

Wszechświat cząstek elementarnych

Wykład 8: Współczesne eksperymenty

prof. A.F.Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych
Instytut Fizyki Doświadczalnej

Detekcja cząstek

- 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 wyzwalań
 - przechowywanie i analiza danych

Kolajdery

LEP/LHC

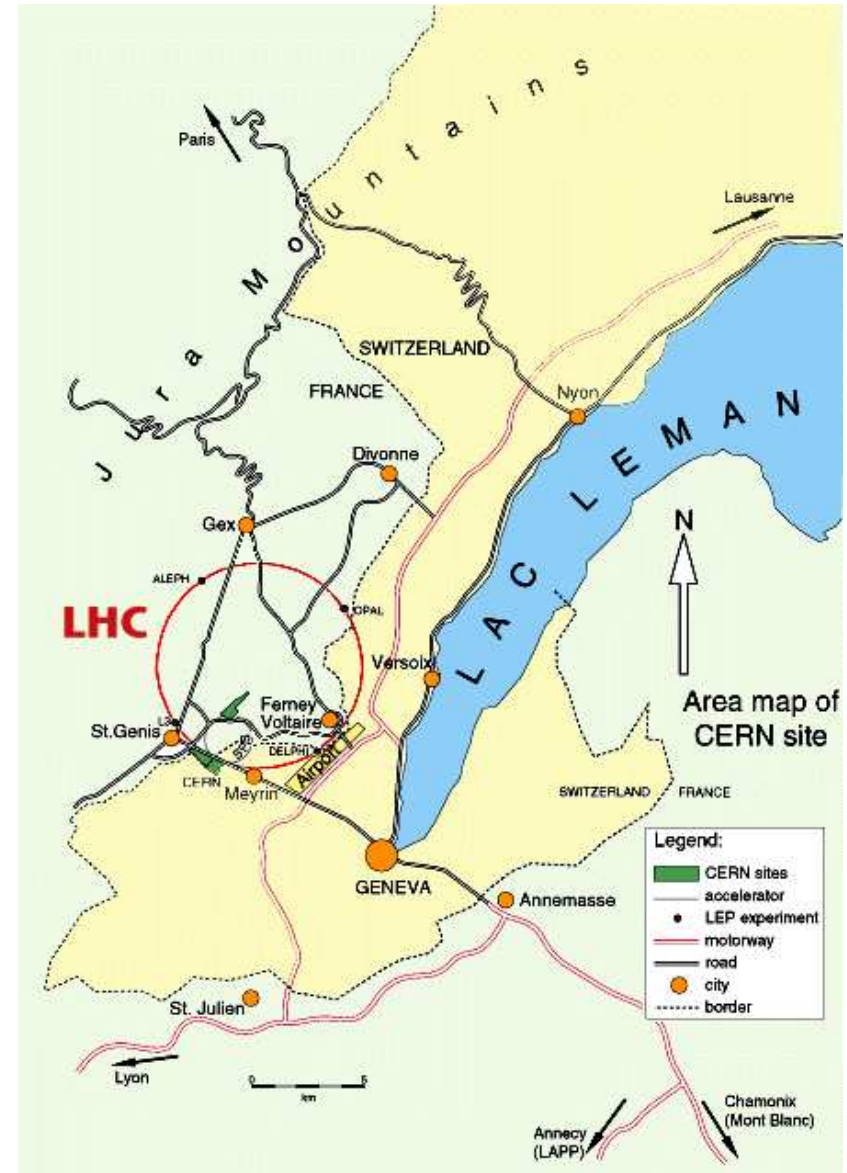
Największym zbudowanym dotąd akceleratorem był LEP. Zbudowany w CERN pod Genewą miał obwód ok. 27 km.

W tym samym tunelu działa obecnie akcelerator LHC.

Przeciwbieżne wiązki protonów o energii 3.5 TeV (docelowo 7 TeV)

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

Zderzenia paczek co 25 ns
(40 milionów na sekundę)



Kolajdery



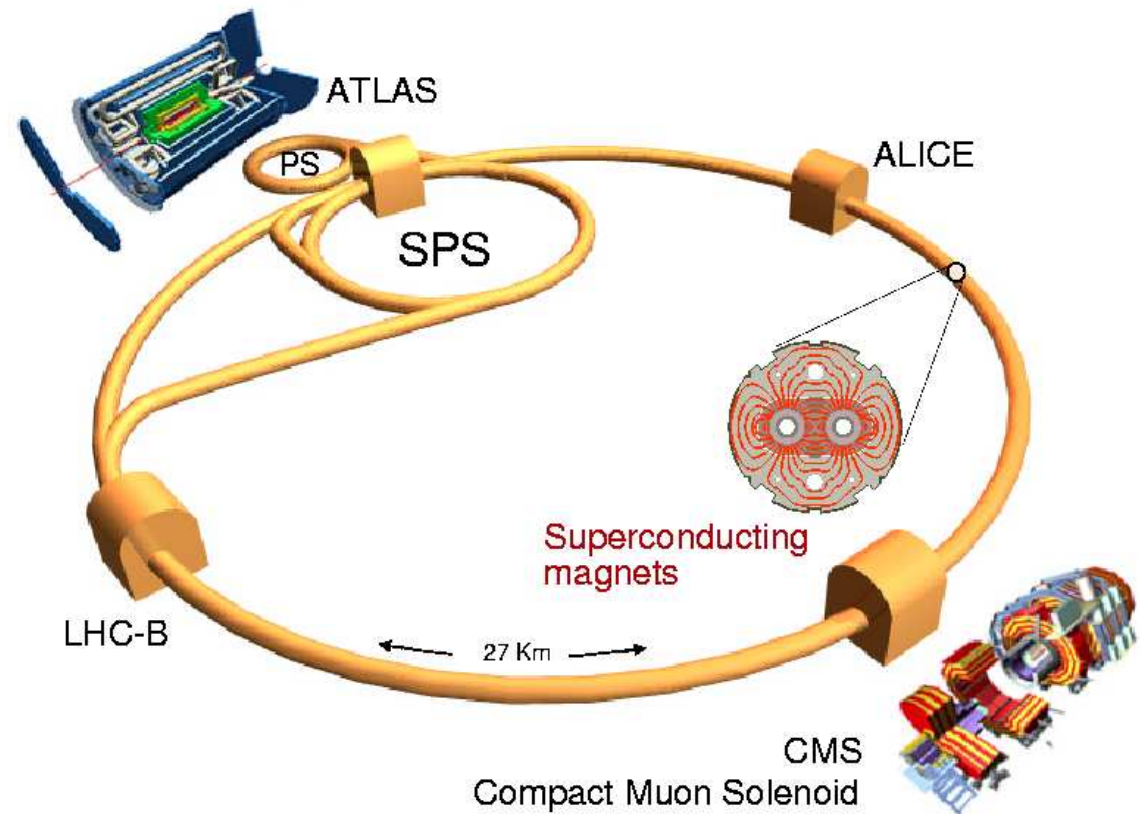
Kolajdery

Przeciwbieżne wiązki protonów w LHC mają mieć docelowo energię $2 \times 7 \text{ TeV}$ ($1 \text{ TeV} = 1000 \text{ GeV}$)

Intensywność wiązek będzie tak duża, że oczekujemy produkcji do 1000 “nowych” cząstek (np. cząstek Higgsa) na godzinę!

Przypadków produkcji tych cząstek będą poszukiwać dwa eksperymenty: ATLAS i CMS

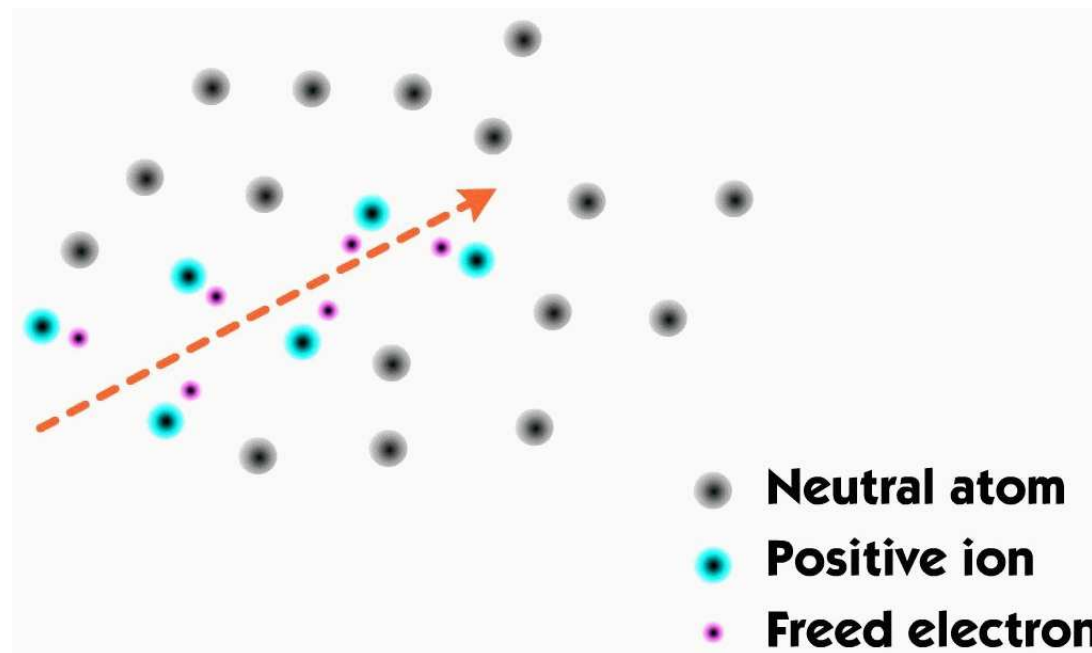
The Large Hadron Collider (LHC)



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

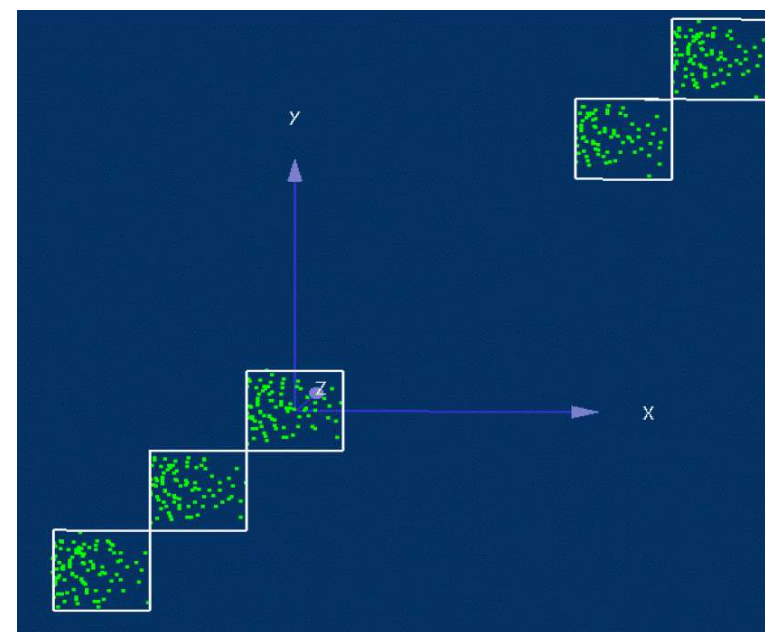
Coraz powszechniej używane.

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



Bardzo precyzyjny pomiar pozycji cząstek (rzędu μm)

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



Niestety wciąż drogie...

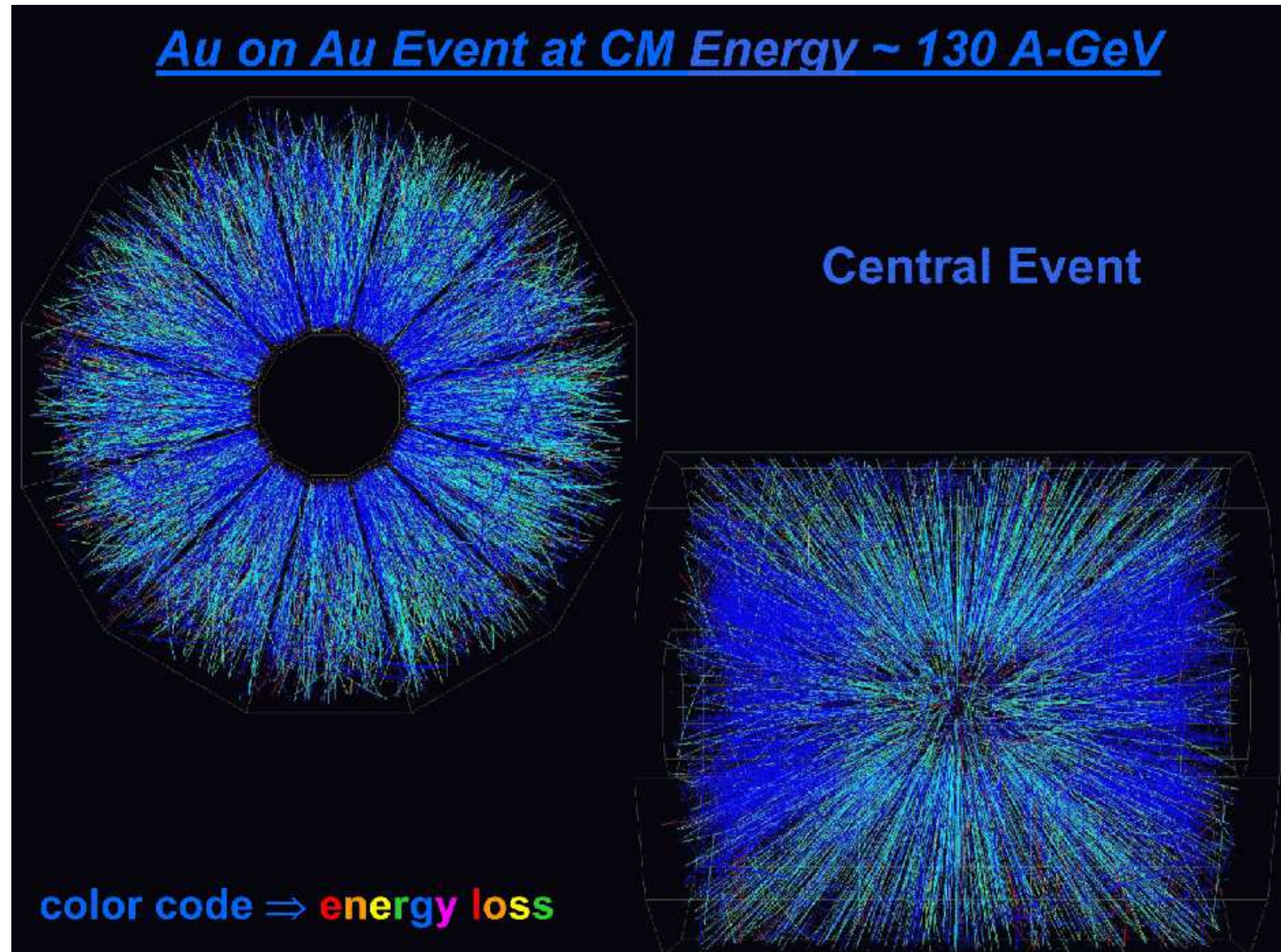
Detekcja cząstek

TPC

Komora
projekcji
czasowej

Przypadek
zderzenia
ciężkich
jonów

detektor
STAR
przy RHIC



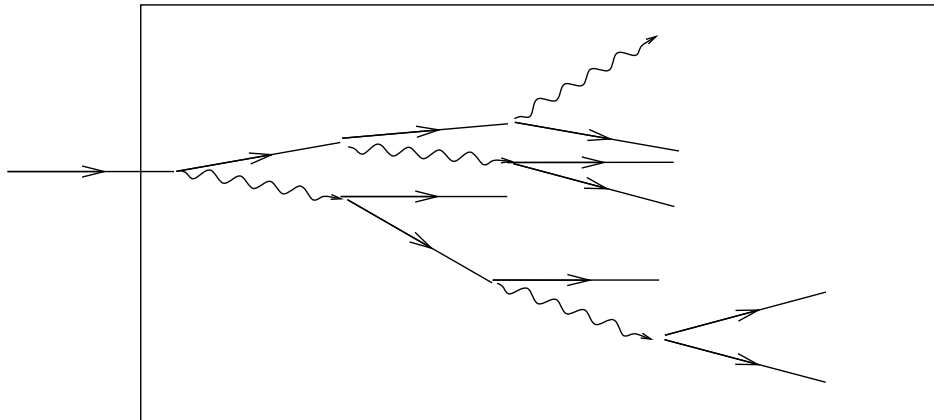
Detekcja cząstek

Kalorymetry

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

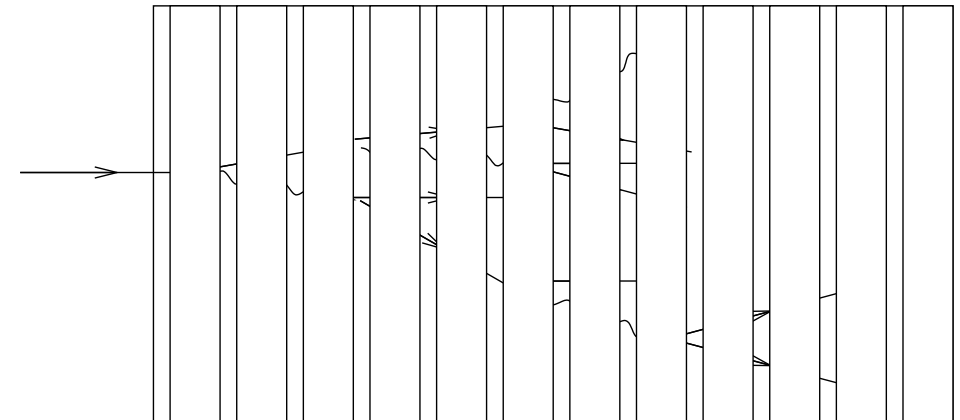
Mierząc liczbę cząstek lub całkowitą długość torów (całkowitzą jonizację) możemy dokładnie określić energię cząstki początkowej

Kalorymetr jednorodny



np. blok scyntylnatora

Kalorymetr próbkujący

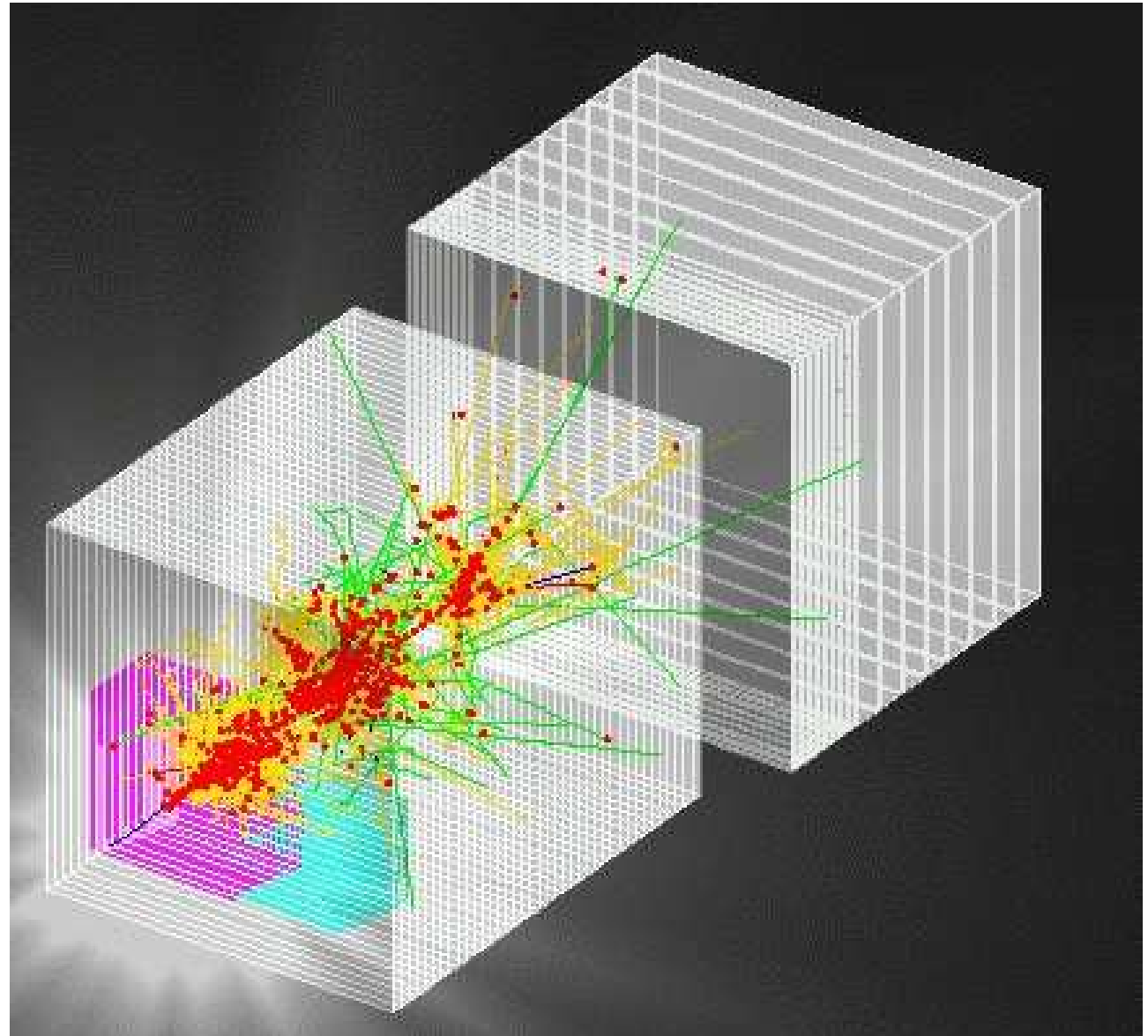


warstwy detektora na przemian z gęstym absorberem

Detekcja cząstek

Kalorymetry

Symulacja rozwoju
kaskady hadronowej
(pomiar energii protonu)



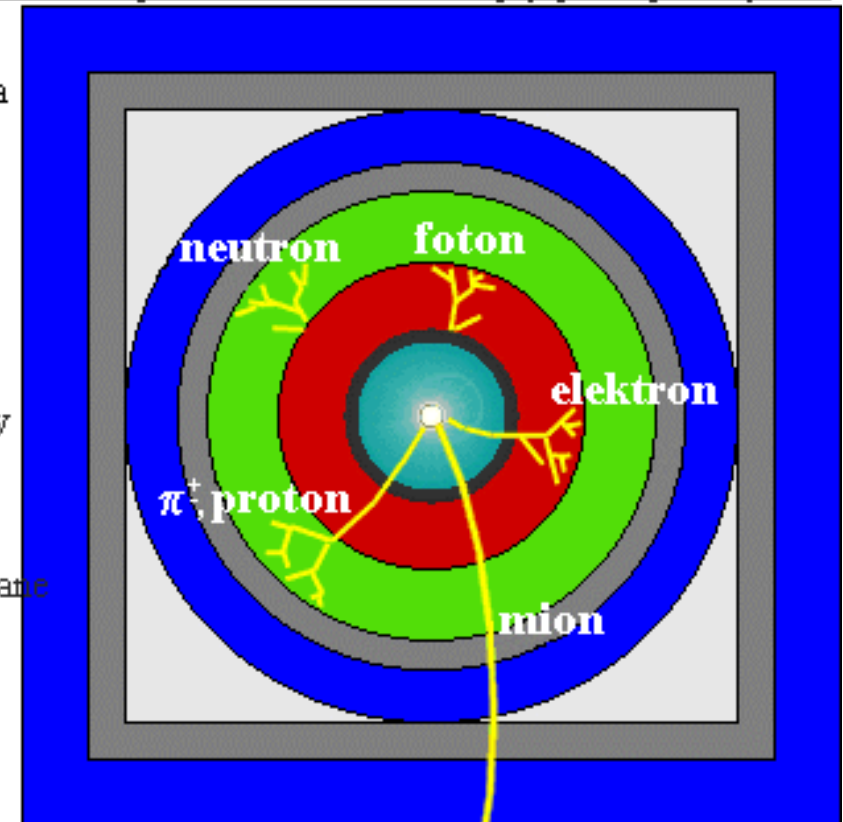
Współczesne eksperymenty

Struktura warstwowa

Współczesne eksperymenty fizyki wysokich energii (zwłaszcza te na wiązkach przeciwbieżnych) są naogół zbudowane z **wielu różnorodnych elementów**.

Przekrój poprzeczny detektora, ilustrujący tory cząstek

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



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

Współczesne eksperymenty

Detektor uniwersalny

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

Kolejno od środka detektora:

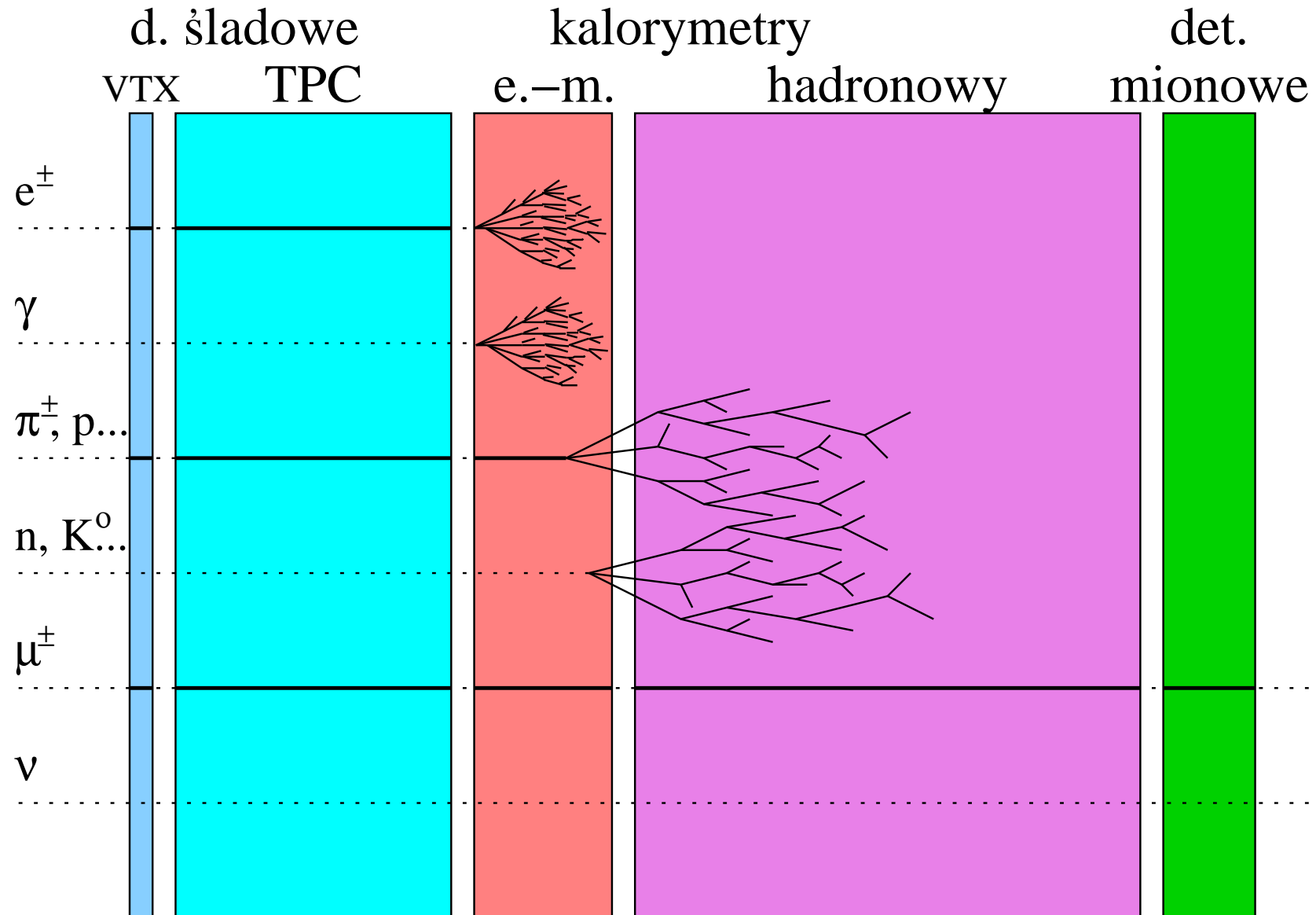
- detektor wierzchołka
jak najbliżej osi wiązki, określa gdzie zaszło zderzenie,
identyfikuje rozpady cząstek krótkożyciowych
(tzw. wierzchołki wtórne)
najczęściej detektor półprzewodnikowy
- detektory śladowe
pomiar torów cząstek naładowanych, wyznaczenie pędów
cząstek z zakrzywienia w polu magnetycznym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

Współczesne eksperymenty

Detektor uniwersalny

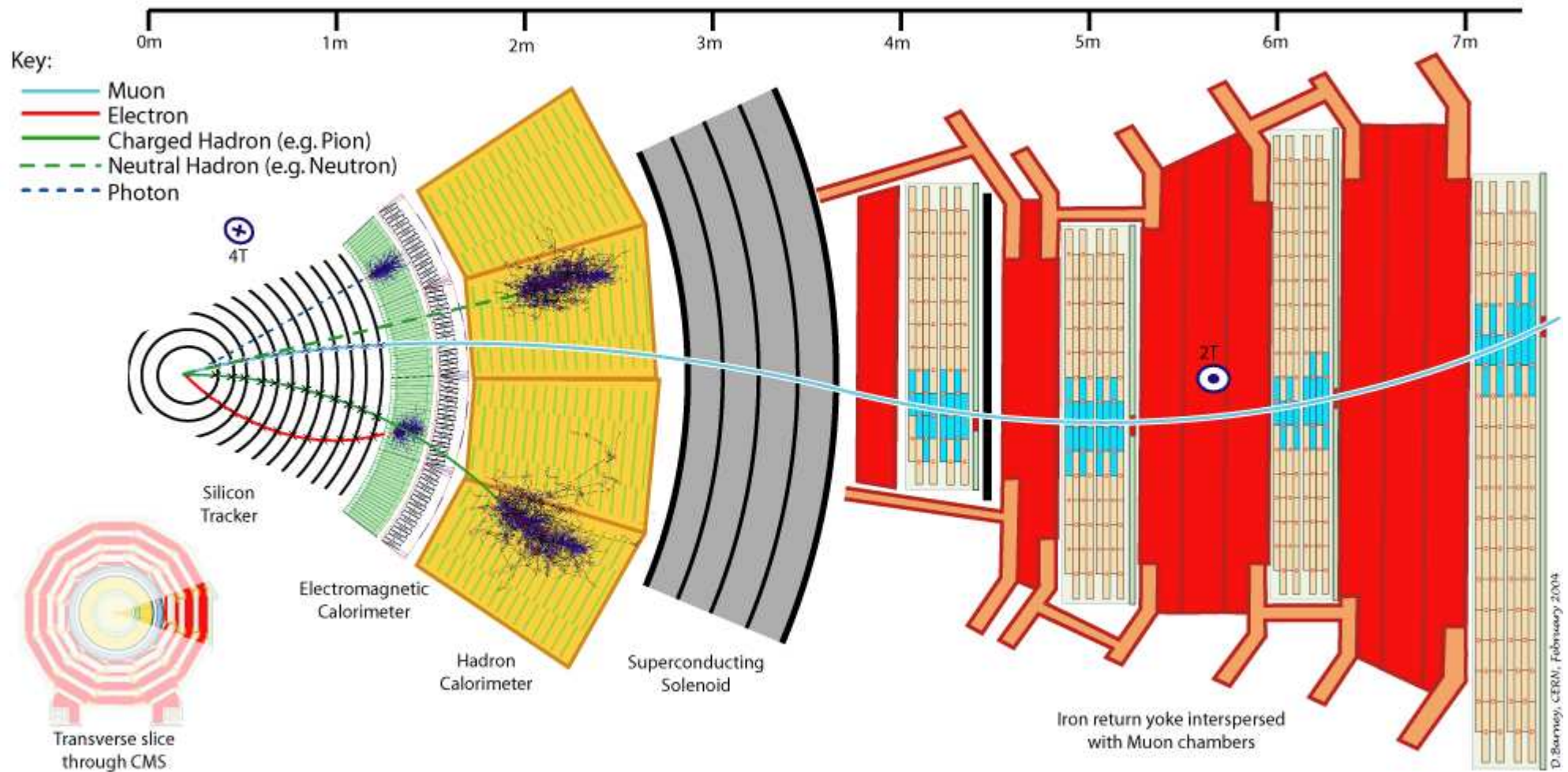
- kalorymetr elektromagnetyczny
pomiar energii elektronów i fotonów
gęsty materiał absorbujący lawinę cząstek
(mięź, ołów, wolfram)
- kalorymetr hadronowy
pomiar energii hadronów (protony, neutrony, piony, kaony)
gęsty materiał absorbujący lawinę cząstek; lawina hadronowa
jest wielokrotnie dłuższa od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

Współczesne eksperymenty



Współczesne eksperymenty

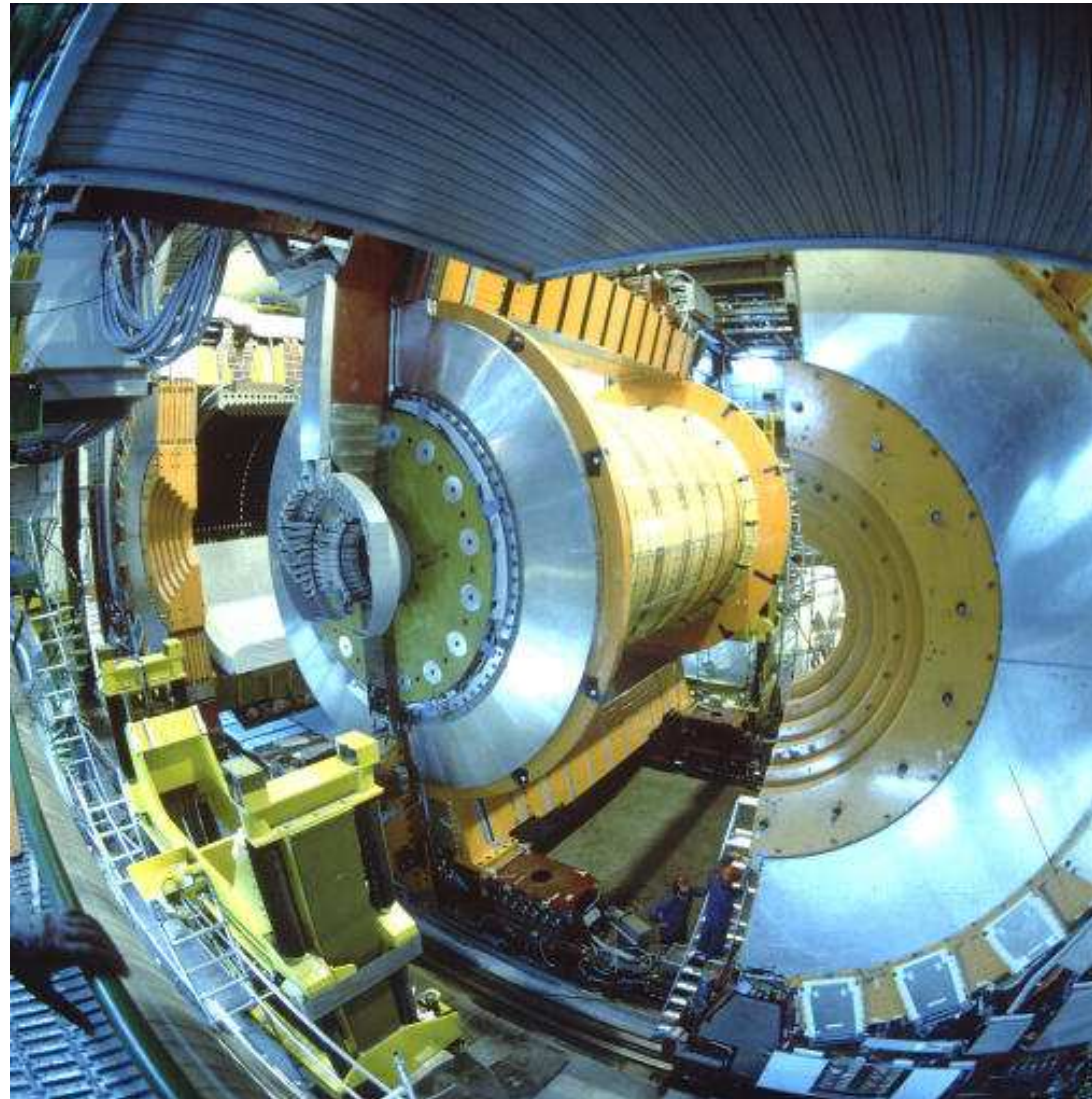
Schemat detektora CMS



Współczesne eksperymenty

OPAL

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

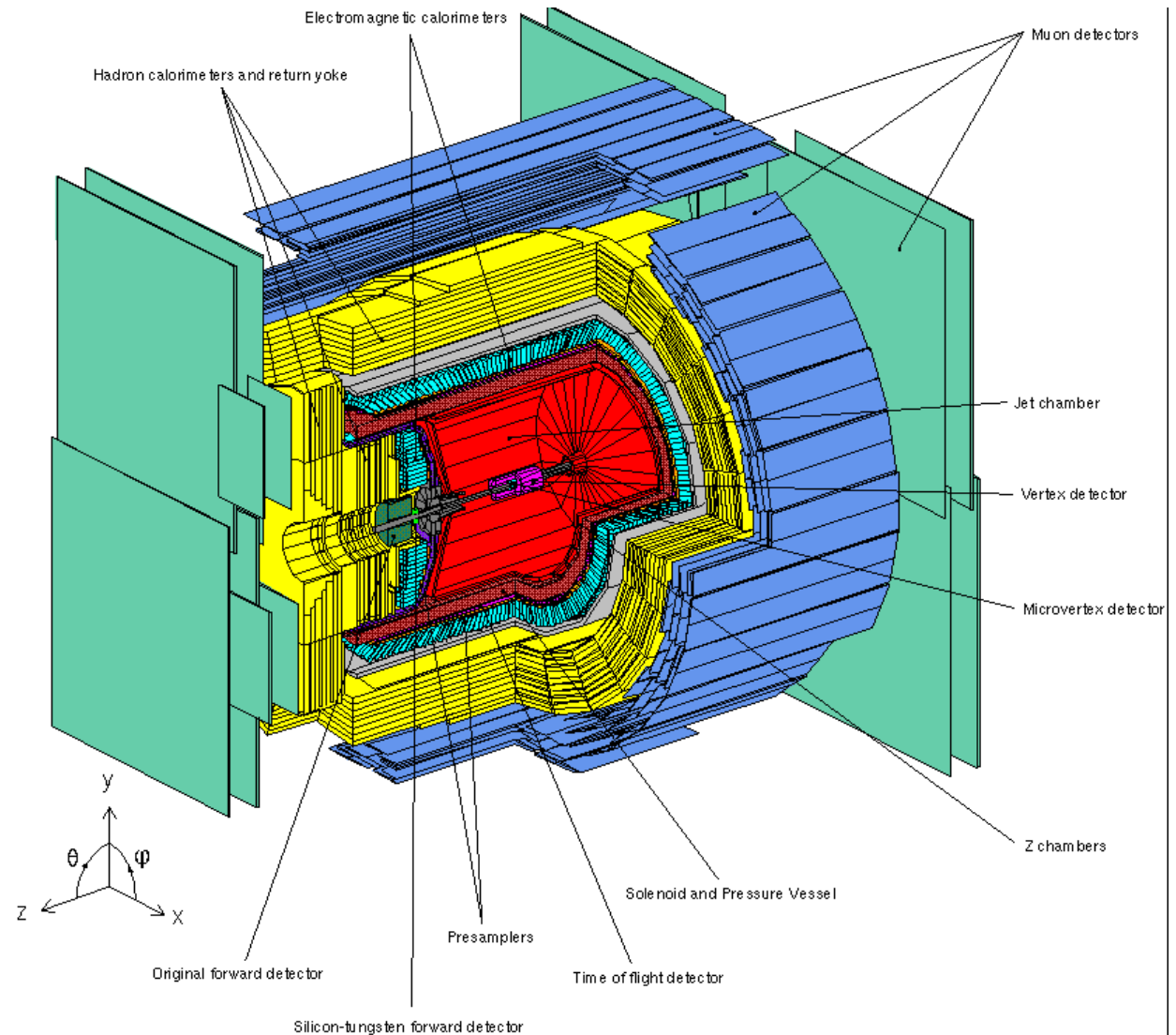


Współczesne eksperymenty

OPAL



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



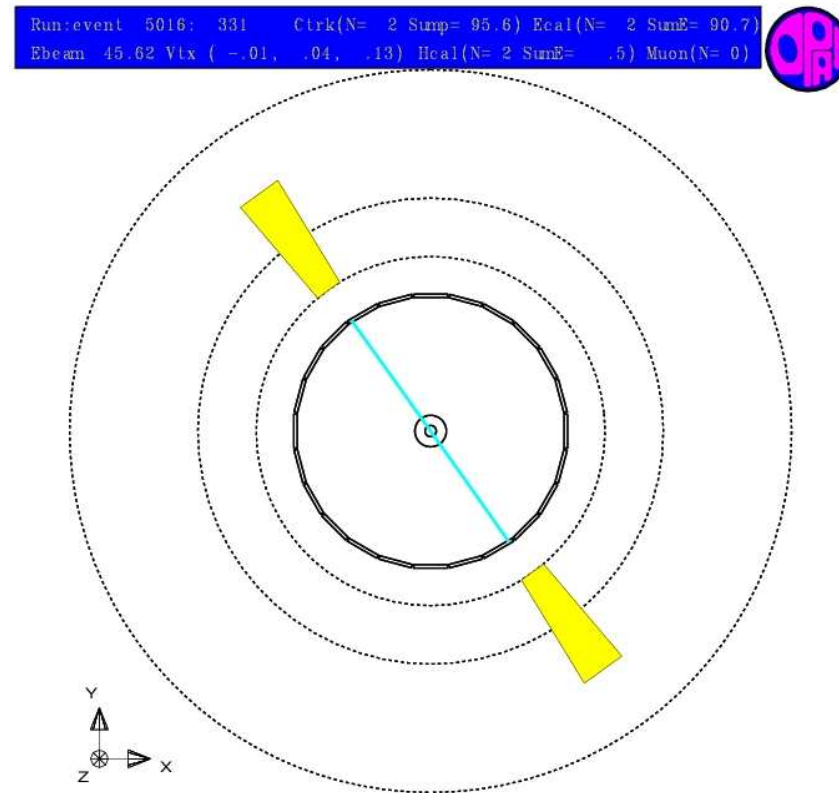
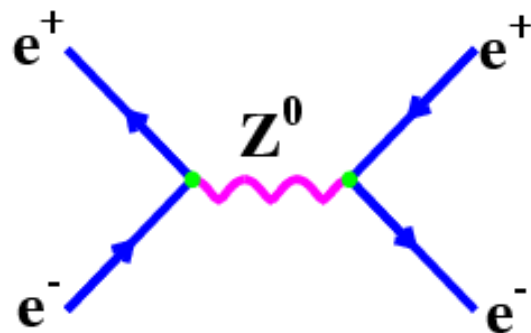
Co rejestrują detektory

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

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



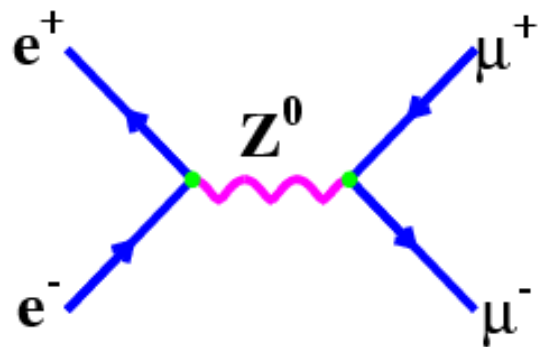
Co rejestrują detektory

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

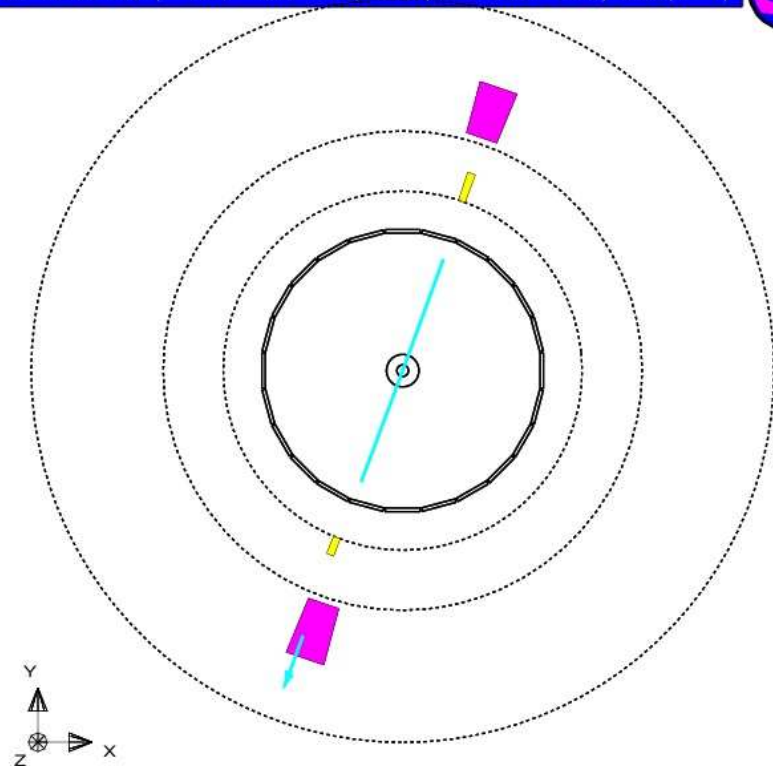
Co jest wynikiem zderzenia? Co pokazuje nam detektor?

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)
```



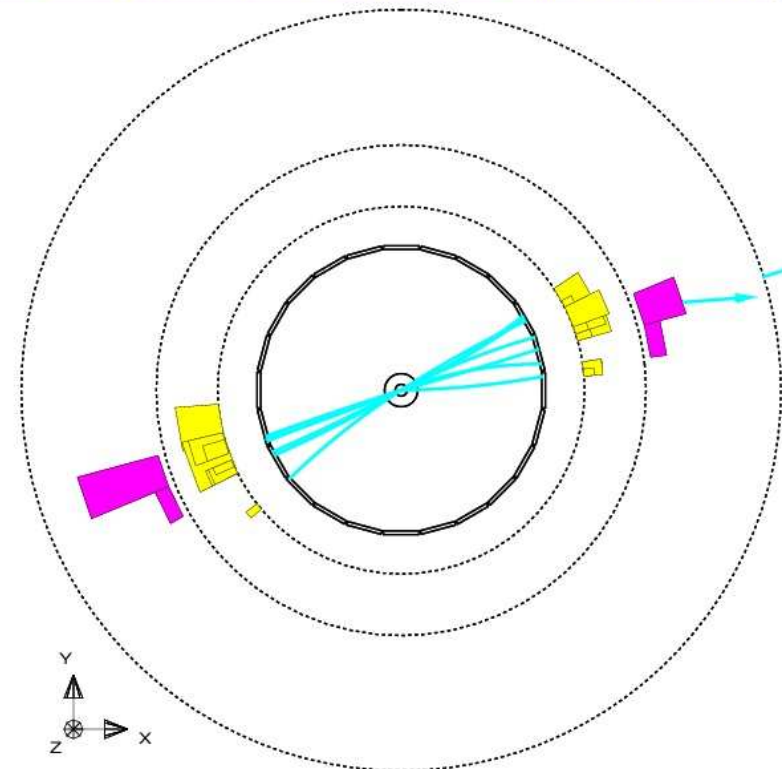
Co rejestrują detektory

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

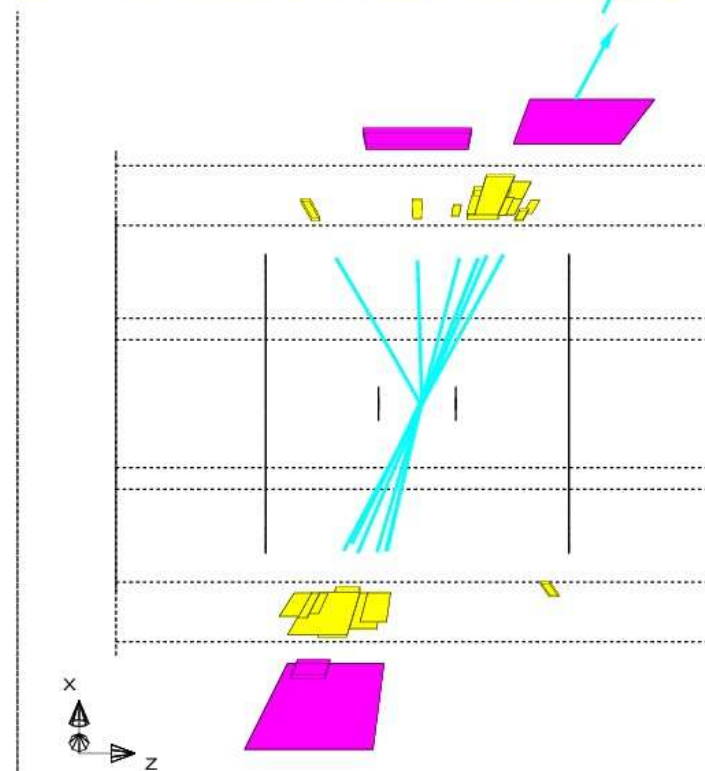
W akceleratorze **LEP** zderzano elektrony i pozytony przy energii dostępnej $\sqrt{s} = 90 - 210 GeV$.

W około 10% przypadków widzimy powstające elektrony lub miony

A jak interpretować taki przypadek?

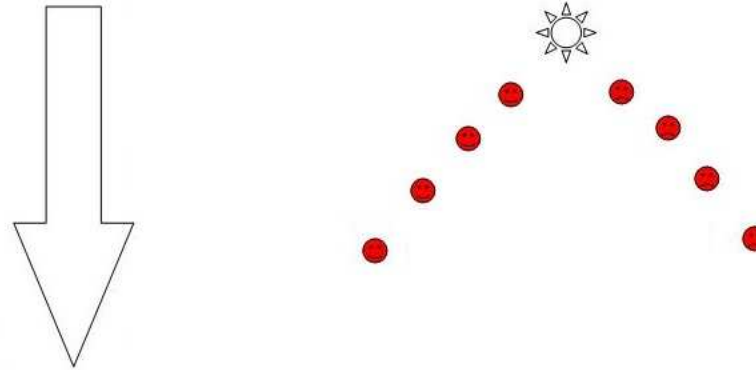
Produkowanych jest wiele cząstek, ale układają się w wyraźne “strugi”
(ang.: jety)

```
Run:event 5014: 432 Ctrk(N= 22 SumE= 42.6) Ecal(N= 26 SumE= 40.3)
Ebeam 45.62 Vtx ( -0.43, -0.05, 6.47) Hcal(N=20 SumE= 17.8) Muon(N= 2)
```



Hadronizacja

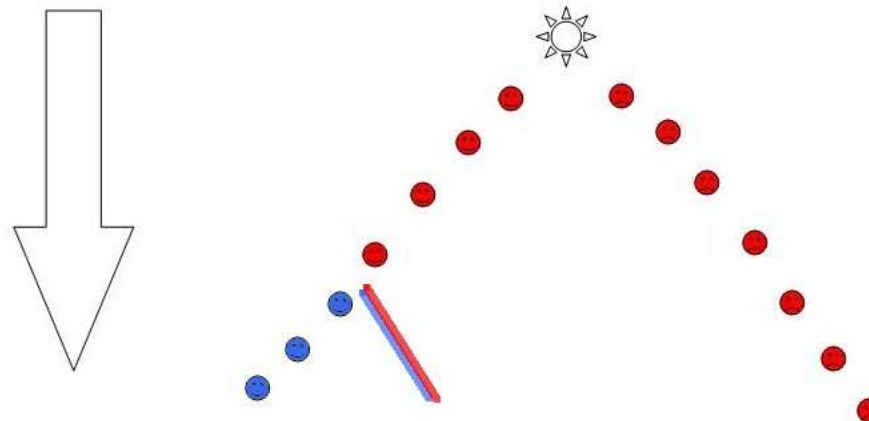
W zderzeniu powstaje para kwarków: $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$



Hadronizacja

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

Kwarki oddalają się od siebie, rośnie oddziaływanie kolorowe

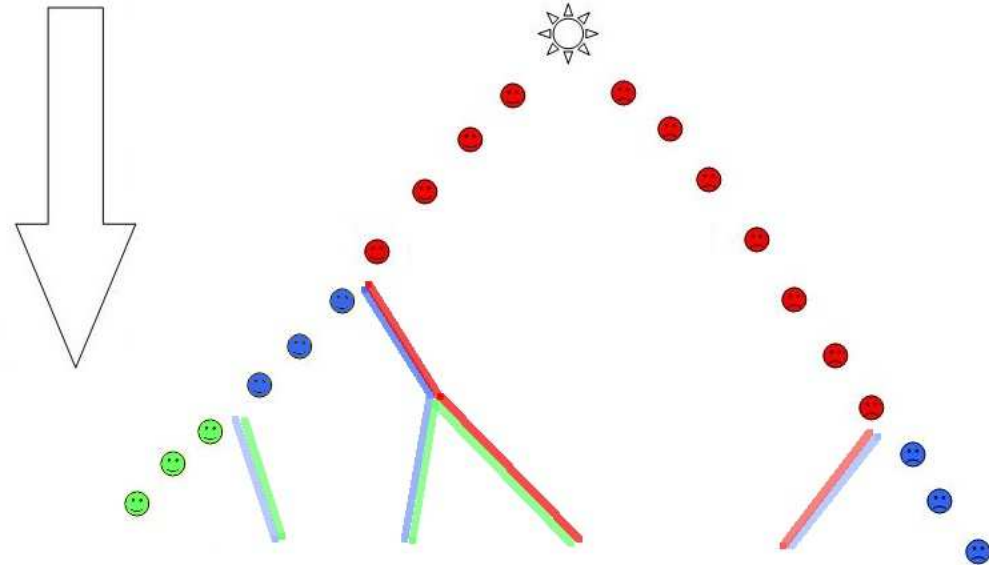


Hadronizacja

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

Kwarki oddalają się od siebie, rośnie oddziaływanie kolorowe

Dochodzi do emisji gluonów



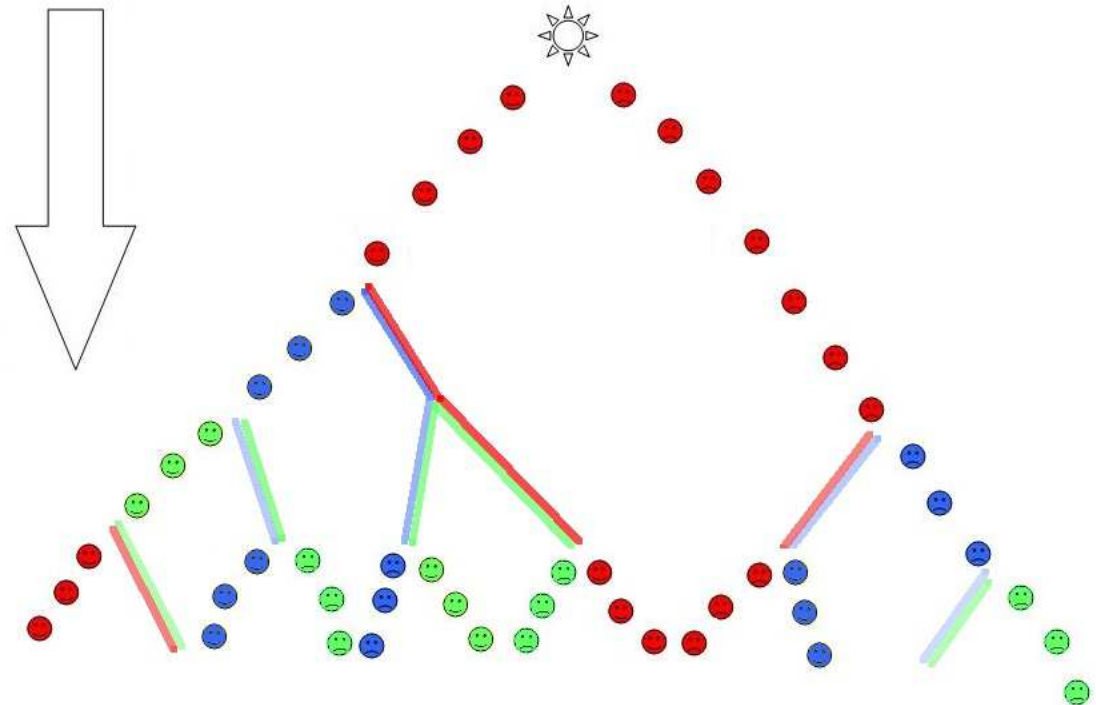
Hadronizacja

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-antykwar



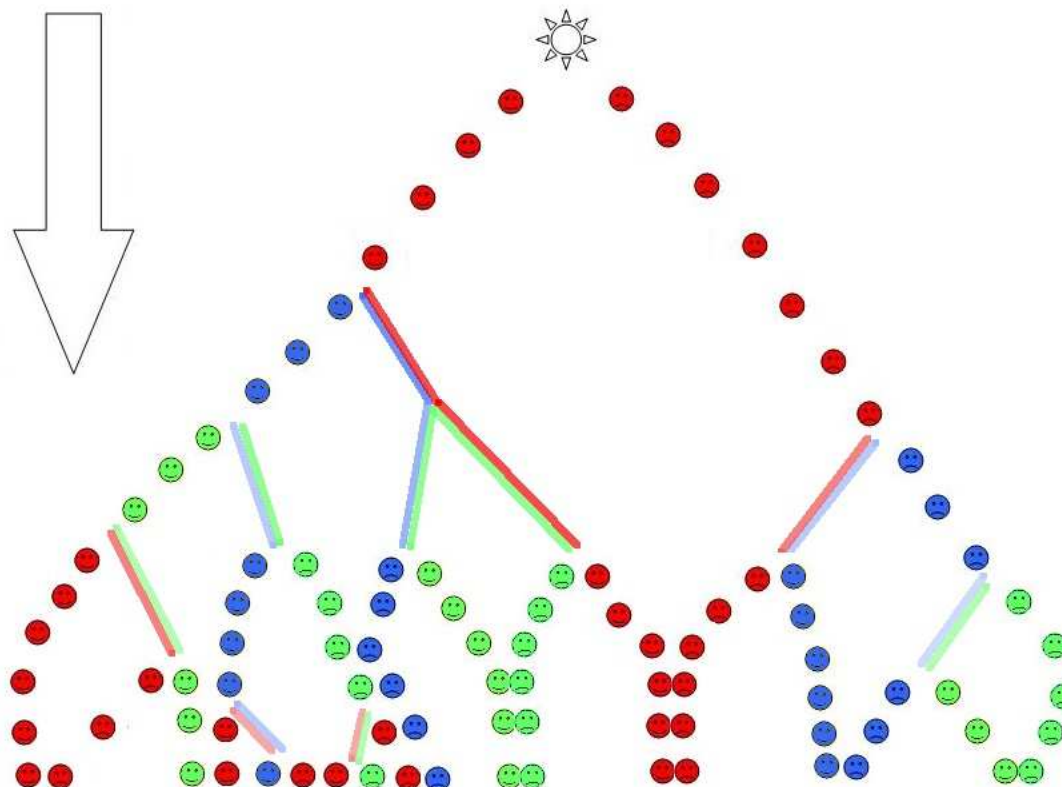
Hadronizacja

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-antykwarek



Hadronizacja

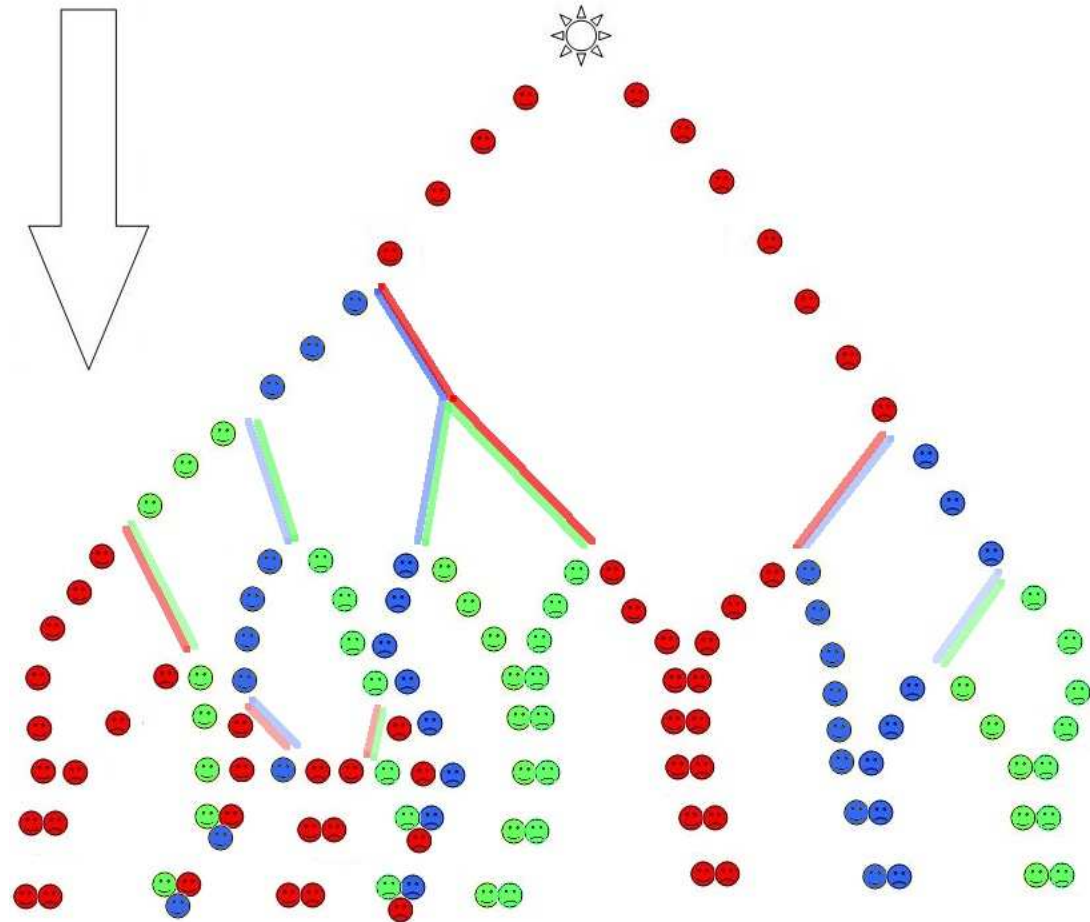
W zderzeniu powstaje para kwarków: $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$

Kwarki oddalają się od siebie, rośnie oddziaływanie kolorowe

Dochodzi do emisji gluonów

Gluony konwertują na pary kwark-antykwarek

Kwarki i antykwarki formują "białe" hadrony



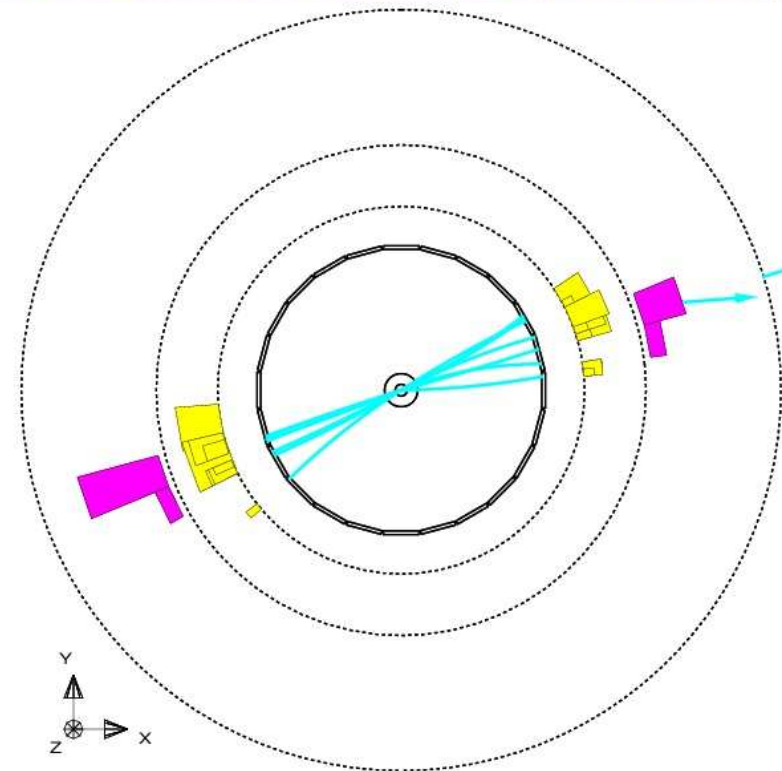
Co rejestrują detektory

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)
```



Co rejestrują detektory

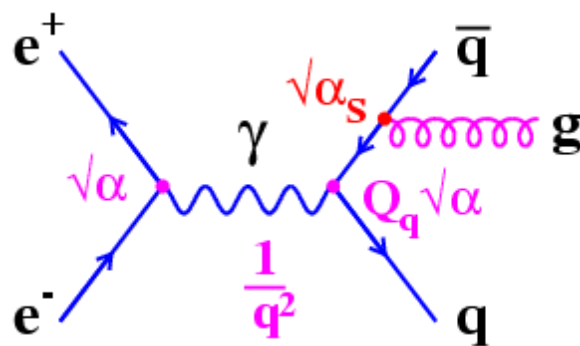
W akceleratorze **LEP** zderzano elektrony i pozytony przy energii dostępnej $\sqrt{s} = 90 - 210 GeV$.

W prawie 90% przypadków widzimy powstające jety hadronowe.

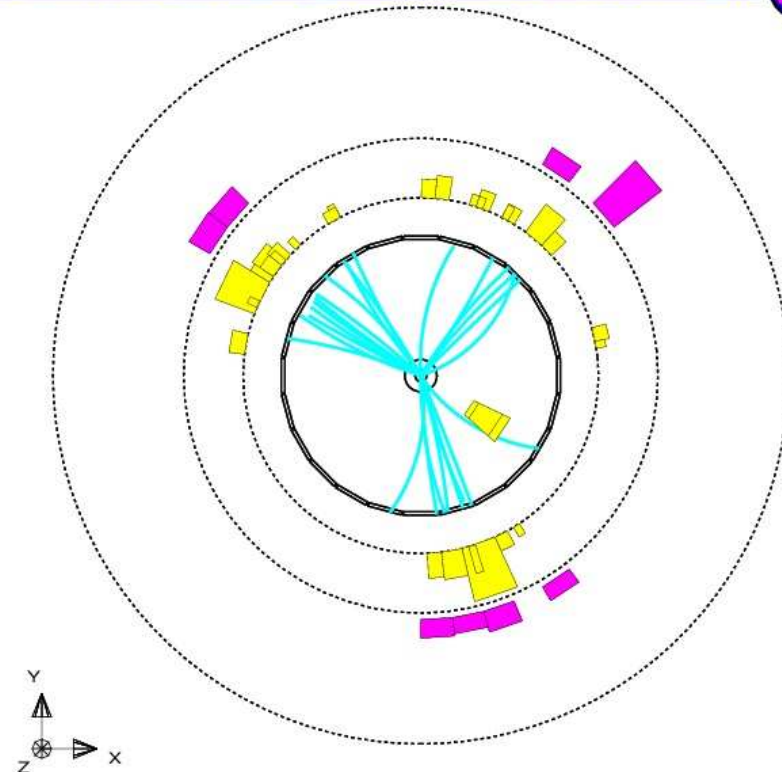
Naogół powstają 2 jety

Ale możliwe też:

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



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

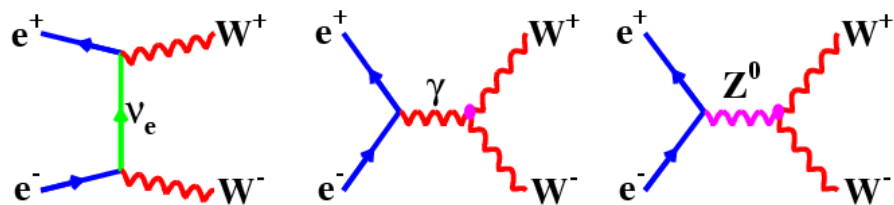


Co rejestrują detektory

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:

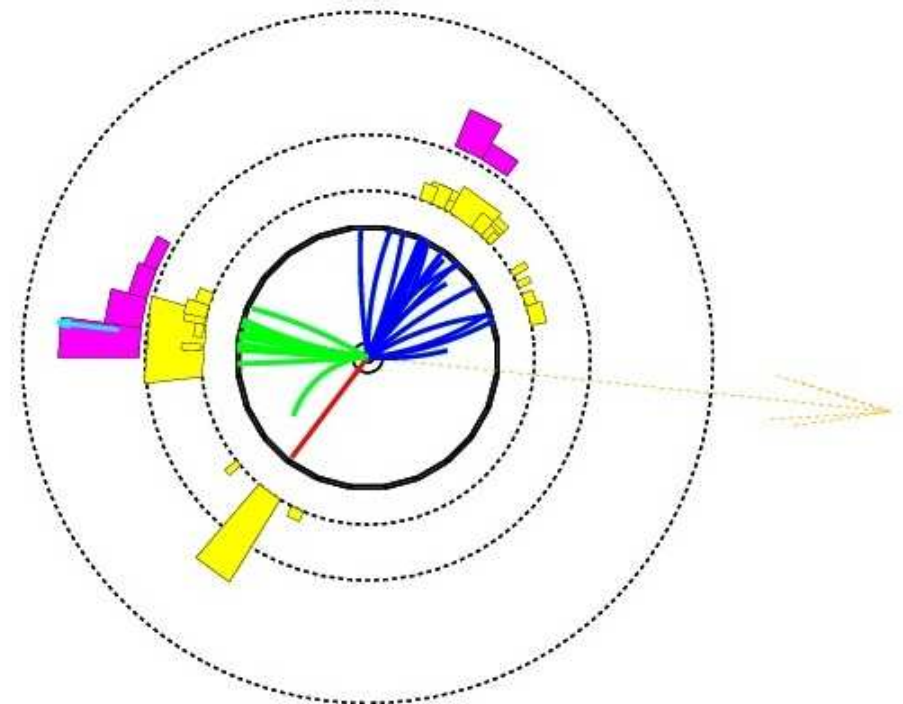


W przedstawionym przypadku

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

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

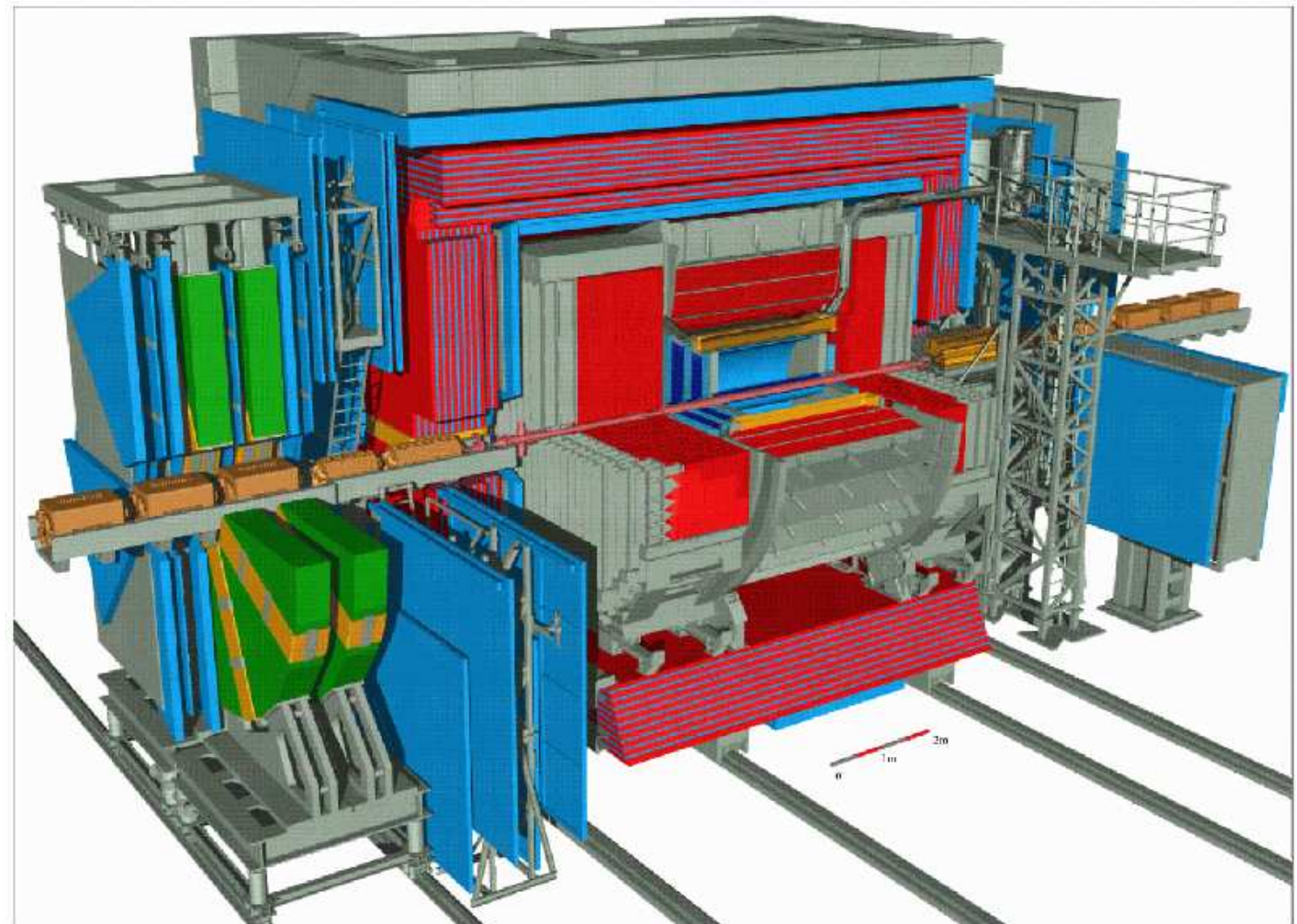
neutrino rekonstruujemy z zasady zachowania energii i pędu



Współczesne eksperymenty

ZEUS

Detektor **ZEUS**,
akcelerator
HERA,
zderzenia wiązek
przeciwbieżnych
 $e^{\pm}p$



ZEUS (HERA) 

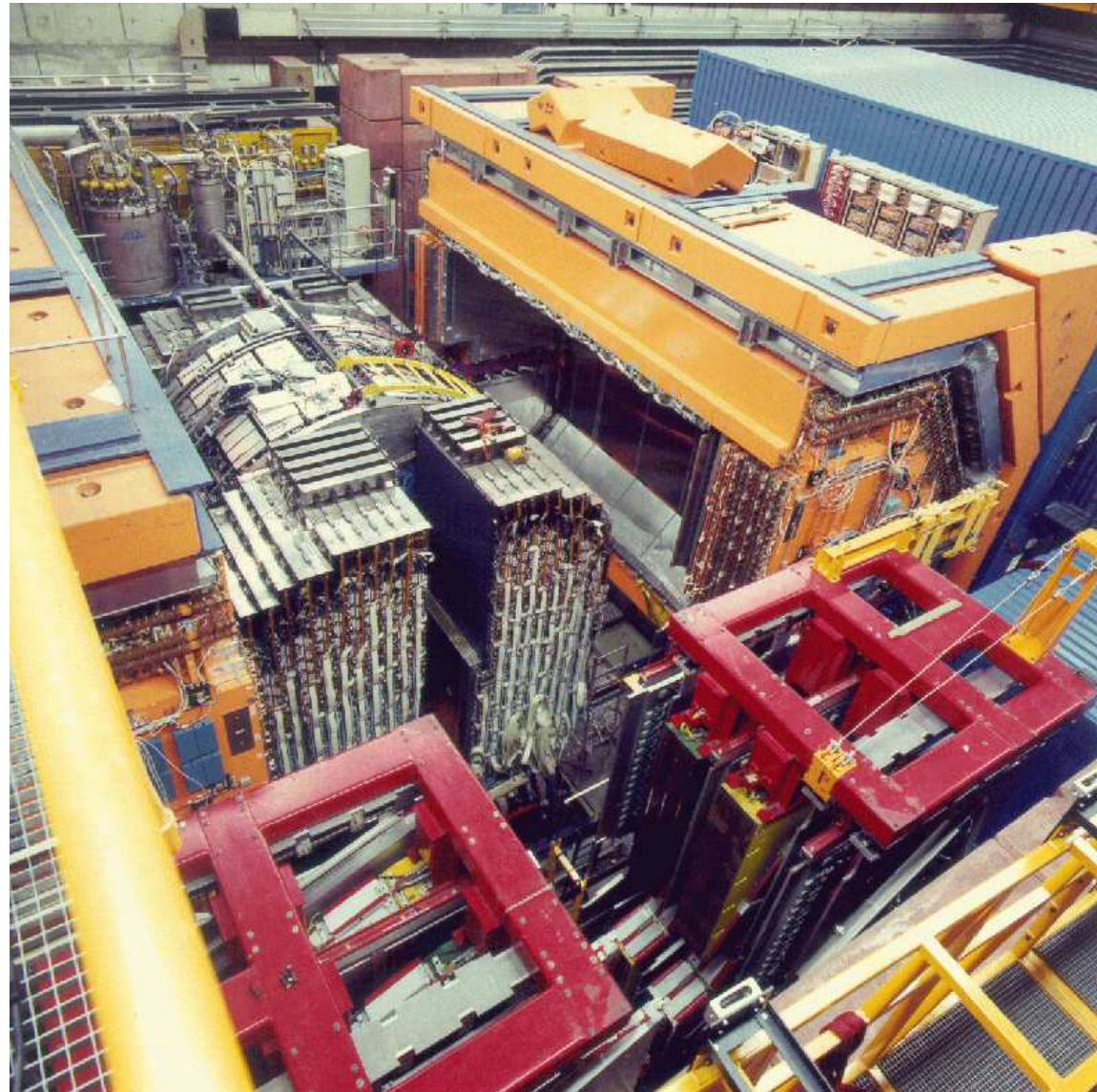
Software :SUKC-IDEAS level V1.1
Performed by : Carsten Hartmann
Status : October 1993



Współczesne eksperymenty

ZEUS

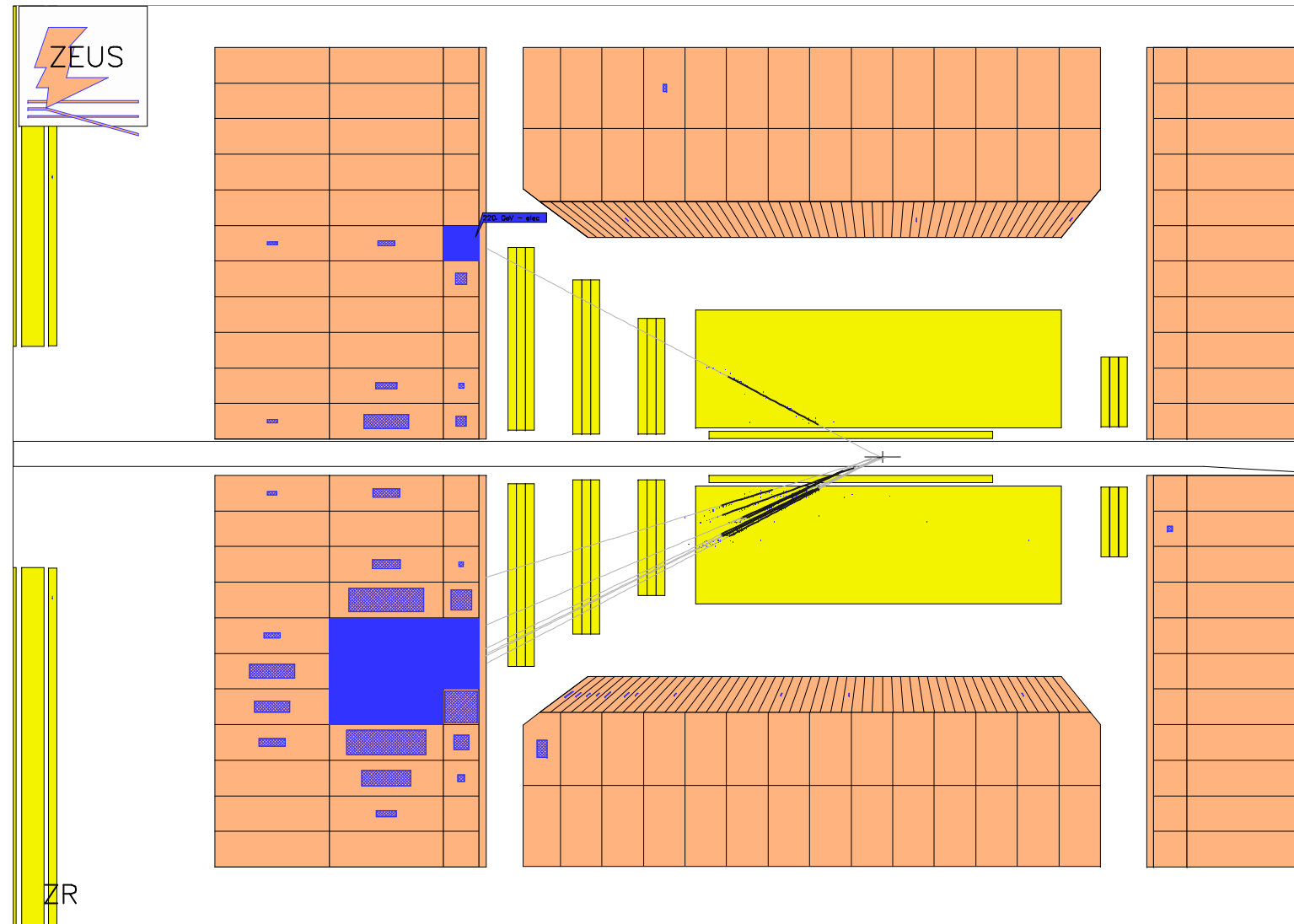
Detektor **ZEUS**,
akcelerator
HERA,
zderzenia wiązek
przeciwbieżnych
 $e^{\pm}p$



Współczesne eksperymenty

ZEUS

Detektor **ZEUS**,
akcelerator
HERA,
zderzenia wiązek
przeciwbieżnych
 $e^\pm p$

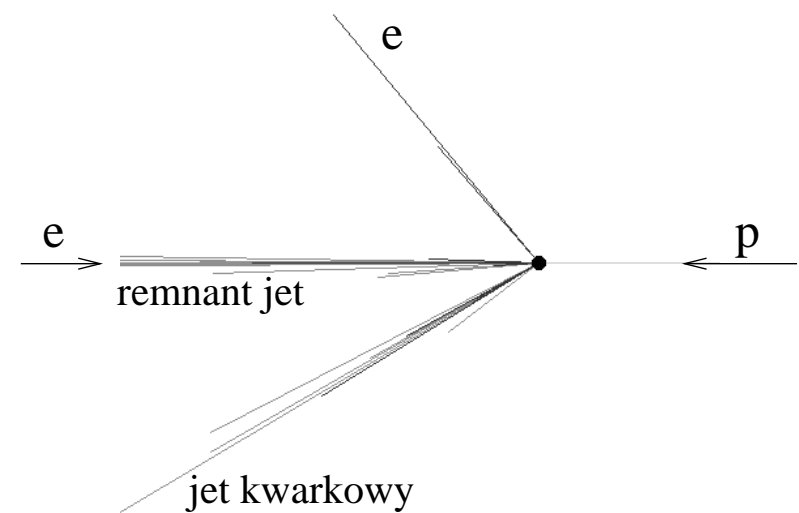
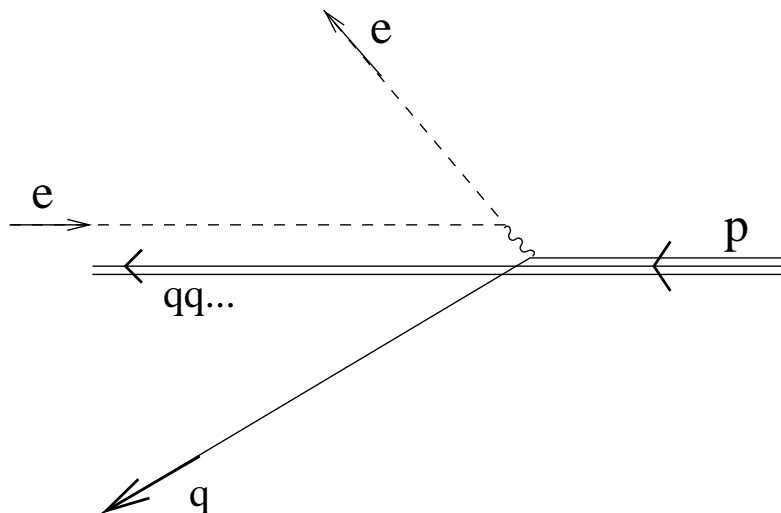


Współczesne eksperymenty

ZEUS

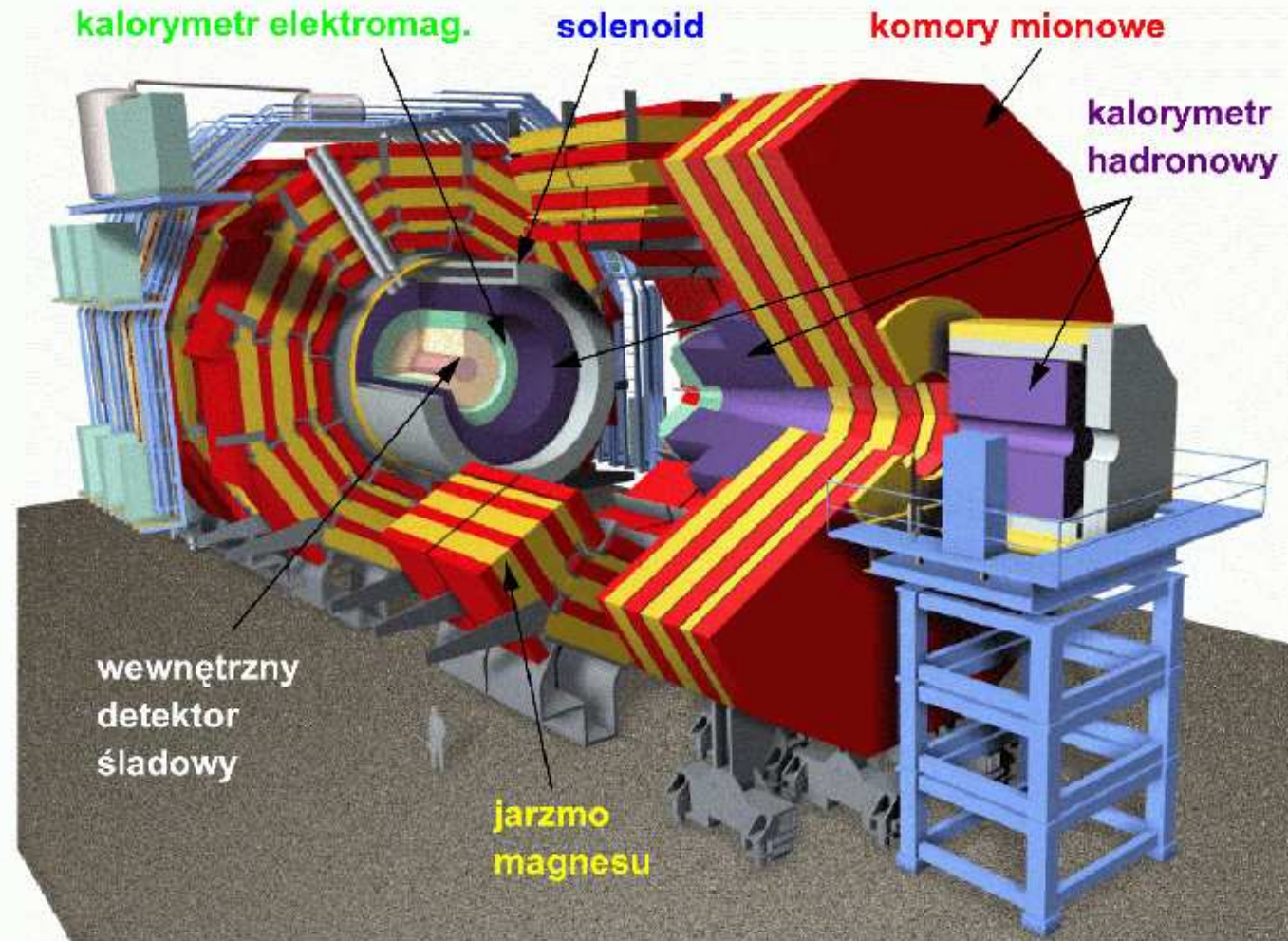
W pierwszym przybliżeniu rozproszeniu ulega **elektron** i **pojedynczy kwark**. Reszta kwarków z protonu kontynuuje swój 'lot' jako tzw. **"remnant"** (pozostałości)

Pojedynczych kwarków nigdy nie obserwujemy. **Oddziaływanie silne** prowadzi do tzw. **hadronizacji**: powstają wtórne pary $q\bar{q}$ i kwarki zamieniają się w **jety**.



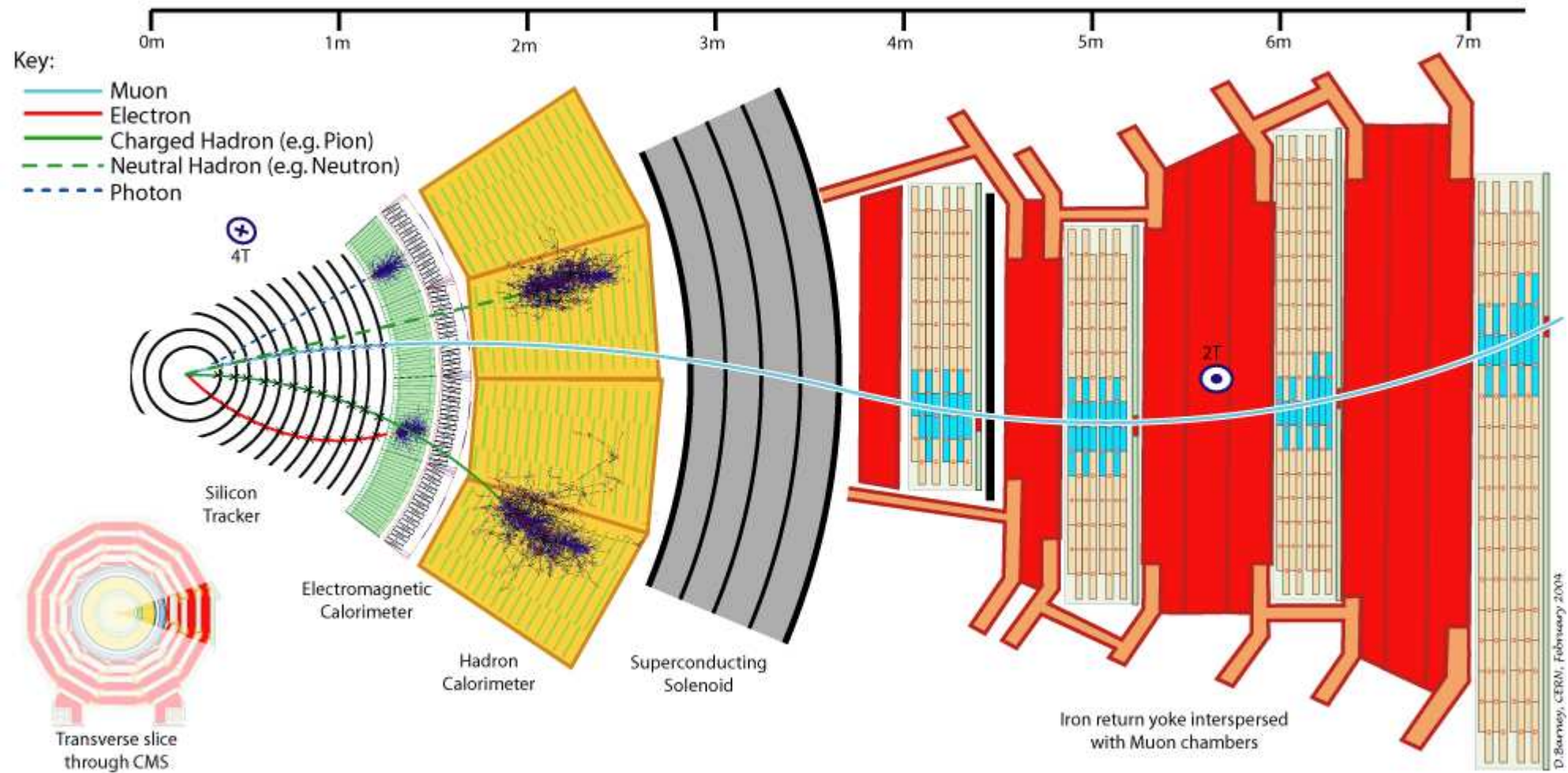
Współczesne eksperymenty

Compact Muon Solenoid



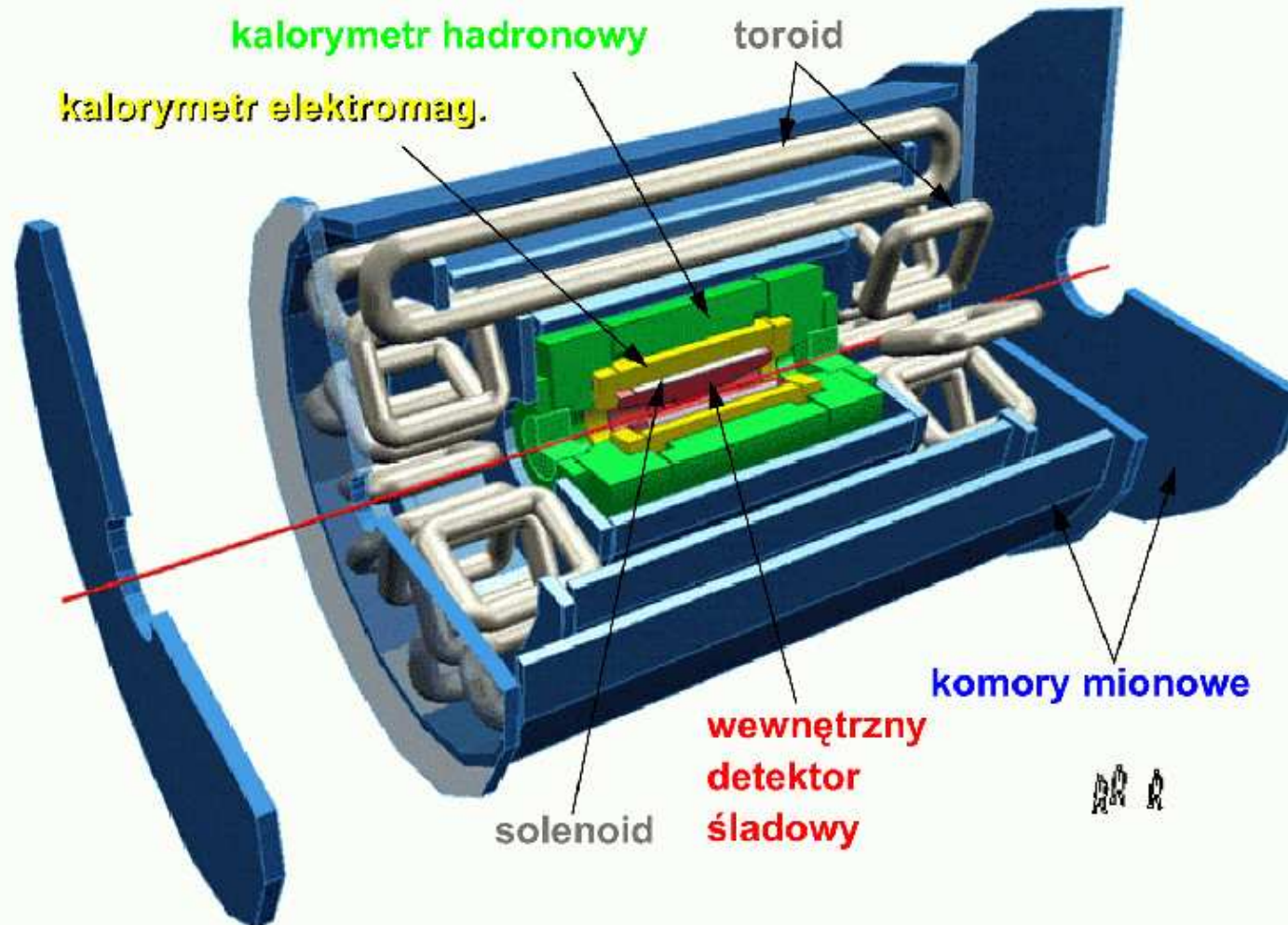
Współczesne eksperymenty

Compact Muon Solenoid - CMS



Współczesne eksperymenty

A Toroidal LHC ApparatuS (ATLAS)



Lata przygotowań - ATLAS

15 grudnia 2003



Lata przygotowań - ATLAS

15 czerwca 2004



Lata przygotowań - ATLAS

15 grudnia 2004



Lata przygotowań - ATLAS

15 czerwca 2005



Lata przygotowań - ATLAS

15 grudnia 2005

UX15 Jura Thu Dec 15 17:00:07 2005



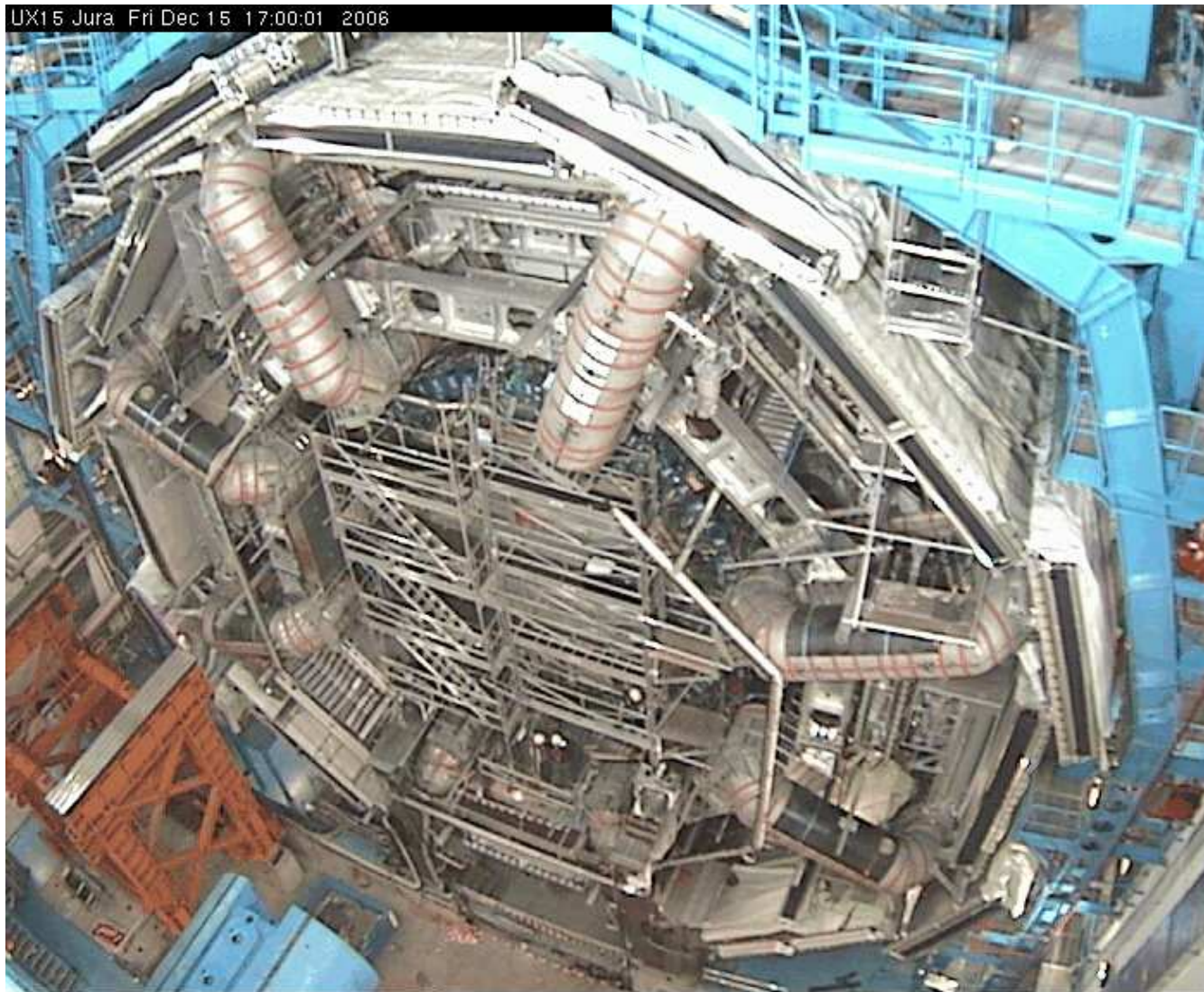
Lata przygotowań - ATLAS

15 czerwca 2006



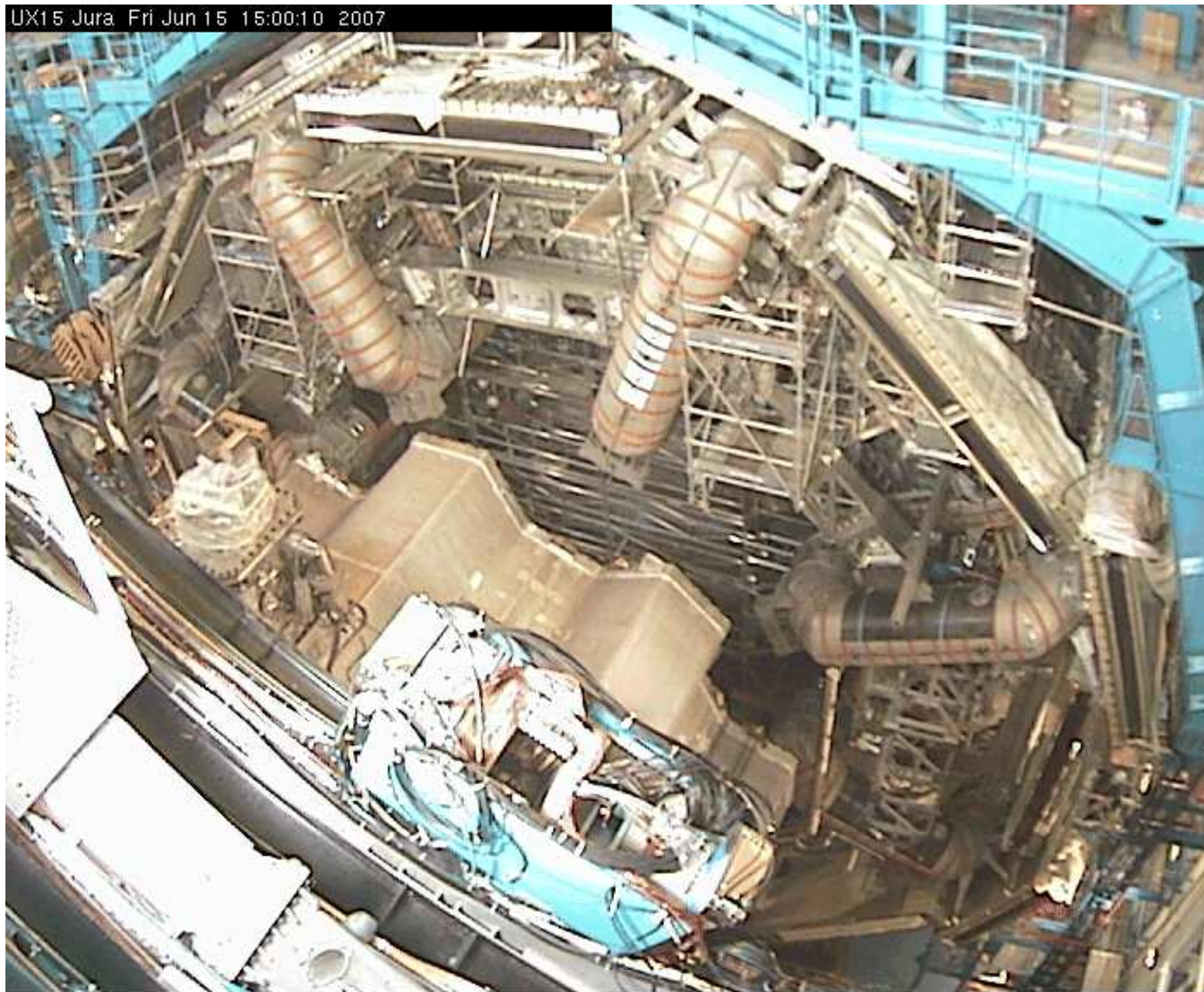
Lata przygotowań - ATLAS

15 grudnia 2006



Lata przygotowań - ATLAS

15 czerwca 2007



Lata przygotowań - ATLAS

15 grudnia 2007



Lata przygotowań - ATLAS

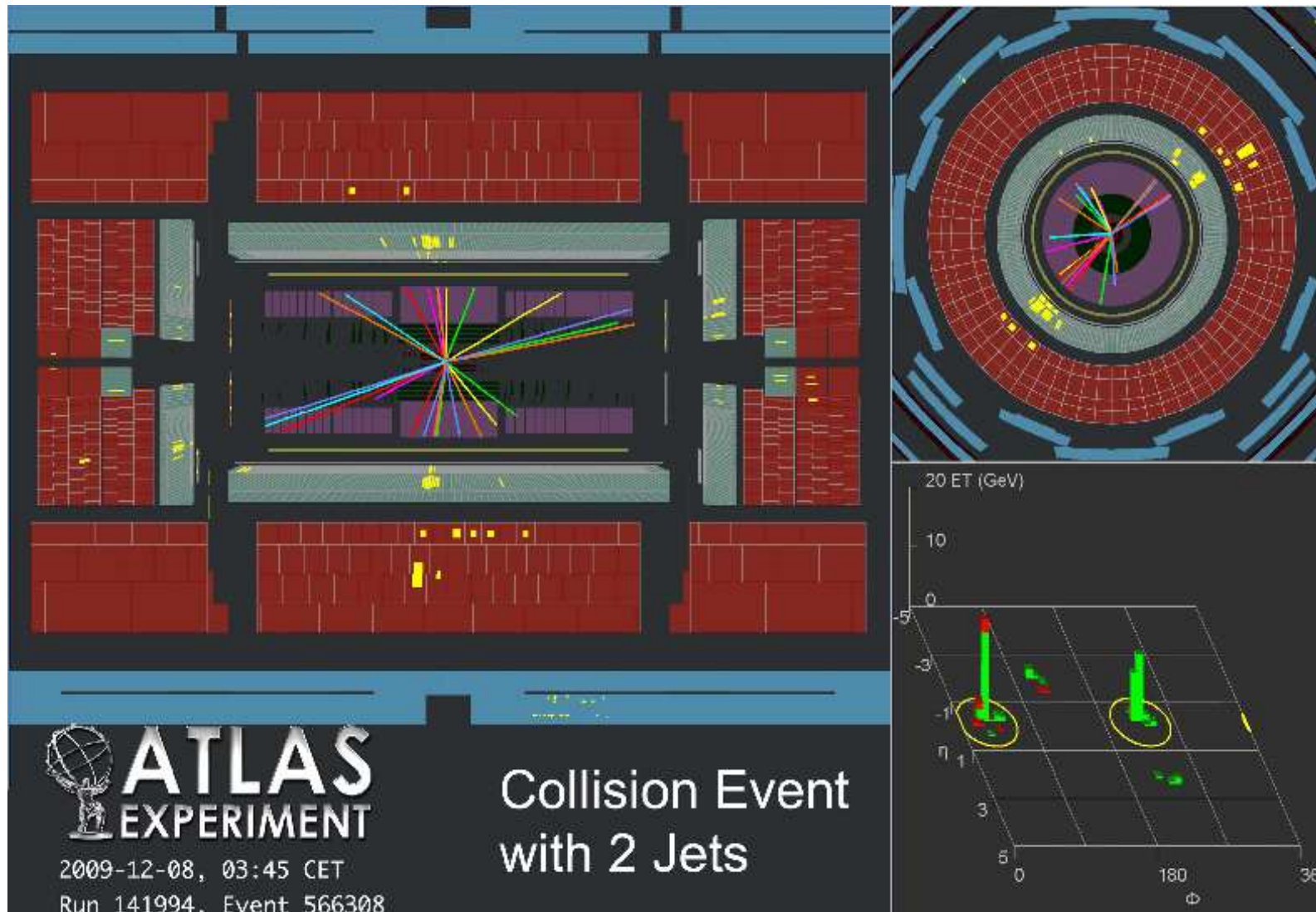
23 luty 2008

UX15 Jura Sat Feb 23 14:00:02 2008



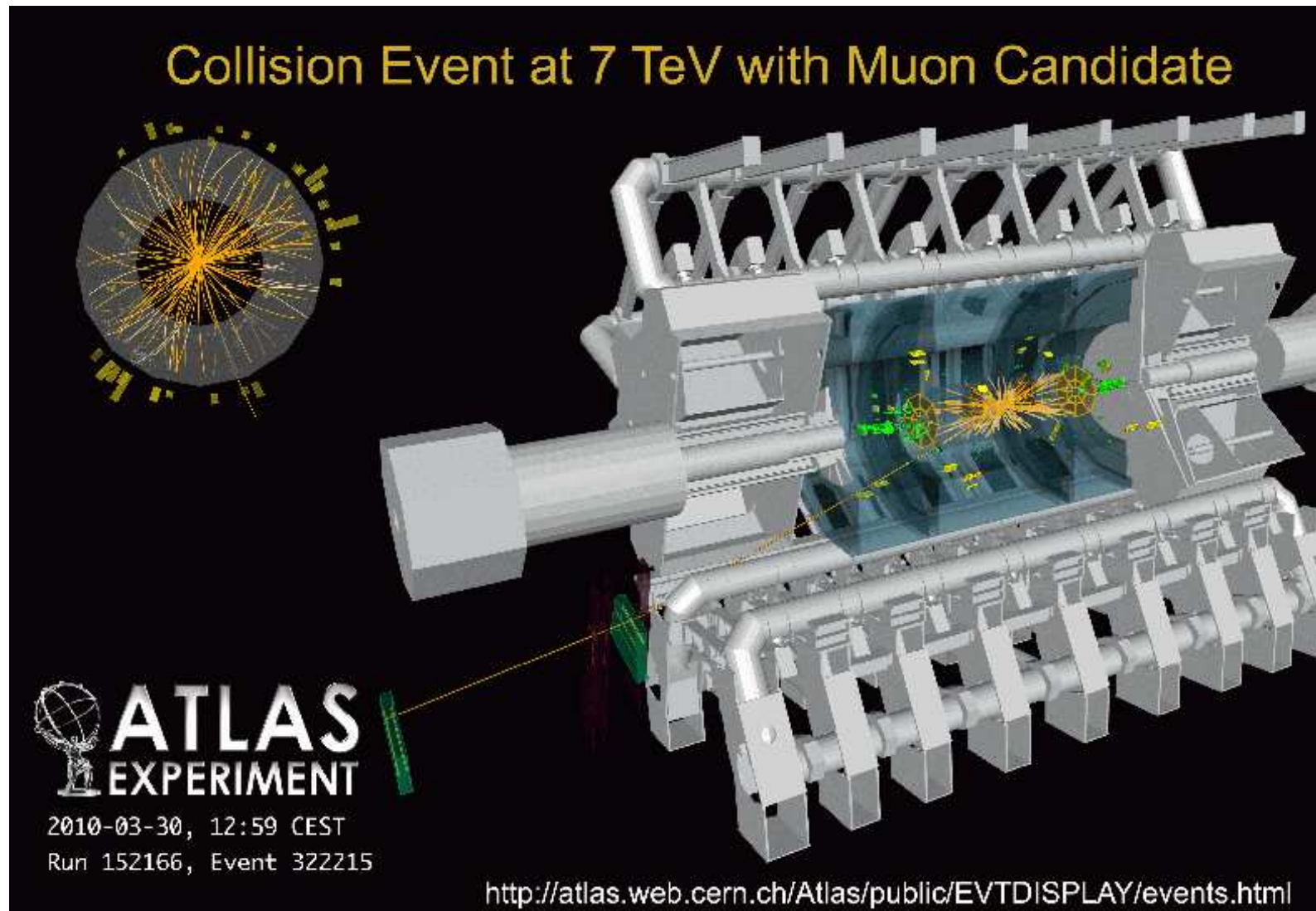
LHC już zbiera dane

ATLAS: pierwsze dane 2009



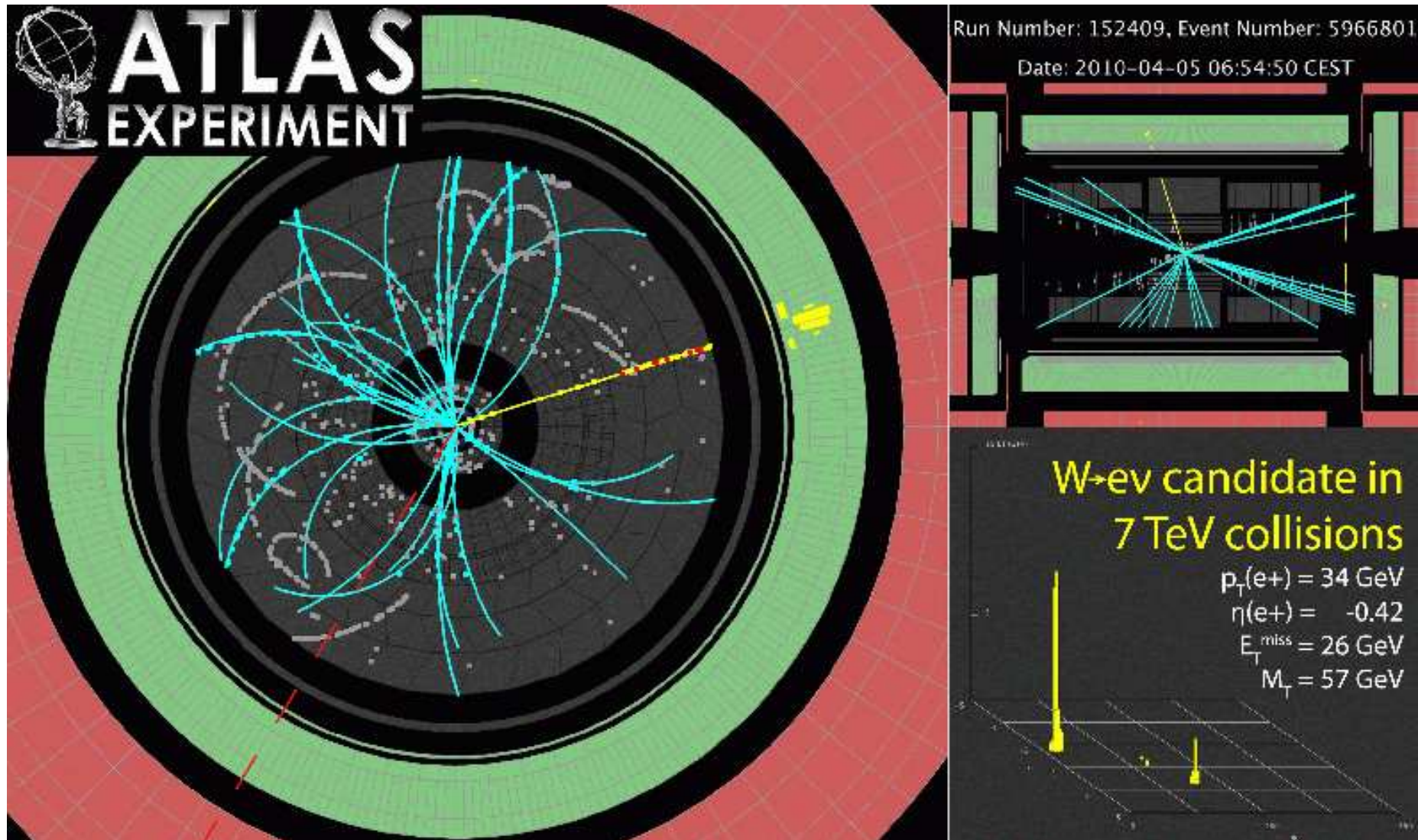
LHC już zbiera dane

ATLAS: pierwsze dane przy 7 TeV (2010)



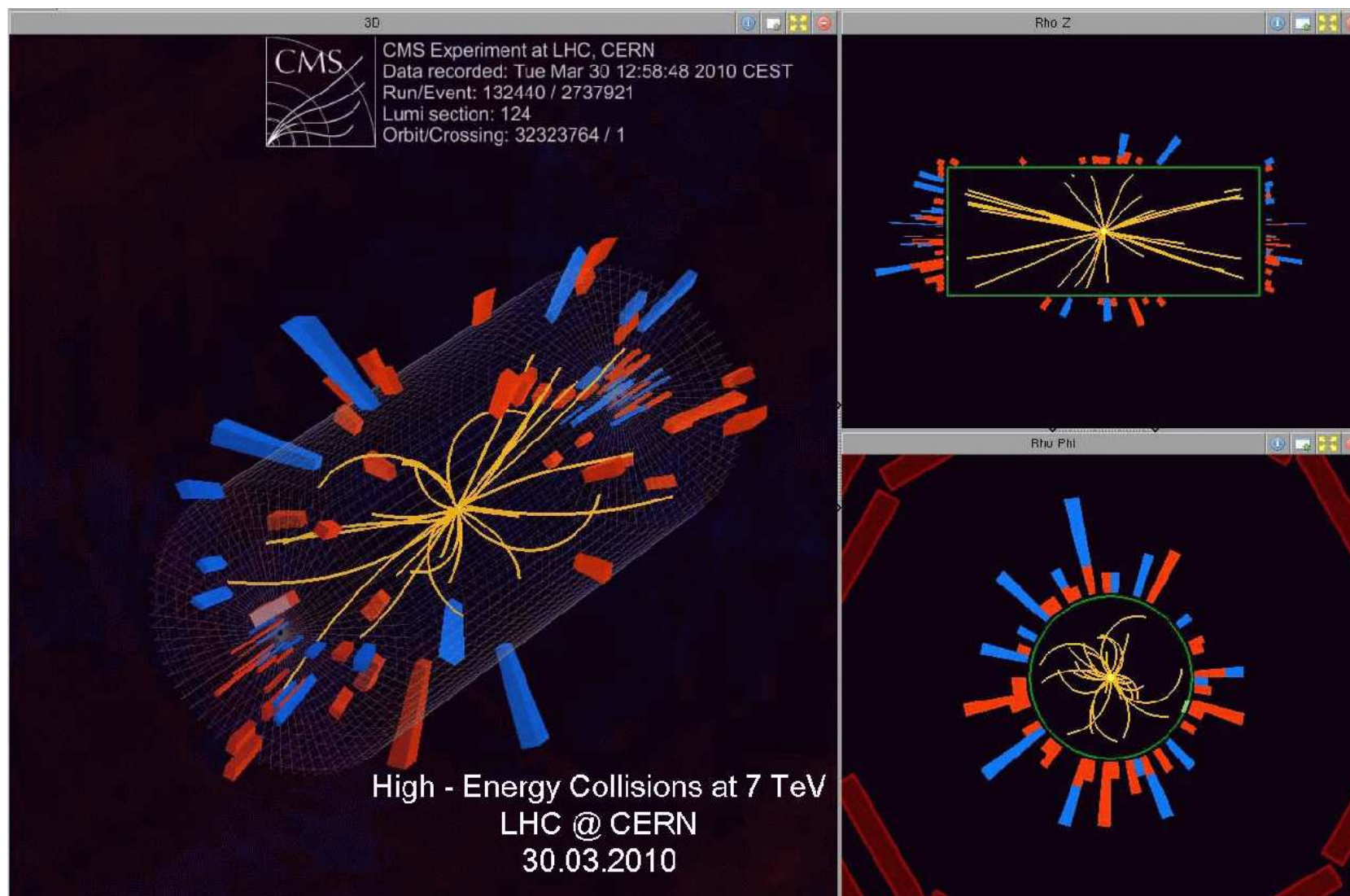
LHC już zbiera dane

ATLAS: pierwsze dane przy 7 TeV (2010)



LHC już zbiera dane

CMS: pierwsze dane przy 7 TeV (2010)

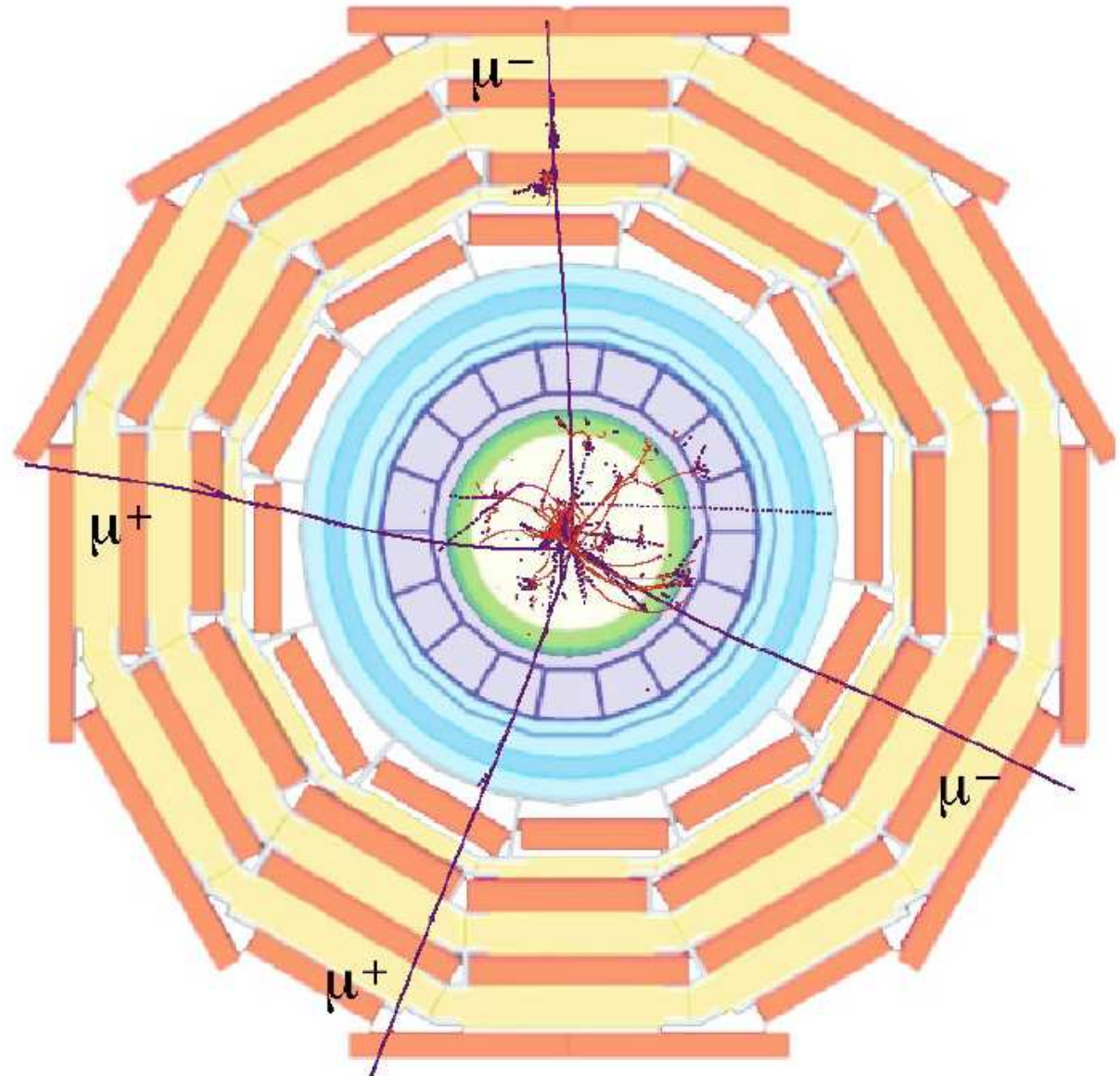


Współczesne eksperymenty

W detektorze CMS przy LHC mamy nadzieję zobaczyć takie przypadki:

Produkcja Bozonu Higgsa i rozpad

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



Współczesne eksperymenty

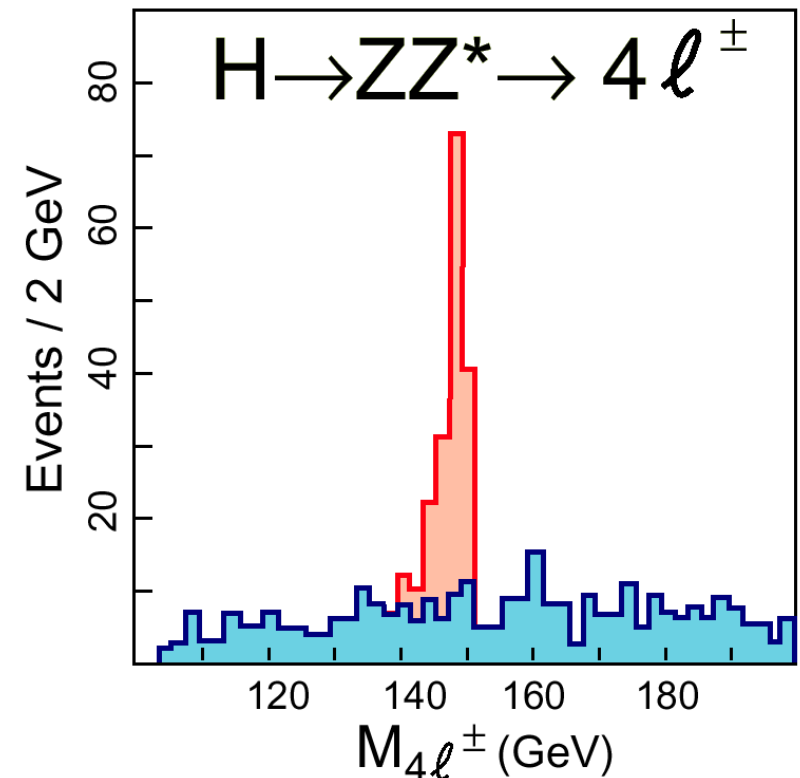
Poszukiwania **bozonu Higgsa** a następnie **pomiar** jego **parametrów** jest jednym z głównych tematów badań w LHC.

Najbardziej obiecujący jest **kanal**:

$$pp \rightarrow H \rightarrow Z^0 Z^0 \rightarrow l^+ l^- l^+ l^-$$

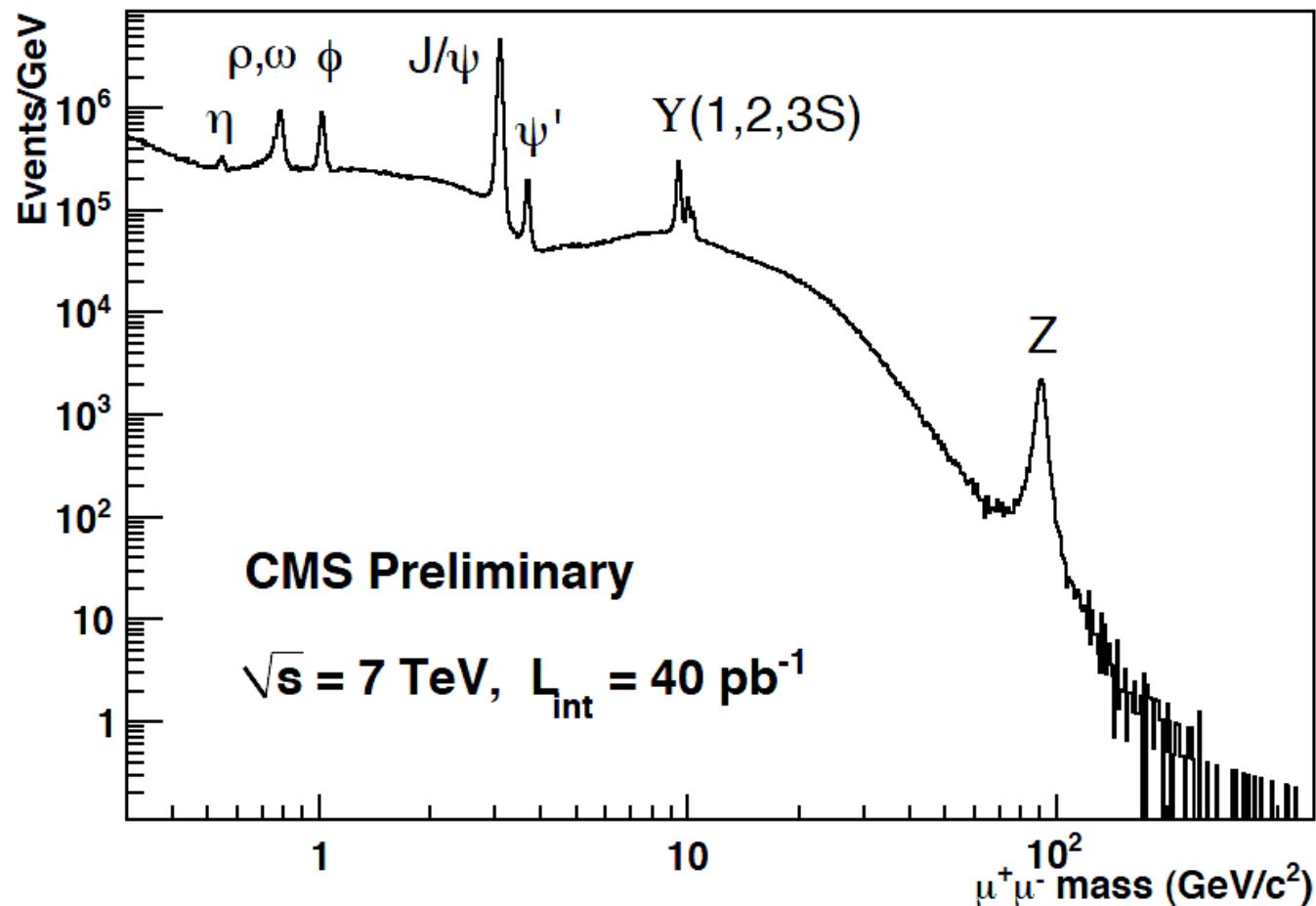
gdyż naładowane leptony (e^\pm i μ^\pm) można **łatwo zidentyfikować** (kalorymetr elektromagnetyczny, komory mionowe)

Ale wciąż nie będzie to łatwe zadanie!



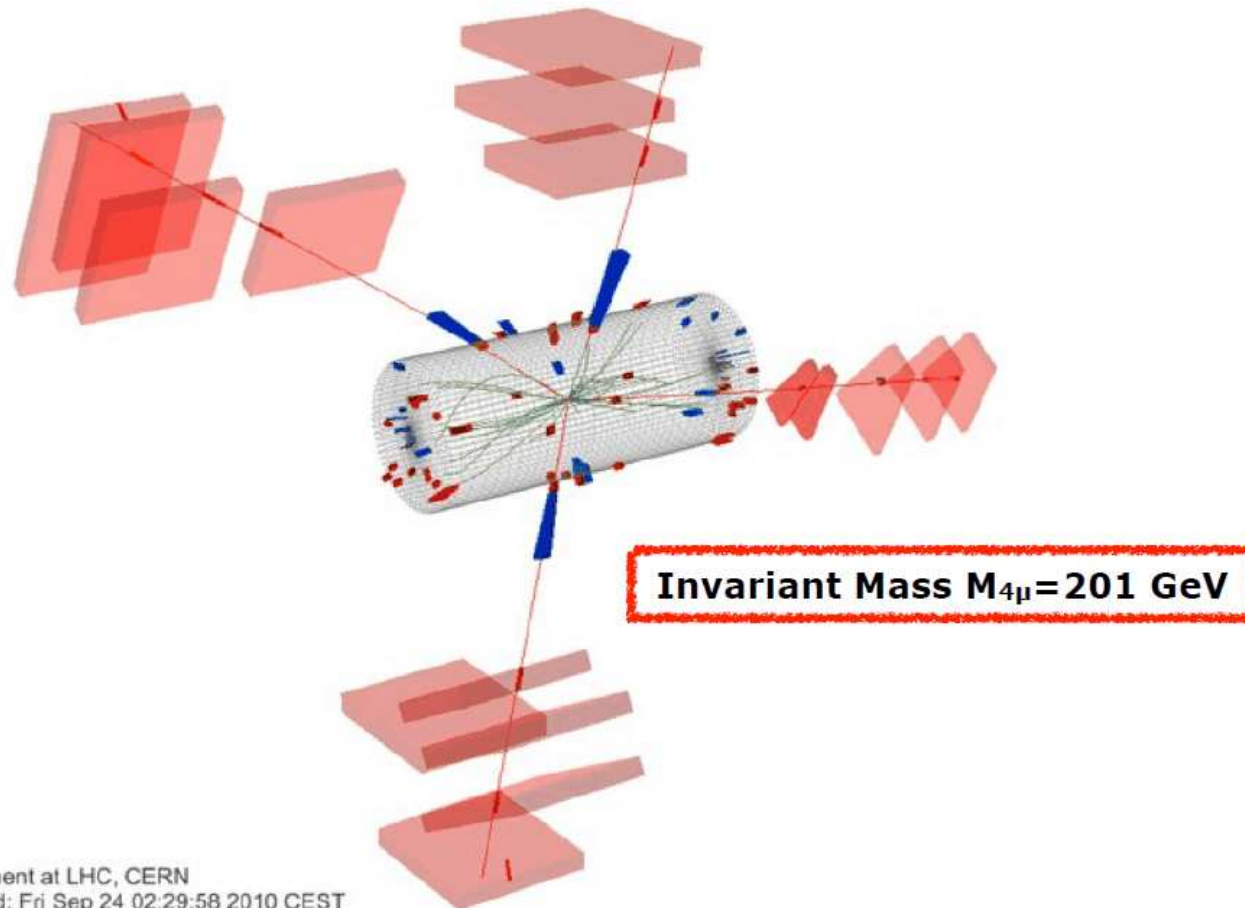
Współczesne eksperymenty

Rozkład masy niezmienniczej par mionów zrekonstruowanych w detektorze CMS, w danych z roku 2010. Jeśli para mionów powstała z rozpadu jakiejś cząstki to masa niezmiennicza odpowiada jej masie.



Współczesne eksperymenty

Do tej pory w CMS znaleziono jednak tylko pojedyncze przypadki, w których widoczne są dwa bozony Z^0 w rozpadzie na dwa miony.



Ale w tym roku świetność akceleratora ma znacznie wzrosnąć!



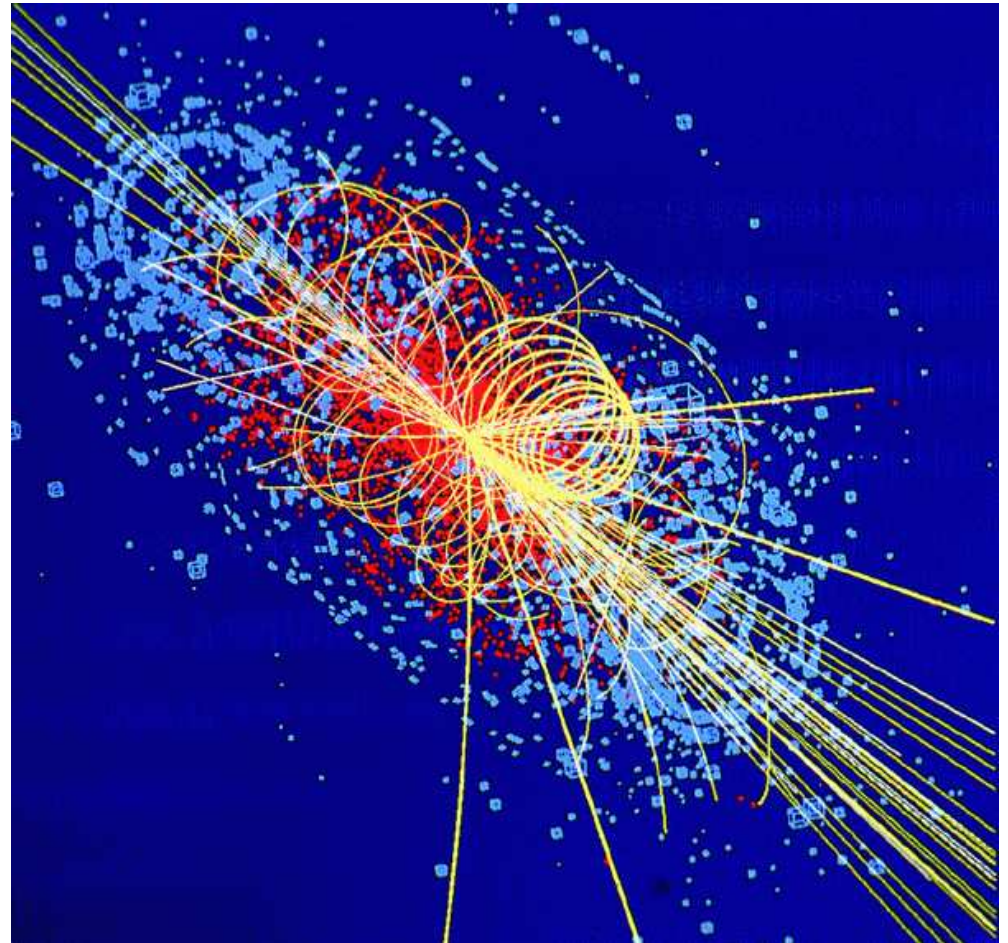
Współczesne eksperymenty

Przy każdym przecięciu paczek zderzać się będzie kilkadziesiąt par protonów.

W prawie każdym zderzeniu wyprodukowane będą nowe cząstki.

Koło miliarda oddziaływań na sekundę!

Jak wybrać te ciekawe?



Współczesne eksperymenty

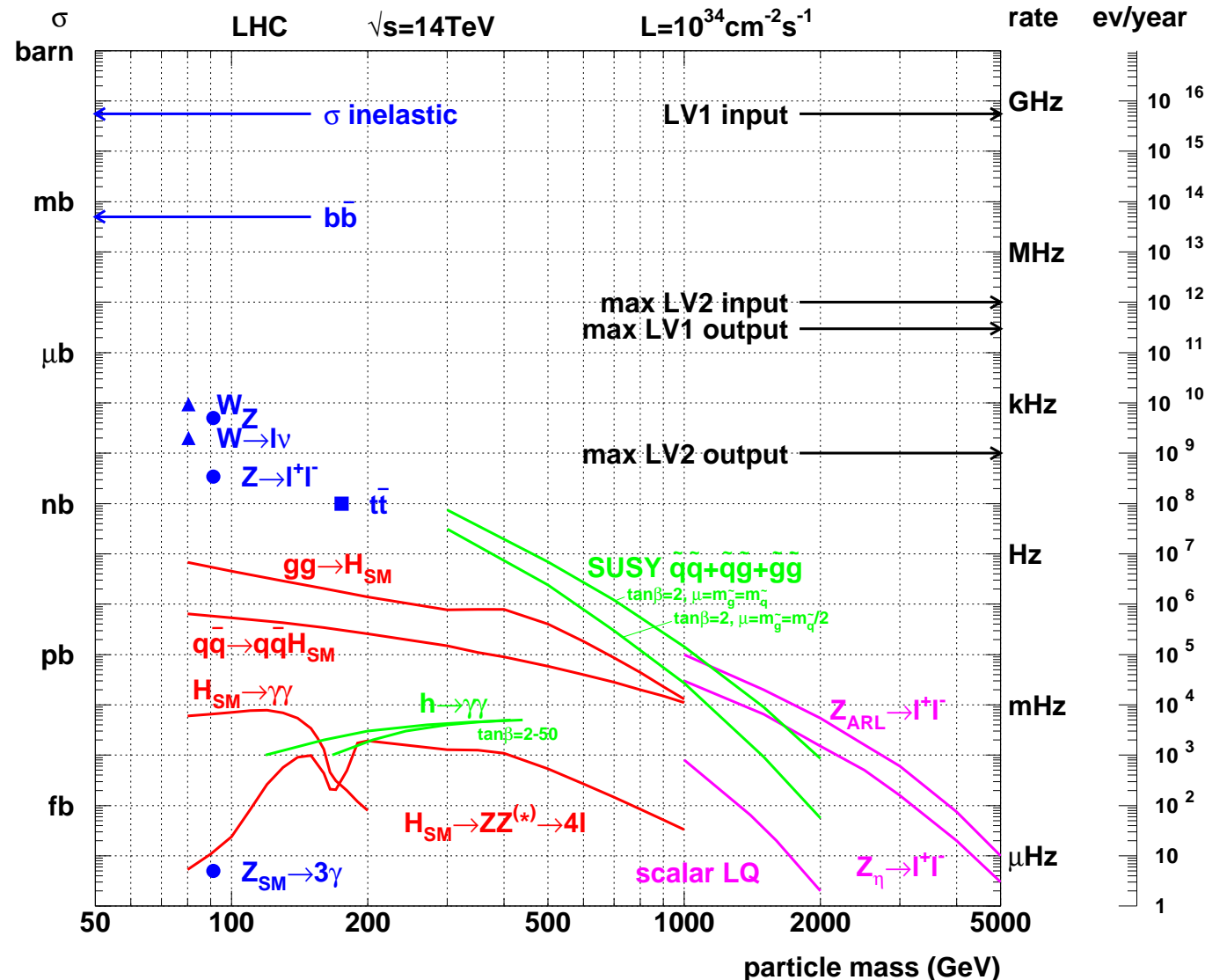
Układ wyzwala

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

Tylko “ciekawe” sygnaly są czytane z detektora.

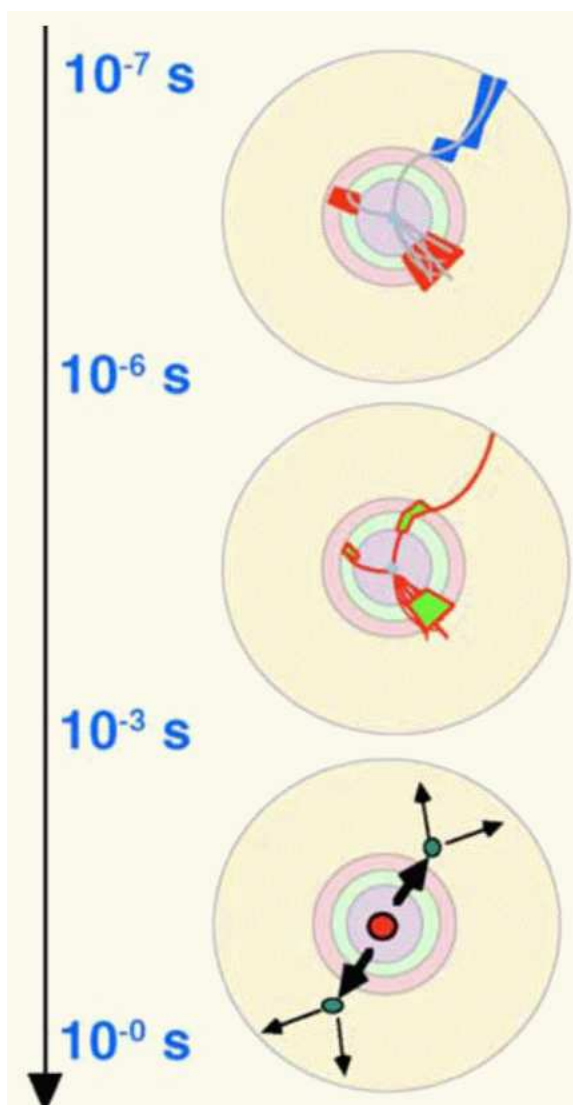
Te przypadki są dalej przepuszczane przez specjalne programy - “filtry”, które mają odrzucać wszystkie śmieci.

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!

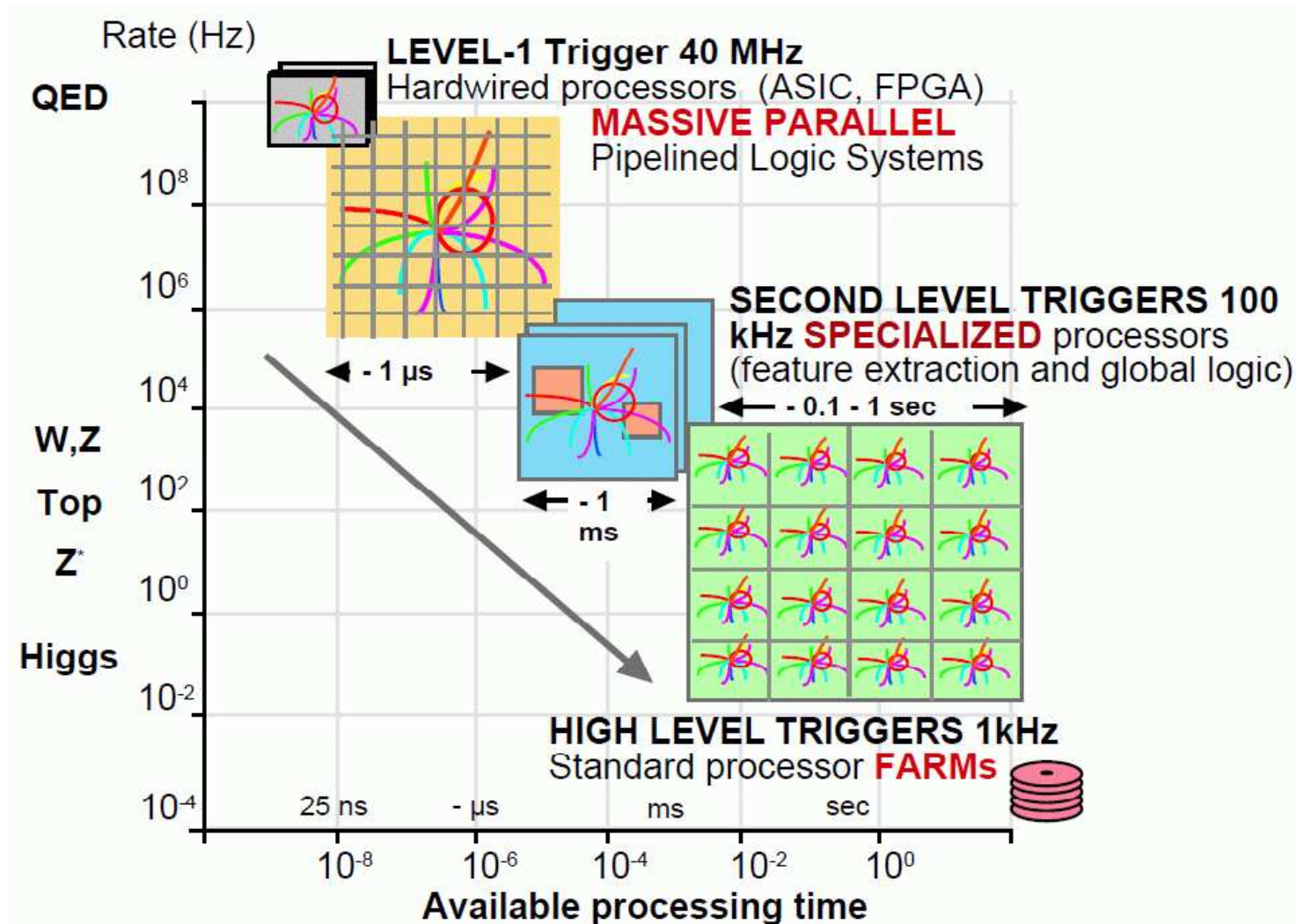
Poziom 1: bardzo szybki (dedykowana elektronika), odrzuca 99.9% oczywistych śmieci.

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

Poziom 3: pełna analiza i ostateczna decyzja

Współczesne eksperymenty

Układ wyzwalań schemat



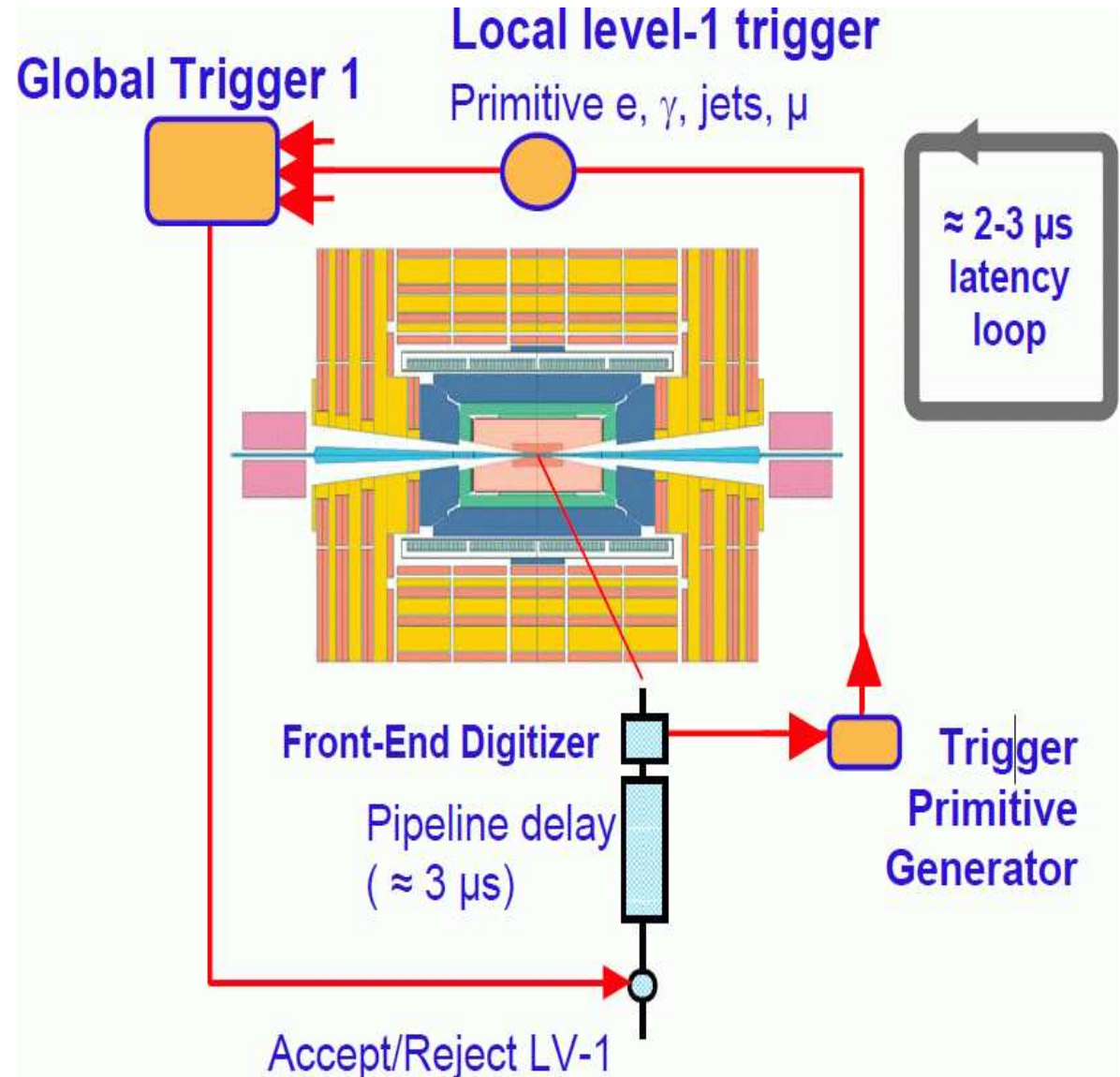
Współczesne eksperymenty

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.

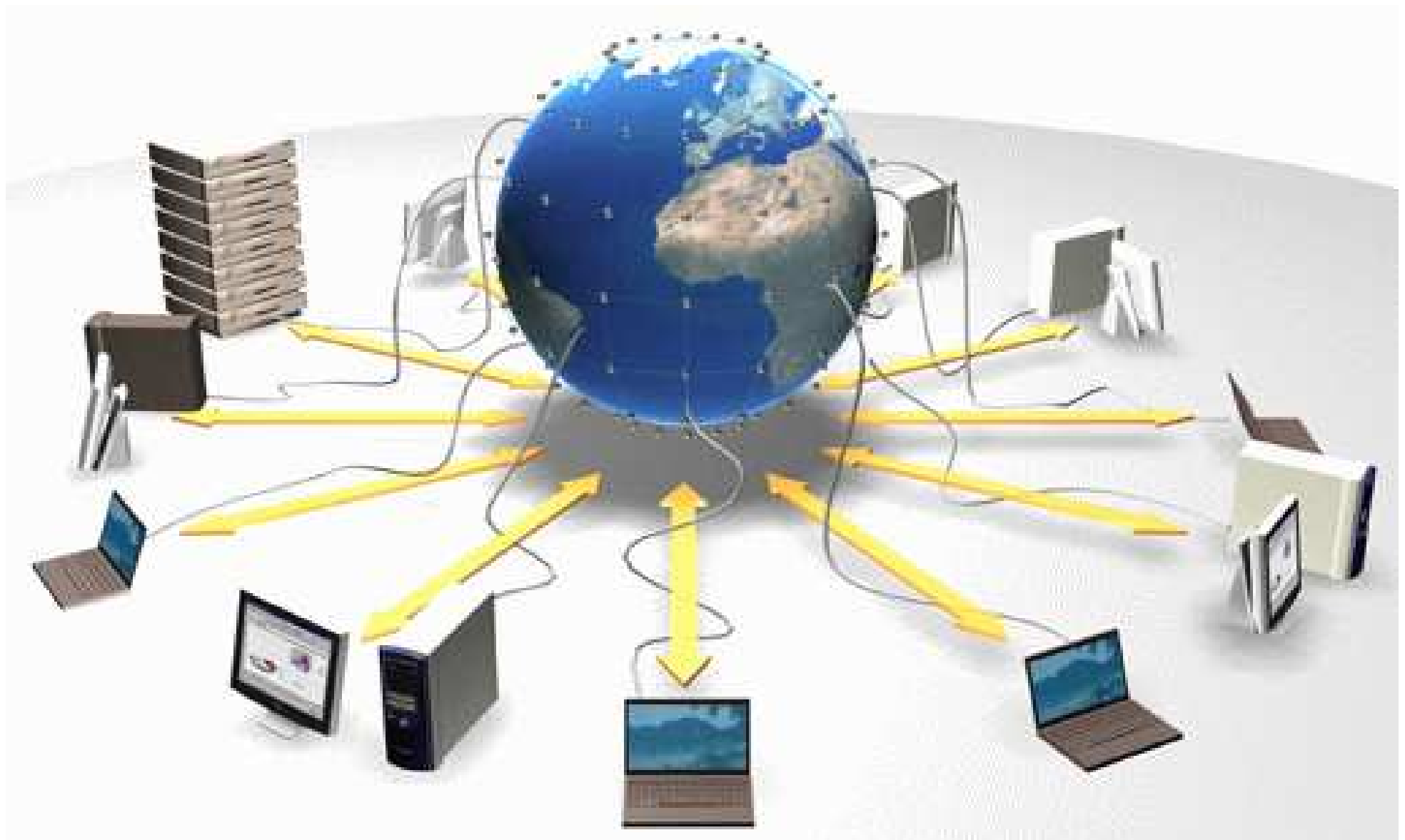
1 przypadek to MB danych

zbieramy miliony przypadków

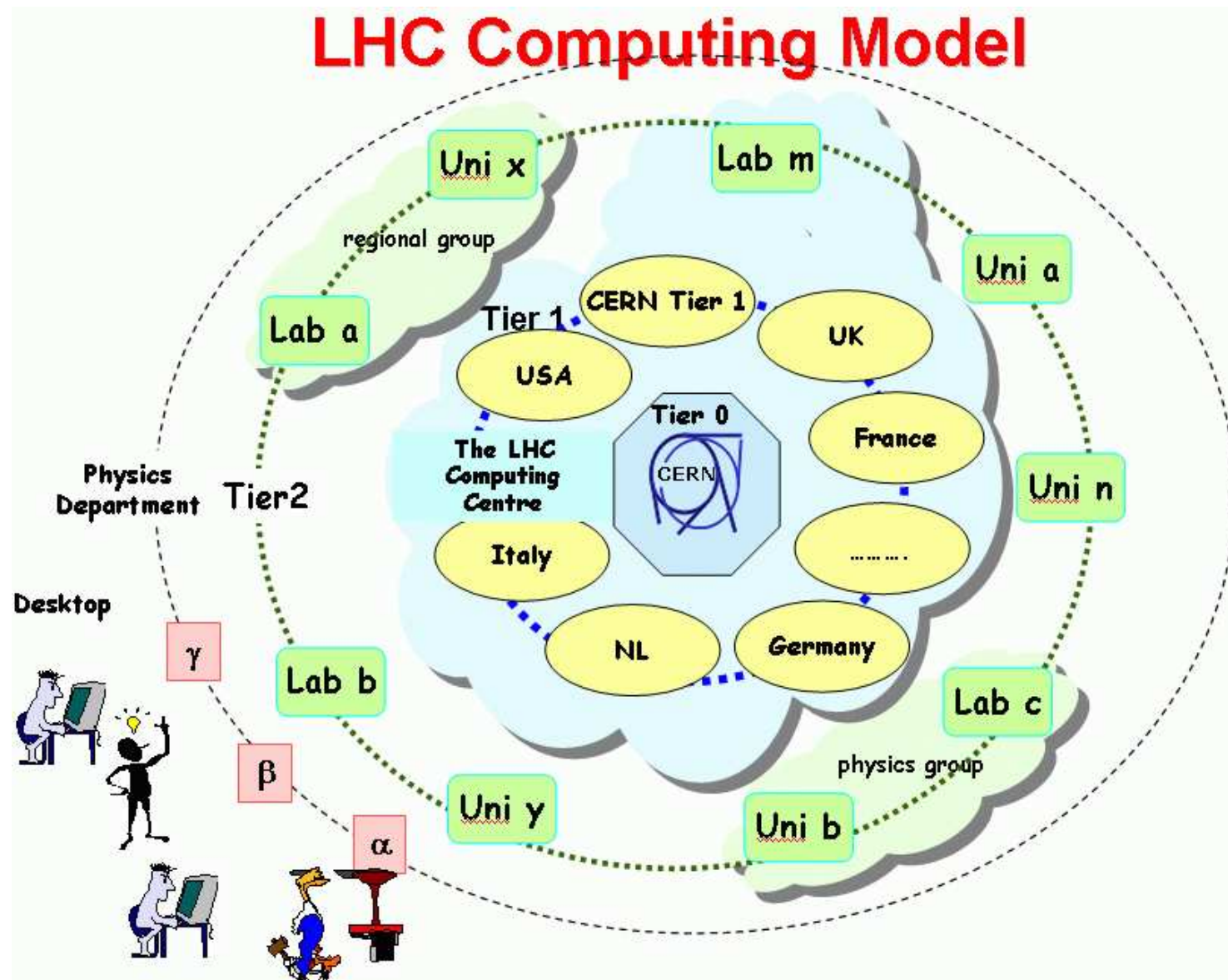
Do niedawna można to było trzymać i przetwarzać w jednym miejscu...



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**):
1 514 000 procesorów, 132 000 TB przestrzeni dyskowej,
131 000 TB taśm (archiwizacja) + **bardzo szybkie łącza** (!)

GRID dla LHC

LHC Data Grid Hierarchy:

