



ВОЛОДИМИР СИРОТЮК
ЮРІЙ МИРОШНІЧЕНКО

АСТРОНОМІЯ

РІВЕНЬ СТАНДАРТУ



11

ШАНОВНІ ОДИНАДЦЯТИКЛАСНИЦІ ТА ОДИНАДЦЯТИКЛАСНИКИ!

В 11-му класі ви вивчатимете астрономічні об'єкти, основні закономірності перебігу астрономічних явищ, дізнаєтеся про будову Всесвіту, методи його пізнання та дослідження. Теоретичний матеріал цього підручника допоможе вам зрозуміти й пояснити відповідні процеси та явища, закони і теорії. Звертайте увагу на текст, виділений **напівжирним** шрифтом та кольором. Це астрономічні терміни, означення, важливі правила і закони, які потрібно пам'ятати і вміти застосовувати.

Рубрика  «**Чи знаєте ви, що...**» містить цікаві факти, вона не лише розширить ваш кругозір, а й допоможе переконатися, що в природі все відбувається за законами фізики, усвідомити роль астрономічного знання в житті людини й суспільному розвитку.

Наприкінці кожного параграфа є  «**Запитання до вивченого**», відповідаючи на які ви зможете перевірити, як ви засвоїли матеріал, а також закріпити свої знання.

 «**Практичні роботи**» допоможуть вам краще зрозуміти закономірності астрономічних явищ.

Зразки розв'язування різних видів задач наведено в рубриці  «**Розв'язуємо разом**». Для самостійного розв'язування підручник містить достатню кількість  «**Задач та вправ**». Задачі із зірочкою потребують більшої уваги і математичних обчислень, над ними потрібно поміркувати.

Зверніть особливу увагу на завдання рубрики  «**Перевір свою компетентність**». Виконуючи їх, ви будете вчитися бачити й розуміти навколишній світ, зможете пояснити перебіг явищ у природі.

У кінці кожного розділу є  «**Тестові завдання**», за допомогою них можна перевірити рівень засвоєння матеріалу та підготуватися до тематичної контрольної роботи.

Усі ці навички допоможуть вам у майбутньому використовувати отримані знання, застосувати їх на практиці в повсякденному житті. Знання з астрономії знадобляться вам, навіть якщо ваша майбутня професія не буде пов'язана з природничими науками.

Якщо виникне потреба дізнатися про якийсь астрономічний термін або правило, скористайтеся *предметно-іменним покажчиком*.

Намагайтеся бути максимально самостійними в засвоєнні матеріалу. І налаштуйтеся на те, що вивчення астрономії — це нелегка праця.

Щасливої вам дороги до знань!

ВОЛОДИМИР СИРОТЮК
ЮРІЙ МИРОШНІЧЕНКО

АСТРОНОМІЯ

(РІВЕНЬ СТАНДАРТУ,
за навчальною
програмою авторського колективу
під керівництвом Яцківа Я. С.)

Підручник для 11 класу закладів
загальної середньої освіти

*Рекомендовано
Міністерством освіти і науки України*



Київ
«ГЕНЕЗА»
2019

УДК 52(075.3)
С40

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України
(наказ Міністерства освіти і науки України від 12.04.2019 № 472)

Видано за рахунок державних коштів. Продаж заборонено

Сиротюк В.Д.

С40 Астрономія : (рівень стандарту, за навч. програмою
авт. кол. під керівництвом Яцківа Я. С.) : підруч. для
11-гокл. закл. заг. серед. освіти / Володимир Сиротюк,
Юрій Мирошніченко. — Київ : Генеза, 2019. —
160 с. : іл.

ISBN 978-966-11-0977-2.

УДК 52(075.3)

ISBN 978-966-11-0977-2

© Сиротюк В. Д.,
Мирошніченко Ю. Б., 2019
© Видавництво «Генеза»,
оригінал-макет, 2019

Вступ



Астрономія – одна з найдавніших наук, що вивчає об'єкти і явища, спостережувані у Всесвіті, зародилася на практичних потребах людини та бажаннях пізнати довкілля. Її внесок у розвиток цивілізації та роль у формуванні світогляду людини важко переоцінити.

Головною метою вивчення астрономії є формування загальнокультурної компетентності, наукового світогляду та основ системи знань про методи й результати вивчення законів руху, фізичної природи, еволюції небесних тіл та Всесвіту в цілому.

Цей безмежний і постійно мінливий світ ми називаємо Всесвіт. Поняття «всесвіт» містить у собі й Землю з іншими планетами, Сонце та зорі, галактики і середовище, у якому вони перебувають. Наша планета Земля, і ми разом з нею є частиною цього Всесвіту.

Люди завжди прагнули зрозуміти природу спостережуваних об'єктів і явищ, тому будували картину довколишнього світу відповідно до тих знань, якими володіли. Поступово з появою нових фактів і теорій, а також з можливістю перевірки цих теорій через спостереження та вимірювання, з використанням досягнень суміжних з астрономією наук (особливо фізики) картина поглядів на світ уточнювалася й змінювалася. Іноді це було революційне ламання віджитих уявлень про світобудову – наприклад, теорія геліоцентричної системи Коперника.

У наш час астрономія використовує дедалі більш сучасну дослідницьку техніку та інформаційно-комунікаційні технології. Сучасні приймачі випромінювання передають інформацію безпосередньо в комп'ютери та інші електронні пристрої. Спостереження ведуться в різних діапазонах електромагнітного випромінювання: радіодіапазоні, інфрачервоних, видимих, ультрафіолетових, рентгеновському й гамма-променях. Відкрито нові об'єкти (чорні діри, нейтронні зорі), виявлено несподівані властивості в багатьох уже відомих тіл, створено умови для прямого дослідження ряду об'єктів Сонячної системи тощо. І що більше астрономи стикаються з невідомим і відкривають нове, то більше з'являється запитань, які потребують відповіді.

Сучасна астрономія вивчає досить далекі космічні об'єкти, і разом з тим вона не відірвана від Землі. Для людства важливо досліджувати активність Сонця і його вплив на земні процеси, відповісти на ряд запитань: чи є життя на інших планетах, як космос впливає на розвиток усього живого? тощо.

Професійних астрономів у світі небагато, їх значно менше, ніж фізиків, хіміків, біологів, математиків і представників інших наук, зате за всіх часів було багато аматорів, які активно спостерігають зорі й планети і згодом стають професіоналами. Початкове ознайомлення з астрономією у школі допоможе одержати найнеобхідніші відомості й знання про цю давню та вічно юну науку, що постійно розвивається, розкриваючи перед людством таємниці Всесвіту.

§ 1. ПРЕДМЕТ АСТРОНОМІЇ. ЇЇ РОЗВИТОК І ЗНАЧЕННЯ В ЖИТТІ СУСПІЛЬСТВА. КОРОТКИЙ ОГЛЯД ОБ'ЄКТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ В АСТРОНОМІЇ

1. Астрономія – фундаментальна наука, яка вивчає об'єкти Всесвіту та Всесвіт у цілому. Астрономія досліджує небесні об'єкти, явища й процеси, що відбуваються у Всесвіті. Люди здавна намагалися розгадати таємницю довколишнього світу, визначити своє місце у світовому порядку Всесвіту, що давньогрецькі філософи називали Космосом. Пильно спостерігали за тим, як сходить і заходить Сонце, за порядком зміни фаз Місяця – адже від цього залежало їхнє життя та трудова діяльність. Людей цікавив незмінний добовий рух зір, але лякали непередбачені явища – затемнення Місяця й Сонця, поява яскравих комет. Особливо сильне враження на людину справляли такі явища, в основі яких лежали ще невідомі науці форми існування матерії, не відомі природні процеси.

Астрономія (від грец. *άστρον* – «зоря», «світло», *νόμος* – «закон») – фундаментальна наука, що вивчає будову, рух, походження та розвиток небесних тіл, їхніх систем і всього Всесвіту в цілому.

Астрономія як наука є важливим видом людської діяльності, що дає систему знань про закономірності в розвитку природи.

Мета астрономії – вивчити походження, будову й еволюцію Всесвіту.

Важливими завданнями астрономії є пояснення та прогнозування астрономічних явищ, наприклад сонячних і місячних затемнень, появи періодичних комет, проходження поблизу Землі астероїдів, великих метеорних тіл або ядер комет тощо. Астрономія вивчає фізичні процеси, що відбуваються в надрах планет, на поверхні та в їхніх атмосферах, щоб краще зрозуміти будову й еволюцію нашої планети. Вісім великих планет (серед яких Земля), карликові планети, їхні супутники, астероїди, метеорні тіла, комети, міжпланетний пил і польові форми матерії разом із Сонцем становлять гравітаційно пов'язану Сонячну систему. Дослідження руху небесних тіл дає змогу з'ясувати питання про стійкість Сонячної системи, про ймовірності зіткнення Землі з астероїдами та ядрами комет. Не втрачає актуальності відкриття нових об'єктів Сонячної системи й вивчення їхнього руху.

Важливими є знання процесів, що відбуваються у Сонці, і прогнозування їхнього подальшого розвитку, адже від цього залежить існування всього живого на Землі. Вивчення еволюції інших зір і порівняння їх із Сонцем допомагають пізнати етапи розвитку нашого світила.

Дослідження нашої зоряної Галактики та інших галактик дає змогу визначити її тип, еволюцію, місце, що займає в ній Сонячна система, імовірність близького проходження від Сонця інших зір або проходження його самого через міжзоряні хмари газу й пилу.

Отже, астрономія вивчає будову й еволюцію Всесвіту. Під терміном «всесвіт» ми розуміємо частину простору, що включає в себе всі доступні для вивчення небесні тіла та їхні системи.

2. Історія розвитку астрономії. Галузі астрономії. Зв'язок астрономії з іншими науками. Астрономія виникла в далеку давнину. Відомо, що ще первісні люди спостерігали зоряне небо і потім на стінах печер малювали те, що бачили. З розвитком людського суспільства, з виникненням землеробства з'явилася потреба в рахунку часу, у створенні календаря. Помічені закономірності в русі небесних світил, зміни фаз Місяця дали змогу стародавній людині визначити одиниці часу (доба, місяць, рік) і вирахувати настання певних сезонів року, щоб своєчасно провести посівні роботи та зібрати врожай.

Спостереження зоряного неба з найдавніших часів формувало людину як особистість, яка вміє мислити. Орієнтація в просторі й часі за Сонцем,

іншими зорями та Місяцем доступна тваринам на рівні рефлексів, і лише людині властиво пророкувати земні явища за небесними спостереженнями. Так, у Давньому Єгипті з появою на передранковому небі зорі Сіріус жреці пророкували періоди весняних розливів Нілу – час землеробських робіт. В Аравії, де через денну спеку багато робіт переносилося на нічний час, істотну роль відігравало спостереження фаз Місяця.

У країнах, де було розвинуте мореплавство, особливо до винаходу компаса, значна увага приділялася способам орієнтування за зорями.

У письмових документах (III–II тисячоліття до н. е.) найдавніших цивілізацій: Єгипту, Вавилону, Китаю, Індії та Америки є сліди астрономічної діяльності. У різних місцях Землі наші предки залишили спорудження з кам'яних брил й оброблених стовпів, які орієнтовані на відповідні астрономічні напрямки. Ці напрямки збігаються, наприклад, з точками сходу Сонця в дні рівнодень і сонцестоянь. Подібні кам'яні сонячно-місячні показчики знайдено на півдні Великої Британії (Стоунхендж, мал. 1).

Аналогічні площадки, що використовувалися для астрономічних спостережень і відправлень культових обрядів, виявлено на багатьох материках. Наприклад, Буена Віста (мал. 2) – найстаріша обсерваторія Західної півкулі, яка розміщувалася в перуанських Андах у кількох кілометрах від Ліми. З огляду на те, що вік обсерваторії датується 4200 роками, вона передувала цивілізації інків на 3000 років.

Місто майя Чичен-Іца було побудовано, щоб приймати «відвідувачів з неба». Найцікавішою спорудою в місті є ступінчаста Піраміда Кукулькана (мал. 3). Тисячі туристів двічі на рік приїжджають до цієї піраміди, щоб подивитися на світлове шоу, яке відбувається під час осіннього й весняного рівнодення. У цей час промені Сонця падають на західну балюстраду головних сходів Піраміди Кукулькана так, що світло й тінь утворюють зображення 37-метрової змії, яка складається з трикутників. Протягом 7 годин, з пересуванням Сонця, тіньова змія повзе до основи піраміди, де з'єднується з безліччю вирізаних у камені змієголових істот.

Також у Чичен-Іца було зведено циліндричну обсерваторію Ель-Караколь (Равлик), яка за всіма ознаками використовувалася для спостереження руху Венери на небосхилі.

Як і будь-яка інша наука, астрономія включає ряд розділів, тісно пов'язаних між собою. Вони відрізняються один від одного предметом дослідження, а також методами й засобами пізнання. Розглянемо виникнення та розвиток розділів астрономії в історичному аспекті.

Правильні наукові дані про Землю як небесне тіло з'явилися в Давній Греції. Александрійський астроном **Ератосфен** (275–194 рр. до н. е.) у 240 р. до н. е. досить точно визначив за спостереженнями Сонця розміри земної кулі.



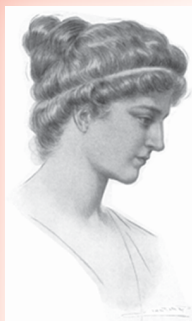
Мал. 1. Стоунхендж – стародавня астрономічна площадка



Мал. 2. Буена Віста



Мал. 3. Піраміда та обсерваторія, місто Чичен-Іца



*Гіпатія
Александрійська*

Гіпатія Александрійська (370–415), яка вивчала математику, астрономію, механіку і філософію, займалася обчисленням перших астрономічних таблиць.

Геліоцентрична система світу **Міколая Коперника (1473–1543)**, яку астроном виклав у праці «Про обертання небесних сфер» (1543 р.), дала ключ до пізнання Всесвіту. Однак століттями укорінена думка про нерухому Землю як центр Всесвіту довго не поступалася новим прогресивним науковим даним. Остаточно затвердив теорію Коперника, одержавши безперечні докази її істинності, італійський фізик, механік й астроном **Галілео Галілей (1564–1642)**. Астрономічні відкриття Галілея зробив за допомогою найпростішого телескопа. На Місяці вчений побачив гори й кратери, відкрив 4 супутники Юпітера. Зміна фаз Венери, яку виявив учений, свідчила про те,

що ця планета обертається навколо Сонця, а не навколо Землі.

Сучасник Галілея **Йоганн Кеплер (1571–1630)** (будучи асистентом великого астронома Тихо Браге) одержав доступ до високоточних результатів спостережень планет, що проводилися понад 20 років. Особливо Кеплера зацікавив Марс, у русі якого виявилися значні відступи від усіх колишніх теорій. Після тривалих обчислень ученому вдалося вивести закони руху планет. Ці три закони зіграли важливу роль у розвитку знань про будову Сонячної системи.

Розділ астрономії, що вивчає рух небесних тіл, одержав назву небесна механіка.

Небесна механіка дала змогу пояснити й попередньо обчислити з дуже високою точністю майже всі рухи, спостережувані як у Сонячній системі, так і в Галактиці.

В астрономічних спостереженнях використовувалися більш удосконалені телескопи. Зорову трубу Галілея вдосконалив Кеплер, а потім **Крістіан Гюйгенс (1629–1695)**. **Ісаак Ньютон (1643–1727)** винайшов новий вид телескопа – телескоп-рефлектор. За допомогою модернізованих оптичних приладів було зроблено нові відкриття, які належать не тільки до тіл Сонячної системи, але й до слабких і далеких зір.

У 1655 р. Гюйгенс розглянув кільця Сатурна й відкрив його супутник Титан. У 1761 р. **Михайло Ломоносов (1711–1765)** відкрив атмосферу у Венери й провів дослідження комет. Приймаючи за еталон Землю, учені порівнювали її з іншими планетами й супутниками. Так зароджувалася наука **планетологія**.

Відкриття спектрального аналізу дало змогу вивчати фізичну природу й хімічний склад зір. Детальні дослідження темних ліній у спектрі Сонця, які виконав німецький учений **Йозеф Фраунгофер (1787–1826)**, стали першим кроком в одержанні спектральної інформації про небесні тіла. Швидкий розвиток лабораторної спектроскопії та теорії спектрів атомів і йонів на основі квантової механіки привів до розвитку на цій основі фізики зір і, у першу чергу, фізики зоряних атмосфер. У 60-ті рр. XIX ст. спектральний аналіз стає основним методом у вивченні фізичної природи небесних тіл.

Розділ астрономії, що вивчає фізичні явища й хімічні процеси, що відбуваються в небесних тілах, їхніх системах у космічному просторі, називають астрофізикою.

Подальший розвиток астрономії пов'язаний з удосконаленням техніки для спостережень. Значних успіхів було досягнуто у створенні нових типів приймачів випромінювання різних діапазонів частот. Фотоелектронні помножувачі, електронно-оптичні перетворювачі, методи електронної фотографії та телебачення підвищили точність і чутливість фотометричних спостережень, що ще більше розширило спектральний діапазон досліджуваних випромінювань.

Завдяки гравітаційному лінзуванню став доступний для спостережень світ далеких галактик, що перебувають на відстані мільярдів світлових років. Виникли нові напрямки астрономії: зоряна астрономія, космологія й космогонія.

Зоряна астрономія вивчає закономірності в просторовому розподілі й русі зір у нашій зоряній системі – Галактиці, досліджує властивості й розподіл інших зоряних систем.

Космологія – розділ астрономії, що вивчає походження, будову та еволюцію Всесвіту як єдиного цілого.

Висновки космології ґрунтуються на законах фізики й даних спостережливості астрономії, а також на всій системі знань певної епохи. Інтенсивно цей розділ астрономії став розвиватися в першій половині XX ст., після того як Альберт Ейнштейн розробив загальну теорію відносності.

Космогонія – розділ астрономії, що вивчає походження і розвиток небесних тіл та їхніх систем.

Оскільки всі небесні тіла виникають і розвиваються, ідеї про їхню еволюцію тісно пов'язані з даними про природу цих тіл узагалі. Під час дослідження зір і галактик використовують результати спостережень багатьох подібних об'єктів, що виникають у різний час і перебувають на різних стадіях розвитку. У сучасній космогонії широко застосовуються закони фізики і хімії.

Астрономія тісно пов'язана з іншими науками. Знання, які набули астрономи, протягом тисячоліть часто ставали у пригоді представникам інших наук, і, навпаки, досягнення фізики, математики, хімії, космонавтики суттєво вплинули на розвиток астрономії. Вивчаючи астрономію, ви переконаєтесь у цьому.

Нагромадження та обробка значної кількості інформації про певні об'єкти Всесвіту є предметом таких розділів астрономії, як **фізика Сонця, фізика планет, фізика зір і туманностей, кометна астрономія, метеорна астрономія, метеоритика**. Земля може розглядатися як одна з планет Сонячної системи – у цьому виражається зв'язок астрономії з географією і геофізикою. Кліматичні й сезонні зміни погоди, магнітні бурі, потепління, льодовикові періоди – для вивчення всіх цих та ще багатьох явищ географі використовують астрономічні знання.

3. Значення астрономії для формування світогляду та культури людини. За всіх часів астрономія дуже впливала на практичну діяльність людини, але головне її значення полягало й полягає у формуванні наукового світогляду та розвитку дослідницької діяльності.

Це можна простежити, розглядаючи розвиток окремих розділів астрономії.

Методи орієнтування, розроблені практичною астрономією, застосовуються в мореплаванні, авіації та космонавтиці. Вимоги до точності визначення координат небесних об'єктів (зір, квазарів, пульсарів) значно зросли у зв'язку з тим, що за ними орієнтуються космічні автоматичні апарати, швидкості яких непорівнянні із земними. У зв'язку з освоєнням тіл Сонячної системи виникає потреба скласти карти Місяця, Марса, Венери та інших небесних тіл.

Робота служби часу, у завдання якої входить вимірювання, зберігання і передача сигналів точного часу, також пов'язана з астрономією. Атомні годинники, точність яких сягає 10^{-13} с, дають змогу вивчати річні й вікові зміни обертання Землі та вносити виправлення в одиниці часу.

З освоєнням космічного простору збільшується число завдань, розв'язувати які покликана **небесна механіка**. Одне з них – вивчення відхилень орбіт штучних супутників Землі (ШСЗ) від розрахованих. Зміна висоти польоту ШСЗ над землею поверхнею залежить від середньої густини порід, які залягають у земних надрах, що вказує на райони пошуку нафти, газу або залізної руди.

Дослідження атмосфер тіл Сонячної системи допомагає краще пізнати закони динаміки атмосфери Землі, точніше побудувати її модель, а отже, упевненіше передбачати погоду.

Розвиток астрофізики стимулює розробку новітніх технологій. Так, дослідження джерел енергії Сонця та інших зір підказало ідею створення керованих термоядерних реакторів. У процесі вивчення сонячних протуберанців народилася ідея теплоізоляції надгарячої плазми магнітним полем, створення магнітогідродинамічних генераторів. Результати спостережень Служби Сонця – міжнародної координувальної мережі з реєстрації активності Сонця – використовуються в метеорології, космонавтиці, медицині та інших галузях діяльності людини.

Земля – унікальна планета, де в процесі еволюції виникла людська цивілізація, природа Землі – унікальна, тому й величезна відповідальність лежить на людях за її збереження.

4. Об'єкти дослідження та просторово-часові масштаби в астрономії. Після Другої світової війни почала бурхливо розвиватися радіофізика (фізика радіохвиль). Удосконалені приймачі, антени й радіолокатори, що залишилися після війни, могли приймати радіовипромінювання Сонця й далеких космічних об'єктів. Так виникла радіоастрономія – одна з галузей астрофізики. Впровадження радіоспостережень в астрономію збагатило її безліччю видатних відкриттів.

Новим імпульсом у розвитку астрономічних спостережень став вихід космічних апаратів і людини в космос. Наукові прилади й телескопи, встановлені на космічних апаратах (мал. 4), дали змогу досліджувати ультрафіолетове, рентгенівське й гамма-випромінювання Сонця, інших зір і галактик. Ці спостереження за межами земної атмосфери, що поглинає короткохвильове випромінювання, надзвичайно розширили обсяг інформації про фізичну природу небесних тіл та їхніх систем.

8



Орбітальний телескоп
«Габбл»



Космічний
телескоп «Кеплер»



Космічна обсерваторія
«Спектр-УФ»

Мал. 4.

Для вивчення та дослідження сучасної наукової астрономічної інформації доступне використання результатів спостережень провідних інститутів та обсерваторій світу через мережу Інтернет, включаючи обсерваторії Південної півкулі.

5. Псевдонауковість астрології та її завбачень. Ще з найдавніших часів людина цікавилася небесними явищами – рухом Сонця, Місяця, планет і зір, появами комет і метеорів, сонячними й місячними затемненнями. Власне, це були перші астрономічні спостереження, які сприяли становленню астрономічної науки.

Натомість астрологія (від грец. *άστρον* – «зоря», *λόγος* – «слово»), що виникла в Месопотамії у II тисячолітті до н. е., була тісно пов'язана з астральними культами. В елліністичну епоху стали складати гороскопи, за якими начебто можна було завбачити долю людини відповідно до положення небесних світил у момент її народження. Проте варто зауважити: для

складання гороскопів треба було знати положення світил, і це змушувало астрологів спостерігати за планетами і зорями, а отже, накопичувати астрономічні знання. Хоча в міру накопичення знань про природу Всесвіту і психологію людини було визнано ненауковість астрології, оскільки вважається, що в ній немає наукового методу та наукового способу пізнання.

Значним аргументом проти астрології є те, що астрологи користуються геоцентричною системою, яку відкинув ще в 1543 р. Коперник. Але жоден з астрологів не вважає Землю центром Сонячної системи (це було б нерозумно). В астрології діє принцип безпосереднього зв'язку Мікрокосму і Макрокосму, тобто ми з вами, наш організм, наша особистість підкоряються тим самим ритмам, за якими живе Всесвіт і Сонячна система зокрема. Ще в халдейському Зводі, написаному близько 4,5 тис. років тому, було описано принцип загальної totoжності, що говорить про єдність усього, що існує у світі: «Те, що вгорі, те й внизу». Але цей принцип не стверджує в чистому вигляді прямого впливу планет на людину та її долю – сенс його набагато ширший і глибший.

Землю оточують два радіаційних пояси – пояси Ван Аллена. **Геннадій Скурідін (1927–1991)** ще в 1971 р. у своїй монографії «Космічна фізика з новими акцентами» описав секторну структуру магнітного поля Землі, що складається із заморожених магнітних полів сонячної атмосфери, і взаємодію сонячного вітру з магнітними полями Землі. На денній стороні вони сягають близько 3 радіусів Землі, а на нічній – у 3 рази більше. Кордон земної магнітосфери через магнітні бурі зазнає великих коливань. Магнітні полюси Землі також переміщуються протягом дня. Переміщення Сонця, Місяця і планет Сонячної системи має великий вплив на напруженість магнітосфери Землі в її різних точках. Ще в 1968 р. учені встановили, що електромагнітні поля є носіями інформації в живій природі. Живі організми, у тому числі людина, помітно реагують на зміну навіть слабого магнітного поля. Усі знають, як у період магнітних бур різко погіршується самопочуття багатьох людей.

Стародавні вчені зазначали, що Юпітер ніби протегує Землі: при його сприятливому впливі збільшувалися врожаї і приплід худоби. Астрофізика встановила, що Юпітер із супутником Іо утворює свого роду генератор, електромагнітні поля якого сприятливі для Землі. Сатурн вважали небезпечною планетою. Ї астрофізика виявила, що Сатурн з його кільцями виступає як гігантський прискорювач частинок: розганяє йони газів до величезної швидкості і викидає їх у простір, впливаючи не тільки на Землю, а й на інший космічний простір. Ці йони спричиняють погіршення здоров'я, епідемії, психологічний дискомфорт тощо.

Жоден астролог не може щось передбачити з абсолютною точністю, хіба що він ясновидець, як Нострадамус, тому що вплив космосу на земне життя є тільки модулюючим фактором. Таким чином, з моменту свого зародження, на даний час і в майбутньому **астрологія залишиться псевдонаукою**.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Що вивчає астрономія? Перелічіть найважливіші особливості астрономії.
2. Як виникла наука астрономія? Схарактеризуйте основні періоди її розвитку.
3. Яка причина того, що саме астрономія є найстарішою із сучасних наук?
4. Яку роль відіграють спостереження в астрономії?
5. Які об'єкти та їхні системи вивчає астрономія? Перелічіть їх у порядку збільшення розмірів.
6. З яких розділів складається астрономія? Коротко схарактеризуйте кожний з них.
7. Яке значення астрономії для практичної діяльності людини?
8. Чим відрізняється астрономія від астрології?
9. Які вітчизняні й закордонні астрономічні сайти та портали ви знаєте?

Розділ 1

НЕБЕСНА СФЕРА. РУХ СВИТИЛ НА НЕБЕСНІЙ СФЕРІ

У цьому розділі ви дізнаєтесь, що таке небесна сфера, сузір'я; про характерні сузір'я зоряного неба, точки й лінії небесної сфери; що таке екліптика, небесні координати, горизонтальний паралакс; про одиниці відстаней в астрономії, видимі й абсолютну зоряну величину, місцевий, поясний і всесвітній час; типи календарів; закони Кеплера. Навчитесь пояснювати причини видимих рухів світил по небесній сфері; дізнаєтесь про методи визначення відстаней до небесних тіл, а також їхніх розмірів і маси; принцип визначення місцевого часу, принцип побудови календаря, системи небесних координат; причини сонячних та місячних затемнень; навчитесь показувати на зоряному небі характерні сузір'я, найяскравіші зорі, планети Сонячної системи, видимі неозброєним оком, користуватися рухомою картою зоряного неба, зоряними атласами, орієнтуватися на місцевості за Сонцем і Полярною зорею.

10

§ 2. НЕБЕСНІ СВИТИЛА ТА НЕБЕСНА СФЕРА. ЗОРІ. ЗОРЯНІ ВЕЛИЧИНИ

1. Сузір'я та яскраві зорі. Зоряні величини. Небо над нами на відкритому місці має вигляд купола. На ньому в безхмарну ніч сяють тисячі зір, і, здається, неможливо розібратися в цій величній зоряній картині. Давні спостерігачі бачили на зоряному небі окремі поєднання яскравих зір й уявляли їх різними фігурами. Щоб було легше орієнтуватися на зоряному небі, групам зір, або сузір'ям, люди дали назви тварин, птахів, різних предметів. У деяких фігурах давньогрецькі астрономи «бачили» міфічних героїв. У праці «Альмагест» («Велика математична побудова астрономії в 13 книгах», II ст. н. е.) давньогрецький астроном **Клавдій Птолемей** (бл. 87–165) згадує 48 сузір'їв. Це Велика Ведмедиця та Мала Ведмедиця, Дракон, Лебідь, Орел, Телець, Терези та ін.

Найпомітніші сузір'я в багатьох народів одержали свої назви. Так, стародавнім слов'янам Велика Ведмедиця уявлялася у вигляді Лося або Оленя. Іноді ківш Великої Ведмедиці порівнювався з візком, звідси й назви цього сузір'я: Віз, Колісниця. Між Великою Ведмедицею й Малою Ведмедицею є сузір'я Дракона. За легендою Дракон (Змій) викрадає юну красуню. А красуня ця – відома Полярна зоря.

Ще в III ст. до н. е. давньогрецькі астрономи звели назви сузір'їв у єдину систему, пов'язану з грецькою міфологією. Ці назви згодом запозичила європейська наука. Тому всі сузір'я, що містять яскраві зорі й видимі в середніх широтах Північної півкулі Землі, одержали імена героїв давньогрецьких міфів і легенд (наприклад, сузір'я Цефея, Андромеди, Пегаса, Персея). Їхні зображення можна знайти на стародавніх зоряних картах: Велика Ведмедиця й Мала Ведмедиця, небесний мисливець Оріон, голова зоряного бика – Тельця та ін. (мал. 1.1). А сузір'я Кассіопея названо на честь міфічної цариці (мал. 1.2).



Мал. 1.1. Сторінки атласа А. Целларіуса із зображенням міфічних образів сузір'їв

На сучасних астрономічних картах немає малюнків міфічних образів сузір'їв, але збережено їхні стародавні назви.

Менш яскраві сузір'я назвали європейські астрономи в XVI–XVIII ст. Усі сузір'я Південної півкулі (невидимі в Європі) одержали назви в епоху Великих географічних відкриттів, коли європейці почали освоювати Новий Світ (Америку).

Однак із часом склалася непроста ситуація – у різних країнах використовувалися різні карти сузір'їв. Виникла потреба уніфікувати поділ зоряного неба. Остаточне число й межі сузір'їв було визначено на I з'їзді Міжнародного астрономічного союзу в 1922 р. Усю сферичну поверхню зоряного неба було умовно розділено на 88 сузір'їв.

У наш час під сузір'ям розуміють ділянку зоряного неба з характерним спостережуваним угрупованням зір. Для полегшення запам'ятовування й пошуку сузір'їв у підручниках з астрономії та астрономічних атласах яскраві зорі, що утворюють сузір'я, сполучено умовними лініями. Сузір'я, зорі яких утворюють виділену на зоряному фоні конфігурацію, або ті, які містять яскраві зорі, належать до головних сузір'їв (мал. 1.3).

Над горизонтом на ясному зоряному небі неозброєним оком можна побачити близько 3000 зір. Вони відрізняються своїм блиском: одні помітні відразу, інші ледь помітні. Тому ще в II ст. до н. е. один з осно-

11



Мал. 1.2. Сузір'я Кассіопея



Мал. 1.3. Схема взаємного розміщення головних сузір'їв і яскравих зір, видимих у середніх географічних широтах

воположників астрономії – **Гіппарх** (190–120 рр. до н. е.) – увів умовну шкалу зоряних величин. Найбільш яскраві зорі було зараховано до 1-ї величини, слабші приблизно в 2,5 раза вважаються зорями 2-ї зоряної величини, а найслабші, видимі тільки в безмісячну ніч, – зорями 6-ї величини.

На зоряному небі яскравих зір 1-ї зоряної величини – усього 12. На території України доступні для спостереження 11 з них.

Багатьом яскравим зорям давньогрецькі та арабські астрономи дали назви: Вега, Сіріус, Капела, Альтаїр, Ригель, Альдебаран та ін. Надалі яскраві зорі в сузір'ях стали позначати літерами грецького алфавіту в міру зниження їхнього блиску.

З 1603 р. діє система позначень зір, яку запропонував німецький астроном **Йоганн Байєр** (1572–1625). У цій системі назва зорі складається з двох частин: з назви сузір'я, якому належить зоря, і літери грецького алфавіту. При цьому перша літера грецького алфавіту α відповідає найбільш яскравій зорі в сузір'ї, β – другій за блиском зорі і т. д. Наприклад, Регул – α Лева – це найяскравіша зоря в сузір'ї Лева, Денебола – β Лева – друга за блиском зоря в цьому сузір'ї. З розвитком науки та у зв'язку з винаходом телескопів кількість досліджуваних зір збільшувалася. Для їхнього позначення вже не вистачало літер грецького алфавіту. І тоді зорі почали позначати латинськими літерами. Коли ж закінчилися й вони, зорі стали позначати цифрами (наприклад, 61 Лебідь).

2. Основні точки, лінії та площини небесної сфери. Нам здається, що всі зорі розміщені на деякій сферичній поверхні небосхилу й однаково віддалені від спостерігача. Насправді вони перебувають від нас на різних відстанях, які настільки великі, що око не може помітити ці відмінності. Тому уявлювану сферичну поверхню стали називати небесною сферою (мал. 1.4).

Небесна сфера – це уявлювана сфера довільного радіуса, центр якої, залежно від розв'язуваного завдання, сполучається з тією або іншою точкою простору.

Центр небесної сфери може бути обрано в місці спостереження (око спостерігача), у центрі Землі або Сонця тощо. Поняттям небесної сфери користуються для кутових вимірювань, для вивчення взаємного розміщення й руху космічних об'єктів на небі.

На поверхню небесної сфери проектується видимі положення всіх світил, а для зручності вимірювань будують на ній ряд точок і ліній. Наприклад, деякі із зір «ковша» Великої Ведмедиці перебувають далеко одна від одної, але для земного спостерігача вони проектується на ту саму ділянку небесної сфери (мал. 1.5).

Прямовисна лінія (або **вертикальна лінія**) – пряма, що проходить через центр небесної сфери і збігається з напрямком дії сили тяжіння в місці спостереження.

Прямовисна лінія перетинає небесну сферу в точках **зеніту** (верхня точка перетину прямовисної лінії з небесною сферою) і **надира** (точка небесної сфери, протилежна зеніту).

Площину, що проходить через центр небесної сфери й перпендикулярна до прямовисної лінії, називають площиною дійсного, або математичного, горизонту.

Математичний горизонт ділить поверхню небесної сфери на дві половини: видиму для спостерігача, з вершиною в зеніті, і невидиму, з вершиною в надирі.

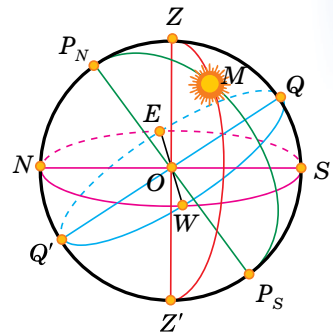
Математичний горизонт не збігається з видимим горизонтом унаслідок нерівності поверхні Землі і у зв'язку з різною висотою точок спостереження, а також викривленням променів світла в атмосфері.

Вертикальне коло, або вертикал світила, – це велике коло небесної сфери, що проходить через зеніт, світило та надир.

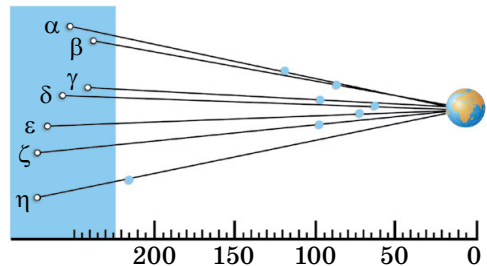
Вісь світу – пряма, що проходить через центр небесної сфери паралельно осі обертання Землі, що перетинає небесну сферу в двох діаметрально протилежних точках.

Точку перетину осі світу з небесною сферою, поблизу якої перебуває Полярна зоря, називають **Північним полюсом світу**, протилежну точку – **Південним полюсом світу**.

Полярна зоря міститься від Північного полюса світу на кутовій відстані близько 1° (точніше, $44'$).



Мал. 1.4. Небесна сфера: O — центр небесної сфери (місцеперебування спостерігача); P_N — Північний полюс світу; P_S — Південний полюс світу; $P_N P_S$ — вісь світу (полярна вісь); Z — зеніт; Z' — надир; E — схід; W — захід; N — північ; S — південь; Q — верхня точка небесного екватора; Q' — нижня точка небесного екватора; ZZ' — вертикальна лінія; $P_N M P_S$ — коло схилення; NS — полуденна лінія; M — світило на небесній сфері



Мал. 1.5. Схема проектування зір у сузір'ї Великої Ведмедиці на небесній сфері

Велике коло, що проходить через центр небесної сфери і перпендикулярне до осі світу, називають *небесним екватором*.

Воно ділить небесну сферу на дві частини: Північну півкулю з вершиною в Північному полюсі світу та Південну – з вершиною в Південному полюсі світу.

Коло схилення світила – велике коло небесної сфери, що проходить через полюси світу і світило.

Добова паралель – мале коло небесної сфери, площина якого перпендикулярна до осі світу.

Велике коло небесної сфери, що проходить через точки зеніту, надир і полюси світу, називають *небесним меридіаном*.

Небесний меридіан перетинається зі справжнім горизонтом у двох діаметрально протилежних точках.

Точку перетину справжнього горизонту й небесного меридіана, найближчу до Північного полюса світу, називають **точкою півночі**.

Точку перетину справжнього горизонту й небесного меридіана, найближчу до Південного полюса світу, називають **точкою півдня**.

Лінію, що сполучає точки півночі й півдня, називають **полуденною лінією**.

14

Вона лежить на площині справжнього горизонту. За напрямком полуденної лінії падають тіні від предметів опівдні.

З небесним екватором справжній горизонт також перетинається у двох діаметрально протилежних точках – **точці сходу** і **точці заходу**. Для спостерігача, який перебуває в центрі небесної сфери обличчям до точки півночі, точка сходу буде розміщена праворуч, а точка заходу – ліворуч. Пам'ятаючи це правило, легко орієнтуватися на місцевості.

Видимий річний шлях Сонця серед зір називають *екліптикою*.

У площині екліптики лежить шлях Землі навколо Сонця, тобто її орбіта.

Вона нахилена до небесного екватора під кутом $23^{\circ}26,5'$ і перетинає його в точках **весняного** (Υ , близько 21 березня) й **осіннього** (Ω , близько 23 вересня) **рівнодення** (мал. 1.6).



Мал. 1.6. Екліптика та небесний екватор

Точкою весняного рівнодення називають точку, у якій Сонце, у результаті свого річного руху, переходить з Південної півкулі небесної сфери в Північну.

У точці осіннього рівнодення Сонце переходить з Північної півкулі небесної сфери в Південну.

Явище проходження світила через небесний меридіан називають *кульмінацією*.

На середніх географічних широтах є світила, що сходять і заходять за горизонт; є такі, що ніколи не заходять за горизонт, і є такі, які

ніколи не сходять над горизонтом (невидимі в цій місцевості). На екваторі всі світила сходять і заходять за горизонт. На полюсах Землі є світила, завжди видимі над горизонтом, і є світила, що ніколи не видимі.

Час s , що минув від верхньої кульмінації точки весняного рівнодення, називають *зоряним часом*.

Інтервал часу між двома послідовними верхніми кульмінаціями точки весняного рівнодення називають *зоряною добою*.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Що розуміють під сузір'ям?
2. На яку кількість сузір'їв розділено небесну сферу?
3. Як сузір'я одержали свої назви? Наведіть приклади назв сузір'їв.
4. За яким принципом побудовано шкалу зоряних величин Гіппарха? Що розуміють під зоряною величиною?
5. У чому полягає суть системи класифікації зір за Байєром?
6. Яка зоря яскравіша: зоря 1-ї зоряної величини чи зоря 6-ї зоряної величини?
7. Що розуміють під небесною сферою?
8. Дайте означення основних точок, ліній і площин небесної сфери.

§ 3. НЕБЕСНІ КООРДИНАТИ

1. Системи координат. Положення світил визначається відносно точок і кіл небесної сфери (мал. 1.4). Для цього введено небесні координати, подібні до географічних координат на поверхні Землі.

В астрономії застосовується кілька систем координат. Відрізняються вони тим, що створені відносно різних кіл небесної сфери. Небесні координати відраховують дугами великих кіл або центральних кутів, що охоплюють ці дуги.

15

Небесні координати – центральні кути або дуги великих кіл небесної сфери, за допомогою яких визначають положення світил відносно основних кіл і точок небесної сфери.

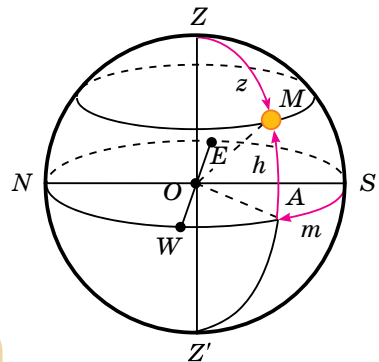
Горизонтальна система координат. Під час астрономічних спостережень зручно визначати положення світил відносно горизонту. Горизонтальна система координат використовує за основу коло дійсного горизонту. У цій системі координатами є висота h і азимут A .

Висота світила h – кутова відстань світила M від справжнього горизонту, виміряна вздовж вертикального кола (мал. 1.7).

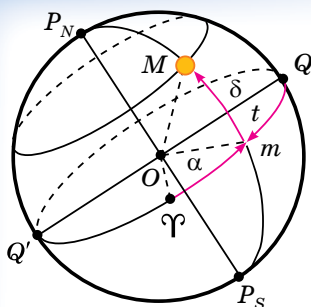
Висота визначається в градусах, хвилинах і секундах. Вона вимірюється в межах від 0 до $+90^\circ$ до зеніту, якщо світило перебуває у видимій частині небесної сфери, і від 0 до -90° до надіра, якщо світило перебуває під горизонтом.

Для вимірювання азимутів за початок відліку беруть точку півдня.

Азимут світила A – кутова відстань, вимірювана вздовж справжнього горизонту від точки півдня до точки перетину горизонту з вертикальним колом, що проходить через світило M (мал. 1.7).



Мал. 1.7. Горизонтальна система координат: h – висота світила M над горизонтом; z – зенітна відстань; A – азимут



Мал. 1.8. Екваторіальна система небесних координат: δ – схилення світила M ; α – пряме піднесення; t – годинний кут

Азимут відраховується на захід від точки півдня в межах від 0 до 360° .

Горизонтальна система координат використовується під час топографічної зйомки, у навігації. Унаслідок добового обертання небесної сфери висота й азимут світила з часом змінюються. Отже, горизонтальні координати мають певне значення тільки для відомого моменту часу.

Кутову відстань від зеніту до світила, вимірювану вздовж вертикального кола, називають зенітною відстанню z .

Вона відраховується в межах від 0 до $+180^\circ$ до надира. Висота й зенітна відстань пов'язані співвідношенням: $z + h = 90^\circ$.

Екваторіальна система координат. Для побудови зоряних карт і складання зоряних каталогів за основне коло небесної сфери зручно прийняти коло небесного екватора (мал. 1.8).

Небесні координати, у системі яких головним колом є небесний екватор, називають екваторіальною системою координат.

У цій системі координатами є схилення δ і пряме піднесення α .

Схилення світила δ – кутова відстань світила M від небесного екватора, виміряна вздовж кола схилення.

Схилення обчислюється в межах від 0 до $+90^\circ$ до Північного полюса світу й від 0 до -90° до Південного полюса світу. За початкову точку відліку на небесному екваторі приймають точку весняного рівнодення Υ , де Сонце буває в день весняного рівнодення, близько 21 березня.

Точку, у якій центр Сонця перетинає екватор під час руху з Південної півкулі до Північної, називають точкою весняного рівнодення Υ , протилежну – точкою осіннього рівнодення Ω .

Унаслідок того, що тропічний рік – інтервал часу між двома послідовними проходженнями Сонця через ту саму точку рівнодення – не збігається з тривалістю календарного року, моменти рівнодення рік у рік зсуваються відносно початку календарної доби. Моменти рівнодення настають у простий рік на 5 год 48 хв 46 с пізніше, ніж у попередній, а у високосний – на 18 год 11 хв 14 с раніше; тому моменти рівнодення можуть припадати на дві сусідні календарні дати. На сьогодні Сонце проходить точку весняного рівнодення 20 або 21 березня за Гринвічем (цей момент вважають початком астрономічної весни в Північній півкулі), а точку осіннього рівнодення – 22 або 23 вересня (початком астрономічної осені в Північній півкулі).

Прямим піднесенням світила α називають дугу небесного екватора від точки весняного рівнодення до кола схилення світила або кут між напрямком на точку весняного рівнодення та площиною кола схилення світила.

Пряме піднесення відраховується у бік, протилежний добовому обертанню небесної сфери, у межах від 0 до 360° у градусній мірі або від 0 до 24^h у годинній мірі.

Для астрономічних завдань, пов'язаних з вимірюванням часу, замість прямого піднесення α вводиться годинний кут t (мал. 1.8). Годинні кути відраховують у бік добового обертання небесної сфери, тобто на захід від верхньої точки небесного екватора, у межах від 0 до 360° (у градусній мірі) або від 0 до 24^h (у годинній мірі). Іноді годинні кути відраховують у

межах від 0 до $+180^\circ$ (від 0 до $+12^h$) на захід і від 0 до -180° (від 0 до -12^h) на схід.

Отже, годинний кут – це кутова відстань, виміряна вздовж небесного екватора, від верхньої точки небесного екватора до кола схилення світила.

Координати зір (α , δ) в екваторіальній системі координат не пов'язані з добовим рухом небесної сфери й змінюються дуже повільно. Тому вони застосовуються для складання зоряних карт і каталогів.

Зоряні карти – це проекції небесної сфери на площину з нанесеними на неї об'єктами в певній системі координат.

Набір зоряних карт суміжних ділянок неба, що вкривають усе небо або деяку його частину, називають **зоряним атласом**.

У спеціальних списках зір, названих зоряними каталогами, вказуються координати їхнього місця на небесній сфері, зоряна величина й інші параметри. Наприклад, каталог *Hubble Guide Star Catalog (GSC)* містить близько 19 млн об'єктів.

2. Висота полюса світу над горизонтом. Ми вже знаємо, що

Полярна зоря, яка перебуває поблизу Північного полюса світу, залишається майже на одній висоті над горизонтом на даній широті під час добового обертання зоряного неба. Під час переміщення спостерігача з півночі на південь, де географічна широта менша, Полярна зоря опускається до горизонту, тобто існує залежність між висотою полюса світу й географічною широтою місця спостереження. На малюнку 1.9 земну кулю й небесну сферу зображено в перетині площиною небесного меридіана місця спостереження. Спостерігач із точки O бачить полюс світу на висоті $\angle PON = h_p$. Напрямок осі світу OP паралельний земній осі. Кут при центрі Землі $\angle OTQ$ відповідає географічній широті місця спостереження φ .

17

Радіус Землі в точці спостереження перпендикулярний до площини дійсного горизонту, а вісь світу перпендикулярна до площини географічного екватора.

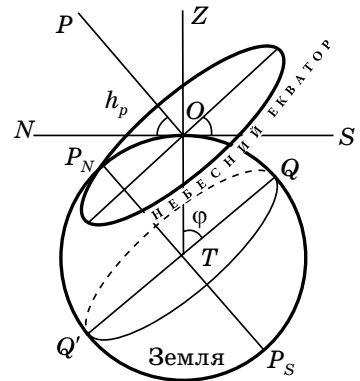
Тому $\angle PON$ і $\angle OTQ$ рівні між собою як кути із взаємно перпендикулярними сторонами. Отже, кутова висота полюса світу над горизонтом дорівнює географічній широті місця спостереження: $h_p = \varphi$.

З іншого боку, видно, що $\angle QOZ$ визначає собою величину схилення зеніту δ_z . Тому можна записати, що $\varphi = \delta_z$, або $\varphi = h_p = \delta_z$. Ця рівність характеризує залежність між географічною широтою місця спостереження та відповідними горизонтальними й екваторіальними координатами світила.

З переміщенням спостерігача до Північного полюса Землі Північний полюс світу піднімається над горизонтом. На полюсі Землі полюс світу буде перебувати в зеніті. Зорі тут рухаються по колах, паралельних горизонту, що збігається з небесним екватором.

На середніх географічних широтах вісь світу й небесний екватор нахилені до горизонту, добові траєкторії зір також нахилені до горизонту. Тому спостерігаються зорі, які сходять і заходять. Під сходом мається на увазі явище перетинання світилом східної частини горизонту, а під заходом – західної.

У середніх широтах, наприклад на території України, спостерігаються зорі північних навколополярних сузір'їв, які ніколи не опускаються під горизонт. Їх називають **зорями, що не заходять**. Зорі, розташовані біля Південного полюса світу, в Україні ніколи не сходять, їх так і називають **зорі, що не сходять**.



Мал. 1.9. Співвідношення між висотою полюса світу над горизонтом h_p і географічною широтою спостерігача φ

Одне з найважливіших завдань практичної астрономії – визначення моментів часу та азимутів точок сходу й заходу небесних світил. Моменти часу сходу та заходу світила, а також положення точок сходу та заходу на математичному горизонті залежать від схилення δ світила і географічної широти φ місця спостереження.

3. Визначення географічної широти за астрономічними спостереженнями. Під час свого добового обертання навколо осі світу світила двічі за добу перетинають небесний меридіан. Явище проходження світилом небесного меридіана називають **кульмінацією**.

Розрізняють верхню й нижню кульмінації. У **верхній кульмінації** світило при добовому русі перебуває в найвищій точці над горизонтом, найближчій до зеніту. Точка **нижньої кульмінації** світила більш віддалена від точки зеніту, ніж точка верхньої кульмінації, і настає через половину доби після верхньої кульмінації.

При складанні географічних і топографічних карт, прокладанні доріг і магістралей, розвідці покладів корисних копалин тощо потрібно знати географічні координати місцевості. Ці завдання можна розв'язати за допомогою астрономічних спостережень. Розглянемо три способи.

1-й спосіб. Визначити географічну широту можна за спостереженням Полярної зорі. Якщо вважати, що Полярна зоря вказує на Північний полюс світу, то приблизно висота Полярної зорі над горизонтом дає нам географічну широту місця спостереження. Якщо виміряти висоту Полярної зорі у верхній (h_v) і нижній (h_n) кульмінаціях, то одержимо більш точне значення широти місця спостереження:

$$\varphi = (h_v + h_n) : 2.$$

Це рівняння справджується для всіх зір, що не заходять, у яких верхня і нижня кульмінації перебувають по один бік від зеніту.

2-й спосіб. Визначити географічну широту можна зі спостереження верхньої кульмінації зір. З рівнянь $h_v = (90^\circ - \varphi) + \delta$ і $h_n = (90^\circ + \varphi) - \delta$ одержимо:

$$\varphi = \delta \pm (90^\circ - h_n).$$

Знак «+» ставиться, якщо зоря кульмінує до півдня від зеніту, а знак «-» – якщо зоря кульмінує до півночі від зеніту.

3-й спосіб. Визначити географічну широту можна зі спостереження зір, що проходять поблизу зеніту: $\varphi = \delta_z$.

В астрономічних обсерваторіях установлюють спеціальні телескопи (зеніт-телескоп, фотографічна зенітна труба), які фіксують зорі, що проходять у полі зору інструмента, поблизу зеніту. Схилення (δ) зорі, що перебуває в зеніті, дорівнюватиме φ .

Ряд обсерваторій, оснащених зеніт-телескопами, створюють Всесвітню службу широти. Її завданням є дослідження зміни географічної широти, тобто спостереження за положенням полюсів на поверхні Землі.

У природі відбуваються такі цікаві явища, як полярний день та полярна ніч, а також біла ніч.

У ті дні року, коли Сонце не заходить за горизонт (навіть у момент нижньої кульмінації), триває полярний день, і, навпаки, у ті дні року, коли Сонце не сходить над горизонтом (навіть у момент верхньої кульмінації), триває полярна ніч.

Застосуємо умову того, що світило не заходить на даній широті $\delta > (90^\circ - \varphi)$ до Сонця. Одержимо, що полярний день триває в ті дні року, коли схилення Сонця задовольняє умову $\delta_\odot > 90^\circ - \varphi$.

Наявність атмосфери приводить до того, що промінь світла від небесного тіла перш ніж потрапити в око спостерігача проходить крізь земну атмосферу і заломлюється, тим самим зміщуючи видиме положення світила відносно справжнього. Це явище називають **астрономічною рефракцією**.

За рахунок рефракції видиме положення світила зміщується відносно справжнього до зеніту. Зміщення ρ залежить від висоти світила над горизонтом, а також від температури та тиску. За нормальних умов для світил, що спостерігаються на горизонті, значення ρ приймають рівним $35'$. З урахуванням рефракції та видимого радіуса Сонця знаходимо, що дата початку полярного дня відповідає тому дню в році, у який схилення Сонця дорівнює

$$\delta_{\odot} = 90^{\circ} - (\varphi + \rho + R_{\odot}).$$

Отримане значення схилення Сонця відшукуємо в астрономічному щорічнику та виписуємо дату, що відповідає цьому значенню. Очевидно, що таких дат буде дві. Одна з них визначає початок полярного дня, інша – кінець. За початок полярного дня обирається той день, після якого схилення Сонця збільшується.

Аналогічно, дата початку полярної ночі відповідає тому дню в році, у який схилення Сонця дорівнює $\delta_{\odot} = \varphi - 90^{\circ} + \rho + R_{\odot}$, а в наступні дні воно зменшується.

Надзвичайно вражаючим астрономічним явищем є біла ніч, коли Сонце ненадовго заходить за горизонт. Протягом білої ночі тривають сутінки, тобто освітленість небосхилу навіть опівночі близька до вечірньої. Це явище можна спостерігати влітку на високих широтах (починаючи приблизно із 60°). Прийнято вважати, що біла ніч відбувається, якщо Сонце опускається за горизонт від 0 до -6° .



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Дайте характеристику горизонтальної та екваторіальної систем координат.
2. Чому в астрономії використовують різні системи координат?
3. У чому полягає принципова різниця між різними системами небесних координат?
4. Як визначити висоту полюса світу над горизонтом?
5. За якої умови світило буде видимим на даній широті?
6. Де на земній кулі всі зорі протягом року рухаються паралельно математичному горизонту?

19

§ 4. АСТРОНОМІЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСУ. ТИПИ КАЛЕНДАРІВ

1. Визначення часу. Усе наше життя пов'язане з періодичною зміною дня та ночі, а також пір року. На цих повторюваних астрономічних явищах базуються основні одиниці часу – доба, місяць, рік. Основна величина для вимірювання часу пов'язана з періодом повного обертання земної кулі навколо своєї осі.

Момент верхньої кульмінації центра Сонця називають **дійсним полуднем**, момент нижньої кульмінації – **дійсною північчю**.

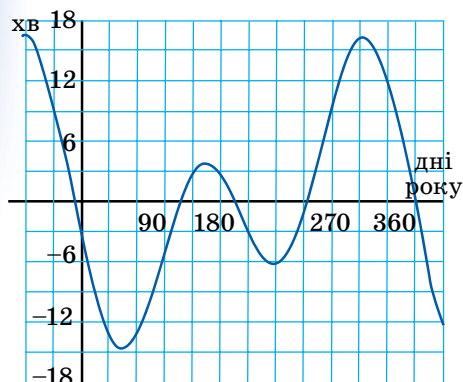
Інтервал часу між двома послідовними однойменними кульмінаціями центра Сонця називають **дійсною сонячною добою**.

Час, що пройшов від моменту нижньої кульмінації центра сонячного диска до будь-якого іншого його положення на тому самому географічному меридіані, називають **дійсним сонячним часом** ($T_{\odot}$).

Потрібно зазначити, що дійсна сонячна доба періодично змінює свою тривалість. У цього є дві причини: 1) нахил площини екліптики до площини небесного екватора, 2) еліптична форма орбіти Землі. Коли Земля перебуває на ділянці еліпса, розміщеній ближче до Сонця (на мал. 1.10 – це положення показано ліворуч), то вона рухається швидше. Через півроку Земля, перебуваючи в протилежній частині еліпса, буде переміщуватися по орбіті повільніше. Нерівномірний рух Землі по своїй орбіті спричиняє нерівномірне видиме переміщення Сонця на небесній сфері. Тобто в різні



Мал. 1.10. Причини зміни тривалості дійсних сонячних діб



Мал. 1.11. Графік рівняння часу

пори року Сонце переміщується з різною швидкістю. Тому тривалість дійсної сонячної доби постійно змінюється.

Унаслідок нерівномірності дійсної сонячної доби користуватися нею як одиницею часу незручно. Із цієї причини в повсякденному житті використовують не дійсну, а середню сонячну добу, тривалість якої прийнято сталою.

Що таке середня сонячна доба? Уявимо точку, що протягом року робить один повний оберт навколо Землі за такий час, як і Сонце, але при цьому переміщується рівномірно по небесному екватору, а не по екліптиці. Назвемо таку уявну точку **середнім екваторіальним сонцем**.

Верхню кульмінацію середнього екваторіального Сонця називають **середнім полуднем**, а інтервал часу між двома послідовними середніми полуднями – **середньою сонячною добою**. Тривалість її завжди однакова. Середню сонячну добу ділять на 24 години. Кожна година середнього

сонячного часу ділиться на 60 хвилин, а кожна хвилина – на 60 секунд середнього сонячного часу. За початок середньої сонячної доби прийнято **середню північ**, тобто момент нижньої кульмінації уявної точки небесної сфери, названої **середнім сонцем**. Інтервал часу від моменту нижньої кульмінації середнього екваторіального Сонця до будь-якого іншого його положення на тому самому географічному меридіані називають **середнім сонячним часом** (T_s).

Різницю між середнім сонячним часом і дійсним сонячним часом у той самий момент називають **рівнянням часу**. Позначають грецькою літерою η , і його можна записати в такому вигляді: $\eta = T_s - T_{\odot}$.

Значення рівняння часу η дається в астрономічних календарях. Наближене значення можна визначити за графіком (мал. 1.11), з якого також видно, що 4 рази на рік рівняння часу η дорівнює нулю. Це відбувається приблизно 14 квітня, 14 червня, 2 вересня та 24 грудня. Та 4 рази на рік графік рівняння часу η досягає екстремумів: двох додатних – 15 травня і 3 листопада, і двох від'ємних – 15 лютого і 1 серпня.

Розрізняють також **зоряну добу** (близько 23 год 56 хв 4 с). Зоряна доба дорівнює інтервалу часу між двома послідовними однойменними кульмінаціями точки весняного рівнодення. Моментом верхньої кульмінації цієї точки, прийнятим за початок зоряної доби, вважається 0 годин зоряного часу.

Час від моменту верхньої кульмінації точки весняного рівнодення до будь-якого іншого її положення на тому самому географічному меридіані називають **зоряним часом**.

2. Визначення географічної довготи. Вимірювання часу сонячною добою пов'язане з географічним меридіаном. Час, виміряний на цьому меридіані, називають **місцевим часом даного меридіана**, і він однаковий для всіх пунктів, що перебувають на ньому. Кульмінація будь-якої точки небесної сфери відбувається в різний час на різних меридіанах земної кулі. Причому що східніше земний меридіан, то раніше в пунктах,

що лежать на ньому, відбувається кульмінація або починається доба. Якщо Земля щогодини повертається на 15° , то різниця часу двох пунктів в одну годину відповідає й різниці довгот 15° (у годинній мірі 1 година). Звідси можна зробити висновок: різниця місцевого часу двох пунктів на Землі чисельно дорівнює різниці значень довготи, виражених у годинній мірі. Для пунктів земної поверхні, розташованих на географічних довготах λ_1 й λ_2 , одержимо: $T_{\lambda_1} - T_{\lambda_2} = \lambda_1 - \lambda_2$.

За початковий (нульовий) меридіан для відліку географічної довготи прийнято меридіан, що проходить через Гринвіцьку обсерваторію поблизу Лондона. Місцевий середній сонячний час Гринвіцького меридіана називають *всесвітнім часом*. Усі сигнали точного часу відповідають хвилини й секундам всесвітнього часу. В астрономічних календарях і щорічниках моменти більшості явищ указують за всесвітнім часом. Моменти цих явищ за місцевим часом якого-небудь пункту легко визначити, знаючи довготу цього пункту від Гринвіча.

Якщо в цей момент на Гринвіцькому меридіані всесвітній час буде T_0 , то в місцевості з географічною довготою λ буде T_λ . Отже, попереднє рівняння при $\lambda_0 = 0$ матиме вигляд: $\lambda = T_\lambda - T_0$. Це рівняння дає змогу знаходити географічну довготу за всесвітнім часом (T_0) і місцевим часом (T_λ), що визначають з астрономічних спостережень. З іншого боку, знаючи довготу місця спостереження (λ) і всесвітній час (T_0), можна визначити місцевий час (T_λ): $T_\lambda = T_0 + \lambda$.

Сьогодні існує введена поясна система рахунку середнього сонячного часу. Відповідно до цієї системи, усю земну кулю розділено на 24 годинних пояси, кожний з яких розміщений по довготі на 15° (або 1 год). Годинний пояс Гринвіцького меридіана вважають нульовим. Іншим поясам, у напрямку від нульового на схід, присвоєно номери від 1 до 23. У межах одного поясу в усіх пунктах у певний момент поясний час однаковий. У сусідніх поясах він відрізняється рівно на одну годину. Межі поясів у малонаселених місцях, на морях та океанах проходять по меридіанах, віддалених на $7,5^\circ$ до сходу й заходу від центрального меридіана даного годинного поясу. В інших районах межі поясів для більшої зручності проведено за державними та адміністративними межами, гірськими хребтами, річками та іншими природними межами.

Знаючи всесвітній час (T_0) і номер поясу даного місця (n), можна знайти поясний час: $T_n = T_0 + n$.

Виключивши T_0 з рівнянь $\lambda = T_\lambda - T_0$ і $T_n = T_0 + n$ одержимо співвідношення, що дає змогу визначати географічну довготу за поясним часом (T_n) і часом для місцевості з географічною довготою λ (T_λ): $T_n - T_\lambda = n - \lambda$.

Система поясного рахунку часу усуває незручності, пов'язані з використанням і місцевого, і всесвітнього часу. Годинники, встановлені за поясним часом, показують ту саму кількість секунд і хвилин у всіх годинних поясах, ці покази різняться тільки на ціле число годин.

Для економії й раціонального розподілу електроенергії протягом доби на літній період у деяких країнах (зокрема, і в нашій) навесні стрілки годинників переводять на годину вперед – уводячи літній час. Восени годинники знову повертають на поясний час.

Відповідно існує межа, що відкриває нову дату й день тижня. Міжнародна лінія зміни дат проходить через Берингову протоку між островами Тихого океану від Північного до Південного полюса (меридіан 180°).

Найбільш надійним і зручним часом вважається атомний час, який увів Міжнародний комітет мір і ваги в 1964 р. За еталон прийнято атомний (квантові) годинники. За такими годинниками секунда – це проміжок часу, за який відбується 9 192 631 770 коливань електромагнітної хвилі, що випромінює атом цезію. З 1 січня 1972 р. усі країни земної кулі ведуть лік часу за атомними годинниками.

3. Календар. *Календар* – це система обліку тривалих інтервалів часу, в основі якої лежать періодичні астрономічні явища: зміна дня й ночі, зміна місячних фаз, зміна пір року.

Будь-яка календарна система спирається на три основні одиниці часу: середню сонячну добу, синодичний (або місячний) місяць і тропічний (або сонячний) рік.

Синодичний місяць – це інтервал часу між двома послідовними однаковими фазами Місяця.

Тропічний рік – інтервал часу між двома послідовними проходженнями центра Сонця через точку весняного рівнодення.

Через повільний рух точки весняного рівнодення назустріч Сонцю відносно зір Сонце буде в тій самій точці неба через інтервал часу на 20 хв 24 с більший, ніж тропічний рік. Його називають **зоряним роком**, і він має 365,2564 середньої сонячної доби.

Синодичний місяць і тропічний рік не мають цілого числа середньої сонячної доби. Так, середня тривалість синодичного місяця дорівнює 29,530589 доби, а тривалість тропічного року – у середньому 365,242190 доби. Як бачимо, усі три міри часу непорівнянні. Неможливо підібрати таке ціле число тропічних років, у якому вміщувалося б ціле число синодичних місяців і ціле число середніх сонячних діб. Прагнення узгодити між собою добу, місяць і рік привело до того, що в різні епохи в різних народів було створено багато різних календарів, які можна умовно розділити на 3 типи: місячні, місячно-сонячні й сонячні. Саме цим пояснюється складність побудови календаря й поява протягом кількох тисячоріч численних календарних систем, що направлені перебороти ці труднощі.

У місячному календарі рік ділиться на 12 місяців, що містять змінно 30 або 29 діб. Усього в місячному календарі 354 або 355 середніх сонячних діб, тобто він коротший від сонячного року приблизно на 10 діб. Цей календар широко використовується в мусульманських країнах.

Через те що місячний рік має менше днів, ніж тропічний, у мусульман взагалі немає фіксованого початку року, він постійно зміщується по сезонах і випадає то на весну, то на літо, то на осінь, то на зиму.

Місячно-сонячні календарі найскладніші. У них сума деякої кількості місячних місяців приблизно відповідає тривалості тропічного року. В основі цих календарів лежить співвідношення: 19 сонячних років дорівнюють 235 місячним місяцям (з похибкою близько 2 год). Рік ділиться на 12 місяців, кожен з яких починається з молодика. У наш час така система збереглася в єврейському календарі. Він має 12 або 13 місяців у році. Тривалість деяких місяців щороку змінюється, початок року завжди припадає на осінь, але не збігається з жодною датою григоріанського календаря, яким ми користуємося.

Римляни спочатку обчислювали час місячними роками. Новий рік починався 1 березня. І до цього часу деякі місяці сучасного календаря називаються відповідно до цієї традиції: вересень – «сьомий», грудень – «десятий» і т. д. Згодом перший день року римляни перенесли на 1 січня, тому що з 153 р. до н. е. у цей день ставали на посаду консули.

Одним з перших сонячних календарів вважається єгипетський, створений в 4 тис. до н. е. За цим календарем рік складався з 12 місяців по 30 днів у кожному, а наприкінці року додавалося ще 5 святкових днів. Сучасний календар бере початок від сонячного римського календаря, що з'явився в результаті реформи **Юлія Цезаря** (100–44 рр. до н. е.), уведений 1 січня 45 р. до н. е. Звідси і його назва – **юліанський календар**. Середня тривалість року за цим календарем дорівнює 365,25 доби, що відповідає тривалості тропічного року.

Для зручності три роки поспіль вважали по 365 днів, а на четвертий (високосний) додавали зайву добу – 366 днів. Рік складався з 12 місяців: непарні місяці – 31 день, парні – 30 днів; тільки лютий простого (не високосного року) мав 28 днів.

Через те що тривалість юліанського року довша за тропічний на 11 хв 15 с, за 128 років накопичувалася помилка в цілу добу, а за 400 років – близько трьох діб. Із плином часу календар запізнювався дедалі більше. Тому в кінці XVI ст. весняне рівнодення наставало не 21-го, а 11 березня.

Помилку було виправлено в 1582 р., коли глава католицької церкви Папа Григорій XIII створив спеціальну комісію з реформи календаря, що пересунула рахунок днів на 10 днів уперед і повернула весняне рівнодення на 21 березня. Виправлений календар отримав назву **григоріанський календар**, або **календар нового стилю**. Систему рахунку часу за юліанським календарем у наш час називають старим стилем.

Високосний рік у григоріанському календарі – кожен четвертий, за винятком років із цілим числом сторіч (наприклад, 1700, 1800). Такий рік вважається високосним тільки тоді, коли число сотень ділиться на 4 без залишку.

В Україні цей календар було введено із середини 31 січня 1918 р. Наступний день уже був 14 лютого, тому що на той час календарна різниця між новим і старим стилем сягала 13 днів.

Це розходження в 13 діб буде зберігатися до 15 лютого 2100 р. за старим стилем або до 28 лютого 2100 р. за новим стилем. Після цієї дати воно збільшиться на одну добу і становитиме 14 діб.

Юліанський календарний рік довший за сонячний рік майже на $11\frac{1}{4}$ хв, а григоріанський – на 27 с. Зайва доба набігає за 3226 років, а для практичних цілей більшої точності і не потрібно.

Григоріанський календар не позбавлений недоліків: неоднакова тривалість місяців, нерівні квартали, неузгодженість чисел місяців з днями тижня. Тому з'явилися проекти нових (всесвітніх) календарів, у яких рік більш рівномірно розділяється на півріччя, квартали тощо. Однак існуючі політичні й економічні відносини між країнами світу не дають змоги провести єдину реформу та ввести всесвітній календар.

Багато-багато років тому, коли європейці тільки будували припущення про існування Америки, а Колумб, який відкрив її, ще не народився, на території сучасних Мексики, Гватемали і Гондурасу існувала величезна могутня цивілізація – індіанці майя. Півтори тисячі років тому вони вже вміли будувати міста, зводити палаци і храми. Деякі храми слугували майя обсерваторіями, вони спостерігали звідти за рухом Сонця, Місяця й інших небесних тіл. Рік за календарем майя (мал. 1.12) дорівнював 365,2420 дня, тобто всього на дві десятитисячні частки відрізнявся від сучасних даних.

У майя була двадцятирічна система рахунку. У її основі лежав знак 0, який сам по собі нічого не означає, але в поєднанні з іншими цифрами збільшує їх в десятки разів. Нуль, розташований ліворуч, збільшував удесятеро; коли майя ставили нуль згори, це означало збільшення в двадцять разів.

А ось цифр у майя було всього дві, вони зображалися крапкою і рискою. За допомогою трьох цих знаків майя вміли розраховувати орбіти планет, час затемнень Сонця і Місяця та інші події на багато років наперед.

Також використовуються ери, тобто тривалі інтервали рахунку років. **Ерою** називають вихідний пункт кожного літочислення. У різних народів ери були різні й пов'язувалися



Мал. 1.12. Календар майя

з якими-небудь знаменними подіями або з роками правління царів та імператорів.

У Римі використовувалася ера від заснування Рима (753 р. до н. е.) і рахунок років від призначення консулів. У середньовічній Європі була поширена ера Діоклетіана, що почалася від приходу на престол імператора Діоклетіана (29 серпня 284 р. н. е.). Вона застосовувалася до XV ст.

У Давній Греції застосовувалася ера олімпіад (початок 776 р. до н. е.), які проводилися раз у 4 роки. Іудеї відраховують початок ери від створення світу – від 3761 р. до н. е. Християни вважають, що створення світу відбулося в 5508 р. до н. е. Еру від Різдва Христового розрахував папський архіваріус Діонісій Малий у 525 р. Він прирівняв 248 р. ери Діоклетіана до 532 р. від народження Христа. Християнська, або нова, ера (**наша ера**) частково почала застосовуватися з X ст., а повсюдно в католицьких країнах – лише з XV ст.

За указом Петра I в Російській імперії в 1700 р. було уведено нову еру, відповідно до якої після 31 грудня 7208 р. від створення світу настало 1 січня 1700 року. Мусульмани всього світу використовують свою еру, яку називають хіджра й веде лік років від дати переселення пророка Мухаммеда з Мекки в Медіну, що відбулося у вересні 622 р. н. е.



ЧИ ЗНАЄТЕ ВИ, ЩО...

За постановою Нікейського собору (325 р.) православна церква святкує Пасху в першу неділю після першої весняної повні. Тобто після першої повні, що прийде після 21 березня. Німецький математик Карл Гаусс запропонував алгоритм для визначення святкування Пасхи за юліанським календарем. Розділіть номер року на 19, 4 й 7 та позначте залишки через a , b , c . Потім $19a + 15$ поділіть на 30 і залишок позначте через d ; залишок $(2b + 4c + 6d + 6) : 7$ через e ; тоді одержимо, що Пасха за юліанським календарем буде $22 + d + e$ березня. Формула універсальна, єдине уточнення, що з першого січня 2101 року різниця між старим і новим стилями становитиме вже 14, а не 13 днів.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Чим відрізняється дійсна сонячна доба від середньої сонячної доби?
2. Що називають зоряною добою?
3. Що розуміють під рівнянням часу? Запишіть і поясніть рівняння часу.
4. Як пов'язані між собою географічна довгота місця спостереження з місцевим часом? Що розуміють під всесвітнім часом?
5. Як можна знайти поясний час? Як визначається географічна довгота за поясним часом?
6. Що розуміють під лінією зміни дат? Де вона проходить? Скільки дат одночасно може бути на Землі?
7. Чому не можливо створити абсолютно точний календар?

§ 5. ВИДИМИЙ РУХ ПЛАНЕТ

1. Система світу Птолемея. У давнину було відомо п'ять схожих на зорі, але більш яскравих світил, які хоча й беруть участь разом із зорями в добовому обертанні небосхилу, але мають також самостійний видимий рух. Стародавні греки назвали ці «світила» **планетами** (від грец. *πλανητός* – «блукаючі»). Неозброєним оком можна побачити блукаючі «світила» (планети): Меркурій, Венеру, Марс, Юпітер та Сатурн.

Планети завжди розташовуються на небі недалеко від екліптики, але, на відміну від Сонця й Місяця, через певні тимчасові інтервали змінюють напрямок свого руху. Вони переміщуються між зорями в основному із заходу на схід (як Сонце й Місяць) – прямий рух. Однак кожна планета в певний час сповільнює свій рух, зупиняється й починає рухатися зі

сходу на захід – зворотний рух. Потім світило знову зупиняється і відновлює прямий рух. Тому видима траєкторія кожної планети на небосхилі – складна лінія із зигзагами й петлями. Ця траєкторія до того ж змінюється від циклу до циклу, протягом якого планета повертається приблизно на те саме місце серед зір (мал. 1.13).

Рух планет тривалий час залишався явищем незрозумілим і загадковим, яке згодом знайшло своє правильне й просте пояснення в теорії Коперника.

Проте в II ст. н. е. Клавдій Птолемей розробив геоцентричну систему світу, що дала змогу обчислювати положення планет відносно зір на багато років уперед і передбачати настання сонячних і місячних затемнень.

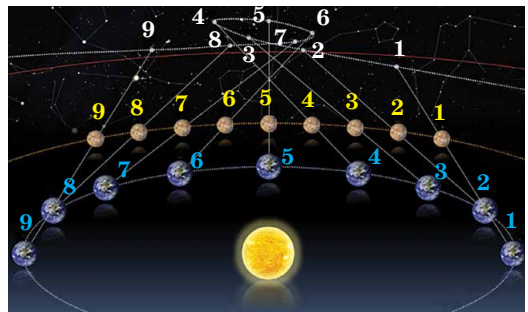
Використовуючи спостереження своїх попередників, а також власні, Птолемей побудував теорію руху Сонця, Місяця, планет і припустив, що всі світила рухаються навколо нерухомої Землі, що є центром світобудови й має кулясту форму.

У міру накопичення спостережень про рухи планет теорія Птолемея дедалі більше ускладнювалася (вводилися додаткові кола з різними радіусами, нахилами, швидкостями тощо), що незабаром зробило її занадто громіздкою і неправдоподібною.

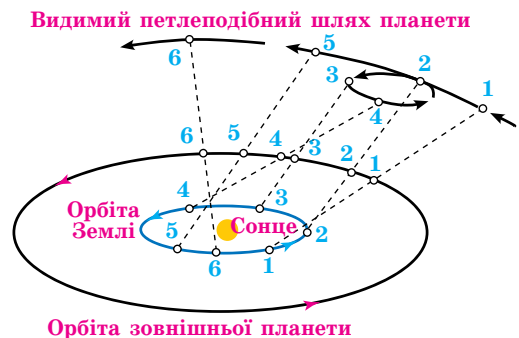
2. Система світу Коперника. У XVI ст. польський учений Миколай Коперник, відкинувши догматичне поняття про нерухомість Землі, поставив її в число звичайних планет. Він указав, що Земля, посідаючи третє місце від Сонця, так само як й інші планети, рухається навколо Сонця й одночасно обертається навколо своєї осі. Геліоцентрична система Коперника дуже просто пояснювала петлеподібний рух планет. На малюнках 1.13 і 1.14 показано рух Марса небесною сферою, спостережуваний із Землі. Однаковими цифрами позначено положення Марса, Землі й точок траєкторії Марса на небосхилі в ті самі моменти часу.

Геоцентрична система Птолемея не давала змоги виміряти відстань до планет. Геліоцентрична система Коперника вперше дала змогу розрахувати пропорції Сонячної системи, користуючись радіусом земної орбіти як астрономічною одиницею довжини.

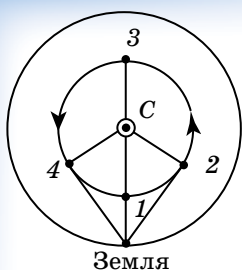
Головну наукову працю Коперника «Про обертання небесних сфер», на написання шести книжок якої учений витратив понад 20 років тяжкої праці, було опубліковано в 1543 р., незадовго до смерті вченого. Революційність праці астронома полягає в тому, що в ній з новим поглядом на будову Сонячної системи нерозривно пов'язане питання про положення Землі, а з нею й людини, у Всесвіті. Простота та реальність системи будови світу, яку виклав Коперник, швидко знайшла собі прихильників. Теорія



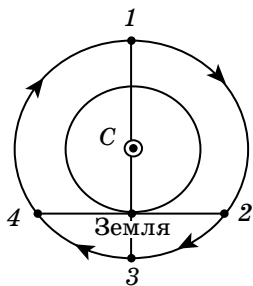
Мал. 1.13. Видимий петлеподібний рух Марса



Мал. 1.14. Пояснення петлеподібного руху планет на основі теорії Коперника



Мал. 1.15. Схема конфігурацій нижніх планет: 1 – нижнє сполучення; 2 – найбільша західна елонгація; 3 – верхнє сполучення; 4 – найбільша східна елонгація



Мал. 1.16. Схема конфігурацій верхніх планет: 1 – сполучення; 2 – західна квадратура; 3 – протистояння; 4 – східна квадратура

Для нижніх планет виділяють **сполучення та елонгації** (мал. 1.15). У нижньому сполученні планета найближче до Землі, а у верхньому – найдалше від неї. При елонгаціях кут між напрямками із Землі на Сонце й на нижню планету залишається гострим. Через еліптичність планетних орбіт найбільші елонгації не мають сталого значення. У Венери вони в межах від 45° до 48° , а в Меркурія – від 18° до 28° . Обидві планети не відходять далеко від Сонця і тому вночі невидимі. Тривалість їхньої ранкової або вечірньої видимості не перевищує чотирьох годин для Венери й півтори години для Меркурія. Меркурій іноді зовсім невидимий, тому що сходить і заходить у світлий час доби.

Розрізняють східну й західну елонгації. У східній елонгації планета спостерігається увечері після заходу Сонця, а в західній – уранці перед сходом Сонця. Для верхніх планет (мал. 1.16) характерні інші конфігурації.

Якщо Земля перебуває між планетою й Сонцем, то таку конфігурацію називають **протистоянням**. Ця конфігурація найбільш сприятлива для спостережень планети, тому що в цей час планета перебуває найближче до Землі та повернута до неї своєю освітленою півкулею, а перебуваючи на небі в протилежному до Сонця місці, буває у верхній кульмінації біля опівночі. Слід зазначити, що у верхніх планет нижнього сполучення не буває, тому не слід сполучення називати верхнім. Якщо кут між напрямками із Землі на верхню планету і на Сонце становить 90° , то кажуть, що планета перебуває у **квадратурі**. Розрізняють західну й східну квадратури. У конфігурації західної квадратури планета сходить біля опівночі, а в східній – заходить біля опівночі. Моменти конфігурацій планет й умови їхньої видимості щорічно публікуються в астрономічних довідниках і календарях.

Коперника змусила звільнити науку від застарілих і схоластичних поглядів, що гальмували її розвиток. Однак сам астроном залишався в полоні деяких переконань. Наприклад, він так і не зміг відмовитися від того, що планети рухаються рівномірно по колових орбітах.

Великий італійський учений Галілео Галілей підтвердив теорію Коперника своїми відкриттями, зробленими за допомогою телескопа. Він виявив, що на Місяці існують гори й кратери, Венера має фази, у Юпітера є 4 супутники і що Чумацький Шлях – не просте сивьо на небі: воно складається з окремих слабких зір, які не можна побачити неозброєним оком.

Йоганн Кеплер розвинув теорію Коперника, відкривши закони руху планет, і довів на основі фактів, що планети рухаються по еліпсах і нерівномірно.

Ісаак Ньютон відкрив у 1687 р. закон всесвітнього тяжіння, що дав змогу виразити теорію руху планет у вигляді формул і відмовитися назавжди від громіздких геометричних побудов.

3. Конфігурації та умови видимості планет.

Під конфігураціями планет розуміють характерні взаємні розміщення планет, Землі та Сонця. Конфігурації різні для нижніх планет (орбіти яких перебувають ближче до Сонця, ніж орбіта Землі) і верхніх планет (орбіти яких розміщені за орбітою Землі).

4. Сидеричні та синодичні періоди обертання планет.

Інтервал часу, протягом якого планета робить повний оберт навколо Сонця по орбіті щодо зір, називають *зоряним*, або *сидеричним*, *періодом обертання планети*.

Одноїменні конфігурації планет настають у різних точках їхніх орбіт.

Інтервал часу між двома послідовними однойменними конфігураціями планет називають *синодичним періодом обертання планети*.

Він відрізняється від зоряного періоду.

Синодичний період (від грец. *σύνωδος* – «зближення») – це період між двома послідовними сполученнями (протистояннями).

Теорія Коперника дає змогу встановити взаємозв'язок синодичного й сидеричного періодів обертання планет.

Припустимо, що T – сидеричний (зоряний) період обертання планети, а T_0 – сидеричний період обертання Землі (зоряний рік); S – синодичний період обертання планети. Середнє значення дуги, що проходить планета за одну добу, називають середнім рухом n , що дорівнює $n = 360^\circ / T$, а середній рух Землі – $n_0 = 360^\circ / T_0$. У нижніх планет $T < T_0$ і $n > n_0$.

Одноїменні сполучення таких планет (наприклад, нижні сполучення на мал. 1.17) настають через синодичний період обертання S , за який

Земля проходить дугу $L_0 = n_0 S = \frac{360^\circ}{T_0} S$, а планета, забігаючи вперед,

робить один оберт навколо Сонця й доганяє Зем-

лю, проходячи кутовий шлях $L = 360^\circ + L_0$,

дорівнює: $L = nS = \frac{360^\circ}{T} S$.

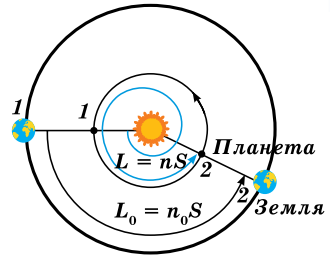
Віднімаючи перше рівняння від другого, одержимо рівняння синодичного руху для ниж-

ніх планет: $\frac{1}{S} = \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}$. Для верхніх планет рів-

няння синодичного руху матиме вигляд:

$\frac{1}{S} = \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}$, тому що $T > T_0$ і $n < n_0$.

Останні рівняння дають середні значення синодичних періодів обертання планет. За допомогою цих рівнянь за спостережуваним синодичним періодом обертання планети легко підрахувати сидеричний період її обертання навколо Сонця.



Мал. 1.17. Синодичний період послідовних нижніх сполучень (1 і 2) нижньої планети



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Який основний недолік системи світу Птолемея?
2. У чому полягає революційність поглядів Коперника? Яка роль його ідей в астрономії?
3. Як Галілей підтвердив теорію Коперника?
4. Що означає зворотний рух планет? Як на основі геліоцентричної системи світу пояснюється петлеподібний рух планет?
5. Що розуміють під конфігураціями планет? У якій з конфігурацій можуть бути верхні й нижні планети?

§ 6. ВИДИМИЙ РУХ СОНЦЯ ТА МІСЯЦЯ

1. Видимий річний рух Сонця. За постійно змінними координатами Сонця δ і α на небесній сфері можна відзначити велике коло, що представляє видиму траєкторію центра сонячного диска протягом року. Це коло стародавні греки назвали **екліптикою**. Оскільки річний рух Сонця відображає реальний рух Землі по орбіті, екліптика є траєкторією від перетину небесної сфери площиною, паралельною площині земної орбіти. Цю площину називають **площиною екліптики**. Крім двох точок рівнодення, про які ми вже говорили, на екліптиці виділяють дві проміжні між ними й протилежні одна одній точки, у яких схилення Сонця буває найбільшим за абсолютним значенням. У **точці літнього сонцестояння** Сонце має максимальне схилення $\delta = +23^\circ 26'$ (близько 22 червня). У **точці зимового сонцестояння** Сонце має максимальне схилення $\delta = -23^\circ 26'$ (близько 22 грудня).

Сузір'я, через які проходить екліптика, називають екліптичними сузір'ями.

У стародавньому Межиріччі виник поділ екліптики разом з її сузір'ями на 12 частин. Цей пояс назвали Поясом зодіаку (від грец. ζῳδιακὸς κύκλος – «коло із зображень тварин»). Спочатку у Вавилоні зодіакальні знаки й екліптичні сузір'я збігалися, тому що точних меж сузір'їв не було. Пізніше, в епоху еллінізму, склалися дані про знаки зодіаку як про 12 рівних частин екліптики, що займають на небі по 30° дуги. Початок відліку знаків установлено від точки весняного рівнодення Υ .

На сьогодні зодіакальні знаки й екліптичні сузір'я не збігаються. Екліптичних сузір'їв 13. З них 12 (табл. 1.1) збігаються за назвами із зодіакальними знаками. Сузір'я Змієносець, що є екліптичним, не входить до числа знаків зодіаку. Різні сузір'я мають на небі різні величини. До того ж точка весняного рівнодення через прецесію (поворот земної осі) постійно зміщується. Наприклад, зодіакальний знак Овна перебуває в сузір'ї Риб.

У таблиці 1.1 подано зодіакальні сузір'я, їхні позначення та час перебування Сонця в знаках зодіаку.

Таблиця 1.1

Назва зодіакального сузір'я	Знак сузір'я	Термін дії зодіакального сузір'я
Козеріг	♈	22 грудня – 20 січня
Водолій	♉	21 січня – 18 лютого
Риби	♊	19 лютого – 20 березня
Овен	♋	21 березня – 20 квітня
Телець	♌	21 квітня – 20 травня
Близнюки	♍	21 травня – 20 червня
Рак	♎	21 червня – 22 липня
Лев	♏	23 липня – 22 серпня
Діва	♐	23 серпня – 22 вересня
Терези	♑	23 вересня – 22 жовтня
Скорпіон	♒	23 жовтня – 22 листопада
Стрілець	♓	23 листопада – 21 грудня

2. Добовий рух Сонця на різних широтах. Ви вже знаєте, що річний рух Сонця серед зір по уявній лінії називають екліптикою. Усю екліптику (360°) Сонце проходить за один рік, однак цей рух уявний,

тому що відбувається внаслідок обертання Землі навколо Сонця. Нагадаємо, що видимий рух світил (у тому числі й Сонця), що відбувається через власне обертання Землі навколо осі, називають **добовим рухом**.

Розглянемо добовий рух Сонця на різних широтах. У середніх широтах Сонце сходить завжди у східній частині неба, поступово піднімається над горизонтом, опівдні досягає найвищого положення на небі, потім починає опускатися до горизонту і заходить у західній частині неба. У Північній півкулі цей рух відбувається зліва направо, а в Південній – справа наліво. Спостерігач у Північній півкулі Землі при цьому буде бачити Сонце на півдні, а перебуваючи в Південній півкулі – на півночі. Денний шлях Сонця на небі симетричний щодо напрямку північ–південь.

За Полярним колом на Землі, де $|\varphi| > 66,5^\circ$, добовий шлях Сонця практично паралельний горизонту. Сонце протягом півроку не заходить, описуючи кола над горизонтом. Це полярний день. Потім на півроку Сонце заходить і настає полярна ніч.

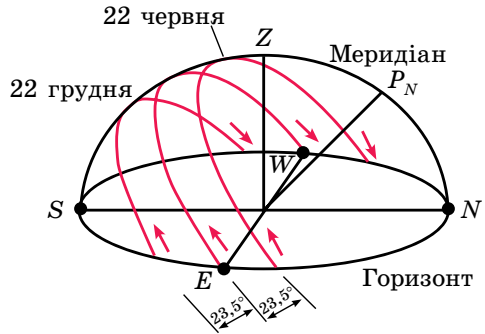
На екваторі Сонце, як й інші світила, сходить і заходить перпендикулярно до площини справжнього горизонту і видиме протягом половини доби.

3. Зміна добового шляху Сонця протягом року. Зміну добового шляху Сонця над горизонтом у різні пори року для середніх географічних широт Північної півкулі показано на малюнку 1.18. Визначаючи протягом року висоту Сонця опівдні, можна помітити, що двічі на рік воно буває на небесному екваторі. Це відбувається в дні весняного (близько 21 березня) і осіннього (близько 23 вересня) рівнодень. Площина горизонту ділить небесний екватор навпіл. Тому в дні рівнодень шляхи Сонця над горизонтом і під горизонтом рівні; відповідно тривалість дня і ночі однакова. Найкоротший день випадає на 22 грудня, а найдовший – на 22 червня.

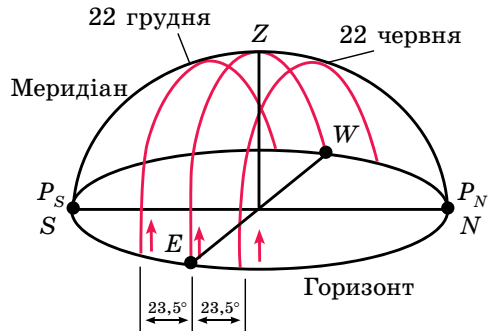
Для спостерігачів, які перебувають на земному екваторі, добові шляхи Сонця над горизонтом протягом року показано на малюнку 1.19.

4. Видимий рух і фази Місяця. Місяць – природний супутник Землі. Це найближче до Землі небесне тіло, він відбиває сонячне світло. Місяць рухається навколо Землі приблизно по еліптичній орбіті в той самий бік, у який Земля обертається навколо своєї осі. Тому ми бачимо, що Місяць переміщується серед зір назустріч обертанню неба. Напрямок руху Місяця завжди – із заходу на схід. Для спостерігача із Землі за добу Місяць переміщується на $13,2^\circ$.

Повний оберт по орбіті навколо Землі Місяць робить за 27,3 доби (сидеричний місяць). І за такий самий час він робить один оберт навколо своєї осі, тому до Землі завжди повернута та сама півкуля Місяця.



Мал. 1.18. Добові шляхи Сонця над горизонтом у різні пори року під час спостережень у середніх географічних широтах



Мал. 1.19. Добові шляхи Сонця над горизонтом у різні пори року під час спостережень на екваторі Землі

Рух Місяця навколо Землі дуже складний, і його вивчення становить одну з найважчих задач небесної механіки. Видимий рух Місяця супроводжується безперервною зміною його вигляду – зміною фаз. Відбувається це тому, що Місяць займає різні положення щодо Сонця і Землі (мал. 1.20).

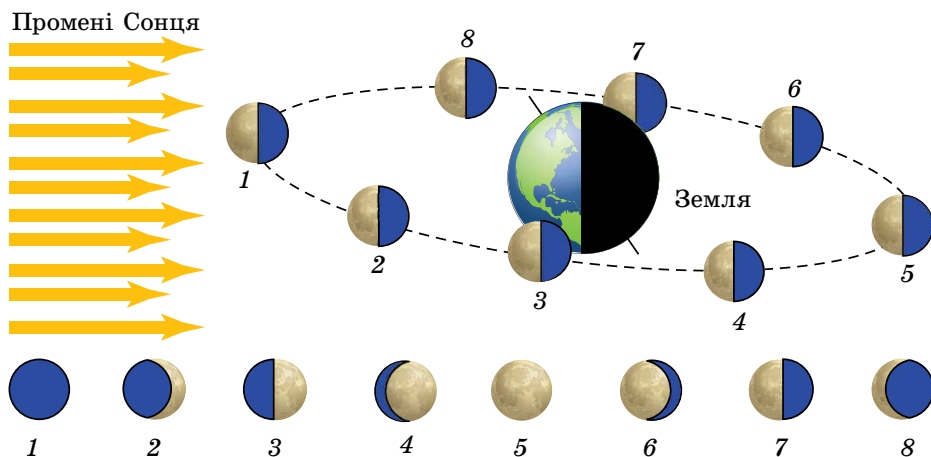
Місячною фазою називають частину місячного диска, видиму в сонячному освітленні.

Розглянемо фази Місяця, починаючи з молодика. Ця фаза настає, коли Місяць проходить між Сонцем і Землею та повернений до нас своїм темним боком (мал. 1.20, 1). Місяця зовсім не видно із Землі.

Через 1–2 дні у західній частині неба з'являється та продовжує рости вузький яскравий серп – «молодий» Місяць (мал. 1.20, 2). Іноді на фоні неба помітно й іншу частину тьмяного місячного диска. Явище тьмяного світла пояснюється тим, що місячний серп освітлюється безпосередньо Сонцем, а інша місячна поверхня – розсіяним сонячним світлом, відбитим Землею. Через 7 діб вже буде видно всю праву половину місячного диска – настає **фаза першої чверті** (мал. 1.20, 3). У цій фазі Місяць сходить удень, до вечора його видно в південній частині неба, заходить він уночі. Далі фаза збільшується (мал. 1.20, 4), і через 14–15 діб після молодика Місяць приходить у протистояння із Сонцем (мал. 1.20, 5). Його **фаза стає повною**, настає повня. Сонячні промені освітлюють усю місячну півкулю, повернену до Землі. Повний Місяць сходить під час заходу Сонця, заходить під час його сходу, а в середині ночі видно в південній частині неба.

Після повні Місяць поступово наближається до Сонця із заходу й освітлюється ним ліворуч (мал. 1.20, 6). Приблизно через тиждень настає **фаза третьої, або останньої, чверті** (мал. 1.20, 7). При цьому Місяць сходить біля опівночі, до сходу Сонця з'являється в південній частині неба і заходить удень. При подальшому зближенні супутника Землі із Сонцем фази Місяця стають серпоподібними (мал. 1.20, 8). Місяць видно тільки під ранок, незадовго до сходу Сонця, а заходить він у світлий час доби, перед заходом Сонця. Вузький серп Місяця цього разу опуклістю повернений до сходу. Потім знову настає молодик, і Місяць перестає бути видимим на небі.

Від одного молодика до наступного проходить близько 29,5 доби. Цей період зміни місячних фаз називають синодичним місяцем. Синодичний (або місячний місяць) триваліший від **сидеричного** (або зоряного) місяця, тому що Місяць і Земля рухаються в просторі в одному напрямку.



Мал. 1.20. Зміна фаз Місяця

5. Сонячні та місячні затемнення. Під час свого руху Місяць часто перекриває зорі зодіакальних сузір'їв. Значно рідше Місяць перекриває планети і Сонце. Перекривання Сонця Місяцем називають **сонячним затемненням**.

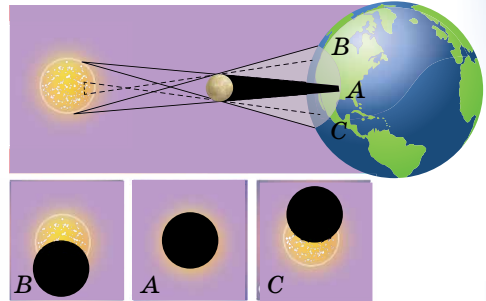
Сонячне затемнення має різний вигляд для різних точок земної поверхні, тому що діаметр Місяця в 400 разів менший за діаметр Сонця і Місяць приблизно в 400 разів ближчий до Землі, тому на небі Сонце і Місяць здаються дисками однакових розмірів. При повному сонячному затемненні Місяць може повністю закрити яскраву поверхню Сонця, залишаючи при цьому відкритою сонячну атмосферу.

Розглянемо схему повного сонячного затемнення (мал. 1.21). Проходячи між Сонцем і Землею, маленький за розмірами Місяць не може повністю закрити Землю. Диск Сонця буде закритий тільки для спостерігача А, який перебуває всередині конуса місячної тіні, максимальний діаметр якої на поверхні Землі не перевищує 270 км. Тільки звідси, із цієї порівняно вузької території земної поверхні, куди падає тінь від Місяця, буде видно повне сонячне затемнення. Там, де падає півтінь від Місяця, усередині так званого конуса місячної півтіні, буде видно (для спостерігачів В і С) часткове сонячне затемнення.

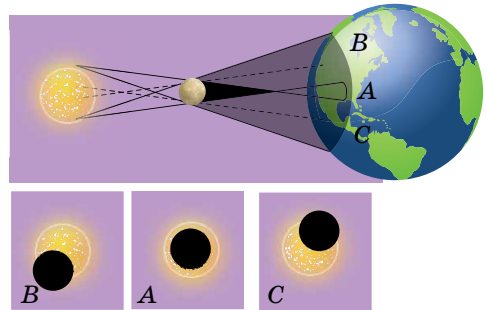
Якщо в момент затемнення Місяць, переміщаючись по еліптичній орбіті, буде перебувати на значній відстані від Землі, то видимий диск Місяця виявиться занадто малим, щоб повністю закрити Сонце. Тоді спостерігач А (мал. 1.22) зможе бачити навколо темного диска Місяця яскраву частину сонячного диска. Це – кільцеподібне затемнення. Для спостерігачів В і С таке сонячне затемнення буде частковим.

За межами місячної півтіні затемнення взагалі не спостерігаються. Сонячне затемнення видно не на всій поверхні Землі, а тільки там, де проходить тінь і півтінь Місяця. Шлях місячної тіні по земній поверхні називають **смугою повного сонячного затемнення**.

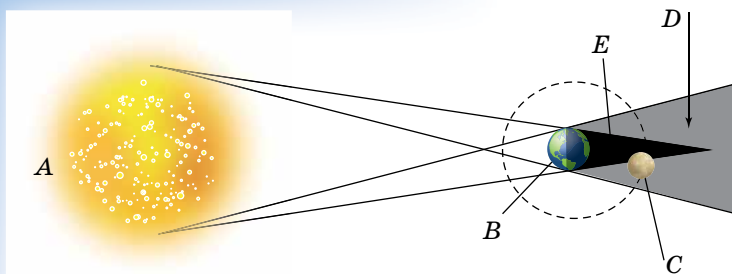
Місячні затемнення відбуваються тоді, коли Місяць потрапляє в земну тінь, що також має форму конуса, й оточений півтіню (мал. 1.23). Під час часткового входження Місяця в земну тінь місячне затемнення називають **частково тіньовим**, а під час повного входження – **повним тіньовим затемненням**. Якщо земна тінь спрямована в бік, протилежний до Сонця, Місяць може пройти крізь неї тільки в фазі повного Місяця. Місяць поступово входить у земну тінь своїм лівим краєм. Під час повного затемнення він стає бурым або темно-червоним (мал. 1.24), оскільки сонячне світло, заломлюючись у земній атмосфері, освітлює Місяць переважно червоними променями, які найменше розсіюються і послабляються земною атмосферою.



Мал. 1.21. Схема повного сонячного затемнення (для спостерігачів А, В, С)



Мал. 1.22. Схема кільцеподібного сонячного затемнення (для спостерігачів А, В, С)



Мал. 1.23. Схема місячного затемнення. Розташування небесних тіл під час затемнення: A – Сонце; B – Земля; C – Місяць; D – напівтінь; E – повна тінь



Мал. 1.24. Вигляд Місяця під час повного місячного затемнення

Щорічно відбувається від двох до п'яти сонячних затемнень. У середньому в тому самому місці Землі повне сонячне затемнення можна спостерігати досить рідко – лише раз на 200–300 років, а тривалість повного сонячного затемнення не перевищує 7 хв 31 с. Тому астрономи ретельно готуються до спостережень затемнення, щоб протягом дуже короткого часу встигнути вивчити зовнішні розріджені оболонки Сонця.

Зазвичай, щорічно відбувається 1–2 місячних затемнення, але бувають роки, коли затемнень зовсім не буває.

Місячні затемнення видно з усієї нічної півкулі Землі, де в цей час Місяць перебуває над горизонтом. Тому в кожній даній місцевості вони спостерігаються частіше від сонячних затемнень, хоча відбуваються приблизно в 1,5 раза рідше. Максимальна тривалість місячного затемнення – 1 год 47 хв.

Ще в VI ст. до н. е. було встановлено, що приблизно через 18 років і 11,3 доби всі затемнення будуть повторюватися в одній і тій самій послідовності. Цей період (період між затемненнями) назвали **саросом** (від грец. *σαρος* – «період», «повторення»).

Під час саросу в середньому відбувається 70–71 затемнення, 42–43 з яких сонячних (14 – повних, 13–14 – кільцеподібних і 15 – часткових) і 28 – місячних.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Які особливості добового руху Сонця на різних широтах? Чи може Сонце спостерігатися в зеніті в Україні, Австралії та Бразилії? Чому?
2. Чому Місяць повернений до Землі завжди одним і тим самим боком? Чи спостерігається в Місяця зворотний рух?
3. У чому відмінність сидеричного й синодичного місяців? Чим обумовлена їхня різна тривалість?
4. Що розуміють під місячною фазою? Опишіть фази Місяця.
5. Чому відбуваються сонячні й місячні затемнення?
6. Що таке сарос? Яка його періодичність?

§ 7. ЗАКОНИ КЕПЛЕРА

До кінця XVI ст. ученим не вдавалося точно розрахувати відносне положення планет на кілька років уперед за допомогою існуючих у той час теорій. Тоді вчені припускали, що планети рівномірно рухаються по строго колових орбітах навколо Сонця. Кінематичні закони руху планет відкрив лише на початку XVII ст. австрійський астроном і математик **Йоганн Кеплер** (1571–1630).

Він уперше встановив, що **планети обертаються по еліпсах, в одному з фокусів яких є Сонце**. Ця закономірність одержала назву **першого закону Кеплера**.

Відрізок AB (мал. 1.25) називають **великою віссю**, а відрізок CD – **малою віссю** еліпса. Відрізки $AO = OB = a$, $CO = OD = b$ називають відповідно **великою** і **малою півосями** еліпса. Відношення $e = \frac{OF_1}{a} = \frac{OF_2}{a}$

називають **ексцентриситетом еліпса**. Що більший ексцентриситет еліпса, то більше зміщені фокуси відносно центра і більшою буде різниця між великою та малою півосями. Тобто ексцентриситет слугує мірою «сплюснутості» еліпса.

Для еліпса $0 < e < 1$. Зазначимо, що якщо $e = 0$, можна розглядати коло як окремий вид еліпса ($b = a$). Припустимо, якщо Сонце перебуває у фокусі F_1 , то найближчу до Сонця точку A орбіти планети називають **перигелієм**, а найвіддаленішу B – **афелієм**. Позначимо $AF_1 = q$ (q – перигелійна відстань), а $BF_1 = Q$ (Q – афелійна відстань).

З малюнка 1.25 випливає, що $q + OF_1 = a$, $OF_1 = ae$, тоді $q = a - ae = a(1 - e)$, $Q = a(1 + e)$.

У земної орбіти ексцентриситет дорівнює 0,017. Земля перебуває в перигелії на початку січня, і перигелійна відстань дорівнює 147 млн км, а в афелії – на початку липня, її афелійна відстань дорівнює 152 млн км.

Вивчаючи рух Марса в просторі, Кеплер помітив, що планета рухається по орбіті нерівномірно – узимку швидше, ніж улітку. Він став шукати закономірність, за якою відбувається зміна швидкості Марса, і висунув гіпотезу, що швидкість має бути обернено пропорційна відстані від Марса до Сонця. Для перигелію й афелію припущення підтвердилося. Тоді Кеплер умовно розбив орбіту Марса на 360 частин і став перевіряти свою гіпотезу для різних її ділянок. Спостереження й розрахунки показали, що за однакові інтервали часу Марс проходить рівні площі секторів орбіти.

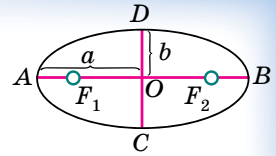
Сучасне формулювання цієї залежності поширене на всі планети й називають його **другим законом Кеплера**. Полягає він у такому: **радіус-вектор планети** (лінія, що сполучає центр Сонця із центром планети) **за однакові інтервали часу описує рівні площі**.

Другий закон Кеплера, або закон площ, проілюстровано на малюнку 1.26. Під час руху планети (P) навколо Сонця (S) її радіус-вектор за однакові інтервали часу описує рівні за площею фігури – P_1SP_2 і P_3SP_4 . Отже, швидкість руху планети по орбіті змінюється, приймаючи максимальне значення в перигелії та мінімальне в афелії. Найбільшу швидкість Земля має взимку: $v_{max} = 30,38$ км/с. Найменшу швидкість Земля має улітку: $v_{min} = 29,36$ км/с. У липні Земля рухається повільніше, тому тривалість літа в Північній півкулі більша, ніж у Південній. Цим пояснюється, що середньорічна температура в Північній півкулі Землі вища, ніж у Південній. Коли б Земля оберталася навколо Сонця зі сталою швидкістю, то кількість днів у цих півріччях була б однаковою.

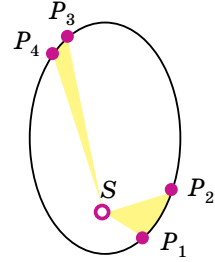
Порівнюючи розміри орбіт і періоди обертання планет навколо Сонця, Кеплер виявив, що квадрати періодів обертання планет пропорційні кубам їхніх середніх відстаней від Сонця (або відношення $r^3 : T^2$ однакове для всіх планет).

Третій закон Кеплера формулюється так: **квадрати сидеричних періодів обертання двох планет відносяться як куби великих півосей їхніх орбіт:**

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}.$$



Мал. 1.25.
Елементи еліпса



Мал. 1.26.
Пояснення другого
закону Кеплера

Відкриття Коперника і його послідовників показали, що Земля – це планета, що рухається навколо Сонця, як і інші планети. Тому з'явилося припущення, що сила тяжіння властива не тільки Землі, але й іншим небесним тілам. На матеріальні тіла, що перебувають біля інших планет, Місяця або Сонця, діє сила тяжіння, що спрямована до їхнього центра так само, як і на Землі. Отже, завдяки поширенню властивостей тяжіння на інші небесні тіла було поставлено питання про взаємодію тіл.

На основі дослідних даних Ньютон сформулював три основних закони руху тіл (закон інерції, закон динаміки матеріальної точки, закон дії і протидії). На основі третього закону Кеплера та закону динаміки Ньютон вивів закон всесвітнього тяжіння: **два тіла притягаються одне до одного із силою, пропорційною добутку мас цих тіл і обернено пропорційною квадрату відстані між ними:**

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2},$$

де m_1 і m_2 – маси двох тіл, що притягаються одне до одного; r – відстань між ними, $G = 6,673 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$ – гравітаційна стала.

На основі закону всесвітнього тяжіння й законів механіки Ньютон математично довів, що під дією сили тяжіння (гравітаційної сили) тіло масою m буде рухатися щодо тіла масою M по одній з кривих: еліпсу, колу, параболі або гіперболі.

34 Таким чином, Ньютон уточнив й узагальнив перший закон Кеплера: **під дією тяжіння одне небесне тіло рухається в полі тяжіння іншого небесного тіла по одному з конічних перерізів – еліпсу, колу, параболі або гіперболі.**



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Сформулюйте закони Кеплера.
2. По яких орбітах можуть рухатися небесні тіла під дією сили тяжіння?
3. Як змінюється значення швидкості при русі планети по орбіті від перигелію до афелію?
4. Як залежить період обертання супутників від мас планет?

§ 8. ВИЗНАЧЕННЯ РОЗМІРІВ, МАС НЕБЕСНИХ ТІЛ І ВІДСТАНЕЙ ДО НИХ У СОНЯЧНІЙ СИСТЕМІ

1. Визначення розмірів Землі. Кулястість Землі дає змогу визначити її розміри способом, що вперше застосував грецький учений Ератосфен, ідея якого полягає в такому. На одному географічному меридіані земної кулі виберемо дві точки O_1 і O_2 (мал. 1.27). Позначимо довжину дуги меридіана O_1O_2 через l , а її кутове значення через n (у градусах). Тоді

довжина дуги 1° меридіана l_0 дорівнюватиме: $l_0 = \frac{l}{n}$, а довжина меридіана: $L = 360^\circ l_0 = \frac{360^\circ l}{n} = 2\pi R$, де R – радіус земної кулі. Звідки $R = \frac{180^\circ l}{\pi n}$.

Довжина дуги меридіана між обраними на земній поверхні точками O_1 і O_2 у градусах дорівнює різниці географічних широт цих точок, тобто

$$n = \Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2.$$

Для визначення n Ератосфен використав ту обставину, що міста Сієна й Александрія лежать на одному меридіані і відстань між ними відома. За допомогою простого приладу, що вчений назвав скафісом, було встановлено: якщо в Сієні опівдні в день літнього сонцестояння Сонце освітлює

дно глибоких колодязів (перебуває в зеніті), то в цей самий час в Александрії Сонце міститься від вертикалі на $1/50$ частину кола ($7,2^\circ$). Отже, визначивши довжину дуги l і кут n , Ератосфен підрахував, що довжина земного кола становить 252 тис. стадіїв (стадій ≈ 180 м). З огляду на точність вимірювальних приладів того часу й ненадійність початкових даних, результат вимірювання був досить задовільним (дійсна середня довжина меридіана Землі дорівнює 40 008 км).

Точне вимірювання відстані l між точками O_1 і O_2 (мал. 1.27) ускладнене через природні перешкоди (гори, річки, ліси тощо). Тому довжина дуги l визначається шляхом обчислень, що вимагають вимірювання тільки порівняно невеликої відстані – базису і ряду кутів. Цей метод, розроблений у геодезії, називають **триангуляцією** (від лат. *triangulum* – «трикутник»).

Суть цього методу така. По обидва боки дуги O_1O_2 , довжину якої потрібно визначити, вибирають кілька точок $A, B, C, \dots$ на відстанях до 50 км так, щоб з кожної точки було видно щонайменше дві інші.

В усіх точках встановлюються геодезичні сигнали у вигляді вишок пірамідальної форми (мал. 1.28, а) заввишки від 6 до 55 м, залежно від умов місцевості. У верхній частині кожної вишки є майданчик для розміщення спостерігача й установки кутомірного інструмента – теодоліта (мал. 1.28, б). Відстань між будь-якими двома сусідніми точками вибирається на зовсім рівній поверхні й приймається за базис триангуляційної мережі. Довжину базису дуже ретельно вимірюють спеціальними мірними стрічками.

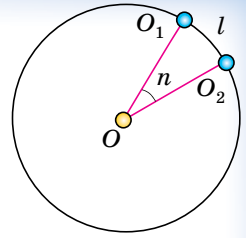
Виміряні кути в трикутниках і довжина базису дають змогу за допомогою тригонометричних рівнянь обчислити сторони трикутників, а за ними й довжину дуги O_1O_2 з урахуванням її кривизни.

Важливе значення для розвитку геодезії мала пропозиція голландського вченого **Снелліуса** (1580–1626) використовувати як метод передачі координат триангуляцію. У 1615–1617 рр. Снелліус виконав у Голландії градусний вимір по дузі меридіана, що складається з 33 трикутників і має протяжність близько 130 км.

З 1816 по 1855 р. під керівництвом астронома і геодезиста **Василя Струве** (1793–1864) було виміряно дугу меридіана завдовжки 2800 км. У 30-х рр. ХХ ст. високоточні градусні вимірювання було проведено під керівництвом професора **Феодосія Красовського** (1871–1948). Довжина базису в той час вибиралася невеликою: від 6 до 10 км. Пізніше завдяки використанню світло- і радіолокації довжина базису була збільшена до 30 км. Точність вимірювання дуги меридіана збільшилася до ± 2 мм на кожні 10 км довжини.

Триангуляційні вимірювання показали, що довжина дуги 1° меридіана неоднакова на різних широтах: біля екватора вона дорівнює 110,6 км, а біля полюсів – 111,7 км, тобто збільшується до полюсів.

Дійсна форма Землі не може бути представлена жодним з відомих геометричних тіл. Тому в геодезії і гравіметрії форму Землі вважають **геоїдом**, тобто тілом з поверхнею, близькою до поверхні спокійного океану й продовженою під материками.



Мал. 1.27. Вимірювання радіуса Землі



Мал. 1.28. Триангуляційна вишка та теодоліт

У наш час створено триангуляційні мережі з електронною радіолокаційною апаратурою, встановленою на наземних пунктах та з відбивачами на геодезичних штучних супутниках Землі, що дає змогу точно обчислювати відстані між пунктами. Цей напрям є найпоширенішим і наймасовішим в геодезії. Він доступний через мережу Інтернет. Супутникові приймачі вже сьогодні широко застосовуються в багатьох геодезичних підрозділах України для оновлення геодезичних мереж, прив'язки аерофотознімків, топографічних і кадастрових зйомок та інших видів робіт.

2. Визначення відстаней методом горизонтального паралаксу.

Середню відстань від усіх планет до Сонця в астрономічних одиницях можна обчислити, використовуючи третій закон Кеплера. Визначивши середню відстань від Землі до Сонця (тобто значення 1 а. о.) в кілометрах, можна знайти в цих одиницях відстані до всіх планет Сонячної системи.

Із 40-х рр. XX ст. минулого століття радіотехніка дала змогу визначати відстані до небесних тіл за допомогою радіолокації, про яку ви знаєте з курсу фізики. Класичним способом визначення відстаней був і залишається кутомірний геометричний спосіб. Ним визначають відстані й до далеких зір, до яких метод радіолокації застосувати не можливо. Геометричний спосіб ґрунтується на явищі паралактичного зміщення.

Удаване зміщення світила, обумовлене переміщенням спостерігача, називають **паралактичним зміщенням**, або **паралаксом світила**.

Визначення відстаней до тіл Сонячної системи ґрунтується на вимірюванні їхніх горизонтальних паралаксів.

36

Кут p , під яким зі світила видно радіус Землі, перпендикулярний до променя зору, називають горизонтальним паралаксом (мал. 1.29).

Що більша відстань до світила, то менший кут p .

Знаючи горизонтальний паралакс світила, можна визначити його від-

стань $D = SO$ від центра Землі. Відстань до світила $D = \frac{R_3}{\sin p}$, де R_3 – раді-

ус Землі. Приймавши R_3 за одиницю, можна виразити відстань до світила в земних радіусах.

Наприклад, паралакс Сонця $p_{\odot} = 8,794''$. Паралаксу Сонця відповідає середня відстань від Землі до Сонця, приблизно 149,6 млн км. Цю відстань приймають за одну астрономічну одиницю (1 а. о.). В астрономічних одиницях зручно вимірювати відстані між тілами Сонячної системи.

При малих кутах $\sin p \approx p$, якщо кут p виражений у радіанах.

Якщо p виражено в секундах дуги, то вводиться множник $\sin 1'' = \frac{1}{206265''}$,

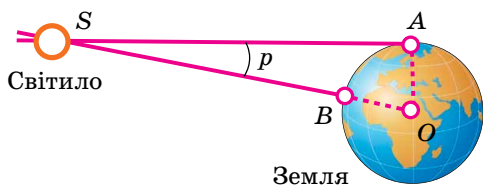
де 206 265 – число секунд в одному радіані. Тоді $\sin p'' = p'' \sin 1'' = \frac{p''}{206265''}$

і $D = \frac{206265''}{p''} R_3$. Це рівняння знач-

но спрощує обчислення відстані D до світила за відомим паралаксом p .

3. Радіолокаційний метод.

Для визначення відстаней до тіл Сонячної системи використовують найбільш точні методи вимірювання — радіолокаційні вимірювання. Вимірявши час t , потрібний для того,



Мал. 1.29. Горизонтальний паралакс світила

щоб радіолокаційний імпульс досяг небесного тіла, відбився і повернувся на Землю, визначають відстань D до цього тіла за формулою

$$D = c \frac{t}{2},$$

де c – швидкість світла, наближено дорівнює $3 \cdot 10^8$ м/с (точніше 299 792 458 м/с).

За допомогою радіолокації визначено найбільш точні значення відстаней до тіл Сонячної системи, уточнено відстані між материками Землі, більш точно визначено астрономічну одиницю (1 а. о. = 149 597 870 км).

Методи лазерної локації (наприклад, спеціальні кутові відбивачі, доставлені на Місяць) дали змогу виміряти відстань від Землі до Місяця з точністю до кількох сантиметрів.

4. Визначення розмірів тіл Сонячної системи. Під час спостереження небесних тіл Сонячної системи можна виміряти кут, під яким їх видно спостерігачеві із Землі. Знаючи **кутовий радіус світила** ρ (мал. 1.30) і відстань D до світила, можна обчислити лінійний радіус R цього світила за формулою: $R = D \sin \rho$.

За визначенням горизонтального паралакса, радіус Землі R_3 видно зі світила під кутом p , тоді одержимо:

$R = \frac{\sin \rho}{\sin p} R_3$. Оскільки значення кутів ρ і p малі, остаточно маємо:

$$R = \frac{\rho''}{p''} R_3.$$

Визначити розміри небесних тіл таким способом можна тільки тоді, коли видно їхні диски.

5. Визначення маси Землі. Однією з найважливіших характеристик небесного тіла є його маса. Закон всесвітнього тяжіння дає змогу визначати масу небесних тіл, у тому числі й масу Землі.

На тіло масою m , що перебуває поблизу поверхні Землі, діє сила тяжіння $F = mg$, де g – прискорення вільного падіння.

Якщо тіло рухається тільки під дією сили тяжіння, то, використовуючи закон всесвітнього тяжіння, прискорення вільного падіння дорівнює:

$g = G \frac{M}{R^2}$ і спрямоване до центра Землі. Отже, знаючи, що $g = 9,81$ м/с²,

а $G = 6,673 \cdot 10^{-11}$ Н·м²/кг² і радіус Землі $R_3 = 6370$ км, можна за форму-

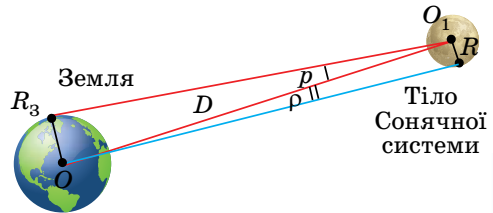
лою $M = \frac{gR^2}{G}$ визначити масу Землі: $M = 5,97 \cdot 10^{24}$ кг.

Середню густину Землі можна визначити, знаючи її масу й об'єм. Середня густина буде дорівнювати $5,5 \cdot 10^3$ кг/м³. Однак густина Землі не є сталою величиною – з глибиною вона збільшується.

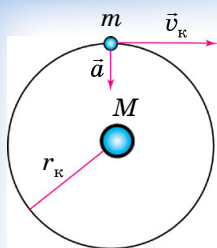
6. Визначення мас небесних тіл. Маса небесних тіл можна визначити різними способами: 1. Шляхом вимірювання сили тяжіння на поверхні даного небесного тіла (гравіметричний спосіб). 2. За третім узагальненим законом Кеплера.

Перший спосіб для Землі ми розглянули вище. Перш ніж розглядати другий спосіб, перевіримо виконання третього закону Кеплера для випадку колового руху планети зі швидкістю v_k .

Нехай тіло масою m рухається з лінійною швидкістю v_k навколо тіла M ($m \ll M$) по колу радіуса r_k (мал. 1.31). Це можливо, якщо рух



Мал. 1.30. Визначення лінійних розмірів тіл Сонячної системи



Мал. 1.31. Коловий рух тіл

відбувається під дією сили, що створює доцентрове прискорення $a = \frac{v_k^2}{r_k}$.

Силою, що створює прискорення, є сила тяжіння, що дорівнює $\frac{GMm}{r_k^2}$. Прирівнюючи $\frac{v_k^2}{r_k}$ до прискорення

$\frac{GM}{r_k^2}$, створюваного тяжінням, одержимо, що $v_k^2 = \frac{GM}{r_k}$.

Якщо період обертання тіла m навколо тіла M становить час T , то лінійна швидкість руху цього тіла по

орбіті дорівнює $v_k = \frac{2\pi r_k}{T}$. Підставивши останнє рівняння в попереднє, одержимо: $\left(\frac{2\pi r_k}{T}\right)^2 = \frac{GM}{r_k}$, або $\frac{r_k^3}{T^2} = \frac{GM}{4\pi^2}$.

Для еліптичного руху це рівняння також справджується, якщо замість радіуса кола r_k підставити значення більшої півосі a еліптичної орбіти.

У такому випадку одержимо відношення: $\frac{a^3}{T^2 M} = \frac{G}{4\pi^2}$, яке можна сформу-

38

лювати так: **відношення куба великої півосі орбіти тіла до квадрата періоду його обертання та маси центрального тіла є величина стала.**

Якщо масою m меншого тіла не можна знехтувати порівняно з масою M центрального тіла, то в третій закон Кеплера, як показав Ньютон, замість маси M увійде сума мас ($M + m$), і останнє співвідношення запи-

меться у вигляді: $\frac{a^3}{T^2 (M + m)} = \frac{G}{4\pi^2}$.

Узагальнивши це рівняння для двох небесних тіл масами M_1 і M_2 , одержимо:

$$\frac{T_1^2 (M_1 + m_1)}{T_2^2 (M_2 + m_2)} = \frac{a_1^3}{a_2^3},$$

тобто квадрати сидеричних періодів супутників (T_1^2 і T_2^2), помножені на суму мас головного тіла й супутника ($M_1 + m_1$ і $M_2 + m_2$), відносяться як куби великих півосей орбіт супутників (a_1^3 і a_2^3).

На основі уточненого Ньютоном третього закону Кеплера можна обчислити другим способом маси планет, що мають супутники, а також обчислити масу Сонця. Третій закон Кеплера також можна використовувати для визначення мас подвійних зір.

Маси планет, що не мають супутників, можуть бути визначені за збуреннями, які вони породжують у русі Землі, Марса, астероїдів, комет, а також за їхніми взаємними збуреннями.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Як грецький учений Ератосфен визначив розміри Землі?
2. Перелічіть способи визначення відстаней до тіл Сонячної системи, які ви знаєте.
3. Як визначають довжину дуги меридіана триангуляційним методом?
4. Що розуміють під горизонтальним паралаксом? Як визначити відстань до світила, знаючи його горизонтальний паралакс?

5. Що таке астрономічна одиниця?
6. У чому полягає радіолокаційний метод визначення відстаней до небесних тіл?
7. Як Ньютон узагальнив закони Кеплера?
8. Як залежить період обертання супутників від мас планет? Як можна розрахувати масу Землі, Сонця?



ПРАКТИЧНА РОБОТА № 1

Робота з рухомою картою зоряного неба. Визначення положення світил на небесній сфері за допомогою карти зоряного неба

Мета роботи: ознайомитися з картою зоряного неба, навчитися використовувати її для визначення положень на небі залежно від дати та часу, визначати моменти часу сходу та заходу світил.

Обладнання: рухома карта зоряного неба, шкільний астрономічний календар.

Теоретичні відомості

Найпростіший астрономічний прилад, який дає змогу стежити за добовою зміною положень світил відносно небесного меридіана та горизонту – **рухома карта зоряного неба (РКЗН)**. За допомогою неї можна (хоч і наближено) досить швидко і без жодних теоретичних розрахунків розв'язувати низку задач практичної астрономії.

Модель рухомої карти зоряного неба

Рухома карта складається із зоряної карти та накладного рухомого круга (мал. 1.32).

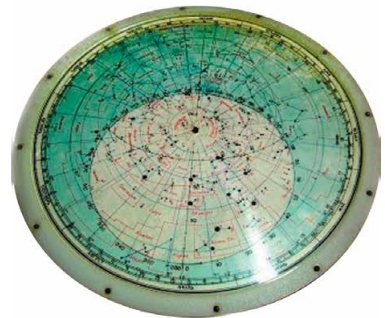
Добові паралелі на РКЗН зображаються у вигляді концентричних кіл, а кола схилень – променів, які виходять з Північного полюса світу, розміщеного в центрі карти. Отже, утворюється сітка екваторіальних координат (α , δ). Схилення світил на карті відраховуються уздовж радіусів від краю карти до центра (від -45° до 90°). Прямі піднесення проставлено поблизу краю карти (від 0 до 24^h). Уздовж краю карти нанесено шкалу календарних дат (лімб дат).

Небесним екватором на зоряній карті є добова паралель зі схиленням, що дорівнює нулю. Область карти, яка міститься всередині небесного екватора, є північною небесною півсферою.

Ексцентричний овал, який перетинається з небесним екватором у двох діаметрально протилежних точках (весняного рівнодення: $\alpha = 0^h$, і осіннього рівнодення: $\alpha = 12^h$), зображає екліптику (на рухомій карті зображається зазвичай червоним кольором). Якщо з полюса світу провести пряму на той чи інший день шкали календарних дат, то точка перетину цієї прямої з екліптикою покаже положення Сонця на небесній сфері в заданий день.

Накладний круг на карті зоряного неба дає змогу виділити ту частину небосхилу, яку можна спостерігати в даному місці Землі в заданий момент часу. За винятком овала, круг фарбують напівпрозорою блакитною фарбою. Сузір'я, які містяться всередині овала, у даний момент часу заданого дня року будуть перебувати над горизонтом, решта – під горизонтом (їх спостереження у даний момент часу з даної точки Землі неможливе).

Відлік часу проводиться за годинною шкалою, яку нанесено вздовж краю накладного



Мал. 1.32. Рухома карта зоряного неба

круга і проградуйовано в годинах від 0 до 24^h . Вона дає змогу проводити відлік місцевого середнього часу з точністю до 5 хв.

Контур овала зображає математичний або істинний горизонт. На цьому контурі є шкала азимутів (у градусах від 0 до 360°), за якою можна наближено оцінювати значення азимутів світил. На шкалі азимутів ще позначено основні точки горизонту: південь S ($A = 0^\circ$), захід W ($A = 90^\circ$), північ N ($A = 180^\circ$) та схід E ($A = 270^\circ$).

Пряма, що проходить через точки півдня та півночі, зображає небесний меридіан. Світила, які перетинаються з небесним меридіаном, перебувають в кульмінації в даний момент часу. У верхній кульмінації містяться ті світила, які перебувають на небесному меридіані між Північним полюсом світу та точкою півдня. Сузір'я, які в даний момент часу сходять над горизонтом, перебувають в східній частині істинного горизонту (поблизу дуги математичного горизонту від точки півночі через точку сходу до точки півдня). А сузір'я, що в даний час заходять, слід шукати поблизу західної частини істинного горизонту.

Положення зеніту на накладному крузі визначається точкою перетину небесного меридіана і добової паралелі, яка має схилення, що дорівнює географічній широті місця спостереження.

Порядок виконання роботи

Завдання 1

40

1. Установіть накладний круг у положення, яке відповідає моменту виконання роботи.

2. Визначте, які сузір'я і яскраві зорі в цей час сходять, заходять, будуть у верхній і нижній кульмінаціях, які видно повністю, а які частково. Установіть за допомогою зоряного атласу, як називаються найяскравіші зорі, які видно в цей час на небі.

3. Визначте для вказаної нижче дати:

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Дата	22.01	22.02	22.03	22.04	22.05	22.12	22.11	22.10	22.09	22.08

1) у якому сузір'ї перебуватиме Сонце; 2) час сходу і заходу Сонця; 3) тривалість дня.

Завдання 2

1. Визначте вигляд зоряного неба в дату свого дня народження.

2. Визначте положення Сонця у свій день народження (сузір'я і координати).

3. Визначте час сходу і заходу Сонця у свій день народження, а також тривалість дня.

4. Визначте координати зір (за варіантами):

Варіант	1	2	3	4
Зоря	α Орла (Альтаір)	α Діви (Спіка)	α Лева (Регул)	α Ліри (Вега)

5. Визначте, у який час зоря сходить та заходить у день вашого народження.

Контрольні запитання до роботи

1. З яких частин складається комплект рухомої карти зоряного неба? Опишіть будову основної карти.

2. Опишіть будову накладного круга рухомої карти зоряного неба.

3. Як за допомогою рухомої карти зоряного неба можна визначити α та δ світила?

4. Як за допомогою рухомої карти зоряного неба можна визначити моменти сходу (заходу) світила в задану дату?

5. Яке із 88 сузір'їв найбільше? Найменше? Яке сузір'я, що перебуває на небесному екваторі, розрізає на дві нерівні частини інше сузір'я?



РОЗВ'ЯЗУЄМО РАЗОМ

Задача 1. Навіщо й коли було введено точки і лінії небесної сфери?

Відповідь. Точки і лінії небесної сфери ввели давньогрецькі вчені – Фалес Мілетський (VII–VI ст. до н. е.), Евклід (III ст. до н. е.) та ін. Вони були потрібні для побудови систем сферичних астрономічних координат і для кутомірних вимірювань.

Задача 2. Увечері учень спостерігав верхню кульмінацію деякої зорі на висоті $66^\circ 30'$ в бік півночі від зеніту, а висота цієї зорі, яку він виміряв у нижній кульмінації, дорівнювала $35^\circ 42'$. Знайдіть географічну широту місця спостереження та схилення зорі.

Розв'язання. Висота зорі над горизонтом для верхньої кульмінації, яка відбувається на північ від зеніту, $h_{\text{в}} = 90^\circ + \varphi - \delta$, де φ – географічна широта місця спостереження, δ – схилення зорі. Для нижньої кульмінації: $h_{\text{н}} = \delta + \varphi - 90^\circ$. Додавши і віднявши ці рівняння, знаходимо:

$$h_{\text{в}} + h_{\text{н}} = 2\varphi, \quad h_{\text{в}} - h_{\text{н}} = 180^\circ - 2\delta.$$

Звідки знаходимо широту місця спостереження:

$$\varphi = \frac{h_{\text{в}} - h_{\text{н}}}{2} = \frac{66^\circ 30' + 35^\circ 42'}{2} = 51^\circ 06'$$

та схилення зорі:

$$\delta = \frac{180^\circ - (h_{\text{в}} - h_{\text{н}})}{2} = \frac{180^\circ (66^\circ 30' - 35^\circ 42')}{2} = 74^\circ 36'.$$

Задача 3. Для визначення положення тіла у просторі потрібні три координати. В астрономічних каталогах найчастіше дають тільки дві координати: пряме сходження і схилення. Чому?

Відповідь. Третьою координатою у сферичній системі координат є модуль радіус-вектора – відстань до об'єкта r . Ця координата визначається з більш складних спостережень, ніж α і δ . У каталогах її еквівалентом є річний паралакс, звідки $r = 1/\pi$ (пк). Для завдань сферичної астрономії достатньо знати лише дві координати α і δ або альтернативні пари координат: екліптичних – λ , β або галактичних – l , b .

Задача 4. Обчисліть період обертання Нептуна навколо Сонця, знаючи, що його середня відстань від Сонця дорівнює 30 а. о.

Розв'язання. Запишемо 3-й закон Кеплера: $\frac{T_{\text{Н}}^2}{T_3^2} = \frac{a_{\text{Н}}^3}{a_3^3}$, де $T_{\text{Н}}$ – зоряний

період Нептуна; a – середня відстань від Сонця (більша піввісь орбіти); T_3 – зоряний період Землі; a_3 – більша піввісь земної орбіти (1 а. о.).

$$T_{\text{Н}} = \sqrt{\frac{T_3^2 a_{\text{Н}}^3}{a_3^3}} = T_3 \sqrt{\frac{a_{\text{Н}}^3}{a_3^3}}; \quad T_{\text{Н}} = 1 \sqrt{\frac{30^3}{1^3}} = 164 \text{ роки.}$$

Задача 5. 21 березня центр Сонця проходить через меридіан майже одночасно з точкою весняного рівнодення, а надалі ці дві точки розходяться на небесній сфері. Чому? Яка із цих точок рухається швидше? (Мова йде про добовий рух).

Відповідь. Вони розходяться, тому що: 1) точка весняного рівнодення робить тільки добовий рух, а Сонце, крім добового, має ще й власний рух; 2) точка весняного рівнодення перебуває на екваторі, а Сонце – на екліптиці. Сонце за добу проходить шлях менший, ніж точка весняного рівнодення, отже, воно рухається повільніше приблизно на 1° за добу.

Задача 6. У пункті, що міститься на 41° сх. довготи, поясний час становить 6 год 40 хв. Знайдіть місцевий час у пункті на 86° сх. довготи в цей момент.

Розв'язання. Різниця місцевих часів дорівнює різниці довгот: $T_{1м} - T_{2м} = \lambda_1 - \lambda_2$. Різниця місцевого і поясного часу становить: $T_{1м} - T_{1п} = \lambda_1 - n_1$, де n_1 – номер пояса. Із цих двох рівнянь $T_{2м} = T_{1п} + \lambda_2 - n_1$. Враховуючи, що $\lambda_1 = 41^\circ$ належить до третього поясу [$37,5^\circ - 52,5^\circ$] і що 1 год = 15° , одержимо, що $\lambda_2 = 86^\circ = 5$ год 44 хв і $T_{2м} = 6$ год 40 хв + 5 год 44 хв – 3 год = 9 год 24 хв.

Задача 7. Як виходить, що юліанський календар за більшої тривалості року, ніж його фактична тривалість, усе-таки відстає від природи? Це нагадує відставання одного мандрівника від іншого при більшій довжині кроку в того, хто відстає? Поясніть цю неузгодженість.

Відповідь. Що більша будь-яка міра, то менше число разів її можна вмістити у вимірюваній величині. Отже, користуючись юліанським роком, ми одержуємо менше років і частин року, ніж використовуючи тропічний рік. Якби ми використали для календаря рік менший, ніж тропічний, то вийшло б, навпаки, забігання наперед.



ЗАДАЧІ ТА ВПРАВИ

1.1. Як за допомогою сузір'я Велика Ведмедиця знайти Північний полюс світу? Відповідь проілюструйте малюнком.

1.2. Як змінилася б карта зоряного неба, якби Міжнародний астрономічний союз у 1922 р. вирішив зберегти не 88 сузір'їв, а лише 44?

1.3. Яка зоря яскравіша: зоря 1-ї зоряної величини чи зоря 6-ї зоряної величини?

1.4. Видима зоряна величина зорі становить 0^m . Поясніть, якою була б її видима зоряна величина: від'ємною чи додатною, – якщо відстань до зорі була б більша.

1.5. Випишіть із зоряного каталогу по п'ять світил, які на вашій широті: ніколи не заходять, сходять і заходять, ніколи не сходять.

1.6. Визначте схилення зір, доступних спостереженню на широті вашого населеного пункту.

1.7. Чи можна користуватися картою земного зоряного неба на поверхні інших планет Сонячної системи? Під час міжпланетних польотів? На планетах, які обертаються навколо інших зір?

1.8. Визначте за зоряною картою, скільки приблизно часу сузір'я Оріона буде проходити через небесний меридіан.

1.9. У який день Сонце сходить на сході й заходить на заході?

1.10. В Україні за давньою традицією зустрічають так званий старий Новий рік – 14 січня. Звідки походить ця традиція?

1.11. Поясніть за допомогою малюнка явище видимого петлеподібного руху планет.

1.12. У якій з конфігурацій найкраще спостерігати Марс? Відповідь поясніть малюнком.

1.13. Планету видно на кутовій відстані 55° від Сонця. Яка це планета – верхня чи нижня?

1.14. Через які інтервали часу повторюється протистояння Марса, якщо зоряний період його обертання навколо Сонця становить 1,88 року?

1.15. Визначте зоряний період обертання Венери навколо Сонця, якщо положення повторюється через 1,6 року.

1.16. Чому Місяць добре видно під час повного місячного затемнення, а Сонця не видно під час повного сонячного затемнення?

1.17. Коли Місяць ближче до Сонця: під час сонячного затемнення чи під час місячного? Відповідь поясніть за допомогою малюнка.

1.18. Поясніть за допомогою малюнка, чому Місяць у фазі першої чверті видно звечора.

1.19. Як може орієнтуватися на поверхні Місяця космонавт, якщо на Землі ми орієнтуємося за допомогою компаса?

1.20. Більшим чи меншим за діаметр Місяця є розмір кругової тіні від Місяця на поверхні Землі під час повного сонячного затемнення? Відповідь поясніть.

1.21. Перелічіть способи визначення відстаней до тіл Сонячної системи, які ви знаєте.

1.22. Радіосигнал, відправлений до Марса, повернувся на Землю через 522,6 с. На якій відстані від Землі містився в той момент Марс?

1.23. Які параметри слід виміряти для того, щоб обчислити, у скільки разів Сонце більше за Місяць?

1.24. Горизонтальний паралакс планети дорівнює $0,3''$. Визначте відстань до неї в астрономічних одиницях.

1.25. Визначте кутовий радіус Марса в протистоянні, якщо його лінійний радіус 3398 км, а горизонтальний паралакс $18''$.

1.26. Поясніть, чи не суперечить першому закону Кеплера рух тіла навколо Сонця по коловій орбіті.

1.27. Який із законів визначає зміну швидкості руху тіла по еліптичній орбіті на різних відстанях від Сонця?

1.28*. За допомогою якого закону і як можна довести, що період обертання Венери навколо Сонця менший, ніж період обертання Марса?

1.29*. Чи близько Меркурій підходить до Сонця, якщо більша піввісь його орбіти 58,34 млн км, а ексцентриситет 0,206?

1.30*. Два тіла з різними масами обертаються навколо Сонця по орбітах з однаковими за значеннями великими півосьми. Період обертання якого з тіл більший? Чи, можливо, ці періоди однакові?

1.31*. Обчисліть, як змінився б період обертання Землі навколо Сонця, якби маса Землі була вдвічі більшою, ніж тепер, а середня відстань від Сонця – такою самою.



ПЕРЕВІР СВОЮ КОМПЕТЕНТНІСТЬ

Контрольні запитання

1. Що розуміють під сузір'ям?
2. На яку кількість сузір'їв розділено небесну сферу?
3. Як сузір'я одержали свої назви? Наведіть приклади назв сузір'їв.
4. Яка відмінність між геоцентричною та геліоцентричною системами світу?
5. Чому в астрономії використовують різні системи координат? У чому полягає принципова відмінність між різними системами небесних координат?
6. Як називають точки перетину небесної сфери з віссю обертання Землі, що продовжена в космос?

Що я знаю і вмію робити

● Я вмію розв'язувати задачі

1. Скільки (приблизно) сузір'їв на небесній сфері над горизонтом удень?
2. Назви яких астрономічних інструментів, приладів та механізмів можна побачити на карті зоряного неба у вигляді сузір'їв?

3. У деякому пункті спостереження найменша висота зорі становить 0° , а найбільша – 50° . На якій широті міститься цей пункт, яким є схилення зорі?

● **Я вмію проводити астрономічні спостереження**

4. Виконайте спостереження заходу або сходу Сонця в день рівнодення – 23 вересня або 21 березня. Сонце в ці дні сходить у точці сходу та заходить у точці заходу. Намалюйте положення цих точок відносно вашого будинку.

● **Я знаю, як потрібно користуватися астрономічним календарем**

5. Визначте за допомогою астрономічного календаря, яка планета Сонячної системи перебуває найближче до Землі в день вашого народження. У якому сузір'ї її можна побачити сьогодні вночі?

6. За допомогою астрономічного календаря відшукайте на небі Юпітер та Сатурн і визначте, у якому сузір'ї спостерігаються ці планети.



ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ

1. Яке тіло розміщене в центрі геоцентричної системи світу?

А Сонце Б Юпітер В Сатурн Г Земля Д Венера

2. Яку планету відкрив Міколай Коперник?

А Марс Б Сатурн В Уран Г Землю Д Юпітер

3. Як перекладається з грецької мови слово «планета»?

А волохата зоря В блукаюча зоря Д холодне тіло
Б хвостата зоря Г туманність

4. Північний полюс світу міститься...

А в Арктиці В у сузір'ї Оріон
Б в Антарктиці Г у сузір'ї Велика Ведмедиця
Д поблизу Полярної зорі

5. Момент, коли світило перебуває найвище над горизонтом, називають...

А прямим сходженням Б верхньою кульмінацією
В нижньою кульмінацією Г верхньою культивациєю
Д нижньою культивациєю

6. Тропіки – це така географічна широта, де...

А ростуть пальми Б Сонце ніколи не заходить
В під час сонцестояння Сонце кульмінує в зеніті
Г під час рівнодення Сонце кульмінує в зеніті
Д ніколи не випадає дощ

7. Полярне коло – це така географічна широта, де...

А весь рік не тане сніг Б живуть білі ведмеді
В півроку триває ніч, а півроку – день
Г під час рівнодення Сонце кульмінує в зеніті
Д у день зимового сонцестояння Сонце не сходить

8. Який кут між площинами екватора та екліптики?

А 0° Б $23,5^\circ$ В 45° Г $66,5^\circ$ Д 90°

9. Як називають точку орбіти, де планета перебуває найближче до Сонця?

А перигелій Б перигей В апогей Г афелій Д апекс

Розділ 2

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ АСТРОНОМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Вивчаючи матеріал цього розділу, ви ознайомитеся з будовою і призначенням телескопів, дізнаєтеся про діапазони електромагнітного спектра, приймачі випромінювання, найвідоміші детектори нейтрино та гравітаційних хвиль, провідні астрономічні обсерваторії України та світу. Навчитися пояснювати вплив атмосфери на астрономічні спостереження, принцип дії оптичного телескопа, відмінності між оптичними телескопами та радіотелескопами, особливості реєстрації випромінювання небесних тіл.

§ 9. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НЕБЕСНИХ ТІЛ

45

1. Випромінювання небесних тіл. У дослідженні природи небесних тіл велику увагу приділяють вивченню їхнього електромагнітного випромінювання. Небесні тіла, залежно від свого фізичного стану, випромінюють електромагнітні хвилі різної довжини.

У вакуумі електромагнітні хвилі завжди поширюються з однаковою для всіх видів випромінювання швидкістю $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

Дуже важливою властивістю електромагнітного випромінювання є те, що швидкість його поширення не залежить від довжини хвилі, від швидкості руху джерела. Хвилі характеризуються частотою ν і довжиною λ , між якими існує залежність: $c = \nu\lambda$. Електромагнітні хвилі, що мають різну довжину хвилі, взаємодіють з речовиною по-різному. Відповідно методи дослідження електромагнітного випромінювання відрізняються. У зв'язку із цим електромагнітне випромінювання умовно ділиться на кілька діапазонів (табл. 2.1).

Таблиця 2.1

Діапазони електромагнітного випромінювання

Діапазони	Довжина хвилі, λ
Радіохвилі	більше ніж 1 мм
Інфрачервоні промені	від 760 нм до 1 мм
Видимі промені	від 390 до 760 нм
Ультрафіолетові промені	від 10 до 390 нм
Рентгенівські промені	від 0,01 до 10 нм
Гамма-промені	менше ніж 0,01 нм

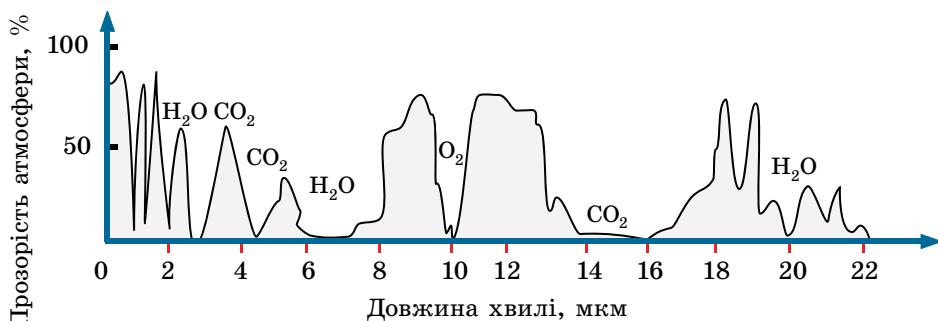
Випромінювання довжиною хвилі від 390 до 760 нм людське око сприймає як світло, причому різним довжинам хвиль відповідають різні

кольори (від фіолетового до червоного). Для виявлення випромінювання в інших діапазонах потрібні спеціальні прилади.

Залежно від свого фізичного стану, одні небесні тіла випромінюють енергію у вузьких інтервалах частот спектра електромагнітних хвиль (наприклад, світлі газові туманності), інші – в усьому його діапазоні: від γ -променів до радіохвиль включно (наприклад, зорі). Вивчення фізичної природи небесних тіл у широкому діапазоні електромагнітного випромінювання привело до появи в науці таких розділів, як: γ -астрономія, рентгенівська астрономія, інфрачервона астрономія, радіоастрономія тощо.

Вивчення електромагнітних хвиль, що випромінюють небесні тіла, ускладнюється тим, що атмосфера Землі пропускає випромінювання лише в певних діапазонах довжин хвиль: від 300 до 1000 нм, від 1 см до 20 м і в кілька «вікон» інфрачервоного діапазону. Випромінювання, що доходить до поверхні Землі, досліджують за допомогою оптичних телескопів (видиме світло) і радіотелескопів.

Кисень, озон, вуглекислий газ і водяна пара – чотири компоненти атмосфери, які спричиняють поглинання випромінювання. Поглинання залежить від довжини хвилі електромагнітного випромінювання. На малюнку 2.1 представлено криву прозорості атмосфери в діапазоні $\lambda = 0\text{--}22$ мкм, з якої видно, що майже половина спектрального діапазону виявляється абсолютно непридатною для дослідження, оскільки відповідне випромінювання не може пройти через атмосферу.



Мал. 2.1. Крива прозорості атмосфери в діапазоні довжин хвиль від 0 до 22 мкм

Сильніше атмосфера поглинає короткохвильову частину діапазону електромагнітного випромінювання: ультрафіолетові, рентгенівські та γ -промені. Спостереження в цих діапазонах можливі тільки за допомогою приладів, піднятих на велику висоту (на літаках або зондах) або встановлених на космічних станціях-лабораторіях, комплексах, штучних супутниках Землі, орбітальних обсерваторіях.

2. Приймачі випромінювання. Випромінювання, яке зібрав об'єктив телескопа, реєструється та аналізується приймачем випромінювання. Протягом перших двох з половиною століть з початку телескопічної ери єдиним приймачем випромінювання слугувало людське око. Однак це не тільки не дуже чутливий, але й досить суб'єктивний приймач випромінювання.

Із середини XIX ст. в астрономії стали широко застосовуватися фотографічні методи. Фотографічний матеріал (фотопластинки, фотоплівки) має багато переваг порівняно з людським оком. Фотоемульсія здатна накопичувати енергію, що на неї падає, тобто, збільшуючи витримку на негативі, можна зібрати більше світла.

Фотографія дає змогу документувати події, тому що негативи можуть зберігатися протягом тривалого часу. Фотопластинки мають панорамність, тобто можуть одночасно і точно фіксувати безліч об'єктів.

Найбільші сучасні телескопи управляються комп'ютерами (та іншою електронною технікою), а отримані зображення космічних об'єктів фіксуються у формі, що обробляється комп'ютерними програмами. Фотографія майже вийшла з використання. В останні десятиліття широко застосовують **фотоелектричні приймачі випромінювання**, відомості від яких передаються безпосередньо на електронний обчислювальний пристрій – комп'ютер. До таких приладів належать ПЗЗ-матриці (прилади із зарядовим зв'язком). ПЗЗ-матриця – це інтегральна схема, розміщена на напівпровідниковому матеріалі, що перетворює світлову енергію випромінювання в енергію електричного струму. Сила струму пропорційна інтенсивності світлового потоку.

Комп'ютерна обробка зображення дає змогу позбутися перешкод і фону, створюваних розсіюванням світла в атмосфері Землі та турбулентністю її атмосфери.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Що розуміють під пропускну здатністю атмосфери Землі?
2. Які види електромагнітних хвиль випромінюють небесні тіла? На які діапазони ділиться весь спектр електромагнітного випромінювання?
3. Як земна атмосфера впливає на проходження різних видів випромінювання до поверхні Землі?
4. Чому з поверхні Землі не можна вивчати небесні об'єкти в усіх діапазонах електромагнітного випромінювання?

§ 10. СУЧАСНІ НАЗЕМНІ ТЕЛЕСКОПИ. ПРИНЦИП ДІЇ І БУДОВА ОПТИЧНОГО ТА РАДІОТЕЛЕСКОПА, ДЕТЕКТОРІВ НЕЙТРИНО І ГРАВІТАЦІЙНИХ ХВИЛЬ

47

1. Астрономічні спостереження та наземні телескопи. Як ви вже знаєте, основним способом дослідження небесних об'єктів і явищ є астрономічні спостереження. **Астрономічні спостереження** – це цілеспрямована й активна реєстрація інформації про процеси та явища, що відбуваються у Всесвіті. Такі спостереження є основним джерелом знань на емпіричному рівні.

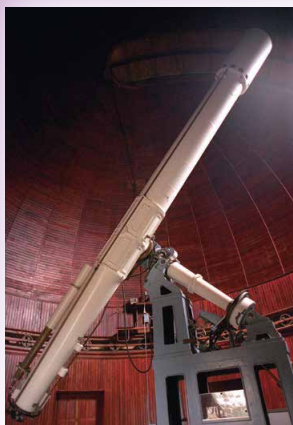
Протягом тисячоліть астрономи вивчали положення небесних об'єктів на зоряному небі та їхнє взаємне переміщення із часом. Точні вимірювання положень зір, планет й інших небесних тіл дають матеріал для визначення відстаней до них та їхніх розмірів, а також для вивчення законів їхнього руху. Результатами кутомірних вимірювань користуються в практичній астрономії, небесній механіці, зоряній астрономії.

Для проведення астрономічних спостережень та їхньої обробки в багатьох країнах створено спеціальні науково-дослідні установи – **астрономічні обсерваторії**.

Астрономічна обсерваторія (від грец. *ἀστρον* – «зоря», лат. *observo* – «спостерігаю») – науково-дослідна установа, у якій проводять спостереження за небесними світилами, вивчають їх.

Астрономічні обсерваторії виникли в час зародження астрономії. Їхні залишки знайдено в Європі, Азії, Південній Америці. Таким, зокрема, є Стоунхендж в Англії. Першу державну обсерваторію (тобто таку, що фінансувалася державою) було засновано в 1671 р. в Парижі.

Сучасні астрономічні обсерваторії, як правило, спеціалізуються в якійсь окремій галузі астрономії, відтак існують астрометричні, астрофізичні, сонячні обсерваторії тощо. З початком космічної ери почали розрізняти наземні й космічні обсерваторії, які розглянемо в §17.



Мал. 2.2. 50-сантиметровий телескоп у Ніцці, Франція



Мал. 2.3. Телескоп-рефлектор Харлана Дж. Сміта в обсерваторії Макдональд, 2,7 м

У наш час у світі налічують близько 400 АО (астрономічних обсерваторій). 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 будувалися поблизу чи навіть у населих пунктах, з XIX ст. їх почали розміщувати на гірських вершинах. Серед найбільших АО світу найвідоміші: АО на вершині давньої вулканічної гори Мауна-Кеа (4205 м, о. Гавайї, уведено в експлуатацію 1990 р., оголошено науковим заповідником за свій унікальний астроклімат; тут встановлено кілька 4-метрових телескопів, а також телескопи «Кек», «Джеміні», «Субару»); англійська АО на о. Ла-Пальма (2327 м, 1986 р.); американська АО Лас-Кампанас (2280 м, 1976 р.) у Чилі та європейська АО Ла-Сілла (2347 м, 1976 р.), де встановлено Дуже Великий Телескоп.

Для виконання астрономічних спостережень та обробки отриманих даних у сучасних обсерваторіях використовують інструменти для спостережень (телескопи, мал. 2.2 і 2.3), світлоприймальну апаратуру, допоміжні прилади для спостережень, електронно-обчислювальну техніку тощо.

Оптичні телескопи використовують для збирання світла досліджуваних небесних тіл та одержання їхнього зображення. Телескоп збільшує кут зору, під яким видно небесні тіла, і збирає в багато разів більше світла, що приходить від світила, ніж неозброєне око спостерігача. Завдяки цьому в телескоп можна розглядати невидимі із Землі деталі поверхні найближчих небесних тіл, а також безліч слабких зір.

При всьому своєму різноманітті телескопи, що приймають електромагнітне випромінювання, виконують два основні завдання: 1) зібрати від досліджуваного об'єкта якнайбільше енергії випромінювання певного діапазону електромагнітних хвиль; 2) створити по можливості найчіткіше зображення об'єкта, щоб можна було виділити випромінювання від окремих його точок, а також виміряти кутові відстані між ними.

Залежно від конструктивних особливостей оптичних схем, телескопи діляться на: лінзові системи – рефрактори; дзеркальні системи – рефлектори; змішані дзеркально-лінзові системи, до яких належать телескопи Берихарда Шмідта (1879–1935), Дмитра Максудова (1896–1964) та ін.

Телескоп-рефрактор в основному використовують для візуальних спостережень (мал. 2.4). Він має об'єктив та окуляр. Телескоп-рефрактор, сполучений з фотокамерою, називають **астрографом** або **астрономічною камерою**. Астрограф — це великий фотоапарат, у фокальній площині якого встановлено касету з фотопластинкою. Діаметр об'єктивів рефракторів обмежений складністю виготовлення великих однорідних блоків оптичного скла, їхньою деформацією та збільшенням світлопоглинання.

Найбільший діаметр об'єктива телескопа-рефрактора, створеного в наш час, – 102 см (Єркска обсерваторія, США). Недоліками такого типу телескопів вважають велику довжину й спотворення зображення. Для усунення оптичних спотворень використовують багатолінзові об'єктиви з просвітленою оптикою.

Телескоп-рефлектор має дзеркальний об'єктив. У найпростішому рефлекторі об'єктив – це одиночне, зазвичай параболічне, дзеркало; зображення отримують у його головному фокусі.

Порівняно з рефракторами сучасні телескопи-рефлектори мають набагато більші об'єктиви. У рефлекторах з діаметром дзеркала понад 2,5 м у головному фокусі іноді встановлюють кабінку для спостерігача. Зі збільшенням розмірів дзеркала в таких телескопах доводиться застосовувати спеціальні системи розвантаження дзеркал, що виключають їхні деформації через власну масу, а також уживати заходів для запобігання їхнім температурним деформаціям.

Створення великих рефлекторів (з діаметром дзеркала 4–6 м) пов'язане з великими технічними труднощами. Тому розробляють конструкції зі складеними з мозаїк дзеркалами, окремі елементи яких вимагають точного налаштування за допомогою спеціальної апаратури або конструкції, що містить кілька паралельних телескопів, що зводять зображення в одну точку.

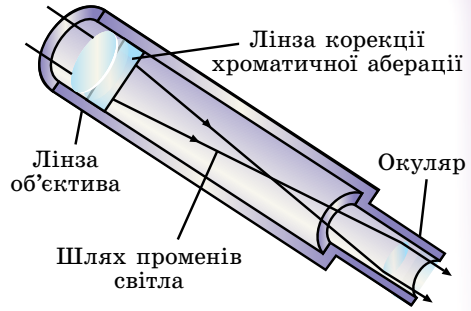
У невеликих і середніх за розмірами рефлекторах для зручності спостереження світло відбивається додатковим плоским (вторинним) дзеркалом до стінки труби, де міститься окуляр (мал. 2.5). Рефлектори використовують переважно для фотографування неба, фотоелектричних і спектральних досліджень.

У дзеркально-лінзових телескопах зображення отримують за допомогою складного об'єктива, що містить і дзеркала, і лінзи. Це дає змогу значно знизити оптичні спотворення телескопа порівняно з дзеркальними або лінзовими системами.

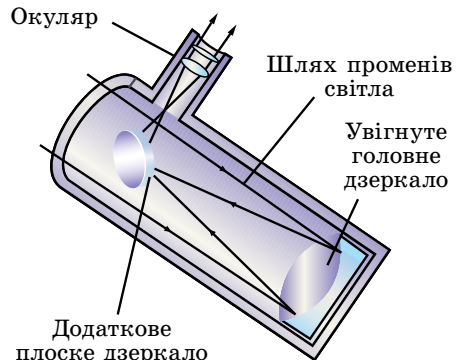
У телескопах системи Шмідта (Естонія) оптичні спотворення головного сферичного дзеркала усуваються за допомогою спеціальної корекційної пластинки складного профілю, встановленої перед ним. У телескопах системи Максудова (Україна) спотворення головного сферичного або еліптичного дзеркала виправляються меніском, установленим перед дзеркалом (мал. 2.6).

Меніск – це лінза з мало відмінними радіусами кривизни поверхні. Така лінза майже не впливає на загальний хід променів, але помітно виправляє спотворення оптичного зображення.

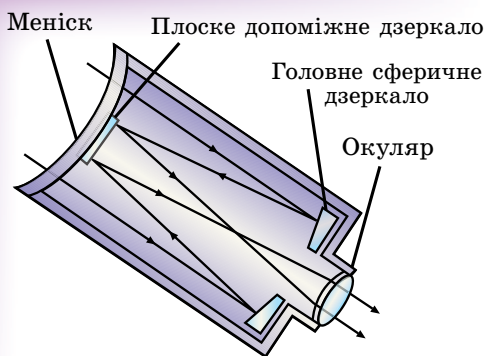
Основними оптичними параметрами телескопа є видиме збільшення, роздільна здатність і проникаюча сила.



Мал. 2.4. Хід променів у телескопі-рефракторі



Мал. 2.5. Хід променів у телескопі-рефлекторі



Мал. 2.6. Хід променів у дзеркально-лінзовому менісковому телескопі

Видиме збільшення G оптичної системи – це відношення кута, під яким спостерігається зображення, що дає оптична система приладу, до кутового розміру об'єкта при спостереженні його безпосередньо оком. Видиме збільшення телескопа можна розрахувати за формулою:

$$G = \frac{F_{\text{об}}}{F_{\text{ок}}},$$

де $F_{\text{об}}$ й $F_{\text{ок}}$ – фокусні відстані об'єктива та окуляра.

Для отримання значного збільшення об'єктиви в телескопах мають бути довгофокусними (фокусна відстань у кілька метрів), а окуляри – короткофокусними (від кількох см до 6 мм). Неспокійна атмосфера Землі породжує тремтіння та спотворення зображення, розмиває його деталі. Тому навіть на великих телескопах рідко встановлюють збільшення в понад 500 разів.

Під **роздільною здатністю** ψ оптичного телескопа розуміють найменшу кутову відстань між двома зорями, які можна спостерігати в телескоп роздільно. Теоретично роздільна здатність (у секундах дуги) візуального телескопа для жовто-зелених променів, до яких найбільш чутливе око людини, може бути визначена за допомогою формули:

$$\psi = \frac{140'}{D},$$

де D – діаметр об'єктива телескопа в міліметрах. На практиці через постійні переміщення повітряних мас роздільна здатність телескопів знижується. Унаслідок чого наземні телескопи забезпечують роздільну здатність близько $1''$, і тільки іноді за досить сприятливих атмосферних умов вдається досягти роздільної здатності десятих часток секунди.

Також важливою характеристикою телескопа є **проникаюча сила (m)**, що виражається граничною зоряною величиною світила, доступного спостереженню за допомогою цього телескопа за ідеальних атмосферних умов. Для телескопів з діаметром об'єктива D (мм) проникаюча сила m , виражена в зоряних величинах при візуальних спостереженнях, визначається за формулою: $m = 2,0 + 5 \lg D$.

З 1995 р. працюють два однакових 10-метрових телескопи «Кек-1» і «Кек-2» в обсерваторії Мауна-Кеа. Кожне дзеркало телескопа складається з 36 сегментів. За якість зображення телескопів відповідає адаптивна оптика, що керує кожним сегментом дзеркала. За роздільною здатністю такий телескоп наближається до космічного. Обсерваторію розміщено на висоті 4205 м над Тихим океаном на Гавайських островах.

Значні можливості має телескоп *VLT* (англ. *Very Large Telescope* – Дуже Великий Телескоп), що належить європейським країнам. Його встановлено на горі Параналь (висота 2635 м) на півночі Чилі (мал. 2.7).

Телескоп *VLT* складається із чотирьох телескопів, кожен з яких має діаметр 8,2 м. Крайні телескопи розміщено один від одного на відстані 200 м, що дає змогу всьому комплексу працювати в режимі **оптичного інтерферометра**. Це означає, що якщо телескопи спрямовано на ту саму зорю, то зібране ними випромінювання сумується, а роздільна здатність телескопів, що спільно працюють, еквівалентна застосуванню дзеркала діаметром 200 м.

У світі телескопів з діаметром дзеркала понад 6 м близько двадцяти.

Вивченням космічних радіоджерел випромінювання займається радіоастрономія. Вона зародилася в 1931 р., коли випадково було виявлено радіовипромінювання Чумацького Шляху. Через 15 років у сузір'ї Лебедя знайшли перше точкове джерело радіохвиль – слабку галактику, яку із часом удалося розглянути в оптичному діапазоні.

Радіовипромінювання більшості небесних об'єктів, що надходить до Землі, надзвичайно слабе. Для виявлення і прийому космічного радіовипромінювання використовують **радіотелескопи**.

Радіотелескопи складаються з антенного пристрою і чутливої прийомної системи. Приймна система, або радіометр, підсилює прийняте антеною радіовипромінювання й перетворює його в зручну для подальшої обробки форму. Основне призначення антенного пристрою – зібрати максимальну кількість енергії, принесеної радіохвилями від об'єкта. За антену використовують суцільне металеве або сітчасте дзеркало, що має форму параболоїда. Антена радіотелескопа відрізняється від звичайних антен радіозв'язку високою спрямованістю, тобто здатністю виділяти радіовипромінювання в невелику ділянку неба. У фокусі параболоїда розміщено опромінювач – пристрій, що збирає радіовипромінювання, спрямоване на нього дзеркалом. Опромінювач передає прийняту енергію на прийомний пристрій, де сигнал підсилюється, детектується і реєструється.

Потужність радіосигналу, що надходить на вхід приймача, прямо пропорційна площі антени. Тому антена більшого розміру з тим самим приймачем дає кращу чутливість, тобто дає змогу виявити слабкі джерела з малою потужністю випромінювання. Антени найбільших радіотелескопів сягають сотень метрів. Великий радіотелескоп з поворотним металевим рефлектором діаметром 100 м розміщено недалеко від міста Бонн в Німеччині. Нерухома антена в Аресібо (Пуерто-Рико), що розміщена в кратері згаслого вулкана, має діаметр 305 м (мал. 2.8). Для того щоб змінити напрямок прийому випромінювання, у цьому радіотелескопі роблять перестановку опромінювача.

Радіотелескопи можуть бути побудовані з окремих дзеркал, кожне з яких фокусує прийняте випромінювання на один опромінювач. Якщо радіовипромінювання джерела одночасно сприймається двома і більше антенами, розташованими на деякій відстані одна від одної, а потім ці сигнали сумуються, то, внаслідок інтерференції радіосигналів, роздільна здатність телескопів значно збільшується. Такий інструмент називають **радіоінтерферометром**. Радіоінтерферометри з наддовгою базою поєднують радіотелескопи, рознесені на тисячі кілометрів. З їхньою допомогою вдалося одержати кутову роздільну здатність близько 0,0001".

Прикладом є *VLA* (англ. *Very Large Array* – Дуже Великий Масив) – радіотелескоп-інтерферометр, Нью-Мексико, США (мал. 2.9).

Радіохвилі вільно проходять крізь величезні міжзор'яні газопилові хмари й атмосферу Землі. Тому методи радіоастрономії дуже важливі для вивчення, наприклад, центральних районів Чумацького Шляху та інших



Мал. 2.7. Телескоп VLT



Мал. 2.8. Гігантський радіотелескоп у кратері (Пуерто-Рико)



Мал. 2.9. Радіотелескоп-інтерферометр, Нью-Мексико, США

галактик, бо оптичні хвилі від них повністю поглинаються.

У Харкові розташовано найбільший у світі радіотелескоп декаметрових хвиль УТР-2 Радіоастрономічного інституту НАН України. Працюючи на УТР-2, астрономи перші у світі виявили в міжзоряному середовищі спектральні лінії вуглецю (головні «цеглинки», необхідні для появи органічного життя), каталогізували джерела випромінювань у далекому космосі, розробили теорію гравітаційних лінз, згідно з якою світло викривляється від далеких зір і галактик, вивчили механіз-

ми радіовипромінювання Сонця і Юпітера.

2. Детектори нейтрино та гравітаційних хвиль. Як відомо, у надрах зір, де відбувається синтез гелію, реакції супроводжуються перетворенням протонів у нейтрони з випромінюванням нейтрино. Нейтрино вільно пронизують усю товщу зорі і виходять у міжзоряний простір.

Спроби вловити нейтрино розпочав американець **Раймонд Девіс** (1914–2006) у 1955 р. У 1967 р. у штаті Південна Дакота в закинутій шахті на глибині 1455 м змонтували установку (горизонтальний циліндричний бак завдовжки близько 14,4 м і діаметром 6 м), що містить 400 000 л (615 т) чотирехлористого вуглецю C_2Cl_4 . У цій сполуці кожен четвертий атом Хлору є ізотопом ^{37}Cl . Порядок спостережень на цьому «телескопі» такий: після кожних 100 днів роботи через бак пропускають 20 000 л газоподібного гелію, що здатний захопити із собою ізотопи Аргону ^{37}Ar , які утворилися в баці. Їх, за обчисленнями, у кожний момент часу має бути кілька десятків. Суміш газів (гелій з поодинокими атомами Аргону) пропускають через вугільні фільтри, охолоджені до 77 К. Результати вимірювань такі: у баці за кожні 2,3 доби утворюється один атом ізотопу ^{37}Ar .

Інший варіант **нейтринного «телескопа»** – галієвий або літєвий детектор. Труднощі полягають у тому, що для отримання надійних результатів детектор повинен містити десятки тонн галію або літію, тоді як видобуток цих металів у світі дуже малий. Детектори на галії працюють, наприклад, в італійських Альпах під горою Монблан та в надрах гори Андирчі поблизу Ельбруса (Північний Кавказ).

Існують так звані **водяні детектори нейтрино**, у яких використовують звичайну воду H_2O або важку воду D_2O (кожний атом Гідрогену тут містить, окрім протона, додатковий нейтрон). Принцип роботи водяних детекторів такий. Нейтрино, проходячи крізь товщу звичайної води, збуджує електрони в молекулах H_2O або реагує з нейтроном молекули D_2O з утворенням протона й електрона. Надлишок енергії швидко висвічується (відомий з фізики ефект *черенковського випромінювання*). Реєстрація цього випромінювання дає змогу не тільки підрахувати кількість нейтрино, які взаємодіють з речовиною детектора за одиницю часу, а ще й вказати напрямок руху нейтрино, а отже, встановити напрямок на джерело цього випромінювання.

У 1916 р. було з'ясовано, що в природі можуть існувати слабкі збурення поля тяжіння, які, як і електромагнітні хвилі, є поперечними і також поширюються зі швидкістю поширення світла. Під дією гравітаційної хвилі розподіл пробних зарядів (тобто пробних масових частинок) періодично зазнає певної деформації, яка залежить від енергії хвилі.

Отже, гравітаційна хвиля, проходячи через певний розподіл мас, спричиняє в ньому збурення сили тяжіння. Тому найпростішим **детектором гравітаційних хвиль** можуть бути дві кулі, з'єднані пружиною. Якщо на них

перпендикулярно до осі, що з'єднує центри куль, падає гравітаційна хвиля, то відстань між кулями буде позмінно збільшуватися і зменшуватися.

Джерелом гравітаційних хвиль є будь-який асиметричний рух речовини. Це може бути зоря, якщо вона стискається і розтягується, наприклад уздовж осі її обертання. Джерелами гравітаційних хвиль є подвійні зорі, а також зоря, яка зазнає різкого стиску – колапсу, якщо лише внаслідок дії певних причин (обертання, дія магнітних сил) цей колапс не є сферично-симетричним.

З 1958 р. американець **Джозеф Вебер** (1919–2000) намагався зареєструвати гравітаційні хвилі за допомогою детектора. Це був алюмінієвий циліндр завдовжки 1,54 м, та діаметром 0,6 м і масою 1,5 т, підвищений на спеціальній тонкій нитці в рамі зі сталевих блоків і поміщений у вакуумну камеру, оточену чутливими акустичними фільтрами. Розтяг і стиск циліндра під дією гравітаційної хвилі датчики можуть реєструвати з надзвичайною точністю.

Щоб уникнути похибок, пов'язаних, наприклад, з коливанням земної кори або електричним розрядом в атмосфері, Вебер встановив два аналогічні детектори на відстані 1000 км. Система реєструє лише ті сигнали, початки яких збігаються з точністю до 0,2 с. Ці детектори і справді впродовж багатьох місяців реєстрували в середньому один імпульс на кожні п'ять діб. Однак дотепер жодна інша лабораторія цього не підтвердила, і природа сигналів, які зареєстрував Вебер, залишається нез'ясованою.

Нині розроблено твердотільні гравітаційні антени другого покоління, у яких п'ятитонні алюмінієві циліндри охолоджуються до 2 К, а датчики здатні реєструвати амплітуди коливань до $2 \cdot 10^{-17}$ см. У США введено в дію велику лазерно-інтерференційну гравітаційно-хвильову обсерваторію ЛІГО, один інтерферометр якої з базою 4 км встановлено у штаті Луїзіана, другий з такою самою базою – у штаті Вашингтон. Інструменти об'єднані за допомогою комп'ютерної мережі. Є плани будівництва великих інтерферометрів для цієї самої мети і в інших країнах, а також встановлення супутникових гравітаційних антен, у яких база досягала б сотень мільйонів кілометрів.

11 лютого 2016 року було оголошено про експериментальне відкриття гравітаційних хвиль, існування яких передбачив ще Альберт Ейнштейн.

Гравітаційна хвиля – це поширення змінного гравітаційного поля в просторі. Вважають, що вивчення гравітаційних хвиль допоможе пролити світло на історію Всесвіту і не тільки.

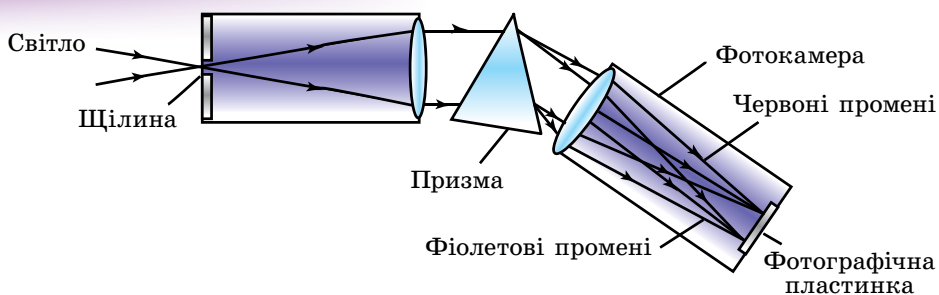


ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Які основні завдання розв'язують в астрономії за допомогою телескопів?
2. Як можна визначити видиме збільшення оптичної системи телескопа?
3. Що розуміють під роздільною здатністю телескопа та проникаючою силою?
4. Чим відрізняються оптичні системи рефрактора, рефлектора та дзеркально-лінзових (камера Шмідта) телескопів?
5. Чим відрізняються оптичні телескопи від радіотелескопів; радіоінтерферометр від радіотелескопа?
6. Назвіть кілька астрономічних обсерваторій.

§ 11. СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ В АСТРОНОМІЇ. МЕТОДИ АСТРОНОМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

1. Види спектрів. У 1666 р. Ньютон, пропускаючи пучок світла через тригранну скляну призму, помітив, що світло не тільки заломлюється, але й розкладається на колірні складові. Отриману на екрані кольорову смужку, що складається із семи основних кольорів, що поступово переходять один в один, назвали **спектром**.



Мал. 2.10. Схема щілинного спектрографа

Для спостереження і дослідження спектрів застосовують прилад – **спектроскоп**. Для одержання та реєстрації спектрів небесних тіл використовують спеціальний оптичний прилад – **спектрограф**.

Спектри порівняно яскравих світил фотографують за допомогою щілинних спектрографів, що складаються з коліматора, призми і фотокамери (мал. 2.10). Фотографічний знімок спектра небесного тіла називають **спектрограмою**. Спектрограмою називають також графік залежності інтенсивності (потужності) випромінювання небесного тіла від довжини хвилі або її частоти.

Будь-яке тіло, що світить, створює спектр випромінювання. Спектри бувають суцільні (неперервні), лінійчасті й смугасті.

54

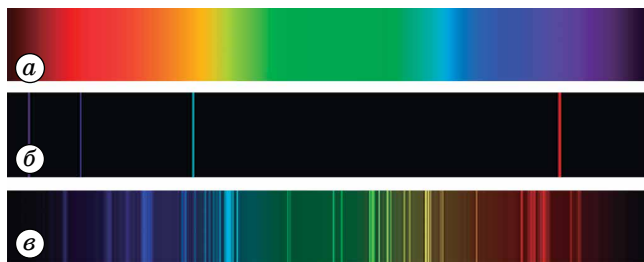
Суцільний (неперервний) спектр – спектр, у якого монохроматичні складові заповнюють без розривів інтервал довжин хвиль, у межах якого відбувається випромінювання (мал. 2.11, а).

Тобто суцільний спектр має вигляд неперервної смужки, кольори якої поступово переходять з одного в інший. Усі тверді тіла, що світяться – розплавлені метали, гази та пари, перебуваючи під дуже великим тиском, дають суцільний спектр. Такий спектр можна, наприклад, одержати від дугового ліхтаря та свічки, що горить.

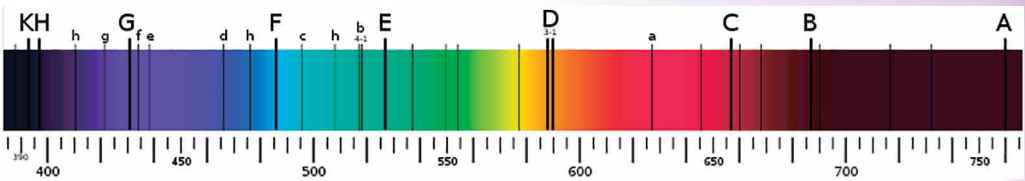
Інший вид має спектр, якщо за джерело світла використати розпечені гази або пари, коли їхній тиск майже не відрізняється від нормального і гази перебувають в атомарному стані.

У цьому випадку говорять про **лінійчастий спектр** (атомний). Він складається з окремих кольорових монохроматичних ліній, що не зливаються одна з одною і розділені темними проміжками (мал. 2.11, б). Установлено, що у стані розігрітого до високої температури кожен хімічний елемент газу складається з атомів і випромінює властивий тільки йому один лінійчастий спектр з характерними кольоровими лініями, завжди розміщеними на певному місці.

Смугастий спектр – спектр, монохроматичні складові якого утворюють групи (смуги), що складаються з багатьох тісно розміщених ліній емісії.



Мал. 2.11. Спектри: а) суцільний, б) лінійчастий, в) смугастий



Мал. 2.12. Сонячний спектр із чіткими фраунгоферовими лініями

Тобто смугастий спектр (молекулярний) складається з окремих ліній, які зливаються в смуги (чіткі з одного краю й розмиті з іншого), розділені темними проміжками (мал. 2.11, в). Такий спектр випромінюють молекули газів і пари.

Поряд із спектрами випромінювання існують спектри поглинання (мал. 2.12).

Суцільний спектр, пересічений темними лініями або полосами в результаті проходження білого світла через розпечені гази або пари, називають **спектром поглинання**. Дослідження явища виникнення спектрів поглинання показало, що **речовина поглинає промені тих довжин хвиль, які воно може випромінювати в даних умовах (закон Кірхгофа)**.

Таким чином, для кожного хімічного елемента його лінійчастий спектр випромінювання обернений до спектра поглинання. Це значить, що розміщення темних ліній поглинання точно відповідає розміщенню кольорових ліній випромінювання.

Спектри містять найважливішу інформацію про випромінювання. Загальний вигляд спектра і детальний розподіл енергії в ньому залежать від температури, хімічного складу й фізичних властивостей джерела, а також від швидкості його руху. Метод дослідження хімічної будови тіл та їхнього фізичного стану за допомогою спектрів випромінювання і поглинання називають **спектральним аналізом**.

2. Хімічний склад небесних тіл. У 1814 р. німецький фізик Йозеф Фраунгофер, спостерігаючи спектр Сонця за допомогою спектроскопа з дифракційною ґраткою, який він виготовив, звернув увагу на те, що суцільний спектр Сонця містить значне число темних ліній. Учений установив, що ці лінії (названі згодом його ім'ям) завжди присутні у спектрі Сонця на певних місцях. Фраунгоферові лінії – не що інше, як лінії поглинання пари різних речовин, що перебувають поблизу джерела суцільного спектра – яскравої поверхні Сонця (між фотосферою і спектральним приладом). Сонце оточене газовою оболонкою, що має нижчу температуру та меншу густину за фотосферу. Таким чином, спектр Сонця є спектром поглинання цієї пари.

При детальній класифікації фраунгоферових ліній на Сонці виявлено всі земні елементи. Так було відкрито новий хімічний елемент – гелій (сонячний), який тільки через 26 років виявили на Землі.

Порівнюючи довжини хвиль ліній поглинання, спостережуваних у спектрах небесних тіл, з отриманими в лабораторії або розрахованими теоретично спектрами різних речовин, можна визначити хімічний склад випромінюючого космічного об'єкта, що перебуває на дуже великій відстані. Спектральний аналіз дає змогу визначити хімічні складові не тільки Сонця, але й інших об'єктів – зір, туманностей. Аналіз спектрів – основний метод вивчення фізичної природи космічних об'єктів, що використовується в астрофізиці.

3. Температура. Закони Віна і Стефана–Больцмана. Усі, навіть слабо нагріті тіла випромінюють електромагнітні хвилі (**теплове випромінювання**). За температур, що не перевищують 10^3 К, випромінюються головним чином інфрачервоні промені і радіохвилі. З подальшим

нагріванням спектр теплового випромінювання змінюється, – збільшується загальна кількість випроміненої енергії та з'являються промені з коротких довжин хвиль – видимі (від червоних до фіолетових), ультрафіолетові, рентгенівські й т. д.

При тепловому випромінюванні внутрішня енергія теплового руху атомів і молекул тіла переходить в енергію випромінюваних електромагнітних хвиль. При поглинанні світла відбувається зворотний процес переходу електромагнітної енергії у внутрішню енергію тіла.

Зі збільшенням температури максимум випромінювання абсолютно чорного тіла зміщується в короткохвильову частину спектра. Довжина хвилі λ_{max} , яка відповідає максимуму в розподілі енергії, пов'язана з абсолютною температурою T співвідношенням, яке називають **законом зміщення Віна**: $\lambda_{max} \cdot T = b$, де b – стала Віна ($b \approx 2,9 \cdot 10^{-3}$ м · К). Цей закон виконується не тільки для оптичного, але й для будь-якого іншого діапазону електромагнітного випромінювання.

У спектрограмі Сонця найбільша інтенсивність випромінювання припадає на довжину хвилі $\lambda = 480$ нм, тому температура сонячної фотосфери наближається до 6000 К.

При збільшенні температури змінюються не тільки кольори випромінювання, але і їхня потужність. У результаті експериментів і теоретичних розрахунків було обґрунтовано, що потужність випромінювання абсолютно чорного тіла пропорційна четвертому степеню температури (закон Стефана–Больцмана). Кожен квадратний метр поверхні абсолютно чорного тіла випромінює за 1 с у всіх напрямках у всіх довжинах хвиль енергію: $\varepsilon = \sigma T^4$, де ε – потужність випромінювання одиниці поверхні нагрітого тіла; T – абсолютна температура; σ – стала Стефана–Больцмана, що дорівнює $5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м² · К⁴).

Знаючи кількість енергії, що надходить від зорі до земної поверхні, можна за законом Стефана–Больцмана визначити її температуру. Закони Віна й Стефана–Больцмана справджуються для випромінювання абсолютно чорного тіла. У першому наближенні можна вважати, що зорі, і зокрема Сонце, випромінюють як абсолютно чорне тіло.

4. Ефект Доплера. В астрофізиці широко використовується ефект Доплера, що виникає при русі джерела випромінювання щодо спостерігача. Суть ефекту Доплера полягає в такому: якщо джерело випромінювання рухається за променем зору спостерігача зі швидкістю v_r названою променевою швидкістю, то замість довжини хвилі λ_0 , що випромінює

джерело, спостерігач фіксує хвилю довжиною λ , так що $\lambda = \lambda_0 \left(1 + \frac{v_r}{c} \right)$, де

c – швидкість світла. Швидкість v_r додатна при віддаленні джерела світла від спостерігача ($\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 > 0$) і від'ємна при наближенні до нього ($\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 < 0$).

Ефект Доплера часто трапляється в акустиці. Наприклад, якщо ви перебуваєте на платформі, біля якої проїжджає поїзд, то можете помітити, що поки він наближається, звуковий сигнал буде більш високим, а коли віддалятиметься, то висота звуку відразу знизиться. Аналогічне явище спостерігається і в оптиці: світло від джерела, що наближається, стає більш синім (частота збільшується), а від джерела, що віддаляється, – більш червоним (частота зменшується). Ця зміна позначається на положенні спектральних ліній у спектрі: вони зміщуються в синю або червону частину спектра.

Для визначення зміщення спектральних ліній поруч із спектром досліджуваної зорі на ту саму фотопластинку фотографують спектр лабораторного джерела, у якому є відомі спектральні лінії. Потім за допомогою мікроскопів, оснащених точними мікрометрами, вимірюють зміщення ліній об'єкта відносно лабораторної системи довжин хвиль і таким чином

знаходять величину $\Delta\lambda$. Потім, використовуючи формулу: $\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{v_r}{c}$, визначають променеву швидкість v_r .

Ця формула Доплера застосовується лише для швидкостей v_r у межах до 0,1 швидкості світла. При русі джерел випромінювання зі швидкостями, близькими до швидкості світла, потрібно враховувати закони теорії відносності.

Зміщення спектральних ліній теоретично передбачив у 1842 р. австрійський фізик Крістіан Доплер.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Що таке спектр? Які явища доводять складну складову світла?
2. Назвіть три основні види спектрів і дайте їм визначення. Яка між ними відмінність?
3. Що таке спектральний аналіз? Як застосовують його в астрономії?
4. Для чого призначено і як улаштовано спектрограф? Що таке спектрограма?
5. Сформулюйте та поясніть закон Кірхгофа.
6. Сформулюйте та запишіть закон зміщення Віна й закон Стефана–Больцмана. Яке значення ці закони мають в астрономії?
7. У чому полягає ефект Доплера? Як зміщуються лінії в спектрі і яка за знаком при цьому швидкість? Де застосовують ефект Доплера в астрономії?



РОЗВ'ЯЗУЄМО РАЗОМ

57

Задача 1. Поясніть, чому зоря, що для неозброєного ока має вигляд однієї, під час спостереження в телескоп може розділитися на дві близько розташовані зорі, тобто виявитися подвійною зоряною системою.

Відповідь. Роздільна сила людського ока становить приблизно 1'. Роздільна сила телескопа пропорційна діаметру об'єктива, а діаметр об'єктива телескопа набагато більший за діаметр зіниці.

Задача 2. З якою кутовою швидкістю має рухатися небесне світило, щоб завжди перебувати в полі зору нерухомо встановленого телескопа, спрямованого в точку небесної сфери, що лежить на небесному екваторі?

Відповідь. Рух має відбуватися зі швидкістю обертання небесної сфери на екваторі, тобто $\omega = 2\pi : T = 6,28 : 86400 = 7,2 \cdot 10^{-5}$ рад/с.

Задача 3. Яке збільшення слід застосувати в шкільному телескопі для того, щоб Марс під час протистояння мав в окулярі телескопа такий самий кутовий діаметр, як Місяць для неозброєного ока? Кутовий діаметр Марса 20''.

Відповідь. Місяць має кутовий діаметр 30' = 1800''. Збільшення телескопа має бути $\frac{1800}{20} = 90$ разів.



ЗАДАЧІ ТА ВПРАВИ

2.1. Поясніть, у чому полягають фундаментальні відмінності між телескопом-рефлектором і телескопом-рефрактором.

2.2. Назвіть дві основні частини телескопа і поясніть їхнє призначення.

2.3. Чому під час спостережень із Землі нам здається, що протягом ночі зорі переміщуються по небесній сфері?

2.4. Що б ви порадили астрономам, які хочуть вивчати Всесвіт, використовуючи γ -промені, рентгенівські промені й ультрафіолетове випромінювання?

2.5. Перелічіть переваги радіотелескопів.

2.6*. Припустимо, ми розглядаємо в телескоп Сонце або Місяць. Який вигляд матиме те, що ми будемо бачити їхні обернені зображення? У який бік будуть рухатися ці світила в полі зору телескопа?

2.7*. Чому в телескоп видно більше зір, ніж неозброєним оком? Чому яскравість зір, які видно неозброєним оком, при розгляданні їх у телескоп помітно збільшується?

2.8. Чому, спостерігаючи в той самий телескоп різні планети і Місяць, помічаєте, що зі збільшенням зображення їхня яскравість дедалі слабшає?

2.9. Чому приміщення, де розміщено телескопи, не опалюються?

2.10*. На якій відстані ми спостерігатимемо Місяць у вигляді світлої точки, тобто під кутом $1'$? Діаметр Місяця – 3473,4 км.

2.11*. На якій відстані ми спостерігатимемо Сонце у вигляді світлої точки? Діаметр Сонця 1 390 600 км. З яких планет Сонячної системи Сонце спостерігається як зоря?

2.12*. На якій відстані система Земля–Місяць здавалася б спостерігачеві як одне небесне тіло? Звичайно, за умови, що він спостерігає цю систему неозброєним оком. (Радіус Землі – 6378,2 км, радіус Місяця – 1736,7 км, середня відстань між Землею та Місяцем 384 400 км). З яких планет Сонячної системи Земля–Місяць спостерігалися б як одне тіло?

2.13. Чому сьогодні більшість обсерваторій розміщують у горах?

2.14*. Космічний корабель летить над Україною на висоті 200 км. Чи можуть космонавти неозброєним оком побачити річку Дніпро, ширина якої 500 м?



ПЕРЕВІР СВОЮ КОМПЕТЕНТНІСТЬ

Контрольні запитання

1. Які основні завдання розв'язують в астрономії за допомогою телескопів?

2. Чим відрізняються оптичні телескопи від радіотелескопів? Радіоінтерферометр від радіотелескопа?

3. Чому інфрачервоні телескопи розміщують у високогірних засушливих районах?

Що я знаю і вмію робити

● **Я знаю, для чого використовуються телескопи і як їх можна виготовити**

1. Яка характеристика телескопа важливіша для спостережень слабких зір: діаметр окуляра чи діаметр об'єктива?

2. Чому зорі в телескоп видно як яскраві точки, а планети в той самий телескоп – як диск?

3. Виготовте телескоп-рефрактор, використовуючи лінзу з окулярів +11 діоптрій, а як окуляр – об'єктив фотоапарата або іншу лінзу з окулярів +10 діоптрій.

4. Спостереженням на яких телескопах можуть заважати мережі стільникового зв'язку?

● **Я вмію розв'язувати астрономічні задачі**

5. Бінокль, як і телескоп, має об'єктив і окуляр. Чому ж тоді в біноклях зображення пряме, а в телескопах – перевернуте?

6. Чому спостереження в космосі дають більше інформації, ніж наземні телескопи?

7. Поясніть механізм утворення фраунгоферових ліній у спектрі Сонця.

8. Лінія водню з довжиною хвилі 434,00 нм на спектрограмі зорі дорівнює 434,12 нм. До нас чи від нас рухається зоря і з якою швидкістю?

9. Космічний корабель віддаляється від Землі зі швидкістю $v = 10$ км/с. Частота ν_0 електромагнітних хвиль, що випромінюються антеною корабля, дорівнює 30 МГц. Визначте доплерівське зміщення $\Delta\nu$ частоти, яка сприймається приймачем.



ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ

1. Телескоп – це такий оптичний прилад, який...
 А наближує до нас космічні світила Б збільшує космічні світила
 В збільшує кутовий діаметр світила Г наближує нас до планети
 Д приймає радіохвилі
2. Чому великі астрономічні обсерваторії будують у горах?
 А щоб наблизитися до планет Б у горах більша тривалість ночі
 В у горах менша хмарність Г у горах більш прозоре повітря
 Д щоб збільшити світлові перешкоди
3. У який із цих телескопів можна побачити найбільше зір?
 А у рефлектор з діаметром об'єктива 5 м
 Б у рефрактор з діаметром об'єктива 1 м
 В у радіотелескоп з діаметром 20 м
 Г у телескоп зі збільшенням 1000 і з діаметром об'єктива 3 м
 Д у телескоп з діаметром об'єктива 3 м та збільшенням 500
4. Де розміщено найбільший у світі радіотелескоп для декаметрового діапазону хвиль?
 А у Японії Б у США В у Китаї Г в Україні Д у Росії
5. Чому астрономи під час спостережень за космічними тілами віддають перевагу телескопам з великим діаметром об'єктива?
 А такий телескоп дає велике збільшення
 Б великий об'єктив збирає більше світла, і в такий телескоп можна побачити більш віддалені світила
 В у такий телескоп можна побачити космічні тіла, що випромінюють енергію в інфрачервоній частині спектра
 Г у такий телескоп можна побачити космічні тіла, що випромінюють енергію в ультрафіолетовій частині спектра
 Д великий об'єктив дає чіткіше зображення та збільшує роздільну здатність телескопа
6. Чи можна за допомогою одного телескопа отримувати різні збільшення?
 А можна, якщо застосовувати окуляри з різною фокусною відстанню
 Б не можна, бо телескоп – стаціонарний прилад, який дає постійно однакове збільшення
 В можна тільки в космічному просторі
 Г можна, якщо в телескоп дивитися в окулярах
 Д можна тільки в астрономічних обсерваторіях, що містяться в горах
7. Чому в телескоп ми бачимо більше зір, ніж неозброєним оком?
8. Чому спостереження в космосі дають більше інформації, ніж наземні телескопи?
9. Які телескопи дають більш чітке зображення – з великим збільшенням чи з великим діаметром об'єктива?
10. Чому зорі в телескоп видно як яскраві точки, а планети в той самий телескоп – як диск?
11. На разі у космосі будується міжнародна космічна станція, на якій Україна буде мати космічний блок. Які астрономічні прилади ви могли б запропонувати для проведення досліджень Всесвіту?
12. Які телескопічні спостереження небесних об'єктів можна вести вдень у хмарну погоду?



Розділ 3

НАША ПЛАНЕТНА СИСТЕМА

Всесвіт таке неймовірно величезне місце, що не можливо охопити всю глибину його неосяжності. Наша Сонячна система за мірками Всесвіту лише його крихітна частинка. А для нас, мешканців маленької планети Земля, Сонячна система видається величезною і незвіданою, незважаючи на всі досягнення астрономії.

§ 12. ЗЕМЛЯ І МІСЯЦЬ

60

1. Земля – третя від Сонця планета Сонячної системи. З космосу наша планета має вигляд гарної блакитної кулі. Крізь хмарний покрив можна розглянути материки й океани.

Земля обертається навколо Сонця еліптичною орбітою (дуже близькою до колової) із середньою швидкістю 29 785 м/с на середній відстані 149,6 млн км з періодом, що приблизно дорівнює 365,24 доби (зоряний рік).

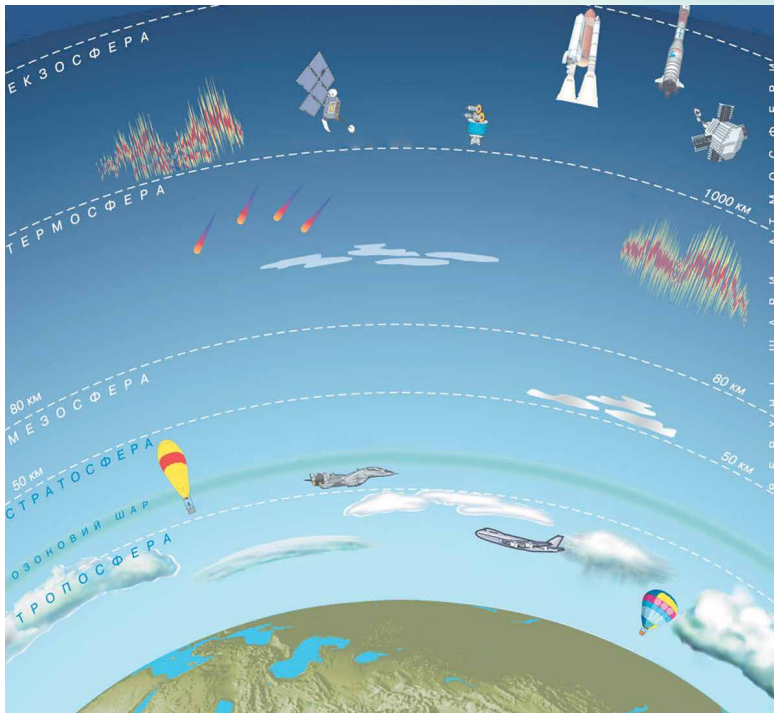
Форма Землі – геоїд. Середній радіус Землі становить 6371,032 км, екваторіальний – 6378,16 км, полярний – 6356,777 км. Площа поверхні земної кулі 510 млн км², об'єм – $1,083 \cdot 10^{12}$ км³, середня густина – 5518 кг/м³. Маса Землі дорівнює $5976 \cdot 10^{21}$ кг. **Температура на поверхні** від –90 °С в Антарктиді до +70 °С у пустелі. Земля має повітряну атмосферу. Понад 70 % поверхні вкрито водою.

Нахил земної осі до площини екліптики – 66°33'22". Період обертання планети навколо своєї осі 23 год 56 хв 4,1 с. Обертання навколо своєї осі спричиняє зміну дня і ночі, а нахил осі до екліптики разом з обертанням навколо Сонця – зміну пір року.

Гравітаційне поле Землі зумовлює її близьку до сферичної форму та існування атмосфери. Газову оболонку, що огортає Землю, називають **атмосферою**. Атмосфера Землі, загальна маса якої $5,15 \cdot 10^{15}$ т, складається з повітря – суміші в основному азоту (78,08 %) і кисню (20,95 %), аргону (0,93 %), вуглекислого газу (0,03 %), інше – це водяна пара, а також інертні та інші гази. Атмосфера Землі захищає все живе від згубного впливу космічного випромінювання.

Атмосфера Землі включає (мал. 3.1): **тропосферу** (до 15 км), **стратосферу** (15–100 км), **йоносферу** (100–500 км). Між тропосферою і стратосферою розміщується перехідний шар – **тропопауза**. У глибинах стратосфери під впливом сонячного світла створюється **озоновий екран**, який захищає живі організми від космічного випромінювання. Вище розміщені **мезо-, термо- й екзосфера**.

Атмосфера як елемент глобальної екосистеми виконує такі функції: є бар'єром для згубного впливу космічних випромінювань на живі організми та ударів метеоритів; регулює сезонні та добові коливання температури; регулює теплообмін Землі з космічним простором, впливає на її



Мал. 3.1. Атмосфера Землі

61

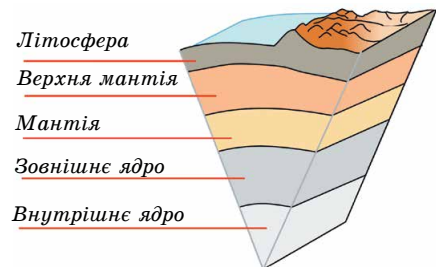
радіаційний та водний баланс; є джерелом газів, які беруть участь у процесах фотосинтезу та забезпечують дихальні процеси живих організмів; зумовлює низку складних екзогенних процесів – вивітрювання гірських порід, діяльність природних вод, мерзлоти, льодовиків тощо.

Земля має магнітне та тісно пов'язане з ним електричне поле. Магнітне поле Землі генерується в рідкому металевому шарі ядра.

Деталі поверхні Землі й умови життя ви знаєте, тому зупинимось детальніше на будові надр (мал. 3.2). Моделі внутрішньої будови Землі й інших планет земної групи приблизно схожі.

За записами коливань земної поверхні під час землетрусів **сейсмограмами** було встановлено, що внутрішня будова планети по вертикалі має шари. За хімічним складом та фізичними характеристиками виділяють три основні сферичні оболонки: **тверда кора, мантія (оболонка) і ядро**. Найтонший зовнішній шар – тверда кора. Глибина її в середньому 35 км (океанічна кора – 10 км, континентальна кора – 70 км). За хімічним складом земна кора складається з кисню (46,6 %), кремнію (27,7 %), алюмінію (8,1 %), заліза (5 %), кальцію (3,6 %) та інших хімічних елементів. Загальна маса земної кори становить усього 0,8 % від загальної маси Землі. Кора відокремлюється від мантії чітко межею.

Ядро – найгустіша частина земних надр. Від поверхні Землі до центра збільшуються тиск, густина й температура. Тиск у центрі планети $3,6 \cdot 10^{11}$ Па, густина приблизно $12,5 \cdot 10^3$ кг/м³, температура – від 5000 до 6000 °С.



Мал. 3.2. Будова Землі

Радіус ядра становить 55 % від радіуса Землі, а маса – близько 30 % від маси планети. Земне ядро ділиться на зовнішнє і тверде внутрішнє радіусом 1270 км. Перехідна зона між зовнішньою та внутрішньою частинами ядра дуже тонка – близько 5 км. Під час дослідження вчені-геологи з'ясували, що тверде металеве ядро всередині Землі утворилося 1–1,5 млрд років тому. Також учені змогли визначити швидкість росту земного ядра: за рік його радіус збільшується приблизно на міліметр.

2. Місяць – єдиний природний супутник Землі. Це тіло кулястої форми діаметром 3475 км. Маса Місяця всього в 81 раз менша від маси Землі. Середня густина Місяця становить 0,6 від густини Землі, а прискорення



Мал. 3.3. Вигляд Місяця в телескоп

вільного падіння в 6 разів менше від земного, тобто на місячній поверхні предмети важать у 6 разів менше, ніж на Землі. Сонячна доба на Місяці триває синодичний місяць (29,5 земної доби). На Місяці немає води в рідкому стані й практично немає атмосфери. За місячний день, що триває близько 15 земних діб, поверхня встигає нагрітися до $+130^{\circ}\text{C}$, а вночі охолонути до -170°C . За високих температур швидкість молекул газу перевищує другу космічну швидкість для поверхні Місяця (2,38 км/с), тому гази, що виділяються з надр супутника Землі або утворюються під час падіння метеорних тіл, швидко залишають Місяць. Без газової атмосфери Місяць підданий впливу всіх видів електромагнітного випромінювання Сонця, а також ударам метеорних тіл різного розміру.

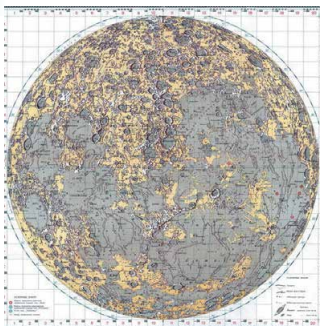
Неозброєним оком на місячній поверхні помітні світлі й темні ділянки. Темні і відносно рівні частини поверхні називали морями, на них припадає 16,9 % усієї поверхні Місяця. Більш світлі гористі ділянки, так би мовити материки, займають решту поверхні і характеризуються наявністю гірських хребтів, кільцевих гір, кратерів (мал. 3.3).

Першу детальну місячну карту склав у 1647 р. польський астроном Ян Гевелій (1611–1687). Відтоді до наших днів збереглися назви морів – Море Спокою, Море Криз тощо. Назви гірських хребтів, що тягнуться уздовж окраїн морів, співзвучні земним – Апенніни, Кавказ, Карпати тощо. Апенніни мають максимальну висоту близько 6 км, а Карпати – лише 2 км.

Космічні дослідження істотно поглибили наші знання про Місяць. У 1959 р. апаратом «Луна-3» було вперше сфотографовано протилежний, невидимий бік Місяця. У 1965 р. з'явилася перша повна карта Місяця (мал. 3.4).

Найбільш численними утвореннями на місячній поверхні є кратери (мал. 3.5). Їхні розміри – від мікроскопічних до 100 км у діаметрі. Великі й середні кратери названо на честь видатних учених: Птолемея, Архімеда, Платона, Коперника, Тихо Браге, Шмідта та ін.

Поверхневий шар природного супутника Землі складається з дрібних шматків **реголіту** зав-



Мал. 3.4. Карта-схема 60-х рр. XX ст. найбільших деталей видимої в телескоп із Землі півкулі Місяця



Мал. 3.5. Кратери на Місяці

товшки приблизно 10 м. До складу місячного реголіту входять також скляні сферичні мікрочастинки. Реголіт має малу густину (верхній шар 1200 кг/м^3) і дуже низьку теплопровідність (у 20 разів меншу за повітря), тому вже на глибині приблизно 1 м коливання температури практично не відчутні.

За хімічним складом місячні породи дуже близькі до базальтових порід Землі. Породи місячних морів відрізняються високим умістом оксидів заліза і титану, материкові – високим вмістом оксидів алюмінію. Останнім часом космічні станції виявили запаси водяного льоду в полярних областях Місяця – у тіні кратерів на Південному і Північному полюсах Місяця. Оскільки кут нахилу місячного екватора до екліптики лише $1,5^\circ$, то дно навіть неглибоких кратерів у полярних областях ніколи не освітлюється сонячними променями. За сталої температури -200°C дно полярних кратерів покриває суміш реголіту з льодом.

Внутрішню будову Місяця (мал. 3.6) вивчили за записами струсів від ударів метеоритів, які фіксували доставлені на Місяць сейсмографи. Під шаром реголіту розміщується кора, товщина якої на видимому (повернутому до Землі) боці становить 60 км, а на зворотному – 100 км. Під корою розміщується мантія завтовшки приблизно 1000 км. Зона глибше від 1600 км нагадує земну мантію, має товщину 430 км і температуру близько 1800 K .

Останні дослідження підтвердили, що в центрі Місяця існує металеве ядро радіусом близько 300 км, маса якого становить близько 3 % від загальної маси Місяця.

Для Землі Місяця відіграє важливу роль. Найважливіший вплив Місяця на Землю полягає в тому, що він ось уже понад 4 млрд років стабілізує клімат. Без Місяця земна вісь коливалася б набагато сильніше. Оскільки екватор Землі розміщений під кутом $23,5^\circ$ до орбіти, по якій планета рухається навколо Сонця, існують різні пори року. Якби не було Місяця, кут нахилу Землі змінився б на 85° . Це означає, що вісь обертання Землі була б на рівні своєї орбіти. Уран з кутом нахилу 97° обертається навколо Сонця так, що протягом одного півріччя до Сонця обернена його північна півкуля, а протягом другого – південна. Якби так відбувалося на Землі, то клімат був би іншим. Імовірно, температура на Землі сягала б екстремальних позначок. А вітри були б набагато сильнішими.

Дослідники з'ясували, що Земля відштовхує від себе Місяць швидше, ніж будь-коли за останні 50 млн років. Супутник планети віддаляється від Землі через припливи і відливи, а це впливає і на саму планету.

Гравітація Місяця створює добовий цикл припливів і відпливів. Цей процес уповільнює обертання планети навколо своєї осі і змушує Місяць віддалятися від Землі приблизно на 3,8 см в рік. Якщо припустити, що темпи віддалення Місяця завжди були однакові, то з віддалення орбіти Місяця можна розрахувати вік супутника – близько 1,5 млрд років. Однак це приблизна цифра, оскільки деякі місячні породи мають набагато більший вік – 4,5 млрд років, що можна порівняти з віком Землі.

Отже, Місяць віддаляється від Землі зі швидкістю, що збільшується, і поки що причину цього явища до кінця не з'ясовано. Можливо, причина в тому, що північна частина Атлантичного океану в наш час набагато ширша, ніж це було 50 млн років тому. Через це утворюються дуже великі хвилі і високі припливи, які відштовхують Місяць сильніше.



Мал. 3.6. Будова Місяця



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Назвіть основні характеристики планети Земля.
2. Яка будова Землі?
3. Який склад атмосфери Землі і яка її роль?
4. Схарактеризуйте супутник Землі – Місяць.
5. Які особливості має Місяць?

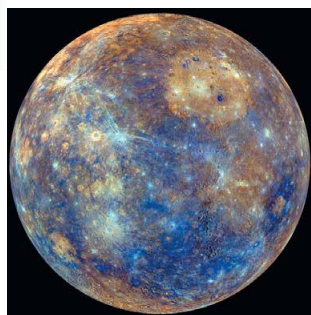


ЧИ ЗНАЄТЕ ВИ, ЩО...

2011 р. у німецькому аерокосмічному центрі було створено найповнішу детальну 3D-карту Місяця, яка охоплює понад 98 % місячної поверхні. Для генерації об'ємної моделі, що відображає безліч деталей рельєфу, учені обробили понад 70 тис. стереокадрів Місяця, знятих американським супутником LRO з висоти 50 км. Безліч сусідніх знімків було зіставлено піксель за пікселем з урахуванням позиції апарата в момент зйомки і напрямку променя зору. У результаті 40 комп'ютерів за два тижні машинного часу склали цифрову модель місячного рельєфу зі 100 млрд точок.

§ 13. ПЛАНЕТИ ЗЕМНОЇ ГРУПИ

1. Меркурій – найближча до Сонця планета (мал. 3.7). Вона постійно «ховається» у сонячних променях, і тому її дуже важко побачити із



Мал. 3.7. Меркурій

Землі. За розмірами і масою Меркурій більше подібний до Місяця, ніж до Землі. У Меркурія немає атмосфери, і його поверхня не захищена від палючих сонячних променів удень і космічного холоду вночі. Удень на поверхні планети температура піднімається до $+430^{\circ}\text{C}$, а вночі опускається до -200°C . Перепад температур відбувається повільно, тому що сонячна доба на Меркурії дорівнює 176 земним. Тривалість року – 88 земних діб.

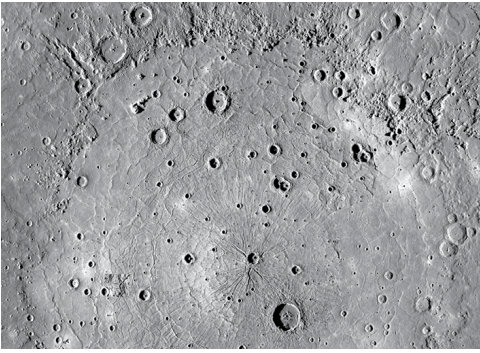
За формою Меркурій подібний до кулі з екваторіальним радіусом $(2439,7 \pm 1,0)$ км (діаметр 4900 км), що приблизно в 2,6 раза менший, ніж у Землі. Екваторіальне й полярне стискання незначні. Геометричний центр планети відхилений від центра мас – у межах 1,5 км. Площа поверхні Меркурія менша в 6,8 раза від поверхні Землі, а об'єм – у 17,8 раза.

Маса Меркурія дорівнює $3,30 \cdot 10^{23}$ кг, це приблизно у 18 разів менше від маси Землі. Середня густина близька до земної і становить $5,43 \text{ г/см}^3$. Прискорення вільного падіння поблизу поверхні – $3,70 \text{ м/с}^2$ (0,38 від земного).

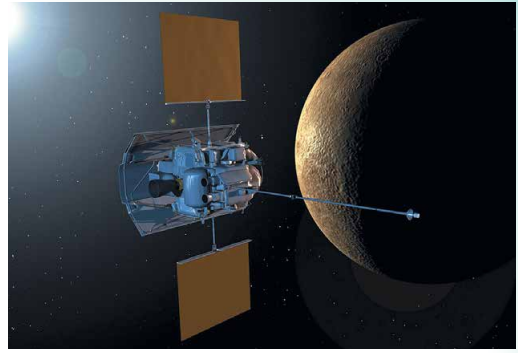
Відстань до Сонця – 58 млн км. Магнітне поле планети дуже слабке, його напруженість у 300 разів менша від земної. **Природних супутників** немає.

Уся кам'яниста поверхня Меркурія покрита численними кратерами, більшість з яких утворилася в результаті падіння метеоритів. Кратери на Меркурії названо на честь видатних представників світової культури: Бетховен, Гомер, Шевченко та ін. Винятками є променистий кратер Койпер, названий на честь видатного планетолога Джерарда Койпера, та маленький кратер Хун Каль, до якого прив'язано систему довгот: він лежить на меридіані 20° , і його назва означає «двадцять» мовою давніх майя.

Вісь обертання Меркурія перпендикулярна до його орбіти, тому дно полярних кратерів ніколи не освітлюється Сонцем. Ці області слугують сховищами водяного льоду, перемішаного з гірськими породами. Гори на Меркурії сягають висоти всього 2–4 км.



Мал. 3.8. Типовий рельєф Меркурія



Мал. 3.9. «Мессенджер», що продовжив дослідження планети

На планеті виявлено кратери та уступи висотою 2–3 км, що тягнуться на сотні кілометрів (мал. 3.8). Імовірно, вони з'явилися під час утворення планети через нерівномірне стиснення під час охолодження. Великий кратер ліворуч угорі на малюнку 3.8 – Шевченко, ширина знімка – близько 500 км.

Поблизу поверхні Меркурія виявлено атоми гелію і водню, а також аргону й натрію. Їхніми джерелами є сонячний вітер і речовина планети, піддана нагріванню й опроміненню Сонцем.

Меркурій – найменш вивчена планета земної групи. На її дослідження було спрямовано лише два апарати. Перший був «Марінер-10», що у 1974–1975 рр. тричі пролетів повз Меркурій (максимальне зближення становило 320 км). У результаті було отримано кілька тисяч фото із середньою роздільною здатністю 1 км/пікс, що охоплюють приблизно 45 % поверхні планети.

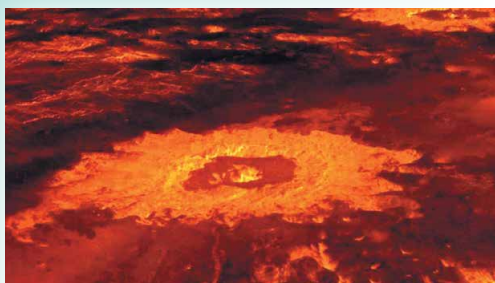
Подальші дослідження із Землі дали змогу отримати деякі дані про поверхню та атмосферу Меркурія, зокрема вказали на можливість існування водяного льоду в полярних кратерах.

У 2008–2015 рр. планету досліджував апарат НАСА «Мессенджер» (мал. 3.9). Його запустили у 2004 р. Апарат летів складною траєкторією з кількома гравітаційними маневрами біля Землі, Венери та Меркурія. Повз останній він пролітав тричі, і в березні 2011 р. нарешті став його супутником. «Мессенджер» відзняв усю поверхню планети та отримав багато інших даних. Його внесок у дослідження Меркурія став революційним.

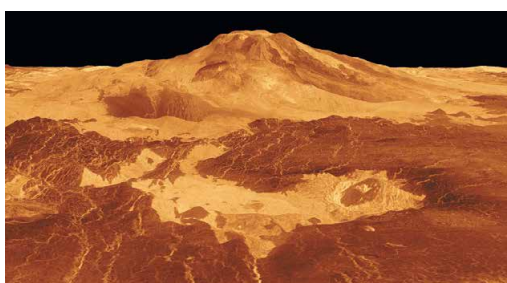
2. Венера – друга від Сонця планета Сонячної системи (мал. 3.10). Вона майже такого самого розміру, як і Земля, а її маса становить більше 80 % від земної маси. На небі Венеру можна спостерігати вранці або увечері у вигляді дуже яскравого світила. Густа атмосфера Венери довго приховувала таємниці її поверхні. Учені ще в середині ХХ ст. думали, що планета вкрита тропічними лісами. Але космічні апарати, що досягли планети, сфотографували безжиттєву розпечену пустелю. Температура поверхні сягає 470 °С і майже не змінюється протягом доби. Густі хмари пропускають мало сонячного світла й створюють «сутінкову» освітленість навіть тоді, коли Сонце перебуває високо над горизонтом. Води на цій планеті немає, кисню – практично теж. **Діаметр** становить 12 100 км. **Відстань до Сонця** – 108 млн км. **Тривалість**



Мал. 3.10. Фото Венери у справжніх кольорах



Мал. 3.11. Поверхня Венери



Мал. 3.12. Гора Маат – згаслий вулкан на Венері

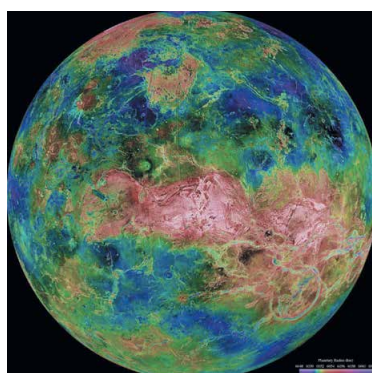
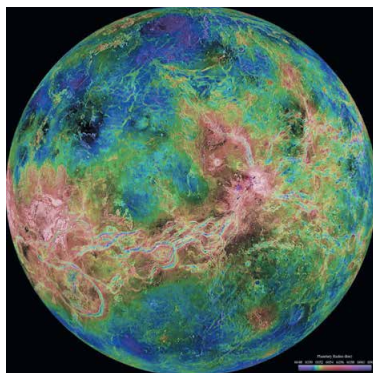
року – 224,7 земної доби, а тривалість доби – 117 земних діб. Венера – третій за яскравістю об'єкт на небі, її блиск поступається лише блиску Сонця та Місяця. Венера відома людству з найдавніших часів. Орбіта планети має форму майже правильного кола, швидкість руху по орбіті близько 35 км/с. Напрямок обертання зворотний до напрямку обертання навколо Сонця. **Природних супутників немає.**

Більшу частину поверхні Венери займають рівнини. Найвищі гори – гори Максвелла – піднімаються на 11 км над середнім рівнем поверхні. На Венері виявлено кратери діаметром до сотень кілометрів (мал. 3.11). Великі кратери названо на честь видатних жінок: Ахматова, Войнич, Дункан, Орлова або просто жіночими іменами: Антоніна, Валентина, Зоя, Ірина, Нана, Ольга та ін. Великі височини-материки мають назви: Земля Афродіти, Земля Іштар, Земля Лади тощо.

Близько 500 млн років тому на Венері відбулася глобальна геологічна катастрофа. Сотні тисяч діючих вулканів викинули величезну кількість лави, що вкрила всю поверхню. Найвищий згаслий вулкан (мал. 3.12) – гора Маат, названа на честь єгипетської богині істини й порядку, підіймається над навколишньою рівниною майже на 8 км.

Для дослідження рельєфу планети було використано метод радіолокації. Автоматична міжпланетна станція «Магеллан» у 1990–1994 рр. провела глобальну радіолокацію поверхні Венери. На основі отриманих даних було складено рельєфні карти, і з'явилася можливість відтворити деталі поверхні в об'ємному зображенні (мал. 3.13).

Атмосфера Венери складається в основному з вуглекислого газу. Тиск на поверхні планети в 95 разів більший, ніж на поверхні Землі. Завдяки такому хімічному складу, а також великій густині атмосфери Венери є



Мал. 3.13. Рельєфна карта поверхні Венери, складена за даними радіолокаційних досліджень космічного апарата «Магеллан» (ліва і права півкулі)

величезним «парником». Парниковий ефект й обумовлює високу температуру поверхні. Хмари Венери мають пластову структуру. Вони розташовуються на висотах від 48 до 70 км і містять крапельки сірчаної кислоти. Швидкість вітру на поверхні становить близько 1 м/с. В атмосфері спостерігаються блискавки.

Магнітне поле Венери дуже слабке через повільне обертання планети навколо осі зі сходу на захід. Його напруженість у 104 рази менша від земної. Магнітосфера майже повністю відсутня, тому потік заряджених частинок, що йде від Сонця, зіштовхується з атмосферою планети й захоплює за собою її речовину, формуючи йонний шлейф. Космічна обсерваторія *SOHO* визначила, що цей «хвіст» тягнеться на 45 млн км, тобто сягає Землі.

3. Марс – четверта від Сонця планета Сонячної системи (мал. 3.14). Для спостерігача вона з'являється на небосхилі у вигляді яскравого червоного світила. За допомогою аматорських телескопів можна побачити полярні шапки на Марсі та деякі великі деталі його поверхні з темніших ліній і плям. На думку вчених, це річки, озера і моря. Марс і Земля кожні 15–17 років зближуються, це називають великим протистоянням. Тоді Марс не зникає з неба всю ніч і світиться особливо яскравим червоно-помаранчевим кольором.

Марс – невелика планета, більша за Меркурій, але майже вдвічі менша від Землі за діаметром (6800 км). Марс має екваторіальний радіус 3396 км і середній полярний радіус 3379 км (обидва значення точно визначив космічний апарат *Mars Global Surveyor*, який почав свою місію на орбіті навколо планети 1999 р.). Маса Марса становить $6,418 \cdot 10^{23}$ кг, що вдсятеро менше за масу Землі, а прискорення вільного падіння на його поверхні – $3,72 \text{ м/с}^2$. Це означає, що об'єкти на Марсі важать лише третину своєї земної ваги. Відстань до Сонця 228 млн км. Температура на поверхні від -70°C до $+20^\circ\text{C}$. Тривалість року – 687 земних діб (1,9 земного року), а тривалість доби – 24 год 39 хв. Марс має слабе магнітне поле напруженістю в 500 разів меншою від земної. Природних супутників два – Фобос (з грец. – «страх») і Деймос («жах»).

Отримані за допомогою космічних апаратів зображення поверхні Марса показали, що вона є мертвою пустелею, значну частину якої вкриває червоний пісок і камені. Червоні кольори поверхні Марса пояснюються високим вмістом у ґрунті оксидів заліза (мал. 3.15).

На поверхні Марса атмосфера дуже розріджена, тому існують великі добові коливання температури: удень на екваторі температура піднімається

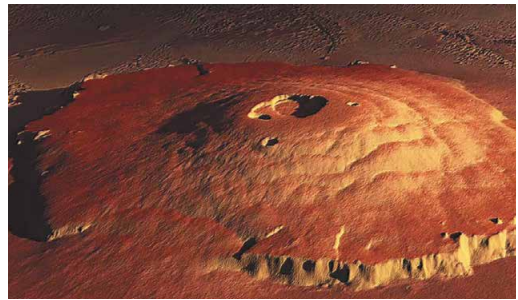


Мал. 3.14. Фото Марса

67



Мал. 3.15. Поверхня Марса



Мал. 3.16. Гора Олімп на Марсі

іноді до $+15^{\circ}\text{C}$, уночі опускається до -65°C . Узимку на поверхні Марса спостерігається сніг та іній, але вода в рідкому стані там існувати не може. Тиск на поверхні планети в 100–170 разів менший, ніж на Землі. В умовах низького атмосферного тиску вода закипає за температури $+2^{\circ}\text{C}$ і відразу випаровується.

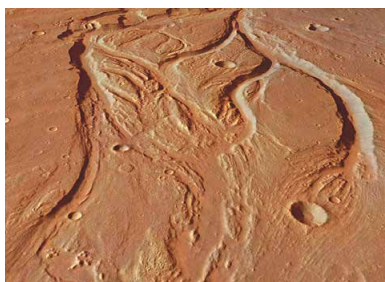
На Марсі дуже багато ударних кратерів великого розміру. Це свідчить про те, що планета пережила безліч катастроф, які змінили умови на її поверхні. Кратери на Марсі названо на честь учених, які вивчали Марс і планети Сонячної системи. Поверхня Марса характеризується чітко вираженою асиметрією. Південна гориста півкуля в середньому на 5 км вища від Північної. На знімках марсіанської поверхні добре видно численні великі й дрібні каньйони. Їхня ширина сягає 600 км, глибина – 5 км. Найбільший каньйон – Долина Марінера – тягнеться майже на 5000 км.

Вражають своїми масштабами згаслі вулкани Марса. Найвищий – гора Олімп (мал. 3.16) – піднімається над поверхнею на 27 км. Діаметр її основи сягає 600 км. Вік таких структур – приблизно 400 млн років.

Знамениті полярні шапки Марса утворені товстими, близько 3 км, шарами льоду, змішаного з пилом. Верхній шар полярних шапок складається із «сухого льоду» (замерзлого вуглекислого газу – CO_2) з невеликою домішкою звичайного льоду (H_2O). Температура тут опускається нижче від -110°C . Коли на одній з півкуль починається зима, то відповідна полярна шапка починає рости і сягає 57° широти в Північній півкулі та 45° у Південній. Навесні шапки починають танути. Восени, коли формуються полярні шапки, можна спостерігати блакитнувато-білі хмари в атмосфері планети.

68

Загадкові марсіанські долини, схожі на русла річок (мал. 3.17), утворилися від водних потоків, які висохли понад мільярд років тому. У 1999 р. було опубліковано дослідження, які доводять, що на Марсі раніше існував океан води. Це вдалося встановити за допомогою фото, переданих на Землю станцією *Mars Global Surveyor*, за особливостями відображеного на них рельєфу. Океан міг існувати, поки температура поверхні Марса була досить висока. Планета спочатку охолоджувалася близько мільярда років. Тонка атмосфера Марса не перешкоджала «зникненню» води в міжпланетний простір.



Мал. 3.17. Висохлі русла марсіанських річок

Зі зниженням температури замерзла вода впереміш із піском утворила підповерхневу крижану оболонку – кріосферу, яка має кількість води, еквівалентну шару завтовшки приблизно 1 км по всій планеті.

Атмосфера Марса має малу густину і складається в основному з вуглекислого газу. Швидкість вітру на поверхні планети не перевищує 15 м/с. Марс – єдина планета, де спостерігаються глобальні пилові бурі. Вони створюють антипарниковий ефект, тому що хмари пилу не пропускають сонячне випромінювання до поверхні. Поверхня планети сильно охолоджується, а пил і навколишня атмосфера, навпаки, розігріваються. В атмосфері Марса спостерігаються піщані вихори, що закручують стовпи пилу заввишки до 8 км. Хмари складаються із силікатного і крижаного пилу, який піднімається так високо в атмосферу, що навіть закриває гору Олімп.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Чому Меркурій не може утримувати сталу атмосферу?
2. Яка планета обертається навколо осі у протилежному напрямку порівняно із Землею?
3. На яких планетах земної групи відбувається зміна пір року?

4. Венера перебуває далі від Сонця, ніж Меркурій, але чому температура на її поверхні вища, ніж на Меркурії?
5. Які є докази того, що на поверхні Марса колись була вода в рідкому стані?
6. На яких планетах земної групи може існувати життя?

§ 14. ПЛАНЕТИ-ГІГАНТИ

1. Юпітер – п'ята та найбільша планета Сонячної системи (мал. 3.18). Маса його в 2,5 раза більша за масу всіх разом узятих планет системи і в 318 разів більша за масу Землі. Юпітер є газоподібним тілом з надзвичайно потужною атмосферою, яка складається переважно з водню та гелію. **Діаметр** планети – 43 000 км. Відстань від Сонця змінюється в межах від 4,95 до 5,45 а. о. (740–814 млн км), середня відстань 5,203 а. о. (778,57 млн км). Орбітальний період дорівнює 11,86 року. Оскільки ексцентриситет орбіти Юпітера дорівнює 0,0488, то різниця відстаней до Сонця в перигелії та афелії становить 76 млн км. Юпітер обертається навколо власної осі швидше, ніж будь-яка інша планета Сонячної системи. Період обертання на екваторі – 9 год 50 хв 30 с, а на середніх широтах – 9 год 55 хв 40 с. Через швидке обертання екваторіальний радіус Юпітера (71 492 км) більший від полярного (66 854 км). Відстань між Юпітером і Землею змінюється в межах від 588 до 967 млн км. **Температура на поверхні** – -140°C . При спостереженнях із Землі під час протистояння Юпітер може досягати видимої зоряної величини $-2,94^m$. Він третій за яскравістю об'єкт на нічному небі після Місяця та Венери. **Природних супутників у Юпітера – 79.**

За середньою густиною на Юпітері переважають водень і гелій, тому Юпітер схожий на зорі. На відміну від планет земної групи, у гігантів немає твердої поверхні. Те, що ми спостерігаємо, – це вершини хмар, що плывуть в атмосфері. Через швидке обертання планет-гігантів і сильні вітри хмари витягаються у смуги паралельно екватору. Хмари бувають різного кольору завдяки домішкам аміачних, метанових та інших складних сполук. Світлі й темні смуги атмосфери Юпітера пояснюються різними зонами тиску. Світлі зони – це області високого тиску, а темні – низького. Теплі гази піднімаються вгору і охолоджуються, досягши верхньої межі хмар. Потім вони падають у сусідні смуги, де тиск менший.

Для Юпітера, як і для всіх планет-гігантів, характерні світлі й темні овальні плями. Найпомітніша з них – Велика Червона Пляма (мал. 3.19), яку спостерігають протягом трьох століть. Це величезний і дуже стійкий вихор, схожий на земний ураган.

У полярних хмарах Юпітера спостерігається явище, подібне до земного північного сяйва (мал. 3.20).

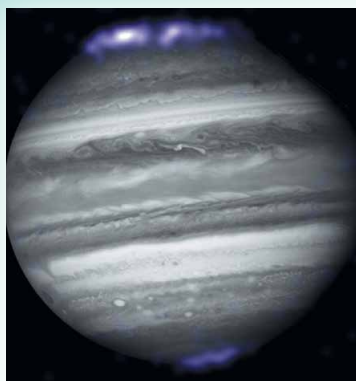
Внутрішню будову Юпітера можна уявити у вигляді оболонки з густиною, що збільшується в напрямку до центра планети. На дні атмосфери завтовшки 1500 км міститься шар газорідкого водню завтовшки близько 7000 км. На рівні



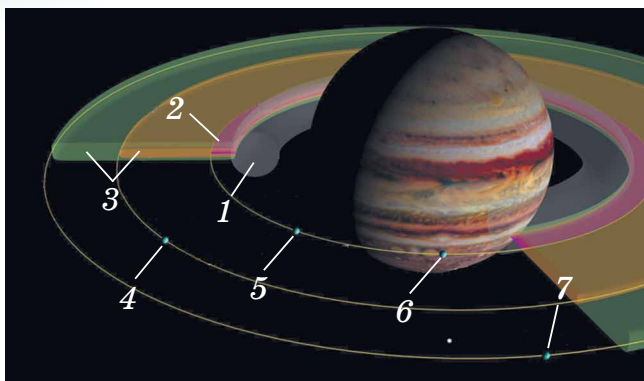
Мал. 3.18. Юпітер. Фото з космічного телескопа «Габбл» (квітень 2014 р.)



Мал. 3.19. Велика Червона Пляма на Юпітері



Мал. 3.20. Комбіноване фото Юпітера з телескопа «Габбл» та з рентгенівського телескопа «Чандра»



Мал. 3.21. Схема кілець Юпітера: 1 — гало, 2 — головне кільце, 3 — зовнішнє павутинне кільце, 4 — Амальтея, 5 — Адрастея, 6 — Метіда, 7 — Теба

0,88 радіуса планети, де тиск становить $0,69 \cdot 10^{11}$ Па, а температура – 6200°C , водень переходить у рідкомолекулярний стан і ще через 8000 км – у рідкий металевий стан. Поряд з воднем і гелієм шари містять невелику кількість важких елементів. У центрі Юпітера є тверде ядро, що складається з оксидів кремнію, магнію та заліза з домішками. Внутрішнє ядро діаметром $25\,000\text{ км}$ – металоцилікатне, із часткою води, аміаку й метану, оточене гелієм. Температура в центрі становить $23\,000^\circ\text{C}$, а тиск – $50 \cdot 10^{11}$ Па. Така висока температура пояснюється повільним гравітаційним стисканням планети.

На рівні приблизно $0,77$ радіуса планети починається оболонка, де водень набуває властивостей металу. Тут він стискається так сильно ($4 \cdot 10^{12}$ Па), що електрони залишають свої атоми і вільно переміщуються. Це є причиною появи магнітного поля Юпітера, напруженість якого на межі хмар у 12 разів вища, ніж у земного магнітного поля.

У 1979 р. космічні апарати «Вояджер-1» і «Вояджер-2» виявили в Юпітера кільця (мал. 3.21). Вони складаються з дуже дрібних пилинок ($0,2\text{--}200\text{ мкм}$). Ці пилинки поступово падають в атмосферу Юпітера, а їхнє місце займають інші, які утворюються під час зіткнення малих супутників, особливо Амальтеї, з метеоритними тілами.

Система кілець Юпітера є слабкою та складається переважно з пилу. Товстий тор із частинок – відомий як кільце-гало (англ. *halo ring*). Відносно яскраве, дуже тонке головне кільце і два широкі та слабких зовнішніх кільця – «павутинні кільця» (*gossamer rings* – кільця тонкі і прозорі, як павутина), які названо за матеріалом супутників, які їх формують: Амальтеї та Теби.

Розмір пилинок у кільцях різний, але площа поперечного перерізу найбільша для несферичальних частинок з радіусом близько 15 мкм у всіх кільцях, крім кільця-гало. Загальна маса системи кілець не відома, але це приблизно від 10^{11} до 10^{16} кг. Вік системи кілець не відомий, але вони могли існувати з моменту остаточного формування Юпітера.

2. Сатурн – це друга за величиною планета-гігант, оточена гарними кільцями (мал. 3.22). Диск планети помітно сплюснутий біля полюсів. Екваторіальний радіус планети дорівнює $60\,300\text{ км}$, а полярний – $54\,400\text{ км}$.

Екваторіальний діаметр верхньої межі хмар – $120\,536\text{ км}$, а полярний – на кілька сотень кілометрів менший. Це спричинено тим, що в Сатурна найменша густина з усіх планет Сонячної системи. Оскільки ексцентрисис-

тет орбіти Сатурна дорівнює 0,056, то різниця у відстані до Сонця в перигелії та афелії становить 162 млн км.

Середня відстань між Сатурном і Сонцем становить 9,58 а. о. (1430 млн км). Середня температура на поверхні – 170 °С. Рухаючись із середньою швидкістю 9,69 км/с, Сатурн обертається навколо Сонця приблизно за 29,46 року (10 759 днів). Відстань від Сатурна до Землі змінюється в межах від 8,0 до 11,1 а. о. (1195–1660 млн км), середня відстань під час протистояння – близько 1280 млн км. Сатурн і Юпітер обертаються майже в точному резонансі (2 : 5). Періодом обертання Сатурна навколо осі вважають 10 год 34 хв 13 с. Точне значення періоду обертання внутрішніх частин планети залишається невідомим. **Природних супутників – 62**, найбільший з них – Титан.

Кільця Сатурна (мал. 3.23) помітив ще Галілео Галілей. У 1610 р. він виявив по обидва боки від диска незрозумілі придатки. Але лише Крістіан Гюйгенс у 1656 р. розрізнив тонке плоске кільце, що не стикається з планетою. Із Землі в телескоп можна побачити кілька кілець, відділених одне від одного темними проміжками.

На основі спектральних досліджень у 1895 р. науковець **Аристарх Белопольський** (1854–1934) установив, що кільця не монолітні, а складаються з окремих дрібних тіл.

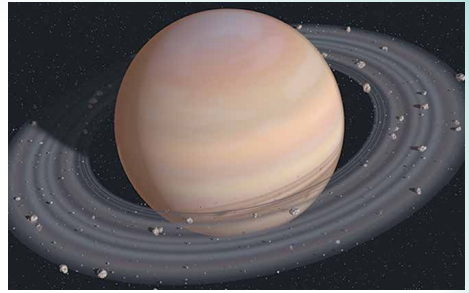
Фото, отримані космічними апаратами, показали, що кільця Сатурна утворені величезною кількістю кілець, що складаються із частинок криги, пилу, кам'яних уламків різних розмірів. Вони рухаються навколо планети, ніби супутники, і так близько розміщені одне до одного, що здалеку здаються суцільним поясом планети. Товщина кілець не перевищує 2 км, а товщина окремого кільця – понад 30 м. Учені передбачають, що в атмосфері Сатурна міститься 94 % водню і 6 % гелію (за об'ємом). Його маса в 95 разів більша за масу Землі, напруженість магнітного поля трохи слабша від земного.

Площина кілець розміщена у площині екватора Сатурна, яка нахилена під кутом 27° до площини орбіти. Під час руху Сатурна по орбіті кільця, зберігаючи положення у просторі, двічі за один оберт планети навколо Сонця повернуті до Землі своєю площиною. Оскільки їхня товщина мала, то в невеликі телескопи їх в цей час не видно. Діаметр по зовнішньому краю кілець становить 272 тис. км, а по внутрішньому – 144 тис. км. Сумарна маса кілець становить близько $3 \cdot 10^{-8}$ маси Сатурна.

3. Уран – третя за розмірами планета-гігант. Планета має дуже гарні зеленувато-блакитнуваті кольори (мал. 3.24). Причина цього – склад атмосфери планети та її температура.

За температури –217 °С у верхніх шарах воднево-гелієвої атмосфери Урана утворюється метановий туман. Метан добре поглинає червоні промені й відбиває блакитні й зелені. Тому планета має гарні бірюзові кольори. В атмосфері Урана не спостерігається жодних помітних збурень.

Інколи Уран помітний неозброєним оком, він темнуватий і повільно рухається, тому раніше його вважали дуже віддаленою зорею. Вісь обертання



Мал. 3.22. Сатурн



Мал. 3.23. Сатурн та його кільця в ультрафіолетовому спектрі (кольори підкреслюють розходження хімічної складової кілець)



Мал. 3.24. Південне кільце і яскрава хмара на півночі Урана (2005 р.)

ва ширина кілець від 1 до 8 км, тільки в найбільшого вона змінюється від 22 до 93 км. Товщина кілець не перевищує 1 км. Кільця Урана складаються з дрібного пилу й невеликих твердих темних частинок.

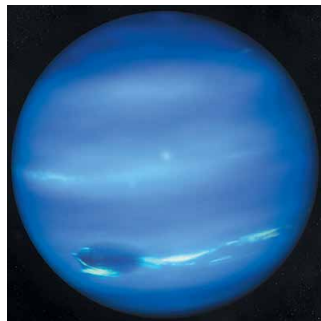
Уран важчий за Землю в 14,5 раза, що робить його найменш масивним з планет-гігантів Сонячної системи. Густина Урана – $1,270 \text{ г/см}^3$. Уран складається в основному з різних льодів – водного, аміачного та метанового. Їхня маса за різними оцінками становить від 9,3 до 13,5 земної маси.

Водень і гелій складають лише малу частку від загальної маси (між 0,5 і 1,5 земної маси), інша частка (0,5–3,7 земної маси) припадає на гірські породи, які становлять ядро планети.

Магнітне поле Урана має цікаву особливість. Вісь обертання планети майже збігається з площиною орбіти, і лінії магнітного поля скручені обертанням Урана в довгий вихор за планетою. Напруженість магнітного поля приблизно дорівнює земній.

4. Нептун – третя за масою планета Сонячної системи, рухається навколо Сонця майже коловою орбітою. Нептун став першою планетою, яку було відкрито не за спостереженнями, а завдяки математичним розрахункам у 1846 р.

Він розміщений майже на краю Сонячної системи й одержує дуже мало сонячної енергії. Але, незважаючи на це, планета дуже активна. На фото Нептуна добре видно хмари, що з'являються та зникають в атмосфері планети. У Нептуна є Велика Темна Пляма (мал. 3.25), схожа за структурою на Велику Червону Пляму Юпітера. Швидкість вітру в атмосфері Нептуна сягає рекордного значення – 640 м/с. Атмосфера складається з водню, гелію і метану. У складі планети є значна кількість льоду. Планета належить до крижаних гігантів.



Мал. 3.25. Нептун з Великою Темною Плямою ліворуч. Фото «Вояджера-2»

Урана майже горизонтальна. Напрямок обертання протилежний до напрямку обертання навколо Сонця. Уран рухається навколо Сонця майже коловою орбітою (ексцентриситет 0,047), середня відстань від Сонця в 19 разів більша, ніж у Землі, і становить 2871 млн км. **Діаметр** – 51 000 км. Середня температура на поверхні – 200°C . Площина орбіти нахилена до екліптики під кутом $0,8^\circ$. Один оберт навколо Сонця Уран здійснює за 84,01 земного року. Період власного обертання Урана становить приблизно 17 годин. **Природних супутників** – 27. **Темних кілець** – 11. У складі планети є велика кількість льоду, тому її вважають крижаним гігантом.

У 1977 р. було відкрито кільця Урана. Фото, зроблені «Вояджером-2» у 1986 р., підтвердили їхнє існування. Уран оточений одинадцятьма вузькими кільцями, що розміщуються в площині екватора на відстані від 42 до 51,4 тис. км (або 1,65–2,02 радіуса) від центра планети. Типова

Уран важчий за Землю в 14,5 раза, що робить його найменш масивним з планет-гігантів Сонячної системи. Густина Урана – $1,270 \text{ г/см}^3$. Уран складається в основному з різних льодів – водного, аміачного та метанового. Їхня маса за різними оцінками становить від 9,3 до 13,5 земної маси.

Водень і гелій складають лише малу частку від загальної маси (між 0,5 і 1,5 земної маси), інша частка (0,5–3,7 земної маси) припадає на гірські породи, які становлять ядро планети.

Магнітне поле Урана має цікаву особливість. Вісь обертання планети майже збігається з площиною орбіти, і лінії магнітного поля скручені обертанням Урана в довгий вихор за планетою. Напруженість магнітного поля приблизно дорівнює земній.

4. Нептун – третя за масою планета Сонячної системи, рухається навколо Сонця майже коловою орбітою. Нептун став першою планетою, яку було відкрито не за спостереженнями, а завдяки математичним розрахункам у 1846 р.

Він розміщений майже на краю Сонячної системи й одержує дуже мало сонячної енергії. Але, незважаючи на це, планета дуже активна. На фото Нептуна добре видно хмари, що з'являються та зникають в атмосфері планети. У Нептуна є Велика Темна Пляма (мал. 3.25), схожа за структурою на Велику Червону Пляму Юпітера. Швидкість вітру в атмосфері Нептуна сягає рекордного значення – 640 м/с. Атмосфера складається з водню, гелію і метану. У складі планети є значна кількість льоду. Планета належить до крижаних гігантів.

Маса Нептуна в 17,2 раза, а діаметр екватора в 3,9 раза більші за земні (маса – $1,0243 \cdot 10^{26} \text{ кг}$, екваторіальний радіус – 24 764 км). Нептун рухається навколо Сонця еліптичною, близькою до колової, орбітою (ексцентриситет 0,009). Її середня відстань від Сонця у 30 разів більша,

ніж у Землі, і становить приблизно 4497 млн км. Це означає, що світло від Сонця до Нептуна йде трохи більше ніж 4 години. Тривалість одного повного оберту навколо Сонця – 164,8 земного року. Власне обертання досить швидке, доба на Нептуні триває всього 16 годин. Прискорення вільного падіння на поверхні цієї планети в середньому в 1,14 раза більше за земне, серед планет Сонячної системи більше має лише Юпітер. Середня густина Нептуна ($1,66 \text{ г/см}^3$) майже втричі менша за земну. Нептун має магнітне поле, напруженість якого на полюсах приблизно вдвічі більша, ніж на Землі. Ефективна температура поверхні планети становить близько 38 К. У центрі ядра Нептуна температура сягає 7000 К при тиску $7-8 \cdot 10^{11} \text{ Па}$. **Природних супутників – 14, кілець – 4.**



Мал. 3.26. Хмари на Нептуні

Припущення про існування кілець у Нептуна було висунуто в 1984 р. на основі спостережень за перекриттям зір планетою. Три замкнута і одне незамкнуте кільце видно на фото, отриманих космічним кораблем «Вояджер-2» у 1989 р. Розміщуються кільця на відстані від 1,7 до 2,5 радіуса планети. Ширина кілець – 1700, 15, 5000 і 50 км відповідно. Вони складаються з дрібних силікатних пилинок, що відбивають 6 % сонячного світла.

Атмосфера Нептуна складається з водню (приблизно 67 %), гелію (31 %) і метану (2 %). На верхніх шарах – 80 % водню і 19 % гелію. Крім них, також є незначні домішки речовин: ацетилен C_2H_2 , діацетилен C_4H_2 , етилен C_2H_4 й етан C_2H_6 , а також чадний газ CO і молекулярний азот N_2 .

Основний шар хмар (мал. 3.26) розміщений на рівні тиску близько 3 атмосфер, він складається із замерзлого сірководню H_2S , можливо, із невеликою домішкою аміаку NH_3 . Температура в цій області становить близько 100 К (-173°C). Вище від основного шару, у холодній прозорій атмосфері, конденсуються рідкісні білі хмари замерзлого метану CH_4 . Ці хмари підіймаються на висоту 50–150 км і відкидають тіні на основний хмарний покрив, як це видно на фото «Вояджера-2».

Нижче від першого шару хмар, на рівні тиску близько 20 атмосфер і температури близько 200 К (-70°C), міститься другий шар хмар з гідросульфиду амонію NH_4SH . Ще глибше – хмари з водяного льоду.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Укажіть відмінності основних фізичних характеристик планет-гігантів від планет земної групи.
2. Яка особливість обертання планет-гігантів навколо осі?
3. Схарактеризуйте особливості будови планет-гігантів.
4. Яка найбільша планета Сонячної системи важить більше від разом узятих інших планет і Місяця?
5. Що являють собою кільця планет? Чому іноді навіть у великі телескопи не видно кілець Сатурна? Які спостереження доводять, що кільце Сатурна не є суцільним?

§ 15. СУПУТНИКИ ПЛАНЕТ

Станом на березень 2019 р. у Сонячній системі відкрито 185 супутників великих планет і 9 супутників карликових планет. Також відомі супутники деяких астероїдів. Сім супутників, включаючи Місяць, мають діаметр більший ніж 2500 км, а Титан (супутник Сатурна) і Ганімед (3-й супутник Юпітера) у 1,5 раза більші, ніж Місяць, і навіть трохи більші,

ніж Меркурій. Титан – єдиний супутник з потужною атмосферою, яка здебільшого складається з азоту.

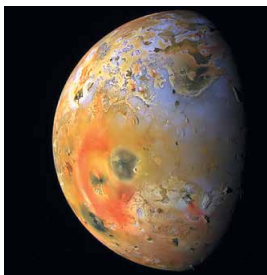
Невеликі супутники розміром десятки кілометрів є кам'яними або крижаними тілами неправильної форми. Їхні поверхні засіяні кратерами та вкриті дрібним пилом. Середні супутники (кілька сотень кілометрів) в основному кулясті і мають малу густину. За зовнішнім виглядом їхня поверхня нагадує місячну. Відрізняються розмаїтістю 7 найбільших супутників. За своєю будовою вони більше схожі на планети земної групи. Найбільші супутники Юпітера відкрив ще в 1610 р. Галілей. Однак основні відомості про природу великих супутників планет-гігантів отримано в результаті досліджень за допомогою космічних апаратів. За допомогою автоматичних міжпланетних станцій вдалося отримати чіткі фото супутників Марса й багатьох супутників планет-гігантів з близької відстані. На них добре видно численні деталі поверхні: кратери, тріщини, нерівності. Супутники Юпітера і більш віддалених планет укриті шаром льоду з пилом завтовшки десятки кілометрів. На супутнику Юпітера – Іо було сфотографовано кілька діючих вулканів. Усі супутники вкриті кратерами ударного (метеоритного) походження. Багато супутників, зокрема і Місяць, повернуті до своєї планети одним боком. Зоряні періоди їхнього обертання дорівнюють періодам обертання навколо своїх планет. Чотири найбільших супутники Юпітера ми можемо побачити у призматичний бінокль. Якщо дивитися в телескоп, то за кілька годин можна помітити, як вони переміщуються, іноді проходять між Юпітером і Землею, а іноді відходять за диск Юпітера чи в його тінь.

74

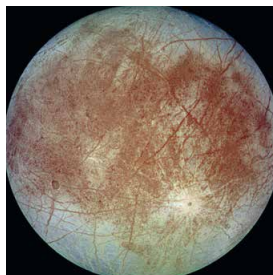
Модель внутрішньої будови великих супутників передбачає наявність у них трьох оболонок: кори, мантії і ядра. Ядра, що містять сполуки заліза і становлять 0,3–0,6 радіуса супутника, мають Іо (мал. 3.27, на якому видно велику темну пляму, окреслену червоним кільцем, яке утворилося внаслідок сильного виверження патели Піллана 1997 р.), Європа (мал. 3.28) та Ганімед.

У Тритона й Каллісто (мал. 3.29) кам'янисті ядра такого самого або навіть більшого розмірів. Силікатна (кам'яниста) кора Іо завтовшки 30 км. Під нею на глибині 100 км є рідка магма, температура якої сягає 2000 К. Магма живить численні вулкани Іо. Інші супутники вкриті крижаною оболонкою різної товщини, під якою міститься кам'яниста мантія.

На поверхні Тритона і Ганімеда видно сліди тектонічної діяльності: розлами, стиски, тріщини, дрібні хребти. Каллісто відрізняється від них наявністю численних кратерів ударного походження. Крижану оболонку Європи перетинає мережа світлих і темних вузьких смуг. Це тріщини в товстій крижаній корі, спричинені приливними впливами Юпітера. Багаторічні спостереження за тріщинами показали, що крижані маси незначно зміщуються одна відносно одної. Це значить, що під льодом є вода. У деяких місцях крижаного панцира Європи космічний апарат «Галілео»



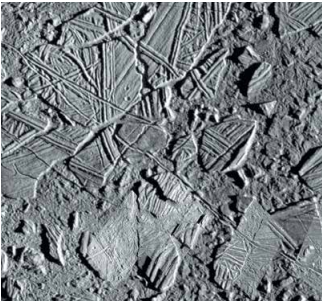
Мал. 3.27. Іо – супутник Юпітера. Фото «Галілео»



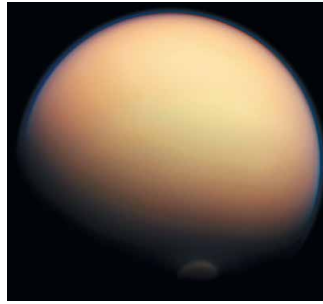
Мал. 3.28. Європа – супутник Юпітера



Мал. 3.29. Каллісто – супутник Юпітера



Мал. 3.30. Хаоси на супутнику Юпітера Європі



Мал. 3.31. Супутник Сатурна Титан та верхні шари атмосфери Титана (фото «Кассіні»)



сфотографував дивні хаотичні накопичення старих крижин, уморожених у свіжий лід. Ці структури називають хаосами (мал. 3.30). Вони свідчать про те, що час від часу лід тоне, але потім знову замерзає. Не встигнувши розтанути, крижини вморожуються в новий лід. Крижана поверхня Європи – молода, про це свідчить майже повна відсутність на ній ударних кратерів.

На Іо немає ознак існування значної кількості води і всередині, і на поверхні супутника. На ньому відбулися численні вулканічні виверження. Викинуті вулканами й осілі на поверхні сполуки сірки надають супутникові кольори від білого до яскраво-червоного і чорного. При цьому кольори залежать від температури речовини. Із жерла вулканів газу викидаються на висоту близько 200 км зі швидкістю приблизно 1 км/с. Газові гейзери помічено над полярною шапкою Тритона. Струмені темної речовини вириваються нагору з його поверхні і сягають висоти 8 км.

Найпотужнішу атмосферу має супутник Сатурна – Титан (мал. 3.31). Вона на 60 % густіша, ніж на Землі, і приблизно на 85 % складається з азоту. Тиск на поверхні в 1,5 раза перевищує земний. Метанові хмари й туман не дають змоги розглянути поверхню Титана.

Розріджену атмосферу з азоту й метану має супутник Нептуна – Тритон (10^{-5} земної). Слабка атмосфера з молекулярного кисню огортає супутники Юпітера – Ганімед та Європу (10^{-9} і 10^{-11} земної).

Утворюється вона так: сонячне світло, космічні промені та мікрометеорити вибивають з крижаної поверхні молекули води, які під дією ультрафіолетового випромінювання розпадаються на атоми Гідрогену й Оксигену. Атоми Гідрогену відразу залишають атмосферу, а атоми Оксигену об'єднуються в молекули. Розріджена атмосфера з вуглекислого газу існує в Каллісто, розріджену атмосферу з оксидів сірки й вулканічних газів має Іо (10^{-9} земної).

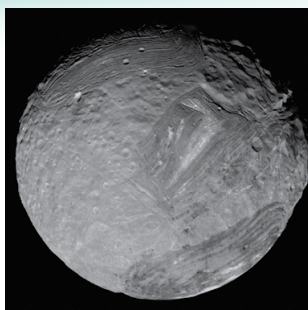
У кількох великих супутників виявлено власні магнітні поля. З планет земної групи, крім Землі, тільки Марс має супутники. Їх два. Їх відкрив у 1877 р. американський астроном Асаф Холл (1829–1907). Це невеликі кам'янисті тіла неправильної форми розміром 27×19 км – Фобос (мал. 3.32) і 16×11 км – Деймос (мал. 3.33).



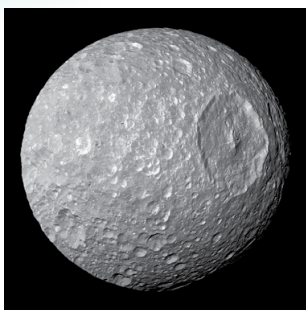
Мал. 3.32. Фобос – супутник Марса та кратер Стікні, фото Mars Reconnaissance Orbiter (2008 р.)



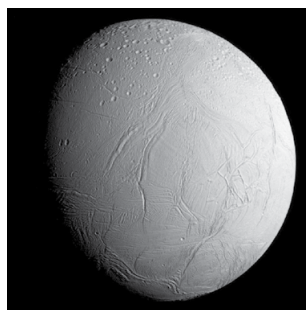
Мал. 3.33. Деймос – супутник Марса



Мал. 3.34. Міранда – супутник Урана. Фото з космічного апарата «Вояджер-2»



Мал. 3.35. Мімас – супутник Сатурна, фото «Кассіні» (2005 р.). Великий кратер має діаметр понад 100 км



Мал. 3.36. Енцелад – супутник Сатурна. Фото «Кассіні–Гюйгенс» (2005 р.)

На малюнках 3.34–3.36 зображено деякі супутники планет Сонячної системи.

Багато супутників планет мають цікавий рух. Наприклад, Фобос обертається навколо Марса втричі швидше, ніж сама планета обертається навколо своєї осі. Тому, якщо спостерігати з Марса, він двічі на добу буде сходити на заході й двічі повністю змінює всі фази, проносячись по небосхилу назустріч добовому обертанню зір. Супутники Марса розміщені близько до поверхні планети. Фобос – на відстані, меншій за діаметр планети. Далекі супутники Юпітера й Сатурна дуже малі й мають неправильну форму. Деякі з них обертаються в протилежний бік до обертання самої планети. Площини орбіт супутників Урана близькі до площини екватора планети і майже перпендикулярні до площини орбіти Урана.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Назвіть найбільші супутники планет Сонячної системи. Розкажіть про деякі характерні риси для кожного з них.
2. Чим пояснюється дивовижне забарвлення Іо?
3. Про що свідчать численні кратери на супутниках Юпітера?
4. Які супутники планет мають атмосферу?
5. Що спричиняє існування досить густої атмосфери на Титані?

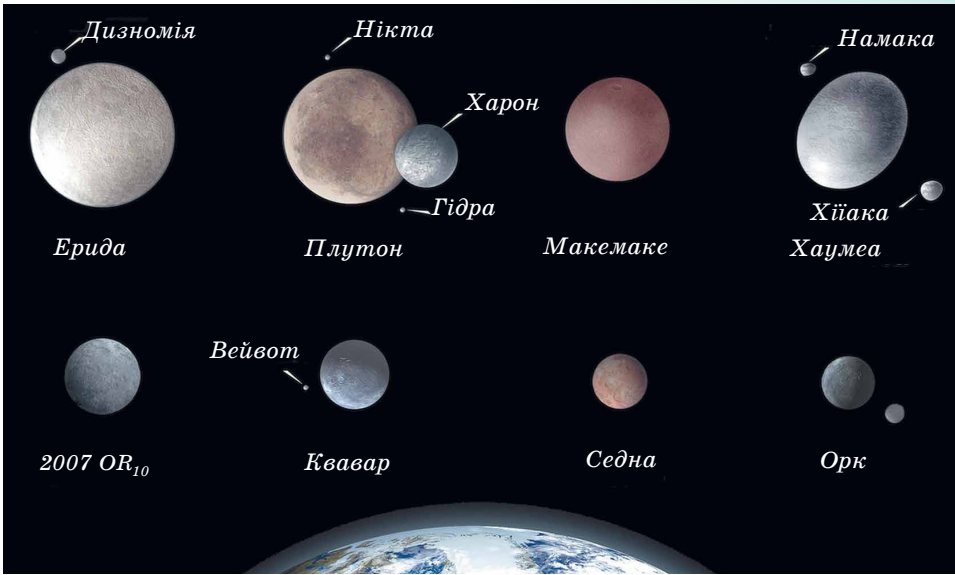
§ 16. КАРЛИКОВІ ПЛАНЕТИ ТА МАЛІ ТІЛА СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ

1. Карликові планети. Пояс Койпера, хмара Оорта. У серпні 2006 р. на Асамблеї Міжнародного астрономічного союзу було прийнято нове визначення планети і вперше введено поняття *карликова планета*.

Карликовими планетами вважають об'єкти, що обертаються навколо зорі, мають гідростатично рівноважну форму (кулясту) і не є супутниками планет.

До серпня 2006 р. Плутон, який відкрив Клайд Томбо (1906–1997) у 1930 р., вважався дев'ятою планетою Сонячної системи.

Однак за динамічними і фізичними характеристиками він істотно відрізнявся від інших планет. У 1978 р. у Плутона відкрито супутник – Харон. Його діаметр становить 1205 км, ледве більше за половину діаметра Плутона, а співвідношення мас становить 1 : 8. Деякі астрономи зараховували Харон до супутників, інші – систему Плутон–Харон вважали подвійною планетою.



Мал. 3.37. Порівняльні розміри Землі та деяких карликових планет

Відповідно до рішення Міжнародного астрономічного союзу, відмінність подвійної планети від системи планета–супутник (наприклад, Земля–Місяць) полягає у розміщенні барицентра – загального центра мас. У першому випадку цей центр перебуває у відкритому космосі, у другому – усередині основної планети, що має супутники.

Стало очевидним, що Плутон – лише один з найбільш великих відомих на цей час об'єктів поясу Койпера, принаймні один з об'єктів (Ерида) поясу є більшим тілом, ніж Плутон (мал. 3.37).

Пояс Койпера – це дископодібна область крижаних об'єктів за орбітою Нептуна – у мільярдах кілометрів від Сонця. Плутон та Ерида є найвідомішими із цих крижаних світів (там можуть бути ще сотні крижаних карликів). Пояс Койпера і хмара Оорта є «домом» для тіл, що обертаються навколо Сонця.

Відомі астероїди і комети в обох областях значно менші, ніж Місяць. Поясом Койпера є кільце, яке починається за орбітою Нептуна на відстані приблизно від 30 до 60 а. о.

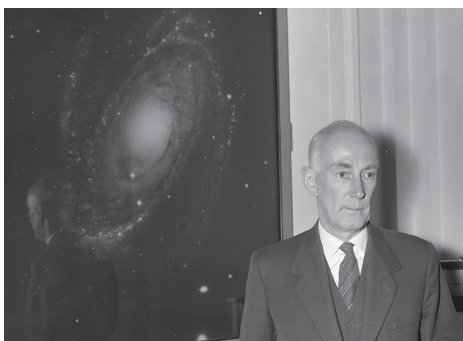
Хмара Оорта є сферичною оболонкою, що займає простір на відстані від 50 до 100 тисяч а. о. (до 1 св. р.). Це становить майже чверть відстані до Проксими Центавра – найближчої до Сонця зорі. Пояс Койпера та розсіяний диск – дві інші відомі області транснептунових об'єктів, у тисячу разів менші за хмару Оорта. Зовнішня межа хмари Оорта визначає гравітаційний кордон Сонячної системи – сферу Гілла, яка розраховується для Сонячної системи у 2 св. роки.

Деякі карликові планети в межах поясу Койпера мають тонкі атмосфери, які руйнуються, коли їхні орбіти несуть їх на найдальшу відстань від Сонця. Кілька карликових планет у поясі Койпера мають крихітні супутники. Не існує відомих кілець навколо астероїдів у будь-якій ділянці простору. Пояс Койпера і хмару Оорта названо на честь астрономів Джерарда Койпера (1905–1973) і Яна Оорта (1900–1992), які передбачили їхнє існування в 1950-х роках.

Планети і карликові планети – це два різних класи об'єктів Сонячної системи. Крім Плутона, карликовими планетами вважають Харон, «колишні» астероїди Цереру, Весту, Палладу, розміщені між орбітами Марса



Джерард Койпер



Ян Оорт

і Юпітера, і об'єкти поясу Койпера – Ериду, Седну та ін., що перебувають ще далі від Сонця, ніж Плутон.

На думку астрономів, в області поясу Койпера є десятки карликових планет, подібних до Плутона, але їхнє відкриття – справа часу.

2. Астероїди. Усі інші об'єкти, крім карликових планет, які обертаються навколо Сонця і не є супутниками, називають **малими тілами** Сонячної системи. До цього типу належить більшість астероїдів, які розміщуються між Марсом і Юпітером, а також транснептунові об'єкти поясу Койпера, комети і всі інші тіла, що обертаються навколо Сонця.

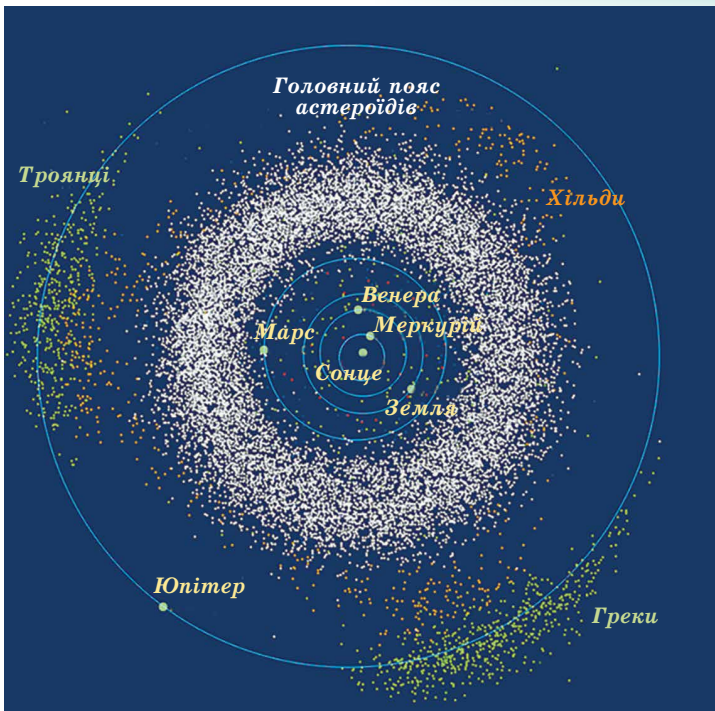
Після 1801 р. між орбітами Марса і Юпітера було виявлено кілька карликових планет і безліч астероїдів.

Астероїд (мала планета) – мале тіло Сонячної системи, що має неправильну форму і перебуває на геліоцентричній орбіті.

До початку ХХ ст. було виявлено близько 500 астероїдів, діаметри яких становлять десятки кілометрів. У наш час в базі даних Центру малих планет налічується близько 100 млн об'єктів, у більше як 600 тис. визначено орбіти і їм надано сталий номер. Близько 18 тис. з них мають офіційно затверджені назви. Дослідники припускають, що в головному поясі астероїдів має бути від 1,1 до 1,9 млн об'єктів, що мають розміри понад 1 км у діаметрі.

Астероїди вважають залишками протопланетного диска, що утворився після формування Сонячної системи. Сумарна маса оцінюється лише як 0,1 маси Землі. Нові астероїди відкривають щороку. Значна частина (98 %) астероїдів рухається в площинах, близьких до екліптики, по орбітах з малим ексцентриситетом, розміщуючись між орбітами Марса і Юпітера на відстані 2,2–4,5 а. о. від Сонця. Навколо Сонця астероїди рухаються в той самий бік, що й планети. Область простору між орбітами Марса і Юпітера, де розміщена більшість астероїдів, називають **головним поясом астероїдів** (мал. 3.38).

За однією з гіпотез, астероїди є залишками існуючої колись безлічі планетезималей (планетезималь – небесне тіло на орбіті навколо зорі, що утворюється в результаті поступового осідання на ньому менших об'єктів та частинок). Процес формування їх у планету колись припинився через збурення з боку гіганта Юпітера, що швидко обертається. У результаті цього об'єднання речовини змінилося на подрібнення. Збурення планет-гігантів змінюють орбіти астероїдів, змушуючи їх зіштовхуватися один з одним, з планетами і їхніми супутниками. Згідно з іншою версією, астероїди виникли в результаті руйнування гіпотетичної планети, що перебувала між Марсом і Юпітером.



Мал. 3.38. Схема розміщення поясу астероїдів у Сонячній системі

79

У 1951 р. французький астроном Джерард Койпер передбачив існування поясу астероїдів за орбітою Нептуна. Теоретично цей пояс має міститися на відстані 35–50 а. о. від Сонця. Можливо, це залишок первісної туманності, з якої сформувалася Сонячна система. Сумарна маса тіл поясу Койпера порівнянна з масою Землі.

Уперше сфотографував поверхню астероїдів міжпланетний космічний апарат «Галілео». Наближаючись до Юпітера, він сфотографував астероїди Гаспра та Іда із супутником Дактиль (мал. 3.39).

Першу вдачу посадку на поверхню астероїда зробив космічний апарат NEAR 12 лютого 2001 р. Астероїд Ерос виявився кам'янистим тілом неправильної форми розмірами $33 \times 13 \times 13$ км і густиною 2700 кг/м^3 , близькою до густини порід земної кори. Поверхня астероїда вкрита пилом, всяяна кратерами і валунами (діаметром до 100 м).

Нині у Сонячній системі на відстані, що не перевищує 100 а. о., перебуває близько 1 млн малих тіл розмірами до 1 км. Орбіти астероїдів збільшують свій ексцентриситет до 0,8 через гравітаційні сили з боку планет-гігантів. Через це деякі астероїди проникають усередину орбіт Марса, Землі і навіть Меркурія. Такі небесні тіла можуть зіштовхуватися із Землею не рідше ніж раз в 20 млн років. Існує не менше як 200 тис. астероїдів діаметром 100 м і більше, орбіти яких можуть перетинати орбіту Землі. Імовірність зіткнення з таким тілом – приблизно 1 раз на 5 тис. років, при цьому на Землі утвориться кратер діаметром близько 1 км.



Мал. 3.39. Астероїд Іда із супутником Дактиль

31 жовтня 2015 р. приблизно о 19:00 за київським часом на небезпечно близькій відстані від Землі (486 тис. км, у 1,3 раза далі від відстані до Місяця) пролетів астероїд. Тому в багатьох країнах, у тому числі і в Україні, створено служби спостереження за небезпечними астероїдами, щоб у випадку загрози для Землі від якого-небудь з них провести роботу зі зміни орбіти або його знищення. Спочатку астероїдам давали імена міфологічних богинь, потім – жіночі імена. Коли вони закінчились, астероїди стали називати на честь відомих учених різних країн. Серед астероїдів є такі, назви яких пов'язані з Україною, – Житомир, Одеса, Херсон, Кобзар, Сковорода, Всехсвятський, Чурюмов, Яцків та ін. Найвідоміші астероїди: Паллада, Юнона, Веста, Ерос, Амур, Гідальго, Ікар.

3. Метеорити. У міжпланетному просторі рухається величезна кількість кам'яних і залізних тіл, найрізноманітніших за розмірами, формою і хімічним складом. Ці тіла одержали назву **метеоритні тіла**. Коли таке тіло вторгається в атмосферу Землі з космічною швидкістю в результаті тертя об повітря воно нагрівається, починає плавитися і світитися – на небі з'являється яскрава вогненна куля. Це явище одержало назву **болід** (від грец. βολίς – «метальний спис»). У нічний час болід яскраво висвітлює місцевість на десятки й сотні кілометрів навколо. Дуже яскраві боліди видно навіть удень при повному сонячному освітленні. За вогненною кулею вздовж її траєкторії залишається слід у вигляді світіння іонізованих молекул повітря і закінчується струменями пилу. Пил – це продукти руйнування метеоритного тіла під час його руху в атмосфері, тому що під час польоту з величезною швидкістю тіло нагрівається до кількох тисяч градусів. Речовина на його поверхні безупинно розплавлюється і частково випаровується: зривається потоками повітря й розприскується у вигляді дрібних крапель. Вони й становлять пиловий слід боліда. Наростаюче згущення повітря створює навколо метеоритного тіла ударну хвилю. Вона спричиняє такі звукові явища – гуркіт і гул.

Уцілілий від повного руйнування залишок метеоритного тіла падає на поверхню Землі. Це і є метеорит. **Метеорити** є уламками небесних тіл Сонячної системи. Метеоритне тіло, що має величезну початкову масу десятки й сотні тисяч тонн, проходить усю товщу атмосфери, зберігаючи космічну швидкість – кілька кілометрів за секунду. У результаті удару відбувається вибух і утворюється метеоритний кратер. Він може мати розміри від кількох метрів до 100 км. Найвідоміший Арізонський кратер має діаметр 1200 м, глибину 180 м і висоту вала близько 50 м (мал. 3.40). Можливо, він з'явився 30 тис. років тому. Сьогодні виявлено понад 180 астроблем – **зоряних ран** (як їх образно називають учені), які знаходяться на всіх земних континентах. На території України, поблизу Вінниці, є зоряна рана, яка має назву **Іллінецька астроблема**. Після падіння метеорита, що сталося кілька мільйонів років тому, утворився гігантський кратер діаметром 5 км.

Бовтиський кратер було виявлено у 2002 р. в околицях Кропивницького. Діаметр кратера 24 км, глибина – понад 500 м. Зона розльоту викинутих порід вкриває всю Центральну Україну, сягає Криму, Румунії та Росії.

Усі метеорити за складом діляться на три основних класи: кам'яні, залізокам'яні й залізні. Кам'яні метеорити близькі за хімічним складом до земних гірських порід: містять оксиди заліза, кремнію, магнію. Близько 90 % кам'яних метеоритів містять хондри – сферичні частинки розміром від мікроскопічних зерен до горошини. Такі кам'яні метеорити називають **хондритами**, інші кам'яні метеорити – **ахондритами**.

Найбільший метеорит виявлено в 1920 р. біля населеного пункту Гоба в Південно-Західній Африці. Це залізний метеорит масою близько 60 т. Метеорит Княгиня знайдено в 1866 р. у Закарпатській області, його маса становить 500 кг, частину показано на малюнку 3.41.



Мал. 3.40. Метеоритний кратер в Арізоні (США)



Мал. 3.41. Частина метеориту Княгиня

В Україні було знайдено всього 43 метеорити. Останній з них – залізний метеорит Верхній Салтів масою 9,5 кг – знайшли у 2001 р. під час розкопок стародавнього хазарського поселення у Харківській області.

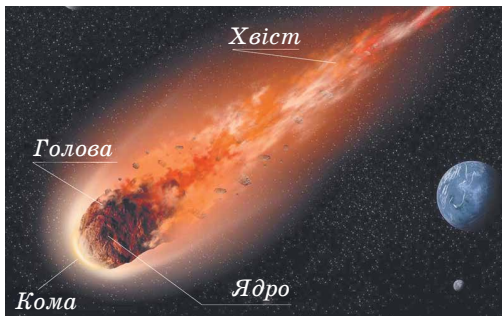
4. Комети. Про комети – «хвостаті зорі» – було відомо з давніх часів. Перші китайські записи про комети датуються III тисячоліттям до н. е. Віддалені від Сонця комети мають вигляд слабких туманних об'єктів. Наближаючись до Сонця, вони стають яскравішими, збільшуються у розмірах, у них з'являється хвіст, спрямований у протилежний бік від Сонця.

За всю історію людства спостерігалось близько 3500 комет. Зареєстровано в каталогах близько 1000 таких малих тіл Сонячної системи й визначено елементи їхніх орбіт. Майже всі комети рухаються по витягнутих орбітах з ексцентриситетом, близьким до одиниці. Комети поділяються на **короткоперіодичні** (з періодом обертання менше як 200 років) і **довгоперіодичні**. Першу періодичну комету виявив англійський астроном Едмунд Галлей (1656–1742).

81

Він обчислив орбіти 24 яскравих комет. Аналізуючи свій кометний каталог, Галлей помітив подібність елементів орбіт комет 1531, 1607 й 1682 років і припустив, що це послідовне повернення тієї самої комети, що рухається по сильно витягнутій еліптичній орбіті з періодом майже 76 років. Відповідно до пророкування Галлея її виявили в 1758 р. За цією кометою закріпилася назва **комета Галлея** (мал. 3.43). Вона рухається по орбіті з більшою піввіссю $a = 17,94$ а. о. у напрямку, протилежному до руху Землі. У будові комети виділяють такі елементи (мал. 3.42): ядро, кома, голова і хвіст.

Ядро комети – це невелике тверде крижане тіло, що включає тугоплавкі частинки та органічні сполуки. До 80 % ядра комети складається з водяного льоду, а також із замерзлого вуглекислого газу, чадного газу, метану, аміаку та вкраплених у лід металевих частинок. Є в кометних



Мал. 3.42. Будова комети



Мал. 3.43. Комета Галлея (1985 р.)

льодах і більш складні речовини, аж до амінокислот. За результатами досліджень, виконаних космічними апаратами, наприклад, ядро комети Галлея є монолітним тілом неправильної форми розмірами 16×8 км, масою $3 \cdot 10^{14}$ кг і малою густиною близько 600 кг/м^3 .

При наближенні до Сонця (на відстані кількох а. о.) у комети утворюється голова. Вона виникає в результаті нагрівання ядра, випаровування і виділення з його поверхні газів і пилу. Видимі діаметри голів комет з наближенням до Сонця сягають розмірів 10^4 – 10^6 км. Під дією тиску сонячного випромінювання на гази, що оточують голову комети, утворюється хвіст. Хвости яскравих комет тягнуться на сотні мільйонів кілометрів. Наприклад, хвіст комети Хякутаке (комета C/1996 B2 (*Hyakutake*) – довгоперіодична комета, яку відкрив у 1996 р. японський астроном-аматор Юдзі Хякутаке) тягнеться приблизно на 300 млн км. Густина частинок у хвостах комет дуже мала, її можна порівняти з міжпланетним середовищем.

Залежно від форми, кометні хвости діляться на кілька типів:

1. Хвіст утворюється при прискоренні сонячним вітром кометних йонів і спрямований у бік, протилежний до Сонця.

2. Хвіст трохи зігнутий і складається з пилинок, що мають розмір до десятків мікрометрів.

3. Хвіст, що складається з більшого пилу, сильно зігнутий під впливом магнітного поля.

4. «Антихвіст» – викидання з голови комети, спрямоване прямо до Сонця.

Кожне повернення комети до Сонця не проходить безслідно. Ядро комети втрачає близько $1/1000$ своєї маси. Тому, наприклад, час існування комети Галлея близько 20 тис. років. Але комети можуть існувати й менше часу, тому що вони піддаються руйнуванню унаслідок внутрішніх напружень, що виникають через нагрівання їх Сонцем або приливним впливом Сонця і Юпітера. Гинуть комети також при зіткненні з планетами й метеоритними тілами. Документально зареєстровано понад 30 комет, що розпалися на окремі компоненти на очах спостерігачів. Так, у 1992 р. комета Шумейкерів–Леві зблизилася з Юпітером. У результаті потужного гравітаційного впливу вона роздрібнилася на 22 уламки. Через 2 роки, обігнувши по орбіті Юпітер, уламки увійшли в атмосферу планети зі швидкістю 60 км/с (мал. 3.44). У результаті виникли гігантські вихрові темні утворення, порівнянні за розмірами з розмірами Землі.

Існує імовірність зіткнення ядер комет із Землею.

Українська вчена в галузі небесної механіки, докторка фізико-математичних наук **Олена Казимирчак–Полонська** (1902–1992) основні наукові праці присвятила вивченню руху комет. Особливу увагу приділяла короткоперіодичним кометам: встановила, що характерними закономірностями руху таких комет є їхнє зближення з великими планетами (передусім з Юпітером). Дослідила рухи 35 короткоперіодичних комет різних планетних сімейств, визначила типи змін



Мал. 3.44. Падіння уламків комети Шумейкерів–Леві на Юпітер



Олена Казимирчак–Полонська

кометних орбіт. Обґрунтувала гіпотезу захоплення короткоперіодичних комет великими планетами і розрахувала загальні закономірності кометних орбіт. У 1978 р. планету № 2006, яку відкрили у Кримській астрофізичній обсерваторії, назвали Полонська. А між Сатурном і Ураном мчить у просторі пояс астероїдів Казимирчак–Полонської.

5. Метеори та метеорні потоки. Під час руху навколо Сонця комети розпадаються. Уздовж їхніх орбіт витягаються шлейфи пилу, які можуть перетинати земну орбіту. Частинки, входячи з величезною космічною швидкістю в атмосферу Землі, згорають, утворюючи світлий слід (у народі кажуть: упала зоря). Це явище називають **метеором** (мал. 3.45). Саму частинку називають **метеорним тілом**.

Розміри метеорних тіл, що спричиняють явище метеора, від кількох мікронів пилинок (тоді їх можна спостерігати тільки в телескоп) до кількох сантиметрів (дають дуже яскраве світіння). За деякими оцінками, входження в атмосферу Землі метеорної речовини становить близько 50 тис. тонн у рік.

Близько 1 % метеорних тіл, що стикаються із Землею, прилітають з міжзоряного простору. Метеорні тіла влітають у земну атмосферу зі швидкістю від 11 до 72 км/с, натрапляючи на своєму шляху на сильно і швидко зростаючий опір повітря. Поверхня метеорного тіла розігрівається до кількох тисяч градусів і перетворюється в розпечений газ, що йонізує навколишні молекули повітря. У результаті чого спостерігач на Землі бачить світлий вогняний слід.

Світіння метеорного тіла починається на висоті 120 км і зникає на висоті 60–80 км від поверхні Землі, коли тіло повністю випаровується в земній атмосфері. Весь політ метеорного тіла триває від десятих часток до кількох секунд. Час спостереження явища метеора залежить від швидкості метеорного тіла.

Властивості й природу метеорної речовини допомагають вивчати візуальні, фотографічні, спектральні й радіолокаційні спостереження. Дослідження показали, що весь комплекс метеорної речовини ділиться на випадкові метеорні тіла й метеорні частинки, що належать до метеорних роїв.

Метеорні тіла, що з'являються в певну пору року й падають десятками за годину, належать до метеорних потоків, або зоряних дощів. Метеорні потоки спостерігаються, коли Земля перетинає орбіту метеорного рою. Метеори кожного потоку рухаються у просторі майже паралельними траєкторіями, але нам здається, що вони вилітають з однієї точки. Саме цю точку й називають **радіантом** (мал. 3.46).

Метеорний потік має назву того сузір'я або зорі, поблизу яких перебуває радіант, наприклад Драконіди, Оріоніди тощо. Серед метеорних потоків трапляються такі, інтенсивність яких з року в рік не змінюється. Це значить, що метеорні частинки розподілено майже рівномірно вздовж орбіти рою. Найбільш відомим таким потоком є потік Персеїдів, що спостерігається щорічно в серпні.

Один раз в 33 роки спостерігаються метеорні дощі з радіантом у сузір'ї Лева, коли Земля зустрічається з найгустішою частиною рою. Цей рій спричиняє метеорний потік Леоніди (мал. 3.47), що спостерігається в середині листопада. Орбіта цього метеорного рою практично збігається з орбітою комети 1866 I. Отже, точно встановлено походження метеорних роїв. Комета, руйнуючись, породжує метеорний рій.



Мал. 3.45. Яскравий метеор



Мал. 3.46. Радіант метеорного потоку



Мал. 3.47. Метеоритний дощ потоку Леоніди пройшов у 2001 р. в Японії. Це зображення – композиція із 34 фото, які було отримано менш ніж за 2 хв



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Що розуміють під карликовою планетою? Які карликові планети ви знаєте?
2. Які небесні об'єкти називають малими тілами?
3. Чому в астероїдів немає атмосфер? Яка форма й розміри більшості астероїдів? Чи існує небезпека зіткнення Землі з астероїдом?
4. Які, на вашу думку, причини утворення поясу астероїдів між орбітами Марса та Юпітера?
5. Як можна на зоряному небі відрізнити астероїд від зорі?
6. Який найбільший метеоритний кратер виявили на території України?
7. Чому хвости комет спрямовані в бік, протилежний від Сонця? Що є ядром і хвостом комети? Який зв'язок комет з метеорами й астероїдами?

§ 17. ДОСЛІДЖЕННЯ ТІЛ СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ ТА ВСЕСВІТУ ЗА ДОПОМОГОЮ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ

1. Сучасні дослідження Всесвіту. Ще донедавно позаатмосферна астрономія була мрією багатьох учених-астрономів. Тепер вона перетворилася в розвинену галузь науки. Результати, отримані на космічних телескопах, без найменшого перебільшення перевернули багато наших уявлень про Всесвіт.

Величезний обсяг інформації про космос цілком залишається за межами земної атмосфери. Більша частина інфрачервоного й ультрафіолетового діапазону, а також рентгенівські й γ -промені космічного походження недоступні для спостережень з поверхні Землі. Для того щоб вивчати Всесвіт у цих променях, потрібно винести прилади для спостережень у відкритий космос.

Для успішної роботи космічної обсерваторії потрібні спільні зусилля різних фахівців. Космічні інженери готують телескопи до запуску, виводять їх на орбіту, стежать за забезпеченням енергією всіх приладів та їхнім нормальним функціонуванням. Кожен об'єкт можна спостерігати протягом кількох годин, тому особливо важливо втримувати орієнтацію супутника, що обертається навколо Землі, у тому самому напрямку, щоб вісь телескопа залишалася націленою строго на об'єкт.

Астрономи збирають заявки на проведення спостережень, відбирають з них найважливіші, готують програму спостережень, стежать за одержанням і обробкою результатів. Дані, отримані космічними телескопами, протягом деякого часу доступні лише авторам програми спостережень.

Потім вони надходять у комп'ютерні мережі, і будь-який астроном може використовувати їх для своїх досліджень через мережу Інтернет.

За часи дослідження космосу було проведено значну кількість наукових космічних місій, які зробили вагомий внесок у розвиток наших знань про Всесвіт. Зупинимось на кількох з них.

2. Космічні телескопи та обсерваторії. У 1946 р. американський астрофізик Лайман Спітцер (1914–1997) опублікував статтю «Астрономічні переваги позаземної обсерваторії» (англ. *Astronomical advantages of an extra-terrestrial observatory*). У статті зазначено дві головні переваги космічного телескопа: 1) його кутова роздільна здатність буде обмежена лише дифракцією, а не турбулентними потоками в атмосфері; 2) космічний телескоп міг би вести спостереження в інфрачервоному діапазоні, ультрафіолетовому, рентгенівському та γ -діапазоні, у яких випромінювання поглинається земною атмосферою.

У жовтні 1959 р. земляни вперше побачили зображення зворотного боку Місяця.

У 1962 р. Велика Британія запустила орбітальний телескоп «Аріель» для досліджень Сонця. У 1966 р. НАСА запустила в космос першу орбітальну обсерваторію ОАО-1 (англ. *Orbiting Astronomical Observatory*). Місія не мала успіху через відмову акумуляторів за 3 дні після старту. У 1968 р. було запущено ОАО-2, яка проводила спостереження ультрафіолетового випромінювання зір і галактик аж до 1972 р., перевищивши розрахунковий термін експлуатації.

У 1967 р. американська космічна обсерваторія ОСО-3 виявила γ -випромінювання нашої Галактики, а в 1975–1982 рр. європейський супутник COS-B склав першу γ -променеву карту Чумацького Шляху. Протягом 70–80-х рр. XX ст. на навколосемній орбіті працювало кілька десятків штучних супутників Землі та орбітальних космічних станцій, що використовувалися для проведення астрономічних досліджень у різних спектральних діапазонах.

Місії ОАО та ОСО продемонстрували можливості орбітальних телескопів. Тому НАСА в 70–90-х рр. XX ст. спроектувала та побудувала 4 великі космічні обсерваторії, кожна з яких досліджувала Всесвіт у певній частині спектра.

Вивчення інфрачервоного випромінювання в астрономії почалося з того, що за допомогою орбітального телескопа провели точні вимірювання температури поверхні й атмосфери планет Сонячної системи.

Так, в атмосферах Марса, Венери і Юпітера було виявлено вуглекислий газ. Інфрачервоні спостереження планет-гігантів дали змогу дізнатися про структуру їхніх атмосфер і виявити лід на супутниках.

Сенсаційним відкриттям інфрачервоної астрономії стала вода, виявлена в космосі у великій кількості. Вона присутня в газопилових туманностях, кометах і на малих планетах.

Першу інфрачервону обсерваторію було запущено в січні 1983 р. у рамках спільного американсько-європейського проекту *IRAS*. До складу комплексу *IRAS* входив телескоп-рефлектор з діаметром дзеркала 57 см (мал. 3.48).

У зв'язку з тим, що земна атмосфера сильно екранує ультрафіолетове випромінювання, його приймачі доводиться розміщувати на штучних супутниках Землі. Проведені в 1999 р. спостереження дали дуже цікаві наукові результати. Виявилось, що в нашій Галактиці широко поширені маси дуже нагрітого (до півмільйона градусів) міжзоряного



Мал. 3.48. Інфрачервона обсерваторія *IRAS*



Мал. 3.49. Обсерваторія
«Чандра»

обсерваторія виявила понад 400 джерел космічного γ -випромінювання, у 10 разів більше ніж було відомо до її запуску. Вона також зареєструвала понад 2,5 тис. γ -спалахів, тоді як раніше було зафіксовано тільки близько 300.

Джерелами γ -випромінювання є спалахи на Сонці, ядра активних галактик, квазари. За допомогою рентгенівських космічних обсерваторій досліджуються наднові зорі, туманності, нейтронні зорі, сонячна корона й спалахи на Сонці.

Третю велику космічну обсерваторію для дослідження Всесвіту в рентгенівському діапазоні було виведено на орбіту в 1999 р. Інформація, отримана цією орбітальною обсерваторією, свідчить, що у Всесвіті існує не менше як 300 млн чорних дір. Обсерваторія «Чандра» (мал. 3.49) уперше зафіксувала процес руйнування звичайної зорі, яка дуже близько підійшла до чорної діри. А в 2004 р. вона уперше зареєструвала потужні рентгенівські джерела, які можуть бути чорними дірами нового типу з масою кілька сотень сонячних мас.

3. Дослідження досягнень орбітального телескопа «Кеплер».

Орбітальний телескоп «Кеплер» (англ. *Kepler*) – космічний телескоп НАСА (мал. 3.50), призначений для пошуків екзопланет і названий на честь Йоганна Кеплера.

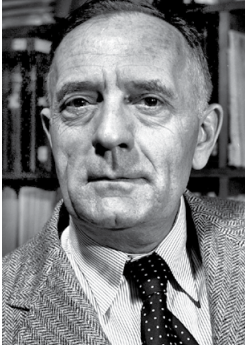
Телескоп було запущено 7 березня 2009 р. з космодрому на мисі Канаверал у штаті Флорида. Місія «Кеплера» планувалася на 3,5 року. Весь цей час він мав спостерігати близько 100 тис. схожих на Сонце зір, навколо яких можуть обертатися екзопланети. Апарат шукає планети, що розміщені поза Сонячною системою, за допомогою транзитного методу. (Коли планета проходить на фоні диска своєї зорі, вона закриває від спостерігача частину її випромінювання. Аналізуючи коливання яскравості світил, астрономи можуть не тільки знаходити планети, але й приблизно оцінювати їхній розмір.) «Кеплер» обертається навколо Сонця орбітою радіусом близько 1 а. о.

Фактично повторює шлях нашої планети, що обертається навколо Сонця.

На момент запуску астрономи виявили близько 350 екзопланет, а станом на 22 грудня 2011 р. – уже 716 екзопланет у 584 планетних системах. Більшість з них – газові гіганти на зразок Юпітера. На таких планетах не можуть розвиватися організми земного типу, а саме заселеність екзопланет найбільше цікавить учених. «Кеплер» зможе знаходити планети, придатні для життя і меншого розміру.



Мал. 3.50. Орбітальний теле-
скоп «Кеплер»



Едвін Габбл



Мал. 3.51. Телескоп «Габбл»

Так, станом на 20 січня 2015 р. встановлено існування 1900 екзопланет у 1202 планетних системах, у 480 з яких більше ніж одна планета. Екзопланетний архів НАСА визнає відкритими 1795 позасонцевих планет. За проектом «Кеплер», нині є 4175 небесних тіл, що є потенційними екзопланетами, але для офіційного підтвердження їхнього статусу потрібна повторна реєстрація наземними телескопами (за статистикою, це стається в 90 % випадків).

Оптика космічного телескопа (мал. 3.51) Едвіна Габбла (1889–1953) наближається до ідеальної оптичної системи. Поза атмосферою дзеркало цього телескопа діаметром 2,4 м дає змогу досягти роздільної здатності 0,06".

Загальна кількість екзопланет у нашій галактиці може сягати сотень мільярдів, якщо не рахувати «планети-сироти», яких у Чумацькому Шляху вірогідно існує до трильйона (їх зазвичай рахують окремо, а знаходять за допомогою обчислення, подібно до того, як відкрили субкоричневий карлик WISE 0855-0714). Звичайних орбітальних планет, – імовірно, від 100 мільярдів, з них – від 5 до 20 мільярдів, імовірно, «землеподібних». Також, за поточним оцінюванням, 22 % сонцеподібних зір мають на своїх орбітах схожі на Землю планети, що перебувають у придатних для життя зонах.

4. Космічні дослідження поверхні Місяця. 16 липня 1969 р. американці на космічному кораблі «Аполлон-11» з екіпажем у складі трьох астронавтів – командир Нейл Армстронг, пілот місячного модуля Едвін Олдрін і пілот командного модуля Майкл Коллінз – уперше висадилися безпосередньо на поверхню Місяця.

Армстронг спустився на поверхню Місяця 21 липня 1969 р. о 2 год 56 хв 20 с за Гринвічем. Ступивши на Місяць, він вимовив: «Це один маленький крок для людини, але гігантський стрибок для всього людства». Камера, встановлена зовні модуля, транслювала вихід Армстронга на поверхню Місяця. А через 15 хв на Місяць ступив й Олдрін, який відразу став випробовувати різні способи пересування поверхнею. Астронавти зібрали потрібну кількість матеріалів, розмістили прилади і встановили телевізійну камеру. Астронавти, перебуваючи на Місяці, могли бачити на небі нашу Землю (мал. 3.52). Американські космічні кораблі серії «Аполлон» протягом наступних трьох років 6 разів доставляли в різні місця Місяця експедиції (12 астронавтів досліджували місця посадок, вони зібрали понад 360 кг місячних зразків). Місячні породи доставляли і радянські автоматичні станції «Луна».

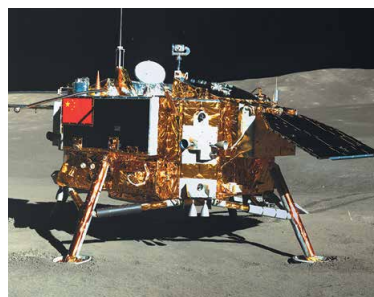
Першим механізмом на Місяці став радянський «Луноход-1» (мал. 3.53). Його запустили в 1970 р., керували по радіо із Землі. Він став першим штучним об'єктом, що пересувався Місяцем. Замість запланованих



Мал. 3.52. Земля – вигляд з поверхні Місяця



Мал. 3.53. «Луноход-1»



Мал. 3.54. Китайський апарат «Чан'е-4» на поверхні Місяця

90 днів «Луноход-1» пропрацював майже рік і подолав 10,5 км. Місце, де він остаточно зупинився, довго було невідоме. Тільки в 2005 р. «Луноход-1» «знайшовся» на фото, зроблених орбітальним місячним апаратом НАСА.

На початку XXI ст. програми дослідження Місяця активізувалися. Про свої плани створити орбітальну навколomisячну станцію оголосило кілька країн, зокрема США, Китай, Індія, Росія, Японія. Міжнародний космічний консорціум планував зробити це до 2010 р.

У 2019 р. 3 січня китайський апарат «Чан'е-4» (мал. 3.54) здійснив м'яку посадку на зворотному боці Місяця. Це перший апарат, який опустився на невідомий і невидимий із Землі бік Місяця. Посадку було здійснено в басейні Ейткена в районі Південного полюса Місяця. Апарат передав на Землю фото поверхні та почав наукове дослідження нашого природного супутника. На борту апарата будуть проводитися дослідження з вирощування організмів в умовах малої сили тяжіння.

Компанія Space X планує відправити урочисту місію навколо нашого природного супутника, а НАСА розробляє *Exploration Mission 1*. Планується відправити на Місяць пілотовану експедицію *Exploration Mission 2* і розпочати будівництво місячної бази, яка буде не лише освоювати Місяць, але і полегшуватиме польоти на Марс та інші планети Сонячної системи.

5. Космічна місія «Розетта». Космічний апарат «Розетта» стартував 2 березня 2004 р. з космодрому Куру (Французька Гвіана) у напрямку до ядра комети Чурюмова–Герасименко. Комету названо на честь її відкривачів – українських науковців Кліма Чурюмова та Світлани Герасименко (мал. 3.55).

Комета 67P/Чурюмова–Герасименко є короткоперіодичною кометою, яка має період обертання приблизно 6 років і 7 місяців. З моменту відкриття комети вона поверталася до Землі вже 7 разів. Перед її сьомою появою поблизу Сонця до комети було відправлено космічний апарат «Розетта».



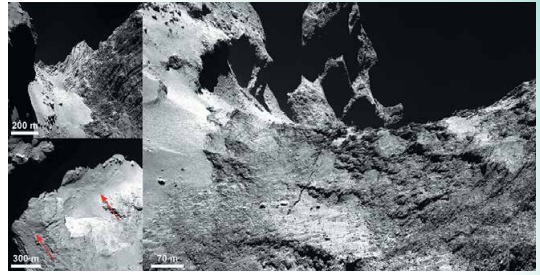
Мал. 3.55. Клим Чурюмов та Світлана Герасименко (1975 р.)

У травні 2014 р. «Розетта» зменшила свою швидкість відносно ядра комети до 2 м/с і наблизилася до нього на відстань 25 км. Усі прилади «Розетти» увімкнулися на повну готовність та почали систематичні дослідження ядра й навколоядерної області комети (мал. 3.56).

У листопаді 2014 р. було проведено найскладніший і найголовніший етап цієї місії – відділення від орбітального модуля зонда



Мал. 3.56. Космічна лабораторія «Розетта» біля комети Чурюмова-Герасименко



Мал. 3.57. Перші фото комети Чурюмова-Герасименко

«Філі» і посадка його на одну з 5 обраних для цієї мети безпечних площадок на ядрі комети. «Філі» – це унікальний науковий контейнер масою близько 21 кг. На ньому встановлено 10 приладів, у тому числі спектрометр α -променів, протонів і рентгенівських променів для дослідження елементного складу кометної речовини.

Операція з висадження «Філі» відбулася на відстані понад 500 млн км від Землі. Таким чином, 12 листопада о 18 год 02 хв за київським часом уперше в історії людства штучний зонд після 10 років космічних подорожей здійснив м'яку посадку на поверхню комети.

Протягом своєї місії «Розетта» ніколи не наближалася до комети ближче ніж на 1,9 км. Під час зниження апарата на «довічне паркування» науковці отримали від «Розетти» детальні фото небесного тіла (мал. 3.57) та дійшли важливих наукових висновків з отриманих даних лабораторії «Філі». Космічна місія була першою в історії «зустріччю» з кометою.

89

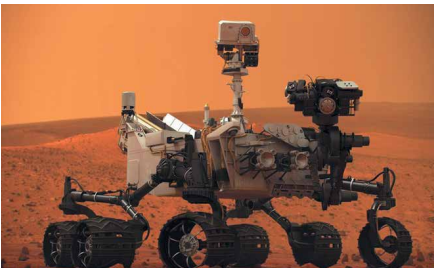
6. Дослідження поверхні Марса. 6 серпня 2012 р. американський марсохід *Curiosity* сів на Марсі (мал. 3.58). Зовнішня поверхня марсохода має наукову лабораторію, оснащену приладами, які проводять аналіз зразків марсіанського ґрунту.

Головною метою цієї експедиції була спроба з'ясувати, чи існували будь-коли на поверхні Марса умови для зародження життя.

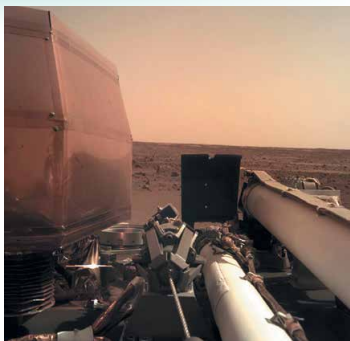
Завдовжки американський дослідницький апарат трохи менший ніж 3 м, а його вага – 900 кг. Пересувна марсіанська лабораторія забезпечена трьома парами коліс, і кожне з них приводиться в рух індивідуальною силовою установкою.

Марсохід може долати перешкоду заввишки до 75 см, а також робити на місці розворот на 360°, фотографуючи поверхню планети. Досліджувати планету можна через мережу Інтернет за адресою доступу: <http://mars.nasa.gov/multimedia/interactives/billionpixel/>.

26 листопада 2018 р. космічний апарат *InSight* американського космічного агентства НАСА здійснив успішну посадку на поверхню планети



Мал. 3.58. Марсохід *Curiosity* і поверхня Марса



Мал. 3.59. Космічний апарат *InSight* та фото Марса

Марс (мал. 3.59). Він стартував з Каліфорнії в травні і за півроку пролетів 548 млн км. Його оснащено інструментами для вимірювання температури під поверхнею планети і вивчення її сейсмічної активності. Апарат увійшов в атмосферу Марса на швидкості 19 795 км/год, після чого розмістився в середині нагір'я Елізіум неподалік від екватора.

InSight проведе на Марсі 24 місяці, тобто приблизно 1 марсіанський рік. За цей час апарат проведе дослідження, які дадуть змогу відповісти на питання про походження Марса, а також й інших скельних планет внутрішньої Сонячної системи, у тому числі й Землі.

90



ЧИ ЗНАЄТЕ ВИ, ЩО...

- Астрономи-любители можуть шукати нові екзопланети на сайті <http://www.planethunters.org/>. Через мережу Інтернет є можливість переглянути дані, отримані з космічного телескопа «Кеплер», що аналізують по фото зміну яскравості «світних точок», за якими визначають наявність екзопланет біля віддалених зір.
- На навколоземні орбіти ШСЗ виводять нові унікальні ультрафіолетові, інфрачервоні й оптичні телескопи. Поступово збільшуються діаметри їхніх головних дзеркал, удосконалюється світлоприймальна апаратура, підвищується чутливість приладів, розробляються нові методи стабілізації телескопів на орбіті. Наступним кроком позаатмосферної астрономії може стати реалізація проектів побудови космічних телескопів діаметром до 8 м і більше, а також створення астрономічних обсерваторій на Місяці, які будуть додавати нові «цеглинки» в космологічну картину Всесвіту.

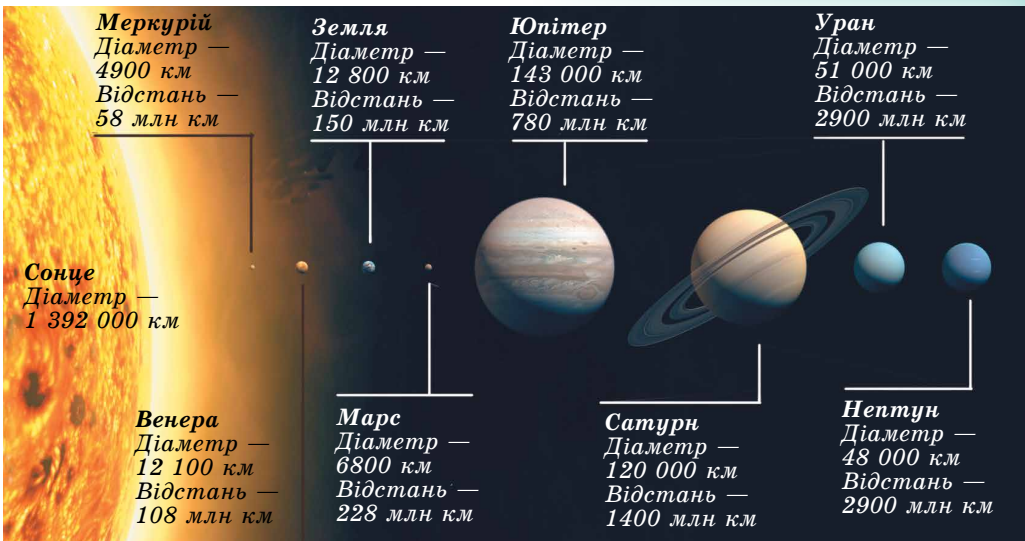


ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Що розуміють під позаатмосферною астрономією?
2. Які орбітальні обсерваторії ви знаєте?
3. Що ви знаєте про космічну місію «Розетта»?
4. Що ви знаєте про американський марсохід *Curiosity* та його знахідки на Марсі?
5. Назвіть основні астрономічні сайти та портали мережі Інтернет, через які можна дізнаватися про останні наукові космічні дослідження та відкриття.

§ 18. ГІПОТЕЗИ І ТЕОРІЇ ФОРМУВАННЯ СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ

1. Особливості будови Сонячної системи. Характерні риси будови Сонячної системи, відомі за астрономічними спостереженнями й космічними дослідженнями, полягають у такому.



Мал. 3.60. Порівняльні розміри Сонця та планет

1. Основна маса речовини Сонячної системи зосереджена в Сонці, що являє собою типову зорю. На масу всіх інших складових системи припадає 1/750 частина маси Сонця (мал. 3.60). Таким чином, у Сонячній системі переважає гравітаційне поле Сонця.

91

2. Орбіти планет і більшості астероїдів лежать майже в одній площині, нахиленій до площини сонячного екватора під кутом $7^{\circ}15'$. Орбіти планет майже колові, тобто їхні ексцентриситети мало відрізняються від нуля.

3. Усі планети й астероїди обертаються навколо Сонця в одному напрямку. Обертання Сонця навколо своєї осі відбувається в той самий бік, що й рух планет навколо Сонця. Планети обертаються навколо своїх осей у напрямку, що збігається з напрямком їхнього обертання навколо Сонця. Виняток становлять Венера й Уран, які обертаються в протилежний бік. Причому вісь обертання Урана майже лежить в площині орбіти планети. Нахил осі обертання інших планет не перевищує 60° до площин їхніх орбіт.

4. Планети поділяють на дві групи: планети земного типу й планети-гіганти (мал. 3.61). **Планети земної групи** – тверді тіла, порівняно невеликі та немасивні, але з великою середньою густиною, з повільним обертанням та з малою кількістю супутників (або без них). Вони розміщені поблизу Сонця. **Планети-гіганти** – Юпітер, Сатурн, Уран, Нептун –



Мал. 3.61. Планети земної групи та планети-гіганти

масивніші за планети земної групи, більші за розмірами, з великою швидкістю обертання, з меншою середньою густиною і численними супутниками. Планети-гіганти мають потужні атмосфери, що складаються в основному з водню й гелію.

5. Момент кількості руху (mvr) між Сонцем і планетами розподіляється нерівномірно. На частину Сонця, у якому зосереджена майже вся маса Сонячної системи, припадає тільки 2 % її повної кількості руху.

6. Орбіти більшості супутників планет наближені до колових. Рух більшості супутників по орбітах відбувається в тому напрямку, у якому рухаються планети навколо Сонця. Орбіти великих супутників в основному мають малий нахил до площин екваторів своїх планет.

Ці особливості потрібно враховувати під час побудови моделі (теорії) формування всього комплексу тіл Сонячної системи мільярди років тому.

2. Походження Сонячної системи. Для побудови теорії походження Сонячної системи потрібно знати вік небесних тіл. Відповідно до сучасних даних вік найдавніших порід Землі сягає 4,64 млрд років. Аналіз порід, доставлених з Місяця, відповідає віку від 2 до 4,5 млрд років. Вік залізних і кам'яних метеоритів приблизно від 0,5 до 5 млрд років. Вік Сонця та інших окремих зір визначається на основі теорії будови й еволюції зір. Для Сонця це приблизно 5 млрд років, що збігається з віком інших тіл системи. Останнє дає змогу зробити припущення, що Сонце й планети сформувалися з єдиної хмари газу й пилу.

Уперше ідею про утворення Сонця й планет з речовини єдиної газової туманності висунув **Іммануїл Кант** (1724–1804) у 1755 р., а розвинув її

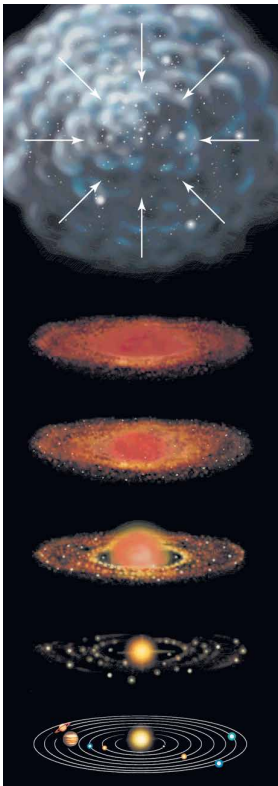
П'єр Лаплас (1749–1827) у 1796 р. Відповідно до цієї гіпотези, Сонячна система утворилася з обертової гарячої газової хмари, що стискалася під впливом гравітації та розпадалася на фрагменти (мал. 3.62). Однак ця гіпотеза не підтвердилася через безліч протиріч. Англійський учений **Джеймс Джинс** (1877–1946) у 1919 р. висунув гіпотезу, відповідно до якої планетна речовина була «вирвана» із Сонця під впливом близько пролітаючої зорі. Вирвана сонячна речовина розпалася на окремі частини, з яких і утворилися планети.

Дані фізико-хімічних досліджень метеоритів і земних порід підказували, що ці тіла утворилися не з газових згустків, а з твердої речовини. У 1944 р. розробкою теорії утворення планет з твердих частинок навколосонячної допланетної хмари займався **Отто Шмідт** (1891–1956), який певний час навчався і працював у Києві, його теорія розвивається і в наш час.

Можна виокремити такі основні етапи походження та ранньої еволюції Сонячної системи.

1. Близько 4,6 млрд років тому відбувся вибух наднової зорі поблизу місця народження Сонячної системи. Ударна хвиля від вибуху поширилася в космічному просторі. Під її дією газопилова хмара, яка складалася з водню, гелію та інших різних за складом хімічних частинок металів, рідкісних ізотопів важких елементів, стала згущатися. Таким чином у ній утворилися згущення, збагачені речовиною наднової зорі.

Споконвічне повільне обертання згущень під дією сил гравітації стало стискатися і перетворю-



Мал. 3.62. Утворення Сонячної системи

ватися в дископодібну газопилову хмару. Надалі в центрі цієї хмари утворюється молоде Сонце.

2. Поступово в диску газопилової хмари дрібні пилінки стали об'єднуватися, захоплюючи гази з довколишнього простору. З дрібних частинок утворювалися дедалі більші брили, з яких надалі формувалися зародки майбутніх планет (розмірами кілька кілометрів) – планетезималі, а пізніше й самі планети. У внутрішній зоні легкі елементи (водень, гелій) під дією світлового тиску залишали центральні області диска, переміщуючись на периферію. Тому поблизу Сонця планетезималі формувалися повністю з кам'янистих мінералів та сполучень металів і зрештою перетворилися в планети земної групи.

Частинки в середній холодній зоні покривалися льодом, ядра майбутніх планет-гігантів швидко росли, захоплюючи навколишній газ. У найхолоднішій зовнішній частині диска конденсуюча речовина була майже крижаною. Безліч окремих крижаних планетезималей і брил породила ядра комет і крижані астероїди. Планети земної групи майже досягли своїх розмірів приблизно через 100 млн років.

3. Наступне гравітаційне стискання підняло температуру в надрах протопланет до температури плавлення заліза. Унаслідок чого важкі компоненти стали відокремлюватися й направлятися до центра планет, а найбільш легкі речовини – підніматися до поверхні. Протягом мільярдів років йшло утворення кори – зовнішнього шару планет земної групи. Розігрівання Землі супроводжувалося виділенням газів і водяної пари. Поступово водяна пара конденсувалася й утворювала моря й океани, а гази – атмосферу. На початковому етапі первинна атмосфера істотно відрізнялася від сучасної.

Супутники планет, що рухаються в напрямку обертання планет, утворилися в результаті тих самих процесів, що й самі планети. Супутники, що рухаються у зворотному напрямку, були захоплені планетою.

93



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. У чому суть гіпотез Канта, Лапласа, Джинса, Шмідта про походження Сонця і планет?
2. Назвіть основні етапи походження та ранньої еволюції Сонячної системи.



РОЗВ'ЯЗУЄМО РАЗОМ

Задача 1. Чи видно з Місяця ті самі сузір'я, що й із Землі?

Відповідь. Відстань від Землі до Місяця надзвичайно мала порівняно з відстанню до зір, і вигляд зоряного неба не зміниться під час переміщення спостерігача із Землі на Місяць. Вигляд сузір'їв не змінюється навіть під час переміщення Землі по своїй орбіті.

Задача 2. Серп Місяця повернутий опуклістю вправо близько до горизонту. У який бік горизонту ви дивитеся?

Відповідь. У цьому випадку ви дивитеся на захід. Указане положення серпа Місяця показує, що Сонце, яке міститься правіше від Місяця, уже заховалося за горизонт у західній частині неба.

Задача 3. Після заходу Сонця на заході перебуває комета. Як відносно горизонту спрямований її хвіст?

Відповідь. Сонце перебуває на заході під горизонтом. Хвіст комети завжди спрямований від Сонця. Отже, комету видно на небі хвостом угору (голова комети ближче до горизонту).

Задача 4. Оператор із Землі управляє по радіо рухом марсохода, який демонструє йому телепанораму на відстані 30 м від себе. Яка при цьому безпечна швидкість марсохода, якщо відстань до Марса становить 2,5 а. о.?

Відповідь. Затримка сигналу Марс–Земля–Марс становить приблизно 40 хв. Отже, для того щоб оператор міг вчасно зупинити марсохід перед перешкодою, його швидкість має бути не більша ніж 1,25 см/с.



ЗАДАЧІ ТА ВПРАВИ

3.1. Спостерігач фіксує вигляд неба регулярно в той самий зоряний час і постійно бачить Сонце на горизонті. У якому місці Землі і в який зоряний час це може відбутися?

3.2. Коли Земля буває найближче до Сонця і коли – найдалі? У чому причина зміни відстані від Землі до Сонця?

3.3. Якби орбіта Землі мала форму кола, то як відрізнялися б пори року від тих, які існують зараз? Як змінилися б пори року, якщо ексцентриситет земної орбіти збільшився до 0,5?

3.4. Які спостереження показують, що Земля рухається під дією сили тяжіння Сонця?

3.5. Як можна відрізнити зростаючий Місяць від спадаючого?

3.6. Як можна пояснити той факт, що Місяць постійно повернений до Землі одним боком?

3.7. Як розрахувати час падіння Місяця на Землю у випадку раптового припинення його руху навколо Землі?

3.8. Чому радіус диска Місяця, освітленого попелястим світлом, здається меншим, ніж радіус світлого серпа?

3.9. Що спільного в усіх планет? У чому подібність і в чому відмінність планет земної групи від планет-гігантів?

3.10. Які планети мають найбільш витягнуті орбіти? Орбіта якої планети найбільше схожа до кола?

3.11. Чому Юпітер сплюснутий до полюсів, а Сонце із Землі має вигляд круглого диска при тій самій газовій природі?

3.12. Марс найкраще видно із Землі під час протистояння? Які умови видимості в цей час Землі з Марса?

3.13. Земля для Марса, як Венера для Землі, є нижньою планетою. Через які інтервали часу можна бачити Землю з Марса у східній елонгації?

3.14. На яких планетах виявлено полярні шапки?

3.15. Усі планети через наявність молекул зі швидкостями, більшими від швидкостей витікання, гублять свої атмосфери. Чому ж атмосфери існують?

3.16*. Температура Венери, визначена радіометричним методом, є дуже низька (-54°C). Як це узгоджується з дуже високою температурою на її поверхні і в нижніх шарах атмосфери?

3.17*. Як можна пояснити, що Сатурн з меншою швидкістю обертання навколо осі, ніж у Юпітера, більше стиснений біля полюсів, ніж Юпітер?

3.18*. Чи існують подвійні астероїди?

3.19*. Чи бувають комети без хвостів?

3.20*. Як пояснити те, що найбільше метеорів видно в передранковій години, а увечері метеорів видно менше?

3.21*. Які космічні тіла можна спостерігати тільки тоді, коли вони проходять через земну атмосферу?

3.22*. Чому космічний корабель, що відлітає на Місяць зі штучного супутника Землі, може не мати обтічної форми?

3.23*. Виберіть відповіді на запитання: які величини змінюються під час посадки космічного апарата на Місяць, порівняно з їхніми значеннями на Землі? 1) Маса астронавта; 2) вага астронавта; 3) сила ваги, що діє на астронавта.

3.24*. Що втримує штучний супутник Землі на орбіті?

3.25*. Штучний супутник Землі одного разу запустили уздовж меридіана, а іншого – уздовж екватора в бік обертання Землі. У якому випадку було витрачено менше енергії?



ПЕРЕВІР СВОЮ КОМПЕТЕНТНІСТЬ

Контрольні запитання

1. Де на Землі тривалість дня протягом року не змінюється?
2. Коли Марс видно на небі цілу ніч?
3. Чи можна Венеру побачити в той час, коли вона найближче до Землі?
4. Чому Меркурій важко побачити на небі, хоча він буває яскравіший за Сіріус?
5. Чому спостереження в космосі дають більше інформації, ніж наземні телескопи?
6. Сьогодні Місяць спостерігався в першій чверті. Чи буде завтра Місяць відбивати сонячне світло опівночі?
7. Венера розміщена далі від Сонця, ніж Меркурій, але чому температура на її поверхні вища, ніж на Меркурії?
8. Які є докази того, що на поверхні Марса колись була вода в рідкому стані?
9. Які особливості планет-гігантів?
10. Чому Юпітер можна вважати дуже схожим на зорю?
11. Що спричиняє гелієві дощі на Сатурні?
12. Чим пояснюється дивовижне забарвлення Іо?
13. Про що свідчать численні кратери на супутниках Юпітера?
14. Які супутники планет мають атмосферу?
15. Чим відрізняється метеор від метеорита?
16. Хвіст комети притягується до Сонця чи відштовхується від нього?

Що я знаю і вмю робити

95

● Я вмю розв'язувати астрономічні задачі

1. Обчисліть, за який час світло долітає від Сонця до Землі; до Нептуна; до межі Сонячної системи. Швидкість світла вважати рівною 300 000 км/с.
2. Астероїд обертається навколо Сонця з періодом 3 роки. Чи може цей астероїд зіткнутися із Землею, якщо він в афелії; перебуває на відстані 3 а. о. від Сонця?
3. Кажуть, що деякі люди мають такий гострий зір, що навіть незброєним оком розрізняють великі кратери на Місяці. Обчисліть достовірність цих фактів, якщо найбільші кратери на Місяці мають діаметр 200 км, а середня відстань до Місяця 380 000 км.

● Я вмю користуватися картою зоряного неба

4. Чи можна користуватися нашою картою зоряного неба на поверхні інших планет Сонячної системи? Під час міжпланетних польотів? На планетах, які обертаються навколо інших зір?

● Я вмю проводити астрономічні спостереження

5. За допомогою бінокля або шкільного телескопа можна спостерігати Галілеєві супутники Юпітера. Визначте моменти затемнення одного із цих супутників – коли він зникає за диском Юпітера.



ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ

1. На Землі спостерігається затемнення Місяця. Що побачать у цей час на Місяці космонавти?

А схід Сонця Б кульмінацію Сонця В затемнення Сонця
Г затемнення Місяця Д захід Сонця

2. Повний Місяць перебуває на горизонті. У який час доби можна спостерігати таке явище в Україні?

А уранці Б удень В увечері Г опівночі Д ніколи

3. Якими із цих приладів космонавти можуть користуватися на поверхні Місяця?

- А компасом
- Б телескопом
- В радіоприймачем
- Г телевізором
- Д барометром

4. На яких планетах земної групи у хмарах виявлено сірчану кислоту?

- А на Меркурії Б на Венері В на Землі Г на Марсі

5. Яка планета земної групи має найгустішу атмосферу?

- А Меркурій Б Венера В Земля Г Марс

6. Які планети обертаються навколо осі у зворотному напрямку?

- А Венера, Юпітер В Юпітер, Сатурн
- Б усі планети-гіганти Г Уран, Венера

7. На якій із цих планет спостерігається найбільша тривалість дня?

- А на Венері Б на Марсі В на Юпітері Г на Урані Д на Землі

8. Чому інколи кільця Сатурна зникають?

- А випаровуються
- Б ховаються за Сатурн
- В закриваються іншими планетами
- Г площина кільця збігається з променем зору спостерігача
- Д закриваються хмарами

9. Який з великих супутників рухається навколо планети у зворотному напрямку?

- А Європа Б Іо В Каллісто Г Ганімед Д Тритон

10. Який із супутників має густу азотну атмосферу з домішками метану?

- А Фобос Б Європа В Титан Г Оберон Д Тритон

11. На яких супутниках виявлено постійно діючі вулкани?

- А на Місяці Б на Деймосі В на Іо Г на Тритоні Д на Хароні

12. Метеором називають явище, коли...

- А зорі падають на Землю
- Б каміння падає на Землю
- В порошинки згорають у повітрі
- Г блискавки спостерігаються в повітрі
- Д пил викидається в атмосферу

13. Із чого складається ядро комети?

- А з льоду та пилу Б із заліза В з каміння
- Г із розжарених газів Д з пари води

14. З якою найменшою швидкістю метеорити влітають в атмосферу Землі?

- А 1 м/с Б 1 км/с В 11,2 км/с Г 22,2 км/с Д 70 км/с Е 100 км/с

Розділ 4

СОНЦЕ – НАЙБЛИЖЧА ЗОРЯ

Наше світило, зігріваючи своїми променями Землю ось уже 4,59 млрд років, є справжньою супердержавою Сонячної системи, яка живе за законами фізики і підпорядкована власному еволюційному розвитку. Це термоядерна піч гігантських розмірів, регулярно здригається потужними вибухами, кожен з яких здатний розпорошити на субатомні частинки наш блакитний оазис. Перебуваючи на відстані 150 млн км від поверхні Сонця, ми начебто захищені від його спопеляючої люті. Проте чи це так насправді? Щоб відчувати себе хоча б у відносній безпеці, людству сьогодні життєво необхідно знати всі таємниці Сонця.

§ 19. ФІЗИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОНЦЯ. БУДОВА СОНЦЯ ТА ДЖЕРЕЛА ЙОГО ЕНЕРГІЇ

97

1. Загальні відомості. Сонце – центральне і наймасивніше тіло Сонячної системи. Сонце – потужне джерело енергії, яку воно постійно випромінює в усіх ділянках спектра електромагнітних хвиль – від рентгенівських і ультрафіолетових променів до радіохвиль. Це випромінювання впливає на всі тіла Сонячної системи: нагріває їх, впливає на атмосфери планет, дає світло й тепло, необхідні для життя на Землі. Сонце – одна зі ста мільярдів зір нашої Галактики. Детально вивчаючи фізичну природу Сонця, ми одержуємо найважливіші відомості про природу інших зір. Диск Сонця видимий із Землі із середнім кутовим діаметром 32'. Світло від Сонця до Землі доходить за 8 хв і 20 с.

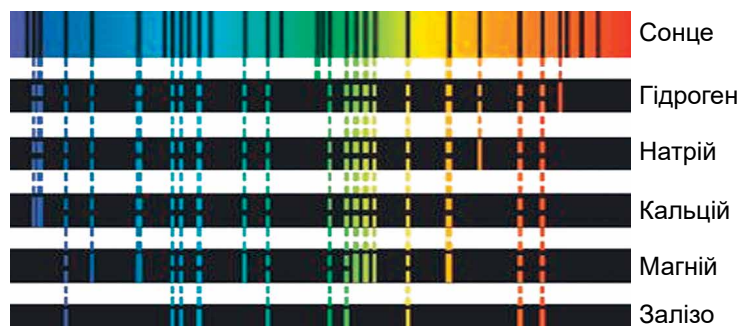
Маса Сонця приблизно в 333 000 разів більша за масу Землі та у 750 разів перевищує масу всіх інших планет, разом узятих. Діаметр Сонця дорівнює 1 млн 392 тис. км (109 діаметрів Землі). Вимірювання за межами земної атмосфери показали, що на площу 1 м^2 , розташовану перпендикулярно до сонячних променів, щосекунди надходить 1,37 кВт енергії. Це значення практично не змінюється протягом тривалого інтервалу часу, тому воно одержало назву **сонячна стала**. Максимум сонячного випромінювання припадає на оптичний діапазон.

Світність Сонця, або повну кількість енергії, випромінювану Сонцем у всіх напрямках за одиницю часу, визначають так: значення сонячної сталої множать на площу сфери радіусом r в одну астрономічну одиницю ($1 \text{ а. о.} = 149,6 \cdot 10^9 \text{ м}$): $L_{\odot} = 4\pi r^2 \cdot 1370 \text{ Вт} = 3,85 \cdot 10^{26} \text{ Вт}$.

На Землю потрапляє незначна сонячна енергія, яка складає близько половини мільярдної частини її значення.

2. Спектр і хімічний склад. Майже всі наші знання про Сонце ґрунтуються на вивченні його спектра. Хімічні елементи, які наявні в атмосфері Сонця, поглинають з неперервного спектра, випромінюваного фотосферою, світло певної частоти. У результаті в неперервному спектрі з'являються темні лінії. Йозеф Фраунгофер уперше вивчив і замалював

576 темних ліній сонячного спектра (мал. 4.1). Учений правильно вказав, що джерело темних спектральних ліній – сонячна атмосфера. За положенням у спектрі (тобто довжинами хвиль) й інтенсивністю цих ліній можна встановити, які хімічні елементи присутні в сонячній атмосфері.



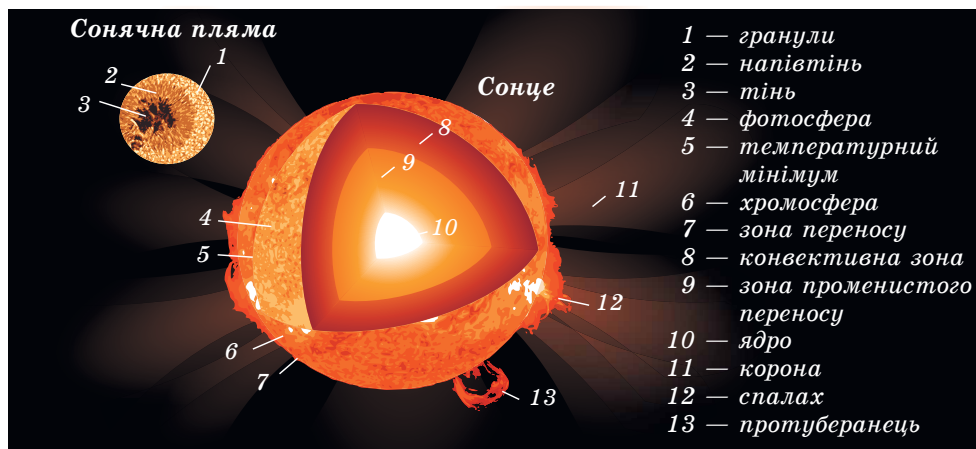
Мал. 4.1. Відповідність між положенням фраунгоферових ліній сонячного спектра і ліній хімічних елементів

На цей час досліджено понад 30 тис. ліній для 70 хімічних елементів, що є в атмосфері Сонця. Фраунгоферові лінії за інтенсивністю та шириною надзвичайно різноманітні. Аналіз спектральних ліній показав, що на Сонці переважає Гідроген – на його частину припадає понад 70 % маси Сонця, близько 25 % припадає на Гелій і близько 2 % – на інші елементи.

98

3. Внутрішня будова. Знаючи дані про радіус, масу, світність Сонця та використовуючи фізичні закони, можна одержати дані про тиск, густину, температуру і хімічний склад на різних відстанях від центра Сонця (мал. 4.2). З наближенням до центра Сонця збільшуються, сягаючи максимальних значень, температура, тиск і густина. Хімічний склад Сонця також відрізняється: процентний вміст водню найменший у центрі.

Високий тиск усередині Сонця обумовлений дією вище розміщених шарів. Сили тяжіння прагнуть стиснути Сонце. Їм протидіє пружність гарячого газу й тиск випромінювання, що йдуть з надр. Ці сили прагнуть розширити Сонце. Тяжіння, з одного боку, а пружність газів і тиск випро-

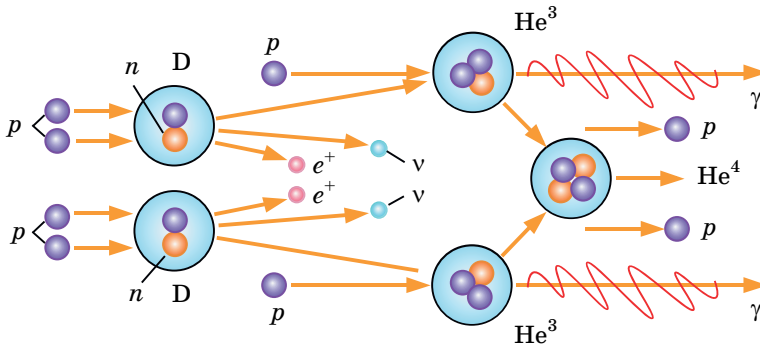


Мал. 4.2. Будова Сонця

мінювання, з іншого боку, урівноважують одне одного. Рівновага має місце в усіх шарах від поверхні до центра Сонця. Такий стан Сонця і зір називають **гідростатичною рівновагою**. Цю просту ідею висунув у 1924 р. англійський астрофізик **Артур Еддінгтон** (1882–1944). Вона дала змогу скласти рівняння, за яким розраховують моделі внутрішньої будови Сонця, а також інших зір.

Такі моделі є сукупністю параметрів зоряної речовини (температура, тиск, густина тощо) на різних глибинах. За обчисленнями та розрахунком моделі випливає, що температура в центрі Сонця сягає 15 млн градусів. Саме в цій частині й генерується енергія Сонця.

Ми вже знаємо, що сонячна речовина в основному складається з водню. За величезних тисків і температур протони (ядра Гідрогену) рухаються зі швидкостями, що становлять сотні кілометрів за секунду. Усередині Сонця, на відстанях до 0,3 радіуса від центра, створюються умови, сприятливі для термоядерних реакцій перетворення атомів легких хімічних елементів в більш важкі атоми (мал. 4.3). З ядер Гідрогену утворюється другий з легких елементів – Гелій. Для утворення одного ядра Гелію



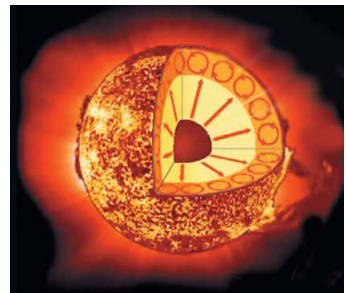
99

Мал. 4.3. Схема протон-протонної реакції: p – протон; n – нейтрон; D – ядро Дейтерію; He^3 , He^4 – ядра ізоотопів Гелію; e^+ – позитрон; ν – нейтрино, γ -кванти

потрібно 4 ядра Гідрогену. На проміжних стадіях утворюються ядра Дейтерію і ядра Тритію. Цю реакцію називають протон-протонною. Під час реакції невелика кількість маси реагуючих ядер Гідрогену втрачається, перетворюючись у величезну кількість енергії, яка й підтримує випромінювання Сонця. Через шари, що оточують центральну частину зорі, ця енергія передається назовні. Усередині від 0,3 до 0,7 радіуса від центра Сонця перебуває зона променистої рівноваги енергії, де енергія поширюється через поглинання та випромінювання γ -квантів.

Народжені в центрі Сонця γ -кванти мають енергію в мільйони разів більшу, ніж енергія квантів видимого світла. Довжина хвилі γ -квантів дуже мала. У процесі поглинання квантів атомами й подальшого їхнього перевипромінювання відбувається поступове зменшення їхньої енергії та збільшення довжини хвилі. Кількість квантів під час цього процесу збільшується. Потужні γ -кванти поступово діляться на кванти з меншою енергією: виникають рентгенівські, ультрафіолетові, видимі й інфрачервоні промені.

У частині останньої третини радіуса Сонця є **конвективна зона**. Тут енергія передається не випромінюванням, а за допомогою конвекції



Мал. 4.4. Енергія передається випромінюванням від ядра Сонця. Головним переносником енергії біля поверхні є конвекція

(змішування, мал. 4.4). Причина виникнення конвекції у зовнішніх шарах Сонця та сама, що й у посудині з водою, що кипить: кількість енергії, що надходить від нагрівача, набагато більша від тієї, що передається теплопровідністю. Тому речовина починає рухатися і сама починає переносити тепло. Конвективна зона практично проходить до видимої поверхні Сонця – **фотосфери**.

4. Джерела енергії. Аналіз хімічного складу земних, місячних порід і метеоритів указує на те, що Сонячна система утворилася близько 4,7 млрд років тому. Сонце, за сучасними даними, існує близько 5 млрд років. За останні 3 млрд років світність його майже не змінилася. Повна енергія Сонця, виділена за цей час, дорівнює $E_{\odot} \approx L_{\odot} t = 3,5 \cdot 10^{43}$ Дж. Поділивши це значення на повну масу Сонця, одержимо, що кожен кілограм сонячної речовини виділив близько $1,8 \cdot 10^{13}$ Дж енергії. Реально це значення ще більше, тому що ми не врахували ще перші 2 млрд років. Жодне хімічне паливо не може забезпечити таке значення внутрішньої енергії, яку виділяє 1 кг сонячної речовини.

У середньому Сонце втрачає приблизно 4 млн тонн водню за секунду. На перший погляд це значення може здатися величезним. Однак воно незначне порівняно з повною масою Сонця. Розрахунки показують, що водню в надрах досить для підтримки світіння на сучасному рівні ще протягом 5 млрд років.

5. Реєстрація сонячних нейтрино. Нейтрино є єдиним видом випромінювання, яке надходить до земного спостерігача з найглибших надр Сонця та зір і несе в собі інформацію про їхню внутрішню структуру та про процеси, що відбуваються там. Сучасні засоби реєстрації нейтрино дають можливість виявляти випромінювання нейтрино лише Сонця і найновіших зір нашої Галактики.

Нейтрино є одним із продуктів протон-протонного циклу. Ці частинки майже без взаємодії здатні проникати крізь товщу зорі, несучи частину енергії безпосередньо з її центральних областей. Нейтрино мають величезну проникаючу здатність, і тому їх важко зареєструвати. Але існують спеціальні нейтринні обсерваторії, які фіксують потоки сонячних нейтрино.

Реєстрація нейтрино має вкрай важливе значення, оскільки саме нейтрино несе інформацію про процеси, що відбуваються в надрах Сонця і подібних до нього зір. Ґрунтуючись на даних про масу, світність і радіус Сонця, можна отримати дані про тиск, густину, температуру та хімічний склад на різних відстанях від центра Сонця. Ці результати дуже важливі для космології. Підтвердження коливань нейтрино разом з попередніми дослідженнями дає змогу фізикам встановити верхню межу на передбачувану масу нейтрино. Об'єднуючи це з очікуваним числом нейтрино у Всесвіті, фізики оцінили, що загальна маса нейтрино приблизно дорівнює загальній масі всіх видимих зір у Всесвіті.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

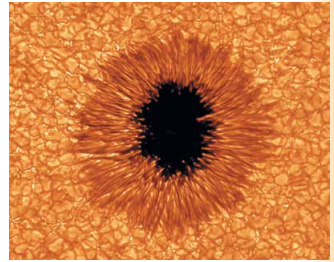
1. Що таке сонячна стала? Як її визначили?
2. Що розуміють під світністю Сонця? Чому вона дорівнює?
3. Які хімічні елементи є переважними для Сонця?
4. Опишіть внутрішню будову Сонця. На які зони умовно ділять надра Сонця? Які процеси відбуваються в кожній із цих зон?
5. За рахунок яких джерел енергії випромінює Сонце? Які при цьому відбуваються зміни з його речовиною?
6. Рівність яких сил підтримує рівновагу Сонця як розпеченої плазмової кулі?
7. Якими способами здійснюється перенесення енергії з надр Сонця до поверхневих шарів?

§ 20. БУДОВА СОНЯЧНОЇ АТМОСФЕРИ

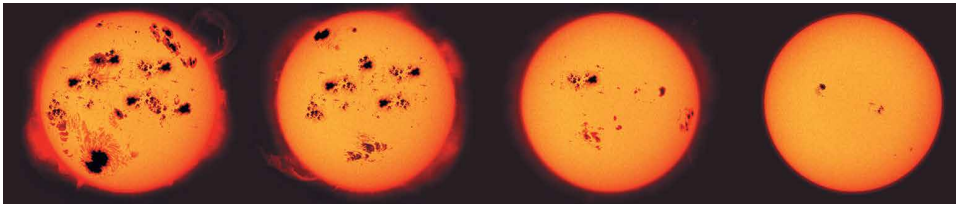
1. Фотосфера. Диск Сонця здається різко окресленим. Це тому, що практично все видиме випромінювання Сонця виходить з дуже тонкого шару – **фотосфери**. Слабке випромінювання більш високих шарів Сонця можна спостерігати під час повного сонячного затемнення, коли диск Місяця повністю закриває фотосферу і стає видно хромосферу й корону. Фотосфера, хромосфера й корона утворюють атмосферу Сонця (мал. 4.2).

Товщина фотосфери не перевищує 300 км. Найбільш помітні об'єкти на Сонці – це темні плями, одну з яких у збільшеному вигляді показано на малюнку 4.5. Діаметри плям іноді сягають 200 тис. км. Зовсім маленькі плями називають **порами**. Уся фотосфера Сонця нагадує сукупність яскравих плям – **гранул**, розділених між собою вузькими і менш яскравими проміжками. Розмір кожної з гранул – приблизно 700 км. Малюнок, який утворюють гранули, постійно змінюється (буквально за 5–10 хв вони встигають з'явитися і зникнути). Плазма у гранулах піднімається вгору, а в міжгранульних просторах опускається вниз. Тому різниця температур гранул і темних проміжків сягає 600 К. Процес постійного виникнення і зникнення гранул у фотосфері називають **грануляцією**.

Картина **сонячних плям** повільніше, але постійно змінюється: плями з'являються, ростуть і розпадаються (мал. 4.6). Час життя груп плям становить 2–3 оберти Сонця навколо своєї осі. Плями холодніші за фотосферу на 2–2,5 тис. градусів, тому на загальному фоні сонячного диска вони темніші.



Мал. 4.5. Одна із сонячних плям і фотосферна грануляція



Мал. 4.6. Динаміка зміни розмірів і форми групи сонячних плям

Сонячні плями зазвичай з'являються групами в межах невеликої області, витягнутої паралельно екватору. За розмірами у групі виділяються дві плями: головна (західна) пляма, що йде попереду за обертанням Сонця, і хвостова. Постійні спостереження сонячних плям показують, що Сонце обертається в напрямку руху планет і площина сонячного екватора нахилена до площини екліптики під кутом $7^{\circ}15'$.

Також виявлено, що кутова швидкість обертання Сонця зменшується від екватора до полюсів. Період обертання Сонця змінюється від 25 діб на екваторі до 30 діб на полюсах. Багаторічні спостереження утворення плям на Сонці показали, що є циклічні коливання числа плям. Іноді їх не буває зовсім, а іноді одночасно виникають десятки великих плям. Середня тривалість такого циклу становить приблизно 11 років.

Крім плям у фотосфері спостерігаються **факели** – яскраві утворення, видимі в білому світлі переважно поблизу краю диска Сонця. Вони мають складну волокнисту структуру, їхня температура на кілька сотень градусів перевищує температуру фотосфери.

Утворення плям і факелів пов'язане з магнітним полем Сонця. Як показують дослідження, індукція магнітного поля Сонця в середньому вдвічі вища, ніж на поверхні Землі, однак у місцях появи сонячних плям вона збільшується в тисячі разів, сягаючи 0,5 Тл. Це призводить до ослаблення конвекції та зменшення температури всередині сонячної плями.

2. Температура фотосфери. У неперервному спектрі Сонця максимальна енергія випромінювання припадає на довжину хвилі $\lambda_{max} = 470$ нм. Тоді за законом зміщення Віна одержуємо температуру: $T = \frac{0,0029}{\lambda_{max}}$, звідки $T = 6170$ К.

3. Зовнішні шари атмосфери: хромосфера та корона. Над фотосферою розміщена **хромосфера** Сонця. Загальна її довжина 10–15 тис. км. Температура у хромосфері з висотою підвищується від 4500 К до кількох десятків тисяч. Випромінювання хромосфери в сотні разів менше від фотосфери, тому для її спостереження застосовують спеціальні методи, що дають змогу виділяти слабе випромінювання. Хромосфера досить неоднорідна і має вигляд довгастих витягнутих язичків або зубчиків – **спікул**, що мають довжину близько 10 тис. км і вигляд палаючої трави. Спікули викидаються з нижньої хромосфери зі швидкістю до 30 км/с; час їхнього життя – кілька хвилин. Одночасно на Сонці існує до 250 тис. спікул.

На краю сонячного диска добре видно **протуберанці** – гігантські арки або виступи, що ніби спираються на хромосферу. Зміна й форма протуберанців (мал. 4.7) тісно пов'язані з магнітним полем Сонця. Протуберанці виділяються на фоні корони, тому що мають більш високу густину і температуру близько 10^4 К. Швидкість руху речовини активних протуберанців сягає 200 км/с, а висота підйому – 40 радіусів Землі.

102



Мал. 4.7. Зміни протуберанця, що спостерігався протягом кількох годин

У хромосфері спостерігаються потужні й швидкі процеси – **спалахи** (мал. 4.8). Ці яскраві утворення існують від кількох хвилин до 3 годин. Зазвичай сонячні спалахи проходять поблизу груп сонячних плям і супроводжуються викидами речовини зі швидкістю до 100 тис. км/с.

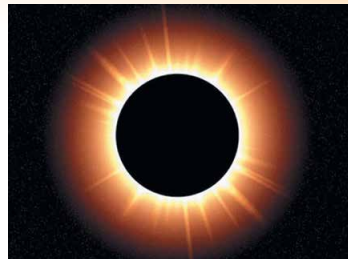
Сонячна корона – найбільш розріджена та гаряча оболонка Сонця, що поширюється від нього на кілька сонячних радіусів і має температуру плазми до 1 млн градусів (мал. 4.9).

Яскравість сонячної корони в мільйон разів менша, ніж фотосфери. Тому спостерігати сонячну корону можна під час повних сонячних затемнень або за допомогою спеціальних телескопів-коронографів. Високу температуру і розрідженість корони підтверджено спектральним аналізом, а також її радіо- і рентгенівським випромінюванням.

Нагрівання корони до високих температур відбувається за рахунок передачі енергії коливальних (конвективних) рухів речовини з фотосфери. Хвилі частотою звукових коливань у короні, де густина речовини



Мал. 4.8. Хромосферний спалах на Сонці



Мал. 4.9. Сонячна корона під час затемнення Сонця

швидко зменшується, стають ударними. Вони швидко згасають, відбувається перетворення механічної енергії хвиль у тепло. Через високу температуру густина корони зменшується повільно, тому зовнішні шари атмосфери Сонця тягнуться аж до орбіти Землі.

4. Магнітні поля та активні утворення. Маса, радіус, кількість енергії, випромінюваної Сонцем, залишаються практично сталими, але на всіх рівнях сонячної атмосфери спостерігаються структурні утворення, що змінюють свої фізичні параметри в часі.

Сукупність нестаціонарних процесів, що періодично виникають у сонячній атмосфері, називають сонячною активністю.

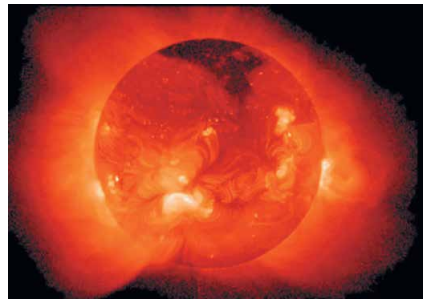
103

Проявом сонячної активності є плями, факели у фотосфері, протуберанці, спалахи й викиди речовини в атмосфері й короні. Місця, де вони виникають, називають **активними областями** (мал. 4.10). Усі активні утворення взаємопов'язані між собою за допомогою магнітних полів і постійно змінюються в активних областях Сонця. Центри активності, зароджуючись на деякій глибині під фотосферою, простягаються у вигляді ярусів далеко в сонячну корону.

У середині XIX ст. швейцарський астроном **Рудольф Вольф** (1817–1893) запропонував характеризувати стан сонячної активності відносними числами плям (названих згодом числами Вольфа): $W = 10g + f$, де g – кількість груп плям; f – загальна кількість усіх плям, які є в цей момент на диску Сонця.

Сонячну активність характеризують також сумарною площею плям, потоком радіовипромінювання в сантиметровому діапазоні хвиль тощо. На початку 11-річного циклу, після мінімуму W , плями з'являються досить далеко від сонячного екватора, на широтах близько 30° . Протягом циклу зона плям спускається до екватора до 15° у максимумі W і до 8° у наступному мінімумі. Далі на високих широтах 30° утворюються плями нового циклу. Ці закономірності стосуються й активних областей у цілому.

Не тільки поява плям, але й сонячна активність у цілому мають 11-річну циклічність (коливання циклів фактично проходить у межах від 7,5 до 16 років).



Мал. 4.10. Сонце в рентгенівських променях. Найяскравіші місця – області прояву сонячної активності



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. З яких оболонок складається атмосфера Сонця?
2. Що таке фотосфера Сонця?
3. Які об'єкти характерні для фотосфери Сонця?
4. Чому сонячні плями темніші, ніж фотосфера?
5. Що розуміють під грануляцією?
6. Що розуміють під хромосферою та короною Сонця?
7. Які явища спостерігають у хромосфері й короні Сонця?

§ 21. ПРОЯВИ СОНЯЧНОЇ АКТИВНОСТІ ТА ЇХНІЙ ВПЛИВ НА ЗЕМЛЮ

1. Інтенсивність сонячного випромінювання поза оптичним

діапазоном. Електромагнітне випромінювання Сонця, максимум якого припадає на видиму частину спектра, не все проходить через земну атмосферу. Вона «прозора» тільки для видимого світла і частково ультрафіолетового та інфрачервоного випромінювань, а також для радіохвиль порівняно вузького діапазону.

В ультрафіолетовому й рентгенівському діапазонах потужність сонячного випромінювання різко зменшується – у сотні тисяч разів порівняно з потужністю випромінювання в оптичному діапазоні. Але якщо в оптичному діапазоні Сонце є постійною зорею, то випромінювання в короткохвильовій області спектра залежить від сонячної активності, збільшуючись або зменшуючись у кілька разів протягом 11-річного сонячного циклу. Сильно зростає потік короткохвильового випромінювання під час хромосферних спалахів. З нижніх шарів хромосфери виходить ультрафіолетове випромінювання, максимальна інтенсивність якого може вдвічі перевищувати мінімальне значення в 11-річному циклі. Основне рентгенівське випромінювання виходить з корони Сонця.

Рентгенівське та ультрафіолетове випромінювання Сонця поглинається у верхніх шарах атмосфери Землі. Воно йонізує гази земної атмосфери. Йонізований шар верхньої атмосфери Землі називають **йоносферою**. Йоносфера Землі повністю визначає поширення коротких радіохвиль між віддаленими пунктами земної поверхні. Під час сильних сплесків сонячного рентгенівського випромінювання через хромосферні спалахи порушується зв'язок на коротких радіохвилях.

Довгохвильове ультрафіолетове випромінювання Сонця здатне проникати на 30–35 км в атмосферу Землі. Там воно розділяє молекули Оксигену O_2 на дві складові – атоми. Вільні атоми, з'єднуючись із молекулами Оксигену, утворюють нову речовину – **озон**, кожна молекула якого складається з трьох атомів Оксигену.

Озоновий шар поглинає практично все ультрафіолетове випромінювання Сонця, залишаючи лише малу частину, що досягає поверхні Землі, і людина має можливість засмагати. Коли товщина озонового шару зменшується, сонячне ультрафіолетове випромінювання може зрости в 1,5–2 рази. Тоді це випромінювання стає дуже активним і може спричинити рак шкіри.

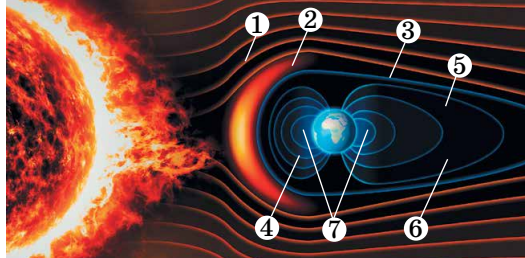
2. Сонячний вітер.

Потік розрідженої плазми, що радіально поширюється від Сонця вздовж ліній напруженості магнітного поля і заповнює собою міжпланетний простір, називають **сонячним вітром**.

У його складові входять протони, електрони, а також α -частинки та в незначних кількостях ряд високоіонізованих атомів Оксигену, Сіліцію-

уму, Сульфур, Ферум. Швидкість частинок сонячного вітру збільшується з віддаленням від Сонця. Поблизу Землі швидкість сонячного вітру сягає 450 км/с, а густина становить кілька частинок у кубічному сантиметрі.

Потік сонячної плазми не може перебороти протидію магнітного поля Землі й обтікає його. При цьому утворюється простір – **магнітосфера** (мал. 4.11).



Мал. 4.11. Будова магнітосфери Землі: 1) ударна хвиля; 2) перехідна зона; 3) магнітопауза; 4) магнітосфера; 5) північна пелюстка магнітного хвоста; 6) південна пелюстка магнітного хвоста; 7) плазмосфера

Магнітосфера має краплеподібну форму. З боку Сонця магнітосфера стиснута тиском сонячного вітру. Межа магнітосфери повернена до Сонця і перебуває на відстані в середньому 10–12 радіусів Землі. З протилежного (нічного) боку магнітосфера витягнута подібно до хвоста комети і має довжину близько 6000 радіусів Землі. Зі зміною швидкості та густини частинок сонячного вітру змінюється і форма магнітосфери.

105

3. Сонячно-земні зв'язки. Сонячна активність впливає, у першу чергу, на зовнішні оболонки Землі – магнітосферу та йоносферу. Під час потужних сонячних спалахів частинки можуть розганятися до 100 000 км/с, тобто виникають космічні промені сонячного походження. Під їхнім впливом утворюється окис азоту NO , взаємодіючи з озоном, – активно його руйнує за рахунок реакції $\text{NO} + \text{O}_3 \rightarrow \text{NO}_2 + \text{O}_2$. Після потужних спалахів на Сонці спостерігається зниження вмісту озону в стратосфері над полярними шапками Землі.

За допомогою коронографів, установлених на космічних апаратах, реєструють грандіозні викиди речовини зі збудженої корони Сонця. Згусток відірваної корональної плазми несе всередині себе замкнуту петлю магнітного поля, що називають **корональним викидом маси** (мал. 4.12).

Зіткнення плазмової хмари з магнітосферою Землі спричиняє її сильне збудження. Вплив коронального викиду призводить до виникнення сильних магнітних бур та розігріву й прискорення плазми всередині магнітосфери. При цьому швидкі протони й електрони, зіштовхуючись із молекулами повітря на висоті 100–200 км, йонізують їх і змушують світитися. Під час йонізації повітря на певній частоті починає світитися. У результаті йонізації на Землі, переважно в навколополярних широтах, спостерігаються полярні сяйва (мал. 4.13). За високої геомагнітної активності полярні сяйва з'являються на висоті 300–400 км.

Під час магнітної бурі змінюється електричні поля над поверхнею Землі. Це призводить до виникнення перевантажень



Мал. 4.12. Корональний викид маси



Мал. 4.13. Полярне сяйво

у лініях електропередач (до кількох сотень ампер) та їхнього відключення, до виникнення сильних струмів у трубах газо- і нафтопроводів і до виходу з ладу їхніх систем керування. Також наслідки магнітної бурі позначаються на бортових електронних системах космічних апаратів.

Магнітні бурі спричиняють зміну тиску у тропосфері (нижньому шарі атмосфери Землі), у результаті чого розвиваються циклони.

Уперше ще в 1915 р. **Олександр Чижевський** (1887–1964) звернув увагу на те, що Сонце впливає на біологічні об'єкти та на здоров'я людини. Проана-

лізувавши історичні документи, учений дійшов висновку, що в минулому масові стихійні лиха, соціальні «вибухи» і спалахи епідемій припадали переважно на роки максимумів сонячної активності. На підставі цього вчений спробував передбачати деякі епідемії на 35 років уперед. Його прогнози збулися в сімох випадках з восьми.

Щоб усебічно досліджувати явища, що відбуваються на Сонці, учені проводять безперервні спостереження за Сонцем. Так створено **Службу Сонця**, яка здійснює сукупність заходів у різних астрономічних обсерваторіях світу для систематичного вивчення всіх проявів сонячної активності.

106



ЧИ ЗНАЄТЕ ВИ, ЩО...

- Чижевський є одним із засновників геліобіології. Ця наука, що виникла на стику фізики Сонця та біології, вивчає вплив циклічної активності Сонця на біологічні об'єкти, здоров'я людини й соціальні катаклізми.
- До коливань сонячної активності особливо чутлива нервова система людини. Встановлено, що число хворих різко збільшується у дні підвищеної сонячної активності. Сонячна активність впливає на людину через збурення магнітного поля Землі. Магнітна буря погіршує вироблення мелатоніну в організмі, у корі надниркових залоз стимулюється вироблення величезної кількості кортизолу, який спричиняє стрес. Це явище провокує загальну слабкість організму, а також занепокоєння, тахікардію, звууження артеріальних судин і підвищення артеріального тиску.
- Якщо магнітна буря триває довгий період, то це може призвести до збою біоритмів і спровокувати неврози та порушення гормонального фону.
- Навіть невеликі бурі можуть бути приводом для серйозного нездужання. Лікарі зазначають, що саме в період магнітних бур спостерігається підвищена кількість інсультів, інфарктів та гіпертонічних кризів. Найпоширенішою реакцією на магнітні бурі є посилені головні болі, а також пришвидшення серцевого ритму, виникають запаморочення, зниження активності та безсоння.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Що таке сонячна активність і яка її циклічність? Які прояви сонячної активності спостерігаються в різних шарах атмосфери Сонця?
2. Що таке сонячний вітер? Як він виникає?
3. Які причини походження полярного сяйва? Чому на території України ми не можемо спостерігати полярні сяйва?
4. Наведіть приклади, як використовує сонячну енергію людина. Які переваги має сонячна енергія порівняно з іншими видами енергії?
5. Які причини й наслідки магнітних бур на Землі? Який їхній вплив на живі організми?



ПРАКТИЧНА РОБОТА № 2

Візуально-телескопічні спостереження Сонця

Мета роботи: ознайомитися з астрономічними способами орієнтації на місцевості за Сонцем, визначенням географічних координат; виглядом Сонця й основних об'єктів його атмосфери (сонячних плям, факельних полів, спалахів); правилами безпеки життєдіяльності під час телескопічних спостережень Сонця.

Обладнання: «Короткий астрономічний календар», «Шкільний астрономічний календар», шкільний телескоп з діафрагмою і сонячними світлофільтрами; екран; спектроскоп (дифракційні ґратки); сітки для спостереження Сонця; годинник, олівець, папір.

Теоретичні відомості

УВАГА! Спостерігаючи Сонце, НЕ можна дивитися на диск Сонця неозброєним оком і в телескоп без спеціального світлофільтра! Використовувати саморобні світлофільтри неприпустимо! Якщо немає спеціального сонячного світлофільтра, то спостерігати Сонце слід тільки на екрані.

Під час проектування зображення Сонця на екран потрібно через кожні 5 хв робити перерви у спостереженні на 2–3 хв, щоб не тріснули лінзи окуляра. Так само потрібно робити під час роботи з окулярними світлофільтрами.

Під час спостережень Сонця найзручніше застосовувати об'єктивний світлофільтр у поєднанні з діафрагмою: він набагато краще захищає телескоп від перегрівання і не перегрівається сам.

Якщо є можливість проводити спостереження із затемненого приміщення (класної кімнати з темними шторами на вікнах тощо), то цим потрібно скористатися. Перед початком спостереження приміщення слід провітрити, відкривши вікна на 15–20 хв, щоб звести до мінімуму повітряні потоки, що виникають від різниці температур усередині й зовні приміщення.

Пригадайте методи й особливості астрономічних спостережень, телескопи, фізичну природу Сонця, орієнтацію на місцевості та визначення географічних координат за спостереженнями Сонця.

Залежно від цілей спостереження, рекомендується застосовувати різні збільшення. Під час загального огляду сонячної поверхні слід застосовувати окуляр, що дає збільшення в 30–40 разів; під час детального вивчення фотосфери – максимальне збільшення у 60–80–120 разів; під час спектральних спостережень і фотографування Сонця в головному фокусі телескопа окуляри не потрібні.

Порядок проведення спостереження

1. Задіафрагмуйте об'єktiv телескопа до відносного отвору $1/30$ – $1/40$. Установіть окуляр зі збільшенням 30–40 разів і сонячний екран.

2. Наведіть телескоп на Сонце. Зручніше всього зробити це по тіні телескопа, яка при правильному наведенні матиме круглу форму труби і мінімальні розміри. Спроектуйте одержане зображення на екран, на білий аркуш паперу і сфокусуйте зображення у круг діаметром 10 см. Найзручніше здійснювати фокусування за краєм сонячного диска, який повинен представляти ідеально чітку лінію.

3. Зверніть увагу на сонячні плями, факельні області і, якщо пощастить, хромосферний спалах.

4. Зверніть увагу на потемніння сонячного диска по краях як свідчення газової (плазмової) природи Сонця.

5. Установіть напрямок добової паралелі. Для цього позначте олівцем послідовні зміни положення якої-небудь плями при нерухомій трубці і проведіть через ці точки пряму.

6. Плавно зміщуючи трубу за Сонцем, щоб зображення його не виходило за межі 10 см круга, позначте олівцем положення груп плям і окремих плям, факельних полів і спалаху.

7. Підвищіть збільшення телескопа до максимально можливого для даних погодних умов (60×–80×). На екрані в затемненому приміщенні стане видно сонячну грануляцію; дуже красивий вигляд мають плями: ядро малинове, півтінь фіолетова, а сама поверхня Сонця блідо-рожева. Якщо спостереження проводяться на вулиці, зображення буде неяскравим і менш контрастним.

8. Одягніть на об'єктив (вставте в окуляр) світлофільтр, зніміть екран і продовжте візуальні спостереження, безпосередньо через окуляр.

9. Замалюйте при максимальному збільшенні зовнішній вигляд, форму і деталі будови факельних полів, плям і груп плям.

10. Зніміть окуляр, приєднавши на його місце шкільний спектроскоп. Спроектуйте зображення спектра на білий папір. Замалюйте основні лінії спектра (лінії водню, гелію та йонізованого кальцію). Замість спектроскопа в навчальних спектральних спостереженнях можуть використовуватися дифракційні ґратки, що мають значно менші розміри і масу при майже такій самій роздільній здатності, як у спектроскопа.

Оформлення одержаних результатів

1. Проведіть загальний аналіз роботи.

2. Визначте сонячний екватор та осі обертання.

108

3. Користуючись сіткою, визначте, на якій широті містяться плями та їхні приблизні розміри.

4. Визначте рівень сонячної активності, розрахувавши число Вольфа за формулою: $W = 10g + f$, де g – кількість груп плям; f – кількість усіх плям.

Оформте результати спостережень, при цьому у звіт перенесіть положення факельних полів, груп плям і окремих плям.

Контрольні запитання до роботи

1. Опишіть внутрішню будову Сонця.

2. З яких оболонок складається атмосфера Сонця?

3. Що таке фотосфера Сонця? Які об'єкти характерні для фотосфери Сонця?

4. Чому сонячні плями темніші, ніж фотосфера?

5. Що розуміють під грануляцією?

6. Що розуміють під хромосферою та короною Сонця? Які явища спостерігаються у хромосфері й короні Сонця?

7. У якому стані перебуває речовина Сонця? Як ви це уявляєте?



РОЗВ'ЯЗУЄМО РАЗОМ

Задача 1. Сонце обертається навколо своєї осі в тому самому напрямку, як і Земля, тобто із заходу на схід. Яким ми бачимо це обертання, спостерігаючи із Землі?

Відповідь. З погляду земних спостерігачів і земних орієнтирів Сонце обертається навколо своєї осі зі сходу на захід проти годинникової стрілки, як і Земля.

Задача 2. Які явища характерні для Землі і Сонця в період високої сонячної активності?

Відповідь. Для Сонця: велика кількість сонячних плям (у фотосфері), спалахів (у хромосфері) і протуберанців (у короні). Посилений сонячний вітер. Для Землі: підвищена кількість та інтенсивність полярних сьвів і збурень геомагнітного поля (магнітних бур).



ЗАДАЧІ ТА ВПРАВИ

4.1. Сонце називають жовтою зорею, тоді як для більшості людей воно має білий колір. Як пояснити це протиріччя?

4.2*. За допомогою третього узагальненого закону Кеплера визначте масу Сонця.

4.3*. На скільки зменшується за 1 рік маса Сонця внаслідок термоядерних реакцій?

4.4. Що знижує температуру всередині сонячних плям?

4.5. Яке явище астрономи називають сонячною активністю?

4.6. Які процеси на Сонці можуть суттєво впливати на стан земної атмосфери?

4.7. Чому Сонце на горизонті, коли воно сходить і заходить, має червоний колір?

4.8. Коли Сонце заходить, його яскравість зменшується і тоді неозброєним оком можна побачити сонячні плями. Обчисліть мінімальний діаметр плями, яку ще можна побачити без оптичних приладів.

4.9. Як земна атмосфера впливає на проходження різних видів сонячного випромінювання до поверхні Землі?

4.10. Чому на Землі часто спостерігається порушення зв'язку на коротких радіохвилях?

4.11. Яка роль озонового шару в атмосфері Землі? Як активність Сонця може впливати на товщину озонового шару Землі?

4.12. Що таке сонячний вітер? Як він виникає?

4.13. Що називають магнітосферою Землі? Який вплив на неї робить сонячний вітер?

4.14. Яка природа коронального викидання маси і які наслідки при цьому виникають?

4.15. Які причини походження полярних сьйв? Чому на території України ми не можемо спостерігати полярні сьйва?

4.16. Наведіть приклади використання сонячної енергії. Які переваги має сонячна енергія порівняно з іншими видами енергії?

4.17. При яких процесах на Сонці виникають корпускулярні потоки й космічні промені?

4.18. Які причини й наслідки магнітних бур на Землі? Як вони впливають на живі організми?

109



ПЕРЕВІР СВОЮ КОМПЕТЕНТНІСТЬ

Контрольні запитання

1. Що є джерелом енергії Сонця?
2. Опишіть будову Сонця.
3. Схарактеризуйте температурний режим Сонця.
4. Які процеси на Сонці можуть суттєво впливати на стан земної атмосфери?

Що я знаю і вмію робити

● Я вмію розв'язувати астрономічні задачі

1. Горизонтальний кут, який виміряли під час сходу Сонця, дорівнював 120° . Визначте, коли зійшло та зайшло Сонце і яка тривалість дня.
2. Визначте час сходу та заходу Сонця і тривалість дня, якщо горизонтальний кут, який було виміряно під час сходу Сонця, становив 80° .
3. Визначте, о котрій годині зійшло та зайшло Сонце, якщо день тривав 12 год 20 хв.

● Я вмію проводити астрономічні спостереження

4. Підрахуйте загальну кількість сонячних плям та намалюйте їхнє розміщення на диску Сонця. Зверніть увагу, що плями часто з'являються

парами. Через кілька днів повторіть спостереження, і ви помітите обертання Сонця навколо осі – плями змістилися. Кількість плям за цей час теж може змінитися. **Увага! Спостерігаючи Сонце, не можна дивитися на диск Сонця неозброєним оком і в телескоп без спеціального світло-фільтра!**



ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ

1. Сонячна стала визначає...

- А кількість енергії, що випромінює Сонце за рік
- Б кількість енергії, що випромінює Сонце за 1 с
- В температуру Сонця
- Г кількість енергії, яку отримує вся поверхня Землі за одиницю часу
- Д енергію, яку отримує 1 м² поверхні Землі за 1 с, якщо сонячні промені падають перпендикулярно до поверхні

2. Для визначення світності Сонця потрібно знати...

- А радіус Сонця
- Б радіус Землі
- В відстань від Землі до Сонця
- Г температуру на поверхні Землі
- Д температуру на поверхні Сонця

3. Які із цих хімічних елементів найпоширеніші на Сонці?

- А Оксиген і Ферум
- Б Гідроген і Гелій
- В Гідроген і Оксиген
- Г Нітроген і Оксиген
- Д Ферум і Нітроген

4. У результаті якого процесу виділяється енергія в надрах Сонця?

- А ядерної реакції
- Б гравітаційного стиснення
- В термоядерної реакції
- Г горіння водню
- Д падіння метеоритів

5. Грануляція у фотосфері утворюється в результаті того, що...

- А корона дуже гаряча
- Б енергія передається конвекцією
- В плями дуже холодні
- Г випромінюються нейтрино
- Д на поверхні Сонця є хвилі

6. Сонце називають жовтою зорею, тоді як для більшості людей воно має білий колір. Як пояснити це?

7. Що знижує температуру всередині сонячних плям?

8. Яке явище астрономи називають сонячною активністю?

9. Які процеси на Сонці можуть суттєво впливати на стан земної атмосфери?

10. Що є джерелом енергії Сонця?

11. Обчисліть, яку сонячну енергію зміг би поглинати за 1 год дах вашого будинку опівдні.

12. Які екологічно чисті джерела енергії можна запропонувати для використання в населеному пункті, де розташовано ваш навчальний заклад?

Розділ 5

ЗОРІ. ЕВОЛЮЦІЯ ЗІР

Існують поодинокі, подвійні, кратні зорі, змінні зорі різних типів, нові й наднові, надгіганти і карлики, зорі різних розмірів, світностей, температур і густин. Чи створюють вони хаос фізичних характеристик? У цьому розділі ви дізнаєтесь так це чи ні.

§ 22. ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗІР

1. Видима зоряна величина. При першому ознайомленні із зоряним небом ми розглядали поняття «зоряна величина» m . Ви знаєте, що зорі 1-ї зоряної величини створюють у 2,5 раза більшу освітленість (точніше, у 2,512 раза), ніж зорі 2-ї зоряної величини, які, у свою чергу, дають світлові потоки у 2,5 раза більші, ніж зорі 3-ї зоряної величини і т. д. Таким чином, за інтервал в одну видиму зоряну величину (позначають 1^m) прийнято відношення освітленостей (E) в 2,512 раза. Це число обрано для зручності так, щоб його десятковий логарифм точно дорівнював 0,4, а інтервал 5^m відповідав відношенню в 100 разів. У вигляді формули ці

111

відношення записав **Норман Погсон** (1829–1891): $\frac{E_1}{E_2} = 2,512^{m_2 - m_1}$.

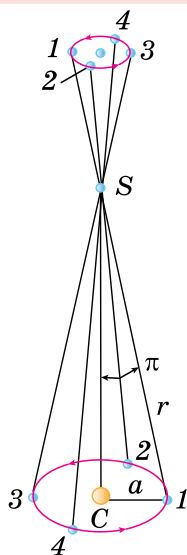
Вимірюючи за допомогою фотометра відношення блиску зір, можна визначити різницю зоряних величин за формулою Погсона. Нульове значення вибирають умовно. При цьому узгоджено, щоб стандартна зоря 1-ї зоряної величини (середня з 20 найяскравіших зір) давала б у 100 разів більше світла, ніж зоря 6-ї зоряної величини, що ще може сприйняти людське око.

Видима зоряна величина Місяця в повні дорівнює $-12,7^m$, а у фазі першої чверті становить $-9,0^m$. За формулою Погсона можемо знайти, що освітленість Місяця в повні ($E_{\text{п}}$) більша від освітленості Місяця у фазі першої чверті (E_1) у 30 разів: $\frac{E_{\text{п}}}{E_1} = 2,512^{m_1 - m_2} = 2,512^{-9+12,7} = 2,512^{3,7} \cong 30$.

Видиму зоряну величину Сонця визначив **Вітольд Цераський** (1849–1925). Її значення $-26,8^m$. Шкала зоряних величин дає змогу виражати в зоряних величинах блиск слабких світил, невидимих неозброєним оком. У наш час найбільші телескопи з діаметром дзеркал 8–10 м і сучасною прийомною апаратурою дають змогу реєструвати об'єкти до 28-ї зоряної величини.

2. Визначення відстаней до зір. Учені давно припускали, що зорі мають таку саму фізичну природу, як і Сонце. Через величезні відстані диски зір не видно навіть у сильні телескопи. Щоб порівнювати зорі між собою та із Сонцем, потрібно знайти методи визначення відстаней до них.

Основним методом є **метод паралактичного зсуву зір**, тому що радіус



Мал. 5.1. Паралактичний зсув зорі протягом року: C – Сонце; S – зоря; a – піввісь земної орбіти; π – річний паралакс

Землі занадто малий порівняно з відстанню до зір. Ще Коперник розумів, що, відповідно до його геліоцентричної системи, близькі зірі на фоні далеких зір повинні описувати еліпси в результаті річного руху Землі навколо Сонця. Припущене переміщення близької зірі на фоні дуже далеких зір відбувається по еліпсу з періодом 1 рік і відображає рух спостерігача разом із Землею навколо Сонця (мал. 5.1). Положення Землі на орбіті та видиме із Землі положення зорі на небі на малюнку позначено однаковими цифрами.

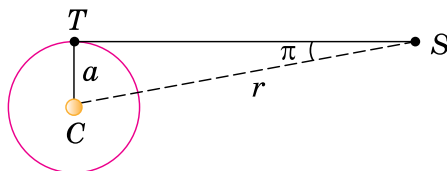
Малий еліпс, описаний зорею, називають **паралактичним еліпсом**. У кутовій мірі більша піввісь цього еліпса дорівнює значенню кута, під яким із зорі видно більшу піввісь земної орбіти, перпендикулярну до напрямку на зорю. Цей кут називають **річним паралаксом** (π). Паралактичне зміщення зір є незаперечним доказом обертання Землі навколо Сонця.

Відстані до зір визначають за їхнім річним паралактичним зміщенням, що обумовлене переміщенням спостерігача (разом із Землею) по земній орбіті.

З малюнка 5.2 видно, що якщо $CT = a$ є середнім радіусом земної орбіти, $SC = r$ – відстань до зорі S від Сонця C , а кут π – річний паралакс зорі, то

$$r = \frac{a}{\sin \pi}.$$

Якщо річні паралакси зір оцінюються десятковими частками секунди, а 1 радіан дорівнює $206\,265''$, то відстань до зорі можна визначити із співвідношення $r = \frac{206265''}{\pi''}$ а. о.



Мал. 5.2. Річний паралакс зорі: C – Сонце; S – зоря; T – Земля

Під час вимірювання відстаней до зір астрономічна одиниця занадто мала. Тому для зручності визначення відстаней до зір в астрономії застосовується спеціальна одиниця довжини – **парсек** (пк), назва якої походить від слів «паралакс» і «секунда».

Парсек – це відстань, з якої середній радіус земної орбіти (рівний 1 а. о.), перпендикулярний до променя зору, видно під кутом $1''$ (одна кутова секунда).

Відповідно до останньої формули $1 \text{ пак} = 206\,265 \text{ а. о.} = 3,086 \cdot 10^{13} \text{ км}$. Отже, відстань до зір у парсеках буде визначатися виразом: $r = \frac{1}{\pi''} \text{ пак}$.

В астрономічних одиницях зазвичай виражаються відстані до тіл Сонячної системи. Відстані до небесних тіл, що перебувають за межами Сонячної

системи, зазвичай виражаються в парсеках, кілопарсеках ($1 \text{ кпк} = 10^3 \text{ пк}$) і мегапарсеках ($1 \text{ Мпк} = 10^6 \text{ пк}$), а також у світлових роках ($1 \text{ св. р.} = 9,46 \cdot 10^{12} \text{ км} = 63\,240 \text{ а. о.} = 0,3067 \text{ пк}$, $1 \text{ пк} = 3,26 \text{ св. р.}$).

Світловий рік – відстань, яку проходить електромагнітне випромінювання (світло) у вакуумі за 1 рік.

Нижня межа вимірювання паралаксів не перевищує $0,005''$, що дає змогу визначати відстані не більші за 200 пк . Відстані до більш далеких об'єктів визначаються менш точно й іншими методами.

3. Абсолютна зоряна величина. Світність зір. Видимий блиск зір не характеризує їхнього реального випромінювання. Він визначається двома факторами: дійсним випромінюванням зорі та відстанню до неї. Сонце, наприклад, набагато ближче до Землі, ніж будь-яка інша зоря, тому воно є найяскравішим світилом на небі. Отже, для порівняння дійсного блиску зір потрібно обчислювати їхню зоряну величину на певній однаковій відстані. За таку однакову (або стандартну) відстань прийнято 10 пк . Видиму зоряну величину, яку мала б зоря, якби перебувала від нас на відстані 10 парсеків , називають **абсолютною зоряною величиною**.

Нехай видима зоряна величина зорі на відстані r дорівнює m , а освітленість, створювана цією зорею, – E . За означенням, видима зоряна величина з відстані $r_0 = 10 \text{ пк}$ буде дорівнювати абсолютній зоряній величині M ,

а E_0 – освітленість (або випромінювання) зорі з відстані 10 пк . Тоді, використовуючи формулу Погсона, можемо записати: $\frac{E}{E_0} = 2,512^{M-m}$.

113

З фізики відомо, що освітленості, створювані одним джерелом випромінювання, обернено пропорційні квадратам відстаней до нього: $\frac{E}{E_0} = \frac{r_0^2}{r^2}$.

Підставляючи це рівняння в попереднє, одержимо, що $2,512^{M-m} = \frac{100}{r^2}$.

Прологарифмувавши цю рівність і спростивши, одержимо: $M = m + 5 - 5 \lg r$, враховуючи, що $r = \frac{1}{\pi''}$, це рівняння можна записати так: $M = m + 5 + 5 \lg \pi''$.

За цією формулою обчислимо абсолютну зоряну величину Сонця. Відстань до Сонця $r = 1 \text{ а. о.} = 1 : 206\,265 \text{ пк}$; видима зоряна величина Сонця дорівнює $-26,8^m$. Після підстановки цих значень у формулу одержимо, що $M_{\odot} = -26,8^m + 5^m + 26,6^m = 4,8^m$. Це означає, що із стандартної відстані 10 пк Сонце має вигляд слабкої зорі майже 5-ї зоряної величини.

Абсолютні зоряні величини зір коливаються від -9^m до 19^m , тобто відрізняються на 28^m одна від одної або за освітленістю в 160 млрд разів.

Знаючи абсолютну зоряну величину зорі, можна обчислити дійсне загальне випромінювання зорі або її світність.

Світністю L називають повну енергію, випромінювану зорею за 1 с .

Світність зорі частіше виражають у світностях Сонця, також її можна виразити у ватах. Нагадаємо, що світність Сонця – $3,85 \cdot 10^{26} \text{ Вт}$.

Зорі-надгіганти з абсолютною зоряною величиною $M = -9^m$ мають потужність випромінювання більшу в 330 тис. разів від Сонця, а неяскараві зорі з абсолютною зоряною величиною $M = 19^m$ випромінюють світло в 480 тис. разів слабше від Сонця.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Що розуміють під річним паралаксом зорі?
2. Що таке парсек і світловий рік?
3. Чим відрізняється абсолютна зоряна величина від видимої зоряної величини?
4. Як можна визначити абсолютну зоряну величину зорі, якщо відомо відстань до неї або річний паралакс?
5. Що розуміють під світністю зорі? Яка світність Сонця?
6. Яка залежність існує між світністю зорі і її абсолютною зоряною величиною?
7. Якими способами можна визначити відстань до зір? Які одиниці використовуються для визначення відстані до зір і яке співвідношення між ними?

§ 23. ТЕМПЕРАТУРА ТА РОЗМІРИ ЗІР. ЗОРІ ТА ЇХНЯ КЛАСИФІКАЦІЯ. ЗВИЧАЙНІ ЗОРІ

1. Температура зір. Будемо вважати, що зорі випромінюють як абсолютно чорні тіла – тіла, які цілком поглинають промені (усіх довжин хвиль), що падають на них. Температуру T поверхні (фотосфери) зір можна визначити, скориставшись законом Стефана–Больцмана, так само, як

114

ми це вже робили, визначаючи температуру Сонця: $T = \sqrt[4]{\frac{L}{4\pi R^2 \sigma}}$, де $\sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – стала Стефана–Больцмана.

Визначену таким методом температуру називають **ефективною температурою**. Однак цей метод застосовується обмежено, тому що досить точне значення радіусів визначено приблизно для кількох десятків яскравих гігантських зір.

Температури зір дуже різняться. Холодні червоні зорі мають температуру близько 3000 К. Наше Сонце з температурою фотосфери 6000 К належить до жовтих карликів. Температура гарячих зір сягає 50 000 К. Основна частина випромінювання гарячих зір припадає на ультрафіолетову частину спектра, і ми їх бачимо як зорі блакитних кольорів. Найбільш гарячими є молоді зорі типу Вольфа–Райе, температури фотосфер яких дуже високі: від 60 000 до 100 000 К.

2. Спектральна класифікація зір. Зорі відрізняються великою розмаїтістю, однак серед них можна виділити окремі групи, що мають загальні властивості. При першому ознайомленні із зоряним небом видно, що зорі відрізняються за кольорами. Особливо це помітно, коли розглядати їхній спектр. Найважливіші розходження спектрів зір полягають у кількості та інтенсивності спостережуваних спектральних ліній, а також у розподілі енергії в безперервному спектрі. З урахуванням видів спектральних ліній і їхньої інтенсивності побудовано **спектральну класифікацію зір**, яку було затверджено у 20-х рр. XX ст.

У Гарвардській обсерваторії (США) було розроблено класифікацію спектрів зір, у якій послідовність спектральних класів позначається великими літерами латинського алфавіту. Розходження всередині кожного класу додатково підрозділяють на 10 підкласів – від 0 до 9. Наприклад, Сонце належить до спектрального класу G2.

Ця послідовність спектральних класів відображає зменшення температури атмосфер (фотосфер) зір від класу O до класу L. Спектральна послідовність одночасно є й колірною: зорі класу O мають блакитний колір, класу B – блакитно-білий, A – білий тощо (мал. 5.3).

O	B	A	F	G	K	M	L
---	---	---	---	---	---	---	---

Мал. 5.3. Спектральна класифікація зір

Хімічний склад атмосфер більшості зір майже однаковий. Зовнішні шари зір складаються з воднево-гелієвої суміші з дуже малою добавкою більш важких елементів. Наприклад, аналогічно до Сонця інші зорі містять у своїх атмосферах 73 % водню, 25 % гелію та 2 % усіх інших елементів.

Розходження у спектрах зір визначаються, головним чином, розходженнями температури. У фотосферах холодних зір можуть існувати найпростіші молекули. Тому характерними деталями спектрів зір класів *M* і *L* є широкі смуги поглинання молекул, наприклад CrH . За більш високих температур молекулярні сполуки розпадаються. У таких спектрах пропадають спектральні смуги молекулярних сполук, проте з'являються лінії, що відповідають нейтральним металам. Таким чином, спектральна класифікація зір – це температурна класифікація зоряних спектрів, що ґрунтується на оцінках відносної інтенсивності й вигляду спектральних ліній. У наш час спектральною класифікацією охоплено понад 500 тис. зір.

3. Розміри зір. Лінійний радіус R зорі можна визначити, якщо відомо її кутовий радіус ρ'' і відстань до зорі r або річний паралакс π'' за формулою $R = r \sin \rho''$. Якщо $r = \frac{205265''}{\pi''}$ а. о., а для кутового радіуса $\sin \rho'' = \frac{\rho''}{205265''}$, то $R = \frac{\rho''}{\pi''}$ а. о.

115

Лінійні радіуси зір прийнято виражати в радіусах Сонця. У радіусах Сонця 1 а. о. = $149,6 \cdot 10^6$ км : $(0,696 \cdot 10^6)$ км = 215.

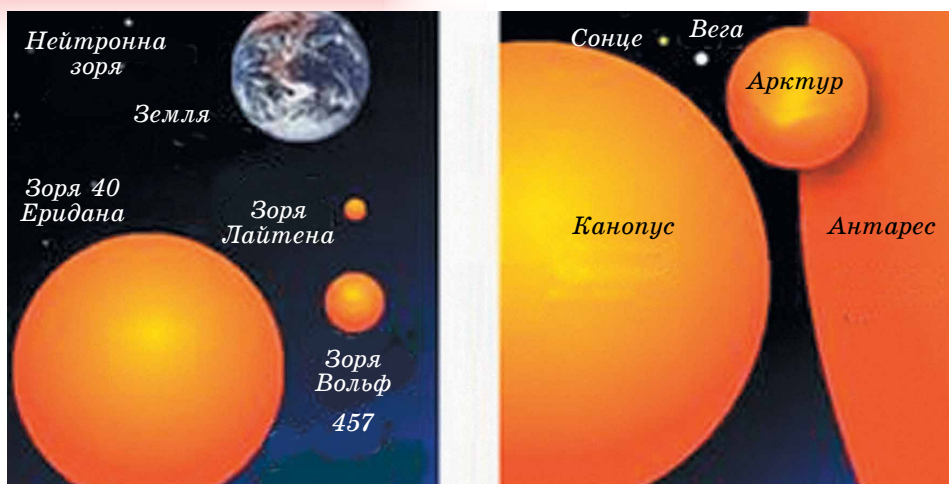
Використовуючи це співвідношення, одержимо формулу для визначення лінійних радіусів зір у радіусах Сонця в такому вигляді: $R = 215 \frac{\rho''}{\pi''}$.

Зорі так віддалені від нас, що їхні кутові розміри менші від межі роздільної здатності найбільших телескопів. Для яскравих близьких зір кутовий радіус визначають за інтерференційною картиною, яка виходить у результаті перекриття зображень зорі, за допомогою двох далеко розміщених телескопів. Наприклад, за допомогою оптичного інтерферометра, що складається з двох сферичних дзеркал діаметром 6,6 м кожне, розміщених на максимальній відстані 180 м одне від одного, вдалося виміряти кутовий діаметр ϵ Оріона. Він виявився рівним $0,00072''$, а якщо річний паралакс зорі дорівнює $\pi'' = 0,0024''$, то $R = 215 \frac{0,00036''}{0,0024''} = 32R_{\odot}$.

Радіуси зір можуть бути обчислені за їхньою потужністю випромінювання (світністю) і температурою. Запишемо значення повної потужності випромінювання для якої-небудь зорі та для Сонця: $L = 4\pi R^2 \sigma T^4$, $L_{\odot} = 4\pi R_{\odot}^2 \sigma T_{\odot}^4$, де L і $L_{\odot}$, R і $R_{\odot}$, T і $T_{\odot}$ – відповідно світності, лінійні радіуси та абсолютні температури зорі й Сонця.

Приймаючи $L_{\odot} = 1$ й $R_{\odot} = 1$, одержимо: $L = R^2 T^4 / T_{\odot}^4$, або остаточно в лінійних радіусах Сонця: $R = \sqrt{L T_{\odot}^2 / T^2}$.

Розміри зір дуже відрізняються: від діаметрів, порівнянних з діаметром орбіти Юпітера (червоні надгіганти), до розмірів планет Сонячної системи (білі карлики) або навіть до кількох кілометрів у нейтронних зір (мал. 5.4).



Мал. 5.4. Розміри деяких зір порівнянних з розмірами Землі (ліворуч) і Сонця (праворуч)



ЧИ ЗНАЄТЕ ВИ, ЩО...

116



Сесілія
Гелена
Пейн-
Гапошкіна

У книжці «Зоряні атмосфери» американка-астроном Сесілія Гелена Пейн-Гапошкіна (1900–1979) уперше розглянула фізичні умови в атмосферах далеких зір шляхом зіставлення спостережуваних інтенсивностей ліній в спектрах зір різних спектральних класів з інтенсивностями, розрахованими для різних температур на основі теорії іонізації і збудження атомів. Вона побудувала першу шкалу температур. Визначила хімічний склад зоряних атмосфер. Встановила, що відносний вміст елементів у більшості зір однаковий і не відрізняється від спостережуваного на Сонці.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Як можна визначити температуру зорі, використовуючи закони Стефана–Больцмана та Віна?
2. За яким принципом здійснюється спектральна класифікація зір?
3. До яких класів належить основна кількість зір? До якого класу і підкласу спектральної класифікації зір належить наше Сонце?
4. З яких хімічних елементів в основному складаються зорі?
5. Від чого залежать кольори зір?
6. У чому головна причина розходження спектрів зір?
7. Які розміри можуть мати зорі порівняно із Сонцем?

§ 24. ПОДВІЙНІ ЗОРІ. МАСА ЗІР. ПЛАНЕТНІ СИСТЕМИ ІНШИХ ЗІР

1. Типи подвійних зір. Спостереження показують, що багато зір у Всесвіті утворюють пари або є членами складних систем. **Подвійними зорями** називають близько розташовані пари зір. Розрізняють оптично- й фізично-подвійні зорі. **Оптично-подвійні зорі** (пари) складаються з досить віддалених одна від одної у просторі зір, які випадково проєктуються на небесну сферу за променем зору. **Фізично-подвійні зорі** є системами близько розташованих у просторі зір, зв'язаних силами тяжіння, що обертаються біля загального центра мас.

Зорі фізично-подвійних пар часто мають різні кольори. Так, Антарес – дуже яскрава червона зоря в сузір'ї Скорпіона – має слабкий зелений (при спостереженні в телескоп) супутник.

Перша, відома ще в давні часи зоряна пара – Міцар (Кінь) і Алькор (Вершник). Міцар – середня зоря ручки ковша сузір'я Великої Ведмедиці, що має видиму зоряну величину $2,2^m$. На кутових відстанях $12'$ від неї розміщена слабка зоря Алькор, зоряна величина якої $4,0^m$. Зоряна пара Міцар і Алькор – приклад оптично-подвійної зорі. Навіть у шкільний телескоп добре видно: Міцар складається з двох дуже близьких зір, які не можна розрізнити неозброєним оком.

Компоненти зоряної пари Міцар *A* і Міцар *B* розміщені один від одного на відстані $14''$ і мають зоряні величини $2,4^m$ і $4,0^m$ відповідно. Зоряна пара Міцар – приклад фізично-подвійної зорі.

Фізично-подвійні зорі, залежно від способу їх спостережень, діляться на **візуально-подвійні зорі** (їхні компоненти можна побачити за допомогою телескопа візуально або сфотографувати), **затемнювано-подвійні зорі** (їхні компоненти періодично затуляють один одного від спостерігача), **спектрально-подвійні зорі** (подвійність проявляється в періодичних зсувах або роздвоєннях ліній їхніх спектрів), **астрометрично-подвійні зорі** (одну зорю, яка впливає на правильний рух сусідньої, не видно).

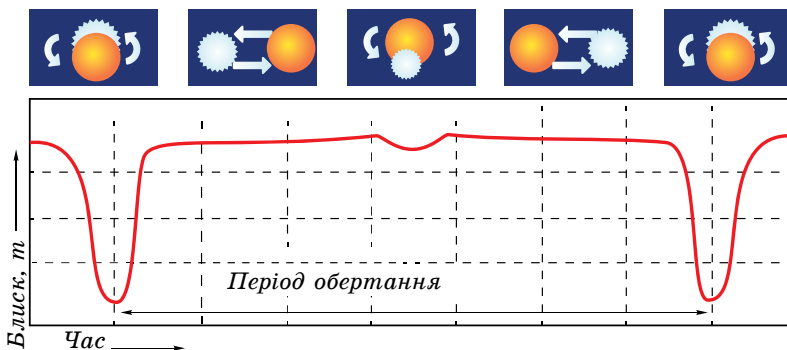
Перший список подвійних зір склав у 1803 р. англійський астроном Вільям Гершель. Цей перелік містив кілька сотень об'єктів.

Періоди обертання компонентів у візуально-подвійних системах мають від кількох років до кількох тисяч років.

Подвійні зорі є окремим випадком кратних зір, що складаються іноді з кількох компонентів. Існують зорі потрійні і навіть більш високої кратності. До кратних зір прийнято зараховувати зорі, що мають менше ніж 10 компонентів. Системи з більшим числом зір називають **зоряними скупченнями**. Подвійність і кратність у зоряному світі – широко розповсюджене явище.

2. Затемнювано-подвійні зорі. Затемнювано-подвійні, або затемнювано-змінні, зорі є тісними парами, що обертаються з періодом від кількох годин до кількох років по орбітах, більша піввісь яких порівнянна із самими зорями. Через ці причини ми не можемо побачити окремо їхні компоненти, тому що кутова відстань між зорями дуже мала. Судити про подвійність системи можна лише за періодичним коливанням блиску.

Якщо промінь зору під час спостереження таких зір і площини їхніх орбіт практично збігаються, то в таких зір виявляється явище затемнень, коли один з компонентів проходить попереду або позаду другого відносно спостерігача. Цю ситуацію пояснює малюнок 5.5, на якому зображено криву зміни



Мал. 5.5. Зміна блиску затемнювано-подвійної зорі

блиску m затемнювано-подвійної зорі, пов'язаної з періодичними затемненнями одного компонента іншим. Значення блиску на графіку належать до відповідних положень одного з компонентів зорі на орбіті. Різницю зоряних величин у мінімумі й максимумі блиску називають **амплітудою**, а інтервал часу між двома послідовними найменшими мінімумами – **періодом змінності**.

Типовим прикладом затемнювано-змінної зорі є зоря β Персея (Алголь), що постійно затемнюється на 9,6 години з періодом 2,867 доби. Падіння блиску в мінімумі в цієї зорі становить $2,3^m$.

3. Спектрально-подвійні зорі. Зорі, подвійність яких установлюється лише на підставі спектральних спостережень, називають **спектрально-подвійними**.

Припустимо, що спостерігач перебуває у площині орбіти подвійної системи, що складається з більш масивної і яскравої зорі A та менш масивної і яскравої зорі B . Кожний з компонентів – A і B , обертаючись навколо центра мас системи, то наближається до спостерігача, то віддаляється від нього. Унаслідок ефекта Доплера в першому випадку лінії у спектрі зорі будуть зміщені до фіолетової області спектра, у другому – до червоної, причому період цих зміщень дорівнює періоду обертання.

Постійне вдосконалення методики визначення зміщення спектральних ліній дало змогу в 1995 р. виявити в зорі 51 у сузір'ї Пегаса супутник масою в половину маси Юпітера. На цей час методом променевих швидкостей у понад 300 зір виявлено планетні системи. Вони одержали назву – **екзопланети**.

118

Екзопланета (від грец. $\epsilon\kappa\omega$ – «поза», «зовні»), або **позасонячна планета**, – планета, що обертається навколо зорі, тобто за межами нашої Сонячної системи.

Планети надзвичайно малі й темні порівняно із зорями, а самі зорі перебувають украй далеко від Сонця (найближча – на відстані 4,22 св. року). Першим намагався розглянути в телескоп планети біля інших зір голландський математик й астроном Крістіан Гюйгенс ще в XVII ст. Однак він нічого не зміг побачити, оскільки ці об'єкти не видно навіть у потужні сучасні телескопи.

У грудні 1995 р. астрономи Мішель Майор і Дідьє Келос із Женевського університету, проводячи спостереження в обсерваторії Верхнього Провансу у Франції, уперше зафіксували екзопланету. За допомогою надточного спектрометра вони виявили, що зоря 51 у сузір'ї Пегаса «погойдується» з періодом ледве більше за чотири земні доби. (Планета, обертаючись навколо зорі, розгойдує її своїм гравітаційним впливом, у результаті чого за допомогою ефекта Доплера можна спостерігати зсув спектра зорі.) Незабаром це відкриття підтвердили й американські астрономи Джеффри Марсі й Пол Батлер. Відкриття в 1995 р. планети, розташованої біля зорі 51 у сузір'ї Пегаса, дало початок зовсім новій галузі астрономії – вивченню позасонячних планет (екзопланет). До цього планети були відомі тільки в одній зорі – нашого Сонця. Для пошуку планет за межами Сонячної системи астрономи за останнє десятиліття обстежили понад 3000 зір, біля деяких зір знайдено по 2, 3 і навіть 4, 5 планет. Більшість з них виявлено з використанням різних непрямих методик виявлення, а не візуального спостереження як з поверхні Землі, так і з космічних обсерваторій.

4. Астрометрично-подвійні зорі. Трапляються такі тісні зоряні пари, коли одна із зір або дуже мала за розмірами, або має малу світність. У цьому випадку таку зорю розглянути не вдається, але виявити подвій-

ність можна. Яскравий компонент буде періодично відхилятися від прямолінійної траєкторії то в один, то в інший бік, начебто по прямій рухається центр мас системи. Такі збурювання пропорційні масі супутника.

Дослідження однієї з найближчих до нас зір Росс 614 (її блиск $11,4^m$ і паралакс $0,25''$) показали, що амплітуда відхилень зорі від очікуваного напрямку сягає $0,36''$. Період обертання зорі відносно центра мас дорівнює $16,5$ року.

На сьогодні відомо понад 5000 затемнювано-змінних зір різних типів.

5. Маса зір. Тривалі спостереження візуально-подвійних зір переконали астрономів, що відносний видимий рух компонентів відбувається по еліпсу й задовольняє закон площин. Із цього випливає, що в подвійних системах обертання зір відбуваються відповідно до законів Кеплера та підкоряються закону всесвітнього тяжіння Ньютона.

За даними спостережень подвійних зір отримано оцінки мас для зір різних типів. Аналіз цих даних привів до таких результатів.

1. Маса зір – у межах від $0,03$ до 60 мас Сонця. Найбільша кількість зір має від $0,4$ до 3 мас Сонця.

2. Існуюча залежність між масами зір та їхньою світністю дає змогу оцінювати маси одиноких зір за їхніми світностями. В інтервалі мас $0,5M_{\odot} \leq M \leq 10M_{\odot}$ світність зорі пропорційна четвертому степеню її маси $L \sim M^4$. При $M > 10M_{\odot}$ показник степеня дорівнює 2 , тобто $L \sim M^2$.

3. Маса зорі в момент її формування є найважливішим параметром, що визначає її наступну еволюцію.

4. Радіуси зір мають досить широкі межі, тому середня густина зір коливається від $5 \cdot 10^{-2}$ до $3 \cdot 10^8$ кг/м³ (порівняйте із Сонцем – 1400 кг/м³).



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

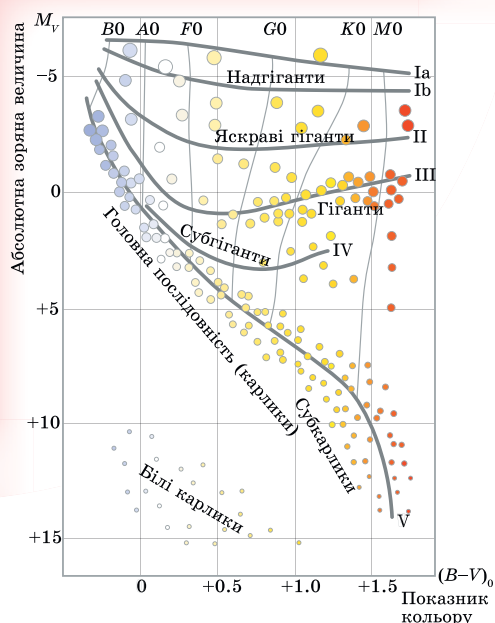
1. Які зорі називають подвійними? Як їх класифікують?
2. Що таке амплітуда й період змінності затемнювано-змінних зір?
3. Поясніть, чому відбувається зміщення ліній у спектрах спектрально-змінних зір.
4. Чим можна пояснити зміну блиску деяких подвійних зір?
5. Хто перший встановив, що подвійні зорі – це системи, компоненти яких зв'язані між собою тяжінням і рухаються за законами Кеплера?
6. Перелічіть види подвійних зір, які ви знаєте.
7. Які зорі існують довше – з малою чи великою масою?
8. Чому в системі з двох зір одна з них світить іноді зовсім незвичайним для одиноких зір кольором: зеленим, синім або блакитним?
9. У яких подвійних зір складові їхнього компонента помітні навіть неозброєним оком?

§ 25. ЕВОЛЮЦІЯ ЗІР. БІЛІ КАРЛИКИ

1. Діаграма «спектр–світність». Існує залежність між основними фізичними характеристиками зір. На основі спостережень визначаються спектральні класи зір, а за відомою відстанню до них – абсолютні зоряні величини або світності зір.

На початку XX ст. незалежно один від одного датський астроном **Ейнар Герцшпрунг** (1873–1967) і трохи пізніше американський астрофізик **Генрі Рассел** (1877–1957) встановили зв'язок між цими характеристиками.

Цю залежність можна представити у вигляді діаграми: по горизонтальній осі відкладається спектральний клас (або температура) зір, а по вертикальній – їхня світність (в абсолютних величинах або в одиницях світності Сонця). Кожній зорі відповідає точка на цій діаграмі. Таку діаграму



Мал. 5.6. Діаграма Герцшпрунга-Рассела

називають **діаграмою Герцшпрунга-Рассела**, або **діаграмою «спектр-світність»** (мал. 5.6).

Зорі на діаграмі не розподіляються випадково по всій її площі, а утворюють кілька груп, названих **послідовностями**. Більшість зір на діаграмі лежить у межах чітко вираженої смуги, що проходить від лівого верхнього до правого нижнього кута, яку називають **головною послідовністю**.

У лівій верхній частині головної послідовності перебувають масивні гарячі зорі спектрального класу *O*, які в десятки тисяч разів перевищують світність Сонця. Такі зорі називають гарячими **надгігантами**. Зі зменшенням температури світність зір зменшується. Потім смуга головної послідовності проходить через область, де перебувають схожі на Сонце зорі класу *G*. І нарешті, головна послідовність опускається до нижньої правої частини діаграми. Тут містяться зорі класу *M* і *L* з малою масою та відносно

низькою температурою. Ці зорі називають **червоними карликами**.

До зір головної послідовності належать добре відомі зорі – Сіріус (α Великого Пса), Вега (α Ліри), наше Сонце. Зорі з відносно низькою температурою фотосфери ($3\text{--}5 \cdot 10^3$ К) і світністю в 100–1000 разів більшою, ніж світність Сонця, утворюють послідовність червоних гігантів. До цієї послідовності належать, наприклад, Арктур (α Волопаса), Альдебаран (α Тельця). У верхній частині діаграми «спектр-світність» розміщується послідовність надгігантів. Це зорі з дуже високою світністю, низькою густиною, у десятки і сотні разів більшими діаметрами, ніж у Сонця. До надгігантів належить зоря Бетельгейзе (α Оріона).

У лівій нижній частині діаграми розташовані гарячі зорі слабкої світності – послідовність **білих карликів**. Їхні розміри близькі до розмірів Землі, а маси близькі до маси Сонця. Тому середня густина білих карликів перевищує густину земних порід у 100 тис. разів. З іншого боку, середня густина зір-надгігантів дуже мала – у тисячі разів менша за густину земної атмосфери. Густина речовини в атмосфері зорі впливає на ширину спектральних ліній. Тому, наприклад, у червоних карликів спектральні лінії ширші, ніж у гігантів і надгігантів. За виглядом спектральних ліній визначається, до якої послідовності належить зоря (головна, карлики, гіганти). За послідовністю оцінюється абсолютна зоряна величина $M = m + 5 - 5 \lg r$, а потім і відстань. Цей метод визначення відстаней називають **методом спектральних паралаксів**.

Серед усіх зір найбільше саме червоних карликів: на 10 млн червоних карликів припадає близько 1 млн білих карликів, 1000 гігантів і лише 1 надгігант.

У Єрксській обсерваторії розроблено двовимірну спектральну класифікацію, у якій кожен спектр зорі враховує особливості спектральних ліній і світність зір. Ця класифікація поділяє всі зорі на кілька класів **світності** (від I до VII, табл. 5.1).

Таблиця 5.1

Клас	Назва	Абсолютні зоряні величини M_V
O	Гіпергіганти	
Ia ⁺	Найяскравіші надгіганти	-10
Ia	Яскраві надгіганти	-7,5
Ib	Нормальні надгіганти	-4,7
II	Яскраві гіганти	-2,2
III	Нормальні гіганти	+1,2
IV	Субгіганти	+2,7
V	Зорі головної послідовності	+4
VI	Субкарлики	+5...+6
VII	Білі карлики	+13...+15

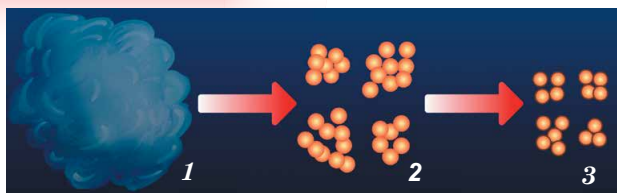
2. Народження зір. Процес зореутворення йде в Галактиці безупинно – з моменту її виникнення. Підтвердженням народження зір у наш час є існування масивних гарячих зір класів O і B, час життя яких не перевищує 10 млн років. Тривалість життя зір становить від мільйонів до десятків мільярдів років. Це час занадто великий, щоб простежити життєвий шлях зір, або їхню еволюцію. Тому основним методом дослідження еволюції зір є побудова **моделей внутрішньої будови зір**. Будуючи модель, задають початкові умови фізичного стану газу: хімічний склад, тиск (густину), температуру, масу. Потім на підставі фізичних законів (газових законів, законів тяжіння) розраховують зміни цих параметрів із часом.

За сучасними даними, зорі утворюються в результаті стиску (гравітаційної конденсації) речовини міжзоряного середовища (мал. 5.7, 1). Зорі народжуються групами з гігантських газопилових комплексів розмірами до 100 пк і масою десятки, а іноді й сотні тисяч сонячних мас. Газ у цих комплексах перебуває в молекулярному стані з температурою близько 10 К.

Під дією гравітаційних сил комплекс стискується, густина його збільшується, і він розпадається на окремі згустки або газопилові хмари (мал. 5.7, 2). У газопиловій хмарі випадково або під дією зовнішніх причин виникають гравітаційно-нестійкі фрагменти, які продовжують стискатися. Зовнішніми причинами, що стимулюють зореутворення, можуть бути зіткнення молекулярних хмар; зоряний вітер від молодих гарячих зір; ударні хвилі, породжені спалахами наднових зір. Якщо маса фрагмента досить велика, то відбувається подальший розпад на окремі фрагменти-згустки (мал. 5.7, 3).

Фрагменти зоряної маси, що стискаються під дією власного тяжіння, називають **протозорями**. При гравітаційному стисканні газ у протозорі розігрівається, і вона починає випромінювати в інфрачервоному діапазоні спектра. Речовина, що оточує ядро протозорі, падає на нього, збільшуючи його масу і температуру. Коли тиск, створюваний випромінюванням зорі, стає досить великий, падіння речовини припиняється. Тиск випромінювання обмежує масу майбутніх зір величиною десятків мас Сонця. Тривалість стадії стискання залежить від маси протозорі: при масі, меншій від сонячної, – сотні мільйонів років, при більшій – сотні тисяч років.

Обертання протозорі відіграє важливу роль у її подальшій еволюції. Часто в протозорі, яка обертається, утворюється навколо центрального



Мал. 5.7. Утворення зір з газопилової хмари

згущення протяжний газопиловий диск, з якого потім утворюється планетна система. Зоря, що формується, наприкінці стадії стискання має значні розміри за ще відносно низької температури поверхні. Стискання протозорі припиняється, коли температура в центрі ядра сягне кількох мільйонів градусів, тоді включаються термоядерні джерела енергії, реакції протон-протонного циклу. Момент початку термоядерних реакцій є моментом народження зорі. У цей час температура та густина внутрішніх шарів стають такими, що сила їхньої пружності може протидіяти вазі зовнішніх шарів. Після початку водневих реакцій і встановлення рівноважного стану зоря потрапляє на головну послідовність діаграми «спектр-світність». Новонароджені зорі з'являються на головній послідовності по всій її довжині (залежно від їхньої маси).

122

3. Еволюційні переміщення. Від маси, у першу чергу, залежить, яку температуру матиме ядро зорі в момент установаження стійкої рівноваги. Що більша маса стискуваного газопилового комплексу, потім протозорі й нарешті зорі, то більшу вагу вищих шарів доводиться витримувати її ядру. Тому потрібна більш висока температура, щоб газовий тиск міг протистояти цій вазі. Спостереження показують, що світність зір пропорційна масі в четвертому степені.

Наймасивніші зорі (розміром 30–50 мас Сонця) породжують найбільш гарячі зорі класу *O*. Температура центральних областей таких зір становить 30–35 млн градусів.

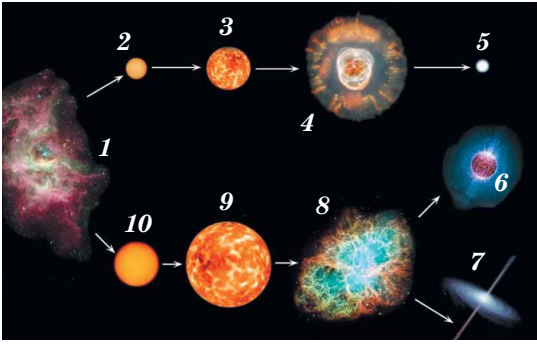
Більшу частину часу зоря перебуває на головній послідовності. Але тому, що запаси водню пропорційні масі, а витрата енергії (світність) пропорційна четвертому степеню маси, водень у масивних зорях вигорає швидше. Час перебування зорі на головній послідовності визначається

залежністю $t = 10^{10} \frac{1}{M^3}$ (років), де M – маса зорі в масах Сонця. За цією

формулою можна підрахувати, що Сонце вичерпає свій запас водневого палива приблизно за 10 млрд років (отже, Сонце, вік якого оцінюється близько 5 млрд років, «прожило» на головній послідовності лише половину свого життя). Зорі, маси яких дорівнюють 10 масам Сонця, вичерпають своє паливо всього за 10 млн років, слабо випромінюючи червоні карлики масою близько 0,5 маси Сонця – за 80 млрд років. Гарячих молодих зір-гігантів спостерігається менше через малий час існування. Тому найбільш заповнена права нижня частина головної послідовності діаграми «спектр-світність».

Після вигорання водню в надрах зорі утворюється гаряче гелієве ядро. Подальша еволюція зорі залежить від маси цього ядра. Якщо вона менша від 1,4 маси Сонця, то під дією гравітаційного стискання гелієве ядро знову розігрівається (температура підвищується до 100 млн градусів). Зовнішні шари зорі при цьому розширюються й охолоджуються. Зоря немов розбухає. Світність її збільшується, а температура знижується. Зоря сходить з головної послідовності й, залежно від маси, стає червоним гігantom (мал. 5.8) або надгігantom.

Атмосфера зорі, яка розростається, поступово віддаляється від ядра, утворюючи **планетарну туманність**. Кінцевою стадією еволюції цих зір є білі



Мал. 5.8. Еволюція зір різної маси: 1 – зоряна туманність; 2 – середня зоря; 3 – червоний гігант; 4 – планетарна туманність; 5 – білий карлик; 6 – нейтронна зоря; 7 – чорна діра; 8 – наднова зоря; 9 – червоний надгігант; 10 – масивна зоря

карлики. **Білий карлик** – компактна зоря масою, що дорівнює приблизно масі Сонця, радіус якої приблизно в 100 разів менший від радіуса Сонця. Густина таких зір більше ніж у 100 тис. разів перевищує густину води.

Стадії еволюції, як і всі зорі, проходить і Сонце. Через 5–8 млрд років воно перетвориться спочатку на червоного гіганта, потім, скинувши оболонку, стане білим карликом. Зорі, які набагато масивніші, ніж Сонце, із часом перетворюються на нейтронні зорі (при масі від 1,4 до 2,5 маси Сонця) або чорні діри (при масі понад 2,5 мас Сонця).



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. За яким принципом будується діаграма «спектр–світність» (діаграма Герцшпрунга–Рассела)?
2. Як на діаграмі «спектр–світність» розміщуються зорі різного розміру?
3. Дайте коротку характеристику зорям: надгіганти, червоні гіганти, білі карлики, червоні карлики.
4. Що розуміють під еволюцією зір?
5. Опишіть загальний процес утворення зір.
6. Що розуміють під класами світності?
7. Які зорі найгарячіші? Найхолодніші?
8. Які зорі розміром із Землю?

123

§ 26. ФІЗИЧНО-ЗМІННІ ЗОРІ. НЕЙТРОННІ ЗОРІ. ЧОРНІ ДІРИ

1. Загальна характеристика змінних зір. Багато зір змінюють свої фізичні характеристики протягом відносно короткого часу. Такі зорі називають **нестационарними**. На відміну від затемнювано-змінних зір вони змінюють свою світність у результаті фізичних процесів, що відбуваються в самих зорях. Тому їх називають **фізично-змінними зорями**. Залежно від характеру процесів, що протікають усередині зір, фізично-змінні зорі бувають пульсуючими та еруптивними.

Пульсуючі змінні зорі – фізично-змінні зорі, у яких відбуваються періодичні коливання блиску (наприклад, цефеїди, зорі типу RR Ліри, міриди).

Еруптивні зорі – фізично-змінні зорі, що проявляють свою змінність у вигляді спалахів, які пояснюються викидами речовини (наприклад, нові й наднові зорі).

Усі змінні зорі мають спеціальні позначення, якщо їм не було присвоєно раніше літер грецького алфавіту. У кожному сузір'ї перші 334 змінні зорі позначаються послідовністю літер латинського алфавіту R, S, T, ... , Z, RR, RS, ... , RZ, SS, ST, ... , ZZ, AA, ... , AZ, QQ, ... з додаванням назви відповідного сузір'я. Наступні змінні, яким не вистачило комбінації цих букв у сузір'ї, позначаються V 335, V 336 і т. д.

2. Пульсуючі змінні зорі. Першу пульсуючу зорю відкрив німецький астроном Давид Фабріціус (1564–1617) у 1596 р. у сузір'ї Кита і назвав Мірою. Період зміни блиску цієї зорі становить 331,6 доби.

Довгоперіодичні змінні зорі (з періодами від кількох тижнів до року і більше; зорі типу Міри Кита) називають **міридами**. Практично всі зорі цього типу – старі червоні гіганти величезних розмірів і великої світності. Амплітуди зміни блиску таких зір можуть сягати десяти зоряних величин.

При еволюційному перетворенні зорі на зорю-гіганта відбувається збільшення її об'єму й зменшення середньої густини речовини. У цей час внутрішня будова зорі змінюється докорінно, що може супроводжуватися порушенням рівноваги між силами гравітаційного притягання й променевого тиску. Це приводить до періодичних коливань об'єму зорі: її оболонка то розширюється, то стискується (повертається до свого колишнього об'єму). Такі періодичні коливання змінних зір називають **пульсаційними**.

Великий клас дуже яскравих змінних зір-гігантів та надгігантів класів *F* й *G* називають **цефеїдами**. Це пульсуючі змінні зорі, блиск яких плавно й періодично змінюється (від 0,5 до 2 зоряних величин). Період зміни блиску становить від 1 до 146 діб. Назва походить від зорі δ Цефея – однієї з найтиповіших для цього класу змінних зір. Вони вже пройшли стадію головної послідовності (де мали спектральний клас *B*), у них розпочалося термоядерне горіння гелію, і вони прямують до стадії червоних надгігантів. Тривалість перебування на цьому шляху становить кілька мільйонів років. За цей час зоря може неодноразово потрапляти до смуги нестабільності на діаграмі Герцшпрунга–Рассела.

За сучасною класифікацією, цефеїди поділяють на: **класичні** (або цефеїди плоскої складової Галактики, типи змінності за класифікацією *GCVS*: *DCep*, *DCepS*, *CepB*); **сферичної складової Галактики** (або змінні типу *W* Діви: *CWa*, *CWb*). Останні відрізняються від класичних цефеїд (з таким самим періодом) меншою світністю: приблизно вчетверо або на $1,5^m$ (тобто для них залежність між періодом та світністю має дещо інший вигляд, ніж для класичних цефеїд).

Одночасно з видимою зоряною величиною в цефеїди змінюється спектр. За зсувом його інтенсивності виявлено, що в цефеїд періодично (з періодом

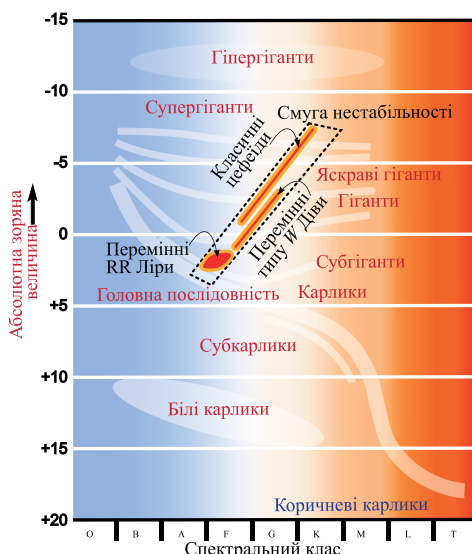
зміни блиску) змінюється температура в середньому на 1500 градусів.

Теоретичні розрахунки та практичні спостереження показують, що тільки зорі-гіганти й надгіганти проходять через стадію цефеїд. Період пульсації зорі залежить від середньої густини її речовини й підкоряється такій закономірності:

$$P = \frac{\text{const}}{\sqrt{\rho}} = \frac{0,12}{\sqrt{\rho}}, \text{ де } P - \text{період пульсації у добах; } \rho - \text{середня густина}$$

(в одиницях середньої густини Сонця). Середня густина речовини цефеїди становить близько 10^{-2} кг/м^3 .

Цефеїди з більшою масою мають більшу світність, більший радіус, але меншу густину і відповідно більший період пульсації, тобто цефеїди мають важливу залежність «період–світність» (мал. 5.9). Ця залежність описується виразом: $M = -1,25 - 3,00 \lg P$,



Мал. 5.9. Залежність «період–світність» цефеїд

де P – період зміни блиску в добах; M – середня абсолютна зоряна величина. Отже, за відомим зі спостережень періодом можна визначити абсолютну зоряну величину або світність зорі. Порівнюючи її зі спостережуваною видимою зоряною величиною, можна визначити відстань до цефеїди. Велика світність і змінність блиску дають змогу виявляти цефеїди аж до відстаней 20 Мпк. Їх спостерігають у найближчих галактиках, визначаючи таким способом відстані до цих зоряних систем.

Цефеїди образно називають маяками Всесвіту. На цей час в нашій Галактиці відомо понад 800 класичних цефеїд, а їхня очікувана кількість перевищує 6000. Також відомо кілька тисяч їх у Магеланових Хмарах та інших галактиках. Телескоп «Габбл» вирізнив кількадесят класичних цефеїд у галактиці NGC 4603, відстань до якої становить 100 млн світлових років.

3. Нові зорі. Зорі, блиск яких раптово збільшується в тисячі й мільйони разів за кілька діб, після чого їхній блиск слабшає до початкового блиску протягом року, називають **новими зорями**. Цей термін не означає, що зоря народилася. Так називають зорі, які раніше були тьмяними, а потім раптово їхній блиск збільшився. Наприклад, одна з нових зір, що спалахнула в червні 1918 р., збільшила свій блиск за 4 дні з 11-ї до 0,5-ї зоряної величини (тобто в 40 тис. разів), а потім прийняла попереднє значення блиску за період близько 1,5 року. Спостереження показують, що новими зорями, що спалахують, є гарячі білі карлики спектральних класів $O-B$, які мають абсолютну зоряну величину порядку 4^m-5^m . Під час спалаху ці зорі збільшують свій блиск на 7^m-16^m зоряних величин. За час спалаху нова зоря випромінює енергію близько 10^{38} Дж (така енергія випромінюється Сонцем приблизно за 100 тис. років!).

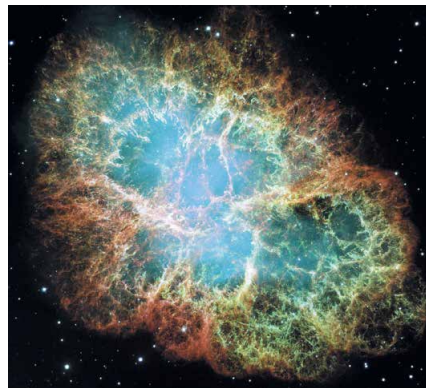
Причиною вибуху нових зір є обмін речовини між компонентами тісних подвійних пар, до яких належать усі детально досліджені колишні нові зорі. Часто нові зорі спалахують неодноразово. Якщо спалах повторюється, таку зорю називають **повторною новою**.

4. Наднові зорі. Наднові зорі – одне з грандіозних і захоплюючих космічних явищ. Надновими називають зорі, що спалахують подібно до нових і досягають у максимумі абсолютної зоряної величини від -18^m до -19^m . Окремі наднові зорі в максимумі блиску перевищують світність Сонця в десятки мільярдів разів, досягаючи абсолютної зоряної величини $M = -20^m$ ÷ -21^m .

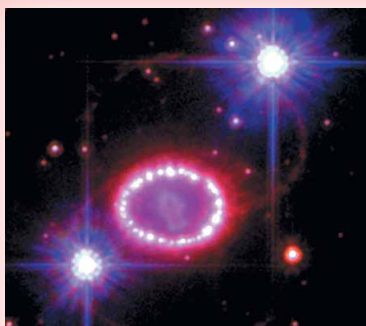
У китайських літописах згадується про раптову появу в 1054 р. у сузір'ї Тельця «зорі-гості», яку спостерігали китайські та японські астрономи, що здавалася яскравішою від Венери. Її було видно навіть удень. Через 2 місяці ця зоря почала згасати, а ще через кілька місяців зовсім зникла з поля зору.

У наш час за допомогою досить потужних телескопів у цьому сузір'ї можна побачити туманність загадкової форми, що нагадує краба, який пливе у воді. Туманність так і назвали – Крабоподібною (мал. 5.10). Спостереження показали, що вона розширюється. З урахуванням швидкості розширення можна вважати, що Крабоподібна туманність – це залишок вибуху наднової зорі в 1054 р.

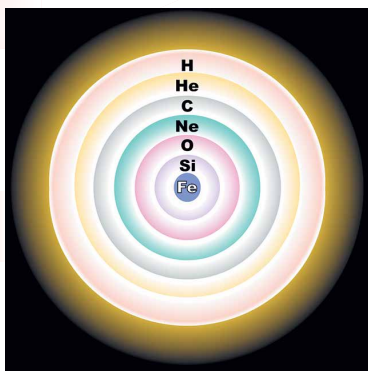
Уперше термін «нова зоря» застосував Тихо Браге (1546–1601) у 1572 р., описуючи яскраву зорю, що з'явилася в сузір'ї Кассіопеї. Незважаючи на те що за



Мал. 5.10. Крабоподібна туманність – залишок від вибуху наднової зорі



Мал. 5.11. Наднова SN 1987A зоря у Великій Магеллановій Хмарі (передає «Габбл» через 20 р. після вибуху зорі)



Мал. 5.12. Розшарування масивних зір

126

нинішніми уявленнями ця назва є не зовсім правильною (спалах означає не народження зорі, а її загибель), вона й зараз використовується в астрономії. Найпотужніші вибухи зір, що гинуть, стали за аналогією називати надновими.

У нашій Галактиці за останнє тисячоліття зареєстровано кілька випадків спалахів наднових зір. Найяскравіша наднова зоря, що спостерігалася за допомогою сучасної техніки, з'явилася в 1987 р. в одній з найближчих галактик – Великій Магеллановій Хмарі (мал. 5.11).

Зоря спалахує внаслідок колапсу свого масивного ядра. Відбувається це так. На різних етапах життя масивної зорі в її ядрі проходять термоядерні реакції, під час яких спочатку водень перетворюється на гелій, потім гелій на вуглець і т. д. до утворення ядер елементів групи заліза (Fe, Ni, Co). Поступово зоря ще більше «розшаровується» (мал. 5.12).

Ядерні реакції з утворенням ще більш важких хімічних елементів відбуваються з поглинанням енергії, тому зоря починає охолоджуватися й стискатися. Внутрішні шари немов обвалюються до центра зорі; виникає ударна хвиля, що рухається назад від центра зорі, унаслідок чого зовнішні шари зорі викидаються з величезною швидкістю. У результаті катастрофічної зміни структури зорі відбувається спалах наднової. Під час вибуху звільняється енергія приблизно 10^{46} Дж. Таку енергію наше Сонце здатне випромінювати мільярди років. Від величезної зорі залиша-

ються тільки газова оболонка, що розширюється з великою швидкістю, і нейтронна зоря (або пульсар). **Пульсар** – нейтронна зоря, яка швидко обертається і для якої характерне радіовипромінювання, що пульсує з періодом, який дорівнює періоду обертання зорі. Густина цієї кулі – **нейтронної зорі** – дивовижно велика: вона може становити $10^{17} - 10^{18}$ кг/м³.

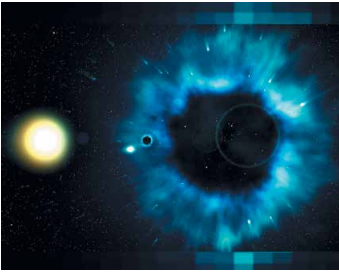
Якщо в надрах зорі відсутні сили, що протидіють її стисканню під дією сил гравітації, то зоря й надалі стискатиметься. Густина речовини продовжуватиме збільшуватися. У результаті масивна зоря на заключному етапі своєї еволюції перетворюється в надзвичайно стиснутий об'єкт – **чорну діру** (мал. 5.13). Поле тяжіння на межі чорної діри таке велике, що сигнали від цього об'єкта не виходять назовні (звідси походить її назва).

Інакше кажучи: гравітаційне поле чорної діри таке сильне, що навіть світло не в змозі його подолати.

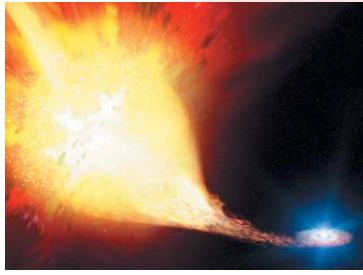
Критичний радіус, до якого має стиснутися зоря, щоб перетворитися на чорну діру, називають гравітаційним радіусом (r_g), або радіусом Шварцшильда.

Для масивних зір r_g становить кілька десятків кілометрів, і його

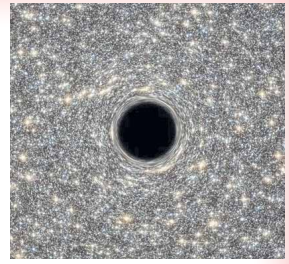
можна визначити за формулою: $r_g = \frac{2GM}{c^2}$, де G – гравітаційна стала; M – маса зорі; c – швидкість поширення світла. За теорією відносності, речовина має бути стиснутою в мікроскопічно малому об'ємі простору в центрі чорної діри. Цей стан називають **сингулярністю**.



Мал. 5.13. Відносні розміри нейтронної зорі та чорної діри



Мал. 5.14. Схема чорної діри в подвійній системі



Мал. 5.15. Гігантська чорна діра в центрі галактики M60-UCD1 (фото НАСА)

Межу чорної діри називають **горизонтом подій**. Якщо чорні діри безпосередньо спостерігати не можливо, то пошуки їх становлять великі труднощі. Найчастіше чорну діру виявляють так: 1) якщо діра утворилася в подвійній системі зір, то її положення можна визначити за обертанням другого компонента навколо «порожнього місця» (мал. 5.14); 2) під час падіння речовини на чорну діру має виникати потужне рентгенівське випромінювання. Джерела такого випромінювання (зокрема Лебідь X-1, Скорпіон X-1 тощо) зареєстровані як «кандидати» в чорні діри. Чорні діри також можуть існувати й спостерігатися як постійно взаємодіючі з речовиною і в ядрах галактик, і в квазарах. Нещодавно НАСА вперше сфотографувала гігантську чорну діру в центрі далекої галактики (мал. 5.15).

Надмасивна чорна діра масою 21 мільйон Сонць розміщена в середині надгустої галактики M60-UCD1. Оскільки світло не може вирватися із чорної діри, вона є просто силуетом на зоряному фоні. Інтенсивне гравітаційне поле чорної діри спотворює світло фонових зір, утворюючи кільцеві зображення прямо за темними краями горизонту подій чорної діри.

127



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Чим відрізняються фізично-змінні зорі від затемнювано-змінних зір?
2. Що таке цефеїди? Чому їх називають «маяками Всесвіту»?
3. Яка причина пульсацій цефеїд?
4. У чому відмінність нової зорі від наднової?
5. Чи часто спостерігають нові й наднові зорі?
6. Як утворилася Крабоподібна туманність?
7. Які причини вибуху нових і наднових зір?
8. Який об'єкт називають чорною дірою? Які властивості має чорна діра?
9. Як знайти чорну діру?
10. На що перетворюються чорні діри?



РОЗВ'ЯЗУЄМО РАЗОМ

Задача 1. Головна послідовність на діаграмі «спектр–світність» – це смуга, уздовж якої еволюціонують зорі, чи геометричне місце точок, де зорі перебувають більшу частину часу?

Відповідь. На головній послідовності розміщені зорі, у яких у центрі відбуваються термоядерні реакції. Цей стан зорі досить довгий, тому головна послідовність – це геометричне місце точок у площині «світність–температура», у яких зорі перебувають більшу частину свого життя.

Задача 2. Білий карлик має масу $0,6M_{\odot}$, світність $0,001L_{\odot}$ і температуру $2T_{\odot}$. У скільки разів його середня густина більша від сонячної?

Розв'язання. Як відомо, світність пропорційна $R^2 T^4$. Отже, густина пропорційна M / R^3 або $MT^6 / L^{3/2}$. Густина такого білого карлика в $1,2 \cdot 10^6$ разів більша за сонячну.

Задача 3. Оцініть, скільки таких зір, як Сіріус ($m = -1,6^m$), на небосхилі, могли б замінити світло Місяця в останній чверті (для повного Місяця $m = -12,4^m$).

Розв'язання. Згідно з формулою Погсона освітленість, яку створює повний Місяць, тобто його блиск, перевищує блиск Сіріуса в $\frac{E_M}{E_C} = 2,512^{-1,6 - (-12,4)} = 20\,903,2$ разів.

Блиск Місяця в останній чверті менший за блиск повного Місяця рівно вдвічі, тому треба було б розмістити на небосхилі 10 452 таких зір, як Сіріус, щоб замінити світло Місяця.

Задача 4. Яка абсолютна зоряна величина зорі Альтаїр (α Орла), яка має видиму зоряну величину $0,77^m$ і розміщена на відстані 16,8 св. років?

Розв'язання. Відстань 16,8 св. років – це $r = 16,8 : 3,26 = 2,09$ парсека.

$$M = m + 5 - 5 \lg r = 0,77 + 5 - 5 \lg 2,09 = 4,17.$$



ЗАДАЧІ ТА ВПРАВИ

128

5.1. Які зорі мають найвищу температуру на поверхні і до якого спектрального класу вони належать?

5.2. У чому полягає відмінність між видимою та абсолютною зоряними величинами?

5.3. Якого кольору зорі мають найвищу температуру на поверхні? Якого – найменшу?

5.4. Чи існують зорі, маса яких менша від маси Землі? Радіус яких менший від радіуса Землі?

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

5.6*. Річний паралакс Веги (α Ліри) дорівнює $0,12''$. Яка відстань до неї у парсеках та світлових роках?

5.7*. Визначте, у скільки разів зоря Капелла (0^m) яскравіша за Полярну ($+2^m$).

5.8*. Скільки зір 5-ї зоряної величини мають таку саму яскравість, як зоря Вега (0^m)?

5.9*. Обчисліть радіус зорі Антарес, якщо вона має світність у 6300 разів більшу від Сонця і температуру поверхні 3000 К.

5.10*. Визначте відстань (у парсеках і світлових роках) до зорі, що має річний паралакс $0,5''$.

5.12*. Паралакс Проціона (α М. Пса) $0,286''$. Скільки часу йде світло від цієї зорі до Землі?

5.11*. У скільки разів зоря Арктур (α Волопаса) більша за Сонце, якщо її світність більша у 100 разів від сонячної, а температура на поверхні – 4500 К?

5.12*. Яка температура зорі порівняно із Сонцем, якщо її розмір такий самий, як і Сонця, а світність у 16 разів більша?

5.13*. Якби замість Землі навколо Сонця оберталася зоря така сама, як Сонце, то який був би період її обертання?

5.14*. Коли параметри зорі залишаються сталими?

5.15*. Які зорі світають найдовше?

5.16*. Як гинуть зорі великої маси?

5.17*. Чи може зоря червоний карлик перетворитися на білого карлика?

5.18*. Чому пульсари періодично змінюють інтенсивність випромінювання?

5.19.** Визначте густину білого карлика, який має діаметр 1000 км, а його маса дорівнює 10^{30} кг.

5.20.** Визначте густину зорі Бетельгейзе, якщо її радіус у 400 разів більший від радіуса Сонця, а маса приблизно дорівнює масі Сонця.

5.21.** Якою буде світність Сонця, якщо воно в майбутньому перетвориться на червоний гігант радіусом у 10 разів більшим від сучасного і з температурою 5000 К?

5.22.** У центрі Сонця температура сягає 15 000 000 К, а в ядрі білих карликів температура понад 30 000 000 К. Чому на Сонці відбуваються термоядерні реакції, а в надрах білих карликів – ні?

5.23.** З яким періодом пульсувало б Сонце, якби воно перетворилося на цефеїду?



ПЕРЕВІР СВОЮ КОМПЕТЕНТНІСТЬ

Контрольні запитання

1. У чому відмінність між видимою та абсолютною зоряними величинами?
2. Як астрономи вимірюють температуру зір?
3. Чи може червоний карлик перетворитися на білий карлик?
4. Чому пульсари періодично змінюють інтенсивність випромінювання?

Що я знаю і вмію робити

● Я вмію розв'язувати астрономічні задачі

1. Поясніть, як за кольором зорі можна наближено визначити її температуру.

2. Паралакс Сіріуса дорівнює $0,37''$, а паралакс Веги – $0,12''$. Виразіть відстань до цих зір у парсеках, у світлових роках, в астрономічних одиницях та в кілометрах.

3. Видима зоряна величина зорі становить $+5^m$. Якою буде видима зоряна величина цієї самої зорі, якщо відстань до неї збільшиться в 10 разів?

● Я знаю як користуватися картою зоряного неба

4. Самостійно відшукайте на небі яскраві зорі, які позначено на карті зоряного неба. Намалюйте яскраві зорі на небосхилі відносно орієнтирів на поверхні Землі – дерев або будинків. Порівняйте ваші малюнки з картою зоряного неба. До яких сузір'їв належать ці яскраві зорі?

5. Відшукайте на карті зоряного неба якусь яскраву зорю. За допомогою накладного круга до карти виміряйте моменти, коли сходять, заходять та кульмінує ця зоря.

6. За допомогою карти зоряного неба знайдіть зорі різних спектральних класів *O*, *B*, *A*, *F*, *G*, *K*, *M*. Порівняйте колір цих зір щодо температури на їхній поверхні.

129



ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ

1. Які одиниці відстані до зір використовують астрономи?

- | | |
|------------------------|-----------------|
| А кілометр | Г світловий рік |
| Б астрономічну одиницю | Д парсек |
| В паралакс | |

2. Видима зоряна величина визначає...

- | |
|---|
| А світність зорі |
| Б радіус зорі |
| В яскравість зорі |
| Г освітленість, яку створює зоря на Землі |
| Д температуру зорі |

3. На якій відстані абсолютна та видима зоряні величини мають однакове значення?

- | | | |
|----------------|------------|-------------|
| А 1 а. о. | Б 10 а. о. | В 1 св. рік |
| Г 10 св. років | Д 1 пк | Е 10 пк |

4. Які з наведених спектральних класів зір мають на поверхні найвищу температуру?

- А А Б В В F Г G Д К Е М Є О

5. Укажіть температуру на поверхні зорі та спектральний клас, до якого належить Сонце.

- | | | |
|-----------------|-----------------|---------------|
| А А; +10 000 °С | Б В; +10 000 °С | В С; +6000 °С |
| Г G; +6000 °С | Д М; +3000 °С | Е О; +3000 °С |

6. Які із цих зір світять найдовше?

- А гіганти спектрального класу О
Б білі зорі спектрального класу А
В Сонце
Г червоні гіганти спектрального класу М
Д червоні карлики спектрального класу М

7. Зорі якого спектрального класу мають найкоротше життя?

- А А Б В В F Г G Д К Е М

8. Який космічний об'єкт називають пульсаром?

- А подвійну зорю, коли одна зоря затуляє іншу
Б нейтронну зорю
В білого карлика
Г пульсуючу зорю
Д гіганта

9. Термін «нова зоря» означає...

- А у космосі утворилася молода зоря
Б вибухнула стара зоря
В періодично збільшується яскравість зорі
Г відбуваються зіткнення зір
Д космічні катастрофи з невідомим джерелом енергії

10. У майбутньому Сонце може перетворитися на...

- А чорну діру
Б нейтронну зорю
В пульсар
Г червоного гіганта
Д червоного карлика
Е білого карлика

11. Чому пульсари періодично змінюють інтенсивність випромінювання?

12. Чи зможе вижити в Сонячній системі наша цивілізація, якщо Сонце перетвориться на червоного гіганта?

Розділ 6

НАША ГАЛАКТИКА

Здавна людський розум намагався проникнути в таємниці цього величезного нескінченного світу. Індійські, грецькі та римські вчені задовго до нашої ери припускали існування безлічі світів, схожих на наш. Уже тоді весь світ отримав назву Всесвіту, або космосу. Він фантастично великий, а наша крихітна Земля і навіть зорі, які ми бачимо, – незначна частина космосу. Всесвіт складається з великої кількості зоряних світів – галактик. Однією з них є наша Галактика, до якої входить Сонячна система. Сонячна система розташована на краю Галактики, тому основну частину нашої Галактики можна бачити ніби збоку – світлу смугу з безлічі зір, що проходить через усе зоряне небо. Це – Молочний Шлях. Український народ здавна називав її Чумацьким Шляхом. У цьому розділі ви дізнаєтеся багато цікавого про галактики.

§ 27. НАША ГАЛАКТИКА. МОЛОЧНИЙ ШЛЯХ. МІСЦЕ СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ В ГАЛАКТИЦІ

131

1. Будова Галактики. Ще в давнину люди помічали на безхмарному нічному небі в ясну безмісячну ніч, що із заходу на схід через зеніт тягнеться добре помітна світла смуга – **Чумацький Шлях (Молочний Шлях)**. Вона нагадувала їм розлите молоко. За легендою, це зробила Гера, що спускалася на Землю.

Українці здавна по-різному називали нашу Галактику. **Чумацький Шлях** – найпоширеніша з них. Згідно з легендою чумаки їздили до Криму по сіль, орієнтуючись уночі на світлу смугу на небі. **Божя Дорога** – давня українська назва Чумацького Шляху. Цією дорогою нібито в золотій колісниці їздить пророк Ілля (християнський наступник давньоукраїнського Перуна) і гримить, метаючи золоті стріли блискавиць у демонів.

Давні греки Чумацький Шлях назвали Галактикою (від грец. γάλα – «молоко»). У 1609 р. Галілей у телескоп виявив, що Чумацький Шлях складається з величезної кількості слабких зір. Тоді виникла гіпотеза про те, що Сонце, усі видимі зорі, у тому числі і зорі Чумацького Шляху, належать до однієї величезної системи. Таку систему назвали **Галактикою**.

Наша Галактика – це велетенський зоряний острів, до складу якого входить Сонце і Сонячна система. Більшість зір Галактики, а їх за сучасними оцінками налічується понад 200 млрд, сконцентровані в плоскому диску, що його ми бачимо на небі як світлу смугу Чумацького Шляху, а також у спіральних відгалуженнях. У центрі Галактики є компактне згущення речовини – ядро, фізична природа якого та фізичні процеси, що відбуваються в ньому, є предметом детального вивчення.

Чумацький Шлях проходить через обидві півкулі по великому колу небесної сфери (мал. 6.1). Лінію, що йде вздовж середини Чумацького Шляху, називають **галактичним екватором**, а площину, яка його утворює, – **галактичною площиною**. Галактична площина нахилена до площини небесного екватора під кутом 63° . Слід розуміти, що термін «галактика»



Мал. 6.1. Чумацький Шлях

Дуже довгими були суперечки про її розміри, масу, структуру розміщення зір. Тільки у XX ст. було встановлено, що вона є спіральною галактикою у вигляді великого диска з перемичкою. Діаметр Галактики складає близько 30 тис. парсеків (близько 100 000 св. років, 1 квітільйон км), а середня товщина – близько 1000 св. років. Галактика містить близько 200 млрд зір (за сучасними даними, від 200 до 400 млрд). Основна частина зір розміщена у формі плоского диска. Згідно з останніми даними, маса Галактики оцінюється в $3 \cdot 10^{12}$ мас Сонця, або $6 \cdot 10^{42}$ кг. Більша частина маси Галактики міститься не в зорях і міжзоряному газі, а в темному гало з темної матерії.

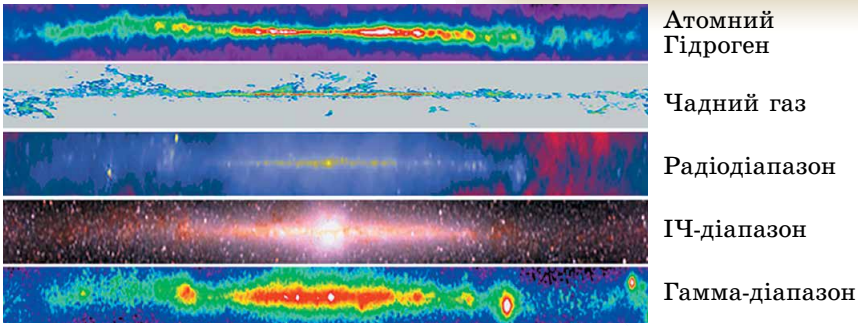
Сонячна система в Галактиці перебуває далеко від центра на відстані 10 кПк (30 000 св. років) і лежить майже на галактичній площині. Центр Галактики міститься в сузір'ї Стрільця в напрямку на $\alpha = 17^h 46,1^m$, $\delta = -28^\circ 51'$.

2. Підсистеми Галактики та її спіральна структура. Надмасивна чорна діра в центрі Галактики. Частина зір нашої Галактики не входить до складу диска, а утворює сферичну складову – **зоряне гало**, радіус якого не менше ніж 20 кпк. Гало оточує дуже розріджена й величезна за розмірами (50–60 кпк) зовнішня частина Галактики – **корона**. Галактика має складну спіральну структуру у вигляді спіральних рукавів. Кулясте стовщення в середині диска одержало назву **балдж** (від англ. *bulge* – «здуття»). Найбільш густу й компактную центральну частину Галактики, розташовану в сузір'ї Стрільця, називають **ядром**.

Дослідження процесів, що відбуваються в центральній частині Галактики, дають змогу припустити, що в ядрі розташована надмасивна чорна діра. Ядро Галактики – малодосліджена частина, тому що схована від нас газопиловими хмарами й зорями. Ця частина нашої зоряної системи має дуже високу активність і випромінює в радіо-, інфрачервоному й рентгенівському діапазонах довжин хвиль. Маса ядра оцінюється в кілька десятків мільйонів мас Сонця.

Якщо говорити про масу видимої речовини нашої Галактики, то приблизно 95 % її припадає на зорі, а близько 5 % – на міжзоряний газ і пил. Простір Галактики пронизаний потоками заряджених частинок величезних енергій, а на міжзоряний газ діє магнітне поле.

Під час вивчення Галактики труднощі спричиняє наше внутрішнє положення в цій зоряній системі; поглинання випромінювання далеких галактичних об'єктів міжзоряною матерією. Ці труднощі можна подолати, якщо вивчати Галактику в усіх діапазонах електромагнітних хвиль. Там, де ми чогось не можемо спостерігати безпосередньо, слід звертатися до теоретичних міркувань та комп'ютерних моделей (мал. 6.2), що допомагають відновлювати ті ланки процесів і явищ, яких не вистачає.



Мал. 6.2. Чумацький Шлях у різних довжинах хвиль

За межами нашої Галактики є безліч інших зоряних систем, які ми можемо спостерігати збоку, у різних ракурсах і на різних стадіях розвитку. Порівнюючи їх одна з одною та з нашою Галактикою, виявляючи їхні подібність і відмінність, з'ясовуючи причини цього, ми пізнаємо загальні закономірності будови та еволюції цих зоряних систем, а отже, і нашого «зоряного острова».

3. Зоряні скупчення та асоціації. Туманності. Структурними складовими Галактики є зоряні скупчення. Зоряні скупчення – це гравітаційно пов'язані групи зір, які мають загальне походження. Зоряні скупчення рухаються в полі тяжіння Галактики як єдине ціле. За зовнішнім виглядом вони діляться на розсіяні й кулясті.

Розсіяні зоряні скупчення не мають правильної форми порівняно з групою зір, що містить від кількох сотень до кількох тисяч зір. Розміри таких скупчень – від 6 до 14 пк. Найближчі до нас розсіяні зоряні скупчення – Плеяди й Гіади, розміщені в сузір'ї Тельця. Неозброєним оком можна розрізнити в Плеядах 5–7 слабких зір, що розміщуються у вигляді маленького ковша (мал. 6.3).

Скупчення Гіади не досить компактне, але містить багато яскравих зір. На цей час відомо понад 1500 розсіяних зоряних скупчень. Усі вони концентруються в галактичній площині та, подібно до інших об'єктів плоскої складової Галактики, беруть участь в обертанні навколо її центра. Загальне число розсіяних скупчень у Галактиці – $2 \cdot 10^4$ об'єктів.

Кулясті зоряні скупчення мають сферичну або еліпсоїдальну форму, вони нараховують від десятків тисяч до мільйонів зір. Діаметри таких зоряних скупчень – у межах від 20 до 100 пк. Просторова концентрація зір різко зростає до центра скупчення, досягаючи десятків тисяч у кубічному парсеку (на околицях Сонця – $0,13 \text{ пк}^{-3}$). Кулясті скупчення утворюють протяжне гало навколо центра Галактики, сильно концентруючись до нього. Усього в Галактиці відкрито близько 200 кулястих скупчень, а їхнє загальне число – близько 500 (мал. 6.4). Зоряне «населення» кулястих скупчень складається з давно проеволюційованих зір – червоних гігантів і надгігантів. Кулясті скупчення нашої Галактики – одні з найстаріших. Їхній вік становить 10–15 млрд років.

Зоряні асоціації – угруповання гравітаційно не пов'язаних або слабо пов'язаних між собою молодих зір (віком до кількох мільйонів років), об'єднаних спільним походженням.



Мал. 6.3. Розсіяне зоряне скупчення Плеяди в сузір'ї Тельця (Стожари, фото телескопа «Габбл»)



Мал. 6.4. Кулясте зоряне скупчення M5 (NGC5904) у сузір'ї Змії

асоціацій. Згодом було виявлено, що високі концентрації та малі дисперсії швидкостей зір у T -асоціаціях свідчать про їхню стійкість.

На відміну від молодих розсіяних скупчень, зоряні асоціації мають більші розміри – десятки парсеків (ядра розсіяних скупчень – одиниці парсеків) та меншу густину зоряного «населення»: кількість зір в асоціації становить від кількох десятків до сотень, маса – 10^2 – $10^4 M_{\odot}$, тоді як розсіяні скупчення налічують сотні тисяч і більше зір.

Своїм походженням зоряні асоціації завдячують областям зореутворення з масивним комплексом молекулярних хмар.

Туманність – внутрішньогалактична хмара розріджених газів і пилу. За типом зоряного «населення» асоціації поділяють на: **ОВ-асоціації**, що здебільшого складаються з гарячих зір спектральних класів O та B ; **T -асоціації**, характерні об'єкти для яких – змінні зорі типу T Тельця.

Поділ на $ОВ$ - та T -асоціації є досить умовним, оскільки зорі типу T Тельця виявлено в усіх близьких до Сонця $ОВ$ -асоціаціях. Однак багато T -асоціацій не мають зір класів O або B . Пізніше Сідні ван ден Берг (1929) запропонував позначення R для асоціацій, що висвітлюють відбивні туманності.

Зоряні асоціації виявив Віктор Амбарцумян (1908–1996) у 1948 р. й передбачив їхній розпад. Пізніше дослідження астрономів підтвердили факт розширення зоряних



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Яка будова нашої Галактики? Які об'єкти входять до складу нашої Галактики?
2. Яке положення Сонячної системи в Галактиці?
3. Чим відрізняються зорі диска Галактики від зір гало?
4. Як розподілені кулясті скупчення в Галактиці? Чим вони відрізняються від розсіяних скупчень?



РОЗВ'ЯЗУЄМО РАЗОМ

Задача 1. Чому в речовині найстаріших зір Галактики дуже мало важких елементів, а в речовині наймолодших, навпаки, їхній вміст підвищений?

Відповідь. Старі зорі утворилися з важких елементів протогалактичної газової хмари. Масивні зорі, швидко еволюціонуючи, вибухали і збагачували протогалактику важкими елементами, що утворилися в них. Пізні покоління зір утворилися з речовин з більшим вмістом металів.

Задача 2. Що таке галактичний рік і який вік Сонця в галактичних роках?

Відповідь. Галактичний рік – період обертання Сонця навколо центра Галактики. Він становить 230 млн років. Вік Сонця приблизно 20 галактичних років.

Задача 3. У чому відмінність у розташуванні кулястих та розсіяних зоряних скупчень у Галактиці?

Відповідь. Відмінність у тому, що майже всі розсіяні зоряні скупчення містяться в районі Чумацького Шляху або поблизу нього. А більшість кулястих зоряних скупчень містяться в одній частині неба в сузір'ї Стрільця. Американський астроном Х. Шеплі висунув гіпотезу, що вони

згруповані навколо центра Галактики. Тобто, на відміну від розсіяних скупчень, усі кулясті скупчення розміщуються сферично-симетрично відносно центра Галактики, помітно концентруючись навколо нього.



ЗАДАЧІ ТА ВПРАВИ

6.1. Знайдіть на зоряній карті сузір'я, через які проходить Чумацький Шлях.

6.2. Чому спостерігач, що перебуває на Землі, бачить Чумацький Шлях переривчастим і клоччастим?

6.3. Чому ми не можемо побачити центр Галактики за допомогою оптичних телескопів?

6.4. У чому відмінність між сузір'ям і зоряним скупченням?

6.5*. Наведіть докази того, що Сонце перебуває близько до галактичної площини.



ПЕРЕВІР СВОЮ КОМПЕТЕНТНІСТЬ

Контрольні запитання

1. Яку структуру має наша Галактика?
2. Який рік більший: галактичний чи тропічний?
3. До якого виду зоряних скупчень належать Плеяди?

Що я знаю і вмію робити

● Я вмію розв'язувати астрономічні задачі

1. На зоряному небі спостерігаємо темні туманності. Чому ми їх бачимо, адже такі туманності не випромінюють видимого світла?
2. Якщо порівнювати фото неба в синіх і червоних променях, то виявиться, що плоска складова Галактики в синіх променях більш яскрава, ніж у червоних, а сферична складова – навпаки. Про які особливості Галактики свідчить цей факт?

● Я знаю для чого використовуються телескопи

3. Опишіть ідеальне місце на поверхні Землі для виконання оптичних астрономічних спостережень Молочного Шляху.
4. Чи маємо ми змогу спостерігати ядро нашої Галактики? Якщо так, то в який спосіб? Якщо ні, то чому?

Розділ 7

БУДОВА І ЕВОЛЮЦІЯ ВСЕСВІТУ

Всесвіт настільки великий, що його розміри важко уявити. Лише частина цього матеріального світу доступна дослідженню астрономічними засобами, що відповідають досягнутому рівневі розвитку науки. Часто цю частину всесвіту називають метагалактикою, вона простягається на $1,6 \cdot 10^{24}$ км. Ви частково про нього дізнаєтесь у цьому розділі.

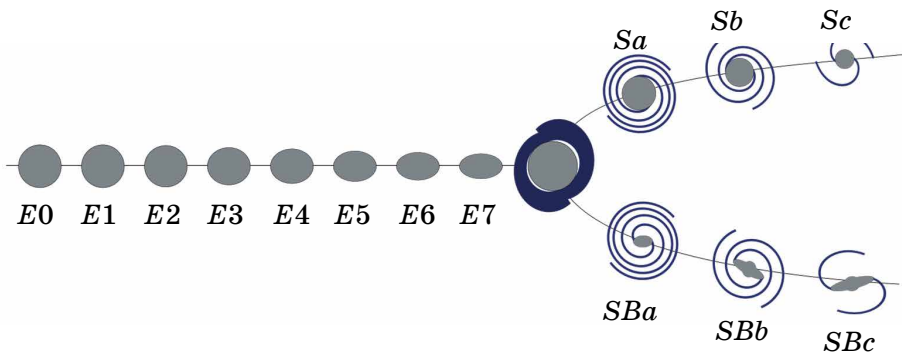
§ 28. ЗОРЯНІ СИСТЕМИ – ГАЛАКТИКИ. СВІТ ГАЛАКТИК

136

1. Типи галактик. У 1924 р. за допомогою найбільшого на той час телескопа (обсерваторія Маунт Вілеон, США) Едвін Габбл установив, що Туманність Андромеди утворена величезною кількістю зір, які зливаються в суцільну туманну пляму через величезну віддаленість. Більшість інших відомих туманностей виявилися такими самими гігантськими системами, що складаються з мільйонів і мільярдів зір. Гігантські гравітаційно пов'язані системи зір і міжзоряну речовину, розташовані поза нашою Галактикою, стали називати **галактиками**. Сучасні потужні телескопи зробили доступною реєстрацію сотень мільярдів галактик.

Фото показали, що галактики розрізняються за зовнішнім виглядом та структурою. Габбл запропонував класифікувати галактики за їхньою формою, його класифікація стала основою сучасної класифікаційної схеми (мал. 7.1). Відповідно до сучасної класифікації, розрізняють галактики таких основних типів: еліптичні (*E*), спіральні (*S*), неправильні (*I_r*) і ліноподібні (*S₀*).

Еліптичні галактики у проекції на небесну сферу мають вигляд кола або еліпса (мал. 7.2). Число зір у них плавно зменшується від центра до краю. Зорі обертаються в таких системах у різних площинах. Самі еліптичні



Мал. 7.1. Класифікація галактик (за Габблом)

галактики обертаються дуже повільно. Вони містять тільки жовті й червоні зорі, практично не мають газу, пилу й молодих зір високої світності. Фізичні характеристики цих галактик мають досить широкий діапазон: діаметри – від 5 до 50 кпк, маси – від 10^6 до 10^{13} мас Сонця, світності – від 10^6 до 10^{12} світностей Сонця. Близько 25 % вивчених галактик належать до галактик еліптичного типу.

Близько половини вивчених галактик належать до спірального типу.

Спіральні галактики – це сильно сплюснені системи із центральним згущенням (у якому є ядро галактики) і з помітною спіральною структурою. Розміри цих галактик сягають 40 кпк, а світності – 10^{11} світностей Сонця. Навколо згущеного диска є дві або більше клоччастих спіральних гілок (рукавів, мал. 7.3). Так, до спіральних галактик Габбла належить галактика *M81* типу *Sa* – система з туго закрученими спіральними краями, куляста частина якої яскрава й протяжна (мал. 7.3, *a*). Галактика *M51* належить до типу *Sb* і має могутні й чіткі спіралі, центральна частина менше виділяється (мал. 7.3, *б*). Галактика *M101* належить до типу *Sc* – система з розвиненою спіральною структурою, куляста частина якої слабо проглядається на загальному фоні (мал. 7.3, *в*).



Мал. 7.2. Молода еліптична галактика NGC2865 (фото телескопа «Габбл»)



Мал. 7.3. Спіральні галактики

Приблизно половина спіральних галактик у центральній частині має майже пряму зоряну перемичку – **бар**, від якої починають закручуватися спіральні рукави (мал. 7.4). Такі галактики називають **спіральними з перемичкою**.

У спіральних гілках галактик зосереджені найбільш яскраві й молоді зорі, яскраві газопилові туманності, молоді зоряні скупчення та зоряні комплекси. Тому спіральний візерунок чітко видно навіть у далеких галактик, хоча на частину спіральних рукавів припадає всього кілька відсотків маси всієї галактики. Наша Галактика є спіральною. Найближча зоряна система, схожа за структурою й типом на нашу Галактику, – це Туманність Андромеди (мал. 7.5). Світло від цієї галактики доходить до нас приблизно за 2 млн років.

До неправильних галактик належать галактики малої маси з неправильною структурою. У них не спостерігається чітко вираженого ядра та обертальної симетрії. Видиму яскравість таких галактик створюють молоді зорі високої світності та ділянки йонізованого водню. Маси неправильних галактик – від 10^8 до 10^{10} мас Сонця, розміри цих галактик сягають 10 кпк, а їхні світності не перевищують 10^{10} світностей Сонця. У таких галактиках є багато газу – до 50 % їхньої загальної маси. Найближчими до нас яскравими неправильними галактиками є Магелланові Хмари



Мал. 7.4. Спіральна галактика Сомбреро з перемичкою (баром) NGC1300



Мал. 7.5. Туманність Андромеди



Мал. 7.6. Магелланові Хмари – одні з найближчих до нас Галактик



Мал. 7.7. Лінзоподібна галактика NGC5866 у сузір'ї Дракона

(Велика й Мала). Вони мають вигляд двох тьмяних хмарин, що сріблясто світяться в гарну погоду на нічному небі. Вони розташовані в Південній півкулі й тому невидимі з території України.

Велика Магелланова Хмара (мал. 7.6), що має в діаметрі 7 кпк, розташована від нас на відстані 52 кпк. На думку деяких астрономів, у Магелланових Хмарах можна розрізнити зачатки спіральної структури.

Лінзоподібні галактики зовні (якщо видно у площині) дуже схожі на еліптичні, але мають сплюснутий зоряний диск. За своєю структурою подібні до спіральних галактик, однак не мають

плоскої та спіральних складових. Від спіральних галактик, спостережуваних з ребра, лінзоподібні галактики відрізняються відсутністю смуги темної матерії (мал. 7.7). Німецький астроном **Карл Шварцшильд** (1863–1916) висунув теорію, відповідно до якої лінзоподібні галактики можуть утворюватися зі спіральних у процесі «вимітання» газопилової матерії.

2. Відстані до галактик. Закон Габбла. Відстані до найближчих галактик визначаються за оцінками видимих зоряних величин цефеїд. Для довгоперіодичних цефеїд це залежність період коливань–світність. За допомогою цієї залежності визначають абсолютну зоряну величину за тривалістю коливань блиску: що коротший період коливань блиску, то цефеїда слабша за абсолютною зоряною величиною. Відстань r обчислюється за формулою: $\lg r = 0,2(m - M) + 1$, де m і M – видима та абсолютна зоряні величини.

Для галактик, де не виявлено цефеїд або їх неможливо побачити, як індикатори відстаней використовують найяскравіші зорі – надгіганти, нові й наднові зорі, кулясті зоряні скупчення. Відстані визначають також за цією формулою. Видиму зоряну величину оцінюють зі спостережень, а абсолютну – вважають відомою (середньою) для цього класу об'єктів. Наприклад, наднові зорі, як це впливає зі спостережень, мають приблизно однакову абсолютну величину в максимумі блиску.

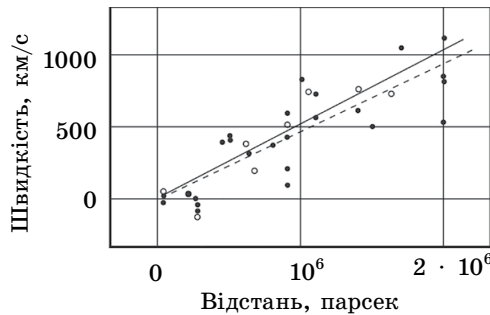
Відстані до далеких галактик визначають також за їхніми кутовими розмірами або за видимою зоряною величиною, а до дуже далеких галактик – винятково за червоним зміщенням у їхньому спектрі.

Червоне зміщення (z) вимірюється відносною зміною довжини хвилі спектральних ліній: $z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$.

Ще в 1912–1914 рр. американський астроном **Весто Слайфер** (1875–1969) виявив, що лінії у спектрах далеких галактик зміщені відносно їхнього нормального положення в бік червоної області спектра. Це озна-

чало, що галактики віддаляються від нас зі швидкостями сотні кілометрів за секунду. Пізніше Габбл визначив відстані до деяких галактик та їхні швидкості. Зі спостережень випливало, що далі від нас перебуває галактика, то з більшою швидкістю вона віддаляється (графічно цю залежність показано на мал. 7.8). Закон, за яким швидкість віддалення галактики пропорційна відстані до неї, одержав назву **закон Габбла**:

відносне збільшення довжин хвиль ліній у спектрах галактик пропорційне відстані r до них, тобто $r \sim (\lambda - \lambda_0) : \lambda_0$.



Мал. 7.8. Залежність швидкості віддалення галактик від відстаней до них

Припускаючи, що явище червоного зміщення обумовлене рухом галактик зі швидкістю v_r за променем зору в напрямку від спостерігача, можемо визначити швидкість галактики за виміряним відносним зміщенням довжини хвилі спектральних ліній: $v_r = c(\lambda - \lambda_0) : \lambda_0$. З урахуванням закону Габбла, це рівняння можна записати так: $v_r = Hr$, де H – коефіцієнт пропорційності – **стала Габбла**, яка показує, на скільки кілометрів за секунду збільшується швидкість галактик зі збільшенням відстані до них на 1 Мпк. Значення H постійно уточнюється, за різними оцінками – це від 50 до 80 км/(с · Мпк). Під час розрахунків часто приймають $H = 75$ км/(с · Мпк). Закон Габбла виконується тільки для далеких галактик, відстань до яких перевищує 5–10 Мпк.

3. Маси галактик. Маси галактик можна оцінити на підставі лінійних швидкостей обертання їхніх зовнішніх частин. Швидкості обертання v встановлюють шляхом порівняння зміщень спектральних ліній у різних частинах галактики.

Припустимо, що вся маса M галактики сконцентрована в її центрі й обертання відбувається за законами Кеплера. Тоді з другого закону Ньютона $F = ma$, де $a = \frac{v^2}{R}$ – доцентрове прискорення, враховуючи рух тіл у

полі сил тяжіння $F = \frac{GMm}{R^2}$, одержимо: $\frac{GM}{R^2} = \frac{v^2}{R}$, де R – радіус галактики.

Після перетворень одержимо вираз для знаходження маси галактики: $M = \frac{Rv^2}{G}$.

Для галактик, як і для зір, є певна залежність між масою і світністю. Ця залежність використовується для обчислення мас галактик. Однак оцінки мас галактик за їхніми світностями виходили значно меншими, ніж за обертаннями галактик. Це явище назвали **парадоксом прихованої маси**. Щоб пояснити його, потрібно припустити, що десь у галактиці є неслітлова, темна матерія.

У 70-х рр. XX ст. за допомогою методів рентгенівської астрономії було відкрито гарячий міжгалактичний газ. За температурою газу можна оцінити масу його скупчень. Перші результати рентгенівських спостережень гарячого газу в групах галактик підтвердили присутність у них прихованої маси, що не входить до складу окремих галактик. На сьогодні астрономи досить упевнено заявляють: Всесвіт переважно заповнений невидимою речовиною. Вона утворює протяжні гало галактик і заповнює міжгалактичний простір, концентруючись у скупченнях галактик.

Спектральні спостереження, зроблені космічним телескопом «Габбл» та великими сучасними наземними телескопами, підтвердили наявність великих мас (близько 50 млн мас Сонця) темної речовини в ядрах ряду галактик.

4. Галактики з активними ядрами. У більшості галактик можна виділити яскраву центральну частину – ядро (мал. 7.9). Ця область відрізняється великою зоряною густиною, що сягає 10^6 – 10^8 пк^3 . Але, незважаючи на це, зіткнень ядер і зір в цій області не відбувається.

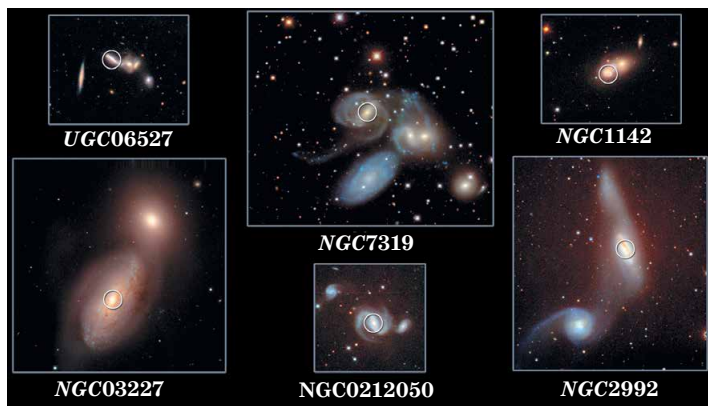
Дослідження останніх років показали, що ядро – не просто велике густе місце галактики: у самому центрі його можна виявити ще одне згущення – ядрце. Так, під час спостереження ядра Туманності Андромеди (його розміри близько 100 пк) вдалося виділити яскраве ядрце діаметром 1–14 пк . Воно обертається як тверде тіло (з періодом обертання 500 тис. років).

Маса ядрця становить приблизно 13 млн сонячних мас. Густина – близько 1500 сонячних мас на 1 пк^3 , це в 20 тис. разів більше, ніж біля Сонця. Ядрце поводить ся так, начебто це самостійне утворення, «вкладене» у галактику.

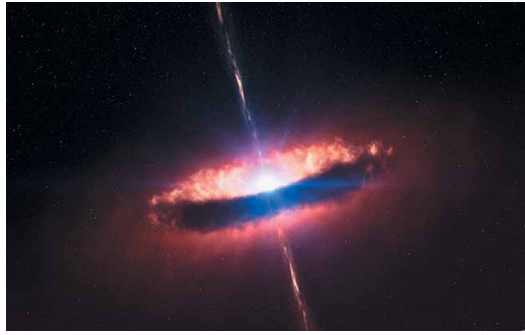
Радіодослідження нашої Галактики показали, що в її центрі також є ядрце розміром приблизно 6 пк .

У ядрах деяких галактик відбувається величезне виділення енергії, яке не можна пояснити випромінюванням або вибухами звичайних зір. Такі галактики одержали назву **галактики з активними ядрами**, або **сейфертівські галактики** (на честь американського астронома Карла Сейферта (1911–1960), який уперше описав їх в 1943 р.).

Форми прояву активності ядер сейфертівських галактик, або просто сейфертів, різні. Це може бути величезна потужність випромінювання в інфрачервоній, оптичній або рентгенівській області спектра, причому мінлива за порівняно невеликий час (за кілька років, місяців або навіть днів). У деяких випадках спостерігається швидкий рух газу в ядрі (зі швидкостями близькими до 1000 км/с).



Мал. 7.9. Ядра галактик містять масивні чорні діри



Мал. 7.10. Ядро галактики викидає газові струмені – джети

Іноді газ утворює довгі прямолінійні газові струмені – джети (мал. 7.10).

Найбільш імовірна гіпотеза, що пояснює активність ядер, припускає наявність чорної діри в центрі галактики.

5. Взаємодіючі галактики. Близько розташовані одна до іншої галактики іноді бувають пов'язані між собою смугою матерії, що світиться. Часто ці світлі блакитного кольору смуги є продовженням спіральних областей. Смуги складаються з гарячих молодих зір. Нерідко галактики занурені в загальний «зоряний туман», тоді їх називають **взаємодіючими**.

Багато дослідників вважають, що взаємодіючі галактики зближаються, а спостереження в сучасні великі телескопи показують, що серед цих галактик дуже багато таких, що зіштовхуються. Навіть наша Галактика є взаємодіючою.

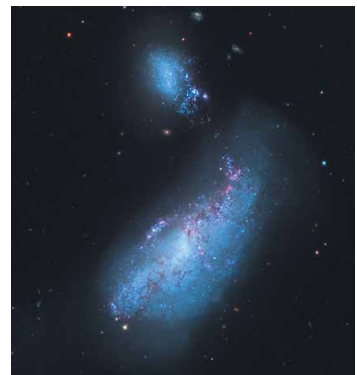
141

Унікальне фото телескопа «Габбл» наблизило до таємниці зародження Всесвіту. Те, що було зафіксовано на кадрі, виглядало катастрофічно: зіткнення двох величезних галактик *NGC4490* і *NGC4485*, що розташовані на відстані 24 млн св. років у сузір'ї Гончих Псів (мал. 7.11). Упродовж багатьох мільйонів років вони наближалися одна до одної, і зрештою – це сталося. Щоправда, нині ми побачили події далекого минулого: світло, що покинуло галактики 24 млн років тому, тільки зараз потрапило в об'єктив телескопа. Ця всесвітня катастрофа була осяяна рожевим світлом, що свідчить про скупчення йонізованого водню. За таким сценарієм, кажуть науковці Європейської космічної агенції, зароджуються зорі.

Галактики зіштовхуються під впливом гравітаційного стиснення, результатом цього може бути гравітаційний колапс – катастрофічно швидке стискання масивних тіл під дією гравітації.

Під впливом сил тяжіння в галактик з'явилися довгі «антени», що складаються з газу й зір, тому їх часто називають **антенними галактиками**. Ці утворення виникли в результаті зіткнення зоряних систем. Астрономи відкрили в антенних галактиках більше тисячі нещодавно утворених зоряних скупчень. У кожному з них міститься до мільйона зір. Вік скупчень не перевищує 100 млн років. Вони утворилися під дією припливних сил, збуджених зближенням двох систем.

Червоними кольорами світяться газопилові хмари, що падають на чорні діри в ядрах



Мал. 7.11. Зіткнення двох величезних галактик *NGC4490* і *NGC4485*, що розташовані на відстані 24 млн св. років у сузір'ї Гончих Псів

галактик, блакитним – молоді гарячі зорі, що народжуються завдяки збурюванням газопилових мас.

6. Квасари. На початку 60 рр. XX ст. за радіовипромінюваннями було виявлено об'єкти, подібні до активних ядер галактик, – **квасари**. Слово «кварзар» утворено від словосполучення «квасизоряні радіоджерела», тобто подібні до радіовипромінюючих зір.

Спектри квазарів мають яскраві емісійні лінії, сильно зміщені в червоний бік, як у далеких галактик. Відстані, визначені за червоним зміщенням, становлять більше як 5 млрд св. років. На фото квазари мають вигляд дуже яскравих порівняно з віддаленими галактиками і в радіодіапазоні випромінюють так сильно, як близькі радіоджерела.

Природу активності радіовипромінювання квазарів точно не встановлено, однак упевнено можна стверджувати: 1) квазари – найвіддаленіші об'єкти, спостережувані у Всесвіті; 2) значна частина квазарів – ядра далеких галактик у стані дуже високої активності; 3) квазари – найпотужніші з відомих у природі джерел видимого й інфрачервоного випромінювань, тобто це космічні об'єкти з величезною поверхневою яскравістю випромінювання.

Вивчаючи велику кількість квазарів за допомогою космічного телескопа «Габбл», у 1995 р. вчені дійшли висновку, що недалеко квазари (із червоним зміщенням $z = 0,5$) пов'язані із взаємодіями еліптичними галактиками. Багато квазарів розташовуються в центрах подібних зоряних систем. Це підтверджує припущення, що квазари є масивними чорними дірами в центрах галактик, які поглинають речовину.



ЧИ ЗНАЄТЕ ВИ, ЩО...

Наша Галактика виникла майже 14 млрд років тому, що приблизно дорівнює віку Всесвіту. Але видима її частина, світла смуга на темному небі, – лише дуже невелика частина Галактики. У ній налічується понад 300 млрд зір, і лише 0,0001 % їх занесено до каталогів. Центр Галактики – надмасивна чорна діра, навколо якої обертається чорна діра меншого розміру. Чумацький Шлях, відповідно до законів фізики, утворився під час зіткнення й злиття невеликих галактик. Свідченням цього, на думку астрономів, є «первісні» зорі, що виникли на надранньому етапі існування Всесвіту. Такі зорі вчені виявляють на околиці Чумацького Шляху, що тягнеться за межі його видимої частини.

Учені, керуючись законами фізики, отримали комп'ютерну модель процесу формування галактик у Всесвіті за останні понад 13 млрд років, узявши за відлік етап після Великого Вибуху. Моделювання показало, що зорі в галактичному гало Чумацького Шляху «випали» туди з карликових галактик під дією сил, що виникають під час їхнього зіткнення. Ці результати узгоджуються з теорією утворення Чумацького Шляху.

Виникає запитання: чи не загрожує в майбутньому катастрофа нашій Галактиці внаслідок зіткнення із сусідніми галактиками? Нещодавно астрофізики за допомогою комп'ютерного моделювання зробили припущення: наша Галактика та галактика Андромеди, які невпинно наближаються одна до одної, урешті-решт зіштовхнуться. І розпочнеться процес формування нової галактики, а зорі й планети, що зараз тут існують, загинуть.

Зараз наша Галактика поглинає одну карликову галактику, що перебуває на протилежному від нас боці галактичного диска. Через кілька мільярдів років наша Галактика «проковтне» Магелланові Хмари, а через 5 млрд років зіштовхнеться з Туманністю Андромеди (M31). Але при цьому дуже мала ймовірність того, що будуть зіштовхуватися окремі зорі тому, що вони віддалені одна від одної на відстані, яка в сотні мільйонів разів перевищує їхній діаметр.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Схарактеризуйте типи галактик за класифікацією Габбла. Чим еліптичні й неправильні галактики відрізняються від спіральних? До якого типу належить наша Галактика?
2. Як визначають відстань до галактик? Поясніть метод червоного зсуву, що застосовується для визначення відстаней до галактик.
3. Сформулюйте й поясніть закон Габбла.
4. Як оцінюють маси галактик?
5. Чи існують подвійні галактики? Що таке скупчення галактик?
6. У чому проявляється активність галактик? Чим пояснюється червоний зсув у спектрах галактик?
7. Як ґрунтуючись на спостереженнях, можна відрізнити зорі від квазарів?
8. Якими особливостями володіють квазари? Який квазар найближчий до Землі?

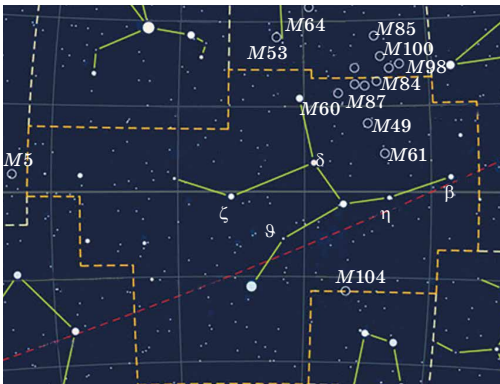
§ 29. ВСЕСВІТ. ПОХОДЖЕННЯ ТА ЕВОЛЮЦІЯ ВСЕСВІТУ. ІСТОРІЯ РОЗВИТКУ УЯВЛЕНЬ ПРО ВСЕСВІТ. СПОСТЕРЕЖНІ ОСНОВИ КОСМОЛОГІЇ

1. Системи галактик. Галактики, як і зорі, утворюють групи й скупчення. Відомо, що загальна кількість в усьому видимому Всесвіті 100–200 млрд галактик. Близько 50 – найближчі галактики, з них наймасивніші – наша Галактика й Туманність Андромеди, утворюють систему галактик розмірами кілька сотень кілопарсеків, що одержала назву **Місцева група галактик**. 143

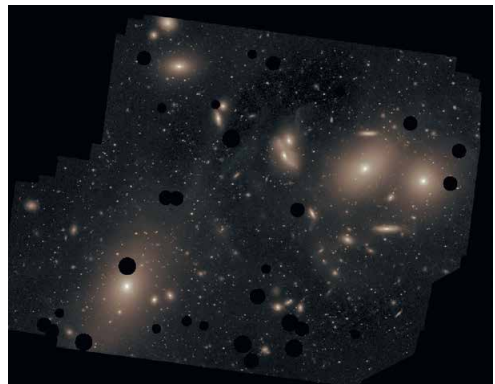
Великі скупчення галактик групуються в системи галактик. Вони містять до тисячі галактик і їхній розмір становить кілька мегапарсеків. Найближче велике скупчення галактик діаметром приблизно 5 Мпк перебуває в напрямку сузір'я Діви. Відстань від нього становить приблизно 20 Мпк. На спостережуваному небі скупчення має кутовий розмір із центром у сузір'ї Діви, звідси й походить його назва (мал. 7.12).

У його скупчення входять гігантські еліптичні й спіральні галактики, наприклад радіогалактика Діва А, спіральна галактика Сомбреро (мал. 7.13) та ін.

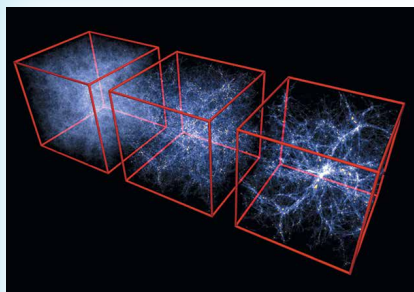
Найбільш віддалене скупчення галактик, до якого визначено відстань (5200 Мпк), розташоване в сузір'ї Волосся Вероніки. Тільки за допомогою найбільших телескопів можна розрізнити його найяскравіші галактики. Комплекси скупчень галактик розмірами 30–60 Мпк, що містять десятки



Мал. 7.12. Скупчення галактик у сузір'ї Діви



Мал. 7.13. Скупчення галактик у сузір'ї Діви, фото телескопа «Буррела»



Мал. 7.14. Розподіл галактик у просторі

«волокон» – близько 10 Мпк. Середня густина речовини у «волокнах» – близько 10^{-24} кг/м³. Великомасштабна структура Всесвіту має стільниковий вигляд. Середня густина світлої речовини в масштабах понад 300 Мпк дорівнює $3 \cdot 10^{-28}$ кг/м³. Це і є середнє значення густини світлої речовини у спостережуваній частині Всесвіту, тобто у великих масштабах Всесвіт у середньому однорідний.

2. Розширення Всесвіту. Сукупність спостережуваних галактик усіх типів та їхніх скупчень, квазарів, міжгалактичного середовища утворює Всесвіт. Одна з найважливіших властивостей Всесвіту – його постійне розширення, «розліт» скупчень галактик, про що свідчить червоне зміщення у спектрах галактик. Всесвіт перебуває у стані приблизно однорідного й ізотропного розширення. Однорідність означає однаковість усіх властивостей матерії усюди у просторі, а ізотропія – однаковість цих властивостей у будь-якому напрямку. Однорідність свідчить про відсутність виділених областей простору, а ізотропія – про відсутність виділеного напрямку. Припущення про однорідність та ізотропність Всесвіту називають **космологічним принципом**.

Гіпотезу про розширення Всесвіту на основі загальної теорії тяжіння Ейнштейна й точних розрахунків висунув у 1922 р. російський фізик і математик **Олександр Фрідман** (1888–1925).

Перші нестационарні розв'язки рівнянь Ейнштейна, які отримав учений у 1922–1924 рр., досліджуючи релятивістські моделі Всесвіту, дали початок розвитку теорії нестационарного Всесвіту. Учений досліджував нестационарні однорідні ізотропні моделі з простором позитивної кривизни, заповненим рівномірно розподіленою матерією (з нульовим тиском). Нестационарність розглянутих моделей описується залежністю радіуса кривизни і густини від часу, причому густина змінюється обернено пропорційно до куба радіуса кривизни. Фрідман з'ясував типи поведінки таких моделей, що допускаються рівняннями тяжіння, причому модель стаціонарного Всесвіту Ейнштейна виявилася окремим випадком. Спростував думку про те, що загальна теорія відносності вимагає допущення скінченного простору. Результати Фрідмана продемонстрували, що рівняння Ейнштейна не приводять до єдиної моделі Всесвіту, хоч би якою була космологічна стала. З моделі однорідного ізотропного Всесвіту випливає, що під час його розширення спостерігається червоний зсув, пропорційний відстані. Це підтвердив у 1929 р. Габбл на підставі астрономічних спостережень: спектральні лінії у спектрах галактик виявилися зміщеними до червоного кінця спектра, що свідчить про розбігання галактик.

З розрахунків Фрідмана випливали три можливих наслідки: Всесвіт та його простір розширюються із часом; Всесвіт через певний час почне стискатися; у Всесвіті повторюються через величезні інтервали часу цикли

скупчень, називають **надскупченнями галактик**. Скупчення галактик у сузір'ї Діви є центральним згущенням у надскупченні галактик, у яке входить і наша група галактик. На сьогодні виявлено близько 60 галактик Місцевої групи, близько 100 000 галактик у нашому місцевому надскупченні.

Надскупчення і скупчення галактик утворюють у просторі волоконподібні структури, що нагадують бджолині стільники (мал. 7.14).

Розміри порожніх «осередків» становлять близько 100–150 Мпк, товщина

стискання і розширення. Виникає запитання: *який з трьох варіантів реалізується в нашому Всесвіті?* Відповіді на нього має спостережувана астрономія, яка повинна визначити сучасну середню густину речовини у Всесвіті й уточнити значення сталої Габбла. *Чому важливо уточнювати ці дві сталі величини?*

За сучасними оцінками, густина речовини Всесвіту наближена до критичного значення: вона або трохи більша, або трохи менша (не вирішено остаточно питання про облік міжгалактичного газу та «прихованої маси»). Якщо фактична середня густина речовини у Всесвіті більша від критичної, то розширення Всесвіту має змінитися його стисканням. Якщо середня густина речовини у Всесвіті менша від критичної, то розширення продовжитися.

Стала Габбла дає змогу оцінити час, протягом якого триває процес розширення Всесвіту. Визначено, що він становить не менше ніж 10 млрд і не більше ніж 19 млрд років. Найімовірніше значення середнього віку Всесвіту – близько 15 млрд років. Це значення не суперечить оцінкам віку найстаріших зір.

3. Модель гарячого Всесвіту. В основі сучасної астрономічної картини світу про еволюцію Всесвіту лежить модель гарячого Всесвіту. Відповідно до неї на ранніх стадіях розширення Всесвіт характеризувався не тільки високою густиною речовини, але і його високою температурою. Гіпотезу «гарячого Всесвіту» висунули бельгійський католицький священик, астроном і математик **Жорж Леметр** (1894–1966) та американський фізик-теоретик, космолог українського походження **Георгій Гамов** (1904–1968). Вона одержала назву **Великий Вибух**.

145

Відповідно до цієї теорії передбачається, що Всесвіт виник спонтанно в результаті вибуху зі стану з дуже високою густиною матерії та величезною енергією. Цей початковий стан матерії називають **сингулярністю** – точковий об'єм з нескінченною густиною. Розширення Всесвіту не можна розглядати як розширення надгустої матерії у довколишнє середовище, тому що його не існувало. Всесвіт – це все, що існує. Речовина Всесвіту із самого початку однорідно заповнювала весь безмежний простір. Причини початку розширення Всесвіту до кінця не відомі. У міру його розширення температура знижувалася від дуже великої до дуже малої, що й забезпечило сприятливі умови для утворення зір і галактик.

На підставі моделей Фрідмана було розроблено поетапну фізичну картину еволюції речовини, починаючи з моменту вибуху. Через 3 хв після Великого Вибуху процес формування раннього Всесвіту закінчився і почався процес сполучення протонів і нейтронів у складові ядра. Потім майже 500 тис. років відбувалося повільне охолодження. Коли температура Всесвіту знизилася приблизно до 3 тис. градусів, ядра Гідрогену і Гелію вже могли захоплювати вільні електрони й перетворюватися на нейтральні атоми.

Через мільйон років після початку розширення настала ера речовини, коли з гарячої воднево-гелієвої плазми з малою домішкою інших ядер почало розвиватися різноманіття нинішнього світу.

Неоднорідності у Всесвіті, з яких згодом виникли всі структурні утворення, зародилися у вигляді незначних випадкових відхилень (флуктуацій). А потім підсилилися в епоху, коли йонізований газ у Всесвіті став перетворюватися в нейтральний, тобто коли випромінювання «відірвалося» від речовини.

Після того як речовина стала «прозорою» для електромагнітного випромінювання, у дію вступили гравітаційні сили. Вони стали переважати над усіма іншими взаємодіями між масами практично нейтральної речовини, що складали основну частину матерії Всесвіту. Гравітаційні сили створили галактики, скупчення зір і планети.

Яка доля Всесвіту? Існують дві теоретичні моделі майбутнього Всесвіту – замкнута і відкрита. **Замкнута** модель припускає, що Всесвіт може бути представлений як грандіозна замкнута система, що випробовує безліч еволюційних циклів. Цикл розширення змінюється циклом наступного стиснення до повернення в сингулярний стан, потім новий вибух тощо. Повний цикл розширення та стиснення Всесвіту становить приблизно 100 млрд років. Щоразу, повертаючись до сингулярності, Всесвіт втрачає «пам'ять» про минулий стан і може знову «народитися» із зовсім новим набором фізичних констант.

У **відкритих** моделях Всесвіту розглядаються різні варіанти його «теплової смерті». Передбачається, що вже через 10^{14} років багато зір охолонуть, і це надалі приведе до відриву планет від своїх зір, а ті, у свою чергу, почнуть залишати галактики. Потім центральні частини галактик колапсують, утворюючи чорні діри, унаслідок чого припинять своє існування.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Опишіть просторовий розподіл галактик у Всесвіті. Який вік галактик і зір?
2. У чому сутність теорії розширення Всесвіту?
3. Яких висновків про стаціонарність Всесвіту дійшов Фрідман?
4. Що таке критична густина Всесвіту? Як критична густина взаємопов'язана з розширенням або стисненням Всесвіту?
5. Опишіть модель гарячого Всесвіту.
6. Опишіть основні ери в історії Всесвіту.
7. Що розуміють під замкнутою та відкритою моделями Всесвіту?

146



РОЗВ'ЯЗУЄМО РАЗОМ

Задача 1. Деякі теорії космологічних моделей передбачають, що повний Всесвіт має розмір набагато більший, ніж спостережуваний. Які висновки із цього можна зробити?

Розв'язання. Теоретично межа спостережуваного Всесвіту доходить до космологічної сингулярності, однак на практиці межею спостережень є реліктове випромінювання (космічне електромагнітне випромінювання з високим ступенем ізотропності та спектром). Саме воно (точніше, поверхня останнього розсіювання) є найвіддаленішим об'єктом Всесвіту, які спостерігаються сучасною наукою. На сьогодні спостережувана поверхня останнього розсіювання збільшується в розмірах так, що межі Метагалактики збільшуються і збільшується маса спостережуваної речовини у Всесвіті.

Спостережуваний Всесвіт можна уявити як кулю зі спостерігачем у центрі. Розмір спостережуваного Всесвіту, виражений у світлових роках, відповідає віку рівномірного розширення простору і дорівнює радіусу від 13 до 18 млрд світлових років. Причому останні визнані оцінки відповідають значенню 13,4–15 млрд світлових років.

Задача 2. Назвіть три можливих варіанти розвитку Всесвіту, згідно з теорією Фрідмана.

Відповідь. За теорією Фрідмана, можливі три варіанти розвитку Всесвіту: Всесвіт замкнений, відкритий і пульсуючий. Спільне в них те, що в якийсь момент часу в минулому (10 чи 20 млрд років тому) відстань між сусідніми об'єктами Всесвіту мала б дорівнювати нулю. У цей момент, який називають Великим Вибухом, густина Всесвіту і кривизна простору мали би бути нескінченно великими, тобто Всесвіт мав би бути точкою, яку математики називають сингулярною. У цій точці всі сучасні закони фізики втрачають свою дію, а тому цю точку можна розглядати як математичний образ нової фізичної реальності. Процес переходу космічної матерії із цього «точкового» стану на стадію розширення і є Великим Вибухом. Від цієї часової межі починається історія нашого Всесвіту.

Задача 3. Поясніть суть методу визначення відстаней до галактик за спектральними спостереженнями.

Розв'язання. Габбл з'ясував, що лінії у спектрах відомих галактик зміщені в червоний бік порівняно з тими самими лініями у спектрі нерухомого об'єкта. Із спостережень було встановлено, що швидкість віддалення галактик пропорційна відстані до них: $v = Hr$, де $H = 75 \text{ км/(с} \cdot \text{Мпк)}$ – стала Габбла. Разом з тим $v = \frac{c \cdot \Delta\lambda}{\lambda}$, де $\Delta\lambda$ – зміщення довжини світлової хвилі λ у спектрі; c – швидкість світла у вакуумі. Тоді $r = \frac{v}{H} = \frac{c\Delta\lambda}{H\lambda}$.



ЗАДАЧІ ТА ВПРАВИ

7.1. Скільки разів за час свого існування Сонце обернулося навколо центра Галактики?

7.2. Визначте просторову швидкість руху зорі, якщо модулі променевої та тангенціальної складових відповідно рівні 30 й 25 км/с. Зробіть креслення.

7.3. Які зорі входять у плоску складову Галактики?

7.4. Які структури мають галактики?

7.5. Як за допомогою закону Габбла можна виміряти відстань до Галактики?

7.6. Чи можуть відбуватися зіткнення галактик?

7.7. Що таке галактичний рік і який вік Сонця в галактичних роках?

7.8. На зоряному небі спостерігаємо темні туманності. Завдяки чому ми їх бачимо, адже такі туманності не випромінюють видимого світла?

7.9. Як за допомогою спектрів можна визначити відстань до далеких квазарів? 147

7.10. Як можна виміряти відстань до галактик за допомогою спалахів наднових зір?

7.11. Що таке реліктове фонове випромінювання?

7.12. Які промені з космосу можна бачити із закритими очима?

7.13. Яке випромінювання з космосу свідчить про Великий Вибух?

7.14. Якою є доля закритого Всесвіту?

7.15. Що чекає в майбутньому на відкритий Всесвіт?

7.16. З якої події почалося розширення Всесвіту?

7.17. Про що свідчить реліктове випромінювання Всесвіту?

7.18*. Галактика перебуває на відстані 100 млн пк. Обчисліть, скільки років летить світло від неї до Землі.

7.19*. Чому утворення важких хімічних елементів не відбувалося спочатку в молодому Всесвіті, а відбувається тепер у надрах зір?

7.20*. З якою швидкістю віддаляється від нас галактика, яка перебуває на відстані 10^9 св. років від Землі?



ПЕРЕВІР СВОЮ КОМПЕТЕНТНІСТЬ

Контрольні запитання

1. Яких хімічних елементів найбільше у Всесвіті і коли вони утворилися?
2. Чи однорідний Всесвіт?
3. Скінченний чи нескінченний Всесвіт?
4. Який вік Всесвіту?
5. Які органічні речовини виявлено в космосі?

Що я знаю і вмію робити

● Я вмію розв'язувати задачі з астрономії

1. Нині наслідком Великого Вибуху є спостережний факт – розбігання галактик. Чому не розбігаються також зорі в межах однієї, цілком конкретної галактики?

2. У спектрі дуже віддаленої галактики спостерігають яскраві лінії в синьому діапазоні електромагнітного спектра, які в земних лабораторіях у цьому діапазоні довжин хвиль не спостерігають. Поясніть, про що це свідчить?

● Я знаю, що відбувається у Всесвіті

3. Якому «космічному прибульцеві» встановлено єдиний у світі пам'ятник і який посланець із космосу сам є своєрідним пам'ятником?

4. Коли у Всесвіті не буде галактик?

5. Чи зворотний процес еволюції речовини у Всесвіті?



ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ

1. Слово «галактика» в перекладі з грецької означає...

- А Чумацький Шлях
- Б сріблястий шлях
- В чорний шлях
- Г велика дорога
- Д Молочний Шлях

2. Що міститься в центрі Галактики?

- А зоряне скупчення
- Б чорна діра
- В червоний гігант
- Г білий карлик
- Д чорна хмара

3. Галактичний рік визначає...

- А період обертання Галактики навколо осі
- Б період обертання Сонця навколо центра Галактики
- В відстань, що пролітає світло до галактики в Андромеді
- Г період обертання Галактики навколо центра світу
- Д період обертання зір сферичної складової навколо центра Галактики

4. Термін «Велика Стіна» в астрономії означає...

- А зародження нових зір та планетних систем
- Б величезне скупчення галактик у напрямку сузір'їв Діви і Волосся Вероніки
- В оборонні споруди, які створили галактичні цивілізації
- Г скупчення газу і пилу в міжгалактичному просторі
- Д скупчення невідомої темної речовини, яка поглинає світло далеких галактик

5. Згідно із законом Габбла всі галактики розлітаються у різних напрямках. Що розміщено в центрі цього розширення?

- А Земля
- Б наша Галактика
- В Галактика М31 в сузір'ї Андромеди
- Г скупчення галактик у сузір'ї Діви
- Д центра не існує, бо в безмежному Всесвіті відсутні центр та околиці

6. Що означає в астрономії термін «Великий Вибух»?

- А вибух нової зорі
- Б вибух ядра галактики
- В зіткнення галактик

- Г момент, коли почалося розширення космічного простору
 Д момент, коли утворилися галактики
7. Коли стався Великий Вибух?
- А 10 років тому
 Б 2003 роки тому
 В 1 000 000 років до н. е.
 Г 1 млрд років до н. е.
 Д 15 000 000 000 років до н. е.
8. Коли утворилася Сонячна система?
- А 6000 років до н. е.
 Б 100 000 років до н. е.
 В 1 000 000 років до н. е.
 Г 5 млрд років до н. е.
 Д 15 млрд років до н. е.
9. У якому місці космосу стався Великий Вибух?
- А у центрі Всесвіту
 Б у ядрі нашої Галактики
 В у скупченні галактик у сузір'ї Діви
 Г скрізь, бо галактики не летять відносно Всесвіту
 Д в іншому вимірі за межами нашого Всесвіту
10. Укажіть середню температуру Всесвіту.
- А 0 °С Б 0 К В -270 °С Г 2,7 К Д -300 °С Е 300 К



Розділ 8

ЖИТТЯ У ВСЕСВІТІ

Немає нічого більш хвилюючого, ніж пошуки життя і розуму у Всесвіті. Людина не заспокоїться, поки не розгадає загадку свого походження. Для цього потрібно дізнатися таємницю народження Всесвіту, вирішити проблему походження життя і зрозуміти природу розуму. Астрономи і фізики вивчають Всесвіт, досліджують його походження та еволюцію. Біологи і психологи вивчають живі істоти та розум. А походження життя хвилює всіх: астрономів, фізиків, біологів, хіміків. На жаль, ми знаємо тільки одну форму життя – білкову та лише одне місце у Всесвіті, де це життя існує, – планету Земля. Якби вдалося виявити інші населені планети, тоді загадку життя було б розгадано набагато швидше. А якби на цих планетах були б розумні істоти... Дух перехоплює, варто тільки уявити перший діалог з братами по розуму.

150

§ 30. ЛЮДИНА У ВСЕСВІТІ. ПОШУК ЖИТТЯ ЗА МЕЖАМИ ЗЕМЛІ

1. Антропний принцип. Імовірність життя на інших планетах.

Життя є однією з великих таємниць Всесвіту. На Землі є різноманітні живі організми, але ми нічого не знаємо про інші форми життя на інших планетах. Усі живі істоти народжують дітей, а потім рано чи пізно помирають, тобто їхні тіла перетворюються в неживу матерію. Але на Землі ще ніхто не спостерігав безпосереднє зародження живих біологічних клітин з неживих хімічних сполук. Із цього приводу англійський біолог **Френсіс Крік** (1916–2004) висловився так: «Ми не бачимо шляху від первісного бульйону до природного відбору. Можна дійти висновку, що походження життя – чудо, але це свідчить лише про наше незнання».

Антропний принцип: ми спостерігаємо Всесвіт таким, як ми його бачимо, бо ми існуємо. Відкрита система обмінюється з довколишнім середовищем енергією та інформацією.

Об'єм інформації, який зберігає тільки одна клітина живого організму, – 1022–1023 біти. Об'єм інформації, яку зберігають сучасні комп'ютерні диски, у мільярди разів менший. Завдяки комп'ютерам на сучасному етапі розвитку нашої цивілізації також спостерігається значне збільшення потоку інформації, якою володіє людство. За допомогою автоматичних міжпланетних станцій (АМС) ми почали збирати інформацію на далеких планетах та приступили до безпосередніх пошуків позаземних форм життя. Імовірність існування життя на інших тілах Сонячної системи досить мала, тому сьогодні пошуки нових цивілізацій ведуться поблизу інших зір. Нещодавно виявлено десятки темних супутників зір, що свідчить про існування інших планетних систем, де можуть бути досі невідомі цивілізації.

Контакти між цивілізаціями, перш за все, означають обмін інформацією. Якщо у Всесвіті існують інші цивілізації і вони мають певний обсяг

інформації про свою частину Галактики, то обмін інформацією між ними може привести до загального зростання інформації, тому такий процес, згідно з теорією біологічної еволюції, можна вважати прогресивним.

Сутність антропоного принципу полягає в тому, що поява життя, розуму є невід'ємною частиною Всесвіту, природним наслідком її еволюції. Наш Всесвіт дивно пристосований до виникнення та розвитку в ньому життя. Так, з нескінченної розмаїтості початкових умов і значень фізичних сталих, які, імовірно, виникали в ранньому Всесвіті, реалізувалися тільки придатні для існування розумного життя. Ось кілька прикладів. 1. Ми живемо у просторі трьох вимірів. Але тільки в такому просторі можливі стійкі планетні рухи (гравітаційна взаємодія). 2. Якщо б гравітаційна стала була в кілька разів більшою, то й час життя Сонця як стійкої гарячої кулі у вигляді плазми вимірювався б кількома десятками мільйонів років. 3. Якщо б маса електрона була втричі більшою за сучасну, то й час життя протона був би малим. Під час взаємодії протона з електроном протон розпадався б на нейтрон і нейтрино. Тоді зорі й галактики складалися б з нейтронів, а більш складних форм не могло б існувати. 4. Якщо б середня густина речовини у Всесвіті була значно меншою, то сили інерції (розльоту) переважали б над силами тяжіння. Тому не встигли б утворитися зорі й галактики. І цей ряд можна продовжити. Отже, висновок один: наш Всесвіт є єдиним цілим, погодженою системою, у якій має місце й існування життя.

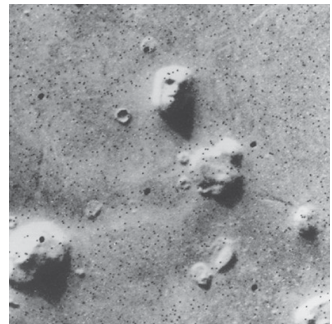
2. Пошуки життя в Сонячній системі. Життя – це складна система хімічних та біологічних сполук з високим ступенем упорядкованості, яка зберігає величезний об'єм інформації про себе та довколишній світ. За рахунок збільшення нестабільності в довкіллі зростає об'єм інформації усередині живого організму, а потім ця інформація передається нащадкам у майбутнє. Земля за багатьма параметрами є закритою системою, тому проблема виживання людства пов'язана з освоєнням космосу. Наша цивілізація зробила перші кроки в цьому напрямку – ми почали дослідження Сонячної системи. Але у процесі проникнення людства в космос виникають проблеми контактів з іншими цивілізаціями.

151

Інші форми життя цікавили людство віддавна. Колись люди думали, що заселено всі планети, навіть Місяць. Але що більше дослідники дізнавалися про планети, то менш оптимістичними ставали їхні прогнози. Із часом вчені дійшли висновку про можливість існування життя на Венері та Марсі. Однак вивчення поверхні Венери показало, що ніщо живе не може вижити на цій планеті. Найбільш імовірно придатною до життя планетою дослідники вважають найзагадковішу планету – Марс.

Головною метою польотів автоматичної орбітально-посадкової станції «Вікінг» до Марса був пошук життя на цій планеті. Було виконано кілька складних біологічних експериментів. У ході аналізу марсіанського ґрунту не було виявлено жодних слідів органічних сполук – продуктів життєдіяльності мікроорганізмів. Такий самий прилад при пробах антарктичного ґрунту знайшов значну кількість викопних органічних сполук. У 1976 р. станція «Вікінг» передала на Землю фото загадкового об'єкта (з області Сідонія) розміром 1,5 км, його назвали «головою сфінкса» (мал. 8.1).

Було висунуто гіпотезу, що це архітектурне спорудження давньої цивілізації. Але у 2001 р. космічний апарат *Mars Global Surveyor* передав на Землю більш детальний знімок цього об'єкта (мал. 8.2).



Мал. 8.1. Фото «голови сфінкса» на Марсі (1976 р.)



Мал. 8.2. Фото «голови сфінкса», отримане з кращою роздільною здатністю (2001 р.)

На новому зображенні добре видно, що «голова сфінкса» – природна структура. Тоді як пошуки життя на Марсі не увінчалися успіхом, космічний апарат «Галілео», який вивчав систему Юпітера, передав повідомлення, що на одному з великих супутників – Європі – виявлено океан теплої води, який перебуває під крижаним панциром. Поверхня Європи вкрита водяним льодом з тріщинами й хаосами.

Аналіз отриманих у різний час зображень показав, що лід трохи зміщується (подібну картину можна спостерігати на земних полярних морях під час весняного танення льоду). Виходячи з розмірів і геометрії крижаних тріщин учені припустили, що на супутнику Європа тонкий крижаний шар вкриває воду або талий лід. Імовірною причиною появи таких структур може бути дія гідротермальних джерел (гейзерів). Отже, якщо на Європі є тепла вода, то можуть існувати і які-небудь форми життя. Але виявити їх можна тільки «приземлившись» на поверхню.

3. Пошуки життя в Галактиці. Формула Дрейка. Сучасна наука

152

визначає позаземні цивілізації як гіпотетичні суспільства розумних істот, які можуть виникнути й існувати за межами Землі.

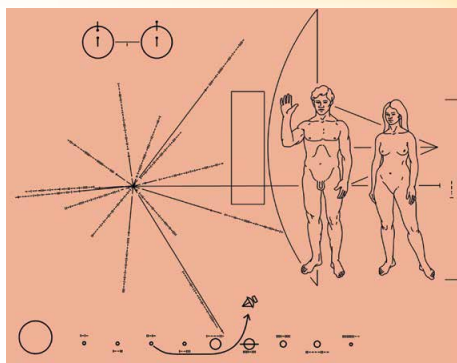
Для оцінки числа позаземних цивілізацій у Галактиці американський радіоастроном Френсіс Дрейк запропонував таку формулу: $N = RfnkdqL$, де N – число позаземних цивілізацій у Галактиці; R – швидкість утворення зір у Галактиці (близько 10 зір за рік); f – частина зір, що мають планетні системи; n – середнє число планет, що входять у планетні системи й екологічно придатні для життя; k – частина планет, на яких дійсно виникло життя; d – частина планет, на яких після виникнення життя розвинулися його розумні форми; q – частина планет, на яких розумне життя досягло фази, що забезпечує можливість зв'язку з іншими світами, цивілізаціями; L – середня тривалість існування таких неземних (космічних, технічних) цивілізацій.

У цій формулі всі величини, крім першої, мають дуже невизначений характер і визначаються на основі експертних оцінок учених. Тому оцінка загальної величини N невизначена. Одні підрахунки показують, що в наш час лише кілька геоподібних цивілізацій галактик (у яких 10^{11} зір) готові до контакту з нами. Згідно з іншими, більш оптимістичними, – таких цивілізацій може бути значно більше. Як один з аргументів на користь того, що позаземні цивілізації – явище досить рідкісне, висувається відсутність видимих проявів їхньої діяльності.

Перші роботи з пошуку сигналів позаземних цивілізацій провів у 1960 р. Дрейк. Він досліджував радіовипромінювання найближчих зір (τ Кита й ε Еридан) на хвилі 21 см. Штучні сигнали виявити не вдалося, але еру пошуків сигналів неземних цивілізацій було відкрито. У наш час космічний простір прослуховується одночасно на багатьох частотах. Прийняті радіотелескопом сигнали обробляються комп'ютерами. У 1967 р. вперше зареєстрували періодичні сигнали, які надходили з міжзоряного простору, і їх назвали пульсарами. Аналіз сигналів показав, що пульсари жодного стосунку до інопланетних цивілізацій не мають, бо періодичні сигнали випромінюють нейтронні зорі.

Паралельно ведеться робота з повідомлення позаземним цивілізаціям інформації про нашу земну цивілізацію. У 1974 р. з радіоастрономічної

обсерваторії в Аресібо в бік кулястого скупчення М31 (сузір'я Геркулеса), що перебуває від Землі на відстані 24 тис. св. років, було спрямовано послання, що містить закований текст про життя та цивілізацію на Землі. Інформаційні повідомлення про земну цивілізацію було запущено в космос на борту 4 автоматичних станцій: «Піонер-10» (старт 3.03.1972), «Піонер-11» (6.04.1973), «Вояджер-2» (20.08.1977) і «Вояджер-1» (5.09.1977). На борту «Піонерів» було прикріплено позолочені таблички з даними про землян (координати щодо пульсарів і щодо планет, зовнішній вигляд чоловіків, жінок, дітей тощо). «Вояджери», крім того, несли пластинку із сотнями кольорових і чорно-білих зображень Землі, тварин, людей, міст, техніки, звукозаписами привітань на багатьох мовах планети, пісень, голосів тварин та природних шумів (мал. 8.3). Інформація про нас звичайно не повна, але загальні уявлення отримати можна. Шкода, що ці зонди летітимуть мільйони років, і малоімовірно, що взагалі на них натраплять коли-небудь представники іншого розуму. Створено міжнародну організацію SETI (англ. *Search of Extra Terrestrial Intelligence* – пошуки позаземного розуму), яка розробила широку програму пошуків життя у Всесвіті.



Мал. 8.3. Табличка з посланням, адресована представникам позаземних цивілізацій

Якщо інша цивілізація за інтелектом набагато випередила землян, то вона може вже здійснювати міжзоряні перельоти. Контакти між цивілізаціями можуть призвести до міжзоряних конфліктів, і ми маємо бути готовими до цього.

Останнім часом серед учених і філософів дедалі більше стверджується думка, що людство самотнє, якщо не в усьому Всесвіті, то принаймні в нашій Галактиці. Із цього випливає найважливіший висновок про значення, цінність та унікальність нашої цивілізації. Отже, людство величезною мірою відповідальне не тільки за нашу планету, а й за Всесвіт у цілому.

А що загрожує нашій цивілізації й планеті? Екологічна катастрофа, яка може виникнути внаслідок забруднення довколишнього середовища промисловими відходами наших підприємств. Зміна клімату на Землі через збільшення кількості вуглекислого газу в атмосфері, збільшення парникового ефекту та підвищення температури. Збільшення озонівих дір в атмосфері може спричинити підвищення частки ультрафіолетового випромінювання Сонця, унаслідок чого можуть загинути флора і фауна нашої планети.

Катастрофічне зіткнення з астероїдом або кометою може призвести до різкого зниження температури та виникнення нового льодовикового періоду. Цивілізація може закінчити життя самогубством через атомну війну. Події останніх років показують, що така загроза існує, поки атомна зброя поширюється серед держав, які не в змозі її належно контролювати.

Таким чином, Земля, на якій є не просто життя, а життя розумне, є унікальним витвором природи і чи не єдиним носієм того дивовижного збігу космічних обставин, що забезпечили появу життя і розуму. І якщо Чумацький Шлях справді позбавлений присутності інших представників розумного життя, то важливо робити все, щоб зберегти його бодай на Землі.

4. Питання існування інших всесвітів. Мультивсесвіт. Всесвіт – це весь існуючий матеріальний світ, безмежний у просторі і часі. Він безперервно змінюється і постійно розширюється.

У вужчому сенсі Всесвіт – світ небесних тіл із законами їхнього руху та розвитку, їхній розподіл у часі і просторі. Матерія у Всесвіті розподілена дуже нерівномірно, значна частина її зосереджена в окремих більш або менш густих космічних тілах: галактиках, зорях і туманностях. Відстані між окремими об'єктами вимірюють у світлових роках, тобто відстанях, які світло проходить за один рік (від Сонця до найближчої до нас зорі воно йде понад 4 роки).

Порівняно вузькі межі можливих змін фундаментальних фізичних сталих, коли ще можливе існування життя, говорить про унікальність їхніх значень у нашому Всесвіті. Саме ця їхня винятковість забезпечує можливість існування життя. З точки зору антропного принципу, наш Всесвіт пройшов через нескінченну послідовність циклів розширення і стиснення. На початку кожного з них складався свій набір фізичних сталих, що змінювався від циклу до циклу. Ми живемо в тому циклі, у якому сформувалося поєднання фізичних сталих та інших властивостей, сприятливе для виникнення складних структур і живих систем. Не виняток, що в матеріальному космосі існує нескінченна кількість різних всесвітів, водночас у кожному з них свій набір, свій комплекс фізичних сталих і властивостей.

У нашому Всесвіті, з нашим комплексом фізичних явищ, зв'язків і фундаментальних фізичних сталих, його стабільність забезпечується саме тими законами природи, які реалізувалися в довколишньому світі. Але можуть існувати й інші, незвичні для нас комплекси явищ, стабільність яких забезпечується іншими законами. 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 в тому Всесвіті, властивості якого сприяють формуванню живих організмів. Можуть існувати інші всесвіти, де діють інші фундаментальні закони, і можливе існування принципово інших форм життя.

«Мультивсесвіт», «Великий Всесвіт», «Мультиверс», «Гіпервсесвіт», «Надвсесвіт» – різні переклади англійського терміна *multiverse*. Області Всесвіту перебувають на величезних відстанях, набагато більших за розмір горизонту подій, та еволюціонують незалежно одна від одної. Будь-який спостерігач бачить тільки ті процеси, які відбуваються в домені, що дорівнює за обсягом сфері радіусом, що становить відстань до горизонту подій. Такі домени можна розглядати як окремі всесвіти, подібні до нашого: вони так само однорідні й ізотропні на великих масштабах. Поєднання таких утворень і є **мультивсесвітом**. Хаотична теорія припускає нескінченну різноманітність Всесвітів, кожна з яких може мати відмінні від інших Всесвітів фізичні сталі. В іншій теорії всесвіти розрізняються за квантовим виміром. За визначенням ці припущення не можна експериментально перевірити.

Питання про нескінченну кількість можливих мультивсесвітів у фізиці та космології, стикається з непорозумінням. Якщо інші мультивсесвіти існують, то їхнє існування підкоряється принципово іншим законам, ніж існування нашого Всесвіту. А це означає, що ми не можемо отримати від них інформацію, адже фізичний зв'язок між різними об'єктами можливий тоді, коли вони живуть за подібними законами.

Як здійснити зв'язок з тим, що принципово не схоже на наш світ? Окремі вчені припускають, що каналами зв'язку можуть слугувати чорні діри. Можливо, що бар'єри простору-часу, які відокремлюють наш Всесвіт від інших всесвітів, не такі вже й неприступні. Не виняток, що із часом наука подолоає ці бар'єри і виведе наші уявлення про космос на якісно новий рівень.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. У чому полягає сутність антропного принципу?
2. На яких планетах Сонячної системи вчені передбачають існування життя?
3. Як можна оцінити кількість позаземних цивілізацій у нашій Галактиці?
4. Чому формула Дрейка дає невизначеність в оцінці кількості цивілізацій у Галактиці, готових до контакту з нами?
5. Як людство намагається встановити контакти з неземними цивілізаціями?
6. Чим відрізняються поняття: *Всесвіт*, *космос*, *Метагалактика*?
7. Що таке Мультивсесвіт?



РОЗВ'ЯЗУЄМО РАЗОМ

Завдання 1. Чи існує життя у Всесвіті?

Відповідь. Позаземні цивілізації належать до числа гіпотетичних об'єктів, пошук яких представляє величезний інтерес. Тривають суперечки про реальність позаземних цивілізацій, але лише подальші спостереження та експерименти дадуть змогу з'ясувати, чи існують де-небудь населені світи або ми самотні принаймні в межах нашої Галактики. Сьогодні можна дійти висновку, що досі вчені всього світу не довели, самотні ми у Всесвіті і чи є розумне життя на інших планетах. Ми часто ставимо загальні запитання, що стосуються існування і властивостей Всесвіту в цілому. Але, якщо запитання поставлено, це ще не означає, що на нього може бути отримана відповідь. Чи правомірно ставити запитання: чому світ, у якому ми живемо, саме такий, а не якийсь інший? Для того щоб отримати на подібне запитання вичерпну відповідь, нам треба було б вийти за рамки спостережуваного Всесвіту й охопити світ у всьому його нескінченному розмаїтті. А це, на жаль, неможливо. Зрозуміло, усе у світі в принципі пізнаване. У тому сенсі, що всі явища мають природні причини і підпорядковуються природним закономірностям. Але практично ми можемо дізнатися далеко не все. Насамперед тому, що сам процес пізнання нескінченно різноманітного Всесвіту нескінченний у часі і на будь-якому рівні розвитку науки в довколишньому світі завжди залишиться для нас чимось невідомим. Та й не про всі світові процеси ми можемо отримати потрібну інформацію.

155

Завдання 2. Біля зір яких спектральних класів з найбільшою імовірністю може виникнути і розвинутися життя? Відповідь пояснить.

Відповідь. Для еволюції життя від найпростіших до найвищих форм потрібні величезні проміжки часу (3–4 млрд років). Тому гарячі білі та блакитні зорі, які можуть прожити не більше як 4 млрд років, навіть якщо в них є планетні системи, майбутнього не мають. Зорі набагато меншої маси, ніж Сонце, також погані кандидати. Щоб отримати потрібну кількість тепла від такої зорі, планета має бути до неї набагато ближче, ніж Земля до Сонця. Вона буде обернена до Сонця одним боком. Це значно уповільнювало б утворення складних хімічних сполук. Крім того, треба відкинути ті зорі, які є в центральних районах зоряної системи, оскільки смертоносний рівень радіації, який там панує, знищить життя в самому зародку. Тому життя може виникнути і розвинутися біля зір пізніх спектральних класів, тобто зір, схожих на Сонце, бо час життя цих зір достатній для розвитку життя.

**ЗАДАЧІ ТА ВПРАВИ**

8.1. Яку роль відіграють космічні катастрофи в еволюції життя на Землі?

8.2. Які існують підстави для пошуків життя за межами Сонячної системи?

8.3. Скільки часу сучасні космічні кораблі летіли б до найближчої зорі?

8.4. Чи можна за допомогою сучасних радіотелескопів установити контакт з позаземними цивілізаціями?

8.5. Що означає вислів «звичайне життя»? Які інші форми життя могли б існувати у Всесвіті?

8.6. Чому пілотовані космічні кораблі для міжпланетних польотів треба будувати в космічному просторі за межами земної атмосфери?

8.7*. Скільки часу летітиме космічний корабель на Марс по еліпсу з найменшою витратою енергії?

8.8*. Під час тривалих космічних польотів виникає проблема невагомості та створення штучного тяжіння. З яким періодом має обертатися навколо осі станція діаметром 2 км, щоб створити земне тяжіння?

8.9*. На небі з'явився диск НЛО, який за кутовими розмірами такий, як Місяць. Які вимірювання слід провести додатково, щоб визначити висоту НЛО над поверхнею Землі та його лінійний діаметр у метрах?

8.10*. Чи можуть існувати паралельні світи?

156

**ПЕРЕВІР СВОЮ КОМПЕТЕНТНІСТЬ****Контрольні запитання**

1. Що потрібно для виникнення розумного життя?
2. Як з'явилося життя на Землі?
3. Чи є життя в Сонячній системі?
4. Назвіть умови, потрібні для життя в космосі?

Що я знаю і вмію робити

● **Я знаю і вмію розв'язувати задачі з астрономії**

1. Яка ваша думка щодо можливості існування комп'ютерної цивілізації?
2. Часто з'являються повідомлення про невизначені літаючі об'єкти (НЛО) на доказ відвідування Землі космічними кораблями інших цивілізацій. Якщо ви колись спостерігали незвичайне небесне явище, яке не було схоже на відомі космічні світила (зорі, планети, комети, боліди тощо), то опишіть його. Укажіть дату й час його спостереження, яскравість порівняно із зорями або планетами, швидкість переміщення по небосхилу.
3. Поясніть, чому в астрономії з'явилася гіпотеза про існування інших всесвітів?

**ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ**

1. Синергетика – це нова наука, що вивчає...

- А космічне право
- Б еволюцію складних систем
- В світову економіку
- Г світову екологію
- Д екологію космосу

2. Контакти з інопланетними цивілізаціями визначають...
 - А зоряні війни із чужими цивілізаціями
 - Б обмін інформацією
 - В спортивні змагання з інопланетянами
 - Г торгівлю з інопланетянами
 - Д передачу інформації інопланетянами
3. Як розшифровується абревіатура НЛО?
 - А нелітаючі легкі об'єкти
 - Б невизначені легкі об'єкти
 - В невизначені літаючі об'єкти
 - Г нові літаючі об'єкти
 - Д наднові літаючі об'єкти
4. Над якою проблемою працює міжнародна організація SETI?
 - А пошуки життя у Всесвіті
 - Б пошуки життя за межами Всесвіту
 - В пошуки радіосигналів від інших цивілізацій
 - Г пошуки інопланетних космічних кораблів
 - Д пошуки марсіан
5. Що означає термін «антропний принцип»?
 - А усе в космосі існує для того, щоб на Землі жили люди
 - Б необхідною умовою виникнення розумного життя є певні фізичні властивості Всесвіту
 - В у космосі можуть бути розумні істоти, які схожі на людей
 - Г з усіх розумних істот у Всесвіті найрозумнішими є люди на Землі
 - Д перші розумні істоти у Всесвіті з'явилися тільки на Землі
6. Як розшифровується абревіатура ДНК?
 - А демографічна невизначеність космосу
 - Б дихлофосонуклеїнова кислота
 - В добровільна народна команда
 - Г дезоксирибонуклеїнова кислота
 - Д диксонуклеїнова кислота
7. Які речовини є основою всіх живих організмів на Землі?

А водень Б кисень В кремній Г вода Д вуглець
8. Який об'єм інформації передає людина своїм нащадкам за допомогою генів?

А 10 Гбайт Б 10^{23} байт В 10^{20} Кбайт Г 10^{23} Мбайт Д 10^{33} байт
9. Які з подій можна вважати контактами з позаземними цивілізаціями третього типу?
 - А обмін інформацією з позаземною цивілізацією за допомогою електромагнітних хвиль
 - Б міжпланетні спортивні змагання з марсіанами
 - В обмін студентами з інопланетянами для навчання в галактичному університеті
 - Г космічна війна із чужими цивілізаціями
 - Д обмін інформацією з інопланетянами за допомогою роботів
10. На яку відстань від Землі вже поширились у космос «розумні сигнали» наших радіостанцій?

А 100 св. р. Б 1000 св. р. В 200 св. р. Г 50 св. р. Д 10 св. р.

ВІДПОВІДІ ДО ЗАДАЧ

1.20. Затемнення Сонця відбувається, коли Місяць перебуває між Сонцем та Землею і закриває сонячне світло. Для різних точок земної поверхні сонячне затемнення має різний вигляд. Диск Сонця буде повністю закритий для спостерігача, який перебуває всередині конуса тіні. Діаметр її на поверхні Землі не перевищує 270 км, а діаметр Місяця дорівнює 3482 км. Отже, розмір кругової тіні від Місяця на поверхні Землі буде менший майже у 13 разів. **1.24.** 29,3 а. о. **1.26.** Рух тіла навколо Сонця по коловій орбіті не суперечить першому закону Кеплера. Орбіти планет майже не відрізняються від кола, тому що вони мають невеликий ексцентриситет ($e = c/a$). **1.28.** Це впливає з третього закону Кеплера $\frac{T_2^2}{T_1^2} = \frac{a_2^3}{a_1^3}$.

Оскільки велика піввісь орбіти Марса більша, ніж у Венери, то й період його обертання навколо Сонця більший. **1.30.** Згідно з уточненим законом

Кеплера $\frac{T_1(M + m_1)}{T_2(M + m_2)} = \frac{a_1^3}{a_2^3}$, що більша маса, то менший період. Враховуючи,

що m_1 і $m_2 \ll M$, зміна періоду буде незначною. **1.31.** Період обертання визначається співвідношенням $T = \frac{2\pi R}{v}$, де R – радіус орбіти. Швидкість

визначаємо з другого закону Ньютона: $\frac{mv^2}{R} = G \frac{Mm}{R^2}$. Звідси: $v = \sqrt{G \frac{M}{R}}$, де

M – маса Сонця. Як бачимо період обертання не залежить від маси Зем-

лі. Отже, період обертання не зміниться. **2.10.** На відстані 11 941 549 = 12 000 000 км. **2.11.** На відстані 4 780 882 800 = 4 800 000 000 км.

2.12. На відстані 1 349 466 226 = 1 350 000 000 км. **2.13.** Для ослаблення

різних атмосферних перешкод і запиленості повітря. **2.14.** Дніпро можна

побачити, бо його ширина має кут $\alpha = 500^\circ = 8'$. **3.10.** Крайні планети

Сонячної системи – Меркурій і Нептун мають орбіти з найбільшими екс-

центриситетами. Найбільше до кола подібна орбіта у Венери, ексцентри-

ситет якої 0,007. **3.11.** Сплюснутість планети Юпітер виникає через її

швидке обертання (період обертання екваторіальної зони 9 год 50 хв).

Сонце також сплюснуте, але внаслідок порівняно повільного обертання

(період обертання екваторіальної зони 25,4 доби), ця сплюснутість дуже

мала – 73 км і не піддається вимірюванням (0,1"). **3.13.** Період цих явищ

дорівнює синодичному періоду Марса ($S = 780^d$). **4.1.** Сонце випромінює

електромагнітні хвилі завдовжки від 400 нм (фіолетова частина спектра)

до 700 нм (червона частина спектра), суміш яких ми називаємо білим

світлом. Але найбільше енергії Сонце випромінює в жовто-зеленій частині

спектра на довжині хвилі близько 500 нм, тому астрономи мають право

називати Сонце жовтою зорею. **4.2.** $M_\odot = \frac{4\pi^2 a^3}{GT^2}$, де a – велика піввісь зем-

ної орбіти; G – гравітаційна стала; T – період обертання Землі навколо

Сонця. **4.3.** Так званий дефект маси визначають за допомогою формули

Ейнштейна: $\Delta M = \frac{E_\odot}{c^2}$, де $E_\odot = 4 \cdot 10^{26}$ ват – світність Сонця; c – швидкість

світла. За одну секунду маса Сонця зменшується на $4,44 \cdot 10^9$ кг, а за

1 рік – $\Delta M = 1,4 \cdot 10^{17}$ кг. **4.8.** Кутовий діаметр плями, яку ще можна

побачити на Сонці, має бути не меншим від роздільної здатності ока $\alpha > 1$.

Лінійний діаметр плями має бути не меншим від 50 000 км. **5.2.** Видима

зоряна величина визначає кількість енергії, яка потрапляє від зорі в

наше око, якщо ми спостерігаємо з поверхні Землі. Абсолютна зоряна

величина визначає кількість енергії, яка потрапляла б до нашого ока,

якби ми перебували на стандартній відстані 10 пк. **5.5.** Наприклад, якщо це Вега, вона буде в 54 рази яскравішою за Сонце. **5.6.** $8,3 \text{ пк} = 27 \text{ св. р.}$

5.7. За допомогою формули Погсона визначаємо: $\frac{E_1}{E_2} = 10^{0,4(2-0)} = 6,3$.

5.8. 100. **5.9.** $R_A = 295 R_\odot$. **5.19.** Середня густина дорівнює $2,4 \cdot 10^8 \text{ г/см}^3$.

5.20. Середня густина дорівнює $1,2 \cdot 10^8 \text{ г/см}^3$. **5.21.** Світність Сонця в майбутньому зросте в 55 разів. **5.22.** Сонце складається на 71 % з Гідрогену, і під дією термоядерних реакцій з ядер Гідрогену утворюються ядра Гелію, тоді як білі карлики – це старі зорі, де Гідроген відсутній.

5.23. Сонце буде коливатися з періодом 2 год 45 хв. **6.5.** Розподіл зір в Галактиці має дві яскраво виражені тенденції: 1) дуже сильно концентруватися до галактичної площини; 2) концентруватися до центру Галактики. Остання тенденція посилюється з наближенням до центральної частини Галактики, яку називають центральним згущенням Галактики, або ядром. Визначаючи відстані, на яких відбувається істотне падіння зоряної густини, отримуємо уявлення про розміри Галактики і про те місце, де приблизно розміщене Сонце. Встановлено, що Сонце віддалене від центра Галактики на відстань близько 10 000 пс, а її кордон у напрямку на антицентр розміщений на відстані 5000 пс від Сонця. **7.1.** 20 обертів. **7.7.** Галактичний рік – період обертання Сонця навколо центра Галактики. Він становить 230 млн років. Вік Сонця приблизно 20 галактичних років. **7.9.** У спектрах квазарів лінії поглинання зміщені в червону частину, і за допомогою ефекту Доплера можна визначити швидкість, з якою віддаляються від нас квазари. Наприклад, якщо квазар має швидкість 250 000 км/с, то за допомогою закону Габбла визначаємо від-

стань до нього: $r = \frac{v}{H} = 3600 \text{ Мпк}$. **7.10.** Наднові зорі в максимумі мають

159

абсолютну зоряну величину $M = -21^m$. **7.13.** Міжгалактичне теплове випромінювання з $T = 2,7 \text{ К}$, назване реліктовим, є застигле електромагнітне випромінювання епохи Великого Вибуху. Густина реліктового випромінювання приблизно 500 фотонів у кубічному сантиметрі. **7.20.** 20 000 км/с. **8.4.** Сучасні радіотелескопи дають можливість приймати електромагнітні хвилі, що випромінюють земні радіостанції, на відстані 100 св. р. Отже, якщо на такій відстані є цивілізація з рівнем інтелекту, як у землян, то ми могли б обмінюватися з нею інформацією. Але, на жаль, тривалість таких космічних переговорів сягатиме сотні років. **8.7.** 254 доби. **8.8.** 1 хвилина.

ПРЕДМЕТНО-ІМЕННИЙ ПОКАЖЧИК

160

Абсолютна зоряна величина 113
 Азимут світила 15
 Антенні галактики 141
 Астероїд 78
 Астрологія 8
 Астрометрично-подвійні зорі 118
 Астрономічна обсерваторія 47
 – рефракція 18
 Астрономія 4

Білі карлики 120

Видима зоряна величина 111
 Видиме збільшення 50
 Випромінювання небесних тіл 45
 Висота світила 15
 Всесвітній час 21

Галактика 136
 Галактики з активними ядрами 140
 Галактична площа 131
 Галактичний екватор 131
 Горизонтальний паралакс 36

Детектори нейтрино та гравітаційних хвиль 52
 Діаграма Герцшпрунга–Рассела 119
 Дійсна сонячна доба 19

Еволюційні переміщення 122
 Екзопланета 118
 Екліптика 28
 Еліптичні галактики 136
 Еруптивні зорі 123
 Ефект Доплера 56

Закон Віна і Стефана–Больцмана 56
 – всесвітнього тяжіння 34
 – Габбла 139
 – Кірхгофа 55
 Закони Кеплера 32, 33
 Затемнювано-подвійні зорі 117
 Зенітна відстань 16
 Зоряна астрономія 7
 Зоряні асоціації 133
 – карти 17
 – скупчення

Календар 22
 Карликові планети 76
 Карта зоряного неба 39
 Квазари 142
 Комети 81

Конвективна зона 99
 Космічна місія «Розетта» 88
 Космічні телескопи 86
 Космогонічний принцип 144
 Космогонія 7
 Космологія 7
 Кульові зоряні скупчення 131

Лінзоподібні галактики 138
 Лінійчастий спектр 5

Маса зір 119
 Метеори 83
 Метеорити 80
 Метод міжзоряних паралаксів 120
 Місячна фаза 30
 Місячне затемнення 31
 Модель будови зір 121
 – гарячого Всесвіту 145
 Молочний Шлях 131
 Мультивсесвіт 154

Надгіганти 120
 Наднові зорі 125
 Надскупчення галактик 144
 Небесна механіка 6
 – сфера 13
 Небесні координати 15
 Нейтронна зоря 126
 Нові зорі 125

Парсек 112
 Періоди обертання планет 27
 Планетарна туманність 122
 Подвійні зорі 116
 Пояс Койпера 77
 Приймачі випромінювання 47
 Протозоря 121
 Протуберанці 102
 Пряме піднесення світила 16
 Пульсар 126
 Пульсуючі змінні зорі 123

Радіант 83
 Радіоінтерферометр 51
 Радіотелескоп 51
 Рівняння часу 20

Роздільна здатність 50
 Розсіяні зоріні скупчення 133

Світловий рік 113
 Світність зір 113
 Сингулярність 126
 Синодичний місяць 22
 Смугастий спектр 54
 Сонячна активність 103
 – корона 102
 – стала 97
 Сонячне затемнення 31
 Сонячний вітер 104
 Сонячні плями 101
 Сонячно-земні зв'язки 105
 Спектральна класифікація зір 114
 Спектрально-подвійні зорі 118
 Спектрограф 54
 Спектроскоп 54
 Спіральні галактики 137
 Стала Стефана–Больцмана 114
 Сузір'я 10
 Супутники планет 74
 Суцільний спектр 54
 Схилення світила 16

Телескоп-рефлектор 49
 Телескоп-рефрактор 48
 Точка весняного рівнодення 16
 – осіннього рівнодення 16
 Точки небесної сфери 13, 14
 Триангуляція 35
 Тропічний рік 22

Уран 72

Факели 101
 Фізично-змінні зорі 123
 Формула Погсона 111
 Фотосфера 101
 Фундаментальні взаємодії

Хмара Оорта 77

Цефеїди 124

Червоні карлики 120
 Число Вольфа 103
 Чорні діри 126
 Чумацький Шлях 131

ЗМІСТ

ВСТУП 3

- § 1. Предмет астрономії. Її розвиток і значення в житті суспільства. Короткий огляд об'єктів дослідження в астрономії..... 4

Розділ 1. НЕБЕСНА СФЕРА. РУХ СВИТИЛ НА НЕБЕСНІЙ СФЕРІ

- § 2. Небесні світила та небесна сфера. Зорі. Зоряні величини 10
- § 3. Небесні координати..... 15
- § 4. Астрономія та визначення часу. Типи календарів..... 19
- § 5. Видимий рух планет 24
- § 6. Видимий рух Сонця та Місяця..... 28
- § 7. Закони Кеплера 32
- § 8. Визначення розмірів, мас небесних тіл і відстаней до них у Сонячній системі 34

Практична робота № 1. Робота з рухомою картою зоряного неба. Визначення положення світил на небесній сфері за допомогою карти зоряного неба 39

Задачі та вправи 42

Перевір свою компетентність 43

Тестові завдання 44

Розділ 2. МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ АСТРОНОМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

- § 9. Дослідження електромагнітного випромінювання небесних тіл 45
- § 10. Сучасні наземні телескопи. Принцип дії і будова оптичного та радіотелескопа, детекторів нейтрино і гравітаційних хвиль 47
- § 11. Спектральний аналіз в астрономії. Методи астрономічних досліджень 53

Задачі та вправи 57

Перевір свою компетентність 58

Тестові завдання 59

Розділ 3. НАША ПЛАНЕТНА СИСТЕМА

- § 12. Земля і Місяць 60
- § 13. Планети земної групи..... 64
- § 14. Планети-гіганти..... 69
- § 15. Супутники планет 73
- § 16. Карликові планети та малі тіла Сонячної системи 76
- § 17. Дослідження тіл Сонячної системи та Всесвіту за допомогою космічних апаратів..... 84
- § 18. Гіпотези і теорії формування Сонячної системи 90

Задачі та вправи 94

Перевір свою компетентність 95

Тестові завдання 95

Розділ 4. СОНЦЕ – НАЙБЛИЖЧА ЗОРЯ

- § 19. Фізичні характеристики Сонця. Будова Сонця та джерела його енергії 97
- § 20. Будова сонячної атмосфери 101
- § 21. Прояви сонячної активності та їхній вплив на Землю..... 104

Практична робота № 2. Візуально-телескопічні спостереження Сонця..... 107

Задачі та вправи..... 109

Перевір свою компетентність 109

Тестові завдання 110

Розділ 5. ЗОРІ. ЕВОЛЮЦІЯ ЗІР

- § 22. Основні характеристики зір 111
- § 23. Температура та розміри зір. Зорі та їхня класифікація. Звичайні зорі 114
- § 24. Подвійні зорі. Маса зір. Планетні системи інших зір 116
- § 25. Еволюція зір. Білі карлики 119
- § 26. Фізично-змінні зорі. Нейтронні зорі. Чорні діри 123

Задачі та вправи..... 128

Перевір свою компетентність 129

Тестові завдання 129

Розділ 6. НАША ГАЛАКТИКА

- § 27. Наша Галактика. Молочний Шлях. Місце Сонячної системи в Галактиці 131

Задачі та вправи..... 135

Перевір свою компетентність 135

Розділ 7. БУДОВА І ЕВОЛЮЦІЯ ВСЕСВІТУ

- § 28. Зоряні системи – галактики. Світ галактик 136
- § 29. Всесвіт. Походження та еволюція Всесвіту. Історія розвитку уявлень про Всесвіт. Спостережні основи космології 143

Задачі та вправи..... 147

Перевір свою компетентність 147

Тестові завдання 148

Розділ 8. ЖИТТЯ У ВСЕСВІТІ

- § 30. Людина у Всесвіті. Пошук життя за межами Землі..... 150

Задачі та вправи..... 156

Перевір свою компетентність 156

Тестові завдання 156

Відповіді до задач..... 158

Предметно-іменний покажчик..... 160

НАЙУЖИВАНІШІ АСТРОНОМІЧНІ ПОЗНАЧЕННЯ			
Позначення	Назва	Позначення	Назва
<i>N</i>	північ	<i>A</i>	азимут
<i>NE</i>	північний схід	α або (<i>AR</i>)	пряме сходження
<i>S</i>	південь	δ	схилення
<i>SE</i>	південний схід	λ	екліптична (географічна довгота)
<i>E</i>	схід	<i>b</i>	галактична широта
<i>NW</i>	північний захід	β	екліптична широта
<i>W</i>	захід	φ	географічна широта
<i>SW</i>	південний захід	<i>z</i>	зенітна відстань
<i>a</i>	рік	μ	власний рух
<i>d</i>	доба	<i>l</i> або <i>l'</i>	галактична довгота
<i>h, m, s</i>	година, хвилина, секунда часу	π	річний паралакс
$^{\circ}, ', ''$	градус, хвилина, секунда дуги	v_r	променева швидкість
<i>t</i>	часовий кут світила	<i>h</i>	висота світила над горизонтом
<i>s</i>	зоряний час	<i>p</i>	полярна відстань
$T_{\odot}$	сонячний час	T_{*}	зоряний рік
Υ	Arles (Овен), а також точка весняного рівнодення в сузір'ї Риб		
$\ Libra$	Libra (Терези), а також точка осіннього рівнодення в сузір'ї Діви		
$\ Taurus$	Taurus (Телець)		
$\ Scorpius$	Scorpius (Скорпіон)		
$\ Gemini$	Gemini (Близнюки)		
$\ Sagittarius$	Sagittarius (Стрілець)		
$\ Cancer$	Cancer (Рак), а також точка літнього сонцестояння в сузір'ї Тельця (з 1990 р.)		
$\ Capricornus$	Capricornus (Козеріг), а також точка зимового сонцестояння в сузір'ї Стрільця		
$\ Leo$	Leo (Лев)		
$\ Aquarius$	Aquarius (Водолій)		
$\ Virgo$	Virgo (Діва)		
$\ Pisces$	Pisces (Риби)		

ГЕОГРАФІЧНІ КООРДИНАТИ ОБЛАСНИХ ЦЕНТРІВ УКРАЇНИ					
Місто	φ	λ	Місто	φ	λ
Вінниця	49,2	28,4	Полтава	49,6	34,6
Дніпро	48,4	35,0	Рівне	50,6	26,1
Донецьк	48,0	37,8	Сімферополь	45,0	34,1
Житомир	50,3	28,7	Суми	50,9	34,8
Запоріжжя	47,8	35,2	Тернопіль	49,6	25,6
Івано-Франківськ	48,9	24,7	Ужгород	48,6	22,4
Київ	50,5	30,5	Харків	50,0	36,3
Кропивницький	48,4	32,2	Херсон	46,6	32,6
Луганськ	48,5	39,3	Хмельницький	49,4	27,0
Луцьк	50,8	25,3	Черкаси	49,5	32,1
Львів	49,9	24,0	Чернігів	51,5	31,3
Миколаїв	47,0	32,0	Чернівці	48,3	25,9
Одеса	46,5	30,75			

ФІЗИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАНЕТ									
Планета	Середній радіус		Маса		Густина, кг/м ³	Гравітаційне прискорення на екваторі, м/с ²	Параболічна швидкість, км/с	Сидеричний екваторіальний період обертання	Видима зоряна величина
	км	у радіусах Землі	у масах Землі	·10 ²⁴ кг					
Меркурій	2439	0,383	0,055	0,330	5500	3,72	4,3	58,65 ^d	−0,2 ^m
Венера	6052	0,950	0,815	4,87	5200	8,87	10,4	243,16 ^d	−4,1 ^m
Земля	6371	1,000	1,000	5,98	5500	9,78	11,2	23 ^h 56 ^m	—
Марс	3393	0,532	0,107	0,64	3900	3,76	5,0	24 ^h 37 ^m	−1,9 ^m
Юпітер	71398	11,19	317,89	1900	1300	25	61,0	9 ^h 50 ^m	−2,4 ^m
Сатурн	60000	9,41	95,17	568	700	11,0	36,0	10 ^h 14 ^m	+0,8 ^m
Уран	26200	4,11	14,6	87	1600	9,50	22,0	10 ^h 49 ^m	+5,8 ^m
Нептун	24300	3,81	17,2	103	1720	11,50	24,0	19 ^h 00 ^m	+7,6 ^m

Навчальне видання
СИРОТЮК Володимир Дмитрович
МИРОШНІЧЕНКО Юрій Борисович

АСТРОНОМІЯ

(рівень стандарту, за навчальною програмою
авторського колективу під керівництвом Яцківа Я. С.)

Підручник для 11 класу
закладів загальної середньої освіти

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України

Видано за рахунок державних коштів.
Продаж заборонено

Головний редактор *Наталія Заблоцька*
Редактор *Олена Мовчан*
Обкладинка *Світлани Железняк*
Художній редактор *Світлана Железняк*
Технічний редактор *Цезарина Федосіхіна*
Комп'ютерна верстка *Лариси Кулагіної*
Коректор *Любов Федоренко*

Формат 70×100/16.
Ум. друк. арк. 13,0. Обл.-вид. арк. 12,94.
Тираж 102 658 пр. Вид. № 2001.
Зам. №

Видавництво «Гене́за», вул. Тимошенка, 2-л, м. Київ, 04212.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи серія ДК № 5088 від 27.04.2016.

Віддруковано у ТОВ «ПЕТ», вул. Ольмінського, 17, м. Харків, 61024.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи серія ДК № 4526 від 18.04.2013.

НАЙЯСКРАВІШІ ЗОРІ										
Назва зорі	Позначення у сузір'ї	Екваторіальні координати		Видима зоряна величина, ^m	Видима кульмінація близько півночі	Радіус, $R/R_{\odot}$	Маса, $M/M_{\odot}$	Температура, К	Колір	Річний паралакс, π
		α	δ							
Альдебаран	α Тельця	4 ^h 34,5 ^m	+16°28'	0,86	На початку грудня	45	5	3500	Оранжевий	0,048''
Альгаїр	α Орла	19 ^h 49,6 ^m	+8°48'	0,76	У середині липня	1,6	2	8400	Білий	0,196''
Антарес	α Скорпіона	16 ^h 27,9 ^m	-26°23'	0,91	Наприкінці травня	750	19	3100	Червоний	0,019''
Арктур	α Волопаса	14 ^h 14,5 ^m	+19°19'	-0,05	Наприкінці квітня	26	4	4100	Оранжевий	0,09''
Бетельгейзе	α Оріона	5 ^h 53,8 ^m	+7°24'	0,42	У середині грудня	900	20	3100	Червоний	0,005''
Вега	α Ліри	18 ^h 36,1 ^m	+38°46'	0,03	На початку липня	3	3	10600	Білий	0,123''
Денеб	α Лебедя	20 ^h 40,6 ^m	+45°11'	1,25	На початку серпня	50	15	9800	Білий	0,004''
Капела	α Візничого	5 ^h 14,8 ^m	+45°58'	0,08	У середині грудня	16	3	5200	Жовтий	0,073''
Кастор	α Близнюків	7 ^h 33,0 ^m	+31°57'	1,99 } 1,58 2,85 }	У середині січня	2,5 } 2,3 }	3 } 2,8 }	10000 10400	Білий Білий	0,072''
Поллукс	β Близнюків	7 ^h 43,8 ^m	+28°05'	1,14	У середині січня	11	3,5	4600	Оранжевий	0,072''
Полярна	α М. Ведмедиці	2 ^h 07,4 ^m	+89°09'	2,02	У середині жовтня	70	10	6200	Жовтий	0,005''
Проціон	α М. Пса	7 ^h 38,0 ^m	+5°17'	0,37	У середині січня	2	1,5	6900	Жовтий	0,286''
Регул	α Льва	10 ^h 07,0 ^m	+12°05'	1,34	Наприкінці лютого	4	5	13200	Білий	0,039''
Ригель	β Оріона	5 ^h 13,3 ^m	-8°14'	0,13	У середині грудня	90	20	12800	Білий	0,003''
Сіріус	α В. Пса	6 ^h 44,0 ^m	-16°41'	-1,46	На початку січня	1,7	3	10400	Білий	0,375''
Спіка	α Діви	13 ^h 23,9 ^m	-11°02'	0,97	У середині квітня	7	15	16800	Біло-голубий	0,021''
Толіман	α Центавра	14 ^h 37,9 ^m	-60°44'	0,33 } 0,06 1,70 }	На початку травня	1,0 } 1,2 }	1,0 } 0,6 }	5900 4200	Оранжевий	0,751''
Фомальгаут	α Півд. Риби	22 ^h 56,3 ^m	-29°45'	1,3	На початку серпня	1,6	2,5	9800	Білий	0,144''