

# Wszechświat cząstek elementarnych dla humanistów

## *Wykład 8: Współczesne eksperymenty*

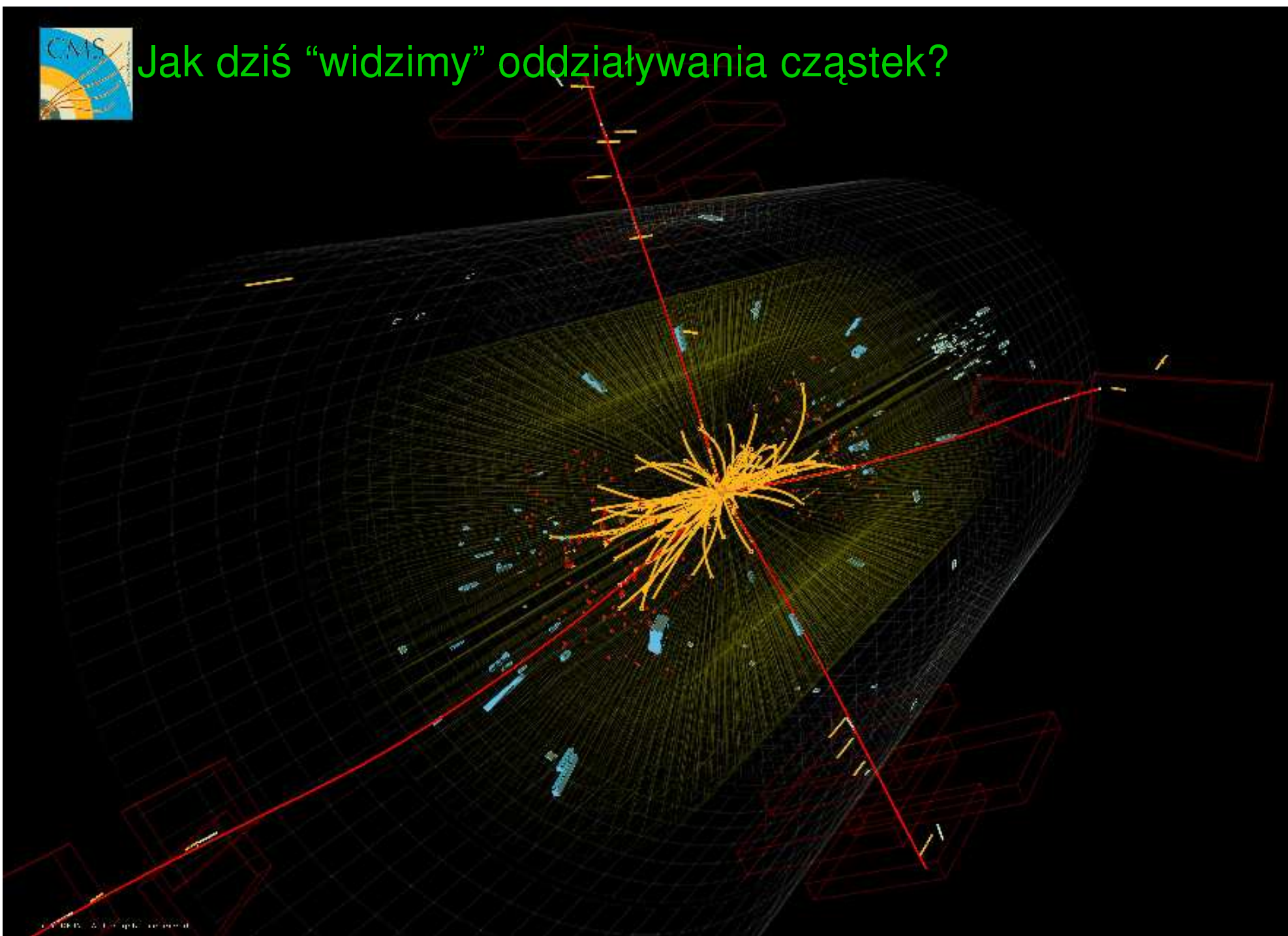
prof. A.F.Żarnecki



Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych  
Instytut Fizyki Doświadczalnej



# Jak dziś “widzimy” oddziaływania cząstek?



# Współczesne eksperymenty

- Przypomnienie
  - Kolajdery cząstek
  - Podstawowe typy detektorów
- Budowa detektora uniwersalnego (hybrydowego)
  - zasada budowy
  - przykładowe konstrukcje
- Co rejestrują detektory
  - Co jest obserwowanym wynikiem zderzenia?
- Zbieranie i analiza danych
  - układ wyzwiania
  - przechowywanie i analiza danych
- Symulacje Monte Carlo

# Kolajdery

## **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)





# Kolajdery

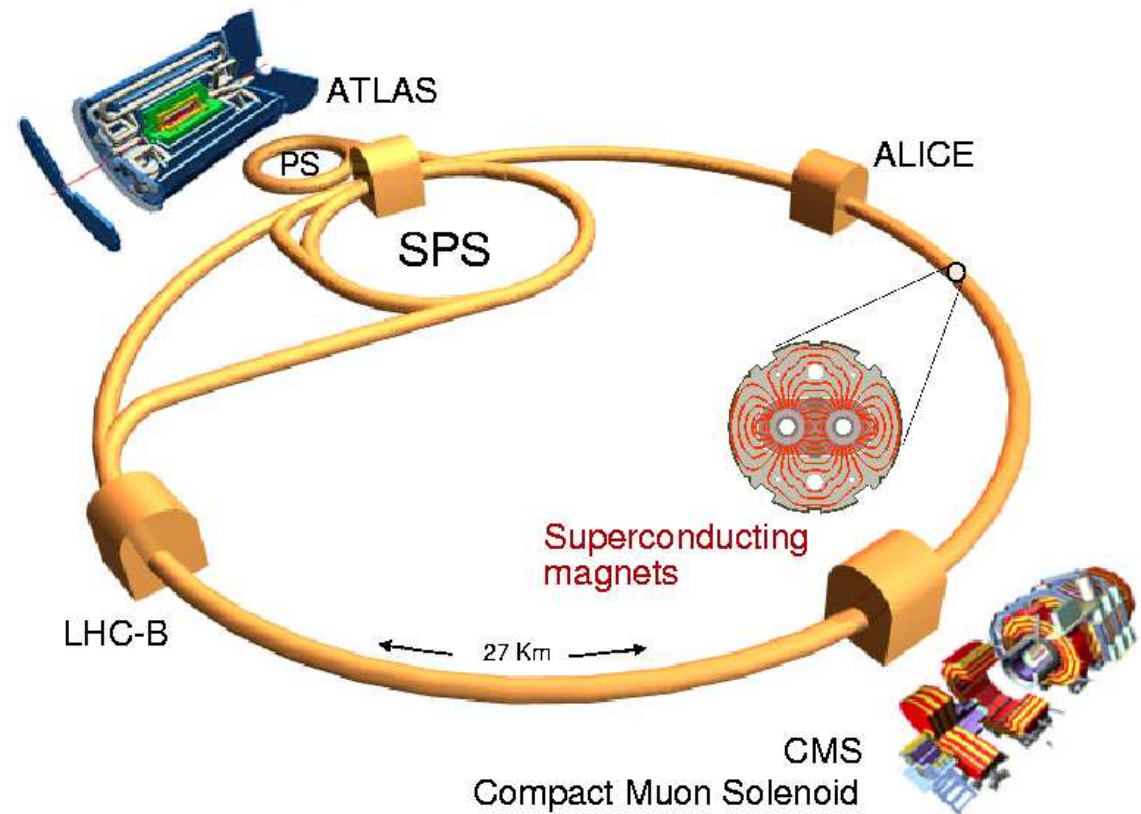
Przeciwbieżne wiązki LHC proton-proton dają energię zderzenia  $2 \times 6.5 = 13 \text{ TeV}$  (1 TeV = 1000 GeV)

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

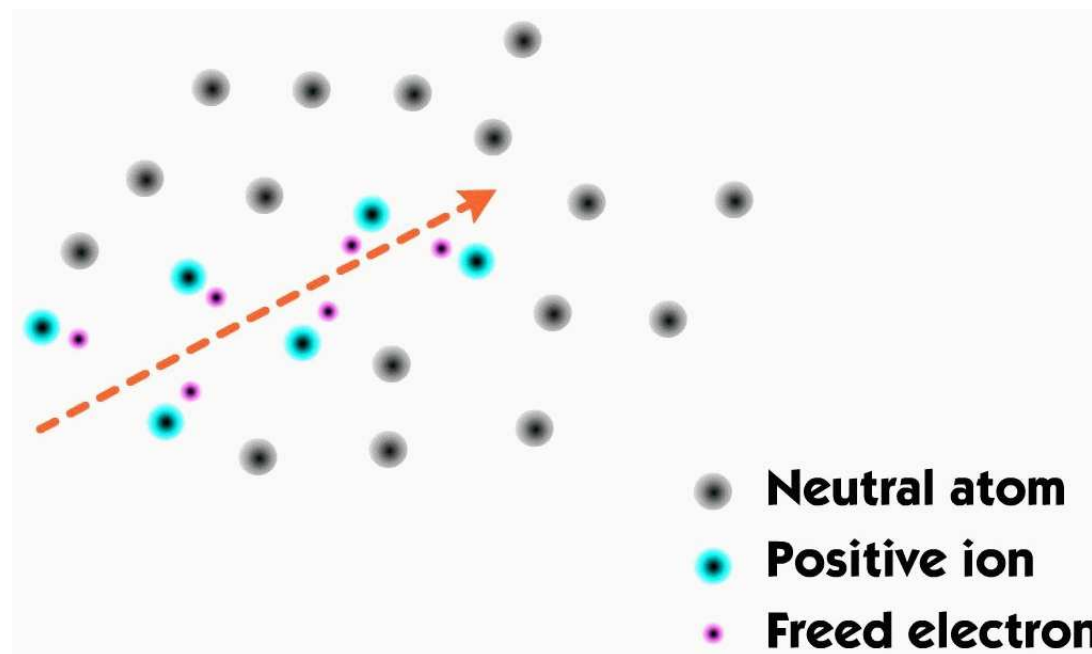
## The Large Hadron Collider (LHC)



# Detekcja cząstek

## **Jonizacja**

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



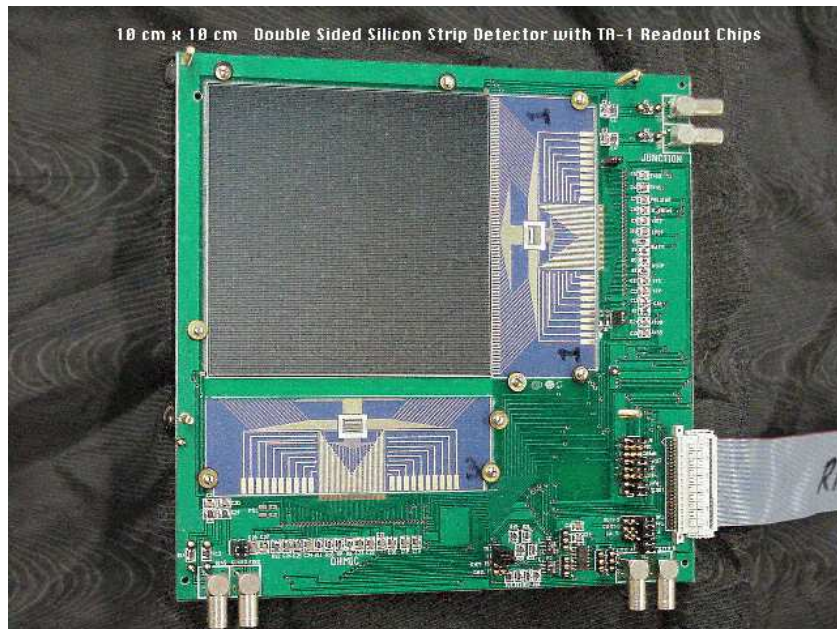
**Cząstka naładowana** przechodząc przez ośrodek **oddziałuje Kulombowsko** z elektronami i oddaje im część swojej energii “wybijając” je z atomów.

# Detekcja cząstek

## **Detektory półprzewodnikowe**

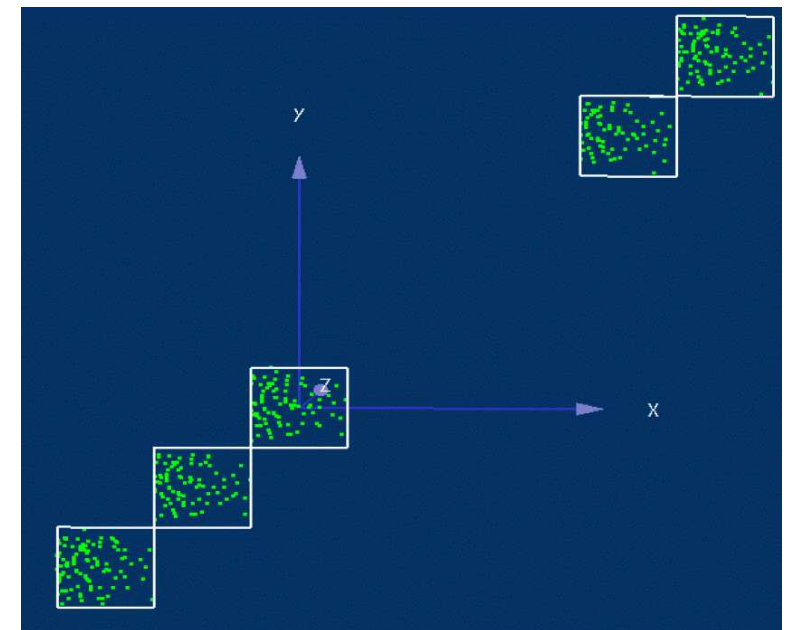
Coraz powszechniej używane.

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 drogie...



# Detekcja cząstek

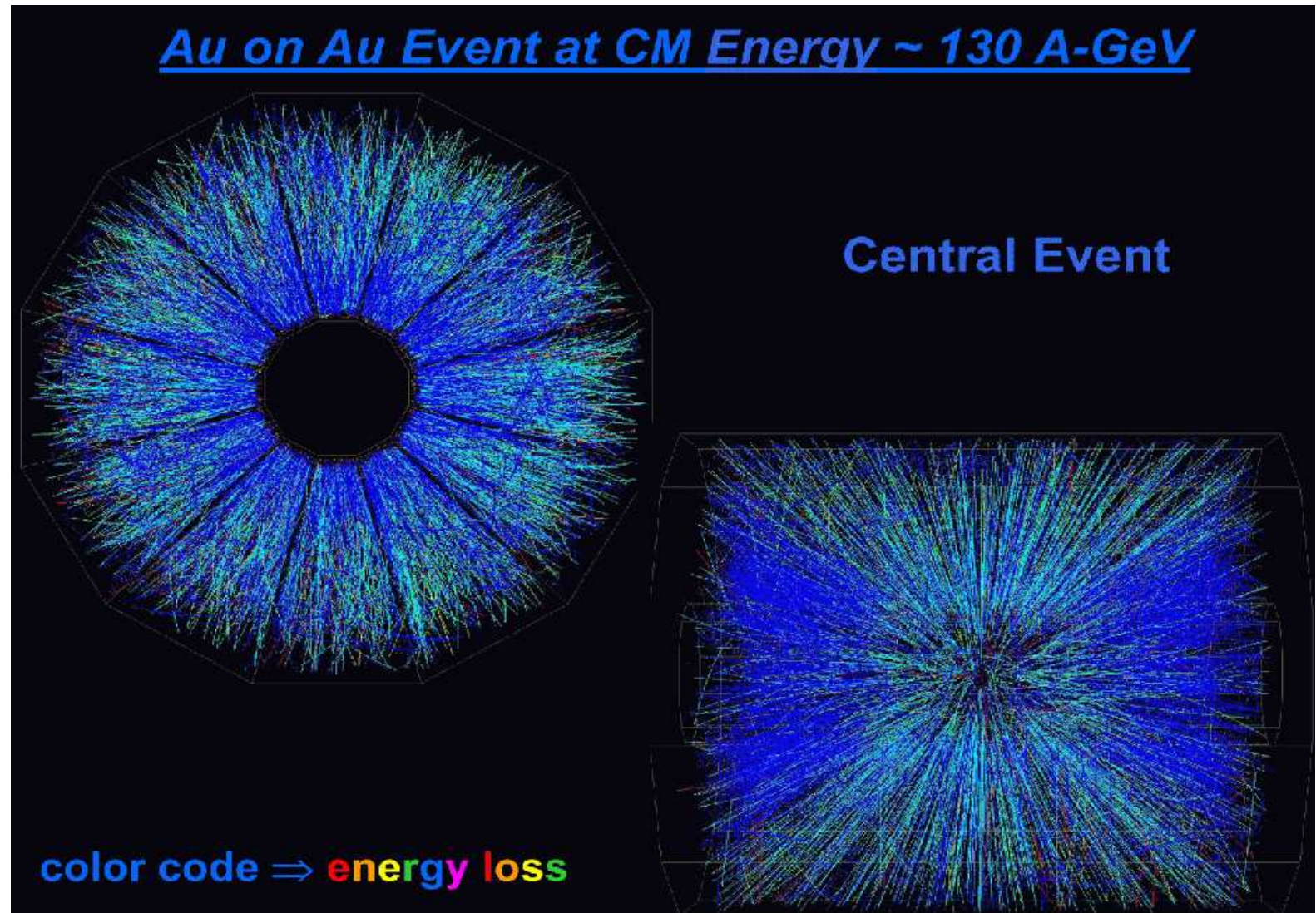
## Detektory gazowe

### TPC

Komora  
projekcji  
czasowej

Przypadek  
zderzenia  
ciężkich  
jonów

detektor  
STAR  
przy RHIC





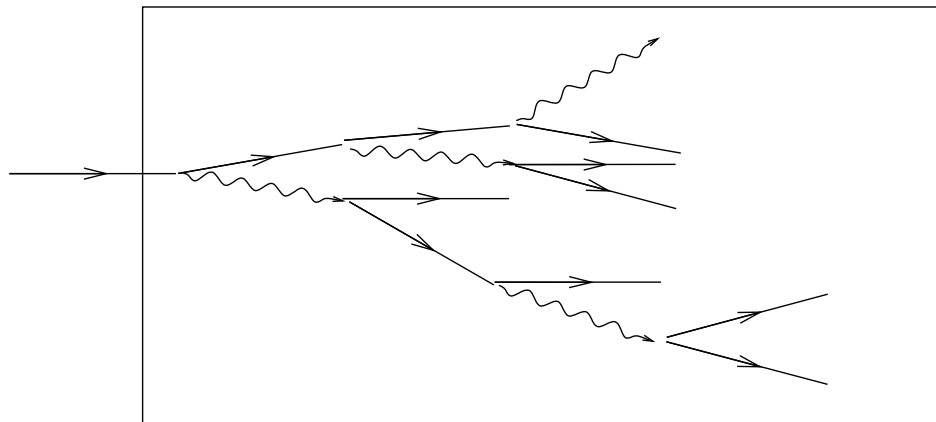
# Detekcja cząstek

## Kalorymetry

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

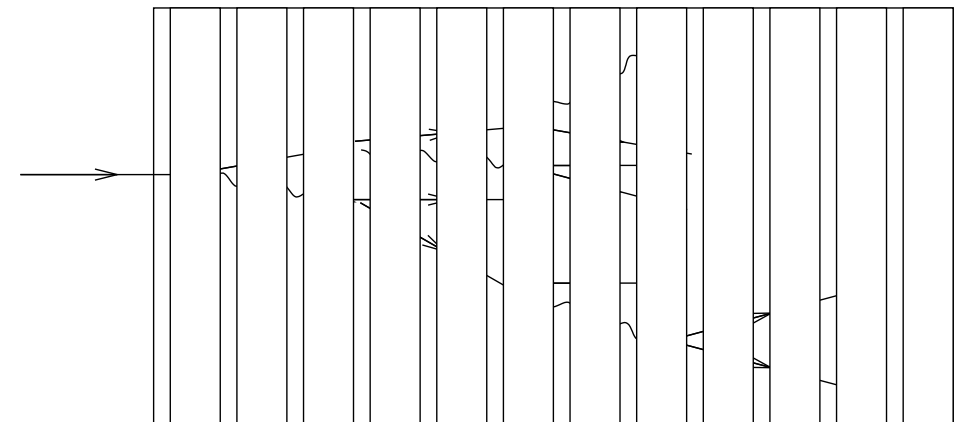
Mierząc liczbę cząstek lub całkowitą długość torów (całkowaną jonizację) możemy dokładnie określić energię cząstki początkowej

### Kalorymetr jednorodny



np. blok scyntyлятора

### Kalorymetr próbkujący

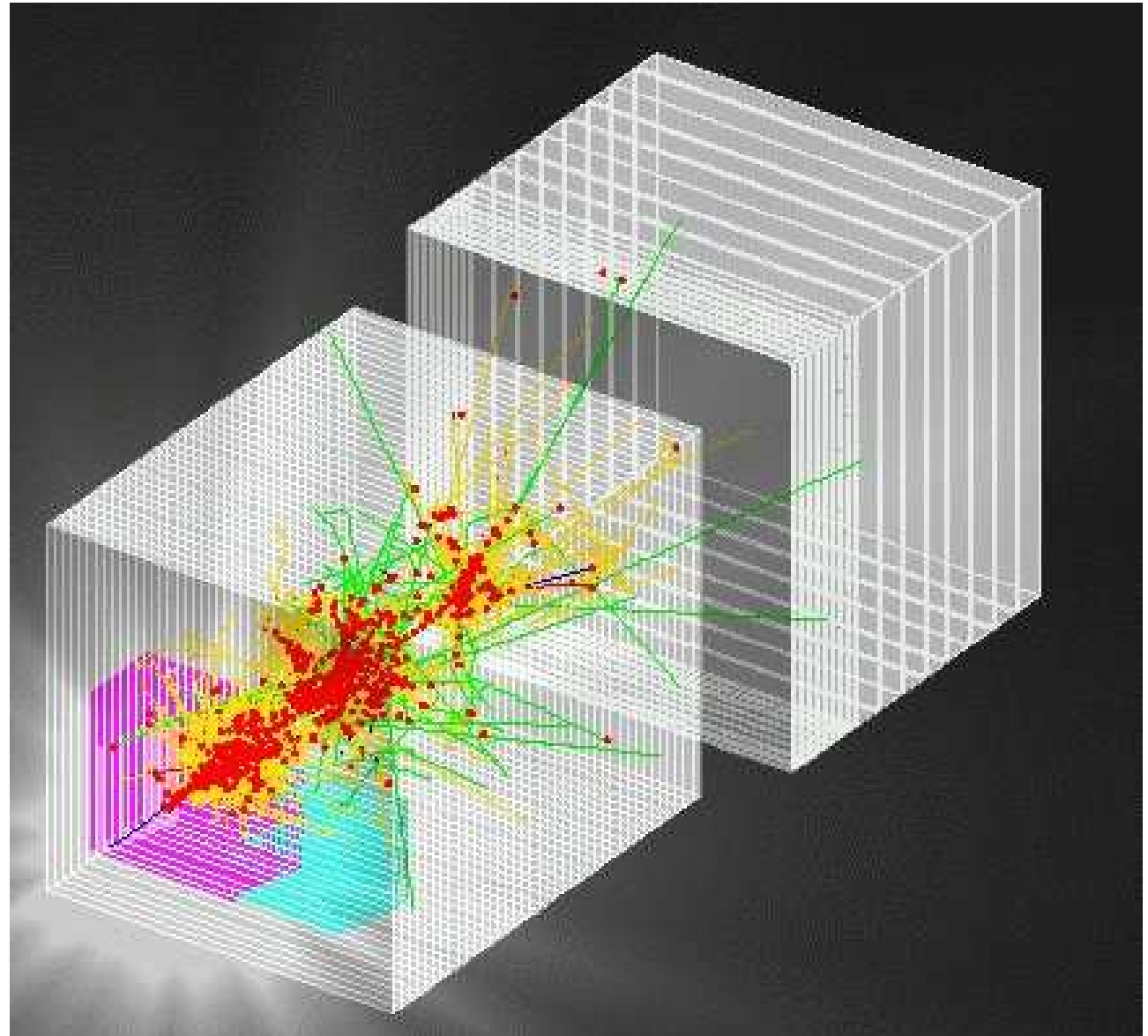


warstwy detektora na przemian z gęstym absorberem

# Detekcja cząstek

## *Kalorymetry*

Symulacja rozwoju  
kaskady hadronowej  
(pomiar energii protonu)



# Współczesne eksperymenty

## *Detektory są jak ogry...*

Ogry są jak cebula...

Cebula ma warstwy...

Ogry mają warstwy...

Detektory mają warstwy...



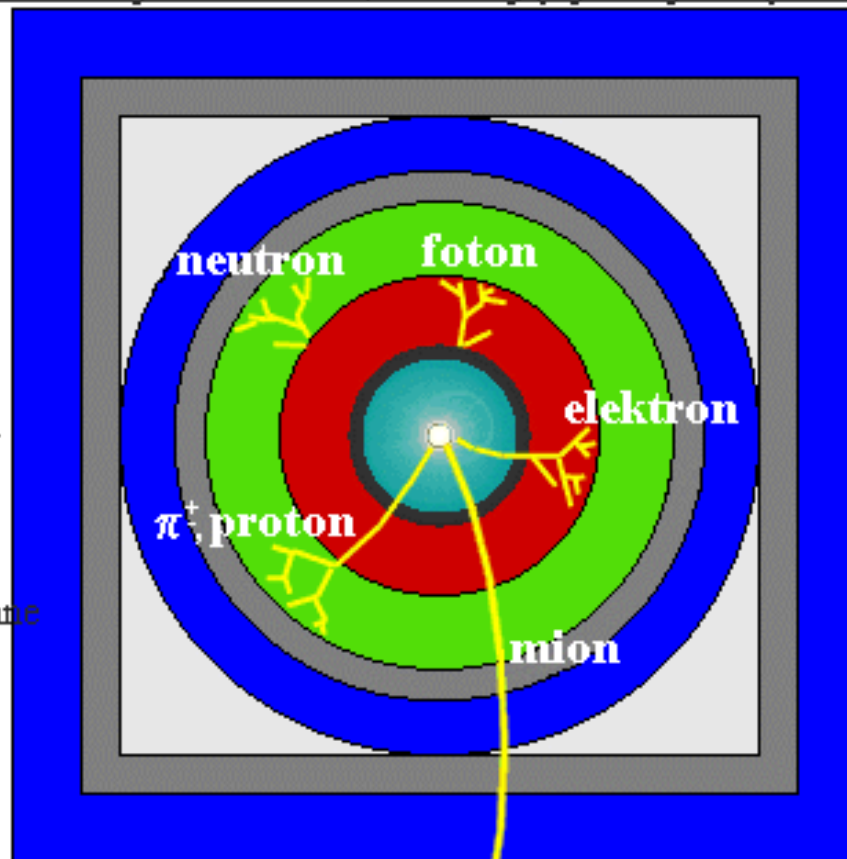
# Współczesne eksperymenty

## Struktura warstwowa

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

Przekrój poprzeczny detektora, ilustrujący torry cząstek

- rura dryfowa
- komora trakera
- solenoid magnesu
- kalorymetr elektromagnetyczny
- kalorymetr hadronowy
- namagnesowane żelazo
- komory mionowe





# Współczesne eksperymenty

## ***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.

# Współczesne eksperymenty

## **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**.

# Współczesne eksperymenty

## **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**.

# Współczesne eksperymenty

## **Detektor uniwersalny**

Ten schemat opisuje większość współczesnych eksperymentów przy kolajderach (LEP, HERA, Tevatron, LHC, ILC):

**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)

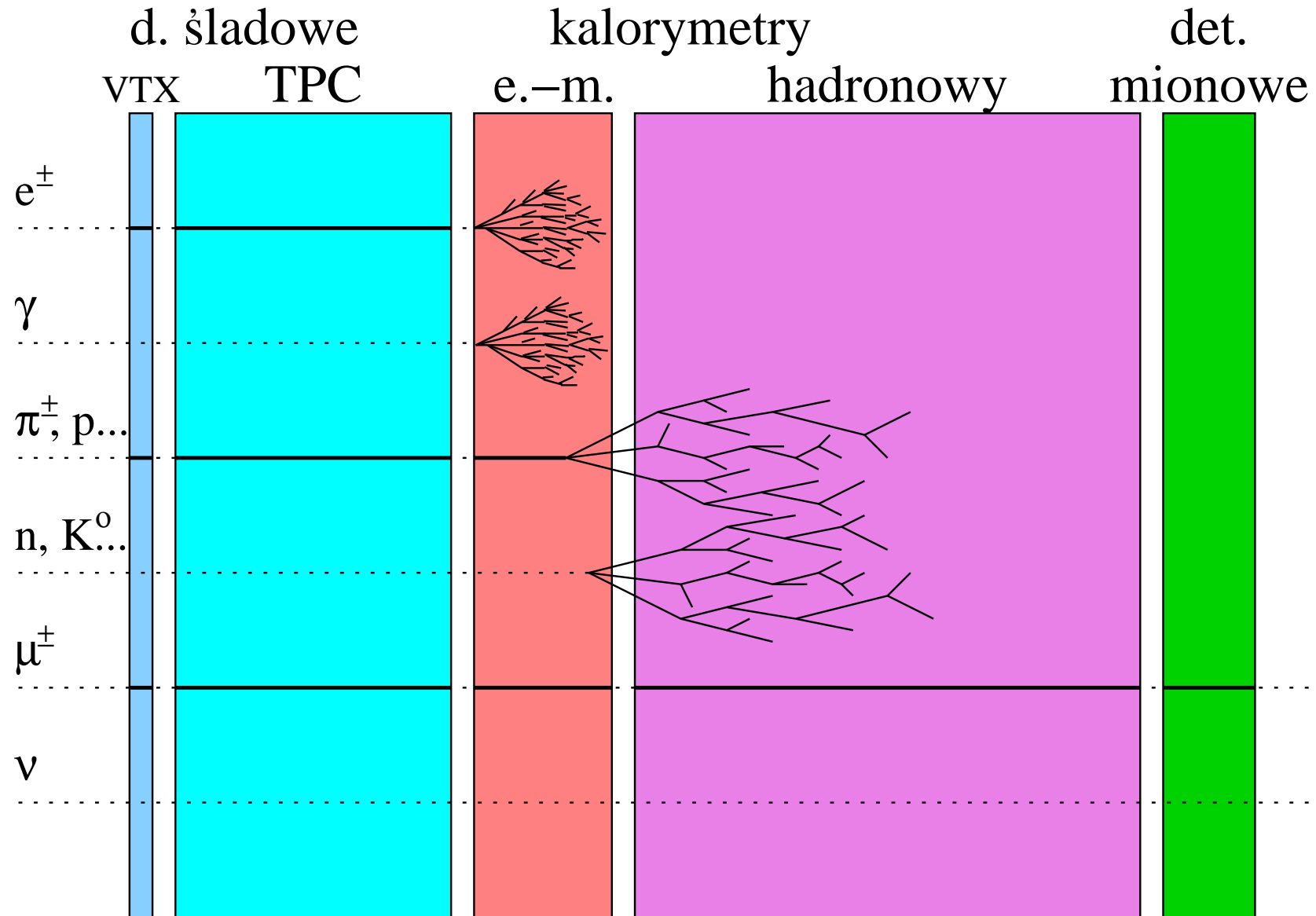


# Współczesne eksperymenty

## *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  
przejsć przez kalorymetry bez dużych strat energii

# Współczesne eksperymenty

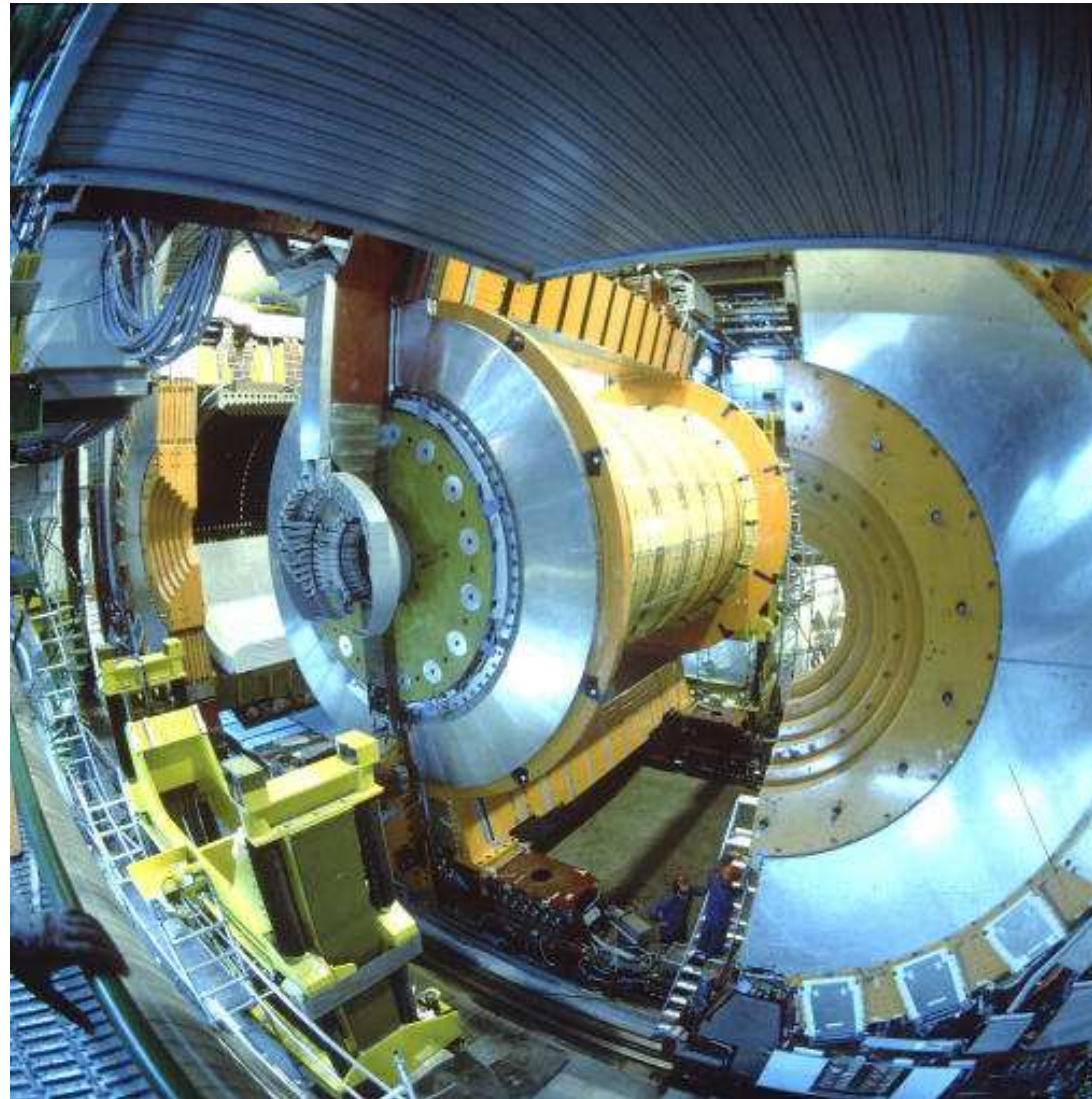


# Współczesne eksperymenty

## OPAL

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

1989-2000



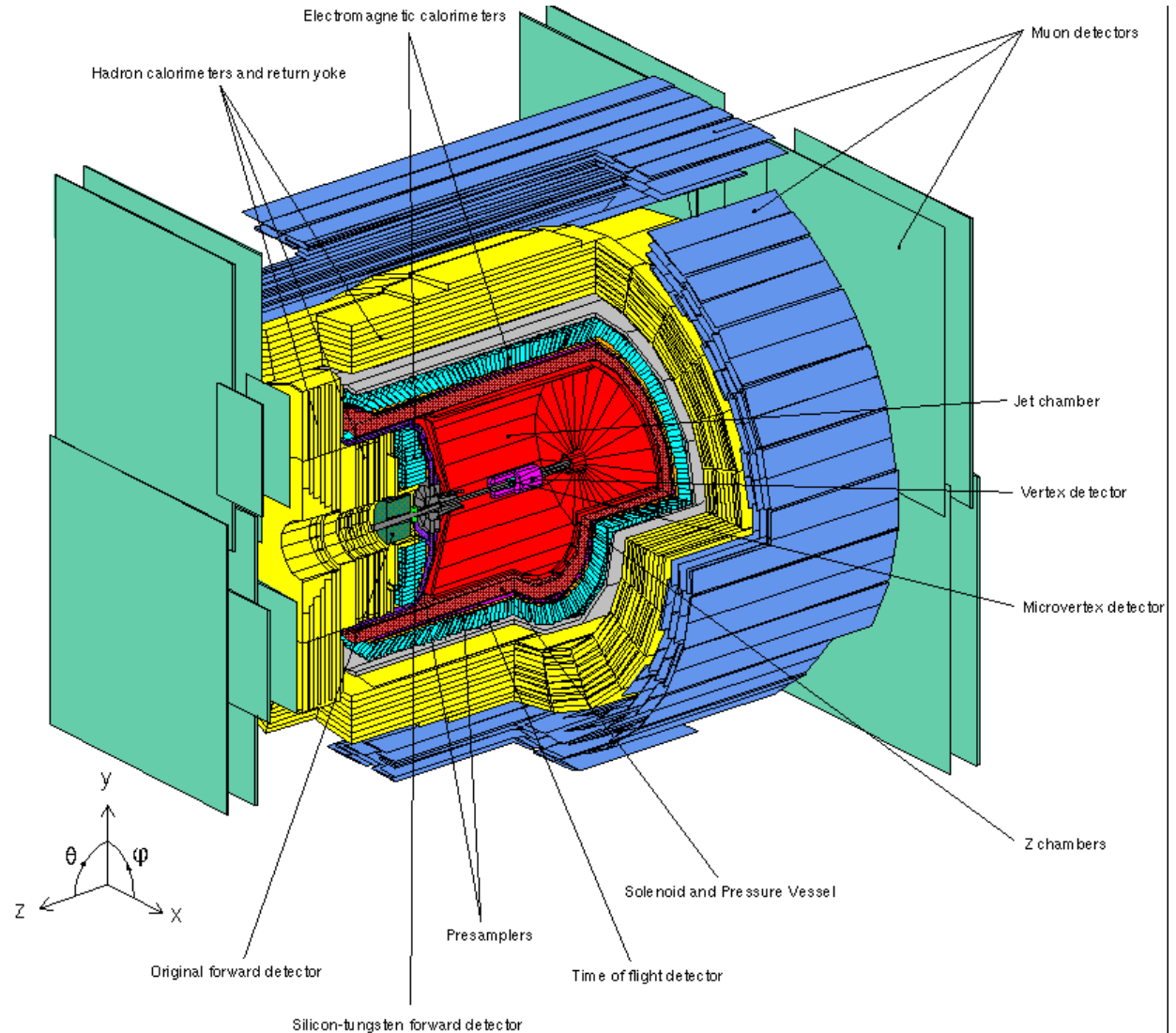
# Współczesne eksperymenty

**OPAL**



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

1989-2000





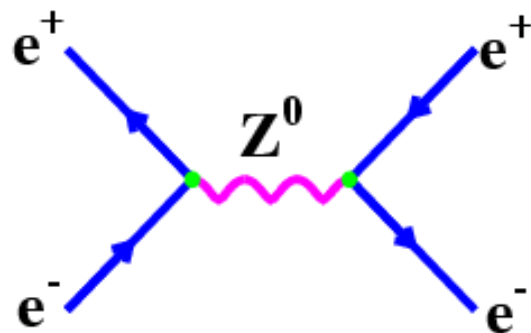
# Co rejestrują detektory

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

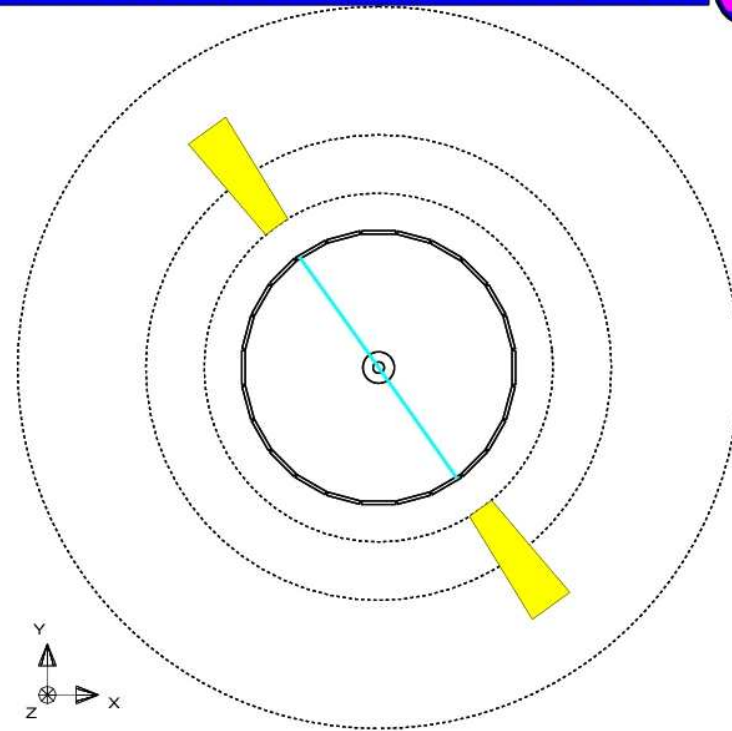
Co jest wynikiem zderzenia? Co pokazuje nam detektor?

Najprostszy przypadek

$$e^+e^- \longrightarrow e^+e^-$$



```
Run:event 5016: 331 Ctrk(N= 2 Sump= 95.6) Ecal(N= 2 SumE= 90.7)
Ebeam 45.62 Vtx (-.01, .04, .13) Hcal(N= 2 SumE= .5) Muon(N= 0)
```



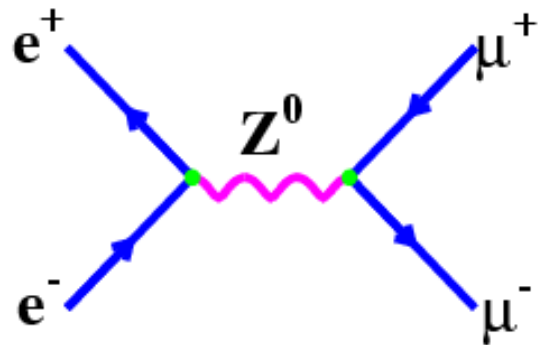
# Co rejestrują detektory

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

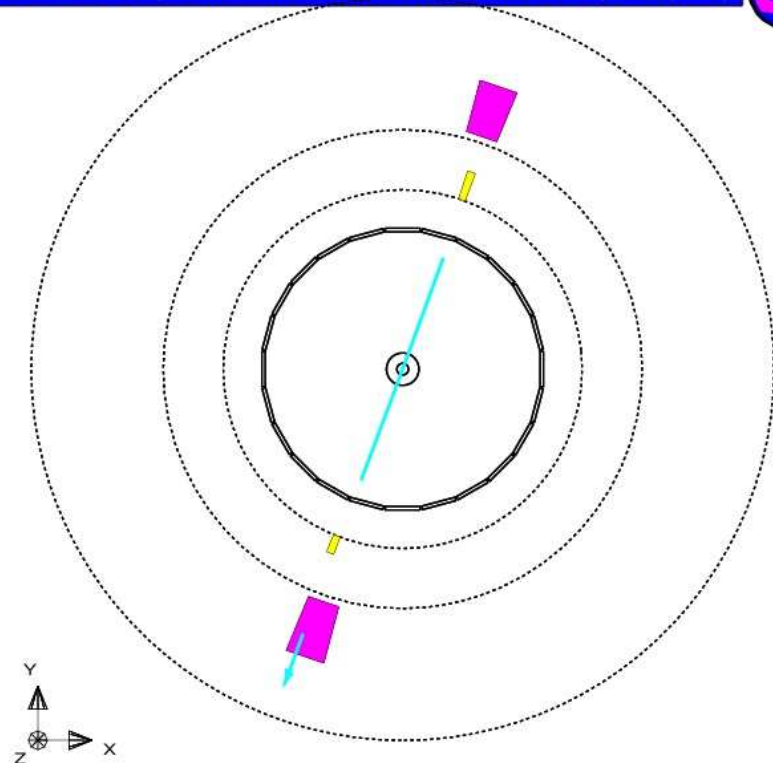
Co jest wynikiem zderzenia? Co pokazuje nam detektor?

Najprostszy przypadek

$$e^+e^- \longrightarrow \mu^+\mu^-$$



```
Run:event 5016: 572   Ctrk(N= 2 Stmp= 87.9) Ecal(N= 3 SumE= 3.6)
Ebeam 45.62 Vtx (-.01, -.04, -.13) Hcal(N= 5 SumE= 18.6) Muon(N= 1)
```



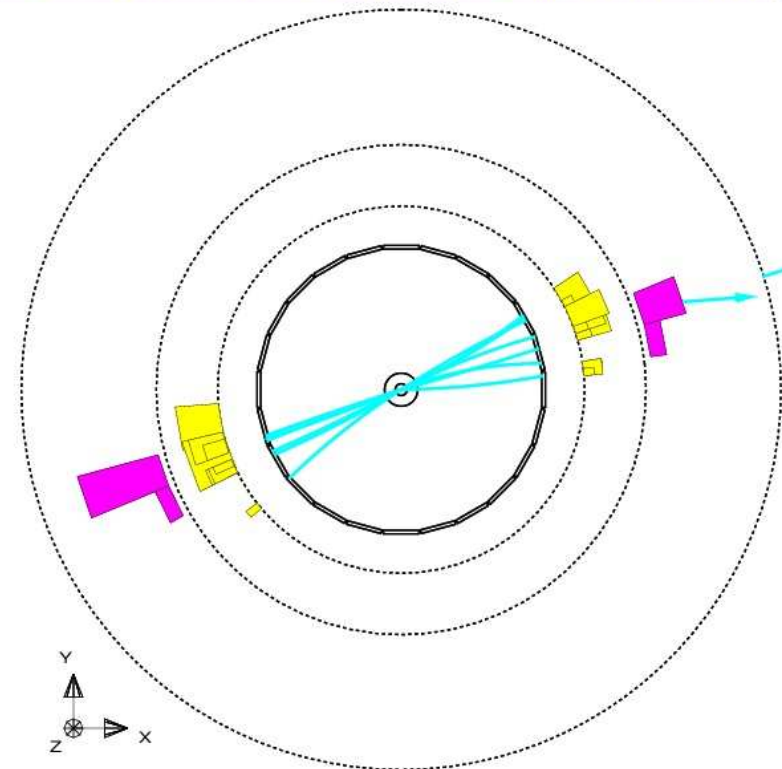
# Co rejestrują detektory

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

W około 10% przypadków widzimy powstające elektrony lub miony

A jak interpretować taki przypadek?

```
Run-event 5014: 432 Ctrk(N= 22 Sump= 42.6) Ecal(N= 26 SumE= 40.3)
Ebeam 45.62 Vtx (-.43, -.05, 6.47) Hcal(N=20 SumE= 27.8) Muon(N= 2)
```



# Co rejestrują detektory

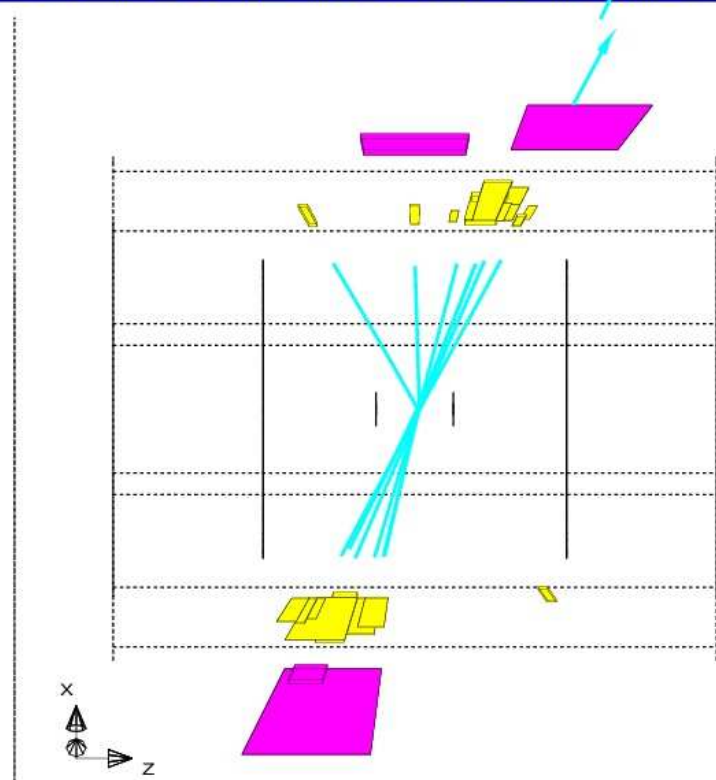
W akceleratorze **LEP** zderzano elektrony i pozytony przy energii dostępnej  $\sqrt{s} = 90 - 210 GeV$ .

W około 10% przypadków widzimy powstające elektrony lub miony

A jak interpretować taki przypadek?

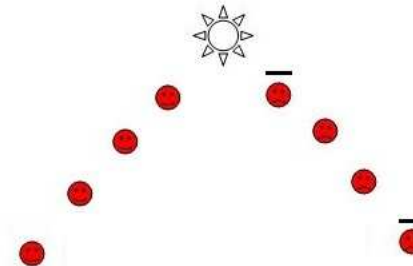
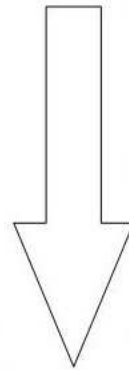
Produkowanych jest wiele cząstek, ale układają się w wyraźne “strugi”  
(ang.: jety)

```
Run:event 5014: 432 Ctrk(N= 22 Sump= 42.6) Ecal(N= 26 SumE= 40.3)
Ebeam 45.62 Vtx ( -0.43, -0.05, 6.47) Hcal(N=20 SumE= 27.8) Muon(N= 2)
```



# Hadronizacja

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

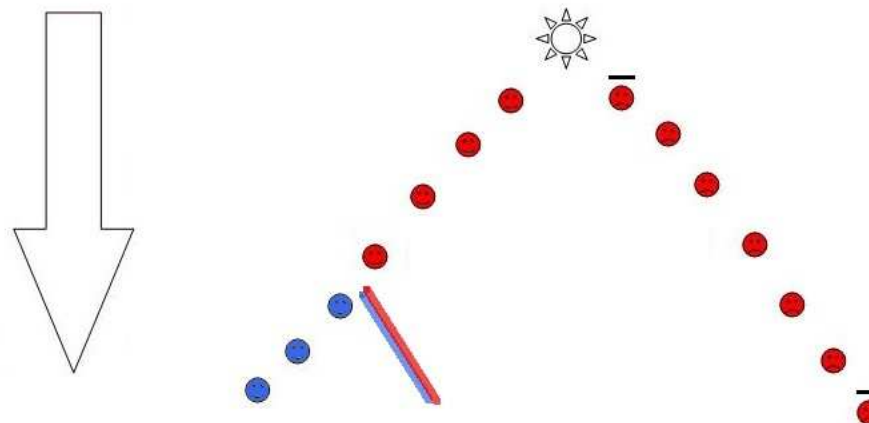




# Hadronizacja

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

Kwarki oddalają się od siebie, rośnie oddziaływanie kolorowe

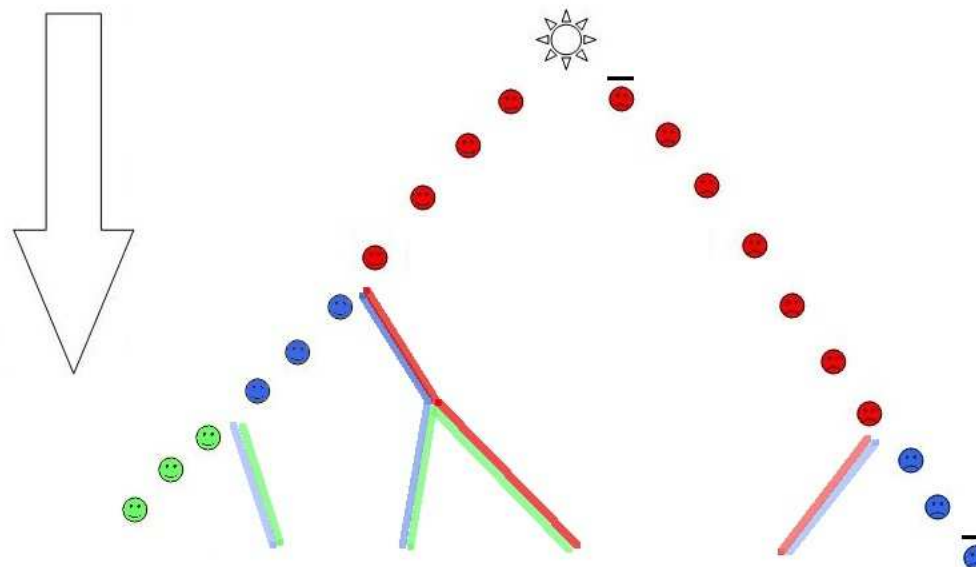


# Hadronizacja

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

Kwarki oddalają się od siebie, rośnie oddziaływanie kolorowe

Dochodzi do emisji gluonów



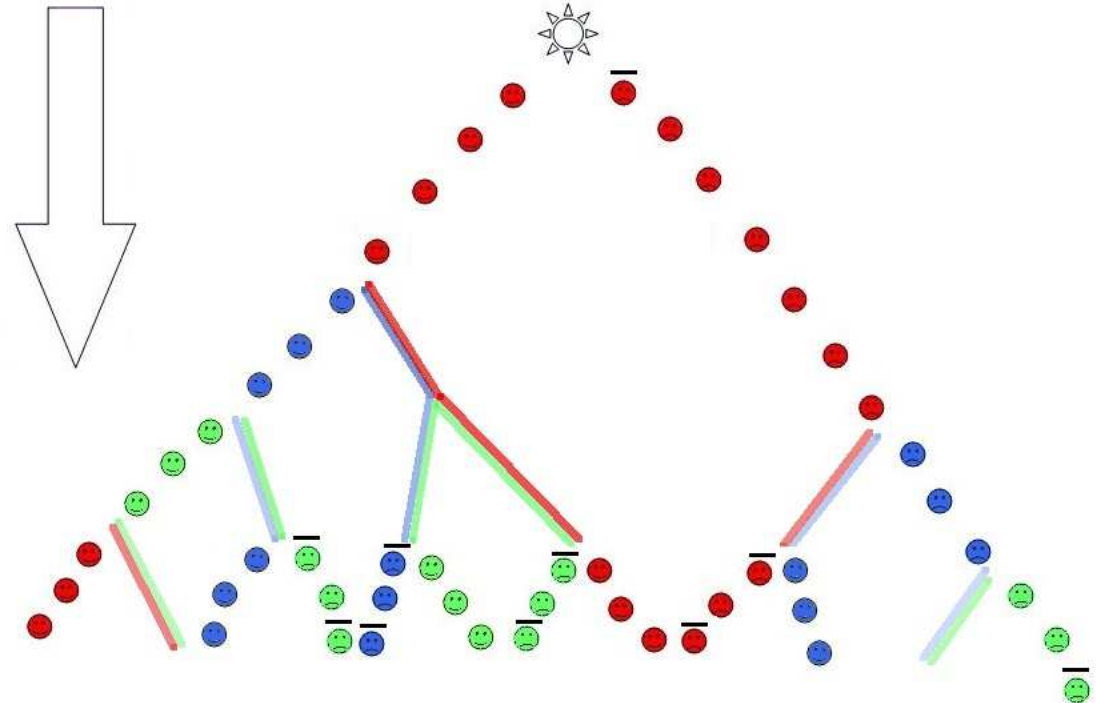
# Hadronizacja

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-antykwarek



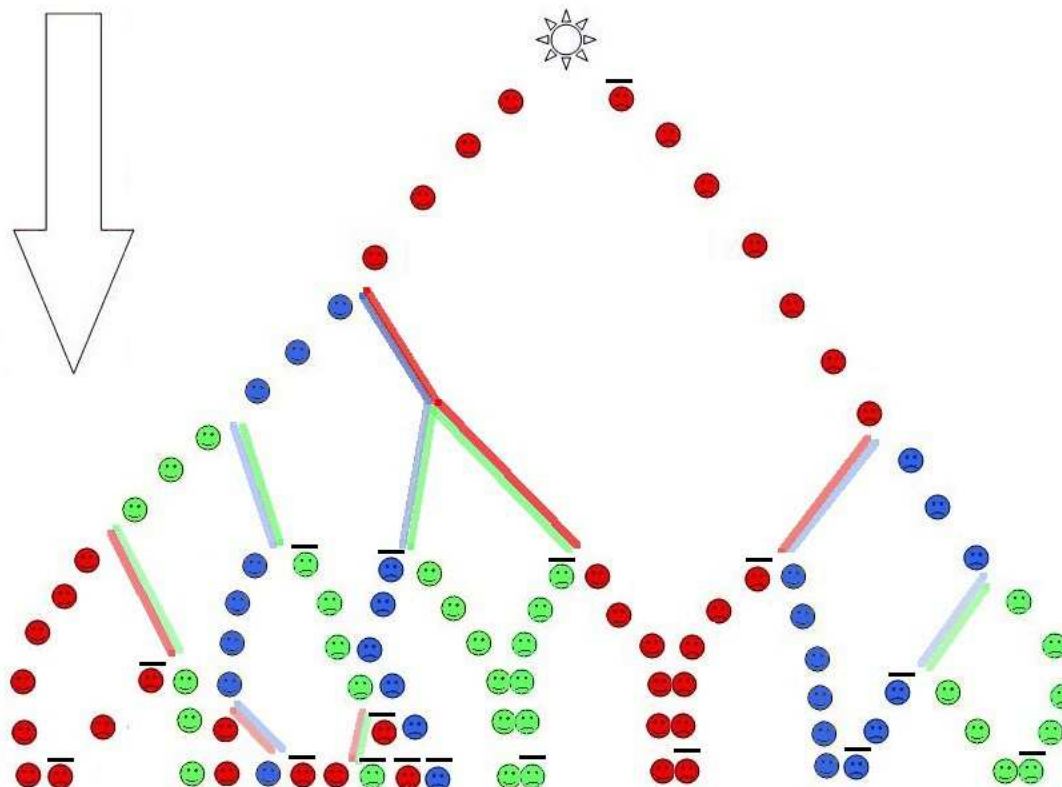
# Hadronizacja

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



# Hadronizacja

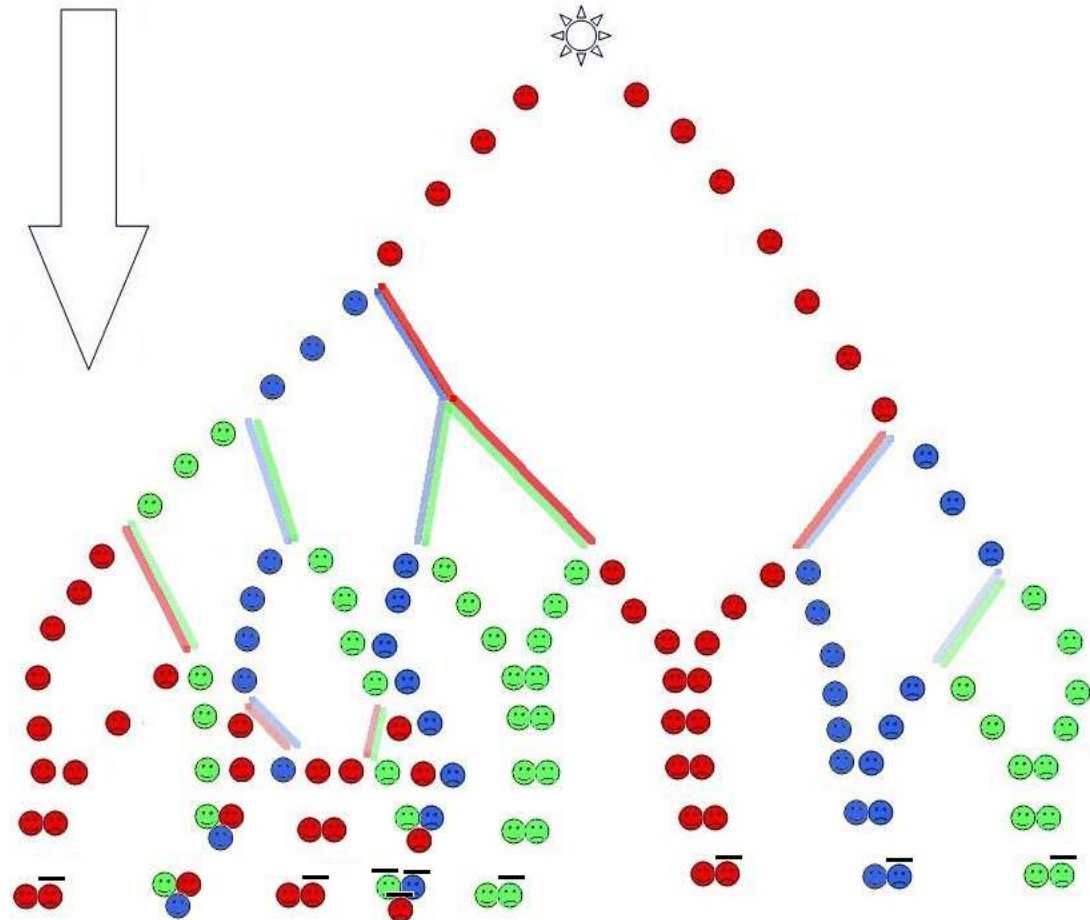
W zderzeniu powstaje para kwarków:  $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$

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

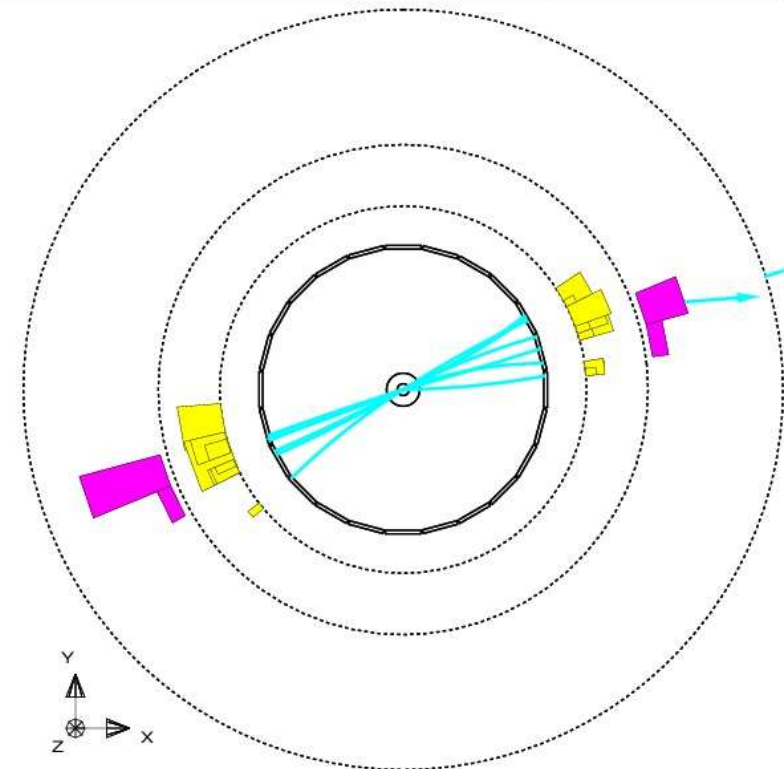
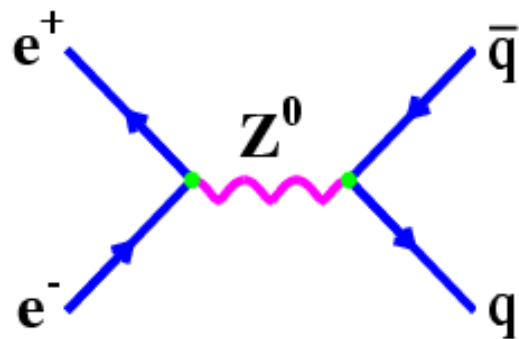
W akceleratorze **LEP** zderzano elektrony i pozytony przy energii dostępnej  $\sqrt{s} = 90 - 210 GeV$ .

W prawie 90% przypadków widzimy powstające jety hadronowe.

Naogół powstają 2 jety

```
Run-event 5014: 432 Ctrk(N= 22 SumP= 42.6) Ecal(N= 26 SumE= 40.3)
Ebeam 45.62 Vtx (-.43, -.05, 6.47) Hcal(N=20 SumE= 27.8) Muon(N= 2)
```

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



# Co rejestrują detektory

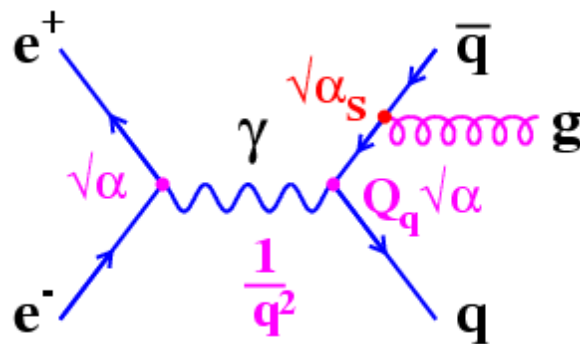
W akceleratorze **LEP** zderzano elektrony i pozytony przy energii dostępnej  $\sqrt{s} = 90 - 210 GeV$ .

W prawie 90% przypadków widzimy powstające jety hadronowe.

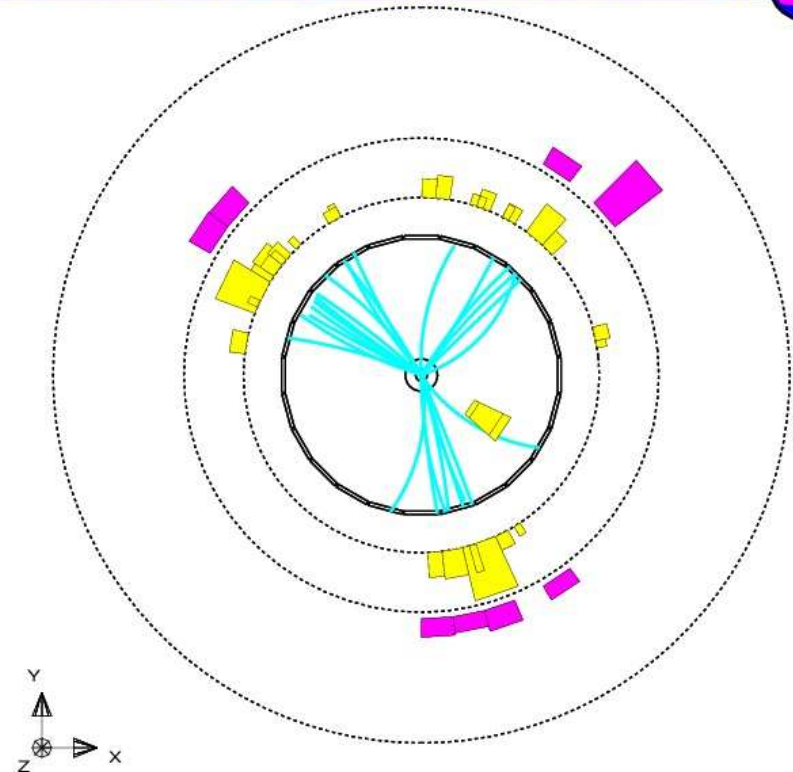
Naogół powstają 2 jety

Ale możliwe też:

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



```
Run:event 5014: 554      Ctrk(N= 36 SumE= 55.8) Ecal(N= 49 SumE= 47.5)
Ebeam 45.62 Vtx (-.02, -.05, -.02) Hcal(N=24 SumE= 21.5) Muon(N= 0)
```

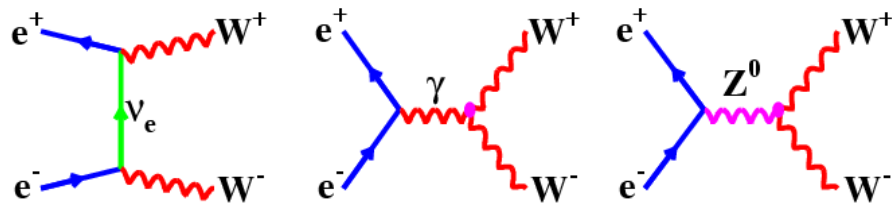


# Co rejestrują detektory

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

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

Trzy możliwe diagramy:

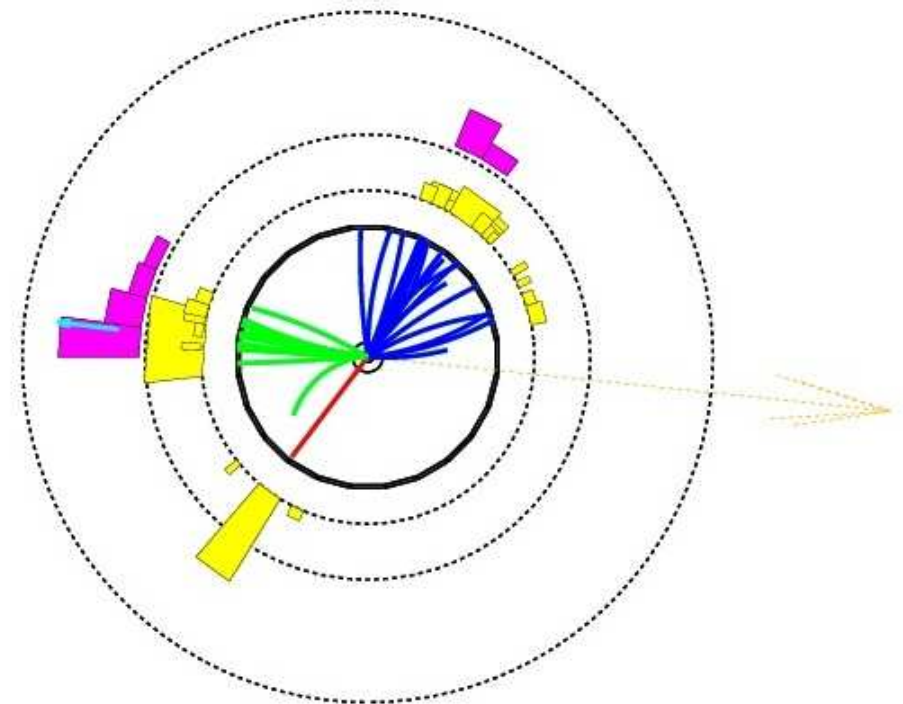


W przedstawionym przypadku

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

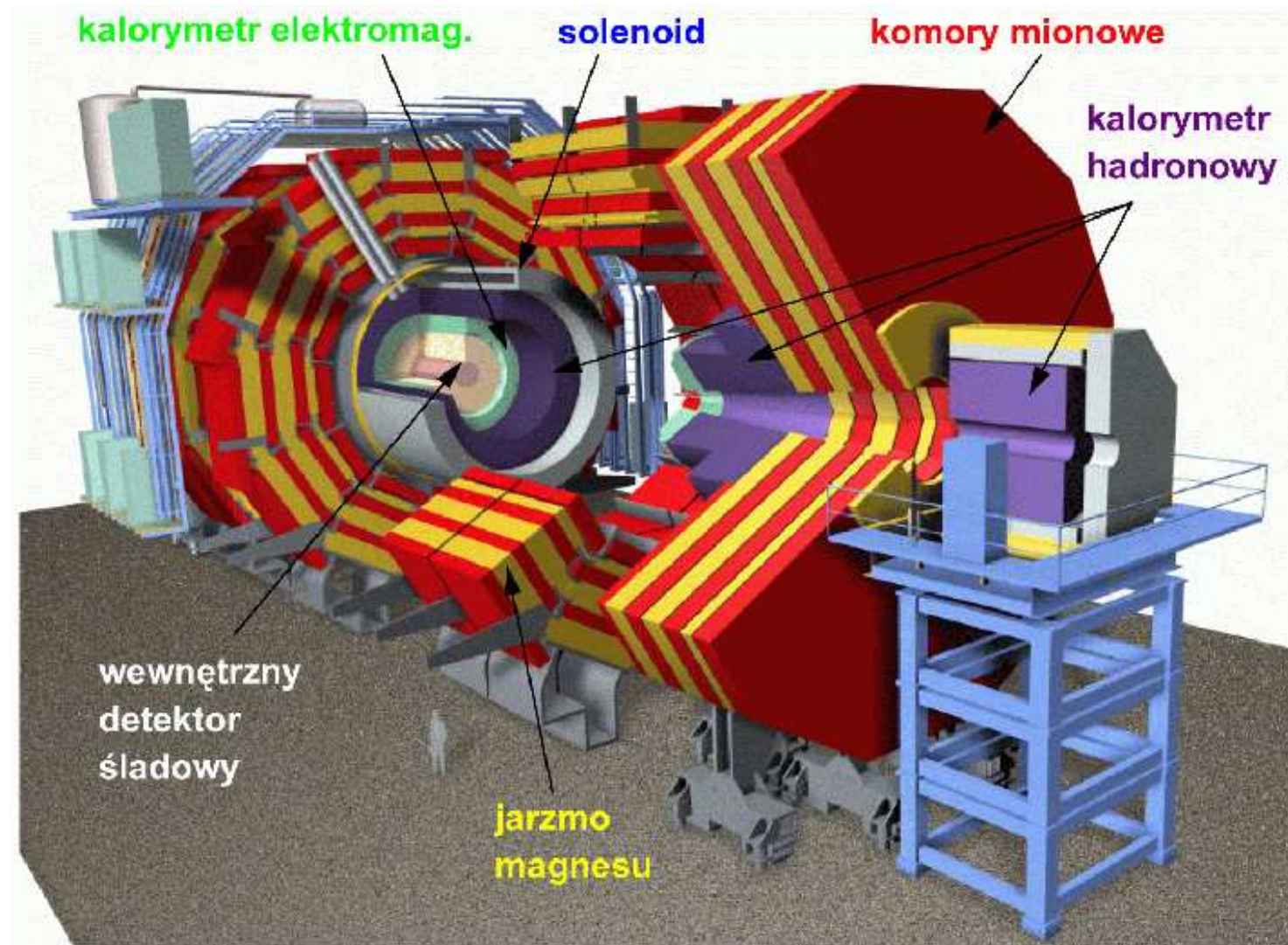
$$W^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$$

neutrino rekonstruujemy z zasady zachowania energii i pędu



# Współczesne eksperymenty

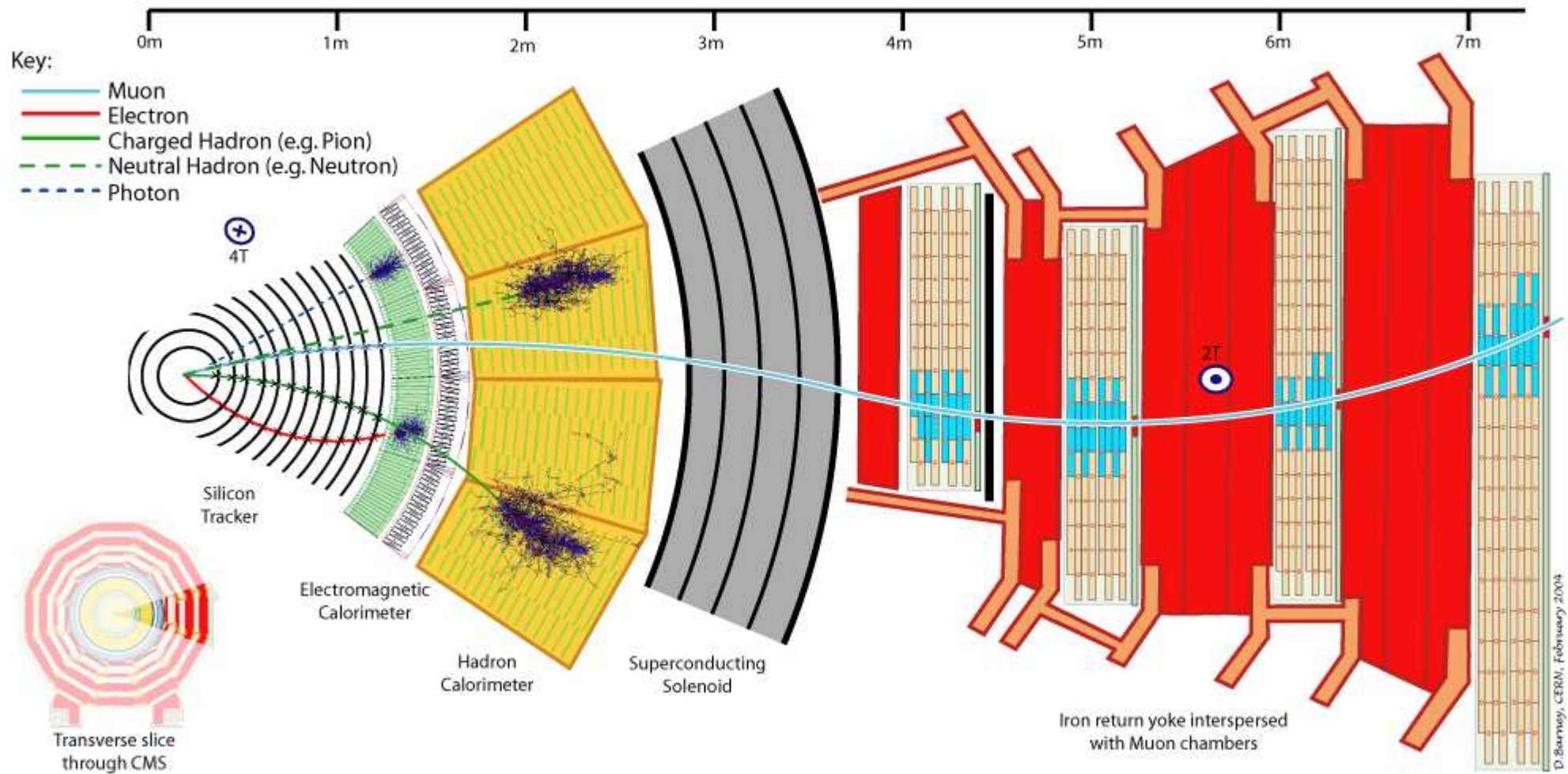
## Compact Muon Solenoid - CMS





# Współczesne eksperymenty

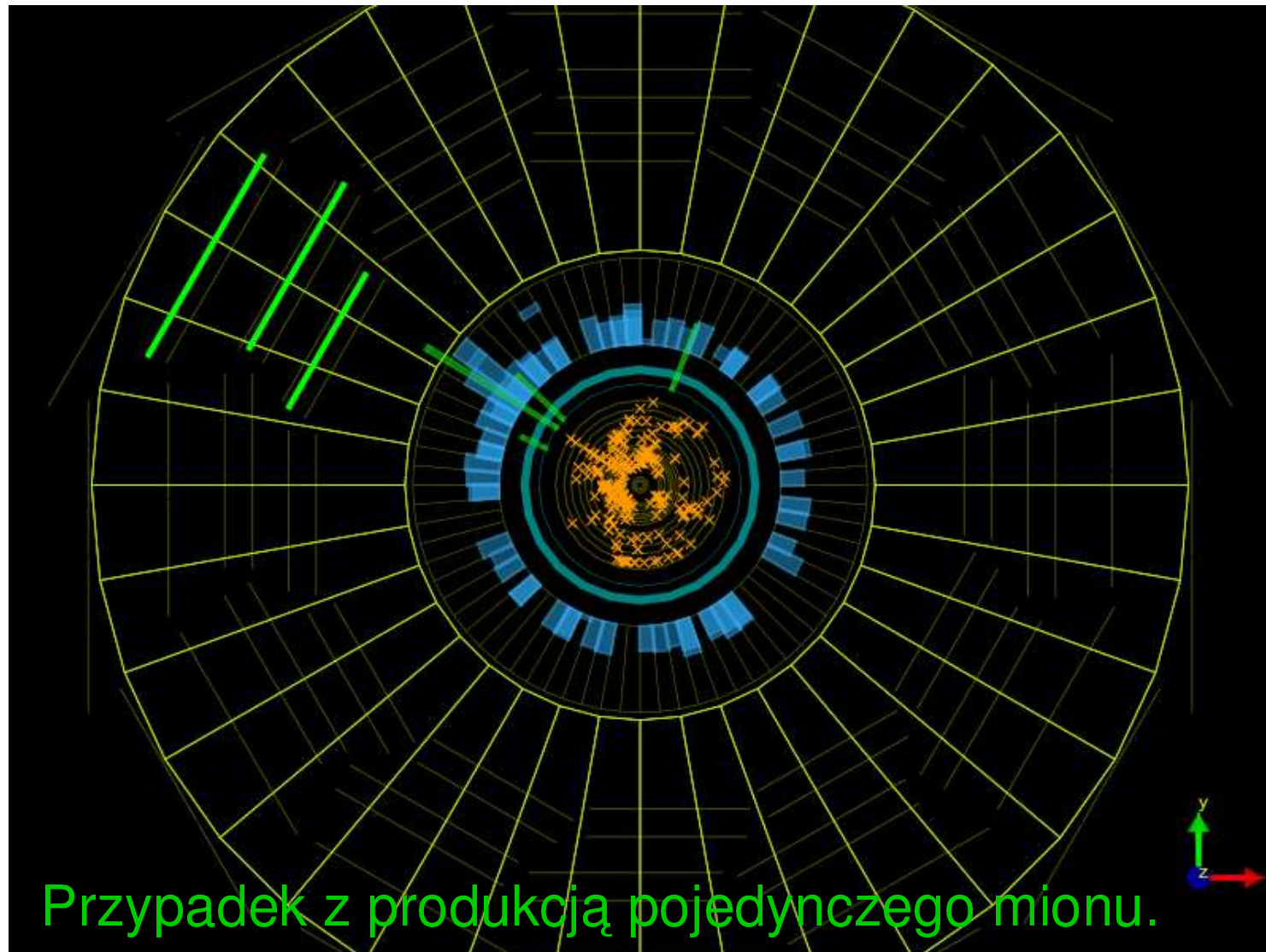
## Compact Muon Solenoid - CMS





# Współczesne eksperymenty

## Compact Muon Solenoid - CMS



# Współczesne eksperymenty

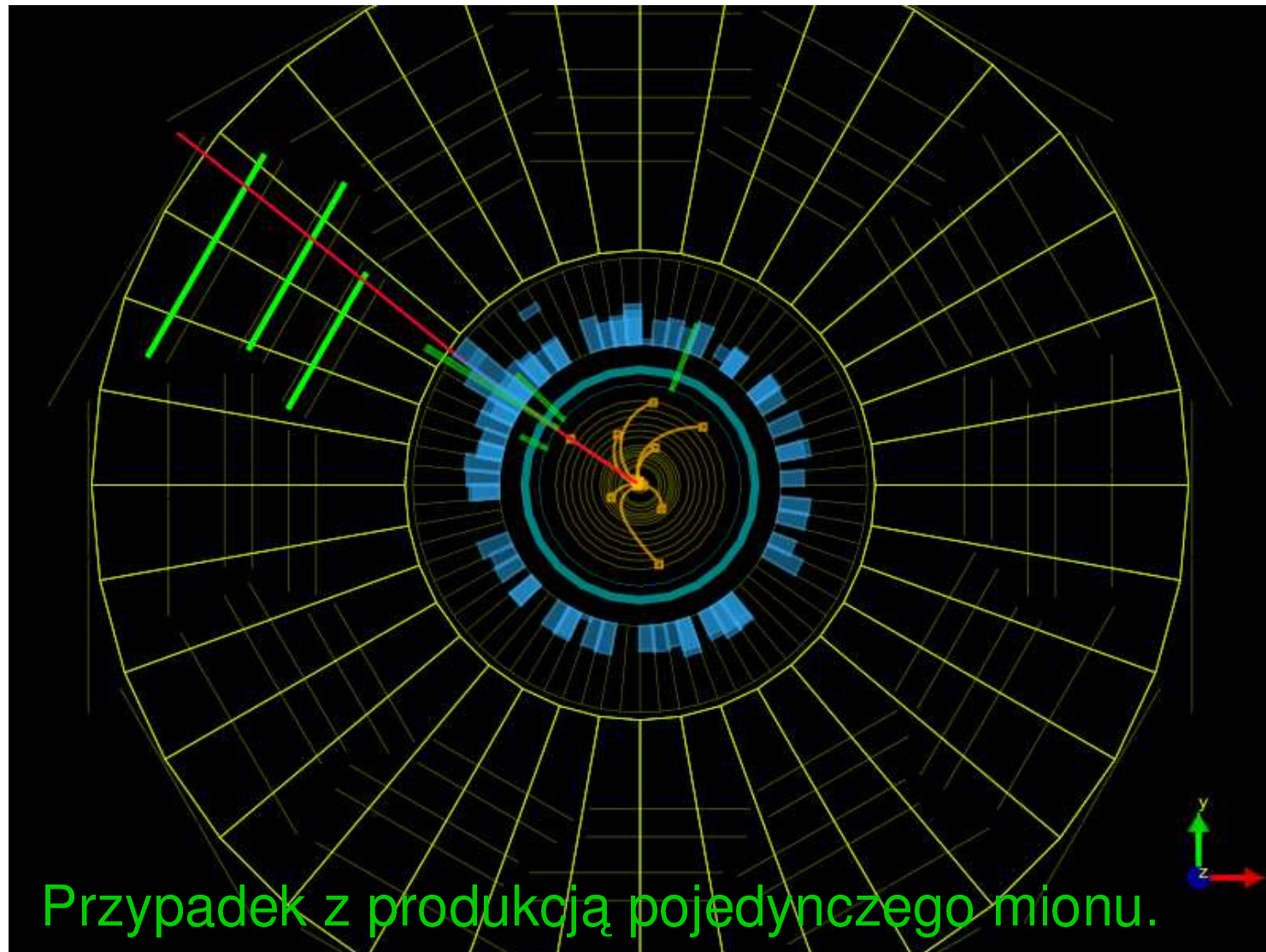
## Compact Muon Solenoid - CMS





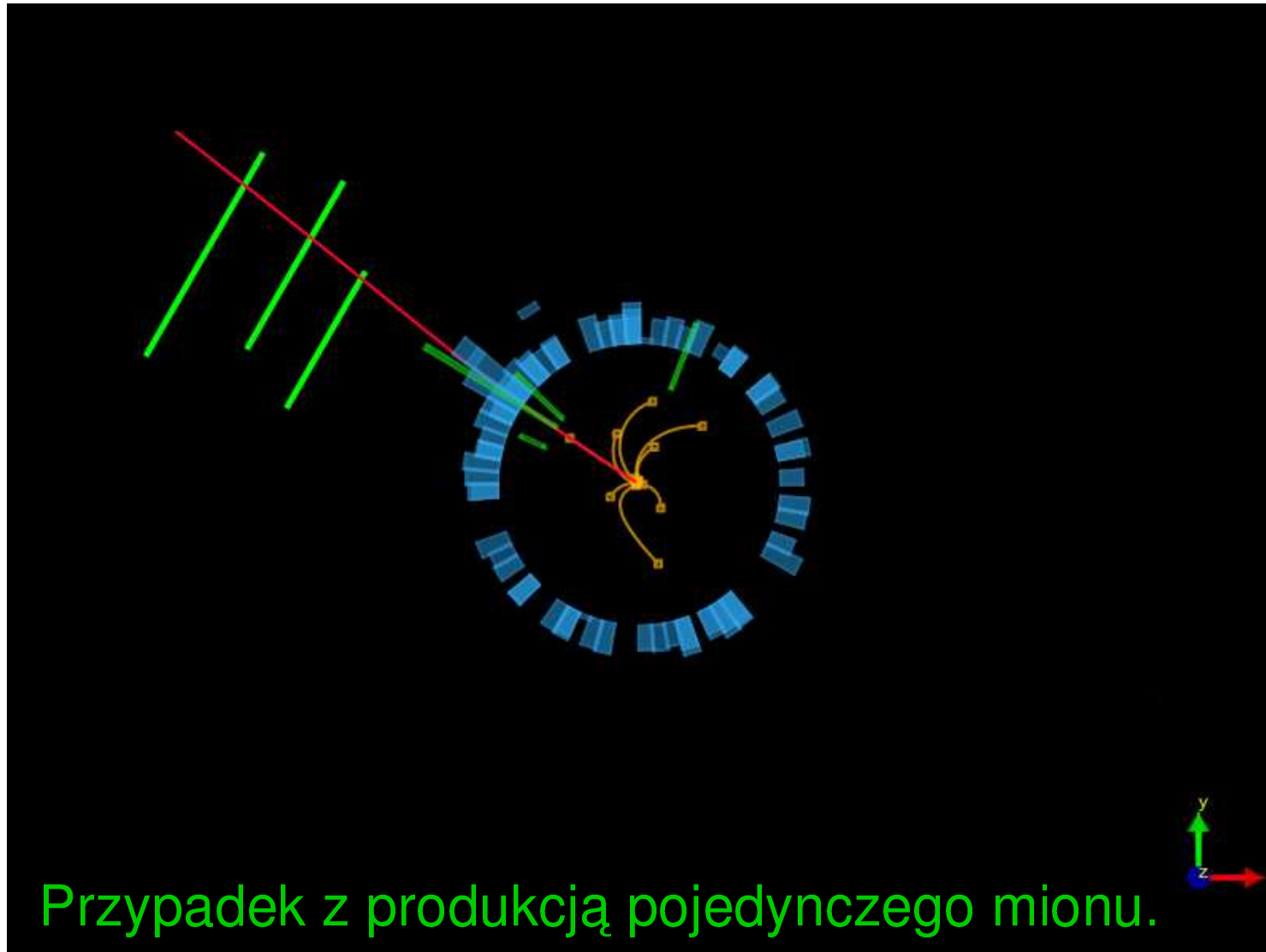
# Współczesne eksperymenty

## Compact Muon Solenoid - CMS



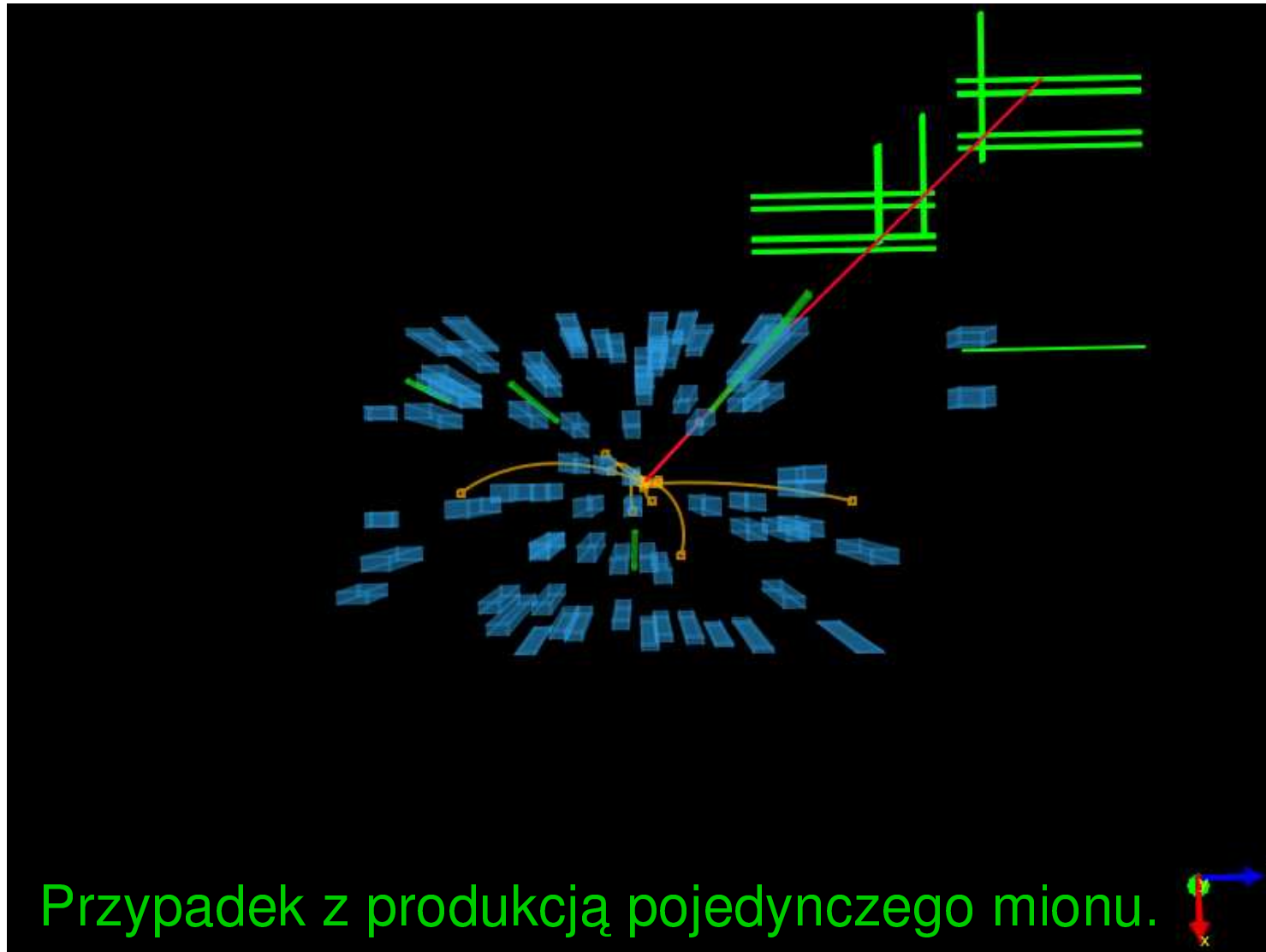
# Współczesne eksperymenty

## Compact Muon Solenoid - CMS



# Współczesne eksperymenty

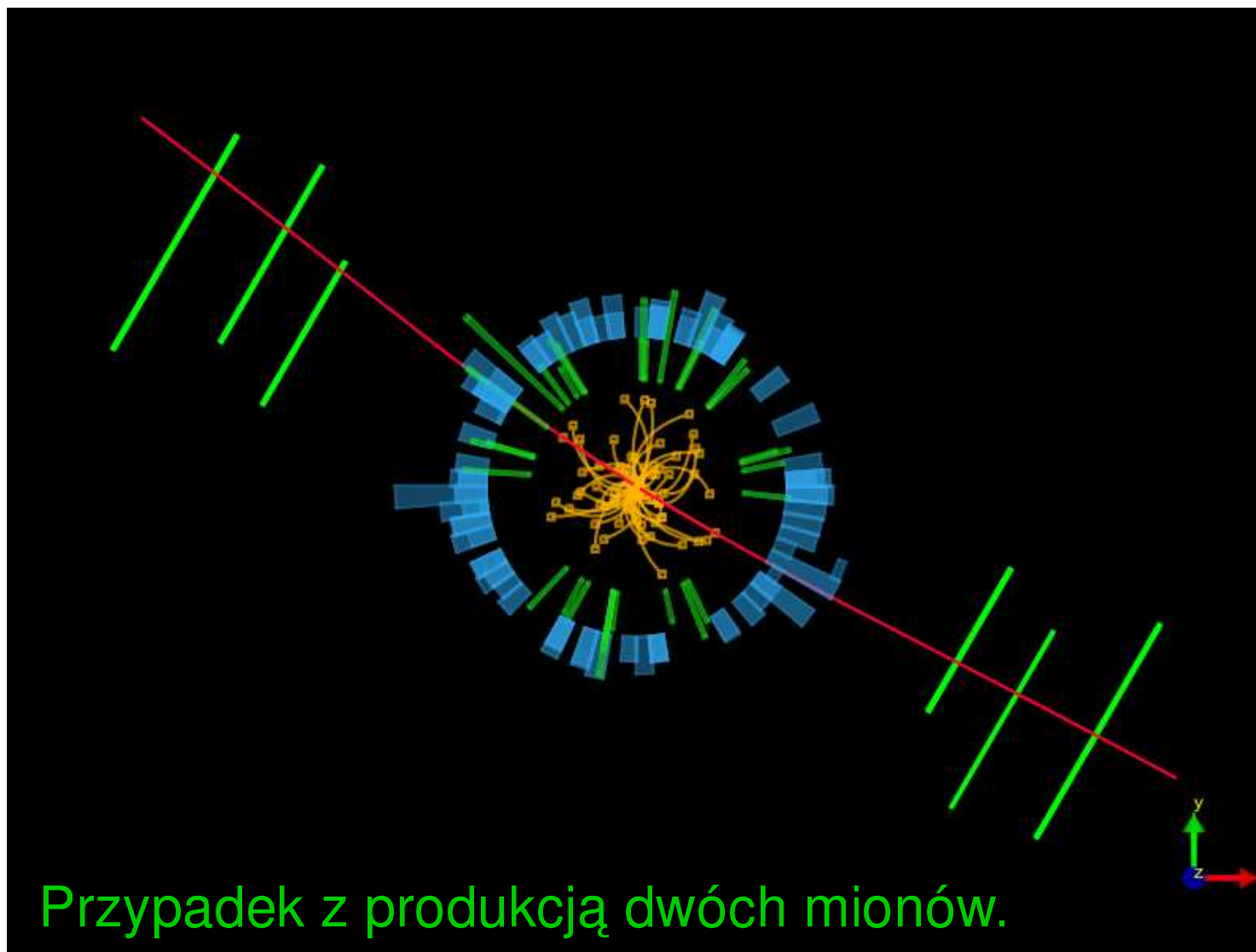
## Compact Muon Solenoid - CMS





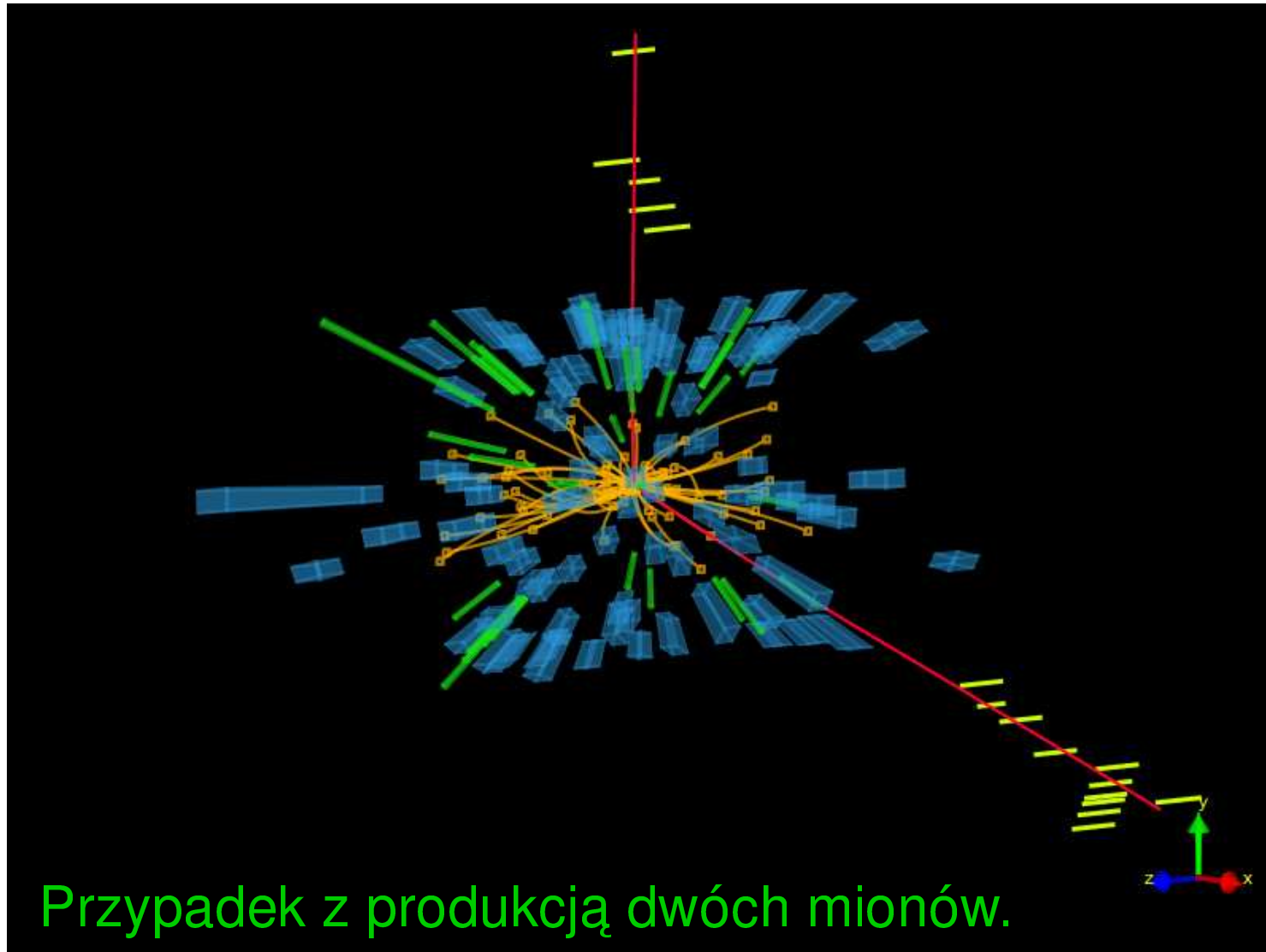
# Współczesne eksperymenty

## Compact Muon Solenoid - CMS



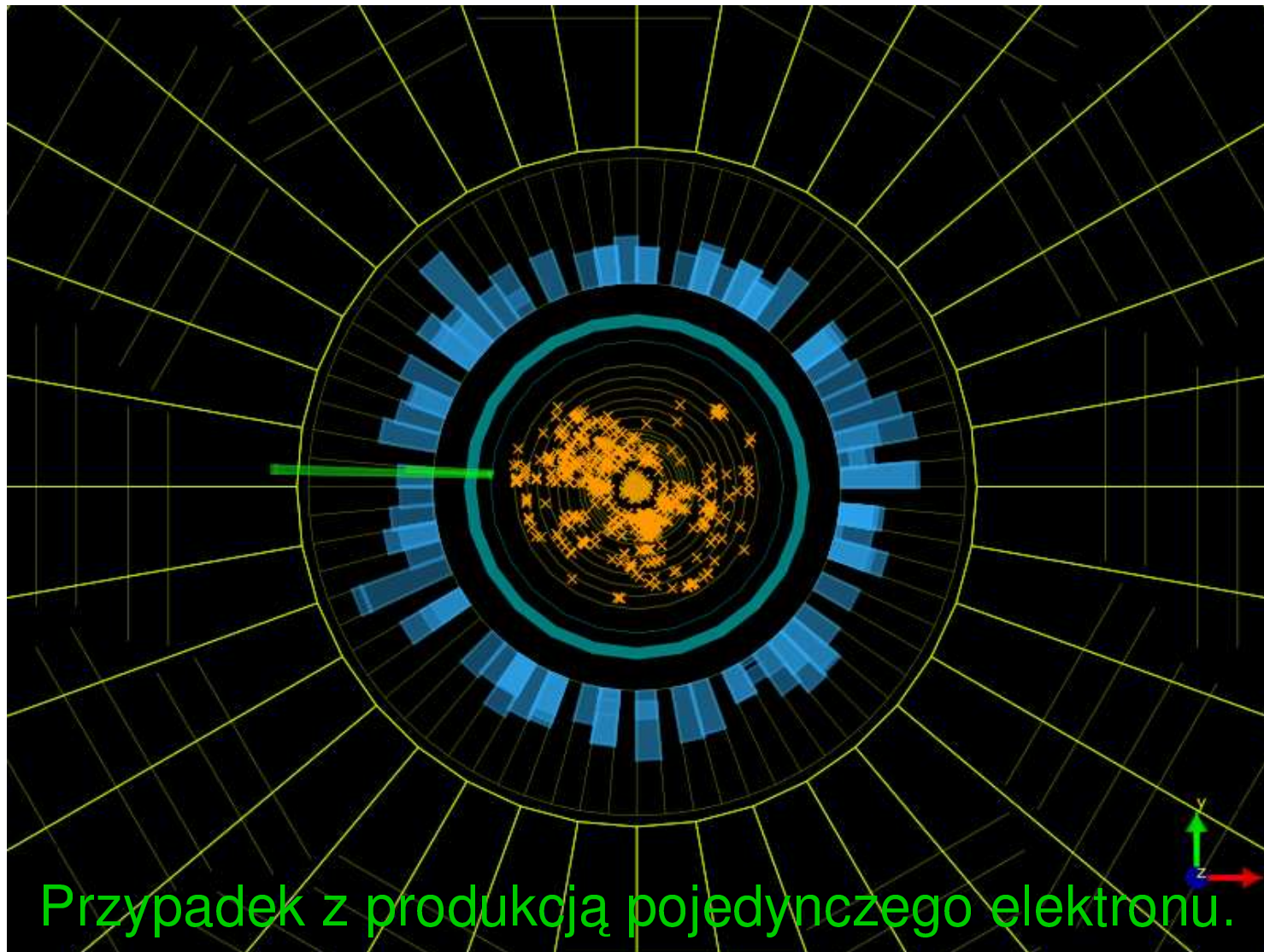
# Współczesne eksperymenty

## Compact Muon Solenoid - CMS



# Współczesne eksperymenty

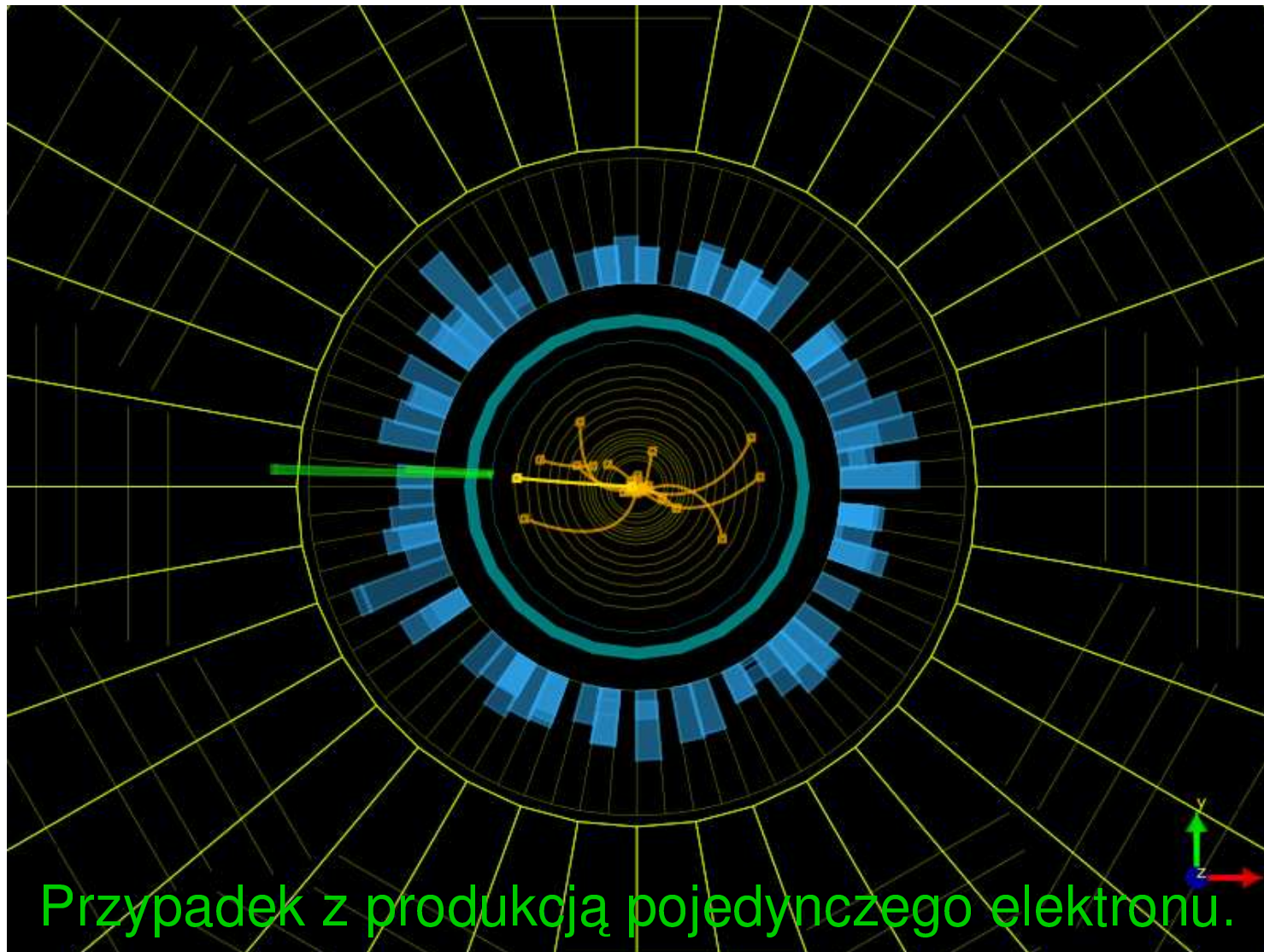
## Compact Muon Solenoid - CMS





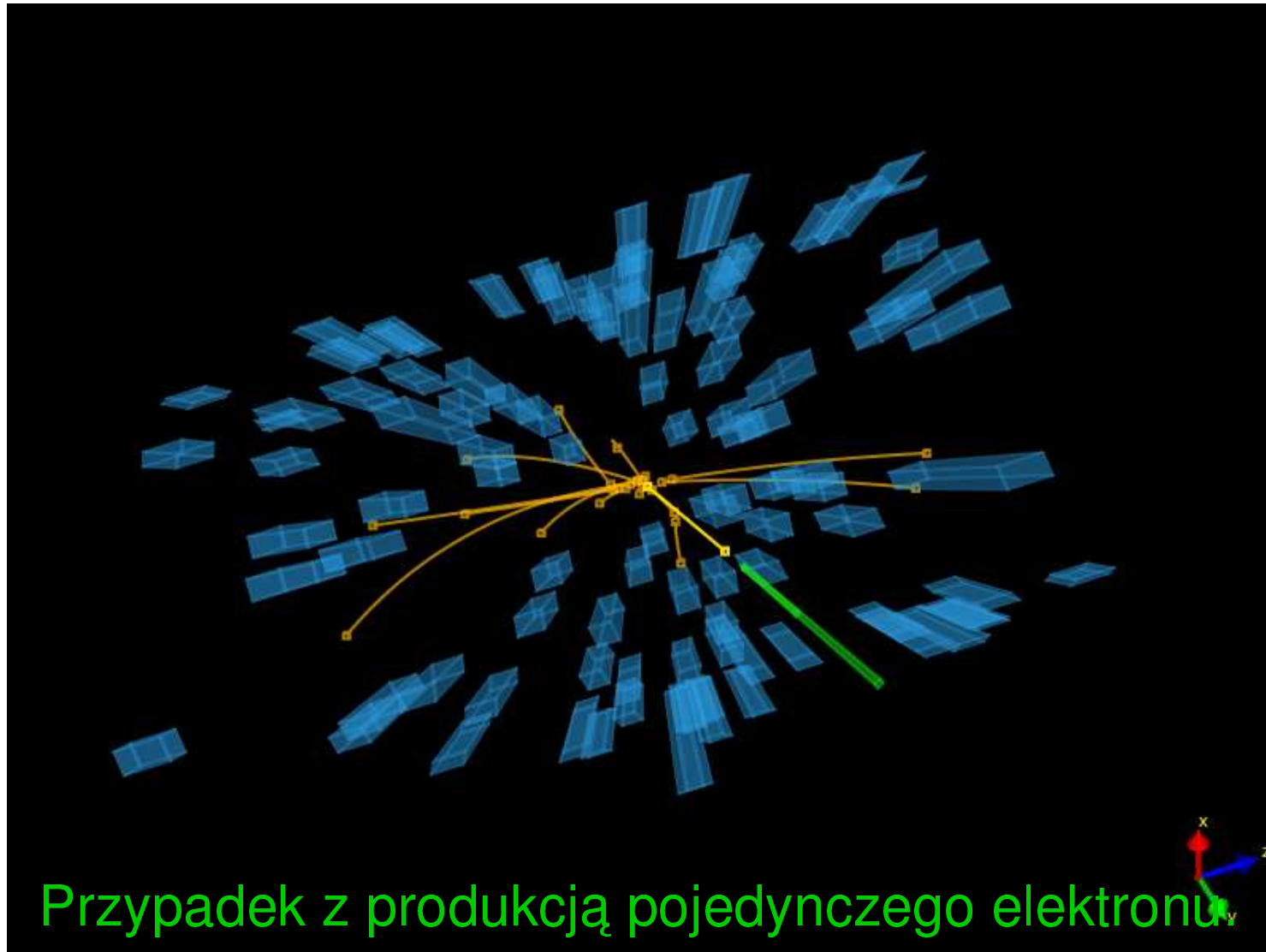
# Współczesne eksperymenty

## Compact Muon Solenoid - CMS



# Współczesne eksperymenty

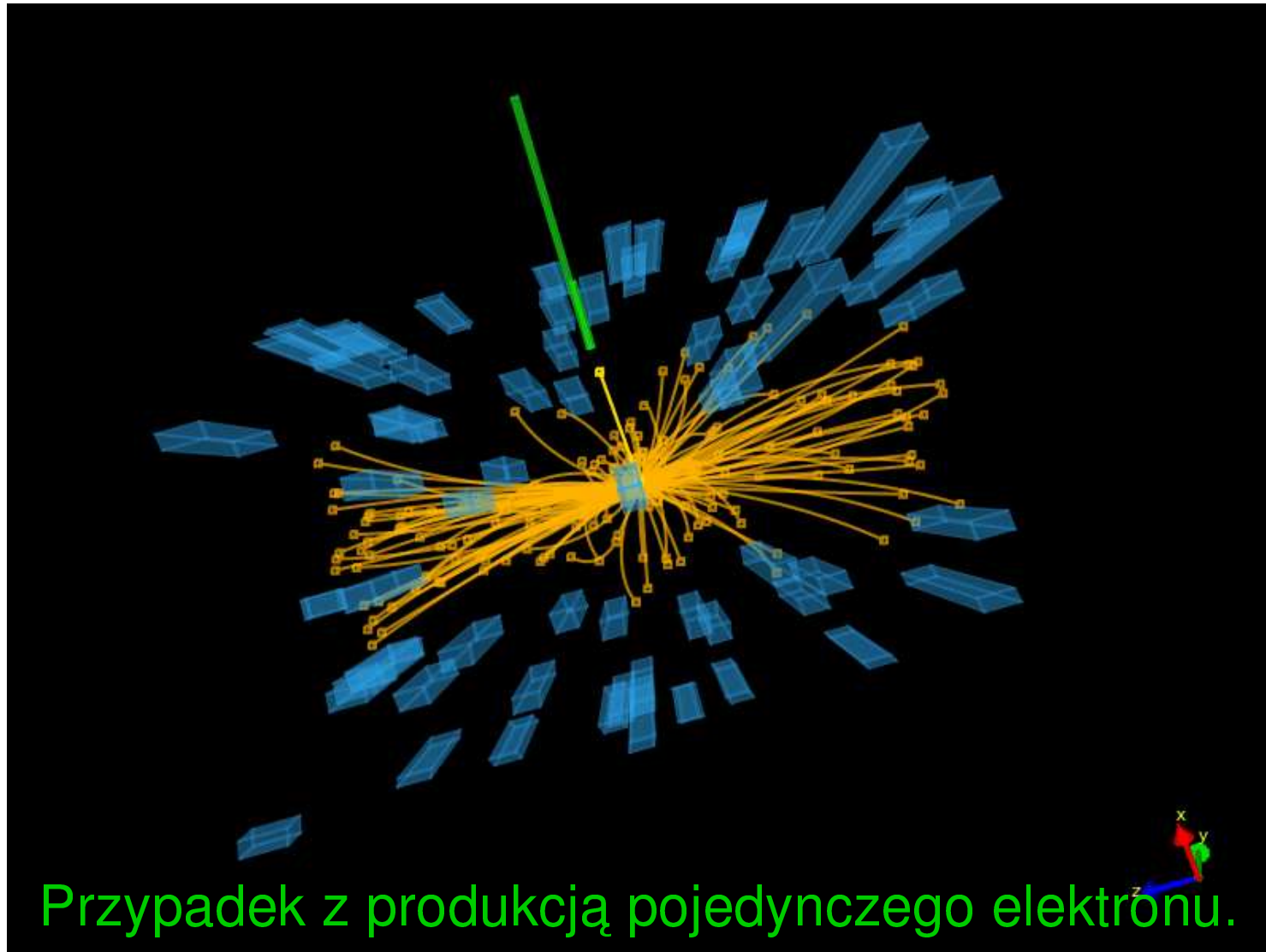
## Compact Muon Solenoid - CMS





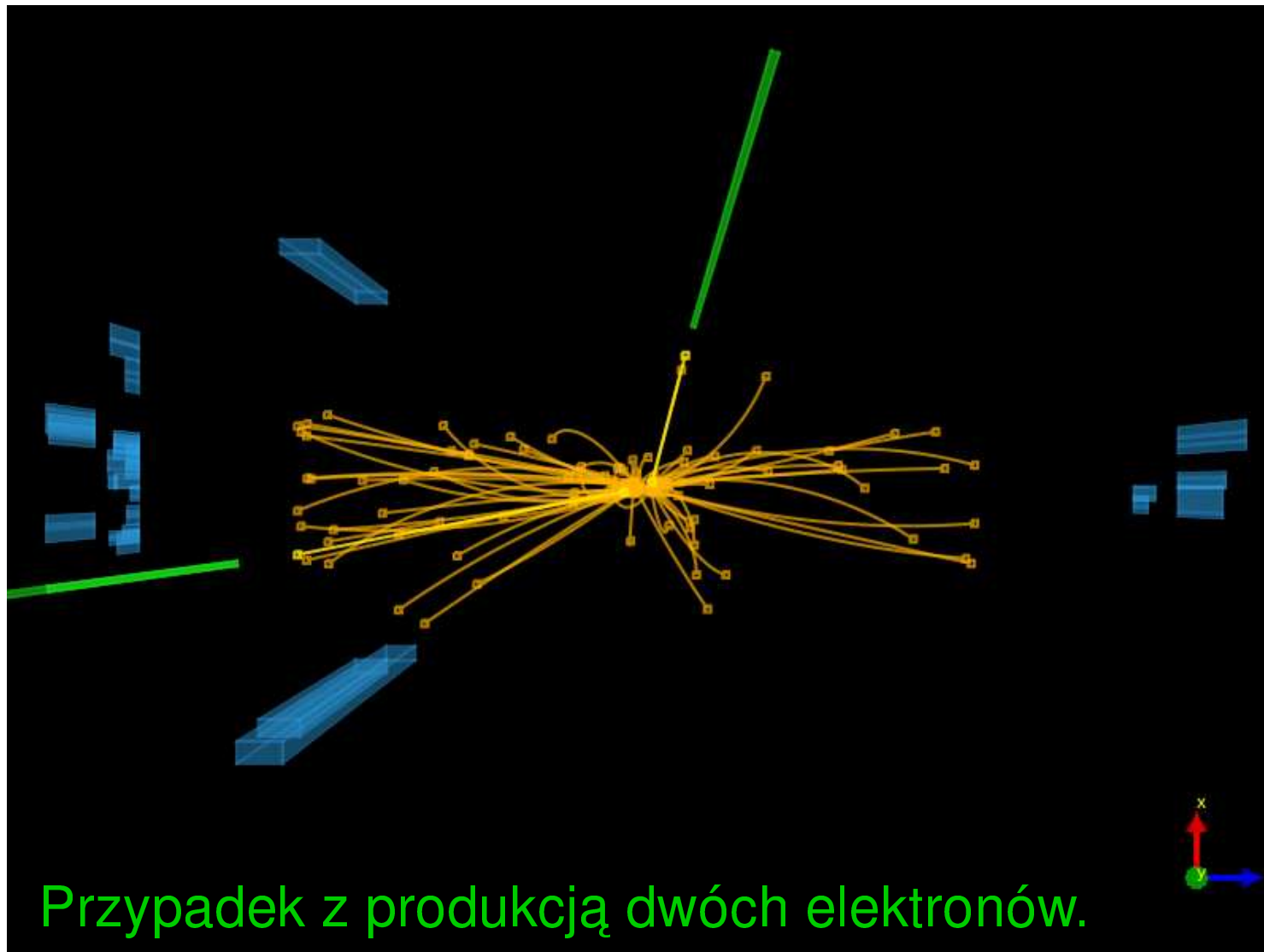
# Współczesne eksperymenty

## Compact Muon Solenoid - CMS



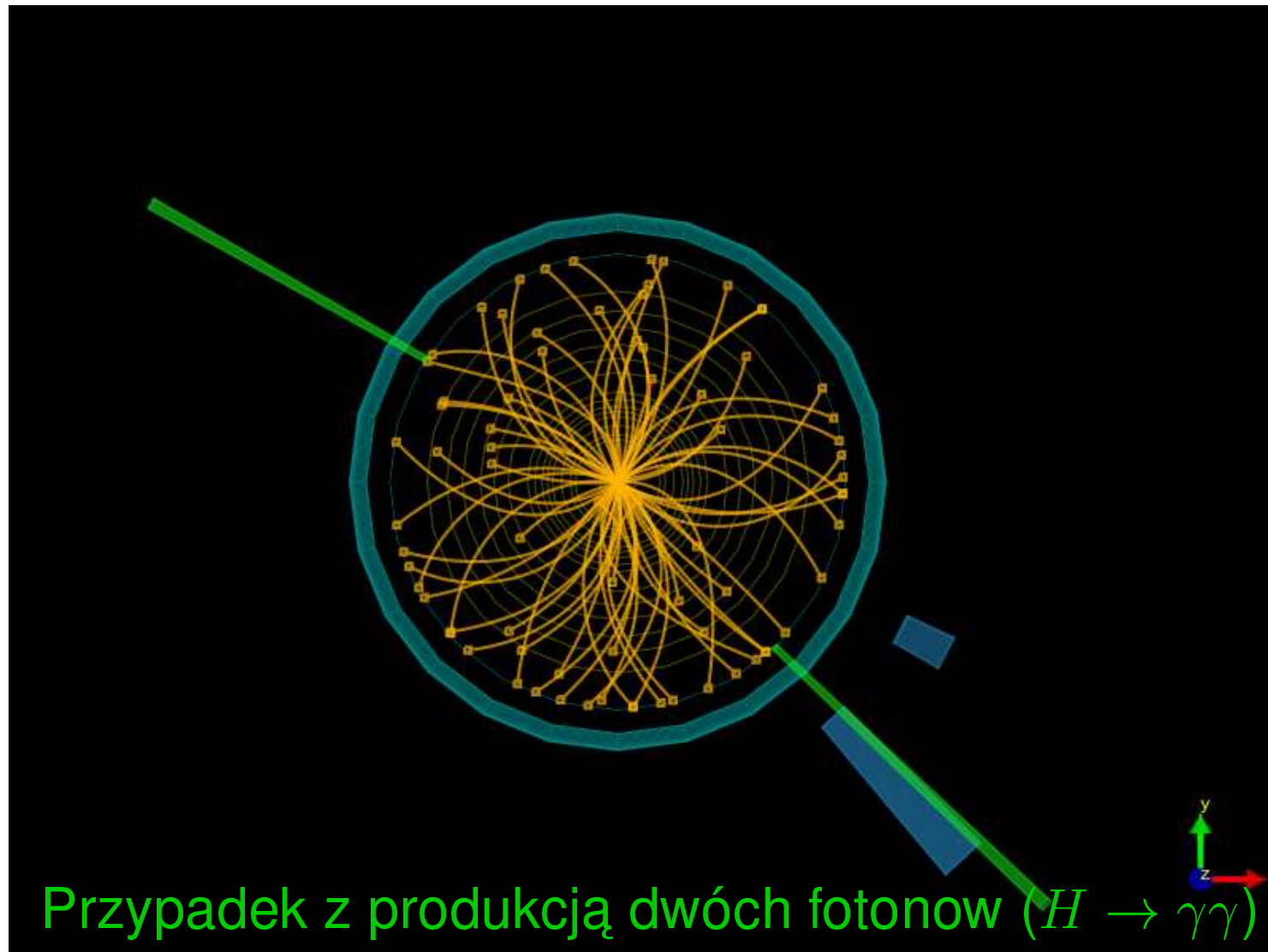
# Współczesne eksperymenty

## Compact Muon Solenoid - CMS



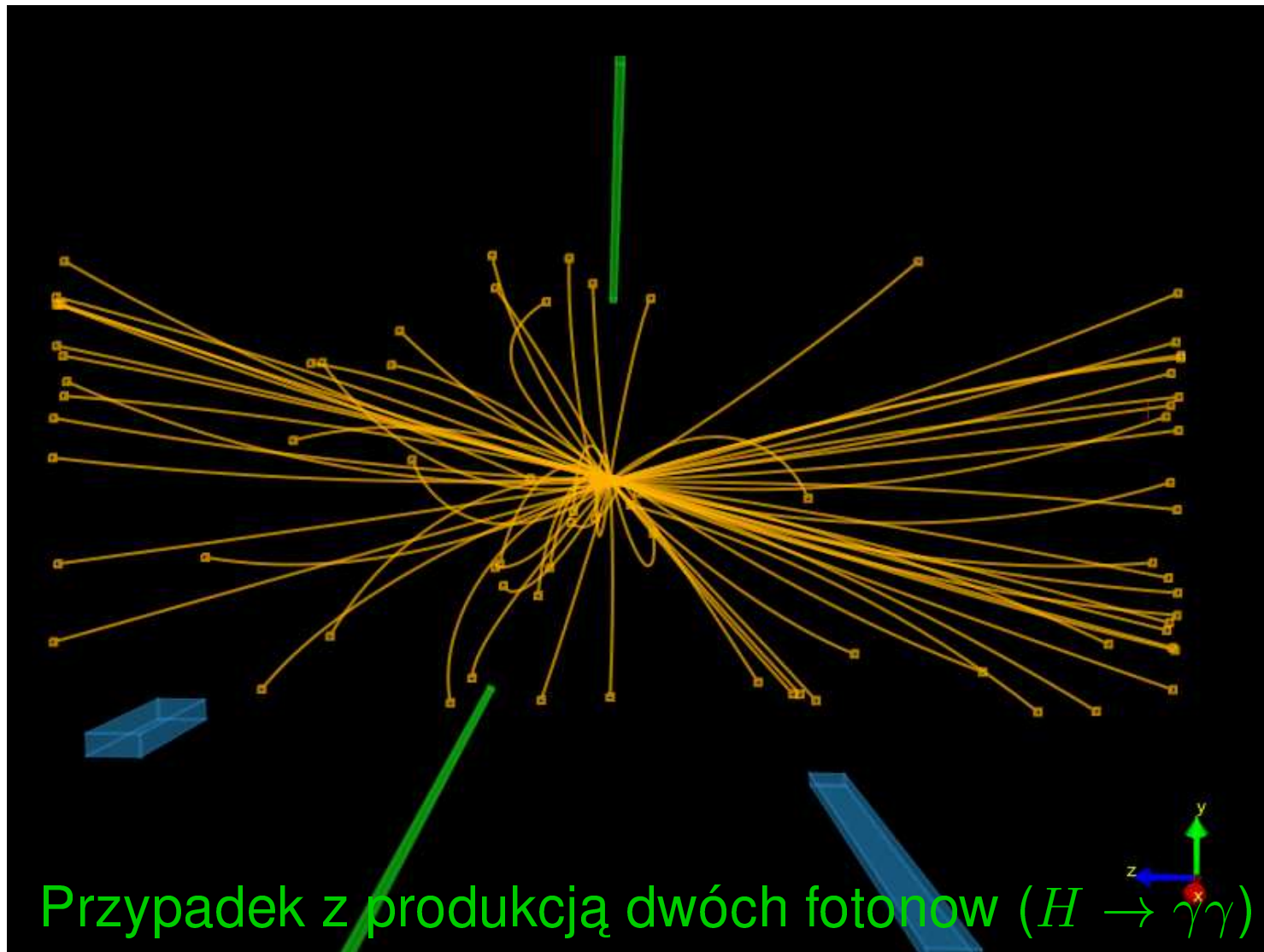
# Współczesne eksperymenty

## Compact Muon Solenoid - CMS



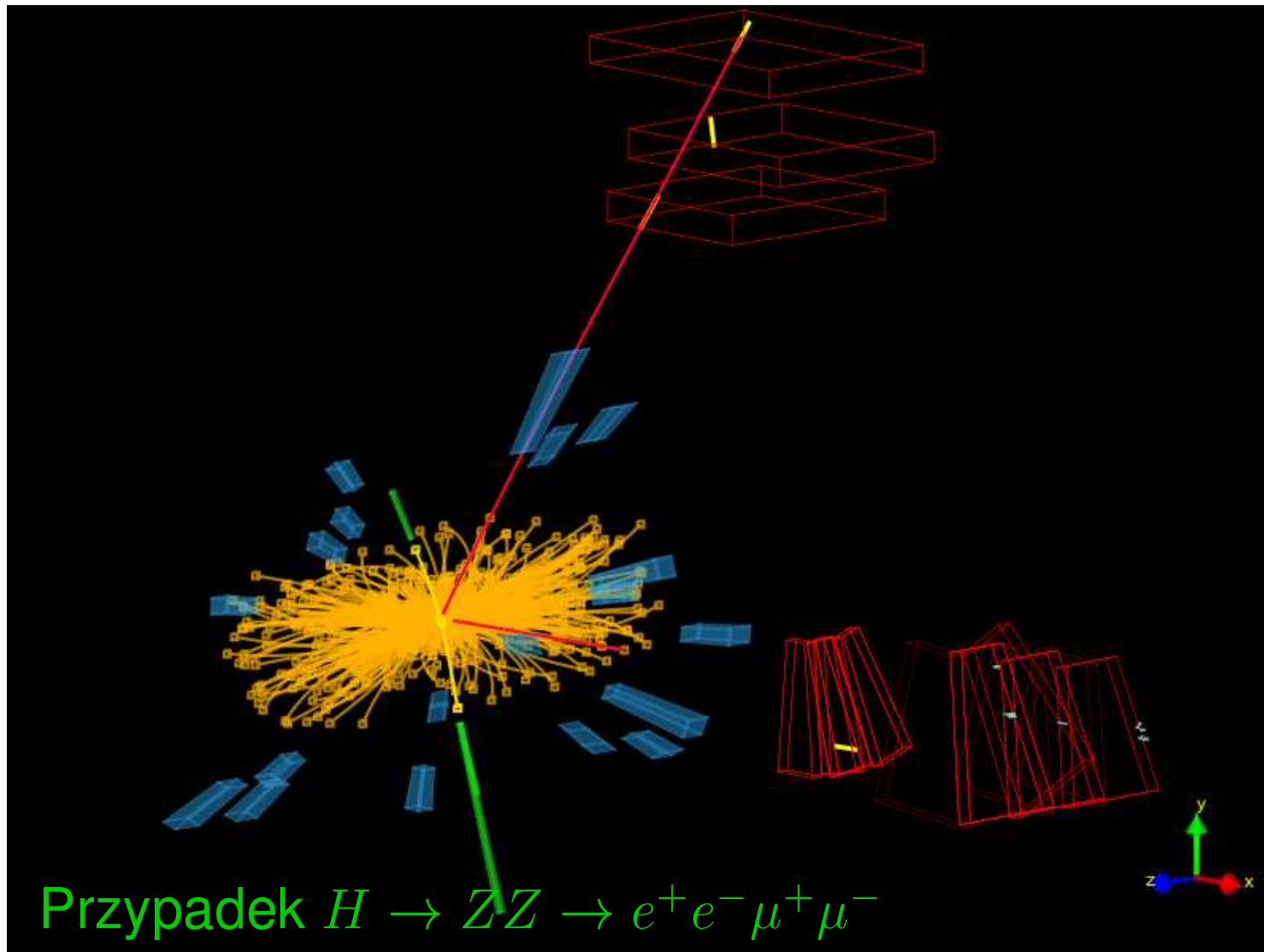
# Współczesne eksperymenty

## Compact Muon Solenoid - CMS



# Współczesne eksperymenty

## Compact Muon Solenoid - CMS





# Współczesne eksperymenty

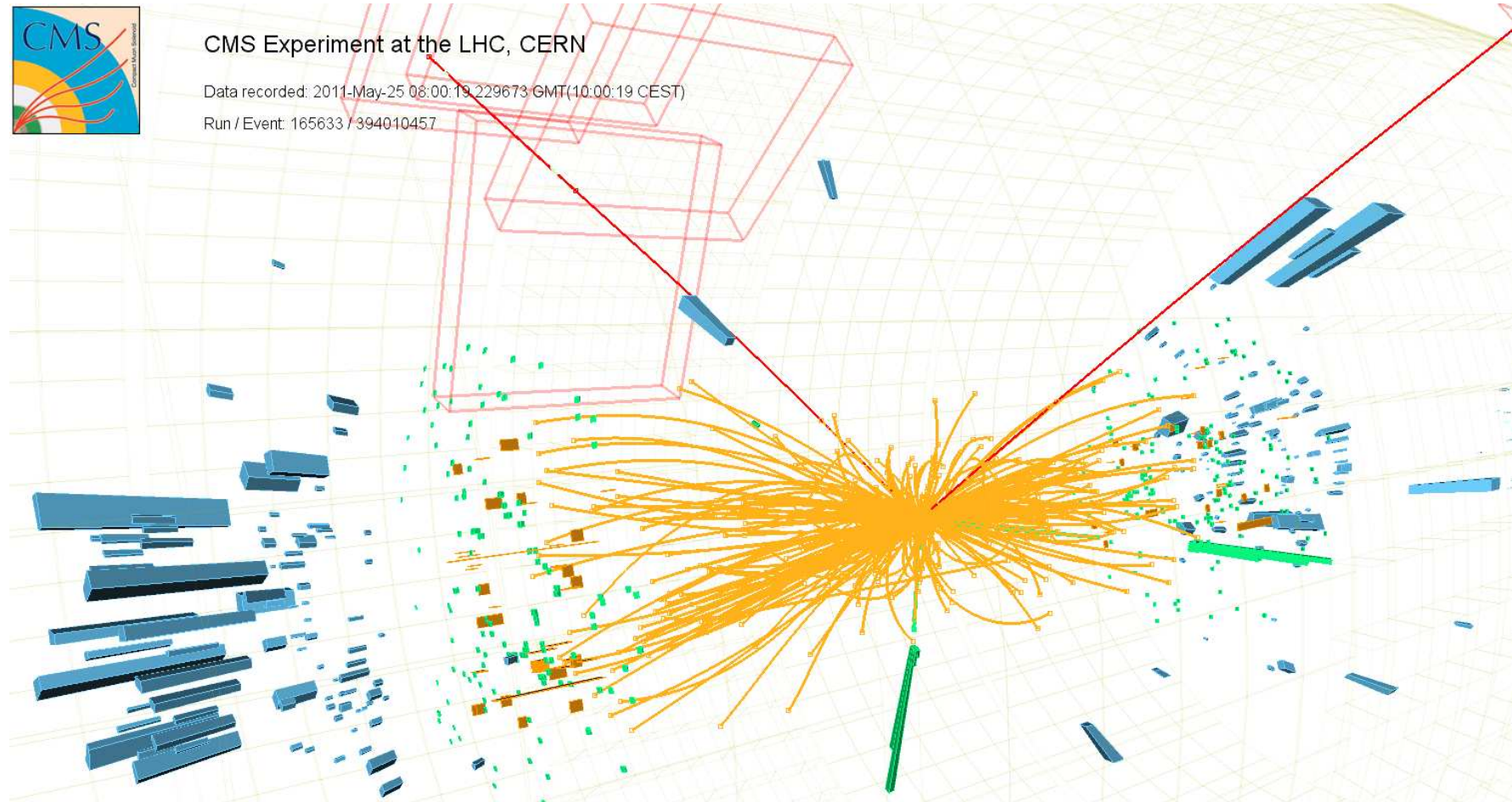
## Compact Muon Solenoid - CMS



CMS Experiment at the LHC, CERN

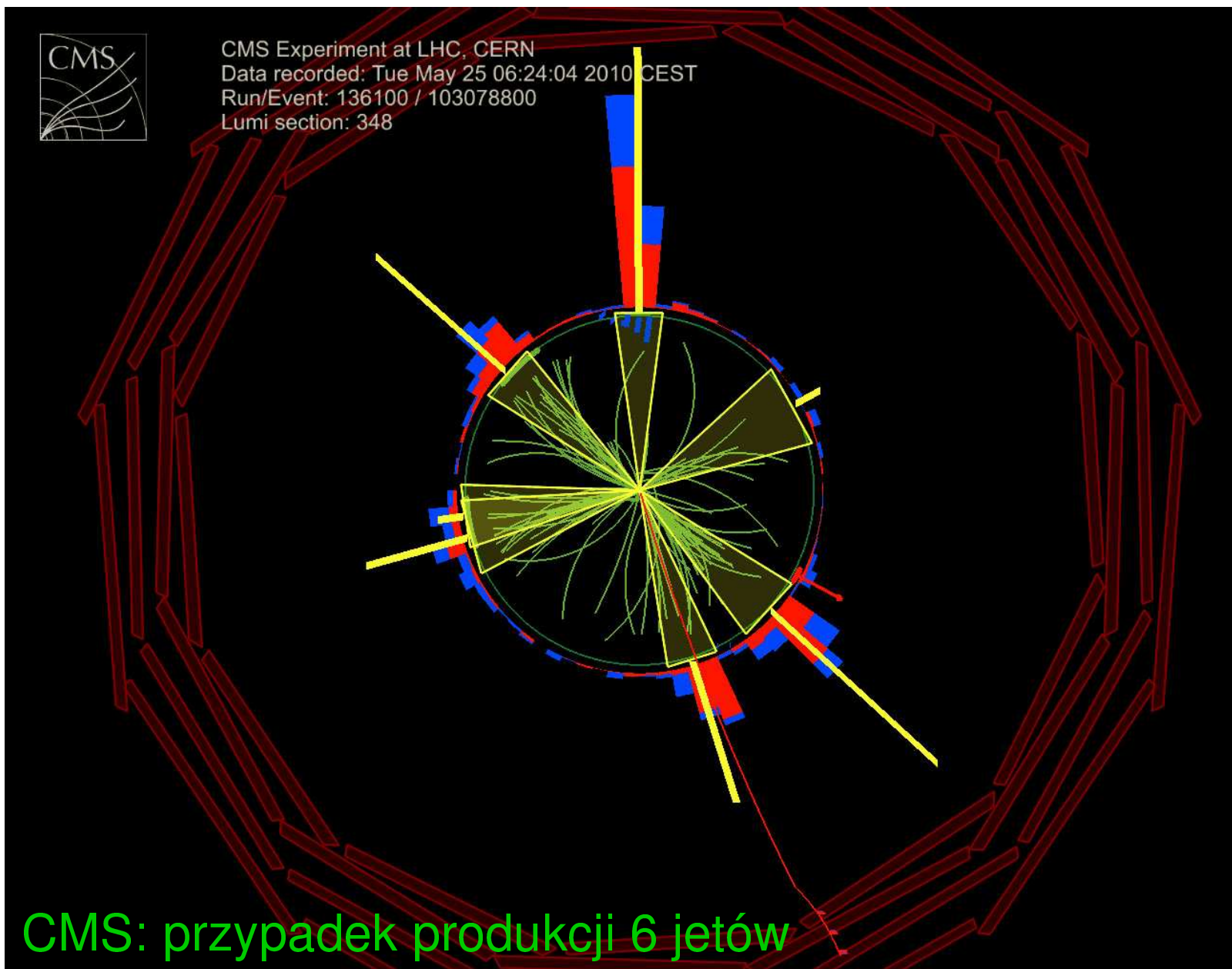
Data recorded: 2011-May-25 08:00:19.229673 GMT(10:00:19 CEST)

Run / Event: 165633 / 394010457



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

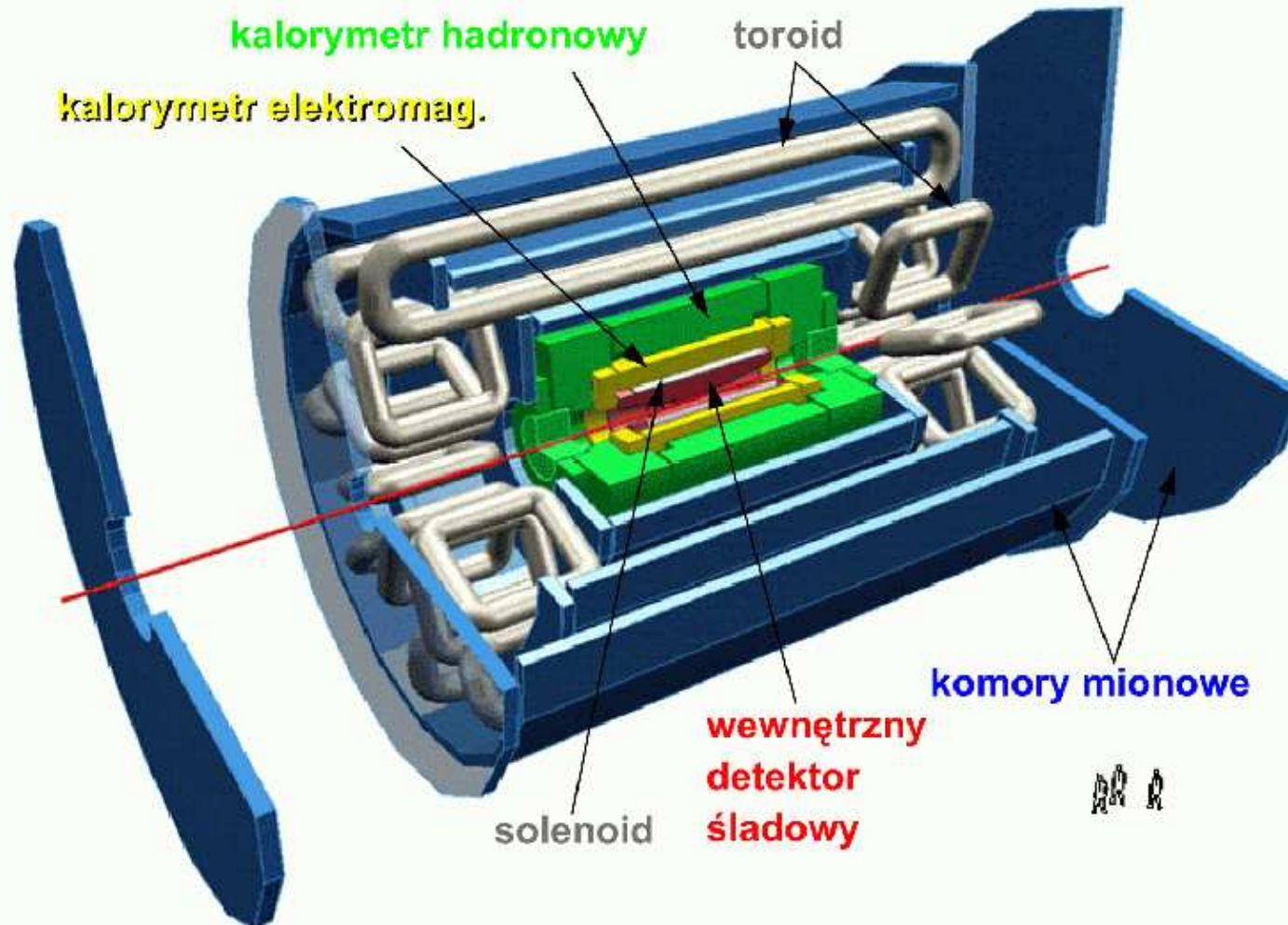
# Współczesne eksperymenty





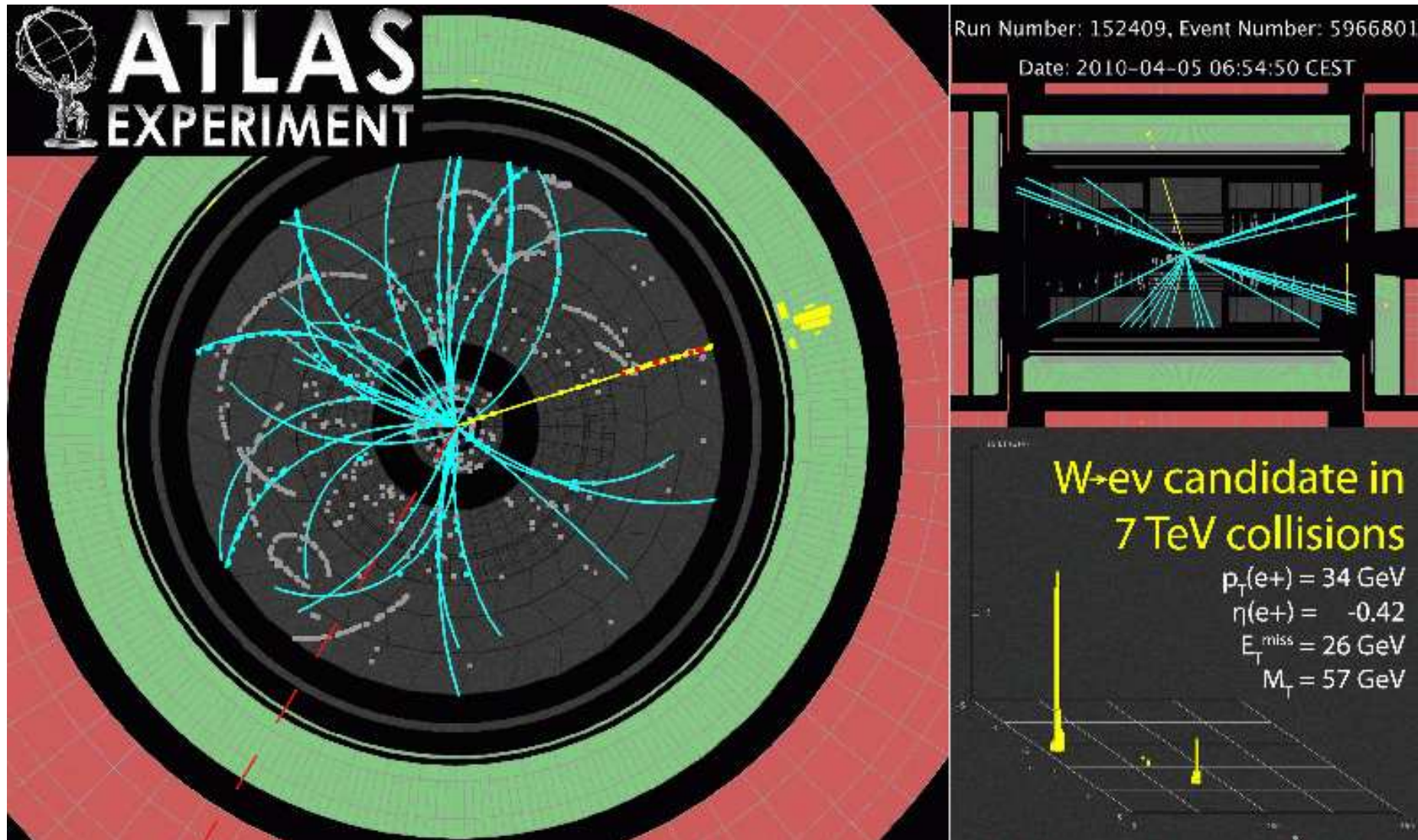
# Współczesne eksperymenty

## A Toroidal LHC ApparatuS (ATLAS)



# Współczesne eksperymenty

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





# Współczesne eksperymenty

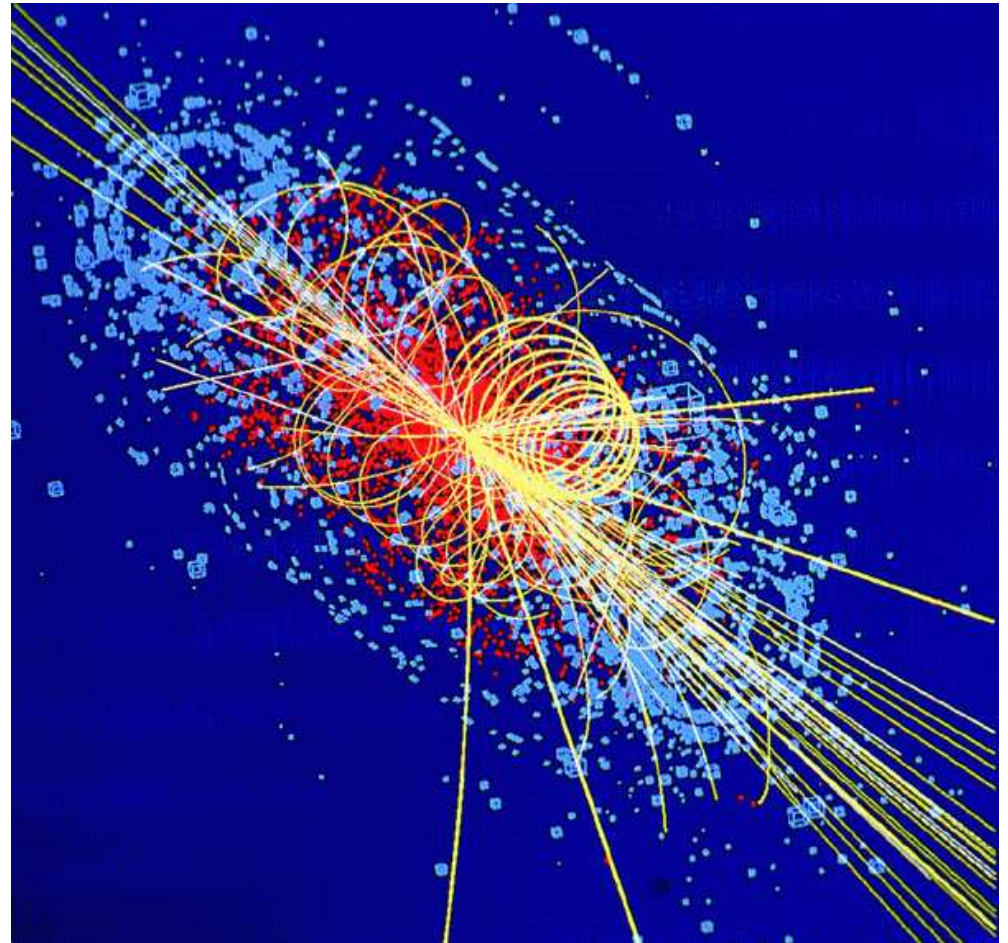
Przy każdym przecięciu paczek w LHC zderza się kilkadziesiąt par protonów.

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

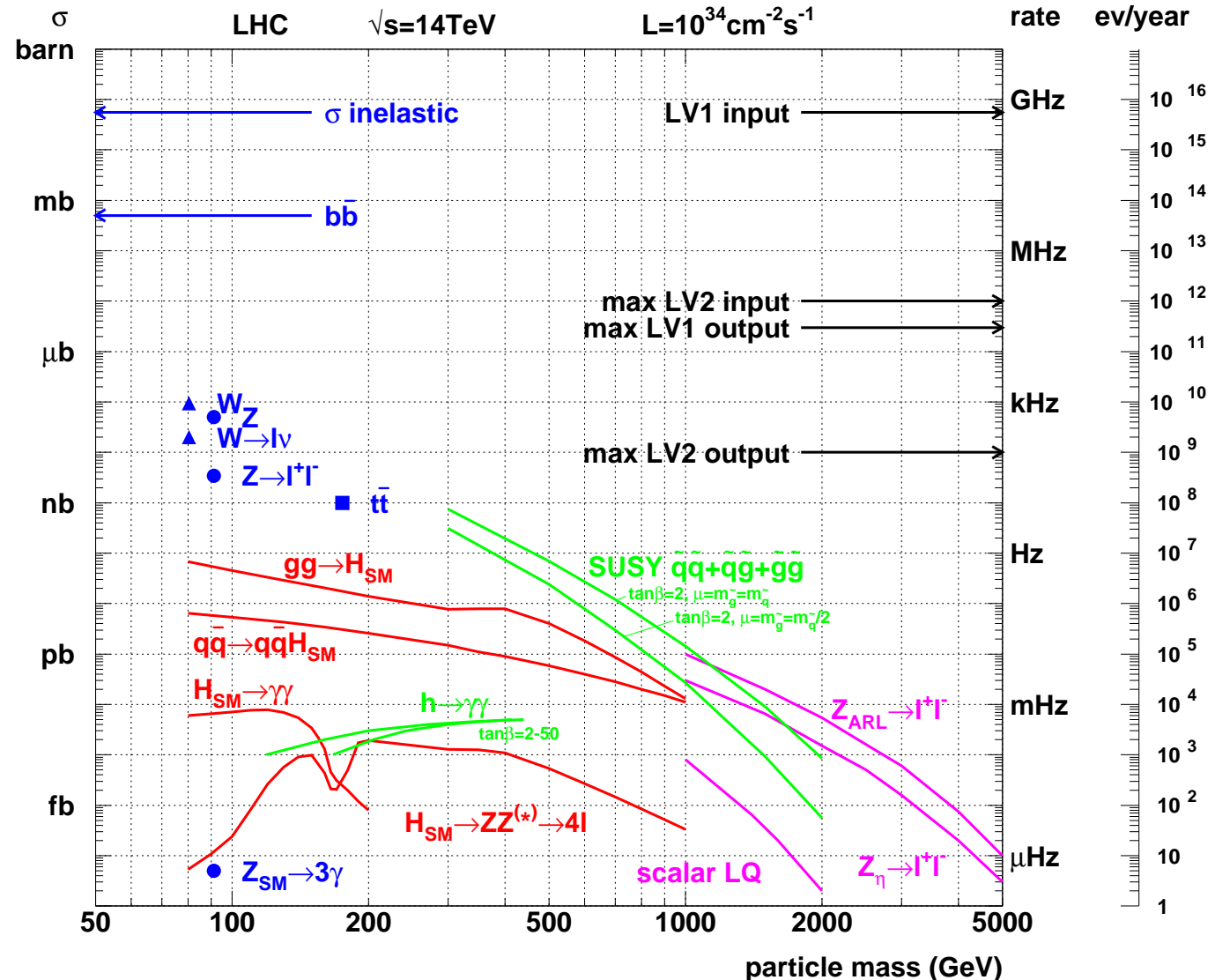
## Układ wyzwala

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

Tylko “ciekawe” sygnaly są czytane z detektora.

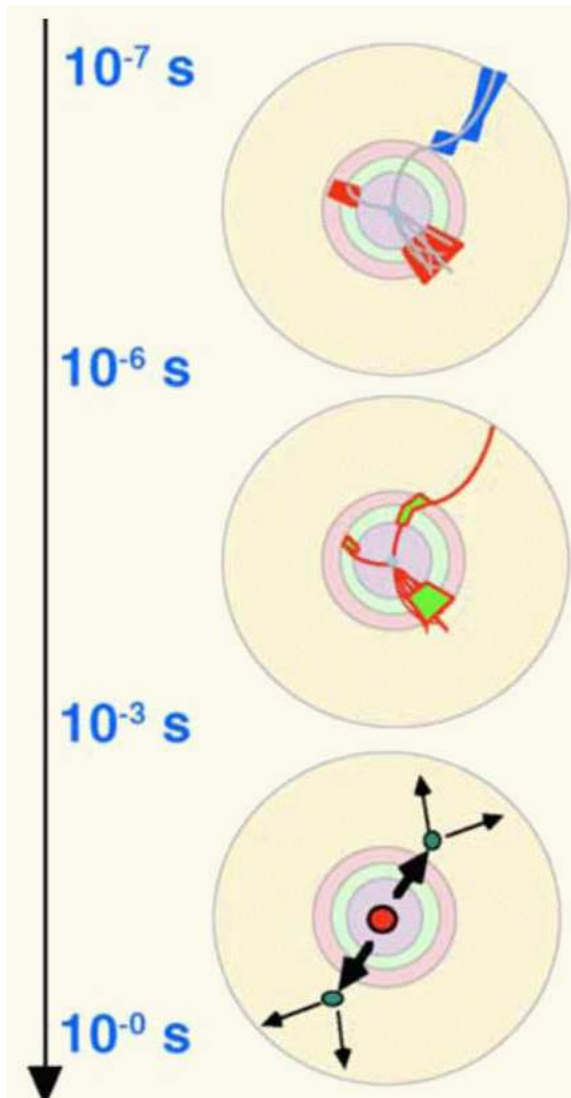
Te przypadki są dalej przepuszczane przez specjalne programy - “filtry”, które mają odrzucać wszystkie śmieci.

Zapisujemy tylko to, co ma szansę być ciekawe!



# Współczesne eksperymenty

## 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!

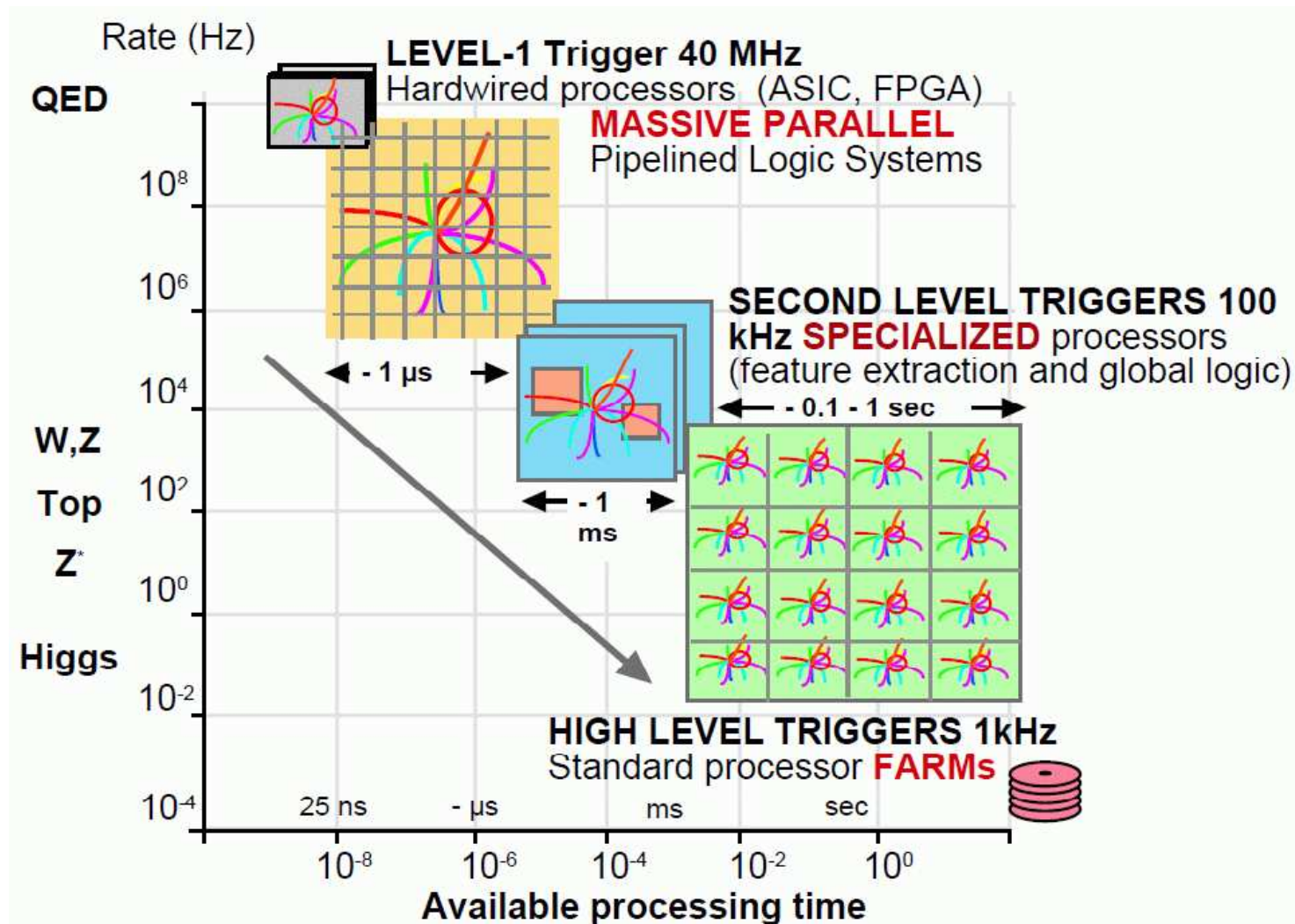
**Poziom 1:** bardzo szybki (dedykowana elektronika), odrzuca 99.9% oczywistych śmieci.

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

**Poziom 3:** pełna analiza i ostateczna decyzja

# Współczesne eksperymenty

## Układ wyzwalań schemat



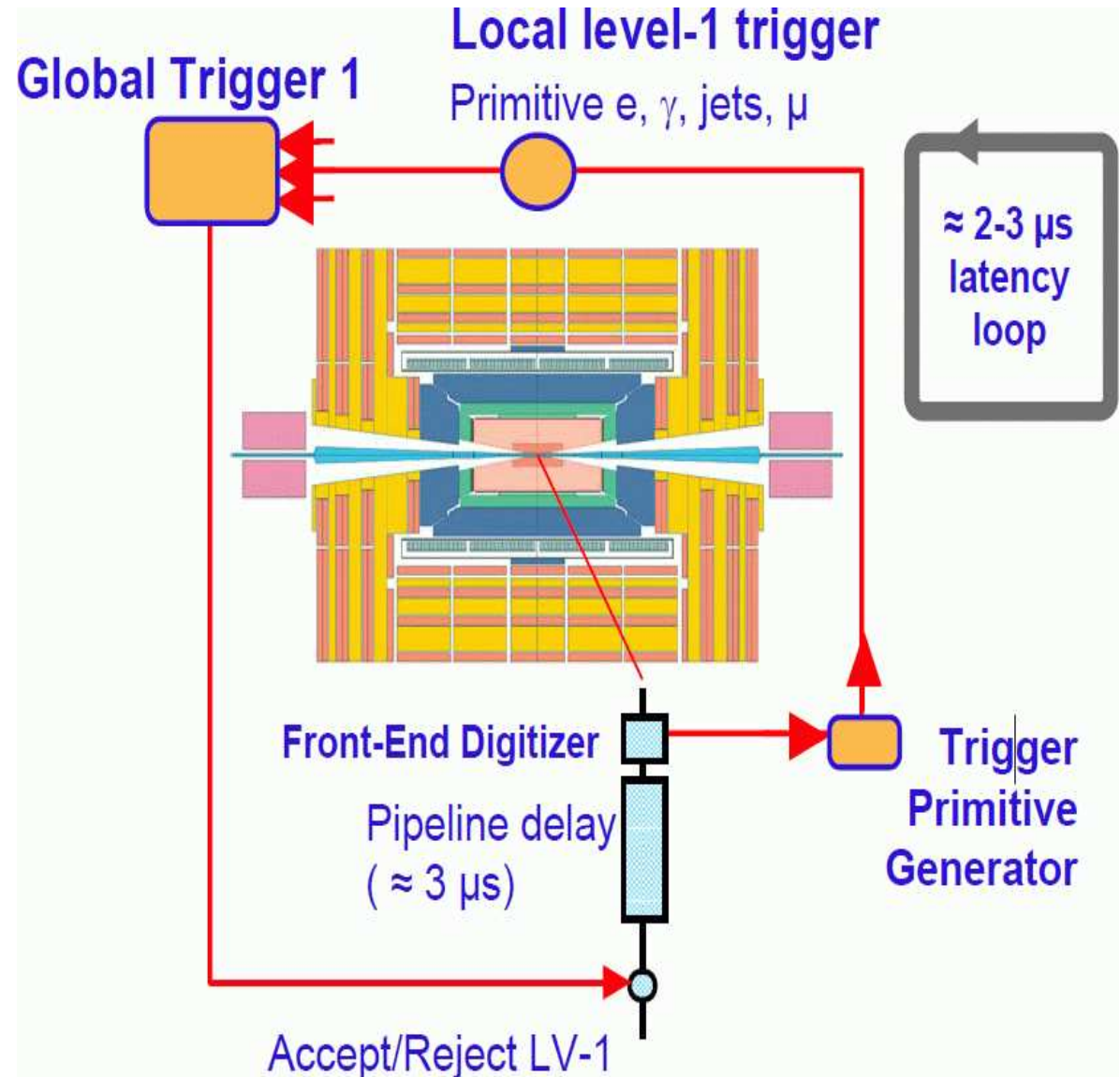
# Współczesne eksperymenty

## Układ wyzwalań

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!





# Współczesne eksperymenty

## *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...





# Współczesne eksperymenty

## Zbieranie i rekonstrukcja danych

Ilość zbieranych danych dawno przekroczyła możliwości pojedynczego komputera.

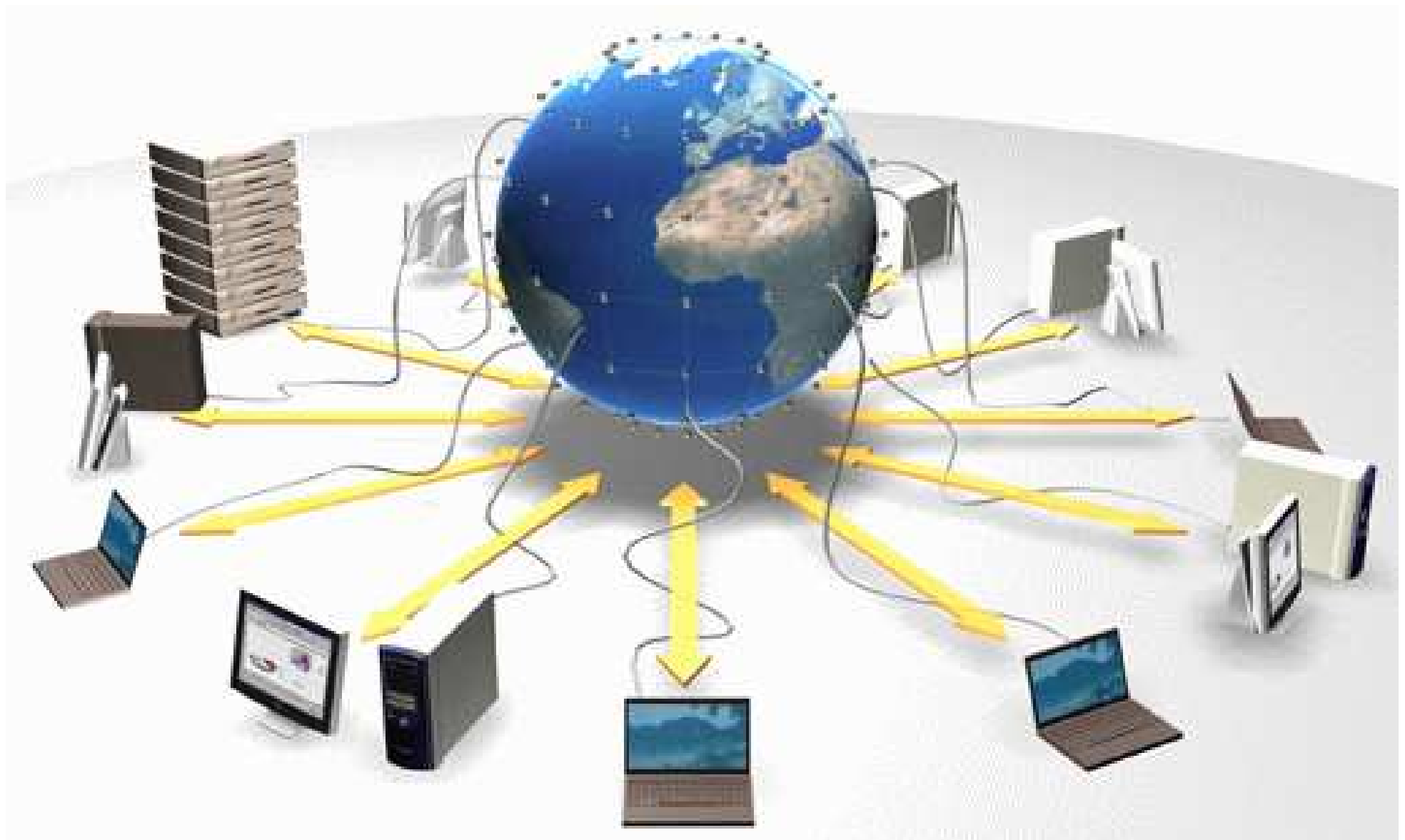
1 przypadek to MB danych

zbieramy miliony przypadków

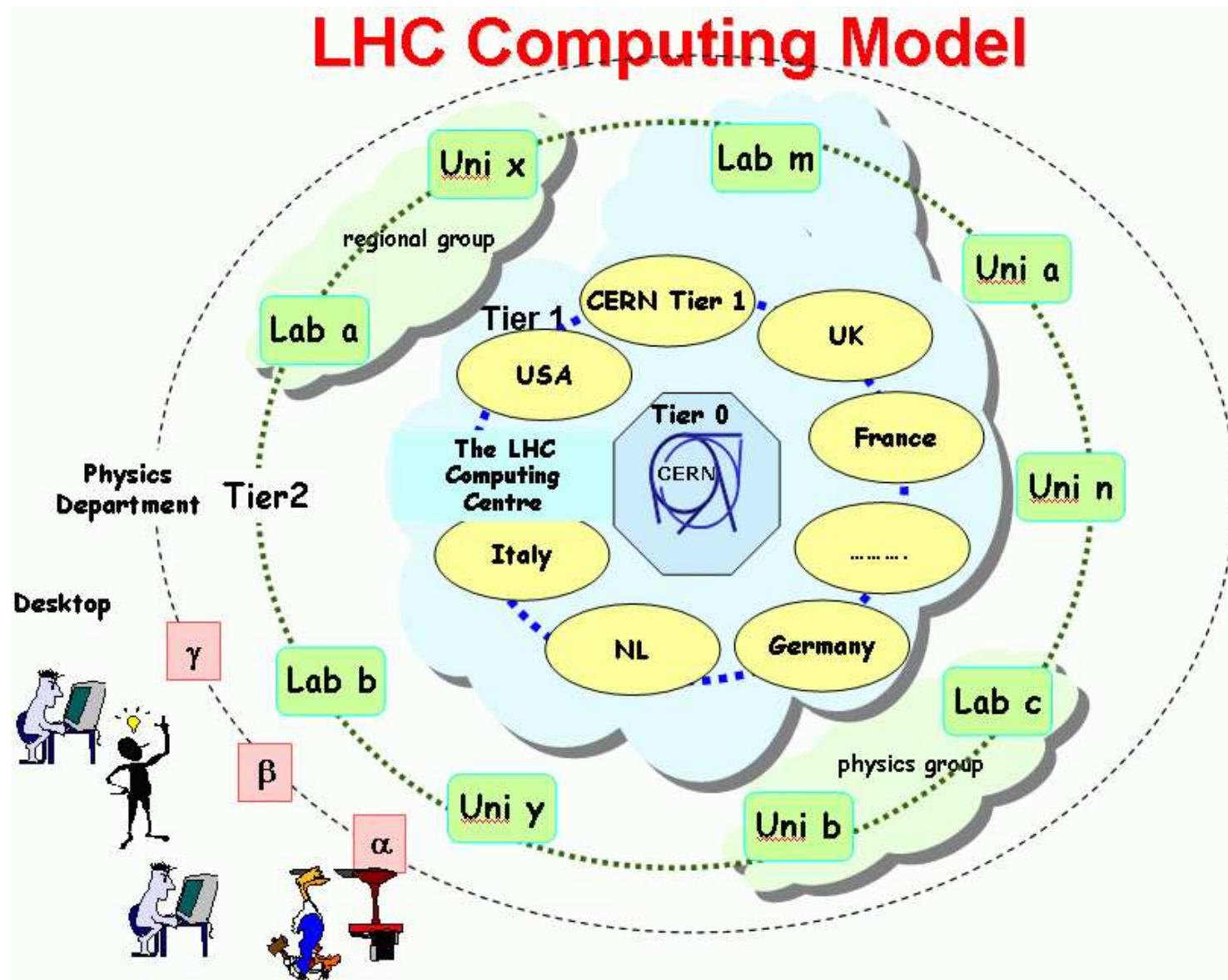
Do niedawna można to było trzymać i przetwarzać w jednym miejscu...



# GRID dla LHC



# GRID dla LHC



# GRID dla LHC

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** (!)



# Symulacje

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 wyzwalań (!), ocenić efektywność rejestracji przypadków i dokładność ich rekonstrukcji.

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

# Symulacje

## ***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.**

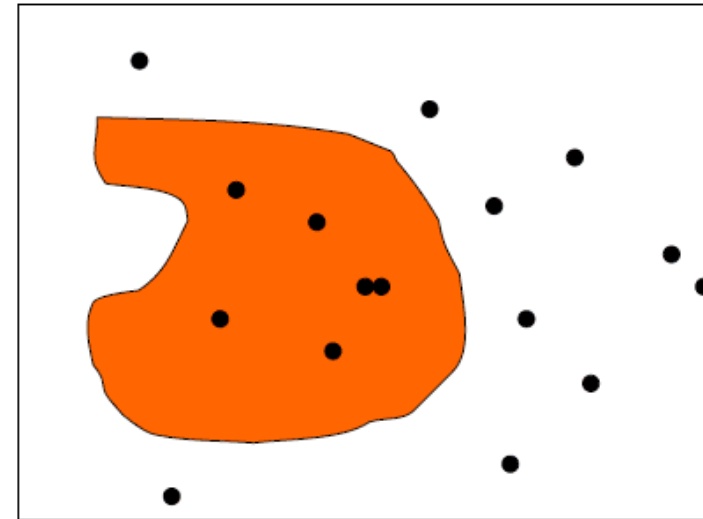
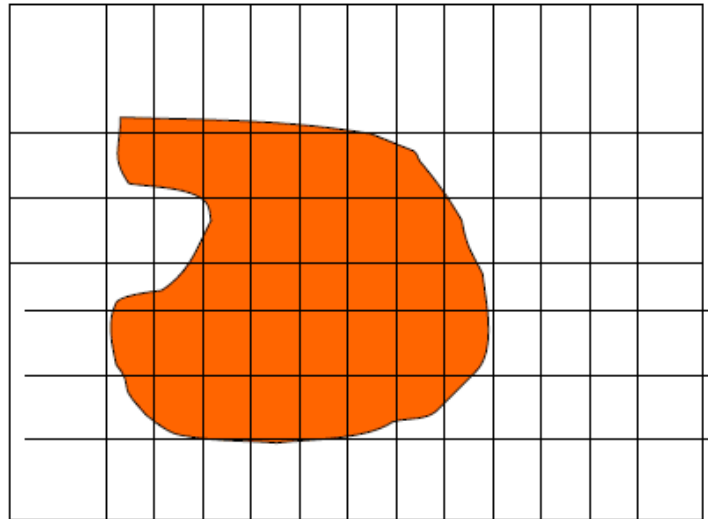
Metoda Monte Carlo jest **sposobem na policzenie** (przesumowanie lub przecałkowanie) takich formuły z **dowolną dokładnością**, praktycznie ograniczoną jedynie przez czas i szybkość działania komputera.

# 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.

# Symulacje

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  $100 fb^{-1}$

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

