

Czym jest Model Standardowy?

Wydaje się to niewiarygodne, ale świat naszej codzienności jest zbudowany z zaledwie czterech rodzajów fundamentalnych „cegiełek”. Podziwiamy go dzięki fotonom, bo to one oddziałują z atomami tworzącymi nasze ciała i nasze środowisko naturalne. Atomy z kolei są złożone z elektronów związanych wokół jąder atomowych. Jądra atomowe zaś to zlepki protonów i neutronów, cząstek składających się z trójek kwarków dolnych i górnych. Kwarki te są złączone dzięki oddziaływaniom przenoszonym przez gluony.

Badania prowadzone od początków XX wieku z użyciem coraz lepszych akceleratorów dostarczyły dowodów, że rzeczywistość jest jednak bardziej złożona. Oprócz elektronu, fotonu, dwóch kwarków i gluonów, istnieje w niej więcej cząstek elementarnych i całe zoo złożonych cząstek jądrowych. Tę skomplikowaną strukturę świata kwantów udało się fizykom opisać za pomocą zespołu teorii nazywanego Modelem Standardowym.

W Modelu Standardowym materia składa się z cząstek elementarnych, które dzielą się na trzy podobne grupy (rodziny). Elektron, neutrino elektronowe, kwark górny i kwark dolny tworzą pierwszą rodzinę. Druga to mion, neutrino mionowe, kwark powabny i kwark dziwny. W trzeciej rodzinie znajdziemy taon, neutrino taonowe, kwark prawdziwy i kwark piękny.

Zamiast na rodziny, można zastosować też inny podział: po prostu na kwarki i pozostałe cząstki, czyli leptony (są więc nimi elektrony, miony, taony i trzy odpowiadające im neutrina).

Wszystkie wymienione cząstki, ze względu na pewne wspólne cechy nazywane fermionami, oddziałują ze sobą. Nośnikami oddziaływań są cząstki podlegające innym prawom statystycznym – bozony. Zaliczamy do nich foton (przenosi siły elektromagnetyczne), bozony W^+ , W^- i Z^0 (odpowiedzialne za słabe oddziaływania jądrowe) oraz gluony (które przenoszą oddziaływania silne, wiążące kwarki w takie kompleksy, jak proton czy neutron).

Względna prostota Modelu Standardowego jest myląca. Gluonów jest w nim aż osiem, a wszystkie kwarki i leptony mają swoich antymaterialnych partnerów, czyli antycząstki (np. antypartnerem elektronu jest pozyton, cząstka o przeciwnym znaku ładunku elektrycznego).

Model Standardowy uwzględnia wiele zjawisk zachodzących w świecie kwantów. Jednak aby jego przewidywania zgadzały się z rzeczywistością, trzeba doświadczać, z ogromną precyzją, dopasować niemal dwadzieścia różnych parametrów. Dlaczego parametry te są właśnie takie, a nie inne – tego nie wiemy. Z całą pewnością Model Standardowy nie jest też teorią ostateczną. Nie uwzględnia przecież istnienia grawitacji ani – wciąż hipotetycznych – cząstek ciemnej materii, która wydaje się wpływać na ruchy galaktyk. Nie wyjaśnia także, dlaczego wkrótce po Wielkim Wybuchu materia, wypełniająca go dokładnie taką samą liczbą cząstek i antycząstek, w całości nie anihilowała.

Mimo wad, Model Standardowy okazał się precyzyjnym sposobem opisu cząstek jądrowych. Swą obecną formę teoria ta przybrała w latach 70. ubiegłego wieku. Z czasem jej przewidywania potwierdzono doświadczalnie. W 1995 roku fizykom udało się zaobserwować ostatni brakujący kwark górny (top), a pięć lat później odkryto w naturze ostatni lepton: neutrino taonowe.

Dlaczego cząstka Higgs'a?

Wczesne wersje Modelu Standardowego miały jeden fundamentalny mankament – występujące w nim cząstki elementarne musiały być pozbawione masy! Nawet codzienne obserwacje pozwalają stwierdzić, że nie może to być prawdą: obiekty wokół nas, zbudowane z cząstek jądrowych, z całą pewnością mają masę. Teoria w rażący sposób nie zgadzała się z rzeczywistością i należało z nią koniecznie coś zrobić.

Na szczęście na początku lat 60. ubiegłego wieku kilku fizyków (Yoichiro Nambu, a później Robert Brout i Francois Englert) zauważyło, że problemy mogą zniknąć, gdy w Modelu Standardowym uwzględnimy obecność jeszcze jednego pola kwantowego.

Pomysł został dopracowany przez brytyjskiego fizyka Petera Higgsa. Zaproponowane przez niego skalarne pole kwantowe miało bardzo specyficzne własności. Nie tylko musiało wypełniać cały Wszechświat, w tym próżnię, ale potencjał związany z tym polem nie mógł w próżni przyjmować wartości zero. Oznaczało to, że w każdym punkcie przestrzeni powinien istnieć pewien stały wkład do gęstości energii, pochodzący od pola Higgsa.

Cząstki elementarne w Modelu Standardowym nabierają masy wskutek oddziaływania z polem Higgsa, które stawia im opór. Nowy mechanizm nie tylko tłumaczył pochodzenie masy, wyjaśniał również, dlaczego masę mają bozony W i Z, cząstki pośredniczące w przenoszeniu słabych oddziaływań jądrowych (pozostałe nośniki oddziaływań, fotony i gluony, nie mają masy).

Skoro w Modelu Standardowym wzbudzenia pól kwantowych są obserwowane jako cząstki, z nowym polem musiała być związana pewna cząstka elementarna. Nazwano ją bozonem Higgsa lub, w skrócie, po prostu higgsem (inne określenie, boska cząstka, zostało mu nadane z wyrachowaniem, wyłącznie dla celów propagandowych). Charakterystyczną cechą bozonu Higgsa jest brak spinu, pewnej cechy kwantowej. Dotychczas wykryliśmy wiele cząstek jądrowych o spinie zerowym, lecz wszystkie były obiektami złożonymi (na przykład z par kwark-antykwar).

Pozostał tylko „drobiazg”: należało tę cząstkę odkryć.

Obserwacja bozonu Higgsa w akceleratorze LHC to potwierdzenie istnienia w przyrodzie pola Higgsa. Oznacza, że w księdze o tytule „Model Standardowy” fizycy właśnie ukończyli ostatni rozdział. Lecz wiemy już, że ten ostatni rozdział zapowiada nową, kto wie, czy nie bardziej fascynującą od dotychczasowej księgę. Kolejny tom, który fizycy całego świata dopiero zaczynają pisać.

Znaczenie bozonu Higgsa i co dalej?

Model Standardowy nie jest ostateczną teorią opisu struktury materii. Fizycy są tego pewni, dlatego od dawna trwają prace teoretyczne nad jego rozszerzeniem i uogólnieniem. Ekstremalne wymagania technologiczne fizyki cząstek elementarnych powodują, że pomysły pojawiają się znacznie szybciej niż możliwości ich doświadczalnej weryfikacji.

W ciągu ostatniego półwiecza teoretycy przedstawili wiele propozycji rozszerzenia Modelu Standardowego. Grupa nowych teorii, nazywanych supersymetrycznymi, zakłada, że wszystkie fermiony (kwarki i leptoni) mają swoich supersymetrycznych partnerów i że są to cząstki podobnie jak higgs elementarne, a ich spin także jest równy zero. Poszukiwanie cząstek supersymetrycznych to dziś jedno z najważniejszych zadań realizowanych w akceleratorze LHC. Są one bowiem najpoważniejszymi kandydatami na ciemną materię, istnienie której zdają się potwierdzać obserwacje astronomiczne ruchów galaktyk i ich gromad.

Inny zespół teorii zakłada istnienie technicoloru, nowego typu oddziaływania, które powinno zachodzić między pewnymi, jeszcze nieodkrytymi cząstkami elementarnymi. W tym ujęciu mechanizm Higgsa, odpowiadający za masy cząstek elementarnych, pojawia się nie na zasadzie deklaracji precyzyjnie dopasowanej do wymogów teorii, lecz wskutek zachodzących w tej teorii dynamicznych procesów.

Dodatkowe wymiary przestrzeni to kolejna próba rozszerzenia Modelu Standardowego, wywodząca się z teorii strun. Teoria wymusza w tym przypadku istnienie aż dziesięciu wymiarów przestrzennych. Widzimy zaledwie trzy, ponieważ siedem wymiarów byłoby mocno zwiniętych. To zwinięcie można sobie wyobrazić poprzez analogię z kartką: kartka ma (w praktyce) dwa wymiary przestrzenne, możemy ją jednak zwinąć w tak ciasny rulon, że z daleka będzie on wyglądał jak jednowymiarowy pręt. Teorie odwołujące się do dodatkowych wymiarów wymagają, w mniejszym lub większym stopniu, uwzględnienia niektórych idei supersymetrii.

Ciekawym aspektem nowych teorii – a wymieniliśmy tylko trzy najpopularniejsze podejścia – jest możliwość zunifikowania oddziaływań występujących w naturze. Unifikacja oznacza, że oddziaływania, które w niskich energiach wyglądają na różne i od siebie niezależne, w wysokich energiach „stapiają się” w jedno oddziaływanie. Od czasów Maxwella wiadomo na przykład, że pole elektryczne i pole magnetyczne są przejawami istnienia tego samego pola – elektromagnetycznego. W XX wieku oddziaływania elektromagnetyczne udało się zunifikować z jądrowymi słabymi. Obecnie fizycy dążą do połączenia oddziaływań elektroslabych z jądrowymi silnymi – są to teorie tzw. Wielkiej Unifikacji.

Przedstawione próby rozszerzenia Modelu Standardowego prezentują najbardziej popularne podejścia do zagadnienia. Każda teoria, a nawet jej wariant, narzuca dość wyraźnie ograniczenia na zakres mas dozwolonych dla bozonu Higgsa. Jednocześnie większość teorii, zwłaszcza aspirujących do wielkiej unifikacji, nie potrafi odtworzyć bozonu Higgsa o masie zaobserwowanej ostatnio w LHC. Oznacza to, że bozon Higgsa i jego własności stały się papierkiem lakmusowym weryfikującym poprawność wielu dotychczasowych idei fizycznych.

Jak działa Wielki Zderzacz Hadronów?

Akcelerator LHC (Large Hadron Collider, czyli Wielki Zderzacz Hadronów) znajduje się w ośrodku CERN pod Genewą. Jest najbardziej skomplikowanym urządzeniem skonstruowanym przez człowieka, rodzajem mikroskopu pozwalającego badać świat w bardzo małych skalach. W akceleratorze dochodzi do zderzeń dwóch poruszających się w przeciwne strony wiązek cząstek – protonów lub jąder ołowiu.

W LHC cząstki są formowane w dwie przeciwbieżne wiązki. Biegają one w dwóch równoległych rurach średnicy kilku centymetrów. Rury ułożono ok. 100 metrów pod ziemią, w kolistym tunelu o obwodzie 27 km. Aby cząstki nie rozpraszały się za szybko na gazach, wewnątrz rur (na całej długości tunelu!) panuje ultrawysoka próżnia.

Docelowo protony będą rozpędzane w LHC do prędkości ok. 0,999999991 prędkości światła i w każdej sekundzie okrążą tunel ponad jedenaście tysięcy razy. Aby zmusić cząstki o tak dużych energiach do ruchu w kolistym tunelu, trzeba zakrzywiać ich tory za pomocą pola magnetycznego wytwarzanego przez ponad 1200 potężnych elektromagnesów. Prąd płynący przez uzwojenia magnesów ma natężenie kilkunastu tysięcy amperów – jak w niewielkim wyładowaniu atmosferycznym.

Elektromagnesy w tunelu LHC zbudowano z nadprzewodników, czyli materiałów, które w bardzo niskich temperaturach nie stawiają oporu elektrycznego. Wszystkie nadprzewodniki są schłodzone do temperatury zaledwie 1,9 stopnia powyżej zera bezwzględnego (oznacza to, że wewnątrz LHC jest chłodniej niż w otwartej przestrzeni kosmicznej). Oprócz magnesów dipolowych, prowadzących cząstki wzdłuż rur próżniowych, LHC wyposażono w zespoły magnesów ogniskujących i korekcyjnych, które zapobiegają rozbieganiu się wiązek i ogniskują je w punktach zderzeń wewnątrz detektorów.

Protony we wnętrzu akceleratora krążą w paczkach po ok. 100 miliardów. Energia jednej paczki może odpowiadać energii eksplozji nawet 80 kg trotylu. W tunelu akceleratora, w siedmiometrowych odstępach, jednocześnie może krążyć ponad 2800 takich paczek. W ostatecznej konfiguracji akceleratora obie protonowe wiązki będą miały energię pociągu o masie 800 t, pędzącego z prędkością 150 km/h. Kontrolowanie tak dużej energii przez tak złożone urządzenie jest unikatowym w skali świata wyzwaniem naukowym i technicznym.

Podczas zderzania wiązek energia kinetyczna pierwotnych cząstek (protonów lub jąder ołowiu) przekształca się w nowe, w większości nietrwałe cząstki. Zadaniem detektorów jest identyfikacja cząstek powstających w zderzeniach, pomiar ich położenia w przestrzeni, ładunku elektrycznego, prędkości, masy i energii. Naprawdę ciężkie cząstki mają czasy życia krótsze od jednej pikosekundy (10^{-12} s) i nie mogą być obserwowane w żadnym układzie detekcyjnym. Ich badanie jest możliwe tylko dzięki analizie energii i pędów zarejestrowanych produktów ich rozpadu.

Opracowane na podstawie materiałów NCBJ dostępnych na stronie

<http://www.ncbj.gov.pl/node/1694>