

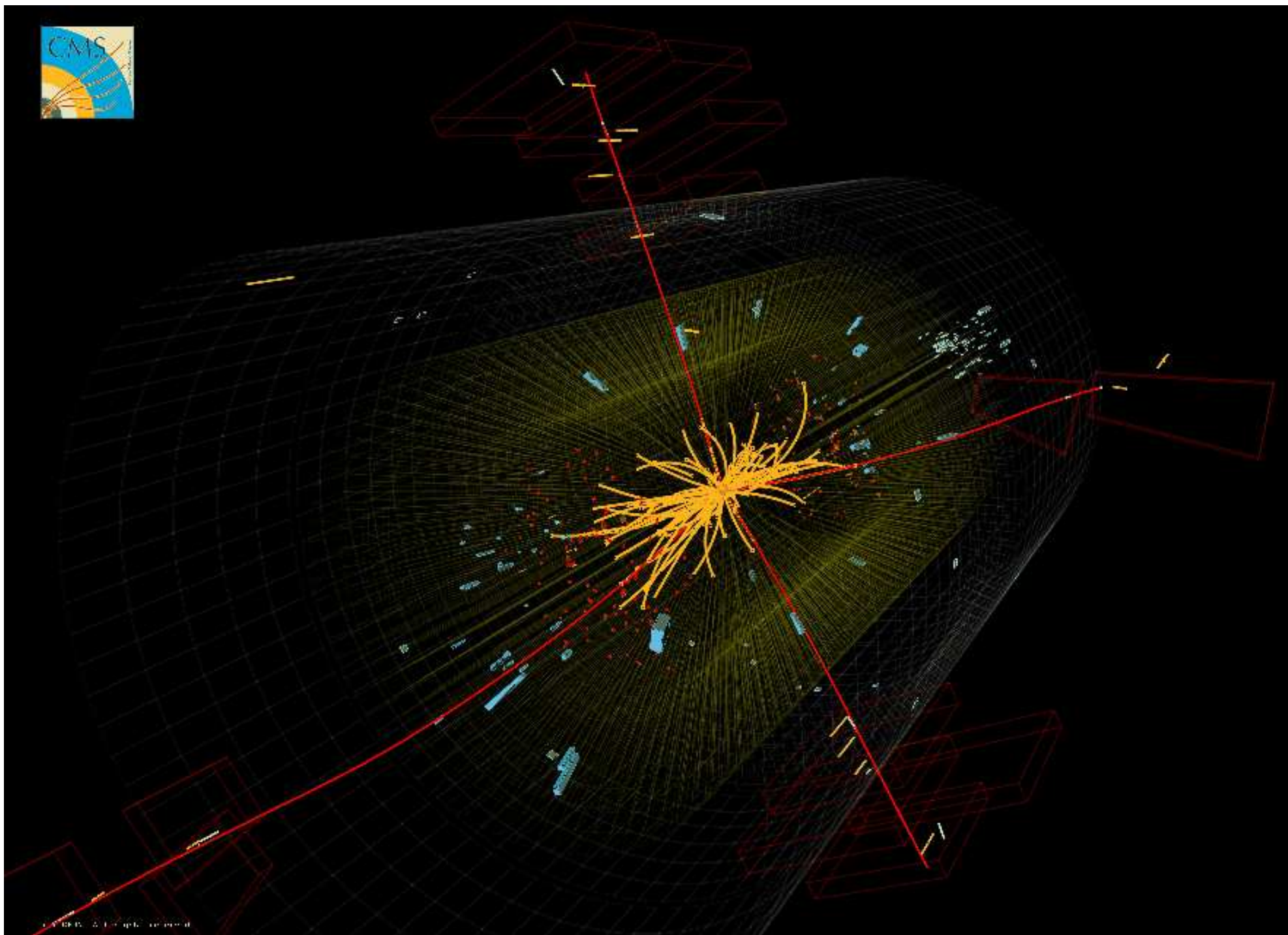
Wszechświat cząstek elementarnych

Wykład 6: Współczesne eksperymenty

prof. A.F.Żarnecki

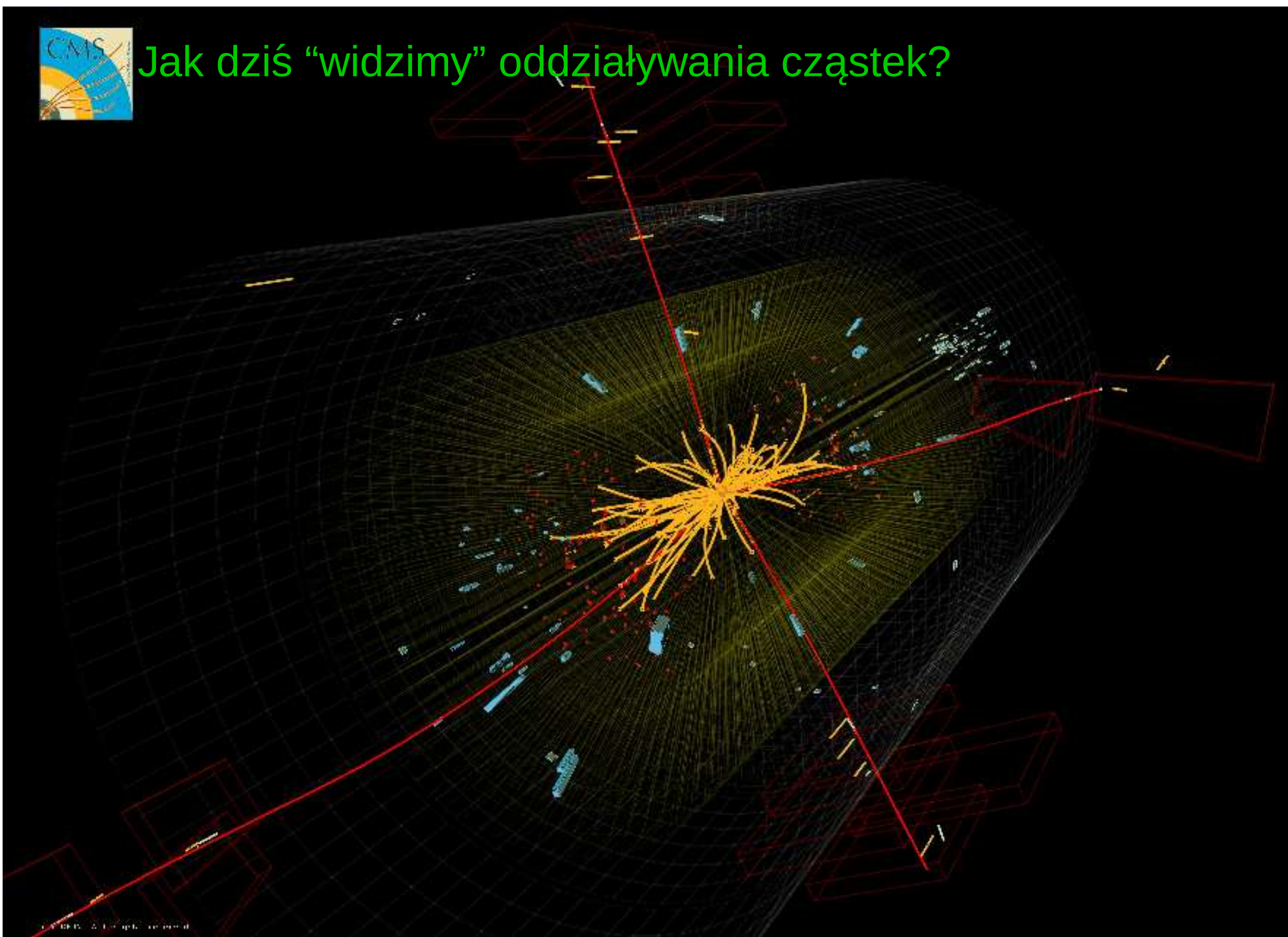


Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych
Instytut Fizyki Doświadczalnej





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 wyzwalania
 - przechowywanie i analiza danych
- Symulacje Monte Carlo

Kolajdery

LEP/LHC

Największym zbudowanym dotąd akceleratorem był LEP. Zbudowany w CERN pod Genewą miał obwód ok. 27 km. Uruchomiony w 1989.

W tym samym tunelu uruchomiono w 2009 akcelerator LHC.

Przeciwbieżne wiązki protonów o energii do 4 TeV (docelowo 7 TeV)

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

Docelowo zderzenia co 25 ns
(40 milionów na sekundę)



Kolajdery



Kolajdery

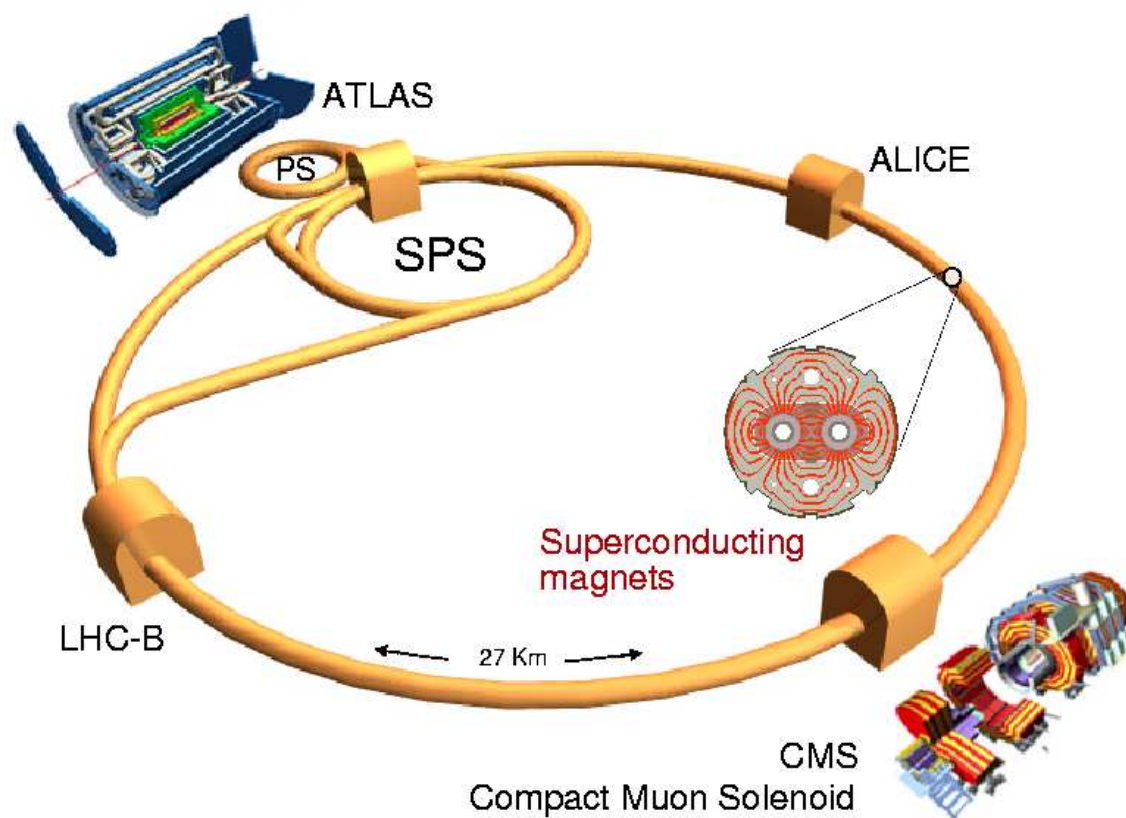
Przeciwbieżne wiązki **protonów** w LHC mają mieć docelowo energię $2 \times 7 \text{ TeV}$ ($1 \text{ TeV} = 1000 \text{ GeV}$)

Intensywność wiązek będzie tak duża, że oczekujemy produkcji do **1000** 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

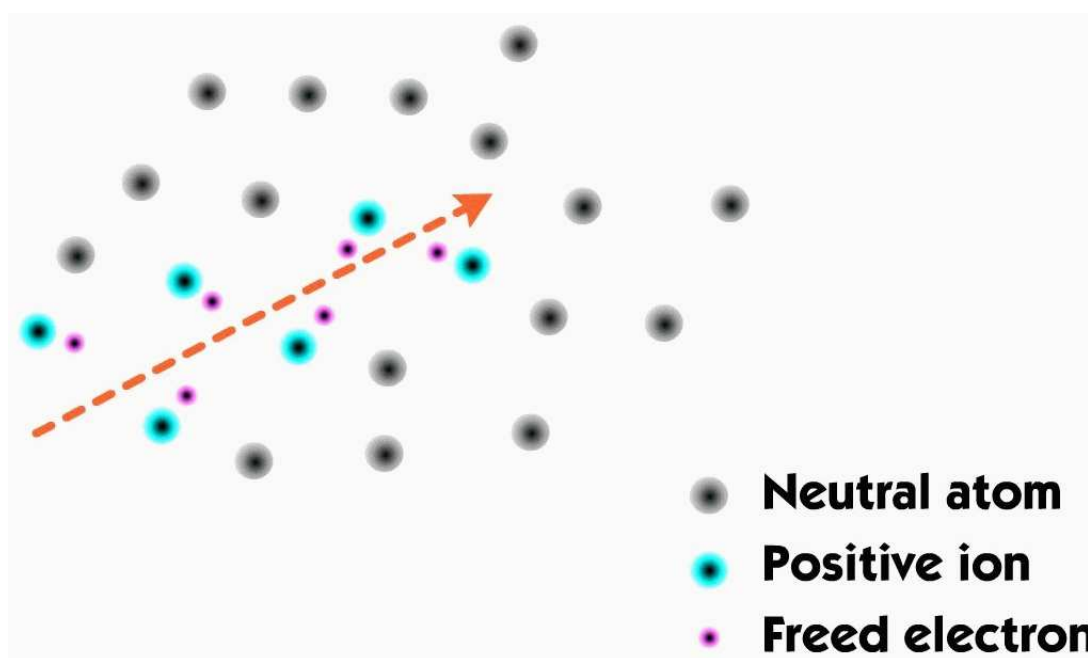
The Large Hadron Collider (LHC)



Detekcja cząstek

Jonizacja

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



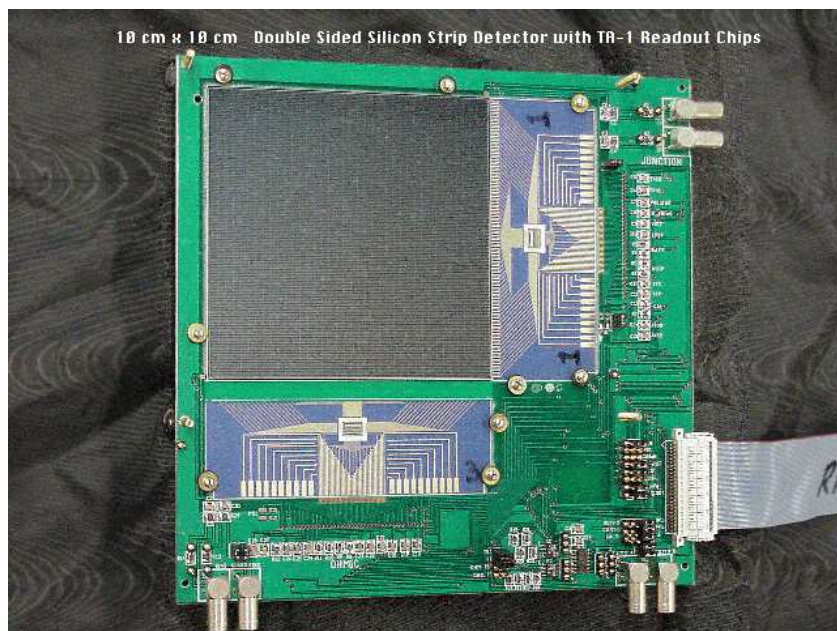
Cząstka naładowana przechodząc przez ośrodek **oddziałuje Kulombowsko** z elektronami i oddaje im część swojej energii “wybijając” je z atomów.

Detekcja cząstek

Detektory półprzewodnikowe

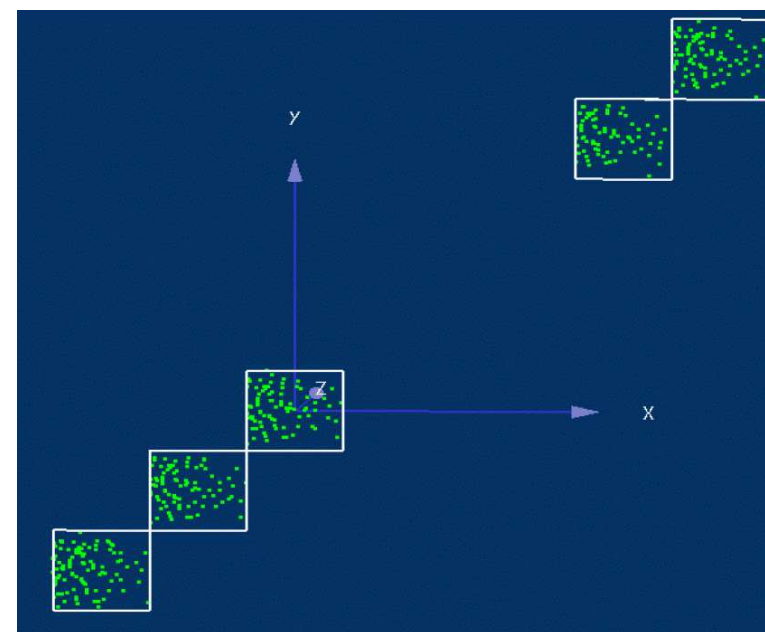
Coraz powszechniej używane.

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



Bardzo precyzyjny pomiar pozycji cząstek (rzędu μm)

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



Niestety wciąż drogie...

Detekcja cząstek

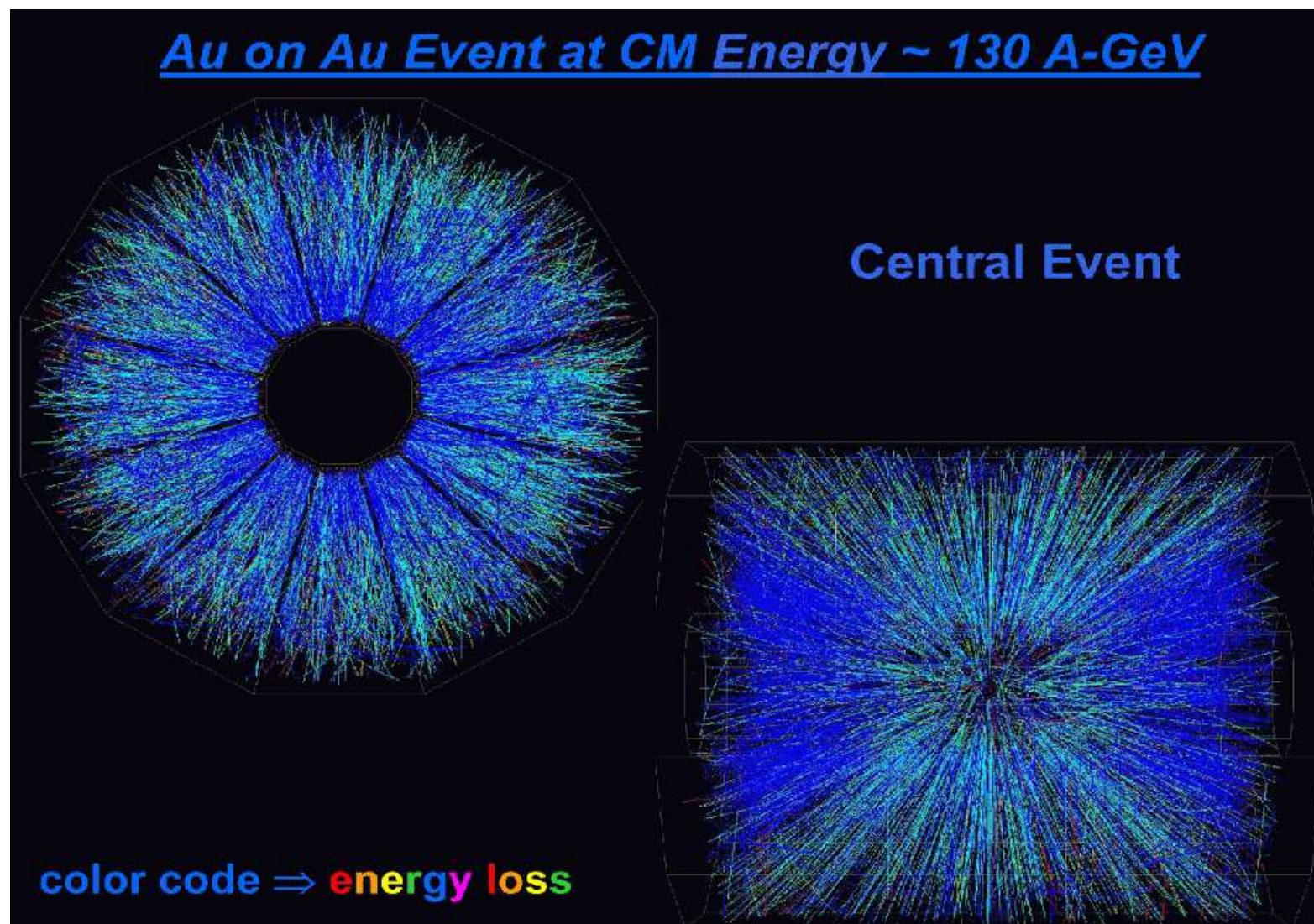
Detektory gazowe

TPC

Komora
projekcji
czasowej

Przypadek
zderzenia
ciężkich
jonów

detektor
STAR
przy RHIC



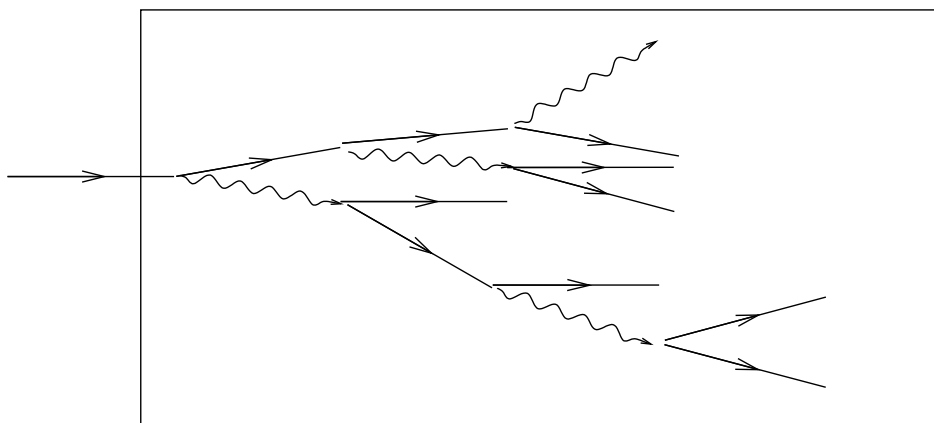
Detekcja cząstek

Kalorymetry

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

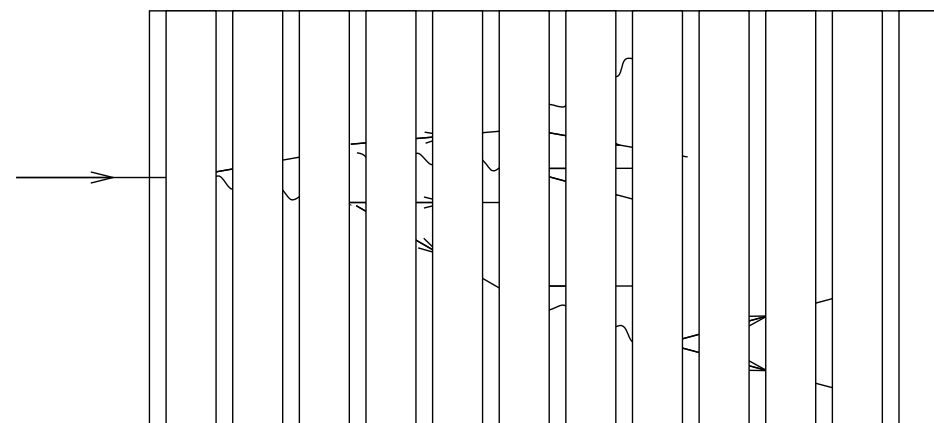
Mierząc liczbę cząstek lub całkowitą długość torów (całkowitą jonizację) możemy dokładnie określić energię cząstki początkowej

Kalorymetr jednorodny



np. blok scyntylatora

Kalorymetr próbkujący

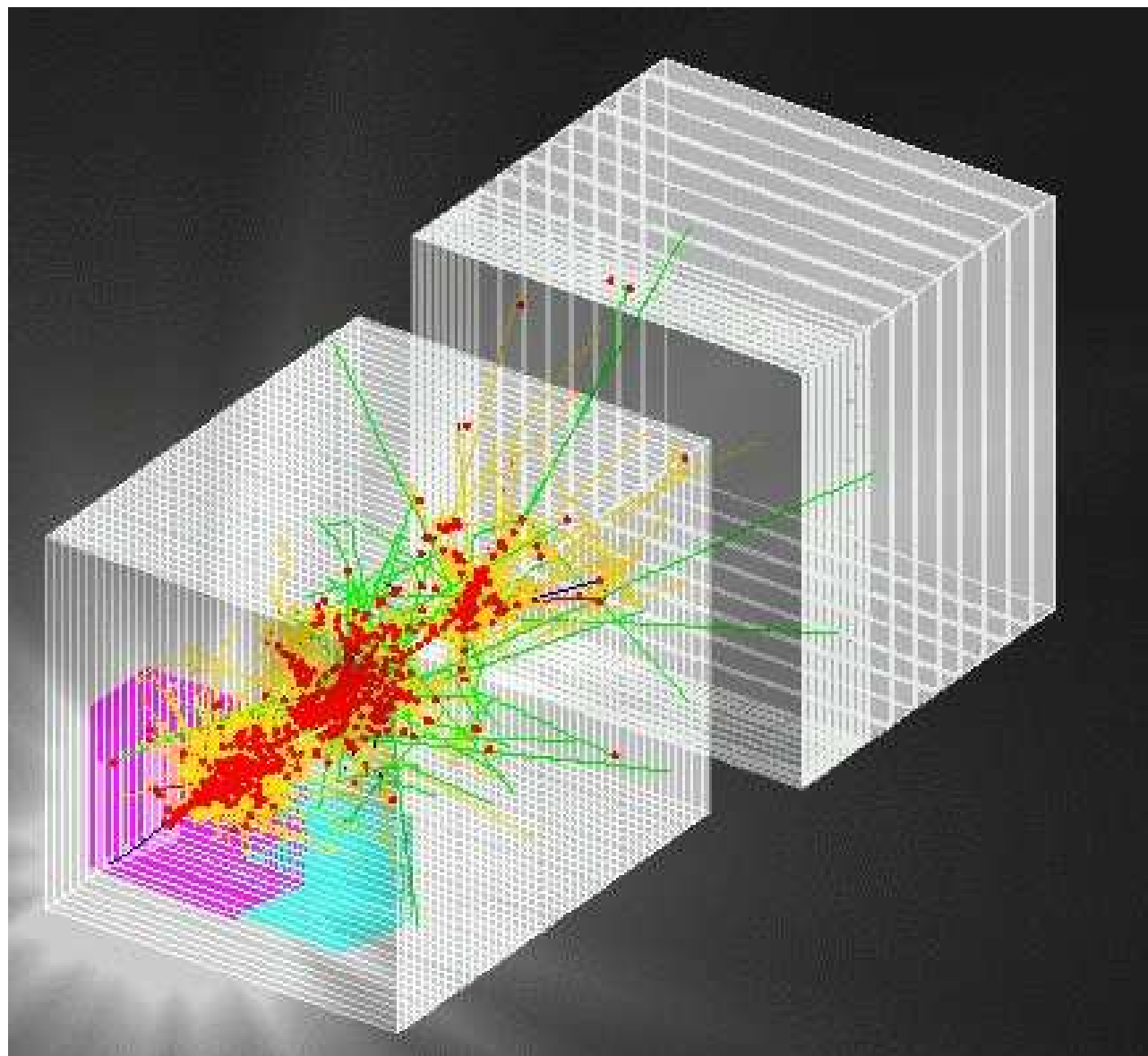


warstwy detektora na przemian z gęstym absorberem

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 (zwłaszcza te na wiązkach przeciwbieżnych) są naogół zbudowane z **wielu różnorodnych elementów**.

Przekrój poprzeczny detektora, ilustrujący tory cząstek

■ rura dryfowa

■ komora trakera

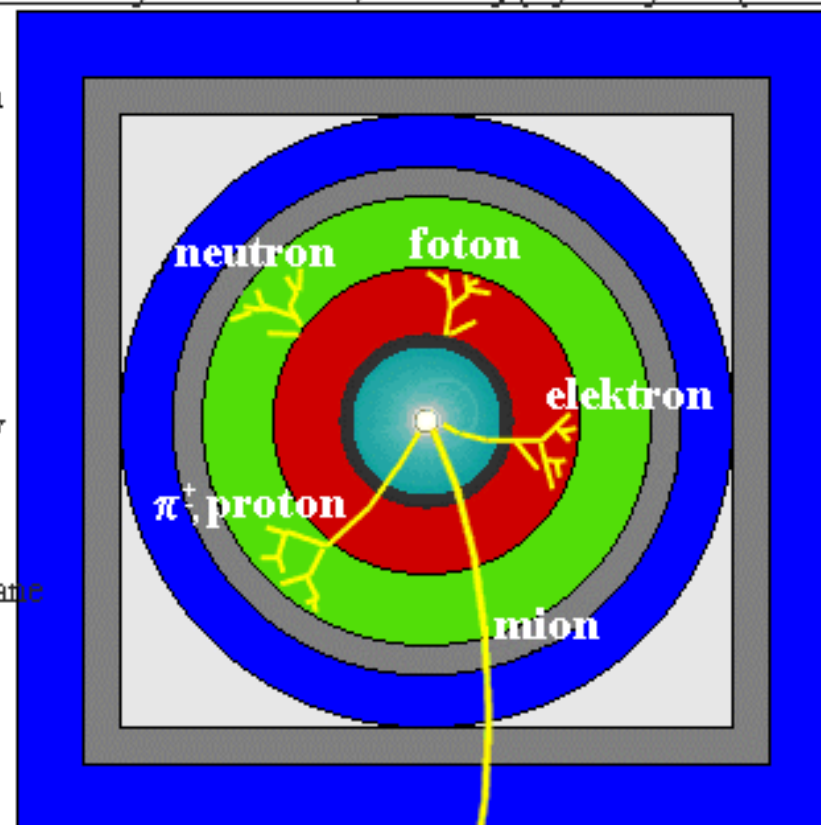
■ solenoid magnesu

■ 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:

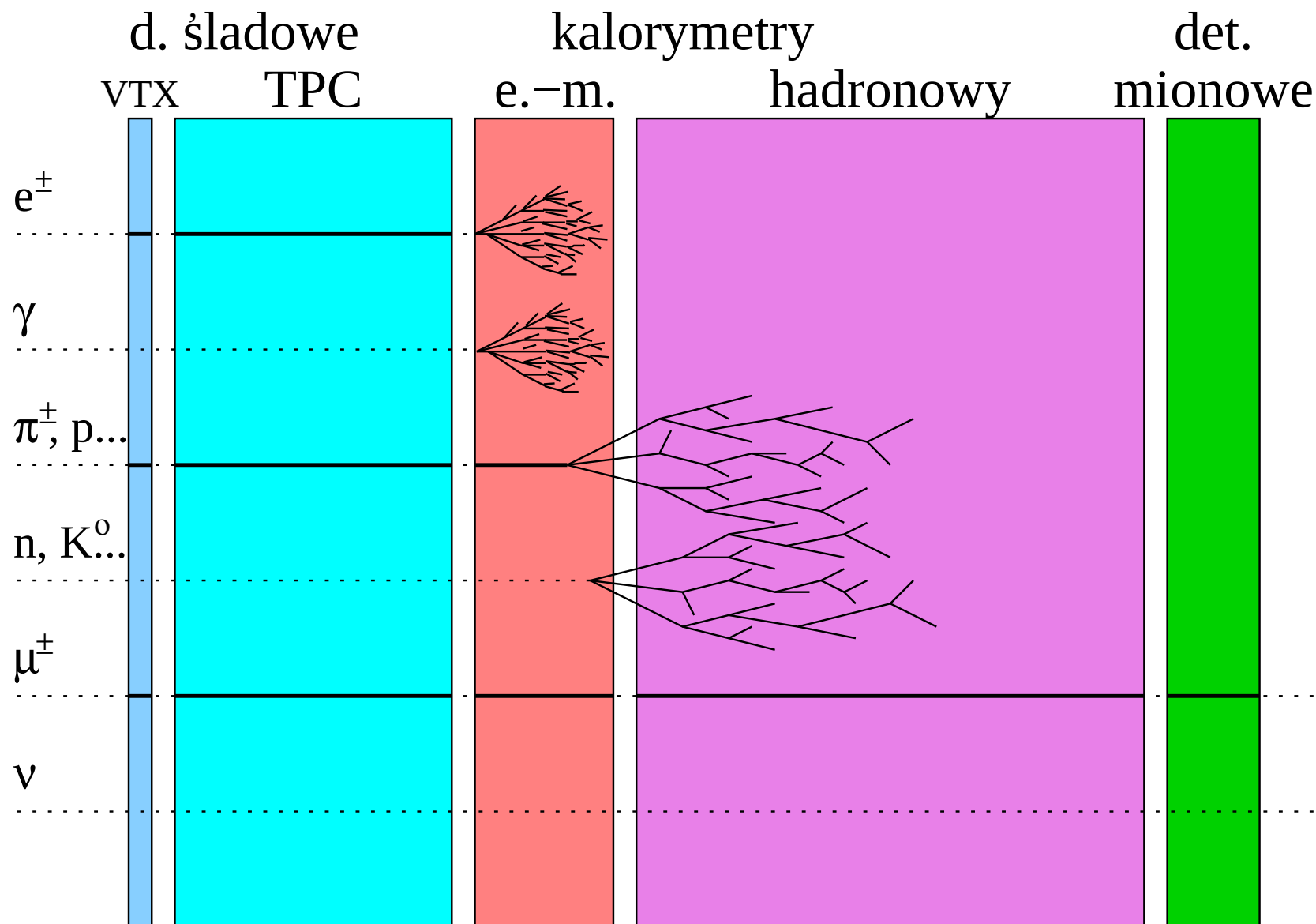
- detektor wierzchołka
jak najbliżej osi wiązki, określa gdzie zaszło zderzenie,
identyfikuje rozpady cząstek krótkożyciowych
(tzw. wierzchołki wtórne)
najczęściej detektor półprzewodnikowy
- detektory śladowe
pomiar torów cząstek naładowanych, wyznaczenie pędów
cząstek z zakrzywienia w polu magnetycznym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

Współczesne eksperymenty

Detektor uniwersalny

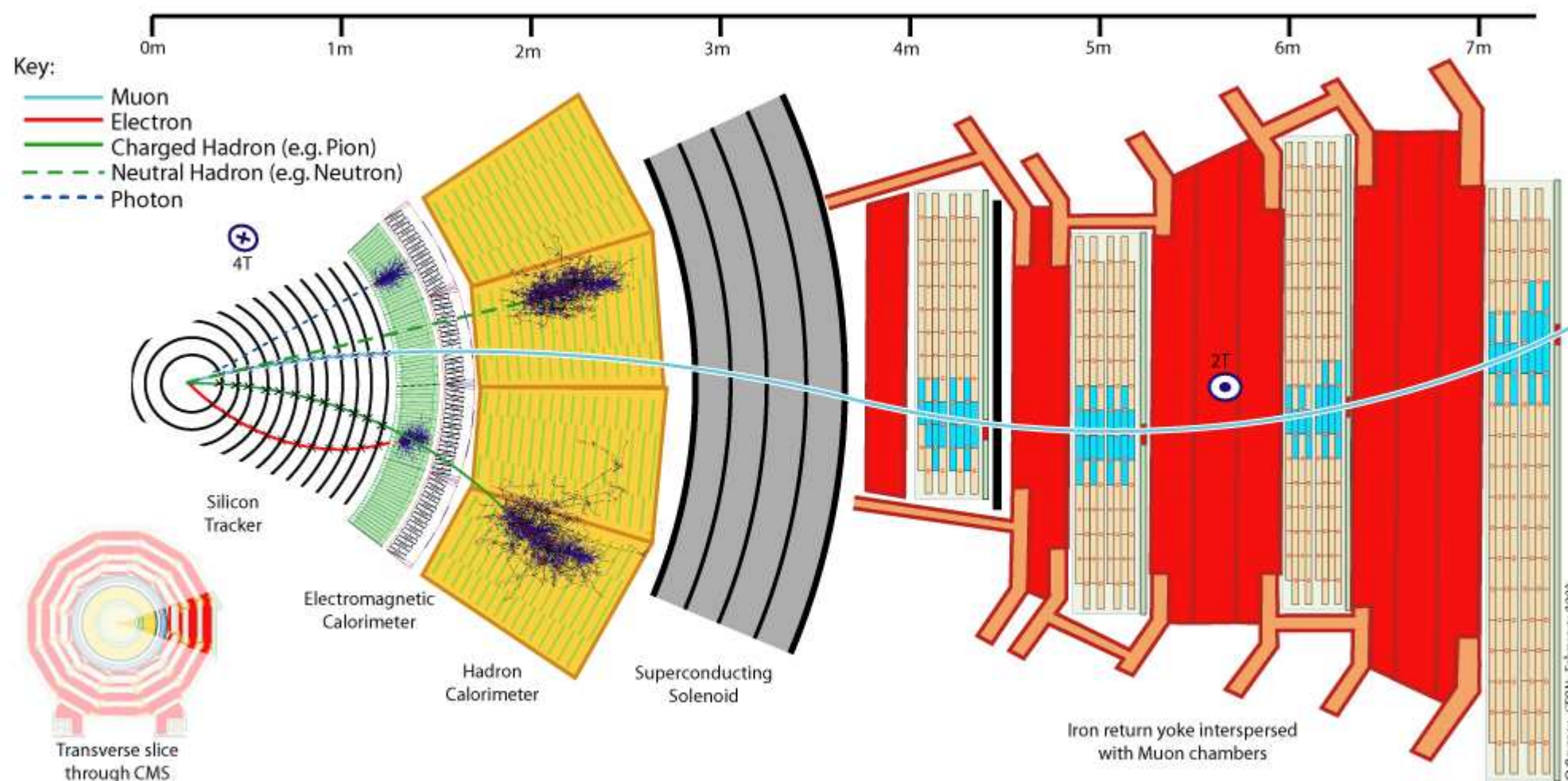
- kalorymetr elektromagnetyczny
pomiar energii elektronów i fotonów
gęsty materiał absorbujący lawinę cząstek
(międz, ołów, wolfram)
- kalorymetr hadronowy
pomiar energii hadronów (protony, neutrony, piony, kaony)
gęsty materiał absorbujący lawinę cząstek; lawina hadronowa
jest wielokrotnie dłuższa od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

Współczesne eksperymenty



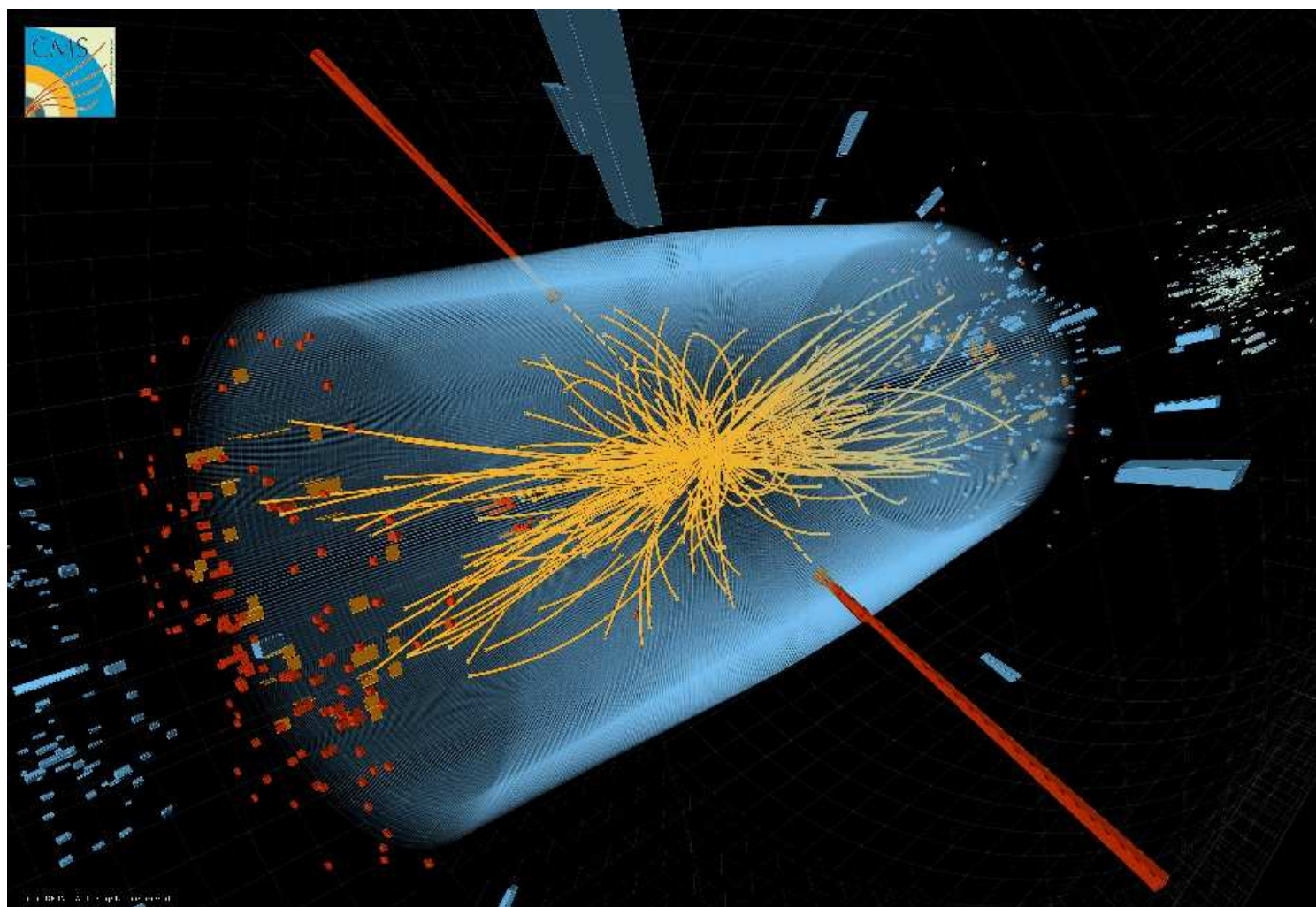
Współczesne eksperymenty

Schemat detektora CMS



Współczesne eksperymenty

Przypadki rejestrowane w detektorze CMS



Współczesne eksperymenty

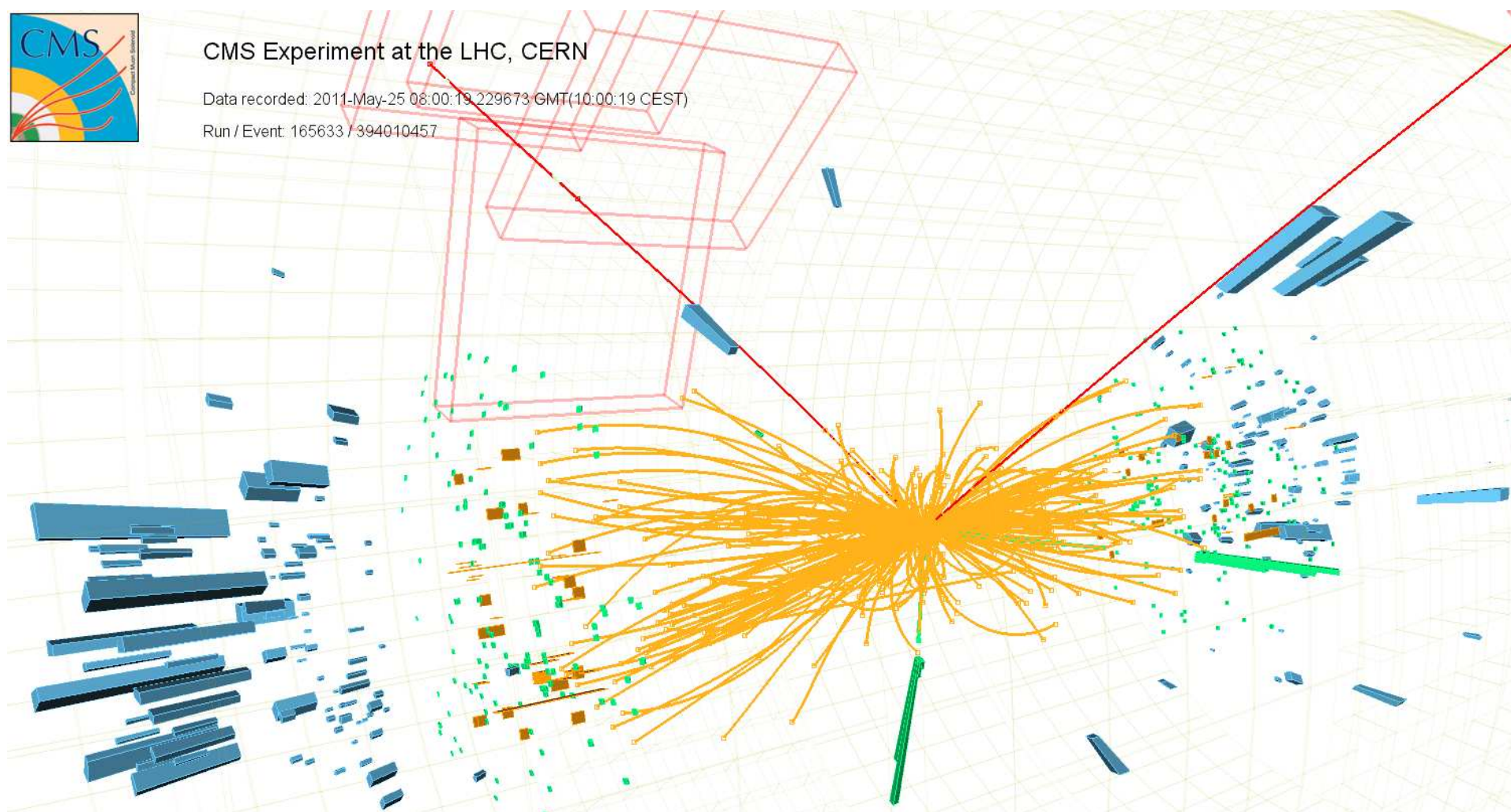
Przypadki rejestrowane w detektorze CMS



CMS Experiment at the LHC, CERN

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

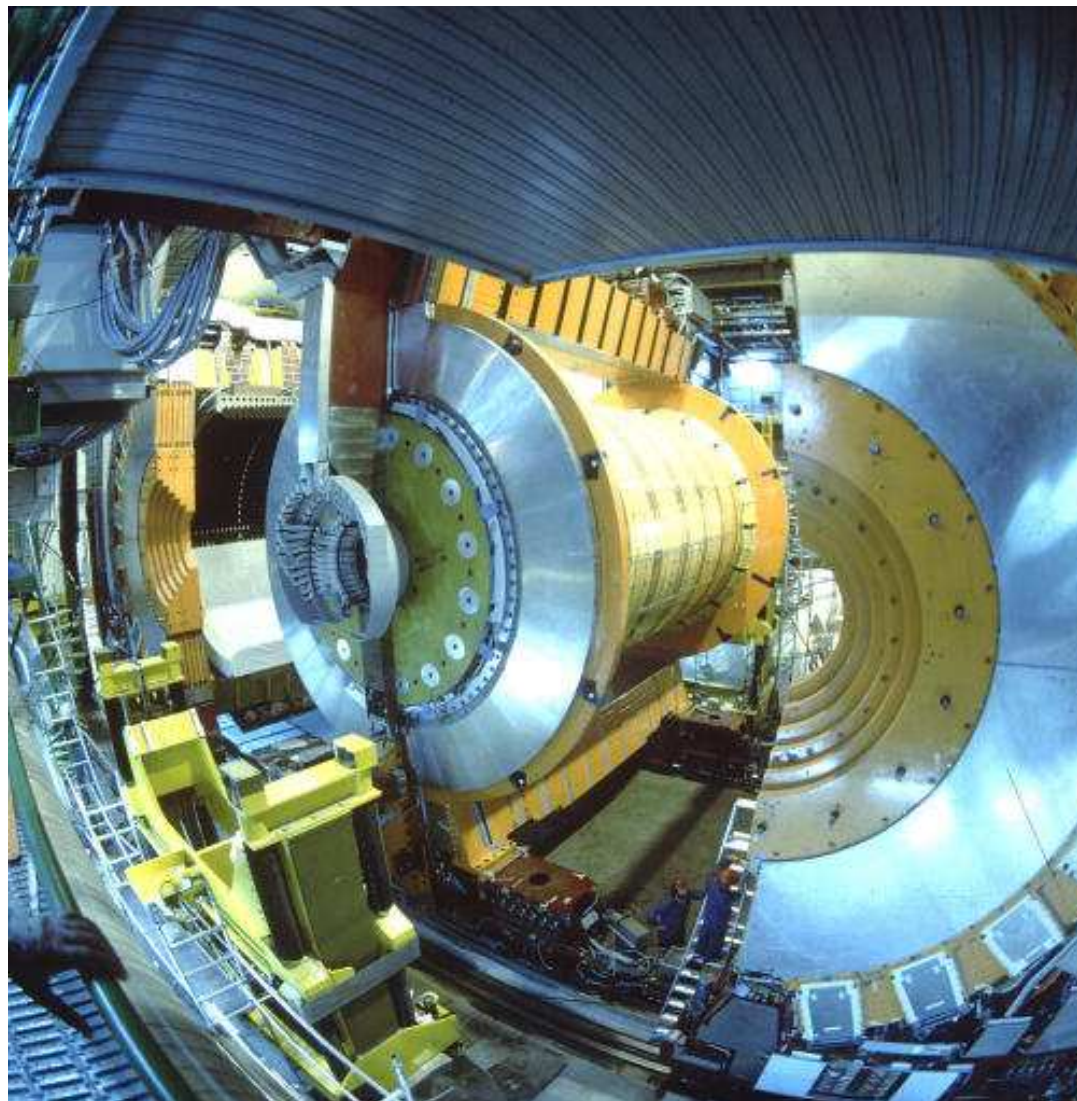
Run / Event: 165633 / 394010457



Współczesne eksperymenty

OPAL

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

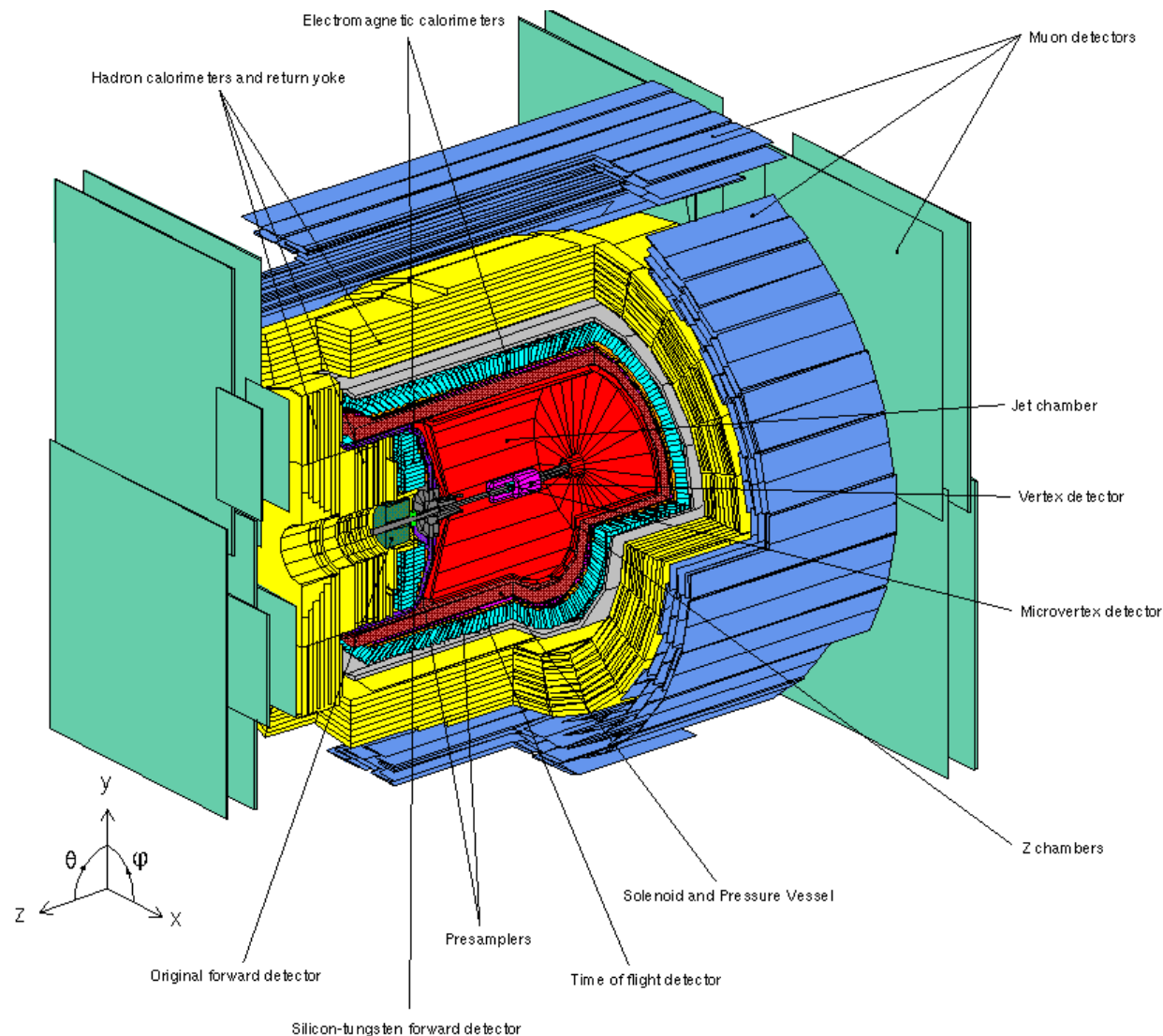


Współczesne eksperymenty

OPAL



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



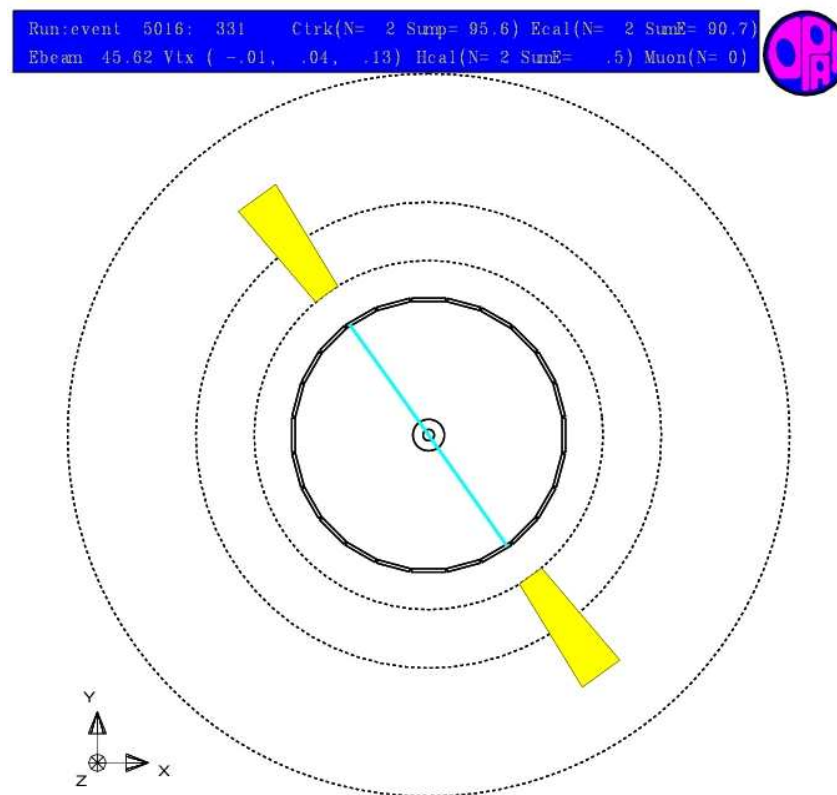
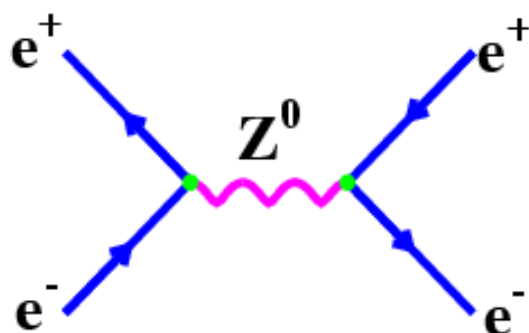
Co rejestrują detektory

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

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



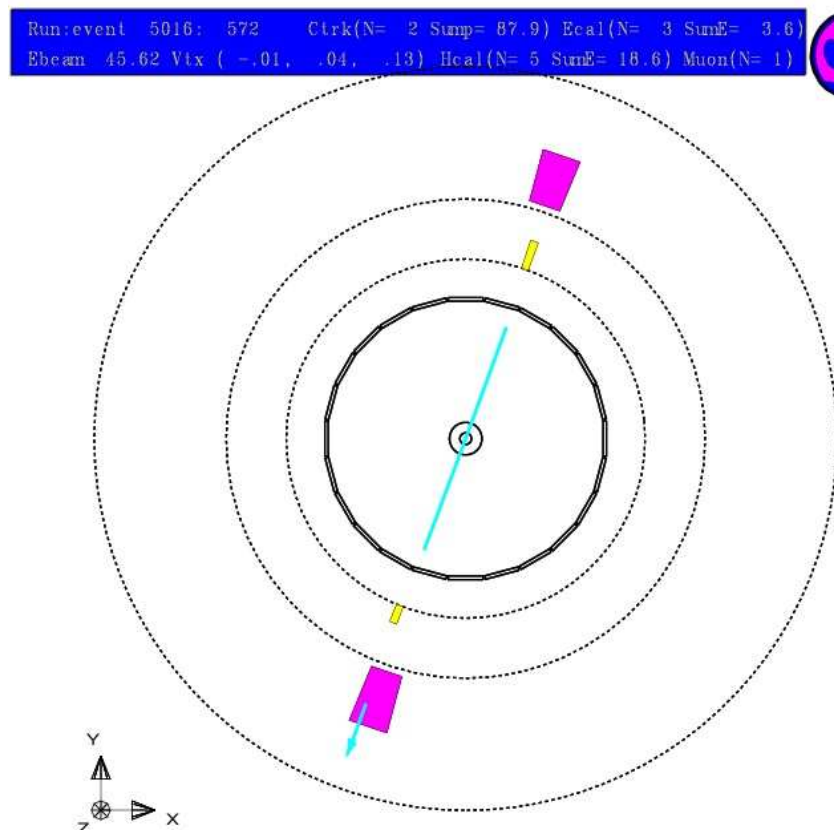
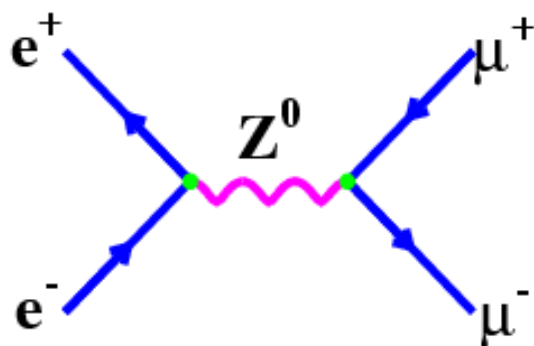
Co rejestrują detektory

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

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



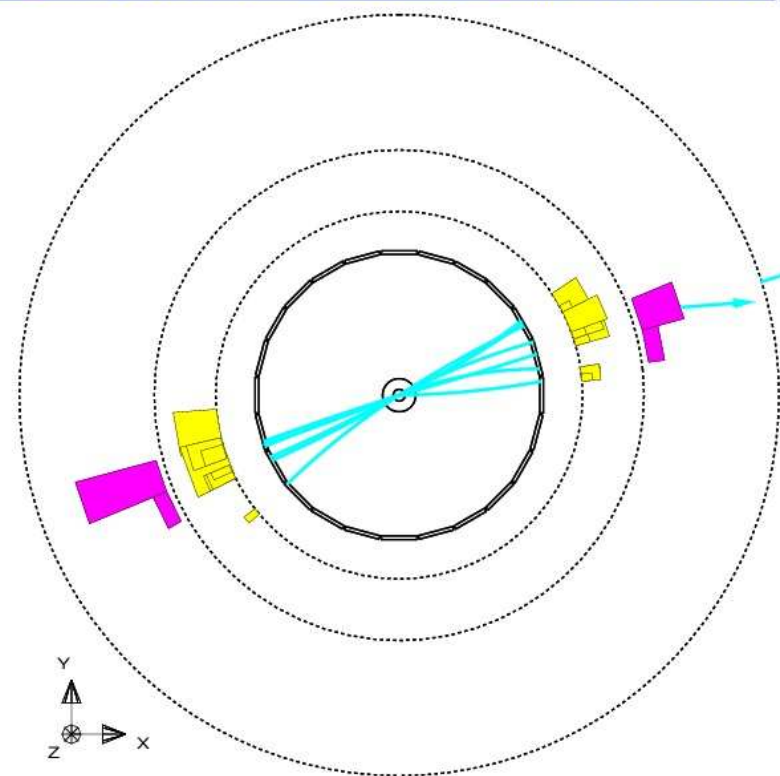
Co rejestrują detektory

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 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)
```



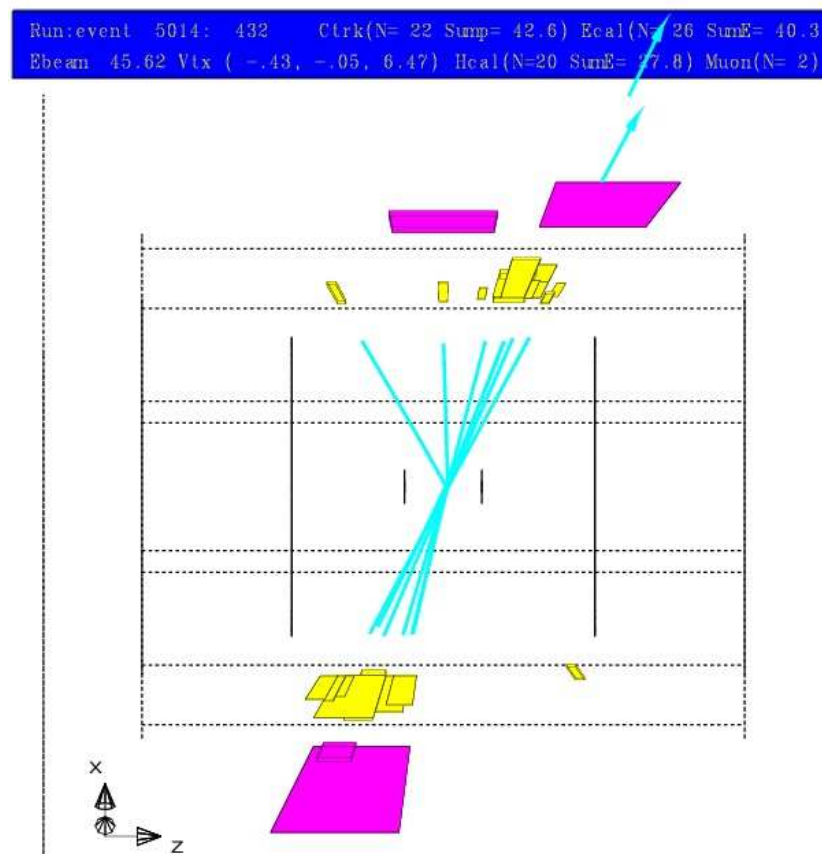
Co rejestrują detektory

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

W około 10% przypadków widzimy powstające elektrony lub miony

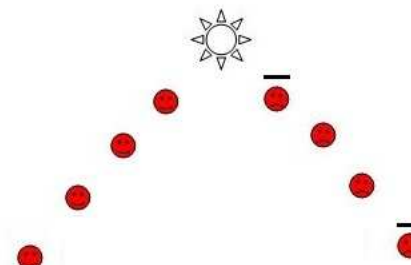
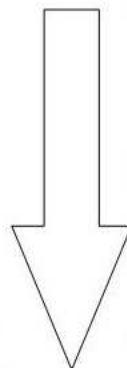
A jak interpretować taki przypadek?

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



Hadronizacja

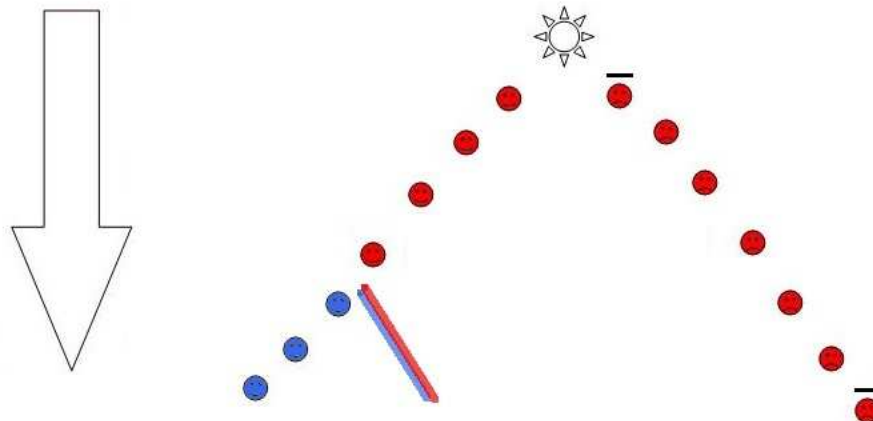
W zderzeniu powstaje para
kwarków: $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$



Hadronizacja

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

Kwarki oddalają się od siebie, rośnie oddziaływanie kolorowe

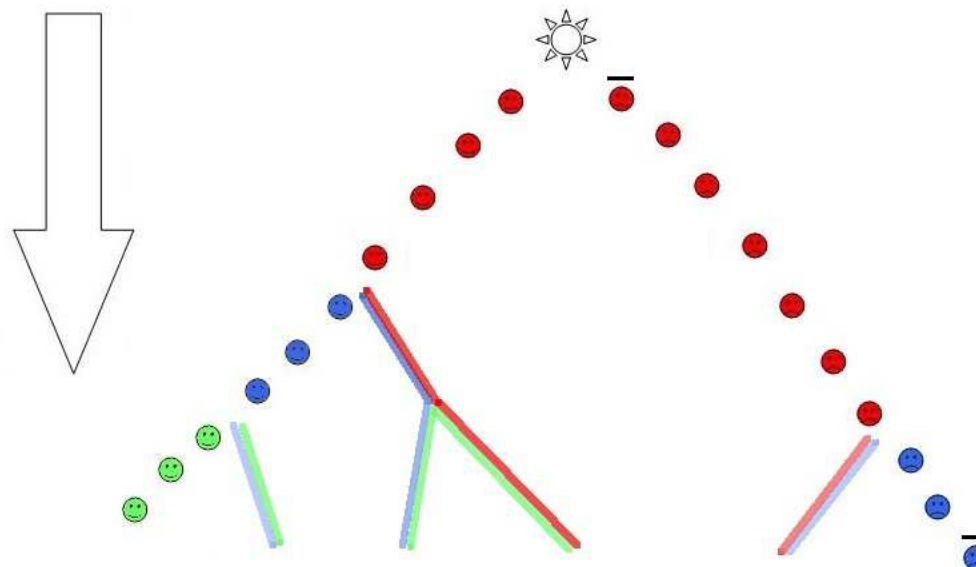


Hadronizacja

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

Kwarki oddalają się od siebie, rośnie oddziaływanie kolorowe

Dochodzi do emisji gluonów



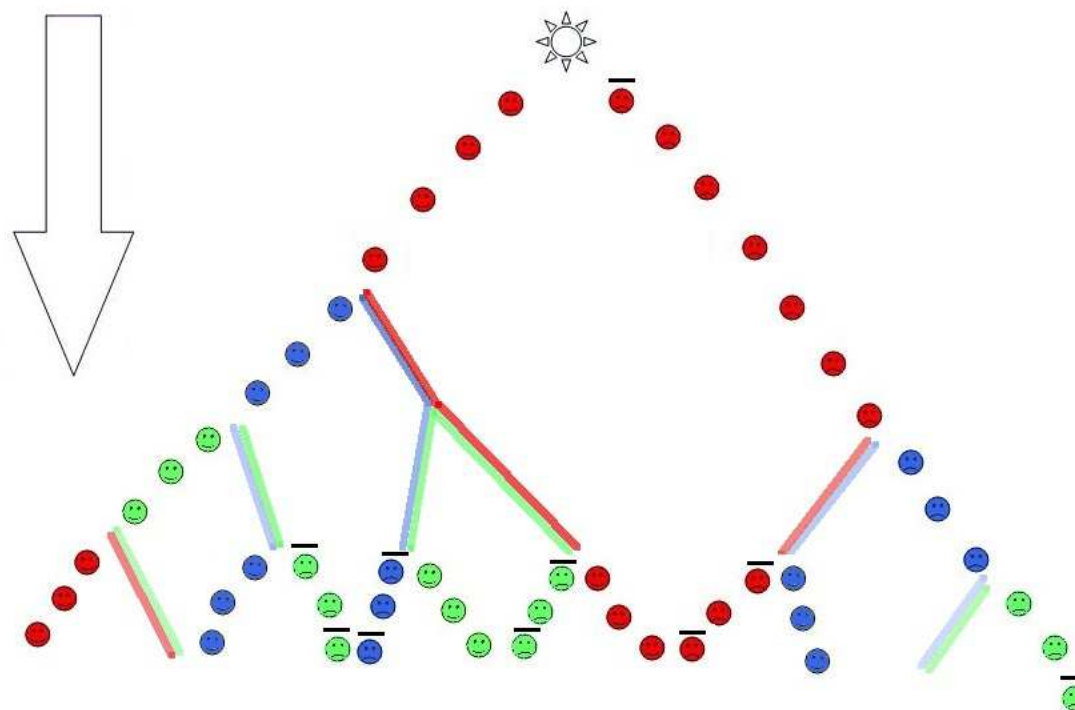
Hadronizacja

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



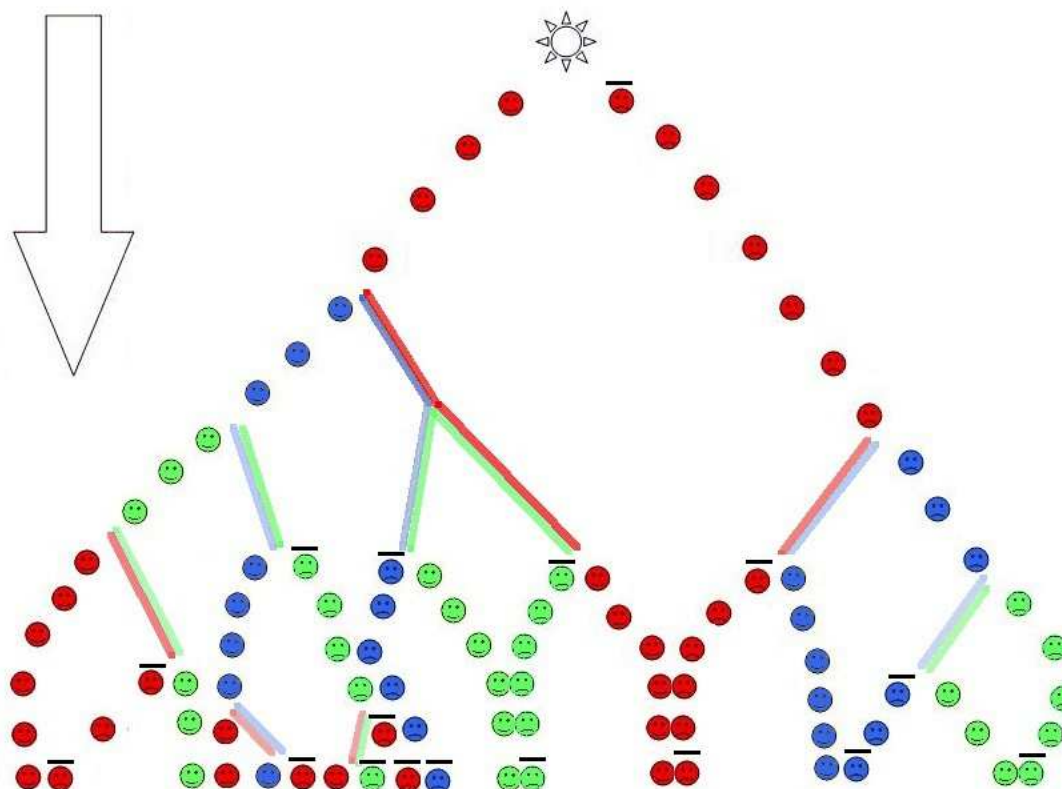
Hadronizacja

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-antykwarek



Hadronizacja

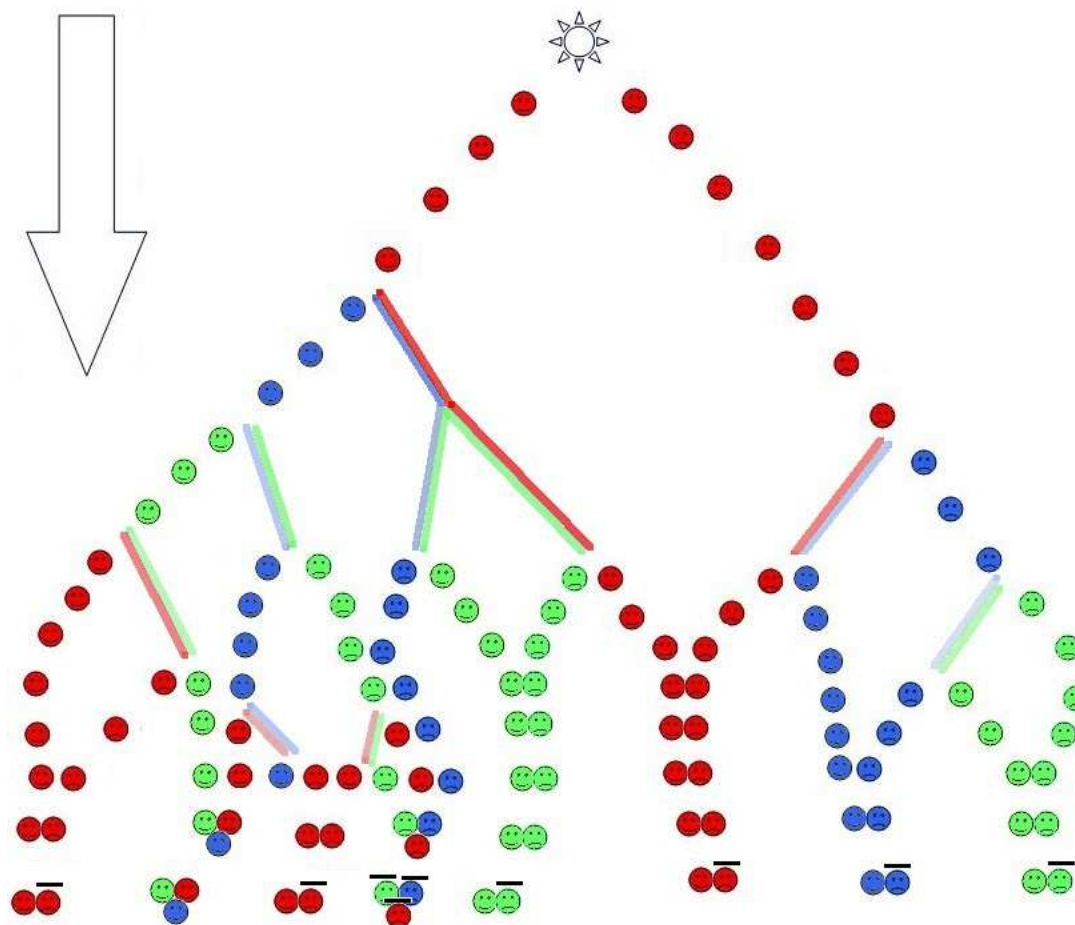
W zderzeniu powstaje para kwarków: $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$

Kwarki oddalają się od siebie, rośnie oddziaływanie kolorowe

Dochodzi do emisji gluonów

Gluony konwertują na pary kwark-antykwarek

Kwarki i antykwarki formują “białe” hadrony



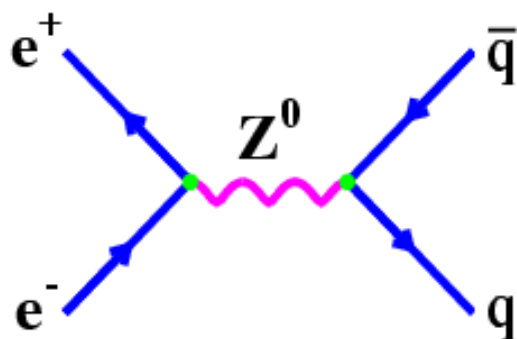
Co rejestrują detektory

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

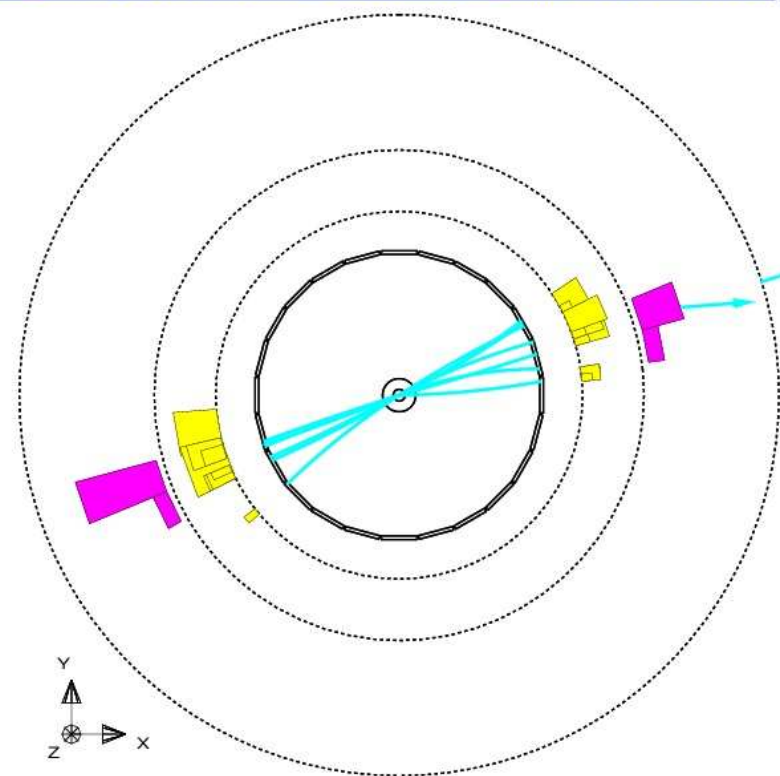
W prawie 90% przypadków widzimy powstające jety hadronowe.

Naogół powstają 2 jety

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



```
Run:event 5014: 432 Ctrk(N= 22 Sum= 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

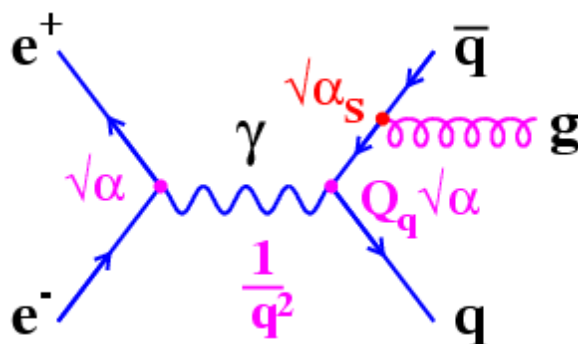
W akceleratorze **LEP** zderzano elektrony i pozytony przy energii dostępnej $\sqrt{s} = 90 - 210 GeV$.

W prawie 90% przypadków widzimy powstające jety hadronowe.

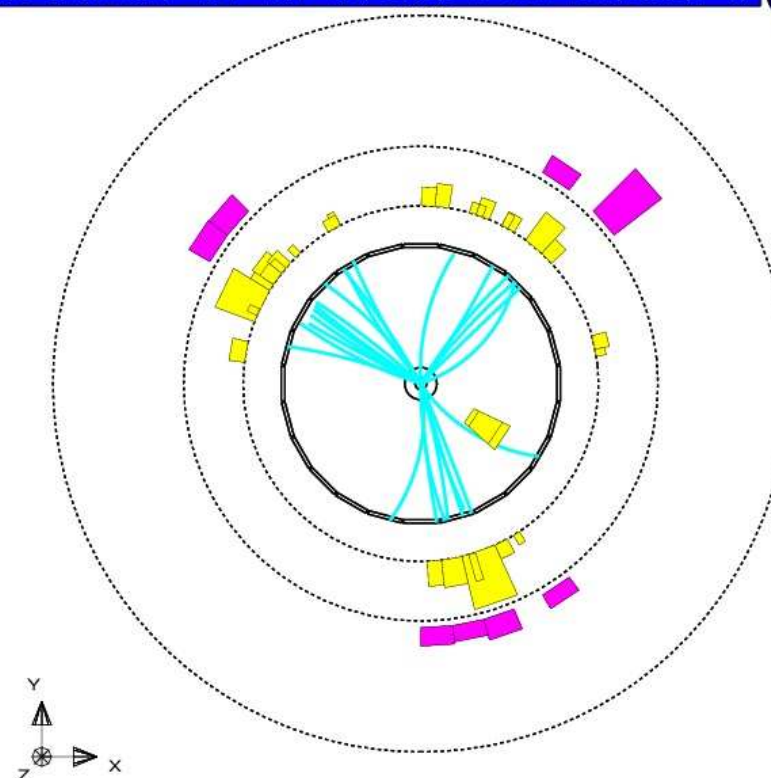
Naogół powstają 2 jety

Ale możliwe też:

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



```
Run:event 5014: 554 Ctrk(N= 36 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)
```

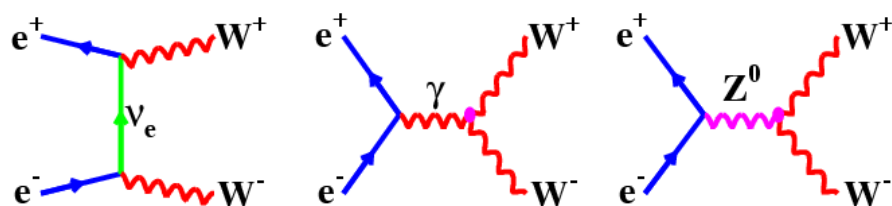


Co rejestrują detektory

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:

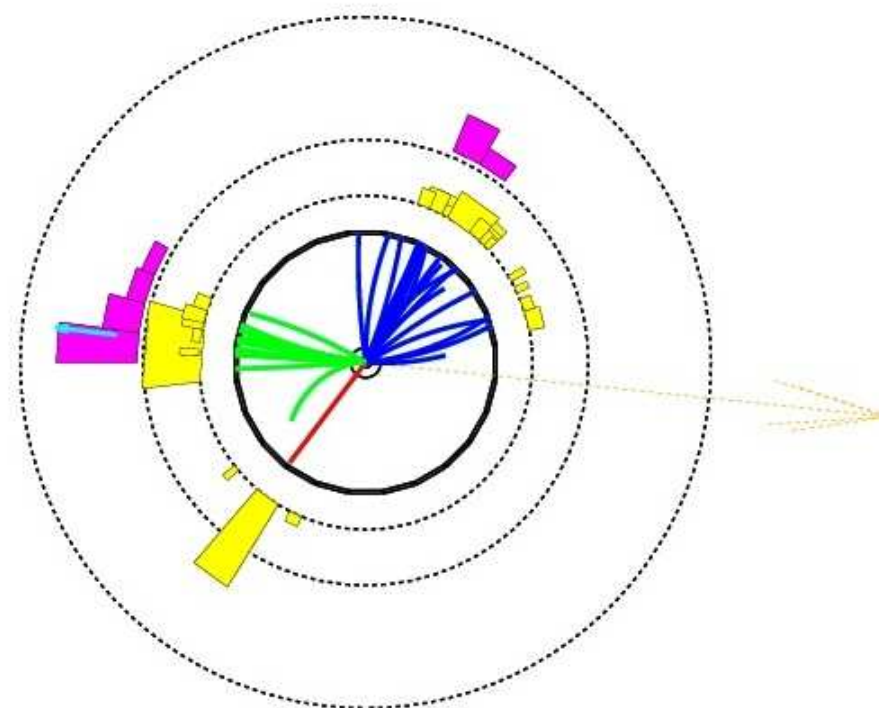


W przedstawionym przypadku

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

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

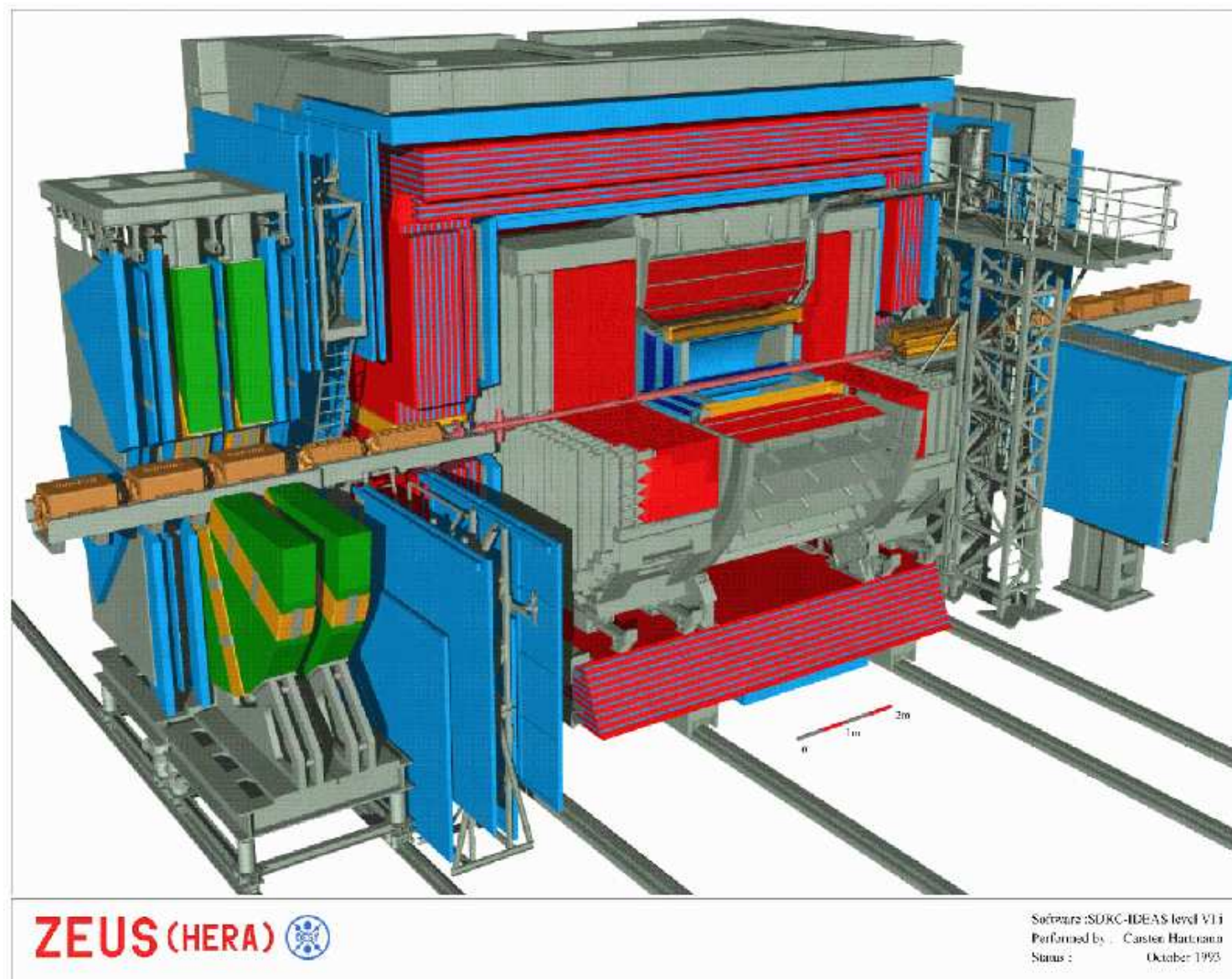
neutrino rekonstruujemy z zasady zachowania energii i pędu



Współczesne eksperymenty

ZEUS

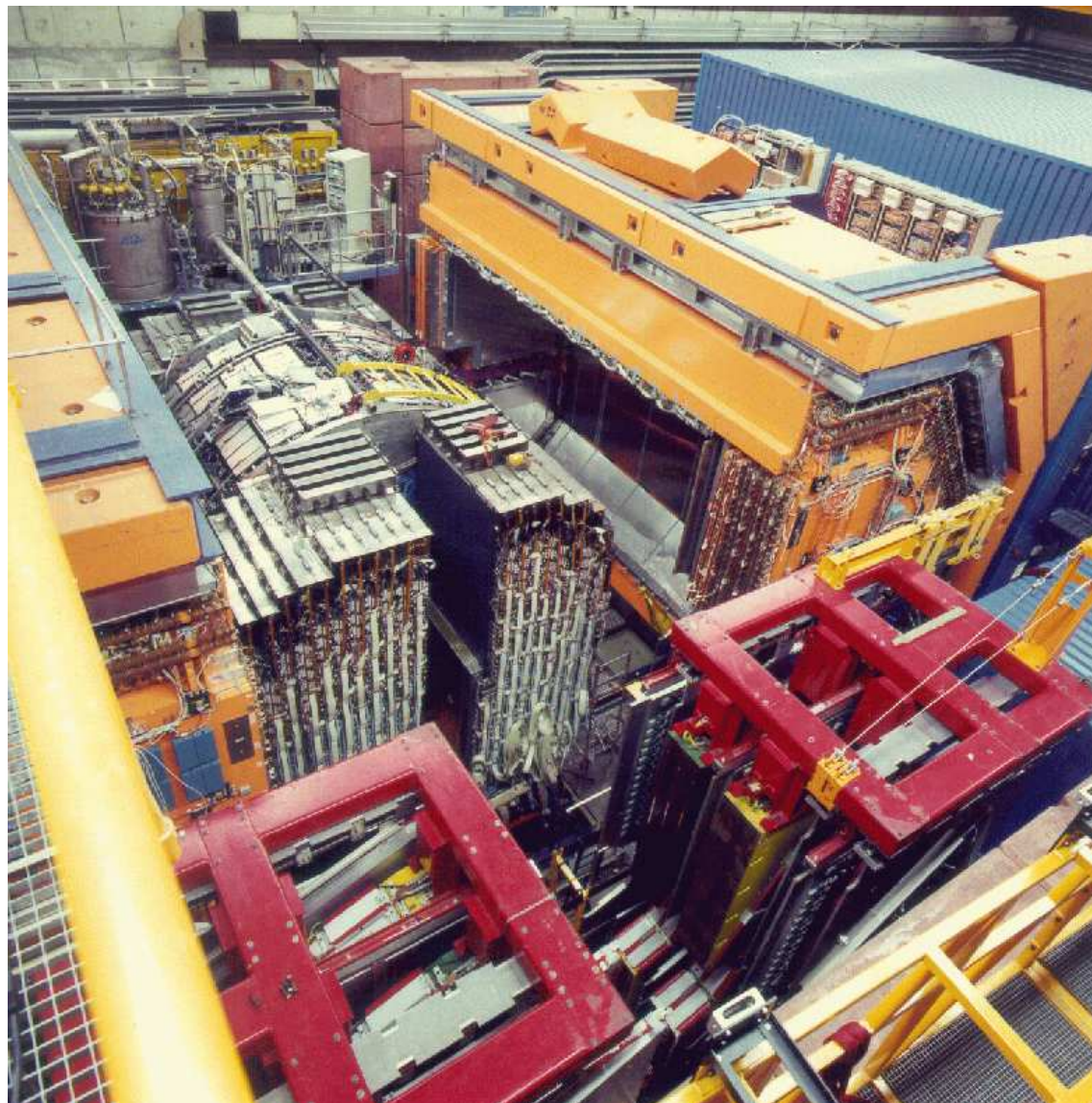
Detektor **ZEUS**,
akcelerator
HERA,
zderzenia wiązek
przeciwbieżnych
 $e^{\pm}p$



Współczesne eksperymenty

ZEUS

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

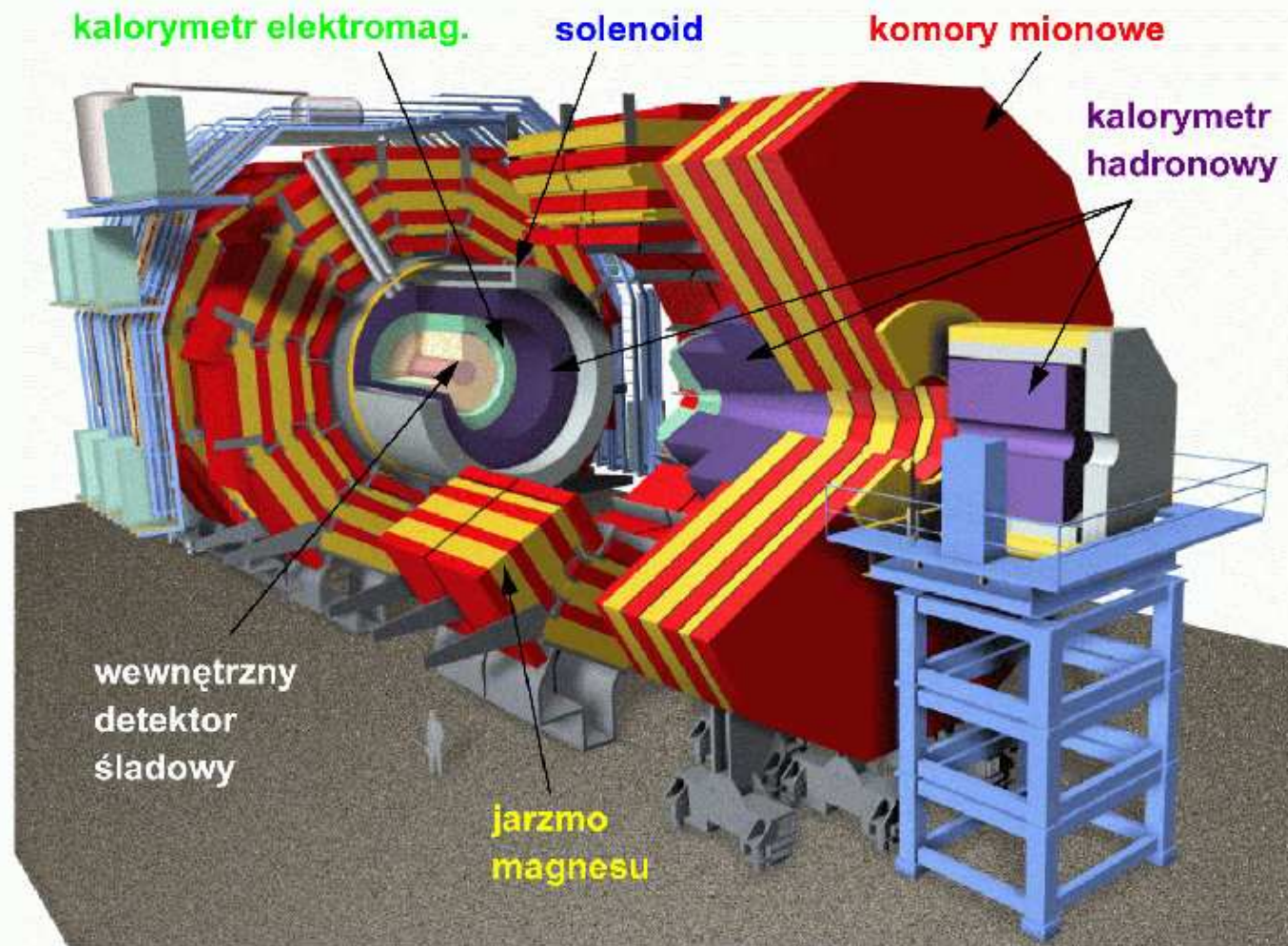


Detektor **ZEUS**,
akcelerator
HERA,
zderzenia wiązek
przeciwbieżnych
 $e^{\pm}p$



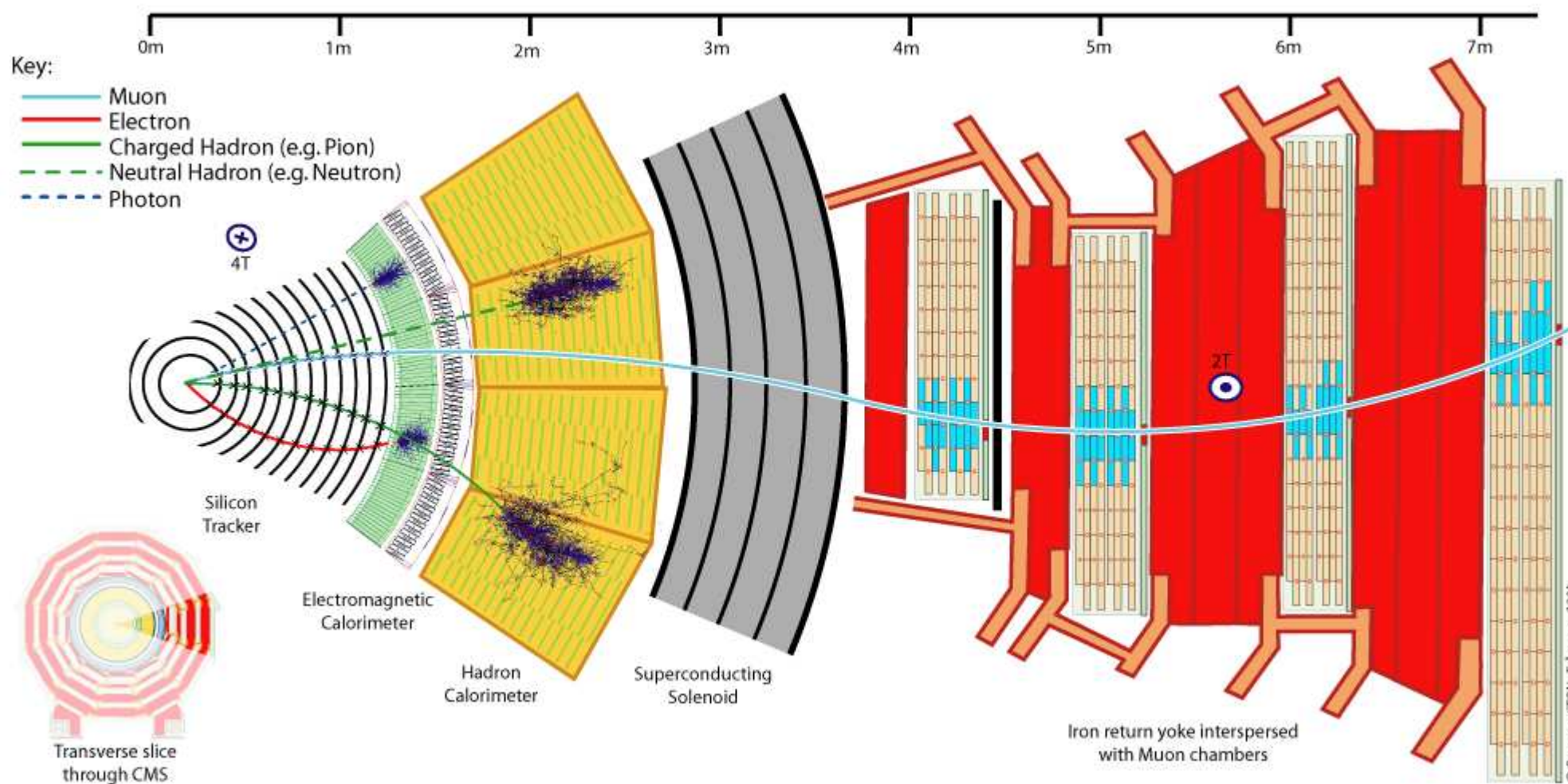
Współczesne eksperymenty

Compact Muon Solenoid

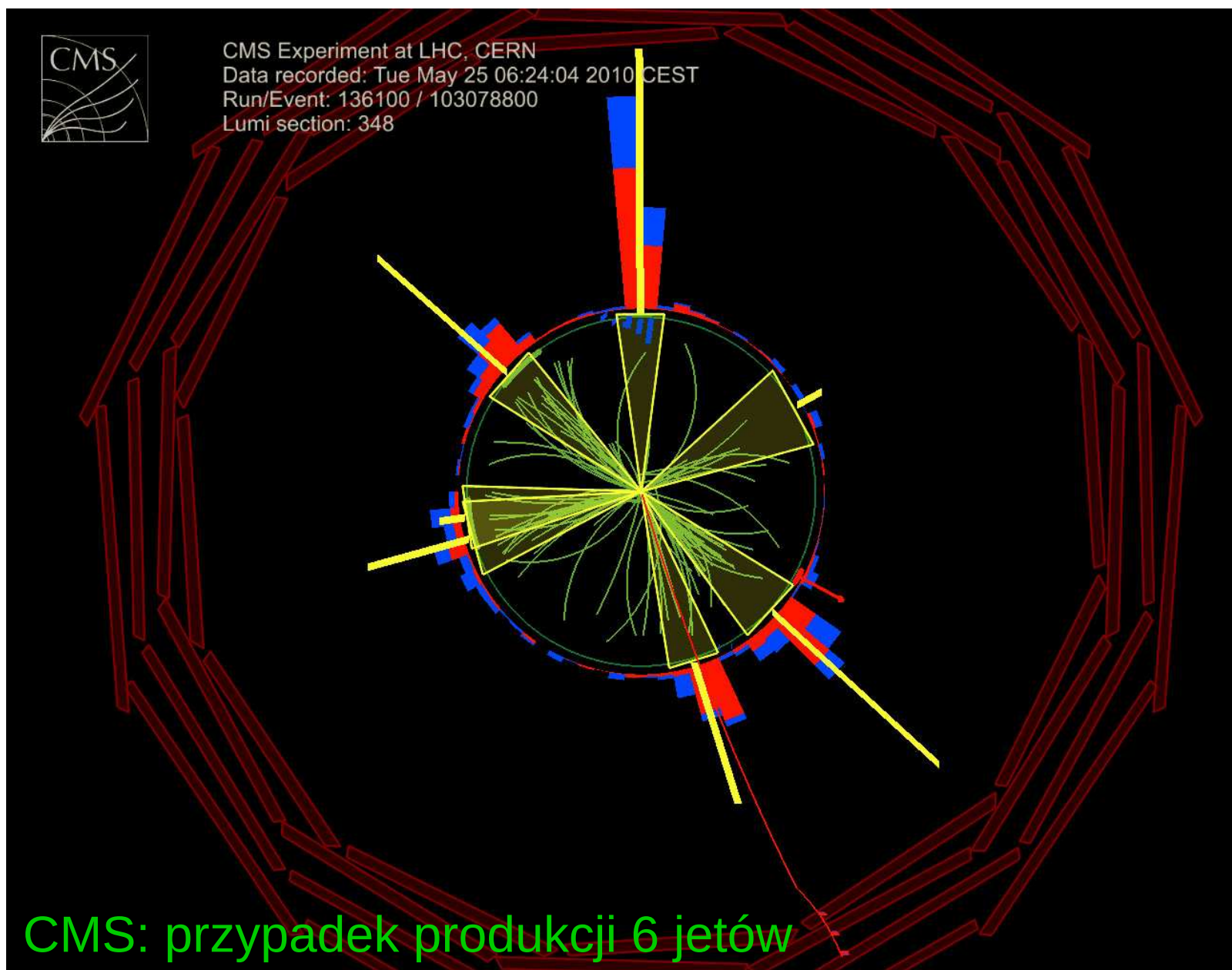


Współczesne eksperymenty

Compact Muon Solenoid - CMS

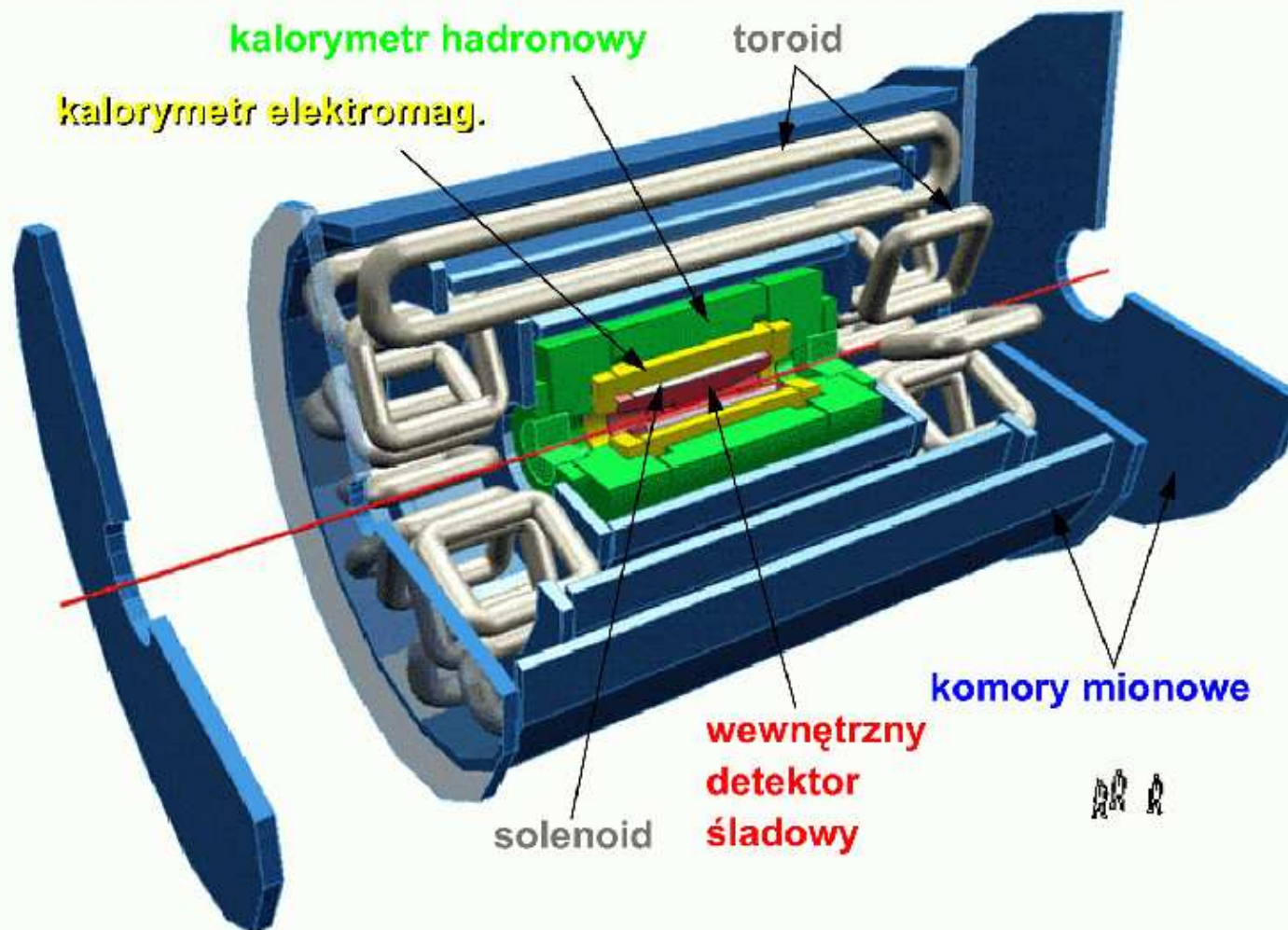


Współczesne eksperymenty



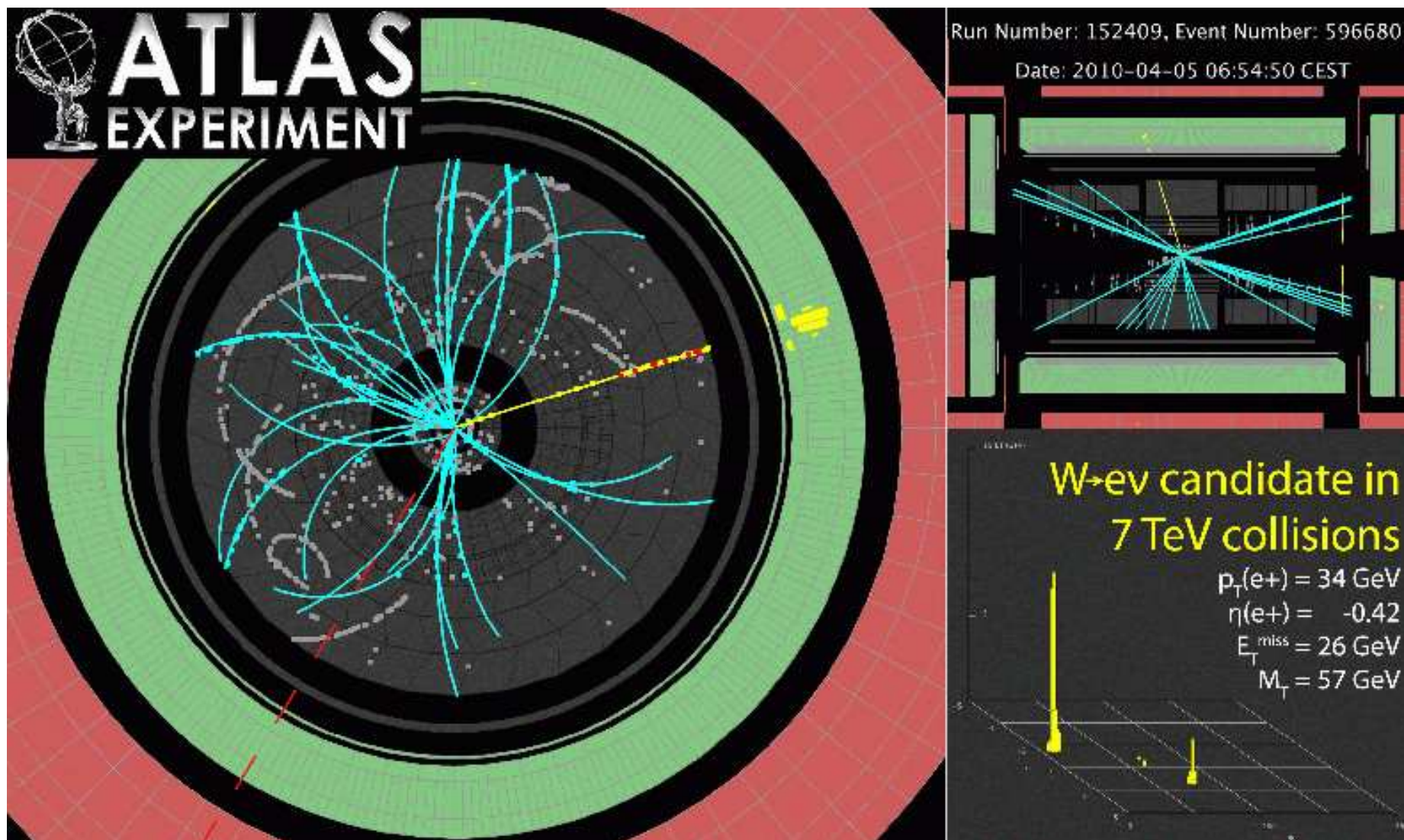
Współczesne eksperymenty

A Toroidal LHC ApparatuS (ATLAS)



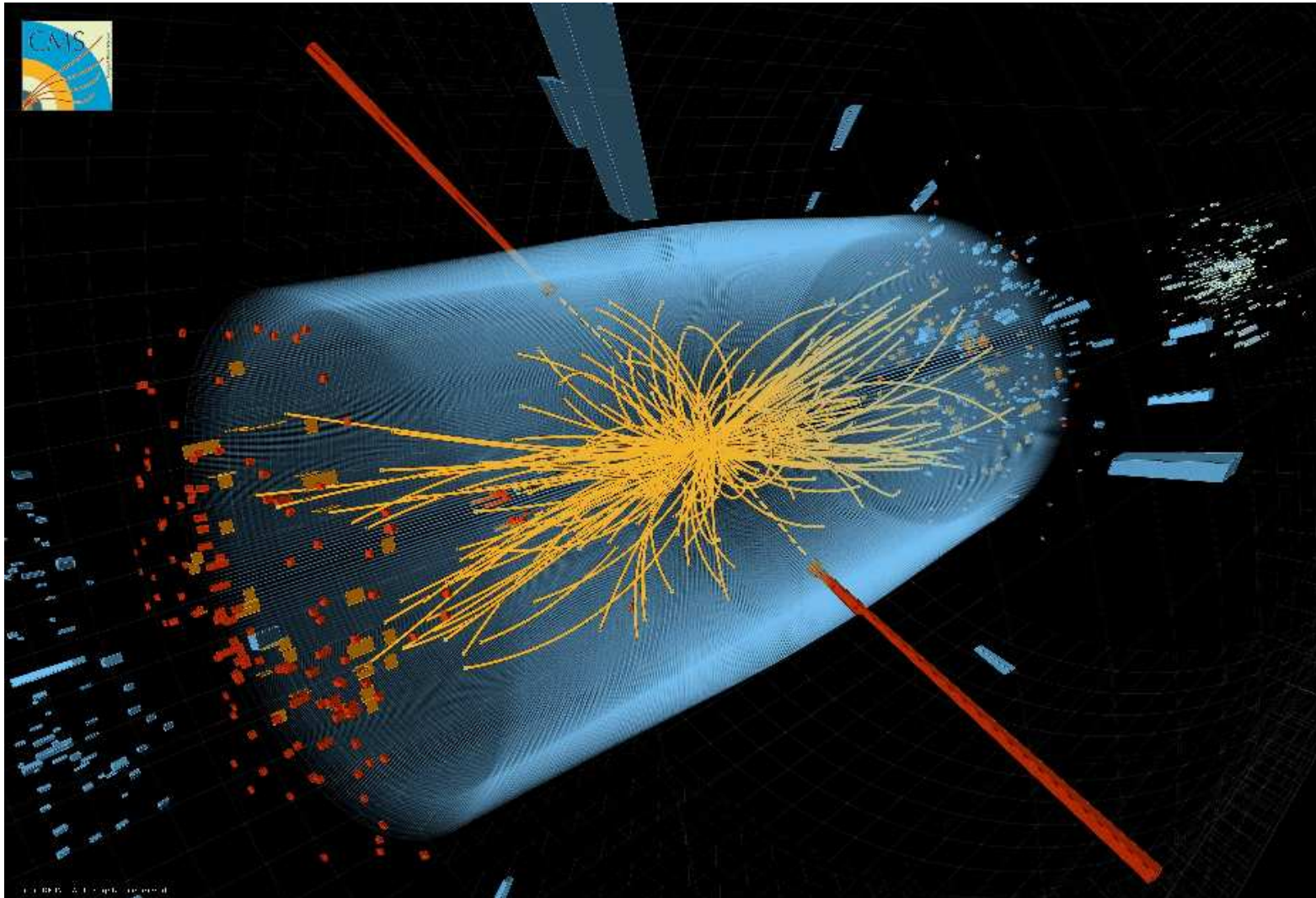
Współczesne eksperymenty

ATLAS: przypadek produkcji bozonu W przy energii 7 TeV



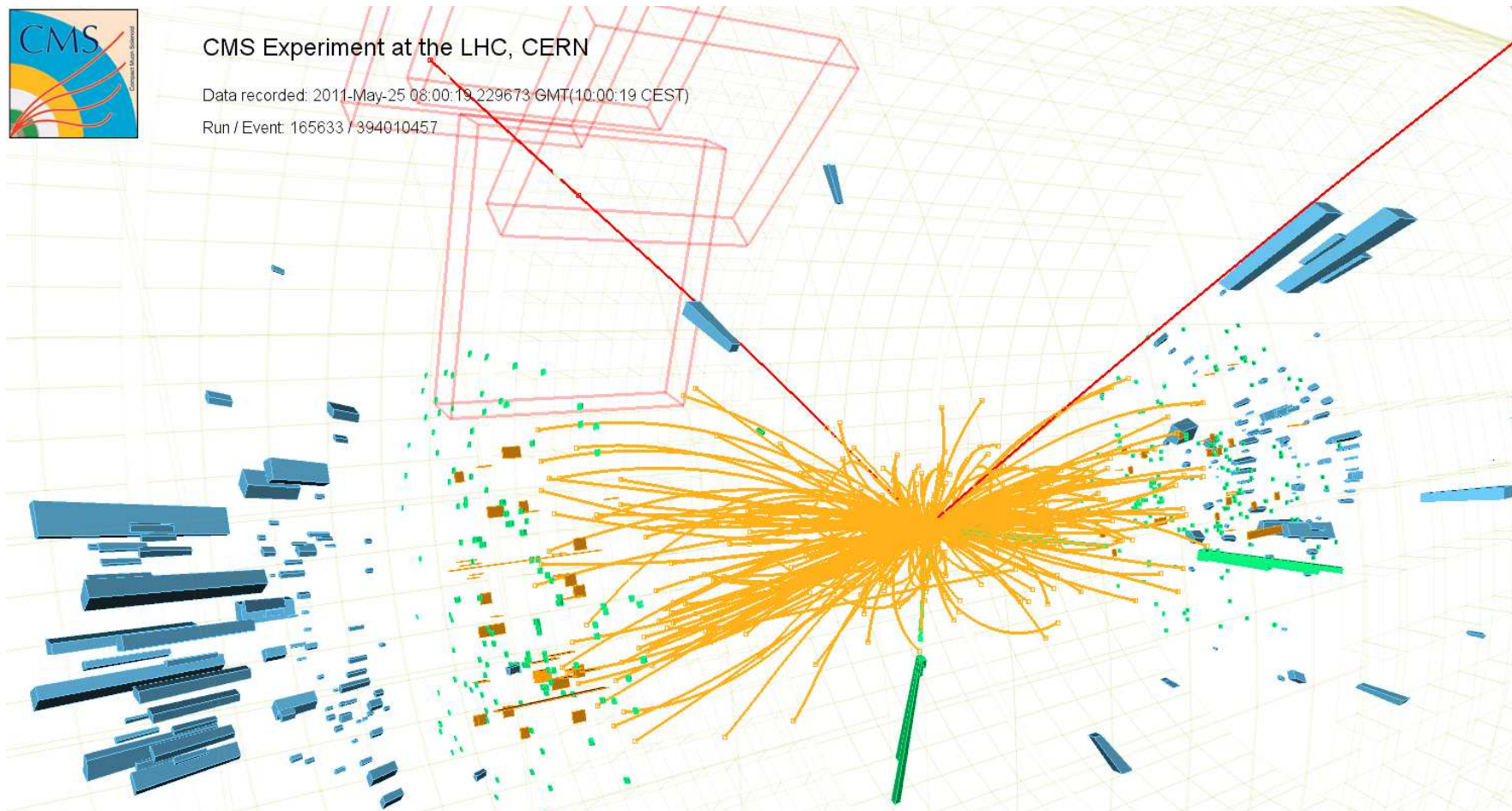
Współczesne eksperymenty

CMS: przypadek $H \rightarrow \gamma\gamma$



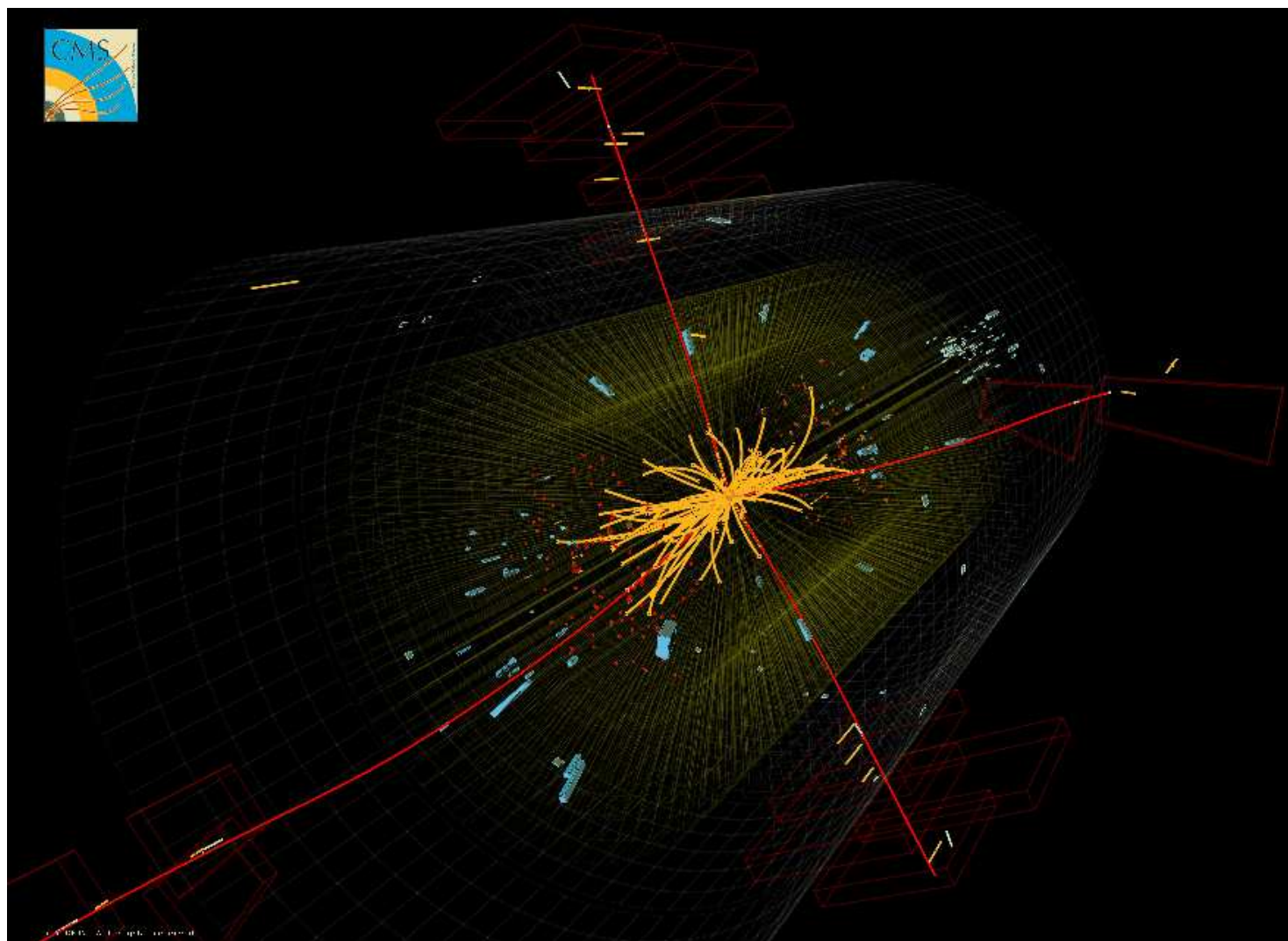
Współczesne eksperymenty

CMS: przypadek $H \rightarrow ZZ \rightarrow e^+e^-\mu^+\mu^-$



Współczesne eksperymenty

CMS: przypadek $H \rightarrow ZZ \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$



Współczesne eksperymenty

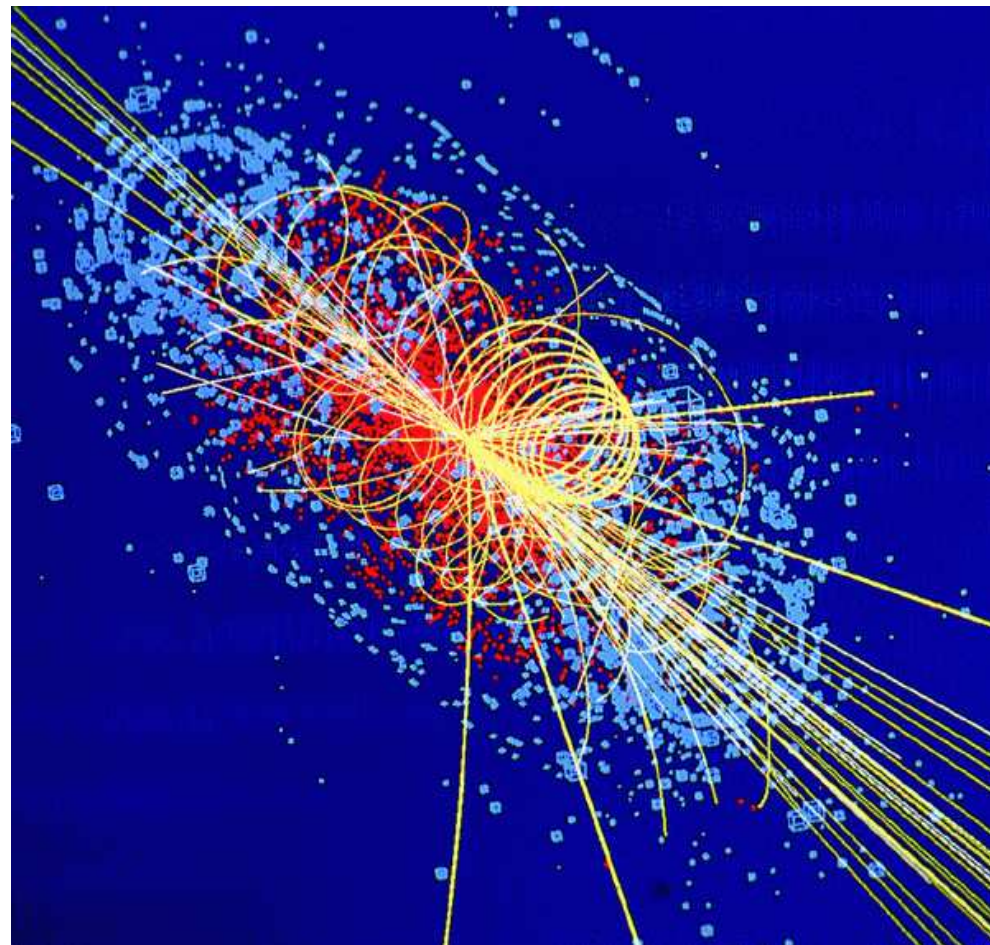
Przy każdym przecięciu paczek w LHC zderza się kilkadziesiąt par protonów.

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

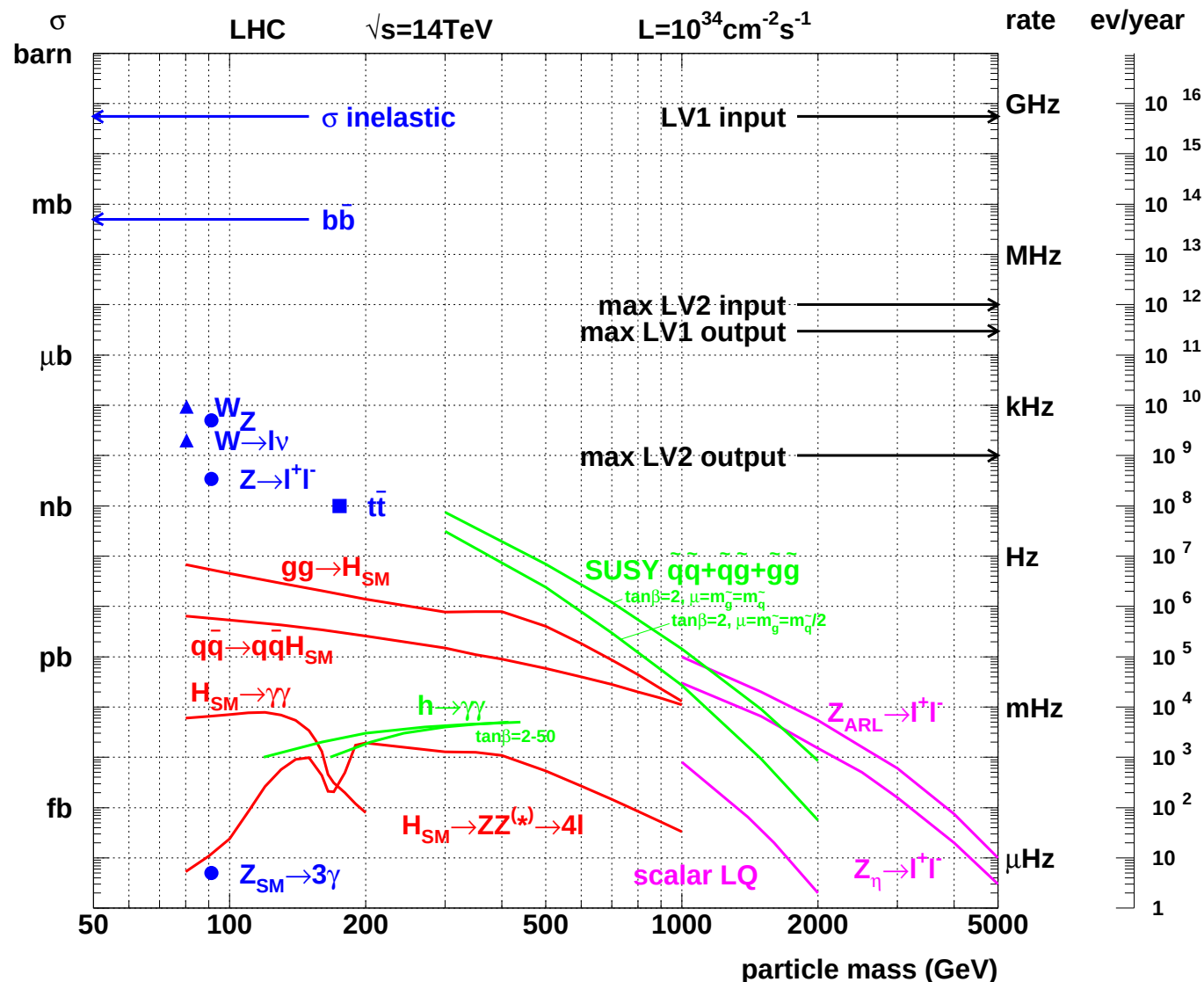
Układ wyzwala

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

Tylko “ciekawe” sygnały są czytane z detektora.

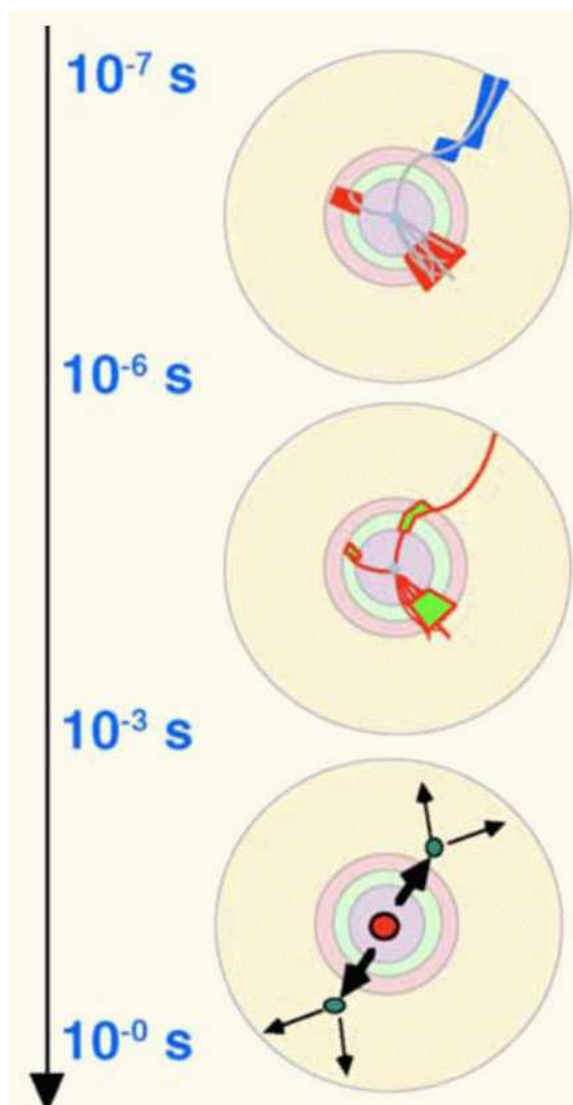
Te przypadki są dalej przepuszczane przez specjalne programy - “filtry”, które mają odrzucać wszystkie śmieci.

Zapisujemy tylko to, co ma szansę być ciekawe!



Współczesne eksperymenty

Układ wyzwalań



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!

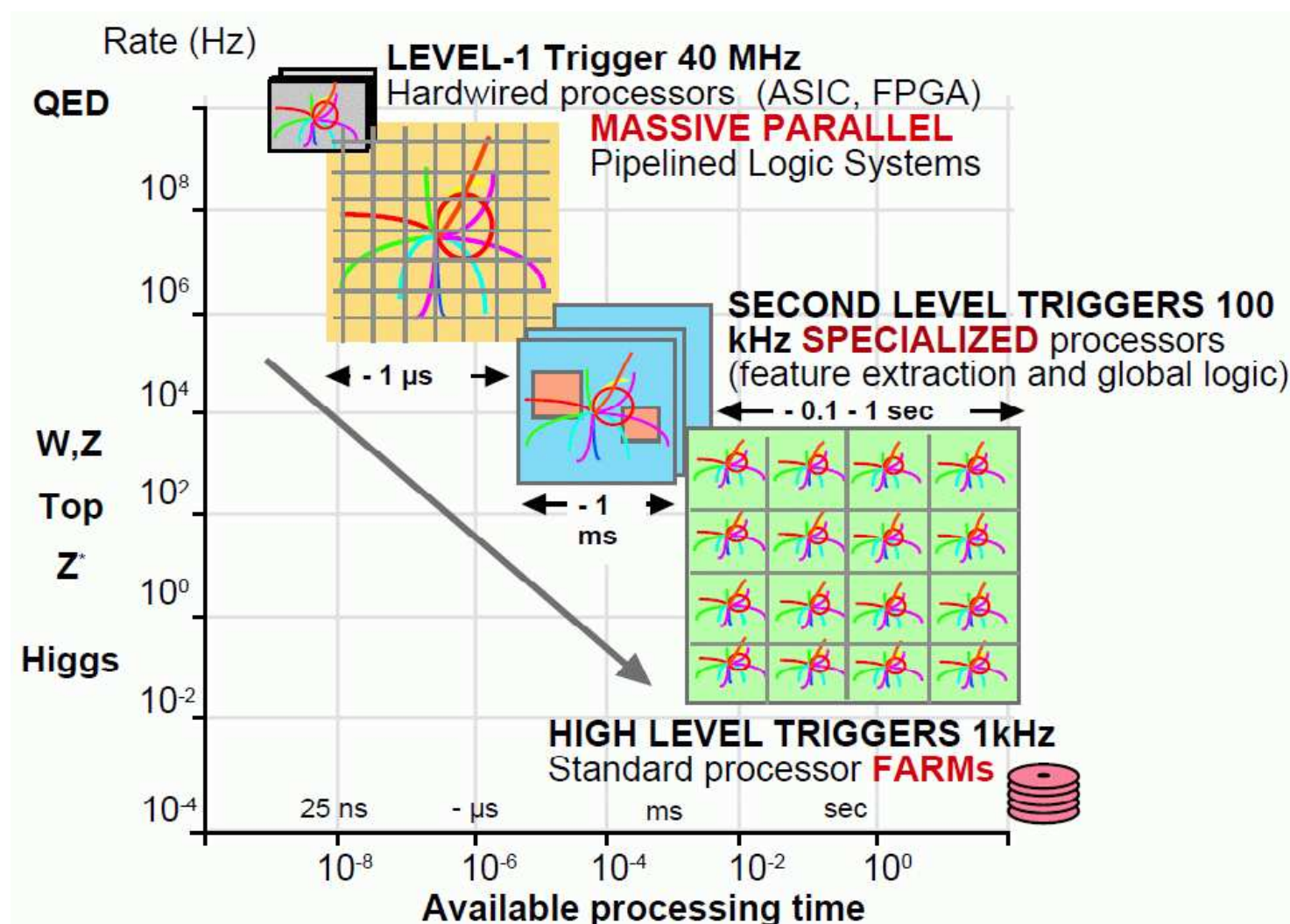
Poziom 1: bardzo szybki (dedykowana elektronika), odrzuca 99.9% oczywistych śmieci.

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

Poziom 3: pełna analiza i ostateczna decyzja

Współczesne eksperymenty

Układ wyzwala schemat



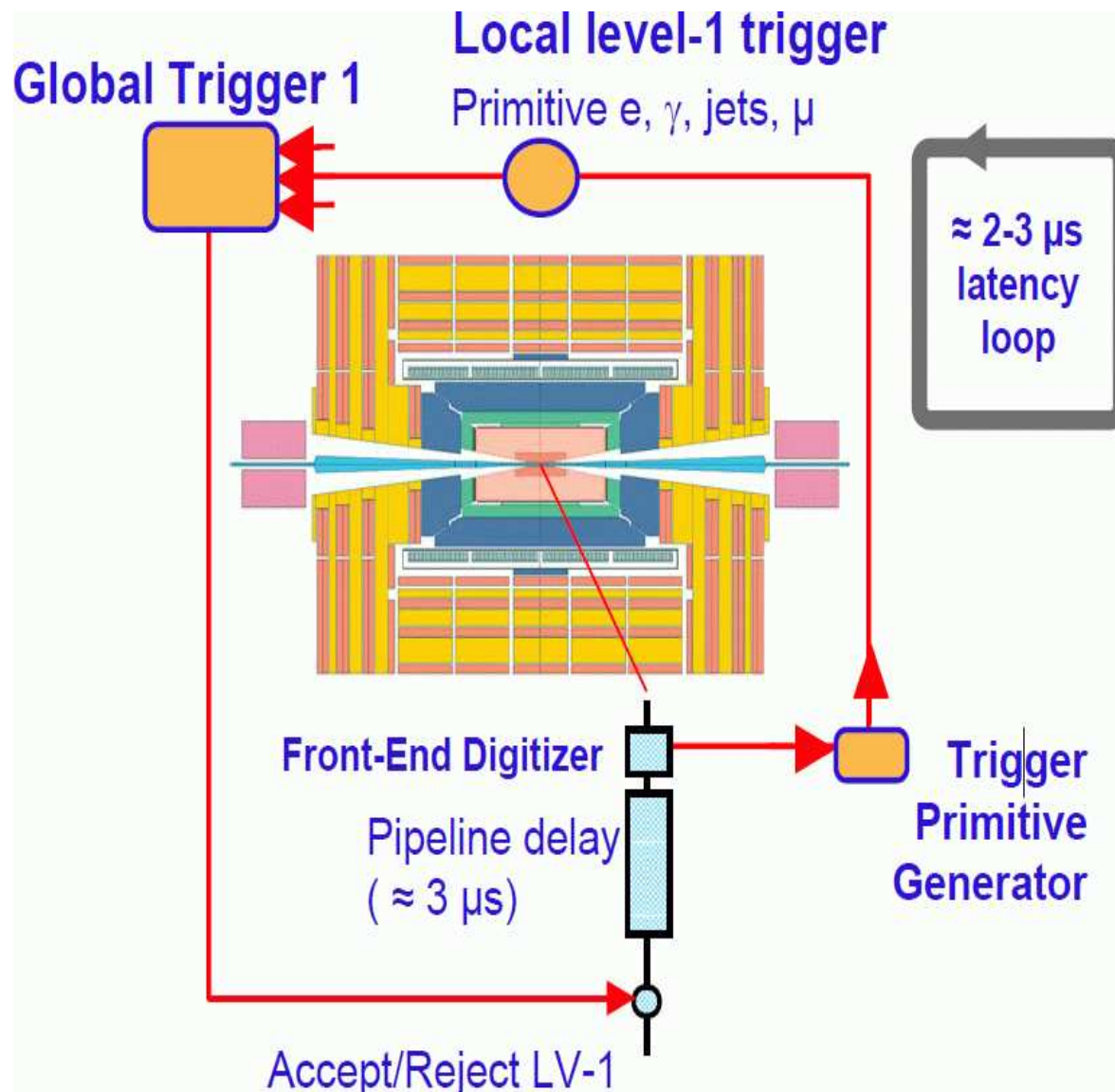
Współczesne eksperymenty

Układ wyzwalania

Najtrudniejszy Poziom 1.

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

Dominuje czas potrzebny na przesyłanie informacji!



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.

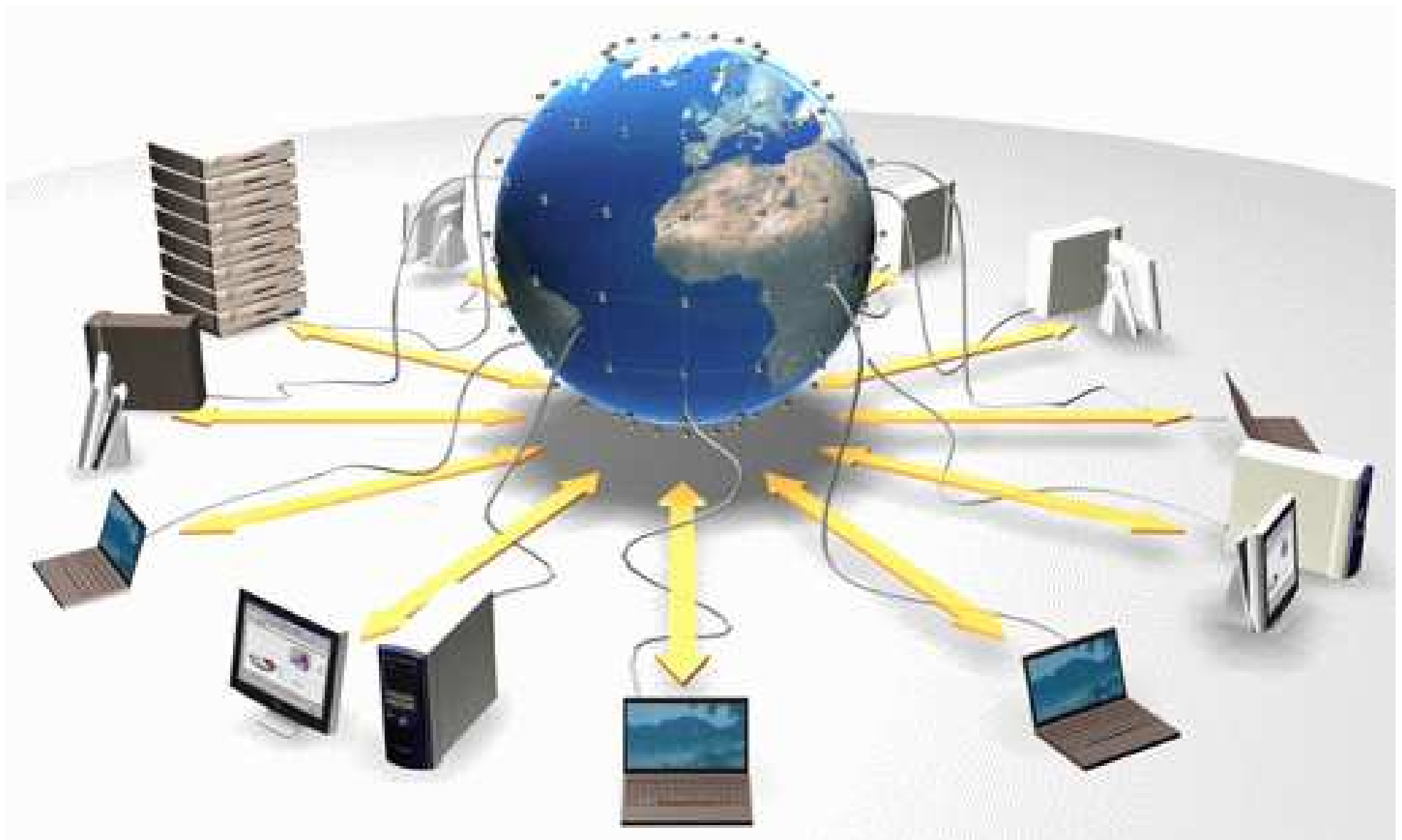
1 przypadek to MB danych

zbieramy miliony przypadków

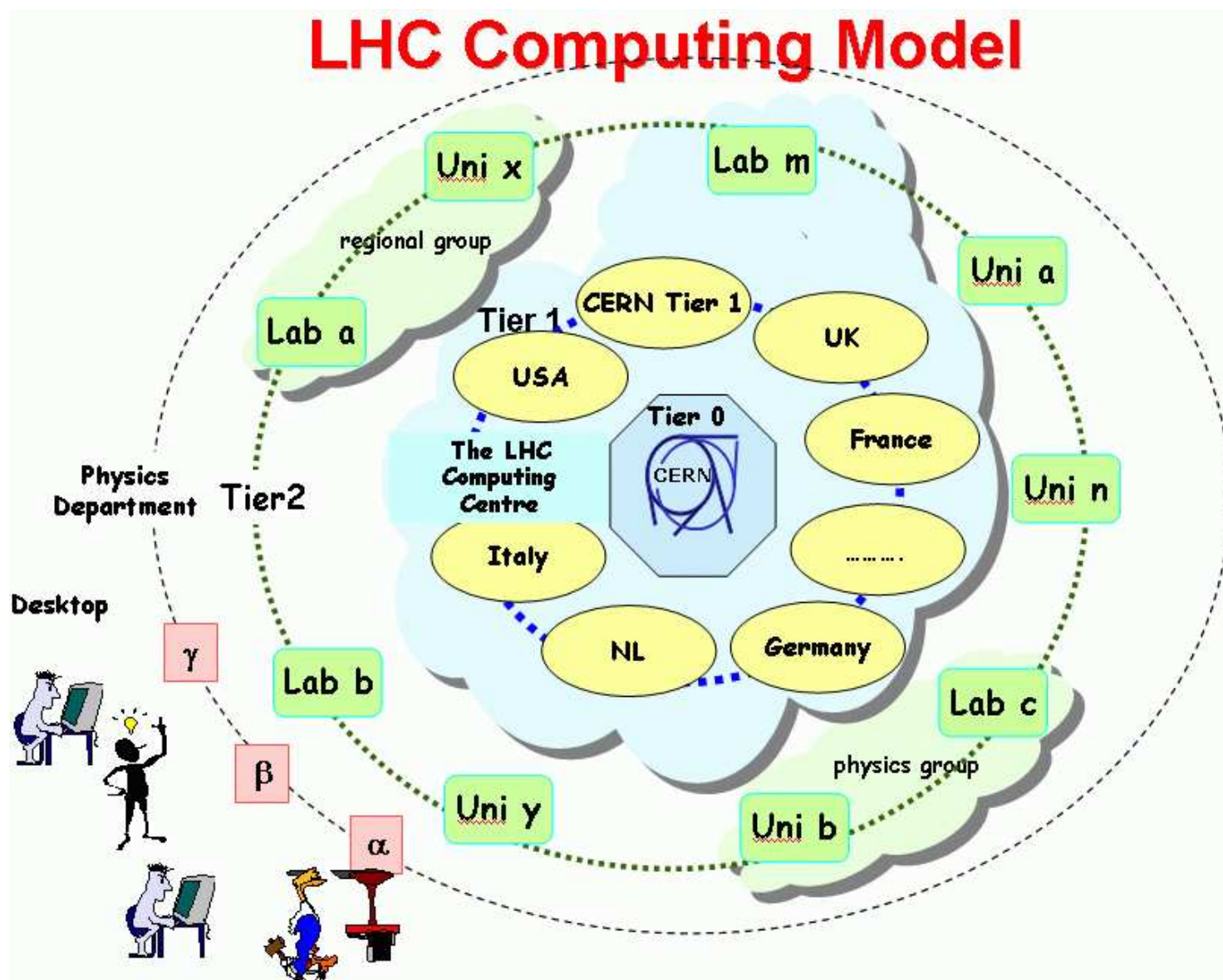
Do niedawna można to było trzymać i przetwarzać w jednym miejscu...



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**):
moc 4 250 000 procesorów (SPEC06), 260 000 TB przestrzeni
dyskowej, 140 000 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 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.

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.

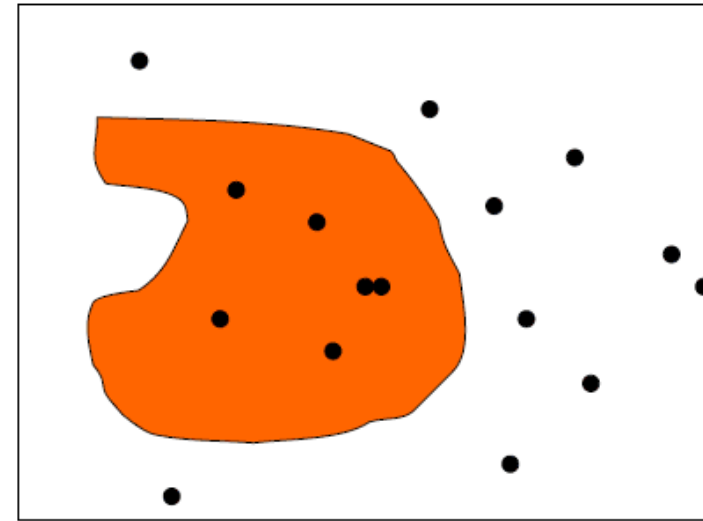
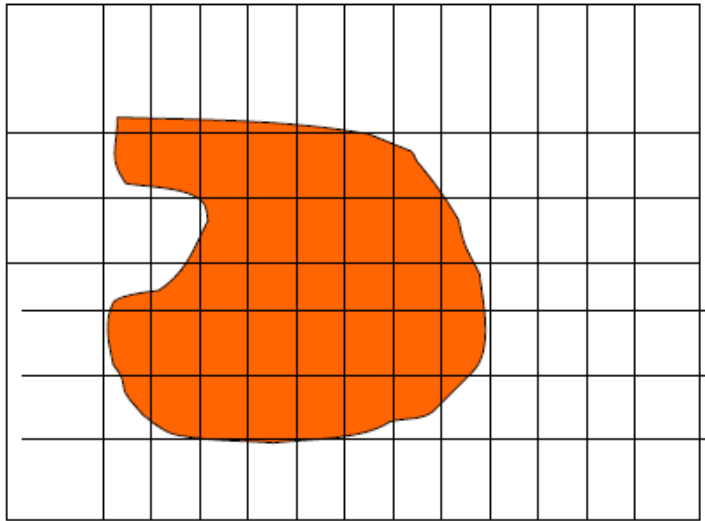
Metoda Monte Carlo jest **sposobem na policzenie** (przesumowanie lub przecałkowanie) takich formuły z **dowolną dokładnością**, praktycznie ograniczoną jedynie przez czas i szybkość działania komputera.

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 ($10.7 fb^{-1}$)

