

Oddziaływania elementarne i LHC

Zygmunt AJDUK, Stefan POKORSKI, Krzysztof TURZYŃSKI

Badanie struktury materii i rządzących nią praw podstawowych należało zawsze do głównych zadań fizyki. U podstaw wszystkich znanych dotychczas właściwości otaczającej nas materii ziemskiej leżą cztery typy oddziaływań: grawitacyjne, elektromagnetyczne, silne i słabe. Wiemy obecnie, że podstawowymi składnikami materii są kwarki i leptoni. Oddziaływania elektromagnetyczne są odpowiedzialne za budowę atomów i oddziaływania między nimi – od przemian chemicznych w komórkach żywych organizmów do oddziaływań płyt tektonicznych. Cząstki oddziałują elektromagnetycznie dzięki wymianie fotonów. Oddziaływania silne, przenoszone przez gluony, są z kolei odpowiedzialne za wiązanie się kwarków w bariony, czyli m.in. protony i neutrony, a tych z kolei w jądra atomowe. Oddziaływania słabe przejawiają się m.in. w jądrowym rozpadzie beta pierwiastków promieniotwórczych oraz rozpadach leptonów, a przenoszą je cząstki W^+ , W^- i Z^0 .

Model Standardowy oddziaływań elementarnych jest kwantową teorią pola i składa się z chromodynamiki kwantowej, czyli teorii oddziaływań silnych, oraz ze zunifikowanej teorii oddziaływań elektromagnetycznych i słabych (w skrócie, elektroslabych). W kwantowej teorii pola każda cząstka jest kwantem pewnego pola fizycznego. Kwantowa teoria pola nie tylko jest więc językiem matematycznego opisu oddziaływań elementarnych, ale proponuje pewien obraz fizyczny struktury materii na bardzo małych odległościach, w którym znika podział na cząstki i pola przenoszące oddziaływania między cząstkami. Podobnie jak foton, który jest kwantem pola elektromagnetycznego, elektron jest kwantem pola elektronowego, kwark – pola kwarkowego itd. Oddziaływania między cząstkami są oddziaływaniami rozchodzących się w czasoprzestrzeni pól, których te cząstki są kwantami.

Każdy stabilny układ fizyczny ma swój stan podstawowy będący stanem o najniższej energii. W fizyce oddziaływań elementarnych zwany jest on próżnią. Jest to taki stan układu pól, w którym na jednostkę objętości przypada najmniejsza ilość energii. Często w stanie próżni energia kinetyczna i potencjalna wszystkich pól jest równa zeru, ale niekoniecznie musi tak być. W niektórych sytuacjach spotykanych w fizyce energia kinetyczna wszystkich pól w stanie próżni jest równa zeru, ale niektóre pola mają niezerową energię potencjalną. Nie jest to zaskakujące, gdyż prostych przykładów stanu podstawowego o niezerowej energii potencjalnej dostarcza nawet powszechnie znana fizyka. Stanem podstawowym wahadła zawieszono na nici w polu ziemskiego przyciągania grawitacyjnego jest jego położenie równowagi (wahadło w spoczynku). W tym stanie mamy różną od zera energię potencjalną wahadła

w polu grawitacyjnym, ale energia ta nie zamienia się w energię kinetyczną (wahadło nie spada), gdyż siła przyciągania grawitacyjnego jest równoważona przez napięcie nici. Dopiero wychylenie wahadła ze stanu podstawowego, czyli położenia równowagi, powoduje jego ruch (drżenie), o którego okresie decyduje różnica energii potencjalnych wahadła wychylonego i wahadła w stanie podstawowym. Także w fizyce oddziaływań elementarnych typowym problemem dynamicznym jest badanie ruchu (drgań) układu fizycznego wokół stanu próżni, tj. badanie stanów wzbudzonych niektórych pól. Wyjątkiem są oddziaływania grawitacyjne, które decydują o ewolucji Wszechświata. Cała energia zawarta we Wszechświecie wpływa na jego ewolucję, w szczególności, bezwzględna energia stanu podstawowego układu pól (energia próżni) musi być uwzględniona w bilansie energii Wszechświata.

W fizyce oddziaływań elektroslabych energia potencjalna pól w stanie próżni nie jest równa zeru. W Modelu Standardowym jedno z pól oddziałujących słabo, pole Higgosa, ma w próżni różną od zera energię potencjalną, co oznacza, że próżnia nie jest pusta. Można ją sobie wyobrazić jako zbiornik nieskończonej liczby cząstek o masach i pędach równych zeru, które, oddziałując z cząstkami W^+ , W^- i Z^0 oraz z kwarkami i leptonami, spowalniają ich ruch, sprawiając, że cząstki te zachowują się jak cząstki masywne. Konsekwencją takich właściwości próżni jest istnienie cząstki o spinie 0, zwanej cząstką Higgosa, która pozostaje jedyną nieodkrytą jeszcze doświadczalnie cząstką przewidywaną przez Model Standardowy. Teoria opisuje z bardzo dużą dokładnością wszystkie badane doświadczalnie procesy elementarne, w których energie oddziałujących cząstek nie przekraczają 10^{11} elektronowoltów i jest obecnie pod tym względem najdoskonalszą teorią fizyczną.

1 elektronowolt (eV) to energia, o jaką zmienia się całkowita energia cząstki o ładunku równym ładunkowi elektronu przy przejściu przez różnicę potencjałów elektrostatycznych 1 wolta. Przykładowo, energia, jaką trzeba dostarczyć, by zjonizować atom wodoru, wynosi 13,6 eV. Korzystając ze wzoru $E = mc^2$, można także wyrażać masę cząstek w eV/c^2 , np. masa elektronu to $511000 eV/c^2$.

Pomimo odniesienia spektakularnego sukcesu Model Standardowy pozostawia bez odpowiedzi wiele pytań. Po pierwsze, nie wyjaśnia, dlaczego mierzone wartości masy bozonów W^\pm i Z^0 są takie, a nie inne, gdyż skala masowa jest wolnym parametrem tej teorii. Po drugie, dość tajemnicze wydaje się istnienie trzech rodzin fermionów (zarówno kwarków, jak i leptonów), różniących się tylko masą, lecz identycznych z punktu widzenia oddziaływań. Po trzecie, z konstrukcji Modelu Standardowego nie wynika, w jakim kierunku należy dalej uogólniać tę teorię, aby stworzyć wspólny opis oddziaływań silnych i elektroslabych lub, bardziej ambitnie, by podać jednolity opis wszystkich czterech znanych oddziaływań. Zasadniczą trudność teoretyczną

przy próbach takiego uogólnienia stanowi ogromna rozpiętość (hierarchia) między masami bozonów W^\pm i Z^0 a następną znaną skalą masy wyznaczoną przez oddziaływania grawitacyjne. Jest nią masa Plancka,

$$M_P = \sqrt{\hbar c/G_N} \sim 10^{27} \text{ eV}/c^2.$$

$G_N \approx 6,7 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ jest stałą Newtona, czyli stałą przyrody występującą w prawie powszechnego ciężenia wyrażającym siłę F oddziaływań grawitacyjnych między dwoma ciałami o masach m i M znajdujących się w odległości r od siebie: $F_N = \frac{G_N M m}{r^2}$. Stała Plancka $\hbar \approx 1,1 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$ pojawia się w opisie zjawisk kwantowych. $M_P = \sqrt{\hbar c/G_N}$ jest kombinacją stałych przyrody, której jednostką jest kilogram, czyli jednostka masy.

Biorąc pod uwagę naturę występujących w tym wzorze współczynników, można oczekiwać, że przy energiach $E_P = M_P c^2 \sim 10^{27} \text{ eV}$ ujawni się kwantowa natura oddziaływań grawitacyjnych i siła tych oddziaływań będzie porównywalna z siłą pozostałych oddziaływań elementarnych, podobnie jak przy energiach $E \approx M_{W^\pm, Z^0} c^2$ oddziaływania słabe dorównują siłą oddziaływaniom elektromagnetycznym. Hierarchia mas $M_P/M_{W^\pm, Z^0} \approx 10^{16}$ jest zaskakująca w świetle dotychczasowych odkryć. Przy przejściu od fizyki atomowej poprzez fizykę jądrową do oddziaływań elektrosłabych pojawiają się nowe, coraz większe skale fizyczne, ale następuje to w sposób stopniowy, a nie hierarchiczny, tzn. skale te nie różnią się o tyle rzędów wielkości. Spodziewamy się więc istnienia głębszej teorii, która rozwiąże problem hierarchii skal i zarazem udzieli odpowiedzi na postawione wyżej pytania. Teoria taka przewidywać będzie istnienie nowych cząstek i nowych oddziaływań na odległościach mniejszych niż 10^{-18} m . Zatem w teorii takiej występować będą skale masy większe od $10^{11} \text{ eV}/c^2$. Nowe cząstki o charakterystycznej skali masowej $10^{12} - 10^{13} \text{ eV}/c^2$ będą mogły być odkryte w akceleratorze LHC budowanym obecnie w CERN-ie pod Genewą (patrz ostatnia strona okładki). Istnienie takiej skali fizycznej, nieco tylko wyższej od skali elektrosłabej, pozwoliłoby uniknąć problemu hierarchii i dlatego jest bardzo prawdopodobne. Warto jednak pamiętać, że w przyrodzie może istnieć nie jedna, lecz kilka nowych skal fizycznych niższych od skali Plancka, których uwzględnienie będzie konieczne przy budowaniu głębszej teorii. Niewykluczone, że jedna z tych skal została niedawno odkryta dzięki doświadczałnemu stwierdzeniu, że neutrino (oznaczane przez fizyków jako ν) mają bardzo małe masy m_ν , których wielkość można elegancko wyjaśnić, zakładając, iż są one wynikiem oddziaływań neutrin z bardzo ciężkimi nowymi cząstkami N , zwanymi *ciężkimi partnerami neutrin*, o masie $M_N \sim 10^{23} \text{ eV}/c^2$. Masy neutrin $m_\nu \leq 1 \text{ eV}$ są wówczas w naturalny sposób rzędu $m_\nu \sim M_{W,Z}^2/M_N$. Mechanizm taki nazywa się mechanizmem huśtawki. Gdyby natomiast zaobserwowano rozpad protonu, oznaczałoby to odkrycie *skali wielkiej unifikacji* oddziaływań silnych i elektrosłabych.

Próby rozwiązania problemu hierarchii skal stymulowały badania teoretyczne przez ostatnich kilkanaście lat. Problem ten wiąże się bowiem z problemem wyznaczenia skali elektrosłabej odpowiadającej masom cząstek W^\pm i Z^0 z bardziej podstawowych założeń, a więc z pełniejszym zrozumieniem mechanizmu decydującego o szczególnych, opisanych wcześniej, właściwościach stanu próżni oddziaływań elektrosłabych (fizycy nazywają ten mechanizm spontanicznym naruszeniem symetrii). Najbardziej konkretnymi propozycjami teoretycznymi uogólniającymi Model Standardowy są:

- 1) dodatkowa symetria przyrody, zwana *supersymetrią*, przyporządkowująca każdej znanej cząstce elementarnej partnera o identycznych właściwościach z wyjątkiem spinu – partnerami kwarków i leptonów, które mają spin $1/2$, byłyby więc w tej teorii cząstki bezspinowe, natomiast partnerami kwantów pola o spinie 1 inne cząstki o spinie $1/2$; supersymetria nie byłaby jednak symetrią dokładną – cząstki będące partnerami znanych cząstek powinny mieć masy około $10^{12} \text{ eV}/c^2$; byłyby to właśnie wspomniana wyżej nowa skala masowa rozwiązująca problem hierarchii;
- 2) co najmniej jeden *dodatkowy wymiar przestrzenny* zawinięty w okrąg o bardzo małym promieniu R – wtedy skala oddziaływań elektrosłabych byłaby wyznaczona przez skalę Plancka i promień R ;
- 3) *dekonstrukcja wymiarów*, czyli istnienie dodatkowych symetrii niejako imitujących oddziaływania w modelu z dodatkowymi wymiarami przestrzennymi – takie symetrie musiałyby być spontanicznie naruszone, a skalę oddziaływań elektrosłabych można by wyznaczyć jako funkcję skali spontanicznego naruszenia tych wyższych symetrii.

Odkrycie cząstki Higgsa w LHC będzie nie tylko jeszcze jednym potwierdzeniem poprawności Modelu Standardowego, ale także pomostem do bardziej fundamentalnej teorii. Właściwości cząstki Higgsa (lub jej brak), jej masa i charakter oddziaływań z kwarkami i leptonami, będą podstawowymi wskazówkami co do wyboru jednej z powyższych koncepcji teoretycznych. Np. teorie supersymetryczne przewidują istnienie lekkiej cząstki Higgsa, niewiele cięższej od cząstki Z^0 , podczas gdy z modeli opartych na istnieniu dodatkowych wymiarów wynika, że cząstka Higgsa jest kilkakrotnie cięższa od cząstki Z^0 . Ale nie tylko własności cząstki Higgsa pomogą wybrać spośród różnych koncepcji teoretycznych tę poprawną. Choć wszystkie one opierają się na istnieniu nowej skali, a zatem przewidują istnienie nowych cząstek o masach około $10^{12} \text{ eV}/c^2$, to ich przewidywania dotyczące rodzaju i właściwości tych cząstek są zupełnie różne. Przewidywania te będzie można sprawdzić w doświadczeniach, które będą przeprowadzane w LHC.