

УДК 539.1.01

ГОРБАР

Едуард Володимирович –
доктор фізико-математичних
наук, професор кафедри
квантової теорії поля
Київського національного
університету імені
Тараса Шевченка

ГУСИНІН

Валерій Павлович –
член-кореспондент НАН України,
доктор фізико-математичних
наук, професор, завідувач відділу
астрофізики та елементарних
частинок Інституту теоретичної
фізики ім. М.М. Боголобова
НАН України,
vgusynin@bitp.kiev.ua

БОЗОН ХІГГСА: ПЕРЕДБАЧЕННЯ, ПОШУК, ВІДКРИТТЯ

Нобелівську премію в галузі фізики за 2013 рік присуджено двом відомим європейським фізикам-теоретикам – бельгійцю Франсуа Енглєру та британцю Пітеру Хіггсу «за теоретичне відкриття механізму, що сприяє нашому розумінню походження мас субатомних частинок і який нещодавно було підтверджено відкриттям передбачуваної фундаментальної частинки в експериментах ATLAS і CMS на Великому адронному колайдері».

Ключові слова: Нобелівська премія, бозон Хіггса, Великий адронний колайдер.

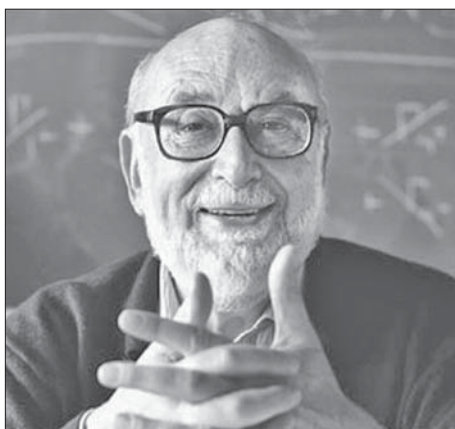
Нобелівська премія з фізики – 2013

8 жовтня 2013 р. у Стокгольмі було оголошено імена лауреатів Нобелівської премії з фізики. Ними стали два фізики-теоретики – бельгієць Франсуа Енглєр (François Englert) і британець Пітер Хіггс (Peter Ware Higgs). Формулювання Нобелівського комітету зачитав постійний секретар Шведської королівської академії наук Стефан Нормарк (Staffan Normark) – «за теоретичне відкриття механізму, що сприяє нашому розумінню походження мас субатомних частинок і який нещодавно було підтверджено відкриттям передбачуваної фундаментальної частинки в експериментах ATLAS і CMS на Великому адронному колайдері», а у традиційному коментарі щодо рішення Комітету професор теоретичної фізики Гуннар Інгельман (Gunnar Ingelman) заявив: «Це не просто тріумф професорів Енглєра і Хіггса, це тріумф фізики елементарних частинок і взагалі всієї теоретичної фізики».

Статтю Франсуа Енглєра і Роберта Браута (Robert Brout) – першу з теоретичних робіт, за які присуджено цю Нобелівську премію, – було опубліковано 31 серпня 1964 р. в журналі Physical Review Letters. У той самий день до редакції цього журналу надійшла стаття Пітера Хіггса, яка побачила світ 19 жовтня 1964 р. А майже через місяць, 16 листопада 1964 р., у Physical Review Letters вийшла стаття трьох авторів – Джеральда Гуральника (Gerald S. Guralnik), Карла Хагена



Пітер Хіггс (Peter Higgs)



Франсуа Енглер (François Englert)



Ф. Енглер і П. Хіггс під час оголошення про відкриття бозона Хіггса. Мельбурн. 4 липня 2012 р.

(Carl R. Hagen) і Тома Кіббла (Tom W.B. Kibble), які досліджували той самий механізм генерації мас частинок, що і в перших двох роботах. Роберт Браут, на жаль, пішов з життя у травні 2011 р. Правила Нобелівського фонду забороняють присуджувати премію більш ніж трьом особам, тому Дж. Гуральника, К. Хагена і Т. Кіббла не було відзначено Нобелівською премією. І це не поодинокий випадок. Свого часу через це правило постраждали такі всесвітньо відомі фізики-теоретики, як Фрімен Дайсон, Микола Боголюбов.

Маса — одна з основних характеристик матерії, і питання, що таке маса, як вона з'являється, є фундаментальними проблемами фізики. У ньютонівській механіці маса є мірою інерції тіл, а також мірою гравітаційної взаємодії. У спеціальній теорії відносності знаменита формула Ейнштейна пов'язує енергію і масу, а принцип еквівалентності інерційної і гравітаційної мас був ключовим для створення загальної теорії відносності. У сучасній фізиці маса всіх тіл зумовлена масами їх складових частин і, в кінцевому підсумку, масами фундаментальних цеглин матерії — кварків і лептонів. У рамках Стандартної моделі (СМ) ці елементарні частинки набувають маси завдяки взаємодії зі скалярним полем — полем Хіггса. Отже, в сучасній фізиці маса повністю зумовлена взаємодією.

Механізм генерації мас частинок завдяки взаємодії зі скалярним полем, який було запропоновано у зазначених вище роботах і який нині називають механізмом Браута—Енглера—Хіггса—Гуральника—Хагена—Кіббла (або скорочено — механізмом Хіггса), покладено в основу теорії електрослабкої взаємодії. За створення цієї теорії Шелдона Глешоу (Sheldon Lee Glashow), Стівена Вайнберга (Steven Weinberg) і Абдуса Салама (Abdus Salam) було удостоєно Нобелівської премії за 1979 р. Внаслідок хіггсівського механізму спонтанного порушення електрослабкої симетрії з необхідністю виникає масивна елементарна частинка — квант поля Хіггса, або бозон Хіггса. І для остаточного підтвердження Стандартної моделі його потрібно було знайти.

Про відкриття частинки, схожої на бозон Хіггса, колаборації ATLAS і CMS в лабораторії ЦЕРН повідомили 4 липня 2012 р. на конференції в Мельбурні. Після того, як у березні 2013 р. фізики, що працюють на Великому адронному колайдері (ВАК), оприлюднили нові дані, які однозначно свідчили про нульовий спин і позитивну парність спостереженої частинки, стало остаточно ясно, що вона і є бозоном Хіггса. Без сумніву, це було найважливішим відкриттям у фізиці елементарних частинок за кілька останніх десятиліть. До речі, П. Хіггс і Ф. Енглер уперше зустрілися один з одним на вищезгаданій конференції, а згодом під час інтерв'ю Пітер Хіггс висловився так: «Дивовижно, що ця подія сталася ще за мого життя».

Who is who?

Британський фізик-теоретик **Пітер Хіггс** народився 29 травня 1929 р. в місті Ньюкасл-апон-Тайн в Англії. У 1947 р. закінчив Королівський коледж у Лондоні і здобув там у 1955 р. ступінь PhD з фізики. Працював в Единбурзькому університеті, Імперському коледжі Лондона, Університетському коледжі Лондона, а з 1960 р. повернувся в Единбурзький університет, де тепер він є професором у відставці (*emeritus*). П. Хіггс — член Королівського товариства Единбурга і Лондонського королівського товариства, брав участь у русі за ядерне роззброєння, однак припинив цю діяльність, коли активісти руху виступили за відмову від атомної енергетики. Цікаво, що у 2004 р. Пітер Хіггс відмовився летіти до Єрусалима для вручення йому премії Вольфа, тому що не погоджувався з політикою Ізраїлю на Близькому Сході.

Як згадує сам П. Хіггс, ідея про спосіб генерації маси калібрувальних полів спала йому на думку під час прогулянки в горах у районі Единбурга, і, повернувшись до лабораторії, він заявив, що у нього виникла «грандіозна ідея».

Бельгійський фізик-теоретик **Франсуа Енглер** народився 6 листопада 1932 р. в Еттербеке (район Брюсселя). Закінчив франкомовний Брюссельський вільний університет за

спеціальністю «інженер-електромеханік», де у 1959 р. здобув ступінь PhD з фізики. До 1961 р. працював у Корнельському університеті разом з відомим фізиком-теоретиком Робертом Браутом. Згодом Ф. Енглер повернувся до Брюссельського університету, обійнявши професорську посаду, а з 1998 р. він почесний професор. У липні 2013 р. король Бельгії Альберт II надав йому баронський титул.

Ще до Нобелівської премії Р. Браут, Ф. Енглер і П. Хіггс здобули низку престижних міжнародних нагород за розроблення механізму генерації маси калібрувальних векторних бозонів: премію Європейського фізичного товариства (1997), премію Вольфа з фізики (2004), разом із Дж. Гуральником, К. Хагеном і Т. Кібблом — премію Сакураї в галузі фізики елементарних частинок (2010). Крім того, Пітер Хіггс є лауреатом медалі Дірака — однієї з найпрестижніших нагород з теоретичної фізики Інституту фізики в Лондоні — і разом з Т. Кібблом — медалі й премії Резерфорда (1984).

Локальна калібрувальна симетрія і спонтанне порушення симетрії

Сучасна теорія елементарних частинок, так звана Стандартна модель, описує всі взаємодії елементарних частинок, крім гравітаційної. Вона ґрунтується на двох основоположних принципах: локальній калібрувальній симетрії і спонтанному порушенні симетрії (СПС). Поняття калібрувальної інваріантності виникло ще в класичній теорії Максвелла. Якщо напруженості електричного поля і магнітної індукції записати через векторний і скалярний потенціали $\mathbf{E} = -\nabla\varphi - \partial\mathbf{A}/c\partial t$, $\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A}$ (c — швидкість світла), то вони залишаються незмінними відносно перетворень, які здійснюються над потенціалами $\mathbf{A} \rightarrow \mathbf{A} + \nabla\alpha$, $\varphi \rightarrow \varphi - \partial\alpha/c\partial t$, де α — довільна функція від просторових змінних і часу. У класичній фізиці використання потенціалів — це питання зручності, але у квантовій фізиці вони є необхідними для опису взаємодії заряджених полів матерії з електромагнітним полем. При цьому при калібрувальних перетвореннях поля матерії перетворюються як

локальна зміна фази $\psi \rightarrow e^{i\alpha(x,t)}\psi$. Квантова електродинаміка, яка в сучасній формі була сформульована Германом Вейлем, Вернером Гейзенбергом і Вольфгангом Паулі у 1929 р., є інваріантною відносно цих калібрувальних перетворень, що належать до групи $U(1)$. Важливим наслідком калібрувальної інваріантності є відсутність маси у фотона, тому що масовий доданок неминуче її порушує.

У 1954 р. Чж. Янг і Р. Міллс узагальнили калібрувальну інваріантність на випадок полів, що перетворюються згідно з неабелевою групою $SU(2)$ [1]. Це виявилось видатним досягненням, оскільки опис взаємодії частинок за допомогою калібрувального векторного поля згодом став основним принципом побудови теорії елементарних частинок. Поля Янга—Міллса покладено в основу Стандартної моделі елементарних частинок, яка має групу локальної симетрії $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ і, відповідно, 12 калібрувальних полів — 8 глюонів, які відповідають за сильну взаємодію, W^\pm - і Z -бозони, що переносять слабку взаємодію, і фотон. При локальних фазових перетвореннях перетворюються як поля матерії, так і поля Янга—Міллса, причому таким чином, що зміни в рівняннях за рахунок них компенсують, тобто «калібрують», один одного. Вимога калібрувальної інваріантності виявилася несподівано зручним способом увести в теорію як електромагнітне поле, так і нові векторні поля Янга—Міллса¹. Проте з самого початку було очевидно, що внаслідок калібрувальної симетрії поля Янга—Міллса мають бути безмасовими, як і фотон. Питання про масу калібрувальних полів було основним запитанням, яке на семінарі в Принстоні в лютому 1953 р. В. Паулі поставив Чж. Янгу і на яке той так і не зміг відповісти. Сам В. Паулі отримав рівняння для калібрувальних полів улітку 1953 р., але не опублікував свої результати, оскільки також

¹ Зауважимо, що, як з'ясувалося, загальна теорія відносності є калібрувальною теорією гравітаційної взаємодії [2]. Проте й дотепер незрозуміло, як її проквантувати, і, крім того, простором, в якому ми виконуємо групові перетворення, є наш чотиривимірний простір-час, а не внутрішній простір полів.

не знав відповіді щодо маси цих полів. Про дослідження В. Паулі стало відомо значно пізніше, коли було опубліковано його листування з відомим американським фізиком голландського походження Абрахамом Пайсом, де Паулі дає детальний опис своїх результатів². Проблема маси полів Янга—Міллса була основною перешкодою для їх застосування у фізиці елементарних частинок, тому що відповідні безмасові частинки експериментально не спостерігалися.

Паралельно розвивалися ідеї СПС. Ще в 1937 р. Лев Ландау створив теорію фазових переходів II роду у фізиці конденсованих середовищ [4], де головну роль відіграють параметри порядку (ПП) і зміна симетрії системи при фазових переходах. На основі цієї теорії в 1950 р. він разом з Віталієм Гінзбургом запропонував напівфеноменологічну теорію надпровідності [5], яку й дотепер використовують для пояснення експериментальних даних³. Основним інгредієнтом цієї теорії було використання потенціальної енергії як функції комплексного параметра порядку Φ , яка за температури нижче критичної має форму сомбреро (рис. 1). Як впливає з форми потенціальної енергії, симетричний стан зі значенням $\Phi = 0$ не є станом системи з найменшою енергією. Енергетично вигідний стан системи реалізується для параметра порядку, відмінного від нуля, $\Phi \neq 0$, і очевидно існує більше ніж один такий стан (точніше, континуум таких станів), тобто має місце виродження основного стану. Вибір будь-якого конкретного стану з $\Phi \neq 0$ еквівалентний спонтанному порушенню симетрії системи відносно обертань навколо вертикальної осі (або відносно зміни фази перетворень ПП).

При квантуванні системи енергія моди збуджень уздовж дна потенціальної ями прямує до нуля зі зростанням довжини хвилі (згодом з'ясувалося, що ця мода є не що інше, як безмасове намбу-голдстоунівське збудження, про

² Історію про відкриття В. Паулі калібрувальних полів і доповідь Чж. Янга на семінарі в Принстоні надзвичайно цікаво описано у книзі [3].

³ За створення цієї теорії В. Гінзбургу було присуджено Нобелівську премію 2003 року.

що див. далі). За наявності електромагнітного поля ця мода об'єднується з безмасовими фотонами, зумовлюючи скінченну масу останніх у надпровіднику, що є причиною ефекту Мейснера — виштовхування магнітного поля з надпровідника. Фактично, як стало зрозуміло пізніше, ефект Мейснера в надпровіднику являє собою аналог механізму Хіггса у фізиці частинок. Більше того, радіальна мода збудження ПП є масивною, а отже, і повним аналогом бозона Хіггса! Її було експериментально відкрито у 1980 р. в раманівському розсіянні в надпровіднику NbSe_2 [6] за температури, меншої за критичну, $T < T_c = 7,2$ К, а теоретичне пояснення цієї моди наведено в роботі [7].

Грунтуючись на мікроскопічній теорії надпровідності, яку в 1957 р. створили Джон Бардін, Леон Купер, Джон Шріффер і Микола Боголюбов, американський фізик японського походження Йоширо Намбу (Yoichiro Nambu) запропонував модель, у якій маса ферміонів виникає в результаті спонтанного порушення кіральної симетрії, що має місце для безмасових ферміонів [8]. Важливо також, що він передбачив існування *безмасових* псевдоскалярних частинок унаслідок такого СПС.

Невдовзі після робіт Й. Намбу американський теоретик Джефрі Голдстоун вказав на альтернативну і простішу в технічному плані можливість СПС за допомогою елементарного скалярного поля. Він розглянув у теорії поля просту релятивістську модель [9] самовзаємодіючого комплексного скалярного поля з від'ємним квадратом маси, що зумовлює потенціальну енергію взаємодії на зразок наведеної на рис. 1. Лагранжیان моделі, запропонованої Дж. Голдстоуном, є настільки простим, що доречно навести його у явному вигляді: $L = |\partial_\mu \Phi|^2 - V(\Phi)$, де перший доданок відповідає кінетичній енергії поля, а потенціальна енергія $V(\Phi) = -m^2 \Phi^* \Phi + \lambda (\Phi^* \Phi)^2$. Цей лагранжیان є інваріантним відносно фазових перетворень поля Φ з постійною фазою $\Phi \rightarrow e^{i\alpha} \Phi$. Стан з найменшою енергією спонтанно порушує цю симетрію і визначає появу збуджень, які відповідають руху вздовж мінімумів потенціальної енергії. Таку ситуацію яскраво ілюструє рис. 2.

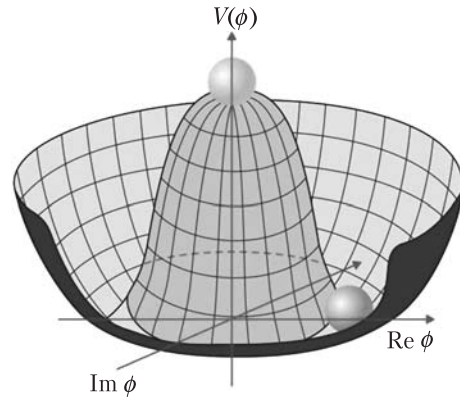


Рис. 1. Потенціальна енергія як функція комплексного параметра порядку

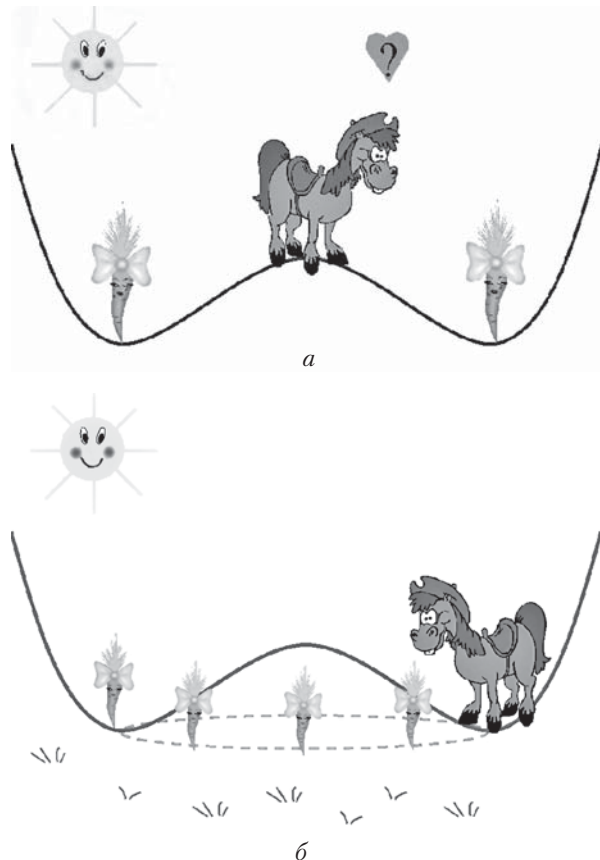


Рис. 2. Хоча поні Ніколя любить симетрію, для того щоб з'їсти морквину, він мусить порушити симетрію (а). Проте у трьох вимірах (б) існує долина, де Ніколя може рухатися від однієї морквини до іншої, не докладаючи зусиль (Ніколя любить теорему Голдстоуна!)

Енергія цих збуджень — суто кінетична, що в релятивістській квантовій теорії поля означає відсутність маси спокою.

Невдовзі у релятивістській квантовій теорії поля було доведено загальну теорему, що при спонтанному порушенні неперервної симетрії у спектрі збуджень з необхідністю виникають безмасові частинки з нульовим спіном і законом дисперсії $E = c|\vec{q}|$ (E — енергія, \vec{q} — хвильовий вектор) [10], які називають голдстоунівськими (або намбу-голдстоунівськими) бозонами. У статистичній фізиці існування збуджень з дисперсійним законом $E(q) \rightarrow 0$, $q \rightarrow 0$ при спонтанному порушенні неперервних симетрій було строго доведено М. Боголюбовим (теорема про $1/q^2$ -сингулярності).

Взаємодія голдстоунівських бозонів між собою у випадку неабелевих груп симетрій та з іншими частинками підпорядковується цілком визначеним законам. У середині 60-х років Стівен Вайнберг і Дмитро Волков для кіральних симетрій побудували відповідні моделі, які добре описують взаємодію псевдоскалярних мезонів за низьких енергій. Винятково важливим виявилось питання, чи можуть голдстоунівські частинки мати напівцілий спін, тобто бути ферміонами. Пошук відповіді на це питання привів Д. Волкова і В. Акулова до відкриття нової симетрії, перетворення якої змішують бозони й ферміони і яка дістала назву суперсиметрії [11].

Отже, на початку 60-х років склалася ситуація, коли в теорії з'явилися безмасові частинки, які не існують у природі, але є наслідком або принципу локальної калібрувальної симетрії, або спонтанного порушення неперервної симетрії. Незважаючи на наявність достатньо успішних феноменологічних моделей (наприклад, модель Сакураї) застосування полів Янга—Міллса з безпосереднім включенням маси до лагранжіана для опису масивних сильновзаємодіючих векторних мезонів, з погляду теорії вони виявилися незадовільними, тому що є неперенормованими, а отже, в них неможливо контролювати поправки, які обчислюються за теорією збурень. Юліан Швінгер, Нобелівський лауреат 1965 р. за створення

сучасної квантової електродинаміки, був першим, хто спростував твердження, що локальна калібрувальна симетрія несумісна зі скінченною масою у калібрувальних полях [12]. Він вказав механізм, коли завдяки сильній взаємодії можуть виникати безмасові частинки, яким відповідає полюс у поляризаційному операторі і, як наслідок, поява маси калібрувальних полів без порушення локальної калібрувальної симетрії. Ю. Швінгер запропонував також «іграшкову» модель квантової електродинаміки у двовимірному просторі-часі з безмасовими ферміонами, де цей механізм реалізується явним чином. Фактично, як стало зрозуміло пізніше, механізм Швінгера генерації мас калібрувальних полів є динамічним механізмом Хіггса, коли скалярні поля не вводяться явно, а виникають як зв'язані стани ферміонів, але про це йтиметься далі.

У 1963 р. Філіп Андерсон, також Нобелівський лауреат, використовуючи формулювання теорії надпровідності у формі Намбу, довів, що кванти електромагнітного поля в надпровіднику отримують масу, пропорційну плазмонній частоті [13]. Це був приклад нерелятивістської теорії з СПС і калібрувальними (у цьому випадку електромагнітними) полями, де безмасові частинки відсутні, а векторні — набувають маси. Ф. Андерсон прямо вказує, що отримання фотонем маси й ефект Мейснера є фізичною реалізацією механізму Швінгера. Більш того, він дійшов висновку, що проблема нульової маси у голдстоунівських частинок не є серйозною, оскільки вони ймовірно об'єднуються з безмасовими частинками полів Янга—Міллса, зумовлюючи масу останніх. Це видатне передбачення не привернуло належної уваги фізиків, оскільки нічого конкретного в цьому аспекті стаття Андерсона не містила. Фактично реалізацію механізму Швінгера генерації маси полів Янга—Міллса без уведення елементарних скалярних полів було здійснено в роботі тоді ще юних радянських фізиків-теоретиків Олександра Мігдала і Олександра Полякова [14]. У своїх спогадах О. Поляков пише, що результат вони отримали на початку 1965 р., дещо пізніше за роботи Браута, Енгле-

ра, Хіггса, про які вони не знали. Проте їхні дослідження, представлені на кількох семінарах, зустріли спротив з боку досвідчених колег і рецензентів спеціалізованих журналів.

Механізм Хіггса і Стандартна модель елементарних частинок

Ми підійшли до моменту, коли до боротьби за розв'язання проблеми безмасових частинок долучилися нобелівські лауреати 2013 р. Спочатку було опубліковано роботу Ф. Енглера і Р. Браута [15], а за місяць — статтю П. Хіггса [16]. Фактично Енглер і Браут досліджували механізм Швінгера в абелевій калібрувальній теорії з комплексним скалярним полем, тобто у скалярній електродинаміці. Форма потенціальної функції не конкретизувалася, натомість було зроблено припущення, що потенціал є таким, що його мінімальне значення досягається за ненульового значення скалярного поля, яке порушує $U(1)$ -симетрію. Прямим обчисленням було продемонстровано, що в цьому випадку в поляризаційному операторі за рахунок безмасових голдстоунівських бозонів виникає полюс, що свідчить про масу калібрувального поля. Фізично це означає, що два ступені свободи (поляризації) безмасового векторного поля об'єднуються з безмасовим голдстоунівським бозоном і породжують масивне векторне поле.

П. Хіггс дійшов до свого розв'язку, шукаючи спосіб обійти теорему Голдстоуна. У своїй першій роботі [17] він звернув увагу, що в калібрувальних теоріях може не виконуватися одна з умов теореми Голдстоуна (лоренцева інваріантність), а саме: можливий вибір такої калібровки, яка порушує явно цю інваріантність. У другій роботі [16] він досліджував таку саму модель, що й Ф. Енглер і Р. Браут, яку згодом назвали моделлю Хіггса. П. Хіггс отримав той самий результат, що векторні калібрувальні бозони в цій моделі стають масивними внаслідок поглинання голдстоунівських бозонів. Спочатку він надіслав статтю до журналу *Physical Letters*, але рецензенти відхилили її на підставі того, що вона не має стосунку до фізики час-

тинок. Як згадує сам П. Хіггс [18], він був цим шокований і не розумів, чому стаття, де лише вказано на можливість обійти теорему Голдстоуна [17], приймається до друку, а стаття, в якій явно наведено спосіб, як це зробити, відхиляється. П. Хіггс додав невеликий параграф, описавши деякі характерні особливості СПС у калібрувальних теоріях, і надіслав рукопис до іншого журналу [16]. Конкретно він зауважив, що після того, як голдстоунівська мода перетворюється на поздовжню компоненту векторного поля, роблячи його масивним, залишається радіальна мода збудження скалярного поля (рис. 1), яка у квантовому випадку стає масивною скалярною частинкою. Саме ці частинки з легкої руки американського фізика Бенджаміна Лі почали називати хіггсівськими бозонами. Насправді, як уже зазначалося, такі частинки наявні також у теоріях СПС, де калібрувальна взаємодія відсутня. Їх експериментальне спостереження підтверджує теорію електрослабких взаємодій, де в основу покладено механізм спонтанного порушення калібрувальних симетрій.

У 1967 р. Стівен Вайнберг запропонував теорію електрослабких взаємодій [19], яка ґрунтується на калібрувальній групі симетрій $SU(2)_L \times U(1)$ і використовує механізм Браута—Енглера—Хіггса—Кіббла для генерації мас W^+ , W^- і Z^0 -бозонів, що відповідають за слабку взаємодію, залишаючи фотон безмасовим. Структура цієї теорії є такою, що ферміони різної кіральності (лівої і правої) належать до різних представлень групи $SU(2)_L$ — дублети з лівою кіральністю (звідси індекс L у $SU(2)_L$) і синглети з правою кіральністю, внаслідок чого неможливо написати масові доданки для ферміонів безпосередньо в лагранжіані. С. Вайнберг показав, що внаслідок взаємодії ферміонів з полем Хіггса той самий механізм спонтанного порушення симетрії генерує маси ферміонів. Пізніше Абдус Салам представив цю модель у матеріалах Нобелівського симпозіуму.

Незважаючи на низку привабливих рис теорії С. Вайнберга, А. Салама і Ш. Глешоу (останній встановив симетрію $SU(2)_L \times U(1)$ електрослабких взаємодій на початку 60-х років),



Ділянка прискорювача ВАК у підземному тунелі

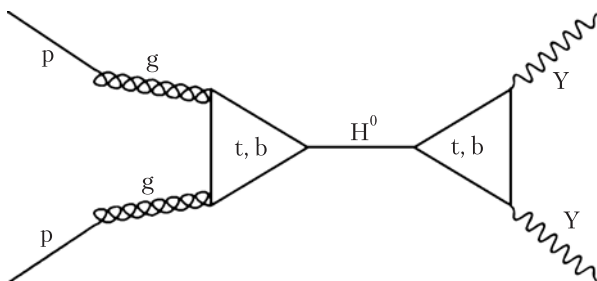


Рис. 3. Розпад бозона Хіггса на два фотони. При зіткненні протонів їх складові частини, кварки *up* і *down*, породжують глюони, що у свою чергу через взаємодію з важкими кварками (*top* або *beauty*) породжують бозон Хіггса, який потім розпадається на два фотони

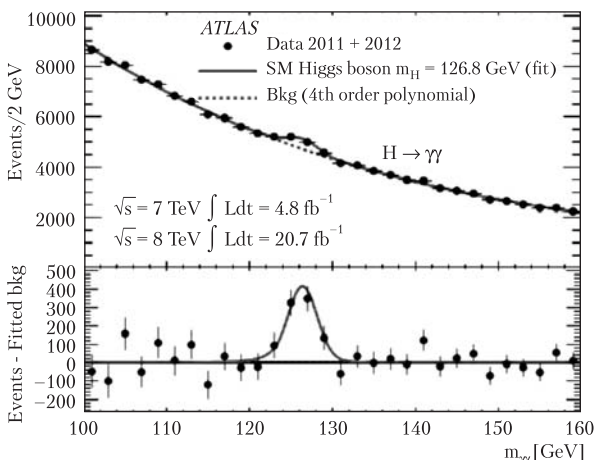


Рис. 4. Дані колаборації ATLAS зі знаходження бозона Хіггса в розпаді на два фотони. Верхня крива — з урахуванням фону, нижня — після виділення фону. Чітко можна бачити пік в околі маси 125,6 GeV

вона не привернула до себе особливої уваги фізиків, оскільки тоді була певна недовіра до квантової теорії поля, і загалом теорії з масивними векторними полями вважали неперенормованими. Ситуація змінилася в 1971 р., коли Мартін Вельтман (Martinus J.G. Veltman) і Герард 'т Хоофт (Gerard 't Hooft) довели перенормованість неабелевих теорій з СПС. Стало зрозуміло, що об'єднану теорію слабких і електромагнітних взаємодій фактично створено. Якщо на роботу С. Вайнберга до 1971 р. було всього два посилання, то після цього кількість цитувань пішла вгору (нині робота має вже понад 8000 посилань).

Відкриття бозона Хіггса

Після створення на початку 70-х років квантової хромодинаміки у фізиці частинок виникла сучасна так звана Стандартна модель, яка ґрунтується на локальній калібрувальній симетрії $SU(3) \times SU(2)_L \times U(1)$, спонтанно порушеній до $SU(3) \times U(1)$, де калібрувальна симетрія з групою $SU(3)$ описує взаємодію кварків і глюонів. Для підтвердження механізму СПС залишалося знайти передбачуваний теорією бозон Хіггса. Полювання на нього розпочалося в середині 80-х років і виявилось зовсім не простою справою, яка потребувала створення нового прискорювача — ВАК. Проблема була в тому, що модель не передбачувала масу хіггсівського бозона. Крім того, взаємодія бозона Хіггса з іншими частинками (W^+ , W^- , Z^0 і ферміонами) є пропорційною масам останніх, унаслідок чого ймовірність його утворення і розпаду в процесах за участю легких частинок надзвичайно мала. З іншого боку, незважаючи на те, що переріз процесів за участю важких частинок значно збільшується, експериментальне спостереження потребує відповідного зростання енергії частинок, які зіштовхуються.

Великий адронний колайдер у ЦЕРН поблизу Женеви є найбільшим у світі прискорювачем заряджених частинок на зустрічних пучках, де відбувається зіткнення протонів і важких іонів. Довжина кола його основного підземного тунелю дорівнює 26,7 км (рані-

ше в цьому тунелі розташовувався Великий електрон-позитронний колайдер), у ньому розміщено 1232 надпровідні магніти, охолоджені до температури -271°C (дещо нижчої від температури переходу гелію у надплинний стан). Експерименти з пошуку бозона Хіггса здійснювали за енергії в системі центра мас протонів, які зіштовхуються, $\approx 7\text{ TeV}$ (тобто $7 \cdot 10^{12}\text{ eV}$). У 2015 р. цю енергію планується довести до 14 TeV. На БАК працюють 4 основні детектори: ATLAS, CMS, ALICE, LHCb. Перші два спроектовано для пошуку бозона Хіггса і частинок темної матерії, ALICE — для пошуку кварк-глюонної плазми в зіткненнях важких іонів, а останній — для дослідження фізики b-кварків при високих енергіях. У кожній із колаборацій ATLAS і CMS беруть участь близько 3000 дослідників. 30 березня 2010 р. було досягнуто енергії пучка протонів у 3,5 TeV (з енергією зіткнення протонів у системі центра мас 7 TeV) і розпочато роботу БАК з пошуку бозона Хіггса.

Щоб мати можливість надійно виокремити події за участю хіггсівського бозона з величезної кількості інших непружних зіткнень, необхідно було зосередитися на розпадах бозона Хіггса (H^0) з добре визначеними характеристиками. Вибрано було розпад на два гамма-кванти, $H^0 \rightarrow \gamma + \gamma$, і 4-лептонний розпад, $H^0 \rightarrow Z + Z \rightarrow L^+ + L^- + L'^+ + L'^-$, де $L (L')$ — електрон або мюон. Ці процеси описуються діаграмами Фейнмана, зокрема, на рис. 3 зображено розпад бозона H^0 на два гамма-кванти. Розпад на два гамма-кванти і 4-лептонний розпад становлять 0,2 % і 0,013 % відповідно від усіх процесів, що відбуваються.

4 липня 2012 р. на конференції в Мельбурні колаборації ATLAS і CMS у присутності майбутніх нобелівських лауреатів Ф. Енглера і П. Хіггса повідомили про спостереження частинки, схожої на бозон Хіггса, з масою близько 125–126 GeV. На рис. 4 наведено результати ATLAS, де після виділення фону можна чітко бачити пік, що відповідає масі бозона. Певна обережність під час анонсування результатів («частинка, схожа на бозон Хіггса») була зумовлена тим, що на той момент ще не встано-

вили спін частинки та її парність. На початку 2013 р. було повідомлено, що спін знайденої частинки дорівнює нулю, а парність додатна, після чого не залишалось жодних сумнівів, що це і є шуканий бозон Хіггса. Обидві колаборації дають з урахуванням статистичних і систематичних помилок близькі значення для маси: $m_H = 125,3 \pm 0,6\text{ GeV}$. Серед усіх елементарних частинок бозон Хіггса посідає унікальне місце: лише він має квантові числа, які збігаються з квантовими числами вакууму, і є єдиною елементарною скалярною частинкою в Стандартній моделі.

Дослідження в Україні

В Україні теоретичні дослідження механізму Хіггса і, більш загально, механізму СПС, а також генерації мас елементарних частинок здійснювали переважно в Харківському фізико-технічному інституті НАН України (ХФТІ) та київському Інституті теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України (ІТФ). У Харкові Дмитро Волков побудував загальну теорію взаємодії голдстоунівських частинок у польових системах із СПС. Разом із Володимиром Акуловим він уперше показав, що голдстоунівські частинки можуть бути не тільки бозонами, а й ферміонами, що привело до відкриття суперсиметрії незалежно від робіт Юрія Гольфанда і Євгена Ліхтмана. Д. Волков відкрив також суперхіггсівський механізм у теорії суперсиметрії, коли калібрувальне поле зі спіном 3/2 (гравітино) поглинає голдстоунівський ферміон зі спіном 1/2 і стає масивним. Разом із В'ячеславом Сорокою в 1973 р. він став першовідкривачем теорії супергравітації, в якій суперхіггсівський механізм відіграє значну роль у генерації мас частинок. Важливі дослідження з фазових переходів у теоріях зі спонтанним порушенням калібрувальних і кіральних груп виконали тодішні співробітники Харківського університету Євген Чудновський та Ілля Криве. Відзначимо також, що І. Криве і Андрій Лінде з Фізичного інституту ім. П.М. Лебедева отримали одне з перших обмежень знизу на масу хіггсівського бозона.

У Києві в ІТФ група Петра Фоміна (Володимир Міранський, Юрій Ситенко та один з авторів цієї статті) в 70–80-ті роки виконували дослідження динамічного механізму Хіггса і генерації мас частинок за аналогією з теорією надпровідності. Вони розвинули мікроскопічну теорію динамічного порушення кіральної симетрії в калібрувальних теоріях (зокрема, у квантовій хромодинаміці), що сформувало новий погляд на походження мас адронів. Було показано, що за динамічним механізмом Хіггса можуть генеруватися маси глюонів. Це започаткувало новий напрям досліджень, який активно розвивається останнім часом. У теорії електрослабких взаємодій Володимир Міранський разом із Коїчі Ямавакі (Koichi Yamawaki) і незалежно від Й. Намбу запропонували модель, у якій поле Хіггса є зв'язаним станом найважливішого з відомих кварків — топ-кварка та його антикварка. Поки що невідомо, чи є поле Хіггса фундаментальним, чи складеним, і тому ця модель привертає значну увагу. Отже, українські вчені зробили помітний внесок у теоретичні дослідження, пов'язані з бозоном Хіггса.

Вагомими є також роботи українських дослідників і в експериментах з пошуку бозона Хіггса в ЦЕРН. Співробітники ХФТІ П. Сорокін і Л. Левчук беруть участь в експериментальній колаборації CMS з оброблення даних з використанням сучасних комп'ютерних технологій. Під керівництвом академіків НАН України Івана Карнаухова і Бориса Гриньова у харківському Інституті сцинтиляційних матеріалів НАН України виготовлено монокристалічні пластини для детекторів ЦЕРН. Група провідних науковців з ІТФ під керівництвом члена-кореспондента НАН України Геннадія Зінов'єва (офіційного представника Украї-

ни в ЦЕРН) бере участь у роботі колаборації ALICE з пошуку кварк-глюонної плазми. У 2013 р. сталася важлива подія для вітчизняних учених — Україна здобула статус асоційованого члена ЦЕРН. Можна сподіватися, що тепер співробітництво з ЦЕРН вийде на якісно новий рівень і дозволить українським науковцям долучитися до розроблення нових наукових програм та виконання експериментів на ВАК.

Подальші перспективи досліджень

Підсумовуючи, зауважимо, що відкриття хіггсівського бозона є величезним успіхом Стандартної моделі, проте залишаються нез'ясованими ще багато питань. Так, поки що експериментально не встановлено сили взаємодії бозона з ферміонами і векторними бозонами, а також константи самовзаємодії хіггсівських бозонів. Невідомо, існує один бозон Хіггса чи кілька. Наприклад, у мінімальній версії розширеної суперсиметричної Стандартної моделі є 5 хіггсівських бозонів — 3 нейтральні та 2 заряджені. У деяких моделях фундаментальні скалярні поля відсутні, а СПС електрослабких взаємодій відбувається завдяки складеним скалярним полям, які є зв'язаними станами ферміонів. У цьому випадку мають існувати збуджені зв'язані стани, спостереження яких було б свідченням на користь таких моделей. Є ще багато інших проблем, добре відомих фахівцям.

Не виключено, що наступний 2015 р., коли ВАК вийде на повну заплановану потужність, відкриє еру нових досягнень у фізиці елементарних частинок, а отже, сприятиме поглибленню наших знань про будову матерії.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Yang C., Mills R. Conservation of isotopic spin and isotopic gauge invariance // *Phys. Rev.* — 1954. — V. 96. — P. 191.
2. Utiyama R. Invariant theoretical interpretation of interaction // *Phys. Rev.* — 1956. — V. 101. — P. 1597.
3. O'Raifeartaigh L. *The Dawnning of Gauge Theory.* — Princeton: Princeton Univ., 1997.
4. Ландау Л.Д. К теории фазовых переходов. I, II // *ЖЭТФ.* — 1937. — Т. 7, № 19. — С. 627.
5. Гинзбург В.Л., Ландау Л.Д. К теории сверхпроводимости // *ЖЭТФ.* — 1950. — Т. 20. — С. 1064.
6. Sooryakumar R., Klein M.V. Raman scattering by superconducting-gap excitations and their coupling to charge-density waves // *Phys. Rev. Lett.* — 1980. — V. 45. — P. 660.

7. *Littlewood P.B., Varma C.M.* Gauge-invariant theory of the dynamical interaction of charge density waves and superconductivity // *Phys. Rev. Lett.* — 1981. — V. 47. — P. 811.
8. *Nambu Y., Jona-Lasinio G.* Dynamical model of elementary particles based on an analogy with superconductivity. I. // *Phys. Rev.* — 1961. — V. 122. — P. 345.
9. *Goldstone J.* Field theories with superconductor solutions // *Nuovo Cimento.* — 1961. — V. 19. — P. 154.
10. *Goldstone J., Salam A., Weinberg S.* Broken symmetries // *Phys. Rev.* — 1962. — V. 127. — P. 965.
11. *Volkov D.V., Akulov V.P.* Is the neutrino a Goldstone particle? // *Phys. Lett.* — 1973. — V. 46B. — P. 109.
12. *Schwinger J.* Gauge invariance and mass // *Phys. Rev.* — 1962. — V. 125. — P. 397.
13. *Anderson P.* Plasmons, gauge invariance, and mass // *Phys. Rev.* — 1963. — V. 130. — P. 439.
14. *Мигдал А.А., Поляков А.М.* Спонтанное нарушение симметрии сильных взаимодействий и отсутствие безмассовых частиц // *ЖЭТФ.* — 1966. — Т. 51. — P. 135.
15. *Englert F., Brout R.* Broken symmetry and the mass of gauge vector bosons // *Phys. Rev. Lett.* — 1964. — V. 13. — P. 321 (received 16 June, 1964; published 31 August, 1964).
16. *Higgs P.W.* Broken symmetries and the masses of gauge particles // *Phys. Rev. Lett.* — 1964. — V. 13. — P. 508 (received 31 August, 1964; published 19 October, 1964).
17. *Higgs P.W.* Broken symmetries, massless particles and gauge fields // *Phys. Lett.* — 1964. — V. 12. — P. 132.
18. *Higgs P.W.* Prehistory of the Higgs boson // *C.R. Physique.* — 2007. — V. 8. — P. 970.
19. *Weinberg S.* A model of leptons // *Phys. Rev. Lett.* — 1967. — V. 19. — P. 1264.

Стаття надійшла 05.02.2014

Э.В. Горбар¹, В.П. Гусьнин²

¹ Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко
ул. Владимирская, 60, Киев, 01033, Украина

² Институт теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова НАН Украины
ул. Метрологическая, 14б, Киев, 03680, Украина

БОЗОН ХИГГСА: ПРЕДСКАЗАНИЕ, ПОИСК, ОТКРЫТИЕ

Нобелевская премия в области физики за 2013 год присуждена двум известным европейским физикам-теоретикам — бельгийцу Франсуа Энглеру и британцу Питеру Хиггсу «за теоретическое обнаружение механизма, способствующего нашему пониманию происхождения массы субатомных частиц и подтвержденного недавно обнаружением предсказанной элементарной частицы в экспериментах ATLAS и CMS на Большом адронном коллайдере в ЦЕРН».

Ключевые слова: Нобелевская премия, бозон Хиггса, Большой адронный коллайдер.

E.V. Gorbar¹, V.P. Gusynin²

¹ Taras Shevchenko National University of Kyiv
60 Volodymyrska St., Kyiv, 01033, Ukraine

² Bogolyubov Institute for Theoretical Physics of NAS of Ukraine
14-b Metrolohichna St., Kyiv, 03680, Ukraine

HIGGS BOSON: ANTICIPATION, SEARCH, AND DISCOVERY

The 2013 Nobel Prize in Physics was awarded jointly to well-known European physicists — Belgian François Englert and British Peter W. Higgs “for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN’s Large Hadron Collider”.

Keywords: Nobel Prize, Higgs boson, Large Hadron Collider.