

Cząstka Higgsa warta Nobla

STEFAN POKORSKI

Wielkie odkrycia naukowe bardzo szybko stają się częścią ogólnej kultury – wyrabiamy w sobie szczególne poczucie ich własności. Któż nie rozpozna twarzy Einsteina na zdjęciu? Jego słynny wzor $E = mc^2$ zobaczyć można na T-shirtach sprzedawanych nad Sekwaną. Kto nie słyszał o DNA, o protonach, neutronach i energii jądrowej? Może nawet o kwarkach? Kto nie patrzył w niebo i szukał na nim śladów Wielkiego Wybuchu? Tylko nieliczni z nas mogą zrozumieć istotę tych odkryć, ale wszyscy czujemy, że my jako ludzkość zrobiliśmy ważny krok naprzód. Mamy świadomość, że choć sami nie wiemy zbyt dokładnie, o co chodzi, ale przecież to już jest zrozumiane, nie jest żadną tajemnicą – czujemy się kulturowo bogatsi. Nie można nie wspomnieć też o tym, że duża część wielkich odkryć w badaniach podstawowych znalazła ważne zastosowania i wszyscy z nich korzystamy.

Nagrody Nobla przyznawane są za wielkie odkrycia naukowe. „Noble” mają szczególny status wśród wielu nagród naukowych. Nie tylko dlatego, że są najbardziej prestiżowe, ale także dlatego, że kibicują im szerokie rzesze ludzi. Nagroda Nobla 2013 z fizyki przyznana została dwóm teoretykom: Françoise Englertowi z Uniwersytetu w Brukseli i Peterowi W. Higgsowi z Uniwersytetu w Edynburgu za prace napisane w roku 1964 (współautor pracy Englerta – Robert Brout – zmarł w 2011 roku).

Nagroda ta jest ściśle związana z ogłoszonym w lipcu 2012 w Europejskim Laboratorium Fizyki Oddziaływań Elementarnych (CERN) w Genewie odkryciem cząstki elementarnej, zwanej cząstką Higgsa. Została ona odkryta po prawie 50 latach poszukiwań ekspery-



Françoise Englert i Peter Ware Higgs w CERN-ie, 2012

mentalnych, w doświadczeniach prowadzonych na niedawno zbudowanym, potężnym urządzeniu badawczym, zwanym Wielkim Zderzaczem Hadronów (Large Hadron Collider – LHC), w którym zderzają się protony przyspieszone do bardzo wysokich energii. W wyniku tych zderzeń wyprodukowanych zostaje wiele innych cząstek elementarnych i wśród nich znaleziono cząstkę Higgsa. Urządzenie LHC budowano przez około 20 lat. Głównym celem badawczym tego projektu było właśnie wykrycie cząstki Higgsa. Zarówno w fazie budowy, jak i przy przeprowadzonych potem eksperymentach pracowało kilka tysięcy fizyków i inżynierów.

Czym zasłużyła sobie cząstka Higgsa na taki upór przy jej poszukiwaniu, tak wielki wysiłek włożony w realizację projektu LHC i taki rozgłos po jej odkryciu? Historia zaczyna się od odkrycia promieniowania pierwiastków innego niż fale elektromagnetyczne, tzw. promieniotwórczości naturalnej, przez Henri Becquerela, Marię Skłodowską-Curie i Pierre'a Curie oraz Ernesta Rutherforda w końcu XIX wieku. Z czasem zrozumiano, że zostały wtedy odkryte nowe oddziaływania (siły), działające między najbardziej elementarnymi składnikami materii, w mikroświecie rządzącym się prawami kwantowymi. Te tzw. oddziaływania słabe i silne, razem z bardziej dostępnymi naszej intuicji oddziaływaniami elektromagnetycznymi i grawitacyjnymi, tworzą listę znanych obecnie oddziaływań elementarnych. Po ponad stu latach badań doświadczalnych i teoretycznych zrozumiano w pełni procesy kwantowe, które są odpowiedzialne za pierwsze trzy oddziaływania z powyższej listy, w ramach teorii kwantowej znanej jako Model Standardowy. W ciągu ostatnich 50 lat przyznano aż 15 Nagród Nobla za odkrycia doświadczalne i teoretyczne ściśle związane z powstawaniem Modelu Standardowego. Jedynym brakującym ogniwem do pełnego potwierdzenia słuszności tej teorii była cząstka Higgsa!

Jej odkrycie zamyka więc wielki rozdział badań nad strukturą materii, jej elementarnymi składnikami i oddziaływaniami pomiędzy nimi – i już choćby w tego powodu zasługuje na wielką uwagę. Ale odkrycie to jest odkryciem fundamentalnym jeszcze z co najmniej trzech powodów, głębiej związanych ze strukturą fizyki kwantowej.

Zanim spróbuję nieco wyjaśnić, o co chodzi, chciałbym poświęcić jeszcze kilka słów tegorocznej Nagrodzie Nobla. Dwie nagrodzone prace są charakterystyczne dla skomplikowanych dróg, jakimi chadzą badania naukowe, i meandrów wielkich odkryć. Stoi za nimi często inna motywacja niż ich końcowe wykorzystanie. Tak było z teoretycznymi ideami Roberta Brouta, François Englerta i Petera Higgsa. Zaproponowali oni pewien mechanizm, który mógłby wyjaśnić źródło masy cząstek elementarnych, myśląc o cząstkach, które później okazały się złożone z jeszcze mniejszych składników i do których ich mechanizm się nie stosuje. Dopiero trzy lata później Steven Weinberg i Abdus Salam (laureaci Nagrody Nobla, wspólnie z Sheldonem Glashowem, w roku 1979) sformułowali hipotezę, że mechanizm ten jest źródłem masy cząstek naprawdę elementarnych, takich jak elektron, kwarki będące składnikami protonu, i kwantów sił działających między nimi, podobnych do fotonów, ale obdarzonych masą, umownie nazwanych cząstkami W i Z. „Śladem” tego mechanizmu jest istnienie jeszcze jednej cząstki, „ochrzczonej” jako cząstka Higgsa, o bardzo szczególnych i precyzyjnie przewidzianych przez teorię własnościach. Nawiasem mówiąc, mechanizm ten, zwany spontanicznym naruszeniem symetrii, był już wcześniej odkryty, zaobserwowany w fizyce materii skondensowanej, w takich zjawiskach jak nadprzewodnictwo i nadciekłość. Jest to piękny przykład jedności fizyki i wielkich wzajemnych inspiracji między różnymi jej gałęziami – inspiracji, które odegrały ważną rolę w pracach Brouta, Englerta i Higgsa.

Wróćmy do powodów, dla których odkrycie cząstki Higgsa jest tak ważne dla fizyki i – chyba ogólniej – dla naszego naukowego poznawania otaczającego nas (wszech)świata.

Po pierwsze, odkrycie to ostatecznie potwierdziło fundamentalną i uniwersalną rolę symetrii w Naturze, jako podstawy do zrozumienia zjawisk zachodzących w mikroświecie. Pojęcie symetrii jest nam intuicyjnie znane. Wyobraźmy sobie np. pręt z dwoma identycznymi kulami umocowanymi na jego końcach. Układ ten ma symetrię względem środka pręta. Można na nią też spojrzeć tak, że nic się nie zmienia przy zamianie kul. Co więcej, jeśli wyobraźmy sobie oś przechodzącą wzdłuż pręta wewnątrz niego, to jest oczywiste, że nasz pręt obrócony o dowolny kąt wokół tej osi wygląda dokładnie tak samo. Mamy więc też symetrię względem takich obrotów. W mikroświecie pojawiają się nowe rodzaje symetrii. Np. proton i neutron różnią się ładunkiem elektrycznym, ale oddziałują tak samo „silnie” i „słabo”. Dla tych dwóch typów oddziaływań mamy więc symetrię względem zamiany protonu na neutron i odwrotnie. Odkrycie cząstki Higgsa potwierdza, że prawa podstawowe rządzące w świecie kwantowym oparte są na zasadach symetrii. Podstawą teorii oddziaływań słabych i elektromagnetycznych jest pewna symetria względem zamiany fotonu (kwantu pola elektromagnetycznego) na cząstkę W lub cząstkę Z (kwantów sił odpowiedzialnych za oddziaływania słabe), ich nierozróżnialność pod względem wielu własności, mimo że foton nie ma masy, a cząstki W i Z są około 100 razy cięższe od protonu. Właśnie istnienie cząstki Higgsa pozwala zrozumieć, że nie ma sprzeczności pomiędzy powyższymi faktami. Daje odpowiedź na pytanie, skąd pochodzi masa cząstek W i Z, bez naruszenia symetrii między nimi a fotonem pod względem wielu innych podstawowych własności.

Dochodzimy w ten sposób do drugiego powodu fundamentalności odkrycia cząstki Higgsa: rzuca ono nowe światło na pochodzenie masy we Wszechświecie. Czym jest masa ciała i skąd może pochodzić?

Wiemy od czasu Newtona (~ 1687), że masa to pewna własność ciała, charakteryzująca możliwość wprawienia go w ruch ze stanu, w którym spoczywa, lub ogólniej, zwiększenia jego prędkości, czyli przyspieszenia go; mówiąc bardziej „naukowo”, to miara jego bezwładności. Jeśli ciało zbudowane jest z mniejszych ciał obdarzonych masą, to w pierwszym przybliżeniu można by się spodziewać, że masa całości jest sumą mas składników. Wyobraźmy sobie jednak, że mamy „balon” – lekką powłokę wypełnioną cząsteczkami prawie bezmasowego gazu. Okazuje się, że masa balonu jest znacznie większa od sumy mas powłoki i cząsteczek gazu. Wyjaśnia nam to wspomniany już wzór Einsteina, $E = mc^2$, który mówi, że masa to energia i odwrotnie, więc do masy balonu daje wkład energia kinetyczna poruszających się w balonie, uwięzionych w nim cząsteczek gazu. Podgrzany balon ma większą masę od chłodnego! Trudniej go pchnąć niż balon chłodny. Gdyby mieć niezwykle precyzyjne przyrządy pomiarowe (różnica w masie będzie bardzo mała), można by ten fakt sprawdzić doświadczalnie.

Proton i neutron są takimi balonami, w których poruszają się z bardzo dużymi energiami uwięzione w nich ich składniki – kwarki. Masa protonu jest znacznie większa od sumy mas kwarków. Ale skąd w takim razie pochodzi masa kwarków lub innych cząstek elementarnych, jak np. elektronu, które najprawdopodobniej nie składają się z jeszcze mniejszych składników?



Odpowiedzi na to pytanie udzielają panowie Brout, Englert i Higgs: „Próżnia” jest „niepusta”: Wszechświat jest równomiernie wypełniony „czymś” – nazwijmy to „eterem”. Fizycy nazywają to polem Higgsa. To „coś” może oddziaływać z pewnymi cząstkami, a z innymi nie; zależy to od własności tego „czegoś”. Mówiąc obrazowo, „eter” przylepia się do cząstek, z którymi może oddziaływać, i cząstki te poruszają się z ładunkiem „eteru” stale na swoim „grzbiecie”; aby je przyspieszyć, trzeba oczywiście także przyspieszyć ten ładunek „eteru”, który niosą – i stąd masa cząstek. Salam i Weinberg postawili hipotezę, że oddziaływanie z „próżnią” stanowi źródło masy cząstki W ; foton nie oddziałuje z próżnią, bo „eter” jest elektrycznie obojętny. Śladem istnienia takiej „próżni” powinna być fizyczna cząstka, o bardzo konkretnych własnościach, i taka właśnie cząstka została odkryta za pomocą LHC w CERN-ie.

Odkrycie to kończy więc pewną historię... Triumfuje obraz świata opartego na zasadach symetrii, z jej naruszeniem przez własności „próżni”.



I wreszcie trzeci, bardziej ogólny powód, dla którego odkrycie cząstki Higgsa ma znaczenie fundamentalne. Po raz kolejny okazuje się, że otaczający nas świat materialny daje się zrozumieć etapami, dzięki przybliżonym prawom fizyki, opisującym pewien zakres zjawisk. Tak było w przypadku teorii Newtona, która okazała się przybliżeniem bardziej fundamentalnej teorii względności Einsteina. Tak jest w przypadku teorii zjawisk elektromagnetycznych, którą dziś rozumiemy jako przybliżenie Modelu Standardowego. I tak zapewne będzie z Modelem Standardowym, który okaże się prawdopodobnie przybliżeniem jakiejś głębszej teorii. Intrygujące jest jednak to, że w tej naukowej wspinaczce możemy od czasu do czasu odpocząć, jak alpinista po osiągnięciu kolejnej półki.

Możemy odpocząć, gdy pewien obszar zjawisk daje się zrozumieć w sposób spójny i z tak dobrym przybliżeniem, że na razie nie widzimy odstępstw od przewidywań teorii dla tych zjawisk. W fizyce nie ma jednak praw ani prawd absolutnych. Prawa fizyki trzeba zawsze traktować jako przybliżone... i poszukiwać od nich odstępstw.

Wszystko, co dotąd obserwujemy w świecie kwantowym w laboratoriach zbudowanych na Ziemi, daje się zrozumieć w ramach Modelu Standardowego. Na razie nie widać żadnych odstępstw od przewidywań tej teorii. Ale o tym, że nie jest to Teoria Wszystkiego, świadczą obserwacje astrofizyczne. Z nich dowiadujemy się o historii Wszechświata.

Wszechświat się rozszerza. Dawno temu był gęsty i gorący – wypełniające go cząstki zderzały się z wielkimi energiami. Zachodzące wówczas procesy, których efekty obserwujemy na „niebie”, podlegały prawom fizyki oddziaływań elementarnych. Większość tych efektów daje się zrozumieć w ramach Modelu Standardowego. Dzięki tej teorii rozumiemy, co zaszło we Wszechświecie w czasie po jednej miliardowej części sekundy po Wielkim Wybuchu. Obserwacje Wszechświata wskazują jednak, że bardzo ważne zjawiska pozostają niewyjaśnione i musiały zajść wcześniej niż jedna miliardowa część sekundy: zniknęła wtedy antymateria oraz ustalony został zaskakujący skład materii (energii) Wszechświata, w którym znana materia stanowi jedynie ~5% całkowitej jego energii, a reszta jest czymś nieznanym – tzw. ciemną materią i ciemną energią.

Potrzebna jest więc głębsza teoria oddziaływań elementarnych, która wyjaśni te zagadki! W LHC cząstki zderzają się z energiami typowymi dla zderzeń cząstek we Wszechświecie, zachodzącymi w czasie jednej dziesięciotysięcznej z jednej miliardowej części sekundy po Wielkim Wybuchu. Spodziewamy się, że przy takich energiach zderzeń pojawią się nowe zjawiska (nowe cząstki?) – wykraczające poza Model Standardowy – które pomogą wyjaśnić skład materii we Wszechświecie. Nowa fizyka...?

Jeżeli P.T. Czytelnicy uważają, że te rozważania są nie tylko poza naszą intuicją, ale nawet wyobraźnią, to ja się z tym zgadzam. Tym bardziej zaskakujący jest fakt, że wnioski z nich są potwierdzane empirycznie! Albert Einstein zwykł mawiać – „Make things as simple as possible but not simpler”.

STEFAN POKORSKI

Instytut Fizyki Teoretycznej, Uniwersytet Warszawski
Członek czynnny PAU