ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА

В. А. ЗАХОЖАЙ, О. В. ЗАХОЖАЙ

ОСНОВИ ЕЛЕМЕНТАРНОЇ АСТРОНОМІЇ

Навчальний посібник

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені В. Н. КАРАЗІНА

В. А. Захожай
О. В. Захожай

ОСНОВИ ЕЛЕМЕНТАРНОЇ АСТРОНОМІЇ

Навчальний посібник

Харків – 2021

УДК 52:550.2(075.8)
З-38

Рецензенти:

С. Г. Кузьменков – доктор педагогічних наук, кандидат фізико-математичних наук, професор, професор кафедри фізики та методики її навчання Херсонського державного університету;

В. Г. Шевченко – доктор фізико-математичних наук, професор кафедри астрономії та космічної інформатики Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна.

Затверджено до друку рішенням Вченої ради
Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна
(протокол № 14 від 28.09.2020 року)

Захожай В. А.

З-38 Основи елементарної астрономії : навчальний посібник / В. А. Захожай, О. В. Захожай. – Харків : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2021. – 232 с.

ISBN 978-966-285-687-3

Навчальний посібник містить основні загальні положення астрономії, розглянуті у контексті побудови сучасної астрономічної картини світу. Кожний розділ супроводжується тестовими завданнями та контрольними запитаннями, які допоможуть перевірити рівень оволодіння матеріалом.

Посібник призначений для студентів, школярів, учителів та аматорів астрономії, які хотіли б поглибити свої знання з астрономії.

УДК 52:550.2(075.8)

ISBN 978-966-285-687-3

© Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, 2021
© Захожай В. А., Захожай О. В., 2021
© Чорна О. Д., макет обкладинки, 2021

ЗМІСТ

Передмова 5

Перелік умовних скорочень 8

Вступ 9
1. Астрономія як наука про Всесвіт..... 9

Частина 1. Спостережна та практична астрономія..... 15
2. Астрономічні явища та їх спостереження. 16
3. Небесна сфера та системи координат в астрономії. 21
4. Видимий рух небесних світил..... 26
5. Час і календар. 31
6. Випромінювання космічних об'єктів..... 37
   Тести 42
   Контрольні питання. 44

Частина 2. Методи астрономічних досліджень 45
7. Астрономічні засоби спостережень..... 45
8. Визначення руху та геометричних відстаней..... 53
9. Установлення законів орбітального руху. 58
10. Прямі визначення мас і розмірів..... 63
11. Визначення астрофізичних характеристик..... 68
    Тести 76
    Контрольні питання. 78

Частина 3. Космічні тіла 79
12. Різноманітність космічних тіл у Всесвіті та їх класифікація 79
13. Зорі та Сонце..... 83
14. Субзорі та планети. 91
15. Великі планети Сонячної системи та їх супутники. 95
16. Карликові планети та малі тіла Сонячної системи 104
    Тести 110
    Контрольні питання. 111

Частина 4. Зоряні та планетні системи 112
17. Класифікація зоряних систем..... 112

18. Поодинокі та кратні зорі й субзорі. 116
19. Планетні системи..... 120
20. Зоряні скупчення й асоціації. 124
21. Галактики. 127
22. Об'єднання галактик у різні рівні ієрархічних структур. 131
Тести 134
Контрольні питання. 136

Частина 5. Космографія 137
23. Сонячна система та її околи 137
24. Наша зоряна система..... 141
25. Місцева група галактик. 144
26. Місцеве надскупчення. 148
27. Метагалактика 153
28. Істинний рух Землі у космічному просторі. 157
Тести 165
Контрольні питання. 167

Частина 6. Еволюція об'єктів Всесвіту 168
29. Процес утворення космічних об'єктів. 169
30. Від протооб'єктів до зоряних і планетних систем..... 173
31. Еволюція зір. 177
32. Еволюція субзір і планет. 181
33. Загальний розвиток Всесвіту. 185
34. Життя у Всесвіті. 189
Тести 192
Контрольні питання. 196

Підсумковий розділ 197
35. Роль астрономії в узагальненні знань про природу..... 197

Ключові визначення 202
Покажчик термінів 215
Покажчик астрономічних об'єктів 222
Відповіді до тестів..... 225
Список рекомендованої літератури..... 226

ПЕРЕДМОВА

Ця книга пропонується аматорам астрономії, учням старшої школи і вчителям, які викладають цей предмет, та підготовлена з урахуванням навчальної програми астрономії, розробленої Національною академією наук України.

У пропонованій книзі «Основи елементарної астрономії» (далі в тексті скорочено – Основи) послідовність викладання матеріалу дещо відходить від загальноприйнятої в підручниках з астрономії. Це пов'язано з тим, що накопичення спостережного та теоретичного матеріалу в астрономії у минулому столітті та особливо в останні роки дало їй змогу вийти на принципово новий рівень дослідження та розвитку. Астрономія перестала бути перш за все спостережною наукою. З'явилися достатні об'єктивні підстави для узагальнення знань про космічні об'єкти, що вимагає і відповідного нового підходу до викладання предмета. З іншого боку, автори поставили перед собою мету представити матеріал таким чином, щоб він не був рутинним, а був цікавим для читача. Щоб після засвоєння матеріалу читач оволодів базовими знаннями про фізичні властивості астрономічних об'єктів, їх устрій, просторове розташування, походження й еволюцію. Випускник загальноосвітнього навчального закладу після оволодіння матеріалом книги в рамках рівня стандарту повинен вміти пояснювати відомі астрономічні явища, знати місце людини в Космосі, орієнтуватися в загальній науковій астрономічній інформації, відокремлювати наукову картину світу від ненаукової, розрізняти астрономію й астрологію, знати місце предмета в міждисциплінарній проблемі пошуку життя у Всесвіті тощо.

Книга складається зі «Вступу», перед яким наведено «Перелік скорочень», які фігурують в тексті, шести частин, «Підсумкового розділу» і різноманітних додатків (ключові визначення, покажчики термінів та астрономічних об'єктів, відповіді до тестів та список рекомендованої літератури). Викладення Основ зведено до шести тем, кожна з яких відповідає певній частині. Перші дві частини подані ближче до традиційного

змісту, чотири наступні написані в стилі, який відповідає сучасному стану розвитку астрономії.

В першій частині представлені базові поняття спостережної астрономії, що стосуються розташування світил на небесній сфері, основ їх кінематики, які зокрема визначають такі поняття, як час і календар, принципів порівняння випромінювання астрономічних джерел, які можуть застосовуватися до космічних об'єктів різної природи. Друга частина присвячена астрономічним засобам і методам спостережень основних характеристик космічних об'єктів. Властивості космічних тіл, включаючи об'єкти Сонячної системи, їх класифікація розглядаються в третій частині.

В четвертій частині розглядаються зоряні системи з позицій їх узагальнених властивостей, а не як раніше: на основі тільки спостережних даних. Устрій Метагалактики представлено в п'ятій частині «Космографія». Більше 100 років тому під такою назвою розумілася «вся» астрономія. У XX сторіччі від цього терміна практично повністю відійшли. З початком XXI сторіччя знову, перш за все, в закордонній науковій літературі з'явився цей термін, але в нього почали вкладати новий зміст – тривимірний устрій світу. Це започаткування було підтримано, оскільки воно відображає сучасний вектор розвитку астрономічної науки. Остання тема присвячена основам походження космічних об'єктів різного ступеня ієрархії, загальному сценарію розвитку Всесвіту та проблемі існування в ньому Життя – всеохоплюючий термін, під яким розуміються всі форми його існування. При цьому розглянуті питання суттєво розширені у порівнянні з тим, як це було в раніше викладених шкільних підручниках.

Фотографії космічних об'єктів наводяться з різних джерел: комічних місій (КТ ім. Хаббла, КА «Кассіні — Гюйгенс», КА «Клементина», АМС «Нові обрії», АМС «Світанок», АМС «Мессенджер» та ін.) і телескопів наземних обсерваторій (Європейської Південної обсерваторії (ESO), Кека (Kek) та ін.), які є, як правило, у вільному доступі в Інтернет-мережі.

Після кожного розділу наводяться тести і запитання, які допоможуть з'ясувати рівень оволодіння матеріалом.

В кінці книги наводиться довідковий матеріал з ключовими визначеннями астрономічних об'єктів, відповідями на тести до кожного розділу та покажчики термінів та астрономічних об'єктів. Першому посиланню (на відповідну сторінку) в Покажчику термінів відповідає, як правило, визначення наведеного терміна, яке дається або безпосередньо в тексті, або у зазначеній виносці. В Покажчику астрономічних об'єктів наводяться сторінки, де вони зустрічаються в тексті або виносці. Список рекомендованої літератури, яка як використовувалася при написанні Основ, так і доречна для подальшого поглибленого ознайомлення з астрономією, завершує книгу.

Представлені Основи є першою сходинкою в оволодінні астрономічними знаннями. Тим читачам, що захочуть вибрати астрономію як свою майбутню спеціальність, слід звернутися до класичних університетів, де викладаються астрономічні курси, для отримання спеціальності «астрономія». В Україні цю спеціальність можна отримати на фізичних факультетах Харківського, Київського та Львівського національних університетів, які носять імена В. Н. Каразіна, Тараса Шевченка й Івана Франка, відповідно, та на факультеті математики, фізики та інформаційних технологій Одеського національного університету І. І. Мечникова.

Аматорам астрономії, які хотіли б поглибити свої знання, але без застосування зайвого математичного апарату, можна рекомендувати підручник В. А. Захожая «Вступ до астрофізики та астрономії» (2017 р.). Якщо ж це зауваження для читача не є перешкодою, є доцільним підвищити свій астрономічний рівень, опанувавши підручник «Загальна астрономія» колективу авторів С. М. Андрієвського, С. Г. Кузьменкова, В. А. Захожая та І. А. Климишина (2019 р.), рекомендований перш за все для студентів вищих навчальних закладів астрономічних відділень класичних університетів і фізико-математичних відділень педагогічних університетів.

Автори висловлюють велику подяку рецензентам рукопису: професорам Сергію Георгійовичу Кузьменкову та Василю Григоровичу Шевченку за корисні зауваження та поради щодо викладеного матеріалу, Надії Володимирівні Адоніній за допомогу у підготовці книги до видання, працівникам Видавництва Харківського університету за їх працю з підготовки оригінал-макета посібника.

Автори

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АМС – автоматична міжпланетна станція
ДГР – діаграма Герцшпрунга–Рассела
ІЧ- – інфрачервоний
КА – космічний апарат
КС – кулясті (зоряні) скупчення
КТ – космічний телескоп
КТХ – космічний телескоп імені Хаббла
МАН – Мала академія наук
МАС – міжнародний астрономічний союз
МГ – Місцева група (галактик)
МНС – Місцеве надскупчення (галактик)
MW – англ.: Milky Way: Молочний Шлях
НЗС – Наша зоряна система
ПГСП – позагалактичний сателітарний пояс
ПЦ – позаземні цивілізації
РС – розсіяні (зоряні) скупчення
SETI – англ.: Search for Extraterrestrial Intelligence: Пошук позаземного розуму
ТПС – тісні подвійні системи
УФ- – ультрафіолетовий
ШСЗ – штучний супутник Землі

ВСТУП

1. Астрономія як наука про Всесвіт

Астрономія (від гр.: αστρον – світило та νομος – закон) – фундаментальна наука про Всесвіт, що вивчає розташування, рух, будову, походження та розвиток небесних тіл і утворених ними систем. Астрономія складає уявлення про наукову картину макро- і мегасвіту, формує світогляд, який є суттєвою специфічною складовою природничо-наукового пізнання світу. *Астрономічний світогляд* окреслює методи вивчення макросвіту, формує уявлення про його будову, походження та розвиток.

Предмет, задачі та засоби астрономії. *Предметом дослідження* астрономії є її об’єкти: зорі, субзорі, планети, астероїди та комети, речовина, що між ними, системи, які складені з них: поодинокі та кратні зорі й субзорі, планетні системи, зоряні скупчення, галактики та їх скупчення різного ступеня ієрархії, міжпланетне, міжзоряне та міжгалактичне середовище. Класифікація й узагальнення спостережного матеріалу з урахуванням того, що дані віддзеркалюють не тільки їх просторове положення та рух цих об'єктів, а й їх вік, дають змогу одержати уявлення про будову Всесвіту на різних етапах його еволюції.

Астрономія вивчає світ на основі аналізу світлового випромінювання, в різних діапазонах електромагнітних хвиль і руху астрономічних об’єктів у різні моменти часу. Розв’язуються *три основні задачі* під час вивчення небесних об’єктів: їх

1) видимих положень та рухів;
2) будови й астрофізичних властивостей;
3) походження та еволюції.

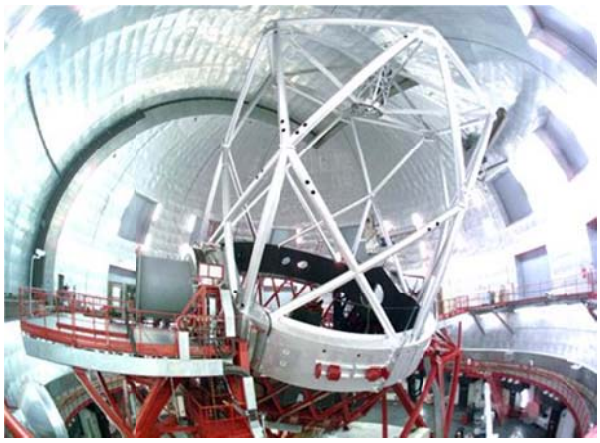
Результати розв’язання цих задач отримують відповідними методами за допомогою спостережних засобів і теоретичного аналізу.

Головним спостережним засобом є телескоп, що дає можливість приймати космічне випромінювання в різних діапазонах електромагнітних хвиль від найкоротших (гамма- та рентгенівських) до довгих, що належать радіодіапазону (рис. 1.1). *Основними спостережними методами* є дистанційні та прямі (як правило, в межах Сонячної системи) астрономічні дослідження.

а

б

в



г

д

ж

Рис. 1.1. 4,5 см зорова труба, побудована Г. Галілеєм у 1609 р. (а), перший 3,3 см дзеркальний телескоп, створений І. Ньютоном у 1668 р. (б), та сучасні: 5 м Паломарський телескоп (в), найбільший у світі Великий Канарський 10,4 м телескоп (г), 2,4 м Космічний телескоп імені Хаббла (д) та Дуже великий масив (Very Large Array – VLA) 27 радіотелескопів з діаметром кожного дзеркала 25 м (ж) – Нью-Мексико, США

Зв'язок астрономії з іншими науками. Астрономічні дослідження проводяться у взаємодії з математикою, природничими та гуманітарними науками. Обробка спостережних даних проводиться виключно математичними методами. Без фізичної трактовки та математичного обґрунтування будь-які астрономічні теорії не вважаються науковими.

Тісна взаємодія астрономії існує з природничими науками: хімією та біологією. Загальна планетологія – симбіоз геліофізики та фізики планет з науками про Землю: геофізикою, геологією, метеорологією, кліматологією, океанологією тощо. Походження планет і планетних систем розглядається ще й у відповідних підрозділах астрономії: астрофізиці, зоряній астрономії та космогонії. Проблема походження життя на Землі та в Космосі – фундаментальна проблема міждисциплінарних досліджень. Одним з напрямів тут є астробіологія, методами якої розв'язуються такі задачі, як виникнення та існування життя у відмінних від земних космічних умовах. Датування історичних хронік часто відновлюється за встановленням настання відповідних астрономічних явищ, і навпаки, за зафіксованими історичними подіями встановлювалися дати астрономічних подій.

Короткий нарис будови Метагалактики[1]. Людина живе на Землі – рядовій планеті Сонячної системи (рис. 1.2). Внутрішню частину системи складають планети, які за своїми фізичними властивостями схожі на Землю. За межами осередку цих планет, які відносять до *земного типу*, розташований *Головний пояс астероїдів* (складові якого ще звуться малими тілами).

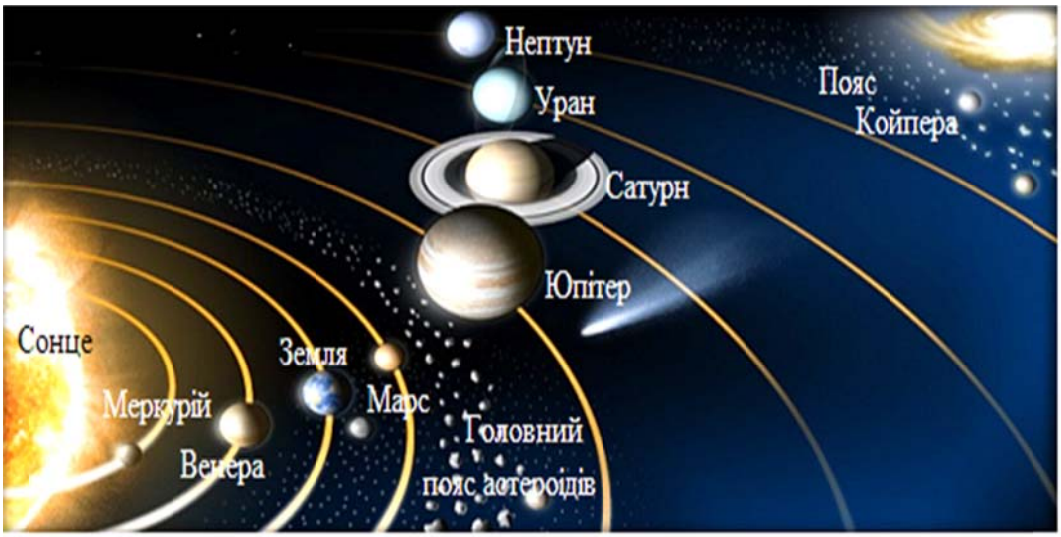


Рис. 1.2. Сонячна система

В зоні від 5 до 30 астрономічних одиниць[2] обертаються навколо Сонця *планети-гіганти*: Юпітер і Сатурн є планетами з приблизно сонячним хімічним складом; Уран і Нептун – з істотним вмістом води, аміаку та метану крім Гідрогену і Гелію. Всі ці планети мають кільця та значні за кількістю системи супутників. У цій зоні обертаються навколо Сонця й астероїдні тіла, які звуть *кентаврами*.

---

[1] Метагалактика – спостережувана частина Всесвіту.

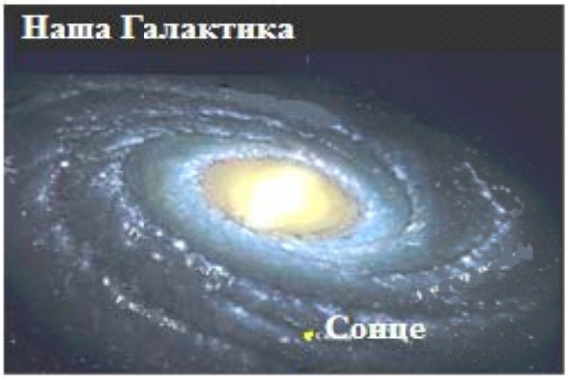
[2] Астрономічна одиниця – середня відстань від Землі до Сонця: 1 а.о. = $1.496 \cdot 10^{11}$ м.

Рис. 1.3. Пояс Койпера та хмара Оорта

За орбітою Нептуна (30 а.о. від Сонця) починається *пояс Койпера* – система льодяних астероїдів, за межами якого розташована *хмара Оорта*, що починається на відстані близько 1000 а.о. від Сонця (рис. 1.3). Це система ядер комет, члени якої епізодично з'являються поблизу Сонця. Очікується, що край Сонячної системи розташований на відстані близько 100 тис. а.о., що становить третину парсека[3], – це чверть відстані від Сонця до найближчої зорі Проксима.

Сонячна система належить до великої зоряної системи – Галактики, яка на небі спостерігається у вигляді Чумацького (чи Молочного) Шляху (рис. 1.4). Наша планетна система обертається навколо галактичного центру (що перебуває на відстані 8 кпк) майже у її площині. Галактика з діаметром 30 кпк має складну структуру. Зоряний диск оточують масивні кулясті зоряні скупчення, які простягаються від центру Галактики на відстань до 125 кпк. Чотирнадцять відомих галактик-супутників розташовані від центру Галактики не далі 254 кпк. Цю систему називають *сімейством*, або *підгрупою Галактики*.

а



б

Рис. 1.4. Молочний Шлях на земному небі (а) та місце в ньому Сонячної системи (б). Перпендикулярно до горизонту видно Зодіакальне світло

Найближчим до нашої підгрупи є *сімейство Андромеди*, яке схоже на нашу спіральну Галактику з оточуючими її галактиками-сателітами. Центральна галактика цього сімейства – Туманність Андромеди, масивніша

[3] Парсек (скорочено – пк) – стандартна відстань в астрономії, за яку приймається значення 1 пк = $3{,}09 \cdot 10^{16}$ м = = 3,26 св. року (за 1 *світловий рік* приймається відстань, на яку поширюється світло, рухаючись зі швидкістю c = $2{,}998 \cdot 10^{8}$ м/с впродовж року, що містить $3{,}16 \cdot 10^{7}$ с). Обґрунтованість наведеного значення та зв'язки з іншими одиницями вимірювання даються в розд. 8.

за нашу, а підгрупа в цілому приблизно така само за масою, як і сімейство Галактики. Обидва ці сімейства складають *Місцеву групу*, яка займає простір розміром близько 1,5 Мпк (рис. 1.5).

Поряд з Місцевою є й інші групи галактик, які входять до Місцевого надскупчення, що налічує більше 30 тисяч галактик. Ця структура галактик входить до складу *гіперскупчення* Ланіакея, за межами якого існують й інші такі ж потужні об'єднання галактик. Між ними перебувають області з заниженою просторовою щільністю галактик, що звуться *войдами*. І гіперскупчення, і войди утворюють *комірчасту структуру Метагалактики* (рис. 1.6). Загалом же Метагалактика є «пустою» – простір пустот – войдів (з діаметрами в декілька мегапарсек) превалює над упорядкованими об'єднаннями галактик: середня просторова густина Метагалактики у мільйон разів менша за середню густину Галактики.

Рис. 1.5. Місцева група галактик

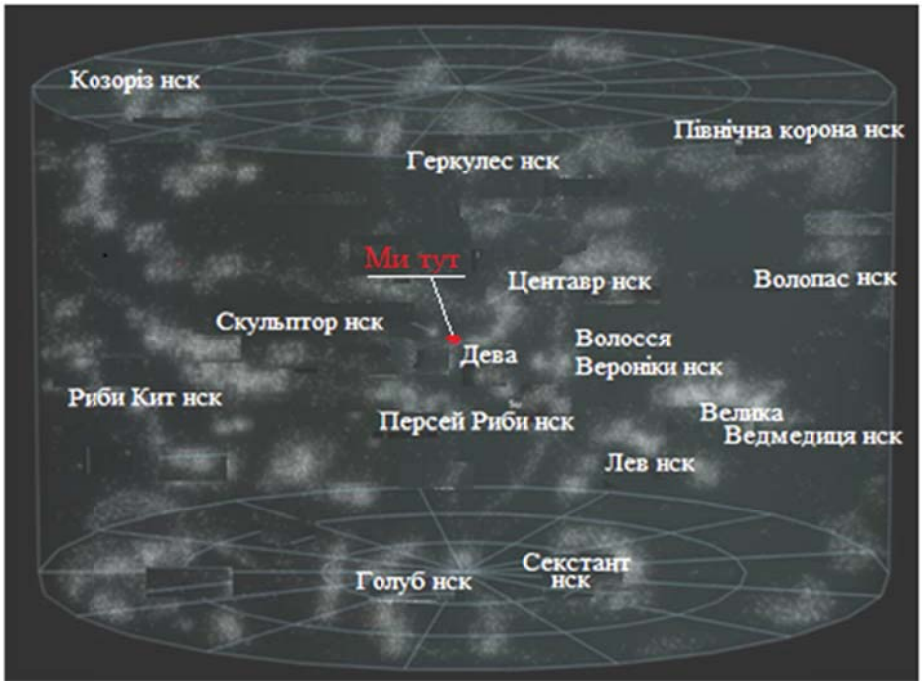


Рис. 1.6. Комірчаста структура околу Місцевого надскупчення

Метагалактика в цілому добре досліджена в області до 1500 Мпк, де нараховується кількасот мільярдів галактик. Загалом радіус Метагалактики становить ~ 10^{26} м і включає ~ 10^{80} нуклонів (протонів і нейтронів). Із цієї речовини складається ~ 10^{21}-10^{22} зір, що дорівнює кількості молекул у краплі

води з поперечником ≈ 2-4 мм (крапля!). Якщо в масштабі за 1 мм прийняти розміри Місцевої групи, то діаметр Метагалактики становитиме близько 5 метрів. Чи велика Метагалактика, що доступна для спостережень?

Як вже згадувалося вище, Всесвіт вивчається шляхом реєстрації електромагнітного випромінювання у різних діапазонах хвиль і проведення вимірів руху космічних об'єктів. Досвід, одержаний на основі спостережень, показав, що закони фізики у Всесвіті однаково проявляються у всіх її регіонах, включаючи земні умови. Прояв тих самих законів спостерігається у найвіддаленіших куточках Всесвіту, звідки світло проходить за час, сумірний з його віком (близько 14 млрд років). А це означає, що ці закони однаково діяли у всі часи існування Всесвіту, оскільки чим далі розташований космічний об'єкт, тим він молодший. Така властивість відображає *просторово-часову структуру Всесвіту*. Можна сподіватися, що й закони еволюції живої природи загальні для всього Всесвіту. Якщо це так, то ми у ньому не поодиноки. Але на сьогодні залишається не відомим, навіть принципово, – якою може бути різноманітність форм життя у Всесвіті.

Частина 1

СПОСТЕРЕЖНА ТА ПРАКТИЧНА АСТРОНОМІЯ

Основою астрономічних досліджень є спостереження небесних об'єктів. Упродовж існування астрономії змінювалися як предмет досліджень, так і засоби, які постійно розширюються й удосконалюються. Уявлення про астрономічні об'єкти будуються на основі аналізу світла, яке сприймається земним спостерігачем, і вивчення їх руху на *небесній сфері* – уявній сферичній поверхні довільного радіуса з центром місцезнаходження спостерігача (рис. 2.1). Вивчення руху небесних світил неможливе без фіксації їх положень на небесній сфері в певний момент часу. Отже, є необхідність в установленні певних астрономічних координат на небесній сфері, вибір яких пов'язується зі зручністю для подальшого аналізу космічних об'єктів, що спостерігаються.

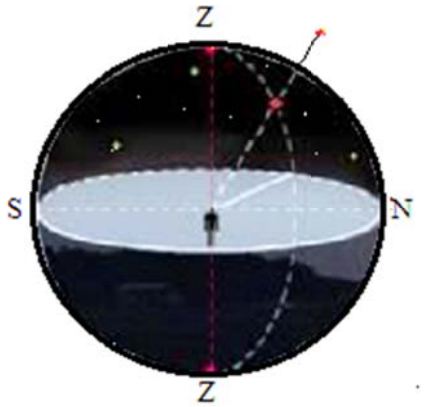


Рис. 2.1. Небесна сфера як уявна сферична поверхня, на яку проектуються небесні світила

Визначення координат світила в різні моменти часу створює базу для вивчення його пересування на небесній сфері, а обчислення відстані до нього дає змогу встановити просторовий рух астрономічного об'єкта. На основі подальшого встановлення закономірностей положень і руху космічних об'єктів будується їх просторовий розподіл та встановлюється істинний їх рух у космічному просторі.

Як вже згадувалось, основним засобом в астрономічних спостереженнях є телескопи, конструкції яких спеціально розробляються та модернізуються. Їх поєднання з відповідними приймачами електромагнітних хвиль, розробка нових методів досліджень та подальше впровадження в телескопічні спостереження забезпечує створення кінцевого «продукту»: певних астрономічних баз даних і каталогів. Описаний тут процес притаманний *практичній астрономії*. Саме вона забезпечує подальший дослідницький процес, який полягає в аналізі, узагальненні та встановленні

законів і закономірностей, за якими розвивається Всесвіт **і** проявляється як в цілому, так і в його складових – у вигляді відповідних астрономічних властивостей.

2. Астрономічні явища та їх спостереження

У безхмарний день на небесній сфері можна бачити Сонце, іноді Місяць, рідше на сході перед сходом або на заході відразу після заходу Сонця – Венеру та Меркурій. У безхмарну ніч на небі спостерігаються зорі, планети, в залежності від фази Місяць, інколи комети та метеори. Неозброєним оком в гарну погоду можна бачити з однієї точки земної поверхні близько трьох тисяч зір, планети Меркурій, Венеру, Марс, Юпітер і Сатурн.

Під час фіксації астрономічного явища необхідно вказати:

1) місцезнаходження його на небесній сфері;
2) час, коли воно відбулося;
3) освітленість, яку воно створило в місці спостереження.

У першому (якісному) наближенні достатньо вказати положення астрономічного явища у відповідному сузір'ї.

Рис. 2.2. Сузір'я навколо Полярної зорі. Наведені положення яскравих зір та показано стрілкою напрямок руху небесної сфери

Сузір'я та назви небесних світил. Для орієнтації серед небесних світил ще в давнину яскраві зорі почали об'єднувати в групи, які одержали назви *сузір'їв*: Лебедя, Цефея, Кассіопеї, Персея, Ліри тощо (рис. 2.2). Зорі в сузір'ї, як правило, не пов'язані між собою фізично[4]. Вони перебувають на різних відстанях від Сонця й їх об'єднує лише те, що вони окреслюють відповідний асоціативний візерунок. Нині небо розділено на 88 сузір'їв. Позначення зір, що перебувають у межах сузір'їв, часто прив'язують до їх назв. Зорі присвоюють або букву грецького алфавіту (найяскравішу позначають α, менш яскраву – β і т. д.[5]), або цифру, залежно від її розташування

[4]Виключенням може слугувати приклад з яскравими компонентами найближчого до Сонця розсіяного скупчення у сузір'ї Великої Ведмедиці, найяскравіші зорі якого і формують відповідний візерунок в цій області небесної сфери.

[5]Таке позначення запропонував І. Байєр (1572–1625) на початку XVII ст.

в сузір'ї (число зростає у порядку появи зір після їх сходу над горизонтом, під час спостереження їх із земного екватора[6]).

Назви сузір'їв наводяться або однією із державних мов, або латиною. В останньому випадку існують офіційні скорочення назв сузір'їв. Найяскравіші зорі, як правило, ще в давнину одержали власні, переважно арабські імена. Наприклад, найяскравіша зоря неба Сіріус відома ще і як α Великого Пса, або α Canis Major, або α CMa; найяскравішу зорю північного неба – Арктур позначають ще як α Волопаса ≡ α Bootes ≡ α Boo; більшість зір не мають власних імен, і називають їх за належністю до певного сузір'я, наприклад, 61 Лебедя ≡ 61 Cygnus ≡ 61 Cyg і т. д. Кратні зорі позначаються або шляхом вводу надрядкової цифри до грецької букви (π^1 Ori, π^2 Ori, …), або великими літерами латинського алфавіту в кінці назви зорі (α CMa A, α CMa B, 61 Cyg A, 61 Cyg B, …). Останні позначення введені і для субзоряних компонентів: тобто із позначення немає змоги визначити, яку природу має компонент системи (наприклад, Gl 229 A – зоря, Gl 229 B – субзоря, в цій системі наведені номери за каталогом Глізе – Gliese). Екзопланети позначаються малими латинськими літерами, починаючи з b (наприклад: Gl 876 b, Gl 876 c, Gl 876 d, таке позначення означає, в загальному випадку, що у поодинокого зоряного чи субзоряного компонента є три екзопланети, і т. д.).

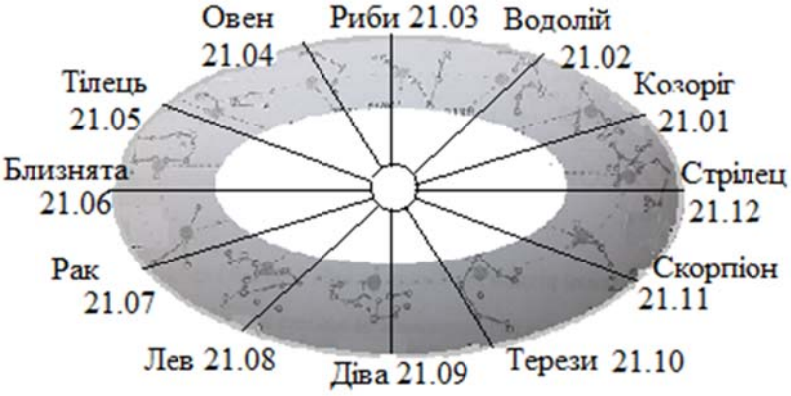


Рис. 2.3. Зодіакальні сузір'я, в яких перебуває Сонце у відповідних датах. Тринадцяте сузір'я – Змієносець, в якому Сонце перебуває 30.11÷17.12, не відносять до зодіакальних

Сузір'я інколи розділяють за належністю до північної чи південної півкуль або за належністю до екваторіальної області (йдеться про район, що прилягає до *небесного екватора*[7]). 12 *зодіакальних сузір'їв*[8] носять

---

[6] Позначення запропоноване Д. Флемстидом (1646–1719), а нумерація остаточно призначена Ж. Лаландом (1732–1807): на початку та в кінці XVIII ст., відповідно.

[7] Небесний екватор – велике коло на небесній сфері, рівновіддалене на 90° від полюсів світу.

назви, як правило, живих істот: Риби, Овен, Тілець, Близнята, Рак, Лев, Діва, Терези, Скорпіон, Стрілець, Козоріг, Водолій[9] (рис. 2.3).

Спостереження небесних світил. Планети спостерігаються в межах зодіакальних сузір'їв і впродовж року змінюють своє положення на небесній сфері (рис. 2.4). Планета знаходиться у *з'єднанні* з Сонцем, Місяцем або планетою, коли вона спостерігається в одному сузір'ї. В ясну та безмісячну ніч, краще за межами населеного пункту, можна бачити, як перетинає небо світла смуга складної будови, неоднакової ширини і яскравості – Молочний Шлях (рис. 1.4а). Ця видима смуга, що здіймається над горизонтом, змикається під ним у повне коло, що проходить через сузір'я: Одноріг, Малий Пес, Оріон, Телець, Візничий, Персей, Жираф, Кассіопея, Андромеда, Цефей, Ящірка, Лебідь, Лисичка, Ліра, Стріла, Орел, Щит, Стрілець, Змієносець, Південна Корона, Скорпіон, Косинець, Вовк, Південний Трикутник, Центавр, Циркуль, Південний Хрест, Муха, Кіль, Вітрила і Корма. Мале коло на небесній сфері[10], що проходить через середину Молочного Шляху і нахилене до небесного екватора під кутом 62°,6, визначає галактичний екватор.

а

б

Рис. 2.4. Рух планет серед зір (а) та пояснення особливостей такого руху (б)

За достатньої прозорості атмосфери, краще всього у безмісячну ніч чи в горах, в межах зодіакальних сузір'їв можна спостерігати клиноподібне *зодіакальне світло*, яке розташоване вздовж *екліптики*. Клин простягається на відстань $60 \div 80^{o}$ по обидва боки від Сонця та біля горизонту може досягати ширини $20 \div 30^{o}$ (рис. 1.4а).

Найяскравіші зорі групуються на небі не до Молочного Шляху, а до великого кола, нахиленого до галактичного екватора на кут близко 20°, який називають *поясом Гулда* (рис. 2.5). Найбільша концентрація цих зір зосереджена у поясі завширшки приблизно $20 \div 30^{o}$.

---

[8]Ці сузір'я, через які проходить екліптика – велике коло на небесній сфері, по якому рухається Сонце впродовж року.
[9]Розташоване між сузір'ями Терезів і Скорпіона сузір'я Змієносця (тринадцяте серед зодіакальних) астрологи до зодіакальних не зараховують.
[10] Це коло рівновіддалене від великого на 1°.

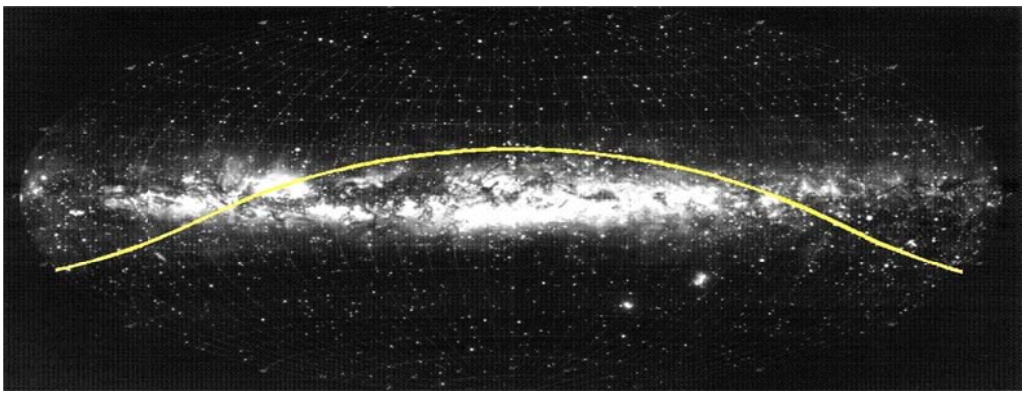


Рис. 2.5. Пояс Гулда не збігається з положенням Молочного Шляху: його об'єкти концентруються до лінії, наведеної жовтим кольором

За підвищеною концентрацією груп зір на небесній сфері виділяють *зоряні скупчення*. Неозброєному оку доступна обмежена їх кількість. Прикладом можуть слугувати *розсіяні скупчення* Стожари (у сузір'ї Тельця – рис. 2.6а) і Велика Ведмедиця (відповідно у названому сузір'ї). Стожари у космічному просторі перебувають істотно далі скупчення зір, яке асоціюється з цілим сузір'ям Великої Ведмедиці. Тому й площу на небесній сфері Стожари займають меншу. Уже в невеликий телескоп можна спостерігати ще й *кулясті скупчення зір*, зоряна густина у яких більша за ту, що спостерігається в розсіяних скупченнях (рис. 2.6б).

а

б

Рис. 2.6. Стожари (Плеяди) – одне з найближчих зоряних скупчень (а), кулясте скупчення М 80 (б)

Кулясті скупчення (які більш компактні за розсіяні) не доступні для спостереження неозброєним оком як у північній, так і в південній півкулях небесної сфери. У південній півкулі неозброєному оку доступні для спостереження дві галактики: Велика і Мала Магелланові Хмари (рис. 2.7). Неозброєному оку у північній півкулі на межі чутливості у сузір'ї Андромеди доступна для спостереження центральна частина велетенської галактики – Туманність Андромеди (рис. 2.8).

Кратні зорі й субзорі, розсіяні та кулясті зоряні скупчення, галактики є зоряними системами. Епізодично на небі з'являються малі тіла Сонячної системи, до яких належать *комети* (рис. 2.9), *болідн та метеори*[11] (рис. 2.10).

Рис. 2.7. Велика (справа) і Мала (зліва) Магелланові Хмари

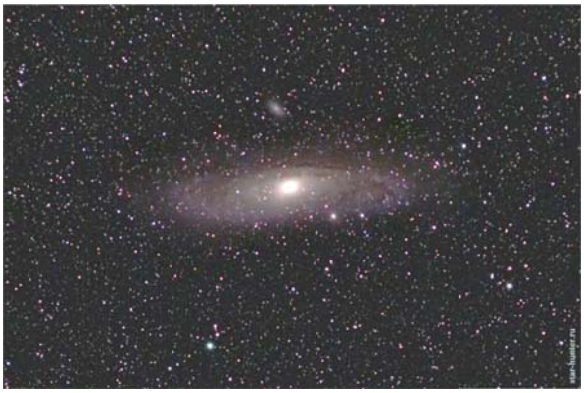


Рис. 2.8. Центральна область Туманності Андромеди

Рис. 2.9. Комета Гейла–Боппа – одна з найбільш вивчених малих тіл

а

б

Рис. 2.10. Болід (а) та метеор (б) на нічному небі

Відомо близько 660 комет, дещо більше 70 з яких спостерігалися два й більше разів. Площини їх орбіт не концентруються до певної площини

[11] Не слід плутати метеори з метеоритами. До метеоритів відносять ті малі космічні тіла, які досягають поверхні Землі. Метеори не падають на земну поверхню, вони або згоряють у атмосфері, або, пролітаючи на великій відстані від поверхні Землі, знову повертаються в космічний простір.

у просторі, тому можуть спостерігатися в будь-якому місці небесної сфери. Яскравість комет залежить від їх маси, хімічного складу та віддаленості від Землі та Сонця. На небі неозброєним оком вони можуть спостерігатися протягом декількох десятків ночей, дифузні *хвости комет* можуть сягати декількох десятків градусів.

Боліди та *метеори* – недовготривалі світлові явища у земній атмосфері. Їх свічення пов'язане із взаємодією газової оболонки Землі з космічною речовиною (різної маси та хімічного складу), яка прилетіла, як правило, з міжпланетного середовища зі швидкістю менше 70 км/с. Боліди мають більші кутові розміри, ніж у метеорів, їх рух супроводжується звуковими явищами. У випадку досягнення болідом земної поверхні залишається *метеорит*.

Штучні небесні тіла. До них відносять штучні супутники Землі (ШСЗ) і космічні станції, які спостерігаються поряд з космічними об'єктами (рис. 2.11).

Рис. 2.11. Міжнародна космічна станція на небосхилі (такий знімок отримують в результаті довгочасної експозиції)

Вони обертаються на навколоземних орбітах вище 100 км, чому відповідає період обертання більше ≈ 90 хвилин. В залежності від висоти орбіти їх кутове переміщення різне: чим вона вище, тим зміщення на небесній сфері менше. Меншому переміщенню на небесній сфері також відповідає більший період обертання ШСЗ. Нульовому кутовому зміщенню відповідає колова орбіта з періодом обертання, що дорівнює періоду обертання Землі навколо осі. Такі супутники перебувають на так званих *геостаціонарних орбітах*, яким відповідає відстань від поверхні Землі близько 36 500 км. Яскравість ШСЗ залежить від їх розмірів (призначення) і періоду обертання навколо власної осі. Як правило, вони періодично або аперіодично змінюють свій блиск завдяки обертанню навколо власної осі.

3. Небесна сфера та системи координат в астрономії

Для розв'язання переважної більшості астрономічних задач не достатньо вказати сузір'я, в якому спостерігалось астрономічне явище. Тому, в залежності від сформульованої задачі, вводяться певні астрономічні координати на небесній сфері, щоб вказати місцезнаходження космічного

об'єкта з необхідною точністю. Всі *астрономічні координати* можна розділити умовно на дві частини: прямокутні та сферичні. В них указуються:

а) вибрана площина у просторі;

б) полюси та їх положення;

в) координати, для яких наводяться

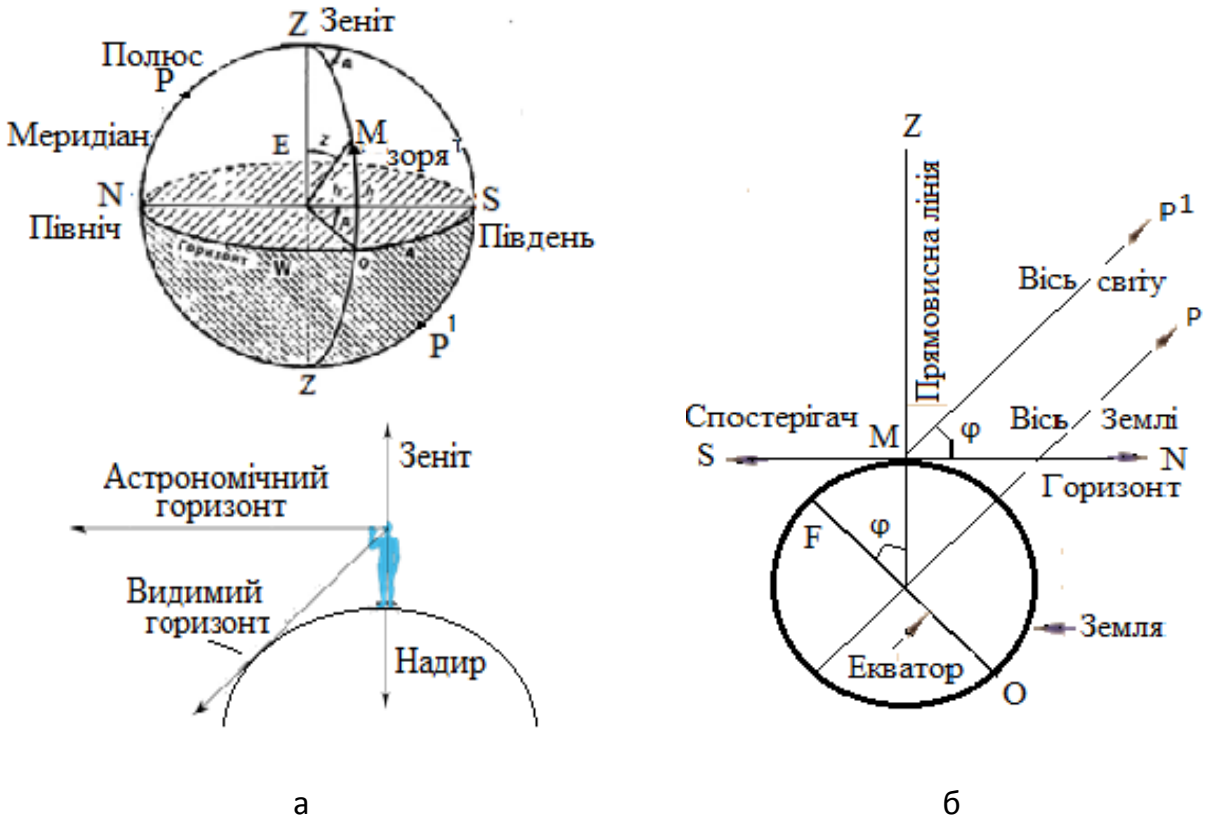
– точки відліку,

– вибір напрямку їх зміни,

– розмірність;

г) особливі точки та кути.

Горизонтальна система координат вводиться для визначення положення світил на небесній сфері в момент їх спостереження (рис. 3.1а).



а б

Рис. 3.1. Горизонтальна система координат (а) та її зв'язок з астрономічною широтою (б)

Вибраною є площина, дотична до сфери, за яку приймається форма Землі. Перетин з небесною сферою

● площини (велике коло) зветься *астрономічним* (математичним) *горизонтом*;

● прямовисної лінії з точки спостерігача вверх зветься *зенітом*, вниз – *надиром*; їх положення збігаються з полюсами системи координат.

Координатами світила є азимут *A* та кутова висота *h* над горизонтом. Особливими є точки півдня, заходу, півночі та сходу, які є перетином

напрямків на південь, захід, північ і схід у площині горизонту. Лінії, які утворилися від перетину площини, що включає положення спостерігача, та точок

- півдня та півночі – зветься *небесним меридіаном*;
- місцезнаходження небесного світила – *вертикалом*.

Відліки ведуться: по *азимуту* – від точки півдня за годинниковою стрілкою; *кутова висота* – від площини горизонту до полюсів (зеніту та надиру). Координати визначаються в градусах: азимут – від 0° до 360°; кутова висота – від 0° до $+90^o$ в сторону зеніту, від 0° до -90° до надиру.

Визначення положень небесних світил в цій системі координат дає змогу встановити місцезнаходження астрономічного явища (об'єкта) в момент, коли воно відбулося. Але це положення безперервно змінюється внаслідок добового обертання небесної сфери, що є суттєвим її недоліком. Тобто в цій системі координат положення світил залежать від часу їх визначення. Для уникнення цього недоліку необхідно вибрати таку систему координат, щоб упродовж добового обертання небесної сфери координати світил були незмінними. Це можливо, якщо компенсувати осьове обертання Землі.

Екваторіальна система координат. Продовження земної осі та площини екватора Землі до перетину їх з небесною сферою веде до установлення рухомої системи координат, якщо період її обертання прийняти таким, що дорівнює земній добі. У цьому разі небесна сфера й об'єкти, що розташовані на ній, будуть обертатися з однаковою кутовою швидкістю. Ця властивість і лежить в основі обрання *екваторіальної системи координат* (рис. 3.2).

Рис. 3.2. Екваторіальна система координат

В цій системі координат земна вісь паралельна лінії, яку звуть *віссю світу* (PP^1), а лінію, яка є результатом перетину перпендикулярної площини до цієї осі світу та проходить через центр Землі, звуть *небесним екватором*. Площина, що проходить через нього та центр Землі, і є вибраною площиною. *Північним і південним полюсами світу* звуть точки перетину осі світу з небесною сферою.

📖 Зауваження: *відповідно до рис. 3.1б, виконується наступна теорема про полюси світу: їх кутове значення над горизонтом дорівнює астрономічній широті φ місця спостереження зі знаками «+» чи «–» для північної та південної півкуль, відповідно.*

Річний рух Сонця в такій системі координат відповідає щодобовій зміні положення на великому колі небесної сфери (у напрямку, зворотному до добового руху) та окреслює лінію, що зветься *екліптикою*. З весни до осені Сонце перебуває в північній півкулі, з осені до весни – в південній. Дати, в яких відбувається перехід Сонця з південної в північну півкулю та навпаки, називають *днями весіннього й осіннього рівнодень*. На Землі в ці дати протяжність дня й ночі однакова. Нахил площин небесного екватора та екліптики дорівнює куту $\varepsilon = 23^o26'$. Він дорівнює куту між осями земного осьового обертання та нормаллю до *площини екліптики*, в якій обертається Земля навколо Сонця.

В такій системі прийняті дві координати: *пряме піднесення* α[12] та *схилення* δ. Відлік прямого піднесення йде від точки весіннього рівнодення в напрямку, протилежному обертанню годинникової стрілки, якщо дивитися з північного полюса, схилення – у напрямку від площини небесного екватора до полюсів. Розмірностями α є часова та градусна міри: за першою з них велике коло вздовж небесного екватора розбите на 24 години (h), кожна з яких дорівнює 60 часовим мінутам (m), які містять по 60 секунд (s); за другою – коло прямих піднесень відповідає 360°, градус якого містить 60', а 1' = 60". Тобто співвідношеннями між часовою і градусною мірами є: $1^h = 360^o/24^h = 15^o$ та, відповідно, $1^s = 15'$, $1^m = 15''$. Схилення змінюється відносно небесного екватора від 0° до $\pm 90^o$ у бік північного («+») та південного («–») полюсів, відповідно.

Відмінність кутових швидкостей обертання небесних тіл і небесної сфери зветься *власним рухом* небесних тіл[13]. Найбільші з них властиві тілам Сонячної системи. Зорі мають істотно менші власні рухи. В екваторіальній системі координат положення світил не залежить від часу спостереження, а змінюється лише в результаті їх власних рухів. Ця властивість покладена в основу визначення координат зір і субзір й інших об’єктів на небесній сфері. У відповідності до цієї системи координат сузір’я інколи розділяють за належністю до північної чи південної півкуль або за належністю до екваторіальної області (район, що прилягає до нього: $\delta \leq \pm 45^o$).

Екліптична система координат. В цій системі координат вибраною площиною є екліптика, а координатами є *екліптичні довгота* λ і *широта* β, які визначаються в градусній мірі: $[\lambda] = 0^o \div 360^o$,

---

[12] Окрім прямого піднесення α у якості другої координати може використовуватися годинний кут t світила, що є дугою небесного екватора від верхньої точки небесного екватора до кола схилення світила (така система називається першою екваторіальною системою). Особливістю такої системи є те, що в ній координати нерухомих зір є змінними: їх годинний кут змінюється з часом за рахунок обертання Землі. Тому для координат небесних об'єктів зручніше використовувати другу екваторіальну систему, де координати небесних об'єктів не змінюються за рахунок добового руху (другою координатою є пряме піднесення α), яка більш детально розглядається у даному розділі.

[13] Власні рухи більш докладно розглядаються в розд. 8.

[β] = $0^o \div \pm 90^o$ (+ 90° – відповідає північному екліптичному полюсу) – рис. 3.3. Як і в екваторіальній системі координат, відлік екліптичної довготи ведеться з точки весняного рівнодення і в тому ж напрямку, тобто проти годинникової стрілки відносно північного полюса екліптики; широти – від екліптичної площини в бік полюсів. Сузір'я, через які проходить річний шлях Сонця (екліптика), звуть зодіакальними – див. розд. 2 та рис. 2.3.

Галактичні системи координат зручні для установлення місцезнаходження світил в галактиці Молочний Шлях і за її межами. Основними з них є дві: сферична та прямокутна.

Сферична система координат (рис. 3.4). В південній півкулі Землі зір спостерігається більше, ніж у північній. Цим пояснюється те, що обчислена площина, до якої гуртуються (рівновіддалені) об'єкти Молочного Шляху на небесній сфері, відповідає малому колу, віддаленому від найближчого до нього великого на 1°. Саме обмежена цим великим колом площина і вибрана як *галактична сферична система координат*. Її координатами є галактичні довгота l та широта b, які мають градусну розмірність та змінюються в межах: $l = 0 \div 360^o$ (в напрямку проти годинникової стрілки, якщо дивитися з північного полюса) і $b = 0^o \div \pm 90^o$ («+» – у бік північного полюса). Відлік координат вибраний: $l = 0^o$ – на центр і $b = 0^o$ – на площину Галактики. Кут між площинами галактичного та небесним екваторами становить $62^o.6$.

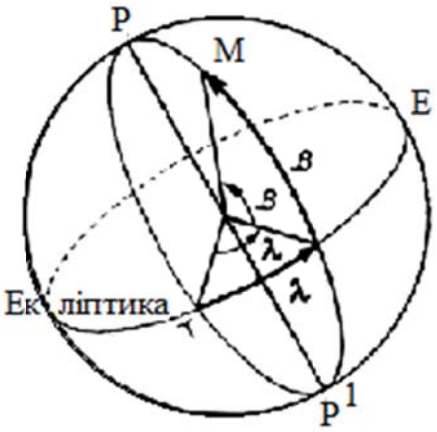


Рис. 3.3. Екліптична система координат

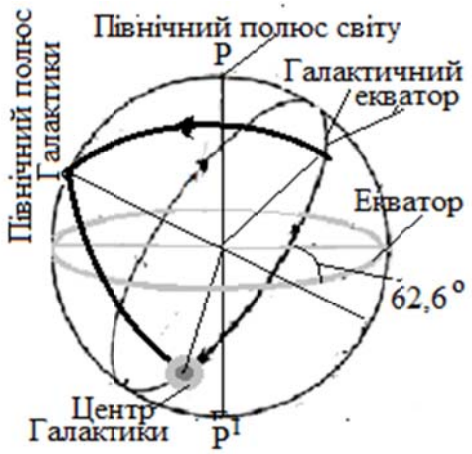
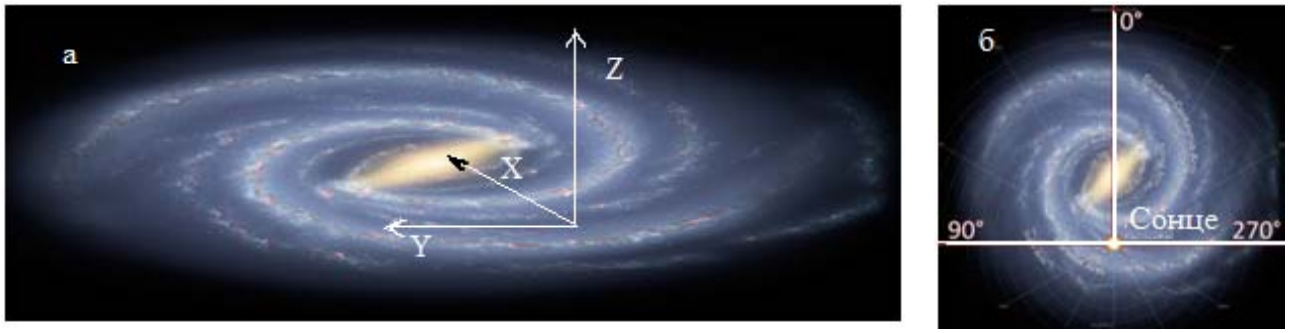


Рис. 3.4. Галактична система координат на сфері

Прямокутна система координат (рис. 3.5). Вибрана площина така сама, що і в сферичній системі координат, в якій лежать дві координати X і Y. Вони направлені: X – на центр Галактики (тобто її галактична довгота становить $l = 0^o$), Y – збігається з напрямком руху Сонця навколо центра



а б

Рис. 3.5. Галактична прямокутна система координат:
а – у просторі, б – на площині

Галактики. Координата Z спрямована на північний полюс Галактики: $b = 0^o \div +90^o$. Розмірності в такій системі координат є, як правило, кілопарсеки: $[X] = [Y] = [Z] =$ кпк, що дає змогу, зокрема, за їх значеннями обчислювати відстані до них за *узагальненою теоремою Піфагора*:

$$d = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}. \qquad (3.1)$$

4. Видимий рух небесних світил

Якщо дивитися на південь (у північній півкулі), небесні світила сходять на східній частині горизонту, рухаються за годинниковою стрілкою зліва направо[14], *кульмінують*[15] в *точці півдня,* підіймаючись над горизонтом, і опускаються до горизонту в західній його частині. Такий рух під час спостереження з земної поверхні притаманний всім світилам. Рух космічних тіл Сонячної системи має свої певні особливості.

Річний рух Сонця окреслює екліптика, яка не збігається з небесним екватором, а перетинає його під кутом $\varepsilon = 23^o26'$. Планети Сонячної системи рухаються навколо Сонця в площинах, близьких до екліптики (рис. 4.1 а). Це добре видно на зображенні, зафіксованому з космічного апарата «Клементина» (рис. 4.1 б).

Щодобово Сонце у своєму русі зміщується по екліптиці приблизно на 1° ($360^o/365.25$) у східному напрямку. Найвище Сонце над горизонтом підіймається в момент кульмінації у *місцевий полудень*[16] в день *літнього*

---

[14] У південній півкулі, відповідно, – справа наліво, якщо стояти обличчям до північної сторони горизонту.

[15] Кульмінацією світила називають перетин його лінії великого кола, що проходить через точки півдня і півночі та перпендикулярна до лінії горизонту. Кульмінація відбувається двічі за добу. При цьому визначають верхню та нижню кульмінації, перша з яких відповідає перебуванню світила над горизонтом, друга – під горизонтом.

[16] Момент часу для відповідної точки на земній поверхні, що відповідає перетину Сонцем небесного меридіана, коли спостерігається його верхня кульмінація. Місцевій півночі відповідає час, коли Сонце перебуває в нижній кульмінації, тобто найнижче під горизонтом.

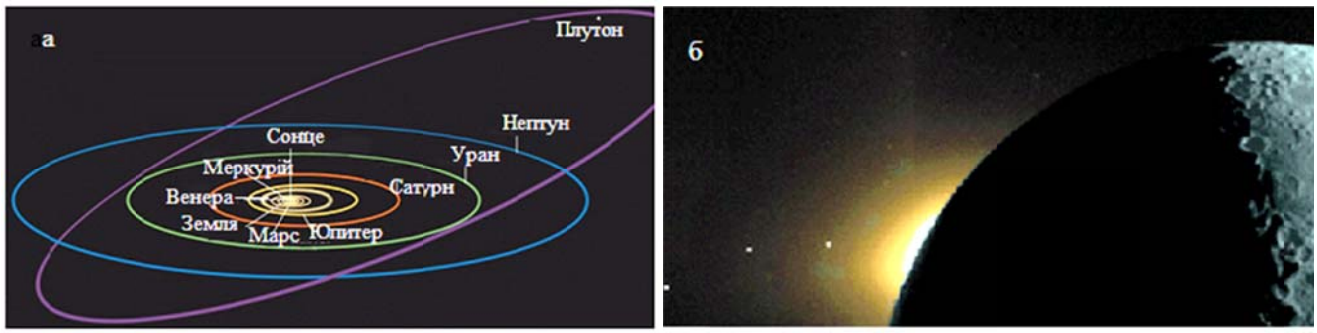


Рис. 4.1. Схема Сонячної системи (а) та положення Меркурія, Марса, Сатурна (зліва направо) відносно Сонця над темною частиною Місяця, згідно з зображенням, одержаним з КА «Клементина» (б)

сонцестояння, якому відповідає найкоротша ніч упродовж року[17] (рис. 4.2). Далі Сонце, рухаючись по екліптиці, перетинає небесний екватор у день *осіннього рівнодення*, якому відповідає однакова тривалість дня та ночі. Надалі Сонце спостерігається нижче всього над горизонтом упродовж року в місцевий полудень у день *зимового сонцестояння* (21-22 грудня), коли тривалість дня найменша. В подальшому русі Сонце знову щоденно кульмінує все вище і вище опівдні, а в день *весняного рівнодення* знову перетинає небесний екватор. В цей день Сонце точно сходить у *точці сходу*[18] та заходить за горизонт точно у *точці заходу*[19]. Чим ближче до літа, тим схід Сонця більше просувається до північного сходу, а захід – до північного заходу, досягаючи максимального значення в день літнього сонцестояння. Далі Сонце починає пересуватися у зворотному напрямку та в день осіннього рівнодення воно знову точно сходить у точці сходу й заходить у точці заходу. Максимальне зміщення точки сходу Сонця до південного сходу та його заходу до південного заходу відбувається в день зимового сонцестояння.

Рис. 4.2. Рух Сонця над горизонтом вдень у різні пори року

---

[17] Із року в рік дата цього дня змінюється (відповідає 21–22 червня) через те, що кількість повних осьових обертів Землі не збігається з тривалістю року (рік, як відомо, складається з 365.25 діб).

[18] Точка сходу розташована зліва на 90° від точки півдня в місці перетину небесного екватора з математичним горизонтом (яким є велике коло небесної сфери, утворене від перетину площини, перпендикулярної до лінії виска, що збігається з напрямком сили тяжіння).

[19] Точка заходу розташована справа на 90° від точки півдня в місці перетину небесного екватора з математичним горизонтом.

Висота Сонця в місцеві полудні змінюється впродовж року через те, що небесний екватор нахилений до екліптики на кут ε. Це веде до зміни схилення[20] Сонця впродовж року. В місцевий полудень у день літнього сонцестояння, коли пряме піднесення Сонця $\alpha = 6^h$, схилення є максимальним $\delta = \varepsilon = +23^o26'$, аналогічно, через півроку, в день зимового сонцестояння – $\alpha = 18^h$, $\delta = -23^o26' = -\varepsilon$, тобто схилення – мінімальне. Це впливає на значення висоти Сонця над горизонтом, яке воно приймає в місцеві полудні впродовж року. В дні рівнодень Сонце перебуває точно на небесному екваторі, схилення якого, за визначенням, є $\delta = 0^o$, а на небесній сфері, згідно з теоремою про полюси світу, воно розташоване від зеніту на кутовій відстані z, рівній широті земного спостерігача φ. В дні літнього та зимового сонцестоянь зенітна відстань Сонця є меншою $(z - \varepsilon)$ і більшою $(z + \varepsilon)$ на значення кута $23^o26'$, відповідно. Тобто в день літнього сонцестояння у місцевий полудень Сонце підіймається на найбільшу кутову відстань над горизонтом, а в день зимового сонцестояння – на найнижчу, що спричиняє у ці дати найдовшу та найкоротшу тривалості дня і ночі. У дні весняного й осіннього рівнодення – вони рівні. Більш точні вимірювання положень центра Сонця показують, що він відносно екліптики упродовж місяця описує ще й еліпс з великою піввіссю 6″,4356[21], який відображує рух Землі навколо центра мас в системі Земля–Місяць.

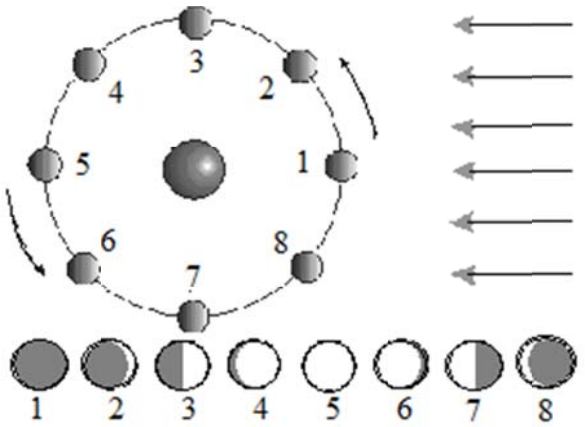


Рис. 4.3. Рух Місяця відносно Землі і променів Сонця та відповідна йому зміна місячних фаз

Рух Місяця здійснюється також із заходу на схід по великому колу небесної сфери, який називається місячним шляхом. Місяць робить повний оберт на небесній сфері за 27.32 доби[22], щодобово пересуваючись приблизно на 13° ($360^o/27.32$). Площина місячного шляху нахилена до екліптики під кутом $i = 5^o09'$. Оскільки кутова швидкість Місяця по небесній сфері більша за кутову швидкість Сонця, спостерігається зміна *місячних фаз*[23], що відображають взаємне положення цих світил відносно Землі (рис. 4.3).

[20] Схилення – мається на увазі друга координата екваторіальної системи.
[21] Це значення називають горизонтальним паралаксом земної орбіти відносно барицентра системи Земля – Місяць.
[22] 27,32 доби – період обертання Місяця навколо Землі відносно зір називається *сидеричним місяцем*.
[23] Фази Місяця – різні форми видимої його частини поверхні впродовж геоцентричного руху.

Молодику відповідає положення «1», коли Місяць і Сонце перебувають на небесній сфері точно в одному напрямку. Випереджаючи сонячне переміщення по небесній сфері, місячний диск все більше освітлюється справа (це явище так спостерігається в північній півкулі у вечірні часи). *Перша чверть* Місяця досягається, коли кутова відстань між Сонцем і Місяцем дорівнює 90° (права половина місячного диска спостерігається освітленою – положення «3»). *Повний Місяць* спостерігається опівночі – за місцевим часом, якому відповідає положення Сонця в нижній кульмінації, коли кутова відстань між Сонцем і Місяцем досягає 180°. В цей час спостерігається повне освітлення Сонцем місячного диска – положення «5». *Остання чверть* Місяця досягається, коли кутова відстань між Сонцем і Місяцем сягає 270° (у північній півкулі спостерігається освітлення лівої половини диска) – положення «7». Ця фаза Місяця спостерігається з опівночі до полудня (за місцевим часом). Проміжок часу між двома послідовними однаковими фазами Місяця називають *синодичним місяцем*, який становить 29,53 доби.

Затемнення Сонця та Місяця. Окрім зміни місячних фаз, пов'язаних з рухом Місяця навколо Землі, щорічно спостерігаються ще й до п'яти сонячних і до трьох *місячних затемнень*: покриття Сонця Місяцем і Місяця Землею, відповідно, коли їх центри знаходяться на одній прямій. Спостереження *сонячних затемнень* залежить від місцезнаходження земного спостерігача, оскільки максимальний діаметр конуса місячної тіні не перебільшує 270 км (рис. 4.4).

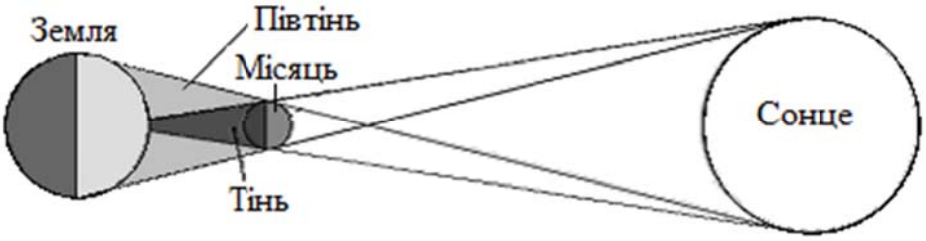


Рис. 4.4. Схема сонячного затемнення

Якщо спостерігач перебуває всередині такої 270 кілометрової смуги, він зможе бачити повне сонячне затемнення упродовж від 2 до 12 хвилин. *Повне кільцеве затемнення* Сонця спостерігається у тому разі, коли тіньовий конус від Місяця закінчується між ним і Землею. У цьому разі, коли Земля, Місяць і Сонце перебувають в околі лінії, що проходить через їх центри, на тлі диска Сонця спостерігається Місяць меншого кутового діаметра за сонячний. Перебування у півтіні призводить до спостереження *часткового сонячного затемнення*. За межами конуса півтіні затемнення не спостерігається.

Коли Місяць потрапляє в конус земної тіні (рис. 4.5), спостерігається місячне затемнення на всьому нічному боці Землі. Місяць має при цьому буро-червоний колір, внаслідок розсіяння сонячного світла в земній атмосфері (розсіюються переважно блакитні промені, а проходять червоні). Повна фаза затемнення продовжується до двох годин.

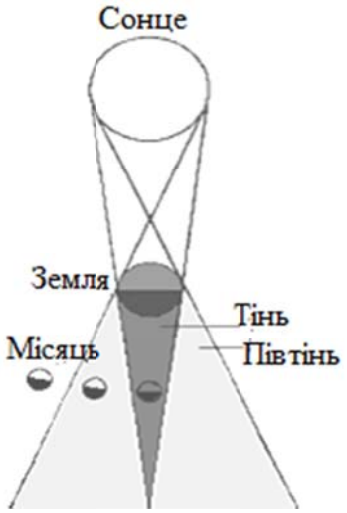


Рис. 4.5. Схема місячного затемнення

Послідовність сонячних і місячних затемнень майже повністю повторюється через кожні 18 років, 11 діб і 8 годин. Цей період називається *саросом*, упродовж якого спостерігається 70 затемнень, з яких 41 сонячне і 29 місячних. В одній і тій самій точці земної поверхні повне сонячне затемнення спостерігається в середньому один раз за 200–300 років.

Конфігурації планет – ситуативне розміщення їх відносно Землі на небесній сфері в результаті руху навколо Сонця. Річний напрямок руху Сонця і Місяця (з заходу на схід) називається *прямим*[24]. Планети також більшу частину часу переміщуються у прямому напрямку. За своїм видимим рухом планети ділять на *нижні* (Меркурій і Венера) та *верхні* (решта, за виключенням Землі)[25]. Нижні планети спостерігаються в променях вечірньої та ранкової зорі в межах найбільшого віддалення від Сонця, яке називають східною та західною *елонгацією*. Тобто знаходяться від Сонця не далі: Меркурій – 18–28°, Венера – 45–48°. Верхні планети можуть спостерігатися протягом усієї ночі. Положення на небі планети, коли вона перебуває в протилежному до Сонця сузір'ї (у зодіакальному ряді), називають протистоянням. Квадратурою зовнішньої планети і Місяця називають положення, якому відповідає їх кутова відстань від Сонця 90°. Перелічені конфігурації, що утворюють із Землею внутрішні і зовнішні планети, наведені на рис. 4.6.

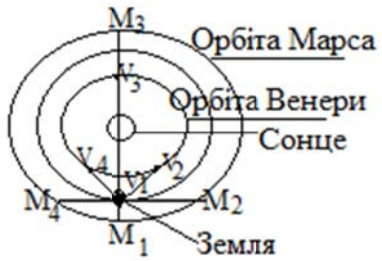


Рис. 4.6. Конфігурації внутрішньої (Венера) і зовнішньої (Марс) планет. Показані положення планет: у протистоянні (M_1), квадратурах (східна – M_4, західна –M_2), елонгації (східна – V_4, західна – V_2) та сполученнях (M_3, нижнє –V_1, верхнє –V_3,)

[24] *Зворотним рухом небесних тіл* називають їх переміщення зі сходу на захід.
[25] Згідно із сучасним розподілом, їх розрізнюють як внутрішні та зовнішні по відношенню до орбіти Землі.

Видимий рух Сонця серед зір. Крім періодичного руху Сонця по екліптиці, є і систематичне його зміщення серед зір (доступних для спостережень неозброєному оку) приблизно у напрямку зорі Веги. Про це свідчать: 1) найменші зміщення зір в околі Веги та Сіріуса та найбільші – в поясі на небесній сфері, що розташований приблизно на 90° від згаданих зір, та 2) променеві швидкості зір з різним знаком, більшість у напрямку, близькому до Веги, є від'ємними, у напрямку на Сіріус – додатними[26]. Така ситуація інтерпретується рухом Сонячної системи у просторі відносно яскравих зір приблизно у напрямку на Вегу (рис. 4.7). Зміщення зір на небесній сфері та їх рух по променю зору були виявлені після застосування телескопів в астрономії, відкриття *ефекту Допплера*[27] і розробки низки спеціальних астрометричних і астрофізичних методів.

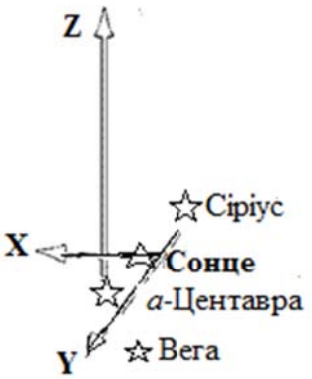


Рис. 4.7. Рух Сонця відносно яскравих зір

Виявилося, що вектори руху та значення швидкостей зоряних систем настільки різні, що без додаткових спеціальних досліджень немає змоги встановити істинну *структуру Метагалактики*.

Для розв'язання такої задачі розроблені спеціальні спостережні астрономічні методи, теорії та моделі, за допомогою яких будується структурна і кінематична картина Мегасвіту.

5. Час і календар

Одні і ті самі астрономічні події, як правило, спостерігаються з різних точок земної поверхні або з космічних обсерваторій. Фіксування цих подій, як правило, відповідає часу, прийнятому в тій державі, де перебуває спостерігач. Тобто в різних обсерваторіях час фіксації події приписується різний. Щоб уникнути цієї невідповідності, з 1 січня 1925 року світова спільнота прийшла до згоди встановити *всесвітній час*, значення якого б не залежало від місця спостереження тієї чи іншої події. Тобто будь-яка астрономічна подія, що відбувається, має бути приведена до певного універсального значення часу. Проведення такої процедури залежить від довготи, на якій перебуває спостерігач. З іншого боку, в 1884 році 26 держав прийшли до згоди ввести *поясний час*, за якого земна куля поділена на 24 часові пояси уздовж, як правило, певних

[26] Зміщення зір на небесній сфері та променеві швидкості більш докладно розглядаються в розд. 8.

[27] Ефект Допплера – зміна істинної довжини хвилі (чи частоти) випромінювання рухомого джерела відносно «нерухомого» спостерігача.

меридіанів, у межах яких прийнятий відповідний (*державний*) час. Це необхідно ураховувати для визначення істинного часу, коли відбулася та чи інша астрономічна подія чи установлення хронології подій.

Загальні визначення. Основними характеристиками сучасної лічби часу є доба та рік. Протяжність місяця – проміжна одиниця часу, яка вводиться шляхом прийняття (домовленості) в ньому певної кількості діб. В основі *визначення доби* лежить протяжність осьового обертання Землі, *року* – протяжність її обертання навколо Сонця.

Протяжність осьового обертання Землі визначають відносно зір і відносно Сонця. В першому випадку це відповідає значенню *зоряної доби* – t_{ds}, у другому – *сонячній добі* t_{dS}. За астрономічними спостереженнями зоряна доба коротше сонячної на $\Delta t_{Ss} = t_{dS} - t_{ds} = 3$ хв 55.909 с (рис. 5.1).

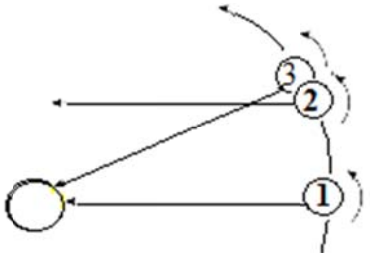


Рис. 5.1. Чому зоряна доба не дорівнює сонячній: положення 1 та 2 – відповідають зоряній добі, 1 та 3 – сонячній. Масштаб не дотриманий

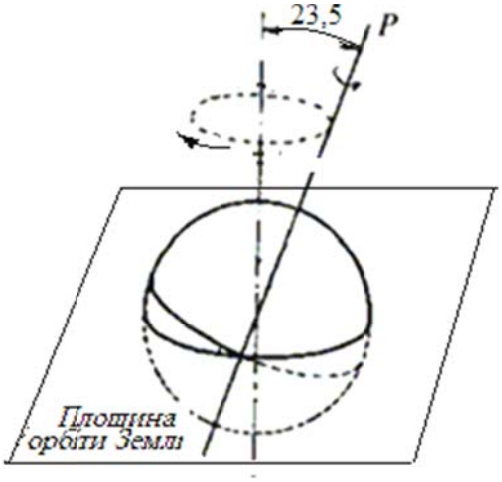


Рис. 5.2. Прецесія земної осі

У повсякденності користуються сонячною добою, яка є проміжком часу між двома однойменними, послідовними кульмінаціями Сонця і на початок 2000 року становила $t_{dS} = 24$ год 00 хв 0,002 с. За *початок доби* приймається його нижня кульмінація. Оскільки на різних довготах Землі доба починається в різний час, то таке його обчислення зветься *місцевим сонячним часом*.

Рік також обчислюється двома способами: як період орбітального руху Землі навколо Сонця відносно зір – T_s і тривалістю часу руху Сонця по екліптиці між послідовними перетинами точки весняного рівнодення – T_t. В першому разі такий рік називають *сидеричним*, в другому – *тропічним* або *сонячним роком* і використовують для літочислення. За відсутності *прецесії*[28] земної осі (рис. 5.2) значення цих «років» були б однакові.

[28] Прецесія (земна) – зміна напрямку у просторі моменту імпульсу Землі через відсутність у неї «строго» сферичної форми, наявності нахилу осі обертання до площини орбітального руху та впливу гравітаційних сил з боку інших світил. Більш докладно – див. розд. 28.

Наявність же прецесії веде до зміщення точки весняного рівнодення у напрямку назустріч річному руху Сонця по екліптиці, в результаті чого тропічний рік є коротшим за зоряний вік на $\Delta T_{st} = T_s - T_t = 20$ хв 24 с $= 0{,}01417^{\mathrm{d}}$, за їх абсолютних значень: $T_s = 365{,}2564^{\mathrm{d}}$, $T_t = 365{,}2422^{\mathrm{d}}$ ($\mathrm{d} = t_{dS} = 24 \cdot 60 \cdot 60^{\mathrm{s}} = 86400$ с – протяжність сонячної доби). З урахуванням визначення зоряних і сонячних діб виконується рівність:

$$\left(T_t + 1^{\mathrm{d}}\right)\left(1^{\mathrm{d}} - \Delta t_{Ss}\right) = T_t \cdot 1^{\mathrm{d}}, \tag{5.1}$$

тобто за один тропічний рік «набігає» ще один зоряний день. Значення ΔT_{st} дає можливість обчислити зміщення точки весняного рівнодення по екліптиці за рік:

$$\frac{\Delta T_{Ss}}{T_t} \cdot 360 \cdot 60 \cdot 60'' = 50{,}27'' \tag{5.2}$$

і дає змогу обчислити *повний цикл* (або період) *земної прецесії*, під яким розуміється протяжність одного обертання осі Землі у просторі відносно зір:

$$T_P = \frac{T_t}{\Delta T_{Ss}} \approx 25780 \text{ років.} \tag{5.3}$$

🕮 Зауваження: *Оскільки Земля навколо Сонця рухається не по колу, а по еліпсу, має нахил осі обертання до екліптики, наведені значення сонячної доби є середньорічними і впродовж року дещо змінюються. Протяжність сонячного року також хоча й повільно, але з роками дещо змінюється через збурення орбітального руху Землі найближчими до неї планетами.*

Всесвітній та поточний час. Шкала часу основана на обертанні Землі навколо своєї осі, а отже, обчислення часу залежить від місцезнаходження, яке характеризує земна географічна довгота λ. За нуль-пункт часу приймається нульовий меридіан ($\lambda = 0^{\mathrm{h}}$), на якому розташована Гринвіцька обсерваторія в Англії. Місцевий час тут збігається з *всесвітнім часом* T_0. *Місцевий сонячний час* спостерігача, який перебуває на *географічній довготі* λ – T_λ, пов'язаний зі всесвітнім часом очевидним співвідношенням:

$$T_\lambda = T_0 + \lambda, \tag{5.4}$$

маючи на увазі, що розмірності довготи та часу є однаковими: часові години, хвилини, секунди.

Принципово такий самий зв'язок існує з *поясним часом*:

$$T_{п} = T_0 + N_{п}, \tag{5.5}$$

де $N_{п}$ – номер поясу. 24 пояси на земній кулі встановлені, як правило, через 1^h – одну годину по географічній довготі, з інтервалом $\pm 7.5^o$ від кожної з них на захід і схід, з урахуванням державних кордонів країн (рис. 5.3). У країн з великою протяжністю до довготі існують декілька поясів.

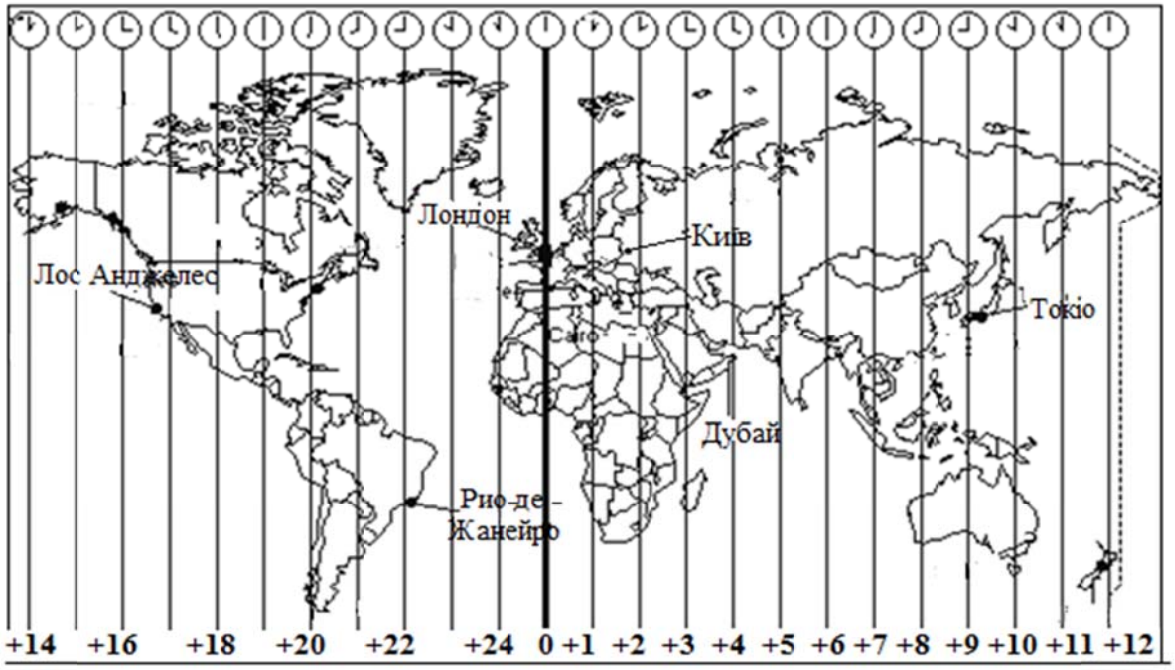


Рис. 5.3. Часові пояси на земній кулі

Україна належить до другого поясу, центру якого відповідає географічна довгота Києва $\lambda \approx 30^o \approx 2^h$ (тобто $N_{п} = 2$). Майже вся континентальна Західна Європа живе в першому поясі ($N_{п} = 1$), який зветься *середньоєвропейським*. Британські острови та Португалія розташовані в нульовому часовому поясі – $N_{п} = 0$. В деяких країнах, і в Україні в тому числі, з останньої неділі березня по останню неділю жовтня вводиться літній час:

$$T_{л} = T_{п} + 1^h. \tag{5.6}$$

Зміна дати не збігається з нульовим меридіаном. Початок відліку нової доби (і нового року) відбувається під час перетину меридіана з довготою $\lambda = 180^o = 12^h$: під час руху через нього в напрямку зі сходу на захід; під час руху у зворотному напрямку – дата змінюється на вчорашню. Ця межа (лінія зміни дати) проходить від північного полюса,

огинає східну частину Азії (через Берингову протоку), з заходу Алеутські острови (так, що вони залишаються у вчорашній даті), нижче екватора – зі сходу Меланезію та Нову Зеландію й далі проходить уздовж виділеного меридіана по Тихому океану до південного полюса.

Календарі, літочислення та юліанські дати. Під календарем розуміють систему лічби тривалих проміжків часу, що базується на певних періодичних рухах світил. Періоди повторюваності положень Сонця серед зір визначає такий проміжок часу, як рік. Основу дроблення його на місяці й неділі історично відтворюють встановлені закономірності повторюваності фаз Місяця. Це проміжки часу між молодиком, першою чвертю, повною та останньою чвертю. Користування поняттями «пори року» є наслідком встановлення повторюваності днів весняного та осіннього рівнодень і літнього та зимового сонцестоянь. Дати цих перерахованих явищ наводяться в *астрономічних календарях*[29]. В *побутових* же *календарях* такі поняття, як відповідний місяць чи тиждень, вже не прив'язуються до настання місячних фаз. Початок настання пір року також обмежується наведенням відповідних місяців, що належать до них.

Першоосновою сучасного був *юліанський календар*, введений з 1 січня 45 р. до н.е. в Римській імперії[30]. Саме в цьому календареві було взято за основу поняття *юліанського року* тривалістю 365,25 доби, найближчого до тривалості тропічного року. Три роки в цьому календареві тривали по 365 діб, четвертий вводився як *високосний* – 366 діб. Спочатку такий календар цілком улаштовував користувачів. Але згодом почала проявлятися відмінність між тривалістю юліанського та тропічного року, яка становить всього 365,25 – 365,2422 = 0.0078 доби. Цьому значенню відповідає те, що через кожні 1/0.0078 = 128 років дата зсувається на одну, більш ранню добу. Це призвело до того, що в XVI ст. дата весняного рівнодення змістилася на 10 діб: з 21 на 11 березня. Виникла необхідність реформи календаря, що й було зроблено за рахунок: по-перше, зсуву дати на момент введення – на 11 діб вперед; по-друге, вилучення певних років з категорії високосних. Було запропоновано не вважати високосними такі столітні роки, число сотень в яких не ділиться без остачі на 4 (наприклад: 1700, 1800, 1900, 2100 і т. д.), тобто тривалість в них року становить 365 діб. Цього виявилося достатнім, щоб похибка в 1 добу набігала за ≈ 3300 років (враховуючи, що тривалість *григоріанського року* становить 365,2425 діб, відрізняючись від

---

[29] Астрономічний календар складається, як правило, на поточний рік і є довідником, який містить дані про положення та рух тіл Сонячної системи і космічних об'єктів за її межами. В ньому наводяться також відомості про затемнення Сонця та Місяця, появи комет і метеорних потоків та умов їх спостереження, різні довідкові матеріали. Наводяться і статті щодо подій, явищ, фактів, пам'ятних історичних подій, річниці яких припадають на рік видання календаря.

[30] Цей календар був введений за правління Юлія Цезаря (100–44 рр. до н.е.) за розробкою астронома Созігена Александрійського (I ст. до н.е.).

тропічного на 0,0003 доби). Такий календар одержав назву григоріанського[31] і використовується дотепер.

Системою лічби часу є *літочислення*, складовими якого є десятиліття, століття, тисячоліття, ера – проміжок часу від певного регламентованого початку відліку років. Літочислення за сучасною шкалою ведеться від початку *нашої ери*, в якій на початок його установлення не було нульового року[32]. Події, що відбувалися раніше, фіксуються часом *до нашої ери* з початку першого року і далі в минуле. Послідовність історичних (і астрономічних у тому числі) подій звуть *хронологією*.

Для визначення дат подій, які відбувалися в останні ≈ 2,5 млн днів, запропоновано[33] ввести так звані *юліанські дати* (JD) як астрономічний спосіб їх обчислення, вибравши за початок числення гринвіцький полудень 1 січня 4713 р. до н.е. за юліанським календарем[34], вважаючи його нульовим днем: JD 0,0 (число після коми позначає дробову частку доби з відліком від полудня, тобто 12 годин). Нижче наводиться табл. 5.1 для числа юліанських днів, що минули від початку їх числення – JD 0,0 на полудень 1 січня наведених років.

Таблиця 5.1

Співвідношення дат юліанського та григоріанського календарів і значення юліанських днів

Юліанський календар		Григоріанський календар	
Дата	JD	Дата	JD
До нашої ери			
1.01. 4713 12^n	0,0		
11.10. 607 –«–	1 500 000,0		
1.01. 500 –«–	1 538 799,0		
1.01. 1* –«–	1 721 058,0		
Наша ера			
1.01. 0 12^n	1 721 058,0		
– « – 1 –«–	1 721 424,0		
1.01. 500 –«–	1 903 683,0		
1.01. 1000 –«–	2 086 308,0		
1.01. 1600 –«–	2 305 458,0	11.01. 1600 12^n	2 305 458,0
		1.01. 1900 –«–	2 415 021,0
		– « – 2000 –«–	2 451 545,0
		– « – 2020 –«–	2 458 850,0
		31.08. 2132 –«–	2 500 000,0

* – 1.01. 1 до н.е. = 1.01. 0 н.е.

Як видно з наведеної таблиці, 31 серпня 2132 року сповниться точно 2,5 млн діб від дня започаткування юліанських дат.

Конвертер дат григоріанського і юліанського календарей он-лайн:
http://graecolatini.bsu.by/htm-different/date-converter.htm

[31] Реформа цього календаря була проведена папою Григорієм XIII за розробкою Луіджі Ліліо (1520–1576).
[32] Близько 2000 років у математиці була відсутня цифра «0». За перший рік літочислення прийнято *Різдво Христове.*
[33] Ж. Ж. Скалігер (1540–1609) запропонував і таку систему числення, і її назву: на честь свого батька Юлія.
[34] За григоріанським календарем обрана дата відповідає 24 листопада 4714 р. до н.е.

6. Випромінювання космічних об'єктів

Астрономічна наука досягла такого рівня розвитку, що вважається всехвильовою. Тобто з'явилася можливість спостерігати астрономічні об'єкти у всьому діапазоні електромагнітних хвиль. На поверхні Землі ж можливості спостережної астрономії обмежені переважно видимим діапазоном хвиль через вибіркову пропускну спроможність земної атмосфери. Тут основною мірою аналізу освітленості, що створюють астрономічні об'єкти, є їх *зоряна величина* – несистемна одиниця введена ще в давнині грецьким астрономом Гіппархом. У наш час зоряна величина отримала фізичну інтерпретацію і є однією з найважливіших характеристик випромінювання астрономічних об'єктів, які є самі джерелами енергії чи відбивають світло, отримане з інших космічних джерел.

Зоряна величина (чи *блиск*) m є мірою фізичної характеристики – освітленості E, яку створює певне астрономічне джерело в місцезнаходженні спостерігача. Шкалу, за якою сітківка ока сприймає певне освітлення E як відповідну йому зоряну величину m, відображає *психофізичний закон Вебера–Фехнера*, за яким вони пов'язані за логарифмічним законом

$$m = m_0 - 2.5 \lg E, \tag{6.1}$$

де $m_0 = -14{,}18^{\mathrm{m}}$ – *нуль-пункт* шкали зоряних величин[35], введений МАС[36] як фотометричний стандарт; значення біля логарифма називають *коефіцієнтом Погсона*, який його запропонував.

Такий зв'язок (6.1) найбільш адекватно відображає введені Гіппархом зоряні величини від 1^m до 6^m, серед яких найяскравіші зорі були позначені першою величиною, а межі чутливості ока відповідає шоста зоряна величина. Згідно з формулою (6.1), різниця в блиску двох зір $\Delta m_{21} = m_2 - m_1$ відповідає відношенню їх освітленостей

$$\frac{E_1}{E_2} = 10^{0,4(m_2 - m_1)} = 2,512^{\Delta m_{21}}. \tag{6.2}$$

Відтак різниці блиску $\Delta m = 6^m - 1^m = 5^m$ відповідає відношення $E_{m=1}/E_{m=6} = 10^{0,4\cdot 5} = 100$, а для $\Delta m = 1^m$ це відношення становить $E_m/E_{m+1} = 10^{0,4} = 2{,}512$.

---

[35] Зоря, що перебуває в зеніті з такою зоряною величиною на горизонтальній земній поверхні, створює освітленість 1 люкс. Слід зазначити, що Місяць у повні в тропіках (де він може спостерігатися в зеніті) має саме таку зоряну величину.

[36] МАС – *Міжнародний астрономічний союз*, заснований в липні 1919 р. в Брюсселі (Бельгія) та є головним координатором діяльності астрономічної спільноти всього світу.

📖 Зауваження: *треба зазначити, що не слід плутати отримане значення 2,512 з модулем коефіцієнта Погсона |–2,5| – це просто збіг.*

Абсолютна зоряна величина. Крім порівняння блиску зір між собою чи з іншими об'єктами, за значеннями зоряної величини немає змоги зробити висновок щодо значень їх фізичних характеристик. Це пов'язано з тим, що освітленість, яку можна розрахувати з формули (6.1), можуть створювати об'єкти, які розташовані на різних відстанях та мають різні радіуси й температури їх поверхонь, що звуться для зір – *фотосферами*[37]. Щоб мінімізувати таку неоднозначність, близько 100 років тому було запропоновано аналізувати всі зорі з однієї умовної відстані, щоб спостережуване випромінювання від них залежало тільки від їх розмірів і температури. За таку відстань зручно виявилося прийняти значення d = 10 пк. Блиск таких зір назвали *абсолютною зоряною величиною – M*, а їх зв'язок зі спостережною (видимою) величиною m як функцію відстані d

$$M = m + 5 - 5\lg d. \tag{6.3}$$

📖 Зауваження: *Оскільки астрономія є всехвильовою, детектування ведеться в різних діапазонах хвиль. Очевидно, що інтенсивність випромінювання об'єктів залежить від їх природи. Може так статися, що у видимому діапазоні джерело випромінювання має достатню інтенсивність, а складовою в інших діапазонах хвиль можна взагалі знехтувати, в той час як може бути й інша ситуація, коли космічний об'єкт найбільше випромінює саме за межами оптичного діапазону. І для кожного з цих об'єктів можна обчислити їх зоряну величину і відповідну їм абсолютну. Співвідношення ж між ними матиме саме такий універсальний зв'язок – (6.3). Тобто, для точного запису співвідношень, необхідно ще й указувати діапазон хвиль Δλ, якому відповідають зоряні величини – вони (M і m) завжди мають бути в одному діапазоні.*

Існує ще й проблема міжзоряного поглинання, коли через нього космічний об'єкт має більшу зоряну величину, ніж насправді (тобто він виглядає менш інтенсивним). У такому разі в праву частину формули (6.3) слід додати складову міжзоряного поглинання зі знаком мінус – A, яка враховує цю невідповідність:

$$M_{\Delta\lambda} = m_{\Delta\lambda} + 5 - 5\lg d - A(d), \tag{6.4}$$

де запис A(d) як функція d підкреслює залежність поглинання від відстані до об'єкта.

---

[37]Фотосфера – найнижчий шар в атмосфері зір і субзір, від якого спостерігається випромінювання і де формується неперервний спектр (більш докладно розглянуто в розд. 11, 13 та 14).

Вводиться ще й *абсолютна болометрична величина* M_b, яка не залежить від діапазону хвиль спостереження об'єкта, а є характеристикою взагалі його сумарному потоку випромінювання у всьому діапазоні хвиль:

$$M_b = M_{\Delta\lambda} + BC_{\Delta\lambda}, \tag{6.5}$$

де $BC_{\Delta\lambda}$ зветься *болометричною поправкою*, яка залежить від діапазону довжин хвиль, в якому визначена зоряна. Саме ця характеристика адекватно відповідає аналогу фізичної величини – *світності.*

Світність – (астро) фізична величина, що характеризує кількість випроміненої енергії певного об'єкта в одиницю часу. Така величина є добутком площі об'єкта S та енергії, що випромінюється з одиниці його повної поверхні в одиницю часу w:

$$L = Sw. \tag{6.6}$$

Відношення світностей двох об'єктів пов'язане з їх абсолютними зоряними величинами таким самим чином, як і зоряні величини з освітленостями (6.2), тобто:

$$\frac{L_1}{L_2} = 10^{0,4(M_{b2} - M_{b1})}, \tag{6.7}$$

де під абсолютними величинами слід розуміти їх болометричні значення. На практиці велике значення має порівняння світності об'єкта (яким можуть бути як зорі, так і їх сумарні значення світностей для галактик та інші) зі світністю Сонця ($L_\odot$), що відповідає наступному запису:

$$\frac{L}{L_\odot} = 10^{0,4(M_{b\odot} - M_b)}, \tag{6.8}$$

де $M_{b\odot} = 4,75^m$.

Випромінювання тіл, що перебувають у термодинамічній рівновазі[38]. Така рівновага, зокрема, може бути забезпечена в умовах, коли за певної густини речовини ρ, довжини вільного пробігу фотона $l_ф$ та *непрозорості*[39] *к*, *оптична товща* астрономічного об'єкта τ, як безрозмірна міра послаблення світла за рахунок поглинання та розсіювання відповідає умові:

---

[38] Термодинамічна рівновага – стан фізичної системи, який досягається в умовах її ізольованості від оточуючого середовища та незмінності об'єму, коли залишаються незмінними основні термодинамічні характеристики, до яких належать, зокрема, температура та тиск.

[39] Непрозорість астрономічних об'єктів – показник поглинання *a*, віднесений до одиниці густин ρ: к = а / ρ.

$$\tau = \rho l_{ф} \kappa > 1. \qquad (6.9)$$

Термодинамічна рівновага в такій системі досягається за рахунок розсіювання фотонів на частинках речовини, в результаті чого енергія, що потрапляє в певний елементарний об'єм на шляху руху фотона, дорівнює енергії, що вийшла з нього, та може характеризуватися відповідною їй температурою.

Саме такій моделі відповідає *абсолютно чорне тіло*, в якому внаслідок взаємодії світла зі стінками замкнутої порожнини між ними досягається термодинамічна рівновага (рис. 6.1).

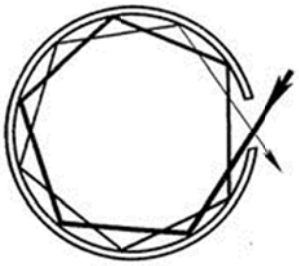


Рис. 6.1. Модель абсолютно чорного тіла

У природі рівновага досягається між енергіями фотонів та частинок, з якими вони взаємодіють в замкнутому просторі, та відповідає *закону Планка* для інтенсивності випромінювання з одиниці поверхні у всіх напрямках в інтервалі довжин хвиль від λ до $\lambda+\Delta\lambda$ (рис. 6.2):

$$E(\lambda,T)\Delta\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5}\frac{\Delta\lambda}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right)-1}, \qquad (6.10)$$

де c – швидкість світла, h і k – сталі Планка та Больцмана відповідно, T – *ефективна температура* за шкалою Кельвіна.

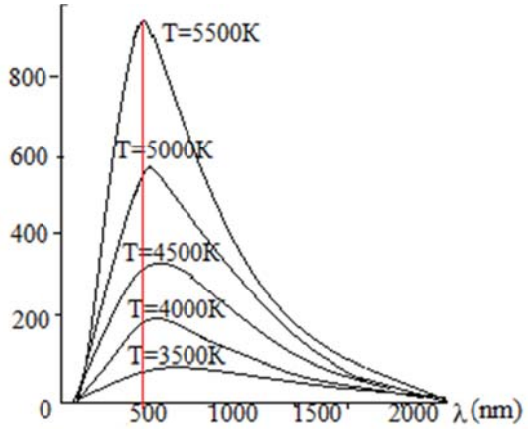


Рис. 6.2. Закон Планка

Сумарному випромінюванню, яке відбувається за законом Планка (6.10), на всьому інтервалі довжин хвиль від $\lambda = 0$ до нескінченності відповідає *закон Стефана–Больцмана*, згідно з яким густина потужності випромінювання залежить тільки від температури

$$E(T) = \sigma T_{ef}^4, \qquad (6.11)$$

де σ – стала Стефана–Больцмана, а $T = T_{ef}$ – називають у цьому випадку ефективною температурою.

У природі існує багато космічних тіл, які випромінюють за законом *чорнотільного випромінювання*. Такій ситуації відповідають умови (6.9) в молекулярних хмарах, в яких виникають зорі; протопланетних дисках, в яких утворюються планети; радіогалактиках, випромінювання яких виникає в середовищі галактичних дисків з високою оптичною товщою та ін. Зокрема випромінювання, що йде з надр зір, також має природу чорного тіла, оскільки його оптична товща τ >> 1. У цьому разі зорі як сферичному тілу з радіусом R і площею поверхні $S = 4\pi R^2$, згідно з виразами (6.6) та (6.10), відповідає світність

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_{ef}^4, \tag{6.12}$$

або з урахуванням світності Сонця, зі значеннями його радіуса й ефективної температури $R_\odot$, $T_{ef\odot}$, світність зір в сонячних одиницях є:

$$L/L_\odot = \left(R/R_\odot\right)^2 \left(T_{ef}/T_{ef\odot}\right)^4. \tag{6.13}$$

Рівняння температурного балансу в астрономії визначає теплообмін між джерелом випромінювання та (пасивним) об’єктом, що нагрівається в результаті дії джерела (світила), що дає змогу визначити його температуру (рис. 6.3).

У загальному випадку рівняння температурного балансу урівноважує світність пасивного об’єкта $L_{по}$ добутку його освітленості джерелом $E_{дж}(d)$, яка залежить від відстані d між ними, на площу тієї частини об'єкта, що освітлюється, та частки освітленості, яка ним поглинається $(1 - A)$:

$$L_{по} = S_{по} E_{дж}(d)(1 - A), \tag{6.14}$$

де A – *альбедо* пасивного об’єкта (відношення потоку випромінювання відбитого чи розсіяного його поверхнею в усіх напрямках, до того, що надійшов ззовні).

Якщо пасивний об’єкт є сферичним (наприклад, планета) з радіусом R і ефективною температурою T_{ef}, його світність визначається формулою (6.12).

Освітленість, що створює джерело, є:

$$E_{дж} = \frac{L_{дж}}{4\pi d^2}, \tag{6.15}$$

де

$$L_{дж} = 4\pi R_{дж}^2 \sigma T_{ef_дж}^4 . \qquad (6.16)$$

Урівноважена температура пасивного об’єкта, згідно з формулами (6.14) – (6.16), дорівнюватиме

$$T_{по} = \frac{1}{2}\left[\frac{(1-A)L_{дж}}{\pi\sigma d^2}\right]^{1/4} = T_{ef_дж}\left(\frac{R_{дж}}{d}\right)^{1/2}\left[\frac{(1-A)}{4}\right]^{1/4}, \qquad (6.17)$$

де як альбедо слід прийняти його сферичне значення, оскільки в наведеному прикладі планету сприймають як сферичний об’єкт.

Тести

1.1. Астрономія вивчає

1.1.1. небесні й атмосферні явища;

1.1.2. космічні об’єкти різної складності та процеси, що відбуваються в ході їх утворення й еволюції;

1.1.3. зоряне небо та метеорологічні явища, що спостерігаються;

1.1.4. вплив небесних тіл на долю людини;

1.1.5. сузір’я, Сонце, Місяць, планети та їх рух впродовж року.

1.2. Чи впливають метеорологічні явища на астрономічні?

1.2.1. Ні, не впливають.

1.2.2. Частково впливають.

1.2.3. Впливають.

1.2.4. Залежить від різновиду метеорологічного явища.

1.2.5. Залежить від різновиду астрономічного явища.

1.3. Чи впливають метеорологічні явища на астрономічні спостереження?

1.3.1. Так.

1.3.2. Залежить від діапазону хвиль та пори року проведення астрономічних спостережень.

1.3.3. Не впливають зовсім.

1.3.4. Залежить від місцезнаходження земного спостерігача.

1.4.5. Залежить від стану здоров’я та самопочуття спостерігача.

1.4. Зміна пір року відбувається у зв’язку

1.4.1. з тим, що Земля, рухаючись по еліптичній геліоцентричній орбіті, то наближається, то віддаляється від Сонця;

1.4.2. з наслідками гравітаційної дії Місяця на річний рух Землі;

1.4.3. з тим, що орієнтація земної осі зберігається у просторі, упродовж річного орбітального руху Землі;

1.4.4. з тим, що впродовж року змінюється світність Сонця з таким же періодом;

1.4.5. зі зміною розташування сузір'їв, через які рухається Сонце впродовж року.

1.5. Місячні затемнення є наслідком

1.5.1. зміни фаз Місяця;

1.5.2. орбітального руху Місяця по еліптичній орбіті навколо Землі;

1.5.3. освітленості Сонцем Місяця з різних сторін;

1.5.4. різного місцезнаходження земного спостерігача місячної поверхні;

1.5.5. місцезнаходження земного спостерігача поблизу лінії, що проходить через центри Сонця, Землі та Місяця.

1.6. Сонячні затемнення відбуваються у разі, коли

1.6.1. Сонце спостерігається з різних сторін;

1.6.2. Місяць перебуває у повні;

1.6.3. центри Сонця, Місяця і Землі розташовані на одній лінії у вказаній послідовності;

1.6.4. Земля покриває сонячний диск;

1.6.5. Сонце перебуває між Місяцем і Землею.

1.7. Упродовж року Сонце сходить і заходить над горизонтом

1.7.1. в точках сходу та заходу;

1.7.2. на південному сході та північному заході;

1.7.3. на північному сході та південному заході;

1.7.4. на південному сході та південному заході;

1.7.5. в околі точок сходу та заходу, де точне положення залежить від пори року.

1.8. Упродовж доби Сонце та Місяць змінюють своє положення серед зір на небесній сфері, відповідно, на кутове значення

1.8.1. 5° і 15°;

1.8.2. 1° і 13°;

1.8.3. 1° і 9°;

1.8.4. 13° і 1°;

1.8.5. 0° і 0°, тобто не змінюють.

1.9. Початок відліку нової доби (і зміна дати) настає опівночі

1.9.1. на гринвіцькому меридіані;

1.9.2. за місцевим часом;

1.9.3. за поясним часом;

1.9.4. на довготі земного меридіана 180°;

1.9.5. нульового часового поясу.

1.10. Крім абсолютної зоряної величини та відстані блиск Місяця залежить ще й від

1.10.1. пори року;

1.10.2. місцезнаходження земного спостерігача;
1.10.3. його фази;
1.10.4. кута знаходження над горизонтом;
1.10.5. зодіакального сузір'я, в якому він знаходиться.

Контрольні питання

1. Які основні задачі розв'язуються в астрономії?
2. Що таке астрономічний об'єкт?
3. У скільки разів Галактика більше за розміри Сонячної системи?
4. Чим відрізняються астрономічні явища від метеорологічних?
5. Чи є спостережний рух на небесній сфері істинним?
6. Як місячні фази пов'язані з затемненнями Сонця та Місяця?
7. З чим пов'язана необхідність створення різних систем координат в астрономії?
8. Чим відрізняється друга екваторіальна система координат від першої і чому вона частіше використовується для визначення положень небесних тіл?
9. Які основні системи літочислення існували/існують і що обумовило необхідність створення григоріанського календаря?
10. Чи достатньо пальців рук, щоб перелічити всі рухи, в яких бере участь земний спостерігач?

Частина 2

МЕТОДИ АСТРОНОМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Основними спостережними методами в астрономії є дистанційні, до яких відносять:

- *позиційні спостереження*, що дають змогу визначати координати небесних тіл на певний момент часу;
- *панорамне детектування* випромінювання в різних діапазонах хвиль для побудови зображень космічних об'єктів;
- *фотометричні*[40], *спектрофотометричні*[41] та *поляриметричні*[42] спостереження, що дають змогу вивчати астрофізичні властивості електромагнітного випромінювання.

Під час проведення астрономічних спостережень космічних об'єктів у першу чергу визначаються їх положення на небесній сфері чи у просторі, параметри видимого та істинного руху в системі більшої ієрархії; основні астрофізичні параметри, до яких належать їх маса, розміри, температура, елементний чи хімічний склад і вік. Способи проведення теоретичних досліджень чи певних заходів з організації спостережень з залученням відповідних астрономічних засобів для отримання вищезгаданих й інших параметрів звуться *методами астрономічних досліджень*.

7. Астрономічні засоби спостережень

Телескоп – головний спостережний засіб, який разом з певним приймачем електромагнітних хвиль дає змогу приймати космічне випромінювання в різних діапазонах: від найкоротшого (гамма- і рентгенівського випромінювання) до наддовгих, що належать радіодіапазону (рис. 1.1в-ж).

---

[40]Фотометрія – метод, в якому ведуться кількісні вимірювання енергетичних характеристик поля випромінювання. Наприклад, визначаються зоряні величини в певних довжинах хвиль тощо.

[41]Спектрофотометрія – метод, в якому вимірювання спектрів поглинання чи випромінювання проводиться шляхом отримання залежності інтенсивності джерела від довжини хвилі.

[42]Поляриметрія – метод, в якому вимірюється ступінь поляризації випромінювання світла та кута завороту площини поляризації світла під час проходження його через оптично-активні речовини.

Ефективність астрономічних інструментів залежить від:

- якості та розмірів приймальних дзеркал;
- чутливості приймачів випромінювання;
- *місця дислокації*[43].

Принципи роботи телескопів. За визначенням, телескоп є приладом, застосування якого дає змогу спостерігати віддалені об'єкти шляхом реєстрації електромагнітного випромінювання. Нині для реєстрації доступний весь діапазон електромагнітних хвиль, який впливає на конструктивні особливості будови телескопів. Тому, принципово, розрізняють чотири *види телескопів*:

– гамма-, – рентгенівські, – оптичні, – радіо-.

Гамма-телескопами досліджується випромінювання космічних об'єктів з довжиною хвилі $\lambda < 0{,}01$ нм (1 нм = 10^{-9} м), рентгенівські телескопи – 0,01 нм < λ < 10 нм, оптичні телескопи – 10 нм < λ < 0,0001 м (включаючи УФ- й ІЧ- діапазони), радіотелескопи – $\lambda > 0{,}0001$ м.

Хоча за будовою телескопи можуть суттєво відрізнятися між собою, принципово всі вони мають чотири *основні складові*:

1) модуль сприйняття випромінювання,
2) система передачі електромагнітних хвиль,
3) науковометричний блок,
4) блок накопичення та реєстрації квантів електромагнітної енергії.

Перший модуль обмежений *апертурою* – діючим отвором телескопа D, що визначає його робочу площу поверхні, через яку проникають кванти електромагнітного поля в телескоп, та *роздільну здатність* – граничний кут між точками небесної сфери, менше якого вони сприймаються як нероздільні:

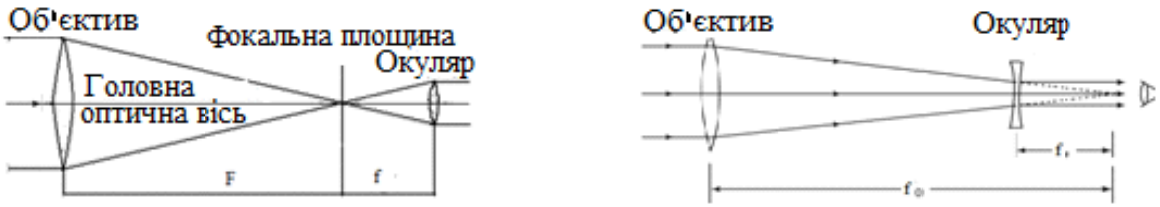
$$\rho_{\text{рад}} = \xi \frac{\lambda}{D}, \qquad (7.1)$$

де $\xi \sim 1$ – безрозмірна величина, яка залежить від геометричної форми апертури (для круглого отвору $\xi = 1{,}22$, для прямокутного – $\xi = 1$ тощо); λ – довжина електромагнітної хвилі, на якій ведуться спостереження.

В оптичних телескопах першим модулем є скляний об'єктив (такі телескопи звуться *рефракторами* – рис. 7.1) або увігнуте дзеркало (їх звуть *рефлекторами* рис. 7.2) з певним профілем: сфери; параболи чи гіперболи. Останнім часом оптичні рефлектори є *складеними* з шести і більше сегментів. Такі конструкції звуться складеними дзеркалами (рис. 7.3). Конструкції, що складаються з двох дзеркал, звуться *інтерферометрами*

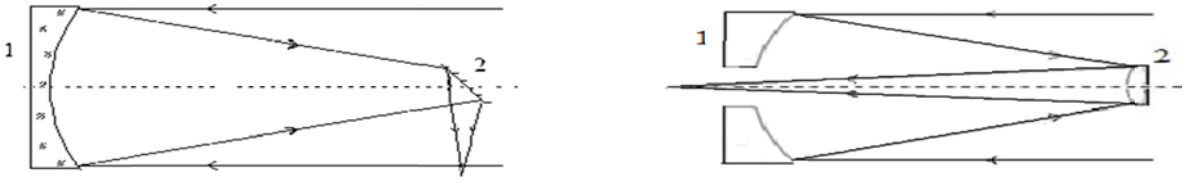
[43]Для наземних обсерваторій: висота над рівнем моря, близькість населених пунктів, «якість» атмосфери, через яку ведуться спостереження. Для орбітальних обсерваторій: висота і нахил орбіти до земного екватора, близькість до площини екліптики. Для космічних обсерваторій: місцезнаходження у космічному просторі.

(рис. 7.4). У таких системах замість діючого отвору вводиться поняття *бази інтерферометра* D_I – лінійна відстань між центрами двох дзеркал, яка і визначає роздільну здатність інтерферометра.



а б

Рис. 7.1. Принципові оптичні схеми рефракторів з опуклою (а) і увігнутою (б) лінзами в якості окуляра



а б

Рис. 7.2. Принципові оптичні схеми параболічних рефлекторів з пласким (а – система Ньютона) і опуклим (б – у разі застосування гіперболічного профілю система зветься касегреновою) вторинним дзеркалами

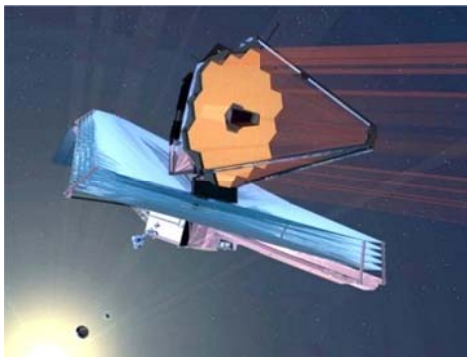


Рис. 7.3. Космічний телескоп імені Джеймса Веба зі складеним (18-елементним) головним дзеркалом

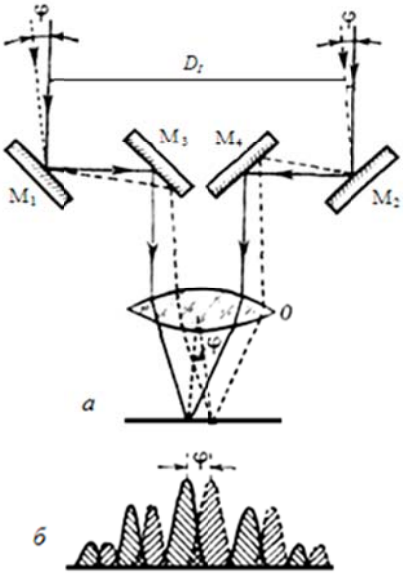


Рис. 7.4. Принципова схема оптичного зоряного інтерферометра у процесі спостереження подвійної зорі з кутовою відстанню між компонентами фі: Мі – поворотні дзеркала, від яких світло потрапляє на об'єктив О, що будує окрему інтерференційну картину від кожного джерела (компонента подвійної системи). Кутова відстань між компонентами системи φ відповідає зміщенню між інтерференційними картинами

В радіотелескопах перший модуль – це суцільна металева параболоїдна антена (рис. 7.5а) чи сукупність антен, які заповнюють певну площу в межах відповідної геометричної форми (рис. 7.5б). В останньому випадку система антен працює в режимі радіоінтерферометра. Роздільна здатність таких інструментів характеризується максимальною відстанню між краями фігури радіотелескопа (вона може бути різною в різних напрямках: наприклад, з півдня на північ та зі сходу на захід[44]).

а

б

Рис. 7.5. Радіотелескоп (а – Аресібо з діаметром параболоїда 300 м) і радіоінтерферометр (б – субміліметровий інтерферометр ALMA, 66 антен з діаметром 7 і 12 м)

Як перший модуль в рентгенівських телескопах застосовують дзеркала, виготовлені з кераміки чи металічної фольги, а іноді використовують покриття з Ауруму чи Іридію. Гамма-телескопи теж включають параболічні дзеркала з апертурами більше 10 метрів, щоб виявляти наслідки входу в атмосферу якомога більше гамма-квантів (безпосередньо вони не доходять до земної поверхні, поглинаючись атмосферою).

У першому модулі тільки сприймається космічне випромінювання, а далі воно перенаправляється в систему передачі електромагнітних хвиль. В оптичних і позаоптичних телескопах кванти світла рухаються за законами геометричної оптики (рис. 7.1-7.2). В залежності від того, яка конфігурація ходу променів використовується в другому модулі, розрізняють оптичні чи позаоптичні схеми телескопів (рис. 7.1-7.2, 7.4). Так, в радіотелескопах, складовими яких є непараболоїдні антени, одержаний з космічного об’єкта сигнал рухається вздовж *фідерної лінії* (електричного провідника, по якому передається енергія).

У разі потраплянні сигналу в науково-метричний блок, в залежності від задачі, яка ставиться для розв’язання, він може підсилюватися й вимірюватися; будувати панорамне зображення; розкладатися в спектр

[44] Прикладом такого радіоінтерферометра є найбільший в Україні та світі УТР-2, який працює на довжинах електромагнітних хвиль від одного до десятків метрів. Його антенне поле має Т-подібну форму з розмірами 1860 м на 900 м у напрямках південь-північ та схід-захід відповідно.

чи аналізуватися на ступінь його поляризації. Очевидно, що саме в цій складовій оптичного телескопа розташовані фотометри, спектрографи та поляриметри. Зокрема основними складовими спектрографів є призми чи дифракційні ґратки, у разі потрапляння світла на які вони його розкладають у спектр (рис. 7.6) – один із найважливіших предметів досліджень, що проводяться в астрофізиці.

а б

Рис. 7.6. Оптичні схеми призмових (а) і дифракційних (б) спектрографів

Далі результати досліджень світла накопичуються, *візуалізуються*[45] та реєструються в останньому четвертому блоці. В оптичному та прилеглому до нього діапазоні хвиль зараз сигнали реєструють *твердотільними фотоприймачами* – приладами зарядового зв'язку: ПЗЗ-матрицями[46] (рис. 7.7), робота яких базується на явищі *внутрішнього фотоефекту*[47]. Такі прилади чутливі в широкому діапазоні спектра: від УФ- до ІЧ-діапазону, а їх *квантовий вихід*[48] перевищує 50 %.

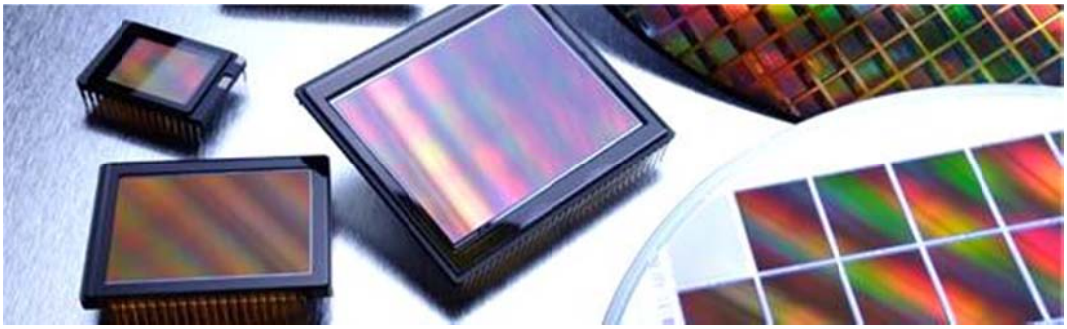


Рис. 7.7. ПЗЗ-матриці різних типів і розмірів. Праворуч показано фрагмент складеної ПЗЗ-матриці

---

[45] Візуалізація – представлення розподілу яскравості досліджуваного об'єкта, незалежно від того, в якій області електромагнітного спектра він випромінює, у зручному для зорового сприйняття й аналізу вигляді.

[46] Такі прилади сьогодні знайшли значне (якщо не основне) застосування як для наукових досліджень, так і в побутових пристроях, перш за все у фотоапаратах, що дає змогу виносити, зокрема, отримане зображення на монітор комп'ютера.

[47] Внутрішній фотоефект – явище дії випромінювання на певні напівпровідники чи діелектрики, в результаті чого відбувається в них перерозподіл електронів за енергетичними рівнями, що проявляється у зміні концентрації носіїв заряду. В результаті відбувається зростання електропровідності, зменшення опору й виникнення фотопровідності.

[48] Квантовий вихід – відношення кількості вільних електронів, що стали носіями заряду в результаті дії внутрішнього фотоефекту, до всіх фотонів, які дістаються фотоприймача.

В радіотелескопах застосовуються чутливі приймальні пристрої, які звуться *радіометрами*. В залежності від діапазону довжин хвиль, на якому працює конкретний радіотелескоп, виготовляються електромагнітні хвилі, які перетинають одиничну площу поверхні радіотелескопа за одиницю часу.

Загальні характеристики телескопів. Діаметр апертури телескопа – найважливіша характеристика, оскільки саме вона визначає роздільну здатність та граничний потік чи кількість квантів випромінювання, доступних для спостереження. *Граничну зоряну величину* $m_г$, доступну для оптичного телескопа з апертурою D (в метрах), визначає його *проникна сила*:

$$m_г = 17^m + 5\lg D. \qquad (7.2)$$

Кутовому розміру об'єкта α (в радіанах – $\alpha_{рад}$) на небесній сфері відповідає його лінійний розмір l у фокальній площині телескопа з фокусною відстанню об'єктива F (рис. 7.8):

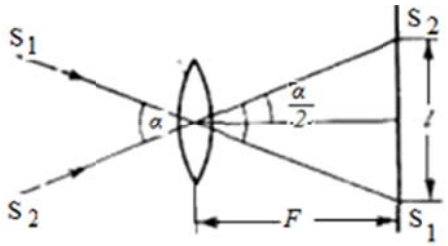


Рис. 7.8. Побудова оптичного зображення з розмірами l в фокальній площині телескопа астрономічного об'єкта S_1S_2 з кутовим розміром α

$$l = 2F\mathrm{tg}\frac{\alpha_{рад}}{2} \approx F\alpha_{рад} = F\frac{\alpha^\circ}{57{,}3^\circ} = F\frac{\alpha''}{206265''}, \qquad (7.3)$$

де знак «≈» відповідає наближенню у разі малих кутів, а верхні індекси «°» і «"» – розмірності кутів в градусах і секундах дуги відповідно.

Відношення кута α до лінійного відрізка l (як правило, в міліметрах) зветься *масштабом зображення*:

$$\mu = \frac{\alpha}{l}. \qquad (7.4)$$

Фокусна відстань може визначатися двома способами. Якщо в оптичній системі відсутні інші вторинні дзеркала або є тільки пласке поворотне дзеркало (як в системі Ньютона – рис. 7.2а), то фокусна відстань $F = f_{дз}$ відповідає безпосередньо значенню фокуса головного дзеркала телескопа. За наявності вторинного неплаского дзеркала (рис. 7.2б, 7.9), яке

має фокус f_2, вводиться поняття *еквівалентної фокусної відстані*, за яку приймається значення

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f_{дз}} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_{дз} f_2}, \tag{7.5}$$

де знак f_2 відповідає: «+» – опуклому, а «–» – увігнутому дзеркалу, d – відстань між головним і вторинним дзеркалами.

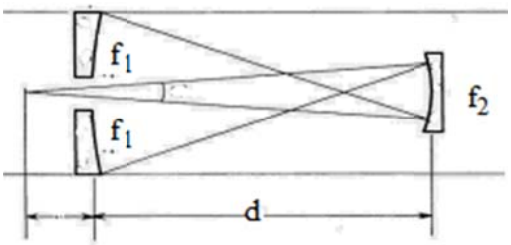


Рис. 7.9. Принципова оптична схема параболічного рефлектора з увігнутим вторинним дзеркалом еліптичного профілю (система Грегорі)

Для телескопів з *окуляром*[49] (рис. 7.1) з фокусною відстанню f введене поняття *кутового збільшення* телескопічної системи

$$\Gamma = \frac{F}{f}, \tag{7.6}$$

за якого об'єкт, що спостерігається на небесній сфері під кутом α, в телескопі спостерігається під кутом

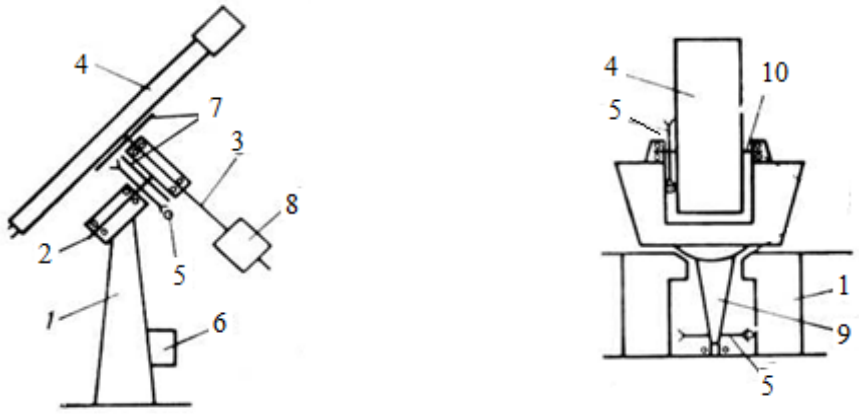
$$\beta = \Gamma\alpha. \tag{7.7}$$

Особливості телескопічних спостережень. В наземних умовах телескоп встановлюється на *монтуванні*, яке має дві взаємно перпендикулярні осі, одна з яких, як правило, направлена на полюс світу (рис. 7.10а). Такі пристрої звуться *екваторіальними монтуваннями*. Це дає змогу застосовувати *годинниковий механізм* для компенсації осьового обертання Землі, що створює умови для того, щоб тривалий час тримати космічні об'єкти в полі зору.

Для великих (тобто й важких одночасно) телескопів знайшло застосування *азимутальне монтування*, в якому оптична вісь направлена в зеніт (рис. 7.10б). У цьому монтуванні компенсація осьового руху Землі розраховується комп'ютером за спеціальним алгоритмом, а від нього подаються команди на направляючі двигуни руху телескопа, які й

[49]Такі телескопи застосовуються або для *візуальних спостережень,* або як гіди телескопів з більшими апертурами.

виконують функції годинникового механізму. Такі установки притаманні оптичним телескопам та параболоїдним антенам радіо- та гамма-телескопів. Є ще й *нерухомі монтування*, коли вісь телескопа спрямована в зеніт. Такі монтування здебільш знайшли застосування в надвеликих радіотелескопах, наприклад у телескопа Аресібо (рис. 7.5а).



а б

Рис. 7.10. Екваторіальне (а – німецьке на прямій колоні) й азимутальне (б) монтування телескопів. Загальними основними складовими є: 1 – основа (або колона); 4 – труба телескопа; 5 – черв'ячні пари осей (завдяки яким передається рух телескопу від управляючих двигунів). В екваторіальному монтування ще є: 2 – полярна вісь (направлена на вісь світу); 3 – вісь піднесень; 6 – годинниковий механізм; 7 – круги відліку кутів повороту осей; 8 – противага. В азимутальному монтуванні телескопа 9 – вертикальна та 10 – горизонтальна осі повороту

Рентгенівські телескопи на земній поверхні відсутні, оскільки атмосфера затримує рентгенівські промені. Наземні гамма-телескопи є, хоча й атмосферою затримуються гамма-кванти. В цьому випадку телескопами фіксуються високоенергійні лавини частинок, породжених від зіткнення гамма-квантів з ядрами атомів хімічних елементів, які присутні у верхніх шарах земної атмосфери та випромінюють *гальмівне випромінювання*[50]. Для них застосовуються, як і для великих оптичних і радіотелескопів, азимутальні монтування (рис. 7.11).

Під час спостережень у телескоп з апертурою більше 10-15 см починає проявлятися дія неоднорідностей в земній атмосфері. В результаті спостерігається їх рух з частотою декілька десятків герц в межах ~ 1" (а інколи і більше) небесної сфери. Таке явище не дає можливості в земних умовах досягти *дифракційної межі* роздільної здатності[51] великих

[50]Таке електромагнітне випромінювання є наслідком розсіювання або гальмування в електромагнітному полі заряджених частинок.

[51] Така межа дорівнює кутовому значенню, обчисленому за формулою (7.1).

телескопів. З іншого боку, діаметр дзеркал наземних телескопів обмежений значенням близько 8 м, міцністю скла, з якого вони виготовляються. Телескопи з більшими діаметрами головного дзеркала є складеними. Застосовується система так званої *адаптивної оптики*, яка дає змогу не тільки виготовляти телескопи з більшими дзеркалами, а й управляти ними в поточному часі з частотою руху атмосферних неоднорідностей, що може істотно покращити роздільну здатність великих телескопів. Очевидно, що такої проблеми з роздільною здатністю немає в *космічних телескопах*. Виготовлення суцільних дзеркал для космічних телескопів нині обмежено спроможністю космічних засобів виводити на земну орбіту вантаж з певними габаритами. Тому великі космічні телескопи, що плануються до запуску на орбіту, будують *складеними*[52].

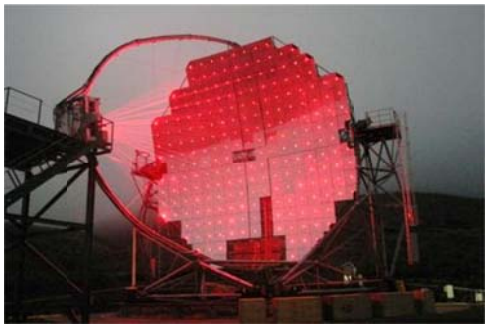


Рис. 7.11. Великий атмосферний черенковський 17 м гамма-телескоп MAGIC. На фотографії зафіксовано процес підстроювання фокуса складових елементів телескопа за допомогою системи лазерів

В космічних умовах телескоп орієнтують у просторі за трьома осями, завдяки застосуванню системи стабілізації, що складається, відповідно, з трьох гіроскопів. У разі запуску телескопа на орбіту в комплект обладнання входить ще три запасні гіроскопи, на які в процесі функціювання телескопа заміняють ті, що виходять із ладу. Наявність справних саме трьох гіроскопів (із шести) обмежує час повноцінної роботи космічних телескопів. Для ІЧ- космічних телескопів час їх функціювання обмежений ще й наявністю рідкого Гелію, який застосовується для охолодження приймачів випромінювання. Як правило, цей час становить близько п’яти років.

8. Визначення руху та геометричних відстаней

Визначення координат світил на небесній сфері впродовж року чи більше дає можливість виявити відхилення від їх відправних визначених значень. Це означає, що світило змінює місце знаходження на небесній сфері й рухається по ній. Зміну позиції небесного світила та його швидкість уздовж променя зору можна встановити за допомогою ефекту Допплера. Одночасне проведення таких визначень лежить в основі обчислень просторових рухів небесних світил, якщо є змога ще й установити відстань до них.

---

[52] Зокрема до таких проєктів належить запланований до запуску на 2021 рік космічний телескоп імені Джеймса Вебба, який буде складатися з 18 шестикутних елементів загальною апертурою 6,5 м (рис. 7.3).

З іншого боку, визначення швидкостей рухів різних космічних об'єктів, систематизація таких досліджень дала змогу установити закони, за якими вони відбуваються. Як виявилося, такі дослідження, крім встановлення закономірностей рухів небесних світил, надають можливості ще й обчислювати широкий спектр їх астрофізичних параметрів, включаючи їх маси, а для велетенських зоряних систем – ще й наявність *темної матерії*[53].

Власні рухи світил – перший крок у визначенні істинної їх швидкості. Визначення координат, як правило, в екваторіальній системі α_i, δ_i в різний час t_i дає змогу обчислити *власні рухи світил за прямим сходженням* μ_α *і схиленням* μ_δ. За двома спостереженнями (i = 1, 2) вони визначаються наступним чином:

$$\mu_\alpha = \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{t_1 - t_2}, \tag{8.1}$$

$$\mu_\delta = \frac{\delta_1 - \delta_2}{t_1 - t_2}. \tag{8.2}$$

Загальний власний рух світила на небесній сфері обчислюється за теоремою Піфагора в сферичній системі координат:

$$\mu = \sqrt{\left(\mu''_\alpha \cos\delta\right)^2 + \left(\mu''_\delta\right)^2}, \tag{8.3}$$

де позначка «"» вказує на те, що значення складових обчислені в кутових секундах (якщо α_i обчислені в часових секундах, то μ_α слід помножити на $15 = 360^o/24^h$); наявність $\cos\delta$ вказує на врахування закону зміни масштабу μ_α під час його обчислення в залежності від схилення світила (рис. 8.1). Як правило, розмірність власних рухів виражається в кутових секундах на рік.

Річний паралакс. Власний рух світил визначається з Землі, яка обертається навколо Сонця (рис. 8.2).

Тобто під час визначення власного руху світила (середній) радіус земної навколосонячної орбіти a спостерігається під кутом $\pi_{рад}$:

$$\frac{a}{d} = \sin\pi_{рад} \approx \pi_{рад}, \tag{8.4}$$

де d – відстань до світила, й ураховується те, що синус малих кутів з достатньою точністю дорівнює самому куту (в радіанах). Цей кут ($\pi_{рад}$)

[53] Темна матерія – субстанція, яка не взаємодіє з електромагнітним випромінюванням (тобто вона є «невидимою», а проявляється лише завдяки гравітаційній взаємодії або з оточуючими її об'єктами, або з фотонами світла.

зветься *річним паралаксом*. Якщо річний паралакс визначається в секундах дуги π", зв'язок між радіанною і кутовою мірами є:

$$\pi'' = 206265'' \frac{a}{d}, \tag{8.5}$$

де 206265 – кількість кутових секунд в радіані. Якщо ж відстань *a* приймається за *астрономічну одиницю* (a = 1 а.о. = $1{,}496 \cdot 10^{11}$ м ≈ 150 млн км), а відстань до світила виражається в парсеках (див. розд. 6), то:

$$\pi'' = \frac{1}{d}, \tag{8.6}$$

оскільки 1 а.о. = 1/206265 пк. Відтак паралаксу π" = 1" відповідає відстань 1 пк.

Зокрема в такому випадку формула, що пов'язує зв'язок видимої з абсолютною зоряними величинами (6.3), набуває форми

$$M = m + 5 - 5\lg d = m + 5 + 5\lg \pi'', \tag{8.7}$$

яка часто застосовується в астрономії.

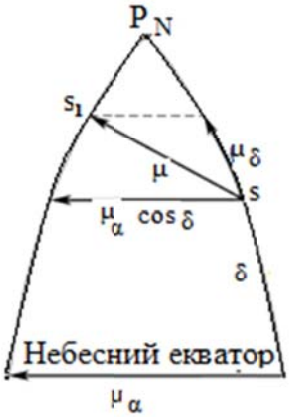


Рис. 8.1. Урахування зміни власного руху світил залежно від їх схилення

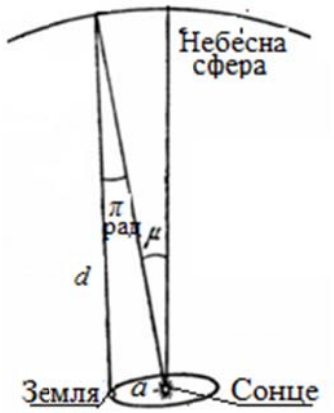


Рис. 8.2. Зміна положення Землі і руху зорі впродовж року

Упродовж року світило, що спостерігається з Землі, описує на небесній сфері проекцію шляху земної орбіти (в загальному плані це еліпс – рис. 8.3а). З точки зору математики – це *гармонічний процес*, який описується функціями синуса та косинуса. В екліптичних координатах опис цього руху виглядає найбільш простим. Відносно центра еліпса на

небесній сфері з координатами λ_0 і β_0 проекція руху земної орбіти залежить від поточних координат λ і β, які змінюються впродовж часу t, складових власного руху μ_λ і μ_β, відстані до світила d та земного сидеричного року – T_s (рис. 8.3б):

$$\lambda - \lambda_0 = \mu_\lambda t + \frac{a}{d}\sin\frac{2\pi}{T_s}t, \tag{8.8}$$

$$\beta - \beta_0 = \mu_\beta t + \frac{a}{d}\sin\beta_0\cos\frac{2\pi}{T_s}t. \tag{8.9}$$

а б

Рис. 8.3. Відображення річного шляху навколосонячного руху Землі на небесній сфері (а) та наслідок зміни екліптичних координат близьких до Сонця зір (б) як відповідного гармонічного процесу

Отже, якщо світило віддалене від Землі не надто далеко, впродовж визначення його екліптичних координат виникають умови для установлення не тільки його власного руху, а і його річного паралаксу.

Променеві швидкості світил. Це міра зміни їх відстані відносно спостерігача, яка визначається на основі ефекту Допплера, згідно з яким довжина зміщеної лінії в спектрі світила λ, яке рухається зі швидкістю $V_r << c$ (c – швидкість світла в вакуумі), пов'язана з тією ж лінією λ_0 в нерухомому джерелі відносно спостерігача наступним виразом:

$$\lambda = \lambda_0\left(1 + \frac{V_r}{c}\right). \tag{8.10}$$

Відтак променева швидкість світила є:

$$V_r = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}c = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}c, \tag{8.11}$$

де $\Delta\lambda$ – зміщення спектральної лінії.

Просторові швидкості світил обчислюються за наявності їх складових: *тангенціальної* та *променевої* (рис. 8.4), які виражаються в однакових одиницях вимірів, як правило в км/с. Як видно з рис. 8.4 та наведених вище зауважень щодо малих кутів паралаксу (а отже, і власних рухів світил), тангенціальна швидкість дорівнює:

$$V_t = d\mathrm{tg}\mu \approx \mu d \text{ а.о./рік} = 4,74\mu d \text{ км/с} = 4,74\frac{\mu}{\pi''} \text{ км/с}, \quad (8.12)$$

де

$$4,74 = \frac{\text{кількість кілометрів в а.о.}}{\text{кількість секунд в тропічному році}} = \frac{149600000}{31556926} \text{ км/с.}$$

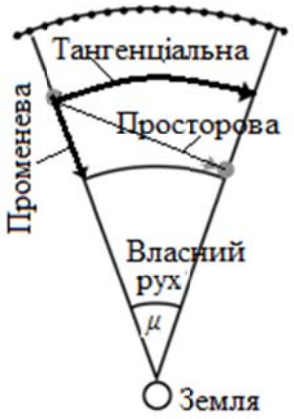


Рис. 8.4. Зв'язок просторової з тангенціальною та променевою швидкостями й власними рухами

Відтак просторова швидкість світила обчислюється за формулою:

$$V = \sqrt{(4,74\mu d)^2 + V_r^2} \text{ км/с.} \quad (8.13)$$

Відстані до космічних тіл у Сонячній системі визначаються за *горизонтальним* паралаксом світил – кутом, під яким видно радіус Землі (база) з космічного тіла, яке спостерігається на земному горизонті (рис. 8.5).

Радіус Землі може бути обчислений із наземних вимірів довжини (меридіана чи екватора), що відповідає куту 1° (див. розд. 10). Вимір паралаксу здійснюється шляхом спостереження світила з різних обсерваторій, якомога більш віддалених між собою, або однією обсерваторією в різні часи доби.

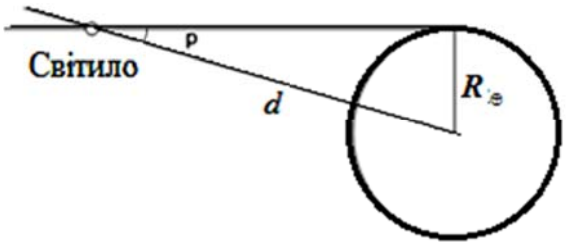


Рис. 8.5. Принцип обчислення горизонтального паралаксу світил. Показано: p – горизонтальний паралакс світила та його відстань d до центра Землі, яка має радіус $R_\oplus$

За астрономічними спостереженнями, горизонтальний паралакс Місяця є найбільшим і змінюється впродовж місяця від 57',1 до 60',4. Це відповідає його руху по еліпсу з *апогеєм*[54]

[54] Апогей – точка навколоземної орбіти тіла, найвіддаленіша від центра Землі.

405 000 км, *перигеєм*[55] 363 000 км і середній відстані до Місяця 384 000 км. Визначений горизонтальний паралакс Сонця є $p''_{\odot}$ = 8″,794, що відповідає відстані до Сонця $1{,}496 \cdot 10^8$ км = 1 а.о. Аналогічно визначаються й інші паралакси об'єктів Сонячної системи та відстані до них, для яких застосовується описаний метод.

Відстані, обчислені за даними річних і горизонтальних паралаксів, називають *геометричними*. В таких методах визначення відстаней застосовуються лише відповідні геометричні визначення кутів на небесній сфері та інформація про *базову лінію* (чи базу), астрономічну одиницю та радіус Землі у разі визначення річних і горизонтальних паралаксів відповідно.

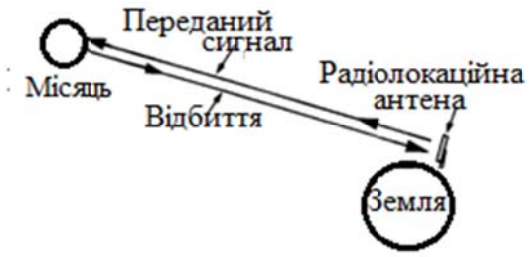


Рис. 8.6. Принцип радіолокації космічних об'єктів

Принципово іншим є визначення відстані за результатами радіолокації Місяця, Сонця, Меркурія, Венери, Марса і Юпітера. Знаючи швидкість світла c і визначивши проміжок часу Δt проходження сигналу на трасі від Землі до небесного об'єкта і у зворотному напрямку (рис. 8.6), можна обчислити відстань до них

$$d = \frac{c\Delta t}{2}. \qquad (8.14)$$

Це суть радіолокаційного методу визначення відстані близьких до Землі тіл Сонячної системи. Таким методом обчислюються відстані до ШСЗ – штучних супутників Землі. У цьому разі може застосовуватися як *радіо*-, так і *лазерна локація*.

9. Установлення законів орбітального руху

Переважна більшість космічних об'єктів бере участь в орбітальному русі зоряних систем чи їх об'єднань більш високої ієрархії. Тому такий рух космічних об'єктів є ключовим в астрономії. *Орбітальний рух* відбувається під дією *всесвітнього тяжіння*, згідно з яким матеріальні точки[56] з масою M і m притягуються між собою з силою F_r, обернено пропорційною квадрату відстані r між ними:

[55] Перигей – точка навколоземної орбіти тіла, найближча до центра Землі.
[56] Матеріальні точка — тіло, розмірами якого можна знехтувати в контексті конкретної задачі.

$$F = G\frac{Mm}{r^2}, \tag{9.1}$$

де G – гравітаційна стала.

Найпростіша система або складається, або може бути зведена саме до двох компонентів, рух яких описується розв'язком *задачі двох тіл*, частковим наслідком якого є три *закони Кеплера*, відкриті за спостережними даними. Значення орбітальних швидкостей визначають стійкість подвійних систем і форму еліптичних орбіт, за якими рухаються їх компоненти відносно центра маси. Загалом розв'язками задачі двох тіл можна скористатися і для аналізу руху систем більш високої кратності, коли зовнішнім впливом на них можна знехтувати.

Рух менш масивного під дією більш масивного компонента відповідає умові: $m << M$.

Закони Кеплера. Момент імпульсу тіла з масою m, яке рухається зі швидкістю υ в полі дії більш масивного тіла (таку силу звуть центральною), на відстані r зберігається, що дає підставу записати для нього умову:

$$J = m\upsilon r = \text{const}. \tag{9.2}$$

У загальному вигляді момент імпульсу є величиною векторною, направленою одночасно перпендикулярно векторам υ і r. Умова (9.2) відповідає збереженню добутку $\upsilon \cdot r$ = const, що інтерпретується як рух в одній площині. Ця ситуація відповідає руху по колу чи еліпсу, в якому, наприклад, зі збільшенням відстані від його фокуса до тіла зменшується його швидкість чи навпаки. Таку властивість вперше зі спостережень за планетами відкрив Кеплер, після чого вона зветься *першим законом* і носить його ім'я.

Радіус-вектор r за час Δt «замітає» під час руху частину площі еліпса, яка відповідно до елементарної складової є площею трикутника ΔS з висотою r та основою $\upsilon \cdot \Delta t$: $\Delta S = r\upsilon\Delta t/2$ (рис. 9.1). Виражаючи добуток $r\upsilon$ з виразу (9.2), одержимо зв'язок:

$$\Delta S = \frac{J}{2m}\Delta t. \tag{9.3}$$

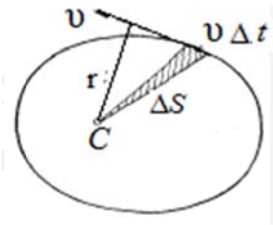


Рис. 9.1. Під час руху по еліптичній орбіті за рівні проміжки часу радіус-вектор описує однакові площі

Вводячи поняття *секторальна швидкість* як зміну площі «замітання» за одиницю часу $\upsilon_{\Delta S} = \Delta S/\Delta t$, отримуємо з (9.3) її значення:

$$\upsilon_{\Delta S} = \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{J}{2m} = \text{const}, \tag{9.4}$$

згідно з виразом (9.2), тобто за рівні проміжки часу радіус-вектор описує однакові площі, що відповідає *другому закону Кеплера*, знайденому ним за результатами спостережень Марса.

Рух у полі центральної сили, яка розглядається, відбувається з прискоренням w, що дає змогу записати його зв'язок з радіусом-вектором r і швидкістю, яка у наближенні колової орбіти дорівнює $\upsilon = 2\pi r/T$:

$$w = \frac{\upsilon^2}{r} = \frac{4\pi^2 r}{T^2}. \tag{9.5}$$

Для двох тіл, що рухаються в полі центрального більш масивного об'єкта, відношення сил, з якими він притягує менш масивні, з урахуванням значення прискорення (9.5) є:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{m_1 w_1}{m_2 w_2} = \frac{m_1 r_1 T_2^2}{m_2 r_2 T_1^2}. \tag{9.6}$$

Підставляючи сюди таке ж відношення, обчислене за формулою (9.1), одержимо після порівняння з (9.6) вираз:

$$\frac{m_1 r_2^2}{m_2 r_1^2} = \frac{m_1 r_1 T_2^2}{m_2 r_2 T_1^2}, \tag{9.7}$$

і далі

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{r_1^3}{r_2^3}, \qquad \text{або} \qquad \frac{T_i^2}{r_i^3} = \text{const}, \tag{9.8}$$

що відповідає *третьому закону Кеплера*, знайденому зі спостережень.

Космічні швидкості. Під час руху у центрально-симетричному полі тяжіння роль доцентрової сили виконує сила гравітаційна. Ця умова визначає мінімальну колову швидкість тіла υ_1 з масою m в полі тяжіння об'єкта з масою M:

$$\frac{m\upsilon_1^2}{r} = G\frac{mM}{r^2}, \qquad \text{звідки} \qquad \upsilon_1 = \sqrt{\frac{GM}{r}}. \tag{9.9}$$

Це значення називають *першою космічною швидкістю*.

Для подолання поля тяжіння, що створює об'єкт з масою M, тілом з масою m, яке відчуває з його боку прискорення $w_m = GM/r^2$ на відстані r і має відповідну потенціальну енергію ($mw_m r$), достатньо, щоб його

швидкість дорівнювала υ_2 (або була більшою за неї), що визначається кінетичною енергією:

$$\frac{m\upsilon_2^2}{2} = mw_m r = G\frac{mM}{r}, \quad \text{звідки} \qquad \upsilon_2 = \sqrt{2\frac{GM}{r}}. \tag{9.10}$$

Це значення називають *другою космічною швидкістю*, яка всього в $\sqrt{2}$ більша за першу космічну. Друга космічна – це так звана параболічна швидкість, за якою подвійна система розпадається. Стаціонарні орбіти подвійних систем можуть існувати за умови, що компоненти з масами m рухаються зі швидкостями в межах $\upsilon_1 < \upsilon < \upsilon_2$ по еліптичних орбітах (рис. 9.2).

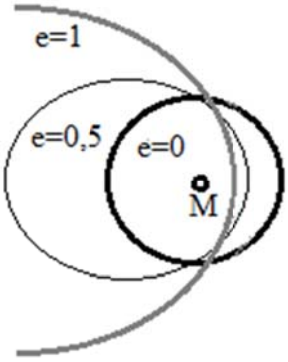


Рис. 9.2. Руху по еліптичній орбіті відповідають ексцентриситети в межах 0 < e < 1. Значення ексцентриситету відповідають орбітам: e = 0 – коловій та e = 1 – параболічній (за якої компонент перестає бути складовою системи)

Рух компонентів з довільними масами. За цієї умови ураховується, що компонент з масою M також має прискорення $w_M = Gm/r^2$ з боку тіла з масою m. У такому разі необхідно змістити початок відліку координат до центра мас системи, маючи на увазі значення повного прискорення $w = w_m + w_M$. Це веде до того, що в формулах (9.8) – (9.10) замість маси M з'являється сума мас $(m + M)$.

Більш загальний рух по еліптичній орбіті ураховується шляхом заміни радіуса-вектора на велику піввісь еліпса – a. Зокрема формула (9.8) має вигляд, в якому константа набуває певного значення:

$$\frac{(M+m)T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{G}. \tag{9.11}$$

Наведена формула відповідає *третьому узагальненому закону Кеплера*.

В описаних умовах ураховується, що рух кожного компонента відбувається по своїй еліптичній орбіті. Схема такого руху представляється двома еліпсами з великими (a_M і a_m) та малими (b_M і b_m) півосями, які

розташовані в одній площині та мають спільний фокус, що відповідає центру мас системи (рис. 9.3а, б).

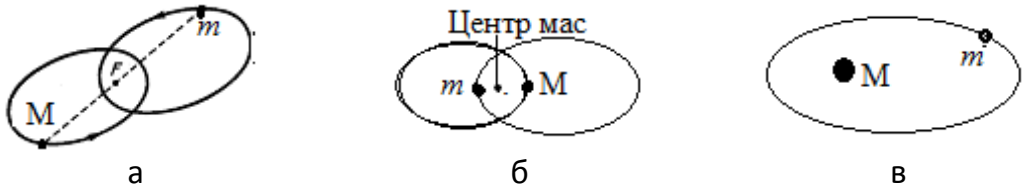


Рис. 9.3. Можливі орбіти компонентів відносно спільного центра мас

Ексцентриситети цих еліпсів однакові:

$$e_M = \sqrt{1 - \frac{b_M^2}{a_M^2}} = e_m = \sqrt{1 - \frac{b_m^2}{a_m^2}} = e. \qquad (9.12)$$

Що цікаво, такому ж ексцентриситету відповідає відносна еліптична орбіта, в якій центр відліку зсунутий до одного (більш масивного) з компонентів (рис. 9.3в):

$$e_{M+m} = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}} = e, \qquad (9.13)$$

де велика та мала півосі відносної орбіти дорівнюють $a = a_M + a_m$, $b = b_M + b_m$ відповідно.

Рух по еліптичній орбіті є нерівномірним, на відміну від колового руху. В цьому разі вводиться так звана *поточна швидкість* компонента, який має відповідну масу та перебуває на певній відстані від центра мас системи. Відтак швидкість компонента з масою m – υ_m, що перебуває на відстані r_m від центра мас і рухається по еліптичній орбіті з великою піввіссю a_m, дорівнює:

$$\upsilon_m = \sqrt{G(M+m)\left(\frac{2}{r_m} - \frac{1}{a_m}\right)}. \qquad (9.14)$$

Звідки, до речі, видно відміну формул для космічних швидкостей (9.9) і (9.10) у зв'язку з урахуванням суми мас ($m + M$) для колових орбіт: у разі $r_m = a_m$. Слід також зазначити, що раптове зменшення суми мас (m+M) удвічі призведе до зменшення значення колової швидкості у √2 для тієї самої відстані від центра, що притягає. Відтак існуюча колова швидкість стане другою космічною (параболічною), а це призведе до розпаду системи.

Під час руху по еліптичній орбіті максимальна υ_{max} та мінімальна υ_{min} швидкості досягаються, коли компонент перебуває в *перицентрі* $r_п$ чи *апоцентрі* – $r_а$ відповідно, значення яких залежать від ексцентриситету e:

$$r_п = a_m(1-e), \tag{9.15}$$

$$r_а = a_m(1+e). \tag{9.16}$$

В такій системі двох тіл виконується *правило важеля* для компонентів відносно центра мас (рис. 9.3а)

$$Mr_M = mr_m, \tag{9.17}$$

де r_M і r_m – поточні відстані компонентів з масами M і m.

Із формули (9.14) видно, що схоже правило виконується і для швидкостей компонентів, які рухаються коловими орбітами:

$$\upsilon_M^2 r_M = \upsilon_m^2 r_m. \tag{9.18}$$

Для систем з довільним ексцентриситетом і будь-яких мас виконується рівність, коли вони перебувають у перицентрі й апоцентрі

$$r_п \upsilon_{max} = r_а \upsilon_{min}, \tag{9.19}$$

як це видно після підстановки визначень (9.15)-(9.16) в формулу (9.14). З цих же підстановок видно, що в перицентрах і апоцентрах виконуються пропорційність швидкості компонентів на орбіті $\upsilon \propto a^{-1/2}$, і завжди – для колових орбіт з радіусом r: $\upsilon \propto r^{-1/2}$. Саме такий закон пов'язують з *кеплерівськими швидкостями*.

10. Прямі визначення мас і розмірів

Маса космічних об'єктів – ключова характеристика в астрономії, знання про яку визначає належність до відповідних зоряних систем, класів космічних тіл, а також визначає їх природу й еволюцію. Розміри космічних об'єктів, наряду з інформацією про їх масу, дають можливість визначити їх густину чи концентрацію, що для космічних тіл дає змогу віднести їх до певного класу або встановити природу. Отже, визначення цих характеристик надзвичайно важливе в астрономії.

Визначення геометричних розмірів космічних об'єктів. Радіус Землі $R_\oplus$ установлюється через відстань, яка відповідає 1° дуги її меридіана чи екватора. Визначення широти спостерігача за теоремою про висоту полюса світу над горизонтом (див. розд. 4) уздовж меридіана показали, що 1° дуги вздовж меридіана в середньому дорівнює $l_1{}^o = 111{,}2$ км. Беручи до уваги, що довжина земного меридіана дорівнює $2\pi R_\oplus$ з урахуванням значення $l_1{}^o$, середній радіус Землі можна обчислити наступним чином:

$$R_\oplus = \left.\frac{l_{1^o}\,360}{2\pi}\right|_{l_{1^o}=111{,}2\ \text{км}} = 6371\ \text{км}. \qquad (10.1)$$

З рис. 10.1 видно, як можна використати значення радіуса Землі як базову лінію для обчислення лінійних радіусів r Місяця, Сонця і планет Сонячної системи. За визначенням горизонтального паралакса світила p обчислюється відстань до нього d. Це дає змогу за кутовими розмірами космічного тіла ρ визначити його лінійні розміри r.

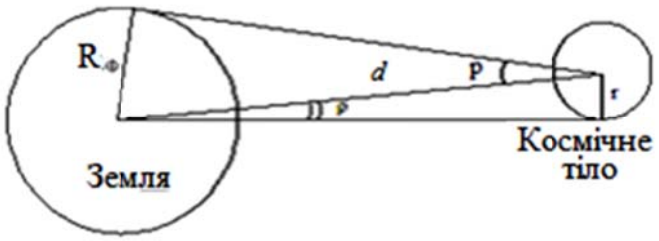


Рис. 10.1. Принцип виміру розмірів Сонця і планет Сонячної системи. Показані: p *– горизонтальний паралакс світила і його відстань d до центра Землі, яка має радіус $R_\oplus$, ρ – кутовий розмір космічного тіла*

Для визначення кутових розмірів зір, значення яких < 0,01", необхідна роздільна здатність, згідно з формулою (7.1), сотих часток кутової секунди, якій відповідають телескопи з апертурою більше 5 м. В наземних умовах реалізувати таку роздільну здатність складно. Головне дзеркало телескопа будує в його фокальній площині зображення завдяки падаючому на нього хвильовому фронту від космічного об'єкта (рис. 10.2). Земна атмосфера турбулентна. Проходячи крізь турбулентні комірки на вхідній апертурі телескопа, хвильовий фронт деформується і зображення у телескопі спотворюється. Турбулентні комірки весь час самі деформуються і переміщуються. Але на проміжках часу ~ 0,01 с земну атмосферу можна вважати замороженою. Якщо отримувати зображення з експозицією у кілька сотих часток секунди, то світлові промені, що проходять крізь різні комірки, будуть інтерферувати. Оскільки максимальна база такого «інтерферометра» дорівнює діаметру головного дзеркала, то повне зображення у фокусі телескопа складатиметься з великої кількості дифракційно обмежених зображень об'єкта – так званих спеклів (від англ. Speckle – плямка, цяточка).

Рух атмосферних неоднорідностей з частотою близько 30 Гц веде до замивання спеклової картини, в результаті чого будується зображення на земній небесній сфері з діаметром близько 1″ або більшим[57]. Відтак це зображення не є істинним, а є наслідком руху атмосферних неоднорідностей саме в цих межах, що й обмежує роздільну здатність телескопів такою величиною.

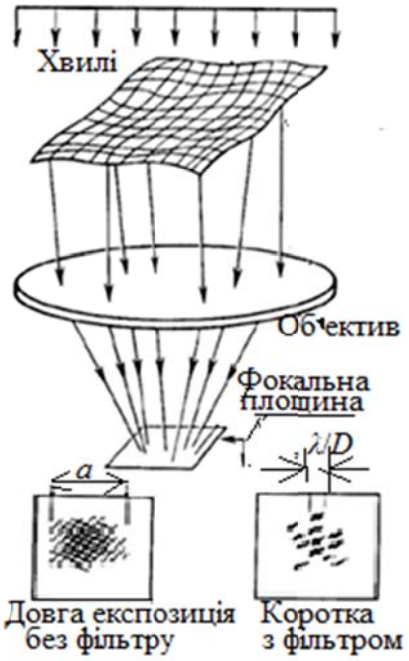


Рис. 10.2. Вигляд спотвореного зображення космічного об'єкта дією земної атмосфери у фокальній площині телескопа залежить від його експозиції: за довгої – має розпливчасту форму в межах певного кутового розміру α (якісно наведений в лівому квадратику – а); за короткої, ~ 0,01 с, – в тих же межах α розбивається на певну кількість так званих спеклів, розмір кожного з яких перебуває на дифракційній межі роздільної здатності телескопа, λ/D (якісно наведений в правому квадратику – а)

Усереднення розподілу яскравості спеклів дає змогу відновити зображення істотно малих за кутовими розмірами космічних об’єктів. Реальне запровадження описаної методики астрономічних спостережень одержано в методі спекл-інтерферометрії[58], що надало можливість вимірювати розміри зір-гігантів і надгігантів та кутові відстані між компонентами спектрально-подвійних зір на телескопах з апертурою більше 5 м, роздільної здатності яких достатньо для таких визначень. Але таких можливостей недостатньо для визначення радіусів навіть найближчих до Сонця звичайних зір, яких у Всесвіті більшість. Розв’язання такої проблеми шукається у винесенні за межі земної атмосфери телескопів з великими апертурами та застосуванні для спостереження зоряних інтерферометрів.

---

[57] Кутові межі, в яких розмивається точковий астрономічний об’єкт (наприклад зоря), є *мірою якості зображення*, що будується внаслідок проходження хвильового фронту через земну атмосферу.

[58] Спекл-інтерферометрія – метод просторової інтерференції, що ґрунтується на аналізі зернистої (спеклової) структури зображень космічних об’єктів у наземних телескопах. Така структура зображень утворюється внаслідок вибору експозицій, менших за характерний час перемішування земної атмосфери (~ 10^{-2} с), та використання систем телескопів з великими апертурами (D > 2 м) і надвеликою фокусною відстанню (~ 10^3 м). Метод дає змогу довести роздільну здатність телескопа до його дифракційної межі (≈ λ/D, де λ – довжина хвилі, на якій ведуться спостереження).

Зоряний інтерферометр приймає випромінювання космічних об'єктів одночасно двома телескопами та надає можливість аналізувати його дифракційно-інтерферометричне зображення (рис. 10.3).

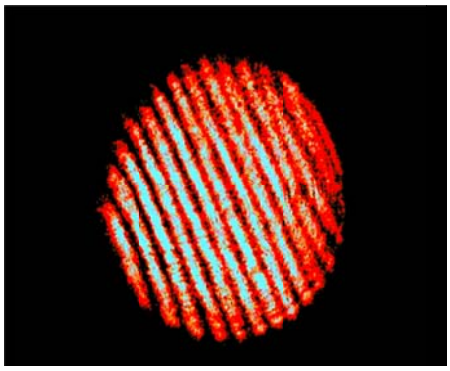


Рис. 10.3. Дифракційно-інтерферометричне зображення, яке будує зоряний інтерферометр, принципова схема якого представлена на рис. 7.4а, а розподіл інтенсивності зображення на рис 7.4б. В залежності від бази інтерферометра контраст смуг різний: він максимальний за найменшой бази D_l, коли світло є когерентним, та зникає за певного значення D_l, коли світло втрачає когерентну властивість через те, що джерело починає сприйматися як неточковий об'єкт

Роздільна здатність зоряних інтерферометрів визначається його базою, тобто відстанню між центрами приймаючих дзеркал телескопів. База зоряного інтерферометра може бути набагато більшою за апертуру навіть великого телескопа[59]. Тому їх роздільна здатність відкриває перспективи для визначення надто малих кутових діаметрів зір і навіть екзопланет. Принцип його дії оснований на установленні бази інтерферометра, за якої випромінювання від зорі втрачає *когерентність*[60]. Тобто для визначення кутових діаметрів зір необхідні зоряні інтерферометри зі змінною базою. Коли відстань між дзеркалами невелика, випромінювання від зорі, що потрапляє на телескопи, сприймається як від *точкового когерентного джерела*[61]. Зведення такого випромінювання докупи призводить до утворення інтерференційної картини. Збільшення бази веде до зменшення контрасту інтерференції, і, якщо бази інтерферометра достатньо, то у разі досягнення першого мінімуму у дифракційній картині від диску зорі як джерела випромінювання (згадайте дифракційну картину від круглого отвору), інтерференційна картина зникає внаслідок того, що випромінювання втрачає властивість когерентності (рис. 10.3). Така база і відповідає у перерахунку кутовому діаметру зорі.

Визначення мас космічних тіл базуються на узагальненому третьому законі Кеплера (9.11). Згідно з формулою (9.11) права частина тут однакова для всіх подвійних систем. Базовими визначеннями є маси

---

[59]Найдовшу базову лінію – 437 м має Navy Precision Optical Interferometer (NPOI): Військово-морський точний оптичний інтерферометр, плечі якого по 250 м розміщені у вигляді букви «Y» (США, Військово-морська обсерваторія).

[60] Когерентність світла – взаємна узгодженість у часі світлових коливань у різних точках простору, яка характеризує їх здатність до інтерференції.

[61]До точкових джерел відносять об'єкти з кутовими розмірами, які є за межами роздільної здатності телескопів чи інтерферометрів, якими їх спостерігають. Такі джерела є когерентними.

Землі та Сонця. Маса Сонця є основною одиницею виміру мас зір і зоряних систем.

Визначення горизонтального паралаксу орбіти Землі ($\pi''_{\oplus} = 6'',4356$) за спостереженнями руху Сонця на небесній сфері (див. розд. 3) дає змогу обчислити положення центра мас системи Земля–Місяць відносно центра Землі. Такий паралакс відповідає відстані центра мас системи від центра Землі 4668 км = 0,732 $R_{\oplus}$.

Маса Землі може бути обчислена, якщо відомий її радіус (10.1) і значення прискорення вільного падіння, $g_{\oplus} = 9{,}81$ м/с^2, яке може бути обчислене із лабораторних вимірювань і яке за визначенням є:

$$g_{\oplus} = \frac{GM_{\oplus}}{R_{\oplus}^2}. \tag{10.2}$$

Звідси

$$M_{\oplus} = \frac{g_{\oplus} R_{\oplus}^2}{G} = 5{,}976 \cdot 10^{24} \text{ кг}. \tag{10.3}$$

Визначення горизонтального паралакса Місяця і застосування правила важеля (9.17) для компонентів системи Земля–Місяць з урахуванням значення маси Землі дає змогу обчислити відношення мас Землі до Місяця – 1 : 81,30 та масу Місяця – $M_{☾} = 7{,}351 \cdot 10^{22}$ кг. Третій узагальнений закон Кеплера дає змогу визначити масу Сонця. Застосовуючи рівняння (9.11) для системи Сонце–Земля, можна знайти масу цієї системи:

$$M_{\odot} + M_{\oplus} = \frac{4\pi^2}{G} \frac{a_{\oplus}^3}{T_{\oplus}^2}. \tag{10.4}$$

Для визначення цієї маси потрібно знати період обертання Землі навколо Сонця і велику піввісь земної орбіти. Підставляючи значення цих величин у (10.4), отримуємо $M_{\odot} + M_{\oplus} \approx 2 \cdot 10^{30}$ кг. Враховуючи (10.3), отримуємо $M_{\odot} \approx 2 \cdot 10^{30}$ кг і $M_{\odot}/M_{\oplus} \approx 333\,000$.

Маси інших планет Сонячної системи визначають, застосовуючи третій узагальнений закон Кеплера до системи планета-супутник. Оскільки маса супутника, зазвичай, набагато менша за масу планети, то цей метод практично надає інформацію про масу планети.

Сума мас зір у подвійних системах, як і для планет, знаходиться також за третім законом Кеплера (9.11). Щоб знайти масу кожної із компонент, шукається відношення їх мас. Воно може бути отримано за астрометричними спостереженнями, коли компоненти істотно розділені у просторі.

В цьому разі існує можливість за спостереженнями відносно опорних зір визначити відстані від компонентів до їх центра мас і співвідношення цих відстаней з формули (9.17). Аналогічне відношення мас компонентів може бути обчислено і за спектроскопічними дослідженнями орбіт подвійних зір: (9.18) чи (9.19). Якщо для такої системи проведені астрометричні спостереження, з яких за третім законом Кеплера визначені суми мас (9.11), то визначення мас компонентів зводиться до системи двох рівнянь з двома невідомими

$$\begin{cases} M + m = \dfrac{4\pi^2}{G}\dfrac{a^3}{T^2}, \\ \dfrac{M}{m} = \dfrac{r_m}{r_M}, \end{cases} \tag{10.5}$$

розв'язання якої є

$$M = \frac{4\pi^2}{G}\frac{a^3}{T^2}\frac{r_m}{r_M + r_m}, \tag{10.6}$$

$$m = \frac{4\pi^2}{G}\frac{a^3}{T^2}\frac{r_M}{r_M + r_m}. \tag{10.7}$$

Наведений алгоритм обчислення є *прямим методом визначення мас* компонентів у подвійних системах.

11. Визначення астрофізичних характеристик

Серед великого загалу астрофізичних характеристик космічних об'єктів виділяють їх температуру, елементний (чи хімічний) склад та вік. По-перше, разом з масою та розмірами, вони є основними характеристиками, які є незалежними між собою. По-друге, наявність розмірів і температури дає змогу обчислювати таку важливу характеристику, як світність; хімічний склад впливає на деякі нюанси щодо меж, в першу чергу, маси основних класів космічних тіл; вік – дає змогу розглядати космічні об'єкти в космогонічному аспекті, тобто завдяки цій характеристиці є можливість розглядати їх на певному етапі еволюційного розвитку.

Визначення температур. Якщо є підстави вважати, що космічний об'єкт перебуває в термодинамічній рівновазі або близькій до неї, то для опису його спостережного випромінювання можуть бути використані властивості абсолютно чорного тіла. До таких космічних об'єктів можуть належати: зорі та субзорі, їх оболонки та диски, міжзоряні хмари. У перелічених об'єктів поле випромінювання їх зовнішніх шарів (у зір і субзір ці шари звуться атмосферами) істотно відрізняється від поля, що

формується в умовах термодинамічної рівноваги: інтенсивність випромінювання тут залежить і від глибини, і від його напрямку поширення. Проте поглинання випромінювання елементарним об'ємом у таких шарах суттєво переробляється. Цей процес прямує до встановлення термодинамічної рівноваги, коли кількість енергії, що поступає у виділений елементарний об'єм, дорівнює енергії, що випромінюється ним. Описані умови, по-перше, виконуються тим краще, чим глибше розташовані виділені для аналізу елементарні об'єми, а по-друге, термодинамічна рівновага в кожному з них відповідає певній температурі, яка є різною для різних шарів. Такі уявлення відповідають умовам *локальної термодинамічної рівноваги*, які певним чином дають можливість застосовувати фізичну модель абсолютно чорного тіла для розрахунків моделей верхніх шарів космічних об'єктів і, зокрема, можуть бути використані для обчислення температур фотосфер зір і субзір.

У такому разі розподіл енергії у неперервному спектрі випромінювання зір і субзір описується формулою Планка (6.10), яка пов'язує, в даному випадку, потік випромінювання фотосферою на певній довжині хвилі з її температурою. Максимум функції Планка описується *законом зміщення Віна*, який встановлює залежність довжини хвилі, на якій функція Планка має максимум, від ефективної температури чорного тіла:

$$\lambda_{\max} = \frac{2,90 \cdot 10^{-3}}{T_{ef}}, \qquad (11.1)$$

де розмірність [λ] = м.

Згідно з цим законом, максимум чорнотільного випромінювання зміщується в далеку чи короткохвильову області спектра в залежності від зменшення чи збільшення ефективної температури відповідно (рис. 6.2). Від того, в якій області спектра спостерігається максимум випромінювання космічного тіла, залежить його колір.

Як вже відмічалося, сумарне випромінювання абсолютно чорного тіла (або його потужність випромінювання з одиниці площі поверхні) для всього діапзону довжин хвиль характеризує закон Стефана–Больцмана, який описується формулою (6.11). Цей закон має велике значення для обчислення температур космічних тіл, зокрема нашого Сонця. Прямими вимірами можна визначити повну кількість променевої сонячної енергії (зі всього інтервалу довжин хвиль), що надходить на одиницю площі (перпендикулярну до напряму на Сонце) над земною атмосферою за одиницю часу. Ця величина зветься с*онячною сталою* і визначає потужність одиниці площі поверхні випромінювання, яке має Сонце на відстані 1 а.о.: Q = 1366 Вт/м^2. Оскільки сонячна енергія нікуди не зникає на шляху до Сонця, помноживши цю величину на площу поверхні сфери, радіус якої дорівнює відстані до

Сонця, отримують його світність – фізичну величину, що характеризує кількість випроміненої енергії зі всієї поверхні за одиницю часу:

$$L_{\odot} = 4\pi d^2 Q\Big|_{d=1\ \text{а.о.}} = 3{,}84\cdot 10^{26}\ \text{Вт}. \qquad (11.2)$$

За визначенням (6.12), світність також є добутком площі поверхні Сонця на величину енергії, що випромінюється ним з одиниці площі, яку і визначає вищезгаданий закон Стефана–Больцмана:

$$L_{\odot} = 4\pi R_{\odot}^2 \sigma T_{ef\odot}^4. \qquad (11.3)$$

Беручи до уваги значення світності Сонця (11.2), його радіуса $R_{\odot}$ = 6,96·10^8 м, який може бути обчислений з його середнього горизонтального паралакса ($p_{\odot}$ = 8,8"), та сталу Стефана–Больцмана σ = 5,67·10^{-8} Вт/м^2·К^4, обчислюється ефективна температура Сонця:

$$T_{ef\odot} = \sqrt[4]{\frac{L_{\odot}}{4\pi R_{\odot}^2 \sigma}} = 5800\ \text{K}. \qquad (11.4)$$

Визначення світності має ще й фотометричне трактування. Їй відповідає абсолютна болометрична зоряна величина – це зоряна величина (див. розд. 6), яку має зоря чи субзоря з відстані 10 пк. Якщо світність зорі виражена в сонячних одиницях $L/L_{\odot}$, то для встановлення зв'язку з її абсолютною болометричною зоряною величиною (6.8) необхідно знати тільки абсолютну болометричну величину Сонця, яка добре досліджена в астрономії ($M_{b\odot}$ = 4,75 ^{m}). Після ділення світності зір (6.12) на вираз (11.3) випливає: якщо обчислювати їх світність і радіуси в сонячних одиницях ($L/L_{\odot}$ і $R/R_{\odot}$ відповідно), можна визначити ефективну температуру зорі, знаючи ефективну температуру Сонця (11.4):

$$T_{ef} = T_{ef\odot}\sqrt[4]{\frac{L}{L_{\odot}}\Big/\left(\frac{R}{R_{\odot}}\right)^2}. \qquad (11.5)$$

Такий метод визначення температур зір дуже поширений в астрофізиці і нині використовується також для визначення температур субзір.

Визначення фізичних характеристик космічних об'єктів за аналізом спектральних ліній. Лінії в спектрах зір і субзір несуть інформацію про їх кінематику і фізичні властивості. В розд. 8 вказувалося, як за зміщеннями спектральних ліній визначаються променеві швидкості, можуть встановлюватися відношення мас компонентів у подвійних системах.

Температура зір суттєво визначає їх спектр і наявність в них відповідних ліній випромінювання та поглинання. Випромінювання, що виходить з ядра зорі, поглинається і перевипромінюється речовиною їх надр. Поверхню зір і субзір визначає їх фотосфера. Неперервний розподіл енергії в спектрі фотосфери характеризується функцією Планка з певною ефективною температурою і довжиною хвилі максимуму випромінювання, яка визначається законом зміщення Віна, якому відповідає формула (11.1).

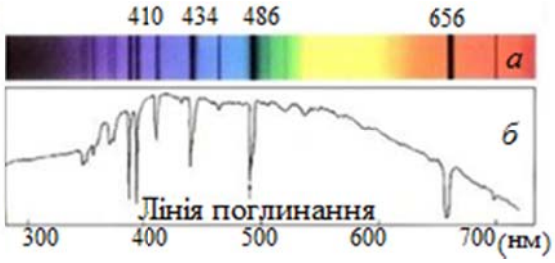


Рис. 11.1. Темні лінії на неперервному спектрі (а), відповідають відповідним лініям поглинання в розподілі енергії в спектрах зір (б)

Газовий шар, що розташований над фотосферою, є атмосферою. Якщо випромінювання, що виходить з фотосфери, розігріває певні складові атмосфери настільки, що цієї енергії достатньо для відриву електронів, то така газова складова іонізується, а у спектрі атмосфери спостерігаються *лінії випромінювання*. В результаті поглинання світла певними елементами чи молекулами в атмосфері, на неперервному спектрі космічних тіл будуть спостерігатися певні темні *лінії* (*поглинання* – рис. 11.1). Для кожного хімічного елемента та молекули існує певний набір спектральних ліній, які можуть бути доступними для спостережень за певних фізичних умов[62] в атмосфері. Ця властивість лежить в основі визначення хімічного складу атмосфери зір і субзір та їх *спектральної класифікації*. Згідно з цією класифікацією, наявності певного набору спектральних ліній поглинання відповідає відповідний інтервал температури (рис. 11.2), кожному з яких відповідає однозначний *гарвардський*[63] *спектральний клас*[64].

Сучасна послідовність такого одновимірного ряду спектральних класів має наступний вигляд:

$$W - O - B - A - F - G - K - M - L - T - Y, \qquad (11.6)$$

відповідно до упорядкування за температурами, які зменшуються зліва направо. В табл. 11.1 представлені характеристики спектрів та кольорів зір і субзір, за якими вони відносяться до певного спектрального класу, якому відповідає інтервал ефективних температур їх фотосфер. За інтенсивністю

[62] Це, в першу чергу, температура, тиск і густина атмосфери зір та субзір, які залежать від їх загальних мас і радіусів.
[63] Перший її варіант був запропонований для зір у Гарвардській обсерваторії, тому вона і дістала таку назву.
[64] У англомовних джерелах їх звуть спектральними типами.

випромінювання чи ступенем поглинання визначаються ще й концентрації хімічних елементів чи молекул, завдяки яким утворюються ці лінії в спектрі.

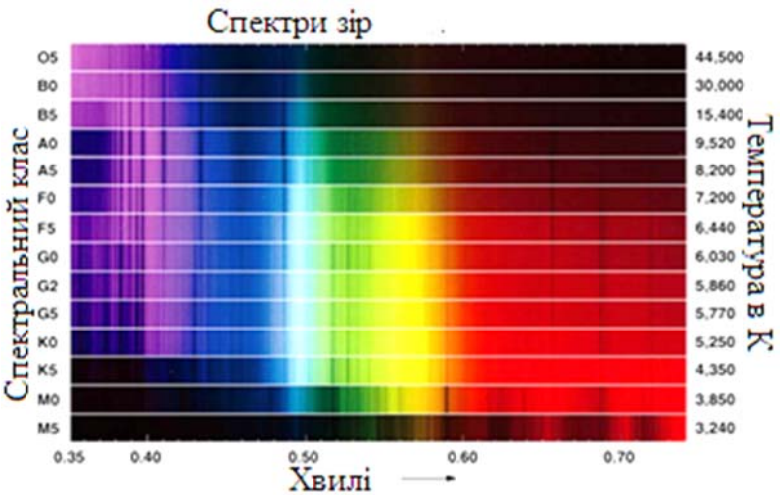


Рис. 11.2. Неперервні спектри з лініями поглинання зір різних спектральних класів і ефективних температур

Інтенсивність і профіль спектральних ліній залежить від її довжини хвилі, температури атмосфери та швидкості її турбулентних рухів, швидкості осьового обертання, концентрації речовини в газі, наявності електричних та магнітних полів. Довжина хвилі спектральної лінії конкретного хімічного елемента чи сполуки може відрізнятися від лабораторної під впливом зовнішнього гравітаційного поля та загального руху.

Рух атомів в атмосфері зір є неупорядкованим. Відносно спостерігача вони рухаються в різних напрямках: до та від нього, вбік і під кутом (рис. 11.3 а). Це веде, згідно з ефектом Допплера, до розширення спектральної лінії, загальна ширина якої відповідає інтервалу швидкостей, які мають атоми, а висота – їх кількості. Профіль спектральної лінії описує розподіл атомів за проекціями швидкостей атомів V_z на промінь зору, який у разі рівноймовірних їх напрямків відповідає так званій *функції Гаусса*, яка має дзвоноподібну форму (рис. 11.3 б, в).

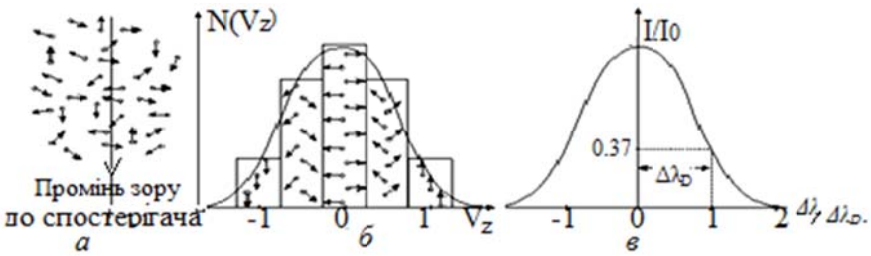


Рис. 11.3. Вектори хаотичних рухів частинок газу (а) та розподіли: проекцій їх просторових швидкостей на площину, перпендикулярну променю зору спостерігача (б), і енергії цих частинок, що проявляється у вигляді Допплерівського профілю інтенсивності спектральної лінії (в). I_0 – центральна інтенсивність випромінювання лінії

Таблиця 11.1

Характеристики гарвардського ряду спектральних класів

Клас	Характеристика спектра, колір зорі	Ефективна температура, К	Типові зорі
W	Випромінювання у лініях He II, He I, N I, N III-V, O III-VI, C II-IV. Колір яскраво-голубий.	60 000-100 000	Зорі типу Вольфа–Райє γ Вітрила, η Килю
O	Слабкі лінії нейтрального H, He, іонізованого He, багатократно іонізованих Si, C, N. Колір блакитний.	35 000-80 000	λ Оріона ξ Персея ι Оріона
B	Лінії поглинання He, H (посилюються до класу A). Слабкі лінії H та K Ca II. Колір блакитно-білий.	12 000-30 000	ε Оріона α Діви γ Персея
A	Лінії H (бальмерівська серія) інтенсивні, лінії H та K Ca II посилюються до класу F, з'являються слабкі лінії металів. Колір білий.	8 000-11 000	α Великого Пса α Ліри γ Близнят
F	Лінії H і K Ca II та лінії металів посилюються. Лінії H слабшають. З'являється лінія Ca I λ422,7 нм і посилюється смуга G, яка утворюється лініями Fe, Ca та Ti на довжині хвилі 431 нм. Колір жовтуватий.	6 500-7 500	δ Близнят δ Малого Пса β Кассіопеї α Персея α Корми
G	Лінії H і K Ca II інтенсивні. Лінія Ca I λ422,7 нм та лінії металів. Лінії H слабшають до класу K. З'являються смуги CH та CN. Колір жовтий.	5 000-6 000	Сонце α Возничого β Геркулеса β Південної Гідри
K	Лінії металів та смуга G інтенсивні, смуга H мало помітна. З підкласу K5 стають видимими смуги поглинання TiO. Колір червонуватий.	4 000-5 000	α Волопаса ε Пегаса β Близнят α Тельця
M	Інтенсивні смуги TiO, VO та інших молекул. Помітні лінії металів, смуга G слабшає. Помітні лінії випромінювання металів. Колір червоний.	2 000-3 500	α Оріона α Скорпіона *o* Кита η Близнят
L	Смуги TiO та VO відсутні. Помітна сильна смуга Cr та Cs, широкі смуги K і Na. Колір темно-червоний.	1 500-2 000	Kelu-1, GD165B
T	Інтенсивні смуги поглинання води, метану та H_2. Колір коричнюватий.	1 000-1 500	Gliese 229B
Y	Смуги поглинання: NH_3, H_2O, CH_4. Колір темно-коричнюватий.	< 700	CFBDSJ005910.90-011401.3, ULASJ003402.77–005206.7

Якщо розширення лінії пов'язане тільки з тепловим рухом атомів, що випромінюють, то за аналізом її контуру можна визначити температуру атмосфери зір і субзір. З такою кінетичною температурою пов'язують проекцію на промінь зору найбільш ймовірної швидкості руху атомів. Із рис. 11.3 б видно, що максимуму інтенсивності лінії відповідає променева швидкість $V_r = 0$. Згідно з властивостями функції Гаусса, середній швидкості руху атомів відповідає значення інтенсивності, що становить ≈ 37 % від максимального значення (I_o). Це відповідає значенню відносної інтенсивності лінії, яку вона має на середині відстані між центром і краєм лінії (рис. 11.3 в), що називається *допплерівською шириною спектральної лінії* – $\Delta\lambda_D$. Тобто цей зсув по довжині хвиль відповідає значенню найбільш ймовірних швидкостей частинок.

За кінетичною теорією газів, за їх температуру відповідальною є швидкість руху частинок, з яких складається газ. Енергетичний баланс між кінетичною енергією частинок з масою m і тепловою енергією системи kT (k – стала Больцмана, T – температура газу) дає змогу пов'язати найбільш ймовірну швидкість атомів υ^* з температурою системи

$$\upsilon^* = \sqrt{\frac{2kT}{m}} \tag{11.7}$$

і допплерівською шириною спектральної лінії. Використавши зв'язок (8.10), в якому за променеву прийнята ймовірна швидкість, можна за значенням допплерівської ширини спектральної лінії

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_o = \frac{\lambda_o}{c}\upsilon^* = \frac{\lambda_o}{c}\sqrt{\frac{2kT}{m}}, \tag{11.8}$$

одержаним зі спостережних даних спектральних ліній, обчислювати кінетичну температуру атмосферного газу:

$$T = \frac{mc^2}{2k\lambda_o^2}\Delta\lambda^2. \tag{11.9}$$

Ефект Допплера проявляється і внаслідок інших рухів, які властиві космічним тілам. Так, осьове обертання космічного тіла веде до розширення спектральних ліній. Крайні екваторіальні області сферичного джерела внаслідок осьового обертання рухаються відносно зовнішнього спостерігача в протилежних напрямках. Це веде до того, що кінці лінії зміщуюся від центра лінії у протилежні сторони, і згідно з ефектом Допплера *відносне розширення лінії*[65] пропорційне проекції швидкості

[65]Тобто відношення ширини лінії до її довжини хвилі.

осьового обертання на небесну сферу. Цей ефект веде до розширення усіх ліній у спектрі; кожна ширина лінії приблизно пропорційна довжині хвилі; інтегральна яскравість ліній не залежить від швидкості осьового обертання космічного тіла. На рис. 11.4 наведено приклад розширення спектральних ліній у Альтаїра і Веги за рахунок різних швидкостей осьового обертання $V_{об}$. Це пов'язано з тим, що вісь обертання Альтаїра спостерігається майже під кутом 90°, а Веги – $\approx 0^o$. Тому лінія Магнію у Веги майже не змінилася під впливом її осьового руху, тоді як у Альтаїра вона зазнала істотного розширення.

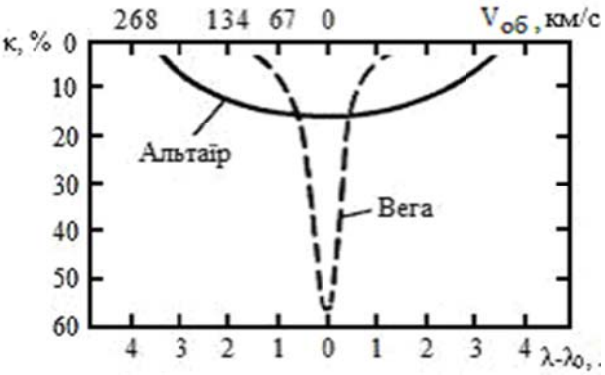


Рис. 11.4. Залежність відношення енергій випромінювання Веги та Альтаїра в лінії поглинання Mg II (λ_0 = 448,1 нм) та неперервного спектра від довжина хвилі $\lambda - \lambda_0$ та швидкості осьового обертання $V_{об}$

Інтегральна яскравість спектральних ліній або їх глибина, якщо це лінії поглинання, що належать певній речовині, залежать від її концентрації, середньої теплової швидкості атомів і довжини хвилі спектральної лінії. Для різних концентрацій речовини знайдені певні залежності між ними, які лежать у основі визначення елементного та хімічного складу атмосфери зір.

Мірою концентрації хімічних елементів є *металічність*: відношення кількості частинок певного хімічного елемента N_E або усіх елементів важче за Гелій до кількості частинок Гідрогену N_H по відношенню до відповідного сонячного розподілу хімічних елементів

$$[\mathrm{Me/H}] = \lg\left(\frac{N_E}{N_H}\right) - \lg\left(\frac{N_E}{N_H}\right)_{\square} . \qquad (11.10)$$

Ця величина також використовується для визначення елементного та хімічного складів атмосфери зір.

Визначення віку космічних об'єктів. Вік космічних об'єктів в астрономії визначається прямими методами і посередніми, що спираються на уявлення про еволюцію космічних тіл та їх систем.

До прямих відносять *метод ядерної космохронології*, заснований на порівнянні у певному зразку початкової кількості атомів N_o з їх кількістю, що залишилася в ньому до теперішнього часу N_t (*час* – t):

$$N_t = N_o e^{-\xi t} = N_o e^{-0,693 t/\tau_{1/2}}, \qquad (11.11)$$

де ξ – стала радіоактивного розпаду, $\tau_{1/2}$ – період піврозпаду радіоактивного ядра, який визначається експериментально з лабораторних досліджень.

Метод застосовують для визначення віку порід Землі, Місяця і метеоритів, тобто тих об'єктів, мінерали яких доступні для лабораторних досліджень. Припускається, що певна порода після її утворення була замкнутою системою, в якій певні ізотопи перетворюються під час радіоактивного розпаду у визначені інші ізотопи. Утворення породи може бути пов'язане з виділенням її з розплаву (у разі вулканічного походження або після первинного розігріву за час формування небесного тіла) чи ізоляцією після космічної катастрофи. Типовим прикладом може слугувати утворення ізотопу Плюмбуму ^{206}Pb із радіоактивного ізотопу Урану ^{238}U, з урахуванням існування природного ізотопу ^{204}Pb, який не має радіоактивного походження. Розглядаються також перетворення первинних хімічних елементів у похідні ізотопи: $^{235}U \rightarrow {}^{207}Pb$, $^{87}Rb \rightarrow {}^{87}Sr$, $^{40}K \rightarrow {}^{40}Ar$ та інші.

Обчислені за цим методом літá для залізних метеоритів дають оцінки не більші за 4,6 млрд років, для кам'яних метеоритів – в межах від 0,5 до 5 млрд років, для земних порід – $4{,}54 \pm 0{,}02$ млрд років, для місячних зразків – від 2 до 4,53 млрд років. Такі дані можуть слугувати певними оцінками для віку усієї Сонячної системи, $4{,}6 \pm 0{,}1$ млрд років, і нижньою межею для віку Сонця.

Вік Сонця та зір одержують із теоретичних еволюційних його моделей внутрішньої будови (це є вже посереднім методом), спираючись на уявлення щодо їх походження і ядерну природу зоряної енергетики. Вік зоряної системи обмежений часом повного її розпаду. За теорією зоряної динаміки зоряні скупчення втрачають в середньому один зоряно-субзоряний компонент за мільйон років. Відтак за підрахунками кількості компонентів у таких зоряних системах можна оцінити час їх повного розпаду.

Оцінка віку нашої й інших галактик може бути отримана із розрахунків необхідного часу для накопичення у них вмісту важких елементів Z (усіх елементів, важчих за Гелій), що спостерігаються у наймолодшого космічного тіла їх населення або у Сонця на момент його утворення. Моделі нашої Галактики дають необхідний вміст для Z після її утворення не більше 7 млрд років. В такому разі за верхню оцінку, з урахуванням віку Сонця (5 млрд р.), слід прийняти вік Галактики 12 млрд років.

Тести

2.1. Для чого будують наземні оптичні телескопі з великими діаметрами дзеркал?

2.1.1. Щоб розгледіти більш детально структуру космічних об'єктів.

2.1.2. Щоб зафіксувати найбільш віддалені об'єкти Всесвіту.

2.1.3. Щоб отримати якомога більші за лінійними розмірами зображення у фокальній площині.

2.1.4. Щоб досягнути найбільшу роздільну здатність та проникну силу.
2.1.5. Щоб витратити якомога більше грошей.

2.2. Чи можна побудувати телескоп з приймачем випромінювання, якому доступний весь діапазон електромагнітного випромінювання?
2.2.1. Можна, якщо є для цього достатнє фінансування.
2.2.2. Не можна.
2.2.3. Можна, для точкових космічних об’єктів.
2.2.4. Можна, якщо спостережні об’єкти мають достатні кутові розміри.
2.2.5. Можливо, це буде зроблено в далекому майбутньому.

2.3. Чи можуть паралакси мати від’ємні значення?
2.3.1. Можуть.
2.3.2. Не можуть.
2.3.3. У загальному вигляді можуть мати комплексні значення.
2.3.4. Можуть, якщо об’єкти перебувають на надто великих відстанях.
2.4.5. Можуть, якщо це об’єкти Сонячної системи.

2.4. Чи можуть власні рухи та променеві швидкості мати від’ємні значення?
2.4.1. Не можуть.
2.4.2. Власні рухи можуть, променеві швидкості – не можуть.
2.4.3. Променеві швидкості можуть, власні рухи – не можуть.
2.4.4. Можуть.
2.4.5. Можуть лише в тому разі, якщо обчислена за їх даними просторова швидкість має позитивне значення.

2.5. Чи можна лише за даними покриття астероїдом подвійної зорі визначити маси, розміри та середні густини компонентів? Обрану відповідь прокоментувати.
2.5.1. Ні.
2.5.2. Так, якщо його орбіта перебуває поблизу земної.
2.5.3. Можна лише маси.
2.5.4. Можна лише розміри.
2.5.5. Так.

2.6. З чим пов'язана неточність у початковому формулюванні третього закону Кеплера? У якому випадку їм можна користуватися (обґрунтуйте)?
2.6.1. Маси компонентів однакові;
2.6.2. Маси компонентів настільки малі, що ними можна знехтувати;
2.6.3. Маса одного з компонентів суттєво перевищує інші;
2.6.4. Компоненти рухаються по колових орбітах відносно центра мас;
2.6.5. Сума мас компонентів надто велика.

2.7. За якої умови, коли маса подвійної системи зосереджена в одному з компонентів, який у процесі еволюції зменшується в масі, інший компонент перестане бути його супутником? Це станеться (обґрунтуйте), коли
2.7.1. Маса істотно більшого компонента зменшиться вдвічі;

2.7.2. Маса більшого компонента зрівняється з меншим;
2.7.3. Супутник вийде на гіперболічну орбіту;
2.7.4. Супутник випарується;
2.7.5. Такий розвиток подій неможливий.

2.8. Відомо, що Місяць віддаляється від Землі зі швидкістю близько 3,8 см/рік. Чи змінюється (обґрунтуйте) при цьому відстань між центрами мас системи Земля–Місяць і Землі?
2.8.1. Ні.
2.8.2. Змінюється тільки відстань між центрами мас системи Земля–Місяць і Місяця.
2.8.3. Не змінюється, тому що відстань між Землею та Місяцем є сумою відстаней від їх центрів до центра мас цієї системи.
2.8.4. Так, тому що маса Землі більша маси Місяця.
2.8.5. Так.

2.9. Якщо б зі спостережень було відмічено, що за незмінним кутовим діаметром Сонця почалося збільшення «сонячної сталої». Це свідчило б про (обґрунтуйте)
2.9.1. Зміну його лінійного радіуса;
2.9.2. Зменшення його ефективної температури;
2.9.3. Збільшення його ефективної температури;
2.9.4. Зменшення відстані від Землі до Сонця;
2.9.5. Зменшення світності Сонця.

2.10. Яке значення має металічність Сонця? Обґрунтуйте.
2.10.1. 0.
2.10.2. –1.
2.10.3. –2.
2.10.4. 0,02.
2.10.5. 1.

Контрольні питання

1. Якими засобами і методами досліджуються космічні тіла?
2. Які основні типи телескопів?
3. Які основні складові будови всіх телескопів?
4. Що визначає роздільну здатність телескопа?
5. У чому відмінність обчислення відстаней до об’єктів Сонячної системи та інших зір?
6. У чому полягає основна складність визначення розмірів космічних об’єктів прямими спостереженнями?
7. Які основні закони орбітального руху?
8. Яка фізична характеристика є визначальною для спектрального класу зорі?
9. Які фізичні процеси призводять до розширення спектральних ліній?
10. У чому принципова різниця визначення віку Землі та Сонця?

Частина 3

КОСМІЧНІ ТІЛА

Сонце, Місяць, зорі та планети, що спостерігаються на небосхилі, метеори, інші світила, що доступні для спостережень тільки в телескоп, – все це космічні тіла. За своєю природою вони можуть бути істотно різними. З іншого боку, Сонце – це таке ж космічне тіло, як і віддалені зорі, і різняться за сприйняттям лише тому, що перебувають на незрівнянних відстанях від Землі. Зорі, які занесені до астрономічних каталогів, нараховують вже декілька мільярдів. Всього ж їх налічують у Всесвіті, за визначеннями фахівців, близько ~ 10^{21}, а можливо, й більше. Планет теж багато: не виключається, що їх може бути на два порядки більше, ніж зір. Тобто вже кількість тільки таких космічних тіл можна порівнювати з числом Авогадро – ~ 10^{23}.

Чи можна дати лад такій великій кількості об’єктів, на підрахунок якої недостатньо тривалості часу людського життя[66]? Очевидно, що в такому разі космічні тіла слід певним чином класифікувати за їх ключовими характеристиками, а це б дало змогу скласти уявлення про відповідні класи цих об'єктів. А з іншого боку, щоб на основі наведеної класифікації можна було певним чином тлумачити фізичні властивості космічних тіл, що вже трапляються чи відкриваються у Всесвіті.

12. Різноманітність космічних тіл у Всесвіті та їх класифікація

Уже в Сонячній системі проявляється певне різноманіття космічних тіл, які мають різні властивості: Сонце – зоря; планети – земної групи та гіганти; малі тіла. За межами Сонячної системи всі космічні тіла, які доступні для спостереження неозброєному оку, є виключно зорями. Їх фізичні характеристики, які здобуті на основі методів астрономічних досліджень (див. розд. 8), відрізняються в широких межах, що віддзеркалює

[66]Тривалість року нараховує $3{,}16 \cdot 10^7$ секунд. Час життя людини становить ~ 10^2 років. Тобто людина живе 10^9–10^{10} секунд. Якщо б людина, народившись, лише те і робила, що рахувала тільки зорі, то, щоб підрахувати їх повну кількість у Всесвіті, повинна була б за секунду підраховувати 10^{11} = 100 млрд зір, що, очевидно, неможливо.

їх велику кількість. Це потребує узагальнення та проведення відповідної класифікації.

Різноманіття зір і планет. Зорі відрізняють одна від одної за їх масами, розмірами, температурою фотосфери, хімічним складом, віком[67], світністю, середньою густиною і т. д. За спостережними даними зір у Всесвіті, вони відрізняються між собою:

- за масою – у 3 тис. разів (наймасивніша: 265 $M_{\odot}$);
- за розмірами – у 7 тис. разів (найбільші: близько 1000 $R_{\odot}$);
- за температурою – у 35 разів (максимальні: 80 –100 тис. K);
- за світністю – у 8 млрд разів (максимальна: 8 млн $L_{\odot}$)
- тощо.

Поряд зі звичайними зорями спостерігаються змінні, малої та великої світності, різні *карлики* (*червоні, білі, коричневі* тощо) й інші.

За межами Сонячної системи відкриті *екзопланети* (префікс «екзо-» від грец.: εξω – поза, зовні). Вони відрізняються за масою та розмірами. Серед них є схожі на планети Сонячної системи, а є й відмінні від них. Наприклад, є планети-гіганти, періоди орбітального руху яких становлять всього 1–2 доби, а не роки – десятки років, як у Сонячній системі. Такі екзопланети отримали назву «*гарячі юпітери*» через те, що вони надто близько розташовані до своїх зір і мають велику температуру (близько 1000° C і більшу).

Відкриті космічні тіла і за межами оптичного діапазону. В інфрачервоному (ІЧ-) діапазоні спостерігаються холодні карлики з температурою менше зоряних і з масами від сумірних з масою Юпітера до сотих часток від сонячної. В радіодіапазоні відкриті *пульсари*, які відносять до *нейтронних зір*. Вони мають середню густину, порівняну з ядерною речовиною ($\sim 3\cdot10^{17}$ кг/м^3). За характерними змінами окремих космічних джерел, які випромінюють у ІЧ- та рентгенівському діапазоні, прийшли до висновку, що всередині їх перебувають *чорні діри,* гравітаційне тяжіння яких настільки велике, що навіть кванти світла не можуть залишити їх околи.

Хімічний склад зір оцінюють за вмістом важчих за ядра Гелію хімічних елементів – в астрофізиці їх звуть металами. Більшість зір Молочного Шляху мають хімічний склад, схожий з сонячним. Вік зір, що належать Молочному Шляху, менший за 10 млрд років. В безпосередньому його околі спостерігаються зорі більш старі – на 2–3 млрд років, з частковим вмістом металів у 10–100 разів менше за сонячний склад. Відомі й такі зорі, в яких цей вміст є ще меншим. В інших галактиках Всесвіту спостерігаються зорі

[67] Ці перелічені перші п’ять характеристик є незалежними, і їх відносять до основних.

з істотними відмінностями за хімічним складом, але в середньому вміст у них металів не перевищує сонячний.

За підрахунками відомо, що кількість зір нашої Галактики ~ 400 млрд, а число галактик у Всесвіті такого ж порядку. До того ж кількість планет у цих зір може суттєво перевищувати загальну кількість зір.

Діаграма Герцшпрунга–Рассела – це залежність між світністю зір та їх температурою (чи спектральним класом). Вона віддзеркалює: фотометричну класифікацію зір у системі координат: абсолютна зоряна величина – колір чи частково астрофізичну, коли по осях наведені дані їх світності та ефективна температура (чи спектральний клас) – рис. 12.1. Всі такі діаграми Герцшпрунга–Рассела (ДГР) якісно подібні між собою. На них виділяються 8 *класів світності*[68]:

0 – гіпергіганти;
I – надгіганти;
II – яскраві гіганти;
III – гіганти;
IV – субгіганти;
V – головна послідовність;
VI – субкарлики;
VII – білі карлики.

Ця діаграма, з одного боку, відповідає двовимірній класифікації зоряних спектрів (де разом зі спектральним типом зорі вказується її клас світності, наприклад, для Сонця: G2V), з іншого, – веде до певної класифікації зір за їх розмірами. Похідні «гігантів», «карликів» віддзеркалюють порівняні розміри зір, а не їх маси. Наприклад, зорі-гіганти типу RR Ліри мають маси 0,8 $M_{\odot}$, в той час як звичайна зоря Сонце (з масою 1 $M_{\odot}$) належить до головної послідовності. Вказані зорі менші за масою, але більші за розмірами за Сонце.

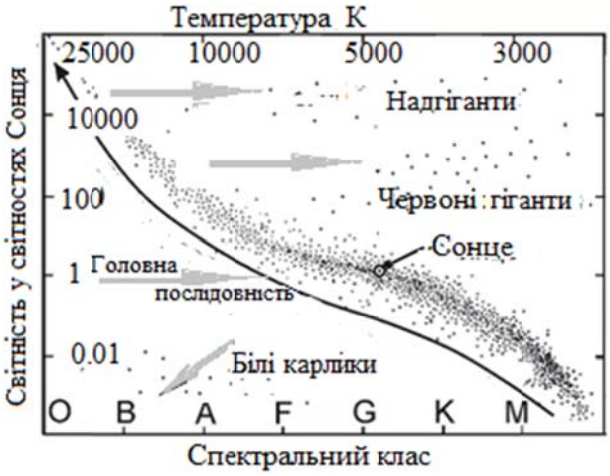


Рис. 12.1. Діаграма Герцшпрунга–Рассела

Астрофізична класифікація космічних тіл. Виокремлення відповідного класу космічних тіл формується на таких його фізичних особливостях, які притаманні тільки їм і відсутні в інших об'єктах. Відтак зорі виділяють в окремий клас через наявність в їх надрах низки довготривалих ядерних реакцій, в результаті яких синтезуються атоми Гідрогену в ядра

[68] Їх ще звуть послідовностями.

Гелію[69]. Наявність фізичних умов для перебігу таких реакцій пов'язана з певним інтервалом мас космічних об'єктів, які створюють в їх центральних областях певний тиск і температуру. Планети виокремлюються через достатність маси для створення умов проходження *гравітаційної диференціації*[70] надр космічного тіла, в результаті чого виділяється ядро, яке має густину, більшу за середню. Як видно, і під час виокремлення зір і планет ключову роль відіграє маса космічного тіла. Друга основна характеристика – хімічний склад, коригує значення інтервалу мас. Так, виявилося, що мінімальна маса планет різного хімічного складу залежить саме від нього: *металеві, силікатні* та *льодяні планети* мають наступні значення: $10^{-9}\,M_{\odot}$, $10^{-10}\,M_{\odot}$, $10^{-11}\,M_{\odot}$ відповідно. Виділяють ще воднево-гелієві планети, мінімальну масу яких пов'язують з їх можливістю утримати в своєму полі тяжіння Гідроген і Гелій, які є летючими хімічними елементами. В такому разі їх мінімальна маса наступна: $10^{-4}\,M_{\odot}$.

Зорі з сонячним хімічним складом потрапляють в інтервал мас 0,08 – 150 $M_{\odot}$. Межа 0,08 $M_{\odot}$ відповідає умовам, за яких виникає протон-протонний цикл ядерних реакцій. Для мас, більших за 150 $M_{\odot}$, зоряний вітер[71] настільки великий, що зоря «випаровується» і не може існувати. Зниження частки металів у хімічному складі зір веде до збільшення їх максимальної маси.

Дослідження показали, що і за мас, менших за 0,08 $M_{\odot}$, можуть йти недовготривалі (не більше 600 млн років, в залежності від маси) ядерні реакції за участі Гідрогену, Літію та Дейтерію[72]. Далі такі космічні тіла виходять на еволюційну стадію вічного остигання. Мінімальній масі, за якою ще може «загорітися» Дейтерій, відповідає значення 0,012 $M_{\odot}$. За менших мас в центрі космічних тіл не виникають умови для жодних ядерних реакцій. Космічні тіла з такими масами вже слід віднести до планет. Наявність інтервалу мас 0,012–0,08 $M_{\odot}$ дала підставу для введення ще одного, третього класу космічних тіл. Їх назвали *субзорями* (або коричневими карликами). На ДГР вони розташовуються в правій нижній частині, продовжуючи головну послідовність зір низької світності.

---

[69] Ця низка складається з 10 ядерних реакцій і зветься *протон–протонним циклом*.

[70] Перерозподіл густини конгломерату планетної речовини впродовж радіуса під дією самогравітації (тобто своєї гравітації).

[71] Зоряний, як і сонячний, вітер – процес витікання плазмової речовини із зорі в міжзоряний простір.

[72] Ця низка складається з 3 ядерних реакцій і зветься зрізаним (скороченим) *протон–протонним циклом*.

Отже, на інтервалі мас $(10^{-9}–10^{-11})\div150\,M_{\odot}$ виділяються три класи космічних тіл: планети, субзорі та зорі (рис. 12.2).

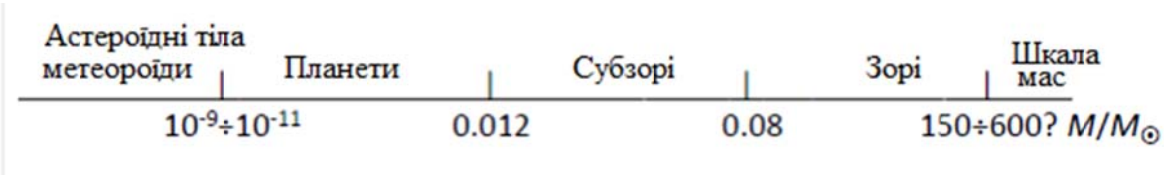


Рис. 12.2. Шкала мас космічних тіл. Знак питання «?» відноситься до чисто водневе-гелієвих зір, максимальна маса яких ще не достатньо визначена

Меншим масам відповідають *астероїди*, а *малі тіла* з діаметром, меншим за 30 м, відносять до *метеороїдів* (або міні-астероїдів). Серед планет виділяють ще карликові планети, які, як і звичайні планети, мають ядра, але межа між цим відгалуженням і звичайними планетами поки що фізично не обґрунтована.

13. Зорі та Сонце

Зорі впродовж більшості часу свого існування перебувають в умовах або повної, або часткової *гідростатичної рівноваги*, обумовленої дією сили гравітації та протидіючої їй сили газового тиску або тиску випромінювання, які утворюються через наявність власного джерела енергії. Саме через це вони мають сферичну форму, якщо осьовим обертанням або дією приплив-них сил за умови наявності масивного зорі-компонента (в подвійній системі) можна знехтувати. Перенесення енергії зір із центральних областей назовні, випромінювання та винесення речовини за межі зорі (*зоряний вітер*), загалом внутрішня будова зір упродовж їх існування в залежності від їх маси, елементного складу і віку є різними. Всі ці чинники зумовлюють різноманітність зір, які поширені у Всесвіті, серед яких Сонце є їх представником.

Власні джерела енергії. Тільки у зір в центральній області є умови для перебігу низки (що звуться *циклом*) *ядерних реакцій*, в результаті яких із ядер Гідрогену (тобто протонів – p) синтезується Гелій-4 з виділенням сумарної енергії ΔE за схемою:

$$4p \rightarrow {}^{4}\mathrm{He} + 2e^{+} + 2\nu_{e} + \Delta E\,, \qquad (13.1)$$

де e^{+} – позитрон, ν_e – електронне нейтрино.

Цією визначальною властивістю зорі відрізняються від інших космічних тіл. Під згаданими умовами розуміють достатню температуру

та щільність речовини в центрі космічного тіла, які залежать від його маси, оскільки саме вона і забезпечує їх шляхом дії тиску, який створює *сила всесвітнього тяжіння* на його центр. Маси космічного тіла 0,08 $M_{\odot}$ достатньо, щоб в його центрі була досягнута температура 3,2 млн К, за якої проходить так званий протон-протонний (*p–p*) цикл ядерних реакцій (в цьому разі ΔE = 26,7 МеВ стає ефективним), що і визначає мінімальну масу зорі.

Енергія, що виникає в результаті ядерних реакцій, завдяки переносу у верхні шари зорі, перешкоджає її стисканню. Від кількості водневого ядерного палива та темпу його вигоряння залежить час, упродовж якого виконується баланс рівноваги зорі, коли вона перебуває на головній послідовності ДГР. Саме положення зорі на цій послідовності вказує на те, що в надрах зір «горить» Гідроген. Темп горіння Гідрогену зростає зі збільшенням маси зір. Зі зростанням маси зір $M > 1\ M_{\odot}$ енергетично вигіднішім є перебіг іншого, *вуглецево-азотного* (CNO) *циклу* ядерних реакцій ($\Delta E = 25$ МеВ). Вигоряння Гідрогену веде до виникнення гелієвого ядра та зупинки ядерних реакцій. Подальша еволюція зір залежить від їх маси.

Якщо зоря перебуває на інших послідовностях ДГР (гігантів, яскравих гігантів, над- чи гіпергігантів), в залежності від початкової маси зорі в надрах створюються умови для ядерного горіння більш важких хімічних елементів, яке в процесі їх синтезу супроводжується виділенням енергії. Границя для хімічних елементів у Періодичній системі елементів Менделєєва, які утворюються в надрах зір, обмежена по горизонталі: IV-м рядом, 4-го періоду та по вертикалі VIII-ю групою, де знаходяться Ферум, Кобальт, Нікол (рис. 13.1). Для хімічних елементів, що розташовані нижче цієї межі, необхідна додаткова енергія ззовні, щоб забезпечити умови для їх синтезу.

Час ядерного горіння хімічних елементів має обернену залежність від їх маси. Наймасивніші зорі Галактики (150 $M_{\odot}$) перебувають на головній послідовності близько 2 млн років. У зір найменших мас (< 0,26 $M_{\odot}$) через те, що вони *повністю конвективні* (речовина їх надр перемішується від центра до зовнішніх шарів), запасів Гідрогену достатньо на горіння до 300 трильйонів років. Є залежність і щодо утворення інших ядер хімічних елементів: більш масивному атомному ядру відповідає менший час його синтезу.

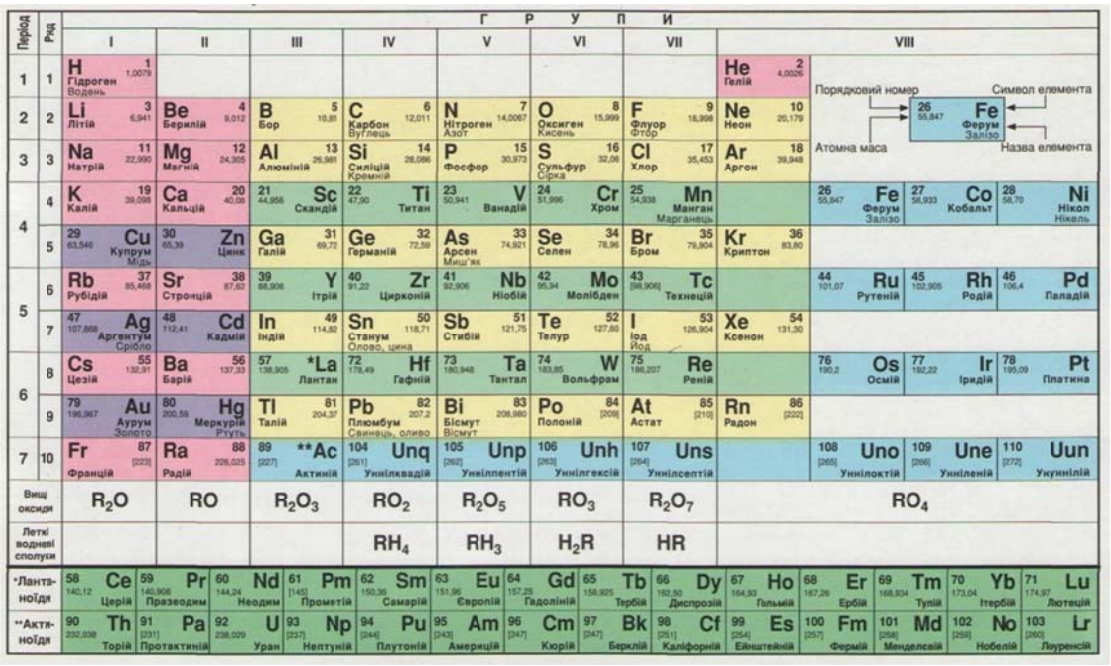


Рис. 13.1. Періодична система хімічних елементів Менделєєва

Перенесення енергії в надрах зір і зоряний вітер. В зорях є два механізми перенесення енергії, яка утворюється в результаті ядерних реакцій та передається назовні через *зону перенесення теплової енергії*: шляхом *конвекції* (тобто перемішування) та *випромінювання*. В разі конвекції нагріта речовина більш глибоких шарів в полі тяжіння зорі переносить теплоту в більш зовні шари. Повністю конвективному космічному тілу відповідає перемішування речовини його надр від центра до найбільш зовнішніх шарів.

Переносником випромінювання є фотон, який отримує енергію від ядерного джерела та рухається з центра назовні. На своєму шляху він поглинається, перевипромінюється, розсіюється різними частинками, які присутні в надрах зорі, що заважає йому швидко перенести енергію, досягнути зовнішніх шарів та покинути зорю. Цей шлях займає десятки, а то й сотню тисяч років. Довгий час перебування фотона в надрах зір спричиняє те, що зветься досягненням термодинамічної рівноваги між енергією, що потрапляє у виділений елементарний об'єм надр і виходить з нього.

З іншого боку, фотон має імпульс і під час руху назовні взаємодіє з зоряною речовиною. При цьому відбувається передача його кінетичної енергії іонам речовини, через що вони покидають верхні шари. Якщо швидкість частинок зоряної речовини перевищує значення другої космічної швидкості, вона покидає межі зорі. Такий процес зветься зоряним вітром. Причому чим більші маса зорі та частка в її складі важких хімічних

елементів, тим більш інтенсивним є зоряний вітер. У наймасивніших зір з сонячним елементним складом роль зоряного вітру надзвичайно велика. Наприклад, зорі з масами в 100 $M_{\odot}$ на головній послідовності втрачають половину своєї маси, а зорі з масами $M = 150\,M_{\odot}$ – всю, що і визначає максимальну масу зір з сонячним елементним складом.

Внутрішня будова зір і їх атмосфер. Якщо зоря має внутрішні джерела енергії, то вищевказану зону ядерних реакцій звуть її *ядром* (рис. 13.2).

а б в

Рис. 13.2. Внутрішня будова зір: а – головної послідовності, б – субгігантів, в – гігантів

Такі зорі розташовуються на гілках послідовностей ДГР: 0, I-III, V та VI (рис. 12.1). Ядро оточує шар переносу енергії назовні. В залежності від астрофізичних обставин, він може ділитися на зони, в яких енергія переноситься шляхом випромінювання чи конвекцією. Фотосфера – верхній шар зорі (в якому майже відсутній градієнт температури), спостереження якого саме і окреслює зорю. Цей же шар є і нижнім зоряної атмосфери. Над ним розташовується другий шар зоряної атмосфери – *хромосфера*, в якій помітним є позитивний градієнт температури, а найбільшому відповідає третій шар – *корона*. В цьому шарі температура може перевищувати значення у фотосфері на порядки, сягаючи ~ 10^6 K. Саме тут енергія фотонів найвища, що і дає підстави для формування в короні зоряного вітру.

Зорі, які перебувають на інших гілках ДГР, мають деякі особливості. Наприклад, на послідовності IV, яка відповідає субгігантам, ядро має гелієвий склад. Над ним розташовується так зване «*шарове джерело*», в якому продовжуються ядерні реакції з перетворення Гідрогену в Гелій – (13.1). Далі йде шар (зона) переносу енергії назовні, який оточує зоряна атмосфера. На стадії субгігантів, а ще більше – гігантів (послідовність III) зорі мають у десятки разів більш протяжну атмосферу, ніж на головній послідовності. В сотні і тисячі разів більш протяжну атмосферу мають зорі, що перебувають на гілках послідовностей 0÷II. В глибоких шарах атмосфери

цих зір (над ядром) енергія переноситься шляхом випромінювання, а в зовнішній, більш протяжній області – шляхом конвекції.

Білі карлики (послідовність VII на ДГР) не мають власних джерел енергії, у них відсутнє ядро, немає градієнта температури уздовж радіуса, а атмосфера є одношаровою.

Елементний склад зір впливає на їх джерела енергії, передачу енергії назовні, темп зоряного вітру, значення основних характеристик. В залежності від наявності в складі зір важких хімічних елементів їх розділяють на три *основні населення*: I, II та III. Уміст (частку) хімічних елементів позначають: X – Гідрогену, Y – Гелію, Z – загалом всіх інших, так, що виконується рівність:

$$X + Y + Z = 1. \tag{13.2}$$

До населень відносять зорі:

I – з часткою $Z \gtrsim 0{,}01$ ($X = 0{,}71 \div 0{,}72$),
II – з $Z \sim 0{,}001$ ($X \approx 0{,}73$),
III – з $Z = 0$ ($X = 0{,}75$, $Y = 0{,}25$).

Така градація відповідає еволюційних процесам, що відбувалися у Всесвіті; спостережним даним щодо елементного складу зір, які належать до зоряних систем і їх складових різного віку; особливостям внутрішньої будови й особливостям зоряної еволюції.

Як з'ясувалося, чим менше Z, тим більші максимальні маси (для $Z = 0{,}02$ – 150 $M_\odot$, для $Z = 0$ не менше 500 $M_\odot$) зір і температура їх фотосфер (при $Z = 0{,}02$ – ≈ 60 тис. K, для $Z = 0$ може сягати 110 тис. K) і темп зоряного вітру (для $Z = 0{,}02$ він більший на порядки від зір з $Z = 0$). Для $Z = 0$ енерговиділення відбувається виключно за рахунок ядерних реакцій *p–p* циклу. Енергія в цьому випадку переноситься назовні шляхом випромінювання, через більш прозорі надра таких зір.

Сонце – найяскравіший небесний об'єкт, що розташований від Землі на відстані близько 150 млн км. Це величезне космічне тіло у діаметрі становить 109 діаметрів Землі ($2R_\oplus$) та більше за її масу ($M_\oplus$) у 329 тис. разів і є наймасивнішим у Сонячній системі, тому воно перебуває в її центрі (рис. 1.2). Сонце належить до населення I з елементним складом: $X = 0{,}71$, $Y = 0{,}27$, $Z = 0{,}02$.

Це поки що єдина зоря, яку можна досліджувати з великою роздільною здатністю, завдяки якій на поверхні Сонця (в його фотосфері)

спостерігаються деталі, недоступні для дослідження в інших зір. В оптичному діапазоні на диску Сонця спостерігаються факели, темні плями та волокна, грануляція (рис. 13.3).

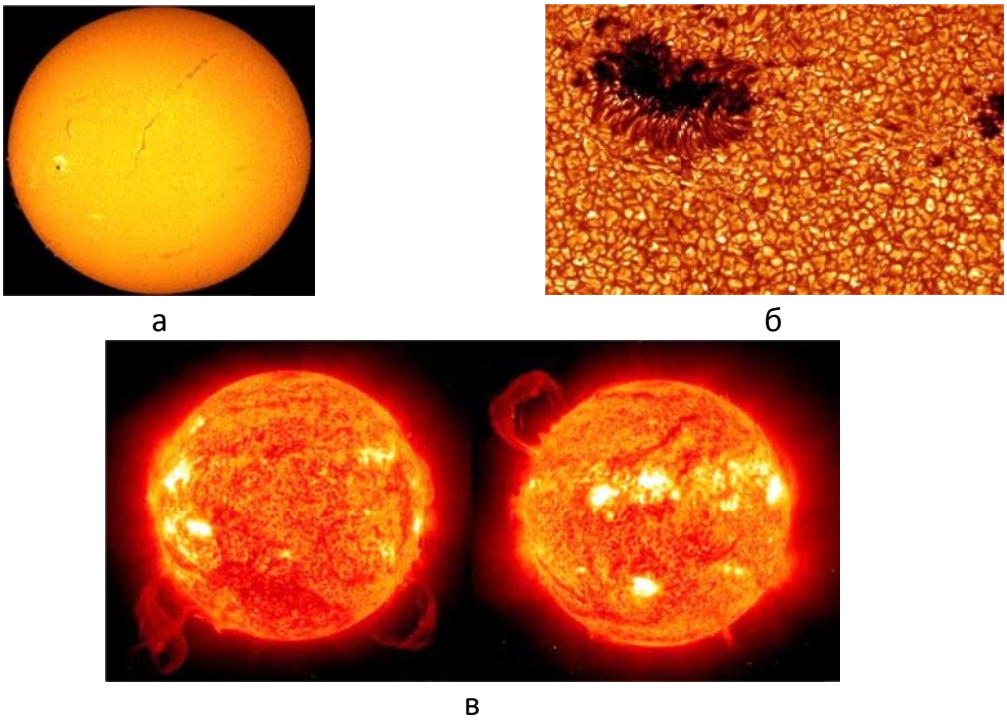
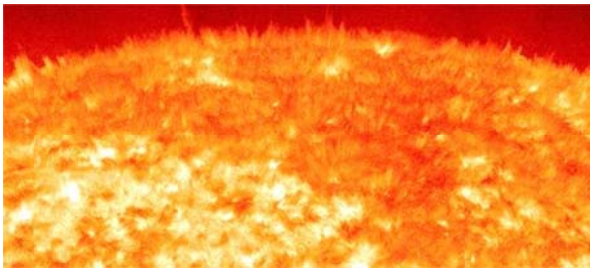


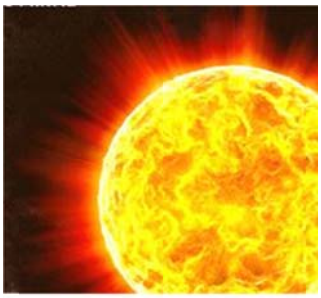
Рис. 13.3. Фотосфера Сонця (а): в екваторіальній області (зліва) спостерігається темна сонячна пляма, над якою яскраве утворення зветься сонячним факелом; велике темне волокно, що починається поблизу центра та простягається направо, й менші (над факелом і внизу) відповідають протуберанцям, які в профілі є петлями, що спостерігається в такому вигляді, зазвичай, на сонячному лімбі (у хромосфері) – (в). Більший масштаб зображення (б) дає можливість спостерігати структуру сонячної плями та грануляцію, що її оточує

Сонячні факели – більш яскраві утворення, по відношенню до загального оточення, складаються з факельних гранул діаметром до 30 тис. км і, загалом, можуть займати значну площу поверхні. *Сонячні плями* – темні області, температура яких нижче на ≈ 1500 K від оточуючої ділянки фотосфери. Магнітне поле плям може сягати 0,45 Тл. *Темні волокна* на сонячному диску відповідають *протуберанцям*, які спостерігаються у вигляді петель на лімбі Сонця (протяжністю від десятків тисяч до кількох мільйонів кілометрів) і територіально розташовані вже у вищих шарах – *сонячній хромосфері*. З достатньою роздільною здатністю фотосфера має плямисту структуру, що зветься *сонячною грануляцією* (рис. 13.3б). Така структура є наслідком конвективних рухів у найвищих шарах світила. Ці утворення мають розмір близько 1000 км і зберігаються впродовж 8–20 хв.

У хромосфері, більш високих шарах, крім протуберанців (рис. 13.3в) спостерігаються ще спікули й флокули. *Сонячні спікули* (рис. 13.4а) – основний елемент тонкої структури хромосфери, що спостерігаються у вигляді достатньо тонких стовпчиків плазми діаметром 500–1200 км і протяжністю від 10 до 20 тис. км і які рухаються зі швидкістю близько 20 км/с до висот 5–10 тис. км над видимою поверхнею Сонця. Час їх життя 5–10 хв і загальна кількість сягає близко мільйона, що покриває приблизно 1 % поверхні Сонця. *Сонячні флокули* (чи хромосферні факели) – волокнисті і більш яскраві за оточення утворення (рис. 13.4б). Вони гуртуються до областей з сильними магнітними полями, часто оточують сонячні плями та є продовженням (у хромосфері) сонячних факелів. Ще вище, в *сонячній короні*, спостерігаються петлі й арки та діри (рис. 13.5). *Корональні петлі й арки* – це гігантські (в сотні тисяч кілометрів) ниткоподібні викиди плазми. *Корональні діри* – області з заниженою (приблизно в 100 разів) густиною та температурою ($8 \cdot 10^5$ K), в той час як для іонізації ліній хімічних елементів, що спостерігаються в короні, необхідна температура $(1{,}5–6{,}3) \cdot 10^5$ K. Профіль загальної форми сонячної корони корелює з 11-річним *циклом сонячної активності*: в її максимумі контур корони має більш центральну симетрію, а в фотосфері збільшену кількість деталей; в мінімумі – якісна симетрія спостерігається тільки відносно осі обертання Сонця та майже відсутні деталі в фотосфері (рис. 13.6).



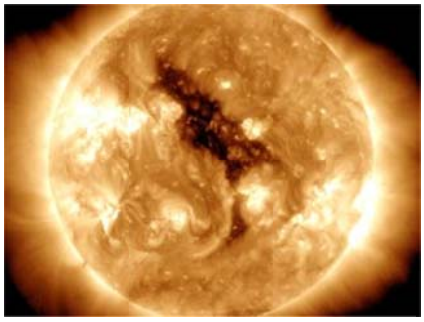
а



б

Рис. 13.4. Фрагмент хромосфери Сонця (а) – спікули та світлі волокнисті утворення – флокули (б)

а



б

Рис. 13.5. Корональні петлі (чи арки) – (а) та діри – (б)

Кількість сонячних плям також зростає з наближенням Сонця до максимуму активності. Мірою зміни кількості плям на сонячній поверхні є так звані *числа Вольфа*, максимуму яких вони досягають в роки максимумів сонячної активності (рис. 13.7).

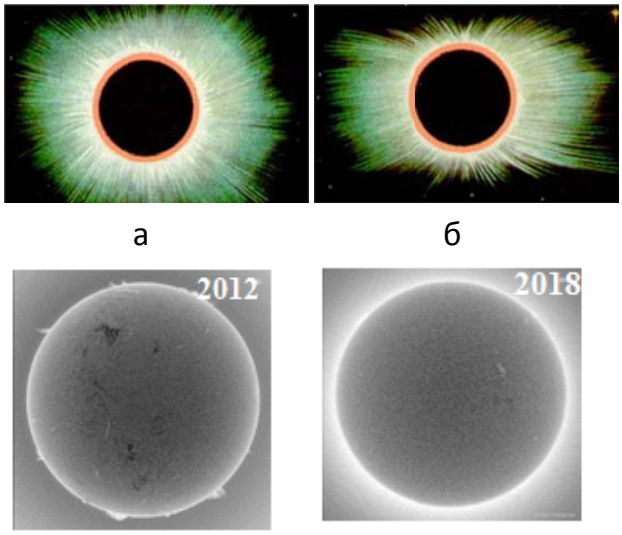


Рис. 13.6. Залежність форми сонячної корони та наявності деталей у фотосфері від фази активності: в максимумі (а, в) і мінімумі (б, г) активності Сонця

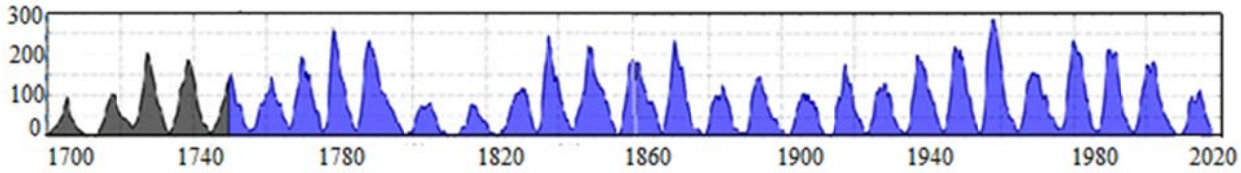


Рис. 13.7. Графік спостережної зміни сонячної активності

Усі описані явища поки що доступні для вивчення тільки на Сонці. Немає сумнівів, що подібні явища притаманні й іншим зорям, але ще не доступні через брак відповідних астрономічних засобів. Тому дослідження Сонця є надзвичайно важливим для вивчення явищ, що відбуваються в атмосферах зір.

Сонце – зоря, що має термоядерне джерело енергії, яка виділяється переважно внаслідок (*p–p*)-*циклу* ядерних реакцій, який проходить за температури близько 16 млн кельвінів і густини $1{,}6\cdot10^5$ кг/м^3. Така енергія, виходячи з надр Сонця, супроводжується спаданням температури так, що на поверхні (у фотосфері) вона становить близько 5 800 К. Середня густина Сонця дещо більша за густину води

$$\bar{\rho}_\odot = \frac{M_\odot}{\frac{4}{3}\pi R_\odot^3} = 1400 \text{ кг/м}^3, \qquad (13.3)$$

де сонячні $M_\odot = 329\cdot10^3\ M_\oplus = 2\cdot10^{30}$ кг – маса та $R_\odot = 109\ R_\oplus = 7\cdot10^8$ м – радіус, що інтерпретується його воднево-гелієвим елементним складом.

Сонце – зоря головної послідовності, жовтий карлик спектрального класу G2V. Зорі сонячних мас випромінюють світло за рахунок ядерного горіння Гідрогену впродовж 10 млрд років. Відтак, з урахуванням віку Сонця, воно перебуватиме на стадії головної послідовності ще 5 млрд років.

14. Субзорі та планети

Класифікація космічних тіл (розд. 12) стала можливою тільки після визначення відповідних фізичних особливостей зір, субзір і планет, яким притаманні певні лише їм фізичні властивості і в незалежності від того, де вони можуть траплятися у Всесвіті. Тому, коли відкрили в середині 1990-х років перші представники субзір[73] і екзопланет[74], уже ні в кого не викликало сумнівів щодо правильності визначеної класифікації та реальній поширеності таких космічних тіл у Всесвіті.

Субзорі. В космічних тілах з масою менше 0,08 $M_\odot$ центральні температури менші за 3,2 млн К. Такі температури унеможливлюють включення повного протон-протонного циклу ядерних реакцій, але в межах температур 3–3,2 млн К може недовготривало «горіти» Гідроген, що відповідає вузькому інтервалу мас космічних тіл 0,07–0,08 $M_\odot$. Температури від 2,5 до 3,2 млн К достатньо для горіння Літію, що відповідає масам космічних тіл 0,06–0,08 $M_\odot$. За температури 0,4–3,2 млн К може «горіти» Дейтерій. Такі умови є в космічних тілах з масою 0.012–0.08 $M_\odot$. Перелічені ядерні реакції діють недовго, не більше 600 млн років через малу ймовірність ядерного перетворення та незначний вміст реліктового Дейтерію і Літію[75]. Температур надр, менших за 3.2 млн К, недостатньо для подолання кулонівського бар'єра ядерної реакції горіння Гелію-3, в результаті якої утворюється Гелій-4 з двома ядрами атома Гідрогену – остання реакція протон-протонного циклу. Саме тому ці об'єкти ще не можуть вважатися зорями.

За розмірами субзорі менші за зорі та порівняні з такою планетою, як Юпітер (рис. 14.1).

---

[73] Глізе 229 B – перша відкрита (1994 р.) субзоря як компонент подвійної системи Глізе 229.

[74] 51 Пегаса b – перша відкрита (1995 р.) екзопланета у зорі 51 Пегаса.

[75] Реліктовий Дейтерій (ізотоп Гідрогену) та Літій – хімічні елементи, які утворилися під час первинного нуклеосинтезу (близько 14 млрд років тому), залишилися до сьогодення у Всесвіті та входять у склад міжзоряної речовини, з якої утворюються зорі та субзорі.

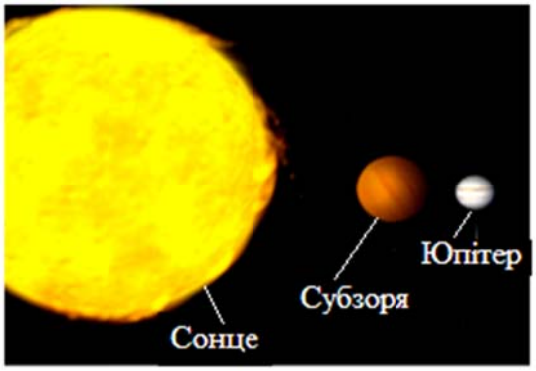


Рис. 14.1. Порівняльні розміри субзір із Сонцем та Юпітером

Субзорі мають зоряний елементний склад, а їх внутрішня структура має три головні складові: *ядро* (де електрони речовини повністю вироджені, а атоми – іонізовані)[76]; *зона часткового виродження електронів й іонізації речовини* та атмосфера, яка є класичним больцманівським газом, що перебуває в *хімічній рівновазі*[77]. Для воднево-гелієвої суміші *атмосфер субзір* з сонячним елементним складом характерними молекулами є оксид карбону (CO), метан (CH_4), аміак (NH_3), вода (H_2O), молекулярний азот (N_2). Передбачається виникнення в таких умовах складних органічних і неорганічних молекул та радикалів, таких як формальдегід, спирти, вуглецевовмісні молекули тощо.

Коли температура фотосферних шарів сягає близко 2000 K, такі хімічні елементи, як Ферум та Силіцій (які спостерігаються за спектроскопічними спостереженнями), існують в газоподібному стані. В процесі вікового остигання ці гази конденсуються в атмосфері, утворюючи хмари. Їх епізодичне розсіювання чи переміщення в атмосфері веде до короткого часового збільшення яскравості субзорі (через оголювання нижчих, більш нагрітих шарів), що підтверджується спостережними даними. Проводячи аналогію між рухом потоків і хмар з процесами в юпітеріанській атмосфері, приходимо до висновку про можливу наявність в атмосферах субзір вітрів і ураганів. Також спостерігалися (за даними КТ Хаббла та Спітцера) нисхідні потоки гарячих піщинок і крапель рідкого заліза й інших частинок, що є фактично відповідним дощем. Тобто атмосфери субзір можуть характеризуватися певною своєрідною метеорологією.

Планети. Розділення планет на класи пов'язується з наявністю теплових зон навколо зір (чи субзір), в яких у залежності від діапазону температур виникають умови для утворення *конденсату*[78], із часточок якого в подальшому шляхом *коагуляції*[79] формуються планети певного хімічного складу. Гравітаційна диференціація часточок космічної речовини в полі тяжіння зорі та дія теплового випромінювання центрального тіла (зорі чи субзорі) призводять до того, що з наближенням до нього групуються часточки з усе більшою температурою випаровування. Відтак у найближ-

[76] Є теоретичні дані про те, що в цій області Гідроген проявляє якості металів (внаслідок іонізації з'являються вільні електрони): він стає електричним провідником. Тому в таких умовах він є *металічним воднем*.

[77] Хімічна рівновага – стан хімічної системи, в якій проходять прямі та зворотні хімічні реакції з рівними швидкостями.

[78] Конденсат – продукт переходу речовини під час охолодження з газоподібної форми в рідку.

[79] Коагуляція – процес злипання (в протопланетній хмарі) дрібних часточок в більші в результаті зчеплення.

чому околі виникають умови для формування планет з більш тугоплавких часточок з більшою густиною, а з віддаленням від центрального тіла утворюються планети з усе меншою температурою плавлення та густиною. Відповідно до хімічного складу космічної речовини (з якої формуються і зорі в тому числі) виникають умови для формування металевих (Fe/Ni), силікатних (чи кам'яних – Si), льодяних (з H_2O – Ic) і воднево-гелієвих (H/He) планет, що й відповідає розділенню їх на такі класи. Кожна планета з відповідного класу має характерну середню густину, яка враховує їх неоднорідність і наявність в них найбільш ймовірних сполук і мінералів. Відтак очікують, що металеві планети містять переважно Ферум і Нікол; силікатні – Ферум і силікатні сполуки; льодяні – силікатні сполуки і воду (чи її лід); у воднево-гелієвих переважають Гідроген і Гелій. Воднево-гелієві планети мають бути гігантами, оскільки інакше вони не зможуть утримувати основні свої летючі хімічні елементи. Враховуючи планети Сонячної системи, середні густини (в г/см^3) планет відповідних класів наступні:

$$\overline{\rho}_{\mathrm{Fe}} = 7 \div 8,\ \overline{\rho}_{\mathrm{Si}} = 3 \div 5,\ \overline{\rho}_{\mathrm{Ic}} = 1 \div 2,\ \overline{\rho}_{\mathrm{H/He}} = 1.$$

Відповідно до цих середніх густин ($\overline{\rho}_{\mathrm{pl}}$) і значень мінімальних мас планет ($M_{\mathrm{min_pl}}$), які наведені в розд. 12, можна провести оцінку їх мінімальних діаметрів:

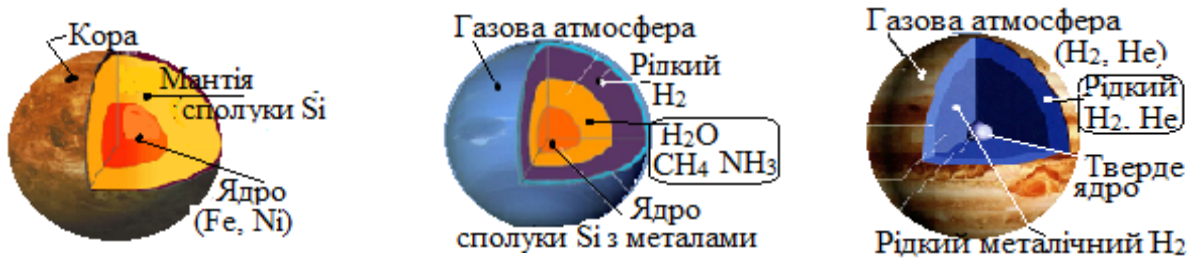
$$D_{\mathrm{min_pl}} = \sqrt[3]{\frac{6M_{\mathrm{min_pl}}}{\pi\overline{\rho}_{\mathrm{pl}}}}, \qquad (14.1)$$

де[80] $D_{\mathrm{min_Fe}} = 800$ км, $D_{\mathrm{min_Si}} = 500$ км, $D_{\mathrm{min_Ic}} = 300$ км, $D_{\mathrm{min_H/He}} = 70\ 000$ км. Очевидно, що наведені оцінки стосуються і карликових планет.

Слід зазначити, що належність планет до відповідного класу є умовною в тому сенсі, що якщо у планети утворилося ядро, то його густина, як слід чекати, має більше значення за середнє. В такому разі, ймовірно, що в металевих планет ядро більш стиснуте, у силікатних планет ядро металеве, у льодяних – силікатне. У воднево-гелієвих планет ядро може бути силікатно-металевим, навколо якого розташована гелієва оболонка. Виходячи з цього, планети можуть мати проміжні класи, такі як металево-силікатні, силікатно-металеві, льодяно-силікатні тощо. Принципово, що у планет слід виділити не більше чотирьох основних шарів: *ядро, мантію* та

[80] Результати обчислень наведені як середні значення для характерних густин і з однією значущою цифрою, оскільки мінімальні маси планет відповідного хімічного складу відомі з точністю до порядку.

кору, над якою розташовується їх *атмосфера* (рис. 14.2). Ядро може перебувати як у розплавленому, так і в твердому стані. В першому випадку у планети за умови достатньо швидкого осьового обертання виникає магнітне поле. Мантія у планет з різним хімічним складом – різна. У силікатних і металічних планет, в залежності від їх маси, віддаленості від центрального світила та віку, мантія також очікується як у твердому, так і в рідкому стані з хімічним складом, близьким до їх відповідного типу. У льодяних безатмосферних планет наявність та товщина кори залежить від термодинаміки надр. Наявність потужної атмосфери у таких планет може призвести як до рідкої, так і до наявності твердої кори, яка може бути продовженням мантії і практично не розділятися з теж твердою мантією. У воднево-гелієвих планет з мантією ототожнюється шар металічного водню, під яким розташоване тверде чи рідке силікатно-металеве ядро. Оскільки металічний водень у таких планет перебуває в рідкому стані, над яким починається шар потужної атмосфери, а для виникнення кори відповідні умови не виникають. Такі умови можуть скластися на пізніх стадіях еволюції, коли як ядро, так і верхні шари суттєво остигнуть.



а б в

Рис. 14.2. Внутрішня будова планет: а – силікатних; б – льодяних гігантів; в – воднево-гелієвих

Загалом атмосфери планет в залежності від віднесення планет до відповідного типу й віддаленості від центрального світила поділяють на чотири основні класи: юпітероподібні (T_{eff} ~ 150 K) з аміачними хмарами; «водяні» (T_{eff} ~ 250 K) з перевагою в хмарах конденсованої води; безхмарові ($T_{\text{eff}} \geq 350$ K) і високотемпературні ($T_{\text{eff}} \geq 900$ K). Очевидно, аміачний клас атмосфер відповідає воднево-гелієвим планетам, оскільки молекули метану, аміаку, водню, азоту й води найбільш характерні саме для низькотемпературної зони навколо зорі. Високотемпературний клас очікується характерним для найбільш близьких до зір і субзір силікатно-металевих планет. Вода та вуглекислий газ, ймовірно, характерні для атмосфер, температура яких ~200-300 K.

В Сонячній системі планети земної групи більше виявляють себе як силікатно-металеві, Юпітер і Сатурн – воднево-гелієві планети, Уран

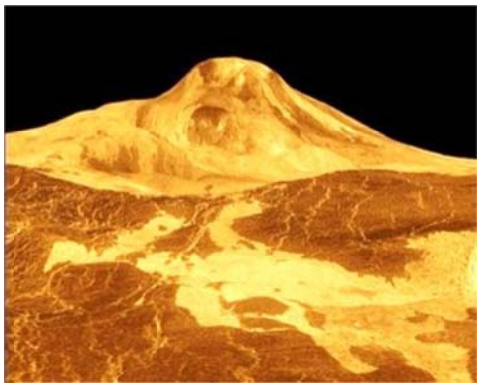
і Нептун – льодяно-силікатні гіганти. В зоні Головного поясу ті астероїди, що належать до карликових планет, є силікатними. У поясі Койпера, ймовірно, до карликових планет належать об'єкти переважно з льодяним складом. Серед представників кентаврів карликових планет немає.

15. Великі планети Сонячної системи та їх супутники

До великих належать планети, що розташовані найближче до Сонця та схожі за фізичними властивостями на Землю, а також ті, що на порядок і більше перебільшують її за масою. Останні відносять до планет-гігантів. Усі вони обертаються навколо Сонця, а деякі з них мають свої «планетні системи» зі значною кількістю супутників та кілець різного хімічного складу.

Венера – найближче до Землі космічне тіло з атмосферою (рис. 15.1а), яка періодично наближується на відстань близько 40 млн км. Ця планета схожа на Землю за розмірами і загальною масою. Маса менша від земної на 19 %, радіус – на 5 %. Маса її атмосфери на два порядки перебільшує масу земної. Тому атмосфера Венери у 52 рази більш густа, а тиск на поверхні перевищує земний у 93 рази. Вітри дмуть на рівні хмарового покриву зі швидкістю 100 м/с.

а



б

Рис. 15.1. Венера (а) та її друга за висотою (близько 5 км) гора Маат (б), що є щитовим вулканом з діаметром в сотню кілометрів

Вуглекислий газ є основною складовою венеріанської атмосфери. Крім того вона містить Нітроген, Аргон, Сульфур, воду, сірчану та фтористо-водневу кислоту. З Венери немає можливості спостерігати за зоряним небом через наявність суцільного хмарового покриву. Він чинить сильний вплив на метеорологію планети, суттєво затримує *теплову радіацію*[81], утворюючи *парниковий ефект*, завдяки якому температури вдень і вночі практично

[81] Венера приблизно в 1,4 рази ближча за Землю до Сонця. Тому вона отримує більше теплоти у $1{,}4^2 \approx 2$ рази.

однакові, +480° С. На поверхні є гори, сліди вулканічної діяльності, невелика кількість кратерів ударного походження. Базальтовою лавою вкрито 90 % поверхні. Найбільш великою гірською системою є гори Максвелла, які мають висоту над околами 6–7 км (10–11 км над середнім рівнем планетної поверхні) та розмірами 850–1000 × 700 км – великого узвишшя Земля Іштар. Залишками найвищого вулкана є гора Маат, що здіймається над поверхнею на висоту майже 5 км (≈ 8,5 км відносно середнього планетного рівня) – рис. 15.1б.

Марс раз у 17 років, у період *найбільшого протистояння*, наближається на відстань близько 55 млн км до Землі (рис. 15.2а). Він у 9 разів за масою і у 1,9 разів за розмірами менший за Землю. Маса атмосфери планети у 220 разів менша за земну, тому тиск у 160 разів менший, ніж у поверхні Землі.

а

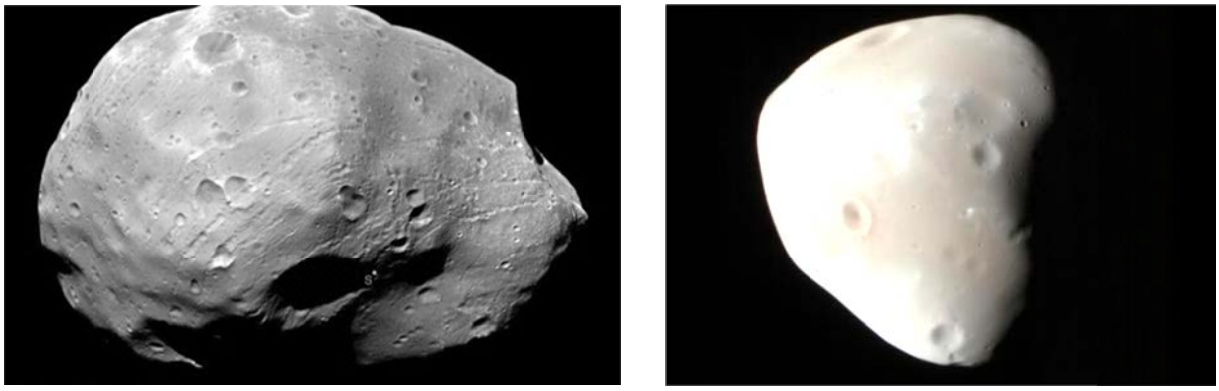
б

Рис. 15.2. Марс (а) та його найбільша за висотою 26 км та розміром близько 540 км гора Олімп (б) вулканічного походження

Атмосфера у Марса, як і у Венери, переважно складається з вуглекислого газу (95 %), частковий склад у порівнянні з земним: водяної пари приблизно стільки ж, азоту менше у 30 разів. Марс розташований у 1,5 рази далі від Сонця, ніж Земля. Тому він отримує в $1{,}5^2 = 2{,}25$ рази менше сонячної енергії. З урахуванням розрідженої атмосфери, яка не може суттєво затримувати тепло, температура вдень на поверхні Марса не перевищує 0° С, а вночі знижується до –120° С. На екваторі температура може досягати +30° С, а на полюсах інколи знижується до –143° С. Тиск у поверхні в 160 разів менше земного та істотно залежить від місцезнаходження на поверхні Марса і пори року. Взимку завжди на відповідній півкулі на полюсі виникає полярна шапка, що складається із замерзлої води та вуглекислого газу.

Поверхня Марса вкрита кратерами, є гори вулканічного походження, найбільша з яких спостерігається навіть з поверхні Землі: гора Олімп має висоту близько 26 км і діаметр ≈ 540 км (рис. 15.2б). Хімічний склад ґрунту неоднорідний по поверхні. Основною складовою є кремнезем (20–25 %),

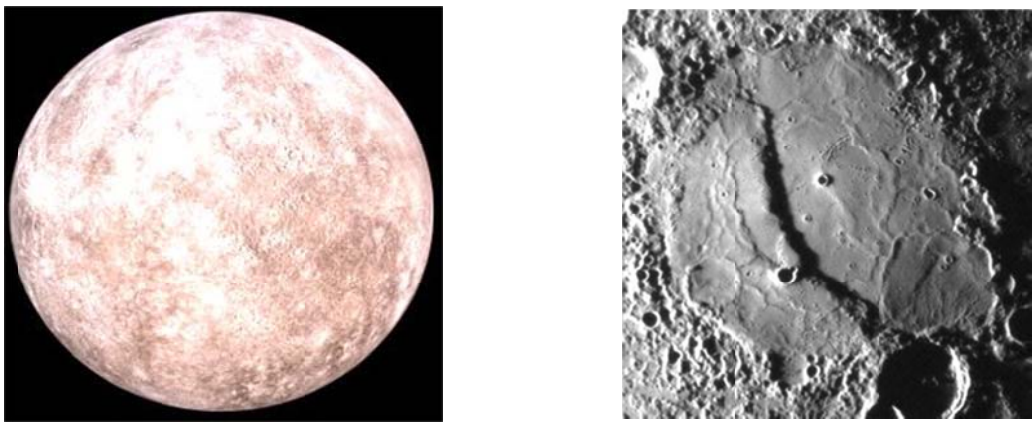
який містить домішок гідратів феруму, що надає ґрунту червонувате забарвлення. Марс, на відміну від Венери, має два астероїдоподібні супутники – Фобос і Деймос, з середніми діаметрами $D \approx 22$ і 13 км відповідно (рис. 15.3).



а б

Рис. 15.3. Фобос (а) та Деймос (б)

Меркурій – найближче космічне тіло до Сонця і найменше серед *планет земної групи*[82] (рис. 15.4а). За масою і розмірами він менший від Землі у 18 і 2,6 разів відповідно. Атмосфера Меркурія надто розріджена – її густина менше земної у 100 квадрільйонів разів ($< 10^{-14}$ кг/м^3), а тиск у поверхні – менше у 50 трильйонів разів ($< 2\cdot10^{-14}$ атм).



а б

Рис. 15.4. Меркурій (а) та його фрагмент з кратером (б), де його перетинає ескарп: уступ завдовжки 160 км з перепадом висоти 1 км

Склад атмосфери Меркурія є воднево-гелієвим. Частковий вміст порівняно з земним: Неону – в 2–3 рази менше, Аргону і вуглекислого газу – на порядок. Вдень планета, що розташована у 2,6 рази ближче до

[82] До планет земної групи належать Меркурій, Венера, Земля і Марс – найбільш схожі за фізичними характеристиками і внутрішньою будовою.

Сонця, ніж Земля, прогрівається до +430° С, вночі охолоджується до температури –180° С.

Поверхня Меркурія схожа на місячну, вона більш кратерована, але великі кратери трапляються рідше. Найбільший кратер розташований в рівнині Спеки (1525 × 1315 км). Особливістю меркуріанського ландшафту є наявність багаточисельних зубчастих відкосів (ескарпів), довжина яких доходить до сотень кілометрів (рис. 15.4б).

Земля (рис. 15.5а) як планета має азотно-кисневу атмосферу (N_2 – 78 %, O_2 – 21 %) з домішками переважно Аргону, води (~ 0.5 %) та вуглекислого газу (0,03 %). У поверхні густина атмосфери становить 1,225 кг/м^3, її тиск – 1 атм. Середня температура вдень становить +25° С, вночі мінімальна температура опускається до –33° С. Такий температурний режим забезпечує існування біосфери, в якій мешкає близко 8,7 млн видів живих істот.

а

б

Рис. 15.5. Земля (а) та найвища її гора (8,848 км) Еверест (б)

Поверхня Землі розділяється на континентальну частину (на яку припадає 29 %) та Світовий океан – гідросферу (71 %). Складова, що здіймається на поверхнею Світового океану, складається з континентів і островів, на яких існують рівнини, гори (рис. 15.5б) та їх масиви, річки та озера, а інколи і моря. Як континентальна частина, так і гідросфера заселені живими організмами. Полярні шапки в північній частині розташовані на території Світового океану – Арктика, а в південній півкулі – Антарктика, на території окремого континенту.

В континентальній корі виділяють три шари, які складаються з гірських порід, гранітів[83] і базальтів[84], основними складовими яких є діоксид силіцію. Світовий океан складається з шару води, під яким

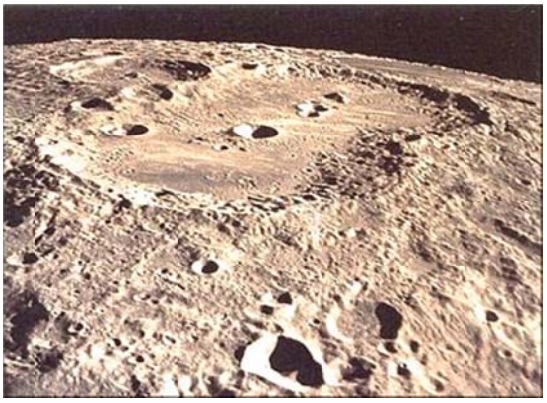
[83] Граніт – магматична гірська порода вулканічного походження, що сформувалася на глибині 3–4 км під дією литосферного тиску > 1 кбар.

[84] Базальт – магматична гірська порода вулканічного походження, яка формується при застиганні лави на поверхні планети.

розташована океанічна кора, основною складовою якої є базальт. Під корою розташована мантія, яка обволікає зовнішнє рідке ядро – джерело магнітного поля Землі. Внутрішнє земне ядро є твердим. Ядро в цілому складається з заліза та нікелю.

Місяць – найближче до Землі (рис. 15.6а) космічне тіло та її природний супутник, віддалений від неї у середньому на 384 000 км. Це безатмосферний об'єкт, менший Землі за розмірами і масою, відповідно, у 3,7 і 81,3 разів. На поверхні Місяця спостерігаються кратери ударного (рис. 15.6б) і вулканічного походження. Кратерів суттєво більше на місячних материкових областях, які світліші за морські райони. В період місячного дня його поверхня прогрівається до +120° С, вночі ця область поверхні охолоджується до –160° С.

а



б

Рис. 15.6. Місяць (а) та його кратер Ван-де-Граафа діаметром 243 км (б)

Місяць відбиває всього 12 % світла, що падає на нього. Верхній шар Місяця покритий *реголітом* – мілким матеріалом, що утворився після зіткнення метеорної речовини з місячними гірськими породами. Основними елементами такої суміші є Силіцій, Алюміній, Кальцій, Магній, Фтор. Товщина реголітового шару сягає від десятків сантиметрів до десятків метрів.

Середня густина Меркурія, Венери і Землі становить близько $5\cdot10^3$ кг/м^3, у Марса – трохи менше за $4\cdot10^3$ кг/м^3, у Місяця – $3{,}3\cdot10^3$ кг/м^3. Це пояснюється наявністю силікатів і металевих ядер у перелічених тілах та їх місцезнаходженням у Сонячній системі. В залежності від відношення маси ядра космічного тіла до загальної маси, Місяць може вважатися ближче до силікатних тіл, Меркурій – до металево-силікатних, Венера, Земля і Марс – до силікатно-металевих.

Юпітер має приблизно такий самий хімічний склад, як у Сонця (іноді при цьому вживають термін «сонячний»). Це найбільша планета, середня густина якої близька до сонячної ($1{,}33\cdot10^3$ кг/м^3). Юпітер менше Сонця за масою (M_J) у 1000 разів, а за радіусом (R_J) – у 10 разів (рис. 15.7а).

Відповідно він більше Землі у 318 разів за масою і в 11 разів за діаметром. У склад атмосфери, крім водню (≈ 82 % за об'ємним частковим вмістом) і гелію (≈ 18 %), входить метан і аміак (менше відсотка). Зовнішня атмосфера має температуру близко –130° С, вона розділена вздовж широт на витягнуті смуги, що призводить до бур і штормів. Швидкість вітрів може сягати 170 м/с і більше. Як результат взаємодій між межами смуг розглядають наявність *Великої червоної плями* (на рис. 15.7а справа нижче екватора та на рис. 15.7б). Вважається, що газова атмосфера плавно переходить в рідкий водневий океан з температурою, близькою до 6 000° С, де створюються умови для його глобального кипіння. Під океаном очікується шар металевого водню завтовшки 30–50 тис. км, тиск якого становить декілька мільйонів атмосфер. Обертання цього шару, в якому протони і електрони перебувають окремо, породжує гігантське магнітне поле. В центрі планети передбачається наявність кам'яного ядра з діаметром 15–30 тис. км, що перебуває під великим тиском (30–100 млн атм). Температура ядра близька до 30 000° С і складається з більш важких за Гелій елементів.

а

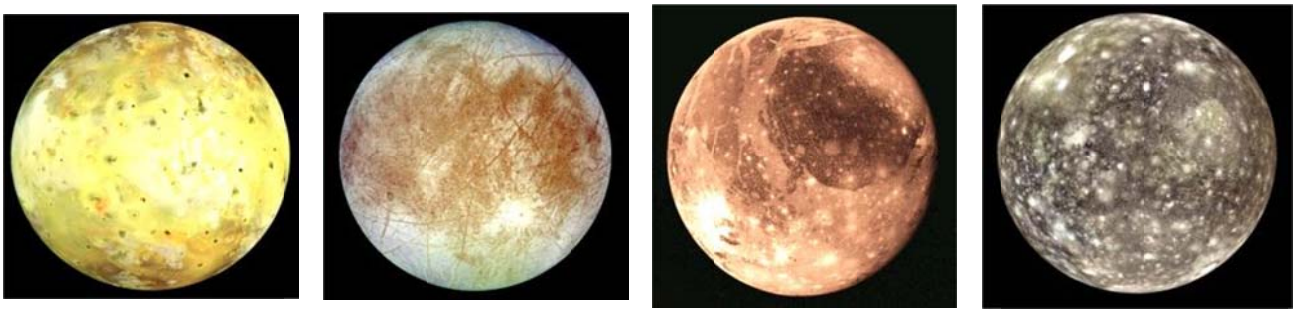
б

Рис. 15.7. Юпітер (а) та його Велика червона пляма (б)

У Юпітера відомо 79 супутників і кільце, що складається з дрібних каменів і газу. Чотири найбільші безатмосферні супутники Юпітера були відкриті ще Галілеєм: Іо ($D \approx 3631$ км), Європа ($D \approx 3122$ км), Ганімед ($D \approx 5268$ км) і Калісто[85] ($D \approx 4820$ км) – рис. 15.8. Виходячи з середньої густини Іо і Європи, відповідно $3{,}6 \cdot 10^3$ кг/м^3 і $3 \cdot 10^3$ кг/м^3, можна вважати, що вони ближче до хімічного складу Місяця ($3{,}3 \cdot 10^3$ кг/м^3). Ганімед і Калісто складаються вірогідно з речовини, що є сумішшю льоду і кам'яних порід, – їх середня густина менша за 2 г/см^3. Як і у планет земної групи, ці супутники мають тверду кору і центральне ядро. 18 внутрішніх супутників (до яких належать і галілеєві) мають пряме

[85] Перелічені супутники звуться *галілеєвими*.

обертання, 61 зовнішній супутник – обернене по відношенню до осьового руху Юпітера.



а б в г

Рис. 15.8. Іо (а), Європа (б), Ганімед (в) і Калісто (г)

Сатурн найближче схожа на Юпітер за фізичними параметрами планета. Він дещо менший за розмірами (0,84 R_J) і масою (0,3 M_J), місткістю гелію (майже в 2 рази за об'ємним складом) і середньою густиною – $0{,}69 \cdot 10^3$ кг/м^3 (рис. 15.9).

а б

Рис. 15.9. Сатурн з полярним сяйвом на полюсі (а) та його Гігантський гексоген (б)

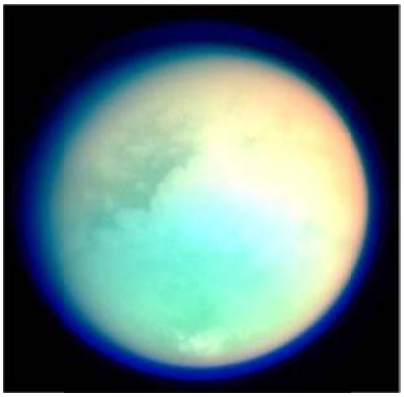
Більш низька середня густина планети свідчить про те, що основним елементом хімічного складу Сатурна є Гідроген (93 % за об'ємним частковим вмістом). Основною домішкою є Гелій (7 %), а також в незначному вмісті вода, метан, аміак і пил з хімічним складом, близьким до «гірських порід». Зареєстровані швидкості повітряних потоків становлять 500 м/с. Сатурніанські атмосферні вітри дмуть переважно у напрямку осьового обертання планети. Періодично (приблизно раз на 30 років[86]) з'являється *Великий білий овал*, схожий на природу юпітеріанської Великої Червоної Плями. Постійно існує феномен *Гігантський гексагон* – атмосферне утворення діаметром 25 тис. км у вигляді правильного шестикутника

[86] Найближчий раз поява такого феномену у 2020 році.

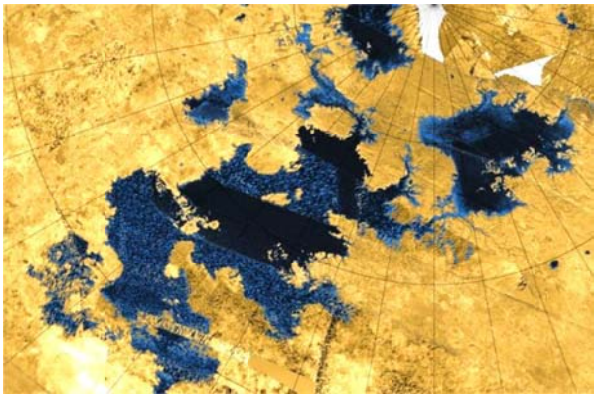
навколо північного полюса (рис. 15.9б), природа якого залишається нез'ясованою.

Як і у Юпітера, під атмосферою Сатурна, на глибині близько 30 тис. км тиск досягає значення близько 3 млн атм, де очікується існування шару металічного водню, а в центрі – залізо-кам'яного ядра з масою до 20 земних мас з домішками льоду.

Кільце, яке спостерігається навіть з Землі, має діаметр близько 250 000 км і товщину менше 1 км. Воно складається переважно з частинок розмірами ~ 1 см, зрідка з монолітів 1–2 м, є й тіла до 1–2 км. За мінералогічним складом – це лід або камені, покриті льодом. Сатурн має 82 супутники, серед яких найунікальнішим є Титан (D = 5152 км), що має азотну атмосферу (98,6 %), тиск якої на поверхні становить 1,6 атм, а температура –179 °С (рис. 15.10а). На Титані є метанові озера, ріки (рис. 15.10б) та, ймовірно і, моря. Внутрішня його будова подібна до місячної та галілеєвих супутників. Внутрішні 24 супутники мають прямий орбітальний рух. Інші 58 супутників відносять до так званих нерегулярних супутників, які демонструють зворотний рух або площини їхніх орбіт помітно відрізняються від екваторіальної площини планети.



а



б

Рис. 15.10. Титан (а) – мультиспектральне зображення, деталі якого не видно у видимому діапазоні через потужну атмосферу; та фрагмент поверхні, зафіксований з підхмарної області радарним способом (б), на якому зафіксовано метанові річки й озера (темні та сині області)

Уран (рис. 15.11) виділяють у окрему категорію «*льодяних гігантів*» через те, що до його складу входить високотемпературна модифікація льоду. Його маса і радіус становлять 14,5 $M_{\oplus}$ і 4,0 $R_{\oplus}$. Основу його атмосфери складають водень і гелій, а також відкриті сліди метану, аміаку та інших вуглеводнів. Атмосфера має складну шарувату структуру хмар, де вода складає нижній шар, а метан верхній. Швидкість вітрів в атмосфері досягає 240 м/с. Передбачають наявність поверхні, що складається з льоду і скель. В надрах Урана металічний водень відсутній.

Уран має систему кілець і 27 супутників. 18 внутрішніх супутників мають пряме обертання навколо планети. Зовнішні 9 супутників, за виключенням Маргарити, рухаються у зворотному напрямку. Найбільші діаметри мають Міранда ($D \approx 472$ км), Аріель ($D \approx 1158$ км), Умбріель ($D \approx 1169$ км), Титанія ($D \approx 1548$ км) і Оберон ($D \approx 1523$ км) – рис. 15.12. Внутрішня їх будова аналогічна Місяцю і галілеєвим супутникам Юпітера.

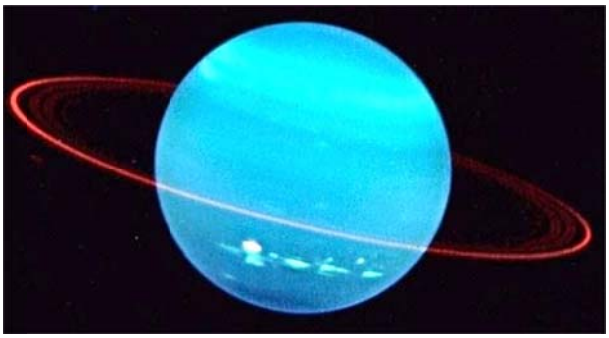
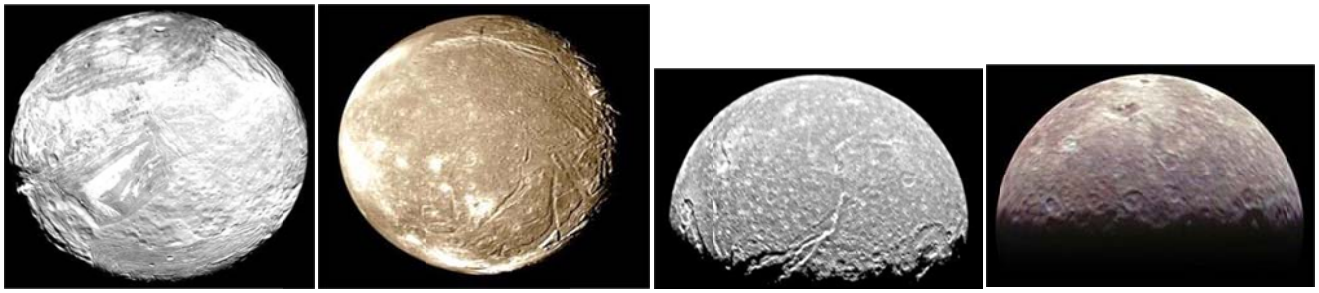


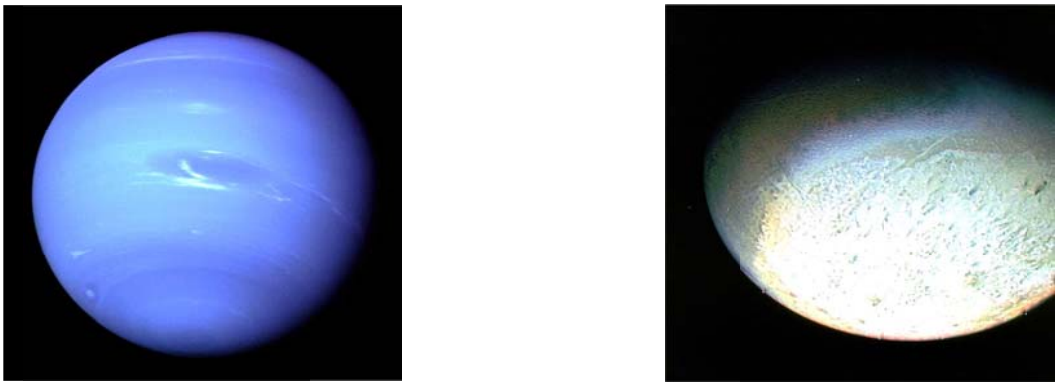
Рис. 15.11. Уран, череда яскравих хмаринок та його кільце



а б в г

Рис. 15.12. Міранда (а), Аріель (б), Титанія (в) та Оберон (г)

Нептун, як і Уран, належить до льодяних гігантів, має масу та радіус, близькі до Урана: 17,2 $M_\oplus$ і 3,9 $R_\oplus$ відповідно. Верхні шари атмосфери планети складаються з водню (80 %) і гелію (19 %) з домішками метану і ще не з'ясованого до кінця компонента, що надає атмосфері Нептуна синій відтінок (рис. 15.13а).



а б

Рис. 15.13. Нептун (а) та його супутник Тритон (б)

В атмосфері Нептуна, температура якого сягає –218° С, спостерігаються шторми, швидкість вітру в них досягає надзвукових значень – 600 м/с. Більшість вітрів дмуть у протилежному напрямку обертання планети. В атмосфері спостерігається *Велика темна пляма*, природа якої аналогічна Великій червоній плямі Юпітера. Атмосфера Нептуна за масою становить близько 10–20 % від його загальної маси (стільки ж займає її глибина від спостережного радіуса). Мантія складається з води, аміаку і метанового льоду. Тут температура змінюється в межах близько 2 000–5 000° С, а максимальний тиск досягає 100 тис. атм, де речовина надр перебуває у вигляді гарячої, густої рідини. Глибше розташоване кам'яно-льодяне ядро, де очікуваний тиск досягає 700 тис. атм, а температура – близько 5 600° С. В таких умовах метан перетворюється на алмазні кристали, що падають на залізо-нікелеве силікатне ядро.

Нептун має кільцеву систему, яку складають льодяні частинки, покриті силікатами або вуглецевим матеріалом, що надають кільцям червоний відтінок. У планети відкрито 13 супутників, найбільшим з яких є Тритон (рис. 15.13б), який дещо менший за Місяць (його діаметр становить близько 2707 км) і має меншу середню густину 2,07 г/см³. Це може свідчити про значну частку льоду в його надрах.

16. Карликові планети та малі тіла Сонячної системи

За класифікацією космічних тіл (розд. 12), планети розділяють за наявністю у них ядра з більшою густиною за середню, причиною утворення якого є достатня маса та умови для проходження процесу гравітаційної диференціації на стадії їх утворення – *протопланет.* Оскільки межі діапазону планетних мас різняться приблизно на шість порядків, а найменш масивні великі планети, наприклад, в Сонячній системі, все ще відрізняються від мінімальних мас планет приблизно на три порядки, то це слугувало приводом для виділення *карликових планет* в окремий підклас.

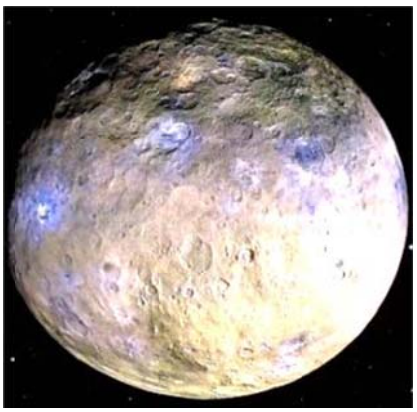
Глибокого фізичного обґрунтування межі, що розділяє великі та карликові планети, ще не існує. Як і не існує суттєвої принципової різниці за структурою, хімічним складом та механізмом утворення між карликовими планетами та тих супутників великих планет, які пройшли стадію гравітаційної диференціації й потрапляють в діапазон планетних мас. Останні ж не завжди прираховують до карликових планет[87], хоча за

[87]За резолюцією Генеральної асамблеї Міжнародного астрономічного союзу (Прага, 2006 р.), до планет слід відносити космічні тіла, які обертаються навколо Сонця; мають достатню масу для того, щоб самогравітація перевищувала твердотільні сили і тіло могло прийняти гідростатичну врівноважену (близьку до сферичної) форму; очищують околи своєї орбіти (тобто поряд з планетою немає інших порівняних з нею тіл). Карликові ж планети відрізняються від великих тим, що не очищують околи своєї орбіти та не є супутником великих планет.

структурою та фізичними властивостями вони нічим не відрізняються від карликових планет, які рухаються по геліоцентричних орбітах. Отже, хоча в Сонячній системі не менше сотні космічних об'єктів пройшли стадію гравітаційної диференціації, серед них «офіційно» поки що відносять до карликових планет лише п'ять, які розташовані в астероїдних поясах.

Космічні тіла з масою, меншою за маси карликових планет, відносять до малих тіл Сонячної системи: астероїди, комети та метеороїди.

Карликові планети. За даними прямих космічних досліджень, у Головному поясі астероїдів два космічні тіла пройшли гравітаційну диференціацію: Церера (рис. 16.1а) та Веста (рис. 16.1б).



а

б

Рис. 16.1. Церера (а) та Веста (б)

Церера більша за масою ($M_Ц$ = 9,4·10^{20} кг) та середній діаметр ($D_Ц$ = 952 км) від Вести ($M_В$ = 2,6·10^{20} кг, $D_В$ = 525 км), тому її форма ближче до сферичної, ніж у Вести (рис. 16.1б). Саме через це Весту не включили в перелік карликових планет. Є й ще один астероїд, який близький за фізичними даними до Вести, – астероїд Паллада ($M_П$ = 2,1·10^{20} кг, $D_П$ = 512 км), форма якого відхиляється від сферичної майже на стільки, як і у Церери (менше, ніж на 9 %). Але, оскільки Паллада ще не досліджувалася космічними засобами, не відомо, є у неї ядро чи ні. За середньою густиною Веста ($\rho_В$ = 3,5·10^3 кг/м^3) і Паллада ($\rho_П$ = 3·10^3 кг/м^3) складаються з кам'яних порід, а у Церери очікується тільки ядро з таких мінералів, мантія ж ймовірно є льодяною ($\rho_Ц$ = 2,2·10^3 кг/м^3).

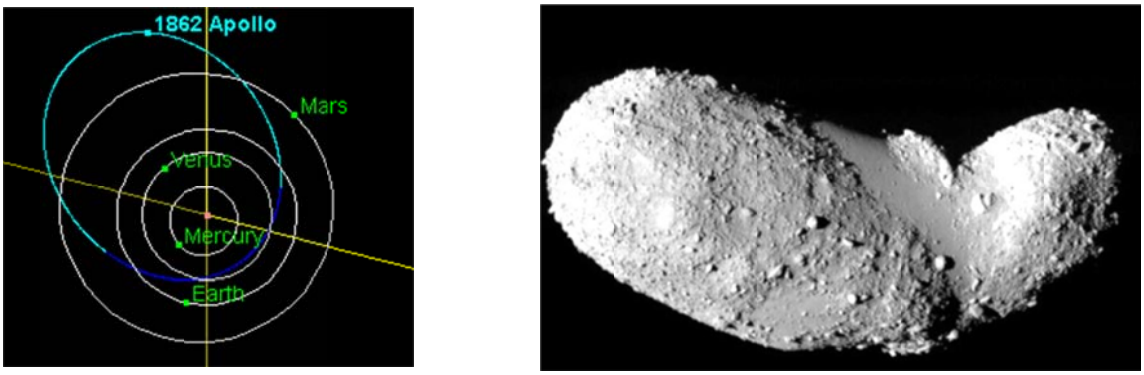
В поясі Койпера поки що тільки чотири космічні тіла відносять до карликових планет: Плутон (рис. 16.2а), Хаумеа, Макемаке та Ериду. Всі вони більші за масою та діаметром від Церери. Найбільшу масу має Ерида ($M_Е$ = 1,7·10^{22} кг), найбільший розмір у Плутона ($D_{Пл}$ = 2372 км). Середні густини Плутона ($\rho_{Пл}$ = 1,9·10^3 кг/м^3) і Макемаке ($\rho_{Мм}$ ≈ 2·10^3 кг/м^3) ближче відповідають льодяному складу, у Хаумеа ($\rho_{Хм}$ ≈ 3·10^3 кг/м^3) така ж, як у Паллади. Середня густина у Ериди ($\rho_Е$ = 2,5·10^3 кг/м^3) має перехідне значення, яке характерне для льодяних і кам'яних порід. П'яте космічне

тіло, яке має типові характеристики для карликових планет, супутник Плутона – Харон (M_X = 1,5·10^{21} кг, D_X = 1212 км, ρ_X = 1,7·10^3 кг/м^3) – рис. 16.2б. Але «формально» його до них не відносять через те, що він є супутником планети.

а б

Рис. 16.2. Плутон (а) та Харон (б)

Астероїди гуртуються до трьох основних зон: Головного поясу, області між орбітами Юпітера та Нептуна та поясу Койпера. Головний пояс розташований між орбітами Марса і Юпітера, пояс Койпера – за орбітою Нептуна. Астероїдні тіла трапляються і ближче за орбіту Марса, а ті, що перетинають орбіту нашої планети, називають *астероїдами, що зближуються з Землею*. Вони належать до астероїдів, що перетинають орбіти планет земної групи. Останніх розділяють на три основні групи за їх орбітальними властивостями: Амура, Аполлона[88] та Атона, (рис. 16.3). Кентаврами називають астероїди, що розташовані між орбітами Юпітера і Нептуна.



а б

Рис. 16.3. Геліоцентрична орбіта астероїда Аполлон (а) та зображення представника аполлонів Ітокава, який має розміри 535 × 294 × 209 м (б)

[88] Першим таким виявився астероїд Аполлон (1932 р.), після чого всі останні представники такого типу й одержали відповідну до нього назву.

Із 740 000 астероїдів, виявлених у Головному поясі, 97 % зосереджені в межах 2,2–3,7 а.о. від Сонця. Загальна їх маса оцінюється в 4 % від маси Місяця. За хімічним складом це силікатні (75 %), вуглецевовмісні (15 %), металічні й ін. Наступні за наведені вище Цереру, Весту та Палладу менші розміри мають астероїд 10 Гігіея ($D \approx 430$ км), Давіда ($D \approx 330$ км) і Юнона ($D \approx 230$ км). Загалом виконується правило: чим діаметр астероїда менший – тим їх більше. Відтак, за підрахунками великих астероїдів та проведеними статистичними оцінками їх кількості N з діаметрами, що перевищує значення D, наступні: $D > 100$ км – $N \approx 200$; $D > 10$ км – $N \sim 10$ тис.; $D > 1$ км – $N \sim 750$ тис.; $D > 100$ м – $N \sim 25$ млн.

Популяція аполлонів налічує близько 8 000 астероїдів з розмірами від 400 м до 39 км. Силікатні і вуглецеві астроїди, як і у Головному поясі, складають більшість аполлонової популяції: до силікатних належить 36 %, до вуглецевих – 27 %.

Кількість кентаврів, відомих на теперішній час, близко 500, у 91 з яких *афелій*[89] перевищує велику піввісь орбіти Нептуна (тобто 30,1 а.о.). Із аналізу блиску кентаврів їх розміри оцінюють меншими за 250 км, що має найбільший з них за розмірами Харікло. Виходячи з їх альбедо, фізичних характеристик супутників планет-гігантів, їх положення у Сонячній системі, характерна їх густина очікується $\sim 2 \cdot 10^3$ кг/м^3.

У поясі Койпера розділяють як мінімум два шари астероїдів: перший, в межах 30–44 а.о., де розташована й орбіта Плутона, та другий, розсіяний пояс Койпера, обмежений відстанню 100 а.е. В поясі Койпера в цілому найбільші діаметри крім згаданих вище карликових планет мають 2007 OR_{10} ($D \approx 1540$ км), Квавар ($D \approx 1100$ км), Орк ($D \approx 950$ км), 2002 AW_{197} ($D \approx 940$ км), Варуна ($D \approx 870$ км), Іксіон ($D < 820$ км), 2002 UX_{25} ($D \approx 700$ км) та інші. Наведені розміри та очікувана середня густина астероїдів поясу Койпера $\sim 1 \cdot 10^3$ кг/м^3 надають аргументи вважати, що це не рядові великі астероїди, а також льодяні карликові планети.

Всього відкрито більше 1000 об'єктів поясу Койпера. Передбачається, що ще близько 70 000 в цій області з діаметром більше 100 км не виявлено. Ще близько у 10 000 об'єктів (нині їх відомо близько сотні) очікуються орбіти зі значним ексцентриситетом, в яких афелій сягає декілька сотень астрономічних одиниць. Такі об'єкти відносять до розсіяного поясу Койпера. Типовим представником цього поясу вважають Седну з афелієм $a \approx 1000$ а.о. ($M = (8–70) \cdot 10^{20}$ кг, $D \approx 1000$ км, $\rho \approx 2 \cdot 10^3$ кг/м^3), яка фізичними властивостями може бути віднесена до карликових льодяних планет. Найбільш відомі об'єкти з афелієм більше 100 а.о. – це 2000 CR_{105}

[89] Афелій – найбільш віддалена точка на геліоцентричній орбіті від Сонця.

($a \approx 220$ а.о., $D \approx 250$ км), 2012 VP_{113} ($a \approx 260$ а.о., $D \approx 600$ км), 2000 SQ_{372} ($a \approx 970$ а.о., $D \approx 100$ км).

Метеороїди – це тверді (але не льодяного складу) мініастероїди з діаметром менше 30 м. Нині вважають, що вони утворюють проміжну популяцію між астероїдами та космічним пилом. Такий об'єкт, влітаючи в земну атмосферу зі швидкістю ≈ 10–70 км/с, сильно нагрівається та згоряє, породжуючи таке явище, як метеор. Коли яскравість метеора перевищує -4^m (яку має Венера) чи його кутові розміри є значними, таке явище носить назву боліда. Ці явища супроводжуються яскравими слідами (хвостами) в атмосфері. Рух боліда також може супроводжуватися звуком.

а б в г

Рис. 16.4. Найбільші знайдені метеорити: Гоба (2,7×2,7×0,9 м, 66 т) – залізо-нікелевий (а); Гасендо (30,8 т) – залізо-нікелевий (б); Альєнде (3 т) – вуглистий (в); Ліван (> 2 м) – два залізо-нікелеві фрагменти (г – знайдені на Марсі КА К'юріосіті)

Метеороїди, що зіштовхуються з земною поверхнею, називають метеоритами (рис. 16.4). Переміщення їх в земній атмосфері спостерігається як метеор чи болід. Якщо метеорит має значні масу та швидкість, після падіння на земну поверхню утворюється *кратер* – колове поглиблення (рис. 16.5а). Такі кратери називають ударними, і вони трапляються й на інших тілах Сонячної системи (рис. 16.5б) як результат падіння на них метеороїдів і астероїдів.

а б

Рис. 16.5. Кратери ударного походження: на Землі – Арізонський (а), з діаметром близько 1220 м; та на Мімасі (б), діаметр якого (близько 135 км) становить майже третину діаметра цього супутника Сатурна

Комети – космічні тіла, які періодично чи аперіодично впродовж декількох ночей і більше з'являються на небосхилі у вигляді головної яскравої частини (що зветься *комою*) та менш яскравого хвоста (рис. 2.9). За природою це, по-суті, невеликі астероїди та метеороїди, які є *конгломератами*[90] замерзлих води (H_2O) та вуглекислого газу (CO_2), з домішками метану (CH_4), аміаку (NH_3), в які вморожені кам'янисті мінерали зі сполуками Силіцію, Натрію, Феруму, Ніколу тощо, характерних для метеорної речовини. «Тіло» комети зветься *ядром*, в якому зосереджена майже вся її маса. Воно складається з надто дірчастого матеріалу, де пори займають десятки відсотків від загального об'єму[91]. Таке тіло, підлітаючи в околи Сонця, нагрівається. Летючі сполуки починають випаровуватися та світитися, утворюючи туманну оболонку – кому. Тиск сонячного випромінювання спрямовує сполуки, що перебувають у зовнішній частині оболонки, у протилежний бік від напрямку на Сонце (рис. 16.6). Так виникає кометний хвіст. Оскільки до складу матеріалу, що випаровується, входить як газ, так і пил, хвіст розділяється на дві складові, пилова складова якого вигинається і дещо відстає від газового хвоста. Колір пилової складової є жовтуватим через те, що пилинки розсіюють сонячне світло. Газовий хвіст світить голубуватим кольором, який пояснюється іонізацією кометного газу (світіння не первинних молекул, а продуктів їх дисоціації і наступної іонізації), що випаровується з ядра УФ-променями та потоком частинок, які генерує сонячна корона. Комети рухаються по витягнутих орбітах, серед яких виділяють короткоперіодичні з періодом $P < 200$ років (всього відомо більше 400 таких комет) і довгоперіодичні, відповідно, з $P > 200$ років. Таких комет більшість – дещо менше 6000. Періодам $P < 200$ років відповідають афелії комет в околах орбіт планет-гігантів. Більшість найкороткоперіодичніших комет мають періоди 3÷10 років, що відповідає їх афелію в околі орбіти Юпітера. Саме з цих районів вони прилітають в околи Сонця, яке їх нагріває, і вони стають досяжними для спостереження.

Рис. 16.6. Рух комети по витягнутій навколосонячній орбіті, в процесі якого з'являється роздвоєний хвіст, який відхиляється дією сонячного світла і сонячного вітру

Довгоперіодичні комети прилітають з так званої хмари Оорта, внутрішній край якої, як нині вважають, розташований на відстані близько 2000 а.о. від Сонця. В області від 2 до 50 ÷ ~100 тис. а.о. в хмарі Оорта

[90] Конгломерат – невпорядковане з'єднання різних матеріалів, мінералів тощо.
[91] За даними космічних досліджень, в ядрі комети Темпеля пори займають 80 % від його об'єму.

очікується декілька трильйонів ядер комет, більших за 1.3 км в діаметрі, з загальною масою близько 5 $M_{\oplus}$

Тести

3.1. Яка з основних характеристик космічних тіл є визначальною, а інша – уточнювальною?

3.1.1. Маса й елементний (чи хімічний) склад.
3.1.2. Маса та температура.
3.1.3. Вік і елементний (чи хімічний) склад.
3.1.4. Радіус і маса.
3.1.5. Температура та радіус.

3.2. Чим відрізняється Сонце від зір? Правильну відповідь обґрунтуйте.

3.2.1. Більшими лінійними розмірами.
3.2.2. Меншою масою.
3.2.3. Нічим.
3.2.4. Кольором.
3.2.5. Наявністю плям.

3.3. Зорі відрізняються від інших космічних тіл

3.3.1. За хімічним складом;
3.3.2. За розмірами;
3.3.3. Тим, що з їх поверхонь випаровується речовина;
3.3.4. Наявністю в їх надрах *p–p* циклу ядерних реакцій;
3.4.5. Нічим.

3.4. Субзорі є проміжним класом космічних тіл між зорями і планетами, тому що

3.4.1. Зорі, перетворюючись у планети, проходять стадію субзір;
3.4.2. За масами вони менш масивні за зорі та більш масивні, ніж планети;
3.4.3. Їх елементний склад має приблизно середнє значення між зорями та планетами;
3.4.4. Їх розміри більші за діаметри планет і менше зоряних;
3.4.5. У воднево-гелієвих планет у процесі еволюції може «загорятися» *p–p* цикл ядерних реакцій.

3.5. Планети виділяються серед інших космічних тіл за наявністю

3.5.1. В їх надрах неповного *p–p* циклу ядерних реакцій;
3.5.2. Силіцію та води у хімічному складі;
3.5.3. Атмосфери;
3.5.4. Ядра зі щільністю, більшою за середнє значення, та процесом гравітаційної диференціації;
3.5.5. Умов для існування життя.

3.6. До великих планет Сонячної системи належать

3.6.1. Меркурій, Венера, Земля, Ганімед, Юпітер, Сатурн, Уран, Нептун;
3.6.2. Меркурій, Венера, Земля, Марс, Юпітер, Сатурн, Уран, Нептун;
3.6.3. Юпітер, Сатурн, Уран, Нептун;

3.6.4. Венера, Земля, Юпітер, Сатурн;
3.6.5. Меркурій, Венера, Земля, Марс, Юпітер, Сатурн, Уран, Нептун, Плутон.

3.7. Яке з космічних тіл не належить до супутників планет?
3.7.1. Плутон;
3.7.2. Фобос;
3.7.3. Нереїда;
3.7.4. Пан;
3.7.5. Оберон.

3.8. За якими фізичними ознаками виокремлюють карликові планети?
3.8.1. У карликових планет відсутнє ядро.
3.8.2. Такі планети розташовані від Сонця найближче.
3.8.3. Такі планети найвіддаленіші від Сонця.
3.8.4. У таких планет відсутні атмосфера та супутники.
3.8.5. Такі фізичні ознаки однозначно ще не визначені.

3.9. Кентаври, астероїди Головного поясу та Поясу Койпера – об'єкти однієї природи, тому що вони
3.9.1. Обертаються навколо Сонця між орбітами великих планет;
3.9.2. Складаються з силікатних порід;
3.9.3. Не є супутниками великих і карликових планет;
3.9.4. Не мають ядра;
3.9.5. Не мають супутників.

3.10. У разі наближення до Сонця комети спостерігаються з «хвостами», тому що
3.10.1. Вони є передвісниками незгод на Землі;
3.10.2. Речовина, яка випаровується з них завдяки сонячній радіації, піддається дії тиску, завдяки чому шлейф, що тягнеться від неї, спрямований завжди у протилежний бік від Сонця;
3.10.3. Їх випаровування речовини зазнає гравітаційної дії великих планет;
3.10.4. Вони захоплюють пилову речовину з плазмою сонячного вітру, яка в подальшому проявляє себе як кометний хвіст;
3.10.5. Пилова та газова складові, що випаровуються з їх поверхонь, взаємодіють між собою, утворюючи джет у напрямі, протилежному від Сонця.

Контрольні питання

1. Чому в надрах Сонця температура більша, ніж в її фотосфері?
2. Чим відрізняються фізичні умови на поверхні Місяця від земних?
3. Що спільного у Венери і Землі та Місяця і Меркурія і чим вони відрізняються?
4. Чи може Юпітер в процесі еволюції стати зорею?
5. До яких типів відносяться планети Сонячної системи?
6. Чи відрізняються малі тіла Сонячної системи від карликових планет?
7. Що спільного у комет, льодяних планет і «гарячих юпітерів»?
8. Яка внутрішня будова субзір і воднево-гелієвих планет?
9. Чи можуть планети мати такий елементний склад, як зорі чи субзорі?
10. Чим відрізняються боліди від метеороїдів?

Частина 4

ЗОРЯНІ ТА ПЛАНЕТНІ СИСТЕМИ

У Всесвіті спостерігається величезна різноманітність структур різної складності. Космічні об'єкти проявляють різний рівень ієрархічного устрою. Якщо основними складовими таких систем є космічні тіла, то такі об'єкти відносять до зоряних і планетних систем.

17. Класифікація зоряних систем

Космічні тіла входять до різних об'єднань: зоряних, субзоряних, планетних і комбінованих. Частіше за все системи є комбінованими, тобто до їх складу входять космічні тіла різних класів. Рівнями об'єднань зір, субзір і планет є кратні зорі (субзорі), зоряні скупчення й асоціації та галактики. Галактики включають системи всіх рівнів ієрархії. В зоряні асоціації входять кратні зорі та субзорі і їх скупчення. Зоряні скупчення складаються з систем зір і субзір. Планети обертаються навколо поодиноких та кратних зір і субзір. Протозорі, протопланетні диски та протопланети є членами зоряних систем, що перебувають на ранньому етапі розвитку. Галактики об'єднуються в сімейства, групи, скупчення різної складності, утворюючи у Метагалактиці великомасштабну комірчасту структуру.

Кожне із перелічених утворень різного рівня ієрархії характеризується складом космічних тіл і газопиловою складовою. Їх основними характеристиками є: маса (чи загальна кількість зір і субзір), розмір (лінійний чи кутовий діаметр або радіус), елементний чи/та хімічний склад (металічність), вік, місцеположення (координати та віддаленість, як правило, від Сонця). Газопилову складову ще характеризують температурою, концентрацією та відсутністю чи ступенем іонізації.

Зоряні системи. Під зоряними системами розуміють три їх рівні ієрархії як наслідок кількості зір і субзір (N^*), що входять до їх складу:

- кратні зорі та субзорі ($N^* \lesssim 20$);
- зоряні скупчення й асоціації ($N^* \approx 20$–10^6);
- галактики ($N^* \sim 10^6$–10^{12}).

Кратні зорі. Їх представниками є подвійні та системи більшої кратності, а також, як окремий випадок, поодинокі (як найбільш прості) зорі й субзорі. Подвійні зорі в залежності від віддаленості компонентів між собою та до Сонця, орієнтації їх орбіт до спостерігача класифікують наступним чином (рис. 17.1):

- оптично-подвійні;
- візуально-подвійні;
- спектрально-подвійні;
- астрометричні-подвійні;
- затемнювано-подвійні;
- тісні подвійні.

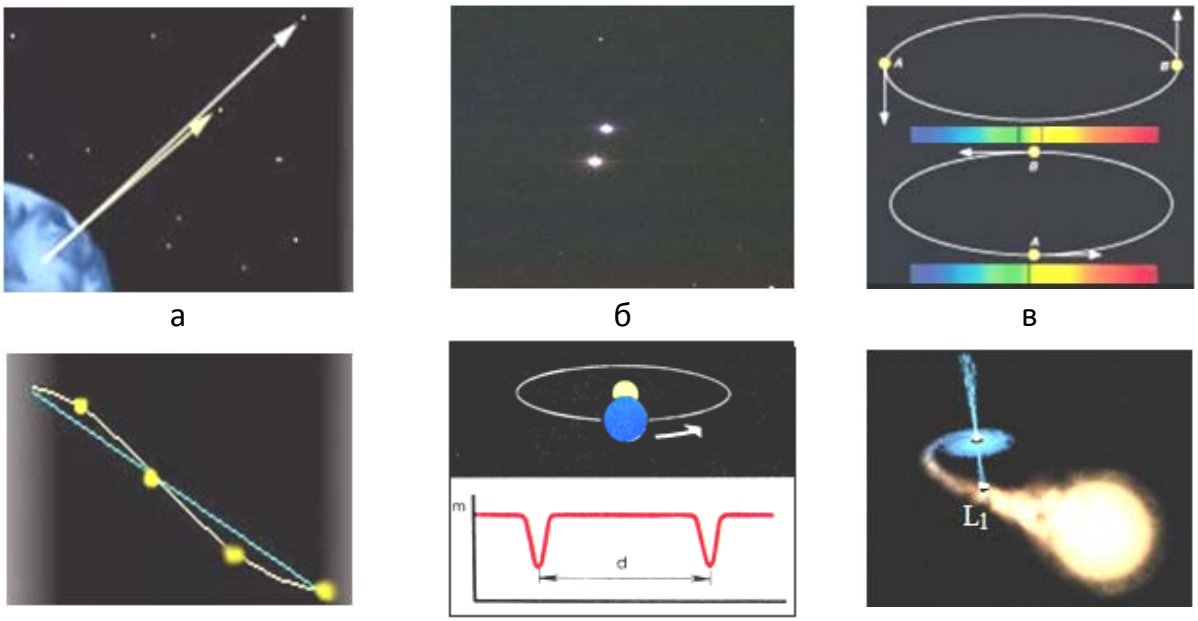


Рис. 17.1. Подвійні зорі: а – оптично-подвійні (компоненти розташовані на різних відстанях від спостерігача); б – візуально-подвійні (компоненти фізично пов'язані за результатами спостережень); в – спектрально-подвійні (коли компоненти рухаються за променем зору в різних напрямках – лінії спектра компонента А зсуваються в синю область спектра, В – в червону; у випадку відсутності руху за променем зору зсув ліній відсутній); г – астрометричні подвійні (пряма лінія – рух барицентра); д – затемнювано-подвійні (внизу – крива блиску, мінімуму зоряній величині m відповідає покриття одного компонента іншим (наведена конфігурація зверху), d – період орбітального обертання); е – тісні подвійні (L_1 – перша точка Лагранжа, сині викиди (джети) утворюються у віддаленого компонента в результаті дії магнітного поля)

Визначальними властивостями таких систем є наступні. *Оптично-подвійні* спостерігаються поряд лише через те, що проектуються на небесну сферу, а у просторі можуть перебувати на істотно різних відстанях. До *візуально-подвійних* належать ті системи, в яких за даними візуальних чи телескопічних спостережень можна бачити роздільно два компоненти. У *спектрально-подвійних* систем компоненти виявляють за спектроскопічними спостереженнями, за допомогою яких на спектрограмі спостерігаються періодичні

зміщення спектральних ліній, як правило, обох компонентів[92]. Системи, компоненти яких в процесі спільного руху періодично затемнюють один одного, через що періодично змінюється їх сумарний блиск, називаються *затемнювано-подвійними.* Компоненти *тісних-подвійних* систем розташовані настільки близько між собою, що можливо перетікання зоряної речовини з одного компонента на інший. Зорі з періодичною зміною в їх власному русі відносять до *астрометрично-подвійних*. Причиною таких коливань є наявність в системі *невидимого супутника*, завдяки якому і спостерігається такий рух. Природа такого супутника може бути і зоряною, і субзоряною, і планетною. Отже, за винятком оптично-подвійних, всі ці зорі утворюють фізичні системи, тобто вони обертаються навколо спільного центра мас. Якщо ж серед цих компонентів є планети, то такі системи відносять ще й до планетних.

Зоряні скупчення й асоціації мають сумірну між собою кількість компонентів, але відрізнюються між собою їх просторовою щільністю: в зоряних асоціаціях вона нижча. Серед цих зоряних систем розрізняють (рис. 17.2):

- розсіяні зоряні скупчення;
- кулясті зоряні скупчення;
- зоряні асоціації;
- зоряні надасоціації.

Така градація зоряних систем пов'язана з кількістю зір і субзір, які входять до їх складу, їх просторовою щільністю та місцезнаходженням в галактиках. Як правило, такі зоряні системи є поодинокими. Виключенням є система χ і h Персея (рис. 17.2б), що складається з двох фізично-пов'язаних між собою розсіяних зоряних скупчень. Подвійних (і більшої кратності) кулястих зоряних скупчень і зоряних асоціацій не спостерігається.

Галактики – це найбільш грандіозні зоряні системи. До їх складу входять зоряні системи меншої ієрархії. В залежності від їх форми та зоряних населень, виділяють чотири основні типи галактик:

- еліптичні;
- спіральні;
- лінзоподібні;
- неправильні.

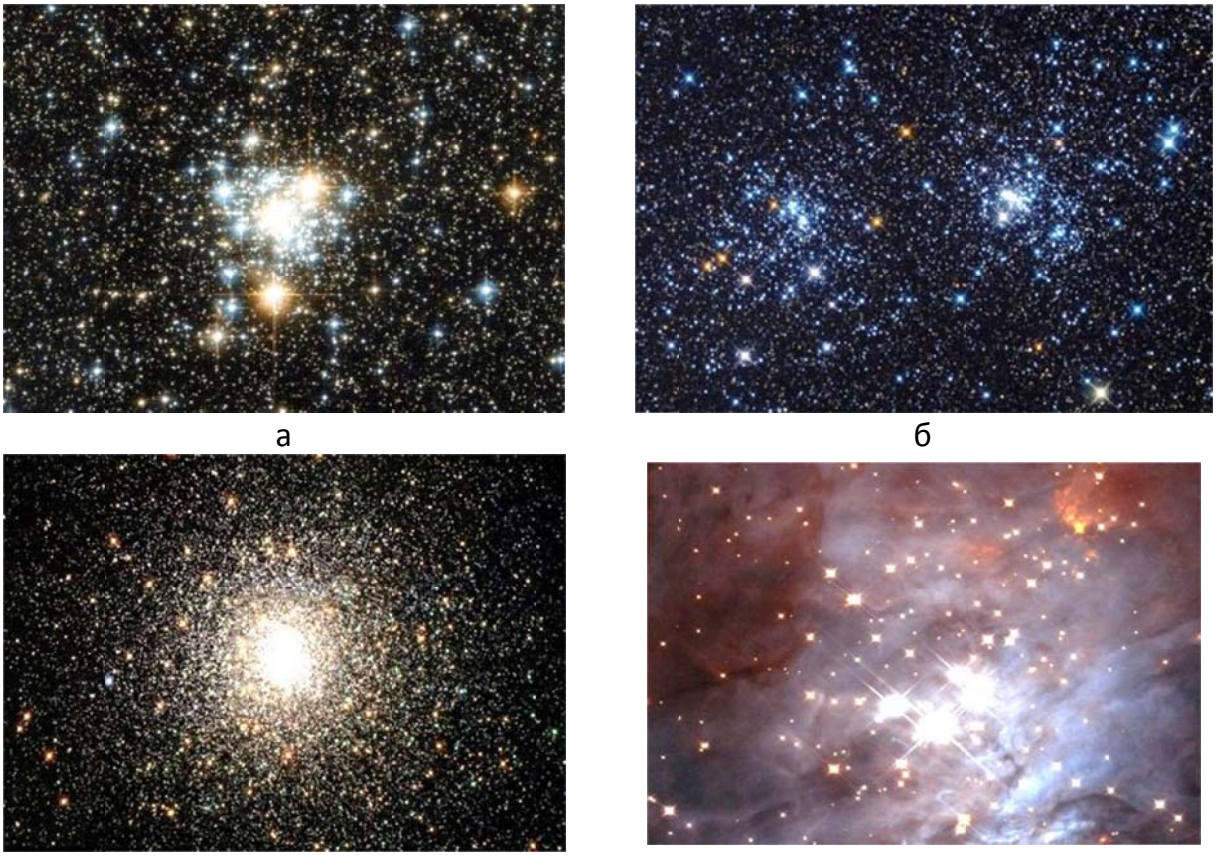
Ще їх розділяють за певними ознаками:

- активні;
- взаємодіючі;
- компактні.

Основні типи галактик підкоряються *камертонній класифікації* Хаббла, представленій на рис. 17.3. Послідовності уздовж кожної зі складових гілок «камертона» віддзеркалюють певні зміни в астрофізичних характеристиках галактик. Під час активних фаз еволюції галактик, в залежності від їх мас і кута спостереження до галактичної площини,

[92] У так званих спектрально-подвіних з «одним спектром» періодичні зміщення спостерігаються тільки в спектрі більш яскравої зорі, коли різниця в зоряних величинах компонентів більша за $4–6^m$. За таких умов виявляють у зір і маломасивні супутники, серед яких є не тільки зорі, а і субзорі, і екзопланети.

вони проявляють себе як квазари, радіо-, ІЧ-, сейфертовські галактики, лацертиди тощо.



а б в г

Рис. 17.2. Зоряні скупчення й асоціації: а –розсіяне зоряне скупчення NGC 299; б – розсіяне подвійне скупчення зір χ і h Персея; в – кулясте скупчення M 80; г – зоряна асоціація Трапеція Оріона

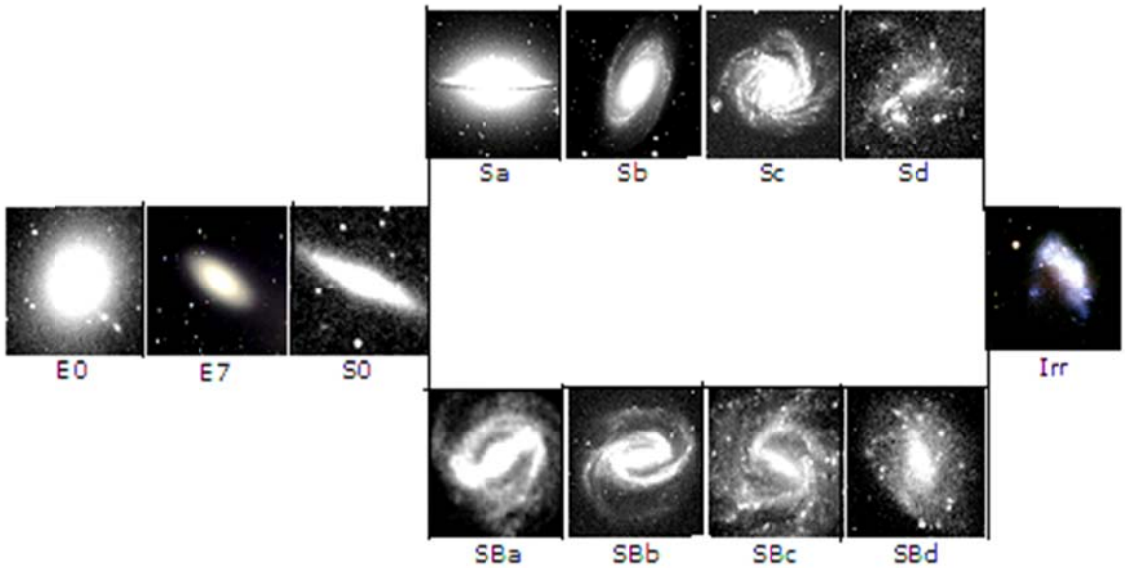


Рис. 17.3. Камертонна класифікація галактик

Взаємодіючі галактики відтворюють дії припливних сил між ними як наслідок сумірності їх розмірів і взаємного розташування. Галактики, що містять менше мільярда зір, відносять до карликових. Їх поділяють на групи, до яких належать майже всі маломасивні аналоги галактик, що входять до хабблівської камертонної класифікації, та *карликові компактні* й *ультра-компактні* карликові галактики.

Відстань від Сонця до віддалених галактик d визначається по зміщенню їх спектральних ліній. У відповідності до ефекту Допплера, зміщення спектральних ліній джерела, що рухається відносно спостерігача, пов'язано з променевою швидкістю Vr джерела формулою:

$$\frac{\lambda' - \lambda}{\lambda} = z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{V_r}{c}, \qquad (17.1)$$

де λ' і λ – довжини хвиль зміщеної лінії та лінії від нерухомого джерела відповідно,

c – швидкість світла,

z – *червоне* ($z > 0$) або *синє* ($z < 0$) *зміщення спектральних ліній*.

Для галактик Леметр виявив закономірність, що їх променева швидкість збільшується пропорційно відстані до них: $V_r \propto d$, яку в подальшому Хаббл узагальнив у вигляді

$$V_r = H_0 d, \qquad (17.2)$$

де H_0 – стала Хаббла.

Вираз (17.2) сьогодні зветься *законом Хаббла–Леметра*. Об’єднуючи вирази (17.1) і (17.2), отримуємо зв’язок відстані до галактик з їх червоним зміщенням:

$$d = \frac{c}{H_0} z. \qquad (17.4)$$

18. Поодинокі та кратні зорі й субзорі

Під *кратністю k зір і субзір* розуміють їх кількість в зоряній системі. У разі $k = 2, 3, 4, \ldots$ їх звуть подвійними, потрійними, квадрупольними (чи чотирикратними) і т.д. зорями. До $k = 1$ відносять поодинокі зорі й субзорі. В таких системах не розрізняють природу компонентів, що належать до зір чи субзір, в тому сенсі, що їх компоненти позначаються однаково – великими латинськими літерами A, B, C і т.д.

Подвійні зорі. Ці системи трапляються у всіх можливих орієнтаціях нахилу орбіт до спостерігача (що відображає їх класифікацію) та комбінаціях компонентів: зоря – зоря, зоря – субзоря, субзоря – субзоря. Всього відомо близько 125 тис. таких систем, до 60 % з яких спостерігаються як візуально-подвійні, більше 35 % – це затемнювано-подвійні, 6 % – спектрально-подвійні та 1 % – тісні подвійні системи. Подвійні зорі виявлені і в околі Сонця, і в полі Галактики (на найрізніших відстанях), і в зоряних скупченнях та асоціаціях.

Візуально-подвійні (рис. 17.1б) зорі мають найрізноманітніші кутові розміри, а їх площини орбіт близькі до «поверхні» небесної сфери. Відмічено, що зі збільшенням їх великих півосей орбіт збільшуються їх ексцентриситети. Такі системи можуть мати розміри, сумірні з відстанями між зорями поля Галактики. Маси компонентів цих систем, як правило, різні. Відомі системи і з сумірними масами.

Астрометрично-подвійні – це окремий випадок візуально-подвійних зір, коли спостерігається тільки один видимий компонент, тому що інший має суттєво менший блиск (рис. 17.1г). У цьому випадку за астрометричними спостереженнями власний рух зорі має синусоїдально-подібну форму, що відображає його відхилення від барицентра, тобто центра мас. Оскільки в такому русі виконується правило важеля відносно центра мас, то це дає змогу записати рівність

$$M_1 a_1(t) = M_2 a_2(t), \tag{18.1}$$

де a_1 і a_2 – відстані компонентів 1 і 2 від барицентра на момент часу t.
Виявлення періодичної зміни в такому русі може свідчити про наявність у системі невидимого супутника. Саме так Ф. Бессель у 1834 році відкрив невидимий супутник у зорі Сіріус, який в подальшому виявився білим карликом, що згодом отримав назву Сиріус В.

Спектрально-подвійні (рис. 17.1в) зорі характеризуються періодичною зміною променевих швидкостей компонентів 1 і 2 з їх амплітудою K_1 і K_2, які обернено пропорційні їх масам[93]. В такому разі виконується співвідношення:

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{K_2}{K_1}. \tag{18.2}$$

У разі, коли один зі спектрів компонентів не спостерігається (через слабкий блиск), то спостерігаються тільки періодичні зміни променевої

[93] Очевидно, що для більшої маси компонента відхилення і амплітуда променевої швидкості є меншими.

швидкості видимої зорі, що є аргументом на користь існування невидимого супутника в системі.

Затемнювано-подвійні (рис. 17.1д) виділяють в окремий клас через спостереження транзиту більш холодного компонента з радіусом R_1 по диску більш гарячого компонента з радіусом R_2 і подальшому аналізу *кривої блиску*[94] такої системи. Тоді, коли на промені зору на диску яскравого компонента перебувають обидва компоненти, яскравість зменшується на величину, пропорційну відношенням площ дисків зір – δ $[(\pi R_1)/(\pi R_2)]$ (де $\delta = \delta(\Delta T)$ – контраст між зображеннями зір, який залежить від різниці їх ефективних температур, який знаходиться в межах $0 \le \delta \le 1$). На кривій блиску це відповідає зменшенню зоряної величини

$$|\Delta m| = 2,5\lg\left[1-\delta\left(\frac{R_1}{R_2}\right)^2\right]. \qquad (18.3)$$

Тісні подвійні – це такі системи, коли їх компоненти розташовані на відстанях між собою, сумірних з віддаленістю планет земної групи від Сонця (рис. 17.1е). Коли такі зорі-компоненти перебувають на стадії головної послідовності, то їх поверхні, в залежності від їх розділення, або мають форму куль (рис. 18.1а), або витягнуті (рис. 18.1б), внаслідок взаємної дії припливних сил. Якщо один із компонентів є зорею-гігантом, то його форма обмежена *порожниною Роша*[95] (рис. 18.1в). В такій ситуації речовина зорі-гіганта після повного заповнення цієї порожнини починає перетікати через так звану *першу точку Лагранжа* (L_1) на інший компонент. Іншим компонентом можуть бути зорі, що перебувають на різних етапах еволюції, включаючи зоряні залишки. Якщо і другий компонент перебуває на стадії гіганта (рис. 18.1г), то взаємне перетікання речовини може призвести до появи спільної оболонки. Такі системи називають симбіотичними.

Визначення мас і відношень радіусів зір за спостереженнями спектрально-подвійних зір. Якщо система одночасно спостерігається і як візуально-подвійна, і як спектрально-подвійна, то згідно з узагальненим третім законом Кеплера (9.11) і формулою (18.2) визначаються сума та відношення мас компонентів. З точки зору математики вирази (9.11) і (18.2) є системою двох рівнянь з двома невідомими. Розв'язуючи цю систему, одержимо вирази для мас

---

[94] Крива блиску зоряної системи – це залежність інтегральної зоряної величини від часу.

[95] Порожнина Роша – область навколо зорі, зовнішнім краєм якої є поверхня рівного потенціалу, яка містить першу точку Лагранжа (рис. 18.1).

$$M_1 = \frac{4\pi a^3}{GP^2}\frac{K_2}{K_1 + K_2}, \tag{18.4}$$

$$M_2 = \frac{4\pi a^3}{GP^2}\frac{K_1}{K_1 + K_2}. \tag{18.5}$$

Відношення радіусів входить у формулу (18.3), що описує головний мінімум кривої блиску. Розв'язуючи це рівняння відносно відношення радіусів компонентів системи, отримаємо

$$R_1 \Big/ R_2 = \sqrt{\delta^{-1}\left(10^{0.4|\Delta m|} - 1\right)}. \tag{18.6}$$

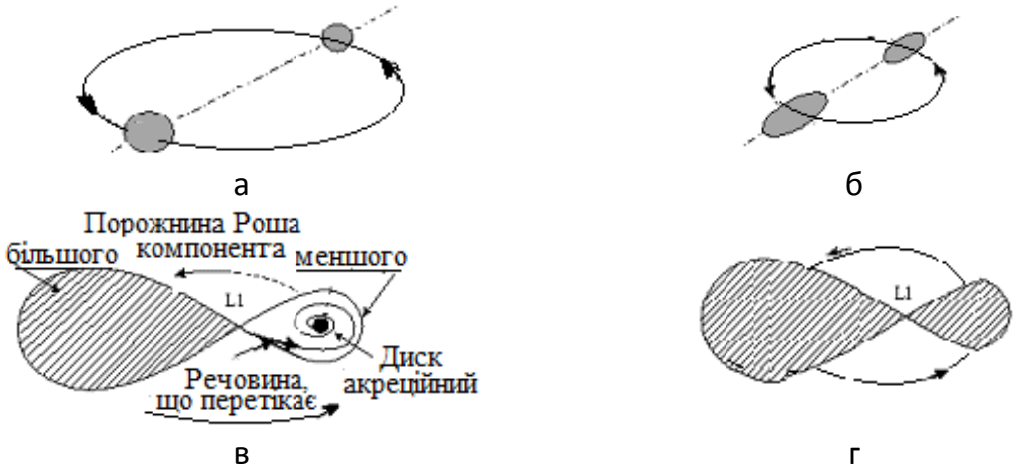


Рис. 18.1. Конфігурації компонентів подвійних систем: а – широких; б – близьких, де починають проявлятися дії припливних сил; тісних, з заповненням одним (в) і обома (г) компонентами порожнин Роша

Потрійні та більшої кратності зорі. Класифікація подвійних зір у певному сенсі поширюється і на зорі більшої кратності. Візуально кратні зорі трапляються частіше за все. Їх компонентами можуть бути всі різновиди поодиноких чи подвійних зір. Тому, коли один із компонентів розташований істотно віддалено від інших компонентів системи (рис. 18.2), їх досліджують такими самими методами, як і поодинокі чи подвійні зорі (наприклад, коли система має невидимий супутник або є спектрально-подвійною зорею чи відноситься до тісних подвійних).

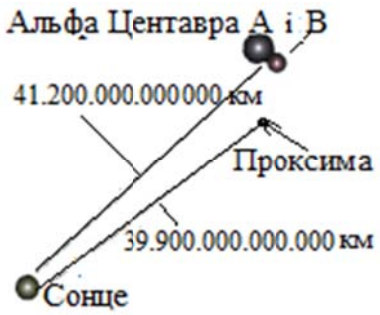


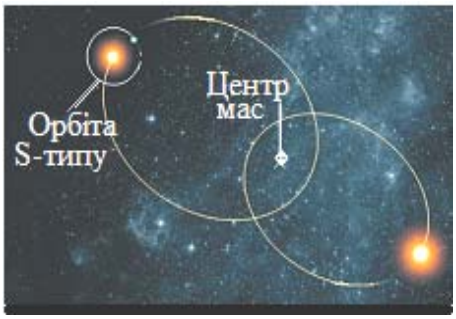
Рис. 18.2. Найближча до Сонця потрійна зоряна система Альфа Центавра, що складається з компонентів А та В і Проксими

Зі збільшенням кратності кількість таких систем значно зменшується. Як і у подвійних систем, маси компонентів у кратних системах, як правило, різні. Також, як і у подвійних зір, компонентами в них є і зорі, і субзорі. Трапляються й такі, де компонентами є виключно субзорі. Такі системи вивчаються методами ІЧ-астрономії, оскільки у видимому діапазоні вони не доступні для дослідження.

19. Планетні системи

Якщо у поодиноких чи кратних зір є ще й планетні компоненти (хоча б один), то така система є одночасно ще й планетною системою. Планетні системи трапляються у всіх класів поодиноких і кратних зір, компонентами яких є зорі та субзорі. До планетних систем відносяться й ті, що перебувають на початковій стадії еволюції, тобто містять *протопланетний диск*[96] (можливо, разом з екзопланетами), відтак перебувають на стадії формування.

Основні типи планетних систем. Коли планети мають орбітальні рухи навколо окремих зір (чи субзір), такі планетні системи відносять до S- *типу* (рис. 19.1а). Виявлені планетні системи, в яких планети обертаються навколо тісних зір (чи субзір), відносять до Р-типу (рис. 19.1б). Переважна частка планетних систем відноситься до S-типу. Вони є складовими поодиноких і кратних зір та субзір. Прикладом планетної системи з центральною зорею є Сонячна система. В нашій планетній системі Сонце – зоря, навколо якої обертаються 8 великих планет. Планетна система S-типу потрійної системи Альфа Центавра належить Проксимі – далекому компоненту, що обертається навколо АВ-компонентів з періодом 550 тис. років. Екзопланета з масою, більшою за земну в 1,3 рази, віддалена від Проксими у 20 разів, ближче, ніж Земля від Сонця, та має орбітальний період близько 11,2 діб.



а

б

Рис. 19.1. Орбітальні рухи компонентів у планетних системах S- (а) і Р- (б) типів

[96]Диск навколо зорі або субзорі, які перебувають на ранній стадії еволюції. Для планетних систем – це первинна стадія їх еволюції.

Планетну систему S-типу має один з найближчих до Сонця А-компонент подвійної зорі Грумбріджа 34 (Gru 34), період якого з компонентом В становить 2,6 років. Екзопланета ж – Gru 34 Aa, земного типу, з масою $3M_{\oplus}$, обертається навколо своєї зорі з періодом 11,4 діб.

Класичним прикладом планетної системи Р-типу є подвійна 2MASS J0249-0557, компонентами якої є субзорі з масами 48 M_J і 44 M_J (M_J – маса Юпітера), що віддалені від Сонця на 49 пк. Їх зовнішній компонент-екзопланета має масу 11,6 M_J. Ця планетна система є першою, дослідженою інфрачервоною астрометрією. Аналогічними є системи, які були відкриті космічним телескопом імені Кеплера, в складі яких є екзопланети: Kepler 16b, Kepler 34b, Kepler 35b, Kepler 38b, Kepler 7b, c, Kepler 64b тощо. Всі екзопланети, що входять до складу планетних систем Р-типу, є газовими воднево-гелієвими гігантами.

Різноманіття планетних систем. Серед відкритих планетних систем у кожної з 4–5 спостерігається від двох до семи екзопланет. В залежності від відстані цих планет від своєї центральної зорі проявляються їх відповідні властивості. Центральними світилами у виявлених планетних систем є субзорі та зорі, які перебувають майже на всіх етапах еволюції (Т Тельця[97], головної послідовності, субгігантів та гігантів і навіть пульсарів). Планети-компоненти у відкритих планетних системах також перебувають на різних етапах еволюції: як мінімум, принципово, на двох. У старих планетних системах планети є сформованими космічними тілами, у молодих, за наявності навколо зорі протопланетного диску, – слід очікувати, що вони є ще протопланетами. Такі протопланети виявлені в околах Сонця, у зір Епсилон Ерідана (рис. 19.2), Бета Живописця, Фомальгаут та інших. Відомо більше тисячі протопланетних дисків, центральними світилами яких є як зорі, так і субзорі, в околах яких виявлені й протопланети.

Планети-гіганти, рухаючись навколо зорі в результаті потужного випаровування її атмосфери та дії зоряного світлового тиску, повинні поводитися як велика «комета». Такі планети відносять до «гарячих юпітерів». Саме такі властивості передбачають для першої відкритої екзопланети: 51 Пегаса b, якій дали ім’я Беллефонт. Вона має масу половину юпітерової, обертається навколо зорі на такій самій відстані, як і Проксима b, з періодом 4,2 доби.

В околах Сонця виявлена також воднево-гелієва планета без центрального світила: WISE 0855–0714, температура якої є близько 240 K. Такі космічні тіла назвали «*планетами-сиротами*».

---

[97] Остання стадія еволюції протозір з масами менше 2 $M_{\odot}$.

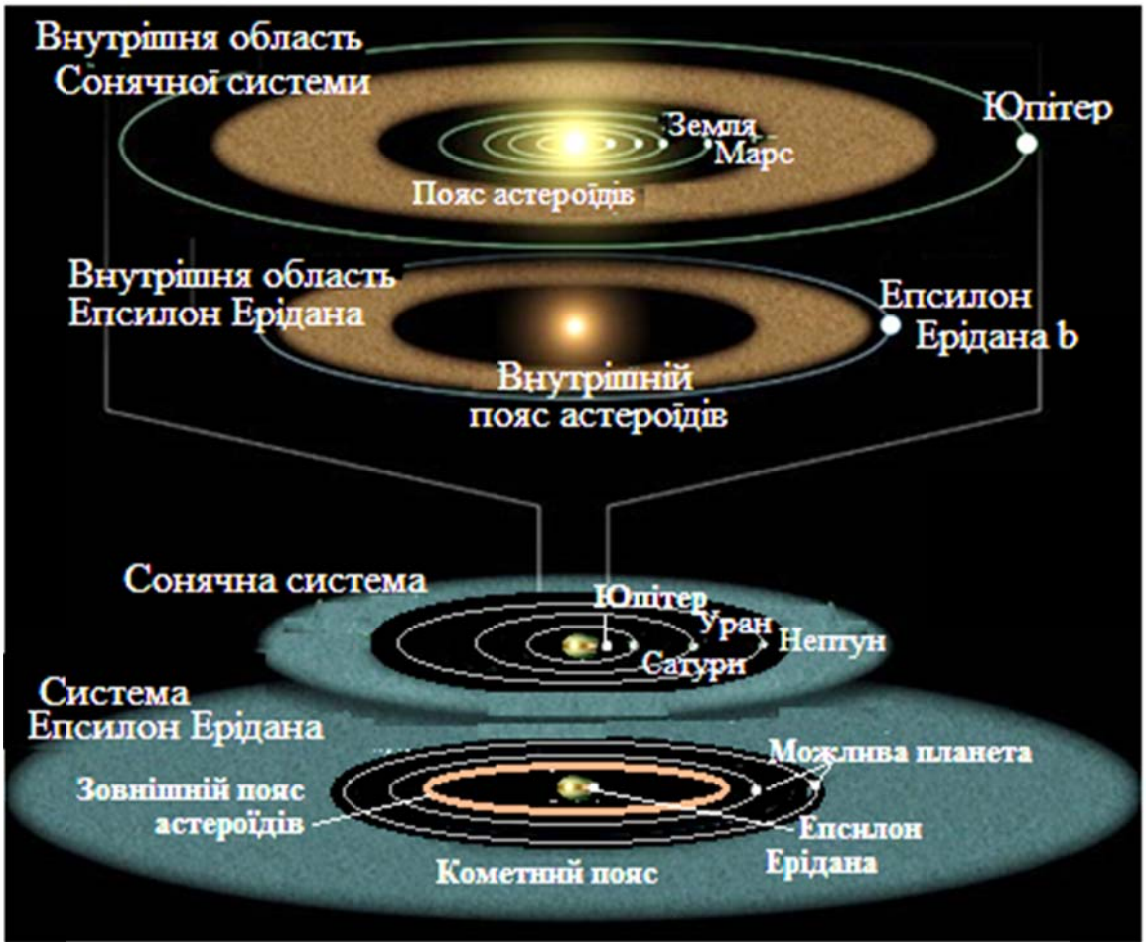


Рис. 19.2. Планетна система Епсилон Ерідана порівняно з Сонячною системою

Системи з планетами, що розташовані в «зоні життя». *Зона життя* навколо зір – простір (кільце), в межах якого вода на планетах (як правило, силікатного чи льодяного типу) перебуває в рідкому стані. Внутрішня межа такого кільця (r_{in}) визначається положенням планети, де весь запас води (H_2O) може бути випаруваним під дією випромінювання центральної зорі. Зовнішня межа (r_{out}) визначається відстанню від зорі, на якій максимальний парниковий ефект не здатний утримати вуглекислий газ (CO_2) від конденсації, що призводить до зледеніння. Віддаленість від центрального світила зони життя та ширина кільця визначаються:

● зоряним потоком випромінювання (який залежить, перш за все, від світності світила та ексцентриситету планети);

● альбедо планети;

● концентрацією парникових газів;

● розподілом енергії у випромінюванні зорі та «вікон прозорості» в атмосфері планети.

Як показують розрахунки, захмареність атмосфери планети (у відсотках – %) в результаті дії перерахованих факторів призводить до наступних меж зони життя в Сонячній системі:

– r_{in} = 0.84–0.95 а.о., r_{out} = 1,67 а.о. (0 %);
– r_{in} = 0.68–0.76 а.о., r_{out} = 1,95 а.о. (50 %);
– r_{in} = 0.46–0.51 а.о., r_{out} = 2,4 а.о. (100 %).

«*Обезводненню*» *планети*, за її ефективної температури $T_{еф}$ = 373 K (100° C) для 50 %-го хмарового покриття, відповідає відстань від Сонця 0,73 а.о. Як видно, положення Землі займає місце в «зоні життя» Сонячної системи, близьке до середнього значення.

До переліку екзопланет, що розташовані в зоні життя, відносять наступні: Глізе 667 Cc, HD 85512 b, Глізе 581 d, g; Глізе 163 c, Kepler-22 b, Kepler-186 f тощо. Планетна система TRAPPIST-1, яка розташована від Сонця на відстані 11,9 пк, відзначається тим, що найбільша кількість планет – три з семи (всі земного типу) перебувають в зоні життя. Центральне світило ж цієї системи має мінімально граничну масу для зір – 0,08 $M_{\odot}$.

Об'єкти SETI. *SETI* (абревіатура, англ.: Search for Extraterrestrial Intelligence) – міждисциплінарний напрям досліджень, спрямований на пошук позаземних цивілізацій. У цих дослідженнях астрономія займає визначальне місце. Саме за даними астрономічних досліджень визначаються місця у Всесвіті, придатні для ймовірного існування життя: відповідні планети в околі зір. Для аналогічних земним формам життя льодяні чи силікатні планети, які перебувають в зоні життя, повинні ще й мати достатній вік для зародження на них живих організмів. Якщо спиратися на «земний досвід» зародження та розвитку живих організмів, до об'єктів SETI слід віднести земноподібні планети, що входять до складу планетних систем зір, вік яких менше кількох мільярдів років. Тут йдеться не про зусилля, спрямовані на пошук саме позаземних цивілізацій, а про більш широкий вибір зір-кандидатів, у яких виявлено планети земного типу, де б вже могли зародитися живі організми на білковій основі. Інші форми життя науці ще не відомі.

В околі Сонця (ближче 10 пк) у близько 40 зір різної кратності відкрито більше 70 екзопланет[98]. Серед них до *супер* (чи великих) *земель*[99] належать близько 60 % планет, до воднево-гелієвих – ≈ 20 %, решта – льодяні гіганти. Серед супер земель відомі такі, вік центральних зір яких перевищує $t = 2$ млрд років (Гр). Такі екзопланети вкрай цікаві у дослідженнях проблеми SETI. Це наступні екзопланети:

---

[98]На початок 2019 року спостережні дані були наступні: у 38 систем кратних зір було відкрито 72 екзопланети. Тобто з урахуванням великих планет Сонячної системи: в околах Сонця з радіусом 10 пк відомо 80 планет, що належать 39 планетним системам. Ще маси двох космічних об'єктів SIMP 0136+0933 та ULAS 1335 в межах похибок визначення їх мас можуть належати як до планет-сиріт, так і до субзір.

[99]До супер (чи великих) земель відносять планети з радіусами менше двох земних. В такому разі при типових густинах для планет земної групи слід очікувати маси таких планет менше $2M_{\oplus}$.

Каптейн b, Глізе 581 d, g – t = 8 Гр;
Проксима Центавра b – t = 6 Гр;
Тау Кита e, f (?) – t = 6 Гр;
Глізе 667 Cc – t = 2 Гр.

За межами 10-ти парсекового оточення до SETI-кандидатів відносять ще й екзопланету HD 85512 b. З урахуванням віку Землі (4,5 Гр), перелічені екзопланети є потенціальними кандидатами, на поверхні яких може зародитися життя, якщо цей процес залежить тільки від відповідних астрономічних властивостей зір і планет.

20. Зоряні скупчення й асоціації

Зоряні системи, які спільно утворюються та включають від десятків до мільйона зоряно-субзоряних компонентів, відносять до зоряних агрегатів. Залежно від механізму утворення, загальної кількості компонентів (N), розмірів ($\varnothing$, пк), їх просторової концентрації компонентів (n, пк$^{-3}$), зоряні агрегати поділяють на:

- зоряні скупчення ($N \sim 10$–10^6, $\varnothing \sim 1$–10^2; $n \lesssim 1$–10^3):
  - розсіяні ($N \sim 10$–10^3, max 10^4; $\varnothing \sim 1$–10, $n \lesssim 1$–10^2),
  - кулясті ($N \sim 10^4$–10^6, $\varnothing \sim 10$–10^2, $n \lesssim 1$–10^3);
- зоряні асоціації ($N \sim 10$–$< 10^2$, $\varnothing \sim 10$–10^2, $n \sim 10^{-2}$–10^{-3});
- зоряні надасоціації ($N \sim 10^2$–$< 10^3$, $\varnothing \gtrsim 500$, $n \sim 10^{-2}$–10^{-3}).

Зоряні скупчення. За підвищеною поверхневою концентрацією на небесній сфері виділяють розсіяні та кулясті скупчення. Деякі розсіяні скупчення доступні для спостережень неозброєному оку, кулясті – виключно за допомогою телескопа.

Розсіяні зоряні скупчення (РС), як правило, нараховують від десятків до тисячі зір і субзір, маючи неправильні форми, обмежені розмірами від 1,5 до 20 пк (рис. 17.2а, б). Це відповідає їх середній просторовій концентрації компонентів у межах $n_{\text{рс}} \lesssim 1$–80 пк$^{-3}$. Елементний склад компонентів схожий з сонячним і не відрізняється між собою більше, ніж у 5 разів. 80 % розсіяних скупчень мають вік $t_{\text{рс}} \lesssim 10^8$ років.

До складу РС входять зорі головної послідовності та типу Т Тельця, субзорі, гіганти та надгіганти, подвійні та змінні зорі. В структурі РС виділяється ядро та розріджена корона, які нараховують приблизно однакову кількість компонентів. У різних РС корона більша за ядро від двох до десяти разів. У молодих РС спостерігається газова складова, яку пов’язують з залишками речовини, з якої утворилися спостережні компоненти.

РС концентруються до площини Молочного Шляху і доступні для спостережень у межах 2,5 кпк від Сонця, де їх налічується більше 1,1 тис. З урахуванням спостережної селекції очікується, що повне число РС

в Молочному Шляху сягає ~ 10–15 тис. Найближче до Сонця РС займає майже ціле сузір'я на небесній сфері (17°). Це скупчення у Великій Ведмедиці, що налічує близько 100 компонентів і досягає розмірів 7 пк у діаметрі (рис. 20.1). Його вік оцінюється в 400 млн років. Найстаріше РС розташоване в сузір'ї Цефея на відстані 2,2 кпк від Сонця: NGC 188, його вік 10 млрд років. Воно налічує приблизно 120 компонентів у межах 6 пк. Дещо далі (2,3 кпк) спостерігається подвійне РС: χ і h Персея (рис. 17.2б). В обох його складових налічують близько 350 компонентів.

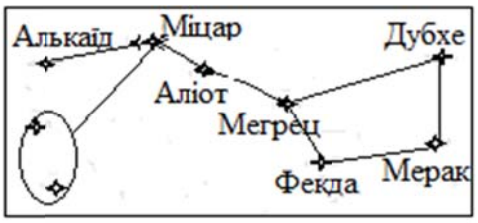


Рис. 20.1. Скупчення зір у сузір'ї Великої Ведмедиці. Крім зір Дубхе та Алькаїд всі зорі сузір'я належать розсіяному скупченню. У зорі Міцар є оптичний компонент – Алькор

Кулясті зоряні скупчення (КС) мають форму сфери з діаметрами від 15 до 200 пк (рис. 17.2в). Вони налічують від $3 \cdot 10^4$ до $5 \cdot 10^6$ компонентів, у складі яких спостерігаються субкарлики, зорі-гіганти, змінні та подвійні зорі, білі карлики. Зорі-компоненти належать до населення II, тобто у них спостерігається суттєвий дефіцит важких хімічних елементів порівняно з сонячним складом. Це дає підставу для оцінки віку КС – > 10 млрд років. Компоненти КС мають концентрацію до його центра і, як і у РС, в них виділяють ядро та корону, відношення розмірів яких у різних скупчень теж таке – від двох до десяти. Середня концентрація компонентів КС відповідає значенню 0,4 $пк^{-3}$, а в центральних областях ядра – 10^2–10^3 $пк^{-3}$.

Газова складова майже відсутня через низьку параболічну швидкість (10 – 30 км/с), достатню для її вимітання та дії припливних сил під час перетину площини Молочного Шляху в процесі руху навколо його центра. Орбіти галактоцентричного руху КС сильно витягнуті та незамкнені. Вони мають сферичну концентрацію до центра Молочного Шляху, який розташований в сузір'ї Стрільця. В нашій Галактиці віявлено 157 КС. Загальна їх кількість очікується від 200 до 600.

Найближче КС розташоване в сузір'ї Скорпіона: М 4, яке налічує $1{,}5 \cdot 10^5$ компонентів. Його відстань від Сонця – 2,1 кпк, а за діаметра 23 пк кутовий діаметр відповідає значенню ρ = 26', що є одним з найбільших серед зоряних систем такого типу. Наймасивнішим КС є М 22 (сузір'я Стрільця) – $7 \cdot 10^6$ $M_\odot$. Відстань до нього 3 кпк, а кутовий діаметр – ρ = 24'. Найстарішим (13 млрд років) є КС Омега Центавра, яке розташоване від Сонця на відстані 5 кпк і має кутовий діаметр ρ = 36', що є найбільшим серед відомих кулястих зоряних скупчень.

Зоряні асоціації й надасоціації. Області в галактичному полі, де крім «звичайних» зір пізніх спектральних класів є ще й молоді OB-зорі чи типу Т Тельця, та в залежності від їх кількості відносять до зоряних асоціацій (рис. 17.2г) чи надасоціацій (рис. 20.2а).

Концентрація цих молодих зір надто низька – $n \sim 10^{-2}$–10^{-3} пк$^{-3}$, тому їх присутність істотно не збільшує середню густину матерії в цій області. З такими областями пов'язуються зони зореутворення, індикаторами яких і є наявність OB-зір та типу Т Тельця. Саме присутність в таких областях таких зір і визначає їх назву: OB- чи Т-асоціації. Області, в яких одночасно зосереджені зорі в межах O–A2-спектральних класів і відбивні газопилові туманності, які їх оточують, відносять до R-асоціацій (від англ.: *reflection* –відбивання).

а

б

Рис. 20.2. OB-надасоціація 30 Золотої Риби в галактиці Велика Магелланова Хмара (а) та R- асоціації – туманність Серце (б)

Проглядається загальна закономірність щодо структури зоряних асоціацій: відмічаються в їх центральних областях наявність подвійних і кратних зір чи зоряних скупчень.

<u>Т-зоряні асоціації</u> – наймолодші зоряні системи, склад яких відрізняється від інших саме наявністю в них від одного до декількох десятків зір типу Т Тельця, молодих FG-карликів, в яких ще не завершився процес гравітаційного стиснення. Розміри таких асоціацій обмежені кількома десятками парсек.

<u>OB-зоряні асоціації</u> – це області з розмірами в межах 40–200 пк, в які входять гарячі зорі-гіганти та надгіганти O–B-спектральних класів. Існування таких зір обмежене віком 10^6–10^7 років, який і кладеться у відповідність до часу життя таких зоряних систем. В OB-асоціаціях можуть бути й зорі типу Т Тельця. Тоді такі зоряні системи є одночасно й Т-асоціаціями (обернене неправильно).

<u>R-зоряні асоціації</u> утримують зорі O–A2-спектральних класів головної послідовності (рис. 20.2б). Їх маси та дії зоряного вітру недостатньо, щоб

позбутися речовини газової туманності, з якої вони утворилися, що і є визначальною рисою, за якою їх виділяють серед інших типів зоряних асоціацій.

Зоряні надасоціації – області з розмірами $\gtrsim$ 500 пк, що містять десятки зоряних асоціацій. За наявністю газової складовою, вони можуть мати загальну масу, сумірну з найбільшими молекулярними хмарами – 10^5– 10^6 $M_\odot$.

Зоряна система Трапеція Оріона (рис. 17.2г) – приклад OB-асоціації з діаметром 130 пк, розташованої на відстані 460 пк від Сонця. В асоціацію входить 15 яскравих компонентів, у центрі розташована кратна зоряна система. NGC 2244 – відома OB-асоціація тим, що до її складу входить «гаряча зоря Пласкетта», з масою 90 $M_\odot$, яку раніше вважали наймасивнішою зорею. Ця асоціація розташована на відстані 1,5 кпк від Сонця й має розміри 160 × 110 пк, до складу якої входить 17 OB-яскравих зір. Серед T-асоціацій відомими є Скорпіон T1 та Оріон T2. Перша з них відома тим, що до її складу входить зоря-надгігант Антарес, діаметр якого настільки великий, що міг би вмістити орбіту Марса. Ця асоціація, діаметром 33 пк, віддалена від Сонця на 210 пк і включає 33 яскравих зір типу T Тельця. Велика асоціація Оріон T2 розташована на відстані 400 пк від Сонця та включає відому зорю T Оріона. Вона має діаметр 30 пк, тут зосереджено 450 яскравих зір. Прикладом R-асоціації є туманність Серце (IC 1805), що розташована на відстані 2,3 кпк і має кутові розміри 20'×20' (сузір'я Кассіопеї) – рис. 20.2б. До її складу входить декілька яскравих зір, маса яких у 50 разів перевищує сонячну.

21. Галактики

Найбільш грандіозними зоряними системами є галактики. Вони включають всі менші за ієрархією зоряні системи. Їх маси та кількість компонентів можуть відрізнятися на 6 порядків (від 10^6 до 10^{12}), а розміри – на 2 – 3 порядки: від 1 до 250 кпк, а максимальне значення може сягати 600 кпк. Галактики містять все різноманіття космічних об'єктів: зорі, субзорі, планети та космічну речовину в різних проявах у вигляді газу та пилу. В галактиках проявляється дія ще й темної матерії, природа якої ще не з'ясована.

Класифікація галактик спирається на їх зовнішні ознаки, які можна спостерігати в телескоп. Виділяють чотири основні типи (рис. 21.1):

еліптичні (E), лінзоподібні (SO, SOB), спіральні (S, SB) та неправильні (Ir, чи Irr – від. англ.: *irregular*), де літера «B» означає наявність перемички в галактиках (від англ.: *bar*).

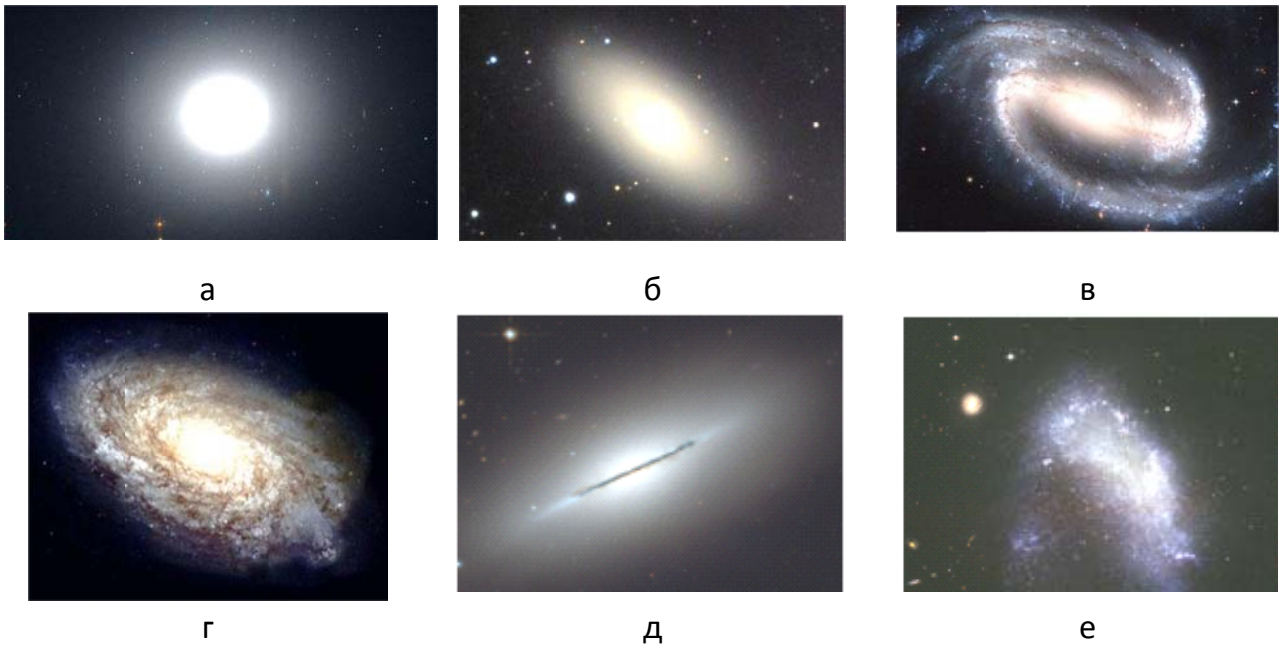


Рис. 21.1. Галактики різних типів: еліптичні з різним стисненням – E0 (M 89 – а) і E7 (NGC 3384 – б); спіральні з перемичкою SB (NGC 1300 – в), без перемички S (NGC 4414 – г), лінзоподібна Веретено (NGC 5866 – д) і неправильна NGC 1427 (е)

Хаббл розташував їх у послідовність, за якою змінювалася упорядкована форма, що нагадує камертон. Звідки вона й одержала назву: камертонна класифікація. Вигляд такої послідовності наведений на рис. 17.3. В подальшому виявилося, що вздовж вибудованої послідовності змінюються й деякі характеристики галактик, такі як швидкість обертання, наявність газу, частково маса. Наведеній класифікації підпорядковується більшість галактик, маса яких більше за мільярд зір.

Відкриття невеликих галактик призвело до введення поняття карликових галактик, які з кількістю компонентів менше мільярда і мають аналоги галактик камертонної класифікації. За цією класифікацією виділяють ще *карликові сфероїдальні галактики* (dSph: d – англ.: *dwarf* – карлик); галактики з кількістю зір менше 10^8 та за розмірами менше 50 пк відносять до ультракомпактних (UCD); найменші з цих зоряних систем, в яких налічують менше 10^7 зір, відносять до галактик-хоббітів.

Виділяють ще *активні галактики* за наявністю глобальних областей спалахового зореутворення, проявом потужного випромінювання у всьому діапазоні хвиль (до них належать квазари), радіовипромінювання (такі галактики звуть радіогалактиками), надто яскравих ядер (такі об’єкти

одержали назву сейфертовських та N-галактик). Окремо також виділяють *взаємодіючі галактики*, які є наслідком об'єднання чи проявом дії їх припливних сил. В таких об'єктах спостерігаються перемички, «хвости», специфічний прояв світлої та поглинаючої матерії.

Астрофізичні властивості основних типів галактик. Найбільш поширеними є наступні типи галактик: спіральні, еліптичні, лінзоподібні та неправильні.

Спіральні галактики. Маси таких галактик перебувають у межах $M \sim 10^9$–10^{11} $M_\odot$ (max – 10^{12} $M_\odot$), розміри – ∅ = 1–250 кпк. Наймасивнішою серед спіральних SBb-типу є галактика NGC 6872, яка має масу 10^{12} $M_\odot$ і більше за розмірами нашої Галактики в 5 разів.

До структури спіральних галактик входять:

- *балдж* (від англ.: *bulge* – опуклість),
- *диск* (з рукавами, населення I),
- *гало* (очікується – населення II).

Третина спіральних галактик не має перемички – S, їх рукави починаються з їх ядра; у інших – є, з якої поширюються два чи чотири рукави. Спіральні галактики розділяють на підтипи (a, b, c, d) – рис. 21.1, вздовж яких (від a до d) *спіральний візерунок* «розкручується», збільшується частка газу в диску галактики (від 4 до 25 % і більше) та зменшується орбітальна швидкість зір у галактичній площині з 300 до 175 км/с і менше. Такі швидкості мають складові галактики, що рухаються через рукави, незалежно від галактоцентричної відстані. Цей факт інтерпретується як прояв наявності темної матерії.

Еліптичні галактики. Маси цих галактик перебувають у межах $M \sim 10^5$–10^{13} $M_\odot$, розміри – ∅ = 1–205 кпк. Наймасивніші серед еліптичних відносять до cD-галактик (від англ.: *central Dominant galaxy* – центральна домінуюча галактика, оскільки вони часто трапляються в центрах великих галактичних скупчень). Наймасивнішою і найбільшою серед них є галактика A1413: радіус дифузної оболонки в ній оцінюється в 2 Мпк (!).

Поділення на підкласи від E0 до E7 пов'язане зі спостережним значенням стиснення цих галактик, яке визначається десятикратним відносним відношенням різниці спостережних великої – a і малої – b півосей E-галактики: $10(a - b)/a$ (заокругленим до цілого значення).

Такі галактики складаються зі старого населення червоних та жовтих гігантів і карликів, які належать до населення II. У них майже відсутній міжзоряний газ і пил, відсутнє *зореутворення* та не відмічена наявність ядра.

Лінзоподібні галактики – мають властивості як еліптичних, так і спіральних галактик. У чверті галактик спостерігається *полярне кільце* (рис. 21.2). Такі галактики мають балдж, бари (тоді їх відносять до

SBO- типу), диск у них позбавлений рукавів. За населенням зір вони схожі на Е-галактики, але мають масивний зоряний диск, як у спіральних галактик, і низький *темп зореутворення*.

Неправильні галактики. Маси цих галактик $M \lesssim 10^{10}\ M_{\odot}$, розміри – $\varnothing$ = 1–10 кпк, газова складова становить – 2–50 %. Вони розрізняються за трьома підтипами, які стосуються їх форми (структури) та кількості компонентів: Irr I – мають *клоччасту структуру*, яку пов'язують з граничним випадком S- та SB-галактик; Irr II – схожі на Е-галактики.

Галактики з потужним випромінюванням. На певних етапах еволюції галактик з центральною *надмасивною чорною дірою,* навколо неї виникає потужний *газопиловий тор.* У процесі поглинання речовини такого тору чорною дірою навколо неї формується *акреційний диск*, який стає джерелом надто потужного випромінювання, світність якого в десятки і сотні разів більша за загальну світність такої галактики, як наша. Уздовж осі обертання галактики також утворюється *джет* – вузький конус із заряджених елементарних частинок, що поширюються з обох полюсів з релятивістськими швидкостями. Такий об'єкт тлумачиться як активне ядро галактики. В залежності від того, яка світність такого активного ядра та під яким кутом воно спостерігається відносно нормалі до галактичної площини, розрізняють такі об'єкти, як: квазари, сейфертовські галактики, радіо-галактики та *блазари* (рис. 21.3), а також N-галактики.

Рис. 21.2. Лінзоподібна галактика NGC 4650 A з полярним кільцем

Рис. 21.3. Класифікація основних типів активних галактик

Квазари – найбільш потужні джерела зі світністю $L_Q \sim 10^{39}$–10^{40} Вт, в яких спостереженню активних ядер (АЯ) «не заважають» ні джети, ні диск.

Радіогалактики – джерела зі світністю $L_R \sim 10^{-1}$–$10^{-2}\ L_Q$, АЯ яких спостерігаються через потужний газопиловий шар.

Сейфертовські галактики – розділяють на два типи, які є аналогами Sy1 – квазарів і Sy2 – радіогалактик, але меншої світності: $L_{Sy} \sim 10^{-3}$–$10^{-5} L_Q$.

Блазари – джерела, що формують джет у межах 20° від променя зору.

N-галактики – яскраві ядра гігантських еліптичних галактик зі світністю $L_N \sim 10^{-5}$–$10^{-6} L_Q$.

22. Об'єднання галактик у різні рівні ієрархічних структур

Спостерігається *об'єднання галактик* у *підгрупи, групи, скупчення*, *надскупчення* та *гіперскупчення*. Надскупчення та гіперскупчення формують комірчасту структуру Всесвіту; області з істотно нижчою концентрацією галактик між ними звуться *войдами* (від англ.: *void* – пустота). Як і у зоряних системах, менші за рівнями об'єднання галактик входять до складу більш потужних ієрархічних структур. Всі перераховані ієрархічні структури складаються з баріонної речовини та занурені у фізичний вакуум, без урахування ролі його не має змоги зрозуміти різноманіття астрофізичних властивостей макросвіту.

Космічна матерія. За сучасними уявленнями космічна матерія проявляється в чотирьох видах: *фізичному вакуумі* (V), *темної* (D) та *баріонної* (B) *матерії* й *випромінювання* (R), так, що їх загальна густина дорівнює критичній густині Всесвіту:

$$\rho_c = \rho_V + \rho_D + \rho_B + \rho_R, \tag{22.1}$$

де $\rho_c = \dfrac{3H_0^2}{8\pi G} = 1 \cdot 10^{-26} \dfrac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, G – гравітаційна стала,

H_0 = 70 км/(с·Мпк) – стала Хаббла.

Тобто Всесвіт не «порожній». За даними спостережень, є *темна матерія*, яка проявляється гравітаційно та не взаємодіє з випромінюванням; «звичайна матерія», з якої складається все різноманіття космічних об'єктів, відноситься до *баріонної матерії*; простір Всесвіту також заповнюють *випромінювання*, що є залишком Великого Вибуху та того, яке випромінюють космічні об'єкти впродовж еволюції; та *фізичний вакуум* – особливий стан матерії, який проявляється появою та зникненням (анігіляцією) віртуальних частинок, які народжуються парами: частинка-античастинка. Рівняння стану фізичного вакууму наступне: $P_V = -\rho_V c^2$, що проявилося в результаті відкриття темної енергії наприкінці минулого сторіччя, яка трактується законом Всесвітнього відштовхування:

$$F_{\mathrm{E}} = \frac{8\pi G}{3} m\rho_{\mathrm{V}} R, \tag{22.2}$$

де індекс «Е» позначає передбачену Ейнштейном силу, m – маса, на яку вона діє на відстані R.

За даними астрономічних спостережень, внесок кожної зі складових матерії у відношеннях до критичної густини є:

$$\rho_{\mathrm{V}}/\rho_{\mathrm{c}} = 0,73;\ \rho_{\mathrm{D}}/\rho_{\mathrm{c}} = 0,23;\ \rho_{\mathrm{B}}/\rho_{\mathrm{c}} = 0,04;\ \rho_{\mathrm{R}}/\rho_{\mathrm{c}} \approx 10^{-4}. \tag{22.3}$$

Відтак частка звичайної матерії у Всесвіті становить всього 4 %.

Групи галактик – гравітаційно-пов'язані об'єднання зоряних систем, в яких спостерігаються десятки галактик. Типові маси груп галактик ~ 10^{12} $M_{\odot}$ (максимальні – < 10^{13} $M_{\odot}$), розміри – < 2 Мпк.

Групи включають одну чи дві підгрупи, до кожної з яких належать *домінуюча галактика* з *галактиками-сателітами*, що рухаються за законами тяжіння ньютонівської фізики. Під домінуючою галактикою розуміється така маса, яка істотно більша на інші. В них не виконується закон Хаббла–Леметра, але діє за їх межами. В такому разі доцільно порівняти силу Всесвітнього тяжіння з *Ейнштейнівською силою* (22.2):

$$G\frac{M_{\text{гр}} m}{R^2} = \frac{8\pi G}{3} m\rho_{\mathrm{V}} R, \tag{22.4}$$

де $M_{\text{гр}}$ – маса групи галактик.
Звідси відстань, більше за яку починає домінувати відштовхування, є:

$$R = \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi}\frac{M_{\text{гр}}}{\rho_{\mathrm{V}}}}. \tag{22.5}$$

Підставляючи в цей вираз типову масу для груп галактик і значення для густини вакууму з (22.3), одержимо, що $R = R_{\text{гр}}$ = 1,5 Мпк.

Якщо група галактик складається з двох підгруп, то в ній ще є область, в якій перебувають галактики, що не належать жодній з підгруп. Їх відносять до галактик так званої периферії цієї групи. За наявності в групі тільки однієї домінуючої галактики периферія в ній відсутня.

Серед найближчих груп галактик більшість мають по дві підгрупи. В парах домінуючих галактик або обидві належать до спіральних, або хоча б одна з них, інша – еліптичного типу. Пар з обох еліптичних домінуючих галактик не виявлено.

Скупчення – гравітаційно-пов'язані об'єднання галактик з характерними масами ~ 10^{14} $M_{\odot}$ і розмірами $\lesssim$ 20 Мпк (рис. 22.1). В їх центральних областях зазвичай розташована гігантська еліптична галактика. Скупчення галактик можна розділити на два види: регулярні й іррегулярні.

Регулярні скупчення галактик наближаються до сферичної форми, в складі яких переважають еліптичні та лінзоподібні галактики, із загальною кількістю декілька десятків тисяч. У них чітко виділяється центральна область, де й спостерігається гігантська еліптична галактика. *Іррегулярні скупчення галактик* не мають певної форми. В їх складі переважають спіральні галактики, а за загальною кількістю галактик вони менші за регулярні.

Одним із найвідоміших є скупчення галактик Волосся Вероніки, яке розташоване на відстані 90 Мпк. Його діаметр дорівнює 17 Мпк, в межах якого спостерігається близко 11000 галактик, в тому числі ≈ 660 гігантських і надгігантських. Домінують E- та S0-галактики. В центрі скупчення перебувають дві надгігантські галактики NGC 4874 та NGC 4889.

Над- і гіперскупчення – відособлені у просторі гравітаційно-непов'язані об'єднання галактик, які беруть участь у розширенні Всесвіту. До складу надскупчень входять близко 100 груп і скупчень галактик. Характерні їх маси є ~ 10^{15} $M_{\odot}$, розміри – десятки мегапарсек. Відкриті ще більш грандіозні волокнисті об'єднання, до складу яких входять ~ 100 надскупчень, вони одержали назву гіперскупчень галактик, маси та розміри яких сягають ~ 10^{17} $M_{\odot}$ і $\lesssim$ 100 Мпк відповідно.

У центрах надскупчень, як правило, спостерігаються потужні скупчення галактик з надмасивними еліптичними галактиками cD-типу. Структура їх більш упорядкована, ніж у гіперскупчень. У деяких з них форма наближена до гігантського диска з проявами осьового обертання. У гіперскупчень відмічаються «листоподібна» чи не визначена форма.

Комірчаста структура розподілу наймасштабніших об'єднань галактик. Надскупчення та гіперскупчення галактик можуть утворювати ще більш грандіозні структури: комплекси, маса яких на порядок більша за гіперскупчення – ~ 10^{18} $M_{\odot}$, а розміри $\gtrsim$ 100 Мпк. На ще більшому масштабі такі комплекси вибудовують комірки з характерним розміром ~ 100 Мпк і товщиною стінок 3–4 Мпк – близьких до діаметрів великих груп чи скупчень галактик. Перетини таких стінок-ребер чи ниткоподібних ланцюжків звуть вузлами, в яких розташовані як надскупчення, так і гіперскупчення галактик. У просторі між галактичними нитками галактики та їх об'єднання майже відсутні. Такі структури звуть войдами або супервойдами, середній розмір яких досягає 40 та 100 Мпк відповідно.

Гігантський войд – один з найбільших: його діаметр сягає 300–400 Мпк, що відповідає 6 % розмірів Всесвіту.

Загалом така великомасштабна картина виглядає як гігантська щільникова структура або тривимірне «павутиння» (рис. 22.2).

Рис. 22.1. Скупчення галактик в сузір'ї Діви, яке є центром Місцевого надскупчення

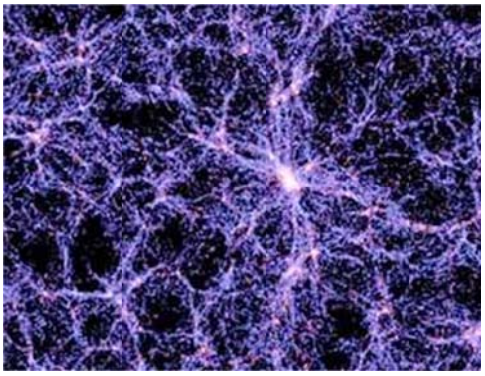


Рис. 22.2. Фрагмент тривимірного космічного «павутиння»: сучасний розподіл галактик у Метагалактиці, одержаний за результатами розрахунків на суперкомп'ютері з урахуванням існування темної матерії з центром у Місцевому надскупченні

На ще більших масштабах (> 200–300 Мпк) є підстави вважати, що галактики у Всесвіті мають рівномірний розподіл з певними флуктуаціями.

Як видно з наведених об'єднань, галактики (з їх кількістю N_g) і ступенем відокремленості, їх три рівні ієрархії, істотно відрізняються між собою: групи, надскупчення та гіперскупчення, де кожен i-й з наступних містить структури (i – 1) на два порядки більше попередніх – $N_i \sim 100N_{i-1}$:

- групи ($N_{gg} = 1$, $N_g \lesssim 10^2$);
- надскупчення ($N_{scg} \sim 10^2\, N_{gg}$, $N_g \gtrsim 10^4$);
- гіперскупчення ($N_{hcg} \sim 10^2\, N_{scg}$, $N_g < 10^6$).

Підгрупи та скупчення галактик є проміжними складовими груп і надскупчень відповідно. Результат, одержаний за виразом (22.5), слід трактувати як те, що закон Хаббла–Леметра є проявом дії всесвітнього закону відштовхування не для окремих галактик, а для їх груп.

Тести

4.1. Загальною властивістю зоряних систем та їх об'єднань є те, що вони

4.1.1. Ізольовані між собою;

4.1.2. Мають компоненти, які за природою підлягають класифікації космічних тіл;

4.1.3. Не взаємодіють між собою;

4.1.4. Впродовж усієї еволюції не розпадаються і є динамічно стійкими;

4.1.5. Підлягають ієрархії, за якою менш складні входять до складу більш складних.

4.2. Чи залежить кратність зір від зоряного оточення, розсіяного в системі більшого рівня ієрархії, до складу якого вони належать?

4.2.1. Не залежить.

4.2.2. Залежить, оскільки більш віддалені компоненти підлягають гравітаційній дії з боку компонентів більшого рівня ієрархії.

4.2.3. Залежить, якщо до їх складу входять субзорі, які мають властивість «випаровуватися» із системи з більшою вірогідністю.

4.2.4. Залежить, якщо в «полі» системи більшого рівня ієрархії є зорі великої світності.

4.2.5. Залежить, якщо в «полі» системи більшого рівня ієрархії вибухають наднові зорі, присутність яких впливає на їх стійкість.

4.3. До якого рівня ієрархії зоряних систем належить Сонячна система?

4.3.1. До подвійних систем, «другим компонентом» якої є планетна система.

4.3.2. До поодиноких зір (Сонце – кратність 1) з планетною системою.

4.3.3. До поодиноких зір.

4.3.4. До планетних систем.

4.4.5. Не належить до жодного рівня ієрархії. Це унікальна система.

4.4. Чи можна вважати планетною систему, центральною зорею якої є найбільш віддалений компонент потрійної зорі? Чи вплине на відповідь ситуація, коли у віддаленого компонента спостерігається протопланетний диск?

4.4.1. Можна. Це зоря з кратністю 3 з планетною системою. Протопланетний диск – початкова стадія еволюції планетної системи.

4.4.2. Не можна, оскільки планети (чи протопланетний диск) обертаються тільки навколо одного компонента.

4.4.3. Це подвійна зоря з планетною системою.

4.4.4. Не можна вважати планетною системою ту, в якій замість планетних компонентів є протопланетний диск.

4.4.5. Можна тільки в тому разі, коли в протопланетному диску сформувалася хоча б одна планета чи протопланета.

4.5. Зоряні скупчення відрізняються від зоряних асоціацій тим, що

4.5.1. Просторова щільність їх компонентів істотно більша;

4.5.2. В них більше зір високої світності;

4.5.3. Нічим не відрізняються;

4.5.4. Їх маси систематично більші;

4.5.5. Спостережна поверхнева щільність їх компоненти менша.

4.6. Головними компонентами зоряних асоціацій, в залежності від їх класу, є

4.6.1. Зорі головної послідовності;

4.6.2. Білі карлики та нейтронні зорі;

4.6.3. Зорі типу Т Тельця та ОВ-зорі;

4.6.4. Зорі з масами менше 0,8 сонячних;
4.6.5. OB-зорі.

4.7. Основними складовими камертонної класифікації галактик є їх наступні типи:
4.7.1. S- та SOB-.
4.7.2. SO-, S- та E-.
4.7.3. Ir-, SOB- та SB-.
4.7.4. SB- та Ir-.
4.7.5. E-, SO-, SOB-, S-, SB- та Ir-.

4.8. Який тип охоплює весь інтервал діапазону мас галактик?
4.8.1. E.
4.8.2. SO.
4.8.3. S.
4.8.4. SB.
4.8.5. Ir.

4.9. До ключових структурних об'єднань галактик належать наступні:
4.9.1. Підгрупи, групи та надскупчення;
4.9.2. Групи, скупчення та гіперскупчення;
4.9.3. Скупчення, надскупчення та гіперскупчення;
4.9.4. Групи, надскупчення та гіперскупчення;
4.9.5. Підгрупи, скупчення та надскупчення.

4.10. Чи можна войди віднести до основних об'єднань галактик?
4.10.1. Можна.
4.10.2. Частково можна.
4.10.3. Так, в їх межах прослідковуються певні структури об'єднань галактик.
4.10.4. Ні, в їх межах не прослідковуються жодні структури об'єднань галактик.
4.10.5. Можна віднести лише ті, які відносять до супервойдів.

Контрольні питання

1. Що таке ієрархія кратних зір?
2. Чи відрізняються визначення зоряних і планетних систем?
3. Що таке «зона життя» та які з планет Сонячної системи потрапляють в неї? Чи є кандидати в інших планетних системах, що потрапили в цю зону?
4. Що обмежує максимальну кількість компонентів у зоряних системах?
5. Чим відрізняються зоряні скупчення від зоряних асоціацій та що у них спільного?
6. В які структури об'єднуються галактики?
7. Які об'єкти розташовані між спіральними гілками і в центральній області галактик?
8. За рахунок чого еліптичні галактики мають форму, що спостерігається?
9. Які основні ознаки характерні для неправильних галактик?
10. Як підрозділяють карликові галактики?

Частина 5

КОСМОГРАФІЯ

Систематичні визначення відстаней до космічних об’єктів різної природи та складності призвели до упорядкування одержаних знань, що створило умови для побудови тривимірної картини Всесвіту. Це і є основною задачею *космографії*. Відлік картини світу зручно вести від Сонячної системи, де живе спостерігач, і далі в космос, розвиваючи ідею створення уявлень про місце людини у Всесвіті.

23. Сонячна система та її околи

Встановлення будови Сонячної системи та визначення місця й руху в ній Землі було першим розв’язанням задачі про місце людини у Всесвіті, оскільки в давні часи та навіть й у середньовіччі Всесвіт обмежувався саме Сонячною системою. З часом межі Всесвіту розширювалися із усвідомленням складності будови Молочного Шляху, а далі й природи виявлених *туманностей*, одні з яких, як з'ясувалось, входять до її складу, а інші виявилися далекими світами. Це довгий і складний шлях пізнання істинного Всесвіту. На початок XXI сторіччя склалися відповідні умови, за яких з’явилася можливість для узагальнення отриманих знань про будову Всесвіту: від Сонячної системи та місця її в Галактиці до місцезнаходження найпотужніших об’єднань галактик і оточуючих їх структур, в яких перебуває наш Молочний Шлях.

Сонячна система як астрономічний об’єкт найнижчого ступеня ієрархії може бути схарактеризована з позиції сучасної класифікації космічних тіл та зоряних систем. Центральним світилом її є зоря головної послідовності, що належить до населення I, – Сонце. Його планетна Сонячна система відноситься до S-типу, а компоненти представляють достатньо повно перелік визначених класів планет (рис. 1.2). Внутрішні три з чотирьох планет (Венера, Земля та Марс) мають всі показники, щоб віднести їх до силікатного класу з металевим ядром. Найближчу до зорі планету – Меркурій можна віднести до перехідного класу планет: між силікатними

і металевими. Планети-гіганти (Юпітер, Сатурн, Уран і Нептун) обмежені двома астероїдними поясами, внутрішній з яких представлений малими тілами, близькими до силікатного хімічного складу, – Головний пояс; зовнішній (пояс Койпера) – компонентами, що складаються переважно з водяного льоду. Дві внутрішні планети-гіганти (Юпітер і Сатурн) відносять до воднево-гелієвого класу з хімічним складом, близьким до центральної зорі; дві зовнішні (Уран і Нептун) – до льодяних гігантів. Карликові планети, які мають теж ядра, дещо повторюють класифікацію великих планет за виключенням металевого та воднево-гелієвого класів. Вони представлені як серед астероїдних поясів, так і супутників великих планет. В центральній частині Сонячної системи (між геліоцентричними орбітами Юпітера та Нептуна), де спостерігаються так звані астероїди-кентаври, карликових планет не виявлено.

Десяту частину за масою Сонячної системи складає *міжпланетний пил*, який гуртується до площини екліптики та простягається до відстані, як очікується, – близько 1000 а.о., проявом якого є *Зодіакальне світло*, що доступне для спостережень з Землі (рис. 1.4а). Пил має типово метеоритний хімічний склад і розподіляється нерівномірно в Сонячній системі. Зі зменшенням відстані від Землі в напрямку до Сонця та збільшенням, також, від Землі до 3 а.о. концентрація його збільшується на два порядки. Далі до орбіти Урану концентрація знову зменшується на три порядки.

Зовнішню частину Сонячної системи завершує ще недостатньо вивчена кометна хмара Оорта, ймовірно обмежена чвертю відстані від Сонця до найближчої зорі Проксима, розташованої на відстані d = 268 145 а.о. (рис. 23.1).

Рис. 23.1. Загальний вигляд Сонячної системи

Безпосередні околи Сонячної системи починаються з найближчих до Сонця зір, субзір і екзопланет, які є поодинокими чи утворюють системи, це: потрійна зоря – Альфа Центавра з Проксимою (d = 1,30–1,34 пк), зоря Барнарда (d = 1.83 пк), подвійна субзоря – Луман 16 (d = 2,02 пк), планета-сирота WISE 0855–0714 (d = 2,20 пк).

Потрійна система зорі Альфа Центавра з Проксимою складається з двох сонцеподібних зір, які обертаються навколо спільного центра мас

з періодом 79 років, а Проксима – червоний карлик, обертається навколо цієї системи з періодом 550 тис. років, велика піввісь орбіти якої 8,7 тис. а.о. (ексцентриситет – e = 0,5) – рис. 18.2. У неї ж відкрита екзопланета з масою на 30 % більшою за земну, яка обертається на відстані у 20 разів ближче, ніж Земля розташована від Сонця.

Зоря Барнарда (сузір'я Змієносця) – червоний карлик. Раніше заявлена наявність у неї планетної системи, що складається з трьох компонентів, не одержала підтвердження. Компонентами субзорі Луман 16 (сузір'я Парусів) є L- і T-карлики, період обертання яких очікується у 45 років. WISE 0855–0714 – маса об'єкта оцінюється в межах 3–10 мас Юпітера, якій відповідає належність до екзопланет. Оскільки у неї відсутнє центральне світило, тому її і віднесли до «планет-сиріт» (розташована в сузір'ї Гідри).

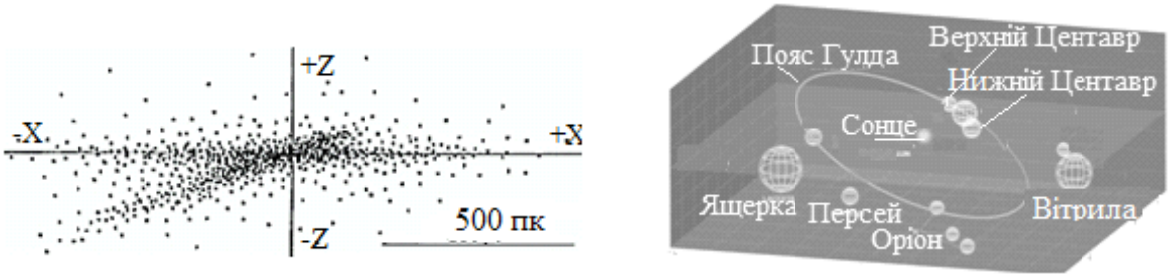
В околах 5 пк від Сонця спостерігаються однакова кількість зір головної послідовності та субзір, по 47, а також 4 білі карлики. У зорі Епсилон Ерідана (d = 3,32 пк), як і в Сонячній системі, відкрито два астероїдні пояси та декілька протопланет (рис. 19.2). В цій області трапляються кратні зорі в усіх комбінаціях компонентів, що мають зоряну та субзоряну природу.

В околах 10 пк від Сонця, де відкрито понад 450 зір і субзір, дві третини з яких – зорі, екзопланети відкриті майже у 40 зір, а загальна кількість планет разом з великими планетами Сонячної системи сягає близько 80. Оточує цю область вкрай розріджена (1 частинка на 3 см^3) Місцева міжзоряна хмара, розмір якої сягає 10 пк. До 20 пк від Сонця всі зорі й субзорі відносяться до так званого *галактичного поля*, тобто в цій області відсутні будь-які зоряні скупчення.

Центр першого із зоряних скупчень перебуває на відстані 25 пк, а його діаметр оцінюється в 7 пк (рис. 20.1). Це найближче до Сонця зоряне скупчення, яке сприймається як майже все сузір'я – Велика Ведмедиця (дві його крайні зорі візерунка сузір'я, Дубхе та Бенетнаш, не належать цьому скупченню, оскільки перебувають у просторі в півтори рази далі). В його складі відкрито біля 100 компонентів. Приблизно в два рази далі (d = 47 пк) розташоване наступне за віддаленістю розсіяне зоряне скупчення – Гіади (сузір'я Тельця) з діаметром 20 пк, в складі якого виявлено ≈ 380 зір. Наступне за віддаленістю (d = 135 пк) зоряне скупчення також перебуває в сузір'ї Тельця, це Плеяди з лінійним діаметром 4 пк (рис. 2.6а). До його складу входить близько 1000 компонентів, чверть з яких – субзорі.

Пояс Гулда. З розширенням зони розташованих до Сонця оточуючих його зір і субзір починає проявляти себе концентрація зір-гігантів, яскравих гігантів і надгігантів до поясу Гулда, нахиленого до галактичної площини на кут ≈ 20° у напрямку на центр Галактики. В межах 500 пк від Сонця його оточує А-кільце, уздовж якого розташовані близькі до нього близько

10 зоряних асоціацій (рис. 23.2) та декілька сотень зоряних скупчень. Центр його розташований у напрямку до Плеяд (рис. 2.5) на відстані ≈ 100 пк від Сонця.

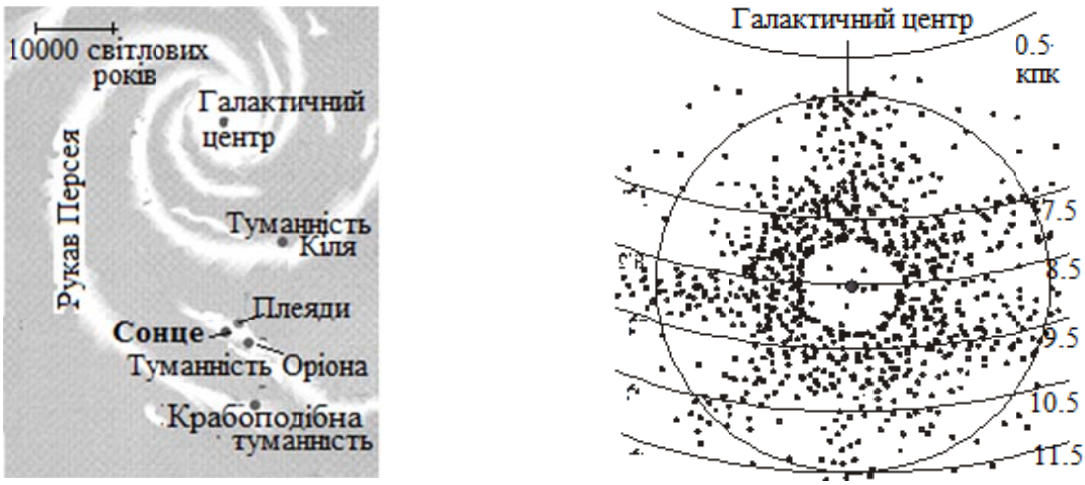


а б

Рис. 23.2. Пояс Гулда. Проекція яскравих зір на галактичну площину (а): вісь «–X ÷ +X»; та розташування до неї А-кільця (б): кульками позначені зоряні асоціаціації у відповідних сузір'ях

В А-кільці найближчою до Сонця є ОВ-асоціація Скорпіона–Центавра, до складу якої входить близько 5 тис. зір. Вона розташована від Сонця на відстані в межах 380–470 пк. В цій асоціації відкриті протопланетні диски у субзір і розташована відома зоря-надгігант Антарес з масою 12 $M_{\odot}$ і радіусом 880 $R_{\odot}$. Це гігантські розміри: якби помістити в центр такої зорі Сонячну систему, орбіта Марса та Головний пояс астероїдів опинилися б всередині.

Найближчий до Сонця осередок *активного зореутворення* перебуває в *гігантській молекулярній хмарі*, де розташована Велика туманність Оріона (d = 400–500 пк), діаметр якої дорівнює 10 пк. В ній виявлені молоді зорі, субзорі та протопланетний диск.



а б

Рис. 23.3. Проекція на площину Галактики в околах Сонця: відгалуження Оріона (а) та 3300 молодих зір (б)

Відгалуження Оріона (ще: Рукав чи Шпора Оріона, Місцевий рукав) – майже відокремлена область між галактичними рукавами Стрільця та Персея (відстань між краями яких в районі місцезнаходження Сонця становить близько 4,6 кпк) з розмірами 3,3×1 кпк (рис. 23.3а). Пояс Гулда занурений у Відгалуження Оріона, перебуваючи поблизу його геометричного центра. В цій області розташовані такі відомі зорі, як Полярна зоря, Рігель, Денеб; розсіяні скупчення з каталогу Месьє: M 18, M 21, M 26 та кулясте скупчення M 55; туманності Лагуна, Орел, Омега тощо.

Зовнішню частину Відгалуження, на відстані далі 1,5–2 кпк, окреслює спицеподібна структура, яка була відкрита після проектування на галактичну площину близько 3300 молодих зір-гігантів (рис. 23.3б).

24. Наша зоряна система

Молочний Шлях – проекція на небесну сферу Галактики, що спостерігається з місця знаходження в ній Сонця. Причому спостерігач перебуває поблизу галактичного екватора, тому ця зоряна система – Галактика, сприймається у вигляді своєрідної зоряної смуги. Таке місцезнаходження спостерігача вкрай незручне для вивчення Галактики (в такому разі термін пишеться з великої літери; вживаються також як міжнародна назва Молочний шлях, так і національна – Чумацький Шлях). В площині її екватора більш віддалені космічні об’єкти, і особливо пил, екрануються тими, що розташовані на ближчих відстанях.

Принципово космічні об’єкти Галактики можуть бути віднесені або до *плаской складової*, або до *сферичної*. Перші гуртуються до галактичної площини, другі – до сферичного розподілу. Є і треті складові – галактики-сателіти (тобто галактичні супутники), що обертаються навколо Галактики. Це окремі зоряні системи, які з Галактикою утворюють фізичну гравітаційну систему. Таке об’єднання, за відповідною класифікацією, і є підгрупою. Наша зоряна система (НЗС) – це об’єднання, утворене з нашої Галактики та належних до неї галактик-сателітів. Тотожні їй назви: підгрупа Галактики чи Молочного Шляху тощо. Загальна маса НЗС – $7{\cdot}10^{11}$ $M_{\odot}$, а її розміри (діаметр) – ≈ 510 кпк.

Галактика – гігантська зоряна система, що об’єднує ~ 400 млрд зір і, можливо, на порядок менше – субзір та на два порядки більше – планет. Молочний Шлях відноситься до спіральних галактик з перемичкою типу SBbc з двома спіральними рукавами (рис. 24.1); має дві основні підсистеми: диск і гало; та проміжну – балдж і центральну область. Диск відноситься до плаской складової, гало – до сферичної, балдж (*англ.*: bulge – здуття) – центральний яскравий компонент, який відносять до проміжної підсистеми.

Рис. 24.1. Комп'ютерна модель Галактики, побудована за даними спостережень Космічного телескопа імені Спітцера

Диск Галактики має масу $6 \cdot 10^{10}$ $M_{\odot}$, діаметр 30 кпк і товщину < 2 кпк. В диску зосереджена майже десята частина маси НЗС. 98 % маси диска припадає на зорі та субзорі, решта – на газопилову складову. Зорі і субзорі зосереджені в розсіяних скупченнях, асоціаціях і між ними – в галактичному полі. Вік найстарішого населення диска не перевищує 10 млдр років, і воно зосереджено, переважно, саме в галактичному полі. Тут спостерігаються звичайні зорі середніх і малих мас, субзорі, гіганти, зоряні залишки з елементним складом, сумірним з сонячним. Такі об'єкти відносять до населення I.

Газопилова складова зосереджена в хмарах, у міжзоряному просторі, в оболонках планетарних туманностей і наднових, коконах молодих зір і протопланетних дисках. Частка пилу в них становить близько 1 %.

Сонце розташоване приблизно на середині між центром і краєм диска, на відстані від центра Галактики $R_{GC} \approx 8$ кпк – у Відгалуженні Оріона, де спостерігається активне зореутворення в зоряних асоціаціях. Тому в оточенні Сонця значна частина зір має більший за сонячний вміст важких хімічних елементів. Переважно наше світило оточують зорі головної послідовності з масою, меншою за сонячну.

Балдж межує з диском в області ближче $R_{GC} \approx 1{,}25$–3 кпк. Він має форму, близьку до еліптичної, з відношенням півосей – 0,4 (див. рис. 22.1), товщина його на осі полюсів становить ≈ 2 кпк. Центр балджу перетинає перемичка, довжина якої очікується близко 8 кпк і яка нахилена під кутом $\approx 45^{\circ}$ до променя зору на галактичний центр (рис. 24.1). З ближнього краю перемички виходить спіральний рукав Щита–Центавра. Рукав Стрільця, який спостерігається у напрямку на галактичний центр, є розгалуженням рукава Персея і Дальнього 3-кілопарсекового рукава, які беруть початок у далекого краю перемички.

У навколоядерній області Галактики спостерігається одна з наймолодших зоряних систем – Арочне зоряне скупчення, в якому виявлено наймасивніші зорі Галактики. В галактичному центрі розташована

надмасивна чорна діра з масою $4{,}3 \cdot 10^6\ M_\odot$, у якої передбачається наявність декількох тисяч супутників – чорних дір, наймасивніша з яких (декілька тисяч сонячних мас) обертається з періодом 100 років.

Сферична підсистема складається з трьох частин: внутрішнього, молодого та зовнішнього гало – концентричні галактоцентричні шари в межах $\lesssim$ 9,9–19 та 19–120 кпк відповідно (рис. 24.2). До старого гало належать кульові скупчення з великим розкидом орбітальних швидкостей і найменшим вмістом важких хімічних елементів. Підсистема молодого гало, ймовірно, обертається у зворотному напрямку до загального обертання Галактики. З зовнішнім гало (чи короною) пов'язується шар, в якому спостерігаються кульові скупчення і незначна кількість субкарликів, цефеїд і змінних зір типу RR Ліри. Такі об'єкти відносять до населення II. Передбачалося там існування газу й темної матерії, природа якої невідома і дотепер.

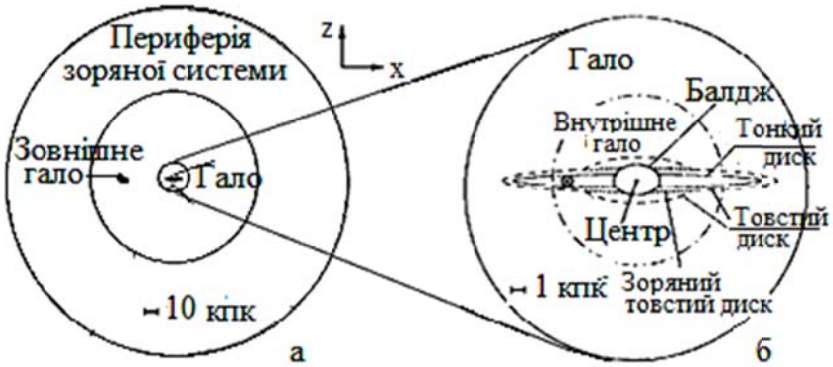


Рис. 24.2. Будова Нашої зоряної системи (в різних масштабах): а – вид плазом; б – збоку

Галактики-сателіти Молочного Шляху. У Галактиці відкрито 15[100] галактик-сателітів, які спостерігаються на галактоцентричних відстанях від 13 до 254 кпк (рис. 24.3). Принципово, що вони належать до трьох поясів. У першому, найближчому позагалактичному сателітарному поясі (ПГСП I) перебувають взаємодіючі галактики з Чумацьким Шляхом; у другому (ПГСП II) – галактики Магелланового поясу; в третьому (ПГСП III) – зовнішні галактики, розташовані далі $\approx$ 90 кпк від центра Галактики. У найближчому ПГСП I перебувають 3 карликові галактики, а фактично, є їх «уламками». Вони розташовані у сузір'ї Великого Пса (яке є найближчим до Сонячної системи, відстань до нього d = 8 кпк), Діви (d = 10 кпк) та Стрільця (d = 22 кпк). Через близьке розташування до центра Галактики припливні сили суттєво змінили їх форму, наслідком

[100] За результатами аналізу руху хмар водню в Галактиці запідозрено існування ще однієї галактики-сателіта з масою ~ $10^9\ M_\odot$ на відстані близько 90 кпк від галактичного центра. З поки що не з'ясованих причин ні у видимому, ні в радіодіапазонах від неї випромінювання не зафіксоване.

чого є утворення уздовж їх руху зоряних і газових шлейфів протяжністю від 10 до 300 кпк. Всі вони перебувають у межах молодого гало, але не мають прямого відношення до його утворення.

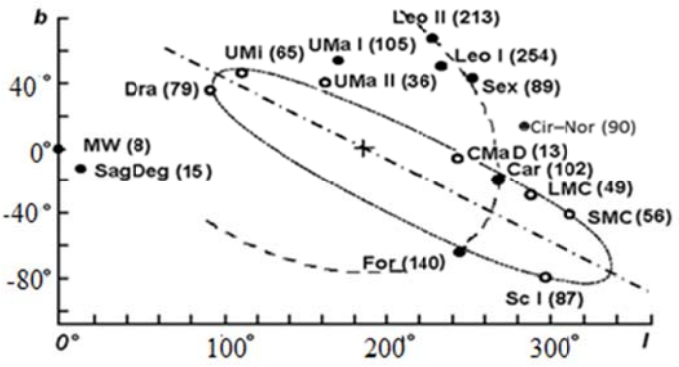


Рис. 24.3. Розподіл галактик-сателітів у галактичній системі координат

В наступному ПГСП II перебуває 6 галактик-сателітів, які розташовані в межах від 36 до 87 кпк, тобто у зовнішньому гало. До складу цих сателітів входять Велика і Мала Магелланові Хмари (рис. 2.7), а також галактики у сузір'ях Великої Ведмедиці, Скульптора, Дракона та Малої Ведмедиці. У просторі ці галактики гуртуються навколо площини, нахиленої до площини галактичного диска під кутом ≈ 70°. В цій же області спостерігається також газова складова у вигляді ланцюжка високошвидкісних газових хмар, який зветься Магеллановим потоком. Перелічені об'єкти формують Магеллановий пояс, що належить саме ПГСП II.

Велика та Мала Магелланові Хмари – найбільші галактики-сателіти, що розташовані від центра Галактики на відстанях 49 і 56 кпк відповідно. Вони утворюють гравітаційно-зв'язану подвійну систему, занурену в загальну водневу оболонку – Магеллановий потік. Інші галактики цього поясу відносяться до карликових сфероїдальних галактик.

Останній ПГСП III складається з п'яти карликових галактик, розташованих далі 90 кпк. Вони розташовані в сузір'ях Пічі, Кіля, Секстанта та дві в Леві, а у просторі гуртуються до площини, нахиленої до екватора Галактики під кутом ≈ 50°. Наймасивнішою серед них є ультракомпактна галактика в Пічі з масою $2 \cdot 10^7 M_\odot$.

Орбіти галактик ПГСП III займають найбільший просторовий навкологалактичний об'єм. Три галактики у Секстанті, Кілі та Великій Ведмедиці розташовані в зовнішньому гало серед його складових: кулястих скупчень, зір населення II і, можливо, газової складової, в межах близько 90–120 кпк. Три інші галактики (одна в Пічі та дві у Леві) перебувають на периферії НЗС, саме в цій області очікується існування темної матерії (до 90 % маси НЗС), природа якої залишається невідомою.

25. Місцева група галактик

Наша зоряна система входить до гравітаційно-зв'язаної Місцевої групи галактик (МГ) і є однією з основних її складових. До МГ також входять

підгрупа Андромеди та окремі карликові галактики, що не належать до жодної з двох згаданих підгруп (рис. 1.5).

Діаметр МГ становить 1,5–2 Мпк, загальна маса – $1{,}4\cdot10^{12}\,M_{\odot}$. Всього, крім запідозрених, достовірно відомо в межах МГ 54 галактики. Наймасивнішими галактиками МГ є Молочний Шлях (MW, *від англ. – Milky Way*) і Туманність Андромеди (M31 – туманність за № 31 у загальновідомому каталогу Месьє – рис. 1.5 та 25.1), відстань між якими дорівнює 760 кпк. Урахування темної матерії в підгрупі Андромеди та НЗС показало, що маси їх однакові. Тому слід прийняти, що центр маси МГ розташований посередині між галактиками MW і M31. Подвоєне значення відстані між цими галактиками можна прийняти за сферу впливу цих домінуючих галактик вздовж лінії, на якій вони перебувають, а половину – у перпендикулярному напрямку. Відтак галактики, що розташовані за цими визначеними межами, не належать жодній з підгруп. Ураховуючи вищенаведені розміри МГ, такі галактики знаходяться в основному в її периферійній області, яка одержала назву периферії МГ.

Підгрупа Андромеди включає галактику Туманність Андромеди, 21 галактику-сателіт і 2 зоряні потоки. M 31 є двохспіральною галактикою типу Sb, що спостерігається під кутом 14° з видимими розмірами $3{,}2\times1{,}0^{o}$, що відповідає її діаметру 80 кпк. Видима маса цієї галактики у 1,5 рази більша за MW, а до її складу входить близко трильйона зір. Оскільки ж маси підгруп MW й M31 однакові, слід зазначити, що вміст темної матерії в області підгрупи Андромеди менше, ніж в НЗС. Розміри підгрупи Андромеди (оцінена за відстанню найбільш віддаленої галактики-сателіта M31: And VI) – ≈ 590 кпк.

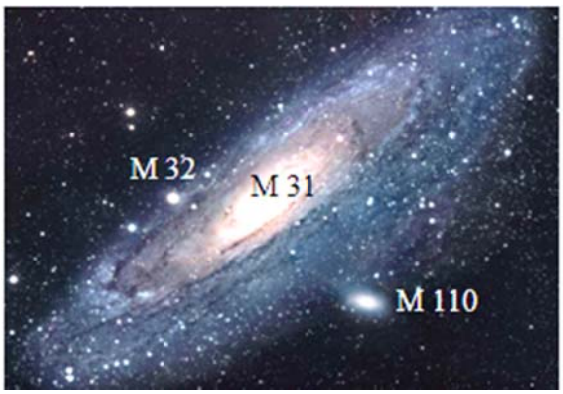


Рис. 25.1. Туманність Андромеди (M 31). Зліва від центра та справа і дещо нижче - галактики-сателіти M 32 і M 110 відповідно

<u>Структура Туманності Андромеди</u> і будова MW принципово схожі між собою. В старому сферичному населенні II спостерігаються зорі, з дефіцитом важких хімічних елементів, цефеїди та 460 кулястих скупчень.

Структура дисків галактики M31 і MW та хімічний склад зір, що в них входять, також схожі. В спіральних руках переважають об’єкти, що відносяться до I-го зоряного населення: голубі гарячі гіганти, надгіганти, сотні OB-асоціацій і їх комплексів, велика кількість змінних зір різних

типів, зони іонізованого Гідрогену. Вміст газопилової складової у диску галактики приблизно такий, як у MW. У зорі-гіганта PA-99-N2 методом гравітаційного мікролінзування відкрито екзопланету з масою 6 мас Юпітера. Це перша виявлена планета за межами Галактики.

Із зовнішнього краю ядра М 31 виходять спіральні рукави. В центральній області галактики присутній нейтральний та іонізований Гідроген. У самому центрі розташована надмасивна чорна діра з масою $7{,}5\cdot10^7\ M_\odot$, навколо якої обертається диск, що складається з більш як 400 молодих голубих зір і має структуру, схожу на Сонячну систему. Цю зоряну структуру оточує майже компланарне кільце з внутрішнім радіусом 1,5 пк, яке складається зі старих червоних зір.

Галактики-сателіти підгрупи Андромеди представлені майже всіма типами класифікації. До їх складу входять 1 спіральна галактика, 2 компактні і 2 карликові еліптичні галактики, 2 іррегулярні та більше 10 сфероїдальних галактик.

Галактика в Трикутнику (М33) – це наступна за величиною маси (після М31 і MW) зоряна система в МГ, яку інколи представляють як домінуючу галактику окремої підгрупи. Вона належить до спіральних галактик типу Sc. Маса та розміри її є $2\cdot10^{10}\ M_\odot$ і 6 кпк відповідно. Розташована вона на відстані 225 кпк від центра Туманності Андромеди та складається з об’єктів диска й гало, як наша та галактика М31.

Дещо меншою за масу М33 має галактика IC 10 (в Кассіопеї) – $1{,}5\cdot10^{10}\ M_\odot$. Вона є неправильною галактикою типу Ir і розташована від М31 на відстані ≈ 250 кпк, а також найближчою до Сонця і єдиною в МГ галактикою з вибухоподібним зореутворенням.

Найближче до М31 розташовані компактні галактики-сателіти М32 і М110 (рис. 25.1). Еліптична галактика М32, майже сферичної форми, розташована у внутрішньому гало на відстані всього 5,4 кпк від центра М31. Це одна з небагатьох галактик типу E–S0, у яких виявлено зоряноподібне ядро. Галактику М 110 також відносять до еліптичного типу E6. Від М31 ця галактика-сателіт розташована на відстані 61 кпк. Деякі оточуючі кулясті скупчення, ймовірно, належать галактиці М110, а не М31. Як і в М32, у М110 виявлене зоряноподібне ядро, занурене в «слабкий зоряний туман», нетиповий для еліптичних галактик. Інші галактики-сателіти відносяться до карликових іррегулярних, еліптичних чи сфероїдальних. Загалом галактики-сателіти М31 займають пояс з галактоцентричними відстанями приблизно від 5 до 294 кпк. Найближчою до М 31, як уже відзначалося, є галактика М32, далі за все розташована галактика And VI. Наймасивніші галактики-сателіти (М33 і IC 10) істотно віддалені від М31 (225–250 кпк). Як і у великих та

близьких до Молочного Шляху галактик-сателітів – ВМХ і ММХ, так і, порівняно, у помірних галактик та близьких до М31, М32 і М110, виявилися спільні властивості. Їх маси і розміри виявилися сумірними, є ознаки спіральної природи (в теперішній час або в минулому) і дії на них припливних сил, відповідно, з боку MW і М31. Суттєво ці пари галактик відрізняються за вмістом газопилової складової і темпом сучасного зореутворення. Саме за цими ознаками ВМХ і ММХ відносили до іррегулярних, а М 32 і М 110 – до компактних галактик.

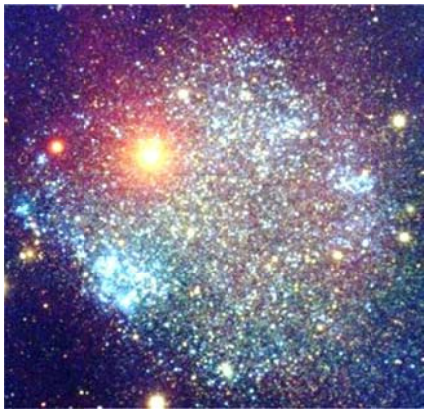
Галактики-сателіти розташовані навколо Туманності Андромеди не безладно. Більшість їх зосереджена в близькій до екваторіальної області, обмеженої шаром з галактоцентричною широтою ± 30–40°, гуртуючись до площини, нахиленої до екватора на ≈ 30°. Сфероїдальні карликові галактики віддають перевагу площині, яка розташована майже перпендикулярно до екватора (83–85°) (рис. 1.5).

Як і в нашій Галактиці, в околі М 31 відкрито 2 зоряні потоки (Північно-західний і Південно-західний), що утворилися від розпаду галактик-сателітів у результаті дії на них припливних сил в період їх суттєвого зближення в минулому з М31.

Галактики периферії Місцевої групи перебувають за межами гравітаційного впливу MW та М 31, тобто переважно у зовнішньому шарі МГ: приблизно від 0,4 до 1,5 Мпк від її центра мас, у перпендикулярному напрямку від лінії, проведеної через центри домінуючих галактик і уздовж її відповідно.

Достовірне число галактик, що населяють периферію МГ, залишається невідомим. Впевнено до її складу відносять 14 галактик: 1 спіральну, 3 еліптичні карликові і 10 неправильних, які знаходяться від Сонця в межах 500–1040 кпк. Найближчою й однією з наймасивніших ($1{,}5\cdot10^{9}$ $M_{\odot}$) є карликова неправильна галактика Барнарда, що перебуває в сузір'ї Стрільця (рис. 25.2а). Карликова галактика Секстант А у півтора рази менша за масою – найвіддаленіша від Сонця (рис. 25.2б).

а



б

Рис. 25.2. Галактики Барнарда (а) та Секстант А (б)

Спіральна галактика з перемичкою в Гідрі (NGC 3109) є найбільшою за масою ($2{,}3 \cdot 10^9\ M_\odot$) в Периферії. Вона періодично взаємодіє з еліптичною карликовою галактикою в сузір'ї Насоса (PGC 29194), яка за масою на два порядки менша за неї. Відстані до цих галактик майже однакові – 1,3 Мпк.

Решта галактик – карликові (тобто їх маси менші $10^9\ M_\odot$). З них дві є еліптичного типу, які розташовані у сузір'ях Кита та Тукана на відстанях 755 і 980 кпк відповідно; вісім – неправильні, п'ять з яких містять залишки перемичок. Найвіддаленішою від центра МГ є карликова галактика SagDIG, що перебуває в сузір'ї Стрільця і розташована від Сонця на відстані 1040 кпк.

Упорядкування в орбітах руху цих галактик в МГ не встановлено.

26. Місцеве надскупчення

МГ є однією з ~ 100 груп галактик, які формують наступний рівень об'єднань галактик – Місцеве надскупчення (МНС). Уявлення про МНС будуються шляхом вивчення широкого кола властивостей галактик і їх об'єднань різного ступеня ієрархії, які потрапляють в області сфер зі збільшенням їх радіусів з центром в МГ. Ключовими такими областями в околі МГ є найближчі до неї групи галактик, Місцевий лист, Місцевий комплекс, Місцевий об'єм, скупчення галактик у сузір'ї Діви і далі простір, який займає МНС.

Околи Місцевої групи галактик. МГ оточують безпосередньо п'ять груп галактик: Маффея (найближча група, відстань до якої є d = 3,0 Мпк), M 81 (d = 3,5 Мпк), Скульптора (d = 3,9 Мпк), Гончих Псів (d = 4,3 Мпк) і NGC 5128 (d = 4,6 Мпк) – рис. 26.1. У найближчій до МГ групі відомо 24 галактики. Переважну більшість цієї групи складають 15 іррегулярних галактик, розміри яких менше 6 кпк. Розміри трьох еліптичних і п'яти спіральних галактик $\varnothing > 3$ кпк. Найбільшими серед них є спіральні галактики IC 342 ($\varnothing = 21$ кпк), Маффей 2 ($\varnothing = 5$ кпк), Двінгелло 1 ($\varnothing = 3{,}4$ кпк) та еліптична – Маффей 1 ($\varnothing = 3$ кпк).

Галактики групи Маффея на небесній сфері гуртуються в двох областях, де домінуючими є IC 342 і Маффей 2. Зоряна система IC 342 спостерігається поблизу диска MW. На Маффей 1 і Маффей 2 та їх оточення (загалом 10 галактик) проектується Галактика і екранує їх світло. Тому їх відкрили за інфрачервоним випромінюванням.

Найбільш представницькою (за кількістю) є група в Гончих Псах, де налічується близко 50 галактик. Більше 75 % з них становлять іррегулярні галактики, 10 належать до спіральних (включаючи одну з перемичкою), 1 – до еліптичних. Найбільші за розмірами галактики в цій групі є: три

спіральні галактики – NGC 4244 (∅ = 20 кпк), з перемичкою NGC 4395 (∅ = 15 кпк) і M 94 (∅ = 12 кпк) та одна іррегулярна галактика – NGC 4214 (∅ = 9 кпк). Всі ці галактики розташовані недалеко одна від одної, до них і концентруються інші члени групи. Майже половина з відомих галактик мають розміри 1,5 кпк і менше.

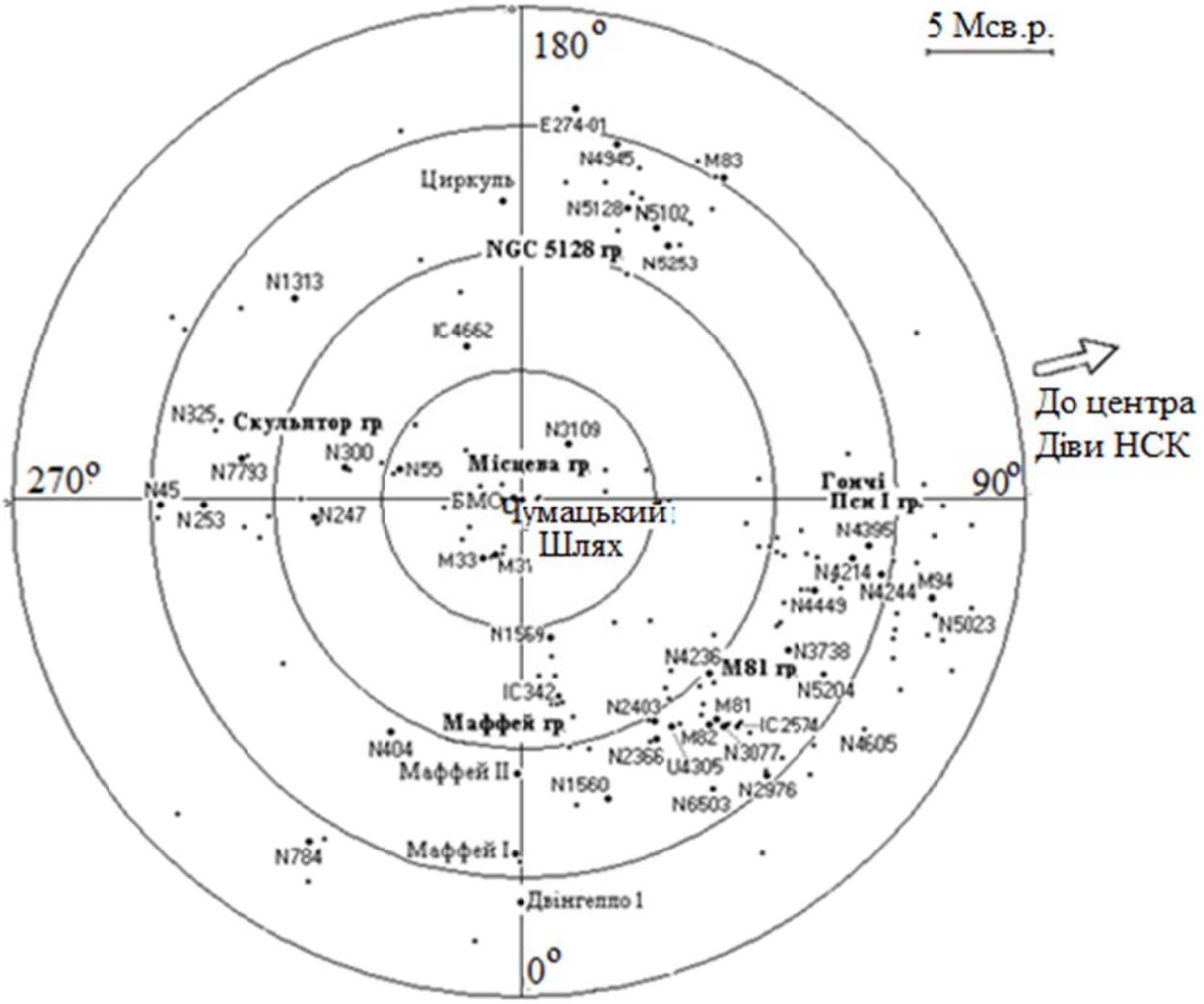


Рис. 26.1. Просторовий розподіл найяскравіших галактик Місцевого Комплексу – області, що входить до найближчих п'яти груп навколо Місцевої групи (з центром в Молочному Шляху), розташованих в межах 6 Мпк. Наведений масштаб зображення (відносно 5 млн світлових років = 1,53 Мпк) та напрям на центр Місцевого надскупчення

Загалом у межах 6 Мпк від центра MW зосереджено 6 груп галактик, у складі яких відкрито більше 200 компонентів, чверть яких припадає на МГ. З віддаленням від МГ відкриття компактних, карликових галактик, а тим більше галактик-хоббітів стає більш складним через їх малу інтегральну світність і незначну поверхневу щільність. Тому слід очікувати, що переважна більшість галактик в цій області залишається невідомою.

П'ять із шести розглянутих груп галактик (крім Гончих Псів) мають по два домінуючі осередки – 2 підгрупи. Одна із домінуючих галактик групи (або обидві, як у МГ, Скульпторі та М 81) є спіральною. Іншою домінуючою галактикою є гігантська еліптична – у групі Маффея, лінзоподібна (разом з іншими спіральними галактиками) – у групі NGC 5128. Максимальні розміри домінуючих галактик, як правило, менші за MW, діаметри NGC 253 (у Скульпторі) і NGC 5128 на 5 % більше нашої Галактики. Отже, Туманність Андромеди за розмірами є найбільшою в околах 6 Мпк, а Молочний Шлях у цьому рейтингу займає четверте місце.

«Місцеві» осередки. МГ і три найближчі до неї групи Скульптора, Маффея та М81 входять до великомасштабної структури – галактичної нитки з радіусом приблизно 7 Мпк і товщиною, що дорівнює діаметрам, рівним розмірам груп галактик. Крім перелічених, до неї належать також ще й групи М94, Центавра А та деякі інші. Ця структура має назву Місцевий лист. Дванадцять найяскравіших гігантських галактик цих груп (названі «Радою гігантів») утворюють кільце радіусом 3,75 Мпк, центр якого розташований поблизу нашої МГ, а його площина нахилена до Місцевого листа на кут 11°. В «Раду гігантів» входять 2 еліптичні та 10 спіральних галактик, до складу якої належать такі відомі галактики, як М81 (рис. 26.2а), Циркуль (рис. 26.2б) Центавр А (рис. 26.3) та інші.

Місцевий лист входить до складу сплющеної області, обмеженої радіусом 8 Мпк, яка зветься Місцевим комплексом, членами якого є близко 280 галактик. У структурі Місцевого комплексу вже прослідковуються «вузли», «волокна» та «пустоти», характерні для великомасштабної будови Всесвіту. Недалеко від околи цієї області (d = 6,4 Мпк) розташована невелика підгрупа М101 з однойменною гігантською спіральною галактикою (яку ще звуть «Водоверть» – рис. 26.4а), що перебуває в сузір'ї Великої Ведмедиці. Її діаметр і маса диска більше нашої Галактики в 1,7 рази і на порядок відповідно.

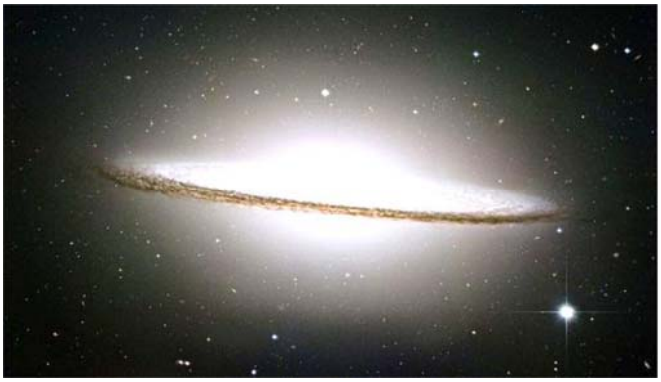
Виділяють ще більш представницький – Місцевий об'єм, якому відповідає сфера радіусом 11 Мпк, де кількість відкритих галактик сягає 870. Однією з найяскравіших серед них є гігантська спіральна галактика Сомбреро ($d \approx 9$ Мпк), яка є домінуючою в однойменній підгрупі, або М 104 (рис. 26.4б). Хоча діаметр цієї галактики становить всього 30 % від MW, маса її центральної надмасивної чорної діри дорівнює 10^9 $M_{\odot}$. Це одна з найбільших чорних дір, відомих у центрах галактик. За результатами спостережень 75 % галактик Місцевого об'єму є карликовими, в яких темп зореутворення такий самий, як і в спіральних, водночас як у еліптичних, лінзоподібних та сфероїдальних він низький.

а б

Рис. 26.2. Галактики Боде (М 81 – а) та Циркуль (б)

а б в

Рис. 26.3. Галактика Центавр А (NGC 5128) у видимому (а), близькому інфрачервоному (б) і композитному (видимому + радіо + рентгенівському) діапазонах хвиль (в)



а б

Рис. 26.4. Галактики Водоверть (а) та Сомбреро (б)

Скупчення галактик у сузір'ї Діва є найближчим, в якому виявлені принципово інші властивості й ознаки більш високого ступеня ієрархії. Це велике скупчення галактик, яке розташоване на відстані 16 Мпк від Сонця (рис. 26.5). Розміри його дорівнюють приблизно 5 Мпк, а щільність майже

на порядок перевищує щільність у групах галактик і становить ≈ 500 галактик/Мпк^3. У скупченні галактик у Діві налічується близько 200 галактик високої і середньої світності, 2/3 з яких відносять до спірального типу. Еліптичні галактики трапляються в широкому діапазоні мас і світностей: від гігантських до карликових; спостерігаються лінзоподібні галактики. В цій області вже недоступні для виявлення галактики типу Магелланових Хмар і, очевидно, менші за них. Тому в цьому скупченні загальна чисельність галактик очікується близько 2 000.

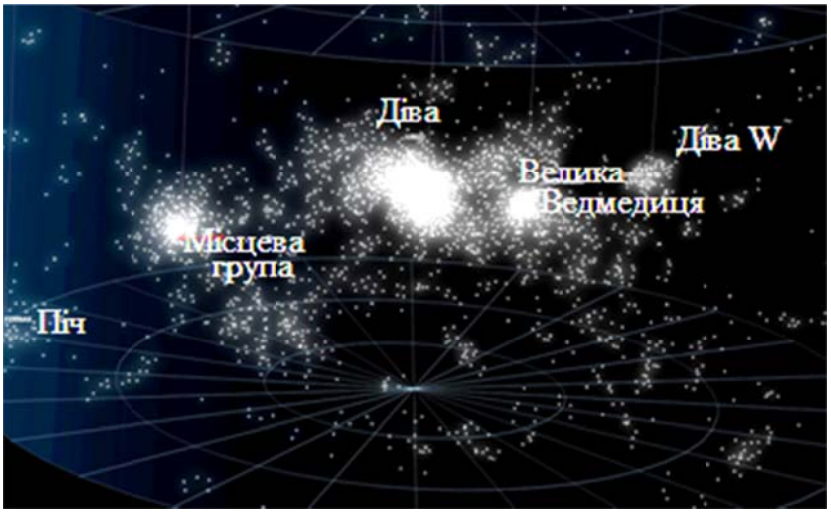


Рис. 26.5. Комп'ютерна модель Місцевого надскупчення з центром у сузір'ї Діви

Скупчення галактик у Діві гуртується до трьох груп, центри яких розташовані від нас на відстанях приблизно 16, 21 і 23 Мпк. До складу найяскравіших членів великого скупчення в Діві належать 10 гігантських спіральних і 7 гігантських еліптичних галактик. Саме в центрі цього скупчення перебуває відома гігантська еліптична радіогалактика Діва А чи М 87 (d = 16,4 Мпк), діаметр якої сягає 37 кпк, а повна маса – у 200 разів більша за MW (рис. 26.6). Наявність в її центрі надмасивної чорної діри ($3{,}5\cdot10^9\ M_\odot$) спричинила активність її ядра, яке породжує *релятивістський джет* – струмінь енергетичної плазми, який простягнувся не менше як на 1,5 Мпк.

Загальна структура й узагальнені властивості МНС одержані на масштабах вивчення навкологалактичного оточення ближче 45–50 Мпк. Вони виявилися наступними. Місцеве надскупчення – відокремлене нерегулярне об'єднання галактик з розмірами близько 60 Мпк. В нього входять близько 30 тис. галактик, які разом з темною матерією мають масу ~ $10^{15}\ M_\odot$.

В цій області відомо 8 скупчень галактик, до найближчого з них входить група галактик М 101. Найближчим скупченням галактик, в якому

виявлено принципово інші властивості й ознаки більш високого ступеня ієрархії, ніж у галактичних груп (див. вище), є велике скупчення галактик, яке перебуває у сузір'ї Діви, всередині якого міститься радіогалактика Діва А, з якою саме й ототожнюється центр МНС. У просторі 60 % галактик МНС зосереджено у вузькому диску, що дорівнює його розмірам і має товщину 3 Мпк, а 98 % всіх галактик належить 11 галактичним хмарам, що займають всього 5 % об'єму МНС.

а

б

Рис. 26.6. Гігантська еліптична cD-галактика M 87: а – Діва А; б – центр галактики, з якого виривається релятивістський струмінь, що є джерелом радіовипромінювання

Місцевий лист, до складу якого входить МГ, розташований на відстані 17 Мпк від центра МНС і нахилений до його площини на кут 8°. Кут між лінією, що з'єднує MW і M 31, і Місцевим листом становить 11°. Ця структура, зокрема, як і Місцеве надскупчення, не є гравітаційно-зв'язаними фізичними системами, вони беруть участь у розширенні Всесвіту. Швидкість МГ відносно центра Місцевого листа становить 66 км/с, в той час як ця структура рухається у напрямку на центр МНС зі швидкістю 185 км/с.

27. Метагалактика

Вивчення структури Метагалактики – доступної частини Всесвіту для дослідження, пов'язується з установленням трьохвимірного розподілу надскупчень і гіперскупчень галактик.

Околи Місцевого надскупчення. Скупчення галактик у Печі розташоване ближче всього до Сонця – на відстані 19 Мпк (рис. 27.1). В цьому ж напрямку дещо далі розташоване скупчення галактик в Ерідані –

d = 23 Мпк. Це велике скупчення, що має масу ~ 10^{14} $M_{\odot}$. Майже в два рази далі розташоване надскупчення Гідри-Центавра – $d \approx 50$ Мпк. Воно включає 6 великих скупчень галактик: чотири розташовані у сузір'ї Центавра та два – в Гідрі. Крім них відомо ще й декілька скупчень галактик, менших за розмірами в області, що займає це надскупчення ($\varnothing \approx 45$ Мпк).

Неподалік від цього надскупчення – у сузір'ї Косинця, розташований Великий Аттрактор. МНС, як і МГ, зазнають впливу від притягання їх Великим Аттрактором – гравітаційною аномалією, виявленою за аналізом руху Сонця відносно реліктового випромінювання. Великий Аттрактор асоціюється з надскупченням галактик Абеля 3627, що розташоване на відстані 65 Мпк. Його загальна маса оцінюється в $5 \cdot 10^{16}$ $M_{\odot}$, що на порядок більше маси видимої речовини в цій області та ще більше за масу МНС. Вважають, що основну частину маси Великого Аттрактора складає темна матерія.

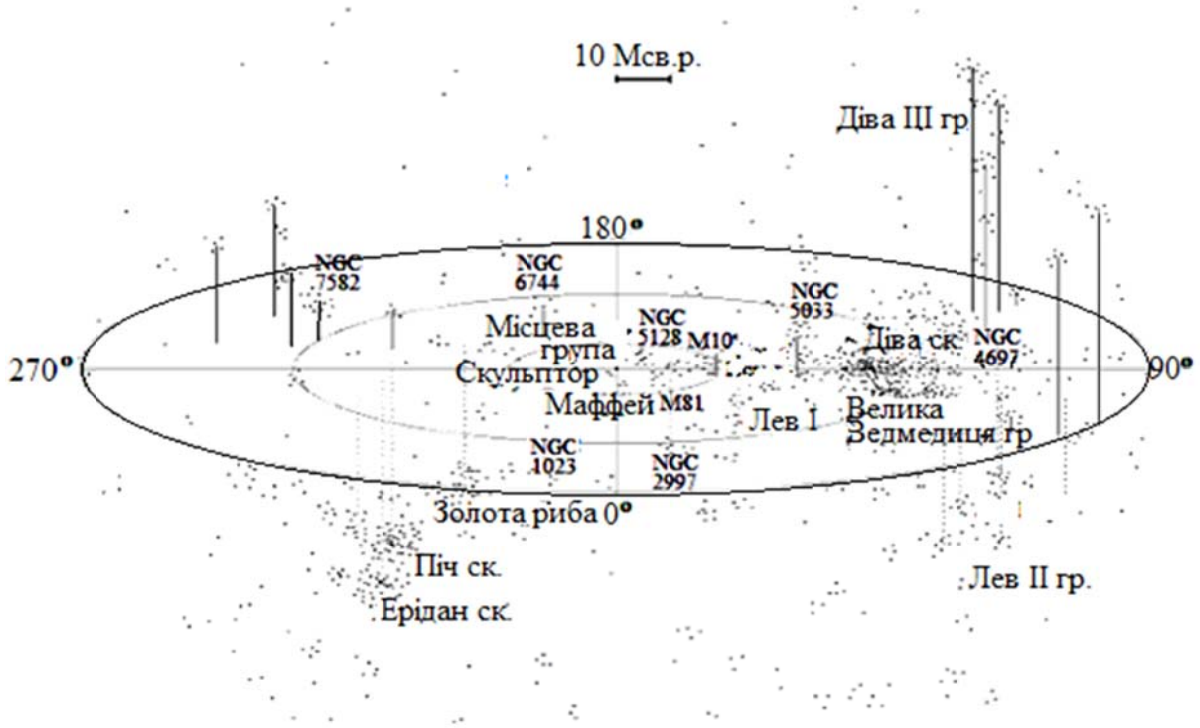


Рис. 27.1. Просторовий розподіл галактик та груп, до яких вони гуртуються, у радіусі 30 Мпк

Гіперскупчення Ланіакея та його оточення. Ланіакея (*гавайською*: «неосяжні небеса») – гіперскупчення, наступне за ступенем ієрархії об'єднання галактик, до складу якого входить МНС (рис. 27.2). Це гігантська область з розмірами 160 Мпк і масою ~ 10^{17} $M_{\odot}$. Крім МНС, воно також включає Великий Аттрактор, надскупчення Гідри-Центавра,

Павича-Індіанця та Південне надскупчення, до складу якого відносять багаті на галактики скупчення, які розташовуються в сузір'ях Пічі, Ерідана (які згадувалися вище) та Золотої Риби. Надскупчення галактик Павича-Індіанця розташоване на відстані ≈ 90 Мпк і має розміри близько 30 Мпк. В ньому відсутні значні за кількістю скупчення галактик, в результаті чого воно має відносно низьку щільність.

а б

Рис. 27.2. Структура гіперскупчення Ланіакея (а) та його найближчі околи (б)

В околі Ланіакеї розташовані надскупчення Волосся Вероніки ($d \approx 90$ Мпк) і гіперскупчення Персея-Риб (d = 77 Мпк), Геркулеса (d = 120–150 Мпк), Шеплі ($d \approx 200$ Мпк). Надскупчення Волосся Вероніки має майже сферичну форму діаметром близько 30 Мпк і містить більш ніж 3 тис. галактик. Це надскупчення розташоване в центрі так званої Великої стіни CfA2 – четвертої за величиною подібної плаского великомасштабної структури, найближчий край якої розташований від Молочного Шляху на відстані 60 Мпк. Ця Стіна простягається завдовжки на 150 Мпк, завширшки – на 90 Мпк і має товщину 5 Мпк.

До надскупчення Персея-Риб входить ланцюжок скупчень галактик завдовжки 90 Мпк, простягаючись на північному небосхилі більш ніж на 40°. Це надскупчення є однією з двох концентрацій галактик, що розташоване по обидві сторони МНС і вздовж площини MW. Воно також межує з войдом Тельця, який має розмір близько 30 Мпк.

Гіперскупчення Шеплі спостерігається як підвищена концентрація галактик у сузір'ї Центавра, має овальну форму з кутовими розмірами в декілька разів більше за діаметр Місяця. Лінійний розмір цього гіперскупчення відповідає 60 Мпк, а маса – більше ніж у 4 рази має Великий Аттрактор. Все ж гіперскупчення Геркулеса є найбільшим в цьому регіоні, сягаючи в діаметрі 100 Мпк.

Всі перелічені гіперскупчення та надскупчення околу Ланіакея входять до складу ще більшої структури – комплексу Риби-Кита. Середня відстань до нього оцінюється в 250 Мпк, а розмір комплексу – близько 110 Мпк.

Комірчаста та просторово-часова структура Метагалактики. Як відмічалося вище (розд. 26), вже в Місцевому комплексі прослідковуються зачатки «вузлів», «волокон» і «пустот». Більш розвинуті такі структури та більші за масштабом проявляються в комплексі Риби-Кита. Наприклад, до гіперскупчення Персея-Риб з двох країв примикають два войди: Тельця, розміри якого сягають близько 30 Мпк; та Місцевий войд, який межує також з Ланіакеєю. Місцевий войд має розміри не менше 45 Мпк і складається з трьох окремих секторів, розділених тонкими «нитками». Цей войд обмежений Місцевим листом (де перебуває наша Галактика) та розташований від Місцевої групи на відстані «всього» 23 Мпк. За межами комплексу Риби-Кита комірчаста структура для об'єднань галактик різного рівня є закономірною і спостерігається на масштабах кількасот мегапарсек, до відстаней сумірних з розмірами Всесвіту – ~ 4 Гпк, в межах яких очікується існування близько 200 тис. надскупчень і гіперскупчень, а в околі близько 1 млрд світлових років (≈ 300 Мпк) навколо МНС – близько 100 (рис. 27.3).

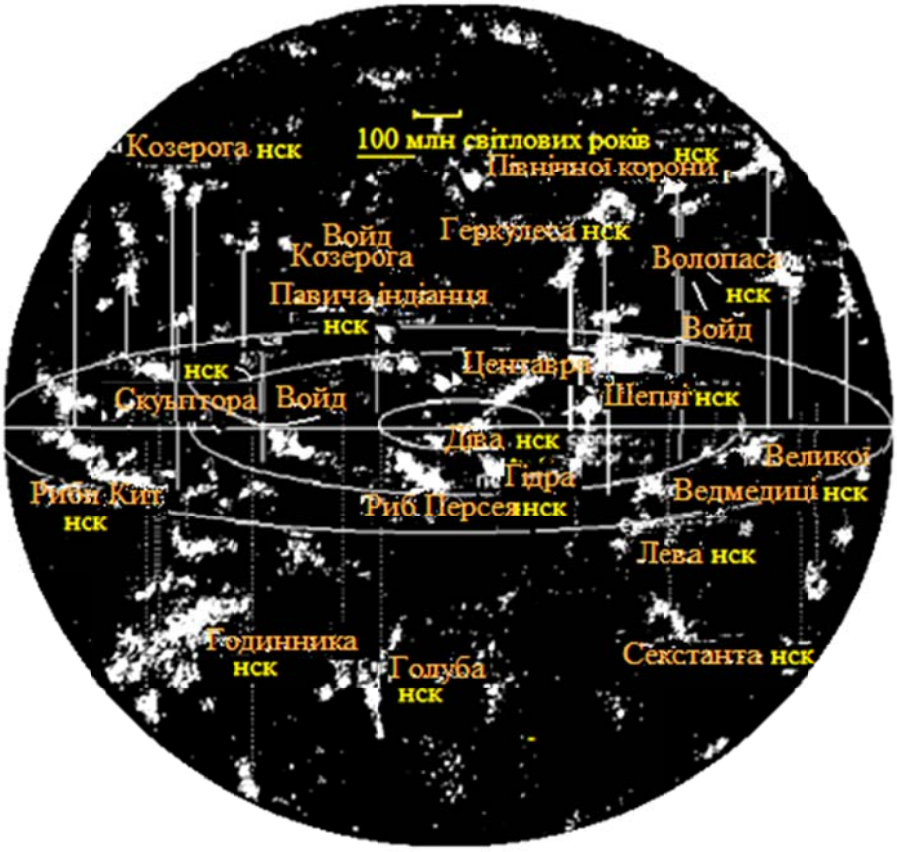


Рис. 27.3. Карта околів Місцевого надскупчення (нск) в радіусі 1 млрд світлових років

Вивчення такої структури Метагалактики стикається з певними проблемами, що пов'язані зі скінченним значенням швидкості світла і з результатом взаємодії фотонів світла (що несуть інформацію про істотно віддалені від земного спостерігача космічні об'єкти) зі значною масою речовини, яку вони зустрічають на своєму шляху. Скінченне значення швидкості світла призводить до сприйняття будови й еволюції Всесвіту через призму просторово-часової структури Метагалактики: чим далі розташований космічний об'єкт, тим молодшим є Всесвіт.

Так, найвіддаленіші складові МНС розташовані на відстані близько $d = 45$ Мпк, або у світлових роках: $t = 3{,}26 \cdot d \approx 150$ млн років. Саме стільки років тому ці об'єкти були такими, якими вони спостерігаються сьогодні. Найвіддаленішим об'єктам, що розташовані на відстані близько 4 Гпк, відповідає час, упродовж якого їх фотони досягли земного спостерігача, порівняний з віком Всесвіту. Тобто земний спостерігач бачить їх такими, якими вони були у ранньому Всесвіті.

Рис. 27.4. Результати дії гравітаційних лінз на скупчення галактик Abell 2218. Дуги і овали – це далекі галактики, лінзовані об'єктами, що розташовані між ними і спостерігачем

Існує й інша проблема. Чим більш рання стадія розвитку Метагалактики є доступною для реєстрації, тим більший шлях мають подолати фотони, що несуть інформацію про неї, і тим більше космічної речовини трапляється на їх траєкторії. Ця речовина перебуває у вигляді скупчень галактик або інших масивних об'єктів. Вони виступають у ролі *гравітаційних лінз*, що викривляють фронт хвиль, які несуть інформацію про відповідний об'єкт (рис. 27.4). Масивних об'єктів на шляху фотонів буде тим більше, чим «глибше» у Всесвіті перебуває їх «генератор» випромінювання. Тому існує певна межа для спостереження значно віддалених космічних об'єктів, далі якої через спотворення світла від космічних лінз не існує можливості скласти достовірні уявлення про початковий об'єкт.

28. Істинний рух Землі у космічному просторі

Визначене уявлення про наше місцезнаходження у космосі дає змогу перелічити всі рухи, в яких бере участь земний спостерігач. Такий перелік складають рухи Землі в наступних динамічних системах:

1. Власний осьовий рух;
2. Земля – Місяць;
3. Земля – Сонце;

4. Сонце – МЗС;
5. Сонце – Галактика;
6. Галактика – Туманність Андромеди;
7. МГ – Надскупчення Діви – Великий Аттрактор;
8. Космологічне розбігання галактик.

Загальні зауваження. В системі трьох тіл «(Земля – Місяць) – Сонце» Земля, рухаючись по еліптичній орбіті навколо Сонця, зазнає періодичного збурення в русі через гравітаційну дію на неї Місяця. Оскільки Земля у 81,3 разів масивніша за Місяць, така дія на неї не є визначальною. Тобто основний рух у системах 2-3 є рух Землі навколо Сонця.

У системі «(Сонце – МЗС) – Галактика» швидкість Сонця навколо центра МЗС є близько 4 км/с, навколо центра Галактики – близько 220 км/с. МЗС рухається навколо центра Галактики зі швидкістю також близько 220км/с. Тобто визначальним рухом у системах 4-5 є рух Сонця навколо центра Галактики.

Чи є перелік рухів у наведеному списку повним? Якби в околі Сонця був об’єкт, масивніший за МЗС, його можна було б виявити сучасними астрономічними засобами. В МГ масивніших галактик за Чумацький Шлях і Туманність Андромеди немає. В межах Надскупчення Діви (або Місцевого надскупчення) її гравітаційне поле є визначальним, на що вказує асиметрія закону Хаббла в околі МГ. За межами Надскупчення виявлено Великий Аттрактор і складова швидкості барицентра МГ. Відтак визначальні рухи, з великою ймовірністю, виявлені на сьогодні всі.

Що стосується космічних об’єктів, що збурюють визначальні рухи, то в наведеному списку вони згадані далеко не всі. В Сонячній системі на Землю, крім Місяця, чинять гравітаційну дію ще й оточуючі її планети, і в першу чергу Юпітер. Про це свідчить те, що планети перебувають між собою в резонансному русі; гравітаційну дію Юпітера враховують під час обчислень поправок у разі визначення променевих швидкостей зір, у яких шукають позасонячні планети. Якщо існує цей супутник (субзоря) Сонця в Сонячній системі, то, безумовно, у термін, коли він буде в перигелії, гравітаційна дія його на планети може бути значною. Така дія може бути ще більшою, якщо існує Немезіда і в неї є планетна система. Не можна виключати, що і за межами Сонячної системи можуть бути космічні об’єкти, які спроможні збурювати рух у перелічених вище 4-7 динамічних системах.

Перелічені динамічні системи проявляють себе під час астрономічних спостережень. Проаналізуємо їх.

1. ***Власний осьовий рух Землі.*** Його проявом є добовий рух небесної сфери. Обертання Землі у напрямку із заходу на схід земний спостерігач сприймає як добовий рух світил за годинниковою стрілкою зі сходу на захід, якщо дивитися на південь у північній півкулі.

2. ***Система Земля – Місяць.*** В результаті гравітаційної взаємодії Місяць кожній земній частинці, згідно з другим законом Ньютона, надає прискорення, яке в силу різної від нього віддаленості неоднаково на них діє. Гравітаційна сила з боку Місяця менша у полюсів Землі, а прискорення, спричинене місячною гравітацією, збільшується з наближенням до земного екватора. Уздовж лінії, що з'єднує центри Місяця і Землі, воно теж різне: найбільше в точці, що розташована найближче до Місяця, найменше – на протилежному боці Землі. Це і призводить до утворення припливних горбів (рис. 28.1 а). Таку дію називають припливною силою. Утворення на земній поверхні припливних горбів проявляються у вигляді припливів і відпливів. Висота припливу в океані не перевищує ≈ 1 м, на суходолі – 53 см (проте в деяких затоках припливна хвиля сягає кількох метрів). Кутова швидкість осьового обертання Землі більша за кутову швидкість руху Місяця навколо Землі. Тому інтервал часу між двома суміжними циклами припливного явища є більшим за земну добу і становить 24 год. 50 хв.

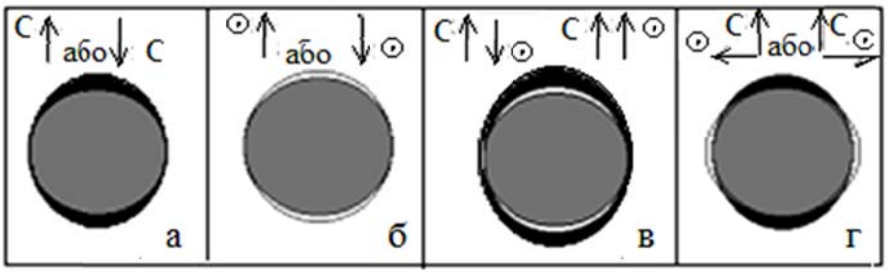


Рис. 28.1. Утворення припливів на Землі в залежності від розташування її відносно Місяця і Сонця. Показані дії припливів: а і б – тільки місячного і сонячного відповідно; сумісного місячного і сонячного, що відповідає фазам Місяця: в – молодику і повному Місяцю, г – I і III чвертям. Напрямок дії з боку Місяця і Сонця вказано стрілками

Місяць також зазнає припливної дії з боку Землі. Оскільки маса Землі у 81,3 разів більша за місячну, відношення величин припливного прискорення на місячній поверхні до земної становить ≈ 20 разів. Тому теоретична висота припливу на Місяці може сягати декількох метрів. Завдяки гравітаційній дії радіус Місяця у напрямку до Землі більший за середній на 1,23 км. Центр мас Місяця також зміщений відносно його геометричного центра на 3 км у земному напрямку і на 1 км ліворуч, якщо дивитися з Землі.

Земля – Місяць утворюють також *квазізамкнену систему*[101], в якій зберігається їх загальна енергія. В такій системі зберігається момент імпульсу системи, що веде до зв'язку її орбітального моменту з осьовими

[101] Система була б повністю замкненою у разі незначної гравітаційної дії Сонця, якою насправді не завжди можна нехтувати.

моментами Землі і Місяця. Тертя припливної хвилі об дно у мілких морях спричиняє систематичне сповільнення її обертання приблизно зі швидкістю 0,000 02 с/рік. Збереження енергії такої системи має спричиняти віддалення Місяця від Землі. Такий процес доступний для вимірювання. Місяць віддаляється від Землі зі швидкістю близько 3 см/рік. Сповільнення осьового руху Землі веде до збільшення періоду земного обертання навколо своєї осі (збільшення доби). У Місяця, як у супутника з суттєво меншою масою за земну, спостерігається синхронний рух навколо Землі: його сидеричний орбітальний період дорівнює періоду обертання навколо осі.

3. ***Система (Земля – Місяць) – Сонце.*** Місяць в середньому віддалений від Землі на 384 000 км і має масу, як уже вказувалося вище, меншу за земну у 81,3 рази. Це означає, що центр мас системи Земля – Місяць розташований на відстані ≈ 4700 км від центра Землі. Відтак у орбітальному русі навколо Сонця зі швидкістю 29,8 км/с Земля зазнає регулярних синусоїдальних відхилень з сидеричним місячним періодом по осі Земля – Місяць.

Гравітаційна дія Сонця, як і Місяця, веде до виникнення земних припливів (рис. 28.1). Під час молодика і повного Місяця (чому відповідають положення Місяця і його фази 1 і 5 на рис. 4.4 відповідно) сонячний і місячний приплив наступають одночасно, дії Місяця і Сонця складаються і спостерігається найбільший приплив (рис. 28.1в). Під час першої і останньої чвертей (відповідно положення і фази Місяця 3 і 7 на рис. 4.3) в момент місячного припливу виникає сонячний відплив (рис. 28.1 г). В цей час на земній поверхні: у підмісячній точці гравітаційна дія Місяця максимальна, а Сонця – мінімальна; тоді як у підсонячній точці амплітуда сонячного припливу максимальна, а місячного – мінімальна.

У земній корі сумарний ефект «твердих» припливів становить 0,78 м, з якого частка сонячного є 0,25 м. В океані приплив від дії Місяця і Сонця має амплітуду 1-2 м. Поблизу берегів висота припливів може бути значно більшою. Найбільша висота припливу спостерігається в затоці Фанді, що розташована на Атлантичному узбережжі Канади, – 18 м. Газова оболонка Землі також відчуває дії припливів і відпливів, що проявляється у варіаціях атмосферного тиску.

В результаті відхилення форми Землі від сферичної (яка тому і зветься *сфероїдом*), нерівномірного розподілу речовини надр однакової густини, наявності мантії, що не є твердим тілом, період обертання і орієнтація осі Землі не залишається сталою. Несферичність Землі спричиняє дію на неї з боку іншого космічного тіла S. У першому наближенні її можна представити трьома векторами сил тяжіння (рис. 28.2 а): перший спрямований із центра кулі (F_O), яка виділена усередині земного сфероїда, другий – із

центра мас екваторіального виступу, що розташований ближче до космічного тіла (F_A), і третій – із більш віддаленого екваторіального виступу (F_B).

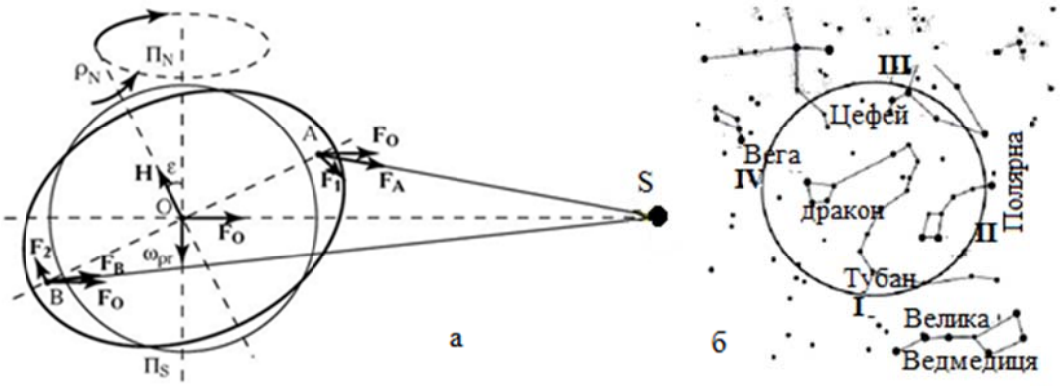


Рис. 28.2. Прецесія руху земної осі: а – утворення її під дією сил тяжіння зовнішнього тіла (ε = 23°26'); б – прояв її у зміні положення північного полюса світу. Північний полюс зміщується по колу проти годинникової стрілки так, що римським цифрам відповідають його наступні положення: I – 5 000 р. до н.е., II – початок н.е., III – 6 000 р. н.е., IV – 13 000 р. н.е.

Оскільки за законом всесвітнього тяжіння перша сила (F_1) більша за другу (F_2), результуюча сила намагатиметься розвернути вісь обертання земного сфероїда у напрямку на космічне тіло. В системі, що розглядається, Земля сприймає дію і від Сонця (оскільки сила від нього значна через велику масу порівняно з земною[102]), і від Місяця (через його близькість до Землі). Це призводить до того, що вісь Землі (яка у продовженні її до небесної сфери утворює полюс світу p_N) описує з періодом 25 765 років навколо полюсів екліптики $П_N$ і $П_S$ малі круги на небесній сфері радіусом близько $\varepsilon = 23°26'$ (рис. 28.2 а). Це явище називають місячно-сонячною прецесією. Зміщення осі обертання Землі спричиняє два наслідки: 1) змінюється напрямок на полюс світу (рис. 28.2 б)[103]; 2) точка весняного рівнодення зміщується на небесному екваторі щорічно на кут 46,11″ назустріч річному пересуванню Сонця, тобто вона рухається по небесному екватору зі сходу на захід (зліва направо у північній півкулі і справа наліво – у південній).

Дія планетної прецесії зміщує точку весняного рівнодення в бік точки сходу зі швидкістю 0,114"/рік. Нахил екліптики до екватора, ε, через прецесію від планет в наш час щорічно зменшується на величину 0,47". Оскільки це явище періодичне, то через декілька тисяч років зменшення зміниться повільним збільшенням.

---

[102] Маса Сонця більше земної в $1{,}99 \cdot 10^{33}$ г : $5{,}98 \cdot 10^{27}$ г = $3{,}33 \cdot 10^{5}$ разів.

[103] Як видно із рис. 28.2б, 4 000 років тому північний полюс світу розташовувався поблизу зорі α Дракона (Тубан), нині перебуває поблизу α Малої Ведмедиці (Полярної), у V тисячолітті буде у сузір'ї Цефея, через 12 000 років буде направлений на зорю α Ліри (Вегу).

Внаслідок того, що вектори прецесійних сил Сонця і Місяця безперервно змінюються[104], земна вісь здійснює коливання з періодом 18,6 років, а вісь полюсів світу описує на небесній сфері еліпси з осями 18,42" і 13,72". Це явище носить назву нутації земної осі.

4. ***Сонце в Місцевій зоряній системі.*** За обчисленнями власних рухів зір високої світності і відстаней до них виявилося, що О-, В-зорі[105], які розташовані в межах ~ 1 кпк від центра поясу Гулда, обертаються разом з ним навколо його центра мас. Під цією областю (з радіусом ~ 1 кпк) нині розуміють МЗС, центральною частиною в якій є пояс Гулда з радіусом близько 500 пк. Пояс Гулда розширюється і має пряме обертання по відношенню до осьового обертання Галактики. Сонце перебуває в межах поясу Гулда на відстані близько 100 пк від його центра (рис. 28.3). У русі Сонця виявили складову швидкості, яка вказує на пряме його обертання навколо центра МЗС зі швидкістю 4 км/с. Це відповідає повному обертанню Сонця навколо центра мас МЗС у 230 млн років.

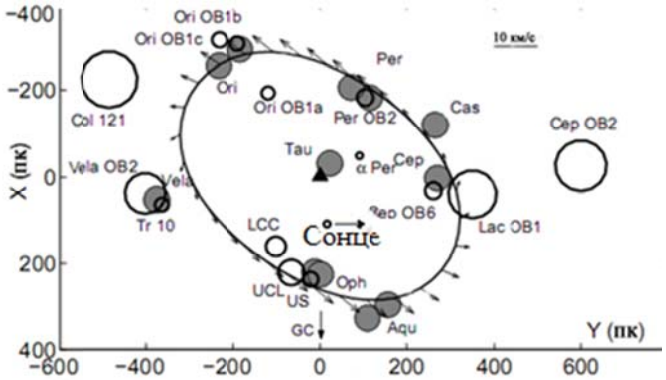


Рис. 28.3. Кінематика руху об'єктів поясу Гулда відносно його центра, показаного трикутником з координатами X = 0, Y = 0; стрілочки показують вектори руху

5. ***Рух Сонця по галактоцентричній орбіті*** здійснюється на відстані ≈ 8 кпк від центра Галактики. Згідно з кривою обертання Галактики, вона обертається на цій відстані зі швидкістю близько 220 км/с, що відповідає *галактичному року*[106] ≈ 220 млн років (рис. 28.4).

Нині Сонце розташовується над площиною Галактики на відстані близько 15 пк в бік північного галактичного полюса (рис. 28.5). Очікується, що максимальне віддалення від галактичної площини ~ 90 пк настане приблизно через 45 млн років, після чого Сонце почне рухатися у зворотному напрямку і ще через 55 млн років перетне галактичну площину.

З урахуванням спільного переміщення в МЗС і по галактоцентричній орбіті більш адекватній траєкторії Сонця відповідає птолемеєва конструкція

---

[104]Дорівнюють нулю, коли Сонце і Місяць розташовуються в площині екватора Землі, і досягають максимуму за найбільшої віддаленості від неї.

[105]Тобто зорі спектральних класів О і В.

[106] Тобто повному обертанню навколо центра Галактики на певній відстані від нього.

руху[107]. Як *деферент*[108] і *епіцикл*[109] виступають орбіти: галактоцентрична і відносно центра мас МЗС відповідно.

Рис. 28.4. Рух Сонця в Галактиці (стрілочка вказує напрямок руху)

Рис. 28.5. Рух Сонця навколо центра Галактики

6. ***Рух галактик в Місцевій групі.*** В МГГ виділяють три осередки галактик: сімейства Молочного Шляху і Туманності Андромеди та галактики периферії. Наша Галактика та Туманність Андромеди рухаються по сильно витягнутій еліптичній орбіті так, що в наш час вони наближаються одна до одної з променевою швидкістю приблизно 120 км/с. Відстань між цими зоряними системами (780 кпк) та невелика тангенціальна складова у власному русі Туманності Андромеди свідчать про те, що через 4,5 млрд років вони зіткнуться між собою, після чого почнеться утворення нової галактики еліптичного типу.

Галактики периферії не належать жодному сімейству, а лише спостерігаються в межах МГ. Оскільки маси цих галактик малі порівняно з масами Чумацького Шляху і Туманності Андромеди, то з певною ймовірністю можна припустити, що вони мають еліптичні орбіти відносно центра мас МГ.

Галактики сімейств (сателіти) територіально відокремлені і спостерігаються відповідно в межах гравітаційної дії Чумацького Шляху і Туманності Андромеди. Загальна маса нашої галактичної системи оцінюється в 1,2 трильйони сонячних мас. Маси сателітів не перевищують 2 % від мас Чумацького Шляху і Туманності Андромеди. Тому центр мас Місцевої групи розташований майже на лінії, що проходить через їх центри.

---

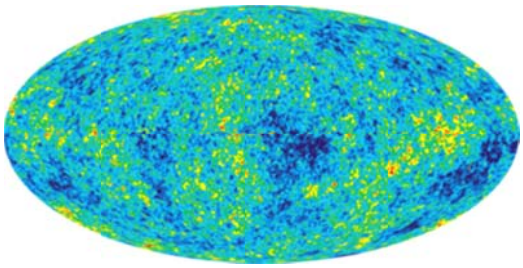
[107]Згідно з давньою системою світу Птолемея, рух планет і Сонця відбувається навколо Землі по деферентах і епіциклах. Така система світу зветься геоцентричною.

[108]Деферент – в геоцентричній системі Птолемея навколосонячна орбіта «середньої планети».

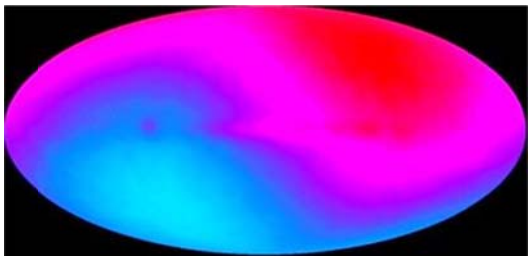
[109]Епіцикл – в геоцентричній системі Птолемея круговий рух «істинної планети», центр якого рухається уздовж деференту.

7. ***Космологічне розбігання галактик*** починає проявлятися за межами МГ. Це грандіозний рух, в якому бере участь весь Всесвіт, і цей рух підпорядковується закону Хаббла–Леметра. Цей закон виражає залежність, а променева швидкість віддалення галактик пропорційна відстані до них, в якій стала Хаббла є коефіцієнтом пропорційності. Оскільки у Всесвіті галактики частіше спостерігаються в групах, в межах яких члени їх сімейств рухаються навколо спільного центра мас, сучасне розуміння закону Хаббла–Леметра полягає в тому, що він поширюється на космологічний опис руху груп галактик і окремих ізольованих у просторі галактик. Найбільш віддалені галактики і квазари, що перебувають на відстанях 1000–1500 Мпк, сумірних з межами Метагалактики, мають швидкості розбігу ~ 0,3 швидкості світла.

8. ***Рух Місцевої групи відносно Місцевого надскупчення і Великого Аттрактора*** відбувається в умовах дії закону Хаббла–Леметра. В локальному полі променевих швидкостей близьких галактик за межами МГ стала Хаббла в різних напрямках різна: на ядро МНС – 81 км/(с·Мпк), на його полярну вісь – 48 км/(с·Мпк), на перпендикуляр до площини, утвореної з наведеної орієнтації, – 62 км/(с·Мпк). Дипольна анізотропія реліктового фону (рис. 28.6), згідно з якою температура випромінювання Всесвіту у напрямку сузір'я Лева на 0,004 К вища, а у протилежному напрямку (сузір'я Водолія) на стільки ж нижча від середнього значення, дала змогу виявити вектор швидкості руху Чумацького Шляху на ще більших масштабах.



а



б

Рис. 28.6. Мапи: а – мікрохвильового реліктового випромінювання, що утворилося через 380 тис. років після виникнення Всесвіту, та б – відхилення його на ±0.004 К від середньої температури 2,728 К (2,724 К відповідає червоному, а 2,732 К – синьому кольорам)

Такому підвищенню і зниженню температури відповідають синє і червоне зміщення довжин хвиль реліктового джерела. Це явище, відповідно до закону Віна та згідно з ефектом Допплера, інтерпретується рухом Чумацького Шляху відносно реліктового джерела по променю зору у напрямку сузір'я Лева зі швидкістю близько 370 км/с. З урахуванням вектора (у напрямку сузір'я Лебедя) і швидкості руху Сонця (220 км/с) навколо галактичного центра Чумацький Шлях в цілому рухається відносно реліктового фону зі швидкістю приблизно 620 км/с. Такий рух має складові:

у напрямку на центр Місцевого надскупчення галактик і Великого Аттрактора (рис. 28.7).

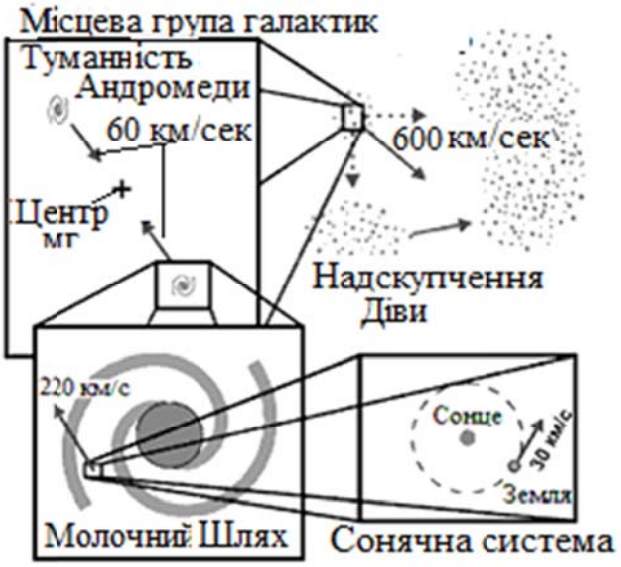


Рис. 28.7. Ієрархія руху за участю нашої планети: навколо Сонця і центра Галактики та під дією сили тяжіння сімейства Туманності Андромеди, Надскупчення Діви і Великого Аттрактора

Барицентр Місцевої групи рухається у напрямку на центр Місцевого надскупчення (яке розташоване на відстані 17 Мпк від МГ) зі швидкістю близько 300 км/с. Гравітаційна дія Великого Аттрактора на Чумацький Шлях і МГГ призводить до зменшення дії закону Хаббла–Леметра у його напрямку на 250 км/с.

Отже, як видно із наведеного переліку, хоча і можна зробити достатньо повний перелік всіх рухів, в яких бере участь земний спостерігач, урахування їх є достатньо складною скрупульозною процедурою. Існують і проблеми визначення певних швидкостей, з якими рухаються космічні об’єкти, які є складовими системи, до яких належить наше Сонце.

Тести

5.1. Чи унікальна за структурою наша Сонячна система?

5.1.1. Так, тому що її структура відрізняється від інших планетних систем.

5.1.2. Ні, її структура подібна до інших планетних систем.

5.1.3. Наша планетна система є унікальною, тому що тільки в ній є планета, на якій існує життя.

5.1.4. Наша планетна система не є унікальною. Вона має таку ж структуру, як і ті планетні системи, де існує життя.

5.1.5. Тільки у нашій планетній системі є зона життя, на відміну від інших.

5.2. Основними складовими Нашої зоряної системи є:

5.2.1. Галактика Молочний Шлях і оточуючі її галактики-сателіти;

5.2.2. Галактика Молочний Шлях і Мала та Велика Магелланові Хмари;

5.2.3. Галактики Молочний Шлях і Туманність Андромеди;

5.2.4. Пояс Гулда та пласка складова Галактики, де розташована Сонячна система;

5.2.5. Пояс Гулда та рукави Стрільця та Персея Галактики, між якими розташована Сонячна система.

5.3. Основними складовими Місцевої групи галактик є:

5.3.1. Галактики Молочний Шлях, Туманність Андромеди та Трикутник;

5.3.2. Галактики-сателіти Молочного Шляху та галактики Туманність Андромеди і IC 10;

5.3.3. Галактики Молочний Шлях, Туманність Андромеди та Периферії;

5.3.4. Галактики Туманність Андромеди, її супутники та Периферії;

5.4.5. Галактики в сфері з радіусом 500 кпк.

5.4. Чи схожі за структурними ознаками підгрупи Молочного Шляху та Туманності Андромеди?

5.4.1. Не схожі.

5.4.2. Є певний перелік структурних ознак, які проявляються в обох підгрупах.

5.4.3. Домінуючі галактики однакові за типом, галактики-сателіти суттєво різняться.

5.4.4. Домінуючі галактики суттєво різних типів, у галактик-сателітів проявляються майже однакові закономірності.

5.4.5. Схожі за належністю домінуючих галактик до Е-типу та принципово однаковим місцезнаходженням наймасивніших галактик-сателітів.

5.5. Чи є приклади в підгрупах Молочного Шляху та Туманності Андромеди, коли в межах одних більш масивних галактик перебувають менш масивні?

5.5.1. Такого випадку не може бути взагалі.

5.5.2. За даними сучасних спостережень такі випадки не виявлені.

5.5.3. Такий випадок можливий, коли менш масивна галактика утворюється в диску іншої більш масивної галактики. Але згаданий випадок не спостерігається.

5.5.4. Є. В підгрупі Туманності Андромеди це галактика М 32, в Молочному Шляху – схоже, що Пояс Гулда.

5.5.5. В підгрупі Молочного Шляху це Мала Магелланова Хмара, в Туманності Андромеди – галактика М 33.

5.6. Чи тотожні об’єкти: Місцеве надскупчення та скупчення галактик в Діві?

5.6.1. Так.

5.6.2. Частково тотожні.

5.6.3. Не тотожні, оскільки Місцеве надскупчення є центром скупчень галактик в Діві.

5.6.4. Не тотожні, оскільки скупчення галактик в Діві є центром Місцевого надскупчення.

5.6.5. Спільним між цими об’єктами є лише те, що вони розташовані ситуативно в сузір’ї Діва.

5.7. Чи можна перерахувати всі рухи, в яких бере участь земний спостерігач?

5.7.1. В жодному разі, їх нескінченно багато.

5.7.2. Ні, оскільки ми не знаємо навіть принципово свого місцезнаходження в Метагалактиці.

5.7.3. Так, якщо б було відомо, де розташований центр Всесвіту.

5.7.4. Так, їх п'ятнадцять.

5.7.5. Так, їх менше, ніж кількість пальців на обох руках.

5.8. Що є загальним між гіперскупченням Ланіакея та Місцевим Войдом?

5.8.1. Нічого.

5.8.2. Тільки те, що вони та гіперскупчення Персея-Риб утворюють спільну кулеподібну суперструктуру.

5.8.3. Гіперскупчення Ланіакея включає в себе Місцевий Войд.

5.8.4. В середині Місцевого Войда розташоване гіперскупчення Ланіакея.

5.8.5. Те, що обидва включають нашу Галактику.

5.9. Прояв комірчастої структури Всесвіту починається за межами

5.9.1. Місцевої групи;

5.9.2. Скупчення галактик в Діві;

5.9.3. Гіперскупчення Ланіакея;

5.9.4. Великого Аттрактора;

5.9.5. Суперструктури, утвореної із гіперскупчень Ланіакея та Персея-Риб і Місцевого Войда.

5.10. Симетрична відносно земного спостерігача просторово-часова структура Метагалактики полягає в тому, що чим

5.10.1. Далі розташований об'єкт, тим більш рання стадія розвитку Всесвіту доступна для спостереження;

5.10.2. Ближче розташований об'єкт, тим більш рання стадія розвитку Всесвіту доступна для спостереження;

5.10.3. Менший вік об'єкта, тим на більш ранній стадії у розвитку Всесвіту він перебуває;

5.10.4. Більший вік об'єкта, тим далі у Всесвіті він розташований;

5.10.5. Більша відстань до об'єкта, тим більший його вік.

Контрольні питання

1. До яких зоряних систем належать околи Сонця?
2. Чи відрізняються поняття галактики Молочний Шлях від Нашої зоряної системи?
3. Що спільного у Туманності Андромеди і Галактики і чим вони відрізняються?
4. За яким принципом визначається належність до Місцевої групи?
5. Які структури спостерігаються за межами Місцевої групи?
6. Де розташовується Місцевий войд і чому він має таку назву?
7. Чи є більші структурні складові, ніж гіперскупчення галактик?
8. Які ієрархічні об'єкти складають Метагалактику?
9. Що розуміється під просторово-часовою структурою Метагалактики?
10. Чи є межі Всесвіту?

Частина 6

ЕВОЛЮЦІЯ ОБ'ЄКТІВ ВСЕСВІТУ

Галактики, їх основні складові – скупчення зір та їх компоненти утворюються й еволюціонують упродовж часу існування Всесвіту за певними законами. За астрономічними спостереженнями вони утворюються з космічного газового середовища, коли виникають відповідні для цього умови. Спочатку виникають певні *протосистеми* (додавання до відповідної назви астрономічного об'єкта префікса «прото-» означає його первісну форму існування). Вони належать, як правило, до першої стадії еволюції відповідного класу об'єктів. Подальший їх розвиток призводить до переходу на основну стадію існування, впродовж якої вони продовжують «знову» еволюціонувати. Кожному з класів об'єктів притаманні як загальні, так і специфічні механізми утворення та еволюційні процеси.

Загальний розвиток об'єктів Всесвіту залежить від умов, що склалися в ньому на момент утворення первинної космічної речовини. Такі умови «диктуються» процесами, що відбувалися у Всесвіті в часи виникнення ядер хімічних елементів, і їх щільністю, на момент часу, коли відбувався процес рекомбінації атомів первинного Гідрогену – завершення об'єднання протонів і електронів в атоми. Це базисні умови первинного космологічного розвитку Всесвіту. Від таких умов залежить подальший розвиток Всесвіту: виникнення перших й подальше утворення всієї різноманітності космічних об'єктів, що спостерігаються в наш час, аж до завершення їх існування (далеке майбутнє).

На тлі загального розвитку об'єктів Всесвіту, виникнення органічних молекул в міжзоряному середовищі, існування умов на планетах Сонячної системи і відкритих екзопланетах для розвитку певних форм життя призвело до постановки його наукового пошуку. Загалом це міждисциплінарна проблема, в якій астрономії відведена роль визначення «адрес» у космосі, де умови для виникнення та розвитку живих форм, за сучасним розумінням, можуть бути найбільш сприятливими. Відтак з'явилися підстави до об'єктів Всесвіту додавати й ті, що можуть належати до «живої природи».

29. Процес утворення космічних об'єктів

Якщо космічне газове середовище перебуває в стаціонарному стані, з ним нічого не відбувається. Вплив на нього певних зовнішніх факторів (їх звуть *тригерними механізмами*) може перевести таке середовище в нестаціонарний стан, після чого в ньому виникають флуктуації (фрагменти), які під дією гравітації спроможні перетворитися в певні протосистеми. Виникнення протосистем за такою схемою називають *механізмом самогравітації*. Існує й інший механізм: в газопиловому середовищі його частинки можуть почати злипатися в більші структури, утворюючи також протосистеми, але дещо іншої природи. Це притаманне *процесу коагуляції*. Такі процеси піддаються відповідному математичному опису, що дає змогу скласти уявлення про їх не тільки якісні, а й кількісні властивості.

Протооб'єкт як газова куля. Впродовж виділення фрагмента маси M з космічного середовища на нього діє всесвітнє тяжіння. Внаслідок цього він перетворюється на сферу з радіусом R зі сталим розподілом її густини, що дорівнює її середньому значенню:

$$\rho = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi R^3}. \tag{29.1}$$

Така сфера зможе перебувати у стаціонарному стані за умови, коли дія на його складові маси m за законом всесвітнього тяжіння Ньютона

$$F_N = G\frac{Mm}{R^2} \tag{29.2}$$

урівноважена дією газового тиску P, який відповідає рівнянню стану ідеального газу, що описується *формулою Клапейрона*

$$P = \frac{k}{\mu m_H}\rho T, \tag{29.3}$$

де k – стала Больцмана, μ – середня молекулярна маса космічної речовини, m_H – маса атома Гідрогена; ρ, T – густина та температура газу відповідно.

Виділимо на поверхні такої сфери елементарну поверхню площею ΔS ($\sqrt{\Delta S} << R$), з формою, наприклад, квадрата. Приймемо його за основу правильної піраміди з вершиною в центрі сфери та обчислимо, з якою

силою вона притягується до сфери в цілому. Беручи до уваги значення середньої густини ρ виділеної піраміди та значення її об'єму V, маса речовини, що міститься в ній, є:

$$m = \rho V = \frac{1}{3}\rho \Delta S R. \tag{29.4}$$

Як відомо, центр мас піраміди розташований на відрізку перпендикуляра (висоти), проведеного через її вершину, і дорівнює 3/4 його висоти (від вершини). З урахуванням умови про елементарне значення площі ΔS, це відповідає в нашому випадку, що значення висоти дорівнює (3/4)R. Відтак ця вибрана елементарна область притягується з силою

$$F_N = G\frac{M}{\left(3R/4\right)^2}\cdot\frac{1}{3}\rho\Delta S R = \frac{G\rho}{3^3/4^2}\frac{M\Delta S}{R}. \tag{29.5}$$

Якщо куля перебуває в *стаціонарному стані*, то сила, що протидіє їй, забезпечується газовим тиском (29.3), що діє на елементарну площу ΔS:

$$F_g = \frac{k}{\mu m_H}\rho T \Delta S. \tag{29.6}$$

Прирівнюючи сили (29.5) і (29.6), одержимо зв'язок між радіусом, масою і температурою такої протосистеми:

$$R = \frac{4^2}{3^3}\frac{G\mu m_H}{k}\frac{M}{T}. \tag{29.7}$$

Подальша підстановка цього виразу в формулу для середньої густини (29.1) дає зв'язок маси, температури та густини:

$$M = M_J \approx \left(\frac{k}{G\mu m_H}\right)^{3/2}\frac{T^{3/2}}{\rho^{1/2}}. \tag{29.8}$$

Вираз зветься *формулою Джинса*, за прізвищем вченого, який вперше її одержав. Ця формула має надзвичайно велике значення в астрофізиці та космогонії. Її фізичний зміст полягає в тому, що *якщо у міжзоряному середовищі виникла флуктуація з середніми значеннями температури та густини T і ρ, то вона еволюціонує до стійкої протосистеми з масою Джинса* (рис. 29.1).

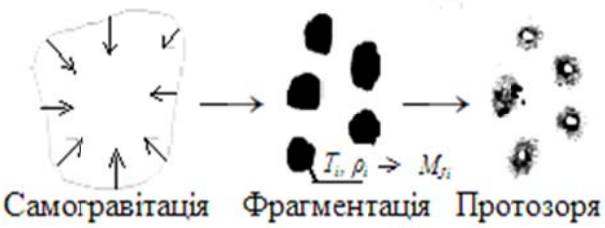


Рис. 29.1. Утворення фрагментів з масою Джинса (M_{Ji}) в залежності від їх середніх значень температури (T_i) і густини (ρ_i)

Механізми утворення та формування протосистем. Доцільно розрізняти три основні механізми, за якими починають утворюватися протосистеми та проходить їх подальша еволюція. Це процеси фрагментації, самогравітації та коагуляції.

Міжзоряне газове середовище існує у вигляді міжхмарної матерії та в хмарах різного розміру. Вони відрізняються між собою за концентрацією частинок (тобто/або густиною) та температурою. Завдяки флуктуаціям температури та густини у цьому середовищі, згідно з формулами (29.7)-(29.8), виникають фрагменти, різні за розмірами та масами. Розміри таких фрагментів можуть сягати десятків парсек з масами більше $\sim 10^3$–$10^4\ M_\odot$.

Розпад на менші фрагменти без зовнішнього впливу не відбувається. Такий подальший процес пов'язується з наявністю певних механізмів, які звуться тригерними, за яких така стійка система, як міжзоряна хмара, розпадається на менші, і теж стійкі, фрагменти. «Спусковий» механізм, за яким це відбувається, пов'язаний з дією ударної хвилі, яка виникає в тому разі, коли її швидкість поширення перевищує *швидкість звуку у цьому середовищі*:

$$\upsilon_s = \sqrt{\frac{\gamma kT}{\langle m \rangle}}, \qquad (29.9)$$

де γ – показник адіабати, $\langle m \rangle$ – середня маса частинок.

За фронтом ударної хвилі створюється надлишок тиску, дія якого ущільнює концентрацію частинок хмари в чотири рази. Цього достатньо для запуску процесу дробіння міжзоряної хмари, після чого кожен з фрагментів, що утворився, починає стискуватися під дією вже своєї власної самогравітації.

У космічному просторі *ударні хвилі* виникають:

- у спіральних рукавах галактик;
- за фронтом оболонок наднових зір, які розширяються;
- під час зіткнення міжзоряних (чи міжгалактичних) хмар;
- в середовищі, що колапсує.

Всі перелічені космічні регіони є областями зореутворення, де закінчується процес *каскадної фрагментації*, під якою розуміється череда утворення протосистем від більших до менших:

протогалактика → протоскупчення → протозоря.

Самогравітація та коагуляція. Шлях еволюції утворених протосистем лише завдяки центральній дії сили гравітації зветься самогравітацією. В такому разі протосистема стискається, а її частинки рухаються в центральному гравітаційному полі в режимі вільного падіння (рис. 29.2а). Оскільки такий рух відбувається з прискоренням, то після перевершення швидкості звуку (29.9), вказаного на рис. 29.2б, створюються умови для фрагментації з більш високого рівня протосистем на менші (рис. 29.2в).

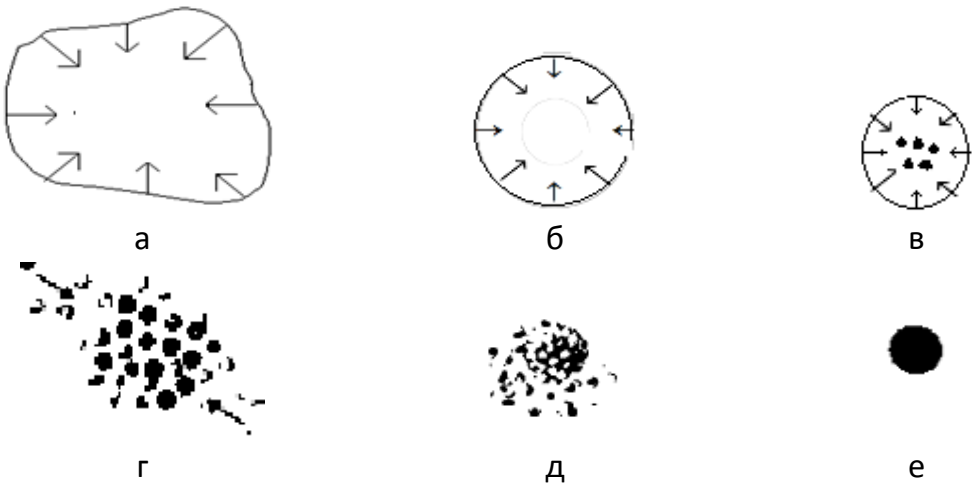


Рис. 29.2. Утворення протосистем шляхом: а-в – самогравітації; в-е – коагуляції. Стиснення протосистеми шляхом самогравітації (а) веде до її «сферізації» та подальшого перевищення частинками швидкості звуку v_s на певній його глибині (б), що спричиняє її фрагментацію (в). Об'єднання пилинок в результаті зіткнень (г) призводить до стиснення згустків під дією гравітаційної взаємодії (д), подальшого ущільнення та утворення протопланет (е)

Наявність важких хімічних елементів (масивніших за Гелій) в газових дисках, які можуть існувати навколо зір і субзір веде до виникнення пилових частинок. Якщо їх швидкості під час зближеня сумірні між собою, то наслідком їх зіткнення є непружний удар, в результаті чого вони злипаються (рис. 29.2г). Повторення такої ситуації ведуть до утворення більш масивних пилинок (рис. 29.2д), з подальшим їх зростанням до все більших і більших згустків (рис. 29.2е). Такий процес зветься коагуляцією. Обертаючись навколо центрального світила (яке, як правило, також перебуває в процесі формування), утворені згустки осідають до площини диска, в якому продовжують об'єднуватися у своєрідні скупчення, які захоплюють все більше речовини на своєму шляху. В самому ж скупченні згустки

зіштовхуються та перемішуються, в результаті чого втрата ними енергії призводить до подальшого об'єднання у так звані *планетезималі*. З більших із них формуються протопланети, з менших – малі тіла.

30. Від протооб'єктів до зоряних і планетних систем

Є три рівні протосистем: *протогалактики*, *протоскупчення* та *протозорі*, послідовність яких відтворює процес каскадної фрагментації. В подальшому вони еволюціонують, відповідно, утворюючи галактики, зоряні скупчення та кратні зорі й субзорі та планетні системи.

Протооб'єкти як джинсівські фрагменти. Саме найперші масивні галактики, що виникли у Всесвіті, пов'язуються з утворенням попередників сучасних зоряних систем – протогалактик. У ранньому Всесвіті були часи, коли його температура була високою, а густина низькою, що дає підстави для обґрунтування зв'язку маси Джинса з сумірними їм великими масами протогалактик. Подальше їх охолодження під час радіального стискання веде до збільшення швидкості газу. Після перевищення значення швидкості звуку в цьому газі має включитися повторна фрагментація, яка ініціює виникнення протоскупчень зір. В «мініатюрі» процес у протоскупченнях якісно повторюється та спричиняє утворення протозір. Тобто кожна із наступних протосистем виникає за менших температур, а отже, вони і мають менші маси.

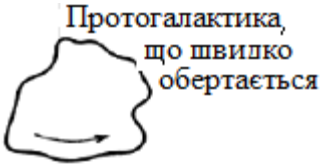
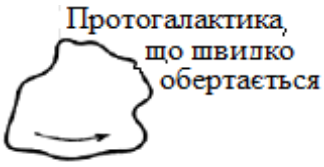
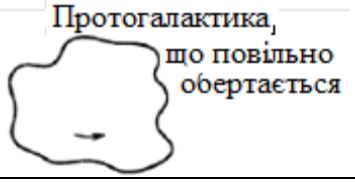
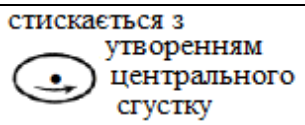
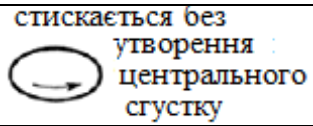
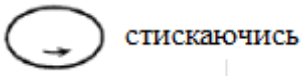
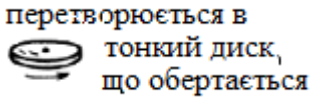
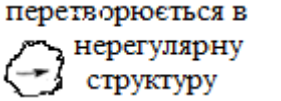
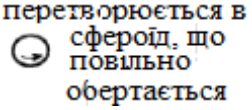
Момент імпульсу		
Значний		Незначний
		
		
		
Формуються Спіральні галактики	Формуються Неправильні галактики	Формуються Еліптичні галактики
а	б	в

Рис. 30.1. Утворення галактик різних типів залежно від МІ протогалактик

<u>Виникнення галактик</u> різних типів, як показують космогонічні дослідження, пов'язується з різним моментом імпульсу (МІ) в прото-

галактиках (рис. 30.1). Наявність значного МІ у протогалактик створює умови для виникнення двох типів галактик. У разі виникнення центрального згущення утворюються спіральні галактики (рис. 30.1а), наслідком відсутності такого згущення є формування неправильних галактик (рис. 30.1б). Якщо ж МІ протогалактик незначний і відсутнє центральне згущення, то виникають еліптичні галактики (рис. 30.1в). Щодо виникнення лінзоподібних галактик, то їх нині розглядають як проміжний тип, що утворюється з вже утворених, імовірно спіральних галактик, коли зникають умови для «збереження» спірального візерунка.

Початковий МІ впливає і на темп зореутворення. Коли наслідком значного МІ є утворення диска та спірального візерунка, наявність у рукавах галактик ударних хвиль веде до ≈ 10 %-го перетворення газу в протозорі, решта йде на подальші зореутворення. Тому в спіральних галактиках і присутня газопилова складова. Відсутність значного МІ в таких галактиках, як еліптичні, веде майже до 100 %-го перетворення газу в протозорі. Тому в таких галактиках і відсутній газ в нинішню епоху, а відповідно, і відсутнє зореутворення.

Як випливає з викладеного вище, такі скупчення зір, як кулясті, що належать до сферичної складової галактик, слід пов'язувати з радіальним стисненням протогалактики, оскільки їх рух ще й відтворює неупорядкований рух первинної галактичної речовини. Розсіяні ж скупчення утворюються в інших умовах, під час проходження протоскупчень через спіральні рукави. Такі протосистеми за масами менші, і в них не вистачає гравітаційної енергії для утворення їх сферичної форми. Такі ж зоряні системи, як асоціації, швидче походять від наслідків взаємодії між міжзоряними хмарами, а значні за масами серед них, напевно, утворилися з *гігантських молекулярних хмар*.

Утворення та подальша еволюція протозір з різними МІ теж різна (рис. 30.2). За відносно незначного МІ – $J_1 < 5\cdot10^{43}\,(M/M_\odot)^{5/3}$ кг·м^2/с, вся речовина під час гравітаційного стискання стягується в поодиноку зорю чи субзорю. За значного МІ – $J_2 > 10^{45}\,(M/M_\odot)^{5/3}$ кг·м^2/с, протозоря приймає тимчасово форму тора. Оскільки це нестійка газова фігура, вона розділяється на фрагменти, з яких у подальшому утворюється кратна зоря. Проміжний варіант значення МІ – $J_1 < J < J_2$ веде до утворення центрального згустку (ядра) з оточуючим його диском. Акреція на центральне ядро та диск веде до їх зростання. Центральне ядро формує зорю чи субзорю, а в диску можуть створюватися умови для утворення протопланет. Диски можуть утворюватися і навколо окремих компонентів кратних зір, якщо гравітаційна дія інших компонентів їх не руйнує.

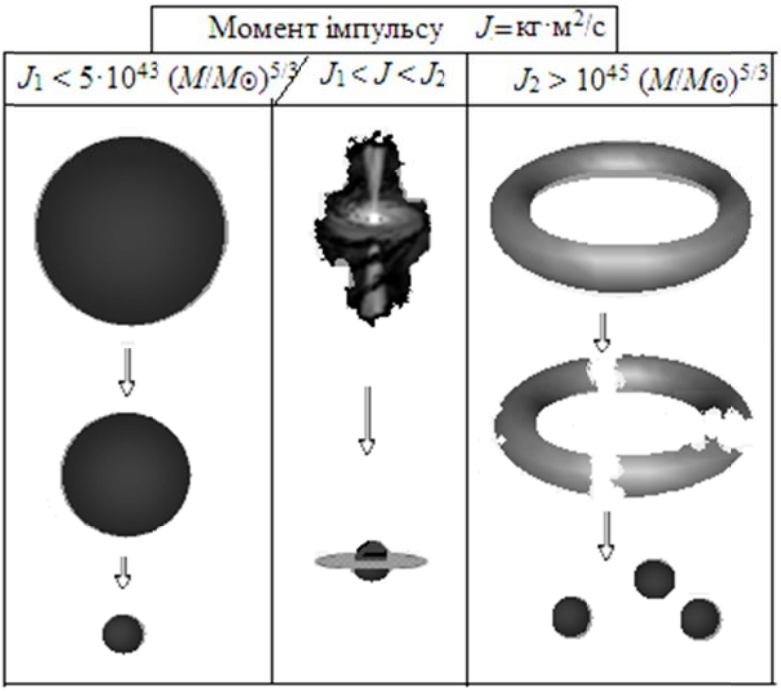


Рис. 30.2. Утворення протозір різної кратності в залежності від їх моменту імпульсу

Деякі ключові події в утворенні систем різної ієрархії. До ключових подій в еволюції зоряних систем відносять такі, які є характерними саме для них. Наприклад, під час формування галактик це може бути час переходу від стискання протогалактики до початку формування її сферичної складової. Для спіральних та лінзоподібних галактик є характерним наявність у них диска. Як пов'язана їх загальна маса з радіусом диска, що формується після утворення сферичної складової цих галактик? Через який час після виділення протоскупчення починається фрагментація на протозорі? За який час утворюються зорі? Це лише деякі складові ключових подій, для яких є змога провести оцінки шляхом елементарних розрахунків.

Тривалість безфрагментарної стадії протогалактик – це час їх існування, впродовж якого ще не з'являються в них протоскупчення як результат *первинної фрагментації*. Очевидно, що це є той час, за який у процесі стиснення протогалактики з прискоренням досягається її краями швидкість звуку. Цей час t_f обчислюється з рівняння, одержаного від прирівнювання швидкості рівноприскореного руху з нульовою початковою швидкістю

$$\upsilon_t = gt = G\frac{M}{R^2}t_f \qquad (30.1)$$

швидкості звуку (29.9), оскільки саме після її досягнення виникає ударна хвиля, за межами якої створюються умови для початку фрагментації:

$$t_f = \frac{R^2}{GM}\sqrt{\frac{3}{2}\frac{kT}{m_H}}, \qquad (30.2)$$

де прийнято до уваги показник адіабати $\gamma = 3/2$ (значення для одноатомного газу) та $\langle m \rangle$ – середня маса частинок прирівнюється масі атома Гідрогену $\langle m \rangle = m_H$. Неважко виконати оцінки, наприклад, для протогалактики з масою $M \sim 10^{11}\ M_\odot$ і радіусом $R \sim 10^2$ кпк: $t_f \sim 10$ млн років.

Маса диска, що формується в галактиках, результат дії двох сил – всесвітнього тяжіння (26.2) і відцентрової:

$$F_{\text{вц}} = m\frac{\upsilon_d^2}{R_d}, \qquad (30.3)$$

де m – маса частинки (молекули) на зовнішньому краю диска, υ_d – швидкість її обертання.
Прирівнюючи їх, одержимо зв'язок між розміром і масою диска галактики

$$R_d = G\frac{M_d}{\upsilon_d^2}. \qquad (30.4)$$

Для маси диска, наприклад, сумірного з тим, що у нашої Галактики $M_d \sim 10^{11}\ M_\odot$ і швидкістю в ньому об'єктів $\upsilon_d \sim 200$ км/с, одержимо значення $R_d \sim 10$ кпк.

Тривалість безфрагментарної стадії протоскупчень зір – обчислюється аналогічно, як і для протогалактик, за одержаною формулою (30.2). Підставляючи в неї типові значення, наприклад, для кулястих скупчень $M \sim 10^5\ M_\odot$ і радіус $R \sim 10$ пк, одержимо: $t_f \sim 100$ тис. років.

Характерний час повного стискання протозорі може бути записаний із відомої формули, що пов'язує час вільного падіння (англ.: *free fall*) тіла t з висоти h під дією прискорення g без початкової швидкості, де як висоту слід взяти R – радіус протосистеми:

$$h = \frac{gt^2}{2} \;\rightarrow\; t_{ff} = \sqrt{\frac{2R}{g}}\Bigg|_{g=G\frac{M}{R^2}} = \sqrt{\frac{2R^3}{GM}}\Bigg|_{\frac{M}{R^3}=\frac{4}{3}\pi\rho} \approx \left(2G\rho\right)^{-1/2}, \qquad (30.5)$$

де ρ – середня густина протозорі, згідно з (29.1).

З іншого боку, підставляючи у вираз (30.5) формулу для радіуса протозорі (29.7), одержимо зв'язок часу повного стискання з масою протозорі та її початковою температурою:

$$t_{ff} = G\left(\frac{2^{13}}{3^9}\frac{m_H}{k}\right)^{1/2} \mu^{3/2}\frac{M}{T^{3/2}}. \qquad (30.6)$$

Виражаючи час в роках (1 рік = $3{,}16\cdot10^7$ с), а масу в сонячних одиницях ($M_\odot = 1{,}99\cdot10^{30}$ кг), отримаємо остаточно:

$$t_{ff} = 3{,}6\cdot10^6\mu^{3/2}\frac{M/M_\odot}{T^{3/2}} \text{ років.} \qquad (30.7)$$

Ураховуючи значення для областей зореутворення: $T \sim 10$ K, $\mu = 2{,}36$, одержимо, що протозоря з сонячною масою стискатиметься за 400 тис. років.

31. Еволюція зір

Розділяють еволюцію поодиноких чи відокремлених зір та зір-компонентів *тісних подвійних систем* (ТПС). Під відокремленими зорями розуміють ті, що входять у подвійні чи більшої кратності зорі, але інші компоненти жодним чином не впливають на процеси, що відбуваються в їх надрах упродовж усього часу існування. До компонентів ТПС відносять такі, які взаємно впливають на хід розвитку подій іншого компонента на певних стадіях еволюції. Зручно вивчати спочатку еволюцію поодиноких зір, а еволюцію компонентів ТПС розглядати як певне відхилення від установлених закономірностей розвитку звичайних зір.

Утворення та ключові етапи розвитку зір. По закінченню стадії протозорі, коли в її надрах починає діяти один із циклів ядерного горіння Гідрогену за схемою (13.1), закінчується утворення зір. Це перша з чотирьох стадій еволюції зір. Загалом зорі можуть проходити наступні ключові еволюційні стадії (рис. 31.1):

протозоря → головна послідовність → гігант → зоряний залишок.

Час, упродовж якого горить Гідроген за схемою (13.1), відповідає основній стадії еволюції зір і ототожнюється зі знаходженням їх на головній послідовності ДГР. Стадії гігантів відповідає час, упродовж якого в процесі відповідних ядерних реакцій утворюються більш масивні ядра хімічних елементів Періодичної системи Менделєєва, обмежені по горизонталі IV-м рядом та по вертикалі VIII-ю групою (Fe, Co, Ni) – рис. 13.1. Такі зорі на ДГР належать послідовностям 0–III. Зоряні залишки – кінцева стадія зоряної еволюції, до яких відносять білі карлики, нейтронні зорі та чорні діри. На ДГР тільки білі карлики мають свою VII-му послідовність.

Рис. 31.1. Еволюційна ДГР як прояв проходження зорями ключових стадій еволюції

Зорі обов'язково проходять перші дві стадії еволюції. Перебування зір на інших стадіях залежить від їх початкових мас. В залежності від того, чи зорі закінчують свою еволюцію стадією зоряних залишків (і яка їх природа), чи їх не мають на заключному етапі розвитку, принципово інтервал зоряних мас розділити на три частини: 0,08–8 $M_\odot$; 8–120 $M_\odot$; 120–150 $M_\odot$. Виключенням є зорі з нульовим вмістом важких хімічних елементів, для яких можна додати ще зорі з масами > 260 $M_\odot$, коли зорі головної послідовності еволюціонують безпосередньо в чорні діри.

Зорі з початковими масами < 8 $M_\odot$. Як уже раніше зазначалося, наймаломасивніші з цих зір (< 0,26 $M_\odot$) є повністю конвективними, що сприяє згорянню практично всього Гідрогену в зоряному ядрі. Такі зорі перетворюються у *гелієві білі карлики*.

У зір з масами 0,26 $M_\odot < M <$ 0,5 $M_\odot$ після закінчення горіння Гідрогену гелієве ядро починає стискатися, оболонка ж, нагріта до великої температури, починає розширюватися. В результаті зоря зміщується на ДГР в область субгігантів. У таких зір умов для горіння Гелію не виникає і згодом верхня оболонка відділяється, залишаючи утворений таким чином гелієвий білий карлик з масою, дещо меншою від початкової маси зорі.

Маси зір в інтервалі 0,5 $M_\odot < M <$ 8 $M_\odot$ достатньо, щоб у центральній частині гелієвого ядра, яке стискається після припинення протон-протонного циклу, «загорівся» Гелій: ядро Гелію-4 захоплює спочатку одну, а потім і ще одну α-частинку, в результаті чого виникає ізотоп Карбону-12. Такий процес зветься *3 α-реакція*. Далі ядро Карбону-12 поглинає ще одну α-частинку, що веде до утворення ядра Оксигену. Такі події сприяють формуванню карбоно-оксигенового ядра зорі в області зір-гігантів. Темп зоряного вітру на цій стадії збільшується на порядок, температура їх фотосфер зростає, а розмір зменшується. На ДГР

вони зміщуються вліво, доки не потрапляють в область нестабільності, в якій зоря починає періодично змінювати свій радіус (пульсувати). Такі зорі одержали назву цефеїд[110]. В подальшій еволюції ці зорі скидають зовнішню оболонку, яку називають планетарною туманністю. Згодом вона розсіюється, залишаючи всередині С-О білий карлик, який потрапляє в ліву нижню область ДГР.

Зорі з початковими масами 8 $M_\odot$ < M < 120 $M_\odot$. Початкова еволюція зір з масою > 8 $M_\odot$ після вигоряння Гідрогену принципово така сама, як у зір з меншими масами. Відмінність в тому, що вони після сходу з головної послідовності мають більші розміри та світності. Це відповідає їх положенню на ДГР вище послідовності гігантів (це зорі послідовностей II, I і 0) – рис. 12.1. Чим більше початкова маса зір, тим більше виникає умов для захоплення ядрами хімічних елементів α-частинок аж до ядер Ніколу, під час утворення якого ще виділяється енергія. Для утворення більш важких ядер необхідно витратити енергію. Тому в надрах зір «виробництво» хімічних елементів закінчується саме на Ніколу. В такому середовищі йде *процес «надзбагачення» ядер нейтронами*. Досягнення ядерної густини в результаті подальшого стиснення зорі приводить до закінчення *процесу нейтронізації*, яке супроводжується спалахом і скиданням оболонки. Цей процес спостерігають як явище наднової зорі. Саме за такого процесу із зір з початковими масами $8\,M_\odot < M \lesssim 20\,M_\odot$ утворюються нейтронні зорі, а з початковими масами $20\,M_\odot \lesssim M < 100\,M_\odot$ – чорні діри. Спалах зір з початковими масами $100\,M_\odot < M < 120\,M_\odot$ відбувається без зоряного залишку: ядро повністю розлітається разом з оболонкою. Енергія, що виділяється під час такого вибуху, йде на утворення ядер хімічних елементів, важчих за Нікол. Граничним хімічним елементом, що може утворитися в таких умовах, очікується Каліфорній-254.

Зорі з найбільшими масами, 120 $M_\odot$ < M < 150 $M_\odot$, не проходять стадії гігантів. Потужний зоряний вітер за час перебування зорі на стадії головної послідовності «випаровує» повністю її речовину без стадії наднової. Тобто такі зорі і не проходять стадії гігантів, і не мають зоряних залишків. Загальний процес еволюції зір відображає рис. 31.2.

---

[110] Назва походить від першого відкритого представника таких зір – δ Цефея.

Рис. 31.2. Узагальнена схема утворення й еволюції зір в залежності від їх початкової маси

Еволюція Сонця починалася, як і в усіх зір, стадією протозорі. Після ядерного загоряння Гідрогену Сонце потрапило на головну послідовність ДГР ~5 млрд років тому. Оскільки час горіння Гідрогену у зір з сонячними масами ~10 млрд років, наше світило буде перебувати ще на цій стадії еволюції ~5 млдр років, упродовж яких, як очікується, його світність буде зростати. Через цей час після нетривалого перебування на стадії субгігантів, коли в центрі перестане горіти Гідроген, Сонце перейде на стадію гігантів, де буде перебувати впродовж ~1 млрд років. Маса його на цій стадії еволюції буде меншою лише на 0,1 % від сучасної маси, розміри очікуються сумірними, але меншими за радіус земної геліоцентричної орбіти. В цей час в надрах Сонця будуть йти ядерні перетворення Гелію на Карбон з подальшим утворенням ще й ядер Оксигену.

Після *стадії планетарної туманності* наша зоря перетвориться на карбоно-оксигеновий білий карлик з масою 0,6 $M_{\odot}$. Загальна схема еволюції Сонця показана на рис. 31.3.

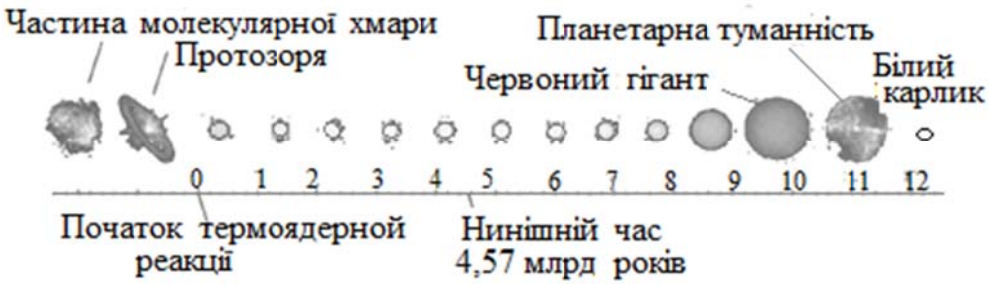


Рис. 31.3. Схема утворення й еволюції Сонця

Подальша еволюція цього сонячного залишку пов’язана з вічним остиганням. Зменшення маси нашого центрального світила призведе до зміщення орбіт планет, їх великі півосі стануть більшими. Якщо Землі пощастить не згоріти від Сонця на стадії гіганта, то в залежності від

швидкості втрати сонячної оболонки на стадії планетарної туманності велика піввісь земної орбіти через 6 млрд років очікується в межах 1,67–3 а.о. За таких умов Земля згодом перетвориться на холодну мертву планету, як і всі планети Сонячної системи.

Особливості в еволюції зір в ТПС. Еволюція компонентів ТПС на перших двох стадіях еволюції принципово не відрізняється від еволюції звичайних зір. Особливістю таких компонентів є їх форма: чим ближче вони розташовані між собою, тим більше проявляється дія припливної сили – вони «витягуються» уздовж лінії, що проходить через їх центри та барицентр.

Відмінності від еволюції звичайних зір у компонентів ТПС настають через наявність у системи *еквіпотенціальної поверхні* – поверхні однакового гравітаційного потенціалу, що оточує її внутрішню область, яку називають *порожниною Роша*. Ця поверхня включає внутрішню точку Лагранжа L_1, в якій сили притягання з боку обох компонентів однакові. Наявність такої поверхні призводить до того, що коли зоря переходить на стадію гіганта, її розмір обмежується межею порожнини Роша. В результаті цього речовина зорі-гіганта починає перетікати через точку L_1 на інший компонент. Зменшення маси зорі-гіганта веде до уповільнення його еволюції, в той час як збільшення маси іншого компонента – до прискорення еволюції.

В таких системах розрізняють ТПС з масами менше та більше 8 $M_\odot$, виділяючи компоненти, які закінчують еволюцію стадіями білих карликів та нейтронних зір і чорних дір. Поява перших з них супроводжується утворенням планетарних туманностей, інших двох – *вибухом наднових*.

Наявність ТПС пов'язується з такими об'єктами, як нові зорі, наднові типу Ia, гелієві білі карлики, зорі типу Вольфа–Райє, *симбіотичні зорі* тощо.

32. Еволюція субзір і планет

На відміну від процесів, які супроводжують еволюцію зір, специфіка субзір пов'язана перш за все з відсутністю джерел енергії, планет – суттєвою відміною їх внутрішньої будови від інших класів космічних тіл, великою різноманітністю за масою та хімічним складом і, загалом, значно більшою поширеністю розповсюдженості у Всесвіті. Тому у субзір і планет спостерігається й очікується велике різноманіття процесів, які притаманні саме цим об'єктам.

Утворення субзір і планет. Розрахунки мінімальної маси Джинса для об'єктів з типовими зоряним елементним складом і температурами, притаманними *областям зореутворення,* близьким до 10–30 K, дають значення 0,7–0,9 M_J (M_J – маса Юпітера) відповідно. З цього випливає, що

субзорі та масивні воднево-гелієві планети утворюються, як і зорі, шляхом самогравітації. Планети ж інших типів утворюються виключно шляхом коагуляції.

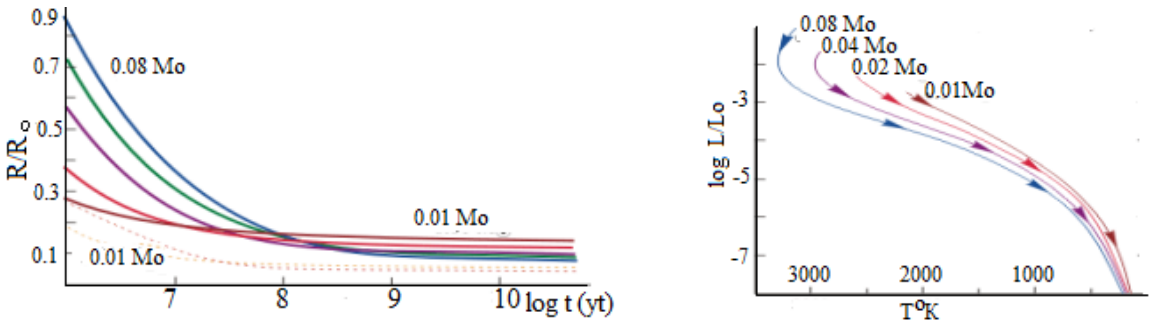
Теоретично існують шляхи зміни належності планет з одного типу на інший. До таких об'єктів може бути віднесений клас «гарячих юпітерів» – воднево-гелієвих планет, що розташовані настільки близько до центрального світила, що температура їх фотосфери сягає 1000÷3000 K (типова для субзір і майже сягає мінімальних значень для зір малої світності). Дія зоряного вітру з боку центрального світила має вимітати верхні шари такої планети, що веде до наявності у них кометопобідного шлейфу («хвоста») та зменшення їх маси і, як наслідок, до поступового випаровування. Залишком такої планети можна очікувати саме ядро, яке тоді вже можна віднести до окремої планети, ймовірніше за все силікатно-металічного складу.

Іншим прикладом можуть бути також близько розташовані воднево-гелієві планети в околі зір з масою 8–10 $M_\odot$. Як відомо, зорі з масами більше за 8 $M_\odot$ закінчують еволюцію вибухом наднової. З іншого боку, зорі з масами $< 10\ M_\odot$ перебувають на стадії протопланетного диска достатньо часу, щоб в їх околах виникли планети. Отже, після стадії наднової може випаровуватись верхній шар планети воднево-гелієвого складу та залишитися лише її ядро, ймовірно металевого складу, яке може вважатися вже самостійною планетою.

Остигання субзір. Після припинення ядерних реакцій у субзір тиск газової плазми, що перебуває в центральних областях їх надр, не спроможний протистояти гравітаційному стисканню. Під час їх стискання змінюється рівняння стану їх надр: електрони зближуються між собою настільки, що це відповідає мовою фізики стану їх повного чи часткового виродження. Тиск такого електронного газу спроможний частково компенсувати гравітаційне стискання, в результаті чого ці космічні тіла продовжують повільно стискатись (рис. 32.1а). Одночасне зниження їх ефективної температури веде до переміщення субзір у правій нижній частині ДГР уздовж її головної послідовності (рис. 32.1б).

При цьому змінюється внутрішня структура субзір. За результатами розрахунків, спочатку в газових надрах в середніх шарах починає з'являтися газорідкий конденсат – суспензія газових і рідких частинок, який в подальшому переходить в рідку фазу. Зі зниженням температури надр і зростання її густини водень, як у середніх шарах, так і центральних областях, переходить в металічний стан. У разі досягнення віку субзір, сумірного з віком Всесвіту, в шарах під верхнім газовим шаром (який

є підстави віднести до субзоряних атмосфер) виділяється ще й шар рідкого водню. Тобто такі об'єкти можуть вважатися *субзорями-океанами*.



а б

Рис. 32.1. Зменшення радіусів субзір (а) та їх рух на ДГР (б) в залежності від маси в процесі еволюції

Загалом, остигання надр субзір призводить до зменшення їх ефективної температури і, як наслідок, – до зміни на більш пізні спектральні класи. Кінцевою фазою еволюції субзір є *чорні карлики*.

Різноманіття еволюційних процесів у планет. Стадія протопланет закінчується формуванням ядра у планет. Очевидно, що в залежності від типу планет хімічний склад ядер є різним. У металевих (Ме-) планет, імовірно, формується ядро з нікелевим складом, оскільки його густина більша за густину заліза на 13 %. Силікатні планети, найімовірніше, мають металеві ядра, льодяні та воднево-гелієві планети – силікатні чи силікатно-металеві ядра.

Перші сотні мільйонів років планета, що утворилася, ймовірніше, є розплавленою, оскільки саме такий стан є необхідним для проходження процесу гравітаційної диференціації. Достатня теплова енергія такої планети є наслідком злипання планетезімалей, гравітаційного стискання (на стадії протопланет), радіоактивного розпаду хімічних елементів, які входили в первинний склад протопланет.

Потім починається охолодження планети, в результаті чого застигають її верхні шари – починає формуватися кора над більш гарячим шаром, який і звуть мантією. Через неоднорідний хімічний склад кори збільшення її товщини йде нерівномірно. Це призводить до відповідних механічних напружень, які охоплюють всю товщину кори. Підігрів гарячою мантією тонких шарів кори, вивільнення енергії виниклих напружень провокують розломи в корі. Наслідком цих процесів є планетотруси та проникнення через розломи, які утворилися, речовини мантії на поверхню кори, що зветься *вулканічною діяльністю*. Виверження вулканів може бути спричинене і зовнішніми процесами. До них відносять падіння великих за розмірами і масами метеороїдів, які можуть

спричинити розломи в корі та спровокувати також вулканічну діяльність. На початку еволюції планети вулканів більше, ніж у подальшому, оскільки були більш тонка кора та більша частота падіння метеороїдів.

Якщо в ядрі планети є електропровідна рідка речовина (наприклад розплавлене залізо), то за наявності конвективних потоків генерується *магнітне поле*. Походження таких потоків може бути пов'язане як з осьовим обертанням планети, так і з наявністю масивного супутника, який є причиною припливних сил. Відтак очікується, що з остиганням надр планети напруженість магнітного поля має зменшуватися, а то й зникнути зовсім. Не виключається, що для існування життєдіяльності на планеті наявність магнітного поля є визначною, оскільки воно захищає планету від дії заряджених частинок, які можуть виникати в атмосфері центрального світила та космічних променів.

Під дією радіації, що випромінює центральне світило, випаровуються хімічні сполуки, що входять до складу кори. Інші хімічні сполуки долучаються в процесі виверження вулканів і випаровування речовини комет, що потрапляють на поверхню планети під час їх зіткнення з поверхнею кори. Якщо кінетична енергія всіх цих частинок менше за другу космічну швидкість планети, вони не покидають її околи, а формують зовнішню оболонку планети – атмосферу. Хімічний склад атмосфер може суттєво змінюватися впродовж еволюції планети. Якщо на планеті створюються умови для появи та існування життя, хімічний склад атмосфери «це відчуває» та може суттєво змінитися й відрізнятися від таких самих планет, на яких воно відсутнє.

На період осьового обертання планет впливає значення великої півосі орбітального руху та наявність у планети великого супутника. Чим ближче планета перебуває від світила, тим істотніша дія резонансів, що виникають між осьовим і орбітальним рухами. Граничним проявом впливу резонансної взаємодії є досягнення однакового значення осьового і орбітального періодів, що відповідає випадку, коли планета повернута однією півсферою до свого світила. Схожа ситуація виникає і в системі планета–супутник, коли останній повернутий також до планети однією півсферою. В такій системі є цікава особливість: упродовж еволюції змінюється їх взаємна відстань, що за наявності масивного супутника впливає ще й на період осьового руху. Коли такий супутник віддаляється від планети, її період зростає доти, доки осьовий період обертання планети не зрівняється з орбітальним періодом. Далі відстань між ними знову почне зменшуватися, і осьовий період також.

Існують й інші процеси та особливості, які проявляються в процесі еволюції планет.

33. Загальний розвиток Всесвіту

Уявлення про походження об'єктів Метагалактики побудовані на основі фізичних уявлень та астрономічних даних про все різноманіття космічних об'єктів. Вони дають змогу відтворювати відповідні еволюційні процеси, які відбувалися у Всесвіті в минулому та дають можливість прогнозувати події, що можуть відбутися в майбутньому.

Космологічний базис. В основі сучасних теорій утворення Всесвіту лежить *інфляційна модель* швидкого розширення простору після Великого вибуху. Сучасна фізика дає змогу описувати поведінку Всесвіту, починаючи з планківських *температур* $T_{\text{Пл}} \sim 10^{32}$ К, *густини* $\rho_{\text{Пл}} \sim 10^{96}$ кг/м^3 і *часу* $t_{\text{Пл}} \sim 10^{-43}$ с – значення одержані методом аналізу *розмірностей*[111], шляхом співвідношень між фундаментальними фізичними сталими. Наприклад:

$$T_{\text{Пл}} = \frac{m_{pl}c^2}{k} \approx 10^{32}\ [\text{K}], \tag{33.1}$$

$$\rho_{\text{Пл}} = \frac{m_{\text{Пл}}}{l_{\text{Пл}}^3} \approx 10^{96}\ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}\ , \tag{33.2}$$

де $m_{\text{Пл}}$ – планківська маса і $l_{\text{Пл}}$ – планківська довжина.

Розширення Всесвіту веде до зниження його густини за законами, які можуть бути узгоджені з різними спостережними астрономічними даними. В основі розуміння утворення елементарних частинок лежить два відомі співвідношення, що пов'язують енергію E з масою ($E = mc^2$) і температурою ($E = kT$). Прирівнюючи їх, одержимо формулу для маси елементарної частинки, яка утворюється, в залежності від того, яка була температура Всесвіту:

$$m \le \frac{kT}{c^2}. \tag{33.3}$$

Частинки народжуються парами в результаті зіткнення двох γ-квантів: «частинка-античастинка» (*particle* – від *англ.*, з зарядом «+/–»), також як і анігілюють під час їх зіткнення, що дає підстави представити цей процес у вигляді:

$$\gamma + \gamma \rightleftarrows particle^{+} + particle^{-}, \tag{33.4}$$

де під частинками розуміються пари: (p^+, p^-), (e^+, e^-) тощо.

---

[111] Метод аналізу розмірностей (у фізиці) – вивчає числові незмінні величини (інваріанти) певної розмірності, які можуть бути отримані в результаті комбінації (множення та ділення) незалежних фізичних сталих.

Ті пари частинок, що не встигли анігілювати, «залишилися» у Всесвіті і відіграли важливу роль, коли його густина знизилася до ядерних значень, а температура до $T \approx (1–2)\cdot 10^9$ K. Такі умови існували всього близько 1000 с після того, як вік Всесвіту досягнув віку 1 с. За цей час устигла пройти низка реакцій ядерного синтезу, в результаті чого утворилося за масою близько 75 % ядер Гідрогену, 25 % – ядер Гелію-4, не більше ≈ 0,01 % загальної маси припадало на дейтерій ^{2}D (протон + нейтрон), інших елементів – ще набагато менше. Впродовж наступних 380 тис. років жодні ядра хімічних елементів не виникали, а Всесвіт остиг до температури $T \approx 3000$ K, що створило умови для завершення *процесу рекомбінації* атомів Гідрогену: тобто ядра об'єдналися з електронами. За таких умов фотони перестають активно взаємодіяти з речовиною. Це дає їм змогу вільно пересуватися у просторі й проявити себе через 13,8 млрд років (сучасне значення віку Всесвіту) у вигляді *реліктового фонового випромінювання*. Таке випромінювання в процесі розширення Всесвіту «остигає» так, що в нашу епоху його значення відповідає температурі всього 2,7 K.

Перші об'єкти. Початок рекомбінації атомів Гідрогену ототожнюється з кінцем у Всесвіті ери випромінювання і настанням ери речовини. Саме в цей період часу, коли середня густина речовини Всесвіту знизилася до значення ~ 10^{-17} кг/м^3, виділилися перші фрагменти, спроможні стискатися під дією гравітації. Це дає змогу застосувати до таких фізичних умов, що склалися, формулу Джинса. Для температури і густини речовини часів первинної рекомбінації це відповідає значенню $M_J \sim 10^5\ M_\odot$. Це недостатня маса для утворення первинних галактик, але достатня для виникнення зір з чисто воднево-гелієвим складом. Саме такі зорі й вважаються першими об'єктами, які утворилися у Всесвіті. За проведеними дослідженнями максимальні маси таких зір можуть сягати 500 $M_\odot$, а можливо, й більше.

Воднево-гелієві зорі, маса яких потрапляє в інтервал 140–260 $M_\odot$, після вигоряння водню вибухають як наднові без утворення зоряного залишку, а зорі з меншими і більшими масами за вказаний інтервал перетворюються в чорні діри без помітного розсіяння ядер важких хімічних елементів у міжзоряний простір. Утворення *перших зір* передбачає «забруднення» первинного реліктового газу важкими хімічними елементами в результаті вибухів наднових зір. Такий процес супроводжується передачею значної енергії навколишньому міжзоряному газу і нагріванню його до температури ~ 10^7 K. Це викликає *реіонізацію* (тобто повторну іонізацію) міжзоряного середовища і припинення первинного зореутворення. В процесі остигання

такого газу виникають умови для утворення фрагментів з масами Джинса, сумірними з масами протогалактик. Отже, саме після декількох сотень мільйонів років після утворення перших зір виникли умови для утворення перших галактик.

Утворення й еволюція космічних об'єктів упродовж існування Всесвіту. Збагачення міжзоряного газу і його нагрівання первинними надновими зорями відбувається в режимі розширення системи. Гравітаційна енергія фрагментів, що виникають у такому середовищі, менша за теплову, тому вони є нестійкими і не можуть бути вихідними протосистемами. Під час охолодження такої протосистеми створюються умови для послідовного утворення фрагментів і їх структур з масами від типових для скупчень галактик до галактичних і скупчень зір.

Перше масове виникнення галактик прослідковується, починаючи з віку Всесвіту – близько 400–500 млн років. Цей процес продовжувався наступні 4,5–5 млрд років. У перші 1–2 млрд років виникли в галактиках населення зір, що належать їх сферичним складовим. У нашій Галактиці в цей час виникло гало з кулястими скупченнями зір, що входять до його складу.

Подальша еволюція Галактики пов'язана з виникненням у неї диска. Максимум зореутворення і в Галактиці, й у Всесвіті припадає на його вік – 4 млрд років. Коли вік став у два рази більшим, почала утворюватися Сонячна система. Імовірніше вона є наслідком утворення і подальшої *динамічної еволюції*[112] розсіяного зоряного скупчення, яке виникло з молекулярної хмари, що занурилася в рукав Стрільця. Покинувши цей рукав, за декілька мільярдів років це зоряне скупчення розпалося, поповнивши поле диска Галактики зорями та субзорями.

У більшості вік галактик є сумірним з нашою Галактикою. Але спостерігаються й більш молоді зоряні системи, що містять зорі з більшим вмістом металів, ніж населення II. До таких систем відноситься Місцева зоряна система, яка має всі ознаки галактик. Вона утворилася та почала формуватися всього 500 млн років тому. Її маса на порядок більша наймасивніших кулястих скупчень. МЗС містить зоряні системи меншого ступеня ієрархії: асоціації, зоряні скупчення та кратні зорі й субзорі. Вона має осьове диференціальне обертання. Вважається, що вона виникла в результаті взаємодії міжгалактичної хмари (яка опустилася на Галактику) з газопиловою складовою диска. Отже, якщо таке явище є типовим, то сучасне утворення карликових внутрішніх галактик слід очікувати саме за таким механізмом.

---

[112]Динамічна еволюція – розвиток систем під дією сили гравітації. Зоряні скупчення в процесі такої еволюції втрачають свої компоненти, що веде до повного їх розпаду.

Те, що розміри Місцевої групи є наслідком дій законів всесвітнього тяжіння та відштовхування (див. розд. 22), можна вважати аргументом на користь того, що вона утворилася в епоху рекомбінації атомів Гідрогену і еволюціонує з тих часів як відокремлена структура. Є аналогічні відповідні розрахунки й щодо інших груп галактик на користь такого розвитку подій.

Великомасштабна структура розподілу галактик формувалася у відповідності до їх розвитку в первинних неоднорідностях, які виявлені у флуктуаціях реліктового випромінювання (рис. 33.1).

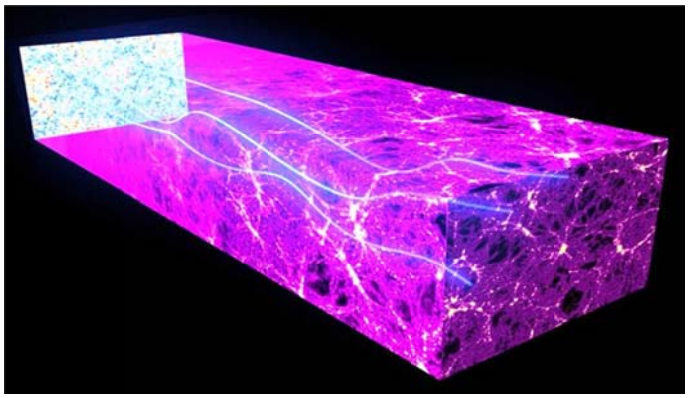


Рис. 33.1. Реліктове випромінювання (його фрагмент наведений у лівій верхній панелі) рухаючись крізь матерію Всесвіту (голубі хвилясті лінії) відхиляється за рахунок дії гравітаційного лінзування. Урахування цього ефекту (за результатами спостереження так званої B-моди поляризації реліктового випромінювання) дає змогу за певною програмою розрахувати карту Всесвіту на наш час (панель у правому нижньому боці) і зіставити її зі спостережними даними щодо реального розподілу галактик

Такий процес згодом і сформував комірчасту структуру Метагалактики (рис. 33.2).

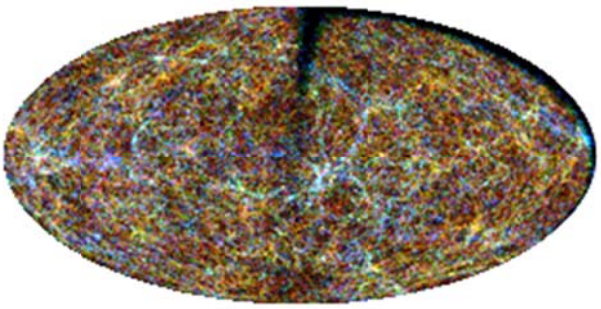


Рис. 33.2. Розподіл 1 600 000 галактик на небесній сфері за даними ІЧ-огляду. Вплив пилу Молочного Шляху відобразився у вигляді темної діагональної полоси та по краю зображення

34. Життя у Всесвіті

У процесі постановки наукової задачі про пошук життя за межами Землі необхідно визначитися з тим, по-перше, що таке життя, а по-друге, з методами, якими цей пошук можна здійснювати.

Поки що крім земної інші форми життя не відомі, хоча, можливо, десь у Всесвіті вони й існують. Тому наукова постановка задачі полягає в тому, що слід поки що обмежитися тією формою життя, яка існує на Землі, оскільки це «науковий факт». Для існування такої форми життя є відповідні фізичні умови, в межах яких вона може існувати. Такі ж умови слід шукати за межами Землі. Існування істотно інших форм життя слід віднести до області наукової фантастики.

Щодо методів та напрямів пошуку, то в наш час принципово є два: прямі – якими ведуться пошуки життя за допомогою міжпланетних станцій на інших планетах Сонячної системи, та дистанційні – які проводяться на базі астрономічних досліджень за її межами.

Що таке життя? Земні живі організми складаються з вуглецевих з'єднань і води, які звуться органічними сполуками. Вони можуть бути одночасно й окиснювачами, і відновниками, і кислотами, й основами, вступати в реакції приєднання, відщеплення і обміну. В земних умовах енергією для функціювання життя є сонячне випромінювання та кисень. Під їх дією та за їх участю у органічних сполук створюються умови для фотосинтезу й участі в оборотних процесах «окислення ↔ відновлення» з киснем. Оскільки Карбон може брати участь у формуванні хімічних зв'язків з іншими атомами, хімія таких органічних сполук достатньо різноманітна та дає можливість вибудовувати складні багатофункціональні молекули, їх своєрідні ряди й функціональні групи, необхідні для перебігу реакцій обміну речовин і відтворення. За таких загальних умов до «функціювання життя» можна представити й інші не вуглецеві форми, в яких основою життя зазначають такі хімічні елементи, як Силіцій, Фосфор, Нітроген. Оксиген міг би бути замінений Хлором чи Сульфуром. Як альтернатива води розглядається амоніак (NH_3), плавикова (HF) чи синильна (HCN) кислоти. Але в будь-якому разі слід мати на увазі ще й умови зовнішнього середовища.

Очевидно, що різні форми життя еволюціонують: від більш примітивних до більш складних. Існування земної цивілізації припускає подібний розвиток життя і в інших світах. Більше того, оскільки життя на Землі розвивалося на інтервалі часу, меншому, ніж вік зір, у яких відкриті земноподібні планети, не слід виключати й існування більш розвинених цивілізацій у Всесвіті.

Життя в Сонячній системі (за межами Землі). Нині вважаються найбільш ймовірними позаземними кандидатами, де є або було життя

в минулому: Марс і супутники Юпітера та Сатурна – Європа та Титан відповідно. Вибір Марса і Європи пов'язаний з наявністю рідкої води як розчинника в клітинах земних організмів. Виявилося, що на Марсі в районах полярних льодяних шапок можуть тимчасово створюватися умови для існування води в рідкому стані. Не виключається і на Марсі, і на Європі наявність рідкої води в приповерхневих термальних джерелах. На Європі джерело тепла пов'язується з можливістю існування вулканічної активності на дні прогнозованого океану та нагрівання внаслідок припливної дії на неї Юпітера.

За даними космічного зонду «Кассіні» (2008 р.), на поверхні Титана були виявлені рідкі озера із етану та метану, і цей супутник може мати підповерхневий океан, що складається з рідкої води й амоніаку. Не виключається наявність такого самого океану в приполярній області супутника Сатурна – Енцелада.

Автоматичні міжпланетні станції (АМС) «Вікінг-1/2», які досягли поверхні Марса (1976 р.), взяли проби ґрунту на наявність в ньому життя. Була виявлена певна хімічна активність (якою вважали представники цього проекту за позитивну), однак явних однозначних слідів життєдіяльності «марсіанських» мікроорганізмів виявити не вдалося. Дослідження, що проводилися АМС «Фенікс» (2008 р.), у місці посадки виявили хлорну кислоту – виключно сильний окиснювач, наявність якого суперечить наявності життя, в той час як рівень солоності марсіанського ґрунту виявився все ж допустимим для його розвитку. В пробах, взятих у породах, вік яких становить 3,5 млрд років, марсоходом «К'юріосіті» (2012 р.) виявлено органічні молекули, що вказує на те, що в минулому були сприятливі умови для життя.

За даними метеоритних досліджень, знайдені структури, схожі на земні окам'янілості, які в минулому були живими формами (рис. 34.1). До них належать три метеорити, які вважаються прибульцями з Марса. Вони містять мікроскопічні структури, які нагадують скам'янілі бактерії, що звуться біоформами. Все ж однозначного підтвердження щодо позаземного походження цих структур не отримано. Отже, якщо питання щодо існування інших форм життя на інших планетах (включаючи і великі супутники) залишається відкритим, то позаземних цивілізацій в Сонячній системі точно не існує. Якщо б вони були, то упродовж дослідження планет Сонячної системи їх би обов'язково виявили.

Пошук позаземного життя (за межами Сонячної системи). Ідея щодо використання радіоастрономії для зв'язку з іншими цивілізаціями, які такого самого технологічного рівня, як і наша, належить Дж. Кокконі та Ф. Моріссону (1959 р.). Було запропоновано скористатися для цього довжиною хвилі 21 см (частота 1440 МГц), на якій випромінюють

нейтральні атоми Гідрогену – найпоширенішого хімічного елементу у Всесвіті, про що, як передбачалося, «повинні знати» всі високорозвинені цивілізації. За їх розрахунками вже існуючих в той час радіоастрономічних засобів було достатньо для встановлення контакту між цивілізаціями, якщо вони перебувають в околах Сонця.

Першу спробу запропонованим методом пошуку позаземних цивілізацій (ПЦ) здійснив Ф. Дрейк (1960 р.), який вибрав у якості сонцеподібних зір-кандидатів – Тау Кита та Епсилон Ерідана (рис. 34.2). Одне з перших радіопосилань з Землі було здійснено в 1974 році з гігантського 300-м параболоїда обсерваторії Аресібо (рис. 7.5а) вбік кулястого зоряного скупчення М13.

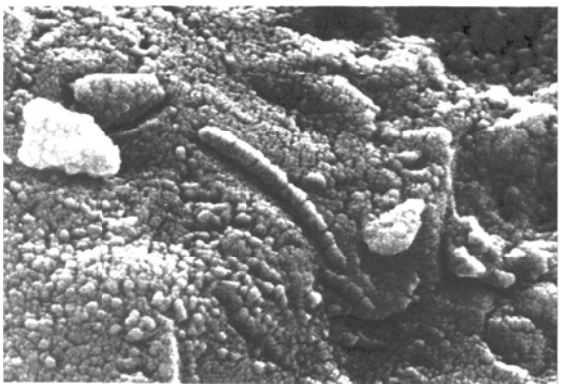
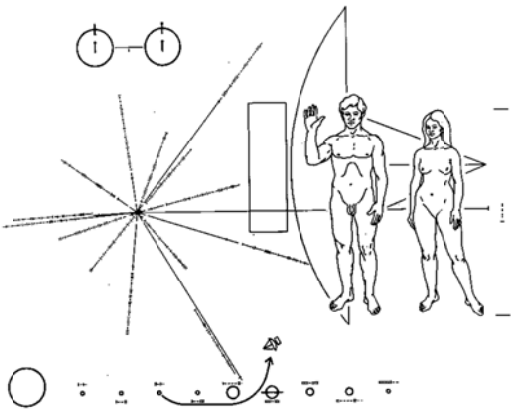


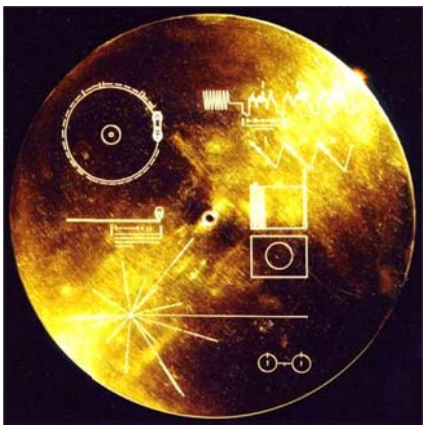
Рис. 34.1. Ймовірні структури бактерій, виявлені в метеориті ALH 84001

Рис. 34.2. Френк Дрейк і радіотелескоп, на якому були проведені перші спроби пошуку позаземних цивілізацій

Першими міжзоряними посланнями, відправленими з космічними станціями, які, вивчаючи планети-гіганти Сонячної системи, згодом покинули її межі, були АМС «Піонер-10» та «Вояджери-1/2», запущеними з Землі у 1972 та 1977 рр. відповідно. На їх борту розташовано послання землян представникам інших цивілізацій (якщо вони їх коли-небудь «перехоплять»). У посланнях (рис. 34.3) вказано місцезнаходження Землі, зображення людей на фоні АМС («Піонер-10»), відправлено відеодиск зі слайдами та звуками земного буття («Вояджери-1/2»). Нині вони вже покинули межі Сонячної системи й перебувають у міжзоряному просторі: «Піонер-10» рухається в бік зорі Альдебаран (околи якої досягне через 2 млн років); «Вояджер-1» – рухається в бік сузір'я Жирафа і через 40 тис. років пролетить на відстані 15 трлн км (1,6 св. років) від зорі АС+79 3888; «Вояджер-2» – теж через 40 тис. років пролетить приблизно на тій самій відстані (1,7 св. років) повз зорю Росс 248, що розташована в сузір'ї Андромеди.



а



б

Рис. 34.3. Перші (не радіо-) послання в космос відправлені на АМС «Піонер-10» – а та «Вояджери-1/2» – б

За перше 60-річчя пошуку сигналів штучного походження було досліджено тисячі зір у радіодіапазоні на частотах 1200–3000 МГц, з використанням надчутливих радіоприймачів. Це десятки наукових програм у рамках загальної міжгалузевої проблеми SETI (від англ.: *Search for Extraterrestrial Intelligence* – пошук ПЦ). Епізодично заявлялося про випадки виявлення сигналів нібито позаземного походження, а останнім часом і в околі виявлених екзопланет. Але однозначного підтвердження штучності сигналів немає. Не виявлено сигналів розумного позаземного походження і спеціально створеним у 1984 році некомерційним Інститутом SETI (США).

Тести

6.1. Який головний процес лежить в основі утворення протосистем певного рівня?

6.1.1. Гравітаційної фрагментації.

6.1.2. Каскадної фрагментації.

6.1.3. Плазмової фрагментації.

6.1.4. Гідродинамічної фрагментації.

6.1.5. Магнітно-гідродинамічної фрагментації.

6.2. Що таке маса Джинса? Це маса речовини,

6.2.1. Що виділяється в процесі фрагментації системи більш високого рівня за певного значення напруженості магнітного поля та температури;

6.2.2. Стійка до дії теплової енергії, яка виділяється під час стиснення фрагменту;

6.2.3. Яка обумовлена певною температурою та густиною за умови, що гравітаційна енергія фрагменту, яка виділяється, перевищує теплову енергію:

6.2.4. Яка обумовлена певною температурою та густиною за умови, що теплова енергія фрагменту перевищує гравітаційну енергію;

6.2.5. Яка обумовлена певною температурою та густиною за умови, що теплова енергія фрагменту урівноважує гравітаційну енергію.

6.3. Чи завжди маса протосистеми, що виділилася в процесі фрагментації, дорівнює масі системи нульового віку?

6.3.1. Завжди.

6.3.2. Ні, це залежить від їх хімічного складу.

6.3.3. Так, оскільки це не залежить від первинного значення моменту імпульсу протосистеми.

6.3.4. Маса протосистем завжди більша за масу систем.

6.4.5. Маса систем завжди більша за масу протосистем.

6.4. Які максимально можливі ключові стадії еволюції проходить зоря? Їх

6.4.1. Три:
- головна послідовність,
- гіганти,
- білі карлики;

6.4.2. Три:
- протозоря,
- головна послідовність,
- зоряні залишки;

6.4.3. Чотири:
- протозоря,
- головна послідовність,
- гіганти,
- зоряні залишки;

6.4.4. Чотири:
- протозоря,
- головна послідовність,
- гіганти,
- чорні діри;

6.4.5. П'ять:
- протозоря,
- головна послідовність,
- субгіганти,
- гіганти,
- зоряні залишки.

6.5. Які основні стадії проходить субзоря в своїй еволюції? Це:

6.5.1.
- фрагмент нульового віку,
- ядерна фаза,
- коричневий карлик;

6.5.2.
- протозоря,
- ядерна фаза,
- стадія головної послідовності;

6.5.3.
- ядерна фаза,
- стадія головної послідовності,
- зоряний залишок;

6.5.4. • протозоря,
• ядерна фаза,
• стадія головної послідовності,
• чорний карлик;
6.5.5. • стадія головної послідовності,
• синій карлик.

6.6. Які основні стадії проходить планета в своїй еволюції? Це:
6.6.1. • фрагмент нульового віку,
• фази стискання та гравітаційної диференціації,
• остигання;
6.6.2. • фаза коагуляції з планетезималей,
• протопланета;
• фаза стискання,
• гравітаційної диференціації та розшарування на основні складові;
6.6.3. • протопланета,
• фаза формування ядра,
• фаза формування мантії, кори та атмосфери;
6.6.4. • планетезималь,
• протопланета,
• фаза гравітаційної диференціації,
• формування материків;
6.6.5. • фаза стискання та розігріву,
• виділення ядра,
• остигання.

6.7. Формування баріонної речовини включає наступну послідовність процесів:
6.7.1. Баріогенезис, утворення елементарних частинок, рекомбінація з появою первинних атомів Гідрогену та Гелію;
6.7.2. Утворення протонів і електронів, проходження первинних ядерних реакцій, баріогенезис та утворення атомів Гідрогену, Дейтерію та Гелію;
6.7.3. • Утворення нейтрино, протонів і електронів,
• баріогенезис,
• утворення ядер Гелію, Дейтерію та Літію з подальшою їх рекомбінацією до утворення відповідних атомів;
6.7.4. • утворення кварків і баріогенезис,
• проходження первинних ядерних реакцій,
• рекомбінація з появою первинних атомів Гідрогену, Гелію, Літію та Берилію,
6.7.5. • утворення бозонів і кварків,
• баріогенезис,
• утворення елементарних частинок,
• проходження первинних ядерних реакцій,
• рекомбінація з появою первинних хімічних елементів.

6.8. До переліку задач, які розв'язуються в астрономії у зв'язку з вирішенням проблеми життя у Всесвіті, входять наступні:

6.8.1. • пошук органічних сполук у Сонячній системі,
• пошук та вивчення землеподібних планет в зоні життя,
• вивчення та узагальнення фізичних умов на планетах, де можливе життя,
• пошук позаземних цивілізацій;

6.8.2. • вивчення НЛО та зв'язок з ними,
• пошук планет у зір,
• зв'язок з позаземними цивілізаціями;

6.8.3. • пошук екзопланет,
• пошук життя в Сонячній системі,
• пошук мазерного випромінювання у зір з екзопланетами;

6.8.4. • пошук мазерного випромінювання та вивчення його природи,
• пошук у зір і субзір планет,
• пошук протопланетних дисків,
• пошук позаземних цивілізацій;

6.8.5. • пошук планет за межами Сонячної системи,
• пошук життя на планетах і супутниках в Сонячній системі за допомогою АМС,
• зв'язок з позаземними цивілізаціями та НЛО.

6.9. Сучасна астрономічна база включає наступні наземні та космічні засоби дослідження:

6.9.1. • оптичні та радіоастрономічні інтерферометри,
• приймачі випромінювання у всьому діапазоні електромагнітних хвиль,
• АМС для вивчення космічних тіл Сонячної системи;

6.9.2. • телескопи з апертурою до 40 м,
• УФ- і ІЧ-високочутливі детектори випромінювання,
• оптичні та радіоастрономічні інтерферометри;

6.9.3. • оптичні та УФ- і ІЧ-телескопи з апертурою до 25–40 м,
• сучасні детектори випромінювання, що працюють в діапазоні від рентгенівського до радіодіапазону,
• телескопи, що встановлені на АМС;

6.9.4. • телескопи з апертурою до 15 м,
• детектори випромінювання, що працюють від гамма- до ІЧ-діапазону,
• космічні засоби, що вивчають Сонячну систему;

6.9.5. • сучасні наземні та космічні телескопи з апертурою до 12 м,
• радіотелескопи та радіоінтерферометри з базою до 1000 м,
• космічні засоби вивчення Сонячної системи та Всесвіту в цілому.

6.10. Сучасні астрономічні дослідження спрямовані на:

6.10.1. • пошук екзопланет,
• вивчення НЛО,
• встановлення закономірностей еволюційних процесів, що відбуваються у Всесвіті,
• та інші;

6.10.2. • пошук життя у Всесвіті,
• будівництво сучасних телескопів та інтерферометрів,
• вивчення сучасної астрології,
• та інші;

6.10.3. • узагальнення знань про фізичні властивості та процеси, що відбуваються в земних і космічних умовах,
• пошук та вивчення нових законів природи,
• вивчення походження й еволюційних процесів у Всесвіті,
• та інші;

6.10.4. • встановлення нових законів, які притаманні космічним умовам,
• вивчення еволюційних процесів, що відбуваються у Всесвіті,
• вивчення природи НЛО,
• та інші;

6.10.5. • узагальнення астрономічних знань,
• походження Всесвіту,
• встановлення структури Всесвіту за межами Хабблівського радіуса,
• та інші.

Контрольні питання

1. У чому полягає фізичне значення формули Джинса?
2. Які фізичні умови мають виникнути для формування протосистем за механізмом самогравітації?
3. У чому схожість та ключова відмінність основних процесів утворення протоситем: самогравітації та коагуляції? Які об’єкти формуються за цими сценаріями?
4. Який етап еволюції закінчився через півтори хвилини після виникнення Всесвіту?
5. Чому первинні зорі з масами $< 140\ M_{\odot}$ і $>260\ M_{\odot}$ майже не вплинули на хімічний склад населення II?
6. Яка роль реіонізації в утворенні перших протогалактик?
7. Яка фізична характеристика зорі визначає основні етапи її еволюції?
8. Які основні етапи формування та еволюції субзір?
9. Як впливає еволюція зір і субзір на еволюцію їх планетних систем?
10. Наведіть основні етапи еволюції Сонячної системи.

ПІДСУМКОВИЙ РОЗДІЛ

35. Роль астрономії в узагальненні знань про природу

Слід виділити п’ять основних напрямів сучасної астрономічної діяльності. Це

- фундаментальні дослідження;
- космографічні дослідження;
- впровадження астрономічних розробок;
- створення нових засобів для астрономічних досліджень;
- освітньо-просвітницька діяльність.

Стан фундаментальних астрономічних досліджень. Зі вступом в дію великих наземних та спеціалізованих космічних телескопів, опанування всього електромагнітного діапазону за допомогою спеціально розроблених високочутливих приймачів випромінювання, досягнення безпрецедентної точності позиційних спостережень в астрономії відбувається чергова революція. Одержано принципово нові астрофізичні результати, пов’язані з застосуванням сучасних результатів досліджень фізики. Побудовано моделі внутрішньої будови перших зір, субзір і екзопланет.

Надзвичайно велике значення має відкриття за даними астрономічних спостережень наднових Іа- типу – темної енергії, яку сьогодні трактують законом всесвітнього відштовхування. З'ясування її природи стосується компетенції і фізиків, і астрофізиків. Вплив її на подальший розвиток Всесвіту – одна з фундаментальних наукових задач поточного сторіччя.

Межі сучасної космографії залежать від засобів, якими вивчається структура Всесвіту. Сонячна система вивчається як традиційними методами спостережної астрономії – за допомогою наземних і космічних телескопів, так і за допомогою АМС. Міжзоряні польоти розглядаються ще як далекоглядна перспектива. Вивчення космосу за межами Сонячної системи доступно лише дистанційно.

Багато існує білих плям щодо структури Нашої зоряної системи, до якої належить Молочний Шлях. Не відома достовірно кількість супутників і параметрів їх орбіт. Це стосується й вивчення Місцевої групи. За межами її виникає інша проблема щодо досліджень карликових галактик, число яких різко зменшується через спостережну селекцію,

спричинену як їх низькою поверхневою яскравістю, так і недостатніми даними щодо відстані до них. Вивчення масивних галактик, їх об'єднань різного ступеня ієрархії дало змогу побудувати їх великомасштабний розподіл, за яким в радіусі 1 млрд світлових років достатньо упевнено проявляється комірчаста структура, що відображається в побудованій трьохвимірній відповідній «мапі». Найбільш віддалені галактики вдалося зафіксувати космічним телескопом імені Хаббла (КТХ), коли вік Всесвіту становив 400 млн років.

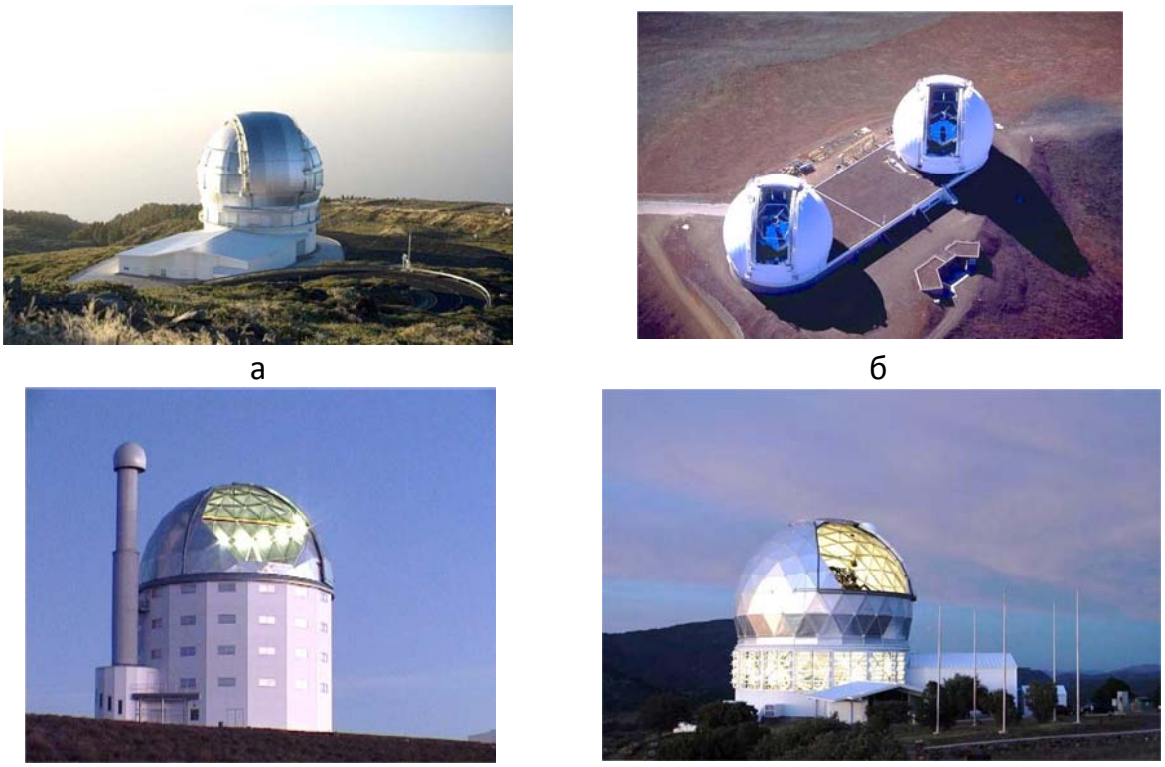
Будуються такі мапи і для більш віддалених галактичних структур. Але на великих відстанях виникають певні проблеми. По-перше, галактики з червоними зміщеннями більше дванадцяти поки що недосяжні для виявлення. По-друге, світло, що проходить з найвіддаленіших куточків Всесвіту, зазнає гравітаційної дії з боку об'єктів, що знаходяться ближче за нього. Внаслідок цього зображення певних ділянок неба сильно спотворюються, а загалом така дія веде до того, що об'єкти, надто віддалені від спостерігача, можуть бути зовсім недоступними для спостереження. Це відповідно стосується й граничної зоряної величини об'єктів (що зветься проникною здатністю), більше за яку «природа» обмежує їх спостереження. Досягнута проникна здатність сучасних наземних телескопів з апертурою 8–10 м доходить до $28–30^m$, КТХ – $31,5^m$ за експозиції 11,3 діб.

Значення впровадження астрономічних розробок. Існують певні напрями в діяльності людини, які залежать від рівня астрономічних досліджень. Перш за все це визначення часу та орієнтація в просторі. Визначення надточних значень часу за атомними еталонами часу порівнюються зі спостереженнями руху осьового обертання Землі. Для орієнтації у просторі за зорями складаються високоточні каталоги зір. Подальше використання їх забезпечує відповідну позиційну точність орієнтації та руху земного чи космічного об'єкта.

Моніторинг Сонця ведеться астрономами з метою попередження людства про прояви його активності. Існує ще й *астероїдна небезпека,* здатна істотно змінити розподіл форм життя, включаючи знищення людства. Контроль за виявленням потенційно небезпечних астероїдів покладений на астрономічні обсерваторії, що їх відкривають, спостерігають і досліджують.

Тісний зв'язок існує між астрономією, космонавтикою та космічними дослідженнями. Перш за все, слід мати на увазі, що всі космічні апарати орієнтуються за зорями. По-друге, значна частина космічних досліджень – це астрономічні програми. Дослідження земної поверхні, як і космічних об'єктів, ведуться через товщу атмосфери (тільки в різних напрямках).

Сучасне астрономічне обладнання та перспективи його оновлення. Найбільші функціонуючі оптичні наземні телескопи є складеними. Це Великий Канарський телескоп, телескопи Кек I і Кек II, Південно-Африканський великий телескоп і його аналог Хоббі–Еберлі телескоп. Загальна апертура цих телескопів – близько 10 м (рис. 35.1).



а б в г

Рис. 35.1. Найбільші у світі: Великий Канарський телескоп – а; телескопи Кек I і Кек II – б; Південно-Африканський великий телескоп – в; телескоп Хоббі–Еберлі – г

Перебувають у стадії будівництва Гігантський Магелланів 24,5-м телескоп, Тридцятиметровий телескоп і Екстремально Великий телескоп з апертурою 39,3 м (рис. 35.2). Великий арсенал сучасних телескопів працює і в інших діапазонах хвиль: радіо-, міліметровому та інших, включаючи космічні обсерваторії.

а б в

Рис. 35.2. Телескопи, введення в експлуатацію яких заплановано у 2020-тих рр.: а – Гігантський Магелланів, б – Тридцятиметровий, в – Екстремально Великий телескопи

Такі телескопи – достатньо коштовні, високотехнологічні та функціонально складні пристрої. Механічні складові телескопів сягають сотень тонн, для виготовлення їх застосовуються найпередовіші технічні засоби та науково-технічні досягнення. Оптичні складові – взагалі є унікальними: точність виготовлення їх поверхонь сягає десятків часток довжини хвилі. Для забезпечення роботи таких унікальних інструментів розробляються й виготовляються спеціальні високочутливі приймачі випромінювання, комп'ютерні засоби обробки одержаної інформації, відповідна обчислювальна техніка та її програмне забезпечення. Виготовлення найбільших наземних і космічних телескопів відбувається, як правило, за індивідуальними проектами. Тому для досягнення мети розробляються специфічні оригінальні конструктивні рішення, які в подальшому можуть бути використані в інших сферах діяльності. Відтак така діяльність сприяє розвитку й загальнотехнічного прогресу.

Рис. 35.3. Апарат (харківського) планетарію – основна складова планетаріїв як центрів просвітницької діяльності

Підготовка астрономічних кадрів і просвітницька робота. Виявлення інтересу до астрономії починається зі шкільних та позашкільних гуртків, участі в астрономічних олімпіадах та роботі в Малій академії наук (МАН). Шкільна програма надає знання й узагальнює уявлення з елементарної астрономії. Це перший рівень опанування астрономічними знаннями.

Другий рівень – університетська освіта. В Україні фахівці з астрономії готуються на відповідних кафедрах, як правило, фізичних факультетів класичних університетів України. На цих кафедрах отримують професійну астрономічну освіту на двох рівнях: бакалавра й магістра. За наявністю

диплома магістра випускник має право вступати в аспірантуру не лише на теренах України, а й за її межами, де оголошуються на це відповідні набори.

Третій рівень – аспірантура, яка є у всіх класичних університетах та у відповідних закладах Національної академії наук України. Після навчання та захисту дисертації одержується диплом кандидата фізико-математичних наук за однією зі спеціальностей астрономії. Четвертий рівень – захист докторської дисертації на вчений ступінь доктора фізико-математичних наук. Фахівці в галузі астрономії працюють в наукових установах, в освіті, займаються просвітницькою діяльністю.

Центрами просвітницької роботи є планетарії (рис. 35.3). Для широкого кола аматорів проводяться лекції у різних аудиторіях: домах вчених, клубах, в школах, на виробництві тощо. Телевізійні та радіопередачі – важлива складова просвітництва. Вони включають як астрономічну, так і космічну тематики, які тісно пов'язані і доповнюють одна одну.

КЛЮЧОВІ ВИЗНАЧЕННЯ

1. Вступ

Астрономія – наука, що вивчає космічні об'єкти на основі вивчення їх руху й аналізу їх світлового випромінювання.
Телескоп – головний спостережний засіб в астрономії.
Всесвіт – світ, що включає всю просторово-часову структуру матерії, яка виникла після Великого Вибуху.
Метагалактика – область Всесвіту, доступна для його спостереження та вивчення.
Астрономічна одиниця – середня відстань від Землі до Сонця: 1 а.о. = $1{,}496 \cdot 10^{13}$ см.
Парсек – відстань, з якої 1 а.о. спостерігається під кутом 1'': 1 пк = $3{,}09 \cdot 10^{18}$ см.
Світловий рік – відстань, що долає світло, швидкість якого сягає 300 000 км/с, за 1 рік: 1 св. рік = $9{,}46 \cdot 10^{17}$ см = 1/3,26 пк.

ЧАСТИНА 1

2. Астрономічні явища та їх спостереження

Астрономічні спостереження – основа для проведення астрономічних досліджень.
Сузір'я – ситуативна проекція, як правило, яскравих зір на певну ділянку небесної сфери.
Полюси світу – точки перетину продовження земної осі з небесною сферою.
Небесний екватор – велике коло на небесній сфері, рівновіддалене на 90° від полюсів світу: проекція земного екватора на небесну сферу.
Екліптика – велике коло на небесній сфері, впродовж якого спостерігається річний рух Сонця.
Зодіакальні сузір'я – сузір'я, що проектуються на екліптику.
З'єднання – спостереження певних світил в одному сузір'ї.

3. Небесна сфера та системи координат в астрономії

Астрономічні координати – положення світила на небесній сфері, що задається двома кутами (чи дугами) відносно певно заданого великого кола та точок відліку.
Астрономічний горизонт – велике коло, що є перетином з небесною сферою дотичної площини до земної поверхні в точці знаходження спостерігача.
Небесний меридіан – велике коло на небесній сфері, утворене перетином площини, що проходить через точки півночі, півдня та положення спостерігача.
Астрономічна широта – кут між полюсом світу та астрономічним горизонтом.
У дні весіннього та осіннього рівнодень – Сонце сходить та заходить за горизонт точно в точках сходу і заходу.

4. Видимий рух небесних світил

Кульмінація світила – найвище положення світила над горизонтом, яке досягається під час добового його руху в момент перетину з небесним меридіаном.
Найдовший день – трапляється в день літнього сонцестояння.
Найдовша ніч – трапляється в день зимового сонцестояння.
Фази Місяця – різні форми видимої частини його поверхні впродовж геоцентричного руху.
Сонячне затемнення – покриття Місяцем сонячного диска, коли Сонце, Місяць і Земля розташовуються на одній лінії.
Місячне затемнення – потрапляння Місяця в земну тінь, коли Сонце, Земля та Місяць перебувають на одній лінії.
Протистояння планети – положення верхньої планети, що досягається в момент її перетину продовження лінії Сонце – Земля.
Ефект Допплера – зміна істинної довжини хвилі (чи частоти) випромінювання рухомого джерела відносно «нерухомого» спостерігача.

5. Час і календар

Доба – усереднене значення тривалості часу між двома кульмінаціями Сонця.
Земна прецесія – зміна напрямку осі обертання Землі у просторі внаслідок припливної дії Сонця та Місяця.
Зміна дати відбувається під час перетину земного меридіана з довготою $\lambda = 180^{o}$: зі сходу на захід; у разі зворотного напрямку – дата змінюється на вчорашню.
Календар – система лічби тривалих проміжків часу, що базується на певних періодичних рухах світил.
Юліанський рік – містить 365,25 діб: три роки по 365 і один високосний – 366 діб.
Наша ера – літочислення, що ведеться від *Різдва Христового*, в якому відлік починається з 1-го (а не нульового) року.
Літочислення – проміжок часу від певного регламентованого початку відліку років.
Хронологія – послідовність певних геологічних, астрономічних й історичних подій.

6. Випромінювання космічних об'єктів

Зоряна величина – несистемна одиниця міри освітленості, яку створює певне астрономічне джерело в місцезнаходженні спостерігача.
Міжнародний астрономічний союз – головний координатор діяльності астрономічної спільноти всього світу, заснований в липні 1919 р. в Брюсселі (Бельгія).
Абсолютна зоряна величина – зоряна величина, яку має світило на відстані 10 пк.
Міжзоряне поглинання – збільшення зоряної величини внаслідок поглинання світла речовиною, що розташована між світилом і спостерігачем.
Болометрична зоряна величина – зоряна величина, яку б мало світило під час спостережень його в усьому діапазоні електромагнітних хвиль.
Світність – кількість виділеної енергії світила зі всієї його поверхні в одиницю часу.
Термодинамічна рівновага – стан фізичної системи, який досягається в умовах її ізольованості від оточуючого середовища та незмінності об'єму, коли залишаються

незмінними основні термодинамічні характеристики, до яких належать, зокрема, температура та тиск.

Абсолютно чорне тіло – фізична система, яка поглинає за будь-якої температури все електромагнітне випромінювання, яке на неї падає, досягає термодинамічної рівноваги з оточуючою стінкою (чи середовищем, наприклад, як у надрах зір), що призводить до встановлення певної температури, яка визначає певний розподіл густини потужності подальшого випромінювання на шкалі електромагнітних хвиль.

Ефективна температура – відповідає виключно значенню температури тіла, що випромінює як абсолютно чорне тіло.

Альбедо – відношення потоку відбитого чи розсіяного поверхнею об'єкта у всіх напрямках до того, що надійшов ззовні.

ЧАСТИНА 2

7. Астрономічні засоби спостережень

Позиційні спостереження – визначають координати світил на певний момент часу.

Панорамне детектування – побудова зображень космічних об'єктів в різних діапазонах хвиль.

Фотометричні спостереження – проведення вимірювань енергетичних характеристик поля випромінювання.

Спектрофотометричні спостереження – проведення вимірювань спектрів поглинання чи випромінювання, шляхом одержання залежності інтенсивності джерела від довжини хвилі.

Поляриметричні спостереження – проведення вимірювань ступеня поляризації світла та кута завороту площини поляризації світла в процесі проходження його через оптично-активні речовини.

Апертура – діючий отвір телескопа, що визначає його робочу площу поверхні, через яку проникають кванти електромагнітного поля.

Роздільна здатність – граничний кут між точками небесної сфери, менше якого вони сприймаються як нероздільні.

8. Визначення руху та геометричних відстаней

Темна матерія – субстанція, яка не взаємодіє з електромагнітним випромінюванням (тобто вона є «невидимою», а проявляється лише завдяки гравітаційній взаємодії або з оточуючими її об'єктами, або з фотонами світла).

Власний рух – зміна координат світил упродовж року.

Річний паралакс – кут, під яким спостерігається усереднений радіус земної навколосонячної орбіти зі світила.

Променева швидкість – зміна відстані до світила впродовж секунди.

Апогей – точка навколоземної орбіти тіла, найвіддаленіша від центра Землі.

Перигей – точка навколоземної орбіти тіла, найближча до центра Землі.

9. Установлення законів орбітального руху

Орбітальний рух світил відбувається під дією всесвітнього тяжіння.
Перший закон Кеплера: планета (як істотно менш масивне тіло) рухається по еліпсу, в одному з фокусів якого розташоване Сонце (чи інше більш масивне тіло).
Другий закон Кеплера: радіус-вектор планети за рівні проміжки часу описує рівновеликі площі.
Третій закон Кеплера: квадрати періодів обертання планет навколо Сонця відносяться як куби великих півосей їх орбіт.
Перша космічна швидкість – мінімально достатня швидкість для руху по коловій орбіті навколо іншого (центрального) космічного тіла.
Друга космічна швидкість – мінімально достатня швидкість для подолання гравітаційного тяжіння центрального тіла.
Ексцентриситет орбіти – числова характеристика, що характеризує її витягнутість.

10. Прямі визначення мас і радіусів

Маса – міра гравітаційної взаємодії (в класичній механіці) чи енергії спокою (в релятивістській механіці).
Спекла в фокусі телескопа – дифракційне зображення світила, яке є результатом його побудови оптичною системою: лінза (неоднорідність в земній атмосфері) – система дзеркал телескопа.
Зоряний інтерферометр – оптичний прилад, який дає змогу визначати відстані між тісними зоряними парами, кутові розміри зір та вивчати розподіл інтенсивності світла по їх поверхні, базуючись на властивостях інтерференції.
Когерентність світла – взаємна узгодженість у часі світлових коливань у різних точках простору, яка характеризує їх можливість до інтерференції.
Горизонтальний паралакс – кут, під яким видно з космічного тіла радіус Землі.
Пряме визначення мас основане виключно на спостереженні руху компонентів подвійних систем.

11. Визначення астрофізичних характеристик

Щодо термінології – доцільно відрізняти терміни елементний та хімічний склад, де у першому випадку йдеться про наявність певного хімічного елементу чи його ядер (як у надрах зір), а у другому – не тільки самих елементів, а й молекул (як в атмосферах космічних тіл чи міжзоряних холодних хмарах).
Локальна термодинамічна рівновага – стан системи, в якій залишаються незмінними в часі макроскопічні термодинамічні величини (до яких належать температура, тиск тощо) в обмеженому об’ємі.
Закон Стефана–Больцмана – визначає залежність густини потужності випромінювання абсолютно чорного тіла від його температури.
Закон зміщення Віна – встановлює залежність між довжиною хвилі електромагнітного випромінювання, на якій потік випромінювання абсолютно чорного тіла певної температури досягає свого максимуму.

Сонячна стала – визначає освітленість Землі Сонцем за межами земної атмосфери, яку зазвичай виражають в енергетичних одиницях (а не в люксах).
Спектр зір – складається з двох складових: неперервного розподілу енергії в спектрі фотосфери та ліній поглинання або випромінювання.

ЧАСТИНА 3

12. Різноманітність космічних тіл у Всесвіті та їх класифікація

Кількість космічних тіл у Всесвіті очікується одного порядку з числом Авогадро – ~ 10^{23}!
Космічні тіла різняться за ключовими характеристиками від десятків до мільярдів разів!
Класи світності на ДГР – віддзеркалюють порівняні розміри космічних тіл, а не їх маси.
Зорі – виділяють в окремий клас через наявність в їх надрах протон–протонного циклу ядерних реакцій.
Планети – виділяють в окремий клас через достатню масу для створення умов проходження гравітаційної диференціації – перерозподілу густини конгломерату планетної речовини вздовж радіуса під дією самогравітації.
Субзорі – проміжний клас космічних тіл між зорями та планетами.

13. Зорі та Сонце

Сферична форма зір – обумовлена рівновагою дії сил гравітації та газового тиску і випромінювання, які є наслідком наявності власного джерела енергії.
Різноманітність зір – обумовлена різними масами й елементним складом, механізмами переносу енергії в їх надрах, темпом зоряного вітру.
Сонце – типова зоря головної послідовності ДГР.
Фотосфера – зовнішній шар зорі, який окреслює її видимий диск

14. Субзорі й планети

Субзорі – не містять умов у центральних областях для перебігу протон-протонного циклу ядерних реакцій.
Атмосфери субзір – містять хмари та можуть характеризуватися певною своєрідною метеорологією.
Планети – формуються у відповідних зонах протопланетних дисків, на хімічний склад яких впливає радіальна диференціація речовини, що і визначає утворення певного їх класу з характерною густиною.
Гори на планетах – можуть слугувати параметром відхилення від гідростатичної рівноваги (що характеризується сферичною формою) та визначати мінімальну планетну масу, враховуючи, що їх висота в цьому випадку максимальна.

Атмосфери планет: наявність залежить від планетної маси та від відстані до центрального тіла; хімічний склад є похідною результату радіальної диференціації протопланетного диска.
Планети Сонячної системи – відображають загальні властивості класифікації і планет, і їх атмосфер.

15. Великі планети Сонячної системи

Великі планети – ті, що розташовані найближче до Сонця та схожі за фізичними властивостями на Землю, а також ті, що на порядок і більше перебільшують її за масою.
Планети земної групи: Меркурій, Венера, Земля і Марс – найбільш схожі за фізичними характеристиками і внутрішньою будовою та відносяться до силікатного типу.
Планети-гіганти: Юпітер, Сатурн Уран і Нептун – перші дві відносяться до воднево-гелієвого типу, останні – до льодяних гігантів.
Великі супутники планет – мають ядра, як і у великих планет.

16. Карликові планети та малі тіла

Карликові планети – мають ядра, на три-п'ять порядків більш масивні за мінімальні маси та не відносяться до великих планет.
Малі тіла – астероїди, комети та метеороїди Сонячної системи.
Астероїди – невеликі за розмірами та масою небесні тіла Сонячної системи різного хімічного складу.
Метеороїди – міні-астероїди з розмірами менше 30 м.
Комети – невеликі льодяно-кам'яні тіла.
Головний пояс астероїдів – зосередження невеликих твердих кам'янистих тіл у Сонячній системі між орбітами Марса і Юпітера.
Кентаври – зосередження менших за карликові планети, як правило, силікатно-льодяних тіл у Сонячній системі між орбітами Юпітера та Нептуна.
Пояс Койпера – зосередження невеликих твердих силікатно-льодяних та льодяних тіл у Сонячній системі за орбітою Нептуна.
Хмара Оорта – зосередження малих тіл у Сонячній системі за межами поясу Койпера.

ЧАСТИНА 4

17. Класифікація зоряних систем

Зоряні системи – гравітаційно зв'язані зорі та інші космічні системи різного ступеня ієрархії.
Зоряні скупчення – зоряні системи, компоненти яких мають спільне походження з обмеженим часом існування.
Зоряні (над)асоціації – зоряні системи, які утворюються в місцях уже існуючих зосереджень зір, мають спільне походження з обмеженим часом існування.

Закон Хаббла–Леметра – космологічний ефект, що описує розширення всесвітнього простору, наслідком якого є спостережуване розбігання (груп) галактик.

18. Поодинокі та кратні зорі й субзорі

Кратні зорі – зоряні системи з обмеженим числом компонентів спільного походження, серед яких є зорі чи субзорі.
Класифікація кратних зір – залежить, як правило, від віддаленості до них та орієнтації орбіт її компонентів до спостерігача, а також від лінійної відстані між компонентами порівняно з розмірами самих компонентів.
Порожнина Роша – область навколо зорі, зовнішнім краєм якої є поверхня рівного гравітаційного потенціалу, яка містить першу точку Лагранжа.
Точки Лагранжа – п'ять положень надлегкого тіла в системі двох масивних тіл, де воно відносно них залишається нерухомим. Перша точка Лагранжа розташована на лінії між цими двома масивними тілами.

19. Планетні системи

Планетна система – окремий випадок поодинокої чи кратної зорі, до складу якої входить хоча б одна планета.
Протопланетний диск – найраніша еволюційна стадія планетної системи.
Гарячі юпітери – короткоперіодичні (1–2 доби) воднево-гелієві планети.
Крихкі планети – різновид гарячих юпітерів зі щільністю нижче 0,5 г/см^3 (гарячий сатурн) за рахунок сильного розігріву центральним світилом, що веде до збільшення їх розмірів.
Планета-сирота – різновид екзопланет, який спостерігається без центрального світила.
SETI-кандидати – землеподібні планети, що перебувають в «зоні життя» та мають достатній вік для не тільки зародження на їх поверхні життя, а й досягнення його розумної форми.

20. Зоряні скупчення й асоціації

Розсіяні зоряні скупчення – зоряні системи неправильної форми, які утворюються в полі (диску) галактик.
Кулясті зоряні скупчення – зоряні системи сферичної форми, які утворюються в гало галактик.
OB-асоціації – протяжні області в областях зореутворення, в яких спостерігаються зорі спектральних класів O та B.
T-асоціації – протяжні області в областях зореутворення, в яких спостерігаються зорі типу T Тельця.
R-асоціації – області, в яких спостерігаються зорі спектральних класів від O до A2 з відбивними газовими туманностями.

21. Галактики

Галактики – наймасивніші зоряні системи, в яких проявляється дія темної матерії.
Карликові галактики – зоряні системи з кількістю менше мільярда зір.
Активні галактики – зоряні системи з настільки потужною світністю, що не може інтерпретуватися за рахунок зоряних джерел енергії.
cD-галактики – наймасивніші та найбільші за розмірами еліптичні галактики.
Домінуючі галактики – найбільші за масою галактики, які спостерігаються в групах і скупченнях галактик.
Надмасивні чорні діри – сягають мас 10^5–10^{11} $M_\odot$ і трапляються в центрах масивних галактик.

22. Об'єднання галактик у різні рівні ієрархічних структур

Баріонна матерія – складається з баріонів (протонів, нейтронів) і електронів.
Фізичний вакуум – простір, що містить віртуальні частинки (які з'являються парами та відразу анігілюють) і не містить реальних елементарних частинок.
Ейнштейнівська сила – трактується законом Всесвітнього відштовхування.
Регулярні й іррегулярні скупчення галактик – мають та не мають ознаки упорядкованої структури відповідно.
Надскупчення галактик – мають ознаки упорядкованої «дископодібної» структури (як у дискових галактик) та прояву дії закону Хаббла–Леметра.
Гіперскупчення галактик – мають «листоподібну» або не визначену (іррегулярну) форму.
Комірчаста структура Всесвіту – великомасштабна неоднорідність просторового розподілу галактик і їх об'єднань різного ступеня ієрархії, більша частина яких зосереджена в перетинках комірок, між якими розташовані великі порожнечі (войди).
Просторово-часова структура Всесвіту – спотворене сприйняття великомасштабної будови Метагалактики через скінченність швидкості світла, коли більш віддалені космічні об'єкти спостерігаються на більш ранній (ніж у подальшому) стадії еволюції.

ЧАСТИНА 5

23. *Сонячна система та її околи*

Космографія – підрозділ зоряної астрономії, що вивчає тривимірну структуру Метагалактики та Всесвіту в цілому.
Сонячна система – планетна система, яка включає Сонце – центральну зорю і всі космічні об'єкти, які його оточують.
Астероїдний пояс – зона в планетній системі, де розташовуються рої астероїдів, метеороїдів, можуть бути в наявності карликові планети, але відсутні великі планети.
Міжпланетний пил – мікрометеори з розмірами менше 0,2 мкм, що гуртуються до площини орбіт великих планет планетної системи.
Зодіакальне світло – прояв на небесній сфері наявності міжпланетного пилу в Сонячній системі.

Проксима – найближча зоря до Сонця (1,83 пк), яка є найбільш віддаленим компонентом потрійної системи Альфа Центравра.
Проксима b – найближча екзопланета до Сонця, є компонентом планетної системи з центральною зорею Проксима.
Галактичне поле – області в диску Галактики, де зосереджені зорі, суборі та їх системи, які не входять в жодні зоряні скупчення.
Пояс Гулда – прояв зосередження яскравих зір (з зоряною величиною яскравіше 4^m), площина гуртування яких не збігається з галактичною площиною.
Відгалуження Оріона – локальна перемичка між галактичними рукавами Стрільця та Персея, в середині якого розташоване Сонце.

24. Наша зоряна система

Галактика (Молочний Шлях) – зоряна система найвищого ступеня ієрархії, до складу якої належить Сонячна система.
Наша зоряна система – Галактика й оточуючі її галактики-сателіти.
Балдж – здуття центральної області Галактики.
Перемичка Галактики – центральна витягнута область в середині балджу, з якої беруть початок галактичні спіральні рукави.
Навколоядерна область Галактики – включає надмасивну чорну діру, оточуючі її менш масивні чорні діри-сателіти та звичайні зорі, що обертаються навколо неї.
Диск Галактики – область, яка визначає її пласку складову.
Гало Галактики – структура сферичної складової, яка віддзеркалює загальні етапи галактичної еволюції.
Позагалактичні сателітарні пояси – тришарова структура просторового розподілу галактик-сателітів.
Галактика у Великому Псі – найближча до Сонячної системи (8 кпк) та найближча до центра Галактики (10 кпк) галактика-сателіт.

25. Місцева група галактик

Місцева група – відокремлена просторова область діаметром 1,5–2 Мпк, основними складовими якої є галактики Молочний Шлях і Туманність Андромеди з їх оточуючими галактиками-сателітами.
Підгрупа Молочного Шляху – Наша зоряна система.
Підгрупа Туманності Андромеди – однойменна галактика з її галактиками-сателітами. Це ще й найближча до Нашої зоряної системи підгрупа галактик.
Периферія Місцевої групи – просторова область, що включає галактики, що не належать до жодної з двох підгруп.

26. Місцеве надскупчення

Місцеве надскупчення – дископодібна область, центр якої розташований в напрямку сузір’я Діви і до складу якої входять близько 100 груп галактик, зокрема Місцева група.
Група галактик Маффея – найближча до Місцевої групи (3,0 Мпк).

Місцевий лист – область радіусом близько 7 Мпк і товщиною, сумірною з діаметром типової групи галактик, що включає Місцеву групу і є складовою Місцевого надскупчення.
«Рада гігантів» – 12 найяскравіших гігантських галактик груп, що входять до складу Місцевого листа.
Місцевий комплекс – область радіусом близько 8 Мпк, що включає Місцевий лист, в межах якого починають прослідковуватися «вузли», «волокна» та «порожнечі», характерні для великомасштабної будови Всесвіту.
Скупчення галактик в Діві – структура, що складається з трьох галактичних груп та є центром Місцевого надскупчення.

27. Метагалактика

Метагалактика – доступна для дослідження частина Всесвіту.
Скупчення галактик у Пічі – найближче до Місцевого надскупчення; відстань до нього від Сонця – 19 Мпк.
Великий Аттрактор – надмасивна гравітаційна аномалія, 90 % якої становить темна матерія.
Гіперскупчення Ланіакея – наймасивніше об'єднання галактик, до складу якого входить Місцеве надскупчення та ще близько 100 таких самих структур, включаючи і Великий Аттрактор.
Гіперскупчення Персея-Риб – найближче до гіперскупчення Ланіакея – 77 Мпк.
Місцевий войд – найближчий до Місцевої групи (23 Мпк), зосереджений між гіперскупченнями Ланіакея та Персея-Риб і обмежений Місцевим листом, де розташована наша Галактика.
Структура найбільш віддалених космічних об'єктів – істотно спотворена внаслідок руху фотонів, що вони випромінюють, у гравітаційному полі менш віддалених об'єктів.

28. Істінний рух Землі у космічному просторі

Перелік рухів, в яких бере участь земний спостерігач – не перевищує кількості пальців на руках.
Осьовий рух Землі – визначає зміну дня та ночі.
Рух Землі та Місяця – взаємно збурюється внаслідок дії припливної сили.
Місяць віддаляється від Землі, що спричиняє повільне збільшення протяжності земної доби.
Річний рух Землі навколо Сонця – визначає протяжність земного року.
Нахил земної осі до площини екліптики – зберігається впродовж року у просторі, що веде до зміни кута, під яким падає на поверхню Землі сонячне світло. Саме ця властивість визначає наявність пір року та їх повторюваність з року в рік.
Сонце впродовж галактичного року – бере участь одночасно в двох рухах: навколо центрів поясу Гулда і Галактики.
Наша Галактика і Туманність Андромеди – взаємно зближуються, що, як очікується, призведе до їх об'єднання в одну галактику еліптичного типу.

Місцева група – одночасно й обертається навколо центра Місцевого надскупчення, й бере участь у космологічному розбіганні (груп) галактик.

ЧАСТИНА 6

29. Процес утворення космічних об'єктів

Протосистеми – перша стадія еволюції певних визначених космічних об'єктів.
Механізм самогравітації – процес стискання протосистеми за рахунок перебільшення газового тиску гравітаційною силою.
Процес коагуляції – механізм злипання малих (газо) пилових структур у більші.
Маса Джинса – мінімальна маса газового космічного об'єкта, загальний газовий тиск якого урівноважений гравітаційною силою.
Швидкість звуку – швидкість поширення звукових (поздовжніх) хвиль у певному середовищі.
Каскадна фрагментація – послідовність утворення все менш масивних протосистем з більших шляхом самогравітації.

30. Від протооб'єктів до зоряних і планетних систем

Утворення галактик різних типів – залежить від початкових моменту імпульсу та розподілу маси уздовж радіуса протосистеми.
Зореутворення – процес утворення протозір, подальша еволюція яких закінчується формуванням зір різної маси та кратності.
Темп зореутворення – швидкість, з якою утворюються зорі (та субзорі) в зоряних системах різного віку.
Молекулярні хмари – осередки міжзоряного середовища різної маси та з низькою температурою, де Гідроген перебуває в молекулярному стані, найбільш придатні для процесу зореутворення.
Утворення кратних зір і планетних систем – залежить від початкового моменту імпульсу протозір.
Первинна фрагментація – процес утворення протоскупчень з протогалактик.
Наявність диска в галактиках – залежить від темпу зореутворення у вихідній протогалактиці: якщо газ повністю втрачається на утворення зір, в подальшому не виникають умови для формування в такій системі диска.
Час стискання протозорі – залежить виключно від її початкової маси та температури.

31. Еволюція зір

Еволюція зір – залежить від їх початкових мас і належності до тісних подвійних систем.
Еволюція відокремлених і тісних подвійних зір – починають суттєво розрізняти після настання стадії гігантів у компонентів систем.
Зорі – природна «фабрика» утворення хімічних елементів.

Ядерне горіння в надрах зір – відбувається під час перебування зір на стадіях головної послідовності, субгігантів і гігантів діаграми Герцшпрунга–Рассела.
Утворення ядер хімічних елементів – залежить від початкової маси зорі.
Утворення важких ядер – від Купруму до Каліфорнію в Періодичній системі хімічних елементів Менделєєва відбувається під час вибуху зір на стадії наднових.
Утворення відповідних зоряних залишків – залежить від початкових мас зір.
Сонце – перебуває на стадії головної послідовності.
Карбоново-оксигеновий білий карлик – кінцева стадія еволюції Сонця.
Порожнина Роша – внутрішня область, обмежена еквіпотенціальною поверхнею, яка є рівнодійною гравітаційних сил тісних подвійних компонентів.
Симбіотичні зорі – короткотривалий етап в еволюції тісних короткоперіодичних подвійних зір з помірними масами, один із компонентів яких перебуває на стадії гіганта.

32. Еволюція субзір і планет

Субзорі – утворюються, як і зорі, шляхом самогравітації.
Планети – утворюються шляхом коагуляції.
Масивні гідрогено-гелієві планети – можуть утворюватися шляхом самогравітації.
Короткочасна стадія еволюції субзір – ядерне горіння Дейтерію, Літію, Гідрогену, яке залежить від початкової загальної маси.
Основний стан субзір – стискання під дією самогравітації й остигання надр.
Субзорі-океани – певна стадія еволюції, коли поверхню вкриває рідкий водень.
Чорний карлик – кінцева стадія еволюції субзір.
Протопланети – початкова стадія еволюції планет, яка завершується формуванням центрального ядра, густина якого більша за середнє значення.
Вулканічна діяльність – виверження речовини мантійного шару на тверду поверхню кори планет.
Магнітне поле планети – генерується розплавленим Ферумом в її ядрі.
Планетні атмосфери – хімічний склад змінюється впродовж еволюційних процесів, що відбуваються в верхніх шарах планети.

33. Загальний розвиток Всесвіту

Космологічний базис для космогонії – визначається набором фізичних характеристик і умов, які стали наслідком процесів, що відбувалися у ранньому Всесвіті, коли ще не утворилися космічні тіла та зоряні системи.
Метод аналізу розмірностей (у фізиці) – вивчає числові незмінні величини (інваріанти) певної розмірності, які можуть бути отримані в результаті комбінації (множення та ділення) незалежних фізичних величин.
Анігіляція – реакція зникнення частинок і античастинок в результаті їх зіткнення і перетворення на чисту електромагнітну енергію.
Рекомбінація (в космології) – епоха в еволюції Всесвіту, впродовж якої електрони та протони формували атоми Гідрогену.

Реліктове випромінювання – теплове випромінювання, яке виникло в епоху первинної рекомбінації Гідрогену.
Перші зорі – космічні об'єкти, що утворилися першими після первинної рекомбінації Гідрогену.
Перші галактики – перші зоряні системи, які утворилися після реіонізації первинного міжзоряного газу.
Динамічна еволюція – розвиток фізичних систем під дією сили гравітації. Зоряні скупчення в процесі такої еволюції втрачають свої компоненти, що веде до повного їх розпаду.
Великомасштабна структура розподілу галактик – наслідок еволюції первинних неоднорідностей, що спричинили флуктуації в реліктовому випромінюванні, які доступні для спостережень.

34. Життя у Всесвіті

Земні форми життя – сформувалися в певних фізичних умовах, їх існування – науковий факт.
Земні живі організми – складаються з органічних сполук на базі карбнових сполук, для яких розчинником є вода.
Енергія для функціонування життя – забезпечується сонячним випромінюванням і киснем, під дією яких відбувається фотосинтез і оборотні процеси.
Позаземне життя – за істотно інших від земних умов зовнішнього середовища, розглядаються альтернативи: Карбону – Силіцій, Фосфор і Нітроген; Оксигену – Хлор і Сульфур; воді – амоніак, метан, етан та плавикова й синильна кислоти.
Загальна властивість життя – еволюція від менш примітивних до більш складних форм.
Тривалість життя на Землі – менше віку Сонця, відтак у землеподібних екзопланет, які розташовані в зонах життя та обертаються навколо зір, вік яких перевищує сонячний, не слід виключати існування більш розвинених цивілізацій за земну.
Найбільш ймовірні кандидати в Сонячній системі – планета Марс; супутники Юпітера – Європа та Сатурна – Титан і Енцелад.
Позаземні цивілізації – в Сонячній системі відсутні; за її межами – не виявлені.

35. Роль астрономії в узагальненні знань про природу

Фундаментальні дослідження – наукова діяльність, спрямована на вивчення ключових явищ природи.
Космографічні дослідження – астрономічна діяльність, спрямована на встановлення тривимірної картини світу.
Астрономічні розробки – наукові напрацювання астрономічних досліджень, спрямовані на практичне використання в повсякденній діяльності.
Астрономічні засоби – обладнання, що забезпечує проведення астрономічних спостережень.
Освітньо-просвітницька діяльність – заходи, що спрямовані на одержання астрономічної освіти та популяризацію астрономічних знань.

ПОКАЖЧИК ТЕРМІНІВ

Абсолютно чорне тіло
Адаптивна оптика
Азимут
Акреційний диск
Альбедо
Апогей
Апоцентр
Апполони
Астероїди
Астероїдна небезпека
Астрономічна (і)
- координати
- широта
- одиниця

Астрономічний
- горизонт
- світогляд

Астрономія
- три основні задачі
- практична
- предмет дослідження

Афелій

Базова лінія
Барицентр
Білі карлики
- гелієві
- С-О-

Блазари
Боліди
Болометрична поправка

Велика Червона Пляма
Велике протистояння Марса
Великий білий овал
Вертикал
Вибух наднових
Випромінювання
- чорнотільне

Висота Сонця
Візуалізація
Вісь світу
Власні рухи
- по прямому сходженню
- по схиленню

Внутрішній фотоефект
Войди
Всесвіт
- інфляційна модель
- просторово-часова структура

Всесвітнє тяжіння
Всесвітній час

Газопиловий тор
Галактики
- активні
  = інфрачервоні
  = лацертиди
  = радіо-
  = сейфертовські
- взаємодіючі
- газопилова
- гало
  = внутрішнє
  = зовнішнє
  = молоде
  = старе
- гіперскупчення
- домінуючі
- еліптичні
- з перемичкою
- камертонна класифікація
- карликові
  = компактні

= сфероїдальні
= ультракомпактні
= хоббіти
– клоччаста
– лінзовидні
– неправильні
– підгрупи
– сателіти
– сімейства
– скупчення
= іррегулярні
= регулярні
– спіральні
– структура
= балдж
= бар
= гало
= диск
≡ спіральний узор
– cD-
– N-
Галактичне поле
Галактичний рік
Галактичні складові
– пласка
– сферична
– центр
– сателітарні пояси
=перший
=другий
=третій
Галілеєві супутники
Гальмівне випромінювання
Гармонічний процес
Гарячі юпітери
Гігантський гексагон
Гігантські молекулярні хмари
Гідростатична рівновага
Годинниковий механізм
Головний спостережний засіб
Головний пояс астероїдів
Горизонт астрономічний (математичний)
Гравітаційна диференціація
Гравітаційні лінзи
Дати
– григоріанські
– юліанські
Деферент
Джети
Динамічна еволюція
Диски
– навколозоряні
– протопланетні
Діаграма Герцшпрунга–Рассела
Дні рівнодення
– весняне
– осіннє
Дні сонцестояння
– зимове
– літнє
Довгота
– галактична
– географічна
– екліптична

Еквівалентна фокусна відстань
Еквіпотенціальна поверхня
Екзопланети
Екліптика
– площина
– полюси
Ексцентриситет
Елонгація
Епіцикл
Ери
– випромінювання
– речовини
Ефект Допплера
Ефективність астрономічних інструментів

Живі організми земні

Задача двох тіл
Закон
– Вебера–Фехнера (психофізичний)
– зміщення Віна
– Планка

– Стефана–Больцмана
– Хаббла–Леметра
Закони Кеплера
– перший
– другий
– третій
= узагальнений
Затемнення
– місячні
– сонячні
= повне кільцеве
= часткове
Зеніт
Зміщення спектральних ліній
– синє
– червоне
Зодіакальне світло
Зона життя
Зореутворення
– активне
– області
– темп
Зорі
– атмосфери
– зона перенесення теплової енергії
– основні населення
– повністю конвективні
– подвійні
– поодинокі
– потрійні
– чотирикратні
– ядро
Зоряна величина
– абсолютна
= боломерична
– нуль пункт
– гранична
Зоряний
– вітер
– залишок
Зоряні
– асоціації
= OB-
= R-
= T-
– інтерферометри
– надасоціації
– скупчення
= кулясті
= розсіяні
З'єднання

Інтерферометри
– база

Календарі
– астрономічні
– побутові
– юліанський
Карбоно-нітрогеновий цикл
Карлики
– білі
– коричневі
– червоні
Квазари
Квазізамкнута система
Квантовий вихід
Кентаври
Класи світності
– білі карлики
– гіганти
– гіпергіганти
– головна послідовність
– субгіганти
– субкарлики
– яскраві гіганти
Коагуляція
Когерентність
Коефіцієнт Погсона
Комети
– кома
– хвости
– ядро
Конгломерат
Конденсат
Конфігурації планет
Координати
– вибрані площини
– особливі

= кути
= точки
– полюси
– прямокутні
– розмірність
– сферичні
– точки відліку
Корона (зоряна)
Космічна матерія
– види
= баріонна
= випромінювання
= темна
= фізичний вакуум
Космічні швидкості
– перша
– друга
Космографія
Кратер
Кратні зорі
– астрометрично-подвійні
– візуально-подвійні
– затемнювано-подвійні
– оптично-подвійні
– спектрально-подвійні
– тісні подвійні
Кратність зір і субзір
Крива блиску
Кульмінація
– нижня
Кутова висота

Лінії
– випромінювання
– поглинання
Літочислення
Локація
– лазерна
– радіо-

Малі тіла
Маса Джинса
Мерехтіння зір
Метагалактика
– комірчаста структура
– структура
Металічний водень
Металічність
Метеори
Метеорит
Метеороїди
Метод аналізу
Методи астрономічних досліджень
Метод ядерної космохронології
Механізм самогравітації
Міжзоряне поглинання
Міжпланетний пил
Міра якості зображення
Місце дислокації (обсерваторій)
Місцевий полудень
Місцевий сонячний час
Місяць
– сидеричний
– синодичний
Місячні фази
– молодик
– остання чверть
– перша чверть
– повний Місяць
Молекулярна хмара
– гігантська
Монтування телескопів
– азимутальне
– екваторіальне
– нерухоме

Надир
Наднові
– типу Ia,
Наша ера
Небесна сфера
Небесний
– екватор
– меридіан
Невидимі супутники
Нейтронні зорі
Непрозорість

«Обезводнення» планети
Об’єднання галактик

– гіперскупчення
– групи
– надскупчення
– підгрупи
– скупчення
Об’єкти SETI
Оптична товща
Орбітальний рух
Основні спостережні методи

Панорамне детектування
Паралакс
– геометричний
– горизонтальний
– річний
Парниковий ефект
Перенос зоряної енергії шляхом
– конвекції
– випромінювання
Перицентр
Перігей
Перша точка Лагранжа
Перші зорі
Планетезималі
Планети
– атмосфера
– верхні
– воднево-гелієві
– вулканічна діяльність
– гіганти
– земної групи
– земного типу
– карликові
– кора
– льодяні
– льодяні гіганти
– магнітне поле
– мантія
– металеві
– нижні
– силікатні
– сироти
– ядро
Планетні системи
– P- типу
– S-типу
Планківські величини
– густина
– температура
– час
Полюси світу
– північний
= Галактики
– південний
Поляриметрія
Полярне кільце (у галактик)
Порожнина Роша
Пояс Койпера
– розсіяний
Поясний час
Правило важеля
Прецесія земної осі
– повний цикл
Протон–протонний цикл
– усічений
Протопланети
Протосистеми
– протогалактики
– протозорі
– протоскупчення
Протяжність
– доби
= зоряної
= початок
= сонячної
– місяця
– року
= сидеричного
= синодичного
= тропічного
Процес
– «надзбагачення» ядер нейтронами
– нейтронізації
– коагуляції
– рекомбінації
=первинний
Пряме піднесення
Прямий метод визначення мас
Прямий рух

Пульсари
Радіометри
Реголіт
Реіонізація
Реліктове фонове випромінювання
Реліктовий
– Дейтерій
– Літій
Релятивістський джет
Речовина
– баріонна
Рік
– високосний
– григоріанський
– юліанський
– світловий
Рух
– власний
– видимий
= Сонця
– зворотний
– прямий
– річний

Світність
Сила
– всесвітнього тяжіння
– Ейнштейнівська
Симбіотичні зорі
Системи координат
– екваторіальна
– екліптична
– галактична
= прямокутна
= сферична
горизонтальна
Скупчення
– кулясті
– розсіяні
Сонцестояння
– літнє
– зимове
Сонячна (і)
– грануляція
– корона
– корональні
= арки
= діри
= петлі
– плями
– протуберанці
– спікули
– стала
– темні волокна
– факели
– флокули
– хромосфера
Спекли
Спекл-інтерферометрія
Спектральна класифікація
Спектральна лінія
– відносне розширення
– допплерівська ширина
– інтегральна яскравість
Спектральний клас
– гарвардський
Спектрофотометрія
Спостережні методи
– основні
– позиційні
– фотометричні
– спектрофотометричні
– поляриметричні
– візуальні
Стадія планетарної туманності
Стаціонарна орбіта
Стаціонарний стан
Субзорі
– атмосфера
– зона часткового виродження електронів й іонізації речовини
– океани
– ядро
Сузір’я
– зодіакальні
Супервойди
Супер (чи великі) землі
Схилення
Сфероїд

Твердотільні фотоприймачі
Телескоп(и)
– апертура
– види
= гамма
= рентгенівські
= оптичні
= радіо-
– космічні
– кутове збільшення
– кутовий розмір
– масштаб зображення
– монтування
= альт-азимутальні
= екваторіальні
– окуляр
– основні складові
– проникна сила
– рефлектори
– рефрактори
– роздільна здатність
= дифракційна межа
– складені
Темна матерія
Температура
– ефективна
Температурний баланс
– рівняння
Теорема
– про полюси світу
– Піфагора (узагальнена)
Теплова радіація
Термодинамічна рівновага
– локальна
Точки
– півдня
– півночі
– сходу
– заходу
Точкове когерентне джерело
Тригерні механізми
Туманності

Ударні хвилі

Фідерна лінія
Форми життя
– напрями пошуку
– в Сонячній системі
Формула
– Джинса
– Клапейрона
Фотосфера
Фрагментація
– каскадна
– первинна
–
Функція Гаусса

Хімічна рівновага
Хронологія

Цикл сонячної активності
Цикл ядерних реакцій

Числа Вольфа
Чорні діри
– надмасивні
Чорні карлики

«Шарове джерело»
Швидкість
– звуку
– кеплерівська
– поточна
– променева
– просторова
– секторіальна
– тангенціальна
Широта
– астрономічна
– галактична
– екліптична

ПОКАЖЧИК АСТРОНОМІЧНИХ ОБ’ЄКТІВ

Альтаїр
Альфа Центавра
Андромеда
Антарес
Аріель
Арктур
Арочне зоряне скупчення

Бенетнаш
Бета Живописця
Близнята

Варуна
Вега
Великий (а)
- Ведмедиця
- Магелланова Хмара
- Пес

Венера
Веста
Відгалуження Оріона
Візничий
Вітрила
Вовк
Водолій
Волосся Вероніки
Всесвіт

Галактика
- Молочний Шлях, Чумацький Шлях
- A1413
- Барнарда
- Водоверть

Галактика в
- Гідрі
- Діві
- Киті
- Насосі
- Секстант А
- Стрільці
- Тукані
- Трикутнику

Ганімед
Гідра
Гіперскупчення
- Геркулеса
- Ланіакея
- Персея-Риб
- Шеплі

Головний пояс астероїдів
Гончі Пси

Давіда
Деймос
Денеб
Діва
Дракон
Дубхе

Енцелад
Ерида
Ерідан
- Епсилон

Європа

Жираф

Земля
Змієносець
Зодіакальне світло
Золота Риба
Зоря
- Барнарда
- Вольфа–Райє
- Пласкетта

Іксіон
Іо

Каллісто
Кассіопея
Квавар
Кіль
Комета Темпеля
Комплекс Риби-Кита
Козоріг
Корма
Косинець

Ланіакея (гіперскупчення)
Лебідь
61 Лебедя (61 Cyg)
Лев
Ліра
RR Ліри
Лисичка
Луман 16

Макемаке
Магелланів потік
Мала (ий)
– Ведмедиця
– Магелланова Хмара
– Пес
Маргарита
Маффей
Марс
Меркурій
Міранда
Місцевий (а,е)
– войд
– група
– зоряна система
– надскупчення
– надскупчення (Надскупчення Діви)
– комплекс Місцевий лист
– об'єм
– рукав
Місяць
Муха

Надскупчення галактик
– Абель 3627
– Великий Аттрактор
– Волосся Вероніки
– Гідри-Центавра
– Павича-Індіанця
Наша зоряна система
Нептун
Нептун
– Велика темна пляма,

Оберон
Овен
Одноріг
Омега Центавра
Орел
Оріон
– T2
Орк

Паллада
Паруси
51 Пегаса b
Персей
– χ і h
Південна (ий)
– Корона
– Трикутник
– Хрест
Піч
Плеяди
Плутон
Полярна зоря
Пояс
– Гулда
= А- кільце
– Койпера
Проксима
– b
– Центавра

Рак
Риби
Рігель

Сатурн
- Великий білий овал
- Гігантський гексагон

Секстант
Сіріус
Сіріус В
Скорпіон
- T1

Скульптор
Сонце
Сонячна система
Стіна
Стожари
Стріла
Стрілець

Тау Кита
Терези
Титан
Титанія
Телець
Т Тельця
Трапеція Оріона
Тритон
Туманності
- Андромеди
- Лагума
- Омега
- Орел
- Серце

Умбріель
Уран

Фобос
Фомальгаут

Харикло
Харон
Хаумеа
Хмара Оорта

Центавр
Церера
Цефей
Циркуль

Шпора (рукав) Оріона

Щит

Юнона
Юпітер
- Велика Червона Пляма

Ящірка

ВІДПОВІДІ НА ТЕСТИ

Тема		Правильний варіант відповіді на тест									
1*		1.1.2	1.2.1	1.3.1	1.4.3	1.5.5	1.6.3	1.7.5	1.8.2	1.9.4	1.10.3
2		2.1.4	2.2.2	2.3.2	2.4.4	2.5.4	2.6.3	2.7.1	2.8.5	2.9.3	2.10.1
3		3.1.1	3.2.3	3.3.4	3.4.2	3.5.4	3.6.2	3.7.1	3.8.5	3.9.4	3.10.2
4		4.1.5	4.2.2	4.3.2	4.4.1	4.5.1	4.6.3	4.7.5	4.8.1	4.9.4	4.10.4
5		5.1.2	5.2.1	5.3.3	5.4.2	5.5.4	5.6.4	5.7.5	5.8.2	5.9.3	5.10.1
6**		6.1.1	6.2.3	6.3.4	6.4.3	6.5.4	6.6.2	6.7.5	6.8.1	6.9.1	6.10.3

* – Вступ та Частина 1.

** – Частина 6 та Підсумковий розділ.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Андрієвський С. М., Кузьменков С. Г., Захожай В. А., Климишин І. А. Загальна астрономія. — Харків: ПромАрт, 2019. — 524 с.
2. Астрономічний енциклопедичний словник / За заг. ред. І. А. Климишина та А. О. Корсунь. – Львів, 2003. – 548 с.
3. Агекян Т. А. Звезды, галактики, Метагалактика. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1981. – 416 с.
4. Александров Ю. В. Фізика планет. – Київ, 1996. – 420 с.
5. Александров Ю. В. Астрофізика. – Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2014. – 216 с.
6. Астрономия: традиции, настоящее, будущее / Под ред. В. В. Орлова, В. П. Решетникова, Н. Я. Сотниковой. – СПб.: СПбУ, ВВМб, 2007. – 408 с.
7. Болотин Ю. Л. Темная материя // Вісн. Харк. унів. – 2006. – № 732, вип. 2 /30/. – С. 3-34.
8. Вайнберг С. Космология. – М.: УРСС, 2013. – 608 с.
9. Веселовский И. Н. Египетские деканы // Историко-астрономические исследования. Вып. X. – М.: Наука, 1969. – С. 39-62.
10. Воронцов-Вельяминов Б. А. Внегалактическая астрономия. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1978. – 480 с.
11. Гинзбург В. Л. О некоторых успехах физики и астрономии за последние три года // Успехи физ. наук. – 2002. – Т. 172, № 2. – С. 213-219.
12. Голдсмит Д., Оуэн Т. Поиски жизни во Вселенной: Пер. с англ. В. Д. Новикова / Под ред. и с предисл. М. Я. Марова. – М.: Мир, 1983. – 488 с.
13. Гуревич Л. Э., Чернин А. Д. Введение в космогонию (Происхождение крупномасштабной структуры Вселенной). – М.: Наука, 1978. – 384 с.
14. Де Ягер К. Звезды наибольшей светимости: Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 493 с.
15. Дума Д. П. Загальна астрометрія: навчальний посібник. – Київ: Наукова думка, 2007. – 600 с.

16. Засов А. В., Постнов К. А. Общая астрофизика. – Фрязино, 2006. – 496 с.

17. Захожай В.А. Роль субзвезд в эволюции Галактики // Вісн. астрон. школи. – 2001. – Т. 2, № 1. – С. 34-44.

18. Захожай В. А. Космические тела Галактики: классификация и эволюция // Вісн. астрон. школи. – 2002. – Т. 3, № 2. – С. 81-99.

19. Захожай В. А. Структура нашей звездной системы // Кинем. и физ. неб. тел. – 2005. – Т. 21, № 6. – С. 414-440.

20. Захожай В. А. Химическая эволюция в Галактике // Вісн. Харк. націон. ун-ту. – № 648, вип. 12 (35). – Хімія. – 2005. – С. 154-158.

21. Захожай В. А. Проблема существования планетных систем. I. Методы и средства поиска // Вісн. астрон. школи. – 2005. – Т. 4, № 2. – С. 34-54.

22. Захожай В. А. Проблема существования планетных систем. II. Ожидаемые свойства и первые результаты поиска // Вісн. астрон. школи. – 2005. – Т. 4, № 2. – С. 55-72.

23. Захожай В. А. На пути к решению проблемы строения и эволюции Галактики. I. Формирование современных представлений // Вісн. астрон. школи. – 2009. – Т. 6, № 1. – С. 6-15.

24. Захожай В. А. На пути к решению проблемы строения и эволюции Галактики. II. Структура и последовательность ключевых событий // Вісн. астрон. школи. – 2009. – Т. 6, № 1. – С. 16-29.

25. Захожай В. А., Захожай О. В. Диски вокруг ближайших звезд и субзвезд // Кинем. и физ. неб. тел. – 2010. – Т. 26, № 1. – С. 3-30.

26. Захожай В. А. Вступ до астрофізики та космогонії: підручник. – Харків: ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2017. – 208 с.

27. Зельдович Я. Б., Новиков И. Д. Строение и эволюция Вселенной. – М.: Наука, 1975. – 736 с.

28. Иванов В. В. Физика звезд. – СПб.: СПб. гос. ун-т, 2010. – 380 с.

29. Иванов В. В., Кривов А. В., Денисенков П. А. Парадоксальная Вселенная (175 задач по астрономии). – СПб.: Изд. СПбУ, 1997. – 144 с.

30. Казютинский В. В. Антропный принцип // Астрономия и современная картина мира. – М.: ИФРАН, 1996. – С. 143-171.

31. Каплан С. А. Физика звезд. – М.: Наука, 1977. – 208 с.

32. Кардашев Н. С. Скрытая масса и поиск внеземных цивилизаций // Астрофизика на рубеже веков. – М., 2001. – С. 564-569.

33. Климишин И. А. Открытие Вселенной. – М.: Наука, 1987. – 320 с.

34. Климишин І. А. Історія астрономії. – Івано-Франківськ: ІФТКДІ, 2000. – 652 с.

35. Климишин І. А., Тельнюк-Адамчук В. В. Шкільний астрономічний довідник. – Київ: Радянська школа, 1990. – 288 с.

36. Колчинский И. Г., Корсунь А. А., Родригес М. Г. Астрономы: Библиографический справочник. – Киев: Наукова думка, 1986. – 512 с.

37. Кононович Э. В., Мороз В. И. Общий курс астрономии. – М.: УРСС, 2001. – 542 с.

38. Куликовский П. Г. Звездная астрономия. – 2-е изд. – М.: Наука, 1985. – 272 с.

39. Куликовский П. Г. Справочник любителя астрономии. – М.: УРСС, 2002. – 687 с.

40. Лейзер Д. Создавая картину Вселенной. – М.: Мир, 1988. – 326 с.

41. Липунов В. М. Астрофизика нейтронных звезд. – М.: Наука, 1987. – 296 с.

42. Маракушев А. А. Происхождение и эволюция Земли и других планет. – Москва, 1992. – 340 с.

43. Марочник Л. С., Сучков А. А. Галактика. – М.: Наука, 1984. – 392 с.

44. Мартынов Д. Я. Курс общей астрофизики. – 4-е изд., перераб. – М.: Наука, 1988.

45. Масевич А. Г., Тутуков А. В. Эволюция звезд: теория и наблюдения. – М.: Наука, 1988. – 280 с.

46. Мюррей К., Дермотт С. Динамика Солнечной системы / Пер. с англ.; Под ред. И. И. Шевченко. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 588 с.

47. На переднем крае астрофизики: Пер. с англ. под ред. В. В. Иванова / Под ред. Ю. Эвретта. – М.: Мир, 1983. – 488 с.

48. Паннекук А. История астрономии: Пер. с англ. – М.: Наука, 1966. – 592 с.

49. Проблема CETI (связь с внеземными цивилизациями)/ Под ред. С. А. Каплана. – М.: Мир, 1975. – 438 с.

50. Происхождение и эволюция галактик и звезд / Под ред. П. Пикельнера. – М.: Наука, 1976. – 484 с.

51. Происхождение Солнечной системы: Пер. с англ. под ред. Г. Ривса. – М.: Мир, 1976. – 571 с.

52. Псковский Ю. П. Соседи нашей Галактики. – М.: Знание, 1983. – 64 с.

53. Рубцов В. В., Урсул А. Д. Проблема внеземных цивилизаций: Философско-методологические аспекты. – 2-е, доп. изд. – Кишинев: Штиинца, 1987. – 337 с.

54. Рузмайкина Т. В. Угловой момент протозвезд, порождающих протопланетные диски // Письма в Астрон. журн. – 1981. – Т. 7. – С. 188-190.

55. Сафронов В. С. Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. – М.: Наука, 1969. – 244 с.

56. Селешников С. И. История календаря и хронология. – М.: Наука, 1972. – 224 с.

57. Силк Дж. Большой взрыв: Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 392 с.

58. Струве О., Зебергс В. Астрономия XX века. – М.: Наука, 1968. – 548 с.

59. Струве О., Линдс Б., Пилланс Э. Элементарная астрономия. – М.: Наука, 1967. – 484 с.

60. Сурдин В. Г. Рождение звезд. – М.: УРРС, 2001. – 264 с.

61. Сучков А. А. Галактики знакомые и загадочные. – М.: Наука, 1978. – 192 с.

62. Тутуков А. В. Образование планетных систем и коричневых карликов около одиночных звезд // Астрон. журн. – 2002. – Т. 79, № 8. – С. 762-767.

63. Уитни Ч. Открытие нашей Галактики. – М.: Мир, 1975. – 238 с.

64. Уокер Г. Астрономические наблюдения: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 352 с.

65. Физика Космоса: Маленькая энциклопедия. – М.: Сов. энциклопедия, 1986. – 784 с.

66. Черепащук А. М., Чернин А. Д. Вселенная, жизнь, черные дыры. – Фрязино: Век 2, 2004. – 320 с.

67. Шкловский И. С. Сверхновые звезды (и связанные с ними проблемы). – 2-е изд., перераб. и доп – М.: Наука, 1976. – 440 с.

68. Шкловский И. С. Вторая революция в астрономии подходит к концу // Вопросы философии. – 1979. – № 9. – С. 80-93.

69. Шкловский И. С. Звезды: их рождение, жизнь и смерть. – 3-е изд., перераб. – М.: Наука, 1984. – 384 с.

70. Armitage Ph. Astrophysics of Planet Formation. – 2nd edition. – Cambridge University Press, 2020. – 342 p.

71. Bromm V., Larson R. B. The First Stars // Annu. Rev. Astron. Astrophys. – 2004. – Vol. 42. – P. 79-118.

72. Burrows A., Liebert J. The science of brown dwarfs // Reviews of Modern Physics. – 1993. – Vol. 65, No.2. – P. 301-336.

73. Burrows A., Hubbard W. B., Lunine J. I., Liebert J. The Theory of Brown Dwarfs and Extrasolar Giant Planets // Rev. Mod. Phys. – 2001. – Vol. 73. – P. 719-765.

74. Cassen P., Guillot T., Quirrenbach A. Extrasolar Planets / Edited by D. Queloz, S. Udry, M. Mayor and W. Benz/. – Springer-Verlag. – Berlin, Heidelberg, 2006. – 242 p.

75. Perryman M. The Exoplanet Handbook. – 2nd edition. – Cambridge University Press, 2018. – 440 p.

76. Seager S. Exoplanets. – University of Arizona Press, 2010. – 526 p.

ДЛЯ НОТАТОК

Навчальне видання

Захожай Володимир Анатолійович
Захожай Ольга Володимирівна

ОСНОВИ ЕЛЕМЕНТАРНОЇ АСТРОНОМІЇ

Навчальний посібник

Коректор *О. В. Анцибора*
Комп'ютерне верстання *О. С. Чистякова*
Макет обкладинки *О. Д. Чорна*

Формат 60х84/16. Ум. друк. арк. 14,66. Тираж 300 пр. Зам. № 2/20.

Видавець і виготовлювач
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,
61022, м. Харків, майдан Свободи, 4.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3367 від 13.01.09

Видавництво ХНУ імені В. Н. Каразіна
Тел. 705-24-32