

## Nagroda Nobla 2013

Tegoroczną nagrodę Nobla z dziedziny fizyki otrzymali François Englert oraz Peter W. Higgs "za teoretyczne odkrycie mechanizmu, który przyczynia się do zrozumienia pochodzenia mas cząstek elementarnych, i który został niedawno potwierdzony poprzez odkrycie przewidywanej cząstki elementarnej dokonane przez grupy ATLAS i CMS w LHC (CERN),”.

Prace François Englerta and Petera W. Higgosa, oraz R. Brouta, G. Guralnika, C. Hagena, i T. Kibblea [1] w sposób fundamentalny przyczyniły się do powstania Modelu Standardowego (MS) oddziaływań elektroślabych. Pozwoliły one na konstrukcję modelu, który jest teorią z symetrią cechowania oraz jednocześnie przewiduje istnienie wektorowych (o spinie 1) *ciężkich* bozonów pośredniczących przenoszących oddziaływania słabe. *Konsekwencją zaproponowanego mechanizmu generacji masy bozonów pośredniczących jest istnienie pola i skalarnej (spin 0) cząstki Higgosa.* Okazało się, że oddziaływanie z polem Higgsa pozwala również generować masę fermionów (kwarków i leptonów). Odkrycie takiej cząstki zostało ogłoszone 4 lipca 2012 roku na wspólnym seminarium w CERN i konferencji “ICHEP 2012” odbywającej się w Melbourne. Naukowcy pracujący w grupie CMS (ang. Compact Muon Solenoid) i ATLAS przedstawili wtedy wstępne wyniki poszukiwań bozonu Higgosa oparte na danych doświadczalnych zebranych do czerwca 2012 roku [2]. Poinformowano o odkryciu nowego bozonu (cząstki o spinie całkowitym) o masie około  $125 - 126 \text{ GeV}/c^2$ . Obecnie, po zebraniu i przeanalizowaniu większej ilości danych wydaje się pewne, że zaobserwowany bozon jest rzeczywiście przewidywaną cząstką Higgosa.

Pierwowzorem Modelu Standardowego była elektrodynamika kwantowa, piękna kwantowa teoria pola sprawdzona z ogromną precyzją w wielu doświadczeniach. Elektrodynamika opisuje cząstki naładowane oraz fotony, o których możemy mówić, że pośredniczą w przenoszeniu oddziaływań elektromagnetycznych: naładowane cząstki „wymieniają” jeden lub kilka fotonów i na skutek tego odpowiednio oddziałują ze sobą. Oddziaływania elektromagnetyczne mają bardzo długi zasięg, jest to możliwe dzięki założeniu, że masa spoczynkowa fotonu jest zerowa. Elektrodynamika ma piękną własność symetrii, która gwarantuje zerową masę fotonu: jest to tzw. symetria cechowania. Symetrią cechowania elektrodynamiki jest grupa  $U(1)$ , warunek symetrii oznacza w tym przypadku, że faza funkcji falowej elektronu (czy innej naładowanej cząstki) może ulegać zmianie zależnej od punktu w czasoprzestrzeni,  $\psi(x) \rightarrow e^{i\theta(x)}\psi(x)$ , bez żadnych konsekwencji fizycznych. Najczęściej symetrie mają dodatkowe konsekwencje, a nie tylko wyjaśniają znane wcześniej fakty. Właśnie upodobanie do symetrii leży u podstaw MS oddziaływań elektroślabych. Powstał on jako próba rozszerzenia idei symetrii cechowania znanej z elektrodynamiki na oddziaływania słabe. Wiązało się to z hipotezą o istnieniu bozonów pośredniczących „przenoszących” oddziaływania słabe, tak jak foton przenosi oddziaływania elektromagnetyczne. Również tym razem skorzystano z założenia o symetrii cechowania, jednak teraz musiała być ona nieco bardziej skomplikowana: grupą symetrii zunifikowanej teorii oddziaływań elektroślabych jest nieprzemienne grupa  $SU(2) \times U(1)$  podczas gdy grupą symetrii elektrodynamiki jest przemienne grupa  $U(1)$ . Taka teoria przewiduje istnienie

trzech bozonów pośredniczących ( $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z$ ) odpowiedzialnych za przenoszenie oddziaływań słabych oraz fotonu ( $\gamma$ ) odpowiedzialnego za oddziaływania elektromagnetyczne. Znalezienie grupy symetrii cechowania niezbędnej do opisu oddziaływań elektroślabych nie wystarczyło jednak do zbudowania pełnej, wewnętrznie spójnej oraz zgodnej z danymi doświadczalnymi teorii. Problem polegał na tym, że założenie o symetrii cechowania prowadziło do wniosku, że bozony pośredniczące w oddziaływaniach słabych będą miały zerową masę (tak jak foton w elektrodynamice), a zatem oddziaływania będą miały nieskończony zasięg. Jednak wiadomo było z doświadczeń, że zasięg oddziaływań słabych musi być skończony, rzędu  $10^{-17} - 10^{-16}$  m. Problem wydawał się nie do przezwyciężenia, wyglądało na to, że piękna idea symetrii cechowania, która tak skutecznie pozwoliła się realizować w elektrodynamice nie daje się zastosować w oddziaływaniach słabych. Rozwiązanie właśnie tego problemu zawdzięczamy polu Higgsa, a bardziej precyzyjnie mechanizmowi Higgsa, został on zaproponowany w latach 60-tych przez F. Englerta i R. Brouta, P.W. Higgsa, i G. Guralnika, C. Hagen, i T. Kibblea [1].

Mechanizm ten jest oparty o zjawisko spontanicznego łamania symetrii, w tym przypadku łamaną symetrią jest właśnie symetria cechowania  $SU(2) \times U(1)$ . Spontaniczne łamanie symetrii ma miejsce w przypadku, gdy teoria (dokładniej jej działanie  $S = \int d^4x L$ ) jest niezmiennicza ze względu na daną transformację, jednak stan o najniższej energii (stan próżni) nie jest niezmienniczy. W przypadku symetrii  $SU(2) \times U(1)$  musimy pamiętać o tym, że po spontanicznym złamaniu symetrii nasza teoria powinna pozostać niezmiennicza ze względu na symetrię cechowania elektrodynamiki,  $U(1)$ . Innymi słowy wyjściowa symetria  $SU(2) \times U(1)$  nie może być złamana „do końca”; symetria cechowania odpowiedzialna za oddziaływania elektromagnetyczne musi pozostać nienaruszona. Spontaniczne łamanie symetrii zostało zrealizowane poprzez wprowadzenie do teorii dodatkowego skalarnego (o spinie 0) pola (zwanego właśnie polem Higgsa) będącego dubletem (oznacza, to że pole transformuje się zgodnie z 2-wymiarową reprezentacją grupy  $SU(2)$ ). Takie pole ma dwie rzeczywiste składowe górne oraz dwie rzeczywiste składowe dolne, w sumie cztery dodatkowe rzeczywiste pola. Oddziaływanie tego pola ze sobą (poprzez tzw. potencjał pola skalarnego) powoduje, że możliwa jest sytuacja, w której konfiguracja pola o najmniejszej energii nie jest niezmiennicza ze względu na transformację symetrii teorii – czyli ma miejsce spontaniczne naruszenie symetrii. Okazuje się, że żądanie symetrii cechowania teorii prowadzi do takich oddziaływań pomiędzy bezmasowymi (podobnie jak foton) bozonami cechowania, a polem Higgsa, że w ich wyniku pola cechowania uzyskują masę. Innymi słowy, główna trudność na drodze do budowy zunifikowanej teorii oddziaływań elektroślabych została przezwyciężona – bozony pośredniczące uzyskały masę! Okazuje się, że trzy z owych czterech rzeczywistych składowych dubletu pola Higgsa znikają z teorii stając się podłużnymi składowymi pól cechowania. Do opisu masywnego pola wektorowego potrzebne są trzy rzeczywiste funkcje, zatem żaden stopień swobody nie zginął: wprawdzie trzy rzeczywiste pola zniknęły z teorii, ale jednocześnie trzy, początkowo bezmasowe pola (dwa stopnie swobody) uzyskały masę (trzy stopnie swobody). W rezultacie, MS przewiduje istnienie zaledwie jednego (fizycznego) pola Higgsa, i co za tym idzie cząstki Higgsa (kwant pola Higgsa) i dlatego jest w pewnym sensie modelem minimalnym. Hipoteza o nadawaniu masy bozonom cechowania poprzez mechanizm Higgsa była odważnym pomysłem, wkrótce okazało się, że posiada on ogromną przewagę nad innymi koncepcjami. Otóż, w 1972 roku,

Martinus J. G. Veltman wraz ze swoim doktorantem Gerardusem 't Hooftem pokazali [3], że teorie ze spontanicznym naruszeniem symetrii cechowania są renormalizowalne. Praca ta była na tyle fundamentalna, że w 1999 roku obaj panowie otrzymali za nią Nagrodę Nobla. W wielkim uproszczeniu, własność renormalizowalności polega na tym, że w teoriach renormalizowalnych można stosować rachunek zaburzeń, a w efekcie obliczać precyzyjnie prawdopodobieństwa rozpadów czy przekroje czynne. Natomiast w teoriach nierenormalizowalnych, w rachunku zaburzeń pojawiają się rozbieżności (nieskończoności) utrudniające (bądź uniemożliwiające) prowadzenie obliczeń. Bez wchodzenia w szczegóły dotyczące renormalizacji trzeba podkreślić, że jest to własność zdecydowanie pożądana, a teorie renormalizowalne są uważane za teorie fundamentalne, w przeciwieństwie do tzw. teorii efektywnych (które zazwyczaj są nierenormalizowalne). W szczególności elektrodynamika kwantowa jest renormalizowalną kwantową teorią pola, a to właśnie elektrodynamika była inspiracją i wzorem dla twórców zunifikowanej teorii oddziaływań elektroślabych. Warto przypomnieć, że masy bozonów pośredniczących mogły być wprowadzone do modelu bez spontanicznego naruszenia symetrii i bez mechanizmu Higgsa: masa bozonu wektorowego może być po prostu pragmatycznie dopisana do Lagrangianu. Takie „dopisanie” jest jednak zabiegiem całkowicie sprzecznym z piękną ideą symetrii cechowania, gdyż wyraz masowy łamie tę symetrię w sposób jawny (w przeciwieństwie do spontanicznego naruszenia symetrii). W związku z tym, że zaobserwowany w LHC bozon ma własności bardzo zbliżone do tych, które przewiduje MS, odkrycie to jest spektakularną ilustracją piękna (symetrii) Natury.

## Literatura

1. F. Englert and R. Brout, “Broken symmetry and the mass of gauge vector mesons”, Phys.Rev. Lett. 13 (1964) 321–323, P.W. Higgs, “Broken symmetries and the masses of gauge bosons”, Phys. Rev. Lett. 13 (1964) 508–509, G. Guralnik, C. Hagen, and T. W. B. Kibble, “Global conservation laws and massless particles”, Phys. Rev. Lett. 13 (1964) 585–587,
2. Seminarium “Latest update in the search for the Higgs boson” w CERN 4.VII.2012:  
- J. Incandela, <http://cms.web.cern.ch/news/observation-new-particle-mass-125-gev> ,  
<http://indico.cern.ch/conferenceDisplay.py?confId=197461>  
- F. Gianotti, <http://www.atlas.ch/news/2012/latest-results-from-higgs-search.html> ,  
<http://indico.cern.ch/conferenceDisplay.py?confId=197461>
3. G. 't Hooft and M. Veltman "Regularization and Renormalization of Gauge Fields". Nuclear Physics B 44: 189–219, 1972,

*Bohdan Grzadkowski  
Instytut Fizyki Teoretycznej  
Wydział Fizyki  
Uniwersytet Warszawski*