



Supersymetria, czyli super symetria

Piotr Korcyl
Instytut Fizyki UJ

W niniejszym artykule chciałbym zaprosić Państwa do świata cząstek elementarnych. Zamierzam przedstawić Państwu kilka zagadnień, na których skupia się moja praca naukowa. Dotyczą one supersymetrii, która jest pewną nową, na razie hipotetyczną, symetrią pomiędzy cząstkami elementarnymi. Zanim jednak opiszę moje badania, zacznę od kilku słów na temat aktualnego stanu naszej wiedzy o mikroświecie, jak również wyjaśnię, czym właściwie jest supersymetria.

Cząstki elementarne

Świat, który obserwujemy, zbudowany jest z dwóch typów cząstek elementarnych: cząstek materii oraz cząstek będących nośnikami oddziaływań. Cząstki materii, np. elektrony oraz kwarki budujące protony i neutrony, nazywamy zbiorowo *fermionami*. Cząstki – nośniki oddziaływań – takie jak np. foton (nośnik oddziaływania elektromagnetycznego), nazywamy *bozonami*. Między fermionami i bozonami istnieje jedna zasadnicza różnica, mianowicie – mówiąc obrazowo – tylko jedna cząstka materii (fermion) może znajdować się w jednym punkcie przestrzeni. Natomiast, jeśli chodzi o cząstki przenoszące oddziaływanie, może to być dowolna liczba.

Cząstkę możemy scharakteryzować poprzez podanie kilku liczb. I tak, powinniśmy podać jej masę, która mówi, w jaki sposób ta cząstka odpowiada na siłę grawitacji. Następnie, powinniśmy podać jej ładunek elektryczny, który określi jak bardzo cząstka będzie odpychać lub przyciągać inne cząstki naładowane elektrycznie. Innymi słowy, aby wskazać konkretną cząstkę musimy powiedzieć, w jaki sposób odpowiada ona na wszystkie znane w Przyrodzie oddziaływania. Znamy cztery fundamentalne oddziaływania. Poza wspomnianą już grawitacją oraz oddziaływaniem elektromagnetycznym istnieją jeszcze: oddziaływania zwane słabymi (odpowiedzialne po części za zjawiska radioaktywności) i oddziaływania zwane silnymi (odpowiedzialne za stabilność jąder atomowych). Do pełnego opisu cząstki musimy więc jeszcze dodać jaki niesie ona ładunek oddziaływania słabego i oddziaływania silnego.

Możliwe jest istnienie pary cząstek, jednej cząstki materii i jednej cząstki przenoszącej oddziaływanie, o identycznych wartościach wszystkich ładunków, tzn. takich samych: masach, ładunkach elektrycznych, ładunkach oddziaływania słabego i ładunkach oddziaływania silnego. Jednakże pozostanie pomiędzy nimi ciągle zasadnicza różnica związana z ich typem; cząstki materii będą fermionami, a cząstki siły – bozonami.

Model Standardowy Cząstek Elementarnych

Jednym z najprostszych doświadczeń, które można wykonać na cząstkach elementarnych jest zderzenie dwóch z nich. Wyniki takiego zderzenia zależą od tego, jaką energię początkową nadamy cząstkom. Jeśli energia jest mała a cząstki niosą np. identyczny ładunek elektryczny, odepchną się od siebie i polecą dalej po zmienionym torze. Zadaniem fizyków jest przewidywanie, jaki będzie kąt tego wychylenia. Jeśli energia będzie większa, to oprócz odchylenia, zgodnie z relacją Einsteina $E = mc^2$, dodatkowa energia zgromadzona w miejscu zderzenia może zamienić się w masę i mogą powstać całkiem nowe cząstki. W takim przypadku można przewidzieć, jakie i ile takich cząstek powstanie. Dzięki takim eksperymentom możemy powołać do życia cząstki, których nie można spotkać w normalnych warunkach, na przykład takie, które istniały tuż po Wielkim Wybuchu, lecz następnie się rozpadły.

W ciągu ostatnich 40 lat fizykom udało się stworzyć teorię matematyczną, dzięki której są w stanie przewidzieć wyniki wspomnianych eksperymentów. Teoria ta nazywana jest Modelem Standardowym Cząstek Elementarnych i opisuje, w jaki sposób cząstki materii oddziałują między sobą, wymieniając cząstki oddziaływań. Posiada on 17 parametrów, których wartości należy zmierzyć doświadczalnie. Raz zmierzone i wstawione do teorii umożliwiają obliczenie wyniku wszystkich innych eksperymentów. Należy podkreślić, że wszystkie przewidywania Modelu Standardowego zgodziły się z wykonanymi do tej pory eksperymentami.

Supersymetria

Supersymetria jest pewnego rodzaju symetrią. Jeśli mówimy, że coś jest symetryczne, rozumiemy przez to, że dany obiekt pozostanie niezmienny, jeśli wykonamy na nim pewną transformację. Okrąg jest symetryczny ze względu na obroty, ponieważ nie potrafimy odróżnić okręgu obróconego o pewien kąt i tego pierwotnego, nieobróconego. Supersymetria zakłada, że cząstki materii i cząstki oddziaływań, fermiony i bozony, mimo swojej różnicy, są pod pewnym względem takie same. Gdy fizycy mówią, że nasz Wszechświat jest supersymetryczny, rozumieją przez to, że można podmienić pewną cząstkę materii, pewien fermion, na jej supersymetrycznego partnera, odpowiedni bozon, i... Wszechświat powinien wyglądać tak samo.

Dlaczego supersymetria?

Choć, jak wspomniałem, Model Standardowy bardzo dobrze sprawdził się we wszystkich dotychczasowych eksperymentach, wiadomo już, że nie jest to pełna teoria opisująca Przyrodę. Sytuacja wygląda podobnie jak z teorią grawitacji Newtona, która dobrze sprawdza się do opisu ruchu większości planet w naszym układzie planetarnym, lecz nie jest wystarczająco dokładna, aby wytłumaczyć pewne zaburzenia w ruchu Merkurego. Do ich wyjaśnienia potrzebna była

pełniejsza teoria, mianowicie teoria grawitacji Einsteina. Podobnie rozumiemy już dzisiaj, że Model Standardowy jest bardzo dobrą teorią dla niskich energii. Dla większych, musimy poszukać pełniejszej teorii.

Jednym z mankamentów Modelu Standardowego jest brak cząstki, która mogłaby odpowiadać za ciemną materię odkrytą niedawno przez astronomów, a która według ich przewidywań wypełnia około 23% naszego Wszechświata. Koncepcja supersymetrii okazuje się tutaj bardzo przydatna. Jeśli rozszerzymy Model Standardowy, tak aby był supersymetryczny, pojawiają się w nim cząstki neutralne, które mogłyby być idealnymi kandydatami na ciemną materię.

Dodatkowo, jednym z faktów, które bardzo podobają się fizykom w idei supersymetrii, jest możliwość unifikacji wszystkich oddziaływań w teoriach supersymetrycznych. Choć Model Standardowy opisuje trzy z czterech podstawowych oddziaływań, niemniej jednak traktuje je jako trzy odrębne zjawiska. Fizycy natomiast od dawna poszukują jednej teorii, w której wszystkie oddziaływania: elektromagnetyczne, słabe i silne, byłyby przejawem pojedynczego oddziaływania fundamentalnego. W świecie, takim jakim go widzimy, wspomniane oddziaływania różnią się w sposób bardzo istotny; przykładowo, oddziaływanie silne jest tysiąc milionów razy większe od oddziaływania słabego. Bardzo trudno zatem znaleźć teorię, w której oddziaływanie fundamentalne raz przejawiałoby się jako bardzo mocne oddziaływanie silne, a w innej sytuacji – jako znikome oddziaływanie słabe. W celu odnalezienia jednej wspólnej teorii – Teorii Wszystkiego – musimy więc poszukać świata, w którym wartości tych sił byłyby bardziej zbliżone do siebie. Okazuje się, że taki świat możemy sami stworzyć: w akceleratorach cząstek elementarnych. W pewnych szczególnych warunkach, jakie mogą panować podczas zderzeń cząstek, pojawiają się sygnały świadczące o tym, że oddziaływania elektromagnetyczne i słabe unifikują się w pojedyncze oddziaływania nazywane oddziaływaniami elektroslabymi. Niemniej jednak świat, w którym wszystkie siły mają zbliżoną wartość, to świat bardzo wysokich energii, prawdopodobnie takich, jakie panowały w naszym Wszechświecie na krótką chwilę po Wielkim Wybuchu. Energie, jakie jesteśmy w stanie wytworzyć w naszych akceleratorach, są w porównaniu z nimi zbyt małe. W związku z tym musimy zbadać taki świat teoretycznie. Niestety, wbrew oczekiwaniom, po przeprowadzeniu rachunków w ramach Modelu Standardowego, okazuje się, że nie istnieje taka energia, dla której wszystkie oddziaływania byłyby równorzędne. Oznacza to, że nasze dotychczasowe teorie nie dają się połączyć w jedną Teorię Wszystkiego. Mogą więc teraz Państwo sobie wyobrazić entuzjazm fizyków, gdy okazało się, że jeśli rozważamy supersymetryczne rozszerzenie Modelu Standardowego, pojawia się dokładnie jedna energia dla której wszystkie siły przyjmują tę samą wartość. W takich warunkach siły stają się nierozróżnialne, a supersymetryczna teoria, która je opisuje, staje się teorią uniwersalną. Poszczególne siły są tylko jej szczególnymi przypadkami. Dlatego też fizycy wiążą wielkie nadzieje z supersymetrią.

Łamanie supersymetrii

Faktem jest jednak, że do dzisiaj żadne doświadczenie nie wykazało istnienia par cząstek o takich samych ładunkach, lecz różnych typach. Oznacza to, że supersymetria, jeśli istnieje, musi być złamana. Fizycy wierzą więc, że na samym początku Wszechświat był supersymetryczny. Wraz z rozszerzeniem się i chłodzeniem, we Wszechświecie nastąpiło wiele przejść fazowych. Przejście fazowe to zmiana stanu skupienia substancji; tak jak w przypadku kondensacji pary wodnej w ciecz lub zamarzania wody, przez co powstaje lód. W czasie jednego z podobnych przejść fazowych Wszechświat przestał być supersymetryczny. We wszystkich parach cząstek powstała różnica w ich masie. Te lżejsze są tymi, które obecnie obserwujemy. Te cięższe rozpadły się na lżejsze i zniknęły. Moglibyśmy je ponownie zobaczyć, gdybyśmy dysponowali akceleratorami cząstek elementarnych o odpowiednio wysokich energiach. Niemniej jednak fizycy myślą, że pomimo złamania supersymetrii, Wszechświat 'pamięta', że kiedyś był supersymetryczny. Dzięki tej pamięci teorii, którymi dysponujemy, pozwalają się połączyć, zunifikować, dla pewnej, dostatecznie dużej energii. Powstaje jednak pytanie, w jaki sposób supersymetria została złamana? Co było przyczyną złamania i jakie warunki musiały być spełnione, aby pomimo wszystko, zachowana została pamięć o supersymetrycznej przeszłości Wszechświata? By znaleźć odpowiedź na takie pytania niezbędne jest teoretyczne zbadanie różnych modeli łamania supersymetrii.

Modele łamania supersymetrii

Działanie supersymetrii najlepiej zrozumieć analizując proste układy fizyczne, nazywane modelami, zaprojektowane w taki sposób, aby posiadać supersymetrię. Dzięki modelom można zobaczyć, w jaki sposób powstają pary cząstek o identycznych masach, lecz różnych typach. W moich badaniach wykorzystałem zarówno modele znane już w literaturze, jak i zaproponowałem nowe.

Oczywiście badane modele nie były pełną teorią Modelu Standardowego. Obliczenia w ramach Modelu Standardowego byłyby zbyt skomplikowane, a olbrzymia ilość dodatkowych zjawisk, które są w nim zawarte, przysłaniałyby i nie pozwalały zrozumieć działania mechanizmów łamania supersymetrii. Zatem do konstrukcji moich modeli wybrałem jedynie najbardziej kluczowe elementy Modelu Standardowego, które następnie dodatkowo uprościłem. Teoria Modelu Standardowego jest w stanie opisać zjawiska w całym Wszechświecie, w szczególności w każdym jego punkcie i w każdej chwili. Znalezienie matematycznych wyrażeń, które zawierałyby tę olbrzymią ilość informacji jest niemożliwe. Dlatego fizycy zazwyczaj zajmują się małym wycinkiem przestrzeni, np. obszarem zderzeń w akceleratorach cząstek elementarnych. Uproszczenie, które zastosowałem, polega na ograniczeniu badanego wycinka do pojedynczego punktu. Jest to dość drastyczne zredukowanie problemu, niemniej jednak możliwe jest znalezienie sytuacji, w których może być uzasadnione. Po obli-

czeniu mas cząstek żyjących w takim modelu można sprawdzić, w jakim stopniu wyniki te odpowiadają pomiarom eksperymentalnym.

W ciągu ostatnich dwóch lat opracowałem różne metody, które pozwalają obliczać masy wszystkich cząstek pojawiających się w moich modelach. Z jednej strony są to metody numeryczne, które polegają na przetłumaczeniu badanego problemu na zagadnienie, które może być rozwiązane za pomocą programu komputerowego. Z drugiej strony, w niektórych przypadkach, przygotowałem metody analityczne, dzięki którym mogę obliczać masy cząstek wprost na kartce papieru. Oczywiście, te ostatnie dają dużo większe zrozumienie problemu. Choć niektóre z moich modeli są znane od przeszło 30 lat, niemniej jednak, jednym z moich większych osiągnięć było znalezienie po raz pierwszy pełnego zbioru ich rozwiązań analitycznych.

Obecnie pracuję nad konsekwencjami wprowadzenia do tych modeli różnych mechanizmów łamania supersymetrii. Jak już wspomniałem, mechanizmy takie nie mogą powodować ‘pełnego’ złamania supersymetrii, musi po niej pozostać pewne ‘wspomnienie’. Fizycy nazywają takie mechanizmy spontanicznym lub dynamicznym złamaniem supersymetrii. Wykorzystując znalezione rozwiązania analityczne mogę badać łamanie supersymetrii dla bardziej realistycznych modeli niż to było dotychczas możliwe. Dodatkowo, mogę otrzymać dużo bardziej precyzyjne wyniki. Dzięki przygotowanym metodom obliczeniowym jestem w stanie otrzymać dokładne liczby mówiące o różnicy mas pomiędzy cząstkami w każdej parze. Mogę zatem sprawdzić, jak ta różnica zależy od parametrów zewnętrznych. Szukam też odpowiedzi na odwrotne pytanie: jakie muszą być parametry zewnętrzne, aby otrzymywane masy cząstek były zgodne z danymi eksperymentalnymi. Dzięki wykorzystaniu aktualnych pomiarów eksperymentalnych być może będę mógł obliczyć, w ramach moich modeli, jaka musiała być temperatura we Wszechświecie, gdy nastąpiło złamanie supersymetrii. Informacje takie będą bardzo pomocne w badaniach modeli kosmologicznych i z pewnością poprawią nasze rozumienie historii Wszechświata.

Zakończenie

Mam nadzieję, że udało mi się Państwa przekonać, że świat cząstek elementarnych jest niezmiernie ciekawy i kryje wiele tajemnic. Możliwość uczestniczenia w badaniach wyjaśniających te tajemnice daje niesamowicie dużo satysfakcji. Mam nadzieję, że zachęciłem tym samym Państwa do śledzenia wiadomości docierających z tego mikroświata, tym bardziej, że niedługo będziemy dysponowali pierwszymi wynikami eksperymentów wykonanych na najsilniejszym akceleratorze cząstek elementarnych zbudowanym dotychczas przez ludzi, mianowicie akceleratorze LHC w CERNie pod Genewą.

Redakcja poleca artykuł Michała Praszalowicza *Po co nam LHC? z Fotonu 108/2010*.