

Fakty, mity i zagadki Modelu Standardowego

Odkrycie bozonu Higgsa zamknęło w 2012 roku ważny okres w historii fizyki. Potwierdziło ono bowiem dobitnie, że tzw. Model Standardowy jest poszukiwaną od ponad pół wieku teorią oddziaływań cząstek elementarnych.

Istnienie bozonu Higgsa było najbardziej dramatycznym przewidywaniem teorii. Bez niego cała subtelna konstrukcja, tłumacząca naturę słabych oddziaływań, ległaby w gruzach. Chodzi o tzw. spontaniczne łamanie symetrii cechowania. Symetria ta jest jedną z najbardziej podstawowych własności mikroświata: faza¹ (zespolonej) funkcji falowej może być dowolnie zmieniona w *każdym punkcie przestrzeni*, jeżeli tylko skompensujemy to odpowiednią modyfikacją potencjałów.

Symetrię taką mają oddziaływania elektromagnetyczne, silne, a także i grawitacyjne. Wymaga ona jednak, aby nośniki tych sił były pozbawione masy. Rzeczywiście, fotony, gluony oraz nieodkryty jeszcze grawiton są bezmasowe. Natomiast bozony W i Z – nośniki słabych oddziaływań – mają masę, i to dużą w stosunku do wcześniej odkrytych cząstek. Jej wartość jest związana z dobrze znaną doświadczalnie stałą Fermiego. Czyżby więc oddziaływania słabe nie miały tej podstawowej symetrii? Otóż nie – i właśnie za teoretyczne wytłumaczenie tej zagadki Peter Higgs i François Englert dostali Nagrodę Nobla w 2013 roku.

Od czasów teoretyka amerykańskiego Jeffreya Goldstone'a i laureata Nagrody Nobla Yoichiro Nambu wiadomo, że symetryczne prawa ruchu, mogą mieć niesymetryczne rozwiązania. Z sytuacjami prowadzącymi do takiego *spontanicznego* łamania symetrii spotykamy się wszędzie: od ołówka postawionego na gładkim ostrzu do Fredrowej „ośliny pośród jądła”. Tak więc rozwiązanie Higgsa i innych polega – mówiąc popularnie – na spontanicznym złamaniu, albo naruszeniu, symetrii cechowania oddziaływań słabych.

Tutaj napotykamy pierwszy mit, a raczej nieporozumienie, które jest dobrze znane specjalistom. Może ono jednak sprawić dociekliwemu studentowi pewien kłopot. Mianowicie, lokalnej symetrii cechowania *nie można* złamać spontanicznie. Udowodnił to ściśle Shmuel Elitzur z Uniwersytetu w Tel Awiwie w 1975 roku. Symetria, której naruszenie nadaje masę bozonom W i Z, jest widoczna dopiero *po ustaleniu* konkretnego wycechowania. Jest to więc symetria ukryta – ukryta pod tłem transformacji cechowania. Wyjaśnił to przekonująco teoretyk irlandzki Lochlainn O'Raifeartaigh. Dlatego też podręcznikowe dowody mechanizmu Higgsa konstruowane są na ogół w ustalonym wycechowaniu.

Innym nieporozumieniem, jest często powtarzane stwierdzenie, że bozon Higgsa jest źródłem całej masy we Wszechświecie. Nieprawda, Twoja i moja masa, Czytelniku, pochodzą głównie od mas protonów i neutronów, które z kolei są wynikiem oddziaływań silnych² między kwarkami i gluonami.

Rzeczywiście, higgs „nadaje” masę kwarkom, ale jest to tylko około 3 promili masy z oddziaływań silnych. Z kolei masa elektronu w całości pochodzi z mechanizmu Higgsa i nie można nie docenić jej roli w fizyce atomów i molekuł.

Po trzecie, potoczne określenie bozonu Higgsa jako „boskiej cząstki” pochodzi z popularnonaukowej książki kolejnego noblisty Leona Ledermana oraz Dicka Teresiego o tym tytule. Sęk w tym, że – jak twierdzi sam Peter Higgs – oryginalny tytuł książki brzmiał *The Goddamned Particle* (bo tak trudno było ją znaleźć), ale wydawca nie przyjął tego emocjonalnego określenia.

Czy Model Standardowy jest więc teorią ostateczną? Czy jego sukces oznacza koniec fizyki cząstek? Czy młodzi, zdolni ludzie nie mają już szans na odkrycia nowych, jeszcze bardziej fundamentalnych praw Natury?

Nie, nie i jeszcze raz nie! Wręcz przeciwnie: spektakularne odkrycie bozonu Higgsa nie tylko ugruntowało Model Standardowy, ale także jeszcze bardziej uświadomiło nam jego efektywną, a tym samym *tymczasową*, naturę.

Należy tutaj podkreślić, że w dwóch grupach doświadczalnych, które odkryły bozon Higgsa w CERN-ie: w ATLAS-ie i w CMS-ie, aktywnie uczestniczą polscy fizycy i inżynierowie.

Historia wielkich odkryć w fizyce (i zapewne nie tylko...) uczy nas, że nowe teorie na ogół nigdy całkowicie nie wykluczają wcześniejszego rozumienia świata. One „tylko” rozszerzają zakres jego stosowalności. Tak było z odkryciem obu teorii względności, z mechaniką kwantową, z teorią pola, z... We wszystkich tych przypadkach „stare teorie” dalej poprawnie opisują obserwowane zjawiska, tyle że dla mniejszego zakresu parametrów: prędkości, rozmiarów, mas itp. – to są teorie efektywne w odniesieniu do nowszych, działających na bardziej mikroskopowym poziomie.

Ta hierarchia kolejno odkrywanych warstw naszej rzeczywistości jest wielokrotnie wyraźnie widoczna w całej historii fizyki, w reinterpretacji pojęcia „elementarny”. Począwszy od molekuł, poprzez atomy, jądra atomowe, aż do protonów i neutronów – wszystkie te składniki materii były kiedyś określane jako elementarne. Obecnie miano to dźwierząd podstawowe cegiełki Modelu Standardowego: kwarki, leptoni, bozony pośredniczące i bozon Higgsa. Ale czy to jest koniec?

Model Standardowy zawiera 61 cząstek elementarnych³. Ich masy, sprzężenia i tzw. amplitudy mieszania teoretycznie są dowolne. Daje to co najmniej 19 swobodnych parametrów. Jest to najprostsza i najbardziej naturalna wskazówka, że hen..., gdzieś tam na jeszcze mniejszych odległościach (czyli przy jeszcze wyższych energiach) istnieje bardziej fundamentalna, prostsza i piękniejsza teoria.

I czeka na Einsteinów XXI wieku.

JACEK WOSIEK

Uniwersytet Jagielloński
Instytut Fizyki

¹ Jest to kąt, który mierzący stosunek części rzeczywistej do urojonej każdej liczby zespolonej. Kąt ten jest odpowiedzialny za charakterystyczne dla świata kwantowego zjawiska interferencji.

² Teraz już wiemy, że są to oddziaływania „kolorowe”, opisywane przez chromodynamikę kwantową.

³ Dla porównania: układ okresowy skonstruowany przez Mendelejewa w 1869 roku liczył 66 pierwiastków.

* * *

Więcej informacji można znaleźć w:

S. Elitzur, *Impossibility of spontaneously breaking local gauge symmetry*, Phys. Rev. D12 (1975) 3978.

L. O'Raifeartaigh, *Some hidden aspects of hidden symmetry*, [in:] Differential geometry, group representations, and quantization (1991), p. 99–108.

P. Higgs, *My life as a boson*, Oscar Klein Memorial Lecture, Stockholm Academy of Sciences (2010), www.ph.ed.ac.uk/higgs/life-boson.

F. Close, *The Infinity Puzzle*, Basic Books, New York 2011 (i późniejsze wydania).