

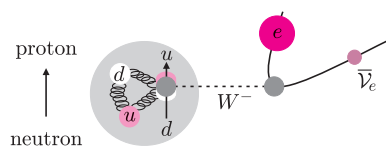
Zostać fizykiem cząstek choć na jeden dzień

Tomasz FRÜBOES*

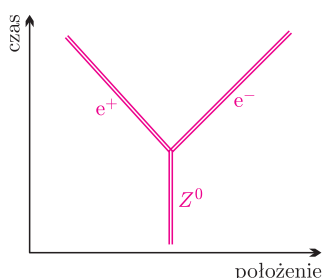
Na wiosnę tego roku grupa uczniów z XIV liceum im. Stanisława Staszica w Warszawie miała okazję posmakować pracy fizyków. Badacze z Uniwersytetu Warszawskiego oraz Narodowego Centrum Badań Jądrowych gościli w gmachu liceum w pewną deszczową sobotę, by poprowadzić warsztaty w ramach programu *International Masterclasses – hands on particle physics*. Ich celem miało być pokazanie, na czym *naprawdę* polega doświadczalne badanie cząstek elementarnych. W niniejszym artykule chcielibyśmy zapoznać z tymi zagadnieniami także Czytelników *Delty*.

Krótkiemu wprowadzeniu do fizyki cząstek elementarnych i podstaw działania detektorów poświęcone były otwierające zajęcia wykłady.

Oddziaływania elektromagnetyczne i słabe są tak naprawdę przejawami tego samego oddziaływania elektroslabego, ale to temat na oddzielną opowieść. Snuliśmy ją np. w *Delcie* 5/2000.



Rys. 1. Rozpad neutronu zachodzi dzięki oddziaływaniom słabym przenoszonym tutaj przez bozon W^- .



Rys. 2. Diagram czasoprzestrzenny przedstawiający rozpad cząstki Z na parę elektron-pozyton w układzie odniesienia, w którym cząstka Z spoczywa. Cząstki potomne mają pędy równe co do wartości, ale przeciwnie skierowane.

Uczestnicy zajęć własnoręcznie zanalizowali niemal dwie setki prawdziwych przypadków zarejestrowanych w LHC.

* doktorant, Narodowe Centrum Badań Jądrowych

Materia, jaką znamy, zbudowana jest z kwarków i leptonów. Znamy sześć różnych rodzajów kwarków – górny (u), powabny (c) i top (t), każdy o ładunku $+\frac{2}{3}e$ (e jest ładunkiem równym ładunkowi elektronu), oraz kwarki dolny (d), dziwny (s) i bottom (b) o ładunku $-\frac{1}{3}e$. Z kwarków zbudowane są nukleony: protony (dwa kwarki u oraz kwark d , co w sumie daje ładunek $+e$), a także neutrony (jeden kwark u oraz dwa kwarki d – łączny ładunek 0). Znamy również 6 różnych rodzajów leptonów – elektron, mion oraz taon (wszystkie o ładunku $-e$) oraz odpowiadające im neutrino – elektronowe, mionowe i taonowe (wszystkie o ładunku 0). Dla każdej z wymienionych wyżej cząstek istnieje antycząstka o dokładnie takich samych własnościach, ale o ładunku przeciwnym; na przykład antycząstką elektronu jest pozyton o ładunku $+e$.

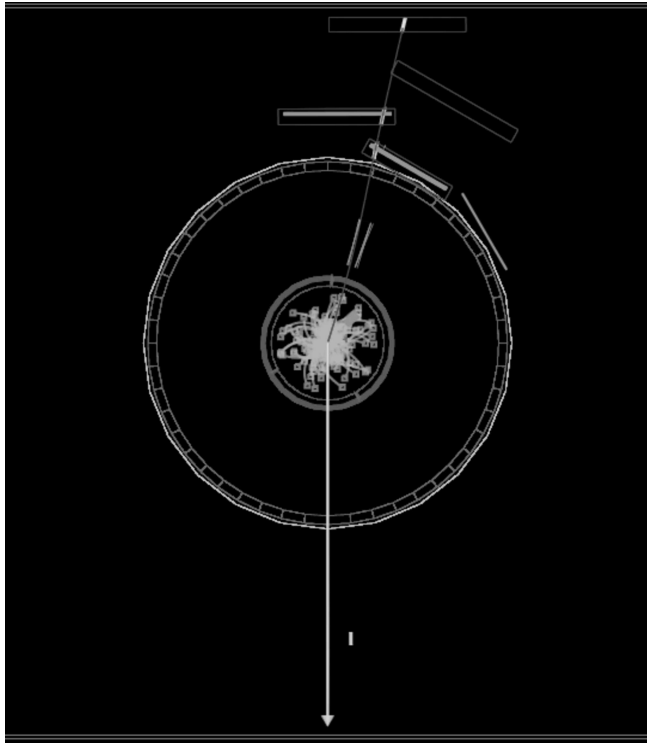
Składniki materii mogą ze sobą oddziaływać. Na przykład, dzięki przyciąganiu elektromagnetycznemu proton łączy się z elektronem, tworząc atom wodoru. Trzy z czterech znanych oddziaływań fundamentalnych są opisywane na poziomie kwantowym w ramach Modelu Standardowego (MS) cząstek elementarnych. Pozostałe oddziaływania w MS to: oddziaływanie silne, odpowiedzialne m.in. za łączenie kwarków w hadrony (np. proton), oraz oddziaływanie słabe, odpowiedzialne np. za rozpad neutronu. MS nie opisuje natomiast oddziaływań grawitacyjnych.

Oddziaływania w MS zachodzą dzięki wymianie cząstek nazywanych nośnikami oddziaływań. Nośnikiem oddziaływania elektromagnetycznego jest znany wszystkim foton, oddziaływanie słabe zapewniają cząstki W^+ , W^- oraz Z^0 (indeks oznacza ładunek elektryczny w jednostkach e), silne zaś – gluony. Rysunek 1 przedstawia przykład oddziaływania słabego, w którym neutron rozpada się na proton, elektron oraz neutrino przez wymianę bozonu W^- .

Wielkie polowanie doświadczalne coraz bardziej osacza ostatni pozostający do odkrycia składnik MS: bozon Higgsa, związany z pewnym polem, które powoduje różnicowanie oddziaływań elektromagnetycznych i słabych oraz jest źródłem masy innych cząstek MS. Istnieje spora szansa, że gdy ten numer *Delty* trafi do kiosków i Internetu, zespoły eksperymentów działających przy LHC (ang. *Large Hadron Collider*, Wielki Zderzacz Hadronów) w laboratorium CERN pod Genewą będą świętować odkrycie bozonu Higgsa.

Cząstki W i Z żyją bardzo krótko – rozpadają się na inne w czasie krótszym niż 10^{-24} s, co nie pozwala ich bezpośrednio zaobserwować w doświadczeniach. MS przewiduje, że cząstka Z niemal tak samo często rozpada się na elektron i pozyton jak na mion i antymion (rys. 2). Innym przewidywaniem MS jest konkretny stosunek liczby zderzeń w LHC, w których produkowana jest cząstka W , do liczby przypadków z produkcją cząstki Z . Przewidywania te można (i należy!) sprawdzać, badając przypadki zarejestrowane przez eksperymenty działające przy LHC. Jednym z takich eksperymentów jest eksperyment CMS (ang. *Compact Muon Solenoid*), w który zaangażowani są fizycy z UW i NCBJ.

Uzbrojeni w przypomniane wyżej podstawowe wiadomości z fizyki cząstek elementarnych możemy zabrać się za analizę prawdziwych danych z LHC.



Rys. 3. Jeden z analizowanych przypadków zarejestrowanych w LHC.

W szczególności, powinniśmy móc określić, czy dany przypadek oddziaływania zarejestrowany w detektorze to taki, w którym produkowana jest cząstka W czy Z , a także, na jakie cząstki potomne się rozpadła – elektrony czy miony.

Rysunek 3 przedstawia jeden z zarejestrowanych w detektorze przypadków. Długa, skierowana ku górze linia przedstawia zrekonstruowany w detektorze tor mionu o dużym pędzie (słabo zakrzywiony przez pole magnetyczne w detektorze). Gęszcz zakrzywionych linii w centralnej części obrazuje zrekonstruowane tory innych cząstek powstałych w tym samym zderzeniu dwóch protonów. Ostatnim ważnym elementem rysunku jest wektor skierowany w dół, równy co do wartości i kierunku sumie tzw. pędów poprzecznych (składowych pędu prostopadłych do osi wiązki) wszystkich cząstek zrekonstruowanych w zderzeniu. Z zasady zachowania pędu wynika, iż suma ta powinna być równa zero (taka była przed kolizją, bo zderzające się protony mają pędy tej samej wartości skierowane przeciwnie). W tym przypadku wartość sumy była istotnie różna od zera, co wskazuje na produkcję neutrino, które oddziałuje zbyt słabo, by mogło zostać zarejestrowane. Z dużym prawdopodobieństwem można zatem przyjąć, że był to przypadek, w którym nastąpiła produkcja cząstki W , która następnie rozpadła

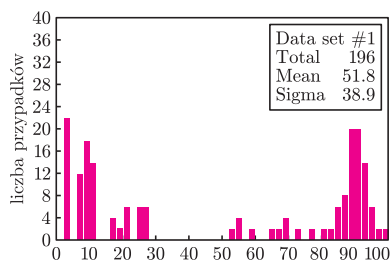
się na mion i neutrino. W zasadzie cząstka taka może jeszcze rozpaść się na parę elektron-neutrino, taon-neutrino lub dwa kwarki. Możliwości te odpowiadałyby jednak innemu obrazowi zarejestrowanemu w detektorze. Elektron, chętnie oddziałujący z materią, ma znacznie krótszy zasięg w detektorze od mionu, taon żyje bardzo krótko i rozpada się, zaś produkcja kwarków powoduje powstanie innych cząstek naładowanych silnie, które ostatecznie łączą się w hadrony tworzące strumienie cząstek zwane dżetami.

Z powyższego wynika, że tylko w przypadku rozpadów cząstki Z możemy zarejestrować obydwie cząstki potomne (elektrony i pozytony lub miony i antimiony) i zmierzyć ich pędy. Wielkości te możemy następnie wykorzystać do wyznaczenia tzw. masy niezmienniczej, odpowiadającej całkowitej relatywistycznej energii rozpadającej się cząstki w układzie odniesienia, w którym cząstka ta spoczywa. Wówczas jednak jedyną formą energii, posiadaną przez rozpadającą się cząstkę, jest energia spoczynkowa, dana wzorem $E = mc^2$. Pomiar masy niezmienniczej odpowiada zatem w rozważanym przypadku pomiarowi masy cząstki Z . Wykres uzyskanych w różnych przypadkach mas niezmienniczych cząstki Z przedstawiony jest na rysunku 4. Wiadomo, że masa ta jest równa około $91,2 \text{ GeV}/c^2$, co dobrze widać na rozkładzie, podobnie jak fakt, że w badanej próbce wystąpiło wiele przypadków, w których para leptonów powstała z rozpadu cząstek innych niż Z .

Czy tego typu analizy, dotyczące wszak cząstek znanych od 30 lat i dobrze od tego czasu zbadanych, mogą być ważne lub interesujące dla prawdziwych fizyków? Oczywiście! Nie wolno zapominać, że LHC i działające przy nim detektory to stanowiąca fascynujące osiągnięcie techniczne, ale także bardzo skomplikowana maszyna. Zanim użyjemy jej do wyprawy w zakresy energii, gdzie spodziewamy się znaleźć nowe cząstki i nowe oddziaływania, powinniśmy mieć pewność, że nasze pomiary mają sens – dla cząstek i oddziaływań znanych.

Następnie warsztaty *Masterclasses* odbędą się wiosną 2013 roku na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego w dwie z marcowych sobót. Więcej informacji można uzyskać, pisząc na adres masterclasses@fuw.edu.pl.

Na zakończenie dnia odbyła się wideokonferencja prowadzona przez fizyków z CERN-u. Podczas niej prezentowane były wyniki uzyskane tego dnia w Warszawie oraz w dwóch innych szkołach z Belgii i Niemiec.



Rys. 4. Rozkład masy niezmienniczej dla przypadków, w których obserwowano dwa naładowane leptony.