

Jak odkryć nową cząstkę?

Maciej MISIURA*

O odkryciu bozonu Higgsa informowaliśmy w *Delcie* 10/2012 i 7/2013.



Fot. 1. Analiza danych eksperymentu CMS w ramach warsztatów.



Fot. 2. Telekonferencja z udziałem innych grup biorących udział w warsztatach.

Po raz kolejny naukowcy z Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego oraz Narodowego Centrum Badań Jądrowych gościli zainteresowanych fizyką licealistów z całej Polski. Warsztaty miały przybliżyć uczniom niektóre z metod, które stosuje się w poszukiwaniach nowych cząstek elementarnych, takich jak bozon Higgsa.

W lipcu 2012 roku w międzynarodowym ośrodku CERN, zlokalizowanym pod Genewą, eksperymenty ATLAS i CMS ogłosiły długo oczekiwane odkrycie bozonu Higgsa. Bozon Higgsa był ostatnią cząstką przewidzianą przez Model Standardowy, której istnienie nie zostało wcześniej potwierdzone eksperymentalnie. Ten niewątpliwie przełomowy wynik jest efektem pracy wielu osób. Obecnie zespoły ATLAS i CMS liczą po około 3000 członków. A ta liczba nie uwzględnia wszystkich techników, inżynierów i fizyków, którzy od lat 80. XX wieku pracowali przy tych eksperymentach, najpierw przy planowaniu, a później budowie i działaniu.

Procesy produkcji i pomiaru własności dowolnej cząstki są skomplikowane. Za produkcję zderzeń protonów dla eksperymentów ATLAS i CMS odpowiada Wielki Zderzacz Hadronów, czyli w skrócie LHC. Przyspiesza on dwie wiązki cząstek (protonów lub jonów ołowiu) do energii zderzenia pozwalającej na wytworzenie interesującego nas obiektu. Wiązki przecinają się wewnątrz detektora, gdzie dochodzi do oddziaływania (zderzenia) cząstek. Produkują się kolejne cząstki, z których większość rozpada się. W wielu punktach detektora dokonywany jest pomiar ich pozycji, a następnie rekonstruowane są ich tory. W detektorach wytwarzane jest silne pole magnetyczne, które powoduje odchylenie toru lotu naładowanych elektrycznie cząstek. Korzystając z tego faktu, można określić znak ich ładunku elektrycznego oraz wartość pędu. Po procesie rekonstrukcji, mając zarejestrowane miliony zderzeń, przystępuje się do analizy danych.

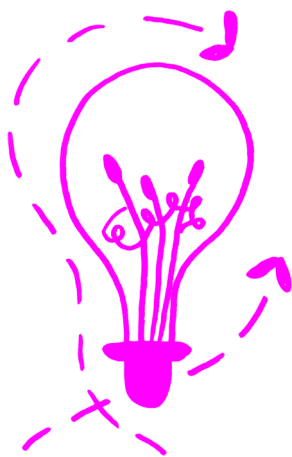
W trakcie warsztatów powtórzone zostały wybrane elementy procesu rekonstrukcji oraz analizy danych. Zadaniem uczestników było zidentyfikowanie nietrwałych cząstek na podstawie produktów ich rozpadów. Możliwych było kilka scenariuszy. Pierwszy z nich to rozpad bozonu W^+ lub W^- . Bozon W rozpada się na naładowany lepton oraz neutrino, więc przypadki z jednym elektronem lub mionem zostały zidentyfikowane jako rozpady bozonu W . Na podstawie kierunku, w którym został zagięty tor leptonu, można było określić ładunek elektryczny tej cząstki (dodatni lub ujemny), a tym samym ładunek bozonu W . Emitowane w takim rozpadzie neutrino nie jest bezpośrednio rejestrowane przez detektor. Obserwujemy natomiast „deficyt pędu” w płaszczyźnie poprzecznej – choć z uwagi na zasadę zachowania pędu suma wektorowa pędów wszystkich cząstek w tej płaszczyźnie powinna być równa zeru. Drugim scenariuszem był rozpad bozonu Z^0 : wówczas w stanie końcowym można obserwować dwa miony lub dwa elektrony. Szczególnie interesujące były przypadki, w których produkty rozpadu mogły pochodzić od pary bozonów Z^0 , jest to bowiem jeden z możliwych stanów końcowych w rozpadzie bozonu Higgsa. Dla każdej pary bozonów Z^0 obliczona została masa niezmiennicza. Przyjrzymy się nieco bliżej temu ważnemu pojęciu, gdyż właśnie dzięki badaniu rozkładu masy niezmienniczej możliwe jest odkrycie nowej cząstki.

Jeżeli nawet w zderzeniu w LHC zostanie wyprodukowany bozon Higgsa, to nie wiadomo, w którym kierunku i z jaką prędkością będzie się poruszał (oprócz tego, że prędkość ta będzie najprawdopodobniej bardzo duża). Szczególna teoria względności orzeka, że czas i położenie oraz energia i pęd wyznaczone w układach odniesienia poruszających się względem siebie z prędkością porównywalną do prędkości światła w próżni związane są transformacją Lorentza. Ma to ciekawe konsekwencje, w szczególności czas w układzie poruszającym się względem obserwatora biegnie inaczej niż w jego układzie odniesienia. Na szczęście, istnieją wielkości, których wartości nie zmieniają się przy transformacjach między układami, nazywamy je niezmiennikami. Przykład niezmiennika łatwo podać dla jednej cząstki: skoro jej energia E i pęd p związane są relacją $E = \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}$, gdzie m jest masą tej cząstki, to, przepisawszy tę zależność w postaci:

$$m^2 c^4 = E^2 - p^2 c^2,$$

otrzymujemy równość, w której wielkości występujące po prawej stronie zależą od wyboru układu odniesienia, a z lewej strony nie! Wyobraźmy teraz sobie, że mamy n cząstek, z których każda ma energię E_i oraz pęd p_i . Przyjmijmy, dla uproszczenia wzorów, że prędkość światła c jest równa 1. (W takim układzie współrzędnych energia, masa i pęd mają te same jednostki – elektronowolty (eV), zamiast odpowiednio: eV, eV/c^2 oraz eV/c ; 1 eV to energia elektronu przyspieszonego różnicą potencjałów 1 V.)

* doktorant, Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski



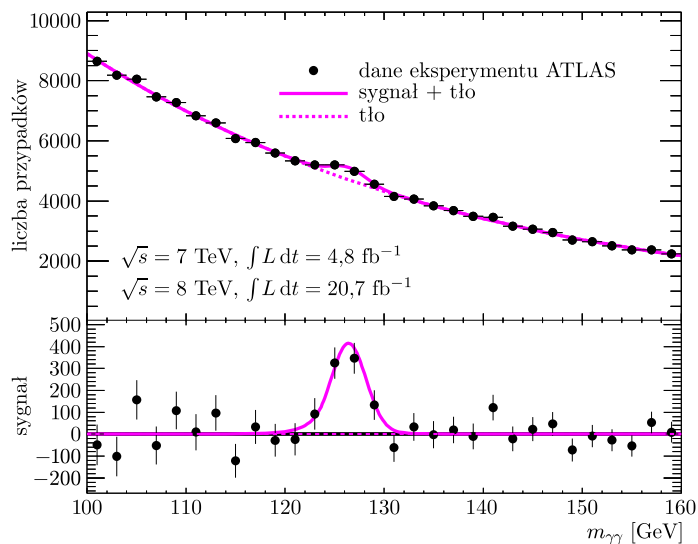
Wówczas wielkość

$$\left(\sum E_i\right)^2 - \left(\sum \vec{p}_i\right)^2$$

nie zależy od układu odniesienia, w którym wyznaczamy energie i pędy – nazywamy ją *masą niezmienniczą*.

Tak zdefiniowana masa niezmiennicza jest zachowana przy rozpadach cząstek, co wynika natychmiast z zasad zachowania pędu i energii. Jeśli zatem układ cząstek jest produktem rozpadu cząstki o masie m , to wyznaczona dla niego masa niezmiennicza będzie miała wartość m . Popatrzmy na rysunek, na którym został umieszczony rozkład masy niezmienniczej par kwantów γ zmierzony przez eksperyment ATLAS. Chociaż Model Standardowy przewiduje, że bozon Higgsa może się rozpaść na dwa kwanty γ , to istnieje wiele powodów, dla których detektor może zaobserwować niezwiązane pary takich kwantów, zwane *tłem*. Jak odróżnić sygnał bozonu Higgsa od tła? Otóż masa niezmiennicza pary kwantów γ , pochodzących z rozpadu bozonu Higgsa, będzie zawsze taka sama, więc przy masie niezmienniczej, odpowiadającej masie Higgsa, powinna wystąpić „nadwyżka” liczby przypadków. Dokładnie to widać na rysunku: charakterystyczną „górkę” przy masie niezmienniczej około 125 GeV/c². Odkryliśmy nową cząstkę!

Efekty kwantowe powodują, że masa niezmiennicza cząstek produkowanych w rozpadzie nie jest dokładnie taka sama jak masa rozpadającej się cząstki, ale rozkład masy niezmienniczej jest rozkładem Gaussa z maksimum w tym miejscu.



Rozkład masy niezmienniczej pary kwantów γ zmierzony przez eksperyment ATLAS. Tłem są pary przypadkowych kwantów γ , a sygnałem – pary pochodzące z rozpadu $H \rightarrow \gamma\gamma$.



Rozwiązanie zadania M 1408.

Zauważmy, że funkcja $f(x) = |x + 1| + |x + 2| + \dots + |x + 2014|$ jest kawałkami liniowa i ograniczona z dołu przez 0. W takim razie przyjmuje minimum w jednym z węzłów $x = -1, \dots, x = -2014$. Nietrudno sprawdzić, że jest to

$$\begin{aligned} f(-1007) &= \\ &= 1006 + \dots + 1 + 0 + 1 + \dots + 1007 = \\ &= 1007^2 = f(-1008). \end{aligned}$$

W marcu 2014 odbędzie się kolejna edycja warsztatów. Więcej informacji można znaleźć na stronie cms.fuw.edu.pl w zakładce *Dydaktyka i popularyzacja*.

We wszystkich pomiarach, w których mierzone wielkości mają losowy charakter (a taki charakter mają efekty kwantowe, rządzące mikroświatem), kluczowa jest duża liczba przypadków, zwłaszcza jeśli interesujący nas proces jest rzadki. Nasuwa się prosta analogia: jeśli chcemy zmierzyć, jak często w rzucie sześcienną kostką otrzymamy trzy oczka, możemy nią rzucić pięć razy. Ale nie zdziwimy się, jeśli nie uda się nam wyrzucić trzech oczek ani razu. Czy to oznacza, że ta kostka nie ma trzech oczek? Nie, nasz pomiar jest obciążony dużą niepewnością, jak to określają fizycy – niepewnością statystyczną.

O roli niepewności statystycznej mieli okazję przekonać się uczestnicy warsztatów. Rozkład masy niezmienniczej par bozonów Z^0Z^0 , który otrzymaliśmy, był trudny do interpretacji ze względu na małą liczbę przypadków. Ale nasz zespół nie był jedyny na świecie, który wykonywał w tym czasie takie samo zadanie. W trakcie połączenia telekonferencyjnego wyniki rozkładów masy niezmienniczej, uzyskane przez zespoły z Niemiec, Serbii i Brazylii, zostały zsumowane. Zobaczyliśmy wyraźną nadwyżkę przypadków w okolicy masy 125 GeV/c². Jak się domyślacie, zinterpretowaliśmy ją jako przejaw bozonu Higgsa! Pokazuje to jeszcze jeden aspekt odkrycia w przypadku fizyki wysokich energii – jego zespołowość.

Odkrycie bozonu Higgsa oczywiście nie kończy działania eksperymentów przy LHC. Kolejnym krokiem jest zbadanie własności odkrytej cząstki: jej spinu oraz tzw. sprzężeń, czyli wielkości określających, jak chętnie bozon Higgsa oddziałuje z innymi cząstkami. Fizycy liczą na znalezienie różnic między pomiarami a przewidywaniami Modelu Standardowego. Najciekawsze nadal przed nami!