

В.В. НЕГЛЯД,¹ Т.В. ОБІХОД²

¹ Київський Національний університет ім. Тараса Шевченка
(Просп. Акад. Глушкова, 6, Київ 03127)

² Інститут ядерних досліджень НАН України
(Проспект науки, 47, Київ 03068; e-mail: obikhod@kinr.kiev.ua)

ПОШУКИ СУПЕРСИМЕТРІЇ НА ВЕЛИКОМУ АДРОННОМУ КОЛАЙДЕРІ

УДК 512.66

Пошук суперсиметрії здійснюється в рамках Мінімальної Суперсиметричної Стандартної Моделі. За допомогою комп'ютерних програм SOFTSUSY і PROSPINO розраховані спектри мас і перерізи утворення суперчастинок. Такі результати є важливими для пошуків нової фізики на Великому адронному колайдері.

Ключові слова: Мінімальна Суперсиметрична Стандартна Модель, спектр мас, переріз утворення суперчастинок.

1. Вступ

Питання фізики високих енергій, які пов'язані із об'єднанням фундаментальних взаємодій в одній теорії, так званої Теорії Всього [1], приводять до необхідності побудови прискорювачів при високих енергіях.

10 вересня 2008 року було проведено офіційний запуск Великого адронного колайдера (ВАК) – самої великої експериментальної установки світу. За допомогою ВАК можливо не тільки вивчити хіггсовський механізм порушення електрослабкої взаємодії, а й перевірити теорію суперструн і D-бран, оскільки вона передбачає існування таких об'єктів:

- суперчастинок;
- Калуца–Клейн частинок;
- кандидатів на темну матерію;
- мікроскопічних чорних дір.

Метою нашої роботи є розрахунки мас суперчастинок на ВАК у рамках теорії суперсиметрії. Теорія суперсиметрії є однією із найпоширеніших теорій за межами Стандартної моделі (СМ), оскільки вона вирішує низку проблем СМ.

© В.В. НЕГЛЯД, Т.В. ОБІХОД, 2014

Стандартна модель фізики частинок є достатньо успішною теорією для опису фізичних явищ, які можна спостерігати на сучасних колайдерах. Однак теоретики переконані, що СМ не буде працювати при більш високих енергетичних масштабах. Зрозуміло, що Стандартна модель не може бути остаточною теорією при дуже високих енергіях, оскільки вона повинна бути модифікованою задля включення гравітаційної взаємодії при масштабах Планка. Ця проблема має назву проблеми ієрархії [2–4]. Навіть якщо СМ є найкращим описом субатомного світу, вона не пояснює повну картину всесвіту, оскільки не передбачає механізму об'єднання констант сильної і електрослабкої взаємодії із гравітаційною взаємодією [1]. Крім того, радіаційні поправки до маси бозона Хіггса приводять до великих розбіжностей експерименту із теорією Стандартної моделі [5]. Велика кількість холодної темної матерії і феномен темної енергії, які спостерігаються в експерименті [6], знаходяться поза межами передбачень СМ.

Останні експериментальні дані є яскравими вказівками на нову фізику за межами СМ:

а) нові вимірювання властивостей бозона Хіггса колабораціями ATLAS і CMS [7] вказують на фізику в рамках і поза рамками СМ;

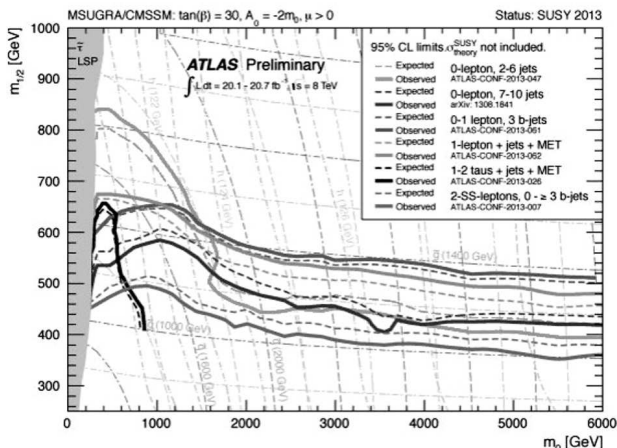


Рис. 1. Маси гейджино і скалярної маси відповідно до масштабу Теорії Великого об'єднання

б) проблеми із стабільністю електрослабкого вакууму [8];

в) повна ширина нещодавно виявленого бозона Хіггса в 5,4 раза більше за значення СМ [9];

г) значення перерізів утворення W^+W^- частинок на ВАК при протон-протонному зіткненні при енергіях $\sqrt{s} = 7$ TeV і $\sqrt{s} = 8$ TeV вказують на значне відхилення від СМ [10].

Для пошуку суперсиметрії ми проводимо розрахунки перерізів утворення суперчастинок на ВАК при енергії $\sqrt{s} = 14$ TeV і встановлюємо нижні границі на маси суперчастинок.

2. Розрахунки спектрів мас і перерізів утворення суперчастинок

Суперсиметрія, яка доповнює ферміони бозонами і навпаки, не може бути точною симетрією в природі, оскільки ферміони і бозони повинні бути вироджені по масі. Для побудови реалістичної моделі фізики високих енергій, суперсиметрія повинна бути порушеною. Питання суперсиметричної взаємодії і умови її порушення, які пов'язані із включенням до потенціалу взаємодії членів м'якого порушення суперсиметрії, добре узгоджене в рамках

Таблиця 1. Два сценарії параметрів МССМ моделі

№	m_0 , GeV	$m_{1/2}$, GeV	A_0 , GeV	$\tan \beta$	$\text{sgn}(\mu)$
I	1400	800	-2800	30	+1
II	5000	600	-10000	30	+1

так званої Мінімальної Суперсиметричної Стандартної Моделі (МССМ) [11].

Мінімальна Суперсиметрична Стандартна Модель визначається суперпотенціалом такого вигляду:

$$W = h_{ij}^e L_i H_1 \bar{E}_j + h_{ij}^d Q_i H_1 \bar{D}_j + h_{ij}^u Q_i H_2 \bar{U}_j + \mu H_1 H_2$$

і потенціалом м'якого порушення суперсиметрії

$$V = m_1^2 |H_1|^2 + m_2^2 |H_2|^2 - m_{12}^2 (\epsilon_{ij} H_1^i H_2^j + \text{h.c.}) + M_Q^2 [\tilde{t}_L^* \tilde{t}_L + \tilde{b}_L^* \tilde{b}_L] + M_{\tilde{U}}^2 \tilde{t}_R^* \tilde{t}_R + M_{\tilde{D}}^2 \tilde{b}_R^* \tilde{b}_R + M_L^2 [\tilde{\nu}^* \tilde{\nu} + \tilde{\tau}_L^* \tilde{\tau}_L] + M_E^2 \tilde{\tau}_R^* \tilde{\tau}_R + \frac{g}{\sqrt{2} m_W} \epsilon_{ij} \left[\frac{m_\tau A_\tau}{\cos \beta} H_1^i \tilde{l}_L^j \tilde{\tau}_R^* + \frac{m_b A_b}{\cos \beta} H_1^i \tilde{q}_L^j \tilde{b}_R^* - \frac{m_t A_t}{\sin \beta} H_2^i \tilde{q}_L^j \tilde{t}_R^* \right] + \frac{1}{2} [M_3 \tilde{g} \tilde{g} + M_2 \tilde{W}^a \tilde{W}^a + M_1 \tilde{B} \tilde{B}],$$

де L_i і Q_i – слептонні і скваркові $SU(2)_L$ дублети, \bar{E}_j і (\bar{D}_j, \bar{U}_j) – селектронні і скваркові $SU(2)_L$ синглети, H_1 і H_2 – хіггсовські $SU(2)_L$ дублети.

Суперпотенціал W і потенціал V мають більше ніж 100 параметрів, які можна скоротити до п'яти завдяки теоретичним міркуванням і експериментальним спостереженням [12]:

$$m_0, m_{1/2}, A_0, \tan \beta, \text{sgn}(\mu),$$

де m_0 і $m_{1/2}$ – відповідно маси скалярних і спінових суперпартнерів, A_0 – параметр трилінійної взаємодії, $\tan \beta$ – відношення значень вакуумних спостережень двох хіггсовських дублетів, $\text{sgn}(\mu)$ – знак параметра змішування бозонів Хіггса.

Використання останніх експериментальних даних, отриманих колаборацією ATLAS [13] при протон-протонному зіткненні із кінцевими станами відповідно: 1) 0 лептонів + 2-6 джетів, 2) 0 лептонів + 7-10 джетів, 3) 0 або 1 лептон + 3 б-кваркових джета, 4) 1 лептон + джети + MET (Missing transverse energy) – відсутня поперечна енергія, 5) 1 або 2 тау-лептонів + джети + MET, 6) 2 одного знака лептона + 0 або ≥ 3 б-кваркових джета, що зображено на рис. 1, дало можливість розглядати два сценарії МССМ моделі, наведеної в табл. 1, які перевищують останні експериментальні спостереження із шести наведених експериментів на рис. 1.

Для розрахунків спектрів мас суперчастинок, які наведено в табл. 2, ми використовували програму SOFTSUSY [14]. Ми представили обмежений спектр мас, оскільки маси суперпартнерів кварків є виродженими.

В табл. 2 наведено маси лівокіральних і правокірально-ральных скварків (\tilde{u}_L, \tilde{u}_R) і (\tilde{d}_L, \tilde{d}_R) першого покоління, маси глюїно \tilde{g} і маси нейтраліно $\tilde{\chi}_1^0$ – кандидата на темну матерію. Оскільки енергія на ВАК в системі центру мас в 2015 році досягне значення 14 TeV, а світимість $10^{35} \text{ см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$, то імовірність спостерігати процеси утворення суперчастинок і їх подальшого розпаду на джети із кварків + лептони + MET (наприклад, нейтраліно $\tilde{\chi}_1^0$), які наведено на рис. 2, значно зростає.

Використовуючи набір параметрів, наведених в табл. 1, можна розрахувати перерізи утворення суперчастинок за допомогою комп'ютерної програми PROSPINO [15]. Ці поперечні перерізи, які враховують головні доданки $\sigma_{\text{LO}}^{\text{PROSPINO}}$ (LO – leading order) для скварк-скваркового, скварк-глюїнного і глюїно-глюїнного утворення і відповідні додаткові члени $\sigma_{\text{NLO}}^{\text{PROSPINO}}$, (NLO – next-to-leading order), які пов'язані із урахуванням ренормгрупових доданків, обчислено при енергії в системі центра мас $\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}$ і наведено в табл. 3.

K-фактор є відношенням між NLO і LO поперечних перерізів $K = \frac{\sigma_{\text{NLO}}}{\sigma_{\text{LO}}}$. Порівнюючи результати розрахунків за двома сценаріями, ми можемо відзначити значну перевагу значень перерізів за I

Таблиця 2. Маси суперчастинок (GeV)

№	$m_{\tilde{u}_L}$	$m_{\tilde{u}_R}$	$m_{\tilde{d}_L}$	$m_{\tilde{d}_R}$	$m_{\tilde{g}}$	$m_{\tilde{\chi}_1^0}$
I	2188	2074	2120	2069	1838	344
II	5079	5081	5080	5079	1542	273

Таблиця 3. LO і NLO поперечні перерізи (pb) та K-фактори для суперчастинок

№	Переріз	$\sigma_{\text{LO}}^{\text{PROSPINO}}$	$\sigma_{\text{NLO}}^{\text{PROSPINO}}$	K^{PROSPINO}
I	Скварк-скварк	0,446E-02	0,488E-02	1,096
	Скварк-глюїно	0,475E-02	0,810E-02	1,704
	Глюїно-глюїно	0,631E-03	0,204E-02	3,226
II	Скварк-скварк	0,374E-08	0,382E-08	1,022
	Скварк-глюїно	0,169E-04	0,481E-04	2,85
	Глюїно-глюїно	0,595E-02	0,137E-01	2,307

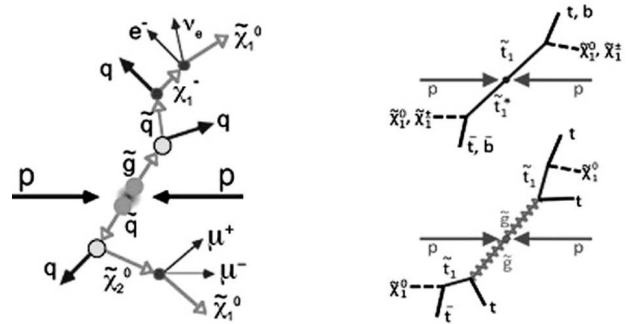


Рис. 2. Процеси утворення суперчастинок на ВАК: зліва – скварк-глюїнний процес, справа – скварк-скварковий (зверху) та глюїно-глюїнний (знизу) процеси

сценарієм над значеннями II сценарію. Це пов'язано із великою різницею значень параметрів m_0 і A_0 для I і II випадків відповідно до табл. 1. Слід також зауважити на великий переріз глюїно-глюїнного утворення для другого сценарію, оскільки маса для такого глюїно становить значення 1542 GeV (див. табл. 2) і імовірність його утворення значно зростає по відношенню до маси глюїно за I сценарієм. Велике значення K-фактора свідчить про необхідність більш ретельних розрахунків перерізів реакцій із включенням до головних членів (LO) додаткових членів (NLO) відповідно до КХД теорії.

3. Висновки

Пошуки суперсиметрії є важливим кроком до з'ясування глибоких протиріч не тільки теоретичного, а і експериментального характеру, на що вказує низка останніх експериментальних даних, результати яких важко пояснити не враховуючи нову фізику, в тому числі суперсиметрію. За допомогою комп'ютерного моделювання (SOFTSUSY, PROSPINO) провідними вченими заходу [16] ведеться широкий фронт робіт задля своєчасного регування на останні експериментальні дані із пошуку суперчастинок. Постійне оновлення експериментальних даних, пов'язаних із обробкою великого масиву бази даних GRID, приводить до необхідності нового моделювання експерименту за допомогою комп'ютерних програм, що робить нашу роботу актуальною і сучасною, оскільки беруться до уваги два нових сценарії простору параметрів MCCM моделі у відповідності до останнього експерименту ATLAS. Оскільки суперчастин-

ки не є такими важкими, як, наприклад, Калуца–Клейн партнери або мікроскопічні чорні діри, нижня границя на маси яких становить приблизно 5–6 TeV [17], а імовірність утворення суперчастинок є достатньо великою, про що свідчать наші розрахунки відповідно до I сценарію, то маємо надію спостерігати їх у найближчому майбутньому, коли енергії і світимості ВАК будуть для цього достатніми.

1. С. Вайнберг, *Мечты об окончательной теории* (ЛКИ, Москва, 2008).
2. E. Gildener, *Phys. Rev. B* **14**, 1667 (1976).
3. S. Weinberg, *Phys. Lett. B* **82**, 387 (1979).
4. L. Susskind, *Phys. Rep.* **104**, 181 (1984).
5. S. Weinberg, *Phys. Rev. D* **13**, 974 (1976); **19**, 1277 (1979); L. Susskind, *Phys. Rev. D* **20**, 2619 (1979).
6. Planck Collaboration, arXiv: 1303.5062 [Astronomy and Astrophysics].
7. ATLAS collaboration, *Phys. Lett. B* **716**, 1 (2012); CMS collaboration, *Phys. Lett. B* **716**, 30 (2012).
8. G. Degrassi *et al.*, arXiv: 1205.6497 [hep-ph].
9. CMS collaboration, arXiv: 1405.3455 [hep-ex].
10. ATLAS Collaboration, arXiv:1210.2979 [hep-ex].
11. H.E. Haber, arXiv: hep-ph/9306207; J.J. Heckman and C. Vafa, arXiv: 0809.1098 [hep-th].
12. G.L. Kane, arXiv: hep-ph/9312272.
13. M.M. Nojiri, arXiv: 1406.1410 [hep-ph].
14. B.C. Allanach, *Comput. Phys. Commun.* **143**, 305 (2002).

15. W. Beenakker, R. Hopker, and M. Spira, arXiv: hep-ph/9611232.
16. R. Gavin, C. Hangst, M. Krämer, M. Mühlleitner, M. Pellen, E. Popena, and M. Spira, arXiv:1305.4061 [hep-ph]; 1407.7971 [hep-ph].
17. V.F.L. Ward, arXiv: 1404.7754 [hep-ph].

Одержано 13.06.14

В.В. Негляд, Т.В. Обиход

ПОИСКИ СУПЕРСИММЕТРИИ
НА БОЛЬШОМ АДРОННОМ КОЛЛАЙДЕРЕ

Резюме

Поиск суперсимметрии реализуется в рамках Минимальной Суперсимметричной Стандартной Модели. С помощью компьютерных программ SOFTSUSY и PROSPINO вычислены спектры масс и сечения рождения суперчастиц. Эти результаты являются важными для поиска новой физики на Большом адронном коллайдере.

V. V. Negliad, T. V. Obikhod

SEARCH FOR SUPERSYMMETRY
AT THE LARGE HADRON COLLIDER

Summary

Search for supersymmetry is carried out in the framework of the Minimal Supersymmetric Standard Model (MSSM). Using the software programs SOFTSUSY and PROSPINO, the mass spectrum and the production cross-sections of superpartners are calculated. The results obtained are of importance for searching the new physics at the LHC.