

НЕЙТРИННІ СЦИНЦИЛЯЦІЇ ЯК РОЗВ'ЯЗОК "ПРОБЛЕМИ СОНЯЧНИХ НЕЙТРИНО"

Студент групи ОФ-81, ФМФ

Колупаєв В.О.

Студент групи ОФ-81, ФМФ

Святий О.В.

Студентка групи ОФ-81, ФМФ

Ісмагілова Б.В.

Доцент кафедри ЗФ, ФМФ, к.ф-м.н.

Іванова І.М.

*Національний Технічний Університет України «Київський Політехнічний
Інститут імені Ігоря Сікорського»*

Нейтрино - стабільна, електрично нейтральна елементарна частинка з напівцілим спіном, з масою, значно меншою, ніж в інших відомих елементарних частинок. Розрізняють нейтрино електронне, мюонне і тау-лептонне нейтрино. Вони беруть участь тільки у слабких та гравітаційних взаємодіях.

Земля лежить на шляху безперервного потоку космічних частинок та інших видів випромінювання.

Нейтрино передбачив в 1930 році Вольфганг Паулі (нобелівська премія 1945 року) але на доказ її існування знадобилося 25 років (Фредерік Рейнс, Нобелівська премія 1995 року). Це пояснюється тим, що нейтрино важко виявити.

У 19 столітті точилися жваві дискусії про джерело енергії Сонця. Одна з теорій полягала в тому, що ця сонячна реакція була викликана вивільненням гравітаційної енергії, коли речовина Сонця стискала. Однак у цьому випадку розрахована тривалість життя Сонця повинна бути короткою.

Реймонд Девіс-молодший сконструював абсолютно новий детектор, гігантський резервуар, наповнений 600 тоннами рідини, який помістили в шахту. Протягом 30 років йому вдалося зафіксувати 2000 нейтрино від Сонця і таким чином він зміг довести, що саме термоядерний синтез забезпечує енергію Сонця.

За допомогою іншого гігантського детектора, який називається Kamiokande, група дослідників під керівництвом Масатоші Кошіба змогла підтвердити результати Девіса. Вони, 23 лютого 1987 року, також змогли виявити нейтрино від далекого вибуху над нової.

Роботи Девіса і Кошіби привела до несподіваних відкриттів і нової, інтенсивної галузі досліджень, нейтринної астрономії.

Вирішальні відмінності між експериментами Девіса та Кошіби полягали в тому, що останній реєстрував час події і був чутливим до напрямку. Таким чином, вдалося вперше довести, що нейтрино походять від Сонця

Модернізований детектор Kamiokande, названий Kamiokande II, був готовий до сонячних нейтрино наприкінці 1986 року. Тоді поріг становив близько 8 MeV для ефективності 50%. Вдалось виявити лише нейтрино з розпаду ^8B . Експеримент Девіса також був чутливим до нейтрино з нижчою енергією, наприклад, протон-електрон-протонна (PEP) реакція

У 2002 році Рей Девіс і Масатоші Кошіба отримали частину Нобелівської премії з фізики за експериментальну роботу, яка виявила, що кількість сонячних нейтрино складає приблизно третину від кількості, передбаченої стандартною сонячною моделлю.[1]

Через незрозуміння причин розбіжностей між передбаченнями та вимірюваннями, фізикам довелося відкласти початкову мету вивчення сонячного ядра шляхом спостереження нейтрино.

При перших спробах пояснити розбіжності припускали, що моделі Сонця були помилковими, тобто температура та тиск у внутрішній частині Сонця істотно відрізнялися від відомого.

Досягнення геліосейсмологічних спостережень дозволили зробити висновок про внутрішню температуру Сонця; ці результати узгоджуються з добре встановленою стандартною сонячною моделлю. Детальні спостереження за нейтринним спектром з більш досконалих нейтринних обсерваторій дали результати, які не могли бути пояснені жодним коригуванням сонячної моделі: Так вийшло тому, що різні ядерні реакції, швидкості яких різняться залежно від температури, виробляють нейтрино з різною енергією. Будь-яке пристосування до сонячної моделі погіршувало принаймні один аспект розбіжностей.

Підтвердивши докази надані в експериментах 1998 р. "Для нейтринних осциляцій", Такааки Кайіта з обсерваторії Супер-Каміоканде та Артур Макдональд з обсерваторії нейтрино Садбері (SNO) були нагороджені Нобелівською премією з фізики 2015 року.

Такааки Кайіта з обсерваторії Супер-Каміоканде та Артур Макдональд з обсерваторії нейтрино Садбері (SNO) підтвердили докази надані в експериментах 1998 р. "Для нейтринних осциляцій" були нагороджені Нобелівською премією з фізики 2015 року.[2,3,4,5]

Нейтринні осциляції - це взаємні перетворення нейтрино різних типів одне у одного. Для того щоб осциляції були можливими необхідне існування різних фізичних та масових станів нейтрино. Фізичні стани виникають при слабких розпадах і беруть участь у слабких взаємодіях.

Масові стани - це стани у яких нейтрино розповсюджуються у вакуумі. Вірогідність переходу нейтрино з одного стану у інший у загальному випадку характеризується різницею мас масових станів та кутом змішання нейтрино.

Явище осциляції нейтрино було передбачено Бруно Понтекорво у 1957 році. Він висунув припущення, що електричні нейтрино які виникають у центрі

сонця по дорозі до Землі можуть перетворюватись частково у мюонні а частково на тау-нейтрино. Цей процес отримав назву вакуумних осциляцій. Пізніше було висунуто припущення про резонансне підсилення осциляції нейтрино при проходженні ним речовини, зокрема Сонця. Такий ефект назвали ефектом Міхєєва-Смирнова-Вольфенштейна. У рамках вищезазначеного ефекту можна виділити три розв'язання, що задовольняють результатам проведених експериментів. Ці розв'язки характеризуються визначеним діапазоном значень різниць мас і кутів зміщення нейтрино.

Якщо у якійсь точці простору з'являється мюонне нейтрино певної енергії E , яке описується хвильовою функцією

$$\nu_{\mu} = \nu_1 \sin a + \nu_2 \cos a$$

то, оскільки швидкості руху ν_1 і ν_2 при однакових енергіях різні, у точці реєстрації на відстані r співвідношення між ν_1 і ν_2 змінюється, що означає появу комбінації

$$\nu_e = \nu_1 \cos a + \nu_2 \sin a$$

Але на деякій відстані l , початкове співвідношення між ν_1 і ν_2 відновиться, і нейтрино знову перейде у початковий стан. Відстань l визначається

$$l = \frac{4\pi\hbar\varepsilon}{c^3(m_1^2 - m_2^2)} = \frac{2.5 \cdot 10^2}{m_1^2 - m_2^2} \text{ см}$$

і називається довжиною осциляції. З формули випливає, що довжина осциляції має макроскопічні масштаби лише при малих різницях мас нейтрино. Описаний приклад показує, що електронне нейтрино, народжене на відстані $r < l$ від цілі, з деякою вірогідністю може перетворитись у мюонне. Відповідно формулі для електронних нейтрино з достатньою різницею квадратів мас $\Delta m^2 \sim 10^{-10} \text{ eV}^2$, щоб довжина осциляції стала меншою ніж відстань від Землі до Сонця, і відбулось значне зменшення потоку електронних нейтрино за рахунок переходу

у мюонні тау-нейтрино, що не реєструються у експериментах. Що і є поясненням «проблеми сонячних нейтрино»[6]

ЛІТЕРАТУРА

1. Raymond Davis Jr. R., Koshiba M., Giacconi R. Neutrino Astronomy The Nobel Prize in Physics 2002. Advanced information. NobelPrize.org. Nobel Prize Outreach AB 2021. Sun. 19 Dec 2021.
2. Haxton, W. C. . The Solar Neutrino Problem. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 1995, v. 33, №1, p. 459–503.
3. McDonald A.B., Joshua R. Klein J.R. Wark D.L. Solving the Solar Neutrino Problem. Scientific American, 2003, v. 288, No. 4, p. 40-49
4. Cho A, Did the Nobel committee get the physics wrong, Science, December 14, 2016,
5. Kajita K., Arthur B. McDonald A.B. Scientific Background: Neutrino Oscillations The Nobel Prize in Physics 2015. NobelPrize.org. Nobel Prize Outreach AB 2021. Sat. 18 Dec 2021.
6. Wolfenstein, L. (1979). Neutrino oscillations and stellar collapse. Physical Review D, 1979, v.20, No 10, p. 2634–2635.