

Polowanie na higgsa

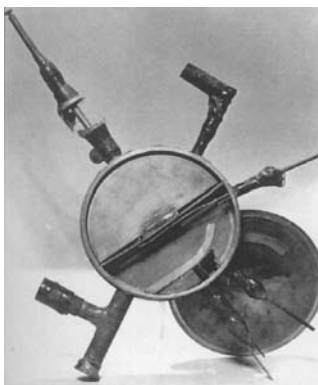
Grzegorz WROCHNA

Akceleratory liniowe, kołowe i ... naturalne

W fizyce cząstek potrzebne są coraz większe energie. Do ich uzyskania potrzebne są coraz potężniejsze akceleratory, czyli urządzenia przyspieszające cząstki naładowane. Najpierw wykorzystywano naturalne źródła cząstek, a więc radioaktywność α (margines na str. 2) i promieniowanie kosmiczne, dzięki któremu odkryto m.in. pozyton (1933, odkrycie antymaterii), mion (1993), pion (1947) i kaon (1947).

Jednak w 1932 roku John Cockcroft i Ernest Walton **rozbili atom litu** już za pomocą **liniowego akceleratora** przyspieszającego protony do energii 800 keV.

W tym samym czasie Ernest Orlando Lawrence zbudował pierwszy **cyklotron**,



w którym protony, zakręcając w polu magnetycznym jak na karuzeli, mogły być wielokrotnie przyspieszane przez stosunkowo słabe pole elektryczne i dzięki temu uzyskiwać jeszcze większe energie.

Współcześnie cząstki rozpędzane są na biegnącej w rurze akceleratora fali elektromagnetycznej jak surfiści na falach oceanu. Najwyższe energie uzyskuje się kierując dwie wiązki naprzeciw siebie w tzw. zderzaczach. Choć trudne technicznie, jest to niezwykle opłacalne, gdyż istotna jest energia w układzie środka masy, która jest proporcjonalna do średniej geometrycznej energii zderzających obiektów.

Z tego względu nawet największe energie promieniowania kosmicznego rzędu 10^{20} eV wyzwalają w zderzeniu z protonem energię zaledwie 2 rzędy wielkości większą niż będzie dostępna w LHC. A ponieważ zderzenia protonów w LHC będą zachodzić tysiąc bilionów razy częściej, więc nie należy spodziewać się, aby badania akceleratorowe można było zastąpić wykorzystywaniem promieniowania kosmicznego.

Można je jednak w ten sposób uzupełnić. Nie wiemy jeszcze, skąd biorą się cząstki rozpędzone do tak fantastycznych energii. Jednym z najbardziej znanych przedsięwzięć w tej dziedzinie jest Projekt Auger, który zakłada budowę olbrzymich zestawów detektorów rejestrujących rozwój lawin cząstek wywołanych w atmosferze przez promieniowanie kosmiczne o największych energiach.

Monumentalnym osiągnięciem fizyki cząstek XX w. jest tzw. *Model Standardowy*, który opisuje strukturę materii i jej oddziaływania na najgłębszym, znanym nam poziomie. Został on potwierdzony eksperymentalnie na wiele sposobów z wielką dokładnością. Postawił jednak przed nami nowe zagadki. Przede wszystkim tzw. cząstka Higgsa związana z mechanizmem potrzebnym, aby inne cząstki w ogóle mogły mieć masę, nie została jak dotąd zaobserwowana. Sam zaś model ma ponad 20 parametrów, których wartości nie da się w jego obrębie obliczyć i trzeba je włożyć „z zewnątrz”, np. mierząc doświadczalnie. Sugeruje to, że być może Model Standardowy jest jedynie przybliżeniem jakiejś bardziej podstawowej i bardziej ogólnej teorii, a znane nam dziś cząstki elementarne, to jedynie część znacznie bogatszego królestwa.

W tej sytuacji rysuje się jasno następująca strategia badawcza:

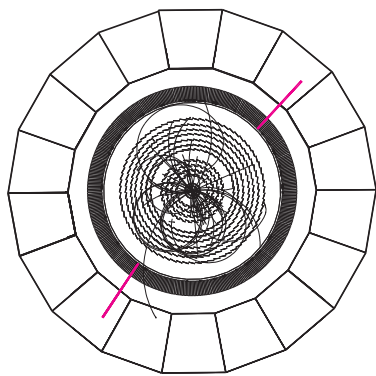
- konieczne jest sprawdzanie konsystencji Modelu Standardowego w poszukiwaniu odchyżeń od jego przewidywań (patrz *Delta* 1/2000),
- poszukiwanie nowych efektów i cząstek przewidywanych przez rozszerzenia Modelu Standardowego;
- w szczególności należy znaleźć higgsa lub wykluczyć jego istnienie w dopuszczalnym przez teorię obszarze.

Realizację tej strategii pokażemy na przykładzie polowania na higgsa. Żeby go móc zaobserwować, trzeba go najpierw wytworzyć. Okazuje się, że najefektywniej (najtaniej i najszybciej) można to zrobić zderzając protony rozpędzone do olbrzymich energii. Jak dużych? Przewiduje się, że higgs ma masę M_H pomiędzy 100 a 1000 GeV. Przy tak wielkich energiach nie można już mówić o zderzaniu całych protonów. Zderzają się ich składniki: kwarki i gluony. Jeden kwark niesie średnio jedynie 10–20% energii całego protonu. Protonom trzeba więc nadać energię rzędu kilku TeV. To marnotrawstwo ma jednak swoje zalety. Gdyby nowe cząstki miały powstawać z całej energii niesionej przez cząstki zderzane, musielibyśmy ją nastroić dokładnie na masę potrzebną do wytworzenia poszukiwanych obiektów. Tej jednak nie znamy! Czekałoby nas więc żmudne przeczesywanie szerokiego zakresu energii, trudne do zrealizowania w praktyce. Tymczasem statystyczny rozkład energii w protonie między kwarki i gluony automatycznie zapewnia takie przeczesywanie. Problem tylko w tym, że niezbyt często zdarza się, żeby zderzające się kwarki miały akurat potrzebną nam energię i dobrze w siebie wycelowały. Przewidujemy, że jeżeli będziemy zderzać protony o energii 7 TeV, to higgs wytworzy się w jednym zderzeniu na 10^9 dla $M_H = 100$ GeV, a raz na 10^{12} dla $M_H = 1$ TeV. Higgs to bardzo rzadkie zwierzę.

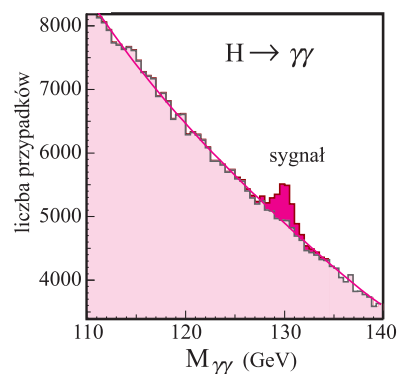
Maszynę do produkcji higgsów konstruuje się obecnie w laboratorium CERN pod Genewą. Dosłownie „pod”, jako że będzie ona umieszczona w istniejącym już tunelu o obwodzie 27 km przypominającym tunel metra. LHC, czyli Wielki Zderzacz Hadronów (ang. *Large Hadron Collider*) to akcelerator, w którym protony rozpędzane będą do energii 7 TeV. Co 25 ns dojdzie do przecięcia się dwóch przeciwbieżnych paczek (po 10^{11} protonów w każdej), w którym zajdzie 10–20 zderzeń proton-proton. Oznacza to prawie miliard zderzeń na sekundę, a więc 1–1000 higgsów na godzinę. Całkiem niezła fabryka.

A jak zaobserwować higgsa? Jest to zwierzę nie dość, że rzadkie, to jeszcze bardzo płochliwe. Pojawia się na czas tak krótki, iż nie zdąży nawet opuścić obszaru przekrywania zderzających się protonów! Natychmiast znika, rozpadając się na inne cząstki. Nie możemy więc nawet marzyć o bezpośredniej obserwacji. Musimy się zadowolić rozpoznaniem jego bytności po tym, co po sobie pozostawił. To stary myśliwski sposób.

Ale co pozostawia po sobie higgs? Najczęściej kwarki b. Tych jest jednak więcej niż liści w lesie, jako że LHC produkuje ich 5 milionów na sekundę. W ten



Symulacja rozpadu higgosa na dwa fotony, widoczne jako duże depozyty energii w kalorymetrze elektromagnetycznym.



Rozkład masy dwóch fotonów. Na tle przypadkowych par fotonów widoczny jest pik pochodzący od higgosa.

Komora pęcherzykowa w kuchni. W kuchence mikrofalowej ogrzewamy wodę w szklanym dzbanku. Gdy zaczną pojawiać się pierwsze duże bąble pary, dzbanek wyjmujemy z kucharki. Do dzbanka szybko wrzucamy torebkę herbaty ekspresowej. Nagle woda zaczyna gwałtownie wrzeć. Uwaga! Gwałtownie wrząca woda wylewa się z dzbanka i może nas poparzyć! W kuchence mikrofalowej woda ogrzewana jest równomiernie w całej objętości (w przeciwieństwie do np. czajnika na palniku gazowym) i wrzenie „nie ma od czego się zacząć”. Temperatura wody przekracza 100°C. Jest to tzw. ciecierz przegrzana. Torebka herbaty spełnia rolę „cząstki elementarnej”. Nierówności jej powierzchni stają się centrami, wokół których rozpoczyna się wrzenie przegrzanej cieczy.

sposób higgosa raczej nie rozpoznamy. Musimy rozejrzeć się za rzadszymi pozostałościami. Okazuje się, że lżejszego higgosa najlepiej wyróżnia rozpad na dwa fotony, cięższego zaś – na dwa bozony Z^0 , z których każdy rozpada się z kolei na parę e^+e^- lub $\mu^+\mu^-$. Takie rozpadły zdarzają się jednak średnio raz na 100–1000 higgosów, możemy ich więc zaobserwować tylko 1–100 dziennie. To i tak niezły wynik. Trzeba się tylko postarać, aby ich nie przegapić i odróżnić higgosowe pary fotonów czy mionów od cząstek pochodzących z innych źródeł.

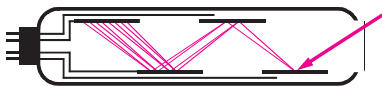
Aby odróżnić higgosowe fotony od innych wykorzystujemy fakt, że higgs ma określoną masę, choć nie musimy wiedzieć z góry jaką. Ponieważ nie wiemy *a priori*, które z fotonów pochodzą z higgosa, rozpatrujemy wszystkie możliwe kombinacje. Dla każdej pary obliczamy z zasad zachowania energii i pędu masę cząstki, z której mogłyby one powstać. Fotony z różnych źródeł dadzą wynik przypadkowy, te zaś z higgosa zgrupują się wokół jednej wartości. Jeśli sporządzimy wykres rozkładu masy, to na kombinatorycznym tle zobaczymy wyraźny pik. W ten sposób nie tylko stwierdzimy istnienie higgosa, ale także zmierzimy jego masę.

Tak więc, aby upolować higgosa, musimy umieć rozpoznawać różne rodzaje cząstek oraz mierzyć ich energie i pędy. Łatwo powiedzieć, trudniej zrobić. Nie zapominajmy, że chodzi przecież o zarejestrowanie pojedynczej cząstki elementarnej! Warunkiem koniecznym jest, by cząstka żyła na tyle długo, aby przelecieć w detektorze choćby kilkanaście centymetrów. Bezpośrednio możemy więc obserwować jedynie cząstki takie jak γ , e^\pm , p^\pm , n , μ^\pm , π^\pm , K^\pm , K_L^0 . Wszystkie inne, podobnie jak higgosa, rekonstruujemy z produktów ich rozpadów.

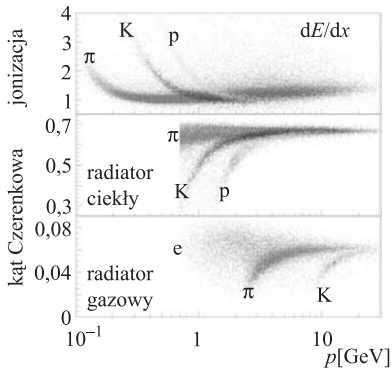
Cząstka naładowana przechodząc przez materię manifestuje swoją obecność przez jonizację ośrodka lub emisję fotonów. **Jonizacja** polega na wybijaniu elektronów z atomów ośrodka. W półprzewodnikach przechodząca cząstka może tworzyć pary elektron-dziura. **Emisję fotonów** mogą powodować różne mechanizmy. **Scyntylacja** polega na tym, że cząstka przechodząca przez niektóre substancje (np. NaI) pobudza atomy, które następnie emitują światło (fotony). **Promieniowanie Czerenkowa** jest wysyłane przez cząstkę poruszającą się w ośrodku szybciej niż światło (w tymże ośrodku, a nie w próżni, czego zabrania teoria względności). Taka cząstka wysyła fotony w charakterystycznym stożku przypominającym falę uderzeniową naddźwiękowego samolotu. **Promieniowanie przejścia** jest emitowane przez cząstkę na granicy dwóch ośrodków, a **promieniowanie hamowania** – przez cząstkę zwalnającą w ośrodku. Wykorzystując te zjawiska konstruuje się rozmaite rodzaje detektorów.

Olbrzymią rolę w historii fizyki cząstek odegrały **detektory wizualne**. Najprostszym z nich jest **emulsja fotograficzna**, w której jonizacja powoduje zaciemnienie wzdłuż toru cząstki. **Komora mgłowa (Wilsona)** zawiera przechłodzony gaz, w którym na zjonizowanych centrach kondensują się krople tworzące obraz toru cząstki, który może być np. sfotografowany. Podobnie działa **komora pęcherzykowa**, gdzie w przegrzanej cieczy (np. ciekły wodór) wzdłuż toru cząstki tworzą się pęcherzyki gazu. W latach 60. analiza takiego zdjęcia wymagała ręcznego pomiaru współrzędnych wielu punktów na torze każdej cząstki. Gigantycznym nakładem pracy można było przeanalizować około 10 000 zdjęć z trwającego kilka lat eksperymentu. Przełomowym momentem było wynalezienie w 1968 r. **komory wielodrutowej**. Detektor ten umożliwił całkowicie automatyczną, elektroniczną rejestrację oddziaływań cząstek. Pozwoliło to na pełną, komputerową ich analizę, co dało możliwość przebadania milionów interesujących przypadków z jednego eksperymentu. Jej wynalazca Georges Charpak został w 1992 r. uhonorowany Nagrodą Nobla.

Komora wielodrutowa należy do szerokiej rodziny **detektorów gazowych**. W tego typu detektorach cząstka jonizuje gaz między dwiema elektrodami o wysokim napięciu, co powoduje wyładowanie dające rejestrowalny impuls elektryczny. Rozkład przestrzenny i czasowy impulsów pozwala określić, którą przesyła cząstka, z dokładnością rzędu od 100 μm do 1 mm.



Fotopowielacz to bańka próżniowa zawierająca zespół specjalnie ukształtowanych elektrod. Padający foton wybija z pierwszej elektrody elektron, który po przyspieszeniu w polu elektrycznym wybija kilka elektronów z drugiej elektrody. Każdy z wybitych elektronów jest znowu przyspieszany i wybija kilka nowych elektronów z następnej elektrody. Proces „powielania elektronów” jest kontynuowany aż do uzyskania mierzalnego prądu na ostatniej elektrodzie. **Fotodioda** to urządzenie półprzewodnikowe. Padający foton wytwarza nośniki (elektrony i dziury) umożliwiające przepływ prądu w kierunku zaporowym.



Pomiar prędkości zazwyczaj służy identyfikacji cząstek, gdyż znając prędkość i pęd, możemy wyznaczyć masę. Możliwy jest tylko dla cząstek o niezbyt dużej energii, poruszających się z prędkością istotnie mniejszą niż prędkość światła w próżni c . Prędkość cząstki v możemy wyznaczyć mierząc czas przelotu $\Delta t = d/v$ między dwoma licznikami odległymi o d . Możemy też zmierzyć kąt θ stożka promieniowania Czerenkowa i obliczyć prędkość ze wzoru $\sin \theta = v_c/v$, gdzie v_c to prędkość światła w danym ośrodku, lub wykorzystując zależność jonizacji ośrodka dE/dx od prędkości. Na zamieszczonym rysunku łatwo można zauważyć pasma odpowiadające różnym cząstkom. Jak widać, użyte metody uzupełniają się, gdyż każda jest czuła w innym zakresie pędu.

Droższe, ale bardziej precyzyjne są **detektory półprzewodnikowe**, w których cząstka przechodząca przez krzem lub arsenek galu tworzy pary elektron-dziura. Powoduje to przepływ rejestrowalnego prądu. W zależności od kształtu elektrod odczytowych wyróżniamy **detektory mikropaskowe** z elektrodami w kształcie pasków o szerokości rzędu 100 μm i długości rzędu 10 cm, oraz **detektory mozaikowe** (ang. *pixel detectors*), gdzie elektrody mają kształt prostokątów o bokach rzędu 100 μm .

Odrębną rodzinę stanowią **detektory optyczne**. Detektor optyczny składa się z przezroczystego ośrodka i elementu światłoczułego. Przechodząca przez ośrodek cząstka powoduje scyntylację, emisję promieniowania Czerenkowa lub promieniowania przejścia. Elementem światłoczułym jest zwykle fotopowielacz lub fotodioda.

Mając w zanadru cały arsenał rozmaitych detektorów (a wymienione powyżej to jedynie skromna część uzbrojenia współczesnej fizyki) zastanówmy się teraz, co nimi można zmierzyć.

Pomiaru pędu dokonujemy wyznaczając promień krzywizny toru cząstki w polu magnetycznym: $R = p/(0,3B)$, gdzie promień R wyrażamy w metrach, pęd p w GeV, a pole magnetyczne B w teslach. Tor może być zaobserwowany bezpośrednio w emulsji fotograficznej, komorze mgłowej lub pęcherzykowej. Może też być wyznaczony przez szereg punktów zmierzonych detektorem mikropaskowym, mozaikowym lub komorą drutową.

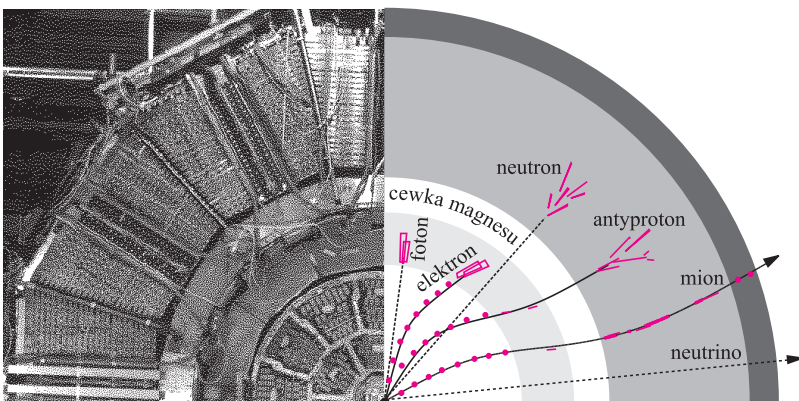
Pomiar energii wykorzystuje fakt, że elektron i foton „grzezną” w materii wywołując krótką kaskadę elektromagnetyczną: pierwotny elektron emituje foton, który zamienia się w parę e^+e^- , te z kolei znowu emitują fotony tworzące kolejne pary e^+e^- itd. aż do wyczerpania energii. Hadrony (p , n , π^\pm , K^\pm , K^0) wywołują kaskadę hadronową: pierwotny hadron rozbija jądro jednego z atomów ośrodka, wybite neutrony i protony rozbijają kolejne jądra itd. Liczba cząstek w kaskadzie jest proporcjonalna do energii cząstki pierwotnej. Do jej pomiaru może służyć scyntylator z fotopowielaczem lub fotodiody czy komora proporcjonalna. Zespół takich detektorów mierzący energię nazywamy kalorymetrem.

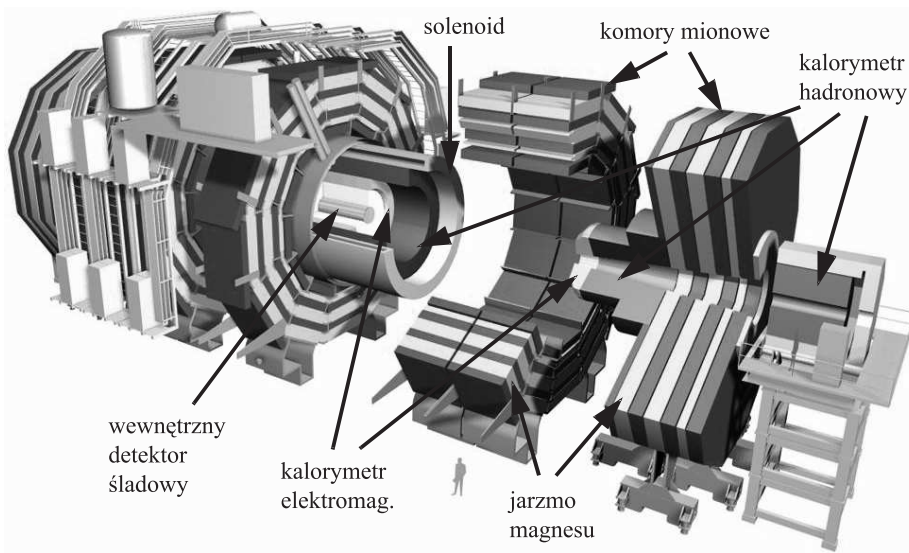
Umiemy już zmierzyć pędy i energie cząstek. Zobaczmy teraz, jak cząstki można odróżnić. Wykorzystujemy do tego fakt, że różne cząstki różnie oddziałują z materią. Cząstka naładowana pozostawia ślad rejestrowalny w detektorach wizualnych, gazowych lub półprzewodnikowych. Elektron i foton wywołują kaskadę elektromagnetyczną, hadrony zaś (p , n , π^\pm , K^\pm , K^0) – hadronową. Znak cząstki naładowanej określamy z kierunku zakrzywienia toru w polu magnetycznym. Obecność takich cząstek jak neutrino można rozpoznać jedynie po „brakującej energii” – pozornym złamaniu zasady zachowania, jako że energia wynoszona z detektora przez neutrino nie jest w żaden sposób rejestrowana.

Współczesny detektor uniwersalny składa się więc zwykle z czterech części (licząc od środka):

- wewnętrznego detektora śladowego (ang. *tracker*),
- kalorymetru elektromagnetycznego,
- kalorymetru hadronowego,
- zewnętrznego detektora śladowego (detektor mionowy).

Części te i ich funkcje przedstawione są obok na schematycznym rysunku. Można je też odnaleźć na zdjęciu detektora ALEPH zrobionym w czasie jego montażu.





Innym przykładem może być pokazany na rysunku detektor CMS (ang. *Compact Muon Solenoid*), który będzie jednym z dwóch detektorów uniwersalnych rejestrujących zderzenia w LHC.

A jak dokonujemy samego pomiaru? Zależnie od rodzaju detektora rejestrujemy samo pojawienie się sygnału, mierzymy czas przelotu cząstki lub dryfu elektronów, powstały ładunek lub prąd. Zmierzone wartości przekształcamy do postaci cyfrowej. Po wstępnej kompresji typowy przypadek (przecięcie wiązek protonów)

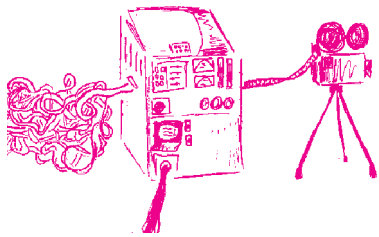
Liczba kanałów elektroniki pomiarowej w poszczególnych częściach detektora CMS.

wewnętrzny detektor śladowy	96 000 000
kalorymetry	650 000
detektor mionowy	1 000 000

W ciągu roku eksperyment CMS zaobserwuje ok. 10^{16} zderzeń proton-proton. Wśród nich być może znajdzie się ok. 100 interesujących nas rozpadów higgsa. Musimy więc wyszukać 1 higgsa wśród 10^{14} zderzeń. Porównajmy to do szukania igły w stogu siana. Załóżmy, że przeciętna igła ma 5 mm^3 , a przeciętny stóg 50 m^3 . Tak więc $\frac{\text{igła}}{\text{stóg}} = \frac{1}{10^{10}}$. Zatem szukanie higgsa jest równie trudne jak szukanie igły w 10 000 stogów siana.



W ciągu 25 ns miony bieżące z prędkością bliską prędkości światła przebiegną jedynie ok. 7 m. Nie zdążą więc nawet opuścić detektora, zanim zajdzie następne zderzenie.



w detektorze CMS zajmuje około 1 MB. Wydaje się, że to niezbyt wiele, ale takich przypadków zachodzi 40 mln/s. Daje to strumień danych 40 TB/s – dziś niemożliwy do zapisania na żadnym nośniku. Projektując system odczytu detektora CMS założono jedynie 100 MB/s. Ta skromna liczba oznacza jednak 10 TB dziennie i ok. 1 PB (petabajt) rocznie! Trudno sobie wyobrazić magazyn, w którym będą przechowywane te dane. Z drugiej strony 100 MB/s to jedynie 100 przypadków na sekundę. To jednak w zupełności wystarczy do upolowania wszystkich interesujących nas higgsów. Problem w tym, że przed naszymi elektronicznymi oczami przebiegać będzie 40 mln przypadków na sekundę, a my możemy nacisnąć spust jedynie 100 razy! Jak uzyskać pewność, że naciśniemy go we właściwym momencie? Oczywiście, będąc przyjaciółmi zwierząt mamy na myśli spust migawki aparatu fotograficznego. Żeby analogia była bliższa, wyobraźmy sobie, że jest to aparat cyfrowy o bardzo wysokiej rozdzielczości. Gdybyśmy fotografowali każde przebiegające zwierzę, to błyskawicznie zapełnilibyśmy całą pamięć tracąc szansę na zaobserwowanie prawdziwego higgsa. Musimy więc dokonywać wyboru i fotografować jedynie te zwierzęta, które choć trochę przypominają higgsa.

W rzeczywistym eksperymencie wyboru dokonuje system wyzwalania zwany **trygerem** od ang. *trigger*, co właśnie oznacza „spust”. Czasu na decyzję jest niewiele, gdyż zderzenia zachodzą co 25 ns. To zdecydowanie za mało, żeby rozpoznać cząstki, pomierzyć ich pędy i zrekonstruować cały przypadek. A jednak udało się znaleźć rozwiązanie. Wyobraźmy sobie, że rozstawiamy w lesie kamery filmowe, z których każda ma wprawdzie ograniczone pole widzenia i słabą zdolność rozdzielczą, ale za to potrafi zarejestrować wszystkie zwierzęta, bo klatki filmu przesuwały się właśnie co 25 ns. Problem w tym, że wywołanie zajmuje około 3 μs . Rozwiązujemy go konstruując specjalną wywoływarkę, przez którą film będzie się ciągle przesuwał. Każda klatka będzie w nim spędzała 3 μs , ale co 25 ns z urządzenia będzie wychodził nowy obrazek. Teraz trzeba tylko złożyć mozaikę obrazków z różnych kamer i podjąć decyzję, czy zarejestrowane zwierzę przypomina higgsa.

W eksperymencie „wywoływarka” jest tzw. **pierwszy stopień trygera**, a zastosowana metoda nazywa się przetwarzaniem potokowym. Wykorzystuje on orientacyjne dane z kalorymetrów i systemu mionowego. „Wywoływanie” polega na rekonstruowaniu śladów cząstek oraz szacowaniu ich energii i pędu. Najpierw dane przetwarzane są przez około 10 000 **trygerów lokalnych**, a następnie ich wyniki łączone w całość i porównywane ze wzorcem przez **tryger globalny**. Cały algorytm podzielony jest na kroki wykonywalne w 25 ns. Procesor potokowy stanowi łańcuch elementów, z których każdy wykonuje jeden krok algorytmu w 25 ns i przekazuje wynik następnemu. W ten sposób przetwarzane dane płyną przez procesor około 3 μs , a wyniki pojawiają się na jego wyjściu co 25 ns.



Procedura ta pozwala na wybranie około 100 tys. spośród 40 mln przypadków na sekundę. Ciągłe jeszcze jesteśmy daleko od docelowych stu. Ponadto decyzja zapadła dopiero po 3 μ s. W tym czasie przed naszym znakomitym aparatem cyfrowym przebiegło 128 zwierząt i po higgsie nie zostało ani śladu. Aparat cyfrowy ma jednak tę właściwość, że potrafi zapamiętać pewną liczbę zdjęć. Kiedy pamięć się zapełni, aparat będzie działał dalej, zamazując najstarsze zdjęcia. Nam w zupełności wystarczy, żeby zapamiętał 128 zdjęć. Trzeba tylko tak zsynchronizować cały system, aby decyzja podjęta na podstawie podglądu z kamer zdążyła dotrzeć do aparatu, zanim interesujące nas zdjęcie zostanie skasowane.



W eksperymencie dokładne dane czekają na decyzje trygera w buforach, które działają podobnie jak nasz aparat. Jest to tzw. pamięć potokowa, w której dane przesuwały się z komórki do komórki co 25 ns. Po 128 krokach nadchodzi decyzja trygera i dane albo giną bezpowrotnie, albo są przekazywane dalej, do procesorów **drugiego stopnia trygera**. Jego zadaniem jest wybranie 100 spośród 100 000 przypadków dostarczanych w każdej sekundzie przez tryger pierwszego stopnia. W naszym lesie funkcję tę będzie pełnił grupa 500 ekspertów przeglądających zdjęcia. Ponieważ wybraliśmy 100 tys. zdjęć na sekundę, średnio przychodzą one co 10 μ s. Każdy z ekspertów ma więc 5 ms na analizę swojego zdjęcia. Gdyby i to nie wystarczyło, możemy ich podzielić na dwie lub trzy grupy, z których pierwsza będzie znów orientacyjnie oceniała zdjęcia i wyrzucając mniej prawdopodobne dawała więcej czasu na dokładną analizę następnej grupie. Kolejne grupy nazywamy kolejnymi stopniami trygera. W eksperymencie CMS ekspertami będą wieloprocessorowe komputery o łącznej mocy obliczeniowej 5 TIPS (tera-instrukcji na sekundę).

Kiedy już zapiszemy wybrane przypadki na dyskach, taśmach czy DVD, przyjdzie czas na ich dokładną analizę. Ruszy ona pełną parą, kiedy tylko pojawią się pierwsze dane. Nastąpi to w roku 2005. Przez następne lata będą się gromadziły petabajty danych i potrzeba będzie wielu rąk (a przede wszystkim głów) do pracy, żeby odnaleźć w nich higgosa, czy jakąś zupełnie Nową, Nieoczekiwaną Fizykę. Dzisiejsi Czytelnicy *Delty* zapewne będą wtedy kończyli studia i rozpoczynali własną działalność naukową. Ta zbieżność daje wiele do myślenia!

