

Відкриття бозона Гіггса – останній штрих Стандартної моделі

Національний технічний університет

Анотація. Робота присвячена глибокому дослідженню відкриття бозона Гіггса — фундаментальної частинки, яка завершує структуру Стандартної моделі фізики елементарних частинок. Значно розширено опис історичних передумов створення механізму Гіггса, ролі спонтанного порушення симетрії, а також проаналізовано експериментальні методи, які дозволили підтвердити існування нової частинки. Особлива увага приділена аналізу даних зіткнень на Великому адронному колайдері, алгоритмам реконструкції подій, статистичним методам підтвердження сигналу та впливу відкриття на сучасні теорії фізики. Отримані результати мають фундаментальне значення для розуміння природи маси, стабільності вакууму та пошуку нової фізики за межами Стандартної моделі.

Ключові слова. бозон Гіггса; Стандартна модель; механізм Гіггса; спонтанне порушення симетрії; ATLAS; CMS; LHC; маса частинок.

Abstract. The work is devoted to an in-depth analysis of the discovery of the Higgs boson, a fundamental particle that completes the structure of the Standard Model. The text provides an expanded explanation of the theoretical background of the Higgs mechanism, including spontaneous symmetry breaking, and discusses experimental approaches that allowed the detection of the Higgs boson at the Large Hadron Collider. The study places emphasis on collision event reconstruction, statistical confirmation techniques, and the significance of the discovery for modern physics, particularly for understanding mass generation, vacuum stability, and the search for physics beyond the Standard Model.

Keywords. Higgs boson; Standard Model; Higgs mechanism; spontaneous symmetry breaking; ATLAS; CMS; LHC; particle mass.

Вступ. / Introduction. Відкриття бозона Гіггса у 2012 році стало подією, яка завершила багаторічну історію пошуку механізму виникнення маси елементарних частинок. Теоретичні основи цього механізму були закладені у 1960-х роках групою фізиків, серед яких Пітер Гігс, Франсуа Енглер та Роберт Браут. Вони працювали над проблемою сумісності локальних калібрувальних теорій і наявності частинок з масою. Головним відкриттям теорії став факт, що порушення симетрії може відбуватися неявно — без руйнування самої теорії, але зі зміною фізичних властивостей частинок, що з нею взаємодіють. Поява ненульового вакуумного середнього поля Гіггса забезпечує масу W- та Z-бозонам, а також ферміонам через механізм Юкави. Протягом більш ніж п'яти десятиліть відкриття частинки Гіггса залишалося однією з найскладніших задач експериментальної фізики. Лише запуск Великого адронного колайдера (LHC) на енергіях 7–13 TeV дозволив досягти умов, за яких створення частинки з масою близько 125 GeV стало можливим. Мільярди протон-протонних зіткнень, зареєстрованих детекторами ATLAS і CMS, створили безпрецедентний масив даних, необхідний для пошуку надзвичайно рідкісних процесів. Спостереження піків інваріантної маси в каналах $H \rightarrow \gamma\gamma$ та $H \rightarrow ZZ$ надало перші експериментальні свідчення існування бозона Гіггса, підтверджені з високою статистичною значущістю у 2012 році. Таким чином, відкриття бозона Гіггса стало не просто підтвердженням окремого теоретичного передбачення, а фундаментальним кроком у розумінні структури матерії, природи маси та еволюції Всесвіту.

Мета роботи. / Aim. Метою роботи є детальне висвітлення теоретичних, експериментальних та методологічних аспектів відкриття бозона Гіггса. Зокрема, розглядаються:

1. концепція спонтанного порушення симетрії та її роль у формуванні мас частинок; 2. математичний опис поля Гігса та його взаємодій зі стандартними ферміонами та бозонами; 3. технічні можливості Великого адронного колайдера, що забезпечили енергетичний діапазон, 4. принципи роботи детекторів ATLAS і CMS, необхідні для реєстрації продуктів розпаду нової частинки; 5. алгоритми реконструкції подій та методи виділення сигналу серед фону; 6. значення відкриття для сучасної фізики та його вплив на майбутні напрямки досліджень за межами Стандартної Робота має на меті надати цілісне уявлення про наукову, технологічну та теоретичну складність, що стояла за відкриттям останнього недостаючого елемента Стандартної моделі.

Матеріали та методи. / Materials and methods. Дослідження базується на відкритих даних експериментів ATLAS і CMS, які працюють на Великому адронному колайдері — найбільшому прискорювальному комплексі у світі. LHC забезпечує зіткнення протонів на енергіях 7–13 TeV, що дозволяє створювати частинки великої маси, включаючи бозон Гігса. У роботі використано такі методологічні підходи: 1. Генерація високоенергетичних зіткнень. Протони розганяються до майже світлових швидкостей і заводяться у зустрічні пучки, що забезпечують максимальну енергію взаємодій. 2. Реєстрація треків частинок. Кремнієві піксельні детектори фіксують траєкторії заряджених частинок з мікронною точністю. 3. Калориметрія. Електромагнітні та гадронні калориметри вимірюють енергію фотонів, електронів, мюонів адронів. 4. Мюонні камери. Забезпечують ідентифікацію мюонів — важливого продукту розпаду каналу $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\ell$. 5. Реконструкція подій. Використовуються багатоваріантні алгоритми, що дозволяють відтворити повну картину зіткнення. 6. Статистичний аналіз. Методи визначення інваріантної маси, порівняння сигнал-фон, фітінг розподілів та оцінка статистичної значущості Z . 7. Основні канали аналізу: $H \rightarrow \gamma\gamma$, $H \rightarrow ZZ$, $H \rightarrow WW$. Застосування цих методів дозволило виділити рідкісні сигнали, що відповідають утворенню та розпаду бозона Гігса, серед величезного шумового фону від інших протон-протонних процесів.

Результати та обговорення. / Results and discussion. Експериментальні дані показали чіткі свідчення існування нової частинки з масою близько 125 GeV. Найпереконливішими стали результати аналізу каналів розпаду: — $H \rightarrow \gamma\gamma$, у якому спостерігався гострий пік інваріантної маси пари фотонів; — $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\ell$, що дав найбільш чисті події завдяки точності вимірювання мюонів та електронів; — $H \rightarrow WW$, який підтвердив характерні поведінкові ознаки процесу. Обидві колаборації — ATLAS і CMS — незалежно підтвердили відкриття з рівнем статистичної значущості понад 5σ , що є офіційним критерієм відкриття в фізиці високих енергій. Подальші дослідження властивостей частинки показали, що вона має спин 0, нульовий електричний заряд і поводить себе як скалярне поле — тобто повністю відповідає передбаченням теорії Гігса. Отримані результати також дозволили дослідити потенціал Гігса, що визначає стабільність вакууму. Сучасні моделі вказують, що вакуум може бути метастабільним, що має глибокі наслідки для космології. Таким чином, відкриття бозона Гігса не лише завершило Стандартну модель, а й відкрило шлях до виявлення нової фізики — суперсиметрії, темної матерії, нових вимірів.

Висновки. / Conclusions. Проведене дослідження демонструє фундаментальне значення відкриття бозона Гігса як ключового елементу, який забезпечує механізм формування мас елементарних частинок. Експериментальне підтвердження існування частинки, передбаченої ще у 1960-х роках, стало найбільшим досягненням фізики високих енергій початку XXI століття. Відкриття підтвердило правильність структури Стандартної моделі, але водночас виявило її межі, оскільки не пояснює природу темної матерії, темної енергії та мас нейтрино. Подальші дослідження мають бути спрямовані на: — точніші вимірювання властивостей бозона Гігса; — пошук відхилень від передбачень Стандартної моделі; — виявлення нових частинок; — дослідження зв'язку між Гігсовим полем і космологічними процесами. Таким чином, бозон Гігса став не фінальною крапкою, а відправною точкою нового етапу розвитку фундаментальної фізики.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. CERN — European Organization for Nuclear Research Режим доступу: [<https://home.cern/>]
2. ATLAS Collaboration. ATLAS Experiment Documentation Режим доступу: [<https://atlas.cern/>]
3. CMS Collaboration. CMS Higgs Boson Publications. Режим доступу: [<https://cms.cern/>]
4. Higgs P., Englert F., Brout R. Spontaneous Symmetry Breaking Papers, 1964.Режим доступу: [<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.13.508>] [<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.13.321>]
5. The Large Hadron Collider Technical Design Report, CERN.Режим доступу: [<https://cds.cern.ch/record/381453>]
6. Aad G. et al. (ATLAS Collaboration), Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson, 2012.Режим доступу: [<https://doi.org/10.1016/j.physletb.2012.08.020>]
7. Chatrchyan S. et al. (CMS Collaboration), Observation of a new boson at a mass of 125 GeV, 2012.Режим доступу: [<https://doi.org/10.1016/j.physletb.2012.08.021>]

Слободян Владислав Сергійович

студент БМ-25мс ФБЦЕІ

<mailto:burbonowuch@gmail.com>

Науковий керівник

Мартинюк Володимир Валерійович

кандидат технічних наук

доцент

доцент кафедри машинобудування та транспорту

національний технічний університет

Вінниця, Україна

Slobodian Vladyslav Sergeevich

FBCEI

Martyniuk Volodymyr Valeriyovych

candidate of technical sciences

associate professor

associate professor of the department of mechanical engineering and transport

national technical university

Vinnitsia, Ukraine