

Pokorski, Stefan

Z życia nauki i z życia Towarzystwa : Pola, cząstki i kosmos : (czyli o oddziaływaniach elementarnych, strukturze materii i historii Wszechświata)

Rocznik Towarzystwa Naukowego Warszawskiego 69, 7-13

2006

Artykuł został zdigitalizowany i opracowany do udostępnienia w internecie przez Muzeum Historii Polski w ramach prac podejmowanych na rzecz zapewnienia otwartego, powszechnego i trwałego dostępu do polskiego dorobku naukowego i kulturalnego. Artykuł jest umieszczony w kolekcji cyfrowej bazhum.muzhp.pl, gromadzącej zawartość polskich czasopism humanistycznych i społecznych oraz w kolekcji mazowieckich czasopism regionalnych mazowsze.hist.pl.

Tekst jest udostępniony do wykorzystania w ramach dozwolonego użytku.

A. Z ŻYCIA NAUKI I Z ŻYCIA TOWARZYSTWA

Stefan Pokorski

POLA, CZĄSTKI I KOSMOS (czyli o oddziaływaniach elementarnych, strukturze materii i historii Wszechświata)

Nauka, a szczególnie nauki ścisłe, nie są dla ludzi spoza wąskiego grona ekspertów w danej dziedzinie łatwo dostępną częścią kultury. Głębsze zrozumienie zjawisk fizycznych od dawna wykracza poza codzienną ludzką intuicję i często wymaga skomplikowanego aparatu matematycznego. Z drugiej strony, badanie granic wiedzy kształtuje nasze poglądy i naszą cywilizację. Fizyka oddziaływań elementarnych jest tego doskonałym przykładem. Jej zadaniem zawsze było, i pozostaje, coraz lepsze zrozumienie struktury materii oraz (choć związek może się wydawać paradoksalny) historii Wszechświata. Konkretnie wyzwania badawcze zmieniały się w czasie wraz z rozwojem tej dziedziny badań. Wyniki osiągnięte w badaniach oddziaływań elementarnych stanowią milowe kroki w rozwoju cywilizacji i szeroko pojętej kultury, takie jak np. odkrycie heliocentrycznej struktury naszego układu planetarnego, struktury atomowej materii czy wykorzystanie fal elektromagnetycznych w technice. Fizyka oddziaływań elementarnych jest ponadto protoplastą wielu innych dziedzin fizyki.

Badania obecnie prowadzone w dziedzinie, jaką jest fizyka oddziaływań elementarnych, stanowią naturalną kontynuację badań prowadzonych na przestrzeni wieków, choć, jak już wspomniałem, ulegały one zasadniczej ewolucji. Najwcześniej poznane oddziaływania elementarne to oddziaływania grawitacyjne. Skodyfikował je, poprzez sformułowanie prawa powszechnego ciężenia, Izaak Newton (1642–1727) – wybitny fizyk i matematyk. Także Newton wprowadził do fizyki pojęcie masy ciała. Definiuje ją druga zasada dynamiki Newtona, jako wielkość charakteryzującą bezwładność ciała przy zmianie jego ruchu. Dalszy postęp w zrozumieniu pojęcia masy zawdzięczamy Albertowi Einsteinowi (słynny wzór $E=mc^2$ wiąże ją z energią spoczynkową ciała) oraz wielu badaniom wskazującym na to,

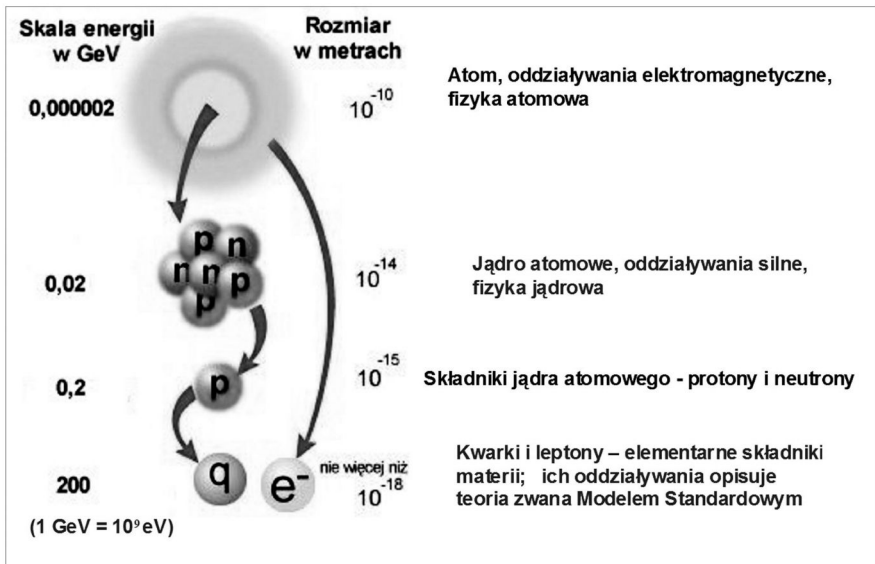
że na masę ciała mają wpływ jego oddziaływania z otoczeniem, w którym się porusza. Okazuje się jednak, że mimo tego postępu naszej wiedzy, wciąż nie znamy odpowiedzi na pytanie, skąd pochodzi „pierwotna” masa elektronu. Nie można jej wyjaśnić przez żadne znane oddziaływania elektronu z innymi cząstkami (np. z fotonami) i jest to największa zagadka w „problemie masy” od czasów Newtona. To pytanie jest obecnie w centrum uwagi fizyków oddziaływań elementarnych. Odpowiedzi na nie będzie można zapewne udzielić dzięki doświadczeniom planowanym w budowanym obecnie w Genewie (w ośrodku Europejskiej Organizacji Badań Jądrowych – CERN) nowym akceleratorze cząstek elementarnych (zwanym LHC od angielskiego *Large Hadron Collider*). Pierwsze wyniki doświadczeń przewidziane są na rok 2008. Fizycy spodziewają się, że odkryte w nich zostanie nowe, piąte z kolei, oddziaływanie cząstek elementarnych (np. elektronu) z polem Higgsa, czyli z dodatkowym polem elementarnym, które odpowiedzialne jest za masę cząstek.

Wracając do historii badań oddziaływań elementarnych: po oddziaływaniach grawitacyjnych, jako następne zostały odkryte oddziaływania elektromagnetyczne. Jest to osiągnięcie wielu badaczy, ale kropkę nad „i” postawili Michael Faraday (1791–1858) i James Maxwell (1831–1879). Ten pierwszy wprowadził do fizyki pojęcie pola elektromagnetycznego, przenoszącego oddziaływania między elektronami, a drugi z kolei podał teorię oddziaływań elektromagnetycznych, w formie słynnych równań Maxwella.

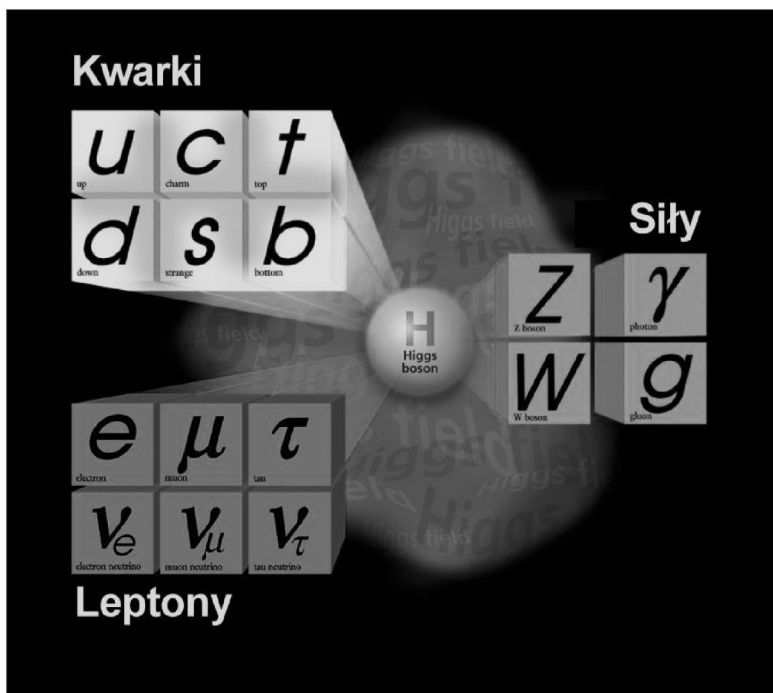
Kamieniem milowym w rozwoju fizyki oddziaływań elementarnych była hipoteza Einsteina, sformułowana w 1905, o istnieniu fotonu – kwantu pola elektromagnetycznego. Doświadczalne odkrycie przez A. Comptona (1923) fotonu – cząstki przenoszącej oddziaływania elektromagnetyczne – nie tylko potwierdziło słuszność hipotezy Einsteina, ale stało się podstawą do stworzenia jednolitego obrazu oddziaływań elementarnych, opartego na kwantowej teorii pola. Wiemy dzisiaj, że pola i cząstki, oddziaływania i materia to w fizyce kwantowej różny opis tej samej rzeczywistości fizycznej. Oddziaływania zachodzą przez wymianę cząstek! Fizyka kwantowa obowiązuje dla odległości mniejszych od rozmiarów atomów (10^{-10} m). Odkrycie oddziaływań elektromagnetycznych, odpowiedzialnych za budowę atomów, powiązało w sposób jednoznaczny fizykę oddziaływań elementarnych ze strukturą materii.

Nowy rozdział w fizyce oddziaływań elementarnych zaczął się wraz z odkryciem promieniotwórczości naturalnej przez Henri Becquerela, Marię Skłodowską–Curie i Piotra Curie w ostatnich latach XIX wieku. Oznaczało to odkrycie dwóch nowych typów oddziaływań elementarnych, zwanych oddziaływaniami silnymi i oddziaływaniami słabymi. Warto w tym miejscu od razu podkreślić, że obecnie badania w fizyce oddziaływań elementarnych znajdują się w punkcie zwrotnym. Rozdział, otwarty przez odkrycie promieniotwórczości naturalnej, został (prawie) zamknięty. Oddziaływania silne, elektromagnetyczne i słabe zostały szczegółowo zbadane i zrozumiane w ramach teorii opartej na kwantowej teorii pola, skromnie zwanej Modelem Standardowym. Na Model Standardowy składa się chromodynamika kwantowa – teoria oddziaływań silnych i zunifikowana teoria oddziaływań elektromagnetycznych i słabych. Ta ostatnia wprowadza hipotezę istnienia piątego oddziaływania elementarnego z polem Higgsa, odpowiedzialnego za masy cząstek. Hipotetyczne oddziaływanie z polem Higgsa ma bardzo szczególne właściwości. Próżnia przestaje być pusta. Model Standardowy jest teorią tak przekonującą i tak dobrze już sprawdzoną doświadczalnie, że zdecydowano się na budowę bardzo kosztownego akceleratora w CERN–ie, by sprawdzić ostatnie przewidywanie teorii – istnienie pola Higgsa właśnie.

Wraz z odkryciem oddziaływań silnych i słabych rozpoczął się także szybki rozwój badań nad strukturą materii w ramach fizyki oddziaływań elementarnych. Okazało się, że oddziaływania silne, odpowiedzialne są za budowę jąder atomowych składających się z protonów i neutronów i, jeszcze głębiej, za budowę protonów i neutronów – obiektów złożonych z bardziej elementarnych cząstek, zwanych kwarkami. Oddziaływania słabe odpowiedzialne są za rozpad β , proces w którym neutron rozpada się na proton, elektron i antyneutrino, który odgrywa istotną rolę w tworzeniu się jąder atomowych różnych pierwiastków we wczesnym Wszechświecie. Okazało się również, że oddziaływania słabe i elektromagnetyczne są bardzo ściśle z sobą powiązane. Fotony, jako nośniki oddziaływań elektromagnetycznych są w oddziaływaniach słabych zastąpione przez ciężkie cząstki, zwane bozonami W i Z . Związek oddziaływań elementarnych ze strukturą materii ilustruje rys. 1, a elementarne składniki materii (kwarki, leptony) oraz nośniki sił silnych (gluony), elektromagnetycznych (fotony) i słabych (bozony W i Z) zestawione są na rys. 2.



Rys. 1



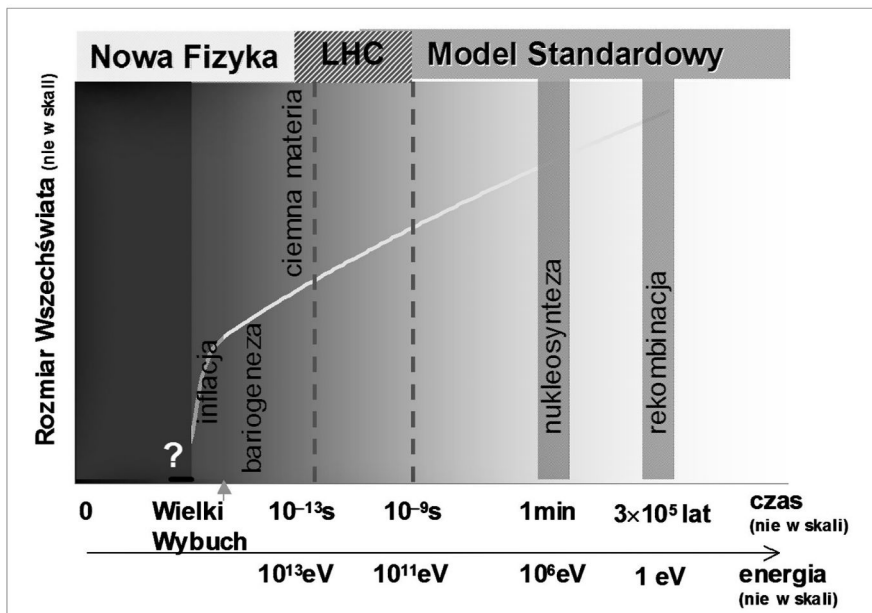
Rys. 2

Ogromny postęp w rozumieniu praw fundamentalnych, jak powstanie Modelu Standardowego, pozwala nam na coraz lepsze rozumienie historii Wszechświata. Związek między tymi pozornie tak odległymi dziedzinami badań opiera się na fakcie empirycznym: Wszechświat rozszerza się! Kiedyś był bardzo mały i bardzo gorący. Obecne w nim cząstki zderzały się z ogromnymi energiami i zachodzące procesy były konsekwencją praw rządzących fizyką oddziaływań elementarnych!

Istotnym punktem odniesienia w historii Wszechświata jest moment zwany Wielkim Wybuchem – chwila, w której Wszechświat (po okresie bardzo gwałtownej ekspansji, zwanej inflacją) stał się bardzo gorący i zaczął stygnąć na skutek dalszego, powolnego rozszerzania się. Po jednej sekundzie zaczęły tworzyć się pierwiastki w procesach nukleosyntezy. Typowa energia zderzeń cząstek była wtedy rzędu masy protonu, a więc charakterystyczna dla fizyki jądrowej. Po 400 000 lat, gdy typowa energia zderzeń była rzędu kilku elektronowoltów, w wyniku rekombinacji powstawały atomy. Maksymalne energie zderzeń osiągniętych dotychczas w laboratoriach ziemskich były typowe dla zderzeń cząstek, do których dochodziło we Wszechświecie w czasie jednej miliardowej części sekundy po Wielkim Wybuchu. Wszystkie zjawiska, które zaszły we Wszechświecie po tej chwili dają się zrozumieć dzięki istniejącej teorii oddziaływań elementarnych – Modelowi Standardowemu!

Obserwacje Wszechświata wskazują jednak także, że niektóre bardzo ważne zjawiska nie dają się wyjaśnić w ramach Modelu Standardowego. Po pierwsze – Model Standardowy nie wyjaśnia ogromnej przewagi materii nad antymaterią, po drugie – obecne dane doświadczalne wskazują, że około 25% materii we Wszechświecie składa się z nieznanymi cząstek, niewchodzących w skład Modelu Standardowego. Muszą więc istnieć dodatkowe cząstki elementarne, które oddziałują inaczej, a poza tym opisany wyżej zaskakujący skład materii we Wszechświecie musiał zostać ustalony w czasie wcześniejszym niż jedna miliardowa część sekundy po Wielkim Wybuchu! Ilustruje to rys. 3.

Energie zderzeń w LHC pozwolą na odkrycie praw rządzących oddziaływaniami elementarnymi, które są ważne dla zrozumienia historii Wszechświata od jednej dziesiątej, jednej miliardowej części sekundy po Wielkim Wybuchu. Poza oczekiwanym odkryciem pola (cząstki) Higgsa, w oparciu o szereg przekonujących argumentów fizy-



Rys. 3

cy spodziewają się także odkrycia nowego rodzaju cząstek, o których istnieniu wiemy na razie tylko pośrednio z istnienia ciemnej (czyli nie wysyłającej promieniowania elektromagnetycznego) materii we Wszechświecie.

Spodziewamy się więc, że doświadczenia w LHC ostatecznie zamkną obecny rozdział w badaniu oddziaływań elementarnych i jednocześnie będą początkiem nowego etapu, prowadzącego do głębszej niż Model Standardowy teorii oddziaływań elementarnych.

Jak jednak widzieliśmy to już wielokrotnie w historii rozwoju fizyki (spójrzmy choćby na wzajemną relację między dynamiką Newtona a szczególną teorią względności Einsteina), Model Standardowy pozostanie dobrym przybliżeniem ogólniejszej teorii w pewnym zakresie zjawisk fizycznych.

Obecnie badania, jak już wspominałem, znajdują się w punkcie zwrotnym, gdyż, w przeciwieństwie do pewnej ciągłości w formułowaniu problemów badawczych, od czasu odkrycia promieniotwórczości naturalnej – wymuszanej przez nowe odkrycia doświadczalne i dążenie do spójnej teorii – fizyka wykraczająca poza Model Standardowy jest oczekiwana, ale całkowicie nieznana. Od dawna sytuacja w fizyce oddziaływań elementarnych nie była tak intrygująca jak obecnie i za-

równy fizycy doświadczalni, jak i teoretycy oczekują z napięciem na pierwsze wskazówki z LHC. W ciągu ostatnich kilkunastu lat teoretycy zaproponowali wiele fascynujących kandydatur na teorię wykraczającą poza Model Standardowy. Jednak żadna z nich nie jest na tyle przekonująca, by zdecydowanie oczekiwać jej potwierdzenia w doświadczeniach w LHC. Choć wiodącym kandydatem na głębszą teorię wydaje się być teoria oparta na nowej symetrii przyrody, zwanej supersymetrią, inne idee, np. ta zakładająca istnienie małych dodatkowych wymiarów przestrzennych lub zupełnie nowego typu oddziaływań silnych, są także atrakcyjne teoretycznie. Patrząc jednak najbardziej obiektywnie, poza oczekiwanym odkryciem pola Higgsa, wyniki doświadczeń z LHC są całkowicie nieprzewidywalne. Przyszedł czas na doświadczenie, by potwierdzić jedną z zaproponowanych idei teoretycznych lub wskazać jakiś nowy kierunek myślenia.

Teoretycy wybiegają w przyszłość bardzo daleko. Spekulacje teoretyczne nie kończą się na fizyce w LHC. Intrygująca jest odkryta niedawno niezwykle mała masa neutrin, sugerująca istnienie nowych zjawisk fizycznych, daleko poza zasięgiem LHC.

Bardzo pociągająca jest idea wielkiej unifikacji oddziaływań silnych i elektroślabych, możliwa przy ogromnych energiach zderzeń bliskich energii, przy której oddziaływania grawitacyjne robią się równie silne, jak inne oddziaływania elementarne. Pojawia się wtedy pytanie o jednolity opis wszystkich oddziaływań elementarnych, łącznie z oddziaływaniami grawitacyjnymi.

Ambitną odpowiedź na to pytanie proponuje teoria strun. Mimo tego, że już ponad dwudziestoletnie badania nad tą teorią nie przyniosły żadnych konkretnych przewidywań, które można by sprawdzić doświadczalnie, pozostaje ona interesującą, niestety zbyt ogólną, koncepcją fizyczną. Nadzieje na zdecydowany postęp doświadczalny w badaniu tych idei są bardzo nikłe. Wyjątkiem może być tu ewentualnie zaobserwowanie rozpadu protonu, który byłby potwierdzeniem poprawności idei wielkiej unifikacji. Niemniej jednak jest wielka szansa na to, że doświadczenia w LHC nie tylko dostarczą bardzo istotnych wskazówek dotyczących rozszerzenia Modelu Standardowego, lecz także bardziej ukierunkują spekulacje teoretyczne, wykraczające daleko poza fizykę LHC¹.

¹ Dziękuję pani Magdalenie Mireckiej za pomoc w zredagowaniu tego tekstu.