

Д. І. Кривенко

В.В. Мартинюк

СТАНДАРТНА МОДЕЛЬ ЕЛЕМЕНТАРНИХ ЧАСТИНОК

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Розглядається Стандартна модель як фундаментальна теорія, що описує елементарні частинки та їх взаємодії. Проаналізовано основні компоненти моделі, включаючи кварки, лептони та бозони, а також фундаментальні сили: сильну, слабку та електромагнітну. Наведено ключові теоретичні засади та експериментальні підтвердження Стандартної моделі.

Ключові слова: Стандартна модель, елементарні частинки, фундаментальні взаємодії, кварки, лептони, бозони, калібрувальна теорія, механізм Хіггса.

Abstract

The Standard Model is considered as a fundamental theory describing elementary particles and their interactions. The main components of the model, including quarks, leptons, and bosons, as well as the fundamental forces (strong, weak, and electromagnetic), are analyzed. The key theoretical principles and experimental confirmations of the Standard Model, including the Higgs mechanism, are presented.

Keywords: Standard Model, elementary particles, fundamental interactions, quarks, leptons, bosons, gauge theory, Higgs mechanism.

Вступ

Стандартна модель елементарних частинок є однією з найвизначніших та найуспішніших теорій у сучасній фізиці. Вона забезпечує узгоджений опис усіх відомих на сьогодні фундаментальних частинок матерії та трьох з чотирьох фундаментальних взаємодій, що керують їхньою поведінкою: сильною, слабкою та електромагнітною. Розуміння Стандартної моделі є ключовим для глибокого пізнання будови матерії на найменших масштабах та для реконструкції еволюції Всесвіту від його ранніх стадій. Метою цієї роботи є системний аналіз основних положень Стандартної моделі, її експериментальних підтверджень, а також визначення її ролі та обмежень у сучасній науковій картині світу.

Основні теоретичні засади

Стандартна модель (СМ) базується на фундаментальних принципах квантової теорії поля та теорії симетрій, зокрема локальної калібрувальної симетрії. Вона описує структуру матерії та взаємодії між елементарними частинками, об'єднуючи три з чотирьох фундаментальних взаємодій природи: електромагнітну, слабку та сильну. Основними компонентами СМ є фундаментальні частинки матерії — ферміони, переносники взаємодій — калібрувальні бозони, а також механізм Хіггса, що надає масу частинкам.

Ферміони — це частинки з напівцілим спіном, які підкоряються статистиці Фермі-Дірака та принципу Паулі. Вони поділяються на кварки та лептони. Кварки існують у шести "ароматах": up (u), down (d), charm (c), strange (s), top (t), bottom (b), і кожен з них може мати один із трьох "кольорів" — умовних зарядів сильної взаємодії: червоний, зелений або синій. Кварки не існують окремо, а формують композитні частинки — адрони, зокрема протони та нейтрони. Вони беруть участь у всіх трьох

взаємодіях СМ: сильній, слабкій і електромагнітній (за наявності заряду). Лептони також існують у шести "ароматах", поділених на три покоління. Кожне покоління включає заряджений лептон (електрон e^- , мюон μ^- , тау-лептон τ^-) та відповідне нейтрино (електронне ν_e , мюонне ν_μ , тау-нейтрино ν_τ). Лептони не беруть участі у сильній взаємодії.

Переносниками фундаментальних взаємодій у СМ є калібрувальні бозони — частинки з цілим спіном, що є квантами відповідних полів. Фотон (γ) є безмасовим переносником електромагнітної взаємодії. Бозони W^+ , W^- і Z^0 є масивними переносниками слабкої взаємодії, яка відповідає, зокрема, за β -розпад. Глюони (g) — це вісім типів безмасових частинок, які є переносниками сильної взаємодії між кварками. Вони самі мають "кольоровий" заряд, тому можуть взаємодіяти між собою, що є унікальною особливістю сильної взаємодії.

Механізм Хіггса пояснює, чому деякі елементарні частинки мають масу. Згідно з цією теорією, у всьому просторі існує скалярне поле — поле Хіггса. Частинки набувають маси внаслідок взаємодії з цим полем. Квант цього поля — бозон Хіггса (H^0) — є масивною скалярною частинкою. Саме взаємодія з полем Хіггса надає масу кваркам, зарядженим лептонам та бозонам W^+ , W^- і Z^0 , але не фотону або глюонам, що залишаються безмасовими.

Результати досліджень та експериментальні підтвердження

Стандартна модель отримала величезну кількість експериментальних підтверджень, що робить її надзвичайно надійною та точною теорією, яка на сьогодні є основою сучасної фізики елементарних частинок. Серед її ключових досягнень варто відзначити низку історичних відкриттів, що послідовно підтверджували правильність її передбачень.

Одним із найважливіших підтверджень стало передбачення та відкриття кварків. Попри те, що кварки не можуть існувати у вільному стані через явище конфайнменту, їхнє існування було підтверджено непрямыми методами. У 1960-х роках в експериментах з глибоко непружного розсіяння електронів на протонах та нейтронах у Стенфордському лінійному прискорювачі (SLAC) були виявлені внутрішні структури нуклонів, що відповідали кварковій моделі. Подальші відкриття чарівного кварка (1974), красивого кварка (1977) та топ-кварка (1995) остаточно утвердили уявлення про кваркову будову адронів.

Ще одним визначним досягненням стало виявлення нейтральних струмів, а також безпосередня реєстрація W^+ , W^- та Z^0 бозонів — носіїв слабкої взаємодії, передбачених у межах теорії електрослабкої взаємодії. Нейтральні струми були відкриті у ЦЕРНі в 1973 році, а у 1983 році там же були експериментально виявлені W^+ , W^- та Z^0 бозони, що стало грандіозним підтвердженням теоретичних передбачень Стандартної моделі.

Особливе місце серед успіхів СМ займає відкриття бозона Хіггса — останньої передбаченої частинки цієї теорії. Його існування довгий час залишалося непідтвердженим, аж поки в 2012 році на Великому адронному колайдері (LHC) у ЦЕРНі було зафіксовано частинку, властивості якої відповідають бозону Хіггса. Це відкриття завершило експериментальне підтвердження повного спектру частинок Стандартної моделі.

Крім відкриття нових частинок, величезне значення мають надточні вимірювання параметрів Стандартної моделі: мас частинок, констант зв'язку, кутів змішування кварків (матриця Кабіббо–Кобаяші–Маскави) та нейтрино (матриця Понтекорво–Маки–Накая), тощо. Такі вимірювання проводилися у численних експериментах по всьому світу — зокрема на прискорювачах LEP, Tevatron, LHC — і показали надзвичайну відповідність теоретичним передбаченням, часто з точністю до кількох знаків після коми.

Усе це свідчить про унікальну точність, внутрішню узгодженість та експериментальну стійкість Стандартної моделі, яка стала одним із найбільш успішних досягнень у фізиці XX–XXI століть.

Ілюстрація: Нижче наведено схематичне представлення фундаментальних частинок Стандартної моделі:

Три покоління матерії (ферміони)				
	I	II	III	
маса спокою→	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
електричний заряд→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
спін→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
назва→	верхній	зачарований	істинний	фотон
	u	c	t	γ
Кварки	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	нижній	дивний	чарівний	глюон
	d	s	b	g
Лептони	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	91.2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	електронне нейтрино	мюонне нейтрино	тау-нейтрино	Z-бозон
	ν_e	ν_μ	ν_τ	Z⁰
Лептони	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	± 1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	електрон	мюон	тау	W-бозон
	e	μ	τ	W[±]

Рисунок 1 — Стандартна модель у вигляді таблиці

- Ферміони (складові матерії):**
- Кварки:**
 - Перше покоління: up (u), down (d)
 - Друге покоління: charm (c), strange (s)
 - Третє покоління: top (t), bottom (b)
- Лептони:**
 - Перше покоління: електрон (e), електронне нейтрино (ν_e)
 - Друге покоління: мюон (μ), мюонне нейтрино (ν_μ)
 - Третє покоління: тау (τ), тау-нейтрино (ν_τ)
- Бозони (переносники взаємодій та поле Хігса):**
- Калібрувальні бозони:**
 - Фотон (γ) - електромагнітна сила
 - $W^+ W^- Z^0$ бозони - слабка сила
 - Глюони (8 типів) - сильна сила
- Скалярний бозон:**
 - Бозон Хігса (H)

Висновки

Стандартна модель елементарних частинок є надзвичайно успішною та елегантною теоретичною конструкцією, яка з високою точністю описує величезний масив експериментальних даних у фізиці високих енергій. Її передбачення були багаторазово підтверджені, кульмінацією чого стало відкриття бозона Хіггса.

Незважаючи на свої тріумфи, Стандартна модель не є остаточною "теорією всього". Вона має низку концептуальних та феноменологічних обмежень, а саме : не включає гравітаційну взаємодію, не пояснює наявність темної матерії та темної енергії, які складають переважну частину маси-енергії Всесвіту, не дає пояснення масам нейтрино (хоча їх осциляції, що вказують на наявність мас, експериментально підтверджені та можуть бути введені в СМ шляхом її розширення), містить близько двох десятків вільних параметрів (маси частинок, константи зв'язку тощо), значення яких визначаються експериментально, а не виводяться з перших принципів, не вирішує проблему ієрархії мас (чому бозон Хіггса набагато легший за планківську масу) та інші теоретичні питання.

Ці обмеження стимулюють активні дослідження "нової фізики" за межами Стандартної моделі. Сучасні експерименти на LHC та інших установках, а також теоретичні розробки (наприклад, теорії суперсиметрії, теорії струн, теорії Великого об'єднання) спрямовані на пошук відповідей на ці відкриті питання та побудову більш фундаментальної теорії природи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ах'єзер О. І., Рекало М. П. Елементарні частинки. Київ : Наукова думка, 1986. 264 с.
2. Langacker P. The Standard Model and Beyond. Boca Raton : CRC Press, 2010. 683 p.
3. Стандартна модель [Електронний ресурс] // Вікіпедія : вільна енциклопедія. – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Стандартна_модель
4. Peskin M. E., Schroeder D. V. An Introduction to Quantum Field Theory. Boulder : Westview Press, 1995. 842 p.

Кривенко Дмитро Ігорович – студент групи 2КН-24Б, ФІТА, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: dkrivenko322@gmail.com

Науковий керівник – Мартинюк Володимир Валерійович, доцент кафедри загальної фізики ВНТУ

Dmytro Igorovich Kryvenko – student of group 2KN-24B, FIITA, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: dkrivenko322@gmail.com

Scientific supervisor – Volodymyr Valeriyovych Martyniuk, associate professor of the Department of General Physics, VNTU