

УДК 539.12; 530.145

<https://doi.org/10.17721/1812-5409.2419/4.12>

Барабаш О. В.¹, к.ф.-м.н, доц.
Ковтонюк В.С.², студ.

O. V. Barabash¹, PhD.
V. S. Kovtoniuk², stud.

Народження S-бозона в реакції кулонівського розсіяння ядра на протоні або електроні

S-boson production in the reaction of Coulomb scattering of a nucleus by a proton or electron

^{1,2}Київський національний університет імені Тараса Шевченка, 01601, м. Київ, вул. Володимирська 64/13, e-mail: ¹obar@univ.kiev, ²vadymkovtoniuk@gmail.com

^{1,2}Taras Shevchenko National University of Kyiv, 01601, Kyiv, Volodymyrska st. 64/13, e-mail: ¹obar@univ.kiev, ²vadymkovtoniuk@gmail.com

Розглянуто процес народження скалярного BSM (Beyond the Standard Model) бозона (S-бозона) в експерименті SHiP (Search for Hidden Particles) на LHC в результаті глибоко-непружного зіткнення зарядженої частинки (електрона або протона) з важким ядром через реакцію фотонного злиття. Показано, що у випадку розсіяння протона на ядрі переріз реакції може бути порівняним з перерізом народження S-бозона при розпаді D_s мезону лише у випадку безмасового бозона ($m_S = 0$). При розсіянні електрона на ядрі переріз $\sigma(eZ \rightarrow S)$ відноситься до $\sigma(D \rightarrow S)$ як 1: 10^5 .

Ключові слова: SHiP, переріз народження, скалярний BSM бозон, реакція фотонного злиття.

The production cross-section of the beyond the standard model (BSM) scalar boson (S boson) have been considered in the article. Scalar boson produced via photon fusion reaction in the deep inelastic scattering of a charged particle (proton or electron) on heavy nucleus of the target. This process is one of the possible mechanisms of BSM boson production at the SHiP (Search for Hidden Particles) experiment at the CERN LHC and may be dominating among others processes due to large nuclear charge. Previously [1], the amplitude and the production cross-section of this reaction were found. The found cross-section was analyzed for the case of proton scattering on the lead nucleus and compared with the production cross-section in the decay of D_s meson. In this paper we make estimate of the process more accurate and consider also electron-nucleus scattering. It was found that the photon fusion reaction $pZ \rightarrow S$ may be effective only in the case of massless S boson.

Key Words: SHiP, production cross-section, BSM scalar boson, photon fusion reaction.

Статтю представив д.ф.-м.н., проф. Єжов С. М.

Вступ

Ця робота є продовженням роботи [1]. В попередній роботі було знайдено амплітуду народження S-бозону при кулонівському розсіянні протона на важкому ядрі мішені (ядрі свинцю). Повний переріз реакції отримується інтегруванням квадрата модуля амплітуди по деякій області Ω , що визначається кінематикою реакції

$$\sigma = \frac{1}{(2\pi)^3} \iiint \frac{|M_{fi}|^2}{32E_{tot}|p_i|} d\varepsilon_1 d\varepsilon_2 d\alpha d\cos\beta = \sigma_0 \frac{m^2}{M|p_i|} \iint \frac{d\varepsilon dE}{\left(\frac{m}{M}\varepsilon_i - E\right)^2} \quad (1)$$

де $\sigma_0 = 3.2 \cdot 10^{-13} \theta^2$ mbarn. Для оцінки величини σ вираз (1) був проінтегрований по прямокутнику

$$[\varepsilon_{\min}, \varepsilon_{\max}] \times [E_{\min}, E_{\max}]$$

який гарантовно включає в себе область інтегрування Ω . Такий підхід дозволяє оцінити σ зверху. Для перерізу було отримано оцінку

$$\sigma(pZ \rightarrow S) \leq 3.5 \cdot 10^{-12} \theta^2 \frac{(1-x)^2}{x} \text{ mbarn} \quad (2)$$

де $x = \frac{m_S}{\varepsilon_i}$. Порівняння перерізу (2) з перерізом народження S-бозона в реакції розпаду D_s мезону

$$\sigma(D \rightarrow S) = 9.56 \cdot 10^{-8} \theta^2 \text{ mbarn} \quad (3)$$

показує, що переріз (2) може конкурувати з перерізом (3) лише у випадку, коли маса S-бозона менша за 0.1 кеВ. Проте, цю оцінку можна суттєво покращити.

Уточнений переріз

В імпульсному просторі область інтегрування в (1) представляє собою перетин трьох еліпсоподібних кривих (які у випадку $m_S = 0$ переходять в точні еліпси). За формою область нагадує сильно витягнутий трикутник (див. Рис. 1). Напівосі цих еліпсів дорівнюють $\sqrt{mM} \sim 10^4$ МеВ та $M \sim 10^5$ МеВ, в той час, як сама область має розміри порядку $p_i \sim 100$ МеВ.

Таким чином, на масштабах ~ 100 MeB дуги еліпсів можна апроксимувати прямими.

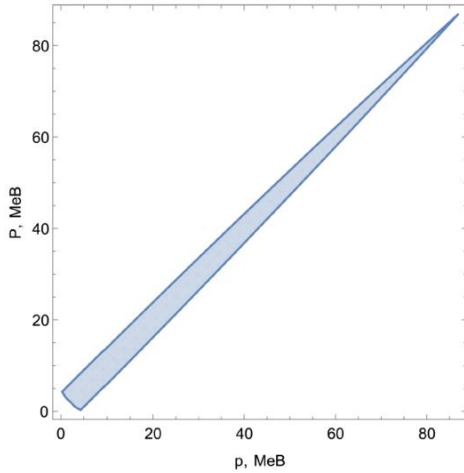


Рис. 1. Область інтегрування для $m_S = 1$ кеВ.

Максимальний вклад в інтеграл вносить область поблизу гострого кута трикутника, де підінтегральний вираз має максимальне значення. Замінюючи складну точну область трикутником (що утворюється дотичними до кривих у гострому куті області та обрізаний знизу при $p_i = 0$) та інтегруючи в (1) отримуємо

$$\begin{aligned} |\overline{\mathcal{M}_{fi}}|^2 = & \frac{128e^4 Z^2 \chi^2}{(\Delta p)^4 (\Delta P)^4} [(\Delta p \Delta P)^2 ((p_i P_i)(p_f P_f) + (p_i P_f)(p_f P_i)) + 2(\Delta p P_i)(\Delta p P_f)(p_i \Delta P)(p_f \Delta P) - \\ & - (\Delta p \Delta P) ((\Delta p P_f)(p_i P_i)(p_f \Delta P) + (\Delta p P_i)(p_i P_f)(p_f \Delta P) + (\Delta p P_f)(p_f P_i)(p_i \Delta P) + (\Delta p P_i)(p_f P_f)(p_i \Delta P)) \\ & - (p_i p_f) ((\Delta p \Delta P)^2 M^2 + (\Delta P)^2 (\Delta p P_i)(\Delta p P_f))] \end{aligned} \quad (5)$$

Всі доданки в квадратних дужках одного порядку малості $\sim \varepsilon^4 M^2 \vec{P}^2$, так що для (5) маємо оцінку

$$|\overline{\mathcal{M}_{fi}}|^2 \sim 64e^4 Z^2 \chi^2 \frac{M}{E_\pi} \quad (6)$$

де \vec{P} – імпульс кінцевого протона, E_π – його енергія в ЛС. Суттєва відмінність від попереднього випадку (розсіяння протона) в тому, що тепер в знаменнику стоїть енергія ядра в першому степені (а не в другому).

Область інтегрування також зазнає суттєвих змін. У випадку, коли $m_S \ll 100$ MeB це трикутник зі сторонами

$$P = \varepsilon_i - \frac{\varepsilon_i^2}{2M}; \quad 2p = \varepsilon_i \pm P. \quad (7)$$

Список використаних джерел

1. Барабаш О. В., Обрахунок перерізу народження BSM бозона в реакції фотонного злиття, Вісник КНУ імені Тараса Шевченка, серія фіз.-мат. науки. – 2019. – № 2. – С. 95-98.

$$\sigma = 2\sigma_0 \left(\ln \frac{2\varepsilon_i}{m_S} - 1 \right) \quad (4)$$

Ця оцінка є оцінкою зверху, оскільки, враховуючи опуклість кривих еліпсів, точна область розташована всередині трикутника, по якому ми інтегрували.

Порівняння (4) з (3) показує, що переріз $\sigma(pZ \rightarrow S)$ стає порядку переріза $\sigma(D \rightarrow S) = 9.6 \cdot 10^{-8} \theta^2 \text{ mbarn}$ лише при $m_S \leq 8 \cdot 10^{-2} \cdot 10^5$ MeB, тобто якщо скалярна частинка безмасова.

Переріз реакції $eZ \rightarrow S$

Вище ми розглядали розсіяння протона на ядрі. Проте, принциповий інтерес представляє реакція за участю електрона. Суттєва відмінність полягає в тому, що при енергії $\varepsilon_i \approx 100$ MeB протон є нерелятивістським, тоді як електрон – ультра-релятивістський. Це принципово змінює аналіз величин амплітуди і фазової області.

В ультрарелятивістському наближенні всі доданки в амплітуді, що пропорційні m , можуть бути опущені, а також доданки, що пропорційні A (див. [1], формула (5)). В результаті, для квадрата амплітуди отримуємо вираз

Прийнявши вираз (6) за типове значення амплітуди та проінтегрувавши його по області (7) отримуємо

$$\sigma = 2\sigma_0 \quad (8)$$

що на п'ять порядків менше за $\sigma(D \rightarrow S)$.

Висновки

Переріз народження S -бозона в реакції фотонного злиття при розсіянні протона на важкому ядрі може бути порівняним з перерізом народження S -бозона при розпаді D_s мезону лише у випадку $m_S = 0$. При розсіянні електрона на ядрі переріз $\sigma(eZ \rightarrow S)$ відноситься до $\sigma(D \rightarrow S)$ як $1:10^5$. Таким чином, у випадку масивного S -бозона реакція з розпадом D_s мезона залишається найбільш перспективною.

References

1. BARABASH O. V. (2019) Calculation the production cross-section of the BSM boson via photon fusion reaction, Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv, Series Physics & Mathematics. – № 2, p. 95 – 98.

Надійшла до редколегії 14.07.19