

МОЖЛИВІСТЬ ДОСЛІДЖЕННЯ СОНЯЧНИХ НЕЙТРИНО З ВИКОРИСТАННЯМ ЯДЕР ${}^7\text{Li}$ У КРІОГЕННИХ БОЛОМЕТРАХ Li_2MoO_4

В. В. Кобичев

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

Ідея використання ядер літію-7 для реєстрації сонячних нейтрино була запропонована ще в 1960-х роках [1-4]. Ця можливість знову привертає увагу у зв'язку з високою енергетичною роздільною здатністю та низьким рівнем фону сучасних експериментів для пошуку подвійного бета-розпаду ${}^{100}\text{Mo}$ з криогенними сцинтиляційними болOMETрами на основі Li_2MoO_4 (LMO), таких як AMoRE та CUPID-Mo. Кристали LMO містять $6,4 \cdot 10^{24}$ ядер ${}^7\text{Li}$ на 1 кг.

Існують два основні канали взаємодії сонячних нейтрино з ядрами ${}^7\text{Li}$: через заряджені струми (CC) та через нейтральні струми (NC). Для CC-реакцій ${}^7\text{Li}(\nu_e, e^-){}^7\text{Be}$ порогова енергія становить 862 кеВ (для переходу на основний стан ${}^7\text{Be}$) та 1291 кеВ (для переходу на збуджений стан, див. Рис.1). За оцінками [5,6], середній переріз для сонячних нейтрино від розпаду ${}^8\text{B}$ (без врахування осциляцій) дорівнює $2,5 \cdot 10^{-42} \text{ см}^2$ для переходів на основний стан та $1,3 \cdot 10^{-42} \text{ см}^2$ на збуджений стан ${}^7\text{Be}$. Оскільки потік борних сонячних нейтрино становить $\sim 3 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$, очікувана швидкість CC-подій від них є надзвичайно малою: порядку $2,2 \cdot 10^{-3}$ подій на рік на 1 кг LMO. Навіть у великомасштабному експерименті на кшталт AMoRE-II (≈ 180 кг) очікується менше однієї CC-події на рік від борних нейтрино. Берилієві нейтрино мають значно більший потік ($\sim 5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$), ніж борні, але їх енергії досягають порогу тільки за рахунок теплового уширення нейтринної лінії $E_\nu = 862$ кеВ, тому загальний переріз CC-реакцій на ядрі ${}^7\text{Li}$ для них становить лише $0,95 \cdot 10^{-45} \text{ см}^2$ [6] та кількість подій $\sim 10^{-3}$ на рік на 1 кг LMO. Ще п'ять компонент спектру сонячних нейтрино лежать вище порогу 862 кеВ: *per*-нейтрино (повний CC-переріз на ${}^7\text{Li}$ дорівнює $6 \cdot 10^{-44} \text{ см}^2$, потік $1,4 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$, $1,7 \cdot 10^{-3}$ подій на рік на 1 кг LMO), ${}^{13}\text{N}$ ($0,42 \cdot 10^{-44} \text{ см}^2$, $2,8 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$, $0,23 \cdot 10^{-3}$ подій), ${}^{15}\text{O}+{}^{17}\text{F}$ ($2,3 \cdot 10^{-44} \text{ см}^2$, $2,0 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$, $0,94 \cdot 10^{-3}$ подій), *her*-нейтрино (незначна). Найбільша компонента спектру, *pp*-нейтрино, є підпороговою. Таким чином, CC-канал практично не робить внеску у сигнал: сумарна кількість подій від усього спектру становить $\sim 5 \cdot 10^{-3}$ подій на рік на 1 кг LMO, або ~ 1 подія на рік для 200-кг детектора. Крім того, експериментальна сигнатура не сприяє детектуванню: розпад створеного ${}^7\text{Be}$ дає в спектрі детектора моноенергетичну подію з енергією 478 кеВ лише у 10,5 % випадків (ще один пик з фіксованою енергією 578 кеВ виникає від захоплення моноенергетичних *per*-нейтрино, $E_{per}=1.442$ МеВ, на основний рівень ${}^7\text{Be}$, $\sim 1/3$ від усіх CC-реакцій).

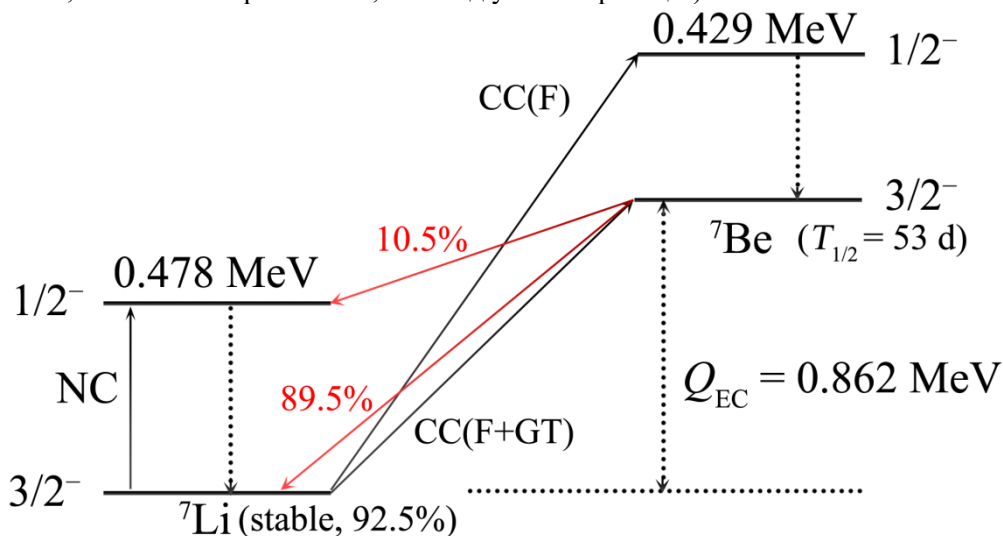


Рис.1. Схема рівнів з енергіями нижче 4 МеВ у системі ${}^7\text{Li}$ - ${}^7\text{Be}$. Показані можливі переходи під дією сонячних нейтрино за рахунок заряджених токів (CC) та нейтральних токів (NC). Позначення F та GT – для ферміївських та гамов-телерівських переходів.

Разом з тим, значно більшу кількість подій мають давати NC-реакції ${}^7\text{Li}(\nu_x, \nu'_x){}^7\text{Li}^*$, що збуджують рівень 478 кеВ безпосередньо. Цей підхід був вперше розглянутий в [8] для запропонованого болOMETричного детектора з LiF. Для нейтрино з енергіями порядку 1 МеВ переріз реакції оцінюється як

$\sim 2 \times 10^{-42} \text{ см}^2$, на два порядки вище, ніж для CC-реакцій. Він не залежить від типу нейтрино, тобто не чутливий до нейтринних флейворних осциляцій. Інтегрування перерізу NC-реакції по сумарному спектру компонент сонячних нейтрино [9], якщо обмежитись наближенням $\sigma(E) = 4 \times 10^{-42} \cdot (E - 0.478 \text{ MeV})^2 \text{ см}^2$, дає 3.2×10^{-33} події на ядро ${}^7\text{Li}$ в секунду, або близько 0,65 події на рік на 1 кг LMO, що відповідає приблизно 100 подіям на рік в детекторі масштабу AMoRE-II [10] або CUPID [11]. Експериментальною ознакою таких подій є чіткий γ -пік з енергією 478 кеВ, що відповідає переходу збудженого стану ядра ${}^7\text{Li}$ у основний; ефективність реєстрації випроміненого гамма-кванта у піку повного поглинання близька до 100% для великомасштабного експерименту. Для індексу фону ~ 20 відліків/(кеВ·кг·рік) в області 0.5 МеВ (CUPID-Mo [12]) та енергетичної роздільної здатності 3 кеВ при експозиції 200 кг·рік пік з площею 100 подій досягає межі детектування.

Таким чином, NC-реакції сонячних нейтрино на ядрах ${}^7\text{Li}$ у кристалах LMO перебувають на межі експериментальної спостережуваності в сучасних низькофонових болометричних установках для пошуку подвійного бета-розпаду. Ці реакції становлять фон для пошуку сонячних аксіонів через резонансне поглинання на ${}^7\text{Li}$ [13], який неможливо усунути, але водночас вони можуть бути використані для дослідження потоків сонячних нейтрино.

1. J.N. Bahcall. Phys. Lett. 13 (1964) 332.
2. F. Reines, R.M. Woods. Phys. Rev. Lett. 14 (1965) 20.
3. V.A. Kuzmin, G.T. Zatsepin. Proceedings of the 9th International Cosmic Ray Conference, Vol. 1, p. 1023 (1965).
4. J.N. Bahcall. Phys. Rev. Lett. 23 (1969) 251.
5. J.N. Bahcall. Rev. Mod. Phys. 50 (1978) 881.
6. W.C. Haxton. Phys. Rev. Lett. 76 (1996) 1562.
7. W. Shao et al. Eur. Phys. J. C 83 (2023) 799.
8. R. S. Raghavan et al. Phys. Rev. Lett. 71 (1993) 4295.
9. J.N. Bahcall. <https://www.sns.ias.edu/~jnb/SNdata/sndata.html>
10. A. Agrawal et al. (AMoRE Coll.). Eur. Phys. J. C 85 (2025) 9.
11. K. Alfonso et al. (CUPID Coll.). J. Low Temp. Phys. 211 (2023) 375.
12. C. Augier et al. (CUPID Coll.). Eur. Phys. J. C 83 (2023) 675.
13. P. Belli et al. Phys. Lett. B 711 (2012) 41.