



ELSEVIER



Stanford University

Science and Education Studies

№ 2. (16), July-December, 2015

VOLUME III

"Stanford University Press"

2015

Sergey Kuzmenkov, Kherson State University,
Associated Professor, Doctor of Pedagogic Sciences,
the Faculty of Physics, Mathematics and Informatics

The solving of astrophysical problems-paradoxes as method of development of dialectical thought

Abstract: This article is devoted to development of dialectical thought of students by solving problems-paradoxes. The five examples of solution such problems with astrophysical contents, which towards forming to scientific world view and integral modern astrophysical world view, are presented.

Keywords: scientific world view, dialectical thought, astrophysical problems-paradoxes, thermal and mechanical equilibrium of stars, transformation of Hydrogen in Helium, white dwarfs, black holes, Doppler effect, gravitational red shift.

Сергій Кузьменков, Херсонський державний університет,
доцент, доктор педагогічних наук,
факультет фізики, математики та інформатики

Розв'язання астрофізичних задач-парадоксів як спосіб розвитку діалектичного мислення

Анотація: У статті пропонується розвивати діалектичне мислення студентів шляхом розв'язування задач-парадоксів. Наведено 5 прикладів розв'язання таких задач з астрофізичним змістом, спрямованих на формування наукового світогляду і цілісної сучасної астрофізичної картини світу.

Ключові слова: науковий світогляд, діалектичне мислення, астрофізичні задачі-парадокси, теплова і механічна рівновага зір, перетворення Гідрогену в Гелій, білі карлики, чорні діри, ефект Доплера, гравітаційне червоне зміщення.

Сучасне суспільство стоїть перед серйозними викликами. Це і поширення псевдонауки (наприклад, астрології), містики, і розповсюдження через засоби

масової інформації, Інтернет неправдивої (зазвичай з присмаком сенсаційності) інформації, і поява нових, сучасних міфів (наприклад, «фальсифікація перебування американців на Місяці», передбачення Майя «кінця світу 2012 р.» тощо) поряд з благополучним існуванням старих. У кіно і на телебаченні з'являються все нові фільми-катастрофи, до створення яких, вочевидь, зовсім перестали залучати як консультантів астрономів-професіоналів.

«Протистояти нинішній хвилі ірраціоналізму та містики – природна позиція кожної освіченої та із здоровим розумом людини, – наголошує відомий російський астрофізик Б.М. Владимирський. – Для творчо активного дослідника така позиція – одночасно і виконання суспільного (якщо завгодно – громадянського) обов'язку. Адже немає жодних сумнівів, що домінування у суспільстві згадуваних акцентів світовідчуття – це зменшення притоку в науку майбутніх Колмогорових та Гамових» [1].

Протистояти псевдонаукам можна, очевидно, формуючи у тих, хто навчається, наукового стилю мислення й діяльності, наукового світогляду. Важливішою складовою наукового світогляду є діалектичне мислення, головною ознакою якого є здатність мислити конструктивно за наявності суперечностей.

Формуванню діалектичного мислення і, в решті решт, наукового світогляду сприяють, на нашу думку, розв'язання задач-парадоксів. Наш досвід підготовки фахівців-фізиків і майбутніх учителів фізики та астрономії свідчить, що надзвичайно ефективним в цьому контексті є розв'язання астрофізичних задач-парадоксів. Розглянемо кілька задач, які ми зазвичай пропонуємо нашим студентам.

Задача 1. Чому ми холодніше за Сонце? *Темп енерговиділення на одиницю маси в тілі людини приблизно дорівнює 10 Вт/кг, а для Сонця ця величина дорівнює $2 \cdot 10^{-4}$ Вт/кг. Чому ж ми набагато холодніше [2] (ця задача була запропонована як якісна у [3])?*

Розв'язання. Енерговиділення відбувається в об'ємі, тому зростає пропорційно кубу характерного розміру об'єкта, а відведення теплоти відбувається з поверхні, площа якої зростає як *квадрат* характерного розміру. Нехай ε – темп енерговиділення на одиницю маси. Тоді загальний темп енерговиділення (L^+) з точністю до числового множника визначається так:

$$L^+ \sim \varepsilon M \sim \varepsilon \rho R^3. \quad (1)$$

А темп відведення теплоти через випромінювання (L^-) за законом Стефана-Больцмана становить:

$$L^- \sim R^2 \sigma T^4. \quad (2)$$

В умовах механічної і теплової рівноваги $L^+ = L^-$, звідси:

$$T \sim \left(\frac{\varepsilon \rho R}{\sigma} \right)^{\frac{1}{4}}. \quad (3)$$

Отже, зі збільшенням розмірів об'єкту (за незмінності ε) його поверхнева температура має зростати.

Слід зазначити, що саме за цієї причини маленькі ссавці їдять набагато більше (по відношенню до власної маси), ніж великі.

Задача 2. Чи важко охолодити зорю? *Не уточнюючи джерел енергії зір, поясніть, за рахунок чого забезпечується теплова стійкість зір [2].*

Розв'язання. Для ідеального одноатомного газу (а саме таким можна вважати повністю іонізований газ всередині зорі) справедлива теорема віріала, що є відомою в класичній механіці (енергією обертання зорі і її магнітного поля нехтуємо) [4]:

$$2W_T = -W_g, \quad (4)$$

де W_T – тепла, W_g – власна гравітаційна енергія зорі. Тоді повна енергія дорівнює:

$$W = W_T + W_g = -W_T, \quad (5)$$

а її зміна:

$$\Delta W = -\Delta W_T. \quad (6)$$

Якщо відбирати енергію у зорі (наприклад, через випромінювання, тобто $\Delta W < 0$), то вона має нагріватись ($\Delta W_T > 0$) і навпаки, якщо якимось чином додавати енергію зорі ($\Delta W > 0$), то вона буде охолоджуватись ($\Delta W_T < 0$).

Оскільки:

$$W = \frac{W_g}{2}, \quad \text{а} \quad W_g \sim -\frac{GM^2}{R}, \quad (7)$$

то зоря буде підтримувати себе у гідростатичній рівновазі, змінюючи радіус.

Ми зіштовхуємось із парадоксальним фактом: віднімаючи у зорі енергію, її неможливо охолонути. Будь-яка спроба відібрати у зорі енергію спонукає її стискатися та вивільняти гравітаційну енергію у такій кількості, що не тільки компенсує витрати енергії з поверхні, але ще й нагріває зоряну речовину. Така «поведінка» зорі фактично означає, що вона має *від'ємну теплоємність*. З методологічного погляду це надзвичайно важливий висновок.

Задача 3. Чому Сонце не вибухає? Чому воднева бомба вибухає, а Сонце – ні, хоча і в тому і в іншому випадках енергія виділяється за рахунок термоядерних реакцій перетворення Гідрогену в Гелій [5]?

Розв'язання. Справа в тому, що повільний темп енерговиділення на Сонці («ядерне жевріння») задається першою реакцією протон-протонного циклу, яка відбувається за каналом слабкої взаємодії:



Характерний час перебігу цієї реакції $\sim 10^{10}$ років. Якщо з якоїсь причини температура у надрах Сонця трохи збільшиться, то раніше ніж термоядерні реакції відреагують на це підвищенням енерговиділення, Сонце встигне розширитись та охолонути (див. попередню задачу).

У водневій бомбі цієї реакції немає. Реакції відбуваються тільки за участі важких ізотопів Гідрогену: Дейтерію ${}^2_1\text{D}$ та Тритію ${}^3_1\text{T}$. Реакції з ними відбуваються без участі слабкої взаємодії і тому дуже активно. Наприклад [6],



Зазначимо, що для створення високої температури (для сприяння умов щодо подолання кулонівського потенціального бар'єру) застосовується атомна бомба, за час вибуху якої ($\sim 10^{-6}$ с) встигають відбутися реакції з ізотопами Гідрогену.

У природі Дейтерій трапляється в надзвичайно малих кількостях, а у надрах зір він «згорів» ще на ранніх етапах їх еволюції. Тритій взагалі є нестабільним – він розпадається з періодом піврозпаду 12,4 роки. Тому у природі він відсутній зовсім.

Задача 4. Дивовижна втеча білих карликів. Як відомо, променеві швидкості зір визначаються за допомогою ефекту Доплера. Приблизно у

сотні білих карликів було виміряне зміщення ліній у спектрах (Ф. Вейдман, 1975 р.). Оскільки для випадкової вибірки кількість зір, що наближаються до нас, приблизно дорівнює кількості зір, що віддаляються від нас, то за існування тільки ефекту Доплера можна було очікувати, що середнє зміщення ліній буде нульовим. Проте, для досліджених білих карликів середнє зміщення було не нульовим, у перерахунку на променеви швидкість воно виявилось таким, що дорівнює 53 ± 6 км/с, і було червоним. Як можна пояснити таку «втечу» від нас білих карликів [2] (в трохи іншому формулюванні вона була вперше запропонована в [7])?

Розв'язання. Зміщення ліній у спектрах білих карликів, якщо інтерпретувати його за допомогою ефекту Доплера, визначається формулою:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{V_r}{c}, \quad (11)$$

де V_r – променеви швидкість зорі (проекція просторової швидкості зорі на промінь зору – лінію, що з'єднує зорю і спостерігача), c – швидкість світла.

Насправді тут ми стикаємось з так званим *гравітаційним червоним зміщенням*. Справа в тому, що фотон, який випромінюється білим карликом та покидає його поверхню, виконує роботу проти сил тяжіння. Отже, енергія фотона зменшується і зменшується його частота (фотон червоніє). Загальна теорія відносності дає формулу для гравітаційного червоного зміщення $\Delta\nu$:

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = -\frac{GM}{Rc^2}, \quad (12)$$

де M та R відповідно маса і радіус білого карлика.

Або інакше:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{GM}{Rc^2}. \quad (13)$$

Для Сонця, наприклад, це зміщення нехтовно мале: $\Delta\lambda/\lambda \approx 2 \cdot 10^{-6}$. Але для білих карликів через їх невеликі розміри, а отже, велику напруженість гравітаційного поля на поверхні, гравітаційне червоне зміщення вже є достатньо помітним.

Задача 5. «Застиглі зорі». Для зорі-надгіганта, в середині якої вичерпались ядерні джерела енергії, не існує стійкого стану, якщо маса ядра цієї зорі більше так званої границі Оппенгеймера-Волкова (значення цієї

границі оцінюється у $2 - 3M_{\odot}$). За сучасними уявленнями ядро зорі, яке має більшу масу, колапсує у чорну діру. Проте з 1958 по 1968 рр. об'єкт, що утворюється в результаті такого схлопування зорі, багато фізиків і астрономів (переважно на Сході) називали «застиглою зорею». Чому від цієї назви згодом відмовились і чорні діри є саме чорними [2]?

Розв'язання. Загальна теорія відносності встановлює співвідношення між власним часом τ (часом, який вимірюють годинником, що вільно падає у гравітаційному полі, – як і сама речовина зорі під час гравітаційного колапсу) і так званим координатним часом t (часом, який вимірює віддалений спостерігач):

$$dt = \frac{d\tau}{\sqrt{1 - \frac{R_g}{r}}}, \quad (14)$$

де R_g – гравітаційний радіус об'єкта маси M , який визначається формулою:

$$R_g = \frac{2GM}{c^2}. \quad (15)$$

Очевидно, якщо $r \gg R_g$, то $dt = d\tau$, але якщо $r \rightarrow R_g$, то для будь-якого інтервалу власного часу $d\tau$, отримуємо $dt \rightarrow \infty$.

На рис. 1 показана тривалість падіння тіла у чорну діру за годинниками спостерігачів, відповідно, що вільно падає (1) і що є нерухомим (2).

Отже, для віддаленого спостерігача поверхня зорі (ядра надгіганта) під час гравітаційного колапсу дійсно лише за нескінченно довгий час наближається до сфери з гравітаційним радіусом (сфери Шварцшильда), начебто застигаючи на цій сфері.

Проте існують два ефекти, які унеможливають спостерігання «застиглих зір» (тому, від цієї назви згодом відмовились). Це ефект гравітаційного червоного зміщення і ефект Доплера.

Відносна зміна частоти внаслідок гравітаційного червоного зміщення визначається формулою (9), а ефект Доплера у релятивістському випадку спричиняє таку зміну частоти:

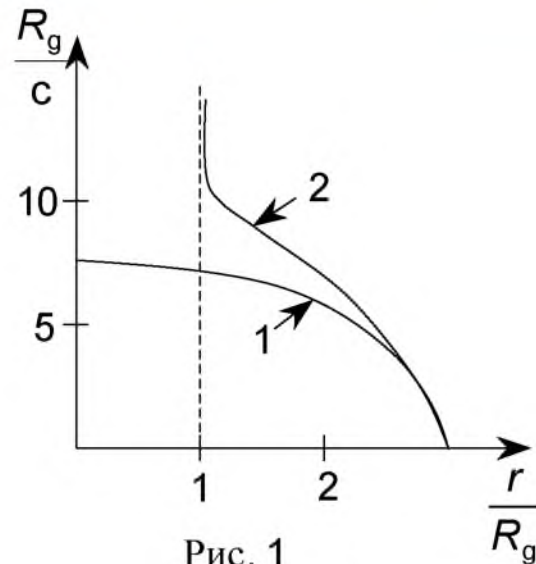


Рис. 1

$$\frac{\Delta v}{v} = 1 - \left(\frac{1 - \frac{V_r}{c}}{1 + \frac{V_r}{c}} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (16)$$

де V_r – проекція швидкості речовини, що вільно падає, на промінь зору зовнішнього спостерігача.

Тоді на гравітаційному радіусі границя відношення $(\Delta v)_g / (\Delta v)_D$ за $V_r = c$ становить $1/2$.

Отже, почервоніння світла, що випромінюється речовиною під час гравітаційного колапсу завжди лишається сильнішим внаслідок ефекту Доплера, ніж внаслідок гравітаційного червоного зміщення, хоча біля сфери Шварцшильда ці ефекти за порядком величини однакові.

Сумісна дія цих ефектів призводить до того, що з наближенням поверхні зорі до сфери Шварцшильда, віддалений спостерігач буде бачити світло все більш червоним та все меншої інтенсивності – чорна діра стає невидимою. При цьому погасання для віддаленого спостерігача відбувається практично миттєво.

Без сумніву розв'язування таких задач збуджує уяву, активізує процес навчання, привчає студентів самостійно (особливо під час виконання домашніх завдань) розв'язувати «маленькі» наукові проблеми, наближає навчальне пізнання до наукового. Крім цього, розв'язування астрофізичних задач допомагає майбутнім фізикам і учителям фізики та астрономії більш глибоко усвідомити вже відому їм фізику, навчає застосовувати відомі їм закони у космічних умовах, беззаперечно сприяє розширенню горизонту їх фізичного

мислення, формуванню цілісної сучасної астрофізичної картини світу. З'являється також більше можливостей демонструвати процес здобуття знань, що надзвичайно важливо з методологічної точки зору.

Список літератури:

1. Владимирский Б. Мысли об иррациональном и рациональном в современной культуре или что делать астрофизикам с астрологией? // Вселенная и Мы. – 2001. – № 4. – С. 29.
2. Кузьменков С. Зорі: Астрофізичні задачі з розв'язаннями. Київ, 2010. – 206 с.
3. Иванов В., Кривов А., Денисенков П. Парадоксальная Вселенная. Санкт-Петербург, 1997. – 144 с.
4. Киттель Ч., Найт У., Рудерман М. Берклевский курс физики: В 6 т. Т. 1. Механика. Москва, 1983. – 448 с.
5. Сурдин В. Астрономические олимпиады: Задачи с решениями. Москва, 1995. – 320 с.
6. Ишханов Б., Капитонов И., Юдин Н. Частицы и атомные ядра. Москва, 2007. – 584 с.
7. Мартынов Д., Липунов В. Сборник задач по астрофизике. Москва, 1986. – 128 с.