

# Wszechświat Cząstek Elementarnych dla Humanistów

## Współczesne eksperymenty przy kolajderach

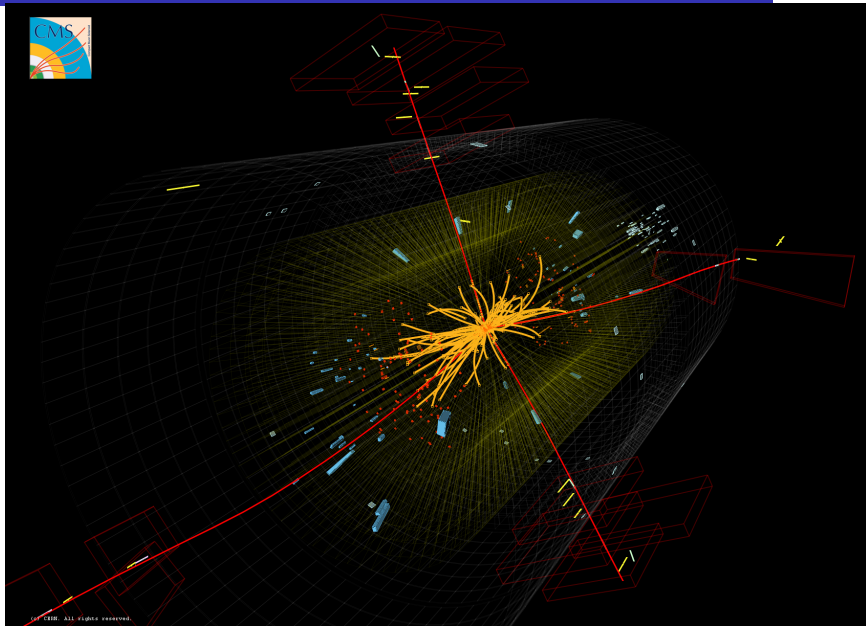
Aleksander Filip Żarnecki

Wykład ogólnouniwersytecki



8 grudnia 2020

# Jak dziś "widzimy" oddziaływania cząstek?



© 2010 CERN. All rights reserved.

- 1 Przypomnienie
  - Kolajdery
  - Podstawowe typy detektorów
- 2 Budowa detektora uniwersalnego
- 3 Co rejestrują detektory?
- 4 Współczesne eksperymenty
  - 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
  - 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)

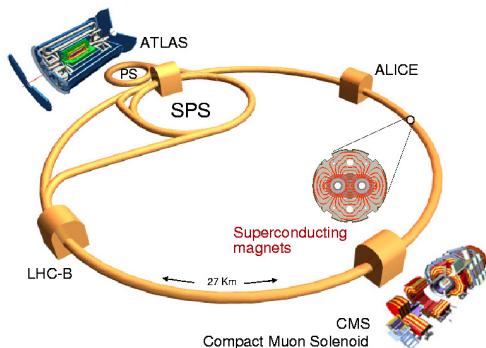
### LHC

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 !

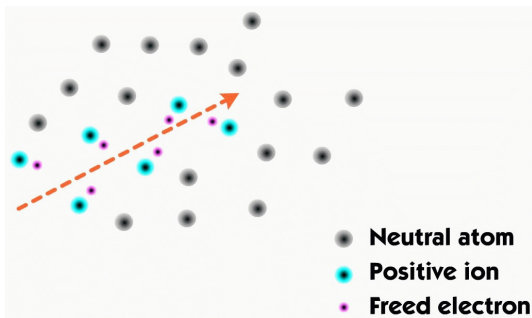
Przypadki produkcji tych cząstek  
badają dwa eksperymenty: ATLAS  
i CMS

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**:

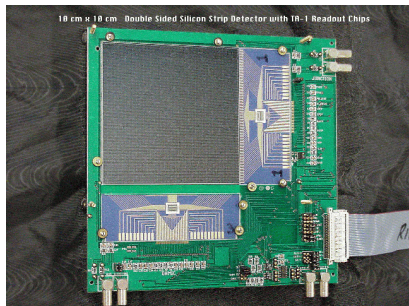


**Cząstka naładowana** przechodząc przez ośrodek **oddziałuje Kulombowsko** z elektronami i oddaje im część swojej energii **“wybijając”** je z atomów.

## Detektory półprzewodnikowe

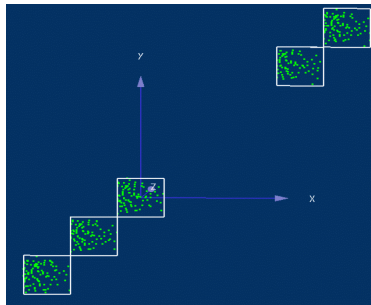
Coraz powszechniej używane.

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



Bardzo precyzyjny pomiar  
pozycji cząstek (rzędu  $\mu m$ )

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



Niestety wciąż stosunkowo drogie...

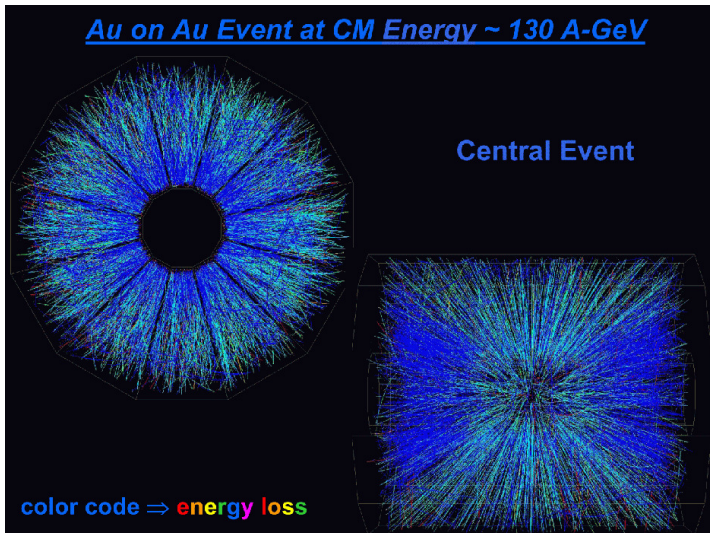
## Detektory gazowe

### TPC

Komora  
projekcji  
czasowej

Przypadek  
zderzenia  
ciężkich jonów

detektor STAR  
przy RHIC



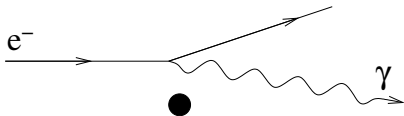
## Kalorymetry

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

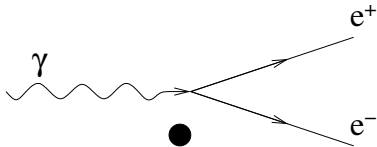
Aby zmierzyć **energię** cząstki musimy sprawić, aby w wyniku wielokrotnych oddziaływań "oddała ją" w całości detektorowi  $\Rightarrow$  **kalorymetry**.

### Kalorymetr elektromagnetyczny

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



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

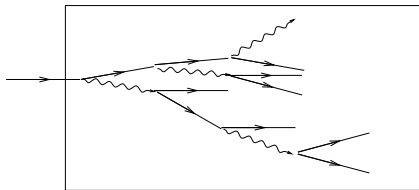


## Kalorymetry

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

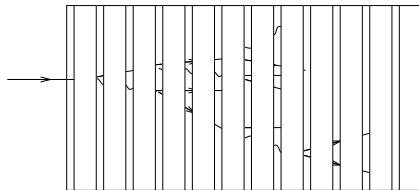
Mierząc liczbę cząstek lub całkowitą długość torów (**całkowitą jonizację**) możemy dokładnie określić energię cząstki początkowej

Kalorymetr jednorodny



np. blok scyntylatora

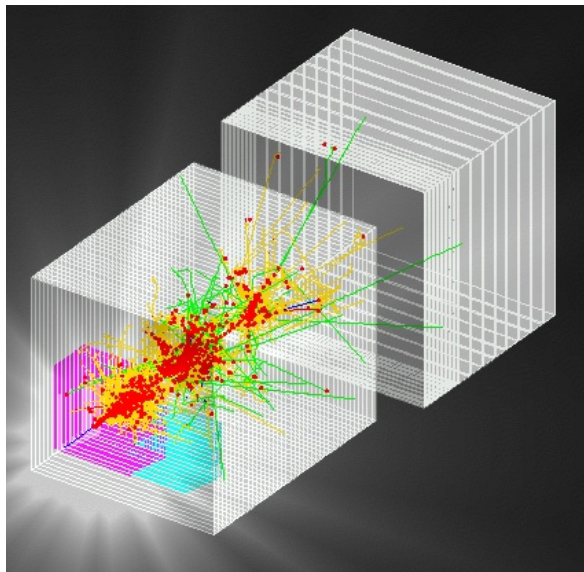
Kalorymetr próbkujący



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
  - Przykładowe przypadki
  - Przechowywanie i analiza danych
  - Symulacje Monte Carlo
  - Układ wyzwalania

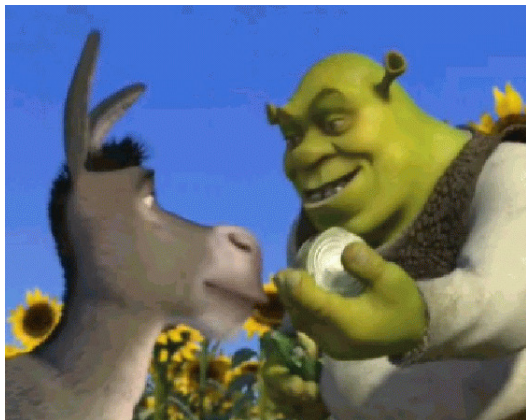
## Detektory są jak ogry...

Ogry są jak cebula...

Cebula ma warstwy...

Ogry mają warstwy...

Detektory mają warstwy...

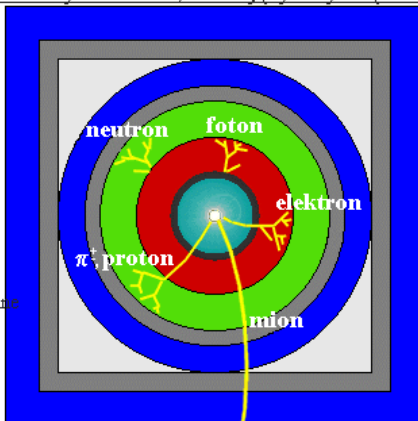


## Struktura warstwowa

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, CLIC):

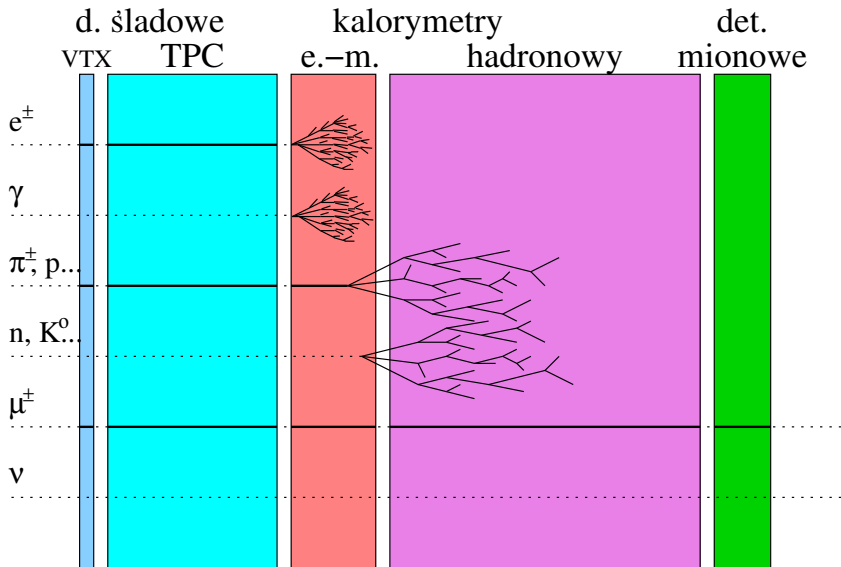
Kolejno od środka detektora:

- detektor wierzchołka (jak najbliżej osi wiązki!)  
określa gdzie zaszło zderzenie, identyfikuje rozpady cząstek krótkozyciowych (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...



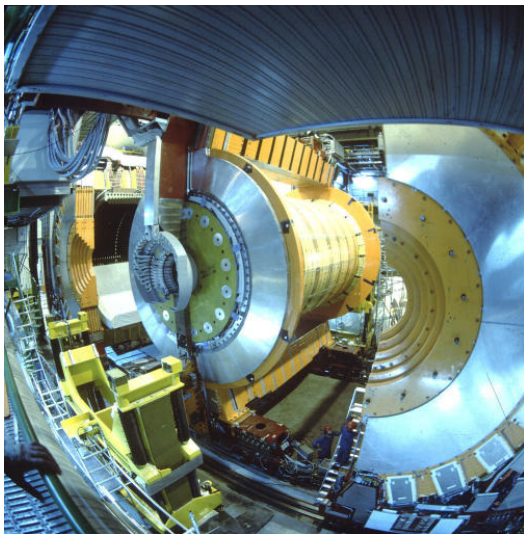


VTX - detektor wierzchołka

## OPAL

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

1989-2000

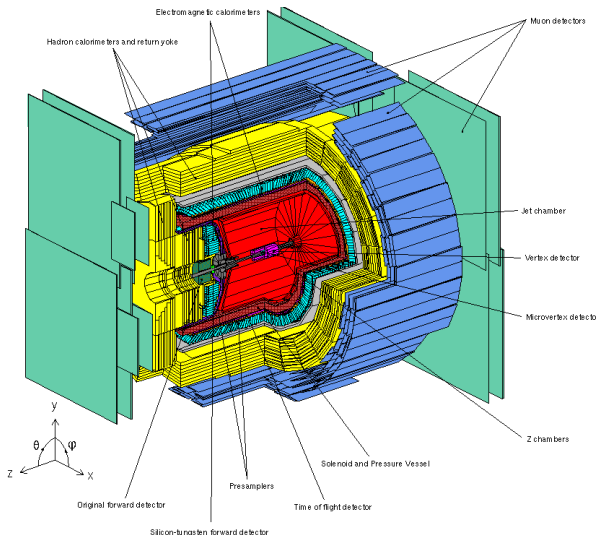


## OPAL



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

1989-2000



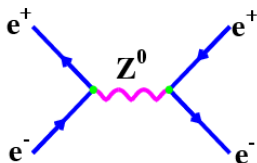
- 1 Przypomnienie
  - Kolajdery
  - Podstawowe typy detektorów
- 2 Budowa detektora uniwersalnego
- 3 Co rejestrują detektory?
- 4 Współczesne eksperymenty
  - Przykładowe przypadki
  - Przechowywanie i analiza danych
  - Symulacje Monte Carlo
  - Układ wyzwalania

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

Co jest wynikiem zderzenia? Co pokazuje nam detektor?

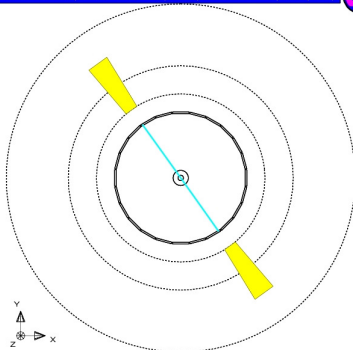
Najprostszy przypadek

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



dwa elektrony

```
Run:event: 9016_337   Circ(N: 2 Sump: 01.0) Ecal(N: 2 Sump: 90.7)
Ebeam: 10.02 Yix (-01, -01, -13) Bcal(N: 2 Sump: -9) Muon(N: 0)
```

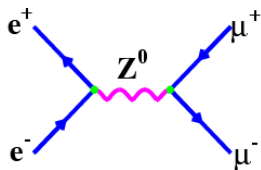


W akceleratorze **LEP** zderzano elektrony i pozytony przy energii dostępnej  $\sqrt{s} = 90 - 210 \text{ GeV}$ .

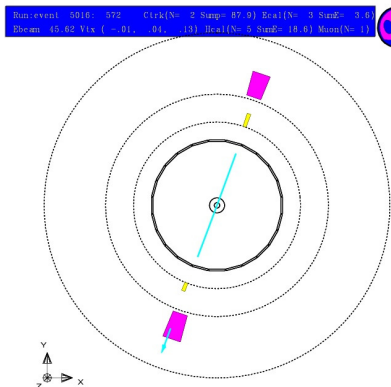
Co jest wynikiem zderzenia? Co pokazuje nam detektor?

Najprostszy przypadek

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



dwa miony



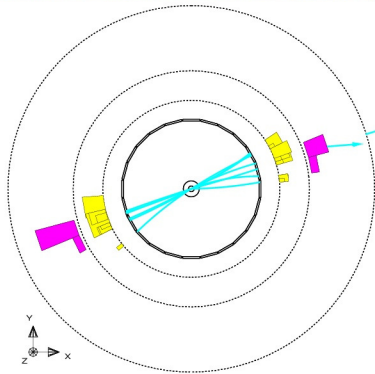
W akceleratorze **LEP** zderzano elektrony i pozytony przy energii dostępnej  $\sqrt{s} = 90 - 210 \text{ GeV}$ .

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)
```



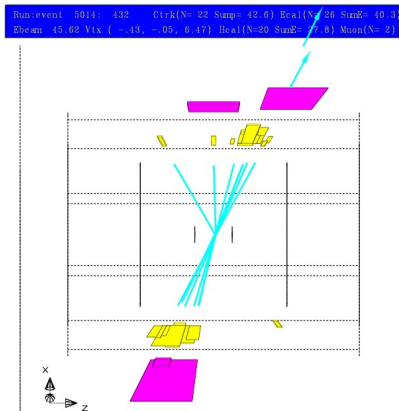
W akceleratorze **LEP** zderzano elektrony i pozytony przy energii dostępnej  $\sqrt{s} = 90 - 210 \text{ GeV}$ .

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

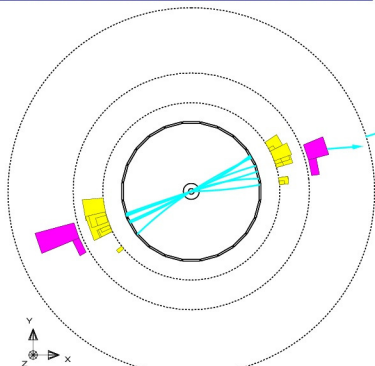
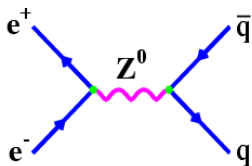
⇒ emisja gluonów, które konwertują na pary kwark-antykwar

⇒ 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 45.02 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

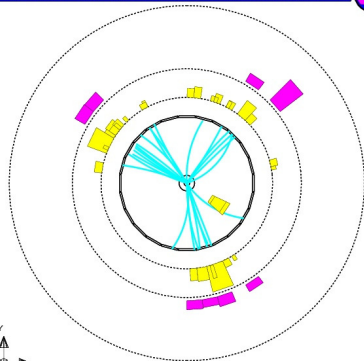
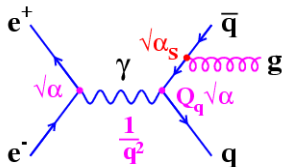
⇒ kwarki i antykwarki formują “białe” hadrony

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)
```

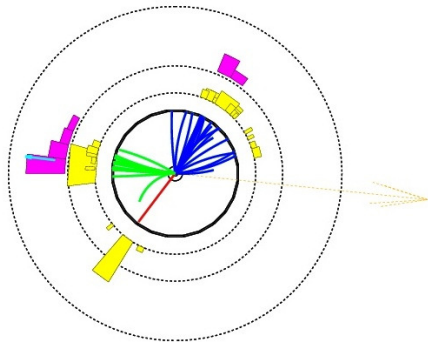
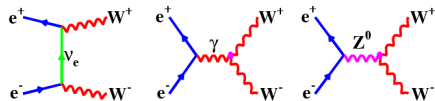
$$e^+ e^- \longrightarrow q \bar{q} g$$



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

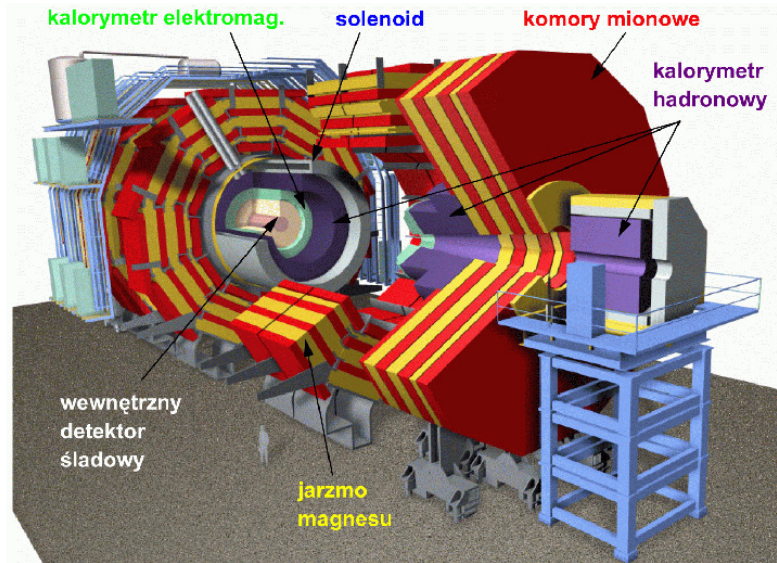
$$W^+ \rightarrow q\bar{q} \quad 2\text{jety}$$

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

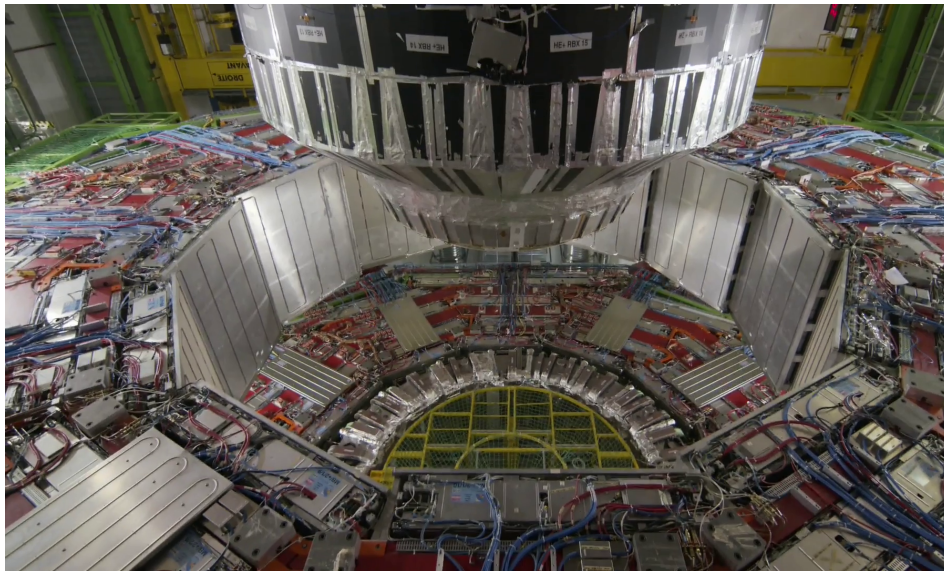
neutrino rekonstruujemy z zasady zachowania energii i pędu

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

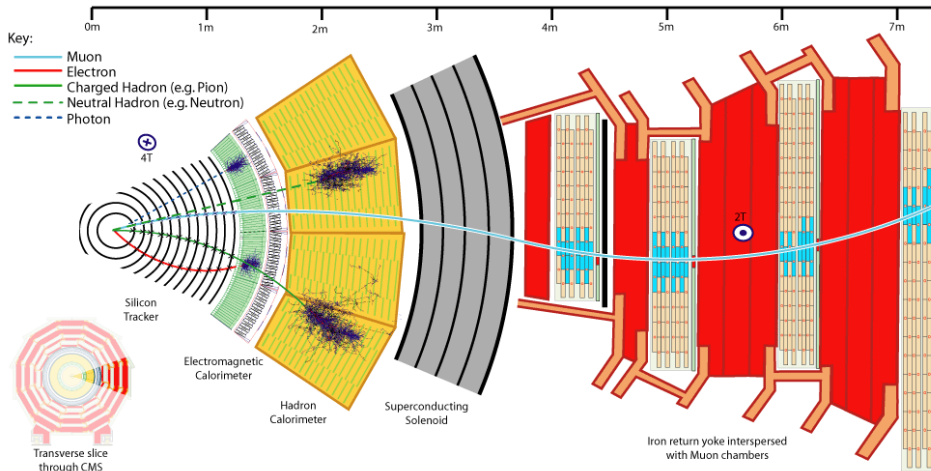
## Compact Muon Solenoid - CMS



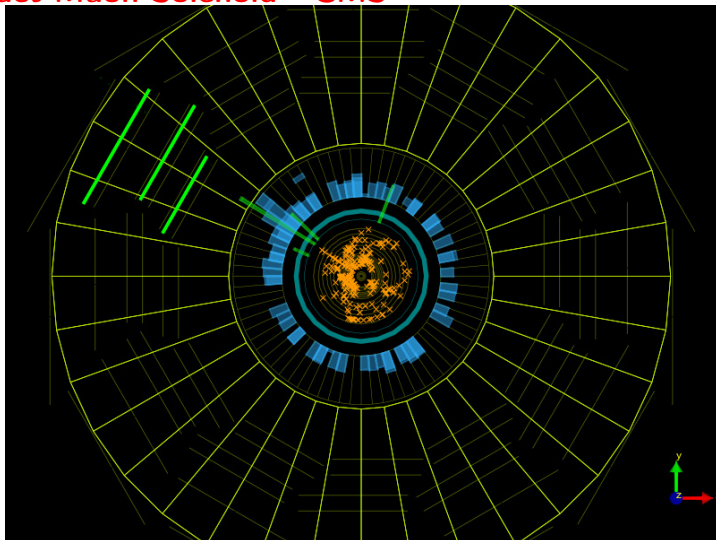
## Compact Muon Solenoid - przegląd i modernizacja detektora 2020



## Compact Muon Solenoid - CMS



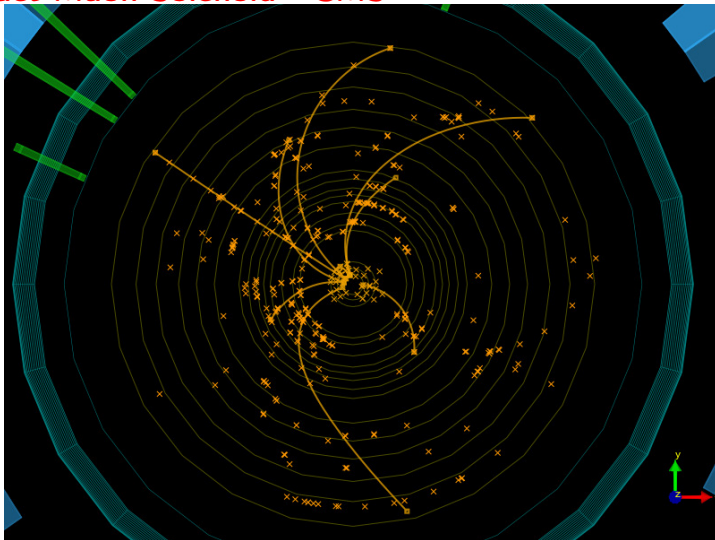
## Compact Muon Solenoid - CMS



Przypadek z produkcją pojedynczego mionu.

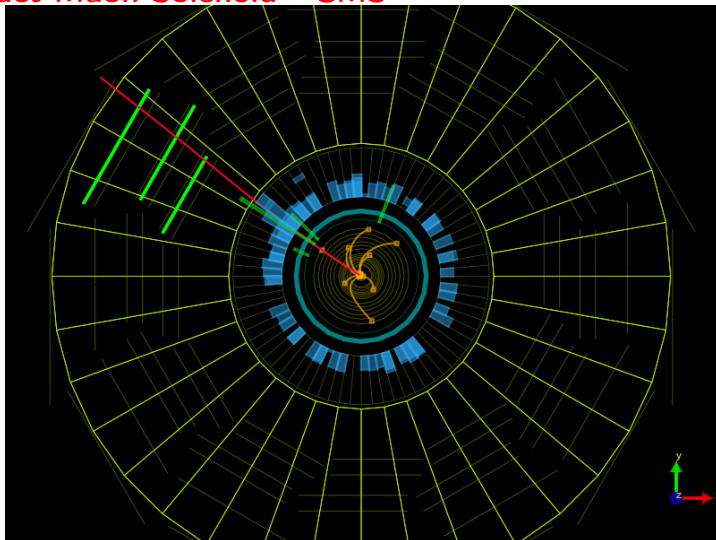


## Compact Muon Solenoid - CMS



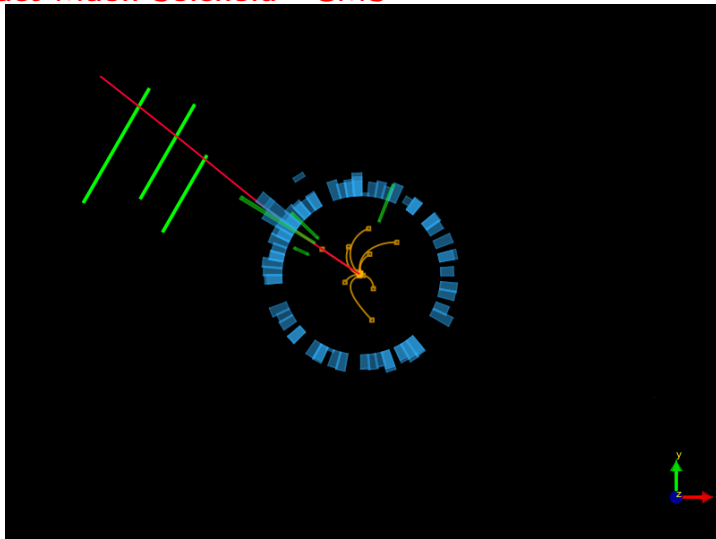
Przypadek z produkcją pojedynczego mionu.

## Compact Muon Solenoid - CMS



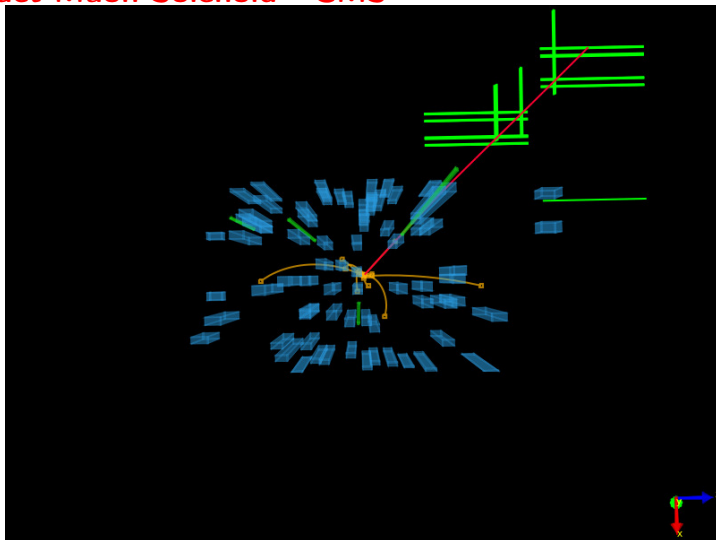
Przypadek z produkcją pojedynczego mionu.

## Compact Muon Solenoid - CMS



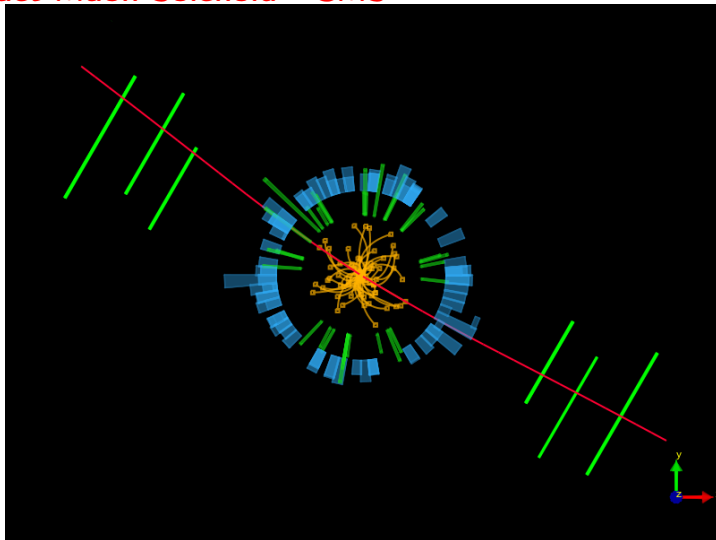
Przypadek z produkcją pojedynczego mionu.

## Compact Muon Solenoid - CMS



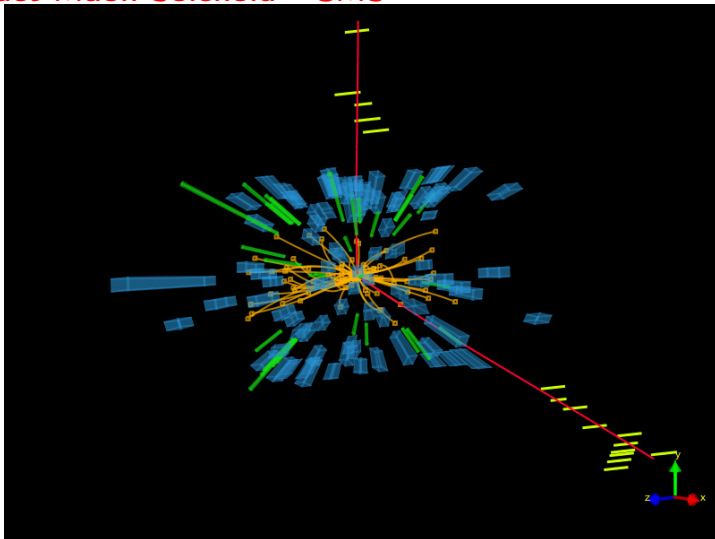
Przypadek z produkcją pojedynczego mionu.

## Compact Muon Solenoid - CMS



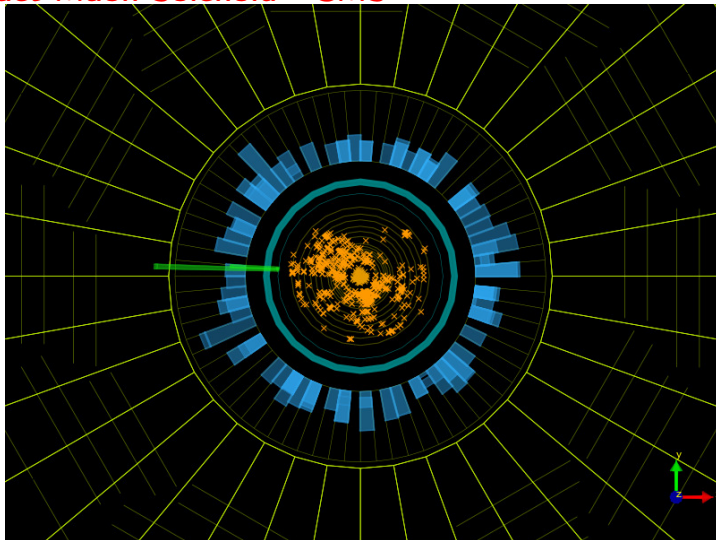
Przypadek z produkcją dwóch mionów.

## Compact Muon Solenoid - CMS



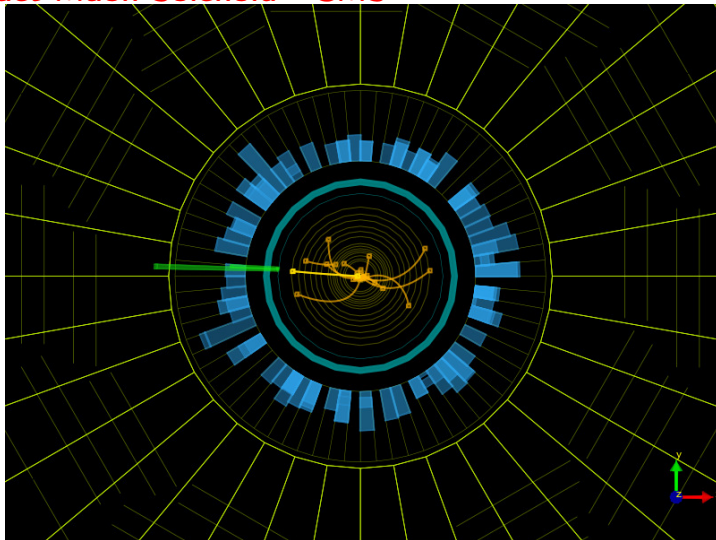
Przypadek z produkcją dwóch mionów.

## Compact Muon Solenoid - CMS



Przypadek z produkcją pojedynczego elektronu.

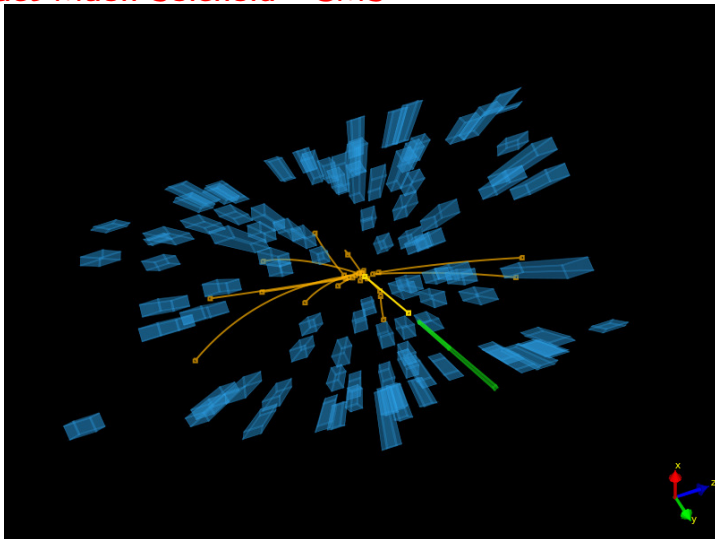
## Compact Muon Solenoid - CMS



Przypadek z produkcją pojedynczego elektronu.

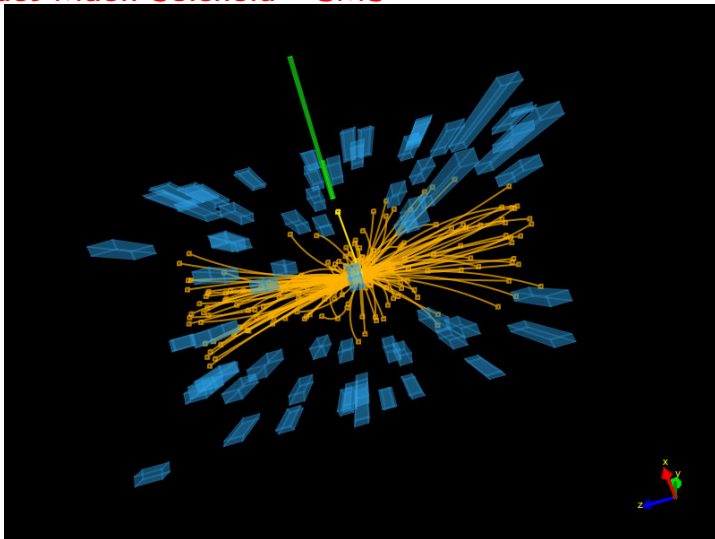


## Compact Muon Solenoid - CMS



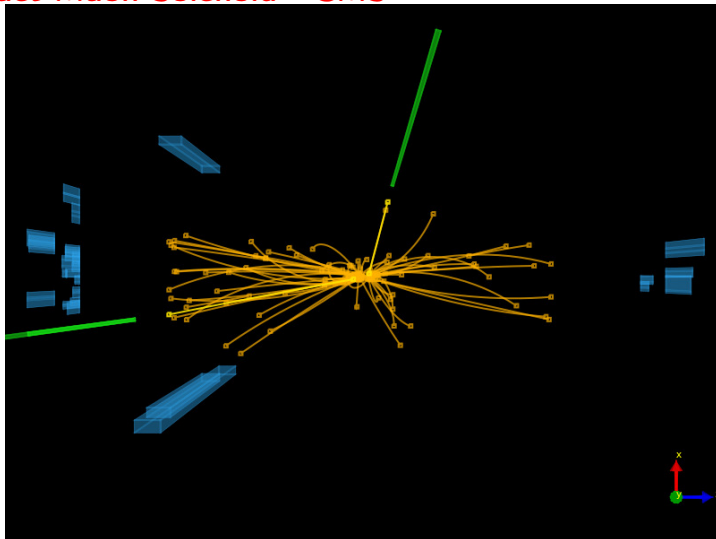
Przypadek z produkcją pojedynczego elektronu.

## Compact Muon Solenoid - CMS



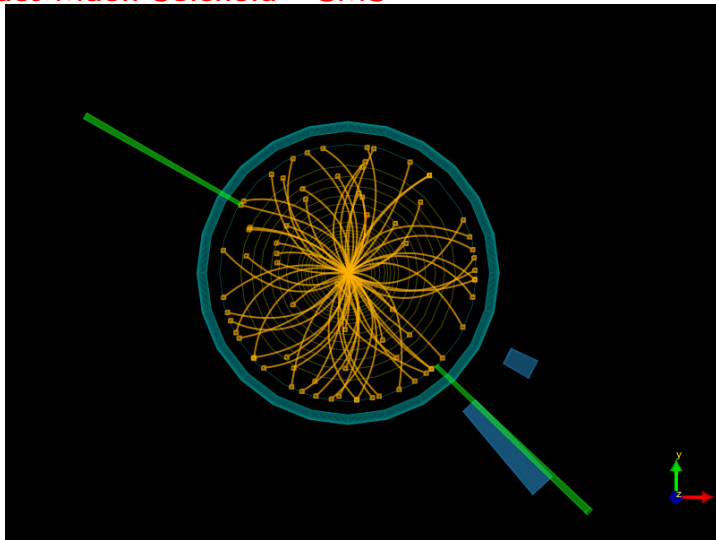
Przypadek z produkcją pojedynczego elektronu.

## Compact Muon Solenoid - CMS



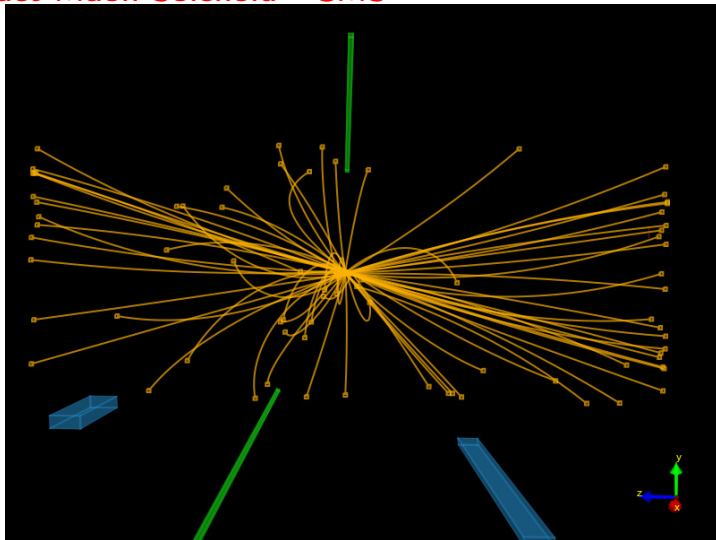
Przypadek z produkcją dwóch elektronów.

## Compact Muon Solenoid - CMS



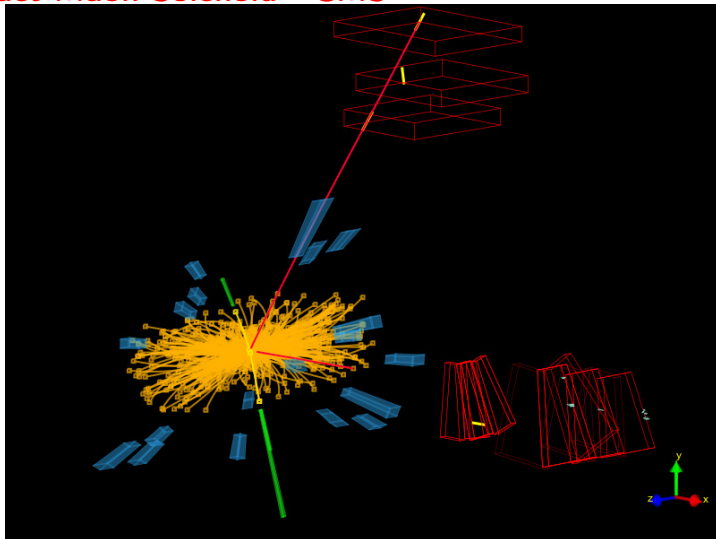
Przypadek z produkcją dwóch fotonów ( $H \rightarrow \gamma\gamma$ )

## Compact Muon Solenoid - CMS



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

## Compact Muon Solenoid - CMS



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

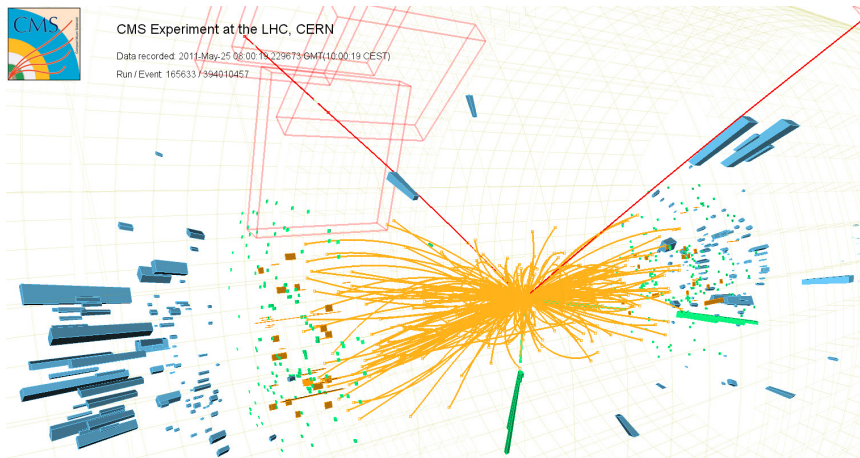
## Compact Muon Solenoid - CMS



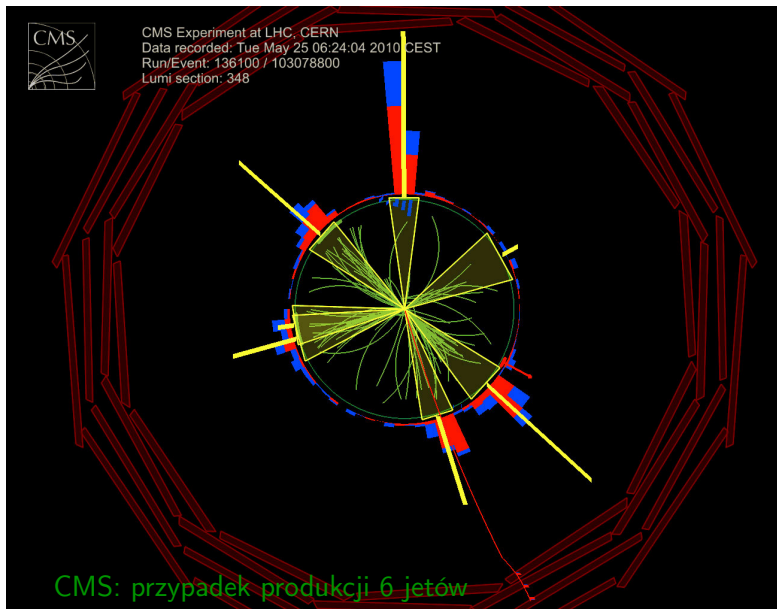
CMS Experiment at the LHC, CERN

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

Run / Event 165633 / 394010457

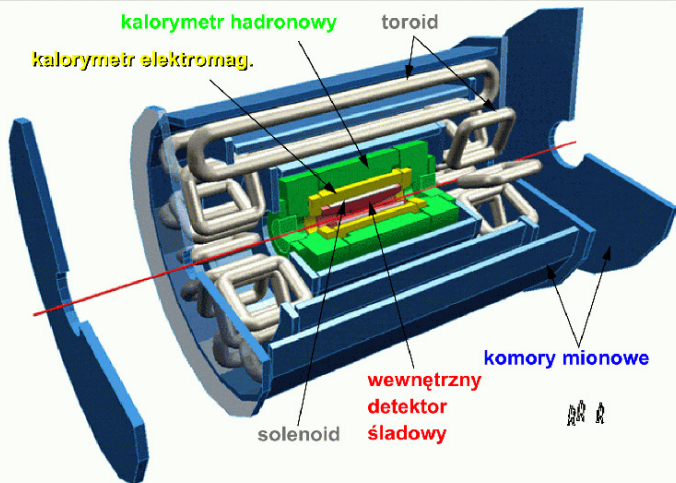


Przypadek  $H \rightarrow ZZ \rightarrow e^+e^-\mu^+\mu^-$

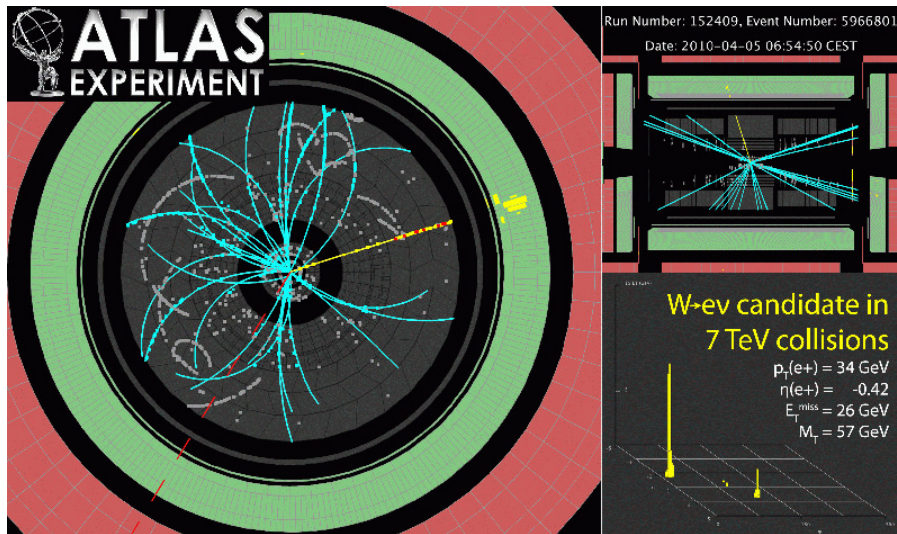




## A Toroidal LHC Apparatus (ATLAS)



## ATLAS: przypadek produkcji bozonu $W$ przy energii 7 TeV



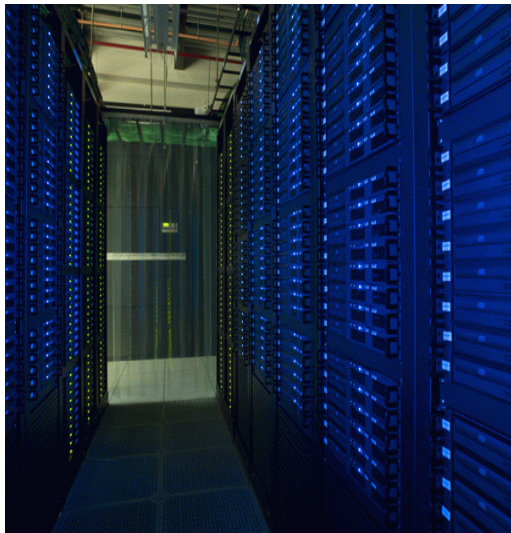
## Zbieranie i rekonstrukcja danych

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

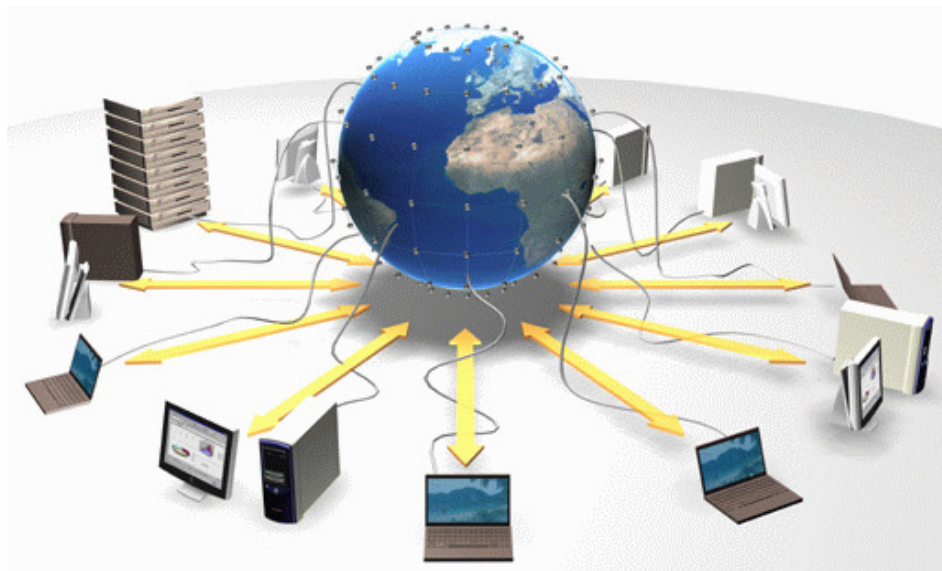
Ilość zbieranych danych dawno przekroczyła możliwości pojedynczego komputera.

1 przypadek to MB danych

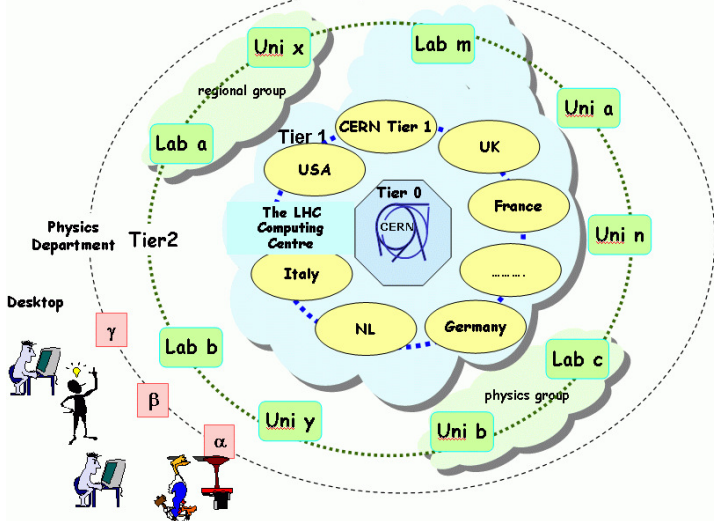
zbieramy miliardy przypadków

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. Higgsa) 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.

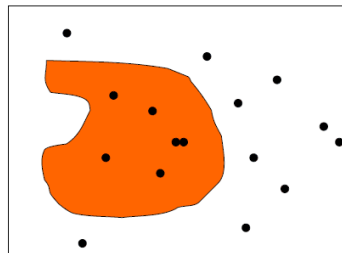
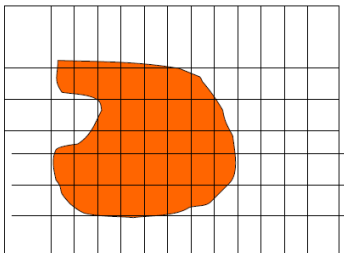
**Ale ich policzenie w tradycyjny sposób byłoby praktycznie niemożliwe.**

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:

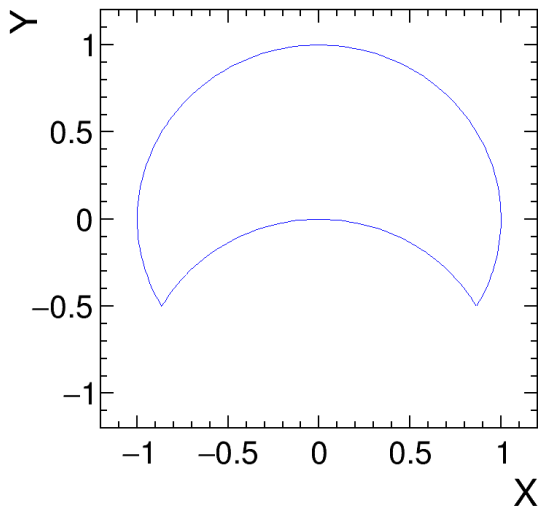
w obu musimy znać obszar w którym zawarta jest figura



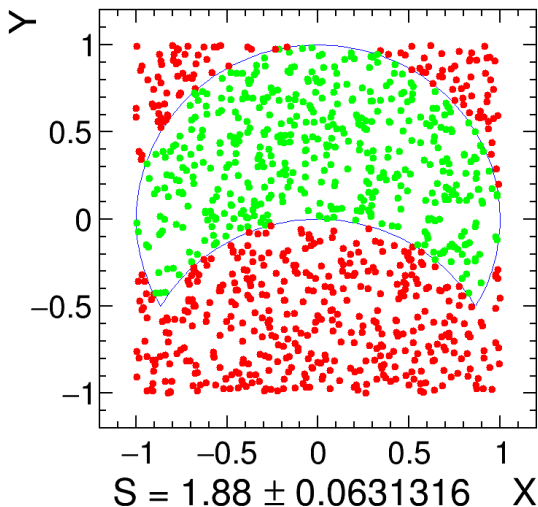
Sumować powierzchnię małych  
elementów należących do figury.

Policzyć jaki ułamek losowo  
wybieranych punktów znajduje się  
wewnątrz figury.

## Wyznaczanie powierzchni metodą Monte Carlo

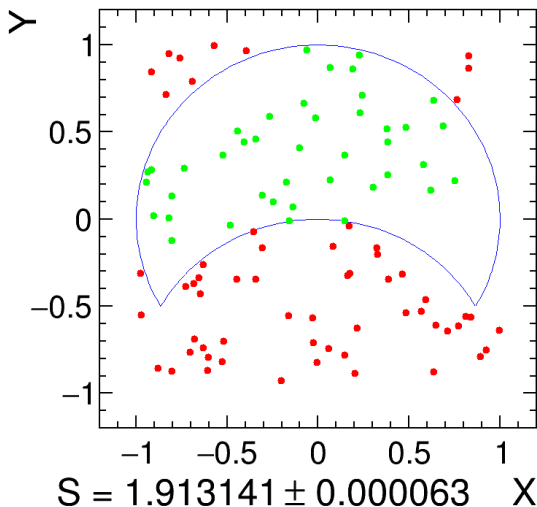


## Wyznaczanie powierzchni metodą Monte Carlo



## Wyznaczanie powierzchni metodą Monte Carlo

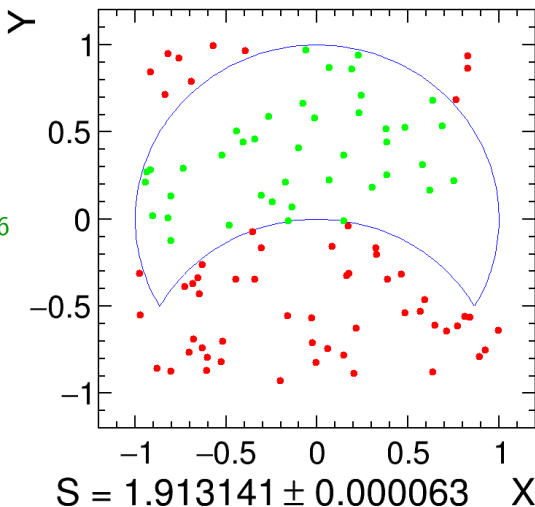
Rysowany jeden punkt na 10 milionów:



## Wyznaczanie powierzchni metodą Monte Carlo

Rysowany jeden punkt na 10 milionów:

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

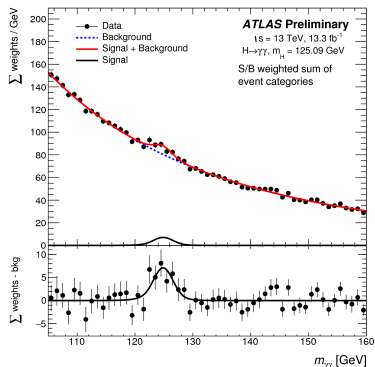
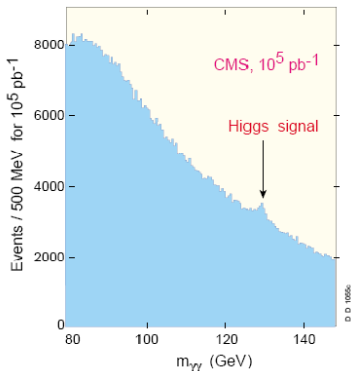


W przypadku eksperymentów przy LHC tło do poszukiwanych sygnałów “nowej fizyki” jest bardzo duże - symulacje są niezbędne.

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

Symulacja próbki  $100fb^{-1}$

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



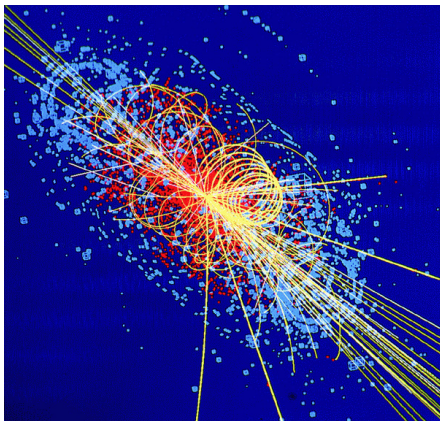
Przy każdym przecięciu paczek w LHC zderza się kilkadziesiąt par protonów.

W prawie każdym zderzeniu wyprodukowane są nowe cząstki.

Koło miliarda oddziaływań na sekundę!

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

Jak wybrać te ciekawe?



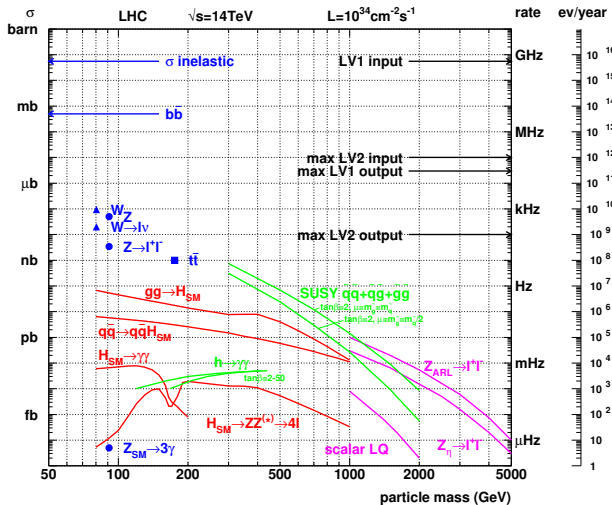


## Układ wyzwala

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

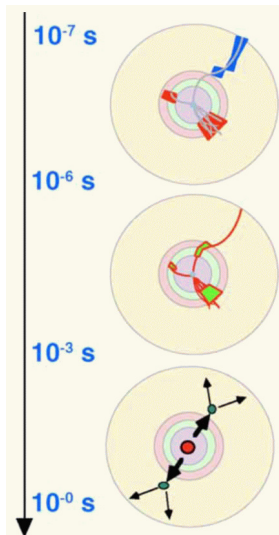
Tylko “ciekawe” sygnaly są czytane z detektora.

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 wyzwania    analogia z dnia codziennego

Na bardzo dużym parkingu szukamy konkretnego samochodu

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

## Układ wyzwalań analogia z dnia codziennego

Na bardzo dużym parkingu szukamy konkretnego samochodu

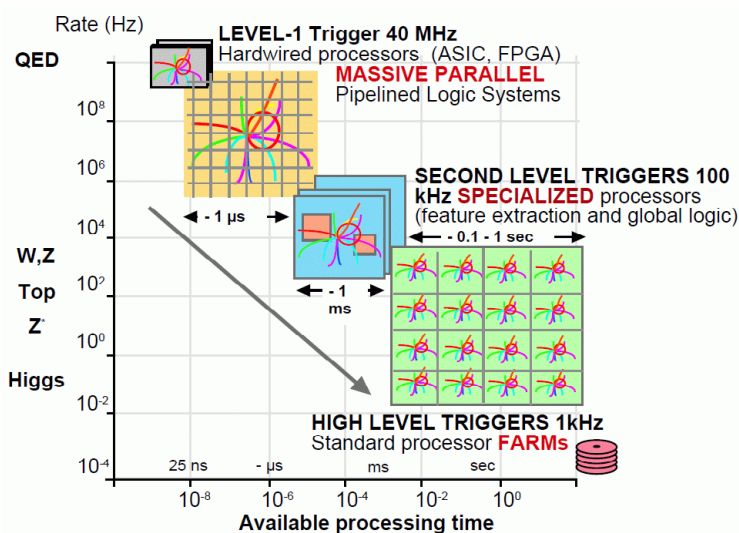
Jeśli będziemy sprawdzać numery rejestracyjne potrwa to bardzo długo...

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 wyzwalań 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...

