

# CZĄSTKA HIGGSA - OSTATNIA OBSERWOWANA CEGIEŁKA TEORII PRAWIE WSZYSTKIEGO

Cao Long Van

Wiesław Leoński

Zakład Optyki i Inżynierii Kwantowej, Instytut Fizyki

Każdego roku, 8 października, cały świat patrzy na Sztokholm, gdzie przyznawana jest kolejna Nagroda Nobla z dziedziny fizyki. Tegorocznymi 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 one oddziałują 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 zeszłego roku 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.

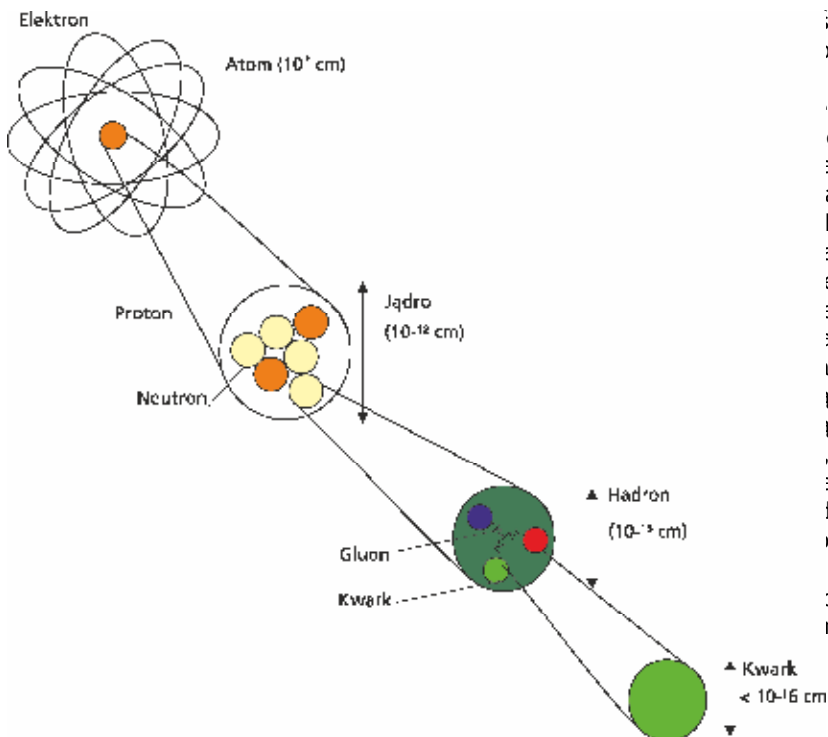
Aby zrozumieć istotę Modelu Standardowego oraz rolę jaką pełni w nim bozon Higgsa, należy wrócić do idei wielkiego fizyka Alberta Einsteina, jednego z największych uczonych nie tylko naszych czasów. Jak napisał znakomity popularyzator nauki Michio Kaku - „Nawet okruchy informacji ze stołu Einsteina stwarzają nauce nowe możliwości”. Można powiedzieć, że utworowały one drogę dla innych uczonych, którzy uzyskali Nagrodę Nobla. Jeszcze nie tak dawno temu pojawiały się głosy, że prowadzone przez Einsteina w ciągu ostatnich trzydziestu lat jego życia poszukiwania „zunifikowanej teorii pola” były tylko stratą czasu. Pomimo tego, jego pionierskie pomysły stały się in-

spiracją dla wielu zdolnych, często młodych naukowców, a poszukiwanie tzw. teorii wszystkiego zostało uznane za centralny problem fizyki. Zaczniemy od zaprezentowanej przez niego podstawowej koncepcji nowoczesnej fizyki, koncepcji dualizmu korpuskularno-falowego, 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 zmniejszenia ilości 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 już starożytny grecki filozof Demokryt z Abdery twierdził, że wszystko składa się z atomów (greckie słowo *átomos* oznacza 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 się z najmniejszych cegiełek materii zwanych kwarkami (patrz rys. 1). 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 „kolor” czy też „zapachy”. Oczywiście, nie mają one nic wspólnego z kolorami i zapachami jakie znamy z życia codziennego, gdyż 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 (takie jak elektron) oraz kwarki.

Jednocześnie, 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 jedyną jej podstawę przez prawie dwa stulecia.



RYŚ. 1. STRUKTURA PODSTAWOWYCH SKŁADNIKÓW MATERII

Zmieniło się to dopiero w drugiej połowie XIX w., kiedy dla wyjaśnienia tajemniczych dla ówczesnych badaczy sił elektrycznych i magnetycznych, James Clerk Maxwell wprowadził pojęcia pola jako niewidzialnego układu linii sił penetrujących całą pustą przestrzeń. Z jego teorii elektromagnetyzmu wynika wniosek, że w odróżnieniu od koncepcji sił newtonowskich, zaburzenia elektromagnetyczne nie przenoszą się natychmiast na 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 polegał tylko na poprawianiu wartości różnych mierzonych wielkości fizycznych na kolejnych miejscach za przecinkiem.

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 tam rozważań, w 1909 r. Einstein wygłosił referat na zjeździe fizyków w Salzburgu, 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 pojawia się współczesne pojęcie kwantów pola zwanych fotonami. Z drugiej strony, inspirowany ideami związanymi z duali-

świata, w 1924 r. francuski fizyk Louis de Broglie przedstawił teorię, w której dwoistą naturą ob-  
 jektów, traktowane dotychczas tylko jako cząstki, a  
 rii. Stwierdził on, że takie obiekty świata  
 o jak elektrony czy też protony zachowują  
 do fotonów: w pewnych eksperymentach  
 a falową naturę, a w innych sytuacjach za-  
 k cząstki. Te idee stanowiły istotną część  
 amentów rodzącej się fizyki współczesnej,  
 ej.

ęszej teorii kwantów odpowiednikami klasyc-  
 ą odpowiadające im cząstki - kwanty. Nie-  
 i naszych zmysłów pole, wypełniającym  
 i nas przestrzeń, odpowiadają różne cząst-  
 ę nośnikiem znanych nam oddziaływań.  
 , cząstka Higgsa, o której była mowa na  
 est kwantem tzw. pola Higgsa. Cztery znane  
 łstawowe oddziaływania fizyczne posiada-  
 je nośniki będące kwantami odpowiednich  
 Na przykład fotony są kwantami pola elek-  
 omagnetycznego, 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 też elektromagne-  
 tyczne. 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 syme-  
 trii w rozwoju fizyki, musimy znowu wrócić do idei zapro-  
 ponowanych przez Einsteina.

### Unifikacja przez symetrię

Jak wspomnieliśmy wcześniej, jednym z filarów dziewiętnastowiecznej fizyki była mechanika Newtona. W 1905 r. 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 mieszają ze sobą czas i przestrzeń. Przed odkryciem Einsteina, lokalizacja i czas dowolnego zdarzenia były traktowane zupełnie oddzielnie (tak jak mamy w szkole oddzielne przedmioty, które nazywamy np. „geografią” czy też „historią”). 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  $60^\circ$  (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 ilością 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 elektrostałych. 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 ułatwiłyby 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 r. 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 wprowadzić równania opisujące foton i cząstki  $W$  oraz  $Z$  tworzące jedną rodzinę z fotonem, musielibyśmy stworzyć odpowiedni mechanizm pozwalający na uzyskanie masy przez bozony pośrednie. Taki mechanizm w zaproponowanej przez Glashowa teorii nosi nazwę spontanicznego łamania symetrii, wprowadzonego po raz pierwszy przez Higgsa. Łamanie to musiałoby zostać spowodowane przez wprowadzenie dodatkowego pola - pola Higgsa,

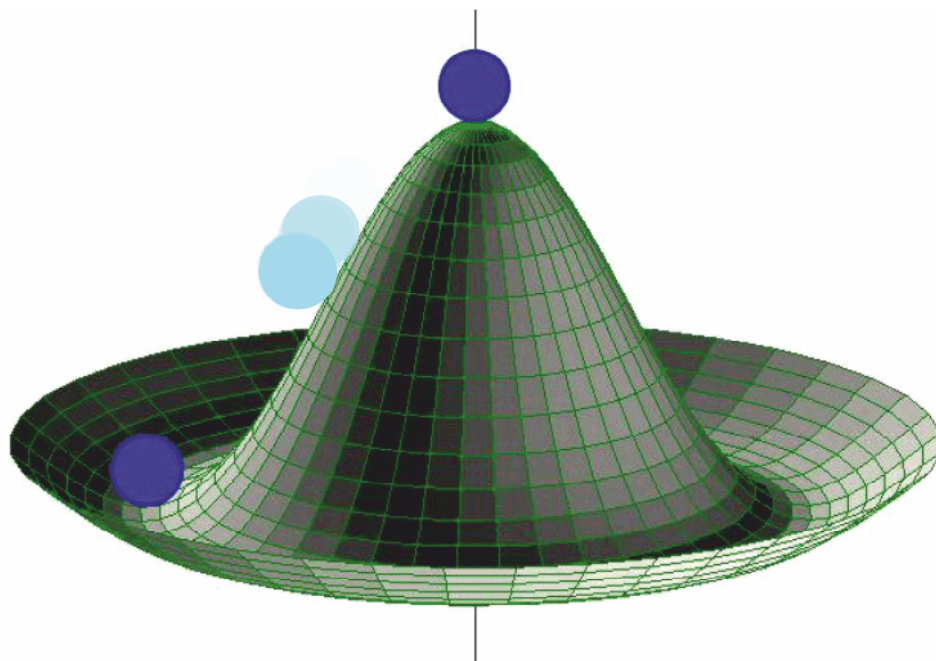
którego nośnikiem jest właśnie cząstka nazywana obecnie bozonem Higgsa. Jeśli chcemy wyobrazić sobie łamanie symetrii, to obrazowo można przedstawić je za pomocą dna butelki szampana, lub jak kto woli, meksykańskiego sombrero. Jeżeli umieścimy na szczycie takiego kapelusza kulkę, to na początku mamy 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 r. w prestiżowym czasopiśmie *Physical Review Letters* i zatytułowanej *Łamanie symetrii 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 inne 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.

W 1967 r. 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 istotna rola jaką pełnił bozon Higgsa w rozwijanej przez nich teorii łączącej oddziaływania słabe z elektromagnetycznymi. Zgodnie ze sławnym wzorem fizyki wprowadzonym przez Einsteina  $E = mc^2$ , w wyniku przejścia ze stanu tzw. „falszywej 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 skalarnie odpowiadające właśnie bozonowi Higgsa. W 1979 r. Glashow wraz z Salamem i Weinbergiem zostali uhonorowani Nagrodą Nobla „za wkład do unifikowanej teorii elektrostałych, w tym przewidzenie istnienia słabych prądów neutralnych”. Od momentu opracowania stworzonej przez nich teorii, właściwie mówimy o oddziaływań elektrostałych.

#### Teoria oddziaływań silnych - Chromodynamika kwantowa

W latach sześćdziesiątych ubiegłego wieku, równoległe z rozwojem teorii oddziaływań elektrostałych 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 Murray'a Gell-Manna, twórcy idei kwarków, przyznana w 1969 r. Kwarki, najbardziej podstawowe cegiełki budujące inne cząstki materialne, oprócz ładunku elektrycznego (co ciekawe, będącego ułamkiem najmniejszego wyodrębnionego i zaobserwowanego ładunku elektrycznego, ładunku elektronu



RYŚ. 2. SOMBRERO MEKSYKAŃSKIE Z ZAZNACZONYMI POŁOŻENIAMI KULKI STACZAJĄCEJ SIĘ Z PUNKTU O NAJWYŻSZEJ ENERGII („FAŁSZYWEJ PRÓŻNI”) DO PUNKTU O ENERGII MINIMALNEJ („RZECZYWISTA PRÓŻNIA”)

- 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 oraz bottom. 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 elektrostałymi (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 elektrostałych, 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 elektrostałych (łączących ze sobą oddziaływania 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 musieli 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 zbudowany w Europejskim Ośrodku Badań Jądrowych CERN koto Genewy. Zbudowany został 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 tym roku uhonorowani przyznaniem Nagrody Nobla w dziedziny fizyki. Należy jednak pamiętać, że - jak to podkreślał 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 - jeszcze trwa, ale to już może być tematem osobnego artykułu.