

„Boska cząstka” odkryta?

Krzysztof Fiałkowski
Instytut Fizyki UJ

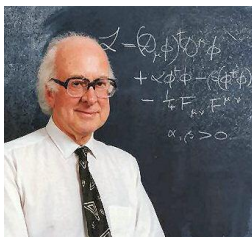
4 lipca 2012 roku w wielkiej sali seminaryjnej CERNu w Genewie odbyło się nadzwyczajne seminarium. Organizatorzy umożliwili chętnym z całego świata wysłuchanie i obejrzenie tego zdarzenia w internecie, a uczestnicy corocznej konferencji fizyki wysokich energii, która odbywała się w tym czasie w Melbourne, mogli nawet brać udział w dyskusji po referatach. Dlaczego to seminarium zostało potraktowane w tak szczególny sposób? Przyczyną był temat dwóch referatów wówczas wygłoszonych: nowe dane z obu największych eksperymentów w LHC (CMS i ATLAS) dowodzące istnienia cząstki Higgsa.



Sala seminaryjna, referat na temat bozonu Higgsa. Od lewej stoi Fabiola Gianotti (ATLAS), Rolf-Dieter Heuer – dyrektor generalny CERNu, i Joe Incandela (CMS)

<http://www.nature.com/news/higgs-triumph-opens-up-field-of-dreams-1.10970>

Cząstka ta stanowi ostatnią niezbadaną jeszcze „cegiełkę” Modelu Standardowego, teorii, która opisuje jednocie oddziaływania elektromagnetyczne, słabe i silne cząstek elementarnych. Oddziaływanie innych cząstek z polem cząstki Higgsa powoduje, że uzyskują one niezerową masę. Skoro masy cząstek stanowią ich podstawową identyfikującą cechę, rola cząstki Higgsa jest wyjątkowa. Skłoniło to laureata Nagrody Nobla Leona Ledermana do nadania przed dwudziestu laty swojej popularnej książki tytułu *Boska cząstka*. Takie określenie cząstki Higgsa przyjęło się powszechnie w popularnych tekstach.



Sir Peter Higgs

Jednak sama idea cząstki Higgsa jest znacznie starsza. Pół wieku temu fizyk brytyjski Peter Higgs zauważył, że wprowadzenie do teorii oddziaływań nowego pola o szczególnych własnościach stanu podstawowego pozwala na nowy typ łamania symetrii, bardzo przydatny do opisu słabych oddziaływań cząstek elementarnych¹. Podobne pomysły zgłaszało zresztą wówczas jeszcze kilku fizyków, ale tylko Higgs podkreślił fakt, że temu polu powinna odpowiadać nieznaną dotąd cząstka. Słusz-

nie więc chyba pole i cząstkę nazwano jego imieniem. Od pół wieku trwały też dyskusje, czy i jak można stwierdzić doświadczalnie istnienie cząstki Higgsa.

Problem polegał na tym, że teoria nie pozwalała przewidzieć wartości masy tej cząstki. Można było wprawdzie wykorzystać istniejące dane, aby pośrednio wnioskować o pewnych ograniczeniach na tę wartość, ale wnioskowanie to nie było niezawodne. Większość fizyków oczekiwała, że cząstkę Higgsa można będzie odkryć w akceleratorze LEP, w którym zderzano wiązki elektronów i pozytonów o energiach przekraczających 100 GeV (czyli ponad sto energii spoczynkowych protonu). Tuż przed zamknięciem tego akceleratora w roku 2000 pojawiły się dane sugerujące, że w zderzeniach tych równocześnie ze znaną już cząstką Z o energii spoczynkowej około 91 GeV powstaje „coś” o energii spoczynkowej około 115 GeV. Jednak konieczność rozpoczęcia budowy nowego akceleratora LHC, który miał działać w tym samym tunelu, nie pozwoliła na dalsze zbieranie danych i rozstrzygnięcie, czy to „coś” jest poszukiwaną cząstką Higgsa, czy tylko efektem fluktuacji statystycznej.

W LHC zderza się wiązki protonów o znacznie większej energii, obecnie po 4 TeV (4000 GeV) każda. Na pozór więc sprawdzenie, czy w zderzeniach produkowane są obiekty o energii spoczynkowej „zaledwie” niewiele ponad 100 GeV powinno być bardzo łatwe. Dlaczego tak nie jest? Aby na to odpowiedzieć, musimy sobie uzmysłowić, co to znaczy „odkryć nową cząstkę”.

Cząstki tak ciężkie, jak cząstka Higgsa, żyją niezwykle krótko. Nawet lecąc z szybkością niemal równą szybkości światła nie zdążą przed rozpadem zostawić żadnego śladu w materii. O ich istnieniu możemy więc wnioskować tylko na podstawie analizy rozkładu sumy energii i pędów produktów rozpadu. Teoria mówi, że najbardziej prawdopodobne powinny być rozpady na pary możliwie najcięższych cząstek. Gdyby więc masa m_H cząstki Higgsa była co najmniej dwukrotnie większa od masy cząstek W, Z albo kwarku t, dominować powinien rozpad na pary tych cząstek. Przy odpowiedniej masie niezmienniczej takiej pary powinniśmy zaobserwować wyraźne maksimum przy wartości m_H , o charakterystycznym kształcie tzw. krzywej Breita-Wignera.

¹ Obszerniejszą popularną dyskusję symetrii i jej łamania można znaleźć w artykule Michała Przaszłowicza: „Po co nam LHC?” zamieszczonym w nr 108 *Fotonu*.

Masa niezmiennicza pary cząstek dana jest wzorem

$$m_{12} = \sqrt{(E_1 + E_2)^2 / c^4 - (\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2)^2 / c^2}$$

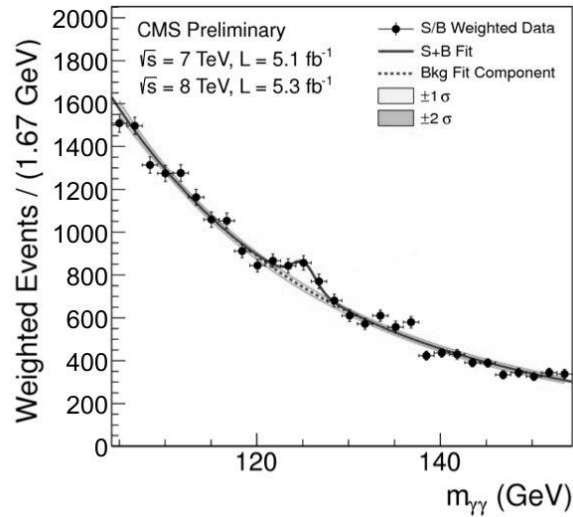
(\mathbf{p}_i oznaczają tu trójwymiarowe wektory pędu). Wzór ten można łatwo uogólnić na układ dowolnej liczby cząstek, zastępując obie sumy w nawiasach sumami odpowiednio większej liczby członów. Masa niezmiennicza jest niezmiennikiem relatywistycznym, co oznacza, że jej wartość nie zależy od wyboru układu odniesienia. Co więcej, dla izolowanego układu cząstek jest to wielkość zachowana, czyli nie zmienia się w czasie.

Wynika stąd, że dla układu produktów rozpadu dowolnej cząstki X masa niezmiennicza układu jest równa masie cząstki X (z dokładnością do rozmycia kwantowego i niepewności doświadczalnych). Na wykresie prawdopodobieństwa uzyskania różnych wartości masy niezmienniczej danego układu cząstek pochodzącego z wszystkich możliwych procesów, przypadki, w których układ ten pochodzi z rozpadu cząstki o masie m , dadzą „górkę” wokół wartości m .

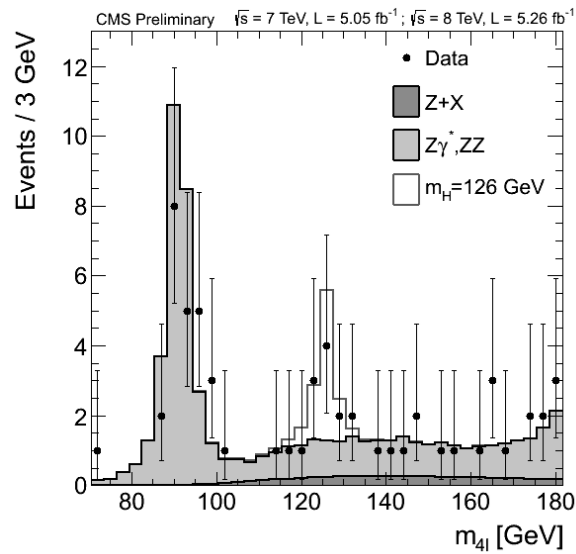
Niestety, natura okazała się złośliwa i energia spoczynkowa cząstki Higgsa jest z pewnością niższa niż podwojona energia spoczynkowa cząstki W (164 GeV). Należało więc szukać efektów innych, znacznie mniej prawdopodobnych rozpadów. Paradoksalnie, najłatwiejsze do identyfikacji okazały się rozpady na obiekty najlżejsze: parę wysokoenergetycznych fotonów $\gamma\gamma$, albo na dwie pary leptonów (elektron-pozyton, albo mion-mion).

Już w grudniu 2011 roku dane z eksperymentów CMS i ATLAS wykazały pewną nadwyżkę liczby przypadków dla obu tych układów cząstek przy masie niezmienniczej około 125 GeV/c². Dane nie były jednak jednoznaczne, bo przypadków było niewiele, a ponadto wyniki obu eksperymentów nie były dokładnie takie same. W marcu 2012 roku przedstawiono wyniki analizy danych z zamkniętego we wrześniu 2011 roku akceleratora Tevatron z Batavii w USA, które wydawały się również sugerować istnienie cząstki Higgsa o podobnej masie. Wciąż jednak nikt nie odważył się ogłosić odkrycia.

Kolejne kilka miesięcy zbierania danych w LHC pozwoliło na podwojenie liczby rejestrowanych przypadków i doprowadziło do decyzji przedstawienia wyników przez obie grupy eksperymentalne. Jak wspomniano, nastąpiło to 4 lipca. Na rys. 1 i 2 pokazano dane z eksperymentu CMS (<http://cms.web.cern.ch/news/observation-new-particle-mass-125-gev>).

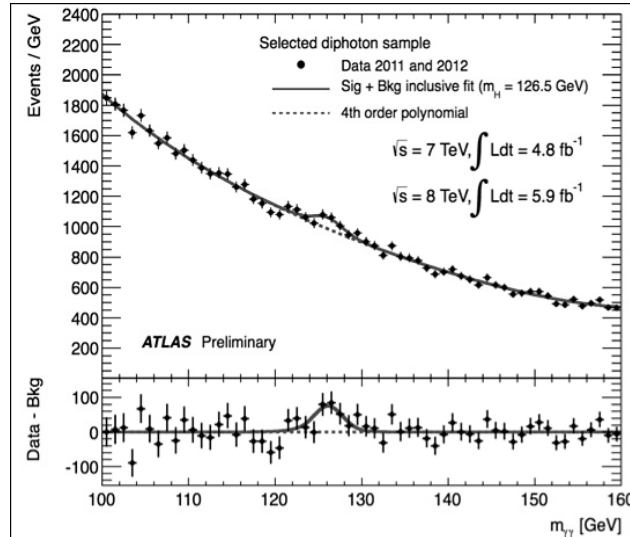


Rys. 1. Rozkład masy niezmienniczej dla pary $\gamma\gamma$ z eksperymentu CMS. Przerywana linia oznacza tło, ciągła – tło z dodanym sygnałem rozpadu cząstki Higgsa

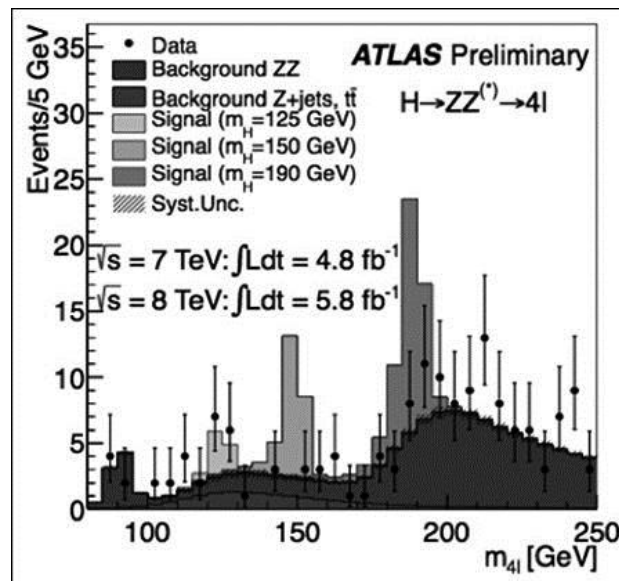


Rys. 2. Rozkład masy niezmienniczej czterech leptonów z eksperymentu CMS. Gruba linia oznacza oczekiwane tło, cienka – tło z dodanym sygnałem rozpadu cząstki Higgsa o masie $126 \text{ GeV}/c^2$

Na rys. 3 i 4 pokazano analogiczne dane z eksperymentu ATLAS (<http://www.atlas.ch/news/2012/latest-results-from-higgs-search.html>).



Rys. 3. Rozkład masy niezmienniczej dla pary $\gamma\gamma$ z eksperymentu ATLAS. Przerywana linia oznacza tło, ciągła – tło z dodanym sygnałem rozpadu cząstki Higgsa. Dolny wykres przedstawia różnicę między danymi a krzywą tła



Rys. 4. Rozkład masy niezmienniczej czterech leptonów z eksperymentu ATLAS. Gruba czarna linia oznacza tło, szara jasna – tło z dodanym sygnałem rozpadu cząstki Higgsa o masie $125 \text{ GeV}/c^2$, dwie pozostałe – tło z dodanymi sygnałami cząstki Higgsa o innych masach

Wyjaśnijmy nieco dokładniej, co przedstawiają wykresy. Na rys. 1 i 3 odłożono na osi x wartości masy niezmienniczej pary fotonów. W eksperymencie CMS

badano zakres od 105 do 155 GeV/c^2 , a w eksperymencie ATLAS od 100 do 160 (zwyczajowo masę podano tu w jednostkach energii – GeV – co oznacza przyjęcie układu jednostek, w którym $c = 1$). Na osi y przedstawiono liczbę przypadków, w których znaleziono parę fotonów o masie z przedziału o szerokości odpowiednio 1,67 lub 1 GeV wokół wartości z osi x . Zauważmy, że tych przypadków jest zaledwie kilkadziesiąt tysięcy na całym wykresie, co stanowi małą ułamek wszystkich przypadków zderzeń, które zaszły w akceleratorze – mniej niż jedną dziesięciomiliardową. Nadal jednak w ogromnej większości tych przypadków para fotonów nie pochodzi z rozpadów cząstki Higgsa, ale z innych źródeł, czyli tła. Wykres ATLASA uzyskany po odjęciu przewidywanego tła zawiera zaledwie około dwustu przypadków, a w CMS jest ich jeszcze mniej. Linie przerywane na wykresie są dopasowane do danych dominowanych przez tło, a ciągłe do tła z dodanymi przewidywaniami dla sygnału cząstki Higgsa o masie odpowiednio 126 i 126,5 GeV.

Na rys. 2 i 4 odłożono na osi x masę niezmienniczą dwu par leptonów, dla CMS w zakresie od 70 do 180 GeV, a dla ATLASA od 80 aż do 250. Na osi y przedstawiono liczbę przypadków z przedziału o szerokości 3 GeV (CMS) lub 5 GeV (ATLAS) wokół wartości z osi x . Tym razem przypadków na całym wykresie jest o wiele mniej – kilkadziesiąt dla CMS, a sto kilkadziesiąt dla ATLASA. Znaczna część tła to przypadki, w których leptony pochodzą z rozpadu jednej lub dwóch cząstek Z . Te i inne przypadki podsumowane są ciągłą linią odgradzającą obszar szary (CMS), albo ciemniejszy (ATLAS). Jak widać, kilka przypadków „wystaje” ponad tę linię. W przypadku CMS widać, że ich rozkład zgadza się doskonale z cienką linią, przedstawiającą przewidywania dla produktów rozpadu cząstki Higgsa o masie 126 GeV. ATLAS przedstawił aż trzy przewidywania: dla cząstki Higgsa o masie 125, 150 i 190 GeV. Dane zgadzają się z krzywą odpowiadającą 125 GeV, a wykluczają obecność leptonów z rozpadu cząstki Higgsa o znacznie większej masie.

Jak widać, mimo długiego czasu trwania eksperymentów i przeprowadzenia wielu bilionów zderzeń, nadal zarejestrowano niewiele przypadków, w których obserwowane cząstki można uważać za produkty rozpadu cząstki Higgsa. Jednak zgodność rozkładów dla obu eksperymentów i jednakowe położenie maksimum dla obu rozpadów sprawiają, że istnienie cząstki Higgsa o masie około 125 GeV/c^2 nie ulega już właściwie żadnej wątpliwości. **Prawdopodobieństwo pojawienia się takich sygnałów w wyniku przypadkowej fluktuacji statystycznej jest rzędu jednej dziesięciomilionowej.**

Nie oznacza to, że fizycy mogą już spocząć na laurach. Dopiero teraz znacznie się żmudne poszukiwanie innych rozpadów i sprawdzanie przewidywań Modelu Standardowego. Jak dotąd, wydaje się, że dane są całkowicie zgodne z tym modelem i nie ma żadnych wskazówek sugerujących konieczność jego modyfikacji lub uogólnienia. Nikt jednak właściwie nie wątpi, że wcześniej czy później takie wskazówki pojawią się!