

Wszechświat cząstek elementarnych

Wykład 9: 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 wyzwiania
 - przechowywanie i analiza danych

Kolajdery

LEP/LHC

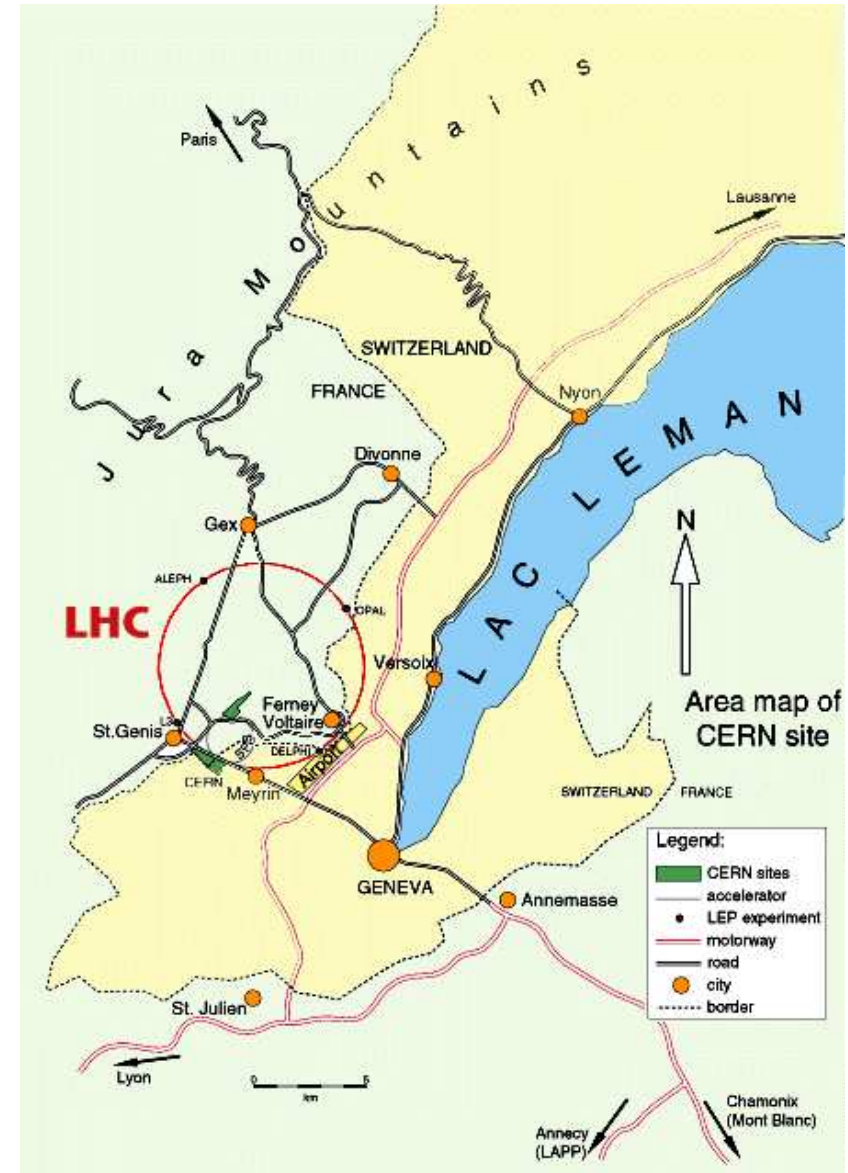
Największym zbudowanym dotąd akceleratorem był LEP. Zbudowany w CERN pod Genewą miał obwód ok. 27 km.

W tym samym tunelu budowany jest obecnie akcelerator LHC.

Przeciwbieżne wiązki protonów o energii 7 TeV.

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

Zderzenia paczek co 25 ns
(40 milionów na sekundę)



Kolajdery



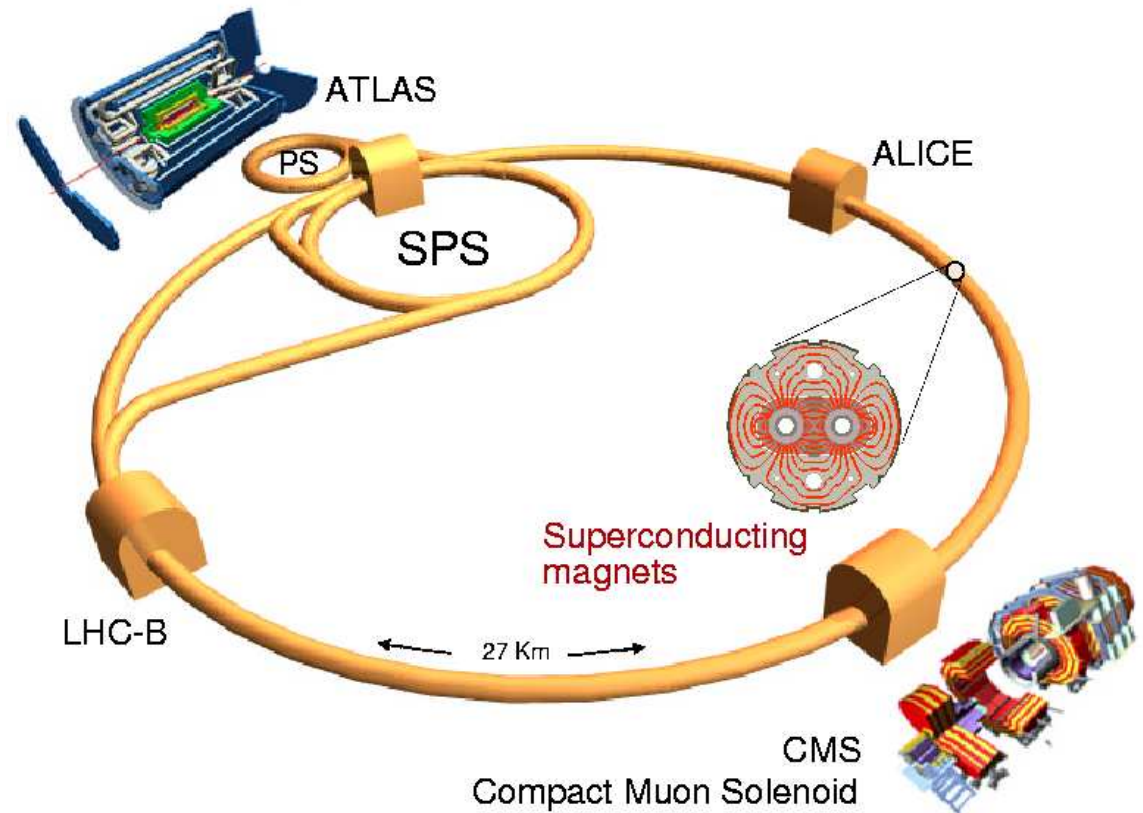
Kolajdery

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

Intensywność wiązek będzie tak duża, że oczekujemy produkcji do **1000** cząstek Higgosa **na godzinę** !

Przypadków produkcji cząstki Higgosa będą poszukiwać dwa eksperymenty: **ATLAS** i **CMS**

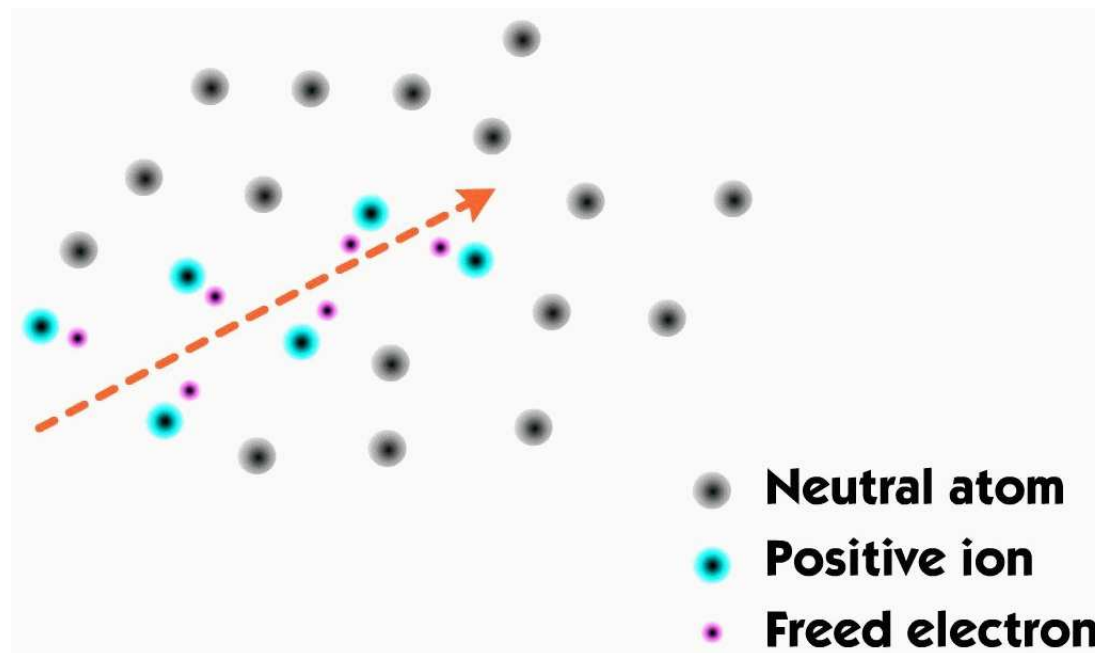
The Large Hadron Collider (LHC)



Detekcja cząstek

Jonizacja

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



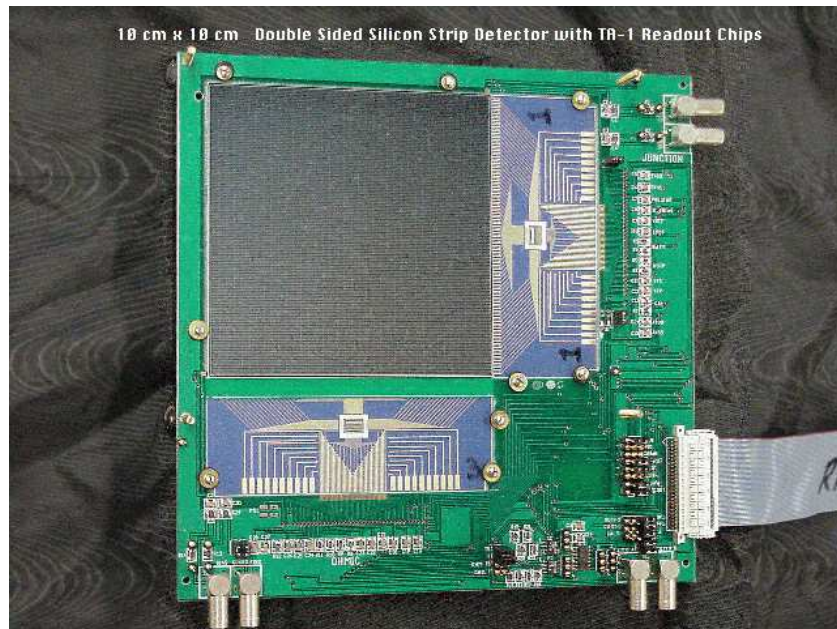
Cząstka naładowana przechodząc przez ośrodek **oddziałuje Kulombowsko** z elektronami i oddaje im część swojej energii “**wybijając**” je z atomów.

Detekcja cząstek

Detektory półprzewodnikowe

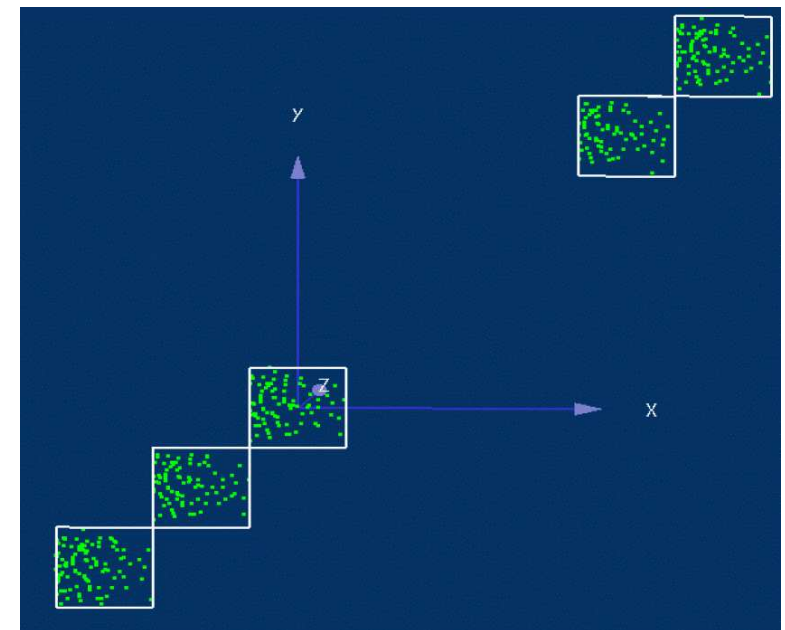
Coraz powszechniej używane.

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...

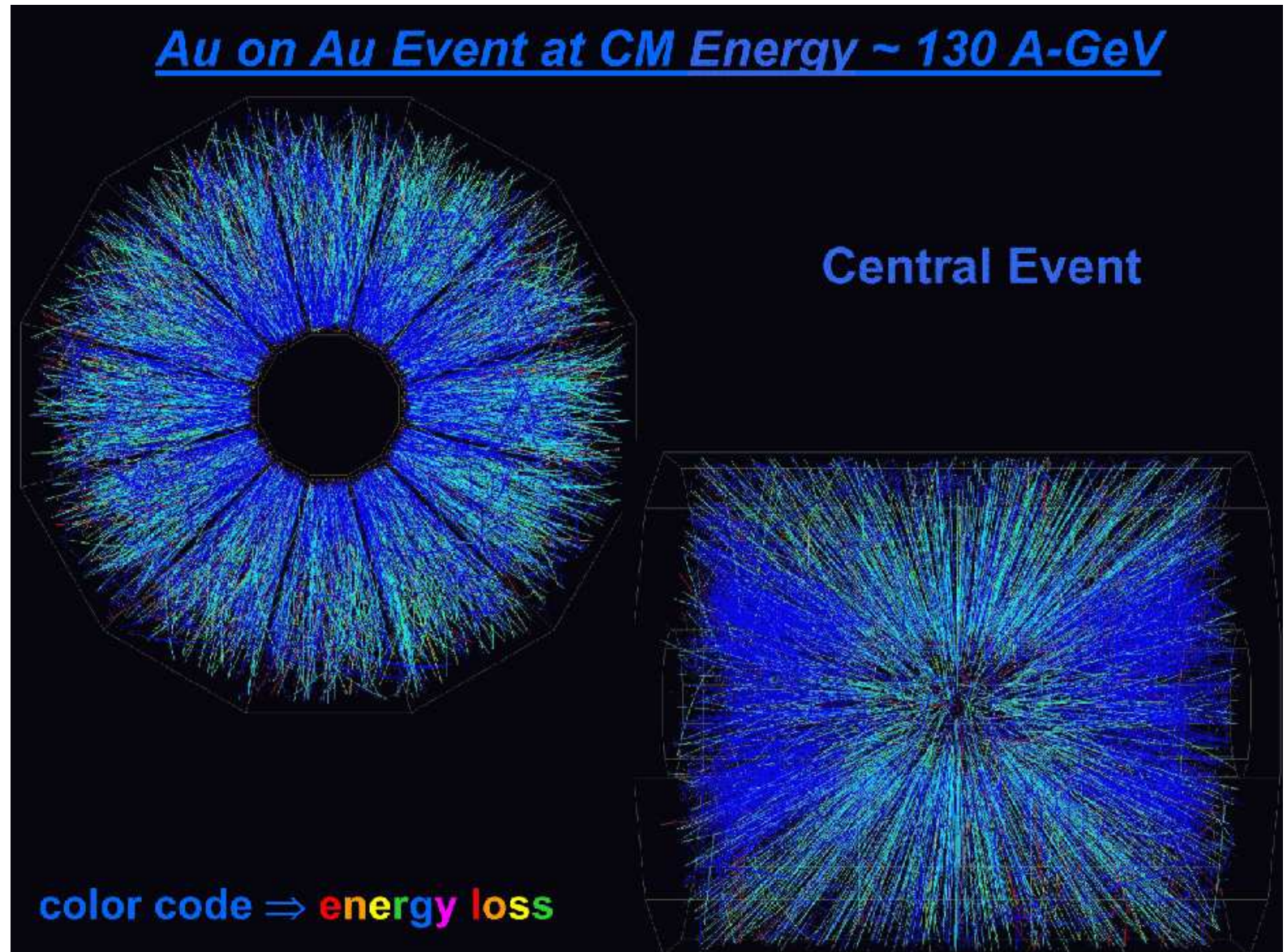
Detekcja cząstek

TPC

Komora
projekcji
czasowej

Przypadek
zderzenia
ciężkich
jonów

detektor
STAR
przy RHIC



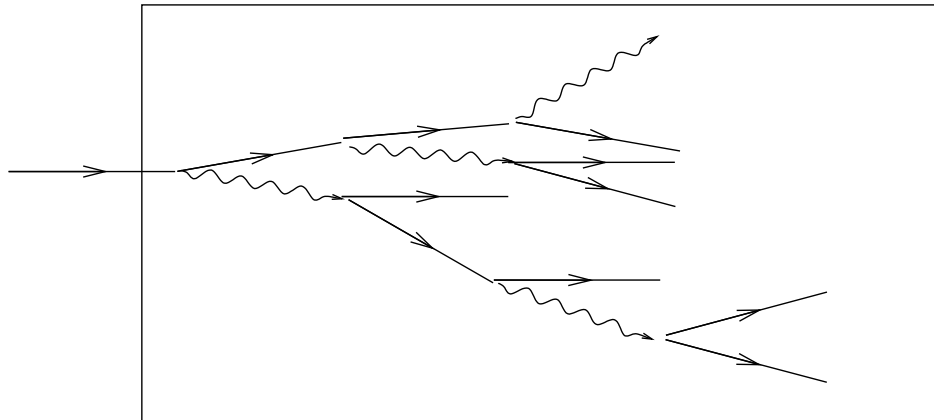
Detekcja cząstek

Kalorymetry

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

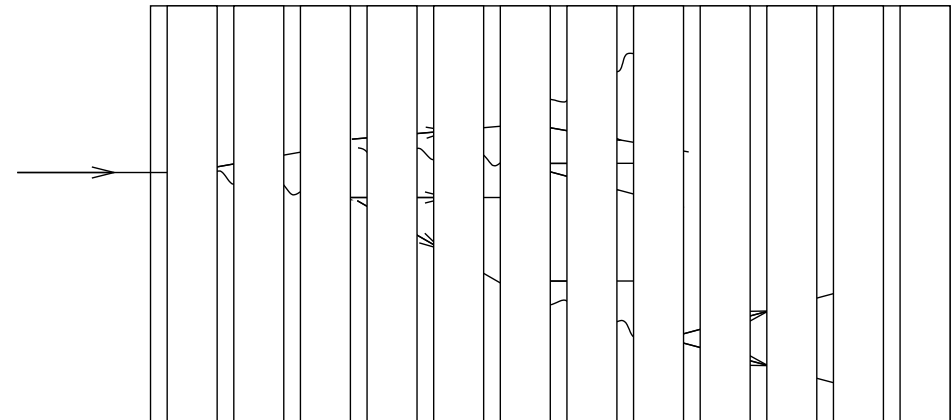
Mierząc liczbę cząstek lub całkowitą długość torów (całkowaną jonizację) możemy dokładnie określić energię cząstki początkowej

Kalorymetr jednorodny



np. blok scyntylnatora

Kalorymetr próbkujący

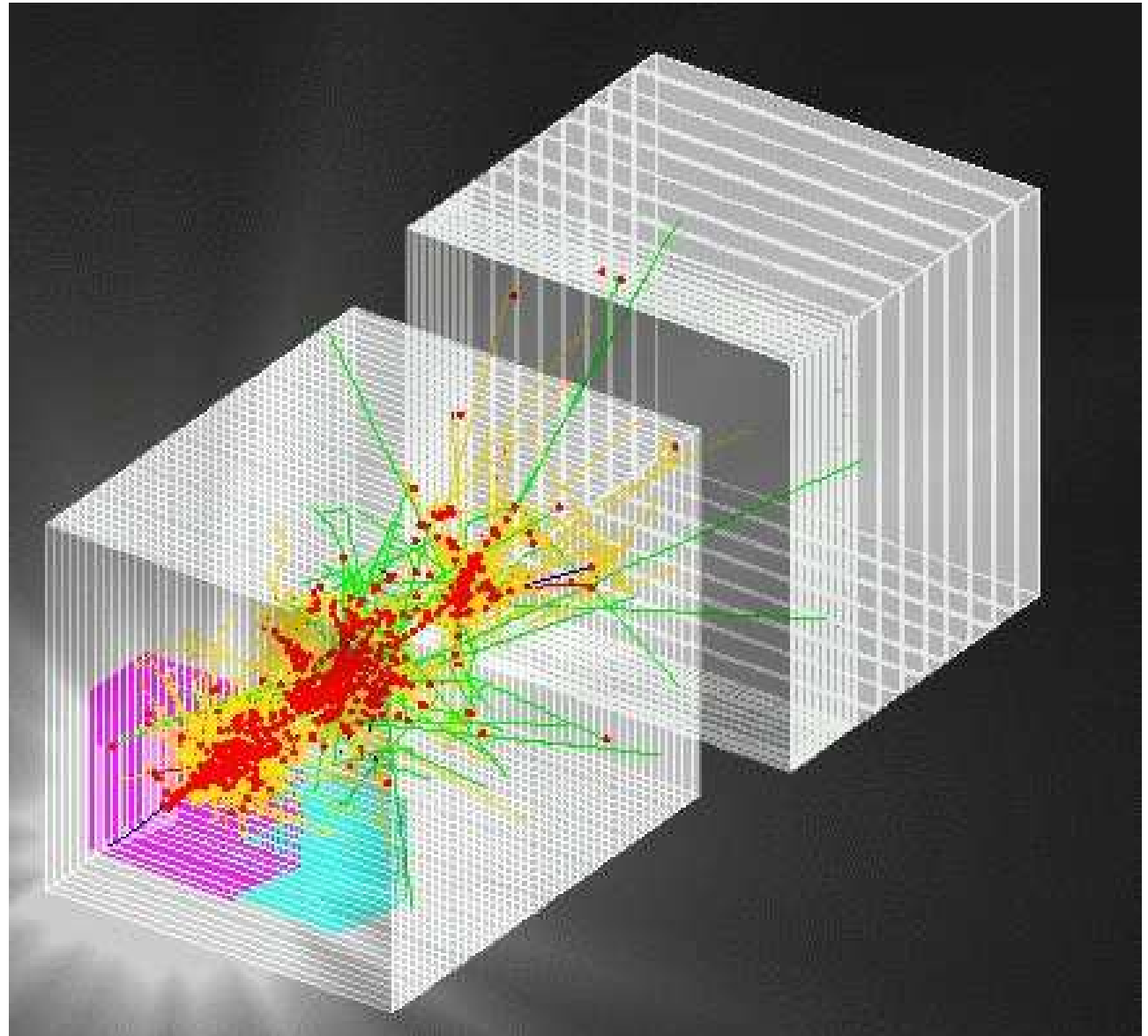


warstwy detektora na przemian z gęstym absorberem

Detekcja cząstek

Kalorymetry

Symulacja rozwoju
kaskady hadronowej
(pomiar energii protonu)










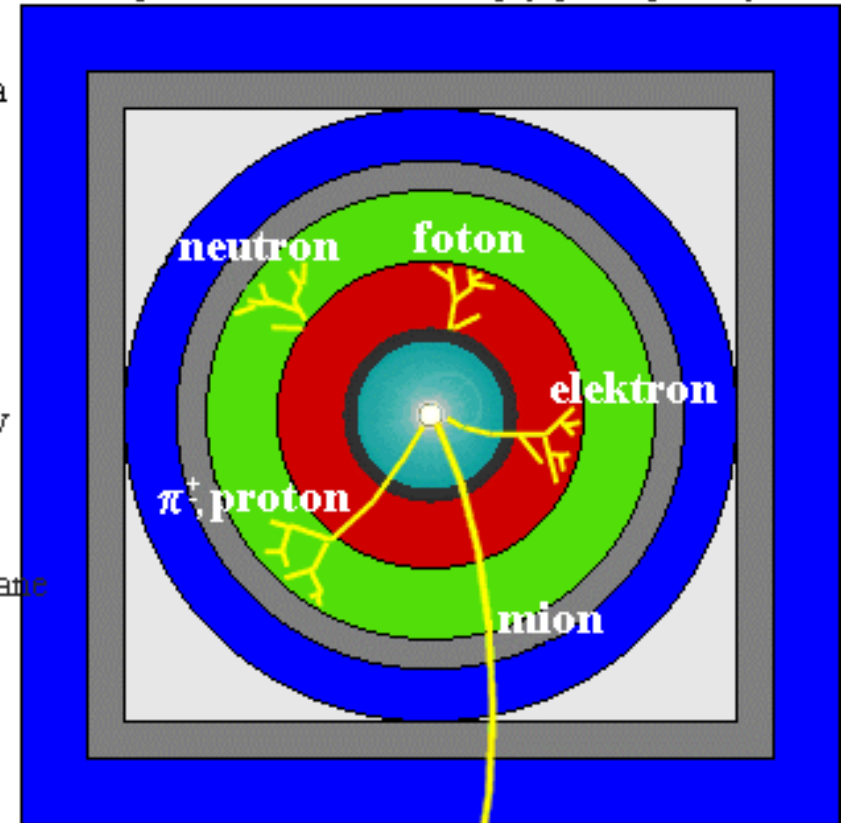
Współczesne eksperymenty

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:

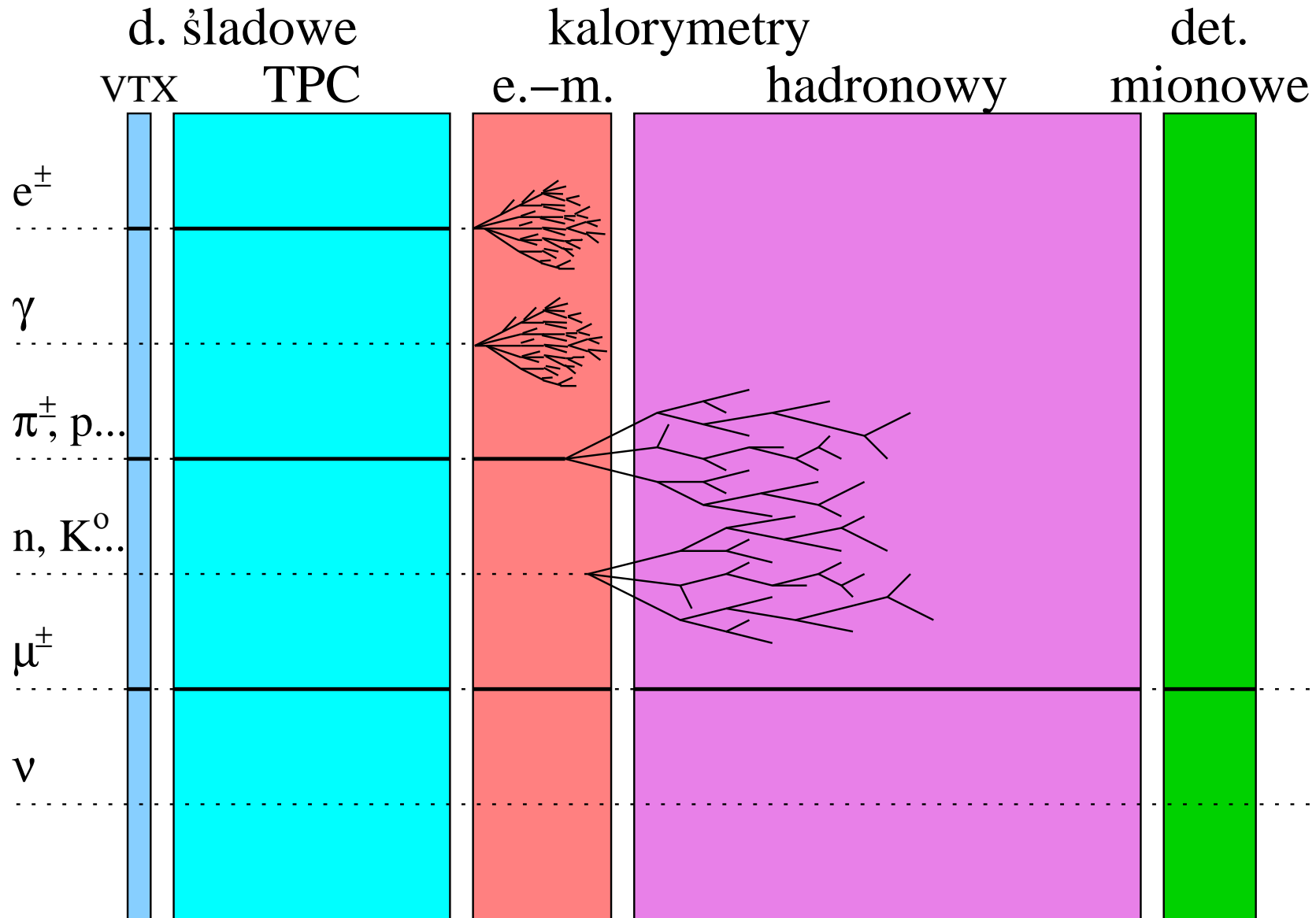
- detektor wierzchołka
jak najbliżej osi wiązki, określa gdzie zaszło zderzenie,
identyfikuje rozpady cząstek krótkożyciowych
(tzw. wierzchołki wtórne)
najczęściej detektor półprzewodnikowy
- detektory śladowe
pomiar torów cząstek naładowanych, wyznaczenie pędów
cząstek z zakrzywienia w polu magnetycznym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

Współczesne eksperymenty

Detektor uniwersalny

- kalorymetr elektromagnetyczny
pomiar energii elektronów i fotonów
gęsty materiał absorbujący lawinę cząstek
(międz, 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

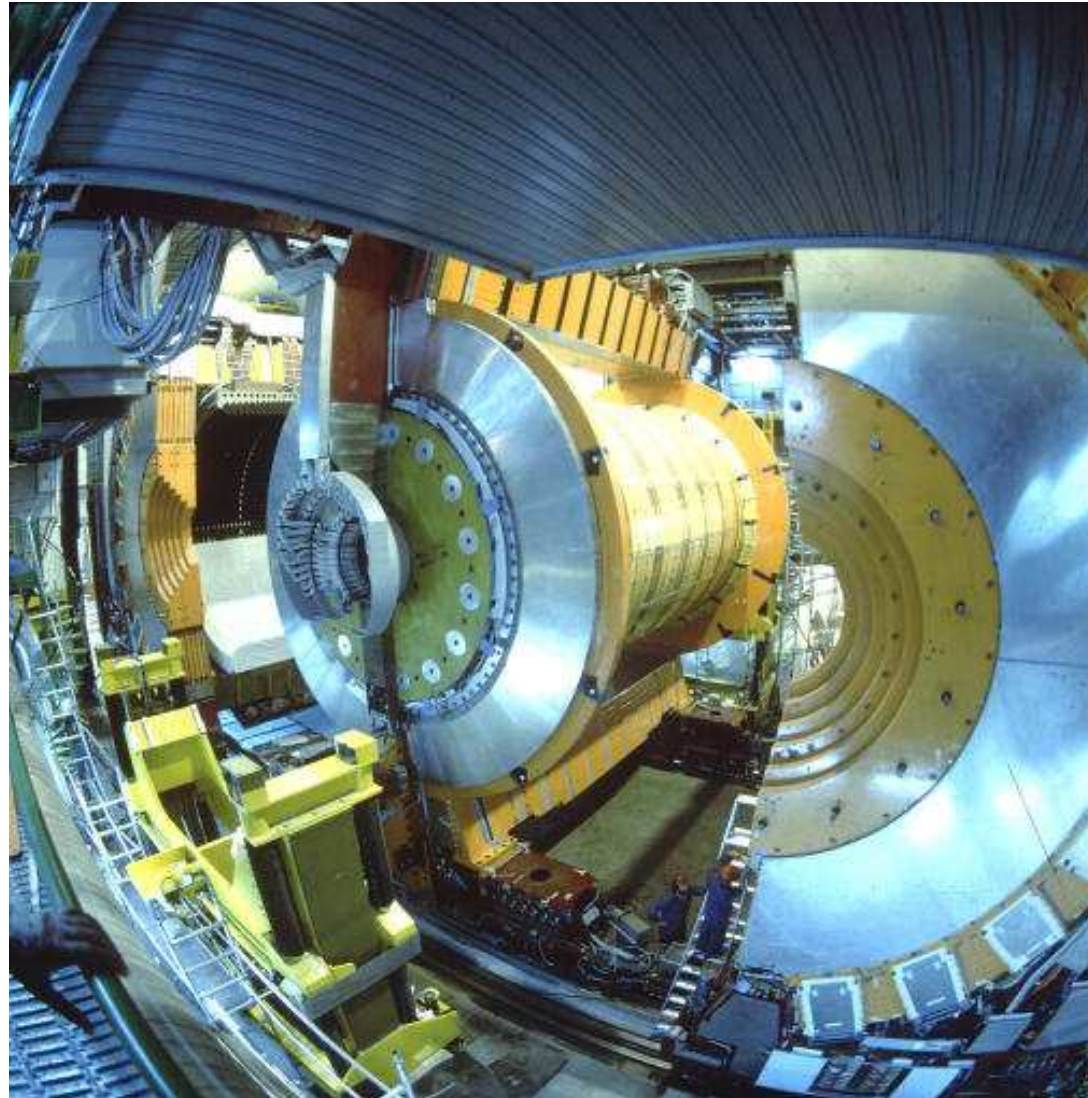
Współczesne eksperymenty



Współczesne eksperymenty

OPAL

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

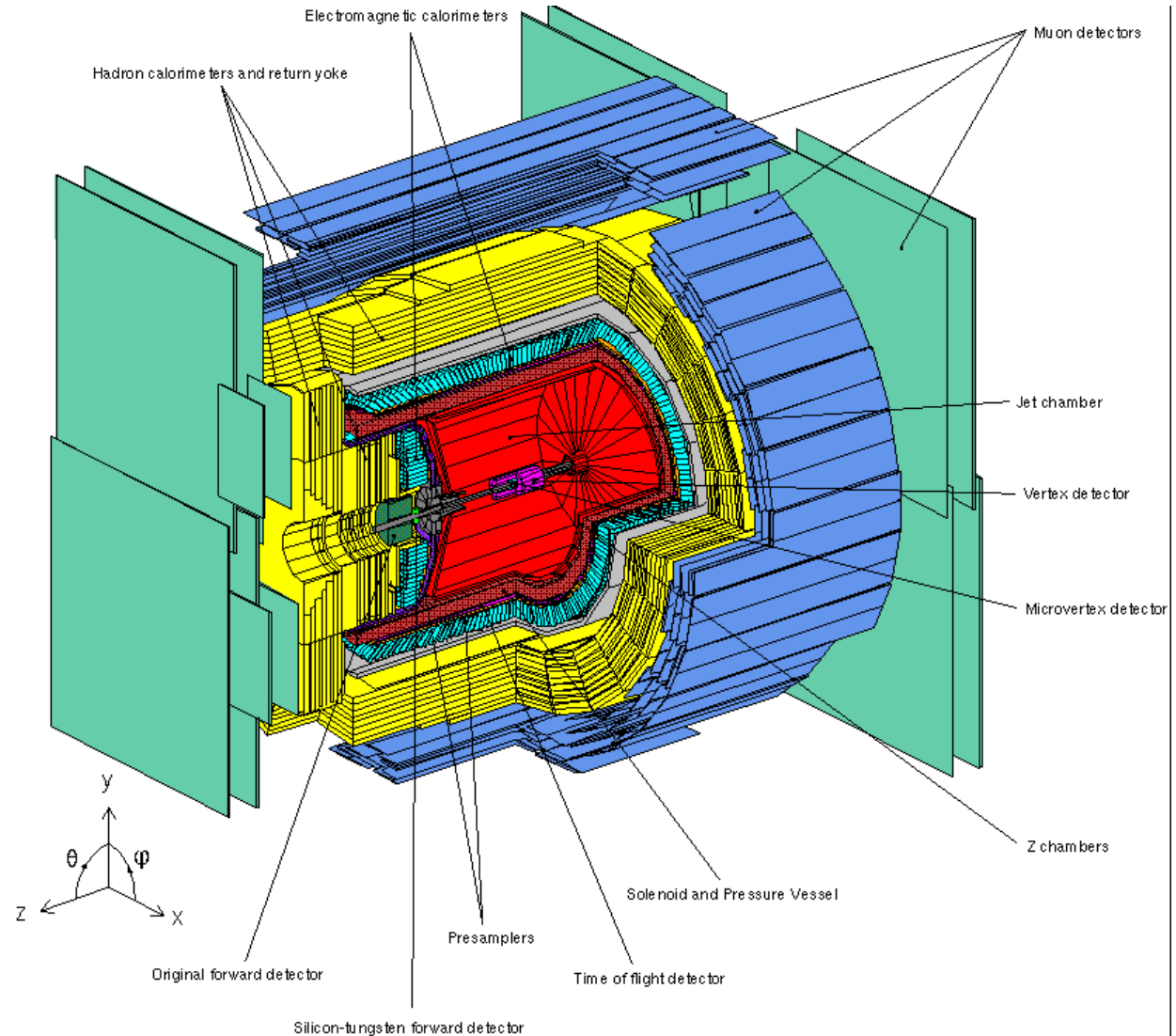


Współczesne eksperymenty

OPAL



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



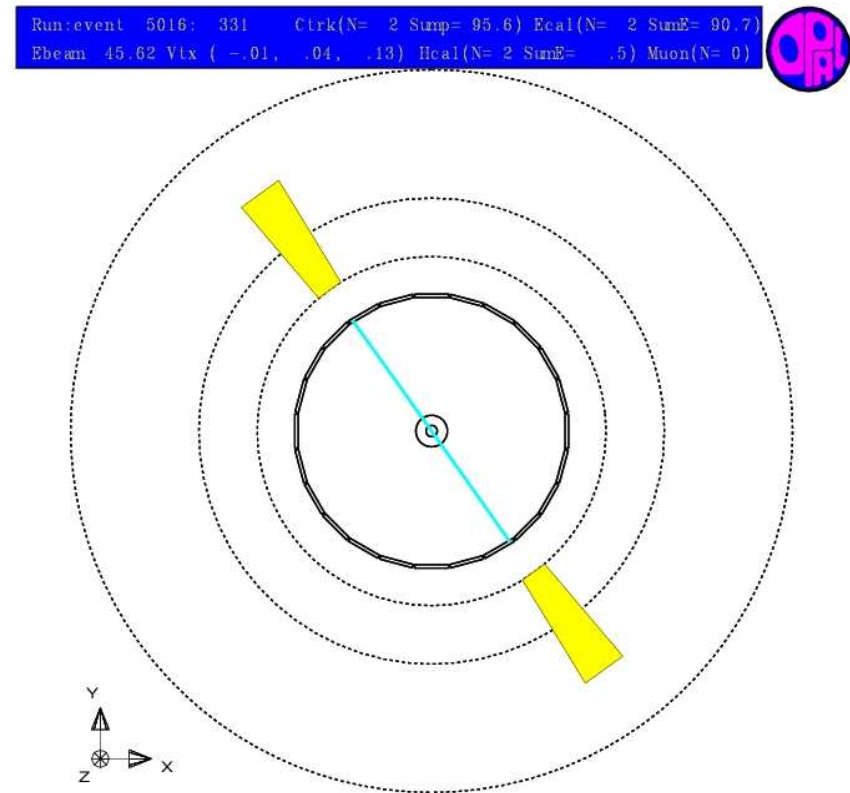
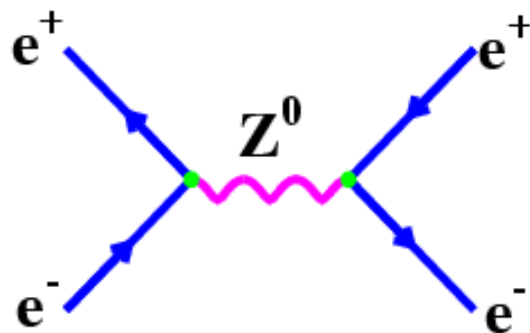
Co rejestrują detektory

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

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



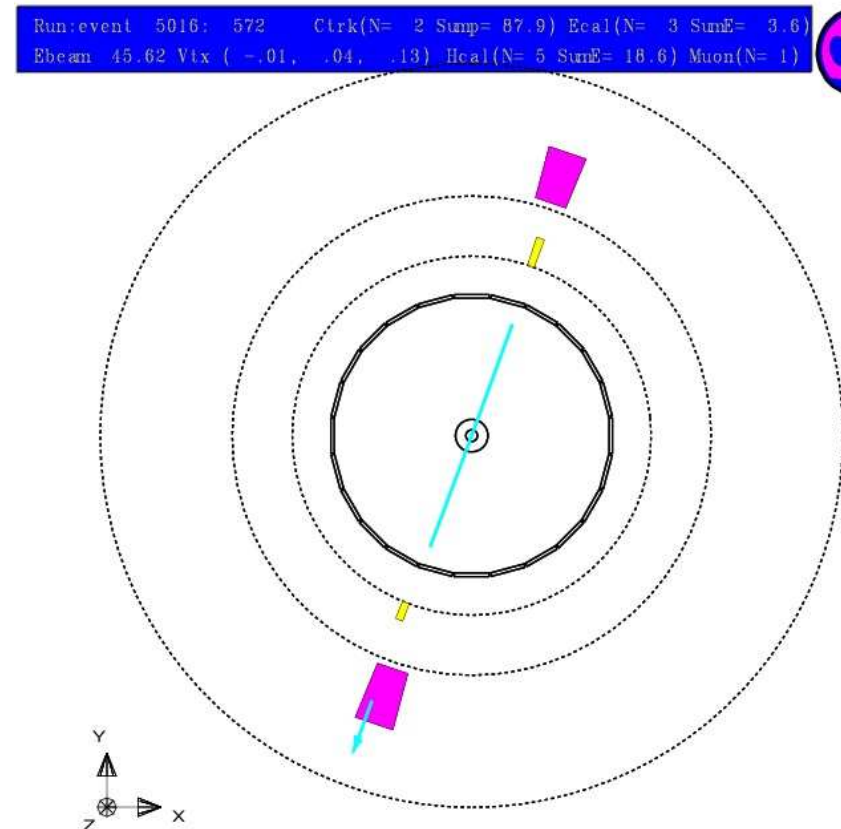
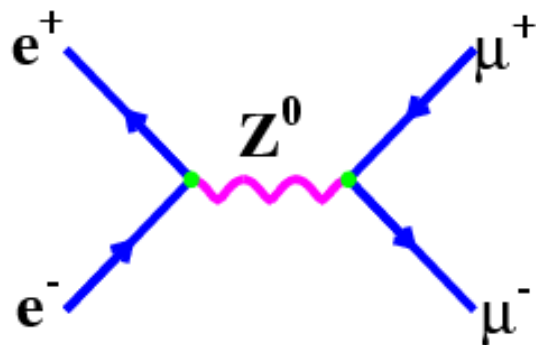
Co rejestrują detektory

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

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



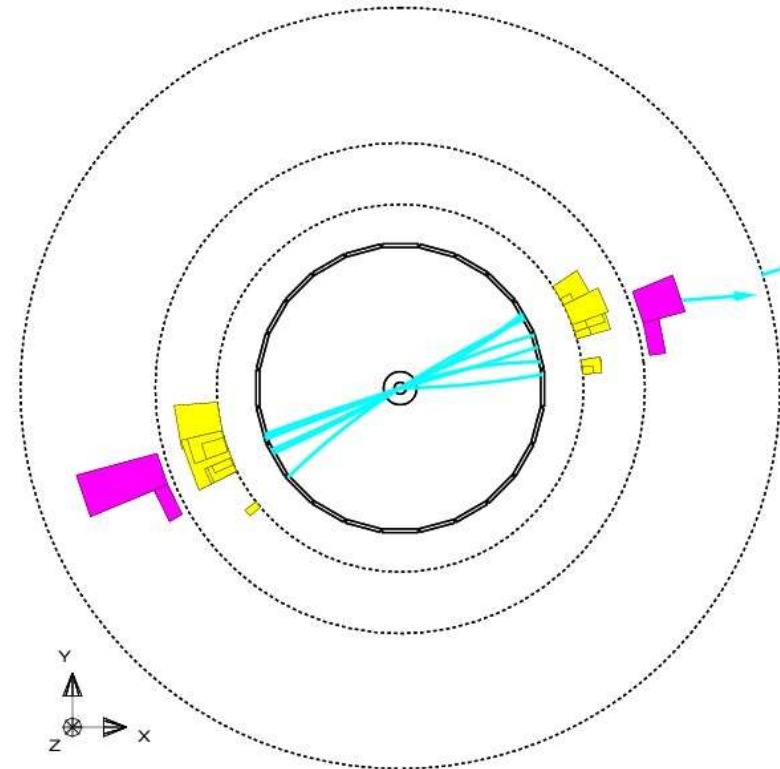
Co rejestrują detektory

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 SumE= 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)
```



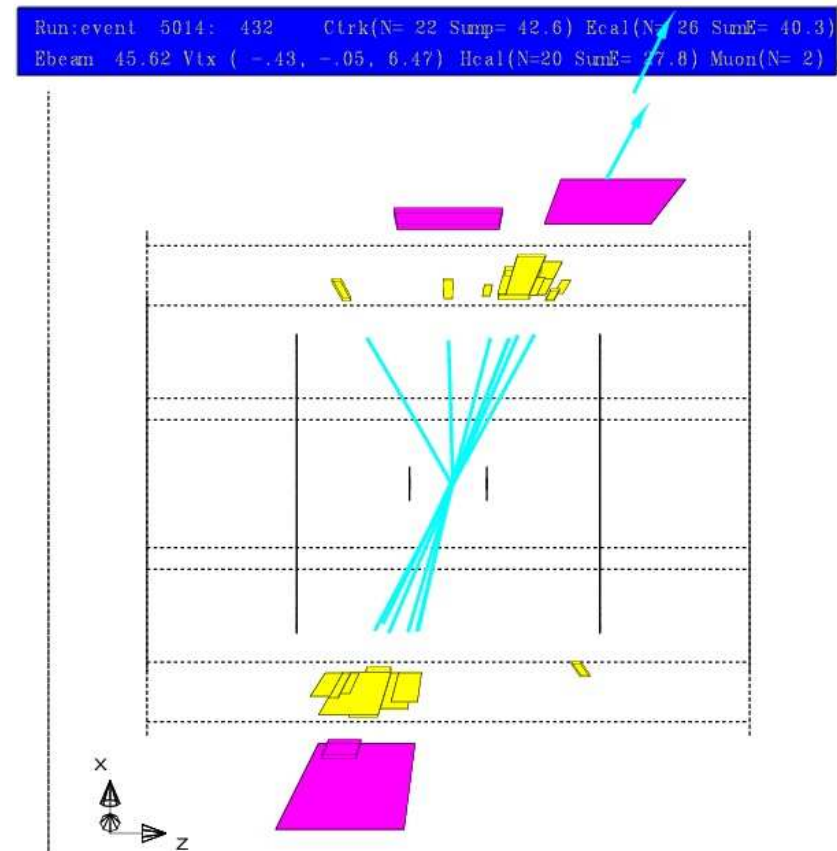
Co rejestrują detektory

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

W około 10% przypadków widzimy powstające elektrony lub miony?

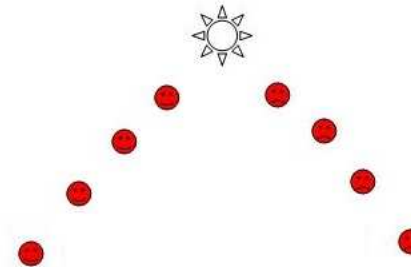
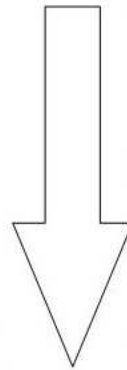
A jak interpretować taki przypadek?

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



Hadronizacja

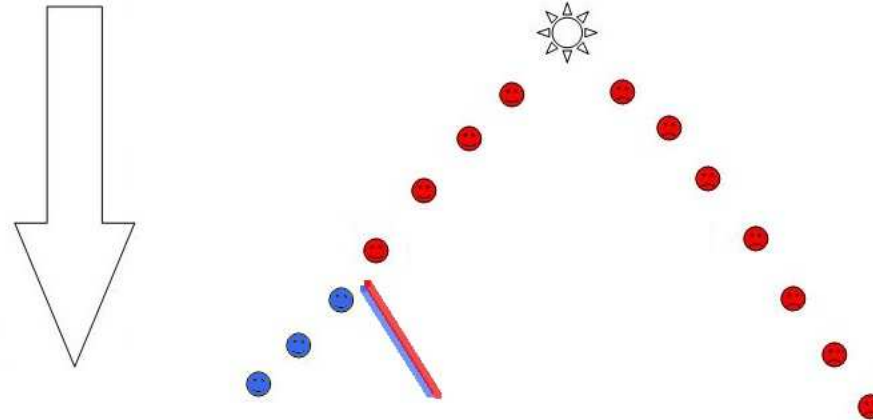
W zderzeniu powstaje para kwarków: $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$



Hadronizacja

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

Kwarki oddalają się od siebie, rośnie oddziaływanie kolorowe

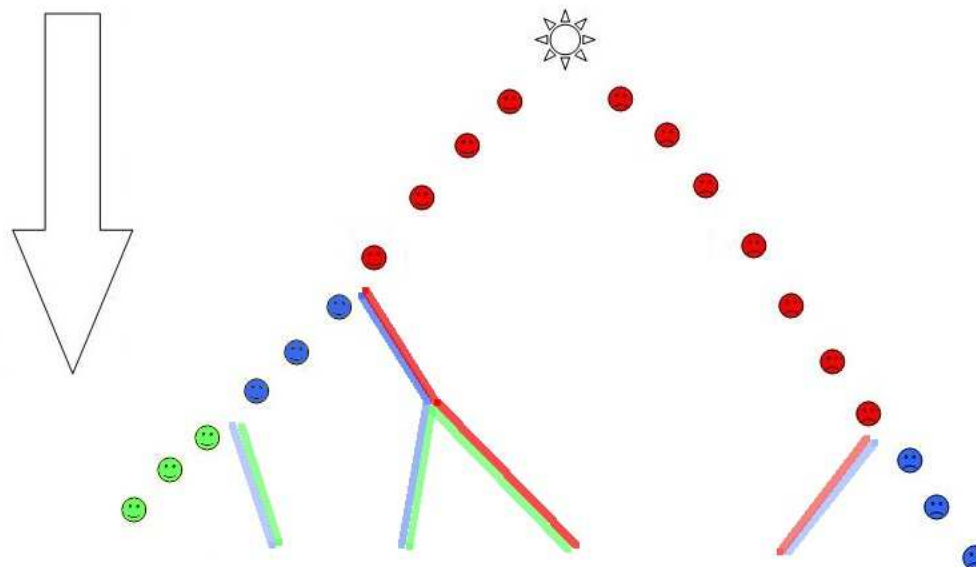


Hadronizacja

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

Kwarki oddalają się od siebie, rośnie oddziaływanie kolorowe

Dochodzi do emisji gluonów



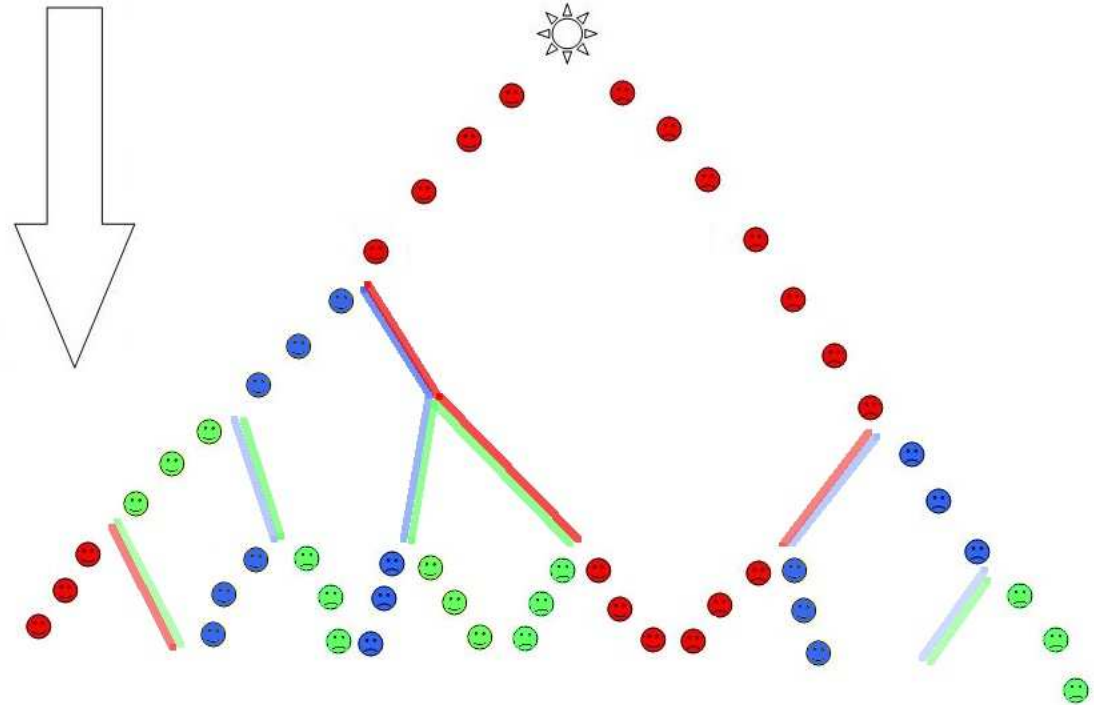
Hadronizacja

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



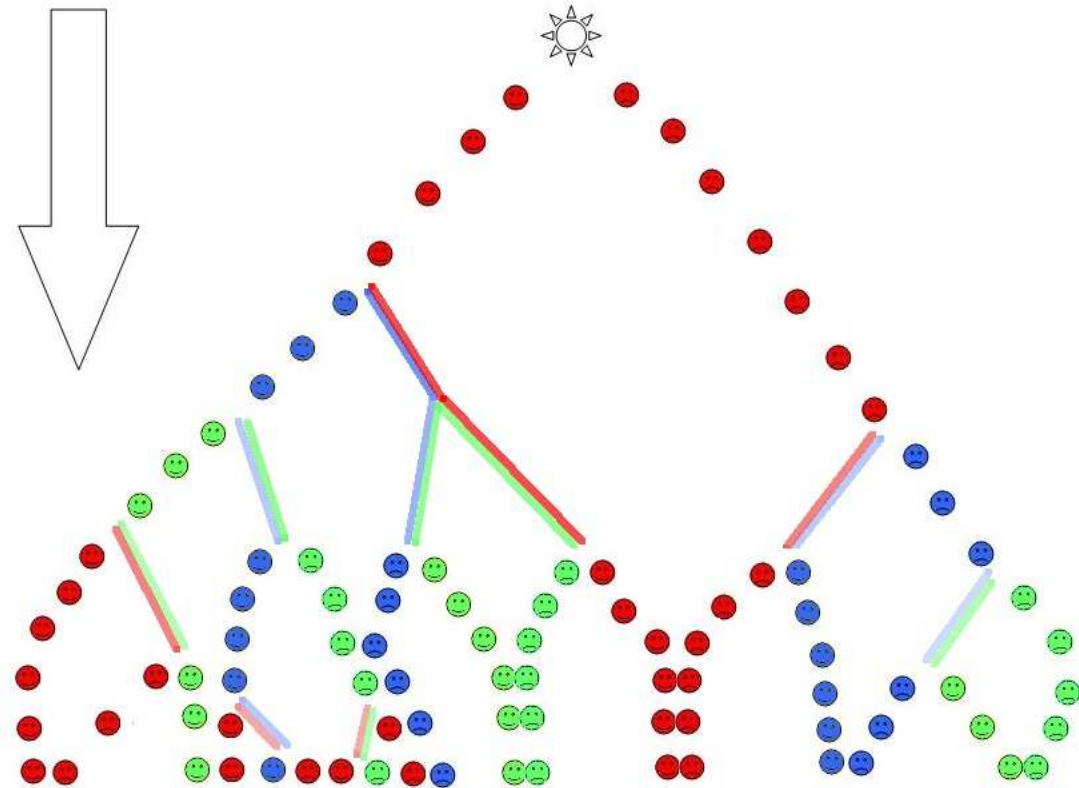
Hadronizacja

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-antykwar



Hadronizacja

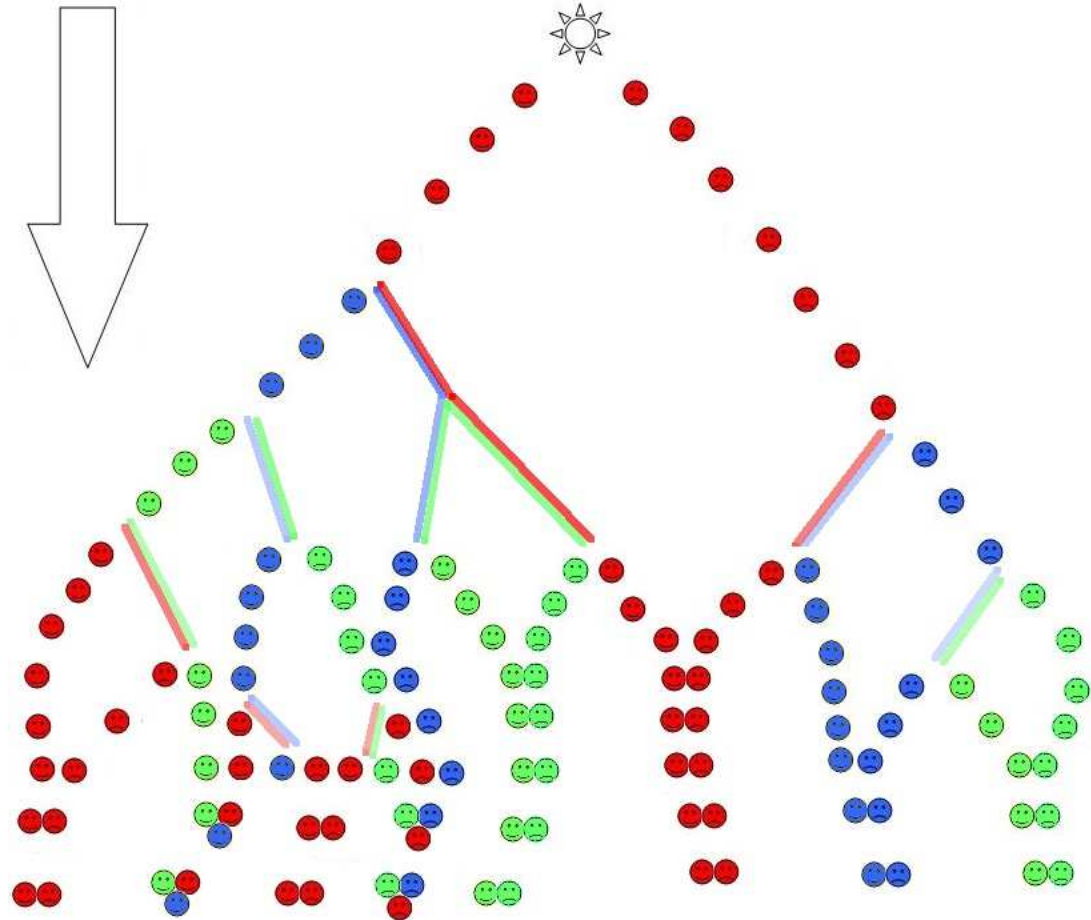
W zderzeniu powstaje para kwarków: $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$

Kwarki oddalają się od siebie, rośnie oddziaływanie kolorowe

Dochodzi do emisji gluonów

Gluony konwertują na pary kwark-antykwar

Kwarki i antykwarki formują "białe" hadrony



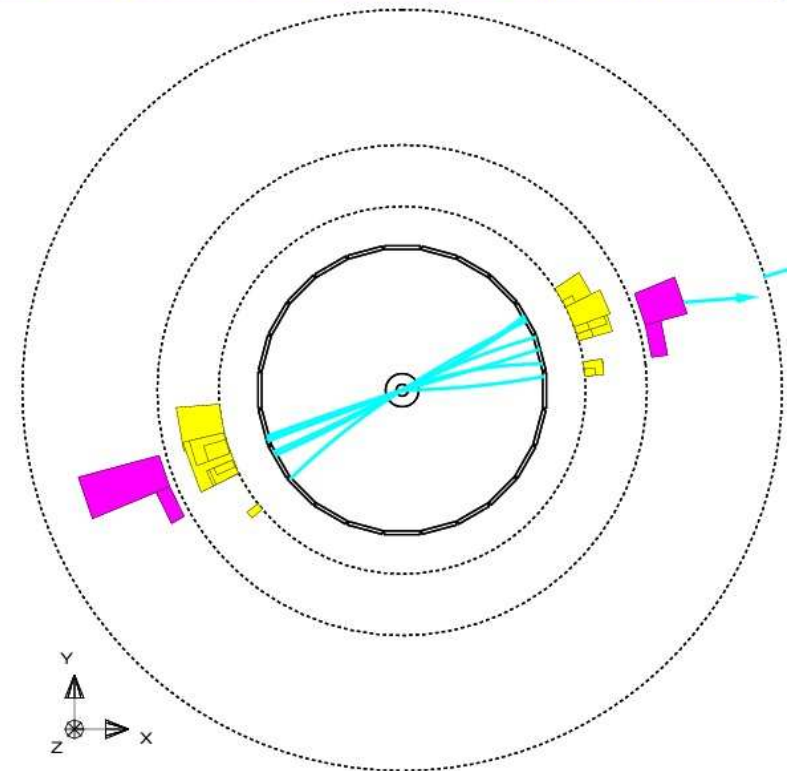
Co rejestrują detektory

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 SumE= 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

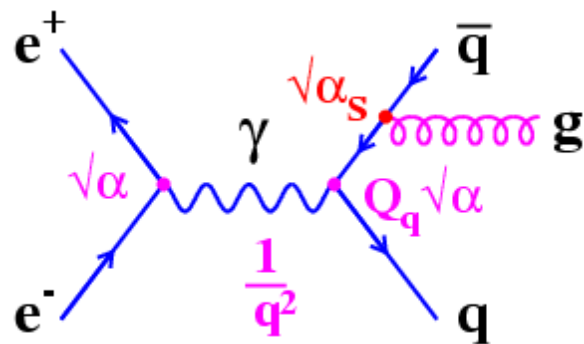
W akceleratorze **LEP** zderzano elektrony i pozytony przy energii dostępnej $\sqrt{s} = 90 - 210 GeV$.

W prawie 90% przypadków widzimy powstające jety hadronowe.

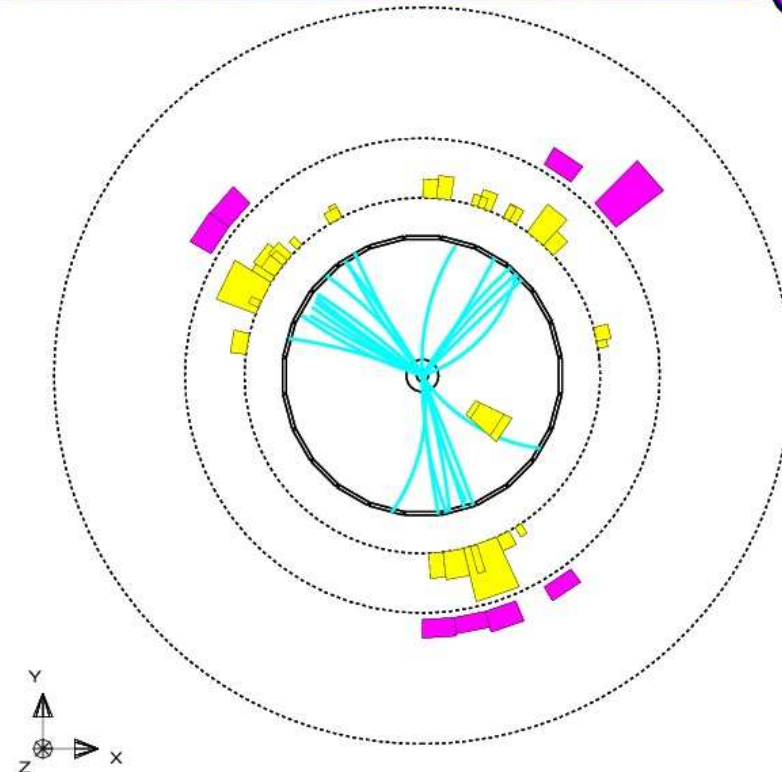
Naogół powstają 2 jety

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)
```

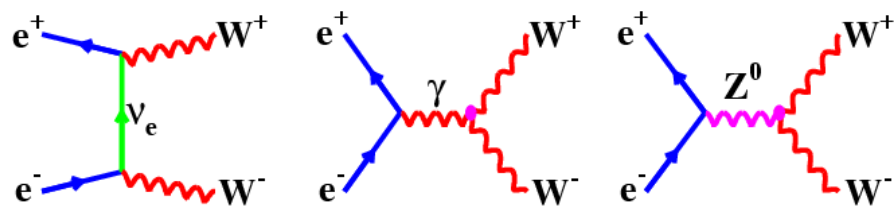


Co rejestrują detektory

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

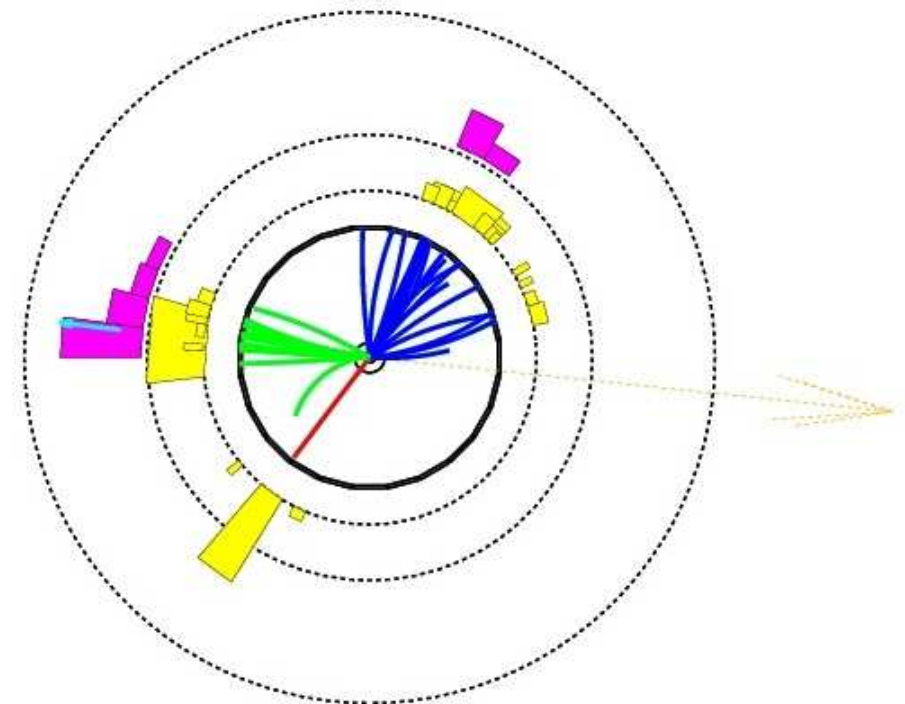
Trzy możliwe diagramy:



W przedstawionym przypadku

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

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

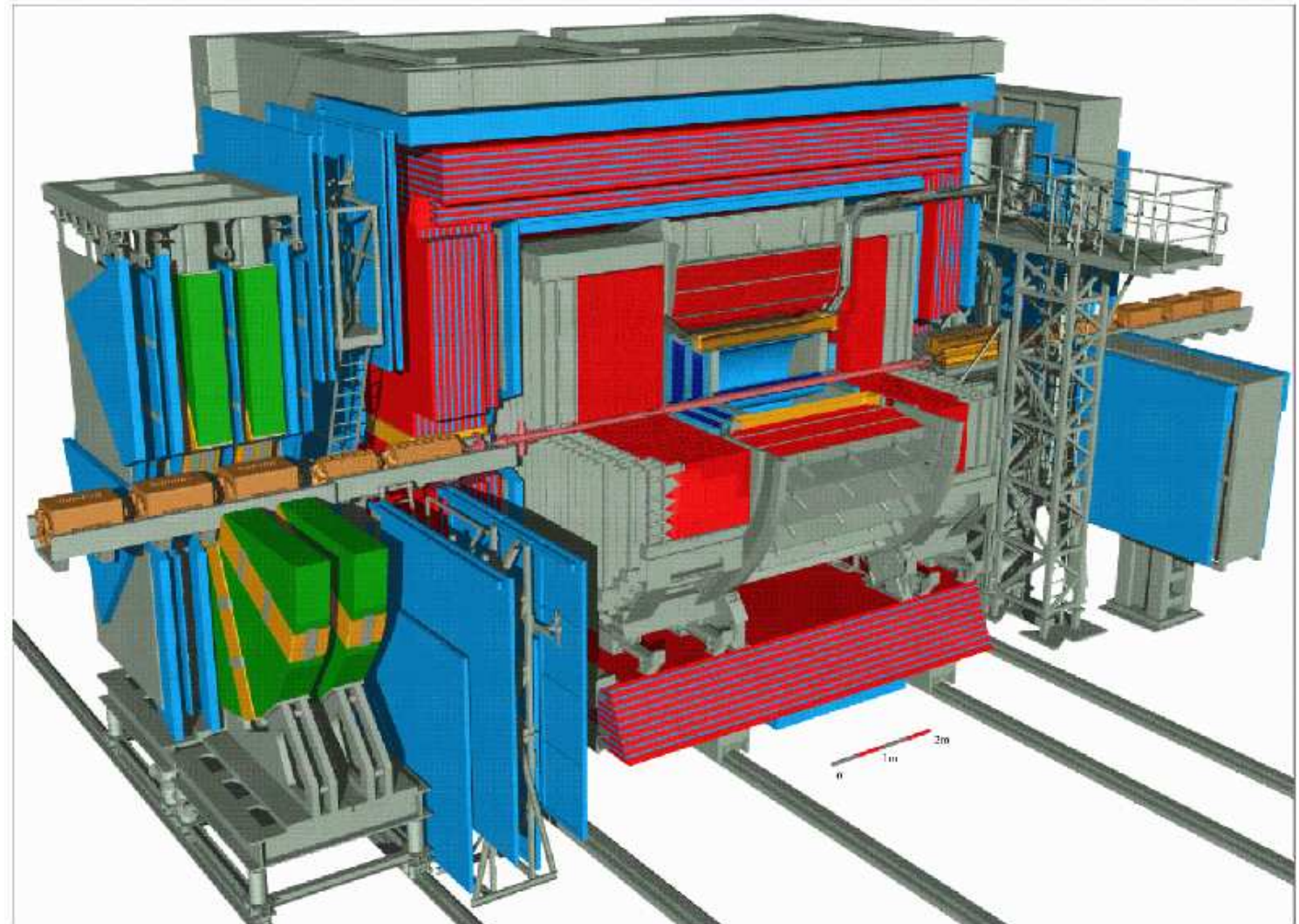


neutrino rekonstruujemy z zasady zachowania energii i pędu

Współczesne eksperymenty

ZEUS

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



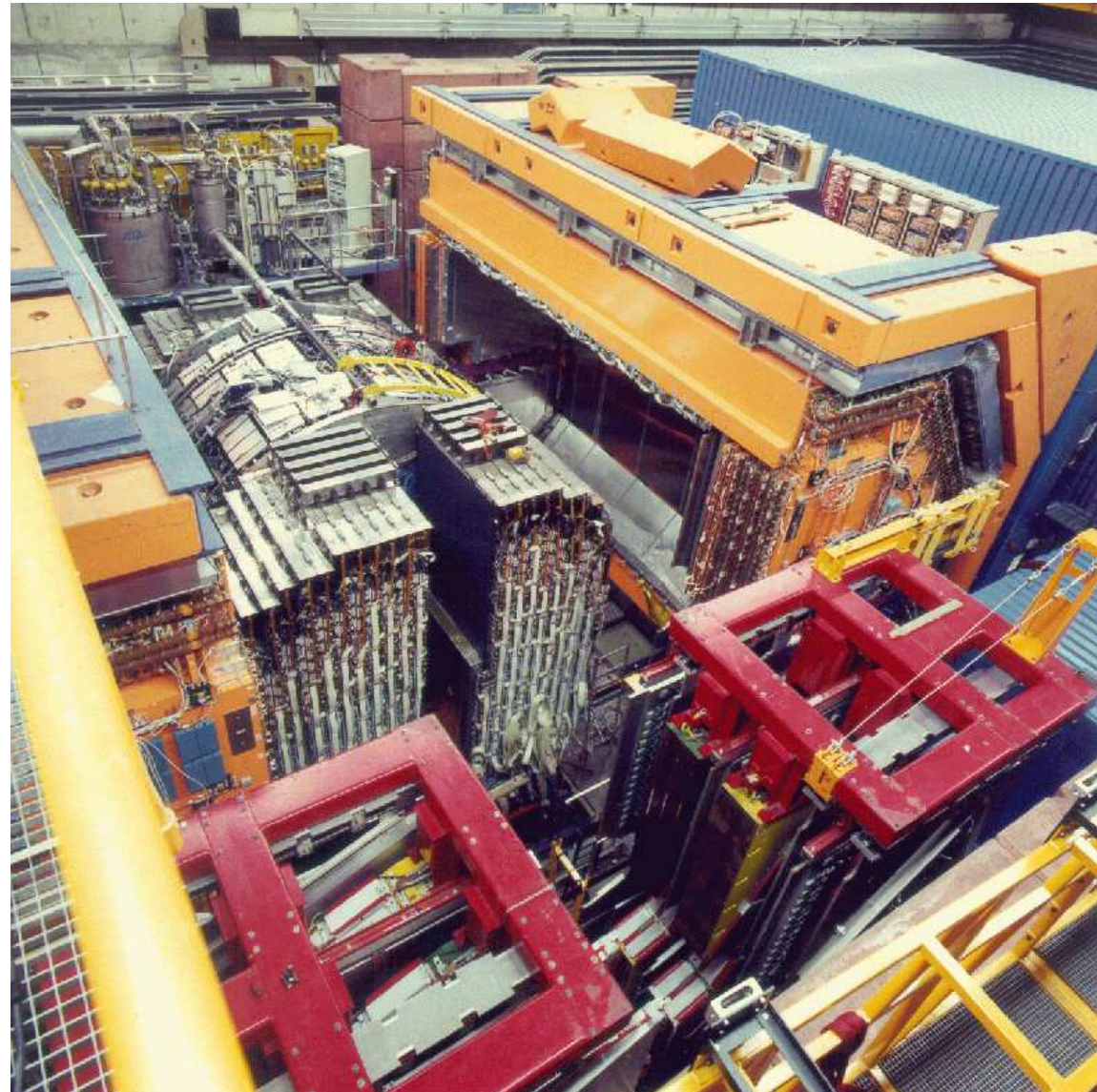
ZEUS (HERA) 

Software: SUKC-IDEAS level V11
 Performed by: Caster Hartmann
 Status: October 1995

Współczesne eksperymenty

ZEUS

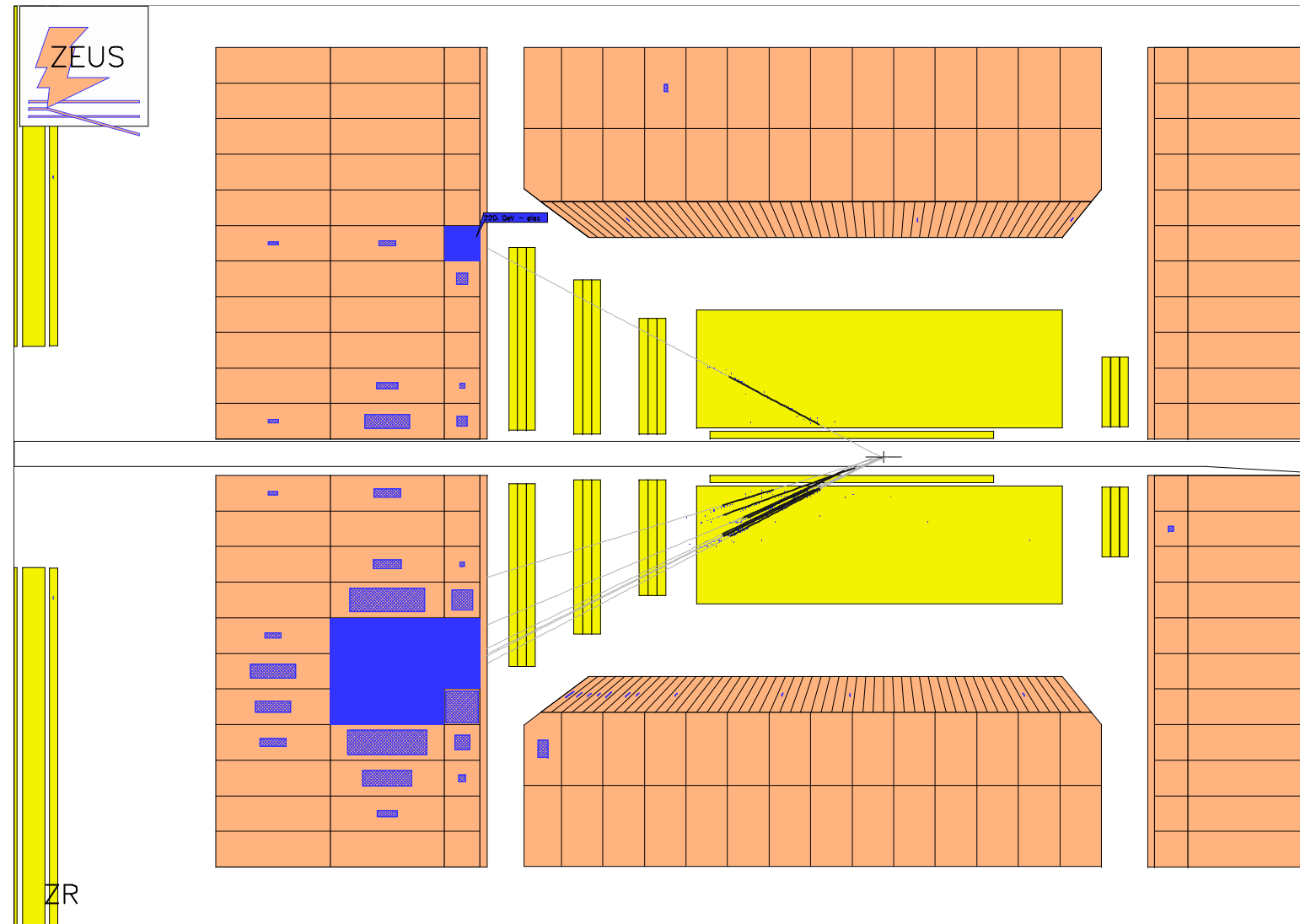
Detektor **ZEUS**,
akcelerator
HERA,
zderzenia wiązek
przeciwbieżnych
 $e^{\pm}p$



Współczesne eksperymenty

ZEUS

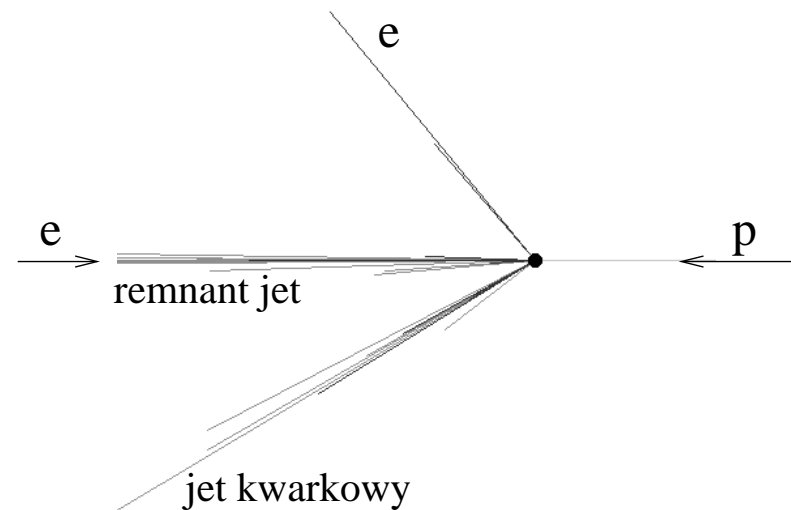
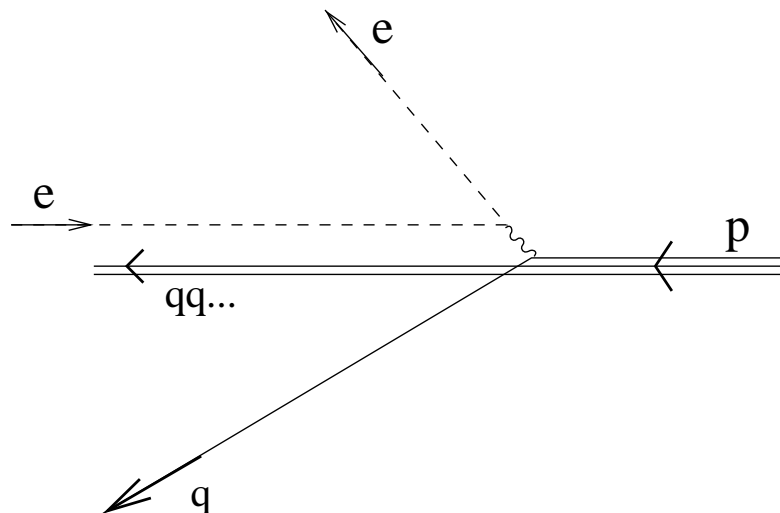
Detektor **ZEUS**,
 akcelerator
HERA,
 zderzenia wiązek
 przeciwbieżnych
 $e^\pm p$



Współczesne eksperymenty

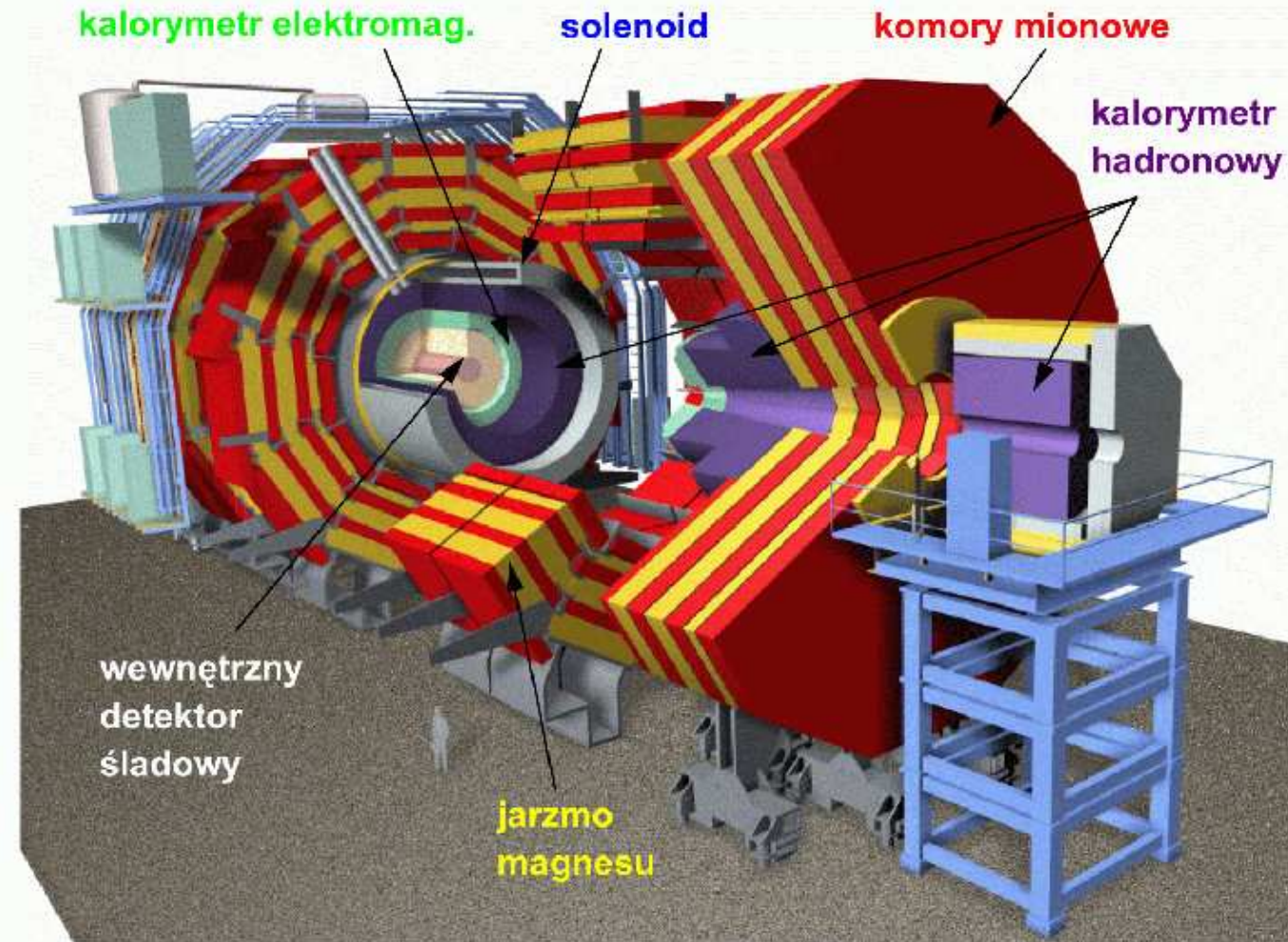
ZEUS

W pierwszym przybliżeniu pojedynczych kwarków nigdy nie rozproszeniu ulega **elektron** obserwujemy. **Oddziaływania** i **pojedynczy kwark**. Reszta **silne** prowadzą do tzw. **hadronizacji**: powstają wtórne pary $q\bar{q}$ i kwarków z protonu kontynuuje swój 'lot' jako tzw. **"remnant"** kwarki zamieniają się w **jety**.
(pozostałości)



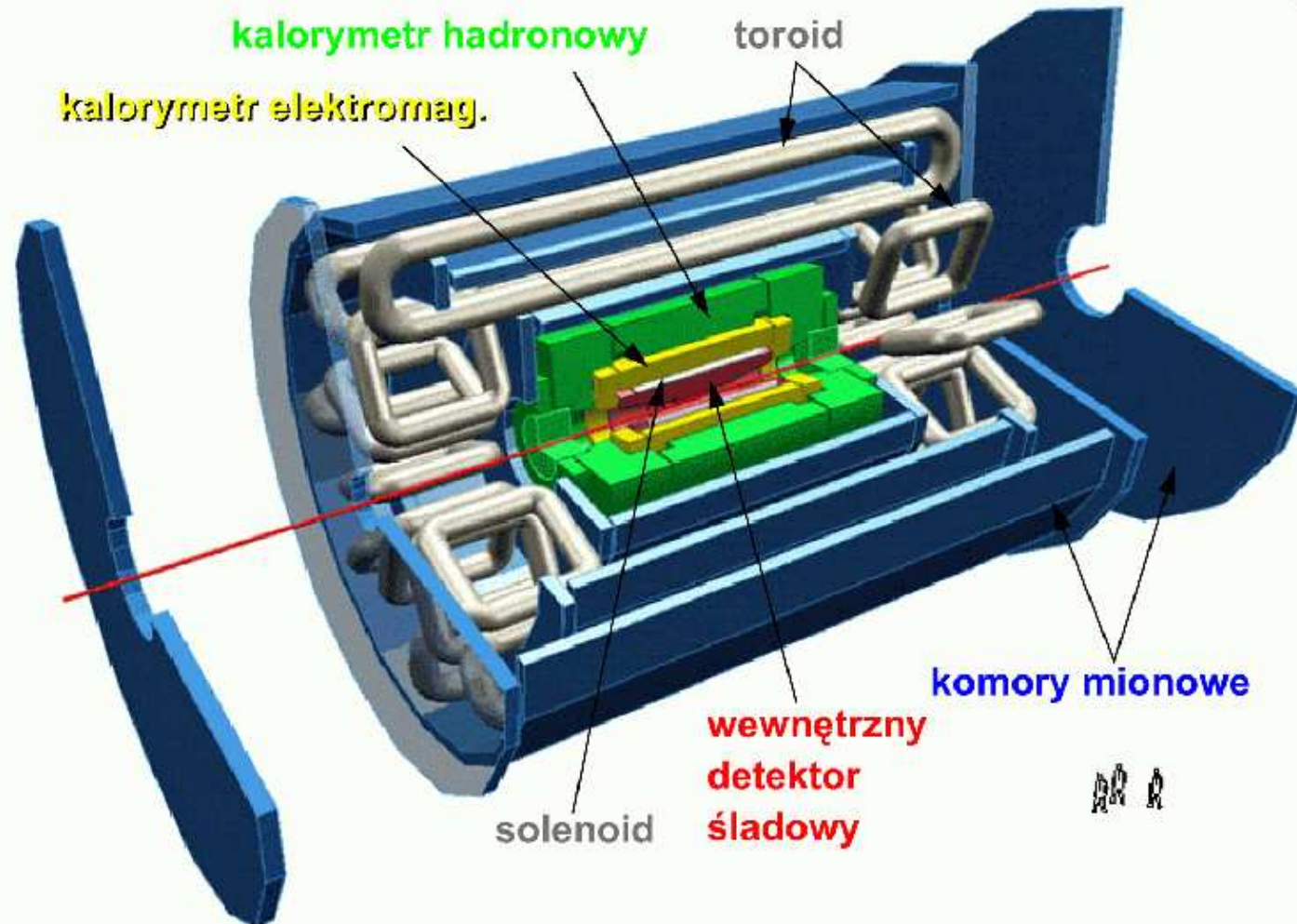
Współczesne eksperymenty

Compact Muon Solenoid



Współczesne eksperymenty

A Toroidal LHC ApparatuS (ATLAS)



Lata przygotowań - ATLAS

15 grudnia 2003



Lata przygotowań - ATLAS

15 czerwca 2004

UX15 Jura Tue Jun 15 17:00:02 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

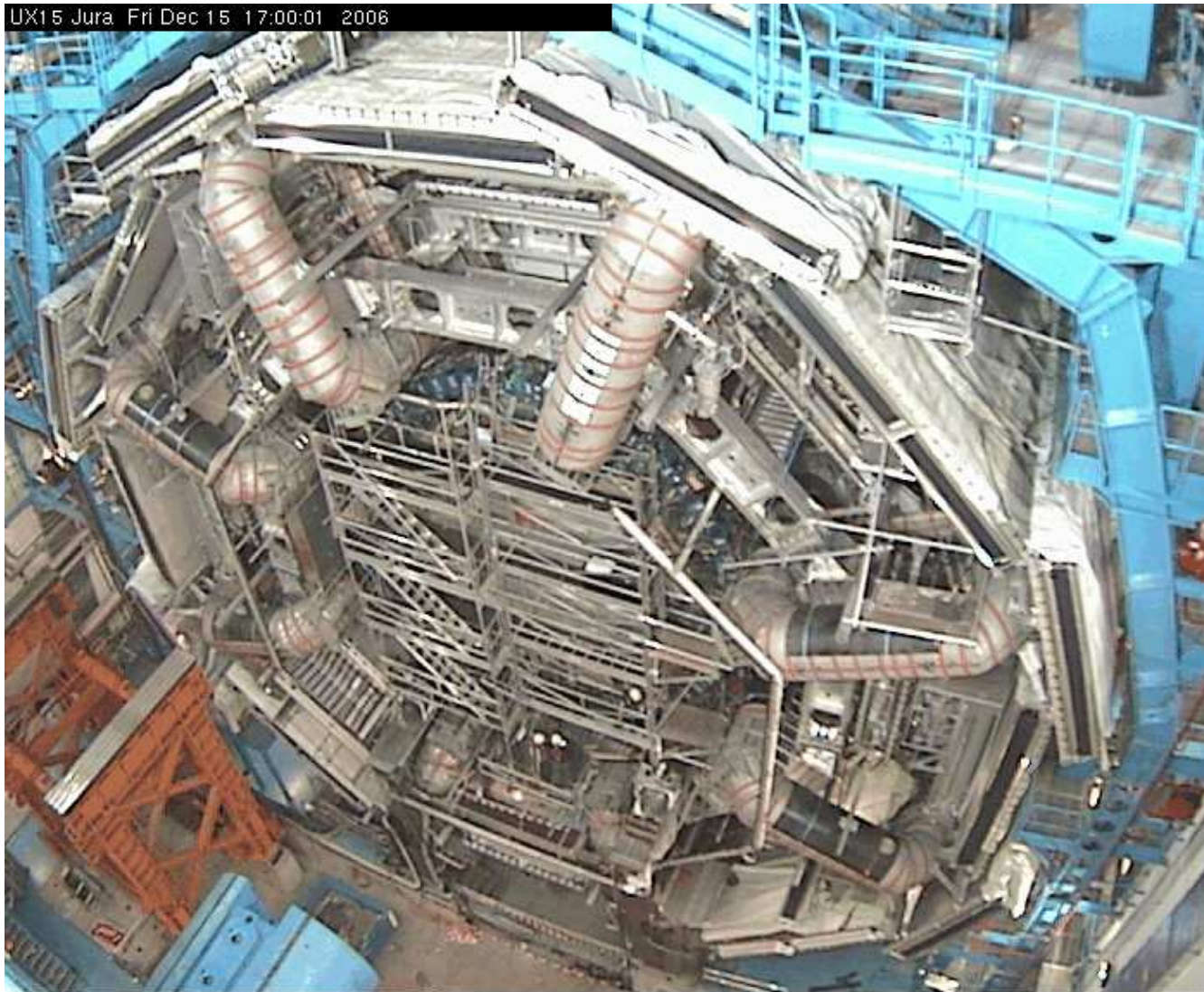
15 czerwca 2006

UX15 Jura Thu Jun 15 17:00:02 2006



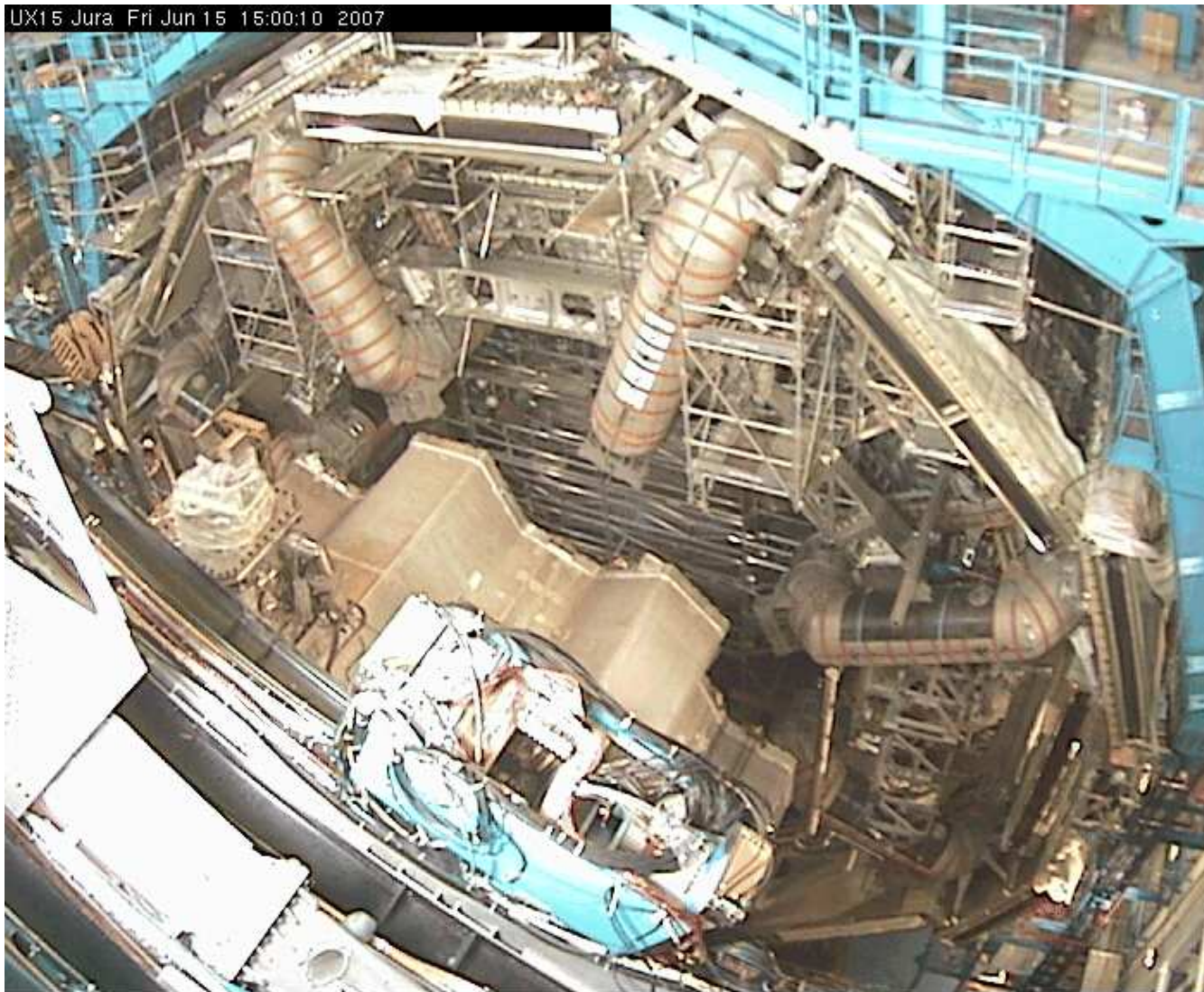
Lata przygotowań - ATLAS

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

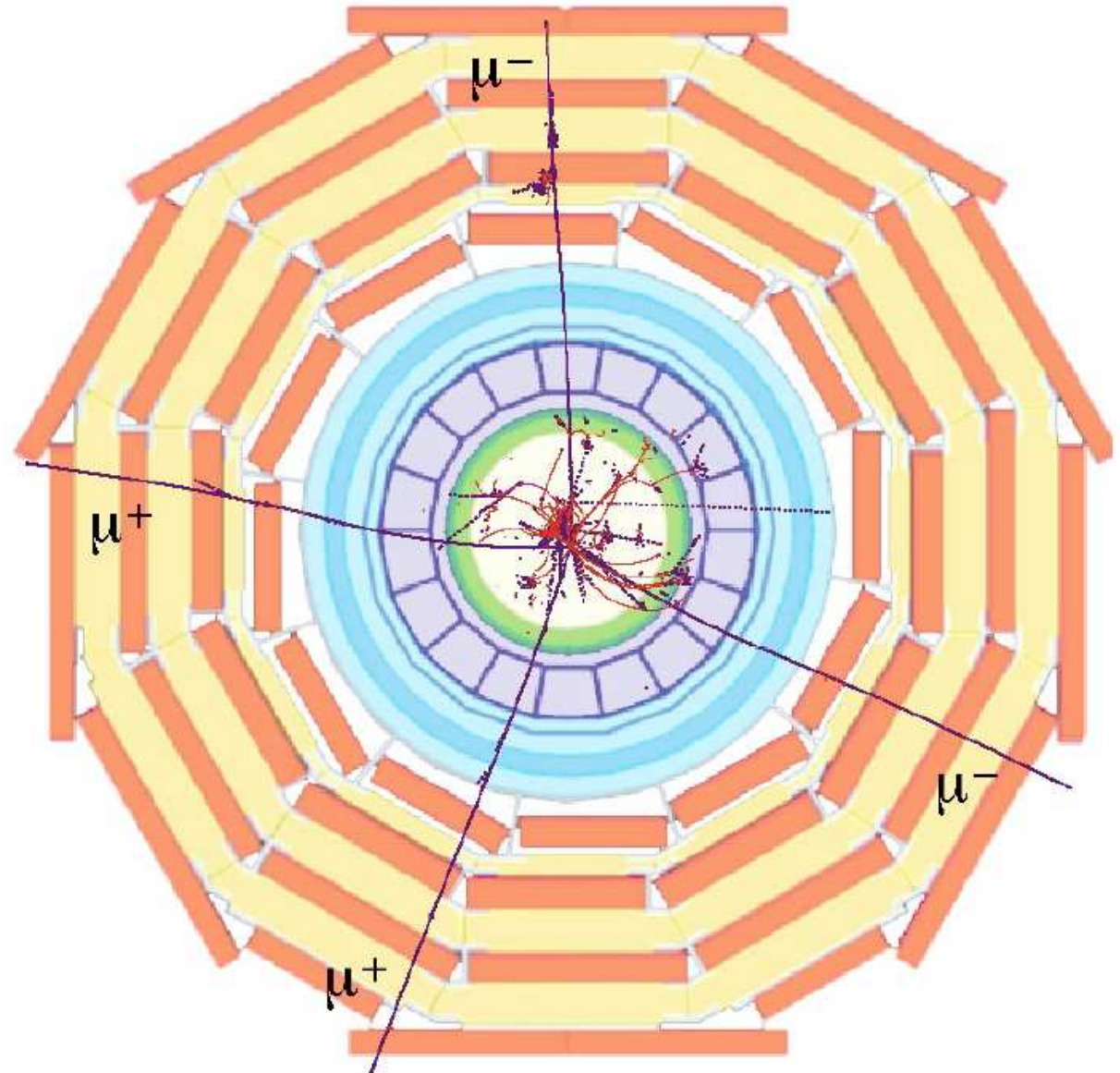


Współczesne eksperymenty

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

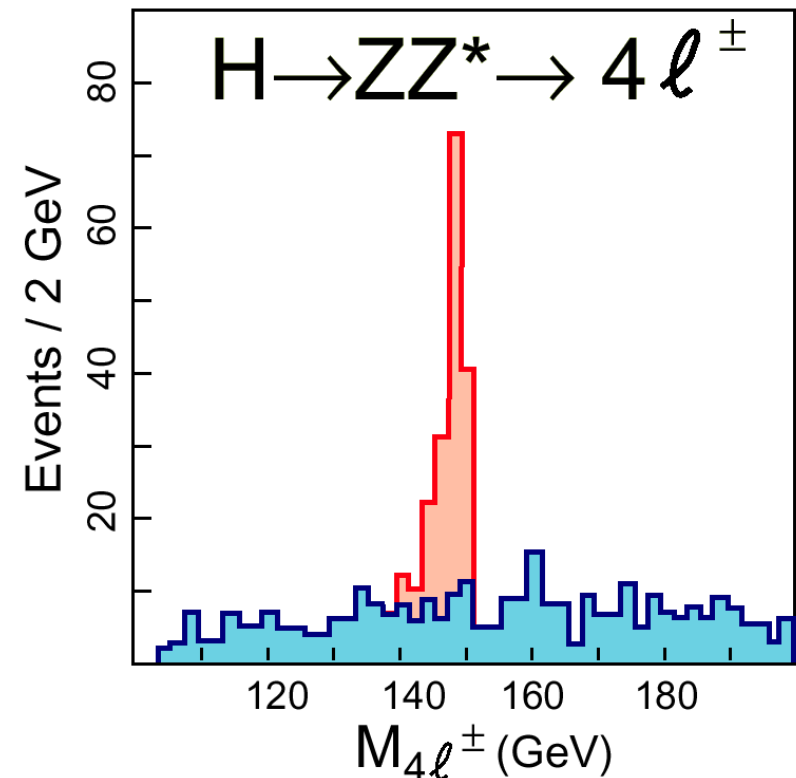
Poszukiwania **bozonu Higgsa** a następnie **pomiar** jego **parametrów** będzie jednym z głównych tematów badań w LHC.

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!



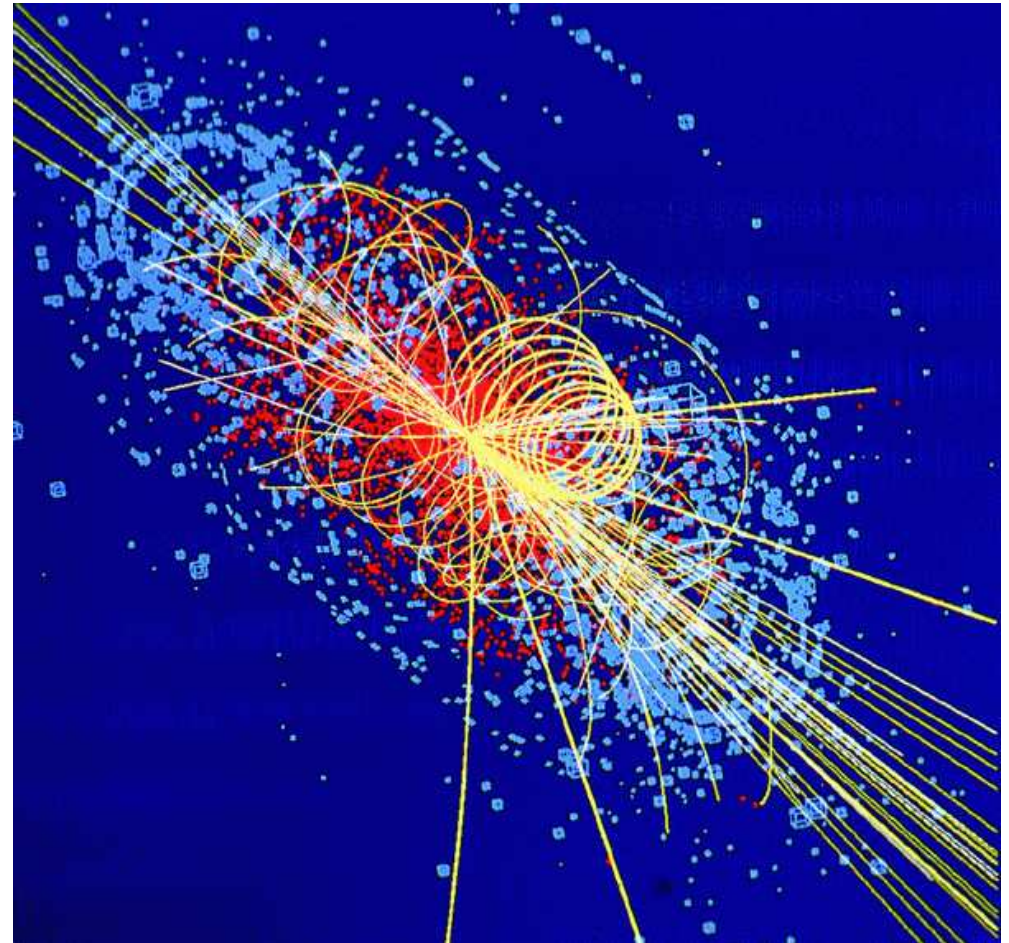
Współczesne eksperymenty

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

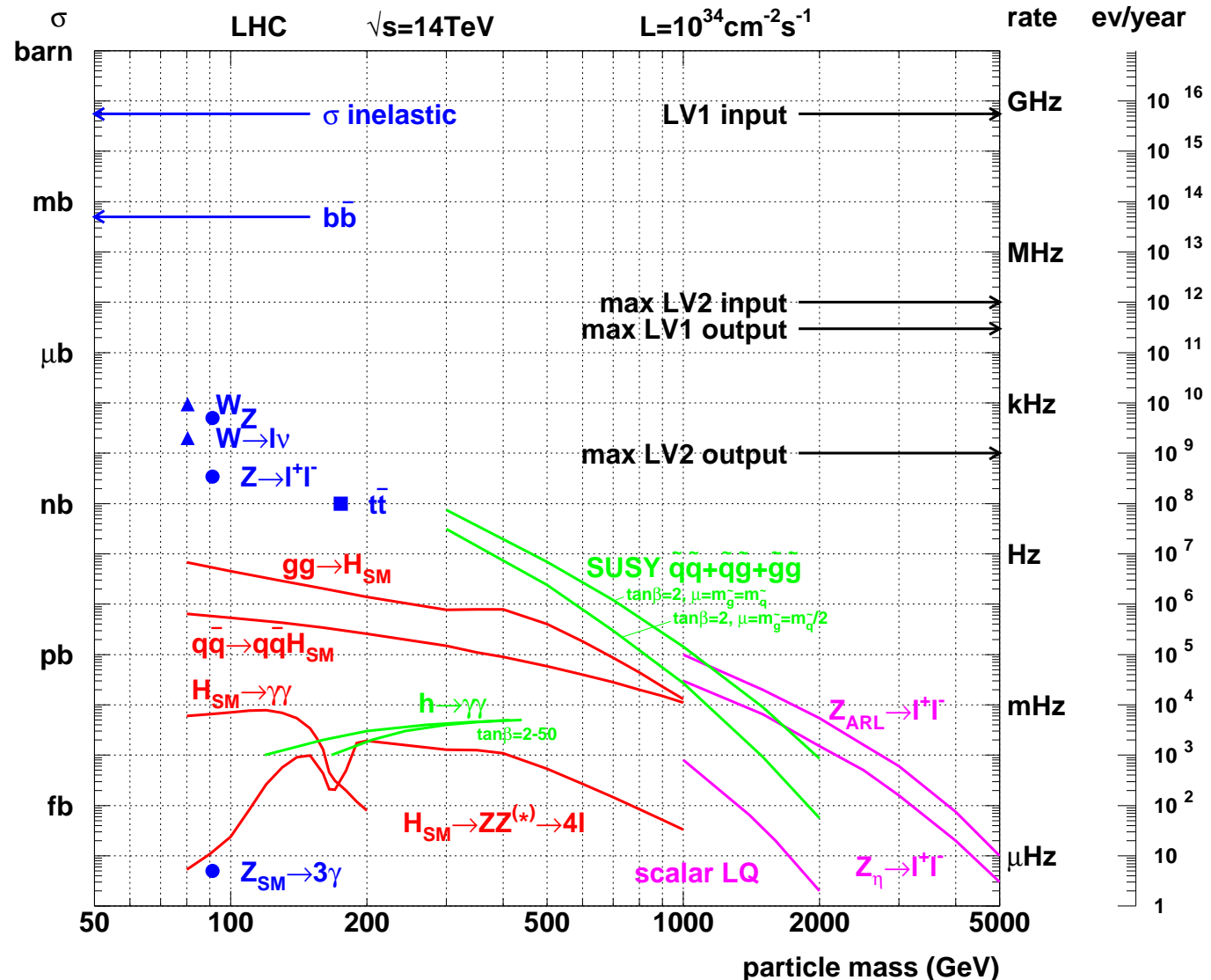
Układ wyzwalań

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

Zbieranie i rekonstrukcja danych

Ilość zbieranych danych dawno przekroczyła możliwości pojedynczego komputera.

1 przypadek to MB danych

zbieramy miliony przypadków

Ale do niedawna można to było trzymać 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

Ale do niedawna można to było trzymać w jednym miejscu...



GRID dla LHC

