

# Wszechświat Cząstek Elementarnych dla Humanistów

## Współczesne eksperymenty przy kolajderach

Aleksander Filip Żarnecki

Wykład ogólnouniwersytecki



Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

14 listopada 2017

## Proponowany termin

- **podstawowy:** 2 lutego 2018, godz. 10:00 - 13:00, sala 0.03
- **dodatkowy:** 27 stycznia 2018, godz. 10:00 - 13:00, sala 0.06

Ankieta dotycząca terminu egzaminu będzie przeprowadzona w przyszłym tygodniu (do zaznaczenia na liście obecności).

## Proponowany termin

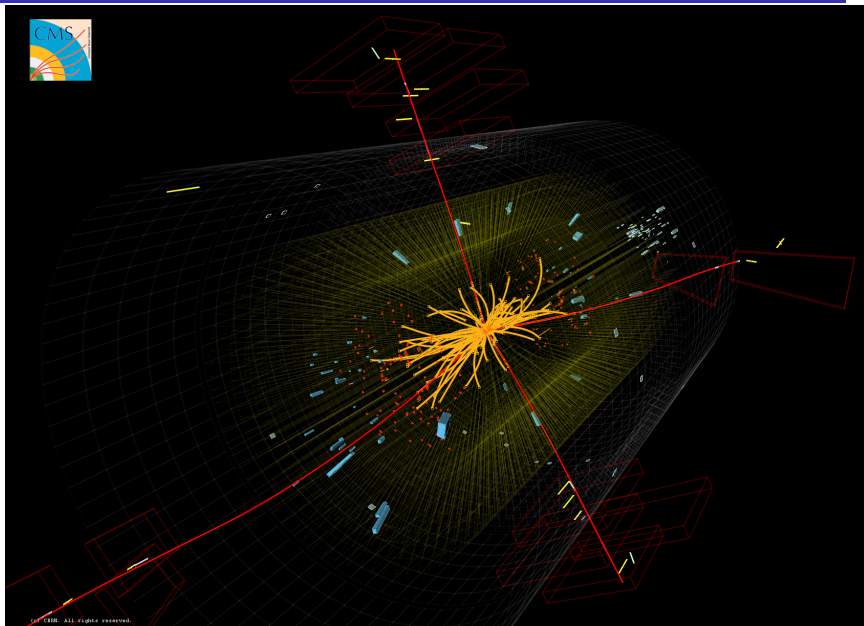
- **podstawowy**: 2 lutego 2018, godz. 10:00 - 13:00, sala 0.03
- **dotatkowy**: 27 stycznia 2018, godz. 10:00 - 13:00, sala 0.06

Ankieta dotycząca terminu egzaminu będzie przeprowadzona w przyszłym tygodniu (do zaznaczenia na liście obecności).

## Informacje o egzaminie

- Test składający się z 30 pytań otwartych (zblizonych do przykładowych pytań z listy)
- Oczekiwany czas trwania: 90 minut
- Można korzystać z **własnoręcznych** notatek
- Nie można korzystać z książek, wydruków, materiałów kopiowanych
- Nie wolno korzystać z urządzeń elektronicznych

# Jak dziś "widzimy" oddziaływania cząstek?



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

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

## LEP/LHC

Największym zbudowanym dotąd akceleratorem był LEP (1989):  
obwód ok. 27 km.

W tym samym tunelu uruchomiono w 2009 akcelerator LHC.

Przeciwbieżne wiązki protonów o energii 6.5 TeV (docelowo 7 TeV)

W każdej docelowo 2800 "paczek" po  $10^{11}$  protonów.

Zderzenia co 25 ns  
(40 milionów na sekundę)



## LHC

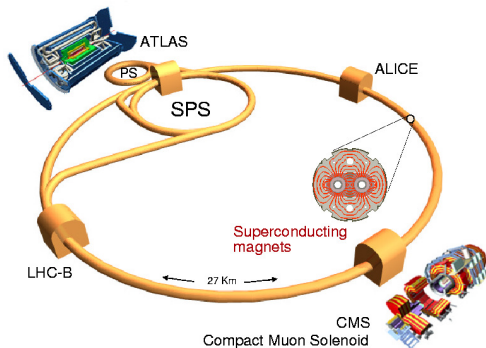
Przeciwbieżne wiązki LHC  
 proton-proton dają energię  
 zderzenia  $2 \times 6.5 = 13 \text{ TeV}$   
 ( $1 \text{ TeV} = 1000 \text{ GeV}$ )

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

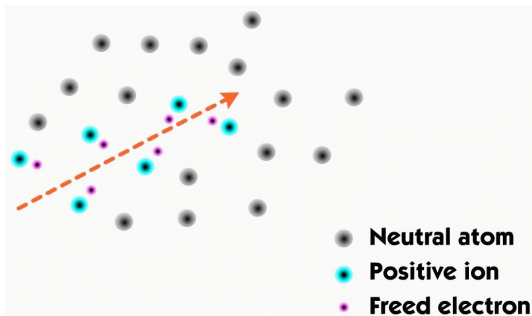
## The Large Hadron Collider (LHC)





## Jonizacja

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

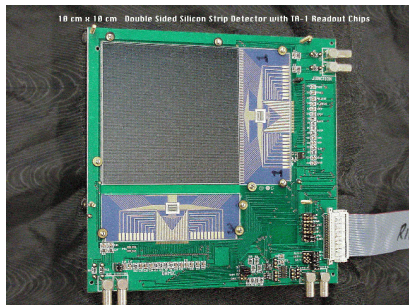


**Cząstka naładowana** przechodząc przez ośrodek **oddziałuje Kulombowsko** z elektronami i oddaje im część swojej energii **“wybijając”** je z atomów.

## Detektory półprzewodnikowe

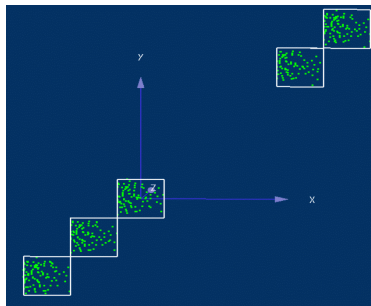
Coraz powszechniej używane.

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...

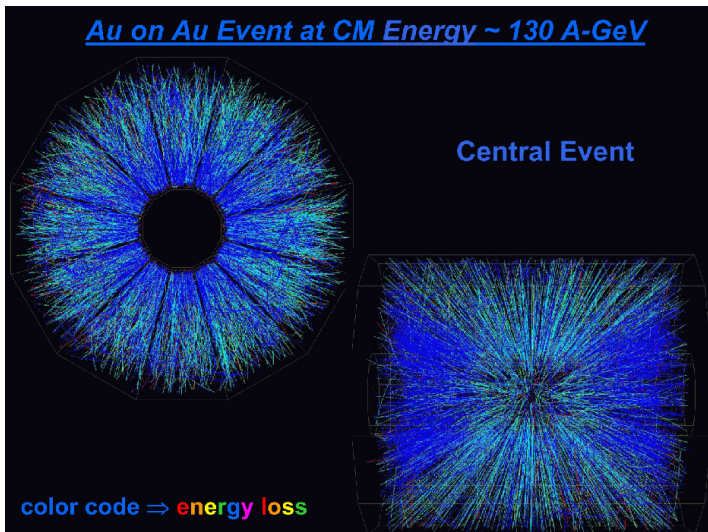
## Detektory gazowe

### TPC

Komora  
projekcji  
czasowej

Przypadek  
zderzenia  
ciężkich jonów

detektor STAR  
przy RHIC

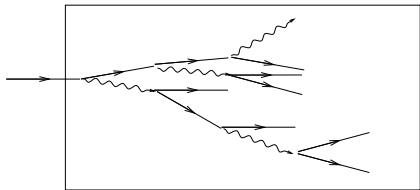


## Kalorymetry

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

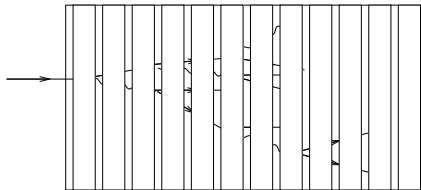
Mierząc liczbę cząstek lub całkowitą długość torów (**całkowitą jonizację**) możemy dokładnie określić energię cząstki początkowej

Kalorymetr jednorodny



np. blok scyntylatora

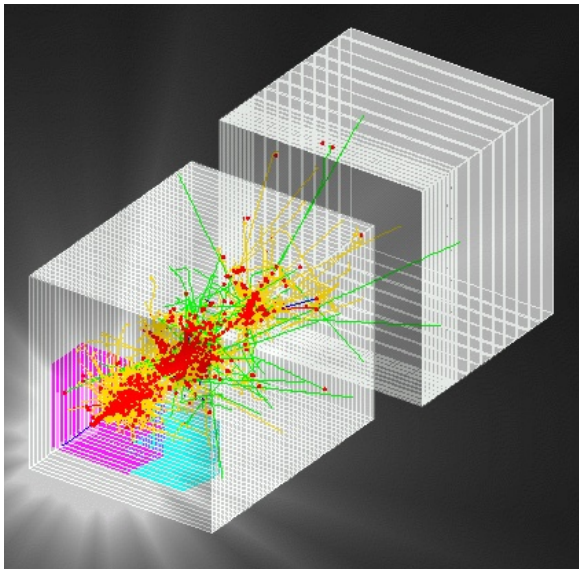
Kalorymetr próbkujący



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

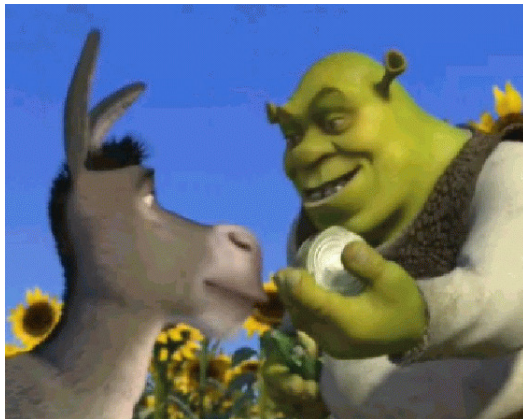
## Detektory są jak ogry...

Ogry są jak cebula...

Cebula ma warstwy...

Ogry mają warstwy...

Detektory mają warstwy...

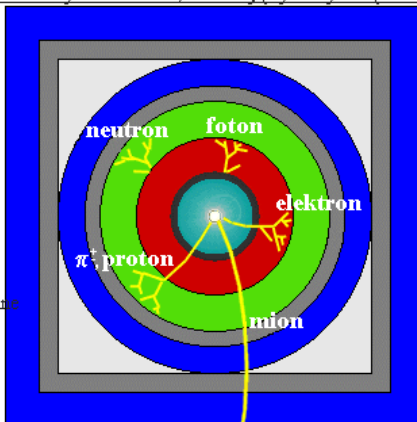


## Struktura warstwowa

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

Przekrój poprzeczny detektora, ilustrujący tory cząstek

-  rura wiązki
-  detektory śladowe
-  solenoid magnesu
-  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

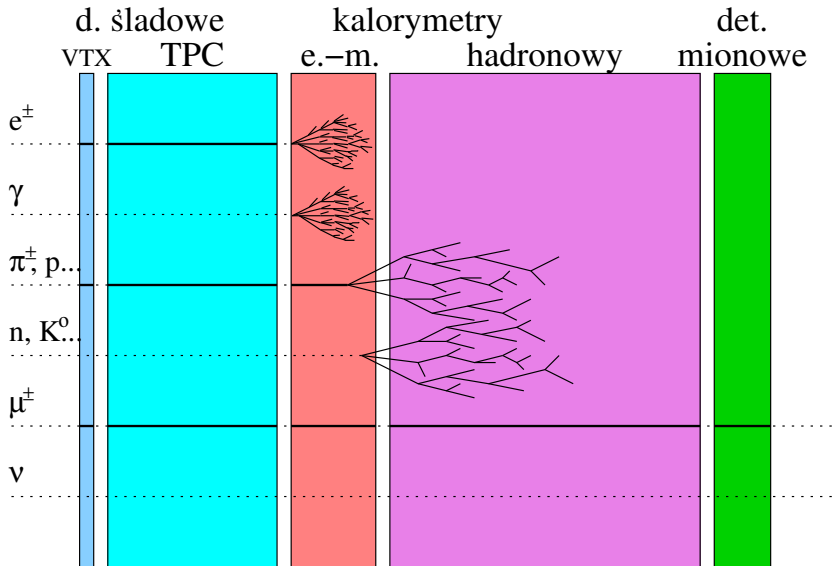
Ten schemat opisuje większość współczesnych eksperymentów przy kolajderach (ATLAS i CMS przy LHC, ale także wcześniejsze eksperymenty przy: LEP, HERA, Tevatron, oraz planowane przy: ILC, CLIC):

### Kolejno od środka detektora:

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

## Detektor uniwersalny

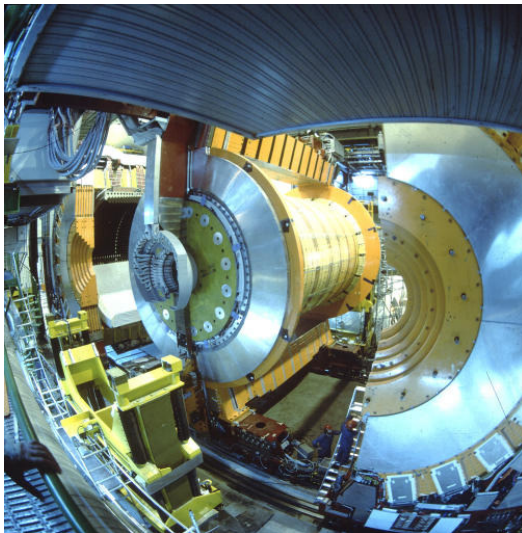
- kalorymetr elektromagnetyczny  
pomiar energii elektronów i fotonów  
gęsty materiał absorbujący lawinę cząstek  
(miedź, ołów, wolfram)
- kalorymetr hadronowy  
pomiar energii hadronów (protony, neutrony, piony, kaony)  
gęsty materiał absorbujący lawinę cząstek; lawina hadronowa jest wielokrotnie dłuższa od elektromagnetycznej.
- detektory mionowe  
identyfikacja mionów - jedyne cząstki naładowane, które mogą przejść przez kalometry bez dużych strat energii



## OPAL

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

1989-2000

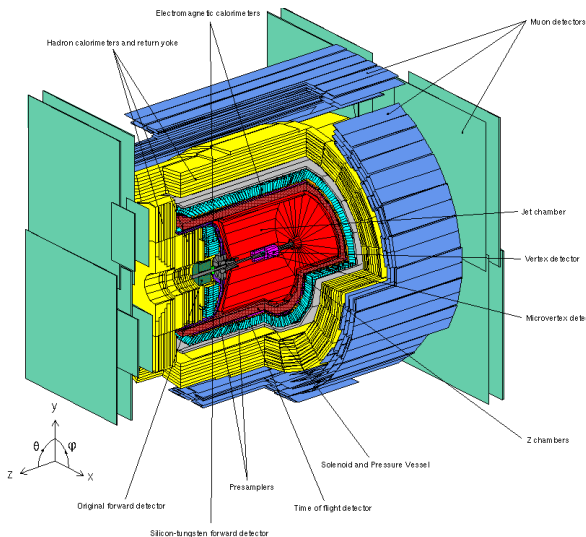


## OPAL



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

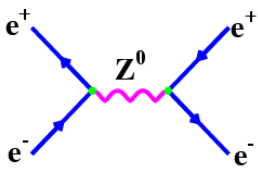
# Co rejestrują detektory?

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

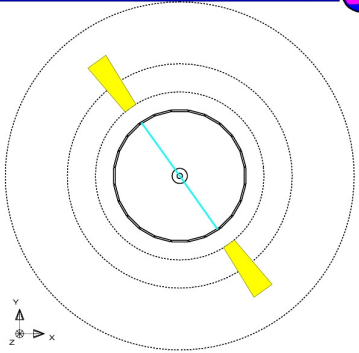
Co jest wynikiem zderzenia? Co pokazuje nam detektor?

Najprostszy przypadek

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



```
Run:event 0016: 33)  Clk(N= 2 SumP= 95.0)  Ecal(N= 2 SumE= 90.7)
Ebeam: 45.02 Yix (-01, 04, 13)  Bcal(N= 2 SumE= 5)  Muon(N= 0)
```



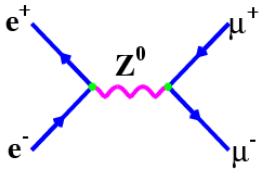
# Co rejestrują detektory?

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

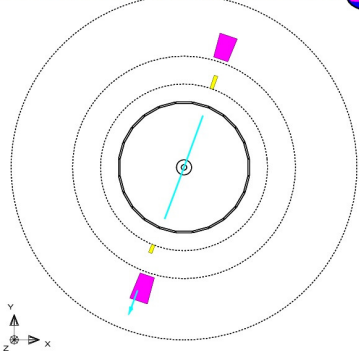
Co jest wynikiem zderzenia? Co pokazuje nam detektor?

Najprostszy przypadek

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



```
Run:event 5010: 572   Cirk(N= 2 Sump= 87.9) Eraf(N= 3 SuraE= 3.8)
Ebeam: 45.02 Vix (- .01, -.04, .13) Hcal(N= 5 SuraE= 18.0) Muon(N= 1)
```



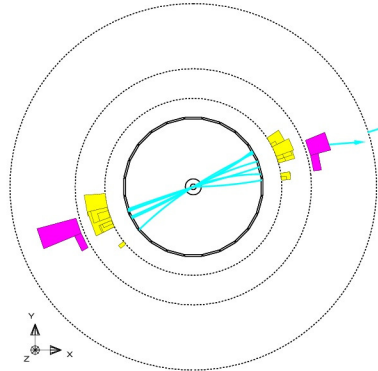
# Co rejestrują detektory?

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

A jak interpretować taki przypadek?

```
Run:event 5014: 432 Clk(N: 22 Samp: 42.6) Era1(N: 26 StrdB: 40.3)
Ebeam 45.62 Vtx (-.49, -.05, 6.47) Era1(N:20 StrdB: 27.0) Muon(N: 2)
```



# Co rejestrują detektory?

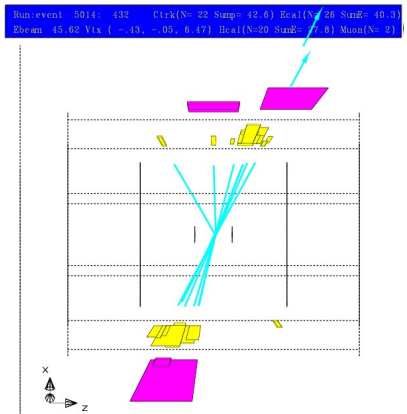
W akceleratorze **LEP** zderzano elektrony i pozytony przy energii dostępnej  $\sqrt{s} = 90 - 210 \text{ GeV}$ .

W około 10% przypadków widzimy powstające elektrony lub miony

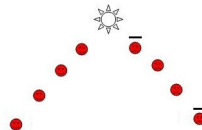
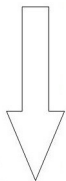
A jak interpretować taki przypadek?

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

Ten sam przypadek, widok "z boku"

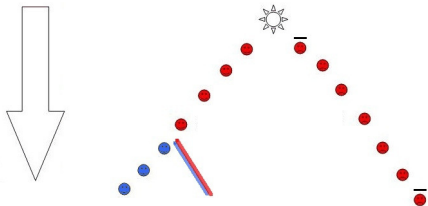


W zderzeniu powstaje para  
kwarków:  $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$



W zderzeniu powstaje para  
kwarków:  $e^+ e^- \rightarrow q \bar{q}$

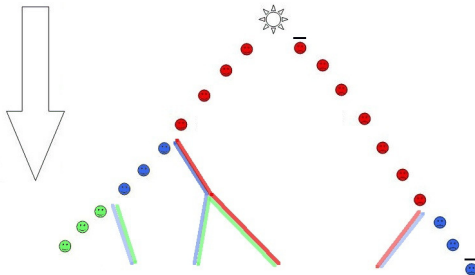
Kwarki oddalają się od siebie,  
rośnie oddziaływanie kolorowe



W zderzeniu powstaje para  
kwarków:  $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$

Kwarki oddalają się od siebie,  
rośnie oddziaływanie kolorowe

Dochodzi do emisji gluonów



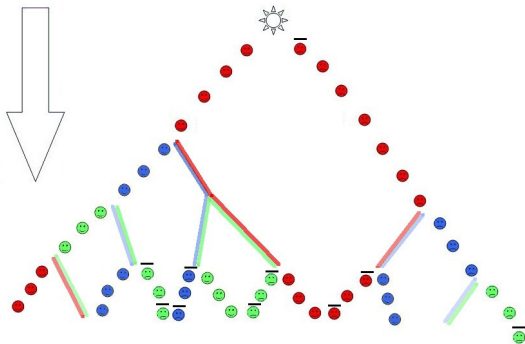


W zderzeniu powstaje para kwarków:  $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$

Kwarki oddalają się od siebie, rośnie oddziaływanie kolorowe

Dochodzi do emisji gluonów

Gluony konwertują na pary kwark-antykwar

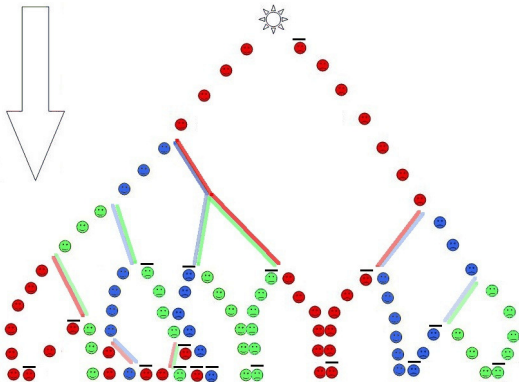


W zderzeniu powstaje para  
kwarków:  $e^+ e^- \rightarrow q\bar{q}$

Kwarki oddalają się od siebie,  
rośnie oddziaływanie kolorowe

Dochodzi do emisji gluonów

Gluony konwertują na pary  
kwark-antykwark



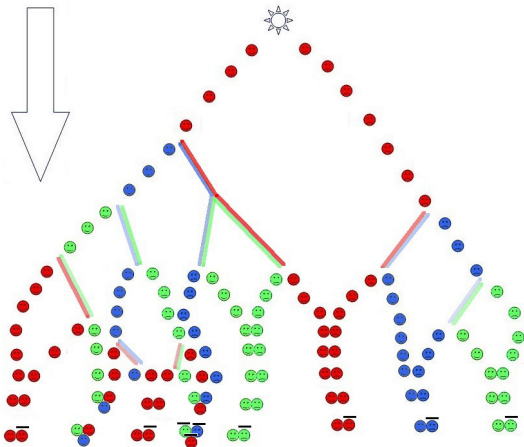
W zderzeniu powstaje para  
kwarków:  $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$

Kwarki oddalają się od siebie,  
rośnie oddziaływanie kolorowe

Dochodzi do emisji gluonów

Gluony konwertują na pary  
kwark-antykwar

Kwarki i antykwarki formują  
“białe” hadrony



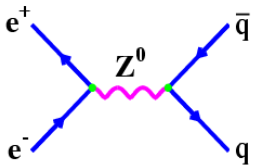
# Co rejestrują detektory?

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

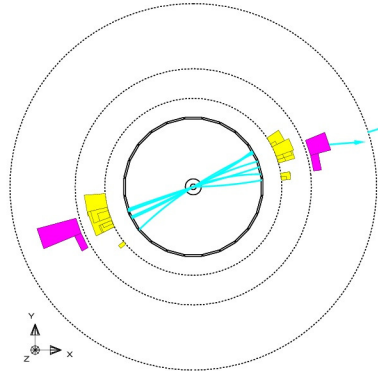
W prawie 90% przypadków widzimy powstające jety hadronowe.

Naogół powstają 2 jety

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



```
Run:event: 5014: 432 Clk(N: 22 Samp: 42.6) Era1(N: 26 Strd: 40.3)
Ebeam: 45.62 Vtx (-.49, -.05, 0.47) Bcal(N:20 Srad: 27.0) Muon(N: 2)
```



# Co rejestrują detektory?

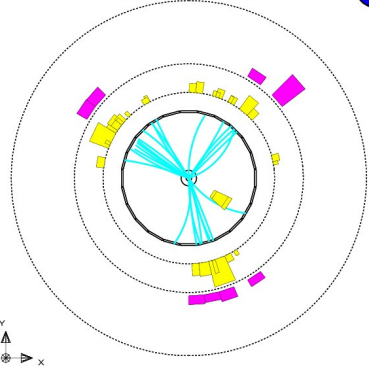
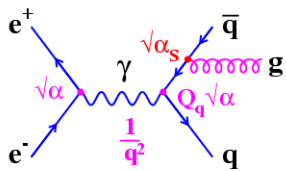
W akceleratorze **LEP** zderzano elektrony i pozytony przy energii dostępnej  $\sqrt{s} = 90 - 210 \text{ GeV}$ .

W prawie 90% przypadków widzimy powstające jety hadronowe.

Naogół powstają 2 jety  
Ale możliwe też:

```
Run: event 5014: 654 Cirk(N= 36 Sump= 55 0) Beal(N= 49 SumE= 47.5)
Ebeam 45.62 Vtx (-.02, .05, -.02) Hcal(N=24 SumE= 21.5) Muon(N= 0)
```

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

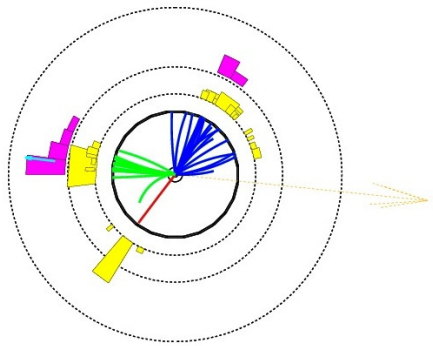
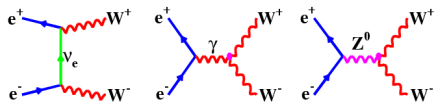


# Co rejestrują detektory?

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

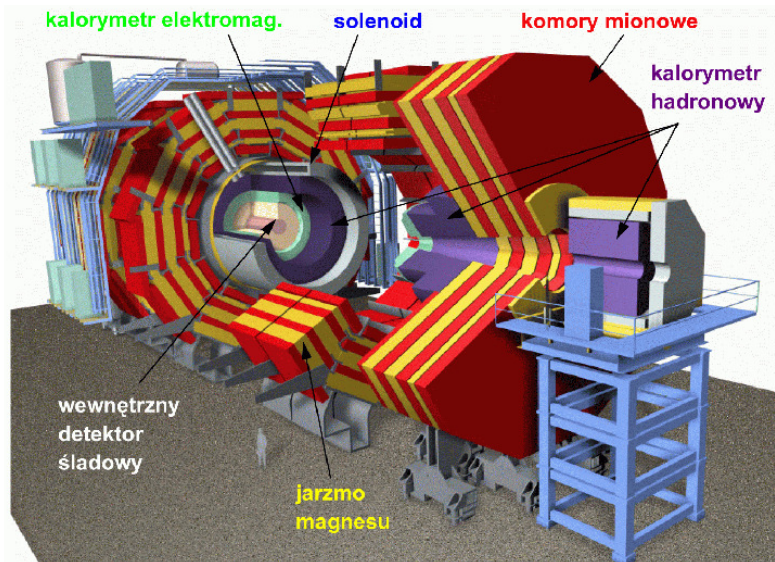
$$W^+ \rightarrow q\bar{q} \quad \text{2jety}$$

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

neutrino rekonstruujemy z zasady zachowania energii i pędu

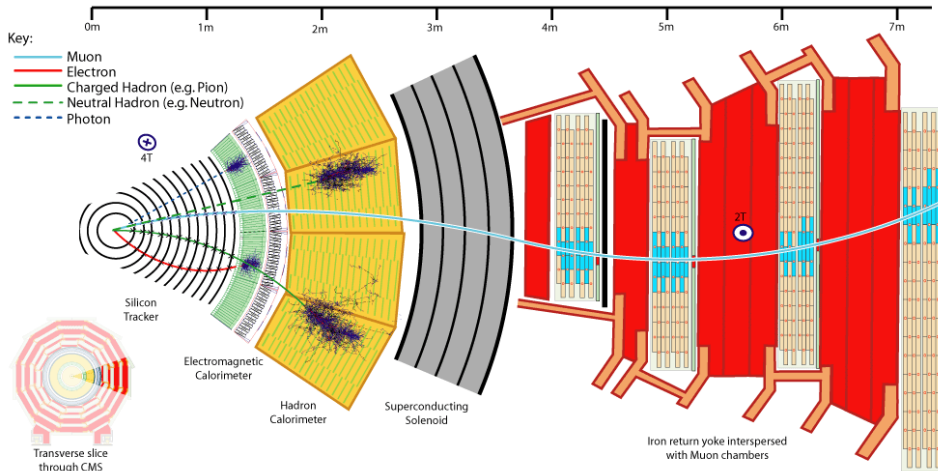
- 1 Przypomnienie
  - Kolajdery
  - Podstawowe typy detektorów
- 2 Budowa detektora uniwersalnego
- 3 Co rejestrują detektory?
- 4 Współczesne eksperymenty
  - Przykładowe przypadki
  - Układ wyzwiania
  - Przechowywanie i analiza danych
  - Symulacje Monte Carlo

## Compact Muon Solenoid - CMS

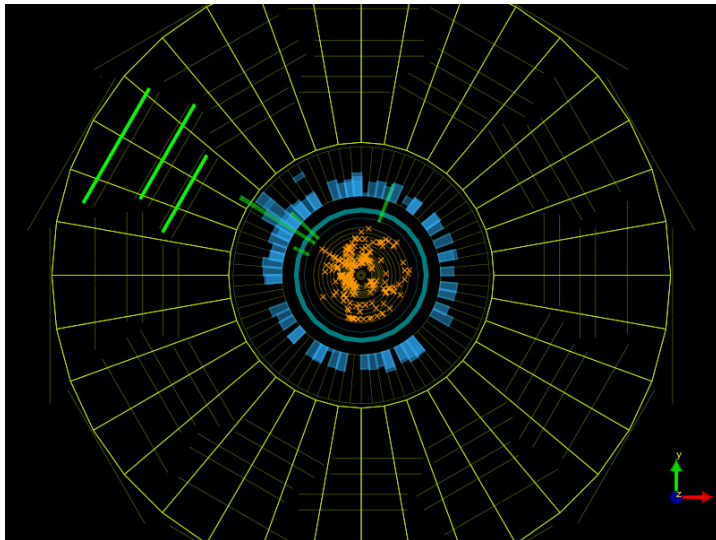




## Compact Muon Solenoid - CMS

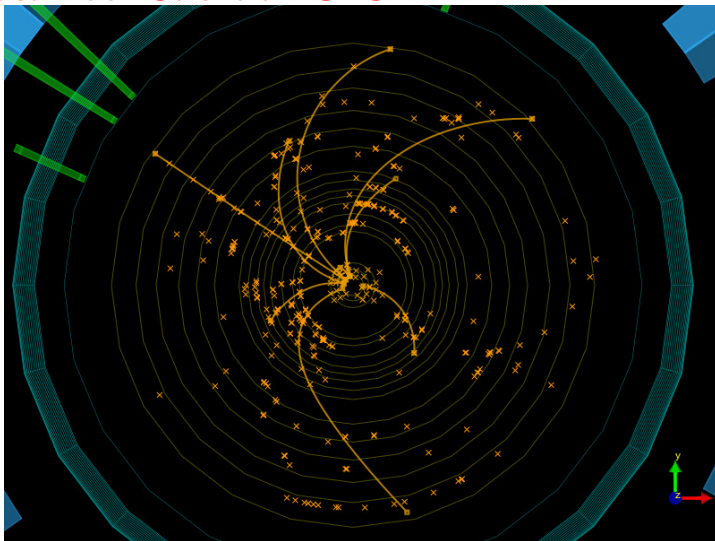


## Compact Muon Solenoid - CMS



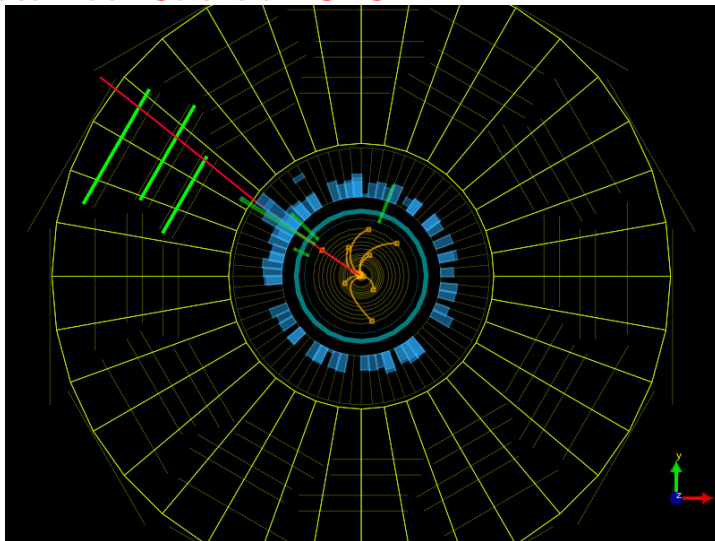
Przypadek z produkcją pojedynczego mionu.

## Compact Muon Solenoid - CMS



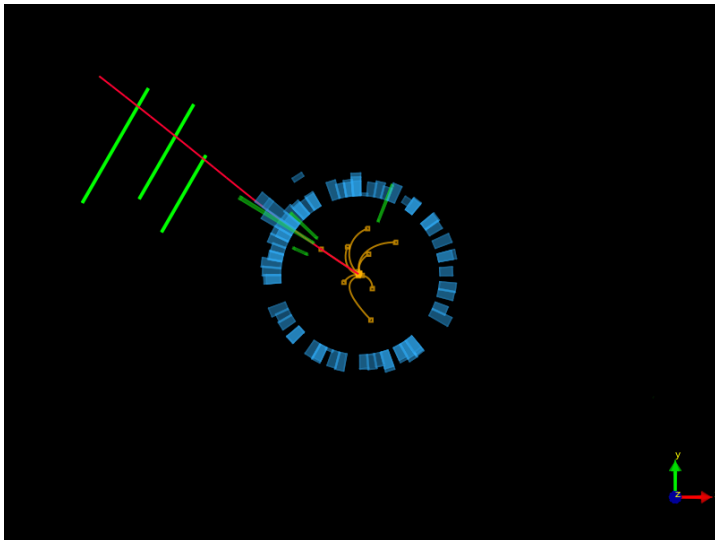
Przypadek z produkcją pojedynczego mionu.

## Compact Muon Solenoid - CMS



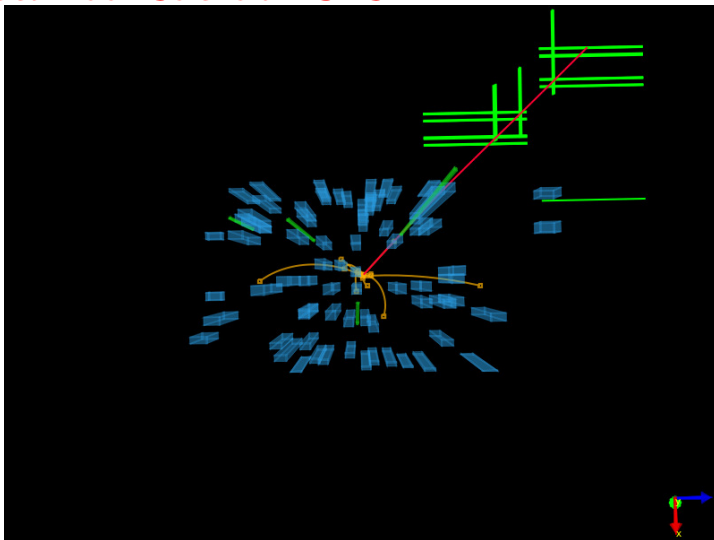
Przypadek z produkcją pojedynczego mionu.

## Compact Muon Solenoid - CMS



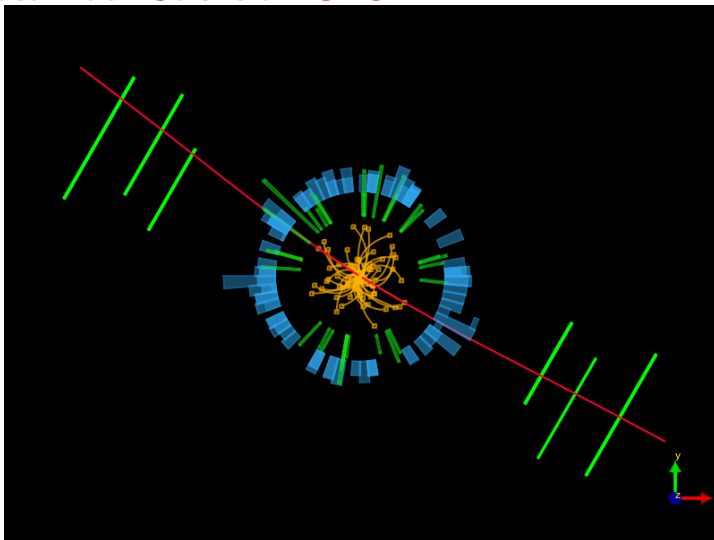
Przypadek z produkcją pojedynczego mionu.

## Compact Muon Solenoid - CMS



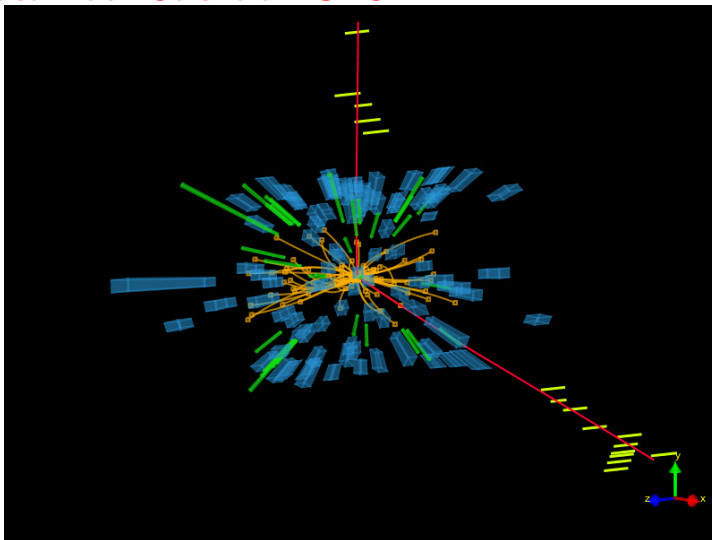
Przypadek z produkcją pojedynczego mionu.

## Compact Muon Solenoid - CMS



Przypadek z produkcją dwóch mionów.

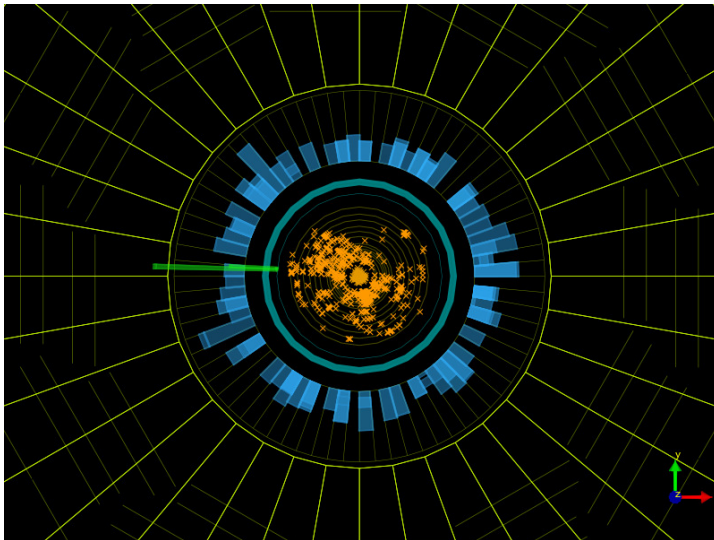
## Compact Muon Solenoid - CMS



Przypadek z produkcją dwóch mionów.

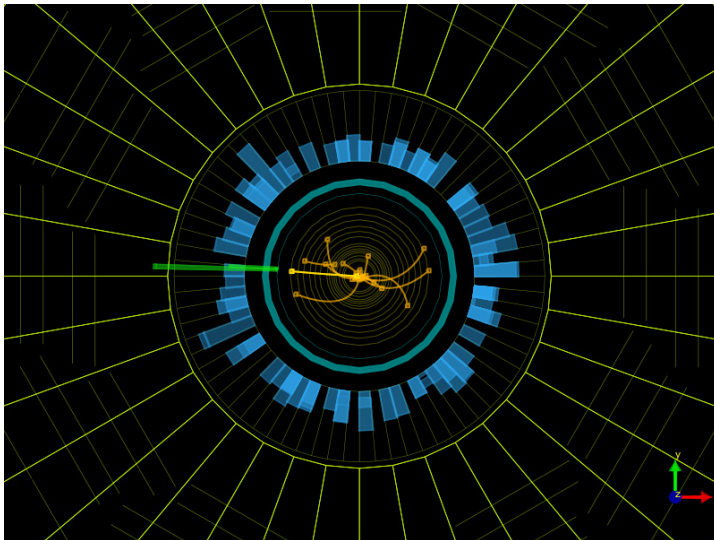


## Compact Muon Solenoid - CMS



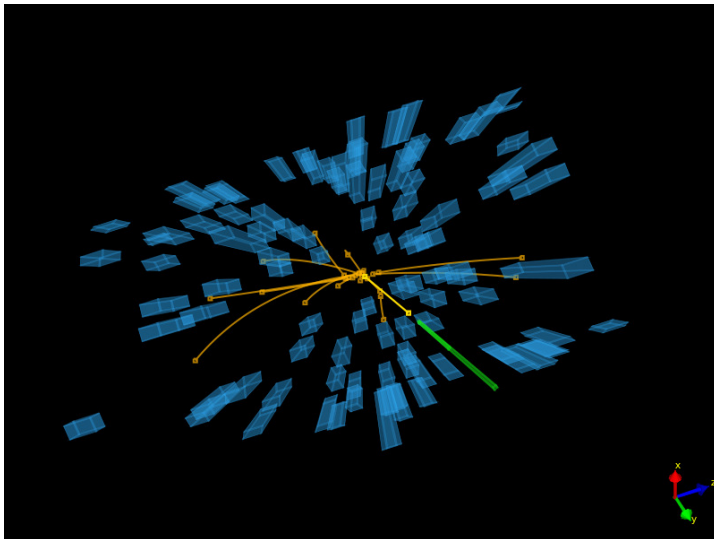
Przypadek z produkcją pojedynczego elektronu.

## Compact Muon Solenoid - CMS



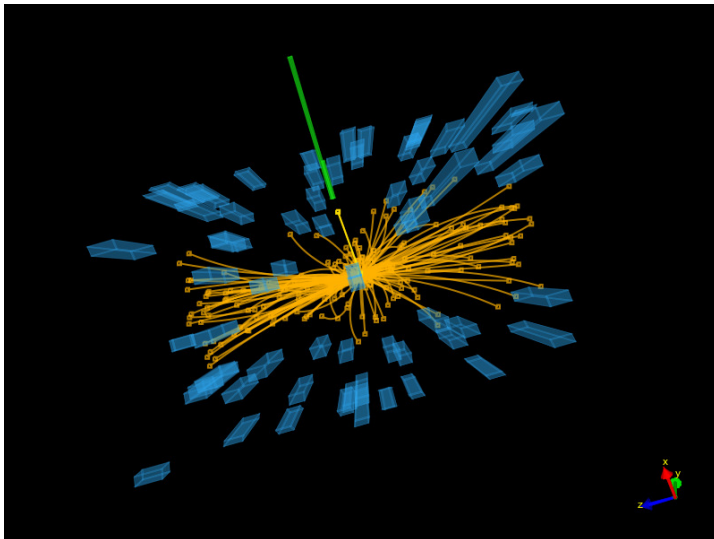
Przypadek z produkcją pojedynczego elektronu.

## Compact Muon Solenoid - CMS



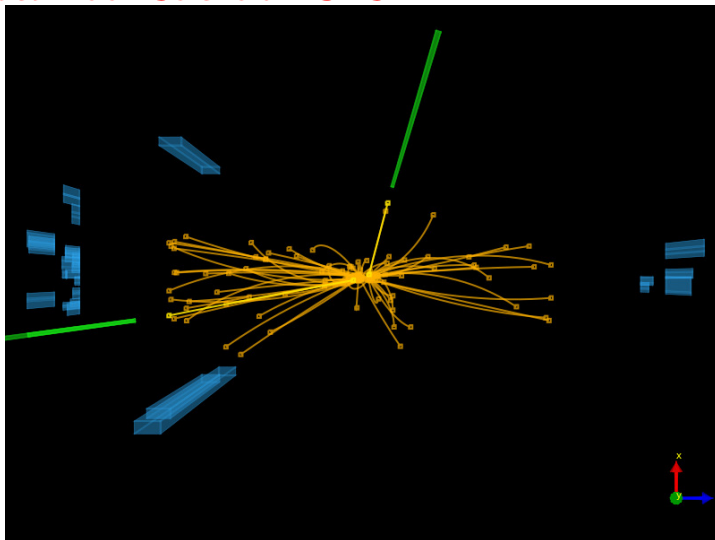
Przypadek z produkcją pojedynczego elektronu.

## Compact Muon Solenoid - CMS



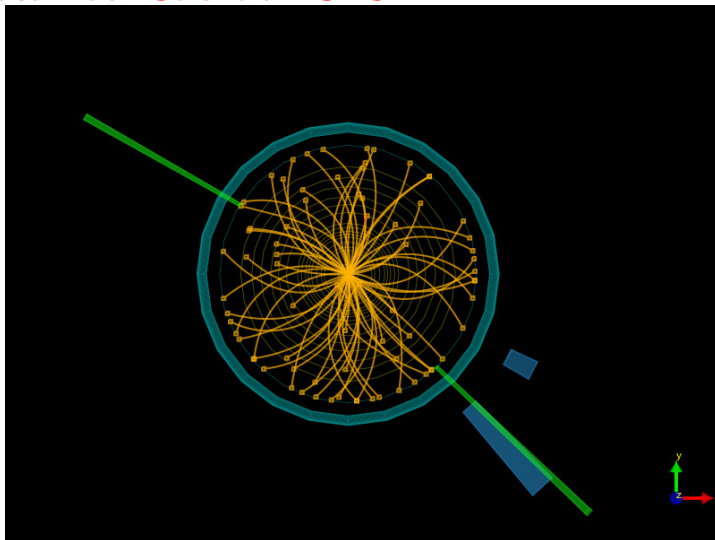
Przypadek z produkcją pojedynczego elektronu.

## Compact Muon Solenoid - CMS



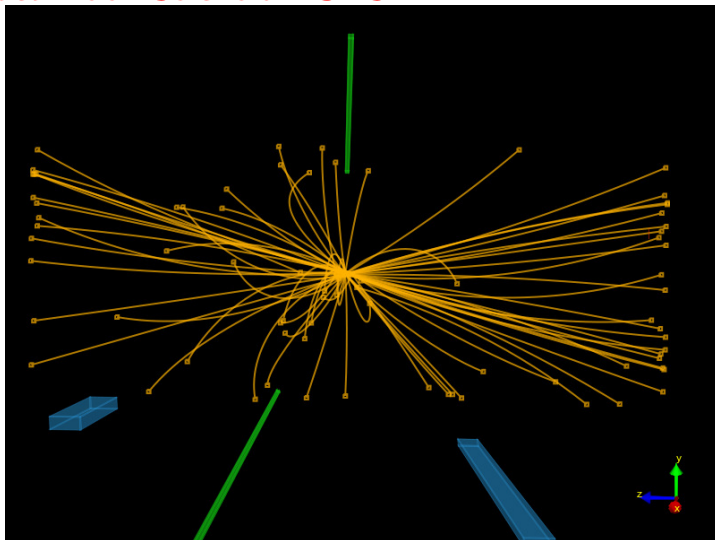
Przypadek z produkcją dwóch elektronów.

## Compact Muon Solenoid - CMS



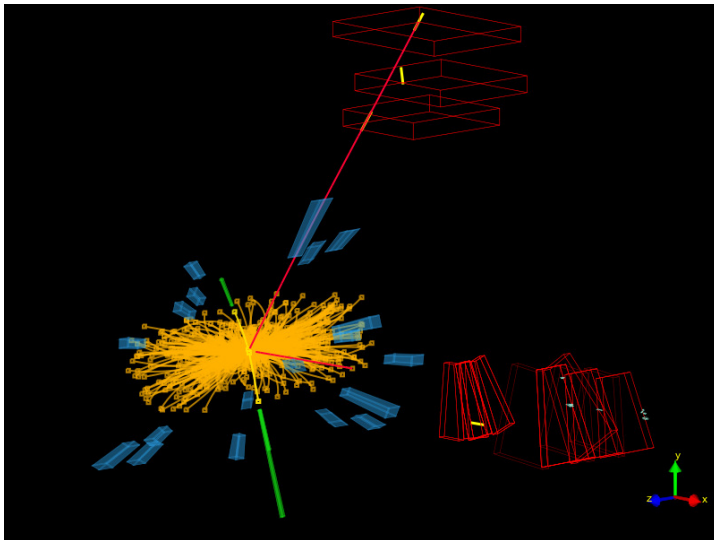
Przypadek z produkcją dwóch fotonów ( $H \rightarrow \gamma\gamma$ )

## Compact Muon Solenoid - CMS



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

## Compact Muon Solenoid - CMS



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



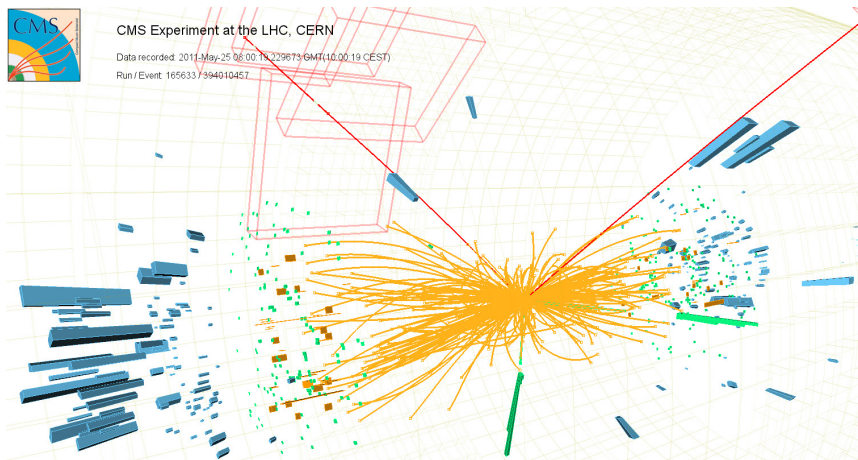
## Compact Muon Solenoid - CMS



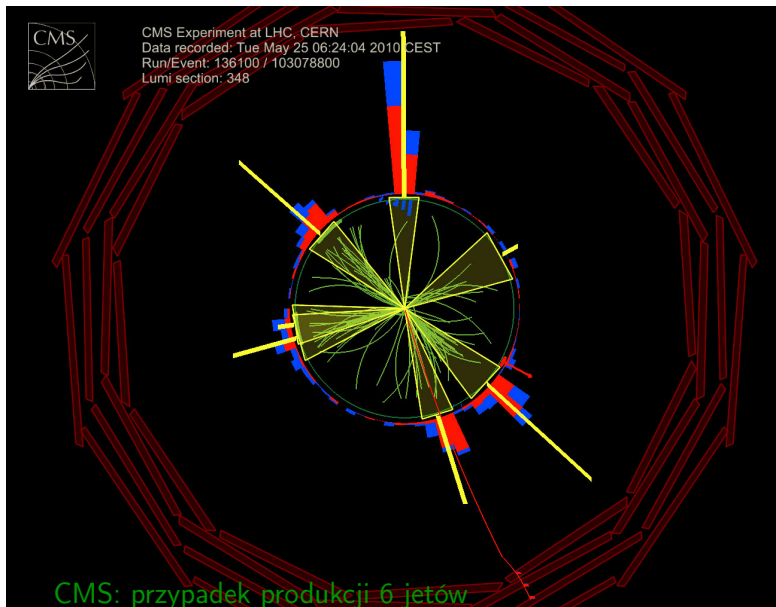
CMS Experiment at the LHC, CERN

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

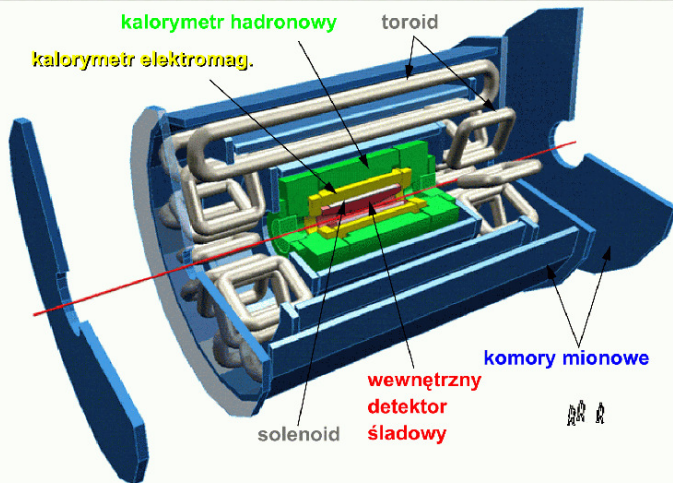
Run / Event 165633 / 394010457



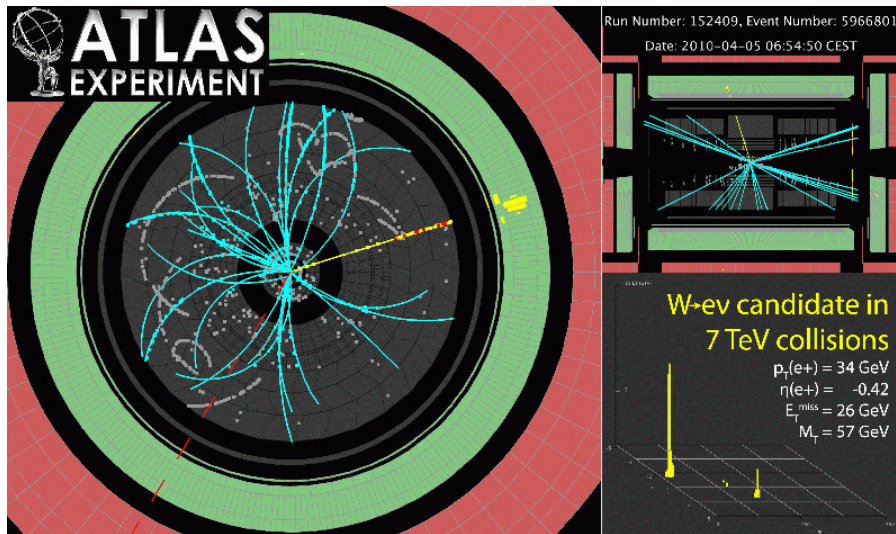
Przypadek  $H \rightarrow ZZ \rightarrow e^+e^-\mu^+\mu^-$



## A Toroidal LHC Apparatus (ATLAS)



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



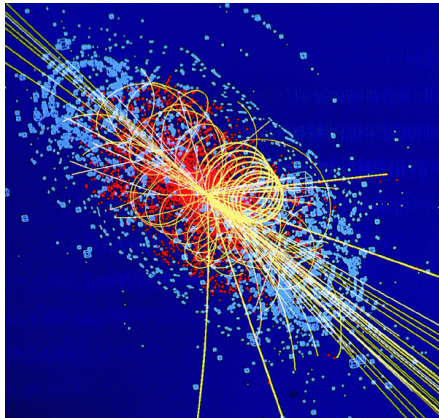
Przy każdym przecięciu paczek w LHC zderza się kilkadziesiąt par protonów.

W prawie każdym zderzeniu wyprodukowane są nowe cząstki.

Koło miliarda oddziaływań na sekundę!

Nie mamy szans zarejestrować (zapamiętać/zapisać) więcej niż ok. 100 na sekundę!

Jak wybrać te ciekawe?



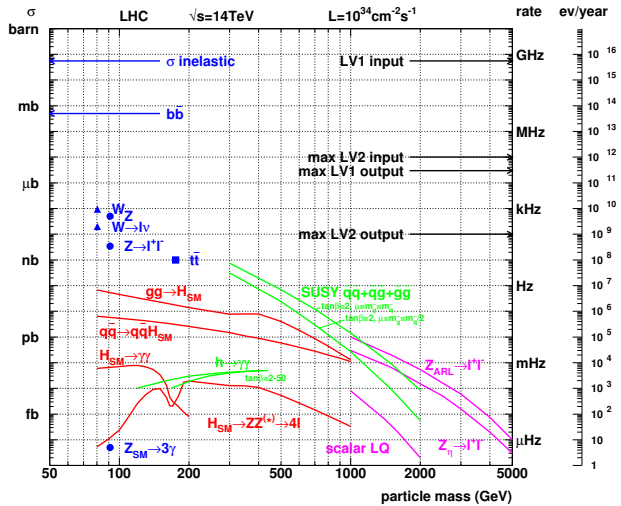
# Współczesne eksperymenty

## Układ wyzwala

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

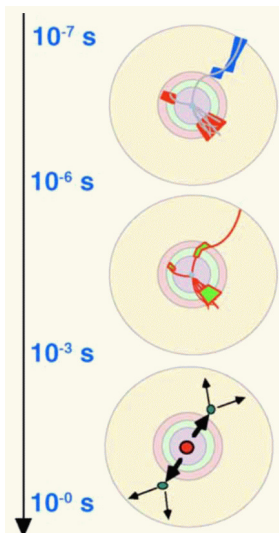
Tylko "ciekawe" sygnaly są czytane z detektora.

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



Zapisujemy tylko to, co ma szansę być ciekawe!

## Układ wyzwala



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

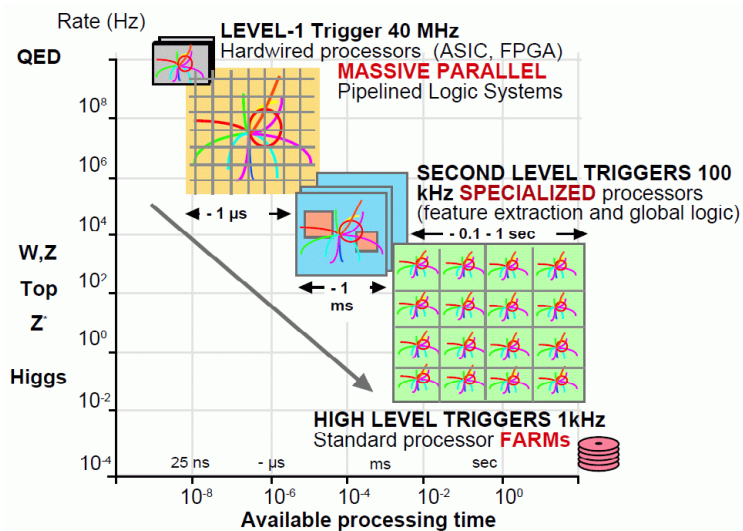
Rozwiązanie: system wielopoziomowy!

**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 wyzwalania schemat



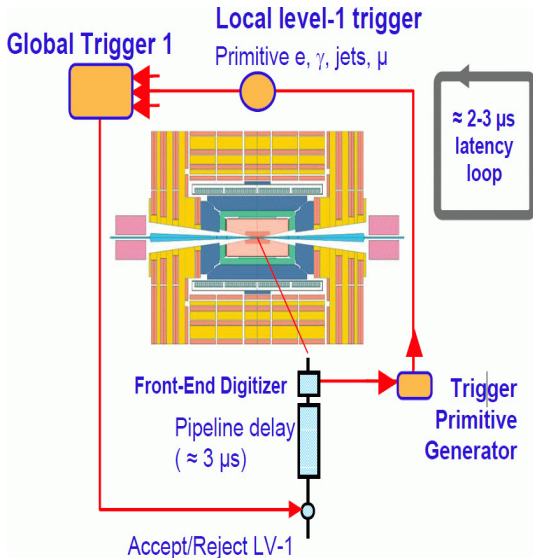


## Układ wyzwalania

Najtrudniejszy Poziom 1.

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

Dominuje czas potrzebny na przesyłanie informacji!



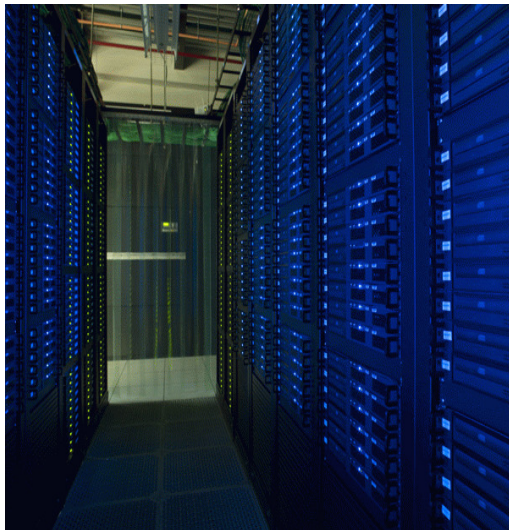
## Zbieranie i rekonstrukcja danych

Ilość zbieranych danych dawno przekroczyła możliwości pojedynczego komputera.

1 przypadek to MB danych

zbieramy miliony przypadków

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



## Zbieranie i rekonstrukcja danych

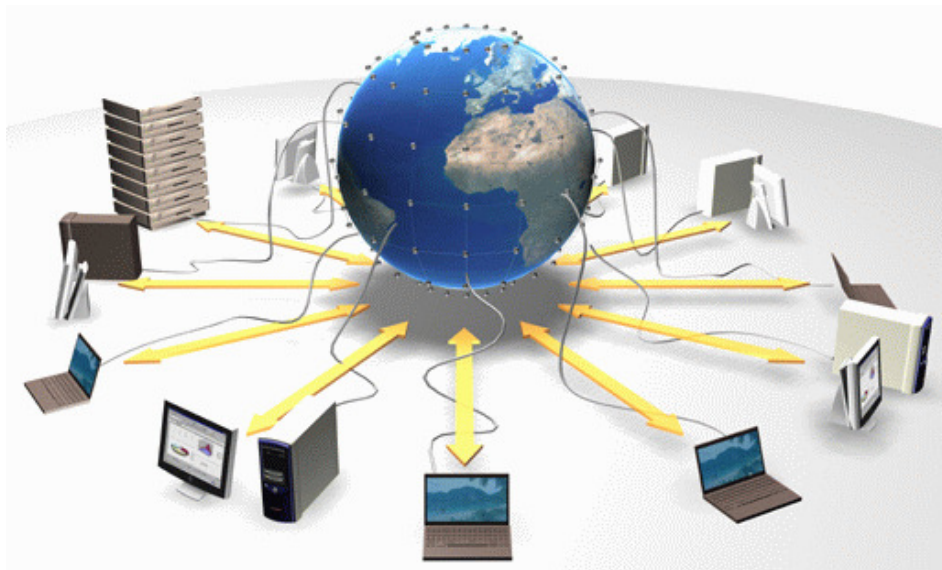
Ilość zbieranych danych dawno przekroczyła możliwości pojedynczego komputera.

1 przypadek to MB danych

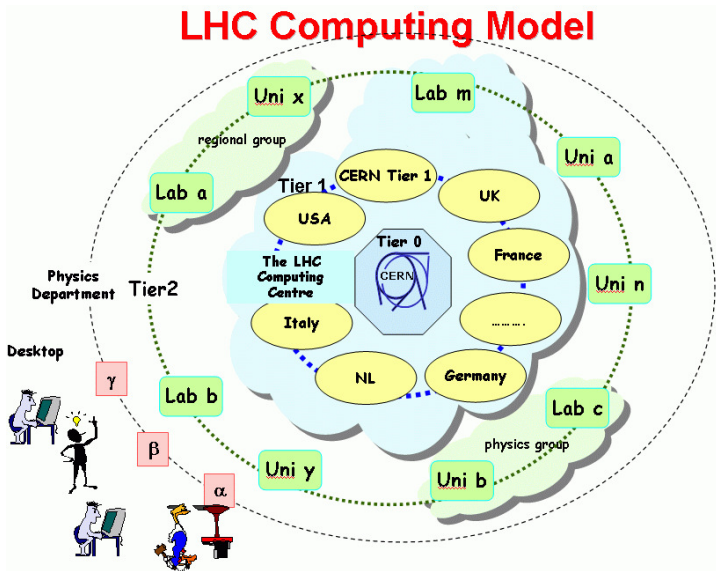
zbieramy miliony przypadków

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





## LHC Computing Model



Komputery na całym świecie zostały 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 (**tylko poziomy 0-2**):  
655 000 procesorów (moc 8 000 000 SPEC06), 340 000 TB dysków,  
330 000 TB do archiwizacji + **bardzo szybkie łącza** (!)

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.

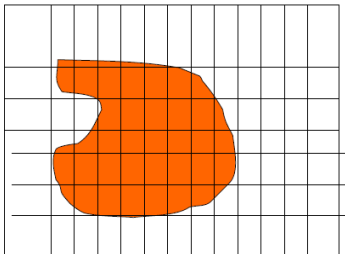


# Przykład

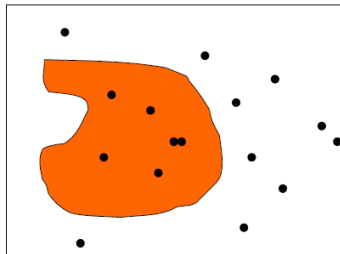
Jak policzyć pole powierzchni bardzo nieregularnej figury  
(np. zadanej przez skomplikowaną formułę matematyczną).

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.

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)

