



Nobel 2013.

Cząstka Higgsa – ostatnia obserwowana cegielka teorii prawie wszystkiego

Cao Long Van, Wiesław Leoński
Zakład Optyki i Inżynierii Kwantowej,
Instytut Fizyki, Uniwersytet Zielonogórski

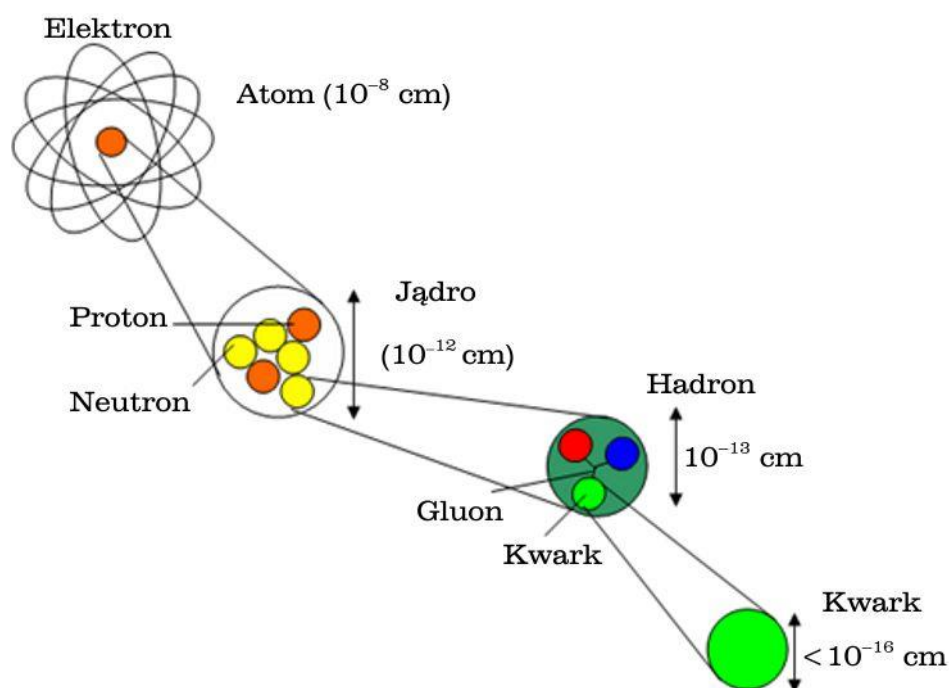
Każdego roku, 8 października, cały świat patrzy na Sztokholm, gdzie przyznawana jest kolejna Nagroda Nobla z dziedziny fizyki. Zeszłorocznymi laureatami tej prestiżowej nagrody zostali fizycy: François Englert z Belgii i pochodzący ze Szkocji Peter W. Higgs. Są oni autorami teorii tłumaczącej fakt, że cząstki elementarne będące podstawowymi cegiełkami, z których zbudowana jest nie tylko otaczająca nas materia, ale i my sami, obdarzone są masą. Teoria ta, zwana *Modelem Standardowym* pokazuje, w jaki sposób wszystkie cząstki elementarne będące budulcem naszego Wszechświata powstały z połączenia kilku cegiełek materii oraz jak oddziałują one pomiędzy sobą, doprowadzając Wszechświat od momentu tzw. *Wielkiego Wybuchu* do tego stanu, w jakim istnieje obecnie. Model Standardowy jest teorią unifikującą trzy podstawowe oddziaływania obecne w przyrodzie. Są to: oddziaływanie elektromagnetyczne, oddziaływanie silne – utrzymujące w spójności jądra atomowe i oddziaływanie słabe – odpowiedzialne za procesy rozpadu tych jąder. Tak więc jest to teoria łącząca ze sobą trzy z czterech znanych nam oddziaływań. Czwarte z nich, oddziaływanie grawitacyjne, nie jest opisywane przez ten model. Aż do roku 2012 cząstka będąca kluczowym elementem tej teorii, tzw. bozon Higgsa, nie została zaobserwowana w eksperymentach fizycznych. Polowanie na nią trwało przez prawie pięćdziesiąt lat i kosztowało wiele wysiłku ze strony fizyków oraz pochłonęło ogromne kwoty pieniędzy. W końcu, dzięki wynikom uzyskanym za pomocą tzw. Wielkiego Zderzacza Hadronów (ang. Large Hadron Collider – LHC) w laboratorium CERN pod Genewą, cząstkę tę udało się zaobserwować. Obserwacja ta stanowiła kluczowy moment, w którym Model Standardowy uzyskał swe potwierdzenie.

Aby zrozumieć istotę Modelu Standardowego oraz rolę, jaką pełni w nim bozon Higgsa, należy wrócić do idei wielkiego fizyka Alberta Einsteina. Jak napisał znakomity popularyzator nauki, Michio Kaku – „Nawet okrucieństwa informacji ze stołu Einsteina stwarzają nauce nowe możliwości”. Można powiedzieć, że utorowały one drogę dla innych uczonych, którzy otrzymali Nagrodę Nobla. Jeszcze nie tak dawno pojawiały się głosy, że prowadzone przez Einsteina w ciągu ostatnich trzydziestu lat życia poszukiwania „zunifikowanej teorii pola” były tylko stratą czasu. Pomimo tego, te pionierskie pomysły stały się inspiracją dla wielu zdolnych, często młodych naukowców, a poszukiwanie tzw. teorii wszystkiego zostało uznane za centralny problem fizyki. Zaczniemy od podstawowej koncepcji nowoczesnej fizyki – koncepcji dualizmu korpuskularno-falo-

wego, w ramach której światło może objawiać nam swoją podwójną naturę – falową, jak twierdził James Clerk Maxwell, bądź też jak sugerował to już Izaak Newton – cząsteczkową.

Cząstki i pola

Obserwując historię rozwoju fizyki zauważamy tendencję zarówno do zmniejszania liczby podstawowych cegiełek będących budulcem materii, jak i do unifikacji oddziaływań pomiędzy nimi. Idea budowy materii składającej się z kilku podstawowych składników jest znana od prawie dwóch i pół tysiąca lat, kiedy to starożytny grecki filozof Demokryt z Abdery twierdził, że wszystko składa się z atomów (grec. *átomos* – coś niepodzielnego). Pojęcie atomu jako najmniejszej i niepodzielnej cząstki materii przetrwało przez stulecia i dopiero w XX wieku ta niepodzielność została „naruszona”. Odkryto mianowicie, że każdy atom jest właściwie prawie pusty, gdyż składa się z bardzo małego jądra i jeszcze dużo mniejszych elektronów poruszających się w przestrzeni je otaczającej. Stwierdzono, że elektrony należą do klasy bardzo lekkich cząstek zwanych obecnie leptonami, a jądra atomowe składają się z protonów i neutronów. Obecnie twierdzimy, że protony i neutrony składają z najmniejszych cegiełek materii zwanych kwarkami (patrz rys. 1).



Rys. 1. Struktura podstawowych składników materii

Kwarki są to takie cząstki elementarne, które posiadają nie tylko własności i cechy podobne do tych, spotykanych u wcześniej znanych cząstek (takich jak np. masa w przypadku protonów czy neutronów), ale są opisane przez „kolory” czy też „zapachy”. Oczywiście, nie mają one nic wspólnego z kolorami i zapachami, jakie znamy z życia codziennego; po prostu fizycy często wymyślają takie nazwy dla nowych, czasami bardzo egzotycznych i specyficznych własności nowo odkrywanych obiektów fizycznych. Ostatecznie, w ramach Modelu Standardowego przyjęto, że elementarnymi cegiełkami materii są leptony (np. elektron) oraz kwarki.

Równocześnie wraz z badaniami podstawowych składników materii, interesowano się też problemami oddziaływań pomiędzy nimi. Pierwszym typem tego rodzaju oddziaływań jest oddziaływanie grawitacyjne pomiędzy cząstkami obdarzonymi masą. Było ono już znane i opisywane w ramach mechaniki Newtona opartej na pojęciu sił. Mechanika Newtona była fundamentalną teorią fizyki, uważaną za jej jedyną podstawę przez prawie dwa stulecia. Zmieniło się to dopiero w drugiej połowie XIX w., kiedy dla wyjaśnienia tajemniczych dla ówczesnych badaczy sił elektrycznych i magnetycznych, J.C. Maxwell wprowadził pojęcia pola jako niewidzialnego układu linii sił penetrujących całą pustą przestrzeń. Z jego teorii elektromagnetyzmu wynika, że w odróżnieniu od koncepcji sił newtonowskich, zaburzenia elektromagnetyczne nie przenoszą się natychmiast na dowolną odległość, lecz przemieszczają z pewną prędkością. W ramach swojej teorii, Maxwell obliczył wartość tej prędkości. Okazało się, że jest ona dokładnie równa wartości prędkości rozchodzenia się światła w próżni. Ogłaszając swą teorię Maxwell nie tylko wyjaśnił falową naturę światła, ale dokonał też pierwszej unifikacji dwóch oddziaływań – elektrycznego i magnetycznego. Tak więc w XIX w. fizyka opierała się na dwóch filarach – mechanice Newtona oraz na teorii elektromagnetyzmu Maxwella. Twierdzono wtedy, że dzięki nim można opisać wszystkie zjawiska fizyczne obecne w przyrodzie. Na przełomie wieków XIX i XX twierdzono nawet, że dalszy postęp fizyki będzie polegać tylko na poprawianiu wartości różnych mierzonych wielkości fizycznych na kolejnych miejscach po przecinku.

W „cudownym” roku 1905, Einstein opublikował kilka fundamentalnych prac, które zmieniły całkowicie obraz fizyki. Jedną z nich dotyczyła zjawiska fotoelektrycznego. W pracy tej pojawiła się hipoteza mówiąca, że światło składa się z cząstek – kwantów, którym później nadano nazwę fotonów. Na podstawie przedstawionych rozważań w 1909 roku Einstein na zjeździe fizyków w Salzburgu wygłosił referat zatytułowany *Rozwój naszych poglądów na naturę i strukturę promieniowania*. Historycznie była to pierwsza prezentacja koncepcji dualizmu w fizyce. Z tych idei Einsteina powstał później formalizm kwantowania klasycznego pola elektromagnetycznego, w wyniku którego pojawiło się pojęcie kwantów pola, zwanych fotonami. Z drugiej strony, inspirowany ideami związanymi z dualizmem natury światła francuski fizyk Louis de Bro-

glie w 1924 roku zaproponował teorię, w której dwoistą naturą obdarzone są inne, traktowane dotychczas tylko jako cząstki, elementy materii. Stwierdził on, że takie obiekty świata mikroskopowego jak elektrony czy też protony zachowują się podobnie do fotonów: w pewnych eksperymentach objawiają swoją falową naturę, a w innych sytuacjach zachowują się jak cząstki. Te idee stanowiły istotną część jednego z fundamentów rodzącej się fizyki współczesnej – teorii kwantowej.

We współczesnej teorii kwantów odpowiednikami klasycznych pól są cząstki – kwanty. Niewidzialnym dla naszych zmysłów polem, wypełniającym całą otaczającą nas przestrzeń, odpowiadają różne cząstki materii, będące nośnikami znanych nam oddziaływań. Przykładowo, cząstka Higgsa, o której była mowa na wstępie, jest kwantem tzw. pola Higgsa. Cztery znane nam podstawowe oddziaływania fizyczne posiadają swoje nośniki, będące kwantami odpowiednich pól. Na przykład fotony są kwantami pola elektromagnetycznego, natomiast bozony pośrednie W i Z – kwantami oddziaływań słabych, a gluony – oddziaływań silnych. Pojawia się tu koncepcja pól cechowania, których szczególnym przypadkiem są pola silne, słabe czy elektromagnetyczne. Tak naprawdę idzie tu o to, że pola te związane są z pewną podstawową symetrią Natury, symetrią względem tzw. cechowania. Aby omówić rolę różnego rodzaju symetrii w rozwoju fizyki, musimy znowu wrócić do idei zaproponowanych przez Einsteina.

Unifikacja przez symetrię

Jak wspomnieliśmy wcześniej, jednym z filarów dziewiętnastowiecznej fizyki była mechanika Newtona. W 1905 roku Albert Einstein opublikował kolejną pracę, w której przedstawił swoją nową teorię, teorię względności. Teoria ta spowodowała zawalenie się jednego z filarów ówczesnej fizyki – mechaniki Newtona i stała się kolejnym fundamentem fizyki współczesnej. Jest ona oparta na założeniu niezmienniczości postaci równań fizycznych względem tzw. grupy transformacji Lorentza, które łączą z sobą czas i przestrzeń. Przed odkryciem Einsteina, lokalizacja i czas dowolnego zdarzenia były traktowane zupełnie niezależnie. Dopiero Hermann Minkowski (nauczyciel Einsteina podczas jego studiów matematyki, który kiedyś nazwał go „leniwym psem”, gdyż młody Einstein często opuszczał wykłady z tego przedmiotu) skonstruował ramy matematyczne dla późniejszej teorii Einsteina, wprowadzając czterowymiarową czasoprzestrzeń. W ten sposób powiązał ze sobą czas i przestrzeń w jedną piękną czterowymiarową strukturę. Należy pamiętać, że praca Minkowskiego to nie jest tylko propozycja nowego formalizmu matematycznego. Wykazał on, że można unifikować dwie, wydawałoby się zupełnie różne, koncepcje za pomocą jednej symetrii: przestrzeń i czas mogą być traktowane jako różne stany tego samego obiektu w pewnej czterowymiarowej strukturze. Jak podkreślił to Michio Kaku – „Unifikacja stała się jedną z najważniejszych zasad Einsteina na

resztę jego życia, wskazówką dla następnych pokoleń w poszukiwaniu jednolitej teorii”.

W życiu codziennym dobrze znamy pojęcie symetrii pojawiających się w przestrzeni trójwymiarowej. Na przykład w czasie zbliżającej zimy z pewnością będziemy obserwowali piękne płatki śniegu. Zauważymy, że po obrocie płatka o kąt 60° (obrót jest właśnie przykładem transformacji), będzie wyglądał on tak samo jak przed obrotem. Minkowski pokazał, że równania Einsteina zachowują swoją postać przy transformacji Lorentza, które są obrotami w czterowymiarowej czasoprzestrzeni, podobnie jak obracane płatki śniegu. Korzystając z różnych zaawansowanych pojęć matematycznych związanych z teorią grup i geometrią różniczkową pokazał, że korzystając z symetrii transformacji Lorentza można zbudować cały formalizm opisujący elektrodynamikę i w konsekwencji optykę. Na przykład, można pokazać, że równania Maxwella są najprostszymi możliwymi równaniami pozwalającymi opisać światło jako falę elektromagnetyczną.

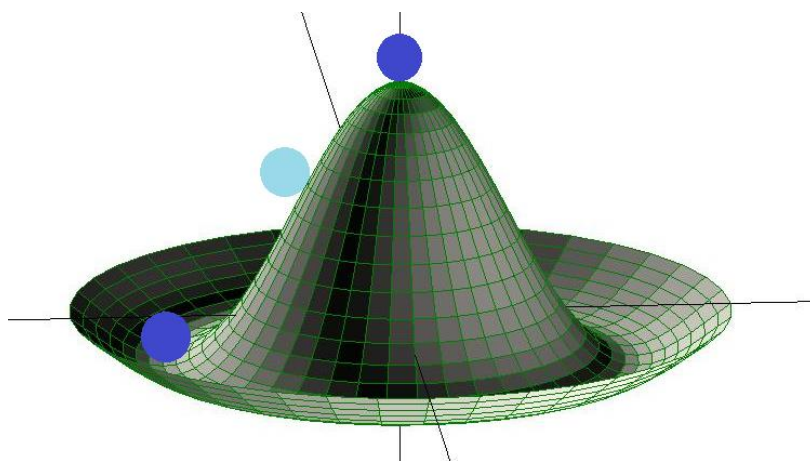
Fizycy zajmujący się fizyką teoretyczną w ciągu kolejnych lat, uogólnili teorię związaną z obrotami i innymi transformacjami Lorentza na przypadki czasoprzestrzeni z większą liczbą wymiarów. Nowo powstające teorie dotyczyły różnych operacji typu odbicia, obrotu, przesunięcia w czasie i przestrzeni oraz symetrii w różnorodnych, bardzo abstrakcyjnych przestrzeniach, które trudno zobrazować sobie za pomocą naszej wyobraźni. Wykorzystanie takich symetrii służy obecnie systematycznemu uporządkowaniu świata cząstek elementarnych. Na przykład symetria obrotowa w doświadczanej przez nas przestrzeni trójwymiarowej, pozwala uporządkować różne stany kwantowe, w jakich może znajdować się atom i, w konsekwencji, pomóc zrozumieć strukturę układu okresowego pierwiastków Mendelejewa. Natomiast wspomniana już wcześniej symetria cechowania pozwoliła na zdefiniowanie Modelu Standardowego.

Model oddziaływań elektroślabych. Bozon Higgsa

Zachęteni sukcesami, jakie święciła elektrodynamika kwantowa (teoria elektromagnetyzmu oparta na połączeniu teorii kwantowej i teorii względności), fizycy przystąpili do konstrukcji nowych teorii opisujących również inne oddziaływania w Naturze. Okazało się, że Natura jest tak łaskawa, że posiada wiele symetrii, które ułatwiałyby jej opis, pozwalając w przyszłości na unifikację wszystkich znanych nam oddziaływań.

Realizując marzenie Einsteina o jednolitej teorii opisującej wszystkie oddziaływania, Sheldon Glashow (laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1979 r.) podjął w 1961 roku próbę konstrukcji teorii łączącej oddziaływanie elektromagnetyczne z oddziaływaniem słabym. W ramach tej teorii nośniki oddziaływania słabego – cząstki nazywane bozonami pośrednimi W oraz Z , nie posiadają masy, podobnie jak ma to miejsce w przypadku fotonów. Jednak przeprowadzone doświadczenia pokazały, że gdyby istniały, musiałyby jednak posiadać jakąś

masę. Gdybyśmy chcieli unifikować oddziaływanie elektromagnetyczne ze słabym, czyli wyprowadzić równania opisujące foton i cząstki W oraz Z tworzące jedną rodzinę z fotonem, musielibyśmy stworzyć odpowiedni mechanizm pozwalający na uzyskanie mas przez bozony pośrednie. Taki mechanizm w zaproponowanej przez Glashowa teorii nosi nazwę spontanicznego łamania symetrii, wprowadzonego po raz pierwszy przez Higgsa. Łamanie to musiałyby zostać spowodowane przez wprowadzenie dodatkowego pola – pola Higgsa, którego nośnikiem jest właśnie cząstka nazywana obecnie bozonem Higgsa. Jeśli chcemy wyobrazić sobie łamanie symetrii, to można je przedstawić za pomocą dna butelki szampana, lub jak kto woli, meksykańskiego sombrero. Jeżeli umieścimy na szczycie takiego kapelusza kulkę, to na początku mamy sytuację w pełni symetryczną – mówimy tu o tzw. symetrii obrotowej. Jednak kulka w tym miejscu jest w położeniu nietrwałym i może się stoczyć na dół w dowolnym kierunku. Dno butelki (lub sombrero) jest nadal obrotowo symetryczne, lecz pozycja kulki, która się stoczyła łamie tę symetrię (rys. 2). W swojej słynnej pracy opublikowanej w 1964 roku w prestiżowym czasopiśmie *Physical Review Letters* i zatytułowanej *Łamane symetrie i masy bozonów cechowania*, Peter Higgs z University of Edinburgh wprowadził podobny mechanizm łamania symetrii. Pokazał, że zaproponowane przez niego pole, znane obecnie jako pole Higgsa, łamie symetrię pojawiającą się w rozważaniach teoretycznych, związanych z oddziaływaniami słabymi i elektromagnetycznymi. Co ciekawe, taki mechanizm łamania symetrii został wprowadzony jeszcze przez naukowców z dwóch innych grup badawczych, zupełnie niezależnie od siebie – przez Roberta Brouta i François Englerta z Université Libre de Bruxelles w Belgii oraz Geralda Guralnika, Carla Hagena i Toma Kibble’a z Imperial College w Londynie.



Rys. 2. Sombrero meksykańskie z zaznaczonymi położeniami kulki staczającej się z punktu o najwyższej energii („fałszywej próżni”) do punktu o energii minimalnej („rzeczywista próżnia”)

W 1967 roku Steven Weinberg i niezależnie od niego (rok później) Abdus Salam kontynuowali prace nad tym modelem, istotnie go rozwijając. Również i w ich pracach wyraźna była ważna rola, jaką pełnił bozon Higgsa w rozwijanej przez nich teorii łączącej oddziaływania słabe z elektromagnetycznymi. Zgodnie ze sławnym wzorem fizyki wyprowadzonym przez Einsteina $E = mc^2$, w wyniku przejścia ze stanu tzw. „fałszywej próżni” (szczyt sombrero) do „rzeczywistej” (dolina sombrero), energia wyzwolana przez pola Higgsa zostaje wykorzystana do tworzenia mas bozonów odpowiadających oddziaływaniu słabemu.

W teorii zaproponowanej przez Weinberga i Salama pojawiają się cztery tzw. pola rzeczywiste Higgsa (dublet pól zespolonych). Trzy z nich są odpowiedzialne za pojawienie się mas bozonów pośrednich – bozonów W oraz Z . Pozostaje zatem jedno pole skalarne odpowiadające właśnie bozonowi Higgsa. W 1979 roku Glashow wraz z Salamem i Weinbergiem zostali uhonorowani Nagrodą Nobla „za wkład do zunifikowanej teorii elektroślabych, w tym przewidzenie istnienia słabych prądów neutralnych”. Od momentu opracowania stworzonej przez nich teorii, właściwie mówimy o oddziaływaniach elektroślabych.

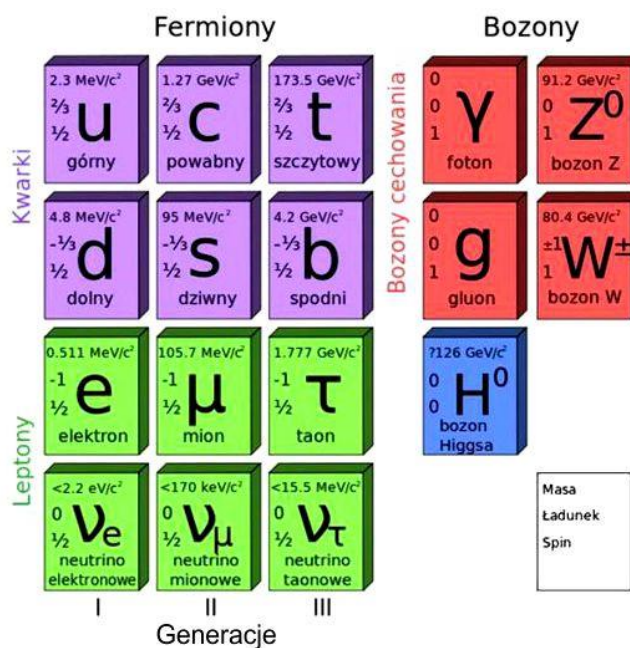
Teoria oddziaływań silnych – chromodynamika kwantowa

W latach sześćdziesiątych ubiegłego wieku, równoległe z rozwojem teorii oddziaływań elektroślabych rozwijała się teoria oddziaływań silnych, oparta również na istnieniu w przyrodzie określonych symetrii związanych z polami cechowania. Wspomniane wcześniej cząstki elementarne nazywane są leptonami i kwarkami, a z badaniami tych cząstek związanych jest również kilka przyznanych Nagród Nobla z dziedziny fizyki, np. nagroda dla Murraya Gell-Manna, twórcy idei kwarków, przyznana w 1969 roku. Kwarki, najbardziej podstawowe cegiełki budujące inne cząstki materialne, oprócz ładunku elektrycznego (co ciekawe, będącego ułamkiem najmniejszego wyodrębnionego i zaobserwowanego ładunku elektrycznego, ładunku elektronu – zwanego ładunkiem elementarnym) są jeszcze obdarzone innym rodzajem ładunku – ładunkiem koloru. Kwarki oddziałują między sobą poprzez wymianę tzw. gluonów (rys. 1), nośników oddziaływania silnego, również obdarzonych ładunkiem koloru. Obecnie znamy sześć rodzajów kwarków: górny, dolny, dziwny, powabny, wysoki (prawdziwy) oraz niski (piękny). W literaturze anglojęzycznej są one nazywane odpowiednio: up, down, strange, charm, top (true) oraz bottom (beauty). Analogicznie do elektrodynamiki kwantowej opisującej oddziaływania elektromagnetyczne poprzez fotony, stworzono teorię zwaną chromodynamiką kwantową opisującą oddziaływania silne. Okazało się, że podobnie do przypadków pól związanych z oddziaływaniami elektroślabymi (pola fotonowe, pola W oraz Z – mówimy tu też o tzw. polach bozonowych), pola leptonowe i kwarkowe (zwane też fermionowymi) można również sprzęgać z polem Higgsa. W rezultacie,

podobnie jak miało to miejsce w przypadku oddziaływań elektroślabych, poprzez spontaniczne złamanie symetrii, bezmasowe cząstki uzyskują swoje masy. Tak więc inne fundamentalne cząstki materii – kwarki i leptony – posiadają masę również dzięki oddziaływaniu z polami Higgsa. Co jest ważne, w wyniku każdego z tych oddziaływań powstaje też odpowiednia cząstka Higgsa.

Model Standardowy – bozon Higgsa obserwowany

W latach sześćdziesiątych ubiegłego stulecia obserwowaliśmy równoległy rozwój dwóch teorii: teorii oddziaływań elektroślabych (łączyących ze sobą oddziaływanie słabe i elektromagnetyczne) i teorii oddziaływania silnego. Zostały one połączone w końcu lat siedemdziesiątych w jeden model – Model Standardowy, a wyniki teoretyczne wyprowadzone w ramach tego modelu zostały w większości sprawdzone eksperymentalnie w latach osiemdziesiątych ubiegłego wieku. Praktycznie wszystkie cegiełki tego modelu zostały zaobserwowane w przeprowadzonych eksperymentach z wyjątkiem jednej z nich, o kluczowym znaczeniu. Chodzi tu oczywiście o cząstkę Higgsa, niezbędną do tego, by uzyskane na drodze rozważań teoretycznych wartości mas obserwowanych przez nas cząstek kwantowych były takie same, jak masy wyznaczone w eksperymentach.



Bozony Higgsa są jedynymi cząstkami, które istniały w epoce Wielkiej Unifikacji tuż po Wielkim Wybuchu, zanim pojawiły się kwarki i inne cząstki Modelu Standardowego. Tak więc, by zaobserwować cząstki Higgsa, uczeni mu-

sieli stworzyć za pomocą potężnych urządzeń do nadawania ogromnych energii cząstkom elementarnym (akceleratorów) takie warunki, które odpowiadałyby warunkom panującym w epoce Wielkiej Unifikacji. Takim urządzeniem jest właśnie Wielki Zderzacz Hadronów LHC, skonstruowany w Europejskim Ośrodku Badań Jądrowych CERN koło Genewy. Został on zbudowany na terytorium Szwajcarii oraz Francji w kołowym tunelu o długości 27 kilometrów. Należy podkreślić, że przy jego budowie liczący udział mieli też fizycy z Polski. Właśnie dzięki wynikom uzyskanym w laboratorium LHC, istnienie cząstki Higgsa można uznać za potwierdzone. Cząstka ta, jak widzimy, pełni kluczową rolę we współczesnej teorii cząstek elementarnych, pozwalającej połączyć w jedną całość opis trzech z czterech znanych nam oddziaływań. Peter W. Higgs oraz François Englert, twórcy idei pola i cząstki, pozwalających na uzyskanie masy przez znane nam inne cząstki elementarne, zostali w ubiegłym roku uhonorowani przyznaniem Nagrody Nobla w dziedzinie fizyki. Należy jednak pamiętać, że – jak podkreśla znakomity polski fizyk i historyk nauki profesor Andrzej Kajetan Wróblewski – Model Standardowy nie jest „teorią ostateczną ani fundamentalną, ponieważ zawiera jeszcze zbyt wiele parametrów swobodnych, które muszą być wzięte z doświadczenia”. Ponadto, należy pamiętać jeszcze o czwartym oddziaływaniu obecnym w naturze – oddziaływaniu grawitacyjnym, które jest poza zasięgiem Modelu Standardowego. Wyścig do Wielkiej Unifikacji wszystkich czterech oddziaływań – marzenia Alberta Einsteina – wciąż trwa, ale to już może być tematem osobnego artykułu.