



Granice fizyki¹

Marek Demiański

*Instytut Fizyki Teoretycznej
Uniwersytet Warszawski*

Wstęp

Wiek dwudziesty był okresem burzliwego rozwoju fizyki, zarówno teoretycznej jak i doświadczalnej. Spowodowało to znaczne rozszerzenie zakresu badań i przyspieszyło tempo prac wdrożeniowych nad praktycznym zastosowaniem nowych odkryć fizycznych. Osiągnięcia fizyki XX wieku w istotny sposób wpłynęły na nasze codzienne życie. Dziś trudno sobie wyobrazić, jak można było sobie radzić bez radia, samolotu, telefonu komórkowego czy komputera.

Jednym z głównych źródeł tych sukcesów był szczęśliwy splot kilku czynników – szybko powiększających się możliwości technicznych, odpowiedniego poziomu finansowania badań i ich koordynacji oraz samej metodologii badań fizycznych. Fizyka jako podstawowa dziedzina nauk przyrodniczych zajmuje się badaniem otaczającego nas świata przez prowadzenie obserwacji, formułowanie w języku matematycznym teorii opisujących różne zjawiska, a następnie konfrontowanie przewidywań tych teorii z danymi doświadczalnymi. Ten bezlitosny i bezstronny mechanizm sprawdzania i selekcji pozwala na wybieranie spośród różnych hipotez i modeli tych, które najlepiej opisują rzeczywistość. Jest to zasada jednocześnie samoograniczająca się i samooczyszczająca – fizyka nie zajmuje się problemami, które nie poddają się testom obserwacyjnym. Zasada ta w naturalny sposób prowadzi do pytania o granice fizyki i granice poznania.

Z perspektywy historycznej wyraźnie widać, że granice fizyki nie są absolutne – są stale przesuwane. Rozpatrzmy dwa narzucające się przykłady: poznawanie i badanie Wszechświata oraz badanie struktury cząstek elementarnych i ich oddziaływań. W obu tych dziedzinach w ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat dokonano bardzo ważnych odkryć, które zmieniły nasze wyobrażenia o mikro- i makroświecie.

Kosmologia – spojrzenie na cały Wszechświat

W drugiej połowie lat dwudziestych minionego wieku dzięki odkryciom Edwina Hubble'a okazało się, że Droga Mleczna – ogromne skupisko ok. 150 miliardów gwiazd – jest tylko jedną z wielu galaktyk wypełniających Wszechświat, a cały Wszechświat, ten największy układ fizyczny, jaki jesteśmy w stanie obserwować, zmienia się, ewoluje. Jeszcze zanim Hubble odkrył, że Wszech-

¹ Przedruk za zgodą autora i redakcji z *Postępów Fizyki*, Zeszyt 2, 58, 2007.

świat się rozszerza, Aleksander Friedman znalazł rozwiązanie równań Einsteina, które opisuje dynamikę czasoprzestrzeni wypełnionej jednorodnie i izotropowo materią, oraz wykazał, że taki wszechświat musi się zmieniać i, co więcej, musiał mieć początek. Oznacza to, że cofając się do coraz wcześniejszych epok, dojdziemy w końcu do stanu, gdy gęstość materii była nieskończona.

W drugiej połowie lat czterdziestych George Gamow poważnie potraktował przewidywania Friedmana i zaproponował model ewolucji Wszechświata nazywany obecnie modelem Wielkiego Wybuchu. Gamow przyjął, że w bardzo wczesnych fazach ewolucji Wszechświat był wypełniony bardzo gorącą i bardzo gęstą materią, tak gorącą i tak gęstą, że mogły wówczas istnieć tylko najbardziej elementarne składniki materii. Ta gorąca, rozszerzająca się plazma ulegała adiabatycznemu ochładzaniu i gdy jej temperatura obniżyła się do kilkudziesięciu milionów kelwinów, rozpoczął się proces tworzenia lekkich pierwiastków. Już pierwsze oszacowania dokonane przez Ralpha Alpera i Roberta Hermana, doktorantów Gamowa, wykazały, że mógł wówczas powstać tylko wodór i hel z niewielką, ledwo zauważalną domieszką innych lekkich pierwiastków aż do tlenu i węgla łącznie. Alpher i Herman oraz niezależnie Gamow przewidzieli, że we Wszechświecie powinien pozostać ślad po tym okresie wczesnej ewolucji w postaci równowagowego termicznego promieniowania relikтового o temperaturze zaledwie kilku kelwinów.

Mimo że analiza zawartości lekkich pierwiastków w gwiazdach i obłokach gazowych potwierdziła przewidywania modelu Wielkiego Wybuchu, nadal poważnie rozważano alternatywny model stanu stacjonarnego, który dopuszczał stałą kreację materii i dzięki temu omijał problem początkowej osobliwości. Model Wielkiego Wybuchu został powszechnie zaakceptowany po odkryciu w 1964 r. promieniowania relikтового przez Arno Penziasa i Roberta Wilsona. Kilka lat później Roger Penrose i Stephen Hawking korzystając z ogólnej teorii względności wykazali, że zmieniający się Wszechświat wypełniony promieniowaniem i materią, nawet bez bardzo silnego założenia o jego jednorodności, musiał mieć osobliwy początek. Tego osobliwego stanu początkowego nie można opisać za pomocą klasycznej teorii czasoprzestrzeni. Formalnie punkt osobliwy reprezentujący początek Wszechświata lub stan końcowy procesu grawitacyjnego zapadania się gwiazdy nie należy do klasycznej czasoprzestrzeni. Można powiedzieć, że równania Einsteina opisujące dynamikę czasoprzestrzeni wyznaczają w naturalny sposób granice ich stosowalności.

Od czasu powstania mechaniki kwantowej i kwantowej teorii pola trwają poszukiwania kwantowej teorii grawitacji (KTG), a dokładniej kwantowej teorii czasoprzestrzeni. Pomimo wysiłku wielu wybitnych fizyków do dziś nie udało się skonstruować takiej teorii. Istnieją i są aktywnie rozwijane dwa podejścia: teoria superstrun – ambitny program unifikacji wszystkich oddziaływań fundamentalnych, który zerwał z czterowymiarową koncepcją czasoprzestrzeni i zastąpił cząstki punktowe jednowymiarowymi strunami poruszającymi się w wie-

lowymiarowej płaskiej czasoprzestrzeni, oraz pętlowa KTG wprowadzająca dyskretną strukturę w czasoprzestrzeni.

Zastosowanie pętlowej KTG do opisu ewolucji Wszechświata pozwala uniknąć początkowej osobliwości. Klasyczny początkowy stan osobliwy zostaje zastąpiony przez regularny stan kwantowy i, co więcej, można odtwarzać jego ewolucję w przeszłości (czyli dla ujemnych czasów z naszego punktu widzenia).

Model ten przypomina rozpatrywany w latach czterdziestych i pięćdziesiątych oscylacyjny model Wszechświata. W różnych modelach bardzo wczesnych faz ewolucji Wszechświata rozpatrywanych w teorii superstrun stan osobliwy nie występuje, ale modele te wymagają dość szczególnego wyboru parametrów i – choć jest to bardzo prawdopodobne – nie wiadomo, czy niewystępowanie początkowej osobliwości jest ich ogólną, wspólną własnością. Dziś nie wiadomo też jeszcze, czy teorie takie można będzie sprawdzać na drodze obserwacji. Jeżeli się okaże, że bardzo wcześnie, w momencie przejścia od kwantowej fazy ewolucji do fazy klasycznej lub nieco później, Wszechświat przeszedł przez okres bardzo szybkiego (wykładniczego) rozszerzania się, zwany okresem inflacji, to najprawdopodobniej wszystkie informacje o kwantowej fazie ewolucji Wszechświata zostały wymazane. Innymi słowy, klasyczny Wszechświat „zapomina” o tym, w jaki sposób powstał. Ta niemożność poznania początku nie oznacza, że fizyka jest bezradna i trzeba się odwoływać do jakichś czynników pozafizycznych i pozamaterialnych, aby wyjaśnić, w jaki sposób powstał Wszechświat. Należy się jednak pogodzić z tym, że na obecnym etapie rozwoju fizyki nie jesteśmy w stanie odpowiedzieć na to pytanie.

Oddziaływania fundamentalne – fizyka w skali mikroświata

Podobne ograniczenia występują również w fizyce cząstek. Odkrycie elektronu i wyznaczenie jego podstawowych parametrów fizycznych, a następnie odkrycie protonu i neutronu otworzyły drogę do poznania świata cząstek elementarnych. Początkowo źródłem nowych cząstek były rozpady promieniotwórczych jąder atomowych oraz promieniowanie kosmiczne. Od początku lat pięćdziesiątych do przyspieszania i badania zderzeń między cząstkami zaczęto stosować różnego rodzaju akceleratory. Rozpoczął się trwający do dziś wyścig w uzyskiwaniu coraz to większych energii. Badanie zderzeń cząstek przy dużych energiach doprowadziło do odkrycia wielu nowych cząstek oraz pozwoliło zauważyć podobieństwa i korelacje, a wreszcie wydzielić trzy podstawowe grupy cząstek elementarnych: leptony, bariony i mezony.

W końcu lat sześćdziesiątych badanie niesprężystego rozpraszania elektronów na protonach doprowadziło do odkrycia struktury protonu. Okazało się, że ładunek protonu nie jest rozłożony równomiernie, lecz skupiony w punktowych centrach, że proton i neutron, uważane dotąd za cząstki elementarne, są zbudowane z jeszcze mniejszych składników – kwarków. Odkrycie kwarków dopro-

wadziło do uproszczenia systematyki cząstek elementarnych – 6 kwarków i 6 leptonów grupuje się w trzy komplementarne rodziny, a oddziaływanie między nimi jest przenoszone przez bozony pośredniczące.

Równoległe z odkrywaniem kolejnych nowych cząstek elementarnych poszukiwano teorii, która łączyłaby różne oddziaływania między nimi. Od drugiej połowy lat trzydziestych wiadano, że w świecie cząstek elementarnych istnieją trzy oddziaływania: elektromagnetyczne, słabe i silne. W roku 1967 Steven Weinberg i niezależnie Abdus Salam korzystając z wcześniejszych prób Sheldona Glashowa zaproponowali teorię oddziaływań elektroślabych, która łączyła oddziaływania elektromagnetyczne i oddziaływania słabe w jeden nowy schemat. Kilka lat później ta nowa teoria została powszechnie zaakceptowana, gdy okazało się, że jest ona renormalizowalna oraz doświadczalnie potwierdzono istnienie słabych prądów neutralnych przewidzianych przez teorię Weinberga i Salama. Odkrycie wszystkich sześciu kwarków potwierdziło przewidywania teoretyczne i przyczyniło się do uznania chromodynamiki kwantowej za poprawną teorię opisującą oddziaływania silne między kwarkami. Połączenie chromodynamiki kwantowej z teorią oddziaływań elektroślabych, nazywane obecnie Modelem Standardowym, zakończyło proces systematyzowania cząstek elementarnych. Model ten jest nadspodziewanie dobrze zgodny z różnymi danymi doświadczalnymi, ale ciągle jeszcze nie został w pełni potwierdzony doświadczalnie. Cząstki elementarne uzyskują w nim masę dzięki oddziaływaniu z bozonami Higgsa, ale cząstek Higgsa do tej pory nie udało się zaobserwować.

Pomimo jego ogromnych sukcesów trudno uznać Model Standardowy za ostateczny opis oddziaływań między cząstkami elementarnymi choćby dlatego, że model ten zawiera zbyt dużo parametrów fenomenologicznych. Trwają więc nadal poszukiwania ogólniejszej teorii, która pozwoliłaby na połączenie oddziaływań silnych z oddziaływaniami elektroślabyymi. Różne próby sformułowania takiej teorii przewidują istnienie nowych cząstek o masach co najmniej 10^{10} – 10^{11} GeV/c². Procesy z ich udziałem mogą powodować, że proton, który obecnie jest uważany za cząstkę trwałą, będzie miał skończony czas życia. Być może w świecie cząstek elementarnych istnieje dodatkowa symetria pozwalająca na zamianę fermionów na bozony i odwrotnie. W takim supersymetrycznym modelu każdej cząstce o spinie 1/2 odpowiadałaby cząstka o spinie całkowitym, a każda cząstka o spinie całkowitym miałaby partnera o spinie półowkowym.

Jak już wspominaliśmy, teoria superstrun jest bardzo ogólnym schematem, który może z jednej strony unifikować nie tylko oddziaływania elektroślabe z oddziaływaniami silnymi, ale również z oddziaływaniami grawitacyjnymi, a z drugiej strony zapewniać symetrię między fermionami i bozonami. Obecnie wydaje się, że efekty superstrunowe można będzie obserwować dopiero przy energiach rzędu 10^{14} GeV. Na obecnym etapie rozwoju techniki nie ma żadnych szans na przyspieszanie cząstek do tak ogromnych energii.

Duże nadzieje wiąże się z budowanym obecnie w CERN-ie akceleratorem LHC (Large Hadron Collider). Będzie o przyspieszał protony do energii 7 TeV, co w zderzeniach wiązek przeciwbieżnych pozwoli na osiąganie energii 14 TeV. Oczekuje się, że wartości energii uzyskiwanych w zderzaczu LHC wystarczą do wytworzenia i zbadania bozonów Higgsa. Być może uda się też odkryć nowe cząstki przewidywane przez teorie supersymetrii. Jeżeli jednak w LHC nie odkryjemy bozonów Higgsa ani nawet śladów supersymetrii, to mogą nastąpić trudne czasy dla doświadczalnej fizyki cząstek elementarnych. Szacuje się, że całkowity koszt budowy LHC wyniesie ok. 7 miliardów euro. Budowa jeszcze potężniejszego akceleratora będzie kosztowała znacznie więcej i może się okazać, że nikt nie zechce sfinansować takiego przedsięwzięcia. Te obawy nie są bezzasadne. W październiku 1993 r. Kongres Stanów Zjednoczonych postanowił przerwać budowę nadprzewodnikowego superzderzacza SSC (Superconducting Supercollider), chociaż wydrążono już 23 kilometry tunelu, a w prace przygotowawcze zaangażowanych było tysiące inżynierów i fizyków. Może się więc okazać, że proces poznawania najmniejszych składników materii zostanie zahamowany z powodu ogromnych kosztów. Fizyka może tu napotkać barierę nie do przebiccia, barierę nie metafizyczną, lecz finansową.

Od Redakcji:

Polecamy artykuł profesora Kazimierza Grotowskiego *ASTRONOMIA i FIZYKA – stosunki doskonałe, czy raczej stulecia wzajemnych, coraz bardziej kłopotliwych pytań*, zamieszczony w *Fotonie*, Lato 97/2007.