

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

Ю. В. Александров
В. Г. Шевченко

АСТРОФІЗИКА

Підручник для студентів спеціальності «Фізика та астрономія»
класичних університетів

Харків – 2016

УДК 52(075.8)
ББК 22.63я73
А 91

Рецензенти:

О. О. Железняк – професор, доктор фізико-математичних наук, завідувач кафедри аерокосмічної геодезії Національного авіаційного університету;

В. П. Тишковець – доктор фізико-математичних наук, завідувач відділом Радіоастрономічного інституту НАНУ, професор кафедри космічної радіофізики Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна.

*Затверджено для друку рішенням Вченої ради
Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна
(протокол № 12 від 30.11.2015 р.)*

Александров Ю. В., Шевченко В. Г.

А 91 Астрофізика: підручник / Ю. В. Александров, В. Г. Шевченко. – Х.: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2016. – 252 с.

ISBN 978-966-285-315-5

У підручнику розглянуті основи провідного зараз розділу астрономії – астрофізики. Наведені необхідні відомості із загальної астрономії, розглянуті основні методи і засоби теоретичної та практичної астрофізики, основи фізики зір та планетних систем, фізики Галактики та Метагалактики, основи космології та проблеми життя у Всесвіті.

Призначено для студентів спеціальності «Фізика і астрономія» класичних університетів.

Александров Ю. В., Шевченко В. Г.

А 91 Астрофизика: учебник / Ю. В. Александров, В. Г. Шевченко. – Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2016. – 252 с.

ISBN 978-966-285-315-5

В учебнике рассмотрены основы ведущего сейчас раздела астрономии – астрофизики. Приведены необходимые сведения из общей астрономии, рассмотрены методы и средства теоретической и практической астрофизики, основы физики звезд и планетных систем, физики Галактики и Метагалактики, основы космологии и проблемы жизни во Вселенной.

Предназначено для студентов специальности «Физика и астрономия» классических университетов.

**УДК 52(075.8)
ББК 22.63я73**

ISBN 978-966-285-315-5

© Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, 2016

© Александров Ю. В., Шевченко В. Г., 2016

© Будник О. В., макет обкладинки, 2016

ЗМІСТ

ВСТУП	5
ГЛАВА 1. Необхідні відомості із загальної астрономії.....	10
1.1. Небесна сфера. Системи астрономічних координат	10
1.2. Визначення астрономічних координат	17
1.3. Закони руху небесних тіл	23
ГЛАВА 2. Методи теоретичної астрофізики	37
2.1. Елементи теорії переносу випромінювання.....	37
2.2. Елементи магнітної електродинаміки та фізики плазми	49
2.3. Основи релятивістської астрофізики.....	54
ГЛАВА 3. Основи практичної астрофізики	62
3.1. Телескопи.....	62
3.2. Аналізатори та приймачі випромінювання	69
ГЛАВА 4. Фізика зір	76
4.1. Характеристики зір. Стаціонарні зорі	76
4.2. Нестаціонарні зорі.....	84
4.3. Еволюція зір.....	86
4.3.1. Утворення зір.....	86
4.3.2. Еволюція зір різної маси.....	89
4.3.3. Кінцеві стадії еволюції зір	93
4.4. Сонце і сонячна активність	100
ГЛАВА 5. Галактика. Метагалактика.....	111
5.1. Будова Галактики	111
5.2. Міжзоряне середовище	117
5.3. Метагалактика	123
ГЛАВА 6. Основи космології.....	133
6.1. Дорелятивістська космологія	133
6.2. Релятивістська космологія.....	134
6.3. Сучасна космологічна модель.....	142
6.4. Фізична еволюція Всесвіту.....	144
ГЛАВА 7. Фізика Сонячної системи	154
7.1. Склад Сонячної системи.....	154

7.2. Фізика планет	156
7.2.1. Фізика планетних тіл.....	156
7.2.2. Фізика планетних поверхонь	165
7.2.3. Фізика планетних атмосфер і магнітосфер	169
7.3. Малі тіла Сонячної системи	176
7.3.1. Астероїди	176
7.3.2. Комети	177
7.3.3. Метеорна речовина. Метеори. Метеорити	178
7.4. Екзопланети	181
ГЛАВА 8. Життя у Всесвіті.....	187
8.1. Антропний принцип.....	187
8.2. Проблема існування і пошуку життя поза Землею	192
8.3. Проблема SETI	194
ВІДПОВІДІ ТА ВКАЗІВКИ ДО ЗАДАЧ.....	202
ДОДАТКИ	208
ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК	242
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	248

ВСТУП

Цей підручник призначено для студентів спеціальності «Фізика та астрономія» класичних університетів. Приводом для його написання стало те, що до нормативної частини стандарту бакалаврів цієї спеціальності повинна входити навчальна дисципліна «Астрофізика» в обсязі не менше одного кредиту. Тому і виникла задача створення підручника, який би був достатньо компактним і не був би переобтяжений методичними та іншими деталями, які важливі лише для астрономів-професіоналів, і в той же час давав би достатнє уявлення про сучасний стан астрофізики, при тому з урахуванням рівня фізико-математичної підготовки студентів-фізиків III або IV курсів.

Таким чином, ідея посібника з'єднує три поняття: «фізика»–«астрофізика»–«астрономія». І насамперед треба обговорити співвідношення між ними. Є точка зору, за якою астрономія і астрофізика – це дві, хоча і близькі, але все ж різні науки. Підтвердженням такої точки зору може слугувати хоча б існування європейського міжнародного журналу «Astronomy and astrophysics». Інша точка зору полягає в тому, що сучасна астрофізика є частиною фізики. Її підтвердження можна знайти в існуванні спеціалізації «Астрофізика» в межах спеціальності «Фізика». І нарешті, можна стверджувати, що астрофізика є, хоча зараз і провідною, але все ж частиною астрономії – єдиної, відносно самостійної науки.

Підставою для останнього твердження є суттєві відмінності між фізикою і астрономією, незважаючи на тісні взаємні зв'язки між ними. Методологічною межею між фізикою і астрономією є те, що в основі фізики лежить експеримент, в основі астрономії – спостереження. При всіх спільних рисах цих засобів пізнання істотна різниця між ними полягає в значно більших можливостях фізичного експерименту провадити його так, щоб безпосередньо одержати відповідь на питання, які стоять перед дослідником, і при тому з найбільшою вірогідністю. Спостерігачу-астроному ж доводиться працювати в тих умовах, які надає йому природа (умови видимості тих чи інших об'єктів, кількість енергії, що надходить від них, рівень завад). Це призводить до значно більшої ролі попередньої обробки безпосередніх даних астрономічних спостережень для виділення з них корисної інформації (або, як кажуть, корисного сигналу, причому буває, що шум за величиною перевищує цей корисний сигнал). Сказане не слід абсолютизувати, дослідження, наприклад, місячного ґрунту в лабораторії нічим не відрізняються від фізичного експерименту, а дослідження з вивчення елементарних частинок на прискорювачах потребують теж значної роботи для виділення корисної інформації.

Але головним є те, що в астрономії значно складніший, як правило, етап переходу від результатів спостереження (а це ті чи інші характеристики випромінювання, яке приходить до нас від досліджуваних об'єктів) до характеристик самих цих об'єктів, від, скажімо, спектрів зір до температур і хімічного складу їхніх атмосфер. Це призводить до того, що в астрономії особливо важливим є етап побудови моделей досліджуваних об'єктів та процесів, моделей спочатку якісних. Побудова на цій основі кількісних математичних моделей дозволяє розв'язувати спочатку пряму задачу – знаходити можливі спостережні наслідки певної моделі, а потім і обернену – визначати параметри моделі порівнянням її з даними спостережень. При цьому важливу роль можуть відігравати такі математичні властивості моделі, як кількість розв'язків оберненої задачі, їх стійкість або нестійкість. Тому встановлення ступеня адекватності розглядуваної моделі реальному об'єкту є вельми нетривіальною задачею та істотним елементом в астрономічних дослідженнях. Усе сказане певною мірою стосується звичайно і фізичних досліджень. Але в астрономії всі ці обставини проявляють себе значно рельєфніше та послідовніше. Це і робить астрономію окремою цілісною наукою, яка має свої специфічні об'єкт і метод дослідження. Хоча, звичайно, однією з наук фізико-математичного циклу, бо вона спирається насамперед на фізику, але вищевказані її особливості значно підвищують роль математичних методів в астрономії (це, насамперед, теорія ймовірностей і математична статистика, диференціальні й інтегральні рівняння, зокрема чисельні методи їх розв'язування).

Згадуване вище поняття моделі широко використовується в теорії та практиці процесу пізнання. Воно підкреслює і зв'язок між реальним об'єктом цього процесу та його результатом, що формується у людській свідомості, та водночас різницю між ними. Кожна пізнавальна модель має певні межі свого застосування, бо відображає досліджуваний об'єкт не повністю, а лише в певному обмеженому прояві його властивостей. І важлива методологічна роль астрономії в усьому точному природознавстві полягає в тому, що вона найбільш чітко демонструє наявність меж у застосуванні різних модельних уявлень та виявляє ці межі. Справа у тому, що земна фізика стикається з явищами та процесами, кількісні характеристики яких, насамперед, просторові та часові, лежать у досить обмежених границях (якщо не брати до уваги фізику атома й елементарних частинок). Це породжує тенденцію до абсолютизації значень параметрів, що визначають застосовність тих чи інших моделей (скажімо, моделі суцільного середовища), і тим самим, до ототожнення моделей з самими реальними об'єктами. Астрономічним же явищам властивий набагато більший діапазон характерних значень розмірів, часів, густин та

інших величин, що описують ці явища. І це виявляє, що в дійсності межі застосування різних моделей визначаються не абсолютними, а відносними значеннями їхніх параметрів.

Дещо відмінними у фізиці й астрономії є співвідношення між конкретними об'єктами й узагальнюючими їх поняттями. Об'єкти вивчення у фізиці позбавлені, так би мовити, індивідуальності. Ученому-фізику досить вивчити, але всебічно, один електрон, і він буде мати уявлення про всі електрони у Всесвіті. У свідомості ж ученого-астронома за загальними поняттями «зоря», «планета» стоять конкретні зорі чи планети з їхніми індивідуальними особливостями.

Коротко про історію розвитку астрофізики. У XVII–XVIII ст. почали накопичуватися факти, котрі потім увійшли в майбутню астрофізику. Це телескопічні відкриття Г. Галілея, відкриття І. Ньютоном неперервного спектра сонячного світла, астрофізичні ідеї М. В. Ломоносова і відкриття ним атмосфери Венери, зоряно-астрономічні роботи У. Гершеля тощо. У XIX ст. послідувала ціла низка астрофізичних відкриттів. Це відкриття інфрачервоного випромінювання Сонця (У. Гершель, 1800 р.); відкриття першої малої планети (Дж. Піацці, 1801 р.); відкриття лінійчастого спектра Сонця (В. Волластон, 1802 р.) та його детальне дослідження (Й. Фраунгофер, 1815 р.); перші поляризаційні дослідження в астрономії (Д. Араго, 1811 р.); перші застосування фотографії в астрономії (Д. Арго, Г. Дрепер, 1840 р.); кількісне уточнення поняття про зоряну величину (Н. Погсон, 1857 р.); відкриття спектрального аналізу і перші його застосування в астрономії (1860-і рр.), перше застосування ефекту Доплера в астрономії (Г. Хеггінс, 1867 р.). І нарешті, введення самого терміна «астрофізика» (Й. Целльнер, 1887 р.).

На межі XIX і XX ст. відбулась зміна самої парадигми астрономічних досліджень. Не стільки положення і рух небесних тіл, скільки їхня будова і фізичні процеси, що цю будову зумовлюють, стало основною метою цих досліджень. Почалося масове дослідження зоряних спектрів й розвиток теорії переносу випромінювання у зоряних атмосферах (Г. Рессел, Е. Герцшпрунг, Р. Емден, Д. Джинс, А. Еддінгтон, О. Д. Хвольсон, К. Шварцшильд, Г. Шустер та інші). Потім почався швидкий процес застосування в астрофізиці здобутків квантової та релятивістської фізики. Це, зокрема, привело до головних здобутків астрономії XX ст. – створення теорії будови та еволюції зір (О. Л. Струве, Б. П. Герасимович, М. Шварцшильд) і появи та розвитку позагалактичної астрономії і релятивістської космології (Е. Хаббл, О. О. Фрідман, В. де-Сіттер, Ж. Леметр та інші).

Взаємодія наук фізико-математичного циклу проявилася з історичного боку і в тому, що багато видатних вчених зробили свій значний внесок і в математику, і в фізику, і в астрономію. Ще засновник фізики Арістотель

водночас завершив і створення першої астрономічної картини світу. Математиком, фізиком і астрономом був Архімед. Важко навіть сказати ким більшою мірою чи фізиком, чи астрономом, чи математиком був великий Ньютон. Багато видатних математиків XVIII–XX століть зробили значний внесок і в механіку, і в фізику, і в астрономію. Це Л. Ейлер, Ж. Лагранж, П. Лаплас, К. Гаусс, У. Гамільтон, А. М. Ляпунов, А. Пуанкаре. У XX ст. загальновідомим є внесок і в фізику, і в астрофізику Г. А. Гамова, Г. Бете, В. Л. Гінзбурга, Я. Б. Зельдовича, С. Хокінга.

У другій половині XX ст. ще однією формою впливу фізики на розвиток астрономії стало широке використання останніх досягнень науково-технічної революції – поява нових приймачів випромінювання (спочатку фотоелектричних, а потім твердотільних на базі приладів із зарядовим зв'язком), створення телескопів для інших діапазонів спектра, крім оптичного, нові принципи побудови телескопів (з адаптивною оптикою, з синтезованою апертурою). Разом із широким застосуванням ЕОМ і ПК для автоматизації спостережень, їхньої обробки, зберігання та пошуку спостережних даних це створило умови для відчутного стрибка в кількості й якості одержаної інформації, що стало емпіричною базою нової революції в астрономії. При цьому з чотирьох складових науково-технічної революції три (це виникнення та розвиток радіоелектроніки, обчислювальної техніки і космонавтики) безпосередньо сприяли перетворенню астрономії, і насамперед астрофізики, з оптичної у всехвильову. Четверту складову (атомну науку та техніку) зв'язує з астрофізикою не тільки спільна теоретична основа – квантова фізика, а і те, що ідея термоядерного синтезу як джерела зоряної енергії зіграла важливу роль у постановці та подальшому розвитку проблеми керованого термоядерного синтезу для потреб земної енергетики. Тут проявилась ще одна грань загальнонаукового значення астрономії – вивчення явищ та процесів в умовах, які не доступні на Землі з усіма їх науково-технічними та соціальними наслідками. Ще одним прикладом може бути сучасна ситуація у фізиці нейтрино. Тільки на початку XXI ст. саме астрофізичними методами було нарешті визначено, що маса нейтрино хоч і дуже мала, а все ж таки відмінна від нуля, а також доведено існування нейтринних осциляцій, передбачених раніше теоретичною фізикою. Проблема раннього Всесвіту стала і одним із стимулів розвитку і чи не єдиною можливістю перевірки єдиної теорії поля, єдиної теорії фундаментальних фізичних взаємодій. Як казав академік Я. Б. Зельдович, ранній Всесвіт – це природний прискорювач для бідного людства.

Даний підручник складається зі вступу, восьми глав та додатків. Перша глава має вступний характер, у ній розглянуті основні поняття та методи класичних розділів астрономії – сферичної астрономії, астрометрії

та небесної механіки. Друга глава є однією з основних у підручнику, в ній обговорюються методи теоретичної астрофізики і ті фізичні явища та процеси, на яких ці методи засновані. У невеликій третій главі розглянуті вкрай стисло технічні засоби і методи спостережної астрофізики без зайвої деталізації, яка потрібна астрономам-професіоналам. Найбільша за обсягом четверта глава присвячена фізиці зір, як основного компонента, у вигляді якого існує речовина у сучасному Всесвіті. В п'ятій главі розглядаються питання зоряної, галактичної та позагалактичної астрономії. Цей матеріал, особливо уявлення про Метагалактику, є емпіричною основою наступної, шостої глави, присвяченій основам космології. Сьома глава містить фізику Сонячної системи, її досить великий обсяг пов'язаний як з різнобічністю об'єктів, про які йдеться мова, так і з великим значенням вивчення цих об'єктів, особливо великих планет, для розуміння процесів у різних оболонках Землі і значенням цього для вирішення екологічних проблем, що постали сьогодні перед людською цивілізацією. Нарешті, остання, восьма глава присвячена проблемі життя у Всесвіті та його пошуку.

У текст підручника порівняно з однойменним посібником Ю. В. Александрова внесені ряд уточнень та доповнень, зокрема розглянуто метод гравітаційного лінзування. А головне те, що до всіх глав (крім останньої) додані задачі. Здебільшого задачі мають обчислювальний характер, але є і задачі на доведення тих чи інших тверджень, що містяться в основному тексті підручника. У теоретичних галузях знань, не пов'язаних безпосередньо з виробництвом, допускається використовуються інші системи одиниць крім СІ. Зокрема в задачах використовується система CGS (а коли йдеться про магнітні явища, то CGSM). Необхідні для розв'язання задач астрономічні дані містяться у тексті підручника та додатках. Багато різноманітних задач можна також знайти у збірках [23, 27, 28, 35]. Деякі з них можуть бути темами для семінарських занять, рефератів та курсових робіт з астрофізики.

Хоча підручник призначений для студентів-фізиків класичних університетів, але він може бути корисним для студентів-фізиків педагогічних університетів, студентів-радіофізиків спеціалізації «Радіоастрономія» та інших осіб, що потребують астрофізичних знань і мають математичну та фізичну підготовку на рівні третього-четвертого курсів фізичних факультетів.

Автори щиро вдячні своїм колегам по кафедрі астрономії і космічної інформатики та НДІ астрономії Харківського університету за численні поради та зауваження, дякують професору, доктору фіз.-мат. наук О. О. Железняку та доктору фіз.-мат. наук В. П. Тишковцю за їх працю з рецензування підручника.

ГЛАВА 1

НЕОБХІДНІ ВІДОМОСТІ З ЗАГАЛЬНОЇ АСТРОНОМІЇ

1.1. Небесна сфера. Системи астрономічних координат

Об'єкти, які ми спостерігаємо у космосі, знаходяться від нас на різних відстанях, які розрізняються між собою на багато порядків. Але безпосередньо ми цього не сприймаємо, а можемо визначити лише напрям на спостережуваний об'єкт. З огляду на це, дуже зручним є уявлення про небесну сферу. *Небесна сфера* – це сфера довільного радіуса з центром у точці, де знаходиться спостерігач. Суть цього поняття у тому, що ми на певному етапі досліджень вважаємо усі спостережувані об'єкти, наприклад, зорі, розташованими на цій сфері. Тоді напрям на певний об'єкт ми можемо задавати двома координатами в заданій системі сферичних координат.

У зв'язку з цим треба згадати деякі елементи сферичної геометрії. Роль, аналогічну прямим на площині, як геодезичних, тобто ліній, за якими вимірюються відстані між точками на сфері, є дуги з радіусом, що дорівнюють радіусу сфери. В астрономії коло такого діаметра має назву *великого кола*. Будь-які два великих кола перетинаються між собою у двох протилежних точках сфери, тобто на сфері немає паралельних ліній. Усі інші кола, що лежать на сфері, – це малі кола. Через три точки на сфері можна провести три великих кола, відповідні дуги яких утворюють *сферичний трикутник*. Оскільки небесна сфера, за визначенням, має довільний радіус, то немає сенсу говорити про лінійні міри сторін сферичного трикутника. Але оскільки кожній дузі на сфері відповідає рівний їй у кутовій мірі центральний кут, то можна ввести у розгляд тригонометричні функції сторін сферичного трикутника. Зазвичай можна розглядати і тригонометричні функції кутів сферичного трикутника, за які правлять кути між дотичними до сторін трикутника в його вершинах.

Для того, щоб задати систему координат на сфері, треба обрати *полюс системи* – певну точку на сфері. Тоді матимемо *екватор системи* як велике коло у площині, що перпендикулярна діаметру, який визначає напрям на полюс системи. Інколи спочатку обирається велике коло, яке

буде екватором системи координат, і тим самим визначаються полюси системи. Потім на цьому екваторі треба обрати точку відліку вздовж екватора та напрям його відліку. Для того, щоб визначити тепер координати довільної точки на сфері, треба провести допоміжне велике коло через цю точку та полюс системи. Тоді координатами точки A будуть довжина дуги від полюса до точки A (або від точки A до точки перетину допоміжного кола з екватором системи) та довжина дуги вздовж екватора від обраного початку відліку до точки перетину допоміжного кола з екватором. Відповідні дуги можуть вимірюватися у кутовій мірі (градусній або радіанній) або у часовій, виходячи зі співвідношення $360^\circ = 2\pi = 24^h$. Першій зі згаданих координат можна зіставити відповідний центральний кут, другій – відповідний двогранний кут.

З різних обставин у астрономії доводиться використовувати багато різних систем сферичних координат. Перед тим, як перейти до опису конкретних систем координат, уведемо поняття про основні точки та лінії на небесній сфері. Точка перетину прямовисної лінії з небесною сферою – це *зеніт* (протилежна точка – *надір*). Велике коло у перетині горизонтальної площини з небесною сферою – *математичний* або *істинний горизонт*. Велике коло, яке утворюється при перетині небесної сфери площиною земного екватора або площиною, їй паралельною, – це *небесний екватор*. Діаметр небесної сфери, перпендикулярний до небесного екватора, – *вісь світу*, точки його перетину з небесною сферою – *полюси світу*. Той полюс, який знаходиться у північній півкулі Землі над горизонтом, – це північний полюс світу. Велике коло, що проходить через полюси світу та зеніт, має назву *небесного меридіану*. Точки перетину небесного меридіану з горизонтом – *точки півдня* та *півночі*. Посередині між ними лежать *точки сходу* і *заходу*. Велике коло, вздовж якого відбувається річний рух Сонця, має назву *екліптики* (кола затемнень). Інакше кажучи, екліптика – це проекція на небесну сферу орбіти, за якою рухається Земля відносно Сонця або Сонце відносно Землі. Екліптика та небесний екватор перетинаються у *точках весняного* та *осіннього рівнодення*. Нарешті, велике коло, яке найкращим чином (у розумінні мінімуму середньоквадратичного відхилення) проходить через Чумацький шлях, – це *галактичний екватор*. Відповідно, вводяться *полюси екліптики* та *галактичні полюси*.

Основні характеристики (зокрема, назви систем і координат) найбільш використовуваних в астрономії систем координат вказані у табл. 2 Додатку. Це горизонтальна, перша та друга екваторіальні системи координат, екліптична та галактична системи. Звернемо увагу ще на таке. У визначенні небесної сфери підкреслювалося, що її центр співпадає з положенням спостерігача (реального або уявного). Якщо він розташовується в певній

точці на поверхні Землі, то це буде *топоцентрична* небесна сфера і, відповідно, *топоцентрична* система координат. Якщо ж центр сфери співпадає з центром Землі, то матимемо *геоцентричну* систему координат. Різниця між цими двома системами істотна лише тоді, коли відстань до досліджуваних об'єктів хоч якоюсь мірою зіставна з радіусом Землі. При вивченні тіл Сонячної системи, насамперед, вивченні їх руху, доцільно ввести до розгляду *геліоцентричну* систему координат. В останній час, зокрема у зв'язку з розвитком космонавтики, доводиться застосовувати системи координат, пов'язані з центром Місяця або з центром будь-якої планети, наприклад, Марса, тоді матимемо *селеноцентричну* систему координат або *планетоцентричну*, зокрема *ареоцентричну*.

Горизонтальна система зручна тим, що положення небесного світила в цій системі визначають умови його видимості, а головне, вона досить легко (принаймні в принципі) фізично реалізується: прямовисна лінія визначається за допомогою виска, а горизонтальна площина – за допомогою двох рівнів. Тому безпосередньо координати світил вимірюються у горизонтальній системі. Але в цій системі координати точок на небесній сфері унаслідок її добового обертання весь час змінюються і до того ж нерівномірно. У *першій екваторіальній системі* одна координата (*схилення*) лишається сталою, друга (*часовий кут*) змінюється рівномірно (принаймні тою мірою, якою є рівномірним осьове обертання Землі). У *другій екваторіальній системі* обертання небесної сфери не впливає на обидві координати. Тому врешті-решт координати небесних об'єктів визначаються в цій системі, і саме їх екваторіальні координати – *пряме сходження* та *схилення* подаються у довідниках та астрономічних щорічниках і календарях. *Екліптична система* використовується при розгляді руху Сонця та інших тіл Сонячної системи, *галактична* – при розгляді нашої зоряної системи Галактики та позагалактичних об'єктів.

З вище викладеного зрозуміло, що важливим є питання переходу від однієї системи координат до іншої, насамперед, від горизонтальної до екваторіальної та навпаки. Перша задача виникає після одержання із спостережень горизонтальних координат у певний момент часу, а друга – при потребі знайти потрібний нам об'єкт на небі за його екваторіальними координатами для спостережень за ним, зокрема астрофізичних. Щоб зрозуміти, як робиться такий перехід, треба познайомитися з елементами сферичної тригонометрії. В її основі лежать формули, що пов'язують тригонометричні функції сторін і кутів у сферичному трикутнику. Головні з них це такі формули (рис. 1.1):

а) *формула косинусів* –

$$\cos a = \cos b \cos c + \sin b \sin c \cos A, \quad (1.1)$$

б) *формула синусів* –

$$\frac{\sin a}{\sin A} = \frac{\sin b}{\sin B} \quad (1.2)$$

(порівняйте цю формулу з формулою (або теоремою) синусів плоскої тригонометрії),

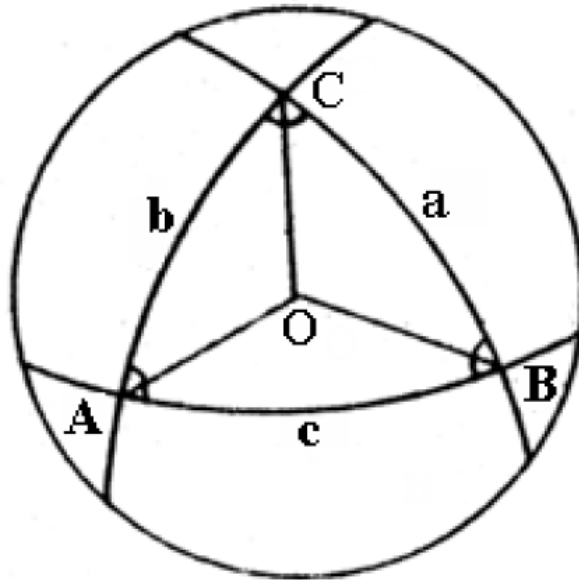


Рис. 1.1. Сферичний трикутник

в) *формула п'яти елементів* –

$$\sin a \cos B = \cos b \sin c - \sin a \cos b \cos A. \quad (1.3)$$

Першу з цих формул можна одержати, якщо розглянути скалярний добуток ортів осі z і радіуса-вектора точки B . Доведення інших двох формул можна знайти в [26].

Крім наведених формул, є формули, що виражають тригонометричні функції кутів через функції сторін, а також інші формули. Формули (1.1)–(1.3) спрощуються, якщо застосовуються до певних часткових видів сферичних трикутників. Це, насамперед, *прямокутні* трикутники, в яких один із кутів дорівнює 90° . Тоді (рис. 1.1) мають місце такі співвідношення:

$$\cos a = \cos b \cos c, \quad \sin b = \sin a \sin B. \quad (1.4)$$

Це також трикутники, в яких одна зі сторін дорівнює 90° , і нарешті це вузькі трикутники, в яких одна зі сторін настільки мала, що можна її синус або тангенс замінити значенням величини самої сторони в радіанній мірі.

Для того, щоб одержати формули переходу від однієї системи координат до іншої, треба застосувати формули (1.1)–(1.3) до трикутника, утвореного полюсами цих систем і точкою, координати якої треба

перетворити. При цьому треба виразити сторони та кути цього трикутника через координати цієї точки та координати полюсу однієї системи в іншій. Якщо зробити це для горизонтальної та першої екваторіальної систем (рис. 1.2), то одержимо, наприклад, що

$$\begin{aligned}\cos z &= \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos t, \\ \sin z \sin A &= \cos \delta \sin t, \\ \sin z \cos A &= -\sin \delta \cos \varphi + \cos \delta \sin \varphi \cos t.\end{aligned}\tag{1.5}$$

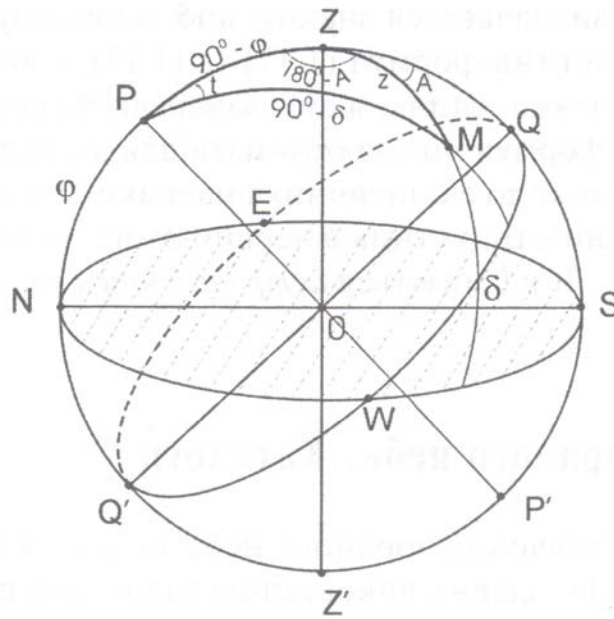


Рис. 1.2. Горизонтальна і екваторіальна системи координат
ZPM – паралактичний трикутник

Те, що у трикутнику PZM, який, до речі, має назву *паралактичного*, сторона PZ доповнює географічну широту місця спостереження до 90° , впливає з теореми про кути із взаємно перпендикулярними сторонами. Важливо звернути увагу на те, що для визначення двох координат потрібні три співвідношення. Бо ці співвідношення визначають тригонометричні функції сторін, а для однозначного визначення кута або дуги за їх тригонометричними функціями в межах повного кута потрібно знати принаймні значення однієї функції та знак іншої.

Зараз у зв'язку з широким використанням обчислювальної техніки все ширше застосовується для перетворення координат апарат матриць спрямовуючих косинусів з використанням відомих формул переходу від сферичних координат до прямокутних і навпаки та стандартної процедури множення вектора на матрицю.

Для того, щоб перейти від першої екваторіальної системи до другої, треба встановити зв'язок між часовим кутом та прямим сходом. А для цього потрібно зупинитися на основах вимірювання часу. Треба, насамперед, усвідомлювати, що вимірювати час з огляду на його одновимірність (яка, у свою чергу, відбиває наявність причинних зв'язків між усіма подіями у нашому світі) можливо тільки за допомогою якогось періодичного процесу, період якого і приймається за основну одиницю виміру часу. В астрономії головним таким процесом є добове обертання Землі та пов'язане з ним видиме обертання небесної сфери. Системи відліку часу відрізняються одна від одної тим, саме обертанням якої точки на небесній сфері вимірюється час у межах доби. Якщо це точка весняного рівнодення, то це буде система виміру *зоряного часу*, який у межах доби вимірюється часовим кутом точки весняного рівнодення. При цьому початком зоряної доби є момент часу, коли точка весняного рівнодення перетинає небесний меридіан і має найменшу зенітну відстань. Це так званий момент її *верхньої кульмінації*. Тоді з визначень прямого сходу α і зоряного часу s випливає такий зв'язок між прямим сходом і часовим кутом будь-якої точки на небесній сфері:

$$t = s - \alpha, \quad (1.6)$$

який і завершує формули переходу від другої екваторіальної системи до горизонтальної. Для встановлення зв'язку між другою екваторіальною та екліптичною системами координат треба знати кут нахилу екліптики до небесного екватора ε , який дорівнює приблизно $23,5^\circ$. А для переходу від другої екваторіальної системи до галактичної потрібні екваторіальні координати галактичного полюсу ($A = 18^{\text{h}}52^{\text{m}}$, $D = +27,13^\circ$).

Повернемося до питань вимірювання часу. Застосовувати зоряний час у повсякденному житті було б вкрай незручно. І не тільки тому, що у даний фізичний момент часу однакового значення зоряний час має тільки на певному меридіані Землі. Але введення системи годинних поясів та поясного часу не завадило іншій незручності. Справа в тому, що внаслідок річного руху Сонця вздовж екліптики і відповідна зміна впродовж року прямого сходу Сонця приводили б до того, що моменти середини світлового дня та ночі – моменти верхньої та нижньої кульмінації Сонця неперервно зміщувалися в межах доби протягом року. Вихід, який полягає в тому, щоб ввести час, який вимірюється часовим кутом центра диска Сонця (тобто введення так званого *істинного сонячного часу*) теж не повністю вирішує цю проблему. Бо внаслідок нахилу екліптики до екватора й ексцентриситету земної орбіти і відповідно зміни швидкості відносного руху Землі і Сонця зміна прямого сходу Сонця відбувається дещо нерівномірно. Це приводить до того, що довжина істинної сонячної доби змінюється протягом року майже на 40^{m} . Тому доводиться вводити

середній сонячний час. Він вимірюється часовим кутом середнього Сонця, за яке править точка небесної сфери, яка починає свій річний рух одночасно зі справжнім Сонцем з точки весняного рівнодення і рухається рівномірно вздовж екватора і здійснює повний оберт за рік. Початок середньої сонячної доби співпадає з нижньою кульмінацією середнього Сонця. Це разом з ідеєю поясного часу і вирішує задачу побудови системи вимірювання часу, якою і користується людство.

Як відомо, у загальноприйнятій системі одиниць СІ як основна одиниця виміру часу прийнята *секунда* як час, за який здійснюється 9192631770 коливань випромінювання, що відповідає енергетичному переходу між двома рівнями надтонкої структури основного стану атома цезію $^{133}_{55}\text{Cs}$. Більше того, застосування атомних і молекулярних стандартів часу виявило нерівномірності у швидкості обертання Землі, а тим самим і в одиниці середнього сонячного часу. Але це не означає можливості відмови від астрономічних методів визначення часу. Бо в силу того значення, яке має в житті людства Сонце, систему *атомного часу* доводиться час від часу корегувати з плином середнього сонячного часу.

На завершення питання про вимірювання часу згадаймо ще про поняття *всесвітнього часу*. Це поясний час нульового часового поясу, тобто місцевий час на нульовому гринвіцькому меридіані. Зв'язок між всесвітнім часом UT і місцевим середнім сонячним часом T досить простий: $T = UT + \lambda$, де λ – географічна широта, виражена у часовій мірі.

Як вже зазначалося, пряме сходження небесного світила впливає на моменти його сходу, а також на моменти його заходу і верхньої та нижньої кульмінацій. А від іншої екваторіальної координати – схилення залежить те, чи буде у даному місці Землі це світило взагалі сходити і заходити. Уважно роздивившись рис. 1.3, можна пересвідчитися у тому, що мають місце такі формули для зенітної відстані світила у верхній та нижній кульмінаціях:

$$\begin{aligned} z &= |\delta - \varphi|, & \text{в. к.} \\ z &= 180^\circ - (\delta + \varphi), & \text{н. к.,} \end{aligned} \quad (1.7)$$

де φ – як і раніше географічна широта. З цих формул випливає, що при достатньо малому схиленні значення $z_{\text{н.к.}}$ може бути менше від 90° , і світило буде *незахідним* у місцях з певною широтою. Якщо ж значення схилення достатньо мале алгебраїчно, таке, що $z_{\text{в.к.}} > 90^\circ$, то світило на відповідній широті буде *невисхідним* і його ніколи не можна побачити. При значеннях схилення більш-менш середніх за модулем, світило буде сходити і заходити. Знов-таки це особливо велике значення має тоді, коли це світило – Сонце. Зміна протягом року схилення Сонця при його русі за

екліптикою відбувається в межах $\pm \varepsilon = \pm 23,5^\circ$. Це суттєво впливає на довжину світлої та темної частин доби на різних широтах і їх зміну протягом року. З цим пов'язане також існування тропічного, помірних і полярних поясів на Землі з їх кліматичними особливостями. Не зупиняючись на цьому докладніше і відсилаючи до курсів загальної астрономії [7, 26], зауважимо лише, що, на нашу думку, будь-який випускник фізичного факультету університету повинен більш-менш розбиратися в цих питаннях, насамперед це стосується викладачів фізики та астрономії.

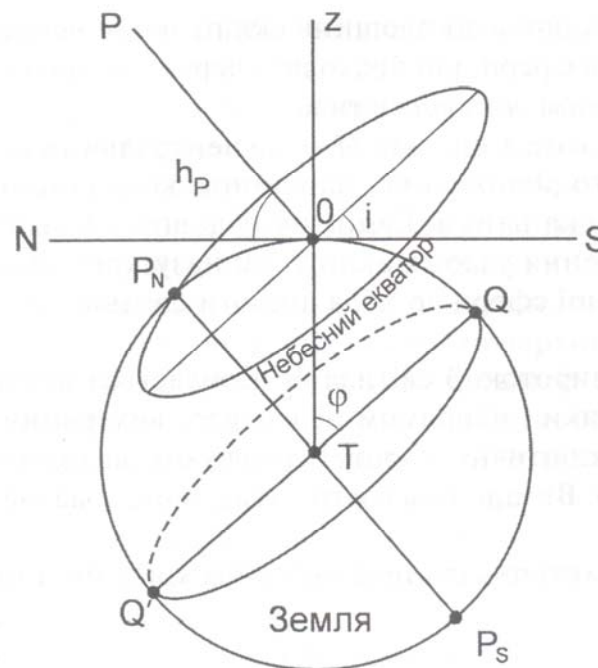


Рис. 1.3. Висота полюса над горизонтом

1.2. Визначення астрономічних координат

Визначенням та використанням координат небесних тіл, насамперед зір, в різних прикладних та наукових цілях займається розділ астрономії, що має назву *астрометрія*. Це розділ астрономії, що займається побудовою просторово-часових систем відліку та визначенням позиційних і дистанційних характеристик небесних об'єктів у цих системах. Координати небесних об'єктів дозволяють вивчати особливості обертання Землі, будувати теорії руху тіл Сонячної системи, визначати значення астрономічних сталих.

Основними приладами для визначення координат за допомогою наземних спостережень до кінця XX ст. були універсальний інструмент і меридіанне коло. *Універсальний інструмент* – це переносний прилад, в якого є вертикальне та горизонтальне розградуйовані кола, які дозво-

ляють вимірювати горизонтальні координати (висоту й азимут) небесного об'єкта або земного предмета у певний момент часу. *Меридіанне коло* має лише вертикальне розградуване коло, яке встановлюється у площині меридіану. Це дає можливість за формулами (1.7) знаходити зенітну відстань. Визначення часу, коли спостережуваний об'єкт кульмінує, дозволяє, знаючи зоряний час у цей момент, знайти і другу його координату – пряме сходження. Ми не будемо зупинятися на інших інструментах та методах (зокрема на методі фотографічної астрометрії), бо зараз спостережні можливості класичної наземної оптичної астрометрії майже вичерпані й основними стають методи і засоби астрометричних досліджень за допомогою космічної техніки. Однак треба відзначити, незважаючи на принципову простоту методів визначення астрономічних координат, визначення їх з великою точністю потребує урахування цілої низки поправок, або, *редукцій*, пов'язаних як з орбітальним і обертальним рухом Землі, так і технічного характеру. Тому це потребує великої, кропіткої та вельми кваліфікованої праці.

Зупинимось коротко на редукціях, необхідність яких викликана рухом Землі. Це, по-перше, поправка за *аберацію світла*, викликана тим, що швидкість орбітального руху Землі v не знехтовно мала порівняно зі швидкістю розповсюдження електромагнітних хвиль у пустоті. Ця поправка дорівнює $\alpha = v/c \cdot \sin \theta \approx 20.50'' \cdot \sin \theta$, де θ – кутова відстань між світилом і точкою неба, в яку направлено рух спостерігача. По-друге, це вплив на системи екваторіальних або екліптичних координат *прецесії* осі обертання Землі, яка описує конус навколо нормалі до площини екліптики, і тим самим приводить до зміщення точки весняного рівнодення – початку відліку відповідної координати. Внаслідок цього екліптичні довготи зір змінюються за рік на $50.26''$, обидві екваторіальні координати теж змінюються, але більш складно. Прецесія спричиняється гравітаційною дією на стиснену Землю з боку Сонця та Місяця, її швидкість пропорційна *динамічному стисненню* Землі

$$H = \frac{C - A}{A}, \quad (1.8)$$

де A і C – екваторіальний та полярний моменти інерції Землі. Сумування кутових швидкостей прецесій від Сонця та Місяця дає для *місячно-сонячної прецесії* період у 25800 років. На цю регулярну прецесію накладаються коливання земної осі, викликані дією на Землю інших планет. Цей ефект має назву *нутації*. Період основної гармоніки нутації дорівнює 18.6 років, а її амплітуда $9.21''$.

Поряд з вимушеною місячно-сонячною прецесією має місце і *вільна прецесія*, що приводить до періодичного зміщення осі обертання Землі

в тілі Землі. Якби Земля була абсолютно твердим тілом, то період *вільної прецесії* також визначався б її динамічним стисненням і дорівнював би 305 добам. Але речовина Землі утворює деформоване суцільне середовище. Це значно ускладнює теорію обертального руху Землі. За рахунок деформацій, що виникають під дією відцентрової сили, стають відмінними від нуля і відцентрові моменти інерції Землі. Тому векторні рівняння обертального руху (рівняння Ейлера) доводиться замінити тензорним узагальненням. Внаслідок цього період вільної прецесії визначається вже таким виразом для динамічного стиснення:

$$H = \frac{C - A - (\omega^2 k R^5) / 3G}{A + (\omega^2 k R^5) / 3G}, \quad (1.9)$$

де ω – кутова швидкість обертання Землі, R – її радіус, G – гравітаційна стала, а k – коефіцієнт *Лява*, який певним чином характеризує пружні властивості речовини Землі. Відповідний період вільної прецесії деформованої Землі (так званий *чандлерівський період*) дорівнює 437 добам. Амплітуда її дуже мала. За цей час полюси Землі описують досить складну криву в межах квадрата зі стороною всього в 30 метрів, яка формується під впливом незначних змін у моментах інерції Землі під впливом сезонних переміщень повітряних мас, океанських течій та великомасштабних геологічних процесів.

Треба також враховувати відносне паралактичне зміщення спостережуваного об'єкта і спостерігача. Для тіл Сонячної системи це *добовий паралакс* p' , який залежить від зенітної відстані об'єкта і відстані до нього. Величина $p' = p_e \sin z$, де p_e – *горизонтальний екваторіальний паралакс*. Останній визначається як $R_e / \Delta = \sin p_e$, де R_e – екваторіальний радіус Землі, а Δ – геоцентрична відстань об'єкта. Найбільший горизонтальний паралакс має, звичайно, Місяць (середнє значення $p_e = 57'$, $\Delta = 384400$ км). Особливе значення має середня величина горизонтального паралаксу Сонця ($p_e = 8.79''$). Бо вона визначає середнє значення відстані між Сонцем і Землею a , або так звану *астрономічну одиницю* (*а.о.*) – основну одиницю для вимірювання відстаней у Сонячній системі. Її значення (1 а. о. 149.6 млн. км) визначає і всю шкалу відстаней поза Сонячною системою – в Галактиці та Метагалактиці. Відстані до зір зв'язані з їхнім *річним паралаксом* π , що визначається так: $\sin \pi = a / r$, де r – відстань зорі від Сонця. Оскільки річні паралакси дуже малі, то в секундах дуги $\pi'' = 206265 / r$. За рік кожна зоря описує на небі еліпс, з великою піввіссю π та малою – $\pi \sin \beta$, де β – екліптична широта. Якщо ж ввести одиницю довжини *парсек* (паралакс-секунда, пк) – відстань, на якій річний паралакс дорівнює одній дуговій секунді, то

відстань r у парсеках є $1/\pi''$. Один парсек дорівнює 206265 $\alpha \approx 3.1 \cdot 10^{13}$ км. Найбільший річний паралакс має зоря α Центавра ($\pi = 0.76''$). Характерні значення відстаней до інших найближчих до Сонця зір – десятки парсеків, масштаби у межах Галактики – це кілопарсеки (Кпк), у межах Метагалактики – мегапарсеки (Мпк). Поряд з одиницею відстані «парсек» використовується у популярній літературі, одиниця «світловий рік» – відстань, яку світло проходить за один рік. Зв'язок між цими одиницями такий – 1 св. р. = 3.26 пк.

Нарешті, при наземних спостереженнях, які ведуться крізь земну атмосферу, треба вводити поправку за *рефракцію* світла в атмосфері ρ , значення якої залежить, насамперед, від зенітної відстані спостережуваного об'єкта і в першому наближенні при значеннях z , не близьких до 90° , величина $\rho'' \approx 58.2'' \operatorname{tg} z$. При обробці спостережень користуються спеціальними таблицями рефракції, обрахованими за певними теоріями цього явища для нормальних умов за температурою і тиском, вводячи поправки за фактичні значення атмосферного тиску та температури повітря.

Усі вищезгадані редукації мають те чи інше природне походження. Але при астрометричних спостереженнях доводиться враховувати також і поправки, пов'язані з відхиленнями реальних інструментів спостереження, що використовуються, від ідеальних (*інструментальні поправки*) – гнуття труби, що використовується для візування спостережного об'єкта, відхилення площини меридіанного кола від площини небесного меридіана, нерівномірність поділок меридіанного кола тощо.

Координати зір змінюються також з плином часу і внаслідок руху зір відносно Сонця, точніше кажучи, від компоненти цього руху в площині, перпендикулярній напрямку на зорю. Величина цієї зміни за один рік має назву *власного руху* зорі $\mu = \sqrt{\mu_\delta^2 + (15\mu_\alpha^s \cos \delta)^2}$ (зазвичай у секундах дуги за рік), де μ_δ – власний рух за схиленням, а μ_α^s – зміна за рік прямого сходження зорі внаслідок її руху у просторі в секундах часу. Списки зір з їхніми екваторіальними координатами, що віднесені до певного положення екватора і точки весняного рівнодення (певного рівнодення) і певного моменту часу (певної епохи) утворюють *зоряні каталоги*. Зазвичай у цих каталогах вказуються також річний паралакс, власний рух і спектральний клас зорі, якщо ці величини відомі. Дані зоряних каталогів відображаються також на *зоряних картах*.

Визначення відстаней до зір було одним з найважливіших завдань астрономії XVIII–XIX століть. Перші зоряні паралакси були визначені лише у кінці 1830-х рр. (В. Я. Струве, Ф. Бессель, Д. Гендерсон). І саме при спробах з їх визначення були відкриті власні рухи зір (Е. Галлей, 1718 р.), нутація та аберація світла (Дж. Брадлей, 1727 р. і 1729 р.).

Зоряні каталоги і зоряні карти мають дуже широкі та різноманітні застосування. Однак їх можна згрупувати у два основні напрями – практична астрономія і фундаментальна астрометрія.

Головною задачею *практичної астрономії* є визначення координат на поверхні Землі та в навколосемному просторі. В основі її розв'язання лежать зв'язки між координатами зір і географічними координатами точки на поверхні Землі та рішення трикутників, утворених двома точками з відомими координатами і точкою, координати якої треба знайти. Важливим застосуванням методів практичної астрономії є вирішення проблем *астрономо-геодезії*, тобто вивчення розмірів і форми Землі для використання цих даних у науках про Землю і у прикладних цілях. Останнім часом тут вже превалюють методи *космічної геодезії*. При цьому вдається розв'язувати відповідні задачі з великою точністю, так точність визначення відстаней сягає дециметра і менше. Завдяки цьому вдалося довести існування горизонтального дрейфу континентів, точніше, горизонтальних рухів тектонічних плит, що складають земну кору, які мають швидкість порядку сантиметрів на рік.

Практично важливим є і застосування різноманітних методів практичної астрономії в навігації у мореплавстві, авіації та космонавтиці. Зупинимось лише на принципах роботи GPS (Global Positioning System, США) та системи ГЛОНАСС (СРСР–Росія), які останнім часом знаходять все більше різноманітних застосувань. В їх основі лежать системи штучних супутників Землі у кількості не менше 24 супутників, виведених на такі орбіти, що з кожної точки земної поверхні та навколосемного простору можна одночасно спостерігати від чотирьох до восьми супутників. З одного боку, радіотехнічні системи відслідковують рух усіх супутників таким чином, що у будь-який момент часу відомі їхні координати. З іншого боку, за часом надходження радіосигналу від споживача системи визначаються відстані від нього до супутників, що заходяться в межах його видимості. Потім розв'язується система рівнянь

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 = c^2(t_{io} - t_{ie}) \quad (1.10)$$

відносно координат споживача x , y і z , де x_i , y_i , z_i – координати супутників, а t_{io} і t_{ie} – моменти відправлення та прийому сигналів. У реальних системах доводиться враховувати і низку поправок. Насамперед, це поправка годинника у навігаційному пристрої споживача відносно годинників на супутниках і урахування того, що сигнал розповсюджується не в пустоті, а в земній атмосфері. Дані про місцеположення споживача передаються йому і відображаються на екрані його навігаційного пристрою.

Фундаментальна астрометрія має таку назву з двох причин. По-перше, що її головною метою є побудова фундаментальних каталогів зір, а по-друге, що вона дійсно пов'язана з фундаментальними питаннями фізики й астрономії. Як відомо, закони класичної ньютонівської фізики виконуються лише в інерціальних системах відліку. Тобто інерціальні системи координат, що реалізовані певними матеріальними тілами, повинні не взаємодіяти з іншими тілами, бо інакше вони будуть рухатися відносно інших інерціальних систем прискорено. Але, строго кажучи, це неможливо. Тому поняття інерціальної системи координат – це лише певна абстракція, яка фізично може бути реалізована тільки з тим чи іншим наближенням. Головною задачею фундаментальної астрометрії і є реалізація у вигляді сукупності координат небесних тіл (відповідного *фундаментального каталогу* їхніх координат) *фундаментальної системи координат*, гранично близької до інерціальної на даному етапі розвитку науки і техніки. З цим пов'язана і проблема створення системи *астрономічних сталих* – системи величин, що характеризують рух Землі і Сонця, і дозволяють з необхідною точністю обчислювати всі ті редуції координат, про які йшлося вище.

У другій половині XIX – на початку XX ст. були створені фундаментальні каталоги, що включали координати найбільш яскравих зір. Але ці зорі є у середньому більш-менш близькими до Сонця і тому мають відносно великі значення власних рухів. Це приводило до певної рухомості побудованої таким чином системи координат і, тим самим, до збільшення ступеня її неінерціальності. У середині XX ст. була побудована низка фундаментальних каталогів більш слабких зір (ФКСЗ). Але зростання методичних і технічних можливостей і вимог до точності координатно-часових вимірювань виявили недостатність і координатних систем, заснованих на ФКСЗ. Потім радіоастрономічними засобами (методом радіоінтерферометрії з наддовгою базою і точністю визначення координат до 0,1 мілісекунди дуги) була створена система ICRS (International Celestial Reference System) – Міжнародна небесна опорна система, заснована на спостереженнях зараз уже понад 3400 позагалактичних радіоджерел, власні рухи яких достатньо малі. У 1989–1993 роках було виконано міжнародний космічний проект «Гіппаркос». На підставі неодноразового вимірювання кутових відстаней між різними парами зір і подальшого розв'язку відповідних рівнянь сферичної тригонометрії визначалися координати, власні рухи та річні паралакси цих зір. У результаті був створений зоряний каталог «Гіппаркос», що включав координати (з точністю до однієї мілісекунди дуги) понад 118 тис. зір та їхні власні рухи та паралакси. Внаслідок цього кількість зір з визначеними паралаксами збільшилася більш ніж у сім разів порівняно з числом зір, для яких паралакси були знайдені за

наземними спостереженнями. Крім того, був створений каталог «Тихо», в якому наведені координати близько 1 млрд зір з точністю у 10 мілісекунд дуги. Постала задача порівняння систем координат, що їх реалізовували каталоги ICRS та «Гіппаркос» і дослідження ступеня їх інерціальності чи неінерціальності. На основі аналізу, створеного в НДІ астрономії Харківського університету, каталогу положень і власних рухів 314 млн зір було встановлено певну незначну неінерціальність системи «Гіппаркос», яка обертається зі швидкістю кілька мілісекунд дуги на рік, що викликано обертальним рухом нашої Галактики. Таким чином, в останні десятиріччя зроблено ще один важливий крок у створенні надійної основи для вивчення просторово-часової структури нашого Всесвіту.

1.3. Закони руху небесних тіл

Після того, як визначені координати спостережуваного об'єкта та відстані до нього у різні послідовні моменти часу, виникає проблема вивчення законів його руху у просторі. Цим займається розділ астрономії, який отримав назву *небесна механіка*. Розглянемо основні її положення.

Головною силою, яка визначає поступальний рух небесних тіл, є гравітація. Однак при описі руху частинок достатньо малого розміру доводиться враховувати і силу променевого тиску світла. Важливою обставиною є і те, що у власному гравітаційному полі достатньо великі небесні тіла (зорі та планети) набувають сферичної форми, відхилення від якої під дією відцентрової сили навіть у тіл, що мають більш–менш швидке осьове обертання, відносно невеликі. Це разом з тим, що відстані між небесними тілами, як правило, значно перевищують їх розміри, визначає те, що дуже часто при описі руху цих тіл можна нехтувати їх формою та розміром, тобто розглядати як *матеріальні точки*. Тоді гравітаційна взаємодія цих тіл описується добре відомим законом всесвітнього тяжіння Ньютона.

Але все ж таки є важливі випадки, коли наближення матеріальних точок недостатнє. Це рух супутника планети, насамперед, штучного на відстані від планети, зіставною з її радіусом, або рух компонентів у тісній подвійній зоряній системі, коли форма одного компонента відчутно відрізняється від сферичної під впливом іншого компонента. У цих випадках потрібно відшукувати опис гравітаційного поля цих тіл у вигляді залежності їх *гравітаційного потенціалу* V від координат довільної точки у просторі, що оточує ці тіла. Як відомо, в пустому просторі гравітаційний потенціал довільного тіла задовольняє рівнянню Лапласа. А розв'язок цього рівняння може бути записаний у вигляді ряду за *сферичними функціями*. Коефіцієнти цього ряду є інтегралами від густини тіла

з ваговими функціями, що дорівнюють відповідним сферичним функціям. Загальний вигляд цього ряду такий:

$$V = \frac{GM}{r} \left[1 + \sum_{n=2}^{\infty} J_n P_n(t) \left(\frac{a}{r} \right)^n + \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=1}^n (C_n^m \cos m\lambda + S_n^m \sin m\lambda) P_n^m(t) \left(\frac{a}{r} \right)^n \right], \quad (1.11)$$

де G – гравітаційна стала, M – маса тіла, $t = \cos \theta$, r , λ , θ – сферичні координати точки, в якій відшукується потенціал, P_n – поліноми Лежандра, а P_n^m – приєднані функції Лежандра. Розгляд виразів для коефіцієнтів ряду (1.11) показує, що коефіцієнти J_n не залежать від довготи λ і обертаються на 0 тільки на паралелях, вони визначають *зональні* гармоніки гравітаційного потенціалу. Коефіцієнти C_n^n та S_n^n не залежать від полярної відстані θ і визначають *секторіальні* гармоніки потенціалу, бо обертаються на 0 тільки на меридіанах. Нарешті, коефіцієнти C_n^m та S_n^m при $m < n$ відповідають *тесеральним* гармонікам, бо обертаються на 0 тільки на криволінійних трапеціях – тесерах, утворюваних паралелями та меридіанами. Якщо полярне стиснення зірки чи планети відчутне, але невелике, то непоганим наближенням для їх гравітаційного потенціалу може бути вираз, у якому вдержана в ряді (1.11) лише друга зональна гармоніка:

$$V = \frac{fM}{r} \left[1 + J_2 \frac{3 \cos^2 \theta - 1}{2} \left(\frac{a}{r} \right)^2 \right]. \quad (1.12)$$

Але повернемося до наближення матеріальних точок. У небесній механіці розглядаються такі головні задачі. Це *задача багатьох тіл* – задача про рух скінченої кількості матеріальних точок під дією сил взаємного тяжіння. Важливим її випадком є відповідна *задача трьох тіл*. Ці задачі є не інтегровними у скінченому вигляді. Але особливо важливою є *задача двох тіл*, як у силу своєї інтегрованості у скінченому вигляді, так і в силу її широкої застосовності в астрономії. Це можуть бути задачі про рух планети або іншого тіла Сонячної системи навколо Сонця, про рух природного або штучного супутника планети, про рух у системі подвійної зорі.

На підставі другого закону динаміки та закону всесвітнього тяжіння Ньютона рівняння руху однієї матеріальної точки з масою m відносно іншої точки з масою M має такий вигляд:

$$\ddot{\vec{r}} = -GM \frac{\vec{r}}{r^3} - Gm \frac{\vec{r}}{r^3}, \quad (1.13)$$

де \vec{r} – радіус-вектор точки m у системі координат з початком у точці M . Тут перший доданок справа визначає прискорення, яке отримує точка m під впливом точки M , а другий – це сила інерції (на одиницю маси), яка потрібна, щоб врахувати неінерціальність системи координат, пов'язаної з точкою M . Якщо ввести для *гравітаційної сталої* даної задачі двох тіл позначення $\mu = G(M + m)$, рівняння (1.13) можна привести до такого вигляду:

$$\ddot{\vec{r}} + \frac{\mu\vec{r}}{r^3} = 0. \quad (1.14)$$

Розв'язок цього векторного рівняння (або системи шести скалярних диференціальних рівнянь) можна знайти за допомогою його перших інтегралів. Це *класичні інтеграли*, що виражають закони збереження моменту імпульсу та енергії. Вони у розрахунку на одиницю маси можуть бути записані у такий спосіб:

$$\vec{r} \times \dot{\vec{r}} = \vec{c} \quad \text{та} \quad V^2 = \frac{2\mu}{r} + h, \quad (1.15)$$

де V тепер означає модуль швидкості точки m , \vec{c} – вектор її моменту імпульсу, h – подвоєна повна енергія цієї точки. Крім того, рівняння задачі двох тіл має ще один специфічний для неї перший інтеграл – *інтеграл Лапласа*:

$$\dot{\vec{r}} \times \vec{c} - \frac{\mu\vec{r}}{r} = \vec{\lambda}. \quad (1.16)$$

Однак ці два векторні та один скалярний інтеграли не є незалежними, вони зв'язані такими двома співвідношеннями:

$$\vec{c} \times \vec{\lambda} = 0 \quad \text{та} \quad \lambda^2 = \mu^2 + hc^2. \quad (1.17)$$

З інтеграла моменту видно, що радіус-вектор і вектор швидкості перпендикулярні сталому вектору моменту, а значить лежать весь час у одній і тій самій площині з векторним рівнянням $\vec{c} \cdot \vec{r} = 0$, тобто рух у задачі двох тіл є *плоским*. А перше із співвідношень (1.17) показує, що і *вектор Лапласа* $\vec{\lambda}$ лежить у цій же площині.

Знайдені перші інтеграли та зв'язки між ними дозволяють знайти рівняння траєкторії або, як кажуть в астрономії, рівняння *орбіти* точки m . Якщо у площині орбіти ввести полярну систему координат r, ν , де полярний кут ν відраховується від напрямку вектора Лапласа, то *рівняння орбіти у задачі двох тіл* буде таким:

$$r = \frac{p}{1 + e \cos \nu}. \quad (1.18)$$

Це рівняння є, як відомо, рівнянням кривих другого порядку або конічних перерізів. При цьому виявляється, що *фокальний параметр* орбіти $p = c^2 / \mu$, а її *ексцентриситет* $e = \lambda / \mu$. Тобто орбітою матеріальної точки у задачі двох тіл є одна з кривих другого порядку – коло ($e = 0$), еліпс ($0 < e < 1$), парабола ($e = 1$) або гіпербола ($e > 1$) залежно від значення її ексцентриситету. У цьому твердженні міститься *перший закон Кеплера* в його узагальненому вигляді. Значення параметра та ексцентриситету, як і сталих перших інтегралів, визначаються з початкових або крайових умов. Тепер ще треба знайти *закон руху* нашої точки за цією орбітою, тобто залежність кута ν , що має назву *істинної аномалії*, від часу t . Розгляд модуля інтеграла моменту приводить до закону руху в такому вигляді:

$$\int_0^{\nu} \frac{d\nu}{(1 + e \cos \nu)^2} = \frac{\sqrt{\mu}}{p^{3/2}} (t - \tau), \quad (1.19)$$

де стала інтегрування τ визначає *момент часу*, в якій матеріальна точка проходить точку своєї орбіти із значенням істинної аномалії, яке дорівнює 0. А з рівняння орбіти видно, ця точка є найближчою до притягуючого центра точкою орбіти, її *періцентром* (перигелієм у разі геліоцентричної орбіти, перигеєм у разі геоцентричної). Тепер ще треба перейти від полярної системи r, ν до вихідної системи x, y, z (це може бути екваторіальна чи екліптична системи). Для цього вводиться *орбітальна* прямокутна система координат ξ, η, ζ таким чином. Вісь ξ спрямовується за лінією перетину площини xu з площиною орбіти (*лінією вузлів*), вісь ζ спрямовується перпендикулярно площині орбіти, тоді вісь η буде спрямована у площині орбіти перпендикулярно осі ξ . Прямокутні орбітальні координати нашої точки є, очевидно, $\xi = r \cos \nu$, $\eta = r \sin \nu$, $\zeta = 0$. Введемо також кути Ейлера, що визначають положення орбітальної системи відносно вихідної (рис. 1.4): кут між віссю x і лінією вузлів (*довготу вузла* Ω), кут між лінією вузлів і напрямом на періцентр орбіти (*періцентрову відстань* ω) і кут між основною координатною площиною (екватора або екліптики) та площиною орбіти (*нахилення орбіти* i). Розглядаючи відповідні сферичні трикутники, можна знайти тепер спрямовуючі косинуси радіуса-вектора \vec{r} і координати нашої точки m у вихідній системі координат:

$$\begin{aligned} x &= r(\cos \Omega \cos u - \sin \Omega \sin u \cos i), \\ y &= r(\sin \Omega \cos u + \cos \Omega \sin u \sin i), \\ z &= r \sin u \sin i, \end{aligned} \quad (1.20)$$

де *аргумент широти* $u = \omega + \nu$ – кутова відстань точки m від вузла орбіти.

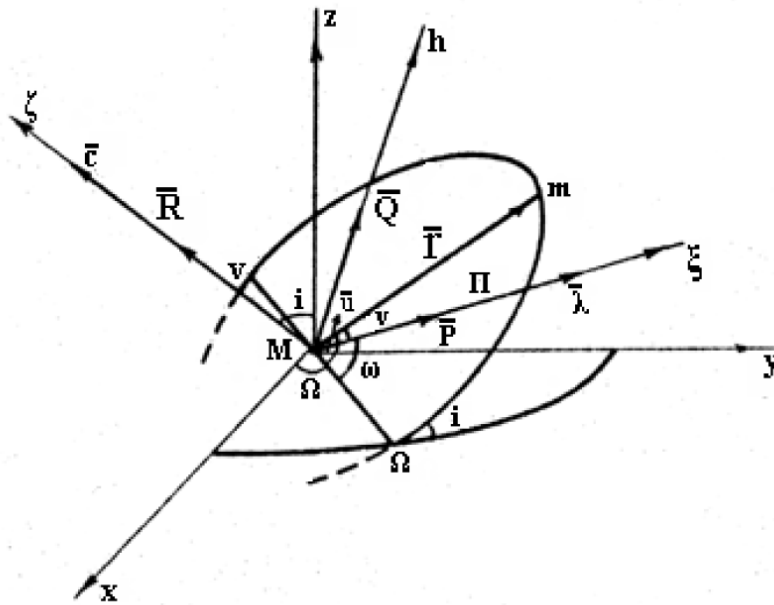


Рис. 1.4. Орбітальна система координат і кути Ейлера

Сталі інтегрування диференціальних рівнянь руху небесного тіла, які визначають орієнтацію орбіти тіла у просторі, її форму і розміри, рух тіла за цією орбітою в астрономії мають назву *елементів орбіти*. У розглянутій задачі двох тіл - це сталі $\Omega, \omega, i, p, e, \tau$, їх називають *кеплерівськими елементами орбіти*.

Із закону збереження енергії та другого із співвідношень (1.17) випливають відомі формули для *колової* та *параболічної* швидкостей і першої та другої космічних швидкостей:

$$V_c = \sqrt{\frac{\mu}{r}}, \quad V_p = \sqrt{\frac{2\mu}{r}}, \quad V_1 = \sqrt{\frac{\mu}{R}}, \quad V_2 = \sqrt{\frac{2\mu}{R}}, \quad (1.21)$$

де R – радіус планети чи зорі.

Модулю інтеграла моменту можна надати такого вигляду:

$$dS = \frac{1}{2} c dt \quad \text{або} \quad S = \frac{1}{2} ct + c_0, \quad (1.22)$$

де dS – площа сектора, утвореного радіусами-векторами \vec{r} і $\vec{r} + d\vec{r}$ у два близькі моменти часу t і $t + dt$. Одержані співвідношення виражають закон сталості секторіальної швидкості або *другий закон Кеплера*.

Найбільш важливим випадком руху в задачі двох тіл є *еліптичний рух*. Для обчислення інтеграла (1.19) у цьому випадку застосовується така заміна змінних:

$$\operatorname{tg} \frac{\nu}{2} = \sqrt{\frac{1+e}{1-e}} \operatorname{tg} \frac{E}{2}, \quad (1.23)$$

де величина E – це *ексцентрична аномалія*, геометричний зміст якої показаний на рис. 1.5. Інтегрування (1.19) в цьому випадку показує, що

$$E - e \sin E = \frac{\sqrt{\mu}}{a^{3/2}}(t - \tau) \text{ або } E - e \sin E = n(t - \tau) \text{ або } E - e \sin E = M, \quad (1.24)$$

де $n = \sqrt{\mu} / a^{3/2}$ – середня кутова швидкість повороту радіуса-вектора точки, що рухається за еліптичною орбітою, або її *середній рух*, а величина $M = n(t - \tau)$, що має розмірність кута і змінюється пропорційно часу, має назву *середньої аномалії*. Рівняння (1.24) називається *рівнянням Кеплера*. Воно є трансцендентним, але легко розв'язується методом ітерацій, особливо тоді, коли (як це часто і буває) малим є значення ексцентриситету ($e \ll 1$). Після цього можна обчислити істинну аномалію і координати точки, що рухається за еліптичною орбітою. Закон збереження енергії в цьому випадку може за допомогою другого зі співвідношень (1.17) бути приведений до такого зручного вигляду:

$$V^2 = \mu \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right), \quad (1.25)$$

де a – велика піввісь орбіти.

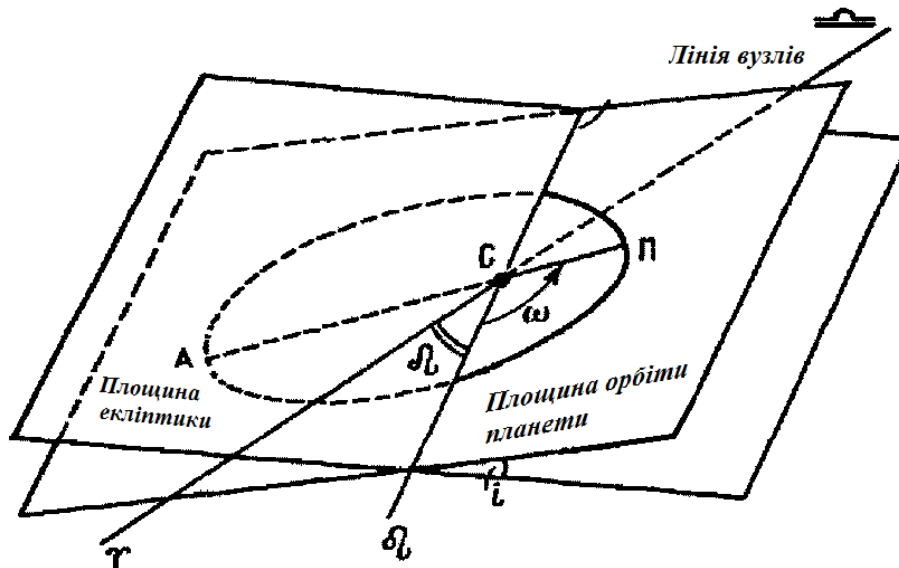


Рис. 1.5. Елементи орбіти в еліптичній задачі двох тіл

Якщо покласти різницю часу $t - \tau$ періоду обертання точки за еліпсом, то зміна ексцентричної аномалії дорівнюватиме 2π , і рівняння Кеплера дасть таке:

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\mu}} a^{3/2}, \quad (1.26)$$

або для двох матеріальних точок, обертання яких навколо одного і того ж притягуючого центра розглядається у межах задачі двох тіл, матимемо, що

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{M + m_2}{M + m_1} \frac{a_1^3}{a_2^3}. \quad (1.27)$$

Останні два співвідношення виражають *третій закон Кеплера* в його модифікованому Ньютоном вигляді. Цей закон має виключно велике значення для астрофізики. Його застосування – це єдиний прямий засіб визначення мас небесних тіл.

Якщо стала інтеграла моменту $\vec{c} = 0$, то матимемо вироджений випадок задачі двох тіл – *прямолінійний рух*, що відбувається за прямою, що проходить через притягуючий центр. Якщо точка рухається від цього центра, то її рух фінітний при швидкості, меншій від параболічної, та інфінітний, коли швидкість більша або дорівнює параболічній.

Однак задача двох тіл – це лише перше наближення для майже всіх випадків руху одного небесного тіла навколо іншого. Завжди діють ще якійсь сили, хоча і відносно малі поряд з дією центрального тіла як матеріальної точки. Це вплив інших планет на рух даної планети, вплив дії Сонця або природного супутника планети на рух іншого природного супутника або її штучного супутника, вплив опору атмосфери на рух супутника, вплив відхилення гравітаційного поля центрального тіла від сферично-симетричного тощо. Тобто крім центральної ньютонівської сили тяжіння $\mu\vec{r}/r^3$ діє ще якась сила \vec{F} , але за умови, що $F \ll \mu/r^2$. При виконанні вказаної умови ця додаткова сила має назву *збурюючої сили*, рух матеріальної точки з урахуванням дії цієї сили – це *збурений рух* цієї точки, а рух без урахування сили \vec{F} – це її *незбурений рух*.

Але навіть у найпростішому випадку тоді, коли збурююча сила – це сила тяжіння на дану матеріальну точку ще однієї матеріальної точки з масою, малою порівняно з масою центрального тіла, одержуємо неінтегроване в скінченному вигляді рівняння руху, і постає задача наближеного інтегрування та дослідження характеру збуреного руху. Основним методом у небесній механіці є метод варіації довільних сталих інтегрування рівнянь незбуреного руху. А такими в небесній механіці є елементи орбіти. Тому в астрономії цей метод має назву методу *оскулюючих елементів* або *оскулюючих орбіт*. Фізичний зміст методу такий – ми відшукуємо такі залежності елементів орбіти від аргументу (часу), щоб координати і швидкість нашої точки у збуреному русі

дорівнювали координатам і швидкості точки у незбуреному русі з миттєвими значеннями елементів орбіти. При цьому виявляється, що збурена орбіта у кожній своїй точці має дотичною певну незбурену орбіту, що відповідає цим миттєвими оскулюючим значенням елементів. Збурена орбіта у кожній точці ніби «цілується» з відповідною оскулюючою орбітою. Звідси і походження цього терміну «оскулюючий».

З аналітичної точки зору застосування вказаного методу передбачає перехід від рівняння збуреного руху у координатах

$$\ddot{\vec{r}} + \frac{\mu\vec{r}}{r^3} = \vec{F} \quad (1.28)$$

до системи шести диференціальних рівнянь для оскулюючих елементів. Цей перехід можна здійснити різними способами і для різних наборів оскулюючих елементів. При цьому треба розрізняти два випадки – один той, коли збурююча сила має потенціал і її компоненти дорівнюють частинним похідним від цього потенціалу за координатами, інший – коли збурююча сила не є потенціальною. Нижче наведена система рівнянь для потенціальної збурюючої сили і *еліптичних* елементів, яка широко застосовується для опису збуреного руху планет Сонячної системи (це *рівняння Лагранжа*):

$$\begin{aligned} \frac{da}{dt} &= \frac{2}{na} \frac{\partial R}{\partial \varepsilon} \\ \frac{de}{dt} &= \frac{\sqrt{1-e^2}}{na^2 e} \frac{\partial R}{\partial \pi} - \frac{1}{na^2} \frac{e\sqrt{1-e^2}}{1+\sqrt{1-e^2}} \frac{\partial R}{\partial \varepsilon} \\ \frac{di}{dt} &= -\frac{1}{na^2 \sqrt{1-e^2} \sin i} \frac{\partial R}{\partial \Omega} - \frac{\operatorname{tg}(i/2)}{na^2 \sqrt{1-e^2}} \left(\frac{\partial R}{\partial \pi} + \frac{\partial R}{\partial \varepsilon} \right) \\ \frac{d\Omega}{dt} &= \frac{1}{na^2 \sqrt{1-e^2} \sin i} \frac{\partial R}{\partial i} \\ \frac{d\pi}{dt} &= \frac{\operatorname{tg}(i/2)}{na^2 \sqrt{1-e^2}} + \frac{\sqrt{1-e^2}}{na^2 e} \frac{\partial R}{\partial e} \\ \frac{d\varepsilon}{dt} &= -\frac{2}{na} \frac{\partial R}{\partial a} + \frac{\operatorname{tg}(i/2)}{na^2 \sqrt{1-e^2}} \frac{\partial R}{\partial i} + \frac{1}{na^2} \frac{e\sqrt{1-e^2}}{1+\sqrt{1-e^2}} \frac{\partial R}{\partial e}. \end{aligned} \quad (1.29)$$

Тут R – збурюючий потенціал, a – велика піввісь оскулюючої орбіти, $\pi = \Omega + \omega$ – її довгота перицентра, $\varepsilon = \Omega + \omega + M_0$ – це середня довгота у початкову епоху t_0 , а M_0 – середня аномалія в початкову епоху t_0 . Вигляд рівнянь (1.29) досить громіздкий, вони нелінійні й тому теж неінтегровані. У чому ж тоді сенс переходу від рівняння у координатах до

рівнянь в оскулюючих елементах? Відповідь на це питання пов'язана з нерівністю $F \ll \mu/r^2$. За відсутності збурюючої сили елементи орбіти є сталими. Отже з міркувань неперервності в силу вказаної нерівності, будуть відносно малими і праві частини рівнянь для оскулюючих елементів у випадку збуреного руху. Тобто оскулюючі елементи будуть функціями, що повільно змінюються з часом на відміну від координат. А тому рівняння для них є значно зручнішими для будь-якого способу їх наближеного чисельного або аналітичного інтегрування, ніж рівняння руху в координатах. А розв'язавши рівняння для оскулюючих елементів наближено з потрібною точністю для потрібних моментів часу, можна потім обчислити координати небесного тіла, рух якого вивчається, за допомогою формул задачі двох тіл. Різниця між координатами точки або елементами орбіти у збуреному та незбуреному рухах – це відповідне їх *збурення*. А можливість розкладу правих частин рівнянь збуреного руху в ряди Фур'є приводить до того, що збурення елементів орбіти можна представити у вигляді ряду, який містить у першому наближенні члени, які лінійно залежать від часу (*вікові збурення*) і певну кількість *періодичних збурень* з малою амплітудою.

Зазначимо, що таблиці координат якогось небесного тіла, як правило, екваторіальних, для ряду рівновіддалених моментів часу в астрономії мають назву *ефемерид* цього тіла. Заздалегідь обчислені ефемериди Сонця, Місяця, великих і малих планет публікуються в астрономічних щорічниках і астрономічних календарях. Останнім часом усе більше поширюється обчислення потрібних ефемерид на персональних комп'ютерах за допомогою відповідного програмного забезпечення і електронних каталогів елементів орбіт небесних тіл. Значно більш складною є обернена задача – задача знаходження елементів орбіт небесних тіл за даними їх астрометричних спостережень, тобто задача *визначення орбіт*.

Важливою задачею крім наближеного розв'язання рівнянь збуреного руху є задача якісного дослідження властивостей збуреного руху. Насамперед, важливо мати уявлення про *стійкість* цього руху. Ще П. Лаплас довів свою знамениту *теорему про стійкість Сонячної системи*, точніше про стійкість руху в системі матеріальних точок, у якій маса однієї точки значно перевищує маси усіх інших точок (наприклад, Сонце і великі планети). За цією теоремою, якщо відсутні вікові збурення великих півосей і початкові значення ексцентриситетів і нахилень орбіт малі, то рух точок малої маси буде стійким, тобто значення ексцентриситетів та нахилень орбіт і надалі будуть залишатися малими. Але Лаплас довів свою теорему лише у першому наближенні, тобто тільки для скінченного проміжку часу. Дослідження стійкості руху в розглядуваній задачі на необмеженому проміжку часу виявилось дуже складною проблемою. Лише у 60-ті р.

минулого століття було показано, що рух у цій задачі є стійким для всіх початкових умов за винятком тих, що приводять до резонансних і майже резонансних співвідношень між періодами орбітальних рухів точок малої маси. Досліджується також питання про наявність періодичних збурених рухів.

Нарешті, декілька слів про найважливіші результати у задачі трьох тіл. Ця задача має назву *обмеженої задачі трьох тіл*, якщо маса однієї точки m знехтовно мала порівняно з масами двох інших точок m_1 та m_2 , і ця точка не впливає на рух точок m_1 та m_2 , так званих «важких» точок. Ці точки відповідно до цього мають кеплерівський рух. Якщо цей рух коловий або еліптичний, то доцільно перейти до системи координат, яка обертається разом з важкими точками навколо їх центра мас (рис. 1.6). Тоді можна довести, що в цій системі координат існують п'ять точок відносної рівноваги точки малої маси – *точки лібрації*. Дві з цих точок утворюють з «важкими» точками конфігурації рівнобічних трикутників (*трикутні точки лібрації* L_4 і L_5). Інші три точки лежать на прямій, що сполучає «важкі» точки (це *прямолінійні точки лібрації*). Точка L_1 розміщується поміж «важкими» точками. Вона має особливо важливе значення для астрономії та космонавтики. Якщо маса $m_2 \gg m_1$, то відстань точки L_1 до точки m_1 дорівнює приблизно $p(m_1/m_2)^{1/3}$, де p – параметр орбіти однієї «важкої» точки відносно іншої. Зовнішня точка лібрації L_2 лежить з боку меншої за масою «важкої» точки, а точка L_3 – з боку точки з більшою масою.

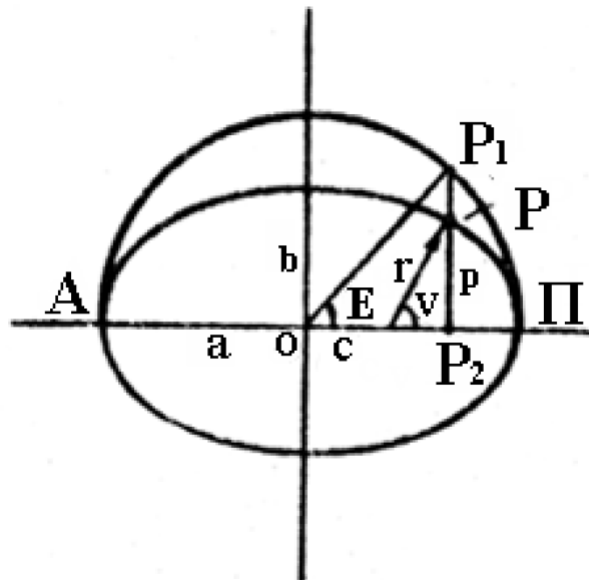


Рис. 1.6. Ексцентрична та істинна аномалії

У точках лібрації обертаються на 0 і відносна швидкість і відносне прискорення. Точки, в яких обертається на 0 лише відносна швидкість, утворюють певні поверхні, форма яких залежить від початкових умов, – це *поверхні Хілла*. Особливе значення має у фізиці тісних подвійних зоряних систем поверхня Хілла, що в перерізі має форму вісімки з самоперетином у внутрішній точці лібрації (рис. 1.7). Внутрішні простори цієї поверхні Хілла, що оточують кожен з «важких» точок, мають назву *порожнин Роша* цих точок.

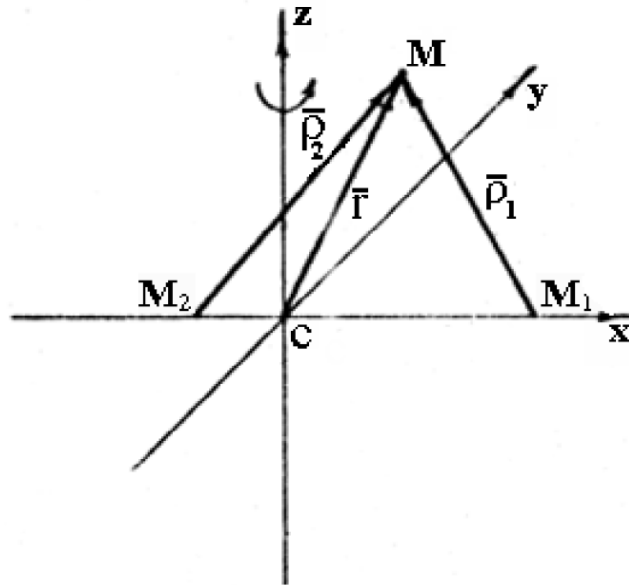


Рис. 1.7. Обмежена кругова задача трьох тіл

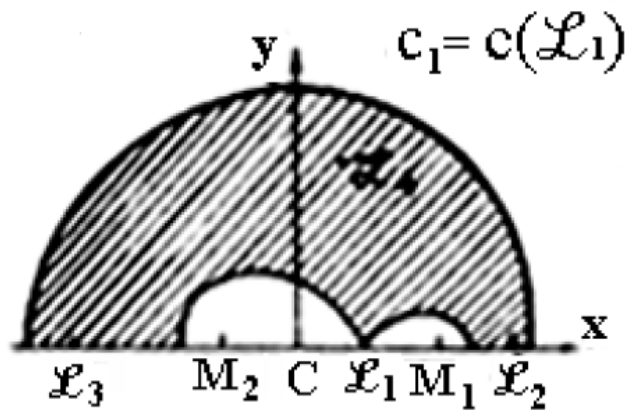


Рис. 1.8. Порожнини Роша

Порожнини утворюються обертанням рисунка навколо осі x

Небесна механіка продовжує і зараз активно розвиватися – в ній з’являються нові аналітичні та чисельні методи, продовжуються дослідження стійкості руху небесних тіл тощо.

Вкажемо на один з останніх цікавих результатів цих досліджень. Вже давно відомо, що в обмеженій задачі трьох тіл точка малої маси може

після фінітного руху в околі «важких» точок піти на нескінченність, але їй для цього буде потрібен нескінчений час. А от у задачі чотирьох тіл така точка може віддалитися у нескінченність за скінченний час.

На межі класичної небесної механіки і теоретичної космонавтики розвивається теорія руху штучних небесних тіл – *астродинаміка*. Астродинаміка має з небесною механікою спільну фізичну і математичну основу, але має також багато специфічного у постановці своїх задач, зокрема у проблемі визначення орбіт.

Досить велике значення в астрономії та космонавтиці має поняття про сферу дії менш масивного тіла, яке рухається у полі тяжіння більш масивного тіла, як область простору навколо менш масивного тіла, де рух третього тіла незначної маси буде визначатися цим менш масивним тілом. П. Лаплас визначив радіус сфери дії так – записуються відносні рівняння руху третього тіла у двох системах координат, наприклад, геліоцентричній та планетоцентричній, і дорівнюють один одному модулі правих частин цих рівнянь. Наближено радіус цієї сфери Лапласа $R_L = a\mu^{2/5}$, де a – відстань між першими двома тілами, μ – відношення меншої маси до більшої. Інший можливий підхід до визначення сфери дії полягає в тому, що за її значення береться відстань від тіла меншої маси до внутрішньої прямолінійної точки лібрації у коловій обмеженій задачі трьох тіл (сфера Хілла), тобто $R_X = a(\mu/3)^{1/3}$.

В останні десятиріччя все більше як практичного, так і теоретичного значення набуває *релятивістська небесна механіка*. У межах Сонячної системи достатньо розгляду її задач у слабких гравітаційних полях для пояснення додаткового повороту великої осі планет земної групи та врахування релятивістських поправок при точних балістичних розрахунках в астродинаміці. Поворот великої осі за один оберт планети складає

$$\delta\omega = \frac{24\pi^3 a^2}{c^2 T^2 (1 - e^2)}, \quad (1.30)$$

де c – швидкість світла, а T – кеплерівський період обертання планети. Це дає величини повороту перигелія за сто років для Меркурія $43.03''$, для Венери – $8.62''$, для Землі – $3.84''$, для Марса – $1.35''$.

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. Що таке небесна сфера?
2. Що треба мати для побудови сферичної системи координат?
3. Що таке полюси світу?
4. Який напрям є основним у горизонтальній системі координат?

5. У чому полягає різниця між першою і другою екваторіальними системами координат?
6. Чому для визначення двох координат доводиться використовувати три формули?
7. Чим вимірюється зоряний час?
8. З чим пов'язана необхідність введення сонячного часу та поясного часу?
9. Чим викликана зміна протяжності світлового дня протягом року?
10. З чим пов'язана назва астрономічного інструменту «меридіанне коло» і яке його призначення?
11. Які редуції доводиться вводити до вимірних значень координат небесних тіл?
12. Яка фізична причина викликає астрономічну прецесію осі обертання Землі?
13. Чому дорівнює горизонтальний екваторіальний паралакс Сонця і від чого він залежить?
14. Що таке парсек і чому він дорівнює в астрономічних одиницях і в кілометрах?
15. Що таке власний рух зір?
16. Що лежить в основі роботи сучасних космічних навігаційних систем?
17. Що таке фундаментальна система координат?
18. Якою формулою наближено описується гравітаційне поле осесиметричного тіла з малим стисненням?
19. У чому умовність назв «задача багатьох тіл», «задача трьох тіл»?
20. Що таке задача двох тіл?
21. Які перші інтеграли має задача двох тіл?
22. Який геометричний зміст мають напрями вектора кінетичного моменту та вектора Лапласа?
23. Чому для опису руху у відносній задачі двох тіл потрібно шість елементів орбіти?
24. З яким законом збереження пов'язаний другий закон Кеплера?
25. Які величини пов'язує між собою рівняння Кеплера?
26. Що таке оскулюючі елементи орбіти?
27. Стійкість яких елементів орбіти визначає теорема Лапласа про стійкість Сонячної системи?
28. Що таке обмежена задача трьох тіл?
29. Що таке точки лібрації?
30. Що таке порожнини Роша?
31. Чим викликаний додатковий поворот великої осі орбіти Меркурія на $43''$ за сто років?

ЗАДАЧІ ДО ГЛАВИ 1

1.1. Записати матриці спрямовуючих косинусів для переходу від горизонтальної системи координат до першої екваторіальної системи та від першої екваторіальної системи до екліптичної системи.

1.2. Записати формули переходу від другої екваторіальної системи координат до галактичної системи.

1.3. Обчислити моменти сходу та заходу Сонця у дні літнього та зимового сонцестоянь в Ужгороді (довгота $\lambda = 1^h 29^m$) та Луганську ($2^h 37^m$) за літнім та за зимовим київським часом. Проаналізувати отримані результати з точки зору доцільності щорічного переходу від зимового часу до літнього і навпаки.

1.4. Зоря τ Кита має паралакс $\pi = 0,275''$ та власний рух $\mu = 1,92''$. З якою швидкістю вона рухається в картинній площині і який шлях вона пройде за 10 років?

1.5. Якою (висхідною, не висхідною, незахідною в Україні) є зоря: а) Сиріус (α Великого Пса, $\delta = -16^\circ 43'$), б) Алголь (β Персея, $\delta = +40^\circ 57'$), в) Канопус (α Кіля, $\delta = -52^\circ 42'$). Чим цікаві ці зорі?

1.6. Які траєкторії описує за рік зоря внаслідок а) аберації світла; б) річного паралакса π'' ?

1.7. Оцінити поправку за рефракцію для зорі Спіка (α Діви, $\delta = -11^\circ 10'$) у Харкові ($\varphi = 50^\circ$) в її верхній кульмінації.

1.8. Відтворити розрахунки І. Ньютона, на основі яких він встановив обернено квадратичну залежність від відстані в законі всесвітнього тяжіння.

1.9. Отримати диференціальне рівняння орбіти в задачі двох тіл

$$\frac{d^2 u}{dt^2} + u = \frac{1}{p},$$

де $r = 1/u$ та проінтегрувати його.

1.10. Довести, що період обороту супутника, що рухається безпосередньо над поверхнею планети, залежить тільки від її середньої густини.

1.11. Знайти масу Марса, якщо відомо, що його супутник Фобос робить один оберт на орбіті з радіусом 9400 км за $0,32^d$.

1.12. Знайти сфери дії: а) Землі, Церери, Юпітера відносно Сонця; б) Місяця відносно Землі; в) Фобоса відносно Марса.

ГЛАВА 2

МЕТОДИ ТЕОРЕТИЧНОЇ АСТРОФІЗИКИ

2.1. Елементи теорії переносу випромінювання

Основу астрофізичних процесів визначає взаємодія між двома макроскопічними формами матерії – речовиною й електромагнітним випромінюванням. Тому розглянемо основні закономірності такої взаємодії, які визначаються теорією переносу випромінювання. Вихідною величиною є *спектральна інтенсивність* випромінювання I_ν , яка визначається як кількість енергії випромінювання, що проходить крізь одиничну площадку, нормального напрямку з ортом \vec{l} і розміщену в точці простору \vec{r} в одиницю часу в одиничному інтервалі частот ν , тобто $I_\nu = I_\nu(\vec{r}, \vec{l}, t)$. Може розглядатися також *інтегральна по спектру інтенсивність* $I(\vec{r}, \vec{l}, t)$. Повна кількість енергії, що проходить крізь одиничну площадку визначає *потік* випромінювання

$$H_\nu = \iint_{4\pi} I_\nu \cos \vartheta d\Omega, \quad (2.1)$$

де ϑ – кут між нормаллю до площадки та напрямом розповсюдження випромінювання, а Ω – тілесний кут. У пустому просторі інтенсивність від точкового або сферично-симетричного об'єкта не змінюється з відстанню до об'єкта, а потік змінюється обернено пропорційно квадрату цієї відстані. Якщо одинична площадка, згадувана у визначенні інтенсивності, є елементом фізичної поверхні, то інтенсивність співпадає з *яскравістю* цієї поверхні.

В оптичній астрономії мірою *освітленості* E , що її створює в місці спостереження той чи інший космічний об'єкт, є його зоряна величина (позначення m від англ. magnitude – величина). *Зоряна величина* – це логарифмічна міра освітленості з протилежним знаком (за історичних обставин) і основою, десятковий логарифм якої дорівнює 0.4, тобто

$$m = -2.5 \lg E + C. \quad (2.2)$$

де стала C визначає нуль-пункт даної фотометричної системи. У радіо-астрономії використовується енергетична одиниця *янський* (на честь першовідкривача космічного радіовипромінювання К. Янського), $1 \text{ ян} = 10^{-26} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{Гц})$. У короткохвильовому діапазоні застосовується одиниця виміру *релей* (R), $1 \text{ R} = 10^6 \text{ фотонів}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$. Для врахування впливу на видиму зоряну величину відстані до об'єкта r вводиться поняття про *абсолютну зоряну величину*. Це та зоряна величина, яку б мав цей об'єкт на відстані у десять парсеків (для зір та інших галактичних і позагалактичних об'єктів) або в 1 а. о. від Сонця та спостерігача і фазовому куті нуль градусів (для тіл Сонячної системи). У першому випадку абсолютна зоряна величина

$$M = m - 5 \lg r + 5, \quad (2.3)$$

де відстань r у парсеках.

Це співвідношення має назву *основної формули зоряної астрономії*.

Якщо випромінювання поширюється в певному середовищі, то взаємодія між ними в макроскопічному масштабі проявляє себе в процесах *розсіяння та поглинання* випромінювання. Розсіяння відбувається на неоднорідностях середовища – заряджених частинках (електронах та іонах), термодинамічних флуктуаціях у газі, частинках речовини – пилових частинках або краплинах. Кількісними мірами цих процесів є *коефіцієнти розсіяння та поглинання* σ та k , які визначаються як відношення зміни інтенсивності внаслідок вказаних процесів при проходженні одиничного об'єму до самої інтенсивності випромінювання, що ввійшло в цей об'єм, тобто величина $dI_\nu = -\alpha I_\nu dl$, де *коефіцієнт ослаблення* (або *екстинкції*) $\alpha = \sigma + k$. Однак інтенсивність випромінювання, що виходить з нашого одиничного об'єму за рахунок того, що випромінює і речовина самого об'єму і що він розсіює в даному напрямі з випромінювання, яке прийшло в нього з інших напрямів. Тому повна зміна інтенсивності

$$\frac{dI_\nu}{dl} = -\alpha I_\nu + \varepsilon_\nu, \quad (2.4)$$

де *коефіцієнт випромінювання* $\varepsilon_\nu = \varepsilon'_\nu + \varepsilon''_\nu$, а ε'_ν – кількість енергії, що її випромінює даний об'єм, а ε''_ν – кількість енергії, яку він розсіює в даному напрямі \vec{l} . Величина

$$\varepsilon''_\nu = \sigma \int_{4\pi} x(\vec{l}', \vec{l}) I_\nu(\vec{l}') \frac{d\Omega}{4\pi}, \quad (2.5)$$

де функція $x(\vec{l}', \vec{l})$ визначає ймовірність того, що випромінювання, яке прийшло в напрямі \vec{l}' , буде розсіяно в напрямі \vec{l} і має назву *індикатриси*

розсіяння. В ізотропному середовищі вона є функцією одного аргументу – кута розсіяння γ між напрямками \vec{l}' та \vec{l} . Таким чином, *рівняння переносу випромінювання* (2.4) є досить складним математичним об'єктом – неоднорідним інтегро-диференціальним рівнянням. Якщо ввести замість геометричного шляху випромінювання l_0 його *оптичний шлях* $\tau_\nu = \int \alpha dl$, рівнянню (2.4) можна надати такого вигляду:

$$\cos \theta \frac{dI_\nu}{d\tau_\nu} = -I_\nu + S_\nu, \quad (2.6)$$

де функція $S_\nu = \epsilon_\nu / \alpha_\nu$ отримала назву *функції джерела*. Крім того, мається на увазі, що в середовищі є певний виділений напрям (наприклад, нормаль до плоского шару або радіус сферично-симетричного середовища), вздовж якого відраховується оптичний шлях, а θ – кут напрямку \vec{l} з цим виділеним напрямком.

Перш ніж говорити про розв'язок рівняння (2.6), з'ясуємо, чим визначаються локальні оптичні характеристики середовища σ_ν , k_ν та $x(\gamma)$, які характеризують процес *однократного розсіяння* випромінювання. Це залежить від фізичної природи розсіювачів та їхніх оптичних властивостей.

У плазмі розсіяння відбувається, насамперед, на вільних електронах у силу їхнього значно більшого, порівняно з іонами, значення відношення електричного заряду до маси. У цьому випадку має місце *розсіяння Томпсона* з коефіцієнтом розсіяння $\sigma_e = 8\pi n_e (e^4 / m^2 c^4) / 3$, де n_e , e та m – концентрація, заряд і маса електронів, а c – швидкість світла. Коефіцієнт поглинання випромінювання іонами залежить від ступеня іонізації та розподілу іонів за енергетичними станами, а тим самим від температури та статистичної ваги різних станів. Оскільки в космічній плазмі переважають атоми та іони водню, в певних умовах значну роль може відігравати поглинання випромінювання негативними іонами водню, тобто зв'язаними системами з нейтрального атома водню та електрона.

Різні астрофізичні середовища не знаходяться в стані термодинамічної рівноваги між речовиною та випромінюванням. Але процеси їхньої взаємодії наближають стан системи до такої рівноваги. Тому в першому наближенні вводиться припущення про стан *локальної термодинамічної рівноваги* (ЛТР), що дає можливість використовувати закони теплового випромінювання – закон Планка та його наслідки – закони Віна та Стефана–Больцмана. Якщо ж припущення про ЛТР неможливе або недостатнє, то для визначення розподілу атомів та іонів за станами доводиться користуватися методами фізичної кінетики. Але в будь-якому випадку залежність коефіцієнта поглинання від частоти

виявляється досить складною. Тому така залежність інколи замінюється середнім за спектром значенням коефіцієнта поглинання. У випадку ЛТР воно має вигляд (так зване *середнє Росселанда*):

$$\bar{k} = \frac{\int \frac{dB_\nu}{dT} d\nu}{\int \frac{1}{k_\nu} \frac{dB_\nu}{dT} d\nu}, \quad (2.7)$$

де планківське значення інтенсивності

$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} (e^{h\nu/kT} - 1)^{-1}. \quad (2.8)$$

В умовах ЛТР функція джерела власного випромінювання $S_\nu = B_\nu(T)$ (закон Кірхгофа). Оскільки властивості випромінювання залежать тільки від температури, то воно має назву *теплого* випромінювання. Якщо ж ситуація далека від термодинамічної рівноваги, точніше кажучи, якщо час *термалізації*, тобто досягнення рівноважного розподілу частинок за енергіями, перевищує час витрати енергії на випромінювання, то виникають різні види *нетеплого* випромінювання, зокрема циклотронне (пункт 2.2), синхротронне (пункт 2.3).

Якщо частинки речовини зіставні за своїм розміром d з довжиною хвилі електромагнітного випромінювання λ , то маємо задачу про дифракцію випромінювання на цих частинках. Насамперед, ця задача була розв'язана для однорідних сферичних частинок. Це зробив у 1908 р. німецький фізик Г. Мі. (*розсіяння Мі*). Виявилось, що індикатриси розсіяння випромінювання поляризованого паралельно площині розсіяння та перпендикулярно до неї пропорційні таким виразам:

$$x_l \propto \left| \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n \pi_n(\gamma) + b_n \tau_n(\gamma)) \right|^2, \quad x_r \propto \left| \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (b_n \pi_n(\gamma) + a_n \tau_n(\gamma)) \right|^2, \quad (2.9)$$

де кутові функції є такими:

$$\pi_n(\gamma) = \frac{dP_n^1(\gamma)}{d(\cos \gamma)}, \quad \tau_n(\gamma) = \frac{dP_n^1(\gamma)}{d\gamma},$$

де $P_n^1(\gamma)$ – перша приєднана функція полінома Лежандра $P_n(\gamma)$, а коефіцієнти a_n і b_n є певними функціями *параметра розсіяння* $\rho = 2\pi r / \lambda$ та оптичних властивостей речовини частинки – її комплекс-

ного показника заломлення $m = n' + \kappa'$ (n' – дійсний показник заломлення, κ' – показник поглинання).

Коефіцієнти ослаблення та розсіяння дорівнюють відповідно

$$\alpha = \frac{N\lambda^2}{2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \operatorname{Re}(a_n + b_n), \quad \sigma = \frac{N\lambda^2}{2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2). \quad (2.10)$$

Типовий хід залежностей $\alpha(\rho)$ та $k(\rho)$ (тобто при збільшенні розмірів частинок або зменшенні довжини хвилі випромінювання) якісно показаний на рис. 2.1.

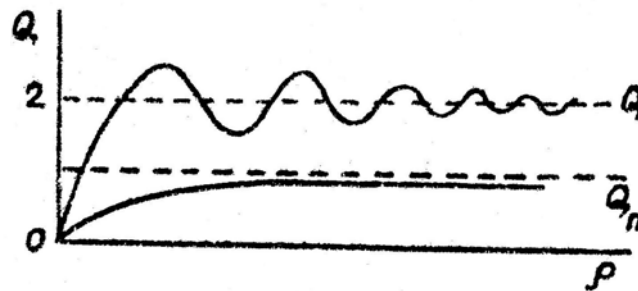


Рис. 2.1. Залежність факторів екстинкції та поглинання від параметра розсіяння

Якщо частинки дуже малі ($\rho \ll 1$) та «м'які» ($|m - 1| \ll 1$), так що можна обмежитися тільки першим членом вищенаведених рядів, то

$$\sigma = \frac{128\pi^4 N r^6}{3\lambda^4} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 1} \right|, \quad k = -8N \frac{r}{\lambda} \operatorname{Im} \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 1} \right), \quad x(\gamma) = \frac{3}{4} (1 + \cos^2 \gamma). \quad (2.11)$$

Ці формули описують *релеївське розсіяння*. Вони справедливі для частинок будь-якої форми і структури. Зокрема і для розсіяння на термодинамічних флуктуаціях у газі. В останньому випадку в видимій частині спектра можна покласти $\kappa = 0$ (*консервативне* або *чисте розсіяння*), і

$$\sigma = \frac{8\pi^3 N}{3\lambda^4 N_L} (n - 1)^2, \quad (2.12)$$

де n – показник заломлення при нормальних умовах, N – концентрація молекул у газі, N_L – число Лошмідта.

Як впливає з останнього виразу (2.11), релеївська індикатриса розсіяння має однакові максимуми в напрямках $\gamma = 0^\circ$ та 180° і мінімум при $\gamma = 90^\circ$. Релеївську індикатрису має і томпсонівське розсіяння на вільних електронах. При збільшенні параметра розсіяння ρ індикатриса

починає швидко витягуватися вперед, так, що все більша доля розсіяного випромінювання концентрується у все більш вузькому конусі в напрямі падаючого випромінювання. Хоча зберігається і відносно невеликий максимум і в зворотному напрямі, який спричиняє явище *глюрії*.

Є наближені вирази для характеристик розсіяння та поглинання і в деяких інших випадках частинок. Зокрема, для «великих» ($\rho \gg 1$) частинок при консервативному розсіянні

$$\sigma = \pi r^2 \left(2 - \frac{4}{\delta} + \frac{4}{\delta^2} (1 - \cos \delta) \right) N, \quad (2.13)$$

де $\delta = 2(m-1)\rho$ – зсув фази хвилі при проходженні нею частинки.

Видно, що «велика» частинка вилучає з падаючого потоку випромінювання асимптотично вдвічі більше енергії, ніж падає на її геометричний переріз. У цьому полягає так званий *парадокс ослаблення*. Він пояснюється тим, що поряд з дифракцією вже діють і закони геометричної оптики, і обидва механізми вилучають однакову кількість енергії. При $\rho \rightarrow \infty$ діють вже тільки закони геометричної оптики на всіх кутах розсіяння, крім деяких, на яких утворюються явища *райдуг* (формально інтенсивність стає нескінченною).

Розвинуто й методи обчислення характеристик розсіяння та поглинання частинками з іншими властивостями, зокрема таких, що рівняння їхньої форми розкладається в ряд Лапласа.

Вище малося на увазі, що розсіяння на окремих розсіювачах відбувається незалежно. Це буде так, якщо відстань між ними значно більша від довжини хвилі випромінювання. Якщо ж ці величини співставні, то доводиться враховувати так звані *колективні ефекти*.

Важливою характеристикою випромінювання є стан його поляризації, повний опис якого, як відомо, дається *вектором Стокса* $\mathbf{I} \equiv (I, Q, U, V)$. Якісно різні стани поляризації подані в табл. 2.1, де $J^2 = Q^2 + U^2 + V^2$.

Таблиця 2.1

Стан поляризації	Довільне світло	Природне світло	Поляризація		
			Еліптична	Кругова	Лінійна
	I	I	I	I	I
Вигляд вектора Стокса	Q	0	Q	0	Q
	U	0	U	U	U
	V	0	V	V	0
	$I > J$	$J = 0$	$I = J$	$I = V$	$I = J$

Дослідження стану поляризації дає певну інформацію про механізм процесу випромінювання та його взаємодію з речовиною.

Перейдемо тепер до проблеми *багатократного розсіяння* випромінювання, тобто до розв'язання рівняння переносу (2.6). Розглянемо найпростішу геометричну модель плоского шару з оптичною товщиною τ_0 . Далі треба уточнити вид коефіцієнта випромінювання ε . Якщо можна знехтувати розсіянним випромінюванням ε'' (наприклад, у планетній атмосфері в інфрачервоній ділянці спектра), то ми маємо справу з лінійним диференціальним рівнянням першого порядку. Однак його розв'язок має досить громіздкий вигляд, зокрема з урахуванням того, що рівняння першого порядку, а ми маємо дві граничних умови на двох поверхнях шару. Тобто доводиться розв'язувати рівняння окремо для випромінювання, що йде знизу вгору і зверху вниз.

Якщо ж навпаки можна знехтувати власним випромінюванням ε' , то одним з можливих підходів є такий. Спочатку розв'язуємо рівняння (2.6) формально відносно інтенсивності $I_\nu(\tau, \theta)$. Потім виключаємо її з цього рівняння і одержуємо інтегральне рівняння відносно функції джерел S_ν , яке розв'язуємо якимось чином. Треба також уточнити постановку задачі. Можна відшукувати поле випромінювання як у межах нашого шару, так і поза його межами. А можна шукати тільки поле випромінювання, яке вийшло з меж шару. При цьому корисно розрізняти три такі випадки: 1) оптично тонкий шар ($\tau_0 \ll 1$), 2) оптично непрозорий шар ($\tau_0 = \infty$) та 3) шар з оптичною товщиною τ_0 порядку і дещо більше 1.

У другому випадку доводиться розв'язувати таку задачу (зоряна фотосфера) – зверху на шар випромінювання не падає, а знизу приходить випромінювання з постійним повним потоком, який позначимо як πF . Один з перших наближених засобів є *метод Шустера–Шварцшильда*, який полягає в тому, що у визначенні потоку випромінювання (2.1) середнє значення $\cos \vartheta$, яке існує відповідно до другої інтегральної теореми про середнє, замінюємо наближеним його значенням, рівним 0.5. Це дозволяє одержати для залежності випромінювання, що виходить з поверхні зорі в напрямі радіуса, який утворює з напрямом на центр диска зорі кут θ , у випадку ізотропного розсіяння такий вираз:

$$I_\nu(0, \theta) = I(0,0)(0.5 + \cos \theta). \quad (2.14)$$

Якщо тепер ввести припущення про наявність ЛТР і замінити коефіцієнт ослаблення α_ν його середнім значенням $\bar{\alpha}$, то згадувана вище умова $S_\nu = B_\nu$ дає змогу, використовуючи закони Планка та Стефана–Больцмана, знайти залежність між температурою T і оптичною глибиною τ у вигляді

$$T = T_e(0.5 + \tau)^{1/4}, \quad (2.15)$$

де введена *ефективна температура* зорі за умовою $\pi F = \sigma T_e$ (σ тут стала Стефана–Больцмана). А інтенсивність $I_\nu(0, \theta)$ набуває тепер такого вигляду:

$$I_\nu(0, \theta) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \int_0^\infty e^{-\tau \sec \theta} \left(\exp\left(\frac{h\nu}{kT_e} (0.5 + \tau)^{1/4}\right) - 1 \right)^{-1} \sec \theta d\tau. \quad (2.16)$$

Важливою обставиною є те, що ефективно випромінює той шар речовини, оптична глибина якого $\tau \approx 1$, а це досягається при різних кутах на різній геометричній глибині. Це дає можливість вертикального зондування фотосфери зорі.

Повну кількість енергії, що її випромінює зоря за одиницю часу (її *світність* L), можна тепер знайти як

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_e^4, \quad (2.17)$$

де R – радіус зорі. Якщо проінтегрувати по диску зорі вираз (2.16), то знайдемо в першому наближенні потік випромінювання від неї, який визначає розподіл енергії в її *неперервному спектрі*. Однак реальний розподіл енергії може відчутно відрізнятись від того, що дає формула (2.16), зокрема завдяки тому, що коефіцієнт поглинання на частотах, що відповідають енергіям іонізації, змінюється стрибком. Це приводить і до певних стрибків і в розподілі енергії у спектрі зорі. Відомий, насамперед, стрибок на межі ліній серії Бальмера, що відповідає енергії іонізації атомів водню з першого збудженого стану.

Важливою задачею є дослідження *лінійчастого спектра* зорі. Під дією низки чинників відбувається поглинання випромінювання не тільки на частоті ν_0 , що відповідає різниці енергій станів, між якими відбувається перехід при поглинанні фотона з енергією, що дорівнює цій різниці, тобто відбувається уширення спектральної лінії. Воно описується *контуром* лінії, тобто залежністю коефіцієнта поглинання від частоти в межах лінії. Мірою впливу на це уширення є відповідна напівширина лінії $\Delta\nu$, де $\Delta\nu$ таке, що $k_\nu(\nu_0 \pm \Delta\nu) = k(\nu_0)/2$. Контур спектральної лінії утворюється під впливом розкиду енергії в наслідок дії принципу невизначеності Гейзенберга (*власне уширення, або затухання випромінювання* в термінах класичної електродинаміки, створює так званий *лоренцівський контур*); взаємодії атомів з сусідніми атомами – *уширення тиском; доплерівського уширення* внаслідок максвеллівського розподілу теплових швидкостей атомів (*доплерівський контур*). Ці фактори, узяті разом, призводять до утворення *контуру Фойгта*, в якому

$$k_\nu = k'_0 \frac{a}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{-y^2} dy}{(u+y)^2 + a^2}, \quad (2.18)$$

де $a = (\Delta\nu_E + \Delta\nu_C) / \Delta\nu_D$, $\Delta\nu_E$ – півширина власна, $\Delta\nu_C$ – півширина за рахунок зіткнень, $\Delta\nu_D = \nu_0 \bar{v} / c$ – півширина доплерівська, $\bar{v} = \sqrt{2kT/m}$; $u = (\nu - \nu_0) / \Delta\nu_D$, $y = \Delta\nu / \Delta\nu_D$ – відносний доплерівський зсув частоти; k'_0 – коефіцієнт поглинання в центрі лінії на одну частинку

$$k'_0 = \frac{c^3}{8\pi^{3/2} \nu_0^2 \bar{v}} \frac{g_k}{g_k} A_{ki}, \quad (2.19)$$

g_k та g_i – статистичні ваги станів k та i , A_{ki} – ейнштейнівський коефіцієнт переходу між ними. Крім того, на контур лінії впливають також електричні поля сусідніх з поглинаючим атомом іонів і вільних електронів (ефект Штарка) і турбулентний розкид швидкостей макроскопічних рухів речовини. Наявність магнітного поля викликає розщеплення спектральних ліній (ефект Зеемана).



Рис. 2.2. Контур спектральної лінії

Структура лінійчастих спектрів воднеподібних атомів визначається формулою Рідберга, яку зручно записати у такому вигляді:

$$\nu = \nu_1 \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad (2.20)$$

де ν_1 – частота, що відповідає енергії іонізації з основного рівня атома. Для водню ця енергія, як відомо, дорівнює 13.63 еВ.

Спостережний профіль спектральної лінії остаточно формується з урахуванням багатократного переносу випромінювання в лінії, при цьому доводиться враховувати некогерентність розсіяння за частотою

і явище флуоресценції. Перерозподіл випромінювання за частотою в межах лінії є наслідком основних механізмів її уширення. Таким чином, теорія утворення лінійчастого спектру космічних об'єктів є досить складною. Однак вона дає змогу вивчати ті властивості цих об'єктів, які впливають на формування профіля ліній. Треба також мати на увазі, що утворення ліній відбувається в основному у шарі речовини, де оптична глибина $\tau_\nu \approx 1$, а це має місце на різних геометричних глибинах для випромінювання, що виходить під різними кутами, наприклад, з різних частин диску зорі.

Профіль спектральної лінії описується відношенням r_ν потоку H_ν у лінії до потоку H_0 у неперервному спектрі поблизу лінії. Тоді еквівалентна ширина лінії є $W = \int (1 - r_\nu) d\nu$. Оскільки оптична товщина в лінії дорівнює $k'_0 N$, де N – кількість атомів у відповідному стані на промені зору, то у наближенні Шустера–Шварцшильда

$$W = \int \frac{k'_0 N}{1 + k'_0 N} d\nu. \quad (2.21)$$

І знову розглянемо три випадки.

1) *Слабкі лінії*. Величина $k'_0 N \ll 1$ всюди в лінії. Тоді за допомогою (2.18) одержимо, що

$$W \approx \sqrt{\pi} \frac{v_0 U}{c} k'_0 N. \quad (2.22)$$

2) *Проміжний випадок*. Величина $k'_0 N \gg 1$, але $k'_0 N \ll 1$ у крилах лінії. Тоді

$$W \approx 2 \frac{v_0 U}{c} \sqrt{\ln(k'_0 N)}. \quad (2.23)$$

3) *Сильні лінії*. Величина $k'_0 N \gg 1$ всюди в лінії. Тоді

$$W \approx \pi^{3/4} \frac{v_0 U}{c} \sqrt{a k'_0 N}. \quad (2.24)$$

Таким чином, залежність еквівалентної ширини спектральної лінії від кількості відповідних атомів, яка має назву *кривої росту*, спочатку лінійна, потім пропорційна кореню квадратному логарифма і, нарешті, параболічна. Вона є основою для визначення хімічного складу небесних об'єктів.

Тепер коротко розглянемо задачу про перенос випромінювання у плоскому шарі, що освітлюється зовнішнім паралельним потоком πF ,

який падає на верхню межу шару під певним кутом θ_0 по нормалі до шару. При цьому необхідно врахувати, що інтенсивність I у будь-якому разі буде пропорційна освітленості шару, і її зручно представити як $I = \mu_0 F \rho(\mu_0, \mu, \phi - \phi_0)$, де величина ρ має назву *коефіцієнта яскравості*, а $\mu_0 = \cos \theta_0$, $\mu = \cos \theta$, θ – кут відбиття, ϕ та ϕ_0 – азимути відбитого та падаючого випромінювання.

Якщо шар оптично тонкий ($\tau_0 \ll 1$), так що можна знехтувати розсіяннями вищих порядків, то розв'язок для коефіцієнтів яскравості відбитого ρ_s та пропущеного ρ_n таким шаром випромінювання записується з фізичних міркувань так:

$$\rho_s = \frac{\omega x(\gamma)}{4(\mu_0 + \mu)} \left(1 - \exp\left(-\tau_0 \left(\frac{1}{\mu_0} + \frac{1}{\mu}\right)\right) \right); \quad \rho_n = \frac{\omega x(\gamma)}{4(\mu_0 - \mu)} \left(\exp\frac{\tau_0}{\mu_0} - \exp\frac{\tau_0}{\mu} \right). \quad (2.25)$$

Тут введена ще одна важлива величина, що характеризує взаємодію випромінювання і речовини – *ймовірність виживання кванта* (або *альbedo однократного розсіяння*) $\omega = \sigma / (\sigma + \alpha)$. Якщо наш шар (наприклад, планетна атмосфера) знизу прилягає до поверхні, що відбиває випромінювання за законом ρ_s , то до першої формули (2.25) треба додати випромінювання, яке пройшло скрізь шар, відбилося від поверхні й ослаблене ще раз проходженням крізь шар, тобто

$$\rho_s \exp\left(\frac{1}{\mu_0} + \frac{1}{\mu}\right). \quad (2.26)$$

Якщо ж шар має оптично нескінченну глибину ($\tau_0 = \infty$), то існує точний розв'язок рівняння переносу, який для випадку ізотропного розсіяння (індикатриса $x(\gamma) = 1$) має вигляд:

$$\rho_s = \frac{\omega}{4} \frac{\varphi(\mu_0)\varphi(\mu)}{\mu_0 + \mu}, \quad (2.27)$$

де допоміжна функція $\varphi(\mu)$ (функція Амбарцумяна) визначається інтегральним рівнянням

$$\varphi(\mu) = 1 + \frac{\omega}{2} \mu \int_0^1 \frac{\varphi(\mu)\varphi(\mu')}{\mu + \mu'} d\mu', \quad (2.28)$$

яке розв'язується методом ітерацій. Якщо застосувати цей розв'язок до достатньо темного оптично напівнескінченного шару ($\omega \ll 1$), то $\varphi(\mu) \approx 1$ і

$$\rho_e = \frac{\omega}{4(\mu_0 + \mu)}. \quad (2.29)$$

Ця формула відома як *закон відбиття Ломмеля–Зеслігера*. Якщо ж наш шар достатньо світлий ($(1 - \omega) \ll 1$), то величина ρ_e виявляється близькою до 1. Це виправдовує досить широке застосування *закону відбиття Ламберта* для *ортотропної* поверхні, за яким інтенсивність відбитого випромінювання пропорційна косинусу кута падіння. У наближенні Шустера–Шварцшильда рівняння (2.28) має розв'язок $\varphi = 1 + 2\mu$.

У середовищах, де наявні частинки з розмірами $d \approx \lambda$ (планетні атмосфери, пилові оболонки зір, міжпланетне середовище), суттєвою проблемою є врахування *анізотропії розсіяння*. Якщо індикатриса розсіяння $x(\gamma)$ може бути розкладена у скінченний ряд за поліномами Лежандра, то коефіцієнт яскравості ρ_e знаходиться у вигляді ряду Фур'є за $\cos(\varphi - \varphi_0)$. Коефіцієнти ряду є сумами доданків виду (2.27), допоміжні функції, що в них входять, задовольняють системам рівнянь типу рівняння (2.28).

Ще більш громіздким є розв'язок задачі при скінченному, але не малому значенні оптичної товщини шару τ_0 . У цьому випадку кількість допоміжних функцій і відповідних інтегральних рівнянь подвоюються. Якщо ряд для індикатриси розсіяння має n членів, то кількість допоміжних функцій сягає $2n(n + 1)$. Тому існують численні асимптотичні наближені розв'язки для окремих випадків – для шару з $\tau_0 \gg 1$, для шару з чистим розсіянням ($\omega = 1$) або шару з майже чистим розсіянням ($1 - \omega \ll 1$) тощо.

Методом, що дозволяє розв'язати і більш складні задачі теорії переносу випромінювання (задачі з сильно витягнутою індикатрисою розсіяння, з неплоскою геометрією, переніс в неоднорідному середовищі) є метод статистичних випробувань. Його застосування полегшується ймовірнісним сенсом індикатриси розсіяння та альбедо однократного розсіяння.

Теорія переносу випромінювання дозволяє знаходити характеристики відбивної здатності несамосвітних небесних тіл (великих та малих планет та їхніх супутників). Для елемента видимої поверхні це його *плоске альбедо*, яке в ізотропному випадку

$$A(\mu_0) = 2 \int_0^1 \rho_e(\mu_0, \mu) d\mu, \quad (2.30)$$

для тіла сферичної форми в цьому ж випадку його *сферичне альбедо*

$$A_s = 4 \int_0^1 \int_0^1 \rho_e(\mu_0, \mu) d\mu d\mu_0. \quad (2.31)$$

Можна також знайти *еквівалентні ширини* спектральних ліній або смуг. Для оптично тонкої атмосфери

$$W = \left(\frac{1}{\mu_0} + \frac{1}{\mu} \right) Nk', \quad (2.32)$$

де k' – інтегральний коефіцієнт поглинання в лінії. Для оптично щільної атмосфери з малим істинним поглинанням і в лінії, і в неперервному спектрі ($\tau_0 \gg 1$, $1 - \omega_v \ll 1$, $1 - \omega \ll 1$)

$$W = \sqrt{3}(\mu_0 + \mu) \int_0^{\infty} (\sqrt{1 - \omega} - \sqrt{1 - \omega_v}) dv. \quad (2.33)$$

Вище розглядалася так звана *скалярна теорія* переносу випромінювання, бо відшукувалася лише одна скалярна функція – інтенсивність I . Але, як відомо, повний опис електромагнітного поля дає чотиривимірний *вектор Стокса*. Теорія, що описує його зміну при взаємодії випромінювання і речовини – це *векторна теорія* переносу випромінювання. Головним ускладненням її є те, що скалярна функція – індикатриса розсіяння замінюється на *матрицю розсіяння* 4×4 . Але така теорія дає повний опис стану поляризації випромінювання. У проміжному випадку розглядаються тільки компоненти випромінювання, поляризовані паралельно (I_l) та перпендикулярно (I_r) відносно до площини розсіяння, і *ступінь поляризації* $p = (I_l - I_r)/(I_l + I_r)$. Так для тонкої релеївської атмосфери

$$p = \frac{3 \sin^2 \gamma}{16(\mu_0 + \mu) \rho_R(\mu_0, \mu, \phi)}. \quad (2.34)$$

2.2. Елементи магнітної гідродинаміки та фізики плазми

Великі розміри астрофізичних об'єктів приводять до того, що досить широко для їхнього опису може застосовуватися *модель суцільного середовища*. Якщо ввести характерний розмір об'єкта L , розмір елемента, який можна вважати матеріальною точкою і який ми приймемо за 1, і, нарешті, характерний розмір l , що визначає атомно-молекулярну структуру речовини, то в космічних умовах, як правило, буде виконуватися співвідношення $L \gg 1 \gg l$. А саме це співвідношення і визначає допустимість застосування моделі суцільного середовища. При цьому, якщо агрегатний стан речовини – рідина або газ (а на достатньо великих проміжках часу і тверде тіло, див. пункт 7.2), то застосовна модель в'язкої

рідини (в реологічному розумінні). У космічних умовах ця рідина є плазмою, іонізація якої викликана або її високою температурою або високоенергетичним електромагнітним чи корпускулярним випромінюванням. А рух її в полі сили тяжіння та в магнітному полі (з урахуванням сили Лоренца) описується рівнянням:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \nabla) \vec{v} = \vec{g} - \frac{1}{\rho} \text{grad } p + \nu \nabla^2 \vec{v} + \frac{1}{4\pi\rho} \text{rot } \vec{H} \times \vec{H}, \quad (2.35)$$

де \vec{v} – швидкість, \vec{g} – прискорення сили тяжіння, ρ – густина середовища, ν – кінематична в'язкість, \vec{H} – напруженість магнітного поля. А зміна магнітного поля задається рівнянням

$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = \text{rot } \vec{v} \times \vec{H} + \frac{1}{4\pi\sigma} \nabla^2 \vec{H}. \quad (2.36)$$

де σ – електропровідність речовини. При записі рівнянь (2.35) та (2.36) ми скористалися рівнянням Нав'є–Стокса для в'язкої рідини та рівняннями електромагнітного поля Максвелла, врахувавши те, що ми розглядаємо вкрай низькочастотні явища, так що можна знехтувати током зміщення.

Важливою обставиною є те, що завдяки великим значенням розміру L рух речовини практично завжди є турбулентним, велике значення має число Рейнольдса $Re = \nu L / \nu$. Хоч у зв'язку з цим буде відмінним від нуля гідродинамічний вихор $\vec{\Omega} = \text{rot } \vec{v}$. Якщо в рівнянні (2.35) перейти до величини $\vec{\Omega}$, одержимо таке рівняння:

$$\frac{\partial \vec{\Omega}}{\partial t} = \text{rot } \vec{v} \times \vec{\Omega} + \nu \nabla^2 \vec{\Omega} + \frac{1}{4\pi\rho} \text{rot}(\text{rot } \vec{H} \times \vec{H}). \quad (2.37)$$

Якщо напруженість магнітного поля не дуже велика, то можна знехтувати в рівнянні (2.35) останнім квадратичним за полем додатком (тобто знехтувати впливом магнітного поля на рух рідини). Тоді рівняння для гідродинамічного вихору (2.37) і зміни напруженості магнітного поля (2.36) стануть *математичо подібними*. Щоб підкреслити цю обставину, введемо так звану *магнітну в'язкість* $\nu_m = 1/4\pi\sigma$. Тоді подібно до гідродинамічного числа Рейнольдса можна ввести *магнітне число Рейнольдса* $Re_m = \nu L / \nu_m$. З міркувань розмірності випливає, що час затухання руху з розміром L унаслідок дисипації його кінетичної енергії у в'язкій рідині є $\tau_v = L^2 / \nu$, а час омичного затухання магнітного поля є $\tau_m = L^2 / \nu_m$. Таким чином, між звичайною в'язкістю та магнітною присутня і фізична аналогія – обидві вони є мірами відповідних процесів дисипації енергії. Звертає на себе увагу квадратична залежність часу затухання від

характерного розміру L , що робить цей час у космічних умовах вельми великими. Час затухання магнітного поля можна записати також у вигляді $\tau_m \approx 4\pi\sigma L^2$. Це підкреслює, що при великих значеннях розміру для прояву магнітогідродинамічного ефекту нема необхідності в дуже великих значеннях електропровідності середовища.

З подібності рівнянь (2.36) та (2.37) впливає вкрай важлива для астрофізики можливість підсилення магнітного поля при рухах провідної рідини (плазми). Це підсилення, або генерація, магнітного поля за рахунок кінетичної енергії рідини буде відбуватися, якщо рух рідини такий, що гідродинамічний вихор $\vec{\Omega}$ буде зростати – тоді буде зростати й пропорційна йому напруженість магнітного поля \vec{H} . При цьому магнітна в'язкість не повинна перевищувати гідродинамічну в'язкість, точніше, повинно бути $4\pi\sigma\nu \leq 1$. На цій можливості заснована ідея *гідромагнітного динамо*, що покликана пояснити походження магнітних полів небесних тіл – зір і планет. З'ясовано, що ці рухи повинні бути тривимірними. Також ефекту гідромагнітного динамо сприяє і турбулентний характер руху. На елементарному рівні це можна пояснити так. Турбулентна завихреність течії приводить до подовження лінії току рідини в певному об'ємі. А разом з ними збільшується і довжина силових ліній «вмороженого», як кажуть, в рідину магнітного поля. Відповідно до цього збільшується і кількість силових ліній на одиницю площі перерізу, що і означає збільшення напруженості магнітного поля.

Важливим у астрофізичному відношенні є поява у провідній рідині *магнітогідродинамічних* (гідромагнітних) *хвиль* (або *хвиль Альфвена*), в яких відбувається періодичний перехід кінетичної енергії речовини в енергію магнітного поля і навпаки. Виникають дві такі хвилі – швидка і повільна. *Швидка альфвенівська* хвиля поширюється зі швидкістю

$$u_{Au} = \frac{H_0}{\sqrt{4\pi\rho}}, \quad (2.38)$$

де H_0 – напруженість зовнішнього магнітного поля, ρ – густина речовини, її швидкість не залежить від напрямку розповсюдження хвилі. Швидкість *повільної альфвенівської* хвилі є

$$u_{An} = \frac{H_0}{\sqrt{4\pi\rho}} \cos\theta, \quad (2.39)$$

де θ – кут між хвильовим вектором \vec{k} і вектором \vec{H}_0 . Альфвенівські хвилі – поперечні, вектори зміщення речовини та збурення магнітного поля перпендикулярні площині (\vec{k}, \vec{H}_0) .

Важливою особливістю плазми є те, що в присутності електромагнітного поля її властивості стають *анізотропними*. Зокрема, скалярну величину електропровідність σ доводиться замінювати на *тензор електропровідності*, який у випадку змінного електромагнітного поля з частотою ω має такий вигляд у системі координат, де вісь z спрямована по вектору магнітної індукції \vec{B} , а вісь $x - y$ площині (\vec{E}, \vec{B}) :

$$\hat{\sigma} = \begin{pmatrix} \frac{i\omega'}{\Omega^2 - \omega'^2} & \frac{\Omega}{\Omega^2 - \omega'^2} & 0 \\ -\frac{\Omega}{\Omega^2 - \omega'^2} & \frac{i\omega'}{\Omega^2 - \omega'^2} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{i}{\omega'} \end{pmatrix}. \quad (2.40)$$

Тут введені комплексна частота $\omega' = \omega - i\nu$, де ν – частота зіткнень зарядженої частинки з іншими частинками, і $\Omega = eB/mc$ – *циклотронна частота* (або *гірочастота*), де e – заряд частинки, m – її маса, c – швидкість світла. Циклотронна частота – це частота обертання зарядженої частинки по гвинтовій лінії навколо напрямку вектора магнітної індукції в даному електромагнітному полі. Якщо ввести також комплексну діелектричну проникність

$$\hat{\varepsilon} = \varepsilon \left(\hat{\sigma} - \frac{4\pi i}{\varepsilon \omega} \right), \quad (2.41)$$

а від неї перейти до показника заломлення плазми n , то цей показник буде певною, досить громіздкою функцією частот ω , ν , Ω_e , Ω_i , Ω_{0e} , Ω_{0i} . З'являється при цьому ще одна важлива характеристика плазми – *власна* або *плазмова частота*

$$\Omega_0 = \sqrt{\frac{4\pi N e^2}{\varepsilon m}}, \quad (2.42)$$

яку можна представити як $\Omega_0 = V / \lambda_D$, де $\lambda_D = \sqrt{kT\varepsilon / 4\pi e^2 N}$ – так званий *дебаївський радіус* плазми, N – концентрація заряджених частинок певного сорту, V – теплова швидкість частинки, k – стала Больцмана, T – температура. Треба також мати на увазі, що так як циклотронна і плазмова частоти залежать від відношення e/m , то вони відчутно розрізняються для електронів та іонів, так же як розрізняються електронна та іонна температури плазми. Вказана обставина і відмічена в переліку частот, від яких залежить показник заломлення плазми.

Ці характерні частоти визначають те, які електромагнітні хвилі з частотою ω можуть розповсюджуватися в плазмі. Особливу роль

відіграють ті значення частоти ω , при яких показник заломлення обертається на 0 та ∞ . Якщо $n = 0$, маємо ситуацію *обрізання* або відсічки відповідної хвилі. У випадку $n \rightarrow \infty$ маємо явище *резонансу*. Якщо це буде при $\omega = \Omega_e$, то має місце електронний резонанс, при $\omega = \Omega_i$ – іонний резонанс. Ці хвилі розповсюджуються вздовж магнітного поля. Поперек поля розповсюджуються гібридні резонанси – верхній з частотою $\omega^2 = \Omega_{0e}^2 + \Omega_{0i}^2$ та нижній з частотою $\omega^2 = \Omega_e \Omega_i (\Omega_{0e}^2 + \Omega_e \Omega_i) / (\Omega_e^2 + \Omega_{0e}^2)$. У довільному напрямку розповсюджується *звичайна* хвиля, швидкість якої не залежить від величини магнітного поля, і *незвичайна* зі швидкістю, залежною від H .

У різних типах хвиль енергія по-різному розподіляється між різними носіями. В резонансах вона розподілена між електромагнітним полем та зарядженими частинками, це *електростатичні* хвилі. Циклотронні хвилі, в яких є відчутною і зміна тиску, – *електроакустичні*. Звичайна і незвичайна хвилі – електромагнітні.

Багатство різновидів хвиль, що можуть поширюватися в плазмі, та взаємодія між ними приводять до того, що рухи речовини та зміни електромагнітного поля можуть набувати хаотичного характеру. Це явище дістало назву *плазмової турбулентності* за аналогією із гідродинамічною турбулентністю. Плазмова турбулентність, як і гідродинамічна, є проявом нестійкості відповідного процесу, вона пов'язана з відхиленням від рівноважного стану. В космічних умовах розвитку нестійкостей у плазмі сприяє великий час встановлення рівноважного стану при низькій густині плазми. Численні плазмові нестійкості можуть бути згруповані в три основні види: 1) *магнітогідродинамічні* нестійкості (виникають при надмірних значеннях магнітного поля); 2) *кінетичні* нестійкості (виникають, зокрема, при поширенні в плазмі пучків заряджених частинок, насамперед, електронів); 3) *параметричні* нестійкості (виникають при розповсюдженні в плазмі електромагнітних хвиль високої амплітуди).

Прискорений рух заряджених частинок в електромагнітному полі примушує їх випромінювати. Якщо частинки нерелятивістські (їхня швидкість $v \ll c$), то виникає *циклотронне* випромінювання на циклотронній частоті Ω та її перших обертонах. У космічних умовах основну роль відіграє циклотронне випромінювання електронів у силу того, що $m_e \ll m_i$. Повна його потужність на основній частоті

$$P = \frac{2}{3} \frac{e^2}{c^3} \Omega_e^2 v_{\perp}^2, \quad (2.43)$$

де v_{\perp} – складова швидкості електрона, перпендикулярна напрямку магнітного поля.

Плазма впливає на стан поляризації випромінювання, яке крізь неї проходить. Має місце *ефект Фарадея*, який полягає у тому, що площина поляризації лінійно поляризованого випромінювання при проходженні шару плазми товщиною L повертається на кут

$$\Omega_F = \frac{2\pi e^3 BN}{m_e^2 c^2 \omega^2} L. \quad (2.44)$$

Фізичні явища в плазмі, зокрема хвильові, важливі для розуміння процесів у космічних об'єктах різного масштабу. Це іоносфери планет, і рідке ядро Землі, мантії планет-гігантів, Сонце і зорі, явища сонячної та зоряної активності, зокрема, міжпланетне та міжзоряне середовище, пульсари, активні ядра галактик та квазари.

2.3. Основи релятивістської астрофізики

Під цим терміном розуміють дослідження таких космічних об'єктів, явищ та процесів, для пояснення яких потрібно врахування ефектів теорії відносності як спеціальної, так і загальної.

Це зміна характеру випромінювання електронами тоді, коли їхня швидкість v стає зіставною зі швидкістю світла c , тобто релятивістськими електронами. На відміну від циклотронного випромінювання, максимум випромінювання зміщується на високі обертони і спектр випромінювання стає практично неперервним з максимумом на частоті

$$\nu_m = \frac{eH_0}{4\pi m_e c} \left(\frac{E_e}{m_e c^2} \right)^2, \quad (2.45)$$

де E_e – енергія електрона. Таке випромінювання має назву *синхротронного* випромінювання. Якщо розподіл електронів у плазмі ступеневий, то і спектр синхротронного випромінювання також є ступеневим з показником ступеня (спектральним індексом) α , що лежить в інтервалі від -0.75 до -2 . Синхротронне випромінювання сконцентроване у вузькому конусі з розхилом порядку $m_e c^2 / E_e$. Повна його потужність однією частинкою

$$P = \frac{2e^4}{3m_e^2 c^3} \left(\frac{E_e}{m_e c^2} \right). \quad (2.46)$$

Синхротронне випромінювання однією частинкою еліптично поляризоване. Воно може мати місце в широкому класі космічних об'єктів – магнітосферах планет-гігантів, проявах сонячної активності, в залишках спалахів наднових, у пульсарах і квазарах.

Важливу роль у взаємодії випромінювання і плазми може відігравати *ефект Комптона* – пружне розсіяння випромінювання на заряджених частинках, знову таки, насамперед, на електронах. При цьому, відповідно до законів збереження енергії та імпульсу, змінюються енергії та імпульси як фотона, так і електрона. Частота розсіяного фотона при цьому є

$$\nu' = \nu \frac{1 - \frac{v_e}{c} \cos \theta}{1 - \frac{v_e}{c} \cos \theta' + \frac{\lambda_c \nu}{\gamma} (1 - \cos \alpha)}, \quad (2.47)$$

де v_e – швидкість електрона до розсіяння, θ – кут між хвильовим вектором падаючого фотона і швидкістю електрона до розсіяння, θ' – кут між хвильовими векторами розсіяного фотона та електрона до розсіяння, $\lambda_c = h/m_e c$ – *комptonівська довжина хвилі*, $\gamma = (1 - (v_e/c)^2)^{1/2}$ – лоренц-фактор електрона, α – кут розсіяння фотона. Якщо електрон нерелятивістський, то довжина розсіяного фотона зменшується – фотон передає частину своєї енергії електрону. Якщо ж електрон релятивістський, то, навпаки, електрон віддає частину своєї енергії фотону, частота останнього збільшується (має місце *обернений Комптон-ефект*).

Переріз комptonівського розсіяння σ є функцією, що зменшується з аргументом $x = (h\nu/m_e c^2)\gamma(1 - \cos \alpha)$. Для низькочастотних фотонів він прямує до своєї томпсонівської межі σ_T . Для високочастотних фотонів він зменшується асимптотично як $3\sigma_T(\ln x + 1/2)/4x$. При цьому практично лишається тільки релятивістський доплерівський зсув частоти

$$\nu' = \nu \frac{1 - \frac{v_e}{c} \cos \theta}{1 - \frac{v_e}{c} \cos \theta'}. \quad (2.48)$$

Ефект Комптона приводить до процесу *комptonізації* випромінювання, за яким при ступеневому розподілі електронів за енергіями спектр випромінювання також наближається до ступеневого. Це відбувається внаслідок багатократного комptonівського розсіяння на теплових електронах у компактних рентгенівських джерелах.

Перейдемо тепер до явищ, котрі потребують застосування загальної теорії відносності (ЗТВ). Це будова та еволюція Всесвіту в цілому (що буде розглядатися в главі 6) і явища, зв'язані з утворенням і впливом компактних масивних тіл зоряної маси – пульсарів та чорних дір і надмасивних чорних дір (НМЧД), тобто квазарів та активних ядер галактик.

Утворення таких об'єктів відбувається шляхом їхнього гравітаційного стиснення, коли з тих чи інших причин тиск не може протидіяти силам тяжіння в процесі їхнього релятивістського гравітаційного колапсу. При цьому метрика плоского простору-часу Мінковського, в якій вираз для інтервалу є певним узагальненням теореми Піфагора, замінюється у сферичній системі координат (r, φ, θ) на таку метрику Шварцшильда:

$$ds^2 = c^2 \left(1 - \frac{r}{r_g} \right) dt^2 - \frac{dr^2}{1 - \frac{r}{r_g}} - r^2 (\sin^2 \theta d\varphi + d\theta^2), \quad (2.49)$$

де *радіус Шварцшильда* (або гравітаційний радіус) $r_g = 2GM / c^2$. Тобто з елементарної точки зору, величина r_g – це такий радіус тіла з масою M , що для нього його друга космічна швидкість дорівнює швидкості світла c . З точки зору ЗТВ, з виразу (2.49) випливає, що при наближенні при колапсі до r_g елемент радіальної координати dr для зовнішнього віддаленого спостерігача стягується до нуля, а елемент часу dt , навпаки, розтягується до нескінченності. Тому для такого спостерігача час колапсу до виникнення чорної діри є нескінченним, координата r прямує до $r_g \exp(-r/r_g)$, швидкість руху поверхні колапсуючого тіла наближається до c . При цьому у все більш викривленому просторі-часі викривлюються траєкторії фотонів випромінювання і спостерігач бачить процес колапсу у вигляді кільця, яке поступово зменшується, а ефект Доплера, що дорівнює $\nu' = \nu(1 - r_g / r)$, необмежено зміщує це зображення у все більш довгохвильову частину спектра. У системі ж *власного часу* $\tau = t / \sqrt{1 - r_g / r}$ процес колапсу продовжується скінчений час. Після утворення чорної діри вона ізолюється від свого околу, ніщо не може покинути її, вона проявляє себе лише своїм гравітаційним полем.

Розглянемо коротко рух пробної частинки з малою масою m у цьому полі. На рис. 2.3 показана (в системі одиниць, де $c = G = 1$) залежність від відстані r узагальненого потенціалу чорної діри (суми потенціалів гравітаційного та відцентрового) для різних значень кінетичного моменту частинки L , який має вигляд:

$$U = mc^2 \left[\left(1 - \frac{r_g}{r} \right) \left(1 + \frac{L^2}{m^2 c^2 r^2} \right) \right]. \quad (2.50)$$

Коловий рух у мінімумах кривої $U(r)$ буде стійким, а максимумах – нестійким. Радіус найнижчої стійкої орбіти дорівнюватиме $3r_g$, найнижчої

нестійкої $-3r_g/2$. Вираз для величини $(dr/d\tau)^2$ (де τ – власний час) є кубічним многочленом, на відміну від квадратичного у ньютонівському випадку. Тому орбіти в околі чорної діри є більш різноманітними. Але рівняння руху завжди інтегруються за допомогою еліптичних інтегралів.

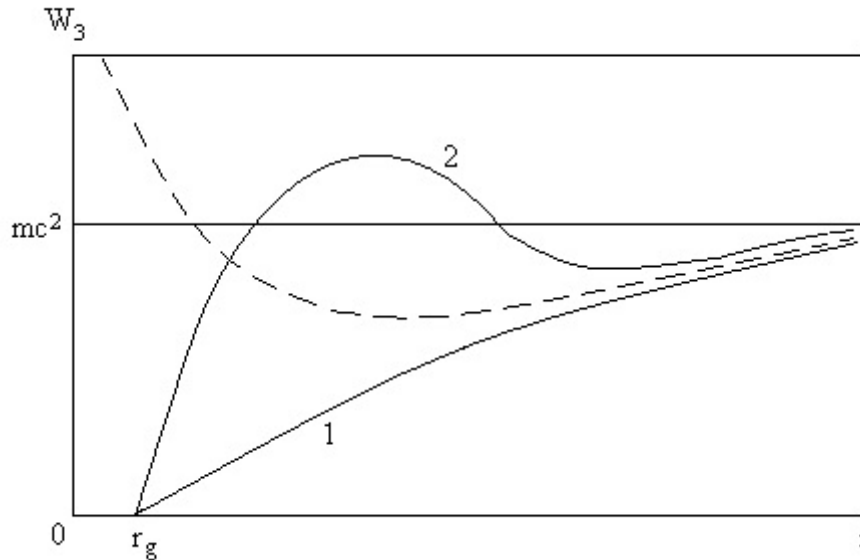


Рис. 2.3. Узагальнені потенціали Ньютона і Шварцшильда

- ньютонівський потенціал
- потенціал Шварцшильда
- 1- $L < r_g \sqrt{3}$; 2- $L > r_g \sqrt{3}$

Важливим процесом, пов'язаним з чорними дірами, є їхнє *квантове випаровування*, відкрите С. Хокінгом. Суть його в тому, що поблизу чорної діри за рахунок енергії її гравітаційного поля народжуються частинка та античастинка, одна з них падає на чорну діру, а інша рухається на нескінченність, зменшуючи масу чорної діри. Але швидкість цього процесу дуже сильно ($\propto M^3$) залежить від маси чорної діри. Тому він не суттєвий для чорних дір зоряних мас та надмасивних чорних дір з масами у мільйони сонячних мас у центрах квазарів та активних ядер галактик.

У 1963 р. П. Керром було знайдено розв'язок рівнянь Ейнштейна для чорних дір, що обертаються. Горизонт подій, на якому дорівнює 0 коефіцієнт при $c^2 dt^2$ у виразі для елементарного інтервалу, для таких дір є сферою з радіусом $\sqrt{M^2 - a^2}$, де a – момент обертання чорної діри. Але поверхня, на якій прямує до нескінченності коефіцієнт при dr^2 , тепер вже не співпадає з горизонтом подій, а лише торкається до нього на полюсах. Ця стиснена поверхня обертання, рівняння якої $r = M + \sqrt{M^2 - a^2}$, обмежує область простору, яка отримала назву *ергосфери*. Сама ця

поверхня має назву поверхні *стаціонарної границі*, бо частинка в межах ергосфери повинна мати відмінну від 0 азимутальну складову руху. В ергосфері має місце *процес Пенроуза*. Він полягає в тому, що частинка, яка влітає в ергосферу з певною енергією, може розпастися на дві частинки, одна з яких падає на чорну діру, а інша вилітає з ергосфери з енергією, що більша від енергії влітаючої частинки. Це приводить до зменшення енергії та моменту обертання чорної діри Керра. Гальмування обертання чорної діри може відбуватися також за рахунок розсіяння електромагнітних хвиль, коли амплітуда розсіяної хвилі виявляється більшою від амплітуди падаючої хвилі.

В останні десятиріччя всезростаючу роль відіграє в галактичній та позагалактичній астрономії метод *гравітаційного лінзування*, заснований на ефекті викривлення світлових променів у гравітаційних полях масивних об'єктів. У найпростішому випадку точкового джерела з масою M_S на відстані D_S від спостерігача і точкової лінзи з масою M_L на відстані D_L утворюється *кільце Ейнштейна* з радіусом

$$R_E = 2 \sqrt{\frac{GM_L (D_S - D_L) D_L}{c^2 D_S}}, \quad (2.51)$$

якщо джерело і лінза знаходяться на одній прямій зі спостерігачем. Наближено можна записати, що

$$R_E \approx 8(a.o.) \sqrt{\frac{M_L}{M_C} \frac{D_L}{8Knk} (1-d)d}, \quad (2.52)$$

де $d = D_L / D_S$.

Кутовий радіус кільця Ейнштейна дорівнює

$$\theta_E \approx 0.0001'' \sqrt{\frac{M_L}{M_C} \frac{D_L}{8Knk} (1-d)d}. \quad (2.53)$$

Якщо лінза сферична, то утворюється кільце певної товщини. А якщо його центр не лежить на осі «джерело – спостерігач», то кільце спочатку деформується, а потім розпадається на два невеликих зображення. А якщо лінза сфероїдальна, то виникає чотири окремих зображення. Відомі приклади – перша з відкритих гравітаційних лінз квазар QSR 0957+561, Хрест Ейнштейна – квазар QSR 2207.

Врахування дискретної структури лінзи потребує статистичного опису сукупності окремих явищ *мікролінзування* на окремих тілах зоряних і навіть планетних мас. Статистичні методи використовуються і для

аналізу впливу на гравітаційне лінзування середовища поміж джерелом, лінзою та спостерігачем.

Все це дає можливість, будуючи певні моделі джерела, лінзи та проміжного середовища, вивчати як самі об'єкти, так і властивості простору-часу.

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. Що таке інтенсивність випромінювання?
2. Що таке зоряна величина?
3. Якими процесами супроводжується поширення випромінювання в речовині?
4. Яким рівнянням є рівняння переносу випромінювання?
5. З яких двох складових складається коефіцієнт випромінювання?
6. Що таке оптичний шлях випромінювання?
7. В якому середовищі відбувається розсіяння Томпсона?
8. Що таке ЛТР?
9. Що таке розсіяння Мі?
10. Коли має місце розсіяння Релея?
11. Як змінюється індикатриса розсіяння при збільшенні параметра розсіяння?
12. У чому полягає «парадокс розсіяння» і коли він має місце?
13. Які можливі види поляризації випромінювання?
14. Які існують наближені методи розв'язку рівняння переносу випромінювання?
15. Що таке ефективна температура зорі?
16. Чому розподіл енергії у неперервному спектрі зорі відрізняється від закону Планка?
17. Що таке контур і профіль спектральної лінії та якими факторами вони зумовлюються?
18. Що таке крива росту?
19. Що визначає ймовірність виживання кванта?
20. За яких умов мають місце закони відбиття Ломмеля-Зеслігера та Ламберта?
21. Що таке плоске та сферичне альbedo?
22. Що таке векторне рівняння переносу випромінювання та чим воно відрізняється від скалярного рівняння?
23. Якими є умови застосування моделі суцільного середовища і чому ця модель дуже широко застосовується в космічних умовах?
24. Який характер мають гідродинамічні рухи в космічних умовах – ламінарні чи турбулентні і чому?

25. Що є умовою застосування рівнянь магнітної гідродинаміки?
26. Що таке гідромагнітне динамо?
27. Які існують види магнітогідродинамічних хвиль і в яких напрямках вони поширюються?
28. Коли і чому потрібен тензорний опис провідності плазми?
29. Що таке циклотронна та власна частоти плазми?
30. Які типи хвиль можуть розповсюджуватися в плазмі?
31. Що таке плазмова турбулентність?
32. Коли виникають у плазмі циклотронне та синхротронне випромінювання?
33. Що таке ефект Фарадея та як він використовується в астрофізиці?
34. Що таке прямий та обернений ефекти Комптона і які їхні наслідки?
35. При розгляді яких космічних явищ потрібна загальна теорія відносності?
36. Що таке метрика Шварцшильда?
37. Що таке гравітаційний радіус?
38. Як відбувається процес гравітаційного колапсу для віддаленого спостерігача?
39. До яких тіл стосується розв'язок Керра рівнянь ЗТВ?
40. Що таке ергосфера і процес Пенроуза в ній?

ЗАДАЧІ ДО ГЛАВИ 2

- 2.1. Поверхня Місяця відбиває усього 7 % падаючого на неї сонячного випромінювання. Чому ж яскравість місячної поверхні не в 14, а в сотні тисяч разів менша?
- 2.2. Записати закон Планка як функцію довжини хвилі λ .
- 2.3. Одержати із закону Планка закон Віна при $\lambda \rightarrow 0$ та закон Релея–Джинса при $\lambda \rightarrow \infty$. Оцінити, при яких значеннях λ похибка у законах Віна та Релея–Джинса буде менша від 1%.
- 2.4. Побудувати в полярних координатах найпростішу несферичну індикатрису $\chi(\gamma) = 1 + x_1 \cos \gamma$ при значеннях параметра $x_1 = 0, 0.5, 0.95$.
- 2.5. Чому дорівнюють довжини хвиль спектральних ліній водню L_α і H_α ?
- 2.6. Як оцінити максимальний вплив обертання на ширину спектральних ліній у спектрі зорі класу B0V, яка має період обертання $T = 2^d$.
- 2.7. Побудувати годографи швидкостей швидкої та повільної хвиль Альфвена.

2.8. Оцінити електронні циклотронні частоти в іоносферах Землі ($B \approx 0.3$ Гс) і Юпітера ($B \approx 4$ Гс), в плазмі спокійної фотосфери Сонця ($B \approx 1$ Гс) та в плазмі сонячної плями ($B \geq 30$ Гс) (Використовуйте для заряду електрона систему СГСЕ, а для маси електрона – СГС).

2.9. Який ефект буде переважати, гравітаційне червоне зміщення чи доплерівське, при наближенні фотона до чорної діри?

2.10. Чому дорівнюватимуть радіуси найменших стійкої та нестійкої орбіт навколо Сонця, якби воно перетворилося на чорну діру?

ГЛАВА 3

ОСНОВИ ПРАКТИЧНОЇ АСТРОФІЗИКИ

Практична астрофізика займається розробкою та застосуванням пристроїв та приладів для вивчення електромагнітного (а в принципі й інших видів) випромінювання, що надходить до нас від небесних тіл та середовищ, і на цій основі здійснює визначення фізичних характеристик та хімічного складу цих тіл і середовищ. З точки зору теорії інформації, вона має справу з каналом зв'язку, який включає в загальному випадку позаземне середовище (міжпланетне, міжзоряне, міжгалактичне), в якому розповсюджується випромінювання, земну атмосферу (при наземних спостереженнях), телескоп (пристрій для фіксації напряму на досліджуваний об'єкт, збільшення одержуваної енергії випромінювання від нього та побудови його зображення), прилади для аналізу випромінювання (його спектрального складу та стану поляризації) і приймачі випромінювання (прилади для вимірювання характеристик випромінювання та фіксації результатів цього вимірювання). Центральним елементом в цьому ланцюзі є телескоп. Суттєвим чинником є також те, що при зростанні довжини хвилі електромагнітного випромінювання зростає роль його хвильових властивостей і спадає роль квантових.

3.1. Телескопи

В оптичному діапазоні телескопи поділяються на *рефрактори*, засновані на заломленні світла, і *рефлектори*, засновані на його відбитті. Хроматична аберація і практична неможливість виготовлення достатньо точних оптичних поверхонь зі скла привели до того, що з кінця XIX ст. в астрофізиці використовуються виключно рефлектори. В інших діапазонах спектра телескопи при всій їх різноманітності теж будуються на принципах відбиття випромінювання. Кількість зібраного випромінювання пропорційна квадрату діаметра головного дзеркала телескопа D , але його кількість, що припадає на одиницю фокальної площини, обернено пропорційна квадрату фокусної відстані дзеркала F . Тому важливою характеристикою телескопа є його *відносний отвір* $A = D / F$,

а величина A^2 – це його *світлосила*. Лінійний розмір зображення (*масштаб*) дорівнює

$$L = F \left(\frac{\beta''}{206265} \right), \quad (3.1)$$

де β'' – його кутовий розмір у секундах дуги.

Іншою важливою характеристикою телескопа є його *роздільна здатність* α , яка визначає кутовий розмір деталі на зображенні об'єкта, яка сприймається як окрема. Принципово роздільна здатність обмежується хвильовою природою випромінювання, а саме явищем *дифракції*. Теорія дифракції на круглому отворі приводить до такого розподілу освітленості у фокальній площині від точкового об'єкта

$$E = E_0 \left(\frac{J_1 \left(\frac{\pi r}{\lambda} \right)}{\frac{\pi r}{\lambda}} \right)^2, \quad (3.2)$$

де r – відстань від центра зображення, λ – довжина хвилі, J_1 – функція Бесселя першого порядку. Так як перший мінімум функції (3.2) має місце при аргументі, що дорівнює 0.61, за міру розділення можна прийняти величину $\alpha'' = 1.22\lambda / D \cdot 206265$ або за порядком величини $\alpha'' \approx \lambda / D \cdot 2 \cdot 10^5$. Тобто метровий телескоп у видимій частині спектра має $\alpha \approx 0.1''$, інфрачервоний телескоп з $D = 25$ м на $\lambda = 12.5$ мкм матиме таке саме розділення, а радіотелескоп з 70-метровою антенною, що працює на $\lambda = 10$ см має $\alpha = 5'$. Функція (3.2) має назву *апаратної функції*.

При реальних спостереженнях апаратна функція визначається, окрім дифракційної границі розділення, ще спотвореннями, які виникають в оптиці телескопа і мають назву *аберацій*. Основні з аберацій це – *сферична аберація*, якщо дзеркало має сферичну, а не параболічну форму, та позаосьові аберації, які спотворюють зображення і тим більше, чим більша відстань від центра фокальної площини, – *кома*, *астигматизм*, *дисторсія*. Для збільшення поля зору доводиться ускладнювати оптичну схему телескопа. Основні з цих схем показані на рис. 3.1. Це класичні схеми рефлекторів – схема Ньютона (а) і схема Касегрена (б). Схема Річі–Кретьєна (г) і схема Шмідта (д) саме і призначені для збільшення поля зору й усунення позаосьових аберацій. Схема куде (в) виводить світловий потік у нерухому вісь конструкції телескопа, що дозволяє застосовувати допоміжну апаратуру великої ваги. Особливий клас складають сонячні телескопи, які завдяки великому світловому потоку можуть бути дуже довгофокусними і є нерухомими, а добовий рух Сонця компенсується

целостатною установкою з системи дзеркал, що певним чином обертаються.

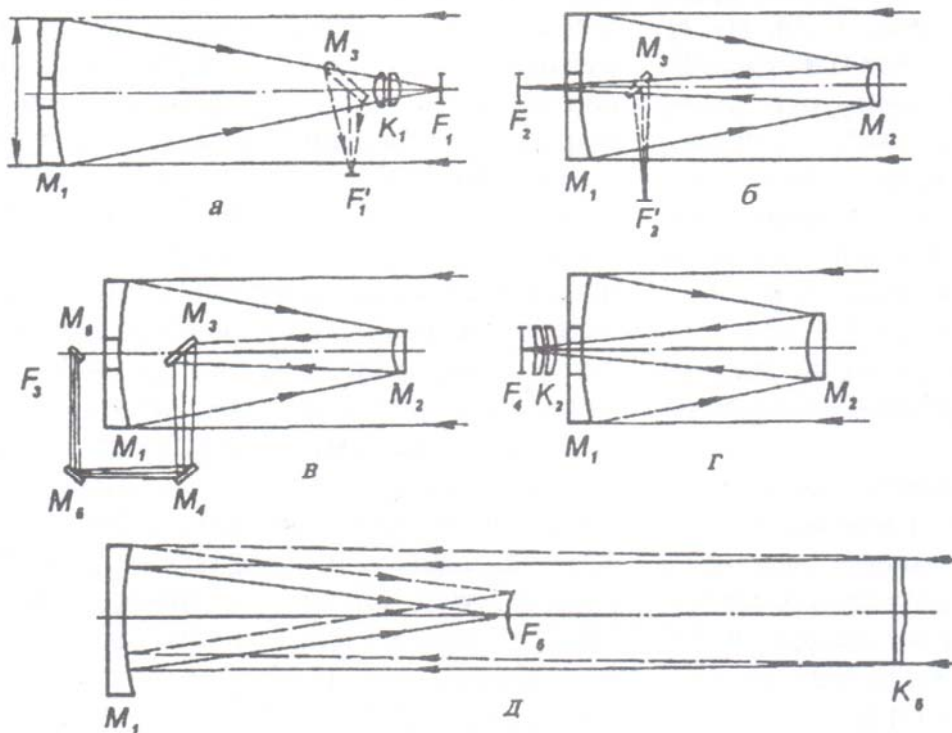


Рис. 3.1. Оптичні схеми телескопів-рефлекторів

Однак для телескопів з $D > 50$ см при наземних спостереженнях апаратна функція визначається, насамперед, *спотворюючим впливом земної атмосфери*. Будь-які рухи в атмосфері є турбулентними. Тому значення густини повітря, а відтак і його коефіцієнта заломлення є випадковою функцією координат. Тому зображення, яке формується в телескопі, суттєвим чином залежить від часу його одержання – часу експозиції. Якщо цей час значно менше часу стабільності атмосфери (це перші соті долі секунди), то зображення має плямисту (спеклову) структуру з плямами розміру порядку дифракційної границі (3.2). Однак ця структура несе інформацію і про структуру об'єкта під дифракційним розділенням (зокрема про розмір зірок і розподіл яскравості по їх поверхні та їхню подвійність). Знаходження цієї інформації складає метод обробки таких плямистих зображень (спеклограм) – це метод *спекл-інтерферометрії*. Якщо ж час експозиції значно більше часу стабільності атмосфери (що зазвичай так і буває), то ця плямиста картина усереднюється і апаратна функція в першому наближенні може бути описана двомірною функцією Гауса:

$$g(r) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}}. \quad (3.3)$$

Характерне значення середньоквадратичного ухилення σ для певного місця на Землі є однією зі складових характеристик *астроклімату* цього місця. Дві інші – це прозорість атмосфери та середня кількість ясних ночей за рік. Для рівнинної місцевості значення σ – це 1" і більше, для поодиноких гірських вершин, зокрема на океанських островах, вона може сягати 0,5". Для космічних телескопів апаратна функція визначається, окрім апаратної функції власне телескопа, точністю системи орієнтації та стабілізації космічного апарата в заданому напрямі.

Для протяжного об'єкта зображення, що формується системою «телескоп+атмосфера», освітленість описується *згорткою* функції, яка описує неспотворений розподіл освітленості від об'єкта з апаратною функцією системи:

$$f(\vec{r}) = \iint_S F(\vec{r} - \vec{r}')g(\vec{r}')dS, \quad (3.4)$$

де S – область, зайнята неспотвореним зображенням. Виникає задача *відновлення зображення*, для чого треба розв'язати інтегральне рівняння (3.4), яке має наближений розв'язок

$$F(\vec{r}) = f(\vec{r}) + \frac{\sigma^2}{2} \nabla^2 f(\vec{r}). \quad (3.5)$$

Однак застосуванню (3.5) та інших засобів розв'язання рівняння (3.4) суттєвим чином заважає некоректність рівнянь типу згортки, тобто те, що малим похибкам у функціях f та g можуть відповідати немалі похибки у розв'язку F . Задача покращення якості зображень та їхньої змістовної обробки вирішується на основі застосування до рівняння (3.4) *перетворення Фур'є*, ліва частина якого переходить при цьому у добуток Фур'є-образів неспотвореного зображення та апаратної функції. Після виділення у спектрі апаратної функції спектра шумів та регуляризації задачі на основі апріорної інформації робиться обернене перетворення Фур'є.

Для дзеркал у будь-якому діапазоні хвиль точність їхнього виготовлення повинна бути не гірше ніж $\lambda/8$. У короткохвильовому (рентгенівському та гамма) діапазонах це неможливо. Тому вони засновані на тому, що фактично «працює» величина $h \cos \theta$, де h – відхилення від потрібної форми, а θ – кут падіння випромінювання на дзеркало. Використовується принцип *«косого падіння»*, коли кут θ достатньо близький до 90° .

У діапазоні міліметрових та сантиметрових радіохвиль радіотелескопи мають вигляд суцільних поворотних *параболічних антен* (діаметром до 100 м), у фокусі яких розміщується приймач випромінювання – радіометр. Найбільшу нерухому антену має телескоп,

побудований у кратері згаслого вулкана в Аресібо (Мексика, $D = 305$ м). Інший клас радіотелескопів – це *багатоелементні системи*. Це набір або окремих елементів параболічної форми як, наприклад, радіотелескоп РАТАН-600 Спеціальної астрофізичної обсерваторії РАН, розміщених по колу радіуса в 600 м. Або це набір дипольних антен, розміщених або у вигляді хреста (*хрест Міллса*) або у вигляді букви Т. Сигнали від сусідніх антен сумуються з певною часовою затримкою («різницею ходу»), яка дорівнює періоду коливань, тобто сумуються сигнали в однаковій фазі. Наприклад, Т-подібний декаметровий радіотелескоп УТР-2 харківського Радіоастрономічного інституту НАНУ має 2040 антен, розміри 1800 на 900 м і роздільну здатність $\alpha = 15'$ (на $\lambda = 10$ м). Наведення такого телескопа на певну ділянку неба здійснюється аналоговою або цифровою обробкою прийнятого сигналу.

Для підвищення роздільної здатності телескопів використовують метод *адаптивної оптики* або принцип інтерферометрії. У першому випадку дзеркало телескопа складається з окремих рухомих елементів, які весь час спостереження за допомогою електронно-механічної системи підстроюються до миттєвого значення апаратної функції, яка визначається за одночасним спостереженням опорного точкового сигналу (зорі). Оскільки потрібні для цього зорі на багатьох ділянках неба відсутні, то доводиться звертатися до створення штучної зорі. Ця «зоря» створюється в атмосфері за допомогою лазерного променя на хвилі 589 нм, де розташований дублет спектральних ліній натрію. На висоті приблизно 90 км поглинання цього випромінювання збуджує атоми натрію, які потім випромінюють, в тому числі й у зворотному напрямі. Для надійної роботи такої системи треба створювати принаймні чотири таких натрієвих зорі.

Інтерферометри засновані на синфазному зведенні сигналів від окремих дзеркал або телескопів, що знаходяться на певній відстані один від одного. При цьому роздільна здатність такого двопроменевого інтерферометра є $\alpha \approx \lambda/a$, де a – відстань між дзеркалами або телескопами, але тільки в напрямі, що їх сполучає. В оптичній області, наприклад, створена система VLT з двох телескопів на відстані 130 м (α – десятки мікросекунд дуги). Значно ширше застосовується інтерферометрія в радіоастрономії. У наземних двопроменевих радіоінтерферометрах відстань a сягає 10000 км (радіоінтерферометрія з наддовгою базою), а розділення $0,005''$. У США побудований радіоінтерферометр VLA (дуже велика антена), який складається з 27 25-метрових повноповоротних антен і на довжині хвилі в 10 см дає роздільну здатність $\leq 1''$. В Україні на основі телескопа УТР-2 створена радіоінтерферометрична система УРАН з найбільшою базою в 900 км. Ще більше перспектив має *космічна інтерферометрія*. Важливим кроком у цьому

напрямі став запуск російського ШСЗ «Радіоастрон» ($D = 10$ м) на орбіту з висотою апогею у 350 тис. км. Він може працювати у парі з різними наземними телескопами, зокрема з 70-метровим радіотелескопом поблизу м. Євпаторія, і давати розділення в перші стотисячні долі кутової секунди.

Певну роль відіграють у сучасній астрономії *світло-* та *радіолокаційні методи*. Лазерна світлолокація використовується при вивченні Місяця. На світлолокації ШСЗ засновані сучасні методи служби часу та застосування ШСЗ у геодезії та геофізиці. Радіолокаційні методи використовуються для дослідження Місяця, планет, їхніх супутників, астероїдів і комет, а також сонячної корони. Визначаються відстані до цих тіл, відбивні здатності їхніх поверхонь та характеристики, що цю здатність визначають – діелектрична стала та структура поверхневих шарів. Одночасний аналіз часового та частотного спектрів дозволяє виділити сигнал від елемента поверхні планети, яка обертається навколо своєї осі (на основі ефекту Доплера), значно меншого, ніж розділення радіотелескопа, за допомогою якого проводиться радіолокація планети. Знайдена емпірична формула, що пов'язує діелектричну сталу ε і густину поверхневого шару ρ :

$$\rho = 2(\sqrt{\varepsilon} - 1). \quad (3.6)$$

В останні десятиріччя все більша частина нової астрофізичної інформації одержується за допомогою *космічних телескопів*. Їхнє використання, насамперед, дозволяє вести спостереження в ділянках електромагнітного спектра поза вікнами прозорості земної атмосфери (рис. 3.2), зокрема в інфрачервоному (IRAS, ISO, «Спітцер», WISE), далекому ультрафіолетовому («Астрон», «Коперник», IUE), рентгєнівському («Ухуру», «Коронас», «Чандра», «Swift») і гамма («Гранат», «Інтеграл») діапазонах. Це також знімає питання про вплив земної атмосфери і дозволяє вести спостереження практично неперервно. Але виникають і специфічні проблеми – це вже згадувана проблема орієнтації та стабілізації і проблема передачі інформації на Землю. Значимість досліджень на згадуваних та інших космічних обсерваторіях підкреслюється такими їх результатами – відкриття подвійних рентгєнівських джерел, знайдення чорної діри в центрі Галактики, підтвердження сучасної космологічної моделі (прискороного розширення Всесвіту і ролі фізичного вакууму та темної матерії в його еволюції). Ефективно вже 25 років працює оптичний космічний телескоп «Хаббл» ($D = 2.4$ м, $\alpha < 0.1''$). Нещодавно почали працювати нові космічні телескопи «Планк», WISE, «Swift». Усі ці інструменти працюють на орбітах ШСЗ, але останнім часом виводяться апарати і в прямолінійні точки лібрації системи «Сонце – Земля», зокрема для дослідження Сонця.

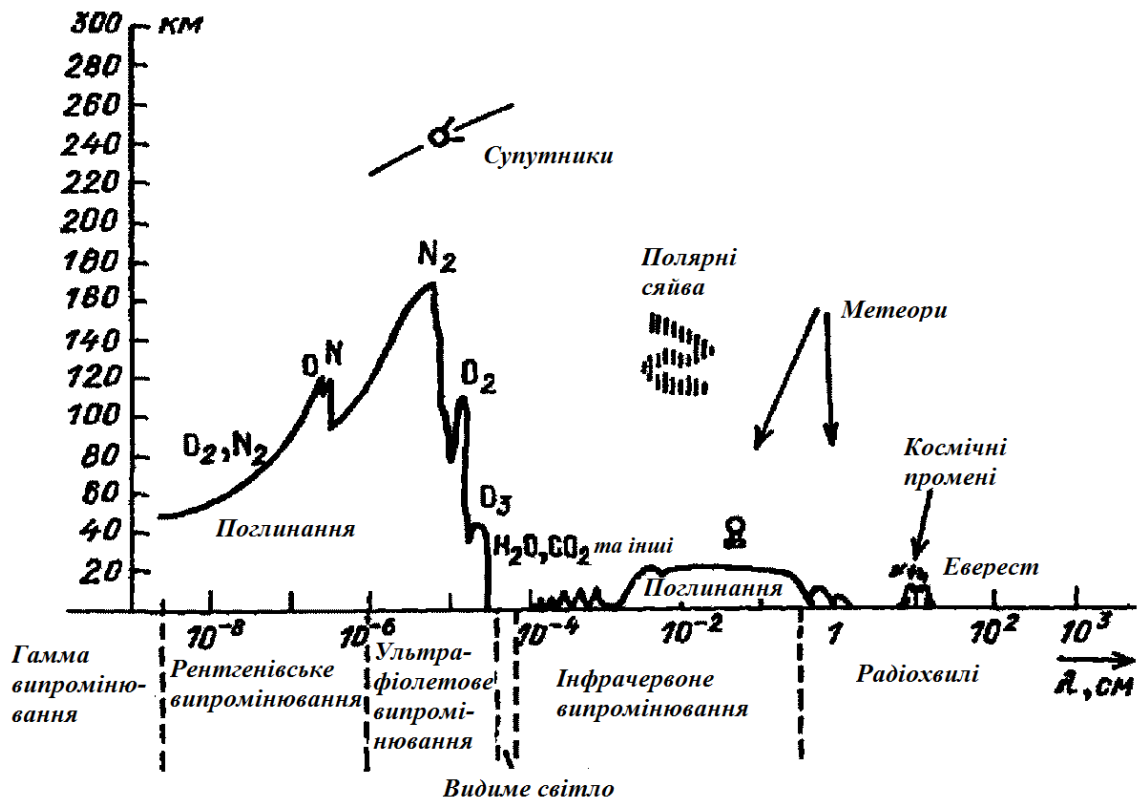


Рис. 3.2. Прозорість земної атмосфери

Принципово новим в історії астрономії є застосування засобів ракетно-космічної техніки до безпосереднього дослідження тіл Сонячної системи. Вже десятки апаратів досліджували Місяць (останнім часом «Лунар Проспектор», LRO (США), «Смарт-1» (ЄКА), «Селена» (Японія), «Чанге-2, 3» (Китай), «Чандрайан-1» (Індія)), приблизно два десятка апаратів досліджували та досліджують Марс. Зараз вивченням за допомогою АМС охоплена практично вже вся Сонячна система. Під час дослідження великих планет найбільш ефективними виявилися комбіновані схеми польоту, коли АМС включає і орбітальні і спускальні модулі. Етапними досягненнями були перші м'які посадки на астероїд Ерос та супутник Сатурна Титан і доставка кометної речовини та речовини астероїда Ітокава на Землю.

Нарешті, характеристикою телескопа є його *проникна здатність*. Це найбільша зоряна величина об'єкта, який може бути зафіксований цим телескопом у зеніті

$$m_{\max} = 5 \lg D + C, \quad (3.7)$$

де стала C є нуль-пунктом шкали зоряних величин і залежить від втрат енергії у самому телескопі та, головним чином, від чутливості приймача випромінювання. Найбільші наземні телескопи можуть фіксувати об'єкти

до 30^m , тобто у 10^{12} разів слабкіші, ніж одна з найяскравіших зір нашого літнього неба Вега (α Ліри), у якої $m \approx 0^m$.

Широке розповсюдження набуло застосування комп'ютерів для автоматизації процесу спостережень. Виникла така їхня форма, як *сервісні спостереження*, коли дослідник тільки чітко формулює те, які об'єкти і яким чином треба проспостерігати, а потім одержує результати у цифровому вигляді, знаходячись далеко від обсерваторії, де знаходиться телескоп. У такому режимі працюють, зокрема, великі сучасні телескопи з діаметром дзеркал у 8–10 метрів, що знаходяться у місцях з хорошим астрокліматом (у Південній Америці, на Канарських та Гавайських островах). Дані про найбільші оптичні телескопи наведені в табл. 3 Додатку.

3.2. Аналізатори та приймачі випромінювання

Аналізатори випромінювання в астрофізиці належать, насамперед, до двох основних груп. Перша з них призначена для вивчення спектрального складу випромінювання, що надходить до нас від небесних тіл. Це спектральні прилади. Друга група досліджує стан поляризації цього випромінювання. Це поляриметри.

Основним елементом *спектрального приладу* в оптичній області є дифракційна ґратка, а її основною технічною характеристикою є кількість штрихів на одиницю довжини. Її *спектральна роздільна здатність* $R = \lambda / \Delta\lambda$, де $\Delta\lambda$ – найменший проміжок між двома спектральними лініями, що спостерігаються як окремі. Якщо в якості приймача випромінювання використовується фотоплівка, відповідний спектральний прилад отримав назву *спектрограф*, якщо фотоелектричний приймач – *спектрометр*. Якщо ґратка має N щілин між штрихами, то при відбитті світла від неї утворюються головні максимуми на довжинах хвиль $a \sin \theta = \lambda, 2\lambda, \dots$, де θ – кут падіння випромінювання на ґратку. При збільшенні кількості щілин відбувається звуження головних максимумів і концентрація світла в них за рахунок додаткових максимумів. *Лінійна дисперсія* такого спектрографа становить:

$$\frac{ds}{d\lambda} = \pm m C f \cdot 10^{-7} \text{ мм} / \text{Å}, \quad (3.8)$$

де m – порядок спектра (1, 2, і т. д.), C – стала ґратки (кількість штрихів на міліметр), f – фокусна відстань камери, а його спектральна роздільна здатність $R = m C l$, де l – довжина заштрихованої частини ґратки в міліметрах.

Застосовуються і більш ефективні, але складні методи спектральних досліджень. Зокрема, метод *Фур'є-спектроскопії*, коли спочатку вимірюється за допомогою інтерферометра потік як функція зі змінною різниці оптичного ходу, а потім до неї застосовується косинус-перетворення Фур'є, яке і дає спектральний розподіл досліджуваного випромінювання як функцію хвильового числа.

Певне уявлення про розподіл енергії у спектрі слабких об'єктів дає *колориметрія* – фотометрія в окремих більш-менш вузьких ділянках спектра за допомогою світлофільтрів. Існують широкосмугові фільтри ($\lambda > 30$ нм, певним чином забарвлені скляні платівки), середньосмугові ($10 \leq \lambda \leq 30$ нм, поляризаційні, або інтерференційні) та вузькосмугові ($10 \leq \lambda \leq 0.01$ нм, інтерференційно-поляризаційні). Певний світлофільтр (разом зі спектральними властивостями оптики телескопа та приймача випромінювання) реалізує певну фотометричну систему. Найбільш вживаною широкосмуговою системою є система Джонсона-Козинса. Її характеристики у видимій та ближній інфрачервоній областях вказані в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Стандартні фотометричні смуги

Смуга	λ_0 мкм	$\Delta\lambda$ мкм	Смуга	λ_0 мкм	$\Delta\lambda$ мкм
<i>U</i>	0,36	0,06	<i>H</i>	1,62	0,2
<i>B</i>	0,44	0,10	<i>K</i>	2,2	0,6
<i>V</i>	0,55	0,08	<i>L</i>	3,5	0,9
<i>R</i>	0,65	0,16	<i>M</i>	5,0	1,1
<i>I</i>	0,81	0,15	<i>N</i>	10,4	6,0
<i>J</i>	1,25	0,30	<i>Q</i>	20,0	5,5

Основними характеристиками *приймачів випромінювання* є:

- *чутливість* – відношення вихідного сигналу до потоку енергії, що надходить до приймача;
- *спектральна характеристика* – залежність чутливості від довжини хвилі;
- *поріг чутливості* – мінімальне значення потоку, яке ще можна зареєструвати;
- *шуми* – флуктуації на виході приймача, які обмежують його чутливість та поріг чутливості;
- *світлова (енергетична) залежність* між потоком енергії та корисним сигналом на виході;
- *динамічний діапазон* – відношення максимального потоку до мінімального, які можуть бути зареєстровані;

– *квантовий вихід* – величина, що обернена до найменшої кількості квантів, потрібних для реєстрації мінімального корисного сигналу.

Протягом двох тисяч років єдиним приймачем випромінювання було людське око, у певних відношеннях досить досконалий оптичний прилад. Він є панорамним, тобто дозволяє будувати зображення об'єкта; має властивість акомодатії, тобто може змінювати поріг чутливості відповідно до умов спостереження. Однак воно не пристосоване до більш-менш точних вимірювань та фіксування їхніх результатів і внаслідок складного процесу психофізіологічної обробки одержуваної інформації має значну долю суб'єктивності. З середини XIX ст. понад сто років основним приймачем випромінювання в астрономії була фотоплівка. Вона мала властивості панорамності, документальності та накопичення сигналу при збільшенні експозиції. Однак нелінійність її світлової характеристики (наявність областей недодержання та передержання) обмежували її динамічний діапазон. Крім того, підвищення роздільної здатності фотоплівки знижувало її чутливість і навпаки. Протягом XX ст. розвивалися фотоелектричні приймачі випромінювання – фотоелементи, фотопомножувачі, але вони не були панорамними і могли здійснювати лише *інтегральну фотометрію*, тобто визначати лише загальну освітленість, створювану спостережним об'єктом. Панорамні для *поверхневої фотометрії* фотоелектричні прилади розвивалися у двох напрямках – електронно-оптичні перетворювачі (ЕОПи) та телевізійні приймачі.

Сучасна спостережна астрономія (як наземна, так і космічна) протягом останніх десятиріч майже повністю перейшла на застосування нових твердо- тільних приймачів – *ПЗЗ-матриць* (приладів із зарядовим зв'язком), які працюють на основі внутрішнього фотоефекту. Така матриця складається з великої кількості, наприклад, 4096×4096 приймальних елементів (пікселів), що забезпечує її високу роздільну здатність. Ці приймачі значно перевершують фотоплівки за своїми спектральними характеристиками (від 0,4 до 1,1 мкм) та чутливістю. Їхній квантовий вихід сягає 0.8 проти 0.02 для фотоплівки. Процес спостережень з ПЗЗ-матрицями включає низку етапів первинної обробки (дослідження якості та характеристик окремих елементів ПЗЗ-матриці, визначення темного струму, визначення нуля-пункту світлової залежності) та введення відповідних поправок у результати вимірювання, що потребує застосування комп'ютера. Натомість результат вимірювань одразу одержується у цифровій формі, придатній для подальшого зберігання, передачі та використання спостережної інформації.

У короткохвильових (рентгенівському та гама) діапазонах використовуються вторинно-електронні помножувачі відкритого типу (ВЕР). У γ -діапазоні та при реєстрації космічних променів застосовуються

сцинтиляційні та черенківські лічильники, ядерні емульсії та іскрові камери.

У радіодіапазоні прийнятною системою є *радіометр*. Радіометр радіотелескопа перетворює енергію випромінювання в електричний струм. Але він виявляється значно слабшим, ніж шумовий струм, викликаний радіофоном та власними шумами приймача. Тому корисний сигнал доводиться виявляти на фоні шумів, що багатократно його перевищують. Це робиться або накопиченням сигналу або (якщо корисний сигнал не дуже вузькосмуговий) розширенням частотної полоси прийому.

В основі сучасних *поляриметрів* лежить метод одержання чотирьох променів з одночасним вимірюванням параметрів лінійної поляризації. Метод заснований на використанні спеціальної призми Волластона для одночасного одержання чотирьох зображень об'єкта з напрямками поляризації 0° , 45° , 90° і 135° . Призма ставиться у плоскопаралельний пучок фокального редуктора і складається з двох пар призм. Призми Волластона у першій парі вирізані та склеєні таким чином, що розщеплюють половину світлового пучка на дві ортогонально поляризовані складові 0° та 90° . Друга пара призм розщеплює другу половину пучка у вертикальному напрямі, але при цьому ортогонально поляризовані компоненти повернуті на кут 45° відносно першої пари, тобто під кутами 45° та 135° . Передня поверхня кожної з призм зроблена у формі клину, щоб промені відхилялись вище і нижче оптичної осі. Така подвійна призма розщеплює колімований пучок на чотири пучки, що дозволяє визначати перші три параметри *вектора Стокса* I , Q , U . Параметри Стокса одержуються одночасно і на одному зображенні. Як детектор використовується ПЗЗ-камера. Ступінь поляризації визначають так:

$$P = \frac{(Q^2 + U^2)^{1/2}}{I} \quad \text{або} \quad P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (3.9)$$

де I_{\max} та I_{\min} - максимальна та мінімальна інтенсивність випромінювання, що одержують обертаючи поляризатор в одноканальних поляриметрах, і котрі пов'язані з параметрами Стокса відповідним чином.

З позаелектромагнітних джерел інформації в сучасній астрофізиці використовується нейтринне випромінювання. Його джерелами, доступними для вивчення, є сонячне нейтринне випромінювання та випромінювання, що виникає при спалахах наднових. Принцип реєстрації нейтрино заснований на тому, що в нейтринному «телескопі» використовується деяка маса (зазвичай вельми велика) певного хімічного елемента, в якому хоча б зрідка відбуваються реакції з нейтрино, які перетворюють атом у радіоактивний атом іншого елемента з утворенням електрона.

Потім відбувається розпад цього радіоактивного елемента з утворенням позитрона. Анігіляція пари «електрон– позитрон» дає γ -квант, який і реєструється. Використовуються в нейтринних детекторах хлор, галій та літій, які перетворюються на аргон, германій та берилій відповідно. Використовуються також водяні або «важководяні» детектори. У першому випадку нейтрино збуджують електрони H_2O , у другому атом D_2O реагує з нейтрино, даючи протон і енергійний електрон. Реєструється виникаюче при цьому черенківське випромінювання.

Вже понад півстоліття продовжуються спроби зареєструвати гравітаційні хвилі, які передбачаються загальною теорією відносності. Ідея їхньої реєстрації полягає у вимірюванні малих періодичних змін у розмірах мас, що є детекторами, або певних змін у їхньому русі під впливом гравітаційної хвилі. Хоча чутливість таких пристроїв постійно зростає, але вона ще недостатня для надійного фіксування гравітаційних хвиль. Знов-таки складною проблемою є відсторонення від шумів різної природи.

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. Чому в сучасній астрофізиці використовуються тільки телескопи-рефлектори?
2. Які існують основні схеми телескопів-рефлекторів?
3. У чому перевага схеми Шмідта?
4. У чому перевага схеми куде?
5. Чим визначається масштаб зображення?
6. Що таке роздільна здатність і чим вона визначається?
7. У чому полягає метод спекл-інтерферометрії?
8. Що таке апаратна функція?
9. Як визначається роздільна здатність зображень протяжних об'єктів?
10. Що таке астроклімат і чим він визначається?
11. Що таке телескопи «косого падіння» і де вони застосовуються?
12. Які існують типи радіотелескопів?
13. Яку інформацію дає радіолокація?
14. Що таке адаптивна оптика телескопів?
15. Що таке космічна радіоінтерферометрія?
16. У чому полягають переваги космічних телескопів?
17. Які тіла Сонячної системи вже вивчаються за допомогою засобів ракетно-космічної техніки?
18. Що таке проникна здатність і від чого вона залежить?
19. Що таке сервісні спостереження?

20. Які існують спектральні прилади?
21. Що таке колориметрія?
22. Які є основні характеристики приймачів випромінювання?
23. У чому полягають переваги ПЗЗ-матриць порівняно з фото-платівками?
24. Які приймачі випромінювання використовуються у коротко-хвильових діапазонах?
25. На чому засновані сучасні поляриметри?
26. На яких принципах засновані приймачі нейтринного випромінювання?

ЗАДАЧІ ДО ГЛАВИ 3

3.1. ПЗЗ-камера, що має розмір матриці 2048×2048 пікселів (розмір пікселя 9 мкм), установлена у фокальній площині 2.5 м телескопа. Визначити фокусну відстань телескопа, якщо відомо, що відстань між компонентами подвійної зорі становить $\beta = 5''$, а на матриці вона досягає 10 пікселів.

3.2. Визначити дифракційну роздільну здатність телескопа з діаметром дзеркала 2.5 м на довжині хвилі 0.55 мкм та скільки пікселів займає центральна дифракційна пляма, якщо фокусна відстань телескопа становить 50 м , а матриця має розмір 4096×4096 пікселів (розмір пікселя 6 мкм).

3.3. Космічний телескоп Гершель з апертурою 3.6 м проводить спостереження в діапазоні довжин хвиль $50\text{-}500 \text{ мкм}$. З якою кутовою точністю потрібно підтримувати орієнтацію телескопа у цьому діапазоні довжин хвиль?

3.4. Знайдіть максимальну роздільну здатність радіоінтерферометра, що працює на довжині хвилі 1 м у земних умовах. Яка при цьому повинна бути точність синхронізації часу на телескопах.

3.5. Виведіть формулу максимальної проникаючої здатності телескопа порівняно з оком людини.

3.6. Скільки штрихів повинна мати дифракційна ґратка, щоб у другому порядку можна було розділити лінії натрію D_1 ($5895, 944 \text{ \AA}$) та D_2 ($5895, 977 \text{ \AA}$). Чому дорівнює лінійна відстань між цими лініями на спектрограмі у першому порядку спектра ґратки з числом штрихів $C = 600 \text{ мм}^{-1}$, якщо фокусна відстань камери дорівнює 80 см ?

3.7. Загалом ступінь поляризації визначають за допомогою формули (3.9), але в астрономії також використовують характеристику: $\Delta m_p = -2.5 \lg(I_{min}/I_{max})$. Знайдіть зв'язок між Δm_p та P .

3.8. Визначити освітленість горизонтальної одиничної площадки, що освітлюється небесною півсферою у припущенні, що яскравість неба B постійна.

3.9. На одному з дивних астероїдів Сонячної системи, альbedo якого практично дорівнює нулю, сидить група абсолютно чорних котів, які дивляться у бік Сонця. Спостерігач на Землі бачить їх як один об'єкт. Один з котів закрив одне своє око, після чого спостерігач помітив, що зоряна величина цього об'єкта змінилася з 24.32^m до 24.52^m . Скільки котів знаходиться на астероїді?

3.10. Земна поверхня має нормальну освітленість від Сонця $1.4 \cdot 10^6$ ерг/(см²·с) (без урахування атмосферного поглинання). Визначити діаметр телескопа, щоб виявити випромінювання зорі, подібної Сонцю, з відстані 10 пк. Приймачем є болометр з чутливістю 0.01 ерг/с.

ГЛАВА 4

ФІЗИКА ЗІР

Відомий радянський астрофізик Й. С. Шкловський у своїй книзі [52] писав: «Якщо задати наївне дитяче питання, які з космічних об'єктів «найголовніші», я, не вагаючись, відповім: з о р і. Чому? Ну, хоча б тому, що 97 % речовини в нашій Галактиці зосереджено в зорях». І далі: «На сучасному етапі еволюції Всесвіту речовина знаходиться переважно у зоряному стані». Що ж таке зорі? Є таке їхнє визначення: «Зоря – це гравітаційно зв'язана маса речовини, всередині якої відбуваються або відбувалися реакції перетворення водню в гелій».

4.1. Характеристики зір. Стаціонарні зорі

Основною спостережною характеристикою зорі є її видима зоряна величина. Сукупність зоряних величин у основних фотометричних системах (U, B, V, R і т. д., див табл. 3.1 на стор. 56) дозволяють знайти різниці U–B, B–V і т. д. (так звані *показники кольору*), які дають уявлення про розподіл енергії в неперервному спектрі зорі. Спостережною основою класифікації зір є наявність у її лінійчатому спектрі певних спектральних ліній тих чи інших хімічних елементів.

Головним фактором, що визначає як неперервний, так і лінійчатий спектри зорі є температура тих поверхневих шарів зорі, з яких надходить до нас її випромінювання. Шар, з якого приходить випромінювання у неперервному спектрі – це зоряна *фотосфера*. Спектральні *лінії поглинання* утворюються частково і в фотосфері, але головним чином вище її, в шарі зоряної атмосфери, яка має назву *хромосфери*. Лінії виникають на тій глибині, де температура відповідає енергії квантів, яка дорівнює переходу електронів в атомі того чи іншого елемента, що утворює спостережувану спектральну лінію. Сучасна *спектральна класифікація* об'єднує зорі з більш-менш однаковими спектрами і близькими ефективними температурами, (класи позначаються латинськими літерами) представлена у табл. 4.1 і на рис. 4.1. Основні класи – O, B, A, F, G, K та M. Додаткові класи – C зі смугами молекулярного водню, вуглецю та деяких його сполук), R і N (зі смугами

CN та C₂), S (зі смугами ZrO). Нещодавно були введені класи L і T для опису холодніших зір та нового класу космічних тіл – субзір (коричневих карликів або ультрахолодних зір). *Субзори* – це об’єкти, в надрах яких температура і тиск недостатні для протікання повної низки реакцій перетворення водню у гелій. Кожен спектральний клас поділяється за більш тонкими особливостями лінійчатих спектрів на 10 підкласів від 0 до 9. За історичними причинами класи O, B, A, F називають ранніми, а G, K, M – пізніми.

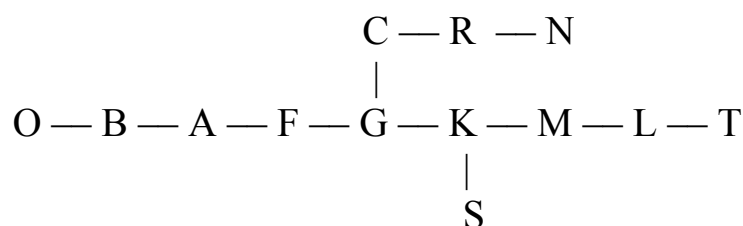


Рис. 4.1. Послідовність спектральних класів зір та субзір

Основні фізичні процеси, що визначають особливості спектрів зір різних спектральних класів такі. У гарячих зорях O і B – це вільно-вільні переходи в іонізованому середовищі та іонізація HeI і HeII. У зорях класу A – іонізація HII у видимій області з другого та третього рівнів. У зорях F та G – іонізація від’ємних іонів водню та іонізація металів. У холодних зорях класів K та M – іонізація від’ємних іонів водню і дисоціація молекул, поява молекулярних смуг. Характеристики основних спектральних класів наведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Спектральна класифікація зір (основні класи)

Спектр. клас	Світність M _{абс}	Ефективн. температура, тис. К.	Основні лінії	Колір
O	-5.6 – -4.0	40 – 28	H ⁺ , He, H	Блакитний
B	-4.0 – +0.8	28 – 10	He, H	Біло-блакитний
A	+0.8 – +2.8	10 – 7	H	Білий
F	+2.8 – +4.4	7 – 6	H, Ca ⁺	Жовтувато-білий
G	+4.4 – +6.0	6 – 5	Ca ⁺ , Fe, Ti	Жовтуватий
K	+6.0 – +8.9	5 – 3.5	Fe, Ti	Помаранчевий
M	+8.9 – +11.1	3.5 – 2.5	TiO	Червоний

Однак виявилось, що до однакових спектральних класів можуть належати зорі зовсім різної світності, а відтак і з різними масами та радіусами. Це привело до ще одного принципу класифікації зір – до введення *класів світності* зір, які позначаються римськими цифрами. Це

такі класи: I – надгіганти; II – яскраві гіганти; III – гіганти; IV – субгіганти; V – головна послідовність; VI – субкарлики; VII – білі карлики. Різниця в спектрах зір одного спектрального класу і різних класів світності зв'язана із суттєво різною густиною їхніх атмосфер. У гігантів вона значно менша, ніж у карликів. Тому процеси іонізації відбуваються в гігантах при дещо меншій температурі. Крім того, спектральні лінії в гігантів не такі широкі, як у карликів, за рахунок меншого їх уширення внаслідок зіткнень.

У спектрах гарячих зір спостерігаються поряд з лініями поглинання і лінії випромінювання – *емісійні лінії*. Це деякі зорі класу O, так звані зорі Вольфа–Райє (WR) – зорі з протяжними оболонками, що розширюються, і зорі типу Ve.

Виявилося, що для зір певного класу світності є тісна кореляція між спектральним класом S_p та світністю зорі L . Цей зв'язок між ними наочно підтверджується діаграмою Герцшпрунга–Рессела (за іменами вчених, які вперше побудували таку діаграму). Ця діаграма (діаграма Г–Р) представлена на рис. 4.2. На цьому рисунку підкреслена та обставина, що координатами зорі можуть бути різні її характеристики, пов'язані між собою (абсциса – спектральний клас, ефективна температура, показник кольору B–V; ордината – світність, абсолютна зоряна величина).

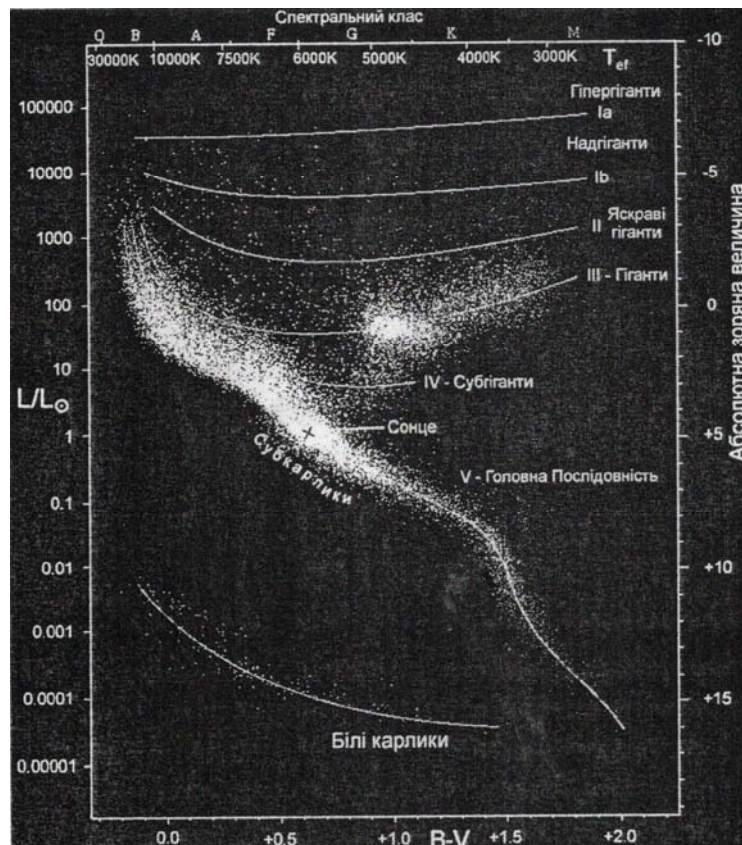


Рис. 4.2. Діаграма Герцшпрунга–Рессела

Фізично феномен стаціонарної зорі заснований на тому, що кожен елемент маси її речовини dM знаходиться у стані гідростатичної рівноваги під дією протилежно спрямованих сил – сили тяжіння та суми сил термодинамічного і променевого тиску з рівнянням:

$$\frac{dp}{dr} = -\rho \frac{GM(r)}{r^2}, \quad (4.1)$$

де

$$\frac{dM(r)}{dr} = 4\pi r^2 \rho(r), \quad (4.2)$$

p – тиск, $\rho(r)$ – розподіл густини вздовж радіуса зорі r , $M(r)$ – маса всередині сфери з радіусом r . Повний тиск дорівнює

$$p = \frac{R}{\mu(X, Y, Z)} \rho T + \frac{4\sigma}{3c} T^4, \quad (4.3)$$

де R – газова стала, X – вміст водню, Y – вміст гелію, Z – вміст важких елементів у речовині зорі, σ – стала Стефана–Больцмана, c – швидкість світла, T – температура. До цього треба додати рівняння променевої рівноваги у вигляді, який описує зміну температури вздовж радіуса зорі та впливає із закону дифузії Фур'є та закону Стефана–Больцмана,

$$\frac{dT}{dr} = -\frac{3}{16\sigma} \frac{\kappa\rho}{T^3} \frac{L(r)}{4\pi r^2}, \quad (4.4)$$

де κ – коефіцієнт непрозорості речовини зорі на одиницю маси, який ступеневим чином залежить від температури. Нарешті, треба записати рівняння, що описує енерговиділення в ядрі зорі:

$$\frac{dL}{dr} = 4\pi r^2 \rho(r) \varepsilon(X, Y), \quad (4.5)$$

де ε – виділення енергії одиницею об'єму, яке теж має ступеневу залежність від температури.

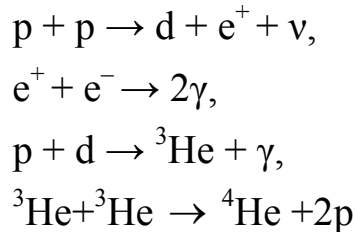
Методом теорії подібності та розмірностей, виходячи з системи рівнянь (4.1)–(4.5), можна довести [44], що радіус і світність зорі повинні також мати ступеневу залежність від її маси, які в одиницях радіуса, світності та маси Сонця матимуть такий вигляд:

$$R = M^{n_1}, \quad L = M^{n_2}. \quad (4.6)$$

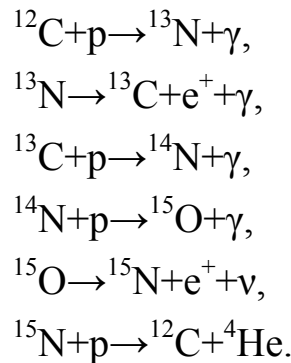
Якщо непрозорість зоряної речовини зумовлена фотоіонізацією та вільно-вільними переходами, то показник ступеня в її залежності від температури дорівнює -3.5 . Тоді показники ступеня в (4.6) є такими:

$$n_1 = \frac{\beta - 3.5}{\beta + 2.5}, \quad n_2 = \beta + 2 - \frac{\beta + 3}{n_1}, \quad (4.7)$$

де β – показник ступеня у залежності $\varepsilon(T)$. А цей показник залежить від типу ядерних реакцій, які зумовлюють перетворення водню в гелій. У зорях типу Сонця і більш холодних «працює» *протон-протонний цикл* (або цикл Бете) з такою послідовністю реакцій:



з виходом енергії 27.3 МеВ на одне ядро гелію ${}^4\text{He}$. У більш гарячих зорях при більших температурах і тисках в ядрі зорі протікає *вуглецевий цикл* (або цикл CNO), в якому вуглець виступає як каталізатор:



Енергія в 26.7 МеВ йде на світіння зорі в електромагнітному спектрі. Випромінюючи, зоря зменшує свою масу, хоча маса фотона, як відомо, дорівнює нулю. Справа в тому, що йдеться про релятивістські процеси, а в релятивістській фізиці маса не є адитивною величиною. Маса чотирьох вільних протонів більша від маси ядра ${}^4\text{He}$ на величину, відповідну енергії зв'язку, яка якраз і дорівнює 26.7 МеВ. Тобто втрата маси при утворенні однієї α -частинки $\Delta m = 26.7 / c^2$. Деяку масу уносять нейтрино, бо їхня маса відмінна від нуля (приблизно 10^{-33} г), а зоряні надра для них прозорі. Усе сказане стосується зір на головній послідовності, перебування на якій займає приблизно 90 % часу життя зорі.

Спостереження дають такі співвідношення між основними характеристиками для більшості зір головної послідовності: $L \approx M^{3.9}$ та $L \approx R^{5/2}$.

Яку ж масу повинна мати зоря, щоб знаходитися у стані рівноваги? Якщо ввести відношення β газового тиску до повного його значення (суми газового і променевого тисків), то рівняння (4.1)–(4.3) разом з рівнянням стану ідеального газу приводить до такого співвідношення для світності зорі:

$$L = \frac{4\pi}{\kappa} GMc(1 - \beta). \quad (4.8)$$

Звідси одержуємо при $\beta \rightarrow 0$ найбільшу можливу масу зорі у стані гідростатичної рівноваги. Це значення маси має назву *границі Еддінгтона* (за ім'ям відомого англійського астрофізика А. Еддінгтона, який вперше знайшов її). Гарячі зорі класів О та В мають більшу масу. Це приводить до того, що під впливом променевого тиску вони відносно швидко втрачають масу та мають протяжні газові оболонки, що розширюються. Це зорі класу О – *зорі Вольфа–Райє* (WR) зі швидкістю втрати маси приблизно $7 \cdot 10^{-5}$ маси Сонця за рік і зорі класу В – *зорі типу* Ве з втратою маси $(7 - 5) \cdot 10^{-5}$ маси Сонця за рік. В їхніх протяжних та прозорих для випромінювання оболонках утворюються поряд з лініями поглинання і лінії випромінювання – *емісійні лінії*. Зараз обговорюється і можливість існування зір з масами у сотні мас Сонця (найбільша відома маса зорі $160 M_{\odot}$). Зрозуміло, що це повинні бути зорі з дуже коротким часом життя і швидкою втратою маси.

Важливі висновки витікають із застосування до стаціонарних зір *теорему віріала*, яка пов'язує середні за часом значення кінетичної (в нашому випадку теплової) і гравітаційної енергій. Якщо в рівнянні гідростатичної рівноваги (4.1) перейти до змінної інтегрування m , де $dm = 4\pi r^2 \rho(r) dr$ і проінтегрувати це рівняння за частинами, одержимо, що гравітаційна енергія

$$U = - \int_0^M \frac{GM(r)}{r} dm = -3 \int p dV. \quad (4.9)$$

Розглянемо застосовне до ідеального газу *політропне* наближення, тобто наближення з рівнянням стану виду $p = K\rho^\gamma$, де γ – відношення теплоємностей c_p/c_v . У цьому випадку питома внутрішня енергія $\varepsilon = p/(\gamma - 1)\rho$, а повна теплова енергія є $Q = \int \varepsilon \rho dV$. Тепер одержимо, що

$$U = -3(\gamma - 1)Q. \quad (4.10)$$

Підставляючи значення $\gamma = 5/3$ для одноатомного ідеального газу, матимемо теорему віріала для зорі у вигляді $2Q = -U$ або повна енергія зорі

$$E = Q + U = -Q. \quad (4.11)$$

Оскільки $Q = c_v M \bar{T}$, де \bar{T} – певне середнє значення температури, то $dE/dT = -c_v M < 0$. Тобто доводиться зробити висновок, що зоря має

від'ємну теплоємність. А це означає, що оскільки зоря випромінює енергію ($\Delta E < 0$), то повинна збільшуватися величина Q і, відповідно, зменшуватися температури \bar{T} . Тобто в зорі працює певний регулюючий механізм, який і забезпечує можливість протікання довгий час в її надрах термоядерних реакцій замість термоядерного вибуху.

Перша рівність (4.9) дає для однорідної кулі значення $U = 3GM^2 / 5R$. При збільшенні густини до центру можна вважати, що

$$U \approx -\frac{GM^2}{R}. \quad (4.12)$$

Тепер можна знайти шкалу часу Гельмгольца–Кельвіна, тобто час, за який схолоне тіло, що не має джерел енергії, але випромінює її зі світністю L . Це

$$t_{HK} \approx \frac{Q}{L} = \frac{GM^2}{2RL}. \quad (4.13)$$

Свого часу, коли тільки був встановлений закон збереження енергії, згадані вище вчені висунули контракційну гіпотезу джерела енергії Сонця, згідно з якою час його життя треба оцінювати за формулою (4.12). Невідповідність цього часу (≈ 30 млн. років) вже тоді відомій, значно більшій, оцінці віку Землі змусило відкинути цю гіпотезу і шукати інші джерела зоряної енергії.

Важливою особливістю зір є те, що багато з них (принаймні більше половини зір Галактики) утворюють гравітаційно зв'язані системи – кратні системи зі ступенем кратності від 2 до 6. Найбільш поширені подвійні зоряні системи. Подвійні зорі класифікуються за методами виявлення їхньої подвійності (табл. 4.2).

Таблиця 4.2

Подвійні зорі

Тип	Спосіб виявлення
Оптичні подвійні	Зорі, близькі лише на небесній сфері, але віддалені у просторі
Фізичні подвійні	Зорі, близькі у просторі та зв'язані гравітаційно
Візуально-подвійні	Компоненти системи розділяються у телескоп*
Затемнено-подвійні	Подвійна зоря періодично змінює свій блиск внаслідок затемнень одного компонента іншим
Спектрально-подвійні	Періодично подвоюються або зміщуються лінії у спектрі зорі

*Зараз для виявлення подвійності зір важливе значення мають засоби та методи підвищення роздільної здатності телескопів, про які йшлося в главі 3.

Дослідження подвійних зір важливе, насамперед, як єдиний більш-менш прямий засіб визначення зоряних мас. Визначення періоду обертання в системі подвійної зорі дозволяє знайти масу за третім законом Кеплера, хоча, строго кажучи, для цього треба знати шість елементів орбіти одного компонента відносно іншого та співвідношення мас компонентів. Конкретний спосіб залежить від типу подвійної зорі, але інколи знаходиться тільки величина $(M_1 + M_2) \sin i$, де i – нахил площини орбіти до картинної площини. Зокрема, вводиться поняття про функцію мас, яка, з одного боку, виражається через вимірювані величини (період обертання P і променеву швидкість однієї зорі), а з іншого - зв'язує маси обох компонент подвійної системи:

$$f(M_2) = \frac{PV_{r1}^3}{2\pi G} = \frac{(M_2 \sin i)^3}{(M_1 + M_2)^2}. \quad (4.14)$$

Розділенню мас компонент допомагає також зв'язок між спектральним класом і масою зорі. Важливим класом подвійних зір є тісні подвійні системи (ТПС), у цьому випадку одна чи обидві зорі заповнюють кожна свою порожнину Роша.

На закінчення цього підрозділу зупинимось на деяких питаннях зоряної топоніміки. Під сузір'ям астрономи зараз розуміють певну ділянку небесної сфери, на якій розташовані більш-менш яскраві зорі, що дали назву цьому сузір'ю. Межами сузір'їв є дуги координатних ліній другої екваторіальної системи координат. Ці межі і назви сузір'їв були остаточно встановлені у 1922 р. на з'їзді Міжнародного астрономічного союзу. Всього налічується 88 сузір'їв. Яскраві зорі сузір'я позначаються грецькими літерами з вказанням скороченої (трилітерної) латинської назви сузір'я. Наприклад, α UMa – це α Ursa Majoris – α Великої Ведмедиці. Понад 200 зір мають власні назви, переважно арабського походження. У певних випадках до позначення спектрального класу та класу світності зорі додається мала латинська літера. Зокрема: e – зоря з емісійними лініями в спектрі, g – зоря-гігант, d – зоря-карлик, p – пекулярна (чимось особлива) зоря. Звісно, що зір значно більше, ніж літер грецької абетки. Тому зорі позначаються в основному номерами того чи іншого зоряного каталогу. Зокрема, це каталоги HD (каталог, названий на честь американського астронома Г. Дрепера та BD – Боннський огляд). Змінні зорі позначаються або великими латинськими літерами R, S, ..., або сполученнями RR, RS, ..., яких налічується 334. Якщо в сузір'ї знайдено більше змінних зір, то вони позначаються так: V335, Деякі групи зір мають назву за назвою зорі – типового представника цієї групи. Наприклад, зорі типу δ Цефея (або цефеїди).

4.2. Нестаціонарні зорі

Багато зір з часом змінюють свою світність і видиму зоряну величину. Їх можна поділити на два основні класи: змінні зорі та наднові зорі. Основні види змінних зір вказані в табл. 4.3.

Важливою властивістю пульсуючих зір є зв'язок між періодом пульсацій та світністю зорі. Період основної моди коливань буде дорівнювати $P = 2Rv_s$, де швидкість звуку $v_s = \sqrt{\gamma p / \rho}$. А з рівняння гідростатичної рівноваги маємо, що середнє значення $p / \rho \approx GM / R$. Звідси одержуємо таку оцінку для періоду: $P \approx 1 / \sqrt{\gamma G \rho}$. Більш точне значення одержується методом теорії подібності та розмірності:

$$P = \sqrt{\frac{3\pi}{G\rho}}. \quad (4.15)$$

Оскільки є статистичні зв'язки між масою, радіусом та світністю, то, виражаючи середню густину через світність зорі, можна знайти зв'язок між світністю та періодом пульсацій блиску зорі. Для *цефеїд* спостереження дають цей зв'язок у логарифмічному вигляді таким:

$$\lg L = 1.15 \lg P + 2.34, \quad (4.16)$$

де L у світностях Сонця, P у добах. Фізичною причиною пульсацій є зростання непрозорості речовини зорі в певному її шарі внаслідок іонізації гелію. Це приводить до підвищення температури і, відповідно, тиску. Радіус зорі збільшується, густина спадає, непрозорість речовини теж спадає, випромінювання більш вільно виходить, спадають температура і тиск, і зоря стискається. Умови, за яких виникають зоряні пульсації, виділяють на діаграмі Γ – P *смугу нестабільності*, де й розміщуються цефеїди і зорі типу *RR* Ліри (або ліриди). Оскільки цефеїди – це зорі-гіганти з великою світністю, то вони можуть спостерігатися на відстанях порядку розмірів Галактики і навіть у близьких галактиках. Тому можливість визначати їхню абсолютну зоряну величину за періодом змінності дає можливість визначати і відстані до них. А це має виключно велике значення для всієї астрономії.

Спалахуючі зорі – це найчисленніша група змінних зір. Це зорі пізніх спектральних класів з потужними конвективними зонами, їхні спалахи є проявами зоряної активності, подібними до сонячної активності, але більш потужними, що проявляються в різних ділянках спектра. Спалахуючі зорі разом зі змінними зорями ще деяких типів утворюють групу *еруптивних зір*.

Таблиця 4.3

Нестационарні зорі
а) Змінні зорі

Тип	Спектр. клас	Період	Амплітуда блиску	Фізичний механізм нестационарності
Фізичні змінні <i>Пульсуючі змінні:</i> Цефеїди (типу δ Цефея)	Fg, Gg	$1^d - 70^d$	$0.1^m - 2^m$	Зміна температури і радіуса фотосфери при зміні прозорості внаслідок іонізації та рекомбінації He^+
Типу RR Ліри Типу Міри Кита	A, F M, S	$0.2^d - 1.2^d$ $80^d - 1000^d$	$0.5^m - 2^m$ $2.5^m - 10^m$	Зміна температури і радіуса фотосфери
<i>Спалахуючі зорі</i>	M		$1 - 5^m$	Конвективні рухи в магнітних полях
<i>Нові зорі</i>	M, білі карлики		$10^m - 13^m$	Термоядерний вибух внаслідок акреції газу з червоного карлика на білий карлик
Затемненні змінні				Зміна блиску викликана затемненням у подвійній системі одного компонента іншим

б) Наднові зорі

Тип	Спектр. клас	Амплітуда	Фізичний механізм
Наднові типу Ia	F, G; білі карлики	19^m	Спалах білого карлика при акреції його речовини в ТПС
Наднові типу Ib	O	19^m	Кінцева стадія еволюції зірок WR
Наднові типу II	O, B	17^m	Вибух C–O ядра у зірок з масою, більшою від 8 мас Сонця

Нові зорі – це білі карлики, що входять до складу тісних подвійних систем, другим компонентом яких є зоря, що заповнює свою порожнину Роша, зокрема червоний гігант. Речовина, яка перетікає з нього на білий карлик, прискорюється в акреційному диску сильним гравітаційним полем білого карлика і розігрівається. Падаючи в поверхневі шари білого карлика, вона спричиняє термоядерний вибух, який і викликає різке збільшення блиску зорі. Для накопичення кількості гарячої речовини, необхідної для вибуху, потрібно приблизно 50–100 років. Тому через такий термін спалахи нових повторюються. Еруптивні та нові зорі об'єднуються в один загальний клас *вибухових (або катаклізмичних) зір*.

Наднові зорі позначаються літерами SN (Supernova) з вказівкою року, коли спостерігався спалах наднової. Однак оскільки явище наднової - це важливий етап в еволюції масивних зір, то ми докладніше розглянемо його в наступному підрозділі.

4.3. Еволюція зір

Одним з найважливіших досягнень астрономії ХХ ст. було створення в основному теорії будови і одночасно еволюції зір. Важливим кроком в цьому напрямі було встановлення В. А. Амбарцумяном у 1949 р. динамічної нестійкості угруповань зір – зоряних асоціацій. З цього факту випливало, що зорі-члени асоціації, пов'язані загальним походженням, виникли більш-менш одночасно, але не раніше, ніж час існування даної асоціації. А цей час порядку 100 тис. років. Тобто процеси зореутворення в нашій Галактиці продовжуються і дотепер.

4.3.1. Утворення зір

В основі уявлень про зореутворення лежить поняття про *масу Джинса*. Якщо в більш-менш однорідному середовищі якимось чином виникло більш щільне утворення певної маси, то мінімальна маса, за якої це утворення починає зростати за рахунок його гравітаційної дії на оточуючу речовину, і дістала назву маси Джинса. Запишемо рівняння неперервності та руху ідеальної рідини і рівняння гравітаційного поля:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v}) = 0, \quad \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \nabla) \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{g}, \quad (4.17)$$

$$\nabla \times \vec{g} = 0, \quad \nabla \vec{g} = -4\pi G \rho.$$

Якщо розглянути малі збурення густини, тиску та швидкості середовища і гравітаційного поля відносно тривіального розв'язку $\rho = const$, $p = const$, $\vec{v} = 0$, то для флуктуацій густини $\delta\rho$ одержимо неоднорідне хвильове рівняння

$$\frac{\partial^2(\delta\rho)}{\partial^2 t} = v_s^2 \Delta(\delta\rho) + 4\pi G\rho \cdot \delta\rho \quad (4.18)$$

з розв'язком $\delta\rho \propto \exp(i\vec{k}\vec{r} - i\omega t)$ та дисперсійним співвідношенням між хвильовим вектором і частотою

$$\omega^2 = k^2 v_s^2 - 4\pi G\rho. \quad (4.19)$$

З (4.19) видно, що власне хвильовий рух зі швидкістю $v_s = (\partial p / \partial \rho)^{1/2}$ буде лише при хвильових числах, більших від критичного значення

$$k_J = \sqrt{\frac{4\pi G\rho}{v_s^2}}. \quad (4.20)$$

Якщо ж величина k буде менша від критичної, то частота буде уявною, і флуктуація густини почне експоненціально зростати. Це означає, що розмір збурення $\lambda_J = 2\pi / k_J$ (довжина Джинса) і, відповідно, маса в об'ємі збурення настільки великі, що сила тяжіння переважає градієнт тиску. Відповідна критична маса є

$$M_J = \frac{4\pi\rho}{3} \left(\frac{2\pi}{k_J}\right)^3 = \frac{4\pi^{5/2}\rho}{3} \left(\frac{v_s^2}{G\rho}\right)^{3/2} = \frac{4\pi^{5/2}}{3\sqrt{\rho}} \left(\frac{\gamma RT}{\mu G}\right)^{3/2}. \quad (4.21)$$

Таким чином, збурення експоненціально зростають з часом при масі збурення, більшій за масу Джинса (4.21). Час стиснення згущення розміром R_0 можна оцінити за допомогою третього закону Кеплера як час вільного падіння з відстані R_0 (або *динамічний час*)

$$t_D \approx \frac{1}{\sqrt{G\rho}}. \quad (4.22)$$

На процес стиснення впливають осьове обертання згущення та магнітне поле. Стиснення продовжується, якщо енергія обертання $E_{rot} = I\Omega^2 / 2$ (I – момент інерції, Ω – кутова швидкість обертання) менша від модуля гравітаційної енергії, який за порядком величини дорівнює GM^2 / R_0 . Аналогічно, магнітне поле не перешкоджає стисненню доти, поки його енергія $B^2 / 8\pi$ менша від модуля гравітаційної енергії.

Процес утворення зір починається в холодних гігантських молекулярних хмарах (концентрація $n \geq 300 \text{ см}^{-3}$, температура $T \approx 10 \div 30 \text{ K}$, маса $10^3 \leq M \leq 10^7$ мас Сонця). Поки густина маси, що стискається, достатньо мала і речовина є прозорою, гравітаційна енергія, що звільняється при стисненні, вільно висвічується переважно

в інфрачервоному діапазоні. Процес відбувається практично в ізотермічному режимі, що викликає зменшення довжини Джинса. Це приводить до того, що у самій хмарі виникає гравітаційна нестійкість, яка приводить до появи згущень менших розмірів. У хмарі відбувається процес її послідовної *каскадної фрагментації*. Цей процес продовжується доти, доки у центральній частині чергового фрагмента густина, тиск і температура не стають достатньо великими для того, щоб там почалися реакції перетворення водню в гелій. Цей фрагмент дістав назву *протозорі*. Режим каскадної фрагментації пояснює, чому зорі з'являються певними групами у вигляді зоряних скупчень, зоряних асоціацій, кратних зір, тощо.

Згідно з вищенаведеним, перший етап еволюції протозорі – це етап її ізотермічного стиснення, коли вона стає потужним джерелом інфрачервоного випромінювання. Цей етап закінчується, коли газовий тиск може протистояти дії гравітації. Після цього стиснення припиняється і основним механізмом зростання протозорі стає акреція речовини з оточуючої її газової оболонки. Етап акреції речовини продовжується доти, доки зростаюче в її ході ядро не збільшує свою світність і, відповідно, променевий тиск, який не тільки перешкоджає подальшій акреції газу на протозорю, а навпаки, починає скидати оболонку, що оточує протозорю.

При цьому масивні протозорі не тільки розсіюють свою оболонку, а і породжують в оточуючому їх просторі ударну хвилю, яка може спричинити появу нових протозір у ньому. У зір меншої маси певний час відбувається процес кельвінівського стиснення, зоря розігрівається і основним механізмом переносу енергії в ній стає конвекція. Цей етап еволюції протозорі дістав назву *стадії Хаяші*. Закінчується еволюція протозорі встановленням гідростатичної рівноваги під дією сили тяжіння і суми сил газового і променевого тиску, і зоря займає своє місце на головній послідовності діаграми Г-Р. Відповідні розрахунки показують, що найменша маса зорі складає $(0.7 \div 0.8) M_{\odot}$. Вплив осьового обертання та магнітного поля збільшують це значення до $(0.10 \div 0.12) M_{\odot}$.

Процеси зореутворення мають багато різних спостережних проявів. Це *глобули* – невеликі темні газопилові туманності ($M \approx 100 M_{\odot}$, $R \approx 1$ пк, $n \approx 10^4 \div 10^6$ см⁻³). Це *об'єкти Хербіга-Аро* – зореподібні згущення з емісійним спектром, на які діє, як вважають, надзвуковий потік від близької протозорі. Це *зорі-кокони* – точкові джерела інфрачервоного випромінювання, про які згадувалося вище. З ними, як і з іншими проявами процесів зореутворення, пов'язані *космічні мазери* – компактні змінні джерела нетеплового індукованого випромінювання з потужними емісійними радіолініями гідроксилу ОН з надзвичайно високими

яскравішими температурами T_b ($\lambda = 18$ см, $T_b \approx 10^{13}$ К) та (або) води H_2O ($\lambda = 1.35$, $T_b \approx 10^{15} \div 10^{16}$ К, а також етанолу ($\lambda = 1.2$ см). Це випромінювання ізотропне та майже повністю має кругову поляризацію. Накачка космічних мазерів здійснюється інфрачервоними фотонами обертово-коливального спектра молекул. Можливі також і зіштовхувальний та хімічний механізми накачки.

Об'єкти, що отримали назву *зір типу T Тельця*, це неправильні змінні класів F – M, вони зустрічаються здебільшого групами. Їхня змінність зв'язана з рухами речовини в оболонках. Наявність в їхніх спектрах ліній літійу свідчить про їхню ще невисоку температуру ($<10^6$ К). Протозорі на прикінцевій стадії стиснення проявляють себе як змінні *зорі типу UV Кита*. Це об'єкти класів K і M з емісійними лініями водню та кальцію. Їхня спалахова активність зумовлена явищами типу хромосферних спалахів на Сонці, але значно більшого масштабу. Близькими до виходу на головну послідовність є *фуори* (назва від FU Оріона) – це об'єкти, що збільшують свою світність у десятки та сотні разів за строки від місяців до років.

4.3.2. Еволюція зір різної маси

Наступні стадії еволюції зорі пов'язані зі змінами типу термоядерних реакцій в її ядрі. При цьому відбувається зміна світності та ефективної температури зорі та зв'язку між її масою та радіусом, бо змінюється співвідношення між газовим і променевим тиском. Тому зоря в ході своєї еволюції змінює положення на діаграмі Г-Р та свій спектральний клас і клас світності. Лінії, вздовж яких зоря переміщується у фазовій площині цієї діаграми, це її *еволюційні треки*. Однак усі ці зміни відбуваються по-різному у зір різної маси. Від маси зорі залежить і кінцева стадія її еволюції. Це білий карлик (стиснення після припинення термоядерних реакцій в ядрі зорі зупиняється процесами виродження речовини), нейтронна зоря (стиснення припиняється процесами нейтронізації речовини) або чорна діра.

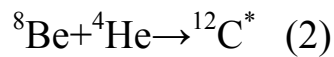
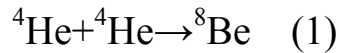
Основним за часом етапом еволюції зір є їхнє перебування на головній послідовності діаграми Г-Р (приблизно 90 % часу). Воно, як вже відзначалося, також визначається масою зорі та досить добре описується такою емпіричною формулою:

$$\lg T_{\text{III}} = 9.9 - 3.8 \lg M + \lg^2 M, \quad (4.23)$$

де час визначається у роках, а маса зорі в масах Сонця, якщо $1 < M < 100$.

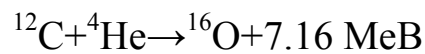
Наступний етап еволюції зір, який проходять усі зорі, - це етап термоядерного горіння гелію в їхніх ядрах. Йому передують утворення

навколо гелієвого ядра шару водню, в якому продовжується горіння водню. Гравітаційне стиснення ядра зорі в міру вигорання в ньому водню приводить до того, що при його температурі $T_c \approx (2 \div 3) \cdot 10^7$ К та густині $\rho_c \approx 10^3 \div 10^4$ г/см³ починається горіння гелію. Основною реакцією при цьому є утворення з трьох α -частинок одного ядра вуглецю (реакція 3α). Це відбувається за такою схемою:



з виходом енергії в 7.28 МеВ. Ядра берилію є нестійкими і швидко знову дають два ядра гелію. Однак певна частина їх встигає вступити в реакцію (2). При цьому утворюється збуджене ядро вуглецю завдяки тому, що у ядра ${}^{12}\text{C}$ є збуджений рівень з енергією в 7.656 МеВ. Ядра ${}^{12}\text{C}$ також нестійкі та в більшості своїй знову розвалюються на берилій та гелій. Але деякі з них переходять в основний стан за реакцією (3). Реакція (3) обумовлена тим, що зняття збудження шляхом утворення фотона заборонена правилами відбору.

Ядра ${}^{12}\text{C}$ вступають у реакцію



зі швидкістю, що сильно залежить від температури ядра, а відтак і від маси зорі. Тому утворюється або вуглецево-кисневе або кисневе ядро.

При ще більших температурах ($T_c \approx 10^9$ К) відбуваються реакції злиття ядер елементів ${}^{12}\text{C}$, ${}^{16}\text{O}$, ${}^{20}\text{Ne}$, ${}^{24}\text{Mg}$, ${}^{28}\text{Si}$. При цьому енерговиділення зіставне з енерговиділенням при реакції 3α , але все більшу роль відіграє нейтринне випромінювання.

Опишемо коротко характер еволюції зір різної маси після перебування їх на ГП. Еволюційні треки деяких з них показані на рис. 4.3, вони одержані шляхом чисельного моделювання (нагадаємо, що маса вказується в масах Сонця).

1. $0.1 < M < 0.5$. Ці зорі є повністю конвективними. Тому у них після вигорання водню в ядрі не виникає шарове джерело навколо ядра, і вони починають стискатися та нагріватися, зміщуючись на діаграмі Г-Р ліворуч. Однак вони просто не встигають перетворитися на білих карликів, бо час горіння водню в їхніх ядрах перевищує вік Всесвіту.

2. $0.5 < M < 2.5$. У цих зір після вигорання водню утворюються вироджене гелієве ядро з масою біля 0,5 і шарове водневе джерело. Зоря розширюється і перетворюється на червоного гіганта. Початок горіння гелію в ядрі з утворенням вуглецю супроводжується короткочасним

енерговиділенням (гелієвим спалахом), що викликає зміщення зорі на діаграмі Г-Р вліво майже горизонтально. Оболонка зорі скидається і вона перетворюється на вуглецево-кисневий білий карлик з масою біля 0.5.

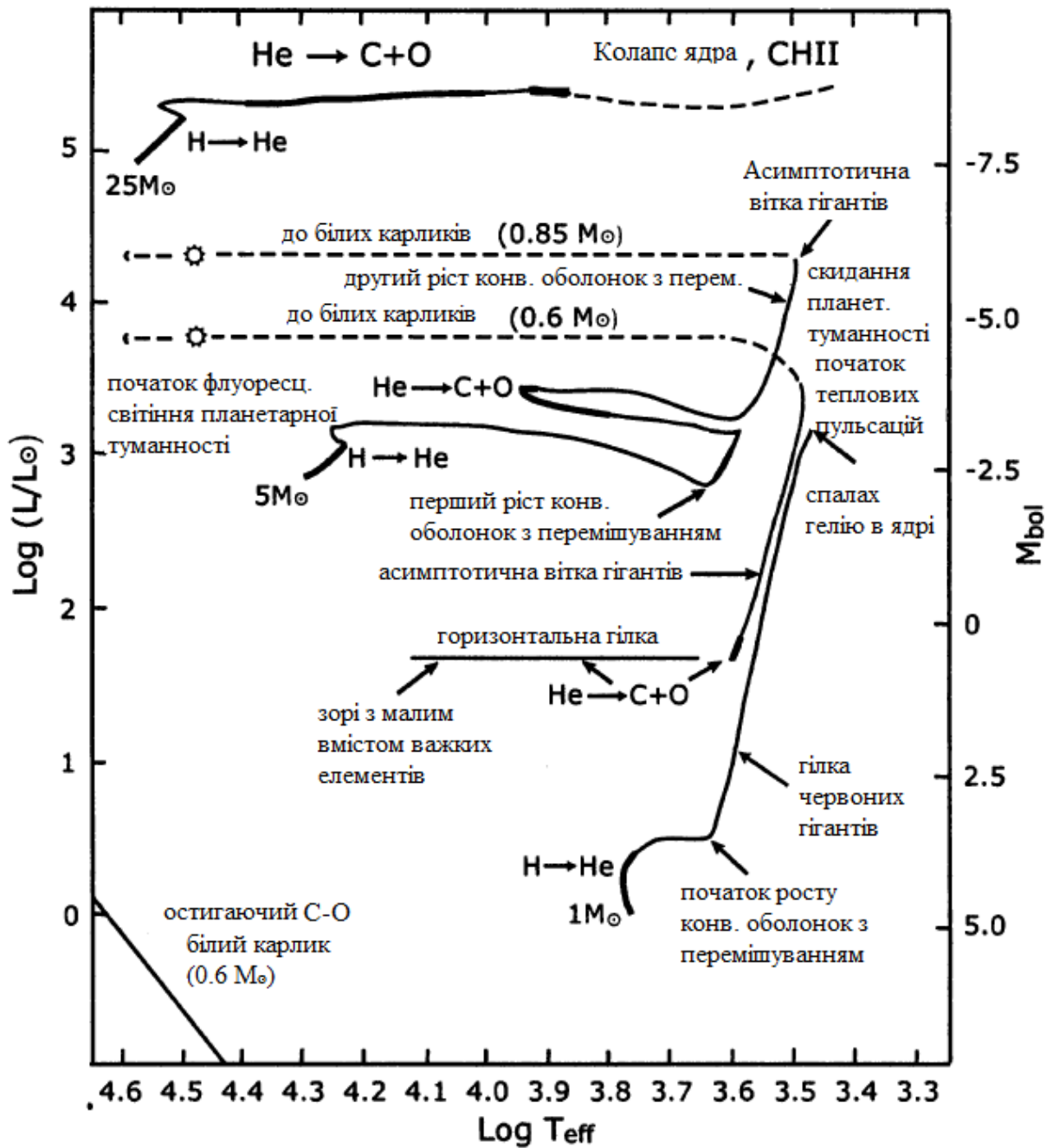


Рис. 4.3. Еволюційні треки зір різної маси

3. $2.5 < M < 8$. Після вигорання водню утворюється неvirоджене гелієве ядро, зоря перетворюється на червоного гіганта з шаровим водневим джерелом. Під час горіння гелію в ядрі утворюються вуглець і кисень, у наслідок чого виникає virоджене (C–O) ядро з масою приблизно 1.2. Оскільки ці реакції розпочинаються у virодженому стані ядра, то початок реакції матиме характер теплового вибуху, що призводить до скидання

оболонки і, після зміщення ліворуч уздовж асимптотичної гілки гігантів, зоря перетворюється на вуглецево-кисневий білий карлик з масою 0.6–0.7.

4. $8 < M < 10 \div 12$. Термоядерні процеси доходять до утворення кисню, неону та магнію. Оболонка зорі розсіюється з утворенням планетарної туманності. Після скидання оболонки утворюється (O–Ne–Mg) білий карлик з масою до 1.2.

5. $10 \div 12 < M < 30 \div 40$. Термоядерні реакції відбуваються включно до межі, можливої для ендотермічних реакцій синтезу, тобто до утворення ядер групи заліза (Fe, Co, Ni). Ядро, що складається з цих елементів, є нестійким і перетворюється на нейтронну зорю з масою 1.5–2. Це супроводжується спалахом наднової типу II (якщо ще збереглася воднева оболонка) або типу Ib/c, (якщо це зоря типу Вольфа–Райє) і утворенням чорної діри.

6. $M > 30 \div 40$. Ці зорі, можливо, утворюють чорні діри з масами порядку 10, хоча процеси їхньої еволюції ще й досі не зовсім з'ясовані.

Свої особливості має зоряна еволюція в тісних подвійних системах (ТПС). Взагалі подвійні зоряні системи поділяються на розділені – такі, в яких жодна зоря не заповнює свою порожнину Роша (див. стр. 26), напіврозділені – такі, що тільки один з компонентів зоряної пари заповнює свою порожнину Роша (головна зоря), і нарешті, контактні, в яких обидва компоненти заповнюють порожнини Роша. Останні два типи і належать до ТПС. У ТПС можливе перетікання речовини з одного компонента на інший крізь точку Лагранжа L_1 , а також втрата маси зорі крізь точки Лагранжа L_2 та L_3 . Це приводить до обмеження маси головної зорі, яка вміщується в її порожнині Роша.

Особливо цікаві процеси відбуваються, тоді, коли супутник головної зорі - це компактний об'єкт. Якщо це білий карлик, то накопичення гарячої речовини на його поверхні приводить до термоядерного вибуху – виникає явище нової зорі з енерговиділенням до $10^{45} \div 10^{46}$ ерг. Це явище може повторюватися з тим більшою амплітудою блиску, чим рідше воно відбувається. Відбувається при цьому і скидання оболонки масою в $10^4 \div 10^5$ маси Сонця. Якщо ж це нейтрона зоря або чорна діра, то відцентрова сила викликає утворення акреційного диска, в якому дуже велика сила тяжіння в околі компактного об'єкта приводить до сильного розігріву речовини (до 10^8 К) і виникнення джерела рентгенівського випромінювання. Ці рентгенівські джерела є змінними. Зокрема виділяються спалахуючі рентгенівські джерела – *барстери*, з рентгенівською світністю між спалахами в $10^{36} \div 10^{37}$ ерг/с та до 10^{39} ерг/с під час спалахів, які продовжуються від 1 с до 100 с.

4.3.3. Кінцеві стадії еволюції зір

Нарешті перейдемо до розгляду згаданих вище кінцевих стадій еволюції зір.

А) *Білі карлики*. Їхнє утворення пов'язане з явищем *виродженого стану* речовини, яке, в свою чергу, є проявом її квантових властивостей. З принципу невизначеності Гейзенберга випливає, що одна комірка фазового простору $\delta x \delta y \delta z \delta p_x \delta p_y \delta p_z = h^3$. А на одну частинку, наприклад, на один електрон, припадає об'єм $4\pi p^3 / 3n_e$ при мінімальному об'ємі $h^3 / 2$ (з урахуванням двох можливих орієнтацій спіну). Найбільш ймовірне значення імпульсу для ідеального газу $p = m_e \sqrt{2kT / m_e}$. Звідси випливає, що при такій концентрації електронів n_e і певній критичній температурі

$$T_{cr} = h \left(\frac{3n_e}{8\pi} \right) \cdot \frac{1}{2km_e} \quad (4.24)$$

будуть зайняті всі можливі комірки фазового простору. І при подальшому стисненні густина частинок не зможе збільшуватися, а буде відбуватися лише збільшення їхнього імпульсу (незалежно від температури), що приведе до збільшення тиску, який стане перешкоджати подальшому стисненню. Макроскопічним проявом цього стане заміна рівняння стану електронного газу з $p = K\rho^{5/3}$ на вираз $p = K_1\rho^{4/3}$, до якого прямує рівняння стану релятивістського газу, тобто при енергії електронів $\varepsilon \gg m_e c^2$. Розрахунки показують, що при критичній температурі для електронів нуклони будуть ще у невинродженому стані, однак збільшення тиску виродженого електронного газу приведе до припинення процесу стиснення.

Порівняння критичної температури (4.24) з температурою в центральній частині ядер зір різної маси, потрібною для протікання реакцій утворення тих чи інших елементів, визначає те, які найбільш важкі елементи можуть утворюватися в ядрі даної зорі. Саме це лежить в основі даних про еволюцію зір різної маси на стор. 72–74.

Якщо вироджений електронний газ нерелятивістський, то використовуючи для оцінок за порядком величини очевидне співвідношення $R \approx (M / \rho)^{1/3}$ та співвідношення $p / \rho \approx GM / R$, одержимо, що радіус зорі $R \approx (G / K) M^{-1/3}$. Тобто при збільшенні маси радіус зорі буде зменшуватися, що і підтверджується спостереженнями. Якщо ж цей газ буде релятивістським, то з цих співвідношень випливає, що стан гідростатичної рівноваги можливий лише при масі зорі

$$M_{Ch} \approx (K_1 / G)^{3/2}. \quad (4.25)$$

Це значення маси має назву *межі Чандрасекара*. Тиск релятивістського електронного газу $p_{rel} \approx n_e \varepsilon$. Концентрацію електронів можна записати як $n_e \approx (Y_e \rho / m_p)$, де Y_e – кількість електронів на один нуклон, а m_p – маса протона. Енергія релятивістського електрона $\varepsilon \approx p_F c$, де $p_F \approx \hbar n_e^{1/3}$ – імпульс Ферми [34, гл. 5]. Звідси одержуємо, що $p_{rel} \approx ch(Y_e \rho)^{4/3} / m_p^{4/3}$, тобто коефіцієнт

$$K_1 \approx ch \left(\frac{Y_e}{m_p} \right)^{4/3}, \quad (4.26)$$

а межа Чандрасекара є, відповідно,

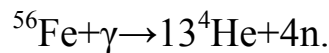
$$M_{Ch} \approx Y_e^2 \left(\frac{ch}{G m_p^{4/3}} \right)^{3/2}. \quad (4.27)$$

Якщо згадати про планківську масу $m_{Pl} = \sqrt{ch / 2\pi G}$, то

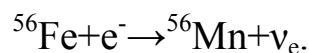
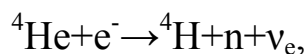
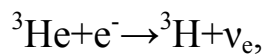
$$M_{Ch} \approx Y_e^2 m_p \left(\frac{m_{Pl}}{m_p} \right)^{1/3}. \quad (4.28)$$

Обчислюючи це значення, одержимо, що найбільша можлива маса білого карлика дорівнює $1.2 \div 1.3$ сонячних мас. Таким чином, маси білих карликів лежать у межах $1.2 \div 0.5$ мас Сонця. Це дає можливість оцінити і їхні радіуси (біля 10 тис. км) і густини (порядку 10^6 г/см³).

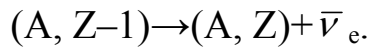
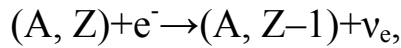
Б) *Нейтронні зорі*. Як показує сама назва цих об'єктів, їхнє утворення пов'язане з процесами *нейтронізації* речовини. У зв'язку з цим треба відзначити, що сам перебіг ядерних реакцій синтезу з утворенням ядер все більш важких елементів збільшує відносну кількість нейтронів, зменшуючи параметр Y_e . Після горіння ^{32}Si з утворенням ^{56}Fe починаються процеси, які ще швидше збільшують кількість нейтронів. Це, по-перше, процес фотодисоціації ядер заліза (бо для нього потрібна температура, лише дещо більша від температури горіння кремнію):



Потім починаються реакції електронного захвату:



Ці реакції, крім того, збільшують і нейтринну світність зорі. Певна частина енергії переноситься і антинейтрино, які виникають внаслідок так званих *урка-процесів* – процесів оберненого та прямого бета-розпадів нестійких ядер (A, Z) з атомним номером A та зарядом Z , переобтяжених надлишком нейтронів:



Сильна залежність виходу енергії при урка-процесах від температури ($\propto T^9$) приводить до того, що на заключних стадіях еволюції масивних зір нейтринна світність починає переважати їхню фотонну світність.

У процесі нейтронізації речовини значно зменшується параметр Y_e , бо зменшується концентрація електронів при збереженні кількості нуклонів. Це приводить значення показника політропи знову до значення γ , близького до $4/3$ і до продовження гравітаційного стиснення, яке може бути припинено тільки при досягненні густини порядку густини ядерної речовини $\rho_{\bar{n}} = 2,8 \cdot 10^{14}$ г/см³.

Нейтронні зорі, існування яких було передбачено ще в 1930 рр., були відкриті лише в 1967 р. як джерела імпульсного радіовипромінювання з періодичністю імпульсів P від 1.5 мс до 8 с. (в основному від 0,5 до 1 с), внаслідок чого вони і отримали назву *пульсарів*. Вважається, що ця періодичність визначається періодом осьового обертання пульсарів. За найкоротшим періодом, за умови рівності відцентрової сили на екваторі і сили тяжіння, можна оцінити нижню межу густини пульсарів:

$$\rho_{\min} \approx \frac{12\pi}{P_{\min}^2 G} \approx 10^{14} \text{ г/см}^3. \quad (4.29)$$

Пульсари, що входять до подвійних систем, дозволили оцінити їхню масу, яка складає дещо більше маси Сонця, оцінка радіусів пульсарів, яка звідси випливає – це 10–15 км.

Гравітаційний колапс при утворенні пульсара викликає різке збільшення швидкості його осьового обертання і магнітного потоку та, відповідно, напруженості його магнітного поля. Характерним для пульсарів є також поступове зменшення швидкості осьового обертання і, відповідно, збільшення протяжності імпульсів. Це збільшення періодів обертання пульсарів пояснюється втратою енергії обертання з випромінюванням релятивістських частинок, що виникають у магнітосфері пульсара. Відповідний аналіз приводить до такого зв'язку параметрів обертання і магнітного поля пульсара:

$$P\dot{P} = (2\pi)^2 B_s^2 R^6 / I c^3, \quad (4.30)$$

де B_s - магнітна індукція на поверхні пульсара, R та I – його радіус і момент інерції, c – швидкість світла. Високоточні виміри значення періодів P дозволяють оцінити і значення їхніх похідних \dot{P} , а відтак і значення напруженості B_s магнітного поля ($10^8 \div 10^{13}$) Гс. Значення часу подвоєння періоду сягають тисяч та мільйонів років.

Структура магнітного поля пульсара пов'язана з такою його характеристикою як *світловий циліндр* – поверхня, на якій швидкість твердотілого обертання дорівнює швидкості світла, його радіус $r_l = cP/2\pi$. Поза межами світлового циліндра магнітне поле пульсара має дипольний характер, у його межах силові лінії поля йдуть на нескінченність. Области на поверхні пульсара, що лежать у межах світлового циліндра (його полярні шапки), і є джерелами спрямованого випромінювання пульсара. Вісі обертання і магнітного поля не співпадають. Коли в межі пучка цього випромінювання попадає Сонце, тоді й спостерігається імпульс випромінювання.

Внутрішня будова пульсарів є такою (рис. 4.4): центральна частина – це рідке нейтронне ядро з домішкою протонів та електронів, потім йде внутрішня кора з атомних ядер, переобтяжених нейтронами, з домішкою вільних нейтронів, нарешті – зовнішня кора з атомів заліза, що утворюють кристалічну решітку, та вироджених електронів.

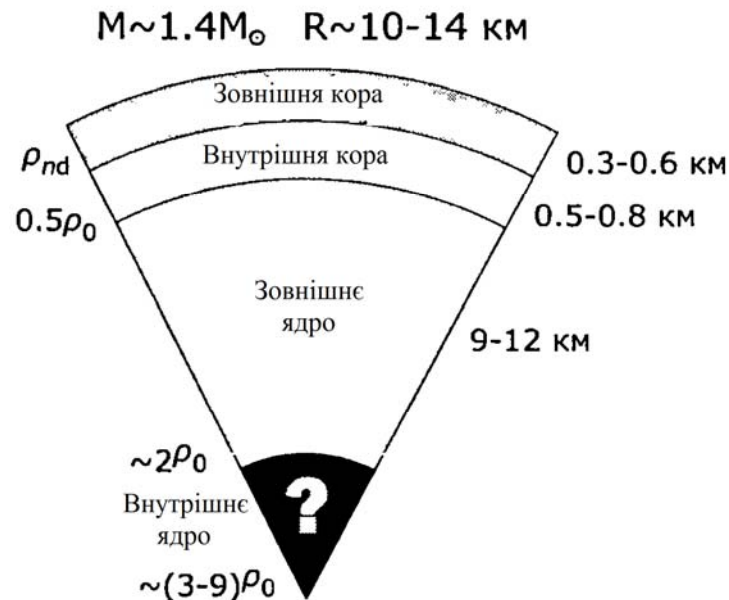


Рис. 4.4. Внутрішня будова пульсарів

В) *Чорні діри*. Нарешті, якщо маса ядра зорі перевищує приблизно $2 M_C$ (початкова маса зорі більша за $(20 \div 40) M_C$), то нейтронне ядро не може протистояти гравітаційному стисненню і утворюється релятивістський

об'єкт – чорна діра. Цей об'єкт за самою своєю сутністю дуже важкий для виявлення. Єдиний спосіб для цього – це знаходження рентгенівського джерела, яке утворюється навколо чорної діри внаслідок перетікання речовини на чорну діру з іншого компонента у тісній подвійній системі та розігріву цієї речовини в акреційному диску, що при цьому виникає. Зараз відомо понад 20 таких джерел з масами невидимих компонентів у ТПС понад $3M_c$ – кандидатів у чорні діри (їхні маси в середньому біля $10M_c$). Нагрівання речовини з подальшим потужним випромінюванням відбувається за рахунок сил в'язкості в акреційному диску і дуже ефективним засобом перетворення гравітаційної енергії на енергію випромінювання. Ефективність його $\eta \approx 0.06$, в той час як для термоядерних процесів вона дорівнює лише ≈ 0.007 .

З кінцевими стадіями еволюції масивних зір зв'язані і найпотужніші явища цієї еволюції – спалахи наднових зір. Зазвичай спалах наднової продовжується сотні діб. Повна енергія, що при цьому виділяється тільки з електромагнітним випромінюванням, сягає $10^{48} \div 10^{49}$ ерг, а з урахуванням нейтринної світності може складати понад 10^{53} ерг.

Наднові типу I (SN I) мають спектри з вузьким максимумом і абсолютною зоряною величиною приблизно в -20^m (у типу Ia) та лінійну частину, на яку крива блиску входить приблизно через місяць після максимуму (рис. 4.5). У спектрі є лінії поглинання металів, але відсутні лінії водню та гелію. Приблизно через 200 діб неперервний спектр слабшає і видно лише заборонені лінії заліза. Спектральні лінії є надзвичайно широкими, що відповідає швидкостям розльоту газу $10 \div 20$ тис. км/с. Наднові підтипів Ia та Ib розрізняються за наявністю чи відсутністю ліній кремнію в їхніх спектрах під час максимуму спалаху. У спектрах SN II присутні лінії водню та гелію, а також лінії металів та заборонені лінії кисню.

Фізичні механізми спалахів наднових зв'язані з шаровою структурою масивних зір і послідовними термоядерними реакціями утворення в цих шарах ядер важких елементів аж до появи залізного ядра в центрі зорі. У зір з масою в $(4 \div 8)$ мас Сонця ядро вироджене, і при температурах приблизно в 10^9 К йдуть процеси утворення нейтрино ($p + e^- \rightarrow n + \nu_e$). Зростання температури при загоранні в ядрі вуглецю знімає виродження – починається гравітаційний колапс. Падаюча до центру зорі речовина швидко нагрівається, що і спричиняє ядерний вибух наднової типу I з утворенням елементів від титану до нікелю. Зорі з масою більше $8M_c$ мають невироджене киснево-вуглецеве ядро і в їхніх ядрах елементи аж до заліза включно утворюються до вибуху, а вибух відбувається внаслідок втрати механічної стійкості зорі під час фотодисоціації ядер заліза. Зоря

колапсує залежно від своєї маси або в нейтронну зорю або в чорну діру. Спалах наднової супроводжується сплеском нейтринного випромінювання протяжністю порядку 10 с, в якому переноситься основна доля енергії вибуху. З надновими пов'язують і потужні короточасні (1÷100 с) сплески гамма та рентгенівського випромінювання. Виникає також ударна хвиля, яка через кілька годин досягає поверхні зорі, нагріває її до мільйонів градусів і спричиняє скидання оболонки та різке збільшення світності зорі та оболонки масою понад 10 мас Сонця.

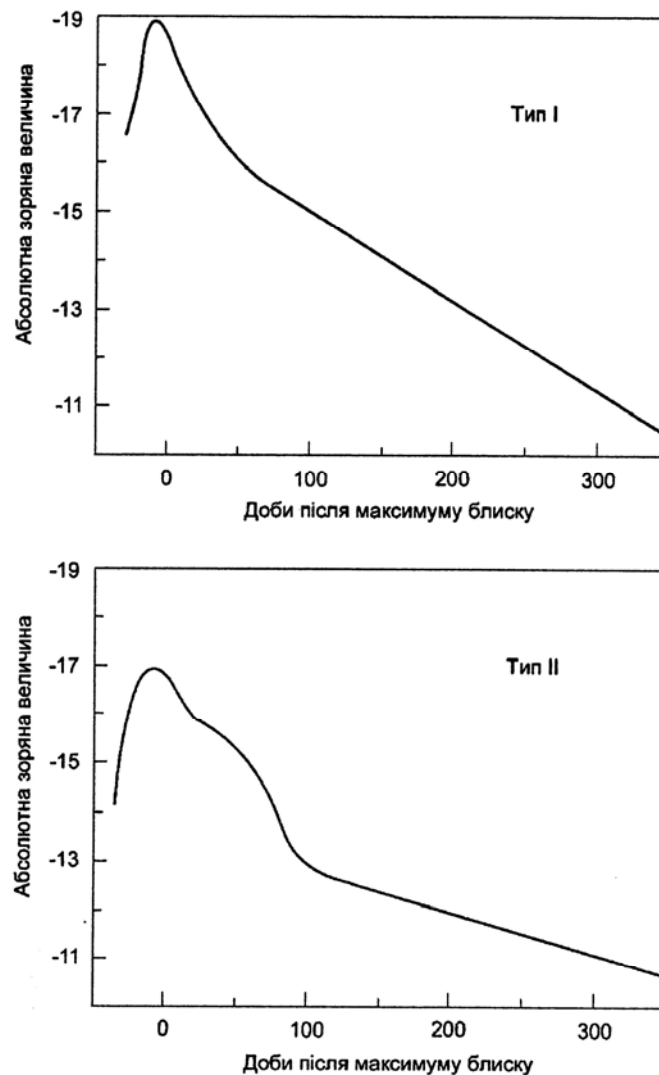


Рис. 4.5. Схематичні типові криві блиску наднових I і II типів

Вибух наднової супроводжується низкою ядерних процесів, найважливіші з них це такі:

s-процес (від англ. «slow» – повільний) – процес повільного захвату атомними ядрами нейтрону і зростанням їхньої маси і атомного номера за рахунок подальшого β -розпаду цього нейтрону;

r-процес (від англ. «rapid» – швидкий) – процес швидкого захвату ядрами нейтронів як на стадії переднаднової, так і під час вибуху, коли ядро захоплює кілька нейтронів до того, як відбудеться їхній β -розпад.

Під час цих процесів утворюються ядра елементів, важчих за залізо, до урану і торію включно. Цим визначається виключно важлива роль спалахів наднових у хімічній еволюції Всесвіту.

Скинута оболонка продовжує розширюватися у міжзоряному середовищі впродовж тисяч років і стає джерелом поляризованого випромінювання у дуже широкому спектральному інтервалі – від гамма до радіодіапазону. Це випромінювання має синхротронну природу. Розширення оболонки проходить принаймні три стадії. Перша – стадія *вільного розльоту*, коли ще можна знехтувати впливом міжзоряного середовища. Вона продовжується доти, доки маса міжзоряної речовини, що захоплюється ударною хвилею, не стає зіставною з масою самої оболонки. На другій стадії втратами на випромінювання можна ще нехтувати, тому вона має назву *адіабатичної* стадії. Наближене рівняння для ударної хвилі приводить до такої залежності радіусу оболонки на цій стадії від часу:

$$R \approx \left(\frac{E_0}{\rho_1} \right)^{2/5} t^{2/5}, \quad (4.31)$$

де E_0 – енергія вибуху, ρ_1 – густина міжзоряного середовища. Відповідно, швидкість ударної хвилі

$$c \approx \frac{2}{5} \left(\frac{E_0}{\rho_1} \right)^{1/5} t^{-3/5}. \quad (4.32)$$

Справедливість цих співвідношень підтверджена вимірюваннями, що були проведені свого часу під час випробувань ядерної зброї в атмосфері Землі.

Нарешті, коли температура оболонки спадає до температури іонізації і нижче і стає можливим утворення електронних оболонок атомів, підсилюється висвічування енергії, то починається третя стадія розширення оболонки, коли ударну хвилю можна вважати ізотермічною. Оскільки ударна хвиля продовжує вимітати, ніби загібати, міжзоряну речовину, то ця стадія отримала назву «стадії снігоочисника» (від англ. «snow-plow»). Задача розльоту оболонки наднової зазвичай розглядається в її простішій постановці – за умови її сферичної симетрії. Але реально обертання зорі, її магнітне поле та неоднорідності міжзоряного середовища роблять її значно складнішою.

Спалахи наднових неодноразово спостерігались як у нашій Галактиці, так і в інших галактиках. Найбільш інформативними були такі спосте-

реження наднової SN 1987A у Великій Магелановій хмарі, коли було вивчено її не тільки електромагнітне, а й нейтринне випромінювання, і багаторічні дослідження залишку спалаху наднової 1054 р. у сузір'ї Тельця, дата спалаху якої була встановлена за китайськими хроніками.

4.4. Сонце і сонячна активність

Сонце – найближча до Землі зоря. Її великі кутові розміри та великий потік випромінювання дають можливість детального вивчення цієї зорі. Це вкрай важливо як з точки зору дослідження зір у цілому, так і того, яке виключне значення має Сонце для життя на Землі взагалі та для існування людської цивілізації.

Таблиця 4.4

Загальні характеристики Сонця

Параметр	Значення
Маса	$2 \cdot 10^{33}$ г
Радіус	$7 \cdot 10^5$ км
Середня густина	1.4 г/см ³
Світність	$4 \cdot 10^{33}$ ерг/с
Ефективна температура	5780 К
Видима зоряна величина	-26.3
Абсолютна зоряна величина	+5.47
Спектральний клас	G2V
Середня магнітна індукція	≈ 1 Гс
Магнітна індукція в плямах	≥ 30 Гс
Період обертання на екваторі	
Синодичний	27.3 ^d
Сидеричний	25.4 ^d
Період обертання поблизу полюсів	
Синодичний	32 ^d
Сидеричний	30 ^d
Нахил екватора до екліптики	7°15'

Сонця стосується все те, що говорилося вище про зорі з масою в межах від 0.5 до 2.5 його маси. Основні характеристики Сонця наведені в табл. 4.4. А дані про його *внутрішню будову*, що є результатами модельних розрахунків, містить табл. 4.5. Привертає увагу різниця в температурі фотосфери у табл. 4.5 і ефективної температури Сонця з табл. 4.4. Це, як і значення яскравісної температури в різних спектральних діапазонах, вказують на відсутність термодинамічної

рівноваги в сонячній фотосфері в цілому і необхідність використання припущення про ЛТР.

Світність Сонця у видимому діапазоні є досить постійною, спостерігаються лише коливання порядку перших сотих процента, обумовлені, зокрема, кількістю плям на його видимій поверхні. У той самий час потік сонячного випромінювання у рентгенівській та далекій ультрафіолетовій областях, з одного боку, і в радіодіапазоні, з другого, є змінним залежно від фази циклу сонячної активності.

Таблиця 4.5

Внутрішня будова Сонця

Відстань від центру, r/R	Температура, К	Тиск, Па	Густина, г/см ³
Ядро енерговиділення			
0	$1.55 \cdot 10^7$	$2.3 \cdot 10^{16}$	149
0.2	$9.42 \cdot 10^6$	$4.4 \cdot 10^{15}$	35.3
Промениста зона			
0.3	$6.81 \cdot 10^6$	$1.1 \cdot 10^{15}$	1.21
0.6	$3.13 \cdot 10^6$	$2.1 \cdot 10^{13}$	0.50
Конвективна зона			
0.7	$2.34 \cdot 10^6$	$6.4 \cdot 10^{12}$	0.20
0.98	$9.96 \cdot 10^4$	$1.7 \cdot 10^9$	0.001
Фотосфера			
1.00	$4.56 \cdot 10^3$	$1.2 \cdot 10^4$	$0.74 \cdot 10^{-7}$

Хімічний склад речовини Сонця близький до середньокосмічного. Дані про вміст деяких елементів у його атмосфері подані в табл. 4.6. Конвективне та турбулентне перемішування речовини в надрах Сонця дають підстави вважати, що ці дані відображають і його склад в цілому. Зауважимо, що хімічний склад інших зір може дещо відрізнятися від сонячного. І кількісною мірою цієї відмінності є їхня *металічність*. Це логарифм відношення кількості атомів усіх елементів важче водню до цих останніх атомів порівняно з металічністю Сонця, тобто

$$[M/H] = \lg(M/H) - \lg(M/H)_c \quad (4.33)$$

Таблиця 4.6

Вміст N(E)/N(H) деяких елементів у атмосфері Сонця

He	$1.10 \cdot 10^{-1}$	O	$7.41 \cdot 10^{-4}$	Si	$3.55 \cdot 10^{-5}$	Fe	$3.16 \cdot 10^{-5}$
Li	$1.44 \cdot 10^{-11}$	Ne	$1.20 \cdot 10^{-4}$	Ar	$3.31 \cdot 10^{-6}$	Co	$8.32 \cdot 10^{-8}$
Be	$1.41 \cdot 10^{-11}$	Na	$2.14 \cdot 10^{-6}$	K	$1.32 \cdot 10^{-7}$	Ni	$1.78 \cdot 10^{-6}$
C	$3.55 \cdot 10^{-4}$	Mg	$3.80 \cdot 10^{-5}$	Ca	$2.29 \cdot 10^{-6}$	Pb	$8.91 \cdot 10^{-11}$
N	$9.33 \cdot 10^{-5}$	Al	$2.95 \cdot 10^{-6}$	Ti	$1.05 \cdot 10^{-7}$	U	$3.38 \cdot 10^{-13}$

За нульовий рівень відліку висот у сонячній атмосфері приймається рівень, на якому оптична глибина фотосфери Сонця в центрі його диску на довжині хвилі в 500 нм дорівнює 1. Збільшення росту оптичної глибини на менших висотах при віддаленні від центра приводить до явища *потемніння* до краю сонячного диска. Ще однією спостережною властивістю фотосфери є *грануляція* – зерниста структура видимої поверхні Сонця. Більш світлі, ніж оточуюча їх поверхня, гранули – це виходи у фотосферу дрібних конвективних комірок більш нагрітого газу з перевищенням температури до 200–300 К. Їхні розміри до 1500 км, час життя ≈ 7 хв. У середньому швидкість потоку газу приблизно 0.5 км/с. Крім того, спостерігається і явище *супергрануляції* з розмірами комірок приблизно в 35 тис. км і швидкостями підйому газу в 0.1–0.5 км/с і часом життя до доби. На верхній межі фотосфери досягається мінімум вертикального розподілу температури в Сонці.

Вище фотосфери розташована сонячна *хромосфера*. Це шар атмосфери Сонця товщиною понад 2 тисяч км, де температура з висотою збільшується (рис. 4.6). Температура в хромосфері з висотою збільшується у зв'язку з тим, що знизу виноситься енергія різного роду рухами, зокрема хвильовими, а густина швидко зменшується. Тому збільшується енергія на одну частинку. Коли є можливість бачити хромосферні шари не в проекції на сонячний диск, а на його краю (під час сонячних затемнень або з космічних апаратів, то видно, що її лінійчастий спектр складають емісійні лінії. А оскільки її температура різна на різних висотах, то в спектрі є і лінії гелію, і бальмерівські лінії водню, а також лінії кальцію. Потоки газу, піднімаючись в більш гарячі шари хромосфери, утворюють явище *спікул*, які найкраще видно як радіальні структури на краю сонячного диска. Сукупність спікул створює на диску Сонця так звану *хромосферну сітку*.

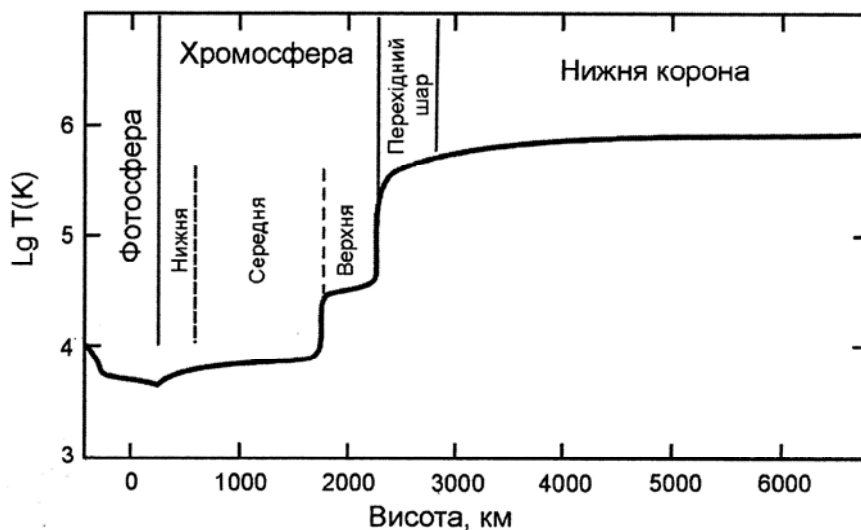


Рис. 4.6. Хід температури в хромосфері та короні Сонця

Над хромосферою починається *сонячна корона* – зовнішня динамічна частина атмосфери Сонця. У короні продовжується падіння густини речовини, і відповідно, збільшення температури. Температура підвищується до сотень тисяч, а потім і мільйонів градусів. Тому в спектрі корони з’являються лінії високо іонізованих атомів, до FeXVII включно. Випромінювання корони – теплове випромінювання гарячої плазми, томпсонівське розсіяння світла Сонця, розсіяння на міжпланетному пилу. Корона поступово переходить у *сонячний вітер* – потік плазми (переважно протонів та електронів) і в замороженого в нього магнітного поля. Характеристики сонячного вітру наведені в табл. 4.7.

Сукупність різноманітних процесів, інтенсивність яких більш-менш періодично змінюється у часі, утворює комплекс явищ, що дістав назву *сонячної активності*. В основі цієї сукупності явищ лежить взаємодія іонізованої речовини Сонця з його магнітним полем. І оскільки часто густина енергії магнітного поля переважає густину енергії речовини, то виникають рухи речовини відповідно до конфігурації магнітного поля. Загальне магнітне поле Сонця має наближено дипольну структуру. Частина його силових ліній у середині Сонця лежить у меридіональних площинах (полоїдальна складова поля). Але осьовим обертанням речовини силові лінії, насамперед, в екваторіальній області витягуються в широтному напрямі (виникає тороїдальна компонента поля). Коли поле в широтному напрямі достатньо закручується, взаємодія між магнітними трубками силових ліній приводить до їхнього вигинання і деякі з них виходять на поверхню.

Таблиця 4.7

Характеристики сонячного вітру

Параметр	Значення		
	мінімальне	середнє	максимальне
Густина, г/см ³	0.4	6.5	100
Швидкість, км/с	200	400	900
Електронна температура, К	$5 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^5$	10^6
Протонна температура, К	$3 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^4$	10^6
Напруженість магнітного поля, ерстед	$2 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-4}$
Альфенівська швидкість, км/с	30	60	150

З явищ сонячної активності найбільш відомими і легкодоступними для спостереження є *сонячні плями*. Це області гальмування конвективних комірок в магнітних трубках, температура речовини знижується до $T \approx 4500$ К, і за контрастом (потік пропорційний T^4) плями виглядають майже чорними на фоні фотосфери. Структура плям така: у середині

більш холодна і темна тінь, яка оточена більш світлою і гарячою півтінню. Спостерігаються як групи плям, так і поодинокі плями. У групах плями існують кілька годин, час життя поодиноких плям – кілька місяців. На рівні фотосфери речовина рухається від центра плями назовні, в хромосфері навпаки - до центра. Середні розміри плям близько 40000 км. Більш дрібні утворення (2000–3000 км) називаються *порами*.

Проявами сонячної активності є також факели та флокули. *Факели* – ділянки підвищеної яскравості у фотосфері поблизу від сонячних плям, нерідко вони передують появі плям. *Флокули* – гарячі й яскраві ділянки в хромосфері, що знаходяться над факелами. Факели утворюються як початковий етап спливання магнітних трубок, який сприяє підвищенню густини речовини та її температури.

У короні такими проявами є протуберанці, корональні конденсації та корональні діри. *Протуберанці* – викиди сонячної плазми, які рухаються вздовж дугоподібних магнітних трубок, виходять з поверхні Сонця і повертаються до неї. Їхні розміри – довжина перші сотні тисяч кілометрів, товщина кілька тисяч кілометрів, напруженість магнітного поля приблизно сотні ерстед. *Корональні конденсації* та *корональні діри* – це структурні неоднорідності у внутрішній короні. Конденсації – місця підвищеної густини корональної плазми. Корональні діри – це області, де силові лінії магнітного поля йдуть від Сонця у міжпланетний простір і по них проходять потоки сонячної речовини, які утворюють сонячний вітер.

Найбільш потужними проявами сонячної активності є *сонячні спалахи*. В областях хромосфери та нижньої корони, де виникають великі градієнти магнітного поля, значні маси речовини одержують велике прискорення, внаслідок чого вони нагріваються. Їхня енергія частково висвічується, частково переходить у кінетичну енергію коронального викиду. У сильному сонячному спалаху виділяється енергія до 10^{32} ерг, він продовжується десятки секунд, температура сягає сотень тисяч градусів, енергія частинок – 10^8 – 10^9 еВ. У короні та сонячному вітрі при цьому виникають *транзієнти* – згустки плазми, що рухаються від Сонця зі швидкістю до 1000 км/с.

Систематичні спостереження сонячних плям почалися ще у 1749 році. Майже через сто років було помічено, що число плям періодично змінюється з середнім періодом у 11.3 років. З'явилося поняття про *цикли сонячної активності*. Цикл, який почався у 1755 р., умовно назвали першим. Зараз йде вже 24-й цикл. Було введено індекс сонячної активності – число Вольфа $W = 10g + f$, де g – кількість груп, f – загальна кількість плям, видимих на диску Сонця. З'ясувалося, що фактичні періоди окремих циклів коливаються від 8 до 17 років. З початком циклу в його мінімумі плями з'являються на широті десь 35° .

Потім плямоутворююча діяльність переміщується до екватора. При цьому полярність магнітних полів ведучих плям у біполярних групах у північній та південній півкулях Сонця протилежна. У наступному циклі знак полярності поля плям змінюється. Тому говорять і про 22-річний період сонячної активності (*цикл Хейла*). У максимумі циклу збільшується і кількість інших проявів сонячної активності. Особливу роль відіграє збільшення числа і потужності сонячних спалахів. З фазою циклу змінюється і вигляд сонячної корони (рис. 4.7). Коли почалися дослідження радіовипромінювання Сонця, було введено ще один індекс його активності $F_{10.7}$ – величину потоку його радіовипромінювання на хвилі 10.7 см.

Основний механізм впливу сонячної активності на планети, зокрема, на Землю – це взаємодія сонячного вітру з магнітосферами планет (пункт 7.3.5), що приводить до збурень їхнього магнітного поля. Накопичені численні свідчення впливу сонячної активності на атмосферу (особливо верхню) та біосферу Землі, зокрема на стан здоров'я людини, насамперед на її серцево-судинну систему. Однак, вивчаючи ці сонячно-земні зв'язки, треба не тільки встановлювати самі факти таких зв'язків, а й головне, з'ясувати їхні конкретні механізми. Крім того, треба мати на увазі, що геофізичні, біологічні та особливо соціальні процеси багатофакторні, і ці фактори взаємодіють між собою.

В останні десятиріччя активно розвивається такий напрям сонячної фізики як геліосейсмологія – вивчення коливальних процесів та хвильових рухів у різних оболонках Сонця – хвиль акустичних, гравітаційних, магнітогідродинамічних. Досить типовою в астрофізиці, зокрема в геліофізиці є виникнення у газі або рідині, що знаходяться в полі сили

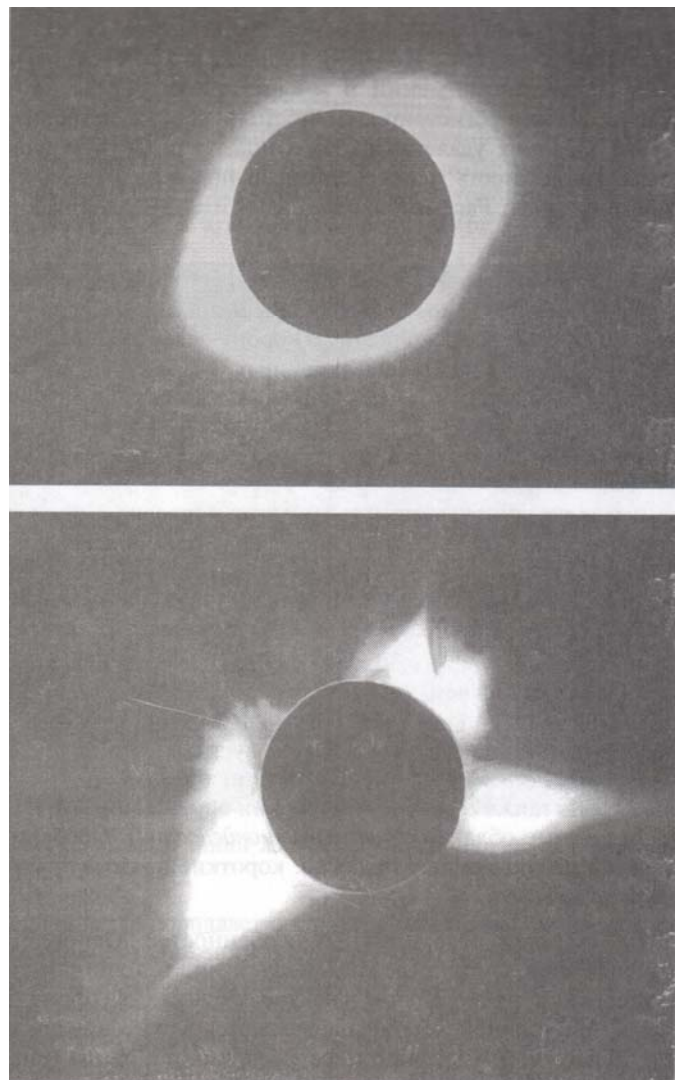


Рис. 4.7. Сонячна корона в епоху мінімуму (вгорі) та в епоху максимуму (внизу) сонячної активності

тяжіння, різних типів хвиль залежно від співвідношення між діючими силами - силою пружності, силою тяжіння та архімедовою силою. Аналіз дисперсійного рівняння, яке пов'язує частоту хвилі з компонентами хвильового вектора (див., наприклад, докладніше [2]), дозволяє побудувати так звану *діагностичну діаграму* (рис. 4.8), яка і визначає, які саме хвилі будуть поширюватися в тих чи інших умовах.

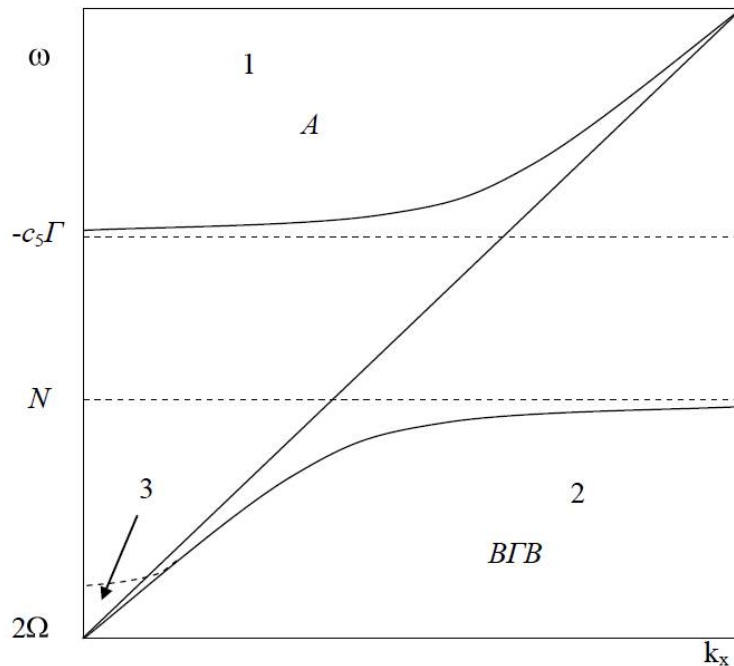


Рис. 4.8. *Діагностична діаграма*

ω – частота хвилі; k_x – горизонтальна складова хвильового вектора

- 1 – акустичні (переважає сила пружності, при $\omega \rightarrow \infty$ переходять у звичайні звукові хвилі)
- 2 – внутрішні гравітаційні хвилі (переважає сила тяжіння)
- 3 – хвилі Россбі (виникають при частотах, сумірних з частотою осевого обертання зорі чи планети)

Нещодавно вдалося вирішити таку проблему фізики Сонця, як значення потоку його нейтринного випромінювання. З часу перших піонерських досліджень Р. Девіса виявилось, що потік електронних нейтрино приблизно втричі менше розрахункового його значення для протон-протонного циклу ядерних реакцій. Причину такої розбіжності вдалося встановити лише після того, як було доведено існування нейтринних осциляцій, тобто спонтанного переходу нейтрино одного сорту в два інших, наприклад, електронних нейтрино у мюонні та таонні (що, до речі, було зроблено за допомогою астрофізичних методів). І коли вимірювання нейтринного потоку Сонця були проведені так, що почали реєструвати нейтрино всіх трьох сортів, то розходження між експериментом і теорією значно скоротилося.

Сонце – джерело життя на Землі. Режим інсоляції визначає кліматичні особливості різних зон на Землі. Чергування дня і ночі задає біоритми живих істот. Невипадковими обставинами є те, що довжини хвиль смуг поглинання світла хлорофілом і максимум чутливості людського ока співпадають з максимумом випромінювання в неперервному спектрі Сонця. Це приблизно 0.55 мкм.

Сонячна енергія є одним з так званих альтернативних джерел енергії, яка може нібито замінити енергетику на органічному паливі та атомну. І там, де це економічно вигідно, сонячну наземну енергетику треба розвивати. Однак біля поверхні Землі в неї є одна суттєва вада – низьке значення потоку енергії. Перспективним для повного вирішення енергетичної проблеми нашої цивілізації вважається розвиток космічної сонячної енергетики в поєднанні з космічними термоядерними установками, враховуючи можливість використання для них як палива гелію-3, що видобуватиметься з місячного ґрунту.

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. Що таке зоря?
2. Що таке зоряна фотосфера?
3. Що таке хромосфера зорі?
4. Що лежить в основі спектральної класифікації зір?
5. Що таке субзоря?
6. Які фізичні процеси визначають особливості спектрів зір?
7. Що таке світність зорі?
8. Які зорі мають емісійні лінії у своїх спектрах?
9. В яких координатах може бути побудована діаграма Герцшпрунга-Рессела і чому?
10. Які основні послідовності виділяються на діаграмі Герцшпрунга-Рессела?
11. Які рівняння утворюють систему рівнянь внутрішньої будови зір?
12. Які зв'язки існують між світністю, радіусом і масою зорі?
13. Які цикли ядерних реакцій мають місце у зорях головної послідовності?
14. Як змінюється маса зорі під час її перебування на головній послідовності?
15. У наслідок чого існує границя Еддінгтона і чому вона дорівнює?
16. Чому зоря не вибухає як термоядерна бомба?
17. Що таке шкала часу Гельмгольца-Кельвіна?
18. Що таке подвійні та кратні зорі?
19. Які основні види подвійних зір існують?

20. У чому полягає значення спостережень подвійних зір для астрофізики?

21. На які два класи поділяються нестационарні зорі?

22. Які основні класи фізично змінних зір існують?

23. Який фізичний механізм викликає змінність цефеїди і яке значення мають цефеїди для астрономії?

24. Що таке спалахуючі зорі?

25. Що таке нові зорі?

26. Що і чому є доказом процесів зореутворення в сучасну епоху?

27. Що таке маса Джинса і від чого вона залежить?

28. Що таке процес каскадної фрагментації, де він відбувається?

29. Які стадії проходить у своєму розвитку протозоря?

30. Яка найменша маса зорі можлива й чому?

31. Які є спостережні прояви процесу зореутворення?

32. Що таке еволюційний трек зорі?

33. Як зв'язані між собою час перебування зорі на головній послідовності та її маса?

34. Які ядерні реакції відбуваються у ядрі зорі після її сходу з головної послідовності?

35. Які особливості еволюції мають зорі малої маси?

36. Як відбувається еволюція зір з масою порядку маси Сонця?

37. Зорі яких мас утворюють наприкінці своєї еволюції білі карлики?

38. Що таке межа Чандрасекара і чому вона дорівнює?

39. Кінцевими стадіями еволюції яких зір є нейтронні зорі?

40. Коли утворюються чорні діри зоряних мас?

41. Що таке тісні подвійні системи?

42. Які процеси відбуваються в тісних подвійних системах?

43. Які процеси відбуваються при утворенні білих карликів?

44. Чим викликані процеси нейтронізації речовини?

45. Яку будову мають пульсари?

46. Які є можливі спостережні прояви існування чорних дір?

47. Які процеси викликають спалахи наднових зір?

48. Якими процесами супроводжуються спалахи наднових зір?

49. Як відбувається розширення оболонок, що утворюються при спалахах наднових зір?

50. Яке значення мають наднові для хімічної еволюції Всесвіту?

51. Які механізми зумовлюють переніс енергії в надрах Сонця?

52. Які шари утворюють внутрішню будову Сонця?

53. Чому дорівнює металічність Сонця?

54. Чому існує потемніння диску Сонця до його краю?

55. В якому шарі сонячної атмосфери температура зростає і чому?

56. Що таке сонячна корона і які особливості має її спектр?
57. Що таке сонячний вітер і який він має склад?
58. Що таке сонячна активність, які є її прояви, і які їхні фізичні причини?
59. Які є індекси сонячної активності?
60. Які процеси зумовлюють планетно-сонячні зв'язки?
61. Які наслідки має вплив сонячної активності на Землю та людину?
62. У чому полягала проблема сонячних нейтрино і яке вирішення вона дістала?
63. Які перспективи використання людством сонячної енергії?

ЗАДАЧІ ДО ГЛАВИ 4

- 4.1. Найближчою до Сонця є потрійна система α Центавра, яка складається з двох досить яскравих зір α CenA ($m_A = 0.32^m$) та α CenB ($m_B = 1.72^m$) і дещо ближчої до Сонця слабкої зорі Проксими (Найближчої) ($m_{\Pi} = 10.68^m$). Яким є блиск подвійної системи A + B? Чи впливає практично на сумарний блиск потрійної системи Проксима?
- 4.2. Порівняти між собою кулонівський бар'єр протона для електрона і середнє значення теплової енергії в центрі Сонця. Чому ж відбуваються реакції термоядерного синтезу?
- 4.3. Як впливатиме на теплову енергію зорі її осьове обертання?
- 4.4. Зробити чисельну оцінку в задачі 2.6.
- 4.5. Якою може бути найбільша амплітуда кривої блиску затемнено-подвійної зорі, якщо один компонент - це зоря класу F0V, а другий – K0V?
- 4.6. Знайти відстань до центра Галактики та до туманності Андромеди, якщо цефеїда з періодом змінності у 50 діб виглядає як зоря 8.9^m , коли вона знаходиться поблизу центра Галактики та як зоря 18.3^m , коли вона розташована в Туманності Андромеди.
- 4.7. Оцінити масу Джинса для гігантської молекулярної хмари.
- 4.8. Знайти радіус білого карлика 40 Eгі, абсолютна зоряна величина якого $M = 11^m$, а ефективна температура фотосфери 17000 К.
- 4.9. Було встановлено, що середнє значення променевої швидкості досліджених білих карликів становить +53 км/с. Чому воно відмінно від нуля? Оцінити середнє значення маси цих зір, приймаючи, що їхній середній радіус складає 0.01 сонячного.
- 4.10. Чому дорівнює мінімальний період обертання пульсара?
- 4.11. Чому дорівнює мінімальний період обертання чорної діри після її утворення?
- 4.12. Подвійна зоря головної послідовності має видиму зоряну величину 9.25^m і знаходиться на відстані 10 пк. Вона не розділяється при

спостереженнях із Землі, але розділяється космічним телескопом Хаббла (діаметр дзеркала 2.4 м). При цьому виявилось, що кутова відстань між компонентами складає $0.15''$, а блиск компонента А дорівнює 10^m і його спектральний клас є G2V. Знайти блиск другого компонента В і період його обертання навколо компонента А. Чому зоря не розділяється при спостереженнях із Землі, але розділяється космічним телескопом Хаббла. Як переконатися, що компоненти подвійної зорі належать до класу G2V?

ГЛАВА 5

ГАЛАКТИКА. МЕТАГАЛАКТИКА

5.1. Будова Галактики

Зоряна система, до якої належить Сонце (Галактика з великої літери, від давньогрецької «молоко», рос. Млечный путь, укр. Чумацький шлях), проявляє себе на небі у вигляді світлої смуги вздовж великого кола, нахиленого до небесного екватора. Ще Г. Галілей виявив зоряну природу Чумацького шляху. Знайдене методом найменших квадратів положення його середньої площини дозволило ввести поняття про *галактичний екватор*. Ураховуючи це та визначення напрямку на центр Галактики привело до введення *галактичної системи координат*. Ця система визначається екваторіальними координатами північного галактичного полюсу: $\alpha = 18^h 52^m$, $\delta = +27^\circ 7.7'$.

Дослідження структури Галактики проводиться методом *зоряної статистики*, тобто визначення функцій розподілу тих чи інших характеристик зір. Насамперед, це *диференціальна функція блиску* зір $A(m)$ – це кількість зір у межах зоряних величин m та $m + 1$ і *інтегральна функція блиску* $N(m)$ – кількість зір до зоряної величини m . Очевидно, що $A(m)dm = dN(m)$. Має місце така *теорема Зеєлігера*: якщо зорі розподілені у просторі рівномірно, то відношення

$$\frac{N(m+1)}{N(m)} = 3.98. \quad (5.1)$$

Порівняння (5.1) з таким же спостережним відношенням у різних напрямках дозволяє скласти уявлення про розподіл зір у нашій Галактиці. Основні виявлені закономірності – це зменшення кількості зір з віддаленням від галактичного екватора і збільшення їхньої кількості в напрямі до центра Галактики. Вводиться також *диференціальна функція світності* $\varphi(M)$, тобто доля зір, що приходить на одиничний інтервал абсолютних зоряних величин ΔM . Якщо просторова густина зір $D(r)$, то *інтегральна функція блиску* $A(m)$ в певному тілесному куті ω пов'язана з функціями $\varphi(M)$ та $D(r)$ таким *інтегральним рівнянням Шварцшильда*:

$$A(m) = \omega \int_0^{\infty} D(r) \varphi(M) r^2 dr, \quad (5.2)$$

де значення r , M та m зв'язані між собою основним рівнянням зоряної астрономії (2.3). Застосування перетворення Фур'є до рівняння (5.2) дозволяє одержати його розв'язок відносно густини зір у такому вигляді:

$$D(r) = \frac{5}{2\pi\omega r^3 \ln 10} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\tilde{A}(\beta)}{\tilde{\varphi}(\beta)} e^{-\rho\beta} d\beta, \quad (5.3)$$

де $\rho = 5 \ln r - 5$.

Відповідні зоряні підрахунки в різних напрямках привели до виявлення таких основних структурних складових Галактики, які представлені в табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Складові Галактики

Підсистеми Галактики	Вік, у млрд років	Вміст важких елементів, %	Радіус і товщина, у K_{pk}
Ядро: Надмасивна чорна діра, зоряне згущення (балдж), газ, пил	< 0.1	2 – 3	0.2 – 0.4
Плоска складова: Зорі класів O і B, надгіганти, зоряні асоціації, молоді розсіяні скупчення, розсіяні скупчення, A і F зорі	0.1 – 2	2 – 3	5 0.5
Зоряний диск Зорі типу Сонця, старі розсіяні скупчення, червоні гіганти, нові зорі	5 – 7	2	4 – 8 1 – 1.5
Сферична складова (гало): Деякі довгоперіодичні зорі, планетарні туманності, зорі з великими швидкостями, шарові скупчення, субкарлики, зорі типу RR Ліри	10 – 12	0.5 – 1	10 – 30
Корона (екстра гало) Старі зорі, газ, шарові скупчення	10 – 15	0.01 – 0.5	30 – 120

Основною складовою Галактики є зоряний диск радіусом у 15 Кпк. Сонце знаходиться на відстані у 8.5 Кпк від центра Галактики. Відносно Сонця цей центр знаходиться в напрямі сузір'я Стрільця. Зоряна густина в околі Сонця дорівнює 0.125 зір на кубічний парсек, що дає середню відстань між зорями приблизно 2 пк. Найближчою до Сонця є потрійна система α Центавра на відстані 1.3 пк.

Центральна, найбільш щільна частина сферичної складової радіусом приблизно 4 Кпк, має назву *балдж* (від англ. bulge – випуклість). У центрі Галактики знаходиться потужне джерело радіовипромінювання Стрілець А з розміром 2.4 пк, воно оточує незвичайне зоряне скупчення радіусом менше 1 пк і зоряною густиною порядку 10^6 зір/пк³. Скупчення оточене хмарою газу, іонізованого УФ-випромінюванням зір скупчення. У самому центрі знаходиться чорна діра масою $\approx 3 \cdot 10^6 M_{\odot}$, існування якої встановлено за дослідженням руху зір поблизу центра Галактики. Схематично будова Галактики представлена на рис. 5.1.

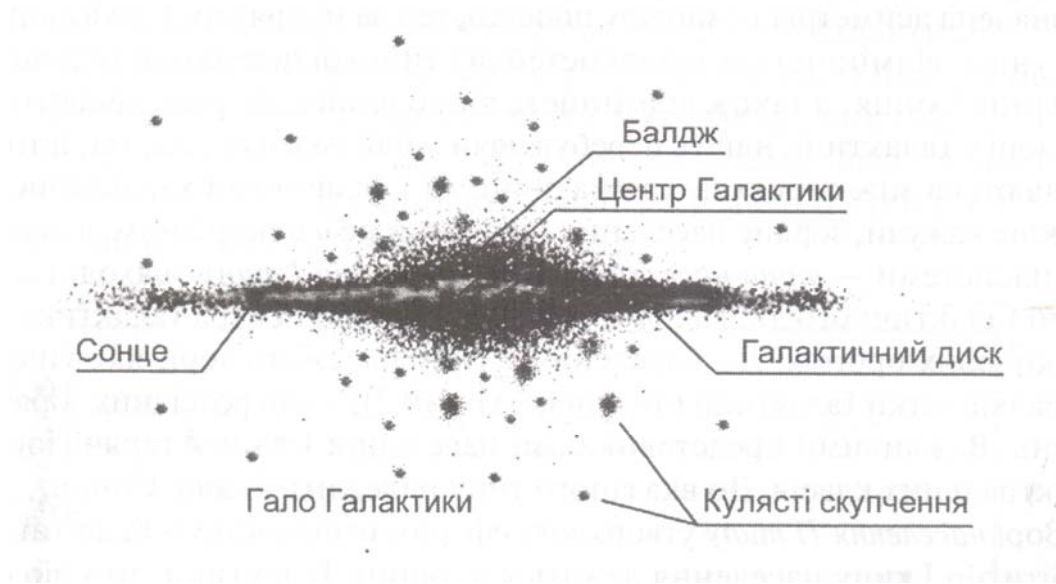
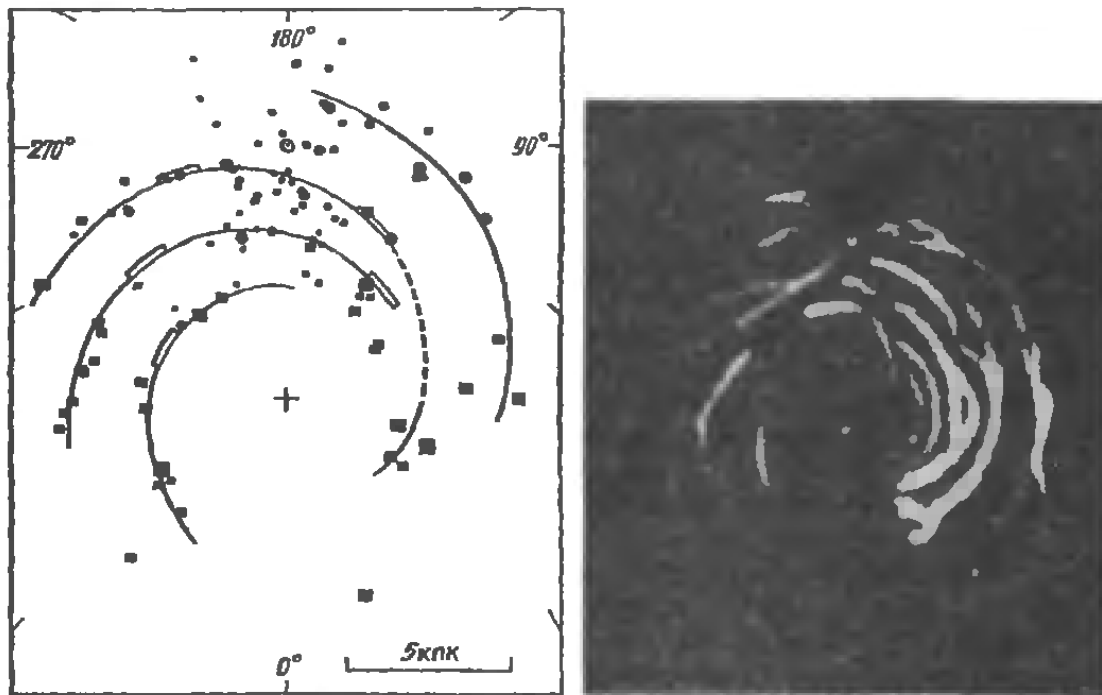


Рис. 5.1. Загальна будова Галактики, вид збоку

Важливою особливістю Галактики, що і визначає її місце серед інших галактик, є наявність двох головних спіральних гілок (або рукавів), що виходять з її ядра (рис. 5.2). Спочатку існування спіралей припускали за аналогією з іншими спіральними галактиками. А потім доведено за спостереженнями в розподілі міжзоряного водню в радіолінії на хвилі довжиною 21 см, що виникає при переході атома водню зі стану з паралельними спінами електрона і протона у стан з антипаралельною їх орієнтацією. Пізніше існування спіралей було підтверджено вивченням розташування пульсарів у Галактиці. Спіральні гілки інтерпретуються як *хвилі густини*. Пружність, що приводить до їхнього виникнення, обумовлена силою Коріоліса, яка виникає внаслідок обертання Галактики.

Пов'язане з хвилею густини підвищення гравітаційного потенціалу, яке, у свою чергу, прискорює міжзоряний газ до надзвукової швидкості, на фронті хвилі зоряної густини виникає ударна хвиля, яка призводить до підвищення густини газу.



а)

б)

Рис. 5.2. Спіральна структура Галактики

а) за розподілом областей НІ; б) за спостереженнями радіолінії 21 см

Важливу інформацію дає зоряна кінематика, тобто вивчення руху зір у просторі. Ефект Доплера дозволяє знайти променевою (або радіальну) швидкість зорі відносно Сонця V_r . Зміна її екваторіальних координат визначає зміщення зорі в картинній площині – її власний рух μ , який вимірюється в секундах дуги за рік ($''/\text{рік}$). Власний рух зорі складається з компонент за прямим сходженням μ_α і за схиленням μ_δ . Повна швидкість зорі є

$$V = \sqrt{V_r^2 + 4.74(\mu_\alpha^2 + (\mu \cos \alpha)^2)} / p, \quad (5.4)$$

де число 4.74 переводить секунди дуги, парсеки та роки у км/с, а p – річний паралакс зорі. Вивчення власних рухів яскравих зір з околу Сонця привело до такого результату. Сонце рухається відносно них зі швидкістю 19.5 км/с до точки на небесній сфері у сузір'ї Геркулеса з координатами $\alpha = 270^\circ$ і $\delta = +30^\circ$. Ця точка дістала назву сонячного апексу.

Але головним висновком вивчення руху зір та інших складових Галактики є висновок про її осьове обертання. Виявилось, що центральна

частина Галактики (до відстані приблизно в 4 Кпк від центра) має твердотільний характер обертання і швидкість збільшується до 250 км/с. Очікувалося, що потім швидкість буде зменшуватися, асимптотично наближаючись до кеплерівської, яка $\propto r^{-1/2}$. Однак було встановлено, що далі від центра швидкість обертання в середньому лишається постійною, лише дещо відхиляючись від свого середнього значення. На відстані Сонця від центра вона дорівнює приблизно 220 км/с. Це дає для періоду обертання Сонця (галактичного року) значення в 230 млн років. Якщо вважати, що відцентрова сила дорівнює тяжінню маси в межах радіуса в 15 Кпк, знайдемо оцінку маси галактики $M_{Gal} \approx 10^{10} M_C$. А оскільки відомо, що середня маса зір дорівнює $0.4 M_C$ матимемо оцінку кількості зір Галактики (окрім її корони) біля 200 млрд зір.

Наступним кроком є дослідження руху зір методами *зоряної динаміки*. Якщо розглядати сукупність зір у безштовхувальному наближенні (а це саме так і є з великою точністю), то функцію розподілу зір у шестивимірному фазовому просторі координат і компонент швидкості $\psi(x_i, \dot{x}_i)$, де значення \ddot{x}_i задовольняють рівнянням

$$\ddot{x}_i = \frac{\partial \Phi}{\partial x_i}, \quad (5.5)$$

а $\Phi(x_i, t)$ – гравітаційний потенціал Галактики.

Розкладаючи функцію $\psi(t + dt)$ в ряд Тейлора, одержимо для неї основне рівняння безштовхувальної зоряної динаміки

$$\sum_1^3 \left(\dot{x}_i \frac{\partial \psi}{\partial x} + \frac{\partial \psi}{\partial \dot{x}_i} \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial \psi}{\partial t} = 0. \quad (5.6)$$

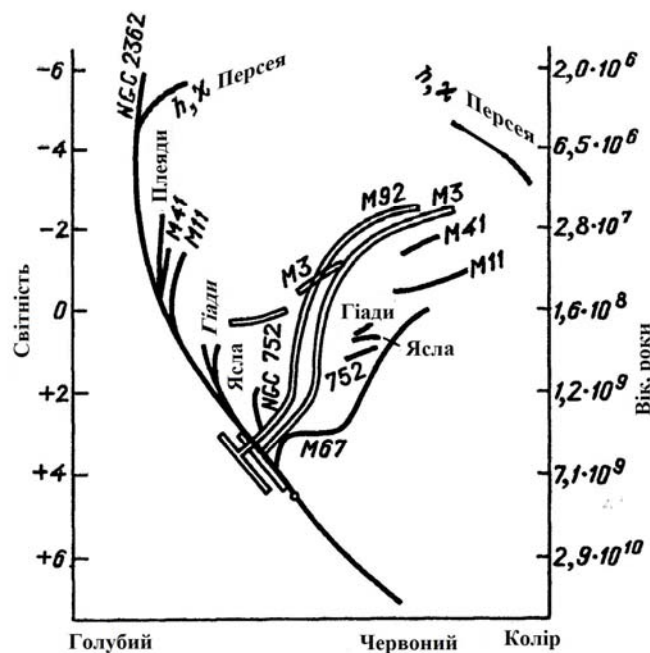
Досліджуючи це рівняння при різних припущеннях (консервативності чи неконсервативності системи, сферичної чи осьової симетрії тощо, зокрема знаходячи його перші інтеграли, можна вивчати властивості функції розподілу ψ . Важливою задачею є дослідження впливу випадкових, іррегулярних сил, зокрема на об'єкти, які збільшують свою енергію, і визначити час, за який ця енергія стає більше енергії звільнення, тобто визначити *час дисипації* таких об'єктів з системи.

Важливим елементом структури Галактики є зоряні скупчення. Розрізняють три їхні різновиди – зоряні асоціації, розсіяні зоряні скупчення і кулясті зоряні скупчення.

Зоряні асоціації – це області підвищеної концентрації молодих зір на тлі зоряного поля. Розрізняють два їхніх типа – ОВ-асоціації з зорями спектральних класів О та В (розміри від 30 до 200 пк, кількість об'єктів

у них складає кілька сотень зір) і Т-асоціації зі змінними зорями типу Т Тельця (розміри – кілька десятків парсек, кількість об'єктів від десятка до сотень). Втрата міжзоряного газу під дією випромінювання та зоряного вітру приводить до динамічної нестійкості зоряних асоціацій у полі припливних сил Галактики. Час їхнього існування складає кілька мільйонів років.

Розсіяні скупчення – гравітаційно зв'язані групи зір розміром у десятки та сотні парсек. Вони розміщуються в галактичному диску. Характерна кількість зір у них до однієї тисячі. Виявляються вони завдяки близькості променевої швидкості або власних рухів, а також за особливостями їхніх діаграм Г-Р. Зорі в розсіяних скупченнях мають більш-менш однаковий вік (десь у десятки мільйонів років), тому зорі з меншим часом перебування на головній послідовності вже зійшли з неї і почали зміщуватися, утворюючи гілку відповідного еволюційного треку (рис. 5.3). При цьому, чим більший вік цього скупчення, тим вище розміщується точка сходу з ГП.



5.3. Діаграма Герцшпрунга–Рессела для скупчень
 Чорні смуги – розсіяні скупчення, білі – кулясті скупчення.
 Права шкала дає вік зір у точці сходу з ГП

Кулясті скупчення – це згущення зір сферичної або сфероїдальної форми з сильним збільшенням зоряної густини до центра скупчення, які налічують мільйони зір. Вони належать до сферичної складової Галактики. Зорі в кулястих скупченнях – це старі зорі малої маси та віку до

десяти млрд. років з дуже низьким вмістом важких елементів, хоча кількість таких елементів збільшується зі зменшенням відстані скупчення до центра Галактики. У сферичному наближенні розподіл зоряної густини $f(r)$ в кулястому скупченні пов'язаний із розподілом спостереженої поверхневої густини в картинній площині $F(r)$ інтегральним рівнянням

$$F(r) = 2 \int_r^R f(\rho) \frac{\rho d\rho}{\sqrt{\rho^2 - r^2}} \quad (5.7)$$

з розв'язком

$$f(r) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\sqrt{R^2 - r^2}} \frac{F'(\sqrt{r^2 - z^2})}{\sqrt{r^2 - z^2}} dz, \quad (5.8)$$

де F' – похідна від $F(r)$.

Ще одним підходом до класифікації зір та інших компонентів у Галактиці є поділ їх за *типами населення*. До населення I типу належать об'єкти плоскої підсистеми – гарячі гіганти та надгіганти, цефеїди, нові зорі, наднові, міжзоряний газ, планетарні та пилові туманності. Населення типу II складають компоненти сферичної складової, а саме червоні карлики, зорі типу RR Ліри, зорі з великими швидкостями руху та низьким вмістом важких елементів, кулясті скупчення. Тобто до населення типу I належать молоді за віком об'єкти і розміщені вони в тій частині Галактики, де й досі тривають процеси зореутворення, до населення типу II – старі об'єкти, які вже встигли покинути галактичний диск.

Зовнішня частина сферичної складової Галактики – це її *гало*, що простягається до 15 Кпк від центра. Далі починається галактична *корона* (або екстрагало), радіус якої приблизно 120 Кпк. Зоряна густина і густина міжзоряного газу в короні значно менша, але завдяки її великому об'єму маса корони зіставна з масою внутрішньої частини галактики, що є умовою її стійкості.

5.2. Міжзоряне середовище

Під міжзоряним середовищем розуміють усю сукупність різних форм матерії, які існують у міжзоряному просторі. За масою вона складає приблизно 2 - 3% від усієї маси Галактики, але це досить складна фізична система, складові якої постійно взаємодіють як з зоряною компонентою Галактики, так і між собою. До складу цієї системи входять міжзоряна речовина (що, в свою чергу, поділяється на міжзоряний газ та міжзоряний пил), космічні промені і галактичне магнітне поле.

Міжзоряну речовину можна поділити за просторовим її розподілом на складову, що більш-менш рівномірно розподілена у міжзоряному просторі, та складову, яка утворює певні структури – туманності та хмари (див. табл. 5.3 і 5.4).

Таблиця 5.3

Середні характеристики міжзоряного газу

Фаза	Структура	Стан водню	\bar{n}	T
Гаряча Тепла	Корональний газ	Іонізований	10^{-3} см^{-3}	10^6 К
	Зони Н II	Іонізований	10^2 см^{-3}	10^4 К
Холодна	Міжхмарне середовище	Атомарний	0.1 см^{-3}	$(5 \div 9) \cdot 10^3 \text{ К}$
	Зони (хмари) Н I	Атомарний	10 см^{-3}	$(60 \div 100) \text{ К}$
	Молекулярні хмари	Молекулярний	10^3 см^{-3}	$(3 \div 100) \text{ К}$
	Глобули	Молекулярний	10^4 см^{-3}	10 К
	Гігантські молекулярні хмари	Молекулярний	300 см^{-3}	20 К
	Мазерні конденсації	Молекулярний	10^{10} см^{-3}	50 К

Здогадку про існування міжзоряного середовища висували ще у XVIII ст. У. Гершель і Ж. Шезо та у XIX ст. В. Я. Струве. У 1904 р. спостережене підтвердження цього одержав Й. Гартман, встановивши відсутність доплерівського зсуву у лінії кальцію у спектрах подвійних зір. Р. Трюмплер у 1930 р. встановив факт міжзоряного поглинання світла. З урахуванням цієї обставини основну формулу зоряної астрономії доводиться застосовувати у такому вигляді:

$$M = m + 5 - 5 \lg r - A(r). \quad (5.9)$$

Величина міжзоряного поглинання поблизу від галактичної площини на один парсек у середньому складає $A \approx 2.2^m$ в системі В і $A \approx 1.6^m$ в системі V. Спектральний хід величини A викликає появу у зір *надлишку кольору* як різницю між спостережними та справжніми їхніми показниками кольору. Значення A в інших напрямках залежить, насамперед, від галактичної широти, що описується *формулою Паренаго*:

$$A = \frac{A_0 \beta}{|\sin b|} \left[1 - \exp \left(- \frac{r |\sin b|}{\beta} \right) \right], \quad (5.10)$$

де A_0 – поглинання на один парсек у галактичній площині, b – галактична широта, а β – параметр зменшення зоряної густини з віддаленням від галактичної площини за законом

$$D(z) = D(0)e^{-\frac{|z|}{\beta}}. \quad (5.11)$$

Головна помітна риса міжзоряної речовини – це її надзвичайно мала густина. Тому час вільного пробігу частинок досягає десятків тисяч років, що набагато більше життя атомів у збуджених станах, причому як для дозволених переходів, так і заборонених (спостерігаються лінії O II та O III, N II, S II та інші). Фотон, що поглинається, встигає висвітитися без істинного поглинання. Тому прозорість міжзоряного газу приводить до ще однієї його важливої особливості – відсутності термодинамічної рівноваги з випромінюванням. Розподіл атомів та іонів визначається балансом між процесами іонізації та рекомбінації, але не має місця і принцип детальної рівноваги.

Оскільки з основного енергетичного рівня К фотоіонізація може відбутися тільки при енергії фотона $E \geq h\nu_1$, то умова $\nu_1 = E_1/h$ для певного елемента визначає частоту К-стрибка у неперервному спектрі (рис. 5.3). Для водню при $E_1 = 13.6$ еВ частота $\nu_1 = 912$ А (цей бальмерівський стрибок спостерігається, як зазначалося, і в спектрах зір).

Важливою особливістю спектра міжзоряного водню є радіолінія при переході між підрівнями надтонкої структури $1^2 S_{1/2}$ атомарного водню (верхній підрівень відповідає паралельним спінам протона, нижній – антипаралельним). Довжина хвилі цього переходу дорівнює 21 см, а частота – 1420 МГц. Якщо крізь хмару H I з температурою T_s спостерігається радіоджерело з яскравісною температурою $T_{b0} \gg T_s$, то вимірювана його температура буде дорівнювати

$$T_b = T_s(1 - e^{-\tau_\nu}) + T_{b0}e^{-\tau_\nu} \approx T_{b0}e^{-\tau_\nu}, \quad (5.12)$$

і замість лінії випромінювання буде на хвилі в 21 см спостерігатися лінія поглинання. Вимірюючи температуру джерела на цій довжині та поруч, можна оцінити радіооптичну товщину хмари τ_ν . Відповідні дослідження дозволили встановити, що атомарний водень зосереджений саме в тонкому шарі (≈ 400 пк) вздовж галактичної площини, і лише на периферії цей шар розширюється до 1 Кпк, а також виявити наявність спіральних гілок галактики. Низька густина міжзоряного газу обумовлює й існування в ньому таких екзотичних об'єктів як збуджені атоми з надзвичайно великими квантовими числами. Так, дослідженнями в декаметровому радіодіапазоні знайдені атоми вуглецю з головним квантовим числом $n = 860$. Взагалі в міжзоряному газі знайдені за їхніми лініями в радіодіапазоні більш ніж сотні різних міжзоряних молекул (у тому числі багато ізотопів), до складу яких, крім водню і елементів першого періоду (C, N, O), входять також S, Si, Al, Ca, K, Na.

Різнобічними є механізми нагрівання й охолодження міжзоряного газу. У цілому вони описуються законом збереження енергії елемента об'єму газу dV з внутрішньою енергією dE та тиском P :

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{dE}{dt} + P \frac{dV}{dt} = \Gamma - \Lambda, \quad (5.13)$$

де $\Gamma(n, T)$ – об'ємний коефіцієнт нагрівання, а $\Lambda(n, T)$ – об'ємний коефіцієнт охолодження. Механізми нагрівання міжзоряного газу такі: ультрафіолетове випромінювання зір (фотоіонізація); нагрівання ударними хвилями при спалахах наднових та при зіткненні газових хмар між собою; нагрівання електронів жорстким електромагнітним випромінюванням (рентгенівським і гама-квантами при фотоіонізації та комптонівському розсіянні); нагрівання космічними променями. Ще більш численні шляхи його охолодження: вільно-вільні переходи (тормозне випромінювання); рекомбінаційне випромінювання; двофотонне випромінювання, коли випромінюються два фотони з фіксованою сумарною енергією, але довільною у кожного окремого фотона, що дає неперервний спектр; обернене комптонівське розсіяння; випромінювання у спектральних лініях з рівнів, збуджених електронними ударами; іонізація електронними ударами з подальшим висвічуванням при рекомбінаціях.

Найгарячіша компонента міжзоряної речовини – *корональний газ*, одночасно і одна з найрозріджених, утворюється під час розширення оболонки після вибухів наднових та під дією потужного зоряного вітру великої кількості молодих гарячих зір. Він практично повністю іонізований. При утворенні «пузирів» коронального газу він стискає газ, що його оточує, але завдяки високій температурі має створити тиск, який врівноважує тиск оточуючого його газу. Розміри таких пузирів сягають сотень парсек. Вони є недовготривалими утвореннями в десятки мільйонів років.

Зони Н II іонізованого водню утворюються фотоіонізацією УФ-випромінюванням ($\lambda \leq 912 \text{ \AA}$) гарячих зір та іонізацією електронними ударами. Це зони активного зореутворення. Радіус зони Н II визначається рівністю між кількістю лайманівських квантів, що поглинаються в лінії з $\lambda = 1216 \text{ \AA}$ з кількістю УФ квантів з $\lambda \leq 912 \text{ \AA}$, які випромінюються центральною зорею, а температура – балансом між нагріванням газу УФ-випромінюванням та охолодженням його за рахунок випромінювання в заборонених лініях кисню і азоту.

Суттєвою особливістю міжзоряного водню є те, що внаслідок швидкого зростання його теплопровідності при $T \approx 10000 \text{ K}$ залежність тиску в ньому від концентрації атомів $p(n)$ є немонотонною (рис. 5.5). Тому в області з від'ємною похідною газ знаходиться у стані теплової нестійкості. Це приводить до існування двох його фаз – з низькою

концентрацією (область розв'язку 1) і підвищеною (область розв'язку 3). Це пояснює утворення хмар нейтрального атомарного водню – зон Н I. Хоча реальна ситуація ускладнюється рухами газу, взаємодією його з магнітним полем, гравітаційною та магнітогідродинамічною нестійкостями.

Найхолоднішою складовою міжзоряної речовини є *молекулярні хмари*. Їх налічується лише в шарі 4–8 Кпк кілька тисяч загальною масою в $10^9 M_C$. Особливо важливу роль відіграють в еволюції Галактики *гігантські молекулярні хмари* (ГМХ) з масами до $10^7 M_C$. Низька температура і досить низька густина дають достатньо мале значення маси Джинса для них, що робить їх гравітаційно нестійкими і включає механізм каскадної їх фрагментації. Вони є головними об'єктами в Галактиці, де відбувається процес зореутворення, причому зорі виникають групами у вигляді зоряних асоціацій та розсіяних зоряних скупчень. Малі ізольовані молекулярні хмари ($M \approx 10 M_C$) дістали назву *глобул*.

Міжзоряна речовина утворює різні типи *туманностей*, основні типи яких вказані в табл. 5.4.

Таблиця 5.4

Типи туманностей

Назва	Природа і основні процеси	Склад	Температура
Емісійні	Випромінювання в лініях атомів Н, збуджених ультрафіолетовим випромінюванням зір О і В	Іони Н (області Н II)	$\approx 10^4 K$
Планетарні	Скинуті оболонки зір, що розширюються	Газ	$\approx 10^4 K$
Світлі або відбиваючі	Випромінювання яскравих зір, розсіяне пилом	Нейтральний газ, пил	$\approx 10^3 K$
Темні	Поглинання світла зір пилом	Нейтральний газ, пил	10 – 100 K
Гігантські молекулярні хмари	Найбільш холодні області	Молекули H_2 , CO, CH, OH	10 K

Лише приблизно 1% за масою від міжзоряного газу складає *міжзоряний пил*. Пилінки з розмірами 0.005÷0.25 мкм утворюються шляхом коагуляції на тупоплавкі зародки з графітів та силікатів. Ці зародки виникають в

атмосферах холодних зір-гігантів і надгігантів пізніх спектральних класів та в оболонках нових, наднових і планетарних туманностей тоді, коли тиск перевищує тиск насиченого пару речовини, що конденсується. Саме пил проявляє себе в міжзоряному поглинанні світла в неперервному спектрі. Крім того, нагріваючись до температури в десятки та сотні кельвінів, пил переробляє короткохвильове випромінювання зір в ІЧ-випромінювання.

Дослідження галактичних космічних променів, міжзоряної поляризації світла зір, нетеплового випромінювання Галактики дозволили встановити основні властивості загального *магнітного поля Галактики*. Характерні значення його становлять $B \geq 0.1$ мкГс. Використання ефекту Фарадея дають значення B у межах $0.1 - 4.5$ мкГс. В околі Сонця поле спрямоване вздовж спіральних гілок і має значення приблизно в 2 мкГс, на яке накладаються неоднорідності з масштабом приблизно 100 пк і величиною до 3 мкГс. Великі розміри роблять те, що умови «вмороженості» магнітного поля в міжзоряне середовище, як правило, виконуються, тобто механізм гідромагнітного динамо і створює це поле.

Сукупність заряджених частинок з енергіями від 10^{11} до $3 \cdot 10^{20}$ еВ, що надходять до Сонця з міжзоряного простору утворює явище *галактичних космічних променів* (частинки менших енергій затримуються міжпланетним магнітним полем). Густина космічних променів поблизу Землі приблизно одна частинка на $\text{см}^2/\text{с}$. Склад космічних променів: електрони, протони (85%), α -частинки, ядра елементів із зарядом $Z \leq 30$ з надлишком легких ядер (Li, Be, B) порівняно з середньокосмічним вмістом. Енергетичний спектр частинок космічних променів ступеневий ($I \propto E^{-1.7}$). Потoki космічних променів енергій від 10^{11} до 10^{15} еВ ізотропні.

Протони космічних променів взаємодіють при зіткненнях з протонами ядер міжзоряного газу по каналу сильної взаємодії з утворенням вторинних нуклонів та піонів, доки енергія на одну частинку не стане менше від енергії народження піонів (≈ 1 GeV). Нейтральні піони породжують пару гама-квантів, що дає основний внесок в дифузне гамма-випромінювання Галактики. Взаємодія космічних променів з випромінюванням здійснюється через обернений комптон-ефект і фотонародження піонів та електрон-позитронних пар.

Розрахунки показують, що частинки космічних променів з енергією до 10^{16} еВ при взаємодії з магнітним полем Галактики мають ларморівський радіус порядку кількох а. о., і можна вважати, що вони рухаються вздовж силових ліній цього поля. Складний характер галактичного магнітного поля приводить до характеру руху частинок на зразок броунівського руху і викликає їхню просторову ізотропію. Частинки ж з енергією, більшою від 10^{17} еВ, мають цей радіус, більший від 10 Кпк, і рухаються практично прямолінійно.

Взаємодія релятивістської електронної компоненти космічних променів з галактичним магнітним полем породжує синхротронне випромінювання з практично неперервним ступеневим спектром, який зв'язаний з енергетичним спектром електронів так: $I(\nu) \propto \nu^{-(\delta-1)/2}$, де $dN/dE \propto E^{-\delta}$. Це випромінювання майже повністю має лінійну поляризацію. Час втрати електроном енергії на синхротронне випромінювання порядку ста тисяч років, що значно менше, ніж час, який потрібен йому, щоб залишити Галактику. Це підтверджує галактичне походження космічних променів.

Повністю проблема походження космічних променів, особливо високих енергій, ще не вирішена. Однак такими механізмами можуть бути прискорення на фронті ударної хвилі під час спалахів наднових (статистичний механізм Фермі), прискорення в змінних електричних полях у магнітосферах пульсарів, процеси поблизу центра Галактики.

Цікавою обставиною є те, що густини енергій трьох складових міжзоряного середовища – міжзоряного газу, галактичного магнітного поля і галактичних космічних променів співпадають за порядком величини, що підтверджує ефективність їхньої взаємодії.

5.3. Метагалактика

Під *Метагалактикою* розуміють усю охоплену астрономічними спостереженнями частину Всесвіту. Зараз її радіус сягає більш ніж 1500 Мпк, тобто більш ніж 10^{27} см, тобто він є вже сумірним з відстанню до космологічного горизонту (див. наступну главу). Основними структурними складовими Метагалактики є найбільші зоряні системи – *галактики* та їхні угруповання – *скупчення* і *надскупчення* галактик. Основні структурні типи галактик вказані в табл. 5.5.

Таблиця 5.5

Класифікація галактик

Тип	Позначення	Маси, M_{\odot}	Розміри, кпк	Спектр	Світність, ерг/с
Еліптичні Лінзоподібні Лінзоподібні з баром	E0, E1, ..., E7 SO SBO	$10^6 \div 10^{13}$	20 ÷ 120	G, K	$10^{38} \div 10^{45}$
Спіральні Спіральні з баром	Sa, Sb, Sc, Sd SBa, ..., SBd	$10^{10} \div 10^{12}$	1 ÷ 50	A, F, G	$10^{41} \div 10^{44}$
Неправильні	Ir	$\leq 10^{10}$	≤ 1	A, F	$\leq 10^{43}$

Розподіл галактик за типами за відносною кількістю таких: E – 13 %, SO – 22 %, S – 61 %, Irr – 4 %. У позначенні EN ціле число N визначає стиснення галактики за формулою $N = 10(a - b)/a$, де a і b – її півосі. Лінзоподібні галактики крім форми відрізняються від еліптичних наявністю екваторіального згущення, вони розглядаються як тип, проміжний між еліптичними та спіральними галактиками. Мала літера в позначенні спіральних галактик характеризує ступінь розкручення спіралей у напрямі його збільшення від a до d . Галактики SB відрізняються від галактик S тим, що спіральні гілки починаються не з центра галактики, а сполучені між собою *баром* (перемичкою), який у проекції на картинну площину має вигляд прямолінійного відрізка. Неправильні галактики поділяються на клочкуваті та аморфні.

Як видно з табл. 5.5, галактики досить різноманітні за формами, розмірами та масами. Найбільш яскраві галактики занесені у складений ще наприкінці XVIII ст. каталог Ш. Месьє (позначення M) і складений наприкінці XIX ст. Й. Дрейєром Новий загальний каталог (позначення NGC – New General Catalog). У XX та XXI ст. складені нові спеціалізовані каталоги, зокрема каталог позагалактичних радіоджерел 3C – 3-й Кембріджський каталог та інтернет-проект Galaxy Zoo. Єдина видима неозброєним оком у північній півкулі неба - це галактика M 31 або NGC 224, відома також як Туманність Андромеди.

Важливе значення для характеристики галактик має визначення відстаней до них. В основі знаходження цих відстаней лежить основна формула зоряної астрономії. Для її застосування поряд з видимою зоряною величиною треба знати і абсолютну зоряну величину якогось об'єкта в галактиці. Такими об'єктами є найбільш яскраві з них у міру віддалення галактик – цефеїди, найяскравіші зорі в галактиці, нові та наднові зорі, яскраві зони H II, найяскравіші галактики в скупченнях. Однак розкид у світностях, а відтак і в абсолютних зоряних величинах, вносив значні невизначеності у відстані та інші характеристики галактик. Справа покращилась наприкінці XX ст., коли була розвинута теорія наднових типу Ia і знайдена оцінка їхньої абсолютної зоряної величини у максимумі блиску ($M = -19,7^m$).

Наприкінці 1920-рр. Е. Хаббл зробив одне з найвизначніших відкриттів в астрономії XX ст. – встановив закон пропорційності доплерівського зсуву спектральних ліній у спектрі галактики (та, відповідно, її радіальної швидкості) відстані до цієї галактики – $V_r = Hr$. Сам Хаббл визначив параметр H , названий пізніше його ім'ям, як 550 км/с/Мпк. Сучасне його значення (70 ± 5) км/с/Мпк. Основною причиною завищення його попереднього значення, усунутого в 1950-рр., було те, що не враховувалася різниця в абсолютних зоряних величинах між двома близькими

групами змінних зір – цефеїдами та зорями типу RR Ліри. Збільшення радіальних швидкостей з відстанню між галактиками інтерпретується як космологічне явище розширення нашого Всесвіту.

Як можна судити з характеру спектрів різних типів галактик, в еліптичних галактиках переважають зорі пізніх спектральних класів, найяскравішими зорями в них є червоні гіганти. У спіральних та неправильних галактиках багато зір ранніх спектральних класів. У них і зраз активно відбуваються процеси зореутворення. Відрізняються галактики і вмістом міжзоряної речовини. Відносна кількість міжзоряного газу збільшується від 80 % до майже 100 % при переході від еліптичних до неправильних галактик.

Процес еволюції спіральних хвиль густини у спіральних галактиках підтверджений як математичним моделюванням на ЕОМ, так і розвитком відповідної теорії. У лінійній теорії збурення гравітаційного потенціалу диску галактики задається у вигляді:

$$\varphi'_g = A(r) \exp[i(\omega t - m\varphi + \psi(r))], \quad (5.14)$$

де m – кількість гілок спіралі, ω/m – швидкість їхнього обертання, а функція $\psi(r) = \psi(r_0) + (\varphi - \varphi_0)m$. Тоді кут закрутки спіралей дорівнює

$$i = \operatorname{arctg} \left(\frac{m}{r \frac{d\psi}{dr}} \right). \quad (5.15)$$

Переважаюча кількість галактик (понад 90 %) об'єднується в ті чи інші угруповання. Наша Галактика разом ще з двома велетенськими галактиками М31 і М33 в Трикутнику разом зі своїми супутниками утворюють *Місцеву групу* галактик, в яку входить приблизно сорок галактик, переважно карликових. Більш за все відомо галактик-супутників нашої Галактики – 15, М31 – 18. Деякі з них знаходяться в межах їхніх корон. Найбільш відомі з них - це Велика та Мала Магелланові хмари, відкриті ще на початку XVI ст. супутником Ф. Магеллана у першій навколосвітній подорожі А. Піфагеттою. Дослідження руху галактик Місцевої групи показує, що десь через 8 млрд. років можливо зіткнення нашої Галактики і Туманності Андромеди. Взагалі, оскільки відстані між галактиками лише на порядок перевищують їхні розміри, то їх тісні зближення та зіткнення відносно часті явища. При зближеннях галактик вони взаємодіють гравітаційно. При зіткненнях у міжзоряному газі виникають потужні ударні хвилі.

Більш великими утвореннями є *скупчення галактик*. Вони містять від 100 до кількох тисяч галактик. Їхні типові розміри 5–10 Мпк. Вони

поділяються на іррегулярні та регулярні. Останні мають більш симетричну форму. Найбільшими об'єднаннями галактик є *надскупчення галактик*, що налічують їх десятки тисяч. Відомо понад 20 надскупчень галактик. Вони являють собою більш-менш витягнуті угруповання скупчень та груп галактик.

Дослідження обертального руху галактик за їхніми спектрами й обертання галактик у скупченнях показали, що після твердотільного обертання центральних частин кутова швидкість лишається більшою, ніж того потребують закони Кеплера. Це означає, що маси галактик повинні бути значно більшими від їхніх спостережних оцінок. Цей факт підтверджується і застосуванням теореми віріала до аналізу обертального руху галактик. Певний внесок у цю нестачу маси можуть внести корони галактик, які є неспостережними в силу їхньої малої поверхневої яскравості. Однак цього явно недостатньо, повинна існувати ще якась значна маса в якійсь іншій, ніж речовина, фізичній формі, що не взаємодіє ані з речовиною, ані з випромінюванням. Вона отримала назву *темної матерії*.

Важливим напрямом у сучасній позагалактичній астрономії стало вивчення активних ядер галактик та квазарів.

Типовими рисами *активних ядер галактик* є нетеплове випромінювання зі ступеневим спектром $I(\nu) \propto \nu^{-\alpha}$, $\alpha > 0$) і наявність у спектрі широких емісійних ліній, що свідчить про високі ступені збудження випромінюючих атомів та неупорядковані рухи зі швидкостями у сотні та тисячі км/с. Еліптичні галактики з активними ядрами дістали назву *галактик Сейферта*. Сейфертівські галактики мають підвищене інфрачервоне випромінювання, подекуди і рентгенівське. Серед галактик Sa та Sb біля 80 % мають активні ядра. Серед галактик Sc та еліптичних частка галактик з активними ядрами менше. Галактики, які мають великий ультрафіолетовий надлишок випромінювання, що пов'язують з активним зореутворенням у них, це *галактики Маркаряна*. Нарешті, зореподібні об'єкти, які мають як емісійні лінії, так і лінії поглинання і показують змінність блиску (порядку місяця) – це галактики типу VL Ящірки або *лацертуди*. Світність активних ядер галактик (зокрема сейфертівських) сягає 10^{44} – 10^{46} ерг/с.

Галактики, в яких радіовипромінювання зіставне або навіть перевищує випромінювання в оптичному діапазоні, це *радіогалактики*. Їхнє випромінювання є нетепловим, синхротронним і зумовлене гальмуванням релятивістських електронів у магнітних полях. Найближчою і найвідомішою є галактика з радіоджерелом Лебідь А на відстані в 260 Мпк.

Найпотужнішими джерелами випромінювання є *квазари* (від виразу «квазизоряні об'єкти»). Їхня світність досягає значення 10^{48} ерг/с. Тому вони є і найвіддаленішими об'єктами, які спостерігаються у Мета-

галактиці. Вони мають, відповідно, і найбільші червоні зміщення, що надає їхнім лінійчастим спектрам незвичайного вигляду. Основна частина випромінювання квазарів має ступеневий спектр і велику ступінь поляризації, що свідчить про синхротронний механізм цього випромінювання. Поряд з квазарами, що мають потужне радіовипромінювання існують і радіоспокійні квазізоряні галактики – *квазаги*.

Найбільш ймовірним механізмом потужного випромінювання активних ядер і квазарів вважається акреція речовини в гравітаційному полі надмасивної чорної діри, яка знаходиться в центрі об'єкта. При цьому світність такого об'єкта дорівнює

$$L \approx Kc^2 \frac{dM}{dt}, \quad (5.16)$$

де c – швидкість світла, а коефіцієнт K є приблизно 0.4 для сферичної акреції та 0.1 для дискової акреції, що формується зі сферичної при обертовому русі об'єкта під дією відцентрової сили.

Характерним для еволюції активних ядер галактик і квазарів є потужні явища вибухового типу з утворенням величезних викидів речовини – *джетів* довжиною в сотні парсеків і більше, з клочкуватою структурою і широким спектром випромінювання від рентгену до радіодіапазону. Джети можуть бути як двосторонніми в двох протилежних напрямках, так і односторонніми.

Поширеність різних типів згаданих вище об'єктів у порівнянні з нормальними галактиками подана в табл. 5.6.

Таблиця 5.6

Просторова густина об'єктів з активними ядрами

Назва об'єкта	Кількість в 1 Мпк ³	Назва об'єкта	Кількість в 1 Мпк ³
Нормальні галактики	10 ⁻¹	Радіогалатики	10 ⁻⁶
Яскраві галактики	10 ⁻²	Радіоспокійні галак. актив.	10 ⁻⁷
Галактики Сейферта	10 ⁻⁴	Квазари	10 ⁻⁸

Дослідження просторового розподілу позагалактичних об'єктів у космосі привели наприкінці 1970-рр. до уявлення про *великомасштабну структуру* Метагалактики. Ця структура полягає в тому, що переважна більшість галактик та їхніх скупчень утворюють мережу з комітками розміром в 50–150 Мпк. Густина речовини, усереднена в масштабах більших від 300 Мпк, є постійною та ізотропною.

Структурування речовини у вигляді зоряних систем та їх скупчень стало можливим лише тоді, коли середня температура у Всесвіті, що еволюціонує, стала меншою від кількох тисяч кельвінів, це зробило можливим існування нейтральних атомів. А зникнення інтенсивної взаємодії між зарядженими частинками та випромінюванням привело до того, що ця взаємодія перестала руйнувати термодинамічні флуктуації речовини і дало можливість деяким з них зростати і ставати прото-скупченнями галактик.

Основи релятивістської теорії малих збурень у Всесвіті, що розширюється, були розвинуті Є. М. Ліфшицем [32]. Спроби опису поведінки збурень після переходу речовини до нейтрального стану і практичного припинення її взаємодії з випромінюванням робляться шляхом розглядання трьох можливих типів збурень:

а) *адіабатичні* – виникають однакові відносні збурення густини речовини та випромінювання (ентропія не змінюється). У речовині виникають безвихореві рухи ($\nabla \vec{v} \neq 0$, $\nabla \times \vec{v} = 0$);

б) *ентропійні* – виникають лише збурення густини, які є майже ізотермічними;

в) *вихореві* – збурення густини речовини супроводжуються виникненням рухів з $\nabla \times \vec{v} \neq 0$ та $\nabla \vec{v} = 0$.

Виявляється, що у випадку адіабатичних збурень маса Джинса є $(10^{13}-10^{14}) M_C$, а у випадку ентропійних – $(10^5-10^6) M_C$. Тобто маси адіабатичних збурень відповідають масам скупчень галактик. Ентропійні ж збурення можуть породжувати лише кульові скупчення та карликові галактики, а більші структури можуть утворюватися тільки в процесах їхнього об'єднання.

Для з'ясування подальшої долі збурень застосовується встановлення зв'язку між лагранжевими та ейлеровими координатами елемента збурення, тобто між координатами певної частинки середовища \vec{r} (*лагранжеві координати* \vec{r}) і координатами певної частинки простору \vec{s} , крізь яку рухається частинка середовища (*ейлерові координати*). Цей зв'язок задається у такому вигляді:

$$\vec{r} = a(t)\vec{s} + b(t)\vec{q}(\vec{s}), \quad (5.17)$$

де перший доданок враховує зміну вектора \vec{r} у космологічному розширенні Всесвіту (a – масштабний фактор, див. главу 6), а другий – його зміну в процесі еволюції збурення. З цього випливає такий зв'язок між густиною збурення і середньою густиною:

$$\rho = \bar{\rho} a^3 D(\vec{r}, \vec{s}), \quad (5.18)$$

де $D(\vec{r}, \vec{s})$ – це якобіан переходу від \vec{r} до \vec{s} . Умова потенціальності поля при адіабатичних збуреннях $\nabla \times \vec{v} = 0$ завжди дозволяє обрати систему координат з осями, спрямованими за головними осями тензора деформації середовища, і привести якобіан до діагонального вигляду. Тоді (5.18) набуває такого вигляду:

$$\rho = \frac{\bar{\rho}}{\left(1 - \alpha \frac{b}{a}\right) \left(1 - \beta \frac{b}{a}\right) \left(1 - \gamma \frac{b}{a}\right)}. \quad (5.19)$$

Коефіцієнти визначають деформації середовища збурення в напрямках головних осей і виражаються через похідні $\partial x_i / \partial x_k$. Нехай α – найбільший з них. Тоді, якщо він додатний, то з розвитком збурення настане момент, коли величина ab/a дорівнюватиме 1, а значення густини ρ прямуватиме до нескінченності. І відбуватиметься практично одновимірне стиснення вздовж осі x_1 – виникне плоске утворення (однак зі скінченною поверхневою густиною). А дотикання та перетини таких плоских утворень («млинців») створять великомасштабну комірчасту структуру, про яку йшлося вище. Щойно викладені уявлення були розвинуті Я. Б. Зельдовичем та його учнями [22].

Подальший процес перетворення протоскупчень галактик на скупчення галактик суттєво залежить від початкових умов. Важливим питанням при цьому є проблема виникнення оберտального руху галактик. Найбільш невимушено вона вирішується в теорії вихоревих збурень. Але є шляхи її вирішення і в інших випадках. Потім при каскадній фрагментації виникають галактики та кулясті скупчення із зір першого покоління. Різні види позагалактичних об'єктів зв'язані між собою генетично. Вважається, що квазари є певним етапом еволюції галактик з активними ядрами, і лише їхня далекість не дозволяє спостерігати самі ці галактики. Можливо, що еволюційно зв'язані між собою спіральні та неправильні галактики (останні є нащадками спіральних галактик, які втратили свою периферію). Структурна еволюція галактик супроводжується також їхньою хімічною еволюцією. Основний напрям цієї еволюції – збагачення міжзоряного середовища ядрами важких елементів, а відтак, і збільшення металічності зір наступних поколінь.

Міжгалактичний простір заповнений дуже розрідженим газом. Ця його вкрай мала густина приводить до того, що енергія окремих частинок може ставати достатньо великою, температура міжгалактичного газу може сягати мільйонів кельвінів, і він є джерелом рентгенівського випромінювання.

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. Що таке Галактика і галактика?
2. Як будується галактична система координат?
3. У чому полягає теорема Зеєлігера і як вона використовується?
4. Які величини пов'язує між собою інтегральне рівняння Шварцшильда?
5. З яких основних складових складається наша Галактика?
6. Де знаходиться центр Галактики відносно Сонця?
7. Яка середня густина зір в околі Сонця?
8. Що таке балдж Галактики?
9. Що знаходиться в центрі Галактики?
10. Яку природу мають спіральні гілки Галактики і які спостереження підтверджують їхнє існування?
11. Що таке власний рух зорі?
12. Що таке апекс Сонця?
13. Який характер має залежність швидкості обертання Галактики від відстані до галактичного центра?
14. Яку функцію визначає основне рівняння зоряної статистики?
15. Які існують типи зоряних скупчень?
16. До яких складових Галактики належать кулясті та розсіяні зоряні скупчення?
17. Який характер мають діаграми Герцшпрунга–Рессела для розсіяних скупчень різного віку?
18. Які характеристики кулястих скупчень пов'язує між собою інтегральне рівняння (5.7)?
19. Які існують у Галактиці типи населення?
20. Що таке гало і корона Галактики?
21. Які складові утворюють міжзоряне середовище?
22. Як враховується і від чого залежить міжзоряне поглинання випромінювання?
23. Який характер мають радіолінії міжзоряного водню на хвилі 21 см?
24. Що таке бальмерівський стрибок у спектрах зір та міжзоряного газу?
25. Що є характерним для молекулярних спектрів міжзоряного газу?
26. Які механізми обумовлюють нагрівання й охолодження міжзоряного газу?
27. Що таке зони Н I та Н II?
28. У чому полягає значення гігантських молекулярних хмар для еволюції Галактики?

29. Які основні види туманностей існують у Галактиці?
30. Які основні властивості має міжзоряний пил?
31. Яка в середньому величина магнітного поля Галактики?
32. Які основні характеристики мають галактичні космічні промені?
33. Який спектр має синхротронне випромінювання галактичних космічних променів?
34. Що розуміють під терміном «Метагалактика»?
35. Які структурні складові Метагалактики існують?
36. Які основні класи галактик існують?
37. У чому полягає основна проблема визначення відстаней до позагалактичних об'єктів?
38. У чому полягає закон Хаббла і яку він має інтерпретацію?
39. Що таке Місцева група галактик?
40. Що таке надскоупчення галактик?
41. Чому існує проблема «темної матерії»?
42. Що таке активні ядра галактик?
43. Що таке галактики Сейферта?
44. Що таке радіогалактики?
45. Що таке квазари і яка їхня ймовірна природа?
46. Що таке джети?
47. У чому полягає великомасштабна структура Метагалактики?
48. Які є підходи до побудови теорії походження протонадскоупчень і протоскоупчень галактик?
49. Як генетично пов'язані між собою різні структури Метагалактики?
50. Яку температуру має міжгалактичний газ і чому?

ЗАДАЧІ ДО ГЛАВИ 5

- 5.1. Довести теорему Зеєлігера.
- 5.2. Річне паралактичне зміщення зорі за рахунок руху Сонця $p'' = \pi'' V_C \sin \lambda / 4.74$, де π – річний паралакс зорі, V_C – швидкість Сонця у км/с, λ – кут між початковим напрямом на зорю та напрямом на апекс. Одержати цю формулу. Звідки береться число 4.74?
- 5.3. Зоря знаходиться на відстані в 10 пк і рухається зі швидкістю 50 км/с у напрямі, перпендикулярному променю зору. Чому дорівнює її власний рух?
- 5.4. Оцінити масу Галактики, знаючи швидкість Сонця в його галактичному обертанні та його відстань від центра Галактики. Якою є ця оцінка і чому?

5.5. Оцінити густину та масу сферичної однорідної водневої туманності, якщо її діаметр дорівнює 2 пк, а оптична товщина ≈ 1 .

5.6. Під яким кутом до променя зору ми бачимо Туманність Андромеди та під яким кутом виглядає наша Галактика з М31?

5.7. Знайти радіус кільця Ейнштейна, яке створюється еліптичною галактикою E0 з масою $M = 10^{12} M_{\odot}$ від квазара з червоним зміщенням $z = 0.7$ у точці, симетричній квазару відносно галактики.

ГЛАВА 6

ОСНОВИ КОСМОЛОГІЇ

6.1. Дорелятивістська космологія

Потреба в знаннях про світ у цілому, про його устрій та загальні властивості почала формуватися у людства ще з первісних часів, відтоді як люди почали усвідомлювати, що світ не обмежується тим, що вони сприймають лише «тут і тепер» (а саме так сприймають його тварини). Тобто ще тоді сформувалася потреба в певних *космологічних уявленнях*. Першою науковою картиною Всесвіту була *космологічна модель* Евдокса–Аристотеля (IV ст. до н. е.), яка попри всю свою наївність з сучасної точки зору була *моделлю сферично обмеженого світу*, що відповідала певному етапу вивчення Всесвіту – етапу безпосереднього споглядання неба. Подальшим кількісним розвитком її стала система світу Гіппарха–Птолемея (II ст. до н.е. – II ст. н.е.). Система епіциклів і диферентів, перекладена на сучасну аналітичну мову, це не що інше, як розкладання прямокутних координат світил у скінченні ряди Фур'є. Вже античній космології була притаманна риса, яку мали і всі наступні космологічні моделі, – тісний зв'язок з фундаментальними фізичними уявленнями своєї епохи. Вона спиралася на фізику Аристотеля, в якій абсолютною була швидкість, а не прискорення. Звідси догма про нерухомість Землі та геоцентричний характер античної космології.

Коперніканська революція в астрономії і наукова революція XVI–XVII ст. у цілому (створення основ класичної механіки та поява телескопічної астрономії) породили ньютонівську космологічну модель – *модель нескінченного у просторі та часі Всесвіту*, заповненого системами зір та планет, що рухаються під дією сили всесвітнього тяжіння. У XVIII–XIX ст. відбувалося наповнення цієї моделі конкретним астрономічним змістом (закладання У. Гершелем перших уявлень про нашу Галактику та подальший розвиток цих уявлень, визначення відстаней до зір, телескопічне вивчення тіл Сонячної системи тощо).

Однак досить швидко почали виявлятися і певні суперечності цієї ньютонівської космології – її парадокси. Це, по-перше, *фотометричний парадокс*. Якщо світ нескінченний у просторі та часі, то наш зір у будь-

якому напрямі зустріне зорю, і все небо повинно мати яскравість, співставну з яскравістю сонячного диска (Е. Галлей (1709 р.), Ж. Шезо (1744 р.), Г. Ольберс (1826 р.)). У 1886 р. Х. Зеєлігер сформулював *гравітаційний парадокс*, який полягає в тому, що в ньютонівському світі неможливо обчислити гравітаційний потенціал у будь-якій його точці, точніше кажучи, це приводить до появи невизначеності типу $\infty - \infty$, яку можна розкрити тільки накладаючи на Всесвіт певні обмеження щодо розподілу мас у ньому. Нарешті, встановлення другого начала термодинаміки привело до *термодинамічного парадоксу*. Постало питання – чому Всесвіт, що існує нескінченно довго, ще не прийшов у стан термодинамічної рівноваги і повністю безструктурний стан.

6.2. Релятивістська космологія

Ці парадокси були зняті у ХХ ст. появою нової грандіозної ідеї – ідеї нестационарного еволюціонуючого Всесвіту. В її основі лежить загальна теорія відносності, створена А. Ейнштейном, а останнім часом і квантова фізика. Розвитком уявлень про метричну і фізичну еволюцію Всесвіту ми зобов'язані, насамперед, О. О. Фрідману та Г. А. Гамову.

Нагадаємо основні фізичні та математичні засади загальної теорії відносності (ЗТВ). Вихідним її пунктом є встановлена з великою точністю рівність інертної і гравітаційної мас будь-якого фізичного об'єкта і, впливаючий з цього факту, тісний зв'язок між рухом за інерцією та рухом у гравітаційному полі. Цей зв'язок знаходить своє вираження у *принципі еквівалентності* руху у гравітаційному полі в інерціальній системі відліку і вільного руху у певній неінерціальній системі. Оскільки рух у довільному гравітаційному полі нерівномірний та криволінійний, то ми приходимо до необхідності перейти від плоскої чотиривимірної різноманітності простору-часу Мінковського - спеціальної теорії відносності (СТВ) - до викривленого простору-часу і замінити відомий вираз для елементарного інтервалу в СТВ на довільну квадратичну форму від диференціалів координат:

$$ds^2 = g_{ik} dx^i dx^k, \quad (6.1)$$

де сукупність коефіцієнтів утворює *метричний тензор* g_{ik} . Зразу ж ми починаємо використовувати правило сумування Ейнштейна, за яким за індексами, що зустрічаються двічі (як нижній та верхній), мається на увазі сумування від 0 до 4, причому значення 0 належить до часової координати, а значення 1, 2, 3 – до просторових. Сама необхідність використовувати нижні та верхні індекси викликана тим, що доводиться розрізняти дві форми векторних та тензорних величин – *контраваріантні*

та *коваріантні*. Різницю між ними та їхній геометричний зміст можна побачити вже в косокутній системі координат на рис. 6.1. Викривленість часу-простору і необхідність користуватися криволінійними системами координат ускладнює процедуру диференціювання векторів і тензорів, бо при перенесенні їх з однієї точки до іншої вздовж певної координатної лінії їхні компоненти змінюються як в силу своєї залежності від координат, так і в силу кривизни цієї лінії. Це приводить, наприклад, до такого виразу для *коваріантної похідної* контраваріантного вектора:

$$A^i_{;k} = \frac{\partial A^i}{\partial x^k} + \Gamma^i_{kl} dx^l, \quad (6.2)$$

де коефіцієнти Γ^i_{kl} у загальному випадку не утворюють тензор третього рангу і мають назву *символів Кристофеля* (або коефіцієнтів зв'язаності). Вони пов'язані з похідними від компонент метричного тензора таким чином:

$$\Gamma^i_{kl} = \frac{1}{2} g^{im} \left(\frac{\partial g_{mk}}{\partial x^l} + \frac{\partial g_{ml}}{\partial x^k} - \frac{\partial g_{kl}}{\partial x^m} \right). \quad (6.3)$$

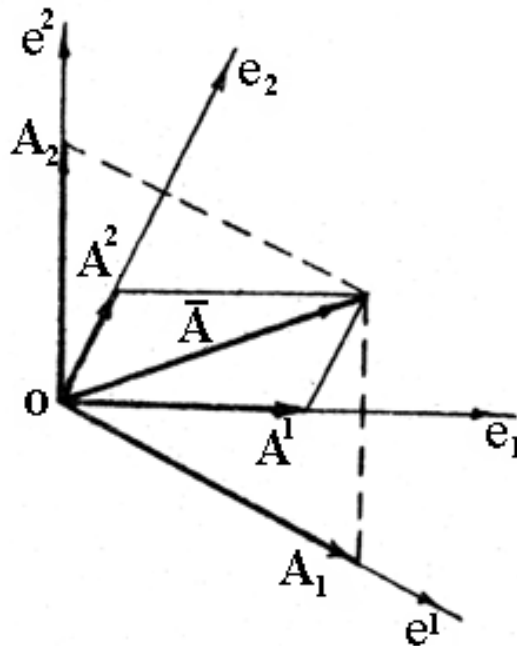


Рис. 6.1. Коваріантні та контраваріантні компоненти вектора

Тензорною мірою кривизни простору-часу, що узагальнює на чотиривимірну множину поняття кривизни плоскої кривої, є *тензор кривизни четвертого рангу*, а тензор другого рангу, що є згорткою цього тензора – *тензор Річчі* дорівнює

$$R_{ik} = \frac{\partial \Gamma_{ik}^l}{\partial x^l} - \frac{\partial \Gamma_{il}^k}{\partial x^k} + \Gamma_{ml}^l \Gamma_{ik}^m - \Gamma_{mk}^l \Gamma_{il}^m. \quad (6.4)$$

Його згортка дає скалярну кривизну

$$R = g^{ik} R_{ik}. \quad (6.5)$$

Головна фізична ідея ЗТВ – взаємний вплив розташування та руху матерії і метричних властивостей простору-часу - реалізується основним рівнянням теорії – *рівнянням Ейнштейна*, яке ми запишемо у змішаній формі:

$$R_k^i - \frac{1}{2} R \delta_k^i = \frac{8\pi G}{3c^4} T_k^i, \quad (6.6)$$

де T_k^i – *тензор енергії-імпульсу*, c – швидкість світла, а δ_k^i – одиничний тензор.

Ще А. Ейнштейн, О. О. Фрідман та інші піонери релятивістської космології значною мірою інтуїтивно виходили з так званого *довершеного космологічного принципу*, тобто припущення, що Всесвіт є однорідним та ізотропним – його властивості однакові в усіх місцях і в усіх напрямках. У 1970–80 рр. це знайшло своє спостережене підтвердження після виявлення великомасштабної структури Всесвіту, про яку йшлося наприкінці попередньої глави. У цьому разі недиагональні компоненти тензора енергії-імпульсу, які пропорційні потоковим енергії, дорівнюють нулю і він має вигляд:

$$T_k^i = (p + \varepsilon) u^i u_k - p \delta_k^i, \quad (6.7)$$

де p – тиск, ε – середня густина енергії, u^i – 4-швидкість, у даному разі $u^i = (1, 0, 0, 0)$.

Тепер нам треба записати для нашого однорідного та ізотропного світу вираз для інтервалу і тим самим визначити вид метричного тензора для нього, а потім обчислити символи Кристофеля і тензор Річчі та підставити останній у рівняння Ейнштейна. При цьому матимемо на увазі, що в такому світі кривизна його буде сталою величиною.

Запишемо в плоскому чотиривимірному просторі рівняння тривимірного підпростору сталої кривизни, яка може бути додатною (аналог опуклої поверхні – сфери, нульовою (аналог – площина) і від'ємною (аналог псевдосфера Лобачевського). Матимемо:

$$x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 = a^2 / k, \quad (6.8)$$

де $k = -1, 0, +1$ – знак кривизни тривимірного підпростору, величина a (радіус нашої тривимірної сфери), в загальному випадку має назву

масштабний фактор і визначає певний характерний розмір всесвіту. У зв'язку з поняттям масштабного фактора зауважимо, що останнім часом ця величина визначається часто як безрозмірна, а саме як відношення a/a_c , де a_c - його сучасне значення, яке покладається рівним 1. Це більше відповідає терміну «масштабний фактор», але ускладнює запис ряду співвідношень і формул. Тому ми зберігаємо його традиційне визначення (див., наприклад, [32]).

Сума квадратів диференціалів координат виразу (6.8) дасть просторову частину інтервалу dl^2 . Якщо продиференціювати рівність (6.8) і виключити фіктивну четверту координату x_4 , то одержимо у сферичних координатах (r, θ, φ) , що

$$dl^2 = \frac{dr^2}{1 - k \frac{r^2}{a^2}} + r^2(\sin^2 \theta d\varphi^2 + d\theta^2). \quad (6.9)$$

Відповідно, для елементарного інтервалу матимемо такий вираз (так звану *метрику Робертсона–Уокера*):

$$ds^2 = c^2 dt^2 - \frac{dr^2}{1 - k \frac{r^2}{a^2}} - r^2(\sin^2 \theta d\varphi^2 + d\theta^2). \quad (6.10)$$

Тепер кропіткі, але нескладні обчислення дадуть для діагональних компонент тензора кривизни такі результати:

$$R_0^0 = -\frac{3}{c^2 a} \ddot{a}, \quad R_\beta^\alpha = -\frac{1}{c^2 a^2} (2kc^2 + 2\dot{a}^2 + \ddot{a}a), \quad \alpha, \beta = 1, 2, 3. \quad (6.11)$$

Підстановка (6.7) та (6.11) у рівняння (6.6) дасть два скалярних диференціальних рівняння. Виключаючи з них другу похідну \ddot{a} , одержуємо рівняння першого порядку, яке описує метричну еволюцію однорідного та ізотропного світу:

$$\dot{a}^2 + kc^2 = \frac{8\pi G}{3c^2} a^2 \varepsilon. \quad (6.12)$$

Звідси одразу випливає, що світ буде плоским з $k = 0$ (хоча і нестационарним), тоді, коли густина енергії буде дорівнювати певному значенню *критичної густини*

$$\varepsilon_{cr} = \frac{3c^2 H^2}{8\pi G}, \quad (6.13)$$

де введено для відносної швидкості зміни масштабного фактора позначення $H = \dot{a}/a$. Це *параметр Хаббла*, який визначає зв'язок між

зміною відстані r між двома точками залежно від швидкості зміни цієї відстані, що випливає з пропорції $\dot{r} | r = \dot{a} / a$, або $V = Hr$ – закон Хаббла, встановлений ним у 1929 р. із спостережень. Параметр Хаббла – це ще одна (поряд із величинами a та ε) характеристика еволюціонуючого Всесвіту. Він є постійним у просторі, але змінним у часі.

Тепер проблема полягає в тому, що ми маємо лише одне рівняння для двох функцій часу $a(t)$ і $\varepsilon(t)$. Треба знайти зв'язок між ними. Із закону збереження енергії у формі першого начала термодинаміки випливає таке співвідношення (з урахуванням того, що об'єм $V \propto a^3$):

$$\int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon} \frac{d\varepsilon}{p + \varepsilon} = 3 \ln \frac{a_0}{a}. \quad (6.14)$$

А зв'язок між тиском p і густиною енергії ε задається рівнянням стану тієї чи іншої фізичної форми матерії, якому в цьому випадку доцільно надати вигляду $p = w\varepsilon$, де w – чисельний коефіцієнт, бо тиск і густина енергії – це величини однакової розмірності. Наприклад, неважко переконатися, що відоме рівняння стану ідеального газу, якщо перейти від температури до середньої густини енергії, стане таким: $p = 2\varepsilon/3$.

Найпростішим рівнянням стану є таке: $p = 0$. Це рівняння стану *пиллоподібного середовища*, бо пилінки мають значно меншу швидкість, ніж молекули газу, і тому практично не зіштовхуються між собою, а саме зіткнення частинок і створює ефект тиску. У теперішньому Всесвіті роль таких «пилинок» виконують зорі, в яких зосереджена основна частина речовини. Тому саме з рівняння стану $p = 0$ і почався свого часу розвиток релятивістської космології. Друга відома макроскопічна форма матерії, *електромагнітне поле*, має, як відомо з електродинаміки, рівняння стану $p = \varepsilon/3$. Нарешті, в останні десятиріччя в космології набула важливого значення ще одна фізична форма матерії – *фізичний вакуум*, середовище, утворене так званими віртуальними елементарними частинками. Вони були названі так тому, що відрізняються від звичайних частинок, хоч існують реально, як і останні. З точки зору СТВ, частинки фізичного вакууму не підкоряються відомому співвідношенню між релятивістською повною енергією, енергією спокою та імпульсом; з квантової точки зору, це частинки, що знаходяться в найнижчому енергетичному стані. У мікрофізиці частинки фізичного вакууму зумовлюють взаємодію інших частинок, зокрема електростатичну. Заряджена частинка оточена хмарою віртуальних фотонів, що весь час утворюються і зникають. Внаслідок порушення сферичної симетрії цієї хмари при появі поблизу іншої зарядженої частинки і виникає електростатична взаємодія двох зарядів.

У 1973 р. було звернуто увагу на те, що у макроскопічному випадку фізичний вакуум може мати досить дивне, на перший погляд, рівняння стану: $p = -\varepsilon$, тобто створювати від'ємний тиск.

Цю обставину можна пояснити так. Фізичний вакуум є скалярним фізичним полем, тобто він описується однією скалярною функцією $\varphi(t)$, на відміну від електромагнітного поля, яке є векторним. Повна густина енергії вакууму дорівнює сумі кінетичної та потенціальної складових: $\varepsilon = \dot{\varphi}^2 / 2 + V$. З іншого боку, за аналогією з рівнянням Бернуллі в гідродинаміці, можна записати, що тиск $p = \dot{\varphi}^2 / 2 - V$. Якщо вакуум гранично збуджений, тобто вся його енергія є потенціальною, то і матимемо, що $p = -\varepsilon$. Наочно представити такий стан можна, якщо уявити собі деформоване суцільне середовище, що зазнає всебічного розтягування. Зауважимо, що в літературі часто замість терміна фізичний вакуум вживається вираз «темна енергія». Однак треба розуміти, що, строго кажучи, він є некоректним, бо енергія це лише одна з кількісних характеристик тієї чи іншої фізичної форми матерії.

Підставляючи згадані рівняння стану у співвідношення (6.14), одержимо: для пилоподібного середовища: $\varepsilon_d = \varepsilon_0 (a_0 / a)^3$ (d – dust – пил), для електромагнітного випромінювання: $\varepsilon_r = \varepsilon_0 (a_0 / a)^4$, для фізичного вакууму: $\varepsilon_\Lambda = \varepsilon_{\Lambda 0}$. У першому випадку результат пояснюється простою зміною концентрації частинок. У випадку випромінювання крім того пропорційно a змінюється довжина його хвилі та обернено пропорційно енергія кожного фотона.

Якщо підставити залежності $\varepsilon_d(a)$ в рівняння (6.12) і проінтегрувати його, то для пилоподібного світу одержимо такі залежності:

$$\begin{aligned} \frac{a_0}{2} (1 - \cos \eta) & \quad \frac{a_0}{2c} (\eta - \sin \eta) & \quad k = +1 \\ a = \frac{a_0}{4} \eta^2 & \quad t = \frac{a}{6c} \eta^3 & \quad k = 0 \\ \frac{a_0}{2} (\operatorname{ch} \eta - 1) & \quad \frac{a_0}{2c} (\operatorname{sh} \eta - \eta) & \quad k = -1 \end{aligned} \quad (6.15)$$

де η – безрозмірний (так званий *конформний час*), зв'язаний з фізичним часом t співвідношенням $cdt = ad\eta$. Тепер неважко знайти і залежності від часу для густини енергії та параметра Хаббла. Зокрема, для плоского світу ($k = 0$) $H = (2/3)t^{-1}$, тобто за порядком величини обернене значення H дорівнює вікові Всесвіту. Щодо густини енергії, то широко застосовується її безрозмірне значення $\Omega = \varepsilon / \varepsilon_{cr}$. Аналогічні формули

одержуються, якщо скористатися рівнянням стану для випромінювання $p = \varepsilon/3$. При цьому для $k = 0$ масштабний фактор $a = \sqrt{2a_0ct}$, а параметр Хаббла $H = 1/2t^{-1}$.

У розглянутих двох моделях звертає на себе увагу те, що при $t \rightarrow 0$ густина енергії прямує до нескінченності. Проте ця незручність знімається тією обставиною, що ЗТВ є класичною теорією відносно квантової фізики, тобто може застосовуватися лише тоді, коли розмір Всесвіту (значення a) вже не є мікроскопічним у розумінні необхідності застосовувати для його опису квантові закономірності. Однак у цих моделях з'являються нові парадокси. Насамперед, це *парадокс горизонту*, який полягає в тому, що за час існування Всесвіту світло встигає розповсюдитися на відстань меншу, ніж його розмір (ця відстань є так званий *космологічний горизонт* або *горизонт подій* $l_g = ct$). Це означає, що у Всесвіті є області, між якими неможливий обмін енергією та інформацією. Тобто такі області є причинно не пов'язаними між собою. А в цьому разі стає незрозумілим те, як же увесь Всесвіт у цілому може бути однорідним та ізотропним.

Цей парадокс знімається таким чином. Якщо підставити в (6.12) рівняння стану фізичного вакууму, то при $k = 0$ матимемо, що

$$a = a_0 e^{Ht}, \quad (6.16)$$

де $H = c/a_0$. Якщо вважати, що на певній, достатньо ранній стадії еволюції, вся матерія знаходилася у стані фізичного вакууму, то надзвичайно швидке розширення Всесвіту за експоненціальним законом виключає парадокс горизонту. Ця стадія еволюції Всесвіту отримала назву *інфляційної стадії*. Назва ця пов'язана з тим, що за таким же законом розвивається і грошова інфляція, якщо їй не протистоять певні антиінфляційні процеси.

Цій інфляційній стадії передувала стадія, коли Всесвіт у цілому був одночасно і гравітуючим, і квантовим. Ця *планківська стадія* вивчається *квантовою космологією*, яка останнім часом активно розвивається. Одним з важливих її висновків є можлива множинність всесвітів, які виникають з квантових флуктацій у первинному квантовому всесвіті. Сукупність таких всесвітів отримала назву *мультиверсуму* на протипагу нашому *універсуму*.

На сучасному етапі розвитку Всесвіту середня густина енергії пилоподібної речовини (зір) ε_d перевищує густину енергії випромінювання ε_r десь у 10^8 – 10^9 разів. Це зв'язано з тим, що густина енергії випромінювання зір та інших випромінюючих об'єктів швидко (як r^{-2}) спадає з віддаленням від джерела випромінювання, крім того значну частину

об'єму Всесвіту складають відносні пустоти між стінками комірок його великомасштабної структури. А тому основний внесок в енергію випромінювання вносить реліктове випромінювання, яке хоч і має зараз низьку температуру, але більш-менш рівномірно заповнює весь простір, і відповідно, має малу густину енергії. Тому сучасний етап еволюції Всесвіту отримав назву *стадії речовини*.

Відношення густин $\varepsilon_r / \varepsilon_d$ з часом буде ще більше зменшуватися. Однак, якщо йти в минуле Всесвіту, то це відношення навпаки буде збільшуватися і в певний момент дорівнюватиме одиниці, а в ще ранню епоху почне переважати за вкладом у повну густину саме енергія випромінювання. У цей час Всесвіт проходив *стадію випромінювання*. Так вимальовується наступна послідовність подій у релятивістській космології: інфляційна стадія \rightarrow стадія випромінювання \rightarrow стадія речовини.

Але як ця теоретична схема співвідноситься із спостереженнями? Для визначення параметра Хаббла, а відтак і величини Ω , і знаку кривизни простору k , використовується залежність $m = m(z)$, або *космологічний тест* «зоряна величина – червоне зміщення». Для одержання залежності $m(z)$ треба узагальнити основну формулу зоряної астрономії глави 2 на випадок нестационарної і неплоскої метрики простору-часу і знайти зв'язок між червоним зміщенням z і характеристиками цієї метрики. Якщо зробити це (докладніше [22]), то матимемо:

$$m = 5 \lg \left\{ qz + (q - 1) \left(\sqrt{1 + 2qz} - 1 \right) \right\} / q^2 + M - 5 \lg H + 5 \lg c, \quad (6.16)$$

де *параметр сповільнення* q – це безрозмірне прискорення масштабного фактора, взяте з протилежним знаком, тобто $q = -\ddot{a} / aH^2$. Для ери речовини $q = -\Omega / 2$. Видима зоряна величина позагалактичного об'єкта і його червоне зміщення визначаються досить впевнено, а от у цілому застосування формули (6.16) викликало протягом багатьох десятиліть великі складнощі. Якщо як такі об'єкти використовувалися, наприклад, цефеїди, це були близькі галактики, то значення z і відхилення формули (6.16) від основної формули зоряної астрономії теж були ще дуже малі. Для більших відстаней і більших значень z доводилося оцінювати світність або наднових зір або галактик у цілому. Це вдавалось зробити лише з великими похибками. Тому не вдавалось знайти надійні значення параметра Хаббла в сучасну епоху, ці значення лежали в межах від 50 до 100 Мпк/км/с. Більше того, не вдавалось навіть визначити знак кривизни простору-часу нашого Всесвіту. Ситуація почала суттєвим чином змінюватися тільки на межі ХХ і ХХІ століть.

6.3. Стандартна космологічна модель

До 1999 р. була виконана програма спостережень наднових зір типу Ia, для яких до того часу була розроблена теорія їхніх спалахів. Це дозволило досить надійно визначати їхню абсолютну зоряну величину. Вдалося використати ці спостереження для застосування тесту «зоряна величина – червоне» зміщення до значень $z \approx 0.7$. Результат виявився несподіваним – зараз наш Всесвіт розширюється прискорено, в той час як у вищерозглянутих моделях ери випромінювання та ери речовини він при будь-якому знакові кривизни розширюється сповільнено. Пізніше цей результат було підтверджено незалежними аналогічними дослідженнями, а також іншими методами. Найважливішим таким методом стало дослідження спектра кутових флуктуацій температури реліктового випромінювання, який також залежить від параметрів космологічної моделі. Одночасно вдалося уточнити сучасне значення параметра Хаббла і встановити, що в межах похибок спостережень метрика простору нашого Всесвіту є плоскою, тобто вважати, що значення $k = 0$. Все це привело до побудови нової моделі Всесвіту, яка отримала назву сучасної *стандартної космологічної моделі* (СКМ). З одного боку, прискорене розширення Всесвіту може бути забезпечене певним внеском енергії фізичного вакууму в повну густину енергії. З іншого, існує у Всесвіті й пилоподібна речовина. Тобто ця модель повинна бути *двокомпонентною*, і залежність густини енергії від масштабного фактора записати у такому вигляді:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \left[\Omega_{\Lambda 0} + \Omega_{d0} \left(\frac{a_0}{a} \right)^3 \right], \quad (6.17)$$

де ε_0 – повна густина енергії в сучасну епоху, Ω_{Λ} і Ω_d – відносні густини фізичного вакууму та пилоподібної матерії. Підставляючи (6.17) у рівняння (6.12), з урахуванням того, що розглядається плоска модель і повна густина дорівнює критичній густині (6.13), одержимо, що

$$H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = H_0^2 \left[\Omega_{\Lambda 0} + \Omega_{d0} \left(\frac{a_0}{a} \right)^3 \right]. \quad (6.18)$$

Інтегруючи (6.18) від 0 до a , знайдемо, що масштабний фактор

$$a = a_0 \sqrt[3]{\frac{\Omega_{d0}}{\Omega_{\Lambda 0}}} \operatorname{sh}^{2/3} \left(\frac{3}{2} H_0 \sqrt{\Omega_0} t \right). \quad (6.19)$$

Відповідно, параметр Хаббла

$$H = H_0 \sqrt{\Omega_{\Lambda 0}} \operatorname{cth} \left(\frac{3}{2} H_0 \sqrt{\Omega_0 t} \right). \quad (6.20)$$

Співставлення моделі «вакуум + пилоподібна матерія» з даними спостережень привели до таких значень параметрів сучасної стандартної космологічної моделі: $\Omega = \Omega_{\Lambda} + \Omega_d = 1$; $\Omega_{\Lambda} = 0.7$; $\Omega_d = 0.3$; $H_c = 70$ Мпк/км/с (див. рис. 6.2). Однак суттєва проблема полягає в тому, що речовина, спостережна у Метагалактиці за її випромінюванням, може давати внесок у значення густини енергії лише порядку перших процентів. Вважається, що це 4 % (може дещо більше за рахунок корон галактик, які ми не спостерігаємо через їхню малу яскравість). Оскільки основний внесок у ці проценти вносять протони і нейтрони, які належать до баріонів, то ця речовина зараз отримала назву *баріонної матерії*. А що ж дає приблизно чверть внеску у загальну густину енергії в сучасному Всесвіті? Фізична природа цієї матерії, яку називають *темною матерією*, – це чи найголовніша проблема сучасної астрономії. Це повинні бути досить масивні нейтральні частинки, які практично не взаємодіють з баріонною матерією та випромінюванням.

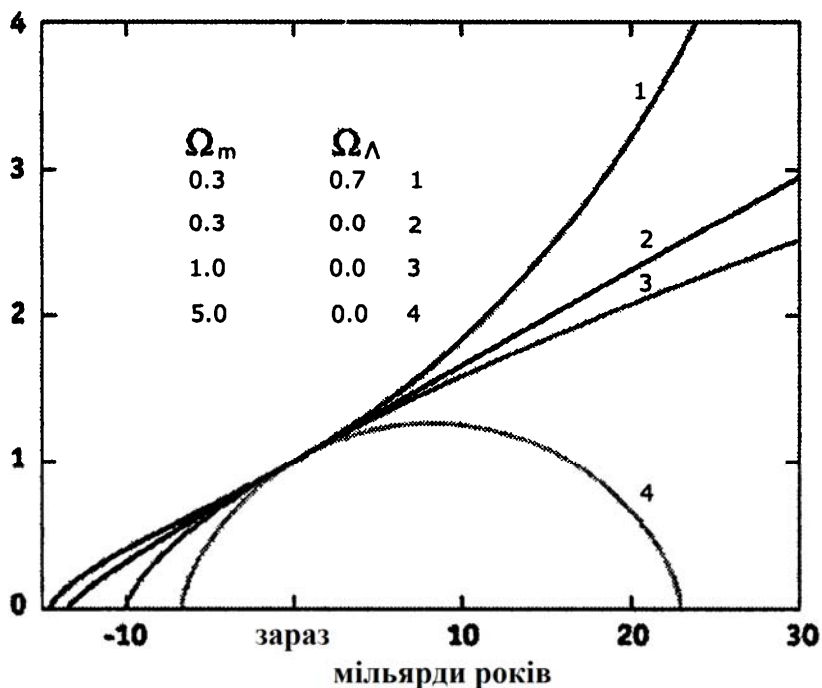


Рис. 6.2. Залежність масштабного фактора від часу в різних космологічних моделях $\Omega_m \rightarrow \Omega_d$

Важливо з’ясувати, як ця темна матерія розподілена у просторі – більш-менш рівномірно, як реліктове випромінювання, або зосереджена в галактиках та їхніх скупченнях. Є вже перші результати, які одержані за

допомогою методу гравітаційного лінзування, що свідчать на користь другого варіанта.

Формули (6.18) – (6.21) та основні параметри СКМ дозволяють розрахувати і хід зміни величин, що характеризують миттєвий стан Всесвіту

Зауважимо, що та обставина, за якою прискорене розширення Всесвіту пов'язується саме з фізичним вакуумом, є лише припущенням, хоча і цілком природнім. Однак це дозволяє розробляти й інші космологічні моделі. Це модель з *квінтесенцією*. Таку назву мають гіпотетичні скалярні поля з рівнянням стану $p = w\varepsilon$, де $-1 < w < 1/3$, які також забезпечують прискорений темп розширення. Це моделі, в яких співвідношення між густинами різних форм матерії змінюються з часом не тільки внаслідок різної залежності $\varepsilon(a)$, а і в силу переходу в процесі еволюції Всесвіту одного виду матерії в інший, зокрема «темної енергії» в темну матерію

У зв'язку з тим, що густина випромінювання спадає з часом швидше, ніж густина пилоподібної матерії, був етап в еволюції Всесвіту, коли густина випромінювання переважала. На тому етапі треба його еволюцію описувати моделлю «фізичний вакуум + випромінювання».

Нарешті, одне історичне зауваження. Ще А. Ейнштейн помітив, що рівняння ЗТВ (6.6) можна узагальнити, додавши до нього доданок виду $\Lambda \delta_k^i$ – так званий Λ -член. Згодом виявилось, що введення цього Λ -члена еквівалентно врахуванню густини енергії фізичного вакууму. Таким чином, доробок піонерів релятивістської космології з Λ -членом став тепер у нагоді. При цьому величина $\Lambda = 8\pi G \varepsilon_0 / c^4 = 3/a_0^2$.

Останнім часом у науковому напрямі на стику космології раннього всесвіту і фізики надвисоких енергій (який дістав назву *космомікрофізики*) набуває все більшого значення *теорія суперструн*. Згідно з уявленнями цієї теорії, елементарні частинки є одновимірними структурами складної форми, різні моди коливань яких і визначають різні властивості цих частинок. Префікс «супер» пов'язаний з тим, що теорія має встановити симетрію між двома основними класами частинок – ферміонами і бозонами. Дуже важливо також, що в цій теорії, квантовій за своєю суттю, природним чином з'являється і гравітаційна взаємодія. Застосування теорії суперструн у космології дає ще один цікавий результат – квантовий всесвіт породжує з більшою ймовірністю саме тривимірні світи.

6.4. Фізична еволюція Всесвіту

Першим кроком у розробці проблеми фізичної еволюції Всесвіту, що розширюється, була принципово важлива ідея, висунута в 1946 р. Г. А. Гамовим. Він доповнив розглянуті вище метричні характеристики

еволюції Всесвіту енергетичною. При цьому він перейшов від середньої густини енергії до енергії однієї частинки, тобто до *середньої температури* Всесвіту, яка при розширенні Всесвіту зменшується. Головна фізична суть ідеї Гамова полягає ось у чому. Певний фізичний процес (наприклад, іонізація атомів) потребує певної енергії. Тому при температурі, значно більшій, ніж ця енергія, відповідний процес та йому зворотний будуть протікати практично з однаковою швидкістю і не будуть змінювати стан Всесвіту. Але як тільки температура при розширенні Всесвіту стане менше характерної температури даного процесу, то з двох протилежних процесів буде здійснюватися лише той, який веде до більш стійкого стану з меншою потенціальною енергією. А це змінить фізичний стан Всесвіту, надаючи йому якісно нові властивості. Таким чином, послідовність значень енергій таких процесів визначає відповідні етапи фізичної еволюції Всесвіту. Ці характерні енергії – це, насамперед, енергії спокою нуклонів та електронів, енергія зв'язку частинок в атомному ядрі, енергія іонізації та рекомбінації атомів. Усе це означало наповнення релятивістської космологічної моделі фізичним змістом та появу *моделі гарячого Всесвіту*.

Але при цьому виникають такі питання методичного плану. Перше полягає ось у чому. В якій послідовності розглядати процес зміни фізичного стану Всесвіту? Йти від сучасного його стану в бік більших середніх енергій (температур), тобто в його минуле, чи розглядати цей процес у тій послідовності, в якій він насправді відбувався у нашому Всесвіті? Але в будь-якому разі виникає ще таке питання. До яких значень енергій ми можемо йти (або з яких починати свій розгляд)? Одне обмеження утворюється з меж застосовності ЗТВ, якими є планківські значення часу, розміру та маси:

$$t_{Pl} = \sqrt{\frac{Gh}{2\pi c^3}} \approx 10^{-43} \text{ с}; \quad l_{Pl} = \sqrt{\frac{Gh}{2\pi c^5}} \approx 10^{-33} \text{ см}; \quad m_{Pl} = \sqrt{\frac{ch}{2\pi G}} \approx 10^{-5} \text{ г}. \quad (6.22)$$

Із значення m_{Pl} та співвідношення між масою та енергією спокою з'являється значення $T_{\max} \approx 10^{19} \text{ ГеВ}$. Як видно з попереднього запису, зручно виражати температуру, тобто середню енергію частинок, в електрон-вольтах. У зв'язку з цим нагадаємо, що $1 \text{ еВ} \approx 10^4 \text{ К} \approx 10^{-12} \text{ ерг}$. З іншого боку, ця межа повинна визначатися тими значеннями енергій, до яких ми маємо надійно встановлену, перевірену експериментом теорію у фізиці елементарних частинок. Зараз ці значення сягають величин $T_{\text{exp}} \geq 10^2 \text{ ГеВ}$. Ці енергії отримані в прискорювачах на зустрічних пучках, що дозволило перевірити теорію електрослабкої взаємодії (встановити існування проміжних (або векторних) бозонів). Це, у свою чергу, дозволило перейти до спроб побудови теорії, що описує об'єднання електро-

слабкої та сильної взаємодій, або так званого «великого об'єднання» (grand unification – G.U.), а потім і до побудови контурів власне єдиної теорії поля – теорії об'єднання трьох вказаних вище взаємодій з гравітаційною або *супероб'єднання* (superunification – S.U.).

З точки зору сучасних уявлень, адрони, які утворюються з кварків, уже не є, строго кажучи, елементарними. Тому вводиться поняття про істинно елементарні (або *фундаментальні*) частинки. З 12 фундаментальних частинок – лептонів та кварків і квантів взаємодій між ними можна побудувати таку таблицю:

ν_e	ν_μ	ν_τ	γ
e	μ	τ	g
u	c	t	Z
d	s	b	W

Перші три стовбці цієї таблиці утворюють групи частинок із всезростаючою масою або, як кажуть, *послідовні покоління* фундаментальних ферміонів. Останній стовбець – бозони. Зверніть увагу на те, що зараз у нашому світі практично відіграють роль лише частинки першого покоління. З кварків *u* і *d* побудовані нуклони, а з нуклонів і електронів – вся речовина. Електронне нейтрино необхідне для здійснення ядерних реакцій – джерел зоряної енергії. Але це, мабуть, було не так у гарячому Всесвіті, коли важливою була і роль більш масивних, більш енергійних частинок.

Якщо тепер, з точки зору наведеної на початку цього підрозділу ідеї Г. А. Гамова, підсумувати найважливіші події в еволюції Всесвіту і вишикувати їх у порядку зменшення відповідних енергій, то сформується така послідовність подій:

- порушення симетрії супероб'єднання – відділення гравітаційної взаємодії, початок інфляційної стадії розширення Всесвіту (10^{22} MeV – 10^{-43} с);
- фазовий перехід у фізичному вакуумі з високоенергетичного стану в низькоенергетичний, порушення симетрії великого об'єднання – відокремлення сильної взаємодії, виникнення ферміонів та бозонів, початок ери випромінювання (10^{18} MeV – 10^{-35} с);
- розділення електрослабкої взаємодії на слабку та електромагнітну (10^5 MeV – 10^{-10} с);

- анігіляція нуклонів та антинуклонів, виникнення баріонної асиметрії, відділення баріонів від лептонів та випромінювання ($1.3 \cdot 10^3 \text{ MeV} - 10^{-6} \text{ c}$);
- анігіляція мюонів та антимюонів і відділення нейтрино від лептонів та випромінювання ($10^2 \text{ MeV} - 10^{-4} \text{ c}$);
- розділення нуклонів на протони та нейтрони ($1.3 \text{ MeV} - 0.6 \text{ c}$);
- анігіляція електронів та позитронів ($0.5 \text{ MeV} - 4 \text{ c}$).

Для того, щоб пов'язати вищевказані значення енергій з часом, коли Всесвіт мав відповідну температуру, зауважимо, що йдеться про досить ранні етапи еволюції Всесвіту, коли ще переважала густина енергії випромінювання. А з формул, які наведені на стор. 109, випливає, що ця густина

$$\varepsilon_r = \frac{3c^2}{32Gt^2}, \quad (6.23)$$

а, з другого боку, за законом Стефана–Больцмана ця ж густина дорівнює

$$\varepsilon_r = 4\sigma T^4 / c, \quad (6.24)$$

де σ – стала Стефана–Больцмана. Виключаючи густину ε_r , одержимо, що середня температура Всесвіту

$$T = \sqrt[4]{\frac{3c}{128G\sigma}} \frac{1}{\sqrt{t}}, \quad (6.25)$$

а обчислюючи коефіцієнт у (6.25), неважко переконатися, що

$$T(\text{MeV}) \approx \frac{1}{\sqrt{t}} (\text{c}). \quad (6.26)$$

Застосовуючи (6.26), одержимо вказані вище часи подій, які якісно змінюють стан та склад матерії у Всесвіті. Після останньої з них лишаються нейтрони (n), протони (p) і відповідна їм кількість електронів (e), що знаходяться в рівновазі з фотонами (γ). Нейтрино (ν), які після анігіляції мюонів майже припиняють взаємодіяти з іншими частинками, вже не знаходяться з ними в рівновазі. Тобто лишаються як раз ферміони першого покоління та бозони, що забезпечують взаємодії між ними. Крім фотонів, це глюони (g) та векторні бозони (W^\pm, Z^0).

Суттєвим питанням при більш детальному розгляді вищенаведеної схеми фізичної еволюції Всесвіту є таке: чому при анігіляції нуклонів та антинуклонів не всі нуклони зникли, а певна їх кількість, саме та, що утворює нині існуючу речовину, збереглася. Це так звана проблема *баріонної асиметрії Всесвіту*. З одного боку, процеси, які спостерігаються на Землі, в Сонячній системі, в Галактиці, у взаємодіючих галактиках, примушують дійти до висновку, що в сучасну епоху антиречовини

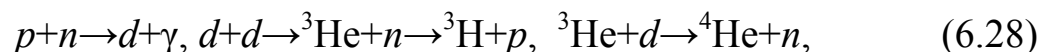
(за виключенням відносно незначної кількості в космічних променях) у Всесвіті нема. З іншого боку, якби якимось чином різниця між кількістю баріонів та антибаріонів внаслідок початкових умов колись й існувала, то вона повинна була б зникнути під час інфляційної стадії розширення Всесвіту. Таким чином, баріонна асиметрія повинна була виникнути наприкінці того етапу еволюції Всесвіту, коли нуклони знаходилися в стані термодинамічної рівноваги з випромінюванням. З'ясуємо, яка ж саме кількість нуклонів збереглася.

Концентрація фотонів дорівнює інтегралу від функції розподілу фотонів (функції Планка), поділеної на енергію одного фотона, тобто

$$n_{\gamma} = \frac{8\pi}{c^3} \int \nu^2 (e^{h\nu/kT} - 1)^{-1} d\nu = 60.4(kT/hc)^3. \quad (6.27)$$

При сучасній температурі реліктового випромінювання це складає $n_{\gamma} \approx 500 \text{ см}^{-3}$. Сучасна кількість нуклонів дорівнює $n_n = \rho_d/m_n$. З урахуванням ступеня невизначеності середньої густини речовини ступінь баріонної асиметрії $\beta = n_n/n_{\gamma} \approx 10^{-8} - 10^{-10}$. Далі з часом ця величина не змінюється. Баріонна асиметрія пояснюється тим, що при анігіляції нуклонів і анти-нуклонів утворюються як проміжні частинки X та \bar{X} -бозони. А ймовірності реакцій за їхньою участю мають дещо різну ймовірність. Це, в свою чергу, пов'язано з тим, що при збереженні СРТ-симетрії, симетрії С (зарядова) і РТ (просторово-часова) окремо можуть порушуватися.

Наступна важлива подія – це утворення з нейтронів, що залишилися, та відповідної кількості протонів більш важких ядер. Температура, при якій це стає можливим, пропорційна $B/(A-1)$, де B – енергія зв'язку ядра, A – його атомний номер. Для ядер, що беруть участь в утворенні ядра гелію He^4 за реакціями



відповідні температури такі: $d - 0.08 \text{ MeV}$, ${}^3\text{H} - 0.15 \text{ MeV}$, ${}^3\text{He} - 0.13 \text{ MeV}$, ${}^4\text{He} - 0.36 \text{ MeV}$. Найменша енергія зв'язку у ядер дейтерія, тому саме температура його утворення визначає час початку всього процесу $t \approx 100-200 \text{ с}$. Наступні стадії утворення ядер гелію протікають досить швидко за 1–3 с. Наявна на цей час кількість нейтронів зв'язується в α -частинках і немовби «заморожується». Вміст первинного гелію становить 25-30 % (залежно від точного значення густини речовини), що близько до його сучасної кількості у Всесвіті. Цей факт має фундаментальне значення, він є одним з основних спостережних підтверджень моделі гарячого Всесвіту. Має місце і залишення певної кількості дейтерію з досить сильною залежністю її від густини речовини. Тому визначення кількості ${}^2\text{H}$ космологічного походження має велике значення.

На проміжку часу від 10^{-35} с до 10^{-10} с основна доля речовини була зосереджена в нуклонах та інших адронах, що супроводжують їх перетворення, тому ця стадія фізичної еволюції Всесвіту отримала назву *адронної ери*. Її наслідувала *лептонна ера* (від 10^{-10} с до 2 с), яка закінчилася анігіляцією електронів та позитронів. До закінчення перших двох трьох хвилин сформувався (за виключенням ядер важких елементів) сучасний елементний склад Всесвіту. Але утворення атомів ще було неможливе, бо вони відразу ж руйнувалися фотонами реліктового випромінювання, енергія яких була ще значно більше енергії іонізації атомів водню та гелію. Світ у цей час являв собою воднево-гелійову плазму, що існувала завдяки взаємодії з випромінюванням, це була радіаційно-домінована плазма. А відповідний етап еволюції Всесвіту – це ера радіаційно-домінованої плазми, або *фотонна ера*.

Продовжувалася фотонна ера доти, поки температура Всесвіту не впала до значень, менших за енергію іонізації, тобто кількох електрон-вольт (або ≈ 4000 К). Тільки тоді в час $t \approx 10^{10}$ с відбулася рекомбінація водню та гелію – почалася *атомна ера* еволюції нашого Всесвіту. Якісна відмінність атомної ери – ери нейтральної речовини від попередніх – це різке ослаблення взаємодії речовини з випромінюванням. Порушується термодинамічна рівновага між ними, з'являється можливість росту флуктуацій речовини у власному гравітаційному полі – починається етап формування великомасштабної структури Всесвіту, етап утворення протоскупчень галактик. Подальша послідовна фрагментація протоскупчень та гравітаційне стиснення цих фрагментів приводить до утворення галактик та більш дрібних зоряних систем із зір першого покоління.

Усе викладене вище підсумовано у вигляді схеми, наведеної в Додатку (табл. 9). На цій схемі вказані (в логарифмічній шкалі) зміни з часом метричних характеристик Всесвіту – масштабного фактора та відносної швидкості його зміни – параметра Хаббла, зміни середньої густини матерії та її температури. Вказані етапи формування сучасної системи фундаментальних взаємодій та якісні зміни у складі речовини. Зауважимо, що застосування логарифмічної шкали часу доцільне не лише у зв'язку з великим діапазоном його значень. Справа в тому, що на ранніх стадіях еволюції Всесвіту завдяки малим його масштабам достатньо і малих часів для істотних змін у стані всього Всесвіту.

Як відомо, ще одним підтвердженням моделі «гарячого Всесвіту» є наявність *реліктового випромінювання*. Велика сукупність спостережень показує, що воно є планківським з температурою $T_{rc} = 2.7 \text{ К} \pm 0.3 \text{ К}$. Слід однак відзначити, що з поверхні Землі можна спостерігати тільки сантиметрову довгохвильову частину цього випромінювання. Ще одним додатковим засобом вивчення реліктового випромінювання з Землі є

дослідження розподілу міжзоряних молекул за їх станами, збудженими цим випромінюванням. Те, що розподіл молекул ціану CN близький до такого, що виникає під впливом випромінювання з температурою близько 3 K, було відомо давно, але своє пояснення цей факт одержав лише після відкриття реліктового випромінювання.

Це випромінювання має бути ізотропним лише у супутній системі координат, яка розширюється в процесі еволюції Всесвіту. У системі координат, що рухається відносно супутньої системи, виникатиме крупномасштабна анізотропія цього випромінювання, обумовлена релятивістським ефектом Доплера. Вона визначається виразом:

$$T_{\text{robs}} = T_r \frac{1 - v \cos \theta}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}}, \quad (6.29)$$

де v – швидкість спостерігача відносно фонового випромінювання, а θ – кут між вектором швидкості та лінією візування. Спостереження вказують на наявність асиметрії у розподілі фонового випромінювання з амплітудою в 3.5 мК і максимумом в сузір'ї Лева та мінімумом у сузір'ї Водоля.

Нарешті, дуже важливою проблемою є питання про наявність та величину дрібномасштабних кутових флуктуацій у розподілі фонового випромінювання, бо вони несуть інформацію про просторові неоднорідності у суміші випромінювання та речовини в епоху рекомбінації речовини, коли речовина стала прозорою для випромінювання, і ці неоднорідності були вихідними для утворення сучасної структури Всесвіту. Виявлення цих флуктуацій дуже складна річ, бо їх треба виділити на тлі флуктуацій, обумовлених радіовипромінюванням як різного роду космічних об'єктів, так і земної атмосфери. Сукупність космічних і наземних експериментів дозволила все ж одержати кутовий спектр цих флуктуацій (рис. 6.3). Перший основний пік визначається відношенням розмірів причинно пов'язаних областей (тобто горизонту подій) в епоху рекомбінації і сучасну епоху з урахуванням доплерівського зсуву. Тобто його кутовий розмір $\theta_r \approx ct_r / (ct_c)(1 + z_k) \approx 2^\circ$, що відповідає розміру комірок великомасштабної структури Всесвіту. Наступні піки свідчать про наявність кореляції в напрямках акустичних коливань у плазмі в епоху рекомбінації. Наявність такої кореляції при спостереженнях у різних напрямках можлива, якщо всі флуктуації знаходилися в межах однієї причинно-пов'язаної області. А це узгоджується з існуванням інфляційної стадії в еволюції Всесвіту. Точне положення головного піка залежить від значення відносної густини енергії Ω . Суцільна крива на рис. 6.3 відповідає СКМ з $\Omega = 1 \pm 0.0015$. Почалися експерименти і з дослідження стану поляризації реліктового випромінювання – навіть саме визначення її

наявності та характеру (лінійна або кругова) дасть інформацію про природу первинних флуктуації, що виникли ще на інфляційній стадії. Лінійна поляризація буде вказувати на те, що джерелом цих флуктуацій є космологічні гравітаційні хвилі.

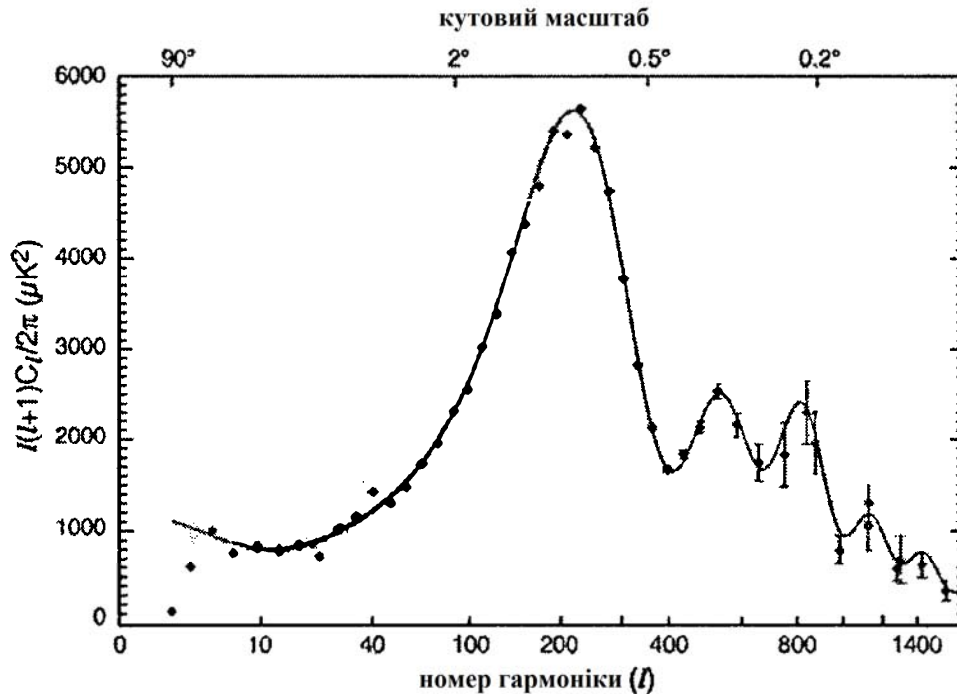


Рис. 6.3 Спектр флуктуацій реліктового випромінювання
 Номер кутової гармоніки (знизу) і відповідний їй кутовий масштаб (зверху)
 Перший пік поблизу гармоніки з $l \approx 200$ відповідає плоскій моделі

Таким чином, зараз відбуваються суттєві зміни в наших космологічних уявленнях, що має велике значення для розвитку астрономії і фізики.

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. Що таке космологічні моделі, яке вони мають значення?
2. Які космологічні моделі передували релятивістській космології?
3. У чому полягає принцип еквівалентності загальної теорії відносності (ЗТВ)?
4. Що таке метричний тензор?
5. Які величини пов'язує між собою основне рівняння ЗТВ – рівняння Ейнштейна?
6. У чому полягає основна фізична ідея ЗТВ?
7. У чому полягає довершений космологічний принцип і яке його підґрунтя?

8. Який зміст мають компоненти тензора енергії-імпульсу в гідродинамічному наближенні?
9. Що таке метрика Робертсона–Уокера?
10. До якого рівняння зводиться система рівнянь Ейнштейна для однорідного та ізотропного Всесвіту?
11. Що таке критична густина енергії?
12. Чому в космологічних моделях треба мати рівняння стану матерії та які рівняння стану застосовні в космології?
13. Що таке фрідманівські космологічні моделі та які в них виникають парадокси?
14. Що таке інфляційна стадія в еволюції Всесвіту?
15. Що таке стадії випромінювання та речовини і чому вони змінюють одна одну?
16. Який космологічний тест є основним і в чому полягають труднощі в його застосуванні?
17. Чому виникає необхідність у застосуванні двокомпонентної космологічної моделі?
18. Які параметри має сучасна стандартна космологічна модель (СКМ)?
19. У чому полягає некоректність терміну «темна енергія»?
20. Який характер буде мати асимптотично в майбутньому розширення Всесвіту в СКМ?
21. У чому полягає основна фізична ідея «гарячого Всесвіту» Г. А. Гамова?
22. Чому існує тісний зв'язок між космологією і побудовою єдиної теорії поля?
23. Які найважливіші події відбувалися у фізичній еволюції Всесвіту?
24. У чому полягає проблема баріонної асиметрії Всесвіту і які є шляхи її вирішення?
25. Які основні фізичні ери мали місце в еволюції Всесвіту?
26. Чому і коли стало можливим існування у Всесвіті нейтральних атомів?
27. Що таке реліктове випромінювання і які його характеристики на сучасному етапі еволюції Всесвіту?
28. Що лежить в основі дослідження первинних флуктуацій густини як передумови виникнення великомасштабної структури Всесвіту?

ЗАДАЧІ ДО ГЛАВИ 6

- 6.1. Знайти планківські значення довжини, часу, маси, густини, температури.

6.2. Виразити сучасне значення параметра Хаббла H_0 в обернених роках та в обернених секундах.

6.3. Знайти граничне значення параметра Хаббла в СКМ при $t \rightarrow \infty$.

6.4. Знайти асимптотичні вирази для залежності $a(t)$ у СКМ при $t \rightarrow 0$ і $t \rightarrow \infty$.

6.5. Знайти вік Всесвіту в СКМ.

6.6. Знайти вік Всесвіту в момент, коли сповільнене розширення змінилося на прискорене.

6.7. Знайти вік Всесвіту, коли густина випромінювання дорівнювала густині пилоподібної речовини.

6.8. Коли відбулося відокремлення нейтрино від випромінювання та пилоподібної матерії, температура Всесвіту дорівнювала $T_\nu \approx 1$ МеВ. Обґрунтувати твердження, що нейтрино не можуть бути відчутною складовою темної матерії.

6.9. Чого в сучасному Всесвіті більше – нуклонів чи фотонів?

ГЛАВА 7

ФІЗИКА СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ

7.1. Склад Сонячної системи

П'ять видимих неозброєним оком *планет* (блукаючих), що рухаються відносно зір, були відомі людству з глибокої давнини. У 1543 р. М. Коперник «додав» до них шосту планету – Землю. З розвитком телескопічної астрономії були відкриті ще три планети: Уран (У. Гершель, 1781 р.), Нептун (Дж. Адамс, У. Левер'є, Й. Галле, 1846 р.) та Плутон (К. Томбо, 1930 р.) і великі *супутники планет*. У 1801 р. була відкрита перша *мала планета* Церера (Дж. Піацці). З остаточним доведенням позаземної природи метеорних явищ та комет і відкриттям нових астероїдів почалось формування уявлення про комплекс *малих тіл Сонячної системи*, зокрема, про *головний пояс астероїдів*. Потім додалися знання про *міжпланетне середовище* – метеорну речовину, газ, пил та магнітне поле. Такою уявлялася картина Сонячної системи протягом майже всього ХХ століття.

Застосування ракетно-космічної техніки і прогрес наземних засобів спостережень (великі телескопи-рефлектори, ПЗЗ-приймачі випромінювання, нові методи обробки спостережень) певним чином змінили ці уявлення. Були відкриті об'єкти поза межами орбіти Нептуна, сукупність яких отримала назву *транснептунові об'єкти* – ТНО. Використовується й інша їх назва – *пояс Койпера*, за ім'ям астронома Дж. Койпера, який передбачив їх існування ще в середині ХХ століття. Значно зросла кількість знайдених супутників планет-гігантів, були відкриті їхні кільця, окрім кільця Сатурна. У зоні планет-гігантів були відкриті тіла, що сполучають зовнішні ознаки і астероїдів, і комет, так звані *кентаври*. Кількість відкритих астероїдів сягає вже сотні тисяч. Хоча перші малі планети, що можуть наближатися до Землі, були відкриті вже давно, зараз кількість відомих таких об'єктів значно зросла.

Явна відмінність Плутона від інших планет і відкриття поясу Койпера поставили питання про статус Плутона. І у 2006 р. після надійного встановлення того, що серед ТНО є тіло з масою і розміром подібне до Плутона (Еріда), в класифікацію тіл Сонячної системи був введений клас

планет-карликів. Це тіла, які, як і *великі планети*, мають: 1) навколо-сонячну орбіту і 2) настільки великі розміри та масу (хоча й менші, ніж великі планети), що їх речовина стає деформованою в їхньому власному гравітаційному полі, і вони приймають форму, близьку до сферичної. Але ще одна відмінність планет-карликів від великих планет полягає в тому, що в області, де розташовані їхні орбіти, рухаються інші тіла зіставних розмірів. І є ймовірність зіткнення з ними, внаслідок чого планета-карлик може зазнати якихось значних змін або навіть зруйнуватися. Спочатку до планет-карликів були віднесені: найбільший астероїд Церера, сам Плутон і Еріда. Зараз відомо вже п'ять планет-карликів (табл. 6 Додатку).

Загальним для великих планет і планет-карликів є деформованість їх речовини у власному гравітаційному полі. Це впливає не тільки на їхню форму, але і приводить до того, що вони починають еволюціонувати, відбувається диференціація їх речовини й утворення різних оболонок тіла— ядра, мантії, кори, атмосфери. Але ж це стосується і найбільших супутників планет, насамперед, Місяця, галілеєвих супутників Юпітера, Титана. Їхня будова в принципі не відрізняється від будови планет земного типу і планет-карликів. Тому доцільно ввести поняття про *планетні тіла* як клас космічних тіл певної фізичної природи, незалежно від характеру їхнього орбітального руху. Це, до речі, відкриває шлях і до питання про існування планетних тіл у міжзоряному просторі. Перші такі тіла вже знайдені за допомогою метода гравітаційного мікролінзування.

Щодо фізико-хімічного складу тіл Сонячної системи, то всі речовини, що її складають, доцільно розділити на три групи залежно від їхнього агрегатного стану на різній відстані від Сонця (при нормальному тиску). Перша група – речовина, яка знаходиться у твердому стані на будь-якій відстані від Сонця (мається на увазі, починаючи приблизно з відстані Меркурія від Сонця), це *тверда компонента* (Т). Це метали, окисли металів і силікати – окисли кремнію та солі кремнієвої кислоти. Друга група має узагальнюючу назву «льоди». Вони залежно від відстані від Сонця можуть перебувати у будь-якому агрегатному стані – твердому, рідкому та газоподібному. Це *льодяна компонента* (Л). До льодів належать вода, вуглекислота, аміак, метан. Нарешті, третю групу утворюють речовини, що на будь-якій відстані від Сонця є газами, це *газова компонента* (Г) – водень і гелій. Головну долю маси Сонячної системи (навіть не враховуючи Сонця) складає газова компонента, з неї в основному складаються Юпітер і Сатурн. Льоди утворюють переважну масу Урана і Нептуна, більшості супутників планет-гігантів і транснептунових тіл. Тверда компонента представлена в планетах земного типу, планетах-карликах, астероїдах та ядрах планет-гігантів, в ядрах комет. Таку залежність хімічного складу від відстані до центрального тіла

демонструють і галілеєві супутники Юпітера: силікатна Іо, силікатна Європа, але вкрита льодяною корою, Ганімед і Калісто, що мають льодяні кору і мантію.

7.2. Фізика планет

7.2.1. Фізика планетних тіл

Деякі важливі характеристики планетних тіл Сонячної системи наведені в Додатку (табл. 6 та 7). У табл. 6 відсутні дані про періоди їх орбітального та осьового обертання, ексцентриситети і нахилення орбіт до площини екліптики. Періоди можуть бути обчислені за наявними в таблиці даними. Щодо ексцентриситетів орбіт великих планет, то більш-менш високі їх значення лише у Меркурія (0.206), Марса (0.093) і Нептуна (0.086). У інших планет вони не перевищують 0.05. Нахилення орбіт великих планет не перевищують 3.5° , крім Меркурія (7°). У планет-карликів розкид значень ексцентриситетів і нахилень значно більший, від 0.078 та 10.6° (Церера) до 0.42 і 44° (Еріда). У супутників планет найбільший ексцентриситет має Місяць (0.055), приблизно 0.03 він у Титана, Япета і Аріеля. В інших не перевищує 0.01 . Нахилення орбіти до площини екватора планети тільки у Япета дорівнює 7.5° . Виключенням є Місяць і Харон. Площина орбіти Місяця стабілізується збурюючою дією Сонця на його рух, бо він є найближчим до Сонця супутником і одночасно найбільш віддаленим від своєї планети (в долях її радіуса). Нахилення орбіти Місяця до екліптики 5.15° . Відповідно, за рахунок прецесії лінії вузлів місячної орбіти з періодом у 18.6 років кут нахилу її до земного екватора змінюється від 18.5° до 28.5° . Харон має обернене осьове обертання, його орбіта нахилена до площини екватора планети на 96.5° .

Усі великі супутники планет обертаються синхронно, тобто їхній період осьового обертання дорівнює орбітальному. Період осьового обертання Меркурія знаходиться в резонансі 2:3 з його орбітальним періодом, а осьове обертання Венери прийшло в подвійний резонанс з орбітальними періодами самої планети і Землі зі співвідношенням кутових швидкостей $\omega = 4n_B - 5n_3$. Усе це є результатом припливної взаємодії внаслідок скінченних розмірів відповідних тіл Сонячної системи. При цьому деформованість планетної речовини (*припливне тертя*) приводить до перерозподілу кінетичного моменту між його орбітальними й осьовими складовими. Унікальною є і ситуація з площиною обертання Урана, яка нахилена до площини його орбіти під кутом у 82° .

Перейдемо до питання про форму планетних тіл. В основі відповідної теорії лежить *принцип гідростатичної рівноваги*, за яким сила тяжіння як векторна сума сил гравітаційної та відцентрової повинна врівноважуватися

градієнтом тиску. Звідси випливає, що поверхні постійного тиску (ізобари) і постійної густини (ізоденси) повинні співпадати з екіпотенціальними поверхнями сили тяжіння. Врівноважена фігура планети повинна мати осьову симетрію. Якщо ввести координати точки на поверхні планети r і θ (полярну відстань), згадати, що потенціал відцентрової сили $Q = \omega^2 r^2 \cos^2 \theta / 2$ і, нарешті, взяти гравітаційний потенціал у вигляді (1.12), то, прирівнюючи потенціал сили тяжіння в довільній точці його значенню на екваторі, одержимо в першому наближенні таке *рівняння фігури планети*:

$$\frac{a}{r} - 1 + \left[\left(\frac{a}{r} \right)^3 P_2(\cos \theta) + \frac{1}{2} \right] J_2 + \left[\left(\frac{r}{a} \right)^2 \frac{1 - P(\cos \theta)}{3} - \frac{1}{2} \right] q = 0, \quad (7.1)$$

де, нагадаємо, a – екваторіальний радіус планети, а *параметр обертання*

$$q = \frac{\omega^2 a^3}{GM} \quad (7.2)$$

– це відношення відцентрової сили до гравітаційної на екваторі. Розв’язок цього рівняння ще у XVII ст. знайшов А. Клеро у такому вигляді:

$$r = a \left[1 - \left(J + \frac{q}{2} \right) \cos^2 \theta \right], \quad (7.3)$$

де введено позначення $J = -3J_2 / 2$. При цьому вважалося, що величини J_2 і q – це малі першого порядку. У цьому наближенні вираз (7.3) співпадає з рівнянням еліпса з геометричним стисненням e . Таким чином, полярне стиснення планети $e = J + q / 2$. А тіло обертання з рівнянням (7.3) отримало назву *сфероїда Клеро*. Тепер можна виразити потенціал сили тяжіння як функцію координат r та θ і спостережних (зовнішніх) параметрів e та q , а диференціюючи цей вираз за r і θ , знайти радіальну і меридіональну компоненти сили тяжіння.

Значення коефіцієнта другої гармоніки гравітаційного потенціалу J_2 наведені в табл. 7.1. З неї можна переконатися, що для Землі, Марса і планет-гігантів співвідношення між малими параметрами e , J_2 і q з тією чи іншою точністю виконується. Але теорія не застосовна до Венери, Меркурія та Місяця, осьове обертання яких сповільнене приливним тертям і параметри теорії лежать на межі похибок їх визначення. З іншого боку, вона не застосовна до планети-карлика Хаумеї, в якій ці параметри не є малими величинами порівняно з 1. У кінці XIX ст. Дж. Дарвінім і В. де-Сіттером була розвинута теорія фігури планети у другому наближенні з урахуванням малих другого порядку малості J_4

та k – параметра, що описує відмінність стиснення *сфероїда Дарвіна–де Ситтера* від стиснення сфероїда Клеро. Пізніше для опису фігур планет-гігантів, що швидко обертаються, були розглянуті й більш високі наближення.

Таблиця 7.1

Параметри гравітаційних полів і фігур планет

Об'єкт	$fM, \text{см}^3/\text{с}^2$	$J_n \cdot 10^6$				
		$n=2$	$n=3$	$n=4$	e	Q
Меркурій	$2.17 \cdot 10^{19}$	~ -100	–	–	≈ 0	10^{-6}
Венера	$3.25 \cdot 10^{20}$	~ -4	–	–	0.0002	$6 \cdot 10^{-8}$
Земля	$3.99 \cdot 10^{20}$	-1083	2.54	1.58	0.0034	0.0033
Марс	$4.30 \cdot 10^{19}$	-1959	30	-10	0.0059	0.0046
Юпітер	$1.27 \cdot 10^{23}$	-14733	–	-587	0.065	0.089
Сатурн	$3.79 \cdot 10^{22}$	-16479	–	-937	0.108	0.157
Уран	$5.80 \cdot 10^{21}$	-3352	–	-29	0.033	0.505
Нептун	$7.05 \cdot 10^{21}$	-3411	–	-50	0.026	0.040
Місяць	$4.90 \cdot 10^{18}$	-206	-37	33	–	–

Але виникає питання: яким же чином принцип гідростатичної рівноваги може бути застосовний до твердотільних планет земного типу? Тут треба звернутися до основних положень механіки суцільних середовищ. При дії на них зовнішніх сил виникають деформації і внутрішні напруження, які описуються тензором деформацій u_{ik} і тензором напружень p_{ik} , що, в свою чергу, входять у рівняння руху суцільного середовища. Тому потрібно мати також рівняння, яке пов'язує між собою ці тензори, або так зване *реологічне рівняння*. У найпростіших випадках це лінійні рівняння, які визначають залежність напружень від величини деформацій або від швидкості останніх. Тобто рівняння *пружного середовища (закон Гука)*

$$p_{ik} = \mu u_{ik} + \lambda u_{ll} \delta_{ik}, \quad (7.4)$$

де μ і λ – сталі Ламе, μ – модуль зсуву, λ описує різницю між напруженнями при зсуві та стисненні. Рівняння (7.4) стосується до ізотропних середовищ. Але речовину твердотільних планет можна вважати такою, бо гірські породи складаються з великої кількості монокристаліків, що хаотично орієнтовані. Рівняння *в'язкої рідини (закон Ньютона)* є

$$p_{ik} = \eta \dot{u}_{ik} + \zeta \dot{u}_{ll} \delta_{ik} - p \delta_{ik}, \quad (7.5)$$

де η – в'язкість, ζ – друга в'язкість (суттєва лише при дуже великих швидкостях деформацій), останній доданок враховує гідростатичний тиск (закон Паскаля).

Якщо ж речовина проявляє і пружні і в'язкі властивості, та є такою, що в ній має місце *релаксація напружень* після припинення деформацій, то така речовина описується *законом Максвелла*, який для зсувних напружень і деформацій має такий вигляд:

$$\dot{u}_{ik} = \frac{\dot{P}_{ik}}{2\mu} + \frac{P_{ik}}{2\eta}, \quad (7.6)$$

або

$$2\mu\dot{u}_{ik} = \left(\frac{t}{\tau} + 1\right)\dot{P}_{ik}, \quad (7.7)$$

якщо ввести сталу з розмірністю часу $\tau = \eta / \mu$. Тепер видно, що, якщо час дії навантаження $t \ll \tau$, рівняння (7.7) переходить в (7.4), а якщо ж $t \gg \tau$, то в (7.5). Тобто в першому випадку речовина незалежно від агрегатного стану веде себе як пружне середовище, в другому – як в'язка рідина. Для гірських порід час τ (*час релаксації напружень*) має порядок перших тисяч років. Тому вона на космогонічних проміжках часу (зокрема, часі формування фігури планети) поводить себе як в'язка рідина (хоча і дуже в'язка), у випадках короткочасних явищ (припливні деформації, сейсмічні явища) – як пружне тіло.

Оскільки сейсмічні явища несуть інформацію про внутрішню будову планет, то зупинимось коротко на *сейсмології планет*, тобто вченні про поширення в них хвиль і коливань. Джерелами цих хвиль і коливань є явища вибухового типу, пов'язані або з тектонічними процесами у поверхневих шарах планет, або з падінням на їхні поверхні метеоритів. Якщо в рівняння руху суцільного середовища для одиничного об'єму речовини підставити закон Гука (7.4), то це рівняння набуде такого вигляду:

$$\rho\ddot{\vec{u}} = \vec{F} + (\lambda + \mu)\nabla(\nabla\vec{u}) + \mu\nabla^2\vec{u}, \quad (7.8)$$

де ρ - густина, а \vec{u} – вектор зміщення, \vec{F} – зовнішня сила. Якщо ж застосувати до цього рівняння операції *div* і *rot*, то для дивергенції і ротора вектора \vec{u} одержимо хвильові рівняння (нехтуючи силою тяжіння). Це означає, що в пружному середовищі поширюються дві хвилі. Зміна $\text{div}\vec{u}$ описує повздовжні хвилі стиснення, а зміна $\text{rot}\vec{u}$ – поперечні. При цьому швидкість повздовжніх хвиль становить $V_P = \sqrt{(\lambda + \mu) / \rho}$, а поперечних – $V_S = \sqrt{\mu / \rho}$, (індекси *P* і *S* означають первинні та вторинні

хвилі). Оскільки сталі Ламе з глибиною, з ростом тиску зростають швидше, ніж густина, то швидкості хвиль з глибиною, зі зменшенням координати r , збільшуються. Це означає, що сейсмічні промені будуть рефрагувати, але (на відміну від світлових променів в атмосфері) вони будуть увігнутими кривими. Тобто, почавшись на поверхні планети (або поблизу від неї), сейсмічний промінь десь знову вийде на поверхню, де хвиля може бути зареєстрована сейсмографом. Якщо розглянути явище заломлення променя на межах шару з товщиною dr , то одержимо співвідношення:

$$\Delta = 2p \int_{r_p}^R \frac{dr}{r \sqrt{\frac{r^2}{v^2} - p^2}}, \quad T = 2 \int_{r_p}^R \frac{ds}{v} = p\Delta + 2 \int_{r_p}^R \sqrt{\frac{r^2}{v^2} - p^2} \frac{dr}{r}. \quad (7.9)$$

Тут Δ – кутова *епіцентрально відстань* між *епіцентром* (точкою на поверхні планети, що співпадає з осередком землетрусу або знаходиться над ним) і точкою виходу променя на поверхню, T – час поширення променя, p – *параметр променя*, v – швидкість променя в точці r . Параметр променя дорівнює, з одного боку, похідній $dT/d\Delta$, з іншого, відношенню r_p/v_p , де r_p і v_p – значення радіуса і швидкості в точці найбільшого заглиблення променя. Ці формули розв'язують пряму задачу сейсмології про геометрію сейсмічних променів і час поширення сейсмічних хвиль. Сейсмічні спостереження дають можливість одержати залежність $T(\Delta)$. Розв'язання оберненої задачі дозволяють знайти залежності $v(r)$, побудувати швидкісні розрізи планети. Такі розрізи для Землі показані на рис. 7.1. Практично це дуже не проста задача, бо в певну точку на поверхні планети приходять не тільки прямі промені, а і промені, відбиті від поверхні, та промені, відбиті та заломлені на межах різних оболонок планети – її кори та мантиї, мантиї та ядра. Розподіл амплітуд між відбитими і заломленими променями описується формулами, подібними до відомих формул Френеля в оптиці, з тим ускладненням, що падаюча повздовжня хвиля породжує по дві відбитих і заломлених хвилі – повздовжню і поперечну, поляризовану у вертикальній площині. Теж саме відбувається і при падінні на межу вертикально поляризованої хвилі (табл. 7.2).

Існування меж приводить також до появи пов'язаних з ними *поверхневих* хвиль. Є два типи таких хвиль – хвилі Релея і хвилі Лява. *Хвилі Релея* виникають на межі розділу двох напівнескінченних середовищ з різними властивостями і, відповідно, різними швидкостями поширення об'ємних хвиль, зокрема на вільній поверхні напівнескінченного шару речовини. Їхня швидкість менша від швидкості вторинних хвиль v_s . *Хвилі Лява* утворю-

ються в шарі скінченної товщини внаслідок інтерференції хвиль SH, відбитих від меж цього шару. Їхня швидкість лежить поміж швидкостями v_S та v_P . Ці хвилі диспергують навіть в однорідному середовищі. Хвилі Релея диспергують тільки в неоднорідному середовищі.

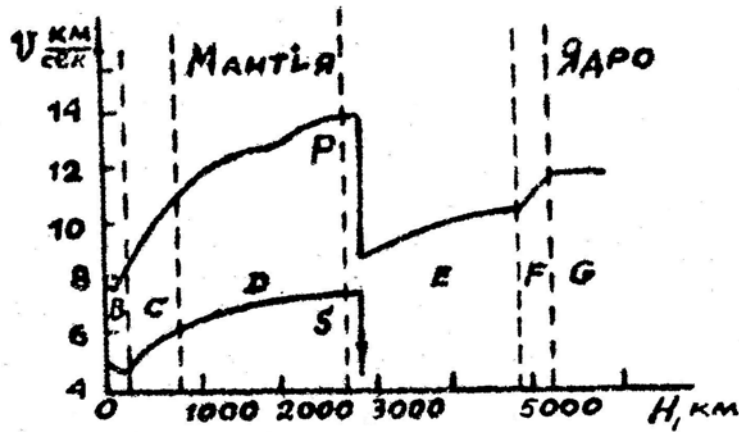


Рис. 7.1. Швидкісні перерізи Землі

Таблиця 7.2

Відбиття та заломлення сейсмічних хвиль у планеті

Падаюча хвиля	Відбиті хвилі	Заломлені хвилі
SH	SH	SH
SV	P, SV	SV, P
P	SV, P	P, SV

Енергія сейсмічних процесів, густина потоку якої пропорційна квадратам амплітуди та частоті коливань, оцінюється в балах за шкалою Ріхтера. Ця шкала є логарифмічною, зміна магнітуди на одиницю означає зміну енергії приблизно у 32 рази. Нуль-пункт шкали (магнітуда 0) відповідає енергії приблизно в 10^{12} ерг.

Важливою задачею є вивчення процесів затухання сейсмічних хвиль. Основні фізичні механізми, що зумовлюють таке затухання в твердотільних планетах – це *тертя* на межах кристалічних зерен, дифузія точкових дефектів кристалічної решітки (вакансій) або *дифузійна в'язкість*, і переміщення поверхневих дефектів (дислокацій, їхнє переповзання) або *дислокаційна в'язкість*. Усі ці процеси суттєвим чином залежать від температури. Оскільки переповзання дислокацій потребує значно більше енергії, ніж переміщення вакансій, то із зростанням температури підвищується роль дислокаційної в'язкості.

Вище малися на увазі сейсмічні хвилі, довжина яких значно менша від розмірів планети. Якщо це не так, то ефективним методом дослідження є метод *власних коливань* планети. Для сферичної планети розрізняють три типи таких коливань: 1) *радіальні* (форма планети не змінюється); 2) *крутильні* (форма та розміри планети не змінюються); 3) *сфероїдальні* (змінюються і форма, і розмір планети, головна мода їх – це періодична зміна форми планети на стиснений і витягнутий сфероїди, звідки й назва всього класу цих коливань). Осьове обертання планети спричиняє ефект, аналогічний ефекту Зеємана в оптиці. Різна залежність різних мод власних коливань від глибини також використовується для сейсмічного зондування планети.

Принцип гідростатичної рівноваги застосовується і під час дослідження внутрішньої будови планетних тіл. Головним тут є знаходження залежностей густини і тиску від глибини, тобто функції $\rho(r)$ і $p(r)$. У першому наближенні спочатку знаходяться значення густини і тиску на еквіпотенціальній поверхні з певним значенням великої півосі a , бо в цьому випадку такою поверхнею є еліпсоїд обертання. Однак ускладненням тут є те, що повне значення потенціалу сили тяжіння у внутрішніх точках планети - це сума потенціалів, які створюються частиною планети усередині певної еквіпотенціальної поверхні та зовні неї, ряди для цих потенціалів мають різний вигляд. Але так чи інакше, принцип гідростатичної рівноваги приводить до такого інтегро-диференціального рівняння:

$$\left(\frac{1}{\rho} \frac{dp}{da} \right) = - \frac{GM(a)}{a^2} - \frac{2}{3} \omega^2 a, \quad (7.11)$$

де $M(a)$ – маса речовини усередині еквіпотенціальної поверхні з піввіссю a , яка дорівнює інтегралу від густини за об'ємом усередині цієї поверхні. Але тут виникає нове ускладнення. Є одне рівняння для двох змінних ρ і p . Зв'язок між ними задається, як відомо, рівнянням стану речовини. Справа в тому, що (на відміну від газів, особливо ідеальних) рівняння стану твердих тіл, а тим більше рідких, це вельми складне питання. Воно вирішується на підставі термодинамічного рівняння $p = -(dF/dV)_T$, де $F(V, T)$ – вільна енергія за Гельмгольцем. Величина $F(V, T)$ складається з кінетичної і потенціальної частин. Кінетична енергія знаходиться через температуру Дебая і функцію Дебая, а потенціальна залежить від типу кристалічної решітки твердої речовини. Але якщо і вдається записати рівняння стану, то воно вводить нову невідому функцію $T(r)$. Вихід було знайдено такий. Якщо замість сталої Ламе λ ввести *модуль стиснення* $K = \rho \cdot dp/d\rho$, який за допомогою закону Гука (7.4) приводиться до виду

$K = \lambda + 2\mu/3$, то формули швидкостей сейсмічних хвиль дозволяють розглянути функцію $\Phi(r) = K/\rho = v_p^2 - 4v_s^2/3$, що визначається за сейсмічними даними. Ця функція дозволяє замінити похідну від тиску за піввіссю a на похідну від густини. І рівняння (7.11) замінюється на таке рівняння Адамса–Вільямсона:

$$\frac{d\rho}{da} = -\frac{\rho}{\Phi(r)} \left(\frac{GM(a)}{a^2} - 2\omega^2 a \right), \quad (7.12)$$

яке можна розв'язувати незалежно від рівняння стану.

Потім треба знайти форму екіпотенціальної поверхні, яку ми розглядаємо, – її геометричне стиснення e . Воно визначається диференціальним рівнянням Клеро:

$$a \frac{d\eta}{da} + \eta^2 - \eta - 6 + 6 \frac{\rho}{\bar{\rho}} (1 + \eta) = 0, \quad (7.13)$$

де логарифмічна похідна від стиснення $\eta = d(\ln e)/d(\ln a)$, а $\bar{\rho}$ – середня густина усередині відповідної екіпотенціальної поверхні. Це рівняння у першому наближенні розв'язується за допомогою перетворення Радо і одержання рівняння Радо

$$d(a^5 \bar{\rho} \sqrt{1 + \eta}) = 5a^4 \bar{\rho} F(\eta) da, \quad (7.14)$$

де функція $F(\eta)$ замінюється на 1, до якої вона вельми близька. Це дозволяє, зокрема, одержати формулу для сталої прецесії

$$H = \frac{C - A}{A} = \frac{e_1 - \frac{q}{2}}{1 - \frac{2}{5} \sqrt{\frac{5}{2} \frac{q}{e_1} - 1}}, \quad (7.15)$$

яка тепер може бути знайдена за зовнішніми параметрами – геометричним стисненням планети e_1 і параметром обертання q .

Важливою обставиною є те, що поширення поперечних хвиль у твердій речовині та їхнє непоширення в рідині дозволяє визначати стан речовини в тих чи інших оболонках планети. А знання кривої плавлення, тобто залежності температури плавлення від тиску $T_{nl}(p)$ дає можливість оцінки розподілу температури в надрах планет $T(r)$. Однак визначення кривої $T_{nl}(p)$ виявляється досить складною справою. Використання для цього (на відміну для переходу «рідина – газ») для фазового переходу «тверде тіло – рідина» рівняння Менделєєва–Клапейрона практично не можливе, бо теплота цього переходу дуже незначна порівняно з тепло-

вмістом твердого тіла і рідини. Доводиться шукати інші шляхи, виходячи з тих чи інших припущень про те, коли розпочинається процес плавлення: або тоді, коли середнє значення амплітуди теплових коливань вузлів кристалічної решітки досягає певної величини, зіставної зі сталою решітки, або тоді, коли кількість дефектів решітки (вакансій) сягає певного критичного значення.

Сам розподіл температури в планеті $T(r)$ і його зміна в часі визначаються *рівнянням теплопровідності*, яке у випадку сферичної симетрії має вигляд:

$$c(r, T)\rho(r, T)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\lambda(r, T)\frac{\partial T}{\partial r}\right) + P(r, t). \quad (7.16)$$

Але розв'язанню цього рівняння повинно передувати вирішення цілої низки теж непростих задач. Треба встановити залежності теплоємності $c(T)$ і коефіцієнта теплопровідності $\lambda(T)$ (причому в дуже широкому діапазоні температур), визначити фізичну природу і математичний опис розподілу в планеті внутрішніх джерел та стоків тепла $P(r, t)$ і, нарешті, записати крайові умови $T(0, t)$ і початкові умови $T(r, 0)$.

Нарешті, важливою характеристикою планет є їхні магнітні поля. Як відомо, магнітні поля створюються рухом заряджених частинок. Умови такого руху виникають там, де є достатньо високі температури для іонізації речовини та її рухомості. Такі умови є в мантиях планет-гігантів і зовнішньому рідкому ядрі Землі. Механізм їх утворення – це дія *гідромагнітного динамо*. Ймовірним джерелом енергії його є диференціальна прецесія, тобто тертя, що виникає на межах різних оболонок планети (зокрема в Землі – на межі нижньої мантиї та зовнішнього ядра), які мають дещо різне стиснення і різну швидкість прецесії. Виникає додаткова сила інерції (*сила Пуанкаре*), що приводить до такої оцінки дипольної складової магнітного поля

$$H \propto \frac{\rho d^3 \Omega \omega \cos \varepsilon}{v_m}, \quad (7.17)$$

де ρ – густина шару, d – його товщина, Ω – кутова швидкість прецесії, ε – кут нахилу площини екватора до площини орбіти, v_m – магнітна в'язкість.

Цікавою особливістю є також існування *скін-шару* в діелектричних породах твердотільних планет. Оскільки його товщина $l = 1/\sqrt{2\pi\sigma\omega}$, то завдяки малій електропровідності σ при частотах ω , що відповідають річним і одинадцятирічним коливанням магнітного поля Землі, товщина скін-шару в її мантиї сягає сотень і тисяч кілометрів.

Таблиця 7.3

Магнітні поля деяких планетних тіл

Планета	$B_{\text{екв}}$, Гс	M , Гс·см·с	θ
Меркурій	0.003	$4 \cdot 10^{21}$	—
Венера	0.0002	$4 \cdot 10^{21}$	—
Земля	0.31	$8.2 \cdot 10^{25}$	11°
Марс	0.0006	$3.5 \cdot 10^{22}$	—
Юпітер	4.1	$1.5 \cdot 10^{30}$	11°
Сатурн	0.21	$4.4 \cdot 10^{28}$	$\approx 20^\circ$
Уран	0.25	$4.1 \cdot 10^{27}$	59°
Нептун	0.1	—	47°
Місяць	0.0002	$1 \cdot 10^{19}$	—
Титан	0.00004	$7 \cdot 10^{20}$	—

7.2.2. Фізика планетних поверхонь

Різноманітність процесів, що відбуваються на поверхнях планет, можна розбити на три групи: взаємодія з космічними факторами (екзогенні процеси), вплив нижче розміщених шарів кори та мантиї (ендогенні процеси) і, нарешті, взаємодія поверхні планети з її атмосферою та гідросферою, якщо вони є. Друга та третя групи процесів вивчаються геологією планет, яка зараз активно розвивається. Ми ж розглянемо процеси першої групи. Це відбиття та випромінювання планетними поверхнями електромагнітних хвиль у різних діапазонах, насамперед, оптичному, а також вплив на поверхні планет метеорної речовини та корпускулярного випромінювання.

Планети з твердими поверхнями (Меркурій, Місяць) мають більш низьке альbedo. Планети з потужними атмосферами і хмаровими шарами в них (Венера, планети-гіганти) мають значно більше альbedo. Марс займає проміжне положення. Земля більш близька до планет другої групи, бо в середньому значна частина її поверхні вкрита хмарами. Велике альbedo хмарових шарів пов'язано з тим, що частинки, які їх утворюють, мають близьке до 1 альbedo однократного розсіяння.

Яскравість видимої поверхні планети можна представити у такому вигляді:

$$I(\alpha, \theta, \psi) = I_0 f(\alpha) \Psi(\alpha, \beta, \lambda), \quad (7.18)$$

де α – фазовий кут, I_0 – яскравість центра диска планети в протистоянні. Фазовий кут α , а також кути падіння та відбиття випромінювання i та ε неважко виразити через координати β і λ елемента поверхні $d\sigma$, якщо розглянути топоцентричну небесну сферу і відповідні трикутники на ній.

Функція $\Psi(\alpha, \beta, \lambda)$ описує розподіл яскравості по диску планети при певному куті фази.

Фазова функція $f(\alpha)$ формується під впливом, насамперед, двох чинників. Перший – це *тіньовий ефект* від затінення одних елементів рельєфу іншими. Він тим більший, чим менше альbedo поверхні, бо визначається, головним чином, розсіянням першого порядку і забезпечує зменшення фазової функції приблизно в інтервалі $5^\circ < \alpha < 15^\circ$. Другий – це *механізм когерентного підсилення* випромінювання (МКП) при розсіянні другого (і більш вищих порядків) на близько розміщених елементах структури поверхневого шару планети (рис. 7.2). Цей механізм працює в основному на малих кутах фази ($\alpha < 5^\circ$). Разом вони приводять до нелінійного зростання яскравості при наближенні фазового кута до 0° . Цей ефект у цілому має назву *опозиційного ефекту* (ОЕ). У зв'язку з фізичним змістом опозиційного ефекту, досить придатною для його опису є така емпірична формула:

$$f(\alpha) = ge^{-\gamma_0\alpha} + (1-g)e^{-\gamma_1\alpha}, \quad (7.19)$$

де $\gamma_0 > \gamma_1$, ваговий множник g характеризує внесок МКП в ОЕ.

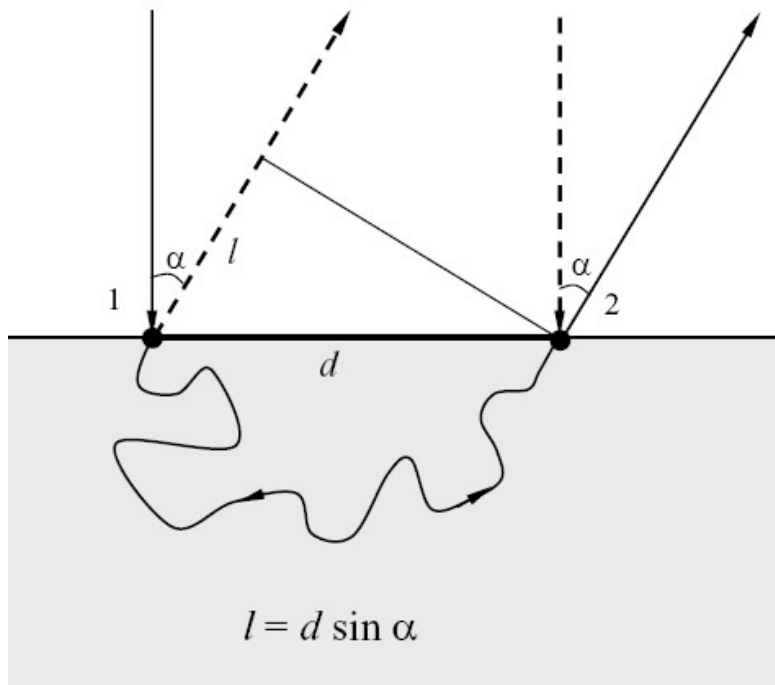


Рис. 7.2. Схема когерентного підсилення оберненого розсіяння

Промені, які йдуть по прямій (суцільні лінії) і додаткові (пунктир) інтерферують з підсиленням при $\alpha = 0$

Для функції $\Psi(\alpha, \beta, \lambda)$ запропоновано багато напівемпіричних виразів, одержаних у тих чи інших припущеннях. Елементи твердої поверхні за їхнім розміром можна поділити на макрорельєф (розміри більші за елемент розділення при даних спостереженнях), мезорельєф (елементи знаходяться під розділенням, але ще можливий їхній опис саме як елементів поверхні) та мікрорельєф (треба розглядати поверхневий шар певної структури). У мікрорельєфі треба розрізняти елементи його структури більші від довжини хвилі випромінювання та порядку і менше її. У першому випадку застосовні закони геометричної оптики, в другому треба враховувати дифракційні ефекти. Якщо ввести поняття про гранично шорстку поверхню як таку, що при накладанні на мікрорельєф мезорельєфу закон відбиття від неї вже не змінюється, то розглядаючи силу світла j (яка пропорційна величині $I \cos \varepsilon$) від елемента розділення, яке є усередненим значенням від елементів мезорельєфу з середньоквадратичним значенням кутів їх нахилу $\bar{\delta}^2$, то прийдемо для величини j до рівняння Пуассона $\nabla^2 j = kj$. Розв'язуючи його методом розділення змінних, одержимо в решті-решт такий вираз для розподілу яскравості по диску планети:

$$\Psi = \frac{(\cos \beta)^{(\pi/(\pi-\alpha))} \cos \frac{\pi(\lambda - \alpha/2)}{\pi - \alpha}}{\cos \lambda}. \quad (7.20)$$

Для більш детального опису взаємодії випромінювання з поверхневими шарами планет широко використовуються різні чисельні методи та методи комп'ютерного моделювання, зокрема з фрактальним описом структури шару.

Повний опис стану поляризації відбитого поверхнями планет випромінювання дає, як відомо, чотиривимірний *вектор Стокса*. Однак складності його визначення зі спостережень приводять до того, що частіше поляризаційні властивості планет описуються *ступенем поляризації* $p = (I_l - I_r)/(I_l + I_r)$, де I_l і I_r – інтенсивності світла, поляризованого паралельно і перпендикулярно до площини розсіяння, який зазвичай виражається в процентах. Але на відміну від розв'язку Мі для сферичних частинок (для яких фазова крива ступеня поляризації обертається на 0 при значеннях α , рівних 0° і 180° , в інших точках є додатною та має максимум при $\alpha = 90^\circ$) фазова крива планет з твердими поверхнями має більш складний характер. Він схематично показаний на рис. 7.3. Її особливістю є від'ємна ступінь поляризації при кутах фази, близьких до 0° . Опорними характеристиками фазової кривої поляризації є координати на площині (p, α) точок мінімуму поляризації α_{\min} , p_{\min} і точок інверсії – точок зміни знаку поляризації α_{inv} та похідна $h = dp/d\alpha$ в точці інверсії. Сенса

параметра h полягає в тому, що при спостереженнях із Землі область значень максимуму ступеня поляризації недоступна (крім Місяця і астероїдів, що наближаються до Землі), а цей параметр дозволяє хоч якось оцінити цей максимум. Значення $p_{\min} \approx -1\%$, а його положення в околі $\alpha = 10^\circ$. Точка інверсії лежить у межах $20 < \alpha_{inv} < 30^\circ$, причому $\alpha_{\min} \approx \alpha_{inv} / 2$. Поява від'ємної поляризації є предметом багатьох досліджень, але однозначного пояснення цього явища ще немає, хоча, мабуть, воно пов'язане якимось чином з багатократним розсіянням.

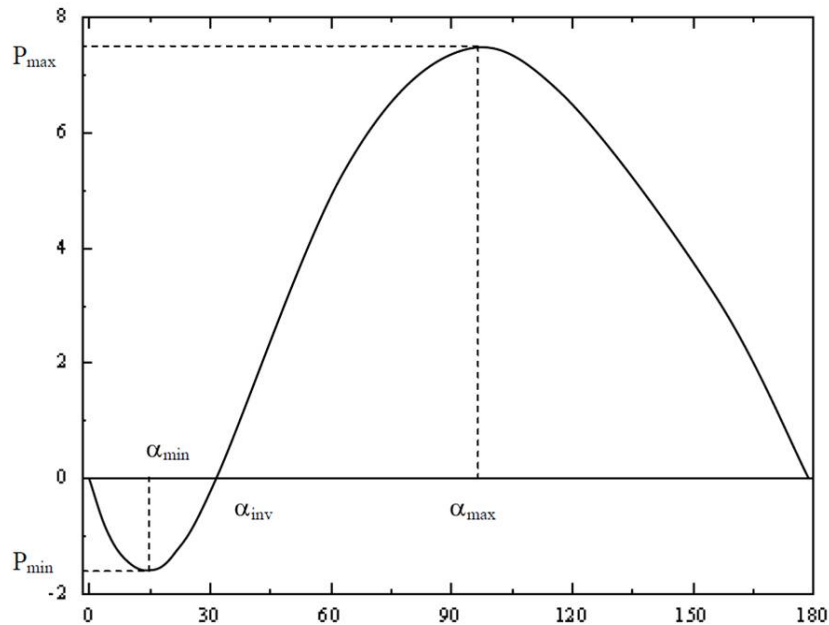


Рис. 7.3. Типова фазова поляризаційна крива планети

Фотометричні та поляриметричні властивості планетних тіл і їх хід по спектру використовуються для прогнозування їхніх хіміко-мінералогічних і геолого-морфологічних характеристик. Особливо це стосується Місяця, для якого побудовано багато карт розподілу по його поверхні оптичних і інших величин, зокрема вмісту низки породоутворюючих елементів (Fe, Ti та інші).

Спектральний хід альbedo планетних поверхонь визначається низкою чинників. Хоча власне поглинання світла силікатами внаслідок переходу електронів з валентної зони в зону провідності лежить в УФ-області, часткова аморфізація речовини під дією мікрометеоритного бомбардування приводить до розмивання межі поглинання й утворення довгохвильового крила, що обіймає майже всю видиму частину спектра. Впливають на форму спектральної кривої і домішки та дефекти кристалічних і аморфних зерен поверхневого шару планети (зокрема металічні включення Fe і Ti). Розщеплення енергетичних рівнів d-оболонки іонів Fe

у складі піроксенів приводить до появи смуг поглинання на 0.95 та 2.2 мкм. Таке саме у іонів Ті утворює слабкі смуги поблизу 1.3 та 5 мкм.

7.2.3. Фізика планетних атмосфер і магнітосфер

Спроможність планети втримати у своїй атмосфері той чи іншій газ визначається співвідношенням між другою космічною швидкістю V_2 для даної планети і середньою швидкістю теплового руху молекул певного газу \bar{V} . Знаходження потоку молекул, що дисипують з атмосфери планети при певній її температурі, приводить до такої оцінки для характерної *тривалості життя даного газу в атмосфері* (часу, за який кількість газу зменшується в e разів):

$$t_0 \approx \sqrt{\frac{H_0}{g}} \frac{e^{X_0}}{X_0}, \quad (7.21)$$

де $X_0 = V_2^2 / \bar{V}^2$. Відповідні обчислення показують, що Венера, Земля і Марс на великі (так звані космогонічні) часи можуть втримати в своїх атмосферах такі гази, як N_2 , O_2 , CO_2 , але не вдержують таких легких газів, як H_2 і He . Планети-гіганти на часи, значно більші, ніж космогонічні, втримують і H_2 та He . Меркурій, Місяць та інші великі супутники планет лише можуть вдержувати всі гази на певний короткий час, тому вони мають тільки дуже малошільні *динамічні атмосфери*, речовина яких весь час оновлюється. І лише далекий від Сонця Титан спроможний мати більш щільну атмосферу з вуглеводнів. Плутон і Еріда можуть мати динамічні атмосфери лише під час проходження перигелійних частин своєї орбіти.

Постійні атмосфери планет, не зважаючи на рухливість окремих їхніх елементів, у середньому є стаціонарними утвореннями. Їхня вертикальна структура визначається рівнянням гідростатичної рівноваги – градієнт тиску врівноважується силою ваги. Разом з рівнянням стану ідеального газу це приводить до *барометричної формули Лапласа*

$$p = p_0 e^{-\int_0^z \frac{z dz}{H(z)}}, \quad (7.22)$$

де p – тиск, p_0 – тиск у поверхні (або іншому рівні, від якого відраховується висота z), *шкала висот* (або вертикальний масштаб атмосфери) $H = RT / \mu g$.

Прискорення сили ваги можна вважати сталим. Поведінка середньої відносної молекулярної маси μ на певній висоті залежить від того, який з двох протилежних процесів переважає: масове турбулентне перемішування або дифузійне розділення газів з різним значенням μ . А це

визначається тим, характерний час якого із двох процесів є меншим. Характерний час перемішування $\tau_m = H / v_m$, де v_m – середня швидкість масових рухів. Час дифузійного розділення $\tau_d = H^2 / D$, де коефіцієнт дифузії D , пропорційний середній довжині пробігу молекул, яка, в свою чергу, зростає обернено до концентрації молекул. Остання ж зменшується з висотою в нульовому наближенні експоненціально. Тому є певний рівень, на якому перемішування змінюється розділенням, – це *гомопауза*, нижче якої атмосфера однорідна за складом (це *гомосфера*, або нижня атмосфера), вище її склад з висотою і середнє значення μ змінюються, це *гетеросфера*, або верхня атмосфера.

Таким чином, основним фактором, який визначає хід тиску (і густини) у планетній атмосфері з висотою є її температура T . А висотний хід температури визначається, насамперед, джерелами енергії в атмосфері. Зверху – це потік короткохвильового і корпускулярного випромінювання Сонця, за рахунок надлишку енергії фотонів та корпускул над енергіями дисоціації та іонізації молекул атмосфери при зіткненнях з останніми. Це приводить до додаткової зміни складу атмосфери й утворення *іоносфери* та *хемісфери*. Знизу – це потік випромінювання з надр планети (планети-гіганти) або випромінювання, відбите поверхнею планети (планети земного типу). Тому основними шарами планетної атмосфери зверху є *термосфера*, в якій температура з висотою зростає, і знизу *тропосфера*, де температура зменшується з висотою. Нижня границя термосфери знаходиться там, де практично вичерпуються фактори, що її утворюють. Таким же самим чином визначається і верхня границя тропосфери, вона там, де практично поглинається все випромінювання, яке йде знизу. Між тропосферою і термосферою розміщується у більшості планет практично ізотермічна *стратосфера*. Виключенням є земна атмосфера, збагаченість якої киснем і ефективно поглинання яким сонячного УФ-випромінювання з утворенням озону, створюють додатковий температурний максимум. Цей максимум розділяє власне земну стратосферу (де температура зростає) і *мезосферу*, в якій температура спадає. Назви границь шарів атмосфери утворюються з першої частини нижнього шару і закінчення «пауза» – *тропопауза* тощо.

Якщо висотний градієнт γ температури постійний (*політропна атмосфера*), то з (7.22) випливає, що тиск

$$p = p_0 \left(\frac{T_0 + \gamma z}{T_0} \right)^{-\mu g / R \gamma}. \quad (7.23)$$

Якщо при цьому має місце адіабатична рівновага, то за допомогою рівняння адіабати одержимо, що тиск

$$p = p_0 \left(\frac{T_0 + \gamma_a z}{T_0} \right)^{-\mu c_p / R}, \quad (7.24)$$

де адіабатичний градієнт температури $\gamma_a = -\frac{\kappa - 1}{\kappa} \frac{\mu g}{R}$, c_p – теплоємність при постійному тиску, κ – відношення теплоємностей при постійних тиску та об'ємі. А перевищення фактичного модуля градієнта температури над модулем адіабатичного ϵ , як відомо, умовою виникнення *конвекції*.

Значення *числа Рейнольдса* $Re = v \cdot l / \nu$, де $\nu = \eta / \rho$ – кінематична в'язкість, показують, що рухи будь-якого масштабу l будуть в атмосфері планети турбулентними. Температура певного об'єму атмосфери може змінюватися внаслідок поглинання та випромінювання енергії, конвективного та турбулентного переносів тепла, фазових переходів у речовині атмосфери. А ця зміна приведе до зміни тиску, що викличе рух повітря – вітер. Повна система рівнянь, що описує цей рух, включає векторне рівняння зміни імпульсу та два скалярних рівняння – неперервності та зміни температури. Треба також математично описати усі джерела та стоки енергії, задати початкові та крайові умови. Тому точний розв'язок рівнянь атмосферної динаміки це і зараз надзвичайно складна задача. Тому розглядаються спочатку окремі більш прості випадки атмосферних рухів.

Це *градієнтний вітер* – горизонтальний прямолінійний стаціонарний рух під дією градієнта тиску та сил інерції. Це *геострофічний вітер* – такий же рух під дією градієнта тиску і горизонтальної компоненти сили Коріоліса. Це також горизонтальний стаціонарний коловий рух під дією градієнта тиску, відцентрової сили та сили Коріоліса. Якщо при цьому напрями відцентрової сили і сили Коріоліса збігаються, то маємо *циклонічний рух*, якщо ж вони протилежні, то *рух антициклонічний*. Рівняння зміни імпульсу приводить при цьому до наступних виразів для швидкості руху для циклону:

$$v = \frac{l_K r}{2} + \sqrt{\left(\frac{l_K r}{2} \right)^2 + \frac{r}{\rho} \left| \frac{\partial p}{\partial r} \right|} \quad (7.25)$$

та для антициклону:

$$v = \frac{l_K r}{2} - \sqrt{\left(\frac{l_K r}{2} \right)^2 - \frac{r}{\rho} \left| \frac{\partial p}{\partial r} \right|} \quad (7.26)$$

Тут $l_K = 2\omega \sin \varphi$ – параметр Коріоліса, r – відстань від центра руху, ρ – густина, φ – широта.

Найбільш масштабні атмосферні рухи, співставні з радіусом планети R_0 , утворюють *загальну циркуляцію* планетної атмосфери. Методи теорії розмірностей дозволяють одержати такі оцінки характерних швидкостей цієї циркуляції та перепаду температур в атмосфері:

$$V \approx q^{7/16} M^{-1/2} c_v^{-3/4} R_0^{1/2} \sigma^{-1/16}, \quad \delta T \approx q^{9/16} M^{-1/2} c_v^{-3/4} R_0^{1/2} \sigma^{-1/16}, \quad (7.27)$$

де q – сонячна стала планети, M – маса одиничного стовпа атмосфери, c_v – теплоємність при сталому об'ємі, σ – стала Стефана–Больцмана. З першої з цих оцінок випливає цікавий факт – повна кінетична енергія загальної циркуляції планетної атмосфери не залежить від її повної маси.

Характер загальної циркуляції атмосфери визначається такими безрозмірними критеріями:

$$\Pi_\omega = \omega R_0 / c_e; \quad \Pi_g = c_e^2 / \kappa R_0 g = H_e / R_0; \quad \Pi_M = q R_0 / c_p T_e c_e M, \quad (7.28)$$

де c_e – швидкість звуку на рівні формування випромінювання, що прямує в космос (тобто там, де оптична глибина атмосфери дорівнює 1), H_e і T_e – шкала висот і температура на цьому рівні, c_p – теплоємність при сталому тиску. Перший критерій визначає вплив сили Коріоліса, другий визначає роль сили ваги і зумовлених нею вертикальних рухів у атмосфері. Останній критерій (з точністю до множника порядку 1) можна представити як відношення двох характерних часів: $\tau_e = R_0 / c_e$ – часу згасання збурень тиску і температури в масштабі планети та τ_0 – часу встановлення радіаційної рівноваги в атмосфері. Це відношення, в свою чергу, визначає роль адвективного та променистого механізмів переносу енергії (*адвекція* – це горизонтальний рух повітряних мас). Критерій Π_ω – малий для атмосфери Венери, порядку 1 для атмосфер Землі та Марса і порядку 10 і більше для атмосфер планет-гігантів. Критерій Π_g і Π_M – малі для всіх атмосфер. В атмосфері Венери, згідно з оцінками (7.26), у зв'язку з великою масою M дуже малі перепади температур ($\delta T \approx 1 \div 2^\circ$) і швидкості ($V \approx 1 \div 2$ м/с) та переважає меридіональний переніс «екватор–поліс». В атмосферах планет-гігантів, навпаки, роль сили Коріоліса є визначальною і переважає зональний переніс вздовж паралелей, що й визначає їхній характерий «смугасти» вигляд. В атмосферах Землі та Марса зіставність термічних градієнтів тиску і сили Коріоліса визначає найбільш складний шарунковий тип загальної циркуляції (циклональний та антициклональний) з характерними швидкостями порядку 10 м/с і 100 м/с відповідно.

Важливою обставиною є те, що атмосфери – це газово-аерозольні оболонки планет. *Аерозольна* складова утворює дисперсні системи – рідкі

аерозолі складають хмарові шари (Венера, планети-гіганти) або окремі хмари (Земля та Марс), тверді частинки заповнюють певний об'єм атмосфери або утворюють пилові хмари. Її кількісними характеристиками є розподіл аерозолів за розмірами (насамперед, середнє значення розміру та його дисперсія) і відносна концентрація q , що дорівнює масі аерозолів на одну одиницю маси газу. Вертикальний розподіл аерозолів $q(z)$ визначається часом їх життя в атмосфері з урахуванням їхнього гравітаційного осідання та турбулентного перемішування. Час гравітаційного осідання визначається з відомої *формули Стокса* для сили опору при рівномірному осіданні частинки та її ламінарному обтіканні повітрям, є і узагальнення її на випадки як турбулентного обтікання великими частинками, так і настільки малими (співставними за розмірами з довжиною вільного пробігу молекул), де вже не може бути застосовано гідродинамічне наближення.

Для утворення рідких конденсаційних аерозолів з певної компоненти атмосфери необхідною умовою є перевищення парціального тиску цієї компоненти над насичуючим її тиском. Але розглядаючи процес росту краплини, треба враховувати такі фактори – залежність насичуючого тиску від температури, його залежність від радіусу краплини під дією поверхневого натягу, дифузію компоненти, що конденсується до краплини, зміну температури за рахунок виділення теплоти конденсації. Все це приводить до такої величини швидкості зростання радіусу краплини r_0 :

$$\frac{dr_0}{dt} = \frac{\mu D}{r_0 RT_\infty} [p_\infty - e(T_\infty)] \exp\left(\frac{\mu L}{RT_\infty} \frac{T - T_\infty}{T_\infty} - \frac{2\mu\sigma}{\rho_0 R T r_0}\right), \quad (7.29)$$

де D – коефіцієнт дифузії, позначка ∞ стосується до умов вдалині від краплини, L – теплота конденсації, σ – коефіцієнт поверхневого натягу. Умови для утворення конденсату в макроскопічному об'ємі (утворення хмари) можуть виникати як за рахунок збільшення вмісту компоненти, яка конденсується, так і за рахунок зниження температури в атмосфері до температури насичення. Різні причини цього зниження приводять до утворення хмар різних типів в атмосферах Землі та Марса.

Тверді аерозолі утворюються шляхом підйому пилу з поверхні планети: на Землі в пустелях і ділянках з еродованим ґрунтом, що приводить до явища пилових бур; на Марсі – це практично вся його поверхня за виключенням полярних шапок. У великі протистояння Марса, коли зростає його інсоляція, локальні *пилові бурі* переростають у глобальні, що покривають всю його поверхню. При цьому значно знижується температура поверхні та нижніх шарів атмосфери планети.

Аналіз процесів розвитку і наслідків глобальних пилових бур на Марсі привів (Г. С. Голіцина в СРСР і К. Сагана в США) до розуміння можливих наслідків повномасштабного ядерного конфлікту на Землі. При цьому виникнуть численні пожежі, внаслідок яких в атмосферу підійметься значна кількість продуктів цих пожеж типу сажі з великою поглинальною здатністю. Сонячне випромінювання не буде доходити до поверхні Землі - настануть так звані «ядерна ніч» та «ядерна зима» протягом приблизно одного року. Пізніше ці висновки були підтверджені шляхом чисельного моделювання відповідних процесів в Обчислювальному центрі АН СРСР і Кліматичному центрі США. Доведені до відома вищого керівництва СРСР і США ці жахливі геофізичні наслідки ядерної війни певною мірою сприяли підписанню нового договору про обмеження стратегічних озброєнь і зниженню ризику ядерної катастрофи.

Самою зовнішньою оболонкою планети є її *магнітосфера*. Це область навколопланетного простору, в якій рух заряджених частинок визначається магнітним полем планети. Схематично будова планетної магнітосфери на прикладі магнітосфери Землі показана на рис. 7.4. Приблизно напівсферична форма магнітосфери на денному боці виникає в результаті стиснення магнітного поля планети під дією сонячного вітру, точніше кажучи, за рахунок підсилення поля токами, що виникають при русі частинок сонячного вітру в магнітному полі планети. Це стиснення продовжується доти, поки магнітний тиск не буде дорівнювати тиску частинок сонячного вітру:

$$\frac{B^2}{8\pi} = \frac{1}{2} \rho V^2. \quad (7.30)$$

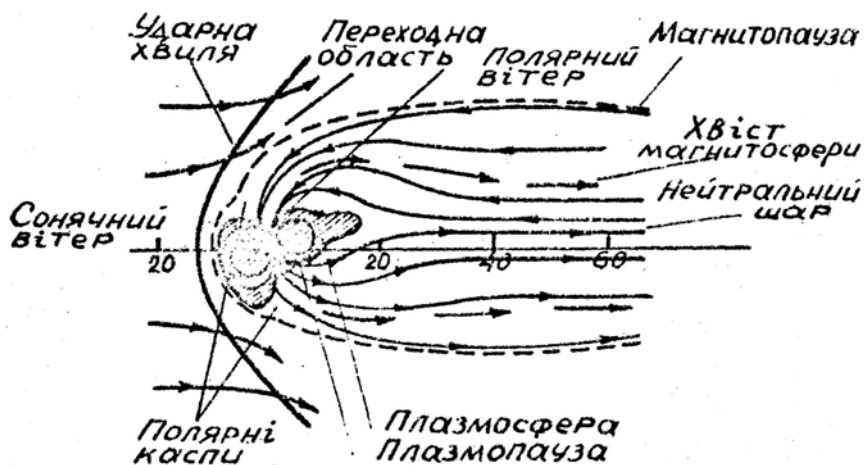


Рис. 7.4. Будова магнітосфери Землі

У дипольному наближенні, якщо магнітний момент планети M_d , то поле $B = M_d / r^3$. Звідси планетоцентрична відстань межі магнітосфери на денному боці планети

$$r_0 = \frac{1}{\sqrt{4\pi\rho}} \sqrt[3]{\frac{M_d}{V}}. \quad (7.31)$$

Для земної магнітосфери величина $r_0 \approx 10 R_3$, для потужної магнітосфери Юпітера, який швидко обертається навколо своєї осі, значення r_0 більше ніж у два рази оцінки (7.31) за рахунок дії відцентрової сили.

Оскільки швидкість частинок сонячного вітру більше і звукової, і альфенівської швидкостей, то на зовнішній межі магнітосфери виникає ударна хвиля. Безпосередньо за фронтом ударної хвилі розміщується турбулентна перехідна область – магнітний шар з сильно флюктууючим магнітним полем, заповнений частинками сонячного вітру. Межа, що відділяє власне магнітосферу від перехідного шару має назву *магнітопаузи*. За магнітопаузою розміщується пограничний шар зі значним перепадом тиску і розвинутими дифузійними процесами. Цей шар поділяється на три частини – денний пограничний шар, воронкоподібні області над магнітними полюсами планети – *полярні каспи* і хвостова частина – плазмова мантия. На нічному боці планети потік сонячного вітру витягує магнітне поле планети у хвіст у десятки і сотні радіусів планети. Силкові магнітні лінії, що виходять з магнітних полюсів планети з різною полярністю, у хвості зближуються і розділяються між собою тонким нейтральним шаром. У кінці хвоста вони замикаються на лінії міжпланетного магнітного поля.

Внутрішня частина магнітосфери, де магнітне поле має квазі-дипольний характер, і визначає рух частинок, що опинилися в ній, має назву *плазмосфери*. Рух заряджених частинок у плазмосфері має складний характер. На циклотронний рух частинки накладаються сили, пов'язані зі зміною магнітного поля вздовж силової лінії та її кривизною. Внаслідок цього частинка зменшує до нуля повздовжню компоненту швидкості та починає рухатися у протилежному напрямі (це відбувається у точці відбиття в областях полярних каспів). Крім цього, відбувається дрейф частинки в горизонтальному напрямі. Усе це утворює складну траєкторію її руху, яка розміщується на певній поверхні. Ця поверхня має назву оболонки з параметром L , який дорівнює відношенню планетоцентричної відстані частинки на магнітному екваторі до радіуса планети. Рух частинки у плазмосфері продовжується доти, поки вона не втрачає свою енергію поблизу точки відбиття у зіткненнях з частинками атмосфери планети. Ця енергія потім висвічується у вигляді *полярних сяйв*.

7.3. Малі тіла Сонячної системи

7.3.1. Астероїди (малі планети)

Це найбільш масивні з малих тіл Сонячної системи. Їхні розміри починаються із сотень кілометрів. Нижня межа більш невизначена. Залежно від їхнього розташування у Сонячній системі та засобів спостереження може варіюватися від 1 км до 10 м. Більшість астероїдів розташовуються у *головному поясі астероїдів* (ГПА) поміж орбітами Марса та Юпітера. 97 % астероїдів ГПА мають великі півосі орбіт від 2.17 а. о. до 3.65 а.о. Кількість астероїдів, для яких відомі їхні орбіти, вже перевищує 700 000. Астероїди – це залишки тієї речовини, з якої виникла Сонячна система. Сформуватися великій планеті на місці ГПА перешкодили гравітаційні збурення від Юпітера, який виник досить швидко в області максимуму поверхневої густини у протопланетній хмарі. Але цей первинний матеріал певною мірою перероблений при *зіштовхувальній еволюції* ГПА. При зіткненнях переважно відбувалося подрібнення тіл, що зіштовхувалися між собою (на перших порах, можливо, і тіл типу планет карликів). При цьому утворювалися їхні *сімейства* – групи астероїдів з більш-менш близькими елементами орбіт. У той же час відбувалося й утворення тіл типу «gubble-pile», які не є суцільними, а являють собою конгломерат невеликих тіл, зв'язаних слабкими силами тяжіння, а також подвійних астероїдів.

Астероїди за своїми оптичними характеристиками (величина та спектральний хід альbedo, поляриметричні властивості) та особливостями хімічного складу поділяються на *класи*. Основні з них – S (середньоальбедні, багаті на силікати), C (низькоальбедні, речовина яких збагачена вуглецем), M (їхні поверхневі шари збагачені металами). Важливим джерелом наших знань про астероїди є їхні криві блиску. Це зміна зоряної величини астероїда з фазою його осьового обертання. Вони несуть інформацію, насамперед, про період цього обертання, а також про форму астероїда й альбедні неоднорідності його поверхні. Форми астероїдів при цьому апроксимуються, як правило, трьохосними або двохосними еліпсоїдами. Подвійність астероїдів та її властивості також визначаються за їхніми кривими блиску (а також за їхніми зображеннями, одержаними за допомогою космічних апаратів).

Особливими популяціями астероїдів є *«троянці»* – астероїди, що групуються поблизу трикутних точок лібрації системи «Сонце–Юпітер» (їх відомо вже біля 7000) і *астероїди, що зближуються із Землею* (А33). До останніх відносять (дещо умовно) астероїди, які рухаються за такими орбітами, що найменша відстань між астероїдом і Землею не перевищує 30 млн км. Вважається, що в цьому випадку не виключена можливість

зіткнення астероїда із Землею внаслідок збурень його орбіти під впливом великих планет. Таких астероїдів відомо вже приблизно 13 000. Наукове значення вивчення АЗЗ полягає в тому, що можна досліджувати тіла значно менших розмірів, ніж у ГПА, і при тому в значно більш широкому інтервалі фазових кутів. Залежно від розміщення орбіт АЗЗ відносно до орбіти Землі вони поділяються на три групи – *групу Амура* (орбіти лежать поза межами земної орбіти), *групу Аполлона* (орбіти перетинають земну у проекції на екліптику) і *групу Атона* (орбіти лежать всередині земної орбіти).

Практичне значення їхнього вивчення полягає в тій небезпеці, в тій шкоді, яку може завдати біосфері та людській цивілізації зіткнення Землі з астероїдом. А такі зіткнення неодноразово мали місце в геологічній історії Землі. Енергія, що при цьому виділяється, залежить від маси астероїда і швидкості зіткнення (в основному в межах 12–20 км/с), і для астероїда радіусом в 1 км сягає $2 \cdot 10^{22}$ ерг, а це потужність ядерного вибуху в 500 кт ТНТ. Не вдаючись більше в деталі цієї *проблеми астероїдної небезпеки*, підкреслимо лише те, що у сучасного людства є технічні можливості відвернути цю загрозу, якщо вона реально виникне.

7.3.2. Комети

Комети – невеликі тіла переважно льодяного складу, які утворюють саму зовнішню структуру в Сонячній системі – хмару в сотні та тисячі а. о., так звану *хмару Оорта*. На великій відстані від Сонця комета являє собою тіло розміром порядку десятка кілометрів у вигляді силікатної матриці, заповненої льодяною речовиною.

Якщо під збурюючим впливом планет-гігантів комета переходить на орбіту з достатньо малим перигелієм, вона починає еволюціонувати. При наближенні до Сонця (приблизно на відстань, дещо меншу, ніж відстань Юпітера) льодяна компонента починає випаровуватися, утворюючи *кому* (атмосферу) комети, формується також зовнішня воднева оболонка розміром у мільйони км. При подальшому наближенні комети до Сонця починає утворюватися *газовий хвіст* комети, який під дією сонячного випромінювання витягується в напрямі від Сонця (інколи на величину в астрономічну одиницю). У міру випаровування газів з ядра комети починає руйнуватися і його силікатна матриця – кома поповнюється пилом, потім може утворитися і *пиловий хвіст* комети, зазвичай менш короткий і більш вигнутий від напряму на Сонце.

Залежно від співвідношення між газом і пилом у комі комети формуються її оптичні (спектральні та поляриметричні) властивості, відповідно яким комети поділяються на *газові* та *пилові*. Випромінювання газової компоненти коми – це світіння продуктів дисоціації й іонізації

первинних газів (C_2 , H – лінія L_α). За орбітальним періодом комети поділяються на довгоперіодичні та короткоперіодичні (відповідно, періоди більше та менше 200 років, найменший у комети Енке – 3 роки). Короткоперіодичні комети відносно швидко руйнуються шляхом поступової втрати своєї речовини, а інколи і шляхом процесів вибухового типу. Класичним прикладом цього є руйнування комети Бієли, яка останній раз спостерігалася у 1849 році.

Найбільш відома *комета Галлея* (період 76 років). За історичними хроніками було просліджено приблизно 30 її проходжень. Найзнаменніші з них – її поява у 1758 р., передбачена Е. Галлеєм на основі теорії руху небесних тіл І. Ньютона, що довело справедливості цієї теорії та ньютонівської механіки взагалі; поява цієї комети в 1910 р., коли Земля пройшла крізь її хвіст; і в 1986 р., коли вперше комета була досліджена засобами ракетно-космічної техніки (СРСР, Японії та Європейського космічного агентства).

Слід відзначити також комету Чурюмова-Герасименко (відкриту українськими вченими К. Чурюмовим та С. Герасименко), до якої було спрямовано європейський космічний апарат «Rosetta» для детального її дослідження. Влітку 2014 р. апарат успішно вийшов на орбіту навколо комети і скинув на її поверхню посадочний модуль «Philae». Це перше вивчення комети з орбітальних модулів навколо неї.

7.3.3. Метеорна речовина. Метеори. Метеорити

Метеорна речовина – це найдрібніша фракція речовини у Сонячній системі – від тіл з розмірами приблизно 10 м до пилинок у 0.5 мкм (узагальнена їхня назва – *метеорні тіла* або *метеороїди*). На рух частинок у 10 мкм і менше у межах, менших, ніж 3 а. о., окрім сили тяжіння Сонця, впливає ефект Робертсона–Пойнтінга внаслідок тиску сонячного випромінювання. Цей тиск є

$$p = (1 + A) \frac{\vec{s}_0 \cdot \vec{n}}{cr^2}, \quad (7.32)$$

де A – альbedo, \vec{s}_0 – потік випромінювання на відстані в 1 а. о., \vec{n} – нормаль до поверхні частинки, r – її геліоцентрична відстань, c – швидкість світла. Компонента повної сили тиску, направлена проти швидкості частинки, гальмує її рух та примушує частинку падати на Сонце. Певна частина метеорної речовини стикається з планетами. У той же час вона поповнюється за рахунок руйнування астероїдів і комет. Таким чином, метеорна речовина – це і найбільш динамічна складова речовини Сонячної частини, яка постійно оновлюється.

Метеор – це комплекс різнобічних фізичних явищ, пов’язаних із вторгненням в атмосферу планети метеорних тіл. Це їхнє аеродинамічне гальмування й утворення ударної хвилі. Це їхнє руйнування на окремі фрагменти та їхнє подрібнення з утворенням пилових частинок. Це їхнє нагрівання і відповідні фазові перетворення – плавлення та випаровування речовини. Це утворення метеорного сліду – маси нагрітого повітря, де відбуваються теплове збудження атомів і молекул з подальшим висвічуванням у лініях різних елементів та іонізація речовини. Останні процеси створюють явище метеорів як оптичних та дають змогу вивчати їх методом радіолокації. Спостереження радіометеорів, яке може проводитися в автоматичному режимі та цілодобово, значно збагатили наші знання про розподіл метеорної речовини в околі земної орбіти та Сонячної системи в цілому.

Яскраві метеори (видимі й удень, із зоряною величиною $m \leq -3^m$) мають назву *болідів*. Метеори, що спостерігаються у земній атмосфері, поділяються на два типи – *потоківі* та *спорадичні*. Потоківі метеори спостерігаються як значне збільшення кількості метеорів у певні дні року, коли Земля перетинає той чи інший *метеорний рій*. Метеорні рої утворюються під час розпаду астероїдів і ядер комет. Продукти розпаду внаслідок стійкості півосей, ексцентриситетів і нахилностей орбіт і нестійкості довгот вузлів і перигеліїв розтягуються вздовж усієї орбіти батьківського тіла, утворюючи метеорний рій. Під час спостережень потоківі метеори здаються вилітаючими з однієї певної ділянки неба, середина якої має назву *радіанта*. Назви потоків утворюються від назв сузір’їв, у яких знаходяться їхні радіанти. Найбільш відомі потоки – Персеїди (кінець червня – перша половина серпня), Ліриди (середина квітня), Леоніди (середина листопада).

Швидкості входу метеороїда в атмосферу (або його зіткнення з безатмосферним тілом) лежать у межах від другої космічної швидкості для даної планети V_2 до величини

$$V_{\max} = \sqrt{V_2^2 + (1 + \sqrt{2})^2 V_{\text{орб}}^2}, \quad (7.33)$$

де $V_{\text{орб}}$ – орбітальна швидкість планети. Цікаво, що діапазон швидкостей $V_{\max} - V_2$ швидко зменшується з геліоцентричною відстанню планети – від понад 100 км/с для Меркурія до 3 км/с для Нептуна.

Спостереження метеорних явищ та їх теорія приводять до таких результатів. Розподіл метеорних тіл за масою є обернено пропорційним їх масі m_0 . За добу на Землю випадає приблизно 300 тонн метеорної речовини. Зв’язок абсолютної зоряної (зоряна величина на висоті 100 км у зеніті) з кінетичною енергією метеороїда дається співвідношенням

$$M_m = -14.2 - 2.5 \lg E_M. \quad (7.34)$$

Втрата маси під час руйнування метеороного тіла в атмосфері відбувається за таким законом:

$$m = m_0 \exp \left[-\frac{\sigma}{2} (V_0^2 - V^2) \right], \quad (7.35)$$

де σ – коефіцієнт абляції, а V_0 та V – швидкості тіла при вході в атмосферу і в поточний момент.

Метеорне бомбардування поверхонь безатмосферних планетних тіл та астероїдів – важливий фактор формування рельєфу поверхонь цих тіл. Значна енергія зіткнення приводить до того, що руйнується і навіть розплавляється маса поверхневої речовини, значно більша маси самого метеороного тіла. Теорія розльоту продуктів викиду показує, що є два максимуми в розподілі викинутої речовини – на найбільшій відстані викиду та в центрі. Це приводить до утворення кратерів з кільцевим валом і центральною гіркою. Причому це відбувається незалежно від кута падіння метеороїда на поверхню. Розподіл метеоритних кратерів з розмірами має ступеневий характер.

Залишки великих метеорних тіл (або їхніх фрагментів), що не повністю зруйнувалися в планетній (зокрема земній) атмосфері та впали на поверхню – це *метеорити*. До недавнього часу метеорити були єдиними зразками позаземної речовини, що була доступна для прямих лабораторних досліджень. Основні типи метеоритів такі: *кам'яні хондрити* (85.7 %), *кам'яні ахондрити* (7.1 %), *залізокам'яні* (1.5 %), *залізні* (5.7 %). *Хондри* – округлі вкраплення у силікатні породи (до 50 % об'єму). Склад хондр, а також так званих вуглистих хондритів, що зустрічаються дуже рідко, практично такий же, як і сонячної речовини. Тобто це дає уявлення про первинний склад протопланетної хмари. Залізні метеорити складаються з нікелістого заліза. Цікавою їхньою особливістю є поява на їх відполірованій поверхні при травленні її кислотою певних візерунків (їхня назва відманштеттові фігури). Це прояв чергування мінералів з різним вмістом нікеля у залізі. Воно свідчить про те, що колись відбувся нагрів речовини до температури понад 2000 К і подальше вкрай повільне охолодження на 1–10 К за мільйони років.

За геологічну історію Землі на її поверхню падали і досить великі тіла типу астероїдів та кометних ядер. Найбільш відомі з них – вельми ймовірне зіткнення Землі з астероїдом 65 млн років тому, утворення метеоритного кратера в Арізоні (США, діаметр 1200 м) приблизно 10 млн років тому, Тунгуське явище 1908 р. (зіткнення з ядром комети) та падіння Чебаркульського метеорита в Челябінській області (Росія) у 2013 р. Сліди

велетенських метеоритних кратерів, майже зруйнованих ерозійними та геолого-морфологічними процесами, що виявляються шляхом аеро-і космічної зйомки, дістали назву *астроблем*. Такі астроблеми є і на Україні.

7.4. Екзопланети

Одним з найзначніших досягнень астрономії двох останніх десятиріч було масове відкриття планет навколо зір – позасонячних планет або *екзопланет*. На вересень 2015 р. відомо 1956 екзопланет, у тому числі 1239 по одній планеті у зорі та 486 планетних систем, тобто випадків, коли у однієї зорі знайдено принаймні дві планети. Спектральні класи зір з екзопланетами переважно це пізні класи G та K. Маси в основному охоплюють інтервал мас більше та порядку мас Юпітера та Сатурна, тобто мас планет-гігантів. Це, вочевидь, наслідок спостережної селекції – чим більше маса планети, тим більше ймовірність її знайдення. Але найбільшу увагу привертає розподіл півосей орбіт. У більшості своїй вони менше відстані Юпітера від Сонця, сягаючи 0.2 а. о. Само по собі те, що відкриваються планети, найбільш масивні та найбільш близькі до зорі, це цілком природно. Бо методи знайдення екзопланет засновані або на точному (<10 м/с) вимірюванні періодичних змін у променевої швидкості зорі за ефектом Доплера або на вимірюванні малих змін у блиску зорі внаслідок проходження планети по диску зорі (космічний телескоп «Кеплер»). Відкриваються нові екзопланети і за допомогою спостережень явища мікролінзування. У перспективі можливий і астрометричний метод спостереження малих періодичних зміщень зорі в картинній площині за допомогою космічних оптичних інтерферометрів (проект «Дарвін»). В останній час виявлені й планети з масою порядку маси Землі.

Робляться спроби класифікувати знайдені екзопланети, в основі цих спроб лежить класифікація великих планет Сонячної системи. Однак виділяється клас так званих «гарячих Юпітерів», тобто воднево-гелієвих планет з масами порядку маси Юпітера, але настільки близьких до своєї зорі, що енергія, яка надходить від неї до планети, може суттєво впливати на будову й еволюцію планети. Зокрема, оцінки ефективних температур атмосфер «гарячих Юпітерів» можуть сягати тисяч кельвінів, і самі атмосфери можуть бути нестійкими відносно принаймні атомарного водню. Є і проблема оцінок розмірів цих планет порівняно з модельними розрахунками для воднево-гелієвих планет без урахування притока зовнішньої енергії.

В основі наших сучасних уявлень про *виникнення планетних систем*, зокрема і Сонячної системи, лежить ідея про те, що речовина, з якої утворюються планети, є залишком речовини того фрагменту гігантської

молекулярної хмари, при гравітаційному колапсі якої виникла материнська зоря. Дія відцентрової сили приводить до сплюснення спочатку сферичної газово-пилової оболонки, яка оточує новонароджену зорю. Підвищення густини в екваторіальній площині оболонки викликає подальше гравітаційне осідання на неї пилинок та важких атомів і молекул – формується *протопланетний диск*. Дія потужного зоряного вітру на стадії Т Тельця, коли зоря скидає надлишок маси після «включення» променевого тиску, приводить до певного розподілу поверхневої густини та хімічного складу в протопланетному диску. Легка компонента (водень та гелій) майже повністю видаляється з певної внутрішньої частини диску. У цій зоні утворюються планети земного типу з відносно невеликою масою, але такі, що складаються переважно з важкої (твердої) і частково льодяної компонент. Далі від зорі в диску виникає максимум поверхневої густини, переважно з газовою компонентою з домішками важкої та льодяної складових, де утворюються воднево-гелієві планети-гіганти. Ще далі виникають планети-гіганти переважно льодяного складу і льодяні планети-карлики та малі тіла, зокрема, комети.

Утворенню планет передують низка процесів у протопланетній хмарі. Коли зі зростанням густини у протопланетному диску його речовина стає непрозорою для випромінювання зорі, вона розігрівається, насамперед, у зоні формування планет земного типу. Іонізація речовини і дія магнітного поля зорі сприяє передачі кінетичного моменту від зорі до протопланетного диску. Після закінчення стадії Т Тельця речовина остигає. Починається її конденсація й утворення пилинок та більш великих тіл. Зіткнення цих тіл при їхньому орбітальному русі приводить з одного боку до їх руйнування, а з іншого – до збільшення деяких з них. Утворюються дещо більші тіла – *планетозімалі*. Найбільш великі з них стають зародками майбутніх планет. Час акумуляції планет з планетозімалей різний. Для планет-гігантів у зоні максимуму поверхневої густини диску шкала цього часу складає перші мільйони років, для планет земного типу – перші сотні мільйонів років.

Зростання планети продовжується доти, доки не вичерпуються планетозімалі з певного кільця навколо цієї планети – її зони живлення. Ширина зони живлення не менше розміру порожнини Роша планети. А розмір порожнини Роша зростає з віддаленням планети від зорі. Відстані між орбітами планет також зростають з віддаленням від зорі, тому поява масивних планет-гігантів можлива лише на досить великій відстані від зорі, не менше кількох астрономічних одиниць. Тому й треба якось пояснити спостереження багатьох екзопланет-гігантів з півосями орбіт в 1 а. о. і менше. Запропоновано механізм міграції цих планет з області їх утворення в напрямі до зорі за рахунок дії опору міжпланетного середовища, доки його густина є більш-менш значною. Можливі

механізми міграції планет і в зворотному напрямі від зорі. Поверхневі шари планети-гіганта, що знаходиться досить близько від зорі, розігріваються і починається ефективна дисипація водню (меншою мірою і гелію). Планета втрачає масу і починає віддалятися від зорі. Аналогічно може діяти і перерозподіл кінетичного моменту системи «зоря–планета» внаслідок припливного тертя.

У цьому сценарії утворення та еволюції планетних систем, який підтверджується спостереженнями протопланетних оболонок і дисків у деяких зір, є ще немало проблемних моментів. Так, наприклад, дискусійним є питання про початкову масу протопланетної хмари. Оцінки коливаються від 0.01 до 2 мас зорі. Не зрозуміло, з чим пов'язаний і розкид ексцентриситетів орбіт, тим більше, що зі зростанням маси планети він повинен зменшуватися. Є припущення, що це результат взаємної збурюючої дії планет, зокрема, у випадку, коли вони знаходяться на резонансних орбітах.

У цілому треба відзначити, що детальне вивчення нашої Сонячної системи, яке продовжується, і всезростаюча інформація про інші планетні системи дозволять вирішити одну з важливих проблем астрономії – побудову більш-менш повної загальної теорії походження та еволюції планетних систем.

Зауважимо наприкінці, що всі тіла, які ми спостерігаємо у космосі, укладаються за масами (не зважаючи на їхню різну фізичну природу) в більш-менш неперервну послідовність. Це - зорі-гіганти, зорі-карлики, субзорі, планети-гіганти, планети земного типу, планети-карлики, астероїди, комети, метеороїди, космічний пил. При цьому в послідовності «зорі, субзорі, планети» зорі за кількістю складають лише близько 10 %.

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. Що таке великі планети та планети-карлики?
2. Які об'єкти, крім планет, входять до складу Сонячної системи?
3. Яке визначення може бути дано планетам як класу космічних тіл?
4. На які три компоненти поділяється речовина тіл Сонячної системи?
5. Які основні закономірності притаманні орбітальним характеристикам планет та їх супутникам?
6. Чим визначається форма планетних тіл?
7. Які параметри планет є малими одного порядку малості при побудові теорії фігур планет і чому?
8. Що таке сфероїд Клеро?
9. Що таке параметр Дарвіна–де-Сіттера?

10. Чому до твердотільних планетних тіл застосовний принцип гідростатичної рівноваги?
11. Які об'ємні хвилі поширюються у твердотільних планетах?
12. Яку форму має сейсмічний промінь у неоднорідній за радіусом планеті та чому, і що таке параметр сейсмічного променя?
13. Які поверхневі хвилі поширюються у планетних тілах і чому?
14. Що таке шкала Ріхтера?
15. Які є механізми затухання сейсмічних хвиль?
16. На які види поділяються власні коливання планети?
17. Що таке рівняння Адамса–Вільямсона?
18. Які величини пов'язує між собою рівняння Клеро?
19. Який вигляд має рівняння розподілу температури в надрах планети?
20. Яким є механізм виникнення магнітних полів планет?
21. Чим відрізняються між собою альбедні характеристики планет-гігантів і твердотільних планетних тіл?
22. Що таке фазова функція поверхні планети і які чинники її формують?
23. Що таке опозиційний ефект?
24. На які частини за розмірами поділяються структурні неоднорідності рельєфу планетних поверхонь?
25. Які характерні точки має полярна фазова крива видимих поверхонь планет?
26. Чим визначається розподіл енергії у відбивних спектрах планетних поверхонь?
27. Чим визначається спроможність планетних тіл утримати той чи інший газ у своїй атмосфері?
28. Як поділяються планетні тіла Сонячної системи за своєю спроможністю втримати атмосферу?
29. Що визначає барометрична формула Лапласа?
30. Що таке шкала висот атмосфери та який її фізичний зміст?
31. Що таке гомосфера і гетеросфера та що визначає межу між ними?
32. Чим визначається температурна стратифікація планетної атмосфери?
33. На які основні шари поділяється земна атмосфера?
34. Що є спільного і чим відрізняються між собою термосфера, хемісфера та іоносфера планети?
35. Що таке політропна атмосфера?
36. Чому в атмосфері планет дмуть вітри?
37. Які є основні типи атмосферних рухів?
38. Чим відрізняються один від одного циклони і антициклони?

39. Що таке загальна циркуляція планетної атмосфери і на які три типи поділяються за її характером планети Сонячної системи і чому?
40. Що таке аерозольна складова планетних атмосфер і які її основні характеристики?
41. Чим визначається час гравітаційного осідання аерозолів у планетній атмосфері?
42. Які умови потрібні для утворення рідких аерозолів і хмар з них?
43. Які процеси призводять до утворення твердих аерозолів?
44. Якими є механізми виникнення та розвитку глобальних пилових бур на Марсі?
45. Що таке «ядерна ніч» та «ядерна зима»?
46. Що таке планетна магнітосфера?
47. Яку структуру має планетна магнітосфера?
48. Які особливості має рух заряджених частинок у плазмосфері?
49. Чому виникає полярне сяйво?
50. Які розміри мають малі планети – астероїди?
51. Що таке головний пояс астероїдів?
52. Що таке сімейства астероїдів?
53. У чому проявляється зіштовхувальна еволюція головного поясу астероїдів?
54. На які основні класи поділяються астероїди за своїми оптичними та фізико-хімічними властивостями?
55. Що таке «троянці»?
56. Що таке астероїди, які зближуються з Землею, і яке значення має їх вивчення?
57. Що таке хмара Оорта?
58. Яка структура комет, що вдалині та поблизу від Сонця?
59. Яка природа «хвостів» комет?
60. Що таке метеороїди?
61. Що таке метеори і якими процесами супроводжується це явище?
62. Що таке метеорити?
63. Чому метеоритні кратери мають сферичну форму незалежно від кута падіння метеорита?
64. Яке значення має метеоритне бомбардування для еволюції планетних поверхонь?
65. На які основні класи поділяються метеорити?
66. Що таке екзопланети?
67. Які існують методи пошуку екзопланет?
68. Якого типу екзопланети переважно відкриваються і чому?
69. Як виникає протопланетна хмара?
70. Які основні етапи проходить формування планетних тіл?

ЗАДАЧІ ДО ГЛАВИ 7

7.1. Знайти найбільшу та найменшу відстані центра Сонячної системи від центра Сонця, враховуючи лише маси Юпітера і Сатурна.

7.2. Обчислити стиснення сфероїда Клеро для Землі, Марса, Юпітера та Сатурна і порівняти результати із спостережними значеннями стиснення цих планет.

7.3. Який зиск можна одержати, перевозячи одну тонну певного товару по ціні 50 грн. за 1 кг з екватора Сатурна на його полюс?

7.4. Оцінити енергію E , яка виділяється при землетрусі з магнітудою у вісім балів і порівняти її з енергією E_1 , яку Земля одержує від Сонця протягом однієї хвилини.

7.5. Обчислити шкали висот для атмосфер Землі та Юпітера.

7.6. З'ясувати характер руху повітря з масштабом 5 см і швидкістю 5 см/с (кінематична в'язкість повітря $\nu = 0.133 \text{ см}^2/\text{с}$ при $t = 0^\circ \text{ C}$).

7.7. Оцінити характерні швидкості вітрів в атмосферах Венери та Марса.

7.8. Порівняти між собою кількості енергії, що її одержує Юпітер від Сонця E_1 , і яку він випромінює сам E_2 .

7.9. В яких межах лежать швидкості входження метеорних тіл в атмосферу Землі?

7.10. Який діаметр має екзопланета, якщо при її проходженні через центр зорі класу K0 блиск зорі змінюється на 0.01^m ?

7.11. Знайти ефективну температуру екзопланети типу «гарячого Юпітера», яка рухається за орбітою з великою піввіссю 0.25 а. е. навколо зорі класу G2V.

7.12. Знайти найбільш можливу амплітуду кривої блиску астероїда, фігура якого апроксимується двохосним еліпсоїдом і відбиває світло за законом Ломмеля–Зеєлігера.

ГЛАВА 8

ЖИТТЯ У ВСЕСВІТІ

8.1 Антропний принцип

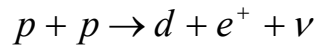
Взаємопов'язані пізнавальні процеси на стику фізики надвисоких енергій і космології ще тільки інтенсивно розвиваються, є різні теоретичні схеми побудови єдиної теорії поля, різні сценарії еволюції раннього Всесвіту. Але з тих результатів, що вже одержані, та з тих перспектив, що проглядаються, можна зробити принаймні два висновки величезного загальнонаукового та світоглядного значення.

Перший з них полягає в тому, що найбільш загальні та глибинні властивості нашого світу – його фундаментальні фізичні властивості - перестають бути просто сукупністю емпіричних фактів. Ми можемо ставити питання, а головне, шукати на них відповіді – чому вони саме такі, якими вони є, і як вони виникли. Це стосується таких підвалин буття, як розмірність простору, кількість фундаментальних взаємодій та значення констант, що їх визначають, спектр мас елементарних частинок. Тобто основи фізики – науки про найбільш загальну форму руху матерії – набувають *еволюційного характеру*. Нагадаємо у зв'язку з цим, що модель гарячого Всесвіту підвела еволюційний фундамент під хімію (а відтак і під біологію), а сама ідея нестационарного Всесвіту є найбільш грандіозним проявом еволюціонізму в сучасній астрономії. Таким чином, на межі ХХ і ХХІ ст. все природознавство набуває *послідовно еволюційного характеру*.

Другий висновок пов'язаний з так званим *антропним принципом*. Зараз можна навести цілу низку фактів, які свідчать про те, що вищезгадані фундаментальні фізичні характеристики визначають не тільки все різноманіття фізичної та астрономічної картини нашого світу, але і його властивості в інших аспектах, на всіх інших ступенях його буття.

Так, якби маса електрона була лише втричі більша від фактичної, то при тих масах нуклонів, що зараз є, неможливе було б існування атомів та молекул. Бо тоді різниця між масами нейтрона і протона була б менша від маси електрона і енергетично було б вигідніше перетворення всіх протон-електронних пар на нейтрони, а не навпаки - розпад вільного нейтрона. А в такому випадку було б неможливим існування атомів і молекул та

розвиток хімічної, а відтак і біологічної, і соціальної форм руху матерії. Існує і ще більш жорстке обмеження на масу електрона. Темп найповільнішої реакції протон-протонного циклу



такий, що забезпечує горіння водню в зорях типу Сонця протягом мільярдів років (що дає час для виникнення і розвитку життя) і є таким лише тоді, коли енергія спокою електрона менша від різниці між енергією зв'язку протона і нейтрона в ядрі дейтерія (2.2 МеВ) і різницею в енергіях спокою протона і нейтрона (1.3 МеВ), тобто

$$m_e < \varepsilon_d / c^2 - \Delta m_N = 0.9 \text{ МеВ},$$

таким чином, електрон не може бути важчим навіть у два рази (при тих же масах нуклонів, якими вони є). У свою чергу величина різниці Δm_N лімітована умовою нестійкості ${}^3\text{He}$ і можливістю реакції $3{}^4\text{He} \rightarrow {}^{12}\text{C}$, що необхідно для утворення ${}^4\text{He}$ і більш важких елементів.

Існування атомно-молекулярної форми організації речовини не можливе і в світі з розмірністю простору, відмінною від трьох. Це впливає з таких міркувань. Закон збереження енергії класичної задачі двох тіл можна представити в такому вигляді:

$$v_r = \sqrt{h - \frac{c^2}{r^2} + V_N(r)}, \quad (8.1)$$

де v_r – радіальна компонента швидкості, h – стала повної енергії, c – стала моменту, V_N – гравітаційний (або електричний) потенціал у N -вимірному просторі. Вигляд останнього неважко знайти як розв'язок N -вимірного рівняння Лапласа

$$\sum_{i=1}^N \frac{\partial^2 V_N}{\partial x_i^2} = 0. \quad (8.2)$$

Звідси матимемо, що

$$V_N = \frac{\mu}{(N-2)r^{N-2}} \quad (8.3)$$

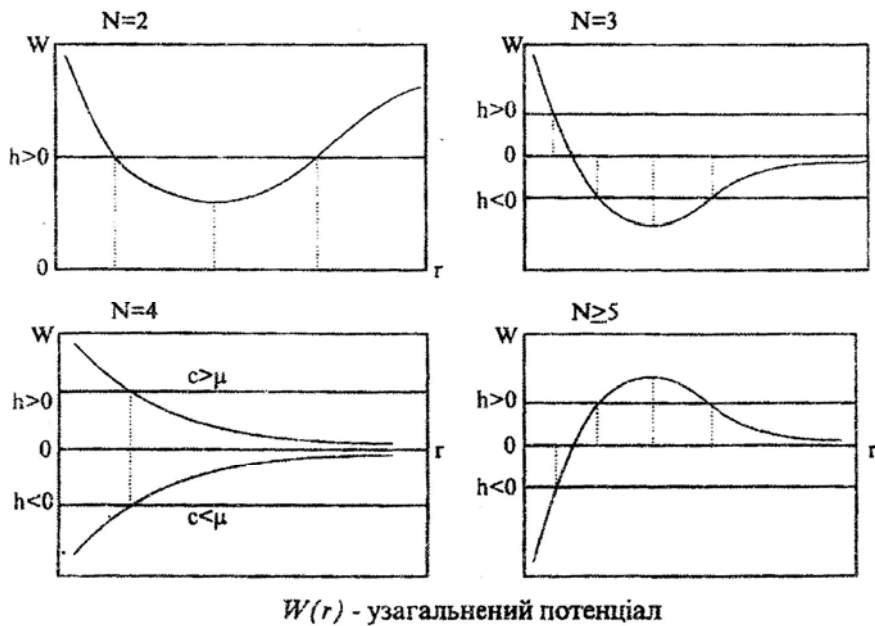
за винятком $N = 2$, коли

$$V_2 = \mu \ln r, \quad (8.4)$$

де μ – гравітаційна стала задачі. Аналізуючи вигляд *узагальненого потенціалу*

$$W_N(r) = \frac{c^2}{r^2} - V_N(r) \quad (8.5)$$

при $N = 2, 3, 4$ та $N \geq 5$, одержимо криві, які схематично показані на рис. 8.1. Рух можливий лише при тих значеннях відстані r , при яких величина W_N не перевищує сталу повної енергії h . Видно, що в двовимірному світі можливий тільки фінітний рух, а віддалення точки на нескінченість потребує нескінченно великої енергії. У чотиривимірному світі навпаки точка врешті-решт або падає на притягуючий центр, або уходить на нескінченність. У світі з розмірністю простору, що дорівнює або більше п'яти, відбувається те саме, і лише як виняток існує нестійка колова орбіта. І лише в такому світі, як наш, – тривимірному, існує більш широкий спектр можливостей – можливий і фінітний рух, і інфінітний, причому останній при скінченній повній енергії рухомої точки. Аналогічні результати мають місце і в квантовій задачі двох тіл. Усе це означає, що тільки в тривимірному світі можливий рух за супутниковими орбітами (планети навколо зорі або електрона в атомі) й водночас долання сили тяжіння будь-якого небесного тіла або іонізація і рекомбінація атомів та молекул. У світах з іншою розмірністю простору неможливе існування гравітаційно (чи електрично) зв'язаних систем ($N \geq 4$) або їх розпад ($N = 2$). А саме такими системами є зорі, а їх розпад (спалахи наднових) є основним шляхом збагачення Всесвіту ядрами елементів, важчих від гелію.



8.1. Задача двох тіл у просторі довільної розмірності
 $W(r)$ – узагальнений потенціал

Результати визначення параметрів космологічної моделі, про які йшлося в главі 6, дозволяють звузити невизначеність відносної густини енергії Ω до величини, близької до 1. У той же час *a priori* це значення могло б бути значно менше або значно більше від 1. У першому випадку

($\Omega \ll 1$) темп розширення Всесвіту був би значно повільнішим і можливо, що в сучасну епоху ще не тільки б не могло виникнути життя, а навіть не встигла б утворитися великомасштабна структура Всесвіту. У другому ж випадку ($\Omega \gg 1$) темп цієї еволюції був би настільки великим, що за час повного циклу еволюції (розширення – стиснення) складні структури, що є наявними в нашому Всесвіті, просто не встигли би утворитися.

Час життя зір визначається розміром їх ядра, де відбуваються термоядерні реакції, та умовами в ньому, які дозволяють подолати кулонівський бар'єр відштовхування між позитивно зарядженими атомними ядрами. Ці умови створюються при гравітаційному колапсі при утворенні зорі. Тому час життя зорі обернений до відношення гравітаційної та електромагнітної взаємодій. Нехай це співвідношення зміниться, скажімо, на два порядки (а це відносно небагато в логарифмічному масштабі, якщо згадати, що в нашому світі відношення гравітаційної взаємодії між протоном та електроном до кулонівської $\approx 10^{-39}$). Тоді при зменшенні цього співвідношення зорі, як об'єкти з ядерними джерелами енергії, взагалі не будуть утворюватися. При його збільшенні час життя зір будь-якої маси буде настільки малий, що на планетах біля них не буде встигати виникати життя, а можливо і самі планети не будуть встигати утворюватися. А термодинамічна нерівноваженість між відносно холодною речовиною планет (≥ 100 K) і відносно гарячим випромінюванням центральної зорі (> 2000 K) є необхідною умовою виникнення та розвитку біологічних систем як відкритих антиентропійних структур.

Таким чином, є ціла низка фізичних і астрофізичних фактів, так чи інакше пов'язаних з глибинними фізичними властивостями нашого Всесвіту, які примушують дійти до такого висновку: *для того, щоб у всесвіті могли виникнути і розвинутися форми організації та руху матерії більш складні, ніж рівноважна суміш елементарних частинок, потрібно, щоб фундаментальні фізичні властивості цього всесвіту не були довільними і навіть не просто лежали в певних межах, а були певним чином збалансовані між собою.* Цей висновок величезного загальнонаукового та світоглядного значення і дістав назву *антропного принципу* (від «антропос» – людина). Об'єктивний фізичний зміст антропного принципу полягає в тому, що він визначає необхідні умови утворення складних фізичних структур (атомів та молекул), а тим самим і розвитку більш складних рівнів організації та руху матерії – хімічного, біологічного (органічного життя), соціального (розумного життя) тощо. Підкреслимо, що йдеться саме про сукупність фізичних і астрофізичних обставин, хоча фундаментальних, але які безпосереднього відношення до людини не мають, тому назва «антропний принцип» не є, на нашу думку, дуже вдалою. Це лише необхідна сукупність обставин, за яких можливий

процес ускладнення форм організації та руху матерії, який потенційно може привести і до появи розумного життя. Зразу ж виникає питання – чи є певні фізичні властивості даного всесвіту (розмірність простору, спектр мас елементарних частинок, співвідношення між константами фундаментальних взаємодій) і достатніми умовами якісної еволюції всесвіту в бік ускладнення виникаючих в ньому структур? Дані синергетики про шляхи еволюції багатовимірних нелінійних систем дозволяють сподіватися на одержання відповіді на це питання, і притому стверджуючої.

Антропний принцип привернув до себе значну увагу після виходу в 1976 р. роботи англійського астрофізика Б. Картера, але думки, що, власне, вже містили в собі цей принцип, були сформульовані ще в 50-60 рр. ХХ ст. вітчизняними вченими Г. М. Ідлісом та А. Л. Зельмановим. Останньому належить такий виразний вислів, що відображає суть антропного принципу: «Ми є свідками саме таких процесів у нашому світі, які ми спостерігаємо, тому що в інших світах усі процеси відбуваються без свідків».

Те твердження, що було сформульоване вище, інколи має назву так званого слабкого антропного принципу. Для формулювання сильного антропного принципу, за яким властивості нашого Всесвіту є такими, якими вони є, визначаються необхідністю появи в ньому людини, об'єктивних підстав немає. Але неминуче виникає питання: а чому ж наш світ саме такий – з малоймовірним поєднанням його властивостей, які дозволили принаймні на одній планеті виникнути розумному життю? І важко заперечувати, що досить природною буде така відповідь: наш світ створений саме з цією спеціальною метою – появи в ньому людини. Тобто антропний принцип ніби підштовхує нас до *телеологічного* (від «teleos» – досягнення мети) погляду на нього. Проте слідом виникає питання – ким створений? Таким чином, цей телеологічний погляд на світ приводить до *теологічного* погляду на нього та до ідеї бога-творця, деміурга цього світу. Чи можливо в цих умовах зберегти і розвинути матеріалістичний погляд на світ як на такий (згадуючи слова Геракліта Ефеського), що «його не створив ніхто ні з богів, ні з людей»? Позитивна відповідь на це питання пов'язана ще з одним висновком, що випливає з розгляду процесів на планківській стадії історії Всесвіту, про який вже згадувалося. Це висновок про можливу множинність всесвітів з різними фундаментальними властивостями, що виникають з одного всеохоплюючого квантового Всесвіту. Цей висновок і сам по собі після його достатнього обґрунтування й уточнення означатиме чергову докорінну зміну в людських уявленнях. Таким чином, приходимо до думки про те, що поява всесвіту з усіма умовами, потрібними для розвитку вищих, ніж фізична, форм руху матерії є подією випадковою. Але при достатньо

великій кількості всесвітів ймовірність такої події також буде досить великою. Є оцінки цієї кількості, що дають її значення $N > 10^7$. Таким чином, існування світу, в якому виникло розумне життя, є явищем цілком природним і закономірним, однак ця закономірність має стохастичний характер.

Думка про те, що людина та її життя тісно пов'язані з природою, причому не тільки з тією, яка безпосередньо оточує людину, а з усією природою, з космосом, із Всесвітом, без перебільшення така ж стара, як і саме людське мислення. Вона пронизує давньоіндійську філософію. Вона ж, нехай і в перекрученому, ілюзорному вигляді лежить в основі астрологічних вірувань. І ось вперше в історії ця ідея виступає як науково обґрунтоване положення. У цьому фундаментальне *філософське* значення антропного принципу. Цей принцип означає новий, більш глибокий рівень пізнання еволюційних зв'язків між різними ступенями організації та руху матерії. У цьому полягає його *інтегруюче загальнонаукове* значення. Зараз гостро постає питання про відповідальність людства і кожної окремої людини за долю навколишнього природного середовища, за долю планети Земля. З часом ареал буття та перетворюючої діяльності людства буде поширюватися все далі в космос. Разом з цим повинно зростати і відчуття відповідальності людини за світ, в якому вона живе і діє. Антропний принцип підносить рівень цієї відповідальності до космічних, справді вселенських масштабів. У цьому його неабияке *соціальне і моральне* значення.

8.2. Проблема існування і пошуку життя поза Землею

Насамперед, спробуємо з'ясувати, про що ж, власне, йдеться. В останні десятиліття при спробах пояснити, що таке життя, як правило, підкреслюють інформаційний аспект цього явища. Нам здається, що треба виходити з визначення життя (принаймні у тому вигляді, яким ми знаємо його на Землі), що його ще наприкінці ХІХ ст. дав Ф. Енгельс, звичайно певним чином його модернізувавши. А саме, *життя* – це спосіб існування білкових тіл, суттєвим моментом якого є обмін речовинами, енергією й інформацією з навколишнім середовищем. Крім того, важливими є ще дві риси цього явища. По-перше, властивість окремого організму підтримувати свій гомеостазіс за допомогою безумовних і умовних рефлексів. А по-друге, наявність механізму спадковості з можливістю впливу на нього. Знаходячись у діалектичній єдності, вони дозволяють живим організмам існувати, відтворюватися і в той же час еволюціонувати.

Якими ж є фізико-хімічні засади органічного життя? З одного боку, це властивість атомів вуглецю утворювати завдяки їхньому положенню

в періодичній системі елементів високомолекулярні полімерні сполуки. З другого боку, це унікальні властивості рідкої води як розчинника завдяки дуже великому значенню її діелектричної проникності. Таким чином, збагаченість середовища, насамперед, вуглецем і киснем, температурний режим і тиск, що дозволяють існувати воді у рідкому стані, – необхідні умови для виникнення і розвитку життя. Потрібна, як вже згадувалося, і суттєва термодинамічна невривноваженість середовища. Всі ці умови можуть виконуватися лише на поверхнях планет земного типу. Для цього планета повинна знаходитися на певній відстані від своєї центральної зорі, тим меншій, чим більш пізній спектральний клас має ця зоря. Коридор необхідних відстаней виявляється досить вузьким. Так, для Землі він дорівнює приблизно 0.1 а. о. Таким чином, саме планети, незважаючи на відносно малу їхню масу в Галактиці (мабуть, десь $10^{-4} - 10^{-3} M_{Gal}$), відіграють дуже важливу еволюційну роль у Всесвіті – вони є базою, на якій у космосі розвиваються вищі, ніж фізична, форми руху й організації матерії – хімічна, яка за певних умов породжує біологічну. А остання, як показує приклад нашої Землі, може породжувати найвищу з відомих нам форм – соціальну.

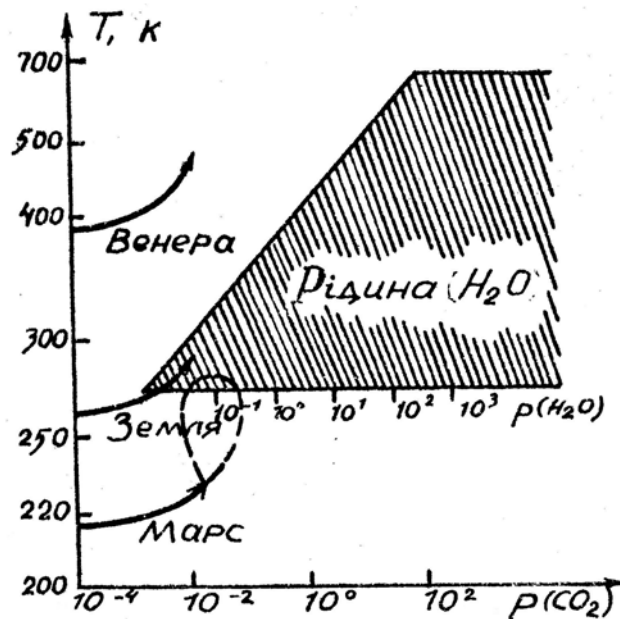


Рис. 8.2. Умови існування рідкої води на поверхні планети

Умови існування рідкої води на планетах земної групи в нашій Сонячній системі, первинні атмосфери яких складаються переважно з CO_2 , показані на рис. 8.2. Вершини «водяної» трапеції визначаються значеннями температури і тиску потрійної та критичної точок води ($T_{тр} = 273$ К, $p_{кр} = 6.1$ мбар, $T_{кр} = 647$ К, $p_{кр} = 220$ бар). Початкові точки еволюційних

треків планетних атмосфер на діаграмі $T - p(\text{CO}_2)$ залежать від ефективної температури планети. Видно, що Землі як раз «пощастило». На Венері існування рідкої води неможливе. На Марсі в сучасних умовах теж. Але періодична зміна нахилу його осі обертання до нормалі до площини орбіти від 10° до 35° під впливом інших планет можуть створювати відносно короткочасні умови, коли рідка вода на поверхні можлива. При мінімальному значенні кута нахилу вуглекислота полярних шапок Марса переходить в атмосферу, атмосферний тиск може сягати 0.5 бар. Але виникнення життя за цей час (біля 10^7 років) вкрай мало ймовірно.

Коли фізичні умови на Марсі не були ще так добре відомі як зараз, факт існування на ньому атмосфери і додатних температур, принаймні влітку на екваторі, породжували надії на існування там життя і навіть розвиненої цивілізації (знамениті «канали» Дж. Скіапареллі, астроботаніка Г. А. Тихова). Пошуки найпростіших форм життя були важливою частиною досліджень Марса за допомогою засобів ракетно-космічної техніки, зокрема місій «Вікінг-1» та «Вікінг-2», а пізніше місії «Любознавство», але вони не дали певних позитивних результатів.

Ще в межах Сонячної системи сподівання знайти якісь форми життя з'явилися, коли було з'ясовано, що на супутнику Юпітера Європі під льодяною корою можливо існування океану рідкої води. Але саме близькість умов там до рівноважних робить це дуже мало ймовірним. Таким чином, поки що Земля це єдиний притулок життя у Сонячній системі.

Протягом ХХ ст. накопичувалися окремі спостережні факти і теоретичні уявлення на користь існування екзопланет. Відкриття в останні десятиріччя понад тисячі таких планет (хоча в основному типу планет-гігантів, а в останні роки вже й планет земного типу) створює умови для якісно нового етапу в проблемі пошуку життя поза Землею. У наступні десятиріччя це стане одним з головних завдань астрофізики. Спостережне підтвердження досить широкої розповсюдженості планетних систем у Галактиці створює ситуацію стриманого оптимізму у вирішенні цієї проблеми.

8.3. Проблема SETI

Питання про існування розумного життя за межами Землі здавна хвилювало людство, хоча підіймалося воно довгий час переважно у міфологічній формі. Початок його постановки в науковому плані пов'язаний з іменем Дж. Бруно (кінець XVI ст.), який зробив висновок про можливість розумного життя на планетах поблизу інших зір, як висновок з геоцентричного вчення М. Коперніка. Причому як висновок, що суперечив не тільки першим же строкам Біблії, а й одному з основних догматів християнства про спокутну місію Христа. І потім протягом майже

чотирьох з половиною століть ця проблема дискутувалася між прихильниками наукових і релігійних поглядів в основному у світоглядному плані. Ситуація змінилася у другій половині ХХ століття.

У 1959 р. була опублікована робота американських учених Ф. Моррісона і Дж. Кокконі, в якій вони запропонували шукати сигнали від позаземних цивілізацій на радіочастоті випромінювання та поглинання випромінювання міжзоряним воднем (21 см або 1420 МГц), мотивуючи це тим, що цивілізація, яка досліджує космос, має відповідну апаратуру. Вже через два роки був здійснений перший проект з реалізації цієї ідеї – проект «Озма» під керівництвом радіоастронома Ф. Дрейка. І справа не в тому, що такі сигнали не були знайдені, а в тому, що людство стало на шлях їх пошуку. Проблема в цілому змінила свій статус – зі світоглядного рівня вона перейшла в ранг конкретних науково-технічних проблем. Існування чи відсутність позаземних цивілізацій тепер треба встановити шляхом відповідних досліджень.

Сформувалася проблема, яка спочатку отримала назву зв'язку (communication) з позаземними цивілізаціями (ПЦ) – проблема СЕТІ. Однак досить швидко з'ясувалося, що проблему треба ставити і розглядати значно ширше – як проблему дослідження та пошуку ПЦ – проблему SETI (Search of Extraterrestrial Intelligence). Постали дуже не прості, але важливі і самі по собі питання. Яка різниця між неживим і живим? Що таке взагалі цивілізаційний етап розвитку матерії та які можливі шляхи розвитку різних цивілізацій? Треба було відповісти і на більш конкретні питання. Який канал міжзоряного зв'язку найбільш ефективний? Які критерії штучності сигналу? Чи можливий взагалі змістовний контакт між різними цивілізаціями, різними культурами? Які можуть бути наслідки контакту нашої цивілізації з іншою?

Для пошуку відповідей на ці питання потрібні зусилля цілої низки наук – фізики й астрономії, біології і теорії інформації, соціології і теорії культури, семантики і семіотики. Цей комплексний характер проблеми, необхідність поєднання в ній методів природничих, технічних і суспільних наук є дуже важливим – у ньому проявляється одна з інтегративних тенденцій у розвитку науки, які протидіють її диференціації та поглибленню кордонів між різними галузями наукового знання. Комплексний характер проблеми підкреслюється *формулою Дрейка* для оцінки можливої кількості цивілізацій у Галактиці:

$$N_c = N_s p_1 p_2 p_3 p_4 (T_c / T_G), \quad (8.6)$$

де N_s – кількість зір у Галактиці, p_1 – ймовірність утворення планетної системи біля певної зорі, p_2 – ймовірність виникнення життя на одній з планет цієї системи, p_3 – ймовірність виникнення цивілізації на базі

біосфери цієї планети, p_4 – ймовірність розвитку цієї цивілізації до технологічного рівня, на якому стануть можливими її контакти з іншими цивілізаціями, T_c – час життя технологічно розвиненої цивілізації, T_G – вік Галактики. Перший та другий множники і знаменник цієї формули визначають астрономічний аспект проблеми, третій – біологічний, четвертий та п'ятий – її соціально-історичний аспект.

Зараз у формулі Дрейка більш-менш відомі лише величини $N_s \approx 2 \cdot 10^{11}$ зір і $T_G \approx 10$ млрд років. Ймовірності, що входять в цю формулу, не можуть бути строго обчислені. Використовуються так звані суб'єктивні ймовірності, тобто усереднені експертні оцінки провідних спеціалістів у відповідних галузях знання. Зокрема можна вважати, що величина p_1 не може за порядком величини відрізнятися від одиниці, бо виникнення планетної системи це природний наслідок процесу утворення зорі. Що стосується множника p_2 , то специфічні умови виникнення життя, про які йшлося вище, роблять його, мабуть, найменшим з усіх ймовірнісних множників у формулі Дрейка.

Непростим виявилось питання, пов'язане з останнім множником T_c – часом існування технологічно розвиненої цивілізації. Виявилось, що під впливом успіхів науки і техніки вельми розповсюдженою стала точка зору, згідно з якою цивілізація, виникнувши, буде існувати необмежено довго. Хоча ще наприкінці XIX ст. Ф. Енгельс писав, що явище розумного життя в кожному своєму конкретному прояві має свою історію, свій початок і свій кінець. Під впливом холодної війни і ризику ядерної війни з'явилася й протилежна точка зору – про надкоротку шкалу життя ПЦ, про чи не фатальну неминучість їхньої загибелі після відкриття ними ядерної енергії. Врешті-решт оцінки за формулою Дрейка приводять до можливої кількості цивілізацій у нашій Галактиці порядку одного мільйона. Це не так вже й багато, з огляду на те, що це означає, що середня відстань між цивілізаціями дорівнює десь 300 пк (або 1000 св. р.).

Основою технічного аспекту проблеми SETI є пошук фізикою, астрофізикою та теорією інформації найбільш ефективного каналу міжзор'яного зв'язку. Зараз, з урахуванням інформаційної місткості та перешкодозахищеності, вважається, що це радіодіапазон електромагнітних хвиль. Інші принципово можливі шляхи пошуку ПЦ вказані на схемі рис. 8.3. Щодо питання про критерії штучності сигналів, які приймаються, то більшість дослідників згодна з необхідністю слідувати принципу «презумпції природності», тобто спочатку виходити з припущення про природне походження цих сигналів і намагатися знайти їх відповідне пояснення, а не поспішати повідомляти людство про знайдення ПЦ.

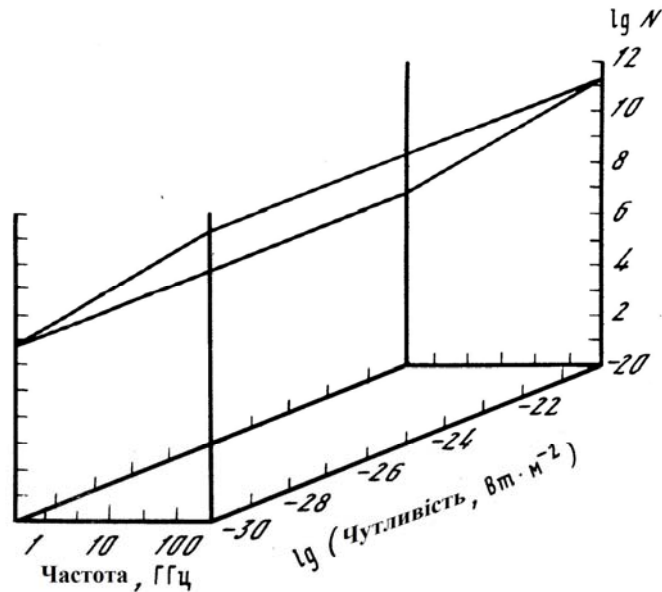


Рис. 8.3. «Космічний стіг сіна»

N – кількість напрямів на небесній сфері

Було введено поняття про п'ятивимірний фазовий простір пошуку ПЦ. Координатами в ньому є напрям на ПЦ, відстань до неї і характеристики випромінюваного сигналу – його потужність та частота. Проведені експерименти з пошуку ПЦ (а їх виконано вже багато десятків, в основному в США та СРСР) охопили ще дуже незначну частину цього простору. Тому їхні негативні результати не повинні викликати особливого неспокою. Великий об'єм простору пошуку викликав аналогію з пошуком голки в стозі сіна (рис. 8.3). Зараз йде природний процес накопичення досвіду цього пошуку. Зокрема досягнуті великі успіхи в прийомі широкосмугових сигналів, що дозволяє одночасно аналізувати сигнали на великій кількості (в кілька мільйонів) частотних каналів.

На стику теорії інформації і семантики виникла проблема можливості змістовного контакту між різними цивілізаціями. Спочатку виникли дві крайні точки зору. Одна з них, «науково-природнича», виходила з того, що загальність законів фізики і математики дає достатню основу для такого контакту, принаймні на першому його етапі. Інша точка зору, виходячи з можливості суттєвої різниці в умовах формування різних цивілізацій та, відповідно, різного відображення в їхній свідомості різних аспектів дійсності, взагалі ставила під сумнів саму можливість такого контакту. Складним питанням, на яке також нема однозначної відповіді, є питання про можливі соціальні наслідки зустрічі земної цивілізації з ПЦ. Аналізувати доводиться широкий спектр можливостей – від достатньо швидкого встановлення контакту й ефективної допомоги більш розвиненій цивілізації менш розвиненій до біологічної або психологічної несумісності різних цивілізацій (рис. 8.4).

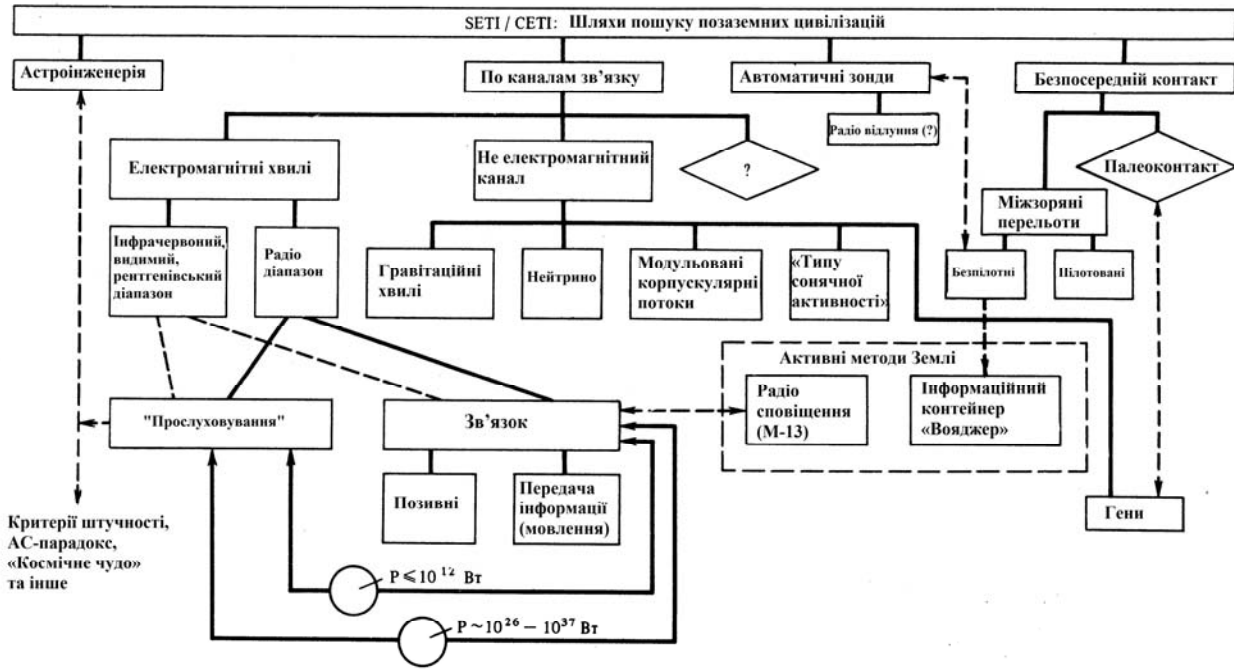


Рис. 8.4. Можливі шляхи пошуку позаземних цивілізацій

Якщо істотною властивістю соціальної форми буття, цивілізаційний етап еволюції матерії – здатність пізнавати навколишній світ і цілеспрямовано впливати на нього – узагальнити на інші, позаземні цивілізації та проекстраполювати в просторових, масових і енергетичних масштабах космосу, то дійдемо до такого цікавого висновку, який зробив філософ Є. Т. Фадеєв. Припустимо, що можна ввести узагальнену кількісну міру розповсюдженості різних форм руху матерії. Якщо тоді побудувати залежність послідовно виникаючих при еволюції Всесвіту ступенів розвитку матерії, то ця залежність буде описуватися опуклою кривою. Для визначеності розглянемо масу, охоплену послідовно фізичною (Ф), хімічною (Х), біологічною (Б) і соціальною (С) формами руху матерії в нашій Сонячній системі, вважаючи її досить типовим явищем. Відповідні оцінки за порядком величини є такими: Ф – 10^{33} г, Х – 10^{29} г, Б – 10^{23} г, С – 10^{16} г. Відповідні епохи часу: виникнення Галактики 10 млрд років (Ф), утворення Сонячної системи 5 млрд років (Х), формування сучасного обличчя Землі та біосфери 2.5 млрд років, сучасна епоха (С). Саме так побудований рис. 8.5. Якщо така тенденція збережеться і в майбутньому, то крива на цьому рисунку перетне вісь абсцис, тобто розглядувана міра розвитку повинна перетворитися на нуль. Який же вихід можливий з цієї еволюційної кризи? Таким виходом є космічна експансія цивілізацій, поступальне розширення просторових, масових, енергетичних та інформаційних параметрів їхньої діяльності, що у сукупності й приведе до того, що крива типу, зображеної на рис. 8.5,

перейшовши через мінімум, почне підійматися вгору. І ключовий момент у цьому процесі якісного розвитку нашого світу є як раз вихід кожної з цивілізацій за межі своєї материнської планети. Саме цей етап і почала проходити зараз наша земна цивілізація.

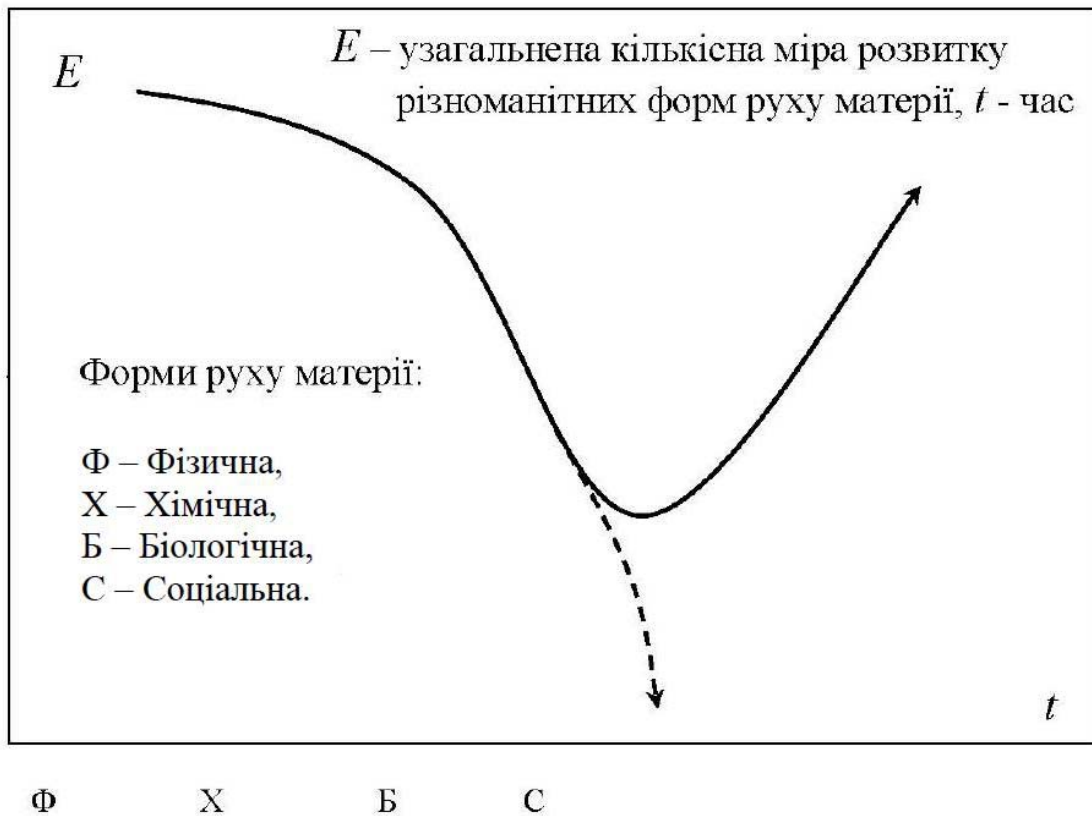


Рис. 8.5. Еволюція матерії у Всесвіті

Розвитком і конкретизацією цих міркувань стала класифікація цивілізацій, яку ввів відомий астрофізик М. С. Кардашев. Він запропонував розглядати цивілізації трьох рівнів. Цивілізація I рівня використовує енергію в масштабах своєї планети; цивілізація II рівня оволоділа енергією, яка за порядком величини дорівнює енергії зір; а цивілізація III рівня оволоділа енергією в масштабах цілої галактики. Наша людська цивілізація вже наближається до виходу на I рівень. Є багато ідей її подальшого розвитку, що можуть вивести її на II рівень — від «ефірних поселень» Ціолковського до сфери Дайсона. Відомий американський фізик Ф. Дайсон, розуміючи, що створення суцільної сфери, яка б перехоплювала всю енергію, що її випромінює Сонце, суперечить законам механіки, запропонував створити велику кількість окремих кілець, які б перехоплювали якщо не всю, то хоча б більшу частину енергії Сонця.

У зв'язку з такою класифікацією ПЦ виник так званий *астросоціологічний парадокс* — питання, чому ми не спостерігаємо цивілізацій II рівня, які повинні бути надзвичайно потужними джерелами інфрачер-

воного випромінювання, враховуючи те, що часу для їхнього виникнення і розвитку було достатньо.

Поряд з виходом цивілізації за межі своєї планети важливим етапом в її розвитку повинно бути утворення *ноосфери* (сфери розуму), тобто забезпечення на підставі знання законів їхньої еволюції гармонійного взаємопов'язаного розвитку планетарного чохла планети (її зовнішніх оболонок), її біосфери і самої цивілізації – їхньої коеволюції.

Виникнення космонавтики та розвиток проблеми SETI викликали і деякі небажані наслідки. Маються на увазі так звані проблеми НЛО та палеоконтактів. В принципі, можливість відвідання Землі представниками іншої цивілізації відкидати не можна. Але ж треба мати на увазі наскільки мала ймовірність такого візиту саме на Землю і саме зараз або навіть за весь час існування людства. Вивченням явища НЛО займається ціла наука – «уфологія» (від англійського UFO). Однак справді науковий підхід до цього явища показує, якщо відкинути відверті фальсифікації та «свідчення» психічно неврівноважених людей, то в переважній більшості випадків тоді, коли є достатньо достовірні інформація, явище знаходить своє природне або техногенне пояснення. Зокрема це і спостереження астрономічних об'єктів в незвичайних умовах. Що ж до так званих палеоконтактів, коли спробують пояснити появу в минулому мегалітичних споруд за допомогою інопланетян, то ці факти також знаходять своє цілком земне пояснення. Тут справа в тому, що в розпорядженні людей минулого було багато часу, і тому для виконання великих за обсягом енергії робіт їм було достатньо невеликих потужностей.

А головна причина розповсюдженості цих білянаукових міфів (як, до речі, і астрології) соціально-психологічна. Людині взагалі, а в періоди соціально-економічних потрясінь і негараздів особливо, треба мати якусь духовну опору. І ось, коли рівень розвитку людини вже не дозволяє їй знайти таку опору в релігії, але ще не дозволяє їй виходити з послідовно наукової точки зору, то вакуум в її душі і розумі заповнюється псевдо-наукою. Місце всемогутнього бога, якому треба лише помолитися, і він все влаштує, займає всемогутній інопланетянин, якій прилетить і теж все влаштує, вирішить усі наші проблеми.

Чи вступить людство в контакт з іншими цивілізаціями, з іншими культурами, і коли це може відбутися? Це може відбутися і завтра. Але скоріше за все ми знаходимося лише на самому початку довгого і складного шляху до такої зустрічі. І поки що нам треба вберегти нашу Землю і нашу цивілізацію від зажерливості можновладців, треба нести в навколишній світ не хаос воєн і екологічних катастроф, а творче світло праці та розуму. І розвиток науки про фізичну будову і еволюцію небесних

тіл та їх систем, про будову і еволюцію Всесвіту – астрофізики – наочно підтверджує, що людина спроможна на це.

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. Які фізичні факти лежать в основі антропного принципу?
2. Які астрофізичні факти лежать в основі антропного принципу?
3. У чому полягає суть антропного принципу?
4. Яке значення має антропний принцип?
5. Що таке органічне життя?
6. Які умови потрібні для виникнення та розвитку органічного життя?
7. Де і як можна шукати позаземне життя в Сонячній системі?
8. Де треба шукати позаземне життя в Галактиці?
9. У чому полягає зміна статусу проблеми пошуку розумного життя у другій половині ХХ століття?
10. У чому різниця між проблемами СЕТІ та SETI?
11. Які питання виникають у межах проблеми SETI?
12. Що визначає формула Дрейка?
13. Які фактори формули Дрейка мають астрономічний характер?
14. До якого висновку приводить формула Дрейка?
15. Який канал міжзоряного зв'язку вважається найімовірнішим?
16. Які ще є можливі шляхи пошуку позаземних цивілізацій?
17. Яке еволюційне значення має вихід цивілізацій за межі материнської планети та їхня подальша космічна експансія?
18. Що лежить в основі класифікації цивілізацій за Кардашевим?
19. У чому полягає астросоціологічний парадокс і чи є він насправді?
20. У чому причина розповсюдженості білянаукових міфів, зокрема астрології, та пов'язаних з проблемою SETI?

ВІДПОВІДІ ТА ВКАЗІВКИ ДО ЗАДАЧ

$$1.1. \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \\ 0 & -\cos \varphi & \sin \varphi \end{vmatrix}; \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varepsilon & -\sin \varepsilon \\ 0 & \sin \varepsilon & \cos \varepsilon \end{vmatrix}.$$

$$\sin b = \sin \delta \sin D - \cos \delta \cos D \cos(\alpha - A)$$

$$1.2. \sin l \cos b = \sin \delta \cos D - \cos \delta \sin D \cos(\alpha - A)$$

$$\cos l \cos b = \cos \delta \cos(\alpha - a)$$

1.3. 22 червня 21 грудня

Місто	Схід	Захід	Схід	Захід
Луганськ	$3(4)^h 16^m$	$19(20)^h 39^m$	$7(8)^h 22^m$	$15(16)^h 27^m$
Ужгород	$5(6)^h 24^m$	$20(21)^h 47^m$	$8(9)^h 30^m$	$16(17)^h 35^m$

В дужках – години за літнім часом

$$1.4. V = 32.1 \text{ км/с}; L = 10.5 \text{ млрд км.}$$

1.5. а) західна, найяскравіша зоря нашого неба, подвійна, її слабкий супутник є першим відкритим білим карликом; б) незахідна, досить яскрава затемнено-змінна зоря з великою амплітудою змінності, що було відомо арабським астрономам, які назвали її за це – «оком» диявола; в) невисхідна, яскрава зоря, що розташована поблизу від південного полюса екліптики, використовується в космічній навігації.

1.6. Якщо зоря знаходиться на полюсі екліптики, то це коло а) з радіусом σ'' , б) з радіусом π'' ; якщо зоря знаходиться на екліптиці, то це відрізок екліптики довжиною а) $2\sigma''$ б) довжиною π'' ; в загальному випадку це еліпс з півосями а) σ'' та $\sigma'' \sin \beta$, де стала аберації $\sigma'' = 206265'' \nu_{\text{орб.з.}} / c = 20.50''$, б) еліпс з π та $\pi \sin \beta$.

$$1.7. \rho = 106''.$$

1.8. На орбіті Місяця сила тяжіння Землі повинна врівноважуватися відцентровою силою.

1.9. Записати проекцію рівняння руху на напрям \vec{r} , перейти від змінних r, t до змінних u, v і виключити нормальну компоненту швидкості за допомогою інтеграла моменту.

1.11. $6.42 \cdot 10^{26}$ г.

1.12. а) $R_{\text{Л}} = 0.92$ млн км, $R_{\text{Х}} = 1.5$ млн км; 75 тис. км, 220 тис. км; 48.3 млн км, 50.6 млн км; б) 66.2 тис. км, 61.5 тис. км; в) 7.9 км, 17.9 км.

2.1. Яскравість відбивної поверхні пропорційна її освітленості та відбивній здатності. Освітленість від Сонця обернена квадрату відстані.
 $B_M / B_C = A(R_C / 1 \text{ а. о.}) = 1/660000$.

2.2. $B_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1 \right]^{-1}$.

2.3. $B_{\lambda PD}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \left[\exp\left(-\frac{hc}{\lambda kT}\right) \right]$; $B_{\lambda PD}(T) = \frac{2c}{\lambda^4} kT$. $\delta_B \leq 0.3\lambda T$;
 $\delta_{P.-Дж.} \geq 70\lambda T$.

2.5. 1216 Å; 6563 Å.

2.6. $\Delta\lambda = 2\lambda \frac{R}{cT}$.

2.7. Годограф – це графік (у полярній системі координат) залежності швидкості від кута θ .

2.8. 6 МГц; 70 МГц; 18 МГц; ≥ 500 МГц.

2.9. $\Delta_D v / v_0 > \Delta_g v / v_0$; $\Delta v_D / \Delta_g v \rightarrow 2$ при $r \rightarrow r_g$.

2.10. 9 км; 4.5 км.

3.1. $F = 206265L/\beta'' = 10 \cdot 9 \cdot 10^{-6} \cdot 206265/5 \approx 3.6$ м.

3.2. $\alpha'' = 1.22 \cdot 206265\lambda/D = 1.22 \cdot 0.55 \cdot 10^{-6} \cdot 206265/2.5 \approx 0.06''$.
 $L = F\beta''/206265 = 50 \cdot 2 \cdot \alpha''/(6 \cdot 10^{-6} \cdot 206265) \approx 5$ пікселів.

3.3. Не гірше роздільної здатності на найменшій довжині хвилі, тобто не гірше 3.5".

3.4. $\lambda/(2 \cdot R_{\oplus}) \approx 0.018$ кут. сек. Точність часу не гірше 10^{-3} с.

3.5. Виходячи з того, що гранична зоряна величина людського ока сягає 6^m , а втрати при візуальних спостереженнях можуть досягати 50 %, то $m_{\max} = 7.5 + 5 \lg D(\text{см})$.

3.6. $C = 490 \text{ мм}^{-1}$, а відстань дорівнює 0.3 мм.

3.7. $\Delta m_p = 2.5 \times \lg((P+1)/(1-P))$.

3.8. Освітленість горизонтальної одиничної площадки, що надходить від небесної сфери з постійною яскравістю у тілесному куті $d\omega$ буде: $dE = B \cos \varepsilon d\omega$, $d\omega = d\sigma/r^2$. Будемо вважати, що $r = 1$, тоді: $dE = B \cos \varepsilon d\sigma$. Елемент площі у сферичній системі координат ε : $d\sigma = \sin \varepsilon d\varphi d\varepsilon$. Тоді освітленість буде:

$$E = B \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} \cos \varepsilon \sin \varepsilon d\varepsilon = \pi B.$$

3.9. Будемо вважати, що спостереження ведуться у протистоянні і зоряна величина об'єкта залежить тільки від кількості очей котів. Тоді

$m_1 = -2.5 \lg(sn) + C$, $m_2 = -2.5 \lg(s(n-1)) + C$, де s – площа ока одного кота, n – кількість очей у котів, а C – нуль-пункт шкали зоряних величин.

$m_1 - m_2 = -2.5 \lg(n/(n-1)) = -0.20$, $n/(n-1) = 10^{0.4 \cdot 0.2}$, $n = 6$, а котів буде три.

3.10. Оскільки освітленість E пропорційна інтенсивності I від об'єкта і обернено пропорційна квадрату відстані r , то на відстані 10 пк від зорі, подібної Сонцю, освітленість буде: $E_2 = E_1 r_1^2 / r_2^2$, $r_1 = 1$ а.о., $r_2 = 10 \cdot 206265$ а.о., $E_2 = 0.32 \cdot 10^{-6}$ ерг/($\text{см}^2 \cdot \text{с}$). Потік, що реєструється приймачем, пропорційний освітленості та площі поверхні телескопу: $\Phi = E \times S$. Чутливість болометра - це і є той мінімальний потік, що може зареєструвати телескоп, тоді $D = (4\Phi/(\pi E_2))^{1/2} \approx 2.0$ м.

4.1. Відношення освітленостей від подвійної системи α CenA є $S_2 / S_A = (S_A + S_B) / S_A = 1 + 10^{0.4(m_B - m_A)}$. Звідси $m_2 = 0.08^m$. Зоря Проксима практично не впливатиме на блиск всієї системи, бо її вплив значно менше точності визначення зоряних величин.

4.2. $W_p / W_T \approx 700$. Ядерні реакції відбуваються завдяки тунельному ефекту.

4.3. Використати теорему віріала для зорі, що обертається.

4.4. $\Delta\lambda = 8 \cdot 10^{-5} \lambda$.

4.5. $\approx 0.2^m$.

4.6. 8500 пк; $7 \cdot 10^5$ пк.

4.7. $M_J \approx 10^3$ мас Сонця.

4.8. $R = 4500$ км.

4.9. Додаткове червоне зміщення викликано впливом гравітаційного поля поблизу поверхонь цих зір. $\bar{M} \approx 0.8 M_C$.

4.10. Швидкість на екваторі не повинна перевищувати першу космічну (див. зад. 1.10). $P_{\min} = 0.7$ мс.

4.11. Швидкість на екватор не повинна перевищувати швидкість світла. $P_{\min} = 0.2$ мс.

4.12. $m_B = 10^m$; ρ (а. о.) = 15 а. о.; $T = 16.2^y$; найкраща наземна роздільна здатність на високогірних обсерваторіях на телескопах без систем адаптивної оптики становить $\rho'' \approx 0.5''$, тому компоненти не розділяються при наземних спостереженнях.

5.1. Розглянути, до яких відстаней можуть знаходитися зорі певної довільної світності з видимими зоряними величинами m і $m + 1$.

5.2. Побудувати напрями на зорю з початкового положення Сонця та через 1 рік. 4.74 – це відношення а.е. у км до довжини року в секундах.

5.3. $\mu = 1'' / \text{рік}$.

5.4. $M \approx \frac{V^2 r}{G} \approx 3 \cdot 10^{11} M_C$. Оцінка знизу.

5.5. $8 \cdot 10^{-18} \text{ г/см}^3$; $M \approx 500 M_C$.

5.6. Відношення півосей на зображенні М31 приблизно 4:1, кут $\approx 14^\circ$; Кут Галактики з М31 дорівнює її галактичній широті (див. зад. 1.3) $b \approx 20^\circ$.

5.7. $\theta_E = 1.5''$

6.1. $l_{Pl} = 1.6 \cdot 10^{-33} \text{ см}$; $t_{Pl} = 5.4 \cdot 10^{-44} \text{ с}$; $m_{Pl} = 2.2 \cdot 10^{-5} \text{ г}$; $\rho_{Pl} = \frac{2\pi c^5}{G^2 h} = 5.2 \cdot 10^{93} \text{ г/см}^3$;

$$T_{Pl} = \sqrt{\frac{hc^5}{2\pi k^2}} = 1.4 \cdot 10^{32} \text{ К.}$$

6.2. $H_0 = 7.13 \cdot 10^{-12} \text{ років}^{-1}$; $2.24 \cdot 10^{-18} \text{ с}^{-1}$.

6.3. $H_\infty = 59 \text{ (км/с)/Мпк}$.

6.4. $a = a_0 \sqrt[3]{\frac{9}{4} \Omega_{d0} (H_0 t)^{2/3}}$ при $t \rightarrow 0$; $a = a_0 \sqrt{\frac{\Omega_{d0}}{\Omega_{\Lambda 0}}} e^{H_\infty t}$ при $t \rightarrow \infty$.

6.5. $t_0 = \frac{2}{3} (H_0 \sqrt{\Omega_{\Lambda 0}})^{-1} \text{ Arsh} \left(\frac{1}{2} \right) = 13.7 \text{ млрд років}$.

6.6. $\ddot{a} = 0$. $t_n = \frac{2}{3} (H_0 \sqrt{\Omega_{\Lambda 0}})^{-1} \text{ Arsh} \frac{1}{\sqrt{2}} = 7.3 \text{ млрд років}$.

6.7. 40000 років.

6.8. $m_\nu \approx 1 \text{ еВ}$, тобто нейтрино - ультрарелятивістські частинки, їхнє рівняння стану $p \approx \varepsilon/3$.

6.9. $n_n = \frac{\bar{\rho}_n}{m_n} \approx 2 \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-3}$; $n_\gamma \approx 20T^3 \approx 400 \text{ см}^{-3}$.

7.1. $r_{\max} = 1115000 \text{ км} < R_C < r_{\min} = 33000 \text{ км}$.

7.2. 0.0034; 0.0062; 0.067; 0.103.

7.3. $g_p / g_e = 0.7$.

7.4. $E / E_1 \approx 3$.

7.5. 8.3 км; 21.5 км.

7.6. $Re \approx 200$.

7.7. Використати незалежність повної енергії від маси атмосфери і порівняти атмосфери планет за їхньою потужністю. Земля $V \approx 10$ м/с; Венера $V \approx 1$ м/с; Марс $V \approx 100$ м/с.

7.8. 1.9 разів.

7.9. $11.2 < V < 72$ км/с.

7.10. Діаметр планети становить 0.1 діаметра зорі.

7.11. $T_e \approx 2000$ К.

7.12. $\Delta m = 0.75^m$.

ДОДАТКИ

Додаток

Таблиця 1

Основні фізичні та астрономічні сталі

Швидкість світла у вакуумі	$c = 300\,000 \text{ км/с} = 3 \cdot 10^{10} \text{ см/с}$
Гравітаційна стала	$G = 6.7 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-2} = 6.7 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3 \text{с}^{-2} \text{Г}^{-1}$
Стала Планка	$h = 6.6 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} = 6.6 \cdot 10^{-27} \text{ ерг} \cdot \text{с}$
Маса протона	$m_p = 1.67 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1.67 \cdot 10^{-24} \text{ Г}$
Маса електрона	$m_e = 9.11 \cdot 10^{-31} \text{ кг} = 9.11 \cdot 10^{-28} \text{ Г}$
Стала Стефана-Больцмана	$\sigma = 5.7 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4} = 5.7 \cdot 10^{-5} \text{ ерг} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с} \cdot \text{К}^{-4}$
Стала Віна	$b = 2.9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К} = 0.29 \text{ см} \cdot \text{К}$
Стала Больцмана	$k = 1.4 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1} = 1.4 \cdot 10^{-16} \text{ ерг} \cdot \text{К}^{-1}$
Газова стала	$R = 8.3 \cdot 10^3 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \text{К}^{-1} = 8.3 \cdot 10^7 \text{ ерг} \cdot \text{Г}^{-1} \text{К}^{-1}$
Електрон-вольт	$1 \text{ еВ} = 1.6 \cdot 10^{-12} \text{ ерг}$
Астрономічна одиниця	$\text{а. е.} = 150 \text{ млн км} = 1.5 \cdot 10^{13} \text{ см}$
Парсек	$\text{пк} = 206265 \text{ а. е.} = 3.1 \cdot 10^{16} \text{ м} = 3.1 \cdot 10^{18} \text{ см}$
Стала прецесії	50.3 ''/рік
Стала річної аберації	20.5 ''
Сонце	
Радіус Сонця	$R = 696\,000 \text{ км} = 7 \cdot 10^{10} \text{ см}$
Маса Сонця	$M = 2 \cdot 10^{30} \text{ кг} = 2 \cdot 10^{33} \text{ Г}$
Світність Сонця	$L = 4 \cdot 10^{26} \text{ Дж} \cdot \text{с}^{-1} = 4 \cdot 10^{33} \text{ ерг} \cdot \text{с}^{-1}$

Сонячна стала для Землі $q = 1.4 \cdot 10^3 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} = 1.4 \cdot 10^6 \text{ ерг} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$

Земля

Радіус Землі $R_{\oplus} = 6371 \text{ км} = 6.4 \cdot 10^8 \text{ см}$

Маса Землі $M_{\oplus} = 6 \cdot 10^{24} \text{ кг} = 6 \cdot 10^{27} \text{ г}$

Перша космічна швидкість $V_1 = 7.9 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$

Друга космічна швидкість $V_2 = 11.2 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$

Середня орбітальна швидкість $V_{\oplus} = 30 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$

Довжина року $T = 365.25 \text{ сонячн. діб} = 366.25 \text{ зорян. діб}$

Нахил екліптики до екватора $\varepsilon = 23.5^\circ$

Місяць

Радіус Місяця $R = 1741 \text{ км} = 1.7 \cdot 10^8 \text{ см}$

Маса Місяця $M = 7.4 \cdot 10^{22} \text{ кг} = 7.4 \cdot 10^{25} \text{ г} = 0,012 M_{\oplus}$

Велика піввісь місячної орбіти $a = 384\,000 \text{ км} = 3.84 \cdot 10^{10} \text{ см}$

Сидеричний місяць $T = 27.3 \text{ діб}$

Синодичний місяць $S = 29.5 \text{ діб}$

Галактика

Радіус Галактики $R = 15\,000 \text{ пк} \approx 5 \cdot 10^{22} \text{ см}$

Радіус гало Галактики $R_g = 120\,000 \text{ пк}$

Маса Галактики (без гало) $M = 4 \cdot 10^{41} \text{ кг} = 4 \cdot 10^{44} \text{ г} = 2 \cdot 10^{11} M_{\odot}$

Відстань Сонця від центра Галактики $8.5 \text{ Кпк} = 2.6 \cdot 10^{22} \text{ см}$

Швидкість обертання Сонця $V = 220 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$

навколо центра Галактики

Стала Хаббла $H = 70 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1}$

Таблиця 2

Системи астрономічних координат

Назва	Основна площина	Основна вісь	Назва координати	Відлічується	Позначення межі зміни	Назва координати	Відлічується	Позначення межі зміни
Горизонтальна	Горизонтальна	Прямовисна лінія	Зенітна відстань	Від точки зеніта	$0^\circ \leq z \leq 180^\circ$	Азимут	Від точки півдня	$0^\circ \leq \alpha < 360^\circ$
Перша екваторіальна	Площина небесного екватора	Вісь світу	Схилення	Від небесного екватора	$-90^\circ \leq \delta \leq 90^\circ$	Годинний кут	Від точки небесного меридіана	$0^h \leq t < 24^h$
Друга екваторіальна	"	"	"	"	"	Пряме сходження	Від точки весняного рівнодення	$0^h \leq \alpha < 24^h$
Екліптична	Площина екліптики	Вісь екліптики	Екліптична широта	Від екліптики	$-90^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$	Екліптична довгота	"	$-90^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$
Галактична	Середня площина Галактики	Вісь Галактики	Галактична широта	Від площини Галактики	$-90^\circ \leq b \leq 90^\circ$	Галактична довгота	Від напрямку на центр Галактики	$0^\circ \leq l < 360^\circ$

Таблиця 3

Найбільші телескопи-рефлектори світу

Назва, діаметр дзеркала, країна	Висота над рівнем моря	Рік уведення в дію
Дуже великий телескоп, 8.2 м×4, (VLT), Чилі.	2635 м	2001
Телескоп ім. В. Кека, 9.8 м×2, (Кекк 1, 2), Гавайські о-ви	4150 м	1996
Великий бінокулярний телескоп, 8.4 м×2, (LBT), США	3170 м	2004
Великий канарський телескоп, 10.4 м, (GTS), Канарські о-ви	2400 м	2002
Телескоп ім. В. Хоббі та Р. Еберлі, 9.1 м, (HET), США	2002 м	1997
Великий південноафриканськ. телескоп, 9.1 м, (SALT), ПАР	1798 м	2003
Телескоп «Субару», 8.2 м, Гавайські о-ви	4139 м	1999
Телескоп «Джеміні» (північн.), 8.1 м, Гавайські о-ви	4214 м	1999
Телескоп «Джеміні» (південн.), 8.1 м, Чилі	2715 м	2001
Телескоп ММТ обсерваторії, 6.5 м, (ММТ), США	2606 м	2000
Телескоп «Магеллан 1 і 2», 6.5 м×2, (М 1 & 2), Чилі	2300 м	2002
Великий телескоп азимутальний, 6.0 м, (ВТА), СРСР-Росія	2070 м	1975
Великий зенітний телескоп, 6.0 м, (LZT), Канада	395 м	2000
Телескоп Дж. Хейла, 5.1 м, США	1706 м	1948
Телескоп ім. У. Гершеля, 4.2 м, (WHT), Канарські о-ви	2332 м	1987
Телескоп Південної обсерваторії, 4.2 м, (SOAR), Чилі	2701 м	2002
Телескоп ім. В. Бланко, 4 м, Чилі	2215 м	1976

Працюють також 15 телескопів з діаметрами дзеркал від 3 до 4 м і 8 телескопів з діаметрами дзеркал від 2.5 до 3 м.

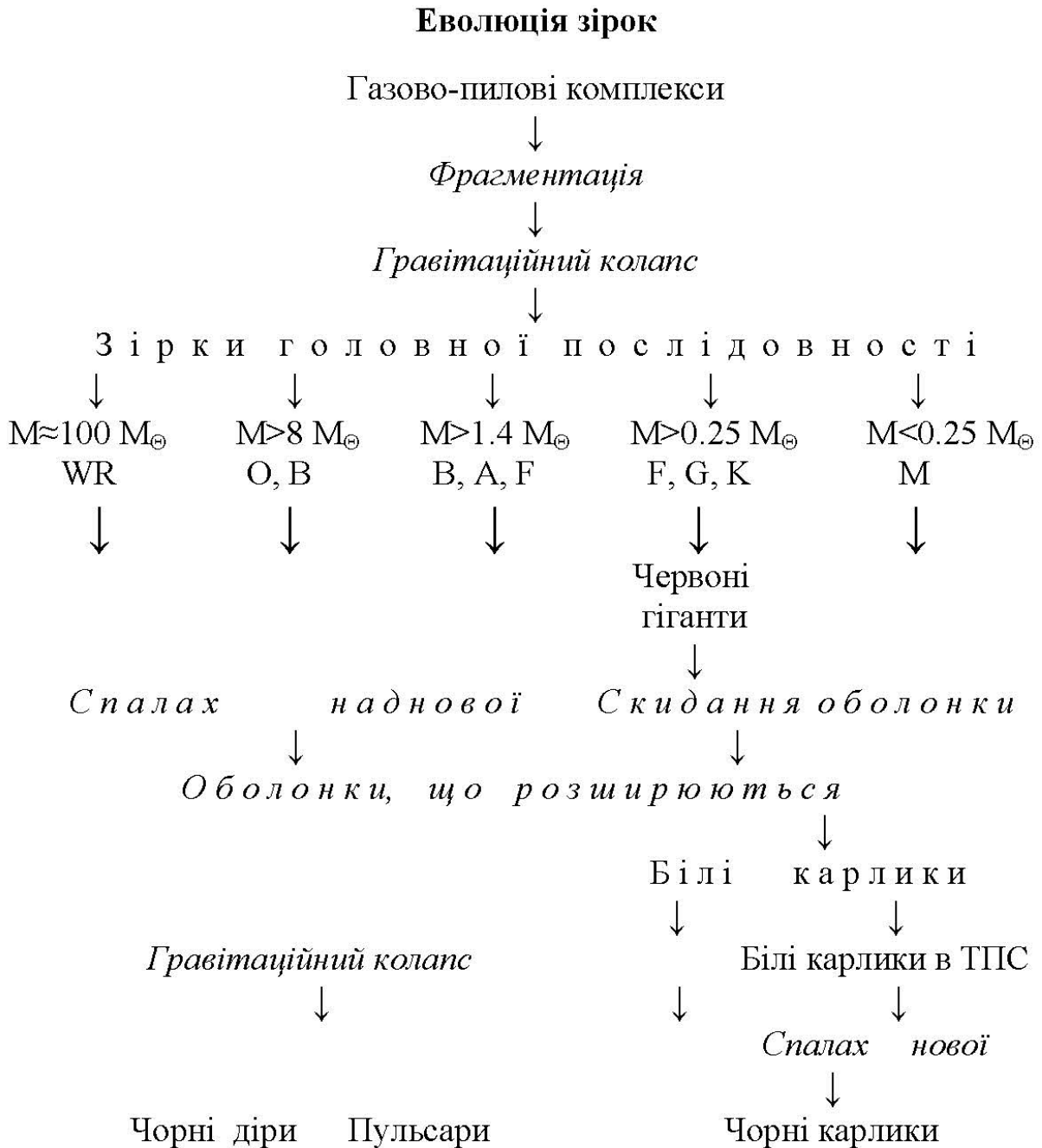
Найбільший телескоп-рефрактор з діаметром об'єктива 1.02 м працює в Йеркській обсерваторії США.

Таблиця 4

Характеристики зірок головної послідовності

Спектральний клас	Маса, M_{\odot}	Радіус, R_{\odot}	Світність, L_{\odot}	Час життя на ГП, млрд. років
B0	17–3.2	9–2.8	30 000–100	$8 \cdot 10^6$
A0	3.2–1.5	2.8–1.25	100–4.8	$4 \cdot 10^8$
F0	1.5–1.02	1.25–1.02	4.8–1.2	$4 \cdot 10^9$
G0	1.02–0.74	1.02–0.74	1.2–0.35	$1.1 \cdot 10^{10}$
G2 Сонце	1.00	1.0	1.0	$1.3 \cdot 10^{10}$
K0	0.74–0.54	0.74–0.54	0.35–0.10	$1.7 \cdot 10^{10}$
K5	0.54–0.31	0.54–0.31	0.10–0.03	$7.0 \cdot 10^{10}$

Таблиця 5



*Верхню межею мас зір є значення маси,
вказане зліва над позначенням WR.
WR – зірки Вольфа–Райє. ТПС – тісні подвійні системи.*

Таблиця 6

Характеристики планетних тіл Сонячної системи

Центр. тіло	Назва	a млн км	R , км	M	V	V_2
Планети земного типу						
Сонце	Меркурій	57.9	2439	3.30/26/	-0.2 E	4.25
	Венера	108.2	6051	4.87/27/	-4.2 E	10.36
	Земля	149.6	6378	5.98/27/	-	11.18
	Марс	227.9	3397	6.42/26/	-2.21 O	5.02
Планети-гіганти						
Сонце	Юпітер	778.4	71398	1.90/30/	-2.55 O	59.6
	Сатурн	1426.7	60330	5.69/29/	+0.55 O	35.4
	Уран	2872.0	26220	8.69/28/	+5.6 O	21.3
	Нептун	4498.3	24760	1.02/29/	+7.8 O	24.0
Планети-карлики						
Сонце	Церера	414.0	473	9.40/23/	+7.4 O	0.51
	Плутон	5915	1187	1.30/25/	+15.1 O	1.21
	Еріда	10166	1163	1.66/25/	+17.0 O	1.38
	Макемаке	6839	850	4/24/	+16.3 O	0.8
	Хаумеа	6465	930–490	4/24/	+15.7÷+17.1 O	≈0.7
Супутники планет						
Земля	Місяць	0.384	1741	7.4/25/	-12.73 O	2.4
	Марс	0.0094	Фобос	11	1.1/19/	11.3 O
	Деймос		6	1.5/18/	12.4 O	0.005
Юпітер	Іо	0.4217	1822	8.9/25/	5.0 O	2.6
	Європа	0.6709	1561	4.8/25	5.3 O	2.0
	Ганімед	1.070	2634	1.48/26/	4.6 O	2.7
	Каллісто	1.883	2410	1.06/26/	5.6 O	2.4
Сатурн	Діона	0.377	561	1.1/24/	10.4 O	0.51
	Рея	0.527	764	2.3/24/	10.0 O	0.64
	Титан	1.222	2576	1.35/26/	8.2 O	2.6
Уран	Япет	3.561	735	1.8/24/	11.0 O	0.57
	Аріель	0.191	579	1.4/24/	14.4 O	0.56
	Умбріель	0.266	585	1.2/24/	14.5 O	0.52
	Титанія	0.436	788	3.5/24/	13.9 O	0.77
Нептун	Оберон	0.583	761	3.0/24/	14.1 O	0.73
	Тритон	0.355	1353	2.1/25/	13.5 O	1.5
Плутон	Харон	0.0196	606	1.6/24/	16.8 O	0.59

a – велика піввісь орбіти; R – для великих планет екваторіальний радіус, для інших тіл – середній радіус (для Хаумеї дані найбільша і найменша півосі); M – маса в грамах, в дужках – її десятковий логарифм; V – зоряна величина об'єкта, E – елонгація, взаємне положення Сонця, Землі та внутрішньої планети, коли кутова відстань між Сонцем і планетою найбільша, O – середнє протистояння (опозиція), положення, коли Земля знаходиться поміж Сонцем і планетою на відстані a від Сонця; V_2 – друга космічна швидкість в км/с.

Таблиця 7

Умови на поверхнях і атмосфери великих планет

Планета	Видима поверхня	Склад поверхні	Склад атмосфери	p_0	T_e	T_n
Меркурій	Тверда	Si, O, Al, Fe, Mn, Ca			435	530
Венера	Тверда	—”—	CO ₂ , N ₂	96	228	735
Земля	Тверда	—”—	O ₂ , N ₂	1	247	290
Марс	Тверда	—”—	CO ₂ , N ₂	0.006	216	225
Юпітер	Хмарна	H, O, C	H ₂ , He	0.5	134	165
Сатурн	Хмарна	—”—	H ₂ , He	0.7	97	120
Уран	Хмарна	—”—	H ₂ , He, CH ₄	-	59	65
Нептун	Хмарна	—”—	H ₂ , He, CH ₄	-	38	50

p_0 – тиск біля поверхні, бар; T_e – ефективна температура, К;
 T_n – температура поверхні, К.

Таблиця 8

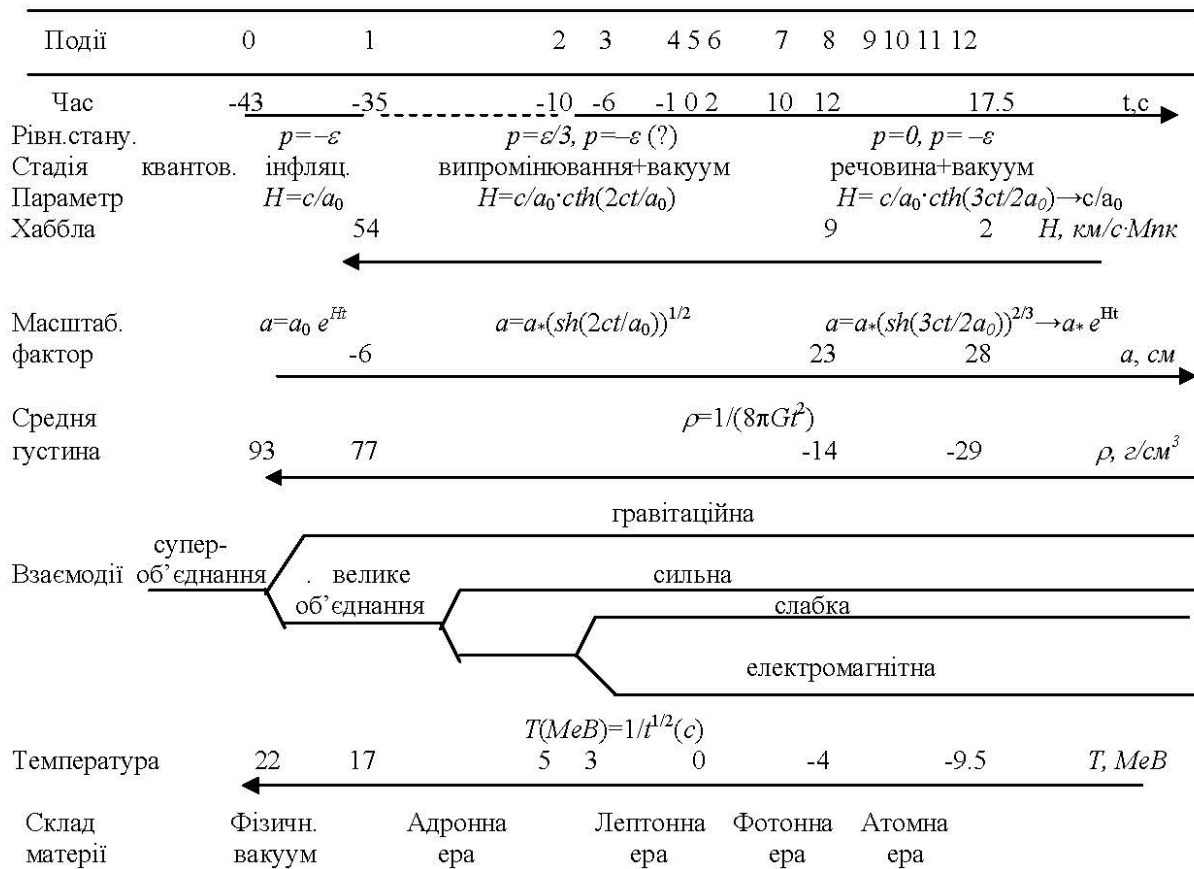
Деякі малі планети (астероїди)

Планета	a	T	S	i	e	R	M	Тип
2 Паллада	2.772	4.61	467	34.8	0.231	256	$2.1 \cdot 10^{23}$	ГП
3 Юнона	2.671	4.36	474	13.0	0.255	116	$2.7 \cdot 10^{22}$	ГП
4 Веста	2.362	3.63	504	7.1	0.089	263	$2.6 \cdot 10^{23}$	ГП
5 Астрея	2.574	4.13	482	5.4	0.191	59	$2.9 \cdot 10^{21}$	ГП
6 Геба	2.426	3.78	497	14.8	0.202	93	$1.3 \cdot 10^{22}$	ГП
153 Гільда	3.973	7.95	419	7.8	0.141	85	$5.2 \cdot 10^{21}$	ГП
433 Ерос	1.458	1.76	846	10.8	0.223	8.4	$6.7 \cdot 10^{18}$	АЗЗ
944 Гідальго	5.745	13.77	393	42.6	0.660	19	–	ТЮ
1566 Ікар	1.078	1.12	340	22.8	0.827	0.6	$2.9 \cdot 10^{15}$	АЗЗ
2060 Хірон	13.708	50.76	373	6.9	0.379	109	–	ТС
20000 Варуна	42.904	281.03	366	17.2	0.056	334	$3.7 \cdot 10^{23}$	ТН
90337 Седна	507	11249	366	11.9	0.855	500	–	ТП

a – велика піввісь орбіти, а. о.; T – сидеричний період, роки; S – синодичний період, доби; i – нахил орбіти, градуси; e – ексцентриситет орбіти; R – радіус, км; M – маса, кг; ГП – астероїди головного поясу; АЗЗ – астероїди, що зближуються з Землею; ТЮ – трансюпітеровий астероїд; ТС – трансатурновий астероїд; ТН – транснептуновий астероїд; ТП – трансплутонівий астероїд.

Таблиця 9

Еволюція Всесвіту



Шкали – логарифмічні, тобто наведені числа – десяткові логарифми відповідних величин

Основні події в еволюції Всесвіту:

- 0 – порушення суперсиметрії, відділення гравітації, початок інфляційної стадії
- 1 – фазовий перехід у вакуумі, відокремлення сильної взаємодії, виникнення ферміонів та бозонів, початок стадії випромінювання
- 2 – розділення електрослабкої взаємодії на слабку та електромагнітну
- 3 – анігіляція нуклонів та антинуклонів, виникнення баріонної асиметрії відділення баріонів від лептонів та випромінювання
- 4 – відділення нейтрино від лептонів та випромінювання
- 5 – розділення нуклонів на протони та нейтрони
- 6 – анігіляція електронів та позитронів
- 7 – синтез первинного гелію
- 8 – густина речовини зрівнюється з густиною випромінювання, початок стадії «речовина+вакуум»
- 9 – рекомбінація первинної плазми, відділення речовини від випромінювання
- 10 – виникнення великомасштабної структури Всесвіту, утворення скупчень протогалактик
- 11 – утворення галактик із зірок першого покоління
- 12 – наступні етапи зореутворення, утворення Сонячної системи

ТЛУМАЧНИЙ СЛОВНИК ОСНОВНИХ ТЕРМІНІВ

Абсолютна зоряна величина – зоряна величина зорі, яку вона б мала при її спостереженні зі стандартної відстані в 10 пк.

Абсолютно чорне тіло – тіло, що поглинає все падаюче на нього електромагнітне випромінювання і само випромінює кількість енергії, яка залежить тільки від його температури, а спектральний розподіл випромінювання підкоряється закону Планка.

Азимут – кут між площиною небесного меридіану та площиною, що проходить через зеніт та світило, відлічується від півдня на захід; вимірюється відповідною дугою математичного горизонту.

Активна галактика – галактика, в ядрі якої відбуваються процеси з потужним виділенням енергії (подекуди вибухового характеру) у вигляді нетеплового випромінювання у неперервному спектрі та теплового в лініях випромінювання.

Альbedo сферичне – відношення кількості відбитої видимою поверхнею планети енергії до кількості енергії, що впала на планету від Сонця;
а. плоске – відношення відбитої плоскою поверхнею енергії до енергії, що впала на неї.

Антропний принцип – існування певної сукупності фізичних та астрофізичних властивостей Всесвіту, необхідних для якісної еволюції матерії – появи атомів та молекул, а тим самим органічного та розумного життя, зокрема появи людини.

Апогей – найвіддаленіша від центру Землі точка орбіти Місяця або ШСЗ.

Астероїд (мала планета) – тверде тіло Сонячної системи розміром від одиниць до сотень кілометрів, здебільшого неправильної форми.

Астероїди, що зближуються з Землею (АЗЗ) – астероїди, у яких найменша відстань між орбітами Землі й астероїда не перевищує 30 млн км; є ймовірність зіткнення таких астероїдів із Землею, що матиме катастрофічні наслідки (астероїдна небезпека).

Астрометрія – розділ астрономії, що займається вимірюванням положень небесних тіл і побудовою систем координат у космосі.

Астрономія – наука, що вивчає рух, будову і еволюцію небесних тіл, їх систем та Всесвіту в цілому.

Астрофізика – розділ астрономії, що вивчає фізичну будову та еволюцію небесних тіл і фізичні процеси, які їх зумовлюють.

Атмосфера (планети) – газово-аерозольна оболонка планети (аерозолі – краплини рідини та частинки пилу в атмосфері планети).

Афелій – найвіддаленіша від Сонця точка орбіти тіла Сонячної системи, що є супутником Сонця.

Баріонна матерія – сукупність речовини у Всесвіті (зорі, субзорі, планети, пил, газ), основний внесок до енергії якої вносять баріони – протони та нейтрони.

Білий карлик – маломасивна зоря ($M < 1.2M_{\odot}$) на кінцевій стадії еволюції, світить завдяки охолодженню, має високу температуру поверхні, але малі розміри.

Блакитний гігант – масивна зоря високої світності, що належить до головної послідовності.

Важка (тверда) компонента (в Сонячній системі) – частина речовини Сонячної системи, що на будь-якій відстані від Сонця знаходиться в твердому стані (метали, силікати).

Велика піввісь орбіти – відрізок, що сполучає центр еліптичної орбіти з однією з більш віддалених її вершин (її довжина є середньою відстанню тіла на еліптичній орбіті до притягуючого центра, що міститься у фокусі орбіти).

Велика Червона Пляма – стійке вихореве утворення в атмосфері Юпітера.

Велике протистояння Марса – протистояння Марса, коли він знаходиться поблизу перигелію своєї орбіти, тобто на найближчій відстані від Землі.

Великомасштабна структура Всесвіту – утворення галактиками та скупченнями галактик комірчастої структури з розміром комірок у сотні мегапарсек і однорідної та ізотропної у більших масштабах.

Випромінювальна здатність – кількість енергії, що її випромінює одиниця поверхні тіла в одиницю часу на певній довжині хвилі (частоті).

Відкрита модель Всесвіту – модель Всесвіту із середньою густиною речовини, що дорівнює критичній або менша від неї, в цій моделі Всесвіт має необмежений розмір і необмежено розширюється (має нульову або від'ємну кривизну простору-часу).

Візуально-подвійні зорі – системи, подвійність яких встановлюється безпосередніми телескопічними спостереженнями.

Всесвіт – весь навколишній світ з усіма фізичними формами матерії (речовина, випромінювання та ін.), що розвивається в просторі та часі.

Всесвітній час (UT) – середній сонячний час на нульовому (Грінвічському) меридіані (прийнятий за аргумент в астрономічних календарях та щорічниках).

Вузол орбіти – точка перетину орбіти з основною площиною системи координат (найчастіше з екліптикою або небесним екватором).

Газова компонента (в Сонячній системі) – частина речовини Сонячної системи, що на будь-якій відстані від Сонця знаходиться в газоподібному стані (водень та гелій).

Газові туманності – скупчення газу та пилу в міжзоряному просторі з переважною кількістю газу.

Газовий хвіст – хвіст комети, в якому переважає газ.

Галактика – 1) галактика – гравітаційно зв'язана система із зір, субзір, планет та міжзоряного середовища (яка не є частиною іншої галактики); 2) Галактика – зоряна система, до якої належать Сонце і Сонячна система.

Галактична площина – середня площина Галактики, що в перетині з небесною сферою дає велике коло, яке проходить через Чумацький шлях, – галактичний екватор.

Галактичне гало – зовнішня розріджена оболонка з старих зір та кулястих скупчень, що оточує власне галактику, його розмір значно перевищує розмір галактики.

Галактичне ядро – масивне згущення речовини в центрі галактики, є джерелом короткохвильового, інфрачервоного та радіовипромінювання, можливо містить масивну чорну діру, принаймні це так у нашій Галактиці.

Галактичний рік – період обертання Сонця навколо центра Галактики (приблизно 200 млн років).

Геостаціонарний супутник – штучний супутник Землі, що рухається в площині земного екватора з періодом обертання, який дорівнює одній добі, постійно знаходиться в зеніті певної точки на екваторі Землі.

Годинний кут – кут між площиною небесного меридіана та площиною, що проходить через полюс світу та світило, відлічується від півдня на захід; вимірюється відповідною дугою небесного екватора.

Головна послідовність – сукупність зір, джерелом енергії яких є реакція перетворення водню в гелій, на діаграмі «спектр–світність» займає смугу приблизно по діагоналі з лівого верхнього кута до правого нижнього.

Головний пояс астероїдів – сукупність астероїдів, що рухаються між орбітами Марса та Юпітера.

Горизонтальний паралакс – кут, під яким видно зі спостережуваного тіла Сонячної системи екваторіальний радіус Землі.

Гравітаційний колапс – стиснення речовини під дією її власної сили тяжіння.

Гравітаційний парадокс – невизначеність сили тяжіння, що діє з боку всіх мас Всесвіту в моделі нескінченного ньютонівського всесвіту.

Григоріанський календар – відрізняється від Юліанського тим, що роки, які мають ціле число сотень, кількість яких націло не ділиться на 4, не є високосними (це компенсує розбіжність між середньою довжиною юліанського року (365.25 діб) і точною довжиною року, що менша на 11 хвилин).

Дефект маси – різниця між масою чотирьох протонів та масою ядра гелію, при утворенні ядра гелію з цих протонів відповідна їй енергія вноситься електромагнітним та нейтринним випромінюваннями.

Діаграма «спектр–світність» (діаграма Герцшпрунга–Рессела) – діаграма, на якій положення зорі визначається її спектральним класом (з фізичної точки зору – температурою її фотосфери) та її світністю (або абсолютною зоряною величиною) й залежить від класу світності та маси зорі.

Друга космічна швидкість – найменша швидкість, одержавши яку на поверхні небесного тіла, матеріальна точка може подолати його силу тяжіння і віддалитися у нескінченність.

Закон Віна – розподіл енергії за довжиною хвилі у спектрі випромінювання абсолютно чорного тіла в залежності від температури, у випадку коли енергія фотона значно перевищує теплову енергію частинок речовини.

Закон Кірхгофа – відношення випромінювальної здатності тіла до його поглинальної здатності не залежить від природи тіла, а є універсальною функцією довжини хвилі (частоти) та температури тіла (функцією Планка).

Закон Планка – описує спектральний розподіл випромінювання абсолютно чорного тіла, тобто залежність кількості випромінюваної енергії від частоти або довжини хвилі випромінювання. Цей розподіл має один максимум, значення і положення якого залежить від температури; (якщо довжина хвилі прямує до нуля або нескінченно зростає, кількість випромінюваної енергії прямує до нуля).

Закон Стефана-Больцмана – визначає повну кількість енергії, що її випромінює одиниця поверхні абсолютно чорного тіла в одиницю часу, ця кількість пропорційна четвертому ступеню температури.

Закон Хаббла – пропорційність між швидкістю віддалення позагалактичних об'єктів та відстанню до них за рахунок розширення Всесвіту.

Закони Кеплера – закони руху в задачі двох тіл, тобто руху однієї матеріальної точки під дією сили тяжіння іншої (або сферично-симетричного тіла). Перший закон Кеплера: орбітою є конічний переріз (коло, еліпс, парабола, гіпербола), в одному з фокусів якого знаходиться притягуючий центр, а також пряма. Другий закон: площа сектора, що її описує радіус-вектор точки, є пропорційною часу. Третій закон: квадрат періоду обертання при еліптичному (коловому) русі є пропорційним кубу великої півосі (радіусу) та обернено пропорційним сумі мас точок.

Закони теплового випромінювання (закони Віна, Кірхгофа, Планка та Стефана–Больцмана) – закони, що описують теплове випромінювання тіла, яке знаходиться у стані термодинамічної рівноваги з випромінюванням.

Закрита модель Всесвіту – модель Всесвіту з середньою густиною речовини, що більша від критичної, в цій моделі Всесвіт має додатну

кривизну простору-часу та обмежений розмір у кожний кінцевий момент часу.

Залізні метеорити – метеорити, що складаються в основному із заліза та нікелю.

Затемнення Місяця – проходження Місяця крізь тінь та півтінь Землі, що утворюються при освітленні її Сонцем.

Затемнення Сонця – проходження Місяця між Землею та Сонцем, при якому Місяць повністю або частково закриває Сонце.

Затемнювано-змінні зорі – подвійна система, сумарний блиск якої періодично змінюється внаслідок затемнень одного компонента іншим.

Затемнювано-подвійні зорі – подвійна система, подвійність якої встановлюється за періодичною зміною сумарного блиску внаслідок затемнень одного компонента іншим.

Збурений рух – рух матеріальної точки під дією сили тяжіння іншої матеріальної точки та ще деяких відносно малих сил.

Зеніт – точка перетину прямовисної лінії з небесною сферою.

Зенітна відстань – кутова відстань світила від зеніту (або величина відповідної дуги на небесній сфері), доповнює висоту світила до 90° .

Зодіак – кільцева смуга сузір'їв, через які проходить екліптика.

Зони хмар – хмарові утворення, паралельні екватору планет-гігантів, більш світлі, ніж сусідні.

Зоря (зірка) – космічне тіло, в надрах якого відбуваються або відбувалися термоядерні реакції, за рахунок енергії яких воно світиться, і яке еволюціонує внаслідок зміни типу або припинення термоядерних реакцій.

Зоряний час – час у межах доби, що вимірюється часовим кутом точки весняного рівнодення.

Еволюційні треки – шляхи переміщення зір на діаграмі «спектр-світність» при переході їх від одного етапу еволюції до наступного (з одного класу світності до іншого) у разі зміни типу термоядерних реакцій або їх припинення.

Екзопланети (поза сонячні планети) – планети біля інших зір (існування таких планет встановлено останнім часом в основному за допомогою точних вимірювань тієї складової променевої швидкості зорі, що обумовлена її рухом навколо центра мас системи під дією планет та проходжень їх по диску зорі).

Екліптика – велике коло небесної сфери, по якому відбувається річний рух Сонця.

Ексцентриситет орбіти (крім параболічної) – відношення фокусної відстані (відстані від фокусу орбіти до її центра) до довжини великої або дійсної півосі орбіти (для еліптичної орбіти – міра відмінності еліпса від кола). Для параболічної орбіти дорівнює 1.

Еліптична галактика – галактика, що має форму еліпсоїда обертання, (має співвідношення осей від 1 до 0.3).

Елонгація – положення Меркурія або Венери, в яких вони мають найбільше кутове віддалення від Сонця при спостереженні з Землі.

Ефективна температура – температура видимої поверхні небесного тіла, яку б воно мало, якби випромінювало як абсолютно чорне тіло.

Єдина теорія фізичних взаємодій (єдина теорія поля) – створювана зараз загальна фізична теорія, яка повинна з'ясувати, як, чому і за яких умов з'являється та зникає різниця між чотирма основними видами фізичних взаємодій; потрібна при розгляді процесів у ранньому Всесвіті в його надщільному й надгарячому стані та для розуміння подальшої фізичної еволюції Всесвіту.

Інфляційна стадія – початкова стадія еволюції Всесвіту, на якій його розширення визначалося енергією фізичного вакууму і відбувалося за експоненціальним законом.

Істинний сонячний час – час у межах доби, що вимірюється годинним кутом центра диска Сонця.

Календар – система відліку великих проміжків часу (у роках, місяцях та добах).

Кам'яні метеорити – метеорити, що складаються в основному із силікатів.

Квazar – зореподібне позагалактичне джерело оптичного, інфрачервоного та радіовипромінювання.

Квінт-есенція – гіпотетична фізична форма матерії, яка має рівняння стану $p = w\varepsilon$, де $-1 < w < 1/3$, і яка може забезпечувати прискорене розширення Всесвіту.

Кільця (планет) – кільцеподібні утворення складної структури з метеорної речовини (каменів, льоду та пилу) навколо планет-гігантів.

Класи світності – групи зір, що знаходяться на певній стадії еволюції і займають певні області на діаграмі «спектр – світність».

Колова швидкість – швидкість, яку повинна мати матеріальна точка в напрямі, перпендикулярному радіусу, щоб рухатися за коловою орбітою.

Кома – газо-пилова оболонка комети, що утворюється при наближенні комети до Сонця.

Комета – мале тіло Сонячної системи, що складається із силікатної та льодяної компонент, при наближенні до Сонця за рахунок випаровування льодяної компоненти та руйнування силікатної компоненти твердого тіла (ядра) комети утворюються кома (атмосфера) та хвіст комети.

Конфігурації планет – певні відносні положення планети, Землі та Сонця (сполучення, елонгації та протистояння).

Кора – зовнішня оболонка твердотільної планети, що утворюється виділенням з мантиї найбільш легких та легкоплавких порід.

Корона – зовнішня частина атмосфери Сонця (до $10 R_{\odot}$), що утворюється потоками частинок сонячного вітру, може спостерігатися із Землі під час повних сонячних затемнень.

Космологічний принцип – поширення на весь Всесвіт властивостей однорідності та ізотропності Метагалактики у достатньо великих масштабах, встановлених астрономічними спостереженнями.

Космологія – розділ астрономії, що вивчає будову та еволюцію Всесвіту на підставі астрономічних спостережень та загальних законів фізики.

Кратер (метеоритний) – утворення кільцевої структури, що виникає на поверхнях планет та їх супутників при падінні астероїдних та метеорних тіл.

Критична густина – значення густини енергії, що залежить від гравітаційної сталої та сталої Хаббла, порівняння з нею фактичної густини визначає характер моделі Всесвіту і знак кривизни простору-часу.

Кульмінація – перетин світилом в його добовому русі небесного меридіану.

Кулясте зоряне скупчення – скупчення зір, що має кульову форму і налічує сотні тисяч зір.

Літосфера – зовнішня, відносно рухома оболонка твердотільної планети, включає кору та частину верхньої мантії.

Льодяна компонента (у Сонячній системі) – частина речовини Сонячної системи, що залежно від відстані до Сонця може бути в будь-якому агрегатному стані (вода, вуглекислий газ, метан, аміак).

Магелланові Хмари – карликові галактики, супутники нашої Галактики, видимі лише в південній півкулі Землі.

Магнітна буря – збурення магнітного поля Землі внаслідок його взаємодії з сонячним вітром.

Магнітосфера – частина навколопланетного простору, в якій рух заряджених частинок визначається магнітним полем планети.

Мантія – основна оболонка планети (тверда у планет земної групи та рідка у планет-гігантів), виділенням з якої більш легких порід утворюється кора, а більш важких – ядро планети.

Математичний горизонт – велике коло на небесній сфері, перпендикулярне прямовисній лінії.

Межа Роша – така відстань від планети, що її великий супутник, який знаходиться ближче до планети, буде розірваний припливними силами.

Метагалактика – охоплена спостереженнями частина Всесвіту.

Метеор – явище руйнування метеорного тіла, що увійшло в атмосферу Землі, супроводжується світінням та утворенням іонізованого сліду (на висоті 80 – 110 км).

Метеорне тіло (метеороїд) – кам'яні та пилові частинки, що рухаються за геліоцентричними орбітами та, входячи в атмосферу Землі, викликають явище метеору.

Метеорний дощ – явище входження в атмосферу Землі великої кількості метеорних тіл, коли Земля перетинає метеорний рій.

Метеорити – метеорні тіла, що зіткнулися з Землею, але не повністю зруйнувалися при проходженні земної атмосфери й впали на поверхню Землі.

Місцева група галактик – група з приблизно 50 галактик, близьких до нашої Галактики (з яких тільки наша Галактика та Туманність Андромеди – гігантські спіральні галактики, більшість інших – це карликові галактики).

Місцевий час – середній сонячний час на певному меридіані Землі (дорівнює: $T_m = UT + \lambda$, де λ – довгота (в часовій мірі) або $T_m = T_{\text{п}} - N + \lambda$, де N – номер часового поясу).

Місячне море – частина місячної поверхні зі зниженою відбивною здатністю, що утворилася внаслідок виливання лави з надр Місяця під час бомбардування Місяця великими метеорними тілами.

Множинність всесвітів – уявлення про існування багатьох всесвітів, що виникають з одного всеосяжного квантового Всесвіту і можуть мати різні фундаментальні фізичні властивості (виникло на підставі розгляду проблеми походження нашого Всесвіту в межах ідей єдиної теорії фізичних взаємодій).

Наднова зоря – явище спалаху зорі, при якому її блиск збільшується на $18\text{--}20^m$, більша частина речовини зорі розлітається, утворюючи газову туманність, яка поступово розширюється, а ядро зорі, стискаючись, перетворюється на нейтронну зорю або чорну діру.

Небесна механіка – розділ астрономії, що вивчає рух небесних тіл та їх систем.

Небесна сфера – сфера довільного радіусу з центром у місці знаходження спостерігача, на яку проектуються спостережувані на небі об'єкти.

Небесний екватор – велике коло на небесній сфері, площина якого паралельна площині екватора Землі (в геоцентричній системі координат співпадає з нею).

Небесний меридіан – велике коло, що проходить через полюс світу та зеніт.

Незбурений рух – рух матеріальної точки під дією сили тяжіння іншої матеріальної точки, підкоряється законам Кеплера.

Нейтронна зоря – зоря проміжної маси ($1.2 M_{\odot} < M < (3\text{--}6) M_{\odot}$) на кінцевій стадії еволюції, при гравітаційному стисненні якої всі протонно-електронні пари перетворюються на нейтрони.

Неправильна галактика – невелика галактика, що має неправильну форму.

Нетеплове випромінювання – електромагнітне випромінювання (у радіодіапазоні), що виникає при прискореному русі заряджених частинок у магнітному полі; циклотронне – якщо швидкість частинок значно менша від швидкості світла (нерелятивістські частинки), синхротронне – якщо швидкість частинок є зіставною зі швидкістю світла (релятивістські частинки).

Нова зоря – компонент тісної подвійної системи, блиск якого раптово збільшується на $7-15^m$ при скиданні речовини її поверхневих шарів внаслідок перетікання на нього речовини з іншого компонента (яким є зоря-карлик пізнього спектрального класу) і виникненні тимчасових ядерних реакцій у поверхневих шарах зорі.

Новий Місяць – конфігурація Місяця, при якій із Землі видно (увечері) найвужчий серп Місяця, коли Місяць знаходиться майже поміж Землею та Сонцем.

Озоновий шар - шар озону (O_3) в атмосфері Землі, що утворюється внаслідок дисоціації молекулярного кисню при поглинанні короткохвильового та корпускулярного випромінювання Сонця й захищає поверхню Землі від цього випромінювання.

Орбіта – траєкторія небесного тіла в його русі навколо притягуючого центра.

Остання чверть – конфігурація Місяця між повним та новим Місяцем, при якій Сонцем освітлена половина видимого із Землі боку Місяця (у північній півкулі Землі видно ліву половину видимого боку Місяця).

Паралакс – кутове зміщення спостережуваного об'єкта при певному переміщенні спостерігача.

Парадокс теплової смерті – протиріччя між спостережною структурою Всесвіту і безструктурним рівноважним станом, в який повинен був би прийти Всесвіт внаслідок дії другого принципу термодинаміки за нескінченний час свого існування в моделі нескінченного ньютонівського всесвіту.

Парниковий ефект – підвищення температури поверхні та нижньої атмосфери планети за рахунок енергії, що її випромінює в інфрачервоній області спектра поверхня планети і поглинає та частково випромінює вниз атмосфера планети (створюється, насамперед, вуглекислим газом та водяною парою).

Парсек (пк) – відстань, з якої велика піввісь земної орбіти видна під кутом в $1''$, дорівнює $206265 \text{ а. о.} = 3.08 \cdot 10^{13} \text{ км}$.

Перигей – найближча до Землі точка орбіти Місяця або ШСЗ.

Перигелій – найближча до Сонця точка орбіти тіла Сонячної системи, що є супутником Сонця.

Перша космічна швидкість – швидкість, одержавши яку в напрямі, перпендикулярному радіусу, матеріальна точка може стати штучним супутником небесного тіла на коловій орбіті з радіусом, що дорівнює радіусу цього тіла.

Перша чверть – конфігурація Місяця між новим та повним Місяцем, при якій Сонцем освітлена половина видимого з Землі боку Місяця (у північній півкулі Землі видно праву половину видимого боку Місяця).

Півтінь – частина простору за Землею, де світло Сонця ослаблене, тому що частина сонячного диска закрыта Землею.

Пилові туманності – скупчення газу та пилу в міжзоряному просторі з підвищеною кількістю пилу.

Пиловий хвіст – хвіст комети, в якому переважають пилові частинки.

Плазма – нейтральна в цілому суміш заряджених частинок (електронів та іонів), суттєвим чином взаємодіє з магнітним полем.

Планетарна туманність – кільцеподібна газова туманність, що утворюється при скиданні червоним гігантом своєї оболонки і перетворенні його ядра на білий карлик.

Планетне тіло – космічне тіло, що має майже сферичну форму й містить речовину в конденсованому стані та еволюціонує внаслідок гравітаційної диференціації речовини.

Планети-карлики – тіла, що обертаються навколо Сонця, мають майже сферичну форму, але знаходяться або в головному поясі астероїдів або в поясі Койпера, тобто їхні орбіти та вони самі можуть зазнавати змін внаслідок зіткнень з іншими тілами.

Планети-гіганти – більш віддалені від Сонця планети великого розміру, містять речовину переважно в рідкому стані (Юпітер і Сатурн – водень та гелій, Уран і Нептун – льодяну компоненту), мають протяжні атмосфери та тверді силікатні ядра.

Планети земної групи – чотири найближчих до Сонця планети, відносно невеликі, основна частина речовини яких знаходиться в твердому стані, подібні за внутрішньою будовою до Землі.

Поглиналина здатність – відношення енергії, яку поглинає тіло, до енергії, яка впала на нього (доповнює альбедо до одиниці).

Полюс світу – точка перетину небесної сфери з віссю світу – прямою, що проходить через центр небесної сфери перпендикулярно площині небесного екватора.

Полярні кола – земні паралелі ($\varphi = \pm 66.5^\circ$), на яких Сонце лише один раз на рік (у день зимового сонцестояння) не сходить та один раз (у день літнього сонцестояння) не заходить.

Полярні шапки – утворення в полярних областях Марса та полярних і помірних областях Землі, що збільшуються взимку та зменшуються влітку (на Марсі – з твердої вуглекислоти та водяного льоду, на Землі – з водяного льоду та снігу).

Пояс Койпера (зовнішній пояс астероїдів) – сукупність планет-карликів і астероїдів, що рухаються поза орбітами Нептуна.

Пояси хмар – хмарові утворення, паралельні екватору планет-гігантів, більш темні, ніж сусідні.

Поясний час – середній сонячний час на середньому меридіані певного часового поясу (дорівнює: $T_{\text{п}} = UT + N^{\text{h}}$, N – номер часового поясу).

Припливні явища – зміщення речовини океану, атмосфери або твердого тіла Землі під дією різниці сил тяжіння, що діють з боку Місяця та Сонця на даний елемент речовини та центр мас Землі.

Протистояння – положення планети, коли її кутова відстань від Сонця найближча до 180° (Земля знаходиться між Сонцем та планетою).

Пряме сходження – кут між площинами, які проходять через полюс світу та точку весняного рівнодення й через полюс світу та світило, відлічується в напрямі річного руху Сонця; вимірюється відповідною дугою небесного екватора.

Пульсар – нейтронна зоря, що є джерелом періодичного радіовипромінювання.

Радіотелескоп – інструмент для приймання та реєстрації радіовипромінювання від небесних об'єктів.

Реголіт – відносно пухкий поверхневий шар Місяця (та інших безатмосферних тіл Сонячної системи), перероблений бомбардуванням поверхні метеоритами та корпускулярним випромінюванням Сонця.

Реліктове (мікрохвильове фонове) випромінювання – первинне електромагнітне випромінювання, що залишилося від попередніх етапів еволюції Всесвіту (коли випромінювання знаходилося у термодинамічній рівновазі з речовиною, має майже ізотропний тепловий характер, зараз має температуру 2.7 K з максимумом інтенсивності на довжині хвилі в 1.1 мм).

Рефлектор – телескоп, в якому випромінювання фокусується завдяки його відбиттю від дзеркала певної форми.

Рефрактор – телескоп, в якому випромінювання фокусується завдяки його заломленню в одній або кількох лінзах об'єктиву.

Рівнодення – момент часу, коли Сонце в своєму річному русі перетинає небесний екватор, у відповідну добу день приблизно дорівнює ночі, весняне рівнодення – 21 березня, осіннє – 23 вересня.

Річний паралакс – кут, під яким із зорі видно велику піввісь земної орбіти.

Роздільна здатність – найменша кутова відстань між двома точковими об'єктами, які можна побачити в певний оптичний прилад як окремі об'єкти (для ідеального приладу визначається хвильовою природою світла – дифракцією, практично – для малих телескопів якістю їх оптики та турбулентністю земної атмосфери, для великих телескопів – тільки станом атмосфери).

Розсіяне зоряне скупчення – скупчення в просторі зір, поєднаних загальним походженням, має неправильну форму й налічує десятки або сотні зір.

Сарос – період (у 18 років і 10 діб) повторення затемнень (визначається періодом обертання лінії вузлів місячної орбіти під збурюючим впливом Сонця).

Світловий рік – відстань, яку проходить у вакуумі світло за один рік, дорівнює $3.26 \text{ пк} = 9.5 \cdot 10^{13} \text{ км}$.

Світність – кількість енергії, що її випромінює зоря або інший самосвітній об'єкт в одиницю часу.

Середній сонячний час – час у межах доби, що вимірюється за допомогою середнього Сонця, уявної точки, яка пересувається у своєму річному русі рівномірно по небесному екватору; дорівнює часовому куту середнього Сонця, збільшеному на 12^{h} .

Сидеричний період – період обертання небесного тіла по його орбіті відносно зір.

Синодичний період – найменший проміжок часу між двома однойменними конфігураціями планети або двома однаковими фазами Місяця.

Смуги хмар – хмарові утворення, паралельні екватору планет-гігантів, більш темні, ніж сусідні зони.

Сонцестояння – момент часу, коли Сонце має найбільше (літнє с.) і найменше (зимове с.) схилення, в північній півкулі Землі в літнє с. (21 червня) – день найдовший, в зимове с. (21 грудня) – найкоротший.

Сонячна стала – кількість енергії, що приходить від Сонця за одиницю часу на одиничну площадку, перпендикулярну сонячним променям, на відстані в 1 а. о. (1.36 кВт/м^2).

Сонячні нейтрино – нейтрино, що виникають в ядрі Сонця при термоядерних реакціях перетворення протонів у ядра гелію й випромінюються в навколосонячний простір; проблема с. н. (полягала в тому, що не було пояснення розходження між розрахунковим та спостережним потоками с. н.) вирішена після встановлення відмінної від нуля маси нейтрино та існування нейтринних осциляцій.

Сонячні плями – темні утворення зі зниженою температурою в фотосфері Сонця, в яких частина теплової енергії перейшла в енергію магнітного поля.

Сонячний вітер – потік плазми (переважно електронів та протонів), що йде від Сонця внаслідок розширення сонячної корони, збільшується в максимумі сонячної активності, особливо після хромосферних спалахів, досягає Землі за 1-3 доби.

Сполучення – положення планети, коли вона має найменше кутове віддалення від Сонця (нижнє – коли планета знаходиться між Землею та Сонцем, верхнє – коли Сонце знаходиться між Землею та планетою).

Спектр – розподіл енергії за довжиною хвилі або частотою, що її випромінює або відбиває небесне тіло; має неперервну складову (приблизно планківського типу), на яку накладаються лінійчасті спектри поглинання та випромінювання, що утворюються при поглинанні або випромінюванні певних порцій енергії атомами та молекулами речовини поверхневих шарів небесного тіла.

Спектральна класифікація – поділ зір на групи за температурою фотосфери (у межах певного класу світності), а відтак і світністю, зовнішня ознака певного спектрального класу – наявність у спектрі ліній тих елементів, які (лінії) виникають за відповідної температури.

Спектрально-подвійні зорі – системи, подвійність яких встановлюється за періодичним зсувом спектральних ліній в їх спектрах внаслідок орбітального руху компонент навколо їхнього центра мас.

Спектральний аналіз – визначення наявності та вмісту хімічних елементів у речовині поверхневих шарів небесного тіла за наявністю та інтенсивністю в лінійчастому спектрі цього тіла спектральних ліній, притаманних певному елементу.

Спіральна галактика – гігантська галактика, в якій поширюються хвилі густини, що надають галактиці структуру з ядра та двох або більше спіралей.

Стадія випромінювання – стадія еволюції Всесвіту, на якій темп його розширення впливала енергія випромінювання (наслідувала інфляційній стадії і передувала стадії речовини).

Стадія речовини – сучасна стадія еволюції Всесвіту, на якій на темп його розширення суттєво впливає енергія речовини та темної матерії.

Стала Хаббла – сучасне значення параметра Хаббла, який є коефіцієнтом пропорційності між швидкістю позагалактичного об'єкта (що віддаляється від спостерігача внаслідок розширення Всесвіту) та відстанню до цього об'єкта.

Субзоря (коричневий карлик) – космічне тіло з масою, проміжною між масами планет та зір, що світить за рахунок енергії, накопиченої під час його утворення внаслідок гравітаційного стиснення.

Схилення – кутова відстань між світилом та небесним екватором (або відповідна їй дуга на небесній сфері).

Телескоп – оптичний прилад, який фокусує випромінювання, що приходить від небесного об'єкта, з метою збільшення створюваної цим об'єктом освітленості, збільшення зображення об'єкта та визначення напрямку на нього.

Термінатор – межа між освітленою Сонцем та неосвітленою частинами видимого диска Місяця або планети (має форму півеліпса).

Термоядерні реакції – реакції синтезу ядер більш важких елементів з більш легких, насамперед, ядер гелію з протонів, що відбуваються в центральних частинах зір і є джерелом їх енергії.

Темна енергія – енергія фізичного вакууму чи квінт-есенції, здатна забезпечити прискорене розширення Всесвіту.

Темна матерія – неспостережувана матерія у Всесвіті, до однієї п'ятої її частини складає неспостережувана баріонна матерія, чотири п'ятих – сукупність якихось елементарних частинок, природа яких ще невідома.

Точка весняного рівнодення – точка перетину екліптики з небесним екватором, в якій Сонце в своєму річному русі переходить з південної півкулі небесної сфери у північну.

Точки лібрації – точки відносної рівноваги в обмеженій задачі трьох тіл, усього їх п'ять, три прямолінійні та дві трикутні.

Траснептунові об'єкти (ТНО) - сукупність планет-карликів та малих тіл Сонячної системи, що рухаються поза межами орбіти Нептуна.

Третя космічна швидкість – найменша швидкість, одержавши яку відносно планети в напрямі руху планети, матеріальна точка може покинути Сонячну систему і віддалитися від неї на нескінченність.

Тропіки – земні паралелі ($\varphi = \pm 23.5^\circ$), на яких Сонце тільки один раз на рік (у день літнього сонцестояння) кульмінує в zenіті.

Троянці – групи астероїдів, що рухаються по орбіті Юпітера поблизу трикутних точок лібрації (точок відносної рівноваги) Юпітера та Сонця, й названі іменами героїв Гомерової «Іліади».

Фази (Місяця або планети) – різні форми освітленої частини видимого диска, що їх бачить спостерігач на Землі (кількісно визначаються відношенням найбільшої ширини освітленої частини диска до його діаметра).

Фізичний вакуум – стан матерії, в якому час життя елементарних частинок визначається співвідношенням невизначенностей; у збудженому стані спричиняє від'ємний тиск, що викликає експоненціальний характер розширення Всесвіту на інфляційній стадії його еволюції та прискорене розширення Всесвіту в сучасну епоху.

Фізично-змінні зорі – зорі, що змінюють свою світність завдяки певним фізичним процесам, що в них відбуваються.

Фотометричний парадокс – відсутність середньої яскравості неба, зіставної з яскравістю сонячного диска, яка повинна б мати місце в моделі нескінченного ньютонівського всесвіту.

Фотосфера – поверхневий шар зорі, з якого до нас приходять випромінювання в її неперервному спектрі.

Хмара Оорта – гіпотетичне скупчення кометних ядер на відстані приблизно 100 тис. а. о., окремі з яких під впливом гравітаційних збурень проникають у внутрішню частину Сонячної системи і утворюють явище комети.

Хромосфера – частина атмосфери Сонця, в якій переважно утворюється лінійчастий спектр Сонця, видна в час повних сонячних затемнень у вигляді кольорового обідка навколо Сонця.

Хромосферний спалах – найпотужніший прояв сонячної активності, супроводжується короткочасним (від хвилин до годин) збільшенням яскравості окремої ділянки хромосфери, збільшенням потоку корпускулярного, короткохвильового та радіовипромінювання Сонця за рахунок енергії магнітного поля в місцях зближення магнітних полів протилежної полярності.

Цефеїди – пульсуючі змінні зорі, що змінюють свій блиск внаслідок коливань, викликаних зміною прозорості речовини при іонізації та рекомбінації гелію в підповерхневих шарах зорі й відповідного їх нагрівання й охолодження.

Хвилі густини – підвищення густини зірок та міжзоряної речовини в галактиці, що поширюючись зі швидкістю, яка залежить від відстані до центра галактики, набувають спіральної форми і визначають зовнішній вигляд спіральних галактик.

Червоний гігант – зоря з відносно холодною поверхнею, але великої світності за рахунок великого розміру; певна стадія еволюції зірок, розширення яких викликається збільшенням виділення енергії внаслідок зміни типу ядерних реакцій.

Чорна діра – об'єкт, радіус якого менше, ніж його гравітаційний радіус, тобто радіус, при якому друга космічна швидкість дорівнювала б швидкості світла (кінцева стадія еволюції масивних зірок ($M > (3-6) M_{\odot}$); надмасивні чорні діри можливі як центральні утворення в галактиках і квазарах; існування ч. д. встановлено в центрі нашої Галактики).

Юліанський календар – календар, в якому три роки мають по 365 діб, а кожен четвертий (високосний) має 366 діб.

Ядро – внутрішня оболонка планети, що утворюється виділенням з мантиї найбільш важких порід, (металева або силікатно-металева у планет земної групи та силікатне у планет-гігантів); внутрішня оболонка зорі, де відбуваються термоядерні реакції, що є джерелом її енергії.

ВИДАТНІ АСТРОНОМИ ТА ДІЯЧІ КОСМОНАВТИКИ

Нижче наведені короткі відомості про вчених і діячів космонавтики – тих, чий внесок у розвиток астрономії і космонавтики є безперечним та загально визнаним; тих, з чийм ім'ям пов'язані відкриття і пріоритетні досягнення або широкоживані терміни; особлива увага приділена тим, чий життя і діяльність пов'язані з Україною. Більш докладні відомості про згаданих нижче та інших вчених, які зробили свій внесок у дослідження Всесвіту, можна знайти у довіднику І. Г. Колчинського, А. О. Корсунь і М. Г. Родригеса «Астрономы» та в енциклопедії «Космонавтика».

Абалакін Віктор Кузьмич (н. 1930 р.) – радянський астроном, н. в Одесі, фахівець у галузі небесної механіки та ефемеридної астрономії, закінчив Одеський ун-т, працював у ньому, пізніше – директор Пулковської обсерваторії, чл.-кор. АН СРСР.

Аксентьєва Зінаїда Миколаївна (1900–1969) – український астроном, н. в Одесі, закінчила Одеський ун-т, працювала в Полтавській гравіметричній обсерваторії, фахівець у галузі астрономо-геодезії, чл.-кор. АН України.

Альфвен Ханнес (1908–1995) – шведський фізик і астрофізик, засновник магнітної гідродинаміки та космічної електродинаміки, зробив великий внесок у вирішення проблем походження космічних променів та природи сонячної активності, лауреат Нобелівської премії.

Амбарцумян Віктор Амазаспович (1908–1984) – видатний радянський астрофізик, один із засновників сучасної теорії переносу випромінювання, встановив нестійкість зоряних асоціацій і довів тим самим наявність процесу зореутворення у сучасну епоху, академік АН СРСР, двічі Герой Соціалістичної Праці.

Аріабхата (476 – приблизно 550) – індійський астроном і математик, розвивав методи астрономічних обчислень, висунув ідею осьового обертання Землі, його ім'ям був названий перший індійський ШСЗ.

Арістарх Самоський (приблизно 310–230 до н. е.) – видатний давньогрецький астроном, вперше визначив відстані до Сонця та Місяця та їх розміри (в долях радіуса Землі) і на цій підставі розвинув першу геліоцентричну систему світу.

Арістотель (384–322 до н. е.) – великий давньогрецький філософ і вчений-енциклопедист, засновник фізики та логіки; у наукову картину світу, створену ним, увійшла і перша наукова космологічна модель Всесвіту, яку він розробив, розвинувши модель *Евдокса* Кнідського.

Армстронг Ніл (1930-2012) – американський астронавт, перша людина у світі, яка 21 липня 1969 р. ступила на поверхню Місяця під час польоту КК «Аполлон-11».

Барабашов Микола Павлович (1894–1971) – відомий український астроном, н. у Харкові, закінчив Харківський ун-т, працював у ньому все життя, фахівець у галузі фізики Місяця та планет, створив відому харківську школу планетознавства, академік АН України, Герой Соціалістичної Праці.

Бессель Фрідріх (1784–1846) – видатний німецький астроном-спостерігач і геодезист, працював у Кенігсберзі, засновник сучасних методів в астрометрії, виміряв один з перших зоряних паралаксів (зорі 61 Лебеда), визначив параметри земного геоїда, що використовувалися понад 100 років.

Біруні (973–1048) – видатний середньоазіатський учений-енциклопедист, висунув цілу низку астрофізичних ідей, створив квадрант з радіусом 7.5 м, визначив з великою точністю нахил екліптики до небесного екватора, запропонував ідею тріангуляції.

Богородський Олександр Федорович (1907–1984) – український астрофізик, н. у Горлівці, з 1944 р. працював у Київському ун-ті, займався загальною теорією відносності та її застосуваннями в астрономії, фізикою Сонця.

Бор Нільс (1885–1962) – великий датський фізик, засновник квантової теорії будови атома, що лежить в основі інтерпретації спектрів небесних тіл і визначення їх хімічного складу, лауреат Нобелівської премії.

Браге Тіхо (1546–1601) – видатний датський астроном, найвизначніший астроном-спостерігач дотелескопічної астрономії, досяг точності позиційних спостережень у 2', дані його спостережень дозволили *Кеплеру* встановити закони планетних рухів.

Брадлей Джеймс (1693–1762) – видатний англійський астроном, директор Грінвіцької обсерваторії, відкрив явища аберації світла і нутації земної осі, уточнив значення паралаксу Сонця.

Брауде Семен Якович (1911–2003) – український радіофізик і радіоастроном, н. у Полтаві, закінчив Харківський ун-т, започаткував декаметрову радіоастрономію, засновник радіоастрономії в Україні, під його керівництвом створені радіотелескопи УТР-1 та УТР-2, радіоінтерферометрична система УРАН, академік АН України.

Браун Вернер (1912–1978) – видатний конструктор у галузі ракетно-космічної техніки, головний конструктор німецьких ракет V-1 і V-2, потім працював у США, зробив великий внесок у розвиток американської космонавтики, зокрема, у здійснення пілотованих польотів на Місяць за програмою «Аполлон».

Вальє Макс (1895–1930) – німецький інженер, один з піонерів ракетно-космічної техніки, автор книги «Полет в мировое пространство как техническая возможность», загинув при випробуванні автомобіля з реактивним двигуном.

Вернадський Володимир Іванович (1863–1945) – видатний радянський вчений-природознавець, засновник геохімії і радіохімії, з'ясував геологічну роль біосфери, розвинув вчення про ноосферу, засновник і перший президент АН України, академік АН СРСР.

Вілсон Роберт (1936–2010) – американський радіоінженер і радіоастроном, разом з А. Пензіасом відкрив реліктове випромінювання; лауреат Нобелівської премії.

Вольф Рудольф (1816–1893) – швейцарський астроном, на підставі багаторічних спостережень Сонця встановив 11-річну періодичність сонячної активності та її зв'язок з коливаннями магнітного поля Землі, ввів числа В. як міру сонячної активності.

Всехсвятський Сергій Костянтинович (1905–1984) – радянський астроном, з 1939 р. багато років працював у Київському ун-ті, займався проблемою походження комет, вивчав явище сонячного вітру, передбачив існування кілець у планет-гігантів.

Гагарін Юрій Олексійович (1934–1968) – льотчик-космонавт СРСР, вперше у світі здійснив космічний політ 12 квітня 1961 р. на КК «Восток», загинув під час тренувального польоту на літаку, Герой Радянського Союзу.

Галілей Галілео (1564–1642) – великий італійський астроном і фізик, один із засновників точного природознавства, засновник телескопічної астрономії, його телескопічні відкриття (рел'єф Місяця, фази Венери, плями на Сонці, структура Молочного шляху) підтвердили геліоцентричне вчення *Коперніка*, висунув найважливіші засади класичної фізики – принцип відносності та закон інерції.

Галлей Едмонд (1656–1742) – видатний англійський астроном і геофізик, розробив методи розрахунку руху комет, передбачив повернення комети, названої його ім'ям, відкрив власний рух зірок, передбачив існування фотометричного парадоксу, вивчав циркуляцію повітря в атмосфері та земний магнетизм.

Гамов Георгій Антонович (1904–1968) – видатний фізик і астрофізик ХХ ст., н. в Одесі, закінчив Ленінградський ун-т, з 1933 р. жив і працював у США, створив теорію альфа-розпаду, розробив теорію «гарячого Всесвіту», яка лежить в основі сучасної фізичної космології і пояснює хімічний склад Всесвіту, передбачив існування реліктового випромінювання, з'ясував інформаційний код молекул ДНК, член-кор. АН СРСР.

Герасимович Борис Петрович (1889–1937) – український астрофізик, н. у Кременчузі, закінчив Харківський ун-т і працював у ньому, потім директор Пулковської обсерваторії, одержав багато важливих результатів у фізиці зірок і туманностей, астрономії подвійних та змінних зірок і зоряній астрономії.

Герцшпрунг Ейнар (1873–1967) – датський астрофізик, встановив існування зір-гігантів і зір-карликів, вперше побудував діаграму «спектр-світність» (діаграму *Г.-Рессела*), вивчав зоряні скупчення і змінні зорі-цефеїди.

Гершель Вільям (1738–1822) – видатний англійський астроном і оптик, будував великі телескопи-рефлектори, створив каталоги змінних і подвійних зір та туманностей, встановив позагалактичну природу деяких з них, створив першу модель будови Галактики, відкрив планету Уран та інфрачервоне випромінювання Сонця.

Гінзбург Віталій Лазаревич (1916–2003) – видатний радянський фізик і астрофізик, вирішував проблеми походження космічних променів, природи сонячного радіовипромінювання, фізики пульсарів і чорних дір, температури міжгалактичного газу, академік АН СРСР, лауреат Нобелівської премії.

Гіппарх (приблизно 185–125 до н. е.) – найвидатніший астроном античності, склав перший каталог зір, ввів їх поділ за зоряними величинами, відкрив прецесію земної осі й встановив її період, почав розробку геоцентричної

системи *Г.-Птолемея*, ввів поняття про географічні координати, один із засновників тригонометрії.

Гленн Джон (н. 1921 р.) – перший космонавт (астронавт) США, здійснив космічний політ 20 лютого 1962 р. на КК «Меркурій».

Глушко Валентин Петрович (1908–1989) – видатний радянський конструктор реактивних двигунів, н. в Одесі, вперше висунув ідею електродинамічного реактивного двигуна, академік АН СРСР, двічі Герой Соціалістичної Праці.

Годард Роберт (1882–1945) – американський вчений, один з піонерів космонавтики, в 1926 р. уперше здійснив запуск ракети на рідкому паливі.

Гоман Вальтер (1880–1943) – німецький інженер, один з піонерів космонавтики, у 1922 р. запропонував оптимальні траєкторії для міжпланетних польотів (еліпси Г.).

Гюйгенс Християн (1629–1695) – видатний голландський астроном, фізик і математик, відкрив кільця Сатурна та його супутник Титан, полярні шапки на Марсі і темні смуги на Юпітері, сформулював поняття про відцентрову силу і висунув ідею про полярне стиснення Землі, винайшов маятниковий годинник.

Дрогобич Юрій (1450–1494) – український астроном. Автор книги з астрономії та астрології на латинській мові. Був ректором Болонського університету в Італії, викладав у Краківському університеті.

Евдокс Кнідський (приблизно 408–приблизно 355 до н. е.) – давньогрецький астроном, склав одну з перших карт зоряного неба, створив першу наукову космологічну модель з концентричних сфер, пізніше розвинуту *Арістотелем*.

Еддінгтон Артур (1882–1944) – видатний англійський астрофізик, заклав основи теорії будови зір та їх атмосфер і теоретичної інтерпретації діаграми «спектр-світність», займався теорією пульсуючих зір, здійснив першу спостережну перевірку загальної теорії відносності.

Ейнштейн Альберт (1879–1955) – великий німецький фізик, один із засновників квантової фізики, створив спеціальну (СТВ) і загальну (ЗТВ) теорії відносності, що підтверджені астрономічними спостереженнями, ЗТВ лежить в основі сучасної космології нестационарного Всесвіту і фізики чорних дір, лауреат Нобелівської премії.

Ератосфен (приблизно 276–194 до н.е.) – давньогрецький астроном і географ, вперше визначив розмір земної кулі, дав оцінку відстаней до Сонця і Місяця, уточнив значення нахилу екліптики до небесного екватора.

Зельдович Яків Борисович (1910–1986) – видатний радянський фізик і астрофізик, один із засновників релятивістської астрофізики, розробив зі своїми учнями адіабатичну теорію утворення великомасштабної структури Всесвіту, зробив великий внесок у розвиток атомної науки і техніки, академік АН СРСР, тричі Герой Соціалістичної Праці.

Каврайський Володимир Володимирович (1884–1954) – радянський астроном, геодезист і картограф, закінчив Харківський ун-т, працював у галузі математичної картографії, морехідної астрономії, астрономо-геодезії, контр-адмірал, лауреат Державної премії СРСР.

Каденюк Леонід Костянтинович (н. 1950 р.), український космонавт, н. у с. Касщивці Чернівецької обл., першим в історії незалежної України здійснив космічний політ на американському КК багаторазової дії «Колумбія» 19–27 листопада 1997 р., Герой України.

Кащев Борис Леонідович (1920–2002) – український радіоастроном, засновник радіо-метеорної астрономії в Україні, працював у Харківському політехнічному інституті та Харківському технічному університеті радіоелектроніки.

Кассіні Доменіко (1625–1712) – видатний французький астроном-спостерігач, відкрив низку супутників Сатурна, щілину в кільці Сатурна, що названа його ім'ям, одержав перше значення сонячного паралаксу, спостерігав зодіакальне світло.

Келдиш Мстислав Всеволодович (1911–1978) – видатний радянський механік і математик, розв'язав низку важливих теоретичних і практичних проблем теорії функцій, математичної фізики, гідро- та газодинаміки, талановитий організатор науки, насамперед, космічних досліджень, президент АН СРСР, тричі Герой Соціалістичної Праці.

Кеплер Іоганн (1571–1630) – видатний німецький астроном, один із засновників природознавства Нового часу, відкрив закони планетних рухів, запропонував нову схему телескопа-рефрактора, близько підійшов до ідеї закону всесвітнього тяжіння, математичні роботи К. сприяли появі диференціального та інтегрального числень.

Климишин Іван Антонович (н. 1933 р.) – український астрофізик, н. у с. Кутиська Тернопільської обл., закінчив Львівський ун-т, працював у ньому, а потім у Прикарпатському ун-ті, розвивав теорію переносу випромінювання у середовищах, що рухаються, автор підручника для середньої школи і багатьох науково-популярних книг.

Койпер Джерард (1905–1973) – відомий американський астроном, вивчав подвійні зорі, досліджував еволюцію зірок, відкрив два супутника планет-гігантів і наявність вуглекислоти в атмосфері Марса, вивчав головний пояс астероїдів та передбачив існування зовнішнього пояса астероїдів.

Кондратюк Юрій Васильович (1897–1942, справжнє ім'я – Шаргей Олександр Гнатович) – радянський інженер і винахідник, один з піонерів космонавтики, н. у Полтаві, працював у Полтаві та Харкові, у книзі «Завоювання міжпланетних просторів» розглянув основи космонавтики, запропонував схему польоту до Місяця, загинув на фронті Великої Вітчизняної війни.

Коноваленко Олександр Олександрович (н. 1951 р.) – відомий український радіоастроном, н. у Харкові, закінчив Харківський інститут радіоелектроніки, фахівець у галузі декаметрової радіоастрономії, відкрив лінії випромінювання міжзоряного вуглецю з квантовими числами понад 800, академік НАН України.

Кононович Олександр Костянтинович (1850–1910) – український астроном, один з піонерів астрофізики в Росії, закінчив Новоросійський ун-т в Одесі і понад 30 років працював у ньому, займався фотометрією планет, спостереженнями сонячної активності, визначенням орбіт подвійних зірок.

Копернік Микола (1473–1543) – видатний польський астроном, засновник геліоцентричного вчення, його книга «Про обертання небесних сфер» стала першим поштовхом для розвитку фізики і астрономії Нового часу, вивільнення їх від релігійного гніту, був також здібним лікарем, економістом і військовим діячем.

Корольов Сергій Павлович (1907–1966) – засновник практичної космонавтики, н. у Житомирі, вчився в Одесі та Києві, під керівництвом К. були здійснені запуск першого ШСЗ, перший політ людини в космос, перший вихід людини у відкритий космос, перші дослідження Місяця і Венери за допомогою космічних апаратів, академік АН СРСР, двічі Герой Соціалістичної Праці.

Кудревич Борис Іванович (1884–1970) – відомий фахівець у галузі морехідної астрономії, закінчив Харківський ун-т, контр-адмірал, заслужений діяч науки і техніки РРФСР.

Лагранж Жозеф (1736–1813) – видатний французький математик, механік і астроном, завершив разом з *П. Лапласом* побудову основ небесної механіки, розвинув метод оскулюючих орбіт, дослідив характер вікових збурень планетних орбіт, заклав основи аналітичної механіки.

Ландау Лев Давидович (1908–1968) – видатний радянський фізик-теоретик, у 1935–1937 рр. працював у Харківському ун-ті, де заклав основи всесвітньо відомого курсу теоретичної фізики, на якому виховується вже не одне покоління фізиків і астрономів, одна з його праць лежить в основі уявлень про нейтронні зірки, академік АН СРСР, Герой Соціалістичної Праці, лауреат Нобелівської премії.

Лаплас П'єр (1749–1827) – видатний французький астроном, математик і фізик, його п'ятитомна праця «Трактат з небесної механіки» завершила створення основ цього розділу астрономії, розглянув широке коло питань руху Місяця, планет, їх супутників і комет, вперше розглянув питання про стійкість Сонячної системи, зробив великий внесок у розвиток математичної фізики та теорії ймовірностей.

Левер'є Урбен (1811–1877) – французький астроном, фахівець у галузі небесної механіки, незалежно від Д. Адамса передбачив існування планети Нептун, розвивав теорію руху великих планет, виявив додатковий поворот перигелію Меркурія, який був пояснений лише загальною теорією відносності.

Левицький Григорій Васильович (1852–1917) – український астроном, н. у Харкові, працював у Пулковській обсерваторії і Харківському ун-ті, засновник постійної астрономічної обсерваторії цього ун-ту, займався спостереженнями сонячної активності та визначенням орбіт подвійних зірок, гравіметричними дослідженнями.

Леонов Олексій Архипович (н. у 1934 р.) – льотчик-космонавт СРСР, 18 березня 1965 р. здійснив перший у світі вихід у відкритий космос з КК «Восход-2», у 1975 р. був командиром радянського екіпажу під час першого міжнародного космічного польоту за програмою «Союз–Аполлон», двічі Герой Радянського Союзу.

Литвиненко Леонід Миколайович (н. 1938 р.) – відомий український радіофізик і радіоастроном, н. у Харкові, закінчив Харківський ун-т, фахівець у галузі декаметрової та міліметрової радіоастрономії, директор Радіоастрономічного інституту НАН України в Харкові, академік НАН України.

Ломоносов Михайло Васильович (1711–1765) – великий російський вчений-енциклопедист, відкрив атмосферу Венери, запропонував нову схему телескопа-рефлектора, розвивав якісні, але в принципі правильні уявлення про будову Сонця, зір і комет, заклав основи гравіметрії в Росії.

Ляпунов Олександр Михайлович (1857–1918) – видатний російський математик і механік, під час роботи в Харківському ун-ті заклав основи теорії стійкості руху, яка зіграла велику роль у розвитку небесної механіки та багатьох інших розділів науки і техніки, зробив великий внесок у розвиток математичної фізики і теорії ймовірностей.

Михайлов Олександр Олександрович (1888-1983) - відомий радянський астроном та гравіметрист. Закінчив Московський ун-т і в 1918-1948 рр. працював у ньому. У 1947-1964 рр. директор Пулковської обсерваторії. У 1939-1962 рр. голова Астрономічної ради АН СРСР. Зробив великий внесок у розвиток сучасних методів гравіметричних досліджень, у теорію затемнень, відомі зоряні атласи М. Академік АН СРСР, Герой Соціалістичної Праці.

Ньютон Ісаак (1643–1727) – великий англійський фізик, астроном і математик, встановив закон всесвітнього тяжіння та основні закони класичної динаміки, заклав основи теорії руху небесних тіл, відкрив неперервний спектр сонячного світла, розвивав корпускулярну теорію світла, винайшов телескоп-рефлектор, заклав основи диференціального та інтегрального числень, завершив закладання основ класичної фізики і заснованої на ній астрономії.

Оберт Герман (1894–1989) – німецький учений, один з піонерів космонавтики, виконав дослідження з теорії ракет та їх застосування для вивчення земної атмосфери та космосу.

Орлов Олександр Якович (1884–1954) – український астроном, був директором астрономічної обсерваторії Одеського ун-ту, засновником Полтавської гравіметричної обсерваторії, директором ГАО АН України, вивчав припливні явища, рух полюсів Землі, сонячну активність, чл.-кор. АН СРСР, академік АН України.

Пензіас Арно (н. 1933 р.) – американський радіоінженер і радіоастроном, у 1965 р. разом з Р. Вілсоном відкрив реліктове випромінювання, лауреат Нобелівської премії.

Піацці Джузеппе (1746–1826) – італійський астроном, відкрив у 1801 р. першу малу планету Цереру (карликову планету), вивчав власні рухи зірок.

Піфагор (приблизно 570–500 до н. е.) – давньогрецький математик, філософ і астроном, висунув ідею кулястості Землі, припустив, що ранкова і вечірня зорі – це одна і та планета Венера, йому приписують перше визначення нахилу екліптики до небесного екватора.

Попович Павло Романович (1930-2009) – льотчик-космонавт СРСР, н. у м. Узині Київської обл., 12–15 серпня 1962 р. вперше у світі здійснив груповий

політ на КК «Восток-4» разом з космонавтом А. Г. Ніколаєвим (КК «Восток-3»), був командиром екіпажу ОС «Салют-3» двічі Герой Радянського Союзу.

Птолемей Клавдій (приблизно 87–165) – видатний грецький астроном, його книга «Альмагест» стала вершиною античної астрономії, завершив розробку геоцентричної системи світу, яка дозволила з потрібною на той час точністю розраховувати рух небесних тіл, вперше почав враховувати при спостереженнях рефракцію, розширив зоряний каталог Гіппарха.

Ремер Оле (1644–1710) – датський астроном, вперше визначив за спостереженнями супутників Юпітера швидкість світла, винайшов і вдосконалив низку астрометричних інструментів та приладів.

Рессел Генрі (1877–1957) – американський астроном, незалежно від *Е. Герцшпруга* побудував діаграму «спектр-світність» для зір, одним з перших застосував в астрофізиці квантову теорію і визначив хімічний склад Сонця та зір, розвивав теорію орбіт затемнено-подвійних зір.

Рош Едуард (1820–1883) – французький астроном і математик, вивчав фігури рівноваги небесних тіл, встановив найменшу відстань, на якій супутник може існувати і не буде розірваний припливними силами з боку центрального тіла (межа Р.), вивчав внутрішню будову зірок і планет.

Сєверний Андрій Борисович (1913–1983) – радянський астроном, багато років працював у Кримській астрофізичній обсерваторії, був її директором, вивчав внутрішню будову і магнітні поля зір, під його керівництвом створено нові інструменти для вивчення Сонця та його магнітного поля, розвинув уявлення про механізми сонячної активності, засновник геліосейсмології, академік АН СРСР, Герой Соціалістичної Праці.

Сергєєв Володимир Григорович (1914–2009) – видатний конструктор систем керування ракетами і космічними апаратами, багато років очолював харківське НПО «Хартрон», академік АН України, двічі Герой Соціалістичної Праці.

Соболев Віктор Вікторович (1914–1999) – видатний радянський астрофізик, один із засновників сучасної теорії переносу випромінювання, зокрема у середовищах, що рухаються, в анізотропних середовищах та з урахуванням стану поляризації, видатний педагог, засновник Ленінградської школи теоретичної астрофізики, академік АН СРСР, Герой Соціалістичної Праці.

Стешенко Микола Володимирович (н. 1927 р.) – український астроном, фахівець у галузі фізики Сонця і телескопобудування, н. у с. Диканька Полтавської обл., закінчив Київський ун-т, працює у Кримській астрофізичній обсерваторії, багато років був її директором, академік НАН України.

Струве Василь Якович (1793–1864) – видатний російський астроном, засновник і перший директор Пулковської обсерваторії, де під його керівництвом були створені високоточні зоряні каталоги, вивчав подвійні та кратні зорі, вперше виміряв зоряний паралакс (зорі Веги), обґрунтував припущення про існування міжзоряного поглинання світла, під його керівництвом було виконано геодезичні роботи з вимірювання «російської» дуги меридіана довжиною у 25°.

Струве Людвиг Оттович (1858–1920) – астроном, онук В. Я. Струве, працював у Дерптському, а потім у Харківському ун-тах, основні роботи у галузі

астрометрії і зоряної астрономії, першим намагався визначити швидкість обертання Галактики.

Струве Отто Людвигович (1897–1963) – видатний астроном ХХ ст., син Л. О. Струве, н. у Харкові, закінчив Харківський ун-т, жив і працював у США, де був директором низки обсерваторій, його роботи із зоряної спектроскопії, визначення осьового обертання зір, фізики туманностей і міжзоряного середовища зробили важливий внесок у створення теорії будови і еволюції зір, був президентом Міжнародного астрономічного союзу.

Терешкова Валентина Володимирівна (н. 1937 р.) – перша у світі жінка-космонавт, яка здійснила космічний політ 16–19 червня 1963 р. на КК «Восток-6», генерал-майор, Герой Радянського Союзу.

Титов Герман Степанович (1935–2000) – космонавт СРСР, вперше у серпні 1961 р. здійснив добовий космічний політ на КК «Восток-2», генерал-полковник, Герой Радянського Союзу.

ат Туси Насреддін ад-Дін (1201–1274) – середньовічний вчений-енциклопедист, створив у Меразі (сучасний Азербайджан) велику обсерваторію, де проводилися позиційні спостереження Сонця, планет і зірок, уточнив швидкість прецесії.

Улугбек Гураган (1394–1449) – найвидатніший середньоазіатський астроном, онук Тамерлана, заснував у Самарканді велику обсерваторію, яка мала квадрант радіусом у 40 м, і багато інших інструментів, створив каталог 1018 зірок з нечуваною раніше точністю в 15', характеристики руху Сонця були визначені ним на підставі тридцятирічних спостережень з точністю в 1".

Федоренко Іван Іванович (1827–1888) – український астроном, закінчив Харківський ун-т, працював в обсерваторіях Харківського та Київського ун-тів, потім очолював кафедру астрономії Харківського ун-ту, працював у галузі практичної та зоряної астрономії.

Федоров Василь Федорович (1802–1855) – російський астроном, засновник астрономічної обсерваторії Київського університету (1846 р.).

Федоров Євген Павлович (1909–1989) – радянський астроном, був директором ГАО АН України, фахівець у галузі астрометрії, теорії обертання Землі як пружного тіла, руху полюсів Землі, академік АН України.

Фесенков Василь Григорович (1889–1972) – видатний радянський астроном, закінчив Харківський ун-т і працював у ньому, засновник низки астрономічних установ, зокрема Астрофізичного інституту АН Казахстану, який носить зараз його ім'я, працював у багатьох галузях астрофізики, академік АН СРСР.

Фрідман Олександр Олександрович (1888–1925) – відомий радянський геофізик і математик, засновник релятивістської космології, першим знайшов розв'язок рівнянь загальної теорії відносності для нестационарного однорідного та ізотропного світу, зробив великий внесок у розвиток статистичної гідродинаміки та фізики атмосфери.

Хаббл Едвін (1889–1953) – видатний американський астроном, засновник сучасної позагалактичної астрономії, запропонував першу класифікацію галактик, встановив закон Х. про пропорційність швидкості віддалення галактик відстані до них.

Хандріков Митрофан Федорович (1837–1915) – російський астроном, багато років очолював обсерваторію Київського ун-ту, працював у галузі практичної і теоретичної астрономії та астрономо-геодезії.

Хеггінс Вільям (1824–1910) – американський астроном, один із засновників зоряної спектроскопії, першим застосував в астрономії ефект Доплера і виміряв променеві швидкості зір.

Хокінг Стівен (н. 1942 р.) – відомий англійський астрофізик, передбачив існування чорних дір малої маси та квантове випаровування чорних дір, все це і багато іншого він зробив, незважаючи на важку хворобу, яка прикувала його до інвалідного візка.

Хьюїш Ентоні (н. 1924 р.) – англійський радіоастроном, відкрив явище мерехтіння радіовипромінювання на неоднорідностях космічної плазми, разом зі своєю аспіранткою Дж. Белл відкрив у 1968 р. пульсари, лауреат Нобелівської премії.

Цандер Фрідріх Артурович (1887–1933) – радянський вчений та інженер, один з піонерів космонавтики, запропонував багато нових ідей у галузі ракетобудування та астродинаміки (зокрема ідеї гравітаційного маневру і кусочно-конічної апроксимації траєкторій КА), був гарячим ентузіастом польоту людини на Марс.

Цесевич Володимир Платонович (1907–1983) – відомий радянський астроном, багато років очолював обсерваторію Одеського університету, відомий фахівець у галузі вивчення змінних зір різних типів, а також спостережень болідів та ШСЗ, чл.-кор. АН України.

Ціолковський Костянтин Едуардович (1957–1935) – великий російський вчений, засновник теоретичної космонавтики, першим заклав основи теорії реактивного руху, намалював основні шляхи розвитку ракетної техніки та космонавтики, визначив значення вивчення і освоєння космосу для майбутнього людства.

Чандрасекар Субраманьян (1910-1995) – видатний астрофізик ХХ ст., зробив значний внесок у теорію внутрішньої будови зір (межа Ч. – гранична маса білого карлика), у теорію переносу випромінювання в атмосферах зір і планет, зоряну динаміку, теорію чорних дір, лауреат Нобелівської премії.

Черних Микола Степанович (1932–2004) – радянський астроном, за багато років праці у Кримській астрофізичній обсерваторії став першовідкривачем понад 500 нових малих планет.

Шайн Григорій Абрамович (1892–1956) – видатний радянський астроном, н. в Одесі, був першим директором Кримської астрофізичної обсерваторії, фахівець у галузі зоряної спектроскопії, вивчав осьове обертання зір, їх хімічний склад, на підставі вивчення зв'язку газових туманностей з магнітними полями довів існування загального магнітного поля Галактики, академік АН СРСР.

Шварцшильд Карл (1873–1916) – відомий німецький астроном, один з засновників фізики зір і теорії переносу випромінювання, вперше розв'язав рівняння

загальної теорії відносності для сферично-симетричного поля (поле Ш.) і одержав формулу для гравітаційного радіуса (радіуса Ш.).

Шеплі Харлоу (1885–1972) – відомий американський астроном, заклав основи сучасних уявлень про будову нашої Галактики, вивчав змінні зорі у нашій та інших галактиках і знайшов відстані до багатьох з них.

Шидловський Андрій Петрович (1818–1892) – український астроном, закінчив Харківський ун-т, потім під час праці у ньому керував великою програмою астрономо-геодезичних робіт на території східної України та півдня Росії, пізніше працював у Київському ун-ті, де багато зробив для розвитку його астрономічної обсерваторії.

Шкловський Йосип Самуїлович (1916–1985) – відомий радянський астрофізик, обґрунтував можливість спостереження радіовипромінювання міжзоряного водню на хвилі 21 см, з'ясував природу радіовипромінювання Сонця та останків спалахів наднових, займався фізикою пульсарів та рентгенівських джерел, чл.-кор. АН СРСР.

Шмідт Мартен (н. 1929 р.) – американський астроном, відкрив у 1963 р. квазари, обґрунтував їх позагалактичну природу.

Шмідт Отто Юлійович (1891–1956) – радянський математик, полярний дослідник, геофізик, астроном, закінчив Київський ун-т і деякий час працював у ньому, заклав основи сучасних уявлень про походження планет Сонячної системи з холодної газово-пилівії хмари, академік АН СРСР, академік АН України, Герой Радянського Союзу.

Яковкін Авенір Олександрович (1887–1974) – радянський астроном, працював у Київському ун-ті та ГАО АН України, був її директором, вивчав фігуру Місяця та його обертання, чл.-кор. АН України.

Янгель Михайло Кузьмич (1911–1971) – видатний радянський конструктор ракетно-космічної техніки, багато років очолював Південний машинобудівний завод і КБ «Південне» у Дніпропетровську, двічі Герой Соціалістичної Праці.

Янський Карл (1905–1950) – американський радіоінженер, відкрив у 1932 р. космічне радіовипромінювання.

Яцків Ярослав Степанович (н. 1940 р.) – відомий український астроном, директор ГАО НАН України, фахівець у галузі фундаментальної астрометрії, геодинаміки та космічної геодезії, був віце-президентом Міжнародного астрономічного союзу, президент Української астрономічної асоціації, академік НАН України

ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК

А			
Аберація світла	18	Від’ємна теплоємність	82
Аберації телескопа	63	Відновлення зображень	65
Абсолютна зоряна величина	38	Відносний отвір	62
Адаптивна оптика	66	Вікові збурення	31
Адвекція	172	Вільна прецесія	19
Адронна ера	149	Вісь світу	11
Аерозолі	172	Власна частота плазми	52
Альbedo	48	Власне уширення	44
Альbedo однократного розсіяння	47	Власний рух зорі	20, 114
Активні ядра	126	Власні коливання	162
Анізотропне розсіяння	48	Внутрішня будова пульсара	96
Антициклон	171	Внутрішня будова Сонця	100
Антропний принцип	187	Вплив земної атмосфери	64
Апаратна функція	63	Всесвітній час	16
Апекс	114	Вуглецевий цикл	80
Аргумент широти	26	В’язка рідина	158
Астродинаміка	34		
Астрометрія	17	Г	
Астроклімат	65	Газова компонента	155
Астрономічна одиниця	19	Газові комети	177
Астрономічна прецесія	18	Галактики Маркаряна	126
Астрономічні сталі	22	Галактики Сейферта	126
Астрономо-геодезія	21	Галактична система координат	11, 111
Астросоціологічний парадокс	199	Галактичний полюс	11, 111
Атомна ера	149	Галактичний екватор	11, 111
Атомний час	16	Галактичні космічні промені	122
		Гало Галактики	112
		Геліоцентрична система координат	12
		Геострофічний вітер	171
		Геоцентрична система координат	12
		Гетеросфера	170
		Гігантські молекулярні хмари	121
		Гідромагнітне динамо	51, 164
		Гіперболічний рух	26
		Глобули	88
		Годинний кут	12
		Головний пояс астероїдів	176
		Гомопауза	170
		Гомосфера	170
		Горизонт подій	140
		Горизонтальна система координат	12
		Горизонтальний паралакс	19
		Гравітаційна стала	25
		Гравітаційний парадокс	134
		Гравітаційний потенціал	23
		Градiєнтний вітер	171
		Границя Еддінгтона	81

Б

Багатоелементні антени	66
Балдж	113
Бар	124
Баріонна асиметрія Всесвіту	147
Баріонна матерія	143
Барометрична формула	169
Барстери	92
Білі карлики	93
Болід	179

В

Вектор Лапласа	25
Вектор Стокса	42, 72, 167
Велике коло	10
Велике об’єднання	147
Великомасштабна структура Всесвіту	127
Вибухові зорі	86
Вироджений стан	93

Грануляція	102		
Групи Амура, Аполлона, Атона	177		
		Ж	
		Життя	192
		З	
Д			
Дебаєвський радіус плазми	52	Задача багатьох тіл	24
Джети	127	Задача двох тіл	24
Динамічна атмосфера	169	Задача трьох тіл	24
Динамічне стиснення	18	Загальна циркуляція атмосфери	171
Динамічний час	87	Загальні характеристики Сонця	100
Дислокаційна в'язкість	161	Закон Гука	158
Дифузійна в'язкість	161	Закон Ламберта	48
Діагностична діаграма	106	Закон Ломмеля-Зеєлігера	48
Діаграма Герцшпрунга-Рессела	78	Закон Максвелла	159
Добовий паралакс	19	Закон Ньютона	158
Довгота висхідного вузла	26	Закон Хаббла	124, 138
Довгота перицентра	30	Залізокам'яні метеорити	180
Довжина Джинса	87	Залізні метеорити	180
Доплерівське уширення	44	Збурений рух	29
Друга космічна швидкість	27	Збурююча сила	29
Другий закон Кеплера	27	Збурюючий потенціал	30
		Зеніт	11
		Зіштовхувальна еволюція астероїдів	176
Е		Зорі Вольфа-Райє	81
Еволюційний трек	89	Зорі з емісійними лініями	81
Еволюція зір великих мас	89	Зорі типу Міри Кита	85
Еволюція зір малої маси	90	Зорі типу Т Тельця	89
Еволюція зір сонячної маси	90	Зорі типу RR Ліри	84
Еволюція зір у тісних подвійних системах	92	Зорі типу UV Кита	89
Екваторіальна система координат	12	Зоряна величина	37
Еквівалентна ширина лінії	49	Зоряна динаміка	115
Екзопланети	181	Зоряна кінематика	114
Екліптика	11	Зоряна статистика	111
Екліптична система координат	12	Зоряний час	15
Екстинкція	38	Зоряні асоціації	115
Ексцентриситет	26	Зоряні скупчення	115
Ексцентрична аномалія	28		
Елементи орбіти	27	Й	
Електроакустичні хвилі	53	Ймовірність виживання кванта	47
Електростатичні хвилі	53		
Еліптичний рух	27	І	
Еліптичні галактики	123	Індекси сонячної активності	104
Епіцентр	160	Індикатриса розсіяння	38
Епіцентральна відстань	160	Інструментальні поправки	20
Ергосфера	57	Інтеграл Лапласа	25
Еруптивні зорі	84	Інтегральне рівняння Шварцшильда	111
Ефект Зеємана	45	Інтенсивність випромінювання	37
Ефект Комптона	55	Істинна аномалія	26
Ефект Фарадея	54	Істинний горизонт	11
Ефект Штарка	45	Істинний сонячний час	15
Ефективна температура	44	Інтерферометри	66
		Інтерферометрія	66

Інфляційна стадія	140	Крутильні коливання	162
Іоносфера		Кульмінація	15
		Кульові функції	23
		Кулясті скупчення	116
	К		
Кам'яні ахондрити	180		
Кам'яні хондрити	180	Л	
Каскадна фрагментація	88	Лацертиди	126
Катаклізмичні зорі	86	Лептонна ера	149
Квазаги	127	Лінійчатий спектр	44
Квазари	126	Лінія вузлів	26
Квантове випаровування	57	Локальна термодинамічна рівновага	39
Квінт-есенція	144	Лоренцівське уширення	44
Кентаври	154	Льодяна компонента	155
Кеплерівські елементи орбіти	27		
Класи астероїдів	176	М	
Класи світності	77	Магнітне поле Галактики	122
Класичні інтеграли руху	25	Магнітне поле Сонця	103
Комета Галлея	178	Магнітні поля планет	165
Комети	177	Магнітне число Рейнольдса	50
Коефіцієнт випромінювання	38	Магнітогідродинамічні хвилі	51
Коефіцієнт ослаблення	38	Магнітопауза	175
Коефіцієнт поглинання	38	Магнітосфера	174
Коефіцієнт розсіяння	38	Маса Джинса	86
Коефіцієнт яскравості	47	Масштаб	63
Коефіцієнти Лява	19	Масштабний фактор	137
Колективні ефекти	42	Математичний горизонт	11
Колова швидкість	27	Матриця розсіяння	49
Коловий рух	26	Межа Чандрасекара	94
Колориметрія	70	Мезосфера	170
Комптонівська довжина хвилі	55	Меридіанне коло	18
Комптонізація випромінювання	55	Метагалактика	123
Конвективна зона	101	Металічність зорі	101
Конвекція	171	Метеор	179
Консервативне розсіяння	41	Метеорит	180
Контур спектральної лінії	44	Метеоритне бомбардування	180
Конформний час	139	Метеоритний кратер	180
Космічна інтерферометрія	66	Метеороїд	178
Космічні мазери	88	Метод Шустера-Шварцшильда	43
Космічні промені	122	Метрика Робертсона-Уокера	137
Космічні телескопи	67	Метричний тензор	134
Космологічний горизонт	140	Механізм когерентного підсилення	166
Космологічний принцип	136	Міжзоряне поглинання світла	118
Космологічний тест	141	Міжзоряний газ	117
Корона Галактики	112	Міжзоряний пил	117
Корональний газ	120	Міжзоряні молекули	119
Корональні діри	104	Міжзоряні хмари	121
Корональні конденсації	104	Міжпланетне середовище	117
Космомікрофізика	144	Місцева група галактик	125
Крива плавлення	163	Місячно-сонячна прецесія	18
Крива росту	46	Модель гарячого Всесвіту	145
Критична густина	137	Модель суцільного середовища	49

Модуль зсуву	158	Параметр Хаббла	124, 137, 143
Модуль стиснення	162	Парсек	19
Мультиверсум	140	Перигей	26
		Перигелій	26
		Перицентр	26
		Перицентрова відстань	26
		Періодичні збурення	31
		Перша космічна швидкість	27
		Перший закон Кеплера	26
		ПЗЗ-матриці	71
		Пилові бурі	173
		Пилові комети	177
		Плазмова турбулентність	53
		Планети земного типу	155
		Планети-карлики	155
		Планети-гіганти	155
		Планетозімалі	182
		Планетоцентрична небесна сфера	12
		Планетні тіла	155
		Плоска складова Галактики	112
		Плоске альbedo	48
		Поверхнева фотометрія	71
		Поверхневі хвилі	160
		Поверхні Хілла	33
		Повільна альфенівська хвиля	51
		Поглинання випромінювання	40
		Подвійні та кратні зорі	82
		Показник кольору	76
		Покоління фундаментальних частинок	146
		Політропне наближення	81
		Полюс системи координат	10
		Полюси світу	11
		Поляриметри	72
		Полярні каспи	175
		Полярні саява	175
		Порожнини Роша	33
		Потік випромінювання	37
		Потокові метеори	179
		Пояс Койпера	154
		Практична астрономія	21
		Прецесія	18
		Приймачі випромінювання	70
		Приймачі нейтринного випромінювання	72
		Принцип гідростатичної рівноваги	156
		Принцип еквівалентності	134
		Припливне тертя	156
		Проблема сонячних нейтрино	106
		Проблема астероїдної небезпеки	177
		Проблема СЕТІ	195
		Проблема SETI	195
		Проникна здатність телескопа	68
		Протозоря	88
Н			
Надір	11		
Наднові зорі	97		
Наднові типу I	97		
Наднові типу II	97		
Надскупчення галактик	123, 126		
Нахилення	26		
Небесна механіка	23		
Небесна сфера	10		
Небесний екватор	11		
Небесний меридіан	11		
Невисхідне світило	16		
Незахідне світило	16		
Незбурений рух	29		
Нейтронізація	94		
Нейтронні зорі	94		
Неперервний спектр	44		
Неправильні галактики	123		
Нестаціонарні зорі	84		
Нестійкості плазми	53		
Нетеплове випромінювання	40		
Нові зорі	86		
Ноосфера	200		
О			
Обернений ефект Комптона	55		
Обертання Галактики	114		
Об'єкти Хербіга-Аро	88		
Обмежена задача трьох тіл	32		
Обрізання хвилі	53		
Однократне розсіяння	39		
Опозиційний ефект	166		
Оптичний шлях	39		
Орбітальна система координат	26		
Освітленість	37		
Оскулюючі елементи орбіти	29		
Основна формула зоряної астрономії	38		
П			
Параболічна швидкість	27		
Параболічний рух	26		
Парадокс горизонту	140		
Парадокс ослаблення	42		
Паралактичний трикутник	14		
Параметр обертання	157		
Параметр променя	160		
Параметр розсіяння (Mi)	40		

Протон-протонний цикл	80	Сервісні спостереження	69
Протопланетний диск	182	Середнє Росселанда	40
Протуберанці	104	Середній сонячний час	16
Пряме сходження	12	Середній рух	28
Прямокутний сферичний трикутник	13	Середня аномалія	28
Прямолінійний рух	29	Сила Пуанкаре	164
Прямолінійні точки лібрації	32	Сильні лінії	46
Пульсари	95	Символи Кристофеля	135
Пульсуючі змінні зорі	85	Синхротронне випромінювання	54
		Скін-шар	164
		Слабкі лінії	46
		Сонячна активність	103
Р		Сонячна корона	103
Радіальні коливання	162	Сонячний вітер	103
Радіогалактики	126	Сонячні спалахи	104
Радіолінія 21 см	113	Спалахуючі зорі	84
Радіолокація	67	Спекл-інтерферометрія	64
Радіус Шварцшильда	56	Спектральна класифікація	76
Райдуги	42	Спектральні прилади	69
Резонанс хвилі	53	Спікули	102
Релаксація напружень	159	Спіральні галактики	123
Релеєвське розсіяння	41	Спіральні гілки Галактики	113
Реліктове випромінювання	149	Спорадичні метеори	179
Релятивістська небесна механіка	34	Стадії розльоту оболонки наднової	99
Реологічне рівняння	158	Стадія випромінювання	141
Рефракція в атмосфері	20	Стадія речовини	141
Рівняння Адамса-Вільямсона	163	Стадія Хаяші	88
Рівняння внутрішньої будови зорі	79	Сталі Ламе	158
Рівняння Ейнштейна	136	Стандартна космологічна модель	142
Рівняння Кеплера	28	Стійкість руху	31
Рівняння Клеро	163	Стратосфера	170
Рівняння Лагранжа	30	Ступінь поляризації	49, 72, 167
Рівняння орбіти	25	Субзорі	77
Рівняння переносу випромінювання	39	Сузір'я	83
Рівняння теплопровідності	164	Супергрануляція	102
Рівняння фігури планети	157	Супероб'єднання	146
Річний паралакс	19	Супутники планет	154
Роздільна здатність	63	Сфера дії	33
Розсіяні скупчення	116	Сферична складова Галактики	112
Розсіяння випромінювання	38	Сферичне альbedo	48
Розсіяння Мі	40	Сферичний трикутник	10
Розсіяння Томпсона	39	Сфероїд Дарвіна-де Сітера	158
г-процес	99	Сфероїд Клеро	157
		Сфероїдальні коливання	162
		Схилення	12
		s-процес	98
		Т	
С		Тверда компонента	155
Світловий циліндр	96	Телескоп-рефлектор	62
Світлолокація	67	Темна матерія	126, 143
Світосила	63		
Світність	44		
Сейсмологія планет	159		
Сейсмологія Сонця	105		
Секторіальні гармоніки	24		
Секунда	16		

Тензор електропровідності	52	Ф	
Тензор енергії-імпульсу	136	Фазова функція	166
Тензор кривизни	135	Фізичний вакуум	138
Тензор Річчі	135	Флокули	104
Теорема Зеєлігера	111	Фокальний параметр	26
Теорема Лапласа	31	Формула Дрейка	195
Теорія суперструн	144	Формула косинусів	12
Термалізація	40	Формула Паренаго	118
Термодинамічний парадокс	134	Формула п'яти елементів	13
Термосфера	170	Формула синусів	13
Тесеральні гармоніки	24	Фотометричний парадокс	133
Типи населення Галактики	117	Фотонна ера	149
Типи подвійних зір	82	Фотосфера	76
Тіньовий ефект	166	Фундаментальна астрометрія	22
Топоцентрична небесна сфера	12	Фундаментальні каталоги	22
Топоцентрична система координат	12	Функції Амбарцумяна	47
Точка весняного рівнодення	11	Функції блиску	111
Точки півдня і півночі	11	Функції світності	111
Транзїєнти	104	Функція джерела	39
Транснептунові об'єкти	154	Фуори	89
Третій закон Кеплера	29	Фур'є-спектроскопія	70
Тривалість життя газу в атмосфері	169		
Трикутні точки лібрації	32	Ц	
Тропопауза	170	Цефеїди	84
Тропосфера	170	Цикл Хейла	105
Туманності	121	Цикли сонячної активності	104
Турбулентне уширення	45	Циклон	171
		Циклотронна частота	52
У		Циклотронне випромінювання	53
Ударна хвиля	175		
Узагальнений потенціал	56, 188	Ч	
Універсальний інструмент	17	Чандлерівський період	19
Універсум	140	Час дисипації	115
Урка-процес	95	Час Гельмгольца-Кельвіна	82
Утворення планетних систем	181	Числа Вольфа	104
Утворення галактик	149	Число Рейнольдса	50, 171
Уширення тиском	44	Чорні діри	55, 96
Х		Ш	
Хвилі Альфена	51	Швидка альфенівська хвиля	51
Хвилі густини	113	Шкала висот	169
Хвіст комети	177	Шкала Рїхтера	161
Хімічний склад Сонця	101		
Хондри	180	Я	
Хондрити	180	Ядро Галактики	112
Хромосфера Сонця	102	Янський	38
		Яскравість	37

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Александров Ю. В. Небесна механіка / Ю. В. Александров. – Х. : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2003. – 252 с.
2. Александров Ю. В. Фізика планет / Ю. В. Александров. – К. : ІЗМН, 1996. – 423 с.
3. Александров Ю. В. Механика сплошних сред / Ю. В. Александров. – Х. : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2011. – 199 с.
4. Александров Ю. В. / Основи релятивістської космології / Ю. В. Александров. – Х. : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2004. – 133 с.
5. Аллен К. Астрофизические величины / К. Аллен. – М. : Мир, 1977. – 446 с.
6. Аллер Л. Астрофизика: в 2 т. / Л. Аллер. – М. : Изд. ин. лит. – Т. 1, 1955. – 455 с. – Т. 2, 1957. – 325 с.
7. Андрієвський С. М. Курс загальної астрономії / С. М. Андрієвський, І. А. Климишин. – Одеса : Астропринт, 2010. – 484 с.
8. Астрономічний енциклопедичний словник / під ред. І. А. Климишина та А. О. Корсунь. – Львів, 2003. – 548 с.
9. Банникова Е. Ю. Теоретическая астрофизика / Е. Ю. Банникова, В. М. Конторович. – Х. : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2010. – 80 с.
10. Болотин Ю. Л. Современная космология / Ю. Л. Болотин, Д. А. Ерохин, Г. И. Ивашкевич и др. – К. : Наукова думка, 2010. – 255 с.
11. Вайнберг С. Космология / С. Вайнберг. – М. : УРСС, 2013. – 608 с.
12. Гибсон Э. Спокойное Солнце / Э. Гибсон. – М. : Мир, 1977. – 408 с.
13. Гиндилис Л. М. Проблема внеземного разума / Л. М. Гиндилис. – М. : Физматлит, 2004. – 648 с.
14. Голицын Г. В. Введение в динамику планетных атмосфер / Г. В. Голицын. – Л. : Гидрометеиздат, 1972. – 102 с.
15. Горбацкий В. Г. Космическая газодинамика / В. Г. Горбацкий. – М. : Наука, 1977. – 360 с.
16. Горбацкий В. Г. Введение в физику галактик и скоплений галактик / В. Г. Горбацкий. – М. : Наука, 1986. – 254 с.
17. Євсюков М. М. Хімія і геологія планет / М. М. Євсюков, Ю. В. Александров. – Х. : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2000. – 190 с.
18. Жарков В. Н. Внутреннее строение Земли и планет / В. Н. Жарков. – М. : Наука, 1983. – 483 с.
19. Засов А. В. Общая астрофизика / А. В. Засов, К. А. Постнов. – М. : Фрязино, 2006. – 493 с.
20. Захожай В. А. Вступ до астрофізики та космогонії / В. А. Захожай. – Х. : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2012. – 207 с.
21. Зельдович Я. Б. Физический основы строения и эволюции звезд / Я. Б. Зельдович, С. И. Блинников, Н. И. Шакура. – М. : Изд-во МГУ, 1988. – 159 с.
22. Зельдович Я. Б. Строение и эволюция Вселенной / Я. Б. Зельдович, И. Д. Новиков. – М. : Наука, 1975. – 735 с.

23. Иванов В. В. Парадоксальная Вселенная / В. В. Иванов, А. В. Кривов, П. А. Денисенков. – СПб. : Изд-во СПб. ун-та, 1997. – 142 с.
24. Каплан С. А. Плазменная астрофизика / С. А. Каплан, В. Н. Цитович. – М. : Наука, 1978. – 440 с.
25. Кокс Дж. Теория звездных пульсаций / Дж. Кокс. – М. : Мир, 1986. – 326 с.
26. Кононович Э. В. Общий курс астрономии / Э. В. Кононович, В. И. Мороз. – М. : УРСС, 2001. – 542 с.
27. Кузьменков С. Г. Сонячна система / С. Г. Кузьменков, І. В. Сокол. – К. : Вища школа, 2007. – 187 с.
28. Кузьменков С. Г. Зорі / С. Г. Кузьменков. – К. : Освіта України, 2010. – 204 с.
29. Куликовский П. Г. Звездная астрономия / П. Г. Куликовский. – М. : Наука, 1978. – 255 с.
30. Курт Р. Анализ размерностей в астрофизике / Р. Курт. – М. : 1975. – 229 с.
31. Ландау Л. Д. Механика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М. : Наука, 1988. – 215 с.
32. Ландау Л. Д. Теория поля / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М. : Наука, 1988. – 502 с.
33. Ландау Л. Д. Электродинамика сплошных сред / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М. : Наука, 1989. – 532 с.
34. Ландау Л. Д. Статистическая физика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М. : Наука, 1976. – 584 с.
35. Липунов В. М. Астрофизика нейтронных звезд / В. М. Липунов. – М. : Наука, 1987. – 295 с.
36. Лозинская Т. А. Сверхновые звезды / Т. А. Лозинская. – М. : Наука, 1986. – 304 с.
37. Лонгейр М. Астрофизика высоких энергий / М. Лонгейр. – М. : Мир, 1984. – 396 с.
38. Масевич А. Г. Эволюция звезд / А. Г. Масевич, А. В. Тутуков. – М. : Наука, 1988. – 280 с.
39. Марочник Л. С. Галактика / Л. С. Марочник, А. А. Сучков. – М. : Наука, 1984. – 392 с.
40. Мельхиор П. Физика и динамика планет / П. Мельхиор. – М. : Мир. – Т. I, 1975. – 574 с. – Т. II, 1975. – 483 с.
41. Миронов А. В. Основы Астрофотометрии / А. В. Миронов. – М. : Физматлит, 2008. – 258 с.
42. Мирошниченко Л. И. Солнечная активность и Земля / Л. И. Мирошниченко. – М. : Наука, 1981. – 285 с.
43. Розенталь И. Л. Геометрия. Частицы. Вселенная / И. Л. Розенталь. – М. : Наука, 1987. – 143 с.
44. Седов Л. И. Методы подобия и размерностей в механике / Л. И. Седов. – М. : Наука, 1989. – 430 с.

45. Соболев В. В. Курс теоретической астрофизики / В. В. Соболев. – М. : Наука, 1985. – 502 с.
46. Солнечная система / под ред. В. Г. Сурдина. – М. : Физматлит, 2008. – 397 с.
47. Сурдин В. Г. Рождение звезд / В. Г. Сурдин. – М. : УРСС, 2001. – 264 с.
48. Теребиж В. Ю. Современные оптические телескопы / В. Ю. Теребиж. – М. : Физматлит, 2005. – 80 с.
49. Уокер Г. Астрономические наблюдения / Г. Уокер. – М. : Мир, 1990. – 352 с.
50. Физика космоса. Маленькая энциклопедия. – М. : Сов. энциклопедия, 1986. – 782 с.
51. Черепашук А. М. Вселенная, жизнь, черные дыры / А. М. Черепашук, А. Д. Чернин. – М. : Фрязино, 2004. – 320 с.
52. Шкловский И. С. Звезды / И. С. Шкловский. – М. : Наука, 1984. – 383 с.
53. Шкловский И. С. Вселенная. Жизнь. Разум / И. С. Шкловский. – М. : Наука, 1987. – 384 с.
54. Шкуратов Ю. Г. Луна далекая и близкая / Ю. Г. Шкуратов. – Х. : ХНУ имени В. Н. Каразина, 2006. – 182 с.
55. Ягер К. Звезды наибольшей светимости / К. Ягер. – М. : Мир, 1984. – 403 с.