

ЗМІСТ

1 Небесна сфера. Системи небесних координат. Вигляд зоряного неба на різних географічних широтах.....	4
2 Системи відліку часу.....	14
3 Рух планет та їх конфігурації.....	19
4 Зоряна астрономія. Блиск світил та їх характеристики.....	25
5 Рух зірок та галактик у просторі.....	33
Відповіді.....	41

1 НЕБЕСНА СФЕРА. СИСТЕМИ НЕБЕСНИХ КООРДИНАТ. ВИГЛЯД ЗОРЯНОГО НЕБА НА РІЗНИХ ГЕОГРАФІЧНИХ ШИРОТАХ

Теоретичні відомості

Небесною сферою називається уявна сфера довільного радіусу, описана з ока спостерігача, як із центру. На цю сферу проєктуються положення всіх небесних світил. Відстані на небесній сфері можна вимірювати лише у кутових одиницях, наприклад, у градусах.

Вертикальна лінія, що проходить через центр небесної сфери (рис.1.1), перетинає її у точках **зеніту** (Z) і **надиру** (Z'). Зеніт розташований над головою спостерігача. Горизонтальна площина, що проходить через центр сфери, перетинається із нею по великому колу – по **лінії математичного горизонту**.

Добове обертання небесної сфери (уявне обертання, яке викликане обертанням Землі) відбувається навколо осі миру, яка

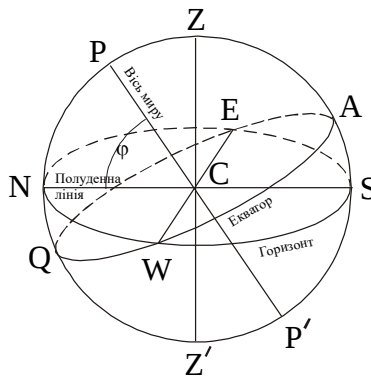


Рис. 1.1

проходить через центр сфери та перетинає її в точках, що називають північним (P) та південним (P') **полюсами миру**. Перпендикулярна до осі миру площина, що проходить через центр сфери, перетинається з нею по лінії **небесного екватору**. Площина, що проходить, через вертикальну лінію та вісь миру, називається площиною меридіану і перетинає сферу по лінії **небесного меридіану**. Перетин горизонту з меридіаном відбувається в точках півдня S та півночі N, а площини цих кругів перетинаються по **полуденній лінії**. Точка півночі (N) лежить на горизонті прямо під північним полюсом миру (P). Екватор перетинається з горизонтом в точках сходу (E) та заходу (W), а з меридіаном у двох точках, з яких та, що знаходиться над горизонтом, називається точкою екватору (A).

Велике коло небесної сфери, по якому на протязі року, уявно рухається центр Сонця (внаслідок річного обертання Землі навколо Сонця), називається **екліптикою**. Екліптика перетинається з екватором (рис.1.2) під кутом $\epsilon = 23^{\circ}27'$. При обертанні небесної

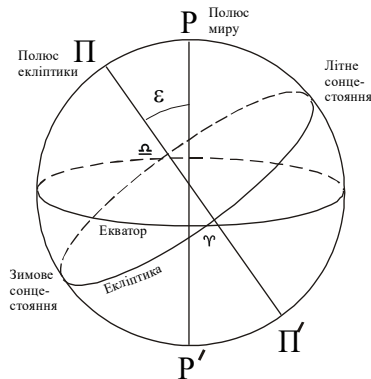


Рис. 1.2

сфери положення екліптики відносно горизонту змінюється, на відміну від всіх інших перерахованих ліній небесної сфери. Екліптика перетинається з екватором в точках весняного та осіннього рівнодення. Відповідно, перша з них (Υ) знаходиться у сузір'ї Риб, друга (Ω) – у сузір'ї Діви.

Положення точок, зокрема світил, на небесній сфері визначаються сферичними координатами. Найбільш поширеними є чотири системи координат. У кожній з них положення точки визначається двома координатами, одна з яких, дає кутову відстань цієї точки від площини деякого основного кола (аналогічно географічній широті), а друга відраховується вздовж цього основного кола від певної його точки (аналогічно географічній довготі).

Горизонтальні координати (h та A). Висота h відраховується від горизонту до даної точки за великим півколом, що проведене через цю точку із zenіту (коло висоти) (рис.1.3). Азимут A відраховується від точки півдня S за годинниковою стрілкою вздовж горизонту до його перетину з колом висоти, яке проходить через дану

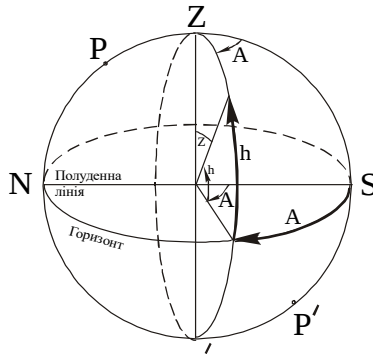


Рис. 1.3

точку. Замість висоти h часто використовують **зенітну відстань** z , яка дорівнює $90^\circ - h$, тобто кутова відстань точки від зеніту. Висота h (або зенітна відстань z) та азимут A залежать від широти місцевості і від моменту спостереження. (В геодезії азимут відраховують від точки півночі N .)

Екваторіальні координати (δ та α). Схилення δ відраховується від небесного екватору до даної точки за великим півколом, що проведене через неї з полюсу миру (коло схилення) (рис.1.4). У північній півкулі неба схилення позитивне, у південній – негативне. **Пряме сходження** α відраховується від точки весняного рівнодення Υ у північній півкулі проти годинникової стрілки, вздовж

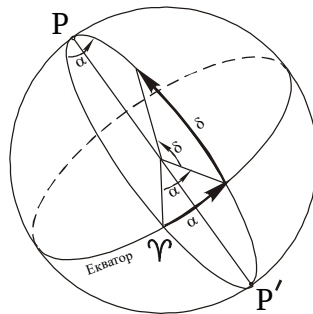


Рис. 1.4

небесного екватора до його перетину з колом схилення, що проходить через дану точку. Воно виражається у годинниковій мірі, виходячи з того, що $24^h = 360^\circ$; $1^h = 15^\circ$; $1^{хв} = 15'$; $1^с = 15''$; $1^\circ = 4^{хв}$. В екваторіальній системі координат (δ та α) положення світила не залежить ні від добового обертання небесної сфери, ні від місця спостереження.

Екваторіальні координати (δ та t). Величина δ - та ж координата, що і в попередній системі координат (рис.1.5), t – **часовий кут**, який відраховується від точки перетину екватору з меридіаном А за годинниковою стрілкою (в напрямку заходу) до перетину екватору з колом схилення, яке проходить через дану точку. Часовий кут t виражається (подібно α) у годинниковій мірі, та залежить від часу спостереження.

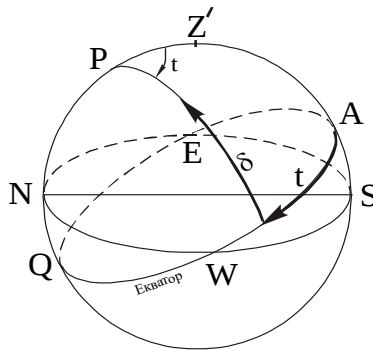


Рис.1.5

Екліптичні координати (β та λ). Екліптична широта β відраховується від екліптики до даної точки за великим півколом, проведеним через дану точку з полюса екліптики П (коло широти) (рис.1.6). Північніше екліптики β позитивна, південніше негативна. **Екліптична довгота λ** відраховується від точки весняного рівнодення Υ проти годинникової стрілки вздовж екліптики до її перетину з колом широти проведеним через дану точку. Координати β та λ , подібно до δ та α , не залежать ні від моменту, ні від місця спостереження.

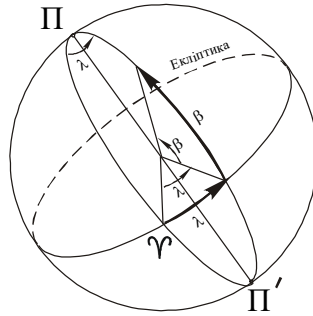


Рис. 1.6

У кожному місці земної поверхні висота h_p полюса миру (точка небесної сфери, через яку проходить її вісь обертання) завжди дорівнює географічній широті φ цього місця, тобто

$$h_p = \varphi, \quad (1.1)$$

а площина небесного екватора та площини небесних паралелей нахилені до площини горизонту під кутом

$$i = 90^\circ - \varphi. \quad (1.2)$$

Висота h і зенітна відстань z будь-якої точки небесної сфери, у тому числі і будь-якого світила, зв'язані між собою співвідношенням

$$h + z = 90. \quad (1.3)$$

В момент верхньої кульмінації (момент найбільшої висоти світила над горизонтом) (рис.1.7) світило із схиленням $\delta < \varphi$ (світила M_1, M_2, M_3) перетинає небесний меридіан південніше зеніту Z (над або під точкою півдня S) із зенітною відстанню

$$z_b = \varphi - \delta, \quad (1.4)$$

висота

$$h_b = (90^\circ - \varphi) + \delta, \quad (1.5)$$

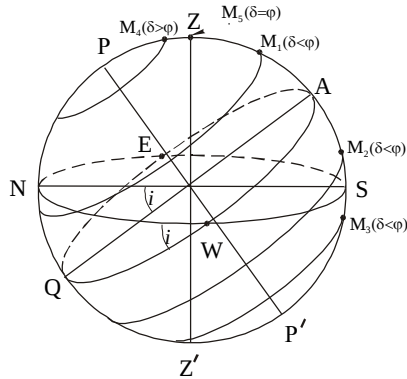


Рис.1.7

азимут $A_b = 0^\circ$ та часовий кут $t_b = 0^\circ = 0^h$.

При $\delta > \varphi$ (світло M_4) у верхній кульмінації перетинає небесний меридіан північніше від зеніту (між зенітом Z та північним полюсом миру P), і тоді зенітна відстань світила

$$z_b = \delta - \varphi, \quad (1.6)$$

висота

$$h_b = (90^\circ - \delta) + \varphi, \quad (1.7)$$

азимут $A_b = 180^\circ$ та часовий кут $t_b = 0^\circ = 0^h$.

В момент нижньої кульмінації (рис.1.8) світло перетинає небесний меридіан під північним полюсом миру: світло, що не заходить (M_4) - над точкою півночі N, світло, що заходить (M_1, M_2) і світло, що не сходить (M_3) - під точкою півночі. У нижній кульмінації висота світила

$$h_n = \delta - (90^\circ - \varphi), \quad (1.8)$$

його зенітна відстань

$$z_H = 180^\circ - \delta - \varphi \quad (1.9)$$

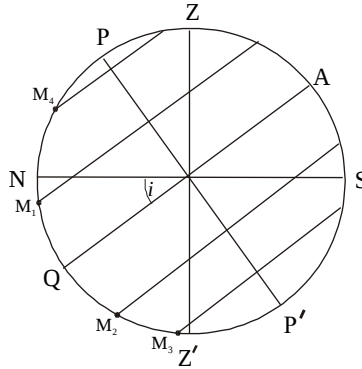


Рис. 1.8

азимут $A_H = 180^\circ$ та часовий кут $t_b = 180^\circ = 12^h$.

Приклад

На якій географічній широті відбувається кульмінація Сонця в день літнього сонцестояння на висоті $+72^\circ 50'$ над точкою півночі? Чому дорівнює полуденна висота Сонця та висота опівночі на тій же широті в дні рівнодень та зимового сонцестояння?

Дано: день літнього сонцестояння; $h_b = +72^\circ 50' N$; $\delta = +23^\circ 27'$

Розв'язування: В день літнього сонцестояння полуденна зенітна відстань Сонця $z_b = 90^\circ - h_b = 90^\circ - 72^\circ 50' N = 17^\circ 10' N$, оскільки кульмінація відбувається північніше зеніту, то $\delta > \varphi$, і згідно з формулою (1.6) $\varphi = \delta - z_b = +23^\circ 27' - 17^\circ 10' = +6^\circ 17'$.

В дні рівнодень $\delta = 0^\circ$, і за формулами (1.5) та (1.8),

$$h_b = 90^\circ - \varphi = 90^\circ - 6^\circ 17' = +83^\circ 43' S$$

та

$$h_n = -(90^\circ - \varphi) = -(90^\circ - 6^\circ 17') = -83^\circ 43' \text{ N.}$$

У день зимового сонцестояння $\delta = -23^\circ 27'$, тобто $\delta < \varphi$, і тому за тими ж формулами

$$h_b = 90^\circ - \varphi + \delta = 90^\circ - 6^\circ 17' - 23^\circ 27' = +60^\circ 16' \text{ S}$$

та

$$h_n = \delta - (90^\circ - \varphi) = -23^\circ 27' - (90^\circ - 6^\circ 17') = -107^\circ 10' \text{ N.}$$

Висота в нижній кульмінації виявилась меншою -90° , що не можливо. Це означає, нижня кульмінація Сонця відбувається під точкою півдня S. Тому дійсна висота $h_n = -(180^\circ - 107^\circ 10') = -72^\circ 50' \text{ S.}$

Задачі

1.1 Визначити висоту полюса миру та нахил небесного екватора до горизонту на земному екваторі, на північному тропіку ($\varphi = +23^\circ 27'$), на північному полярному колі ($\varphi = +66^\circ 33'$) та на північному географічному полюсі.

1.2 У яких світил азимут в Запоріжжі ($\varphi = +47^\circ 48'$) ніколи не дорівнює нулю?

1.3. При якому схиленні зірки її азимут в момент верхньої кульмінації дорівнює 0° та при якому він дорівнює 180° ?

1.4 Розрахувати нахил екліптики за виміряними в дні сонцестоянь полуденним зенітним відстаням Сонця $29^\circ 48'$ та $76^\circ 42'$ південніше від зеніту.

1.5 Зірка α Візничого ($\delta = +45^\circ 54'$) в момент нижньої кульмінації видно на горизонті. Яка висота полюсу миру в місці спостереження?

1.6 В деякому місці спостереження зірка із схиленням $+32^\circ 19'$ піднімається над точкою півдня на висоту $+63^\circ 42'$. Знайти зенітну відстань та висоту цієї зірки в тому ж місці, при азимуті 180° .

1.7 Розрахувати різницю найбільшої та найменшої висоти зірки Альдебаран (α Тільця) в тих місцях, де обидві її кульмінації бувають північніше від zenіту. В межах яких географічних паралелей можливі ці явища? Схилення Альдебарану дорівнює $+16^{\circ}25'$.

1.8 Розрахувати для днів рівнодень та сонцестоянь полуденну висоту Сонця в Запоріжжі ($\varphi = +47^{\circ}48'$), Москві ($\varphi = +55^{\circ}45'$) та Ашхабаді ($\varphi = +37^{\circ}45'$).

1.9 Знайти zenітну відстань Веги (α Ліри) ($\delta = +38^{\circ}42'$) під час кульмінації в Запоріжжі ($\varphi = +47^{\circ}48'$).

1.10 Полярна відстань (відстань від полюса миру) зірки дорівнює $20^{\circ}15'$. Яка її zenітна відстань в нижній кульмінації в Запоріжжі ($\varphi = +47^{\circ}48'$)?

1.11 В Одесі ($\varphi = +46^{\circ}29'$) на zenітній відстані $63^{\circ}05'$ спостерігалась верхня кульмінація Сиріуса. Яке його схилення?

1.12 До якого схилення видно зірки південної півкулі в Києві ($\varphi = +50^{\circ}27'$)?

1.13 Полуденна висота центру Сонця, виміряна штурманом океанського судна, виявилась $+30^{\circ}15'$. Схилення Сонця в цей час $\delta = -19^{\circ}25'$. Визначити широту.

1.14 На якій географічній широті Сонце кульмінує в день літнього сонцестояння на zenітній відстані $10^{\circ}41'$ північніше від zenіту? Чому дорівнює полуденна висота Сонця на тій же широті в дні рівнодень та сонцестоянь?

1.15 Знайти широту місцевості, якщо опівночі Сонце спостерігалось на висоті $4^{\circ}11'$, а його схилення було $+22^{\circ}08'$.

1.16 Зірка, що не заходить, спостерігалась у верхній кульмінації північніше від зеніту на зенітній відстані $29^{\circ}47'$, а в нижній - на $+41^{\circ}41'$ Визначити географічну широту місця спостереження.

1.17 Зірка, що не заходить має висоту 20° в нижній кульмінації та 50° в верхній. Знайти схилення цієї зірки та широту місця спостереження.

1.18 На яких географічних паралелях Сонце не сходить, проходить в зеніті і не заходить в дні, коли його схилення дорівнює $+21^{\circ}19'$ та $-16^{\circ}43'$?

1.19 Визначити відношення кількості тепла, що одержує від Сонця одинична горизонтальна площа опівдні в дні рівнодень та сонцестоянь в містах, вказаних в задачі 1.8. Порівняння провести для кожного міста окремо (за датами) та між містами в кожному дати.

1.20 Знайти планетографічну широту (кутова відстань від екватора планети, аналогічна географічній широті на Землі) тропіків та полярних кіл на Марсі, Юпітері та Урані, якщо нахил осі Марса $24^{\circ}48'$, осі Юпітера $3^{\circ}07'$, а осі Урана 98° (нахил більший 90° означає протилежне обертання планети).

2 СИСТЕМИ ВІДЛІКУ ЧАСУ

Теоретичні відомості

Зоряний час S визначається часовим кутом t_{γ} точки весняного рівнодення і тому завжди $S = t_{\gamma}$. У світила з прямим сходженням α часовий кут

$$t = S - \alpha. \quad (2.1)$$

Зоряний час S в пункті з географічною довготою λ пов'язаний із зоряним гринвіцьким часом S_0 рівнянням

$$S = S_0 + \lambda, \quad (2.2)$$

причому λ відраховується у східному напрямку від Гринвіча і виражається в годинах, хвилинах та секундах дуги.

Середня сонячна доба, яка використовується у повсякденні, триваліша зоряної доби на $3^{\text{хв}}56^{\text{с}},6$.

Місцевий середній час

$$T_{\lambda} = T_{\text{O}} + \eta, \quad (2.3)$$

де η - рівняння часу (поправка, що обумовлена ексцентриситетом орбіти Землі та нахилом екліптики відносно небесного екватору), а T_{O} - дійсний сонячний час, що визначається часовим кутом Сонця, збільшеним на $12^{\text{г}}$, тобто

$$T_{\text{O}} = t_{\text{O}} + 12^{\text{г}} \quad (2.4)$$

Місцевий середній час $T_{\lambda 1}$ та $T_{\lambda 2}$, двох пунктів зв'язані між собою рівнянням

$$T_{\lambda 2} - T_{\lambda 1} = \lambda_2 - \lambda_1, \quad (2.5)$$

а з середнім Гринвіцьким часом T_0 (який називають всесвітнім часом) – рівнянням

$$T_{\lambda} = T_0 + \lambda. \quad (2.6)$$

В повсякденному житті використовується або поясний час

$$T_n = T_0 + n, \quad (2.7)$$

або декретний час

$$T_d = T_n + 1^{\text{г}} = T_n = T_0 + n + 1^{\text{г}}, \quad (2.8)$$

де n – номер часового поясу.

Приклад

В момент верхньої кульмінації зірки α Дракона на зенітній відстані $9^{\circ}17'$ на північ. Зоряний годинник, що йде за гринвіцьким зоряним часом показував $7^{\text{г}}42^{\text{хв}}54^{\text{с}}$. Екваторіальні координати α

Дракона: пряме сходження $14^{\text{г}}03^{\text{хв}}02^{\text{с}}$; схилення $+ 64^{\circ}37'$. Визначити географічні координати місця спостереження.

Дано: $\alpha = 14^{\text{г}}03^{\text{хв}}02^{\text{с}}$; $\delta = + 64^{\circ}37'$; $z_{\text{в}} = 9^{\circ}17' \text{ N}$; $S_0 = 7^{\text{г}}42^{\text{хв}}54^{\text{с}}$;

Розв'язування: За формулою (1.6), географічна широта

$$\varphi = \delta - z_{\text{в}} = +64^{\circ}37' - 9^{\circ}17' = + 55^{\circ}20'.$$

Згідно із формулою (2.1), зоряний час в місці спостереження

$$S = \alpha = 14^{\text{г}}03^{\text{хв}}02^{\text{с}}.$$

За формулою (2.2), географічна довгота місця спостереження

$$\lambda = S - S_0 = 4^{\text{г}}03^{\text{хв}}02^{\text{с}} - 7^{\text{г}}42^{\text{хв}}54^{\text{с}} = 6^{\text{г}}20^{\text{хв}}08^{\text{с}}, \text{ або переводячи у}$$

кутові одиниці, $\lambda = 95^{\circ}02'$.

Задачі

2.1 Визначити зоряний час в момент верхньої та нижньої кульмінації Фомальгаута (α Південної Риби), пряме сходження якої $22^{\text{г}}54^{\text{хв}}53^{\text{с}}$.

2.2 Знайти зоряний час в моменти, в які часовий кут Рігеля (β Орiona) відповідно дорівнює $-3^{\text{г}}17^{\text{хв}}43^{\text{с}}$ та $1^{\text{г}}42^{\text{хв}}29^{\text{с}}$. Пряме сходження цієї зірки $5^{\text{г}}12^{\text{хв}}08^{\text{с}}$.

2.3 Визначити зоряний час в пунктах з географічною довготою $2^{\text{г}}13^{\text{хв}}23^{\text{с}}$ та $84^{\circ}58'$ в момент, коли в пункті з довготою $4^{\text{г}}37^{\text{хв}}11^{\text{с}}$ Кастор (α Близнюків) знаходиться у верхній кульмінації. Пряме сходження Кастора $7^{\text{г}}31^{\text{хв}}25^{\text{с}}$.

2.4 Розрахувати часові кути Алголя (β Персея) та Альтаіра (α Орла) в $8^{\text{г}}20^{\text{хв}}30^{\text{с}}$ зоряного часу. Пряме сходження цих зірок відповідно $3^{\text{г}}04^{\text{хв}}54^{\text{с}}$ та $19^{\text{г}}48^{\text{хв}}21^{\text{с}}$. Часові кути виразити в градусних одиницях.

2.5 На яких географічних меридіанах зоряний час відповідно дорівнює $22^{\text{г}}48^{\text{хв}}30^{\text{с}}$ та $7^{\text{г}}36^{\text{хв}}34^{\text{с}}$, якщо в місцевості з географічною довготою

$5^{\text{h}}31^{\text{m}}40^{\text{s}}$ зірка Капелла (α Візничого) має часовий кут $-2^{\text{h}}39^{\text{m}}08^{\text{s}}$?

Пряме сходження Капелли $5^{\text{h}}13^{\text{m}}0^{\text{s}}$

2.6 Знайти середній, поясний та декретний час в пунктах з географічною довготою $4^{\circ}43'28''$ та $9^{\circ}18'37''$ в момент $6^{\text{h}}52^{\text{m}}06^{\text{s}}$ за середнім гринвіцьким часом. Перший пункт знаходиться у п'ятому, а другий у десятому часовому поясі.

2.7 В даний момент зоряний час $s = 6^{\text{h}}38^{\text{m}}$. Визначити пряме сходження світил, які будуть знаходитись у верхній кульмінації через $2^{\text{h}}10^{\text{m}}$.

2.8 В Києві ($\varphi = 50^{\circ}27'$) спостерігалась кульмінація комети, що з'явилась. Зенітна відстань виявилась $3^{\circ}52'$ південніше зеніту, а за зоряним годинником момент кульмінації $15^{\text{h}}15^{\text{m}}10^{\text{s}}$. Визначити δ та α комети.

2.9 Знайти різницю між поясним та середнім, а також між декретним та середнім часом в пункті з географічною довготою $7^{\circ}18'58''$, розташованому у сьомому часовому поясі.

2.10 Повна фаза місячного затемнення 4 травня 2004 року почалося в $19^{\text{h}}53^{\text{m}}$ та скінчилась в $21^{\text{h}}09^{\text{m}}$ за всесвітнім часом. Визначити, коли почалося та скінчилось затемнення в Запоріжжі за київським часом.

2.11 Літак вилетів з Єкатеринбургу ($n = 4$) в $11^{\text{h}}20^{\text{m}}$ та прибув у Київ в $13^{\text{h}}5^{\text{m}}$ ($n=2$). Скільки часу летів літак?

2.12 Через скільки часу після верхньої кульмінації Денеба (α Лебедя) наступить верхня кульмінація зірки γ Оріона, а потім знову верхня кульмінація Денеба? Пряме сходження Денеба $20^{\text{h}}39^{\text{m}}44^{\text{s}}$, а γ Оріона $5^{\text{h}}22^{\text{m}}27^{\text{s}}$. Інтервали часу виразити в системах зоряного та середнього часу.

2.13 Довгота першого пункту від Гринвіча $37^{\circ}34'$ на схід. На якій довготі від Гринвіча знаходиться другий пункт, де годинник за зоряним часом показує $8^{\text{г}}45^{\text{хв}}$, в той час коли в першому $2^{\text{г}}30^{\text{хв}}$?

2.14 За спостереженням на судні, 14 червня, виконаними за допомогою секстанту, кульмінація відбулась в $8^{\text{г}}23^{\text{хв}}$ за годинником, що показує гринвіцький зоряний час. Кульмінація відбулась при зенітній відстані $22^{\circ}2'$. Визначити довготу та широту судна, якщо за морським астрономічним щорічником в цей день та час координати Сонця були $\alpha = 5^{\text{г}}26^{\text{хв}}$, $\delta = +18^{\circ}25'$.

2.15 Капітан корабля виміряв в дійсний полудень 22 грудня зенітну відстань Сонця $z = 66^{\circ}33'$. Хронометр, що йде за гринвіцьким часом, показав в момент спостереження $11^{\text{г}}54^{\text{хв}}$. Рівняння часу в цей день було $\eta = -9^{\text{хв}}$. Знайти координати корабля.

2.16 Діаметр деякого міста дорівнює 20 км. На скільки дійсний полудень на його східній околиці настає раніше, ніж на західній околиці, якщо його широта $\varphi = 47^{\circ}48'$.

2.17 В які моменти часу у Гринвічі знаходяться у верхній кульмінації зірки Поллукс ($\alpha = 7^{\text{г}}42^{\text{хв}}16^{\text{с}}$), а в нижній кульмінації зірка Арктур ($\alpha = 14^{\text{г}}13^{\text{хв}}23^{\text{с}}$) 10 лютого ($s_0 = 9^{\text{г}}17^{\text{хв}}48^{\text{с}}$) та 9 травня ($s_0 = 15^{\text{г}}04^{\text{хв}}45^{\text{с}}$)? Якщо s_0 – зоряний час опівночі за всесвітнім часом.

2.18 В які моменти часу 5 лютого ($s_0 = 8^{\text{г}}58^{\text{хв}}06^{\text{с}}$) та 15 серпня ($s_0 = 21^{\text{г}}31^{\text{хв}}08^{\text{с}}$) часові кути зірок Сіріуса ($\alpha = 6^{\text{г}}42^{\text{хв}}57^{\text{с}}$) та Альтаіра ($\alpha = 19^{\text{г}}48^{\text{хв}}21^{\text{с}}$) в Запоріжжі ($\lambda = 35^{\circ}07'$, $n = 2$) дорівнюють $3^{\text{г}}28^{\text{хв}}47^{\text{с}}$? Якщо s_0 – зоряний час опівночі за всесвітнім часом.

2.19 О $14^{\text{г}}15^{\text{хв}}10^{\text{с}}$ за середнім часом Сіріус з прямим сходженням $6^{\text{г}}42^{\text{хв}}57^{\text{с}}$ знаходився у нижній кульмінації. В які найближчі моменти часу після цього Гемма (α Північної Корони) буде знаходитись у

верхній кульмінації та коли її часовий кут буде становити $3^{\text{г}}16^{\text{хв}}0^{\text{с}}$?
Пряме сходження Гемми $15^{\text{г}}32^{\text{хв}}34^{\text{с}}$.

2.20 На яких географічних меридіанах зірки α Близнюків та γ Великої Ведмедиці знаходяться у верхній кульмінації 20 вересня (зоряний час опівночі за всесвітнім часом становить $21^{\text{г}}31^{\text{хв}}08^{\text{с}}$) в $8^{\text{г}}40^{\text{хв}}26^{\text{с}}$ за київським часом. Пряме сходження цих зірок відповідно становить $7^{\text{г}}31^{\text{хв}}25^{\text{с}}$ та $11^{\text{г}}51^{\text{хв}}13^{\text{с}}$.

З РУХ ПЛАНЕТ ТА ЇХ КОНФІГУРАЦІЇ

Теоретичні відомості

Планети рухаються навколо Сонця по еліптичним орбітам. Витягнутість цих орбіт і нахили їх площин до екліптики малі (крім орбіти Плутона), тому при вирішенні багатьох задач планетні орбіти можна вважати коловими та які знаходяться в площині екліптики. Орбіти планет Меркурія та Венери лежать усередині орбіти Землі, це – нижні планети. Інші планети – верхні – далші від Сонця ніж Земля.

Різні характерні взаємні розташування планет відносно Землі та Сонця (планетні конфігурації) показані на рис.3.1, на якому положення Землі відзначене літерою Т, та назви цих конфігурацій підписані.

Якщо позначити через T – період обертання планети навколо Сонця (**сидеричний період**), T_0 – тривалість року, S – проміжок часу між двома однаковими конфігураціями планети (**синодичний період**), то можна записати **рівняння синодичного руху**:

$$\text{для нижньої планети} \quad \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} = \frac{1}{S} \quad (3.1)$$

для верхньої планети $\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} = \frac{1}{S}$. (3.2)

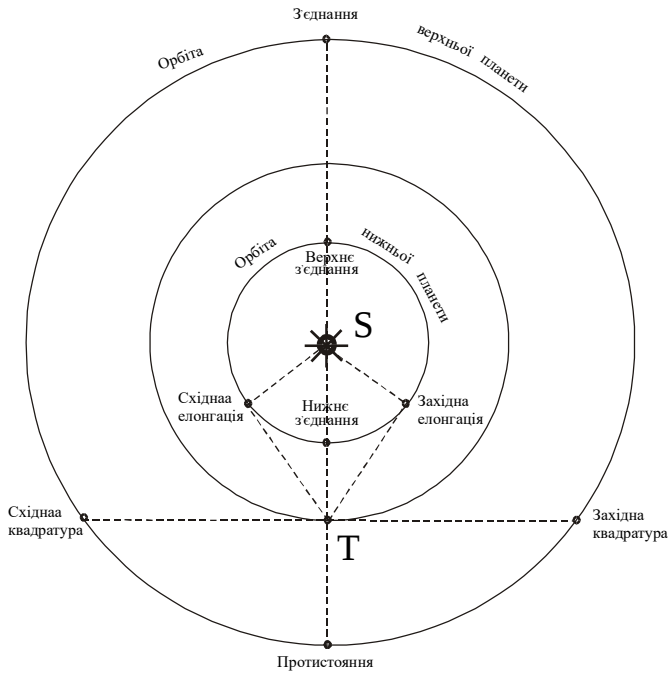


Рис. 3.1

Рух планет відбувається за законами Кеплера:

- 1) Кожна планета рухається по еліпсу, в одному з фокусів якого заходиться Сонце.
- 2) При русі планети її радіус – вектор описує рівні площі за рівні проміжки часу.

3) Квадрати сидеричних періодів обертання планет відносяться як куби великих півосей їх орбіт (як куби їх середніх відстаней від Сонця), тобто

$$\frac{a_1^3}{a_2^3} = \frac{T_1^2}{T_2^2}. \quad (3.3)$$

Ці закони справедливі і для руху супутників навколо своєї планети.

Витягнутість еліпса характеризується величиною ексцентриситету e . Якщо $e = 0$, то орбіта – коло, у випадку $0 < e < 1$, то орбіта – еліпс. Якщо $e = 1$, то орбіта – нескінченно витягнутий еліпс, тобто парабола, при $e > 1$, то орбіта – гіпербола.

Найменша відстань планети від Сонця (рис.3.2)

$$q = a(1 - e), \quad (3.4)$$

найбільша відстань

$$Q = a(1 + e). \quad (3.5)$$

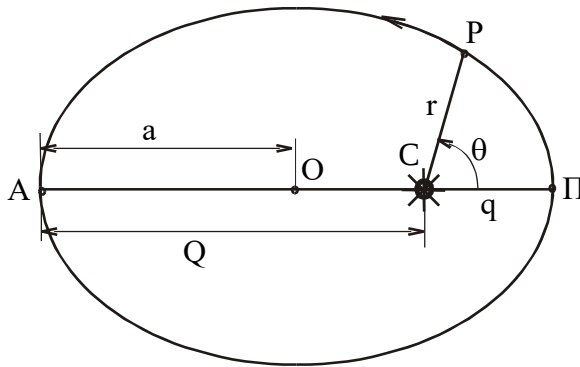


Рис. 3.2

Точка П – найближча до Сонця називається **перигелієм**, точка А – найбільш віддалена від Сонця – **афелієм**. Радіус – вектор r планети визначається рівнянням еліпса

$$r = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos \theta} \quad (3.6)$$

де θ - кут між напрямком на перигелій та радіусом – вектором планети (дійсна аномалія).

Приклад

Знайти перигелійну та афелійну відстань, сидеричний та синодичний період обертання малої планети Поезії, якщо велика піввісь та ексцентриситет її орбіти дорівнюють 3,12 а. о. та 0,144.

Дано: $a = 3,12$ а.о.; $e = 0,144$.

Розв’язування: За формулами (3.4) та (3.5) перигелійна відстань $q = a(1 - e) = 3,12(1 - 0,144) = 2,67$ а.о. та афелійна відстань $Q = a(1 + e) = 3,12(1 + 0,144) = 3,57$ а.о.

З формули (3.3) випливає, що:

$$T = a^{\frac{3}{2}} = 3,12^{1,5} = 5,51 \text{ року, а оскільки } a > a_0 = 1 \text{ а.о. то}$$

планета верхня і тому її синодичний період обертання S розраховується за формулою (3.2) при $T_0 = 1$ рік:

$$S = T/(T-1) = 5,51/(5,51 - 1); S = 1,22 \text{ року.}$$

Задачі

3.1 Чи можна спостерігати Меркурій вечором на сході?

3.2 Наскільки (у кутовому виміру) Земля за добу випереджує Марс, якщо дивитись з Сонця (зоряні періоди обертання цих планет відповідно дорівнюють 365,25 та 687 діб)?

3.3 Спостерігач помітив, що якась планета знаходиться на 90° на схід від Сонця кожні 505,25 діб. Чому дорівнює період обертання планети навколо Сонця?

3.4 Відстань від Юпітера до Сонця становить 5,2 астрономічних одиниць. Яка елонгація Землі (в градусах), що спостерігається з Юпітера в якості ранкового або вечірнього світила?

3.5 Приймаючи орбіту Меркурія за коло, розрахувати його середню відстань від Сонця, знаючи, що в середній елонгації Меркурій віддаляється від Сонця на 23° .

3.6 Знайти ті точки орбіти, в яких швидкість зміни відстані планети від Землі виявляються найменшою та найбільшою.

3.7 За який час оберталась би навколо Сонця планета з радіусом орбіти 100 а.о.?

3.8 В яких межах відстані від Сонця повинні знаходитись всі планети, що мають синодичний період обертання більший двох років?

3.9 У кометної орбіти ексцентриситет $e = 0,9$ та період $T = 1000$ років. Які відстані цієї комети від Сонця в перигелії та афелії?

3.10 Астероїд Фортуна зближується із Землею до відстані 1,056 а.о., а астероїд Офелія – до 1.716 а.о. Їх середні геліоцентричні відстані відповідно дорівнюють 2,422 а.о. та 3,129 а.о. Знайти ексцентриситети орбіт цих астероїдів, їх перигелійну та афелійну відстань. Орбіту Землі вважати колом, а нахилами орбіт астероїдів ($1,5^\circ$ та $2,5^\circ$) знехтувати.

3.11 Перший супутник планети Юпітера – Іо обертається навколо неї за $42^{\text{г}}28^{\text{хв}}$ на середній відстані 421800 км. З яким періодом обертаються навколо Юпітера його супутники Європа та Ганімед, великі півосі орбіт яких дорівнюють 671,1 тис. км. та 1070 тис. км?

3.12 Знайти значення дійсної аномалії планети, при яких її радіус - вектор дорівнює середній геліоцентричній відстані.

3.13 Видиме із Землі добове зміщення по екліптиці на початку січня досягає найбільшого значення $61'$, а на початку липня – найменшого значення $57'$. Розрахувати ексцентриситет земної орбіти та вказати, які її точки Земля проходить у ці дні.

3.14 Знайти межі зміни діаметра сонячного диску з планети Марс, якщо при середній геліоцентричній відстані планети він становить $21'03''$. Ексцентриситет орбіти планети $0,093$.

3.15 На яких приблизно відстанях обертаються навколо Марса його супутники Фобос та Деймос, які за спостереженнями із Землі при середньому протистоянні планети віддаляються від неї відповідно на $24'',7$ та $61'',8$? Велика піввісь орбіти Марса $1,524$ а.о.

3.16 Визначити періоди обертань навколо Сонця малої планети Апполона та комети Ікеї, якщо обидві вони проходять поблизу Сонця майже на однакових відстанях, що дорівнює в Апполона $0,645$ а.о., а у комети $0,633$ а.о., але їх орбіти мають ексцентриситет $0,566$ та $0,9922$ відповідно.

3.17 Визначити колову швидкість руху по орбіті планет Урана та Плутона, середня відстань яких від Сонця становить відповідно $19,19$ а.о. та $39,52$ а.о.?

3.18 Встановити співвідношення між відстанями a планет від Сонця та їх середніми кутовими швидкостями ω , вважаючи орбіти коловими.

3.19 Встановити співвідношення між середніми лінійними швидкостями v руху планет та їх середніми відстанями a від Сонця, вважаючи їх орбіти коловими.

3.20 Як зміниться період обертання планети, якщо велика піввісь збільшиться на малу величину Δa ?

4 ЗОРЯНА АСТРОНОМІЯ. БЛИСК СВІТИЛ ТА ЇХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Теоретичні відомості

Блиск світила E характеризується його видимою зоряною величиною m . Одне і те ж світило може мати різну видиму зоряну величину в залежності від способу його визначення: візуальну зоряну величину m_v , фотографічну зоряну величину m_{pg} , фотовізуальну зоряну величину m_{pv} , фотоелектричні зоряні величини V (жовту), B (синю), та U (ультрафіолетову), болометричну m_b і т.д.

Відношення блиску E_1 та E_2 двох світил зв'язане з їх видимою зоряною величиною m_1 та m_2 формулою Погсона:

$$\lg \frac{E_1}{E_2} = 0,4(m_2 - m_1). \quad (4.1)$$

Різниця $C = m_{pg} - m_v = m_{pg} - m_{pv}$ називається звичайним показником кольору, різниця $(B-V)$ – основним показником кольору, а різниця $(U-V)$ – ультрафіолетовим показником кольору, хоча часто під цим показником мається на увазі різниця $(U-B)$.

Планети та їх супутники світять відбитим сонячним світлом, тому при повній фазі їх блиск

$$E = kA \frac{d^2}{r^2 \rho^2}, \quad (4.2)$$

де k – коефіцієнт, що враховує освітленість Сонцем та систему одиниць вимірювання, A – сферичне альbedo (вказує яку частину падаючого світла відбиває тіло, $A < 1$), d – лінійний діаметр, r – геліоцентрична відстань та ρ – відстань від спостерігача.

Відстань r зорі, виражена у парсеках (один парсек – відстань на якій радіус орбіти Землі видно під кутом $1''$), та її річний паралакс (кут під яким видно радіус орбіти Землі з відстані на якій знаходиться зоря) π , виміряний у секундах дуги ($''$), зв'язані співвідношенням

$$r = \frac{1}{\pi}. \quad (4.3)$$

Оскільки блиск E кожної зорі прямо пропорційний її світності L та обернено пропорційний квадрату відстані r від спостерігача, то відношення світності двох зірок

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{E_1 r_1^2}{E_2 r_2^2} = \frac{E_1 \pi_2^2}{E_2 \pi_1^2}. \quad (4.4)$$

Світність зірок розраховується за їх абсолютною зоряною величиною M (зоряна величина, яку мала б зірка на відстані 10 парсек), яка зв'язана з видимою зоряною величиною m співвідношеннями

$$M = m + 5 + 5 \lg \pi \quad (4.5)$$

та

$$M = m + 5 - 5 \lg r \quad (4.6)$$

де π - річний паралакс зорі в секундах дуги ($''$), r – відстань в парсеках (пс).

Знайдена за формулами (4.5) та (4.6) абсолютна зоряна величина M належить до того ж типу, що й видима зоряна величина m , тобто, може бути візуальною M_v , фотографічною M_{pg} , фотоелектричною (M_v , M_B , M_U) і т.д. Зокрема, абсолютна болометрична зоряна величина, що характеризує повне випромінювання, $M_b = m_v + b$ може бути також розрахована за видимою болометричною зоряною величиною $m_b = m_v + b$, де b –

болометрична поправка, яка залежить від спектрального класу та класу світності зорі.

Світність L зірок виражається у світності Сонця, прийнятою за одиницю ($L_{\odot} = 1$), тоді

$$\lg L = 0,4(M_{\odot} - M), \quad (4.7)$$

де $M_{\odot}$ - абсолютна зоряна величина Сонця: візуальна $M_{\odot v} = +4^m,79$; фотографічна $M_{\odot pg} = +5^m,36$; фотоелектрична жовта $M_{\odot v} = +4^m,77$; фотоелектрична синя $M_{\odot b} = +5^m,40$; болометрична $M_{\odot b} = +4^m,73$.

Розрахована за формулою (4.7) світність зорі відповідає типу абсолютних зоряних величин зорі та Сонця.

Колірна температура Сонця та зірок, в спектрах яких відомий розподіл енергії, може бути знайдена за законом Віна

$$T = \frac{K}{\lambda_m} \quad (4.8)$$

де λ_m – довжина хвилі, що відповідає максимуму енергії, а K – стала. При вимірюванні λ в ангстремах $K = 2,898 \cdot 10^4 \text{ Å} \cdot \text{град}$.

З достатньою точністю колірна температура зірок розраховується за їх показниками кольору C та $(B-V)$

$$T = \frac{7200^0}{C + 0^m,65} \quad (4.9)$$

та

$$T = \frac{7920^0}{(B - V) + 0^m,72} \quad (4.10)$$

Маси M зірок виражаються в масах Сонця ($M_{\odot} = 1$) і надійно визначаються тільки для фізично подвійних зірок (з відомим

паралаксом) за третім узагальненим законом Кеплера: сума мас компонентів подвійної зорі

$$M_1 + M_2 = \frac{a^3}{T^2} \quad (4.11)$$

Де T – період обертання зорі – супутника навколо головної зорі (або обох зірок навколо загального центру мас), виражений у роках, і a – велика піввісь орбіти зорі супутника в астрономічних одиницях (а.о.).

Величина a в а.о. розраховується за кутовим значенням великої півосі a'' та паралаксом π , одержаним із спостережень у секундах дуги

$$a = a''/\pi. \quad (4.12)$$

Якщо відомо відношення відстаней a_1 та a_2 компонентів подвійної системи від їх загального центру мас, то рівність

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{a_2}{a_1} \quad (4.13)$$

дозволяє розрахувати масу кожного з компонентів.

Лінійні радіуси R зірок завжди виражаються в радіусах Сонця ($R_\odot = 1$) і для зірок з відомим кутовими діаметрами Δ (в секундах дуги)

$$R = 107,5 \frac{\Delta}{\pi} \quad (4.14)$$

причому

$$\lg \Delta = 5,444 - 0,2m_b - 2 \lg T \quad (4.15)$$

Лінійні радіуси зірок розраховуються за формулами

$$\lg R = 8,473 - 0,20M_b - 2 \lg T, \quad (4.16)$$

$$\lg R = 0,82C - 0,20M_v + 0,51 \quad (4.17)$$

$$\lg R = 0,72(B - V) - 0,20M_V + 0,51 \quad (4.18)$$

у яких T – ефективна температура (якщо її не відомо, то використовують колірну температуру).

Приклад

Знайти фізичні характеристики Сіріуса (α Великого Пса) та його супутника за наступними даними спостережень: видима жовта зоряна величина Сіріуса $-1^m,46$, основний показник кольору $0^m,00$, а у зірки супутника відповідно $+8^m,50$ та $+0^m,15$; паралакс зірки становить $0'',375$; супутник обертається навколо Сіріуса з періодом 50 років по орбіті з кутовим значенням великої півосі $7'',60$, причому відношення відстаней обох зірок до загального центру мас становить 2,3:1. Абсолютну зоряну величину Сонця в жовтих променях прийняти рівною $+4^m,77$.

Дано: Сіріус, $V_1 = -1^m,46$, $(B-V)_1 = 0^m,00$;

супутник, $V_2 = +8^m,50$, $(B-V)_2 = +0^m,15$;

$P = 50$ років, $a'' = 7'',60$

$a_2:a_1 = 2,3:1$; $\pi = 0'',375$.

Сонце, $M_{O\ V} = +4^m,77$.

Розв'язування: Згідно з формулами (4.5) та (4.7), абсолютна зоряна величина Сіріуса

$$M_{V1} = V_1 + 5 + 5 \lg \pi = -1^m,46 + 5 + 5 \lg 0,375 = +1^m,41,$$

а логарифм його світності

$$\lg L_1 = 0,4(M_{O\ V} - M_{V1}) = 0,4(4^m,77 - 1^m,41) = 1,344,$$

звідки світність $L_1 = 22$.

За формулою (4.10), температура Сіріуса

$$T_1 = 7920 / (0^m,00 + 0^m,72) = 11000 \text{ K},$$

за формулою (4.18)

$$\begin{aligned} \lg R_1 &= 0,72(B - V) - 0,20 M_{V1} + 0,51 = \\ &= 0,72 \cdot 0^m,00 - 0,20 \cdot 1^m,41 + 0,51 = 0,228, \end{aligned}$$

і тоді радіус Сіріуса $R_1 = 1,7$.

Ті ж формули дають для супутника Сіріуса: $M_{V2} = + 11^m,37$;

$$L_2 = 2,3 \cdot 10^{-3}; T_2 = 9100^\circ; R_2 = 0,022.$$

За формулою (4.12), велика піввісь орбіти супутника

$$a = a''/\pi = 7'',60/0'',375 = 20,3 \text{ а.о.,}$$

З (4.11) сума мас обох зірок

$$M_1 + M_2 = a^3/P^2 = 20,3^3/50^2 = 3,3$$

та за (4.13), відношення мас $M_1/M_2 = 2,3/1$, або $M_1 = 2,3M_2$

Вирішення рівнянь (4.11) та (4.13) дає шукані маси $M_1 = 2,3$;

$$M_2 = 1,0.$$

Задачі

4.1 У скільки разів блиск зірки 1-ої зоряної величини більший від блиску самих слабих зірок, що видно неозброєним оком (тобто зірок 6-ої величини)?

4.2 У скільки разів повний Місяць світить слабше ніж Сонце, якщо її візуальний блиск $-12^m,7$, а видима візуальна зоряна величина Сонця $-26^m,8$?

4.3 Між 20 та 22 лютого 1901 р. блиск нової зірки, що спалахнула у сузір'ї Персея, збільшився у 25000 разів. На скільки змінився блиск у зоряних величинах?

4.4 На скільки зміниться зоряна величина зірки, якщо її приблизити на 40% відстані? Якщо її віддалити на таку ж величину?

4.5 Розрахувати візуальну світність зірок, візуальний блиск та річний паралакс яких вказані в дужках: α Орла ($0^m,89$ та $0'',198$), α Малої Ведмедиці ($2^m,14$ та $0'',005$) та ϵ Індіанця ($4^m,73$ та $0'',285$).

4.6 Діаметр Місяця менше діаметра Землі у 3,67 разів; сферичне альbedo Землі 0,39, а Місяця 0,07. При геоцентричній відстані у 384400 км блиск повного Місяця становить $-12^m,7$. Які зоряні величини мають Земля та Місяць при спостереженні із Сонця?

4.7 Який вигляд має Сонце з відстані зірки Толімана (α Центавра), паралакс якої $0'',751$?

4.8 Максимум енергії в спектрі Спіки (α Діви) припадає на електромагнітну хвилю довжиною 1450 Å, в спектрі Капелли (α Візничого) – на 4830 Å та в спектрі Поллукса (β Близнюків) – на 6580 Å. Визначити колірну температуру цих зірок.

4.9 Знайти відстані від Сонця та паралакси трьох зірок Великої Ведмедиці за їх блиском в жовтих променях, показником кольору та абсолютній зоряній величині в синіх променях:

1) α , $V = 1^m,79$, $(B-V) = +1^m,07$ та $M_B = +0^m,32$

2) δ , $V = 3^m,31$, $(B-V) = +0^m,08$ та $M_B = +1^m,97$

3) η , $V = 1^m,86$, $(B-V) = -0^m,19$ та $M_B = -5^m,32$.

4.10 На якій відстані від Сонця знаходиться зірка Спіка (α Діви) та чому дорівнює її паралакс, якщо її світність в жовтих променях 720, основний показник кольору дорівнює $-0^m,23$, а блиск в синіх променях $0^m,74$?

4.11 Визначити температуру зірок, візуальний та фотографічний блиск яких вказаний в дужках: γ Оріона ($1^m,70$ та $1^m,41$); ϵ Геркулеса ($3^m,92$ та $3^m,92$) α Персея ($1^m,90$ та $2^m,46$); β Андромеди ($2^m,37$ та $3^m,94$).

4.12 Блиск Нової Лебедя, знайденої 29 серпня 1975 р., до спалаху був близьким до 21^m , а в максимумі збільшився до $1^m,9$. Якщо вважати, що в середньому абсолютна зоряна величина нових зірок досягає близько -8^m , то яку світність мала ця зірка до спалаху та в максимумі блиску і на якій приблизно відстані від Сонця знаходиться зірка?

4.13 Порівняти діаметри зірки δ Змієноця та зірки Барнарда, температури яких однакові, якщо у першій зірки видима болометрична зоряна величина $1^m,03$ та паралакс $0,029''$, а в другій ті ж параметри $8^m,1$ та $0,545''$.

4.14 Розрахувати лінійні радіуси зірок, температура та абсолютна болометрична зоряна величина яких відомі: у α Кита 3200° та $-6^m,75$, у β Лева 9100° та $+1^m,18$, у ϵ Індіанця 4000° та $+6^m,42$.

4.15 Знайти кутові та лінійні діаметри зірок, видима болометрична зоряна величина, температура та паралакс яких вказані в дужках: η Великої Ведмедиці ($-0^m,41$, 15500° та $0,004''$), ϵ Великої Ведмедиці ($+1^m,09$, 10000° та $0,008''$) та β Дракона ($+2^m,36$, 5200° та $0,009''$).

4.16 Якщо в двох зірок приблизно однакової температури радіуси відрізняються у 20, 100 та 500 разів, то в скільки разів відрізняється їх болометрична світність?

4.17 Розрахувати болометричну поправку для зірок спектрального підкласу B0Ia, до яких належить зірка ϵ Оріона, якщо її кутовий діаметр $0,0007''$, видима візуальна зоряна величина $1^m,75$ та максимум енергії в її спектрі припадає на довжину хвилі $1094 \text{ \AA}$.

4.18 Візуальний блиск Полярної зірки $2^m,14$, її звичайний показник кольору $+0^m,57$, паралакс $0,005''$ і маса дорівнює 10. Ті ж параметри у Фомальгаута (α Південної Риби) $1^m,29$ $+0^m,11$, $0,144''$ та 2,5, а у зірки

ван-Маанена $12^{\text{m}},3 +0^{\text{m}},50, 0'',236$ та 1,1. Визначити світність, радіус та середню густину кожної зірки (середня густина Сонця $1,4 \text{ г/см}^3$).

4.19 Знайти суму мас компонентів подвійної зірки ϵ Гідри, паралакс якої $0'',010$, період обертання супутника 15 років та кутові розміри великої півосі його орбіти $0'',21$.

4.20 Знайти суму мас компонентів подвійної зірки α Великої Ведмедиці, паралакс якої $0'',031$, період обертання супутника 44,7 років та кутові розміри великої півосі його орбіти $0'',63$.

5 РУХ ЗІРОК ТА ГАЛАКТИК У ПРОСТОРИ

Теоретичні відомості

Просторова швидкість V зірок завжди визначається відносно Сонця (рис.5.1) та розраховується за променевою швидкістю V_r , що направлена вздовж променя r , який з'єднує зірку з Сонцем, та за тангенціальною швидкістю V_t :

$$V = \sqrt{V_r^2 + V_t^2} \quad (5.1)$$

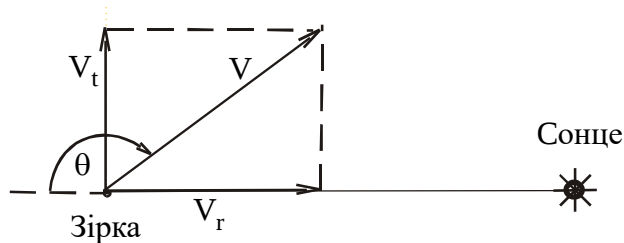


Рис. 5.1

Напрямок просторової швидкості V зірок характеризується кутом θ між нею та променем зору спостерігача:

$$\cos \theta = \frac{V_r}{V}; \quad \sin \theta = \frac{V_t}{V}, \quad (5.2)$$

причому $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$.

Із спостережень визначається променева швидкість v_r зірки відносно Землі. Якщо в спектрі зірки лінія з довжиною хвилі λ зміщена від свого нормального (лабораторного) положення на величину Δx мм, а дисперсія спектрограми на даній її ділянці дорівнює D Å/мм, то зміщення лінії, виражене в Å,

$$\Delta \lambda = \lambda' - \lambda = \Delta x \cdot D \quad (5.3)$$

і променева швидкість

$$v_r = c \frac{\Delta \lambda}{\lambda}, \quad (5.4)$$

де $c=3 \cdot 10^5$ км/с – швидкість світла.

Тоді променева швидкість в кілометрах за секунду відносно Сонця

$$V_r = v_r - 29,8 \cdot \sin(\lambda_* - \lambda_\odot) \cos \beta_* \quad (5.5)$$

де λ_* - екліптична довгота та β_* - екліптична широта зірки, $\lambda_\odot$ - екліптична довгота Сонця в день одержання спектрограми зірки (наводиться в астрономічному щорічнику), а число 29,8 виражає кругову швидкість Землі в кілометрах за секунду.

Швидкість V_r (або v_r) позитивна при напрямку від Сонця (або від Землі) і негативна при оберненому напрямку.

Тангенціальна швидкість V_t зірки в кілометрах за секунду визначається за її річним паралаксом π та власним рухом μ , тобто дузі на яку зміщується зірка по небу за 1 рік:

$$V_t = 4,74 \frac{\mu}{\pi} = 4,74 \mu \cdot r, \quad (5.6)$$

причому μ та π виражені в секундах дуги (’'), а відстань r – до зірки - в парсеках. В свою чергу μ визначається за зміною екваторіальних координат α та δ зірки за рік (враховуючи прецесію):

$$\mu = \sqrt{(15\mu_\alpha \cdot \cos \delta)^2 + \mu_\delta^2}, \quad (5.7)$$

причому компонента власного руху зірки за прямим сходженням μ_α виражена в секундах часу (с), а компонента за схиленням μ_δ - в секундах дуги (’').

У галактик та квазарів власний рух $\mu = 0$, і тому в них визначається тільки променева швидкість V_r , а оскільки ця швидкість велика, то швидкістю Землі нехтують і тоді $V_r = v_r$. Позначаючи

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = z, \text{ одержимо для відносно близьких галактик, в яких } z \leq 0,1$$

$$V_r = cz \quad (5.8)$$

і згідно з законом Хаббла, їх відстань в мегапарсеках (Мпс)

$$r = \frac{V_r}{H} = \frac{V_r}{50}, \quad (5.9)$$

де сучасне значення сталої Хаббла $H = 50$ км/с·Мпс.

Для далеких галактик та квазарів, в яких $z > 0,1$, слід користуватись релятивістською формулою

$$V_r = \frac{(1+z)^2 - 1}{(1+z)^2 + 1} c, \quad (5.10)$$

а оцінка їх відстаней залежить від прийнятої моделі Всесвіту. Так, в закритій пульсуючій моделі

$$r = \frac{c}{H} \cdot \frac{z}{1+z}, \quad (5.11)$$

а у відкритій моделі Ейнштейна – де Сіттера

$$r = \frac{2c}{H} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+z}}\right). \quad (5.12)$$

Приклад

В спектрі квазара, фотографічний блиск якого $15^m,5$ та кутовий діаметр $0'',03$, емісійна лінія водню H_β з довжиною хвилі $4861 \text{ \AA}$ займає положення, що відповідає довжині хвилі $5421 \text{ \AA}$. Знайти променеву швидкість, відстань, лінійні розміри і світність цього квазара.

Дано: $m_{pg} = 15^m,56$, $\Delta = 0'',03$;

H_β , $\lambda' = 5421 \text{ \AA}$, $\lambda = 4861 \text{ \AA}$

Розв'язування: За формулою (5.3), зміщення спектральної лінії водню

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = 5421 \text{ \AA} - 4861 \text{ \AA} = +560 \text{ \AA}$$

та

$$z = \Delta\lambda/\lambda = +560/4861 = +0,115,$$

оскільки $z > 0,1$, то згідно (5.10), променева швидкість

$$V_r = \frac{(z+1)^2 - 1}{(z+1)^2 + 1} c = \frac{(0,115+1)^2 - 1}{(0,115+1)^2 + 1} c = +0,108 \cdot c,$$

або $V_r = 0,108 \cdot 3 \cdot 10^5 \text{ км/с} = 32400 \text{ км/с}$.

За формулою (5.11), в закритій пульсуючій моделі Всесвіту відстань до квазара

$$r = \frac{c}{H} \cdot \frac{z}{1+z} = \frac{3 \cdot 10^5}{50} \cdot \frac{0,115}{1+0,115} = 619 \text{ Мпс}$$

Лінійний діаметр квазара знайдемо із співвідношення:

$$D = r \frac{\Delta''}{206265''} = 619 \cdot 10^6 \cdot \frac{0'',03}{206265''} = 90 \text{ пс}$$

(206265'' – кількість секунд дуги в одному радіані).

Згідно з (4.6), його абсолютна фотографічна величина

$$M_{pg} = m_{pg} + 5 - 5 \lg r = 15^m,5 + 5 - 5 \lg 619 \cdot 10^6 = -23^m,5$$

і, за формулою (4.7) логарифм світності

$$\lg L_{pg} = 0,4(M_{\odot pg} - M_{pg}) = 0,4(5^m,36 + 23^m,5) = 11,54,$$

звідки світність $L_{pg} = 347 \cdot 10^9$ тобто дорівнює світності 347 мільярдів зірок типу Сонця.

Ті ж величини в моделі Ейнштейна – де Сіттера одержуємо за формулою (5.12):

$$r = \frac{2c}{H} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+z}}\right) = \frac{2 \cdot 3 \cdot 10^5}{50} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+0,115}}\right)$$

$$r = 636 \text{ Мпс};$$

$$D = 92,5 \text{ пс і з тим же ступенем точності } M_{pg} = -23^m,5 \text{ та } L_{pg} = 347 \cdot 10^9.$$

Задачі

5.1 Лінії поглинання водню H_β та H_δ , довжини хвиль яких $4861 \text{ \AA}$ та $4102 \text{ \AA}$, зміщені у спектрі зірки в сторону червоного кінця відповідно на $0,66$ та $0,56 \text{ \AA}$. Визначити променеву швидкість зірки відносно Землі в ніч спостереження.

5.2 В яку сторону спектра та на скільки міліметрів зміщені лінії поглинання заліза з довжиною хвилі $5270 \text{ \AA}$ та $4308 \text{ \AA}$ в спектрограмі

зірки з променевою швидкістю -60 км/с, якщо дисперсія спектрограми на першій її ділянці дорівнює $25 \text{ \AA/мм}$, а на другій $20 \text{ \AA/мм}$?

5.3 Розрахувати положення водневих ліній поглинання H_β , H_δ та H_γ в спектрах зірок, променева швидкість однієї з яких відносно Землі -50 км/с, а другої $+30$ км/с. Нормальна довжина хвилі цих ліній відповідно 4861 , 4102 та $3750 \text{ \AA}$.

5.4 Зірки β Дракона та γ Дракона знаходяться поблизу північного полюсу екліптики. Лінії заліза з $\lambda = 5168 \text{ \AA}$ та $\lambda = 4384 \text{ \AA}$ в спектрі першої зірки зміщені до фіолетового кінця на $0,34 \text{ \AA}$ та $0,29 \text{ \AA}$, а в спектрі другої зірки – на $0,47 \text{ \AA}$ та $0,40 \text{ \AA}$. Визначити променеву швидкість цих зірок.

5.5 В ніч фотографування спектра зірки Веги (α Ліри) її екліптична довгота відрізнялась від екліптичної довготи Сонця на 180° , і лінії поглинання водню H_β ($4861 \text{ \AA}$) та H_δ ($4102 \text{ \AA}$) виявились зміщеними до фіолетового кінця спектрограми відповідно на $0,0225 \text{ мм}$ та $0,0380 \text{ мм}$ при дисперсії на ділянках розташування цих ліній $10 \text{ \AA/мм}$ та $5 \text{ \AA/мм}$. Знайти променеву швидкість Веги.

5.6 Наша сонячна система наближається до Веги ($\pi = 0'',123$) із швидкістю 14 км/с. Через скільки років видима зоряна величина Веги зміниться на $0^m,1$?

5.7 Відстань до Сіріуса становить 2.70 парсек, але внаслідок руху зменшується на 8 км щосекунди. Розрахувати, через скільки років видимий блиск Сіріуса зросте удвічі.

5.8 Розрахувати тангенціальну швидкість зірок, паралакс та власний рух яких вказані після їх назв: Альтаір (α Орла) $0'',198$ та $0'',658$; Спіка (α Діви) $0'',021$ та $0'',054$; ϵ Індіанця $0'',289$ та $4'',69$.

5.9 Променева швидкість Веги -14 км/с, її власний рух $0'',345$, паралакс $0'',123$. Визначити повну просторову швидкість зірки відносно Сонця.

5.10 Напрямок руху зірки Капелли утворює кут $48^\circ,2$ з променем зору; повна просторова швидкість її руху дорівнює 45 км/с. Визначити річний власний рух зірки, якщо її паралакс $0'',063$.

5.11 Визначити дату найбільшого зближення “летючої зірки Барнарда” із Сонцем. Які в цей момент паралакс, власний рух та візуальна зоряна величина, якщо сучасні дані такі: $m = 9,57$, $\mu = 10'',25$, $\pi = 0'',546$, $V_r = 117$ км/с, $V_t = 90$ км/с.

5.12 Візуальний блиск Веги $+0^m,14$, її власний рух $0'',345$, паралакс $0'',123$ та променева швидкість -14 км/с. Знайти епоху найбільшого зближення Веги із Сонцем та розрахувати для неї відстань, паралакс, власний рух, променеву та тангенціальну швидкість і блиск цієї зірки у цю епоху.

5.13 Вирішити попередню задачу для зірки Толіман (α Центавра), візуальний блиск якої у сучасну епоху дорівнює $+0^m,06$, власний рух $3'',674$, паралакс $0'',751$ та променева швидкість -25 км/с. Якими були шукані величини 10 тис. років назад і якими вони будуть через 10 тис. років після епохи найбільшого зближення?

5.14 В спектрах далеких галактик та квазарів спостерігається зміщення ліній до червоного кінця (червоне зміщення). Якою променевою швидкістю володіють названі об'єкти при червоному зміщенні, що становить відповідно 0,1, 0,5 та 2 довжини хвилі спектральних ліній?

5.15 За даними попередньої задачі розрахувати відстані до тих же об'єктів у двох космологічних моделях, прийнявши сталу Хаббла рівною 50 км/с·Мпс.

5.16 Знайти червоне зміщення в спектрах позагалактичних об'єктів, що відповідає променевій швидкості 0,25 та 0,75 швидкості світла.

5.17 В спектрі квазара 3C 102, що має блиск $17^m,3$, зміщення емісійних ліній перевищує відповідну довжину хвилі у 1,037 рази, а в спектрі квазара PKS 0237-23 (блиск $16^m,6$) – у 2,223 рази. На яких відстанях знаходяться ці квазари і чому дорівнює їх світність? Задачу вирішити за двома космологічними моделями.

5.18 Розрахувати відстань, лінійні розміри та світність квазара 3C 48, якщо його кутовий діаметр $0'',56$, блиск $16^m,0$, а лінія λ 2798 Å іонізованого магнію зміщена в його спектрі до положення λ 3832 Å.

5.19 Вирішити попередню задачу для квазара 3C 273 з кутовим діаметром $0'',24$ та блиском $12^m,8$, якщо емісійні лінії водню в його спектрі зміщені: H_{β} (λ 4861 Å) до $\lambda = 5640$ Å; H_{γ} (λ 4340 Å) до $\lambda = 5030$ Å; H_{δ} (λ 4102 Å) до $\lambda = 4760$ Å.

5.20 В одного з найбільш віддалених квазарів червоне зміщення становить 3,53 нормальної довжини спектральних ліній. Знайти променеву швидкість квазара та оцінити відстань до нього.

Відповіді

1.1 0° та 90° ; $+23^\circ 27'$ та $66^\circ 33'$; $+66^\circ 33'$ та $23^\circ 27'$; $+90^\circ$ та 0° . **1.2** при $\delta > +47^\circ 48'$. **1.4** $\varepsilon = 23^\circ 27'$. **1.5** $44^\circ 06'$. **1.6** $89^\circ 04'$ N та $+0^\circ 56'$. **1.7** $147^\circ 10'$; $-16^\circ 25' < \varphi < +16^\circ 25'$. **1.8** Для Запоріжжя $+42^\circ 12'$, $+65^\circ 39'$; $+18^\circ 45'$. **1.9** $9^\circ 06'$ S. **1.10** $62^\circ 27'$ N. **1.11** $\delta = -16^\circ 36'$. **1.12** $\delta = -39^\circ 33'$. **1.13** $\varphi = 40^\circ 10'$. **1.14** $\varphi = 12^\circ 46'$, $77^\circ 14'$, $79^\circ 19'$, $53^\circ 47'$. **1.15** $\varphi = 72^\circ 03'$. **1.16** $54^\circ 12'$. **1.17** 35° . **1.18** $< -68^\circ 41'$, $+21^\circ 19'$, $> +68^\circ 41'$; $< +73^\circ 17'$, $-16^\circ 43'$, $> -73^\circ 17'$. **1.19** Для Запоріжжя $0,672 : 0,911 : 0,321$. **1.20** $\pm 24^\circ 48'$ та $\pm 65^\circ 12'$; $\pm 3^\circ 07'$ та $\pm 86^\circ 53'$; $\pm 82^\circ$ та $\pm 8^\circ$. **2.1** $22^\circ 54' 53''$ та $10^\circ 54' 53''$. **2.2** $1^\circ 54' 25''$ та $6^\circ 54' 37''$. **2.3** $5^\circ 07' 37''$ та $8^\circ 34' 06''$. **2.4** $5^\circ 15' 36'' = 78^\circ 54', 0$ та $-11^\circ 27' 51'' = 12^\circ 32' 09'' = 188^\circ 02', 2$. **2.5** $1^\circ 46' 18'' = 26^\circ 34', 5$ та $10^\circ 34' 22'' = 158^\circ 35', 5$. **2.6** $11^\circ 35' 34''$, $11^\circ 52' 06''$, $12^\circ 52' 06''$; $16^\circ 10' 43''$, $16^\circ 52' 06''$, $17^\circ 52' 06''$. **2.7** $8^\circ 48'$. **2.8** $\alpha = 15^\circ 15' 10''$ $\delta = 46^\circ 35'$. **2.9** $-18^\circ 58' + 41^\circ 02'$. **2.10** $1^\circ 49'$, $5^\circ 11'$. **2.11** $3^\circ 45'$. **2.12** $\Delta S = 8^\circ 42' 43'' \rightarrow \Delta T = 8^\circ 41' 17''$; $\Delta S_1 = 24^\circ \rightarrow \Delta T_1 = 23^\circ 56' 04''$; $\Delta S_2 = 15^\circ 17' 17'' \rightarrow \Delta T_2 = 15^\circ 14' 47''$ (після γ Оріона). **2.13** $8^\circ 45'$ E. **2.14** $\lambda = 2^\circ 57'$ на захід від Гринвіча, $\varphi = 40^\circ 27'$. **2.16** 64° . **2.17** Поллукс: $22^\circ 20' 48''$ та $16^\circ 34' 48''$; Арктур: $16^\circ 52' 49''$ та $11^\circ 06' 49''$; Поллукс: $22^\circ 20' 48''$ та $16^\circ 34' 48''$; **2.19** $11^\circ 01' 22''$ та $14^\circ 16' 50''$. **3.2** $0^\circ, 461$. **3.3** 1320 діб. **3.4** 11° . **3.5** 0,39 а.о. **3.6** Найменша в з'єднаннях та протистояннях, найбільша в квадратурах та в найбільших елонгаціях. **3.7** 1000 років. **3.8** Від 0,763 до 1,588 а.о. **3.9** 10 та 190 а.о. **3.10** 0,158 2,056 а.о. та 2,828 а.о.; 0,132 2,716 а.о. та 3,542 а.о. **3.11** 3,55 доби, 7,15 доби. **3.12** $\theta = \arccos(-e)$. **3.13** 0,017. **3.14** Від $23^\circ 12''$ до $19^\circ 16''$. **3.15** 9400 км та 23500 км. **3.16** 1,81 року та 919 років. **3.17** 6,80 км/с та 4,74 км/с. **3.18** $\omega = 2\pi a^{-1,5}$. **3.19** $v = 2\pi a^{-0,5}$. **3.20** на $3\Gamma\Delta a/2a$. **4.1** У 100 разів. **4.2** У 437000 разів. **4.3** 11,0 зоряних величин. **4.4** На 1,11 зоряних величин стане яскравішою. На

0,73 зоряної величини ослабне. **4.5** 16,8; 4610; 0,13. **4.6** $-4^m,4$; $+0^m,2$. **4.7** $+0^m,41$. **4.8** 20000 K; 6000 K; 4400 K. **4.9** 32,2 пс, $0'',031$; 19,2 пс, $0'',052$; 239 пс, $0'',004$. **4.10** 46,6 пс, $0'',021$. **4.11** 20000 K; 11100 K; 6000 K; 3240 K. **4.12** 1/250, 160000; 1000 пс. **4.13** У 478 разів. **4.14** 650; 2,1; 0,97. **4.15** $0'',0014$ та 38; $0'',0017$ та 23; $0'',0035$ та 42. **4.16** У 400; 10000; 250000 разів. **4.17** $-3^m,0$ **4.18** 4570, 71 та $4,0 \cdot 10^{-5}$ г/см³; 12,1, 1,5 та 0,99 г/см³; $1,78 \cdot 10^{-4}$, 0,012 та 900 кг/см³ **4.19** 42,8. **4.20** 4,2. **5.1** $+40,8$ км/с. **5.2** -0,042 мм, -0,043 мм. **5.3** 4860,2 Å, 4101,3 Å, 3749,4 Å; 4861,5 Å, 4102,4 Å, 3750,4 Å. **5.4** -19,8 км/с, - 27,3 км/с. **5.5** -13,9 км/с. **5.6** Через 26000 років. **5.7** Через 97000 років. **5.8** 15,8; 12,2; 78,0 км/с. **5.9** 19 км/с. **5.10** $0'',44$. **5.11** $t = -9800$ років, $\pi = 0'',80$; $\mu = 22''5$ m = 8,9. **5.12** 310 тис. років; 5,5 пс; $0'',182$; $0'',755$; 0 та 19 км/с; $-0^m,71$. **5.13** Через 28,1 тис. років; 0,902 пс; $1'',108$; $7'',992$; 0 та 34 км/с; $-0^m,78$. 10 тис. років назад: 1,60 пс; $0'',625$; $2'',505$; -28 та 19 км/с; $+0^m,46$. Через 10 тис. років після найближчого зближення: 0,967 пс; $1'',034$; $6'',915$; +12 та 32 км/с $-0^m,62$. **5.14** $30 \cdot 10^3$, $115,5 \cdot 10^3$, $240 \cdot 10^3$ км/с. **5.15** У закритій: 545 Мпс, $2 \cdot 10^3$ Мпс, $4 \cdot 10^3$ Мпс. У відкритій: 564 Мпс, $2,21 \cdot 10^3$ Мпс, $5,08 \cdot 10^3$ Мпс. **5.16** 0,29, 1,65. **5.17** 1) $3,06 \cdot 10^3$ Мпс та $76 \cdot 10^{10}$; $3,59 \cdot 10^3$ Мпс та $132 \cdot 10^{10}$. 2) $4,14 \cdot 10^3$ Мпс та $13,5 \cdot 10^9$; $5,32 \cdot 10^3$ Мпс та $525 \cdot 10^{10}$. **5.18** У закритій: $1,62 \cdot 10^3$ Мпс, 4400 пс, $8,32 \cdot 10^{11}$. У відкритій: $1,74 \cdot 10^3$ Мпс, 4720 пс, $10 \cdot 10^{11}$. **5.19** У закритій: 828 Мпс, 963 пс, $4,37 \cdot 10^{12}$. У відкритій: 864 Мпс, 1000 пс, $4,79 \cdot 10^{12}$. **5.20** 0,907с; $4,67 \cdot 10^3$ Мпс та $6,36 \cdot 10^3$ Мпс.