



Павло Шигорін

**ВИБРАНІ ПИТАННЯ
АСТРОНОМІЇ ТА АСТРОФІЗИКИ**

ВОЛИНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ЛЕСІ УКРАЇНКИ

ПАВЛО ШИГОРІН

**ВИБРАНІ ПИТАННЯ
АСТРОНОМІЇ ТА АСТРОФІЗИКИ**

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

Луцьк – 2020

УДК 519.67: 371.214.114

ББК 22.6 я 731

Ш 55

Рекомендовано до друку вченою радою Волинського національного університету імені Лесі Українки (протокол №12 від 29.10.2020р.).

Рецензенти:

Мислінчук В. О. — кандидат педагогічних наук, доцент кафедри методики фізики і хімії Рівненського державного гуманітарного університету.

Федосов С. А. — доктор фізико-математичних наук, професор кафедри теоретичної та комп'ютерної фізики ВНУ імені Лесі Українки.

Шигорін П. П.

Ш 55 **Вибрані питання астрономії та астрофізики:** Навч. пос. — Луцьк, 2020. — 136 с.

У навчальному посібнику розглянуто вибрані питання астрономії та астрофізики. Сформульовані основні поняття та закони практичної астрономії, небесної механіки та астрофізики. Теоретичний матеріал доповнений прикладами розв'язання практичних задач. Кожен розділ посібника містить низку запитань та задач для самостійної роботи читача. У посібнику також викладено основні принципи роботи з програмним пакетом Stellarium.

Для студентів природничих спеціальностей вищих навчальних закладів.

УДК 519.67: 371.214.114

ББК 22.183.4 я 81

ISBN 999-4545-545-4545

© Шигорін П. П., 2020

Зміст

Передмова	5
Розділ 1 Практична астрономія	7
1.1 Небесна сфера. Системи небесних координат	7
1.2 Основи вимірювання часу	20
1.3 Рухома карта зоряного неба	30
1.4 Схід і захід світил	37
1.5 Розміри та відстані в астрономії	47
Розділ 2 Елементи небесної механіки	57
2.1 Рух тіл під дією гравітації	57
2.2 Закони Кеплера та конфігурації планет	67
Розділ 3 Елементи астрофізики	77
3.1 Фотометрія небесних світил	77
3.2 Фізика Сонця	91
3.3 Ефекти просторового руху зір	105
Розділ 4 Віртуальна обсерваторія Stellarium	116

Додатки	125
Предметний покажчик	129
Література для подальшого вивчення	132
Електронні ресурси	133

Передмова

Астрономія — фундаментальна наука про будову, динаміку, походження та еволюцію небесних тіл. Об'єктами дослідження астрономії є планети, комети, астероїди, зорі та зоряні скупчення, галактики та туманності, а також Всесвіт уцілому.

Астрономія побудована на теоретичних моделях, що засновані на основі великої кількості спостережень за небесними тілами. Досліджуючи рух планет, вивчаючи електромагнітне випромінювання небесних світил, його спектральні характеристики, було встановлено закони динаміки небесних (а також земних!) тіл, визначено відстані до планет та зір, описано їх будову і фізичні властивості, а також встановлено хімічний склад їхніх атмосфер, побудовано сценарії еволюції небесних світил впродовж мільйонів років.

Астрономія відноситься до найдревніших наук. Її зародження пов'язане з розвитком древніх цивілізацій (Вавилон, Єгипет, Греція, Індія, Китай, Майя). Упродовж своєї еволюції астрономія постійно здійснює суттєвий вплив на розвиток інших природничих наук. Особливе значення астрономія має для фізики. На основі астрономічних спостережень за рухами планет були сформульовані закони Кеплера, які згодом стали фундаментом для закону Всесвітнього тяжіння Ньютона. Розвиток фундаментальної концепції простору-часу, що має надзвичайно важливе значення у загальній теорії відносності та квантовій теорії поля, безпосередньо пов'язаний з астрофізичними дослідженнями. Зокрема, нового дихання теорія простору-часу набула після експериментальної реєстрації гравітаційних хвиль у 2015 році. Нещодавно перед фізиками-теоретиками з'явився новий виклик, пов'язаний із відкриттям темної матерії та темної енергії.

Дослідження космосу також стимулює розвиток технологій. Від моменту створення першої зорової труби Ліпперсгеєм, Янсенем та Метьюсом до конструювання таких телескопів як “Габбл”, “Гершель” та “Джеймс Вебб” пройшло чотири століття. За цей час відбувся величезний технологічний стрибок та розвиток інженерії.

Запропонований Читачу навчальний посібник містить виклад основних розділів сучасної астрономії та астрофізики. Розглянуто фундаментальні закони та прикладні аспекти практичної астрономії та астрофізики. Зокрема описано елементи небесної сфери, системи небесних координат, основи вимірювання часу, принципи використання рухомої карти зоряного неба, способи та методи вимірювання відстаней в астрономії; наведено закони руху тіл під дією сил гравітації та конфігурації планет; викладено основи фотометрії зір та ефектів їх просторового руху; описано фізику Сонця; також викладено основні принципи роботи з програмним пакетом Stellarium.

Докладний виклад теоретичного матеріалу доповнений низкою задач та запитань для самостійного опрацювання. Ідеї для деяких задач було взято з учнівських та студентських олімпіад з астрономії та астрофізики.¹

Даний навчальний посібник призначений для студентів-фізиків, які вивчають курси “Астрономія” та “Астрофізика”. Сподіваємося також, що посібник буде корисним усім, хто цікавиться питаннями астрономії та астрофізики.

Павло Шигорін
грудень 2019 року

¹Увесь перелік олімпіадних задач можна знайти на електронних ресурсах, адреси яких приведені у кінці посібника.

Розділ 1

Практична астрономія

1.1 Небесна сфера. Системи небесних координат

Теоретичні відомості

Модель небесної сфери

В якому б місці земної поверхні ми не знаходились, нам завжди здається, що всі небесні тіла знаходяться від нас на однаковій відстані, ми бачимо небо над собою у формі сферичної поверхні.

З метою наочності та для вивчення видимих положень і рухів небесних світил в астрономії запроваджується допоміжна сферична поверхня — *небесна сфера*.

Небесна сфера — уявна сфера довільного радіусу, на яку спроектовані всі світила так, як їх бачить спостерігач у певний момент часу з певної точки простору.

Таким чином, уявний спостерігач, котрий знаходиться в центрі небесної сфери, повинен бачити положення світил на її поверхні у такому розміщенні, в якому справжній спостерігач бачить небесні світила на небі.

Розглянемо основні точки та кола небесної сфери (Рис. 1.1).

Верхня і нижня точки перетину небесної сфери з вертикальною лінією (лінією виска), яка проходить через центр сфери, називаються відповідно *зеніт* Z і *надир* Z' . Велике коло небесної сфери SWNE,

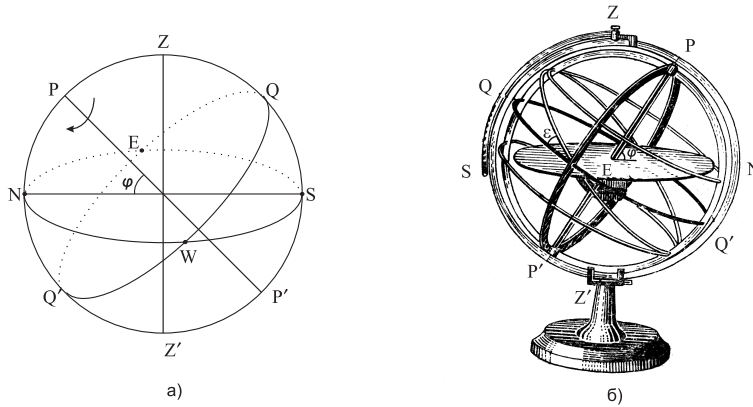


Рис. 1.1: а) Основні кола і точки небесної сфери; б) модель небесної сфери.

площина якого перпендикулярна до вертикальної лінії, називається *математичним горизонтом* (або *істинним горизонтом*). Математичний горизонт розділяє поверхню небесної сфери на дві половини: видиму та невидиму. Велике півколо, яке проходить через зеніт, світило і надир, називається *вертикалом* або *колом висоти*.

Спостереження зоряного неба показують, що небесна сфера повільно обертається в напрямку зі сходу на захід. Для спостерігача, який знаходиться в північній півкулі Землі та повернутий обличчям на південь, це обертання відбувається зліва направо, за годинниковою стрілкою. Сузір'я піднімаються над горизонтом у східній частині неба і опускаються до горизонту в західній стороні. В дійсності ж Земля обертається навколо своєї осі в напрямку з заходу на схід. Цьому існують строгі докази: обертання площини маятника Фуко, відхилення падаючих тіл на захід тощо. Видиме обертання небесної сфери називається *добовим обертанням*, оскільки його період дорівнює одній добі.

Діаметр небесної сфери, навколо якого вона обертається, називається *віссю світу*, а точки перетину осі світу з небесною сферою — *полюсами світу*. Вісь світу нахилена до математичного горизонту

під кутом, що рівний географічній широті місця спостереження φ .

Полюс, відносно якого небесна сфера обертається проти годинникової стрілки (для спостерігача, який перебуває у центрі сфери), називається *північним полюсом світу* P , протилежний йому — *південним полюсом світу* P' . Північний полюс світу знаходиться в сузір'ї Малої Ведмедиці поблизу Полярної зорі.

Велике коло небесної сфери $QWQ'E$, площина якого перпендикулярна до осі світу, називається *небесним екватором*. Небесний екватор ділить небесну сферу на дві півкулі: північну та південну. Велике півколо, яке проходить через полюси світу та світило, називається *колом схилення*.

Небесний екватор перетинається з математичним горизонтом у *точці сходу* E і у *точці заходу* W . Вертикал, який проходить через точку сходу, називається *першим вертикалом*.

Добовий рух небесних світил на небі здійснюється по *добових паралелях* — малих колах, що проходять через світила і площини яких паралельні до площини небесного екватора.

Велике коло небесної сфери $PZQSP'Z'Q'N$, яке проходить через полюси світу і зеніт, називається *небесним меридіаном*. Небесний меридіан ділить небесну сферу на дві півкулі: східну та західну. Площина небесного меридіану перетинається з площиною математичного горизонту вздовж прямої лінії NS , яка називається *полуденною лінією*. Полуденна лінія перетинається з небесним меридіаном у *точці півночі* N та у *точці півдня* S . Точкою півночі обирають ту, що лежить ближче до північного полюса світу.

Ще одним важливим елементом небесної сфери є *екліптика* — велике коло небесної сфери, по якому центр диска Сонця здійснює видимий річний рух по небесній сфері (для спрощення на Кресленні 1а. екліптика не відображена). Площина екліптики нахилена до площини небесного екватора під кутом $\varepsilon = 23^\circ 26' 25,5''$. Екліптика перетинається з небесним екватором у двох точках, які називаються

точками весняного та осіннього рівнодень. Через точку весняного рівнодення Сонце 20 або 21 березня переходить з південної півкулі неба в північну. У цей день тривалість дня дорівнює тривалості ночі. Осіннє рівнодення (початок астрономічної осені в Північній півкулі) припадає 22 або 23 вересня. Точки на екліптиці, які віддалені від точок рівнодень на 90° називаються точками *літнього* (20 або 21 червня) та *зимового* (21 або 22 грудня) *сонцестоянь*. У ці дні маємо найдовший день і найкоротшу ніч (літнє сонцестояння) та найдовшу ніч і найкоротший день (зимове сонцестояння).¹

Внаслідок добового обертання небесної сфери кожне світило двічі перетинає небесний меридіан. Момент проходження світила через меридіан називається *кульмінацією світила*. У верхній кульмінації світило перетинає небесний меридіан в точці, яка знаходиться ближче до зеніту.

Системи небесних координат

Оскільки положення будь-якої точки на сфері можна однозначно задати двома величинами (центральною кутами, або ж дугами великих кіл), то положення світила на небі можна визначити задаючи дві координати, які називаються *небесними координатами*.

При розв'язанні різноманітних задач астрономії користуються різними системами небесних координат. Ці системи відрізняються одна від одної вибором основної площини і початком відліку.

а) Горизонтальна система координат

В цій системі координат основною площиною є площина математичного горизонту. Положення світила на небесній сфері задається азимутом A і висотою світила над горизонтом h (див. Рис. 1.2).

Азимут A світила M називається кут між площиною небесного меридіана і площиною вертикала світила. Азимут відраховують від точки півдня S на захід (у напрямку добового обертання небесної сфери) вздовж математичного горизонту до вертикала світила.

Одиницею вимірювання азимута є градус. Таким чином, значен-

¹Точні дані про моменти початку рівнодень та сонцестоянь можна дізнатися на порталі United States Naval Observatory <http://www.usno.navy.mil/USNO/astronomical-applications/data-services/earth-seasons>.

ня азимута світила лежить в межах від 0° до 360° . Наприклад, азимут точки півночі N рівний $A_N = 180^\circ$.

Висотою h світила M називається кут між площиною горизонту і напрямом на світило, виміряний у площині вертикалу. Висоту світила відраховують від горизонту вздовж вертикала до світила.

Як і азимут, висота світила вимірюється в градусах. Вона змінюється в межах від 0 до $+90^\circ$ для світил, що перебувають над горизонтом і від 0 до -90° — для світил під горизонтом.

Іноді замість висоти світила використовують іншу координату — *зенітну відстань* світила z . Для світил, що перебувають у видимій частині небесної сфери $z \leq 90^\circ$, а в невидимій $z \geq 90^\circ$.

Для одного і того ж світила зенітна відстань пов'язана з висотою наступним співвідношенням:

$$z + h = 90^\circ.$$

Таким чином, в горизонтальній системі небесних координат положення світила на небесній сфері можна задати наступними парами координат: (A, h) або (A, z) .

При встановленні небесної сфери спостерігачем, що знаходиться у певному географічному пункті, керуються *теоремою про висоту полюса світу*: висота полюса світу над горизонтом рівна географічній широті місця спостереження.

При добовому обертанні небесної сфери світила переміщуються по добових паралелях, тому протягом доби обидві горизонтальні ко-

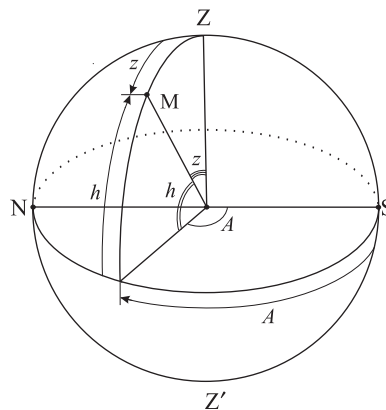


Рис. 1.2: Горизонтальна система небесних координат.

ординати світил неперервно змінюються, набуваючи в різні моменти часу строго визначених значень. Це дозволяє завчасно визначити умови видимості небесних світил в задані моменти часу.

Проте горизонтальна система небесних координат не придатна для складання зоряних карт і каталогів. Для цього необхідна така система координат, в якій би обертання небесної сфери не впливало на значення координат світил.

б) *Екваторіальні системи координат*

В екваторіальній системі небесних координат основною площиною є площина небесного екватора (див. Рис. 1.3). Залежно від вибору пари координат розрізняють *першу* та *другу екваторіальні системи небесних координат*.

В першій екваторіальній системі парю координат обирають годинний кут t та схилення δ світила.

Годинним кутом t світила M називається кут між площиною небесного меридіана і площиною кола схилення світила. Він відраховується від найвищої точки небесного екватора (точки Q) на захід вздовж екватора до кола схилення світила.

Годинний кут вимірюється в одиницях часу (годинах h , хвилинах m , секундах s) від 0^h до 24^h . Наприклад, годинний кут світила, що перетинає небесний меридіан в тій частині небесної сфери де знаходиться надир (момент нижньої кульмінації), дорівнює $t = 12^h$.

Схиленням δ світила M називається кут між площиною небесного екватора і напрямком на світило, виміряний у площині кола схилення. Схилення відраховують від небесного екватора вздовж кола

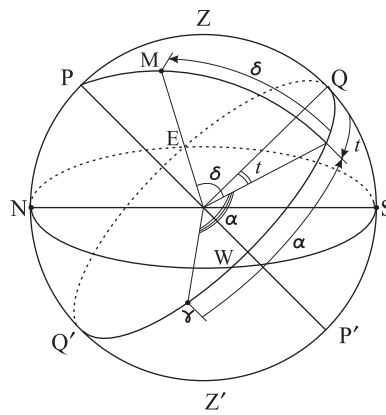


Рис. 1.3: Екваторіальні системи небесних координат.

схилення до світила.

Схилення відраховуються в межах від 0 до $+90^\circ$ в напрямку до північного полюса світу (в північній півкулі небесної сфери) і від 0 до -90° в напрямку до південного полюса світу (в південній півкулі небесної сфери).

В другій екваторіальній системі парою координат обирають пряме піднесення (пряме сходження) α світила та його схилення δ .

Прямим піднесенням світила називається кут між напрямком на точку весняного рівнодення і площиною кола схилення світила, вимірний у площині небесного екватора. Пряме піднесення відраховують від точки весняного рівнодення назустріч видимому обертанню небесної сфери до кола схилення світила.

Пряме піднесення вимірюють в одиницях часу від 0^h до 24^h .

Екваторіальні координати α і δ під час добового обертання небесної сфери не змінюються, оскільки вони відраховуються від точок небесного екватора, які самі беруть участь у добовому обертанні, а тому положення світила відносно цих точок не змінюється.

Друга екваторіальна система небесних координат є основою при складанні списків положень зір (зоряних каталогів) та зоряних карт.

Зв'язок між градусною та годинною мірою величин

Для встановлення зв'язку між градусною та годинною мірою будемо виходити зі співвідношення

$$24^h = 360^\circ.$$

Звідси одержуємо:

$$1^h = 15^\circ, \quad 1^m = 15', \quad 1^s = 15'' \quad (1.1)$$

$$1^\circ = 4^m, \quad 1' = 4^s, \quad 1'' = \left(\frac{1}{15}\right)^s. \quad (1.2)$$

Зв'язок між системами небесних координат

Між координатами горизонтальної та екваторіальної систем небесних координат існує зв'язок, який виражається наступними співвідношеннями:

$$\cos z = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t; \quad (1.3)$$

$$\sin \delta = \sin \varphi \cos z - \cos \varphi \sin z \cos A; \quad (1.4)$$

$$\sin z \sin A = \cos \delta \sin t. \quad (1.5)$$

Ці формули отримуються в результаті застосування формул сферичної геометрії до паралактичного трикутника. *Паралактичним трикутником* називається сферичний трикутник, вершинами якого є полюс світу P , зеніт Z і світило M .

Формули (1.3) — (1.5) широко застосовуються в сферичній та практичній астрономії. Зокрема, з їх допомогою можна обчислити моменти часу й азимуті точок сходу і заходу світил в пункті з географічною широтою φ .

Розглянемо спрощений варіант формул (1.3) та (1.4) для випадку, коли світило перебуває в кульмінації. У цей момент годинний кут світила $t = 0^h$ для верхньої кульмінації і $t = 12^h$ для нижньої кульмінації.

- *Момент верхньої кульмінації*

Можливі два випадки: світило кульмінує на південь від зеніту ($\delta < \varphi$), або світило кульмінує на північ від зеніту ($\delta > \varphi$). З формул (1.3), (1.4) випливає

$$\begin{cases} z = \varphi - \delta, \\ A = 0^\circ, \\ t = 0^h; \end{cases} \quad \text{кульмінація на південь від зеніту,} \quad (1.6)$$

$$\begin{cases} z = \delta - \varphi, \\ A = 180^\circ, \\ t = 0^h; \end{cases} \quad \text{кульмінація на північ від зеніту.} \quad (1.7)$$

- Момент нижньої кульмінації

$$\begin{cases} z = 180^\circ - \varphi - \delta, \\ A = 180^\circ, \\ t = 12^h. \end{cases} \quad (1.8)$$

Співвідношення (1.6) — (1.8) виражають зв'язок між горизонтальними та екваторіальними координатами світила в момент його кульмінації.

Приклади розв'язання типових задач

Задача 1

В пункті з географічною широтою $\varphi = 60^\circ$ світило перебуває на висоті 60° і має азимут $A = 120^\circ$. Визначити його схилення і годинний кут.

Розв'язання

Зенітна відстань світила

$$z = 90^\circ - h = 90^\circ - 60^\circ = 30^\circ.$$

На основі формули (1.4) отримуємо:

$$\begin{aligned} \sin \delta &= \sin 60^\circ \cos 30^\circ - \cos 60^\circ \sin 30^\circ \cos 120^\circ = \\ &= \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{1}{2} \frac{1}{2} \left(-\frac{1}{2} \right) = \frac{7}{8} = 0,875. \end{aligned}$$

Звідси

$$\delta = 61^\circ,045 = 61^\circ 02' 42''.$$

Підставляємо одержаний результат у формулу (1.5), отримуємо

$$\sin t = \frac{\sin 30^\circ \sin 120^\circ}{\cos 61^\circ,045} = \frac{\sqrt{3}/4}{0,484} = 0,8944.$$

Звідси

$$t = 63^\circ,435 = 63^\circ 26' 06''.$$

В годинній мірі $t = 4^h 13^m 44,4^s$.

Задача 2

Пряме піднесення зорі β Великого Пса рівне $\alpha = 6^h 21^m 09^s$. Виразити його в градусній мірі.

Розв'язання

Використовуючи співвідношення (1.1), одержуємо

$$09^s = 2'15'', \quad 21^m = 5^\circ 15', \quad 6^h = 90^\circ.$$

Остаточо $6^h 21^m 09^s = 95^\circ 17' 15''$.

Контрольні запитання

1. Чому рівні азимуту точок півночі, півдня, сходу і заходу?
2. Чому рівна висота світила в момент його сходу?
3. Чому дорівнюють пряме сходження і схилення точок весняного й осіннього рівнодень?
4. Світило має годинний кут $t = 18^h$. В якій частині небесної сфери його можна спостерігати?
5. В яких випадках висота світила над горизонтом не змінюється протягом доби?
6. Вкажіть, які з координат горизонтальної та екваторіальних систем небесних координат змінюються під час добового обертання небесної сфери, а які не змінюються.
7. Чи залежить пряме піднесення і схилення світила від географічної широти місця спостереження?

Завдання

1. Вивчити основні елементи моделі небесної сфери, а також зміну їх положення відносно спостерігача під час добового обертання небесної сфери.

2. Дослідити добове обертання небесної сфери для спостерігача, який знаходиться: а) на північному географічному полюсі; б) на екваторі; в) на широті Луцька ($\varphi = 50,8^\circ$). Для кожного з цих випадків зробити в зошиті малюнок, на якому слід зобразити небесну сферу.

3. Визначити схилення Полярної зорі (α Малої Ведмедиці) якщо відомо, що вона віддалена від північного полюса світу на $53'$.

4. Визначити, який кут з горизонтом утворює екліптика в момент сходу точки весняного рівнодення для спостерігача, що знаходиться на широті $\varphi = 55^\circ$?

5. Азимут світила 45° , висота 30° . Визначити його схилення та годинний кут, якщо спостерігач знаходиться на екваторі.

6. Пряме піднесення зорі рівне $3^h 17^m 09^s$. Виразити його в градусній мірі.

7. Схилення світила $\delta = 60^\circ$. Визначити азимут і висоту світила в момент верхньої кульмінації, якщо спостерігач знаходиться на широті $\varphi = 45^\circ$.

8. На яких широтах в дні літнього та зимового сонцестоянь Сонце кульмінує в zenіті?

9. На якій широті в день літнього сонцестояння висота Сонця в момент нижньої кульмінації дорівнює -6° ?

10. Упродовж ночі двічі спостерігалася кульмінація певної зорі: у верхній кульмінації її висота дорівнювала 80° , а у нижній – 60° . Визначити широту місця спостереження та пору року, коли воно проводилося. Зробити схематичний рисунок.

11. Висота Сонця над горизонтом в істинний полудень 21 грудня дорівнює $15^\circ 44'$. Визначте географічну широту місця спостережен-

ня. Зробити схематичне креслення умови задачі на моделі небесної сфери.

12. Визначте максимальну висоту, на яку може піднятися Місяць над горизонтом у Луцьку. Орбіта Місяця нахилена до площини екліптики під кутом $+5^{\circ}09'$. Виконайте схематичне креслення умови задачі на моделі небесної сфери.

13. Використовуючи карту зоряного неба виконайте наступні завдання: (а) Вкажіть назву сузір'я у якому перебуває Сонце 21 листопада, 29 січня, 8 квітня, 1 липня.

(б) Визначте екваторіальні координати Сонця (схилення та пряме піднесення) у ці дні.

(с) Визначте екваторіальні координати (схилення та пряме піднесення) для наступних найяскравіших зір у своїх сузір'ях: Сіріус, Бетельгейзе, Арктур, Капелла.

(д) Визначити, які із вказаних зір відносяться до таких, що не заходять, сходять і заходять, а також не сходять для спостерігача, що перебуває у:

(i) Луцьку;

(ii) Кейптауні (географічні координати $\lambda = 18^{\circ}29'$ східної довготи та $\varphi = 33^{\circ}55'$ південної широти).

14. На знімку (Рис. 1.4) наведено фрагмент зоряного неба над Луцьком 12 січня, а також вказано сторони горизонту. (а) Знайдіть на даному знімку наступні сузір'я: Близнюки, Велика Ведмедиця, Великий Пес, Візничий, Дракон, Кассіопея, Мала Ведмедиця, Лев, Цефей.

(б) Знайдіть розміщення на даному знімку небесного меридіану, полюсу світу та зеніту.

(с) Визначте, які сузір'я у даний момент перебувають у кульмінації.

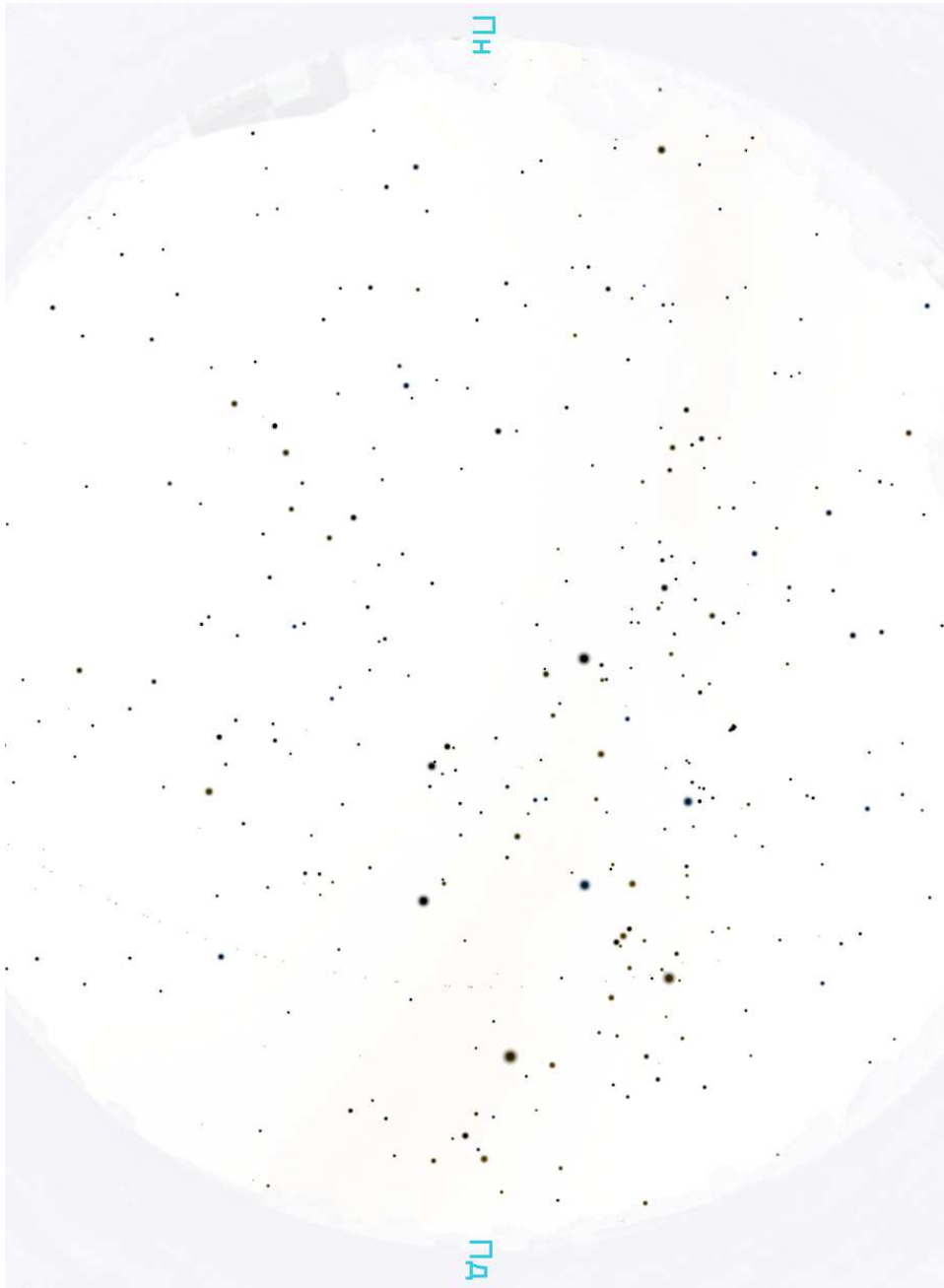


Рис. 1.4

1.2 Основи вимірювання часу

Теоретичні відомості

Плин часу може бути виміряний будь-яким регулярно повторюваним (періодичним) процесом. Наше життя пов'язане з періодичними астрономічними явищами природи: з чергуванням дня та ночі, зміною пір року, які пов'язані з обертанням Землі навколо своєї осі та обертанням Землі навколо Сонця відповідно.

Таким чином, на основі астрономічних спостережень встановлюються дві основні одиниці часу: доба та рік.

Проміжок часу, за який Земля здійснює повний оберт навколо своєї осі відносно довільної точки на небі, називається *добою*.

В залежності від вибору точки на небі розрізняють зоряну та істинну сонячну добу. *Зоряна доба* — проміжок часу між двома послідовними однойменними кульмінаціями точки весняного рівнодення. *Істинна сонячна доба* — проміжок часу між двома послідовними однойменними кульмінаціями центра Сонця. Сонячна доба приблизно на 4 хвилини довша за зоряну, оскільки Сонце рухається серед зірок в напрямку обертання Землі, і для того, щоб його наздогнати, Землі потрібно зробити серед зірок трохи більше одного оберту.²

а) Зоряний час

За початок зоряної доби на даному меридіані приймається момент верхньої кульмінації точки весняного рівнодення. Час, що пройшов від моменту верхньої кульмінації точки весняного рівнодення, називається *зоряним часом*.

Враховуючи, що кут, на який повернеться Земля від моменту верхньої кульмінації точки весняного рівнодення до будь-якого іншого моменту часу, дорівнює годинному куту точки весняного рів-

²Зауважимо, що вимірювання часу зоряними чи сонячними добами означає вибір тої чи іншої одиниці виміру часу. Так само, як відстань між містами можна виразити в кілометрах, а можна й в милях.

нодення, одержуємо, що значення зоряного часу:

$$s = t_\gamma.$$

Оскільки точка весняного рівнодення на небосхилі нічим не помічена, то її годинний кут неможливо безпосередньо виміряти. Тому на практиці зоряний час визначають шляхом вимірювання годинного кута t будь-якого світила з відомим прямим піднесенням α . Легко переконатися, що

$$s = t_\gamma = t + \alpha.$$

В один і той же фізичний момент різниця зоряних часів у двох пунктах земної кулі дорівнює різниці їх географічних довгот, виражених у годинній мірі:

$$s_1 - s_2 = \lambda_1 - \lambda_2.$$

Місцевий зоряний час на нульовому меридіані називається Всесвітнім або гринвіцьким зоряним часом s_0 .³

Зоряний час s в пункті з географічною довготою λ в момент Всесвітнього зоряного часу s_0 рівний:

$$s = s_0 + \lambda.$$

б) Істинний сонячний час

За початок істинної сонячної доби приймається момент нижньої кульмінації центра Сонця. Час, що пройшов від моменту нижньої кульмінації центра Сонця, називається *істинним сонячним часом*:

$$T_\odot = t_\odot + 12^h.$$

Незважаючи на простоту вимірювання часу істинними сонячними добами, ця система лічби часу не придатна для використання в

³Нульовий або гринвіцький меридіан проходить через астрономічну обсерваторію у місті Грінвіч в Англії.

повсякденному житті, через те, що тривалість істинної сонячної доби змінюється протягом року. Така непостійність пов'язана з наступними двома факторами:

1) Сонце здійснює видимий річний рух не по небесному екватору, а по екліптиці, яка нахилена до екватора під кутом $23^{\circ}26'$. Як наслідок, зміна прямого піднесення Сонця за одну добу поблизу точок сонцестоянь більша ніж поблизу точок рівнодень, а отже, проміжок часу між послідовними нижніми кульмінаціями Сонця поблизу точок сонцестоянь більший за відповідний проміжок часу поблизу точок рівнодень;

2) рух Сонця по екліптиці є нерівномірним за рахунок еліптичності орбіти Землі. Його лінійна швидкість поблизу перигею більша ніж поблизу апогею.

Вказані фактори призводять, наприклад, до того, що тривалість найдовшої доби (22 грудня) більша за тривалість найкоротшої доби (16 вересня) на 51 секунду.

Інтегральний ефект зміщення сонячного часу в довільний день року зображено на Рис. 1.5.

в) Середній сонячний час

Аби уникнути незручностей, пов'язаних з непостійністю істинної сонячної доби, запроваджується поняття *середнього екваторіального Сонця* — уявної точки, що рівномірно рухається по екватору й проходить точку весняного рівнодення одночасно зі справжнім Сонцем.

Проміжок часу між двома послідовними однойменними кульмінаціями середнього екваторіального Сонця називається *середньою сонячною добою*.

Час, що пройшов від моменту нижньої кульмінації середнього екваторіального Сонця, називається *середнім сонячним часом*:

$$T_m = t_m + 12^h.$$

Зрозуміло, що середній сонячний час безпосередньо з астроно-

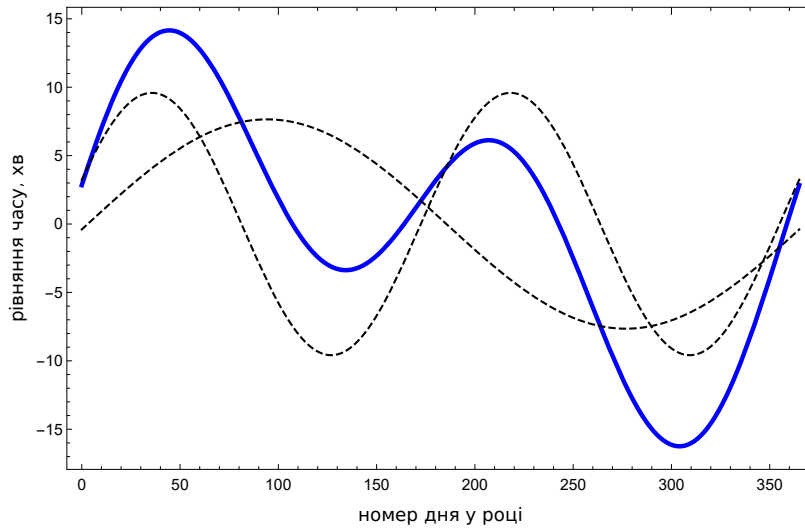


Рис. 1.5: Рівняння часу. Пунктирними лініями відокремлені ефекти пов'язані з еліптичністю орбіти Землі та нахилом осі обертання до екліптики.

мічних спостережень визначати неможливо. Його можна тільки обчислювати. Зв'язок між істинним сонячним часом та середнім сонячним часом виражається *рівнянням часу* η :

$$T_m = T_{\odot} + \eta.$$

Значення η на будь-яку календарну дату наведено на Рис. 1.5, його також можна знайти в астрономічному календарі.

Наприклад, 12 лютого рівняння часу $\eta = +14$ хв 17 с (максимальне позитивне значення); 3 листопада $\eta = -16$ хв 24 с (максимальне негативне значення).

Аналогічно, як і для зоряного часу, місцевий середній сонячний час T_m на меридіані з довготою λ пов'язаний з Всесвітнім (гринвіцьким) середнім сонячним часом T_0 співвідношенням:

$$T_m = T_0 + \lambda.$$

Очевидно також, що:

$$T_{m1} - T_{m2} = \lambda_1 - \lambda_2,$$

$$T_{\odot 1} - T_{\odot 2} = \lambda_1 - \lambda_2.$$

г) Поясний час

З метою узгодження місцевого часу для людей, які живуть в різних куточках нашої планети (тобто на різній географічній довготі від Гринвіча) в 1884 році, за домовленістю більшості країн світу, була прийнята *поясна система* лічби середнього часу. Згідно з цією домовленістю, земну кулю умовно поділено на 24 годинних пояси (від 0 до 23), розміщених один від одного на 15° по довготі починаючи з нульового меридіана. Через середину кожного годинного поясу проходить центральний меридіан поясу.

Місцевий час центрального меридіана поясу N називається *поясним часом* T_N . Приймається, що в межах одного поясу час однаковий і рівний поясному.

За нульовий центральний меридіан прийняли гринвіцький меридіан. Нульовий годинний пояс простягається по довготі на $7,5^\circ$ на захід і на стільки ж на схід від гринвіцького меридіана. Україна розташована в другому годинному поясі.⁴

Очевидно, що поясний час пов'язаний з гринвіцьким наступним співвідношенням

$$T_N = T_0 + N^h.$$

⁴Хоча Москва та прилеглі до неї території знаходяться у тому ж самому поясі, що й Україна, «московський час» зміщений відносно «київського» на одну годину вперед. Це пов'язане з тим, що в Росії діє так званий *декретний час*. Він був запроваджений урядовим декретом в 1930 році для всієї території колишнього Радянського Союзу. У 1992 році постановою Кабінету Міністрів України для населення нашої держави декретний час був скасований. Тому «київський час» збігається з поясним часом другого поясу.

Поряд з цим можемо написати формулу:

$$T_N - T_m = N^h - \lambda.$$

д) *Літній час*

З метою заощадження електроенергії більшість країн світу, в тому числі й Україна, на своїх територіях запроваджують *літній час*. Для цього щорічно в останню неділю березня о 2 годині ночі стрілки годинників переводять на одну годину вперед, а в останню неділю жовтня о 3 годині ночі на одну годину назад. Таким чином, взимку ми живемо за поясним часом, а влітку за літнім.

Очевидно, що

$$T_{Summ} = T_N + 1^h.$$

е) *Тропічний рік*

Для вимірювання великих проміжків часу використовується тропічний рік.

Проміжок часу між двома послідовними моментами проходження центра Сонця через точку весняного рівнодення називається *тропічним роком*. Він містить 365,2422 середніх сонячних діб, або 365 діб 5 год 48 хв 46 с.

Приклади розв'язання типових задач

Задача 1

Визначити зоряний час 8 квітня в момент $T_m = 14^h 36^m 48^s$ середнього часу.

Розв'язання

Зоряний час: $s = \alpha + t = \alpha_m + t_m$, де α_m та t_m – пряме піднесення та годинний кут середнього Сонця в розглядуваний момент. Середній час: $T_m = t_m + 12^h$. Звідси знаходимо годинний кут: $t_m = T_m - 12^h = 14^h 36^m 48^s - 12^h = 2^h 36^m 48^s$.

Залишається визначити пряме піднесення середнього Сонця в задану дату. Для цього скористаємося наступним наближеним методом.

Оскільки 21 березня (весняне рівнодення) пряме піднесення середнього Сонця $\alpha'_m = 0^h$, а за одну добу середнє Сонце зміщується по екваторі приблизно на $1^\circ = 4^m$, то пряме піднесення середнього Сонця 8 квітня дорівнює $\alpha_m = \alpha'_m + n \cdot 4^m = n \cdot 4^m$. Тут n – кількість діб, що розділяє 21 березня та 8 квітня. Неважко порахувати, що $n = 18$.

Таким чином, 8 квітня пряме піднесення середнього Сонця $\alpha_m = 18 \cdot 4^m = 1^h 12^m$.

Шуканий в умові зоряний час: $s = 1^h 12^m + 2^h 36^m 48^s = 3^h 48^m 48^s$.⁵

Задача 2

В момент верхньої кульмінації зорі Бетельгейзе ($\alpha = 5^h 51^m$) годинник, що відлічує зоряний гринвіцький час, показує $1^h 9^m$. Визначити довготу місця спостереження кульмінації зорі. Вказати номер годинного пояса даної місцевості.

Розв'язання

Вказаний в умові час є Всесвітнім зоряним часом: $s_0 = 1^h 9^m$. Використаємо зв'язок Всесвітнього часу з місцевим: $s = s_0 + \lambda$. Звідси $\lambda = s - s_0$. За означенням, зоряний час $s = \alpha + t$. В момент верхньої кульмінації $t = 0^h$.

Таким чином $\lambda = \alpha - s_0 = 5^h 51^m - 1^h 9^m = 4^h 42^m = 70,5^\circ$.

Оскільки перший годинний пояс починається на відстані $7,5^\circ$ від Гринвіча і ширина кожного поясу 15° , то місцевість з довготою $70,5^\circ$ знаходиться в V годинному поясі.

Контрольні запитання

⁵Описаний в задачі метод переведення сонячного часу в зоряний є наближеним. Точне переведення зоряного часу в середній або середнього в зоряний здійснюється за допомогою спеціальних таблиць, які надруковані в астрономічному календарі.

1. Який проміжок часу називають зоряною добою?
2. Який час вимірюється сонячним годинником?
3. Чим відрізняється середній сонячний час від істинного сонячного часу?
4. З якими факторами пов'язана нерівномірність істинної сонячної доби?
5. До якого часового поясу відноситься Пекін, довгота якого від Гринвіча рівна $7^h45^m, 9$?
6. Чи відрізняється літній час від поясного?
7. Яким чином із астрономічних спостережень та маючи сигнал точного Всесвітнього часу можна визначити географічну довготу місця спостереження?

Завдання

1. У момент верхньої кульмінації зорі Бетельгейзе (α Оріона) всесвітній зоряний час рівний 15^h09^m . Визначити довготу місця спостереження, якщо пряме піднесення зорі $\alpha = 5^h51^m$.
2. Визначити годинний кут зорі Альтаїр (α Орла) в момент $8^h20^m20^s$ зоряного часу. Пряме піднесення зорі $\alpha = 19^h48^m21^s$.
3. Користуючись наближеним методом переведення зоряного часу в середній сонячний, визначити середній сонячний час 1 вересня в момент 13^h42^m зоряного часу.
4. Обчисліть зоряний і середній час у Луцьку 19 лютого в момент, коли в Гринвічі зоря Кастор (α Близнюків) спостерігається у верхній кульмінації.
5. На скільки відрізняється місцевий час в Ужгороді від місцевого часу в Донецьку?
6. Поясний час в Токіо 10^h00^m . Який місцевий час Луцька? Довгота Токіо $09^h19^m, 1$.
7. Визначити істинний сонячний час 12 лютого в момент 11^h12^m середнього сонячного часу.

8. В деякому населеному пункті 14 червня в момент 18^h45^m середнього сонячного часу було прийнято радіосигнал «київський час 18^h00^m ». Визначити географічну довготу населеного пункту та номер годинного поясу, в якому цей пункт лежить.

9. У південній Америці (Чилі) розташована унікальна обсерваторія «Ла-Сілья» (географічні координати: 29.25° пд. ш. та 70.73° зх. д.), яка є складовою частиною Європейської південної обсерваторії. 25 лютого 2017 року о 22:30 за поясним часом обсерваторії було заплановано початок онлайн-трансляції рідкісного астрономічного явища: поглинання чорною дірою газової хмарини. Розрахуйте дату та час початку онлайн-трансляції за київським часом.

10. Під час навколосвітньої мандрівки ви здійснюєте політ на літакові із острова Ізабела (Атлантичний океан, Галапагоські острови, широта острова $\varphi = 0^\circ$, західна довгота $91^\circ20'$) в Кенію помилуватися чудовими краєвидами озера Вікторія. Ваш літак має здійснити посадку в Найробі, що знаходиться на екваторі (східна довгота $36^\circ40'$). Оцініть, о котрій годині (за годинником аеропорту прибуття) здійснить посадку ваш літак, якщо час відправлення (за годинником аеропорту на острові Ізабела) становив 9^h00^m . Середня швидкість літака 1000 км/год. При розрахунку вважати, що літак рухається за найкоротшим шляхом (по великому колу). Радіус Землі прийняти рівним 6378 км.

11. Для задачі 14 із попереднього розділу (ст. 18) оцініть зоряний час, що відповідає розміщенню небесних світил на фрагменті зоряного неба.

12. У тропічному році міститься $365,2422$ середніх сонячних діб. Як змінилося б це число, коли обертання Землі навколо осі відбувалося б із тим самим періодом, але в зворотному напрямі?

13. Визначити похибку «юліанського» та «григоріанського» календарів.

14. Екзопланета обертається по коловій орбіті навколо зорі з пе-

ріодом 392,019 земних діб. Період обертання планети навколо осі $20^h 24^m$ (земного часу). Планета обертається навколо своєї осі у напрямку, що збігається з напрямком обертання по орбіті.

- (a) Складіть календар для цієї планети: вкажіть тривалість року в сонячних добах даної планети, порядок чергування довгих (високосних) та звичайних років, їх тривалість та кількість у циклі.
- (b) Знайдіть різницю між синодичною (на Землі сонячною) та сидеричною (зоряною) добою на цій планеті в земних одиницях часу.

1.3 Рухома карта зоряного неба

Теоретичні відомості

Одним з найпростіших астрономічних приладів, який дозволяє прослідкувати за добовою зміною положень світил відносно небесного меридіана та горизонту, є *рухома карта зоряного неба*.

За допомогою рухомої карти зоряного неба можна, хоча і наближено, але надзвичайно швидко і без будь-яких теоретичних розрахунків розв'язувати низку задач практичної астрономії. Найважливіші серед них:

- встановлення вигляду зоряного неба в будь-який момент часу заданого дня року;
- визначення моментів часу і азимутів сходу та заходу світил;
- встановлення положення Сонця на екліптиці в задану календарну дату та визначення початку, кінця і тривалості сонячної доби на географічній широті спостереження;
- встановлення умов видимості сузір'їв в даному місці Землі;
- визначення моментів часу сходу, кульмінації та заходу планет і Місяця;⁶

Модель рухомої карти зоряного неба

Рухома карта складається з двох елементів: зоряної карти та накладного рухомого круга (див. Рис. 1.6).

Зоряна карта складена в проекції Михайлова: проекції небесного глобуса на площину, дотичну до нього в точці північного полюса

⁶Для розв'язання цієї задачі необхідно знати ефемериди планет та Місяця, які можна знайти в астрономічному щорічнику.

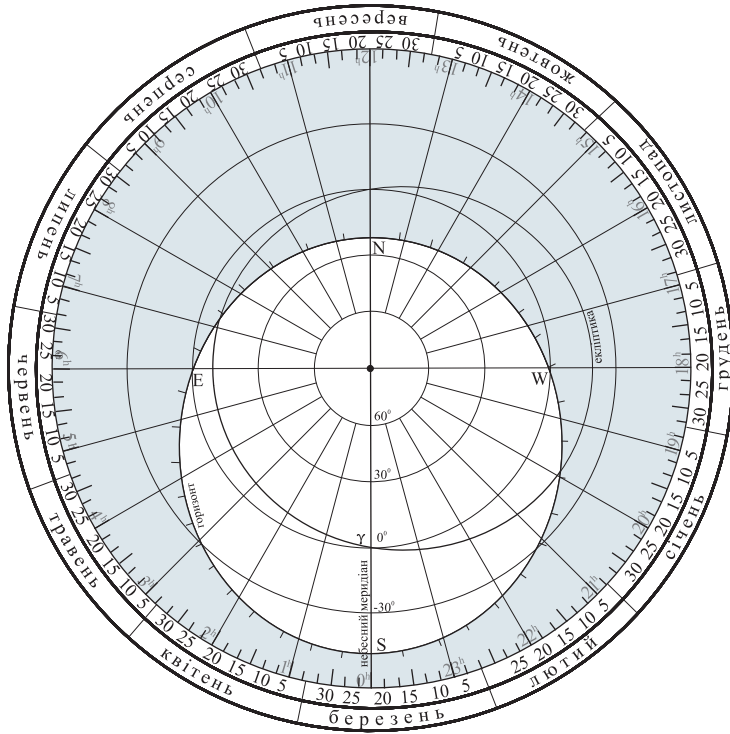


Рис. 1.6: Рухома карта зоряного неба.

світу.⁷ В ній *добові паралелі* зображаються у вигляді концентричних кіл, а кола схилень — променів, які виходять з північного полюса світу, розміщеного в центрі карти. Таким чином, утворюється сітка екваторіальних координат (α, δ). Схилення світил на карті відраховуються вздовж радіусів від краю карти до центру, в межах від -45° до 90° . Прямі піднесення проставлені поблизу краю карти в межах від 0^h до 24^h .

Вздовж краю карти нанесено *шкалу календарних дат* (лімб дат).

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

⁷Точки, що зображають сузір'я, розміщені на поверхні сфери, проєктуються на площину.

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

Накладний круг на карті зоряного неба дозволяє виділити ту частину небосхилу, яку можна спостерігати в даному місці Землі в заданий момент часу. Для цього він пофарбований напівпрозорою блакитною фарбою, за виключенням овалу.⁸ Ті сузір'я, які знаходяться всередині овалу на накладному крузі, в даний момент часу заданого дня року будуть знаходитись над горизонтом. Решта ж сузір'їв буде знаходитись під горизонтом, і їх спостереження в даний момент часу з даної точки Землі неможливе.

Відлік часу проводиться за *годинною шкалою*, яка нанесена вздовж краю накладного круга і проградуйована в годинах від 0^h до 24^h . Вона дозволяє проводити відлік місцевого середнього часу з точністю до 5 хв.⁹

Контур овалу зображає *математичний* або *істинний горизонт*. На цьому контурі нанесена шкала азимутів, за якою можна наближено оцінювати значення азимутів світил. Вона проградуйована в градусах від 0° до 360° . На шкалі азимутів також позначені основні

⁸Розміщення овалу на накладному крузі і його форма залежать від географічної широти місця спостереження.

⁹Середній час, який вказується на годинній шкалі, не завжди збігається з громадянським часом, за яким живе спостерігач. Цю обставину слід враховувати при плануванні спостереження. Визначивши за допомогою рухомої карти місцевий середній час певного явища, слід внести поправку на довготу та врахувати літній час. Проте, на розуміння суті досліджуваних в роботі явищ така неточність часу не впливає. Тому при виконанні роботи можна вважати, що на годинній шкалі вказано час, за яким живе населення України.

точки горизонту: південь S ($A = 0^\circ$), захід W ($A = 90^\circ$), північ N ($A = 180^\circ$) та схід E ($A = 270^\circ$).

Пряма, що проходить через точки півдня та півночі, зображає *небесний меридіан*. Світила, які перетинаються з небесним меридіаном, перебувають в кульмінації у даний момент часу. У верхній кульмінації знаходяться ті світила, які розміщені на небесному меридіані між північним полюсом світу та точкою півдня.

Сузір'я, які в даний момент часу сходять над горизонтом, знаходяться в східній частині істинного горизонту (поблизу дуги математичного горизонту від точки півночі, через точку сходу, до точки півдня). І навпаки, сузір'я, що в даний час заходять, слід шукати поблизу західної частини істинного горизонту.

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

Приклади розв'язання типових задач

Задача 1

За допомогою рухомої карти зоряного неба визначити, які зорі будуть перебувати у верхній кульмінації 20 лютого о 21.30 годині.

Розв'язання

Встановимо накладний круг рухомої карти зоряного неба таким чином, щоб поділлка на годинній шкалі, яка відповідає місцевому часу 21^h30^m , збігалася з поділлкою шкали календарних дат, що відповідає 20 лютому.

Помічаємо, що небесний меридіан між північним полюсом світу та точкою півдня перетинає дві зорі: β Близнюків та α Малого Пса.

Таким чином, 20 лютого о 21.30 у верхній кульмінації перебуває дві зорі: β Близнюків та α Малого Пса.

Задача 2

За допомогою рухомої карти зоряного неба визначити які зорі будуть сходити, а які заходити 25 березня о 12 годині.

Розв'язання

Аналогічно, як і у попередній задачі, встановлюємо накладний круг у положення, яке відповідає моменту спостереження.

Бачимо, що поблизу східної частини горизонту перебувають зорі β та ξ Оріона, а також μ Лева та γ Рака. Поблизу західної частини горизонту перебувають зорі α Змієносця, α Змії.

Отже, 25 березня о 12 годині сходять зорі β та ξ Оріона, μ Лева, γ Рака, а заходять — α Змієносця та α Змії.

Задача 3

Використовуючи рухому карту зоряного неба, визначити місцевий час та азимут Сонця в момент його заходу 20 грудня та 20 червня.

Розв'язання

Проведемо з північного полюса світу уявний радіус до точки шкали календарних дат, що відповідає 20 грудня. Точка перетину цього радіуса з екліптикою визначає положення Сонця на екліптиці 20 грудня. Запам'ятавши положення цієї точки, обертаємо накладний круг до того моменту, коли вона почне ховатися під горизонт. Помічаємо, що навпроти позначки «20 грудня» на шкалі календарних дат стоїть позначка годинної шкали, яка відповідає моменту місцевого часу $15^h 20^m$. Азимут точки заходу Сонця приблизно рівний 45° . Таким чином, 20 грудня Сонце заходить о $T = 15^h 20^m$.¹⁰

Аналогічно знаходимо місцевий час та азимут моменту заходу Сонця 20 червня. Одержимо $T = 20^h 30^m$, $A = 140^\circ$.

¹⁰Без врахування рефракції та поправки до місцевого часу.

Контрольні запитання

1. Встановіть накладний круг у положення, яке відповідає моменту виконання роботи.
2. Назвіть основні елементи рухомої карти зоряного неба.
3. Вкажіть на накладному крузі положення зеніту.
4. Чому горизонт на накладному крузі має овальну форму?
5. Чому приблизно рівне схилення та пряме піднесення зорі ϵ Великого Пса?
6. Чому приблизно рівне пряме піднесення Сонця 20 лютого?

Завдання

1. Встановіть накладний круг у положення, яке відповідає моменту виконання роботи. Запишіть у зошит назви сузір'їв, які в даний момент знаходяться над горизонтом. Які з них сходять? Які заходять? Які перебувають в кульмінації?
2. Визначити пряме піднесення та схилення наступних зірок: α Оріона (Бетельгейзе), β Оріона (Рігель), α Орла (Альтаїр), α Ліри (Вега).
3. У дні 21 березня, 22 червня, 23 серпня та 22 грудня знайти моменти часу сходу, верхньої кульмінації, заходу та нижньої кульмінації зірок: 1)Веги; 2) Рігеля; 3) Альтаїра.
4. Визначити місцевий час моментів сходу та заходу Сонця 1 вересня, 1 січня та в дату проведення заняття. Обчисліть тривалість дня в зазначені дати.
5. Визначити азимути точок сходу і заходу наступних зірок: α Діви (Спіка), α Великого Пса (Сіріус), α Лебедя (Денеб).
6. Використовуючи астрономічний щорічник, виписіть ефемериди внутрішніх планет (Меркурія та Венери) та Місяця на момент проведення заняття. Знайдіть відповідні положення на рухомій карті. Обертаючи накладний круг, визначте моменти сходу, кульмінації та заходу цих світил.

7. У романі Л.М. Толстого “Анна Кареніна” описано полювання героїв твору Облонського і Левіна. “Стало темніти. Красуня Венера низько на заході уже світилася між березами своїм ніжним блиском, а високо на сході переливався своїми червоними вогнями хмурий Арктурус. Над головою у себе Левін “ловив та губив” крайню зорю із ручки ковша В.Ведмедиці, а на горизонті намагався відшукати ліворуч від Андромеди Ящірку”. На основі цього опису, за допомогою рухомої карти зоряного неба, необхідно визначити коли і де відбувалося полювання, а саме:

- (a) які екваторіальні координати Ящірки;
- (b) орієнтовна географічна широта місця полювання;
- (c) яка була пора року;
- (d) календарний місяць, орієнтовна дата.

1.4 Схід і захід світил

Теоретичні відомості

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

Наближено це завдання розв'язується за допомогою рухомої карти зоряного неба.¹¹

Точні вирази для годинного кута t та азимута світила A в момент його сходу чи заходу залежно від географічної широти φ та схилення δ випливають із геометричних співвідношень між сторонами та кутами сферичного трикутника, вершинами якого є полюс світу P , зеніт Z та світило M . Такий сферичний трикутник називається *паралактичним* (Рис. 1.7а).

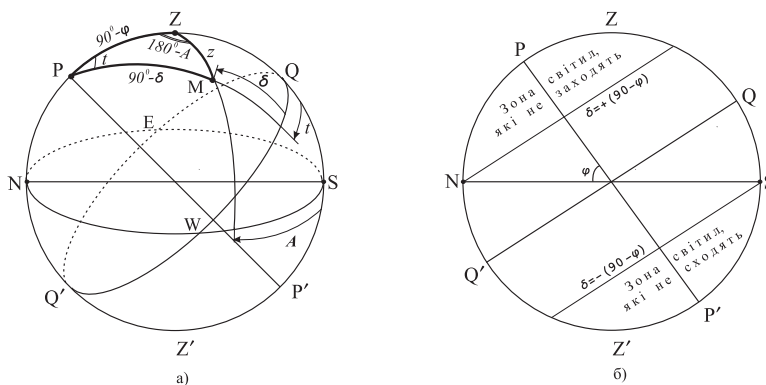


Рис. 1.7: а) Паралактичний трикутник; б) зони світил, що не заходять та не сходять.

¹¹Про метод визначення моментів часу та азимутів точок сходу і заходу небесних світил за допомогою рухомої карти зоряного неба докладно описано у попередньому параграфі.

Перш ніж застосовувати до паралактичного трикутника формули сферичної геометрії з'ясуємо, за яких умов світило буде сходити і заходити.

Оскільки в момент сходу чи заходу світило перетинає горизонт, то для того, щоб світило сходило і заходило, необхідно, аби його добова паралель перетиналася з істинним горизонтом (Рис. 1.7б).

Математично ця умова виражається наступним співвідношенням:

$$|\delta| < (90^\circ - \varphi). \quad (1.9)$$

Якщо ж для світила виконується умова $\delta > (90^\circ - \varphi)$, то воно ніколи не заходить в місцевості з широтою φ (постійно перебуває над горизонтом). І навпаки, якщо $\delta < -(90^\circ - \varphi)$, то світило ніколи не сходить на широті φ (постійно перебуває під горизонтом).

Отож, коли ми беремося розрахувати, наприклад, момент сходу якоїсь зорі, то спершу потрібно перевірити чи виконується умова (1.9).

Тепер перейдемо до виведення формул для обчислення моментів сходу та заходу, а також азимутів точок сходу і заходу світил.

Розглянемо паралактичний трикутник PZM (Рис. 1.7а). Запишемо значення сторін і кутів цього сферичного трикутника

$$\begin{aligned} PZ &= 90^\circ - \varphi, & PM &= 90^\circ - \delta, & ZM &= z, \\ \angle ZPM &= t, & \angle PZM &= 180^\circ - A. \end{aligned}$$

Застосуємо до сторони ZM формулу косинуса сторони сферичного трикутника.¹² Одержимо

$$\cos ZM = \cos z = \cos(90^\circ - \varphi)\cos(90^\circ - \delta) + \sin(90^\circ - \varphi)\sin(90^\circ - \delta)\cos t.$$

¹²Згідно з цією формулою косинус сторони сферичного трикутника дорівнює добутку косинусів двох інших сторін плюс добуток синусів цих сторін на косинус кута між ними: $\cos a = \cos b \cos c + \sin b \sin c \cos A$.

Після спрощень одержуємо співвідношення

$$\cos z = \sin\varphi\sin\delta + \cos\varphi\cos\delta\cos t. \quad (1.10)$$

Аналогічно

$$\cos PM = \cos(90^\circ - \delta) = \cos(90^\circ - \varphi)\cos z + \sin(90^\circ - \varphi)\sin z\cos(180^\circ - A).$$

Звідси

$$\sin\delta = \sin\varphi\cos z - \cos\varphi\sin z\cos A. \quad (1.11)$$

Формули (1.10) та (1.11) виражають співвідношення між екваторіальними та горизонтальними системами координат. Вони відіграють дуже важливу роль у сферичній та практичній астрономії.

Скористаємося цими формулами для знаходження моменту часу та місця сходу і заходу світил.

Для цього врахуємо, що в момент сходу чи заходу світила воно перетинає горизонт, тобто в цей момент зенітна відстань світила $z = 90^\circ$.

Одержимо

$$\cos 90^\circ = \sin\varphi\sin\delta + \cos\varphi\cos\delta\cos t,$$

звідки

$$\cos t = -\frac{\sin\varphi\sin\delta}{\cos\varphi\cos\delta} = -\frac{\operatorname{tg}\delta}{\operatorname{tg}(90^\circ - \varphi)}. \quad (1.12)$$

Годинний кут, обчислений за формулою, (1.12) має два значення: $+t$ для моменту заходу ($t < 180^\circ$) і $-t$ для моменту сходу ($t > 180^\circ$).

Знаючи пряме піднесення світила α , знаходимо моменти місцевого зоряного часу сходу й заходу світила

$$s_{\text{сх}} = \alpha - |t|, \quad s_{\text{зах}} = \alpha + |t|. \quad (1.13)$$

За відомим зоряним часом легко знайти середній сонячний час сходу й заходу світила.¹³

Якщо обчислюються моменти сходу та заходу Сонця, то немає потреби знаходити зоряний час, оскільки одразу можна обчислити місцевий істинний сонячний час $T_{\odot} = t_{\odot} + 12^h$. Тоді місцевий середній час

$$T_{\text{сх}} = 12^h - t_{\odot} + \eta, \quad T_{\text{зах}} = 12^h + t_{\odot} + \eta,$$

де η – рівняння часу.

Для знаходження азимутів точок сходу і заходу світила скористаємося формулою (1.11). Підставляючи в неї $z = 90^\circ$, одержимо

$$\cos A = -\frac{\sin \delta}{\cos \varphi} = -\frac{\sin \delta}{\sin(90^\circ - \varphi)}. \quad (1.14)$$

Для точки заходу світила береться значення азимута, що дорівнює A , а для точки сходу — $(360^\circ - A)$. Таким чином

$$A_{\text{сх}} = 360^\circ - A, \quad A_{\text{зах}} = A. \quad (7)$$

Знайдені вище формули для годинного кута та азимута точок сходу і заходу є точними в математичному сенсі, але наближеними у фізичному. Йдеться про те, що ми не врахували ефекти спричинені атмосферою Землі. Наявність атмосфери призводить до того, що промінь світла від небесного тіла перш ніж потрапити в око спостерігача проходить крізь земну атмосферу і заломлюється, тим самим зміщуючи видиме положення світила відносно справжнього. Це явище називається *астрономічною рефракцією*.

За рахунок рефракції видиме положення світила зміщується відносно справжнього до зеніту. Величина зміщення ρ залежить від висоти світила над горизонтом, а також від температури та тиску. За

¹³Метод переведення зоряного часу в сонячний описано в практичній роботі №3.

нормальних умов для світил, що спостерігаються на горизонті, значення ρ приймають рівним $35'$.

З врахуванням рефракції, формула (1.10) набуде вигляду

$$\cos(90^\circ + \rho) = \sin\varphi\sin\delta + \cos\varphi\cos\delta\cos t,$$

звідки

$$\cos t = -\frac{0,0105 + \sin\varphi\sin\delta}{\cos\varphi\cos\delta}. \quad (1.15)$$

Розв'язуючи задачі на визначення моментів часу сходу та заходу Сонця, потрібно враховувати крім рефракції також видимий радіус Сонця ($R_\odot \approx 16'$). Це уточнення пов'язане з тим, що часом сходу або заходу Сонця вважається момент часу, коли верхній край сонячного диска торкнеться горизонту, тоді як в астрономічних календарях подані схилення центра сонячного диска δ_\odot .

З врахуванням рефракції та видимого кутового радіуса Сонця, годинний кут в момент перетину краєм сонячного диска горизонту рівний

$$\cos t_\odot = -\frac{0,0148 + \sin\varphi\sin\delta_\odot}{\cos\varphi\cos\delta_\odot}. \quad (1.16)$$

Відповідні поправки до значення азимута мають вигляд

$$\cos A = -0,0105\operatorname{tg}\varphi - \frac{\sin\delta}{\sin(90^\circ - \varphi)}, \quad (1.17)$$

$$\cos A_\odot = -0,0148\operatorname{tg}\varphi - \frac{\sin\delta_\odot}{\sin(90^\circ - \varphi)}. \quad (1.18)$$

На завершення скажемо кілька слів про такі цікаві явища як *полярний день* та *полярна ніч*, а також *біла ніч*.

У ті дні року, коли Сонце не заходить за горизонт (навіть у момент нижньої кульмінації), триває полярний день і навпаки, у ті дні

року, коли Сонце не сходить над горизонтом (навіть у момент верхньої кульмінації), триває полярна ніч.

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

$$\delta_{\odot} > 90^\circ - \varphi.$$

З врахуванням рефракції та видимого радіуса Сонця, знаходимо, що дата початку полярного дня відповідає тому дню в році, в який схилення Сонця рівне

$$\delta_{\odot} = 90^\circ - (\varphi + \rho + R_{\odot}). \quad (1.19)$$

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

Аналогічно, дата початку полярної ночі відповідає тому дню в році, в який схилення Сонця рівне

$$\delta_{\odot} = \varphi - 90^\circ + \rho + R_{\odot}, \quad (1.20)$$

а в наступні дні воно зменшується.

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

Приклади розв'язання типових задач

Задача 1

З'ясувати, чи можна спостерігати на зоряному небі у вашій місцевості зорю Арктур (α Волопаса), екваторіальні координати якої рівні $\delta = 19^\circ 27'$, $\alpha = 14^h 13^m 24^s$? Якщо так, то чи буде вона сходити і заходити? Визначте момент сходу зорі.

Розв'язання

Будемо вважати, що спостерігач знаходиться в Луцьку ($\varphi = 50,8^\circ = 50^\circ 48'$).

Світило буде спостерігатися над горизонтом, якщо виконується умова $\delta \geq \varphi - 90^\circ$. В нашому випадку $\varphi - 90^\circ = 50,8^\circ - 90^\circ = -39,2^\circ$. Таким чином, на широті Луцька можна спостерігати світила, схилення яких більші $-39,2^\circ$. Оскільки схилення Арктура $\delta = 19^\circ 27'$, то зорю можна спостерігати в даній місцевості.

Далі з'ясуємо, чи буде вона сходити і заходити.

Для цього слід перевірити, чи виконується умова (1.9). Маємо

$$|\delta| < (90^\circ - \varphi) = 90^\circ - 50,8^\circ = 39,2^\circ.$$

Таким чином, на широті Луцька будуть сходити і заходити світила, схилення яких лежать в інтервалі

$$-39,2^\circ < \delta < 39,2^\circ.$$

Бачимо, що схилення Арктура потрапляє в цей інтервал.

Залишається визначити момент сходу зорі. Згідно з формулою (1.15) годинний кут світила в момент сходу чи заходу

$$\begin{aligned} \cos t &= -\frac{0,0105 + \sin\varphi\sin\delta}{\cos\varphi\cos\delta} = \\ &= -\frac{0,0105 + \sin 50^\circ 48' \sin 19^\circ 27'}{\cos 50^\circ 48' \cos 19^\circ 27'} = -0,45. \end{aligned}$$

Звідки

$$t = \arccos(-0,45) = 116,78^\circ = 116^\circ 46' 57'' = 7^h 47^m 07^s.$$

Зоряний час сходу Арктура

$$s = t + \alpha = 7^h 47^m 07^s + 14^h 13^m 24^s = 22^h 00^m 31^s.$$

Задача 2

Визначте місцевий середній час та азимут точки сходу Сонця 1 січня в Києві ($\varphi = 50,5^\circ = 50^\circ 30'$). Рівняння часу 1 січня рівне $\eta = 4^m$.

Розв'язання

З таблиці сонячних ефемерид астрономічного щорічника випишемо схилення та пряме піднесення Сонця 1 січня

$$\delta_{\odot} = -23^\circ 04' 18'', \quad \alpha_{\odot} = 18^h 43^m 02^s.$$

Годинний кут моменту сходу Сонця знаходимо за формулою (1.16)

$$\begin{aligned} \cos t_{\odot} &= -\frac{0,0148 + \sin\varphi \sin\delta_{\odot}}{\cos\varphi \cos\delta_{\odot}} = \\ &= -\frac{0,0148 + \sin 50^\circ 30' \sin(-23^\circ 04' 18'')}{\cos 50^\circ 30' \cos(-23^\circ 04' 18'')} = 0,49. \end{aligned}$$

Звідки

$$t_{\odot} = \arccos(0,49) = 60,565^\circ = 60^\circ 33' 55'' = 4^h 02^m 15^s.$$

Місцевий середній час сходу Сонця

$$T_{\text{сх}} = 12^h - t_{\odot} + \eta = 12^h - 4^h 02^m 15^s + 4^m = 08^h 01^m 45^s.$$

Азимут точки сходу Сонця знаходимо за формулою (1.18)

$$\begin{aligned} \cos A_{\odot} &= -0,0148 \operatorname{tg}\varphi - \frac{\sin\delta_{\odot}}{\sin(90^\circ - \varphi)} = \\ &= -0,0148 \operatorname{tg} 50^\circ 30' - \frac{\sin(-23^\circ 04' 18'')}{\sin(90^\circ - 50^\circ 30')} = 0,598. \end{aligned}$$

Звідси

$$A_{\odot} = \arccos(0,598) = 52,26^{\circ} = 53^{\circ}15'48''.$$

Азимут точки сходу Сонця

$$A_{\text{сх}} = 360^{\circ} - A_{\odot} = 360^{\circ} - 53^{\circ}15'48'' = 306^{\circ}44'12''.$$

Контрольні запитання

1. За якої умови світило буде видимим на даній широті?
2. Який трикутник називається паралактичним?
3. Чому рівна висота світила в момент його заходу?
4. У чому полягає явище рефракції? Як впливає рефракція на видиме положення світила?
5. Яким чином можна визначити тривалість світлового дня в задану календарну дату?
6. В яких межах змінюється схилення Сонця протягом року?
7. За якої умови в даній місцевості може розпочатися полярний день?

Завдання

1. Випишіть із зоряного каталогу по п'ять світил, які на вашій широті: ніколи не заходять, сходять і заходять, ніколи не сходять.
2. З'ясувати, чи можна спостерігати на зоряному небі у вашій місцевості зорю Антарес (α Скорпіона) схилення якої рівне $\delta = -26^{\circ}19'$? Те саме, визначити для спостерігача, що знаходиться в Мурманську ($\varphi = 68^{\circ}58'$).
3. Визначте зоряний час сходу зорі Альтаїр (α Орла) на широті Сімферополя ($\varphi = 45^{\circ}$), екваторіальні координати якої рівні $\delta = 8^{\circ}44'$, $\alpha = 19^{\text{h}}48,3^{\text{m}}$.
4. Визначте місцевий середній час та азимут сходу Венери 5 березня у вашій місцевості. В дану календарну дату на момент

0^h Всесвітнього часу екваторіальні координати Венери $\delta = 12^\circ 21'$, $\alpha = 1^h 46^m 36^s$.

5. Визначите місцевий середній час та азимут точки сходу Сонця 8 березня в Луцьку. Рівняння часу 8 березня рівне $\eta = 10^m 49^s$.

6. Враховуючи рефракцію та видимий кутовий радіус Сонця, визначте тривалість дня та азимути Сонця в момент його сходу та заходу 22 червня та 22 грудня в Луцьку.

7. Визначте дату початку полярного дня на острові Діксон ($\varphi = 73^\circ 30'$).

8. Визначте дату початку і тривалість полярної ночі на острові Рудольфа ($\varphi = 82^\circ$).

9. Визначити початок і тривалість періоду білих ночей в містечку Інарі (Фінляндія), широта якого $68^\circ 54' 20''$ та у Санкт-Петербурзі (Росія), для якого $\varphi = 59^\circ 57' 00''$.

10. Вкажіть та обґрунтуйте розміщення спостерігача на Землі, для якого тривалість сходу Сонця буде мінімальною. Розрахуйте відповідну тривалість сходу Сонця.

11. У результаті спостережень за рухом Юпітера упродовж доби було виявлено, що планета перебувала на висоті 45° у верхній кульмінації на південь від зеніту і на висоті 02° у нижній кульмінації. Оцініть час, від моменту даного спостереження, через який Юпітер зійде над горизонтом у точці сходу. Нахилом орбіти Юпітера до екліптики можна знехтувати. Період обертання Юпітера навколо Сонця становить 12 років.

1.5 Розміри та відстані в астрономії

Теоретичні відомості

Визначення відстаней до світил

Визначення відстаней від Землі до тіл Сонячної системи засноване на вимірюванні їх паралаксів — зміщень положень тіл відносно певного фону при спостереженнях із різних точок.

Добовим паралаксом світила p називається кут, під яким зі світила S видно радіус Землі AO . Паралакс змінюється зі зміною висоти світила над горизонтом. Коли світило перебуває в зеніті, його паралакс дорівнює нулеві. Найбільшого значення p_0 цей кут досягає, коли світило перебуває на горизонті (Рис. 1.8).

Як відомо, Земля трохи сплюснута біля полюсів (різниця екваторіального та полярного діаметрів становить 42 км), тобто форма її поверхні близька до сфероїда (еліпсоїда обертання). Таким чином, горизонтальний паралакс для даного світила буде залежати від положення спостерігача. Очевидно, що для заданого світила найбільшого значення горизонтальний паралакс набуває на екваторі. Зазвичай вимірюють горизонтальні екваторіальні добові паралакси світил.¹⁴

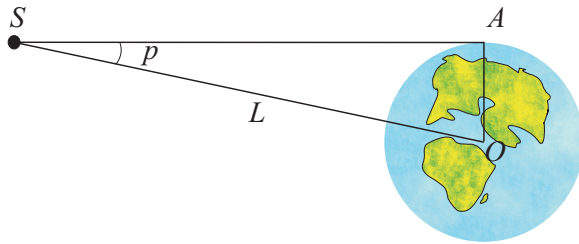


Рис. 1.8: Визначення добового паралаксу світила.

Горизонтальний паралакс Місяця дорівнює $57'$, планет — менше $1'$.

¹⁴Надалі під горизонтальним паралаксом будемо розуміти горизонтальний екваторіальний добовий паралакс.

Якщо відомий горизонтальний паралакс світила, то можна обчислити відстань від Землі до світила L .

Справді, з прямокутного трикутника AOS (див. Рис. 1.8) знаходимо

$$L = SO = \frac{AO}{\sin p_0} = \frac{R}{\sin p_0}. \quad (1.21)$$

Оскільки для всіх світил, крім Місяця, паралакси не перевищують $1'$, то формулу (3.9) можна спростити, скориставшись наближенням $\sin p_0 \simeq p_0$. Тоді

$$L = \frac{R}{p_0}, \quad (1.22)$$

де p_0 виражається в радіанах.

Якщо паралакс вимірюється у секундах дуги, то відстань до світила обчислюється за формулою:

$$L = R \frac{206\,265}{p_0''}. \quad (1.23)$$

Нагадаємо, що екваторіальний радіус Землі рівний $R = 6378$ км.

Таким чином, визначення відстаней від Землі до світил Сонячної системи зводиться до знаходження їх горизонтальних добових паралаксів.

Найпростіший спосіб знаходження горизонтального паралаксу заснований на тому, що спостерігають кульмінацію світила одночасно з двох обсерваторій, які лежать на одному меридіані. Можна показати, що горизонтальний паралакс

$$p_0 = \frac{\delta_1 - \delta_2}{\sin(\varphi_2 - \delta_2) - \sin(\varphi_1 - \delta_1)}, \quad (1.24)$$

де φ_1 та φ_2 – широти першої та другої обсерваторій, а δ_1 та δ_2 – топоцентричні схилення світила, що були визначені зі спостережень

з першої та другої обсерваторій відповідно.¹⁵

Зауважимо, що описаний спосіб визначення горизонтального паралаксу не може бути застосований до центрального світила сонячної системи — Сонця. Його паралакс визначають опосередковано, застосовуючи третій закон Кеплера.¹⁶

Альтернативним методом визначення відстаней до тіл сонячної системи є метод радіо- та лазеролокації.

Вимірявши час t поширення сигналу з Землі до небесного тіла і назад, обчислюємо відстань L до світила

$$L = \frac{ct}{2}, \quad (1.25)$$

де c – швидкість поширення сигналу ($c = 3 \cdot 10^5$ км/с).

Першу радіолокацію Сонця було здійснено у 1963 році.

На даний момент приймаються наступні значення горизонтального паралаксу Сонця p_{\odot} та середньої відстані від Землі до Сонця a :

$$p_{\odot} = 8'', 7941, \quad a = 149\,597\,870 \text{ км.}$$

Визначення відстані до зірок та інших небесних тіл, які знаходяться за межами сонячної системи, засноване на вимірюванні річних паралаксів цих світил.

Річним паралаксом π світила S називається кут, під яким зі світила було б видно середній радіус земної орбіти, за умови, що напрямок на зірку перпендикулярний до цього радіусу (Рис. 1.9).

Відстань від Землі до світила S дорівнює

¹⁵Топоцентричні координати отримуються зі спостережень на поверхні Землі. В астрономічних календарях і щорічниках даються геоцентричні координати світил, які розраховуються для напрямів на світило з центра Землі. Топоцентричні координати збігаються з геоцентричними в момент, коли світило перебуває в зеніті.

¹⁶Докладніше про визначення горизонтального паралаксу Сонця див. у підручнику [2].

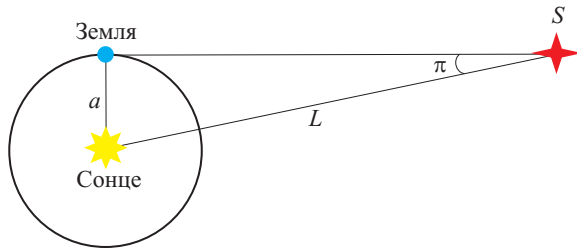


Рис. 1.9: Визначення річного паралаксу світила.

$$L = \frac{a}{\sin \pi}. \quad (1.26)$$

Оскільки річні паралакси зірок менші $1''$, то з великою точністю буде виконуватись співвідношення

$$L = a \frac{206\,265}{\pi''}. \quad (1.27)$$

Визначення розмірів світил

Після того, як ми навчилися визначати відстані до світил сонячної системи, можемо знайти їх лінійні розміри. Для цього необхідно також знати кутові розміри світила.

Кутовим діаметром світила називається кут, під яким з Землі спостерігається його диск. Кутові діаметри деяких небесних тіл (Сонця, Місяця, планет) легко виміряти за допомогою телескопа.

Позначимо кутовий радіус світила S через ρ , а лінійний радіус через r (Рис. 1.10). Тоді, якщо L — відстань до світила S , то має місце співвідношення

$$r = L \sin \rho, \quad (1.28)$$

або наближено

$$r = L \frac{\rho''}{206\,265}. \quad (1.29)$$

Позначення ρ'' вказує на те, що кутовий радіус має виражатися в секундах дуги.

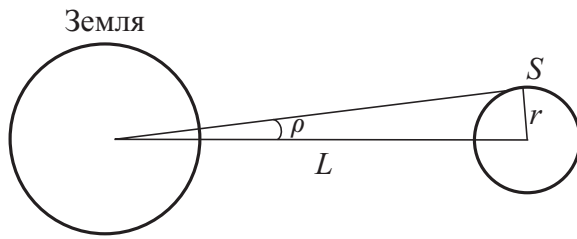


Рис. 1.10: Визначення лінійних розмірів світил.

Одиниці вимірювання відстаней в астрономії

Якщо відстані до небесних тіл дуже великі, то вимірювати їх кілометрами незручно.

Тому в астрономії поряд із кілометром запроваджено три додаткових одиниці вимірювання відстаней:

астрономічна одиниця (а. о.) — чисельно рівна середній відстані від Землі до Сонця.

$$1 \text{ а. о.} = 149\,597\,870 \text{ км.}$$

світловий рік (св. р.) — чисельно рівний відстані, яку світло проходить за один рік.

$$1 \text{ св. р.} = 9,46 \cdot 10^{12} \text{ км} = 63\,240 \text{ а. о.}$$

парсек (пс) — чисельно рівний відстані, що відповідає річному паралаксу в $1''$.

$$1 \text{ пс} = 206\,265 \text{ а. о.} = 3,26 \text{ св. р.}$$

Приклади розв'язання типових задач

Задача 1

Середній горизонтальний добовий паралакс Місяця дорівнює $57'02''$, його середній кутовий діаметр — $31'05''$. Визначити відстань від Землі до Місяця, а також його лінійний радіус.

Розв'язання

Спершу знайдемо відстань від Землі до Місяця. З формули (3.9) знаходимо

$$L = \frac{6378}{\sin 57'02''} = \frac{6378}{0,0165895} = 384\,460 \text{ км.}$$

Середній кутовий радіус Місяця $\rho = \frac{31'05''}{2} = 15'32'',5$. Підставимо отримане ρ в формулу (2.16):

$$r = 384\,460 \sin 15'32'',5 = 384\,460 \cdot 0,00452 = 1737,7 \text{ км.}$$

Задача 2

Річний паралакс Сіріуса дорівнює $0'',37$. Визначити відстань від Землі до Сіріуса. Виразити відповідь в астрономічних одиницях, світлових роках та парсеках.

Розв'язання

Якщо у формулі (2.15) a вимірювати в а. о., то й знайдена відстань також буде вимірюватись в а. о.

$$L = \frac{206\,265}{0,37} \text{ а. о.} = 557\,473 \text{ а. о.} = 8,8 \text{ св. р.} = 2,7 \text{ пс.}$$

Контрольні запитання

1. Яка величина називається добовим паралаксом?
2. Яким співвідношенням пов'язані добові паралакси світила, виміряні на екваторі та на північному полюсі?
3. Скільком секундам дуги відповідає кут в один радіан?

4. Яким чином можна виміряти річний паралакс?
5. Скільки часу світловий промінь проходить відстань від Сонця до Землі?
6. Як пов'язані між собою одиниці вимірювання відстані в астрономії?

Завдання

1. Середній паралакс Сонця дорівнює $8'',8$, його кутовий радіус — $16'1''$. Визначити середню відстань від Землі до Сонця, а також діаметр Сонця. У скільки разів радіус Сонця більший радіуса Землі?
2. Визначити горизонтальний паралакс Марса в момент, коли ця планета знаходиться найближче до Землі ($L = 0,378$ а. о.)
3. У деякий момент горизонтальний паралакс Юпітера дорівнює $1'',47$. Визначити, на якій відстані від Землі в даний момент знаходиться Юпітер? Відповідь виразити в а. о.
4. Максимальна відстань від Землі до Сатурна дорівнює $1658,5$ млн. км, а його максимальний кутовий діаметр — $20'',1$. Визначити лінійний діаметр Сатурна. Порівняти його з діаметром Землі.
5. Найменша відстань Венери від Землі дорівнює 40 млн. км; у цей момент кутовий радіус Венери дорівнює $32'',4$. Визначити лінійний діаметр цієї планети. Порівняти його з діаметром Землі.
6. Радіосигнал відправлений до Марса, повернувся на Землю через $522,6$ с. На якій відстані від Землі знаходиться в даний момент Марс?
7. Скільки часу потрібно було б уявному потягу, який рухається без зупинок зі швидкістю 100 км/год, щоб доїхати до найближчої зорі — α Центавра, річний паралакс якої дорівнює $0'',76$?
8. Паралакс Спіки дорівнює $0'',02$, а паралакс Веги — $0'',12$. Виразити відстань до цих зірок у парсеках, світлових роках та астрономічних одиницях.

9. Скільки часу світловий промінь рухається від Альтаїра до Землі? Паралакс Альтаїра дорівнює $0''$, 20.

10. Знайдіть відношення довжини сонячної тіні, яку відкидає Нептун до довжини тіні від Землі у момент, коли планети перебувають на середній відстані від Сонця. Великі півосі Нептуна та Землі відповідно дорівнюють 30 а.о та 1 а.о. Діаметр Нептуна у 3,88 разів більший земного.

11. Висота найбільшого вулкану на Марсі 27 км. З якої відстані його може розгледіти космонавт, якщо цю гору видно на краєві диска планети? Роздільна здатність людського ока (гострота зору) складає $1'$.



Рис. 1.11

12. На фото (1.11, автор Кріс Томас) зображена «Астрономічна картинка дня», яка фігурувала на сайті космічного агентства NASA (<https://apod.nasa.gov>) 29 вересня 2010 р. Беручи до уваги, що фотографія зроблена з поверхні Землі, а кутові розміри Місяця та розмах крил літака дорівнюють $30'$ та 45 м відповідно, оцініть на якій висоті над поверхнею Землі летить літак.

13. Астроном-аматор, спостерігаючи за повним сонячним затемненням, відмітив, що воно відбулось, коли Сонце було практично в зеніті. При цьому він знав, що ширина смуги повної тіні становила 44,5 км. Розрахуйте відстань до Місяця в момент затемнення, якщо відомо, що відстань до Сонця від Землі становила 152,1 млн. км (1,017 а.о.). Вкажіть орієнтовно широту місця розташування астронома та час, коли відбулось затемнення?

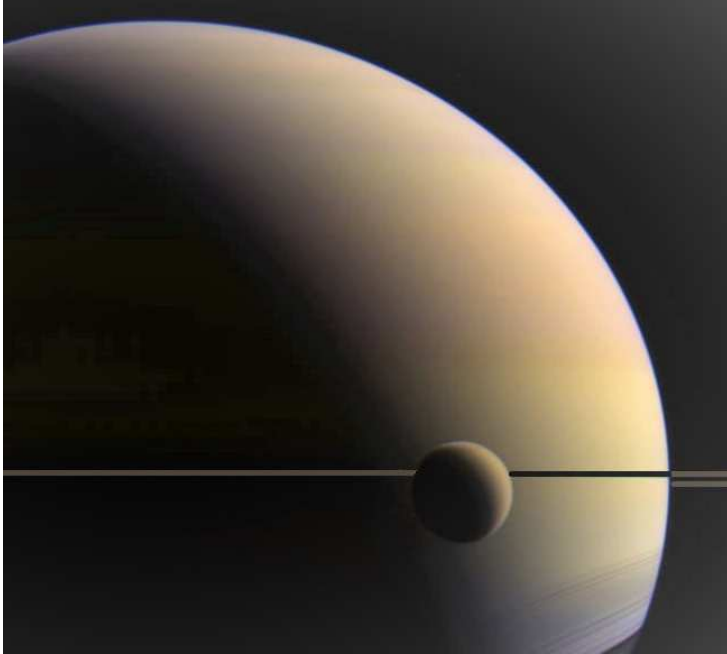


Рис. 1.12

14. На фото (Рис. 1.12), яке отримане з відстані 2,19 мільйона кілометрів від планети космічним зондом “Кассіні” зображено Сатурн та його супутник Титан. Вважаючи, що Титан має сферичну форму, оцініть його радіус, якщо полярний радіус Сатурна 54364 км. Велика піввісь орбіти Титана 1221800 км.

15. Використовуючи фотографію місячного затемнення (Рис. 1.13), оцінити довжину конуса земної тіні. Відстань від Землі

до Місяця вважати 384 500 км, діаметр Місяця 3474 км, радіус Землі 6370 км.



Рис. 1.13

Розділ 2

Елементи небесної механіки

2.1 Рух тіл під дією гравітації

Теоретичні відомості

Рух небесних тіл здійснюється під дією гравітаційної взаємодії, яка описується законом Всесвітнього тяжіння, що був відкритий Ньютоном (1687р.). Згідно із цим законом сила взаємодії між двома тілами масами m_1 та m_2 , відстань між центрами яких дорівнює r , визначається формулою¹

$$\mathbf{F} = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \frac{\mathbf{r}}{r}, \quad (2.1)$$

де $G \simeq 6.6742 \cdot 10^{-11} \frac{\text{м}^3}{\text{кг} \cdot \text{с}^2}$ — гравітаційна стала.

Прискорення вільного падіння на поверхні небесного тіла масою M та радіусом R (поверхнева гравітація) визначається співвідношенням

$$g = G \frac{M}{R^2}. \quad (2.2)$$

¹Зауважимо, що наведена формула закону Всесвітнього тяжіння справедлива для точкових тіл. У випадку, коли тіла мають скінченні просторові розміри, силу притягання між ними слід обчислювати шляхом інтегрування сили у векторній формі по об'ємах двох тіл. Можна показати, що для тіл зі сферично-симетричним розподілом мас відповідне інтегрування дає ту саму силу тяжіння, яку б давали точкові маси розташовані у центрі тіл.

Із закону Всесвітнього тяжіння випливає, що сила гравітаційної взаємодії між тілами прямо пропорційна добутку мас та обернено пропорційна квадрату відстані між тілами. Зауважимо, що гравітаційна взаємодія завжди створює притягання між тілами, або окремими частинами одного тіла.

Відповідна потенціальна енергія гравітаційної взаємодії має вигляд

$$U(r) = -G \frac{m_1 m_2}{r}. \quad (2.3)$$

Ця енергія не залежить від часу та взаємної орієнтації тіл, а визначається лише відстанню між тілами. Наслідком такої залежності потенціальної енергії є виконання двох законів збереження: повної механічної енергії та моменту імпульсу

$$E = \frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} - G \frac{m_1 m_2}{r} = \text{const}, \quad (2.4)$$

$$\mathbf{M} = m_1 [\mathbf{v}_1 \times \mathbf{r}_1] + m_2 [\mathbf{v}_2 \times \mathbf{r}_2] = \text{const}, \quad (2.5)$$

На основі законів динаміки руху тіл під дією гравітації можна розрахувати “космічні швидкості”.

Швидкість руху тіла на коловій орбіті поблизу поверхні планети масою M та радіусом R (без урахування опору повітря) називається *першою космічною швидкістю*. Вона розраховується на основі другого закону Ньютона

$$ma = G \frac{mM}{R^2}, \quad a = \frac{v_I^2}{R},$$

$$v_I = \sqrt{G \frac{M}{R}} = \sqrt{gR}. \quad (2.6)$$

Друга космічна швидкість — мінімальна швидкість, яку необхідно надати тілу на поверхні планети (або іншого масивного небесного

тіла), щоб воно вийшло за межі гравітаційної дії цієї планети. Із закону збереження енергії одержуємо

$$E = \frac{mv_{II}^2}{2} - G\frac{mM}{R} = 0$$

$$v_{II} = \sqrt{2G\frac{M}{R}} = \sqrt{2gR} = \sqrt{2}v_I. \quad (2.7)$$

Теорія руху двох тіл під дією гравітаційної взаємодії відома як задача двох тіл. Розв'язок цієї задачі показує, що два тіла, які притягуються за законом Всесвітнього тяжіння, будуть здійснювати рух навколо спільного центра мас. У залежності від початкових умов (швидкості тіл, їх мас та відстані між ними) тіла можуть обертатись по еліптичних траєкторіях або розсіюватись по параболічних чи гіперболічних траєкторіях (див. Рис. 2.1)

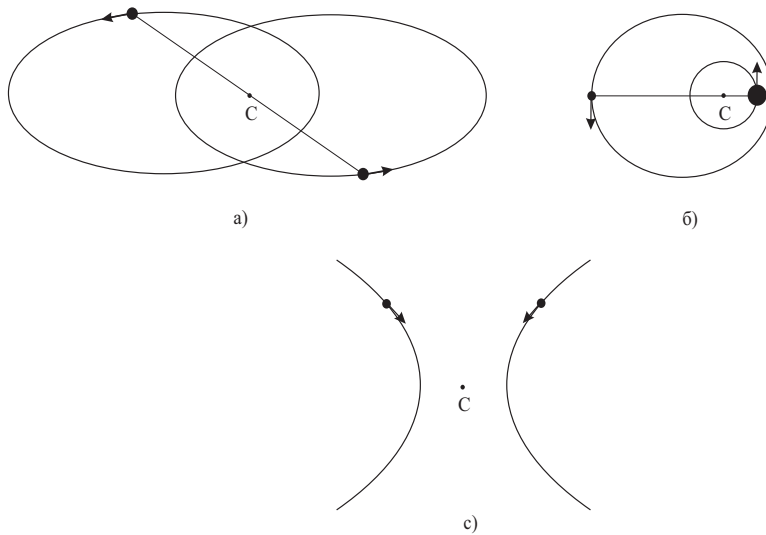


Рис. 2.1: Траєкторії в задачі двох тіл.

Очевидним є той факт, що при обертовальному русові взаємодіючих тіл їх центри мають залишатися на лінії, яка проходить через центр мас, координати якого визначаються за формулою

$$\mathbf{r}_c = \frac{m_1 \mathbf{r}_1 + m_2 \mathbf{r}_2}{m_1 + m_2}. \quad (2.8)$$

Період обертання “подвійної системи” навколо центра мас визначається на основі рівнянь руху тіл (наприклад у формі другого закону Ньютона) і описується формулою

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{G(m_1 + m_2)} a^3,$$

де $a = a_1 + a_2$, a_1 та a_2 — середні відстані тіл від центру мас. Це співвідношення відоме як уточнений третій закон Кеплера (про закони Кеплера див. нижче).

Можна також показати, що виконується наступне співвідношення

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{m_2}{m_1}.$$

З останнього співвідношення випливає, що у випадку, коли маса першого тіла набагато більша за масу другого ($m_1 \gg m_2$), то середній радіус орбіти першого тіла набагато менший радіуса орбіти другого тіла ($a_1 \ll a_2$), тобто набагато масивніше тіло знаходиться поблизу центра мас і практично нерухоме. Така ситуація має місце у випадку взаємодії Сонця із планетою сонячної системи.

Значно складнішою виглядає задача трьох тіл. Для цієї задачі не існує загального розв’язку в квадратурах, лише в окремих випадках (колінеарне розташування або розташування на трикутнику Лагранжа) знайдені точні аналітичні розв’язки.

Точки Лагранжа — це 5 точок в орбітальній конфігурації, де тіло з незначною масою, що зазнає тільки гравітаційного впливу двох взаємопов’язаних масивних тіл, буде перебувати у незмінній позиції щодо них (див. Рис. 2.2).

Усі точки Лагранжа лежать у площині обертання масивних тіл. Точки L_1 , L_2 та L_3 називають *колінеарними*, а точки L_4 та L_5 —

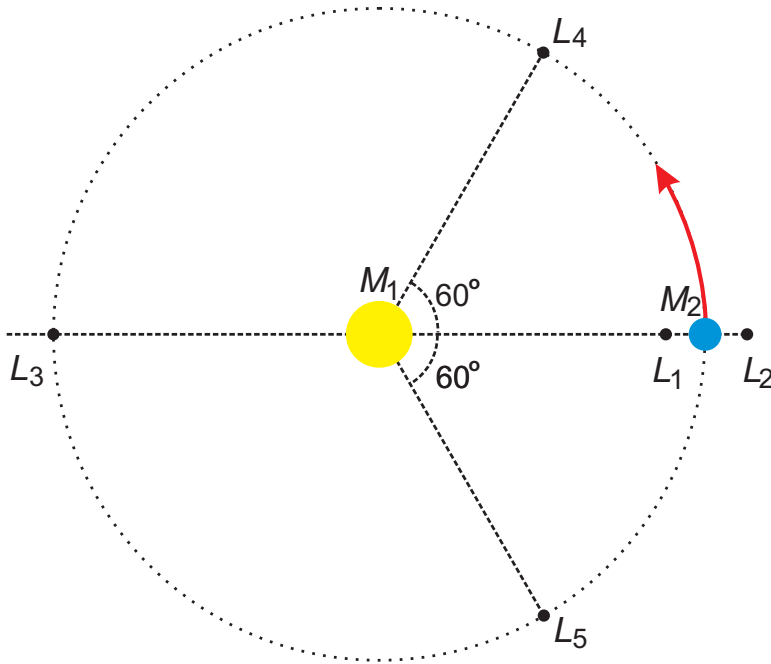


Рис. 2.2: Точки Лагранжа.

троянськими або трикутними. Відстань від центра мас системи до колінарних точок наближено обчислюється за формулами

$$r_1 = R \left[1 - \left(\frac{\alpha}{3} \right)^{1/3} \right],$$

$$r_2 = R \left[1 + \left(\frac{\alpha}{3} \right)^{1/3} \right],$$

$$r_3 = R \left[1 + \frac{5}{12} \alpha \right],$$

де R відстань між масивними тілами, $\alpha = \frac{M_2}{M_1 + M_2}$, M_1 — маса більш масивного тіла, M_2 — маса менш масивного тіла.

Задача трьох тіл має важливе значення для розрахунку орбіт супутників (наприклад у системі “Сонце–Земля–Місяць”). Простір навколо планети, у якому вона сильніше впливає на рух свого супутника,

ніж Сонце називається *сферою Гілла*. Відповідно, орбіти супутників можуть існувати лише всередині сфери Гілла планети. Сфера Гілла простягається від планети до точки Лагранжа L_1 , а в інший бік — приблизно до точки L_2 . Радіус сфери Гілла розраховується за формулою

$$r_H = a \sqrt[3]{\frac{M_1}{3(M_1 + M_2)}},$$

де a — велика піввісь орбіти планети.

Зауважимо, що усередині сфери Гілла притягання супутника збоку планети не обов'язково має бути більше за притягання супутника збоку Сонця. Наприклад Сонце притягує Місяць у 2.2 рази сильніше ніж Земля. Для того, щоб планета утримувала супутник необхідно, щоб прискорення, якого набуває супутник під дією гравітації планети, перевищувало різницю прискорень, яких набувають планета та супутник під дією Сонця.

Точки Лагранжа також відіграють важливу роль у космічних місіях. Наприклад, якщо об'єкт розташований у точці Лагранжа L_2 , то на нього не потрапляють сонячні промені, оскільки він завжди знаходиться у тіні від Землі. На 2019 рік запланований запуск і подальше розміщення у точці Лагранжа L_2 системи "Земля–Сонце" космічного телескопа Джеймса Вебба JWST (James Webb Space Telescope), який має замінити телескоп «Габбл». У точці Лагранжа L_1 системи "Земля–Сонце" із 1996 року функціонує сонячна та геліосферична обсерваторія SOHO (Solar and Heliospheric Observatory). Також на 2020 рік запланований запуск космічної місії Euclid, метою якої є дослідження темної матерії та темної енергії. Відповідне обладнання буде розміщене у точці Лагранжа L_2 системи "Земля–Сонце".

Приклади розв'язання типових задач

Задача 1

Розрахувати поверхневу гравітацію та космічні швидкості для Венери. Радіус планети 6052 км, маса — 4.87×10^{24} кг.

Розв'язання

Поверхнева гравітація за означенням (3.10)

$$g = G \frac{M}{R^2} = 6.67 \times 10^{-11} \frac{4.87 \times 10^{24}}{(6052 \times 10^3)^2} = 8.87 \text{ м/с}^2.$$

Перша космічна швидкість (2.14)

$$v_I = \sqrt{G \frac{M}{R}} = \sqrt{gR} = \sqrt{8.87 \times 6052 \times 10^3} = 7.33 \text{ км/с.}$$

Друга космічна швидкість (2.15)

$$v_{II} = \sqrt{2}v_I = 10.36 \text{ км/с.}$$

Задача 2

Визначити положення центру мас системи “Земля–Сонце”. Маса Сонця $M_\odot = 330\,000M_\oplus$. Відстань від Землі до Сонця 1 а.о. = 1.496×10^8 км.

Розв'язання

Нехай початок відліку знаходиться у центрі Сонця. За означенням центру мас системи (2.16)

$$x_c = \frac{m_1x_1 + m_2x_2}{m_1 + m_2} = \frac{M_\odot x_\odot + M_\oplus x_\oplus}{M_\odot + M_\oplus}.$$

$$x_c = \frac{M_\oplus \times 1 \text{ а.о.}}{330\,000M_\oplus + M_\oplus} = \frac{1 \text{ а.о.}}{330\,001} \simeq 453 \text{ км.}$$

Таким чином, центр мас системи “Земля–Сонце” розміщений уздовж ліній, що сполучає Землю та Сонце на відстані 453 км від центру Сонця.

Контрольні запитання

1. Сформулюйте закон Всесвітнього тяжіння.
2. Назвіть, які механічні величини зберігаються під час руху двох тіл, що взаємодіють гравітаційно.
3. Поясніть, завдяки чому траєкторії планет є плоскими кривими.
4. Оцініть положення центра мас системи “Земля – Сонце”.
5. Назвіть можливі типи траєкторій у задачі двох тіл. Від яких фізичних параметрів залежить форма траєкторії?
6. Поясніть, у чому полягає відмінність між першою та другою космічними швидкостями?

Завдання

1. Розрахуйте поверхневу гравітацію та космічні швидкості для Марса.
2. Визначте відношення маси Землі до маси Марса, якщо супутник Фобос віддалений від Марса на 9300 км і здійснює один оберт навколо планети за 7 год 40 хв. Відстань від Землі до Місяця 380 тисяч кілометрів. Місяць здійснює оберт навколо Землі за 27 діб.
3. Оцініть масу центральної зорі в системі Trappist-1, якщо екзопланета Trappist-1c знаходиться на середній відстані 0.0158 а.о. від зорі і здійснює повний оберт навколо неї за 2.42 доби.
4. Знайдіть положення центра мас для системи “Земля–Місяць”.
5. Розрахуйте відстані до колінеарних точок Лагранжа системи “Земля – Сонце”.
6. Знайдіть відстань між компонентами подвійної зорі, яка обертається навколо центра інерції з періодом T . Сумарна маса компонент зорі M .
7. Визначте маси компонентів подвійної системи $_1$ та $_2$, якщо $a_2 = 2a_1$, а сума мас компонентів дорівнює $M_1 + M_2 = 6M_{\odot}$.

8. Нехай у подвійній системі відбулося перенесення речовини з головного компоненту A на компонент B . Визначте, як після цього зміняться великі півосі a_A та a_B компонентів, якщо спочатку їх маси були M_A та M_B ($M_A > M_B$), і маса кожної зорі змінилася на величину ΔM (консервативне перенесення). Вважайте, що $\Delta M \ll M_A$ та M_B .

9. Супутник Марса, рухаючись по коловій орбіті радіуса r , після короткочасного гальмування перейшов на еліптичну орбіту, яка доторкається до поверхні Марса. Визначте час падіння супутника на планету, якщо її радіус R , маса M .

10. Визначте радіус сфери Гілла для системи “Юпітер – Сонце”. Маса Юпітера $1/1047M_\odot$. Середня відстань від Юпітера до Сонця 5.2 а.о.

11. Подвійний астероїд — це система з двох астероїдів, гравітаційно зв'язаних один з одним, які обертаються навколо спільного центра мас. Такими є Іда, Калліопа, Євгенія, Камілла, Герміона та інші. Оцініть найбільшу можливу відстань астероїда діаметром 20 км Головного поясу до його супутника — астероїда з меншою масою, при якій система ще буде існувати. Вважайте, що характерна густина речовини астероїдів дорівнює 3000 кг/м^3 і що головний астероїд має сферичну форму.

12. Уявімо собі, що майбутні колоністи Марса вирішили повернутися на Землю. Для цього вони збудували космічний корабель і вивели його на колову геліоцентричну орбіту неподалік від орбіти Марса, яку можна вважати коловою. Яку мінімальну швидкість має додатково отримати космічний корабель, щоб він міг потрапити на орбіту Землі? Обчисліть модуль та напрям вектора цієї швидкості.

13. Знайдіть мінімальний період обертання пульсара. Вважайте, що його середня густина дорівнює ядерній густині ($2.8 \times 10^{17} \text{ кг/м}^3$).

14. У масивній зорі, ядро з масою $2M_\odot$ та густиною 10^9 кг/м^3 зазнає низку нестійкостей і колапсує у нейтронну зорю радіусом 10 км. Оцініть характерний час колапсу.

15. За радіуси чорних дір приймають так званий гравітаційний радіус (радіус Шварцшильда). Його значення збігається із радіусом тіла, для якого друга космічна швидкість дорівнює швидкості світла. Наймасивніша з чорних дір, що була відкрита у центрі галактики NGC 4889 (сузір'я Волосся Вероніки), за оцінками має масу $2.1 \times 10^{10} M_{\odot}$. Визначте у скільки разів середня густина цієї чорної діри відрізняється від ядерної густини. За ядерну густину можна прийняти середню густину наймасивнішої нейтронної зорі Vela X-1 (сузір'я Вітрила) із масою $1.88 M_{\odot}$ та радіусом 10 км.

16. Розрахуйте, до якого радіусу необхідно стиснути Землю ($M_{\oplus} = 5.97 \times 10^{24}$ кг), щоб вона стала чорною дірою.

2.2 Закони Кеплера та конфігурації планет

Теоретичні відомості

Розглянемо застосування законів небесної механіки до опису кінематики сонячної системи.

Сонячна система складається з однієї зірки (Сонця), восьми великих планет та їхніх супутників, а також менших небесних тіл, таких як астероїди, комети та метеорити.

Центральним тілом сонячної системи є Сонце. Навколо Сонця обертається вісім великих планет: Меркурій (0,387 а. о.), Венера (0,723 а. о.), Земля (1 а. о.), Марс (1,524 а. о.), Юпітер (5,203 а. о.), Сатурн (9,539 а. о.), Уран (19,191 а. о.) і Нептун (30,071 а. о.).²

Рух планет навколо Сонця здійснюється під дією сили Всесвітнього тяжіння і описується трьома законами Йогана Кеплера, які він встановив емпіричним шляхом на основі аналізу результатів власних спостережень та 20-річних спостережень Тіхо Браге. Ці закони формулюються наступним чином:

1. Усі планети рухаються по еліпсах, в одному із фокусів яких (спільного для всіх планет) знаходиться Сонце (1609 р.).
2. Радіус-вектор планети, проведений із Сонця, за однакові проміжки часу описує однакові площі (1609 р.).
3. Квадрати періодів обертання планет навколо Сонця відносяться, як куби їх середніх відстаней до Сонця (1619 р.):

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}. \quad (2.9)$$

²У дужках зазначено середню відстань планети до Сонця.

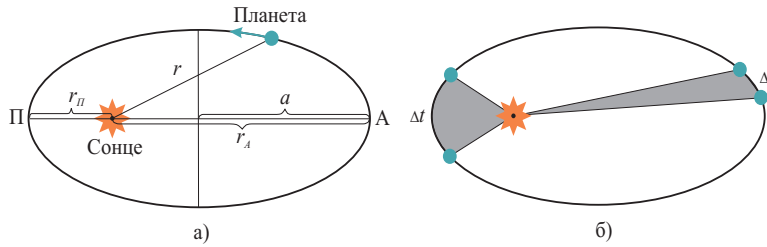


Рис. 2.3: Ілюстрація першого та другого законів Кеплера.

Найближча до Сонця точка орбіти планети називається *перигелієм* (П), а найбільш віддалена — *афелієм* (А) (Рис. 2.3).

Перигелійна $r_{\text{П}}$ та афелійна $r_{\text{А}}$ віддалі пов'язані з ексцентриситетом e і великою піввіссю a еліпса співвідношеннями:

$$r_{\text{П}} = a(1 - e), \quad r_{\text{А}} = a(1 + e). \quad (2.10)$$

Звідси легко отримуються зворотні формули:

$$a = \frac{r_{\text{А}} + r_{\text{П}}}{2}, \quad e = \frac{r_{\text{А}} - r_{\text{П}}}{2a}. \quad (2.11)$$

З другого закону Кеплера (закону збереження проекції моменту імпульсу)

$$r_{\text{А}}v_{\text{А}} = r_{\text{П}}v_{\text{П}}$$

слідуює, що лінійна швидкість руху планети по орбіті є нерівномірною. Вона досягає максимального значення у перигелії і є мінімальною в афелії. Перигелійна і афелійна швидкості визначаються зі співвідношень

$$v_{\text{П}} = v_c \sqrt{\frac{1+e}{1-e}}, \quad v_{\text{А}} = v_c \sqrt{\frac{1-e}{1+e}}. \quad (2.12)$$

Тут $v_c = \sqrt{\frac{G(M_{\odot} + m)}{a}}$ — середня швидкість, що відповідає рухові планети масою m по коловій орбіті радіуса a .

Середня швидкість планети виражається через період її обертання навколо Сонця T за допомогою співвідношення:

$$v_c = \frac{2\pi a}{T}. \quad (2.13)$$

Зауважимо, що період обертання небесного тіла навколо центра тяжіння називається *сидеричним*. У третьому законі Кеплера та у формулі (2.13) фігурує саме сидеричний період.

Сидеричний період обертання Землі відрізняється від сидеричних періодів обертання інших планет. Це призводить до того, що положення планет відносно Сонця та Землі безперервно змінюються.

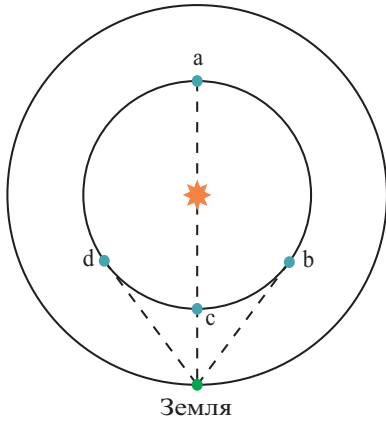


Рис. 2.4: Конфігурації нижньої планети.

Положення планет відносно Сонця та Землі називаються *конфігураціями планет*. Серед безлічі конфігурацій виділяють декілька особливих положень. Розрізняють чотири конфігурації *нижніх планет* (Меркурій, Венера) і чотири конфігурації *верхніх планет* (Марс, Юпітер, Сатурн, Уран, Нептун).

Для нижніх планет особливими є наступні положення (Рис. 2.4): а) верхнє сполучення; б) західна елонгація; с) нижнє сполучення; д) східна елонгація.

У моменти *сполучень*, коли екліптична довгота планети дорівнює довготі Сонця, нижня планета, перебуваючи на одній прямій із Сонцем та Землею, ховається у сонячних променях.

У моменти *елонгацій* нижня планета досягає найбільшого кутного відхилення від Сонця. Під час східної елонгації планета спостерігається на сході, у променях вечірньої заграви, після заходу Сонця. При західній елонгації планету видно на сході перед світанком.

Найбільша елонгація Венери дорівнює 48° , Меркурія — 28° . Через невелику елонгацію Меркурій майже завжди закритий променями ранкової або вечірньої заграви.

Для верхніх планет характерними є наступні конфігурації (Рис. 2.5): а) сполучення; б) західна квадратура; с) протистояння; д) східна квадратура.

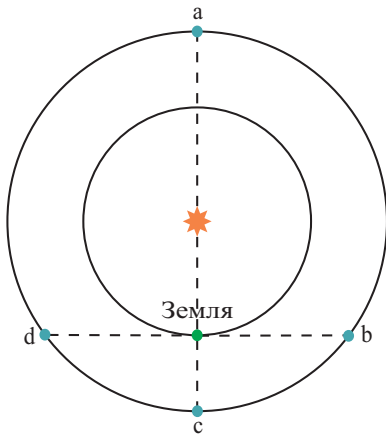


Рис. 2.5: Конфігурації верхньої планети.

Під час *протистояння* верхня планета перебуває на небосхилі у точці, протилежній напрямку на Сонце. В моменти *квадратур* верхня планета перебуває на кутовій відстані 90° від Сонця. Положення, коли Земля, Сонце і верхня планета лежать на одній прямій, називається *сполученням* верхньої планети з Сонцем.

Видимий рух верхніх планет відрізняється від руху нижніх планет. Коли верхню планету видно після заходу Сонця на західному небосхилі, вона переміщується на фоні зірок із заходу на схід (прямий рух), як і Сонце. Оскільки швидкість руху Сонця по екліптиці більша швидкості руху довільної верхньої планети, то воно поступово наздоганяє планету, ховаючи її в своїх променях. Коли Сонце переганяє верхню планету, вона стає видимою на сході перед світанком. Швидкість прямого руху планети поступово зменшується, планета зупиняється і починає назадній рух зі сходу на захід. Через деякий час планета знову зупиняється, змінює напрямок свого руху на прямиий, і усі явища повторюються у тому ж порядку.

Повторюваність конфігурацій планет характеризується їх синодичним періодом обертання.

Синодичним періодом обертання планети S називається проміжок часу між двома послідовними однойменними конфігураціями планети. За своєю суттю синодичний період — це період обертання

планети навколо Сонця розрахований в системі відліку пов'язаній із Землею. Для знаходження періоду обертання планети навколо Сонця у системі відліку пов'язаній із Сонцем, тобто сидеричного або зоряного періоду потрібно скористатися формулами перетворення кутової швидкості при переході від нерухомої до рухомої системи відліку. Нехай ω — кутова швидкість обертання планети навколо Сонця в системі відліку “Сонце”, ω_S — кутова швидкість обертання планети навколо Сонця в системі відліку “Земля”, ω_{\oplus} — кутова швидкість обертання Землі навколо Сонця в системі відліку “Сонце”. Оскільки обертання усіх планет сонячної системи навколо Сонця відбувається в одному напрямкові, то одержуємо

$$\omega_S = \pm(\omega - \omega_{\oplus}).$$

Із урахуванням співвідношення $\omega = \frac{2\pi}{T}$, одержуємо

$$\frac{1}{S} = \pm \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\oplus}} \right).$$

Таким чином синодичний період обертання планети S пов'язаний з її сидеричним періодом T співвідношенням:

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\oplus}} \quad (\text{для внутрішніх планет}); \quad (2.14)$$

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{T_{\oplus}} - \frac{1}{T} \quad (\text{для зовнішніх планет}). \quad (2.15)$$

Тут $T_{\oplus} = 365,26$ діб = 1 рік — сидеричний період обертання Землі.

Визначаючи зі спостережень синодичні періоди обертань планет, на основі формул (2.14) та (2.15) знаходимо сидеричний період обертання планети, тобто час, протягом якого планета робить оберт навколо Сонця.

Якщо відомий сидеричний період обертання планети, то за допомогою третього закону Кеплера можна визначити середню відстань від Сонця до даної планети.

Для цього у формулі () покладають $T_2 = 1$ рік, $a_2 = 1$ а. о., тоді сидеричний період обертання планети — T (у роках), і її середня відстань від Сонця — a (в а. о.) пов'язані співвідношенням

$$T^2 = a^3. \quad (2.16)$$

На закінчення зауважимо, що для визначення орбіти планети недостатньо знати лише її велику піввісь a та ексцентриситет e . До цих параметрів слід додати *нахил орбіти* i — кут між площинами орбіти планети та екліптикою. Найбільший нахил орбіти у Меркурія — $i = 7^\circ 00' 12''$, найменший в Урана — $i = 0^\circ 46' 22''$. Через невеликий нахил орбіт планет сонячної системи, можна наближено вважати, що всі планети лежать в одній площині.

Приклади розв'язання типових задач

Задача 1

Найбільша елонгація Меркурія змінюється внаслідок еліптичності його орбіти в межах від $\psi_{\text{П}} = 18^\circ$ до $\psi_{\text{А}} = 28^\circ$ (Рис. 2.6). Обчислити перигелійну і афелійну відстань Меркурія від Сонця, ексцентриситет і велику піввісь його орбіти, а також сидеричний та синодичний періоди обертання навколо Сонця. Віддаль від Землі до Сонця $a_{\oplus} = 1$ а. о.

Розв'язання

Спочатку визначаємо перигелійну $r_{\text{П}}$ та афелійну $r_{\text{А}}$ віддалі Меркурія від Сонця:

$$\begin{aligned} r_{\text{П}} &= a_{\oplus} \sin \psi_{\text{П}} = a_{\oplus} \sin 18^\circ = \\ &= 0,309 \text{ а. о.}, \\ r_{\text{А}} &= a_{\oplus} \sin \psi_{\text{А}} = a_{\oplus} \sin 28^\circ = \\ &= 0,469 \text{ а. о.} \end{aligned}$$

На основі формул (3.9) знаходимо

$$a = \frac{r_A + r_P}{2} = \frac{0,469 + 0,309}{2} = 0,389 \text{ а. о.},$$

$$e = \frac{r_A - r_P}{2a} = \frac{0,469 - 0,309}{2 \cdot 0,389} = 0,2.$$

З третього закону Кеплера у формі (2.16) знаходимо сидеричний період обертання Меркурія:

$$T = \sqrt{a^3} = \sqrt{0,389^3} = 0,242 \text{ року} = 88 \text{ діб.}$$

Оскільки Меркурій нижня планета, то синодичний період обертання будемо шукати з формули (2.14):

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\oplus}}.$$

Звідси

$$S = \frac{T \cdot T_{\oplus}}{T_{\oplus} - T} = \frac{0,242 \cdot 1}{1 - 0,242} = 0,319 \text{ року} = 116 \text{ діб.}$$

Задача 2

Визначити середній добовий рух по орбіті та середню орбітальну швидкість планети Нептун, якщо його велика піввісь $a = 30,071 \text{ а. о.}$

Розв'язання З третього закону Кеплера знаходимо сидеричний період обертання Нептуна:

$$T = \sqrt{a^3} = \sqrt{30,071^3} = 164,9 \text{ років} = 60188,66 \text{ діб.}$$

Знайдемо середній добовий рух Нептуна по орбіті — кутову відстань, яку проходить планета за добу:

$$n = \frac{360^\circ}{T^d} = \frac{360^\circ}{60188,66} = 0,006^\circ.$$

Середню орбітальну швидкість визначимо з формули (2.13):

$$v_c = \frac{2\pi a}{T} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 30,071 \cdot 149\,597\,870}{60188,66 \cdot 24 \cdot 3600} = 5,43 \text{ км/с.}$$

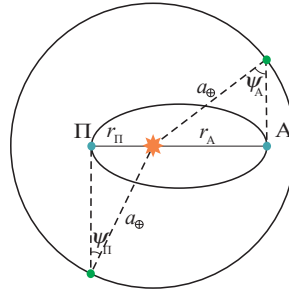


Рис. 2.6: Елонгації Меркурія.

Контрольні запитання

1. Сформулювати закони руху планет навколо Сонця.
2. Пояснити причину видимих петлеподібних рухів планет серед зір.
3. Чи може відбуватись проходження Марса по диску Сонця?
4. Чи може спостерігатися Меркурій вечорами на сході?
5. В яку пору року вечірнє спостереження Меркурія є найбільш сприятливим?
6. В яких точках орбіти швидкість зміни відстані планети від Землі є найбільшою та найменшою?

Завдання

1. Найменша відстань Землі до Сонця дорівнює 0,983 а. о., найбільша — 1,0167 а. о. Знайти велику піввісь та ексцентриситет орбіти Землі. Визначити середній добовий рух Землі по орбіті, її середню орбітальну швидкість, а також швидкість планети в перигелії та афелії. Зобразити на одному рисунку еліпс, який моделює орбіту Землі та концентричне до нього коло радіусом 1 а. о. (рисунок виконати на міліметровому папері з масштабом 1 а. о.=10 см).

2. У 1766 році Й. Д. Тіциусом було запропоноване емпіричне правило для визначення середніх відстаней від Сонця до планет. Нині воно відоме як правило Тіциуса–Боде. Згідно із цим правилом, середня відстань планети із номером n від Сонця виражена в а.о. визначається співвідношенням $r_n = 0.4 + 0.3 \times 2^n$, $n = -\infty, 0, 1, 2, \dots$. Використовуючи правило Тіциуса–Боде визначте середні відстані для усіх планет сонячної системи. Порівняйте одержаний результат із реальними значеннями.

3. Визначити середню і афелійну віддаль Урана від Сонця, а також ексцентриситет його орбіти, якщо відомо, що сидеричний період обертання Урана дорівнює 84,01 роки, а його віддаль від Сонця в перигелії — 18,275 а. о.

4. Віддаль комети Аренда від Сонця у перигелії дорівнює 1,8317 а. о., а в афелії — 6,029 а. о. Визначити середню відстань комети від Сонця та її сидеричний період.

5. Визначити кутову та лінійну швидкість Сатурна, якщо його середня віддаль від Сонця дорівнює 9,359 а. о.

6. Протистояння Юпітера відбулося 15 липня. Коли воно відбудеться знову? Середня віддаль Юпітера від Сонця дорівнює 5,203 а. о.

7. У результаті спостережень за рухом Юпітера упродовж доби було виявлено, що планета перебувала на висоті 45° у верхній кульмінації на південь від зеніту і на висоті 2° у нижній кульмінації. Оцініть час, від моменту даного спостереження, через який Юпітер зійде над горизонтом у точці сходу. Нахилом орбіти Юпітера до екліптики можна знехтувати. Середня відстань Юпітера від Сонця 5,2 а. о.

8. Найбільша елонгація Венери коливається внаслідок еліптичності її орбіти в межах від 43° до 48° . Обчислити перигелійну і афелійну віддаль Венери від Сонця, ексцентриситет і велику піввісь його орбіти, а також сидеричний та синодичний періоди обертання навколо Сонця.

9. Протистояння малої планети повторюється через кожні 511 діб. На якій середній віддалі від Сонця вона знаходиться?

10. Пан, найближчий супутник Сатурна, робить повний оберт навколо планети за $0,575^d$, а найбільш віддалений супутник, Феба, — за $550,48^d$. Визначити відношення їх середніх відстаней до Сатурна.

11. Нижнє сполучення Венери відбулося 26 січня. Визначити календарні дати, коли відбудуться її чергова найбільша західна елонгація (47°) та наступне нижнє сполучення. Середня відстань Венери до Сонця дорівнює 0,7233 а. о.

12. Деяка планета масою M рухається навколо Сонця по еліптичній орбіті таким чином, що її відстань до Сонця у перигелії r_{\min} , а в афелії r_{\max} . Визначити період обертання планети навколо Сонця.

13. Час від часу жителі Землі спостерігають заворожливе астрономічне явище — малий парад планет. При цьому Венера, Марс та Юпітер перебувають в сполученні. Розрахуйте мінімальний проміжок часу, через який Венера та Марс знову будуть перебувати у сполученні. Орбіти планет вважати коловими. Сидеричні періоди обертань планет $T_V = 225^d$, $T_M = 689^d$.

14. У таблиці наведені календарні дати послідовних найбільших західних елонгацій Меркурія у 2015 та 2016 роках. На основі цих даних розрахуйте орієнтовні дати наступних найбільших західних елонгацій Меркурія у 2017 – 2018 роках, а також середню відстань планети до Сонця.

2015	2016	2017	2018
24.02	06.02		
24.06	05.06		
15.10	28.09		

Розділ 3

Елементи астрофізики

3.1 Фотометрія небесних світил

Теоретичні відомості

Блиск світил

Вивчення фізичної природи небесних світил засноване на кількісному та якісному аналізові їхнього електромагнітного випромінювання. Мірою інтенсивності видимого випромінювання небесних світил є *блиск* — освітленість, що створена небесним світилом на приймачі променевої енергії (око, фотопластинка, світлочутлива матриця, тощо).

Блиск світил вимірюється не у фізичних одиницях освітленості (люксах), а у відносних одиницях — *зоряних величинах*. Оцінка блиску світил зоряними величинами була запроваджена грецьким астрономом Гіппархом (II ст. до н. е.). Вона заснована на фізіології сприйняття світла людським оком, яке чітко відрізняє різницю інтенсивності джерел світла, якщо одне із них яскравіше другого приблизно у 2.5 рази.¹ Найяскравіші зорі Гіппарх назвав зорями 1-ї величини, менш яскраві — зорями 2-ї величини і т.д., а ледве помітні —

¹Така властивість ока описується психофізіологічним законом Вебера-Фехнера (XIX ст.). Згідно цього закону: зміна будь-якого сприйняття прямо пропорційна відносній зміні подразнення, тобто, коли інтенсивність якої-небудь фізичної величини збільшувати в геометричній прогресії, то відчуття цієї величини буде збільшуватись в арифметичній прогресії. Як наслідок, відчуття пропорційне логарифму інтенсивності стимулювання.

6-ї величини. Блиск кожної наступної групи зір зменшується в 2,512 разів у порівнянні з попередньою.

Надалі блиск світила будемо позначати через E , а зоряну величину — m (від лат. *magnitude* — величина). Для кількісного розрахунку зоряних величин використовують правило Погсона: при відмінності блиску світил у 100 разів різниця їх зоряних величин дорівнює 5. Відповідно до цього правила має місце формула Погсона

$$m_2 - m_1 = -2,512 \lg \frac{E_2}{E_1}, \quad (3.1)$$

$$\lg \frac{E_2}{E_1} = -0,4(m_2 - m_1), \quad (3.2)$$

$$\frac{E_2}{E_1} = 10^{0,4(m_1 - m_2)} = 2,512^{m_1 - m_2}. \quad (3.3)$$

При різниці зоряних величин в $\Delta m = 1^m$ блиск світил відрізняється у $10^{0,4} \simeq 2,512$. Чим світило яскравіше, тим меншою його є зоряна величина.

Шкала зоряних величин є відносною, тому виникає необхідність вибору певного «еталонного» світила для відліку блиску. Вимірювання блиску світил також залежить від властивостей приймачів випромінювання, кожен із яких має свою спектральну чутливість. Сумарний потік випромінювання небесним світилом у всьому діапазоні спектру характеризується *болометричною зоряною величиною*.

Найбільш розповсюджена фотометрична система — система UVV, що має три смуги (спектральні діапазони, в яких здійснюються вимірювання):

- ультрафіолетова зоряна величина (U) — визначається в ультрафіолетовому діапазоні;
- «синя» зоряна величина (B) — визначається в синьому діапазоні;

- візуальна зоряна величина (V) — визначається у видимому діапазоні, причому крива спектральної чутливості вибрана так, щоб найкраще відповідати людському зору (око найбільш чутливе до жовто-зеленого світла з довжиною хвилі близько 555 нм.).

Еталонним світилом у системі візуальних зоряних величин є α Малої Ведмедиці ($m = 2^m, 12$). Декілька яскравих зір на небосхилі нашої півкулі мають зоряну величину, близьку до нуля (Вега $m = 0^m, 03$, Арктур $m = -0^m, 05$). Найяскравіша зоря нашого зоряного неба — Сіріус (α Великого Пса) $m = -1^m, 58$. У планет блиск змінюється в залежності від умов їх освітлення Сонцем. Максимальний блиск Венери $m = -4^m, 9$, Юпітера $m = -2^m, 94$.

Візуальний блиск Сонця $m_{\odot} = -26^m, 74$, Місяця у повні $m = -12^m, 74$. Зауважимо, що незброєне людське око ще може сприймати світила із блиском, що відповідає приблизно $m = 6^m$ зоряній величині.

Для візуального спостереження світил із зоряною величиною, що перевищує 6^m , використовують оптичні телескопи. Граничну зоряну величину світила $m_{\text{ТТ}}$, яке ще видно у телескоп (для світила, що перебуває у зеніті) називають *проникною силою телескопа*. Ця величина визначається діаметром D об'єктива телескопа (дзеркала).

Оскільки освітленість обернено пропорційна площі приймача променевої енергії, то блиск світила, який реєструє телескоп і людське око відрізняється у D^2/d^2 разів, де d — діаметр людського ока. Звідси

$$m_{\text{ТТ}} - m_{\text{око}} = -2,512 \lg \frac{E_{\text{ТТ}}}{E_{\text{око}}} \simeq 5 \lg \frac{D}{d}.$$

$$m_{\text{ТТ}} = m_{\text{око}} + 3,9^m - 5 \lg D.$$

Враховуючи, що діаметр зіниці людського ока $d \approx 6$ мм, одержимо значення проникної сили телескопа

$$m_{\text{ГТ}} = 6^m + 5 \lg \frac{D}{5} = 2^m, 1 + 5 \lg D. \quad (3.4)$$

Тут діаметр D вимірюється в міліметрах.

Абсолютна зоряна величина

Видимий блиск зорі визначається не лише її потужністю випромінювання, а й відстанню до неї. Тобто дві зорі із однаковою потужністю (світністю), які знаходяться на різних відстаннях до спостерігача будуть мати різні візуальні зоряні величини. Щоб порівняти потужності випромінювання двох зір, необхідно вирахувати їх зоряні величини які б вони мали, знаходячись на однаковій відстані до спостерігача. Стандартною відстанню для порівняння прийнято 10 пк. Зоряна величина світила на відстані 10 пк називається *абсолютною зоряною величиною* M .

Як відомо, освітленість обернено пропорційна квадрату відстані від джерела до приймача променевої енергії. Тому для світила, що знаходиться на відстані r видима зоряна величина пов'язана із абсолютною зоряною величиною співвідношенням

$$M - m = -2,512 \lg \frac{E_{10\text{пк}}}{E_r} = -2,512 \lg \frac{r^2}{10^2} \simeq 5 - 5 \lg r.$$

Звідси для абсолютної зоряної величини одержуємо

$$M = m + 5 - 5 \lg r. \quad (3.5)$$

Зазвичай відстань до зір визначається через річний паралакс π зі співвідношення $r = 1/\pi$, де паралакс вимірюється у секундах градуса, а відстань у парсеках. Тоді

$$M = m + 5 + 5 \lg \pi.$$

Якщо візуальний блиск Сонця $m_{\odot} = -26^m, 74$, то йому відповідає абсолютна зоряна величина $M_{\odot} = +4^m, 83$, тобто на відстані 10 пк Сонце виглядало б ледь помітною зорею.

Світність зір

Знаючи абсолютну зоряну величину можна оцінити *світність зорі* L , тобто потужність її випромінювання. Якщо E — освітленість, створена зорею на межі земної атмосфери, то світність зорі

$$L = 4\pi r^2 E, \quad (3.6)$$

де r відстань до зорі.

Світність двох зір пов'язана із їх абсолютними зоряними величинами співвідношенням

$$\lg \frac{L_1}{L_2} = 0,4(M_2 - M_1).$$

Звідси світність зорі, виражена в одиницях світності Сонця,

$$\lg L = 0,4(M_\odot - M). \quad (3.7)$$

З іншого боку, світність зорі визначається потужністю її електромагнітного випромінювання. Для розрахунку цієї потужності використовують теорію випромінювання абсолютно чорного тіла. Згідно із *законом Стефана-Больцмана*, потужність випромінювання одиниці площі поверхні абсолютно чорного тіла визначається абсолютною температурою тіла T

$$u = \sigma T^4, \quad \sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K}^4).$$

Сумарна потужність випромінювання з усієї поверхні зорі

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4, \quad (3.8)$$

де R — радіус зорі.

Кутові радіуси найближчих зір визначають за допомогою оптичних інтерферометрів. Для віддалених об'єктів їх кутові розміри визначають на основі формул (3.6) та (3.7).

Спектральна класифікація зір

Аналіз спектрів випромінювання зір надає нам інформацію про фізичні умови в атмосфері зорі, оскільки саме там формується спектр. Зокрема можемо одержати інформацію про хімічний склад атмосфери зорі, ефективну температуру, швидкість осьового обертання, поверхневу гравітацію тощо.

Відповідно до закону зміщення Віна максимум потоку випромінювання локалізується в певному діапазоні довжин хвиль поблизу λ_{max} , який залежить від ефективної температури:

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T}, \quad b = 0,00289 \text{ м} \cdot \text{К}.$$

Таким чином, зорі різних спектральних класів мають різну ефективну температуру й різний візуальний колір: від яскраво-блакитного (гарячі зорі з $T = 60\,000 - 50\,000 \text{ К}$) до темно-червоного (холодні зорі з $T = 3000 - 1000 \text{ К}$).

Загальноживаною є класифікація спектральних класів розроблена Вільямом Морганом та Філіпом Кінаном (*йеркська класифікація*), що ґрунтується на значеннях ефективної температури зорі та її світності. Класифікація, що заснована лише на ефективній температурі називається *гарвардською класифікацією спектральних класів*. Для позначення спектральної класифікації зір послідовно вживають латинські літери O, B, A, F, G, K та M, де клас O відповідає найгарячішим зорям, а класи K та M – найхолоднішим зорям.²

Оскільки ефективна температура зорі визначає її спектральний клас, а також світність (формула (3.7)), то між світністю та спектральним класом має існувати залежність. Така залежність була побудована 1910 року Ейнаром Герцшпрунгом та Генрі Ресселом. Вона має форму діаграми і використовується для класифікації зір та

²Щоб легше запам'ятати цю послідовність використовують мнемонічну фразу "O Be A Fine Girl, Kiss Me".

відповідає сучасній уяві про зоряну еволюцію. Діаграма Герцшпрунга–Рессела, або діаграма “спектр-світність” зображена на Рис. 3.1.

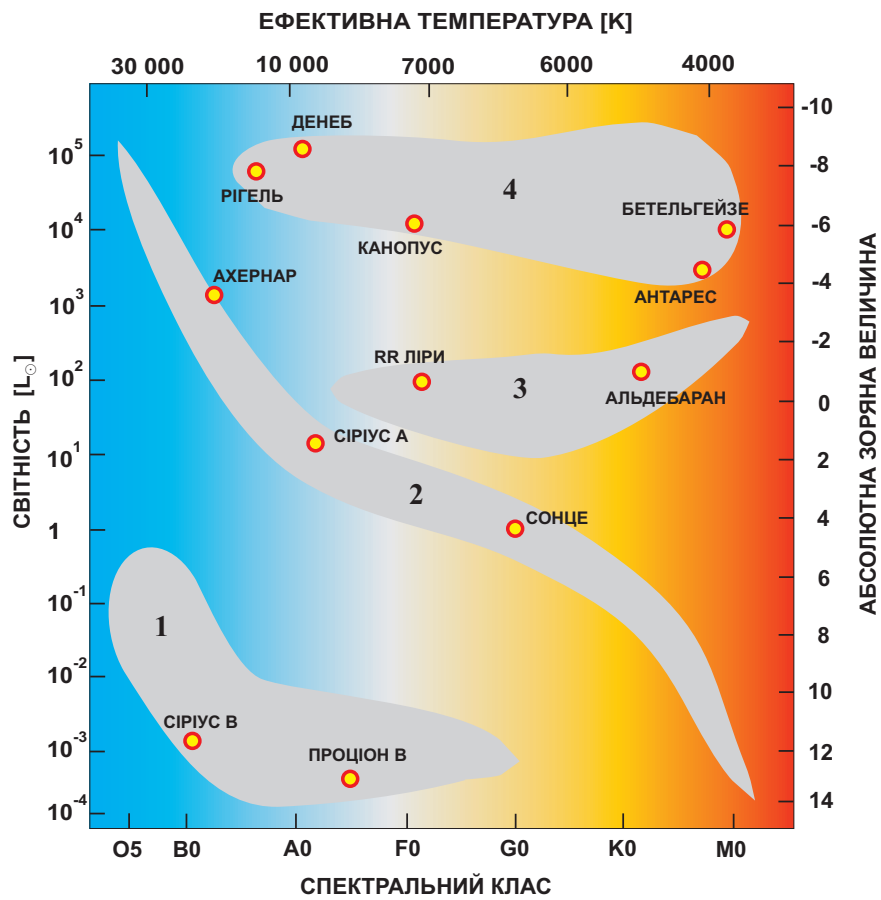


Рис. 3.1: Діаграма Герцшпрунга–Рессела. Арабськими цифрами позначено основні області діаграми: 1 – білі карлики, 2 – головна послідовність, 3 – гіганти, 4 – надгіганти. Також наведено декілька представників кожної групи.

Для більш прецизійної класифікації спектральних властивостей зір у межах одного класу, Морган та Кінан, разом з літерами для позначення підкласів, запропонували використовувати арабські цифри від 0 до 9.

Другим параметром у їхній класифікації є світність зорі, яка відповідає певній ширині та формі ліній поглинання в спектрах. Було виявлено, що ці характеристики залежать від поверхневої гравітації, а, значить, від маси та розмірів зорі. Розрізняють наступні класи світності

- 0 (або Ia+) — гіпергіганти;
- Ia — яскраві надгіганти;
- Ib — надгіганти;
- II — яскраві гіганти;
- III — гіганти;
- IV — субгіганти;
- V — зорі головної послідовності;
- VI — субкарлики;
- VII — білі карлики.

Наприклад, Сонце належить до спектрального класу G2V і, відповідно, є зорею головної послідовності. Найяскравіша зоря неба північної півкулі, Сіріус, має спектральний клас A1V, а отже, є білою зорею головної послідовності.

Основні фізичні характеристики різних спектральних класів наведено у Табл. 3.1.

Клас	Температура К	Колір	Радіус R_{\odot}	Маса M_{\odot}	Світність L_{\odot}
O	$\geq 33\,000$	синій	$\geq 6,6$	≥ 16	$\geq 30\,000$
B	10 000 – 30 000	біло-блакитний	1,8 – 6,6	2,1 – 16	25 – 30 000
A	7 500 – 10 000	білий	1,4 – 1,8	1,4 – 2,1	5 – 25
F	6 000 – 7 500	біло-жовтуватий	1,15 – 1,4	1,04 – 1,4	1,5 – 5
G	5 200 – 6 000	жовтий	0,96 – 1,15	0,8 – 1,04	0,6 – 1,5
K	3 700 – 5 200	помаранчевий	0,7 – 0,96	0,45 – 0,8	0,08 – 0,6
M	$\leq 3\,700$	червоний	$\leq 0,7$	$\leq 0,45$	$\leq 0,08$

Табл. 3.1: Гарвардські спектральні класи

Приклади розв'язання типових задач

Задача 1

Розсіяне зоряне скупчення має видимий візуальний блиск, що відповідає зоряній величині 1^m . З якого максимального числа зір складається дане скупчення, якщо ці зорі можна побачити неозброєним оком?

Розв'язання

Максимальне число зір у скупченні буде за умови, що усі вони постої зоряної величини, яку ще може реєструвати неозброєне око. Сумарний блиск від N однакових зір

$$E = E_1 + E_2 + \dots + E_N = NE_1.$$

Звідси

$$N = \frac{E}{E_1}.$$

Згідно формули Погсона $\frac{E}{E_1} = 10^{0,4(m_1-m)}$. Остаточно

$$N = 10^{0,4(m_1-m)} = 10^{0,4(6-1)} = 10^2 = 100.$$

Задача 2

Оцінити температуру поверхні малої планети Седна у момент, коли вона знаходиться в афелії орбіти, якщо велика піввісь її орбіти

$a = 540$ а. о., ексцентриситет $e = 0,86$. При оцінюванні температури вважати, що усі сонячні промені поглинаються поверхнею планети.

Розв'язання Освітленість, яку створює Сонце на Седні

$$E = \frac{L_{\odot}}{4\pi r^2},$$

де $r = a(1 + e) = 1000$ а. о. – відстань від Сонця до Седні.

За одиницю часу планета отримує енергію

$$\frac{W}{t} = ES = \frac{L_{\odot}}{4\pi r^2} \pi R_{\text{Седні}}^2.$$

В умовах термодинамічної рівноваги, планета випромінює стільки ж енергії як і поглинає. Тому, згідно з законом Стефана–Больцмана, одержуємо

$$\frac{W}{t} = 4\pi R_{\text{Седні}}^2 u = 4\pi R_{\text{Седні}}^2 \sigma T^4 = \frac{L_{\odot}}{4\pi r^2} \pi R_{\text{Седні}}^2.$$

Звідси

$$T = \sqrt[4]{\frac{L_{\odot}}{16\pi r^2 \sigma}} = \sqrt[4]{\frac{4\pi R_{\odot}^2 \sigma T_{\odot}^4}{16\pi r^2 \sigma}} = \sqrt{\frac{R_{\odot}}{2r}} T_{\odot} \simeq 10\text{К}.$$

Задача 3

Видима зоряна величина Веги (α Ліри) дорівнює $m = 0,03^m$, її річний паралакс — $\pi = 0,13''$. Визначити, до якого спектрального класу вона відноситься, якщо її ефективна температура $T = 9300$ К. Оцінити значення маси Веги у порівнянні з масою Сонця? Встановити колір зорі.

Розв'язання Спектральний клас можемо визначити за допомогою діаграми Герцшпрунга—Рессела (Рис. 3.1) або Табл. 3.1. Для цього потрібно мати два параметра: ефективну температуру та абсолютну зоряну величину. Знайдемо значення абсолютної зоряної величини

$$M = m + 5 + 5 \lg \pi = 0,03 + 5 + 5 \lg 0,13 = 0,60^m.$$

Позначаємо на діаграмі Герцшпрунга—Рессела положення Веги ($T = 9300 \text{ K}$, $M = 0,6^m$). Помічаємо, що дана зоря знаходиться поблизу головної послідовності і відноситься до спектрального класу A0V.

На основі Табл. 3.1 визначаємо, що маса Веги приблизно дорівнює $2M_{\odot}$. Колір — білий.

Контрольні запитання

1. Чим відрізняється блиск від освітленості?
2. Яка відмінність видимої зоряної величини від абсолютної?
3. Що таке світність зорі?
4. Яка фізична величина описується законом Стефана – Больцмана?
5. Які фізичні величини покладені в основу спектральної класифікації зір?
6. Яка відмінність у фізичних параметрах гігантів і карликів?

Завдання

1. У 386 році китайські літописці відмітили появу в сузір'ї Стрільця «зорі-гості». За сучасними оцінками її видима зоряна величина була $+1,5^m$, а відстань до зорі оцінюється у 16 000 світлових років. Визначити, що спостерігали древні китайці: спалах нової чи наднової зорі?

2. Компоненти подвійної зорі Аламак із сузір'я Андромеди мають видимі зоряні величини $2,26^m$ та $4,84^m$. Обчисліть видиму зоряну величину цієї подвійної системи.

3. У лютому 2013 року над Челябінськом вибухнув метеорит. За оцінками метеорне тіло мало поперечний діаметр порядку 15 м. Якщо допустити, що це тіло мало кулясту форму і альbedo як у Місяця (7%), визначити, який був його блиск на відстані Місяця від Землі?

Вважати, що освітлена сторона цього метеорного тіла була повернута до Землі в момент спостереження. Яким повинен бути діаметр об'єктива телескопа D (мм), щоб зафіксувати це тіло?

4. «Велике Скупчення в Геркулесі» — один із найвідоміших об'єктів «далекого космосу» (відстань до скупчення складає 7600 пк). Це кулясте скупчення має видиму зоряну величину $+5.8^m$, і тому його видно неозброєним оком при відмінному прозорому небі і малому його засвіченні. Через невеликий телескоп чи бінокль скупчення має вигляд світлої дифузної плями, однак у дещо потужніший телескоп воно виглядає як хмара окремих зір. Оцінити кількість зір у скупченні, вважаючи, що усі його зорі мають параметри близькі до сонячних.

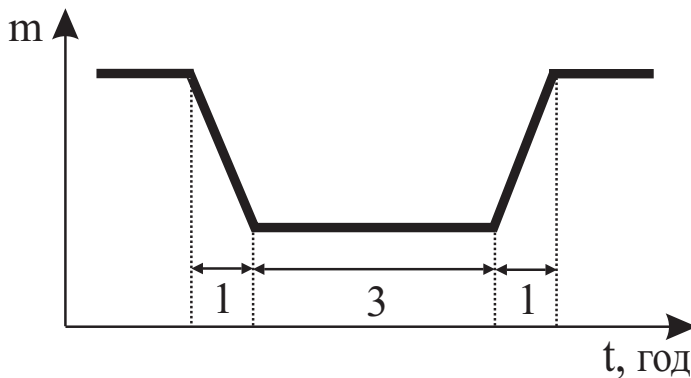


Рис. 3.2: Залежність блиску подвійної зорі від часу.

5. Затемнювана подвійна зоря має період зміни блиску 3 доби. Сумарна маса компонент 4 сонячні. Орбіта колова і розташована так, що промінь зору лежить у її площині. Затемнення головної зорі зорею-супутником продовжується 5 годин, з них по 1 годині блиск зменшується та зростає (часткове затемнення) і 3 години залишається незмінним (повне затемнення, див. Рис. 3.2). Знайти радіуси компонент подвійної зорі (вважаючи зорею-супутник темною у порівнянні з головною зорею) та амплітуду змін блиску впродовж головного мінімуму.

6. Змінна зоря типу UV Кита, що має температуру поверхні 3000 К під час спалаху змінила свій блиск на 2 зоряні величини. У максимумі спалаху зі спектрофотометричних спостережень встановлено, що температура склала 12000 К. Оцініть, яка частина площі зорі охоплена спалахом. (Вважати, що спалах відбувся поблизу центру видимого диску зорі).

7. Одним із методів пошуку екзопланет є метод отримання прямих зображень планет. Реалізація цього методу залежить від різниці блиску між планетою і зорею Δm , що її освітлює. Чим менша ця різниця, тим більше шансів отримати зображення екзопланети. Уявіть, що астрономи якоїсь позаземної цивілізації намагаються отримати пряме зображення планет Сонячної системи. Яку з планет їм вдасться сфотографувати ймовірніше за все за умови, що площини орбіт планет перпендикулярні до променя зору спостерігача?

8. У сузір'ї Великого Лева (Leo Major, LMa) в 2004 р. спалахнула яскрава зоря, що за блиском була тільки трохи слабшою від Венери. Її позначили SN2004A та віднесли до типу Ia. Про зорі цього типу відомо, що в максимумі блиску їх зоряна величина є однаковою і дорівнює -19.3^m . Видима зоряна величина SN2004A в максимумі блиску становила -4.3^m . Яка відстань від Землі до SN2004A?

9. Астронавти майбутнього здійснили висадку на Седну поблизу афелію з метою детального вивчення особливостей її поверхні. План робіт написаний на аркуші дрібним шрифтом, як в умові цієї задачі. Чи потрібно їм захопити ліхтарики для виконання завдання? Період обертання Седни 11400 років, ексцентриситет орбіти 0.85, нахил орбіти близько 12° .

10. Боллометрична світність центральної зорі в системі Trappist-1 складає $0.000522L_\odot$. Температура поверхні 2500 К. Визначте, до якого спектрального класу відноситься дана зоря.

11. Абсолютний блиск центральної зорі в системі Trappist-1 становить 18.4^m . Визначте видимий блиск зорі на екзопланеті Trappist-

1с, яка віддалена від центральної зорі на середню відстань 0.0158 а.о. Порівняйте його із видимим блиском Сонця на поверхні Землі.

12. Користуючись діаграмою Герцшпрунга—Рессела заповніть таблицю.

Назва зорі	Температура поверхні, K	Радіус R/R_{\odot}	Світність L/L_{\odot}	Спектральний клас
Сонце	5778	1	1	G2V
Сіріус А	9900	1.68		
Сіріус В	24790	0.008		
Канопус	7350	32.5		
Арктур	4300	24.5		
Вега	9300	2.73		
Капела	5700	9.2		
Рігель	11000	70		
Бетельгейзе	3600	650		
Альтаір	8000	1.7		
Альдебаран	4100	44.2		
Антарес	2500	700		
Регул	12400	3		
Фомальгаут	8590	1.8		

Розмістіть дані зорі на діаграмі Герцшпрунга—Рессела.

3.2 Фізика Сонця

Теоретичні відомості

Загальні відомості про Сонце

Сонце — центральне тіло нашої планетної системи. У ньому зосереджено 99% маси сонячної системи. Його притягання є головною силою, що керує рухом тіл сонячної системи. Водночас, Сонце є велетенським джерелом енергії, необхідної для підтримки усього живого на Землі.

За своєю сутністю Сонце є типовою зіркою. Воно відноситься до спектрального класу G2V (жовтий карлик).

Профіль Сонця має форму круга з чітко окресленим краєм (лімба). Середній кутовий радіус Сонця дорівнює $960''$. Відповідно лінійний радіус Сонця $R_{\odot} = 696\,000$ км.

Масу Сонця та інших небесних тіл визначають з третього, уточненого Ньютоном, закону Кеплера:

$$\frac{T_1^2(M_{\odot} + m_1)}{T_2^2(M_{\odot} + m_2)} = \frac{a_1^3}{a_2^3}. \quad (3.9)$$

Якщо за перше тіло обрати Землю з масою M_{\oplus} , а за друге — її супутник Місяць з масою M_L , то з формули (3.9) можна визначити відношення маси Сонця до маси Землі:

$$\frac{M_{\odot}}{M_{\oplus}} \approx \left(\frac{T_L}{T_{\oplus}}\right)^2 \left(\frac{a_{\oplus}}{a_L}\right)^3 = 332\,958. \quad (3.10)$$

Зауважимо, що при виведенні формули (3.10) ми знехтували масою Землі, у порівнянні з масою Сонця та масою Місяця порівняно із масою Землі.

Масу Землі визначаємо за вимірюваннями прискорення вільного падіння на її поверхні (гравіметричний метод)

$$M_{\oplus} = \frac{gR_{\oplus}^2}{G} = 5,974 \cdot 10^{24} \text{ кг.}$$

На основі формули (3.10) знаходимо, що маса Сонця

$$M_{\odot} = 1,9891 \cdot 10^{30} \text{ кг.}$$

Знаючи масу та лінійний радіус Сонця, знаходимо його середню густину

$$\rho_{\odot} = \frac{M_{\odot}}{\frac{4}{3}\pi R_{\odot}^3} = 1,41 \text{ г/см}^3 \approx \frac{1}{4}\rho_{\oplus}.$$

Прискорення вільного падіння на поверхні Сонця

$$g_{\odot} = G \frac{M_{\odot}}{R_{\odot}^2} = 274 \text{ м/с}^2 \approx 28g_{\oplus}.$$

Спостереження показують, що Сонце обертається навколо своєї осі. Кутова швидкість обертання Сонця найбільша на сонячному екваторі і зменшується при наближенні до полюсів. Таким чином, різні ділянки Сонця обертаються навколо осі з різними періодами. Для точок на екваторі цей період дорівнює 25 діб, а поблизу полюсів він сягає 30 діб.

Важливою енергетичною характеристикою Сонця є його *світність* L_{\odot} — повний потік енергії з усієї поверхні Сонця за одну секунду.

Визначення світності Сонця засноване на вимірюванні *сонячної сталої* q — кількості енергії, яку одержує від Сонця площадка площею 1 см^2 , що знаходиться поблизу Землі за межами атмосфери і розміщена перпендикулярно до сонячних променів, за одну хвилину.

Спостереження показують, що сонячна стала

$$q = 1,9 \text{ кал}/(\text{см}^2 \cdot \text{хв}) = 1,37 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2.$$

Звідси знаходимо енергію, яка проходить через сферу радіусом 1 а. о. за одну секунду, тобто світність

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

При цьому одиниця поверхні Сонця випромінює енергію

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

Якщо вважати, що Сонце випромінює, як абсолютно чорне тіло, то на основі закону Стефана — Больцмана,

$$u_{\odot} = \sigma T^4, \quad \sigma = 5,6705 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4),$$

можна обчислити так звану *ефективну температуру* його поверхні T_{eff} :

$$T_{eff} = \sqrt[4]{\frac{u_{\odot}}{\sigma}} \approx 5770 \text{ К.}$$

У видимій ділянці спектр випромінювання Сонця є неперервним. На фоні яскравого неперервного спектру помітно десятки тисяч темних ліній поглинання — *фраунгоферових ліній*. За довжинами хвиль ці лінії збігаються з лініями випромінювання розжареного розрідженого газу. Порівнюючи фраунгоферові лінії в спектрі Сонця з лініями випромінювання хімічних елементів таблиці Менделєєва, можна встановити хімічний склад атмосфери Сонця (Рис. 3.3). Аналізуючи інтенсивність фраунгоферових ліній, можна отримати інформацію про кількість атомів даного хімічного елемента на Сонці.

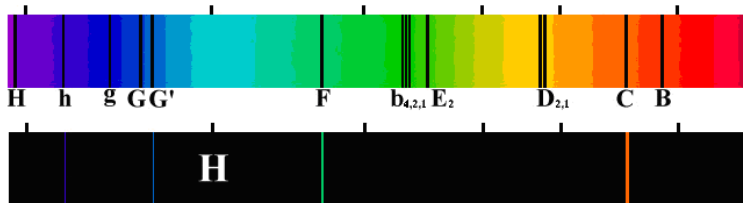


Рис. 3.3: Частина спектра Сонця та лінії випромінювання водню.

Найяскравішою лінією сонячного спектра є резонансна лінія водню L_{α} , яка знаходиться в далекій ультрафіолетовій області ($\lambda =$

1216 Å). У видимій області найбільш інтенсивними є K і H лінії іонізованого кальцію. Менш інтенсивними є лінії бальмерівської серії водню, магнію, заліза та інших елементів.

Таким чином, переважаючим хімічним елементом на Сонці є водень (74% маси). Наступним за поширенням йде гелій (25%). Один відсоток маси Сонця припадає на наступні хімічні елементи: Fe, Ni, O, Si, S, Mg, C, Ne, Ca та Cr.

Для неперервної частини спектру найбільша інтенсивність випромінювання Сонця припадає на діапазон довжин хвиль 4300 — 5000 Å.

Температуру верхніх шарів Сонця можна оцінити на основі закону зміщення Віна

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}, \quad b = 2,8978 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}.$$

Для $\lambda_{\max} = 4700 \text{ Å}$ обчислюємо $T = 6150 \text{ К}$.

Зауважимо, що сонячний спектр далеко простягається у невидимі короткохвильову та довгохвильову області.

Будова Сонця

Візуальні та фотографічні спостереження Сонця дають нам інформацію про його верхні шари. Для дослідження внутрішньої будови Сонця розроблена така галузь, як геліосейсмологія, в якій аналізуються інфразвукові хвилі, що поширюються з внутрішніх шарів Сонця на його поверхню. Інформацію про внутрішню структуру Сонця отримують також, досліджуючи потоки нейтрино, які народжуються при термоядерних реакціях всередині Сонця.

Розглянемо структуру Сонця (Рис. 3.4).

1) *Ядро.*

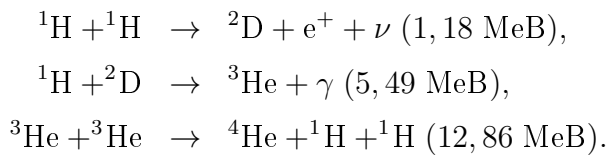
Вважається, що ядро має протяжність від центру Сонця до $0,2R_{\odot}$ (140 000 км). Температура в ядрі порядку 14 000 000 К (для порівняння, температура поверхні Сонця 5 800 К), густина речовини

в ядрі дорівнює 150 г/см^3 , що в 150 разів більше ніж густина води на Землі.

Ядро Сонця є природнім реактором, в якому відбуваються реакції термоядерного синтезу. Головну роль у виділенні енергії відіграють реакції перетворення водню в гелій. Кожної секунди приблизно $3 \cdot 10^{38}$ ядер водню перетворюються в ядра гелію.

Перетворення водню в гелій у зорях може відбуватися за двома циклами: протон-протонному та вуглецевому.

На Сонці домінуючим є протон-протонний цикл. Він складається з трьох ланок:



Зауважимо, що на першій ланці один з двох протонів зазнає β -розпаду. Утворений при цьому нейтрон зливається з другим протоном, і синтезується дейтерій. Для кожної пари протонів цей процес у середньому відбувається за 14 млрд. років. Наступні два процеси проходять значно швидше. Тому саме перший процес, який регулюється слабкою взаємодією, встановлює темп термоядерних реакцій на Сонці і, таким чином, визначає тривалість його «життя».

Високоенергетичні фотони, народжені в ядерних реакціях, поширюються з ядра до поверхні Сонця. У процесі поширення вони зазнають розсіювання та поглинання (з подальшим перевипромінюванням) частинками сонячної плазми. За оцінками «час подорожі» фотона з ядра на поверхню лежить в межах від 10000 до 170000 років (при вільному русі таку відстань фотон пройшов би за 2 секунди).

Вважається, що на Сонці основними є два механізми переносу енергії від ядра до поверхні: променистим переносом та конвекцією.

2) Зона променистого переносу

У цій зоні Сонця відбувається процес переносу енергії шляхом поглинання речовиною випромінювання і подальшого перевипромінювання. При цьому виділення енергії в цій зоні є незначне. Зона променистого переносу займає прошарок Сонця в межах від $0,2R_{\odot}$ до $0,7R_{\odot}$. Температура тут змінюється в межах від 7 000 000 К до 2 000 000 К.

3) Конвективна зона

Вище зони променистого переносу (від $0,7R_{\odot}$ до видимої поверхні Сонця) знаходиться конвективна зона, в якій енергія переноситься переміщенням речовини, тобто конвекцією. Конвективний механізм переносу енергії виникає в оболонках зір, якщо речовина там мало або зовсім неіонізована, промениста енергія поглинається в певному шарі оболонки зорі, після чого нагріта речовина рухається до поверхні зорі.

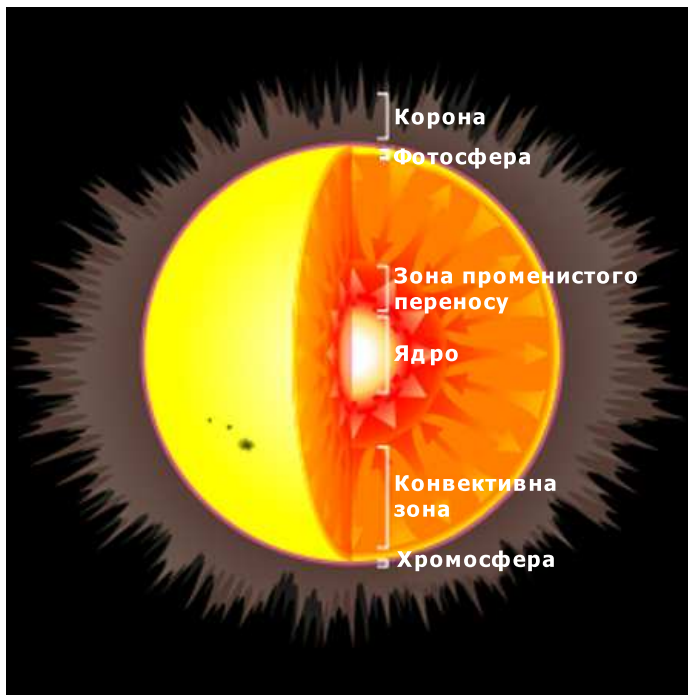


Рис. 3.4: Структура Сонця.

4) Фотосфера

Фотосферою називається видима поверхня Сонця. Саме у фотосфері формується неперервний спектр випромінювання Сонця. Протяжність фотосфери порядку кількох сотень кілометрів. Її середня температура близька до 6000 К, а середня густина дорівнює $0,000\,000\,2\text{ г/см}^3$.

У фотосфері спостерігається ефект потемніння сонячного диска до його краю. Зменшення яскравості диска Сонця до краю вказує на те, що температура газу, який висвічує і випромінювання якого досягає спостерігача, зростає з глибиною.

Проявом конвекції у зовнішніх прошарках Сонця є *грануляція* — неоднорідна за яскравістю структура сонячної поверхні, яка нагадує розсіпані рисові зерна. Кутові розміри гранул дорівнюють $1''$, що відповідає лінійним розмірам порядку 700 км. Яскравість гранул майже на половину більша, ніж у проміжках між ними. Це означає, що температура у гранулі на кілька сотень градусів вища.

Гранули — є не що інше, як конвективні потоки гарячого газу, які підіймаються на поверхню і різко охолоджуються через висвічування. Відповідно у темних проміжках охолоджений газ опускається вглиб Сонця.

5) Атмосфера

Частини Сонця, які знаходяться вище фотосфери, утворюють сонячну атмосферу.

Найкращі умови для спостереження сонячної атмосфери створюються під час повних сонячних затемнень. В цей час Місяць повністю закриває сонячний диск і тим самим екранує випромінювання фотосфери. Навколо цього диска спостерігається вузький, товщиною до 5 000 км, ореол рожевого кольору — *хромосфера*. Температура хромосфери швидко зростає з висотою, досягаючи 100 000 К біля її верхнього краю.

Спектр випромінювання хромосфери подібний до фраунгоферо-

вого спектра диска Сонця, в якому усі темні лінії поглинання замінені яскравими лініями випромінювання, а неперервний спектр майже відсутній. Найбільш інтенсивними є лінії випромінювання іонізованого кальцію, водню і гелію. Зауважимо, що лінії гелію у фраунгоферовому спектрі диска Сонця практично непомітні.

Хромосфера має дуже неоднорідну структуру, яка набагато чіткіше виражена, ніж грануляція фотосфери. Найдрібнішими структурними утвореннями хромосфери є *спікули* — колони газу довжиною в кілька тисяч кілометрів і товщиною близько тисячі кілометрів. Спікули рухаються вгору зі швидкістю порядку 20 км/с і тим самим здійснюють перенесення речовини у верхні шари сонячної атмосфери.

Над хромосферою простягається до декількох сонячних радіусів сріблясто-біла *корона*. Яскравість сонячної корони в мільйони разів менша, ніж фотосфери. Корона не має чітких контурів, а її форма змінюється з часом.

Спектр випромінювання нижніх шарів корони (внутрішньої корони) складається з емісійних ліній, в якому наявні лінії випромінювання високоіонізованих металів. Поява таких ліній свідчить про сильну розрідженість та високу температуру речовини у короні. Оцінюється, що температура корони досягає 2 000 000 К, а її густина порядку 10^{-15} г/см³.

Спектр випромінювання зовнішніх шарів корони (зовнішньої корони) є неперервним, і на ньому присутні фраунгоферові лінії поглинання. Такий спектр утворюється внаслідок розсіювання вільними електронами випромінювання від фотосфери.

Хромосфера і корона нагріваються завдяки хвильовим рухам, які переносять уверх механічну енергію конвективних елементів і трансформують її в теплову. У свою чергу нагріта до високих температур речовина сонячної корони безперервно розширюється в навколосонячний простір. Такий потік іонізованої плазми називається *сонячним*

вітром.

Сонячна активність

Явища, що відбуваються на поверхні Сонця, в сукупності характеризують міру *сонячної активності*. Відповідні місця на сонячній поверхні, де спостерігають ці явища, називаються *активними зонами*.

На поверхні Сонця час від часу спостерігаються темні утворення — *сонячні плями*. Лінійні розміри плям сягають 100 000 км. Темний колір сонячних плям свідчить про те, що температура речовини в них менша приблизно на 2000 К, ніж у фотосфері. Тривалість «життя» плями коливається від кількох годин до кількох місяців.

Важливою особливістю сонячних плям є наявність у них сильного магнітного поля. Утворення сонячних плям пов'язують з впливом магнітного поля на конвективні рухи речовини в глибині конвективної зони. Сильне магнітне поле гальмує заряджену речовину, яка рухається впоперек силових ліній. Тому в конвективній зоні під плямою зменшується циркуляція газу, а отже зменшується передача енергії до фотосфери. У свою чергу це призводить до зменшення температури даної ділянки фотосфери та виникнення плями.

Біля країв сонячного диска, де фотосфера здається темнішою, часто спостерігаються так звані *факели* — області більшої яскравості, ніж навколишня поверхня фотосфери. Факели завжди оточують групи плям, але іноді спостерігаються і без них.

Утворення факелів пов'язане з підсиленням конвекції в даній області, спричинене дією слабкого магнітного поля, яке зменшує поперечний конвективний рух і тим самим зменшує опір вертикального конвективного руху.

В окремих місцях внутрішньої корони спостерігаються своєрідні викиди речовини — *протуберанці*. Спектр протуберанця близький до спектра хромосфери. Особливо інтенсивною є α -лінія водню. Протуберанець утворюється під дією магнітного поля, яке підіймається над

поверхнею Сонця і при цьому «тягне за собою» частину газу.

Ще одним потужним проявом сонячної активності є *сонячні спалахи*. Під час спалаху спостерігається потужне випромінювання в ультрафіолетовому, рентгенівському та радіодіапазонах. Найчастіше спалахи виникають у проміжках між плямами, особливо поблизу границі розділу полярності сильних магнітних полів. Їхня поява пояснюється виділенням великої кількості енергії при «анігіляції» магнітного поля в плазмі, коли енергія магнітного поля переходить в тепло, нагріваючи газ до температури в десятки мільйонів градусів.

При деяких спалахах виділяється енергія порядку 10^{25} Дж. Така енергія еквівалентна енергії, яку випромінює «спокійне» Сонце за одну секунду, або енергії, що виділяється при вибухові мільйона мегатонних водневих бомб.

Таким чином, бачимо, що з сонячними плямами пов'язана решта явищ, які характеризують сонячну активність. Тому для кількісної характеристики сонячної активності обрали так зване *число Вольфа* W , яке пов'язане з кількістю плям на Сонці f та кількістю груп плям g наступним співвідношенням:

$$W = 10g + f. \quad (3.11)$$

Аналізуючи зміну середнього річного числа Вольфа протягом кількох століть, встановили, що сонячна активність періодично змінюється. Максимуми і мінімуми сонячної активності чергуються в середньому через кожні 11 років, хоча проміжки часу між двома послідовними максимумами можуть коливатися в межах від 7 до 16 років. Тому передбачення наступного максимуму є складним завданням.

Описані вище активні явища на Сонці певним чином впливають на Землю, на стан її атмосфери, на її магнітне поле, а також на біосферу, зокрема на організм людини.

Приклади розв'язання типових задач

Задача 1

Розрахуйте число Вольфа для Сонця зображеного на Рис. 3.5.

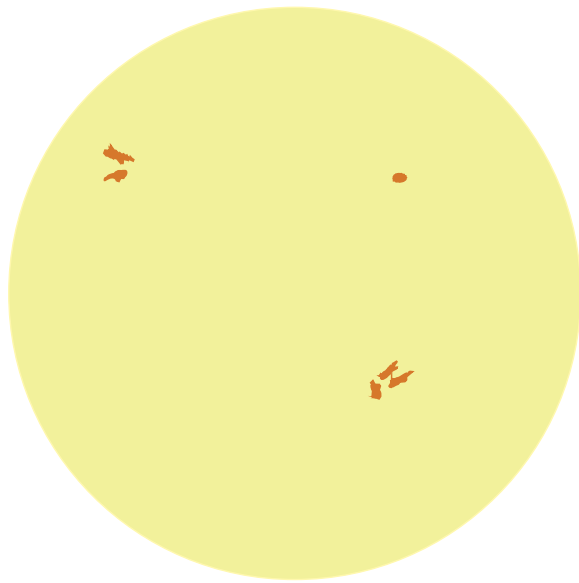


Рис. 3.5

Розв'язання

Число Вольфа визначається за допомогою співвідношення (3.11)

$$W = 10g + f.$$

На знімку Сонця помічаємо три групи плям ($g = 3$), у яких загалом міститься шість плям ($f = 6$). Таким чином, число Вольфа

$$W = 10 \times 3 + 6 = 36.$$

Задача 2

Порівняйте видимий блиск Сонця на Землі та на Марсі.

Розв'язання

Скористуємося зв'язком абсолютного та видимого блиску

$$M = m + 5 - 5 \lg r.$$

Звідси

$$m_3 + 5 - 5 \lg r_3 = m_M + 5 - 5 \lg r_M$$

Для різниці видимих блисків одержуємо

$$m_3 - m_M = 5 \lg \frac{r_3}{r_M} = 5 \lg \frac{1}{1.524} = -0.91^m.$$

Таким чином, Сонце із поверхні Землі виглядає світилом яскравішим на одну зоряну величину у порівнянні з Сонцем із поверхні Марса.

Контрольні запитання

1. Яке співвідношення розмірів та маси Сонця у порівнянні із Землею?
2. Яка внутрішня будова Сонця?
3. Яка причина появи плям на поверхні Сонця?
4. Які хімічні елементи можна знайти на Сонці?
5. До якого спектрального класу відноситься Сонце?
6. Який орієнтовний вік Сонця?

Завдання

1. Обчислити першу космічну швидкість на поверхні Сонця.
2. Сонячна стала дорівнює $1,3 \cdot 10^3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$. Визначити час, за який під дією сонячних променів розплавиться кубик льоду з ребром 10 см, що знаходиться поблизу поверхні Землі за межами атмосфери і розміщений перпендикулярно до променів. Обчислити відповідний час для такого ж кубика льоду, що знаходиться на Венері, середня

відстань якої до Сонця дорівнює 0,7233 а.о. Густина льоду — $900 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, питома теплота плавлення льоду — $333,7 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$.

3. На міліметровому папері зробити схематичний рисунок Сонця у масштабі $1 \text{ см} = 0,1 R_{\odot}$. Вказати характерні температури та густини у різних його частинах.

4. Обчислити тиск газу у фотосфері Сонця, вважаючи його ідеальним газом. Порівняти одержаний результат із атмосферним тиском на Землі за нормальних умов.

5. Спостережений з поверхні Землі синодичний період обертання сонячної плями дорівнює 30,43 діб. Визначити період обертання плями навколо осі Сонця. Встановити, на якій геліографічній широті φ знаходиться спостережувана пляма, якщо для кутової швидкості добового обертання сонячних плям ω справедлива емпірична формула $\omega = 14^{\circ},37 - 2^{\circ},79 \sin^2 \varphi$?

6. Визначити масу, яку Сонце втрачає через випромінювання за одну секунду. Визначити у відсотках долю маси Сонця, яку вона втрачає через випромінювання за один рік.

7. Встановити відповідність між лініями поглинання у спектрі Сонця та лініями випромінювання хімічних елементів (див. Додаток 3). Визначити довжини хвиль ототожнених ліній.

8. Визначити число Вольфа для Сонця на момент виконання роботи (зображення Сонця взяти з вебсайту космічної обсерваторії SOHO за адресою soho.nascom.nasa.gov в розділі sunspots). Перевірити чи узгоджується одержаний результат із діаграмою активності Сонця?

9. За даними таблиці середньорічної кількості Сонячних плям та їх груп визначити середні числа Вольфа для кожного року із заданого інтервалу. Побудувати графік залежності сонячної активності від номера року.

Рік	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990
g	8.23	5.01	3.11	1.31	0.94	2.01	6.09	9.67	9.8
f	72.56	38.27	25.73	7.8	5.15	12.61	51.43	95.7	74.15
Рік	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
g	9.59	7.05	4.05	2.68	1.66	0.81	1.69	4.88	6.78
f	95.5	58.31	31.4	16.41	10.34	4.53	10.59	33.96	57.32
Рік	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
g	9.04	8.89	8.82	5.55	3.39	2.55	1.58	0.84	0.42
f	69.49	70.64	54.87	47.12	27.62	17.83	8.5	4.24	1.33
Рік	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
g	0.42	1.67	4.57						
f	1.82	7.25	33.19						
Рік	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
g									
f									

На основі одержаного графіка зробити прогноз сонячної активності на найближчі роки.

10. Як повинна змінитися температура поверхні Сонця, аби сонячна стала зросла на 10 %?

11. Сонячна стала на земній орбіті становить близько 1.37 кВт/м². Оцініть зміну сонячної сталої внаслідок проходження Венери по диску Сонця. Радіус Венери 6050 км, радіус її орбіти 0.72 а.о. Радіуси орбіт планет вважати коловими, проходження Венери відбулось по діаметру диска Сонця.

3.3 Ефекти просторового руху зір

Теоретичні відомості

Власні рухи зір

Якщо зіставити сучасне розташування зір на небосхилі із давніми зоряними каталогами (наприклад Альмагестом Птолемея, II ст.), то можна помітити, що майже за 2000 років їх положення суттєво змінилися. Ці зміщення у положеннях зір не пов'язані із періодичними змінами координат завдяки руху Землі навколо власної осі та навколо Сонця. Вони є наслідком просторового руху зір.

Кутове зміщення видимого розташування зорі на небесній сфері за один рік, пов'язане із її рухом відносно Сонячної системи називають *власним рухом* зорі.

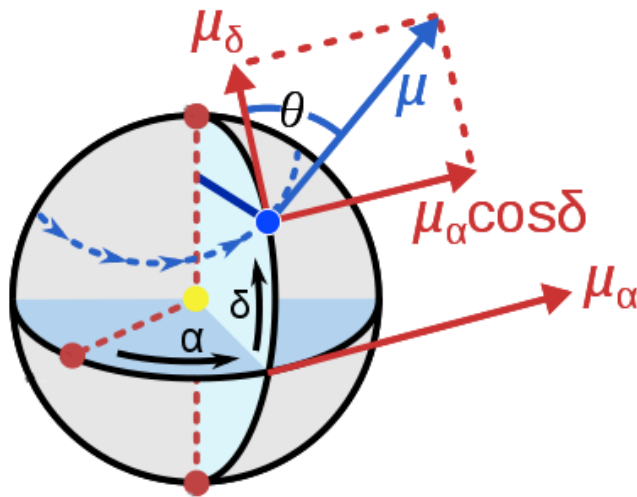


Рис. 3.6: Компоненти власного руху зорі.

Розрізняють зміну у положенні зорі по прямому піднесенню μ_α та по схиленню μ_δ (Рис. 3.6). Результуючий власний рух зорі визначають за формулою

$$\mu = \sqrt{\mu_\delta^2 + \mu_\alpha^2 \cos^2 \delta}. \quad (3.12)$$

Дані про власні рухи зір наведені у зоряних каталогах, наприклад у каталозі Європейського космічного агентства “Hipparcos” (режим доступу <http://sci.esa.int/hipparcos/>). Значення власного руху задають у секундах дуги на рік ("/рік). Рекордсменом за власним рухом серед зір є зоря Барнарда (сузір'я Змієносця).³ Її власний рух становить 10.36"/рік.

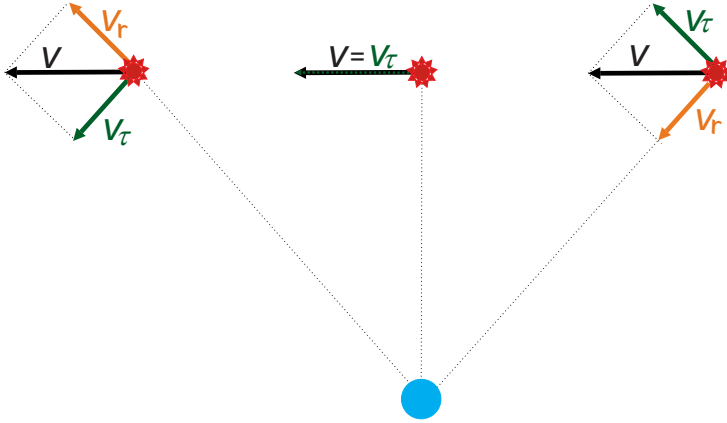


Рис. 3.7: Тангенціальна та радіальна компоненти відносної просторової швидкості зорі.

Власний рух визначає тангенціальну складову лінійної швидкості руху зорі у просторі (Рис. 3.7). Для зорі, яка знаходиться на відстані r від сонячної системи знаходимо

$$V_t = \frac{\mu}{206265} r, \quad (3.13)$$

де власний рух μ виражається у секундах дуги на рік.

Використаємо зв'язок відстані та паралаксу $r = 206265 \text{ а.о.}/\pi''$. У результаті одержуємо

$$V_t = \frac{\mu}{\pi''} \left(\frac{\text{а.о.}}{\text{рік}} \right) \quad (3.14)$$

³За найбільший власний рух зоря отримала назву “Летюча”.

Перейдемо від астрономічних одиниць до кілометрів та від років до секунд. Одержуємо

$$V_r = 4.74 \frac{\mu}{\pi''} \left(\frac{\text{км}}{\text{с}} \right). \quad (3.15)$$

Поряд з тангенціальною складовою просторової швидкості зоря має також радіальну компоненту, яка визначається як проекція відносної просторової швидкості зорі на промінь зору. Радіальну компоненту просторової швидкості зорі називають *променевою швидкістю* та позначають V_r . Променева швидкість має знак “+”, якщо об’єкт віддаляється від спостерігача, та знак “-”, коли об’єкт наближається.

Таким чином, у будь-який момент часу, відносна просторова швидкість зорі дорівнює

$$V = \sqrt{V_r^2 + V_t^2}. \quad (3.16)$$

Як зазначалося вище, тангенціальну складову швидкості можна визначити на основі спостережень за кутовим зміщенням зорі. Променева швидкість зорі визначається на основі *ефекту Доплера*, який полягає у зміні довжини хвилі (або частоти) яку реєструє спостерігач через відносний рух джерела та спостерігача.

Променеву швидкість зорі визначають на основі аналізу зміщення спектральних ліній випромінювання зорі відносно лабораторних. Зсув спектральної лінії у бік коротких хвиль (“блакитний зсув”, Рис. 3.8), свідчить, що джерело наближається до спостерігача, а зсув у бік довгих хвиль (“червоний зсув”, Рис. 3.9) означає, що джерело віддаляється.

Червоний чи блакитний зсув позначається літерою z . Кількісно він визначається відносною зміною довжини хвилі, що реєструється λ та лабораторною довжиною λ_0

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}. \quad (3.17)$$

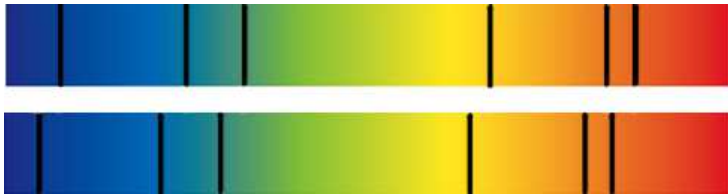


Рис. 3.8: Блакитний зсув. Спектральні лінії зміщені у бік коротких хвиль (нижній спектр) по відношенню до лабораторних (верхній спектр). Дане джерело світла рухається до спостерігача.



Рис. 3.9: Червоний зсув. Спектральні лінії зміщені у бік довгих хвиль (нижній спектр) по відношенню до лабораторних (верхній спектр). Дане джерело світла рухається від спостерігача.

З іншого боку, розрахунок зсуву на основі ефекту Доплера дає наближену формулу (для невеликих значень зсуву $|z| \ll 1$)

$$z = \frac{V_r}{c}. \quad (3.18)$$

Тут c – швидкість світла у вакуумі.

У випадку значного зсуву ($|z| \geq 0.1$) необхідно використовувати точну релятивістську формулу⁴

$$z + 1 = \sqrt{\frac{c + V_r}{c - V_r}}. \quad (3.19)$$

⁴В астрофізиці також існує поняття гравітаційного червоного зсуву та космологічного червоного зсуву (див., наприклад, <https://en.wikipedia.org/wiki/Redshift>). Гравітаційний червоний зсув у ньютонівському наближенні обчислюється за формулою $\Delta\lambda/\lambda_0 = GM/Rc^2$.

Таким чином (при $V_r \ll c$) променевою швидкістю розраховують за формулою

$$V_r = zc = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}c. \quad (3.20)$$

Доплерівська спектроскопія відіграє важливу роль у відкритті екзопланетних систем. Зокрема цей метод дозволяє виявити масивну екзопланету (щонайменше кілька земних мас), яка знаходиться поблизу центральної зорі. Така подвійна система здійснює рух навколо спільного центру мас. Центральна зоря буде рухатися по своїй орбіті періодично наближаючись та віддаляючись відносно земного спостерігача. Накладання руху центра мас екзопланетної системи відносно Землі та обертального руху її центральної зорі навколо центра мас призводить до періодичних коливань променевої швидкості. Статистичний аналіз спектрів даної зорі дозволяє визначити період та амплітуду коливань променевої швидкості.⁵

Доплерівська спектроскопія дозволяє не лише виявити екзопланету, але й оцінити відстань екзопланети до центральної зорі, період її обертання, нижню межу її маси. Станом на 2018 рік, близько 30% екзопланет було відкрито за допомогою ефекту Доплера.

Ефект Доплера також використовується для оцінки відстаней до галактик. Під *галактикою* розуміємо гравітаційно зв'язану систему із зір і зоряних скупчень, міжзоряного газу та пилу, а також темної матерії. Найменші галактики містять кілька сотень мільйонів (10^8) зір, а у найбільших кількість зір досягає сотень трильйонів (10^{14}). Усі об'єкти в складі галактик беруть участь в обертанні навколо спільного центру мас. Сонячна система входить до складу галактики Чумацький Шлях (Milky Way).

Галактики є надзвичайно віддаленими об'єктами. Відстань до найближчих із них вимірюється в мегапарсеках.⁶ У визначенні від-

⁵https://en.wikipedia.org/wiki/Doppler_spectroscopy

⁶Найближчою до Сонячної системи є галактика Андромеда (M31). Відстань до неї становить 778 кпк.

станей до галактик важливу роль відіграє ефект Доплера. Як показують спостереження, лінії у спектрах усіх віддалених галактик ($r \geq 10$ Мпк) зсунуті у бік червоного кольору. Таким чином галактики віддаляються одна від одної. Швидкість розбігання галактик може бути визначена на основі червоного зсуву (3.20). Аналізуючи червоний зсув у спектрах галактик, Едвін Габбл у 1929 році виявив, що наближено швидкість віддалення галактик від Землі прямо пропорційна відстані до них. Математичний запис *закону Габбла* має вигляд

$$V_r = Hr. \quad (3.21)$$

Коефіцієнт пропорційності H називається *постійною Габбла*. Її значення становить $H = 73.45$ (км/с)/Мпк.⁷

Комбінуючи (3.20) та (3.21), одержуємо формулу для розрахунку відстані до галактики

$$r = \frac{c}{H}z. \quad (3.22)$$

Приклади розв'язання типових задач

Задача 1

Визначити тангенціальну швидкість зорі Барнарда. Власний рух зорі — $10.36''$ /рік, паралакс — $0.545''$.

Розв'язання

Тангенціальна швидкість визначається співвідношенням (3.15)

$$V_r = 4.74 \frac{\mu}{\pi''} \left(\frac{\text{км}}{\text{с}} \right)$$

У нашому випадкові

$$V_r = 4.74 \frac{10.36}{0.545} = 90.10 \left(\frac{\text{км}}{\text{с}} \right)$$

⁷Значення постійної Габбла, яке систематично уточнюється, наведено станом на 22.02.2018. Її первинне значення, розраховане зі спостережень Габблом, становило $H = 500$ (км/с)/Мпк.

Задача 2

При дослідженні спектру зорі було виявлено, що спектральна спостережувана лінія $\lambda_0 = 4500 \text{ \AA}$ зсунута у бік збільшення довжини хвилі на $\Delta\lambda = 1.11 \text{ \AA}$. Визначити зсув та променево швидкість зорі. У якому напрямі відносно Землі рухається зоря.

Розв'язання

Зсув визначається співвідношенням (3.17)

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}.$$

У нашому випадкові

$$z = \frac{1.11}{4500} = 2.47 \times 10^{-4}.$$

Оскільки зсув $z \ll 1$, то для визначення променевої швидкості можемо скористатися нерелятивістською формулою (3.18)

$$V_r = zc = 2.47 \times 10^{-4} \times 3 \times 10^8 = 74000 \text{ м/с} = 74 \text{ км/с}.$$

Оскільки променева швидкість додатня, то зоря віддаляється від Землі (червоний зсув).

Контрольні запитання

1. Що таке власний рух зорі?
2. Які причини власного руху зорі?
3. Що променева швидкість?
4. Яким чином можна визначити величину променевої швидкості зорі?
5. У чому полягає ефект Доплера?
6. Якщо спектральні лінії зміщені у бік менших довжин хвиль у порівнянні з лабораторними, то у якому напрямі відносно Землі рухається джерело електромагнітних хвиль?
7. Як за допомогою ефекту Доплера можна виявити екзопланету?

Завдання

1. Лінії водню $\lambda = 6563 \text{ \AA}$ у спектрі зорі, яка швидко обертається, має ширину $\Delta\lambda = 6.5 \text{ \AA}$. Вважаючи, що розширення лінії відбувається завдяки обертанню зорі, оцініть якою є лінійна швидкість обертання зорі на екваторі. Вважайте, що промінь зору лежить у площині обертання зорі.

2. Галактики А та В знаходяться на однаковій космологічній відстані 50 Мпк від нашої Галактики та одна від одної. З нашої Галактики надсилається лазерний сигнал із довжиною хвилі 500 нм в напрямку галактики А, там він відбивається від дзеркала у напрямку галактики В, а в галактиці В — відбивається у напрямку на нашу Галактику. Яку довжину хвилі відбитого сигналу зареєструють в нашій Галактиці?

3. Зоря Барнарда, станом на 2018 рік, має екваторіальні координати $\alpha = 17^h 57^m 48.50^s$, $\delta = +04^\circ 41' 36.21''$. Компоненти власного руху зорі становлять $\mu_\alpha = -0.799''/\text{рік}$, $\mu_\delta = 10.34''/\text{рік}$. Паралакс зорі — $0.545''$. Радіальна швидкість зорі дорівнює -110.6 км/с . На основі цих даних визначте:

а) положення зорі на небесній сфері станом на 2018 рік. У межі якого сузір'я потрапляє зоря?

б) чи доступна зоря Барнарда для спостережень із території України станом на 2018 рік?

в) якими будуть екваторіальні координати зорі через тисячу років? Вкажіть положення зорі на небесній сфері? Якщо просторовим рухом сузір'я знехтувати, то чи залишиться зоря у межах того самого сузір'я?

г) у який бік і наскільки зміщена лінія водню H_β у спектрі зорі? (лабораторне значення довжини хвилі лінії H_β $\lambda_0 = 486.1 \text{ нм}$);

г) яке значення має просторова швидкість зорі? Який кут утворює просторова швидкість зорі з напрямком “зоря – земний спостерігач”?

д) розрахуйте час (у роках), через який відбудеться (чи відбулося) мінімальне зближення зорі Барнарда із Сонцем за умови, що швидкість зорі Барнарда відносно Сонця є сталою. Знайдіть мінімальну відстань між Сонцем і зорею Барнарда у цей час;

е) видима зоряна величина зорі Барнарда станом на 2018 рік становить 9.51^m . Якою вона буде (чи була) на мінімальній відстані до Сонця?

4. Найближча до нас зоряна система — Альфа Центавра (α Centauri) знаходиться на відстані 4.37 св. років. Ця зоряна система складається із трьох компонент. Два з них — Альфа Центавра А та Альфа Центавра В — яскраві зорі, що утворюють тісну подвійну систему (середня відстань між компонентами 23.4 а.о), що обертається навколо спільного центру мас. Третій компонент системи — Альфа Центавра С — зоря Проксима Центавра, гравітаційно зв'язана із системою “А+В” і обертається навколо неї по орбіті радіусом близьким до 13 000 а.о. із періодом порядку пів мільйона років. Екваторіальні координати головного компонента системи Альфа Центавра А $\alpha = 14^h 39^m 36.50^s$, $\delta = -60^\circ 50' 02.37''$. Компоненти власного руху зорі становлять $\mu_\alpha = -3.679''/\text{рік}$, $\mu_\delta = 0.473''/\text{рік}$. Паралакс зорі має значення $0.7548''$. Радіальна швидкість зорі дорівнює -21.4 км/с. На основі цих даних визначте:

а) положення зоряної системи на небесній сфері;

б) чи доступна зоряна система Альфа Центавра для спостережень із території України?

в) якими будуть екваторіальні координати зорі через тисячу років? Вкажіть положення зоряної системи на небесній сфері?

г) у який бік і наскільки зміщена лінія водню H_α у спектрі Альфа Центавра А? (лабораторне значення довжини хвилі лінії H_α $\lambda_0 = 656.28$ нм);

г) яке значення має просторова швидкість Альфа Центавра А? Який кут утворює просторова швидкість зорі з напрямком “зоря —

земний спостерігач”?

д) розрахуйте час (у роках), через який відбудеться (чи відбулося) мінімальне зближення системи Альфа Центавра із Сонцем за умови, що швидкість системи відносно Сонця є сталою. Знайдіть мінімальну відстань між Сонцем і системою Альфа Центавра у цей час.

5. Найближча відома зоря зі сферичної складової Галактики — зоря Каптейна (сучасні координати $\alpha = 5^h 11.7^m$, $\delta = -45^\circ 01'$) була відкрита Якобусом Каптейном у 1898 році. Її власний рух $\mu_\alpha = 6.5''/\text{рік}$, $\mu_\delta = -5.7''/\text{рік}$, паралакс $0.256''$, променева швидкість 245 км/с , блиск 8.853^m . Як змінилась відстань до зорі, її видима зоряна величина та на який кут вона змістилась на фоні далеких зір з моменту відкриття. Вважайте, що просторова швидкість зорі з часом не змінюється.

6. Зоря Альтаїр (α Орла) має екваторіальні координати $\alpha = 19^h 50^m 47.50^s$, $\delta = +08^\circ 52' 05.96''$. Компоненти власного руху зорі становлять $\mu_\alpha = 0.536''/\text{рік}$, $\mu_\delta = 0.385''/\text{рік}$. Паралакс зорі — $0.195''$. Радіальна швидкість зорі дорівнює -26.1 км/с . На основі цих даних визначте:

а) за який час вона пройде на небі відстань, що дорівнює кутовому діаметру Місяця;

б) які будуть у цей час її екваторіальні координати?

в) якою буде у цей час видима зоряна величина Альтаїра, якщо сучасне її значення 0.77^m .

7. Спектральні спостереження деякої галактики дали змогу визначити червоне зміщення у її спектрі $z = 0.1$. Знайдіть, на якій відстані від нас перебувала ця галактика у момент випромінювання спостережуваного світла. Вважайте швидкість окремої галактики незмінною впродовж космологічного розширення.

8. Деяка подвійна система зір з масами компонентів $m_1 = 12M_\odot$, $m_2 = 3M_\odot$ здійснює обертання навколо спільного центру мас за 12

діб. Менш масивний компонент є рентгенівським пульсаром з власним періодом пульсацій 0.15 с (у системі відліку, в якій він є нерухомим). Знайдіть відносну зміну періоду пульсара унаслідок ефекту Доплера. Вважайте, що орбіта пульсара є коловою, і промінь зору спостерігача лежить у площині орбіти.

9. Як зазначалося вище, ефект Доплера є основою для одного із методів виявлення екзопланет. Зокрема, уже знайдено біля десяти екзопланет у системах, де центральною зорею є пульсар. У таких системах екзопланети виявляють на основі аналізу змін у частоті надходження радіоімпульсів, які викликані рухом нейтронної зорі навколо центру мас системи “пульсар–екзопланета”. Оцініть точність (у відсотках), з якою необхідно вимірювати частоту надходження радіоімпульсів, щоб виявити цим методом екзопланету з масою, що дорівнює масі Землі, і обертається навколо пульсара з періодом 50 діб.

10. Як відомо, променеві швидкості зір визначають за допомогою ефекту Доплера. Приблизно у сотні білих карликів було виміряне зміщення ліній у спектрах. Оскільки для випадкової вибірки кількість зір, що наближаються до нас, приблизно дорівнює кількості зір, що віддаляються від нас, то за існування тільки ефекту Доплера можна було очікувати, що середнє зміщення ліній буде нульовим. Проте для досліджених білих карликів середнє зміщення ліній було не нульовим, у перерахунку на променеву швидкість воно виявилось рівним 55 км/с і було червоним. Поясніть причину «втечі» білих карликів? Оцініть середню масу досліджених білих карликів, якщо прийняти їх середній радіус рівним $0.01R_{\odot}$.

Розділ 4

Віртуальна обсерваторія Stellarium

Теоретичні відомості

Stellarium — безкоштовний програмний пакет, за допомогою якого можна здійснювати комп'ютерне моделювання зоряного неба в режимі реального часу. За допомогою цього пакету будь-який комп'ютер можна перетворити у віртуальний планетарій. Stellarium дозволяє відображати на екрані Вашого монітора небосхил з будь-якого місця на Землі в довільний момент часу, моделювати образи сузір'їв, планет та їх супутників, а також фази Місяця. Цей програмний пакет корисний при плануванні астрономічних спостережень, оскільки дозволяє легко визначати положення світил на небесній сфері, місце і момент часу сходу та заходу небесних світил. База даних Stellarium містить інформацію про положення, зоряну величину, спектральний клас та відстань для понад 600 000 зірок.

Перша версія програмного пакету Stellarium була презентована Фабіаном Шеро зі співробітниками у травні 2004 року. З кожним роком Stellarium активно розвивають та вдосконалюють. Найновішу версію програми можна отримати на офіційному сайті Stellarium (<http://www.stellarium.org>).¹

Інтерфейс та налаштування програми

Перед початком віртуальних спостережень необхідно провести налаштування програми. Для цього слід запустити Stellarium і ско-

¹На головній сторінці сайту розміщене посилання на електронний підручник користувача Stellarium.

ристанися панеллю інструментів, яка знаходиться в лівому нижньому кутку екрана (Рис. 4.1). Вибір української мови інтерфейсу здій-



Рис. 4.1: Вікно програми Stellarium (нічний режим).

снюється за допомогою меню *Configuration window* [F2] ⇒ *Main* ⇒ *Program language* ⇒ *українська мова* (*Вікно налаштувань* [F2] ⇒ *Основне* ⇒ *Мова програми* ⇒ *українська мова*). Цей пункт меню також дозволяє увімкнути чи вимкнути навігацію програмою за допомогою клавіатури та миші, а також керувати скриптами та додатками Stellarium.

Далі необхідно вибрати розташування спостерігача, тобто вказати географічні координати місця спостереження. Для цього використовуємо *Вікно розташування* [F6] і вибираємо зі списку Ваш населений пункт, або задаємо «руками» широту, довготу та висоту над рівнем моря Вашої місцевості.

Дата та час спостереження встановлюються автоматично після












запуску програми. Їх значення відповідають тим, які має в даний момент операційна система. Для зміни дати та часу використовується меню *Вікно встановлення дати та часу* [F5].

Вибір «параметрів за замовчуванням» відображення неба, ландшафту, планет і супутників здійснюється за допомогою меню *Вікно параметрів неба та відображення* [F4].

Для пошуку об'єктів на небі використовується меню *Вікно пошуку* [F3].

Довідка про програму знаходиться в меню *Вікно довідки* [F1]. В цьому вікні ви можете знайти інформацію про розробників та Вашу версію Stellarium, а також довідку про «гарячі клавіші».

Проведення спостережень

а) «мандрування у часі». Після запуску Stellarium на екрані буде відобразитися небо, яким воно є на даний момент. За налаштуванням швидкість обертання віртуальної небесної сфери збігається зі швидкістю обертання Землі. У програмі передбачена можливість зміни темпу і напрямку обертання небесної сфери. Для збільшення швидкості «прямого» обертання неба слід натиснути на кнопку збільшення темпу протікання часу  на панелі керування часом (у правому нижньому кутку екрана), або ж натиснути клавішу  на клавіатурі. Кожне послідовне натиснення цієї кнопки збільшує темп. Природній темп обертання небесної сфери встановлюється натисканням кнопки  (клавіша  на клавіатурі). Повернення до поточної дати та часу здійснюється натисканням кнопки  (клавіша ). Для «подорожей у минуле» слід скористатися кнопкою , або ж клавішею . Зупинка плину часу (обертання небесної сфери) відбувається після натискання клавіші . При натисканні клавіш  або  Stellarium здійснює «стрибки у часі» на 7 днів уперед або назад відповідно.

б) «мандрування у просторі». Програмний пакет Stellarium дає можливість переглядати будь-яку ділянку зоряного неба зі збільшенням або зменшенням масштабу. Вибір ділянки неба для перегля-

ду здійснюється клавішами керування курсором, або лівою клавішею маніпулятора «миша». Зміна масштабу здійснюється за допомогою клавіш `Page Up` та `Page Down`, або обертанням колеса прокрутки «мишки».

в) спостереження світил. Вибір об'єкта на небі (зірки, планети чи супутника) можна зробити двома способами: використовуючи меню *Вікно пошуку* [F3], або «руками» виділяючи його лівою кнопкою «мишки». Останній спосіб зручний для вибору великих об'єктів, або коли назва об'єкта невідома. Після виділення об'єкта у лівому верхньому кутку екрана з'являється інформація про дане світило (інформаційне меню). Для зірок це інформація про абсолютну та видиму зоряну величину, горизонтальні та екваторіальні координати, спектральний клас, відстань та паралакс. Для планет та супутників — інформація про абсолютну та видиму зоряну величину, горизонтальні та екваторіальні координати, нахил осі обертання, відстань та видимий діаметр. Для центрування виділеного об'єкта на екрані потрібно натиснути клавішу `Space` («пробіл»). Щоб зняти виділення з об'єкта слід натиснути праву клавішу «мишки» у довільній точці екрану.

Під час проведення віртуальних спостережень зоряного неба можна інтерактивно вмикати та вимикати наступні параметри відображення (в дужках зазначені відповідні клавіші):

- лінії сузір'їв — лінії, які з'єднують зорі у сузір'ях (`C`);
- мітки сузір'їв — назви сузір'їв (`V`);
- зображення сузір'їв — художні зображення сузір'їв (`R`);
- екваторіальна сітка — екваторіальна система небесних координат (`E`);
- горизонтальна сітка — горизонтальна система небесних координат (`Z`);

- Земля — наявність або відсутність поверхні Землі (**G**);
- частини світу — позначення на горизонті чотирьох сторін світу (**Q**);
- атмосфера — наявність або відсутність атмосфери у планети, на якій знаходиться спостерігач (**A**);
- туманності — мітки туманностей (**N**);
- мітки планет — назви планет (**P**);

Для закінчення роботи з програмою слід натиснути кнопку «Вийти» на панелі інструментів, або комбінацію клавіш **Ctrl+Q**.

Приклади розв'язання типових задач

Задача 1

Визначити горизонтальні координати Венери 8 квітня поточного року о 22^h00^m за місцевим часом. Яка видима зоряна величина світила та видимий діаметр в заданий момент часу? Прослідкуйте за траєкторією планети до моменту часу 05^h00^m наступного дня. Зробіть висновки про умови спостереження планети за цей проміжок часу.

Розв'язання

Використовуючи вікно розташування, встановлюємо географічні координати місця спостереження. За допомогою вікна встановлення дати та часу вибираємо дату спостереження 8 квітня поточного року і встановлюємо час 22:00. Використовуючи меню пошуку **[F3]** знаходимо об'єкт «Венера». В інформаційному меню даного об'єкта знаходимо: висота світила $21^{\circ}37'24''$, азимут $283^{\circ}29'07''$. Видима зоряна величина Венери у цей момент дорівнює -4.32 , а видимий кутовий діаметр $27''$.

Встановлюємо за допомогою кількох послідовних натискань клавіші [L] пришвидшене обертання небесної сфери і спостерігаємо, що приблизно о 24:00 планета заходить за горизонт. Таким чином, у зазначеному в умові інтервалі часу спостереження планети Венера можна здійснювати лише протягом двох годин: з 22:00 до 24:00.

Задача 2

Визначити пряме піднесення та схилення Сонця 1 липня в момент його нижньої кульмінації.

Розв'язання

Нижня кульмінація Сонця відповідає початку доби, тобто 24^h00^m . Встановлюємо дату 01.07, час — 24:00. За допомогою вікна пошуку [F3] знаходимо об'єкт «Сонце»². У лівому верхньому кутку знаходимо необхідну інформацію: пряме піднесення $6^h45^m17^s$, схилення $+23^\circ01'29''$.

Задача 3

Визначити абсолютну та видиму зоряні величини зорі Бетельгейзе. До якого спектрального класу відноситься зоря? Яка відстань до зорі? У якому сузір'ї вона знаходиться?

Розв'язання

Знаходимо задану в умові зорю використовуючи меню пошуку. За необхідністю вимикаємо атмосферу ([A]) та поверхню Землі ([G]). З інформаційного меню визначаємо: видима зоряна величина +0.45, абсолютна зоряна величина -5.14, спектральний клас M21b, відстань 427.47 св. роки.

Вмикаючи лінії ([C]) та мітки ([V]) сузір'їв, визначаємо, що Бетельгейзе є найяскравіша зоря в сузір'ї Оріона.

Контрольні запитання

²Очевидно, що для широт України у цей момент Сонце буде знаходитися під горизонтом. Для візуального спостереження Сонця необхідно вимкнути відображення земної поверхні ([G]).

1. Які можливості програмного пакету Stellarium?
2. Як задати місце розташування?
3. Яким чином здійснюється керування швидкістю обертання небесної сфери?
4. Яку інформацію про планети можна отримати за допомогою Stellarium?
5. Чи можна побачити в Stellarium вигляд зоряного неба з поверхні Марса?

Завдання

1. Запустити Stellarium. Встановити місце розташування, яке відповідає Вашому населеному пункту. Провести спостереження небесної сфери у режимах відображення з атмосферою та за її відсутності. Визначити горизонтальні та екваторіальні координати Сонця в момент проведення заняття.

2. Збільшити темп обертання небесної сфери. Прослідкувати за зміною положень світил на небесній сфері протягом доби. Визначити максимальну та мінімальну висоту Сонця протягом доби, що відповідає моменту спостереження. Провести аналогічні спостереження в календарні дні, які відповідають весняному і осінньому рівноденням та літньому і зимовому сонцестоянням. Порівняти одержані результати.

3. Повернутися до календарної дати, яка відповідає моменту проведення заняття. Провести спостереження нічного неба. Виписати кілька найяскравіших світил, які можна спостерігати протягом цієї ночі. Які планети з'являються на нічному небі?

4. Провести спостереження сузір'їв. В якому сузір'ї знаходиться Сонце у даний момент. Знайти на небесній сфері Полярну зірку. Прослідкувати за зміною її положення протягом доби. Сформулювати відповідний висновок. Зробити у зошиті рисунки будь-яких чотирьох

сузір'їв у вигляді зірок, що з'єднані лініями. На рисунку мають бути вказані назви сузір'їв та найяскравішої зірки.

5. Провести спостереження добового руху небесних світил на географічних широтах 0° та 82° . Сформулювати висновки спостережень. Визначити полуденну висоту Сонця в день весняного рівнодення для спостерігача, який перебуває на екваторі. Прослідкувати за зміною дня і ночі в червні та грудні для спостерігача, який перебуває на широті 82° .

6. Провести спостереження планет Сонячної системи. Визначити екваторіальні та горизонтальні координати планет для моменту часу 24^h00^m . У яких сузір'ях перебувають планети та яка у них видима зоряна величина? Встановити наявність у планет супутників.

7. Визначити дати, що відносяться до даного календарного місяця, у які можна спостерігати різні фази Місяця. Визначити найкращий момент часу для проведення спостереження «першої чверті» Місяця. Які висота та азимут Місяця в цей момент? Чому дорівнює видима зоряна величина світила?

8. Провести перевірку рівняння синодичного руху, шляхом визначення проміжків часу між двома послідовними однойменними конфігураціями планет.

9. Для планет сонячної системи провести перевірку третього закону Кеплера.

10. Вказати розміщення на небесній сфері екзопланетної системи TRAPIST-1. Дослідити її параметри (кількість екзопланет та їх відстані від центральної зорі).

11. Провести спостереження туманностей. Знайти положення на небесній сфері та вказати екваторіальні координати наступних туманностей: Крабовидної (M1 або NGC 1952), Орла (M16 або NGC 6611), Великої туманності в Андромеді (M31 або NGC 224). У яких сузір'ях знаходяться туманності? Зобразити у зошиті форму туманностей.

12. За допомогою програмного пакету Stellarium визначити і порівняти фізичні характеристики зір головної послідовності.

13. Прослідкувати за пробігом повного сонячного затемнення, яке відбулося 20 травня 2012 року на території північної Америки. Визначте тип затемнення для спостерігача із координатами (39° Пн.ш., 107° Зх.д.). Визначити час початку та тривалість затемнення за київським часом. Яким воно було на території України?

14. Прослідкувати за пробігом повного сонячного затемнення, яке відбулося 20 березня 2015 року на території Англії. Яким воно було на території України? Визначити час початку та тривалість затемнення.

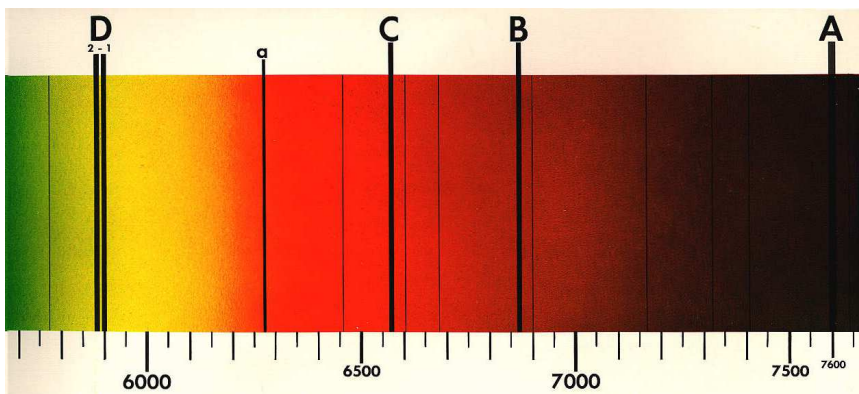
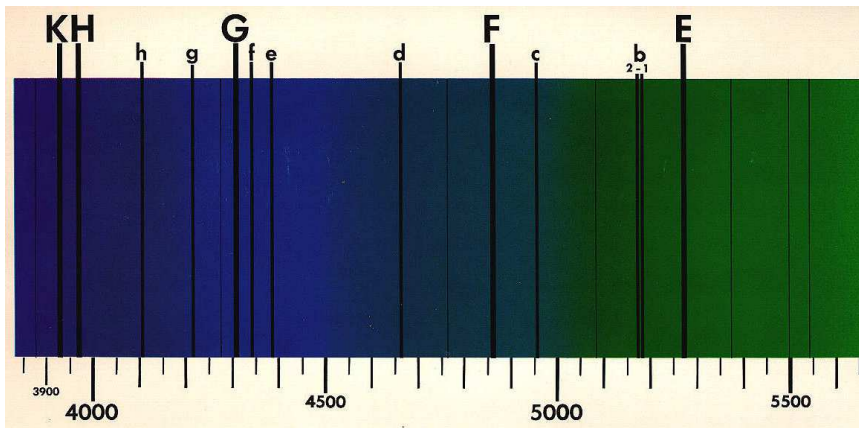
15. Перевірте передбачення щодо сонячного затемнення 13 липня 2075 року. Визначити час початку та тривалість затемнення за київським часом. Яким воно буде на території України?

Додатки

1. Географічні координати обласних центрів України

Місто	φ	λ	Місто	φ	λ
Вінниця	49,2	28,4	Полтава	49,6	34,6
Дніпропетровськ	48,4	35,0	Рівне	50,6	26,1
Донецьк	48,0	37,8	Сімферополь	45,0	34,1
Житомир	50,3	28,7	Суми	50,9	34,8
Запоріжжя	47,8	35,2	Тернопіль	49,6	25,6
Івано-Франківськ	48,9	24,7	Ужгород	48,6	22,4
Київ	50,5	30,5	Харків	50,0	36,3
Кіровоград	48,4	32,2	Херсон	46,6	32,6
Луганськ	48,5	39,3	Хмельницький	49,4	27,0
Луцьк	50,8	25,3	Черкаси	49,5	32,1
Львів	49,9	24,0	Чернігів	51,5	31,3
Миколаїв	47,0	32,0	Чернівці	48,3	25,9
Одеса	46,5	30,75			

2. Спектр Сонця



Найяскравіші лінії поглинання у видимому діапазоні спектру Сонця. Довжини вказані в ангстремах.

Лінії випромінювання хімічних елементів

Хім. ел.	λ , Å	Хім. ел.	λ , Å
Ca	3933	Fe	5169
Ca	3968	Mg	5173
H	4102	Mg	5183
Ca	4227	Fe	5270
Fe	4308	Na	5890
H	4340	Na	5896
H	4861	H	6563
Fe	4958	O ₂	6867
Mg	5167	O ₂	7593

3. Відомості про найяскравіші зорі

Назва	Позначення в сузір'ї	Видима зор. вел.	Абсолют. зор. вел.	Пряме піднесення h m	Схилення o $'$	Паралякс "	Спектральний клас
Сіріус	α Великого Пса	-1,44	1,45	06 45,2	-16 43	0,3792	A1V
Канопус	α Кіля	-0,62	-5,50	06 24,0	-52 42	0,0105	F0II
Толіман	α Пентавра	-0,28	4,11	14 39,7	-60 50	0,7548	G2V
Аргтур	α Волопаса	-0,05	-0,35	14 15,7	+19 11	0,0888	K1.5III
Вега	α Ліри	0,03	0,60	18 36,9	+38 47	0,1302	A0V
Калелла	α Візничого	0,08	-0,51	05 16,7	+46 00	0,0762	G8III
Рігель	β Оріона	0,18	-6,93	05 14,5	-08 12	0,0037	B8Iab
Проціон	α Малого Пса	0,40	2,67	07 39,3	+05 14	0,2845	F5IV
Ахернар	α Еридана	0,45	-2,70	01 37,7	-57 14	0,0233	B3Vne
Бетельгейзе	α Оріона	0,45	-5,47	05 55,2	+07 24	0,0655	M2Iab
Хадар	β Пентавра	0,61	-4,79	14 03,8	-60 22	0,0083	B1III
Альтаір	α Орла	0,76	2,21	19 50,8	+08 52	0,1949	A7V
Альдебаран	α Тельця	0,87	-0,68	04 35,9	+16 31	0,0489	K5III
Спіка	α Діви	0,98	-3,44	13 25,2	-11 10	0,0130	B1III
Ангарес	α Скорпіона	1,05	-5,09	16 29,4	-26 26	0,0058	M1.5Iab
Поллукс	β Близноків	1,16	1,08	07 45,3	+28 02	0,0965	K0III
Фомальгаут	α Південної Риби	1,16	1,74	22 57,6	-29 37	0,1298	A3V
Денеб	α Лебедя	1,25	-6,93	20 41,4	+45 17	0,0023	A2Iae
Регул	α Льва	1,36	-0,57	10 08,4	+11 58	0,0411	B7V
Кастор	α Близноків	1,58	0,61	07 34,6	+31 53	0,0641	A2Vn

Предметний покажчик

- Вольфа число, 100
- Герцшпрунга—Рессела діаграма, 83
- Доплера ефект, 107
- азимут, 10
- астрономічна одиниця, 51
- афелій, 68
- блиск, 77
- вісь світу, 9
- висота світила, 11
- власний рух, 105
- галактика, 109
- годинний кут, 12, 39
- головна послідовність, 84
- грануляція, 97
- доба
- зоряна, 20
 - сонячна, 20
- екліптика, 9, 22
- елонгація, 69
- задача двох тіл, 59
- закон
- Всесвітнього тяжіння, 57
 - Габбла, 110
 - Погсона, 78
 - Стефана-Больцмана, 81
 - зміщення Віна, 82, 94
- закони Кеплера
- третій уточнений Ньютоном, 60
 - другий, 67
 - перший, 67
 - третій, 67
- зеніт, 7
- зенітна відстань, 11
- зона
- конвективна, 96
 - променистого переносу, 96
- зоряна величина
- абсолютна, 80
 - болометрична, 78
- карта зоряного неба рухома, 30
- квадратура, 70
- кульмінація світила, 10, 14, 20
- кутовий діаметр світила, 50
- лінії фраунгофера, 93
- математичний горизонт, 8, 33
- нахил орбіти, 72
- небесні координати

- горизонтальні, 10
екваторіальні, 12
небесна сфера, 7
небесний
 екватор, 9, 31
 меридіан, 9, 33
- паралакс, 47
паралактичний трикутник, 37
парсек, 51
перигелій, 68
поверхнева гравітація, 57
програмний пакет Stellarium, 116
проникна сила телескопа, 79
протистояння, 70
протоберанець, 100
протон-протонний цикл, 95
пряме піднесення, 13
- рівнодення, 10
рівняння часу, 23
рік тропічний, 25
рефракція, 40
- світловий рік, 51
світність, 81
сидеричний період, 69
синодичний період, 71
сонцестояння, 10
сонячна активність, 99
сонячна корона, 98
сонячна стала, 92
- сонячне ядро, 94
сонячний вітер, 99
спікула, 98
спектральна класифікація
 гарвардська, 82
 йєркська, 82
спектральний клас, 82
сполучення, 69
сфера Гілла, 62
схилення, 13
- теорема про висоту полюса світу,
 11
точки Лагранжа, 60
 колінеарні, 60
 троянські, 60
трикутник паралактичний, 14
- фотосфера, 97
- хромосфера, 97
- час
 істинний сонячний, 21
 Всесвітній, 21
 зоряний, 20
 літній, 25
 поясний, 24
 середній сонячний, 22
червоний зсув, 107
- швидкість
 друга космічна, 58

перша космічна, 58

швидкість зорі

променева, 107

тангенціальна, 106

Література для подальшого вивчення

- [1] Александров Ю. В. Астрофізика: підручник / Ю. В. Александров, В. Г. Шевченко. – Х.: ХНУ імені В. Н.Каразіна, 2016. – 252 с.
- [2] Андрієвський С.М. Курс загальної астрономії: Навчальний посібник / С.М. Андрієвський, І.А. Климишин – Одеса: Астропринт, 2007. – 480 с.
- [3] Кононович Э.В. Общий курс астрономии / Э.В. Кононович, В.И. Морозов – М: Едиториал УРСС, 2004. – 544 с.
- [4] Bradley W. Carroll An Introduction to Modern Astrophysics / Bradley W. Carroll and Dale A. Ostlie – Cambridge University Press, 2017. – 1359 p.
- [5] Smart W.M. Textbook on Spherical Astronomy / W.M. Smart, R.M. Green – Cambridge University Press, 1977. – 431 p.
- [6] Moore P. The Data Book of Astronomy / P. Moore – Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia, 2000. – 522 p.
- [7] Воронцов-Вельяминов Б.А. Сборник задач и практических упражнений по астрономии / Б.А. Воронцов-Вельяминов – М.: Наука, 1977 – 272 с.
- [8] Дагаев М.М. Сборник задач по астрономии / М.М. Дагаев – М.: Просвещение, 1980 – 128 с.
- [9] Климишин І.А. Астрономія: Практикум / І.А. Климишин – Л.: Світ, 1996. – 248 с.

Електронні ресурси

Олімпіади з астрономії та астрофізики

<http://www.astroosvita.kiev.ua/proekty/astroolimpiada/Astroolimp/golovna.html>

<http://usao.org.ua/>

<http://space.univ.kiev.ua>

Програмний пакет Stellarium

<http://stellarium.org/uk/>

<http://www.astroosvita.kiev.ua/infoteka/articles/>

Астрономічні портали: новини, зображення, ефемериди

<http://www.nasa.gov/>

<http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/astropix.html>

<http://space.univ.kiev.ua/eph/index.html>

<https://sohowww.nascom.nasa.gov/>

<http://www.stsci.edu/>

Навчально-методичне видання

Шигорін Павло Павлович

**Вибрані питання
астрономії та астрофізики**

Навчальний посібник

Друкується в авторській редакції

Верстка *П. П. Шигорін*