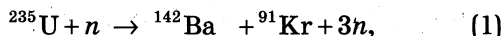


# ПОСИЛЕННЯ РОЛІ ДОВЕДЕНЬ ПІД ЧАС НАВЧАННЯ АСТРОНОМІЇ НА ПРИКЛАДІ ТЕМИ «ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ ЗІР. ЯДЕРНІ РЕАКЦІЇ»

Сергій КУЗЬМЕНКОВ, доктор педагогічних наук, професор кафедри фізики та методики її навчання Херсонського державного університету

Щоразу, як тільки у фізиці робили якоесь серйозне відкриття, астрономи починали «приміряти» його до своїх проблем. Так, наприкінці XIX ст. майже одразу після відкриття Анрі Беккерелем явища радіоактивності була висунута гіпотеза, що світність Сонця підтримується за рахунок розпаду ядер важких хімічних елементів, наприклад Радію (відкритий у 1898 р.) або Урану. З огляду на висунуту нами стратегічну лінію, що заснована на доведеннях сучасних астрофізичних уявлень про будову та еволюцію зір [6], можна запропонувати студентам спробувати підтвердити або спростувати цю гіпотезу.

Головний аргумент «за» міг би бути таким. Під час розпаду одного ядра  $^{235}\text{U}$ , наприклад, у реакції



вивільняється приблизно 200 МеВ енергії, отже, під час розпаду 1 кг урану можна отримати близько  $8 \cdot 10^{13}$  Дж [9]. Це на шість порядків більше, ніж питома теплота згорання одного з найефективніших видів палива – бензину, яка становить  $4,6 \cdot 10^7$  Дж/кг. Звідси випливає, що уранове Сонце могло б випромінювати із сучасною світністю  $L_{\odot} \approx 4 \cdot 10^{26}$  Дж/с і в припущенні сталості цієї величини – впродовж понад 10 млрд років (повністю бензинового Сонця вистачило б лише на 7000 років [7]). З цієї точки зору виглядає все гаразд. Проте існують кілька вагомих заперечень, які унеможливають такий механізм.

Період піврозпаду Радію дорівнює 1620 років, а ізотопу Урану  $^{238}\text{U}$ , частка якого в природному Урані становить 99,27 %, – 4,51 млрд років [10]. Отже, наприклад, радіове Сонце «висвітлює» б основну частину своєї енергії усього за декілька тисяч років, а уранове Сонце було б істотно слабкішим за сучасне, оскільки кількість радіоактивних ядер згідно із законом радіоактивного розпаду зменшується з часом за експонентою.

До того ж уранове Сонце спалахнуло б, як велетенська ядерна бомба, відразу під час свого утворення (заради історичної справедливості слід зазначити, що ланцюгові реакції та існування критичної маси було виявлено значно пізніше). І хоча на сьогодні відомо, що в сучасному природному урані, який містить лише 0,72 %  $^{235}\text{U}$ , ланцюгова реакція неможлива (в існую-

чих ядерних реакторах вона відбувається лише за умови використання уповільнювачів нейтронів), але 5 млрд років тому вона обов'язково розпочалася б, оскільки період піврозпаду  $^{235}\text{U}$  становить 713 млн років, тому його частка приблизно становила б 30 % (для ланцюгової реакції достатньо 3 % – див., наприклад, [10]).

Ще один аргумент «проти» наводить Володимир Сурдін [11]. Оскільки хімічний склад зір одного віку однаковий, то й частка радіоактивних елементів у них має бути однаковою. Тоді світність зір була б пропорційною їх масам (у першому степені), а насправді зорі переважної частини головної послідовності підкоряються співвідношенню  $L \sim M^4$  (див., наприклад, [7]). Тому астрономи згодом відкинули цю гіпотезу.

Крім того, ми знаємо, як утворюються хімічні елементи, і розуміємо тенденції щодо їх поширеності. За винятком деяких сплесків (Карбон, елементи «залізного піку»), головна тенденція є такою: чим важчий хімічний елемент, тим він рідше трапляється в природі. Тому уранові зорі або навіть зорі з урановими ядрами виглядають сьогодні повним абсурдом.

На початку XX ст. цілком серйозно розглядалася можливість «анігіляції матерії» (Джозеф Лармор, Джеймс Хопвуд Джинс [5; 8]). Малося на увазі, що дуже швидкий електрон (за швидкості  $v \approx c$ ) зіштовхується з протоном (до відкриття протона на цю «роль» пропонувався гіпотетичний антипод електрона) так, що відбувається цілковита «нейтралізація зарядів», причому «обидві частинки, природа яких має електромагнітний характер, припиняють існування, повністю перетворюючись на енергію» [5]. Під час розрахунків зльїненої енергії використовували формулу Альберта Ейнштейна  $E = mc^2$ , де під  $m$  розуміли масу протона (?), а масою електрона нехтували.

Отже, в одному акті анігіляції вивільнялось би  $1,5 \cdot 10^{10}$  Дж, і за чисто гідрогенового Сонця з кількістю протонів  $\sim 10^{57}$  цього палива вистачило б (за сучасної й сталої світності) на  $\sim 10^{13}$  років. Це на три порядки перевищує вік Метагалактики. І хоча дуже швидко було зроблено висновок, що в надрах зір температури становлять 20 – 40 млн К і тому там практично немає електронів, які рухалися б зі швидкостями, що наближаються до швидкості поширення світла, за цю

гіпотезу «трималися» довго. У 1925 і 1926 рр. відповідно її підхопили видатні астрофізики Генрі Рессел і Артур Еддінгтон. Так, у своїй книжці «Зорі й атоми» (1927 р.) Еддінгтон писав: «Існують переконливі докази, що в міру того як зоря старішає, вона втрачає значну частку своєї речовини..., і це, очевидно, можна пояснити лише анігіляцією матерії» [5].

Як сучасні студенти могли б спростувати гіпотезу «анігіляції»? Взагалі, ця гіпотеза виникла через неправильне розуміння процесу анігіляції. По-перше, реакція злиття протона з електроном не має жодного стосунку до анігіляції, а може відбуватися за таким каналом



де використано традиційні позначення:  $n$  – нейтрон;  $\nu_e$  – електронне нейтрино.

По-друге, оскільки нейтрон трохи масивніший за протон (приблизно на  $2,3m_p$ ), то така реакція дійсно можлива лише за умови, якщо швидкості електронів наближаються до швидкості поширення світла, але такі умови виникають тільки в ядрах надгігантів за температури в мільярди кельвінів. Масовий характер таких реакцій призводить до нейтронізації речовини і є одним із чинників, що спричиняють гравітаційний колапс, який закінчується спалахом наднової II-типу й утворенням нейтронної зорі.

По-третє, за сучасними уявленнями, анігіляція можлива тільки між частинкою та її власною античастинкою, наприклад між електроном і позитроном або між протоном й антипротоном. І цей процес відбувається миттєво під час зустрічі речовини й антиречовини, причому в енергію перетворюється однакова кількість речовини й антиречовини.

І, по-четверте. Спостережуваним фактом є так звана баріонна асиметрія Метагалактики (відсутність рівної кількості частинок та античастинок), тобто Метагалактика складається з речовини, а антиречовини практично немає. Спостережуваним фактом є також значне переважання фотонів над баріонами в Метагалактиці. Відношення концентрації фотонів до концентрації баріонів становить [3]:

$$\frac{n_\gamma}{n_b} \sim 10^9. \quad (3)$$

Ці значення на сьогодні пояснюють так. У процесі народження нашого Всесвіту на ранніх етапах унаслідок спонтанного порушення симетрії між ймовірностями народження баріонів та антибаріонів на кожний мільярд античастинок припадало мільярд і одна частинка. Частинки та античастинки проанігілювали в рівних кількостях, залишивши в результаті на кожну частинку (один баріон) по мільярду фотонів (за порядком величини). Тому й маємо сьогодні співвідношення (3), яке збереглося у подальшій еволюції Всесвіту.

Ідея про термоядерне джерело зоряної енергії за рахунок синтезу Гелію з Гідрогену має довгий і складний шлях становлення. Початок цієї

історії можна датувати 1919 р., коли англійський фізик і хімік Френсіс Вільям Астон сконструював мас-спектрограф [12]. За його допомогою він обчислив точні значення мас атомів Гідрогену й Гелію. Це якраз є одним із яскравих прикладів у історії науки, коли точність вимірювання мала вирішальне значення. Виявилось, що маса атома Гелію становить 3,97 маси атома Гідрогену, безпосереднього його сусіда в Періодичній системі Д. І. Менделєєва. Цілком природно було припустити, що за певної температури чотири ядра атома Гідрогену можуть об'єднуватися в ядро атома Гелію. Виділення енергії у ході такого процесу неважко було оцінити за відомою формулою Ейнштейна:

$$\Delta E = \Delta mc^2 = (4m_p - m_{\text{He}})c^2 = 4,3 \cdot 10^{-12} \text{ Дж}, \quad (4)$$

де  $m_p$  і  $m_{\text{He}}$  – маси протона та ядра атома Гелію відповідно.

Дефект маси ядра Гелію, що утворюється з чотирьох протонів, визначає енергію зв'язку ядра  ${}^4_2\text{He}$  (нагадаємо, що, за означенням, вона від'ємна). Саме ця енергія й виділяється під час синтезу ядра Гелію.

Щоб переконатися в ефективності термоядерних реакцій, визначимо енергію, яка виділяється в процесі перетворення 1 кг Гідрогену в Гелій. Враховуючи кількість циклів, що відбуваються в 1 кг Гідрогену

$$N = \frac{1 \text{ кг}}{4m_p}, \quad (5)$$

знаходимо:

$$q = \frac{N\Delta E}{1 \text{ кг}} = \frac{\Delta E}{4m_p} = 6,4 \cdot 10^{14} \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}. \quad (6)$$

Це на сім порядків більше, ніж питома теплота згоряння бензину і на порядок більше, ніж під час розпаду Урану.

Ефективність механізму генерації енергії (коєфіцієнт енерговиділення) можна визначити як відношення енергії, що виділилась, до енергії спокою речовини, яка брала участь у процесі виділення енергії. Тоді

$$\eta = \frac{\Delta mc^2}{4m_p c^2} = 1 - \frac{m_{\text{He}}}{4m_p} = 0,007. \quad (7)$$

Фактично це означає, що 0,7 % маси переходить в енергію, і отже, в результаті термоядерних реакцій зорі втрачають масу. Тут немає нічого містичного! Нагадаємо, що згідно з релятивістською теорією маса, по-перше, не є адитивною величиною, по-друге, вона є мірою енергії.

Слід зазначити, що термоядерне «горіння» Гідрогену вирізняється найвищою ефективністю порівняно з іншими хімічними елементами.

Синтез Гелію з Гідрогену як джерело енергії зір запропонував А. Еддінгтон – один із творців теорії внутрішньої будови зір. Дивовижно, але в уже згадуваній книжці «Зорі й атоми» він писав: «Точка зору, за якою енергія зорі виникає під час побудови інших елементів з Гідрогену, має

велику перевагу, бо не існує сумнівів відносно можливості цього процесу, оскільки ми не маємо доказів того, що в природі може відбуватися анігіляція матерії... На мою думку, існування Гелію є найкращим доказом того, що Гелій може утворюватися...» [5]. Щоправда тут Еддінгтон помилявся. Сьогодні загально визнано, що існуюча кількість Гелію не могла утворитися в зорях, а виникла в результаті первісного нуклеосинтезу на ранніх етапах еволюції нашого Всесвіту.

Проти ідеї синтезу Гелію з Гідрогену енергійно і, як здавалося, не без підстав виступали фізики того часу. Справді, по-перше, щоб утворилося ядро Гелію мають водночас зіткнутися чотири протони і два електрони. Ці шість частинок мають одночасно зустрітися в одній точці. Таку подію можна вважати практично неймовірною. По-друге, навіть якщо усі шість частинок випадково летітимуть одна до одної, то сили електричної взаємодії викривлять їхні траєкторії, і вони не зможуть об'єднатися в одне ядро.

Можна зробити нескладні розрахунки на підтвердження цих аргументів «проти». Розглянемо випадок зближення двох протонів. Як однаково заряджені частинки, вони мають відштовхуватися, причому тим сильніше, чим ближче будуть одна до одної. Максимальна висота кулонівського потенціального бар'єра (мал.), що його потрібно подолати протонам для злиття в одне ядро (наприклад, ядро Дейтерію), буде на відстані дії ядерних сил  $r_0 \sim 10^{-15}$  м:

$$U_{\max} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r_0} = 2,3 \cdot 10^{-13} \text{ Дж} \approx 1440 \text{ кеВ}. \quad (8)$$

Середня теплова енергія протона, наприклад, у центрі Сонця за температури  $T = 1,55 \cdot 10^7$  К дорівнює:

$$\bar{E}_T = \frac{3}{2} kT = 3,2 \cdot 10^{-16} \text{ Дж} = 2 \text{ кеВ}. \quad (9)$$

Їх відношення становить:

$$\frac{U_{\max}}{\bar{E}_T} \approx 720 \quad (!). \quad (10)$$

Насправді ми порівнювали висоту кулонівського бар'єра із середньою кінетичною енергією протонів, і можна припустити, що не все так погано і завжди знайдуться протони з набагато більшою енергією, ніж середня. Проте за максвеллівського розподілу з температурою  $T = 1,55 \cdot 10^7$  К енергію в 1440 кеВ має частка частинок:

$$\frac{dN}{N} \sim \exp\left[-\frac{U_{\max}}{kT}\right] \approx e^{-1115} \approx 10^{-484} \quad (!). \quad (11)$$

Нагадаємо, що Сонце містить всього  $\sim 10^{57}$  частинок, так що з погляду класичної фізики зіткнення двох протонів за таких умов неможливо.

Сонячні та й загалом зоряні надра здавалися фізикам 20-х років ХХ ст. занадто холодними, щоб там могло відбуватися перетворення Гідрогену в Гелій.

Проте Еддінгтон певний час коливався між анігіляцією й термоядерним синтезом, згодом став наполягати на останньому. Він писав: «Я усвідомлюю, що багато критиків не вважають умови в зорях достатньо придатними для перетворення елементів – зорі недостатньо гарячі. Цим критикам ми радимо: нехай підуть і пошукають гарячіше місце» [5] (деякі вчені припускають, що це натяк на пекло, м'яка форма вислову «Ідіть до дідька!» [4]. Еддінгтон вважав, що фізики повинні продовжувати дослідження, тоді з часом зрозуміють, як за порівняно низьких температур Гідроген може перетворюватися на Гелій. Так і сталося.

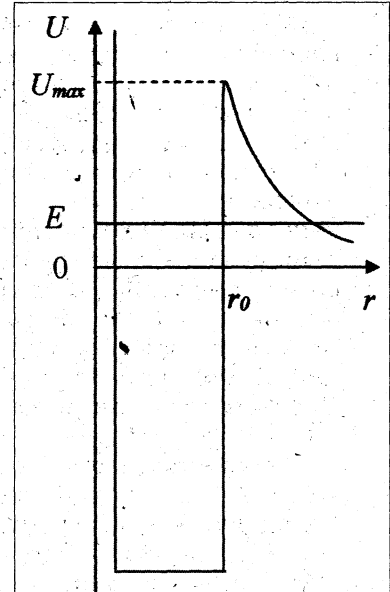
Цю проблему розв'язали фізики Роберт Аткинсон і Фрідріх Хоутерманс. Вони скористались уявленнями Георгія Гамова про тунельний ефект (1928 р.). З нової фізичної теорії – квантової механіки, що якраз створювалась в ті часи, випливало, що мікрочастинки завдяки своїм хвильовим властивостям можуть проникати під потенціальні бар'єри і просочуватись крізь них.

Наприклад, було знайдено [1], що коефіцієнт прозорості прямокутного потенціального бар'єра завширшки  $l$  і заввишки  $U_0$  з точністю до числового множника порядку одиниці визначається за формулою:

$$D = \exp\left[-\frac{2l}{\hbar} \sqrt{2m(U_0 - E)}\right], \quad (12)$$

де  $E$  – повна механічна енергія мікрочастинки;  $\hbar$  – стала Планка. Звідси видно, що спроможність частинки подолати бар'єр залежить від її маси, ширини бар'єра і співвідношення між її енергією та висотою бар'єра (ми розглядаємо випадок, коли  $E < U_0$ ).

Гамов розв'язав проблему розпаду радіоактивних ядер, а Аткинсон і Хоутерманс, скориставшись цим, розв'язали обернену задачу. У березні 1929 р. вони надіслали в редакцію німецького журналу статтю під назвою «До питання про можливість утворення елементів у надрах зір». У цій статті вони довели, що хоча в межах класичної фізики протони можуть зливатися один з одним лише за температур у кілька десятків мільярдів кельвінів, тунельний ефект допускає ймовірність такого процесу вже за відносно низьких



Мал. Графік залежності енергії взаємодії двох протонів від відстані між ними

температур, що існують у надрах зір. Ймовірність такого процесу не дуже велика, проте тунельний ефект дає змогу протонам зливатися один з одним достатньо часто, щоб енергія, яка вивільняється при цьому, могла підтримувати життя зорі [7]. Так що можна сказати, що зорі світять «за рахунок» винятково квантових ефектів.

Під час вивчення цього матеріалу, щоб повернути увагу студентів до цієї важливої події, можна навести такий епізод із книги Роберта Юнга «Ярче тисячі Сонця» (1961 р.) [4]. Там наводиться розповідь Хоутерманса: «У той самий вечір, після того як ми закінчили нашу статтю, я пішов гуляти з чарівною дівчиною. Коли стемніло і одна за одною стали з'являтися зорі в усій їхній величч, моя супутниця виукнула: «Як чудово вони виблискують! Справді?» Я вип'ятив груди і вимовив важко: «Зі вчорашнього вечора я знаю, чому вони виблискують».

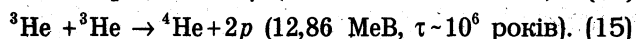
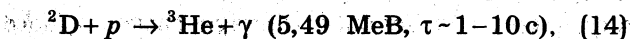
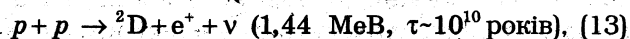
Доля Хоутерманса пов'язана також з Україною. Його, вже як видатного фізика і німецького комуніста, у 1934 р. запросили працювати до Радянського Союзу. З 1935 по 1937 рр. він був співробітником Українського фізико-технічного інституту (м. Харків), де вже з 1932 р. працював Л. Д. Ландау. У 1937 р. Хоутерманс був заарештований НКВС як німецький шпигун. Його жорстоко били і катували багатоденними конвеєрними допитами, але він не втратив гідності й не дав брехливих свідчень на своїх колег. Можна вважати, що йому пощастило: у 1940 р. його звільнили і вислали із СРСР як «небажаного іноземця» [2].

Отже, після статті Аткинсона і Хоутерманса стало зрозуміло, що джерелом енергії зір все ж таки можуть бути термоядерні реакції. Але які саме? За якими каналами? Конкретна відповідь на ці запитання з'явилася лише майже через 10 років.

Першу відповідь знайшли незалежно один від одного Карл-Фрідріх фон Вейцеккер у Німеччині і Ганс Бете в США. У 1938 р. вони виявили перший цикл послідовної трансформації Гідрогена в Гелій, який ми сьогодні називаємо *карбон-нітрогеновим* [4; 5; 8]. Метод розрахунку швидкостей реакцій був у тому самому році розроблений Георгієм Гамовим та Едвардом Теллером [8]. Інший варіант перетворення Гідрогена в Гелій, відомий нині як *протон-протонний цикл*, запропонували у тому самому 1938 р. Ганс Бете і Чарльз Критчфілд [4; 5; 8]. Конкретний розрахунок швидкостей виділення енергії для обох гілок «горіння» Гідрогена був остаточно виконаний Г. Бете у 1939 р. (Нобелівська премія 1967 р. [12]).

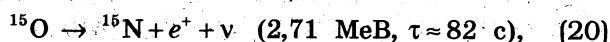
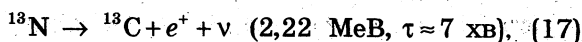
Запропоновані ланцюжки реакцій спочатку мали такий вигляд.

#### Протон-протонний (p-p) цикл



У дужках наведено сучасні значення енергетичного виходу реакцій і характерний час їх перебігу. Очевидно, для того щоб відбулася третя реакція, першим двом потрібно відбутися двічі. Перша реакція – найповільніша, оскільки йде за каналом слабкої взаємодії. Саме вона визначає темп енерговиділення на 1 кг речовини і час життя зорі на головній послідовності.

#### Карбон-нітрогеновий (CN-) цикл



У цьому циклі реакцій ядро Карбону виступає в ролі каталізатора, і його вміст не змінюється. Отже, в кінцевому рахунку, як у p-p-циклі, так і у CN-циклі чотири протони перетворюються на ядро Гелію.

За принципами розвитку справжньої науки будь-які теоретичні розрахунки, якими б вони не виглядали правдоподібними, потребують експериментальної перевірки. Як же переконатися, що саме ці реакції відбуваються в надрах Сонця та інших зір? Про це – в наступній статті.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Венгер Е. Ф. Збірник задач з квантової механіки : навч. посіб. / Е. Ф. Венгер, В. М. Грибань, О. В. Мельничук. – К. : Вища шк., 2003. – 230 с.
2. Горобець Б. С. Круг Ландау: Жизнь гения / Б. С. Горобець. – М. : Изд-во ЛКИ, 2008. – 368 с.
3. Засов А. В. Общая астрофизика / А. В. Засов, К. А. Постнов. – Фрязино, 2006. – 496 с.
4. Киппенхан Р. 100 миллиардов солнц: Рождение, жизнь и смерть звезд : пер. с нем. / Рудольф Киппенхан. – М. : Мир, 1990. – 293 с.
5. Климишин И. А. История астрономии / И. А. Климишин. – Івано-Франківськ : Вид-во ІФТКД, 2000. – 652 с.
6. Кузьменков С. Посилення ролі доведень під час навчання астрономії на прикладі теми: «Джерела енергії зір» / Сергій Кузьменков // Фізика та астрономія в рідній шк. – 2014. – № 4. – С. 23-27.
7. Кузьменков С. Г. Зорі: Астрофізичні задачі з розв'язаннями : навч. посіб. / С. Г. Кузьменков. – К. : Освіта України, 2010. – 206 с.
8. Масевич А. Г. Эволюция звёзд: теория и наблюдения / А. Г. Масевич, А. В. Тугуков. – М. : Наука, 1988. – 280 с.
9. Рау В. Г. Основы теоретической физики : Физика атомного ядра и элементарных частиц. – М. : Наука, 2005. – 144 с.
10. Сборник задач по общему курсу физики : учеб. пособие : для вузов. – В 3 ч. – Ч. 3. Атомная и ядерная физика. Строение вещества / Под ред. В. А. Овчинкина. – М. : Изд-во МФТИ, 2001. – 432 с.
11. Сурдин В. Г. Астрономические олимпиады : Задачи с решениями / В. Г. Сурдин. – М., 1995. – 320 с.
12. Храмов Ю. А. Физики: биограф. справ. / Ю. А. Храмов. – М. : Наука, 1983. – 400 с.