



Historia symetrii, jej łamania i poszukiwania źródeł masy cząstek elementarnych

*Leszek Motyka
Instytut Fizyki UJ*

8 października 2013 roku Komitet Noblowski ogłosił przyznanie Nagrody Nobla z fizyki Françoisowi Englertowi i Peterowi Higgsowi za teoretyczne odkrycie mechanizmu pozwalającego zrozumieć źródła masy cząstek elementarnych, potwierdzonego eksperymentalnie odkryciem bozonu Higgsa w 2012 roku przez eksperymenty ATLAS i CMS w Wielkim Zderzaczu Hadronów w CERN.

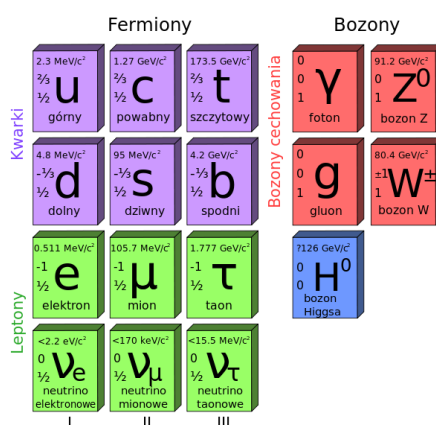
Tegoroczna Nagroda Nobla jest zwieńczeniem ponad półwiecza intensywnych badań teoretycznych i eksperymentalnych nad źródłami masy w świecie cząstek elementarnych. Masa, miara bezwładności, jest jedną z najbardziej podstawowych i uniwersalnych własności obiektów fizycznych. Pytanie zatem o jej źródła dotyka podstaw całej fizyki, jest jednym z fundamentalnych pytań o naturę świata. Eksperymentalne odkrycie bozonu Higgsa pokazało, że fizyka cząstek elementarnych zajmująca się mikroświatem, którego relatywna prostota pozwala na klarowne postawienie i zbadanie problemów podstawowych, potrafi udzielić częściowej odpowiedzi na to ważne pytanie. Historia tego odkrycia jest fascynującą opowieścią o potędze metody dedukcyjnej i niezwyklej skuteczności konstrukcji matematycznych w odkrywaniu natury świata fizycznego. Jest także historią o twórczym przepływie idei między różnymi dziedzinami fizyki, przypominającym dobitnie o jedności i uniwersalności fizyki. Jest wreszcie opowieścią o ogromnym znaczeniu wytrwałości i determinacji w badaniach, koniecznymi, by udzielić niezbitnej, eksperymentalnej odpowiedzi na pytania podstawowe.

Utarło się już by nazywać „mechanizmem Higgsa” teoretyczną konstrukcję opisującą sposób uzyskiwania masy przez cząstki elementarne. Stało się tak pomimo tego, że mechanizm ten miał co najmniej trzech odkrywców – do tych samych wniosków, leżących u podstaw sformułowania mechanizmu Higgsa, niezależnie od siebie doszli: Peter Higgs w 1964 roku i współpracujący z sobą François Englert i Robert Brout. Robert Brout, którego udział w odkryciu jest bez wątpliwości nie mniejszy od tego, czego dokonali François Englert i Peter Higgs, zmarł przed czterema laty i nie mógł znaleźć się w gronie tegorocznych laureatów.

Czym jest Model Standardowy?

Mechanizm Higgsa jest kamieniem węgielnym współczesnej teorii cząstek elementarnych. U podstaw jego sformułowania są wymagania matematycznej spójności teoretycznego opisu fizyki mikroświata i zdolności tej teorii do sfor-

mułowania jednoznacznych przewidywań w oparciu o skończoną liczbę pomiarów eksperymentalnych. Okazuje się, że te pozornie słabe i oczywiste wymagania w odniesieniu do kwantowego mikroświata nakładają bardzo silne ograniczenia na jego matematyczny opis. Umożliwiło to teoretyczne przewidzenie istnienia niezwyklej cząstki elementarnej, bozonu Higgsa, na niemal 50 lat przed jego eksperymentalnym odkryciem.



Cząstki elementarne, z których zbudowana jest materia według Modelu Standardowego

Współczesna teoria oddziaływań elementarnych w mikroświecie: elektromagnetycznych, słabych i silnych nosi nazwę Modelu Standardowego. Ta teoria fizyczna jest niezwykle, pozwala na spójne i jednoznaczne wyjaśnienie zdecydowanej większości obserwowanych procesów i zjawisk fizycznych, poza zjawiskami związanymi z grawitacją i zachodzącymi na kosmologicznie wielkich skalach odległości. Model Standardowy zawiera w sobie teorie wszelkich, prócz grawitacji, oddziaływań w świecie nam znanym, np. fizykę atomową, jądrową, ciała stałego, ale pozwala także na wyjaśnienie tak egzotycznych dla nas zjawisk, jak procesów na skalach odległości tysiące razy mniejszych od rozmiaru protonu, procesów we wnętrzach gwiazd czy ewolucji materii we Wszechświecie na ułamki sekund po jego powstaniu. Jednocześnie ta teoria fizyczna przeszła z sukcesem tysiące niezależnych, niezwykle dokładnych testów eksperymentalnych i należy do najdokładniejszych i najlepiej sprawdzonych teorii fizycznych. Tę imponującą dokładność i uniwersalność Model Standardowy uzyskuje pomimo, że ma jedynie 26 niezależnych parametrów (włącznie z parametrami opisującymi neutrina).

Co to jest mechanizm Higgsa?

Mechanizm Higgsa pełni szczególną rolę w Modelu Standardowym. To dzięki niemu uzyskują masy inne cząstki elementarne: leptony, kwarki, neutrina, pośredniczące bozony elektrosłabe W i Z (bezmasowe pozostają bozony pośredni-

czące w oddziaływaniach silnych – gluony oraz elektromagnetycznych – foton). Okazuje się, że matematyczne ograniczenia na opis oddziaływań podstawowych silnie preferują (w sensie, który wyjaśnię dalej) cząstki pozbawione masy. Mechanizm Higgsa pozwala zrozumieć, dlaczego, pomimo wszystko, obserwujemy cząstki masywne. W ujęciu mikroskopowym w mechanizmie Higgsa w całkowicie pustej przestrzeni (czyli w doskonałej próżni) mamy niezerową wartość oczekiwaną pola Higgsa – mówimy o kondensacie pola Higgsa (pole Higgsa jest obecne nawet w stanie fizycznym, który interpretujemy jako całkowicie pustą przestrzeń). Nie dostrzegamy bezpośrednio obecności tego pola, ponieważ jest ono powszechne, wszędzie ma taką samą wartość, jest ono uniwersalnym „tłem”, niezależnym od innych procesów fizycznych, w dostępnym nam zakresie energii. Ponieważ przestrzeń jest zawsze wypełniona jednorodnym kondensatem pola Higgsa, to sytuacja taka stanowi dla nas „sytuację odniesienia”. To, co my postrzegamy jako całkowicie pustą przestrzeń, nie jest jednak pustą przestrzenią dla cząstek elementarnych. Pierwotnie pozbawione masy cząstki elementarne, np. bozony elektroslabe W i Z , poruszając się w kondensacie Higgsa, wiążąc się z masywnym polem Higgsa, stają się masywne. Tak właśnie działa mechanizm Higgsa, który pozwala – jednocześnie – na istnienie masywnych nośników oddziaływań elementarnych i zachowanie matematycznej spójności teorii opisu.

Można zapytać o fizyczną realność kondensatu Higgsa. Skoro jest powszechny, uniwersalny i jednorodny, to jak odnieść sytuację z istniejącym kondensatem do sytuacji przeciwnej (nieistniejącego kondensatu), by wykazać różnicę i stwierdzić istnienie kondensatu bezpośrednio? Na szczęście, uniwersalność i jednorodność kondensatu jest słuszna jedynie w typowych warunkach – o ile nie zdołamy wywołać wzbudzeń (fal) w tym kondensacie lub „podgrzać go” do tak wielkich temperatur, że ulegnie swoistemu stopieniu. Ekstremalna sytuacja, w której kondensat Higgsa był zniszczony przez wysoką temperaturę, prawdopodobnie miała miejsce w bardzo wczesnym Wszechświecie. We współczesnych eksperymentach fizyki cząstek elementarnych, wymuszamy drgania kondensatu Higgsa, czyli bezpośrednią produkcję kwantów pola – bozonu Higgsa. Ten ostatni sposób odkrycia i zbadania własności kondensatu Higgsa był i pozostaje głównym celem programu fizyki Wielkiego Zderzacza Hadronów w CERN. Latem 2012 roku obydwie główne eksperymenty – ATLAS i CMS – ogłosiły bezpośrednie odkrycie bozonu Higgsa, ciężkiej cząstki elementarnej o masie równej około 130 masom protonu o własnościach zgodnych z przewidywaniami mechanizmu Higgsa dla Modelu Standardowego.

Dlaczego potrzeba mechanizmu Higgsa?

Wy tłumaczenie pochodzenia masy cząstek elementarnych bez mechanizmu Higgsa, w matematycznie spójny sposób, jest bardzo trudne. Te trudności pojawiają się w ramach zaawansowanego języka opisu Modelu Standardowego,

jakim jest kwantowa teoria pola. W ogromnym uproszczeniu, jest to kwantowa teoria obiektów o nieskończonej liczbie stopni swobody, których kwanty są punktowymi cząstkami. Na taką teorię nałożone są pewne oczywiste więzy – takie jak konieczność zachowania prawdopodobieństwa w mechanice kwantowej (nic nie może zniknąć bez śladu lub pojawić się z niczego), czy podstawowe prawa zachowania i zasada przyczynowości. Dodatkowo, obowiązujący obecnie paradygmat fizyki cząstek elementarnych wymaga, by „dobra teoria podstawowa” miała taką samą postać i te same parametry, po uwzględnieniu efektów kwantowych na dowolnie dokładnym poziomie. Tę własność kwantowej teorii pola nazywamy renormalizowalnością. Jest to o tyle ciekawa własność, że – przynajmniej o ile dziś wiemy – nie jest ona podstawowym prawem przyrody wynikającym z empirii czy spójności, a jedynie jest warunkiem pragmatycznym – efektywności i autonomii opisu matematycznego. Brak renormalizowalności teorii powodowałby ogromne osłabienie jej zdolności przewidywania, gdyż rozszerzanie opisu na kolejne zjawiska, procesy i zwiększanie dokładności wymagałoby wprowadzania nowych, niezależnych parametrów, których liczba musiałaby rosnać nieograniczenie wraz z rosnącym zbiorem opisywanych zjawisk i wymaganą dokładnością. Być może własność renormalizowalności ma jakąś głęboką, jeszcze niezrozumianą przyczynę, gdyż jej rola, jako ważnej zasady wiodącej do sformułowania Modelu Standardowego, jest ogromna.

W Modelu Standardowym nośnikami oddziaływań podstawowych są bozony pośredniczące: foton, gluony, bozony elektroślabe W i Z. Każdy z tych bozonów ma wewnętrzny moment pędu (spin) równy jeden w naturalnych jednostkach. Takie bozony nazywamy bozonami wektorowymi. Spójne, renormalizowalne kwantowe teorie oddziaływań takich bozonów wymagają pewnej specjalnej symetrii pól kwantowych, zwanej symetrią cechowania. Najprostszym, dobrze znanym fizykom przykładem takiej teorii, jest elektrodynamika kwantowa. W takich teoriach, tak w jak w kwantowej elektrodynamice, symetria cechowania wymaga tego, by w pustej przestrzeni bozony wektorowe miały, tak jak foton, zerową masę spoczynkową. Dla oddziaływań słabych ta własność teorii cechowania w pustej przestrzeni jest jednak sprzeczna z eksperymentalnymi obserwacjami: w oddziaływaniach słabych pośredniczą masywne wektorowe bozony W i Z o masach niemal sto razy większych od masy protonu.

W poszukiwaniu ukrytych symetrii i masywnych bozonów

W latach 60. XX wieku, gdy powstawały nagrodzone prace teoretyczne Higgsa, Brouta i Englerta, znane były liczne przejawy oddziaływań silnych i słabych, ale ich podstawowe teorie nie były jeszcze sformułowane. Wiadomo było jednak, że nie obserwuje się bezmasowych cząstek pośredniczących w oddziaływaniach słabych. Zatem było jasne, że te cząstki, o własnościach bozonów wektorowych, muszą być zbyt masywne, by je wytworzyć przy energiach dostęp-

nych w ówczesnych eksperymentach. Nie było jednak wiadomo, jak sformułować spójną i renormalizowalną kwantową teorię pola masywnych bozonów wektorowych. Poszukiwania wyjścia z tej sprzeczności między eksperymentem a ograniczeniami matematycznymi kwantowej teorii pola były w owym czasie silnie inspirowane odkryciami teoretycznymi w fizyce ciała stałego, zwłaszcza teorią nadprzewodnictwa Landaua i Ginzburga (1950) oraz Bardeena, Coopera i Schrieffera (1957). W tych teoriach kluczową rolę odgrywa kondensat, występujący w nadprzewodniku, który tworzy środowisko odmienne od pustej przestrzeni, wyróżniające pewne stopnie swobody pól cząstek. Środowisko, tworzone przez taki kondensat, jest mniej symetryczne, niż faktycznie pusta przestrzeń. Takie ograniczenie symetrii środowiska przez kondensat nazywa się złamaniem symetrii teorii. Okazuje się, że w środowisku, jakie tworzy nadprzewodnik, pojawiają się masywne wzbudzenia (masywne quasi-cząstki), zamiast bezmasowych. Nasuwało to przypuszczenia, że cząstki mogą uzyskiwać masę wskutek złamania symetrii stanu podstawowego przez hipotetyczny kondensat wypełniający pustą przestrzeń.

W roku 1960 japoński fizyk Yoichiro Nambu badał możliwość występowania takich kondensatów w ramach teorii cząstek elementarnych. Zaproponował scenariusz, w którym równania ruchu relatywistycznej teorii pola są symetryczne (niezmiennicze) ze względu na pewne przekształcenia pól, ale poniżej pewnej temperatury, stan podstawowy tej teorii (stan próżni) już tej symetrii nie ma – symetria teorii jest „ukryta”. Takie zjawisko nazywa się spontanicznym łamaniem symetrii, a za jego teoretyczne odkrycie Nambu otrzymał Nagrodę Nobla z fizyki w 2008 roku. Nambu badał pewne symetrie oddziaływań silnych, niezależne od punktu przestrzeni – tak zwane symetrie globalne. Jak się wkrótce okazało, mechanizm spontanicznego łamania symetrii globalnej nie pozwala uniknąć generacji nowych, bezmasowych cząstek, towarzyszących ukrytym symetriom. Wkrótce Jeffrey Goldstone zaproponował (1960), a następnie Goldstone wspólnie z Abdusem Salamem i Stevenem Weinbergiem (1962) wykazali twierdzenie Goldstone’a, według którego złamanie symetrii globalnej powoduje pojawienie się bezmasowego bozonu. Wydawało się, że to twierdzenie zamyka drogę do konstrukcji teorii, w której spontaniczne złamanie symetrii pozwoli nadać masy elementarnym bozonom pośredniczącym.

Jak odkrywano mechanizm Higgsa?

Twierdzenie Goldstone’a jest matematycznie ściśle, ale opiera się na pewnych założeniach, w szczególności na tym, że łamane symetrie mają charakter globalny. Autorzy prac, które zostały nagrodzone tegoroczną Nagrodą Nobla, jako pierwsi zrozumieli ograniczenia twierdzenia Goldstone’a i pokazali, kiedy i jak można go obejść, tak by nadać masę cząstkom przez spontaniczne złamanie symetrii w ramach relatywistycznej kwantowej teorii pola. Ponownie inspiracją była fizyka ciała stałego i teoria nadprzewodnictwa. W nadprzewodniku mamy

do czynienia z kondensatem, który łamie pewne symetrie teorii. Pomimo tego, zamiast pojawienia się bezmasowych bozonów Goldstone'a, w nadprzewodniku pojawiają się masywne wzbudzenie gęstości ładunku – tak zwane plazmony. W 1963 roku Philip Anderson (późniejszy laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1977 za prace z teorii ciała stałego) opisał w krótkim, jakościowym komentarzu swoje przypuszczenia na temat możliwego scenariusza pogodzenia twierdzenia Goldstone'a z fizyką nadprzewodnictwa. Ten komentarz stał się jedną z ważnych inspiracji dla Petera Higgsa, Roberta Brouta i François Englerta.

Latem roku 1964 Higgs oraz niezależnie Brout i Englert, uogólnili fenomenologiczny model nadprzewodnictwa Landaua-Ginzburga do relatywistycznej teorii pola, kwantowej elektrodynamiki z kondensatem, łamiącym symetrię stanu próżni. Wykazali, że w tym modelu nie tylko pojawia się masywny bozon, związany ze wzbudzeniem kondensatu (odpowiednik bozonu Higgsa z Modelem Standardowego!), ale również foton w ramach tego modelu staje się masywny, dokładnie tak, jak bozony pośredniczące w oddziaływaniach słabych w Modelu Standardowym! Tak właśnie narodził się mechanizm Higgsa. W swoich najważniejszych pracach z 1964 roku, tegoroczni laureaci Nagrody Nobla wykazali, że twierdzenie Goldstone'a nie ma zastosowania do modelu przez nich rozważanego. Głównym powodem jest fakt, że przekształcenia symetrii w teoriach cechowania są lokalne – to znaczy, zależą od punktu w przestrzeni, podczas gdy twierdzenie Goldstone'a stosuje się jedynie do przekształceń globalnych, niezależnych od współrzędnych.

Scenariusz nadawania mas wektorowym bozonom cechowania przez oddziaływanie z kondensatem pola Higgsa okazał się właściwą teorią dla mikroświata. W 1967 roku Salam i Weinberg zaproponowali opis oddziaływań słabych za pomocą teorii cechowania, skonstruowanej wcześniej przez Sheldona Glashowa, z uwzględnieniem mechanizmu Higgsa, uogólniając model Higgsa, Brouta i Englerta elektrodynamiki kwantowej na tle kondensatu. Na początku lat 70. Gerard t'Hooft i Martin Veltman pokazali, że teoria Glashowa-Weinberga-Salama z mechanizmem Higgsa jest renormalizowalna. Wkrótce potem odkryto eksperymentalnie masywne bozony pośredniczące w oddziaływaniach słabych. 48 lat po pracach Brouta, Englerta i Higgsa, CERN ogłosił odkrycie bozonu Higgsa, jako ostatniej brakującej cząstki elementarnej Modelu Standardowego, który tym samym stał się teorią kompletną.

Koniec czy początek?

Czy ta kompletność i dokładność Modelu Standardowego oznacza koniec fizyki cząstek elementarnych jako pola wielkich odkryć? Czy też może przeciwnie, początek ery nowych wielkich pytań i nowych przełomowych obserwacji?

Jest wiele przesłanek, by oczekiwać właśnie tego drugiego, optymistycznego scenariusza. Model Standardowy, choć niezwykle efektywny w opisie mikroświata w laboratoriach, jest wciąż bezradny wobec kilku wielkich problemów

fizycznych i matematycznych. Prawdopodobnie najważniejszym, nierozwiązanym problemem teoretycznym współczesnej fizyki jest rozszerzenie teorii mikroświata do hiper-ekstremalnego reżimu, w którym nawet pole grawitacyjne (a więc sama czasoprzestrzeń!) podlegałoby efektom kwantowym. W takim reżimie, należałoby oczekiwać jakiejś formy unifikacji teorii grawitacji i Modelu Standardowego w całkowicie nową, głębszą teorię.

Sam Model Standardowy, ekstrapolowany do wielkich skal energii o dwanaście rzędów wielkości większych niż dostępne w Wielkim Zderzaczach Hadronów, wskazuje na możliwość unifikacji podstawowych oddziaływań silnych i elektroślabych w jedno super-oddziaływanie elementarne; wciąż nie wiadomo jednak, jak miałyby wyglądać ta Wielka Unifikacja. Dodatkowo Model Standardowy budzi wątpliwości o charakterze estetycznym. Chcielibyśmy, by prawdziwie podstawowa teoria fizyczna była maksymalnie prosta w sformułowaniu i „naturalna” – to znaczy, by jej najważniejsze przejawy były nieuchronną lub najbardziej prawdopodobną konsekwencją jej zasad. Model Standardowy niezbyt dobrze spełnia te estetyczne wymagania. Przede wszystkim Model Standardowy zaskakuje nas liczbą podstawowych stałych fizycznych – jest ich 26 – wydaje się, że to za dużo, jak na teorię podstawową. Co gorsza, zwłaszcza w sektorze mas cząstek elementarnych, skąd pochodzi aż 13 parametrów Modelu Standardowego, nie widać porządku: masy cząstek elementarnych są rozproszone w zakresie ponad 11 rzędów wielkości! Kolejny problem z Modelem Standardowym bierze się z relatywnie niskiej, w porównaniu do energetycznej skali unifikacji, masy bozonu Higgsa. Okazuje się, że jeśli popatrzeć na Model Standardowy z perspektywy ekstrapolacji od skali unifikacji oddziaływań elementarnych w dół, do energii nam dostępnych, to zmierzona wartość masy bozonu Higgsa jest nieprawdopodobnie („nienaturalnie”) mała. Wreszcie Model Standardowy ma problemy z wyjaśnieniem kosmologicznych obserwacji, wskazujących na ogromne rozpowszechnienie tak zwanej ciemnej materii we Wszechświecie. Wiele wskazuje na to, że ciemna materia jest zbudowana z nieznanymi cząstek elementarnych, cząstek spoza Modelu Standardowego.

Podsumowując rozważania na temat tegorocznej Nagrody Nobla z fizyki, można stwierdzić, że jesteśmy w zupełnie szczególnym momencie w fizyce zjawisk podstawowych. Po ponad stuleciu od pierwszej obserwacji rozpadów słabych i po niemal półwieczu od stworzenia matematycznych podstaw Modelu Standardowego, dysponujemy spójną, w pełni potwierdzoną i niezwykle dokładną teorią wszystkich podstawowych zjawisk zachodzących w naszych laboratoriach. Skończyła się era budowy i sprawdzania Modelu Standardowego, pozostały jednak ważne, otwarte problemy, które wskazują na to, że Model Standardowy nie jest teorią ostateczną. Być może koniec ery odkrywania Modelu Standardowego jest początkiem ery odkrywania Czegoś Nowego.