

ПОСИЛЕННЯ РОЛІ ДОВЕДЕНЬ ПІД ЧАС НАВЧАННЯ АСТРОНОМІЇ НА ПРИКЛАДІ ТЕМИ «ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ ЗІР. СОНЯЧНІ НЕЙТРИНО»

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

Наведені у попередній статті [6] аргументи на користь термоядерних реакцій, що забезпечують зорі енергією, необхідною для їх тривалого існування, є переконливими. Проте, як вже наголошувалось, за принципами розвитку науки будь-які теоретичні міркування, якими вони не виглядали б правдоподібними, потребують експериментальної перевірки.

На жаль, не всі реакції протон-протонного ($p-p$) і карбоно-нітрогенового CN-циклів [6] можуть бути перевірені експериментально. Наприклад, перша реакція $p-p$ -цикла відбувається за каналом слабкої взаємодії і перебігає настільки повільно, що її неможливо досліджувати в лабораторних умовах. Щоб знайти ефективні перерізи адронних реакцій, здійснювалась екстраполяція значень, отриманих за високих енергій, в область енергій у декілька кілоелектрон-вольтів, характерних для надр зір. Більшість відповідей дуже старанних експериментів було виконано в Каліфорнійському технологічному інституті під керівництвом Вільяма Альфреда Фаулера (Нобелівська премія 1983 р.) [8].

Врешті-решт було встановлено, що для умов у центральних ділянках Сонця швидкість генерації енергії одиницею маси речовини у випадках $p-p$ - та CN-циклів можна обчислювати за наближеними формулами [7]:

$$\epsilon_{p-p} \approx 10^{-12} \rho X^2 \left(\frac{T}{10^6} \right)^4 \left(\frac{\text{Вт}}{\text{кг}} \right), \quad (1)$$

$$\epsilon_{\text{CN}} \approx 6,6 \cdot 10^{-30} \rho X Z_{\text{CN}} \left(\frac{T}{10^6} \right)^{20} \left(\frac{\text{Вт}}{\text{кг}} \right), \quad (2)$$

де ρ – густина речовини; X – частка Гідрогену; Z_{CN} – частка Карбону в складі зорі (Сонця); T – температура зоряних надр.

За цими формулами можна з'ясувати, який цикл реакцій реалізується на Сонці. Покладаючи для центра Сонця $T = 1,55 \cdot 10^7$ К, $\rho = 1,49 \cdot 10^5$ кг/м³, $X = 0,65$ та $Z_{\text{CN}} \approx 0,003$ [7], матимемо $\epsilon_{p-p} \approx 3,6 \cdot 10^{-3}$ Вт/кг та $\epsilon_{\text{CN}} \approx 1,2 \cdot 10^{-3}$ Вт/кг. Як бачимо, для самого центра Сонця $\epsilon_{p-p}/\epsilon_{\text{CN}} = 3$.

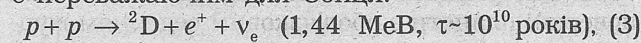
Із віддаленням від центру температура безперервно знижується, і роль CN-циклу ще сильніше зменшується. Наприклад, на відстані $r = 0,2R_{\odot}$, де згідно з сучасною моделлю Сонця [7] $T = 9,42 \cdot 10^6$ К та $\rho = 3,53 \cdot 10^4$ кг/м³, матимемо $\epsilon_{p-p}/\epsilon_{\text{CN}} \approx 10^4$.

Виявляється, що по усьому ядру, де відбувається виділення енергії, внесок CN-циклу становить не більш ніж 10 % [3].

Принагідно зазначимо, що для гарячіших зір, а саме для зір з масою, більшою за $\approx 1,2$ сонячної, CN-цикл є основним джерелом енергії.

Зазначимо також, що обчислені значення ϵ_{p-p} та ϵ_{CN} майже на порядок відрізняються від спостережуваного темпу енерговиділення на одиницю маси Сонця, який дорівнює $\epsilon = L_{\odot}/M_{\odot} \approx 2 \cdot 10^{-4}$ Вт/кг. Така відмінність легко пояснюється тим, що термоядерні реакції відбуваються тільки в ядрі Сонця.

І все ж таки, чи існує можливість безпосередньо перевірити наявність термоядерних реакцій на Сонці? Звернімося до перших двох реакцій протон-протонного циклу [6], оскільки саме він є переважаючим для Сонця:



де в дужках наведено значення енергетичного виходу реакцій і характерний час їх перебігу. Оскільки ізоотоп Гелію ${}^3\text{He}$ «спалюється» в наступній реакції, єдиними індикаторами перебігу цих реакцій і умов, за яких вони відбуваються, є потенційно три частинки: позитрон, електрон-нейтрино і фотон. Але позитрон швидко анігілює з найближчим електроном, а фотон також не лишає нам жодних шансів. Справа в тому, що вільний фотон міг би пролетіти відстань, що дорівнює радіусу Сонця, приблизно за 2 с. Насправді ж рух фотона всередині Сонця – це не рух по прямій, а дуже повільне просочування назовні. Фотони не зберігають свою «індивідуальність», а взаємодіючи з речовиною, вони можуть розсіюватись, поглинатись, знову народжуватись, дробитись. Сонце покидають фотони переважно оптичного діапазону, нічо-

го «не пам'ятаючи» про своїх рентгенівських «пращурів».

Отже, лишається тільки нейтрино. Відомо, що ці частинки надзвичайно слабо взаємодіють з речовиною. Наприклад, нейтрино з енергією 1 МеВ може пролетіти крізь шар води товщиною 10 парсеків, не зазнавши поглинання або помітного відхилення. Тому, народившись під час ядерних реакцій у центрі Сонця, нейтрино покидають його практично «неушкодженими» і можуть бути гарними свідками цих процесів народження.

Оцінимо очікувану кількість нейтрино на поверхні Землі. Відомо, що в процесі утворення одного ядра Гелію вивільняється $\Delta W = 4,3 \cdot 10^{-12}$ Дж і народжуються два нейтрино [6]. Це дає змогу легко обчислити повну кількість нейтрино, які утворюються на Сонці і покидають його щосекунди (нейтринну «світність»):

$$L_\nu = 2 \frac{L_\odot}{\Delta W} = \frac{2 \cdot 3,84 \cdot 10^{26}}{4,3 \cdot 10^{-12}} \approx 1,8 \cdot 10^{38} \text{ с}^{-1}. \quad (5)$$

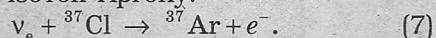
Тоді густина потоку нейтрино на Землі (нейтринна «освітленість») дорівнює ($r_{\odot\oplus}$ – відстань між Землею і Сонцем):

$$E_\nu = \frac{L_\nu}{4\pi r_{\odot\oplus}^2} = 6,4 \cdot 10^{14} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}. \quad (6)$$

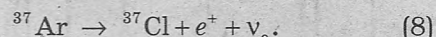
Ми буквально купаємось у морі нейтрино!

Водночас виникає проблема, як зареєструвати такі невлітими частинки. Багатьом фізикам, зокрема «конструктору» *p-p*- та CN-циклів Гансу Бете [6], з огляду на надзвичайно малий ефективний переріз реакцій з поглинанням нейтрино вони здавалися «цілком неспостережуваними» [5].

У 1946 р. італійський фізик Бруно Понтекорво запропонував хлор-аргоновий метод реєстрації нейтрино. Його схема така. Ядро Хлору захоплює нейтрино, в результаті чого утворюється радіоактивний ізотоп Аргону:



Період напіврозпаду цього ізотопу Аргону становить приблизно 35 дб. Він відбувається за каналом:

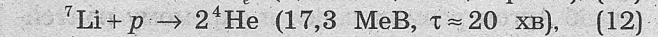
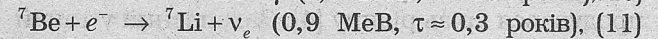
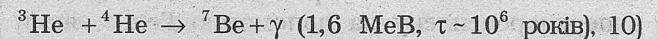


У результаті відновлюється Хлор і випромінюється позитрон, анігляцію якого вже можна спробувати зареєструвати.

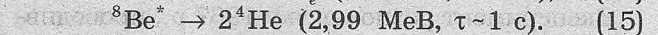
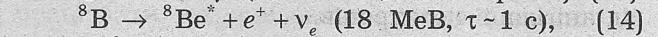
Піонером у побудові нейтринних детекторів став американський фізик Раймонд Девіс (молодший). У 1955 р. він створив перший хлор-аргоновий детектор ємністю 3 800 л, заповнений перхлоретиленом (C_2Cl_4 – розчин для хімічного чищення одягу), який було у 1960 р. встановлено в шахті (штат Огайо) на глибині 700 м. У результаті цього першого експерименту було з'ясовано параметри майбутнього робочого детектора.

Виявилось, що з ядрами Хлору можуть взаємодіяти тільки нейтрино високих енергій. Енергетичний поріг для нейтрино в реакції (7) становить 0,814 МеВ. Потрібно було уточнити, нейтрино яких енергій можуть випромінюватись під час *p-p*-циклу. Було з'ясовано, що третя реакція цього циклу, а саме

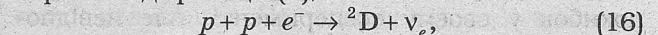
${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + 2p$ (12,86 МеВ, $\tau \sim 10^6$ років), (9) не є єдиною можливим варіантом його завершення, а за умов у центрі Сонця відбувається з ймовірністю 65 %. А з ймовірністю 35 % замість реакції (9) відбувається цикл таких реакцій:



А з ймовірністю менш ніж 1 % замість реакції (11) відбувається такий цикл:



У реакції (3) з ймовірністю 99,75 % народжуються нейтрино різних енергій (спектр) з максимальним значенням $E_{\max} = 0,42$ МеВ. У різновиді реакції (3), а саме:



яка відбувається з дуже низькою ймовірністю 0,25 %, випромінюється моноенергетичне нейтрино з енергією 1,44 МеВ.

У реакції (11) з ймовірністю 90 % народжуються моноенергетичні нейтрино з енергією 0,86 МеВ, і з ймовірністю 10 % – з енергією 0,38 МеВ. Нарешті, в реакції (14), так звані борівські нейтрино, мають спектр різних значень енергії з максимальним значенням $E_{\max} = 14,1$ МеВ.

Виходило так, що можна було сподіватися зареєструвати нейтрино не в головному, а в побічних циклах: або ті, що виникають у реакції (11), або в реакції (14). Безумовно, набагато більше можна було сподіватись на борівські нейтрино, але їх народжувалось так мало порівняно з іншими... Цикл реакцій (13) – (15) взагалі є несуттєвим для астрофізичних процесів у надрах зір. На жаль, хлор-аргоновий детектор не давав змоги «побачити» нейтрино, які виникають у надзвичайно важливих для Сонця (а отже, й для нас) реакціях *p-p*-циклу. Проте якщо наша модель Сонця є близькою до реальності, то вона правильно передбачатиме й кількість високоенергійних нейтрино.

Новий детектор Девіса являв собою резервуар, що містив 390 000 л (610 т) перхлоретилену, який був розміщений на глибині 1,5 км у покинутій шахті Хоумстейк, де раніше видобували золото (м. Ліда, штат Південна Дакота, США). Додатково резервуар був оточений товстим шаром води для надійнішого захисту від космічних променів. За

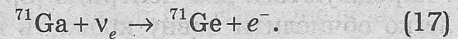
розрахунками, в контейнері щоденно в середньому одне ядро Хлору мало перетворюватися на ядро Аргону. Внаслідок реакції (8) приблизно через місяць у резервуарі встановлюється баланс між кількістю ядер Аргону, що народжуються, і тими, що розпадаються. Отже, можна було сподіватись, що через місяць у всьому резервуарі міститиметься близько 35 атомів Аргону.

За вдалим висловом Рудольфа Кіппенхана [4], задача пошуку 35 атомів Аргону в 610 т рідини залишає далеко позаду задачу про пошук голки в копиці сіна. Проте її було розв'язано. Виявилось, що атоми Аргону можна «відмити» з перхлоретилену за допомогою Гелію, який продувався крізь рідину [4]. Захоплений у такий спосіб Аргон розміщувався в окремому контейнері, оточеному великою кількістю спеціальних оптичних детекторів – фотоелектронних помножувачів (ФЕП), здатних зареєструвати спалахи від анігіляції позитронів.

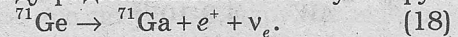
Експеримент розпочався у 1967 р., проводився кілька років і показав приблизно вчетверо менший результат, ніж очікували. Астрофізики знову й знову перевіряли свою модель Сонця, а Девіс не припиняв пошуку можливих джерел похибок у своєму експерименті. Але невідповідність між теоретичними передбаченнями й результатами експерименту не зникала. Цю невідповідність добре видно на мал. 1, де представлено результати вимірювань впродовж 20 років. По осі ординат відкладено потік у со-

нячних нейтринних одиницях (SNU), які визначаються як одна нейтринна подія за секунду на 10^{36} атомів речовини. Вимірювання дають для повного потоку середнє значення $2,1 \pm 0,3$ SNU (чорна пунктирна лінія). Теоретичні розрахунки, що їх зроблено в цей період (сірі лінії), передбачають потік у середньому $7,9 \pm 2,6$ SNU (сіра пунктирна лінія). Навіть у межах похибок обидва значення не узгоджуються між собою.

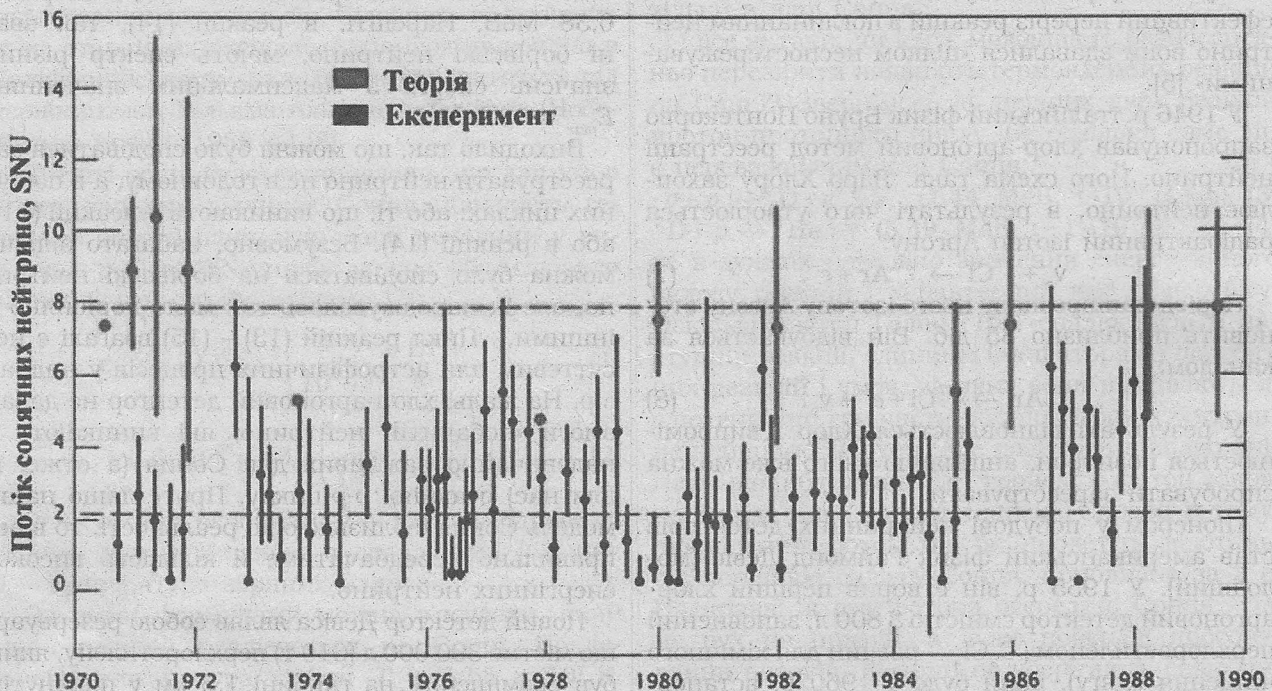
Пошуки виходу майже з кризової ситуації продовжувались. Крім Хлору пропонувались інші хімічні елементи, ядра яких можуть взаємодіяти з нейтрино. Одним з них є ізоотоп Галію з масовим числом 71. Реакція за його участю виглядає так:



У результаті цієї реакції утворюється радіоактивний ізоотоп Германію з періодом напіврозпаду 11,4 доби. Він розпадається за каналом, що аналогічний розпаду радіоактивного ізоотопу Хлору:



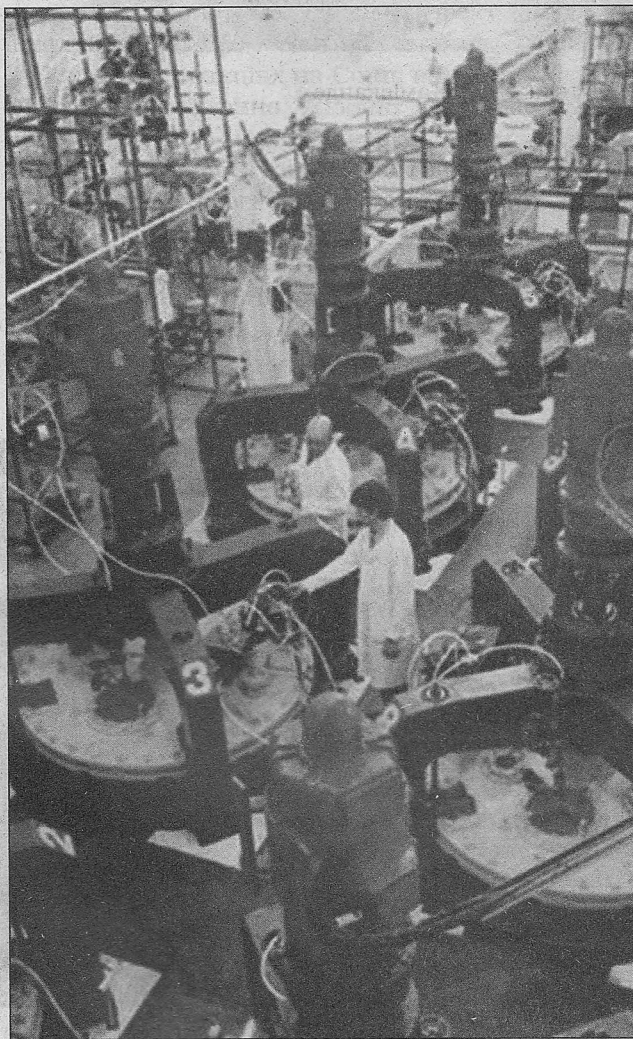
Енергетичний поріг реакції (17) майже вчетверо нижчий, ніж у реакції з Хлором і становить 0,233 MeV. Однак необхідно близько 40 т чистого галію, щоб зафіксувати впродовж доби хоча б одне перетворення атома Ga на атом Ge. Галій надзвичайно цінний хімічний елемент, оскільки широко застосовується в електронній промисловості. І хоча він не витрачається в нейтринному детекторі, його можна повторно використовувати, необхідна кількість Галію для



Мал. 1. Результати вимірювання потоку сонячних нейтринів у хлор-аргоновому експерименті Р. Девіса (чорний колір) за 20 років порівняно з теоретичними передбаченнями (сірий колір). Відрізки вертикальних ліній означають межі невизначеності, а пунктирні лінії – середні значення

початку експерименту була близькою до його запасів у всьому світі.

Після домовленості між СРСР і США з 1989 р. на Північному Кавказі в надрах гори Андирчі (поблизу Ельбруса) запрацював нейтринний детектор (радянсько-американський галієвий експеримент, SAGE). Цей детектор складався з чотирьох контейнерів, що вміщували загалом 30 т рідкого галію (його температура плавлення дорівнює 29 °C), 40 % якого становить ізотоп ^{71}Ge . Згодом тут був створений цілий комплекс, який отримав назву «Баксанська нейтринна обсерваторія», і нині об'єм контейнерів з Галієм збільшений майже до 60 т (мал. 2). Проте всі спроби дали врешті-решт після постійного вдосконалення методики експерименту вдвічі менший потік нейтрино, ніж очікувалось. Такі ж самі результати було отримано на іншому галієвому детекторі (маса робочої речовини становила 30 т), розташованому в гірському масиві Гран-Сассо на території Італії (італійсько-німецький експеримент, GALLEX).



Мал. 2. Детектори з галієм у Баксанській нейтринній обсерваторії

З 1983 р. в Японії почав проводитися принципово інший експеримент з виявлення сонячних нейтрино. Головним процесом тут є пружне розсіяння нейтрино на електронах звичайної води. Результатом зіткнення нейтрино з атомом, що є складовою молекули води, могло бути вибивання електрона з електронної оболонки атома. Формально реакція виглядає так:



Високоенергійне нейтрино може передати значну кінетичну енергію електрону, в результаті чого він може набути швидкості, що перевищує швидкість світла у воді, і тоді виникає так зване черенковське випромінювання (темно-блакитного кольору).

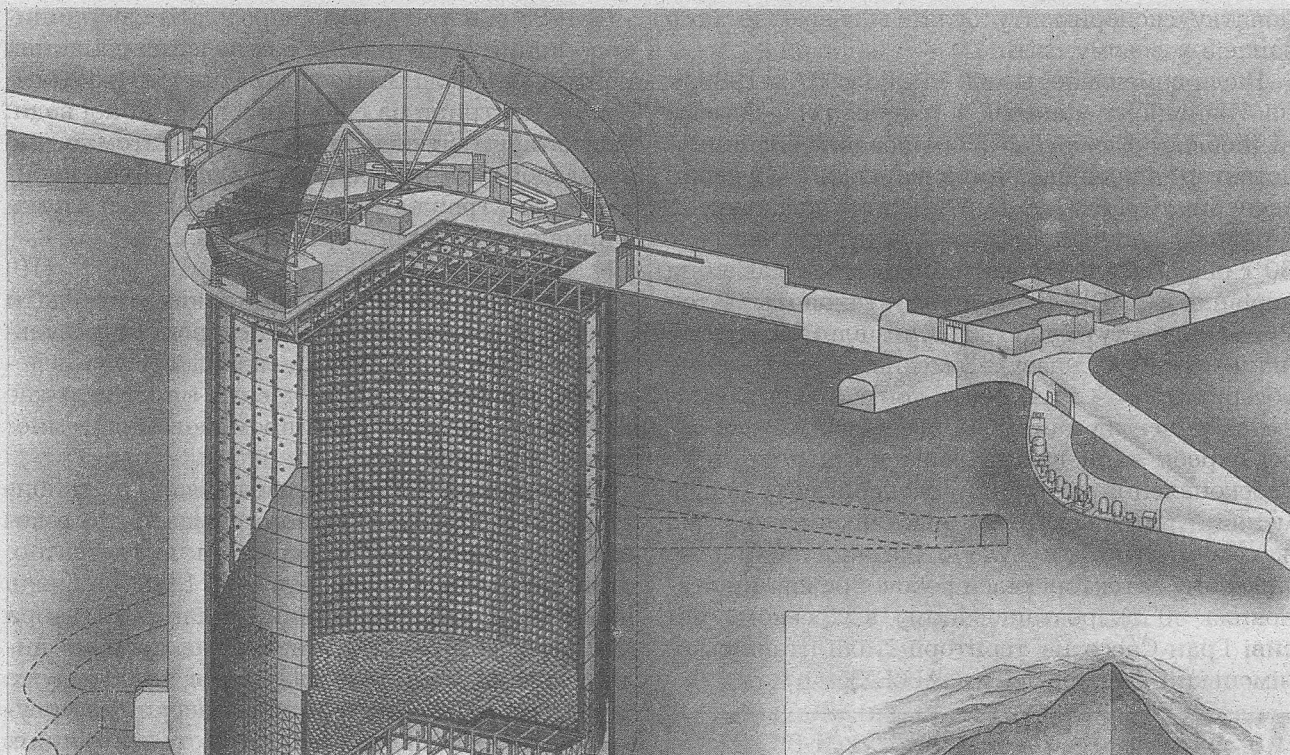
Нейтринний детектор розташували на глибині 1 000 м (2 700 м водного еквівалента) в копальні Каміюка, тому експеримент, як і детектор, отримав назву «Каміюканде». З 1988 р. почав працювати модернізований варіант детектора (Каміюканде II), який являв собою сталевий циліндричний резервуар, що містив 3 000 т дуже чистої води. На внутрішній поверхні резервуара були розміщено 1 000 фотоелектронних помножувачів для реєстрації черенковського випромінювання. На відміну від радіохімічних детекторів (хлорних і галієвих) це були детектори прямої дії, в яких безпосередньо фіксувався результат взаємодії нейтрино з електронами. Його перевага полягала в тому, що можна було точно визначити напрямок, з якого прилітали нейтрино, оскільки електрони зберігають напрямок руху нейтрино.

Детектор працював до 1995 р. Частка експериментально виявлених нейтрино становила близько половини від теоретично розрахованої кількості. У результаті спроб теоретично обґрунтувати отриманий результат виникло багато нових суто фізичних запитань: чи має нейтрино мас і магнітний момент; який час життя нейтрино тощо. Намагання дати відповіді на ці запитання стимулювали появу нейтринного детектора нового покоління, одним з яких є СуперКаміюканде.

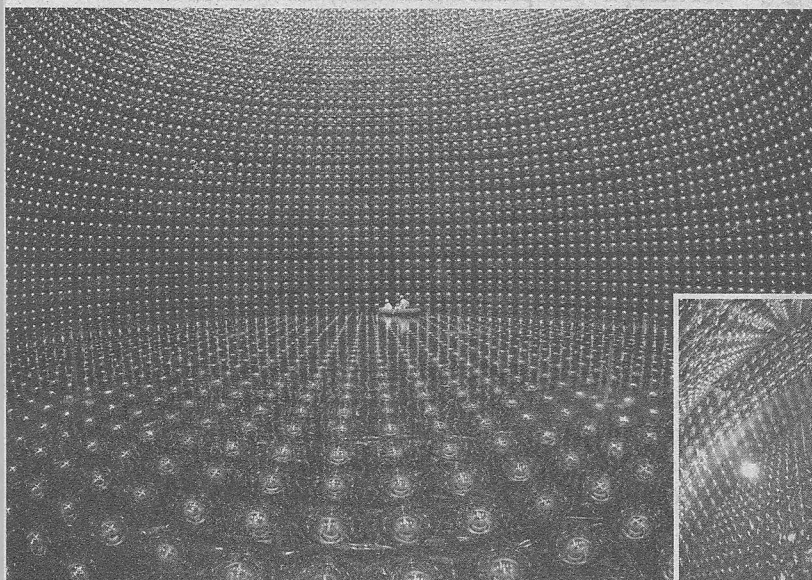
Детектор СуперКаміюканде (SK) – величезний резервуар (40×40 м) зі сталі, що не ржавіє, і містить 50 000 т чистої води. На внутрішній поверхні резервуара розміщено 11 146 ФЕУ (мал. 3, 4, а, б).

Результати роботи цього детектора також були невтішними – дефіцит спостережуваного потоку нейтрино залишився приблизно таким, як і в експерименті Каміюканде II.

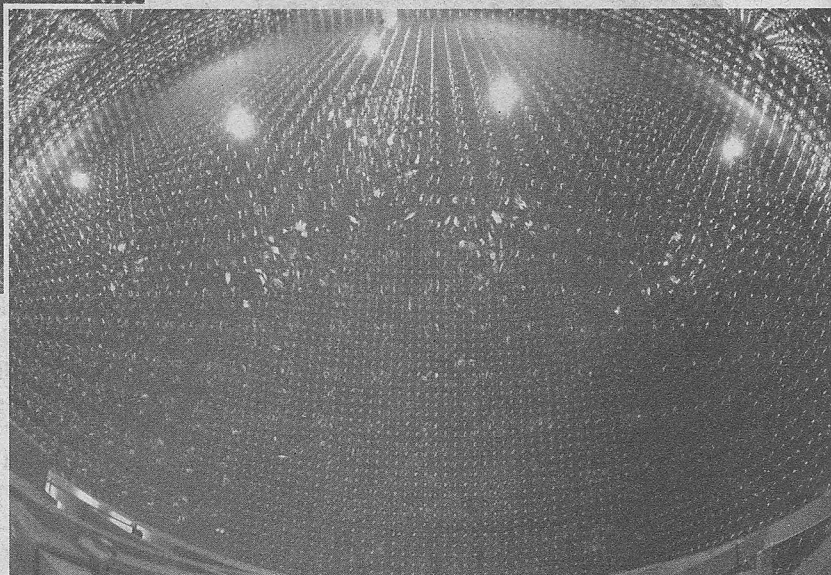
Проблему сонячних нейтрино «атакували» з усіх боків. Переглядали параметри стандартної моделі Сонця, ускладнювали модель його внутрішньої будови, уточнювали ефективні перерізи реакцій усіх каналів протон-протонного



Мал. 3. Загальна структура детектора СуперКаміоканде



Мал. 4, а. Всередині детектора
СуперКаміоканде на початку
заповнення його водою



Мал. 4, б. Всередині детектора
СуперКаміоканде наприкінці
заповнення його водою

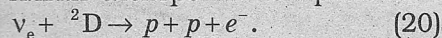
циклу, вдосконалювали детектори й методики експериментів з пошуку нейтрино – все це не давало бажаного результату. Після багатьох дискусій дійшли висновку, що жодними змінами параметрів стандартної моделі Сонця, її ускладненням не вдасться усунути розбіжність між теорією та експериментом. Фактично залишилась єдина можливість – так звані осциляції нейтрино, їхні перетворення з одного сорту в інший. Як відомо, кожному зарядженому лептону відповідає свій сорт (аромат) нейтрино: електрону e^- – електронне нейтрино ν_e , мюону μ^- – мюонне нейтрино ν_μ , τ^- – лептону – тау-нейтрино ν_τ . Отже, 6 лептонів утворюють 3 покоління (або сімейства): електрон і електронне нейтрино відносять до першого покоління і т. д.

Ідея осциляції нейтрино належить видатному фізику Бруно Понтєкорво. Ще в 1957 р. він показав, що доказом існування ненульової маси в нейтрино можуть бути спостереження нейтринних осциляцій. Пізніше було показано, що осциляції можуть підсилюватись в процесі поширення нейтрино в речовині (ефект Міхеєва – Смірнова, 1986 р. – Вольфенштейна, 1978 р.).

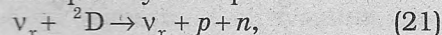
В ядерних реакціях на Сонці виникають лише електронні нейтрино. Мюонні та тау-нейтрино мають набагато менші перерізи взаємодії з речовиною, ніж електронні нейтрино. Якщо під час поширення всередині Сонця відбуваються перетворення $\nu_e \rightarrow \nu_\mu, \nu_\tau$, то спостережуваний дефіцит нейтрино може бути пояснений саме цим без зміни стандартної моделі Сонця.

Осциляції сонячних нейтрино було експериментально виявлено в 2001 р. на нейтринній обсерваторії Садбері (SNO) у Канаді (провінція Онтаріо). Детектор SNO являє собою резервуар (мал. 5 а, б), що містить 1 000 т надчистої важкої води D_2O з невеликою домішкою солі $NaCl$, розташований глибоко під землею (2 000 м водного еквівалента). Увесь об'єм проглядається 9456 ФЕП, які реєструють черенковське випромінювання швидких електронів, що виникають внаслідок взаємодії енергійних нейтрино з атомами Дейтерію за трьома такими каналами.

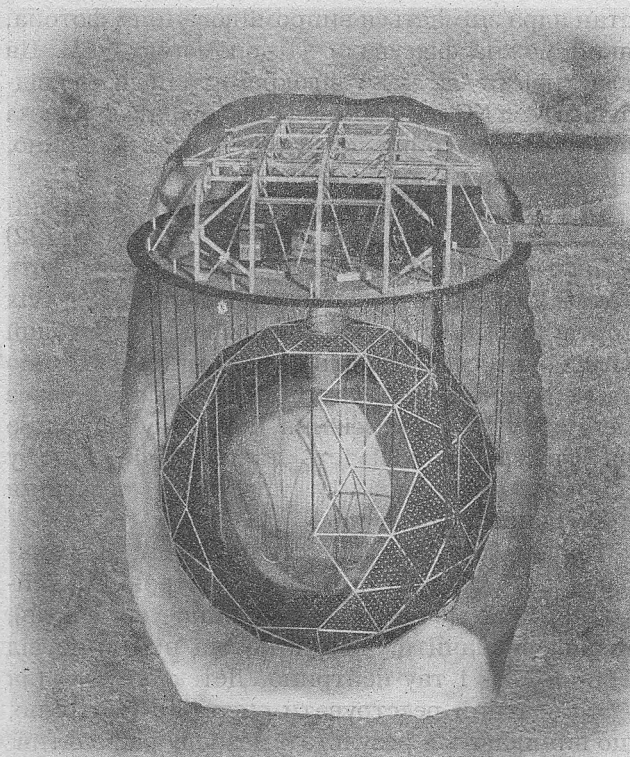
1) Реакція дисоціації ядра Дейтерію (взаємодія заряджених струмів – CC, оскільки тут відбувається зміна заряду однієї з частинок), в якій беруть участь тільки електронні нейтрино



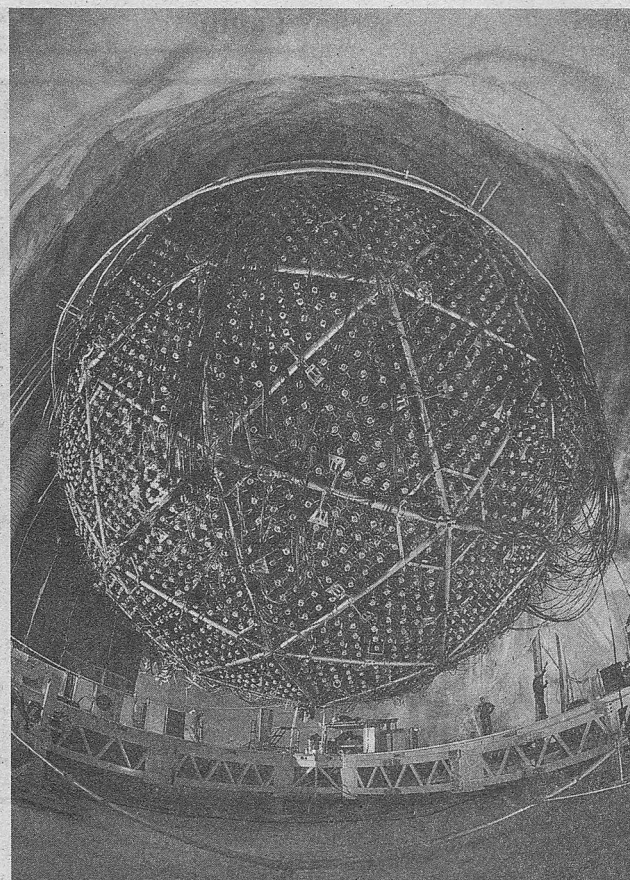
2) Реакція дисоціації ядра Дейтерію (через взаємодію нейтральних струмів – NC, оскільки тут не відбувається зміни заряду частинок), в якій беруть участь нейтрино усіх сортів



де індекс x може означати як електронне (e), так і мюонне (μ), або тау (τ)-нейтрино. У цьому разі нейтрон, що утворився, захоплюється ядрами атомів у молекулах $NaCl$, а збуджений



Мал. 5, а. Загальна структура детектора Нейтринної обсерваторії Садбері (SNO)



Мал. 5, б. Куля з важкою водою (D_2O) діаметром 12 м, що оточена майже 10 000 фотоелектронними помножувачами детектора SNO

стан ядра знімається випромінюванням фотона, який можна фіксувати за допомогою ФЕП. Ця властивість дає змогу відокремити події, що відбуваються NC-каналом. За цією реакцією можна виміряти сумарний потік усіх сортів нейтрино, що потрапили на детектор.

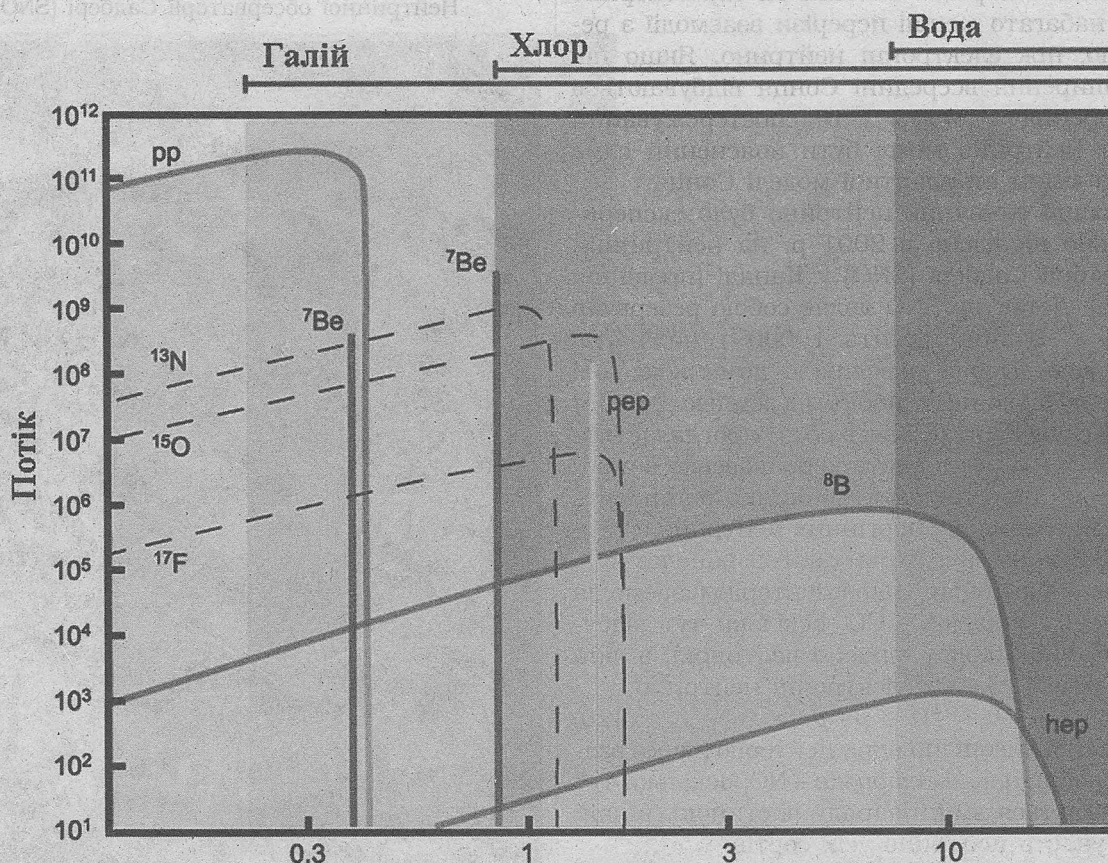
3) Реакція пружного розсіяння на електроні $\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$, $x = e, \mu, \tau$. (22)

Як з'ясувалось, ця реакція (яку спостерігають також у СуперКаміоканде) відбувається для усіх сортів нейтрино. Отже, насправді в цій реакції вимірюють суму потоків електронних нейтрино та нейтрино інших сортів (μ -, τ -), проте через менший переріз розсіяння мю- і тау-нейтрино на електронах кількість таких подій буде у 6,5 разів меншою, ніж у випадку розсіяння електронних нейтрино.

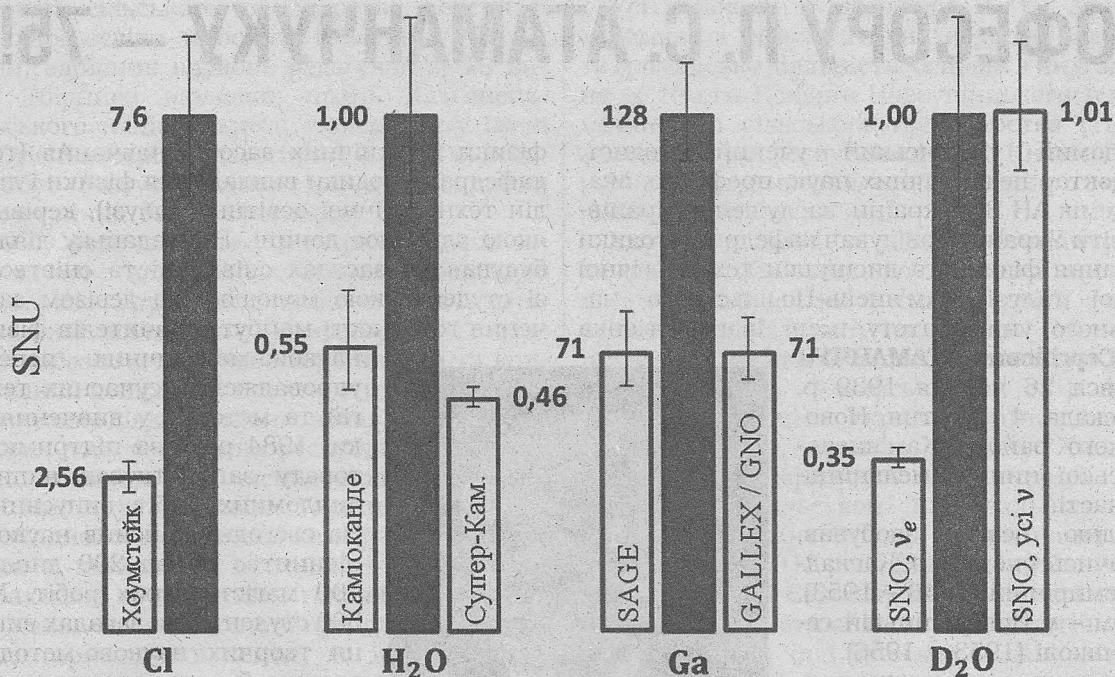
Порівнюючи темп реєстрації подій за каналами CC- (за участю лише електронних нейтрино) і NC- (за участю нейтрино усіх сортів), можна визначити, чи є в потоці нейтрино від Сонця, мю- і тау-нейтрино. Детектор SNO (як і SK) здатний реєструвати енергійні нейтрино, що виникають в результаті розпаду радіоактивного Бору ^8B (реакція (14)). На мал. 6 показано

значення енергій нейтрино, які народжуються в термоядерних реакціях на Сонці, в тому числі й за різними каналами карбоно-нітрогенового циклу, і тлом різного кольору відмічено чутливості різних робочих речовин у відомих детекторах.

Якби осциляцій електронних нейтрино не відбувалось, то, очевидно, потік реєстрованих CC-нейтрино (канал 1) і NC-нейтрино (канал 2) був би однаковим. За наявності осциляцій $\nu_e \rightarrow \nu_\mu, \nu_\tau$ потік NC-нейтрино має бути помітно (статистично значуще) більшим. Це й було виявлено в нейтринній обсерваторії Садбері. Порівняння результатів, отриманих детектором «рівних можливостей» на основі важкої води (реакція з Дейтерієм за каналом 2) з результатами роботи детектора СуперКаміоканде (розсіяння нейтрино на електронах відбувається в обох детекторах) підтвердило достовірність висновків. Результати, отримані найвідомішими нейтринними детекторами, представлено на мал. 7. Як видно з малюнка, електронні нейтрино становлять близько третини від усіх зареєстрованих під час спостережень у Садбері, що блискуче підтверджує існування нейтринних осциляцій.



Мал. 6. Значення енергій нейтрино, що народжуються в термоядерних реакціях на Сонці, у тому числі й за різними каналами карбоно-нітрогенового циклу (пунктирні лінії). Поодинокі вертикальні лінії відповідають моноенергетичним нейтрино. Позначення «рер» означає реакцію (16), а «hep» – дуже рідкісну реакцію $^8\text{He} + p \rightarrow ^4\text{He} + e^+ + \nu_e$



Мал. 7. Результати найвідоміших експериментів з реєстрації сонячних нейтрино порівняно з теоретичними передбаченнями (чорний колір). Відрізки вертикальних ліній означають межі невизначеності

Отже, проблему сонячних нейтрино було, нарешті, розв'язано. На її розв'язування пішло понад 30 років, ця, без перебільшення, кризова ситуація мобілізувала фізиків й астрономів багатьох країн, до сьогодні було збудовано 15 нейтринних обсерваторій. Розв'язування цієї проблеми є одним з найвидатніших успіхів світової науки кінця XX – початку XXI ст. Наявність нейтринних перетворень (осциляцій) є само по собі фундаментальним відкриттям у фізиці елементарних частинок. Але воно також означає, що нейтрино мають ненульову масу, оскільки перетворюються одна в одну можуть тільки частинки з ненульовою масою. Цей успіх свідчить також, що сучасні уявлення про внутрішню будову, джерела енергії та еволюцію зір є загалом правильними. І це є дуже важливим з методологічного і філософського поглядів.

Довгі й драматичні пошуки джерел енергії зір фактично завершилися на рубежі XXI ст. У 2002 р. за розв'язування проблеми сонячних нейтрино Р. Девісу (Брукхевенська Національна лабораторія, США) і М. Кошибі (одному з творців детектора СуперКаміюканде, Японія) було присуджено Нобелівську премію з фізики.

В ідеалі астрономічна освіта має бути побудована так, щоб усі теоретичні міркування, висновки були аргументованими, переконливими (а інакше, як формувати переконання, що є засадою світогляду?). Для астрономії це має величезне значення, інакше її науковість може бути

в будь-який момент поставлена під сумнів. Тому однією зі спеціальних компетентностей учителя астрономії є, на нашу думку, вміння доводити, і цьому потрібно вчити.

ЛІТЕРАТУРА

1. Алексеев Е. Н. Баксанская нейтринная обсерватория / Е. Н. Алексеев // Земля и Вселенная. – 1998. – № 3. – С. 41 – 46.
2. Бакал Дж. Н. Проблема солнечных нейтрино / Дж. Н. Бакал // В мире науки. – 1990. – № 7. – С. 16 – 24.
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. Ядерні реакції» / С. Кузьменков // Фізика та астр. в рідній шк. – № 5. – 2014. – С. 14 – 17.
7. Кузьменков С. Г. Зорі: Астрофізичні задачі з розв'язаннями : навч. посіб. / С. Г. Кузьменков. – К. : Освіта України, 2010. – 206 с.
8. Ядерная астрофизика : пер. с англ. / Под ред. Ч. Барнса, Д. Клейтона, Д. Шрамма. – М. : Мир, 1986. – 519 с.