

Кузьменков, С.Г. Як доказово викладати астрономію [Текст] / С.Г. Кузьменков // Фізика та астрономія в школі. – 1999. – № 2. – С. 34–37.

Як доказово викладати астрономію

Сергій КУЗЬМЕНКОВ

«Віра і цікавість одне з одним завжди не в згоді».

Б. Стругацький. Пошук призначення

Астрономія — це частина сучасної науки, яка спирається на докази, а не на віру. Цим принципом слід керуватися і під час викладання астрономії.

Досвід роботи автора зі студентами старших курсів і вчителями на курсах підвищення кваліфікації свідчить про те, що переважна більшість з них не спроможна відокремити істину від псевдонауки. Для них характерне некритичне ставлення до змісту надрукованого в пресі й «навколонукавої» літератури, яка майже повністю витіснила з полиць книгарень науково-популярну. На жаль, сучасна система освіти не прищеплює критичного, вдумливого ставлення до друкованого слова. Звідси й значне поширення, у тому числі й серед осіб з вищою педагогічною освітою, різноманітних езотеричних, містичних та астрологічних теорій.

Можна погодитися з авторами [1], що навчальне пізнання стерильне від багатьох форм розумових операцій, що властиві науковому пізнанню. Воно зводиться в основному до запам'ятовування готових істин.

Учнів і студентів не вчать задавати собі запитань: «Чому?», «Чому так, а не інакше?», «Що сталося б, якби?» і доказово, з розрахунками та оцінками відповідати на них.

Перевірка гіпотез. Йдеться не про відомий статистичний метод, а про захід, що сприяє певною мірою наближенню навчального пізнання до наукового. Основна мета цього заходу — відійти від стереотипної форми зазубрювання відомих істин, відкривати їх у результаті активної розумової праці на уроці.

Схема діяльності на уроці може бути такою: учням про-

понується дати своє пояснення, свою модель якогось явища, що починають вивчати. Далі за допомогою вчителя знайти в ній сильні та слабкі боки, і лише потім звернутися до пояснення, яке дає наука. Адже іноді достатньо зробити елементарний розрахунок, щоб переконатися в помилковості пропонованої гіпотези.

Уже протягом кілька років за цим методом в Обласному ліцеї м. Херсона і на фізико-математичному факультеті Херсонського державного педагогічного університету автор викладає дві теми: «Внутрішня будова зір» і «Джерела енергії зір». Це зумовлено тим, що раніше під час викладання цих тем неодноразово можна було почути запитання: «А хто там був і все це бачив?» Схожі питання відносно різних астрономічних явищ спо-

нукали відомого російського астронома В. Курта написати нещодавно статтю: «Чи вірно астрономи уявляють собі світ?» [2].

Як же разом з учнями або студентами дізнатися, що робиться в надрах зір? Тут треба зауважити, що астрофізика, як і фізика, має справу з моделями, які до певного ступеня наближення описують астрономічні явища і об'єкти, відкидаючи менш важливі деталі. Це дає змогу аналізувати ці явища і об'єкти за допомогою сучасної фізики і математики.

«Для організації навчального процесу існує така дилема. Або процес навчання є науковим, і учень розуміє, усвідомлює що є що: де вихідні факти, у чому суть моделі-гіпотези, як із прийнятих постулатів роблять теоретичні висновки, які експериментальні докази того, що побудована теорія — істинна. Однак 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» [3].

Конкретний приклад. Вивчення теми «Внутрішня будова зір» відбувається за такою схемою. Спочатку доводимо, що зорі — газові кулі. Щодо зовнішніх шарів, то це можна зробити, посилаючись на результати спектрального аналізу. Щодо внутрішніх шарів це твердження не є очевидним, тому що середня густина, наприклад, Сонця більша, ніж густина води. Переконатися в тому, що і внутрішні шари перебувають у газуватому стані, можна, якщо оцінити температуру зоряних надр, виходячи з умов гідростатичної рівноваги зорі. Але цю рівновагу треба пояснити. Роз-



ВИВЧАЄМО АСТРОНОМІЮ

глянемо дві гіпотези [див. опорний конспект (ОК)].

Гіпотеза перша: *відсутність гравітації*. Аналізуємо, які наслідки випливають з такого припущення. Зоря, напевно, буде розширюватися, розпливатися у просторі. Можна оцінити час розпливання зорі, прийнявши, що воно відбувається з тепловою швидкістю атомів водню за температури зовнішніх шарів зорі. Наприклад, Сонце збільшило б свої розміри в 10 разів приблизно за 6–7 діб.

Гіпотеза друга: *єлише гравітація*. У цьому разі можливо оцінити час колапсу зорі (час вільного падіння зовнішніх шарів усередину — так званий гідродинамічний час). Тут, однак, роблять припущення, що прискорення вільного падіння в цьому процесі залишається сталим — таким, яким воно є на поверхні зорі в початковий момент. Зі студентами гідродинамічний час ми оцінюємо також за допомогою третього закону Кеплера в узагальненій формі (див. задачу 2), і вони переконуються, що результати мало відрізняються один від одного.

Для Сонця гідродинамічний час, обчислений у такий спосіб, становить 37 хв. Сонце існує вже 5 млрд років, тобто зоря перебуває в рівновазі. Це можливо тому, що для кожного елемента маси зорі сила гравітації, яка діє в напрямі до центра зорі, зрівноважується різницею сил тиску, що діють на цей самий елемент «знизу» і «зверху».

З'ясувавши умову рівноваги зір, можна обчислити їх середню температуру. Тиск, зумовлений гравітацією, дуже просто розрахувати для однорідної зорі, якщо визначити тиск, що виникає між двома половинками зорі в результаті їх притягання однієї до одної (див. ОК). Для того щоб визначити температуру, слід

використати зв'язок між температурою і тиском зоряної речовини, тобто рівняння стану цієї речовини. Тут також треба висувати гіпотезу: *зоряні надра описуються моделлю ідеального газу*. І тоді можна використовувати рівняння Менделєєва—Клапейрона. За цим рівнянням середня температура Сонця становить $T_0 = 4,6 \cdot 10^6$. За такої температури речовина може перебувати лише в газуватому стані. Але використання рівняння Менделєєва—Клапейрона потрібно обґрунтувати.

Згадаємо критерій ідеальності газу і порівняємо середню відстань між частинками зоряної речовини з розмірами самих частинок. Середню відстань між частинками можна обчислити, знаючи густину речовини (див. ОК). Найцікавіше визначити цю величину в центрі Сонця, де густина набуває максимального значення.

Знаючи густину зорі в центрі й масу частинок, з яких вона складається (можна використати масу протона), обчислюємо їх концентрацію. Величина, обернена до неї, — це об'єм, який припадає на одну частинку. Вважаючи його сферичним, легко знайти середню відстань між частинками.

Для загальноприйнятої моделі Сонця густина в центрі становить $1,32 \cdot 10^5$ кг/м³ [4]. Тоді середня відстань між частинками $\approx 10^{-11}$ м.

Щоб визначити розміри самих частинок, треба з'ясувати фізичний стан зоряної речовини. Для цього можна порівняти середню кінетичну енергію частинок з енергією, що потрібна для іонізації атомів водню, тому що всі нормальні зорі складаються в основному з водню. Із розрахунків випливає (див. ОК і задачу 3), що водень (а також гелій, енергія іонізації

якого становить 24,46 еВ) у надрах Сонця і подібних йому зір перебуває в іонізованому стані. Тому розмірами частинок можна вважати розміри самих ядер (для водню це просто протони). За такий можна взяти радіус дії ядерних сил $r \approx 10^{-15}$ м. І тоді з'ясовується, що саме іонізація в надрах Сонця «врятовує» модель ідеального газу.

Зі студентами ми оцінюємо також вплив тиску випромінювання. Для Сонця він виявляється приблизно у 1000 разів меншим, ніж тиск газу. Тому для зір, подібних до Сонця, ним можна знехтувати.

Розглядаючи різні гіпотези і виконуючи нескладні розрахунки (а це є обов'язковим елементом), можна наочно обґрунтувати основні положення сучасної теорії внутрішньої будови зір. Крім того, відомі учням закони фізики в астрономічних явищах постають перед ними в інших ракурсах, глибше розкриваючи свій зміст. Це, наприклад, стосується такої відомої фізичної моделі, як ідеальний газ. Виявляється, що «ідеальним» може бути не лише розріджений газ, як це виходить за підручником [5], а й газ у центрі зір, де його густина сягає приблизно 10^5 кг/м³.

Наближення навчального пізнання до наукового розвиває навички учнів аналізувати явища і давати їм наукові пояснення, сприяє розвитку їхнього творчого мислення і здібностей, посилює інтерес до навчального предмета, підвищує ефективність навчання.

Наводимо кілька задач, що ілюструють викладений вище матеріал. Для простих задач наводимо лише відповіді.

Задача 1. Припустивши відсутність гравітації, визначити час, за який Вега (α -Ліри) збільшить свої розміри в 10 разів. Температура поверхні Веги 10 000 К, радіус — $3R_{\odot}$.

Розв'язання: див. ОК.

Відповідь: 15,4 доби.

ВИВЧАЄМО АСТРОНОМІЮ

Задача 2. Визначити гідродинамічний час червоного надгіганта Антареса (α -Скорпіона). Маса цієї зорі становить $19 M_{\odot}$, радіус — $560 R_{\odot}$.

Розв'язання. Розв'яжемо задачу за допомогою третього закону Кеплера. Можна вважати, що траєкторією руху обраної нами частини поверхні масою m (це може бути і один атом гідрогену) буде половина дуже витягнутого еліпса (з ексцентриситетом, близьким до одиниці). Величина півосі цього еліпса пов'язана з радіусом зорі R таким чином:

$$a = \frac{R}{2}. \quad (1)$$

Гідродинамічний час — це половина періоду обертання по еліпсу:

$$t_{\text{гд}} = \frac{T}{2}. \quad (2)$$

Згідно з третім законом Кеплера в абсолютній формі:

$$\frac{T^2(M+m)}{a^3} = \frac{4\pi^2}{G}, \quad (3)$$

де M — маса зорі; G — гравітаційна стала. Підставляючи (1) і (2) у (3) та враховуючи, що $m \ll M$ і нею можна знехтувати, маємо:

$$t_{\text{гд}} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{R^3}{2GM}}. \quad (4)$$

Відповідь: 39,5 доби. Це набагато більше, ніж у Сонця, але треба звернути увагу на розміри цієї зорі. Якщо її розташувати на місці Сонця, то навіть Марс опиниться всередині неї.

Задача 3. За якої найменшої температури гідроген перебуватиме у вигляді високотемпературної плазми (повністю іонізованим)?

Відповідь: $T_{\text{мін}} = \frac{2E_{\text{іон}}}{3k} \approx 10^5 \text{ К.}$

Задача 4. Визначити відносну молекулярну масу сонячної речовини.

Розв'язання. Як впливає з розв'язку попередньої задачі, гідроген буде повністю іонізованим за температури порядку 10^5 К . За температури порядку 10^6 К вся речовина зорі перебуватиме у стані дуже

сильної іонізації. Не лише гідроген і гелій, а й атоми багатьох важких елементів втраять майже всі свої електрони. Це дає змогу визначити відносну молекулярну масу сонячної речовини.

Якби речовина складалася лише з нейтральних атомів гідрогену, то $\mu = 1$. Для повністю іонізованого гідрогену $\mu = 1/2$, оскільки електрон вважаємо такою самою частинкою, як і протон. Аналогічно для нейтрального гелію $\mu = 4$, а для повністю іонізованого $\mu = 4/3$, оскільки при повній іонізації кожен атом гелію дає три частинки. Для важких хімічних елементів наближено виконується співвідношення $A = 2Z$, де A — атомна вага; Z — атомний номер. Але атом з атомним номером Z при повній іонізації розпадається на $Z+1$ частинок, тому:

$$\mu = \frac{A}{Z+1} = \frac{2Z}{Z+1} \approx 2. \quad (5)$$

Так, наприклад, для карбону, який має 6 електронів і $A = 12$, при повній іонізації $\mu = 12/7 \approx 2$; для феруму ($Z = 26$ і $A = 56$) $\mu = 56/27 \approx 2$.

Позначимо масові частки гідрогену і гелію у сонячній речовині через X та Y відповідно. Тоді масова частка всіх інших хімічних елементів буде $1-X-Y$ для відносної молекулярної маси даної суміші справедлива формула:

$$\frac{1}{\mu} = \frac{X}{\mu_X} + \frac{Y}{\mu_Y} + \frac{1-X-Y}{\mu_{\text{і.х.р}}}. \quad (6)$$

При повній іонізації $\mu_X = 1/2$, $\mu_Y = 4/3$, $\mu_{\text{і.х.р}} = 2$ і за (6):

$$\mu = \frac{4}{2+6X+Y}. \quad (7)$$

Відповідь: для стандартної моделі Сонця ($X = 0,73$; $Y = 0,25$) $\mu_{\odot} = 0,6$.

Задача 5. Оскільки компоненти плазми електрично заряджені, перевірити, чи не порушує електромагнітна взаємодія «ідеальність» сонячної речовини.

Вказівка. Доцільно порівняти енергію кулонівської взаємодії між частинками з їх кінетичною енергією.

Розв'язання. Енергія кулонівської взаємодії:

$$E_q = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 d}, \quad (8)$$

де e — заряд електрона; ϵ_0 — електрична стала; d — середня відстань між частинками. Маємо (див. ОК):

$$d = \sqrt{\frac{6m_p}{\pi\rho}} \approx 3 \cdot 10^{-11} \text{ м.}$$

Тоді $E_q = 8 \cdot 10^{-18} \text{ Дж}$. Середня кінетична енергія частинки за температури у центрі Сонця $T_c = 1,4 \cdot 10^7 \text{ К}$ становить:

$$E_k = \frac{3}{2} kT_c \approx 3 \cdot 10^{-16} \text{ Дж.}$$

Відношення енергій $E_k / E_q = 40$.

Відповідь: оскільки $E_k \gg E_q$, то, незважаючи на електромагнітну взаємодію, плазму в центрі Сонця можна вважати ідеальним газом.

ЛІТЕРАТУРА

1. Разумовский В. Г., Рабоджийска Р. К. Обучение школьников и развитие их способностей // Физика в шк. — 1994. — № 2. — С. 52–56.
2. Курт В. Г. Правильно ли астрономы представляют себе мир? // Земля и Вселенная. — 1996. — № 5. — С. 17–22.
3. Пинский А. А., Разумовский В. Г. Метод модельных гипотез как метод познания и объект изучения // Физика в шк. — 1997. — № 2. — С. 30–35.
4. Мартынов Я. Д. Курс общей астрофизики. — М.: Наука, 1988.
5. Мякишев Г. Я., Буховцев Б. Б. Физика: Учеб. для 10 кл. сред. шк. — М.: Просвещение, 1992.

НАД ЦИМ ВАРТО ЗАМИСЛИТИСЬ...

«Ні мистецтво, ні мудрість не можуть бути досягнуті, якщо їм не навчатися».

«Не прагни знати все, щоб не стати в усьому неуком».

Демокрит

«Корисніше знати кілька мудрих правил, які завжди могли б слугувати тобі, ніж навчитися багатьом речам, для тебе некорисним».

Сенека

«Виховання — справа важка, і поліпшення його умов — один із священних обов'язків кожної людини, бо немає нічого важливішого, як освіта самого себе і своїх близьких».

Сократ



ВИВЧАЄМО АСТРОНОМІЮ

ДО ВНУТРІШНЬОЇ БУДОВИ ЗІР (опорний конспект)

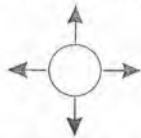
Спектральний аналіз \Rightarrow зовнішні шари — газ (73% H, 25% He)

Зоря — газова куля?

Для Сонця $\bar{\rho}_\odot = \frac{M_\odot}{\frac{4}{3}\pi R_\odot^3} = 1410 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} > \rho_{\text{води}}$

Гіпотези

Гравітація відсутня



Час розпливання $\rightarrow t = \frac{10R}{\bar{v}}$

$\bar{v} = \sqrt{\frac{3kT}{m_p}}$ ← маса протона

На поверхні Сонця $T = 5770 \text{ K}$

$t_\odot \approx 6,7 \text{ діб}$



Що протидіє?



Гравітація

Тільки гравітація



Гідродинамічний час $R = \frac{gt_{\text{гд}}^2}{2}$

Припущення: $g = \frac{GM}{R^2} = \text{const}$



$t_{\text{гд}} = \sqrt{\frac{2R^3}{GM}}$

$t_{\text{гд}\odot} \approx 37 \text{ хв}$

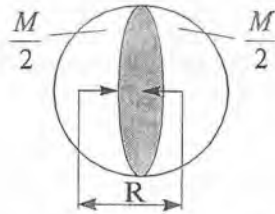


Що протидіє?



Тиск газу

$P_{\text{грав}} = P_{\text{газ}}$ — гідростатична рівновага



$P_{\text{грав}} = \frac{GM^2/4R^2}{\pi R^2} = \frac{GM\bar{\rho}}{3R}$

гіпотеза

$\frac{GM\bar{\rho}}{3R} = \frac{\bar{\rho}}{\mu m_p} k\bar{T} \Rightarrow \bar{T} = \frac{1}{3} \frac{G}{k} \mu m_p \frac{M}{R}$



$\mu_\odot = 0,6 \Rightarrow \bar{T}_\odot = 4,6 \cdot 10^6 \text{ K}$



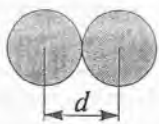
$E_{\text{іонізації}} (13,55 \text{ eV для H}) \ll \frac{3}{2} k\bar{T}_\odot$



іонізований газ (плазма)



Середня відстань між частинками $d \gg$ розміри частинок $\sim 10^{-15} \text{ м}$



$V_0 = \frac{1}{n} = \frac{m_p}{\rho}$

$d = \sqrt[3]{\frac{6V_0}{\pi}} \sim 10^{-11} \text{ м (у центрі Сонця)}$

модель ідеального газу