ФІЗИКА та АСТРОНОМІЯ
В РІДНІЙ ШКОЛІ

НАУКОВО-МЕТОДИЧНИЙ ЖУРНАЛ

№ 2 (153) КВІТЕНЬ — ТРАВЕНЬ — ЧЕРВЕНЬ 2021

Виходить чотири рази на рік

Передплатний індекс **68839**

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНЕ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИРОБНИЧЕ ПІДПРИЄМСТВО
ВИДАВНИЦТВО «ПЕДАГОГІЧНА ПРЕСА»

Заснований у 1995 р., видається з 1996 р.
До 2012 р. журнал виходив у світ
під назвою «Фізика та астрономія в школі»,
до 2014 р. – під назвою «Фізика та астрономія в сучасній школі»

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу
масової інформації серія КВ № 20024-8924Р від 25.06.2013 р.

ЗМІСТ

ІІІ ЕТАП ВСЕУКРАЇНСЬКОЇ УЧНІВСЬКОЇ ОЛІМПІАДИ З АСТРОНОМІЇ *(КИЇВ-2016)*

Вадим ГАВРОНСЬКИЙ, старший викладач кафедри методики природничо-математичної освіти і технологій ІППО КУ ім. Бориса Грінченка

10 клас

1. *На поданому нижче зображенні покриття Місяцем Венери, отриманому в Північній півкулі Землі, видно маленький серпик Місяця та Венери. Користуючись цим зображенням поясніть:*

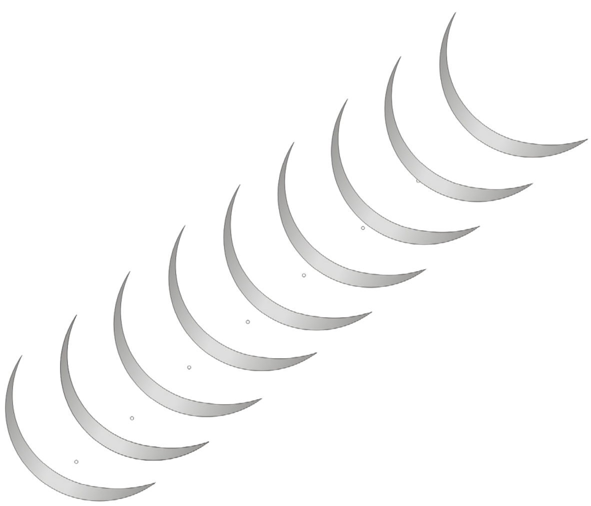
а) рух якого тіла на небесній сфері визначає відстань між зображенням Венери і краєм Місячного диска;

б) в який час доби (ранок, день, вечір, ніч) було зроблено цю світлину;

в) в якому напрямку рухалися тіла відносно один одного;

г) зображення з якого кута (нижнього лівого або верхнього правого) було зроблено першим;

д) оцініть інтервал часу, через який було зафіксовано ці зображення.



П р и м і т к а: такого типу зображення отримують шляхом накладання декількох знімків на один кадр.

Розв'язання

а) У межах доби рухом Венери можна знехтувати порівняно з рухом Місяця, а отже, саме рух Місяця визначає відстань між тілами.

б) Якщо розглядати фото «як є», то однозначно – ранок. Знизу горизонт, Місяць освітленою частиною дивиться на схід. Якщо зображення відобразити **відносно** вертикальної осі, то отримаємо аналогічну картину, але для вечора.

в) На ранковому небі Місяць серед зір рухається на схід, крім того, з плином часу висота і Місяця, і Венери збільшується внаслідок добового обертання небесної сфери, а отже, Місяць і Венера зближуються.

г) Зважаючи на розмірковування, що їх наведено вище в п. б, перше зображення розташовано в лівому нижньому куті.

д) Приймаючи діаметр Місяця за півградуса, можна оцінити відстань між зображеннями, що приблизно дорівнює 0,2 градуса (оцінювання краще проводити за зображеннями Венери). На 0,2 градуса небесна сфера повертається за 0,8 хв або 48 с.

2. *З метою дослідження кори нейтронної зорі навколо неї було запущено космічний апарат на дуже низьку колову орбіту. Оцініть період обертання такого апарату.*

Розв'язання

Це задача є оцінною, через те треба пам'ятати про характерні розміри та масу нейтронних зір. Характерний радіус нейтронної зорі становить R = 10 км (точніше 11 км), маса – близько 1–2 мас Сонця.

Варіант I

Якщо маса нейтронної зорі близька до сонячної, то можна скористатися третім законом Кеплера в спрощеній формі:

$$T = \sqrt{a^3}$$

де $a = R$ – велика піввісь орбіти КА, а. о.; у нашому випадку – це фактично радіус нейтронної зорі (згідно з умовою задачі).

$$T \approx 1{,}7 \cdot 10^{-11} \text{ року} \approx 5 \cdot 10^{-4} \text{ с.}$$

Швидкість дорівнює: $\upsilon = \dfrac{2\pi R}{T} \approx 10^8$ м/с.

Варіант II

Перша космічна швидкість становить:

$$\upsilon_1 = \sqrt{\frac{GM}{R}} \approx 10^8 \text{ м/с.}$$

Формулу для першої космічної швидкості можна вивести з рівності доцентрової та гравітаційної сил під час руху по колу:

$$\frac{m\upsilon^2}{R} = \frac{GMm}{R^2}.$$

Якщо прийняти, що маса нейтронної зорі становить дві маси Сонця, то перша космічна швидкість становить $1{,}6 \cdot 10^8$ м/с.

3. *Київський астроном-аматор визначив, що одна зоря зійшла в точці сходу в той момент, коли інша зоря була в зеніті. Визначте схилення зір, якщо координати спостерігача такі:* $\varphi = 50°$, $\lambda = 30°$.

Розв'язання

Зоря, яка зійшла в точці сходу, очевидно, перебуває на екваторі, її схилення становить $\delta = 0$.

Якщо зоря у зеніті, то її схилення та широта пов'язані простим співвідношенням (як для випадку верхньої кульмінації із зенітним кутом 0): $\varphi = \delta = 50°$.

4. *Метеорне тіло влітає в атмосферу Землі вздовж лінії, що проходить через спостерігача та центр Землі. Який вигляд матиме явище метеора для даного спостерігача?*

Розв'язання

Така траєкторія метеорного тіла означає, що для спостерігача тіло пройде через точку зеніту. Крім того, при цьому проекція траєкторії тіла на небесну сферу буде постійно розміщуватись в одній точці. Спостерігач бачитиме т. зв. стаціонарний метеор.

Звичайні метеорні сліди на небі на початку явища метеора мають невеликі ширину та блиск. У процесі розвитку явища метеорний слід стає яскравішим і ширшим. Наприкінці явища слід знову стає тонким і малопомітним.

Отже, спостерігач спочатку бачитиме в зеніті маленьку, ледь помітну точку, потім ця точна стане яскравішою й ширшою, потім потьмяніє, зменшиться й зникне.

5. *Штучний супутник обертається навколо Землі коловою орбітою з періодом 15 діб у площині орбіти Місяця. Яку приблизну сумарну частину поверхні Місяця можна бачити з такого супутника протягом року?*

Розв'язання

Відомо, що період обертання Місяця навколо осі дорівнює періоду його обертання навколо Землі. Внаслідок цього Місяць завжди повернутий до Землі одним боком.

Насправді це не зовсім так. Через ексцентричність геоцентричної орбіти Місяць повертає до Землі частини його східної та західної поверхонь (лібрація за довготою). Крім того, вісь обертання Місяця не перпендикулярна до площини його орбіти. Ось чому із Землі можна бачити додаткові частини його північної та південної зон (лібрація за широтою). Внаслідок цих лібрацій із Землі за один оберт Місяця можна бачити близько 59 % його поверхні. Існує також фізична лібрація – невеликі реальні коливання Місяця, що практично не змінюють загальної видимої поверхні.

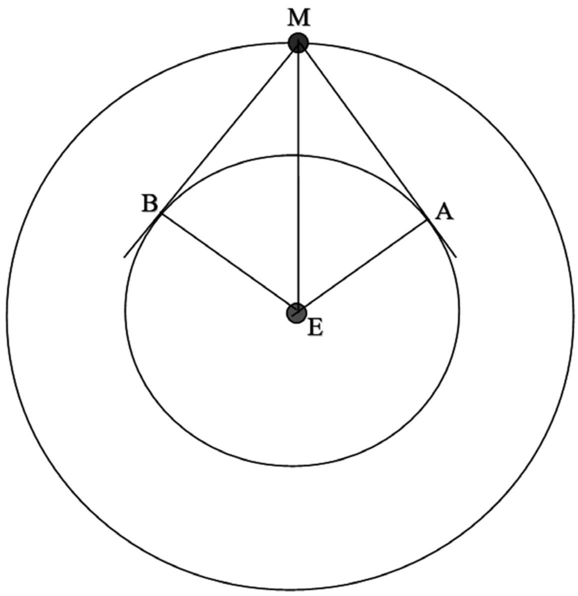
У даній задачі вважатимемо, що Місяць завжди повернутий до Землі одним боком, тобто видно 50 % його поверхні. Із супутника, що обертається навколо Землі, можна бачити більш ніж половину поверхні Місяця.

Місяць обертається навколо Землі по орбіті з періодом $T_М$ = 27,3 доби й великою піввіссю $a_М$ = 385 000 км. За III законом Кеплера визначаємо велику піввісь орбіти супутника $a_С$:

$$a_С = a_М \left(T_С / T_М\right)^{2/3} = 258\,000 \text{ км.}$$

На мал. 1 зображено орбіти Місяця та супутника, а також положення Місяця (М) на довільний момент. Орбіту Місяця в нашому наближенні вважаємо коловою. Вважаємо також, що екватор Місяця лежить у площині малюнка.

Очевидно, що найбільшу частину невидимої із Землі поверхні Місяця буде видно з точок *A* та *B*, що найбільше віддалені за кутовими відстанями від лінії Земля – Місяць (*EM*).



Мал. 1

Зрозуміло, що ці точки лежатимуть на дотичних до орбіти супутника, проведених із точки положення Місяця. Маємо два рівні прямокутні трикутники: *EBM* та *EAM*; $\angle B$ і $\angle A$ – прямі.

Оскільки точки *A* та *B* лежать в одній площині з місячним екватором, то відсоток видимої з цих точок поверхні Місяця буде рівний відсотку видимої дуги екватора Місяця відносно всього кола (360°). З якоїсь окремої точки видно дугу кола 180°, тобто половину поверхні Місяця. Інша точка збільшує цю дугу на $\angle BMA$. Якщо цей кут дорівнюватиме 180°, то можна буде бачити всю поверхню. Отже, чином, відсоток видимої з двох крайніх точок поверхні (*k*) визначатиметься відношенням:

$$k = (180^\circ + \angle BMA)/360^\circ$$

$\angle BME$ (або $\angle AME$) можна визначити так:

$$\angle BME = \arcsin(BE/EM) = \arcsin(a_С/a_М) = \\ = \arcsin[(T_С/T_М)^{2/3}] = 42{,}1^\circ.$$

Загальний вираз:

$$k = \{180^\circ + 2\arcsin[(T_С/T_М)^{2/3}]\}/360^\circ,$$
$$\text{або } k = (180 + 84{,}2)/360 = 73{,}4\ \%.$$

Тепер потрібно з'ясувати, чи зможе супутник за рік побувати в точках *A* і *B*. Це можливо, якщо синодичний період супутника та Місяця відносно Землі S буде менший від1 року.

З виразу для синодичного періоду $1/S = 1/T_С - 1/T_М$ отримуємо: $S = T_С T_М/(T_М - T_С) = 33{,}3$ доби.

Отже, за рік із супутника можна дійсно бачити близько 73,4 % поверхні Місяця.

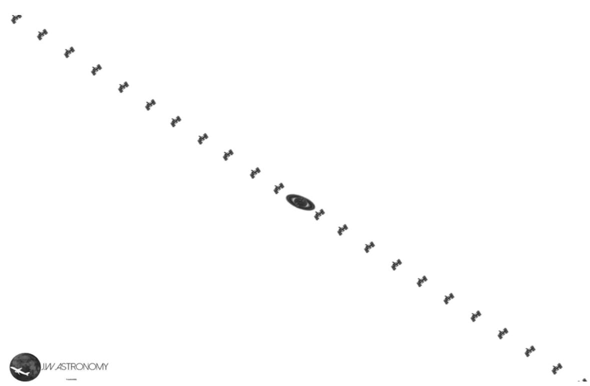
Це відповідь на встановлену кількість балів.

Урахування лібрацій збільшить цей відсоток. Якщо з однієї точки можна бачити не 50 %, а 59 %, то до отриманого значення можна також додати 9 %. Отримаємо 82,4 %.

Урахування лібрації заслуговує на додаткові бали (*залежно від повноти врахування лібрації та встановленої кількості балів*).

11 клас

1. *На зображенні, отриманому 15 січня 2016 р., представлено проходження Міжнародної космічної станції (МКС) по диску Сатурна. Знайдіть час, за який МКС перетнула поле зображення. Оцініть відстань до Сатурна в момент спостереження та розміри МКС. Відомо, що МКС на момент зйомки перебувала на відстані 1 140 км від спостерігача, зображення отримували із частотою 42 кадри за 1 с, а Сатурн на момент зйомки мав такі екваторіальні координати:* $\alpha = 16h\ 45m\ 27s$; $\delta = -20^\circ 40' 37''$. *Велика піввісь орбіти Сатурна становить ~ 9,6 а. о., екваторіальний діаметр – ~120 000 км. Вважати, що площина орбіти Сатурна лежить у площині екліптики.*



Мал. 2

П р и м і т к а: такого типу зображення отримують шляхом накладання декількох знімків на один кадр.

Розв'язання

Простим підрахунком супутників на малюнку 2 визначимо, що було зроблено 22 кадри, звідси маємо, що проходження полем зображення тривало ~ 0,5 с.

Для оцінювання відстані до Сатурна передусім необхідно знайти його елонгацію (кут Сонце – Земля – Сатурн). Для отримання точного значення кута елонгації необхідно скористатися теоремами та формулами із сферичної тригонометрії, проте непогане оцінювання можна зробити, визначивши різницю прямих піднесень Сонця та Сатурна. Так можна зробити з двох причин: площина орбіти Сатурна не сильно відрізняється від площини екліптики; і Сонце, і Сатурн розташованіне далеко від точки зимового сонцестояння, поблизу якої дуги екліптики проєктують рівними дугами на небесний екватор.

Приблизне значення прямого піднесення Сонця можна знайти, виходячи із таких міркувань: 21 березня пряме піднесення Сонця дорівнює 0. З кожним наступним днем воно збільшується приблизно на 4 кутові хвилини та приблизно на 2 год за місяць. Таким чином, 15 січня пряме піднесення Сонця має становити приблизно 19h 36m; звідси різниця прямих піднесень Сонця та Сатурна становить 2h 51m або ~ 43°. (Реальне значення кутової відстані між Сатурном і Сонцем на вказаний день згідно з ефемеридами становило 41,7°.)

Далі, використовуючи трикутники знаходимо відстань від Землі до Сатурна, що приблизно дорівнюватиме 10,17 а. о. або 1,52 млрд кілометрів.

Вимірюючи розміри МКС та діаметр Сатурна на зображенні, отримаємо співвідношення їх кутових розмірів (головне – не переплутати диск Сатурна з його кільцями, бо тоді відповідь майже вдвічі відрізнятиметься від правильної). Складаючи пропорцію, оцінимо розмір МКС:

$$\frac{a_{ISS}}{l_{ISS}} = \frac{d_{Saturn}}{l_{Saturn}} \Rightarrow a_{ISS} = \frac{d_{Saturn} l_{ISS}}{l_{Saturn}}$$

Звідси чисельно маємо ~ 90 м, що досить не погано узгоджується із реальними значеннями.

2. *Телескоп може вимірювати координати зір з точністю до 0.1″. Які максимальні відстані до зір можна буде вимірювати методом річного «марсіанського» паралакса? Період обертання Марса становить 687 діб. Орбіту планети вважати коловою.*

Розв'язання

Згідно з III законом Кеплера:

$$a = T^{2/3} \approx 1{,}52 \text{ а. о.}$$

Оскільки максимальна відстань Марса від Сонця становить a, то максимальна відстань до зір становитиме:

$$r[\text{пк}] = \frac{a[\text{а.о.}]}{\pi''} \approx 15 \text{ пк}$$

3. *Метеорити падають на поверхню Місяця під різними кутами і з різними швидкостями. Чому ж всі кратери на Місяці мають однакову круглу форму?*

Розв'язання

Під час падіння метеорита на поверхню Місяця швидкість тіла майже миттєво спадає від якогось значення v_0 до нуля, отже, майже миттєво зменшується й кінетична енергія тіла. Ця енергія йде на нагрівання та руйнування поверхні Місяця, нагрівання та руйнування самого тіла, переходить у кінетичну енергію уламків, що розлітаються.

Якщо швидкість падіння невелика, то утворюється невеликий кратер (його розмір близький до розміру метеорита). Такі кратери називаються ударними. Форма кратера залежить від кута падіння. У разі вертикального падіння форма кратера нагадує форму тіла. За великих кутів падіння на поверхні може утворитися канавка. Кінетичної енергії метеорита достатньо лише для цього. Описане явище можна відтворити, кидаючи камінець на пісок під різними кутами.

Однак швидкості падіння метеоритів на поверхню Місяця дуже великі. Середня швидкість становить близько 20 км/с. Процеси руйнування й нагрівання в околі розміру тіла недостатні для вичерпування кінетичної енергії. У такому разі відбувається вибух. Вибухова хвиля руйнує тіло й поверхню Місяця, утворюючи вибуховий кратер. Розміри вибухових кратерів на Місяці в 10 – 20 разів перевищують розміри метеоритів, що їх утворюють. Вибух відбувається в момент зупинки метеорита на невеликій глибині під поверхнею Місяця. Оскільки ударна хвиля (УХ) йде рівномірно у всі боки, то утворюється кратер, форма якого близька до кола.

Звичайно, УХ йде й у глиб. Але в тому напрямку опір речовини набагато більший, ніж у поверхневих шарах. Через те ширина кратера в кілька разів перевищує його глибину.

Крім того, варто пам'ятати і про інший можливий сценарій. Під час падіння метеорита на Місяць унаслідок великої швидкості його кінетичної енергії достатньо для розігрівання й розплавлення в $10^3 – 10^4$ більшої маси (тому і розмір кратера в десятки разів перевищує розмір метеорита). Метеорит різко гальмується під час зіткнення з поверхнею, передаючи поверхні контакту свою енергію та імпульс. Всередину Місяця рухається сильна УХ, за фронтом якої місячний матеріал розігрівається до розплаву (і частково – випаровування). Розплавлена порода має властивості рідини. Зокрема, діє закон Паскаля щодо ізотропності тиску. Це основний аргумент, чому розплав займає приблизно сферичний об'єм. Суттєвого викиду розплаву від поверхні Місяця немає, бо розплав за фронтом УХ має суттєву радіальну швидкість у тілі Місяця. У міру затухання УХ всередині Місяця плавлення припиняється,але ще деякий час УХ руйнує структуру місячної кори.

Водночас на пізніх стадіях розплав схлюпується до центра й утворює центральний горбик – як на воді викидаються крапельки після падіння каменя.

4. *Український астроном-аматор виміряв інтервал часу між сходом зорь 1 та 2. Друга зоря зійшла на 3 год пізніше й на 3 год раніше зайшла, ніж перша зоря. Причому зоря 1 зайшла в точці заходу. Що можна сказати про схилення цих зір (δ_1 і δ_2)? Координати місця спостереження $\phi = 45°$, $\lambda = 34°$.*

Розв'язання

Перша і друга зорі пройшли меридіан одночасно (оскільки час затримки між сходом та заходом однаковий – по 3 год), значить, ці зорі мають приблизно однакові прямі піднесення.

Оскільки зоря 1 зайшла в точці заходу, то вона на небесному екваторі, її схилення – 0, тобто вона була над горизонтом упродовж 12 год (якщо не враховувати рефракцію). Значить, зоря 2 була над горизонтом упродовж 6 год згідно з умовами задачі: 3 год від сходу до верхньої кульмінації і 3 год після верхньої кульмінації до моменту заходу.

Варіант I

Згідно з формулою, що пов'язує годинний кут, схилення та широту на момент заходу: $\cos t = \mathrm{tg}\,t\,\mathrm{tg}\varphi$. У нас годинний кут на момент заходу становив:

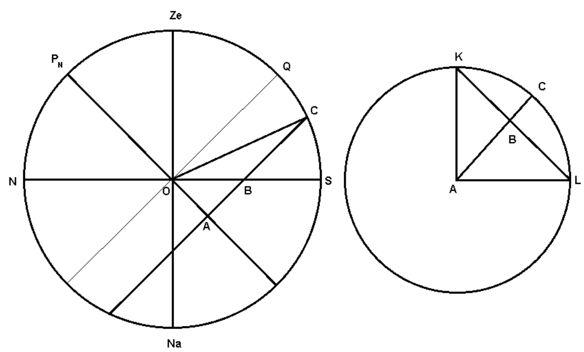
$$t = 3 \text{ год} = 45°.$$

$$\delta = \mathrm{arctg}\frac{1}{\sqrt{2}} \approx -35°$$

Знак «мінус» через те, що зоря 2 розташована нижче від екватора.

Варіант II

Розглянемо мале коло, яким «рухається» зоря 2. Проєкція цього кола на площину небесного меридіана наведена на мал 3 (*а*) (пряма *AC*), а саме мале коло – на мал. 3 (*б*).



а *б*

Мал. 3

Частина малого кола (яким унаслідок обертання Землі рухається світило), що видима над горизонтом – *KCL*, довжина цієї дуги становить 90° (оскільки зоря 2 перебуває над горизонтом упродовж 6 год). Тому $\angle KAL$ – прямий. Звідси можна легко отримати співвідношення між відрізками:

$$AB : AC = 1 : \sqrt{2}$$

З мал. 3, *а* кут схилення $\angle QOC = \angle OCA$, і можна знайти схилення:

$$\mathrm{tg}\delta = \frac{OA}{AC}.$$

Водночас $\angle AOB$ – це широта місцевості, тому з прямокутного трикутника враховуючи $\angle OAB$ і що $\phi = 45°$: $OA = AB$, тому широта:

$$\mathrm{tg}\delta = \frac{AB}{AC}\frac{1}{\sqrt{2}}.$$

Звідси $\delta = \mathrm{arctg}\frac{1}{\sqrt{2}} \approx -35°.$

5. Див. задачу **5** (**10 клас**).