

# ПОСИЛЕННЯ РОЛІ ДОВЕДЕНЬ ПІД ЧАС НАВЧАННЯ АСТРОНОМІЇ НА ПРИКЛАДІ ТЕМИ «ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ ЗІР»

**Сергій КУЗЬМЕНКОВ**, доктор педагогічних наук, кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізики та методики її навчання Херсонського державного університету

*...Наступним поколінням, які користуються апробованими відповідями на всі запитання, часто нелегко оцінити, яких зусиль їхніх попередників це потребувало.  
Чарльз Дарвін*

**А**строномія – частина сучасної науки, яка спирається на доведення, а не на віру. Цим принципом слід керуватися й під час навчання астрономії.

Досвід роботи автора зі студентами старших курсів і вчителями на курсах підвищення кваліфікації свідчить про те, що переважна більшість з них часто не спроможна відокремити істину від псевдонауки. Для них характерне некритичне ставлення до змісту надрукованого в пресі або побаченого по телевізору. На жаль, сучасна система освіти не прищеплює критичного, вдумливого ставлення до інформації, особливо до друкованого слова. Звідси й значне поширення, в тому числі й серед осіб з вищою педагогічною освітою, різноманітних езотеричних, містичних та астрологічних теорій.

Сучасне навчальне пізнання позбавлене багатьох форм розумових операцій, що властиві науковому пізнанню. Воно зводиться в основному до запам'ятовування готових істин. Учнів і студентів не вчать ставити собі запитання: «Чому?», «Чому так, а не інакше?», «Що б сталося, якби?» і доказово, з розрахунками та оцінками відповідати на них.

«Для організації навчального процесу існує така дилема. Або процес навчання є науковим, і учень розуміє, усвідомлює що є що: де вихідні факти, в чому суть моделі-гіпотези, як із прийнятих постулатів здобувають теоретичні висновки, які експериментальні доведення того, що побудована теорія – істинна. Або учень не відрізняє категорій здобутої інформації, не розуміє їх значення у процесі пізнання – тоді він приречений на механічне заучування навчального матеріалу... Таке навчання викликає огиду до предмета, що, на жаль, буває дуже часто» [7].

Ми вже вказували на таку особливість навчального предмета «астрономія», як складність доведень деяких положень астрономічної науки [4; 5]. Водночас астро-

номічна освіта майбутнього вчителя астрономії має бути побудована так, щоб усі теоретичні міркування, висновки були аргументованими, переконливими. Тому особливої актуальності під час підготовки вчителя набуває діяльнісний підхід. Цей підхід можна реалізувати через практикум із розв'язування астрономічних задач, лабораторний практикум і семінари. Проте деякі можливості застосування діяльнісного підходу є й на лекціях, де можна відкривати істини разом із студентами в результаті активної розумової діяльності.

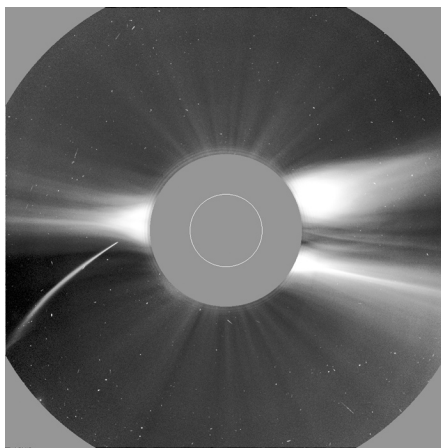
Схема діяльності викладача на лекції може бути такою: студентам пропонується дати своє пояснення, власну модель якогось явища, що починають вивчати. Оскільки астрофізика, як і фізика, має справу з моделями, які з певним наближенням описують астрономічні явища та об'єкти, відкидаючи менш важливі деталі, то це дає змогу аналізувати ці явища та об'єкти за допомогою сучасної фізики й математики.

Далі спільними зусиллями можна знайти в запропонованій моделі переваги й вади і лише потім розглянути пояснення, що його дає сучасна наука. Адже іноді достатньо виконати елементарний розрахунок, щоб переконатися в помилковості або правильності висунутої гіпотези. Покажемо, як це можна зробити на прикладі з'ясування джерел енергії зір.

У сучасних шкільних підручниках астрономії [8] (іноді одним реченням) просто констатується той факт, що в центральній області Сонця (та інших зір) відбуваються термоядерні реакції. Але ж який довгий і драматичний шлях здобування істини криється за цими скупими словами! Можна вважати, що остаточно (за сучасними уявленнями) цей шлях завершився лише в 2001 р. Ці пошуки істини цікаві й надзвичайно важливі для вчителя астрономії і з методичного, і з методологічного поглядів.

Над джерелами енергії, що випромінюють зорі, замислювався ще Ісаак Ньютон. Напри-

кінці своєї фундаментальної праці «Математичні основи природознавства» (1687 р.) він пише: «Отже, нерухомі зорі, які поступово витратилися на світло й випаровування, можуть відновлюватися падаючими на них кометами і, одержавши новий запас пального, можуть бути сприйняті за нові зорі» [2]. Як відомо на сьогодні, комети на Сонце дійсно падають (мал.). Проте чи може такий процес «відновлення» бути ефективним, згодом з'ясуємо.



Мал. Падіння комети на Сонце, що зареєстроване космічним апаратом «SOHO» 23 грудня 1996 р.

На фотографії яскраве Сонце перекрито спеціальним диском

Довгий час про фізичну природу Сонця висловлювались найнеймовірніші, наївні судження. Наприклад, німецький астроном Йоганн Боде (увійшов в історію як співавтор встановлення знаменитого правила планетних відстаней – правила Тіціуса–Боде) у 1776 р. стверджував, нібито Сонце насправді темне, подібне до Землі тіло, яке частково вкрито рідиною, частково материками, серед яких підіймаються гори, і що воно оточене двома атмосферами – першою з пари, другою – зі світлої речовини. Плями, на думку Боде, – це тверда, темна поверхня, яку ми бачимо через хмари [2].

Дивовижно, але подібних поглядів дотримувався видатний англійський астроном, відкривач Урана і автор першої науково обґрунтованої моделі нашої Галактики – Вільям Гершель. Розроблена ним у 1795 р. модель будови Сонця мала визнання понад півстоліття [2]. Гершель вважав, що Сонце – холодне, тверде, темне тіло, оточене двома хмарними шарами, з яких зовнішній – фотосфера – дуже розжарений та яскравий. Натомість внутрішній шар хмар, наче своєрідний екран, захищає центральне ядро від дії спеки. Гершель писав: «З цього нового погляду Сонце здається мені надзвичайно величною, величезною та яскравою планетою; очевидно, це перше або, точніше кажучи, єдино первинне тіло нашої системи... найімовірніше, що воно заселене, як й інші планети, істотами, органи

яких пристосовані до особливих умов, що падають на цій велетенській кулі» [2].

Фантастичні уявлення про Сонце як заселену планету могли існувати лише доти, доки не було визначено, скільки енергії воно випромінює за одиницю часу (світність Сонця). Воістину, «справжня наука починається там, де вимірюють» (Д. І. Менделєєв). У 1837 р. англійський астроном Джон Гершель і французький фізик Клод Пуйє незалежно один від одного оцінили кількість теплоти, що надходить від Сонця на одиницю земної поверхні за одиницю часу. Сьогодні ми цю величину називаємо «сонячною сталою», вона становить  $E = 1,36 \cdot 10^3$  Дж/с · м<sup>2</sup>. Знаючи сонячну сталу й відстань від Землі до Сонця  $r \approx 1,5 \cdot 10^{11}$  м, нескладно обчислити світність Сонця:  $L_{\odot} = 4\pi r^2 E \approx 4 \cdot 10^{26}$  Дж/с.

Ця перша оцінка сонячної сталої, а потім і світності Сонця, актуалізувала запитання: звідки Сонце черпає таку величезну кількість енергії?

Цікаво, що одним із перших, хто спробував відповісти на це запитання вже на новому рівні астрономічних знань, був не астроном чи фізик, а лікар, щоправда один із відкривачів закону збереження енергії, Роберт Юліус Майєр. У своїй праці «Динаміка неба» (1848 р.) він висунув гіпотезу, що Сонце поповнює власну енергію, яка весь час затрачається на випромінювання, за рахунок метеоритів, що випадають на нього («метеоритна гіпотеза Майєра») [2]. Фактично він відродив на новому етапі ідею Ньютона про падаючі комети. Сьогодні механізми, що пов'язані з випаданням речовини на космічне тіло, називають *акреційними* (лат. *accretio*, від *accresco* – зростаю, збільшуюсь).

Перевіримо, наскільки ефективним може бути такий механізм. Світність Сонця пов'язана зі зміною повної енергії за одиницю часу очевидним співвідношенням

$$L = -\frac{dW}{dt}. \quad (1)$$

Знак «мінус» означає, що існуюча світність підтримується за рахунок зменшення власної енергії зорі. Згідно з теоремою віріала [1; 3; 5; 6] повна енергія зорі дорівнює половині потенціальної, тобто в нашому випадку  $W = W_g/2$ , де власна гравітаційна енергія Сонця  $W_g$  з точністю до числового множника визначається формулою

$$W_g = -\frac{GM^2}{R}. \quad (2)$$

Для сил притягання потенціальна енергія завжди від'ємна. В цьому легко переконатись, уявивши, що якесь тіло віддаляють від поверхні Землі. При цьому виконується робота, яка йде на збільшення потенціальної енергії тіла. Проте це збільшення закінчується тим, що на нескінченності ця енергія, за означенням, перетворюється на нуль (яка може бути взаємодія між тілами, що

розділені нескінченністю?). Це можливо лише за умови, що потенціальна енергія від'ємна.

Виконуючи елементарне диференціювання виразу (2) і підставляючи результат в (1), отримуємо:

$$L = \frac{GM}{R} \frac{dM}{dt}. \quad (3)$$

Звідси для темпу акреції отримаємо:

$$\frac{dM}{dt} = \frac{LR}{GM}. \quad (4)$$

За теперішніх значень світності, маси та радіуса Сонця темп акреції мав би дорівнювати

$$\frac{dM}{dt} = 2 \cdot 10^{15} \frac{\text{кг}}{\text{с}} \approx 0,01 \frac{M_{\oplus}}{\text{рік}}.$$

Отже, щоб підтримувати сучасну світність, на Сонце має випадати така кількість метеорної речовини, що приблизно дорівнює масі Землі за кожні сто років. На сьогодні ми знаємо, що такої кількості метеорної речовини немає в Сонячній системі – навіть у головному поясі астероїдів (між Марсом і Юпітером) сумарна маса всіх космічних тіл не перевищує  $1/_{1000}$  маси Землі.

Проте в середині XIX ст. цього не знали, але від «метеоритної» гіпотези відмовились. Чому? (Таке запитання якраз доречно адресувати сучасним студентам і вимагати від них відповіді, оскільки їхніх знань для цього цілком достатньо.)

А міркування були такі. Якщо маса Сонця збільшується, то має зростати сила притягання Землі до Сонця. Тоді Земля має наближатись до Сонця, що згідно з третім законом Кеплера спричинить зменшення періоду обертання Землі навколо Сонця. Період обертання Землі навколо Сонця в ті часи можна було виміряти доволі точно, й для астрономів це було критерієм виявлення змін маси Сонця. Але чи є такий критерій достатньо ефективним для розрахованого темпу акреції, адже кількість речовини, що має випадати на Сонце, нехтовно мала порівняно з масою Сонця?

З'ясуємо, на скільки має зменшуватись період обертання Землі  $T_{\oplus}$  через такий приріст маси Сонця [3]. Нехтуючи масою Землі порівняно з масою Сонця, запишемо третій узагальнений закон Кеплера для системи Сонце – Земля:

$$\frac{M_{\odot} T_{\oplus}^2}{a_{\oplus}^3} = \frac{4\pi^2}{G}, \quad (5)$$

де  $a_{\oplus}$  – велика піввісь земної орбіти;  $G$  – гравітаційна стала. Диференціюємо це співвідношення, враховуючи, що змінюються і маса, і період, і велика піввісь:

$$\frac{(T_{\oplus}^2 dM_{\odot} + 2M_{\odot} T_{\oplus} dT_{\oplus}) a_{\oplus}^3 - 3M_{\odot} T_{\oplus}^2 a_{\oplus}^2 da_{\oplus}}{a_{\oplus}^6} = 0. \quad (6)$$

Виконуючи очевидні скорочення, отримаємо:

$$(T_{\oplus} dM_{\odot} + 2M_{\odot} dT_{\oplus}) a_{\oplus} - 3M_{\odot} T_{\oplus} da_{\oplus} = 0. \quad (7)$$

Щоб розв'язати це рівняння, скористаємось законом збереження моменту імпульсу Землі:

$$M_{\oplus} a_{\oplus} \sqrt{\frac{GM_{\odot}}{a_{\oplus}}} = \text{const}, \quad (8)$$

в якому використано колову швидкість руху Землі по орбіті. Диференціюючи це співвідношення, отримуємо:

$$\frac{da_{\oplus}}{a_{\oplus}} = -\frac{dM_{\odot}}{M_{\odot}}. \quad (9)$$

Підставляючи (9) у рівняння (7), остаточно знаходимо:

$$\frac{dT_{\oplus}}{T_{\oplus}} = -2 \frac{dM_{\odot}}{M_{\odot}}. \quad (10)$$

Використовуючи розрахований темп акреції на Сонце, отримаємо зменшення періоду на 2 с за один рік. Таку зміну періоду обертання Землі навколо Сонця без сумніву можна було помітити за часів Р. Майєра. Оскільки жодної зміни періоду не спостерігалось, то Майєру довелося навіть припустити, що випромінювання Сонця супроводжується одночасною втратою його маси (з нашими теперішніми знаннями про термоядерні реакції можна навіть вигукнути: «Яка геніальна здогадка!»).

Варто зазначити, що насправді акреція відіграє важливу роль на певних етапах еволюції зір, наприклад під час народження зорі або обміну речовиною в тісних подвійних зоряних системах.

Наступна гіпотеза щодо джерел енергії Сонця пов'язана з іншим варіантом зміни його власної гравітаційної енергії. Якщо подивитись на відповідну формулу (2), то стає очевидним, що ця енергія може зменшуватись не тільки за рахунок збільшення маси, а й за рахунок зменшення радіуса зорі.

І ось Герман Гельмгольц у 1854 р. відмітив, що випромінювання Сонця може довгий час підтримуватись його поступовим стисканням (такий механізм поповнення енергії, яка витрачається на випромінювання, називають *контракційним*). Уільям Томсон (лорд Кельвін) обчислив, що в існуючому стані Сонце не могло перебувати понад 20 млн років [2]. Цю шкалу часу пізніше стали називати шкалою Кельвіна–Гельмгольца. Оцінимо цей характерний час.

Якщо вважати, що світність Сонця не змінювалась з часом, то характерний час його стискання  $t_{\text{кн}}$ , яке забезпечує спостережувану світність, дорівнює [3]:

$$t_{\text{кн}} = \frac{|\Delta W|}{L_{\odot}} = \frac{1}{2} \frac{|\Delta W_g|}{L_{\odot}}. \quad (11)$$

Зміну гравітаційної енергії Сонця  $\Delta W_g$  можна оцінити як різницю між сучасним її значенням та початковим:

$$W_g \approx -\frac{GM_\odot^2}{R_\odot} - \left( -\frac{GM_{\odot 0}^2}{R_{\odot 0}} \right) \approx -\frac{GM_\odot^2}{R_\odot}. \quad (12)$$

Враховано, що початковий розмір є набагато більшим від теперішнього:  $R_{\odot 0} \gg R_\odot$ . Цікаво, що від свого народження з газопопилової хмари потенціальна енергія Сонця зменшилась на величину, яка дорівнює його сучасному значенню.

Отже,

$$t_{\text{кн}} = \frac{GM_\odot^2}{2L_\odot R_\odot} = 5 \cdot 10^{14} \text{ м} \approx 16 \cdot 10^6 \text{ років.}$$

Проте у точнішій моделі процесу, де враховано, що непрозорість речовини підкоряється закону Крамерса, світність збільшується у процесі стискання, тобто в минулому світність була менше, ніж нині. Тому час стискання потрібно приблизно подвоїти, й тоді  $t_{\text{кн}} \approx 30$  млн років.

Чи могли в ті часи підтвердити або спростувати гіпотезу Гельмгольца? (Радимо і це запитання адресувати студентам.) Для цього з'ясуємо, на скільки мав би зменшуватись радіус Сонця щорічно відповідно до цієї гіпотези [3].

У припущенні, що  $L_\odot = \text{const}$ , матимемо

$$-\Delta W = -\frac{1}{2} \Delta W_g = -\frac{1}{2} \frac{dW_g}{dR} \Delta R = -\frac{GM_\odot^2}{2R_\odot^2} \Delta R = L_\odot \tau, \quad (13)$$

де  $\tau = 1$  рік  $= 3,16 \cdot 10^7$  с. Звідси знаходимо:

$$\Delta R = -2 \frac{L_\odot \tau}{GM_\odot^2} R_\odot^2 \approx -45 \text{ м.}$$

Такі зміни розмірів Сонця навіть сьогодні виявити практично неможливо.

У середині XIX ст. вік Сонця у кілька десятків мільйонів років здавався цілком прийнятним. Він узгоджувався з відомими на той час геологічними оцінками віку Землі. Більше того, Кельвін саме через цей отриманий ним результат не сприймав еволюційну теорію Ч. Дарвіна, оскільки для природної еволюції необхідні сотні мільйонів років. Проте до кінця XIX ст. поступово накопичувались геологічні свідчення тривалішої шкали часу існування Землі.

Існуюча на той час узгодженість між теорією й спостереженнями була безповоротно порушена відкриттям явища радіоактивності (А. Бекерель, 1896 р.). У 1903 р. П'єр Кюрі запропонував використовувати період напіврозпаду радіоактивного елемента як еталон часу для визначення абсолютного віку земних порід [9]. Було з'ясовано, що вік Землі становить кілька мільярдів років (на сьогодні прийнято вважати,

що 4,6 млрд років), тобто Земля «виявилась» набагато старішою за Сонце. Стало зрозуміло, що забезпечити світність Сонця впродовж такого інтервалу часу може лише якийсь інше, набагато потужніше джерело енергії.

Тим не менше, за сучасними уявленнями, контракційний механізм забезпечує випромінювання зір на перехідних етапах, наприклад на стадії протозір, коли ще не розпочались термоядерні реакції в їх надрах і протозоря не стала зорею. У зір, масивніших за Сонце, цей механізм завжди вмикається з вичерпуванням чергового ядерного палива. У цьому випадку порушується механічна рівновага, ядро зорі починає стискатись і розігріватись, що спричиняє синтез все складніших атомних ядер.

Які гіпотези висувалися у XX ст. і як їх можна спростувати або підтвердити – дізнаємося в наступній статті.

## ЛІТЕРАТУРА

- К и т т е л ь Ч. Берклеєвський курс фізики: в 6 т. Т. 1. Механіка / Ч. Киттель, У. Найт, М. Рудерман; пер. с англ. под ред. А. И. Шальникова и А. С. Ахматова. – М. : Наука, 1983. – 448 с.
- К л и м и ш и н І. А. Історія астрономії / І. А. Климишин. – Івано-Франківськ : вид-во ІФТКДІ, 2000. – 652 с.
- К у з ь м е н к о в С. Г. Зорі: Астрофізичні задачі з розв'язаннями : навч. посіб. / С. Г. Кузьменков. – К. : Освіта України, 2010. – 206 с.
- К у з ь м е н к о в С. Г. Особливості астрономічного освітнього середовища, призначеного для підготовки вчителя астрономії / С. Г. Кузьменков // Зб. наук. праць. Пед. науки. – Вип. 55. – Херсон : Вид-во ХДУ, 2010. – С. 295–302.
- К у з ь м е н к о в С. Г. Підготовка сучасного вчителя астрономії : Моногр. / С. Г. Кузьменков. – Херсон : ХДУ, 2011. – 332 с.
- К у з ь м е н к о в С. Г. Про одну маловідому теорему / С. Г. Кузьменков // Вісн. Чернігів. НПУ ім. Т. Г. Шевченка. – Вип. 99 / Чернігів. НПУ ім. Т. Г. Шевченка; гол. ред. Носко М.О. – Чернігів : ЧНПУ, 2012. – С. 213–218. (Сер.: Пед. науки).
- П и н с к и й А. А. Метод модельних гіпотез як метод познання и объект изучения / А. А. Пинский, В. Г. Разумовский // Физика в шк. – 1997. – № 2. – С. 30–35.
- П р и ш л я к М. П. Астрономія : підруч. для 11 кл. загальноосвіт. навч. закл. / М. П. Пришляк. – К. : Академперіодика, 2008. – 148 с.
- Х р а м о в Ю. А. Фізика : Биограф. справ. / Ю. А. Храмов. – М. : Наука, 1983. – 400 с.