

Wszechświat Cząstek Elementarnych dla Humanistów

Współczesne eksperymenty przy kolajderach

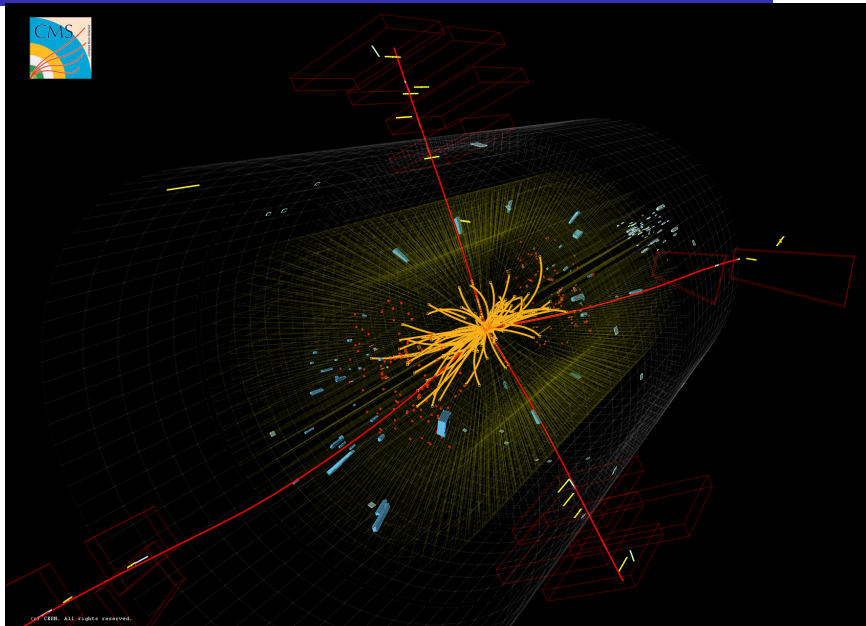
Aleksander Filip Żarnecki

Wykład ogólnouniwersytecki



30 listopada 2021

Jak dziś "widzimy" oddziaływania cząstek?



© 2011 CERN. All rights reserved.

- 1 Przypomnienie
 - Kolajdery
 - Podstawowe typy detektorów
- 2 Budowa detektora uniwersalnego
- 3 Co rejestrują detektory?
- 4 Współczesne eksperymenty
 - Jak wygląda współczesny detektor
 - Przykładowe przypadki
 - Przechowywanie i analiza danych
 - Symulacje Monte Carlo
 - Układ wyzwalania

1 Przypomnienie

- Kolajdery
- Podstawowe typy detektorów

2 Budowa detektora uniwersalnego

3 Co rejestrują detektory?

4 Współczesne eksperymenty

- Jak wygląda współczesny detektor
- Przykładowe przypadki
- Przechowywanie i analiza danych
- Symulacje Monte Carlo
- Układ wyzwalania

LEP/LHC

Największym zbudowanym dotąd akceleratorem był LEP. Zbudowany w CERN pod Genewą miał obwód ok. 27 km.

W tym samym tunelu działa obecnie LHC!

Przeciwbieżne wiązki protonów $E = 7 \text{ TeV}$

W każdej do 2800 "paczek" po 10^{11} protonów

Energia jednej paczki: $\sim 10^5 \text{ J}$

Samochód osobowy jadący ok. 60 km/h

Całkowita zgromadzona energia: $\sim 6 \cdot 10^8 \text{ J}$

Zderzenia paczek co 25 ns
(40 milionów na sekundę)



The Large Hadron Collider (LHC)

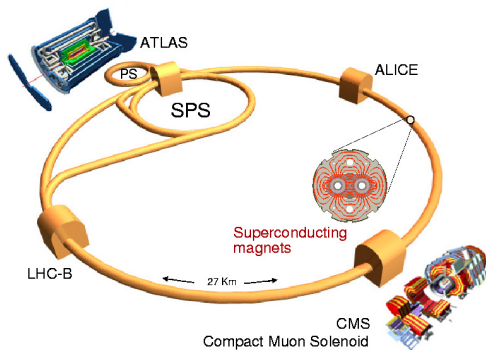
LHC

Przeciwbieżne wiązki LHC
proton-proton dają energię
zderzenia $2 \times 7 = 14 \text{ TeV}$
($1 \text{ TeV} = 1000 \text{ GeV}$)

Intensywność wiązek jest tak
duża, że pozwala na produkcję
rzędu 1000 cząstek Higgsa na
godzinę !

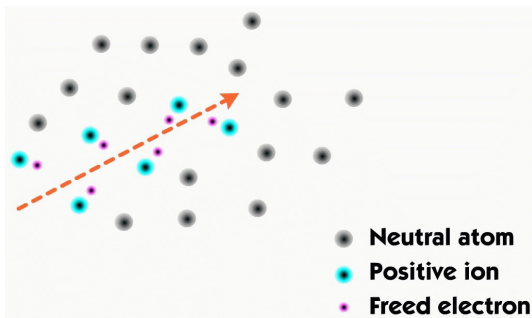
Przypadki produkcji tych cząstek
badają dwa eksperymenty: ATLAS
i CMS

Poszukują one także produkcji nowych, "egzotycznych" cząstek i innych
sygnałów "nowej fizyki", poza Modelem Standardowym



Jonizacja

U podstaw działania przeważającej większości detektorów cząstek elementarnych leży **zjawisko jonizacji**:

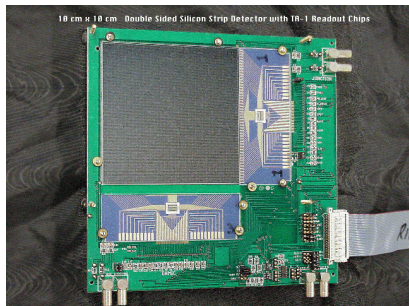


Cząstka naładowana przechodząc przez ośrodek **oddziałuje Kulombowsko** z elektronami i oddaje im część swojej energii **“wybijając”** je z atomów.

Detektory półprzewodnikowe

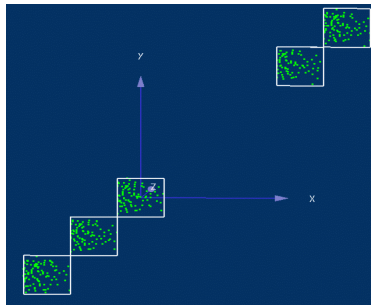
Coraz powszechniej używane.

Bardzo różne technologie, m.in. CCD
(używane w fotografii cyfrowej)



Bardzo precyzyjny pomiar
pozycji cząstek (rzędu μm)

Mierzone punkty przejścia wiązki
cząstek przez pięć warstw "teleskopu":



Niestety wciąż stosunkowo drogie...

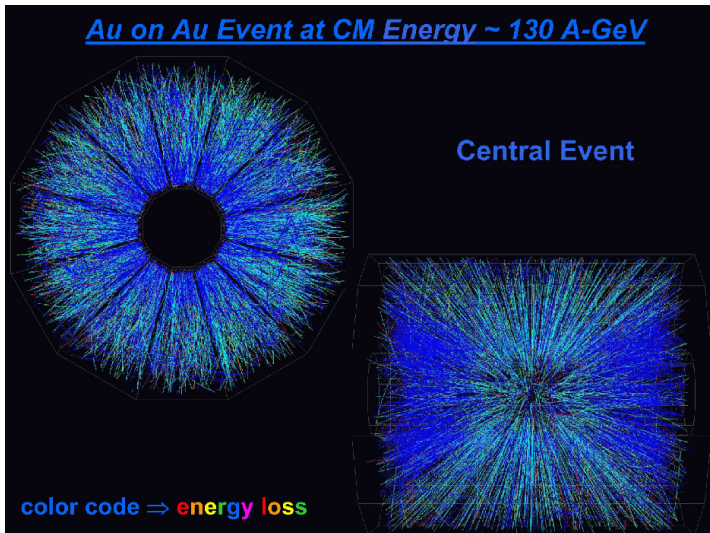
Detektory gazowe

TPC

Komora
projekcji
czasowej

Przypadek
zderzenia
ciężkich jonów

detektor STAR
przy RHIC



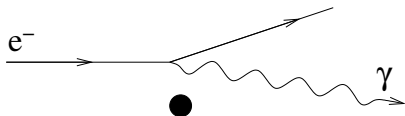
Kalorymetry

Wszystkie przedstawione poprzednio detektory rejestrowały przejście cząstki, "śląd" **naładowanej** cząstki w materii \Rightarrow detektory śladowe.

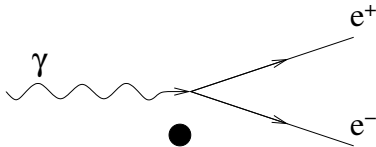
Aby zmierzyć **energię** cząstki musimy sprawić, aby w wyniku wielokrotnych oddziaływań "oddała ją" w całości detektorowi \Rightarrow **kalorymetry**.

Kalorymetr elektromagnetyczny

Wysokoenergetyczne elektrony tracą energię prawie wyłącznie na **promieniowanie hamowania**



Wysokoenergetyczne fotony ulegają **konwersji na pary $e^+ e^-$**

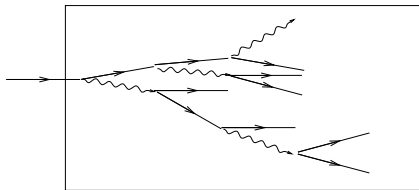


Kalorymetry

Wysokoenergetyczny **elektron lub foton** wpadając do detektora wywołuje **kaskadę** składającą się z $N \sim E$ cząstek

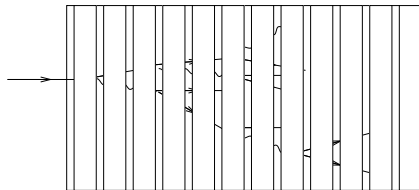
Mierząc liczbę cząstek lub całkowitą długość torów (**całkowitą jonizację**) możemy dokładnie określić energię cząstki początkowej

Kalorymetr jednorodny



np. blok scyntylatora

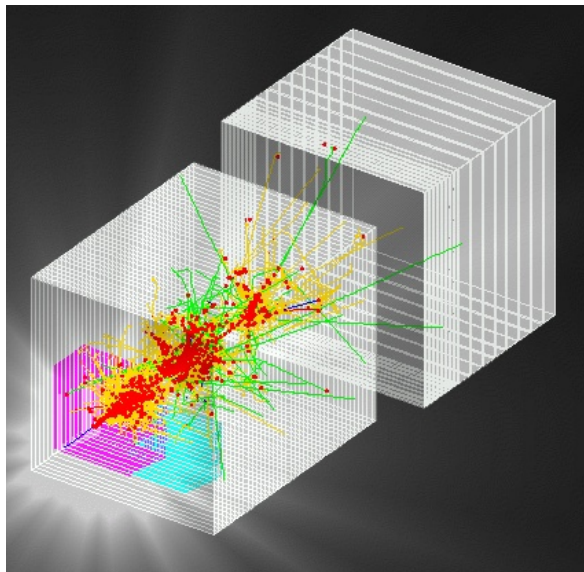
Kalorymetr próbkujący



warstwy detektora na przemian z gęstym absorberem

Kalorymetry

Symulacja rozwoju
kaskady hadronowej
(pomiar energii protonu)



- 1 Przypomnienie
 - Kolajdery
 - Podstawowe typy detektorów
- 2 Budowa detektora uniwersalnego
- 3 Co rejestrują detektory?
- 4 Współczesne eksperymenty
 - Jak wygląda współczesny detektor
 - Przykładowe przypadki
 - Przechowywanie i analiza danych
 - Symulacje Monte Carlo
 - Układ wyzwalania

Detektory są jak ogry...

Ogry są jak cebula...

Cebula ma warstwy...

Ogry mają warstwy...

Detektory mają warstwy...



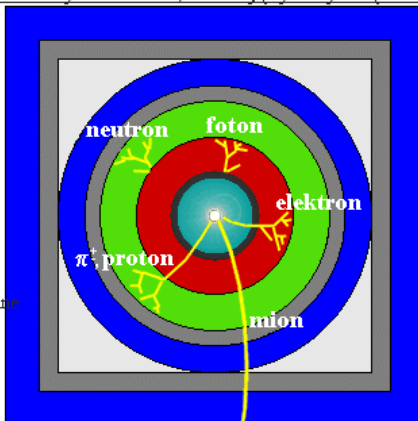
Film by DreamWorks (2001)

Struktura warstwowa

Współczesne eksperymenty fizyki wysokich energii są naogół zbudowane z wielu różnorodnych elementów.

Przekrój poprzeczny detektora, ilustrujący tory cząstek

-  rura wiązki
-  detektory śladowe
-  solenoid manganu
-  kalorymetr elektromagnetyczny
-  kalorymetr hadronowy
-  namagnesowane żelazo
-  komory mionowe



Struktura warstwowa

Współczesne eksperymenty fizyki wysokich energii są naogół zbudowane z wielu różnorodnych elementów.

Ułożone jeden za drugim detektory umożliwiają optymalny pomiar wszystkich rodzajów cząstek i ich (zwykle częściową) identyfikację.

Struktura warstwowa

Współczesne eksperymenty fizyki wysokich energii są naogół zbudowane z wielu różnorodnych elementów.

Ułożone jeden za drugim detektory umożliwiają optymalny pomiar wszystkich rodzajów cząstek i ich (zwykle częściową) identyfikację.

Najbliżej punktu zderzenia wiązek umieszcza się detektory, które jak najmniej oddziałują z wyprodukowanymi cząstkami - detektory gazowe, cienkie detektory krzemowe.

Struktura warstwowa

Współczesne eksperymenty fizyki wysokich energii są naogół zbudowane z wielu różnorodnych elementów.

Ułożone jeden za drugim detektory umożliwiają optymalny pomiar wszystkich rodzajów cząstek i ich (zwykle częściową) identyfikację.

Najbliżej punktu zderzenia wiązek umieszcza się detektory, które jak najmniej oddziałują z wyprodukowanymi cząstkami - detektory gazowe, cienkie detektory krzemowe.

Najdalej od punktu zderzenia umieszcza się detektory, które absorbują/zatrzymują cząstki - kalorymetry, detektory mionowe.

Detektor uniwersalny

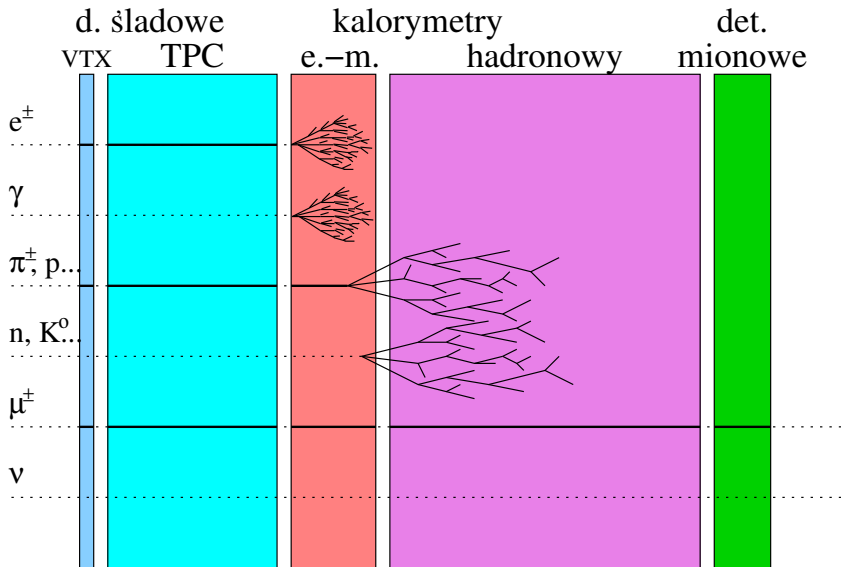
Ten schemat opisuje większość współczesnych eksperymentów przy kolajderach (ATLAS i CMS przy LHC, ale także wcześniejsze eksperymenty przy: LEP, HERA, Tevatron, oraz planowane przy: ILC, FCC, CLIC):

Kolejno od środka detektora:

- detektor wierzchołka (jak najbliżej osi wiązki!)
określa gdzie zaszło zderzenie, identyfikuje rozpady cząstek krótkożyciowych (tzw. wierzchołki wtórne)
najczęściej detektor półprzewodnikowy
- detektory śladowe
pomiar torów cząstek naładowanych, wyznaczenie pędów cząstek z zakrzywienia w polu magnetycznym
najczęściej detektory gazowe lub cienkie warstwy półprzewodnika
(minimalizuje oddziaływania cząstek w detektorze)

Detektor uniwersalny

- kalorymetr elektromagnetyczny
pomiar energii elektronów i fotonów
gęsty materiał absorbujący lawinę cząstek
(miedź, ołów, wolfram)
- kalorymetr hadronowy
pomiar energii hadronów (protony, neutrony, piony, kaony)
gęsty materiał absorbujący lawinę cząstek;
lawina hadronowa jest wielokrotnie dłuższa od elektromagnetycznej!
dlatego kalorymetr hadronowy musi stać za elektromagnetycznym...
- detektory mionowe
identyfikacja mionów - jedyne cząstki naładowane,
które mogą przejść przez kalometry bez dużych strat energii
wszystkie pozostałe cząstki (poza neutrinami) powinny się zatrzymać...

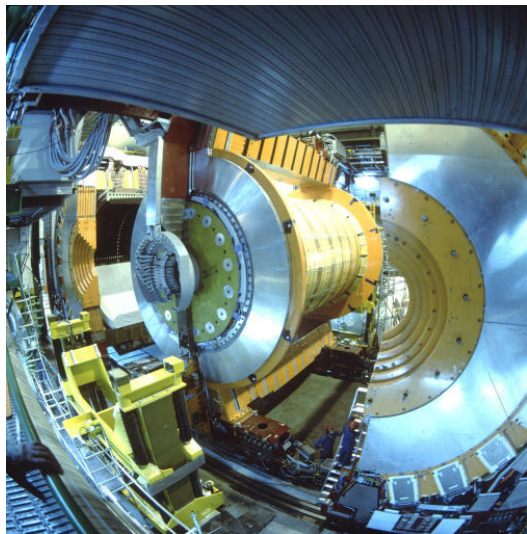


VTX - detektor wierzchołka

OPAL

Detektor **OPAL**,
akcelerator **LEP**,
zderzenia wiązek
przeciwbieżnych
 e^+e^-

1989-2000

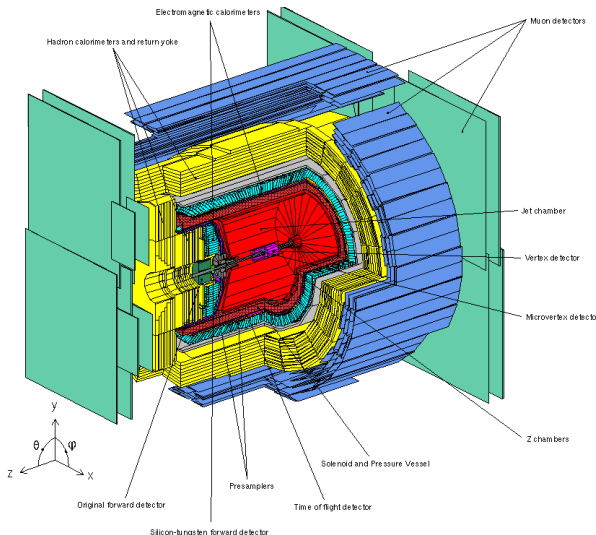


OPAL



Detektor **OPAL**,
akcelerator **LEP**,
zderzenia wiązek
przeciwbieżnych
 e^+e^-

1989-2000



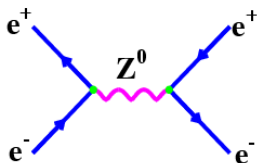
- 1 Przypomnienie
 - Kolajdery
 - Podstawowe typy detektorów
- 2 Budowa detektora uniwersalnego
- 3 Co rejestrują detektory?
- 4 Współczesne eksperymenty
 - Jak wygląda współczesny detektor
 - Przykładowe przypadki
 - Przechowywanie i analiza danych
 - Symulacje Monte Carlo
 - Układ wyzwalania

W akceleratorze **LEP** zderzano elektrony i pozytony przy energii dostępnej $\sqrt{s} = 90 - 210 \text{ GeV}$.

Co jest wynikiem zderzenia? Co pokazuje nam detektor?

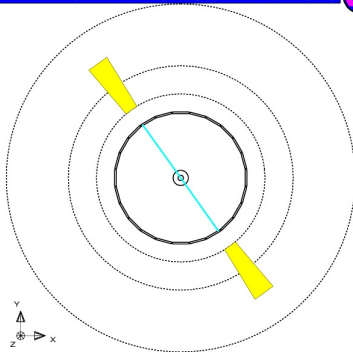
Najprostszy przypadek

$$e^+e^- \rightarrow e^+e^-$$



dwa elektrony

```
Run event: 9018_337 ... Circle(N: 2 Sample: 01.0) Scale(N: 2 Size: 90.7)
Ebeam: 40.62 Vtx (-01., -01., -13) Beam(N: 2 Size: 9) Muon(N: 0)
```

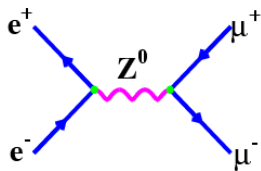


W akceleratorze **LEP** zderzano elektrony i pozytony przy energii dostępnej $\sqrt{s} = 90 - 210 \text{ GeV}$.

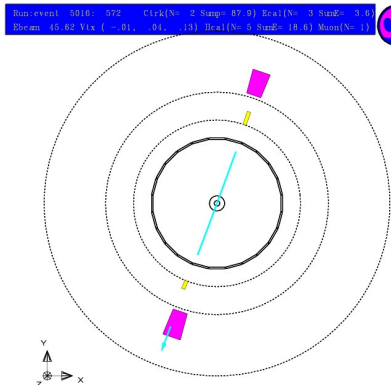
Co jest wynikiem zderzenia? Co pokazuje nam detektor?

Najprostszy przypadek

$$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$$



dwa miony



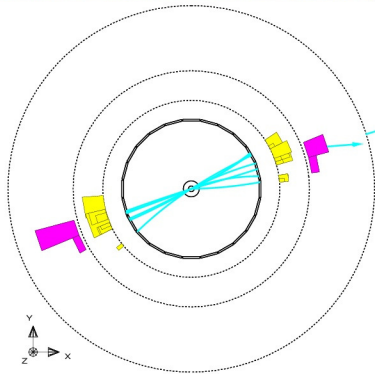
W akceleratorze **LEP** zderzano elektrony i pozytony przy energii dostępnej $\sqrt{s} = 90 - 210 \text{ GeV}$.

W około 10% przypadków widzimy powstające elektrony lub miony

Ale jak interpretować taki przypadek?

Produkowanych jest wiele cząstek, ale układają się w wyraźne “strugi”
(ang.: **jety**)

```
Run event: 5014: 432      Ctrk(N= 22 Samp= 42.6) Ecal(N= 26 StnE= 40.3)
Ebeam: 45.02 Vtx ( -49, -05, 0.17) Ecal(N=20 StnE= 27.8) Muon(N= 2)
```



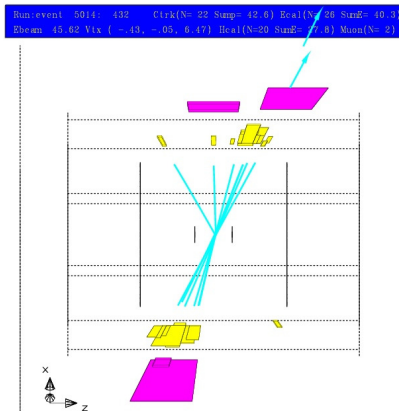
W akceleratorze **LEP** zderzano elektrony i pozytony przy energii dostępnej $\sqrt{s} = 90 - 210 \text{ GeV}$.

W około 10% przypadków widzimy powstające elektrony lub miony

Ale jak interpretować taki przypadek?

Produkowanych jest wiele cząstek, ale układają się w wyraźne “strugi”
(ang.: jety)

Ten sam przypadek, widok “z boku”



W prawie 90% przypadków widzimy powstające **jety hadronowe**.

Są one wynikiem “hadronizacji” produkowanych kwarków (lub gluonów)

Gdy kwarki oddalają się od siebie, rośnie oddziaływanie kolorowe

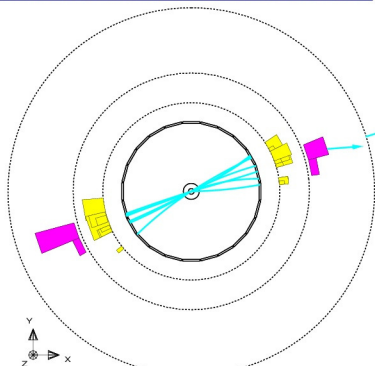
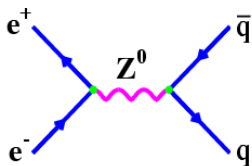
⇒ emisja gluonów, które konwertują na pary kwark-antykwar

⇒ kwarki i antykwarki formują “białe” hadrony

Naogół powstają 2 jety

```
Run: event 5014: 432 CTrk(N= 22 SumP= 42.6) Real(N= 26 SumE= 40.3)  
Ebeam 45.62 Vix (-.43, -.05, 0.47) Real(N=20 SumE= 27.8) Moon(N= 2)
```

$$e^+ e^- \rightarrow q \bar{q}$$



W prawie 90% przypadków widzimy powstające **jety hadronowe**.

Są one wynikiem “hadronizacji” produkowanych kwarków (lub gluonów)

Gdy kwarki oddalają się od siebie, rośnie oddziaływanie kolorowe

⇒ emisja gluonów, które konwertują na pary kwark-antykwar

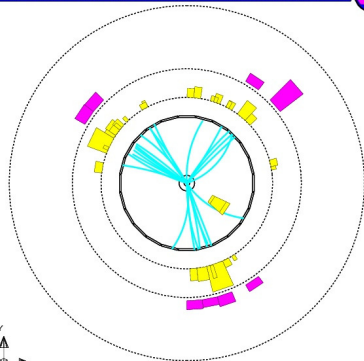
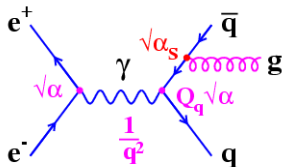
⇒ kwarki i antykwarki formują “białe” hadrony

Naogół powstają 2 jety

Ale możliwe też:

```
Run: event 5014: 554 Ctrk(N= 36 Simp= 55.0) Real(N= 49 Simf= 47.5)
Ebeam 45.62 Vix (-.02, .05, -.02) Real(N=24 Simf= 21.5) Muon(N= 0)
```

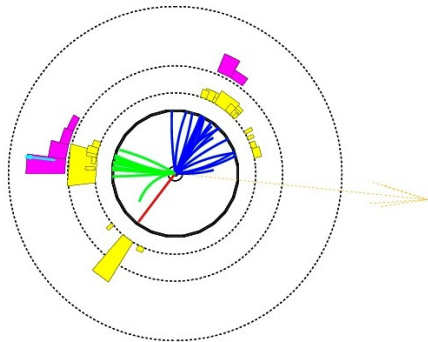
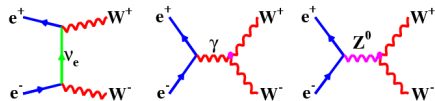
$$e^+ e^- \longrightarrow q \bar{q} g$$



W akceleratorze LEP zderzano elektrony i pozytony przy energii dostępnej $\sqrt{s} = 90 - 210 \text{ GeV}$.

Dla $\sqrt{s} > 2M_W$ możliwa produkcja par bozonów W^\pm

Trzy możliwe diagramy:



W przedstawionym przypadku

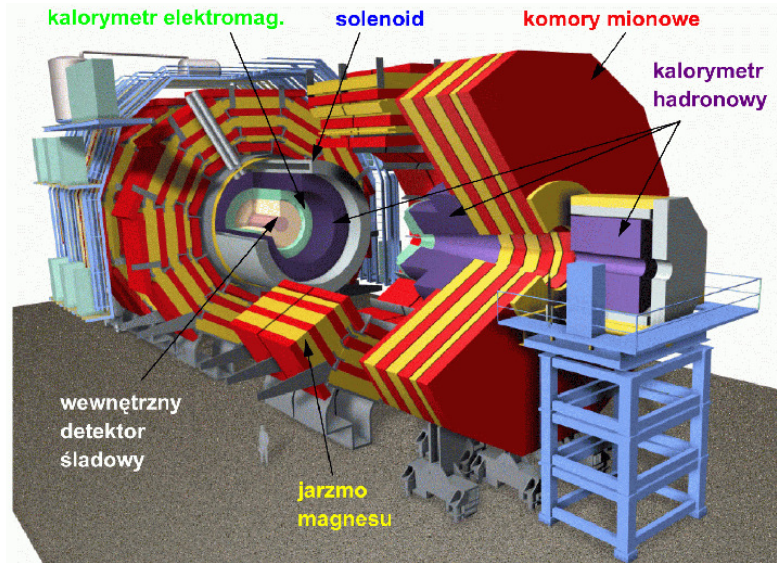
$$W^+ \rightarrow q\bar{q} \quad 2\text{jety}$$

$$W^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$$

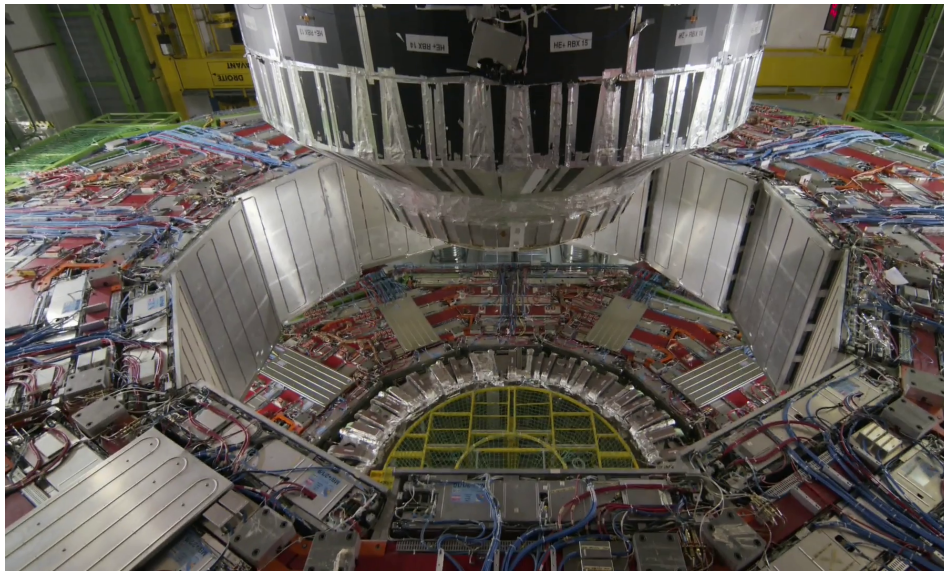
neutrino rekonstruujemy z zasady zachowania energii i pędu

- 1 Przypomnienie
 - Kolajdery
 - Podstawowe typy detektorów
- 2 Budowa detektora uniwersalnego
- 3 Co rejestrują detektory?
- 4 **Współczesne eksperymenty**
 - Jak wygląda współczesny detektor
 - Przykładowe przypadki
 - Przechowywanie i analiza danych
 - Symulacje Monte Carlo
 - Układ wyzwalania

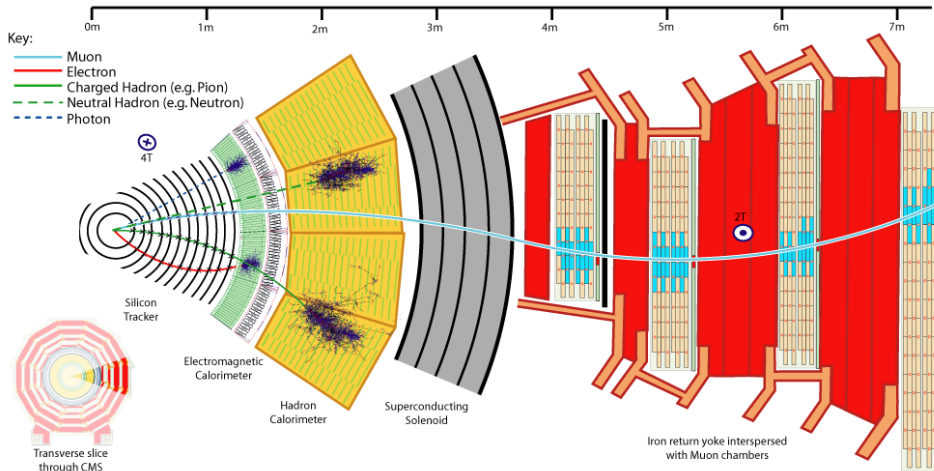
Compact Muon Solenoid - CMS



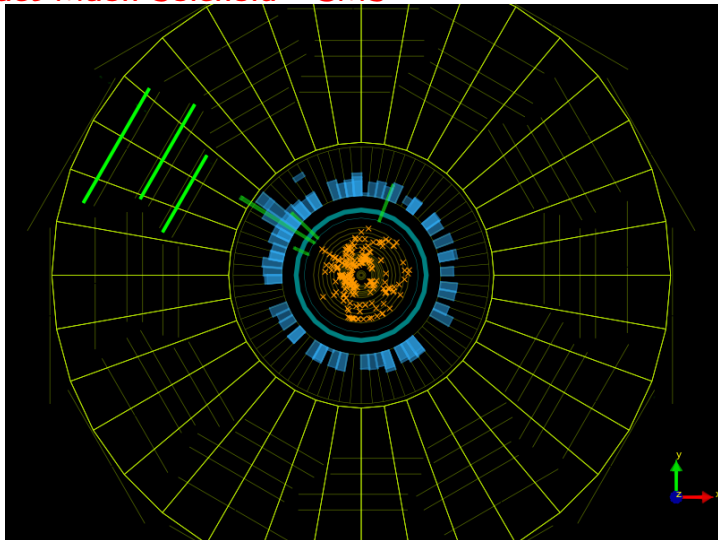
Compact Muon Solenoid - przegląd i modernizacja detektora 2020



Compact Muon Solenoid - CMS

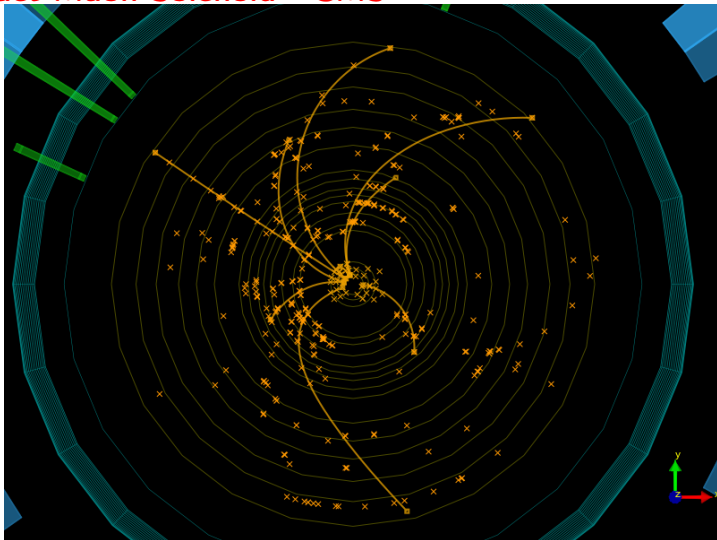


Compact Muon Solenoid - CMS



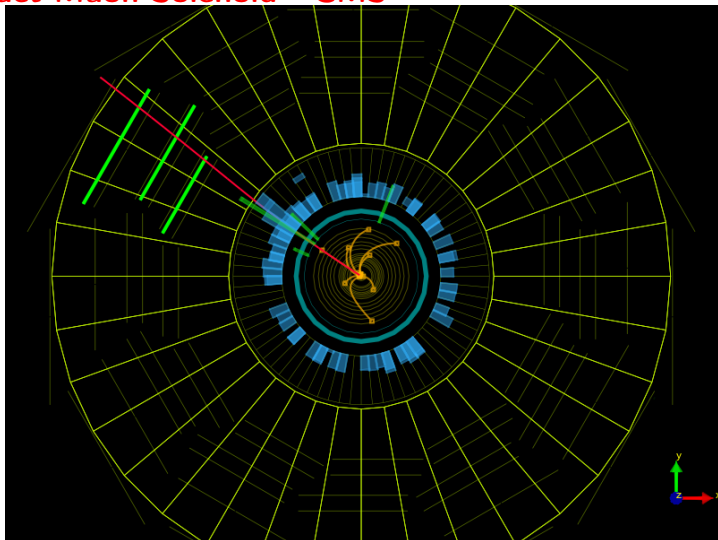
Przypadek z produkcją pojedynczego mionu: sygnały z detektora

Compact Muon Solenoid - CMS



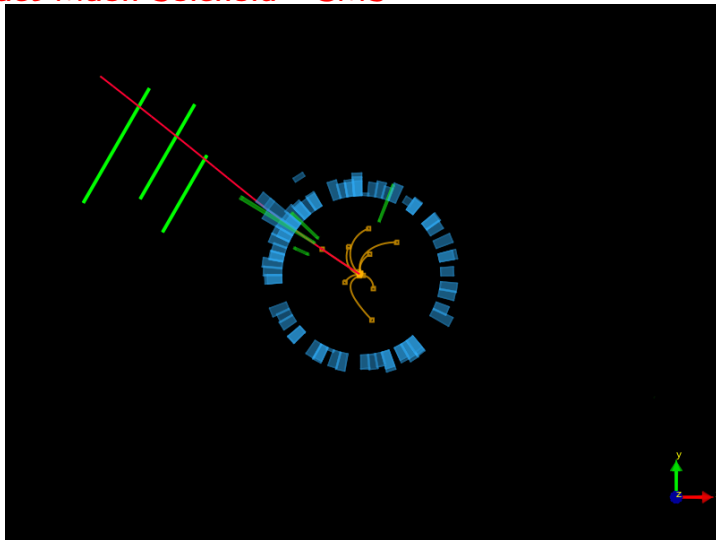
Przypadek z produkcją pojedynczego mionu: rekonstrukcja torów

Compact Muon Solenoid - CMS



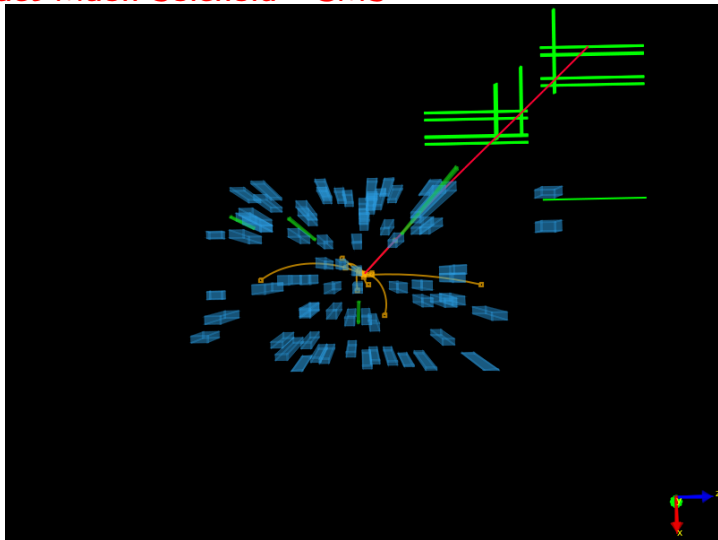
Przypadek z produkcją pojedynczego mionu: **rekonstrukcja mionu**

Compact Muon Solenoid - CMS



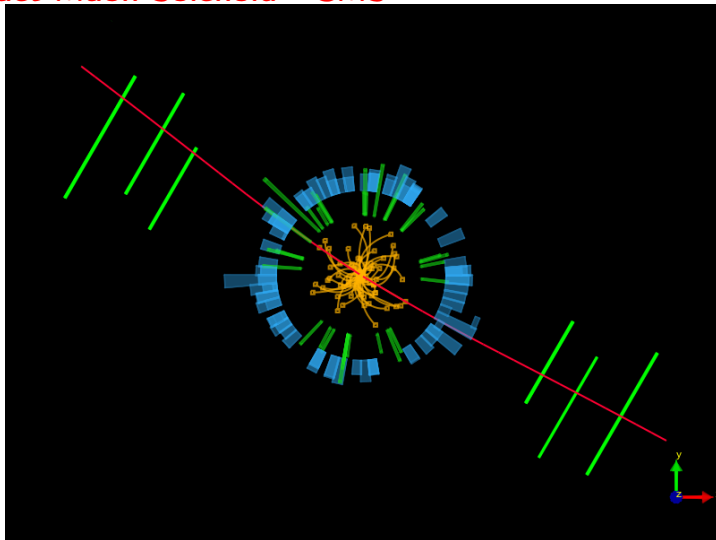
Przypadek z produkcją pojedynczego mionu: **rekonstrukcja mionu**

Compact Muon Solenoid - CMS



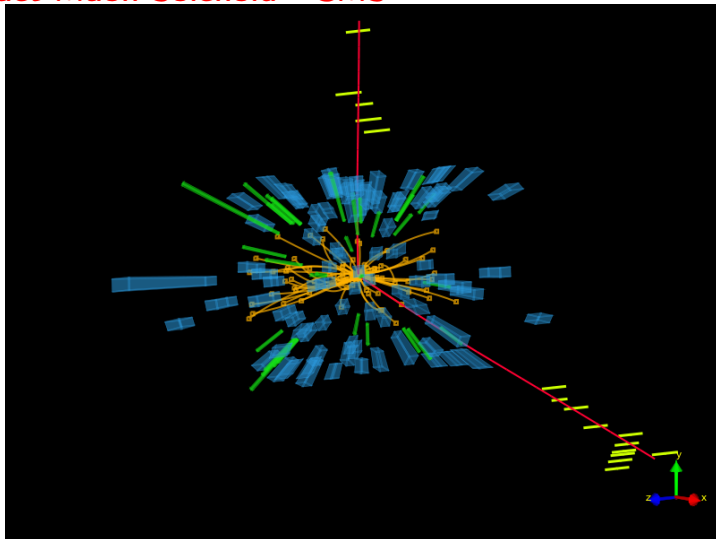
Przypadek z produkcją pojedynczego mionu: **rekonstrukcja mionu**

Compact Muon Solenoid - CMS



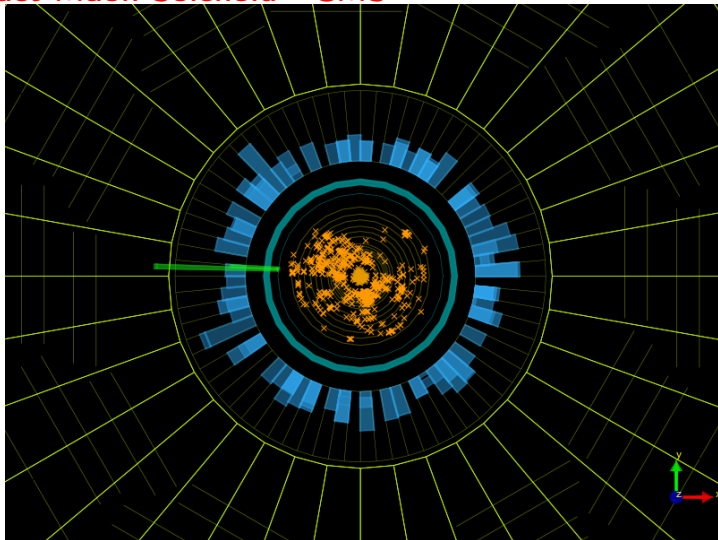
Przypadek z produkcją dwóch mionów.

Compact Muon Solenoid - CMS



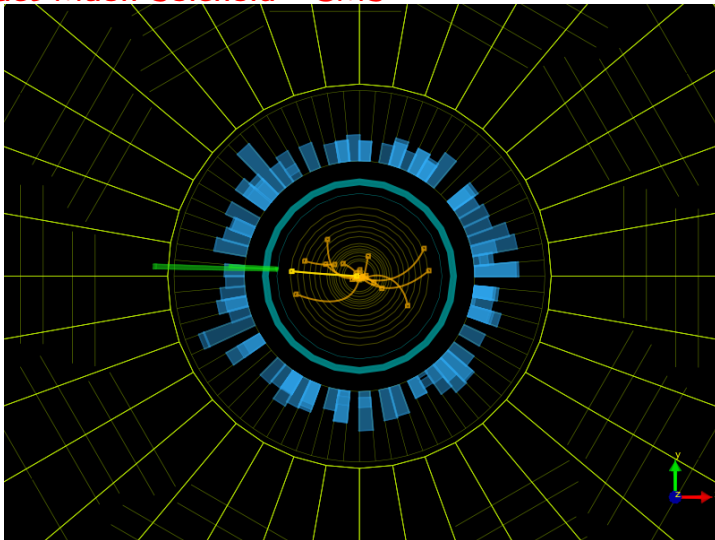
Przypadek z produkcją dwóch mionów.

Compact Muon Solenoid - CMS



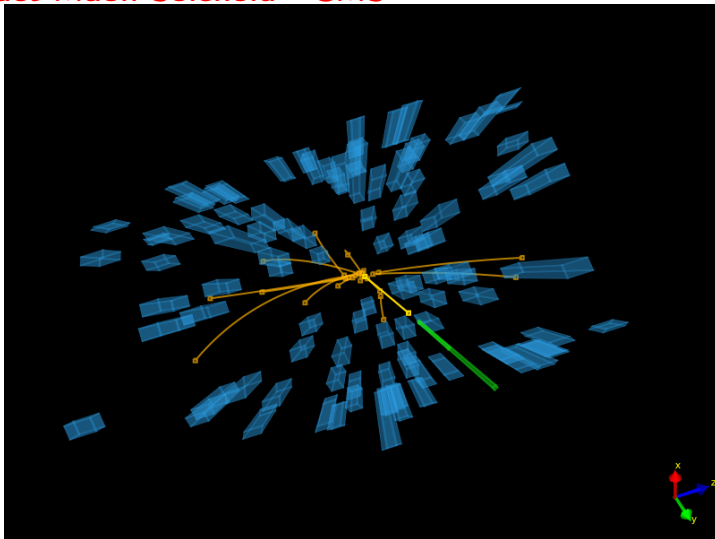
Przypadek z produkcją pojedynczego elektronu.

Compact Muon Solenoid - CMS



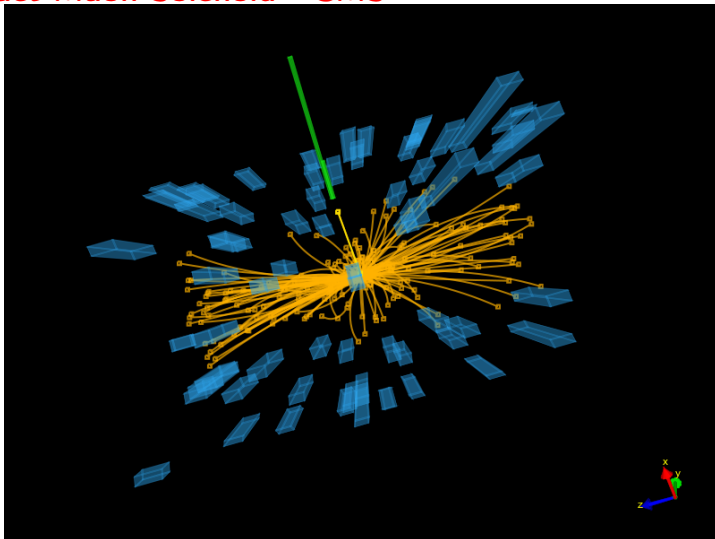
Przypadek z produkcją pojedynczego elektronu.

Compact Muon Solenoid - CMS



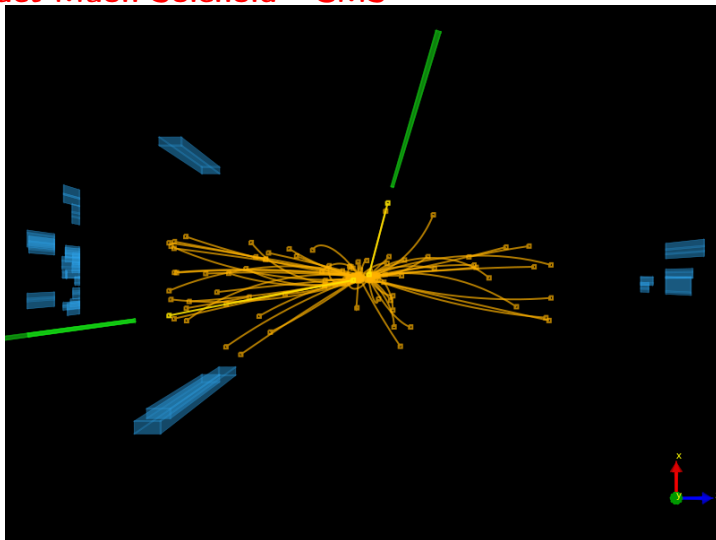
Przypadek z produkcją pojedynczego elektronu.

Compact Muon Solenoid - CMS



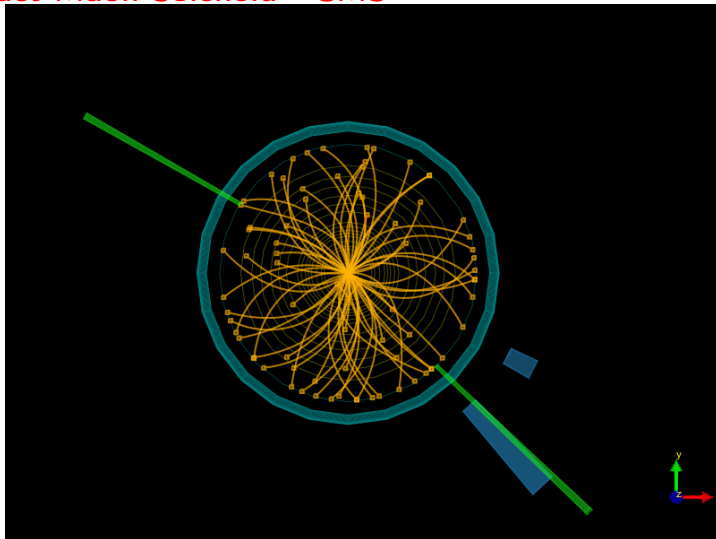
Przypadek z produkcją pojedynczego elektronu.

Compact Muon Solenoid - CMS



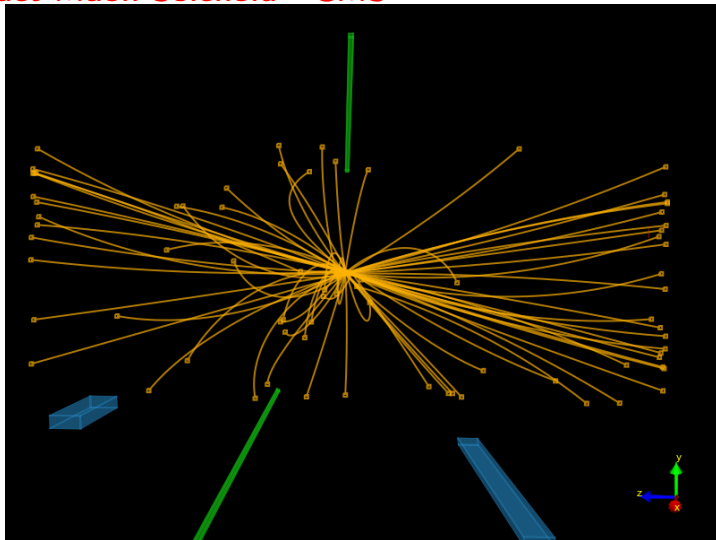
Przypadek z produkcją dwóch elektronów.

Compact Muon Solenoid - CMS



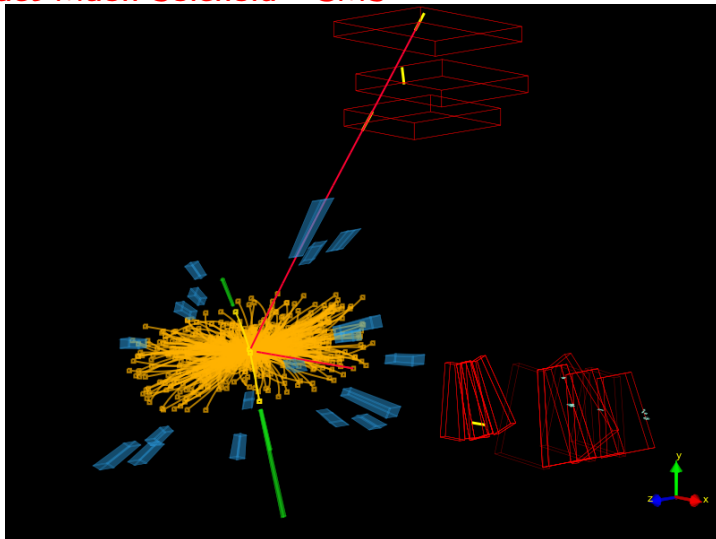
Przypadek z produkcją dwóch fotonów ($H \rightarrow \gamma\gamma$)

Compact Muon Solenoid - CMS



Przypadek z produkcją dwóch fotonów ($H \rightarrow \gamma\gamma$)

Compact Muon Solenoid - CMS



Przypadek $H \rightarrow ZZ \rightarrow e^+e^-\mu^+\mu^-$

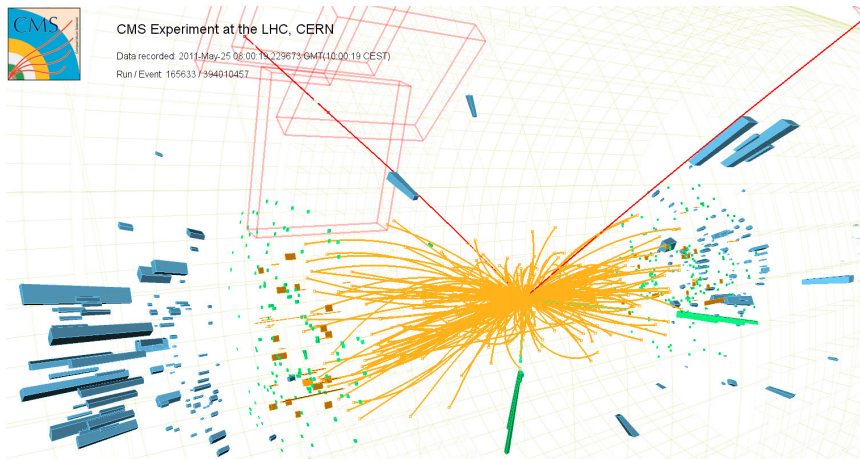
Compact Muon Solenoid - CMS



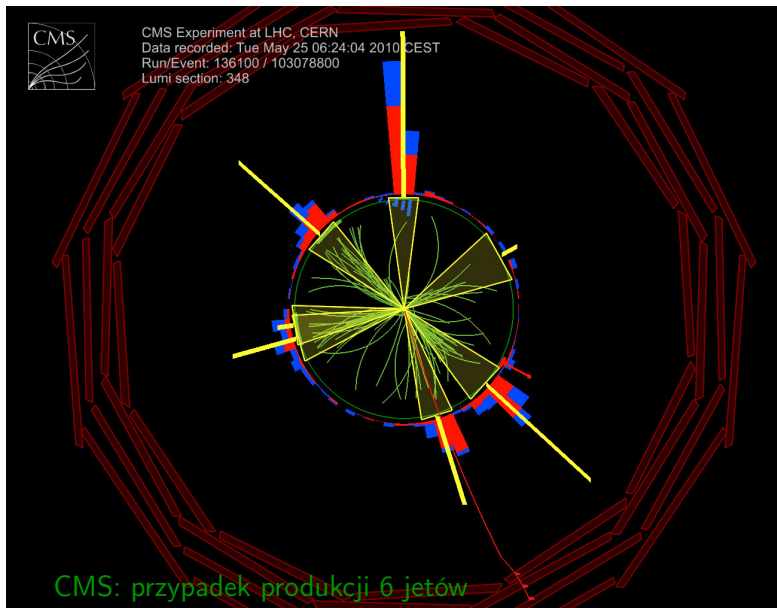
CMS Experiment at the LHC, CERN

Data recorded: 2011-May-25 06:00:19.229673 GMT(10:00:19 CEST)

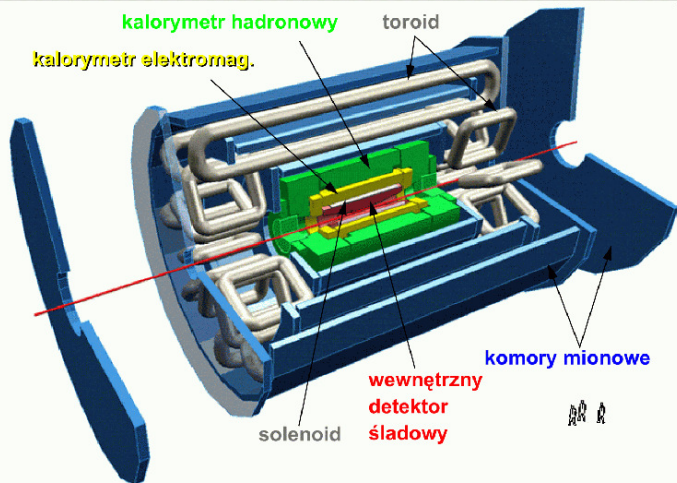
Run / Event: 165633 / 394010457



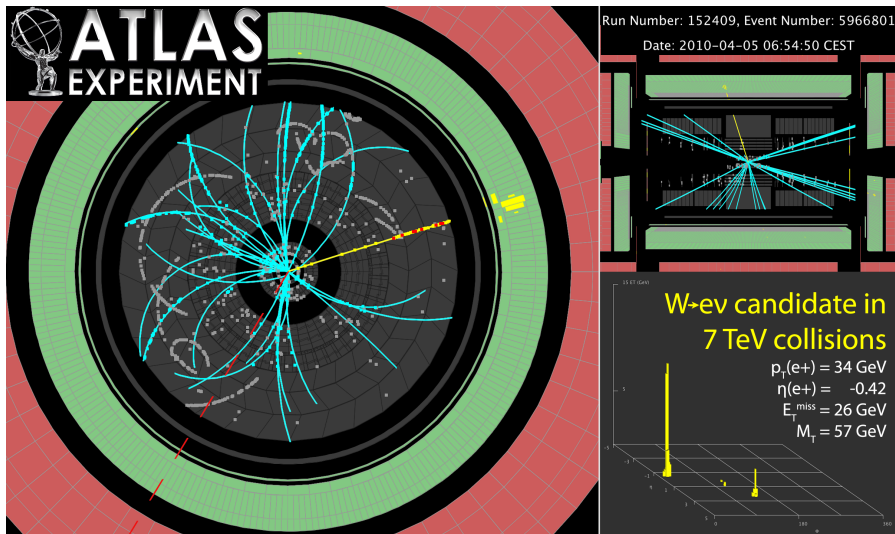
Przypadek $H \rightarrow ZZ \rightarrow e^+e^-\mu^+\mu^-$



A Toroidal LHC ApparatuS (ATLAS)



ATLAS: przypadek produkcji bozonu W przy energii 7 TeV



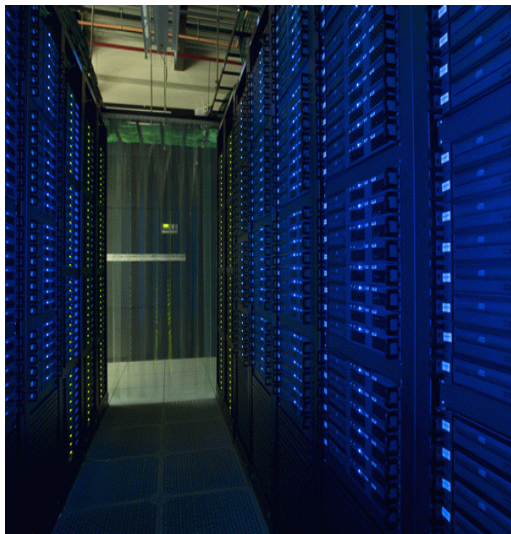
Zbieranie i rekonstrukcja danych

Ilość zbieranych danych dawno przekroczyła możliwości pojedynczego komputera.

1 przypadek to MB danych

zbieramy miliardy przypadków

Do niedawna można to było trzymać i przetwarzać w jednym miejscu...



Zbieranie i rekonstrukcja danych

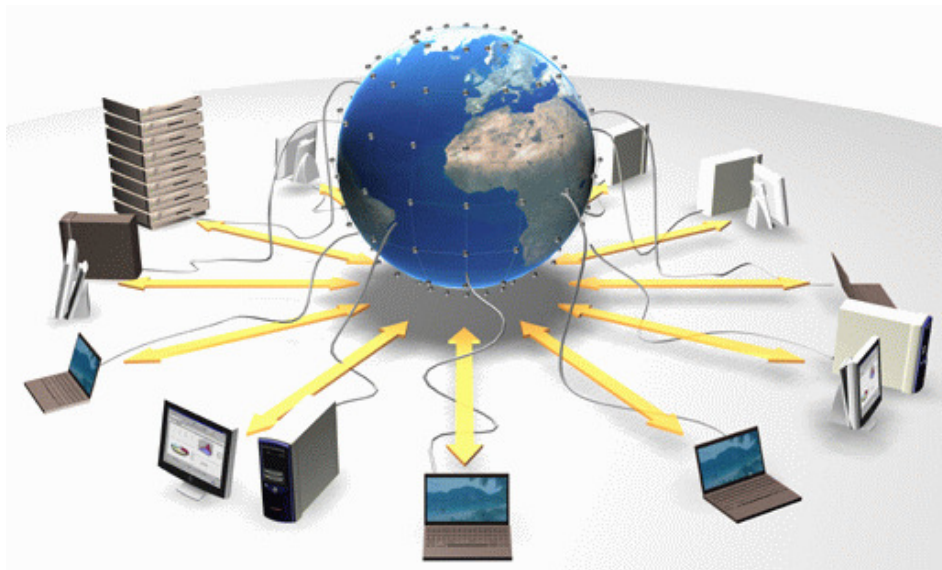
Ilość zbieranych danych dawno przekroczyła możliwości pojedynczego komputera.

1 przypadek to MB danych

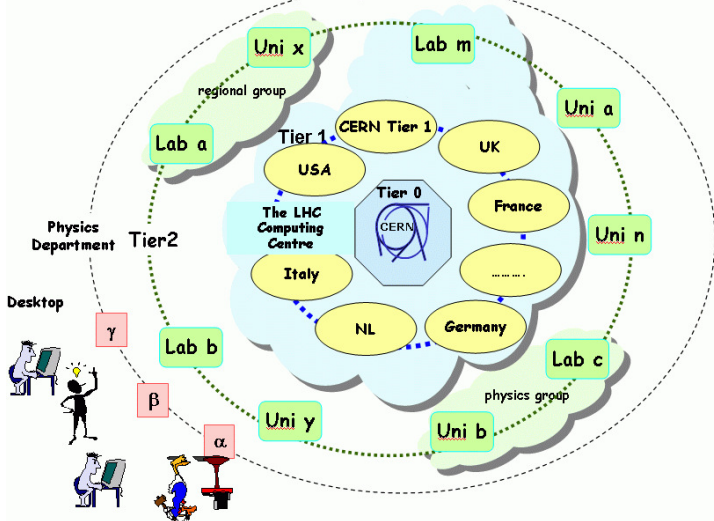
zbieramy miliardy przypadków

Do niedawna można to było trzymać i przetwarzać w jednym miejscu...





LHC Computing Model



Komputery w 170 ośrodkach na całym świecie połączone w ogromną sieć.

Głównym węzłem tej sieci jest **CERN** (poziom 0).

Poziom 1 stanowią największe narodowe ośrodki obliczeniowe na świecie, połączone bezpośrednio z CERN.

Poziom 2 tworzą regionalne centra obliczeniowe i duże uniwersytety, które łączą się z węzłami poziomu 1.

Do **poziomu 3** należą poszczególne jednostki naukowe, wydziały itp.

Dla “zwykłego” **użytkownika** wszystkie zasoby sieci (CPU i dyski) widoczne są jako **jedna całość !!!**

Łączne zasoby dostępne do analizy danych LHC to około miliona procesorów, 400 PB dysków, dodatkowe 400 PB do archiwizacji

Bardzo szybkie łącza: możliwość “uwspólnienia” przetwarzanych danych

Zapotrzebowanie na moc obliczeniową i przestrzeń dyskową wynika nie tylko z ilości zbieranych danych.

Ich analiza we współczesnych eksperymentach jest niemożliwa bez wykorzystania metod symulacji komputerowej, tzw. Monte Carlo.

Przy pomocy programów Monte Carlo generujemy próbki symulowanych przypadków, zarówno tych poszukiwanych czyli “sygnału” (np. Higgosa) jak i procesów tła.

Ich analiza pomaga nam zrozumieć działanie detektora, dobrać właściwe cięcia na poziomie układu wyzwalania (!), ocenić efektywność rejestracji przypadków i dokładność ich rekonstrukcji.

Symulacja obejmuje wszystkie elementy: badane procesy fizyczne, oddziaływanie cząstek w detektorze, odpowiedź detektora, algorytmy systemu wyzwalania.

Dlaczego potrzebujemy symulacji?

Symulacja nie jest sposobem na uproszczenie zagadnienia, czy “zakrycie” naszej niewiedzy.

Teoretycznie, wykorzystując posiadane informacje moglibyśmy przedstawić oczekiwane wyniki pomiaru w postaci **zbioru formuł** matematycznych.

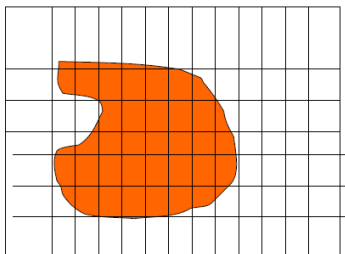
Ale ich policzenie w tradycyjny sposób byłoby praktycznie niemożliwe.

Metoda Monte Carlo jest **sposobem na policzenie** (przesumowanie lub przecałkowanie) takich formuły z **dowolną dokładnością**, praktycznie ograniczoną jedynie przez czas i szybkość działania komputera.

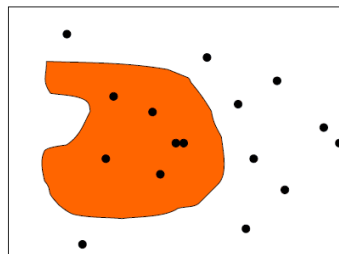
Jak policzyć pole powierzchni bardzo nieregularnej figury
(np. zadanej przez skomplikowaną formułę matematyczną).

Są dwa podejścia:

w obu musimy znać obszar w którym zawarta jest figura

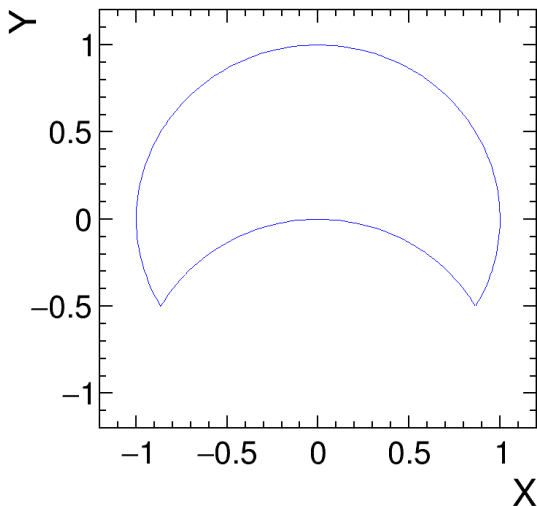


Sumować powierzchnię małych elementów należących do figury.

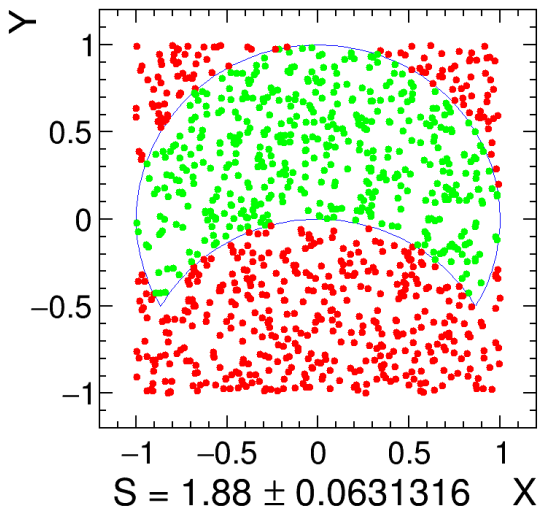


Policzyć jaki ułamek losowo wybieranych punktów znajduje się wewnątrz figury.

Wyznaczanie powierzchni metodą Monte Carlo

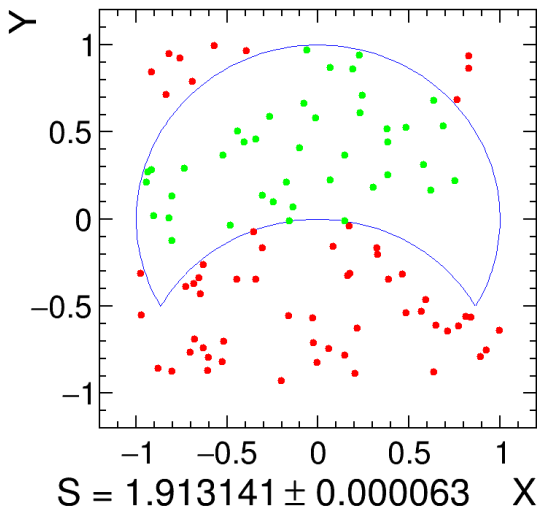


Wyznaczanie powierzchni metodą Monte Carlo



Wyznaczanie powierzchni metodą Monte Carlo

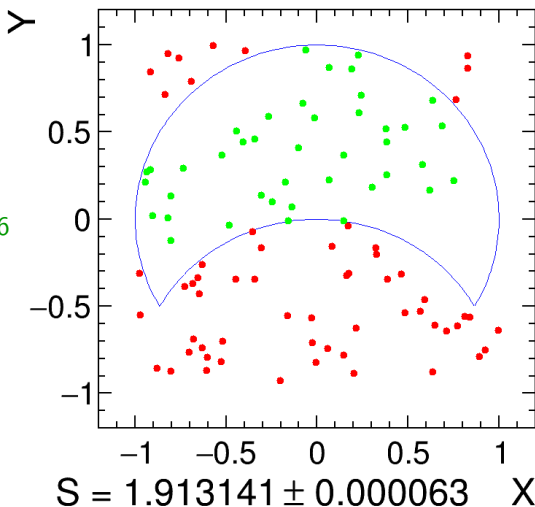
Rysowany jeden punkt na 10 milionów:



Wyznaczanie powierzchni metodą Monte Carlo

Rysowany jeden punkt na 10 milionów:

$$S = \frac{\pi}{3} + \frac{\sqrt{3}}{2}$$
$$\approx 1.91322296$$

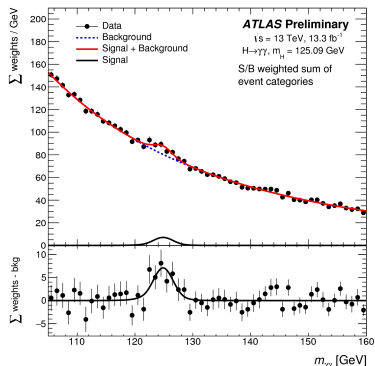
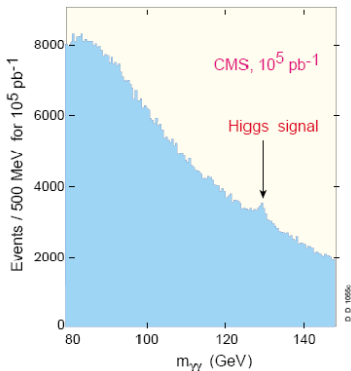


W przypadku eksperymentów przy LHC tło do poszukiwanych sygnałów “nowej fizyki” jest bardzo duże - symulacje są niezbędne.

Poszukiwanie bozonu Higgsa w kanale $H \rightarrow \gamma\gamma$

Symulacja próbki $100fb^{-1}$

Dane ATLAS ($13.3fb^{-1}$ przy 13 TeV)



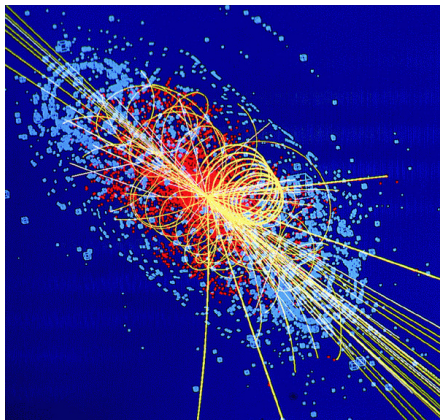
Przy każdym przecięciu paczek w LHC zderza się kilkadziesiąt par protonów.

W prawie każdym zderzeniu wyprodukowane są nowe cząstki.

Koło miliarda oddziaływań na sekundę!

Nie mamy szans zarejestrować (zapamiętać/zapisać) więcej niż ok. ~ 1000 na sekundę!

Jak wybrać te ciekawe?

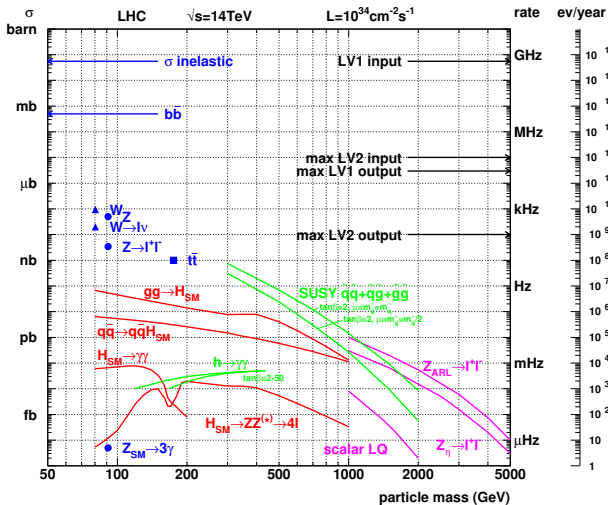


Układ wyzwala

Sygnaly z detektora są na bieżąco “podglądane” przez dedykowane układy elektroniczne.

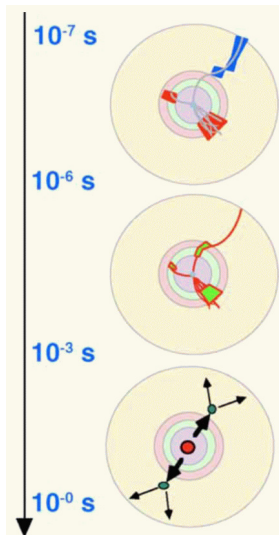
Tylko “ciekawe” sygnaly są czytane z detektora.

Te przypadki są dalej przetwarzane przez specjalne programy - “filtry”, które mają odrzucać wszystkie śmieci.



Zapisujemy tylko to, co ma szansę być ciekawe!

Układ wyzwalania



Aby wybrać **ciekawe przypadki** trzeba się im **bardzo dokładnie przyjrzeć**. Ale żaden układ nie byłby w stanie przeanalizować dokładnie **40 milionów przypadków na sekundę!**

Rozwiązanie: system wielopoziomowy!

Poziom 1: bardzo szybki (dedykowana elektronika), odrzuca 99.9% oczywistych śmieci.

Poziom 2: analizuje podstawowe parametry przypadku, wybiera 1% do dalszej analizy

Poziom 3: pełna analiza i ostateczna decyzja

Układ wyzwalań analogia z dnia codziennego

Na bardzo dużym parkingu szukamy konkretnego samochodu

Jeśli będziemy sprawdzać numery rejestracyjne potrwa to bardzo długo...

Układ wyzwania analogia z dnia codziennego

Na bardzo dużym parkingu szukamy konkretnego samochodu

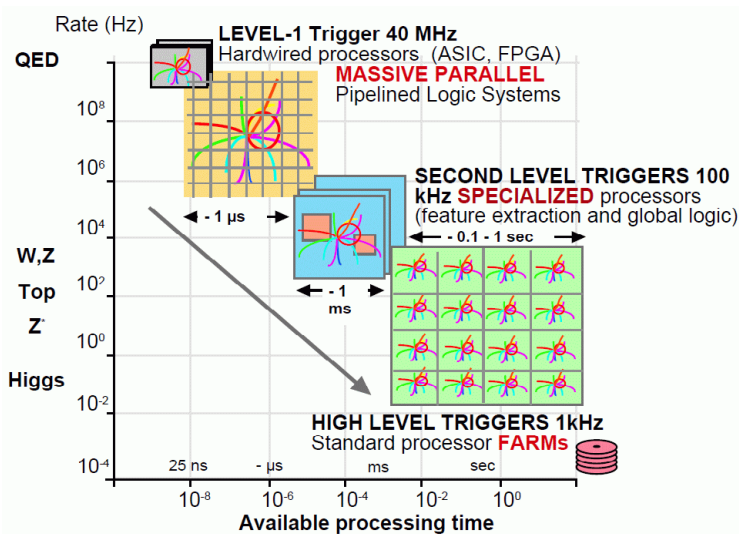
Jeśli będziemy sprawdzać numery rejestracyjne potrwa to bardzo długo...

Dużo efektywniejsze jest podejście “wielostopniowe”

- wypatrujemy samochodu w określonym kolorze
kolor można określić bardzo szybko i z daleka
- sprawdzamy markę/model samochodu
często można rozpoznać na “pierwszy rzut oka”
- dopiero gdy kolor i model się zgadzają, sprawdzamy numery...

⇒ to jest naturalne podejście do zagadnienia,
minimalizuje wysiłek i czas poszukiwania...

Układ wyzwalania schemat



Układ wyzwalania

Najtrudniejszy Poziom 1.

Decyzję trzeba podjąć w ok. $3 \mu s$ (przez tyle czasu dane są pamiętane w rejestrach elektroniki odczytu).

Dominuje czas potrzebny na przesyłanie informacji!

Prędkość światła jest skończona!

W 25 ns światło pokonuje "tylko" 7.5 m!
Sygnały elektryczne i impulsy w światłowodach odpowiednio mniej...

