

М. В. Головка, І. П. Крячко

# АСТРОНОМІЯ

Навчальний посібник  
для профільної школи

м. Київ  
«КОНВІ ПРІНТ»  
2018

УДК 52(075.3)

**«Схвалено для використання у загальноосвітніх  
навчальних закладах».**

(лист ДНУ «Інститут модернізації змісту освіти»  
№ 22.1/12-Г-84 від 02.02.2018)

Рекомендовано до друку вченою радою Інституту педагогіки НАПН України  
(протокол № 11 від 27.11.2017 р.)

Рецензенти:

**Сиротюк В. Д.**, доктор педагогічних наук, професор, завідувач кафедри теорії та методики навчання фізики і астрономії фізико-математичного факультету Національного педагогічного університету імені М. П. Драгоманова.

**Тарара А. М.**, кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, доцент, завідувач відділу технологічної освіти Інституту педагогіки НАПН України.

**Шабалтас Г. Б.**, учитель-методист, учитель фізики гімназії № 178 м. Києва.

**Астрономія:** навчальний посібник / М. В. Головка, І. П. Крячко. – К.: ТОВ «КОНВІ ПРІНТ», 2018. – 272 с.

ISBN 978-617-7724-24-6

Навчальний посібник реалізує зміст варіативного складника профільного навчання астрономії в старшій школі. Він призначений учням 10–11 класів закладів загальної середньої освіти. У ньому на засадах компетентісно орієнтованого підходу висвітлюється навчальний матеріал з астрономії, що розширює та поглиблює зміст профільного предмету «Астрономія». Містить систему вправ та завдань, спрямованих на формування та розвиток предметної і ключових компетентностей учнів у процесі навчання астрономії.

УДК 52(075.3)

© Інститут педагогіки НАПН України, 2018

© М. В. Головка, І. П. Крячко, 2018

ISBN 978-617-7724-24-6

© КОНВІ ПРІНТ, 2018

# Зміст

Вступ .....	5
Як працювати з посібником .....	6
<b>Частина 1. Космографія.</b> .....	8
§ 1. Що таке астрономія і навіщо вона потрібна? .....	8
<b>Розділ I. Вступ до астрономії.</b> .....	11
<i>ТЕМА 1.1. ЗОРЯНЕ НЕБО Й НЕБЕСНА СФЕРА</i> .....	11
§ 2. Зоряне небо, небесні світила і небесна сфера .....	11
§ 3. Сузір'я, видимі та абсолютні зоряні величини. ....	14
§ 4. Системи небесних координат. ....	21
§ 5. Зоряні мапи й каталоги небесних об'єктів .....	24
§ 6. Вигляд зоряного неба на різних широтах .....	28
<b>Розділ II. Рух небесних світил та основи практичної космографії.</b> .....	32
<i>ТЕМА 1.2. ВИДИМІ РУХИ СВІТИЛ</i> .....	32
§ 7. Обертання небесної сфери і зміна вигляду зоряного неба .....	32
§ 8. Видимі рухи Сонця, Місяця, планет .....	35
§ 9. Закони Кеплера та їх застосування .....	41
<i>ТЕМА 1.3. ОСНОВИ ПРАКТИЧНОЇ КОСМОГРАФІЇ</i> .....	47
§ 10. Орієнтування на місцевості по небесних світилах .....	47
§ 11. Визначення часу з астрономічних спостережень. Календарі .....	50
<b>Частина 2. Основи астрономії.</b> .....	55
§ 1. Вступ. Предмет астрономії та його особливості .....	55
<b>Розділ I. Методи і засоби астрономії</b> .....	59
§ 2. Джерела інформації про небесні об'єкти .....	59
§ 3. Основи астрофотометрії .....	61
§ 4. Спектральний аналіз в астрономії .....	63
§ 5. Оптичні телескопи .....	67
§ 6. Радіотелескопи та телескопи і детектори для невидимого випромінювання .....	74
§ 7. Приймачі випромінювання в астрономії. ....	80
§ 8. Астрономічні обсерваторії .....	84
§ 9. Астрономія з космосу .....	86
<b>Розділ II. Елементи астрофізики</b> .....	92
<i>ТЕМА 2.1. ФІЗИКА ТІЛ СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ</i> .....	92
§ 10. Земля і Місяць .....	92
§ 11. Будова Сонячної системи .....	97
§ 12. Планети земної групи .....	101
§ 13. Планети-гіганти .....	106
§ 14. Карликові планети та малі тіла .....	111
§ 15. Космогонія Сонячної системи .....	119
<i>ТЕМА 2.2. ФІЗИКА ЗІР І МІЖЗОРЯНОГО СЕРЕДОВИЩА</i> .....	122
§ 16. Поняття зорі. Найближча зоря – Сонце. ....	122
§ 17. Джерело енергії Сонця. ....	126
§ 18. Сонячна активність і її прояви на Землі .....	129

§ 19. Зорі та їх класифікація . . . . .	134
§ 20. Подвійні, кратні та змінні зорі . . . . .	138
§ 21. Утворення зір . . . . .	145
§ 22. Кінцеві стадії еволюції зір . . . . .	150
§ 23. Міжзоряне середовище . . . . .	156
<b>Розділ III. Елементи позагалактичної астрономії . . . . .</b>	<b>162</b>
<i>ТЕМА 3.1. НАША ГАЛАКТИКА . . . . .</i>	<i>162</i>
§ 24. Будова Галактики . . . . .	162
§ 25. Розподіл речовини в Галактиці та її супутники . . . . .	168
<i>ТЕМА 3.2. ГАЛАКТИКИ . . . . .</i>	<i>173</i>
§ 26. Типи галактик . . . . .	173
§ 27. Великомасштабна структура Всесвіту . . . . .	179
<b>Розділ IV. Елементи космології . . . . .</b>	<b>184</b>
<i>ТЕМА 4.1. ВСЕСВІТ ЯК ЦІЛІСНЕ СЕРЕДОВИЩЕ ЖИТТЯ . . . . .</i>	<i>184</i>
§ 28. Всесвіт як ціле . . . . .	184
§ 29. Елементи сучасної космології . . . . .	189
<b>Частина 3. Космософія . . . . .</b>	<b>198</b>
§ 1. Вступ до наукової космософії . . . . .	198
<b>Розділ I. Коротка історія астрономії . . . . .</b>	<b>203</b>
<i>ТЕМА 1.1. РОЗВИТОК АСТРОНОМІЧНОЇ НАУКИ В СВІТІ . . . . .</i>	<i>203</i>
§ 2. Астрономія в стародавньому світі . . . . .	203
§ 3. Розвиток астрономії в середні віки (V–XV ст.) . . . . .	210
§ 4. Астрономія в XVI – XX століттях . . . . .	216
§ 5. Перспективи розвитку астрономії . . . . .	221
<i>ТЕМА 1.2. РОЗВИТОК АСТРОНОМІЧНОЇ НАУКИ В УКРАЇНІ . . . . .</i>	<i>223</i>
§ 6. Уявлення про Всесвіт у Київській Русі . . . . .	223
§ 7. Астрономія в Україні в XV – XVIII ст. . . . .	227
§ 8. Перші астрономічні обсерваторії в Україні . . . . .	230
§ 9. Астрономія в Національній академії наук України . . . . .	233
<b>Розділ II. Астрономічні знання, наукова картина світу і світогляд . . . . .</b>	<b>238</b>
<i>ТЕМА 2.1. АСТРОНОМІЯ І НАУКОВА КАРТИНА СВІТУ . . . . .</i>	<i>238</i>
§ 10. Системи світу . . . . .	238
§ 11. Астрономія і наукова картина світу . . . . .	241
<i>ТЕМА 2.2. АСТРОНОМІЧНІ ЗНАННЯ І СВІТОГЛЯД . . . . .</i>	<i>244</i>
§ 12. Астрономія і світогляд . . . . .	244
§ 13. Сучасні астрокосмічні міфи . . . . .	248
<b>Розділ III. Астрономія як складова культури . . . . .</b>	<b>251</b>
<i>ТЕМА 3.1. КОСМОС В КУЛЬТУРІ . . . . .</i>	<i>251</i>
§ 14. Міфи і легенди про Всесвіт . . . . .	251
§ 15. Астрономічна картина Середньовіччя . . . . .	255
§ 16. Астрономія в культурі XVII – XX століть . . . . .	259
<i>ТЕМА 3.2. ЛЮДИНА І ВСЕСВІТ . . . . .</i>	<i>265</i>
§ 17. Життя у Всесвіті . . . . .	265
§ 18. Мультивсесвіт . . . . .	271

# Вступ

Навчальний посібник призначено для учнів, які бажають докладно вивчити астрономію – науку, що розкриває таємниці нашого всесвіту, а також, можливо, мріють стати професійними астрономами.

Астрономія належить до фізико-математичних наук, які вивчають об'єкти і явища природи в широких просторових і часових межах. Об'єкт вивчення астрономії – небесні тіла та їх системи, явища природи, що відбуваються за межами Землі та в її атмосфері. Особливість астрономічних досліджень та, що небесні тіла і їх системи перебувають у процесі розвитку.

Астрономія самодостатня: вона має об'єкт вивчення; розробила і розробляє методи дослідження, спираючись на власні здобутки, на знання, отримані фізикою та іншими природничими науками, а також на математику, як універсальну «наукову мову». Водночас для багатьох людей астрономія – цікава наука, бо таємничим та загадковим і водночас чарівним і прекрасним є світ зоряного неба.

Шкільні навчальні предмети, які подають астрономічні знання, традиційно орієнтовані головню на суто наукові результати, а також методи і засоби їх отримання. Наш посібник виходить за рамки цієї традиції і подає астрономію ширше – як елемент культури, як суттєвий чинник, що впливає на зміст наукової картини світу та світогляд. Тобто до наукової складової змісту, що становить основу посібника, ми допасовуємо світоглядну й культурну складові.

Ми вважаємо, що людина, яка ґрунтовно цікавиться астрономією, має опанувати не лише наукове астрономічне знання, але й отримати певну частину історичної та культурологічної інформації, пов'язаної з астрономією та її розвитком.

Нині астрономічна наука вивчає небесні тіла і космічний простір в дуже широких просторових межах – від Місяця до найвіддаленіших галактик, що лежать на межі видимого Всесвіту. Астрономи розробляють все більші й більші наземні й космічні телескопи, планують і споряджають нові космічні місії й експерименти в межах Сонячної системи.

Астрономія завжди перебуває на передньому краї природознавства. Вона тісно взаємодіє з фізикою, хімією та біологією з різних питань, які ці науки намагаються вивчати за межами Землі. Це привело до появи колись астрофізики і астрохімії, а згодом і астробіології.

Астрономія в багатьох аспектах є дивовижною наукою. Здобуті нею знання – важливий скарб нашої цивілізації. Автори посібника підтримують Ваш намір вивчати ґрунтовно астрономію і мають надію, що він стане Вам у пригоді.

Бажаємо Вам успіхів у вивченні астрономії!

*Автори*

## Як працювати з посібником

Посібник містить три частини – «Космографія», «Основи астрономії» та «Космософія». Вони вміщують навчальні матеріали, які розкривають наукову, світоглядну та культурологічну складові змісту профільного рівня курсу астрономії загальноосвітніх навчальних закладів.

Структуру і зміст посібника укладено й дібрано з позицій діяльнісного, практико-орієнтованого підходу до навчально-пізнавальної діяльності учня. Навчальний матеріал не лише відповідає сучасному стану астрономічної науки, але й відображає її соціальну роль і значення в культурі. Він зорієнтований на інтелектуальний розвиток учня у процесі навчання (головно самонавчання).

Параграфи посібника вміщують основний текст – стислий опис навчальної теми. Цей текст радимо прочитати ретельно. Більшість термінів, виділених курсивом, пояснено в тексті. Якщо будуть незрозумілі терміни, радимо звертатися до Термінологічного астрономічного словника на Українському астрономічному порталі (<http://www.astrosvit.in.ua/astroslovnuk>).

Жирним шрифтом у посібнику виділено найважливіші поняття, які вам доцільно опанувати, тобто зрозуміти їх суть, навчитись використовувати під час подальшого вивчення астрономії.

Посібник ілюстровано рисунками. Вони є важливою складовою навчального матеріалу, а тому радимо працювати з ним також вдумливо. Бажано зрозуміти, що зображено на малюнку, а для цього потрібно прочитати підпис під ним.

Окремі параграфи містять «Типову задачу» – їх розв'язування базується на тих знаннях, які ви маєте отримати, опанувавши матеріал параграфа. Задачу називаємо типовою, бо як за схемою її розв'язування, так і за даними, які в ній фігурують, можна розв'язувати низку інших, схожих, задач.

Кожен параграф посібника вміщує Висновки – стислий опис навчального матеріалу, який було викладено в тому чи іншому параграфі.

Зверніть увагу на практичні роботи, що є частиною окремих параграфів і які варто виконати, опановуючи навчальний матеріал. Радимо виконувати їх самостійно, наприклад, спостерігати характерні сузір'я чи фази Місяця. Поради щодо спостережень небесних об'єктів подано на сторінках посібника.

Умістити всю інформацію, яка стосується навчального матеріалу, на сторінках посібника неможливо, адже її дуже багато. Тому розглядайте цей посібник не стільки як підручник, а як своєрідний дороговказ, що спрямовує вас на вивчення певного матеріалу.

Використовуйте можливості інформаційно-навчального середовища курсу астрономії загальноосвітньої школи, яке формують Український астрономічний портал, сайт «Астроосвіта», науково-популярний інтернет-журнал «Наше небо», Ютуб-канал Astronomy in UA. Користуйтеся додатковими джерелами інформації. Читайте тексти, переглядайте світлини і відеозображення. Думайте, міркуйте щодо прочитаного і побаченого. Працюйте самостійно. Це не дуже легко, окремі питання можуть бути для вас складними, але завжди намагайтеся їх опанувати. Тільки в такому разі ви досягнете навчальних цілей.

Отже, посібник перед вами. Все інше у вивченні астрономії залежить тільки від вас. Навчайтеся!

# Частина 1. Космографія

## § 1. ЩО ТАКЕ АСТРОНОМІЯ І НАВИЩО ВОНА ПОТРІБНА?

Людство спостерігає зоряне небо з давніх-давен, адже на Землі для цього є важлива умова – ясне безхмарне небо. Спостерігати зоряне небо змушували людину життєві потреби, а також відома кожному з нас людська допитливість. Нового сенсу набула потреба спостерігати зоряне небо та його об'єкти після того, як людина пов'язала небесні події з обставинами свого життя.

### 1. Астрономія – одна з найдавніших наук.

Вибиті на камені зображення яскравих зір та їх груп, зарубки на бивні мамонта для відліку часу за фазами Місяця, спеціальні майданчики для спостережень за небесними світилами (перші обсерваторії) є свідченнями давнього інтересу людини до зоряного неба.

Рис. 1.1. Матеріальні пам'ятки – свідчення давнього інтересу людини до зоряного неба.



Було щонайменше дві причини, які зумовили появу і стимулювали розвиток астрономії. Перша – практична потреба в орієнтуванні на місцевості та визначенні часу доби. Із появою тваринництва і хліборобства потрібні були календарі, що дозволяли визначати найсприятливіші періоди року для виконання певних робіт. Ці життєво важливі завдання людина вирішувала, спостерігаючи небесні світила. Друга причина – прагнення людини розкрити таємниці світобудови, зрозуміти свою залежність від космічних обставин і своє місце у Всесвіті.

Але найперші астрономічні знання були лише засобом для задоволення життєвих потреб. Сума накопичених результатів астрономічних спостережень та їх застосування – ще не наука. Наука виникла тоді, коли людина навчилася оперувати ідеальними образами об'єктів зовнішнього світу, тобто опанувала вищий рівень мислення і новий тип знання. Цивілізації стародавнього Сходу та Америки не мали потрібного рівня абстрагування. Його досягли в Стародавній Греції у VI – V ст. до н. е.

Отже, **астрономія** (від грецьких слів: «астрон» – «зоря», «номос» – «закон») – наука про небесні тіла, про закони їхнього руху, будови і розвитку, а також про будову й розвиток Всесвіту в цілому.

Ентоні Паннекук, автор книжки «A History of Astronomy» (1961), зауважив: «Історія астрономії збігається з процесом розвитку людства від самого початку цивілізації і відноситься, головню, до того часу, коли суспільство й особистість, праця і обряд, наука і релігія були ще єдиним нероздільним цілим. Протягом усіх цих століть вчення про зорі було суттєвою складовою філософсько-релігійного світогляду, що відображав суспільне життя. Якщо сучасний фізик озирнеться на своїх попередників, які стоять першими біля підвалин будівлі науки, він знайде таких же людей, як і він сам, з аналогічними уявленнями про експеримент і теорію, про причину і наслідок (щоправда, це були перші, складніші шукання). Якщо ж астроном подивиться назад, на своїх попередників, він виявить вавилонських жерців та ворожбитів, грецьких філософів, мусульманських володарів, середньовічних ченців, дворян і духовних осіб епохи Відродження і далі, аж доки в особі вчених XVII і XVIII ст. не зустрине своїх колег по професії. Для всіх них астрономія була не обмеженою галуззю науки, а вченням про світ, тісно пов'язаним з їхніми думками й почуттями, з усім їх світоглядом у цілому».

## 2. Значення астрономічних знань для людства.

Здавна астрономія сприяє вирішенню практичних потреб людини. На підставі знань, отриманих зі спостережень небесних світил, було розроблено перші годинники і календарі, виявлено періодичність сонячних і місячних затемнень. Ці знання – одні з перших. Вони стали основою уявлень людини про довкілля.

Вивчення Космосу дозволило зробити багато важливих відкриттів. Наприклад, було виявлено невідомі раніше на Землі стани речовини й нові джерела енергії (зокрема, атомна енергія). Розвиток математики, географії, фізики, хімії, а також інших наук, якщо не прямо, то опосередковано був пов'язаний з успіхами й запитами астрономії в дослідженні небесних тіл.

Принцип інерції, відкритий Галілео Галілеєм, закон всесвітнього тяжіння Ісаака Ньютона й загальна теорія відносності Альберта Айнштайна – усі ці відкриття зроблені на підставі астрономічних даних. Легенда про яблуко, що впало на голову І. Ньютона й підштовхнуло його до виявлення закону всесвітнього тяжіння, красива. Але геніальній здогадці науковця передував ретельний аналіз руху Місяця навколо Землі.

А. Айнштайн вважав, що інтелектуальні здобутки, без яких розвиток сучасної техніки неможливий, отримані, головню, завдяки спостереженням зоряного неба. Отже, уявлення про те, що астрономія – відірвана від життя абстрактна наука, яка лише задовольняє людську допитливість щодо природи небесних тіл, є хибним.

Дослідження Всесвіту лежать у руслі загального наукового прогресу нашої цивілізації. Завдяки астрономії, Всесвіт став для дослідників величезною науковою лабораторією, в якій відбувається пошук технічних і технологічних рішень на благо людини.



### НАВЧАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

- Поміркуйте, які знання про Космос мало б людство, якби мешкало на планеті, де небо завжди суцільно вкрите хмарами? Підготуйте на цю тему усну доповідь.
- 

### ВИСНОВКИ

Астрономія – наука про небесні тіла, про закони їхнього руху, будови й розвитку, а також про будову й розвиток Всесвіту в цілому. Хоча перші астрономічні знання людина здобула й використала для практичних і духовних потреб дуже давно, астрономія як наука зародилася в Стародавній Греції в VI – V ст. до н. е.

# Розділ I. Вступ до астрономії

## ТЕМА 1.1. ЗОРЯНЕ НЕБО Й НЕБЕСНА СФЕРА

### § 2. ЗОРЯНЕ НЕБО, НЕБЕСНІ СВІТИЛА І НЕБЕСНА СФЕРА

Перше враження від спостереження зоряного неба – незліченність зір і хаотичність їх розміщення на небосхилі. Насправді неозброєним оком на небі Землі можна побачити близько 6000 зір. За найяскравішими з них легко «намалювати» прості геометричні фігури, наприклад, трикутники чи прямокутники.

#### 1. Зоряне небо і небесні світила.

В різний час на небі, окрім зір, можна спостерігати Місяць, планети та інші об'єкти. Їх в астрономії для зручності позначають поняттям *небесні світила*. Якщо йдеться про астрономічні спостереження, коли природа небесного тіла не важлива, то використовують саме цей термін.

Найяскравіші світила на небі Землі – Сонце, Місяць, п'ять планет (Меркурій, Венера, Марс, Юпітер і Сатурн). Доволі яскравими є також деякі зорі, наприклад, Сиріус, Канопус, Арктур, Вега, Капелла, Рігель, Прокціон.

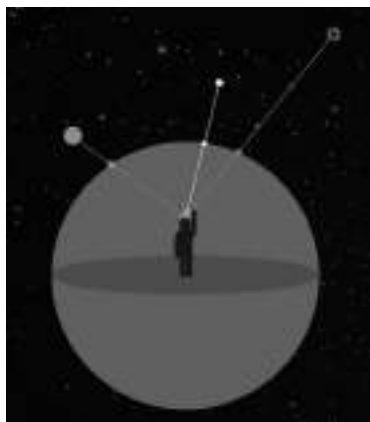


Рис. 2.1. Перше враження від спостереження зоряного неба – небесні світила лежать на внутрішній поверхні деякої сфери. Зверніть увагу: в її центрі фактично міститься око спостерігача.

#### 2. Небесна сфера.

Спостерігаючи зоряне небо, важко позбутися враження про сферичне склепіння, яке начебто є над головою. Насправді ніякого твердого неба не існує. Світила містяться від Землі на різних відстанях, але вони такі великі, що наше око не сприймає цієї різниці. Ми розрізняємо відстані лише в межах до 2 км.

Всі предмети, що лежать далі, нам здаються віддаленими однаково. Тому й виникає відчуття, що всі небесні світила лежать на однаковій відстані на внутрішній поверхні сфери. Ще в стародавні часи її назвали *небесною сферою* (рис. 2.1). Астрономи використовують небесну сферу як модель для вивчення видимих рухів світил та визначення їх взаємних положень.

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

У визначенні небесної сфери її радіус вказано довільним. Що це означає? Для правильного розуміння поняття треба вважати радіус небесної сфери як завгодно великим – таким, що перевищує відстань до найдалшого з відомих нам небесних об'єктів. Водночас радіус небесної сфери не може бути нескінченно великим ( $R = \infty$ ), бо в такому разі кривизна поверхні (величина, обернена до радіуса) буде дорівнювати нулю. Тобто, сферична поверхня стане плоскою, що суперечить спостереженням.

Проведемо через центр небесної сфери (рис. 2.2) прямовисну лінію, або лінію виска. Вона перетне її в двох точках: точці *зеніту* ( $Z$ ) – найвищій над головою спостерігача, і точці *надиру* ( $Z'$ ) – у протилежній півкулі під його ногами. Площина, проведена через центр небесної сфери перпендикулярно до прямовисної лінії, перетинає небесну сферу по великому колу, яке називають *математичним*, або *істинним горизонтом* ( $SWNE$ ). Він практично ніколи не збігається з видимим горизонтом. На суші видимий горизонт – неправильна лінія, точки якої лежить вище або нижче за істинний горизонт. У відкритому морі видимий горизонт є завжди малим колом, площина якого паралельна до площини математичного горизонту.

Мале коло, що проходить через світило і площина якого паралельна до площини математичного горизонту, називають *альмукантаратом* світила. А велике півколо, що проходить через світило, зеніт і надир, – *колом висоти*, *вертикальним колом*, або просто *вертикалом світила*.

Вигляд нічного неба повсякчас змінюється: на заході світила опускаються до горизонту й деякі з них заходять, а на сході – поступово піднімаються, а на їх місці з'являються нові, яких раніше не було видно. Це є наслідком обертання небесної сфери.

Вісь обертання небесної сфери (вона паралельна осі обертання Землі, адже насправді обертається Земля, а не ця сфера), називають *віссю світу*. Вона перетинає небесну сферу в двох точках – *полюсах світу*. Північним полюсом світу є той, дивлячись на який з поза меж небесної сфери, ми бачимо її обертання за годинною стрілкою. У нашу епоху ця точка лежить поблизу зорі  $\alpha$  Малої Ведмедиці, яку називають *Полярною зорею*.

Коло великого діаметра, що проходить через зеніт, надир та полюси світу називають *небесним меридіаном*. Кожне світило за один добовий оберт перетинає його двічі. Такі моменти називають *кульмінацією* (від латинського *culmen* – *вершина*).

Площина небесного меридіана перпендикулярна до площини горизонту. Діаметр  $SN$ , по якому вони перетинаються, називають *полуденною лінією*. Полуденна лінія перетинається з горизонтом у двох точках: точці півночі  $N$  (над нею лежить північний полюс світу) і точці півдня  $S$  (діаметрально протилежній до точки півночі).

Площина, що проходить через центр небесної сфери перпендикулярно до осі світу, – це площина небесного екватора. Вона перетинає небесну сферу по великому колу, яке називають небесним екватором ( $QWQ'E$ ). Він поділяє небесну сферу на півкулі – північну й південну.

Ще одне коло великого діаметра, по якому Сонце здійснює свій річний рух на небесній сфері, називають *екліптикою* (ч. 1, § 8). Вона перетинає небесний екватор у двох точках – весняного й осіннього рівнодення.

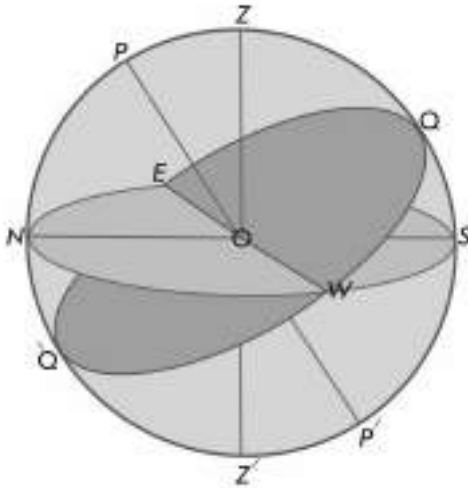


Рис. 2.2. Основні точки і лінії на небесній сфері

Визначивши основні лінії і точки на небесній сфері, можна запровадити на ній небесні координати (ч. 1, § 4) так, як на поверхні Землі запроваджено географічні координати.

Видимі відстані між довільними точками на небесній сфері, зокрема між зорями, або видимі діаметри небесних світил, вимірюють в кутових або дугових одиницях – градусах, хвилинах і секундах дуги. Відстань між точками  $A$  і  $B$  небесної сфери, показана на ній дугою  $AB$

(рис. 2.3), відповідає значенню центрального кута  $\alpha$  між напрямками на ці точки з центра  $O$  небесної сфери. Центральні кути завжди лежать у площинах великих кіл, і дуги, що їх стягують, – це найкоротші відстані між точками небесної сфери.

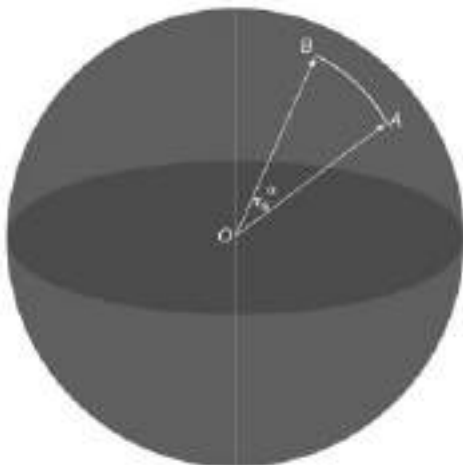


Рис. 2.3. Відстань (показана дугою  $AB$ ) між точками на небесній сфері вимірюють центральним кутом  $\alpha$  між напрямками на ці точки з центра  $O$  небесної сфери

### НАВЧАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

- Намалюйте небесну сферу й позначте на малюнку: вісь світу; північний і південний полюси світу; зеніт і надир; математичний горизонт; небесний екватор; небесний меридіан.

- Яким елементам небесної сфери відповідають такі точки і лінії на поверхні земної кулі: екватор; місцевий меридіан; географічні полюси.

## ВИСНОВКИ

Поняття небесної сфери, що з'явилося на початку зародження астрономії, дозволяє вивчати рухи небесних світил та визначати їх взаємні положення на небі.

## § 3. СУЗІР'Я, ВИДИМИ ТА АБСОЛЮТНІ ЗОРЯНІ ВЕЛИЧИНИ

Наші пращури зі спостережень зоряного неба зауважили одну важливу його особливість, хоча на зоряному небі від часу до часу трапляються непередбачувані явища й блукають сім яскравих світил (Сонце, Місяць і планети), загалом положення зір на ньому лишається незмінним.

### 1. Сузір'я.

Видиме взаємне розташування зір на небі змінюється, але дуже повільно. Без точних вимірів помітити його впродовж сотень і навіть тисяч років неможливо. Це дозволило в давнину намалювати по найяскравіших зорях перші характерні «зоряні візерунки», що отримали назву *сузір'я* (рис. 3.1).

Рис. 3.1. Мапа зоряного неба, укладена на початку нашої ери (649–684 рр.) в Китаї



Кожен народ на Землі відображав у візерунках-сузір'ях власних героїв, історію та побут. Було своє зоряне небо і в українського народу. Його заселяли *Пастух* (нині сузір'я Волопаса), *Дівчина з відрами* (нині сузір'я Орла), *Косарі* (три яскраві зорі з сузір'я Оріона). Були на цьому небі *Великий Віз* (ківш сузір'я Великої Ведмедиці) та *Малий*

*Віз* (ківш сузір'я Малої Ведмедиці). Все це – лише дициця з великого, майже втраченого, масиву знань, який називають народною астрономією.

Більшість нині чинних назв сузір'їв успадковані від давніх греків. У творі Клавдія Птолемея «Альмагест» перелічено 48 сузір'їв. Нові сузір'я з'явилися

на небі після перших подорожей у південну півкулю Землі під час великих географічних мандрівок XVI – XVII ст., а також після винайдення телескопа.



Рис. 3.2. Уявлення художника про Дівчину з відрами та Пастуха – давні українські сузір'я

У кінці XVI ст. голландські мореплавці увели 12 нових сузір'їв на південному небі. Згодом Петрус Планціус (астроном з Голландії), укладаючи мапи небесної сфери, додав ще три, розмістивши їх між сузір'ями стародавніх греків. Польський астроном Ян Гевелій додав 11 фігур, уперше показаних в укладеному ним зоряному атласі, опублікованому 1690 р. Після подорожі на мис Доброї Надії в 1751–1752 рр. французький астроном Ніколя Луї де Лакайль розмістив на південному небі 14 нових сузір'їв. Їхні назви пов'язані з наукою, технікою та мистецтвом. Він також розділив старогрецьке сузір'я Корабель Аргонавтів на три самостійні фігури: Кіль, Корму і Вітрила.

На початку XX ст. на небесній сфері налічували 108 сузір'їв. Але в 1922 р. Міжнародний астрономічний союз (МАС) ухвалив рішення зменшити їх кількість до 88. Зазнало змін і поняття сузір'я. Якщо до цього під сузір'ям розуміли групу яскравих зір, то від 1922 р. **сузір'я – це ділянка небесної сфери з чітко окресленими межами, що охоплює всі належні їй світила і яка має власну назву.** Тоді ж було остаточно закріплено назви (переважно старогрецького походження) та встановлено нові межі сузір'їв, що існують досі.

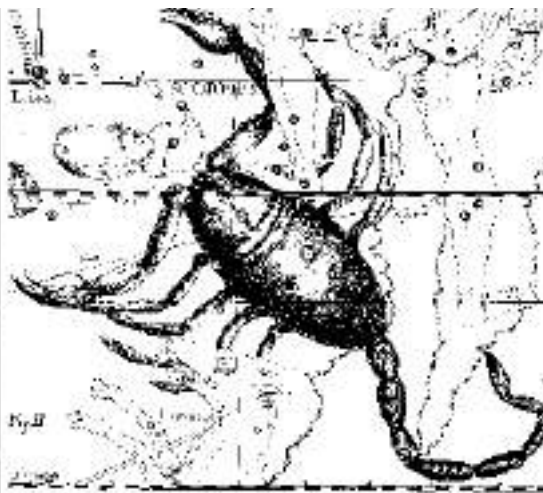


Рис. 3.3. Ян Гевелій; сузір'я Скорпіона з Атласа Яна Гевелія

Знати всі сузір'я не обов'язково, але вміти знаходити на небі характерні (найвиразніші) для свого місця проживання бажано кожній освіченій і культурній людині. У північній півкулі Землі до них належать: *Мала Ведмедиця, Велика Ведмедиця, Андромеда, Візничий, Волопас, Кассіопея, Лебідь, Ліра, Пегас, Оріон, Орел, Телець.*

Рис. 3.4. Сучасне сузір'я Скорпіона на небесній сфері з межами

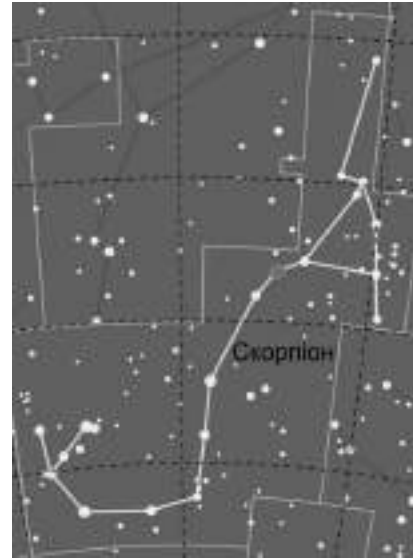
Основні фігури сузір'їв «малюють» на небесній сфері з допомогою яскравих зір. З давніх-давен такі зорі мають власні назви. Наприклад, Капелла – найяскравіша зоря Візничого – це кізка, яку він несе на плечі. Спіка – колос, який Діва, богиня жнив, тримає в руках. З'являючись восени на вранішньому небі, Спіка сповіщала про настання пори збору врожаю.

На початку XVII ст. німецький астроном Й. Байер позначив у своєму зоряному атласі зорі в сузір'ях літерами грецької абетки, запозичивши цей принцип в італійського астронома А. Пікколоміні. Порядок літер в абетці здебільшого відповідає яскравості зорі в межах окремого сузір'я. Тому Сиріус – це  $\alpha$  Великого Пса; Бетельгейзе, Ригель, Беллатрикса – відповідно  $\alpha$ ,  $\beta$  і  $\gamma$  Оріона тощо. Цю просту і зручну систему використовують дотепер, але в ній є одна істотна вада. Грецька абетка має лише 24 літери, а зір в кожному сузір'ї більше. Тому, зрештою, для їх позначення було введено цифрову систему.

Першим це запровадив англійський астроном, перший директор Гринвіцької обсерваторії і перший королівський астроном Дж. Флемстід. Він уклав каталог положень 3000 зір, надавши їм номери у порядку зростання їхніх небесних координат у межах кожного сузір'я. Цими номерами зорі часто позначають досі (наприклад, 61 Лебеда, 70 Змієносця тощо).

Змінні зорі (ті, яскравість яких змінюється з часом) позначають великими літерами латинської абетки, наприклад, RR Ліри. Якщо для певного сузір'я можливість позначати в такий спосіб змінні зорі вичерпано, то застосовують числові позначення, перед якими ставлять велику латинську літеру V (*від lat. variable – змінний*), наприклад, V 371 Ori (Оріона).

Нині зорі також позначають порядковими номерами того каталогу, до якого їх занесено. Тобто та сама зоря (особливо яскрава) може мати кілька різних позначень.



## 2. Визначення відстаней в астрономії.

Першим небесним світилом, до якого вдалося визначити відстань, був Місяць. Це зробив приблизно в 150 р. до н. е. грецький учений Гіппарх, порівнявши видимий кутовий радіус Місяця і радіус земної тіні на відстані Місяця. Отримане значення ( $59 R_{\oplus}$ ) доволі точно відповідає середній відстані до Місяця, яку визначено в наш час –  $60,3 R_{\oplus} = 384\,400$  км.

Відстані до планет Сонячної системи визначили в XVII ст. шляхом вимірювання *горизонтального паралаксу* (рис. 3.5). Суть вимірювання полягає в застосуванні відомого з географії методу триангуляції

Рис. 3.5. Кут між напрямком на світило  $M$  з якої-небудь точки  $T$  земної поверхні й напрямком з центра Землі  $O$  називають горизонтальним паралаксом світила



**Горизонтальний паралакс – це кут між напрямком на світило (що лежить на горизонті) з якої-небудь точки земної поверхні й напрямком з центра Землі.**

Відстані до близьких зір визначають за їхніми річними паралаксами (рис. 3.6). Діаметр Землі замалий, щоб бути базисом для вимірювання відстаней навіть до найближчих зір. Тому астрономи використовують для цього велику піввісь орбіти Землі, тобто середню відстань від Землі до Сонця. Спостерігаючи ту саму зорю з інтервалом у півроку, визначають її зміщення (його називають паралаксом) на тлі далеких «нерухомих» зір. Далі

діють так, як і в разі вимірювання відстаней методом горизонтального паралаксу. Отже, *річний паралакс  $\pi$  – кут, під яким із зорі було б видно велику піввісь земної орбіти.*

З рис. 3.6 видно (з тригонометричних формул для прямокутного трикутника), що відстань до зорі визначає співзалежність:

$$r = \frac{a}{\sin \pi} \quad (3.1)$$

Рис. 3.6. Визначення відстані до зорі шляхом вимірювання її річного паралаксу





Річні паралакси навіть найближчих зір дуже малі – десятки частки секунди дуги. Це дозволяє замість синусів кутів у вираз (3.1) ставити значення самих кутів, подаючи їх у радіанах ( $\sin \pi = \frac{\pi}{206\,265''}$ ). Тоді

$$r = 206\,265'' \frac{a}{\pi} \quad (3.2)$$

Оскільки відстані між астрономічними об'єктами дуже великі, то звичні одиниці довжини (метр, кілометр) не зручні на практиці. Тому в астрономії використовують інші: астрономічну одиницю (а. о.), що дорівнює середній відстані Землі від Сонця, і парсек (пк), від слів «паралакс» і «секунда», – відстань, з якої середній радіус земної орбіти видно під кутом  $1''$  (секунда дуги). Часто використовують похідні одиниці: кілопарсек (1 кпк = 1000 пк) і мегапарсек (1 Мпк = 1000000 пк). Інколи використовують одиницю довжини світловий рік (св. р.). Це така відстань, яку проходить світло за один рік, поширюючись зі швидкістю 300 000 км/с.

Візьмемо до уваги, що 1 пк = 206265 а. о. Тоді формулу (3.2), яка подаватиме відстань до зорі в парсеках, можемо записати так:

$$r = \frac{1}{\pi} \quad (3.3)$$

З виразу (3.2) видно, що парсек – це відстань, з якої велику піввісь земної орбіти видно під кутом  $1''$ . Жодна зоря в околі Сонця не лежить на такій відстані – річні паралакси усіх відомих зір менші за одну секунду дуги.

Перше успішне вимірювання відстані до зорі виконав 1838 р. німецький вчений Фрідріх Бессель. Він виміряв паралакс подвійної зорі 61 *Лебідь*. Її зсув на небесній сфері становив  $0,29''$ , а відстань до зорі – 3,4 пк або 11,1 св. р.

Найбільший паралакс ( $0,76''$ ) має зоря  $\alpha$  Кентавра. Вона лежить найближче до Сонячної системи. Альфа Кентавра є системою з трьох зір. Дві зорі перебувають близько одна від одної, а третя – тьмянний карлик – ближча до Сонця, ніж два її великих компаньйони. Тому зорю назвали *Проксима* (з лат. *proxima* – найближча) *Кентавра*.

Метод річного паралаксу можна застосувати лише до зір, що лежать відносно близько до Землі. Що далі від нас зоря, то менший її паралакс. У більшості зір видимого зміщення на небесній сфері спостерігати не вдається. Тому в астрономії розроблено інші методи визначення відстаней до віддалених об'єктів (деякі з цих методів ми розглянемо далі).

### 3. Видимі й абсолютні зоряні величини.

Першим поділив зорі за їхнім блиском давньогрецький астроном Гіппарх. Він виразив його в умовних одиницях – **видимих зоряних величинах**. Найяскравіші з них він виділив у групу зір 1-ї величини, трохи слабкіші – 2-ї, а ледве помітні – 6-ї величини. Так було запроваджено шкалу зоряних величин, в якій що більший блиск зорі (тобто, що яскравіша зоря), то менша

її зоряна величина. З ослабленням блиску зоряна величина збільшується. Гішпарх вважав, що ця шкала відображає розміри зір, але він помилявся. Видима зоряна величина характеризує блиск небесного світила, але аж ніяк не його кутові або лінійні розміри.

Зоряні величини позначають літерою  $m$  (від лат. «magnitude» – «величина»), яку ставлять як показник степеня праворуч угорі біля цифри, що вказує її числове значення (наприклад,  $1^m$ ).

Коли в першій половині XIX ст. винайшли оптичні прилади для кількісного порівняння інтенсивності світла зір (фотометри), з'ясувалося, що за різниці в одну зоряну величину блиск зір різниться приблизно в 2,5 рази. Тому освітленість  $E$ , яку створює світловий потік від зорі  $1^m$ , в 2,512 разів більша, ніж від зорі  $2^m$ , у (2,512) 2 рази більша, ніж від зорі  $3^m$  і т. д.

Оскільки різниця блиску двох зір  $1^m$  і  $6^m$  становить  $E_1 / E_2 = 2,5^{6-1} = 2,5^5 = 97,66$ , тобто майже 100, то англійський астроном Норман Погсон 1856 р. запропонував вважати, що різниця у п'ять зоряних величин ( $\Delta m = 5^m$ ) означає різницю блиску рівно в 100 разів. Ідею було схвалено, і це правило діє в астрономії.

Зі співзалежності  $100 = x^5$ , знайдемо  $\lg 100 = 2 = 5 \lg x$ , звідки  $\lg x = 0,4$  і  $x = 2,512$ . Отже, блиск двох об'єктів з довільними зоряними величинами  $m_1$  і  $m_2$  відрізняється в  $E_1 / E_2 = 2,512^{m_2 - m_1}$  разів.

**Цю закономірність узагальнює формула Погсона:**

$$\lg \left( \frac{E_1}{E_2} \right) = 0,4(m_2 - m_1) \quad (3.4)$$

Чутливі приймачі випромінювання дозволяють вимірювати навіть незначні відмінності блиску, тому його для більшості світил подають у дробових числах з точністю в межах від  $0,1^m$  до  $0,01^m$ .

Точні виміри виявили зорі з блиском, що перевищує першу видиму зоряну величину, – їх віднесли до зір нульової зоряної величини ( $0^m$ ). Є кілька зір, що мають від'ємні видимі зоряні величини. Наприклад, блиск Сиріуса ( $\alpha$  Великого Пса) – найяскравішої зорі на небі Землі – дорівнює  $-1,58^m$ . Ще яскравішими світилами (з більшим блиском) є планети Сонячної системи, Місяць і Сонце.

Видима зоряна величина  $m$  не дає інформації про справжню потужність джерела світла, бо не враховує відстань до нього (наприклад, свічка, що міститься поруч, краще освітлює текст, ніж електрична лампочка з великої відстані). Тому для характеристики яскравості зір введено поняття *абсолютної зоряної величини*  $M$ .

**Абсолютна зоряна величина  $M$  – це зоряна величина, яку має зоря, що лежить від спостерігача на відстані 10 пк (32,6 св. р.).**

Абсолютну зоряну величину легко знайти, якщо відома видима зоряна величина зорі  $m$  і її паралакс  $\pi$ , тобто відстань до неї  $r$ . Нехай абсолютна

зоряна величина зорі  $M$ , її блиск на відстані 10 пк –  $E_m$ , видимий блиск і видима зоряна величина – відповідно  $E_m$  і  $m$ . Тоді формула (3.4) дає

$$\lg\left(\frac{E_m}{E_M}\right) = 0,4(M - m)$$

Але блиск зорі обернено пропорційний квадрату відстані:

$$\frac{E_m}{E_M} = \frac{r_M^2}{r_m^2}, \text{ або } \lg\left(\frac{E_m}{E_M}\right) = 2 \lg r_M - 2 \lg r_m$$

Запишемо останню рівність так:  $0,4(M - m) = 2 \lg r_M - 2 \lg r_m$ . Поділимо її на 0,4 і знаючи, що  $\lg r_M = 10 = 1$ , отримуємо:

$$M = m + 5 - 5 \lg r_m, \quad (3.5)$$

де відстань  $r_m$  подано в парсеках. Замінивши у виразі (3.5) відстань  $r$  на річний паралакс  $\pi$ , згідно з формулою (3.3), отримуємо рівність

$$M = m + 5 + 5 \lg \pi, \quad (3.6)$$

де значення  $\pi$  подано в секундах дуги. Знаючи відстань до зорі, тобто її абсолютну зоряну величину, можна встановити повну кількість енергії, яку зоря випромінює з усієї поверхні за одиницю часу в усіх напрямках. Цю величину називають *світністю*  $L$  зорі. Зазвичай її виражають в одиницях світності Сонця, тобто  $L_\odot$ .

Позначивши потужність випромінювання зорі як  $I$ , а потужність випромінювання Сонця  $I_\odot$ , виразимо світність зорі

$$L = I / I_\odot.$$

Взявши до уваги формулу Погсона (3.4), отримуємо залежність

$$L = L_\odot \times 10^{0,4(M_\odot - M)} \quad (3.7),$$

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

### Типова задача

Формула Погсона (3.1) дозволяє обчислювати освітленість земної поверхні небесними світилами. Приклад. Позначимо зоряну величину Сонця через  $m_\odot = -26,8^m$  ( $\odot$  – знак Сонця), а зоряну величину повного Місяця через  $m_\bullet = -12,7^m$  ( $\bullet$  – знак Місяця), знайдемо:

$$\frac{\lg E_\odot}{E_\bullet} = 0,4 \left[ -12,7^m - (-26,8^m) \right] = 0,4 \cdot 14,1^m = 5,64^m \text{ і}$$

$$\frac{E_{\odot}}{E_{R}} = 4,37 \cdot 10^5,$$

тобто Сонце освітлює Землю в 437 тис. разів сильніше, ніж повний Місяць.

## ВИСНОВКИ

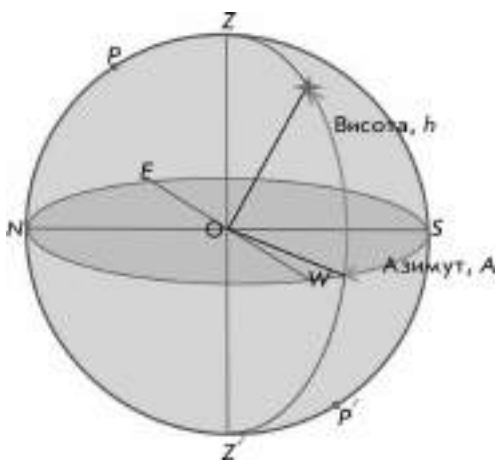
Нині під сузір'ям розуміють певну ділянку небесної сфери з чітко окресленими межами, що охоплює всі належні їй світила і яка має власну назву. Відстані до планет Сонячної системи були визначені в XVII ст. через виміри горизонтального паралаксу, а відстані до найближчих зір (XIX ст.) – через виміри річного паралаксу.

## § 4. СИСТЕМИ НЕБЕСНИХ КООРДИНАТ

Визначення положень небесних світил зводиться до вимірювання кутів на небесній сфері. В астрономії кути вимірюють різними одиницями. Найчастіше користуються градусною мірою, коли величину кута подають у градусах, хвилинах і секундах (повне коло має  $360^{\circ}00'00''$ ), або годинною мірою (повне коло має  $24^{\text{h}} 00^{\text{m}} 00^{\text{s}}$ ). Зверніть увагу, що одиниці годинної міри кутів збіжні назвою і позначенням з одиницями часу, а тому їх варто розрізняти на практиці. Кути часто вимірюють у радіанній мірі (повне коло має  $2\pi$  радіанів). Радіан має приблизно  $206265''$  ( $360^{\circ} / 2\pi = 360^{\circ} / 2 \cdot 3,1416 \approx 57^{\circ}17'45''$ ).

### 1. Горизонтальна система небесних координат.

У цій системі координат використовують азимут  $A$  світила  $M$  і його висоту над горизонтом  $h$  (рис. 4.1), або зенітну відстань  $z$ . Відлік координат ведуть від площини горизонту  $SN$  та точки півдня  $S$ .



Азимут  $A$  світила  $M$  відлічують від точки півдня  $S$  уздовж горизонту в бік заходу до вертикала світила (велике коло, що проходить через світило, зеніт і надир). Висоту  $h$  світила  $M$  відлічують від площини горизонту вздовж вертикала до світила. Зенітну відстань  $z$  відлічують від зеніту.

Рис. 4.1. Горизонтальна система координат

Азимут  $A$ , висоту  $h$  і зенітну відстань  $z$  світила вимірюють у градусах: азимут від  $0$  до  $360^{\circ}$ , висоту – від  $0$  до

+90° (над горизонтом до зеніту) і від 0 до -90° (під горизонтом до надиру), а зенітну відстань від 0 до +180°.

Обидві координати світила в цій системі змінюється внаслідок обертання небесної сфери. Хоча їх вимірювати відносно просто, для багатьох завдань змінність координат є недоліком.

## 2. Перша екваторіальна система координат.

За початок відліку в цій системі координат використовують площину небесного екватора і його найвищу точку  $Q$  (перетин небесного екватора з небесним меридіаном), а координатами є годинний кут  $t$  світила і його схилення  $\delta$  (рис. 4.2).

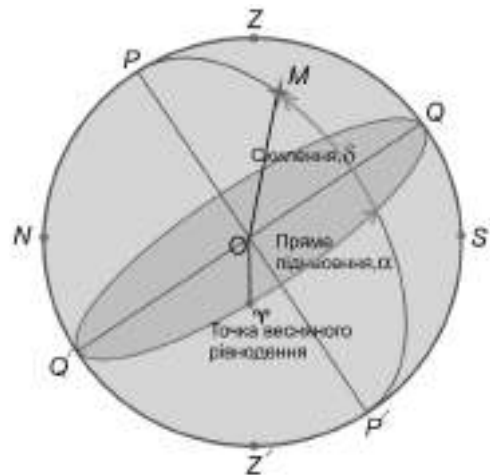
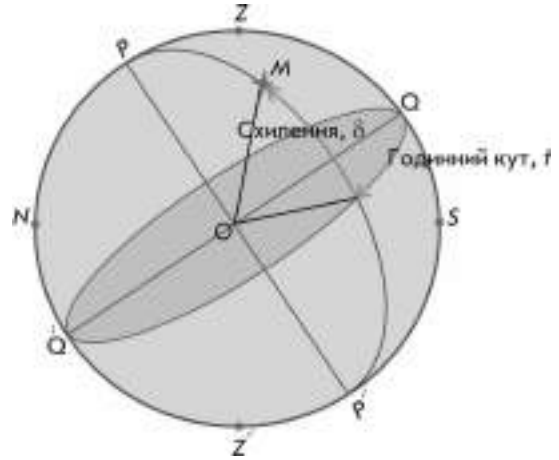
Рис. 4.2. Перша екваторіальна система координат

Годинний кут  $t$  світила  $M$  вимірюють від точки  $Q$  уздовж небесного екватора в бік заходу до кола схилення світила (велике коло, що проходить через світило і полюси світу). Тобто, годинний кут  $t$  – це час, що минув від верхньої кульмінації світила. Координату  $t$  світила вимірюють у годинах, хвилинах, секундах від 0<sup>h</sup> (світило у верхній кульмінації) до 24<sup>h</sup> (знову у верхній кульмінації).

Схилення  $\delta$  світила  $M$  відлічують від небесного екватора уздовж кола схилень до світила в межах від 0° (світило на небесному екваторі) до +90° у північній півкулі небесної сфери і від 0° до -90° у південній півкулі.

У цій системі одна з координат – схилення світила  $\delta$  – незмінна під час обертання небесної сфери, а друга – годинний кут  $t$  – безперервно зростає. Отже, координата  $t$  у першій екваторіальній системі, як і горизонтальні координати  $A$  і  $h$  світила, має своє певне значення лише для деякого моменту часу.

Рис. 4.3. Друга екваторіальна система координат



### 3. Друга екваторіальна система координат.

У цій системі використовують пряме піднесення  $\alpha$  світила  $M$  і його схилення  $\delta$  (рис. 4.3). Початком відліку першої з координат є точка весняного рівнодення  $\Upsilon$ , а другої – площина небесного екватора.

Пряме піднесення  $\alpha$  світила  $M$  відлічують від точки весняного рівнодення вздовж небесного екватора назустріч видимому обертанню небесної сфери до кола схилення світила. Вимірюють  $\alpha$  в годинах  $h$ , хвилинах  $m$ , секундах  $s$ . Схилення  $\delta$  світила вимірюється так само, як у першій екваторіальній системі небесних координат.

З рис. 4.2 і 4.3 бачимо, що для кожного світила виконується рівність:  $a + t = s$  (4.1). Тобто, *зоряний час*  $s$  – це годинний кут точки весняного рівнодення:  $s = t^\Upsilon$ .

В астрономічних календарях і каталогах (ч. 1, § 5) наведено координати  $\alpha$  і  $\delta$  світил у другій екваторіальній системі координат. Обчисливши зоряний час  $s$  на момент спостереження, можна з рівняння (4.1) знайти годинний кут світила  $t = s - a$ , який вказує його положення відносно небесного меридіана.

Оскільки координати  $\alpha$  і  $\delta$  змінюються з плином часу повільно (причиною є власний рух світила та ін. обставини), то їх використовують для складання каталогів небесних об'єктів, наприклад зір. Цю систему координат наносять на мапи зоряного неба.

### 4. Інші системи небесних координат.

Горизонтальна й екваторіальні системи небесних координат – не всі координатні системи, що є в астрономії. Здавна використовують екліптичну систему координат, яка історично давніша за екваторіальну. Основним колом небесної сфери в ній є *екліптика* (ч. 1, § 8).

Дві точки, що лежать на  $90^\circ$  на північ і на південь від екліптики, називаються полюсами екліптики. Кола, проведені через обидва полюси екліптики, називаються колами широти.

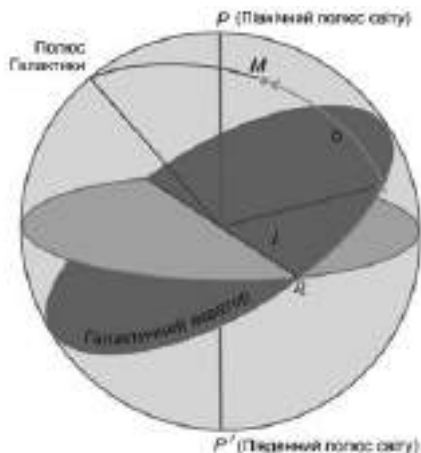


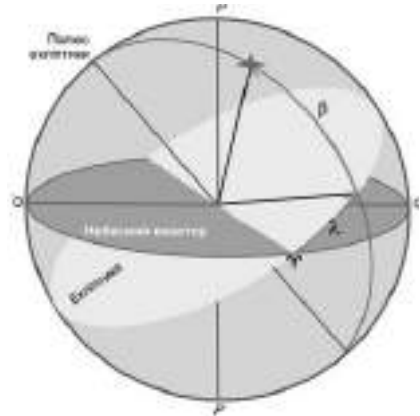
Рис. 4.4. Екліптична система координат

Положення світил в екліптичній системі координат визначають астрономічна широта і довгота (рис. 4.4). Широта зорі  $\beta$  – це її кутова відстань від площини екліптики, яку відлічують по колу широти від  $0$  до  $+90^\circ$ . У напрямку до північного полюса екліптики широту вважають додатною, до південного – від'ємною. Довгота  $\lambda$  – кут при полюсі екліптики між колом широти зорі й колом широти, проведеним через точку

весняного рівнодення. Довготу можна вимірювати також дугою екліптики від точки весняного рівнодення до кола широти зорі. Вона відлічується від точки весняного рівнодення проти руху годинникової стрілки (для спостерігача у північній півкулі) і для різних зір змінюється від  $0$  до  $360^\circ$ .

У галактичній системі координат (рис. 4.5) основним є велике коло (його називають галактичним екватором), що проходить приблизно посередині смуги Молочного Шляху. Від нього відлічують галактичну широту  $b$ . А від точки його перетину з небесним екватором – галактичну довготу  $l$ .

Рис. 4.5. Галактична система координат



### ТИПОВА ЗАДАЧА

Відомо, що висоту  $h$  світила вимірюють від  $0$  до  $+90^\circ$  в бік зеніту та від  $0$  до  $-90^\circ$  в бік надиру, а його зенітну відстань  $z$  – від  $0$  до  $+180^\circ$ . Доведіть, що  $h + z = 90^\circ$ .

**Доведення:** З мал. 4.1 видно, що сума кутів  $KOM$  та  $MOZ$  дорівнює  $90^\circ$ . Оскільки  $\angle KOM = h$ ,  $\angle MOZ = z$ , то  $h + z = 90^\circ$ .

### ВИСНОВКИ

Наявність небесної сфери дозволяє ввести системи небесних координат. Принцип їх побудови такий, як і для географічних координат. В астрономії використовують кілька різних систем небесних координат.

## § 5. ЗОРЯНІ МАПИ Й КАТАЛОГИ НЕБЕСНИХ ОБ'ЄКТІВ

Мапа зоряного неба – це проекція (зображення) небесної сфери на плоску поверхню. Нині паперові мапи зоряного неба поступилися місцем цифровим носіям інформації з координатами небесних об'єктів – каталогам.

### 1. Мапи зоряного неба.

Першу мапу зоряного неба для друку (на відміну від накреслених вручну в рукописах), вигравірував Альбрехт Дюрер у 1515 р. На ній зображено 48 сузір'їв з «Альмагеста» Птолемея. Йоган Байер у першому (1603 р.) великому зоряному атласі «Уранометрія» окрім них помістив мапи 12 нових сузір'їв південного неба. В атласі Байера подано 2 тис. зір – удвічі більше, ніж у Дюрера, для позначення яких використано літери грецької абетки.

Застосування телескопа підвищило точність картографування небесної сфери й дозволило Джону Флемстиду створити «Атлас неба» (опублікований

в 1729 р. вже після смерті вченого). Ця робота стимулювала Йогана Боде до укладання в 1801 р. «Уранографії» – першого атласу, де вказано всі зорі, видимі неозброєним оком і багато слабких (усього 17 тис. зір). У ньому вперше введено межі сузір'їв. Боде, як і його попередники, використовував грецькі зображення сузір'їв. У ХІХ ст. заради точніших позначень положень зір від практики подавати зображення на зоряних мапах відмовилися. Такий підхід, наприклад, застосував німецький астроном Фрідріх Аргеландер (1799–1875) в атласі «Боннський огляд».

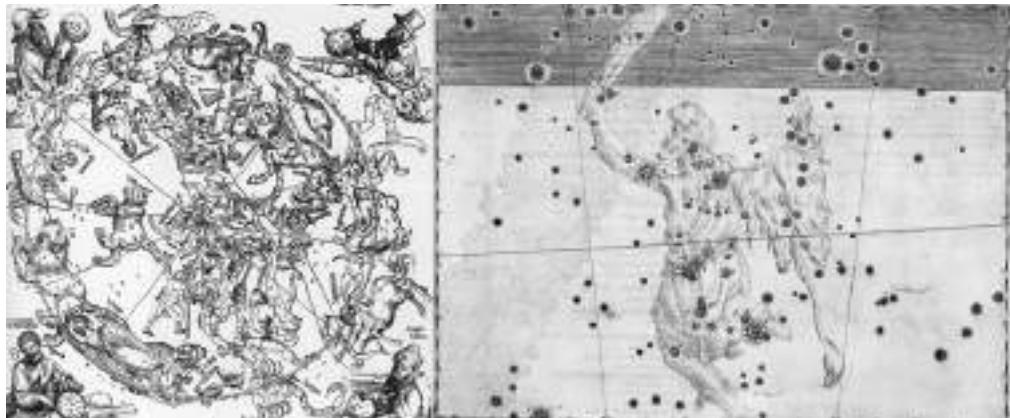


Рис. 5.1. Перша мапа зоряного неба, виготовлена друкарським способом з гравюру Альбрехта Дюрера, й мапа зоряного неба з «Уранометрії» Й. Байера

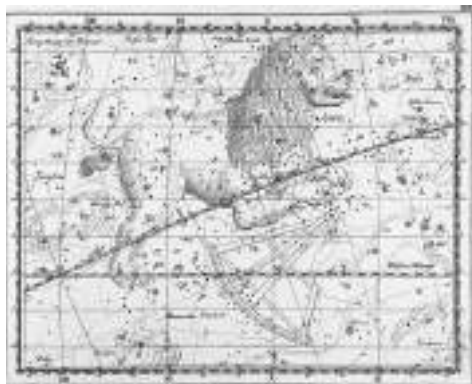


Рис. 5.2. Мапа зоряного неба з «Уранографії» Й. Боде

У ХХ ст. завдяки застосуванню фотографії відбулися значні зміни в картографуванні небесної сфери. У 50-х рр. минулого століття в обсерваторії Маунт-Паломар створено широко відомий в астрономії фотографічний «Паломарський атлас неба».

Мапи зоряного неба виконують у формі прямокутника або круга (рис. 5.3). На прямокутній мапі по горизонталі відкладено пряме піднесення  $\alpha$ , по вертикалі – схилення  $\delta$  світл. На мапі, що має вигляд круга, в центрі показано північний (або південний) полюс світу. Пряме піднесення  $\alpha$  зір проставлено на її обводі. Радіальні лінії, що сходяться до центра мапи – це проекції кіл схилень. Принаймні вздовж чотирьох із них проставляють значення  $\delta$ .



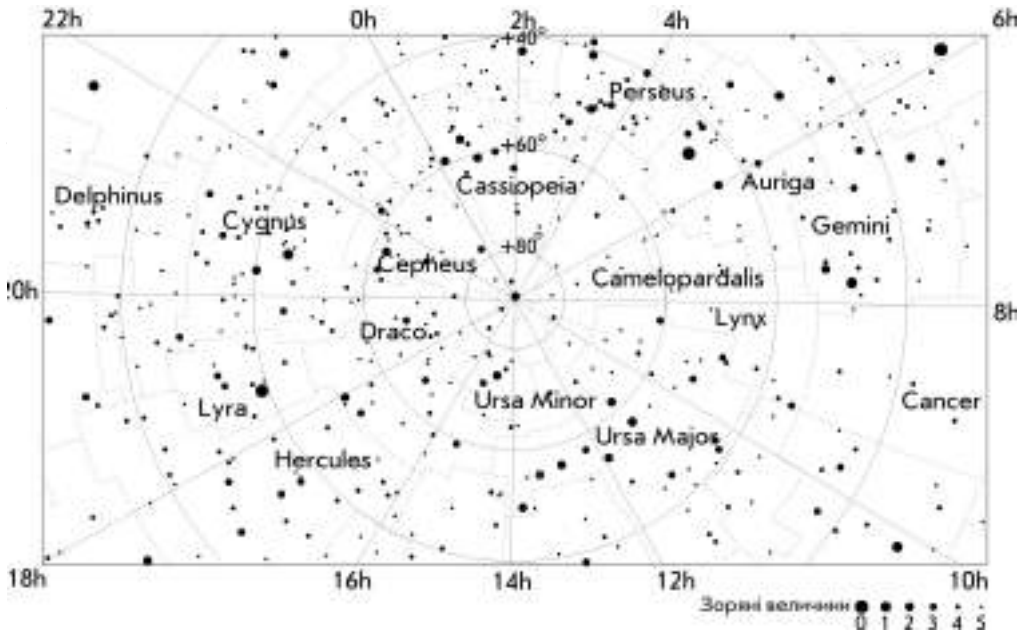


Рис. 5.3. Прямокутна мапа зоряного неба

Після появи телескопів (1609 р.) та меридіанних інструментів, положення зір на небесній сфері стали вимірювати значно точніше. Відтоді й дотепер на підставі великої кількості спостережень створено кілька сотень каталогів не лише зір, а й інших небесних об'єктів. Роботу з укладання каталогів виконують, головню, в рамках міжнародної кооперації. Для цього використовують космічні апарати. Так, спеціалізований супутник «Гіппаркос» (Hipparcos, від англ. High Precision Parallaxes Collecting Satellite – супутник для визначення високоточних паралаксів) дозволив створити каталог «Тіхо-2», який містить не лише координати понад 2,5 млн зір, але й їхні зоряні величини, власні рухи та ін.

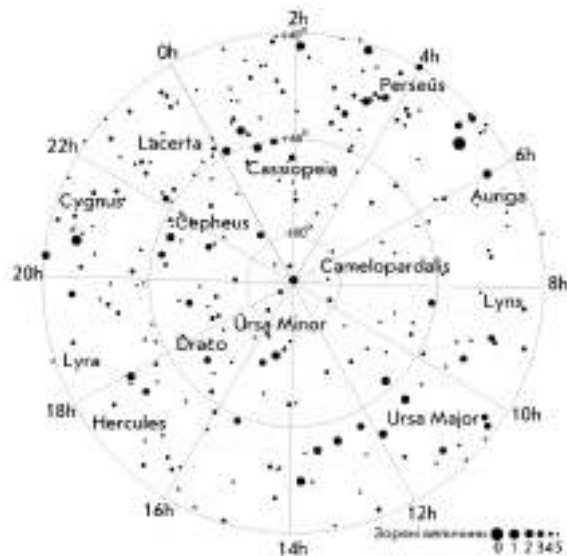


Рис. 5.4. Мапа зоряного неба у вигляді круга

За результатами спостережень космічного апра-

рата «Гайя» (Gaia, Global Astrometric Interferometer for Astrophysics), що перебуває в космосі з 2013 р., буде створено новий каталог, що міститиме точні координати майже одного відсотка зір нашої галактики. Окрім них, буде визначено відстані до цих зір, що дозволить скласти тривимірну карту Галактики.

Астрономічні каталоги вміщують дуже важливу інформацію, систематизовану за певними параметрами. Нині є багато різних каталогів, де вміщено інформацію про один певний тип небесних об'єктів (наприклад, галактики) чи про різні космічні тіла, але спостережувані в якомусь одному діапазоні електромагнітного спектра.

Ще донедавна астрономічні каталоги друкували в книжках і журналах. Тепер їх укладають в цифровому форматі й передають на зберігання в Міжнародний центр астрономічних даних в Страсбурзі. Будь-хто з науковців може звернутися до цього сховища й отримати потрібну для роботи інформацію з відповідного каталогу.

#### ТИПОВА ЗАДАЧА

- Знайти на мапі зоряного неба об'єкти з координатами:
  - 1)  $\alpha = 06^{\text{h}} 45^{\text{m}} 09^{\text{s}}$ ,  $\delta = -16^{\circ}42'58''$ ; 2)  $\alpha = 18^{\text{h}} 36^{\text{m}} 56^{\text{s}}$ ,  $\delta = +38^{\circ}47'01''$ ;
  - 3)  $\alpha = 13^{\text{h}} 25^{\text{m}} 12^{\text{s}}$ ,  $\delta = -11^{\circ}09'41''$ ; 4)  $\alpha = 04^{\text{h}} 35^{\text{m}} 55^{\text{s}}$ ,  $\delta = +16^{\circ}30'33''$ ;
  - 5)  $\alpha = 05^{\text{h}} 55^{\text{m}} 10^{\text{s}}$ ,  $\delta = +07^{\circ}24'25''$ .

*З'ясувати назви, видимі зоряні величини і сузір'я, в яких вони містяться.*

- Відповідь:** 1) Сиріус (-1,43), сузір'я Великого Пса; 2) Вега (+0,03), сузір'я Ліри; 3) Спіка (+0,98), сузір'я Діви; 4) Альдебаран (+0,85), сузір'я Тельця; 5) Бетельгейзе (+0,2), сузір'я Оріона.

#### ВИСНОВКИ

Мапа зоряного неба – це проекція небесної сфери на плоску поверхню. Каталоги небесних об'єктів вміщують їхні координати на небесній сфері, а також інформацію про ці об'єкти (відстань від Землі, спектральні характеристики тощо).

#### § 6. ВИГЛЯД ЗОРЯНОГО НЕБА НА РІЗНИХ ШИРОТАХ

Людина в якомусь певному місці на Землі завжди бачить одні й ті самі сузір'я: вигляд зоряного неба змінюється протягом ночі й упродовж року, але для такого спостерігача цим все і закінчується. Однак ще давні мандрівники звернули увагу на те, що зміна місця перебування дозволяє спостерігати на небі інші сузір'я.

### 1. Вигляд зоряного неба на різних широтах.

Вигляд зоряного неба залежить від географічної широти пункту спостережень на земній поверхні. Спостерігач, який перебуває на екваторі Землі ( $\varphi = 0^\circ$ ) бачить небесну сферу так, як показано на рис. 6.1.

Рис. 6.1. Вигляд небесної сфери на екваторі Землі

Вісь світу  $PP'$  лежить у площині математичного горизонту і збігається з полуденною лінією  $NOS$ . Північний полюс світу  $P$  збігається з точкою півночі  $N$ , а південний полюс світу  $P'$  – з точкою півдня  $S$ . Небесний екватор  $QQ'$  проходить через зеніт  $Z$  і надир  $Z'$ . Він та всі небесні паралелі перпендикулярні до математичного горизонту  $NWSE$ , що ділить їх навпіл. Очевидно, на земному екваторі можна бачити всі зорі обох небесних півкуль.

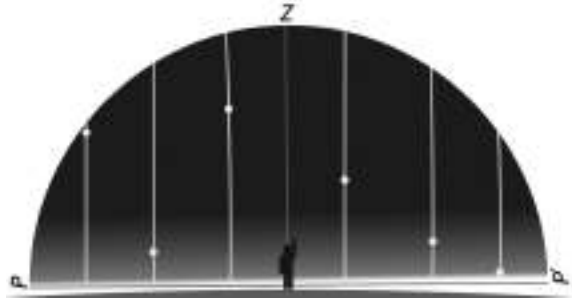
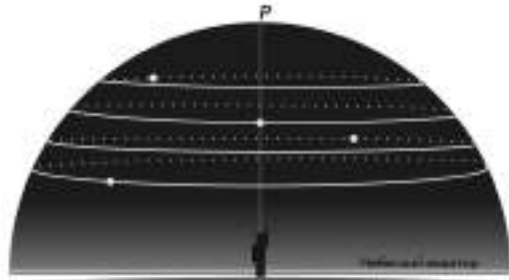


Рис. 6.2. Вигляд небесної сфери на полюсах Землі

Інакша картина на полюсах Землі (рис. 6.2). Для спостерігача на північному полюсі Землі світила північної небесної півкулі завжди перебувають над горизонтом (ніколи не заходять), а світила південної небесної півкулі – під горизонтом (ніколи не сходять). На південному географічному полюсі навпаки – світила південної небесної півсфери не заходять, а світила північної півсфери не сходять.



Якщо спостерігач перебуває на північному географічному полюсі ( $\varphi = +90^\circ$ ), то для нього вісь світу  $PP'$  перпендикулярна до площини математичного горизонту і збігається з прямовисною лінією  $ZOZ'$ . Північний полюс світу  $P$  збігається із зенітом  $Z$ , а південний полюс світу  $P'$  – з надиром  $Z'$ . Небесний екватор  $QQ'$  збігається з математичним горизонтом, а поняття точок півночі, сходу, півдня і заходу відсутні. Також немає небесного меридіана і полуденної лінії. У місцях земної поверхні з довільною географічною широтою  $\varphi$  спостерігач може бачити менше або більше світил (залежно від значення  $\varphi$ ) з обох півкуль небесної сфери (рис. 6.3). Певна їх частина ніколи не заходить, якісь із них сходять і заходять, а якісь ніколи не сходять.

Через зеніт проходить небесна паралель, схилення якої дорівнює географічній широті місцевості ( $\delta = \varphi$ ). Світила, що лежать на небесному екваторі, півдоби перебувають над горизонтом і півдоби – під ним.

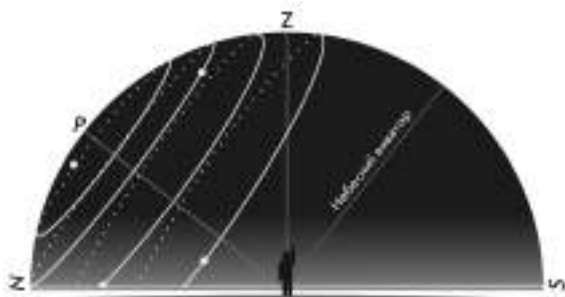


Рис. 6.3. Вигляд небесної сфери у пункті спостережень, що лежить на довільній географічній широті ( $0 < \varphi < 90^\circ$ )

Щоб з'ясувати, які світила можна спостерігати на певній географічній широті, розглянемо питання про висоту світила

в меридіані. На рис. 6.4 дуга кола зображає небесний меридіан,  $P$  – полюс світу,  $Z$  – зеніт,  $QQ'$  – площина екватора,  $NS$  – горизонт. Оскільки кут  $PON$ , який дорівнює куту  $Q'OZ$ , відповідає широті місця спостереження  $\varphi$ , то дуги  $NP$  і  $Q'Z$  також дорівнюють  $\varphi$ . Схилення  $\delta_1$  світила  $M_1$ , що перебуває у верхній кульмінації, вимірюють дугою  $QM_1$ . Позначивши зенітну відстань світила  $M_1$  через  $z_1$ , матимемо для світила, що кульмінує на південь від зеніту:

$$z_1 = \varphi - \varphi_1. \quad (6.1)$$

Для таких світил  $\delta < \varphi$ .

Якщо ж світило має верхню кульмінацію на північ від зеніту (наприклад, в точці  $M_1$ ), його схилення  $\varphi_1$  буде  $QM_1$ , а зенітна відстань в кульмінації

$$z_1^1 = \delta_1^1 - \varphi. \quad (6.2)$$

У такому разі  $\delta > \varphi$ . З рівності  $h + z = 90^\circ$  легко визначити висоту  $h_1$  світила  $M_1$  у верхній кульмінації.

Очевидно:  $h_1 = 90^\circ - \varphi + \delta_1$  для верхньої кульмінації на південь від зеніту,  $h_1 = 90^\circ - \delta_1 + \varphi$  – на північ від зеніту.

Якщо  $\delta = \varphi$ , то світило у верхній кульмінації проходить через зеніт.

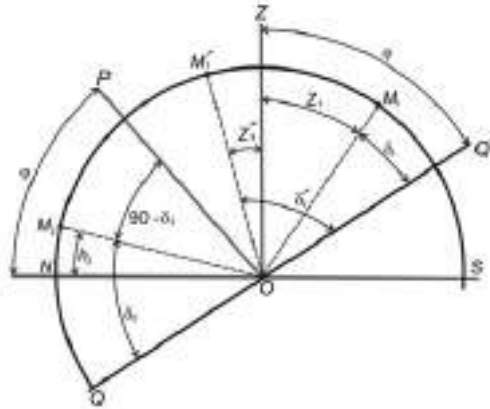
Визначимо тепер висоту світила в момент нижньої кульмінації. На рис. 6.4 видно, що висота  $h_2$  світила  $M_2$  у нижній кульмінації визначається дугою  $NM_2 = NP - M_2P$ . Дуга  $NP = \varphi$ ,  $M_2P = 90^\circ - \varphi_2$ ; звідси:

$$h_2 = \varphi + \varphi_2 - 90^\circ. \quad (6.3)$$

Якщо в момент нижньої кульмінації висота світила  $h_2 > 0$ , то світило не буде заходити на цій широті, тобто його можна спостерігати на зоряному небі упродовж усього календарного року. Якщо в момент верхньої кульмі-

нації  $h_1 < 0$ , то світило не буде сходити і його неможливо спостерігати на цій широті.

Рис. 6.4. Залежність між висотою світила в меридіані, його схиленням і широтою місця спостереження



Розв'язуючи нерівності  $h_1 < 0$  і  $h_2 > 0$ , легко з'ясувати, що у північній півкулі на широті  $\varphi$  світила з  $\delta > 90^\circ - \varphi$  не будуть заходити, а світила з  $\delta < \varphi - 90^\circ$  не будуть сходити.

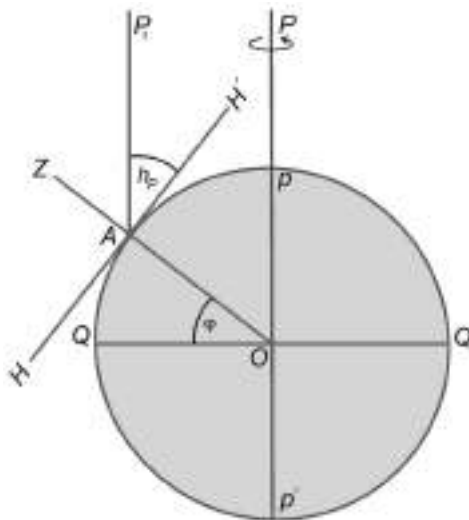
## 2. Визначення географічної широти з висоти полюса світу над горизонтом.

Географічну широту  $\varphi$  спостерігача, що перебуває в точці  $A$  (рис. 6.5), визначають кутом  $ZOQ$ , який називають зенітною відстанню точки екватора  $Q$ . З рис. 6.5 бачимо, що  $\angle QOA = P_1AH'$ , як кути із взаємно перпендикулярними сторонами. Тобто:  $h_p = \varphi$  (6.4).

Якщо спостерігач переміщається по земній поверхні, то для кожного місця його перебування ця рівність зберігається. Отже, для будь-якої точки на Землі висота полюса світу дорівнює її географічній широті. Цю залежність в астрономії називають теоремою про висоту полюса світу. З неї випливає, що в кожній точці земної поверхні небесний екватор нахилений до математичного горизонту під кутом

$$i = 90^\circ - \varphi. \quad (6.5)$$

Рис. 6.5. Визначення географічної широти з висоти полюса світу над горизонтом



Теорема про висоту полюса світу дозволяє на практиці визначати географічну широту місця спостерігача за висотою Полярної зорі. Але таке визначення доволі грубе, бо Полярна зоря не лежить точно в точці північного полюса світу.

### Типова задача

З'ясувати, чи сходить зоря Канопус ( $\alpha$  Киля), схилення  $\delta$  якої дорівнює  $-52^\circ 42'$ , на широті Києва ( $\varphi = 50^\circ 27'$ ).

**Відповідь:** Скористаємось формулою для визначення висоти світила у верхній кульмінації  $h_1 = 90^\circ - \varphi + \delta_1$  та підставимо значення широти Києва і схилення Канопуса. Тоді  $h_1 = 90^\circ - 50^\circ 27' + (-52^\circ 42') = -13^\circ 09'$ . Як бачимо, Канопус має верхню кульмінацію на висоті з від'ємним значенням, тобто під горизонтом, отже, в Києві ця зоря не сходить.

### НАВЧАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

- Зоря Мірфак ( $\alpha$  Персея,  $\delta = +49^\circ 55'$ ) у верхній кульмінації проходить через зеніт в м. Полтава. Яка географічна широта Полтави?

**Відповідь:**  $\varphi = 49^\circ 55'$ . Бо якщо  $\delta = \varphi$ , то світило у верхній кульмінації проходить через зеніт.

### ВИСНОВКИ

Вигляд зоряного неба залежить від географічної широти місця спостережень. Для будь-якої точки на Землі висота полюса світу дорівнює її географічній широті. Цю залежність в астрономії називають теоремою про висоту полюса світу.

# Розділ II. Рух небесних світил та основи практичної космографії

## ТЕМА 1.2. ВИДИМІ РУХИ СВІТИЛ

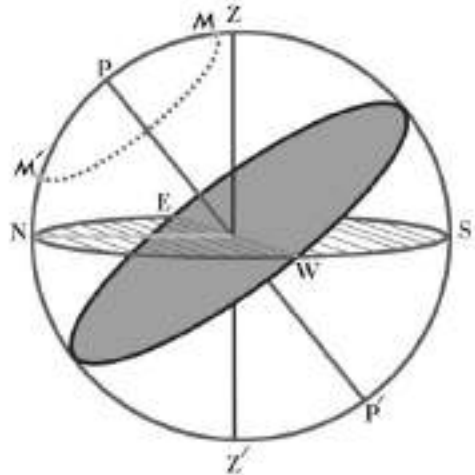
### § 7. ОБЕРТАННЯ НЕБЕСНОЇ СФЕРИ І ЗМІНА ВИГЛЯДУ ЗОРЯНОГО НЕБА

Спостерігаючи зоряне небо протягом кількох годин поспіль, легко помітити, що його вигляд змінюється. Це зумовлено добовим обертанням небесної сфери.

#### 1. Добовий рух небесних світил.

Внаслідок добового обертання небесної сфери кожне світило двічі перетинає небесний меридіан. Це явище, згадаємо § 2, називають *кульмінацією*.

Рис. 7.1. Перетин світилом небесного меридіана (в точці  $M$  південної його половини, а в точці  $M'$  – північної) внаслідок обертання небесної сфери



Проходження світила через південну половину небесного меридіана називають верхньою кульмінацією, бо в цей момент висота світила над горизонтом найбільша. Проходження світила через північну половину небесного меридіана називають нижньою кульмінацією, бо тоді висота світила найменша (рис. 7.1).

Деякі зорі в момент верхньої кульмінації проходять через зеніт. Залежно від кутових відстаней, на яких світила лежать від полюсів світу, в кожній певній точці земної кулі вони можуть сходити й заходити, або ніколи не заходити, або ніколи не сходити.

Для світил, які в даній місцевості не заходять, ми бачимо і верхню, і нижню кульмінації; для світил, які сходять і заходять, – тільки верхню кульмінацію; для світил, які не сходять, обидві кульмінації відбуваються під лінією горизонту.

Сонце також бере участь в добовому обертанні небесної сфери і двічі на добу перетинає небесний меридіан. Коли центр сонячного диска перебуває у верхній кульмінації, настає астрономічний полудень, а в момент нижньої кульмінації центра сонячного диска – астрономічна північ.



Рис. 7.2. Вигляд південної ділянки зоряного неба на широті Києва о 22 год. місцевого часу 15 жовтня

## 2. Зміна вигляду зоряного неба упродовж року.

Якщо зафіксувати розміщення сузір'їв у певний час доби і повторити спостереження в той самий час через 1–2 місяці, то легко помітити зміну картини зоряного неба. Сузір'я, що

лежали високо в південній частині неба поблизу меридіана, опиняться на заході, а зорі, які було видно в західній ділянці неба, стали невидимі: вони разом із Сонцем зайшли за горизонт. Отже, Сонце за цей відтинок часу пересунулось назустріч добовому обертанню неба із заходу на схід.

Така зміна вигляду зоряного неба безупинна; кожній порі року притаманна своя картина, наприклад, вечірніх сузір'їв, і ця картина щороку повторюється.

Восени південну ділянку вечірнього зоряного неба північної півкулі Землі прикрашає великий зоряний чотирикутник – найпомітніша частина сузір'я Пегаса. Від його лівої верхньої вершини ланцюгом пролягає кілька зір сузір'я Андромеди. У вересні квадрат Пегаса проходить над точкою півдня приблизно о першій годині ночі, в жовтні – опівночі, а в листопаді о 20 год (рис. 7.2).



Рис. 7.3. Вигляд південної ділянки зоряного неба на широті Києва о 22 год місцевого часу 15 січня

На зимовому зоряному небі в наших широтах особливо виділяється Оріон (рис. 7.3). Його фігуру малюють яскраві зорі Бетельгейзе ( $\alpha$  Оріона), Беллатрікс, Ригель. У грудні сузір'я Оріона

лежить над точкою півдня приблизно опівночі, в січні – близько 22 год, а в лютому о 20 год. Праворуч від Оріона лежить сузір'я Тельця з його знаменитими Плеядами, а ліворуч і нижче – сузір'я Великого Пса, в якому сяє Сиріус – найяскравіша зоря на небі Землі. До зимових сузір'їв також належать



Малий Пес (найяскравіша зоря сузір'я – Проціон) та Близнюки (найяскравіші зорі – Кастор і Поллукс).

Рис. 7.4. Вигляд південної ділянки зоряного неба на широті Києва о 22 год місцевого часу 15 квітня

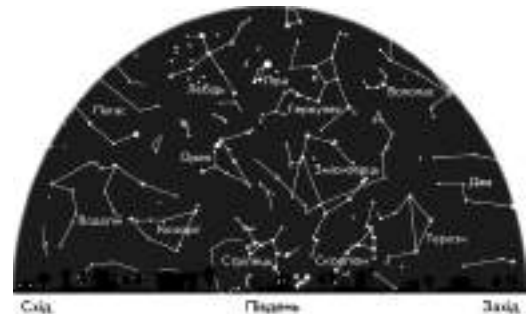
Південну ділянку весняного вечірнього зоряного неба прикрашає сузір'я Лева з яскравою зорею Регул (рис. 7.4). У березні воно проходить на точкою півдня приблизно опівночі, у квітні – о 22 год, а в травні о 20 год (в цей час його не видно на ще світлому небі). До весняних сузір'їв також належить Діва з яскравою зорею Спіка.



На літньому зоряному небі в північній півкулі Землі легко помітити великий зоряний трикутник (рис. 7.5). Його вершини утворюють яскраві зорі трьох різних сузір'їв – Вега ( $\alpha$  Ліри), Денеб ( $\alpha$  Лебеда) і Альтаір ( $\alpha$  Орла). Оскільки цю фігуру видно на зоряному небі й восени, то її зазвичай називають літньо-осіннім зоряним трикутником. Його видно опівночі в червні в південно-східній ділянці неба, в липні – у південній, а в серпні на південному заході.

Окрім названих сузір'їв Ліри, Лебеда і Орла до літніх належать сузір'я Скорпіона (його прикрашає яскрава зоря Антарес), Стрільця, Козорога й Водоля.

Рис. 7.5. Вигляд південної ділянки зоряного неба на широті Києва о 22 год місцевого часу 15 липня



Зміна вигляду зоряного неба упродовж року для спостерігача на Землі пояснюється тим, що крім добового руху, в якому Сонце бере участь разом з іншими світилами, воно має ще й видимий річний рух по небесній сфері (§ 8).

## НАВЧАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

- Візьміть значення схилень небесних об'єктів з «Астрономічного календаря» чи з інших джерел і з'ясуйте умови їх видимості для своєї місцевості. Перевірте обчислення спостереженнями.

## ВИСНОВКИ

Унаслідок добового обертання небесної сфери кожне світило, описуючи на небі коло (тим менше, що ближчим є світило до полюса світу), двічі перетинає небесний меридіан. Зміна вигляду зоряного неба упродовж року для спостерігача на Землі зумовлена видимим річним рухом Сонця по небесній сфері.

## § 8. ВИДИМІ РУХИ СОНЦЯ, МІСЯЦЯ, ПЛАНЕТ

Люди помітили рух Місяця на тлі зір дуже давно – для цього достатньо спостерігати Місяць поспіль протягом кількох вечорів. Давнім є висновок і про те, що Сонце та планети також мають власний рух на небесній сфері.

### 1. Видимий річний рух Сонця.

Зміна вигляду нічного неба протягом року вказує на рух Сонця серед зір. У різні пори року опівночі небесний меридіан над точкою півдня послідовно перетинають зорі різних сузір'їв, а саме – тих сузір'їв, що в цей момент протилежні Сонцю. За 365,24 доби (рік) Сонце описує серед зір на небі повне коло, проходячи щодоби відрізок приблизно в два своїх кутових діаметри ( $0,5^\circ$ ). Цей відрізок стародавні астрономи називали «кроком» Сонця. Оскільки повне коло вміщує 360 таких «кроків», з часом закріпилося правило ділити його на 360 градусів (з лат. «градус» – «крок»).

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

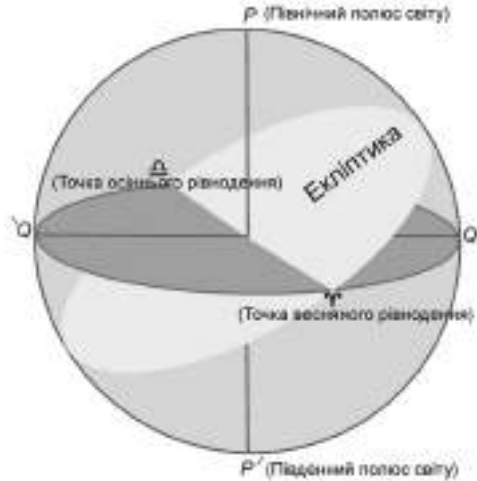
Слово «екліптика» походить від грецького «екліпто» – «затемнюю», бо коли Місяць у своєму русі навколо Землі перетинає екліптику в повню, настає затемнення Місяця, а якщо у фазі нового Місяця – затемнення Сонця (див. п. 2). Як і небесний екватор, велике коло, по якому площина земного екватора перетинається з небесною сферою, – екліптика є великим колом, по якому з небесною сферою перетинається площина земної орбіти.

Екліптика нахилена до небесного екватора під кутом  $\varepsilon = 23^\circ 26,5'$  і перетинає його в двох точках рівнодень: весняного і осіннього (їх позначають знаками  $\Upsilon$  та  $\varOmega$ ). Через точку  $\Upsilon$  центр диска Сонця 20 чи 21 березня переходить з південної півкулі неба в північну, а через точку  $\varOmega$  22 чи 23 вересня – з північної півкулі в південну.

Екліптика проходить через 13 сузір'їв, які в давнину отримали переважно назви тварин (грецьке «зоон»). Тому весь пояс сузір'їв називають Зодіаком (до нього не потрапив Змієносець, тринадцяте сузір'я, через яке також пролягає річний шлях Сонця небесною сферою).

Астрономи давнього Вавилону розділили екліптику на 12 рівних відрізків по  $30^\circ$ . Кожний із цих відрізків, які називають знаками Зодіака, отримав назву зодіакального сузір'я, в межах якого він пролягав на той час.

Рис. 8.1. Екліптика на небесній сфері



**Отже, знак Зодіака – це дуга екліптики протяжністю в  $30^\circ$ , що має назву відповідного їй зодіакального сузір'я.**

Знаки Зодіака відлічують уздовж екліптики на схід від точки весняного рівнодення. В середині I тис. до н. е. ця точка була в сузір'ї Овна, тому її й позначають знаком цього сузір'я –  $\Upsilon$ , а відрізок у  $30^\circ$  на схід від неї називають знаком Зодіака Овен. Сонце колись проходило його з 21 березня по 21 квітня. Другий  $30^\circ$ -градусний відрізок – знак Зодіака Телець, який Сонце проходило з 22 квітня по 21 травня, і так ще десять знаків до знаку Риб. Як бачимо, в кожному знаку Зодіака Сонце перебуває місяць.

Однак точка весняного (а отже, й осіннього) рівнодення не стоїть на місці. Вона повільно зміщується вздовж екліптики назустріч видимому річному руху Сонця на величину в  $50,29''$ , тому Сонце щорік приходить в цю точку трохи раніше, ніж попереднього року. Отак Сонце поступово зміщується вздовж зодіакального сузір'я, проходячи весь Зодіак за 25800 років. Це явище, відкрите Гіппархом в II ст. до н. е., називають *прецесією* (з лат. *praecessio aequinoctiorum* – випередження рівнодення). Внаслідок прецесії знаки Зодіаку не збігаються зі своїми сузір'ями вже на понад  $37^\circ$ . Приміром, знак Зодіаку Овен перебуває в сузір'ї Риб, а знак Зодіаку Скорпіон – у сузір'ї Терези.

Ще стародавні спостерігачі помітили нерівномірність видимого руху Сонця небесною сферою впродовж року. Восени і взимку Сонце рухається швидше, ніж навесні й влітку. Найшвидше Сонце рухається близько 3 січня (майже  $1^\circ 1'$  за добу) а найповільніше – близько 4 липня ( $57'$  за добу). Тому весна й літо тривають 186 діб, а осінь і зима – 179 діб.

Видимий діаметр сонячного диска також неоднаковий протягом року. Найбільший ( $32,5'$ ) він в січні, а найменший ( $31,5'$ ) – в липні. Це означає, що відстань до Сонця взимку менша, ніж улітку (§ 9).

Добовий рух Сонця на різних широтах упродовж року, як і рух інших світил, відбувається по-різному. Розгляньмо особливості видимого руху Сонця на полярних колах і на тропіках (візьмемо для прикладу північне полярне коло й північний тропік – у південній півкулі Землі на цих широтах явища відбуваються так само).

На географічній широті північного полярного кола ( $\varphi = +66^{\circ}33'$ ), згідно з § 6, світила із схиленням  $\delta > 90^{\circ} - \varphi = 90^{\circ} - 66^{\circ}33' = +23^{\circ}27'$  не заходять, а світила із схиленням  $\delta < -23,5^{\circ}$  не сходять. Але ці значення є найбільшим і найменшим з можливих схилень Сонця. Отже, на полярному колі Сонце в день літнього сонцестояння не заходить. Опівночі воно лише дотикається до горизонту в точці півночі. Натомість в день зимового сонцестояння воно не сходить, лише дотикаючись опівдні до горизонту біля точки півдня.

У місцях, що лежать між полярним колом і полюсом Землі, влітку тривалість полярного дня, коли Сонце не заходить, і взимку тривалість полярної ночі, коли Сонце не сходить, зростають в міру наближення до полюса.

Сонце на північному тропіку (географічна широта  $\varphi = +23^{\circ}27'$ ) в день літнього сонцестояння проходить через зеніт. У місцях, що лежать між тропіками, Сонце буває в зеніті двічі на рік – у ті дні, коли його схилення дорівнює широті місця.

Зважаючи на це, географічні пояси мають чіткі астрономічні ознаки: в полярних поясах Сонце в певні дні не сходить і не заходить; у жарких

поясах двічі на рік буває в зеніті; у помірних поясах щодня сходить і заходить, але ніколи не буває в зеніті. Поділ земної кулі на географічні пояси пов'язаний з кількістю сонячного тепла, що потрапляє на поверхню Землі протягом року.

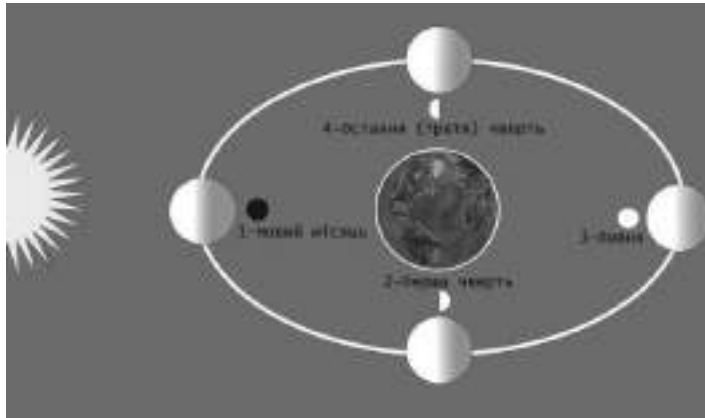


Рис. 8.2. Схема руху Місяця навколо Землі. Фази Місяця

## 2. Видимий рух Місяця, затемнення Сонця та Місяця.

Уже кілька тисяч років тому було відомо, що Місяць рухається зоряним небом у тому напрямку, що й Сонце, – проти обертання небесної сфери, але швидше за нього. Було також відомо, що висота Місяця над горизонтом під час перетину ним меридіана змінюється впродовж року, і що рухається він серед зір по великому колу, нахиленому до екліптики під кутом  $5,8^{\circ}$ . Про-

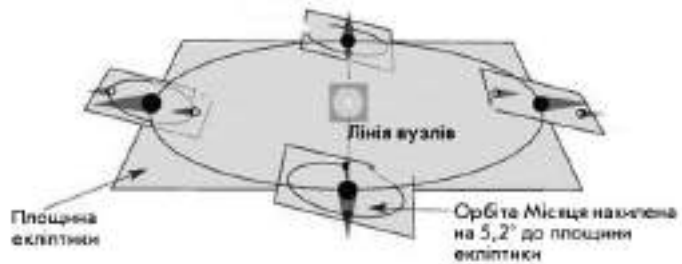
міжок часу в 27,3 доби, за який Місяць робить на небесній сфері повний оберт, назвали сидеричним місяцем (з лат. *sideris* – зоря). Кутова швидкість видимого добового зміщення Місяця серед зір становить трохи більше  $13^\circ$ .

Видима форма Місяця – його фази – змінюється періодично внаслідок зміни положення Місяця відносно Землі й Сонця. Цей період називають синодичним місяцем (від грец. *synodos* – збори, з'єднання). Він триває близько 29,53 доби.

Рухаючись навколо Землі й опиняючись між Землею і Сонцем, Місяць може закрити його собою, спричинивши сонячне затемнення. З іншого боку, коли Земля опиняється між Місяцем та Сонцем, Місяць може потрапити в тінь Землі, внаслідок чого настане місячне затемнення.

Якби орбіта Місяця лежала в площині орбіти Землі і він рухався б небом так само, як Сонце, вздовж екліптики, затемнення Сонця й Місяця відбувались би в кожному повню і в кожний новий місяць. Але через нахил площини місячної орбіти до площини земної орбіти Місяць не завжди перетинає лінію екліптики в тому місці, де міститься Сонце. Внаслідок цього сонячне або місячне затемнення може відбутися лише тоді, коли Місяць у фазі нового місяця або в повні перебуває в точці перетину своєї орбіти з орбітою Землі або близько до неї. Таких точок є дві, вони називаються *вузлами* місячної орбіти.

Рис. 8.3. Орбіти Землі та Місяця. Вузли місячної орбіти



Сонячне затемнення видно по-різному в різних точках земної поверхні. Диск Сонця буде повністю закритим (повне сонячне затемнення)

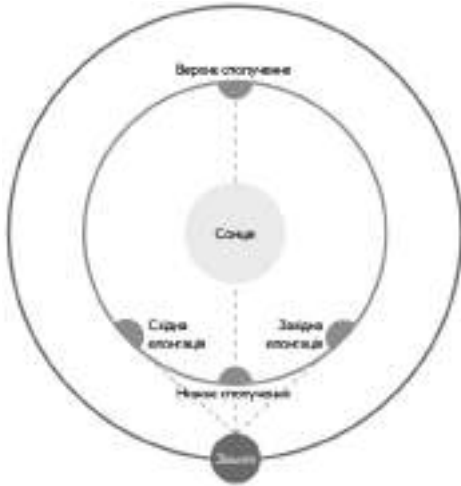
тільки для спостерігача, який перебуває всередині місячної тіні. На ділянках земної поверхні, куди падає півтінь від Місяця, всередині конуса місячної півтіні, можна спостерігати часткове сонячне затемнення.

У різних точках Землі сонячне затемнення настає в різний час. Внаслідок руху Місяця навколо Землі та обертання Землі навколо осі тінь від Місяця зміщується по земній поверхні приблизно із заходу на схід, утворюючи смугу в кілька тисяч кілометрів завдовжки і найбільше в 270 км завширшки. Повна фаза затемнення, коли диск Місяця повністю закриває Сонце, триває не більше 7,5 хв. Кожного року на земній кулі обов'язково відбувається два сонячних затемнення. Загалом їх може бути п'ять. Що ж до місячних затемнень, їх може бути два чи три, а може й зовсім не бути. Отже, мінімальна

кількість затемнень на рік – два (обидва сонячні), максимальна – сім (п'ять сонячних і два місячних або чотири сонячних і три місячних).

### 3. Видимі рухи планет. Верхні та нижні планети.

Видимі рухи планет складніші за рухи Сонця та Місяця, бо деякі планети рухаються то проти добового обертання небесної сфери, то за ним. Рух



проти добового обертання називають прямим, рух у напрямі добового обертання – зворотним. При цьому планети описують петлі на зоряному небі. Змінюючи прямий рух на зворотний і навпаки, планета наче зупиняється – таке її положення називають стоянням.

Рис. 8.4. Конфігурації нижньої планети

Зважаючи на видимий рух планет на небесній сфері їх поділяють на верхні й нижні. Нижніми планетами є Меркурій і Венера. Їх можна спостерігати тільки вранці перед сходом Сонця в східній ділянці неба або увечері після його заходу в західній. Видиму кутову віддаль на небі між планетою й Сонцем називають елонгацією (від лат. *elongo* – віддаляюся, віддалення). Вона може бути західною – планету видно вранці, і вона лежить на захід від Сонця, і східною – планету видно увечері на схід від Сонця. Елонгація Меркурія та Венери змінюється в певних межах: найбільші значення для Меркурія коливаються від 18° до 28°, а для Венери – від 43° до 48°.

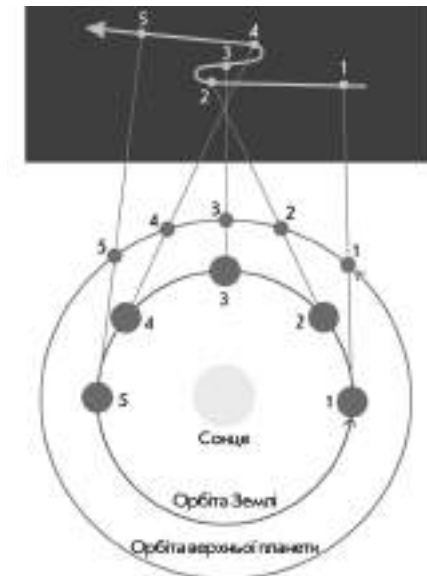


Рис. 8.5. Видимий рух верхньої планети на зоряному небі

Рис. 8.5. Видимий рух верхньої планети на зоряному небі

Видимі рухи верхніх планет (Марс, Юпітер, Сатурн, Уран і Нептун), а також астероїдів, бачимо інакше. З певного моменту схід кожної з цих планет настає дедалі раніше, ніж схід Сонця, бо Сонце рухається серед зір швидше, ніж вони. Уповільнюючи свій рух відносно зір, верхня планета зупиняється, настає її

стояння. Потім вона починає рухатись у зворотному напрямку, нарощуючи швидкість, а її віддалення від Сонця збільшується. Коли воно досягає максимального значення, настає протистояння планети по відношенню до Сонця.

У цьому положенні планета сходить близько моменту заходу Сонця, кульмінує опівночі і всю ніч перебуває над горизонтом. Цей час є найсприятливішим для її спостережень.

Після протистояння зворотний рух планети починає уповільнюватись, аж поки знову не настане її стояння. Після стояння вона знову починає рухатись серед зір, нарощуючи швидкість, але вже прямим рухом. Сонце поступово «наздоганяє» планету, і згодом настає період її невидимості, бо вона опиняється за Сонцем. Коли Сонце «переганяє» планету, через певний час вона з'являється вранці на сході і потім з кожним днем сходить дедалі раніше, ніж Сонце. Далі цикл повторюється.

### ТИПОВА ЗАДАЧА

Визначте широти географічних паралелей де: а) Сонце 21 березня і 23 вересня опівдні буває в зеніті; б) полуденна висота Сонця 22 червня і 22 грудня становить  $90^\circ$ ; в) Сонце опівдні 22 грудня з'являється на горизонті ( $h_\odot = 0^\circ$ ).

*Відповідь:* Скористаємося формулою  $h_n = \delta + (90^\circ - \varphi)$  з § 6. Для умови а) схилення  $\delta_\odot$  Сонця в дні рівнодення дорівнює 0, а висота  $h_\odot = 90^\circ$ , тому  $90^\circ = 0 + (90^\circ - \varphi)$ , звідки  $\varphi = 0^\circ$ . Для умови б)  $h_\odot = 90^\circ$ , а  $\delta_\odot = \varepsilon = 23^\circ 26,5'$ , тому  $90^\circ = 23^\circ 26,5' + (90^\circ - \varphi)$ , звідки  $\varphi = 23^\circ 26,5'$  для дати літнього сонцестояння і  $\varphi = -23^\circ 26,5'$  для дати зимового сонцестояння. Для умови в)  $h_\odot = 0^\circ$ ,  $\delta_\odot = \varepsilon = 23^\circ 26,5'$ , тому  $0^\circ = -23^\circ 26,5' + (90^\circ - \varphi)$ . Звідки  $\varphi = 66^\circ 33,5'$ .

Таким чином: а)  $0^\circ$ ; б)  $23^\circ 27'$ ; в)  $66^\circ 33,5'$ .

### НАВЧАЛЬНІ ЗАВДАННЯ

- Чому на Землі повне сонячне затемнення можна спостерігати лише у вузькій смузі?
- Скільки затемнень Сонця й Місяця упродовж року спостерігали б на Землі, якби орбіта Місяця лежала у площині орбіти Землі?
- Поясніть за допомогою малюнка петлеподібний рух планети на небесній сфері.

### ВИСНОВКИ

Видимі рухи Сонця, Місяця і планет на небесній сфері зумовлені обертаннями Землі навколо осі та навколо Сонця. Просторовим розміщенням Землі, Місяця й Сонця пояснюються місячні та сонячні затемнення.

## § 9. ЗАКОНИ КЕПЛЕРА ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ

Видимий рух семи яскравих світил на сфері нерухомих зір, загадковий для стародавніх астрономів, К. Птолемей пояснив комбінацією рівномірних колових рухів. Але це пояснення не спиралося на справжні закономірності їхнього руху в космічному просторі.

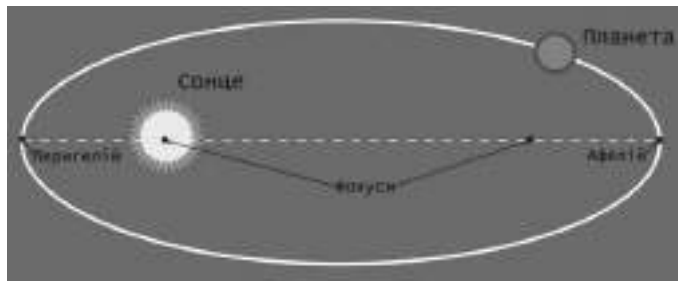


Рис. 9.1. Орбіта планети Сонячної системи – еліпс

### 1. Закони Кеплера.

Закони руху планет знайшов Йоган Кеплер на підставі точних спостережень планети

Марс, які впродовж багатьох років виконував відомий данський астроном Т. Браге (Й. Кеплер був помічником Т. Браге в останні роки його життя). Тривалі, виснажливі пошуки впродовж 1600–1609 рр. дали йому змогу встановити три закони руху планет.

**Перший закон Кеплера.** Кожна з планет рухається навколо Сонця по еліпсу, в одному з фокусів якого міститься Сонце.

Еліпс (рис. 9.1) – це замкнена крива, сума відстаней до кожної точки якої від фокусів  $F_1$  і  $F_2$  рівна його великій осі, тобто  $2a$ , де  $a$  – велика піввісь еліпса.

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

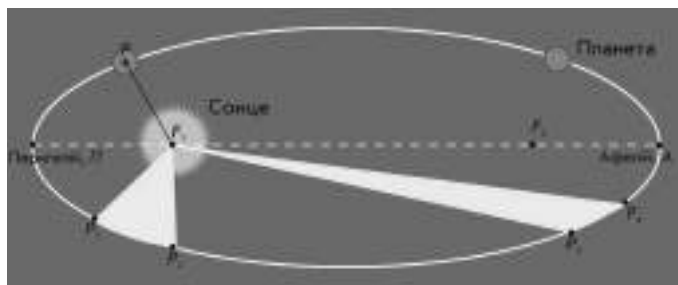


Рис. 9.2. Ілюстрація другого закону Кеплера

Орбіти планет у Сонячній системі мало відмінні від колових. Найближчу до Сонця точку планетної орбіти

$\Pi$  називають *перигелієм*, найвіддаленішу точку орбіти  $A$  – *афелієм*. Земля проходить перигелій 3 січня, а афелій – 4 липня. Внаслідок гравітаційних збурень точки перигелію й афелію дещо зміщуються вздовж орбіти Землі, тому вказані дати проходження Землі через перигелій і афелій є середніми для нашої епохи.

**Другий закон Кеплера.** Радіус-вектор планети за однакові інтервали часу описує рівновеликі площі.



З цього закону випливає важливий висновок: раз площі 1 і 2 (рис. 9.2) рівні, то по дузі  $P_1P_2$  планета рухається з більшою швидкістю, ніж по дузі  $P_3P_4$ , тобто швидкість планети найбільша в перигелії  $\Pi$  і найменша в афелії  $A$ .

**Третій закон Кеплера. Квадрати сидеричних періодів обертання планет відносяться як куби великих півосей їхніх орбіт.**

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

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

Пропорцію (9.1) можна, переставивши члени, записати так:

$$\frac{a_1^3}{T_1^2} = \frac{a_2^3}{T_2^2} = C \quad (\text{стале число}) \quad (9.2)$$

Ця формула показує, що частка від ділення куба великої півосі на квадрат періоду обертання планети навколо Сонця є сталою величиною й однаковою для всіх планет Сонячної системи; тому її досить обчислити для однієї якої-небудь планети. Числова величина цієї сталої залежить від того, в яких одиницях виражено відстань і період обертання планети. Якщо за одиницю взяти зоряний рік і астрономічну одиницю, то  $C = 1$ , і отже, опускаючи індекси,  $a^3 = T^2$  або  $T = a^{3/2}$ .

Частіше за одиницю часу беруть середню добу. Тоді для Землі  $a = 1$ ,  $T = 365,26$  доби, і формула (9.2) дає для сталої

$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{1}{(365,26)^2}, \quad \text{звідки } T = 365,26a^{3/2}.$$

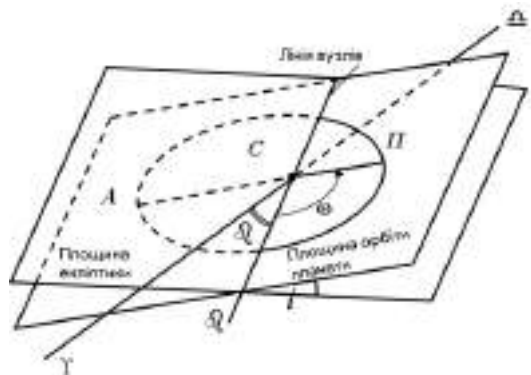
Ця формула виражає період обертання планети в добах.

Третій закон Кеплера, як і два інших, справедливий не лише для планет, а й для інших небесних тіл, наприклад, для супутників планет та штучних супутників. Тільки стала третього закону, застосованого до якої-небудь планети і її супутників, матиме інше числове значення.

## 2. Елементи планетних орбіт.

Рух планети у просторі повністю визначають значення шести величин, які називаються елементами орбіти (рис. 9.3).

Рис. 9.3. Елементи орбіти планети



**Величини ці такі:**

1. Кут між площинами орбіти Землі й орбіти планети називають нахилом орбіти  $i$ . Планета обертається навколо Сонця в тому напрямку, що й Земля (прямий рух), якщо  $0 \leq i \leq 90^\circ$ . Коли  $90^\circ < i < 180^\circ$  – у протилежному, тобто зворотнім рухом. Так рухаються тільки деякі комети, а всі планети й більшість комет мають прямий рух.
2. Лінію перетину площин орбіти планети й орбіти Землі називають *лінією вузлів*. Довготу вузла, в якому планета переходить з південної півкулі неба в північну, називають *довготою висхідного вузла*  $\omega$ . Довгота висхідного вузла  $\omega$  та нахил  $i$  визначають положення площини орбіти у просторі.
3. Кут між висхідним вузлом і перигелієм, який відлічують у площині орбіти, називають кутовою відстанню перигелія  $\pi$ . Іноді замість  $\omega$  вживають довготу перигелія  $\pi = \omega + i$ . Кут  $\pi$  відлічують у двох площинах: у площині орбіти Землі ( $\omega$ ) і в площині орбіти планети ( $\omega$ ).

Кутова відстань перигелія  $\omega$  визначає положення орбіти в її площині.

4. Велика піввісь еліпса  $a$ .
5. Ексцентриситет орбіти  $e = (\sqrt{a^2 - b^2}) / a$ , де  $a$  і  $b$  – півосі еліпса орбіти. Велика піввісь  $a$  і ексцентриситет  $e$  визначають розміри і форму орбіти.
6. Момент проходження через перигелій  $T_0$ .

Знаючи шість елементів  $i, \omega, e, a, T_0$  можна із законів Кеплера встановити положення планети на будь-який момент часу в різних часових інтервалах: роки, століття, тисячоліття. Обчислені наперед положення планет називають *ефемеридами* і подають їх у вигляді таблиць, де положення планети подано на кожний день на багато років уперед.

Уперше завдання визначення орбіти небесного тіла з небагатьох спостережень постало тоді, коли виникла потреба визначити орбіти комет. Задачу цю можна сформулювати так: є ряд спостережень положень тіла Сонячної системи, що рухається під дією сили всесвітнього тяжіння. Треба визначити елементи еліпса (або параболи), яким рухається це тіло.

Метод визначення параболічних орбіт комет створив Ньютон, який уперше обчислив елементи орбіти комети 1680 р. Після відкриття астероїдів їхні орбіти обчислювали також з небагатьох спостережень.

### 3. Основи визначення відстаней в Сонячній системі.

Вимірюючи відстані в Сонячній системі, як базис беруть середню відстань Землі від Сонця, тобто астрономічну одиницю. Такі виміри вперше зробив Коперник. Але всі одержані при цьому значення відносні, бо виражені в а. о. Щоб визначити їх величину в кілометрах, потрібно виміряти в кілометрах сам базис, тобто відстань Землі від Сонця.

Її визначення було одним з найважливіших завдань в астрономії й водночас дуже складним. Паралакс Сонця малий – менший за  $9''$ . Його не могли визначити точно шляхом спостережень паралактичного зміщення з двох віддалених точок земної поверхні, бо сонячне тепло, діючи на інструменти,

спричиняло великі похибки. Тому використовували непрямі методи. Наприклад, можна обчислити відносні відстані двох планет від Сонця й однієї від іншої. Далі досить виміряти одну відстань, щоб можна було знайти всі інші. Або вимірюють горизонтальний паралакс планети, яка підходить до Землі на відстань меншу, ніж відстань від Землі до Сонця, і яку спостерігати зручніше.

Для цього часто використовували спостереження Марса. Він міститься від Сонця далі, ніж Земля, і кожні два роки підходить до неї на відстань в середньому вдвічі меншу, ніж між Землею і Сонцем. Це буває в момент протистоянь, коли Сонце  $S$ , Земля  $T$  і Марс  $M$  лежать приблизно на одній прямій. У цей час горизонтальний паралакс Марса можна виміряти з великою точністю. Перехід від паралакса Марса до паралакса Сонця здійснюється так (рис. 9.4).

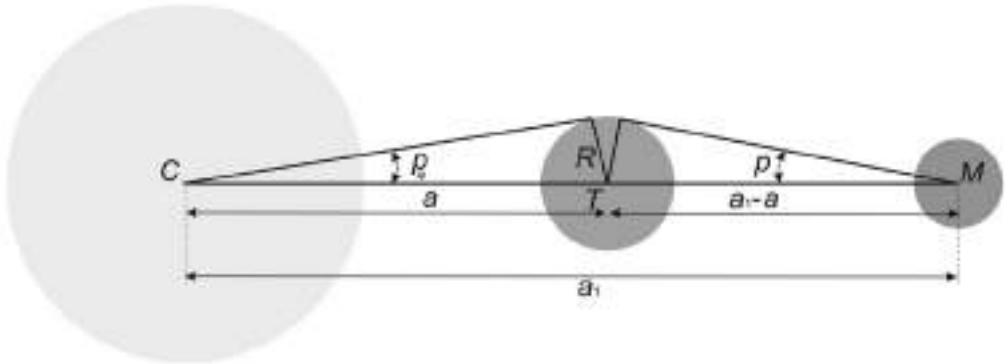


Рис. 9.4. Визначення паралакса Сонця

Нехай  $a$  і  $p_{\odot}$  позначають відповідно середню відстань і паралакс Сонця,  $p$  – паралакс Марса,  $a_1$  – його середню відстань від Сонця,  $R$  – радіус Землі. Припустимо, що всі три тіла лежать на одній прямій і на своїх середніх відстанях від Сонця, і тоді матимемо з рис. 9.4:

$$R = a \sin p_{\odot} \text{ і } R = (a_1 - a) \sin p .$$

Прирівнюючи праві частини і заміняючи синуси малих дуг самими дугами  $p$  і  $p_{\odot}$ , матимемо  $ap_{\odot} = (a_1 - a)p$ ; звідси знаходимо

$$p_{\odot} = \left( \frac{a_1}{a} - 1 \right) p \quad (9.3)$$

Відношення  $\frac{a_1}{a}$  визначають з теорії руху планети за третім законом Кеплера (див. п. 1 цього параграфа).

Для вимірювання паралакса Сонця використовували спостереження деяких астероїдів. Після появи радіоастрономії відстані до тіл Сонячної системи стали визначати з допомогою радіолокації.

#### 4. Визначення мас небесних тіл.

На підставі закону всесвітнього тяжіння ( $F = Gm_1m_2/r^2$ ) Ньютон створив новий напрямок в астрономії – небесну механіку, завданням якої є дослідження руху небесних тіл під дією їх взаємного тяжіння. Першим успіхом стало узагальнення ним же третього закону Кеплера. Виявилось, якщо дві маси  $m_1$  і  $m_2$  обертаються навколо свого центра мас з періодом  $T$  на відстані  $a$  одна від одної, то виконується співзалежність

$$(m_1 + m_2)T^2 a^3 = 4\pi^2 G \quad (9.4)$$

За умови, що  $m_1 > m_2$  формулу (9.4) можна записати так:

$$m = \frac{4\pi^2}{G} \cdot \frac{a^3}{T^2} \quad (9.5).$$

Цей вираз дозволяє визначати масу центрального тіла, навколо якого обертається супутник з періодом  $T$  і велика піввісь орбіти якого має значення  $a$ . Нехай, наприклад,  $m_\odot$ ,  $m_\oplus$  і  $m_\bullet$  – маси Сонця, Землі й Місяця,  $T_\odot$  і  $T_\bullet$  – періоди обертання Землі навколо Сонця і Місяця навколо Землі,  $a_\oplus$  і  $a_\bullet$  – великі півосі земної і місячної орбіт. Запишемо співзалежність (9.4) спочатку для системи Сонце – Земля, потім – для системи Земля – Місяць і прирівняємо їх ліві частини. Нехтуючи масою супутника у порівнянні з масою центрального тіла, знайдемо значення маси Сонця, виражене в масах Землі

$$m_\odot = \left(\frac{T_\odot}{T_\oplus}\right)^2 \cdot \left(\frac{a_\oplus}{a_\bullet}\right)^3 m$$

Точно так, порівнюючи дані про систему Земля – Місяць і систему «планета – її супутник», можна визначити масу будь-якої планети.

Обертаючись навколо Сонця, кожна з планет відчуває гравітаційний вплив з боку інших своїх сусідів. Внаслідок цього відбуваються відхилення (інакше *збурення*) в русі планет від кеплеровських орбіт, які також вивчає небесна механіка. Наприклад, незабаром після відкриття планети Уран виявилось, що в її русі є відхилення від кеплеровської орбіти. Вважаючи, що вони спричинені тяжінням ще невідомої планети, яка лежить за Ураном, англійський астроном Джон Адамс і французький учений Урбен Левер'є незалежно один від одного виконали розрахунки і визначили її положення серед зір. На прохання Левер'є астроном Берлінської обсерваторії Йоганн Галле 23 вересня 1846 р. виявив нову планету – Нептун. Це був перший в історії астрономії випадок, коли існування нової планети передбачили на підставі

теорії, обчислили її координати, а вже потім відкрили зі спостережень. Відкриття Нептуна «на кінчику пера» показало можливості небесної механіки.

Маси планет, які не мають супутників, визначають з аналізу збурень, які вони викликають у русі інших тіл Сонячної системи. Масу Меркурія визначено за збуреннями руху комети Енке; масу Венери – за збуреннями руху Місяця.

### ТИПОВА ЗАДАЧА

Користуючись 3-м законом Кеплера, знайдіть сидеричний період обертання тіла з великою піввіссю орбіти 4 а. о.

**Розв'язання:** Дано:  $a_2 = 4$  а. о. Знайти  $T_2$ . Третій закон Кеплера:  $\frac{T_2^2}{T_1^2} = \frac{a_2^3}{a_1^3}$ . Припустимо, що першим тілом є Земля. Для неї  $a_1 = 1$  а. о.,  $T_1 = 1$  рік. Тоді з виразу для третього закону Кеплера отримуємо співзалежність  $T_2 = \sqrt{T_1^2 a_2^3 / a_1^3} = \sqrt{1^2 \cdot 4^3 / 1^3} = \sqrt{64} = 8$  років.

*Відповідь:*  $T_2 = 8$  років.

### НАВЧАЛЬНІ ЗАВДАННЯ

Визначити масу Юпітера  $m$ , якщо відомо, що його супутник Ганімед обертається навколо планети на відстані  $a = 1070000$  км з періодом  $T = 7,2$  доби.

**Розв'язання:** З формули (9.5)  $m = 4\pi^2/G a^3/T^2$  підставляючи числові значення, знаходимо

$$m = \frac{5,9 \cdot 10^{11} \frac{\text{кг} \cdot \text{с}^2}{\text{м}^3} \cdot (1,07 \cdot 10^9 \text{ с})^3}{(6,22 \cdot 10^5 \text{ с})^2} = 1,9 \cdot 10^{27} \text{ кг}$$

*Відповідь:* Маса Юпітера становить майже  $2 \cdot 10^{27}$  кг.

### ВИСНОВКИ

Три закони руху планет встановив Йоган Кеплер. Ці закони справедливі не лише для планет, але й для їх супутників, як природних, так і штучних. Узагальнений третій закон Кеплера дозволяє визначати маси небесних тіл.

## ТЕМА 1.3. ОСНОВИ ПРАКТИЧНОЇ КОСМОГРАФІЇ

### § 10. ОРІЄНТУВАННЯ НА МІСЦЕВОСТІ ПО НЕБЕСНИХ СВІТИЛАХ

Незважаючи на сучасні технічні засоби, які дозволяють легко орієнтуватися у просторі, досі є професії (пілоти літаків, моряки, рятувальники, військові тощо), що вимагають уміння робити це з допомогою небесних світил.

#### 1. Орієнтування на місцевості по Сонцю і Місяцю.

Найпомітніші світила на небі Землі – Сонце і Місяць, тому не дивно, що людина використовує їх для орієнтування на місцевості та визначення часу з давніх-давен.

**Орієнтування на місцевості по Сонцю.** Щоб визначити, нехай і дуже грубо, напрямок на сторони горизонту по Сонцю, треба пам'ятати де, в якій частині горизонту, воно сходить і заходить в різні пори року. В Україні, тобто в середніх широтах північної півкулі Землі, Сонце сходить влітку на північному сході й заходить на північному заході. Взимку воно сходить на південному сході й заходить на південному заході. Двічі на рік Сонце сходить точно на сході й заходить на заході (у дні рівнодення – близько 21 березня і 23 вересня).

Інший спосіб визначення сторін світу – зафіксувати положення Сонця на небесній сфері опівдні. В цей момент воно лежить над точкою півдня  $S$  і тінь від нього збігається з полуденною лінією  $SN$ , що вказує напрямок південь – північ. У полудень тіні від вертикально встановлених предметів найкоротші, бо Сонце в цей час перебуває найвище над горизонтом.

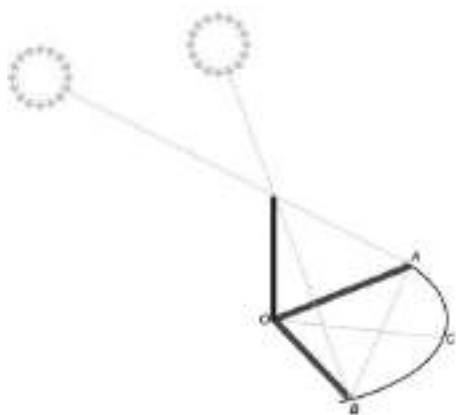


Рис. 10.1. Визначення полуденної лінії з допомогою гномона

На практиці полуденну лінію визначають, фіксуючи найкоротші тіні, створені вертикально встановленими предметами, наприклад, жердиною (гномоном). Простежити, коли тінь найкоротша, важко, бо її довжина змінюється повільно й непомітно для ока. Тому краще відзначити однакові тіні до й після полудня, а потім взяти середній напрямок. Для цього на рівному майданчику з допомогою виска (нитка з вантажем) поставимо жердину вертикально. За деякий час до полудня, наприклад, за годину, відзначимо кінець  $A$  тіні жердини (рис. 10.1). Прив'язавши мотузку до нижньої

частини жердини  $O$ , накреслимо на майданчику частину кола  $AB$  радіусом рівним довжині тіні  $OA$ .

Внаслідок добового руху Сонця тінь від жердини буде переміщатися і зменшуватись, а потім знову почне збільшуватись, поки своїм кінцем не досягне накресленого кола. Відзначивши цю точку  $B$ , розділимо навпіл відстань між  $A$  і  $B$  та проведемо через знайдену середину й основу жердини напрямком  $OC$ , який і дасть нам полуденну лінію.

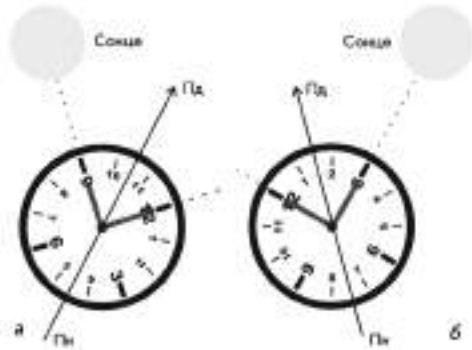
Розгляньмо спосіб визначення напрямку північ – південь по Сонцю й годиннику. Для цього годинник розміщують в горизонтальній площині так, щоб годинна стрілка вказувала на Сонце (на хвилинну й секундну стрілки не зважають). Кут між годинною стрілкою і напрямком на цифру 12 циферблата ділять навпіл. Тоді бісектриса цього кута приблизно вкаже напрямком північ – південь, або полуденну лінію, причому південь до 12 години буде праворуч від Сонця, а після 12 годин – ліворуч (рис. 10.2).

Рис. 10.2. Визначення напрямку по Сонцю й годиннику до (а) і після (б) полудня

Треба взяти до уваги, що такий спосіб дає більш-менш правильні результати в північних і частково в помірних широтах. Найточніші – взимку, менш точні – навесні й восени. Влітку помилка може становити до  $25^\circ$ . Для південних широт, де влітку Сонце стоїть високо, цей спосіб непридатний.

**Орієнтування на місцевості по Місяцю.** Треба пам'ятати, що повний Місяць на небесній сфері лежить проти Сонця. Увечері він піднімається в східній частині неба, опівночі проходить через небесний меридіан (верхня кульмінація), перебуваючи в цей момент над точкою півдня, а потім переходить в західну ділянку неба й заходить вже зі сходом Сонця. Коли взяти до уваги, що внаслідок добового обертання небесної сфери Місяць зміщується упродовж однієї години на  $15^\circ$ , то до 3-ї години ночі повний Місяць зміститься від точки півдня приблизно на  $45^\circ$  і його буде видно на південному заході. Увечері о 21 годині повний Місяць лежить у південно-східній ділянці неба. Ці особливості видимого добового руху Місяця в повні, дозволяють визначати напрямки на сторони горизонту.

Варто пам'ятати, влітку повний Місяць видно низько над горизонтом (так, як Сонце взимку), а схід і захід Місяця відбуваються ближче до точки півдня. Взимку навпаки, Місяць в повню високо піднімається опівночі, а сходить між точками півночі і сходу, заходить між точками півночі й заходу.



**2. Орієнтування на місцевості по Полярній зорі та яскравих зорях.** Сонце допомагає визначати напрямки на сторони світу лише вдень, а Місяць не завжди видно на небі. Але будь-якої ясної ночі сяють зорі, які також можуть бути хорошими дороговказами. Для цього треба тільки вміти знаходити деякі з них на зоряному небі.

Найвідоміша зоря-орієнтир у північній півкулі Землі – Полярна, що лежить поблизу північного полюса світу і вказує на північ. Її легко знайти з допомогою однієї з найвиразніших фігур на небі – ковша із семи яскравих зір (рис. 10.3) сузір'я Великої Ведмедиці.

Яскравість Полярної приблизно така сама, як у зір ковша Великої Ведмедиці, тому її легко виокремити на тлі слабкіших зір, що лежать навколо. Пам'ятаймо, в різні години ночі і в різні пори року Велика Ведмедиця буває вечорами і нижче і вище, ніж Полярна, або праворуч чи ліворуч від неї.

Полярна зоря – не єдиний орієнтир на зоряному небі. Для цього можуть слугувати інші зорі. Зокрема, Сиріус ( $\alpha$  Великого Пса), Капелла ( $\alpha$  Візничого), Вега ( $\alpha$  Ліри), Альдебаран ( $\alpha$  Тельця), Проціон ( $\alpha$  Малого Пса), Регул ( $\alpha$  Великого Лева), Арктур ( $\alpha$  Волопаса), Альтаір ( $\alpha$  Орла) і Альферац ( $\alpha$  Андромеди). Потреба знаходити ці зорі може з'явитися тоді, коли, наприклад, північну частину неба закрито хмарами або через особливості рельєфу її не видно.



Рис. 10.3. Як знайти Полярну зорю з допомогою семизір'я Великої Ведмедиці

Не зайвою буде навичка знаходити на зоряному небі прості геометричні фігури, «намальовані» по зорях, наприклад, літньо-осінній зоряний трикутник, квадрат Пегаса чи весняний майже рівно-

сторонній трикутник, вершинами якого є яскраві зорі Арктур ( $\alpha$  Волопаса), Спіка ( $\alpha$  Діви) і Денебола ( $\beta$ ).

## ТИПОВА ЗАДАЧА

- У який день року Місяць у фазі повні найдовше перебуває над горизонтом в північній півкулі Землі?

**Відповідь:** Згадаймо, влітку повний Місяць видно низько над горизонтом, а взимку навпаки – повний Місяць високо піднімається над горизонтом. Тому Місяць у фазі повні найдовше перебуває над горизонтом в північній півкулі Землі в день зимового сонцестояння (21 чи 22 грудня).



## НАВЧАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

- Навчитися визначати напрямок на сторони світу з допомогою Сонця, Місяця та Полярної зорі.

## ВИСНОВКИ

Небесні світила (Сонце, Місяць, зорі) – надійні орієнтири для визначення сторін світу та дороговкази для орієнтування на місцевості.

## § 11. ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСУ З АСТРОНОМІЧНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ. КАЛЕНДАРІ

Усі події нашого життя, явища і процеси в природі відбуваються в певній послідовності, а також відрізняються своєю тривалістю. Ніч змінює день, осінь – літо, одна фаза Місяця іншу. Періодично повторюються затемнення Місяця і Сонця тощо. Все це свідчить про те, що небесні тіла і явища існують і розвиваються в часі.

### 1. Принципи вимірювання часу в астрономії.

Період, за який небесна сфера здійснює повний оберт навколо Землі, а отже повторення явищ сходу й заходу світил і їхніх кульмінацій, дали людям природну одиницю лічби часу – добу. Насправді за цей період часу Земля робить один оберт навколо осі.

Але обертання Землі не ідеально рівномірне. Відбувається вікове сповільнення обертання внаслідок припливного тертя, спричиненого Місяцем і Сонцем; від цього доба щостоліття збільшується на 0,0016 с. Сезонні коливання швидкості обертання Землі, пов'язані, головню, з атмосферною циркуляцією та переміщенням повітряних мас. Взимку атмосфера гальмує обертання Землі, а влітку прискорює. Є сезонний перерозподіл снігового й льодового покриву між Північною й Південною півкулями Землі, а також процеси, що відбуваються в ядрі й мантії планети, виверження вулканів і землетруси. Тобто причин багато, і не всі вони добре вивчені. Такі коливання не сталі від року до року. Обертання Землі доволі швидко й нерегулярно збільшується й зменшується на тисячні частки секунди через різні проміжки часу. Тому нині точний час визначають з допомогою атомного годинника.

Але астрономічні методи визначення часу не втратили свого значення, бо життя людей «прив'язане» до Землі. Тобто показники дуже точних годинників потрібно в багатьох випадках узгоджувати з природним процесом – тривалістю добового обертання Землі.

Оскільки це обертання легко фіксувати з огляду на явище видимого обертання небесної сфери, то позначивши на ній, наприклад, положення точки весняного рівнодення чи Сонця, отримаємо точки відліку для ос-

новних систем лічби часу (найчастіше їх називають просто часом): *зоряний час* і *сонячний час*.

## 2. Зоряний і сонячний час.

Залежно від того, що беруть за орієнтир на небесній сфері, розрізняють зоряну і сонячну добу.

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

Отже, зоряний час – це час  $s$ , що минув від верхньої кульмінації точки весняного рівнодення.

Зоряну добу розділено на 24 зоряних години (в годині – 60 зоряних хвилин; у хвилині – 60 зоряних секунд). Оскільки повний оберт Землі відносно точки  $\Upsilon$  становить  $360^\circ$ , то маємо співвідношення:  $1 \text{ год} = 15^\circ$ ,  $1^\circ = 4 \text{ хв}$ . В астрономії позначають години (h), хвилини (m) і секунди (s) праворуч від відповідних чисел у вигляді верхнього індексу прямим шрифтом: наприклад,  $5^{\text{h}} 20^{\text{m}}$  або  $20^{\text{h}} 45^{\text{m}} 55^{\text{s}}$ .

Земля обертається навколо осі, тому на різних географічних меридіанах кульмінація точки весняного рівнодення настає в різні моменти. Позначимо через  $s_0$  зоряний час на нульовому меридіані. Тоді для спостерігача, який перебуває на схід від Гринвіча і географічна довгота якого  $\lambda$  виражена в годинах і частках години, зоряний час буде більшим на величину  $\lambda$ :  $s = s_0 + \lambda$ .

Зоряний час зручний для астрономічних спостережень, але повсякденне життя людини пов'язане з видимим положенням Сонця (схід, кульмінація, захід), тобто із сонячним часом.

Проміжок часу між двома послідовними однойменними кульмінаціями центра диска Сонця на тому самому географічному меридіані називають справжньою сонячною добою.



Рис. 11.1. Поблизу рівнодень Сонце під час річного руху переміщується під значним кутом до небесного екватора, поблизу сонцестоянь – під невеликим; крім того, годинні кола сходяться до полюсів. Тому рівним змінам годинних кутів ( $t_1 = t_2$ ) поблизу рівнодень (ліворуч) відповідатимуть більші дуги екліптики, а поблизу сонцестоянь (праворуч) – менші

Початок справжньої сонячної доби на певному меридіані відлічують від моменту нижньої кульмінації Сонця (справжня північ).

Тривалість справжньої сонячної доби не є сталою величиною з двох причин: по-перше, Земля впродовж року рухається навколо Сонця по еліптичній орбіті, тобто нерівномірно, а отже, є нерівномірним і видимий річний рух Сонця серед зір; по-друге, Сонце рухається не вздовж небесного екватора, а по екліптиці, нахиленій до небесного екватора під значним кутом (рис. 11.1).

Налаштувати годинник, щоб він точно показував справжній сонячний час  $T_{\odot}$ , неможливо. Тому виникла потреба запровадити сталу одиницю часу, пов'язану з Сонцем і яка мало відрізняється від справжньої сонячної доби. Для цього було введено поняття *середнього сонця*.

Середнє сонце – фіктивна точка, що рівномірно рухається вздовж небесного екватора, і як і Сонце, за той самий проміжок часу (рік) повертається до точки весняного рівнодення  $\mathcal{V}$ . Час, визначений за середнім сонцем, називають середнім сонячним часом.

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

Отже, середній сонячний час  $T_{\lambda}$  – це час, що минув від нижньої кульмінації середнього сонця. Оскільки це фіктивна точка, то визначити середній сонячний час зі спостережень неможливо. Його можна лише обчислити.

Різницю між середнім сонячним часом  $T_{\lambda}$  і справжнім сонячним часом  $T_{\odot}$  називають *рівнянням часу*  $h = T_{\lambda} - T_{\odot}$  (11.1). Астрономічні щорічники наводять його значення для різних днів календарного року.

З правил визначення проміжку часу, названого добою, випливає, що десь на Землі має бути меридіан, при переході через який буде змінюватись дата. Цей меридіан, 180-й від Гринвіча, проходить між Азією й Америкою, і саме до нього віднесено лінію зміни дат.

Доба (24 години) є зручним у користуванні відліком часу, але потрібно вміти рахувати більші проміжки часу. Для цього використовують ще один природній періодичний процес – обертання Землі навколо Сонця.

**Проміжок часу між двома послідовними проходженнями центра диска Сонця через точку весняного рівнодення називають тропічним роком.** Тривалість тропічного року становить  $365^{\text{d}} 5^{\text{h}} 48^{\text{m}} 46^{\text{s}}$ . Ця величина не є сталою, а повільно змінюється.

## 2. Місцевий, поясний і всесвітній час.

Середній сонячний час має різне значення для кожного конкретного меридіана на поверхні Землі. Наприклад, географічні довготи Ужгорода, Києва і Луганська становлять  $22,3^{\circ}$ ,  $30^{\circ}$  і  $39,4^{\circ}$ , або в годинній мірі  $1^{\text{h}} 29^{\text{m}}$ ,  $2^{\text{h}} 00^{\text{m}}$ ,  $2^{\text{h}} 38^{\text{m}}$ . Отже, в Луганську Сонце як у нижній, так і верхній кульмінації буде на 38 хв раніше, а в Ужгороді – на 31 хв пізніше, ніж у Києві.

Середній сонячний час, виміряний на певному географічному меридіані, називають місцевим часом (позначають  $T_{\lambda}$ ). Для всіх пунктів, що лежать на одному меридіані, місцевий час буде однаковим. Для пунктів, що лежать на різних меридіанах, він буде різним. Це викликає певні незручності.

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

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

Гринвіцький меридіан, що проходить через Гринвіч (передмістя Лондона), є центральним для нульового годинного поясу. Центральний меридіан другого годинного поясу лежить на схід від Гринвіча на  $30^\circ$  або на 2 години за часом (київський меридіан проходить через вертикальне коло Астрономічної обсерваторії Київського Національного університета ім. Тараса Шевченка) і т. д.

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

Кульмінації світил на географічному меридіані східної довготи  $\lambda$  відбуваються на  $\lambda$  годин раніше, ніж на гринвіцькому. Тому місцевий середній сонячний час  $T_\lambda$  пов'язаний з  $T_0$  так:  $T_\lambda = T_0 + \lambda$  (11.2). Водночас, поясний час  $T_n = T_0 + n^h$ , (11.3) де  $n$  – номер поясу, що збігається з вираженою в годинах довготою центрального меридіана поясу.

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

### 3. Календарі.

Будь-яку певну систему лічби значних проміжків часу з поділом на окремі періоди (роки, місяці, дні) називають календарем (від лат. «calendas» – перше число місяця).

Всі календарі, що існують на Землі, поділяються на три головні типи: *сонячні, місячні й місячно-сонячні*. В основі сонячного календаря лежить тривалість тропічного року, в основі місячного – тривалість місячного місяця, а місячно-сонячний календар поєднує й те, і інше.

Сучасний календар, запроваджений в більшості країн світу, є сонячним. Уперше сонячний календар складено близько 7000 років тому в Єгипті.

У 46 р. до н. е. за наказом імператора Юлія Цезаря календар римлян було змінено на новий, розроблений александрійським астрономом Созігеном. У ньому за середню тривалість тропічного року прийнято проміжок часу в 365,25 доби. А щоб кожний рік мав ціле число діб, три роки календаря містять по 365 діб, а кожний четвертий – 366 діб. Цей рік називають високосним, а календар – *юліанським*, або *старим стилем*.

Неточність року в юліанському календарі становить 11 хв 14 с – настільки він довший за тропічний рік. Це означає, якщо в 4 ст. н. е. весняне рівнодення наставало 21 березня, то через 1250 років – вже 11 березня. Але до дня весня-

ного рівнодення прив'язані розрахунки дат найбільшого християнського свята Великодня, яке традиційно святкують навесні. Через цю розбіжність його дата змістилась, що не влаштовувало християнську церкву. Тому 1582 р. папа Григорій XIII запровадив новий календар, який тепер називають *григоріанським*, або *новим стилем*. Цей календар, розроблений італійським математиком і лікарем Ліліо, повертав день весняного рівнодення на 21 березня (зайві дні викинули, й після 4 жовтня 1582 р. настало не 5, а одразу 15 жовтня). Щоб різниця не накопичувалась знову, було введено нове правило обчислення простих і високосних років. Роки, що завершують століття, але їх число не ділиться на 400, у новому календарі, на відміну від юліанського, є простими, а не високосними.

На новий стиль (григоріанський календар) країни Європи переходили поступово – до початку ХХ ст. цей процес практично було закінчено. В Україні новий стиль запроваджено з 1918 р. (після 1 лютого одразу настало 14 лютого).

Григоріанський календар значно точніший за юліанський. Помилка в одну добу набігає в ньому лише за 3300 років, адже різниця між тропічним і григоріанським роками становить усього 26 секунд. Але оскільки тропічний рік не вміщує ціле число діб, жодний календар не буде досконалим.

### НАВЧАЛЬНІ ЗАВДАННЯ

- Знайдіть географічну довготу Полтави, якщо в момент передачі радіосигналу о 12 годині всесвітнього часу місцевий середній сонячний час Полтави дорівнює  $14^{\text{h}} 18^{\text{m}} 2^{\text{s}}$ .  
**Відповідь:**  $2^{\text{h}} 18^{\text{m}} 2^{\text{s}}$ .
- Визначте, коли за місцевим середнім і поясним часом настає момент справжнього полудня 16 січня в м. Кременчук (2-й годинний пояс,  $l = 2^{\text{h}} 13,6^{\text{m}}$ ).
- **Відповідь:**  $12^{\text{h}} 09^{\text{m}} 35^{\text{s}}$ ,  $11^{\text{h}} 55^{\text{m}} 59^{\text{s}}$  (якщо взяти значення  $\eta = +9^{\text{m}} 35^{\text{s}}$ ).
- За старим стилем І. Ньютон народився 25 грудня 1642 р. Переведіть цю дату на новий стиль.  
**Відповідь:** 4 січня 1643 р.

### ВИСНОВКИ

Періодичне обертання небесної сфери, повторення явищ сходу й заходу світил та їх кульмінацій дали людям природну одиницю лічби часу – добу. Інший періодичний процес – обертання Землі навколо Сонця – дав іншу одиницю лічби часу – тропічний рік. Будь-яку систему лічби значних проміжків часу з поділом на окремі періоди (роки, місяці, дні) називають календарем. Всі календарі, що існують на Землі, можна поділити на три головні типи: сонячні, місячні й місячно-сонячні. В основі сонячного календаря лежить тривалість тропічного року, в основі місячного – тривалість місячного місяця, а місячно-сонячний календар поєднує і те, й інше.

# Частина 2. Основи астрономії

## § 1. ВСТУП. ПРЕДМЕТ АСТРОНОМІЇ ТА ЙОГО ОСОБЛИВОСТІ

Давно, коли людина ще не мала систематичних знань з фізики і хімії, астрономія вже була високорозвиненою наукою. Ця особливість визначила її чільне місце в історії культури.

### 1. Астрономія – фундаментальна наука.

Астрономія, як і фізика, належить до фундаментальних наук. Їх завдання – вивчати основоположні питання світобудови. Завдяки цим наукам людство здобуває знання, що спричиняють появу нових напрямів практичної діяльності людей та суттєві зміни в технологіях і техніці.

Астрономія – наука про еволюцію в найширшому розумінні цього терміну. Вона вивчає походження й еволюцію усього суцього – Всесвіту в цілому. Це друге, що вирізняє її серед багатьох інших наук. Усвідомлення факту, що небесні тіла змінюються, а Всесвіт еволюціонує як ціле, зрештою привело до потреби застосовувати в астрономії не лише фізичні закони, але й здобутки, наприклад, хімії, а тепер (у зв'язку з відкриттям екзопланет і пошуку на них життя) і біології.

Третя особливість астрономії, як порівняти з іншими природничими науками, полягає в тому, що аматори астрономії – непрофесійні астрономи – до нашого часу можуть робити внесок в її розвиток. Прикладів цьому багато: відкриття комет, спостереження астероїдів, участь в обробці великих масивів астрономічних даних. Деякі видатні астрономи, наприклад, Вільям Гершель, розпочинали свої дослідження в астрономії як аматори. Великий внесок в астрономію зробили вчені, які прославилися в математиці (наприклад, П'єр-Симон Лаплас) чи фізиці (Галілео Галілей).

### 2. Розділи астрономії.

Астрономія вивчає різні небесні тіла і явища. Це спонукало до поділу її на низку окремих розділів. Серед них чотири основних: 1) *астрометрія* вивчає положення небесних світил, вирішує завдання вимірювання часу, 2) *небесна механіка* вивчає рух небесних тіл під дією сил тяжіння, 3) *астрофізика* досліджує походження, будову й розвиток небесних тіл, їхні фізичні властивості та хімічний склад, 4) *космологія* вивчає походження й розвиток Всесвіту в цілому.

Таблиця 1. Сучасний поділ астрономії на окремі наукові дисципліни (розділи)

НАЗВА	ЧАС ВИНИКНЕННЯ	ЩО ВИВЧАЄ
<b>Астрометрія</b>	Від початку астрономічних спостережень. Астрометрія – найдавніший розділ астрономії.	Вивчає положення на небі небесних тіл у певні моменти часу.
<b>Небесна механіка</b>	XVII ст.	Вивчає рухи небесних тіл та космічних апаратів під дією гравітації, а також атмосферного гальмування і тиску випромінювання.
<b>Астрофізика</b>	XIX ст.	Вивчає фізичну природу астрономічних об'єктів. Практична астрофізика пояснює електромагнітне випромінювання небесних тіл. Теоретична астрофізика інтерпретує ці спостереження в рамках математичних моделей, які будують на підставі законів фізики.
<b>Зоряна астрономія</b>	На межі XVIII і XIX ст.	Вивчає власні рухи зір у Галактиці, а також їхній блиск, колір, спектри, просторовий розподіл тощо.
<b>Космогонія</b>	XIX ст.	Вивчає походження й еволюцію небесних тіл і їх систем.
<b>Космологія</b>	XX ст.	Вивчає будову й еволюцію Всесвіту як цілого.

Водночас кожний із цих розділів має окремі напрямки, як-от: фізика планет, фізика Сонця, зоряна астрономія, позагалактична астрономія, космогонія (походження небесних тіл) тощо.

### 3. Зв'язок астрономії з іншими науками.

В астрономічних дослідженнях застосовують фундаментальні закони фізики, використовують методи фізики, математики, хімії та інших суміжних наук. Наприклад, закон всесвітнього тяжіння лежить в основі небесної механіки, а на закони геометричної оптики спираються під час розробки оптичних схем телескопів.

Нині в астрономії широко використовують також комп'ютерні технології. З допомогою потужних комп'ютерів моделюють астрономічні процеси (наприклад, еволюцію зір і зоряних систем) з метою виявлення закономірностей, що проявляються в реальних об'єктах.

Для побудови телескопів наземного й космічного базування, а також різних приймачів випромінювання і детекторів частинок, застосовують досягнення в галузі матеріалознавства, як і деяких інших прикладних наук.

Водночас астрономія, здобуваючи фундаментальні знання про довкілля, збагачує фізику і хімію результатами досліджень речовини за таких фізичних умов (температура, тиск, магнітне поле тощо), які неможливо відтворити в земних лабораторіях.

Астрономія – переважно спостережна наука. Всі об'єкти (за винятком метеоритів), які вона вивчає, лежать за межами земної атмосфери. На відміну від фізики чи хімії, де застосовують експериментальні методи, в астрономії досі спостереження є базовим методом, на який спираються майже всі дослідження небесних тіл. Фізичний чи хімічний експеримент можна в разі невдачі повторити чи так само, як і в перший раз, чи навіть у сприятливіших умовах. Астрономічне явище неможливо повторити. Можна лише виконати спостереження, якщо відбудеться нове явище, що буде точно відповідати першому. Але цього, строго кажучи, не буває: сонячні затемнення від року до року будуть значною мірою не схожі між собою, плями на Сонці завтра будуть не ті, що були сьогодні, і навіть будь-яка з так званих «нерухомих» зір уже за якийсь час зміститься зі свого теперішнього місця.

Тільки з початком космічної ери (1957 р.), завдяки космічним апаратам (КА), астрономи отримали змогу виконувати дослідження та експерименти на поверхні деяких небесних тіл і в міжпланетному просторі. Це стосується вивчення хімічного складу та фізичних властивостей атмосфер і поверхонь планет, астероїдів і комет.

#### 4. Практичне застосування астрономії.

Хоча астрономія і належить до фундаментальних наук, але впродовж усієї історії вона сприяє вирішенню практичних потреб людини. Здавна зорі і планети допомагали орієнтуватися на місцевості, визначати час. На підставі знань, отриманих зі спостережень небесних світил, було розроблено перші календарі, виявлено періодичність сонячних та місячних затемнень. Ці знання стали підґрунтям первісних уявлень людини про довкілля.

Сучасні супутникові системи зв'язку, телебачення, позиціонування на поверхні Землі (визначення координат) неможливі без астрономії та космонавтики, що, своєю чергою, також «тримається» на астрономічних знаннях. Значний внесок астрономії і в справу спостереження й дослідження Землі із космосу.

Водночас астрономія допомагає, наприклад, фізиці, здобувати дані, що стосуються до багатьох фізичних теорій. Космічний простір – єдине місце, де речовина існує при температурах в сотні мільйонів градусів і майже при абсолютному нулі. Досягнення астрономії використовують також в географії, геології і навіть в історії.



### НАВЧАЛЬНІ ЗАВДАННЯ

- Які здобутки інших наук використовує астрономія? Наведіть два – три приклади.
  - Поясніть, як довго в астрономії спостереження буде головним методом дослідження?
  - Які здобутки астрономії використовують інші науки? Наведіть приклад.
- 

### ВИСНОВКИ

Астрономія – фундаментальна наука, що виникла однією з перших і суттєво вплинула на розвиток людства. На відміну від інших природничих наук, вона вивчає еволюцію усього суцього – Всесвіту в цілому. Її головним методом досліджень ще й дотепер є спостереження.

# Розділ I. Методи і засоби астрономії

## ТЕМА 1.1. МЕТОДИ АСТРОНОМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

### § 2. ДЖЕРЕЛА ІНФОРМАЦІЇ ПРО НЕБЕСНІ ОБ'ЄКТИ

Астрономія оперує величезними обсягами даних про небесні тіла, використовуючи для їх отримання: електромагнітне випромінювання; космічні промені; нейтрино й антинейтрино; гравітаційні хвилі.

**1. Астрономія – спостережна наука.** Вивчення Всесвіту почалося зі спостережень тих небесних об'єктів, які людина могла бачити. Це дозволило накопичити велику кількість фактів і виявити закономірності астрономічних явищ, наприклад, місячних і сонячних затемнень.

Нині завдяки космонавтиці астрономія має змогу виконувати окремі експерименти за межами Землі. Але більшість об'єктів дослідження астрономії такі, що їх ніколи не вдасться помістити в дослідну лабораторію чи вивчати з близької відстані. Їхній розвиток, як і Всесвіту в цілому, може відбуватися тільки в природі. Людина може лише спостерігати за цим процесом.

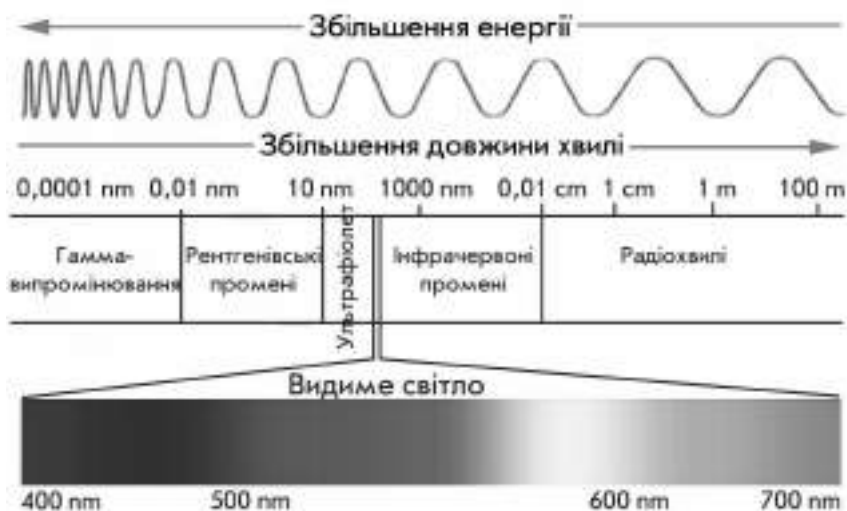


Рис. 2.1. Електромагнітний спектр – впорядкована по довжині сукупність монохроматичних електромагнітних хвиль

Першим носієм інформації про небесні світила було світло, що є одним з різновидів електромагнітних хвиль. Ці хвилі класифікують по їх частоті. Повний набір усіх частот називають електромагнітним спектром. Окрім видимого світла, його складають радіохвилі, мікрохвильове, інфрачервоне, ультрафіолетове, рентгенівське і гамма-випромінювання. Радіохвилі мають найменші частоти і найбільші довжини хвиль: від кількох десятків часток міліметра до багатьох кілометрів. Найбільші частоти і найменші довжини хвиль має гамма-випромінювання.

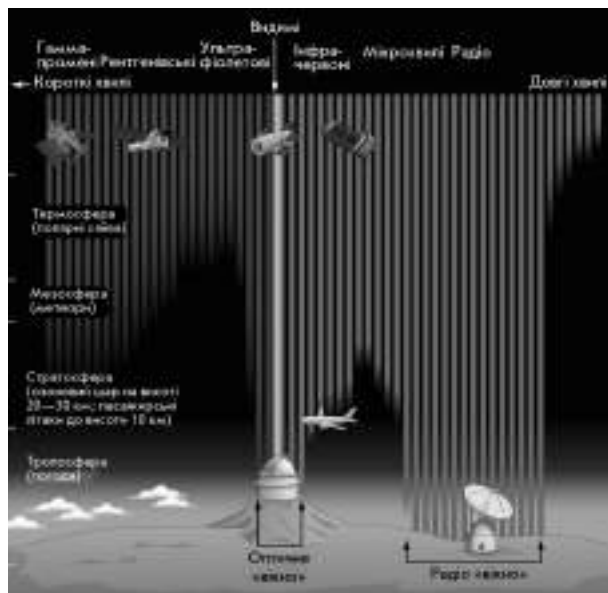
Більшість електромагнітних хвиль атмосфера Землі не пропускає до її поверхні. Крізь «вікна прозорості» (рис. 2.2) проникають тільки видимі промені (ті, що сприймає людське око) з довжиною хвиль 390–760 нм, інфрачервоні промені 0,76–5,2 мкм та вибірково 8,2–22 мкм завдовжки і радіохвилі з довжиною хвиль 0,0001–30 м.

Практично весь ультрафіолет, жорсткі рентгенівські й гамма-промені в атмосфері на висоті з нижньою межею в 20–40 км поглинають молекули азоту, кисню й озону. Вони відіграють роль своєрідного щита для біосфери від випромінювання фотонів з високими енергіями. Поверхні Землі досягає незначна частка ультрафіолету з довжиною хвилі близько 300 нм. Від цих довжин хвиль і приблизно до 900 нм прозорість атмосфери є найбільшою – це і є те «вікно» крізь яке людина протягом тривалого часу вивчала Всесвіт. Далі прозорість атмосфери падає через поглинання інфрачервоних променів різними атмосферними газами такими, як CO, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, але головно, водяною паром і вуглекислим газом. Радіовипромінювання з довжиною хвилі більшою за 30 м крізь атмосферу не проникає – його поглинають гази й аерозолі та відбивають верхні шари іоносфери.

Рис. 2.2. Вікна прозорості земної атмосфери

## 2. Астрономія – всехвильова наука.

Упродовж багатьох століть астрономи спостерігали зоряне небо через вузьке «оптичне вікно» атмосфери. З XIX ст. Всесвіт почали вивчати крізь «вікно прозорості» в інфрачервоних променях. Радіоастрономія виникла на початку 30-х років XX ст. й уможливила дослідження небесних об'єктів



крізь ще одне вікно прозорості – «радіовікно», яке майже в десять мільйонів разів ширше, ніж оптичне.

Від початку космічної ери (1957), коли стало можливим відправляти за межі атмосфери Землі наукові прилади, астрономи отримали змогу виконувати спостереження небесних тіл у всьому діапазоні електромагнітного спектра.

Новим джерелом інформації в астрономії з 2015 р. є гравітаційні хвилі – зміни (флуктуації) простору-часу. Їх у 1916 р. теоретично передбачив А. Айнштейн. Такі хвилі виникають тоді, коли будь-які рухи матеріальних тіл спричиняють неоднорідні зміни сили тяжіння в навколишньому просторі. Це може бути, наприклад, обертання тіла або системи тіл, несиметричних відносно осі обертання. До таких систем належать тісні подвійні зорі, а надто ті, компоненти яких – це нейтронні зорі чи чорні діри. Потужні сплески гравітаційних хвиль виникають під час несиметричного колапсу масивної зорі перед спалахом Наднової (ч. 2, § 20), під час злиття нейтронних зір або чорних дір (ч. 2, § 22).

### НАВЧАЛЬНІ ЗАВДАННЯ

- Чому астрономи тривалий час для спостережень небесних тіл використовували тільки видиме світло?
- Як пояснити те, що високо в горах людина бачить більше зір, ніж на рівнині?
- Поясніть, які умови потрібно було створити для того, щоб астрономія стала всехвильовою наукою?

### ВИСНОВКИ

Інформацію про Всесвіт астрономам приносять електромагнітне випромінювання, космічні частинки, нейтрино та гравітаційні хвилі. Завдяки вивченню різних приладів за межі земної атмосфери, астрономія розширила вікна прозорості й стала всехвильовою наукою.

## § 3. ОСНОВИ АСТРОФОТОМЕТРІЇ

В астрономії працюють з усіма випромінюваннями, що складають електромагнітний спектр. Але оскільки атмосфера Землі пропускає не всі з них, то існують особливості реєстрації випромінювання в різних ділянках спектра.

### 1. Особливості реєстрації випромінювання небесних тіл.

Знайти можливість реєструвати не лише видиме світло – важливе завдання в астрономії. Відносно просто його вирішують для інфрачервоного та субміліметрового випромінювання з довжинами хвиль від 13 мкм до 1000 мкм.

Концентрація водяної пари, що головню поглинає інфрачервону радіацію, швидко зменшується з висотою і це випромінювання можна реєструвати з аеростатів і літаків вже на висотах 25–30 км. Для них же доступні спостереження в жорсткому рентгенівському та гамма-діапазоні. Ультрафіолет, м'які та середні рентгенівські промені реєструють на висоті від 150 км, де атмосфера повністю прозора для всіх видів випромінювань. Дослідження в цих ділянках спектра розпочалися з 1957 р. після запуску першого штучного супутника Землі.

Інформацію про небесні тіла доносять до нас також космічні промені і нейтрино. Космічні промені – це головню протони, а також електрони, ядра гелію і важчих хімічних елементів. Нейтрино – частинка, що не має електричного заряду, з масою спокою, величину якої ще й досі достовірно не визначено, – здатне проникати крізь тверде тіло навіть легше, ніж світло крізь скло. Нейтрино, що утворюється під час термоядерних реакцій у зорях, майже негайно зі швидкістю світла вилітає назовні, несучи інформацію про умови в надрах зорі у поточний момент, тоді як електромагнітне випромінювання рухається до поверхні зорі сотні тисяч чи навіть мільйон років. Тому методи нейтринної астрономії важливі для вивчення процесів у надрах Сонця і зір.

## 2. Методи визначення блиску небесних тіл.

Видиму яскравість небесних світил називають їх блиском. Його фізична суть – це освітленість, яку створює світило на приймачі світлової енергії, наприклад, на сітківці людського ока. Термін блиск запроваджено у зв'язку з тим, що фізичне визначення яскравості стосується до протяжних, а не до точкових об'єктів.

З фізики відомо, освітленість – це кількість світлової енергії, що падає на одиницю поверхні за одну секунду. У Міжнародній системі одиниць (СІ) її вимірюють люксами (лк). Світлові потоки, які надходять до Землі від небесних світил (крім Сонця) дуже малі. Наприклад, повний Місяць в zenіті створює на місцевості освітленість майже 0,3 лк, а найяскравіші зорі – в сотні тисяч і мільйони разів слабкіші, ніж повний Місяць. Виразити блиск небесних світил у люксах незручно, тому в астрономії використовують умовну шкалу зоряних величин.

Для вимірювання випромінювання небесних тіл в астрономії використовують спеціальні прилади – фотометри, а відповідні дослідження називають астрофотометрією. Вона є одним з найважливіших астрономічних методів, який почали застосовувати наприкінці ХІХ – початку ХХ ст. Розрізняють точкову (зоряну) фотометрію і фотометрію протяжних об'єктів – Сонця, Місяця, туманностей. Метод фотометрії використовує доволі прості принципи. Щоб визначити блиск небесного тіла, його світло візуально порівнюють (візуальна фотометрія) з іншим, часто штучним, джерелом. Так працюють фотометри вирівнювання або ослаблення світла. Потік світла штучної зорі ослаблюють доти, доки її блиск не стане рівним блиску справжньої зорі.

Величину цього ослаблення точно вимірюють і за нею обчислюють блиск спостережуваної зорі.

Блиск зорі можна виміряти іншим способом. З допомогою поляризаційних пристроїв (поляроїдів) її світло повністю гасять. Відлік кута повороту поляроїда, що відповідає гасінню світла, дає можливість обчислити блиск зорі.

До появи цифрових приймачів випромінювання в астрономії широко застосовували фотографічну фотометрію. Вимірювали ступінь «почорніння» фотографічних зображень небесних тіл чи їхніх спектрів, що було результатом дії випромінювання на фотоплатівку, і на підставі цього визначали блиск об'єктів.

Око й фотоплатівка мають різну чутливість в тих самих ділянках спектра. Тому, наприклад, червоні зорі на фотоплатівці виходили слабкішими, ніж білі зорі з таким самим візуальним блиском. Але точність фотографічної фотометрії значно вища, ніж візуальної.

З початку ХХ ст. в астрономії застосовують термо- і фотоелектричні фотометри. Світло, що потрапило до такого фотометра, створює в ньому електричний струм тим сильніший, що більший потік світла. Переваги електрофотометрії – висока чутливість приладів, зокрема важлива у вимірюванні дуже слабого випромінювання багатьох небесних тіл, і об'єктивність вимірювань – їх незалежність від індивідуальних особливостей спостерігача.

#### НАВЧАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

- Поясніть, чому фотометрія є одним з найважливіших методів астрономічних досліджень?

#### ВИСНОВКИ

Завдання астрономів – знайти можливість реєструвати не лише видиме світло. Вимірювання потоків випромінювання від небесних світил дозволяє визначати їхній блиск, тобто освітленість. Такі вимірювання в астрономії забезпечує астрофотометрія.

#### § 4. СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ В АСТРОНОМІЇ

Філософ Огюст Конт у 1842 р. зауважив, що «ніколи і жодним чином нам не вдасться вивчити хімічний склад небесних світил». Але вже за двадцять років це завдання вдалося вирішити завдяки відкриттю спектрального аналізу – дослідження спектрального складу світла. Новий метод став основою астрофізики.

## 1. Спектри небесних тіл.

Вивчаючи процеси і явища, що відбуваються у Всесвіті, важливо не лише вміти реєструвати електромагнітне випромінювання, яке надходить від небесних об'єктів, але й зрозуміти, за яких фізичних умов воно виникло. Тому коли з'ясували, що вигляд спектра (розподілу енергії випромінювання за частотами) будь-якого тіла залежить від його температури, ширина спектральних ліній вказує на густину, а їх зміщення в спектрі свідчить про рух тіла вздовж променя зору спостерігача, стало зрозуміло – електромагнітне випромінювання несе дуже багато інформації.

Розрізняють три основні види електромагнітного спектра – 1) *неперервний*, або *суцільний*, 2) *лінійчастий* і 3) *смугастий*. Сонце і зорі оточені газовими атмосферами, холоднішими за глибші шари, тому їхні спектри – це *спектри поглинання*. На тлі неперервних спектрів їхніх видимих поверхонь видно багато темних ліній, що виникають, коли світло з глибин проходить крізь атмосфери цих небесних тіл.

Для отримання спектрів застосовують *спектроскопи* і *спектрографи* головною складовою яких є призма чи дифракційна ґратка. Спектроскоп дозволяє розглядати спектр візуально, а спектрограф – зафіксувати його зображення з допомогою приймача випромінювання.

Спектральні прилади розміщують за фокусом об'єктива телескопа. Якщо використовують дифракційну ґратку, то отриманий спектр називають дифракційним. Нині в астрофізиці застосовують і складніші прилади для спектрального аналізу різних видів випромінювання.

## 2. Визначення фізичних властивостей і швидкості руху небесних тіл з допомогою їхніх спектрів.

Спектри небесних тіл дають змогу виявити їхній хімічний склад, а інтенсивність спектральних ліній вказує на кількісний вміст того чи іншого елемента. Водночас вигляд спектральних ліній, наприклад їх ширина, вказує на температуру, тиск і наявність електричного чи магнітного полів у небесного тіла. Великий тиск, електричне чи магнітне поле приводять до розширення, а також до розщеплення ліній в спектрі. Висока температура спричиняє явище іонізації – атоми втрачають частину електронів. Спектр речовини з іонізованими атомами відмінний від спектра тієї ж речовини в нейтральному стані. Що вища температура і менший тиск, то сильніша іонізація газу. Окрім цього, різні елементи за однакової температури іонізуються неоднаково. Тому особливості спектрів дозволяють на підставі теорії іонізації отримати багато даних, що стосуються до природи небесних тіл.

Розгляньмо докладніше методи *визначення температури* небесного тіла з його спектра. Один з них ґрунтується на припущенні, що спектр випромінювання небесного тіла схожий на спектр випромінювання абсолютно чорного тіла. Енергія, яку випромінює цей гіпотетичний об'єкт на різних довжинах хвиль неперервного спектра, неоднакова. Температура тіла ви-

значає положення максимуму випромінювання в спектрі. З її підвищенням він зміщується в короткохвильову, фіолетову, ділянку спектра (рис. 4.1). Цю властивість називають законом Віна. Згідно з ним, довжина  $\lambda_{\max}$  електромагнітної хвилі, що переносить максимальну енергію, пов'язана з температурою тіла, яке її випромінює, залежністю:

$$\lambda_{\max} = \frac{0,0029}{T} \quad (4.1),$$

де  $\lambda_{\max}$  виражена в метрах, а  $T$  – у кельвінах.

Закон Віна лежить в основі одного з методів визначення температури світила з його спектра.

Можна визначити температуру небесного тіла з аналізу його повного випромінювання. Для абсолютно чорного тіла справедливий закон Стефана – Больцмана:

$$E = \sigma T_e^4 \quad (4.2),$$

де  $E$  – енергія, яку випромінює тіло з одиниці площі за одиницю часу,  $\sigma$  – стала Стефана – Больцмана, а  $T_e$  – ефективна температура (температура абсолютно чорного тіла, що створює потік випромінювання на різних довжинах хвиль такої ж потужності, як і реальне тіло). Щоб із рівняння (4.2) визначити  $T_e$  небесного тіла, треба виміряти повну кількість енергії, яку воно випромінює в одиницю часу. Знаючи відстань до об'єкта та його радіус, обчислюють величину  $E$  і з формули Стефана – Больцмана знаходять значення  $T_e$ .

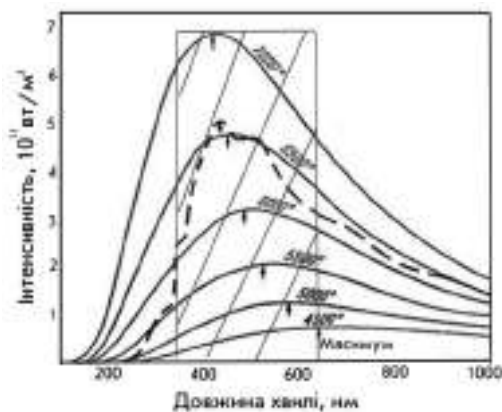


Рис. 4.1. Максимум кривої розподілу енергії в спектрі випромінювання абсолютно чорного тіла з підвищенням температури зміщується в бік коротких хвиль. Пунктирна крива – розподіл енергії в спектрі Сонця. Ділянку видимих променів заштриховано

З різних причин (головна з яких – закони випромінювання абсолютно чорного тіла не придатні для повного пояснення випромінювання небесного тіла) розглянуті методи дають наближені результати і тому визначити температуру доводиться іншими способами. Інколи в астрономічній практиці поняття температури втрачає звичайний фізичний сенс і характеризує якусь певну властивість фізичного стану речовини (іонізаційна температура, кінетична температура тощо).



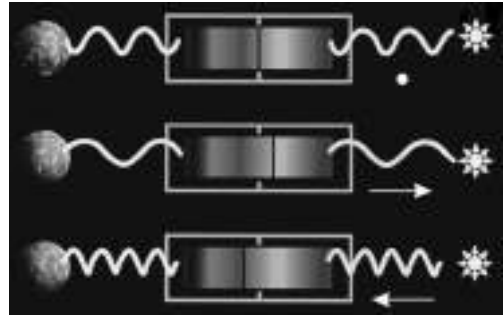
Спектральні спостереження дають змогу визначати променеву швидкість  $v_r$  (швидкість вздовж променя зору спостерігача) небесного тіла. Це швидкість, з якою об'єкт наближається до спостерігача або віддаляється від нього. Метод вимірювання променевих швидкостей ґрунтується на застосуванні ефекту Доплера. Згідно з ним, рух тіла вздовж променя зору спостерігача спричиняє зміщення ліній в його спектрі (рис. 4.2).

Вимірявши зміщення ліній у спектрі світила і знаючи швидкість світла, променеву швидкість  $v_r$  небесного тіла обчислюють з формули:

$$\lambda' - \lambda = \left(\frac{v_r}{c}\right)\lambda, \text{ або } \Delta\lambda = \left(\frac{v_r}{c}\right)\lambda, \text{ чи } v_r = \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right)c \quad (4.3),$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі нерухомого джерела світла,  $\lambda'$  – довжина хвилі, змінена внаслідок руху джерела світла вздовж променя зору,  $\Delta\lambda$  – доплерівське зміщення спектральної лінії,  $v_r$  – швидкість руху джерела,  $c$  – швидкість світла.

Рис. 4.2. Зміщення ліній в спектрі зорі, спричинене ефектом Доплера



Для багатьох небесних тіл зміщення спектральних ліній, спричинене їх рухом уздовж променя зору спостерігача, невеликі. Тому точне вимірювання променевих швидкостей стало можливим тільки тоді, коли зоряні спектри почали фотографувати.

### 3. Спектр Сонця.

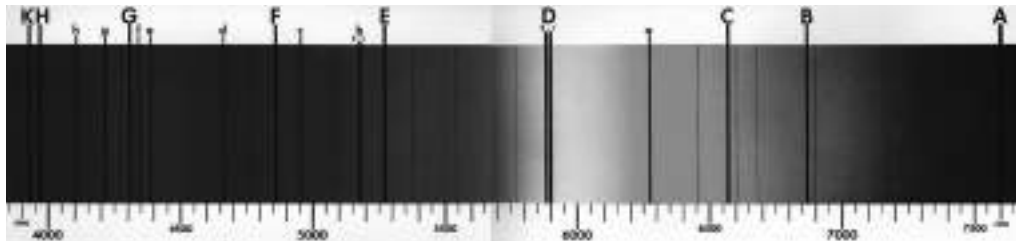


Рис. 4.3. Спектр Сонця – на тлі неперервного спектра видно темні лінії поглинання різних хімічних елементів, що присутні в сонячній атмосфері. Довжина ліній вказана в ангстремах ( $1\text{\AA} = 10^{-10}\text{ м}$ )

Як і в багатьох зір, у спектрі Сонця на яскравому тлі неперервного спектра видно темні лінії. Їх називають фраунгоферовими на честь оптика Й. Фраунгофера.

унгофера, який дослідив ці лінії одним із перших. Окремі, дуже різкі, лінії сонячного спектра він позначив латинськими літерами (рис. 4.3). Ця традиція зберігається дотепер.

Природу сонячного спектра пояснив у 1858 р. німецький фізик Густав Роберт Кірхгоф. Він з'ясував: коли світло від джерела, що дає неперервний спектр, проходить крізь шар холоднішого газу, то газ поглинає з усіх променів спектра тільки ті, які він сам випромінює в розжареному стані. Наприклад, натрій, що дає жовте світло, з усіх променів неперервного спектра затримує якраз жовті, а інші пропускає. Тому в жовтій ділянці сонячного спектра є вузька темна подвійна лінія натрію. Таке поглинання світла називають вибірконим або селективним.

Для дослідження спектра Сонця використовують спеціальні сонячні телескопи (ч. 2, § 5).

### ТИПОВА ЗАДАЧА

Максимум випромінювання в спектрі зорі Сиріус припадає на довжину хвилі  $\lambda_{\max} = 280,0$  нм. Визначити температуру поверхні цієї зорі.

**Розв'язання:** Згідно з законом Віна,  $\lambda_{\max} = 0,0029/T$ . Звідси  $T = 0,0029/\lambda_{\max}$ . Підставимо в цей вираз значення  $\lambda_{\max}$  у метрах (один нанометр =  $10^{-9}$  м), отримаємо:  $T = \frac{0,0029}{280,0} \cdot 10^{-9} = 0,0104 \cdot 10^6$  К.

### НАВЧАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

- Доплерівське зміщення лінії водню  $H_{\beta}$  ( $\lambda = 486,13$  нм) у спектрі небесного тіла в бік червоної ділянки становить 0,05 нм. Обчисліть променеву швидкість тіла. (Відповідь: 30,86 км/с).

### ВИСНОВКИ

Спектральний аналіз – основа астрофізики. З його допомогою визначають хімічний склад, температуру, швидкість руху та інші параметри небесних тіл.

## ТЕМА 2.2. ЗАСОБИ АСТРОНОМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

### § 5. ОПТИЧНІ ТЕЛЕСКОПИ

Телескоп має **три головні призначення**: збирати випромінювання від небесних світил на приймальний пристрій (око, фотопластинка, спектрограф тощо); будувати зображення об'єкта чи певної ділянки неба; збільшувати

кут зору, під яким видно небесні тіла, тобто розділяти об'єкти, що лежать на близькій кутувій відстані.

### 1. Принцип дії оптичного телескопа і його характеристики.

Складові частини конструкції оптичного телескопа: об'єктив (збирає світло і будує у фокусі зображення об'єкта чи ділянки неба); труба (тубус) – з'єднує об'єктив з приймальним пристроєм; монтування – механічна конструкцію, що тримає трубу й забезпечує її наведення на небо. Для візуальних спостережень, коли приймачем світла є око, використовують окуляр. Через нього розглядають зображення, побудоване об'єктивом. Під час фотографічних, фотоелектричних, спектральних спостережень окуляр не потрібний – приймач розміщують у фокальній площині телескопа. Об'єктивом оптичного телескопа є лінза (кілька лінз) чи дзеркало, що має певну кривизну поверхні (наприклад, сферичне).

Після об'єктива промені збираються в точці  $F$  – фокусі телескопа. Відстань від центра об'єктива до фокуса називають *фокусною відстанню* телескопа. Пряма, що з'єднує центр об'єктива і фокус, – це оптична вісь телескопа. Небесні світила лежать дуже далеко, практично «на нескінченності», і їх зображення утворюються в фокальній площині, тобто у площині, проведеній через фокус  $F$  перпендикулярно до оптичної осі (рис. 5.1).

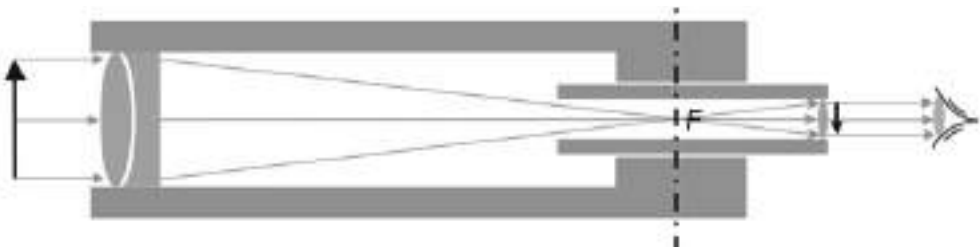


Рис. 5.1. Хід променів у лінзовому телескопі (схема)

Розгляньмо головні характеристики телескопа – діаметр об'єктива, світлосилу, фокусну відстань, збільшення, розділення і поле зору.

Діаметр об'єктива  $D$ , точніше, вільного отвору об'єктива, не закритого оправою або діафрагмою, визначає кількість світла, яке збирає телескоп. Вона пропорційна  $D^2$ . Важливою характеристикою об'єктива є відношення  $A$  діаметра об'єктива (вільного отвору) до його фокусної відстані  $F$ :  $A = D/F$ . Його називають *відносним отвором*, або *світлосилою*.

Величину  $F/D$ , обернену до світлосили, називають *відносним фокусом*. Що вона менше, то яскравішим є зображення протяжного об'єкта у фокальній площині телескопа. Справді, зі зменшенням фокусної відстані об'єктива лінійні розміри зображення протяжного об'єкта теж зменшуються, а при

незмінному діаметрі об'єктива світловий потік, який він сприймає, також незмінний, тому зображення об'єкта стає яскравішим. Однак зменшувати фокусну відстань об'єктива можна до певних меж, щоб розміри зображення були не дуже малі й помітні. Для вивчення протяжних об'єктів бажані довгофокусні телескопи, що дають більше збільшення.

Фокусна відстань  $F$  об'єктива телескопа визначає лінійні розміри  $l$  зображення протяжних небесних об'єктів (Сонця, Місяця, планет, туманностей тощо) у фокальній площині телескопа, бо, згідно з рис. 5.2:

$$l = 2F \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\rho}{2}\right) \quad (5.1),$$

де  $\rho$  – кутові розміри об'єкта (позначеного променем АВ). Якщо ж  $\rho$  – це кутова відстань між об'єктами (наприклад, між зорями), то формула (5.1) дає лінійну відстань між їх зображеннями у фокальній площині телескопа.

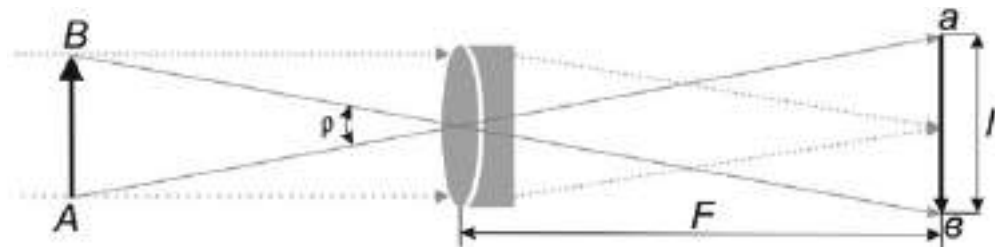


Рис. 5.2. Лінійні розміри зображення протяжних небесних об'єктів (Сонця, Місяця, планет, туманностей тощо) у фокальній площині телескопа

Видимі кутові розміри небесних об'єктів малі, наприклад у Сонця і Місяця не перевищують  $33'$ . З математики відомо, що тангенси малих кутів (до  $3^\circ$ ) близькі до самих кутів, виражених в радіанах ( $\rho_{\text{рад}}$ ). Оскільки  $1 \text{ рад} = 3440' = 206265''$ , то

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\rho}{2}\right) = \frac{1}{2\rho_{\text{рад}}} = \frac{1}{2\rho''} / 206265''$$

де  $\rho'$  позначає кутові розміри у хвилинах дуги, а  $\rho''$  – кутові розміри в секундах дуги. Звідси випливає, що

$$l = \frac{2F1}{2\rho'} / 3440' = \frac{F\rho''}{206265''} \quad (5.2),$$

причому  $l$  виражене в тих же лінійних одиницях, що й фокусна відстань  $F$ . Такими самими лінійні розміри виходять на цифровому приймачі (матриці) чи платівці під час фотографування об'єктів у фокальній площині телескопа.

Під час візуальних спостережень зображення світила у фокальній площині розглядають в окуляр. Він зазвичай складається з двох невеликих коротко-

фокусних лінз, що дозволяє збільшувати розміри зображень світил. Під збільшенням розуміють відношення видимих кутових розмірів небесного об'єкта при спостереженні його в телескоп і без телескопа.

Збільшення телескопа  $M$  дорівнює відношенню фокусної відстані об'єктива  $F$  до фокусної відстані окуляра  $f$ :

$$M = \frac{F}{f} \quad (5.3)$$

Навіть за дуже хороших атмосферних умов неможливо домогтися від телескопа довільно великого збільшення шляхом застосування окулярів з дуже малою фокусною відстанню. Завадою цьому є оптичні недоліки лінз. Тому телескоп має найбільше допустиме, або граничне, збільшення  $M_{\max} = 2D$ , де діаметр об'єктива  $D$  виражений в міліметрах ( $M_{\max}$  вважають безрозмірною величиною).

Роздільна здатність (або розділення) телескопа  $\theta$  (тета) – найменша кутова відстань між об'єктами – вказує на можливість бачити окремо два світила, що лежать на небесній сфері дуже близько одне до одного (наприклад, дві зорі). Її величина обернено пропорційна діаметру об'єктива і прямо пропорційна довжині електромагнітних хвиль, які сприймає телескоп.

$$\theta = \frac{1,22\lambda}{D} \quad (\text{в радіанах}), \text{ або } \theta = \frac{206265'' \cdot 1,22\lambda}{D} \quad (5.4),$$

де довжина хвилі  $\lambda$  і діаметр об'єктива  $D$  виражені в однакових одиницях.

Підставивши в (5.4) значення  $\lambda = 0,555$  мкм (довжина хвилі видимого світла до якої найчутливіше людське око) і взявши значення  $D$  в міліметрах, отримаємо:

$$\theta = \frac{140''}{D} \quad (5.5)$$

*Поле зору* телескопа називають максимальний кутовий поперечник кружка неба, який видно в телескоп. Розмір поля зору за незмінного окуляра обернено пропорційний фокусній відстані об'єктива. За великих збільшень поле зору дуже мале і дорівнює кількома хвилинами дуги.

## 2. Типи телескопів.

У 1609 р. Г. Галілей виконав перші спостереження небесних тіл з допомогою власноруч збудованого телескопа-рефрактора (від лат. «рефракто» – «заломлюю»). Хоча телескопи були недосконалими, Галілей спостерігав кратери на Місяці, відкрив супутники Юпітера, в смузі Молочного Шляху побачив велику кількість слабких зір.

Й. Кеплер у 1611 р. дав опис телескопа з двох двоопуклих лінз, тобто відмінного за складом лінз від телескопів Галілея. Світлові промені різних довжин хвиль мають неоднакові кути заломлення, тому окремо взята лінза

дає забарвлене зображення. Цей недолік називають *хроматичною аберацією*. Для його усунення з часом стали будувати об'єктиви з кількома лінзами зі скла з різними коефіцієнтами заломлення. Потім з'ясували, що лінзи великих розмірів зазнають деформацій під власною вагою, тому найбільший лінзовий об'єктив має діаметр лише 102 см (Єрксський рефрактор, уведений в дію 1897 р. в США).

Перший дзеркальний телескоп, або рефлектор (від лат. «рефлекто» – «відбиваю») побудував у 1668 р. І. Ньютон, хоча ідея такого телескопа з'явилася раніше (виготовити його спробував у 1664 р. фізик Р. Гук, але телескоп через свою якість виявився непридатним для спостережень). Рефлектор Ньютон був малий розмірами – головне ввігнуте сферичне дзеркало з полірованої бронзи мало в поперечнику 2,5 см, а його фокусна відстань становила 6,5 см. Телескоп давав збільшення у 41 раз.

Розгляньмо оптичні схеми і принцип дії телескопа-рефрактора (див. рис. 5.1) і телескопа-рефлектора (рис. 5.3). У першому з них промені світла, що падають на об'єктив, заломлюються лінзами, а в другому дзеркало-об'єктив їх відбиває.

Телескоп-рефлектор системи Ньютон будує справжнє, збільшене й перевернуте зображення. Остання обставина в астрономії несуттєва, адже в космосі немає абсолютного верху чи низу.



Рис. 5.3. Хід променів (оптична схема) в телескопі-рефлекторі

Дзеркальні телескопи мають переваги (зокрема, дають незабарвлене зображення) над лінзовими, тому стали дуже поширеними. Всі сучасні великі оптичні телескопи оснащено дзеркальними об'єктивами. Завдяки досягненням комп'ютерної техніки й матеріалознавства нині можна виготовляти й використовувати збірні (з окремих сегментів) дзеркала. Це дозволяє будувати на поверхні Землі оптичні телескопи з діаметром головного дзеркала в кілька десятків метрів.

Найбільшими в світі оптичними телескопами тепер є Великий канарський телескоп (головне дзеркало 10,4 м) і два телескопи з діаметром головного дзеркала 10 метрів – «Кек-1» і «Кек-2». Але в найближчі десять років до ладу мають стати Гігантський магелланів телескоп (The Giant Magellan Telescope, GMT) з діаметром головного дзеркала майже 25 м, а також Європейський Дуже великий телескоп (European Extremely Large Telescope, E-ELT), що матиме 39-метрове головне дзеркало.

Окремо розглянемо телескопи для дослідження Сонця. Здебільшого вони мають довгофокусні об'єктиви, що дає змогу отримати зображення Сонця великого масштабу без додаткової оптики. Такі телескопи часто роблять нерухомими, світло спрямовує в їх оптичну систему спеціальна установка – целостат – система з двох плоских дзеркал, одне з яких обертається навколо полярної осі, що лежить у площині дзеркала. Воно подає зображення Сонця на друге дзеркало, яке спрямовує його в оптичний тунель на головне дзеркало телескопа. Оптичний тунель виконує роль труби телескопа.

Рис. 5.4. Целостатна група горизонтального сонячного телескопа АЦУ-5 ГАО НАН України



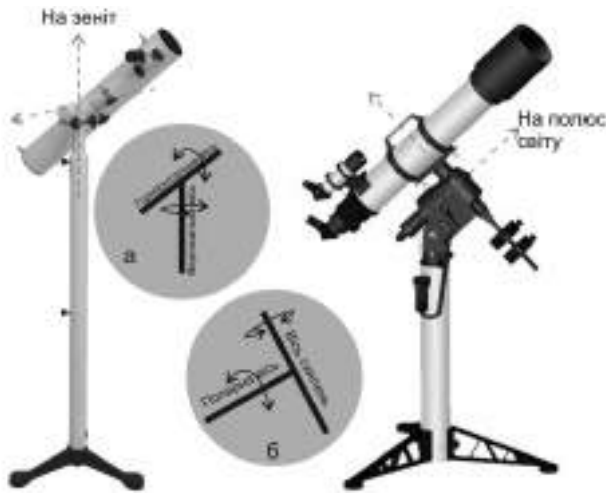
Великі сонячні телескопи є двох типів – вертикальні, або баштові, й горизонтальні. В баштовому телескопі целостат посилає промінь вертикально вниз, і оптична система, яка будує зображення Сонця, розташовується по вертикалі. Наукова апаратура

міститься в лабораторному приміщенні біля основи башти. В горизонтальному телескопі целостат посилає промінь в горизонтальному напрямку, де містяться всі оптичні елементи системи. В сенсі конструкції горизонтальний телескоп набагато зручніший. Однак атмосферні збурення в приземному шарі повітря сильніше впливають на якість зображення горизонтального телескопа, ніж баштового. Одним з кращих у світі за спектральною роздільною здатністю є горизонтальний сонячний телескоп АЦУ-5 Ернеста Гуртовенка, встановлений в ГАО НАН України в Києві.

### 3. Монтування телескопів.

Під час спостережень виникає потреба наводити телескоп на різні ділянки неба. З цієї метою його трубу встановлюють на спеціальному монтуванні. Воно буває двох видів: азимутальним і паралактичним, або екваторіальним.

Азимутальне монтування (рис. 5.5 а) дозволяє обертати трубу телескопа навколо двох взаємно перпендикулярних осей: горизонтальної (лежить у площині горизонту) і вертикальної (паралельна до лінії виска). Воно має просту конструкцію, але стежити за об'єктом на небі доводиться, повертаючи телескоп одночасно по двох осях. Раніше це робили вручну й тому таке монтування для професійних телескопів, окрім універсальних інструментів, не застосовували. Тепер його використовують для великих телескопів, бо автоматика



легко справляється із завданням ведення телескопа одночасно по двох осях.

Рис. 5.5. Азимутальне (а) і паралактичне або екваторіальне (б) монтування телескопа

Паралактичне (екваторіальне) монтування (рис. 5.5 б) також дозволяє обертати трубу телескопа навколо двох взаємно перпендикулярних осей. Полярна вісь спрямована паралельно осі світу, а друга – вісь схилень – лежить у площині екватора. Повертаючи полярну вісь зі швидкістю обертання небесної сфери, досягають того, що телескоп постійно тримає світило в полі зору. Щоб обертати полярну вісь, застосовують часові механізми, наприклад електродвигуни.

Паралактичне (екваторіальне) монтування (рис. 5.5 б) також дозволяє обертати трубу телескопа навколо двох взаємно перпендикулярних осей. Полярна вісь спрямована паралельно осі світу, а друга – вісь схилень – лежить у площині екватора. Повертаючи полярну вісь зі швидкістю обертання небесної сфери, досягають того, що телескоп постійно тримає світило в полі зору. Щоб обертати полярну вісь, застосовують часові механізми, наприклад електродвигуни.

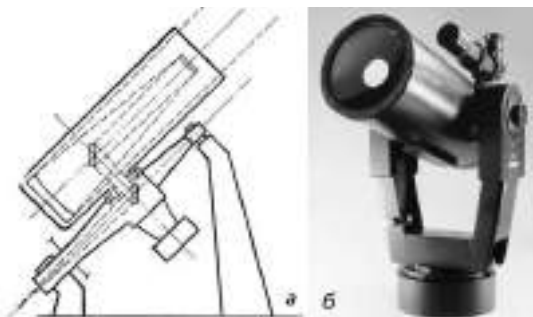


Рис. 5.6. Німецьке (а) та вилкове (б) монтування телескопа

Найпростіше екваторіальне монтування – німецьке (рис. 5.6 а). Його застосовують для рефракторів і невеликих телескопів-рефлекторів системи Ньютона. Недоліком монтування є потреба використовувати противагу та великий підкупольний

простір. Ще один тип монтування телескопа – вилкове (рис. 5.6 б). Воно буває як азимутальним, так і екваторіальним. Хоча це монтування компактніше й надійніше за німецьке, його можна застосувати тільки для телескопів з короткою трубою, яку поміщають між консолями «вилки».



### ТИПОВА ЗАДАЧА

Об'єктив телескопа має діаметр  $D = 150$  мм і фокусну відстань  $F = 2250$  мм. Чи можна розрізнити в цей телескоп компоненти подвійної зорі  $\gamma$  Кита, якщо видима кутова відстань між ними становить  $l = 2,8''$ .

**Розв'язання:** Скористаємося формулою  $\theta = 251640'' \lambda/D$ . Взеввши до уваги, що  $\lambda = 480$  нм, отримаємо  $\theta = 0,8''$ .

**Відповідь:** Оскільки  $\theta < l$ , то компоненти зорі розрізнити в цей телескоп можна.

### НАВЧАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

- Обчисліть лінійний діаметр зображення Місяця у фокальній площині об'єктива рефрактора, якщо фокусна відстань об'єктива  $F = 60$  см, а видимий кутовий діаметр Місяця становить  $31'$ .

### ВИСНОВКИ

Телескоп – головний інструмент в астрономії. Його завдання – зібрати якомога більше світла (випромінювання) від небесних тіл, а також розділити об'єкти, що лежать близько один до одного.

## § 6. РАДІОТЕЛЕСКОПИ ТА ТЕЛЕСКОПИ І ДЕТЕКТОРИ ДЛЯ НЕВИДИМОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

У 30-х роках ХХ ст. виникла радіоастрономія, а з початком космічної ери з'явилась можливість реєструвати випромінювання, що не проникають крізь атмосферу Землі. Астрономи отримали змогу вивчати небесні тіла і явища одночасно в різних діапазонах електромагнітного спектра. Це відкрило якісно нові можливості для пізнання Всесвіту.

### 1. Будова й характеристики радіотелескопа.

Принципова схема будови *радіотелескопа* (РТ) не відрізняється від будови телескопа-рефлектора: космічне радіовипромінювання збирає металеве дзеркало параболічної форми – іноді суцільне, іноді ґратчасте, а детектор радіохвиль – високочутливий радіоприймач.

Принцип дії РТ зводиться до того, що дзеркало фокусує радіохвилі на дипольну антенну (її називають опромінювачем), внаслідок чого в ній виникає швидкозмінний електричний струм. Спеціальні провідники – хвилеводи – передають його до радіоприймача, з'єданого з комп'ютером. Таким чином реєструють потік радіохвиль певної довжини.

Найбільші в світі радіотелескопи з параболічними антенами: встановлений у природному карстовому заглибленні на півдні Китаю з діаметром

антени 500 м та схожий інструмент обсерваторії Аресибо на острові Пуерто-Ріко (США) з поперечником антени 305 м. Їхні антени нерухомі, а тому завжди спрямовані в zenit. Через це телескопи не можуть реєструвати випромінювання з будь-якої точки неба, але внаслідок добового обертання Землі та можливості зміщувати опромінювач їм доступна значна частина небесної сфери.



Рис. 6.1. Принципова схема будови радіотелескопа

В Україні під Харковом працює найбільший в світі РТ декаметрового діапазону – УТР-2, споруджений за ініціативи академіка С. Я. Брауде в 1970 р. Це велика фазована антенна

решітка, призначена для спостережень в діапазоні 8–33 МГц. Ефективна площа УТР-2 (площа, якою він сприймає випромінювання) становить 150 тисяч кв. м, що перевищує сумарну ефективну площу всіх інших наявних радіотелескопів у світі.

З допомогою УТР-2 отримано величезний обсяг астрофізичної інформації. Доступними для досліджень виявились практично всі об'єкти Всесвіту – від Сонячної системи і нашої галактики до найвіддаленіших об'єктів – радіогалактик та квазарів.

Зважаючи на те, що ширина радіовікна в атмосфері Землі майже в 10 млн разів більша, ніж оптичного, а виготовлення РТ у порівнянні з оптичними телескопами є справою простішою, на Землі збудовано багато радіотелескопів різного типу.

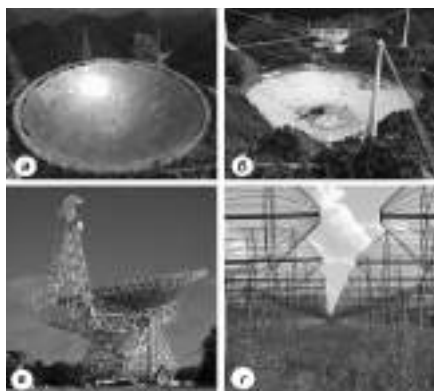


Рис. 6.2. Китайський радіотелескоп (а), РТ обсерваторії Аресибо (б), 100-метровий повноповоротний радіотелескоп (в) та УТР-2 (г)

На відміну від оптичних телескопів з дуже високим роздільням, роздільна здатність РТ, особливо тих, що реєструють довгохвильове випромінювання, мала. Для підвищення роздільної здатності РТ астрономи використовують явище інтерференції. Пристрій, що працює в радіодіапазоні з використанням інтерференції називають радіоінтерферометром.

Радіоінтерферометр – це щонайменше два радіотелескопи, розділені відстанню (базою) і з'єднані електричним кабелем, посередині якого містить-

ся радіоприймач. Від джерела радіовипромінювання на обидва радіотелескопи безупинно приходять радіохвилі. Ті з них, що потрапляють на ліве дзеркало, проходять більший шлях, ніж радіохвилі, що потрапляють на праве дзеркало. Цю різницю в шляхах називають різницею ходу. Неважко зміркувати: якщо в ній укладається парне число півхвиль, то радіохвилі прийдуть у приймач з однаковою фазою і підсилять одна одну. За умови непарного числа півхвиль відбудеться протилежне – взаємне гасіння радіохвиль, і радіосигнали зовсім не надійдуть у приймач.

Рис. 6.3. Схема будови радіоінтерферометра

Радіоінтерферометри набагато «гострозоріші», ніж звичайні радіотелескопи. Наприклад, максимальна кутова роздільна здатність системи радіоінтерферометрів VLA (Very Large Array, «Дуже велика антена») становить  $0,004''$ , що перевищує можливість будь-якого окремого оптичного телескопа на Землі. Хоча, наприклад, Дуже великий телескоп в режимі інтерферометра, коли працюють разом 4 восьмиметрові та допоміжні телескопи, може дати розділення  $0,001''$ .

Систему радіотелескопів, віддалених один від одного на тисячі кілометрів, називають радіоінтерферометром з наддовгою базою (РНДБ). Його кутова роздільна здатність становить тисячні частки секунди. Нині працює глобальна мережа РНДБ, яка об'єднує крупні телескопи Європи, США, Австралії та інших країн. В Україні на основі радіотелескопа УТР-2 побудовано декаметрову систему радіоінтерферометра з наддовгою базою УРАН. Крім УТР-2, до неї входять ще чотири радіотелескопи менших розмірів (рис. 6.4).

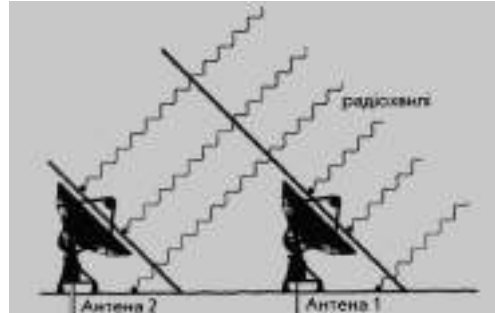
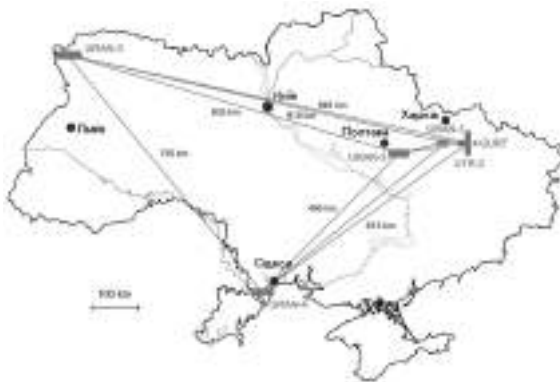


Рис. 6.4. Українська декаметрову систему радіоінтерферометра з наддовгою базою УРАН



Об'єктами дослідження радіоастрономії є практично всі небесні тіла та їх комплекси від тіл Сонячної системи до скупчень галактик, а також речовина і поля, що заповнюють космічний простір, –

міжпланетне середовище, міжзоряні газ і пил, магнітні поля, космічні промені, реліктове випромінювання тощо.

## 2. Рентгенівські та гамма-телескопи.

Кванти рентгенівського випромінювання мають велику енергію, тому майже не заломлюються в речовині. Для фокусування рентгенівських променів використовують дзеркала косоного падіння. Промінь падає на дзеркало під дуже малим кутом і наче ковзає вздовж його поверхні. Зазвичай це два й більше дуже тонких металевих чи склокерамічних дзеркала – параболічне й гіперболічне, вкладених одне в одне з невеликим проміжком. Найчастіше для покриття дзеркал використовують золото, іридій, нікель і хром. Що вища енергія рентгенівського кванта, то меншим має бути кут падіння. Ковзаючи вздовж поверхні одного, а потім другого дзеркала, промені фокусуються і будують зображення об'єкта.

Рентгенівські телескопи спочатку встановлювали на повітряних кулях, потім на ракетах, зрештою – на штучних супутниках Землі. Завдяки цьому 1948 р. відкрито рентгенівське випромінювання Сонця, а 1960 р. одержано перше його зображення в рентгенівських променях.

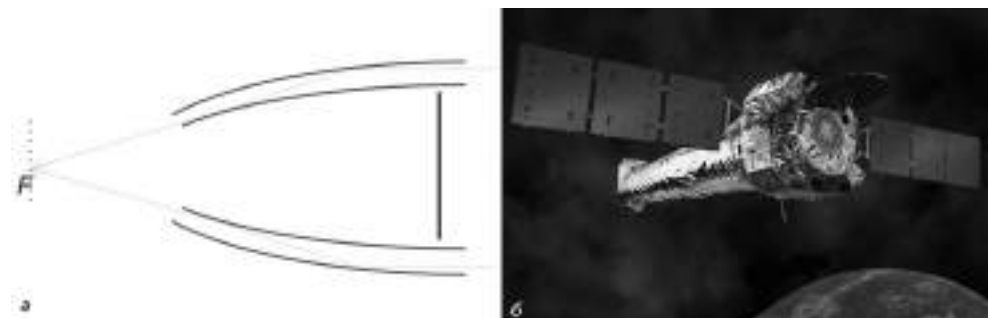


Рис. 6.5. Оптична схема рентгенівського телескопа (а) та космічна обсерваторія «Чандра» (б)

1970 р. на орбіту було запущено першу рентгенівську обсерваторію (космічний апарат «Ухуру»). Потім були інші КА, серед них космічні обсерваторії «Чандра» (1999), XMM-Newton (1999), INTEGRAL (INTErnational GAMMA-Ray Astrophysics Laboratory, 2002), «Свіфт» (2004), NuSTAR (Nuclear Spectroscopic Telescope Array, 2012) і Hitomi (2016).

Прилади (детектори), що реєструють випромінювання небесних тіл в діапазоні високих енергій, зовні не схожі на оптичні телескопи. Це повною мірою стосується гамма-телескопа – головного інструмента гамма-астрономії. Принцип його дії коротко можна описати так. Гамма-випромінювання, що надходить з космосу, потрапляє у приймач А, наприклад, у пластину зі свинцю. Внаслідок взаємодії гамма-квантів з матеріалом пластини, виникають

електрони й позитрони, які на великій швидкості потрапляють у черенковський лічильник і змушують світитися речовину. Це світіння дуже слабке, тому його посилюють і реєструють. Сучасні гамма-телескопи дозволяють реєструвати гамма-випромінювання Молочного Шляху, а також окремих дискретних джерел (наприклад, залишків спалахів Наднових) чи активних ділянок на Сонці під час сонячних спалахів тощо.

### 3. Детектори нейтрино та гравітаційних хвиль.

Оскільки нейтрино – це частинка, яка дуже слабо реагує з речовиною, немає сенсу виносити нейтринні телескопи в космос чи будувати на поверхні Землі. Їх треба розміщувати якомога глибше під землею, водою чи льодом. Товстий шар речовини зменшує кількість сторонніх випромінювань, що можуть зменшувати чутливість детектора.

Для реєстрації нейтрино використовують кілька методів. Один із них, радіохімічний аналіз, в 1946 р. запропонував Б. Понтекорво. Принцип реєстрації частинок полягає в тому, що взаємодія нейтрино з ядрами хлору, приводить до утворення атомів радіоактивного аргону, які можна полічити. Перший такий нейтринний телескоп 1955 р. змонтував Р. Девіс у Південній Дакоті (США) на глибині 1490 м. Приймачем нейтрино був горизонтальний циліндричний бак завдовжки 14 м, що містив майже 400 000 літрів перхлоретилену. Резервуар можна заповнити галієм. Тоді після взаємодії з нейтрино утворюються ядра радіоактивного германію. Установа GALLEX у підземній лабораторії «Гран Сассо» (Італія) містить тридцять тонн галію.

В установці Каміоканде, яка містилась на глибині 1000 м у цинковій шахті Каміока в Японських Альпах, використали інший метод. Резервуар заповнили 700 тоннами надчистої води. Унаслідок зіткнення нейтрино з атомом, що входить до складу води, з атомної оболонки вилітає швидкісний електрон, створюючи у воді черенковське світіння, яке й реєструють.

Такий метод дозволяє визначати не лише енергію частинки, але й напрямок, з якого вона прилетіла, адже вибитий електрон зберігає напрямок руху нейтрино. У такий спосіб реєструють нейтрино високих енергій (5–8 МеВ). Натомість хлорний метод дозволяє реєструвати нейтрино з енергією близько 800 МеВ, а галієвий – з енергією близько 200 МеВ.

Наступник Каміоканде – детектор Супер-Каміоканде – став до ладу 1996 р. і вміщує в 15 разів більше води, ніж його попередник.

На початку 1997 р. було запущено установку в нікелевій шахті на глибині більшій за 2000 м у провінції Онтаріо (Канада). У ній використовують важку воду. Під ударами різних нейтрино ядро дейтерію, що входить до складу важкої води, розпадається на різні частинки. Це дає можливість обрахувати різні сорти нейтрино з енергією в 3,5 МеВ.

Нейтринний детектор встановлено на Південному полюсі, де під кригою на глибині 2000 м реєструють частинки з енергією до 10 МеВ. Нині нейтринні телескопи діють також в США, Індії та Південно-Африканській Республіці

(на глибині 3000 м). Як і традиційна астрономія, що працює в широкому діапазоні довжин хвиль, нейтринна астрономія прагне розширити спектр енергій, де можливі спостереження.

Ще один носій астрономічної інформації, гравітаційні хвилі, що виникають під час катастрофічних подій у Всесвіті – злиття масивних компактних об'єктів (нейтронних зір чи чорних дір у подвійних системах), зіткнення галактик тощо. Вважають, що гравітаційні хвилі – це брижі (складки), які поширюються у «тканині» простору-часу. Як і світло, гравітаційні хвилі поширюються у вигляді коливань і з такою самою швидкістю. Ефекти, пов'язані з дією гравітаційних хвиль на довкілля, такі слабкі, що для їх реєстрації потрібна дуже чутлива апаратура, створення якої перебуває на межі можливостей сучасних технологій.



Рис. 6.6. Детектор гравітаційних хвиль LIGO

Нині діє кілька установок-приймачів для реєстрації гравітаційних хвиль. До них належать японський детектор KAGRA, франко-італійський VIRGO, німецько-англійський GEO600 та гравітаційно-хви-

льова обсерваторія на основі лазерної інтерферометрії (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory, LIGO) в США. Застосування методу інтерферометрії зрозуміле: теорія вказує на те, що гравітаційні хвилі мають стискати й розтягувати простір в різних плечах установки, змінюючи інтерференційну картину.

LIGO – це дві окремі споруди (труби завдовжки 3 км на кінцях яких встановлено тонко налагоджену систему лазерів і датчиків, які можуть виявити крихітні брижі у просторі-часі). Обсерваторія така чутлива, що може реєструвати брижі в 10000 разів менші розмірами, ніж протон.

Уперше гравітаційні хвилі зареєстрували в 2015 р. на установках LIGO. Виявлений сигнал прийшов від злиття двох чорних дір з масами 36 і 29 сонячних, що містились на відстані близько 400 млн пк від Землі. При цьому сукупна маса зменшилася на три сонячних, що пішли на випромінювання.

Для реєстрації гравітаційних хвиль планують створити Космічний антенний лазерний інтерферометр (Laser Interferometer Space Antenna, LISA). Він зможе реєструвати хвилі дуже низької частоти і буде на порядки чутливішим за всі гравітаційні детектори, що існують нині. Тестову орбітальну антену LISA для перевірки деяких технічних рішень в цьому проекті було запущено на орбіту в 2015 році. Зонд LISA планують запустити в космос у 2034 р.

## ТИПОВЕ ЗАВДАННЯ

- Поясніть, в який час доби найкраще реєструвати сонячні нейтрино?

*Відповідь:* В будь-який час, бо нейтрино проникають через величезні товщі речовини майже не взаємодіючи з нею. З огляду на це Земля не є завадою для спостережень в будь-який час доби.

## НАВЧАЛЬНІ ЗАВДАННЯ

- Поясніть будову і принцип роботи радіоінтерферометра.
- Поясніть будову і принцип роботи гравітаційно-хвильової обсерваторії на основі лазерної інтерферометрії.

## ВИСНОВКИ

Сучасній астрономії доступні всі види електромагнітного випромінювання космічного походження. Завдяки розвитку космічної техніки є можливість виконувати астрономічні дослідження за межами земної атмосфери. Окрім цього, в астрономії здійснюють реєстрацію нейтрино та гравітаційних хвиль.

## § 7. ПРИЙМАЧІ ВИПРОМІНЮВАННЯ В АСТРОНОМІЇ

Нині астрономи досліджують зоряне небо в усіх діапазонах електромагнітного спектра. Цього вдалося досягти завдяки винаходам приймачів випромінювання, що, по-перше, замінили людське око, а по-друге, – чутливі до тих випромінювань, які воно не сприймає.

### 1. Фотографія в астрономії.

З середини ХІХ ст. астрономи стали застосовувати фотографію. У 1840 р. аматор астрономії Дж. Дрейпер отримав перший знімок Місяця, а в 1850 р. у Гарвардській обсерваторії уперше зробили знімок зорі Вега. Після того, як на фотоплатівці були зареєстровані спектри небесних тіл, фотокамера, з'єднана з телескопом, стала незамінним астрономічним приладом. До появи цифрових приймачів випромінювання фотографію в астрономії застосовували дуже широко. Вона майже цілком витіснила візуальні спостереження.

Чому фотографічний метод став незамінним в астрономії? Бо фотографія, як і цифрові її замітники, має унікальні властивості. По-перше, на відміну від людського ока, фотоплатівка, вкрита чуливим шаром – фотоемульсією, має здатність нагромаджувати дію світла. Дія світла на фотоемульсію тим сильніша, що триваліша експозиція. При експозиції в кілька секунд на платівці вийдуть лише найяскравіші зорі, а в міру продовження фотографування з'являються дедалі слабкіші. Це дозволяє отримувати знімки слабких небесних світил, які неможливо побачити оком у найпотужніший телескоп. По-друге,

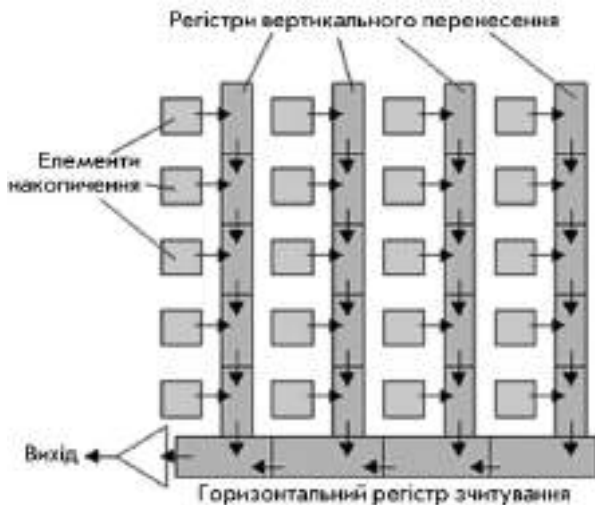
на фотоплатівці отримують зображення одразу великої кількості небесних світил. У разі візуальних спостережень їх довелось би спостерігати кожне окремо. Окрім цього, отримавши фотоплатівку, далі вивчають зображені на ній об'єкти з допомогою різних спеціальних приладів. За потреби такі виміри можна повторити в лабораторії, не вдаючись до нових спостережень. По-третє, фотоплатівка – це задокументований результат спостережень, що не залежить від помилок, яких може припуститися астроном під час візуальних спостережень.

Фотоплатівки старанно зберігають у спеціальних архівах – «скляних бібліотеках». Такі бібліотеки є безцінним матеріалом в астрономії. Він не лише зберігає інформацію про вигляд якоїсь ділянки неба у певний час, іноді багато років тому, але й дозволяє з'ясувати зміни, що відбулися з небесними тілами. Світова астрономічна спільнота з метою створення Віртуальної обсерваторії вирішила оцифрувати всі платівки, отримані від початку використання фотографії в астрономії. Це буде загальносвітовий цифровий архів астрономічних даних.

Нині фотоплатівки замінено на інші приймачі випромінювання – напівпровідникові ПЗЗ-матриці – прилади із зарядовим зв'язком, або пропорційні зарядові лічильники. Вони не лише зберегли, але й суттєво розширили властивості фотоплатівок.

Рис. 7.1. Схема будови ПЗЗ-матриці

ПЗЗ-матриця – це плоский кремнієвий кристал, поверхня якого розбита на мільйони дрібних клітинок. Кожна з них є «пасткою» (потенційною ямою) для електронів, які світло вибиває з кристала. Накопичений в цих пастках заряд, пропорційний кількості випромінювання, що потрапило на матрицю. Хороша матриця реєструє до 90 % зібраного телескопом світла, тоді як фотоплатівка лише близько одного відсотка.



Завдяки застосуванню ПЗЗ, гранична зоряна величина, яку можна зареєструвати на 5-метровому рефлекторі, зростає з 25<sup>м</sup> до 28<sup>м</sup>, тобто стало можливим реєструвати потоки світла в 16 разів слабкіші, ніж раніше. Щоб



досягти такого прогресу зі старими (фотографічними) приймачами, довелося б побудувати оптичний телескоп з діаметром дзеркала 31 м.

Отже, ПЗЗ-матриці – значно чутливіші приймачі випромінювання, ніж фотоплатівки. Це дозволило суттєво зменшити час експозиції, уможливило виконання спостережень швидких (тривалістю кілька секунд чи хвилин) небесних явищ і космічних процесів. Окрім цього, цифрова форма запису сигналу дозволяє дуже швидко передавати його до комп'ютерів для опрацювання, значно зменшуючи час, потрібний для обробки результатів спостережень.

Телескопи, призначені спеціально для фотографічних робіт, називають астрографами. Такі телескопи широко застосовували для астрометричних робіт – визначення точних положень небесних світил. Зазвичай використовували довгофокусний рефрактор (щоб мати великий масштаб зображення), але не дуже великих розмірів, щоб уникнути гнуття труби.

Щоб добути знімки протяжних об'єктів (туманностей, комет) або фотографії, хоча б і в малому масштабі, великих ділянок неба, потрібні ширококутні (тобто з великим полем зору) і світлосильні астрографи. Для цього застосовують спеціальні складні об'єктиви або дзеркально-лінзові камери Шмідта чи Максутова.

## 2. Фотоелектричні прилади.

Наприкінці XIX ст. було створено принципово новий приймач випромінювання – болометр. Хоча він може реєструвати випромінювання в усіх діапазонах електромагнітного спектра, найвища його чутливість у субміліметровій та інфрачервоній ділянках. Для реєстрації цих випромінювань болометр є головним приймачем.

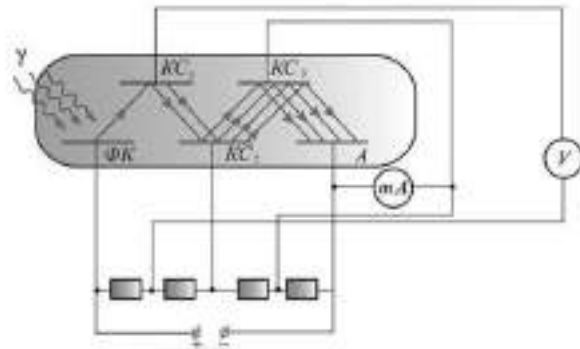


Рис. 7.2. Будова і принцип дії фотоелектронного помножувача

На початку XX ст. для реєстрації інфрачервоного випромінювання почали застосовувати новий фотоелектричний приймач – фотоопір. Згодом для реєстрації випромінювання цього діапазону було розроблено приймачі, дія яких заснована на використанні

явища внутрішнього фотоефекту (фотодіоди, фотоеlementи). Ще пізніше з'явилися фотоелектронні помножувачі (ФЕП). Світло від слабкого джерела падає на нанесений усередині вакуумної колби світлочутливий шар і вибиває з нього електрони. Їх прискорює електричне поле низки пластинок, на які

подають дедалі більші потенціали. Електрони послідовно вдаряються об кожну з них, вибиваючи дедалі більше електронів, отак значно посилюючи електронний потік.

Майже зараз із фотопомножувачем було створено й електронно-оптичний перетворювач (ЕОП). Цей прилад перетворює інфрачервоне випромінювання небесних світил у видиме. ЕОП має вигляд вакуумної колби. На одному її кінці розміщено світлочутливий шар (фотокатод), а на другому – світний екран, схожий на телевізійний. Вибитий випромінюванням небесного світила з фотокатада електрон прискорюється й фокусується на світному екрані. Електронно-оптичні перетворювачі нині в астрономії не використовують – вони є тільки в її історії.

Атмосфера Землі майже не пропускає ІЧ-випромінювання. Невеликі вікна прозорості є лише в ближній ІЧ-ділянці та в субміліметровому діапазоні. Для спостереження небесних тіл з допомогою наземних оптичних телескопів використовують ділянку спектра в околі 2,2 мкм. Сильно ослаблене атмосферою випромінювання в субміліметровому діапазоні можна приймати телескопами, встановленими високо в горах. Щоб реєструвати випромінювання в середньому і далекому ІЧ-діапазонах, треба піднімати прилади за межі щільних шарів атмосфери. Їх встановлюють на аеростатах, висотних літаках і космічних апаратах.

Для реєстрації ІЧ-випромінювання треба долати ще одну перешкоду – власне теплове випромінювання приймача і дзеркала телескопа. Позбутися його неможливо, бо всі нагріті тіла дають тепло. Щоб знизити тепло інструментів, доводиться сильно охолоджувати приймачі випромінювання і дзеркало телескопа навіть за умови, що космічний апарат перебуває далеко від Землі й захищений від сонячного світла.

### ТИПОВА ЗАДАЧА

- Від зорі  $0^m$  на  $1 \text{ см}^2$  поверхні землі падає близько 1 млн фотонів у секунду. Скільки фотонів потрапить на фотоплатівку (матрицю ПЗЗ) від зорі  $20^m$  за 1 год, якщо об'єкти телескопа має діаметр 0,5 м?

**Розв'язання:** Оскільки різниця в п'ять зоряних величин зменшує блиск в 100 разів, тобто  $\Delta 5^m = 10^2$  (див. ч. 1, § 3, п. 3), то різниця в  $20^m$  зменшить потік фотонів у  $10^8$  разів. Натомість, час експозиції (1 год = 3600 с) і площа об'єктива ( $\pi D^2/4 = 1962,5 \text{ см}^2$ ) збільшують його в  $3600 \cdot 1963 = 7,1 \cdot 10^6$  разів.

### НАВЧАЛЬНІ ЗАВДАННЯ

- Поясніть фразу «вся історія розвитку астрономії – це, фактично, пошуки й знахідки засобів, що покращують людський зір».

## ВИСНОВКИ

До засобів, що покращують людський зір, належать приймачі випромінювання та детектори космічних частинок. Фотоемулсії, ПЗЗ-матриці та інші приймачі випромінювання дозволяють астрономам реєструвати випромінювання небесних тіл у всьому діапазоні електромагнітного спектра.

## § 8. АСТРОНОМІЧНІ ОБСЕРВАТОРІЇ

Головні осередки професійних астрономів – астрономічні обсерваторії, які з огляду на історію науки є найпершими в світі науковими установами. Своею суттю – це науково-дослідні інститути, що працюють у різних галузях астрономії. Професію астронома здобувають у вищих навчальних закладах.



Рис. 8.1. Обсерваторія Яна Гевелія, облаштована на приватному об'їсті відомого польського астронома у Гданську

облаштовувала вже на зорі цивілізації. До астрономічної обсерваторії (*від. лат. *observo, спостерігаю**) давніх часів відносять відому мегалітичну споруду Стоунгендж (Англія). В Китаї в 1100 році до н. е. було засновано обсерваторію, залишки якої збереглися до наших днів. У 829 р. було засновано обсерваторію в Багдаді. Одну з перших обсерваторій в Європі створено в 1471 р. у м.



1. Астрономічні обсерваторії – місця спостережень небесних світил. Історики науки вважають, що пункти спостережень небесних світил людина відомими в Європі були обсерваторії, створені зусиллями видатних астрономів Тіхо Браге в Данії та Яна Гевелія у Польщі.

Рис. 8.2. Гринвіцька обсерваторія (сучасний вигляд)

Ще до винаходу телескопа будували обсерваторії для визначення на небесній сфері положень Сонця, Місяця, зір і планет. Першу державну астрономічну обсерваторію в Європі – Паризьку – відкрито в 1671 році, а відому багатьом обсерваторію в Гринвічі – в 1675 р.

Лише в другій половині XIX ст. з'явилися обсерваторії сучасного типу, де телескопи стали встановлювати в спеціальних вежах – круглих будинках з куполом, що обертається. У куполі є люк, прикритий спеціальними стулками, які розсуваються під час спостережень.

## 2. Астрономічні обсерваторії – наукові установи.

Наукову установу, в якій виконують астрономічні спостереження та наукові дослідження, зазвичай називають *астрономічною обсерваторією*. Більшість обсерваторій обладнано телескопами різних типів, призначеними для реєстрації електромагнітного випромінювання, причому кожна з них переважно спеціалізується на вивченні певного спектрального діапазону.

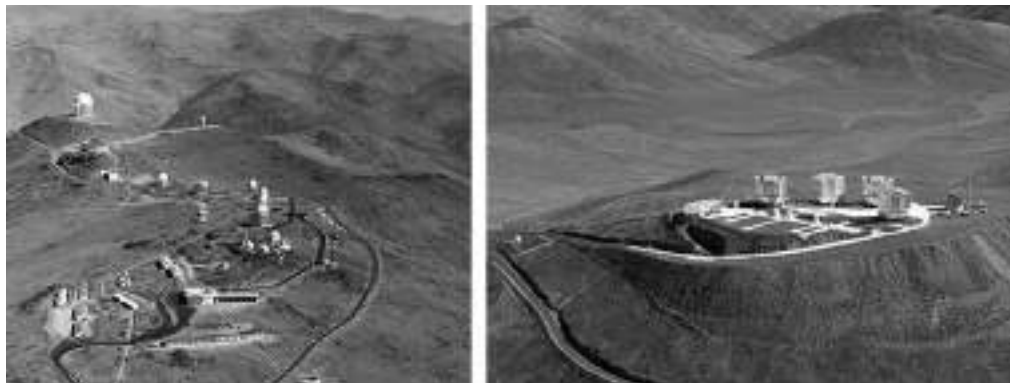


Рис. 8.3. Філіали Європейської південної обсерваторії в Чилі: Ла-Сілла та Паранал

Нині у світі діє кілька потужних астрономічних обсерваторій, до яких належить і Європейська південна обсерваторія. Вона має в Чилі (пустеля Атакама) кілька окремих обсерваторій (Ла-Сілла, Паранал, Лано-де-Чайнатор), де розміщені великі телескопи, зокрема, «Дуже великий телескоп» (Very Large Telescope, VLT), Велика міліметрова/субміліметрова антена Атакама (Atacama Large Millimeter/sub-millimeter Array, ALMA). Неподаляк від обсерваторії Паранал на вершині Сьєрра-Амазоне нині будують Європейський надзвичайно великий телескоп (European Extremely Large Telescope, E-ELT) з діаметром дзеркала 39 метрів. Його планують ввести в дію 2024 р.

Унікальною є обсерваторія на горі Мауна-Кеа (висота над рівнем моря становить 4215 м) на острові Гаваї, заснована в 1967 р. За винятковий астроклімат це місце оголошене науковим заповідником. Тут встановлено 12 різ-

них телескопів, що належать різним державам. Серед них відомі телескопи «Кек-1» і «Кек-2», «Джеміні», «Субару».

Дуже хороші умови для астрономічних спостережень на Канарських островах. На острові Ла-Пальма діють обсерваторії світового рівня. 2007 р. в обсерваторії Роке де лос Мучачос став до ладу Великий канарський телескоп з діаметром дзеркала 10,4 м – нині один із найбільших у світі.

Усі великі астрономічні обсерваторії, розміщені в місцях з хорошим астрокліматом, мають так звані штаб-квартири – адміністративні та наукові центри, що містяться в інших населених пунктах. Тобто на високогірних майданчиках з телескопами виконують лише астрономічні спостереження, а опрацювання отриманих даних – в таких центрах чи астрономічних установах (інститути, кафедри тощо), які діють у складі університетів.

Україна – відома у світі астрономічна держава. В українських землях астрономічні знання здавна були в пошані, тому найвідоміші класичні університети (Київський, Львівський, Харківський, Одеський) майже від дня свого заснування мають астрономічні обсерваторії та кафедри астрономії. Нині в нашій країні діють знані у світі астрономічні обсерваторії (ч. 3, § 8–§ 9), серед яких дві найбільші – Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України (ГАО НАН України) та Кримська астрофізична обсерваторія (КрАО).

## НАВЧАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

- Поясніть, що було і є причиною створення астрономічних обсерваторій?

## ВИСНОВКИ

Астрономічна обсерваторія – наукова установа, в якій виконують астрономічні спостереження та дослідження. Більшість обсерваторій обладнано телескопами різних типів, призначеними для реєстрації електромагнітного випромінювання, космічних частинок та гравітаційних хвиль.

## § 9. АСТРОНОМІЯ З КОСМОСУ

Першу орбітальну астрономічну обсерваторію вивели за межі Землі в 1966 р. США, але вона вийшла з ладу до початку роботи. 1968 р. Радянський Союз вивів на орбіту Землі штучний супутник, оснащений кількома невеликими телескопами для реєстрації ультрафіолету та детектором рентгенівського випромінювання. Він став першою астрономічною обсерваторією космічного базування.

1. Космічні телескопи та обсерваторії. Телескопи, розміщені в космічному просторі, мають суттєву перевагу над тими, що встановлені на поверхні Зем-

лі: їм не заважає атмосфера нашої планети. Окрім цього, телескопи можна розміщувати на великій відстані від Землі, що покращує реєстрацію дуже слабких потоків випромінювання від небесних тіл.

Один з найвідоміших орбітальних телескопів – Космічний телескоп імені Габбла. Він виконує спостереження у видимому та частково інфрачервоному й ультрафіолетовому діапазонах електромагнітного спектра. Телескоп вивели на орбіту Землі в 1990 р. з допомогою космічного корабля багаторазового використання. Цю транспортну систему потім використовували чотири рази для виконання ремонтних робіт на телескопі.

Рис. 9.1. Космічний телескоп імені Джеймса Вебба



Поперечник головного гіперболічного дзеркала телескопа – 2,4 м, фокусна відстань 58 м. Телескоп оснащено низкою приймачів, зокрема ширококутною і планетарною камерами, спектрографом високого розділення, камерою для фотографування тьмяних об'єктів, спектрографом тьмяних об'єктів тощо.

Термін роботи Космічного телескопа імені Габбла неодноразово продовжували, готуючи йому на заміну інструмент із дзеркалом більшого розміру. Його, космічний телескоп імені Джеймса Вебба з діаметром дзеркала 6,5 м, готують до запуску в 2021 р. Телескоп планують розмістити не на орбіті Землі, а в одній із точок Лагранжа (L2), на відстані 1,5 млн км від нашої планети. У цій ділянці міжпланетного простору він буде нерухомий відносно Землі та Сонця. На нього не впливатиме інфрачервоне випромінювання Землі й Місяця; він також буде за межами радіаційних поясів Землі, що можуть перешкоджати спостереженням.

Новий телескоп задумано, насамперед, для пошуку найвіддаленіших і, отже, найстаріших об'єктів Всесвіту, які фізично неможливо виявити в оптичному діапазоні. Тому головна камера телескопа буде отримувати цифрові зображення в діапазоні від 0,6 до 5 мікрометрів.

У 1983 р. на орбіті Землі працював супутник IRAS (Infrared Astronomical Satellite), який виявив майже 250 тисяч раніше невідомих джерел інфрачервоного випромінювання та дозволив відкрити новий клас дуже старих «холодних» галактик. Упродовж 1995–1998 р. р. космічна інфрачервона обсерваторія ISO (Infrared Space Observatory) виконала обстеження зоряного неба в діапазоні довжин хвиль від 2,5 мкм до 200 мкм. 2003 р. на орбіту виведено інфрачервоний телескоп «Спітцер» (Spitzer) з поперечником дзеркала 85 см

і розділенням до однієї кутової секунди. З допомогою цього телескопа, серед іншого, виявлено екзопланети та деякі надмасивні чорні діри.

З 2009 р. на орбіті Землі працює космічний телескоп WISE (Wide-field Infrared Survey Explorer) – Широкосмуговий інфрачервоний дослідник. Він допоміг отримати інформацію про майже два мільйони небесних об'єктів.

Упродовж 2009–2013 рр. у точці Лагранжа (L2) працював космічний телескоп «Гершель» з поперечником дзеркала 3,5 м. Це був дотепер найбільший інфрачервоний телескоп космічного базування. Його приймачі, охолоджені з допомогою рідкого гелію до температури майже абсолютного нуля, реєстрували випромінювання в діапазоні 55–672 мкм.

2009 р. розпочала роботу «Стратосферна обсерваторія для інфрачервоної астрономії» – 2,4-метровий телескоп, встановлений на борту літака Boeing 747SP. Літак може підніматися на висоту 12–14 км, що дозволяє на 99 відсотків уникнути завад від водяної пари – найсуттєвішої перешкоди для інфрачервоних астрономічних спостережень.

Наземні радіотелескопи працюють в доволі широкому «вікні прозорості» (1 мм – 30 м) земної атмосфери. Але іоносфера Землі – шар іонізованого газу на висоті близько 70 км – відбиває в космос все випромінювання на хвилях довших, ніж 30 м. Космічне випромінювання з довжиною хвилі менше 1 мм повністю поглинають молекули атмосфери (головно кисень і водяна пара). Тому для реєстрації цих випромінювань потрібні космічні радіотелескопи. Їх також використовують для створення радіоінтерферометрів з дуже великою базою – сотні тисяч км.

Короткохвильова частина електромагнітного спектра складається з ультрафіолетового, рентгенівського і гамма-діапазонів. Є досить багато астрономічних об'єктів, які виявляють себе в цих діапазонах. Натомість в оптичному випромінюванні вони майже не помітні.

Ультрафіолетовий діапазон (УФ-діапазон) електромагнітного спектра досить широкий – довжини хвиль лежать в інтервалі 10–400 нм. Атмосфера Землі пропускає ультрафіолетове випромінювання лише з довжинами хвиль 300–400 нм. Реєстрація хвиль коротшої довжини можлива тільки з допомогою приладів, винесених за межі атмосфери. Водночас міжзоряний пил також поглинає ультрафіолетове випромінювання далеких джерел (за межами Сонячної системи), а нейтральний міжзоряний і міжгалактичний водень – випромінювання в діапазоні 10–91,2 нм.

Космічні ультрафіолетові спостереження розпочато наприкінці 60-х р. ХХ ст. У 1972–1981 рр. на орбіті працювала обсерваторія «Коперник», а протягом 1978–1996 рр. космічна обсерваторія «IUE» (International Ultraviolet Explorer, «Міжнародні дослідження в ультрафіолеті»). Обсерваторія «GALEX» (Galaxy Evolution Explorer, «Дослідник еволюції галактик») діяла в 2003–2005 роках, виконавши огляд джерел УФ-випромінювання на всій небесній сфері. Великий обсяг інформації отримано також за допомогою спектрографа УФ-діапазону, встановленого на Космічному телескопі імені Габбла.

Рентгенівські спостереження дозволяють вивчати небесні об'єкти високих енергій, для яких характерні температури в мільйони градусів, сильні магнітні поля й екстремальна гравітація. Найперший космічний апарат (Uhuru, «Ухуру») для реєстрації рентгенівського випромінювання працював у 1970–1973 рр. і виявив понад 300 рентгенівських джерел.

Перший великий рентгенівський телескоп з дзеркалами косоного падіння діаметром 60 см було встановлено на космічній обсерваторії «Айнштайн». Вона працювала упродовж 1978–1981 рр. Телескоп з роздільною здатністю майже п'ять кутових секунд реєстрував рентгенівські кванти в діапазоні 200 еВ – 20 кеВ і дозволив визначити точне положення понад 7000 джерел рентгенівського випромінювання. Обсерваторія вперше виконала високоякісні спектрографічні дослідження залишків наднових зір і відкрила велику кількість дуже слабких позагалактичних джерел рентгенівського випромінювання. Вона показала, що рентгенівське випромінювання у Всесвіті – таке ж звичне явище, як і оптичне.

Після обсерваторії «Айнштайн» у космосі майже постійно працюють апарати, призначені для реєстрації рентгенівського випромінювання. Наприклад, з 2012 р. виконує спостереження обсерваторія NuSTAR (Nuclear Spectroscopic Telescope Array), маса якої становить лише 370 кг. Її телескоп з чутливістю й роздільною здатністю на порядок вищими, ніж у його попередників, реєструє випромінювання з енергією від 7 до 80 кеВ.

Випромінювання гамма-діапазону (довжина хвилі менше 0,01 нм, що відповідає енергії квантів понад 124 кеВ) можна реєструвати з допомогою приймачів, встановлених на висотних аеростатах, ракетах, або винесених у космічний простір. Уперше гамма-промені від небесного тіла (Сонця) було зареєстровано в 1959 р. з аеростата.

Перший гамма-телескоп побував у космосі в 1961 р. на борту американського супутника Explorer-11. Він зареєстрував не більше сотні гамма-квантів, що надійшли з різних ділянок небесної сфери. Це вказувало на те, що вони виникли за межами нашої галактики. Гамма-випромінювання Галактики вперше зареєстрували в 1967 р., а першу мапу його розподілу в межах Молочного Шляху склали в 1975–1982 рр.

У 1991–1999 роках на орбіті Землі працювала велика (масою 17 т) гамма-обсерваторія «Комптон». Її апаратура реєструвала фотони з енергіями від 30 кеВ до 30 ГеВ. Обсерваторія зафіксувала майже 3000 гамма-спалахів і дозволила встановити, що вони належать до двох класів. Короткі гамма-спалахи тривають в середньому близько 300 мілісекунд, а довгі – від 2 до 20 секунд (і навіть до хвилин). Середня енергія фотонів коротких спалахів значно вища, ніж енергія квантів довгих спалахів.

Суттєва проблема в гамма-астрономії – низька роздільна здатність гамма-телескопів. Наприклад, обсерваторія «Комптон» реєструвала координати гамма-спалахів на небесній сфері з точністю 1–10 градусів. Тому астрономам тривалий час на вдавалося ототожнити гамма-спалахи з оптичними дже-



релами, що дозволило б визначити відстань до них з червоного зміщення в їхніх спектрах.

З 2008 р. на орбіті реєструє фотони з енергією від 20 MeV до 300 GeV телескоп «Фермі». Він також фіксує гамма-спалахи з фотонами меншої енергії. З його допомогою астрономи укладають каталог джерел гамма-випромінювання.

Оглянуті космічні телескопи та обсерваторії призначені для астрофізичних досліджень. Але суттєвий внесок космічні апарати зробили і в астрометрію. Перший астрометричний космічний апарат «Гіппаркос» (Hipparcos, від High Precision Parallax Collecting Satellite – Супутник для збирання високоточних паралаксів) працював протягом 1989–1993 рр. Він допоміг виміряти паралакси у понад мільйона зір, а також їхні координати та власні рухи з точністю на порядок вищою, ніж з допомогою наземних телескопів.

У 2013 р. розпочато місію «Глобальний астрометричний інтерферометр для астрофізики» (Global Astrometric Interferometer for Astrophysics, GAIA). Її завдання – виміряти положення й відстані до понад одного мільярда зір нашої галактики, а також їхні власні рухи. Точність вимірювань буде на 2–3 порядки вищою, ніж у місії «Гіппаркос». Нові дані дозволять укласти тривимірну мапу Галактики.

Рис. 9.2. Космічний зонд «Гайя»



Космічні апарати застосовують також для дослідження Сонця. Зазвичай, це спеціалізовані обсерваторії, завдання яких – вивчати тільки це небесне тіло. До найвідоміших з них належать «SOHO» (Solar and Heliospheric Observatory), STEREO (Solar TERrestrial RELations Observatory, «Обсерваторія взаємодій Сонця і Землі») та «Обсерваторія сонячної динаміки» (Solar Dynamics Observatory, SDO).

Обсерваторія «SOHO» працює з 1995 р. поблизу точки Лагранжа L1 на відстані 1,5 млн км від нашої планети на лінії, що сполучає Землю і Сонце. Наукові прилади SOHO дозволяють вивчати сонячний вітер, здійснювати моніторинг атмосфери і корони Сонця. «Обсерваторія сонячної динаміки» працює на геостаціонарній орбіті з 2010 р. Це перший спеціалізований космічний зонд для докладного вивчення Сонця та сонячно-земних зв'язків у рамках наукової програми «Життя із зорею» (Living with a Star). Він вимірює сумарний потік короткохвильового ультрафіолетового випромінювання Сонця, реєструє звукові хвилі у його фотосфері та вимірює фотосферне магнітне поле з дуже високою роздільною здатністю.

На 2018 р. розпочалася місія «Сонячний зонд Паркера» (Parker Solar Probe). Цей термостійкий зонд має наблизитися до Сонця на відстань 7 млн км

щоб зібрати інформацію про склад і параметри сонячного вітру, корону та магнітні поля.

Розробка й удосконалення космічних астрономічних обсерваторій триває безупинно. Водночас і наземні телескопи ще не сказали свого останнього слова в астрономії.

## 2. Автоматичні міжпланетні станції.

Завдяки космонавтиці, астрономія отримала змогу не тільки виводити на орбіту Землі телескопи й обсерваторії, але й відправляти до тіл Сонячної системи автоматичні міжпланетні станції (АМС). Це суттєво розширило можливості вивчення таких об'єктів, бо їх тепер можна не лише спостерігати з близької відстані, але й виконувати експерименти на їхніх поверхнях чи в атмосферах.

Про внесок окремих АМС у вивчення тіл Сонячної системи буде сказано у відповідних параграфах посібника (ч. 2, § § 12–14). Тут коротко розглянемо лише узагальнені дані. Космічні апарати побували біля всіх великих планет Сонячної системи. На поверхні Венери і Марса було здійснено посадки, а Меркурій, Юпітер і Сатурн вивчали орбітальні зонди. Ураг, Нептун, а також карликову планету Плутон, вивчали космічні апарати, що летіли повз ці тіла.

Автоматичні міжпланетні станції дистанційно досліджували супутники планет (Місяць, Фобос, Деймос, галілеєві супутники Юпітера та інші). На поверхню Титана, супутника Сатурна, здійснивав посадку космічний зонд «Гюйгенс», доставлений в систему Сатурна АМС «Кассіні».

Космічні апарати вивчали дистанційно карликову планету Цереру, астероїди і комети. 2001 р. космічний зонд уперше здійснив посадку на поверхню астероїда (Ерос), на ядро комети Чурюмова–Герасименко зонд, доставлений АМС «Розетта», здійснив посадку в 2014 р.

---

## НАВЧАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

- Поясніть, чому Космічний телескоп імені Джеймса Вебба націлено на спостереження в інфрачервоному діапазоні електромагнітного спектра.
- 

## ВИСНОВКИ

Нині в космічному просторі працюють різні телескопи й обсерваторії, а до тіл Сонячної системи було спрямовано багато автоматичних міжпланетних станцій.

# Розділ II. Елементи астрофізики

## ТЕМА 2.1. ФІЗИКА ТІЛ СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ

### § 10. ЗЕМЛЯ І МІСЯЦЬ

Про будову Землі ми докладно дізнаємося з географії, про її розмаїтий біологічний світ – з біології. Проте, Земля – це одна із планет Сонячної системи. І хоча, як порівняти з іншими небесними тілами, її досліджено найкраще, таємниць залишилося ще багато. А надто – в частині еволюції Землі як космічного об'єкта, її взаємодії з іншими тілами Сонячної системи.

Хоча астрономічні спостереження Місяця почалися ще до появи перших телескопів, автоматичні космічні апарати вивчають його понад півстоліття, а 50 років тому на його поверхні побували люди, астрономи досі не мають остаточної теорії його виникнення.

#### 1. Земля як небесне тіло.

За багатьма ознаками Земля – звичайна планета Сонячної системи. Як й інші планети, вона обертається навколо своєї осі й рухається навколо Сонця. Її розміри не найбільші, але й не найменші серед планет Сонячної системи.

І все-таки Земля особлива планета, бо на ній є життя! Жодна інша планета Сонячної системи не має таких сприятливих умов для життя, як Земля. Немає атмосфери, склад якої забезпечує дихання живих істот і водночас, як щит, захищає все живе від згубних космічних променів. Немає таких сприятливих температур і величезних запасів води, яких потребує життя.

Рис. 10.1. Земля з відстані 11,6 млн км. Фото космічного апарата «Вояджер-1» (1977 р.)



Орбіта Землі має форму еліпса з незначним ексцентриситетом ( $e = 0,0167$ ), тому мало відмінна від кола. Планета рухається по орбіті навколо Сонця зі швидкістю майже 30 км/с на середній відстані 149,6 млн км. Її вісь нахилена до площини орбіти під кутом  $66,5^\circ$  і під час руху Землі у просторі цей нахил не змінюється. Саме тому в різних точках орбіти одні й ті самі ділянки поверхні планети освітлюються по-різному, що спричиняє періодичну зміну пір року.

У першому наближенні Земля має форму кулі. Але насправді через обертання вона дещо сплюснута біля полюсів й опукла біля екватора. Тому зазвичай форму Землі подають як еліпсоїд обертання — еліпс, що обертається навколо малої осі. Ще точніше форму Землі описує геоїд — поверхня геоїда повторює вільну незбуджену поверхню води в Світовому океані. Її уявно продовжують під материками так, щоб вона була скрізь перпендикулярна до напрямку сили тяжіння.

Маса Землі відносно невелика — приблизно в 318 разів менша, ніж маса Юпітера, найбільшої планети в Сонячній системі.

З космосу Земля мало нагадає звичний шкільний глобус: замість чітких обрисів материків і океанів видно мінливий візерунок білих хмар, що огортають більше половини її диска. Проте у проміжках між ними можна розгледіти контури берегових ліній, пустелі, лісові масиви, гірські райони, великі міста. З місячної поверхні нашу планету видно як диск, учетверо більший, ніж диск повного Місяця із Землі. На марсіанському небі Земля сяє як зоря  $-2,5$  видимої зоряної величини.

Водяна пара й почасти вуглекислий газ затримують у нижніх шарах атмосфери значну кількість тепла, яке випромінює Земля. Натомість до її поверхні відносно вільно проходять світлові сонячні промені. Тобто, як скло в парниках і оранжереях, атмосфера пропускає сонячні промені всередину, але затримує тепло, що йде назовні. Це явище, назване парниковим ефектом, має винятково велике значення для існування життя на Землі. Завдяки йому поверхня не надто вихолоджується в холодну пору року. Зникнення водяної пари й вуглекислого газу з атмосфери призвело б до зниження середньої температури на планеті майже на  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Земля має стале магнітне поле, що простягається від поверхні в космос на кілька її радіусів. Поблизу поверхні воно таке саме, як магнітне поле лінійного магніта (диполя), вісь якого нахилена до осі обертання Землі під кутом  $11^{\circ}$ . Тому магнітні полюси Землі не збігаються з її географічними полюсами. Наявність магнітного поля пов'язують з дуже повільними рухами речовини в рідкому зовнішньому ядрі планети.

Магнітне поле захоплює й утримує поблизу Землі безліч заряджених частинок, що приходять від Сонця, утворюючи навколо неї радіаційні пояси. Навколосонячний простір, фізичні властивості якого визначає взаємодія магнітного поля планети з потоками заряджених частинок, називають магнітосферою. Як і атмосфера, магнітосфера захищає все живе на планеті від жорстких космічних частинок, що приходять від Сонця.

## 2. Місяць — природний супутник Землі.

Природу Місяця почали розуміти задовго до винайдення телескопа. Вже давньогрецькі вчені здогадувалися, що Місяць — кулясте тіло, яке обертається навколо Землі і світить відбитим сонячним світлом. У III ст. до нашої ери астроном Аристарх Самоський з дивовижною для того часу точністю об-

числив відстань між Місяцем і Землею у 60 земних радіусів. Хоча насправді ця відстань коливається між 55 і 63 радіусами Землі. Темні ділянки місячного диска греки сприймали як водойми, а світлі, як суходіл. Звідти пішла традиція називати морями ті ділянки Місяця, що відбивають найменше світла. Г. Галілей був першим, хто виділив у рельєфі Місяця гори і кратери.

1651 р. італійський астроном Дж. Річчолі та його французький колега Ф. Гримальді опублікували докладну карту Місяця, де великій кількості місячних структур було вперше надано назви. Найпримітніші кільцеві гори вони назвали іменами видатних вчених, а великі рівнини отримали географічні або метеорологічні назви. Цю класифікацію незабаром визнала наукова громада, її використовують і дотепер. Назви – Море Ясності, Море Спокою, Океан Бурь, кратери Коперника й Тіхо з'явилися завдяки цим астрономам.

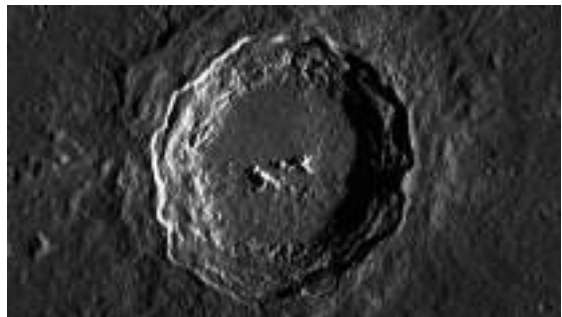
До початку космічної ери було відомо – Місяць не має атмосфери в звичному розумінні, а внутрішня активність його надр припинилася дуже давно. Проте сліди цієї активності донині зберігають на поверхні Місяця різні ландшафти – лавові поля океанів і морів та гірські пасма материків.

Кратери, найпоширеніший елемент місячного рельєфу, утворені внаслідок падіння метеоритів. На видимому боці Місяця їх налічують до кількох десятків тисяч. Через відсутність атмосфери навіть найменші частинки досягають місячної поверхні й залишають слід від удару.

Виміри показали, що вдень поверхня Місяця розігрівається до  $+110\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Та як тільки Сонце зайде за обрій, температура швидко падає до  $-170\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Поверхню Місяця вкриває шар пухкої речовини – реголіт, що структурою й хімічним складом близький до земних вулканічних порід. Він утворюється внаслідок дроблення, перемішування і спікання місячних порід, спричинених ударами метеоритів. Середня товщина поверхневого шару становить 2–3 м, а деінде до 10 м. Цей шар роздроблених порід має низьку теплопровідність, тому, всупереч значним температурним коливанням на поверхні, вже на глибині близько одного метра температура не змінюється.

Рис. 10.2. Кратер Коперника на поверхні Місяця



Місячні моря – це ділянки, що лежать нижче середнього рівня поверхні супутника Землі й мають гладке рівне «дно» з малою кількістю кратерів. Такі ділянки складені породами, що погано відбивають сонячне світло, і тому здаються темними. Як порівняти з іншими місячними структурами, моря з'явилися не так давно – 3,8–3,3 млрд років тому, і схоже, їхня поверхня утворена лавою вулканічного походження.

Материки – це ділянки, що лежать вище середнього рівня поверхні Місяця. Вони відбивають сонячного світла значно більше, ніж моря, і вкриті кратерами різних розмірів. Більшість з них, як і великі кругові моря, утворилися внаслідок падіння метеоритів. Коли тіло, що падало на Місяць, мало великі розміри, сила удару спричиняла викид лави з мантії, яка зміщувалася з речовиною поверхні. Навколо деяких кратерів помітні промені: вони утворилися з потоків лави, що вилитась після падіння метеорита.

Сила тяжіння Місяця спричиняє припливні деформації (явище припливів і відпливів) у літосфері, гідросфері й атмосфері Землі. Вони виникають, бо Місяць з неоднаковою силою притягає до себе різновіддалені від нього частини Землі, що спричиняє деформацію й розтягування її тіла вздовж прямої, направленої в бік Місяця.

Через припливи й відпливи Місяць гальмує обертання Землі навколо осі. Розрахунки показують, що на початку існування планети земна доба тривала не 24, а лише 6 годин. Водночас Земля загальмувала осьове обертання Місяця так, що тепер доба на ньому триває майже 28 земних діб, тобто рівна періоду обертання навколо Землі. Тому нині Місяць повернутий до нас одним боком.

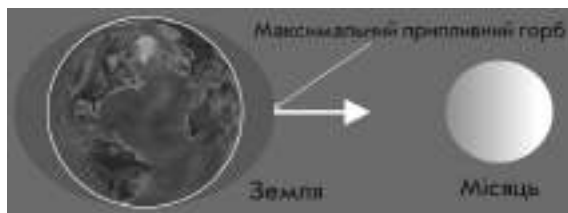


Рис. 10.3. Схема утворення припливів, спричинених дією Місяця

Місяць лежить найближче до Землі, тому він став першим небесним тілом, до якого спрямували космічні апарати (1958).

У 1959 р. радянський КА «Луна-3» передав на Землю зображення невидимого з поверхні нашої планети боку Місяця. Згодом космічні зонди здійснили м'яку посадку, взяли зразки місячних порід і доставили їх на Землю. Вершиною радянської місячної програми стала доставка на поверхню Місяця самохідних апаратів «Луноход-1» (1970–1971) і «Луноход-2» (1973).

Натомість США, виконуючи проект «Аполлон», здійснили висадку людини на Місяць. Упродовж 1969–1972 рр. шість екіпажів побували на Місяці: уперше це трапилось 20 липня 1969 року, коли космічний корабель «Аполлон-11» доставив астронавтів Нейла Армстронга та Едвіна Олдріна в море Спокою.

Після закінчення програм «Аполлон» і «Луна» дослідження Місяця з допомогою космічних апаратів не припинилося, хоча інтенсивність суттєво зменшилася. На початку XXI ст. інтерес до вивчення Місяця знову зріс. Європейське космічне агентство 28 вересня 2003 запустило перший місячний зонд «Смарт-1», а США 2004 р. оголосили про плани створення нових пілотованих космічних кораблів, здатних доставити людей на Місяць.

Космічні дослідження індійської місії «Чандраян-1» (2008) та американської LCROSS (2009) – Lunar CRater Observation and Sensing Satellite (Космічний апарат для спостереження і зондування місячних кратерів) дали можливість виявити на Місяці водяний лід, а також різні хімічні елементи і сполуки – оксид вуглецю, метан, аміак, кальцій, магній, ртуть, срібло тощо. Деякі з цих речовин до складу місячного ґрунту, імовірно, внесли астероїди й комети.

Внутрішню будову природного супутника Землі досліджено не так докладно, як його поверхню. Проте сейсмічні дослідження показали, що, окрім твердої літосфери, Місяць має мантію з частково розплавленим нижнім шаром. А на глибині 1400–1500 км, імовірно, лежить межа місячного ядра. Його існування ще є предметом дискусії, але модель внутрішньої будови Місяця включає ядро з масою не більше 1 % від маси всієї місячної кулі.

Маса Місяця мала, щоб він міг утримувати атмосферу. Друга космічна швидкість для Місяця становить майже 2,4 км/с, а швидкості теплового руху газових частинок здебільшого вищі. Тому вони або покидають навколomisячний простір, або розсіюються на великі відстані від поверхні. Ця умовна місячна атмосфера перебуває в сильно розрідженому стані і своїми фізичними властивостями аналогічна земній екзосфері (найвищий шар атмосфери Землі).

Місяць практично не має глобального магнітного поля дипольної природи. Плазма сонячного вітру й потоки частинок високих енергій вільно досягають місячної поверхні, де їх поглинає реголіт. Величина глобального магнітного поля на поверхні не перевищує 0,5 гам. Проте напруженість місцевого магнітного поля подекуди може сягати 100–300 гам. Появу цих аномалій пояснюють палеомагнетизмом. Але першоджерело стародавніх магнітних полів на Місяці залишається загадковим і є однією з невирішених проблем його природи.

### 3. Перспективи освоєння Місяця людиною.

Місяць – найближче до Землі космічне тіло, тому земляни, напевне, освоють його найпершим. Майбутня місячна індустрія має забезпечити не лише нормальне життя мешканцям Місяця, але й стати основою для дальшого розвитку науки. У цьому сенсі це небесне тіло – вдале місце для астрономічних досліджень. Тут можна без перешкод вивчати весь електромагнітний спектр – від гамма-променів до наддовгих радіохвиль. Стануть доступними для прямого вивчення первинні космічні промені (потоки швидких протонів, альфа-частинок і ядер важких елементів), які не проникають крізь атмосферу Землі в «чистому» вигляді. Важливою буде «Служба Землі». Під цим терміном мають на увазі регулярні спостереження з Місяця земної атмосфери й вивчення глобальних змін у біосфері Землі, зумовлених техногенною діяльністю людини. Спостереження з поверхні Місяця допоможуть поліпшити синоптичні прогнози, що має велике практичне значення.

Як наукова лабораторія Місяць цікавий не тільки астрономам, але й фізикам, геологам, біологам. Освоєння Місяця виявить нові непередбачувані напрямки місячної науки й особливі риси розвитку місячної техніки. Місяць може бути проміжним космодромом для міжпланетних польотів, відправною точкою для освоєння землянами Сонячної системи.

### НАВЧАЛЬНІ ЗАВДАННЯ

- Як зі спостережень Місяця, користуючись лише біноклем чи невеликим телескопом, можна зробити висновок, що період обертання Місяця навколо осі рівний періоду його обертання навколо Землі?
- Чому під час припливів світовий океан витягається не лише в бік Місяця, а й у протилежному напрямку?

### ВИСНОВКИ

Земля має один природний супутник – Місяць. Це найближче до нас небесне тіло. Саме тому там вже побували люди. Місяць розглядають як місце створення бази землян – наукового та технічно-технологічного форпосту для подальшого освоєння тіл Сонячної системи.

## § 11. БУДОВА СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ

Мало хто із землян сприймає Сонячну систему, як свою, нехай і велику, домівку. Ми дуже сильно «прив'язані» до рідної планети, до її фізичних умов. Проте пам'ятаймо, без Сонця, головного тіла планетної системи, наше існування неможливе.

### 1. Загальна будова Сонячної системи.

Нашу планетну систему схематично можна уявити так: в її центрі міститься Сонце, навколо якого обертаються вісім планет. Окрім них, є карликові планети (найвідоміша з них – Плутон), до 200 відомих на кінець 2018 р. супутників планет, астероїди й комети. На найдальшій околиці нашу планетну систему огортає сферична хмара крижаних об'єктів різних розмірів (хмара Оорта). До Сонячної системи також належать міжпланетний пил і газ, випромінювання й фізичні поля.

Понад 99,8 % маси нашої планетної системи припадає на Сонце. Решта маси розподілена так: 99 % – планети (Юпітер, Сатурн, Уран, Нептун); 1 % – всі інші тіла Сонячної системи.

Завдяки гравітаційній взаємодії Сонце утримує всі тіла планетної системи, що обертаються навколо нього. Орбіти більшості великих об'єктів лежать поблизу площини орбіти Землі (екліптики). Натомість орбіти комет і об'єк-



тів поясу Койпера, який починається за орбітою Нептуна, часто лежать під великими кутами до екліптики. Майже всі тіла обертаються навколо Сонця в одному напрямку – проти стрілки годинника, якщо дивитися з північного полюса Землі. Отже, Сонячна система – динамічне утворення: всі її об'єкти перебувають у стані руху (навколо власної осі і навколо Сонця). Рух усіх небесних тіл навколо Сонця описують закони Кеплера, що є проявом відомого з курсу фізики закону всесвітнього тяжіння. Планети гравітаційно впливають одна на одну та на інші тіла Сонячної системи. Щоправда, порівнюючи з гравітацією Сонця, такий вплив дуже незначний.

Хоча про планети люди знають здавна, чітко визначеного поняття «планета» в астрономії не було до 2006 р. Однак потреба в чіткому розмежуванні планет Сонячної системи підштовхнула МАС до його визначення.

**Отже, планета – це небесне тіло, яке:**

- обертається навколо Сонця,
- відносно велике й масивне, щоб мати кулясту форму,
- очищає околиці своєї орбіти (тобто поряд з планетою немає інших, співмірних з нею розмірами й масою, тіл).

Важливим не лише під оглядом науки, але й світогляду є питання про межі Сонячної системи. Воно цікавило людину завжди, але відповідь на нього було знайдено тільки у ХХ ст. Нині такою межею вважають оболонку геліосфери – ділянку космічного простору, де сонячний вітер (частинки, що летять від Сонця) стикається з «вітрами» від інших зір, втрачає швидкість і взаємодіє з міжзоряними частинками. Геліосферу можна уявити як велетенську «бульбашку» (за різними оцінками діаметром 200–350 а. о.), що огортає Сонячну систему, наповнену речовиною та магнітними полями, які походять із Сонця. Вона обмежує кількість заряджених частинок, що потрапляють з далекого космосу в Сонячну систему, й отак, імовірно, захищає життя на Землі.

## 2. Особливості будови Сонячної системи.

В астрономії часто Сонячну систему поділяють на окремі ділянки. Цей поділ не формальний – він відображає особливості як її загальної будови, так і окремих груп об'єктів. До внутрішньої Сонячної системи відносять чотири найближчих до Сонця планети, а також пояс астероїдів між орбітами Марса і Юпітера. Зовнішню Сонячну систему утворюють інші чотири планети й об'єкти за орбітою Нептуна – пояс Койпера, що тягнеться на відстань, як гадають, від 30 до 50 а. о. від Сонця.

З огляду на головні фізичні параметри (розмір, маса, середня густина, хімічний склад) планети Сонячної системи поділяють на дві групи – планети земного типу і планети-гіганти. До першої групи, окрім Землі, належать Меркурій, Венера й Марс, до другої групи – Юпітер, Сатурн, Уран і Нептун.

Особливості планет земної групи. Це відносно невеликі розмірами і масами планети з твердими поверхнями, рельєф яких має спільні риси. Середне

значення густин їх речовини в кілька разів більше за густину води. Те, що ці значення схожі, свідчить про схожість хімічного складу надр. Планети земної групи складаються, головню, з силікатних порід і металів.

Натомість атмосфери планет земного типу значно різняться між собою. Меркурій оточений дуже розрідженою воднево-гелієвою оболонкою, яка насправді є потоком сонячної плазми, децю згущеної навколо планети під дією її сили тяжіння. Атмосфера Венери на 97 % складається з вуглекислого газу і дуже густа: біля поверхні її густина в 15 разів менша за густину води, а тиск становить майже 90 атм. Марсіанська атмосфера, в складі якої 95 % вуглекислого газу, значно розрідженіша, ніж Венери. Тиск біля поверхні Марса в 170 разів менший, ніж біля поверхні Землі.

У планет земної групи дуже мало супутників: у Землі – один, у Марса – два крихітних, у Венери й Меркурія – жодного. Періоди обертання навколо осей відносно зір (зоряна доба) майже однакові (18 хв різниці) у Землі і Марса. Меркурій обертається навколо осі майже за 59 земних діб, Венера – за 243 земних доби, але у зворотному напрямку. Тобто за погляду на Венеру з боку Північного полюса нашої планети її обертання відбувається за годинною стрілкою, а не проти неї, як у більшості інших планет.

Сонячна доба Меркурія і Венери, як порівняти із Землею і Марсом, дуже відмінна від зоряної. На Меркурії вона найтриваліша в Сонячній системі – 176 земних діб, що дорівнює двом меркуріанським рокам по 88 земних діб. На Венері сонячна доба триває 117 земних діб, тоді як рік – 225 земних діб.

Планети земної групи різняться між собою й розмірами. Меркурій майже втричі менший за Землю, Марс – удвічі. Найближча розмірами до Землі Венера – усього на 640 км менша в поперечнику за нашу планету.

Особливості планет-гігантів. Ці планети помітно відмінні від планет земної групи, і не лише істотно більшими розмірами й масами. Вони мають значно менші середні густини, близькі до густини води, що свідчить про інший хімічний склад.

Планети-гіганти мають потужні воднево-гелієві атмосфери з домішками метану й аміаку і не мають твердих поверхонь. У міру заглиблення в їхні атмосфери речовина плавно переходить у суміш газу й рідини, а потім – у рідину. Проте під атмосферами, товщина яких закономірно зменшується зі збільшенням відстані від Сонця, кожна з них має тверде ядро.

Усі планети-гіганти швидко обертаються навколо своїх осей, але не як тверді тіла: періоди обертання на різних широтах різні – приполярні зони обертаються повільніше, ніж екваторіальні. Такий, притаманний тілам, що складаються з газу, характер обертання властивий також і Сонцю. Через швидке обертання у планет-гігантів навіть на око помітно сильну сплюсненість: полярний радіус Юпітера й Сатурна на кілька тисяч, а Урана й Нептуна на кілька сотень кілометрів менший за екваторіальний.

Група планет-гігантів, своєю чергою, чітко поділяється на дві пари: Юпітер і Сатурн мають більші розміри, менші густини й менші періоди обертання, ніж Уран і Нептун.

Планети-гіганти є центральними тілами своїх систем, де обертаються їхні супутники. Окрім того, вони оточені кільцями, утвореними відносно дрібними тілами й частинками. Тому в межах Сонячної системи можна виділити підсистеми – планети вкупі з супутниками.

Пояс астероїдів між орбітами Марса і Юпітера – це безліч невеликих твердих тіл неправильної форми, що складаються з гірських порід і металів. Найбільшим серед них є карликова планета Церера (950 км у поперечнику). Об'єкти з поясу Койпера і хмари Оорта складаються здебільшого з легких матеріалів – льодів метану, аміаку і води. Найбільшими серед тіл поясу Койпера, що відомі сьогодні, є Плутон, Ерида, Макемаке і Хаумеа.

Якщо розглядати рух планет-гігантів навколо Сонця на великих проміжках часу, то можна зауважити, що іноді вони опиняються у вузькому секторі площини екліптики по один бік від Сонця. Цю конфігурацію називають парадом планет. Востаннє парад планет відбувся в кінці 70-х років ХХ ст., що дозволило NASA реалізувати науково-дослідницьку програму «Великий тур» (АМС «Вояджер-1» і «Вояджер-2»). Хоча засоби масової інформації доволі часто пишуть про «паради планет» у Сонячній системі, але конфігурація, схожа на ту, що була наприкінці 70-х років минулого століття, повториться тільки в 2200 р. Хоча положення планет відносно Сонця безупинно змінюється, небесна механіка дозволяє дуже точно обчислити їх на будь-коли. Це означає, що парад планет – цілком передбачуване явище природи.

### 3. Коротка історія вивчення будови Сонячної системи.

Професійне вивчення складу Сонячної системи почалося 1610 року, коли Галілео Галілей відкрив у телескоп 4 найбільші супутники Юпітера. 1655 р. Християн Гюйгенс відкрив Титан – найбільший супутник Сатурна. До кінця ХVІІ ст. Кассіні відкрив ще 4 супутники Сатурна.

1781 р. вперше з допомогою телескопа було відкрито раніше невідому планету Уран. Незабаром Гершель, першовідкривач нової планети, відкрив 2 супутники Урана і ще 2 супутники Сатурна.

Ще з 1766 р. астрономам було відоме правило Тиціуса-Бодє, суть якого полягає в тому, що відстані планет від Сонця в астрономічних одиницях близькі до геометричної прогресії. Якщо Меркурію, Венері, Землі, Марсу, Юпітеру і Сатурну приписати відповідно числа  $n = -\infty, 0, 1, 2, 4, 5$ , то їх відстані від Сонця визначатиме формула  $r = 0,4 + 0,3 \cdot 2^n$ .

З порівняння справжніх відстаней планет від Сонця з обчисленими за правилом Тиціуса-Бодє випливало, що на відстані 2,8 а. о., тобто між Марсом і Юпітером, має бути планета. Після відкриття Урану, відстань до якого задовільно описувало це правило, астрономи почали її пошук. Відкриття 1 січня 1801 р. випадково зробив італійський астроном Джузеппе Піацца. Це

був перший астероїд Церера (з 2006 р. карликова планета). Термін «астероїд» («зореподібний») запровадив Вільям Гершель, бо за спостережень в телескоп ці об'єкти схожі на зорі.

1846 р. було відкрито восьму планету Сонячної системи – Нептун. 1930 р. Клайд Томбо відкрив Плутон – дев'яту планету, яку 2006 р. позбавили статусу великої й перевели в сімейство карликових планет.

У другій половині ХХ ст., головню завдяки космічним місіям, було відкрито багато супутників планет-гігантів. На межі двох тисячоліть і початку ХХІ ст. було відкрито карликові планети поясу Койпера й супутники деяких із них.

### НАВЧАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

- Підготуйте усну доповідь або презентацію на тему «Коротка історія вивчення будови Сонячної системи».

### ВИСНОВКИ

Сонячну систему схематично можна уявити так: в її центрі міститься зоря – Сонце, навколо нього обертаються вісім великих планет. Окрім них, є карликові планети, до 200 супутників планет, астероїди й комети. До Сонячної системи також належить міжпланетний пил і газ, випромінювання й фізичні поля.

## § 12. ПЛАНЕТИ ЗЕМНОЇ ГРУПИ

У внутрішній Сонячній системі лежать планети Меркурій, Венера, Земля і Марс. Їхні поверхні тверді, а серед речовин, що входять до складу планет, переважають силікати (сполуки кремнію з різними елементами) і метали. Кору і мантію утворюють, головню, силікати, а метали (найбільше залізо й

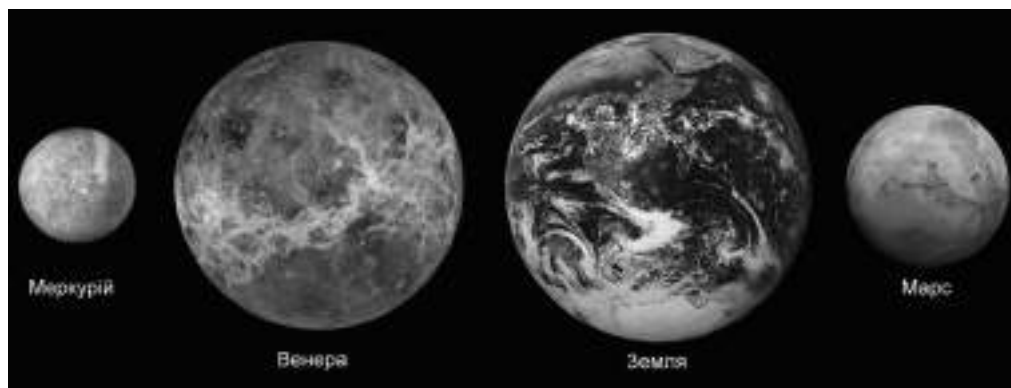


Рис 12.1. Порівняльні розміри планет земної групи

нікель), містяться в ядрах. Планети земної групи лежать ближче одна до одної, ніж планети-гіганти. Радіус міжпланетного простору, де перебувають ці об'єкти, менший за відстань між орбітами Юпітера й Сатурна.

### 1. Фізичні характеристики планет земної групи.

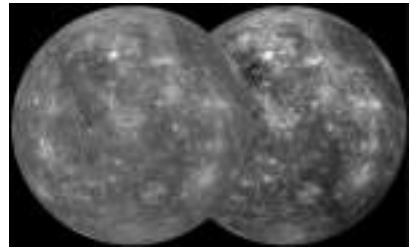
Фізичні умови на поверхнях планет земної групи залежать, як від маси планети, що дозволяє силі тяжіння утримувати атмосферу певної потужності, так і від відстані до Сонця, що визначає певний діапазон температур.

*Меркурій.* Своїми розмірами він найменший в групі планет земного типу. Через близькість до Сонця його важко спостерігати з Землі. У періоди видимості Меркурій можна бачити лише низько над обрієм на тлі вечірньої чи ранкової заграви. Тому основні дані про фізичні умови на поверхні планети астрономи отримали тільки з початком космічної ери, коли в 1974–1975 рр. до нього було відправлено перші космічні апарати.

Меркурій майже втричі ближче до Сонця, ніж Земля, і практично позбавлений атмосфери, якщо не вважати за таку воднево-гелієвий потік сонячного вітру, що силою тяжіння планети ненадовго затримується біля поверхні. Тому на денному боці планети температура становить майже 700 К, а на нічному – 90 К. Проте, незважаючи на високу температуру поверхні, на дні меркуріанських кратерів біля полюсів знайдено лід. Головним його джерелом, найімовірніше, є комети.

Меркурій складається переважно із заліза і нікелю. В центрі планети залягає металеве ядро, що охоплює понад 40 % його об'єму. Середнє значення густини речовини Меркурія становить 5,43 г/см<sup>3</sup>, що трохи менше, ніж середня густина Землі. У планети немає супутників, а магнітне поле становить лише 1 % від земного. Однак це слабке магнітне поле вказує на те, що її ядро перебуває у рідкому стані.

Рис 12.2. Поверхня Меркурія



Поверхня Меркурія дуже нагадує місячну. Перше, що впадає в око, – велика кількість кратерів різних розмірів. Їх на Меркурії навіть більше, ніж на Місяці, й лежать вони густіше. Проте, на відміну від Місяця, тут значно менше великих відносно гладких ділянок, таких, як місячні моря. Очевидно, кратери на Меркурії мають метеоритне походження.

Усі примітні деталі меркуріанського рельєфу мають власні назви. Кратерам надано імена видатних художників, композиторів, письменників, як-то: Бетховен, Бальзак, Лермонтов, Пушкін, Софокл тощо. Гірські ланцюги і каньйони отримали назви знаменитих кораблів і наукових станцій: Кон-Тікі, Мирний, Восток тощо.

*Венера.* Друга від Сонця і найближча до Землі планета. Іноді їх розділяють усього 40 млн км. Як і Меркурій, її видно ввечері після заходу або вранці перед сходом Сонця. На відміну від Меркурія, Венера на небосхилі майже вдвічі далі відходить від Сонця і світить у 10 разів яскравіше. В такі періоди видимості вона поступається яскравістю лише Місяцю, а предмети відкидають від неї тіні.

Дослідження Венери космічними апаратами показали, що хмаровий покрив планети в 30 км завтовшки містить переважно дрібні крапельки сірчаної кислоти, які в міру збільшення висоти над поверхнею перетворюються в кристалики. Саме завдяки цьому Венера така яскрава – відбиває в космічний простір до 70 % сонячного світла. Для уявного спостерігача на планеті хмари ніколи не відкривають зоряного неба: ні Сонця, ні зір з поверхні Венери не видно.

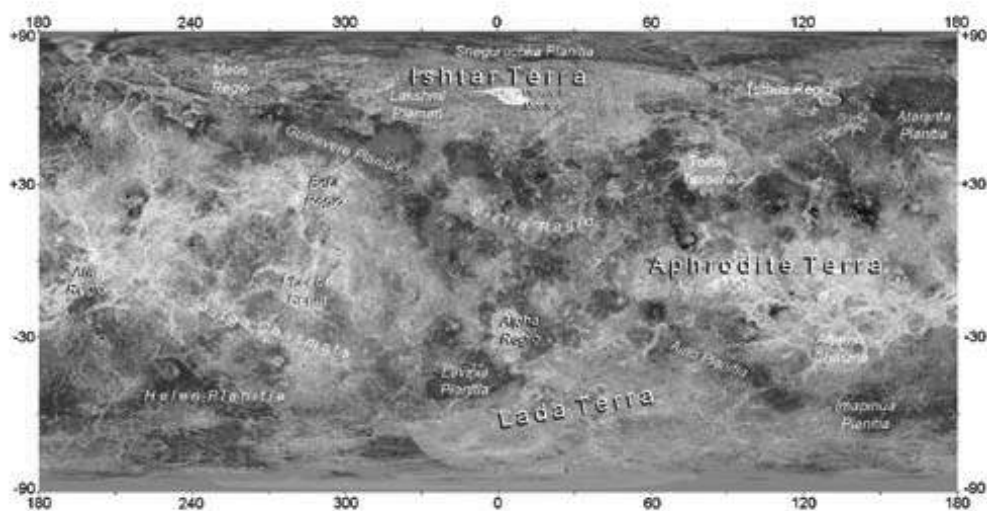


Рис 12.3. Мапа поверхні Венери

Крізь товщу хмар сонячного тепла надходить мало, але через високий вміст вуглекислого газу (97 %) парниковий ефект проявляється на Венері значно сильніше, ніж на Землі. Нижні шари атмосфери сильно поглинають випромінюване поверхнею тепло, внаслідок чого впродовж мільярдів років вона розігрілась до високої температури – майже 700 К.

Рельєф Венери схожий на земний. Радіолокатори космічного апарата «Магеллан» (США) ще в 1990 р. склали докладну карту 98 % її поверхні. Було виявлено велику кількість ударних кратерів діаметром від трьох до трьохсот кілометрів. Відсутність кратерів меншого розміру зумовлена тим, що метеорити, здатні їх утворити, втрачають швидкість в атмосфері чи згорають. На Венері є плоскі й горбисті рівнини вулканічного походження, просторі ни-

зовини і плато, високі гірські масиви, а також глибокі каньйони (найбільший понад 6400 км завдовжки) і багато згаслих вулканів. Один з таких – вулкан Маат, навколо якого видно потужні потоки лави, що тягнуться на сотні км. Основний матеріал поверхні – базальтова лава.

Утворення на поверхні Венери називають як жіночими іменами – Земля Афродити, Земля Іштар, плато Лакшмі, так й іменами видатних вчених у галузі радіо- та електротехніки – Гальвані, Едісон, Попов та інші.

*Марс.* На відміну від Меркурія і Венери, Марс, залежно від його кутової відстані від Сонця, можна спостерігати і ввечері, і вранці, і протягом усієї ночі. Як світило він має червонуватий колір, що дозволяє досить легко відшукати його на зоряному небі.

У розрідженій атмосфері Марса води і кисню дуже мало. І все ж досить часто в ній з'являються хмари з дрібненьких кристаликів льоду. Через це атмосфера Марса рідко буває цілком прозорою. Коли ж на Марсі вирують пилові бурі, його поверхня на кілька місяців стає недосяжною для спостережень. За сприятливих марсіанських погодних умов із Землі можна розглядати крупні деталі рельєфу, а полярні шапки біля полюсів видно навіть в аматорський телескоп.

Через особливості взаємного руху Землі і Марса кожні 15 років він опиняється на найменшій віддалі від Землі – 56 млн км. Таке зближення називають великим протистоянням. У такі періоди вивчати Марс було найзручніше. Тепер це не важливо. Космічні апарати уможливили вивчення планети з її орбіти чи поверхні.

Рис. 12.4. Гора Олімп на Марсі

На Марсі майже повсюдно панують низькі температури, бо він отримує сонячного тепла майже вдвічі менше, ніж Земля. Лише на екваторі вдень температура піднімається приблизно до 288 К (+15 °С), а вночі, через розріджену атмосферу, неспроможну утримати накопичене за день тепло, поверхня швидко вихолоджується до 170 К на екваторі й 145 К на полюсах.

Найнижчу температуру зафіксовано взимку на полюсах – майже 140 К.

Поверхня Марса – типова для планет земної групи. У чомусь вона нагадує місячну, а деінде земну. З одного боку, тут дуже багато кратерів, а з іншого, – є великі території, де кратерів майже немає, але добре помітні сліди діяльності потужних геологічних процесів. Червонуватий колір поверхні планети пояснюють присутністю в породах великої кількості мінералів (наприклад, магнетиту), що містять оксиди заліза.



На поверхні Марса є кілька дуже великих згаслих вулканів – найбільших в Сонячній системі. Найвищий з них, гора Олімп, вивершується над поверхнею планети майже на 27 км. Його вік і вік кількох менших за нього висотою сусідів становить від 3,7 млрд до 500 млн років.

Ще одна особливість марсіанського рельєфу – система гігантських каньйонів «Долини Маринера» завдовжки 4000 км і завглибшки до 7 км. Є на Марсі безводні річища. Їх – тисячі, і вони тягнуться на сотні кілометрів. Нині умови на Марсі такі, що вода там не може перебувати в рідкому стані. Але напевне колись Марс мав потужнішу атмосферу, там діяв парниковий ефект, і клімат сприяв існуванню води в рідкому стані. Що призвело до втрати атмосфери, а згодом і річок, поки не зрозуміло. Згідно з однією із гіпотез, причиною було падіння астероїда. Згідно з іншими уявленнями, – це наслідок тривалого в часі впливу сонячного вітру – потоку заряджених частинок, що на великій швидкості приходять від Сонця. Ще одне припущення – Марс лежить поза «зоною життя» в Сонячній системі і надто мало тепла отримує від Сонця, щоб вода перебувала в рідкому стані.

Як було виявлено, нині великі запаси водяного льоду є під марсіанською поверхнею у вигляді вічної мерзлоти.

2004 р. на Марсі виявлено метан. Його джерело досі невідоме, але це може бути як наслідком вулканічної активності, так і діяльності живих організмів. Нові космічні місії (зокрема, «ЕкзоМарс») мають розкрити таємницю походження марсіанського метану.

У Марса є дуже слабке стале магнітне поле, що свідчить про тверде, а не рідке його ядро. Середнє значення густини речовини Марса менше, ніж у Землі.

На відміну від Меркурія й Венери, у Марса є два супутники. Максимальний діаметр Фобоса трохи більший за 25 км, а Деймоса – близько 15 км. Їхні поверхні суцільно вкриті кратерами. Походження супутників ще не з'ясоване. Можливо, колись вони були самостійними небесними тілами – астероїдами й рухалися в поясі астероїдів, але були захоплені Червоною планетою. А можливо, колись удар колосальної сили вибив з Марса мільярди тонн речовини, і з неї на орбіті згодом сформувалися супутники. Схожим припущенням про гігантське зіткнення з Землею космічного тіла нині пояснюють і утворення Місяця.

Тепер з'являється все більше свідчень на користь другої версії. Нові докази здобуто після вивчення структури і складу Фобоса, виконаного з допомогою зонда «Марс Експрес». З'ясовано, що хімічний склад супутника не характерний для астероїдів, але має багато спільного з мінералами на Марсі.

## 2. Дослідження планет земної групи.

Оскільки планети земної групи можна спостерігати на зоряному небі неозброєним оком, вивчати їх стали дуже давно. Багато нової інформації про ці планети отримано від часу появи телескопа. Але принципово новий



етап досліджень розпочався від початку космічної ери. До Меркурія, Венери та Марса були спрямовані космічні апарати. На поверхні Венери і Марса міжпланетні космічні станції здійснили посадку.

Нині космічні дослідження планет земної групи (як й інших тіл Сонячної системи) виконують майже в неперервному режимі. Одну космічну місію змінює інша, а біля Марса і на його поверхні одночасно працюють кілька зондів.

### ТИПОВА ЗАДАЧА

- Якою має бути швидкість космічного корабля, щоб уявні марсіани могли на ньому вирушити в бік Землі?

**Розв'язання:** Пригадаймо, що мінімальну швидкість, яку треба надати тілу на поверхні планети, щоб воно вийшло за межі її гравітаційної дії, називають другою космічною швидкістю. Її значення виражає формула:  $v_2 = \frac{\sqrt{2GM}}{R}$ , де  $M$  і  $R$  – значення маси і радіуса планети, а  $G$  – гравітаційна стала ( $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ (Нм}^2 / \text{кг}^2 \text{)}$ ). Для Марса  $v_2 = 5,0$  км/с.

### ВИСНОВКИ

До планет земної групи, окрім Землі, належать Меркурій, Венера і Марс. Ці планети мають тверді поверхні й складаються переважно з силікатів і металів.

## § 13. ПЛАНЕТИ-ГІГАНТИ

Планети Юпітер, Сатурн, Уран і Нептун, залежно від їх кутової відстані на небесній сфері від Сонця, видно і ввечері, і вранці, і протягом усієї ночі. Юпітер і Сатурн можна спостерігати неозброєним оком, а Уран і Нептун з допомогою телескопа.

### 1. Фізичні характеристики планет-гігантів.

Ця група планет чітко поділяється на дві пари: Юпітер і Сатурн мають більші розміри, менші густини і менші періоди обертання, ніж Уран і Нептун.

*Юпітер і Сатурн.* Юпітер – найбільша розмірами планета Сонячної системи й масивніша за всі інші планети разом узяті. Якби його маса була більшою в 75 разів, він став би зорею, щоправда меншою і холоднішою, ніж Сонце.

Навіть в аматорський телескоп на диску Юпітера видно яскраві кольорові світлі й темні смуги хмар, витягнуті через швидке обертання планети паралельно до екватора. В її атмосфері є стійке атмосферне утворення – Велика Червона Пляма, яку вперше помітили в XVII ст. Ця пляма, щодо природи

якої було багато припущень, своїми розмірами майже втричі перевершує Землю. Коли отримали космічні знімки Юпітера з близької відстані, стало зрозумілим: це – велетенський, дуже стійкий атмосферний вихор (рис. 13.2), схожі на який виявлено в атмосферах інших планет-гігантів. Червоного кольору йому надають, можливо, сполуки фосфору. Світлі й темні смуги хмар – це вершини висхідних потоків газу з глибин і низхідних ділянок між ними.

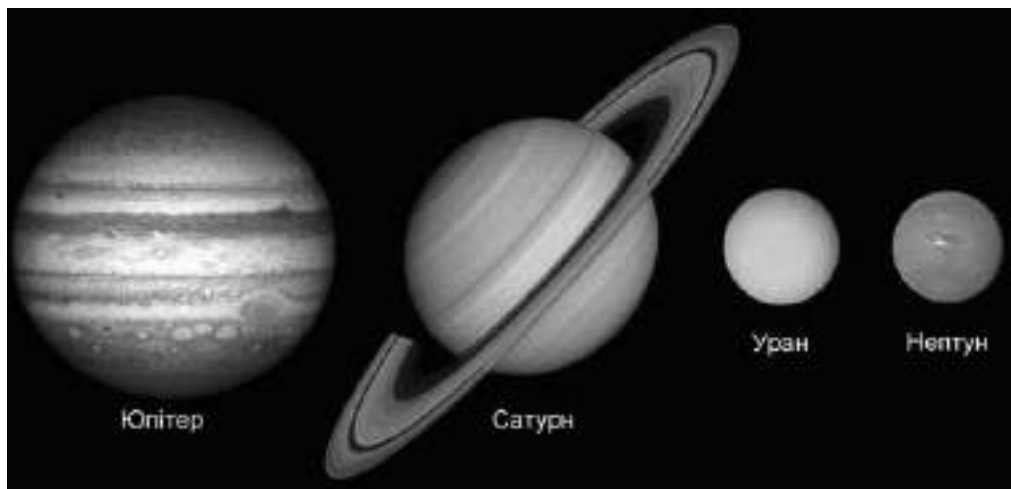


Рис. 13.1. Порівняльні розміри планет-гігантів

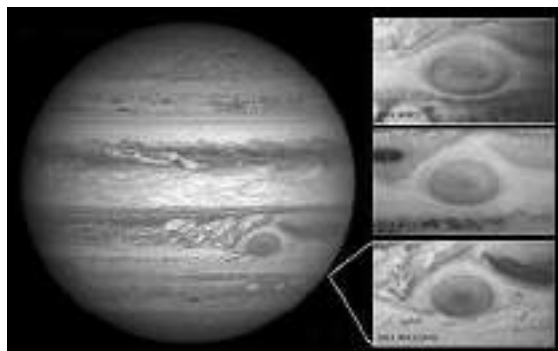


Рис. 13.2. Велика Червона Пляма в атмосфері Юпітера – стійкий атмосферний вихор, що існує вже понад 350 років

зовнішній вигляд. Це пояснюють тим, що планета випромінює енергії вдвічі більше, ніж отримує від Сонця. Тобто, Юпітер має власне її джерело. За одним із припущень в ядрі планети досі триває процес гравітаційного стискання первинної речовини, що й породжує додаткове виділення енергії. Її потік, підігриваючи атмосферу знизу, зумовлює появу потужних висхідних течій, що виносять догори великі маси гарячої речовини. Згодом, охолоджуючись, потоки газу знову поринають у глибини.

Для атмосфери Юпітера властиві бурхливі турбулентні процеси, завдяки яким він впродовж кількох місяців змінює свій

Космічний зонд «Юнона» виявив на екваторі Юпітера пояс аміаку, що проникає вглиб атмосфери майже на 300 км. Це вказує на існування погодної системи, яку визначає процес перерозподілу аміаку між різними ділянками планети.

У Юпітера є три тонких кільця, утворених переважно крихітними темними пиловими частинками (рис. 13.3). Про їх існування ще до початку космічної ери висловлював думку відомий вчений, який понад 40 років завідував кафедрою астрономії Київського національного університету імені Тараса Шевченка, професор С. К. Всехсвятський. Кільця відкрили в 1979 р., коли повз Юпітер пройшли міжпланетні зонди «Вояджер-1» і «Вояджер-2». Знімки кільця стали блискучим підтвердженням наукових завбачень нашого співвітчизника.



Рис. 13.3. Кільце Юпітера (ліворуч) утворюють переважно дрібні пилинки; портрет С. К. Всехсвятського та космічний зонд «Вояджер-1» (праворуч)

Автоматичні міжпланетні станції (зокрема «Галілео» та «Юнона») дозволили вивчити значно потужніше (в 20 разів), ніж земне, магнітне поле Юпітера та сформовані ним кілька радіаційних поясів. Планету оточує великих розмірів поле з електрично заряджених частинок. При цьому рівень радіації поблизу Юпітера в 25 разів перевищує смертельну дозу для людини. Саме ці пояси є джерелом сильного радіовипромінювання в дециметровому й метровому діапазоні, відкритого ще в 50-ті роки ХХ ст. Радіошум від Юпітера іноді буває сильнішим за радіовипромінювання Сонця і здатний впливати навіть на короткохвильові антени на Землі. Навколо полюсів планети існують яскраві полярні сйива, що іноді змінюють свою інтенсивність.

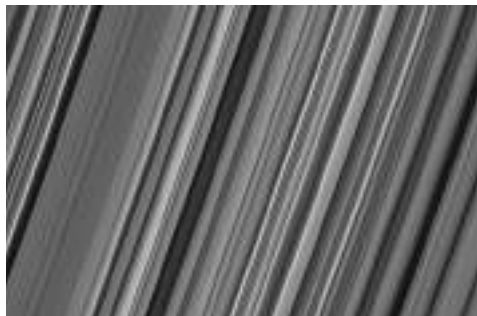
Юпітер має своєрідну внутрішню будову. Товщина його воднево-гелієвої з домішками метану й аміаку атмосфери становить до 1500 кілометрів. Далі вона переходить у газорідкий і потім у рідкий стан. А на глибині майже в 16000 км за температури близько 2273 К і величезного тиску водень починає добре проводити електричний струм. По аналогії з металами, що є хорошими провідниками струму, цей стан водню називають «металевим». Товщина цього шару становить майже 40000 км. Внутрішнє метало-силікатне

ядро планети до 25000 км в діаметрі – тверде. З допомогою зонду «Юнона» з'ясовано – внутрішні шари атмосфери Юпітера повсякчас перемішуються.

*Сатурн* – друга розмірами й масою планета Сонячної системи. Багато в чому він дуже схожий на Юпітер. Майже такий самий хімічний склад, розміри, маса, швидке обертання навколо осі, виділення більшої кількості тепла із надр, ніж отриманого від Сонця, і багато іншого ріднять ці планети. Щоправда смуги на його диску не такі яскраві і спокійніші, ніж на диску Юпітера.

Середня густина речовини Сатурна дуже мала, менша за густина води – усього 0,68 г/см<sup>3</sup>. Магнітне поле Сатурна має вдвічі меншу напруженість, ніж магнітне поле Землі. Внаслідок цього його магнітосфера значно менша, ніж у Юпітера.

Ще донедавна відзнакою лише Сатурна вважали великі, яскраві кільця, що оперізують планету. Нині їх виявлено у всіх планет-гігантів. Проте, через істотно більші розміри й яскравість, кільця Сатурна – виняткові. З близької відстані (рис. 13.4) вони мають вигляд системи з кількох сотень тонких кілець, розділених вузькими темними проміжками. Кожне з них утворене з окремих крихких крижаних частинок розмірами від зовсім дрібних до брил у 10–15 м завбільшки. Ширина кілець Сатурна становить близько 65000 км.



Під час досліджень Сатурна космічними апаратами в інфрачервоних променях на його північному полюсі було виявлене полярне сяйво.

Рис. 13.4. Вигляд кілець Сатурна з близької відстані

Найбільший супутник Сатурна Титан має щільну атмосферу й тверду поверхню.

*Уран і Нептун.* Так само, як Юпітер і Сатурн, ці планети теж дуже схожі між собою (рис. 13.5). Тільки масивніший Нептун має трохи менші розміри, ніж Уран. Середня густина Нептуна найбільша серед густин усіх планет-гігантів. Це свідчить про найменшу протяжність його атмосфери, як порівняти з іншими планетами цієї групи. Хімічним складом Уран і Нептун дещо відмінні від Юпітера й Сатурна: вони мають більше важких елементів (метан, аміак, вода). У зв'язку з цим в надрах Урана та Нептуна відсутній «металевий» водень. Проте в них є багато модифікацій перегрітого льоду, тому їх виділили в окрему категорію «крижаних гігантів».

Уран рухається навколо Сонця наче лежачи на боку, – кут між площиною його орбіти і віссю обертання становить усього 8°. Це унікальний випадок в Сонячній системі. Так само, як і Венера, Уран обертається навколо осі в зворотному напрямку. Напевне, ще на початку історії Сонячної системи

він пережив катастрофічне зіткнення з великим об'єктом, що змінив нахил його осі й напрямок обертання аж до протилежного.

Уран і Нептун оточені тонкими темними кільцями з дуже дрібних пилинок, льоду й космічного сміття (залишків речовини після утворення Сонячної системи). Кільця погано відбивають світло. Навколо Урана налічують 13 кілець, навколо Нептуна – шість.

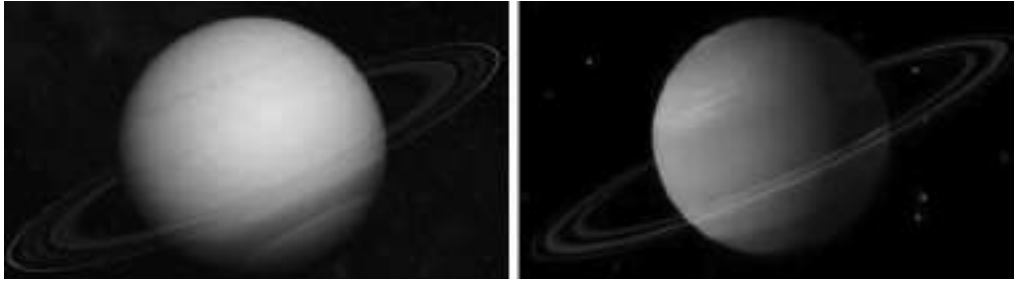


Рис. 13.5. Уран (ліворуч) та Нептун (праворуч)

Уран не випромінює більше енергії, ніж отримує від Сонця. Його атмосфера – найхолодніша (49 К) серед усіх планет. В ній багато льодяних частинок з води і твердого аміаку. Навіть ядро огортає мантия з льоду. Причиною цього може бути те, що під час катастрофічного зіткнення, яке «поклало» Уран на бік, він втратив своє внутрішнє тепло.

Верхні шари атмосфери Урана заволочені метановим туманом, який надає йому слабкого синюватого відтінку і приховує бурі в атмосфері. Під метановими хмарами залягають хмари з води. В газовій оболонці планети в більшій концентрації, ніж на інших гігантах, присутні сполуки сірководню, аміаку та метану.

Космічний апарат «Вояджер-2» у 1989 р. виявив на диску Нептуна темні плями, які мають таку саму природу, що й Велика Червона Пляма на Юпітері. Найбільша з них, «Велика темна пляма», – циклон розмірами 13 000 на 8000 км, де швидкість вітру досягає 2400 км/год. Вітри на Нептуні – найсильніші в Сонячній системі. Їх існування в атмосфері планети, як загалом і в усіх планет-гігантів, окрім Урана, вказує на наявність внутрішнього джерела тепла. Планета випромінює у простір в 2,6 рази більше енергії, ніж отримує від Сонця.

Атмосфера Нептуна, як і в Урана, плавно переходить в рідину, потім у перегріту рідку мантию і тверде ядро. Нептун має магнітне поле, напруженість якого на полюсах приблизно вдвічі більша, ніж в магнітного поля Землі.

## 2. Дослідження планет-гігантів.

Вивчати планети-гіганти з поверхні Землі досить складно, адже вони перебувають відносно далеко від нашої планети. Саме тому найкращі результати

отримано з допомогою автоматичних міжпланетних станцій, спрямованих до цих планет.

Окрім самих планет-гігантів, великий інтерес для науковців становлять їхні супутники. До таких із них, як Європа і Титан, нині планують космічні місії.

### ТИПОВА ЗАДАЧА

Період обертання Нептуна становить  $T_n = 16^h 06^m$ , а екваторіальної зони Юпітера  $T_{ю} = 9^h 55^m$ . Обчисліть різницю лінійних швидкостей екваторіальних точок Юпітера і Нептуна, якщо радіуси цих планет становлять  $R_{ю} = 71\,490$  км і  $R_n = 24\,760$  км.

**Розв'язання:** Скористаємося формулою для лінійної швидкості тіла, що рівномірно обертається по колу:

$$v = \frac{2\pi R}{T}$$

Звідси:  $v_{ю} - v_n = 2\pi \left( \frac{R_{ю}}{T_{ю}} - \frac{R_n}{T_n} \right) = 1,57 \text{ км/с}.$

### НАВЧАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

- Уявіть, що кільце Сатурна миттєво розрізали по радіусу від краю до краю. Що з ним буде відбуватись після цього?

### ВИСНОВКИ

Планети-гіганти відмінні від планет земної групи істотно більшими розмірами й масами, малими періодами обертання, хімічним складом, будовою, системами супутників та кілець. Вони не мають твердих поверхонь а є газо-рідинними кулями. У своєму складі планети містять багато водню й гелію, чим споріднені більше з Сонцем, ніж з планетами земної групи.

## § 14. КАРЛИКОВІ ПЛАНЕТИ ТА МАЛІ ТІЛА

2006 року Міжнародний астрономічний союз ухвалив рішення про заснування в Сонячній системі нового сімейства об'єктів – карликових планет і дав визначення поняття карликова планета. Це небесне тіло, яке: обертається навколо Сонця; відносно велике й масивне, щоб мати кулясту форму; не очищає околиці своєї орбіти; не є супутником планети.

### 1. Особливості карликових планет.

*Плутон*, колись дев'яту планету Сонячної системи, було відкрито 1930 р. Його період обертання навколо Сонця становить майже 250 земних років, і рухається він по такій витягнутій орбіті, що в деякі епохи опиняється до

Сонця ближче, ніж Нептун. Розміри Плутона невеликі – 2374 км у поперечнику.

Наприкінці 70-х років ХХ ст. біля Плутона на відстані близько 20000 км було відкрито супутник, названий Хароном (діаметр ~ 1200 км). Оскільки центр мас (барицентр) цих тіл лежить у відкритому просторі між ними, то таку систему називають подвійною планетою. Так само, як Місяць відносно Землі, Харон завжди повернутий до Плутона однією півкулею. Але й Плутон завжди повернутий до Харона одним боком. Період їх обертання навколо спільного центра мас становить понад шість земних діб.

Досі не лише найбільші наземні телескопи, але й космічні, не дозволяли роздивитися на поверхні Плутона, а тим паче на його супутниках, які-небудь деталі. Цього вдалося досягти з допомогою автоматичної міжпланетної станції «Нові Горизонти», яка влітку 2015 р. пройшла на відстані 12500 км від поверхні Плутона (рис. 14.1).

Рис. 14.1. Поверхня Плутона



Виявилося, що уявлення про Плутон як «мертву» (на поверхні якої вже дуже давно не відбувається жодних змін) планету, були помилкові. Він має на поверхні гори й рівнини, вік яких становить не більше 100 млн років. Це вказує на тектонічні процеси, що відбувалися на Плутоні порівняно недавно.

До того, як «Нові Горизонти» побували в системі Плутона, це небесне тіло вважали не схожим ні на планети земного типу, ні на планети-гіганти. Його порівнювали з малими тілами, що утворюють пояс Койпера (Міжнародний астрономічний союз рекомендує називати їх транснептуновими об'єктами, бо вони лежать за орбітою Нептуна). Пояс Койпера – це безліч дрібних небесних тіл, що містяться на околиці Сонячної системи. Його ближня межа лежить від Сонця на відстані приблизно 30 а. о., а дальня простягається на відстань до 50 а. о.

Нині відомо, що пояс Койпера містить не менше, ніж 70000 об'єктів розмірами понад 10 км, зосереджених переважно в смузі від 30 до 50 а. о. Але є й віддаленіші тіла, що перебувають за доступними для спостережень межами. Припускають, що в цілому тіл з розміром більшим за 10 км є близько 10 млн, а з розміром понад 1 км – близько 10 млрд.

Об'єкти поясу Койпера дуже цікавлять астрономів, адже вони є залишками речовини, з якої утворилася Сонячна система.

Окрім Плутона, до сімейства карликових планет віднесено Цереру – найбільше тіло з поясу астероїдів з діаметром 950 км, а також відносно великі крижані тіла поясу Койпера – Ериду, Макемаке, Хаумеу. На статус карли-

кових планет також претендують Кварвар, Іксіон, Седна, Орк, Варуна. Деякі з них мають супутники.

## 2. Малі тіла Сонячної системи.

До малих тіл відносять астероїди, комети й метеороїди. Астероїди – тверді кам'яністі тіла, що рухаються, як і планети, по еліптичних орбітах навколо Сонця з періодом 3–6 років. Нахили орбіт астероїдів до площини екліптики ( $i$ ) різні й досягають 70 градусів, а тому ці об'єкти поділяють приблизно порівну на плоску і сферичну підсистеми.

Для земного спостерігача кутовий діаметр навіть найбільших астероїдів не більший за 0,5", тому з допомогою наземних телескопів неможливо розгледіти їхні форми. Діаметри деяких астероїдів вдалося виміряти методом покриття зір – коли астероїд опиняється на промені зору спостерігача з яскравою зорею. Але здебільшого їх розміри оцінюють побічно за блиском, кольором та відстанню. Як і планети, астероїди у видимому діапазоні спектра світять відбитим сонячним світлом.

Внутрішня структура астероїдів здатна чинити опір гравітаційному стисканню. З цієї причини вони менш схильні до внутрішньої еволюції, ніж планети (наприклад, в їхніх надрах не відбувається гравітаційна диференціація речовини), але сильніше реагують на вплив зовнішніх факторів, таких як ударна переробка поверхні й еволюція орбіти.

Орбіти більшості астероїдів пролягають між орбітами Марса і Юпітера на відстані 2,2–3,6 а. о. від Сонця. Оскільки в цій частині Сонячної системи міститься кілька сотень тисяч таких об'єктів, її називали поясом астероїдів (рис. 14.2). Інколи цей пояс називають внутрішнім, або головним, маючи на увазі, що за орбітою Нептуна пролягає пояс Койпера з об'єктів, які здебільшого також відносять до сімейства малих тіл Сонячної системи.

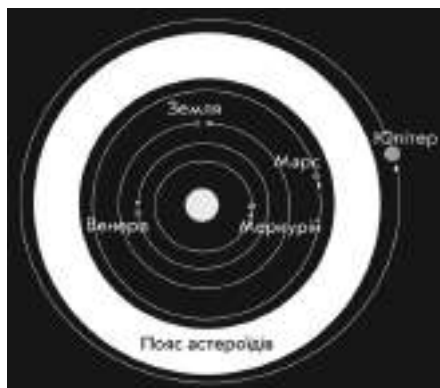


Рис. 14.2. Схема розміщення поясу астероїдів у Сонячній системі

Поза основним поясом астероїдів є ще багато малих тіл, наприклад, астероїди-троянці. Це дві групи об'єктів, що обертаються навколо Сонця по орбіті Юпітера: перша рухається на  $60^\circ$  попереду планети, друга – на  $60^\circ$  позаду неї. Деякі астероїди рухаються сильно витягнутими еліптичними орбітами, що пролягають поблизу Сонця. А орбіти груп Аполлона, Амура й Афін перетинають орбіту Землі або дуже близько підходять до неї.

нотими еліптичними орбітами, що пролягають поблизу Сонця. А орбіти груп Аполлона, Амура й Афін перетинають орбіту Землі або дуже близько підходять до неї.



Переважає більшість астероїдів має розміри від кількох метрів до 100 км і неправильну форму. У найбільших із них форма майже сферична й поперечники становлять сотні кілометрів. Зокрема в Паллади майже 600 км, у Вести 540 км і 245 км в Юнони.

Згідно з правилами МАС назви астероїдам дають їх першовідкривачі. Спочатку це були назви, пов'язані з міфами, бо намагалися продовжити традицію найменування планет. Потім астероїди стали називати іменами видатних людей. Нині, завдяки автоматизації процесу пошуків астероїдів, частота відкриття цих об'єктів суттєво зросла, тому багато з них спершу отримують числово-буквені позначення.

Щодо походження астероїдів було дві гіпотези. Згідно з першою (нині вже відхиленою), астероїди – це залишки планети, що розкололася внаслідок зіткнення з іншим масивним тілом. Згідно з другою, астероїди – це малі тіла, згруповані в пояс сильним гравітаційним полем гіганта Юпітера. У будь-якому разі вони є найдавнішими об'єктами Сонячної системи, і тому їх вивчення допомагає розкрити таємницю її походження.

Комети – ще один різновид малих тіл. Ті з них, що належать Сонячній системі, обертаються навколо Сонця по витягнутих еліптичних чи параболических орбітах. Тому вони наближаються до світила і віддаляються на великі відстані, де комету важко, а часто й неможливо, спостерігати навіть у потужні телескопи. З наближенням до Сонця комета збільшує яскравість на зоряному небі й інколи може перетворитися на справжнє видовище (рис. 14.3). У давнину це лякало людей, бо комети вважали вісниками поганих подій – стихійних явищ, війн, епідемій тощо. Нову, раніше невідому, комету називають прізвиськом її відкривача (наприклад, комета Гейла–Боппа).

Рис. 14.3. Комета Гейла–Боппа на небі Землі



У комет розрізняють голову і хвіст. Голова складається з невеликого льодяного ядра з домішками твердих речовин і газової оболонки навколо нього, які світить відбитим сонячним світлом. Діаметри ядер зазвичай становлять кілька кілометрів чи

десятків кілометрів, тоді як поперечники світних оболонок (їх називають комою) можуть сягати діаметра Сонця. Світні оболонки виникають під час наближення комети до Сонця: ядро нагрівається і його речовина сублімує – переходить з твердого в газоподібний стан. Кометний хвіст формується під тиском світла й сонячного вітру – речовину коми відкидає у протилежний бік від Сонця. Іноді довжина хвоста комети сягає сотень мільйонів кілометрів.

Речовина, що утворює голову (за винятком ядра) і хвіст комети, надзвичайно розріджена.

Багато нового про комети вдалося з'ясувати завдяки космічним зондам, що досліджували їх з близької відстані. Уперше космічний апарат наблизився до комети в 1985 р. Тоді виміряли густину речовини в комі й хвості комети Джикобіні-Циннера. Потім з допомогою космічних зондів «Вега-1», «Вега-2» і «Джотто» (Giotto) вивчали комету Галлея (1986), комету Бореллі (2001, Deep Space 1). У січні 2004 р. зонд Stardust взяв проби речовини коми комети Вільд-2 й відправив їх на Землю. 4 липня 2005 р. космічний апарат Deep Impact вистрелив у ядро комети Темпель-1 мідним снарядом, який вибив з поверхні фонтан речовини загальною масою до 10000 т. З'ясувалося, що ядро містить не лише водяний лід і пил (його було значно більше, ніж води), а ще й вуглекислий газ, аміак та органічні сполуки.



Рис. 14.4. Орбіта та будова комети: голова, ядро), хвіст

Але найдокладніші результати вдалося отримати завдяки місії «Розетта» до комети Чурюмова–Герасименко. У листопаді 2014 р. космічний апарат доставив на поверхню ядра комети модуль з обладнанням для хімічного аналізу, а сам до кінця вересня 2016 р. був її супутником. Одна із знахідок «Розетти» – молекулярний кисень  $O_2$  в газовій оболонці біля ядра комети. До цього  $O_2$  було виявлено в космічному просторі лише двічі (в туманностях).

Походження ядер комет поки що лишається таємницею. Існує гіпотеза, що їх джерелом є хмара Оорта, яка лежить на межі Сонячної системи. Її поділяють на дві складові – внутрішню дископодібну і зовнішню сферичну. Відстань від Сонця до хмари Оорта оцінюють в 50000–100000 а. о., що становить майже чверть відстані до Проксими Кентавра – найближчої зорі до Сонця. Її зовнішня межа визначає гравітаційний кордон Сонячної системи. Хмара Оорта містить величезну кількість об'єктів різних розмірів (до кількох

десятьків км). Їх загальна маса за грубими оцінками у п'ятеро більша, ніж маса Землі. Зважаючи на відомості про речовину ядер комет, переважна більшість об'єктів хмари Оорта має складатися з льодів летких сполук – води, метану, етану, моноξειду вуглецю, ціаністого водню та аміаку.

Після кількох сотень обертів навколо Сонця комета втрачає леткі речовини й перетворюється в темне тіло, схоже на астероїд. Частинки, викинуті з ядра у хвіст, довгий час продовжують рухатись тією самою орбітою, що й комета. Іноді, перетинаючи орбіту Землі, вони потрапляють в земну атмосферу й утворюють в небі явище метеорів. Його також спричиняють метеороїди – тіла невеликого розміру (до 50 м), що рухаються в міжпланетному просторі й від часу до часу проникають в атмосферу Землі.



Рис. 14.5. Явище метеора (а) та болід (б) на небі Землі

Іноколи метеор може бути таким яскравим, що затьмарює собою найяскравіші зорі й навіть планети. В цьому разі його називають болідом. Буває, що він пролітає небом велику відстань, а потім розпадається зі своєрідним шумом на дрібні фрагменти, які згорають в атмосфері.

Метеороїд, що не «згорів» в атмосфері й досяг поверхні Землі, називають метеоритом. Залежно від маси тіла та швидкості, з якою воно входить в атмосферу, внаслідок його падіння може утворитися кратер. На Землі є метеоритні кратери різних розмірів (рис. 14.6) – від кількох метрів до сотень кілометрів у діаметрі. Їхня форма залежить від різних чинників: природи поверхні, в якій утворився кратер, фізичних і кінетичних параметрів тіла, що впало, геологічних і атмосферних зміни, що відбулися внаслідок такої події.

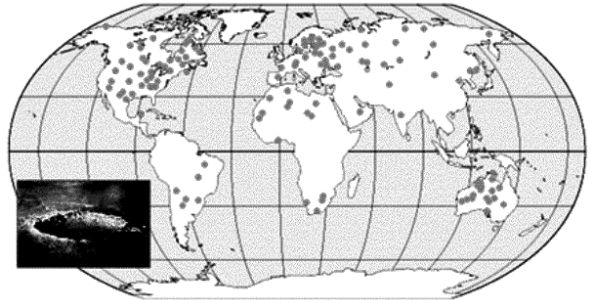
Рис. 14.6. Один з найвідоміших метеоритних кратерів на Землі – Аризонський кратер (поперечник 1200 м). Його відкрили 1891 р., а утворився він приблизно 50 000 років тому



Дуже давній і сильно зруйнований кратер, що виник від зіткнення комет і астероїдів з поверхнями планет і їхніх супутників, називають астроблемою.

Як порівняти з іншими тілами Сонячної системи, наприклад, з Місяцем або Меркурієм, астроблем на земній поверхні (рис. 14.7) мало. Тих, метеоритне походження яких вважають підтвердженим, є до 200, і лише 128 з них лежать на поверхні відкритими, інші приховано водами морів, льодовиками й рослинністю. Земля бідна на кратери з двох причин: наявність активної атмосфери, що руйнує кратери впродовж геологічного проміжку часу, й відновлення ґрунту через вулканічну й тектонічну діяльність.

Рис. 14.7. Астроблеми на поверхні Землі



Є астроблеми й на території України. Наприклад, Бовтиський кратер в Кропивницькій обл. 26 км в діаметрі й 600 м завглибшки віком 65 млн років; Оболонський кратер в Полтавській обл.

20 км в діаметрі й віком у майже 170 млн років або Іллінецька западина у Вінницькій обл. 7 км в діаметрі й віком близько 400 млн років.



Рис. 14.8. Астроблеми на території України

### 3. Проблема астероїдної небезпеки.

Астроблеми на Землі – наслідок її бомбардування космічними тілами в далекому минулому. Окремі науковці вважають, що масове зникнення динозаврів 65 млн років тому пов'язане з падінням велетенського метеорита, внаслідок чого на тривалий час змінився клімат і харчовий ланцюг цих тварин. Кратер Чиксулуб від падіння метеорита, з яким ототожнюють зникнення динозаврів, міститься на півострові Юкатан (Мексика). Дата його утворення збігається з часом зникнення динозаврів наприкінці крейдового періоду. Проте багато палеонтологів вважає, що падіння метеорита, навіть великого розміру, було лише однією з причин цього процесу.

змінився клімат і харчовий ланцюг цих тварин. Кратер Чиксулуб від падіння метеорита, з яким ототожнюють зникнення динозаврів, міститься на півострові Юкатан (Мексика). Дата його утворення збігається з часом зникнення динозаврів наприкінці крейдового періоду. Проте багато палеонтологів вважає, що падіння метеорита, навіть великого розміру, було лише однією з причин цього процесу.

Потенційно небезпечними для Землі космічними об'єктами вважають небесні тіла, орбіта яких пролягає на відстані меншій за 0,5 а. о. (близько 8 млн км), з розмірами (орієнтовно) від 30–50 м у поперечнику, падіння яких може спричинити катастрофу регіонального чи глобального масштабу.

Середня ймовірність зіткнення Землі з космічним об'єктом, залежно від його поперечника, така: тіло діаметром 1 м – кілька разів на рік; 10 м – один раз на 100 років; 100 м – один раз на 500 років; 1 км – один раз на 10 мільйонів років. Тіло діаметром 5–10 км падає на Землю, імовірно, однораз на 25–200 млн років, а понад 10 км – однораз на 500 мільйонів років.

Нині на території США і в інших країнах світу діють кілька систем пошуку небезпечних космічних тіл. Найвідоміші з них LINEAR, Space Watch і LONEOS. Розташовані вони на базі великих університетів в Аризоні, на Гавайських островах, у штаті Нью-Мексико та в інших місцях. Кілька обсерваторій з телескопами діаметром від одного до чотирьох метрів повсякчас сканують небесну сферу. Діють вони в автоматичному режимі.

### ТИПОВА ЗАДАЧА

Космічний корабель здійснив посадку на поверхню астероїда діаметром 1 км. Середня густина речовини астероїда  $\rho = 2,5 \text{ г/см}^3$  (її значення виражає формула  $\rho = 3M/4\pi R^3$ , де  $M$  і  $R$  – відповідно маса і радіус астероїда). З'ясуйте, чи зможуть астронавти об'їхати астероїд по екватору на всюдиході за 2 години?

Розв'язання: Щоб рухатися по поверхні астероїда, швидкість всюдихода має бути меншою, ніж перша космічна швидкість  $v$  (інакше він відірветься від поверхні астероїда). Час обльоту астероїда з цією швидкістю на низькій орбіті становить  $T = 2\pi R/v$ . Враховуючи, що  $v = \sqrt{GM/R}$ , отримуємо  $T = 2\pi\sqrt{R^3/GM}$ . Виразивши  $R$  через  $\rho$ , отримуємо:  $T = \sqrt{3\pi/G\rho}$ . Далі варто пригадати, що період обертання супутника на низькій орбіті навколо Землі, середня густина якої  $\rho_{\oplus} = 5,5 \text{ г/см}^3$ , становить 1,5 години. Тоді для планети, середня густина якої становить  $\rho$ , отримуємо:  $T = 3,5 \text{ год} \cdot \sqrt{\rho_{\oplus}/\rho}$  ( $\text{г/см}^3$ ). За допомогою цього виразу визначимо для астероїда  $T = 3,5\sqrt{2,5} = 2,2 \text{ год}$ . Отже, астронавти на зможуть об'їхати астероїд за 2 години.

### ВИСНОВКИ

До складу Сонячної системи належать карликові планети, а також малі тіла (астероїди, комети, метеороїди і міжпланетний пил).

## § 15. КОСМОГОНІЯ СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ

Космогонія – розділ астрономії, що вивчає походження й розвиток небесних тіл, зокрема і Сонячної системи в цілому та її окремих об'єктів.

Завдання космогонії – з’ясувати коли, з якої форми матерії і як утворився той чи інший астрономічний об’єкт. Які процеси передували та сприяли його виникненню, і яким буде його розвиток надалі.

### 1. Загальні параметри будови Сонячної системи.

У процесі вивчення тіл Сонячної системи та її загальної будови з’ясовано, що вона має низку параметрів (табл. 15.1), які в сукупності визначають її особливість.

Таблиця 15.1 Характерні особливості будови Сонячної системи

1.	Площини орбіт усіх планет і всіх супутників, за винятком супутників Урана, майже збігаються з площиною сонячного екватора.
2.	Усі планети обертаються навколо Сонця в одному й тому самому напрямку, що збігається з напрямком обертання Сонця навколо своєї осі. Цей напрямок обертання в астрономії називають прямим.
3.	Планети обертаються навколо своїх осей у прямому напрямку, за винятком Венери й Урана, які мають зворотне обертання.
4.	Еліптичні орбіти планет і супутників дуже близькі до кіл.
5.	Більшість супутників обертаються навколо своїх планет також у прямому напрямку.
6.	Планети поділяються на дві групи – планети земної групи (Меркурій, Венера, Земля, Марс) і планети-гіганти (Юпітер, Сатурн, Уран і Нептун). Обидві групи відмінні між собою розмірами і складом речовини.
7.	Середні відстані від Сонця для майже всіх планет підпорядковуються правилу Тиціуса–Бодє.
8.	Майже всі комети мають витягнуті орбіти (часто параболічні й навіть гіперболічні). Ці орбіти по-різному орієнтовані щодо площини екліптики.
9.	99,86 % маси Сонячної системи припадає на Сонце і лише 0,14 % – на всі інші тіла, однак 98 % її моменту загальної кількості руху припадає на планети.

### 2. Гіпотези утворення Сонячної системи.

В космогонії Сонячної системи за останні понад 350 років було сформульовано кілька різних гіпотез (Р. Декарт, І. Кант, П. Лаплас, Дж. Джінс та ін.), що намагалися пояснити походження нашої планетної системи. Серед них продуктивними виявилися гіпотези, які пояснювали походження Сонячної системи з газопилового диска, що обертався навколо Сонця. Поступова фрагментація такого диска врешті-решт привела до формування планет. Ці загальні уявлення існували в такому вигляді до середини ХХ ст. Далі почався новий етап вивчення питання походження Сонячної системи. У 1950-х роках

О. Ю. Шмідт і його послідовники докладно розробили гіпотезу Канта-Лапласа і на її підставі створили теорію походження нашої планетної системи.

Важливим елементом теорії стало уявлення про те, що в газопиловому диску, маса якого становила кілька відсотків від маси Сонця, на якомусь етапі його еволюції почався процес злипання окремих пилинок. Це привело до формування спершу невеликих, а потім дедалі більших згустків, які зіштовхуючись і злипаючись, утворили рій допланетних тіл різного розміру – планетезималей. Такі об'єкти стали будівельним матеріалом для планет, а найбільші планетезималі – їхніми «зародками».

Через високу температуру та видування легких елементів у центральній частині диска залишилися важкі тугоплавкі частинки – кам'янисті сполуки, залізо та інші метали. З них сформувалися планети земної групи. У віддаленіших зонах, де залишалось багато газів і води, виникли планети-гіганти та їхні супутники. У них спочатку, як і в планетах земної групи, утворилися ядра з кам'янистих сполук і металів, поверх яких потім нарощувались воднево-гелієві оболонки.

Під час формування планет-гігантів процес випадання речовини (акреція) на планети супроводжувався утворенням навколо них газопилових дисків. З цих дисків утворилися супутники та кільця.

Для пояснення перерозподілу моменту кількості руху між Сонцем і планетами припускають, що Протосонце мало відчутне магнітне поле. Його взаємодія з газом протопланетного диска, гальмувала власне обертання Протосонця і прискорювало обертання протопланетної речовини.

Особливості обертання Венери й Урана пояснюють тим, що на початку існування Сонячної системи вони пережили зіткнення з дуже масивними планетезималіями. Енергії зіткнення виявилось досить, щоб Уран «покласти на бік» і «заставити» його обертатися протилежно до напрямку руху довкола Сонця, а у Венери тільки змінити напрямок обертання.

Астероїди внутрішнього поясу та планетоїди поясу Койпера теж утворені з первинної речовини газопилової хмари, що через різні обставини не була увібрана великими планетами під час їхнього формування. Причому тверді кам'янисті тіла поясу астероїдів формувалися за орбітою Марса і густинами ближчі до планет земної групи. А планетоїди поясу Койпера з великим вмістом льодів різного походження формувалися у віддаленій зоні Сонячної системи.

Раніше вважали, що Марс свого часу гравітаційною силою захопив два астероїди з внутрішнього поясу, які стали його супутниками. Нині переважає думка, що вони утворилися з речовини, яку викинуло на орбіту з поверхні Марса внаслідок сильного зіткнення з іншим космічним тілом в ранню епоху Сонячної системи. Схоже, що й Місяць колись утворився на орбіті Землі з таких самих причин. Але деякі супутники планет-гігантів, що рухаються тепер навколо них не в прямому, а у зворотному напрямку, колись таки були астероїдами.

Якщо за часів О. Шмідта існування газопилового диска було лише припущенням, то в останні десятиріччя ХХ ст. такі диски відкрито в багатьох молодих зір, а наприкінці минулого століття відкриті перші планети та системи планет біля інших зір. Це стало новим етапом в розвитку ідей щодо походження Сонячної системи. Астрономи отримали змогу порівнювати системи планет. Воно показало суттєві відмінності між Сонячною системою й виявленими планетами біля інших зір. Наприклад, планети-гіганти типу Юпітера обертаються на дуже близьких відстанях від материнських зір (для порівняння, там, де в Сонячній системі рухаються Венера і Меркурій, а то й ще ближче). Такі факти нинішня теорія формування Сонячної системи не пояснює. Ще одна проблема – зі спостережень молодих зір виявлено, що протопланетні диски існують не більше за 10 млн років, далі їхня речовина розсіюється. Але формування планет Сонячної системи, згідно з попередніми уявленнями, тривало сотні мільйонів років. Це лише окремі проблеми, що виникли після відкриття планет біля інших зір.

Отже, теорія формування Сонячної системи нині в загальних рисах пояснює походження планет та інших об'єктів, але вимагає суттєвих уточнень деталей цього процесу.

А що буде з нашою планетною системою далі? Згідно з сучасними уявленнями, вона існуватиме практично в такому ж вигляді, як нині, ще принаймні кілька мільярдів років. Її зміни пов'язують з еволюцією Сонця, яке на прикінцевій стадії еволюції перетвориться в червоний гігант, випарує Меркурій і Венеру, а Земля стане непридатною для життя.

### НАВЧАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

- Поясніть, чому питання походження Сонячної системи досі є складним в астрономії?

### ВИСНОВКИ

Згідно з сучасними уявленнями, всі тіла нашої планетної системи, зокрема і Сонце, утворилися з велетенської газопилової хмари шляхом її стискання, акреції та дефрагментації приблизно 4,6 млрд років тому.

## ТЕМА 2.2. ФІЗИКА ЗІР І МІЖЗОРЯНОГО СЕРЕДОВИЩА

### § 16. ПОНЯТТЯ ЗОРІ. НАЙБЛИЖЧА ЗОРЯ – СОНЦЕ

Здавна зорі були для наших пращурів таємничими незмінними небесними світилами. Водночас свою залежність від Сонця люди зрозуміли дуже давно,

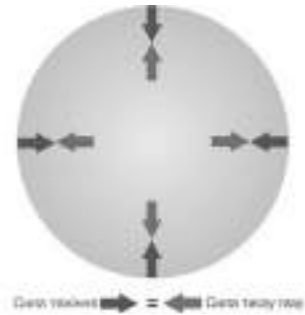


адже практичний досвід свідчив – без його тепла життя неможливе. Тому не дивно, що майже всі народи світу поклонялися йому та обожнювали Сонце.

### 1. Зоря як небесне тіло.

Самосвітна газова куля, утримувана в стані рівноваги власною гравітацією і внутрішнім тиском, у надрах якої відбуваються (або колись відбувались) реакції термоядерного синтезу – ось що таке зоря. В надрах зір при температурах у десятки мільйонів кельвінів (10 млн – 40 млн К) і величезних густинах тиск становить мільярди атмосфер. За таких умов зоря може перебувати в стаціонарному стані лише завдяки тому, що в кожному її прошарку внутрішній тиск газу врівноважений дією гравітації. Такий стан називають гідростатичною рівновагою.

Рис. 16.1. Існування зорі можливе за умови балансу двох сил: гравітації та сили газового тиску



Для стаціонарного стану зорі властива не лише гідростатична (механічна) рівновага, але й теплова. Теплова рівновага означає, що всю енергію, яка утворюється в надрах зорі, вона випромінює в навколишній простір. Якщо тепловідведення перевищить генерацію енергії, зоря почне стискатися, а отже, розігріватися. Це прискорить термоядерні реакції в надрах, виробіток енергії збільшиться і тепловий баланс знову відновиться. Зорі є стійкими системами, що самі себе регулюють.

### 2. Загальна будова та фізичні параметри Сонця.

Доступна для прямих спостережень поверхня Сонця – це нижній шар сонячної атмосфери, товщина якого становить приблизно 300 км. Цей шар Сонця – фотосфера (у перекладі з грец. – «сфера світла») – у вигляді світла й тепла випромінює практично всю енергію, яку виділяє наше світило. Температура фотосфери в середньому становить 6000 градусів за шкалою Кельвіна і зростає з глибиною.

Тривалий час було незрозумілим, чому в Сонця – вогняної газової кулі – є така різка межа, адже край сонячного диска окреслений дуже чітко? Виявилось, до Землі видиме світло приходять тільки з фотосфери – з більшої глибини внаслідок непрозорості речовини верхніх шарів воно не доходить. Оскільки 300 км фотосфери майже ніщо у порівнянні з розмірами Сонця, ми й бачимо його край дуже чітким.

Фотосфера Сонця неоднорідна, вона має зернисту структуру (рис. 16.2). Ці «зерна», розділені темними вузькими проміжками, – гранули з розмірами в кілька сотень кілометрів – повсякчас виникають і розпадаються. Існують вони лише кілька хвилин, і тому складається враження, що поверхня Сонця

безупинно кипить. Таке кипіння поверхні нашої зорі – наслідок конвекції сонячної речовини, а гранули є вершинами конвективних потоків. Розжарений газ, піднявшись із глибини Сонця до поверхні, охолоджується і знову опускається в надра.

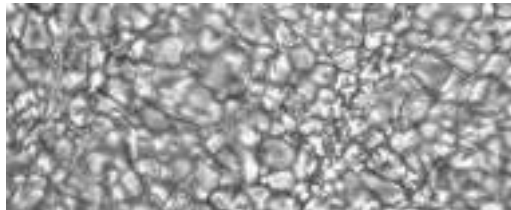


Рис. 16.2. Фотосфера Сонця (знімок з високим просторовим розділенням)

Крім гранул, у фотосфері помітні утворення більших розмірів. Це – супергрануляція. Її складові, що нагадують бджолині стільникові комірочки, мають розміри в тисячі кілометрів. Супергранули існують у безупинно змінній фотосфері набагато довше гранул – приблизно добу. Такої стійкості їм надає пов'язане з кожною коміркою магнітне поле.

Гранули й супергранули на поверхні Сонця – це постійні утворення, тоді як інші деталі фотосфери – плями й факели – виникають лише від час до часу (§ 18).

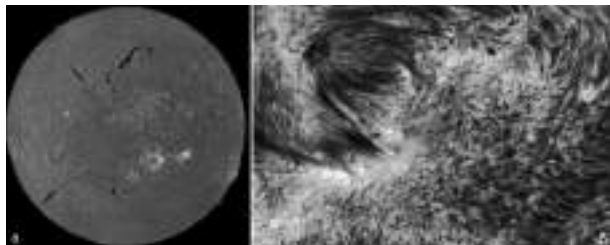


Рис. 16.3. Хромосфера Сонця: загальний вигляд (а) та її тонка структура (б)

Над фотосферою лежить хромосфера (у перекладі з грец. – «забарвлена сфера»), шар розрідженого газу, що простягається на висоту 10–14 тис. км. Свою назву вона отримала за властивий їй червоний колір (рис. 16.3 а). Хромосферу можна спостерігати на початку й наприкінці повного сонячного затемнення, коли червоно-оранжеве кільце на мить обрамляє місячний диск. Нині з допомогою спеціальних приладів є змога спостерігати й вивчати хромосферу Сонця в будь-який час, а не тільки під час затемнення.

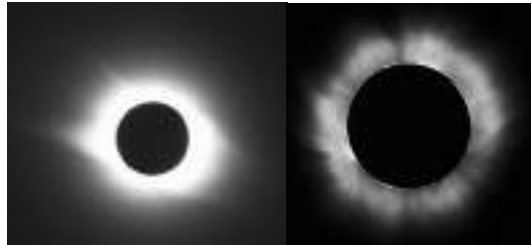
Сонячна хромосфера повсякчас перебуває в русі: її можна порівняти з великою кількістю дрібних фонтанів. Окремі струмені розжареного газу, спікули, піднімаються на висоту до 10 тис. км, згинаються й нахилиються, наче язички полум'я над вогнищем (рис. 16.3 б).

Під час повних сонячних затемнень можна спостерігати не лише хромосферу, але й сонячну корону – зовнішній, найпротяжніший шар атмосфери Сонця. З допомогою спеціального телескопа – коронографа, в фокусі об'єктива якого розміщено диск («штучний місяць»), корону, як і хромосферу, можна спостерігати з поверхні Землі не лише під час затемнення.

Вигляд сонячної корони залежить від сонячної активності. В роки її максимуму корона дуже розлога й тягнеться іноді на кілька сонячних радіусів від Сонця, а в роки мінімумів вона, зазвичай, має менші розміри й витягнута вздовж сонячного екватора.

Будова корони не однорідна: в ній можна спостерігати промені, дуги, окремі згущення речовини. Вигляд корони та її деталі нерозривно пов'язані з нижніми шарами атмосфери, а також з явищами, що там відбуваються. Вивчення фотографій, одержаних під час різних затемнень, допомогло встановити, що зовнішній край корони, тягнучись на великі відстані від Сонця, наче випаровується в міжпланетний простір.

Рис. 16.4. Сонячна корона у рік максимуму (ліворуч) і мінімуму (праворуч) активності Сонця



Сонячна корона є джерелом безупинного плазмового потоку, що рухається аж до околиць нашої планетної системи. Цей потік, який складається з великої кількості протонів, електронів, ядер гелію та інших хімічних елементів, називають *сонячним вітром*. Поширюючись далеко за орбіти планет-гігантів, він утворює велетенську геліосферу. Зона, де частинки через взаємодію з розрідженим міжзоряним газом втрачають свою кінетичну енергію й сонячний вітер припиняється, називається геліопаузою, і саме нею зазвичай позначають межу сфери впливу Сонця.

В атмосфері Сонця, крім плям і грануляції, часто можна спостерігати факели (ділянки з підвищеною температурою), протуберанці (пасма сонячної речовини), а також спалахи – доволі швидкі й енергетично дуже потужні явища. Всі ці утворення відносять до проявів активності Сонця, що змінюється циклічно.

Внутрішня будова Сонця. В центрі світила міститься ядро, розмір якого становить 0,3 від радіуса Сонця, і в якому відбуваються ланцюгові термоядерні реакції. На відстані до 0,7–0,8 радіуса Сонця ядро оточує зона променистого переносу енергії і далі – конвективна зона. Над ними лежить зовнішня оболонка Сонця – атмосфера.

Хоча ядро Сонця прямо побачити не можна, фізичні умови в ньому відомі досить точно. Температура речовини ядра становить  $15 \cdot 10^6$  К, а густина – майже  $100 \text{ г/см}^3$ . Саме такі фізичні умови потрібні для того, щоб відбувалися термоядерні реакції.

Фізичні параметри Сонця. Сонце складається головню з водню, на частку якого припадає майже 71 % усієї маси світила. Близько 27 % маси Сонця становить гелій, а 2 % – це інші хімічні елементи, серед яких є вуглець, азот, кисень, метали.

Фізичні параметри Сонця для зручності їх сприйняття подано в таблиці 16.1.

Таблиця 16.1. Фізичні параметри Сонця

Маса	$\approx 2 \cdot 10^{30}$ кг
Радіус (екваторіальний), R	700 000 км
Середня густина, $\rho$	1409 кг/м <sup>3</sup>
Площа поверхні	$6,1 \cdot 10^{18}$ м <sup>2</sup>
Температура поверхні	$\approx 6000$ °К
Температура ядра	$\approx 15 \cdot 10^6$ °К
Світність, L	$3,85 \cdot 10^{26}$ Вт

### ТИПОВА ЗАДАЧА

З поверхні Землі диск Сонця видно під кутом  $0,5^\circ$ , а відносно велика фотосферна гранула – приблизно під кутом  $\beta = 0,6''$ . Знайдіть розміри  $l$  такої гранули в км.

**Розв'язання:** Візьмемо значення  $R_\odot = 7 \cdot 10^5$  км, цей радіус видно із Землі під кутом  $\alpha = 15'$ . Далі з прямокутних трикутників отримуємо співзалежність:  $\beta / \alpha = l / R_\odot$ . Звідси  $l = \beta / \alpha \cdot R_\odot = 467$  км.

### НАВЧАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

- Як зі спостережень за диском Сонця встановити, що воно обертається навколо осі?

### ВИСНОВКИ

Зоря – самосвітна газова куля, що існує завдяки балансу двох сил: гравітації, яка утримує газ від розширення, а отже, й розпорошення в космічному просторі, та сили газового тиску, що протидіє гравітації й не дозволяє їй стиснути газ до надщільного стану.

## § 17. ДЖЕРЕЛО ЕНЕРГІЇ СОНЦЯ

Дослідникам природи дуже довго не вдавалося зрозуміти, яке джерело енергії ось уже майже 5 млрд років дозволяє Сонцю так потужно світити.

## 1. Історія виявлення джерела енергії Сонця.

Перше наукове пояснення джерела енергії Сонця (і зір загалом) спробували зробити Г. Гельмгольц і В. Томсон (лорд Кельвін) в середині XIX ст. Вони обчислили кількість енергії, яка виділяється під час гравітаційного стискання зорі, коли потенціальна енергія її мас, що падають до центра, перетворюється в кінетичну, а отже, й у внутрішню енергію речовини. Від цього світність і температура зорі мають зростати.

Час гравітаційного стиснення легко оцінити. Зміна потенціальної енергії маси  $M$  при її переміщенні на відстань  $R$  під дією поля тяжіння, що створює прискорення  $g$ , становить  $MgR$ . Візьмемо в якості  $g$  його значення  $GM/R^2$  в зовнішніх шарах зорі й отримаємо, що повна енергія зорі становить  $GM^2/R$ . Отже, за рахунок гравітації зоря матиме світність  $L$  лише впродовж часу  $t = GM^2/RL$ . Для Сонця він становить 1,6 млн років, що занадто мало, зважаючи на його вік. Енергія від гравітаційного стиснення не може тривалий час підтримувати існування Сонця (і зорі загалом) як стаціонарного об'єкта.

У 20-х роках XX ст. англійський астроном Артур Еддінгтон висловив припущення про те, що в центрі Сонця вивільняється ядерна енергія, і саме вона забезпечує його світіння. Фізики-атомники з цим не погоджувалися. Вони вважали, що температура в надрах зір мала для вивільнення ядерної енергії. Також було не ясно, як можна «змусити» взаємодіяти частинки з однаковим зарядом. Наприклад, ядра водню (протони) згідно із законами електростатики мають відштовхуватися.

Цю, на перше око неподолану, проблему вдалося вирішити. Було відкрито сильну ядерну взаємодію, що поширюється як на нейтрони, так і на протони, але яка діє лише на дуже малій відстані. Протони, рухаючись з великими швидкостями, можуть зблизитися так, що потраплять під вплив сильної ядерної взаємодії. Температури в ядрах зір лежать в межах від 10 млн до 40 млн К, а цього якраз досить, щоб протони досягали швидкостей, за яких можливе їхнє злиття, як і твердив Еддінгтон.

Наприкінці тридцятих років XX ст. фізики Г. Бете і К.Ф. фон Вейцзеккер незалежно один від одного теоретично з'ясували послідовність ядерних перетворень, що спонтанно можуть відбуватися в надрах зір. Лише після цього було доведено, що джерелом енергії Сонця є реакції термоядерного синтезу.

## 2. Фізичні процеси в ядрі Сонця.

В надрах Сонця відбувається термоядерна реакція перетворення водню в гелій, яка має назву протон-протонної, бо починається з тісного зближення двох протонів – ядер атомів водню. Щоправда, не кожна зустріч двох протонів стає початком ядерної реакції. Протягом мільярдів років протон може раз у раз зіштовхуватися з іншими протонами, але так і не вступити у ядерні перетворення. Але якщо в момент тісного зближення двох протонів відбудеться ще одна, дуже малоімовірна подія – розпад протона на нейтрон,

позитрон і нейтрино (такий процес називається бета-розпадом), то протон з нейтроном об'єднуються в ядро атома важкого водню – дейтерію.

Ядро дейтерію (дейтон) своїми властивостями схоже на ядро водню, тільки важче за нього. Але на відміну від протона, дейтон у надрах Сонця довго існувати не може. Вже через кілька секунд, зіштовхнувшись з іще одним протоном, дейтон приєднує його до себе, випромінює гамма-квант і стає ядром ізотопу гелію, в якого два протони зв'язані не з двома нейтронами, як у звичайного гелію, а тільки з одним. Раз у кілька мільйонів років ядра легкого гелію наближаються одне до одного так близько, що можуть об'єднатися в ядро звичайного гелію, «відпустивши на волю» два протони.

Отже, внаслідок ланцюжка перетворень виникає нове ядро, що складається з двох протонів і двох нейтронів – ядро гелію. Схематично це можна відобразити так:  $p + p \rightarrow d + e^+ + \nu$  > далі >  $d + p \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$  > далі >  ${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + 2p$ , або загалом:  $4 {}^1\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu_e$  + енергія. Окрім цього, продуктами реакції є два позитрони ( $e^+$ ), два нейтрино ( $\nu_e$ ) та енергія у вигляді гамма-квантів.

Виділення енергії зумовлене тим, що загальна маса чотирьох ядер водню, які беруть участь у реакції синтезу, трохи перевищує сумарну масу продуктів реакції (ядра гелію та інших чотирьох легких частинок). Але спеціальна теорія відносності Айнштайна вказує на те, що втрата в масі має бути компенсована виграшем в енергії. Вони пов'язані відомою формулою Айнштайна  $E = Mc^2$ .

У реакції синтезу ядер гелію втрачена маса еквівалентна енергії 26,72 МеВ (МеВ, або 1 млн електронвольт, – одиниця енергії в атомній фізиці, одна кіловат-година – одиниця, яку широко використовують для виміру електроенергії, дорівнює приблизно  $2 \cdot 10^{19}$  МеВ). Іншими словами, частина маси, яка переходить в енергію, становить 0,7 % маси усього водню, що перетворюється в гелій.

З кожного грама водню, що бере участь у реакції, виділяється  $6 \times 10^{11}$  Дж енергії. На Землі такої кількості енергії вистачило б для того, щоб нагріти від температури 0 °С до точки кипіння 1000 м<sup>3</sup> води! Отже, головним паливом на Сонці є водень.

Повну потужність випромінювання Сонця визначають за формулою:

$$w_{\odot} = 4\pi a_{\odot}^2 q_{\odot} \quad (17.1),$$

де  $a_{\odot}$  – середня відстань Землі від Сонця (одна астрономічна одиниця),  $q_{\odot} = 1,37 \cdot 10^3$  Вт/м<sup>2</sup> – сонячна стала – кількість сонячної енергії  $q$ , що падає за одиницю часу на одиницю поверхні, перпендикулярної до променів, за межею земної атмосфери на відстані 1 а. о. від Сонця.

Народжені в ході реакції позитрони та гамма-кванти передають енергію навколишньому газу, а нейтрино без перешкод покидають Сонце.

Енергія гамма-квантів, що утворилися внаслідок ядерних реакцій в ядрі Сонця, в мільярди разів більша за енергію квантів видимого світла, а довжина хвилі дуже мала. Гамма-кванти покидають ядро, але під час подорожі назовні в товщі Сонця атоми речовини кожний квант багато разів поглинають і одразу випромінюють новий. Під час перевипромінювання частіше за все

виникає не один, а кілька квантів, з меншими енергіями. Тобто гамма-кванти дробляться на менш енергійні – спочатку виникають рентгенівські, що дробляться на ультрафіолетові, а ті своєю чергою на кванти видимого й інфрачервоного світла.

У підсумку найбільше енергії Сонце випромінює у видимому світлі, і не даремно наше око чутливе саме до цього виду електромагнітних хвиль. Шар Сонця, де передача енергії здійснюється через поглинання й випромінювання речовиною квантів електромагнітних хвиль, називають зоною променистої рівноваги або зоною променистого переносу. В цілому для того, щоб дістатись від сонячного ядра до поверхні, кванту енергії потрібно майже мільйон років.

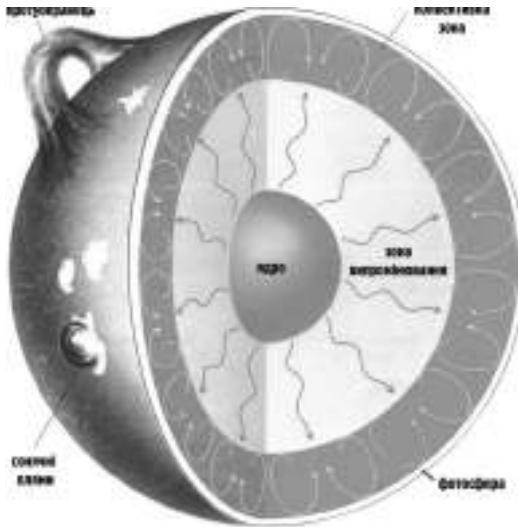


Рис. 17.1. Внутрішня будова Сонця

Мандруючи до поверхні товщею Сонця, кванти зрештою опиняються в прошарку, де в умовах все менших температури й тиску речовина стає непрозорою. Тут домінує інший механізм переносу енергії – конвекція: гарячі потоки газу підіймаються догори, віддають свою енергію навколишньому середовищу й, охолонувши, опускаються донизу.

Верхня межа конвективної зони має вигляд дрібних гранул, що змінюються впродовж кількох хвилин.

На сонячній поверхні їх можна бачити навіть у телескоп зі скромними можливостями.

Про внутрішню будову Сонця відомо не стільки зі спостережень, як через побудову теоретичних моделей внутрішньої будови зір. Нині їх створюють з використанням можливостей дуже потужних комп'ютерів. Та все одно ще є багато невідомого.

Наприклад, стандартна модель зоряної еволюції вказує на те, що з віком зорі сонячного типу мають світити все яскравіше. Це означає, що Сонце 4 млрд років тому мало випромінювати на третину менше енергії, ніж тепер. Розрахунки показують, що в такому разі на Землі було б досить холодно, і вся вода на її поверхні повністю б замерзла. Але геологічні знахідки свідчать: рання Земля мала вологий і теплий клімат, який сприяв виникненню життя. Незважаючи на кілька гіпотез, запропонованих для пояснення цієї проблеми (в астрономії її називають парадоксом слабкого молодого Сонця), питання ще не вирішене.

## ВИСНОВКИ

- Головне «паливо» Сонця – водень. У ядрі Сонця відбуваються термоядерні реакції перетворення водню в гелій, які є джерелом енергії нашої зорі.

## § 18. СОНЯЧНА АКТИВНІСТЬ І ЇЇ ПРОЯВИ НА ЗЕМЛІ

Сонце – доволі стабільна зоря. Але наша цивілізація створює комп'ютеризовані системи управління, GPS-навігацію, транспортні засоби, системи зв'язку тощо, чутливі до зовнішніх факторів, зокрема до змін в докільді, зумовлених активністю Сонця.

### 1. Поняття сонячної активності та її прояви в атмосфері Сонця.

Плями, факели, активні та еруптивні протуберанці, сонячні спалахи (рис. 18.1) називають активними утворами на Сонці, а їх появу й розвиток – проявами сонячної активності. Багаторічні спостереження Сонця показали, що в середньому впродовж кожних майже 11-ти років кількість всіх проявів сонячної активності, поступово збільшується, а потім поступово спадає. Цей період назвали *11-річним циклом сонячної активності*.



Рис. 18.1. Активна ділянка у фотосфері Сонця

Про наявність плям на Сонці знали ще з античних часів, хоча послідовники Арістотеля не вірили в їх реальність. З джерел давнього Сходу відомо, сонячні плями спостерігали за сотні років до винаходу телескопа. Г. Галілей, виконуючи перші телескопічні спостереження,

відкрив ці утворення знову. Систематично спостерігати сонячні плями почали приблизно в середині XVIII ст. Ці спостереження, серед іншого, спонукали науковців Середньовіччя до перегляду аристотель-птолемеевої моделі Всесвіту, згідно з якою зорі – це ідеальні неподільні сфери.

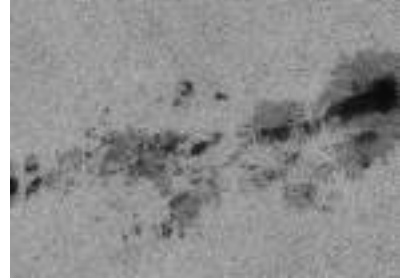
Сонячні плями інколи мають такі розміри (40000–50000 км), що їх можна бачити неозброєним оком. Вони можуть з'являтися поодиночці, але здебільшого – групами. Крім того, плями зміщуються поверхнею Сонця і самі собою, і набагато сильніше через його обертання. Як кожне тіло, що складається з газів, наша зоря обертається нерівномірно: швидше в близьких до екватора зонах (період обертання становить 27 діб), ніж у полярних (майже 32 доби).

У сонячних плямах відбуваються направлені рухи речовини: темними волокнами півтіні газ витікає з них назовні, а світлими волокнами навпаки – з навколишньої фотосфери гаряча речовина тече в напрямку до плями. Найважливішою особливістю плям і причиною їх появи є наявність у них сильних магнітних полів. Магнітні силові трубки, що внаслідок конвектив-



них рухів речовини формуються в підфотосферних шарах Сонця, спливають у фотосферу. Потужне магнітне поле на деякий час гальмує винос гарячої речовини з глибших шарів, що й спричиняє охолодження цієї ділянки фотосфери. Існують сонячні плями від кількох днів до кількох місяців.

Рис. 18.2. Типові сонячні плями мають розміри в кілька десятків тисяч кілометрів, діаметри найбільших плям перевищують 200 тис км



Факели – повсякчасні супутники плям – утворення світліші (яскравіші), ніж фотосфера, а отже, й гарячіші. Якщо група плям перебуває поблизу краю сонячного диска, то зазвичай навколо неї видно безліч факелів – факельне поле. Факели – це місця, де на поверхню Сонця піднімається гарячіша речовина, ніж в інших ділянках фотосфери. Майже завжди факели виникають трохи раніше плям й існують в середньому втричі довше, ніж вони.

На краю сонячного диска в спеціальний телескоп можна побачити протуберанці (від лат. «здуваюся») – гігантські вогняні струмені, що виникають у сонячній короні або проникають в неї з хромосфери.

Рис. 18.3. Протуберанці схожі на полум'я або величезні хмари й утворюють характерні арки та петлі. Речовина протуберанців поглинає й розсіює випромінювання, що йде знизу, тому на яскравому диску Сонця їх видно як темні волокна



Протуберанці поділяють на спокійні, що існують кілька тижнів або навіть місяців, й активні, які живуть набагато менше. Спокійні протуберанці руйнуються повільно, й речовина, викинута в простір, поступово «тане» подібно до земних хмар. Активні протуберанці швидко піднімаються над сонячним диском і швидко осідають донизу.

Найпотужнішим проявом сонячної активності є спалахи – нестационарні процеси, що охоплюють всі шари атмосфери Сонця. Найслабкіші спалахи тривають 5–10 хв, а найсильніші бушують упродовж кількох годин.

Початок великого спалаху зазвичай має вигляд різкого підвищення яскравості невеликої ділянки поверхні Сонця у світлі хромосферних ліній, зокрема в лінії водню  $H_{\alpha}$ . Потім він охоплює дедалі більший простір – десятки мільйонів квадратних кілометрів. При цьому в ділянці спалаху вивільняється в 100–1000 разів більше енергії, ніж за той самий проміжок часу з такої

самої площі незбуреної поверхні. Сонячний спалах часто спричиняє викид у міжпланетний простір прискорених до високих енергій заряджених частинок, а також розігрів речовини, появу жорсткого електромагнітного випромінювання й потужного випромінювання в радіодіапазоні. Найпотужніші сонячні спалахи навіть породжують сонячні космічні промені, серед яких, крім протонів і електронів, трапляються ядра хімічних елементів, присутніх в атмосфері Сонця. Частинки сонячних космічних променів рухаються в міжпланетному просторі з майже світловими швидкостями.

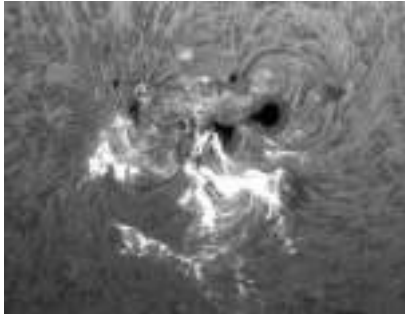


Рис. 18.4. Сонячний спалах. Теоретичні моделі вказують на те, що головна причина спалахів – швидкі зміни в потужних магнітних полях активних зон на поверхні Сонця, а основний спалаховий процес, як стрімкий викид енергії, накопиченої магнітним полем активної зони, розгортається у верхній хромосфері й нижній короні

Незважаючи на видиме розмаїття, поява активних утворень має спільну причину – різку зміну напруженості магнітного поля в деяких ділянках поверхні Сонця.

Німецький астроном-аматор Г. Швабе, який 17 років поспіль виконував регулярні спостереження сонячних плям, зауважив: їх кількість зменшується до мінімуму і збільшується до максимального значення за період майже в 10 років. У максимумі активності на сонячному диску може бути 100 і більше плям, а в мінімумі – лише кілька або жодної.

Швейцарський астроном Р. Вольф уточнив: середній період зміни кількості плям становить не 10, а 11 років. Він запропонував для кількісної оцінки активності Сонця використовувати умовну величину, названу пізніше числом Вольфа  $W$ .

$$W = 10g + f \quad (18.1),$$

де  $g$  – кількість груп плям, при цьому як групу вважають також кожен окрему пляму або пору  $f$  – повна кількість плям на видимій півкулі Сонця.

Аналізуючи спостереження плям з початку телескопічних досліджень, англійський астроном У. Маундер 1893 р. виявив, що з 1645 р. по 1715 р. на Сонці взагалі не було плям. З'ясувалося, що таке траплялося і в далекому минулому. Саме на маундерівський мінімум припав період найхолодніших зим в Європі за останнє тисячоліття.

Головні плями в усіх групах однієї півкулі Сонця (перші в напрямку його обертання) впродовж одного циклу активності мають однакову полярність магнітного поля, наприклад, північну, а ті, що замикають групу, – південну. Водночас в другій півкулі полярність плям протилежна. З початком нового циклу вона змінюється в обох півкулях. Тому «істинний» сонячний цикл

з поверненням старої магнітної полярності головних плям насправді охоплює не 11, а 22 роки (в середньому).

Цикл сонячної активності називають 11-річним, проте за час регулярних спостережень він змінювався від 7 до 17 років. Цикли позначають номерами, які їм приписують протягом майже 300 років. Найпершим є цикл 1755–1766 років, бо саме з нього Вольф почав реєструвати періоди сонячної активності.

## 2. Вплив сонячної активності на Землю.

Під дією сонячного вітру магнітне поле Землі, що має форму диполя, на денному боці притискається до її поверхні, утворюючи майже сферичну поверхню з радіусом в 10–15 земних діаметрів. На нічному боці магнітні силові лінії витягаються у протилежному від Сонця напрямку, утворюючи шлейф у сотні тисяч кілометрів завдовжки, спрямований від Сонця. Особлива конфігурація силових ліній геомагнітного поля створює для заряджених частинок пастку. Захоплені нею частинки сонячного вітру (переважно електрони, протони й альфа-частинки) утворюють навколо Землі радіаційні пояси, в яких вони можуть існувати від 10 до 100 років. Але згодом частинки втрачають енергію, розсіюються, й їх поглинає атмосфера.

Під час хромосферного спалаху на Сонці відбувається викид у міжпланетний простір потоку заряджених частинок, які вже через 10–12 год. досягають орбіти Землі. Під тиском магнітного поля, створеного таким потоком, на денному боці Землі магнітосфера стискається ще більше, внаслідок чого напруженість геомагнітного поля збільшується. Потім магнітосфера розширюється, й напруженість геомагнітного поля зменшується. Так виникає одноразовий сплеск геомагнітного збурення, який триває близько години.

Якщо спалах на Сонці потужний і тривалий, то потік частинок у сонячному вітрі довго не вичерпується. В магнітосферу надходить один імпульс за іншим, напруженість геомагнітного поля багато разів різко й неправильно змінюється, і, замість одного короткого сплеску, відбувається їх серія. Таку швидко й неправильно зміну напруженості магнітного поля Землі називають магнітною бурєю. Магнітні бурі можуть тривати від кількох годин до кількох діб. Найчастіше вони трапляються поблизу максимуму 11-річного циклу сонячної активності.

Магнітні бурі впливають на техносферу й біосферу планети, і часом вони спричиняють дуже негативні наслідки. Зазнають аварій космічні апарати і їхнє бортове обладнання; виходить з ладу електроніка авіалайнерів, що здійснюють польоти поблизу полюсів; перегорають електротрансформатори, що призводить до аварій в лініях електропередач; посилюється корозія металевих труб магістральних нафто- і газопроводів тощо.

У різні роки, залежно від активності Сонця, об'єм клітковини, яку нарощують дерева, буває більшим чи меншим. Такий зв'язок є опосередкованим до зміни клімату планети й кількості опадів, що випадають у різні роки. На-

рошена клітковина відкладається в стовбурах дерев у вигляді річних кілець. Аналізуючи товщину річних кілець дерев-довгожителів, наприклад, секвоїї, вдалося прослідкувати цикли сонячної активності за останні 7500 років і виявити 18 випадків, коли Сонце було або спокійнішим, або активнішим, ніж завжди.

Потужні сонячні спалахи і спричинені ними магнітні бурі можуть змінювати циркуляцію земної тропосфери, а також впливати на поведінку фізико-хімічних систем (зокрема, колоїдних розчинів) і живих організмів. Вимірювання часу осідання оксихлориду вісмуту показали, що в період сильних сонячних спалахів цей час помітно збільшується.

Спалахи спричиняють зміни в стані людини. Медична статистика показує: в дні, коли відбуваються сильні спалахи, у півтора – два рази збільшується кількість захворювань серцево-судинної системи і кількість смертей з цієї причини. Відомо також про кореляцію між появою спалахів і зростанням кількості транспортних пригод.

Проте, сучасні знання про сонячно-земні зв'язки мають емпіричний характер і спираються, головню, на статистичні дані. Фізичні механізми таких зв'язків на рівні теоретичних узагальнень вивчені мало. Але феномен «космічної погоди» нині привертає увагу багатьох дослідників, її визнано одним із важливих завдань, що вимагає докладного вивчення.

### НАВЧАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

- Підготуйте, скориставшись додатковими джерелами інформації, усну доповідь на тему «Космічна погода».

### ВИСНОВКИ

З періодом близько 11 років на поверхні Сонця збільшується кількість плям, сонячних спалахів, а також інших активних утворень, що дозволяє говорити про максимуми й мінімуми його активності. Сонячна активність впливає як на живу, так і неживу природу нашої планети.

## § 19. ЗОРІ ТА ЇХ КЛАСИФІКАЦІЯ

Астрономії знадобилось багато часу, щоб з'ясувати роль зір у житті людини. Ця роль виявилася значно глибшою, ніж передбачали наші пращури.

### 1. Фізичні параметри зір.

Головні параметри зір – маса  $M$ , радіус  $R$  і світність  $L$ . Світність – це повна кількість енергії, яку випромінює зоря у простір з усієї своєї поверхні за одиницю часу. Світність залежить від температури на поверхні зорі та її радіуса:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4 \quad (19.1)$$

Числові значення маси, радіуса й світності зір прийнято виражати в одиницях маси, радіуса й світності Сонця. Світність зорі пов'язана з її абсолютною зоряною величиною співзалежністю:

$$M = 4,77 - 2,51g_L \quad (19.2),$$

де  $L$  – світність в одиницях світності Сонця.

Маси відомих зір лежать у межах від 0,01–0,03 до 60–70 сонячних мас. Імовірно існують зорі, маса яких становить 100 чи навіть 200 мас Сонця. Важливим є те, що маса зорі визначає всі інші її параметри – від температури в надрах і на поверхні до тривалості існування. І як зоря завершить своє життя, також визначає маса.

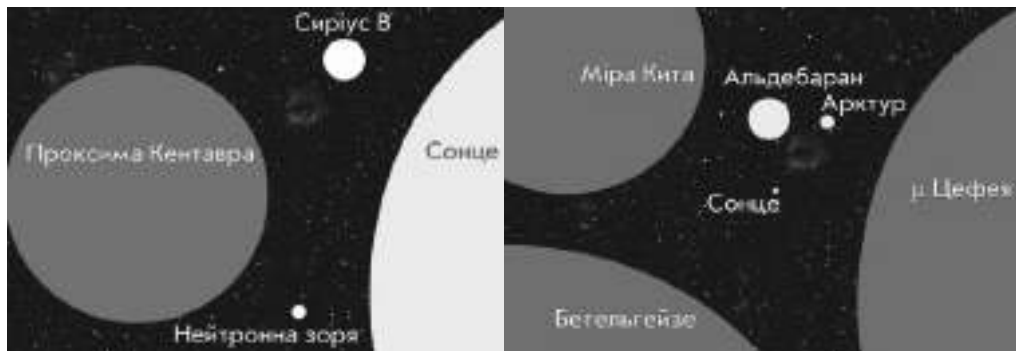


Рис. 19.1. Відмінність зір у розмірах: Сонце й карлики (а); Сонце й гіганти (б)

У своїх розмірах зорі демонструють значно більше розмаїття: від 10 км до кількох тисяч радіусів Сонця. Наприклад, зоря Бетельгейзе, опинившись на місці Сонця, поглинула б собою частину Сонячної системи разом з планетою Марс. Зате нейтронних зір помістилося б на території, наприклад, Києва до трьох десятків.

Ще більшу розбіжність мають світності зір. Для нормальних зір вони лежать у межах від  $10^{-5}$  до  $10^6$  світностей Сонця. Наприклад, світність найближчої до нас зорі Проксима Кентавра (червоний карлик) становить 0,000056 світності Сонця. І водночас одна із зір в сузір'ї Киля (блакитний надгігант) світить, як мільйон наших Сонць разом узятих.

За фізичними властивостями речовини в надрах всі відомі зорі поділяють на три основні групи: нормальні зорі, білі карлики й нейтронні зорі. Водночас нормальні зорі можуть бути й червоними карликами, й такими, як наше Сонце, і блакитними гігантами й надгігантами.

До нормальних належить абсолютна більшість усіх спостережуваних зір у Всесвіті. Їх речовина – це іонізований газ (плазма), який можна описати законами ідеального газу. Його тиск тим більший, що вища його температура

й менший об'єм, в якому він зосереджений. Знаючи фізичні закони, яким підкоряється ідеальний газ, астрономи розраховують густину, тиск і температуру в надрах зір, що важливо для розуміння їхньої будови. Середня густина нормальних зір порівняна з густиною води. Наприклад, для Сонця вона становить  $1,4 \text{ г/см}^3$ .

Натомість білі карлики і ядра деяких червоних гігантів та надгігантів мають таку велику густину газу, що він перебуває у «виродженому» стані. За такого стану ядра атомів в одиниці об'єму запаковані набагато щільніше, ніж у звичайному газі, а тиск газу не залежить від його температури. Тобто він є високим, навіть якщо температура газу спадає до нуля. Середня густина білих карликів набагато вища за густину нормальних зір – у середньому  $10^6 \text{ г/см}^3$ , а їхні розміри значно менші розмірів Сонця й порівняні з розмірами Землі.

Речовина нейтронних зір складається переважно з електрично нейтральних елементарних частинок – нейтронів, які разом з протонами входять до складу атомних ядер. Нейтронні зорі мають розміри 9–10 км, а їхні значення густин порівняні з густиною атомного ядра і більші за  $10^{12} \text{ г/см}^3$  ( $10^6 \text{ т/см}^3$ ).

## 2. Спектри і спектральні параметри зір.

Зоряні спектри почали досліджувати на початку XIX ст. Застосування фотографії (з другої половини XIX ст.) дозволило отримувати на фотоплатівках сотні зоряних спектрів за одну експозицію. До початку XX ст. їх було отримано кілька сотень тисяч. Саме тоді в Гарвардській обсерваторії в США було розроблено докладну класифікацію зоряних спектрів.

Спектри зір, так само як і спектр Сонця, – це спектри поглинання, де на тлі неперервного спектра є багато темних ліній. З огляду на це, всі спектри було розміщено в ряд, у якому два сусідніх спектра були мало відмінні між собою, але на кінцях ряду вони були несхожими. Потім цей ряд поділили на сім окремих класів і кожний з них позначили літерою в послідовності: *O – B – A – F – G – K – M*. Такий поділ спектрів на класи з невеликими змінами й доповненнями використовують дотепер і називають гарвардською класифікацією зоряних спектрів.

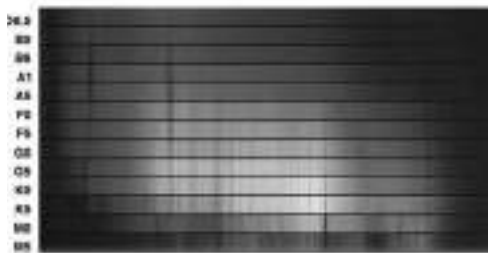


Рис. 19.2. Типи зоряних спектрів

Колір зір (фактично їхніх поверхонь) залежить від температури. Цей зв'язок не випадковий. Вивчаючи спектри з метою спектральної класифікації, астрономи, головню, беруть до уваги параметри спектральних ліній. Але й неперервні спектри, на тлі яких

спостерігають ці лінії, з переходом від класу до класу теж змінюються. У гарячих зір класів *O* та *B* підсилена синя частина спектра й послаблена

червона. Це означає, що поверхня зорі випромінює багато блакитних і синіх променів, і тому таку зорю ми бачимо блакитною. Зорі класів  $F$  і  $G$  найбільше випромінюють у жовтих променях і здаються нам жовтими. А зорі класу  $M$  випромінюють переважно в червоних променях, тому ми бачимо їх червоними.

Отже, зовнішній вигляд спектра зорі визначає температура її поверхні, тому послідовність спектральних класів Гарвардської класифікації своєю суттю є температурною послідовністю: вона відображує хід температур зоряних фотосфер. Додаткові класи  $R$ ,  $N$  і  $S$ , які запровадили пізніше, відображують ще й особливості хімічного складу червоних зір-гігантів.

Дуже багато зір у Всесвіті належить до цієї послідовності. Послідовність неперервна, тобто з переходом від одного класу до іншого параметри зір плавно змінюються.

З появою інфрачервоних приймачів, винесених в космос, в кінці ХХ ст. було відкрито холодні об'єкти з температурами поверхонь нижче 2000 К. Це – коричневі карлики, які випромінюють переважно в інфрачервоному діапазоні. Ці тіла вважають проміжною ланкою між планетами й нормальними зорями. Для них довелося ввести ще кілька спектральних класів –  $L$ ,  $T$ ,  $Y$ . До класу  $L$  відносять об'єкти з температурами поверхні від 1300 до 2000 К. Серед них не лише коричневі карлики, але й найбільш тьмяні червоні карлики, які раніше відносили до  $M$ -класу. Клас  $T$  містить тільки коричневі карлики, атмосфери яких нагріті від 700 до 1300 К. А клас  $Y$  – це коричневі субкарлики зі ще нижчою температурою.

### 3. Діаграма спектр – світність.

На початку ХХ ст. данський астроном Е. Герцшпрунг і дещо пізніше американський астрофізик Г. Рассел виявили залежність між виглядом спектра і світністю зір. Вони ілюстрували її графіком, на якому вздовж однієї осі відкладають світність зорі (абсолютну зоряну величину), а вздовж другої – спектральний клас (температуру). Так з'явилася діаграма, що показує зв'язок двох зоряних параметрів – спектрального класу (температури) і світності (абсолютної зоряної величини). Її називають діаграмою спектр-світність або (на честь обох учених) діаграмою Герцшпрунга – Рассела ( $G - R$ ).

Фізичні параметри та стадія еволюції зорі визначають її положення в тій чи іншій точці діаграми  $G - R$ . Зорі головної послідовності – це зорі, які перебувають в найстабільнішій фазі свого життя, коли в їхніх ядрах відбувається синтез атомів гелію з атомів водню. Ця фаза становить майже 90 % тривалості життя будь-якої зорі. Саме тому більшість зір належить до головної послідовності. Ще 10 % тривалості свого життя зоря, залежно від своєї маси, проводить у зоні надгігантів, гігантів чи субгігантів, доки в її ядрі йдуть реакції горіння гелію, а також ядерні реакції з участю важчих хімічних елементів. Далі, скидаючи оболонку, зоря перетворюється в білий карлик і переміщується в зону білих карликів. Щоправда, це стосується зір з масою

не більшою 6 сонячних мас. Масивніші зорі, переживаючи гравітаційний колапс, або вибухають як Наднові, або перетворюються в чорні діри. Отак діаграма Г – Р унаочнює еволюційний шлях зір, протягом якого вони повсякчас змінюються, й іноді дуже суттєво.

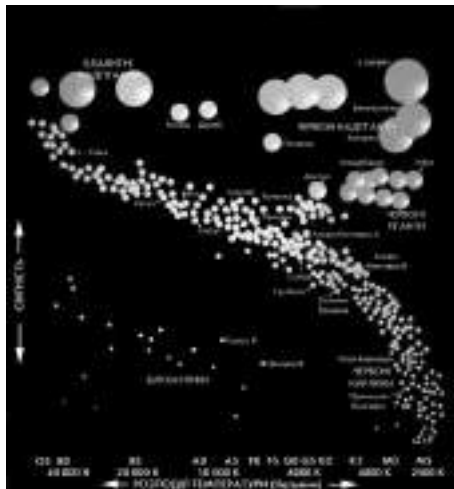


Рис. 19.3. Діаграма спектр – світність

Поза головною послідовністю праворуч угорі на діаграмі Г – Р розміщена зона червоних гігантів і надгігантів. Це холодні зорі (приблизно 3000 К), що мають набагато більші світності, ніж зорі з такою ж температурою на головній послідовності. Пояснення цієї розбіжності просте: такі зорі мають більші світності через більші розміри. Аналогічно, відмінністю в розмірах можна пояснити значно меншу, ніж у зір головної послідовності, світність групи гарячих білих зір, що є в лівому нижньому куті на тій

же діаграмі. Це – білі карлики, дуже щільні й компактні зорі розмірами в десятки чи то й сотні разів менші за Сонце.

#### 4. Відстані до зір.

Найуживанішим методом визначення відстаней до далеких об'єктів на поверхні Землі є метод триангуляції. Його суть: з двох кінців відрізка відомої довжини – базиса – вимірюють напрямки на об'єкт, а потім розраховують розміри трикутника, утвореного кінцями відрізка й віддаленим об'єктом. Видиме зміщення об'єкта на тлі ще віддаленіших об'єктів називають паралаксом. У такий же спосіб можна вимірювати й відстані до зір. Першим запропонував метод паралаксів для визначення відстаней до небесних об'єктів М. Коперник, що було прямим наслідком його геліоцентричної системи (ч. 3, § 10, п. 2).

Але відстані в космосі такі великі, що до середини ХІХ ст. виміряти паралакси у зір не вдавалося (ч. 1, § 3, п. 2). Навіть в найближчих із них паралакси надзвичайно малі (менші за 1"), і для їх вимірів потрібні дуже точні інструменти. Вимірювання річних паралаксів – найточніший метод визначення відстаней, тому він є основою шкали відстаней в астрономії.

Методом паралаксів визначають відстані до відносно близьких від Землі небесних об'єктів. Для віддаленіших вдаються до інших методів. Один із таких – метод спектральних паралаксів, у якому особливості спектрів зір використовують для визначення їхніх абсолютних зоряних величин. Приймаючи, що зорі з однаковими спектрами мають однакові абсолютні зоряні



величини і знаючи для тих самих зір зі спостережень ще й видимі зоряні величини, за відомими формулами обчислюють до них відстані.

Таким чином метод спектральних паралаксів дає змогу визначати відстані до зір, тригонометричні паралакси яких виміряти неможливо.

### ТИПОВА ЗАДАЧА

- Знайдіть світність  $L$  зорі ε Еридана для якої  $m = 3,81$ , а  $\pi = 0,303''$ .

*Розв'язання:* Спершу за формулою  $M = m + 5 + 5 \lg \pi$  знайдемо абсолютну зоряну величину зорі  $M$ . Далі з формули (20.2) знайдемо  $L = 0,27$ .

### НАВЧАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

- Поясніть, що розуміють під світністю зорі. Які фізичні характеристики зорі її визначають?

### ВИСНОВКИ

Головними характеристиками зір є їхня маса, радіус і світність. За фізичними властивостями речовини в надрах всі відомі зорі поділяють на три основні групи: нормальні зорі, білі карлики й нейтронні зорі. Діаграма спектр-світність показує зв'язок двох зоряних параметрів – спектрального класу (температури) і світності (абсолютної зоряної величини).

## § 20. ПОДВІЙНІ, КРАТНІ ТА ЗМІННІ ЗОРІ

Давно з'ясовано, що зорі «уникають самотності» й утворюють різні групи, або системи. Найпростішою зоряною системою є подвійна зоря.

### 1. Подвійні та кратні зорі.

Спочатку подвійними зорями вважали кожні дві дуже близькі на небесній сфері зорі. Але після того, як астрономи навчилися визначати відстані до зір, з'ясувалося, що деякі з них насправді далекі одна від одної, фізично між собою не пов'язані й лише проєктуються в дуже близькі точки на небесній сфері. Тепер такі зорі називають оптичними подвійними зорями. Натомість фізичні подвійні зорі під дією взаємних сил тяжіння обертаються навколо спільного центра мас, утворюючи динамічну систему.

Спостереження вказують на те, що фізичні подвійні зорі – поширене явище у Всесвіті. Важко точно визначити відсоткове співвідношення між подвійними й одиночними зорями. Проте на основі теоретичних моделей можна припустити, що до подвійних зір належить до 70 % усього зоряного населення.

Відповідно до засобів, якими їх виявлено, фізичні подвійні зорі поділяють на три класи. Якщо подвійність виявлена з візуальних спостережень – зорі видно окремо з допомогою оптичних засобів – їх називають візуально-подвійними.



Рис. 20.1. Візуально-подвійна зоря Міцар і Алькор із сузір'я Великої Ведмедиці

Якщо подвійність виявлена з фотометричних спостережень періодичних змін блиску системи, такі подвійні називають затемнювано-змінними, бо ці зміни виникають, коли компо-

ненти тісної системи затемнюють одна одну. На рис. 20.2. показано схему і криву блиску затемнювано-змінної зорі Алголь в сузір'ї Персея.

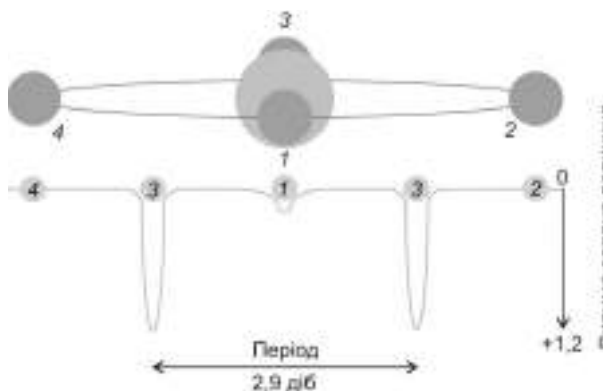


Рис. 20.2. Схема затемнення і крива блиску затемнювано-змінної зорі Алголь у сузір'ї Персея

Спектрально-подвійними зорями називають ті системи, в спектрі яких лінії зазнають періодичних роздвоєнь. Внаслідок ефекта Доплера найбільше роздвоєння ліній, спільних для спектрів обох

зір, є тоді, коли одна з них рухається в напрямку до спостерігача, а друга – від нього. Часто один з компонентів спектрально-подвійної системи є таким слабким, що його спектральних ліній не видно. Тоді замість роздвоєння ліній спостерігають періодичне зміщення ліній яскравого компонента то в синій, то в червоний бік спектра. Нині створено дуже точні вимірювальні прилади з високою роздільною здатністю, що дозволяють вимірювати коливання ліній в спектрах, навіть якщо воно зумовлене невидимим компонентом дуже малою у порівнянні з видимою зорею маси. Саме в такий спосіб відкривають планети біля інших зір (екзопланети).

Щоб помітити доплерівське зміщення в спектрі, орбітальна площина системи відносно спостерігача має бути нахилена на кут, менший за  $90^\circ$ . Це зміщення максимальне, коли кут дорівнює нулю, і лінія променя зору спостерігача збігається з орбітальною площиною системи.

Іноді у подвійній системі зорі перебувають так близько одна до одної, що під дією взаємних сил тяжіння їхня форма спотворюється, і кожна з них стає схожою на м'яч для гри в регбі. При цьому вони активно обмінюються речовиною. Такі пари називають тісними подвійними системами. Нині є можливість спостерігати ці незвичайні пари на різних етапах їхнього розвитку. Вони допомагають краще зрозуміти механізм зоряної еволюції.

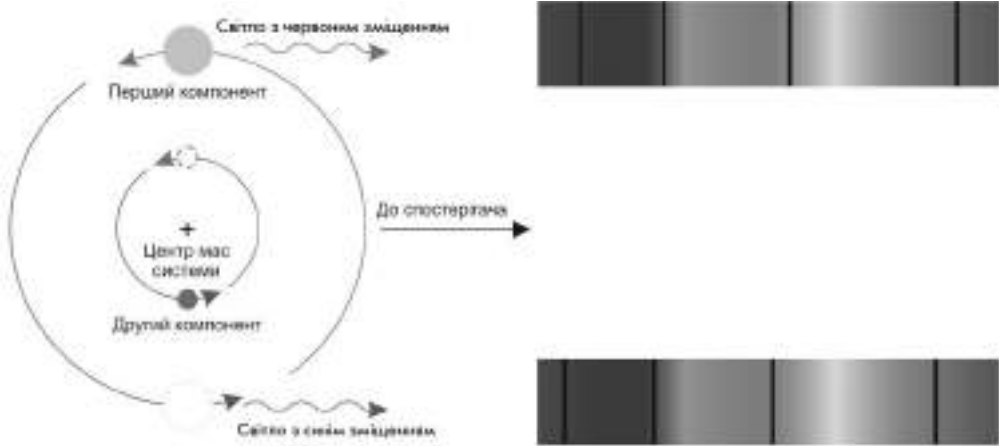


Рис. 20.3. Ефект Доплера і спектрально-подвійна зоря

Важливість вивчення подвійних зір, окрім усього іншого, полягає в тому, що в таких системах можна визначити найважливіший параметр зорі – її масу. Для візуально-подвійних систем, якщо виміри параметрів видимого руху (період обертання, великі півосі) компонентів належною мірою точні, це можна зробити з третього закону Кеплера.

Подвійні зоряні системи існують не вічно. Їх руйнування через розрив взаємного тяжіння між компонентами можливе в разі близького проходження повз систему масивного тіла або внаслідок вибуху одного з компонентів як наднової зорі. Тоді система може втратити більше половини загальної маси. Крім того, вибухи Наднових асиметричні. Компактний об'єкт, що утворюється, в момент вибуху отримує поштовх, додаткову швидкість. Якщо ця швидкість більша, ніж орбітальна швидкість об'єкта в подвійній системі, то це призводить до розриву зоряної пари.

2. Змінні зорі. 1596 р. німецький астроном Д. Фабриціус відкрив у сузір'ї Кита нову зорю 2-ї зоряної величини, але через деякий час зоря зникла. Та зненацька в 1609 р. Фабриціус знову знайшов її на небі. Отак уперше було виявлено зорю, що дуже сильно змінювала свій блиск: іноді ставала невидимою для неозброєного ока, іноді спалахувала знову. Й. Байєр наніс цю зорю на карту свого атласу, позначивши її Оміврон (o) Кита. Інша назва зорі – Міра Кита або просто Міра (з лат. «дивовижна»).

Отже, змінні зорі – це зорі, блиск яких змінюється. Вони відмінні масою, розмірами, віком, причинами змінності, тому їх розділяють на кілька великих груп. Одна з них – пульсуючі зорі, яскравість яких змінюється через коливання розмірів. До них належать зорі типу Міри або міриди – червоні гіганти спектрального класу  $M$ , що змінюють блиск у межах 2,5–11 зоряних величин з періодами в середньому 80–100 діб. Особливістю змінних типу Міри є те, що зберігаючи тривалість періоду пульсації сталою, вони не зберігають від циклу до циклу однаковими амплітуди зміни блиску. Приміром, в одному циклі блиск може змінитися на 7 зоряних величин, а в наступному тільки на 3. Пульсації мірид пояснюють періодичним проходженням ударної хвилі в протяжній атмосфері зорі. Така хвиля виникає в пульсуючих зорях внаслідок тиску нижніх шарів на верхні і є тонкою перехідною зоною, що відокремлює гарячий газ від холодного та рухається в бік холодного газу.

Серед пульсуючих зір є клас цефеїд, що отримали назву від однієї з перших відкритих змінних цього типу –  $\delta$  Цефея. До цефеїд відносять багато типів змінних зір – гігантів і надгігантів високої світності головно спектральних класів  $A$ ,  $F$  і  $G$ , які періодично змінюють блиск у межах 0,5–2 зоряних величини. Коливання блиску цефеїд пояснюють пульсаціями зовнішніх шарів зорі, внаслідок чого періодично змінюються їхні радіуси (приблизно на 10 %) і температури. Зазвичай цефеїди поділяють на короткоперіодичні з періодами до 1,2 доби й довгоперіодичні з періодами понад 1 добу.

Довгоперіодичні цефеїди – це прикінцеві стадії життя блакитно-білих гігантів спектрального класу  $B$ . У процесі еволюції вони набули особливої структури: на певній глибині, але не більшій за 0,1 радіуса, виник шар, що накопичує енергію, яка приходить з надр зорі, а потім віддає її назовні. Зовнішні шари зорі, періодично стискаючись, розігріваються (температура і блиск зростають), а коли вони розширюються, то охолоджуються (температура і блиск зорі спадають). Періоди довгоперіодичних цефеїд залежать від їхнього віку: що більший вік, то коротший період зміни блиску. Цефеїди з періодом в 50 діб мають вік 10 млн років, а з періодом в 1 добу – 100 млн років.

На відміну від мірид у цефеїд не лише періоди, а й амплітуди зміни блиску є постійними з дуже високою точністю. Головна особливість цефеїд – залежність період-світність, відкрита 1908 р. Генрієтою Левітт. Вона має такий вигляд:

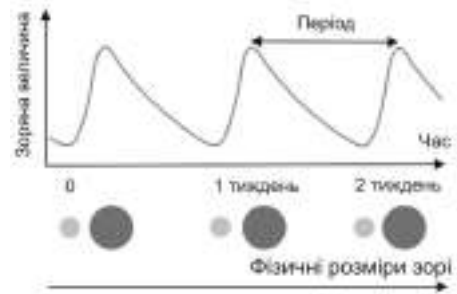
$$M_v = -3,88 - 2,87(\lg P - 1) \quad (20.1),$$

де  $M_v$  – абсолютна зоряна величина у видимому світлі,  $P$  – період зміни блиску.

Ця залежність дає можливість за виявленим зі спотережень періодом змінності обчислити світність цефеїди, а потім і відстань до неї. Завдяки цій залежності цефеїди стали «маяками» Всесвіту, адже маючи великі світності, вони помітні з дуже великих відстаней. Оскільки розміри галактик невеликі, як порівняти з відстанями до них, визначивши відстань до цефеїди в іншій галактиці, легко встановити відстань і до самої галактики, в якій її спостерігають.

Серед короткоперіодичних цефеїд виділяють зорі типу *RR Ліри* – гіганти спектральних класів *A – F* з температурою 6400–7600 К і масою 0,6 сонячної. *RR Ліри* – це дуже старі зорі віком понад 10 млрд років. У великій кількості вони присутні в кулястих зоряних скупченнях.

Рис. 20.4. Головна особливість цефеїд – залежність період–світність, відкрита 1908 р. Генрієтою Левітт (США)



Увагу астрофізиків привертають не лише пульсуючі змінні, але і спалахуючі, або вибухові зорі. Вони мають дуже розмаїту природу й вік: від дуже молодих, що тільки-но ступають на життєвий шлях, до старих, які його завершують. Прикладом молодих зір є спалахуючі змінні типу *T Тельця*, які ще не завершили процесу гравітаційного стискання, не стали стабільними зорями і не посіли постійного місця на головній послідовності. Ці зорі змінюють блиск так нерівномірно, що не можна встановити ніякої закономірності. Припускають, що вивільнення енергії відбувається не в атмосферах зір, а в глибших підфотосферних шарах, і це є залишковим явищем зореутворення.

### 3. Нові та наднові зорі.

Новими зорями називають ті, блиск яких раптово зростає в тисячі й навіть мільйони разів (у середньому на 12 зоряних величин). При цьому іноді виділяється енергія, яку Сонце випромінює за  $10^5$  років.

Початкова фаза спалаху аж до максимуму блиску триває кілька діб, після чого він повільно, впродовж років чи десятків років зменшується до початкового значення. Зазвичай через кілька років потому навколо Нової спостерігають газову оболонку, що розширюється. Це свідчить про відрив від зорі під час спалаху поверхневих шарів.

Причина вибухів нових зір – особливості обміну речовиною в тісних подвійних системах, компоненти яких мають маси близькі до сонячної або й менші за неї, а відстань між ними лише трохи перевищує їхні розміри.

Якщо одна із зір вже стала білим карликом, а друга ще перебуває на головній послідовності або є холодним гігантом пізніх спектральних класів *K* чи *M*, під дією сили тяжіння багата на водень речовина з поверхневих шарів зорі-компаньйона перетікає на білий карлик. У міру накопичення водню і збільшення температури й щільності на поверхні білого карлика до певної критичної величини, в збагаченому воднем шарі починаються термоядерні реакції з претворення водню в гелій. Цей процес надзвичайно швидкий, тому енергія вивільняється вибухово. Виникає сильна ударна хвиля, що скидає зов-

нішні шари зорі в навколишній простір. Скинута газова оболонка розширюється, внаслідок чого зростає блиск зорі, що й спостерігають як появу Нової.

Та після спалаху перетікання газу на білий карлик починається знову, і через деякий час (до 1000 років) спалах повторюється.



Рис. 20.5. Тісна подвійна зоряна система, в якій відбувається процес перетікання речовини з одного компонента на другий. Такий процес зрештою призводить до появи Нової

Спалах Наднової зорі незрівнянно сильніший, ніж спалах Нової. Адже її блиск зростає на десятки зоряних величин упродовж кількох діб. Поява Наднової в іншій галактиці демонструє всю грандіозність цього явища: інколи її блиск у максимумі перевищує сумарну яскравість усієї зоряної системи, в якій вона спалахнула. Такою, наприклад, була Наднова 1972 р. в галактиці NGC 5253, що світила майже в 13 разів яскравіше, ніж материнська галактика.

Під час вибуху Наднова скидає свою оболонку, яка далі розширюється зі швидкістю від 5000 до 20 000 км/сек, і через деякий час на місці Наднової можна спостерігати туманність специфічної форми. Такою є Крабоподібна туманність в сузір'ї Тельця. Її появу пов'язують з Надною 1054 р. яку було зафіксовано в китайських хроніках.

У тій частині Галактики, яку можна спостерігати із Землі, явище Наднової трапляється раз на 200–300 років. Тому нині Наднові вивчають через їх спостереження в інших галактиках. Такі спостереження виконують не тільки професійні астрономи, але й астрономи-аматори. Наднові прийнято позначати літерами SN (Supernova), вказуючи рік і черговість відкриття у порядку літер латинської абетки.

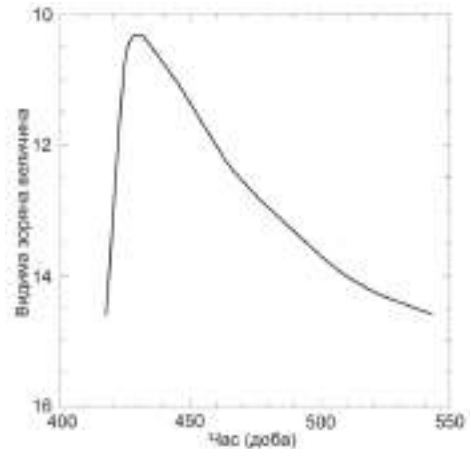
Зорі, що спалахують як Наднові, поділяють на дві основні групи: Наднові I і II типу. Головною особливістю Наднових I типу є те, що, по-перше, спектри різних об'єктів дуже схожі між собою; по-друге, в цих спектрах відсутні лінії водню; по-третє, у них майже повністю подібні криві блиску. Натомість у спектрах Наднових II типу присутні лінії водню, і зорі демонструють велике розмаїття кривих блиску.

Наднові I типу випромінюють майже в 6 разів більше енергії, ніж Наднові II типу. У максимумі блиску перші досягають в середньому  $20^m$  і випромінюють у 12 млрд разів більше енергії, ніж Сонце. Другі досягають  $18^m$  і випромінюють енергії у 2 млрд разів більше, ніж Сонце.

Вивчення просторового розподілу й інших параметрів Наднових I і II типу дозволило зробити висновок, що зорі, які породжують Наднові I типу, – старі з масами в 1–2 сонячних у складі тісних подвійних систем. Надновими II типу внаслідок гравітаційного колапсу стають одиночні масивні зорі з масами не

менше, ніж 8–10 сонячних мас, що перебувають на кінцевому етапі еволюції (ч. 2, § 22). При цьому, залежно від маси, зоря, що вибухнула, може взагалі зруйнуватись дощенту, а може залишити після себе нейтронну зорю.

Рис. 20.6. Типова крива блиску Наднової типу Ia має характерний крутий підйом. Максимального значення блиску Наднова досягає за 15–20 днів і «тримає» його приблизно 10 днів, після чого блиск спочатку переривчасто, потім майже рівномірно спадає



Наднові I типу виникають у тісних подвійних зоряних системах, одним з компонентів яких є білий карлик.

Нарощування маси, зростання щільності й температури одного з компонентів схоже з процесом появи Нових. Але, на відміну від нової зорі, коли термоядерна реакція охоплює лише поверхневі шари зорі, в разі Наднової потужний термоядерний вибух охоплює всю зорю і може зруйнувати її, а не лише зриває поверхневі шари. Тому явище Нової в тісній подвійній системі може повторитися, а вибух Наднової знаменує остаточну смерть зорі. І якщо для появи Нових, подвійна система має складатися з компонентів менш масивних, ніж Сонце, сумарна маса системи для Наднових I типу має перевищувати сонячну в кілька разів.

Бувають випадки, але доволі рідко, коли в тісних подвійних системах спалахують Наднові не внаслідок термоядерного вибуху, а гравітаційного колапсу одного з компонентів. З Надновими I типу їх ріднять спектральні параметри, а саме – відсутність ліній водню, а іноді й ліній гелію. Їм присвоїли позначки типу Ib і Ic, тоді як Надновим типу I додали латинську літеру «a». Фактично це Наднові II типу, тільки бідні воднем (Наднові Ic не мають ще й гелію). Можливо ці зорі позбулися зовнішніх шарів ще до вибуху, що й пояснює їхні особливості. Тобто Наднові Ib і Ic схожі на Наднові I типу лише спектрами, а не фізичною природою. Докладніше про фізичний механізм вибуху Наднової йтиметься в § 22.

## ТИПОВА ЗАДАЧА

Видима зоряна величина цефеїди становить  $m = 19,6$ . Зоря змінює блиск з періодом  $P = 50,2^d$ . Визначте абсолютну зоряну величину  $M$  цефеїди та відстань до неї.

Розв'язання: Величину  $M$  цефеїди визначаємо із залежності період – світність за формулою  $M_v = -3,88 - 2,87(\lg P - 1)$ . Звідси  $M = -5,9$ . Значення відстані знаходимо з формули  $M = m + 5 - 5 \lg r$ . Звідси  $r = 10^6$  пк, або 1 Мпк.

## ВИСНОВКИ

Більшість зір, доступних для спостережень, належать до подвійних зоряних систем різних типів, а також проявляють змінність блиску. Залежність період-світність пульсуючих змінних зір цефеїд використовують в астрономії для визначення відстаней як до таких зір, так і до галактик, у яких вони містяться.

## § 21. УТВОРЕННЯ ЗІР

Процес формування зір тривалий час був загадковим для астрономів. Було здобуто значно більше даних про те, як зорі закінчують життя, ніж про те, як вони народжуються. Водночас наявність в нашій галактиці молодих зір (їхній вік лише кілька сотень тисяч років) переконливо свідчить про те, що зорі утворюються й нині.

### 1. Основні етапи утворення зорі.

Зорі народжуються в газопилових хмарах. У площині Галактики (ч. 2, § 23) і біля неї, а особливо в спіральних рукавах, є багато масивних (до 10 млн сонячних мас), протяжних (до 300 св. р.) і доволі щільних (10–100 атомів/см<sup>3</sup>) молекулярних хмар з температурою 10–30 К. Доведено, такі хмари – утворення не стійкі. З часом вони розбиваються на окремі фрагменти.



Рис. 21.1. Газопилова хмара – джерело зореутворення

У середовищі, навіть коли речовина в ньому розподілена однорідно, за наявності сил тяжіння обов'язково виникають невеликі збурення щільності й швидкості руху частинок. Вони не зникають, а навпаки, мають тенденцію до нарощування, й нарощування відбуваються тим швидше, що більші збурення. Це явище називають гравітаційною нестійкістю.

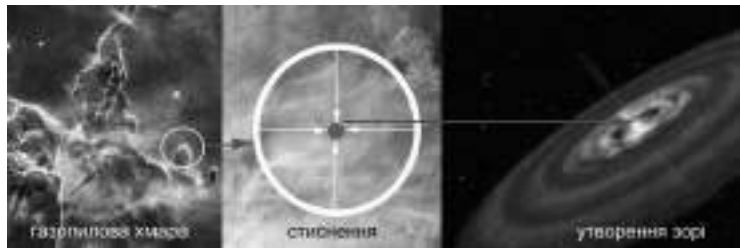
Така нестійкість – одна з причин поділу протяжних масивних хмар газу на менші фрагменти. До поділу хмар сприяють і зовнішні чинники, такі як: зіткнення хмар між собою, потужний міжзоряний вітер, ударні хвилі, що виникають під час вибуху Наднових, хвилі ущільнення, що формують спіральну структуру галактик тощо. Якщо маса й розміри фрагмента, що виділився, перевищать деяку критичну величину, сили гравітації в ньому переважають сили газового тиску, і він почне стискатися. Ця подія – початок зореутворення.



Стискання відбувається тим швидше, що більшою була маса фрагмента. Тривалий час його температура, незважаючи на дедалі більше ущільнення, залишається низькою, бо речовина прозора для інфрачервоних променів. Випромінювання молекул виносить за межі хмари утворене під час стискання тепло. Але коли газ втрачає прозорість, всередині фрагмента виникає щільне й гаряче, гідростатично рівноважне зореподібне ядро. В ньому гравітацію врівноважує внутрішній тиск – оце і є протозоря.

На цій стадії протозорю не видно, бо вона оточена непрозорим для видимого світла коконом з газу і пилу. Кокон поглинає випромінювання ядра протозорі, нагрівається до сотень градусів і дає потужне інфрачервоне випромінювання. Якраз його і спостерігають в ГЧ-діапазоні з допомогою сучасних телескопів.

Рис. 21.2. Схема народження зорі з газопилової хмари



Тим часом газ із масивної оболонки протозорі

продовжує падати до її центра. Гравітаційна енергія перетворюється в тепло, температура ядра зростає і збільшується його світність. Урешті-решт тиск випромінювання розсіює в міжзоряному середовищі газ, що оточує протозорю, подальше зростання маси її ядра зупиняється, й вона остаточно еволюціонує в зорю. У нашій галактиці, згідно з підрахунками, швидкість зореутворення (маємо на увазі масу зір, що формуються щорічно,) становить 1–5 сонячних мас.

Тільки-но сформована зоря хоча й має ще досить низьку температуру поверхні, та через значно більші розміри, ніж в зір такої ж маси на головній послідовності, випромінює велику кількість енергії. На цьому етапі формування вона розміщується на діаграмі Герцшпрунга–Рассела в зоні червоних гігантів і надгігантів. Коли температура ядра молоді зорі досягає кількох мільйонів кельвінів, починаються перші термоядерні реакції «вигорання» літію, берилію, бору. Але газового тиску, який існує при таких температурах, ще не вистачає для того, щоб припинити стискання. Тому додатковим джерелом її світіння є енергія гравітаційного стискання, що перетворюється в тепло.

Тільки через кілька сотень тисяч років для майбутніх масивних зір і через сотні мільйонів років для майбутніх карликів, коли температура ядра досягає 10 млн К, у ньому починаються термоядерні реакції, в яких водень перетворюється в гелій. Процес ущільнення закінчується, зоря стабілізується і стає нормальною зорею, в якій газовий тиск врівноважує сили гравітації.

Що більша маса новонародженої зорі, то вища температура в її надрах і на поверхні, більша світність, і тим вище вона «лягає» на головній послідов-

ності. Тут зоря перебуває доти, доки весь водень в її ядрі не вичерпається й утвориться гелієве ядро. Цей період охоплює до 90 % тривалості життя зорі й залежить від її початкової маси. Для Сонця він триватиме 10 млрд років. Для зорі з масою в 17 разів більшою – лише 8 млн років, а для зорі з масою 0,5 сонячної – до 80 млрд років. Маса зорі визначає не лише тривалість її життя, а й усі інші параметри – радіус, температуру в надрах і на поверхні (а отже, спектральний клас і колір), світність.

Після вичерпання запасів водневого пального стаціонарний період життя зорі закінчується, і вона покидає головну послідовність. Далі з зорею відбуваються кардинальні зміни, які залежать від її початкової маси. Про це докладно йтиметься далі в § 22.

## 2. Моделі зір.

Астрономи досі не в змозі «зазирнути» в надра будь-якої зорі, щоб вивчити її внутрішню будову. Щоправда, метод астросейсмології дозволяє отримувати інформацію про стан речовини в надрах Сонця та інших зір. Однак докладно вивчати внутрішню будову зір можна лише теоретично. Математичні розрахунки, які спираються на відомі фізичні закони і враховують загальні параметри зорі (маса, радіус, світність, хімічний склад), дозволяють

побудувати модель її внутрішньої будови, а також зрозуміти, як зоря змінюватиметься з плином часу. Такі теоретичні розрахунки в астрономії називають моделями зір. Порівняння моделей з результатами астрономічних спостережень доводять, що вони доволі точні. Нині для побудови моделей зір використовують потужні комп'ютери.

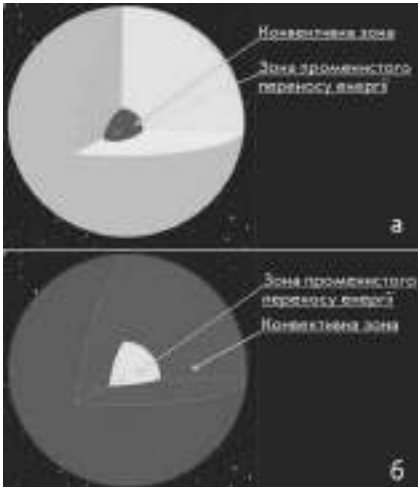


Рис. 21.3. Моделі (внутрішня будова) зір: гіганта (а) і маломасивної зорі (б)

Для прикладу розгляньмо внутрішню будову зорі, маса якої становить 10 сонячних мас. У її центрі є конвективне ядро з радіусом приблизно 0,2 від радіусу зорі. Причина появи такого ядра зумовлена тим, що механізм перенесення енергії випромінюванням не може забезпечити її відвід з центральних районів зорі, адже температура в її центрі становить майже 30 млн К, тому «вмикається» механізм конвекції речовини. Від конвективного ядра й до поверхні зорі пролягає зона променистого переносу енергії.

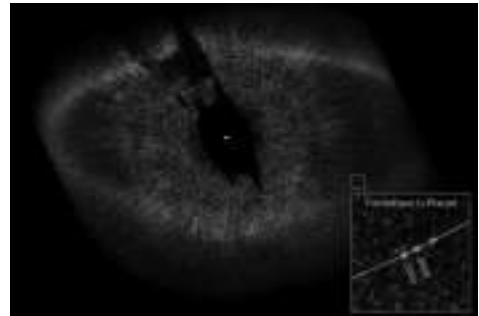
Іншу будову мають маломасивні зорі (рис. 21.3 б) і зорі сонячної маси. Якщо маса менша, ніж 0,08 маси Сонця, то температура в центрі зорі ні-

коли не досягає значень, потрібних для горіння водню, і вони стискаються необмежено довго.

### 3. Екзопланети і планетні системи зір.

Питання утворення зір пов'язане ще з одним важливим процесом – утворенням планет і планетних систем. Хоча теоретичні розрахунки вказували на те, що принаймні біля окремих зір мають утворюватись планети, телескопічні спостереження тривалий час не підтверджували ці висновки. Планети світять тільки відбитим світлом своєї зорі, причому більша частина цього випромінювання припадає на інфрачервоний діапазон. Тому для прямого виявлення планети, потрібно виділити її випромінювання зі світла материнської зорі, що потребує дуже чутливих інфрачервоних телескопів.

Рис. 21.4. Екзопланети зорі Фомальгаут, відкриті методом прямих спостережень



Поява наприкінці ХХ ст. нових інструментів, розробка досконалих наземних і космічних оптичних приладів і приймачів випромінювання, а також розробка методів, відсутність яких раніше не дозволяла спостерігати екзопланети (планет біля інших зір), урешті-решт дали астрономам можливість їх побачити.

Здебільшого відкриття таких об'єктів роблять непрямими методами. До таких належать метод транзитів, метод променевої швидкості (метод доплерівської спектроскопії), мікролінзування тощо. Хоча вже є екзопланети, виявлені прямо в оптичному й радіодіапазоні.

Суть методу транзитів полягає в тому, що реєструють зменшення блиску зорі тоді, коли по її диску проходить планета. Далі з фотометричних вимірів будують графік коливань блиску зорі в часі, а потім знаходять період обертання планети і її радіус. Цей метод працює, коли промінь зору спостерігача збігається з площиною орбіти екзопланети.

В основі методу променевої швидкості лежить оцінка радіальної (променевої) швидкості зорі. Швидкість руху небесного тіла відносно спостерігача можна розкласти на дві складові. Одну з них – проекцію швидкості на промінь зору спостерігача або радіус-вектор – називають променевою швидкістю. Іншу складову швидкості, перпендикулярну до променя зору, називають власним рухом небесного тіла. Променеву швидкість зорі визначають зі зміщення ліній в її спектрі. Оскільки планета (чи планети) чинять гравітаційний вплив на свою зорю, то її променева швидкість стає нерівно-

мірною. Цим методом у 1995 р. була відкрита перша екзопланета (51 Пегаса b) біля зорі головної послідовності.

Метод мікролінзування ґрунтується на використанні «гравітаційних лінз» (їх утворюють масивні тіла – чорні діри або системи тіл – галактики і скупчення галактик). Фактично, це різновид прямого спостереження, тільки чутливість астрономічних приладів посилює природа.

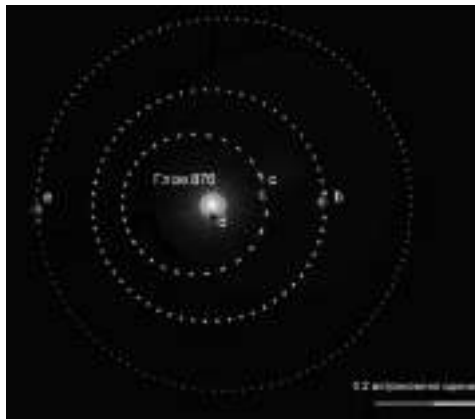


Рис. 21.5. Планетна система зорі Глізе

Залежно від маси й хімічного складу, екзопланети поділяють на кілька класів: планети-гіганти (маса від 0,19 до 13 мас Юпітера); нептуні (маса від 7 до 60 мас Землі, або від 0,022 до 0,19 мас Юпітера); планети земного типу (їх маса менша за 7 мас Землі).

Планети-гіганти – їх часто називають «юпітерами» й «сатурнами», мають хімічний склад, близький до зоряного, «нептуні» – складаються головню з льодів із домішками твердих порід, планети земного типу – утворені переважно із силікатів і заліза.

Багато відкритих екзопланетних систем будовою не схожі на Сонячну систему. В них планети-гіганти типу Юпітера рухаються навколо материнських зір по дуже близьких орбітах – для порівняння: там, де в Сонячній системі містяться Венера, Меркурій, а то й ще ближче. Це вимагає як критичного ставлення до відомої теорії походження нашої планетної системи, так і розширює діапазон пошуків, пов'язаних з формуванням планет і їх систем у Всесвіті.

6

### НАВЧАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

- Опишіть якісно процес утворення зорі. Чи обов'язково молода зоря посяде місце на головній послідовності діаграми Герцшпрунга–Рассела?

### ВИСНОВКИ

Зорі народжуються з газопилових хмар шляхом їх гравітаційного стиску. Цей процес відбувається й нині. Внутрішня будова будь-якої зорі досі залишається не доступною для прямих спостережень, тому про неї дізнаються на підставі математичних моделей. Від 90-х років ХХ ст. астрономи відкривають екзопланети – планети біля інших зір.

## § 22. КІНЦЕВІ СТАДІЇ ЕВОЛЮЦІЇ ЗІР

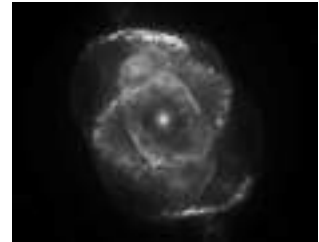
Зоря існує як самодостатній об'єкт завдяки рівновазі двох сил: гравітації та газового тиску. У такому стані вона посідає певне місце на головній послідовності діаграми Герцшпрунга–Рассела, яке залежить від маси зорі.

### 1. Прикінцеві етапи існування зорі.

Після того, як весь водень в ядрі зорі перетвориться в гелій, енергію їй дає «горіння» водню у шарі, що прилягає до гелієвого ядра. Тут водень ще є, але через низьку температуру реакція відбувається мляво. В цей час зоря покидає головну послідовність і зміщується в зону червоних гігантів. У цій зоні вона посідає певне місце, яке залежить від її маси. Тут зоря проводить 10 % свого життя. Для нашого Сонця, наприклад, цей період триватиме 1 млрд років.

Червоні гіганти мають дуже неоднорідну структуру. Тонкий шар, де може відбуватись воднева реакція, ділить зорю на дві істотно різні частини: внутрішню (гелієве ядро), де реакції немає з причини відсутності водню, і зовнішню потужну конвективну зону, де водень є, але реакції не відбуваються через низькі температуру й тиск. Фізичні процеси в двох зонах зорі розгортаються по-різному.

Рис. 22.1. Планетарна туманність – залишок зовнішньої оболонки зорі – червоного гіганта



Які зміни відбуваються всередині зорі? Завдяки надходженню гелію в ядро із шарового джерела енерговиділення, його маса й температура поступово збільшуються. Коли маса досягає 0,4–0,5 сонячної, а температура 150 млн К починає «горіти» гелій, даючи на виході вуглець, кисень і деякі інші елементи. І так доти, доки не вигорить гелій і не утвориться вуглецево-кисневе ядро.

### 2. Білі карлики, нейтронні зорі та чорні діри.

Зорі з масою до восьми сонячних на цьому етапі «доживають» віку, бо вичерпують запаси речовини, які могли б підтримувати зростання тиску й температури в ядрі, а отже, і продовження термоядерних реакцій. Холодна протяжна оболонка або поступово стікає в навколишній простір, або відділяється від ядра у вигляді планетарної туманності, яка розширюється зі швидкістю до 20–40 км/сек. Під дією ультрафіолетового випромінювання ядра вона яскраво світиться (рис. 22.1) Гаряче вуглецево-кисневе ядро, що залишилося, стає білим карликом – компактним об'єктом із розмірами, які, залежно від маси, можуть бути навіть меншими від розмірів Землі в десятки разів. На діаграмі спектр – світність білі карлики посідають місце в ліво-

му нижньому куті, де розміщені зорі дуже малої світності, але з високою температурою поверхні. Поступово охолоджуючись, білий карлик з часом перетвориться в чорний карлик – недогарок колишньої зорі.

Білими карликами можуть стати лише ті зорі, в надрах яких утворюється вироджене ядро з масою не більше, ніж 1,4 сонячної. Цю граничну масу, обчислену С. Чандрасекаром в 1931 р., називають межею Чандрасекара. Такий об'єкт є стійким, бо дію сил гравітації врівноважує тиск виродженого електронного газу.

Саме так після стадії червоного гіганта завершить свій життєвий шлях Сонце. Згідно з сучасними уявленнями, воно покине головну послідовність у віці близько 10 млрд років. Через 2,2 млрд років потому Сонце досягне верхівки гілки червоних гігантів. На той час його світність перевищить нинішню у 2700 разів, а радіус становитиме приблизно одну астрономічну одиницю. Після загоряння гелію, Сонце перебуватиме близько 100 млн р. на горизонтальній гілці маючи світність у 50 разів вищу, ніж нині, а радіус удесятеро більший за нинішній. На цій стадії еволюції температурні нестійкості всередині Сонця призведуть до того, що воно почне втрачати масу скидаючи оболонку. Потім буде короткочасна стадія, коли його світність становитиме від 2000 до 4000 нинішніх, а радіус – приблизно 0,8 а. о. Зрештою Сонце скине оболонку, яка стане планетарною туманністю, і від нього залишиться тільки дуже гарячий білий карлик розмірами в кілька разів більшими за Землю.

По-іншому завершують свій життєвий шлях масивні зорі. Залежно від кінцевої маси ядра, що утворюється після вичерпання всіх можливих видів палива, вони закінчують своє життя або як нейтронні зорі, або спалахують як Наднові, або перетворюються в чорні діри.

Розгляньмо коротко ці варіанти.

У зорі з масою 8 сонячних водень в ядрі вигорає приблизно за 20 мільйонів років. На цьому етапі, як і в разі менш масивних зір, внутрішня частина зорі має гелієве ізотермічне ядро, оточене шаром речовини, де відбуваються термоядерні реакції. В міру надходження гелію в ядро і збільшення його маси, зростають температура і тиск. За досягнення в ньому температури понад 100–150 млн К спалахує гелій, утворюючи вуглець, кисень і важчі елементи.

Реакції синтезу вуглецю відбуваються із значно більшим виділенням енергії, ніж водневі реакції, тому ядро швидко розігрівається до 200–300 млн К. На деякий час світність зорі зростає і вона повертається на головну послідовність. Але це триває недовго. Стадія горіння гелію в 10 разів коротша за стадію горіння водню.

Коли гелій в ядрі вичерпується й через припинення «горіння» воно дещо охолоджується, знову порушується рівновага між тиском і гравітацією – починається стискання ядра. Зоря знову розширюється до велетенських розмірів і стає червоним надгігантом. Гелій ще горить, але тільки у прилеглому до вуглецевого ядра тонкому сферичному прошарку. А утворений при цьому

вуглець нарощує масу вуглецевого ядра. На цьому етапі всередині зорі є два шарових джерела енерговиділення: внутрішнє, де навколо вуглецево-кисневого ядра «горить» гелій з утворенням вуглецю і кисню, і зовнішнє, де «догорає» водень з утворенням гелію.

Збільшуючи масу, ядро стискається, розігрівається, і за досягнення в ньому температури близько 1 млрд К починає «горіти» вуглець з утворенням неону й попутно натрію й магнію.

Поступово із збільшенням густини, тиску й температури в ядрі масивної зорі після вичерпання чергового палива, у принципі, можуть іти все нові й нові термоядерні реакції. При цьому продукти попереднього термоядерного горіння стають паливом для утворення наступних за ними в таблиці Менделєєва хімічних елементів.

Так триває аж до утворення ядра з елементів групи заліза. На цю пору залізне ядро зорі огортають багато шарів з продуктів ядерного горіння на попередніх етапах. Далі, незважаючи на те, що температура в ядрі досягла 3,5 млрд К, термоядерні реакції припиняються, бо для утворення ще важчих елементів у зорі не вистачає енергії, і її потрібно підводити ззовні, тобто зорю треба «підігрівати». Водночас, доки всередині зорі займаються все нові джерела ядерного палива, роздута до велетенських розмірів оболонка поступово стікає в міжзоряний простір або взагалі скидається.

Весь цей процес, починаючи з моменту спалаху водню навколо ядра й закінчуючи стадією червоного надгіганта, триває близько двох мільйонів років.

З утворенням залізного ядра, коли зоря вичерпує запаси ядерного пального, вона інтенсивно втрачає енергію через випромінювання нейтрино. Втрати енергії призводять до охолодження ядра й наступного його стискання, а отже, й нагрівання речовини. Збільшення температури до 7–8 млрд К і густини врешті-решт спричиняє розпад елементів групи заліза на ядра гелію і нейтрони, що своєю чергою розпадаються на нейтрони і протони. Цей процес вимагає таких великих затрат енергії теплового руху на подолання енергії зв'язку атомних ядер, що зі збільшенням густини різко сповільнюється зростання тиску. До цього додаються процеси народження електрон-позитронних пар і нейтронізація речовини (протони поглинають електрони й виникають нейтрони). Зоря втрачає всі можливості для підтримання гідростатичної рівноваги. Тиск не може протидіяти гравітації, і починається гравітаційний колапс ядра.

Образно кажучи, відбувається «обвал» зорі всередину, речовина центральних зон майже зі швидкістю вільного падіння (до 20 % від швидкості світла) падає до центра.

Якщо маса ядра лежить у межах  $1,4 \leq 2$  сонячної маси і зоря втратила свою оболонку через її одно- чи кількаразове скидання або поступове звігрювання в навколишній простір, тиск виродженого нейтронного газу, а також блискавичне збільшення відцентрової сили внаслідок збільшення швидкості обертання зорі за різкого зменшення її радіуса припиняють гравітаційний

колапс. Гаряча нейтронна зоря, що утворилася, охолоджувана нейтринним випромінюванням, стає холодною нейтронною зорею, і не відбувається вибуху Наднової.

Якщо ж оболонка зорі збереглася, то під дією сили тяжіння вона падає на ядро й, наштовхнувшись, «відскакує» від нього зі швидкістю в десятки тисяч кілометрів на секунду. Ця швидкість значно перевищує швидкість звуку в речовині зорі, тому виникає ударна хвиля. Вона рухається зсередини назовні й розігріває оболонку до мільярдів кельвінів. В ній починаються реакції з утворенням всіх елементів таблиці Менделєєва – за короткий час виділяється колосальна енергія, яка розкидає речовину оболонки в навколишній простір. Так виникає Наднова II типу.

Внаслідок вибуху оголюється колишнє ядро зорі – гаряча нейтронна зоря – компактна куля діаметром до десяти кілометрів, заповнена щільно упакованими нейтронами. А навколо неї утворюється волокниста туманність, що розширюється, – залишок Наднової.

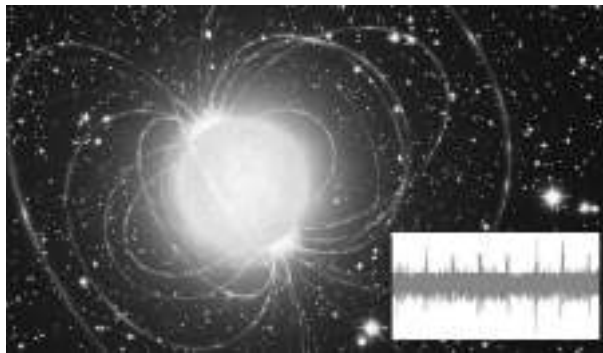


Рис. 22.2. Нейтронна зоря – пульсар в уяві художника-фантаста (а) і запис випромінювання одного з пульсарів (б)

Нейтронна зоря дуже швидко обертається – період обертання досягає кількох сотих чи то й тисячних часток секунди, і має дуже сильне магнітне поле. Поблизу магнітних полюсів, що зазвичай не збігаються з полюсами обертання, утворюються магнітні воронки, звідки електрони, прискорені потужним магнітним полем до майже світлових швидкостей, покидають поверхню нейтронної зорі. При цьому вони випромінюють у напрямку свого руху в радіо-, рентгенівському, гамма-, а також в оптичному діапазонах. Випромінювання від нейтронної зорі поширюється в простір на величезні відстані у вигляді конусів. Конуси випромінювання, наче прожектори, обертаються разом з зорею і з тим же періодом, що й вона. Якщо Земля потрапляє в такий конус, то вдається реєструвати сигнали від пульсара.

Властивості пульсарів з часом суттєво змінюються. В міру сповільнення обертання поступово зникає високочастотне випромінювання, все рідше приходять радіосигнали, час від часу вони взагалі «завмирають», аж поки пульсар, пославши останній імпульс, не «замовкне» назавжди. Таких «мертвих» пульсарів, згідно з підрахунками, у кілька тисяч разів більше, ніж тих,

Властивості пульсарів з часом суттєво змінюються. В міру сповільнення обертання поступово зникає високочастотне випромінювання, все рідше приходять радіосигнали, час від часу вони взагалі «завмирають», аж поки пульсар, пославши останній імпульс, не «замовкне» назавжди. Таких «мертвих» пульсарів, згідно з підрахунками, у кілька тисяч разів більше, ніж тих,



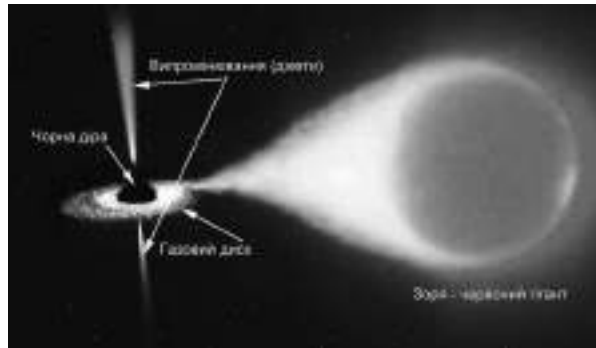
що генерують потужне радіовипромінювання. Тривалість життя пульсара вимірюється кількома мільйонами років.

Наднові відіграють дуже важливу роль в зореутворенні, бо під час вибуху виникає ударна хвиля, що спричиняє ущільнення міжзоряного газу й пилу, а це зрештою приводить до початку формування зір в туманностях. Крім того, внаслідок цих вибухів змінюється склад міжзоряного середовища: воно збагачується важкими хімічними елементами, які потрібні для утворення планет земного типу і виникнення життя.

У зір, маса яких становить 10–20 сонячних, а маса ядра перевищує 2,5 сонячної, під час необмеженого колапсу в ядрі замість нейтронної зорі виникає інший об'єкт – чорна діра (часто навіть без спалаху Наднової). Чорна діра – це ділянка простору, де поле тяжіння таке велике, що друга космічна швидкість для тіл, які там перебувають, є більшою за швидкість світла. З'ясовано, що колапс масивної зорі призводить до повної руйнації її речовини й появи точки сингулярності, в якій сила тяжіння зростає до нескінченності. Крім маси чорна діра успадковує момент інерції й електричний заряд зорі, що зазнала гравітаційного колапсу. Всі інші параметри зорі – її хімічний склад, спектральний клас тощо зникають.

Зовнішня межа чорної діри – замкнута поверхня, яку називають горизонтом подій. Якщо в чорну діру перетворилася зоря, яка не оберталася, то ця поверхня є сферою, радіус якої збігається з гравітаційним радіусом (його також називають радіусом Шварцшильда). Якщо зоря оберталася, то відцентрові сили стискають горизонт подій вздовж осі обертання і розтягують в площині екватора, тому сфера перетворюється в щось схоже на еліпсоїд. Окрім цього, обертання зменшує лінійні розміри горизонту.

Рис. 22.3. Чорна діра в подвійній зоряній системі (фрагмент малюнка художника-фантаста)



Горизонт подій – це просторова межа між подіями, які може фіксувати зовнішній спостерігач, і подіями, інформація про які не вийде назовні. Далеко від горизонту подій сила тяжіння чорної діри обернено пропорційна квадрату відстані, тому для віддаленого спостерігача вона проявляє себе як звичайне тіло певної маси.

Уявлення про фізичний вакуум, де постійно виникають і зникають віртуальні частинки, вказує на те, що чорні діри мають втрачати масу. Народжені парами, віртуальні частинки рухаються у протилежних напрямках (цього

вимагає закон збереження імпульсу). Якщо одна з них виникне зовні, а друга (античастинка першої) всередині горизонту подій чорної діри, то зовнішня за сприятливих умов може віддалитись від горизонту подій. Тобто, чорна діра є джерелом випромінювання і тому втрачає енергію, а отже, й масу. Це явище називають ефектом Гокінга, на честь фізика-теоретика, який його відкрив у середині 1970-х років.

Оскільки чорні діри не можна спостерігати прямо, для їх пошуку й вивчення застосовують непрямі методи. Зокрема, якщо чорна діра входить до складу тісної подвійної системи, а видима сусідка – це зоря-гігант, то під дією сили тяжіння її речовина буде перетікати на чорну діру. Падаючи в полі тяжіння діри, газ нагрівається до температури в мільйони кельвінів і випромінює рентгенівські промені. Найявність рентгенівського джерела – характерна ознака подвійних систем, куди входять чорні діри.

Нині відомо про велетенські чорні діри в ядрах масивних галактик, серед них і в нашій галактиці. Водночас припускають існування мікроскопічних чорних дір, що утворилися на самому початку Всесвіту.

### 3. Утворення хімічних елементів.

Астрономічні спостереження вказують на те, що зорі, міжзоряний газ, планети містять багато різних хімічних елементів – вуглець, кисень, азот, кремній тощо. Водночас відомо, що на початку існування Всесвіту (ч. 2, § 29) його впродовж сотень мільйонів років заповнювали лише водень (75 %), в меншій кількості гелій (23 %), а також в дуже малій кількості дейтерій, літій і берилій (2 %). Всі інші хімічні елементи утворилися в інший час існування Всесвіту в надрах зір, що є наслідком термоядерних реакцій.

Перше покоління зір сформувалося з водню й гелію приблизно через 300 млн років після виникнення Всесвіту. Термоядерні реакції, основне джерело енергії зір, «переплавляли» легкі ядра у важчі. Наприклад, вуглець виник після злиття трьох альфа-частинок в ядрах масивних зір, коли основна частина водню в них перетворилася в гелій. Внаслідок спалахів перших зір, синтезовані елементи розпорошувалися в космічному просторі. З цієї газопилової речовини згодом формувалися зорі другого покоління, які також робили свій внесок у хімію Всесвіту.

Спостереження дуже віддалених галактик вказує на те, що присутній там газ – це суміш водню і гелію. Ніяких слідів інших елементів у таких об'єктах не виявлено. Астрономи, які за традицією всі елементи, окрім водню й гелію, називають «металами», вказують на низьку металічність об'єктів, що виникали в ранньому Всесвіті.

Склад речовини у Всесвіті повільно змінюється і в нашу епоху. Зорі невпинно виробляють дедалі більше елементів, важчих за гелій. Спостереження вказують на те, що зорі з більшою металічністю мають вищу ймовірність сформувати біля себе планети. Тобто хімічна еволюція Всесвіту сприяє появі складних структур (можливо аж до появи розумних істот, тіла яких утворює

«попіл давно згаслих зір»). Водночас з'ясовано, що складна хімія – це доволі мала частина на тлі великої кількості водню, який досі є найпоширенішим елементом у Всесвіті. Щоправда, вся хімія нашого світу становить не більше п'яти відсотків від його загальної маси. У Всесвіті значно більше темної матерії і темної енергії (ч. 2, § 29).

### НАВЧАЛЬНІ ЗАВДАННЯ

- Поясніть, чому для нас (людей) важливими є спалахи Наднових?
- Опишіть якісно, що відбувається із зорею, яка стала Надноюю.
- Поясніть, чому не можна спостерігати прямо чорні діри?

### ВИСНОВКИ

Час існування зорі на головній послідовності діаграми Герцшпрунга–Рассела визначається її масою. Заключні етапи життя зорі також визначені її масою. Зорі, типу нашого Сонця, врешті перетворюються на білих карликів, масивніші – на нейтронні зорі, а наймасивніші закінчують своє існування у вигляді чорних дір. Усі хімічні елементи, окрім водню і гелію, виникли у процесі термоядерних реакцій в надрах зір і під час вибухів Наднових.

## § 23. МІЖЗОРЯНЕ СЕРЕДОВИЩЕ

Астрономи давно висловили припущення про те, що простір між зорями не порожній і не зовсім прозорий. Проте виявити міжзоряну речовину тривалий час не вдавалося.

### 1. Ознаки та властивості міжзоряного середовища.

У першій половині ХХ ст. було з'ясовано, що космічний простір заповнює міжзоряна речовина у вигляді надзвичайно розрідженого газу і пилу. Це впливало з відкриття поглинання (ослаблення) світла зір на шляху до земного спостерігача. Так виявили одну зі складових міжзоряного середовища – дрібний пил, через який воно не зовсім прозоре, а надто в напрямку на Молочний Шлях (рис. 23.1). Вже тоді астрономи дійшли висновку, що пил впливає на видимі блиск і колір далеких зір. Щоб знати їх справжні значення, треба було навчитися враховувати поглинання світла. Це сприяло інтересу до вивчення пилу, спершу як до завади для спостережень далеких об'єктів, а згодом і як до власне фізичного середовища (процеси виникнення і руйнації порошинок, взаємодія з випромінювання, роль у формуванні зір тощо).

Ступінь ослаблення світла залежить від кольору зорі. Від блакитних зір світло поглинається інтенсивніше, ніж від червоних. Тому якщо зоря ви-

промінює в блакитних і червоних променях однакову кількість енергії, то з поверхні Землі зоря здається червонуватою.

Міжзоряний пил – це суміш графітових, вуглецевих, кремнієвих і металевих частинок, середній радіус яких становить частки мікромметра. Вони вкриті оболонками з льоду газоподібних елементів (водень, кисень, аміак, метан) та багатоатомних органічних молекул. Ці речовини налипають на порошок чи утворюються на поверхні під час її переміщення в міжзоряному просторі. Під дією, наприклад, ультрафіолету частина цих речовин покидає поверхню пилинки, натомість інші намерзають або синтезуються. Температура пилу лежить у межах 15–25 К. У нашій галактиці (ч. 2, § 24) сумарна маса пилу становить 0,03 % від її маси. В інших зоряних системах ця кількість може бути іншою.



Рис. 23.1. Роздвоєння Молочного Шляху – наслідок послаблення випромінювання зір, спричиненого взаємодією світла з частинками пилу в міжзоряному середовищі

Крім пилу, між зорями є велика кількість невидимого холодного газу. Маса його майже в сто разів перевищує масу пилу. Про його існування стало відомо після того, як вдалося зареєструвати радіовипромінювання нейтрального водню з довжиною хвилі 21 см (частота 1420 МГц). Типова хмара атомарного нейтрального водню має температуру близько 70 К і невисоку густину (кілька десятків атомів в кубічному сантиметрі простору). Розміри хмар водню – від 10 до 100 пк (для порівняння: зорі в середньому перебувають одна від одної на відстані 1 пк).

Згодом було виявлено ще холодніші й щільніші хмари молекулярного водню  $H_2$ . Їхні розміри становлять від 5 до 50 парсек, тому всередину них не потрапляють ультрафіолетові промені, не відбувається іонізації атомів, унаслідок чого й можуть утворюватися молекули. Ці хмари зовсім непрозорі для видимого світла. Саме в них зосереджена велика частина холодного міжзоряного газу й пилу. Маса великих молекулярних хмар може досягати  $10^5$ – $10^6 M_{\odot}$ . Розподіл речовини в них неоднорідний – близько 100 частинок в  $1 \text{ см}^3$ . Але в ущільненнях може бути й десятки тисяч частинок в  $1 \text{ см}^3$ , а в ядрах цих ущільнень – мільйонів частинок в  $1 \text{ см}^3$ . Температура таких хмар – від 5 до 30 К. Загалом, близько половини міжзоряного газу міститься в молекулярних хмарах.

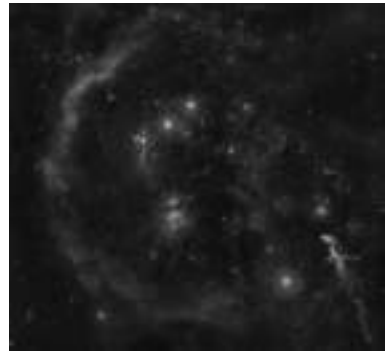
Більшість молекулярних хмар «видно» тільки в радіодіапазоні. Втім, деякі з них давно відомі астрономам. Наприклад, темна туманність Вугільний Мішок, яку видно незброєним оком в південній частині Молочного Шляху.

Діаметр цієї хмари 12 пк, але вона здається великою, бо лежить від Землі на відстані лише 150 пк. Її маса становить близько 5 тис. сонячних мас. Найближчі до нас ділянки зореутворення – це темні хмари в сузір'ях Тельця і Змієносця. Трохи далі міститься величезний комплекс хмар в сузір'ї Оріона (рис. 23.2).

Деяка частина міжзоряної речовини нагріта до дуже високих температур, тому її можна спостерігати в ультрафіолетових і рентгенівських променях. Найгарячіший газ із температурою близько мільйона градусів випромінює в рентгенівському діапазоні. Це – корональний газ, названий так за аналогією з розігрітим газом у сонячній короні. Він утворюється внаслідок спалахів наднових зір. Від місця вибуху в міжзоряному газі поширюється ударна хвиля і нагріває газ до температури, при якій він стає джерелом рентгенівського випромінювання. Ні в оптичних спостереженнях, ні в спостереженнях в радіодіапазоні цей газ «побачити» неможливо – середовище надто розріджене й повністю іонізоване, але, він заповнює істотну частину об'єму нашої галактики.

Великий обсяг міжзоряного газу і пилу сконцентрований в диску Галактики як шар завтовшки до двох сотень парсек. Він неоднорідний – найбільше пилу й газу, зосередженого, головню, в молекулярних хмарах, міститься в спіральних рукавах Галактики. За оцінками в нашій зоряній системі є близько 8 млрд сонячних мас міжзоряного газу, або приблизно 5 % від її повної маси.

Рис. 23.2. Приклад хмар молекулярного водню (комплекс хмар в сузір'ї Оріона). Три яскраві зорі в центрі зображення – пояс Оріона



Крім пилу та газу, в міжзоряному середовищі присутні магнітні поля. Вони пов'язані з хмарами міжзоряного газу й рухаються разом з ними. Ці поля приблизно в 100 тис. разів слабкіші, ніж магнітне поле Землі. Проте їх роль в Галактиці дуже важлива – вони сприяють утворенню найщільніших холодних хмар газу, в яких утворюються зорі.

На міжзоряне магнітне поле також реагують частинки космічних променів (п. 3): вони рухаються вздовж його силових ліній по спіральних траєкторіях. При цьому електрони зі складу космічних променів, випромінюють радіохвилі. Це випромінювання називають синхротронним.

## 2. Хімічний склад міжзоряного середовища.

Міжзоряний газ на понад 67 % складається з водню (H та H<sub>2</sub>), на 28 % – з гелію (He) і менше, ніж 5 % припадає на інші елементи. Найчисленніші серед яких кисень, вуглець і азот. В міжзоряному просторі з допомогою радіотелескопів сантиметрового й міліметрового діапазонів та методами

спектроскопії також виявлено воду, оксиди вуглецю, азоту, сірки і кремнію, хлористий водень, аміак, ацетилен.

У молекулярних хмарах, окрім водню, присутні й складніші молекули, наприклад, етиловий спирт ( $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ ), бензол ( $\text{C}_6\text{H}_6$ ), нафталін ( $\text{C}_{10}\text{H}_8$ ), а також найпростіші органічні сполуки – мурашина й оцтова кислоти. Виявлено гліцин ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{NO}_2$ ) – одну з амінокислот, що складають білок, а також толіни – великі й складні органічні молекули, які утворюються з простих органічних молекул внаслідок дії ультрафіолетового світла. Спостереження вказують: органічні речовини і їх компоненти поширені в космосі, причому не тільки в нашій зоряній системі, але й далеко за її межами.

Важливою є роль частинок пилу в хімічних реакціях, що відбуваються в міжзоряному середовищі. Вони є поверхнею, на якій молекули газу вступають у реакцію з молекулами інших речовин. Пилкові частинки поглинають ультрафіолет і видиме світло, виділяючи енергію у вигляді інфрачервоного світла. На ранніх стадіях еволюції зір пил може збиратися у великі згустки, що є першим кроком на шляху до формування планет.

Звідки в міжзоряному просторі береться пил? Існує два джерела пилу – потоки частинок від зір (зоряний вітер, аналог сонячного вітру) на різних етапах еволюції і спалахи Наднових. Холодні зорі (спектральні класи *M*, *R*, *N*, *S*) є джерелом молекул, наприклад,  $\text{TiO}$ ,  $\text{CN}$ ,  $\text{C}_2$ ,  $\text{ZrO}$ , які є основою для утворення частинок пилу. Наднові також є джерелом багатьох елементів для утворення пилин.

### 3. Космічні промені.

Це не випромінювання якогось світла, як вважали до середини ХХ ст., а потік заряджених частинок, головню протонів і альфа-частинок. До 1 % складу космічних променів – це ядра важких елементів аж до заліза чи навіть урану. Космічні промені – звичайна речовина, але сильно іонізована і прискорена майже до швидкості світла.

Якщо енергія космічної частинки, що входить в атмосферу Землі, становить не менше  $10^{13}$  еВ, то її взаємодія з ядрами елементів повітря спричиняє появу кількох мільярдів елементарних частинок (це явище назвали «широкою атмосферною зливою»). Вони досягають поверхні Землі на площі поперечником до 1000 метрів.

Космічні промені, що потрапляють в атмосферу Землі, здебільшого мають енергії до  $10^{14}$  еВ, але трапляються частинки з енергією  $10^{20}$  еВ. Де вони набувають такої енергії, поки не ясно, хоча й запропоновано кілька гіпотез. Наприклад, прискорення частинок відбувається в електричному полі пульсара, або – космічні частинки пов'язані з джерелами гамма-спалахів чи з досі суто теоретичними космічними струнами. Але всі ці гіпотези не пояснюють енергії наявних космічних променів.

Щоб розгадати таємницю походження космічних променів високих енергій будують спеціальні детектори, розміром в кілька квадратних метрів. Їх

об'єднують в наземні масиви, що покривають десятки квадратних кілометрів. Інший метод для вивчення космічних променів заснований на тому, що частинки зливи збуджують азот в атмосфері, який потім світиться. Таке світло можна спостерігати з поверхні Землі на відстані двадцяти кілометрів від осі зливи.

Рис. 23.3. Схема широкої атмосферної зливи, спричиненої космічною частинкою високої енергії



З 2007 р. в Аргентині діє обсерваторія імені П'єра Оже, оснащена 1600 водяними черенковськими детекторами. Вони розміщені на площі 3000 км<sup>2</sup> на відстані близько 1,5 км один від одного. Кожний детектор — бак, що містить 11 тонн дистильованої води. Вторинні частинки, потрапивши в воду, генерують черенковське випромінювання. Обсерваторія має також 24 телескопи, згруповані в чотири станції. Вони реєструють флюоресценцію азоту в атмосфері. Телескопи можуть вести спостереження тільки ясними безмісячними ночами, а водяні детектори працюють завжди.



Рис. 23.4. Обсерваторія імені П'єра Оже для реєстрації космічних променів

Окрім цих детекторів існують інші: як наземні, так і космічні. Але походження космічних променів, як і їх велика енергія, досі залишається загадкою.

---

### НАВЧАЛЬНІ ЗАВДАННЯ

- Поясніть, чому більшість молекулярних хмар «видно» тільки в радіодіапазоні?
  - У чому суть гіпотез, що висунуті для пояснення високих енергій космічних променів?
  - Поясніть, на яких фізичних процесах засновані методи реєстрації космічних променів?
- 

### ВИСНОВКИ

Основний компонент міжзоряного середовища – газ, що складається з атомів і молекул. Він перемішаний з пилом, який становить майже 1 % маси міжзоряної речовини, і пронизаний швидкими потоками елементарних частинок – космічними променями – і електромагнітним випромінюванням, які також є складовими міжзоряного середовища.



## Розділ III. Елементи позагалактичної астрономії

### ТЕМА 3.1. НАША ГАЛАКТИКА

#### § 24. БУДОВА ГАЛАКТИКИ

Великим зоряним містком, перекинутим через усе зоряне небо, видається спостерігачеві Молочний Шлях. Щоправда для жителів міст він став практично недоступним, адже його сяйво зникає в світлі яскравих вуличних вогнів. Молочний Шлях найкраще спостерігати далеко від великих поселень. В Україні особливо красивим він буває в серпні, коли проходить через зеніт від обрію до обрію.

##### 1. З історії вивчення Галактики.

Таємниця Молочного Шляху хвилювала людей впродовж багатьох століть. Міфи та легенди народів світу зберегли різні його назви – Чумацький Шлях (в Україні), Зоряний Міст, Небесна Ріка та інші. В стародавній Греції його називали *Galaxias kuklos*, що означає «молочне коло». Від «галактикос» (молочний) походить слово «галактика».

Ще старогрецькі мислителі, зокрема Піфагор, Левкіпп, Демокріт, вважали, що Молочний Шлях – це величезне скупчення зір, але то були не підкріплені доказами міркування. Лише Галілео Галілей, направивши в січні 1610 р. телескоп на зоряне небо, побачив у межах цієї сріблясто-білої смуги скупчення незліченних зір. Проте чому слабкі зорі концентруються у вузьку смугу, зрозуміти на той час було неможливо.

Вивчати будову Галактики не просто, бо ми перебуваємо всередині неї. Важко скласти план міста, якщо стояти на одному місці й роздивлятись тільки навсебіч. Спостереження нашої зоряної системи ускладнені, багато її деталей приховані від нас, бо Сонячна система лежить в її площині – ми не можемо охопити поглядом, оцінити будову Галактики. Незважаючи на ці труднощі астрономи, починаючи від піонерських робіт Вільяма Гершеля в XVIII ст., знайшли методи, щоб розкрити багато таємниць будови Галактики.

Метод, який В. Гершель застосував для вивчення будови Галактики, – це визначення кількості зір у полі зору телескопа на обраних ділянках (більше тисячі) небесної сфери (метод «черпків»). На основі цих спостережень він зробив висновок про форму Молочного Шляху як про «зоряний острів» у Всесвіті. Гершель створив схематичний малюнок, з якого випливало, що

наша зоряна система має неправильну витягнуту форму й нагадує величезний диск (рис. 24.1). Оскільки диск оточує Сонячну систему кільцем, то це означає, що Сонце міститься всередині нього і розташоване десь поблизу центральної частини. Такою уявляв В. Гершель Галактику й це уявлення існувало в астрономії майже до середини минулого століття.

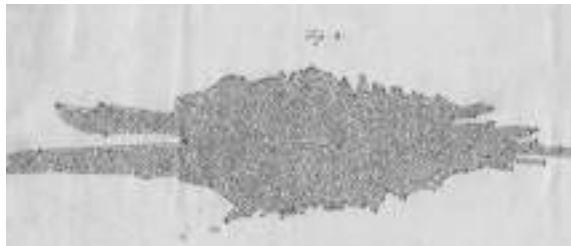


Рис. 24.1. Будова нашої галактики за уявленнями В. Гершеля

З висновків В. Гершеля випливало, що Сонце посідає в Галактиці центральне положення. Така структура була чимось схожа на геоцентричну

систему світу, прийняту до епохи Коперника, з тією лише різницею, що раніше центром Всесвіту вважали Землю, а не Сонце.

Лише в XX ст. вдалося виявити загальну будову нашої галактики, яка насправді дуже не схожа на те, як її уявляв Гершель. Цьому сприяли роботи багатьох астрономів, насамперед Едвіна Габбла і Вальтера Бааде.

## 2. Підсистеми Галактики.

Якби ми могли подивитися на Галактику ззовні, наприклад, «згори», то побачили б, що вона нагадує плоский диск, в якому чітко видно спіральні рукави (рис. 24.2).

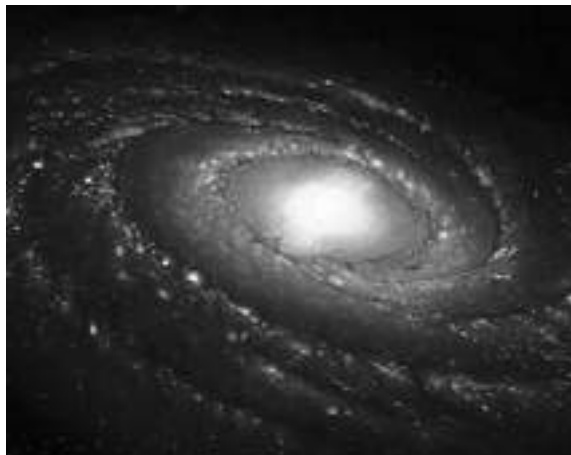


Рис. 24.2. Приблизно такий вигляд має наша галактика, якщо її розглядати «згори» чи «знизу»

Хоча зовнішній вигляд Галактики вказує на її плоску зовнішню форму, це не зовсім так. Її диск огортає гало – хмара розрідженої речовини. Навколо ядра з перемичкою (бар) і центрального потовщення (балдж) є велика кількість кулястих зоряних скупчень, утворених

старими холодними червоними зорями (рис. 24.3). Такий явний поділ нашої зоряної системи на окремі великомасштабні елементи дав підставу астрономам говорити про її підсистеми – плоску й сферичну. Кожна з них також поділяється на окремі підсистеми (табл. 24.1).

Таблиця 24.1 Підсистеми Галактики

НАЗВА	ХАРАКТЕРИСТИКА
<b>Галактичний центр</b>	У центрі нашої галактики міститься чорна діра, маса якої в 2,6 мільйони разів перевищує масу Сонця. Вона оточена щільним шаром газу і пилу, зоряними скупченнями, залишками наднових зір і молекулярною хмарою, маса якої у 10 тисяч разів більша за сонячну. Всі ці об'єкти утворюють ядро Галактики, яке на зоряному небі лежить у напрямку сузір'я Стрільця.
<b>Бар</b>	Протяжне утворення, що поєднує галактичний центр та спіральні рукави. Його виявили відносно недавно – наприкінці ХХ ст.
<b>Балдж</b>	Сферичне потовщення навколо ядра Галактики. Загальна маса балджа у 20 млрд разів перевищує масу Сонця. Тут переважають старі зорі з малим вмістом металів.
<b>Тонкий диск</b>	Поперечник тонкого диска становить понад 30 кпк, а товщина – від 92 до 920 пк. Ця підсистема Галактики вміщує лише п'ять відсотків галактичної маси, зате випромінює до 90 відсотків світла, бо саме в ній є багато молодих зір. Тут також багато газопилових хмар, де ще мільярди років будуть народжуватися нові зорі. В тонкому диску є два (можливо, чотири) великі й кілька десятків маленьких спіральних рукавів. Тонкий диск трохи вигнутий; його кривизна з незрозумілої досі причини змінюється з часом.
<b>Товстий диск</b>	Оточує тонкий диск і має такий самий діаметр. Його товщина становить від 920 до 5500 пк.
<b>Кулясті скупчення зір</b>	Підсистема Галактики до якої, за оцінками астрономів, входить близько трьохсот кулястих скупчень. Окреме скупчення вміщує від 10 тисяч до мільйона зір, що утримуються як єдине ціле силою гравітації. Обертаються навколо галактичного центра, часто перетинаючи диск галактики.
<b>Гало</b>	Утворення у вигляді еліпсоїда діаметром понад 184 кпк, що охоплює всі інші підсистеми Галактики. Обертається гало дуже повільно. Його маса становить від двох до шести трильйонів сонячних мас. До складу гало входять одинокі зорі, кулясті скупчення й газові хмари, причому загальна маса зір не перевищує мільярда сонячних мас. Проте основним компонентом гало є темна матерія.
<b>Корона</b>	Зовнішня підсистема Галактики – шар водневої плазми, що утворений, імовірно, внаслідок вибухів наднових зір.

Спіральна структура Галактики. В 50-х роках ХХ ст. з допомогою радіотелескопів було складено картину розподілу хмар іонізованого водню, що міститься в околицях Сонця. З'ясувалося, існують принаймні чотири ділянки, які можна було б ототожнити зі спіральними рукавами (або гілками) Молочного Шляху. Один із них, найближчий до Землі, називають рукавом Оріона – Персея. Той, що ближче до центра Галактики, назвали рукавом Лебеда, а два інші – рукавом Стрільця й рукавом Кентавра. Щоправда детальної картини спіральної структури Молочного Шляху досі немає: його гілки зливаються одна з одною, і визначити відстань до них дуже важко.

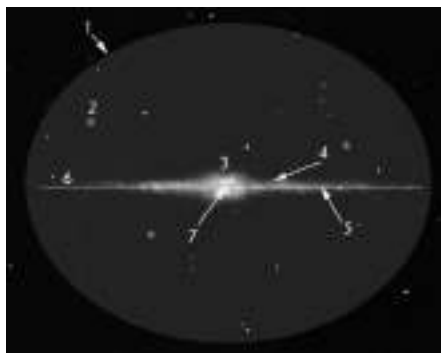


Рис. 24.3. Схематичний вигляд нашої галактики збоку: 1 – гало; 2 – кулясте скупчення; 3 – балдж; 4 – товстий диск; 5 – тонкий диск; 6 – галактичний екватор; 7 – галактичний центр з баром

Наявність спіральних гілок в Галактиці пояснюють гігантськими хвилями стиснення й розрідження міжзоряного газу, які пробігають галактичним диском.

Раніше астрономи вважали – Галактика звичайна спіральна зоряна система (ч. 2, § 26), але виявилось, що вона має бар. Перші докази існування такої структури з'явилися в 70-х роках ХХ ст. – на неї вказували орбіти зір і хмар газу в центрі Галактики, що не відповідали уявленням про лише спіральну структуру. Виявити бар вдалося в оглядах неба, виконаних у ближньому інфрачервоному діапазоні. Нині в астрономії превалює думка, що бари і спіралі – це не одвічні елементи галактик. Імовірно, ці структури виникають і зникають під дією гравітації у процесі еволюції зоряної системи.

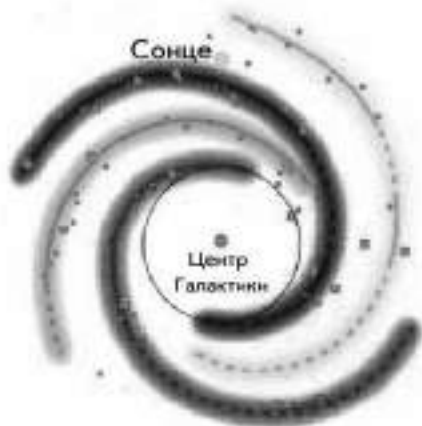


Рис. 24.4. Спіральна структура галактики Молочний Шлях, визначена на підставі радіоспостережень

Масу нашої галактики оцінюють у 150 млрд сонячних, а кількість зір – до 400 млрд. Але враховуючи відкриття холодних маломасивних коричневих карликів, які важко спостерігати, напевне їх кількість значно більша.

Оскільки зорі істотно відмінні між собою фізичними параметра-

ми, то В. Бааде розділив зоряне населення Галактики на дві групи – два типи населення. До населення I типу віднесено зорі, що заповнюють спіральні гілки Галактики, зорі розсіяних скупчень, довгоперіодичні цефеїди. Важливими представниками населення I типу є гарячі зорі – білі гіганти, зорі раних спектральних класів. Населення II типу – це зорі кулястих скупчень, зорі ядра Галактики. Серед цього типу населення виділяються яскраві червоні надгіганти.

Аналіз хімічного складу зоряних атмосфер призвів до висновку, що в зір населення I типу (належать до плоскої складової Галактики) металів приблизно у сто разів більше, ніж у зорях II типу (сферична складова). Це свідчить: розподіл зір на підсистеми має глибокий еволюційний сенс (населення I типу значно молодше за населення II типу).

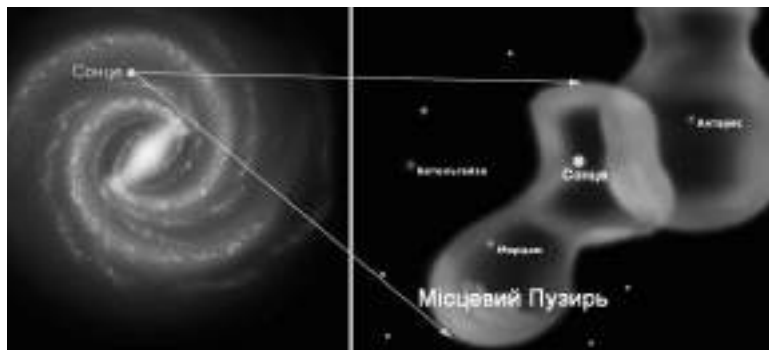
### 3. Місце Сонячної системи в Галактиці.

Сонце разом з планетами рухається навколо ядра Галактики в одному з її «тихих закутків». Відстань до центра Галактики становить близько 9 кпк. Перебуваючи на такій відстані, Сонце здійснює один оберт навколо нього за майже 230 млн років, які становлять галактичний рік (швидкість руху Сонця – 220 км/с). Земля вже облетіла навколо центра Галактики приблизно 30 разів.

Водночас Сонячна система міститься в дещо особливій ділянці Галактики. Цю ділянку називають Місцевою Бульбашкою (Місцевий Пузир, англ. – Local Bubble), бо вона має вигляд міхура радіусом приблизно в 90 пк. В ній є локальна міжзоряна хмара поперечником 10 пк, де нині й міститься Сонячна система. Специфіка цієї ділянки полягає в тому, що всередині неї густина міжзоряного газу не більша за 1 атом на  $10 \text{ см}^3$  – це приблизно у п'ятеро менше, ніж в навколишньому просторі. Сонце разом з планетами увійшли в цю хмару, за різними оцінками, від 44 до 150 тис. років тому, а вийде з неї протягом десятків чи сотень тисяч років.

Місцева Бульбашка – явище молоде. Ще 10 млн років тому вона не існувала, і Сонце з планетами рухалося крізь густіший, але й холодніший газ. Проте спалахи наднових зір на відносно близькій відстані від Сонця вимели з його околиць велику кількість газу, сприяючи утворенню Місцевого Пузиря.

Рис. 24.5.  
Приблизне місце  
розташування  
Сонця в галактиці  
та Місцевий Пузир



Під час утворення Місцевого Пузиря тиск газу мав би знищити локальну міжзоряну хмару. Але цього не трапилося, бо хмара має відносно сильне магнітне поле. Воно в сотню тисяч разів слабкіше, ніж магнітне поле Землі, але цього досить, щоб утримувати хмару від руйнування зовнішніми чинниками.

Сонячна система рухається крізь локальну міжзоряну хмару зі швидкістю близько 25 км/с, оточена геліосферою. Заряджені частинки міжзоряної речовини всередину Сонячної системи не проникають – геліосфера їх відхиляє. Натомість ті, що не мають заряду, проникають у внутрішню частину нашої планетної системи. Більшість із них потрапляє в сферу впливу Сонця і падає на нього. Для їх реєстрації та аналізу використовують космічні зонди, наприклад, IBEX (Interstellar Boundary Explorer, зонд для дослідження міжзоряного кордону). Він також вивчає взаємодію заряджених частинок на далеких кордонах Сонячної системи. Дані, отримані цим зондом, а також космічними апаратами «Вояджер-1», «Вояджер-2» та «Кассіні», свідчать, що форма геліосфери майже сферична, а не кометоподібна, як вважали раніше.

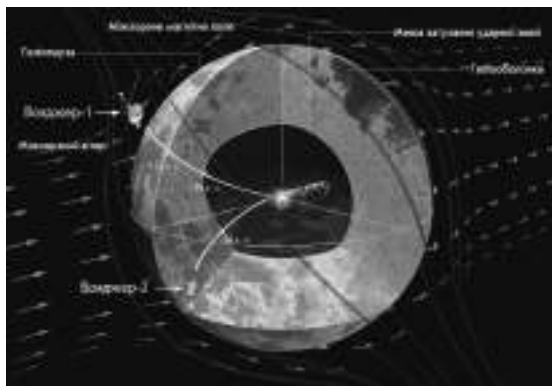


Рис. 24.6. Уявлення про геліосферу, що екранує близько 90 % космічних променів, захищаючи Сонячну систему

#### ТИПОВА ЗАДАЧА

- Обчисліть, бодай грубо, скільки часу космічний апарат «Вояджер-1» перетинатиме диск Галактики, рухаючись з швидкістю

стю 17,0 км/с.

**Відповідь:** Діаметр диска Галактики становить приблизно  $3 \cdot 10^4$  пк (або  $9 \cdot 10^{17}$  км). З формули  $s = t \cdot v$ , знаходимо  $t = 0,53 \cdot 10^{17}$  с, або  $1,58 \cdot 10^9$  років.

#### НАВЧАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

- Уявіть собі, що ви спостерігаєте Галактику, перебуваючи на самому краю її диска, де зір уже вкрай мало. Яким ви побачите тоді зоряне небо?

#### ВИСНОВКИ

Зоряну систему, в якій міститься Сонце, називають *Галактикою* (інакше – наша галактика, або Молочний Шлях). В ній розрізняють плоску і сферичну підсистеми, які також поділяються на кілька складових.

## § 25. РОЗПОДІЛ РЕЧОВИНИ В ГАЛАКТИЦІ ТА ЇЇ СУПУТНИКИ

Розподіл речовини в Галактиці – нерівномірний. Окрім зір, в ній є зоряні скупчення й асоціації, а також туманності. Значна частина речовини нашої галактики сконцентрована в міжзоряному просторі – в газопилових хмарах. Довкола Галактики (у полі її сили тяжіння) є кілька десятків невеликих зоряних систем – її супутники.

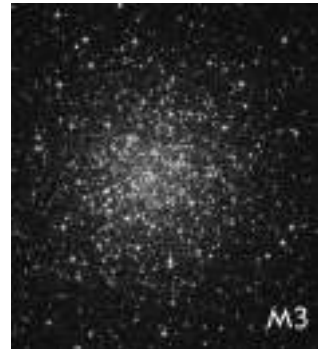
### 1. Зоряні скупчення і асоціації.

Пов'язані взаємним тяжінням групи зір спільного походження називають зоряними скупченнями. Їх поділяють на два види – розсіяні й кулясті.

Кулясті зоряні скупчення – це щільні системи, що складаються з сотень тисяч чи кількох мільйонів зір. Через велику взаємну силу тяжіння зір вони мають правильну, майже сферичну, форму, що істотно не змінюється мільярди років. Просторова концентрація зір у скупченні різко зростає від його периферії до центра, іноді досягаючи тисячі на 1 кубічний св. р. Середня відстань між зорями становить приблизно 0,15 пк, а в центральних частинах – до 0,05 пк. Типові поперечники кулястих скупчень: 21–61 пк.

Розподіл цих об'єктів у Галактиці має сферичну форму – вони концентруються навколо її ядра, перебуваючи на великих відстанях від диска. Кулясті зоряні скупчення обертаються навколо галактичного центра з періодами в сотні мільйонів років. Їхні орбіти – дуже витягнуті еліпси, по-різному нахилені до площини нашої зоряної системи.

Рис. 25.1. Своїм зовнішнім виглядом кулясті скупчення вирізняються серед інших об'єктів. Унаслідок дуже великих відстаней від Землі їх майже неможливо спостерігати неозброєним оком. Лише три з них (у сузір'ях Геркулеса, Змії і Стрільця) в темні безмісячні ночі можна побачити без допомоги телескопа, як у край слабкі туманні плями



Зорі кулястих скупчень найстаріші в Галактиці. Їх вік становить 5–6, а інколи й більше 12 млрд років. За такий час масивні зорі, що виникли на початку формування скупчення, віджили свій вік, тому в кулястих зоряних скупченнях нині присутні лише маломасивні зорі, більшість з яких перебуває на пізніх стадіях еволюції. Головна їхня особливість – низький вміст важких елементів – майже в 100 разів менший, порівнюючи з Сонцем, і відсутність серед них блакитних зір.

У кулястих скупченнях є багато пульсуючих змінних зір, що належать до різних типів. Найчисленнішими (до 90 %) є змінні типу RR Ліри або ліриди – це короткоперіодичні цефеїди, гіганти спектральних класів A – F, період

пульсації яких становить 0,2–1,2 доби. Вони мають температури поверхонь 6400–7600 К, маси 0,6 сонячної і перебувають на прикінцевих стадіях своєї еволюції.

У кожному окремому кулястому скупченні хімічний склад зір схожий, але від скупчення до скупчення він може бути дуже різним. Загалом ті, що лежать ближче до центра Галактики, багатші на метали, ніж периферійні скупчення.

Розсіяні зоряні скупчення об'єднують від кількох десятків до кількох тисяч зір і містяться в диску Галактики поблизу її площини. Їх ще називають відкритими, бо вони не мають чіткої зовнішньої межі. За спостережень ці скупчення проявляють себе як ділянки, на яких є більше зір, ніж у середньому на небі. Якщо, наприклад, в тій частині Молочного Шляху, де нині міститься Сонце, середня відстань між зорями становить 2–3 пк, то в розсіяних скупченнях така відстань становить 0,6 пк.

У структурі розсіяних зоряних скупчень виділяють ядро, діаметр якого не перевищує 20–30 пк (середнє значення лежить в межах 5–6 пк) і корону, діаметр якої в 2–10 разів більший, ніж діаметр ядра.

Зорі розсіяних скупчень зазвичай молоді віком – приблизно десятки чи сотні мільйонів років. Проте трапляються скупчення, де зорі мають вік у кілька мільярдів років (5–6 млрд років), наприклад, М67. Отже, розсіяні скупчення можуть бути між собою значно відмінні зоряним складом. У молодих скупченнях, окрім інших зір, є багато блакитних гігантів, але немає гігантів червоних. У скупченнях віком в мільярди років навпаки: є червоні надгіганти, гіганти, цефеїди, спалахуючі та ін., що властиво зорям на пізніх етапах еволюції, але немає блакитних гігантів.

Розсіяні скупчення не завжди досягають «глибокої старості». Через слабкий гравітаційний зв'язок між членами скупчення й під впливом гравітаційного поля Галактики за проміжок часу від кількох сотень мільйонів до кількох мільярдів років вони розпадаються. Найстаріші розсіяні зоряні скупчення водночас і найщільніші, вочевидь, в них діють великі гравітаційні сили.

Зорі в кожному окремому розсіяному скупченні мають приблизно однаковий хімічний склад, що свідчить про їх спільне походження. Загалом вміст важких хімічних елементів у зорях різних скупчень різниться не більше, ніж в 5 разів, і в середньому близький до сонячного. Хоча відмінність хімічного складу окремих зір у скупченні може бути значною, якщо це скупчення великого віку. Масивні зорі в таких скупченнях встигли далеко пройти своїм еволюційним шляхом і значно змінити хімічний склад, порівнюючи з початковим. Спостереження також вказують на можливу залежність хімічного складу розсіяних скупчень від відстані до центра Галактики: що ближче скупчення до центра, то більше в ньому важких елементів.

Вивчення зоряних скупчень важливе для розуміння процесів еволюції зір, хоча вивчати їх не просто. Через низьку зоряну щільність зорі скупчень легко сплутати з випадковими зорями, що лежать в тому самому напрямку.



Виділити реальні групи зір можна, дослідивши їхній рух у просторі й відстані від Сонця. Якщо зорі, що містяться приблизно на однаковій відстані від нас, рухаються в одному напрямку, мабуть вони справді пов'язані в одну систему. Нині виявлено понад 1200 розсіяних скупчень. Найвідоміші серед них – Плеяди (M45) і Гіади в сузір'ї Тельця. Крім них, привертають увагу дуже яскраві й красиві розсіяні скупчення: M44 (Ясла) в сузір'ї Рака,  $h$  і  $\chi$  у сузір'ї Персея, M6 у сузір'ї Скорпіона, M35 у сузір'ї Близнюків.

Рис. 25.2. Розсіяні зоряні скупчення: Плеяди – M45 в сузір'ї Тельця (а) і  $h$  і  $\chi$  в сузір'ї Персея (б)



Окрім розсіяних зоряних скупчень, в Галактиці відкрито ще один схожий тип

утворень, де зорі мають спільне походження – зоряні асоціації. Вони не такі щільні, як скупчення, і більші розмірами: їх протяжність становить 60–100 пк. Зважаючи на зоряне населення, асоціації поділяють на *OB*- і *T*-асоціації.

Типове населення *OB*-асоціацій – гарячі блакитні гіганти спектральних класів *O* та *B*. Це – дуже масивні зорі (10–50 мас Сонця), які швидко еволюціонують. Прикладом *OB*-асоціації є група зір, що оточують розсіяне скупчення  $h$  і  $\chi$  Персея. В *OB*-асоціаціях є багато газопилової матерії, але під дією тиску випромінювання *O*-зір вона швидко вимітається за їх межі. Оскільки зорі в таких асоціаціях перебувають досить далеко одна від одної і гравітаційно між собою пов'язані слабо, це може призвести до того, що з часом густина речовини в асоціації стане замалою для утримання зір укупі, й вона розсіється під впливом гравітаційного поля Галактики. *OB*-асоціації мають поперечники від 30 до 200 пк. У деяких з них виявлено розсіяні зоряні скупчення.

Рис. 25.3. Зоряна асоціація NGC 3603

*T*-асоціації містять велику кількість зір типу *T* Тельця. Це – молоді нестаціонарні зорі, що перебувають у процесі стискання і світять за рахунок перетворення гравітаційної енергії в теплову. Зорі типу *T* Тельця ще не вийшли на головну послідовність діаграми Герцшпрунга–Рассела, для них властива велика втрата маси через активне витікання речовини з поверхні. Вони мають маси до 3-х сонячних і належать



до спектральних класів *G*, *K* та *M*. Оскільки *T*-асоціації – досить щільні групи (їхні поперечники не перевищують кількох десятків світлових років) зір з майже однаковими швидкостями, вони можуть бути доволі стійкими.

До складу *OB*-асоціацій в невеликій кількості часто входять і зорі типу *T* Тельця, тому їх іноді називають асоціаціями *OB+T*. Але до складу *T*-асоціацій рідко входять зорі *O* та *B*.

Зоряні асоціації пов'язані з масивними хмарами холодного молекулярного газу, з якого й формуються зорі. Вони є місцем зореутворення, де цей процес або нещодавно закінчився, або триває й нині.

## 2. Туманності.

До початку XX ст. астрономи називали туманністю будь-який об'єкт незоряної природи, що мав вигляд розмитої світлої плями. Згодом було з'ясовано, що багато з таких туманностей насправді є зоряними системами або галактиками. Нині в астрономії туманностями називають скупчення газу й пилу, що відокремлені у просторі та пов'язані силами гравітації або зовнішнім тиском. Їх маса може бути від 0,1 до 10 000 мас Сонця, а розмір – від 1 до 10 парсек. Туманності виділяються на тлі зоряного неба своїм випромінюванням або поглинанням випромінювання.

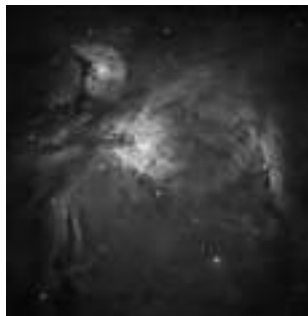


Рис. 25.4. Одна з найвідоміших світлих туманностей – туманність Оріона (M42)

Туманності, що є в Галактиці, поділяють за їх зовнішнім виглядом на планетарні й дифузні, а відповідно до фізичної природи, – на газові, пилові та газопилові. Всі планетарні туманності й частина дифузних є газовими. Пилові туманності бувають і світлими (рис. 25.4), і темними (рис. 25.5).



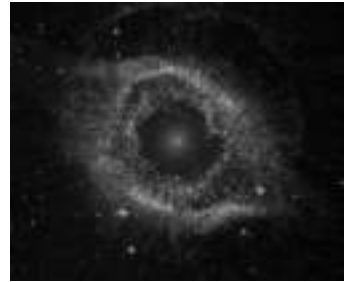
Рис. 25.5. Одна з найвідоміших у північній півкулі неба темних туманностей – Кінська Голова в сузір'ї Оріона

Світлі туманності поділяють на ті, що відбивають світло, й такі, що світять самі (світлі емісійні туманності, спектр яких, головню, складається з ліній випромінювання). Перші з них – це газопилові хмари, що самі не випромінюють, а лише відбивають світло близьких до них зір. Вони мають неперервний спектр, пересічений слабкими лініями поглинання. Оскільки газ у складі таких хмар краще розсіює короткохвильове випромінювання, туманності цього типу мають синювате забарвлення.

Туманності, що світять, – це газопилові хмари, поряд з якими є молоді гарячі зорі, здатні своїм ультрафіолетовим випромінюванням збуджувати атоми газу. Атом водню, поглинаючи ультрафіолетовий квант, іонізується, а коли згодом електрон з'єднується з протоном, щоб знову утворити нейтральний атом, поглинуту раніше енергію він випромінює як видиме світло.

Темні туманності – це щільні, зазвичай молекулярні, газопилові хмари, непрозорі через поглинання пилом світла віддаленіших зір. Вони не випромінюють світла, тому здаються чорними, а видимими стають за умови контрасту зі світлішими сусідніми ділянками зоряного неба. Однією з найвідоміших темних туманностей є туманність Кінська Голова в сузір'ї Оріона.

Рис. 25.6. Планетарна туманність Равлик у сузір'ї Водоля



Наприкінці XVIII ст. В. Гершель назвав слабкі туманні об'єкти, чий вигляд нагадував йому планетні диски Урана й Нептуна, планетарними туманностями. Нині відомо, що вони не пов'язані з планетами, проте історично склалося так, що ця назва за ними закріпилася.

Поперечники планетарних туманностей бувають від сотих часток парсека до одного парсека, тобто всі вони значно більші, ніж поперечник Сонячної системи.

Частина дифузних туманностей – це залишки спалахів наднових зір. Велику кількість таких залишків відкрито завдяки їх потужному синхротронному радіовипромінюванню.

Ці туманності – відносно молоді об'єкти, їх вік становить від кількох сотень до кількох тисяч років. Це пов'язано з тим, що згодом вони розріджуються й фактично зникають.

Дуже часто великі дифузні газові туманності мають досить хаотичні химерні форми, що свідчить про їх нестабільність. Міжзоряне магнітне поле, ймовірно, деякою мірою перешкоджає розсіюванню дифузної речовини. Маса дифузних емісійних туманностей дуже різні: від часток сонячної маси до кількох сотень, а іноді до 1–5 тисяч мас Сонця.

### 3. Супутники Галактики.

Перші два супутники нашої галактики відкрили 1519 р. під час кругосвітньої подорожі Фернандо Магеллана. Ці туманні плями, видимі неозброєним оком на зоряному небі південної півкулі Землі, назвали Великою й Малою Магеллановими Хмарами.

Те, що Магелланові Хмари є зоряними системами, астрономи з'ясували тільки тоді, коли навчилися визначати відстані до таких об'єктів. Велика Магелланова Хмара лежить на відстані понад 52 000 пк, а Мала – 61 000 пк.

Обидві Хмари з'єднані з нашою галактикою Магеллановим потоком, що складається з газу.

До початку 90-х років ХХ ст. ці об'єкти вважали єдиними супутниками Галактики. Але відтоді, як 1994 р. виявили карликову галактику в сузір'ї Стрільця (вона лежить на відстані приблизно 16 000 пк від центра Галактики), кількість супутників зростає до кількох десятків.



Рис. 25.7. Велика і Мала Магелланові Хмари на зоряному небі Землі

Усі вони є невеликими (розміром, масою, кількістю зір) галактиками, що перебувають у полі тяжіння нашої зоряної системи. Імовірно, що якась частина зір цих галактик вже перебуває

в галo Молочного Шляху. Тобто повільно відбувається процес поглинання Галактикою цих карликових зоряних систем. Через кілька мільярдів років наша галактика поглине й обидві Магелланові Хмари.

### НАВЧАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

- Поясніть, в чому полягає істотна відмінність між зоряними скупченнями та зоряними асоціаціями.

### ВИСНОВКИ

Розподіл речовини в Галактиці дуже нерівномірний. Окрім зір, у нашій зоряній системі є зоряні скупчення (розсіяні й кулясті) та асоціації, а також різної природи туманності. Значна частина речовини нашої галактики сконцентрована в міжзоряному просторі – в газопилових хмарах.

---

## ТЕМА 3.2. ГАЛАКТИКИ

---

### § 26. ТИПИ ГАЛАКТИК

Ще сто років тому астрономи сприймали нашу галактику як увесь зоряний Всесвіт. Однак у 20-х роках ХХ ст. було розгадано таємницю «острівних всесвітів», тьмяних цяток на зоряному небі, які спостерігав у свій час В. Гер-

шель. Як з'ясувалося, багато з цих об'єктів є зоряними системами, тобто галактиками.

### 1. З історії відкриття зоряних систем.

З допомогою своїх телескопів Вільям Гершель відкрив на зоряному небі кілька тисяч туманних плям, схожих на Туманність Андромеди. Окремі науковці висловлювали припущення, що це можуть бути зоряні системи, такі як Молочний Шлях. Але їхня природа була невідома ще понад 100 років. (У 1899 р. німецький астроном Юліус Шейнер виявивши схожість між оптичними спектрами Сонця й Туманності Андромеди, висловив припущення, що туманна пляма в сузір'ї Андромеди є величезним скупченням зір.)

На початку ХХ ст. астрономи дискутували щодо природи «острівних усесвітів» (так В. Гершель називав туманні плями, в яких було чітко видно спіральну структуру). Одні вважали, що всі ці об'єкти належать нашій галактиці. Інші наполягали на тому, що це зоряні системи, які лежать за межами Галактики і схожі з нею природою.

1923 р. американський астроном Едвін Габбл з допомогою 2,5-метрового телескопа обсерваторії Маунт-Вілсон виявив у Туманності Андромеди цефеїди. Із залежності період-світність (ч. 2, § 20, п. 2) для цефеїд він обчислив відстань до Туманності Андромеди. Хоча Габбл і помилився з її значенням, але вона виявилася значно більшою, ніж розміри Галактики. Стало очевидним, що об'єкт у сузір'ї Андромеди – зоряна система. Згодом Габбл встановив відстані до деяких інших «туманних плям» і показав, що вони перебувають далеко за межами Молочного Шляху. Так було з'ясовано, що наша галактика не єдина зоряна система у Всесвіті й започатковано новий розділ астрономії – позагалактичну астрономію.

Рис. 26.1. Туманність Андромеди – галактика, доступна для візуальних спостережень з території України та її зображення (на вставці), отримане з допомогою великого телескопа



Галактики – це гігантські зоряні системи, пов'язані в єдине ціле гравітаційною взаємодією. Вони розділені у просторі величезними відстанями. Від багатьох із них світло летить до нас сотні мільйонів і мільярди років. Не дивно, що вивчати їх можна лише в потужні телескопи. На небі Землі є лише три галактики, які відносно легко можна бачити неозброєним оком. Одна з них – Туманність Андромеди – доступна для спостережень в Україні. Ця зоряна система віддалена від нас на 2,5 млн св. р. Дві інші галактики – Велика та Мала Магелланові Хмари видно на зоряному небі Південної півкулі Землі.

## 2. Головні параметри галактик різних типів.

Світ галактик дуже розмаїтий. Тому не дивно, що нині є кілька класифікацій цих об'єктів. Першим галактики за їх зовнішнім виглядом класифікував Е. Габбл. Він виділив три типи галактик: еліптичні; спіральні й неправильні.



Рис. 26.2. «Камертон Габбла» – класифікація галактик, виконана Е. Габблом за їх зовнішнім виглядом

*В еліптичних галактиках (їх позначають літерою E) зорі розподілені переважно сферично-симетрично,*

тому такі галактики схожі на кулясті скупчення (рис. 26.3). Їхні зорі старі, зоряного населення II, серед яких найяскравіші – червоні гіганти. Саме вони забарвлюють в червонуваті кольори всю галактику в цілому. Оскільки в таких галактиках майже немає міжзоряної матерії, зореутворення в них не відбувається. Маси еліптичних галактик дуже відмінні між собою: від менших за один мільйон (карликові еліптичні галактики) до кількох тисяч мільярдів сонячних мас (гігантські еліптичні галактики).



Рис. 26.3. Одна з найбільших еліптичних галактик М 87 (об'єкт під номером 87 у каталозі Месьє) лежить на небесній сфері в напрямку сузір'я Діви

*Для спіральних галактик (S) властива структура у вигляді плоского тонкого диска, де міститься більша частина зір. У диску чітко видно спіральні рукави, або гілки, які огортають центральну світну зону – балдж. Залежно від ступеня «закрученості» рукавів, ці галактики підрозділяють на три типи і позначають Sa, Sb, Sc (рис. 26. 4).*

*Спіральні галактики з туго закрученими рукавами відносять до типу Sa. Вони мають яскравий і протяжний балдж, а рукави – нечіткі й розмиті. Якщо спіралі потужніші й чіткіші, а центральна зона виділяється менше, то такі галактики відносять до типу Sb. За наявності кльочкуватої спіральної структури й балджа, що виокремлений слабо, галактики відносять до типу Sc.*

*До окремої групи належать спіральні галактики з перемичкою (SB): ядро галактики перетинає пряма зоряна смуга – перемичка, або бар, з якої й «ростуть» спіралі (рис. 26.5). Залежно від зовнішнього вигляду спіралей, ці галактики також підрозділяють на три типи (SBa, SBb і SBc).*

Диски спіральних галактик зазвичай складаються з молодих зір зоряного населення I, які головно локалізуються в спіралях. Старі зорі населення II перебувають переважно в гало, тобто на периферії галактики. Крім того, міжзоряний простір у дисках спіральних галактик заповнений великою кількістю пилу та газу, з яких активно утворюються зорі.

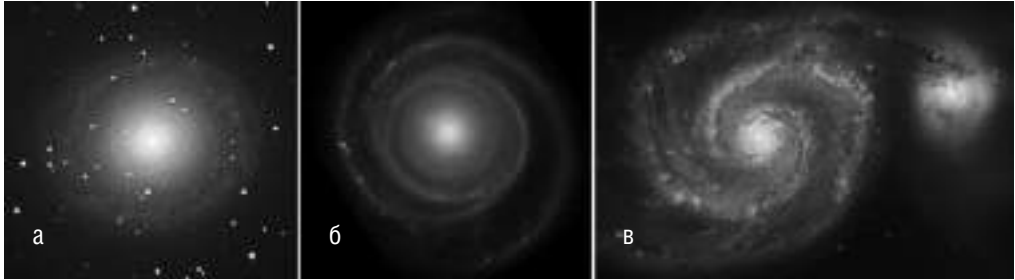


Рис. 26.4. Приклади спіральних галактик типу Sa (а), Sb (б), Sc (в)

Інші галактики через неможливість визначити їхню форму класифікують як неправильні (*Ir*). Їхні маси малі (соті частки маси Молочного Шляху), і зазвичай вони є супутниками більших галактик. Типовий приклад таких зоряних систем – Магелланові Хмари. Неправильні галактики мають багато міжзоряної речовини й молодих зір.



Рис. 26.5. Спіральна галактика з перемичкою (тип Sba)

Починаючи з 40-х років XX ст. відкрито зоряні системи, що випадають з традиційної класифікації Габбла, – це галактики з активними ядрами. До них належать галактики Сейферта, галактики Маркаряна, радіогалактики, квазари та деякі інші. Для всіх цих об'єктів, як порівняти зі звичайними галактиками, властива дуже інтенсивна енергетична діяльність у центральних зонах, зокрема в ядрі.

Рис. 26.6. Галактика Сейферта – один з типів активних галактик

1943 р. К. Сейферт опублікував список з десяти галактик, які тепер називають сейфертовськими. У них надто малі, але дуже яскраві ядра. Розмірами й формою – це спіральні галактики, схожі на нашу, але ядро діаметром близько 300 пк випромінює до 40 % світла всієї



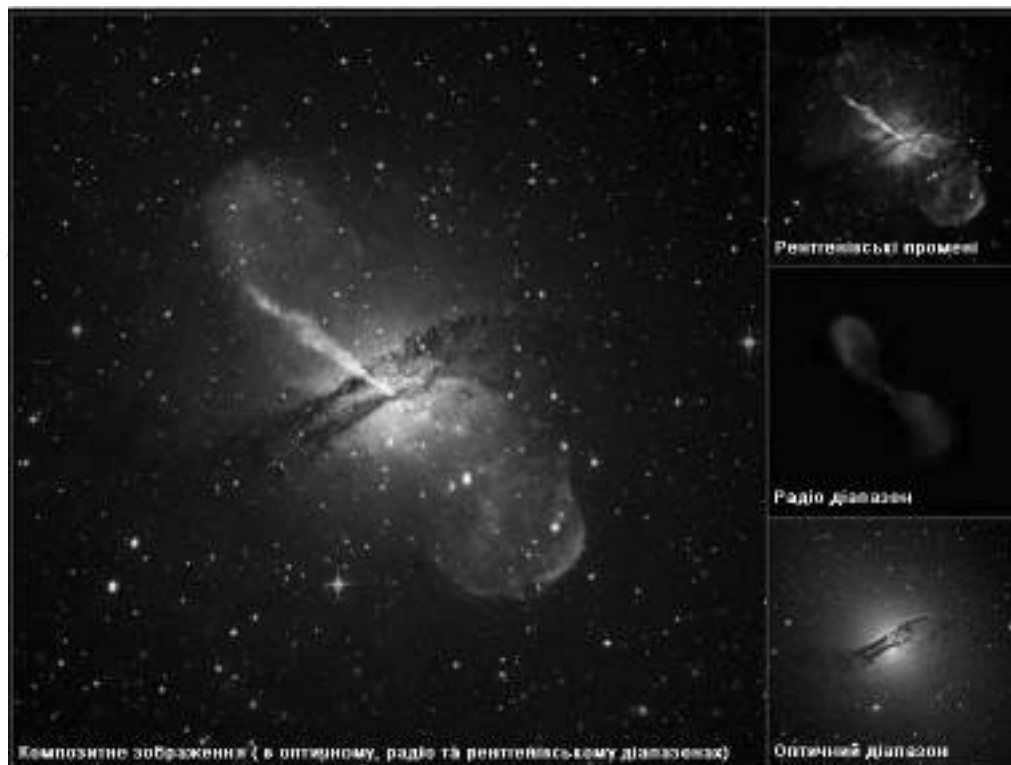


Рис. 26.7. Еліптична галактика із сузір'я Кентавра – приклад радіогалактики

Радіогалактики виявляють себе як два джерела інтенсивного радіовипромінювання, симетричні відносно оптичної галактики в тих місцях, де оптичні телескопи «бачать» лише порожній простір. Прикладом такої галактики є зоряна система Кентавр А (рис. 26.7).

В еліптичних галактиках практично немає міжзоряної речовини. То звідки береться в них газ, здатний тривалий час підтримувати явище радіогалактики? Збагачення такої галактики газом відбувається через поглинання нею багатой на міжзоряну речовину спіральної зоряної системи.

### 3. Квазари.

У 60-і роки ХХ ст. було зроблено ще одне важливе відкриття: деякі з потужних, але надзвичайно віддалених радіоджерел за спостережень в оптичному діапазоні своїм зовнішнім виглядом більше нагадували зорі, ніж галактики. Їх було виділено в особливий клас і названо квазарами (квазізоряними радіоджерелами). Водночас було з'ясовано: оптичні спектри квазарів дуже схожі на спектри галактик Сейферта.

Вимірювання в спектрах квазарів червоного зміщення показало, що вони дуже швидко рухаються і перебувають на відстані 460–3070 Мпк від Землі.



Тобто, квазари – це одні з найвіддаленіших від нас об'єктів Всесвіту, що випромінюють величезну кількість енергії. Один з найпотужніших нині квазарів S 50014+81 випромінює енергію в 60 тисяч разів інтенсивніше ніж уся Галактика.

Рис. 26.8. Зображення квазара 3С 175, отримане за допомогою космічного телескопа імені Габбла

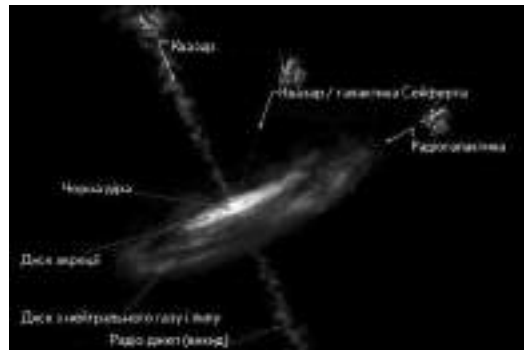


Природа квазарів упродовж двох десятик років була для астрономів загадкою, але копіткі спостереження дали змогу встановити: квазари не що інше, як дуже компактні й активні ядра деяких галактик, де в об'ємі розмірами з Сонячну систему відбувається колосальне виділення енергії. Завдяки цьому ядра такі яскраві, що слабкі спіральні рукави галактик дуже важко побачити (рис. 26.8).

Квазари відносять до галактик з активними ядрами, в яких містяться надмасивні (від 100 млн до 1 млрд сонячних мас) чорні діри. Речовина, що падає в чорну діру, формує навколо неї в екваторіальній площині кільцеву структуру, яку називають акреційним диском. Падаючи в діру вздовж спіралі, газ внаслідок внутрішнього тертя сильно нагрівається й випромінює інфрачервоні, видимі, ультрафіолетові, рентгенівські промені, а часом і гамма-кванти, які можна зареєструвати.

Розмаїття галактик з активними ядрами, імовірно, лише зовнішнє й залежить від того, під яким кутом їх видно. Споглядаючи галактику з ребра, її оптичного випромінювання, значно ослабленого пилом, ми не бачимо. Але з ділянок обабіч галактичного диска, куди простягаються два перпендикулярні до його площини викиди речовини з ядра, нас без перешкод досягають радіохвилі – тоді це радіогалактика. Якщо галактика зорієнтована так, що викид спрямований уздовж лінії зору спостерігача, то можна прямо бачити її дуже яскраве ядро – тоді вона проявить себе як квазар. І нарешті, якщо площина галактичного диска має якийсь кут нахилу до променя зору спостерігача і можна спостерігати лише один викид, то, залежно від величини цього кута, об'єкт має вигляд або радіогалактики, або квазара.

Рис. 26.9. Об'єкт з активним ядром та його різновиди залежно від кута зору спостерігача (галактика Сейферта, радіогалактика, квазар)



Крім того, можливо квазари, радіогалактики й галактики Сейферта – це об'єкти одного роду, які перебувають на різних етапах своєї еволюції. Схоже на те, що за віком квазари молодші, а галактики Сейферта – старіші.

### НАВЧАЛЬНІ ЗАВДАННЯ

- Яка особливість і яких зір дозволила Е. Габблу визначити відстань до Туманності Андромеди?
- Опишіть відмінності між галактиками різних типів згідно з класифікацією Е. Габбла.

### ВИСНОВКИ

Галактики – це гігантські зоряні системи, зв'язані в єдине ціле гравітаційною взаємодією. Світ галактик надзвичайно різноманітний. Досі існує кілька класифікацій цих об'єктів. Першу спробу класифікувати галактики за їхнім зовнішнім виглядом здійснив у 1925 р. Е. Габбл. Він виділив три типи галактик: еліптичні; спіральні та неправильні. У 40-х роках ХХ ст. виявили галактики з активними ядрами, а на початку 60-х років – квазари.

### § 27. ВЕЛИКОМАСШТАБНА СТРУКТУРА ВСЕСВІТУ

Вивчення об'єктів, що лежать за межами нашої галактики нині відбувається дуже активно. Цьому сприяє те, що астрономи мають великі телескопи й чутливі приймачі випромінювання.

#### 1. Закон Габбла-Леметра, визначення відстаней до галактик.

Дослідження Е. Габбла, зокрема спектрів галактик, виявили важливу закономірність: що далі галактика від Землі, то з більшою швидкістю вона рухається, віддаляючись від нас. Такий висновок було зроблено на підставі зміщення спектральних ліній галактик у червону ділянку спектра (рис. 27.1).

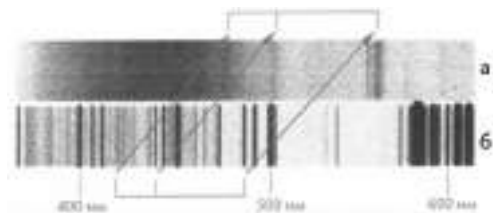


Рис. 27.1. Зміщення спектральних ліній галактики в червону ділянку спектра (а) у порівнянні з лабораторним (еталонним) спектром (б)

Фактично Габбл пояснив зміщення спектральних ліній дією відомого ефекта Доплера й відкрив явище розбігання галактик. Залежність між відстанню до галактики та швидкістю її віддалення називають законом Габбла-Леметра:

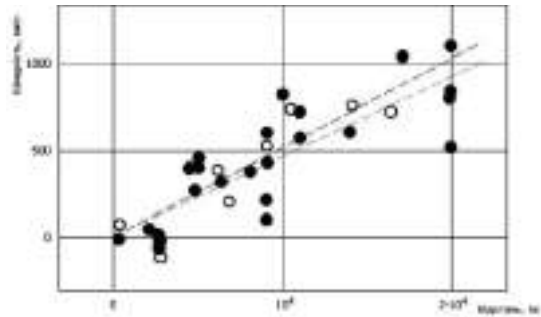
$$v = Hr \quad (27.1),$$

де  $v$  – швидкість віддалення галактики від спостерігача,  $r$  – відстань до неї, а  $H$  – стала Габбла.

Сталу Габбла  $H$  визначають зі спостережень. Нині її значення оцінюють приблизно в  $71,9 \pm 2,7$  км/(с·Мпк) (кілометрів на секунду на мегапарсек). На таку величину зростає швидкість руху галактики на кожний мегапарсек.

У наш час з червоних зміщень визначають відстані до галактик, віддалених від Землі на тисячі мегапарсек. Але треба мати на увазі, що значення цих відстаней залежить від моделі еволюції Всесвіту (ч. 2, § 28, п. 2), яку використовують для розрахунків. Крім того, відстань, на якій була галактика в момент генерації світла, відстань до неї в момент, коли це світло дійшло до Землі, а також відстань, яку світло пройшло від початкової точки до кінцевої, – мають різні значення. Тому астрономи зазвичай для далеких об'єктів вказують значення червоного зміщення, не вдаючись до пояснення, про яку відстань ідеться.

Рис. 27.2. Графік, що ілюструє закон Габбла-Леметра



Закон Габбла дає змогу оцінити вік Всесвіту (звісно, вельми спрощено і приблизно). Припустимо, що всі галактики від самого початку віддалялися від нас з тією ж швидкістю  $v$ , яку ми спостерігаємо нині.

Нехай  $t$  – час, що минув від початку їх розльоту. Це і буде вік Всесвіту, а визначають його співзалежністю:  $v \cdot t = r$ , або  $t = r/v$  (27.2).

Але із закону Габбла-Леметра (27.1) випливає, що  $r/v = 1/H$ , тому вимірявши швидкості віддалення галактик і визначивши  $H$ , можна отримати оцінку часу, протягом якого галактики розбігаються. Це і є прогнозований час існування Всесвіту. Звернімо увагу на те, що визначене в такий спосіб значення  $t$ , дуже чутливе щодо значення сталої Габбла. Лише її точна величина дає «справжній» вік Всесвіту.

Донедавна закон Габбла-Леметра був прямо перевірений лише на відносно невеликих відстанях – тих, що вдавалося більш-менш точно виміряти. Про те, як відбувалося розширення Всесвіту в далекому минулому, тобто на великих відстанях, можна було робити висновок лише з непрямих спостережень. Виконати пряму перевірку закону Габбла-Леметра на великих відстанях вдалося лише в кінці ХХ ст., коли з'явилася змога визначати відстані до далеких галактик зі спалахів у них наднових зір.

## 2. Розширення Всесвіту і просторовий розподіл галактик.

Із закону Габбла-Леметра випливає два важливих висновки. Перший – Всесвіт розширюється, наслідком чого і є розліт галактик. Але вони не просто розлітаються в різні боки у просторі, а розсовується сам простір. При цьому зорі чи галактики не зазнають цього розширення (принаймні досі це не зареєстровано), бо завдяки гравітації є стійкими утвореннями. Ще одна особливість такого розширення – зі спостережень із Землі здається, що скупчення галактик розбігаються однаково в різних напрямках так, як наче наша галактика є центром Всесвіту. Це оманливе враження. Спостерегіач скрізь у Всесвіті буде бачити однакову картину – всі галактики розбігаються від нього. Це означає, що Всесвіт немає центру, від якого йде розширення.



Рис. 27.3. Схема Місцевої групи галактик до якої належить Молочний Шлях

Другий висновок – Всесвіт колись мав початок. Такий висновок легко отримати, якщо подумки «прокрутити назад» умовну кінострічку розширення

Всесвіту. В результаті ми дійдемо до моменту часу, коли вся речовина нашого світу була зосереджена в одній точці.

Нині відомо, що галактики, як і зорі, утворюють скупчення. Наша галактика і ще майже три десятки її сусідок належать до скупчення, яке називають Місцевою групою галактик. Серед них, окрім Молочного Шляху, є ще дві великі галактики: Туманність Андромеди й галактика в сузір'ї Трикутника. Всі інші члени – карликові галактики неправильної форми.

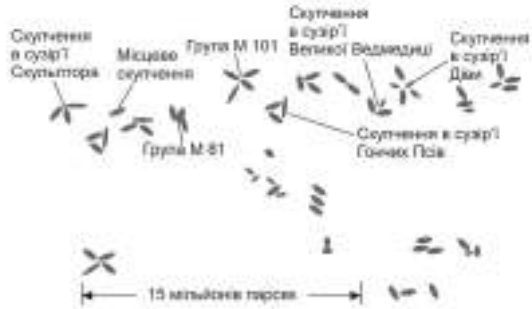


Рис. 27.4. Найближче до Землі велике скупчення галактик у сузір'ї Діви

За кількістю наявних галактик скупчення поділяють на багаті (вміщують сотні й тисячі членів) і бідні (вміщують десятки членів), а за формою – на регулярні, або правильні, що мають сферичну симетрію й велику концентрацію до центра, та іррегулярні, або неправильні, більш дифузні й розмиті. У центрі багатих скупчень зазвичай є масивна еліптична галактика.

Найближче до Землі багате неправильне скупчення лежить в напрямку сузір'я Діви (часто говорять «в сузір'ї Діви») на відстані близько 15 Мпк. Воно вміщує майже 2500 галактик, а його центр перебуває приблизно біля гігантської еліптичної галактики M87.

Рис. 27.5. Схема місцевого надскупчення галактик

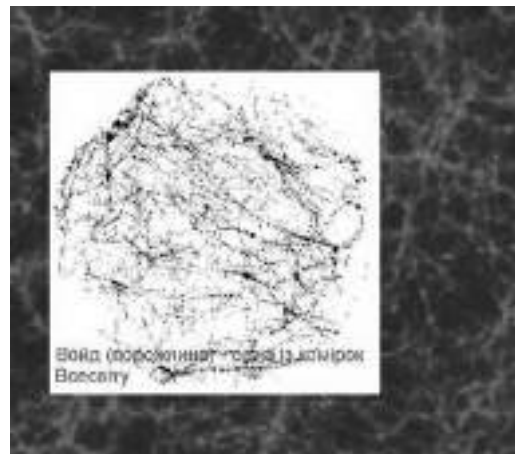


Типовим представником багатого правильного скупчення є скупчення в сузір'ї Волосся Вероніки. Воно лежить від Землі на відстані майже 125 Мпк (567 млн св. р.) і налічує близько 40 000 галактик.

Водночас скупчення галактик об'єднані в галактичні надскупчення. У другій половині 50-х років ХХ ст. було виявлено, що більша частина найяскравіших галактик, видимих із Землі, утворюють цілісну структуру, в центрі якої міститься скупчення в сузір'ї Діви, а на її периферії перебуває наша Місцева група галактик. Цю структуру назвали Місцевим надскупченням галактик. Воно охоплює в космосі ділянку розмірами в кілька десятків мегапарсек, що в 10 разів перевищує розміри скупчення в сузір'ї Діви.

Рис. 27.6. Комірчаста структура Всесвіту

Дослідження розподілу скупчень і надскупчень галактик у великих об'ємах простору впродовж останніх 50 років дозволило космологам створити великомасштабну модель Всесвіту. Згідно з цією моделлю, Всесвіт має комірчасту структуру, тобто складається з велетенських порожнин (їх називають войдами), схожих на бджолині стільники, що дотикаються один до одного. Скупчення й надскупчення галактик, зібрані у волокнисті структури, «нитки», завдовжки в десятки мегапарсек, утворюють своєрідні «стіни», які охоплюють порожнини. Та насправді порожнини – не зовсім порожні. Тепер відомо, що там, де ми бачимо начебто пустий простір, присутня темна матерія, природа якої досі невідома.



### НАВЧАЛЬНІ ЗАВДАННЯ

- Що є об'єктом вивчення позагалактичної астрономії? Коли виник цей розділ астрономії?
  - Які спостереження привели до розуміння того, що наш Всесвіт розширюється? Хто їх виконав і коли?
- 

### ВИСНОВКИ

Закон, відкритий теоретично Ж. Леметром та зі спостережень Е. Габблом, відображає закономірність: що далі галактика від Землі, то з більшою швидкістю вона рухається. Галактики утворюють скупчення й надскупчення, які формують у Всесвіті волокнисті структури завдовжки в десятки мегапарсек. Згідно з великомасштабною моделлю, Всесвіт має комірчасту структуру, тобто складається з великих порожнин (войдів), схожих на бджолині стільники, що дотикаються один до одного.

## Розділ IV. Елементи космології

### ТЕМА 4.1. ВСЕСВІТ ЯК ЦІЛІСНЕ СЕРЕДОВИЩЕ ЖИТТЯ

#### § 28. ВСЕСВІТ ЯК ЦІЛЕ

Всесвіт як ціле вивчає окремий розділ астрономії – космологія (нині її інколи позиціонують як окрему науку на «перетині» астрономії, фізики й математики). Витоки космології знаходять у давніх міфах і легендах, філософських вченнях і навіть релігійних віруваннях. Суто наукова космологія бере початок від часу створення (1916) А. Айнштайном загальної теорії відносності.

#### 1. Розвиток уявлень про Всесвіт.

Вже давньогрецькі філософи висловили низку здогадок про будову Всесвіту. Наприклад, про те, що Земля, як і Сонце, обертається навколо якогось гігантського небесного вогнища чи про те, що Земля має форму кулі (Парменід, VI – V ст. до н. е.) й обертається навколо своєї осі (Гераклід Понтійський, V – IV ст. до н. е.) тощо.

Французький філософ і вчений Рене Декарт (1596–1650) створив теорію вихорів – космогонічну гіпотезу, згідно з якою Сонце та інші зорі занурені в певну субстанцію – ефір. Обертання Сонця надає обертального руху прилеглому до нього ефіру, і цей рух поширюється на весь космічний простір. Для XVII ст. ідея Р. Декарта була новаторською, хоча й помилковою.

Видатний англійський фізик Ісаак Ньютон (1642–1727) на підставі геліоцентричної системи світу М. Коперника та законів Кеплера сформулював закон всесвітнього тяжіння, що пояснив причини руху небесних тіл. Ньютон створив першу наукову модель Всесвіту, яку називають механістичною картиною світу – в її основі лежать закони механіки.

Великий німецький філософ Іммануїл Кант (1724–1804) створив першу універсальну концепцію еволюційного нескінченного Всесвіту. Він обґрунтував можливість виникнення Всесвіту винятково під дією механічних сил притягання й відштовхування та намагався з'ясувати подальшу його долю на всіх масштабних рівнях – від планетної системи до світу туманностей. Кант вважав, що Всесвіт має величезну кількість зоряних систем, розкиданих у просторі, як острови в океані.

Загальна теорія відносності, створена Альбертом Айнштайном (1879–1955), спонукала до радикального перегляду уявлень про Всесвіт. Уперше принципово нові космологічні наслідки загальної теорії відносності розкрив

радянський математик і фізик-теоретик Олександр Фрідман (1888–1925) у своїх моделях Всесвіту.

Невдовзі ці теоретичні моделі знайшли підтвердження зі спостережень рухів далеких галактик, виконані наприкінці 20-х років ХХ ст. Е. Габблом. Установлення факту розширення Всесвіту зруйнувало уявлення про його вічність і незмінність в часі й привело до створення різних теорій зародження й еволюції Всесвіту.

## 2. Космологічні моделі Всесвіту.

Моделі, з допомогою яких намагаються описати загальні закономірності еволюції Всесвіту як цілого, називають космологічними. Відтоді, як І. Ньютон створив теорію гравітації на підставі закону всесвітнього тяжіння, в астрономії панувала теорія стаціонарного Всесвіту – класична ньютонівська космологія. Вона спиралась на такі постулати: а) Всесвіт завжди був, є і буде стаціонарним, тобто незмінним (змінюватися можуть окремі космічні системи, але не світ у цілому); б) простір і час абсолютні, метрично нескінченні, однорідні й ізотропні і не залежать від матеріальних об'єктів і процесів, що відбуваються у Всесвіті.

Ньютонівська космологія має два парадокси, пов'язані з постулатом нескінченності Всесвіту. Перший парадокс отримав назву гравітаційного. Суть його така: якщо Всесвіт нескінченний і в ньому існує нескінченна кількість небесних тіл, то сила тяжіння буде нескінченно великою, і Всесвіт має зазнати колапсу, а не існувати вічно. Другий парадокс називають фотометричним: якщо існує нескінченна кількість небесних тіл, то світність неба має бути нескінченною. Але ми такого явища не спостерігаємо.

Ці парадокси не можна вирішити в рамках ньютонівської космології, але їх знімає сучасна космологія, в межах якої було введено уявлення про Всесвіт, що розширюється й еволюціонує.

Першу релятивістську космологічну модель Всесвіту розробив А. Айнштейн, відкинувши постулати ньютонівської космології про абсолютність та нескінченність простору і часу та застосувавши космологічний принцип, згідно з яким наш Всесвіт є однорідним й ізотропним. Поняття однорідності означає – вигляд Всесвіту в один і той самий момент часу не залежить від місця спостереження. Вивчаючи Всесвіт з будь-якої його точки в один і той самий момент часу, ви отримаєте однакові результати. А поняття ізотропності означає, що властивості Всесвіту не залежать від напрямку, в якому його спостерігають. Всі напрямки у Всесвіті рівноправні.

На відносно невеликих масштабах (до 80 Мпк) «нитки» і «стіни», утворені зі скупчень і надскупчень галактик, що огортають войди, є відхиленням від однорідності. Бо з різних точок цього об'єму картина ближнього Всесвіту буде дещо різною. Але астрономічні спостереження свідчать: на великих масштабах (більших за 100 Мпк) однорідність розподілу матерії у Всесвіті й відсутність виділених напрямків виконуються з належною точністю.

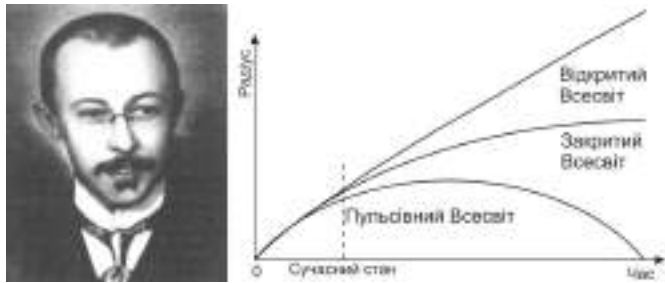


Космологічну модель Всесвіту А. Айнштайн розробив, спираючись на основне рівняння тяжіння, яке входить до створеної ним раніше загальної теорії відносності (ЗТВ). Це рівняння пов'язує кривизну простору-часу з матерією, що заповнює даний викривлений простір. Згідно з цією теорією, простір і час – величини взаємозалежні. Їх визначає розподіл гравітаційних мас у Всесвіті. А його властивості як цілого, зумовлені значенням середньої густини речовини та іншими фізичними параметрами. Тобто з рівнянь випливало, що Всесвіт не є стаціонарним, а має або стискатись, або розширюватись.

На початку ХХ ст. така модель не узгоджувалася з відомими астрономічними спостережними даними. Для тодішніх астрономів простір не залежав від часу, а Всесвіт був нескінченним в часі й безмежним у просторі. Щоб отримати розв'язок свого рівняння для статичного й незмінного Всесвіту, Айнштайн увів до нього безрозмірну сталу, яка позначала силу, що протидіяла гравітації, тобто запобігала стисканню. Цю сталу він позначив грецькою літерою  $\Lambda$  (лямбда) і припустив її значення таким малим, щоб не помічати її прояву в природі. Отак космологічна модель Айнштайна стала моделлю стаціонарного Всесвіту. Тепер цей член називають космологічною сталою, і вважають що вона описує властивості вакууму.

Коли було з'ясовано, що основне рівняння тяжіння ЗТВ має не одне, а багато розв'язків, з'явилися інші космологічні моделі Всесвіту. Одну з таких у 1917 р. запропонував голландський астроном Віллем де Сіттер. Ця модель передбачала можливість швидкого руху космічних об'єктів і стала попередницею пізніших теорій Всесвіту, що розширюється.

Рис. 28.1. Портрет О. Фрідмана та ілюстрації до космологічних моделей: відкритий Всесвіт; закритий Всесвіт; пульсівний Всесвіт



У 1922 р. О. Фрідман знайшов нові розв'язки рівняння тяжіння ЗТВ, з яких випливало кілька сценаріїв розвитку Всесвіту. Серед них був цікавий варіант, коли космологічна стала дорівнювала нулю ( $\Lambda = 0$ ). Тоді еволюція Всесвіту стає залежною від початкового значення густини речовини, а Всесвіт, заповнений масою, на яку діє сила тяжіння, не може бути статичним. Він має або розширюватися, або стискатися.

Космологічна модель О. Фрідмана вказує на те, що розвиток Всесвіту залежить від кількості речовини в ньому (інакше – від значення середньої густини речовини у Всесвіті). Якщо середня густина речовини і випромі-

нювання  $\rho_c$  у Всесвіті дорівнює або менша за деяку критичну величину  $\rho_{к.}$  ( $\rho^c = \rho_{к.}$  або  $\rho_c < \rho_{к.}$ ), то Всесвіт необмежено розширюється від початкового точкового стану. Якщо  $\rho_c$  більша за  $\rho_{к.}$  ( $\rho_c > \rho_{к.}$ ), то розширення Всесвіту на якомусь етапі зміниться на стискання, що триватиме аж до точки сингулярності (рис. 28.1). Нині за різними оцінками значення  $\rho_{к.} \sim (8-9,3) \times 10^{-30}$  г/см<sup>3</sup>.

Спостереження Е. Габбла спонукали Жоржа Леметра в 1927 р. розробити космологічну модель Всесвіту, згідно з якою наш світ виник унаслідок вибуху надщільної матерії («первинного атома»). У цій моделі Всесвіт, після вибуху, розширюється так, як це описують рівняння ЗТВ. Окрім цього, Ж. Леметр математично довів, що радіальна швидкість розширення має бути пропорційна відстані від Сонячної системи. Зі спостережень цю залежність знайшов, згадаймо, Е. Габбл у 1929 р. і її тепер називають законом Габбла–Леметра.

Отже, на кінець 20-х років ХХ ст. космологічні моделі, що свідчили про нестационарну природу нашого Всесвіту, отримали спостережне підтвердження. Проте існували й проблеми. Наприклад, модель Леметра давала змогу оцінити тривалість існування Всесвіту – для цього потрібно було визначити величину сталої Н в рівнянні закону Габбла–Леметра. Спроби визначити сталу Габбла приводили до висновку, що наш світ виник лише близько двох мільярдів років тому. Однак геологи стверджували, Земля набагато старіша. Астрономи також не мали сумнівів – у Всесвіті дуже багато зір значно більшого віку.

1946 р. Джордж Гамов запропонував нову космологічну модель. Згідно з нею Всесвіт, за якусь мить після народження, складався з відомих частинок – електронів, фотонів, протонів і нейтронів. Ця суміш містилась у критичному (порівнюючи з нинішнім) об'ємі, і тому її густина була великою та мала високу температуру.

Хоча модель «гарячого» народження Всесвіту пояснювала механізм утворення основного ізотопу гелію (<sup>4</sup>He), вона також мала суттєві неузгодженості. Щоправда з неї випливав один цікавий висновок – космічний простір має пронизувати мікрохвильове випромінювання, що виникло через 300 тис. р. після народження Всесвіту.

До відкриття у 1965 р. мікрохвильового випромінювання в космології домінувала інша модель Всесвіту (автори Ф. Хойл, Т. Голд і Г. Бонді), що залишилась в історії астрономії під назвою «Космологія стабільного стану». Модель вказувала на повну рівноправність не лише всіх точок простору, але й усіх моментів часу. Це означає, що Всесвіт розширюється, але не має початку, тобто існує вічно. В такому Всесвіті спостерігають явище розбігання галактик, але розширення простору, на думку Хойла, забезпечувало С-поле (поле творіння, від англ. creation) з від'ємним тиском. Водночас в космосі мала «спонтанно» виникати нова речовина, причому з такою інтенсивністю, що середня густина матерії залишалася незмінною. Походження елементів, зокрема водню і гелію, Хойл пояснював термоядерними процесами в зорях.

### 3. Теорія Великого Вибуху.

Після того, як астрономи довели, що стала Габбла на порядок менша за попередні оцінки, вік Всесвіту в космологічній моделі з Великим Вибухом зріс до 10–20 млрд років (сучасна оцінка – 13,7 млрд років  $\pm$  200 млн. Тому коли в 1965 р. А. Пензіас і Р. Вільсон зареєстрували передбачене в «гарячій» моделі походження Всесвіту випромінювання – теорія Великого Вибуху посіла чільне місце серед космологічних моделей. Нині її вважають стандартною й загально визнаною, а всі інші – надбанням історії науки.

Головна її особливість полягає в тому, що Всесвіт мав початок, тобто виник колись унаслідок своєрідного вибуху: енергія наче зненацька вихлюпнулась з якогось далекого від сучасного розуміння стану, породивши тим самим наш світ. Цю грандіозну подію називають «Великим Вибухом».

Хоча момент народження нашого Всесвіту називають Великим Вибухом, варто розуміти, що із звичайним вибухом він не має нічого спільного. Звичайний вибух відбувається в певну мить у певному місці простору. Проте до моменту Великого Вибуху не було ні простору, ні часу. Вони виникли після Великого Вибуху. Тобто наслідком цієї події стала поява Всесвіту, який почав розширюватися. А тому порівнювати подію народження Всесвіту зі звичайним вибухом не можна.

Наш всесвіт народився дуже гарячим і відразу почав розширюватися. Висока густина й температура унеможливають існування будь-яких складних утворень. Тому в дуже молодому Всесвіті немає не лише звичних нам атомів та їхніх ядер, але навіть найпростіше ядро, водневе, тобто одиночний протон, не може існувати. Речовина Всесвіту в цей момент – набір елементарних частинок і квантів випромінювання, які безперервно перетворюються одне в одне. Однак розширення Всесвіту приводить до того, що він стає холоднішим і енергія частинок стає меншою за масу протона. Тільки відтоді має сенс говорити про хімічний склад Всесвіту (ч. 2, § 22, п. 3), адже в ньому виникає Н (водень).

На користь теорії Великого Вибуху (інколи вживають термін «стандартна космологія») є кілька доказів, серед яких факт розширення Всесвіту. Також ця теорія пояснює поширеність у Всесвіті легких хімічних елементів, таких як гелій і літій. Але головним доказом є наявність космічного фонового (реліктового) випромінювання (ч. 2, § 29), яке можна спостерігати.

Теорія Великого Вибуху, пояснивши багато космологічних проблем, водночас поставила низку інших. Наприклад, що було до Великого Вибуху? Чому Всесвіт однорідний і чому кривизна простору має нульове значення, тобто він плоский, а отже, його описує геометрія Евкліда? Деякі з цих проблем вирішила інфляційна (ч. 2, § 29) теорія Великого Вибуху. Інші проблеми, наприклад, причину Великого Вибуху, науковці намагаються пояснити в рамках нових космологічних теорій.

Одна з таких – теорія струн, у якій елементарні частинки вважають не точками, а одномірними протяжними об'єктами – квантовими струнами.

Космологічні моделі Всесвіту, що спираються на теорію струн, розглядають Великий Вибух як флуктуацію, що спричинила виділення з  $n$ -мірного простору-часу нашого всесвіту з його трьома просторовими вимірами й одномірним часом. У такий спосіб вдається «обійти» проблему початку Всесвіту, але досі немає ніяких підтверджень існування інших просторових вимірів, як і не спостережено жодної одномірної струни.

### НАВЧАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

- Статичний Всесвіт, тобто такий, що не розширюється і не стискається, не може реально існувати. Обґрунтуйте це.

### ВИСНОВКИ

Теорія Великого Вибуху має декілька доказів, серед яких і факт розширення Всесвіту, а також існування космічного фонового (реліктового) випромінювання, яке можна спостерігати.

## § 29. ЕЛЕМЕНТИ СУЧАСНОЇ КОСМОЛОГІЇ

Визначні фізичні теорії (загальна теорія відносності, квантова механіка тощо) разом з великим масивом спостережних астрономічних даних дозволили космологам за неповні 100 років з'ясувати загальну картину народження й розвитку нашого всесвіту. Щоправда, багато важливих моментів його еволюції, а надто його походження, ще й досі нез'ясовані.

### 1. Основні етапи еволюції Всесвіту.

Нинішнє астрономічне та фізичне знання не пояснює однозначно того, що було до Великого Вибуху чи одразу після нього. Але відомі й перевірені на практиці закони фізики дозволяють зробити наукову екстраполяцію в минуле аж до моменту  $t = 10^{-43}$  с від початку розширення. Це так званий час Планка, що є гіпотетичною граничною природною одиницею вимірювання масштабу часу (квантом часу), яку увів німецький фізик-теоретик Макс Планк. Подій у проміжку часу, що менший за час Планка, від  $t = 0$  до  $t = 10^{-43}$  с відомими нині законами фізики описати неможливо – вони в цьому часовому інтервалі не діють. Саме тому науковці не знають, що відбувалось у крихітну частку часу тривалістю  $10^{-43}$  с, яка минула після Великого Вибуху, тобто від часу  $t = 0$ .

Згідно з сучасними уявленнями, процес народження Всесвіту має описувати квантова теорія гравітації. Але її ще не створено. Поняття «вік Всесвіту» має сенс для моментів часу не раніше  $10^{-43}$  секунди. На менших масштабах вже не можна говорити про звичний нам лінійний плин часу, адже в цей проміжок

властивості простору – не стабільні. Такий стан простору-часу зі змінною топологією називають квантовою піною. З невідомих поки причин, можливо, через квантові флуктуації, в одній із «бульбашок» квантової піни виникає самовільно, спонтанно, буквально з «нічого», фізичне поле, яке у віці близько  $10^{-35}$  секунди змушує її розширюватися з колосальним прискоренням. Цей процес називають інфляцією, а поле, що його спричиняє – інфлантонним (від назви частинки, носія цього поля, – інфлантон).

Теоретичні розрахунки показують, що у віці  $10^{-43}$  с Всесвіт був дуже малим ( $l \approx 10^{-33}$  см) і щільним, але потім він зазнав розширення від дуже малих розмірів до неймовірно ( $10^{10}$  в степені 4 см) великих розмірів. Для опису розширення Всесвіту вводять поняття масштабного фактора  $a(t)$ , який збільшується з плином часу так, що відстань між об'єктами у Всесвіті змінюється пропорційно  $a(t)$ .

Отже, розміри Всесвіту росли експоненціально ( $a(t) \sim e^{Ht}$ ), тобто зростання масштабного фактора було пропорційне його значенню  $da(t)/dt \sim a(t)$ . В економіці подібні процеси називають інфляцією, тому космологічну теорію, що описує перші миті існування Всесвіту, називають інфляційною теорією Великого Вибуху. Її запропонував у 1980 р. американський вчений А. Гут. Вона є вдосконаленою теорією Великого Вибуху.

Початок інфляції спричинив «хибний» вакуум, або псевдовакуум, – різновид фізичного вакууму з від'ємним тиском (основними параметрами вакууму є енергія і тиск, залежно від них він може бути в різних енергетичних станах). Такий тиск створює силу відштовхування, що діє як антигравітація. Що вища енергія вакууму, то вищий тиск, а в разі псевдовакууму – відштовхування. «Хибний» вакуум не стабільний і дуже швидко розпадається, переходячи у вакуум з низьким рівнем енергії (інфляція закінчується, коли інфлантонне поле досягає мінімуму енергії). Вивільнена, внаслідок розпаду, енергія іде на утворення великої кількості елементарних частинок – кварків та антикварків, з яких вже через десятитисячну частку секунди утворились різні частинки, серед яких протони і нейтрони та їхні античастинки. Інакше кажучи, з енергії виникає речовина, яка має високу температуру.

Розпад псевдовакууму і спричинене цим швидке розширення, яке в інфляційній теорії відіграє роль Великого Вибуху, привели до того, що з мікроскопічної «бульбашки» квантової піни утворився Всесвіт величезних розмірів. Далі його розвиток відбувається так, як передбачає стандартна космологія Великого Вибуху. Нині ми живемо в дуже низькоенергетичному вакуумі. Тривалий час вважали, що його енергія нульова, але спостереження наприкінці ХХ ст. показали: вона трохи відмінна від нуля (її назвали темною енергією).

Інфляційна теорія Великого Вибуху пояснила особливості нашого всесвіту, які не вдавалося зрозуміти у стандартній космологічній моделі Фрідмана. Це, зокрема, однорідність Всесвіту – псевдовакуум всюди має строго однакову густину енергії (за винятком малих неоднорідностей, що пов'язані з кван-

товими флуктуаціями в ньому). Інша особливість Всесвіту – його плоска геометрія, яку астрономи спостерігають нині, – знайшла пояснення в тому, що інфляція збільшила «бульбашку» до розмірів величезної сфери. Ми бачимо лише її крихітну частину, тому вона здається плоскою, як і Земля, коли ми розглядаємо невелику її ділянку. Те, що геометрія Всесвіту плоска, перевірено шляхом вимірювання кутів велетенського трикутника розміром майже до космологічного горизонту. Їх сума склала 180 градусів, як і має бути у плоскій, евклідовій, геометрії.

Окремо зауважимо про космологічний горизонт, що є межею спостережуваного Всесвіту. Раз вік Всесвіту це скінченна величина, то за цей проміжок часу світло може подолати скінченну відстань, яка дорівнює добутку його швидкості на час, що минув від утворення Всесвіту. Безліч точок, що перебувають на цій відстані від нас, величезну сферу називають космологічним горизонтом. Космологічний горизонт – це межа, своєрідний кордон, що відділяє простір, який ми можемо спостерігати в даний момент, від того, який ми у принципі спостерігати не можемо, бо світло звідти ще не встигло до нас дійти. Але Всесвіт неупинно розширюється, і світло приходить з усе віддаленіших його ділянок, розширюється й горизонт. Водночас світло несе інформацію про все більш ранні об'єкти Всесвіту. Найвіддаленішим, і водночас найбільш раннім об'єктом, який може спостерігати сучасна наука, є реліктове випромінювання (про нього в п. 2).

З інфляційної теорії випливає, що значна частина Всесвіту перебуває за межею космологічного горизонту. Адже доки світло 13,7 млрд років ішло до нас, самі ці об'єкти вже давно покинули видиму частину Всесвіту й рухаються далеко за її межею.

Ще один висновок цієї теорії – хоча в нашій частині космосу інфляція закінчилася, у Всесвіті в цілому вона триває досі. Внаслідок розпаду псевдовакuumу повсякчас виникають нові «локальні» всесвіти, тобто триває процес, який називають вічною інфляцією. Теорію вічної інфляції розробив А. Лінде, і її вважають удосконаленим варіантом теорії А. Гута. Вічна інфляція приводить до того, що в матеріальному світі повсякчас виникає величезна кількість «локальних» всесвітів з усіма можливими варіантами фізичних параметрів. Сукупність таких всесвітів позначають поняттям Мультиверсум (ч. 3, § 18).

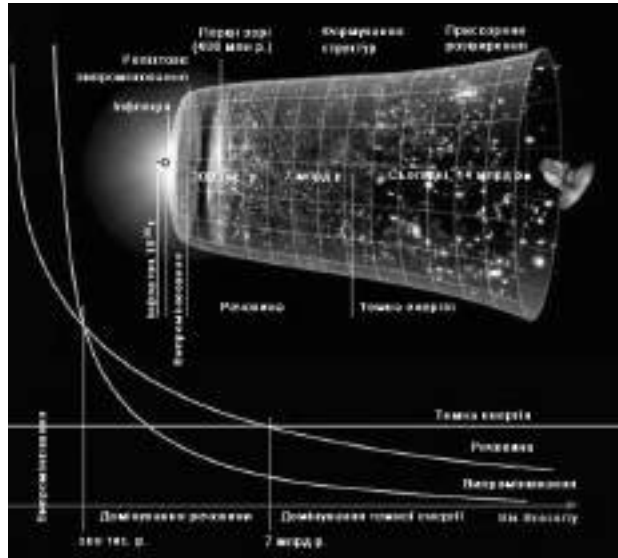
Після закінчення інфляції Всесвіт розширювався й охолоджувався. Ще через одну десятитисячну частку секунди при температурі  $10^{12}$  К відбулась анігіляція протонів з антипротонами і нейтронів з антинейтронами з утворенням фотонів. Та вочевидь від самого початку концентрація частинок перевищувала кількість античастинок приблизно на одну мільярдну частку. Цей «лишок» став будівельним матеріалом для світу речовини – галактик, зір, планет тощо. З фотонів, що утворилися під час анігіляції, значною мірою складається реліктове випромінювання. Через 1 с після Великого Вибуху при температурі  $10^{10}$  К Всесвіт став прозорим для нейтрино, тоді як протони, нейтрони, електрони й позитрони були перемішані з фотонами.

Через 3 с температура знизилась до  $3 \cdot 10^9$  К, й електрони проанігілювали з позитронами, а ще через 3 хвилини при температурі  $3 \cdot 10^8$  К почалось утворення перших хімічних елементів – дейтерію, гелію, літію.

У наступні 300000 років помітних змін не відбувалося. Увесь цей час Всесвіт був непрозорим для світла, бо електрони, протони, ядра гелію і в значно меншій кількості ядра літію, з яких складалася первісна плазма, безперервно поглинали, випромінювали й розсіювали фотони, не даючи їм поширюватись вільно. Але, розширюючись далі, Всесвіт охолов до температури близько 3000 К. Тоді енергія фотонів стала меншою від сили кулонівського притягання електронів і протонів, а відстані між частинками стали великими для того, щоб фотони перестали розбивати щойно утворені нейтральні атоми водню та гелію. Зв'язані в атомах, частинки перестали заважати руху фотонів, і Всесвіт раптово став «прозорим» для випромінювання: світло відокремилось від речовини.

Рис. 29.1. Основні етапи розвитку Всесвіту

Від цього моменту випромінювання вільно поширюється у Всесвіті, бо практично не взаємодіє з речовиною. Існування в наш час цього «залишкового випромінювання» передбачив у 1948 р. Г. Гамов, розвиваючи ідею теорії Великого Вибуху. Часто його називають реліктовим випромінюванням, оскільки воно справді є реліктом ранньої епохи розвитку Всесвіту.



Отже, через 300 тис. р. після Великого Вибуху домінуючою формою матерії у Всесвіті стає речовина (видима й невидима). Відтак починають швидко збільшуватися в розмірах її неоднорідності, що існували від моменту закінчення інфляції. Адже поки у Всесвіті домінувало випромінювання, воно заважало процесу наростання з часом просторових флуктуацій швидкості й щільності речовини під дією сил тяжіння (гравітаційних збурень). Саме розвиток гравітаційної нестійкості у наступні мільйони років «змусив» речовину збиратися в окремі згустки – протогалактики, в яких, своєю чергою, приблизно через мільярд років після Великого Вибуху почали утворюватись перші зорі.

## 2. Реліктове випромінювання.

Коли в 1965 р. американські радіоастрономи А. Пензіас і Р. Вілсон зареєстрували реліктове випромінювання, це стало одним із доказів на користь теорії Великого Вибуху. Адже воно характеризує гарячий стан речовини у Всесвіті задовго до утворення дискретних джерел. Нині температура цього випромінювання становить приблизно 2,7 К, тому воно припадає на мікрохвильовий діапазон довжин хвиль. У зв'язку з цим інша його назва – космічне мікрохвильове фонове випромінювання.

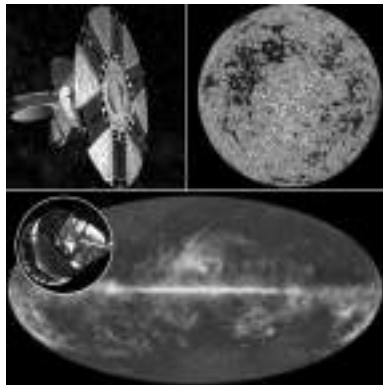


Рис. 29.2. Обсерваторії WMAP (результати) і Планк (результати)

Фонове випромінювання має великий ступінь однорідності. Проте вже під час його відкриття стало зрозуміло, що воно не може бути абсолютно ізотропним, бо пов'язане з речовиною, в якій мали існувати неоднорідності густини (саме це стало запорукою майбутнього утворення у Всесвіті галактик і скупчень галактик).

Анізотропію мікрохвильового фонового випромінювання вдалося виявити в 1992 р. зі спостережень спеціалізованого супутника COBE (COsmic Background Explorer). За це відкриття американським астрофізиком Джорджу Ф. Смуту і Джону С. Мейзеру присуджено Нобелівську премію з фізики 2006 року.



Рис. 29.3. Мапа розподілу космічного мікрохвильового фонового випромінювання на небесній сфері

Дослідження анізотропії реліктового випромінювання виконував у 2001–2010 рр. космічний зонд WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe), а також космічна обсерваторія «Планк» (2009–2012).

Вивчення результатів, отриманих космічними обсерваторіями, дозволило побудувати мапу розподілу реліктового випромінювання на небесній сфері (рис. 29.3). На ній видно у вигляді плям слабкі (на рівні сотих і тисячних часток відсотка) відхилення від однорідного тла. Плями позначають флуктуації, що існували на початку Всесвіту (до моменту інфляції). Після сильного розширення вони збереглися, як неоднорідності густини речовини в космічному просторі, що стали зародками галактик. Кутові відстані між плямами на мапі вказують на розміри неоднорідностей, а перепади яскравості – на ступінь ущільнення зародків майбутніх скупчень галактик.



### 3. Прискорене розширення Всесвіту.

Яким є наш всесвіт – відкритим, закритим чи пульсівним – залежить від значення середньої густини речовини  $\rho_c$ . Визначити її значення дуже складно, адже можна врахувати тільки ту речовину, яку ми бачимо або реєструємо приладами (зорі, газ, пил, різні частинки, випромінювання тощо). А її, зі спостережних даних, явно не вистачає, щоб створити силу тяжіння, здатну тримати вкупі окремі галактики, їх скупчення й надскупчення. З того, що великі системи космічних тіл упродовж дуже тривалого часу зберігають свої розміри стабільними, випливає, що у Всесвіті є ще й невидима, прихована маса, або інакше – темна матерія. Вона не світить, але виявляє себе силою тяжіння (рис. 29.4).

Рис. 29.4. Хоча виявити темну матерію прямо не вдається, про її існування свідчить низка непрямих даних. Як приклад наведено знімок скупчення галактик Куля. Рентгенівське випромінювання об'єкта, що лежить за нею (показано червоним), спотворене впливом прихованої маси, яку і вважають темною матерією. Її розподіл, визначений з розрахунків, показано синім



На існування темної матерії у скупченнях галактик 1932 р. вказав астроном Фріц Цвіккі. Пізніше її виявили в ізольованих великих галактиках, довкола яких існують невидимі гало з темної матерії. Радіуси цих гало в 5–10 разів більші, ніж розміри власне зоряних систем, а їхня маса становить до 90 % маси галактики.

Згідно з нинішніми уявленнями, темна матерія відіграла особливу роль у формуванні великомасштабної структури Всесвіту. Якби темної матерії не було, то ця структура не змогла б виникнути. Імовірно спочатку виникли згустки темної матерії (їх називають гравітаційними ямами), а потім звичайна матерія скупчилась навколо них. Якщо темна матерія заповнює увесь Всесвіт, то це означає, що галактики існують не ізольовано, а в рамках колосальної мережевої структури, основою якої є темна матерія. Отже, галактики – скупчення звичайної матерії, розміщені у вузлових точках всесвітньої мережі з темної матерії. Галактики – це лише «піки» в концентрації речовини, розподіленої у Всесвіті.

Природа темної матерії досі невідома. Згідно з припущеннями, існують щонайменше два види небаріонної темної матерії – гаряча і холодна. Носіями першої можуть бути релятивістські частинки, наприклад, нейтрино, а другої – ще не відкриті елементарні частинки, наприклад, аксіони чи

вимпи WIMP (weakly interacting massive particles), тобто масивні частинки зі слабкою взаємодією.

Нині пошуки темної матерії виконують як прямими, так і непрямими методами. У першому разі для реєстрації взаємодії частинок темної матерії з речовиною створюють високочутливі детектори – величезні ємності, наповнені охолодженою дуже чистою речовиною, зазвичай благородним газом. Суть непрямих методів – пошук «слідів» темної матерії. Наприклад, анігіляція вімпів, згідно з теоретичними обчисленнями, має спричинити появу нейтрино і позитронів.

У 1998–1999 рр. спочатку астрономи, а потім і фізики, на підставі спостережень спалахів Наднових типу Ia виявили, що їхня спостережувана яскравість регулярно є меншою, ніж має бути, при відстанях до них, обчислених за законом Габбла. Згадаймо, Наднові типу Ia використовують в астрономії як «стандартні свічки» для вимірювання відстаней, недоступних для вимірів іншими методами. Адже, по-перше, їхній блиск часом перевершує блиск усієї материнської галактики, і їх видно з величезних відстаней, а по-друге, оскільки до появи Наднових типу Ia призводить катастрофічний термоядерний вибух киснево-вуглецевих карликів майже однакової маси, в максимумі вони мають практично однаковий блиск. Знаючи зі спостережень видиму зоряну величину й порівнюючи її з абсолютною зоряною величиною, яку вони повинні мати, за відомими формулами обчислюють відстань до них.

Отже, справжні відстані до Наднових типу Ia виявились більшими, ніж мають бути, згідно з обчисленими. А це означає, що Всесвіт на космологічних відстанях розширюється швидше, ніж це впливає із закону Габбла–Леметра, тобто розширення відбувається з прискоренням. Звичайна речовина не може надавати галактикам додаткової швидкості, навпаки, вона сповільнює розліт. Тому з факту прискореного розширення випливає: у Всесвіті є субстанція, що діє як антигравітація. Її назвали темною енергією.

Але яку її природа? З космологічного рівняння стану  $p = \omega \varepsilon$ , де  $p$  – тиск середовища,  $\varepsilon$  – густина його енергії, а  $\omega$  – коефіцієнт пропорційності, за умови, що густина середовища вища за нуль, впливає, що для забезпечення прискореного розширення Всесвіту на роль темної енергії претендують три субстанції – це або вакуум, або квінтесенція, або фантомна енергія, і для кожної з цих субстанцій властивий від’ємний тиск, тобто антигравітація.

Від природи темної енергії залежить геометрія Всесвіту. Якщо це фізичний вакуум, то Всесвіт має бути плоским. Якщо квінтесенція, то його форма сферична або гіперболічна (сідлоподібна). Якщо це фантом, то на Всесвіт чекає Великий розрив. Досі більшість спостережень вказують на те, що Всесвіт має плоску геометрію. Тому є всі підстави вважати, що темну енергію створює фізичний вакуум – повністю звільнений від будь-якої речовини простір, заповнений полем, в якому без кінця народжуються і зникають віртуальні частинки.

Сучасну космологічну теорію, що враховує, окрім видимої (баріонної) матерії ще й невидиму холодну темну матерію (CDM – від англ. Cold Dark

Matter), а також темну енергію, описувану космологічною сталою Айнштайна  $\Lambda$ , що заповнюють просторово плоский Всесвіт, називають –  $\Lambda$ CDM (лямбда-СіДіЕм). Часто її ще називають стандартною космологічною моделлю Великого Вибуху, бо вона пояснює:

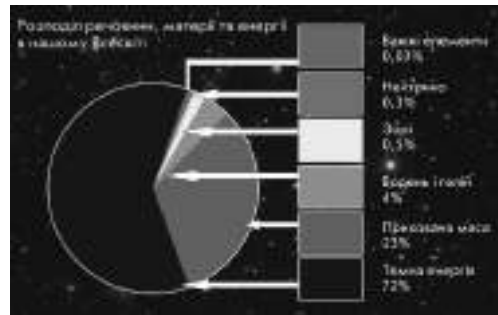
- наявність і структуру космічного мікрохвильового фону;
- великомасштабну структуру скупчень галактик;
- розподіл водню, гелію, літію, кисню у нашому всесвіті;
- прискорене розширення Всесвіту, яке спостерігають за електромагнітним випромінюванням далеких галактик і Наднових типу *Ia*.

Це найпростіша модель, яка в цілому узгоджується зі спостережними даними.

Дослідження (1998 р.) Наднових *Ia* в дуже далеких галактиках, а також аналіз результатів (2003 р.), отриманих орбітальною космічною обсерваторією ім. Вілкінсона, що вимірювала анізотропію мікрохвильового фонового випромінювання, допомогли дати відповіді на деякі питання, що накопилися в космології за тривалий час.

Було з'ясовано, що вік Всесвіту становить 13,7 млрд р. (з точністю до 1 %), а його складовими є – 73 % темна енергія, 23 % невидима темна матерія і лише 4 % видима речовина, яку можна реєструвати приладами, а також різні поля й випромінювання.

Рис. 29.5. Баланс речовини, темної матерії та темної енергії у нашому Всесвіті, згідно з сучасними уявленнями



Дані про космологічне прискорення вказують на те, що першу половину своєї історії Всесвіт розширювався з уповільненням, а другу – з прискоренням. Спочатку середня густина речовини (темної матерії і баріонів) у Всесвіті була значно більшою, ніж густина темної енергії. Тому гравітація переважала антигравітацію і гальмувала розліт галактик. Але густина речовини внаслідок розширення Всесвіту спадає, а густина темної енергії не залежить від часу – вона є сталою. Це означає, що із збільшенням об'єму Всесвіту темна енергія безупинно продукується вакуумом і її кількість зростає. Коли вік Всесвіту становив 7–8 млрд років, кількість темної енергії досягла критичного значення – 33 % від усієї кількості енергії у Всесвіті, і темп розширення почав зростати. З плином часу, в майбутньому, густина матерії й надалі спадатиме, тоді як темної енергії зі сталою густиною ставатиме дедалі більше.

Далі еволюція Всесвіту залежить від природи темної енергії. Якщо це фізичний вакуум ( $\omega = -1$ ), а багато фактів схиляють саме до такої думки, то Всесвіт відкритий і його прискорене розширення триватиме вічно. Зорі поступово витратять своє ядерне паливо, згаснуть і вже ніколи не стануть формуватися знову, бо газ, з якого

вони утворюються, буде вичерпано. Залишаться тільки охололі білі карлики, нейтронні зорі та чорні діри. Але й вони також зникнуть, бо розпадуться нейтрони і протони, а чорні діри приблизно через  $10^{100}$  років «випаруються» і перетворяться у випромінювання. Отак у Всесвіті зникне будь-яка структура й організація, лише необмежено довго триватиме розширення сукупності фотонів, нейтрино та вкрай розрідженого газу з електронів і позитронів, які ще залишилися.

*Існують й альтернативні сценарії.*

Якщо темна енергія – це квінтесенція ( $-1 < \omega < -1/3$ , припускають, що це надслабке скалярне поле з антигравітацією), густина енергії якої спадає з часом, то врешті-решт розширення Всесвіту сповільниться і, можливо, зміниться на стискання. Тоді речовина у Всесвіті повернеться до гарячого й щільного стану.

Якщо темна енергія – це фантом ( $\omega < -1$ ), середовище з антигравітацією, густина енергії якого зростає з часом, то прискорене розширення ставатиме дедалі швидшим, і розвиток Всесвіту відбуватиметься за сценарієм, який називають «Великим розривом». Необмежений ріст густини енергії спричинить катастрофічне зростання антигравітації, як наслідок – катастрофічне падіння гравітаційних сил і «розрив» об'єктів – надкупчення розпадуться на окремі галактики, галактики на окремі зорі, розірветься Сонячна система, далі планети, кожна молекула, кожний атом і навіть кожна елементарна частинка.

Проте допоки фізичну природу темної енергії ще тільки з'ясовують (згідно з сучасними оцінками, значення  $\omega$  лежить у межах  $-1,18 < \omega < -0,93$ ), усе це лише гіпотези. Чітко відомо тільки одне: існування темної енергії і створеної нею антигравітації надійно й остаточно доведено. Поступово підсилюються об'єктивні свідчення на користь уявлень про темну енергію, як про фізичний вакуум. Прискорене розширення Всесвіту триватиме ще кілька десятків мільярдів років. За цей час наша галактика зіллється з Туманністю Андромеди і більшістю галактик, що входять до складу Місцевої групи. Всі інші галактики лежатимуть далеко за космологічним горизонтом, і їх не можна буде побачити навіть у найпотужніший телескоп.

**НАВЧАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ**

- Чому мікрохвильове фонове випромінювання не є однорідним?

**ВИСНОВКИ**

Питання походження й розвитку Всесвіту, яке споконвіку хвилює людину, стало прояснюватися тільки в ХХ ст. – після відкриття космологічного розширення. Згідно з сучасними уявленнями наш всесвіт існує близько 13,7 млрд р. Він виник унаслідок Великого Вибуху, зазнав дуже швидкого розширення, після чого вступив в епоху формування галактик і зір. Нині цей етап розвитку Всесвіту все ще триває. Розширення Всесвіту відбувається прискорено і, ймовірно, він буде необмежено розширюватися й надалі.

# Частина 3. Космософія

## § 1. ВСТУП ДО НАУКОВОЇ КОСМОСОФІЇ

Питання взаємозв'язку Космосу і людини цікавить науковців від епохи Стародавньої Греції. Його розглядали філософи, астрономи, фізики. У ХХ ст. з'явилася ідея ноосфери, як нового етапу в розвитку біосфери на Землі. Багато різних уявлень про цей зв'язок виникло за межами науки – в окултному середовищі, псевдонаукових вченнях та релігійних культурах. Від початку ХХІ ст. розмов про «космічну філософію», «космічну свідомість», «космічний світогляд» тощо стало більше. Часто за цими фразами знаходимо лише сумнівні ідеї та уявлення, несумісні з науковими поглядами. Водночас на тлі загальносвітових соціальних й екологічних проблем землянам треба зберегти Землю – єдине в тривалій історичній перспективі небесне тіло, де може жити людина.

### 1. Космософія – гармонія і мудрість.

З давніх-давен людей вражає неповторна краса зоряного неба, вабить, хвилює й цікавить його безмежність і таємничість. Значною мірою ці душевні й розумові переживання втілилися в астрономії. Її успіхи змінили уявлення людини про Всесвіт. Якщо наші пращури мало розуміли його закони, і тому сприймали довкілля суто інтуїтивно, образно, то нині ми знаємо про наш Всесвіт значно більше.

Ми не просто живемо у Всесвіті. Ми проявляємо його через своє існування, «оживляємо» його в собі – в своїй свідомості, через свої помисли і дії. Саме тому вивчення Всесвіту – це водночас вивчення і пізнання людини. Тому астрономія, яка належить до фізико-математичних наук, є до певної міри гуманітарною наукою, що стосується до кожного з нас набагато більше, ніж здається на перший погляд.

Проте нині вже мало отримати наукове знання про довкілля, значно важливіше використати його так, щоб не завдати шкоди не лише людині, але й планеті в цілому. В науковому пізнанні, використанні його результатів дуже важливими є мораль і мудрість – те, що лежать за межами науки. Моральні основи, духовний світ і поведінка людини в біосфері тепер здебільшого загрожують умовам існування цивілізації на Землі. Наявна невідповідність технічних можливостей і потреб людини, що безупинно зростають, обмеженим ресурсам нашої планети. Якщо людство не схаменеться і не припинить варварськи забруднювати довкілля та нищити екосистему, з якої живе, воно загине.

Нині нагальна потреба – формування в землян нового світорозуміння (ч. 3, § 12, п. 1), суть якого зводиться до того, що надалі розвиток людства не може

бути спонтанним процесом самоорганізації. Розвиток і діяльність цивілізації мають стати процесами, що цілеспрямовані колективним розумом людства. Варто не лише здобувати нові знання, підвищувати освіченість і розвивати культуру, але й затвердити низку заборон (табу) в поведінці людства.

Першим кроком в цьому напрямі стало підписання в 2015 р. угоди про зменшення шкідливих викидів в атмосферу для запобігання глобальному потеплінню. При цьому Паризька кліматична угода діє у всепланетарному масштабі й передбачає, що зобов'язання зі скорочення шкідливих викидів в атмосферу парникових газів беруть на себе всі держави, незалежно від рівня їх економічного розвитку.

Наша планета – це система, в якій тісно взаємодіють нежива природа й жива речовина, це деяка цілісність, що перебуває під дією зовнішніх сил космічної природи, наприклад під дією сонячного випромінювання. Нам треба розуміти, що вплив космосу на Землю ми вивчили ще дуже слабо, що людина зробила тільки перший крок за межі своєї планети. Вже очевидно – не лише космічне середовище, але й поверхні та атмосфери інших планет Сонячної системи, несприятливі для життя земного типу. Це означає, що землянам дуже важко (а може й неможливо) буде знайти прихисток в космосі за межами Землі. Тобто Земля ще тривалий час буде єдиною домівкою для людства.

Поява людства, нової форми організації матерії у Всесвіті, суттєво змінила розвиток земної біосфери. І людині в своїй діяльності вже час орієнтуватися не на бажання і потреби, а на мудрість.

Наші пращури вдумливо спостерігали зоряне небо, намагаючись пізнати його таємниці. Ми тепер не лише його спостерігаємо, але й посилаємо в космічний простір різні апарати. Небо, яке колись було царством богів, стало місцем, де перебуває велика кількість штучних супутників Землі, працюють астронавти.

50 років тому людина вперше побувала на Місяці й залишила на його поверхні свої сліди. В 70-х роках ХХ ст. з допомогою автоматичних космічних апаратів розпочато пошук ознак життя на поверхні Марса, пізніше було спрямовано зонди до найвіддаленіших планет Сонячної системи. Окремі з них вже перебувають за її межами.

Попри всі ці успіхи нам треба дбати про наступні покоління, про те, що ми залишимо їм на планеті Земля. Буде вона комфортним місцем для людини чи перетвориться на забруднену пустелю. Слід, залишений нашим далеким предком на стежці біля містечка Лаєтолі в Танзанії 3,7 мільйони років тому, й слід на Місяці – це вузлові точки, які пов'язують нас із минулим. Відбиток черевика астронавта в морі Спокою має стати таким вузлом для майбутніх поколінь. Але існування цих поколінь цілком залежить від нас нинішніх, від того, наскільки мудрою є наша поведінка і на Землі, і в Космосі.

## 2. Астрономія в культурі.

Можливість спостерігати зоряне небо, небесні світила і явища – один з основних чинників, що спрямував розвиток людства в цілком певному напрямі. Природне середовище – точка відліку культури землян.

Безліч космологічних та космогонічних міфів і легенд пов'язані з зоряним небом у різних народів світу. Персонажі цього фольклору стали героями літературних і художніх творів. Поділ зоряного неба на сузір'я – окрема лінія в культурі. Згадаймо, Зодіак – сузір'я, якими Сонце здійснює свій річний рух по небесній сфері, відомий з дуже давніх часів. Величезний масив символів (міфи, легенди, зображення, споруди тощо), пов'язаних із Зодіаком, а також кожним сузір'ям, що належить до нього, навічно закріпився в культурі.

У зв'язку з назвами сузір'їв доцільно згадати твір «Явища», визначну пам'ятку культури, грецького поета III ст. до н. е. Арата. Ця поема – віршований переказ книг Евдокса «Явища» і «Дзеркало природи», що не дійшли до нас. У ній ідеться про сферичність неба, описано вісь світу й положення чотирьох головних небесних кіл, які й сьогодні використовують в сферичній астрономії. Описи сузір'їв у поемі, дозволили астрономічними методами оцінити епоху, в яку ці сузір'я могли спостерігати в такому вигляді. З'ясувалося: зоряне небо, змальоване в поемі Арата, спостерігали в середині III-го тисячоліття до н. е. Цей факт свідчить – ідея поділу небесної сфери на сузір'я – дуже давня.

До астрономічних знань, що вийшли за суто наукові рамки і стали загальнокультурними символами, відносимо поняття часу та фіксацію його різних проміжків з допомогою небесних світил. Це дозволило створити календарі. Уміння вимірювати час зіграло суттєву роль в утвердженні кількісного принципу в науковому пізнанні, а поєднання годинникового механізму з курантами стало поштовхом до розвитку механіки й конструювання всіляких автоматів. Нині важко знайти людину, яка б не користувалась тим чи іншим календарем. А засоби фіксації часу – величезна суперрозвинута індустрія.

Астрономічні знання завжди були суттєвою складовою картини світу, яка є важливим чинником культури. Зважаючи на уявлення про місце Землі у просторі, виділяємо в історії людства чотири картини світу: архаїчну, геоцентричну, геліоцентричну й антропну.

Архаїчна картина світу, характерна для спільнот людей, які перебувають на початковому етапі розвитку. На Землі навіть в наш час є племена, що перебувають на такому етапі, а тому варто мати на увазі – архаїчна картина світу в різних народів існувала в різний час загальної історії людства.

Геоцентричну систему світу створив К. Птолемей. Він також автор «Географії» й «Оптики», а також енциклопедії античного музикознавства «Гармоніка», де показав аналогії інструментальної музики й космічної «музики сфер». Оскільки ідею геоцентричного Всесвіту довершено в Стародавній Греції, то згадаймо, що там було розвинуто й ідею Космосу – світу гармонійного і прекрасного за межами Землі.

Упродовж V – XII ст. н. е. в європейській історії тривав відтинок часу, коли знання стародавніх греків були вже втрачені, а доба Відродження ще не настала. Тоді в Європі повсюдно панували християнство, Церква і віра в Бога. Космос уявляли як творіння Бога і головною ідеєю середньовічної людини був Бог, а не природа. Земля ще перебувала в центрі світобудови, а систему світу Аристотеля – Птолемея Церква визнавала єдиноправильною.

Такі уявлення про будову Всесвіту знайшли відображення в багатьох пам'ятках культури тієї доби. Наприклад, композиція (XI ст.) в одному з малих куполів собору св. Марка у Венеції яскраво демонструє теологічні уявлення щодо процесу й «механізму» створення Всесвіту. Ще одним прикладом уявлень про Всесвіт доби Середньовіччя є знаменита «Божественна комедія» Данте Аліґ'єрі (1265–1321). У цьому монументальному творі поет змалював грандіозну картину гармонійного космосу, виклав роздуми над долею і природою людини, описав пошук сенсу людського буття.



Рис. 1.1. Мініатюра «Урок астрономії» з молитовника Людовика IX. В руках професора астролібія – прилад для вимірювання кутів на небесній сфері

Знання античного світу значною мірою були збережені завдяки арабським ученим, які перекладали й коментували грецькі книги, розвивали й уточнювали знання з астрономії, механіки, математики, медицини. Згодом на взірці університету в Багдаді було засновано перші європейські університети, починаючи з Болонського, який став діяти з XI ст.

Художники Відродження перевели погляд з неба на Землю (характерним є закон прямої перспективи – промені сходяться на горизонті в одній точці). Оволодіння правилами побудови центральної перспективи означало, що художник опанував об'єктивний погляд на світ і його просторову будову.

Історичну епоху, коли з'явилася й утвердилася геліоцентрична система світу, науковці характеризують як «розпад космосу». Ідею упорядкованого й чітко структурованого світу було відкинуто, їй на зміну прийшла ідея відкритого, безмежного й нескінченного Всесвіту. В «новому Космосі» діяли однакові закони і для Землі, і для Неба. Межу між двома світами – земним і небесним – було зруйновано.

В уявленнях людини відбувся розкол гармонійного Космосу, хоча тисячолітній інстинкт ще й напертав її до цілісного світу. Саме тоді виникла сучасна наука. Природу стали розуміти вже не як щось вічне й незмінне і не як творіння Бога, а як об'єкт людського дослідження й опанування. Вона стала



матеріалом, який людина почала використовувати для своїх потреб, а сама людина протиставила себе природі. Микола Коперник у 1543 р. опублікував роботу «Про обертання небесних сфер», у якій в центр Всесвіту помістив Сонце, а всі планети «змусив» рухатись навколо нього. Це був початок руйнування системи світу К. Птолемея, яка панувала майже дві тисячі років.

Отже, астрономія «віддала» культурі багато результатів, здобутих нею впродовж усього часу існування нашої цивілізації. Внесок астрономії в культуру і в розвиток людини дозволяє обстоювати ідею, суть якої полягає в тому, що не просто астрономічні знання чи астрономія як наука є складовими культури, а сама культура пронизана астрономічним змістом.

---

## ВИСНОВКИ

Вже наші далекі пращури інтуїтивно відчували зв'язок земного життя і космічних світил та явищ. Астрономія, яка тоді виникла, у процесі свого розвитку здобувала дедалі більше знань, і тепер вже цілком аргументовано ми можемо стверджувати – життя на Землі є наслідком еволюції Всесвіту. Але людство може загинути, якщо не прийде до нового світорозуміння, в основі якого має бути «космічну мудрість», тобто наукова космофія.

# Розділ I. Коротка історія астрономії

## ТЕМА 1.1. РОЗВИТОК АСТРОНОМІЧНОЇ НАУКИ В СВІТІ

### § 2. АСТРОНОМІЯ В СТАРОДАВНЬОМУ СВІТІ

На десятки тисяч років у минуле сягає інтерес людини до зоряного неба та до його окремих світил і явищ. Свідченнями цьому є матеріальні пам'ятки, залишені первісною людиною по всіх куточках Землі, – вибиті на камені зображення зоряних фігур (сузір'їв), зарубки на кістках тварин для відліку часу за фазами Місяця, майданчики, облаштовані для астрономічних спостережень, – найдавніші обсерваторії.

#### 1. Зародження астрономії в ранню добу людства.

Найдавніші докази інтересу людини до неба – малюнки астрономічного змісту, або «солярні знаки», які виявлено серед багатьох наскельних і печерних зображень епохи палеоліту. Їх використовували як знаки-обереги і для житла, і для окремої людини. Ця традиція певною мірою зберігається й досі навіть в цивілізованих народів світу. Наявність солярних знаків вказує на те, що первісна людина відчувала водночас і потяг до неба, і свою залежність від нього та його світил. Це відчуття, а згодом й усвідомлення своєї залежності від світобудови, напевне виникло раніше, ніж здогад використати небесні світила як знаки-позначки для обчислення часу й визначення напрямку на місцевості.

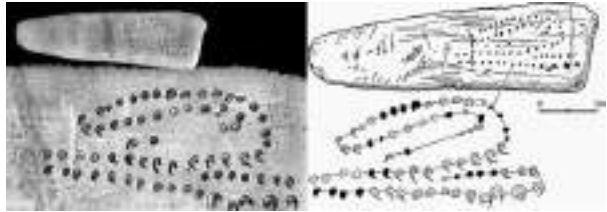


Рис. 2.1. Солярні знаки – наскельні й печерні малюнки первісної людини з позначеними на них небесними світилами

Отже, до головних причин, що стимулювали появу астрономії (ч. 1, § 1) відносять життєві потреби й людську допитливість, яка спонукала шукати зв'язки між подіями людського життя і небесними світилами та явищами. Останній мотив призвів до появи астрології (ч. 3, § 12). До життєвих потреб належить орієнтування на місцевості та визначення й лічба часу доби, а згодом укладання календарів.

Найкращими небесними орієнтирами здавна є яскраві зорі (їх досі використовують для цієї мети й називають навігаційними). Оскільки в різні відтинки ночі зорі внаслідок добового обертання небесної сфери перебувають щодо сторін горизонту в різних ділянках неба, то стародавні люди, щоб мати зорі, як орієнтири, мушили знати ці особливості.

Рис. 2.2 Зарубки на бивні мамонта, що позначають фази Місяця



На небесній сфері, принаймні в її північній півкулі, є один майже «абсолютний»

орієнтир – зоря, що лежить поблизу північного полюсу світу – Полярна. В сучасну епоху це зоря  $\alpha$  Малої Ведмедиці. Але вона не завжди була Полярною. Оскільки внаслідок прецесії вісь обертання Землі рухається по колу з періодом близько 25800 років, то біля полюсу світу в різні відтинки цього періоду бувають різні зорі. Наприклад, упродовж IV – II тис. до н. е. це була зоря Тубан ( $\alpha$  Дракона), а через 12000 років Полярною стане Вега ( $\alpha$  Ліри).

Найкращими небесними «годинниками», мірилами часу, є Сонце і Місяць. Головні фази Місяця, що змінювалися з періодом близько 7 діб, використовували для визначення проміжків часу вже в епоху палеоліту, задовго до винайдення письма. Згодом, накопичивши спостережні дані, для цієї мети стали використовувати й зорі.

На систематичну астрономічну діяльність людей вказують деякі найстаріші археологічні пам'ятки, появу яких відносять до епохи неоліту. До таких належать мегалітичні споруди з великих кам'яних брил і стовпів, установлених на плоскому великому майданчику. Їх вивчення дозволило з'ясувати, що камені розміщені впорядковано. Вони позначають астрономічно значущі напрямки, наприклад, – точки сходу Сонця в дні рівнодення й сонцестояння, а також вказують на видимість Місяця в певні моменти року.

Найвідоміша з таких споруд – Стоунгендж («Висячі камені») у Південній Англії на рівнині Солсбері. Споруда має форму кола з поперечником у 30 м, де по обводу стоять вертикально вкопані в землю тесані кам'яні стовпи, перекриті горизонтальними плитами. Усередині кільця є п'ять вузьких арок з каменю, а за межами головного кільця, встановлено П'ятковий камінь. Якщо дивитися з центра Стоунгенджа, то точно над цим каменем сходять Сонце в день літнього сонцестояння. Каміні також вказують на точки сходу й заходу Сонця на горизонті в дні сонцестоянь і рівнодень. Позначено точки сходу й заходу Місяця.

Стоунгендж вважають місячно-сонячною обсерваторією. Схожі майданчики для спостережень небесних світил в окремі особливі дні календарного року виявлено в інших частинах світу, зокрема й на території сучасної України.

Мегалітичні пам'ятки «горизонтної астрономії» (визначає астрономічно значимі точки на горизонті) кромлехи, менгіри, дольмени нині досліджує наука археоастрономія (інколи використовують іншу назву – палеоастрономія).



Рис. 2.3. Стоунгендж – давня (II тис. до н. е.) мегалітична споруда (сучасний вигляд)

У ще віддаленіші тисячоліття сягає астрономічний фольклор, або етноастрономія (ч. 3, § 6, п. 2 і § 14).

## 2. Астрономія давніх цивілізацій.

З історії відомо кілька давніх цивілізацій, які культивували астрономічні знання. До таких належать Месопотамія, стародавній Єгипет, Китай та Індія, а також цивілізації майя, інків та ацтеків у Центральній Америці.

У Месопотамії з V – IV тис. до н. е. існували міста-держави шумерів, а протягом II тис. – VI ст. до н. е. держава Вавилон. Письмові джерела (глиняні таблички) вказують на те, що шумери виконували регулярні спостереження неба щонайменше з другої половини III тис. до н. е. Спершу вони фіксували небесні явища і положення світил, але з VII ст. до н. е. стали вивчати рух світил, насамперед Місяця, з допомогою математичних методів. Це дозволило виділити на небі яскраві зорі (Сиріус), сузір'я (Оріон), п'ять планет (I тис. до н. е.) і дати їм назви, створити місячний календар (II тис. до н. е.), скласти майже повний список затемнень Сонця і Місяця аж від 763 р. до н. е.



Рис. 2.4. Зображення сузір'їв північного неба на накритці давньоєгипетського саркофага

З VII ст. до н. е. у Вавилоні було запроваджено офіційну посаду придворного астронома. Він робив систематичні записи найважливіших змін і явищ на небі. Спостереження небесних світил (Сонця, Місяця, планет і яскравих зір), які в Месопотамії сприймали як астральних богів, зводилося до виявлення прикмет і закономірностей для практичного використання, а фактично астрологічних завбачень, у житті держави.

Від астрономії в Месопотамії наука успадкувала поділ кола на 360 градусів, Зодіак з 12 сузір'їв та елементи екліптичної системи координат.

У Стародавньому Єгипті в епоху Середнього Царства (бл. 2050–1700) існував поділ зоряного неба на 36 сузір'їв. До нашого часу збереглися деякі їх зображення (рис. 2.4).

Головним стимулом інтересу до небесних явищ в Стародавньому Єгипті були потреби хліборобів, які залежали від розливів Нілу. Зв'язок періодичності розливів річки з полуденною висотою Сонця помітили в Єгипті давно, не даремно йому вклонялися як головному богу Ра.

У III тис. до н. е. початок розливу Нілу збігався з першим ранковим, *геліактичним*, сходом Сиріуса (геліактичний схід, перша у році поява зорі перед сходом Сонця після періоду невидимості). На підставі цього було укладено календар, рік якого відповідав відтинку часу між двома послідовними геліактичними сходами Сиріуса. У Стародавньому Єгипті створили також сонячний календар, в основі якого був тропічний рік. Для вимірювання часу використовували сонячні й водяні годинники, а кутомірні прилади – для спостережень зір у кульмінаціях.

Як і в Месопотамії, в Стародавньому Єгипті добу ділили на 24 години. Але ще з другої половини III тис. до н. е. користувалися десятковою системою лічби.

Астрономія в Стародавньому Китаї має дуже давнє коріння. Є свідчення, що наприкінці III тис. – початку II тис. до н. е. при дворі імператора існували дві офіційні посади астрономів. Досі збереглися залишки гномона, побудованого в VII ст. до н. е. в астрономічній обсерваторії, заснованій в 1100 р. до н. е.

На межі II – I тис. до н. е. китайські астрономи розділили частину неба, де рухалися Сонце, Місяць і планети, на 28 ділянок-сузір'їв. Значно пізніше астроном Чжан Хен (78–139) виділив на всьому зоряному небі 124 сузір'я. Крім цього, існував поділ на чотири «сезонних» ділянки по три сузір'я в кожному.

На підставі астрономічних спостережень у Стародавньому Китаї створили різні календарні системи, уклали каталоги зір, з'ясували тривалість тропічного року. Китайські астрономи першими зареєстрували плями на Сонці, відкрили 19-річний місячно-сонячний цикл (відомий в астрономії як цикл Метона). Для потреб астрономічних спостережень використовували сонячний і водяний годинники, глобус, компас, армілярну сферу. Останні два інструменти винайдено в Китаї.

За рухами планет, а також появою комет (найперша зафіксована поява комети – 1058/1057 рр. до н. е. – є першим в історії спостереженням комети Галлея), спалахами нових зір (від 532 р. до н. е.), метеорами й болідами спостерігали, головню, з метою астрологічних завбачень. Цього вимагали від придворних астрономів.

Як і в інших районах Стародавнього Світу, в Індії жерці регулярно спостерігали небесні світила, найперше Сонце і Місяць. Результати цих спостережень дозволили створити місячний і сонячний календарі. Здавна було виділено

ту частину зоряного неба, по якій здійснював рух Місяць. Її поділили на 28 ділянок – «стоянок» Місяця. Про це йдеться в «Рігведі» – стародавньому зібранні релігійних міфів, створених не пізніше першої половини I тис. до н. е.

Цивілізація індіанців майя існувала протягом II – X ст. н. е. в південній частині Мексики (півострів Юкатан і штат Чіапас) і на території нинішніх Гватемали, Гондураса та Беліза. Це були міста-держави, іноді досить ізольовані одне від одного непрохідними тропічними лісами, здебільшого зруйновані в кінці IX ст. н. е. У XVI ст. культуру майя знищили іспанські колонізатори, які, викорінюючи місцеву релігію, спалили практично всі рукописи, що містили знання й історію цього народу.



Коли в XIX ст. почали відкривати руїни міст майя, то виявляли залишки великих храмів-обсерваторій. Одна з таких – обсерваторія «Караколь» – була серед руїн міста Чичен-Іца на півночі Юкатана, заснованого в VIII ст.

Рис. 2.5. Залишки обсерваторії «Караколь» у стародавньому місті Чичен-Іца народу майя

Народи майя, інки й ацтеки обожнювали Сонце і Місяць, сліdkували за небесними та погодними явищами. Майя, наприклад, виділили в тій частині зоряного неба, по якій упродовж року рухалося Сонце, 13 сузір'їв – Зодіак – і дали їм назви.



Рис. 2.6. Кам'яний календар ацтеків – Сонячний камінь

Для астрономічних спостережень жерці використовували майданчики, облаштовані на плоских вершинах східчастих пірамід заввишки в десятки метрів. Особливу увагу приділяли затемненням Сонця і Місяця, а також рухам планет, бо вважали, що всі ці події мають великий вплив як на життя і справи окремих людей, так і держави загалом.

Регулярні спостереження дозволили астрономам народу майя доволі точно визначити синодичні періоди всіх відомих планет, а також укласти календар, в основі якого лежав сонячний тропічний рік. Майя знали про розбіжність свого календарного року з істинним сонячним і, щоб усунути похибку,

вводили систему вставок. Завдяки цьому тривалість року в календарі майя була на 20 секунд меншою за тривалість тропічного року.

Досі залишається загадкою те, чому майя використовували в системі лічби років періоди, що охоплюють величезні проміжки часу, наприклад, 64 000 000 років.

З 1885 р. в Національному музеї Мексики в Мехіко виставлено кам'яний календар ацтеків (Сонячний камінь). Висічений у формі круга з базальтового моноліту, масою у 25 т і з діаметром понад 3,5 м, він є унікальною пам'яткою астрономічної культури стародавніх мешканців Мексики.

### 3. Астрономія у Стародавній Греції.

Розвиток науки в Стародавній Греції почався тоді, коли цивілізації Єгипту й Вавилону вже перебували на спаді. Хоча історія Греції почалася за тисячоліття до цього, попередні свідчення про стан астрономії не збереглися.

Грецька наука мала дві особливості: по-перше, вона була світською (її практикували вільні громадяни), а по-друге, відбувся перехід від споглядання явищ природи і їх наївно-реалістичного тлумачення до спроб наукового пояснення, заснованого на вивченні явищ і пошуках їхніх справжніх причин. Саме у Стародавній Греції астрономія вийшла на новий етап розвитку – етап теоретичних узагальнень результатів спостережень. Це відбулося на основі геометричних знань, запозичених з Єгипту, де геометрія досягла високого рівня.

Одним із перших грецьких астрономів був Фалес (бл. 625–550 рр. до н. е.). Вважають, що він передбачив сонячне затемнення 585 р. до н. е., а також уявляв Землю у вигляді плоского тіла, оточеного водою.

Накопичені до першої половини IV ст. до н. е. знання дозволили грецьким ученим пояснити закономірності видимого руху Сонця, Місяця і планет. Їх тлумачили як прояв справжнього руху цих тіл у просторі. Ці закономірності помітили ще спостерігачі в Месопотамії, але вони не змогли створити математичну теорію, що пояснювала спостережувані особливості рухів небесних тіл.

Теорію руху Сонця, Місяця, планет і зір навколо нерухомої Землі висунув Евдокс Кнідський (бл. 410–355 до н. е.). В її основі лежало припущення, що небесні тіла можуть рухатися тільки по колу, хоча тоді вже було відомо – видимі рухи цих світил складніші.

Щоб пояснити видимий рух світил, Евдокс припустив, що, наприклад, рух Сонця регулюють три сфери, центри яких лежать у центрі Землі. Осі цих сфер мають різний кут нахилу одна відносно одної. Одна сфера забезпечує добовий рух Сонця, друга – річний, третя – малі рухи, що зумовлюють прискорення й уповільнення руху Сонця по небу.

Для пояснення руху Місяця також знадобилося три сфери, а для кожної з відомих тоді п'яти планет – чотири. Найпростіше було із зорями: вони не змінюють своїх взаємних положень на небі, а їх добове обертання навколо Землі сприймали як спільний, нічим не спотворений, рух. Зорі, згідно

з уявленнями Евдокса, лежать на одній сфері, тому всі вони перебувають на однаковій відстані від Землі, причому далі, ніж інші небесні тіла. Сфера зір ніби замикає Всесвіт.

Філософ і вчений-енциклопедист Арістотель (384–322 до н. е.) звів усі відомі на його час природничі знання в систему, що була непорушною протягом багатьох століть. Він уперше розглянув питання про форму Землі та небесних тіл на підставі спостережних даних. Раз під час місячних затемнень тінь Землі на диску Місяця має круглу форму, то Земля та інші небесні тіла мають мати кулясту форму. Водночас нерухому у просторі Землю Арістотель вважав центром Всесвіту. Сонце і Місяць в його системі світу – найближчі до Землі небесні тіла, а планети лежать на великих відстанях. Скінченний Всесвіт обмежувала сфера зір, удев'ятеро віддаленіша від Землі, ніж Сонце, а всі тіла всередині неї, неминуче тяжіли до Землі.

Центральне положення Землі у Всесвіті та її нерухомість у просторі Арістотель пояснював двома спостережними фактами: видимим добовим рухом зір та відсутністю змін у положенні зір на небесній сфері (якби Земля рухалась у просторі, то спостерігач, який рухається разом із Землею, мав би спостерігати такі зміни). Ці факти не лише в добу Арістотеля, а й пізніше, протягом майже 2000 років, були серйозним аргументом на користь нерухомої Землі та її центрального положення у Всесвіті.

Після розпаду величезної імперії (друга половина IV ст. до н. е.), створеної Олександром Македонським, на Близькому й Середньому Сході виникли нові держави, де неабиякий вплив мала грецька культура. Почалася епоха еллінізму, в яку грецька (елліністична) культура тісно взаємодіяла з культурами народів Індії та Середньої Азії.

Столицею елліністичного Єгипту стало місто Александрія, де виник найвизначніший в античному світі науковий центр – Александрійська бібліотека з музеєм та обсерваторією. Тут у III ст. до н. е. почали регулярно визначати положення зір шляхом вимірювання їх кутових відстаней від деяких визначальних точок небесної сфери. Цю роботу розпочали астрономи Аристилл і Тимохарис, а продовжили наступні покоління александрійських учених. Важливе досягнення – визначення розмірів земної кулі александрійським ученим Ератосфеном (бл. 275–195).

У першій половині III ст. до н. е. Аристарх Самоський висловив ідею про рух Землі навколо Сонця. Такої думки він дійшов, можливо, після того, як визначив відстань від Землі до Сонця в одиницях відстані Місяця. Хоча значення відстані, отримане Аристархом, і було в 20 разів меншим від справжнього, воно вказувало на те, що діаметр Сонця в 6–7 разів більший, ніж діаметр Землі. Тобто Сонце є більшим, ніж Земля, тілом у Всесвіті, а тому природно було вважати, що саме воно міститься в його в центрі.

Найвищого розвитку спостережна астрономія в Александрії досягла в II ст. до н. е. завдяки працям видатного стародавнього астронома Гіппарха. На підставі багаторічних спостережень александрійських астрономів він уклав



зоряний каталог, в якому розділив видимий блиск зір на шість величин (тоді їх сприймали буквально, як справжні розміри зір). Гіппарх визначив з великою точністю тривалість тропічного року, відстань від Землі до Місяця та його розміри. З порівняння виміряних ним довгот зір з довготами тих же зір, але визначеними на 150 років раніше александрійськими астрономами, він відкрив явище прецесії.

На підставі припущення, що центр Землі не збігається з центром орбіти Сонця, Гіппарх пояснив помічену попередниками нерівномірність руху Сонця, що спричиняє різну тривалість пів року. З цього також випливало, що відстань від Землі до Сонця не завжди однакова.

Про розвиток астрономії в Стародавній Греції протягом приблизно чверті тисячоліття після Гіппарха відомостей майже не збереглося. Відома тільки діяльність александрійського астронома Созигена, який розробив за дорученням римського імператора Юлія Цезаря новий, юліанський, календар.

Завершальним етапом розвитку астрономії в Стародавній Греції стала система світу Клавдія Птолемея (ч. 3, § 10, п. 1), створена в II ст. нашої ери.

### НАВЧАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

- Поясніть, чому зоряні величини, визначені по блиску зір, Гіппарх сприймав буквально, як фізичні розміри зір?

### ВИСНОВКИ

Інтерес людини до зоряного неба та до його окремих світил і явищ сягає в минуле на десятки тисяч років. Свідченнями цьому є матеріальні пам'ятки, залишені первісною людиною по всіх куточках Землі, – вибиті на камені зображення зоряних фігур (сузір'їв), зарубки на кістках тварин для відліку часу за фазами Місяця, майданчики, облаштовані для астрономічних спостережень.

### § 3. РОЗВИТОК АСТРОНОМІЇ В СЕРЕДНІ ВІКИ (V–XV ст.)

Після того, як наприкінці V ст. перестала існувати Західна Римська імперія, спадщина давньогрецької культури перейшла до Візантії (Ромейська держава). В її християнських монастирях зберігали рукописи епохи еллінізму. За відсутності світської освіти вони були центрами принаймні писемної вченості. Пізніше це стало характерним і для Європи середніх віків.

Доба Середньовіччя в Європі «переплавила» глибокі природничі знання Стародавньої Греції з примітивними християнськими уявленнями про довкілля, що привело як до нових астрономічних знань, так і до нового розуміння світобудови. Водночас, коли в континентальній Європі на початку

середніх віків астрономічні знання попередньої епохи були майже втрачені, то в Індії, Китаї та країнах арабського світу вони отримали новий розвиток.

### 1. Астрономія в Індії і Китаї.

У перші століття нашої ери в Індії з'явилися твори астрономічного змісту (сиддханті – «рішення», «остаточні твердження»). Перші з п'яти відомих сиддханті вміщують деякі відомості з давніх «Вед», але інші, наприклад «Вашіштха-сиддханті», подають відомості й методи, що спиралися на спеціальні спостереження, виконані за часів нашої ери. В них висвітлено методи визначення середньої тривалості дня (з допомогою гномона), положення екліптики – її висоти над горизонтом (за довжиною полуденної тіні гномона в моменти сонцестояння). Також наведено значення довжини тропічного й зоряного років і синодичні періоди руху п'яти відомих тоді планет.

Результати спостережної й обчислювальної індійської астрономії вміщує п'ята сиддханті (її назва «Сурья-сиддханті» походить від імені бога Сонця – Сур'я). Цей твір є індійським аналогом «Альмагеста». Він умістив опис рухів і положень п'яти планет, місячних і сонячних затемнень, а також виклад деяких методів спостережень та опис астрономічних інструментів. Енциклопедією знань з математики й астрономії, накопичених в Індії до V ст., став трактат знаменитого індійського математика Аріабхати (бл. 476 – бл. 550). До заслуг Аріабхати також відносять запровадження функції синуса й застосування її в астрономії, виклад правила визначення кутового діаметра земної тіні на місячній орбіті, тривалості й типу затемнення, зокрема ступеня часткового затемнення. Також він з дуже високою точністю обчислив тривалість тропічного року (365,27 доби).

Індійські вчені розвинули математичний апарат астрономії, а надто тригонометрію. Разом з десятковою системою обчислення його успадкували астрономи арабського світу.

У період VI – X ст. астрономія набула нового розвитку в Китаї, коли там знову виникла об'єднана могутня китайська держава. Тоді було встановлено тісні наукові контакти з Індією, а з VIII ст. – з арабським світом і Середньою Азією (Бухара, Хорезм, Самарканд). У Китаї до IX ст. було створено спеціальну державну установу, фактично астрономічний інститут. Його співробітники виконували спостереження, укладали календарі, передбачали затемнення, а також визначали «щасливі дні» для державних справ і церемоній.

Таке ставлення до астрономії дало свої плоди. В Китаї відкрили прецесію (IV ст.), обчислили (V ст.) з дуже високою точністю тривалість драконічного місяця (усереднений проміжок часу між двома послідовними проходженнями Місяця через висхідний вузол своєї орбіти), а також тривалість сидеричного періоду обертання Юпітера. Знаменитий китайський астроном І Сін (683–727) за тисячу років до Галлея відкрив власний рух зір. На 100 років раніше, ніж це зробили араби, в Китаї (VIII ст.) виміряли довжину дуги меридіана в градусній мірі.

Китайські середньовічні астрономи продовжили роботу попередників зі спостережень нових зір та комет. Упродовж X – XVII ст. було відзначено 12 випадків появи Нових. Серед них і знаменита нова зоря (її залишок – нейтронна зоря, оточена Крабоподібною туманністю), що спалахнула на небі 28 червня 1054 р. і яку було видно до 1056 р. Серед комет в китайських хроніках неодноразово відзначали ту, яку зрештою назвали кометою Галлея.

Рис. 3.1. Залишки давньої китайської обсерваторії Гаочен (XIII ст.)



Протягом XII – XVII ст. китайська астрономія, як і культура загалом, перебувала в занепаді. Після цього почався сучасний етап її розвитку.

## 2. Астрономія в арабському світі.

Наукові здобутки Стародавньої Греції потрапили до арабів у VII ст., коли на великій території (від Середньої Азії на сході до Іспанії на заході) виникла нова імперія – Арабський халіфат. Це відбувалося через асиміляцію культури Візантії, завойованої арабами, і через запозичення знань з Індії. Наприкінці VIII ст. арабською було перекладено індійські сиддханти Брахмагупти й Аріабхати, а в IX ст. «Альмагест» Птолемея. Це стимулювало розвиток спостережної астрономії та будівництво перших великих інструментів. Водночас тривала розробка математичних методів для потреб астрономії.

Відомий арабський астроном аль-Баттані (858–929), який виконував спостереження в Багдаді, визначив нахил екліптики до екватора з вищою точністю, ніж Птолемей. Після X ст. новими науковими центрами арабської культури були в різний час Каїр, де існував «Будинок знання» й обсерваторія і де працював відомий астроном Ібн Юніс (950–1009); Ісфахан, де в обсерваторії працював поет і вчений Омар Хайям (бл. 1048 – після 1122); пізніше – Марага, на території нинішнього іранського Азербайджану і, нарешті, Самарканд.

В одному з таких центрів – Газні, на південному сході сучасного Афганістану, тривалий час працював вчений-енциклопедист арабського світу Аль-Біруні (973–1048). Він побудував великий настінний квадрант з радіусом дуги 7,5 м, що дозволяв вимірювати положення Сонця і планет з точністю до 2'. Результати своєї астрономічної діяльності Аль-Біруні виклав у творах: «Індія», «Книга тлумачення основних засад астрономії», «Канон Масуда» (Астрономічні таблиці та зоряний каталог). Дві останні книги протягом століть були основними підручниками астрономії в арабському світі. Аль-Біруні мав цікаві уявлення про світобудову. Наприклад, він вважав Сонце і зорі вогняними кулями, а Місяць і планети – темними тілами, що відбивають сонячне світло. Біруні дуже критично ставився до астрології, яка відродилася та поширилася на середньовічному Сході.

Арабські астрономи навчилися по творах греків виготовляти астрономічні кутомірні інструменти (секстанти і квадранти). Вони значно підвищили точність вимірювання положень світил на небесній сфері, головню через збільшення розмірів кутомірних інструментів, а також за рахунок тривалих регулярних спостережень. Це дозволило виявити неточність астрономічних таблиць Птолемея. Тому великі зусилля було спрямовано на укладання нових сонячних, місячних і планетних таблиць (арабською – зідж) і зоряних каталогів. Ця складова арабської астрономії збереглася і в середньоазіатських наукових центрах вже після розпаду в X ст. халіфату на окремі держави.

Визначних успіхів у цій справі досягли відомі середньоазіатські астрономи-спостерігачі Насиреддін Тусі (1201–1274) та Улугбек (1394–1449). Тусі очолював Марагинську обсерваторією, де в 1271 р. було укладено «Ільханські таблиці». Вони, окрім положень Сонця, Місяця і планет, містили новий зоряний каталог.

Улугбек у XV ст. збудував у Самарканді найбільшу на той час у світі обсерваторію, обладнану дуже великим квадрантом – радіус його дуги становив 40 м. Упродовж 30-річних спостережень Сонця з його допомогою вдалося з високою точністю виміряти положення точки весняного рівнодення, нахил екліптики до екватора, а також визначити тривалість тропічного року.



Рис. 3.2. Сучасний вигляд (після реконструкції) частини квадранта з обсерваторії в Самарканді

Астрономи обсерваторії Улугбека уклали новий зоряний каталог, що вміщував небесні координати понад тисячі зір. У Самарканді для майже 700 зір положення були визначені з досить високою для того часу точністю. Ці результати увійшли в «Гураганські таблиці» (1437), які протягом кількох століть були найточнішими.

Загалом арабські вчені, зберігши певною мірою здобутки античної астрономії, досягли суттєвих результатів у частині спостережень та укладання таблиць і каталогів, а також математичних методів для астрономії.

### Астрономічні знання в середньовічній Європі.

Після тривалого, впродовж V – VII ст., занепаду наукової діяльності на території континентальної Європи (її західної частини) запровадження (782 р.) Карлом Великим, імператором Франкської держави, при своєму дворі наукового товариства стало ознакою її відродження. Водночас в монастирях стали виникати школи, що мали два рівні навчання: «тривіум» (граматика, риторика, діалектика) і «квадривіум» (астрономія, арифметика, геометрія, музика).

Через арабів, які до кінця IX ст. захопили частину Європи, на континент проникли астрономічні твори Стародавньої Греції, а також результати арабських вчених. У X – XI ст. виникли навчальні центри в Іспанії (Кордова, Толедо, Севілья) і Північній Африці. Перші в середньовічній Європі астрономічні таблиці («Толедські») було укладено 1080 року.

У Толедо за сприяння Альфонса X (Мудрого), майбутнього короля Кастилії й Леону, було збудовано першу в Європі астрономічну обсерваторію та укладено (1252 р.) нові таблиці положень небесних світил. Їх підготувала група мусульманських, єврейських та християнських астрономів і математиків, запрошених Альфонсом X. Для укладання «Альфонських таблиць» науковці разом з результатами власних спостережень використали також досягнення арабських астрономів.

У період XI – XIII ст. в Західній Європі суттєво зросла перекладацька діяльність, що привело до появи багатьох латинських перекладів творів Арістотеля, Евкліда («Елементи»), Аль-Батані («Астрономія»), Птолемея («Альмагест»).

Хоча Церква спершу й намагалася заборонити вчення Арістотеля про світобудову, та зрештою засновники схоластики німецький філософ і богослов Альберт Великий (1193–1280) і його знаменитий учень і послідовник італійський філософ і теолог Тома Аквінський (1225–1274) допасували католицьке вчення до його космологічної картини світу. Внаслідок цього Земля «стала» центром Всесвіту, як указували Птолемей і Арістотель, і саме такі уявлення про світобудову узаконила Католицька церква.

Освічені європейці, наприклад, видатний англійський філософ і натураліст Р. Бекон (1214–1294), вже в XIII ст., уважно ознайомившись з науковою спадщиною Стародавньої Греції і спостереженнями арабів, побачили, що між системою Птолемея й уявленнями Арістотеля про довкілля існують неузгодженості. Це підштовхувало їх до думки про те, що вивчення природи вимагає експериментів і дослідів, а також широкого застосування математичних методів. Очевидним ставало те, що пасивне споглядання явищ природи та їх суто розумове пояснення на підставі логіки, що не спирається на досліди, не дозволяє їх пояснити.

Однак, за винятком діяльності Альфонса X, упродовж XIII – XIV ст. в середньовічній Західній Європі астрономія не мала бодай якогось розвитку, хоча інтерес до неї помітно зріс. Уявлення про світобудову були примітивними, астрономічні знання – на елементарному рівні. Про це свідчить поширення астрономічного твору «Трактат про сферу» (1230) англійського письменника Джона Галіфакса (ширше відомого як Сакробоско). Хоча автор виклав найпростіші астрономічні знання, проте його твір використовували як університетський підручник з астрономії протягом чотирьох століть (до XVI ст. він мав 65 видань).

Тільки від початку XV ст. (доба Відродження) астрономія в Західній Європі набула ознак спостережної науки, що спиралась на математичні методи. Головну роль у цьому відіграли австрійський астроном і математик Георг

Пурбах (1423–1461) та його німецький друг, учень і соратник Йоганн Мюллер (1436–1476), більше відомий як Регіомонтан.

Читаючи лекції у віденському університеті про математичну теорію планет, Пурбах згодом на підставі теорії Птолемея написав книжку «Нова теорія планет», яка протягом десятиліть була для європейців основним посібником з астрономії.

Регіомонтан у 16-річному віці став співробітником Пурбаха. Протягом 1456–1461 рр. вони виконали багато спостережень Сонця, Місяця, місячних затемнень, а також спостерігали рух та зміну вигляду комети (1456–1457), яка пізніше отримала назву комета Галлея. З результатів спостережень Пурбах і Регіомонтан побачили, що Альфонські таблиці XIII ст. застаріли (наприклад, обчислене за ними положення Марса не збігалося зі справжнім на  $2^\circ$ ).

Науковці вирішили укласти нові таблиці положень небесних світил на підставі власних спостережень та обробки результатів із застосуванням методів сферичної тригонометрії. Окрім цього, Пурбах задумав видати скорочений переклад «Альмагеста», але до смерті не встиг виконати переклад. Цю роботу завершив Регіомонтан у Нюрнберзі (її було видано в 1496 р.).

У Нюрнберзі Регіомонтан разом з аматором астрономії Б. Вальтером, який влаштував у своєму будинку першу на німецькій землі обсерваторію, виконували в 1471–1475 рр. перші в Європі тривалі регулярні спостереження Сонця. Водночас Регіомонтан організував власну друкарню зі спеціальним верстатом для друкування астрономічних текстів і таблиць. Це дозволило йому друкувати астрономічні календарі-щорічники, які вміщували не тільки астрономічні дані, але й дати церковних свят, а також інформацію астрологічного змісту.

Друкарня Регіомонтана видала його головну працю – «Ефемериди» – астрономічні таблиці на 1475–1506 рр., що були значно точнішими, ніж Альфонські таблиці. Це були останні в Європі таблиці, обчислені на підставі геоцентричної теорії Птолемея. Твір також містив опис нового методу (на підставі порівняння табличних і спостережуваних на місці положень Місяця) визначення географічної довготи в морі. «Ефемериди» використав Колумб, а згодом Америго Веспуччі у своїх подорожах, наслідком чого стало відкриття Нового Світу (Америки).

## НАВЧАЛЬНІ ЗАВДАННЯ (ПРАКТИЧНА РОБОТА)

- Підготуйте усну доповідь, реферат, есе на тему з історії астрономії в світі.

## ВИСНОВКИ

Доба Середньовіччя в Європі «переплавила» глибокі природничі знання Стародавньої Греції з примітивними християнськими уявленнями про довкілля. Це привело до нових астрономічних знань і до нового розуміння

світобудови. Водночас, коли в континентальній Європі на початку середніх віків астрономічні знання попередньої епохи були майже втрачені, то в Індії, Китаї та країнах арабського світу вони отримали новий розвиток.

## § 4. АСТРОНОМІЯ В XVI – XX СТОЛІТТЯХ

Розвиток астрономії, що розпочався в XVI ст. і триває досі, спричинили кілька обставин, серед яких винахід телескопа, поява спектрального аналізу, можливість виводити в космічний простір дослідницькі апарати. Ці обставини здаються суто технологічними. Але вони тісно пов'язані з одвічним прагненням людства до пізнання довкілля.

### 1. Телескопічна ера в астрономії.

Наприкінці XV – початку XVI ст. в астрономії виник новий, дослідницький, напрямок, коли європейські астрономи стали не лише спостерігати зоряне небо, а й розробляти нові методи спостережень та намагались пояснювати їх результати. Наприклад, великий італійський вчений-енциклопедист, художник, інженер Леонардо да Вінчі (1452–1519) правильно пояснив природу попельястого світла Місяця як результат освітлення його Землею.

На рубежі XVI – XVII ст., завдяки працям Коперника, освічені люди в Європі звернули увагу на питання світобудови. Ідея про те, що центром світу є Сонце, а не Земля, була сприйнята не одразу. Вона не лише суперечила релігійним уявленням, але й не мала підтверджень, хоча легко пояснювала причину «дивних» видимих рухів планет на небесній сфері. Однак її пропагували окремі філософи і природознавці, зокрема Джордано Бруно, Йоганн Кеплер і Галілео Галілей.

До них належав і Тіхо Браге (1546–1601), який на отриманому від данського короля у володіння острові Вен, збудував дві обсерваторії – Ураніборг (Палац астрономії) і Стърнеборг (Зоряний палац). Оснастивши їх різними астрономічними інструментами, він виконав велику кількість регулярних спостережень, зокрема й положень планети Марс.

Ці результати використав для визначення законів руху планет Йоган Кеплер (1571–1630), який в останні роки життя Тіхо Браге був його помічником у Празі.

Телескопічну еру в астрономії розпочав Галілео Галілей (1564–1642), який власноруч спорудив підзорну трубу й направив її на зоряне небо восени 1609 р. Навіть дуже скромні можливості першого телескопа дозволили Галілею зробити дивовижні, як на той час, відкриття. Він побачив гори й рівнини на Місяці, чотири супутники Юпітера (тепер їх називають галілеєвими), фази Венери. Явище зміни фаз Венери стали доказом того, що вона, як і вказував Коперник, обертається навколо Сонця. Окрім цього, спостерігаючи плями на Сонці, Галілей виявив його обертання навколо осі. Перші телескопічні спостереження розкрили таємницю Молочного Шляху. Свої астрономічні відкрит-

тя Галілей опублікував у «Зоряному віснику» в березні 1610 р., започаткувавши традицію виносити на публічний огляд результати наукової праці.



Рис. 4.1. Перший телескоп Галілео Галілея

Після піонерських телескопічних спостережень Г. Галілея стало зрозумілим, що майбутнє астрономії – телескопи з дедалі більшими об'єктивами. Великі розмірами телескопи навчився

будувати для своєї власної обсерваторії в Гданську відомий польський астроном-спостерігач Ян Гевелій (1611–1687). Його телескопи називали «повітряними», бо вони не мали труби – лінзу-об'єктив встановлювали на високій (до 30 м) щоглі, а лінзу-окуляр на довгій (до 45 м) палиці. Спостерігати в такі телескопи було важко. Але навіть без телескопів, тільки з допомогою кутомірних інструментів, Гевелій виконав багато спостережень й отримав важливі результати (наприклад, уклав каталог зір).

Обсерваторія Я. Гавелія була найбільшою в Європі приватною обсерваторією, яку створила заможна людина для власних занять астрономічною наукою. Але розвиток економіки провідних європейських країн, зокрема мореплавання, вимагав астрономічних даних, які могли здобути науковці, що працюють в державних обсерваторіях. Тому 1667 р. було засновано Паризьку, а 1675 р. Гринвіцьку (тоді поблизу Лондона) обсерваторії. Першу очолив Джованні Кассіні (1625–1712), а другу – Джон Флемстід (1646–1719). Він також здобув титул Королівського астронома. Традиція, згідно з якою директор Гринвіцької обсерваторії одночасно є Королівським астрономом, зберігалась аж до 1974 року.



Рис. 4.2. Будівля Паризької обсерваторії (першої державної в Європі)

Важливим для розвитку астрономії стало відкриття англійським астрономом Едмондом Галлеєм (1656–1742) власного руху зір (1718). Його він зробив, порівнявши координати зір Сиріус, Арктур і Альдебаран у трьох каталогах: Гіппарха, Тіхо Браге

і Дж. Флемстіда, тобто на інтервалі часу майже в 19 століть. Це дозволило виявити, що відомі з давнини зорі помітно змістилися щодо інших зір, змінилися також їхні відстані від екліптики.



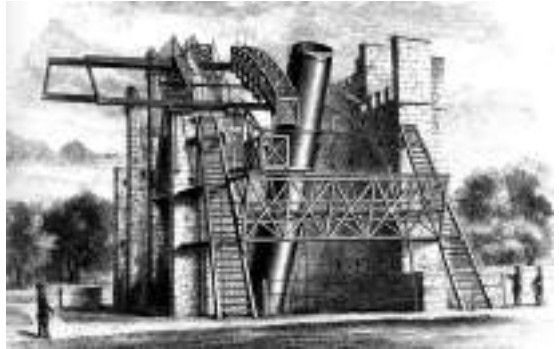
1728 р. англійський астроном Джеймс Бредлі (1693–1762), намагаючись виявити паралактичні зміщення зір, відкрив річну аберацію (всі зорі на небесній сфері зміщуються на деякий кут до точки – апекса, в напрямку якої рухається в даний момент Земля). Відкриття річної аберації стало першим прямим доказом руху Землі навколо Сонця. Окрім цього, знання сталих річної аберації, нутації (її також відкрив Дж. Бредлі), як і сталої прецесії, сприяло підвищенню точності спостережень.

До середини XVIII ст. астрономи вже зрозуміли – відстані до зір дуже великі. А телескопічні спостереження дозволили виявити не тільки багато слабких невидимих оком зір, але й туманностей. Проте можливості телескопів, які астрономи мали протягом більшої частини XVIII ст., не дозволяли систематично вивчати розподіл зір у Молочному Шляху.

Такі дослідження розпочав видатний англійський астроном В. Гершель (1738–1822), який власноруч виготовляв телескопи-рефлектори. 1789 р. він збудував телескоп із дзеркалом у діаметрі 122 см і з фокусною відстанню у 12 м. Понад 55 років цей інструмент був неперевершеним.

Коли Гершель почав вивчати будову Молочного Шляху, відстані до зір та їхні світності були невідомі. Тому він не зміг зробити правильні висновки щодо його будови. Але робота не була марною – дослідження В. Гершеля суттєво розширили знання про небесні об'єкти, з яких складається Молочний Шлях. На підставі своїх досліджень Гершель дійшов висновку: Молочний Шлях – це величезне утворення з окремих зір, зоряних скупчень і туманностей, що утворюють єдину систему.

Рис. 4.3. Телескоп В. Парсонса



Багаторічні спостереження туманностей дозволили Гершелю з'ясувати, що деякі з них складаються з розсіяної матерії і, ймовірно, перебувають в межах Молочного Шляху. Натомість ті з них, в яких він спостерігав зорі, є далекими зоряними системами. До таких Гершель, наприклад, відносив Туманність Андромеди.

Відстані до зір на підставі вимірів їхніх річних паралаксів вдалося визначити наприкінці 30-х років XIX ст. Василь Струве (1793–1864) в 1837 р. опублікував результати визначення паралаксу зорі Вега, Фридріх Бессель (1784–1846) в 1838 р. визначив паралакс зорі 61 Лебеда, а Томас Гендерсон (1798–1844) на мисі Доброї Надії (Південна Африка) виміряв паралакс зорі  $\alpha$  Кентавра.

Це були дуже важливі результати для астрономії. Вони остаточно зруйнували тисячолітні уявлення про «сферу нерухомих зір» і вказали на те, що Всесвіт безмежний у просторі.

Те, що в космічному просторі є багато туманностей зоряної природи, виявив ірландський астроном Вільям Парсонс (1800–1867), який 1845 р. збудував телескоп-рефлектор з діаметром дзеркала 183 см (цей телескоп був найбільшим у світі до початку ХХ ст.).

Парсонс також виявив, що деякі туманності, в яких навіть у його телескоп не було видно окремі зорі, мають характерну спіральну форму. Ці нові відкриття, як і результати спостережень В. Гершеля, поставили перед астрономами проблему існування у Всесвіті окремих зоряних систем, що лежать за межами Молочного Шляху.

## 2. Зародження небесної механіки та астрофізики.

Закони Кеплера – перші кількісні закони астрономії – пояснювали рух планет, але не вказували на його причину. Її, як силу тяжіння між тілами, виразив у законі всесвітнього тяжіння (1687) видатний англійський вчений Ісаак Ньютон (1643–1727). Цей закон став не лише підґрунтям нової фізики, але й суттєво вплинув на розвиток астрономії. В ній виник окремий розділ – небесна механіка, що вивчає рух небесних тіл на підставі закону всесвітнього тяжіння і класичної механіки.

З допомогою методів небесної механіки за невеликими відхиленнями руху планети Уран англійський астроном і математик Джон Адамс (1819–1892) і французький астроном Урбен Левер'є (1811–1877) майже одночасно теоретично передбачили положення невідомої тоді планети Сонячної системи. Її восени 1846 р. в Берлінській обсерваторії відкрив Йоганн Галле (планету назвали Нептун).

Ще один розділ астрономії – астрофізика, що відкрив нові можливості пізнання Всесвіту, – виник у другій половині ХІХ ст. завдяки досягненням фізики й хімії, а також появі спектрального аналізу й фотографії. Застосування методів спектрального аналізу, астрофотографії та фотометрії дозволило розпочати вивчення фізичних і хімічних властивостей небесних тіл.

Спектральний аналіз виник з досліджень І. Ньютона із розкладання призмою сонячного світла на окремі складові та з відкриття Йозефом Фраунгофером (1787–1826) багатьох темних ліній в спектрі Сонця. Але його основою став закон, відкритий 1859 р. німецькими вченими – фізиком Густавом Кірхгофом (1824–1887) і хіміком Робертом Бунзенем (1811–1899), який стверджує, що частоти випромінювання й поглинання світла в спектрах хімічних речовин збігаються. Це дозволило астрономам в другій половині ХІХ ст. помітити загальні риси, характерні для зоряних спектрів, та розробити першу їх класифікацію.

Фотографію було винайдено за чверть століття до відкриття спектрального аналізу й майже одразу застосовано для фотографування небесних об'єктів,

зокрема Місяця і Сонця, а трохи згодом і яскравих зір. Після вдосконалення фотографічної технології астрофотографія стала одним з головних методів астрофізики.

### 3. Позагалактична і всехвильова астрономія.

Розвиток астрофізики дозволив на початку ХХ ст. зробити відкриття, що уможливили вивчення віддалених об'єктів Всесвіту, зокрема з'ясування їхньої будови. Одне з таких – виявлення в 1908 р. Генрієттою Лівітт (1868–1921) у Гарвардській обсерваторії залежності між періодом зміни блиску цефеїд і їхніми світностями (залежність «період – світність»). Відкриття дозволило, спостерігаючи цефеїди, визначати відстані до дуже далеких космічних об'єктів, де є такі зорі.

Цей метод у 1924 р. застосував американський астроном Едвін Габбл (1889–1953) для визначення відстані до кількох спіральних «туманностей» (однією з них була Туманність Андромеди). З допомогою найбільшого тоді в світі телескопа з діаметром дзеркала у 2,5 м обсерваторії Маунт-Вілсон Габбл отримав фотографії туманностей. У зовнішніх ділянках їх зображень було чітко видно окремі зорі, серед них і цефеїди. Визначивши відстані до них, Габбл з'ясував, що ця відстань є суттєво більшою, ніж розміри Молочного Шляху. Так було доведено існування інших зоряних систем, галактик, у Всесвіті й започатковано новий розділ астрономії – позагалактичну астрономію.



Рис. 4.4. Едвін Габбл виконує спостереження на 2,5-метровому телескопі обсерваторії Маунт-Вілсон (США, Каліфорнія)

Після відкриття Габблом світу галактик, розширення меж спостережуваного Всесвіту відбувалося дуже швидко. Цьому сприяла поява нових великих телескопів, зокрема 5-метрового рефлектора в Паломарській обсерваторії (1948), а також можливість виконувати спостереження в інших діапазонах електромагнітного спектра, окрім видимого світла.

У 30-х роках ХХ ст. виникла радіоастрономія, а з кінця 40-х років астрономи почали розміщувати телескопи і приймачі випромінювання на ракетах. З початком космічної ери (1957) астрономія позбулася завад, які створює атмосфера Землі, й стала всехвильовою наукою, бо отримала змогу реєструвати випромінювання всіх діапазонів електромагнітного спектра.

Космонавтика зробила астрономію не лише всехвильовою, але й експериментальною наукою. Автоматичні міжпланетні станції дозволили виконувати експерименти на поверхнях окремих тіл Сонячної системи (планети, супутники планет, астероїди і комети).

## НАВЧАЛЬНІ ЗАВДАННЯ

- Поясніть, чому Гершелю не вдалося на підставі отриманих результатів спостережень зробити правильні висновки щодо будови нашої зоряної системи.
- Відкриття якої залежності сприяло появі нового розділу в астрономії – позагалактичної астрономії.

## ВИСНОВКИ

Протягом чотирьох століть (XVI – XX) астрономія вступила в телескопічну еру, розвинула нові напрями досліджень (небесна механіка, астрофізика, позагалактична астрономія) і стала всехвильовою наукою. Все це докорінно змінило попередні уявлення людства про світобудову.

## § 5. ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ АСТРОНОМІЇ

За перші майже двадцять років XXI ст. астрономія зробила новий системний крок у пізнанні Всесвіту. Ще цікавішим буде наступне десятиліття, адже до ладу стануть якісно нові наземні й космічні телескопи. Це означає – астрономія отримує нові знання, розкриє таємниці, що існують сьогодні, й відкриє щось нове й досі незбагненне. Результати роботи вчених початку XXI ст. будуть новим стимулом для розвитку вічно молоді науки астрономії.

### 1. Астрономія – передовий рубіж природознавства.

І на початку своєї історії, і в Середньовіччі астрономія була «каталізатором» розвитку інших природничих наук, а також математики. Нині вона знову виходить на передовий рубіж, бо астрономічна наука тією чи іншою мірою стосується всіх інших природничих дисциплін – від фізики, для якої Всесвіт нині перетворився у величезну лабораторію, до біології, з якою астрономія дотична в питанні походження життя на нашій планеті та пошуку його на інших небесних тілах. Окрім цього, астрономія широко використовує математику й інформатику. З допомогою комп'ютерів моделюють астрономічні явища і процеси, наприклад, формування найперших зір і галактик чи злиття масивних чорних дір тощо.

У телескопобудуванні для виготовлення космічних обсерваторій, а також створення нових чутливих приймачів випромінювання, для астрономії використовують новітні технологічні досягнення. Наприклад, Сонячний зонд імені Паркера, який в 2020-х роках буде досліджувати Сонце з відносно близької відстані, оснастили теплозахисним екраном зі спеціально створеного для цієї мети матеріалу.

Розвиток астрономії суттєво залежить від нових, більших розмірами, ніж їхні попередники, телескопів. У цьому питанні в найближчі 10 років відбу-

дуться кардинальні зміни. 2021 р. в космічний простір має вийти телескоп імені Джеймса Вебба, оснащений дзеркалом у 6,5 м. Його на замовлення NASA, Європейського й Канадського космічних агентств виготовили фахівці з понад 100 різних фірм світу.

Нові технології та досягнення комп'ютерної техніки дозволяють будувати великі наземні телескопи. Вже діють телескопи з діаметром дзеркала в 10 м, а нові будуть удвічі – втричі більшими. Нині тривають роботи зі спорудження трьох великих наземних телескопів: Гігантського магелланового телескопа (Giant Magellan Telescope, GMT) з діаметром дзеркала 24,5 метра; Тридцятиметрового телескопа (Thirty Meter Telescope, TMT) та Європейського надзвичайно великого телескопа (European Extremely Large Telescope, E – ELT) з діаметром дзеркала 39 м.

Водночас астрономи планують нові космічні місії й експерименти. До таких належать космічні телескопи з пошуку планет земного типу поблизу інших зір, автоматичні міжпланетні станції для вивчення супутників планет-гігантів, дальше дослідження Марса та повернення до Місяця – створення на його поверхні наукової бази.

Зрозуміло, нарощування засобів спостереження суттєво вплине на кількість отриманих даних, які для одержання нових астрономічних знань потрібно буде опрацьовувати. Вже нині таких даних дуже багато, а незабаром буде ще більше. Астрономія явно увійшла в новий етап розвитку, однією з особливостей якого буде інтенсивний потік даних (data intensive astronomy).

Обробка та інтерпретація великої кількості даних можлива за умови, що їх зможуть виконувати науковці з усього світу. Для цієї мети започатковано «Міжнародну віртуальну обсерваторію» (International Virtual Observatory Alliance). Її завдання: створити умови для швидкого і зручного доступу до величезних масивів спостережних даних, зокрема й тих, які було отримано в «доцифрову еру».

У зв'язку з великими обсягами даних, які треба опрацьовувати, нової якості набуває аматорство в астрономії. Аматори можуть виконувати спостереження не лише для власного задоволення, але в деяких питаннях і для наукових потреб. Суттєвим є їх внесок в обробку даних, які вони виконують у рамках загальносвітового руху «Громадська наука» (Citizen science).

## 2. Невирішені наукові проблеми.

Астрономічні дослідження, виконані на межі XX – XXI століть, привели до суттєвого перегляду уявлень про Всесвіт. З'ясовано, що видима в телескопи матерія (баріонна речовина), становить заведне 4 відсотки від загальної кількості матерії нашого Всесвіту (ч. 2. § 29, п. 3).

Якщо окреслити коло невіршених наукових проблеми, то нині в усіх розділах астрономії їх доволі багато. В зоряній астрономії до таких належать: методи вивчення внутрішньої будови зір; картина походження й еволюції зір побудована тільки в загальних рисах і вимагає суттєвої деталізації; немає

докладної моделі Сонця, здатної точно пояснити всі його спостережувані властивості; немає докладної фізичної теорії деяких проявів зоряної активності (спалахи Наднових); відсутнє пояснення причин гамма-спалахів тощо.

У галактичній і позагалактичній астрономії досі не з'ясовано багато питань щодо будови Галактики; лишається таємницею природа темної матерії; досі немає єдиної теорії формування галактик. Як і немає багатьох відповідей в космогонії Сонячної системи (наприклад, утворення Місяця і кілець планет-гігантів, міграції великих планет, формування планетної системи тощо).

Космологія ще не змогла створити довершеної теорії народження Всесвіту. Залишаються незрозумілими багато питань щодо його подальшої еволюції, тобто його майбутнього.

Нині астрономи зосереджують зусилля на тому, щоб у найближчому майбутньому знайти біля інших зір планети земного типу та виявити на них ознаки біосфери; зрозуміти механізми, що запускають процеси формування зір; знайти методи «прямих» спостережень чорних дір; виявити носія (частинки) темної матерії; зрозуміти фізичну суть темної енергії тощо.

Звісно, немає гарантії, що відповіді на ці та інші питання буде знайдено досить швидко, але розвиток астрономії триває, тому відповіді неодмінно будуть.

## НАВЧАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

- Поясніть, чому астрономію вважають переднім краєм природознавства.

## ВИСНОВКИ

За перші десятиліття ХХІ ст. астрономія зробила новий системний крок у пізнанні Всесвіту. В наступне десятиліття до ладу стануть якісно нові наземні та космічні телескопи, що дозволить розкрити нинішні таємниці й отримати нові знання про Всесвіт. Результати роботи науковців на початку теперішнього століття стануть новим стимулом для розвитку вічно молодого науки астрономії.

## ТЕМА 1.2. РОЗВИТОК АСТРОНОМІЧНОЇ НАУКИ В УКРАЇНІ

### § 6. УЯВЛЕННЯ ПРО ВСЕСВІТ У КИЇВСЬКІЙ РУСІ

Землі сучасної України здавна заселяли народи, які мали певні астрономічні знання. Свідчення цьому – зображення астрономічного змісту на каменях і скелях, вік яких встановити важко, але які, ймовірно, були створені ще в дослов'янську епоху. Дешифрація цих знань збереглася до наших днів у народній астрономії.

## 1. Уявлення та знання про Всесвіт у Київській Русі.

Племена східних слов'ян, які жили на території нинішньої України з VI ст., обожнювали природні тіла і явища, зокрема й небесні світила – Сонце і Місяць. Водночас Місяць, завдяки зміні його фаз, здавна використовували як календар. Цей досвід знайшов утілення в народному слов'янському календарі, який ще довго використовували прості люди навіть після введення на Русі юліанського календаря.

Інтерес до зоряного неба посилювався, коли виникла держава Київська Русь. Цьому сприяли практичні потреби орієнтування з допомогою небесних світил під час сухопутних і морських походів. На жаль свідчень про астрономічні знання та їх практичне застосування під час плавань наших предків у X – XI ст. Чорним морем до, наприклад Царгорода (нинішній Стамбул), не збереглося. Але без зоряних дороговказів вони навряд чи могли обійтися.

З X ст. Київська Русь мала тісні зв'язки з Болгарською державою, що межувала з Візантією. Тому твори візантійських авторів природничої тематики через Болгарію проникали на Русь. Після запровадження наприкінці X ст. християнства, така література здебільшого відображала релігійний погляд на світобудову. Окрім цього, як і в Західній Європі в середні віки, центрами писемної вченості надовго стали монастирі.

Рис. 6.1. Зображення знаків Зодіаку в книзі  
«Ізборник Святослава»



У монастирях, окрім переписування книг про життя святих, стали укладати літописи, заносючи до них і відомості про спостереження небесних явищ. Перша згадка про астрономічне явище – сонячне затемнення – позначена 1064 роком. Літописець указав на вигляд Сонця під час цього явища та відкинув поширене в народі повір'я про якусь потвору, що нібито з'їдає в такий момент Сонце. Людей, які вірять у це, він назвав «невегласями», тобто невігласами.

Для чернігівського князя Святослава в 1073 р. був переписаний болгарський збірник, відомий під назвою «Ізборник Святослава». В ньому вміщено зображення знаків Зодіаку.

Кирик Новгородець у XII ст. підготував твір «Вчення про числа», де виклав основи теорії укладання календаря та обчислення пасхалий – дат Великодня. Інша відома книжка – збірник «Толковая Палея», був укладений не пізніше XIII ст. (з тих, які збереглися, найдавніший відносять до 1350 р.). Він уміщує опис світобудови, заснований на уявленнях Арістотеля в інтерпретації діячів Церкви V – X ст.

Загалом розвиток астрономічного знання в Київській Русі відбувався в руслі європейської традиції, хоча й мав свою особливість – майже повне несприй-

няття астрології. Найпершою перешкодою для неї було духовенство, яке водночас чинило спротив поширенню античних уявлень і знань про Всесвіт.

## 2. Народна астрономія українців.

Людина сивої давнини відчувала єдність світу й намагалася облаштувати своє особисте життя, життя своєї родини, свого народу, зважаючи на це відчуття. Небесні світила – далекі й недосяжні – були для неї такими ж близькими, як і все те, що оточувало її на Землі. Збережені народною пам'яттю фрагменти єдиної картини небесного світу наших пращурів свідчать про допитливість і високий духовний рівень давніх людей.

У далекі часи увагу привертала небесні світила, які людина бачила щодня – Сонце, Місяць і яскраві зорі. Саме вони й отримували власні назви. Сонце – сила (божество) над природою, що оживляє її навесні і припиняє її розвиток узимку. З огляду на це Сонце наші предки уявляли вродливим юнаком (парубком), статним воїном чи мудрим сивим дідом (Ярило, Купало, Дажбог) залежно від пір року. Часто Сонце уявляли у вигляді колеса: «Колесом, колесом в гору Сонце йде...» (з української народної пісні).

Окрім Сонця, головним небесним символом наших пращурів був Місяць. В Україні про нього народ казав: «Це – предок Дідух, а зорі – то його рідня».

Виокремили на зоряному небі праукраїнці й окремі сузір'я. До наших днів дійшли лише деякі з цих назв. Найвідоміша з них – Великий Віз – четверо коліс та троє коней (семизір'я Великої Ведмедиці). Поява небесного Воза не випадкова, адже віз – неодмінний елемент побуту кочівників, а для хлібороба – важливе знаряддя праці. Небесний Віз допомагав нашим предкам визначати час уночі (за положенням Ковша відносно горизонту). Не зрозуміло з яких підстав, але побутувала також думка: «Між крайнім переднім конем (зоря η) і другим конем (зоря ζ) є маленька зірочка – вудила: коли вони переїдаються, тоді й кінець світу».



Рис. 6.2. Чумацький Шлях – українська назва примітної особливості зоряного неба Землі

Сузір'я Малої Ведмедиці здавна в Україні має назву Пасіка. Інколи його називають Малим Возом – дається взнаки схожість цього семизір'я з ковшем Великої Ведмедиці. Сузір'я Оріона мало кілька назв – Плуг, Граблі, Полиця, Чепіги, а три зорі поясу Оріона – Косарі. Походження такої назви пояснюють тим, що ці зорі сходять уранці в пору сінокошу.

Через зовнішню схожість сучасне сузір'я Орла мало назву – Дівка з відрами. А не дуже виразне сузір'я Дельфіна, що міститься поруч з небесною Дівкою, слугувало праукраїнцям небесною Криницею.



На зоряному небі наших пращурів було місце для Пастуха (Волопас), що мав слідувати за небесним Биком (сузір'я Тельця). Яскраву групу зір, яку видно в наших краях у будь-яку пору року, назвали Бороною (Кассіопея). В цій назві увіковічено ще одне знаряддя праці хлібороба – п'ять яскравих зір справді нагадують примітивну бороно.

З доби Київської Русі до нас дійшла українська назва сузір'я Лебедя – Хрест, бо найяскравіші його зорі утворюють саме цю фігуру. На зоряному небі сузір'я Хреста міститься посеред Шляху в Київ. Цей шлях – примітна деталь зоряного неба Землі. Ще одна його українська назва – Чумацький Шлях. Вона виникла в період чумакування (XV – XVI ст.), що залишило помітний слід в історії України (рис. 6.2). Яким важливим був цей промисел для життя людини, якраз і свідчить поява небесного Чумацького Шляху, або Чумацької Дороги. Її виділили, бо сріблясто-біла смуга на зоряному небі слугувала чумакам дороговказом: коли вони їздили в Крим (це було влітку й взимку) з материкової України, то прямували на південний схід. Якраз улітку та взимку Чумацький Шлях пролягає на вечірньому небі з північного заходу на південний схід.

Українці вважали зорі дітьми Сонця і Місяця. Дотепер збереглася українська назва лише однієї зорі. Вона належить до сузір'я Візничого і від стародавніх греків отримала назву – Капелла. Наші пращури називали її Козою. Дивно, але в перекладі з грецької Капелла – це коза. Хто в кого запозичив назву, та й чи було це запозиченням – залишається загадкою.

Наші пращури були уважними спостерігачами зоряного неба. Підтвердженням цьому є й те, що вони виділили в сузір'ї Біка-Тельця окрему яскраву групу зір, назвавши її Квочкою (розсіяне скупчення зір Плеяди). Про ці зорі говорили: «Квочка – одна велика, а коло неї штук сім-вісім меншеньких. Вона йде вперед, а за нею ті зорі купкою». Плеяди ще називали: Волосини, Волосожар, Курка, Баби. «Коли Плеяди з'являються на небі, то відмикають небо весняним дощам». У давнину їх сприймали як позначку, від якої ділили рік на дві частини: коли Плеяди вперше сходять уранці – початок теплого періоду (літа), а коли вранці заходять – початок холодного періоду року – зими. Походження назви «Бабине літо» можливо пов'язано саме з цим зоряним скупченням. Найвідоміша українська назва скупчення Плеяди – Стожари – збереглася досі. Її часто використовують у поетичних творах, піснях тощо.

Свідчень щодо давніх назв планет Сонячної системи практично не лишилось. Єдина серед них (найяскравіша на зоряному небі) – планета Венера – мала назву Зорі, або ж Вістунки. В народній уяві Зоря на світанку ключем відмикає небесні ворота й випускає Сонце на небо.

## НАВЧАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

- Підготуйте усну доповідь на тему «Народна астрономія українців» та з'ясуйте народні назви небесних світил, притаманні для місця вашого проживання (район, область, край).

## ВИСНОВКИ

Землі сучасної України здавна заселяли народи, що мали астрономічні знання. Про це свідчать зображення астрономічного змісту на каменях і скелях, створених ще в дослов'янську епоху. Дециця цих знань збереглася до наших днів у народній астрономії. Астрономічні знання розвивалися далі після утворення Київської Русі.

## § 7. АСТРОНОМІЯ В УКРАЇНІ В XV – XVIII СТ.

Відтинок часу з другої половини XVI ст. та першу половину XVII ст. історики називають першим українським національно-культурним відродженням, або блискучою й величною епохою в історії України. Тоді відбувся ніколи раніше небувалий розквіт культури. Саме в цей період в Україні почали друкувати книги (1574) та відкривати навчальні заклади, зокрема Острозьку академію (1577) та Києво-Могилянську колегію (1632).

Упродовж XV ст. – першої третини XVIII ст. астрономічні уявлення в Україні еволюціонували від примітивних візантійських вчень про плоску Землю, через поступове засвоєння античних ідей Арістотеля і Птолемея про кулясту форму небесних світил та про геоцентричну систему світу, – аж до сприйняття й утвердження геліоцентричного вчення.

### 1. Астрономічна освіта і поширення астрономічних знань.

Заснування навчальних закладів спонукало до появи книжок, зокрема й астрономічного змісту, які використовували як підручники. Ректор Острозької академії Герасим Смотрицький видав (1587) працю «Календар римський новий», присвячену питанням астрономії. Комета 1618 р., появу якої зафіксовано в Київському літописі, надихнула Мелетія Смотрицького підготувати рукописний твір про ці небесні тіла. Автор докладно виклав астрономічні, а надто астрологічні, уявлення того часу.

Астрологія з XV ст. набула суттєвого поширення серед освіченого прошарку українства, особливо панівної верхівки. Її привітно сприймали при дворі київських князів Омельковичів у середині XV ст. Це було звично для Європи в цілому. Протягом XV – XVII ст. астрологія посідала центральне місце в світогляді освічених європейців, суттєво впливаючи на розвиток культури. Оскільки тоді астрологію й астрономію сприймали переважно як єдину науку, існував суттєвий інтерес і до астрономічного знання.

На українських землях у другій половині XVI ст. була поширена література астрономічного та астрологічного змісту, що походила із Західної Європи. Перша причина цьому – астрономія була обов'язковим предметом у тогочасних українських школах. Тому, наприклад, бібліотека Острозької академії мала книги «Космографія» (1564), «Фізика і сферика» (1593), «Астрономічний

календар на 1506 рік». Друга причина – інтерес до астрології (до окультних наук загалом), яка була тісно переплетена з астрономічними знаннями.

Український переклад книжки Йоанна Сакробоско «Космографія» (назва в оригіналі «Tractatus de sphaera») було видано ще раніше – в другій половині XV ст. Автор виклав вчення про світобудову в уявленнях Птолемея й Арістотеля. Книжка була основним астрономічним твором не лише в Україні, але й у всій Європі аж до кінця XVI ст.

Наприкінці XVI ст. було укладено Холмський збірник (автор-укладач невідомий), що містив твори астрономічного й астрологічного змісту. Окрім «Космографії» Сакробоско та статей пізнішого походження, він вміщував переклад однієї з астрологічних праць видатного українського вченого XV ст. Юрія Дрогобича (Котермака).

На межі XVI – XVII ст. українською було перекладено книгу енциклопедичного змісту «Луцідарій» («Світильник»). Вона вміщувала астрономічні відомості про будову світу (кулясту Землю, планети, сонячні й місячні затемнення тощо), згідно з уявленнями Птолемея й Арістотеля, у формі діалога: вчитель відповідав на запитання учня. Така подача матеріалу добре пасувала до шкільного навчання.

Водночас, а надто в монастирях, була популярною праця візантійського книжника VI ст. Козьми Індикоплова «Християнська топографія», в якій він заперечував кулястість Землі. Тобто в Україні впродовж XV – XVI ст. існували два варіанти астрономічного знання, що спиралися на геоцентричну систему світу, але мали суттєві розбіжності щодо будови Землі й «облаштування» неба. Прихильники першого варіанту дотримувалися вчення Птолемея й Арістотеля про сферичну Землю та небесні сфери, що забезпечують рух планет. Прихильники другого були адептами візантійських церковних уявлень про плоску Землю й небесні світила, яких рухають ангели.

З кінця XVI ст. й особливо в першій половині XVII ст. в Україні стало поширюватись геліоцентричне вчення Коперника. В Острозькій школі працювали викладачі, які здобували освіту в Падуанському університеті й слухали лекції Галілео Галілея. З передовими ідеями європейської астрономії були обізнані професори Львівської братської школи. Наприклад Стефан Зизаній, один з чільних викладачів цієї школи, відкрито висловлював і обстоював (1596) ідею про множинність і нескінченність світів у Всесвіті.

Спершу вчення Коперника в Україні, як і в Західній Європі, сприймали на тлі традиційної геоцентричної моделі світу дуже критично. Але воно поступово проникло в навчальні програми з астрономії й завоювало право на існування в українській астрономічній думці XVII ст. Це виразно показує наукова практика Києво-Могилянської колегії.

## 2. Викладання астрономії в Києво-Могилянській академії.

Відомі просвітителі Іов Борецький і Петро Могила 1615 р. організували Київську братську школу. На її підставі, а також на підставі Лаврської школи,

1632 р. було організовано Києво-братську колегію, яку невдовзі стали називати Києво-Могилянською. 1701 р. цей навчальний заклад став академією.

Як і освітні заклади вищого рівня, створені раніше в інших містах України, Києво-Могилянська академія наслідувала європейські освітні традиції. Основою науково-освітнього процесу було вивчення семи вільних мистецтв (*artes liberales*), або, як їх тоді називали в Україні, «сім наук визволених». До них належали науки тривіуму – граматики, риторики, логіки та квадрівіуму – арифметики, геометрії, музики, астрономії.

Ректор Києво-Могилянської колегії Інокентій Гізель у 1646–1647 рр. в курсі філософії виклав систему Коперника. Хоча викладач мав критичне ставлення до таких уявлень, адже вони суперечили Святому Письму, але вважав за потребу ознайомити з ними студентів. Мабуть він гадав, що це розширить їхню широкоглядність і спонукає до пошуків наукової істини.

У другій половині XVII ст. в Києво-Могилянській колегії викладали як геоцентричну, так і геліоцентричну системи світу, але поступово система Коперника завойовувала дедалі більше прихильників і серед викладачів, і серед студентів. Упродовж 1705–1716 рр. курс природничих наук (астрономія, фізика, математика й логіка) під назвою «Трактат з фізики» читав Теофан Прокопович (1681–1736). Він не лише пояснював світобудову на підставі поглядів Коперника, але й посилався на дослідження Г. Галілея – розповідав студентам про телескопічні відкриття супутників Юпітера, фаз Венери, плям на Сонці, рельєфу Місяця. Окрім цього, Т. Прокопович указував на те, що доктор медицини й математик М. Коперник розробив свою систему, сприйнявши давні погляди Аристарха Самоського і Філолая, та прагнув обґрунтувати її переконливими доказами.

Загалом вихідці з Києво-Могилянської колегії вже з першої половини XVII ст. поширювали геліоцентричні уявлення про світобудову не лише в Україні, а й у всій Східній Європі. Наприклад Єпіфаній Славинецький, професор Києво-Могилянської колегії в 40-х рр. XVII ст., 1649 р. переїхав з культурною місією до Москви і разом з іншим киянином, Арсенієм Сатановським, переклав і видав там (1655–1677) космологічну працю Йоганна Блеу «*Theatrum orbis terrarum*» (Амстердам, 1645). У перекладі цей твір мав назву «Зерцало всієї вселенної» і об'єктивно подавав систему Коперника.

## НАВЧАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

- Поясніть роль астрології в утвердженні астрономічних знань в Україні протягом XV – XVII ст.

## ВИСНОВКИ

Протягом XV ст. – першої третини XVIII ст. астрономічна думка в Україні еволюціонувала від примітивного вчення про плоску Землю до сприйняття й утвердження геліоцентричної системи світу.

## § 8. ПЕРШІ АСТРОНОМІЧНІ ОБСЕРВАТОРІЇ В УКРАЇНІ

Розвиток вищої освіти в Україні, що почався наприкінці XVI ст., привів до появи університетів, а разом з ними й до заснування університетських астрономічних обсерваторій. Вони взяли на себе не лише освітню функцію (навчання астрономії), але й наукову.

### 1. Університетські астрономічні обсерваторії в Україні.

Першу астрономічну обсерваторію в Україні було засновано при Львівському університеті 1771 р. Після приєднання західноукраїнських земель до Австрії науковці обсерваторії виконали геодезичну зйомку Галичини, але вже на початку 80-х років XVIII ст. вона припинила роботу. В університеті астрономія, як навчальна дисципліна, стала частиною фізики.

Майже за сто років потому (1871) в Львівській Політехніці відкрили кафедру геодезії і сферичної астрономії. Вона мала астрономічну обсерваторію, де виконували прикладні роботи з визначення часу та географічних координат.

Кафедру астрономії та астрономічний інститут у Львівському університеті було засновано в 1900 р. Марцін Ернст (приват-доцент, а згодом професор астрономії) започаткував регулярні спостереження планет, комет, змінних зір та сонячних затемнень. Упродовж 1932–1945 рр. кафедрою та обсерваторією завідував Еугеніуш Рибка.

Після Другої світової війни в обсерваторії започатковано нові напрями досліджень – фізика Сонця, сонячна активність та сонячно-земні зв'язки, небесна механіка, фізика зір і міжзоряного середовища, релятивістська астрофізика. Став виходити Циркуляр Львівської астрономічної обсерваторії.

У 1960 р. Львівська астрономічна обсерваторія отримала в селищі Брюховичі заміську базу спостережень, де було також організовано станцію оптичних спостережень штучних супутників Землі (ШСЗ). Тут виконували візуальні, фотографічні, а згодом і фотометричні спостереження цих об'єктів. Наприкінці XX ст. створено комплекс лазерної локації ШСЗ. Це дозволило підняти точність спостережень до світових вимог – з 2002 р. пункт лазерної локації Львівської астрономічної обсерваторії входить до глобальної світової мережі спостережень ШСЗ.

Нині обсерваторія виконує дослідження з фізики Сонця, зір і галактик, релятивістської астрофізики і космології. В її складі – відділ практичної астрономії та фізики ближнього космосу, відділ технічного обслуговування телескопів, а також бібліотека.

В обсерваторії працювали і працюють нині відомі в Україні та за її межами науковці: Богдан Бабій, Богдан Гнатик, Моріс Ейгенсон, Ярослав Капко, Самуїл Каплан, Іван Климишин, Олександр Логвиненко, Богдан Новосядлий, Володимир Степанов, Мирослав Стоділка.

1845 р. засновано Астрономічну обсерваторію Київського університету, яку очолив В. Ф. Федоров (1802–1855) – учень знаменитого В. Я. Струве, професор

астрономії і ректор (1843–1847) університету. Проект обсерваторії розробив відомий архітектор В. Беретті. Її будівництво, обладнання інструментами та інші роботи тривали до 1862 р.

У 70-х роках XIX ст. обсерваторію очолив М. В. Хандриков (1837–1915), який визначив напрям її наукової роботи, – фундаментальна астрометрія. В обсерваторії встановили (1872) меридіанне коло фірми Репсольда, що дозволило виконувати високоточні спостереження зір протягом тривалого часу. Окрім роботи в галузі позиційної астрономії, виконували дослідження, пов'язані з методикою визначення орбіт небесних тіл. Згодом розпочали спостереження комет, покриттів зір Місяцем, сонячних плям і факелів.

На межі XIX – XX ст. в обсерваторії працювали такі висококваліфіковані спеціалісти, як В. І. Фабриціус (1845–1895), Р. Ф. Фогель (1859–1920), М. П. Диченко (1863–1932), С. Д. Чорний (1874–1956).

Новий етап розвитку Київської астрономічної обсерваторії (як часто називають університетську обсерваторію в Києві, скорочено КАО) почався тоді, коли наприкінці 30-х років XX ст. її очолив С. К. Всехсвятський (1905–1984). Він був астрофізиком за фахом, тому, не минаючи увагою проблеми астрометрії, став розвивати астрофізичний напрям – вивчення активності Сонця, фізики малих тіл Сонячної системи тощо. Під керівництвом С. К. Всехсвятського в обсерваторії виконали великий обсяг досліджень з кометної астрономії.

А. О. Яковкін (1887–1974) розпочав у КАО дослідження фігури Місяця, О. Ф. Богородський (1907–1984) – вивчення релятивістських ефектів в астрономії. 1957 р. в обсерваторії було організовано станцію спостережень штучних супутників Землі, а також метеорний відділ. З початку 70-х років XX ст. в обсерваторії почали виконувати дослідження з фізики сонячних спалахів, сонячної активності та її довготривалого прогнозування.

Астрономічну обсерваторію в складі Одеського університету засновано 1871 р. Її очолив завідувач кафедри астрономії професор Л. Х. Беркевич (1828–1897). Він попросив директора Пулковської обсерваторії Отто Струве висловити міркування щодо можливих астрономічних досліджень в Одеській обсерваторії. Струве вказав на важливість астрофізичних досліджень – їх започаткував професор О. К. Кононович (1850–1910), який очолював обсерваторію в 1881–1912 роках.

Новий директор (1913–1933) Одеської обсерваторії О. Я. Орлов, відомий в світі фахівець з питань астрометрії і гравіметрії, домігся розширення наукової тематики. Протягом 1934–1944 рр., коли обсерваторію очолював професор К. Д. Покровський (1868–1944), почалися дослідження комет, астероїдів, подвійних зір, фотометричні та спектральні спостереження зір. Також К. Покровський приділяв велику увагу популяризації астрономії.

Суттєвого розвитку зазнала Одеська обсерваторія в 1954–1983 роках, коли її очолював В. П. Цесевич – знаний в світі астроном, талановитий педагог та популяризатор астрономії. Було створено дві спостережні станції за межами Одеси, а також три високогірні станції у Вірменії, на Північному Кавказі

(пік Терскол) і в Туркменістані. В обсерваторії збудували нові телескопи з дзеркалами діаметром 20–80 см, а також інші прилади для спостережень.

З 1993 р. обсерваторія має статус науково-дослідного інституту (НДІ) при Одеському національному університеті зі збереженням назви «Астрономічна обсерваторія».

Одеська астрономічна обсерваторія щороку організовує і проводить міжнародну наукову конференцію «Літня Гамовська астрономічна школа».

Обсерваторія в Одесі зберігає третю за вмістом у світі колекцію зображень зоряного неба із понад 100 тисяч фотографічних платівок. Її наукова бібліотека має понад 200 тисяч одиниць зберігання.

В Одеській обсерваторії працювали багато відомих у світі астрономів, серед яких Віктор Абалакін, Зінаїда Аксентьева, Ігор Астапович, Георгій Гамов, Олексій Ганський, Віталій Григоревський, Микола Діварі, Венчеслав Жардецький, Микола Стойко-Раділенко, Валентин Каретников та інші.

1883 р. за ініціативою професора Г. В. Левицького (1852–1917) було засновано Астрономічну обсерваторію Харківського університету. Але ще з 1808 р. в університеті діяв астрономічний кабінет, а пізніше й кілька тимчасових обсерваторій, які використовували з навчальною метою.

Перші дослідження обсерваторії стосувалися до астрометрії. В цій галузі над створенням каталогів працювали відомі астрономи Л. О. Струве (1858–1920) і Микола Євдокимов (1868–1941). Упродовж 1920–1931 років астрофізичні дослідження розвивав видатний український астроном Б. П. Герасимович (1889–1937). Планетні дослідження в Харківській обсерваторії розпочав В. Г. Фесенков. Натомість М. П. Барабашов (1894–1971), видатний український астроном, директор Харківської обсерваторії протягом 1930–1970 років, заснував у 20–30 роках ХХ ст. харківську школу дослідників планет. Завдяки цьому обсерваторія стала в колишньому Радянському Союзі одним з лідерів у вивченні тіл Сонячної системи. В співпраці з іншими обсерваторіями тут було виконано обробку фотографій зворотного боку Місяця та створено «Атлас оберненого боку Місяця» (1960–1964).

2002 р. на базі Харківської обсерваторії створено науково-дослідний інститут астрономії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Нині це одна з провідних астрономічних установ України, де виконують фундаментальні й прикладні дослідження з фізики Сонця, Місяця, планет і їхніх супутників, астероїдів і комет, з фундаментальної астрометрії та зоряної астрономії, розробляють і вдосконалюють методи астрономічних спостережень. Її обладнано низкою різних телескопів та іншими інструментами й приладами. Обсерваторія має заміську спостережну станцію та наукову бібліотеку.

Окрім названих вище, в Астрономічній обсерваторії Харківського університету працювали і працюють нині відомі українські астрономи Ю. В. Александров, В. А. Захожай, П. С. Порецький, Ю. Г. Шкуратов та інші.

## 2. Миколаївська астрономічна обсерваторія (МАО).

Цю обсерваторію створили в 1821 р. для потреб Чорноморського флоту – забезпечення його точним часом і морехідними картами та для налагодження навігаційних приладів і навчання штурманів астрономічним методам орієнтування. Першим директором обсерваторії був К. Х. Кнорре (1801–1883), який обіймав цю посаду протягом 50 років. Він, окрім визначення координат зір, з допомогою телескопа-рефрактора визначав положення комет, зокрема комети Галлея під час її повернення до Сонця в 1835 р.

З 1872 р. морським астрономом (так називали очільника Миколаївської обсерваторії) став І. Є. Кортацці (1837–1903). За результатами власних спостережень Кортацці опублікував каталог положень 5976 зір; спостерігав комети, Юпітер, склав таблиці для визначення координат корабля в морі, а також таблиці для визначення часу. Одним з перших (1885) Кортацці виконав з допомогою горизонтального маятника дослідження припливів у земній корі. Крім цього, він навчав астрономії морських офіцерів.

З 1881 р. науковою роботою обсерваторії в Миколаєві керувала Пулковська обсерваторія. У 1909 р., коли базу Чорноморського флоту перевели з Миколаєва до Севастополя, вона в 1912 р. перемістила в Миколаїв своє відділення, яке до того часу було в Одесі. Його керівником залишився Б. П. Остащенко-Кудрявцев (1877–1956), який з 1909 р. був морським астрономом.

Миколаївські астрономи, наслідуючи наукові традиції Пулковської астрометричної школи, уклали низку каталогів положення зір високої точності.

1992 р. Миколаївська астрономічна обсерваторія стала самостійною науковою установою, з 2002 р. має статус науково-дослідного інституту. 2007 р. МАО включено до списку світової спадщини ЮНЕСКО. Музей обсерваторії зберігає унікальну колекцію астрономічних приладів та інструментів: меридіанне коло й переносне вертикальне коло фірми Репсольда, колекцію астрономічних годинників XVIII – XIX ст., астрономічні книги XVII – XIX ст., а також десятки інших експонатів.

## ВИСНОВКИ

Заснування університетських астрономічних обсерваторій зумовив розвиток вищої освіти в Україні, що почався наприкінці XVI ст. і привів до появи університетів. Обсерваторії виконували й виконують нині не лише освітню функцію (навчання астрономії), але й наукову. Співробітники обсерваторій і дотепер виконують систематичні астрономічні дослідження.

## § 9. АСТРОНОМІЯ В НАЦІОНАЛЬНІЙ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ

Академії наук – об'єднання дослідників, а також науково-дослідних установ різних галузей науки, існують у багатьох країнах світу. Іноді вони не містять



у своїй назві слова «академія», як наприклад, Лондонське королівське товариство (засноване в 1660 р.). Українську академію наук (з 1994 р. Національна академія наук України, НАН України) засновано 1918 р. указом гетьмана Павла Скоропадського. Її першим президентом був видатний український вчений Володимир Вернадський.

### 1. Головна астрономічна обсерваторія НАН України.

У складі Української академії наук (УАН) від дня її заснування було передбачено створення Астрономічної обсерваторії. Дійсним членом УАН, академіком, 1919 р. було обрано О. Я. Орлова (1880–1954), на той час директора Одеської астрономічної обсерваторії.

Олександр Орлов, засновник і перший директор Головної астрономічної обсерваторії (ГАО) в структурі Академії наук України, понад 20 років домагався її відкриття. Це вдалося зробити в 1944 р., коли було ухвалено рішення про створення обсерваторії в Голосіївському лісі (тоді на околиці Києва). З січня 1945 р. перші співробітники обсерваторії почали наукову роботу в Голосіїві.

Окрім О. Я. Орлова, за всю історію ГАО її очолювали відомі українські астрономи В. П. Цесевич, А. О. Яковкін, Є. П. Федоров, І. К. Коваль. З 1975 р. директором обсерваторії є академік НАН України Я. С. Яцків.

Хоча Голосіївську обсерваторію (неофіційна назва ГАО) створювали з метою виконання астрометричних досліджень, невдовзі після відкриття в ній також започаткували роботи з астрофізики. Оскільки Київське зоряне небо не відповідає багатьом вимогам для таких досліджень, то з ініціативи ГАО та за участі її співробітників було побудовано астрофізичний філіал на піку Терскол (Приельбрусся). Нині це Міжнародний центр астрономічних та медико-екологічних досліджень. Тут встановлено найбільший 2-метровий телескоп ГАО.

Обсерваторія виконує наукову діяльність за такими напрямками: позиційна астрономія та космічна геодинаміка, фізика Сонця і тіл Сонячної системи, фізика й еволюція зір та галактик, астрономічне й космічне приладобудування. За даними фотографування космічним апаратом «Зонд-3» її науковці створили Атлас зворотного боку Місяця. Також було створено зоряний каталог ФОНАК, оригінальні спектральні, фотометричні й поляриметричні прилади (вперше у світі), з допомогою яких визначили фізичні властивості атмосфер Марса, Юпітера й Сатурна. У ГАО розроблено фотометричні моделі комет та фізична теорія ядер комет, оригінальні методи і програмне забезпечення для спостережень за космічними та астрономічними об'єктами і для обробки отриманих даних. З допомогою Космічного телескопа імені Габбла академік НАН України Ю. І. Изотов відкрив блакитну компактну галактику SBS 0335–052 з рекордним дефіцитом важких елементів.

ГАО була учасником виконання наземних астрономічних програм та проєктів космічних досліджень («Вега», «Коронас-І» та «Коронас-Ф»), зокрема, тіл Сонячної системи (Місяць, Марс, Венера, комета Галлея) та Сонця.

Нині Обсерваторія також бере участь у різних міжнародних службах та спостережних програмах.

Сучасна ГАО посідає провідне місце в Україні та світі з деяких напрямів астрономії й астрофізики, зокрема дослідження обертання Землі й побудови координатних систем у космічному просторі, в галузі визначення вмісту первинного гелію у Всесвіті, вивчення блакитних карликових галактик з рекордно низьким вмістом важких елементів, дослідження та теоретичного моделювання коричневих карликів, теорії переносу випромінювання в сонячній та зоряних атмосферах, поляризаційних дослідженнях тіл Сонячної системи.

2004 р. в обсерваторії відкрито Музей історії ГАО НАН України, де зібрано експонати й матеріали, що розповідають про її 70-річну історію та сьогодення.

## 2. Полтавська гравіметрична обсерваторія та Радіоастрономічний інститут.

1926 р. О. Я. Орлов заснував у Полтаві гравіметричну обсерваторію з метою вимірювання сили тяжіння з дуже високою точністю. Її розмістили на північній околиці Полтави в будинку, що раніше належав відомому художнику Григорію Мясоедову. Нині обсерваторія входить до складу Інституту геофізики НАН України імені С. І. Суботіна. Вона є фундаментальним гравіметричним пунктом, зв'язаним зі світовою гравіметричною мережею.

У 1926–1938 роках колектив обсерваторії виконав першу велику роботу – створив гравіметричну карту України. Її використали для пошуку корисних копалин. Протягом 1930–1997 рр. у Полтаві дослідили припливні деформації Землі, спричинені гравітаційним впливом Сонця та Місяця. Ці дослідження, виконані з допомогою надзвичайно чутливих та високоточних приладів, дозволили вивчити динаміку земної кори та внутрішню будову Землі.

Дотепер в обсерваторії виконують спостереження змін широти Полтави (для цієї мети використовують зеніт-телескопи та призмову астролябію Данжона), розпочаті ще 1939 р. Ці результати дали змогу отримати фундаментальні дані про рух земних полюсів, вивчити деякі тонкі ефекти обертання Землі.

З 1980 р. Полтавська гравіметрична обсерваторія організувала пошукові роботи з проблеми провісників землетрусів. Запроваджено дослідження динаміки поверхневих шарів земної поверхні з метою виявлення закономірностей її деформацій і виявлення зв'язків між геодинамічними параметрами та зовнішніми збурюючими факторами. Після того, як 1991 р. під Полтавою став до ладу радіотелескоп УРАН-2 (Український радіоінтерферометр академії наук) обсерваторія виконує також радіоастрономічні спостереження небесних об'єктів різних типів (залишки наднових зір, радіогалактики, квазари та ін.).

З 2001 р. в обсерваторії виконують GPS спостереження (глобальна система визначення місцеположення). Полтавська GPS-станція входить до Української мережі станцій космічної геодезії та геодинаміки.

Нині Полтавська гравіметрична обсерваторія виконує дослідження за такими основними напрямками: вивчення обертового руху Землі й пов'язаних з ним геодинамічних явищ методами космічної геодезії та оптичної

астрометрії; вивчення динаміки земної кори й сили тяжіння на підставі геодезичних та геофізичних спостережень; геофізичні дослідження з проблеми прогнозу землетрусів; вивчення джерел космічного радіовипромінювання в декаметровому діапазоні радіохвиль.

У Полтавській гравіметричній обсерваторії працювали відомі українські науковці Олександр Орлов, Євген Федоров, Зінаїда Аксентьева, Юрій Гулак, Микола Попов, Василь Баленко та інші.

В Україні головною науковою установою з астрономічних досліджень у радіодіапазоні електромагнітного спектра є Радіоастрономічний інститут (РІ) НАН України, створений 1985 р. на базі Відділення радіоастрономії Інституту радіофізики та електроніки АН України.

Наукові напрямки діяльності РІ НАН України – радіоастрономія різних об'єктів Усесвіту; дистанційне зондування навколоземного космічного простору та Сонячної системи; фізичні принципи побудови радіотелескопів і радіотехнічних систем дистанційного зондування. Інститут також виконує прикладні дослідження, розробляє прилади та радіотехнічні системи для різних діапазонів радіохвиль.

Радіоастрономічний інститут має в розпорядженні найбільший у світі радіотелескоп декаметрового діапазону УТР-2 та систему УРАН. Це дозволяє Україні бути світовим лідером у галузі декаметрової радіоастрономії. Харківська наукова школа декаметрової радіоастрономії, заснована академіком С. Я. Брауде (1911–2003), визнана в світі. РІ НАН України є ініціатором та учасником міжнародних програм та проектів, працює з науковими установами різних країн.



Рис. 9.2. Антени радіотелескопа декаметрового діапазону УТР-2

У РІ НАН України працювали й нині працюють відомі українські радіоастрономи А. В. Мень (1927–2011), О. А. Мінаков (1949–2012), Л. М. Литвиненко, О. О. Коноваленко, В. М. Шульга та інші.

### 3. Кримська астрофізична обсерваторія (КраО)

Розміщена в селищі Наукове за 10 км від Бахчисарая. Хоча її засновано 1945 р., а відкрито 1956 р., історія цієї астрономічної обсерваторії почалася в 1908 р., коли в Криму створили відділення Пулковської обсерваторії. Тоді О. П. Ганський (1870–1908) умовив аматора астрономії М. С. Мальцова, який збудував у Симеїзі обсерваторію, подарувати її Пулково.

До початку Другої світової війни Симеїзька обсерваторія була головною астрофізичною обсерваторією Радянського Союзу та однією з найбільших в Європі. Але після війни її довелося створювати заново, бо обсерваторію

було майже знищено. Нову обсерваторію вирішили будувати не в Симеїзі, де турбулентність атмосфери заважала отримувати якісні зображення небесних об'єктів, а в Кримських горах. Водночас її перетворили з філії Пулковської в Кримську астрофізичну обсерваторію АН СРСР. Першим директором КрАО став академік Г. А. Шайн (1892–1956).

КрАО обладнали низкою телескопів не лише для видимого, але і для радіодіапазону, а також автоматизованим телескопом для реєстрації гамма-променів. Ця обсерваторія має найбільший в Україні телескоп з діаметром дзеркала 2,6 м. Його встановлено 1962 р. і названо на честь Г. А. Шайна. З 1980-х років у КрАО працює повністю автоматизований дзеркальний телескоп АЗТ-11 ( $D = 1,250$ ), який використовують для фотометричних, спектроскопічних і поляризаційних спостережень зір.



Рис. 9.3. Телескоп імені Шайна Кримської астрофізичної обсерваторії

Кримська астрофізична обсерваторія виконує дослідження в різних галузях астрономії. Вона відома в астрономічному світі дослідженнями Сонця й астероїдів. Багатьом астероїдам кримські першовідкривачі дали імена, пов'язані з Україною – її культурою, історією й наукою. Від початку заснування обсерваторії створено лабораторію, яка виконує розробку та конструювання нових приладів для астрономічних досліджень.

Окрім Г. А. Шайна в КрАО працювали відомі в світі астрономи А. Б. Северний (1913–1987), М. О. Козирев (1908–1983), М. В. Стещенко (1927–2018) та інші.

Зверніть увагу! В зв'язку з анексією Криму, яку 2014 р. вчинила Російська Федерація, КрАО нині перебуває на тимчасово окупованій території України і не підпорядкована українським органам управління.

### НАВЧАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

- Підготуйте усну доповідь або презентацію про відомих науковців, які працювали в астрономічних установах НАН України.

### ВИСНОВКИ

Від початку діяльності Української академії наук (1918) в її складі було передбачено Астрономічну обсерваторію, яку створили тільки в 1944 р. Тепер це Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України. Нині в структурі НАН України діють також Радіоастрономічний інститут та Полтавська гравіметрична обсерваторія. Окрему історію має Кримська астрофізична обсерваторія, розміщена в селищі Наукове.

# Розділ II. Астрономічні знання, наукова картина світу і світогляд

## ТЕМА 2.1. АСТРОНОМІЯ І НАУКОВА КАРТИНА СВІТУ

### § 10. СИСТЕМИ СВІТУ

Історія астрономії зберегла уявлення про системи світу з допомогою яких людина намагалася пояснити порядок розміщення в космічному просторі та рух відомих їй давня світил.

#### 1. Геоцентрична система світу.

Філософи та астрономи Стародавньої Греції досягли великих успіхів у спробах пояснити закономірності видимих рухів небесних тіл. Вершиною їх досягнень стала геоцентрична система світу, яку створив Клавдій Птолемей у II ст. н. е. Її опис він виклав у творі «Велика побудова» («Μεγάλη συντάξις»). Пізніше, коли книгу переклали іншими мовами, її назва змінилася. Наприклад, назва арабською – «Al Magest», латинською (в перекладі з арабської) – «Almagestum». Як «Альмагест» книга Птолемея стала відома на багатьох мовах світу.

«Велика побудова» узагальнила досягнення астрономії в Стародавній Греції. Книга містила каталог 1022 зір (координати й зоряні величини), опис інструментів, з допомогою яких Птолемей виконував спостереження, пояснювала відомі тоді нерівномірності руху Сонця, Місяця і планет. Птолемей виходив з припущення про центральне положення Землі у Всесвіті. Він допускав, що видимі рухи небесних тіл можна пояснити обертанням Землі, але, згідно з тодішніми уявленнями, вирішив, що такого не може бути. Якби Земля оберталася, то це призводило б до падіння предметів на її поверхні, а хмари і птахи в атмосфері не встигали б за цим рухом. Водночас Птолемей погоджувався з Арістотелем: Земля має форму кулі.

Взятися за створення нової теорії руху небесних тіл Птолемея спонукали результати тривалих спостережень александрійських астрономів: вони вказували на те, що видимі рухи Сонця, Місяця і планет набагато складніші, ніж вважали раніше, зокрема Евдокс і Арістотель. Гіппарх, попередник Птолемея, знайшов пояснення, хоча лише частково, нерівномірностям рухів Сонця і Місяця. Але спробувати пояснити рухи планет не наважився – вони були складними і вимагали тривалих додаткових спостережень.

Маючи результати спостережень і вважаючи Землю нерухомою, Птолемей поставив собі за мету створити математичну теорію, яка пояснює всі нерівномірності рухів небесних тіл тільки комбінаціями їхніх рівномірних рухів по колу. Застосувавши поняття деферента й епіцикла, він зміг побудувати теорію, яка задовільно описувала видимий рух планет і дозволяла визначати їх положення в майбутньому.

Ця теорія отримала назву геоцентричної системи світу, бо, згідно з нею, всі небесні тіла обертаються навколо Землі. Але насправді, в теорії Птолемея кожна планета рухається не навколо Землі, а навколо математичної точки (центра епіциклу), що обертається навколо Землі по деференту (рис. 10.1). Щоб пояснити всі відомі нерівномірності руху планет, Птолемей також припустив, що Земля міститься не в центрі деферента, а трохи осторонь від нього. Ще одне припущення – центр епіциклу переміщується по деференту нерівномірно, але так, що його рух здається рівномірним, якщо дивитися на нього з екванта – точки, симетричної до центра Землі відносно центра деферента.



Рис. 10.1. Деферент і епіцикл в теорії Птолемея

Отже, геоцентрична система світу – доволі складна математична модель, внутрішньо логічна і певною мірою завершена, яка для свого часу задовільно пояснювала видимі рухи планет і дозволяла визначати їх положення на небесній сфері наперед. Водночас вона не відображала справжньої будови Сонячної системи.

У добу раннього Середньовіччя про систему світу Птолемея забули, але пізніше вона, як і уявлення Арістотеля про докілья, стала опорою схоластики в її боротьбі проти розвитку правильних уявлень про будову Всесвіту.

## 2. Геліоцентрична система світу.

Не Земля, а Сонце, центр світу – ось постулат, який висунув Микола Коперник, коли створював геліоцентричну систему світу. Уперше стисло, без математичного обґрунтування, він виклав її основні положення в рукописному творі «Малий коментар», який розіслав деяким своїм знайомим природознавцям. Ця інформація поширилася в європейських наукових колах, а тому освічені люди того часу знали, що Коперник має уявлення про світобудову, відмінні від загальноприйнятих.

Публікувати основний твір, в якому ідеї геліоцентричної системи були не тільки сформульовані, але й докладно обґрунтовані, Коперник не поспішав. Згідно з легендою, він отримав перший примірник книги «Про обертання небесних сфер» в день смерті 24 травня 1543 р. Передмову до неї (без відома

автора) написав лютеранський богослов Осіандер, який цікавився астрономією і вів справу щодо видання і друку книги в Нюрнберзі. Він розумів, що зміст книги суперечить догмам християнської віри, тому в анонімній передмові вказав: твердження Коперника про рух Землі – лише припущення автора, яке він зробив для зручності математичних розрахунків руху планет. Справжню будову Всесвіту розкриває тільки Біблія, а науки, зокрема й астрономія, цього робити не можуть.

Анонімна передмова, яку читачі сприймали за слова Коперника, вказувала на те, що сам автор книги трактує геліоцентричну систему тільки як математичне припущення. Але зміст книги однозначно вказував – Коперник розглядав центральне положення Сонця у Всесвіті та рух Землі, як об'єктивну реальність. Книга мала присвяту римському папі Павлу III, в якій Коперник наголошує – він приступив до своєї праці з метою знайти пояснення тому, що досі не було вирішено наукою, і щоб, зрештою, дати огляд будови Всесвіту.

Хоча ідею про рух Землі висловлювали в Стародавній Греції, а також в арабському світі та в середньовічній Європі, ніхто до Коперника не зміг перетворити її в розроблену теорію. Коперник обґрунтував добове обертання Землі навколо своєї осі й пояснив цим зміну дня і ночі, а також видиме обертання небесної сфери. Визнавши Сонце центром планетної системи, він зміг просто пояснити складні рухи планет. У його системі світу знайшло пояснення явище, яке так і не зрозуміли в рамках геоцентричної системи світу, – періодична зміна блиску планет із плином часу. З'ясувалося, що ця зміна зумовлена постійною зміною відстані між планетою і Землею внаслідок їх обертання навколо Сонця.

У геліоцентричній системі світу залишилось уявлення про сферу нерухомих зір. Вони лежать дуже далеко від Землі, але відстань для всіх однакова. Коперник відкинув аргумент прихильників геоцентризму про те, що якби Земля оберталася навколо Сонця, то внаслідок цього руху можна було б помітити зміщення зір на небесній сфері. А раз таких зміщень не видно, то геліоцентрична система світу хибна. Коперник заявив, що такі зміщення насправді є, але їх неможливо спостерігати через величезні відстані до зір.

Розвиток астрономії, наукова праця таких відомих вчених, як Тіхо Браге, Джордано Бруно, Галілео Галілей, Йоганн Кеплер та інших повільно переконували європейців, найперше викладачів університетів, у тому, що геліоцентрична система світу правильно відображає світобудову. До кінця XVII ст. вона стала практично загальноприйнятною.

## ПРАКТИЧНА РОБОТА

- Організуйте і проведіть з своїми однокласниками (друзями, рідними) диспут на тему «Якою є сучасна система світу?».

## НАВЧАЛЬНІ ЗАВДАННЯ

- Комбінацією яких рухів Птолемей пояснив петлеподібні переміщення планет на небесній сфері?
- Які спостереження могли беззаперечно підтвердити геліоцентричну систему світу й чому їх не виконували одразу після появи цієї системи?

## ВИСНОВКИ

Уявлення про розміщення у просторі Землі, Сонця, планет і зір, що виникли в давнину і ґрунтувалися на прямих враженнях від спостереження довкілля, називають системами світу. Найвідоміші з них – геоцентрична й геліоцентрична системи світу.

## § 11. АСТРОНОМІЯ І НАУКОВА КАРТИНА СВІТУ

На початку ХХ ст. наш співвітчизник В. І. Вернадський говорив про те, що практична діяльність людини стає основною геологотвірною силою планети. Нині ми знаємо, що людина владна не лише змінити довкілля, але й знищити все живе на Землі. Ця обставина фактично стала одним з наріжних каменів світорозуміння сучасного людства.

### 1. Наукова картина світу.

Філософський словник визначає поняття наукової картини світу (НКС) так: «Наукова картина світу – система загальних принципів, понять, законів і наочних уявлень, сформована на основі синтезу наукових знань». Тобто НКС впорядковує, систематизує й узагальнює результати наукових досліджень, але ці узагальнення своїм змістом і суттю є вищими за конкретні результати окремих дисциплін.

Уявлення науки, передової на певному історичному етапі, значною мірою визначають суть НКС. Але водночас і від наукової картини світу залежить інтерпретація і тлумачення, окремих наукових теорій та концепцій.

Зазвичай виділяють три різнорівневих типи наукової картини світу: 1) загальнонаукова картина (об'єднує уявлення про природу і людину); 2) природничо-наукова і соціально-історична картина (комплекс загальних поглядів на природу і суспільство); 3) частковонаукові картини світу (відображають окремі суттєві фрагменти реальності, які досліджує людина, – астрономічної, біологічної тощо).

Оскільки НКС відображає діяльність людини, то вона містить досягнення не лише природничих наук, але також суспільних і технічних. У своїй структурі НКС має центральне, відносно стійке, теоретичне ядро, утворене ustalеними неспростовними фундаментальними уявленнями даної конкретної епохи, й окремі часткові теоретичні моделі, що повсякчас перебувають



у стадії доопрацювання. Коли йдеться про фізичну реальність, то до сучасних надстійких елементів наукової картини світу відносять принцип збереження енергії, принцип безупинного зростання ентропії, фундаментальні фізичні константи, що описують основні властивості Всесвіту, – простір, час, речовину, поле.

Характерна ознака наукової картини світу – її захищеність, спрямована на збереження власної концептуальної основи. Набуваючи рис парадигми (від грец. *παράδειγμα* – сукупність загальноновизнаних наукових досягнень в ту чи іншу епоху, які є основою і зразком для нових наукових досліджень), НКС задає систему принципів освоєння довкілля, накладає певні обмеження на характер гіпотез, впливає на формування норм наукового дослідження. Вона вказує на стандарти наукової практики, на ідентичність переконань, цінностей і технічних засобів, етичних правил і норм, які сповідує наукове співтовариство для забезпечення існування наукової традиції. Все це впродовж тривалого часу визначає стійку систему знань, яку транслюють і розповсюджують через освіту, виховання й популяризацію наукових ідей та досягнень.

НКС – системне утворення. Її не може змінити одиночне, навіть найвидатніше, відкриття, а лише низка взаємопов'язаних відкриттів у фундаментальних науках, що спричиняють радикальну перебудову методів дослідження і значні зміни в нормах та ідеалах науковості. Зміна наукової парадигми приводить до повного або часткового заміщення елементів наукової картини світу, її еволюції, зміни її історичних форм.

Наукова картина світу історична. Вона спирається на досягнення науки конкретної епохи і є синтезом наукових звань, що відповідають конкретному історичному періоду розвитку людства. Діяльність кожного ученого, який здобуває нові знання, багато в чому зумовлена пріоритетами й потребами своєї епохи.

Процес наукового пізнання залежить від засобів та умов його здійснення. Натомість НКС визначає стратегію і тактику наукового пошуку (добір актуальних проблем, оцінку доступності й доцільності їх дослідження), задає темп зростання ядра достовірних знань. Екстраполяція нових достовірних знань і деяких найістотніших і обґрунтованих гіпотез за межі, де можлива для даної епохи їх перевірка експериментом і спостереженнями, поповнює новими деталями і збагачує НКС або, навпаки, виявляє її неузгодженість з виявленими фактами. У разі появи суперечностей виникають передумови кризової ситуації, яка рано чи пізно приводить до зміни наукової картини світу.

Отже, НКС є одночасно й умовою, і одним з головних результатів процесу наукового дослідження довкілля. Вона і направляє наукове дослідження, і змінюється сама за принципом зворотного зв'язку.

Хоча наукова картина світу – це лише тимчасова й доволі умовна модель дійсності, без її побудови і без сприйняття її як обґрунтованого відображення

дійсності людський розум не міг би просуватися далі у пізнанні світу. Картина світу постулює універсальність відкритих законів природи і, врешті-решт, загальну впорядкованість, закономірність об'єктивного світу, без чого його пізнання неможливе.

## 2. Астрономічна складова сучасної наукової картини світу.

Нині вважають, що найдокладнішою є фізична картина світу, яка значною мірою спирається на астрономічні знання. Сучасна астрономія збагатилася НКС такими поняттями як темна матерія і темна енергія. Переосмислення антропоцентризму, яке розпочалося з праць Коперника і поява вже в сьогодення антропоного принципу та ідеї мультиверсуму (ч. 3, § 19), також сприяють розвитку наукової картини світу. Астрономія не просто збагачує НКС новими знаннями, але як і раніше посилює її евристичну функцію.

У минулому такими були висновки Миколи Орема про несумірність небесних рухів і неможливість кругообігу в розвитку Всесвіту (XIII ст.) та думки Миколи Кузанського (ще раніше Демокріта) – про нескінченний Всесвіт без центра і краю (XV ст.). Пізніше, в розвиток цих думок, виникла ідея геліоцентризму, з'явилися висновки Бруно про взаємозалежний світ зір і планет (навіть придатних для життя). А концепції – передбачення про структуру й еволюцію Всесвіту, Канта, Ламберта, Гершеля вже спиралася на ньютонівську картину світу.

Прогрес астрономії приводить до того, що її достовірні знання переходять в ядро НКС. Так геліоцентрична система світу, що була моделлю всього Всесвіту, з часом обґрунтована доказами, перейшла своєю основною частиною в розряд об'єктивних знань – теорію будови Сонячної системи. Інші ж її складові: абсолютний геліоцентризм, сфера нерухомих зір, що замикає Всесвіт, – все це було відкинуто вже Джордано Бруно.

Оскільки НКС має вписатися в культуру відповідної історичної епохи, то вона не відразу виходить з гіпотетичної фази і її не одразу сприймає більшість дослідників. Якийсь час існує конкурентна боротьба між новою картиною і її прихильниками, з одного боку, й адептами старої – з іншого. Нині в багатьох аспектах нове для НКС постачає саме астрономія.

Важко передбачати майбутнє, але інтелект людини такий потужний, що дає впевненість у його спроможності виявити не лише закономірності розвитку Землі та майбутні її етапи, але й охопити в теоретичному синтезі глобальніші, несумірні з земними, еволюційні перетворення, такі як еволюція Всесвіту.

Формування наукової картини світу залежить не лише від того, яким є Всесвіт, але й від передісторії суспільної практики нашої цивілізації. НКС відображає не всю сукупність закономірностей нескінченно різноманітного Всесвіту, а лише його окремі особливості чи сторони, певні властивості. І характер цього «зрізу» визначає не лише внутрішня логіка розвитку науки, а найперше

ті завдання, які ставить перед дослідниками суспільна практика. Іншими словами, наукова картина світу має соціальний, суспільний характер.

### НАВЧАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

- На підставі саморефлексії оцініть місце у вашому світогляді наукової картини світу.

### ВИСНОВКИ

Сформована в людини наукова картина світу, тобто система загальних принципів, понять, законів і наочних уявлень, створена на основі синтезу наукових знань, значною мірою визначає її ставлення до дійсності. Завдяки НКС людина отримує образ довкілля, де всі елементи Всесвіту впорядковані й співвіднесені з нею самою так, що кожна її дія є елементом загальної структури.

## ТЕМА 2.2. АСТРОНОМІЧНІ ЗНАННЯ І СВІТОГЛЯД

### § 12. АСТРОНОМІЯ І СВІТОГЛЯД

Наукова картина світу в структурі світогляду сучасної людини мала б домінувати. Оскільки наука вивчає об'єктивні закони розвитку Всесвіту, то НКС – широка панорама знань про природу і людство, що містить найважливіші теорії, гіпотези і факти, – претендує на те, щоб бути ядром світогляду. Але це не завжди так. Світогляд людини може формуватись не лише на підставі НКС, а й на підставі міфічних, релігійних чи навіть антинаукових уявлень.

#### 1. Астрономія і світогляд.

Систему принципів, поглядів, цінностей, ідеалів і переконань, що визначають як загальне розуміння світу та відношення до нього, так і життєві позиції, програми діяльності людей, називають світоглядом. Базовий носій світогляду – окрема людина, індивід, але він також притаманний соціальним, професійним групам, релігійним і національним спільнотам і суспільству в цілому.

У складі світогляду вирізняють такі якісно різні елементи, як знання й переконання. Знання – це переважно змістовий компонент світогляду, а переконання дають йому ціннісне наповнення, визначаючи етичне й емоційне ставлення як до знань, так і до реальності. До складу світогляду людини входить не вся сукупність знань, якими вона володіє. Тільки найважливіша для індивіда їх частина – та, що лежить в основі його пізнання.

З історії розвитку людства відомо, що форми світогляду змінювалися: спершу основою світогляду був міф, потім релігія, а з XVII ст. й до нашого часу істотною роллю у формуванні світогляду відіграє наука. Хоча окремі міфологічні елементи досі зберігають вплив на свідомість людей, а релігія, як для багатьох людей, так і соціальних груп, є основою їхнього світогляду.

Тобто нині формування світогляду людини та його зміни відбуваються головню на тлі трьох чинників: традицій (пам'ять про далеке минуле свого народу) і міфів, релігії та науки. Наукові знання в якості джерела світогляду визначають те, як людина розуміє світ, тобто її світорозуміння, що є важливим елементом світогляду. Це його інтелектуальна складова.

Існує й інша складова – емоційна, яку позначають поняттями «світовідчуття» і «світосприйняття». В цій діаді понять первинний елемент – світовідчуття, бо він відповідає за прямий контакт людини зі світом. Цей контакт зазвичай є динамічним, а його характерна особливість – розмаїття відчуттів і настроїв. Натомість світосприйняття – це образи і уявлення, які цілісно відображають ситуації і події життя людини. Світосприйняття окремої людини сильно залежить від її вподобань і формується на основі різних джерел (природа, мистецтво, спілкування тощо).

Розуміння світу, його світосприйняття змінюються й розвиваються разом з розширенням знань про довкілля та збагаченням досвіду людини.

Астрономія від самого свого початку, тобто з сивої давнини, впливала на світогляд людини. Її знання, як і міфологічні та релігійні уявлення, допомагали людині відповідати на засадничі питання про сенс її існування, місце в світі та світобудову загалом. Суть тривалої боротьби між релігією і наукою зводилася до того, що вони по-різному давали людині відповіді на ці вічні запитання.

Нинішні астрономічні дослідження мають не лише наукове, але й світоглядне значення, бо вказують на місце людини у світобудові та взаємозв'язок між еволюцією матерії у Всесвіті й виникненням життя.

## 2. Астрологія як марновірство і як культурний феномен.

Астрологія має таке ж давнє походження, як і астрономія. Здобуваючи перші астрономічні знання і використовуючи їх у практичній діяльності, людина намагалася знайти глибші зв'язки між небесними світилами і явищами та земними подіями. Відчуваючи зв'язок земного й небесного, люди прагнули не лише його зрозуміти, але й використати для облаштування свого життя. Щось на зразок того, як вони використовували фази Місяця для лічби часу.

Щоб використовувати небесні світила чи особливі їхні положення на небесній сфері для пояснення подій земного життя, треба було розглядати їх не лише як природні об'єкти. Треба було перетворити світила в небесні знаки-символи. Якщо планета Венера – це символ краси і любові, то в неї варто шукати допомоги у вирішенні, наприклад, питання одруження. Такі

уявлення, що лягли в основу астрології, виникли у всіх стародавніх цивілізаціях Землі. Як система поглядів про вплив небесних знаків на земні події, астрологія набула поширення у Вавилоні та Стародавньому Єгипті ще в IV – III тис. до н. е.

Оскільки всі планети упродовж року рухаються вздовж екліптики і проходять через зодіакальні сузір'я, то кожне з них отримало відповідний символ – знак Зодіаку. Астрологічні уявлення про певну планету та знак Зодіаку, в якому вона була на момент народження людини, а також про взаємні положення інших планет, Сонця і Місяця, поєднує в собі гороскоп. З його допомогою, начебто, можна пророкувати певні події в житті людини. Оскільки люди завжди хотіли знати і завбачати своє майбутнє, то астрологія, яка обіцяла таку можливість, знайшла підтримку.

Заняття астрологією, потреба складати гороскопи, вимагали астрономічних спостережень. Їх результатом стало визначення точних положень планет, Місяця, Сонця на небесній сфері в той чи інший період, визначення координат зір у зодіакальних сузір'ях тощо. Тобто, пошуки небесних символів для завбачення подій на Землі сприяли розвитку астрономії. І це було єдиною користю від астрології.

Коли виникли монотейстичні релігії (юдаїзм, християнство, мусульманство), астрологію було визнано ними як ересь. Це, щоправда, не завадило поширенню астрології. Наприклад, в Середньовічній Європі її активно культивували в XV – XVII ст. Знаменитий Тіхо Браге був не лише відомим астрономом-спостерігачем, але й астрологом. Гороскопи для можновладців складав Йоганн Кеплер. Але якщо перший часто виконував астрономічні спостереження з астрологічною метою, то другий в такий спосіб заробляв на життя. В часи Т. Браге і Й. Кеплера, як і раніше, науку про зорі та зоряне небо, тобто астрономію, часто поєднували з астрологічною практикою, медициною. Зв'язок астрології з лікувальною практикою зумовлювало уявлення про те, що небесні світила і зодіакальні знаки пов'язані з тілом людини та його внутрішніми органами.

Лише в XVIII ст., коли зріс культурний і освітній рівень людей і стала прояснюватись природничо-наукова картини світу, астрологію визнали в європейських країнах як псевдонауку. Всі узагальнення щодо небесних світил та їхнього впливу на Землю, які колись зробила астрологія, не знайшли підтвердження в науці – ні в астрономії, ні в фізиці, ні в медицині. Астрологія – не наука, бо не може пояснити своїх основ, які незмінно використовує вже кілька тисячоліть поспіль. Хоча нічого незмінного, окрім законів природи, в нашому світі немає. Наприклад знаки Зодіаку, які були «прив'язані» астрологами до цілком певних сузір'їв на зоряному небі, вже давно втратили цей зв'язок через явище прецесії.

### 3. Астрологія в сучасному світі.

Фізичне й духовне здоров'я кожної людини значною мірою визначає довкілля. Але ці зв'язки дуже складні, тому навіть в сучасну пору ще мало вивчені наукою. Немає жодних доказів про залежність долі людини від знаку Зодіаку чи конфігурації планет на зоряному небі. Тому астрологія, що намагається ці речі нав'язувати людству впродовж кількох тисяч років, будує свої висновки на давніх вигадках.

Були неодноразові намагання підтвердити астрологічні прогнози. Це робили як окремі астрологи, так і неупереджені дослідники. Наприклад, американський фізик Дж. Мак-Джерві намагався виявити закономірності в схильності людей до професії зважаючи на їхні знаки Зодіаку. За цим критерієм він вивчив розподіл дат народження 17 тис. науковців і 6 тис. політичних діячів і з'ясував, що розподіл випадковий, і збіг відсутній.

Прихильники астрології вказують на результати французького астролога Мішеля Гоклена з освітою психолога. Але статистичні дослідження, які він виконав, не виявили зв'язку між характером і діяльністю людини та її астрологічними характеристиками. На думку Гоклена йому вдалося виявити лише якісь натяки на зв'язок моменту (години і хвилини) народження людини з її професійною діяльністю. Проте навіть ці результати Гоклена не були підтверджені незалежними експертами.

Сучасні астрологи, маскуючи свою діяльність під начебто науку, видають, як і їхні попередники, власні твердження й фантазії за природні закономірності. Чому ж астрологія існує досі? На це є щонайменше три причини. По-перше, багато людей мають низькі знання з астрономії. Хоча вона якраз і розкриває справжні зв'язки людини й Космосу, показує наскільки він є тісним. По-друге, це сила давньої традиції, яка досі приваблює своїми обіцянками завбачити майбутнє. По-третє, активна діяльність астрологів, які намагаються «впровадити в життя» астрологію, продати свої послуги якщо не державі, то хоча б малоосвіченим її громадянам. У багатьох країнах світу існують різні астрологічні школи та академії, в книгарнях широкий вибір астрологічної літератури, астрологічну символіку наносять не тільки на сувеніри, але і на вжиткові речі. Така масова астрологізація життєвої сфери переконала багатьох людей в тому, що астрологія має якесь відношення до науки.

Науковці, а надто природознавці, в усьому світі виступають проти поширення астрології засобами масової інформації, адже це веде до зростання в суспільстві ірраціоналізму та невігластва. Цьому може протистояти тільки розвиток науки, який має привести до розкриття справжніх зв'язків людини і Космосу. Такі зв'язки вже нині намагається розкрити, наприклад, геліобіологія, що вивчає вплив Сонця, його активності на земне життя.

### ПРАКТИЧНА РОБОТА

- Виконайте міні-опитування щодо ставлення до астрології рідних і друзів.

## ВИСНОВКИ

Світогляд людини може формуватись не лише на підставі наукової картини світу, а й на підставі міфологічних, релігійних чи навіть антинаукових уявлень. До псевдонаукових уявлень, що виникли майже одночасно з астрономією та існують досі, належить астрологія.

### § 13. СУЧАСНІ АСТРОКОСМІЧНІ МІФИ

Багато небесних явищ, яким не вдається знайти пояснення, позначають терміном НЛО – «неопізнаний літальний об'єкт» (англ. unidentified flying object, UFO, звідси – уфологія). Нині в світі мільйони людей вважають, що вони спостерігали такі об'єкти. Багато з них вірять у те, що НЛО – це космічні кораблі прибульців з космосу. Є люди, які стверджують: вони бачили їх зблизька, а деякі навіть вступали в контакт з іншопланетянами. Існують групи і товариства дослідників, які намагаються розкрити таємницю НЛО. Це питання досліджували військові, окремі професійні астрономи, інші науковці. Але природа неопізнаних літальних об'єктів досі лишається загадкою. Масове захоплення НЛО дозволяє віднести його до сучасних міфів, що намагаються пояснити невідоме. Окрім міфів про неопізнані літальні об'єкти, існують й інші, пов'язані з небесними явищами чи об'єктами.

#### 1. Неопізнані літальні об'єкти (НЛО) та космічні прибульці.

Початком уфології вважають подію 24 червня 1946 р. – тоді пілот Кеннер Арнольд, за його словами, побачив дев'ять дископодібних об'єктів над горою Рейнхер у штаті Вашингтон. У заяві для преси він сказав, що об'єкти нагадували тарілки, які ковзають над поверхнею води. Газети використали образ «літальної тарілки» й невдовзі повідомлення про такі об'єкти почали надходити з усіх кінців планети. Ніхто не знав, що це за об'єкти – можливо, атмосферні чи астрономічні явища. Ці пояснення тоді домінували.

Проте кількість повідомлень про НЛО швидко зростала й інтерес до них суттєво підвищився в багатьох країнах світу. На тему НЛО стали виходити (1950) художні фільми та книжки. Їхніми героями часто були прибульці з Космосу. Так виник зв'язок між НЛО та іншопланетянами. Але відповіді щодо природи НЛО не було, хоч її й намагалися знайти. Наприклад, комісія військово-повітряних сил США вже в 1952 р. під час виконання проекту «Блакитна книга» розглянула майже 13 тис. випадків спостережень НЛО. Комісія не виявила доказів, які би вказували на позаземне походження цих феноменів. Часто за неопізнані об'єкти сприймали яскраві зорі, Місяць, планети, метеори, повітряні кулі, а також різні літальні апарати й, навіть, птахів або незвичної форми хмари. Інколи це були жарти чи свідомі містифікації.

Повідомлення про спостереження НЛО мають істотні розбіжності в деталях, але мають і багато спільного. Очевидці говорять про незвичні об'єкти

в небі – циліндричні чи у вигляді дисків, з яскравим або мерехтливим світлом. Вони створюють переривчасті звуки і летять дуже швидко, злітають чи змінюють траєкторію польоту під великим кутом, раптово зупиняються або стають невидимими.

Вже в 50-х р. XX ст. були свідчення про контакти людини з гуманоїдами, які виходили з «тарілок». А від початку 60-х років з'явилися повідомлення про викрадення прибульцями з НЛО землян – історії розповідали учасники цих подій. В масовій свідомості міцно вкорінилась думка про неопізнані об'єкти, як кораблі прибульців. Цьому значною мірою сприяло те, що з 1961 р. почалися пілотовані космічні польоти.

Нині в світі є мільйони людей, які стверджують, що бачили НЛО. Але розвиток цієї історії набув інших рис – різні соціологічні опитування вказують: значний відсоток людей вірить в НЛО навіть за умови, що самі ніколи в житті не бачили неопізнаних об'єктів. Фактично, люди жадають речей, які мають бути незрозумілими й аномальними. А раз наука не може пояснити феномен НЛО, суспільна свідомість створила з нього сучасний міф. Він, як і його давні попередники, виник на тлі непізнаного, на бажанні знайти бодай якесь пояснення цій таємниці. Появі нового міфа сприяли наукові досягнення в дослідженні Всесвіту, пошуки життя за межами Землі.

Сучасна уфологія – це міфологія космічної ери. Її відмінність від попередніх епох полягає в тому, що замість ангелів, які танцюють на кінчиках голки, люди вірять у космічні кораблі прибульців та представників позаземних цивілізацій. Але все це – продукт творчої уяви, яка з давніх-давен супроводжує емоційну складову людського буття. З її допомогою людина прагне знайти сенс свого існування у Всесвіті. Через неї вона проявляє свій потяг до невідомого, непізнаного, до чогось більшого, ніж має в житті, свою надію на щось, принципово недоступне пізнанню через досвід.

Прибульці з космосу, їхні космічні кораблі й планети потрапили в образний ряд і систему переконань сучасного суспільства, бо вони зберігають місце для дивовижного й незвіданого в житті людини. Таку роль давніх космічних міфів наука розкрила вже давно. Але людина потребує дивовижного навіть тоді, коли наука залишає для нього все менше й менше місця в довкіллі.

## 2. Вигадані загрози з Космосу.

Яких би результатів не досягла астрономія, таємниць Всесвіту не стає менше. Деякі з них, оформлені у вигляді міфів, посідають місце в масовій суспільній свідомості. Прикладом такої таємниці є наявність планети великих розмірів на околиці Сонячної системи. Ця ідея також «перетинається» з ідеєю про існування у Сонця зорі-компаньйона. Вона, рухаючись по дуже витягнутій орбіті, періодично наближається до нашої зорі, спричиняючи суттєві збурення в Сонячній системі. Ці дві таємниці породили міф про планету Нібіру, яка рухається в напрямку Землі, й мала спричинити катастрофу спершу 2003 р.,



а потім у 2012 р. Але планету Нібіру не спостерігали ні в 2003 р., ні до, ні після цього року.

Міф про Нібіру став таким поширеним на початку другого десятиріччя XXI ст. ще й тому, що на грудень 2012 р. був призначений «кінець світу». Його анонсували, спираючись на ще одне «неймовірне відкриття»: календар майя закінчується в день зимового сонцестояння 2012 р. Логіка нового міфу така – оскільки закінчується календар, з яким пов'язано багато різних таємниць, то має добігти кінця й існування світу. Переконати людей в тому, що календар майя, як і будь-який інший, відображає певний циклічний процес (наприклад, річний рух Землі навколо Сонця) і його закінчення не означає кінець світу, не вдалося.

Поширення астрокосмічних міфів на тему кінця світу (вибух Сонця в найближчому майбутньому, зміна полюсів Землі, падіння астероїда тощо) відображає страх сучасної людини за свою долю, долю дітей і онуків. Цей страх базується на низькому освітньому рівні, а надто в галузі природничих наук, багатьох людей. Окрім цього, його дуже сильно «підтримують» сучасні ЗМІ – телебачення, бульварна преса, а часто відверто антинаукові інтернет-ресурси.

Сформована нова інформаційна культура, яка має потужний пласт ненаукових даних, вигаданих (фейкових) історій, зокрема і про астрокосмічні явища та небесні тіла. З огляду на це астрономію треба поширювати серед якомога більшої кількості людей.

---

## НАВЧАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

- Підготуйте усну доповідь на тему «Сучасні астрокосмічні міфи», звернувши найперше увагу на ті з них, які поширені в місці вашого проживання.
- 

## ВИСНОВКИ

Сучасна людина не відрізняється від своїх попередників у сенсі творення міфів. Незвідане й таємниче в довкіллі хвилює нинішніх людей так само, як колись хвилювало наших пращурів. Таємниці світу, не маючи раціонального пояснення, знаходять його в нових міфах. Серед найвідоміших міфи про НЛО та астрокосмічні міфи про кінець світу.

## Розділ III. Астрономія як складова культури

### ТЕМА 3.1. КОСМОС В КУЛЬТУРІ

#### § 14. МІФИ І ЛЕГЕНДИ ПРО ВСЕСВІТ

В доісторичні часи міф не лише розповідав про походження й долю світу та всього того, що оточувало людину, але й обґрунтовував тогочасний спосіб життя людей (взаємини, звичаї тощо), був регулятором їх поведінки. Міф також виражав етичні й естетичні переконання людей. Він був першою в історії розвитку людства формою світогляду.

##### 1. Уявлення про Всесвіт у міфах і легендах народів світу.

Всі стародавні народи мали культ поклоніння небесним світилам, бо уявляли їх надприродними створіннями. Їх наділили цілком певними рисами, зважаючи на уявлення про характер і силу різних живих істот на Землі, визначили їхні взаємостосунки з огляду на досвід взаємин у своєму племені. Небесні світила ототожнили з героями або з рослинами чи тваринами, яких вважали предками свого народу. В такий спосіб небесні світила стали частиною міфології давньої людини, а уявлення про зоряне небо набули міфологічного змісту. Найдавніша модель Всесвіту (астрономічна картина світу) стала антропоцентричною, де людина була центром Всесвіту.

Щоб виконувати обряди поклоніння світилам, треба було знати їх положення на небі в потрібний момент часу. Це спонукало до виконання доволі точних астрономічних спостережень, що за обсягом отриманих даних суттєво перевершували потреби практики. Тобто потреби культури були дієвим стимулом для розвитку астрономії. Саме тому першими астрономами в різних народів були жерці, а перші обсерваторії влаштовували біля капищ.

Отже, на тлі окремих астрономічних знань та усвідомлення основних закономірностей довкілля, виникла найдавніша космологія, оформлена у вигляді системи міфів. Ці міфи передавали з покоління в покоління. Вони стали основою космологічних уявлень пізніших часів, коли їх стали витісняти філософські вчення. Такі вчення містять багато відомостей з первісної космології. Але головне їхнє джерело – прадавні міфи, легенди, казки, а також давні епічні твори, наприклад «Махабхарата».

Причину появи сузір'я Дракона, одного з найстаріших у Давньому Вавилоні, легенда пояснює потребою охороняти зоряне небо. Дракон був створений

зі шкури потвори Тіамат, узореної діамантами, яку переміг бог Мардук. Ця легенда цікава не лише міфічним сюжетом про створення світу, але й інформацією про те, що вже в 3 тис. до н. е. вавилоняни вирізняли на небі сузір'я Дракона. Можливо це пов'язано з тим, що тоді найближчою яскравою зорею до Північного полюса світу була зоря  $\alpha$  Дракона.

Дуже давній єгипетський міф розповідає про народження Сонця з квітки лотоса, яка, виникла з первинного водяного хаосу. Пізніші космологічні уявлення Стародавнього Єгипту зводились до того, що центром світу є Земля, довкола якої обертаються всі світила. Давньоєгипетську систему світу зі слів жерців описав у IV ст. до н. е. Гераклід Понтійський.

У стародавньому Китаї світ уявляли як Піднебесну (все, що існує під небом). Його центром, Серединою державою, вважали Китайську імперію. Її історію відлічували від часу, коли з окремих частин тіла померлої першої людини Пань-гу виникли Сонце, Місяць, зорі тощо. Пізніші (IV ст. до н. е.) уявлення про будову Всесвіту подавали Землю нерухомою у вигляді плоского чотирикутника. Над нею оберталося напівсферичне небо.

На три сфери, Землю, небо і повітряний простір, поділяли Всесвіт у Стародавній Індії в добу «Рігведи». Боги (вітру, грози, блискавки і грому) діяли в повітряному просторі, який пролягав від Землі до небесних світил, тобто був істотною частиною всього Всесвіту.

Свого головного бога Індру, який «відповідав» за блискавки, грім та інші руйнівні стихії, в Індії також пов'язували з Сонцем, що перебуває в зеніті. Нічне Сонце уособлював його брат-близнюк – бог Агні. Водночас Сур'я, бог Сонця, позначав нашу денну зорю в її видимому русі зі сходу на захід.

Майя уявляли Всесвіт у вигляді стародавнього житла. Його центром спершу було дерево (образ світового дерева присутній в багатьох давніх космологічних уявленнях), а пізніше стовп. Разом з іншими чотирма стовпами-підпорами по кутах ця конструкція утримували небо над плоскою Землею. Небо було не одне, їх було кілька. Найнижчим було небо Місяця. Далі лежали небо зір, небо Сонця, а також блакитне небо дня і бога кукурудзи тощо. Останнім, тринадцятим, було небо бога, якого уявляли у вигляді сови.

Найдавніші міфи і легенди астрального змісту завжди були пов'язані з найяскравішими світилами зоряного неба – Сонцем, Місяцем і п'ятьма планетами («магічна» сімка). З ними за увагу людини конкурують астеризми – окремі групи яскравих зір, що дозволяють намалювати з їх допомогою на небесній сфері найпростіші геометричні фігури, наприклад трикутник (літньо-осінній зоряний трикутник), або виразні групи зір, як от ківш Великої Ведмедиці. Поєднання уявними лініями яскравих зір на певній ділянці неба дозволило отримати виразні фігури, легкі для запам'ятовування. Так з'явилися перші сузір'я.

Нині визначити точний час появи перших сузір'їв на небесній сфері майже неможливо. Але археологічні знахідки, зокрема клинописні таблички

в долині Євфрату, вказують на те, що небо було поділене на сузір'я ще за 2500 років до н. е.

Найдавнішими сузір'ями були ті, що лежать уздовж екліптики. Їх виокремили мешканці Месопотамії, Фінікії та інших частин Східного Середземномор'я. Появу цих сузір'їв пояснюють тим, що в цих регіонах Землі, де споконвіку жили люди, не існувало чіткої межі між різними сезонами року. Тому головним «визначником» їх зміни було зоряне небо. У Стародавньому Єгипті до зодіакальних сузір'їв допасували знаки Зодіаку. Як і зодіакальні сузір'я, пов'язані з давніми міфами, знаки Зодіаку набули певного символічного значення.

## 2. Космос Стародавньої Греції.

Міфи і легенди Стародавньої Греції космологічного змісту вимагають окремої уваги, адже вони лежать в основі культури нашої цивілізації. Існувала низка, якщо не система, міфів, що розвивалися в часі і які по-різному пояснювали виникнення світу. Найвідомішим є міф про Гею (уособлення Землі), що виникла з Хаосу, і від якої походить Уран, тобто небо. Далі виникло ціле сімейство різних богів, титанів, гігантів тощо. Між ними часто спалахували суперечки та війни, що призводили до появи нових істот та розвитку світу. Так титани Кронос і Рея породили головного бога Стародавньої Греції Зевса (у Стародавньому Римі – Юпітер), який обрав місцем перебування богів гору Олімп.

Згідно з уявленнями стародавніх греків, олімпійські боги активно заселяли зоряне небо різними персонажами. Походження багатьох сузір'їв пов'язане з героями та дійовими особами грецьких міфів. Велика Ведмедиця і Мала Ведмедиця – це відповідно німфи Калісто і Кіносура, яких на небо помістив Зевс. Овен – баран, на якому Фрікс і Гелла летіли до Колхиди, Оріон – мисливець, супутник Артеміди, Лев – той страшний звір, якого в Немеї переміг Геракл, що також зрештою став сузір'ям Геркулеса. Сузір'я Візничого зберігає пам'ять про міфічного царя Ерихтонія, який винайшов квадригу (двоколісна колісниця). За це його після смерті Зевс переніс на небо й перетворив у сузір'я Візничого.

Доволі струнка й розгорнута старогрецька міфологія, пов'язана з сузір'ями, а також використання персонажів міфів як героїв художніх творів, втілення їх образів у фресках, скульптурах, живопису та на театральній сцені не лише в добу стародавньої Греції, але й пізніше в Європі, – дозволило зберегти це культурне надбання до наших днів. Не випадково Міжнародний астрономічний союз в 20-х роках ХХ ст. зберіг, як офіційні, назви сузір'їв, що дійшли до нас зі Стародавньої Греції.

## 3. Українські казки й легенди про Всесвіт.

Хоча історики досі сперечаються про час, коли на арену всесвітньої історії вийшов український народ, достеменним є факт – люди з незапам'ятних віків населяли землі сучасної України. Світовідчуття, світосприйняття, світоба-

чення та світорозуміння цих племен і народів певною мірою успадкували українці, додавши до цього культурного надбання свій світогляд.

Згідно з уявленнями наших пращурів, до появи світу панував хаос. В одній з українських народних казок про це сказано так: «Тоді не було ні неба, ні землі, ні синього моря». Цей сюжет має дивовижний збіг із тим, що описує давньоіндійська «Рігведа» чи міфи Стародавньої Греції.

Праукраїнці, як і багато інших давніх народів, уявляли цілісну й універсальну картину світу в образі світового дерева (у фольклорі це найчастіше райське дерево, явір, дуб тощо). Світове дерево відображало три рівні світу, які здавна виділили наші пращури, – підземне царство, земля і небо. Відповідно до цих трьох рівнів були віднесені й різні живі істоти та небесні світила, зокрема Сонце і Місяць.

Цю космологічну картину, як прояв давнього світогляду, відображає народне мистецтво в астрокосмічних мотивах найдавніших хороводів, пісень, казок, загадок та міфів. Символічні образи зоряного неба використовували в оздобленні предметів побуту та одягу ще в добу Трипільської культури (V тис. до н. е.).

З давніх глибин історії дійшли до нас казки, що відображають світоглядні уявлення наших пращурів. Одна з таких – казка про дванадцять місяців, що дуже образно, але водночас і правильно відображає річний цикл змін у природі. Інша казка – про яйце-райце – відображає ідею про творення Всесвіту. Недаремно розписи українських писанок містять астрокосмічні символи – стилізовані зображення Сонця, Місяця і зір.

Зоряне небо споконвіку супроводжувало життя наших пращурів. Нині вже важко точно визначити пору, коли небо стало для них не лише годинником і компасом, але й їхньою пам'яттю, бо закарбувало давні вірування і знання. Назви його світил відображали життя народу – котився небосхилом небесний віз, палахкотіли небесні стожари, бродила небесна квочка з курчатами, йшла до криниці Дівчина з відрами.

Проте небо не завжди було привітним – воно посилало дощі й грози, наводило спеку та інші, на думку людини, напасті, а тому, безумовно, давнім українцям хотілося прихилити до себе його ласку. Тому всі найяскравіші небесні світила, а також виразні групи зір, наші предки обожнювали. Сонце, Місяць, окремі сузір'я набували рис того чи іншого Бога.

Небесним вогнем «завідував» Сварог (культ цього бога виник на межі бронзового й залізного віків). Міф про нього є в «Повісті врем'яних літ». Уявлення про Сонце, що змінювало свою «силу» протягом року, уособлювали різні божества. Дажбог, син Сварога, – небесний бог Сонця та світла, що мав двох сестер: Денницю – Світанкову зорю та Вечірницю – Вечірню зорю. Молоде Сонце – Коляда – з'являлося щороку в день зимового сонцестояння. Йому на зміну приходив Ярило – бог весняного Сонця. У пору літнього сонцестояння з'являвся Купало – бог літнього Сонця. Замикав це божественне коло Світовид – бог осіннього Сонця.

Велеса (Волоса) вважають опікуном земних стад, але можливо він був у наших пращурів богом Місяця. «Поле не міряно, вівців не лічено, пастух – рогатий» (укр. загадка). У цій загадці всіх дійових осіб відгадати не складно. Тому можна висловити припущення, що Велес був передусім богом небесних стад, а через те і став опікуном стад земних.

Збереглися, хоча й зовсім мало, астрокосмічні міфи пращурів слов'ян, пов'язані з сузір'ями. Один з них розповідає про те, що за часів царя Таргитая на землю Скіфії з неба впали золоті речі: плуг з ярмом, сокира і чаша. В Україні здавна існував культ золотого плуга і це, звісно, неспроста – хлібороб без плуга обійтися ніяк не міг. От і помістили наші пращури Плут на зоряне небо, вибравши для цього один з найвиразніших зоряних візерунків, який стародавні греки назвали сузір'ям Оріона.

### НАВЧАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

- Поясніть, чому першими астрономами в різних народів були жерці, а перші обсерваторії влаштовували біля капищ?

### ВИСНОВКИ

Давні міфи і легенди, пов'язані з космосом і зоряним небом, дозволяють глибше пізнати спосіб життя, світогляд і загалом культуру багатьох народів світу. Ця усна народна творчість, збережена з доісторичної доби, є унікальною перлиною світової культури.

## § 15. АСТРОНОМІЧНА КАРТИНА СЕРЕДНЬОВІЧЧЯ

Наприкінці IV ст. християнство стало основною релігією там, де раніше квітнула культура Стародавньої Греції. Окрім цього, відбувся розпад священної Римської імперії. Все це привело до того, що змінилося не лише буденне життя людей, але і їхні погляди на світобудову.

### 1. Астрономічні уявлення народів сходу та арабського світу.

Епоха Середньовіччя (V – XV ст.) вивела на арену історії багато нових народів, особливо на європейському континенті. В цей період небувалого розквіту зазнав арабський світ. Окрему й особливу культуру Сходу зберігали Індія і Китай. На тлі активного розвитку спостережної астрономії в арабів, окремих успіхів у цій справі в Китаї та майже повної відсутності її в Європі й Індії, космологічні уявлення існували повсюду.

В Індії астрономічні уявлення про світобудову спиралися на залишки давньої, доарійської, культури, давньогрецькі джерела, але головно на математичні та філософські роботи місцевих видатних вчених. На увагу заслуговує діяльність

математика і астронома Аріабхати (476–550), який вважав, що Земля має форму кулі й обертається навколо вісі. Він уклав коментарі до трактату «Сурья-сиддханта» та написав твір, який називають «Аріабхати». В коментарях до цього твору, які в Індії складала аж до XVI ст., автора піддавали критиці за його припущення про обертання Землі, а також пояснення причин затемнення Місяця. Серед критиків Аріабхати був відомий індійський науковець Брамагупта (598–660), який одним з перших висловив ідею про всесвітнє тяжіння.

Для китайської цивілізації з давніх-давен були притаманні регламентація і централізація. Це суттєво вплинуло на організацію астрономічної діяльності – її виконували як державну службу. Вона зводилася головню до реєстрації астрономічних явищ з метою їх прогнозування і передбачення «щасливих» або «нещасливих» днів для державних справ. На тлі такої спостережної астрономії формувалися в Китаї світоглядні уявлення та космологічні системи світу.

Про космологічні уявлення в Китаї на початку Середньовіччя розповідає літопис династії Цзінь (265–420), а також інші китайські писемні пам'ятки. Хоча ідея астронома Чжана Хена (78–139) про кулястість Землі ще не була загально визнаною, але її вже не вважали плоскою (опукла форма – в середині Земля вище, по краях нижче) й такою, що тримається на чомусь. Астрономічні спостереження, які тоді виконували в Китаї, сприяли поширенню реалістичних уявлень про будову Землі. Водночас небо в моделі світу під назвою «гайтянь» уявляли то у вигляді капелюха, що покриває Землю, то схожого на жорна. Сонце, Місяць і планети китайці вважали схожими на мурахи, що повільно повзуть в напрямку, протилежному обертанню неба.

Інша модель світу («сюань»), яка виникла в Китаї раніше, в III ст., й ґрунтувалась на ідеї «нескінченної порожнечі», подавала уявлення про небо, як порожнечу без меж, в якій незалежно рухаються кулясті Сонце, Місяць і п'ять планет. Рух світил відбувається під дією особливого вітру й цей рух можна вивчати з допомогою нерухомих зір, тобто на їхньому тлі, або відносно них. Рух Землі її мешканці не помічають, бо рухаються разом з нею.

Починаючи з XI ст. в Китаї виникли ідеї щодо природніх причин появи і розвитку Всесвіту. Такі думки висловлював філософ Чжоу-цзи (1007–1073), а також Чжан Цзай (1020–1077), який розвинув ідеї свого попередника. Він вважав існування природи незалежним від свідомості людини. В основі всього, що існує у світі, лежить невидима матеріальна субстанція «ци», розпорошена в нескінченному просторі. Вона проявляє себе в різних формах природи та природніх тіл.

Перші астрономічні знання араби отримали з Індії, коли в останній чверті VIII ст. за наказом багдадського халіфа аль-Мансура було зроблено переклади арабською сиддхант Брамагупти й Аріабхати. З цих перекладів араби вперше познайомилися з теорією Птолемея (знаменитий «Мегале синтаксис» переклали з грецької на арабську лише в IX ст.).

В епоху існування Халіфату (VII – IX) в арабському світі домінували, спираючись на ідеї Птолемея, геоцентричні уявлення про світобудову. Пізніше арабські вчені висловили низку якісно нових припущень. Серед таких науковців був Абу Рейхана Біруні (973–1048). Він дійшов думки, що теорія Птолемея не відповідає справжній будові Всесвіту. Біруні вважав, можливо наслідуючи думки Брамагупти, що Земля обертається навколо осі й рухається у просторі, обертаючись навколо Сонця – центрального тіла у Всесвіті.

Під впливом ідей Біруні, а також з власних занять астрономією, ідеї про рух Землі та нескінченність Всесвіту висловлював знаменитий таджицький поет і вчений-енциклопедист Омар Хайям (1040–1123).

## 2. Уявлення про Всесвіт в культурі європейських народів.

Близько 547 р. у Візантії побачила світ книга «Християнська топографія Всесвіту, заснована на свідченнях Святого Письма, в якому християнам не можна сумніватися» колишнього купця й мандрівника, а потім ченця, Козьми Індикоплова. Автор виклав уявлення про світобудову де тверде небесне склепіння неба тримається над плоскою чотирикутною Землею на чотирьох стінах. Зміну дня і ночі було пояснено тим, що Сонце на півночі ховається за високу гору. Ця надзвичайно примітивна «система світу» стала дуже поширеною в той час.

Але у Візантії збереглися елементи грецької науки і культури. Тому поряд з примітивними космологічними уявленнями, що спиралися на тлумачення біблійного тексту, тут існували вчення, які бодай частково відображали давньогрецькі погляди на природу. Їх висловлював, наприклад, в першій половині VIII ст. богослов Іоанн Дамаскін. Він не сприймав ідеї про розвиток природи (після божественного творіння світ незмінний), вважав, що земне і небесне є абсолютними протилежностями. Але Дамаскін поділяв ідею Арістотеля про кулястість Землі.

У Візантії давньогрецькі наукові праці часто були єдиним джерелом знань, але з огляду на релігійні погляди, їх доводилося пояснювати і тлумачити. Це породило схоластику, яка на кілька століть стала основною темою для освічених діячів Церкви.

Протягом V – XI ст. в країнах Західної Європи панували примітивні космологічні уявлення. Єдиним достовірним джерелом відомостей про світобудову в християнському світі була Біблія, а також твори діячів церкви, присвячені тлумаченню християнського віровчення. З одного боку натуральне господарство і просте ремісниче виробництво не вимагали наукових знань, що не спонукало до їх розвитку. З іншого – християнство переконувало людей у тому, що дізнаватися про світ більше, ніж сказано про нього в Біблії, неможливо й не потрібно.

Але з часом наукова і культурна спадщина Стародавньої Греції проникла, головню через арабів, у Західну Європу. Вчення Арістотеля й система світу Птолемея були сприйняті й допасовані до християнських поглядів на світ.



Однак деякі світочі думки стали сумніватися в тому, що Земля нерухома і що міститься в центрі Всесвіту. До таких належали французькі богослови і природознавці Жан Буридан (1295–1363) та Микола Орезмський (1320–1382), відомий також як Микола Орем.

Орем, зважаючи на свої погляди і міркування про світобудову, критикував астрологію. Він не заперечував можливості фізичного впливу небесних тіл як на земні процеси, так і на організм людини. Але твердження про зв'язок між розташуванням світил і долями окремих людей і навіть держав, а також поради брати це до уваги у повсякденних справах, вважав шарлатанством.

Теолог і філософ Микола Кузанський (1401–1464) у виданому посмертно творі «Про вчене незнання» поряд з богословськими ідеями, виклав власні космологічні уявлення, які суперечили традиційним. Всесвіт він уявляв необмеженим, бо інакше треба говорити про щось, що існує за його межами. Таке припущення суперечило б розумінню Всесвіту як такого, що містить все суще. Зважаючи на такі уявлення, Кузанський зробив висновок, що не тільки Земля, але й Сонце, і взагалі будь-яке тіло не може бути центром Всесвіту, бо, за його висловом, центр Всесвіту – скрізь, а межа – ніде. Кузанський, всупереч вченню Арістотеля, вважав, що між земними і небесними тілами немає принципової різниці. Всі тіла у Всесвіті перебувають в русі й у цьому сенсі вони рівноправні. Фактично Микола Кузанський за 100 років до Коперника проголосив принцип однорідності Всесвіту.

Цікаві космологічні ідеї мав Леонардо да Вінчі (1452–1519), що були оприлюднені тільки в XIX ст. Він був упевнений в матеріальній єдності Землі і Космосу, вважав зорі іншими світами, схожими на Землю. Натомість, Сонце, на думку Леонардо да Вінчі, єдине небесне тіло, що світить власним світлом. Воно відіграє головну роль у Всесвіті, бо є джерелом як будь-якої сили, так і самого життя. Великий італієць в переддень появи геліоцентричної системи світу обстоював ідею найтіснішої гармонії життя і Всесвіту.

---

## НАВЧАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

- Чому на ваш погляд араби, які були вправними спостерігачами зоряного неба, в питанні космологічних уявлень не просунулися далі геоцентричної системи світу Птолемея.
- 

## ВИСНОВКИ

Для Середньовіччя є характерним занепад науки (як порівняти зі Стародавньою Грецією) та примітивні світоглядні погляди. Але за цей період людство змогло не лише відновити раніше здобуті знання, але й підготувати корінну зміну космологічних уявлень. Астрономічна картина еволюціонувала від визнання Землі плоскою і нерухомою до сумнівів щодо відповідності геоцентричної системи світу справжній будові Всесвіту.

## § 16. АСТРОНОМІЯ В КУЛЬТУРІ XVII – XX СТОЛІТЬ

Астрономія виникла однією з перших серед інших наук, тому її внесок в культуру маємо оцінювати на рівні астрономічних символів, що пронизують культуру від часу зародження людства дотепер.

### 1. Астрономічні символи в європейській культурі.

Таких символів багато, але серед них є головні, що визначають усі інші і впливають на них. До таких відносимо астрономічні знання і наукові картини світу. Водночас те, що людина має можливість бачити зоряне небо, є визначальним чинником для того, щоб наша цивілізація стала такою, якою вона є.

Уявімо фантастичну ситуацію: Земля від початку своєї історії оповита товстим шаром хмар, крізь які на її поверхню не проникає світло зір та інших небесних світил. Якою була б у такому разі наша цивілізація? Важко сказати, але чи змогло б тоді людство дізнатися про існування інших планет, зір, галактик, про безмежний Всесвіт? А якщо змогло б, то якими темпами розвивалася б така цивілізація? Мабуть, ми були б іншими, сприймали б інакше світ та облаштовували своє матеріальне й духовне життя. На планеті Земля була б інша цивілізація з іншою культурою.

Отже, можливість спостерігати зоряне небо, небесні світила та явища є одним з головних чинників, що спрямував розвиток людства у певному напрямі. Він є джерелом найперших астрономічних знань. Археологія зустрічає свідчення не лише осмисленого, але й певною мірою впорядкованого погляду на Всесвіт навіть у пам'ятках 30-тисячолітньої давності.

Астрономічні мотиви впевнено увійшли в мистецтво, музику, поезію. Зображення окремих небесних світил, як і зоряного неба, знаходимо на полотнах багатьох художників від початку XVII ст. (після телескопічних спостережень Г. Галілея) до наших днів. Наприклад, італійський художник Донато Креті в 1711 р. створив серію картин на тему «Астрономічні спостереження». На полотнах зображено сцени спостережень усіх відомих тоді планет, а також Місяця і Сонця. Картини замовив один заможний астроном-аматор в подарунок Папі Клименту XI, щоб спонукати його до сприяння будівництву обсерваторії в м. Болонья.

Під враженням від спостережень зоряного неба були написані музичні твори. Наприклад, в кінці XVII ст. Йозеф Гайдн після візиту на обсерваторію Гершеля, де він подивився на зорі в телескоп, загорівся ідеєю написати ораторію «Створення Світу». Ораторія мала величезний успіх в сучасників і стала перлиною світового мистецтва.

До астрономічних знань, що вийшли за рамки суто наукових і стали загальнокультурними символами від XVII ст., відносимо ідею населеності всіх без винятку планет Сонячної системи і життя у Всесвіті. Про це писали відомий фізик-оптик Християн Гюйгенс, великий сатирик Вольтер та ін. Найкращим притулком для позаземного життя вважали Марс. Наприкінці XIX ст. кіль-

ка європейських астрономів, серед них італієць Дж. Скіапареллі, відкрили ледь помітні прямі лінії на поверхні Марса – ушановані марсіанські «канали» (італійське слово canali означає як «канали», так і «продиви»).

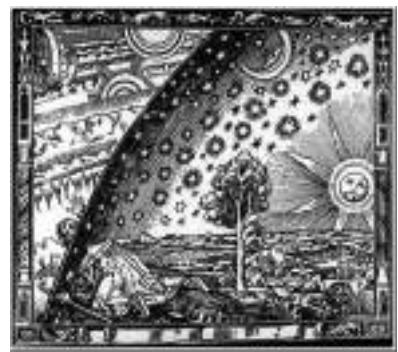
«Канали» викликали гарячу полеміку, в якій брали участь не лише астрономи, але й інші європейські та американські інтелектуали, журналісти, пересічні громадяни. На хвилі зацікавленості марсіанським життям Г. Уеллс створив роман «Війна світів». Персиваль Ловелл, який повірив у реальність марсіанських каналів, побудував обсерваторію з метою ретельних спостережень Марса. Зрештою він склав карту мережі каналів, що покривають усю поверхню планети, за винятком крижаних полярних шапок. Здавалося, що ця мережа зазнає сезонних змін одночасно зі змінами на великих темних ділянках Марса.

Однак вже на початку ХХ ст., переважна більшість астрономів переконалась, що марсіанські канали – це ілюзія. Але ідея існування розвиненої цивілізації на Червоній планеті так захопила громадську думку, що 31 жовтня 1938 р. в США виникла справжня паніка під час трансляції радіоспектакля за мотивами роману Г. Уеллса. Сотні тисяч радіослухачів покинули свої будинки і вийшли на вулиці, одні – щоб зустріти марсіан, інші, – щоб рятуватись від марсіанських завойовників.

Нині тема існування позаземного життя залишається відкритою в науці. Але це ніяк не стримує письменників-фантастів чи кінематограф розвивати її в культурному (часто навіть маскультурному) аспектах.

Важливим символом європейської культури стали державні астрономічні обсерваторії, а також телескопи та інше наукове обладнання, яким їх оснащують. Будівлі багатьох давніх обсерваторій стали пам'ятками культури, що перебувають під охороною ЮНЕСКО, а вежі сучасних телескопів – неповторними архітектурними витворами.

Рис. 16.2. Гравюра «Скептик, або Пілігрим на краю Землі»



Сьогодні астрономічні знання, нехай і шляхом їх суттєвої трансформації, надмірного спрощення і навіть спотворення, дуже швидко проникають у масову свідомість. Це зумовлено процесом глобалізації – зближенням культур різних країн, сприйняттям ідей в планетарному масштабі. Цьому сприяє поява нових каналів поширення інформації та явний суспільний запит на «видовища». Фотографії космічних об'єктів, отримані, наприклад, з допомогою Космічного телескопа імені Габбла, можна зустріти не лише на сторінках науково-популярних видань, але і як тло для різного виду реклами. Очевидно, що такі зображення мають позитивну естетику.

Значно зросло відчуття єдності нашої планети зі Всесвітом після появи космонавтики. Пілотовані польоти на орбіту Землі, політ людини на Місяць, дослідження тіл Сонячної системи автоматичними космічними апаратами – все це суттєво змінило не лише астрономічну науку, але назавжди увійшло в планетарну культуру. Космічні апарати «Вояджер» несуть на своїх обшивках послання землян позаземним цивілізаціям. Це послання, що має цінність не так науковим змістом, як радше культурологічним, є ще одним свідченням проникнення наукових знань у культуру.

Згадаймо геоцентричну та геліоцентричну системи світу, що були основою світогляду цілих епох. Вони створювались на підставі астрономічних знань, здобутих в тому чи іншому періоді західно-європейської історії. Це теж астрономічні символи, без яких немислима наша цивілізація.

Теорія Коперника відіграла суттєву роль у відродженні науки в Європі, яка зрештою посіла центральне місце в західно-європейській культурі. Образ Всесвіту, сформований на підставі законів механіки (Г. Галілей, І. Ньютон), як подоба механізму годинника, проник в культуру. Прикладом цьому є відома гравюра «Скептик, або Пілігрим на краю Землі». Здивований мандрівник, діставшись до середньовічного «краю світу», бачить за його межею не темряву, а безліч променистих саяв, пронизаних мереживом зубчатих коліс. Гравюра виражає суть уявлень людини Нового часу. За її видимим світом існує світ невидимий, світ механічний.

З 50-х років XX ст., коли фізика й астрономія накопичили досить знань про облаштування нашого світу, астрономи стали замислюватись над тим, чому Всесвіт наче спеціально має такі властивості, щоб у ньому могла жити людина. Ідеться про антропний принцип (ч. 3, § 18), який було сформульовано в середині 70-х роках XX ст. Суть його в тому, що наше існування у Всесвіті – не випадкове. Наш всесвіт саме такий тому, що в ньому є ми. Отже, геліоцентричну систему світу з її ідеєю про безмежний Всесвіт, у якій людина є малесеньким «нікчемним» створінням, яка через науку й інші форми суспільної свідомості намагається його зрозуміти, змінила антропна картина світу. Її суть – єдність Людини і Всесвіту.

У науковому середовищі ставлення до антропного принципу не однозначне. Дехто вважає його свідченням розумного (тобто божественного) творення Всесвіту, хтось розмірковує про існування безмежної кількості всесвітів (Мультиверсум) і про те, що в одному з таких всесвітів склались умови для виникнення нашого життя. Але попри все це є факт: ми – частина Всесвіту і підкоряємося фізичним та іншим закономірностям, що в ньому існують.

Одне з важливих досягнень природознавства – висновок про те, що можливість нашого існування забезпечена сукупністю фундаментальних властивостей Всесвіту. Значення для життя має вся послідовність етапів розвитку матерії в нашій частині матеріального світу: початкове розширення надщільної плазми; утворення легких хімічних елементів – водню та гелію; виникнення зір, у надрах яких відбувався синтез важких хімічних елементів аж до заліза; вибухи масивних зір, наслідком чого став синтез ще важчих елементів; нарешті утворення планет...

І лише після цього – формування живих структур. Отже, життя людини – це закономірний результат усіх попередніх етапів розвитку Всесвіту. Якби навіть один із них не відбувся, скажімо, не виникло розмаїття хімічних елементів або не утворилися планети, – нас не було б. Можна сказати, що людина фактом свого існування і хімією свого організму відображає всю передісторію Всесвіту.

Відкриття єдності людини і Всесвіту, створення антропої картини світу – це ще один феномен духовного життя суспільства, нова світоглядна теорія, яку можна вважати астрономічним символом, що нині проникає в загальнолюдську культуру.

## 2. Популяризація астрономічних знань.

Нині життя більшості людей мало залежить від їх уміння використовувати на практиці свої знання про довкілля, але люди зберігають природну допитливість, намагаючись дізнатися про нове в тій чи іншій галузі природознавства.

Один із найкращих способів задовольнити потреби широкого загалу в новій науковій інформації полягає в популяризації науки, її методів і результатів досліджень. Під популяризацією мають на увазі не спрощений, а радше доступний для розуміння людиною, яка не є фахівцем, виклад і пояснення того, що зроблено наукою. Такий підхід є універсальним, але звісно різні галузі науки не схожі між собою, тому для забезпечення рівня доступності потрібно докласти різні зусилля.

Астрономія в цьому аспекті дуже вирає, адже краса зоряного неба не перестає вражати землян, а зацікавленість таємницями Космосу сягає глибин початку людства. Окрім цих факторів, що спричиняють інтерес людей до астрономії, важливим є її постійний розвиток, її нові відкриття. Вони прямо впливають на світогляд і картину світу багатьох людей і людства в цілому.

Тих, хто нині популяризує астрономію, поділяють на кілька груп, які хоча і працюють зазвичай окремо, але всі разом створюють «кумулятивний» ефект. До першої групи належать науковці (професійні астрономи), які є авторами науково-популярних книжок, журнальних статей, виступають на радіо й телебаченні, читають публічні лекції, створюють і підтримують сайти чи сторінки в соціальних медіа. Майже всі, хто цікавиться астрономією, знають, як популяризаторів астрономічних знань, Стівена Гокінга, Мартіна Ріса, Карла Сагана. Цей, зовсім не повний, перелік доповнюють ті, хто працював в епоху, коли книжка була майже єдиним джерелом поширення й популяризації астрономічних знань. До таких належать Франсуа Араго, Джон Гершель і Каміль Фламмаріон, які є авторами книжок – «перлин» науково-популярного жанру.

До другої групи популяризаторів астрономії належать ті науковці, що нині працюють в різних астрономічних обсерваторіях. Майже всі вони відкриті для екскурсій. Наприклад, можна безкоштовно відвідати обсерваторію Роке де лос Мучачос на Канарських островах – одну з найбільших в світі (тут встановлено Великий канарський телескоп з поперечником головного

дзеркала в 10,4 м). На Канарських островах практикують навіть астрономічні тури – туристів селять у зручних для астрономічних спостережень місцях й організовують для них екскурсії в обсерваторії.

До окремої (третьої) групи відносять планетарії та народні обсерваторії (часто ці об'єкти утворюють єдиний просвітницький комплекс), що відіграють важливу роль в популяризації астрономії. Першу будівлю-планетарій, обладнану спеціальним проектором (його називають апаратом Планетарій) для демонстрації зоряного неба на сферичному екрані, було відкрито 1925 р. в Мюнхені на території Німецького музею. Нині Мюнхенський планетарій – один з найкраще обладнаних у світі. При ньому також є астрономічна обсерваторія.

У місті Гархінг (поблизу Мюнхена, Німеччина), де міститься штаб-квартира Європейської південної обсерваторії, збудовано Центр для відвідувачів (ESO Supernova Planetarium & Visitor Centre), складовою частиною якого є планетарій. Цей комплекс став до ладу в 2017 році.

1930 р. збудовано планетарій Адлера в Чикаго – перший планетарій за межами Європи й перший в західній півкулі Землі. Нині планетарії діють на всіх континентах (окрім Антарктиди) і майже всі об'єднані в Міжнародне товариство планетаріїв.

Класичним прикладом народної обсерваторії (як місця для популяризації астрономічної науки) є обсерваторія Архенхольд, яку відкрили 1896 р. в Берліні на території Трептов-парка. Обсерваторія виникла з ідеї Фридріха Архенхольда збудувати великий телескоп-рефрактор (ця ідея була ним реалізована) і відома не лише телескопом з найдовшою трубою (за це його називають «Небесною пушкою»), але й як місце, де 1915 р. Альберт Айнштайн зробив свою першу публічну доповідь про загальну теорію відносності.

До особливої групи популяризаторів досягнень астрономічної науки належать клуби й товариства аматорів астрономії. Особливість полягає в тому, що для багатьох людей аматори на власному прикладі показують захоплення зоряним небом і його явищами. Це багатьом імponує, а для деякого є першим поштовхом до власного зацікавлення астрономією.

Аматори започаткували нові форми популяризації астрономії. Наприклад, 1968 р. Джон Добсон в США заснував товариство The Sidewalk Astronomers і почав проводити незвичні досі заходи – «ночі тротуарної астрономії». Суть ідеї зводиться до того, що телескопи виставляють в людних місцях (на центральних майданах, перехрестях вулиць, біля входів у торгові центри тощо) і всім перехожим пропонують подивитися на зоряне небо.

Завдяки аматорам астрономії виникло свято – Міжнародний день астрономії, яке вперше відзначили 1973 р. в США. Нині його підтримують астрономічні обсерваторії, планетарії, природничі музеї, окремі навчальні заклади тощо в багатьох країнах світу. Головна ідея Дня астрономії – привернути увагу якомога більшої кількості людей до астрономії як науки, а також як до цікавого й корисного заняття у вільний час.

Міжнародна спільнота «Астрономи без кордонів» (Astronomers Without Borders) започаткувала ще одну цікаву з огляду на популяризацію астрономії

акцію – Глобальний місяць астрономії (Global Astronomy Month, GAM). Його відзначають під гаслом «Один народ, одне небо» («One People, One Sky»), що втілює дуже важливу ідею про астрономію без меж. Тобто не лише як фундаментальну науку, але й як явище культури. Саме тому в рамках GAM відбуваються різноманітні заходи: День Сонця, поетичні астрочаси, вечори спостережень Юпітера й Сатурна, конкурси астрофотографії тощо.

Окреме місце в сенсі популяризації астрономії посідають науково-популярні астрономічні журнали та радіо- і телевізійні програми (вони найперше розраховані на аматорів-астрономів), а їх головна мета полягає в інформуванні про події в астрономії й астрономічні явища.

### ПРАКТИЧНЕ ЗАВДАННЯ

- Підготуйте доповідь чи презентацію на тему «Космічна поезія» (про поетичні твори в яких ідеться про космос, всесвіт, зоряне небо і його світила, а також про авторів цих творів).

### НАВЧАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

- Опишіть, спираючись на сюжет гравюри «Скептик, або Пілігрим на краю Землі» уявлення про світобудову в Європі на початок XVII ст.

### ВИСНОВКИ

Оскільки астрономія виникла однією з перших серед інших наук, то її внесок у культуру оцінюють на рівні астрономічних символів, що пронизують культуру від часу зародження людства до тепер.

## ТЕМА 3.2. ЛЮДИНА І ВСЕСВІТ

### § 17. ЖИТТЯ У ВСЕСВІТІ

Досі наука не може дати чіткої відповіді на питання походження життя на Землі. Водночас не виявлено принципових обмежень, які б забороняли можливість виникнення життя на планетах біля інших зір. Згідно з сучасними уявленнями, наш всесвіт придатний для життя принаймні такого виду, як на Землі.

#### 1. Особливості Землі – «колиски життя» в Сонячній системі.

Лабораторні експерименти вже давно показали: для утворення складних органічних молекул, що передують виникненню життя, потрібна низка умов.

Зокрема, наявність у складі небесного тіла хімічних елементів, що входять до складу живого; відповідна температура для того, щоб була рідка вода; відсутність кисню в атмосфері планети. Якщо він є, то виникає озоновий шар, що поглинає ультрафіолет, який, руйнуючи електронні оболонки атомів, дає їм змогу об'єднуватись у складні передбіологічні сполуки. Коли ці умови виконано, в силу відомих законів фізики й хімії негайно починають утворюватись складні органічні сполуки. Тож напевне початок життя на Землі був цілком закономірним явищем, бо на ній реалізувалися всі початкові умови.

А от далі перехід від переджиття до життя, а також його існування стали можливими за підтримки стабільними впродовж мільярдів років певних параметрів зовнішнього середовища (стабільність клімату). І ця умова також реалізувалася на Землі.

Є три особливості, що роблять Землю унікальною серед інших планет в Сонячній системі: віддаль від Сонця, її розміри та відносно велика маса Місяця. Ці особливості виявились дуже важливими для існування й розвитку життя.

Орбіта Землі пролягає майже посередині зони життя – просторової зони планетної системи, де середня температура на поверхні така, що дозволяє воді, головній складовій в тілах живих істот, перебувати в рідкому стані, а не суцільно у вигляді льоду чи водяної пари. В нашій планетній системі пояс життя – це ділянка простору в межах 0,95–1,37 а. о. від Сонця.

Якби орбіта Землі пролягала лише на 6 % ближче до Сонця, на ній не змогли б утворитися моря й океани. Як наслідок – вода не зв'язала б вуглекислий газ, яким була насичена первісна атмосфера планети, і цього парникового газу було б так багато, що врешті-решт Земля стала б схожою на нинішню Венеру із занадто високою для існування життя температурою.

Якби орбіта Землі пролягала хоча б на 38 % далі від Сонця, то зменшення кількості тепла від Сонця спричинило б охолодження океанів і збільшення площі полярних шапок. А це, зрештою, перетворило б її на планету із занадто низькою для існування життя температурою.

Щодо розмірів нашої планети: маючи розміри більші в кілька разів, Земля мала б більшу силу тяжіння. Тоді її атмосфера нагадувала б атмосфери планет-гігантів і для життя нашого типу була б непридатною. За розмірів і маси, як у Меркурія, Земля взагалі не змогла б утримати атмосферу.

Отже віддаль від Сонця і маса – це два вирішальних фактори під оглядом умов для існування життя (принаймні схожого на земне).

Наявність відносно масивного Місяця на орбіті Землі також відіграло роль в розвитку життя до високоорганізованих форм. Високі припливи й відпливи на морському узбережжі, спричинені Місяцем, могли сприяти утворенню мікросередовищ, придатних для існування життя і виходу його на суходіл. Він стабілізує орієнтацію осі обертання Землі, зберігаючи майже сталим кут її нахилу до площини орбіти, що важливо для підтримання стабільних кліматичних умов. Нині цей кут становить 23,5°, але з періодом в 41 тис. р. він коливається в межах 24,5° – 22,1°.



Важливою є наявність планет-гігантів, а надто Юпітера, в Сонячній системі. Їхня присутність стабілізує орбіту Землі, без чого її могло викинути за межі планетної сім'ї або вона упала б на Сонце. Зараз ексцентриситет орбіти Землі дорівнює 0,0167, але з періодом 93 тис. років він змінюється в межах від 0,0034 до 0,058. Це впливає на клімат, але не так, щоб зробити умови на планеті непридатними для життя.

Юпітер також, як наймасивніша планета в Сонячній системі, відтягає на себе основну масу метеоритів і комет, запобігаючи надто частим космічним катастрофам, що могли б зруйнувати поверхню планети й життя на ній.

Після формування в Сонячній системі планет їх протягом кількох сотень мільйонів років інтенсивно бомбардували космічні тіла менших розмірів. Згідно з сучасними уявленнями, життя на Землі виникло або під час цього бомбардування, або майже відразу після закінчення (приблизно 3,9 млрд років тому). Головними доставниками на Землю вуглецю, інших елементів, а також органічних молекул, ймовірно, були комети, метеорити і міжпланетний пил. Наприклад, в речовині комети Галлея виявлено мікроскопічні гранули, які містять вуглець, водень, кисень і азот. У метеоритах, які потрапили на Землю, виявлено амінокислоти і нуклеїнові основи, які живі істоти використовують для побудови білків.

Ідею про те, що прості форми життя могли потрапити на Землю з космосу, в 1870-х роках було оформлено у вигляді гіпотези панспермії, але вона досі лишається гіпотезою проти якої є суттєві аргументи. Один з найсуттєвіших – радіація, що знищує все живе у відкритому космосі. Але, навіть якщо гіпотеза панспермії справедлива, то це не знімає питання походження життя як такого. Десь у Всесвіті воно мало виникнути з неживої матерії.

На Землі це трапилось, і нині відомо про понад 10 млн різних видів тварин і дуже багато мікроорганізмів, які мешкають на планеті. Однак тільки людина в своєму розвитку досягла рівня інтелекту. Тобто шанс появи розуму є меншим за один з десяти мільйонів. Це може свідчити про те, що поява розумних істот на придатних для життя планетах доволі рідкісне явище.

Життя суттєво змінило Землю, а надто її поверхню, насичило атмосферу та води Світового океану великою кількістю кисню. Тому під час пошуку життя на космічних тілах, науковці найперше звертають увагу на аномально високий вміст кисню та інших сполук, пов'язаних з життєдіяльністю на Землі.

## 2. Пошуки життя за межами Землі.

Знайти просте життя в межах Сонячної системи досі не вдалося, але шанси ще є. Якщо не на Марсі, то можливо в океані Європи – супутника Юпітера, чи на поверхні Титана – супутника Сатурна. Нині для дослідження цих тіл Сонячної системи з метою пошуку на них ознак життя готують спеціальні космічні місії.

У питанні життя за межами Землі є дві суттєві складові: перша – це пошук ознак життя як такого, а друга – реєстрація сигналів від позаземних цивілізацій або відправлення в космос повідомлень від землян у надії, що

хтось їх зареєструє, розшифрує, а потім надішле відповідь. Ці стратегії науковці та ентузіасти пошуку позаземного життя реалізують у рамках наукових програм SETI (Search for Extraterrestrial Intelligence, пошук позаземного розуму) і METI (Messaging to Extra-Terrestrial Intelligence, послання позаземним цивілізаціям).

Програма SETI вирішує завдання реєстрації сигналу, його декодування й виділення з нього осмисленої інформації. Тобто науковий пошук відбувається так само, як і в разі пошуку нових природних явищ. Одна лише відмінність – його результатом має стати не якесь явище природи, а повідомлення, надіслане розумними істотами. Завдання програми METI інше – скласти послання, яке хай яка розвинена розумна істота не ототожнить з природним явищем, а сприйме його як послання від іншої розумної істоти.

Перші сигнали від «космічних братів», що мешкають біля зір Тау Кита і Епсилон Еридана, намагався зареєструвати 1960 р. з допомогою радіотелескопа американський астроном Френк Дрейк у рамках виконання проекту «Озма». Протягом чотирьох місяців він прослуховував на частоті близько 1,420 ГГц радіосигнали, але, окрім шуму, нічого не почув. Частота прийому сигналу була обрана не випадково – на ній випромінює атомарний водень ( $\lambda = 21,1$  см) – найпоширеніший елемент у Всесвіті.

Інтерес до контакту між землею й позаземними цивілізаціями виник наприкінці 50-х років ХХ ст. Тоді вийшло кілька наукових публікацій, в яких автори розглядали різні методи (радіосигнали, лазери тощо) такого зв'язку. 1961 р. в Національній радіоастрономічній обсерваторії США відбулася перша конференція з питань контактів з позаземними цивілізаціями. На ній Ф. Дрейк запропонував рівняння (його називають формулою Дрейка) оцінки кількості цивілізацій в нашій галактиці, з якими ми потенційно можемо встановити контакт.

$$N = R \cdot fp \cdot ne \cdot fl \cdot fi \cdot fc \cdot L,$$

де:  $N$  – кількість позаземних цивілізацій нашої галактики, готових вступити в контакт;  $R$  – кількість зір, які щорічно виникають в Галактиці;  $fp$  – частка зір, що мають планети;  $ne$  – середня кількість планет у зір, які мають умови для життя;  $fl$  – імовірність зародження життя на планеті з відповідними умовами;  $fi$  – імовірність появи розумного життя на планеті;  $fc$  – відношення планет, розумні мешканці яких здатні до контакту і шукають його, до кількості планет, на яких існує розумне життя;  $L$  – час існування високорозвиненої готової до контакту цивілізації.

Згідно з оцінками Дрейка, який взяв довільні параметри для своєї формули,  $N = 10$ . Хоча нині окремі параметри, що входять до формули Дрейка, мають менше чи більше прогнозовані значення (наприклад  $R$  – не більше п'яти, тоді як Дрейк припускав, що  $R = 10$ ), здебільшого є невизначеними. Тому оцінка кількості потенційних цивілізацій в Галактиці досі лишається складним завданням.

Ідею космічного зв'язку з позаземними цивілізаціями в 70-х роках ХХ ст. підтримало NASA (National Aeronautics and Space Administration, Національне управління

ня з аеронавтики і дослідження космічного простору). Якраз тоді (1976) з'явилася назва SETI, що замінила попередню – CETI (Communications with Extraterrestrial Intelligence – зв'язок з позаземними цивілізаціями). На той час стало зрозумілим, що зареєструвати сигнали від мешканців інших планет землянам з якихось причин не вдається, тому треба зосередити зусилля на їх пошуку. Зважаючи на «туманні» перспективи такого пошуку, NASA припинила фінансувати дослідження в цій галузі. Але науковці-ентузіаста продовжували пошуки сигналів за рахунок благодійних коштів, а 1984 р. заснували в США приватній Інститут SETI (SETI Institute). 2007 р. цей Інститут разом з Каліфорнійським університетом заснував обсерваторію для пошуку сигналів від позаземних цивілізацій. Її оснащено радіотелескопом Аллена (Пол Аллен, один із засновників Microsoft, пожертвував 30 млн доларів на його створення), який реєструє сигнали в діапазоні 0,5–11 ГГц від майже тисячі зір, що лежать у радіусі понад 60 пк від Сонця.

З 1999 р. пошук сигналів з космосу може виконувати кожен власник персонального комп'ютера. Для цього треба приєднатися до проекту SETI@home, започаткованого астрономами Каліфорнійського університету. Він став одним із перших проектів, які згодом стали позначати терміном громадська наука. Суть його полягає в тому, що для опрацювання великої кількості даних, отриманих, наприклад, з астрономічних спостережень, у професійних астрономів не вистачає ресурсів (головно часу і людей). Тому науковці залучають добровольців до обробки результатів спостережень за принципом розподілених обчислень (коли один комп'ютер виконує обробку якоїсь окремої частини з великого масиву даних).

Перше радіопослання землян до позаземних цивілізацій було відправлене 1974 р. з допомогою 300-метрової антени радіотелескопа в Аресибо. Сигнал спрямували в бік кулястого скупчення M13, що лежить на відстані 7670 пк від Землі. Закодований сигнал містить базові відомості про людину, Землю та Сонячну систему.

У Космос, але вже до зір, що лежать на відстані понад 10 пк, спрямовували сигнали (вони містили малюнки, світлини, фрагменти музичних творів тощо) ще кілька разів. Для цієї мети використовували 70-метровий радіотелескоп, розміщений поблизу м. Феодосія в Криму.

Всі намагання знайти сигнал від позаземних цивілізацій досі не досягли успіху. Це наводить на роздуми як щодо існування життя за межами Землі, так і щодо методів та засобів пошуку сигналів. Одні науковці вважають, що в питанні міжзор'яного зв'язку треба мінімізувати властивий людині антропоцентризм і спиратися на максимально простий математичний апарат. Інші, зокрема С. Гокінг, застерігають землян – не варто сигналізувати в Космос, адже невідомо, хто на це одізветься. Але проти таких поглядів є вагомий аргумент: з початком радіо- і телетрансляцій Земля випромінює радіосигнали в космос, які легко може зареєструвати розвинена цивілізація, що перебуває на відстані до 30 пк від нашої планети.

Ще одна група науковців, з огляду на уявлення про поширеність життя у Всесвіті, вказує на парадокс Фермі, суть якого зводиться до запитання: «Якщо навіть у нашій галактиці дуже багато розвинених цивілізацій, то чому ми з Землі не спостерігаємо видимих слідів їхньої діяльності, адже за мільярди років існування вони мали б

розселитися по всій Галактиці». Часто парадокс Фермі розглядають як крайню форму прояву астросоціологічного парадоксу (АС-парадокс). У загальній формі АС-парадокс означає відсутність будь-яких спостережуваних проявів діяльності високорозвинених цивілізацій в космічному просторі. АС-парадокс в такому розумінні називають інколи також парадоксом мовчання Всесвіту (або Великим мовчанням).

Отже Космос мовчить, наші сучасні засоби астрономічних спостережень не реєструють у Всесвіті проявів інженерної діяльності високорозвинених цивілізацій, докази відвідин іншопланетянами Землі нині чи в минулому відсутні. Знайти пояснення цьому факту не вдається. Гіпотез існує багато, але жодна з них досі не стала теорією.

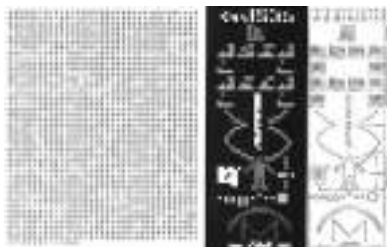


Рис. 17.2. Зміст першого послання землян до позаземних цивілізацій

Усе це є надто дивним з огляду на відкриття в Галактиці екзопланет земного типу, що перебувають в зонах життя своїх материнських зір, виявлення складних органічних молекул і сполук у газопилових хмарах та живих організмів

на Землі там, де, як вважали, у принципі вони жити не можуть: в дуже кислому середовищі, в окропі сірчаних джерел, у товщі антарктичного льоду тощо.

Ми досі не знаємо, як виникло життя на Землі й чи існує воно у Всесвіті, а надто його розумні види. Але це не означає, що пошук позаземного життя треба припинити. Адже такі інтелектуальні потуги приносять користь і для вирішення суто земних проблем, вказуючи на потребу збереження життя на планеті.

### ТИПОВЕ ЗАВДАННЯ

- Визначте час повної колонізації Галактики однією надрозвиненою цивілізацією за таких умов: а) з прабатьківської планети стартують три кораблі з переселенцями в різних напрямках; б) швидкість руху корабля становить  $0,03 c$  ( $c$  – швидкість світла); в) відстань між зорями – 1 парсек; г) час колонізації кожної наступної планети становить 300 років, а потім з неї стартує три нових космічних кораблі з переселенцями.

*Відповідь:* При таких припущеннях переселенці будуть поширюватися по Галактиці зі швидкістю 1 парсек в 400 років (100 років витрачається на переліт до нової планети і 300 років на її колонізацію). Розмір нашої Галактики становлять 50 кілопарсек. Щоб її заселити, треба повторити операцію  $5 \cdot 10^4$  разів. Звідси  $400 \cdot 5 \cdot 10^4 = 20 \cdot 10^6$ . Тобто через 20 млн років одна цивілізація заповнить усю Галактику.

Зверніть увагу, що ця цифра отримана з суттєвим запасом, бо між великою кількістю зір в Галактиці відстань менша за 1 пк. Крім того, не всі зорі мають планети, придатні для життя, а тому на їх заселення не буде витрачено час.

## НАВЧАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

- Поясніть суть гіпотези панспермії. Наведіть докази за і проти неї.

## ВИСНОВКИ

Наш всесвіт пройшов складний еволюційний шлях, аж поки в ньому не виникла найскладніша організацією форма матерії – життя. Проблема походження життя на Землі є фундаментальною для сучасного природознавства. Хоча лишається ще багато нез'ясованого, але основний постулат відомий: життя – явище космічне.

## § 18. МУЛЬТИВСЕСВІТ

Упродовж кількох тисяч років людина вважала Землю центром світу. Після появи теорії Коперника ці уявлення стали історією. В середині ХХ ст. астрономи вже знали, що Сонце – пересічна зоря однієї з галактик Всесвіту. Нині в астрономії розглядають уявлення, згідно з якими наш всесвіт є одним з багатьох інших у Мультивсесвіті (часто використовують інший термін – Мультиверс, від англ. Multiverse).

### 1. Антропний принцип.

У 1973 р. астрофізик Брендон Картер висловив припущення – існування людства свідчить про те, що закони Всесвіту цьому сприяють, і назвав свою ідею антропним принципом (від грец. *anthropos* – людина).

Картер сформулював антропний принцип так: «Очікувані результати спостережень мають бути обмежені умовами, які потрібні для нашого існування як спостерігачів». Це означає, що закони природи в якомусь сенсі спеціально обрані так, щоб допустити наше існування.

Розгляньмо два приклади збігу значень фізичних величин, що є критичними для існування нашого світу. Позитивно заряджені протони лише на 0,14 % легші за нейтрони, що не мають електричного заряду, і ця різниця приблизно вдвічі більша, ніж маса електрона. Надлишок маси дозволяє вільному нейтрону спонтанно виділити електрон (і антинейтрино), перетворившись на протон. Натомість протон не може самовільно стати нейтроном. Йому для цього потрібно десь взяти додаткову масу. Саме тому протони стійкі, а нейтрони – ні. Якби маса протона була лише на чверть відсотка більшою, ситуація стала б кардинально іншою. У нашому всесвіті не було б водню, адже його ядра – це окремі протони. Без водню не спалахнули б зорі, не утворились би важкі елементи. В такому світі не було б життя.

Другий приклад. Якби гравітаційна стала  $G$  була меншою в кілька разів, то це не позначилося б на властивостях атомів і молекул, але у Всесвіті не було б ні зір, ні галактик, адже сила тяжіння була б замалою для їх формування із хмар водню. Якби навпаки,  $G$  була більшою в кілька разів, то сила

тяжіння була б завеликою й розширення Всесвіту швидко змінилось би на стискання, так що життя в ньому не встигло б розвинути до високого рівня.

Такі залежності між значеннями фізичних величин відомі науковцям вже кілька десятиліть. Але ще донедавна ніхто не замислювався над тим, чому це так. Тільки після запровадження Картером антропного принципу на це звернули увагу. Більшість астрономів спершу вважали цей принцип ненауковим, бо він нібито свідчив про творіння нашого всесвіту вищою силою. Але Картера спочатку підтримав і став пропагувати його ідею королівський астроном Мартін Ріс, пізніше – Стівен Вайнберг (один з видатних фізиків-теоретиків ХХ ст.), а згодом й інші науковці.

Нині розглядають антропний принцип у двох варіантах – сильному й слабкому. Перший, фактично, є іншим формулюванням принципу біологічного детермінізму (життя – неодмінний атрибут нашого всесвіту). Згідно з ним фундаментальні закони та константи Всесвіту спеціально налаштовані так, щоб міг виникнути спостерігач, який зможе їх осмислити. Слабкий антропний принцип вказує на те, що за інших значень космологічних параметрів Всесвіту (його вік, стала Габбла тощо), життя в ньому могло б і не з'явитися. Приміром, якби Всесвіту було не 14 млрд років, а лише 5, то ще не встигли б утворитися в потрібній кількості хімічні елементи, потрібні для розвитку й еволюції життя у всіх формах.

Досі багато науковців скептично ставляться до антропного принципу, а окремі з них вважають, що уявлення про важливість тонкого налаштування фізичних констант в нашому всесвіті дуже перебільшені. Якщо змінювати одночасно чотири константи (маси протона і електрона, сталі сильної й електромагнітної взаємодій), що визначають властивості матерії в масштабах від атомів до зір, то можна отримати великий відсоток всесвітів, в яких зорі можуть існувати понад кілька мільярдів років. Тобто межі антропних параметрів не такі вже й малі. Окрім цього, антропний принцип ґрунтується на тому, що спостерігачами нашого всесвіту мають бути якщо не люди, то неодмінно розумні істоти, представники вуглецевої форми життя. Такий підхід до життя у Всесвіті вважають «вуглецевим шовінізмом». Він сильно зменшує діапазон можливих умов для існування розуму.

Однак антропний принцип знайшов собі пояснення в рамках ідеї про Мультиверсум, тобто про існування величезної кількості всесвітів, окремі з яких випадково є придатними для життя. І вже в таких всесвітах розумні спостерігачі зауважують дивовижне тонке налаштування фізичних сталих.

## 2. Питання існування інших всесвітів.

Удосконалення інфляційної моделі (ч. 2, § 29) виникнення Всесвіту показало, що інфляція приводить до появи великої кількості всесвітів. Сукупність таких всесвітів називають *Мультивсесвітом*.

Виявилось, інфляція в Універсумі є одвічним явищем. Вона відбувається завжди. Безупинно виникають окремі ділянки інфляційного розширення, спричиненого

розпадом псевдовакууму. Деякі з них породжують окремі всесвіти. Ми якраз живемо в одному з таких всесвітів. Вічна інфляція породжує велику кількість всесвітів з усіма можливими значеннями базових фізичних сталих.

Хоча Універсум нескінчений, а інфляція вічна, з теорії струн випливає, що енергія всесвітів у Мультивсесвіті має дискретне значення. Це означає, що кількість окремих всесвітів є обмеженою величиною, тобто їх можна порахувати.

Поєднання ідей космологічної інфляції та теорії струн дозволяє припустити, що існує дуже багато ізольованих один від одного всесвітів з різними космологічними сталими і фізичними законами. Це якраз те, що потрібно для обґрунтування антропного принципу.

Питання взаємодії окремих всесвітів, їх співіснування та розміщення в Універсумі поки що є відкритим. Згідно з одними уявленнями, ці всесвіти існують на величезних відстанях один від одного, далеко за межами видимої нами частини Всесвіту. Такі думки ґрунтуються на припущенні, що Всесвіт, який виник після Великого Вибуху, в багато разів перевищує ту його частину, яку ми можемо спостерігати в телескопи. А можливо різні всесвіти вміщені один в одного, тобто «менші» в «більші». Ці уявлення ґрунтуються на ідеї відносності фізичних явищ.

Якщо окремі всесвіти існують, то як можна це виявити? Прямі спостереження допоки не дають цьому ніяких свідчень, хоча є спроби знайти прояви взаємодії нашого всесвіту з якимось іншим на ранньому етапі розвитку з аналізу реліктового випромінювання. Більше сподівань на непрямі методи. Один з них пов'язаний з визначенням космологічної сталої  $\Lambda$ , що характеризує густину енергії вакууму в нашому всесвіті. Її значення, визначене з астрономічних спостережень, узгоджується з передбаченнями, що спираються на концепцію Мультивсесвіту.

Не всі науковці, навіть ті, які розробляють теорію струн, поділяють думку про існування Мультивсесвіту. Вони переконані, що вдасться створити «теорію всього», яка пояснить і існування нашого всесвіту, і антропний принцип, без залучення ідеї про існування інших всесвітів.

## НАВЧАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

- Наведіть аргументи за і проти антропного принципу.

## ВИСНОВКИ

Існування людства свідчать про те, що закони нашого всесвіту це допускають. Таку ідею називають антропним принципом. Згідно з уявленнями окремих науковців, принцип указує на можливість існування великої кількості всесвітів з різними фізичними законами. Сукупність цих всесвітів називають Мультивсесвітом.

**НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ**

*Головко Микола Васильович*  
*Крячко Іван Павлович*

# **Астрономія**

**навчальний посібник**

Редактор – Бартош С. В.  
Верстка – Перепелиця Є. В.  
Обкладинка – Лук'яненко Л. П.

Підписано до друку 03.10.2018 р. Формат 70x100 1/16  
Гарнітура Палатіно. Друк офсетний. Папір офсетний.  
Ум. друк. арк. 22,1  
Наклад 300 пр.

Віддруковано у ТОВ «КОНВІ ПРІНТ».  
03680, м. Київ, вул. Антона Цедіка, 12  
тел. +380 44 332 84 73

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи  
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів  
видавничої продукції серія ДК № 6115, від 29.03.2018 р.

---

## **ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ:**

*Головко Микола Васильович* – кандидат педагогічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник відділу біологічної, хімічної та фізичної освіти Інституту педагогіки НАПН України.

*Крячко Іван Павлович* – науковий співробітник відділу біологічної, хімічної та фізичної освіти Інституту педагогіки НАПН України.