

Wszechświat Cząstek Elementarnych dla Humanistów

Współczesne eksperymenty przy kolajderach

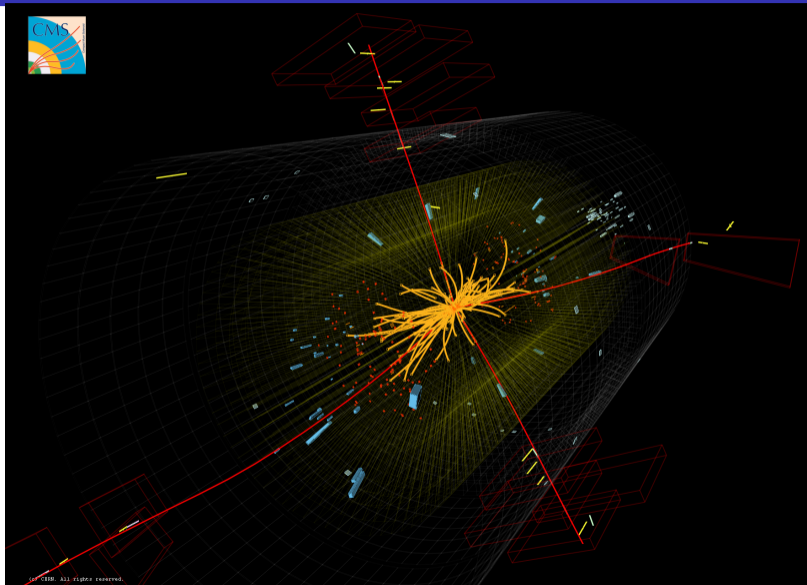
Aleksander Filip Żarnecki

Wykład ogólnouniwersytecki



6 grudnia 2022

Jak dziś "widzimy" oddziaływania cząstek?



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

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

LEP/LHC

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

W tym samym tunelu działa obecnie LHC!

Przeciwbieżne wiązki protonów $E = 7 \text{ TeV}$

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

Energia jednej paczki: $\sim 10^5 \text{ J}$

Samochód osobowy jadący ok. 60 km/h

Całkowita zgromadzona energia: $\sim 6 \cdot 10^8 \text{ J}$

Zderzenia paczek co 25 ns

(40 milionów na sekundę)



The Large Hadron Collider (LHC)

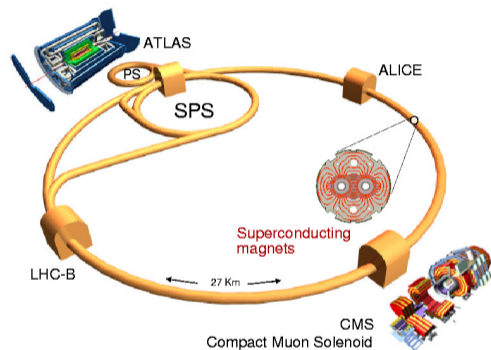
LHC

Przeciwbieżne wiązki protonów w LHC dają energię zderzenia **proton-proton** wynoszącą $2 \times 7 = 14 \text{ TeV}$ ($1 \text{ TeV} = 1000 \text{ GeV}$)

Intensywność wiązek jest tak duża, że pozwala na produkcję rzędu **1000** cząstek Higgsa **na godzinę** !

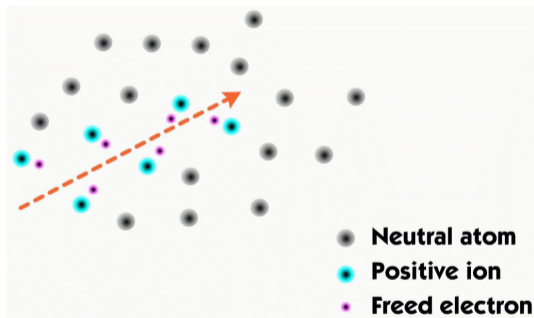
Przypadki produkcji tych cząstek badają dwa eksperymenty: **ATLAS** i **CMS**

Poszukują one także sygnałów produkcji nowych, **"egzotycznych"** cząstek i innych sygnałów **"nowej fizyki"**, czyli zjawisk, które nie mogą być opisane w ramach Modelu Standardowego



Jonizacja

U podstaw działania przeważającej większości detektorów cząstek elementarnych leży **zjawisko jonizacji**. W izolatorze nie ma swobodnych nośników ładunku:

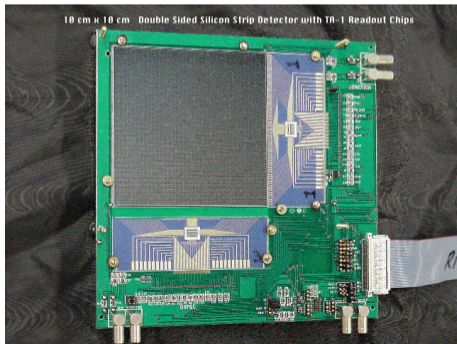


Cząstka naładowana przechodząc przez ośrodek **oddziałuje Kulombowsko** z elektronami i oddaje im część swojej energii “**wybijając**” je z atomów. **Pojawiają się wzbudzone atomy i swobodne nośniki ładunku...**

Detektory półprzewodnikowe

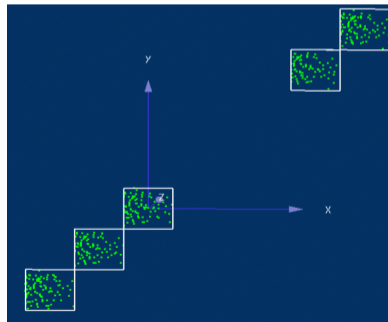
Coraz powszechniej używane.

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



Bardzo precyzyjny pomiar pozycji cząstek
(rzędu μm)

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



Niestety wciąż stosunkowo drogie...

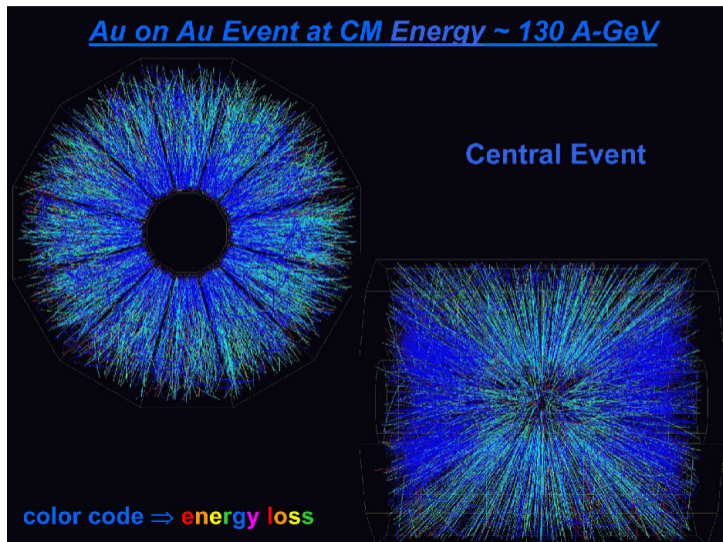
Detektory gazowe

Komora projekcji czasowej (TPC)

Przypadek zderzenia ciężkich jonów (złoto-złoto) w RHIC

zarejestrowany przez detektor STAR

zrekonstruowano tory ~ 6000 cząstek naładowanych



Kalorymetry

Wszystkie przedstawione poprzednio detektory rejestrowały "śląd" przejścia **cząstki naładowanej** w materii detektra \Rightarrow są to tzw. **detektory śladowe**.

Aby zmierzyć **energię** cząstki musimy sprawić, aby w wyniku wielokrotnych oddziaływań "oddała ją" w całości detektorowi \Rightarrow inny rodzaj detektorów, tzw. **kalorymetry**.

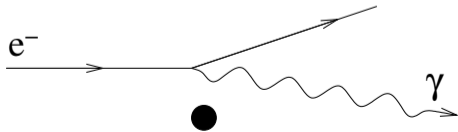
Kalorymetry

Wszystkie przedstawione poprzednio detektory rejestrowały "śląd" przejścia **cząstki naładowanej** w materii detektra \Rightarrow są to tzw. **detektory śladowe**.

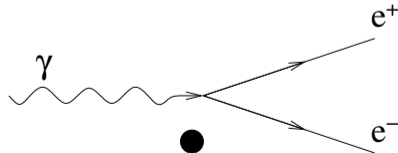
Aby zmierzyć **energię** cząstki musimy sprawić, aby w wyniku wielokrotnych oddziaływań "oddała ją" w całości detektorowi \Rightarrow inny rodzaj detektorów, tzw. **kalorymetry**.

Kalorymetry elektromagnetyczne

Wysokoenergetyczne elektrony tracą energię prawie wyłącznie na **promieniowanie hamowania**



Wysokoenergetyczne fotony ulegają **konwersji na pary $e^+ e^-$**



Kalorymetry

Wysokoenergetyczny **elektron lub foton** wpadając do kalorymetru wywołuje **kaskadę cząstek wtórnych**. Liczba cząstek w kaskadzie jest proporcjonalna do energii cząstki pierwotnej $N \sim E$

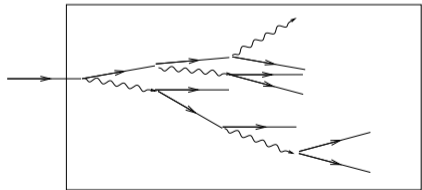
Mierząc liczbę cząstek naładowanych w kaskadzie lub całkowitą długość torów (**całkowitz jonizację**) możemy dokładnie określić **energię cząstki początkowej**

Kalorymetry

Wysokoenergetyczny **elektron lub foton** wpadając do kalorymetru wywołuje **kaskadę cząstek wtórnych**. Liczba cząstek w kaskadzie jest proporcjonalna do energii cząstki pierwotnej $N \sim E$

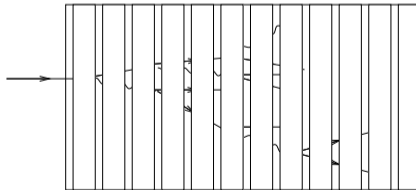
Mierząc liczbę cząstek naładowanych w kaskadzie lub całkowitą długość torów (**całkowitz jonizację**) możemy dokładnie określić **energię cząstki początkowej**

Kalorymetr jednorodny



np. blok scyntylny

Kalorymetr próbkujący



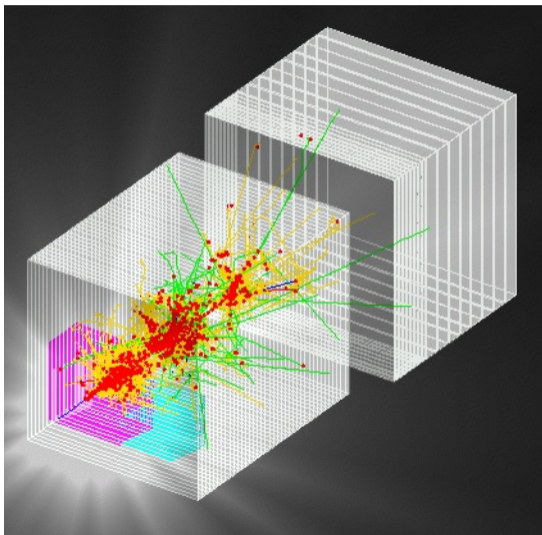
warstwy detektora na przemian z gęstym absorberem

Kalorymetry hadronowe

Symulacja rozwoju kaskady hadronowej
(pomiar energii protonu)

Wysokoenergetyczne hadrony także
wywołują kaskady cząstek wtórnych.

Jednak fluktuacje w rozwoju kaskady są
dużo większe \Rightarrow mniejsza dokładność
pomiaru energii cząstki pierwotnej



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

Detektory są jak ogry...

Ogry są jak cebula...

Cebula ma warstwy...

Ogry mają warstwy...

Detektory mają warstwy...



Film by DreamWorks (2001)

Struktura warstwowa

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

Przekrój poprzeczny detektora, ilustrujący tory cząstek

■ rura wiązki

■ detektory śladowe

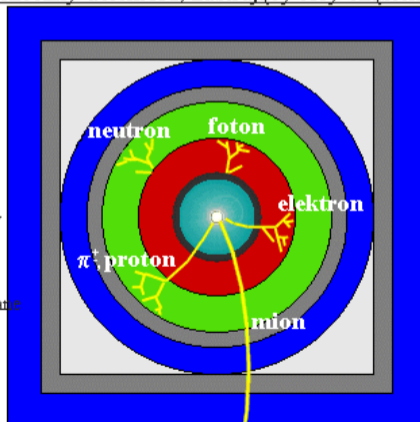
■ solenoid magnesu

■ kalorymetr elektromagnetyczny

■ kalorymetr hadronowy

■ namagnesowane żelazo

■ komory mionowe



Struktura warstwowa

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

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

Struktura warstwowa

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

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

Najbliżej punktu zderzenia wiązek umieszcza się detektory, które jak **najmniej oddziałują** z wyprodukowanymi cząstkami - **(detektory gazowe, cienkie detektory krzemowe)**.

Struktura warstwowa

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

Ułożone **jeden za drugim** detektory różnego typu 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)**.

Dalej od punktu zderzenia umieszcza się detektory, które **absorbują/zatrzymują cząstki** **(cząstki tracą energię na rozwój kaskady)** - **kalorymetry**.

Struktura warstwowa

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

Ułożone **jeden za drugim** detektory różnego typu 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)**.

Dalej od punktu zderzenia umieszcza się detektory, które **absorbują/zatrzymują cząstki** **(cząstki tracą energię na rozwój kaskady)** - **kalorymetry**.

Na końcu umieszcza się detektory, które mają zmierzyć cząstki naładowane uciekające z detektora - **detektory mionowe**.

Detektor uniwersalny

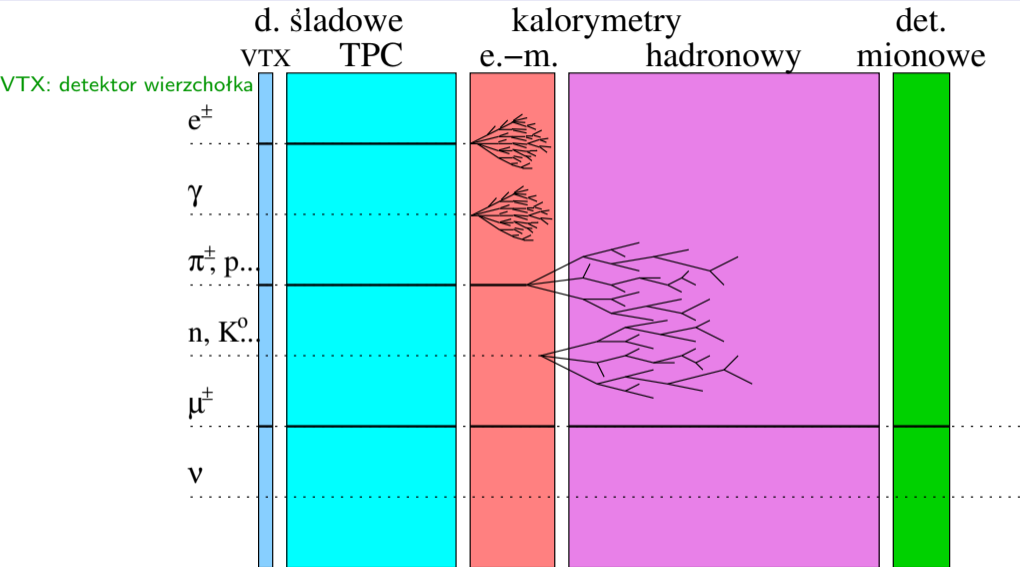
Ten schemat opisuje większość współczesnych eksperymentów przy kolajderach (ATLAS i CMS przy LHC, wcześniejsze przy: LEP, HERA, Tevatron, planowane przy: ILC, FCC, CEPC ...):

Kolejno od środka detektora:

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

Detektor uniwersalny

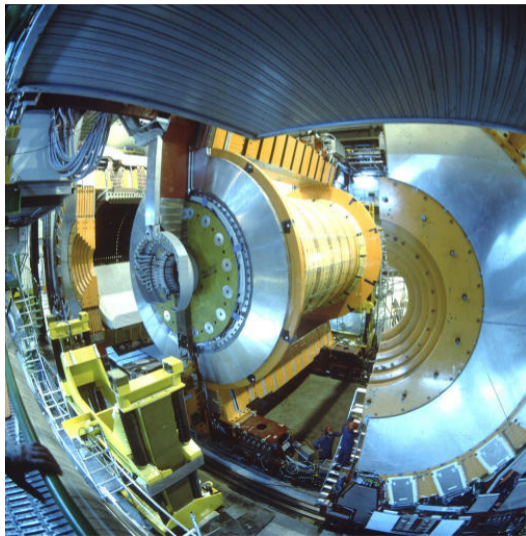
- kalorymetr elektromagnetyczny
pomiar energii elektronów i fotonów
gęsty materiał absorbujący lawinę cząstek (miedź, ołów, wolfram)
- kalorymetr hadronowy
pomiar energii hadronów (protony, neutrony, piony, kaony)
gęsty materiał absorbujący lawinę cząstek;
lawina hadronowa jest wielokrotnie dłuższa od elektromagnetycznej!
dlatego kalorymetr hadronowy musi stać za elektromagnetycznym...
- detektory mionowe
identyfikacja mionów - jedyne cząstki naładowane,
które mogą przejść przez kalometry bez dużych strat energii
wszystkie pozostałe cząstki (poza neutrinami) powinny się zatrzymać...



OPAL

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

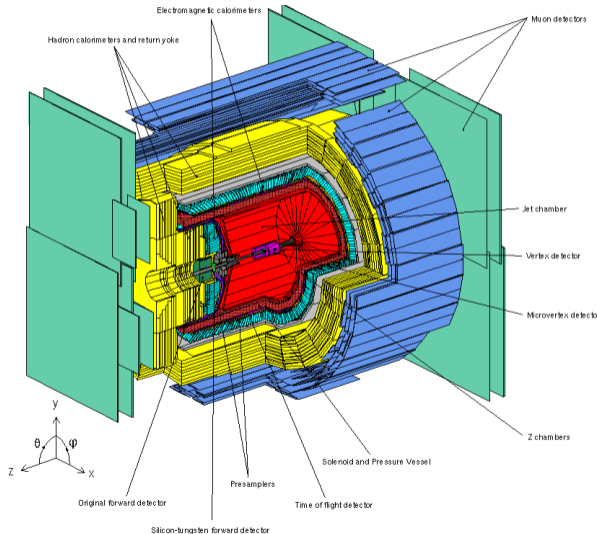
zbierał dane w latach 1989-2000



OPAL

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

zbierał dane w latach 1989-2000

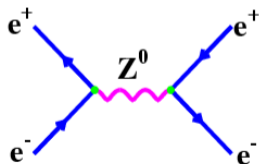


- 1 Przypomnienie
 - Kolajdery
 - Podstawowe typy detektorów
- 2 Budowa detektora uniwersalnego
- 3 Co rejestrują detektory?
- 4 Współczesne eksperymenty
 - Jak wygląda współczesny detektor
 - Przykładowe przypadki
 - Przechowywanie i analiza danych
 - Symulacje Monte Carlo
 - Układ wyzwalania

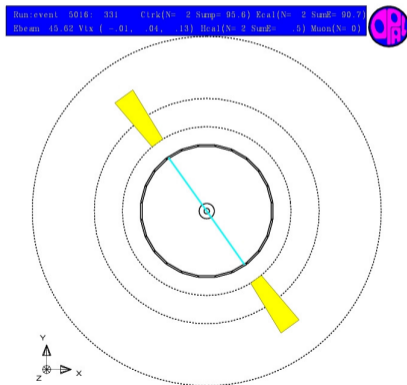
W akceleratorze LEP zderzano elektrony i pozytony przy energii dostępnej $\sqrt{s} = 90 - 210 \text{ GeV}$.
Co jest wynikiem zderzenia? Co pokazuje nam detektor?

Najprostszy przypadek

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



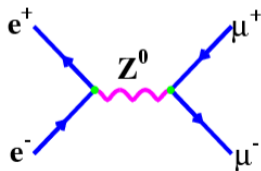
dwa elektrony



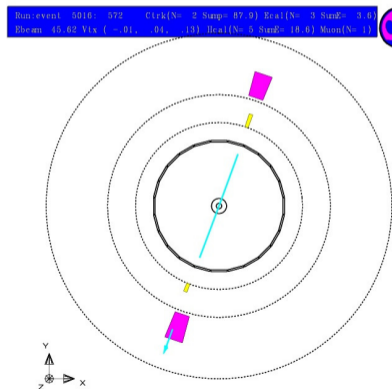
W akceleratorze LEP zderzano elektrony i pozytony przy energii dostępnej $\sqrt{s} = 90 - 210 \text{ GeV}$.
Co jest wynikiem zderzenia? Co pokazuje nam detektor?

Najprostszy przypadek

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



dwa miony

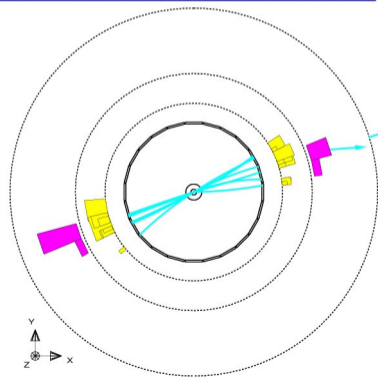


W akceleratorze LEP zderzano elektrony i pozytony przy energii dostępnej $\sqrt{s} = 90 - 210 \text{ GeV}$.
W około 10% przypadków widzimy powstające elektrony lub miony

Ale 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 (-.43, -.05, 6.47) Hcal(N=20 SumE= 27.6) Muon(N= 2)
```



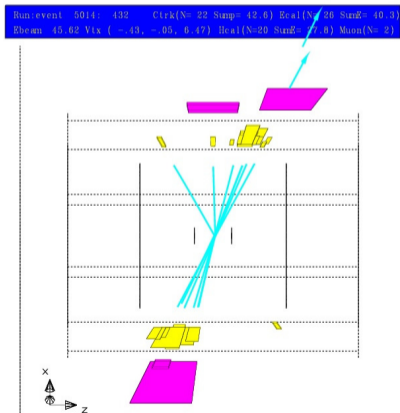
W akceleratorze LEP zderzano elektrony i pozytony przy energii dostępnej $\sqrt{s} = 90 - 210 \text{ GeV}$.
W około 10% przypadków widzimy powstające elektrony lub miony

Ale jak interpretować taki przypadek?

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

Ten sam przypadek, widok "z boku"

Skąd biorą się tak liczne cząstki?...



W prawie 90% przypadków widzimy powstające “strugi”, **jety hadronowe**.

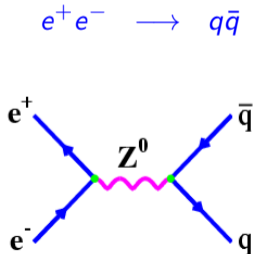
Są one wynikiem “hadronizacji” produkowanych kwarków (lub gluonów)

Gdy kwarki oddalają się od siebie, rośnie oddziaływanie kolorowe

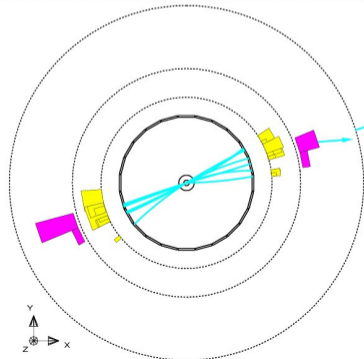
⇒ następują kolejne emisja gluonów, które konwertują na pary kwark-antykwar

⇒ kwarki i antykwarki dobierają się tak, żeby uformować “białe” hadrony

Na ogół powstają 2 jety



```
Run: event 5014: 432   Clk(N= 22 Sump= 42.6) Scal(N= 26 SumE= 40.3)  
Ebeam 45.02 Vtx (-13, -05, 6.47) Bcal(N=20 SumE= 27.8) Muon(N= 2)
```



W prawie 90% przypadków widzimy powstające “strugi”, **jety hadronowe**.

Są one wynikiem “hadronizacji” produkowanych kwarków (lub gluonów)

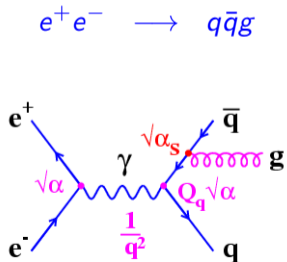
Gdy kwarki oddalają się od siebie, rośnie oddziaływanie kolorowe

⇒ następują kolejne emisja gluonów, które konwertują na pary kwark-antykwar

⇒ kwarki i antykwarki dobierają się tak, żeby uformować “białe” hadrony

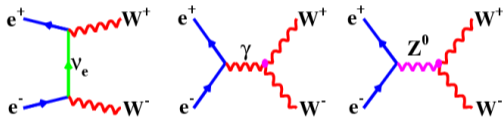
Na ogół powstają 2 jety

Ale możliwe też:



W akceleratorze LEP zderzano elektrony i pozytony przy energii dostępnej $\sqrt{s} = 90 - 210 \text{ GeV}$.
Dla $\sqrt{s} > 2M_W$ możliwa produkcja par bozonów W^\pm

Trzy możliwe diagramy:

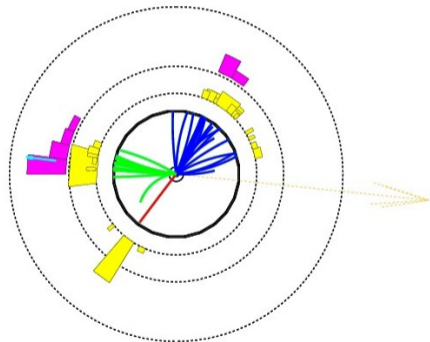


W przedstawionym przypadku

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

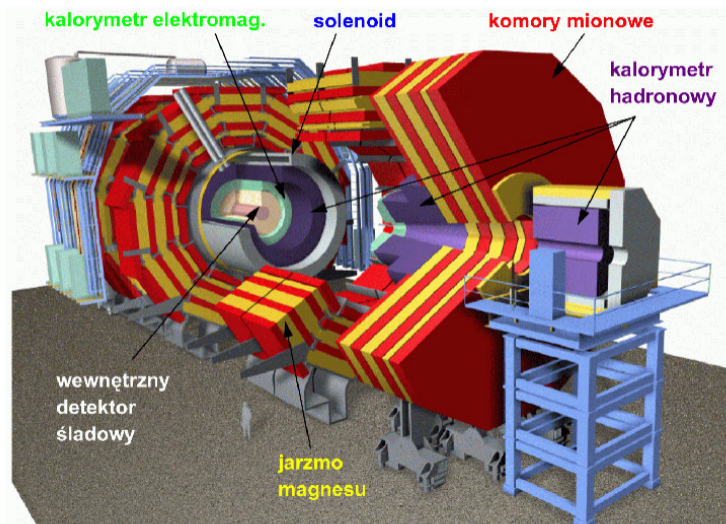
$$W^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$$

o emisji neutrina wnioskujemy z zasad zachowania energii i pędu

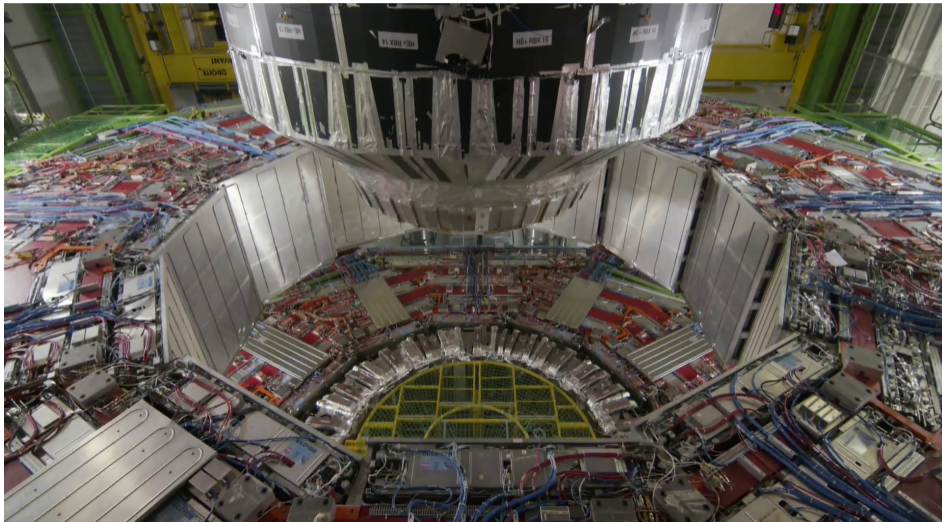


- 1 Przypomnienie
 - Kolajdery
 - Podstawowe typy detektorów
- 2 Budowa detektora uniwersalnego
- 3 Co rejestrują detektory?
- 4 **Współczesne eksperymenty**
 - Jak wygląda współczesny detektor
 - Przykładowe przypadki
 - Przechowywanie i analiza danych
 - Symulacje Monte Carlo
 - Układ wyzwalania

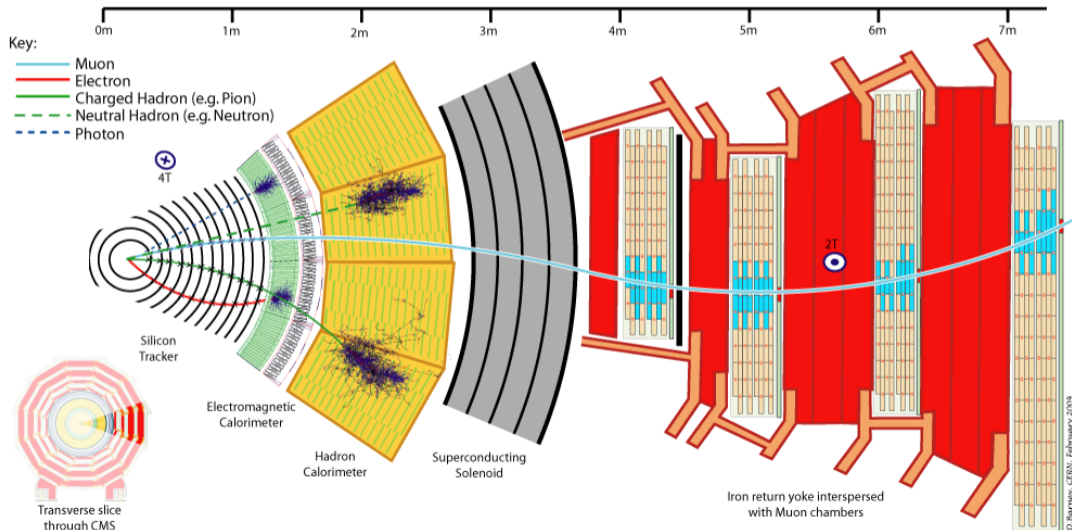
Compact Muon Solenoid - CMS



Compact Muon Solenoid - przegląd i modernizacja detektora 2020

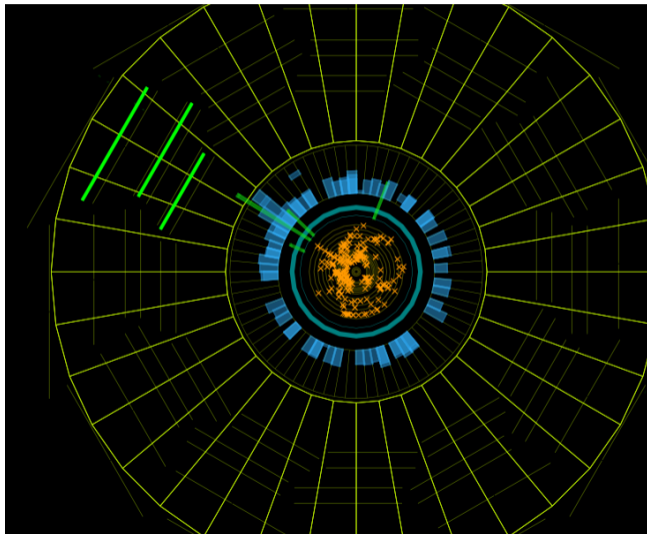


Compact Muon Solenoid - CMS



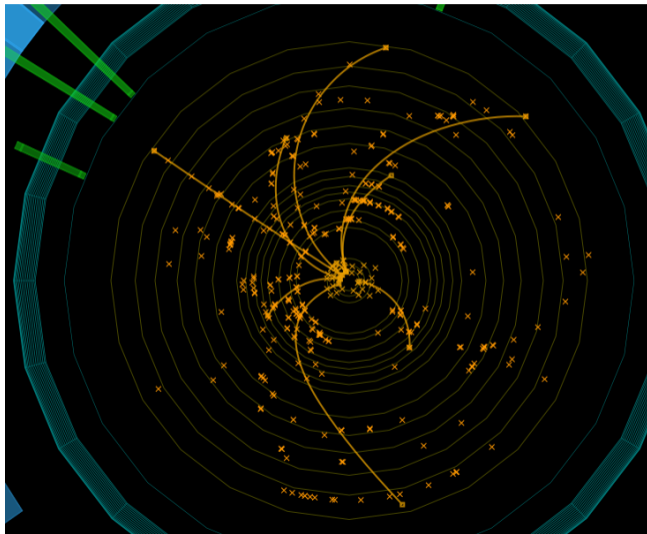
Compact Muon Solenoid - CMS

Przypadek produkcji pojedynczego mionu:
sygnały z detektora



Compact Muon Solenoid - CMS

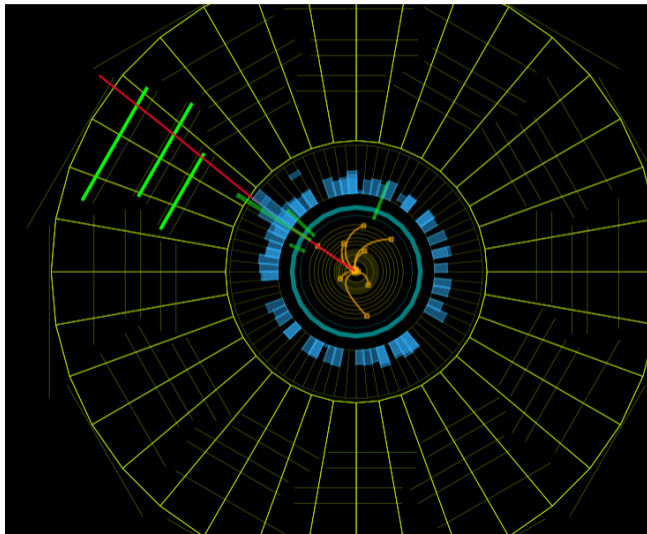
Przypadek produkcji pojedynczego mionu:
rekonstrukcja torów



Compact Muon Solenoid - CMS

Przypadek produkcji pojedynczego mionu:

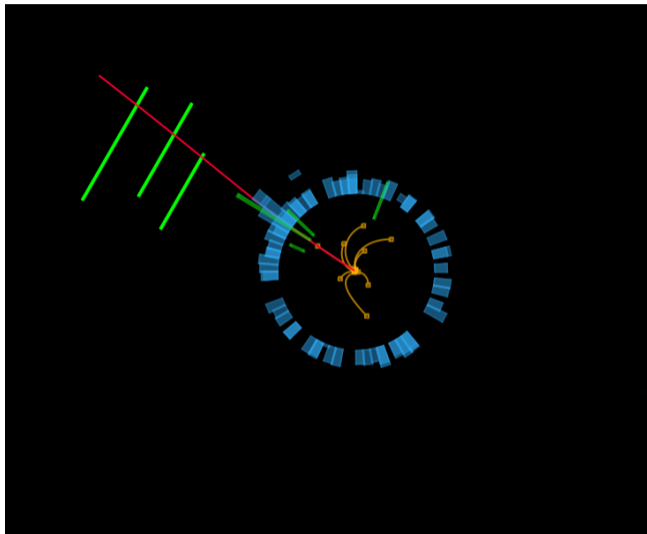
rekonstrukcja mionu



Compact Muon Solenoid - CMS

Przypadek produkcji pojedynczego mionu:

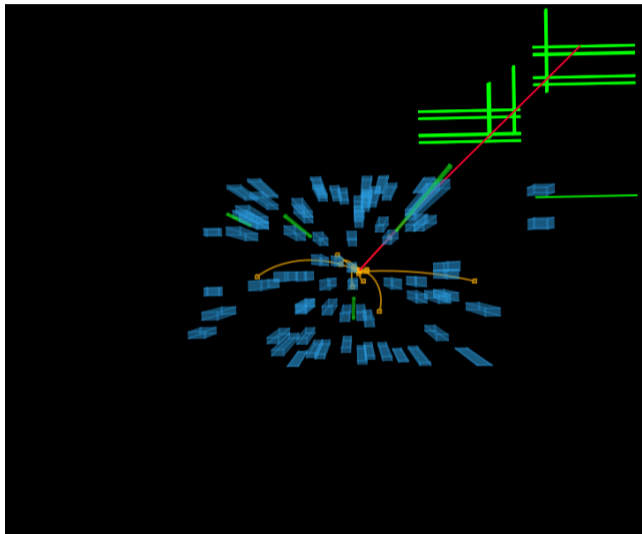
rekonstrukcja mionu



Compact Muon Solenoid - CMS

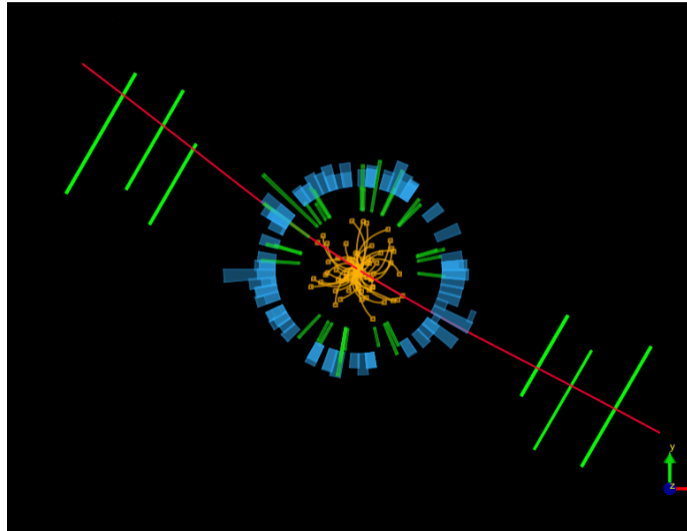
Przypadek produkcji pojedynczego mionu:

rekonstrukcja mionu



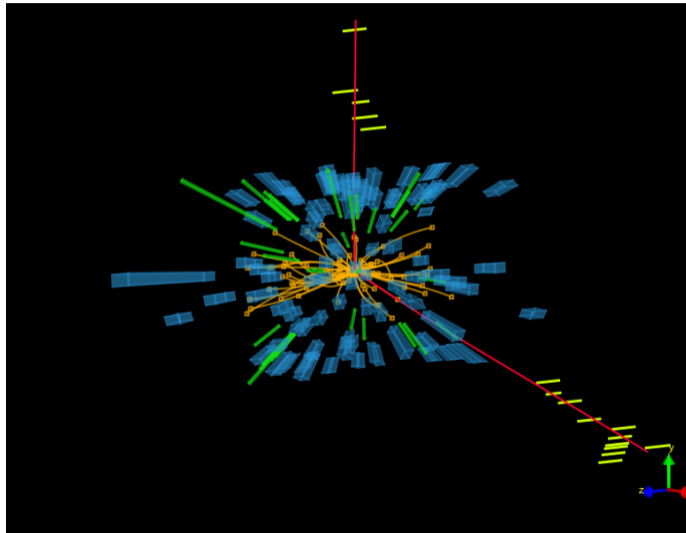
Compact Muon Solenoid - CMS

Przypadek produkcji dwóch mionów.



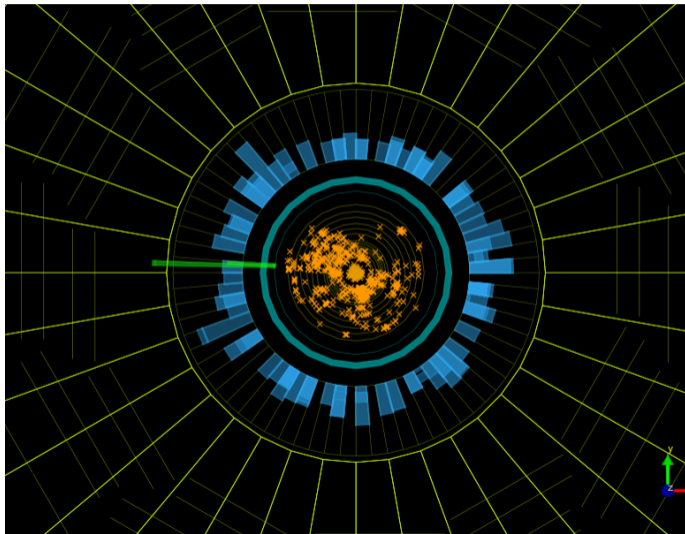
Compact Muon Solenoid - CMS

Przypadek produkcji dwóch mionów.



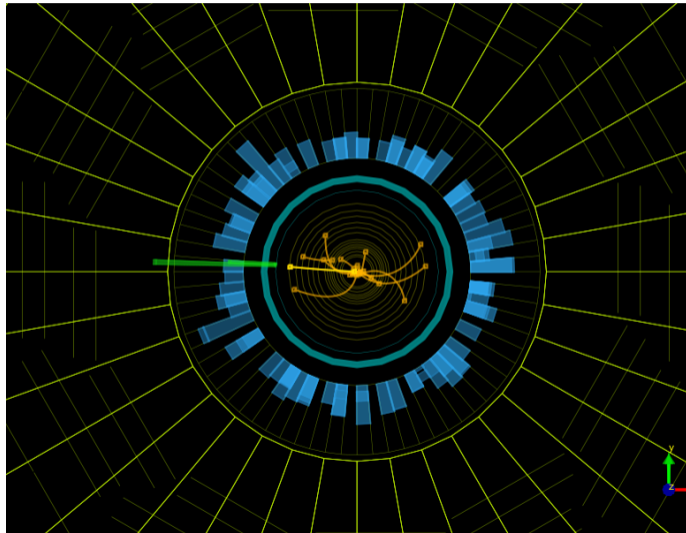
Compact Muon Solenoid - CMS

Przypadek produkcji pojedynczego elektronu.



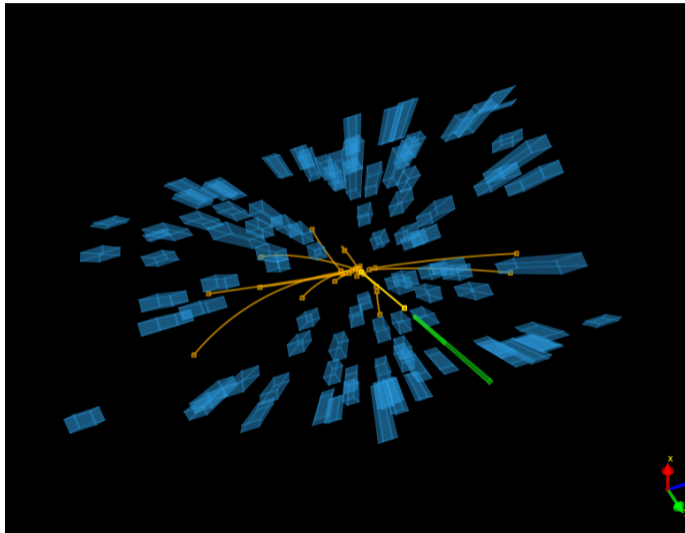
Compact Muon Solenoid - CMS

Przypadek produkcji pojedynczego elektronu.



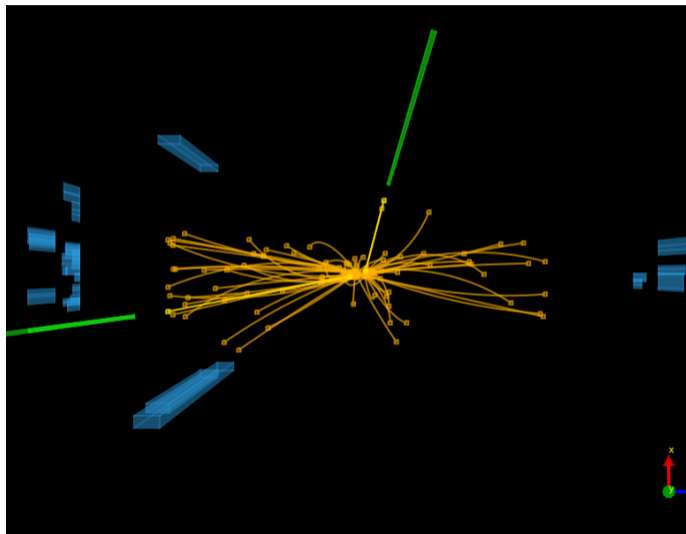
Compact Muon Solenoid - CMS

Przypadek produkcji pojedynczego elektronu.



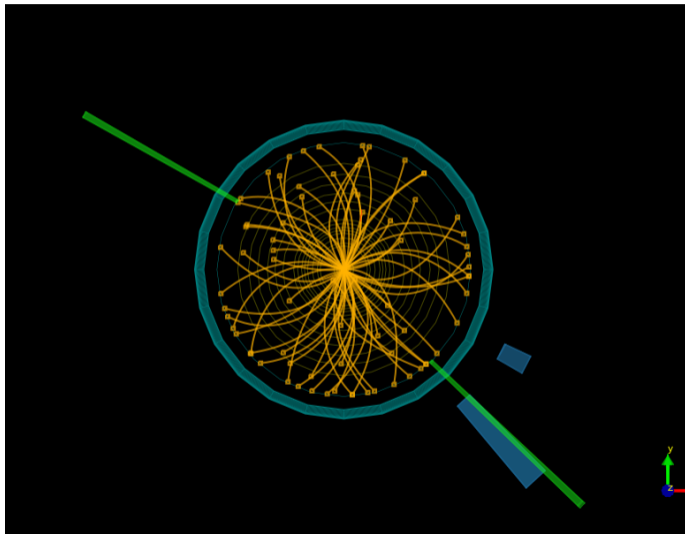
Compact Muon Solenoid - CMS

Przypadek produkcji dwóch elektronów.



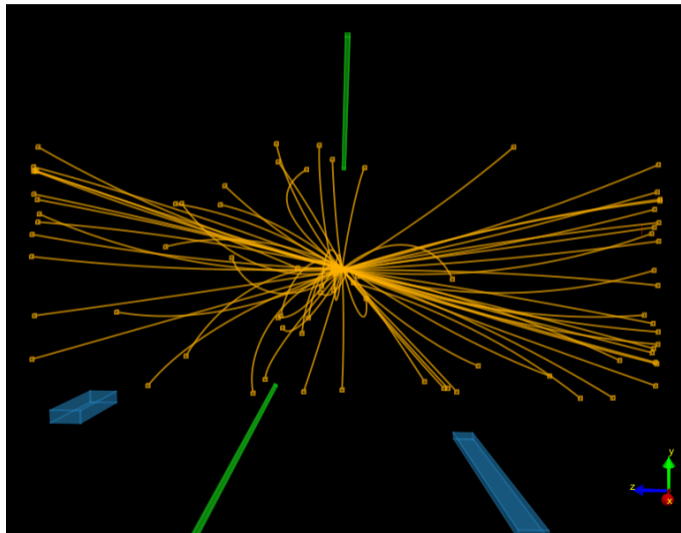
Compact Muon Solenoid - CMS

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



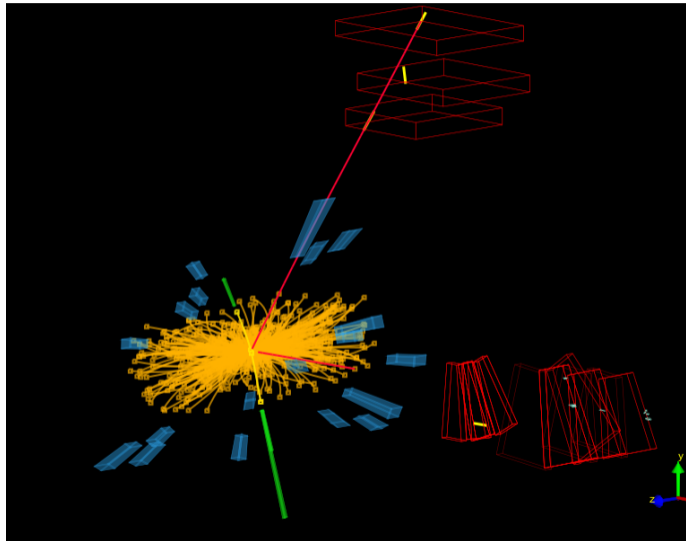
Compact Muon Solenoid - CMS

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



Compact Muon Solenoid - CMS

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



Compact Muon Solenoid - CMS

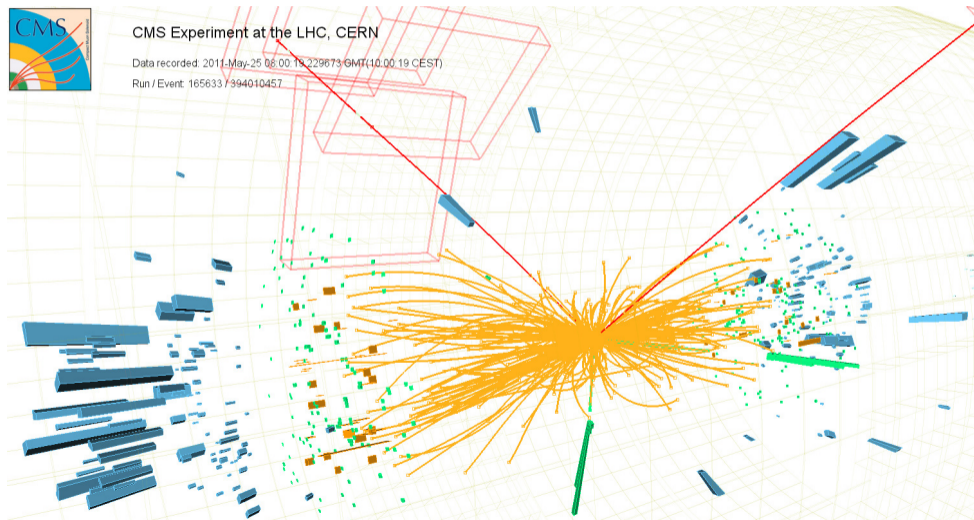
Przypadek $H \rightarrow ZZ \rightarrow e^+e^-\mu^+\mu^-$



CMS Experiment at the LHC, CERN

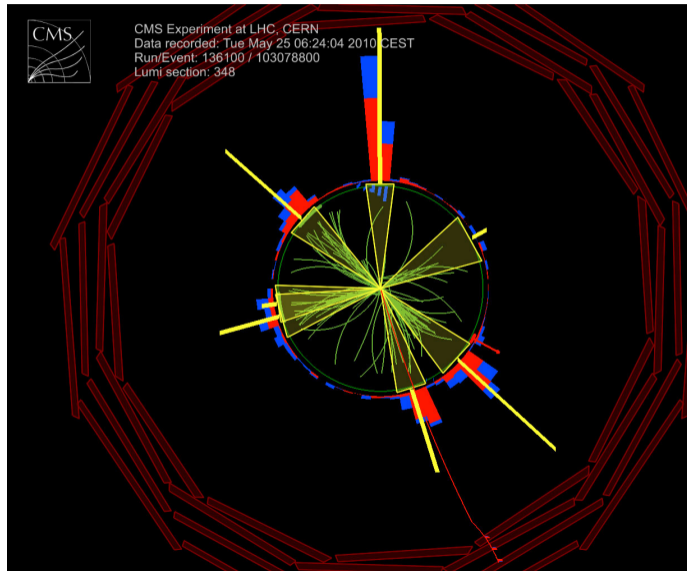
Data recorded: 2011-May-25 08:00:19.229673 GMT(10:00:19 CEST)

Run / Event: 165633 / 394010457

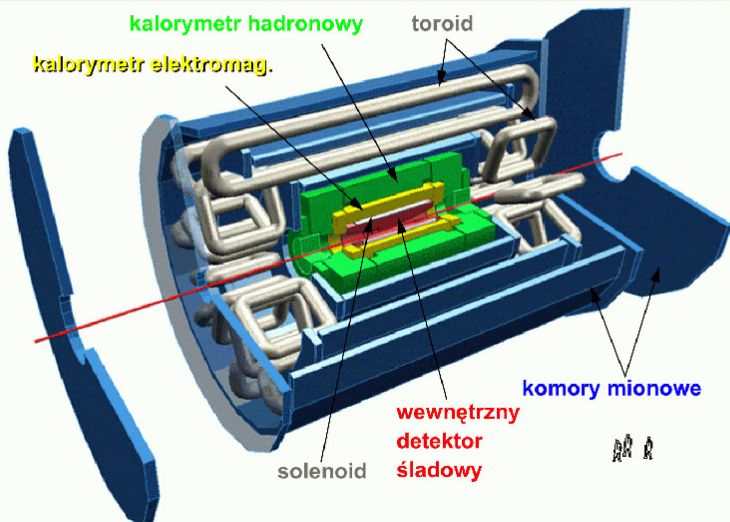


Compact Muon Solenoid - CMS

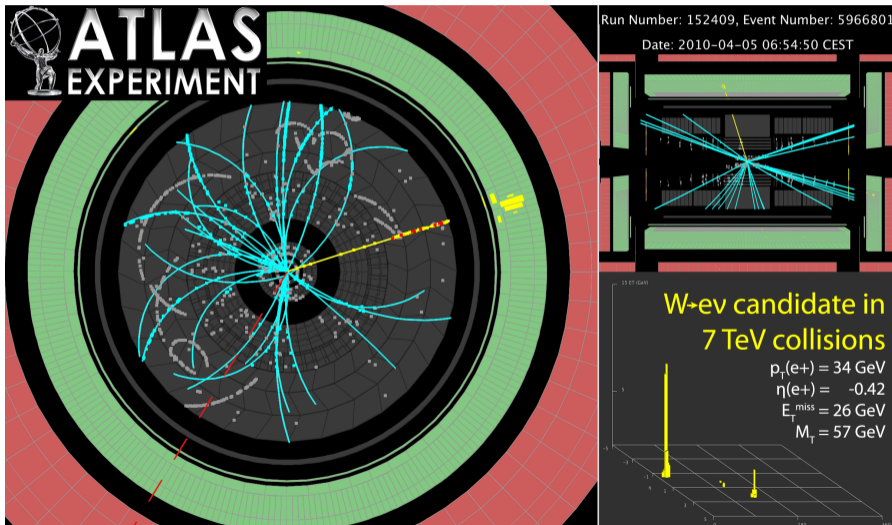
Przypadek produkcji 6 jetów



A Toroidal LHC ApparatuS (ATLAS)



ATLAS: przypadek produkcji bozonu W przy energii 7 TeV



Zbieranie i rekonstrukcja danych

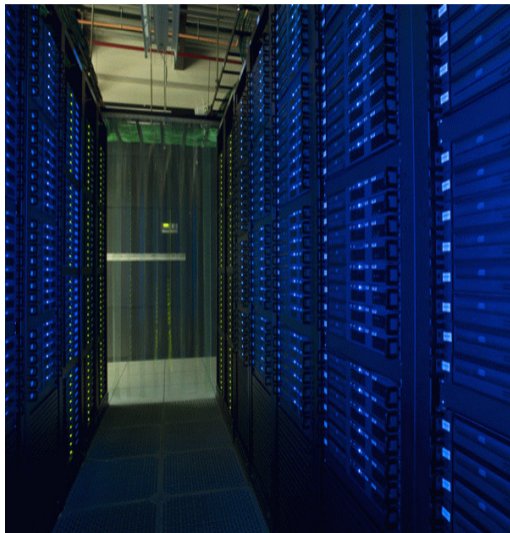
Ilość zbieranych danych dawno przekroczyła możliwości pojedynczego komputera.

1 przypadek to MB danych

zbieramy miliardy przypadków

W poprzedniej generacji eksperymentów można to było trzymać i przetwarzać w jednym miejscu...

W przypadku LHC nie jest to już możliwe!



Zbieranie i rekonstrukcja danych

Ilość zbieranych danych dawno przekroczyła możliwości pojedynczego komputera.

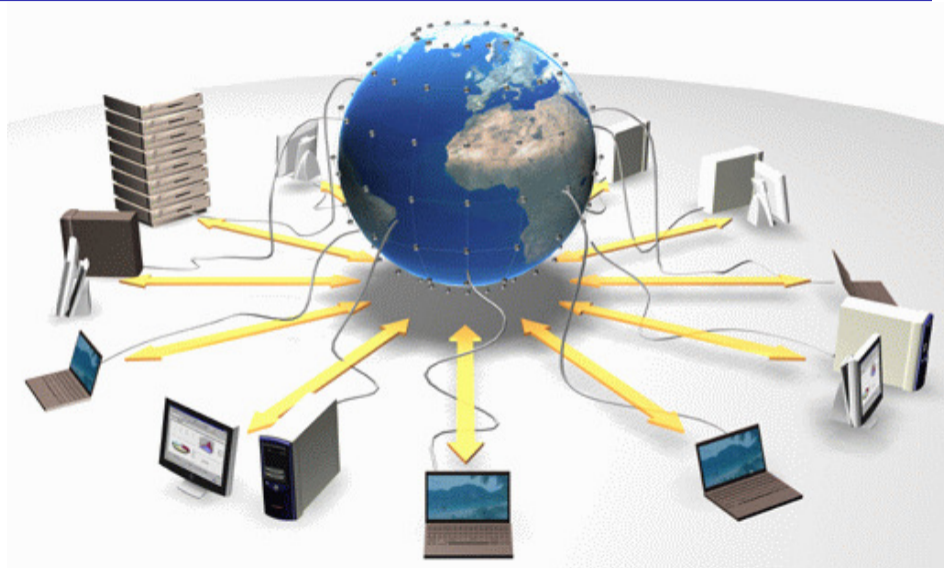
1 przypadek to MB danych

zbieramy miliardy przypadków

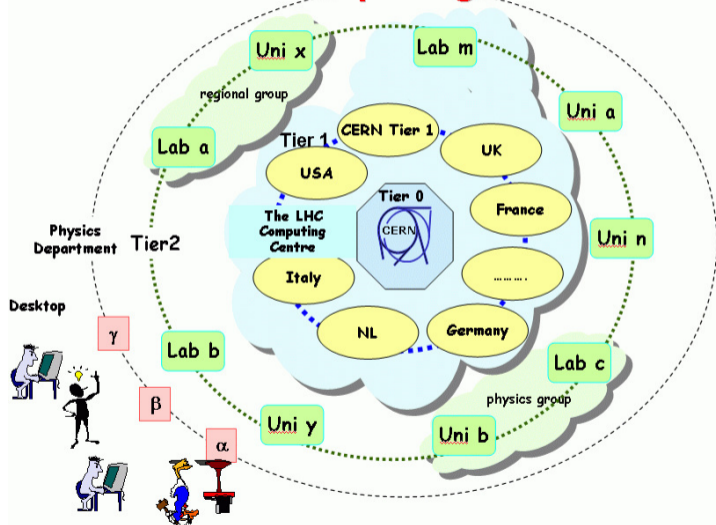
W poprzedniej generacji eksperymentów można to było trzymać i przetwarzać w jednym miejscu...

W przypadku LHC nie jest to już możliwe!





LHC Computing Model



Komputery w ponad 170 ośrodkach na całym świecie połączone w ogromną sieć.

Głównym węzłem tej sieci jest “źródło danych” - CERN (poziom 0).

Poziom 1 stanowią największe narodowe ośrodki obliczeniowe na świecie, połączone bezpośrednio z CERN bardzo szybkimi łączami.

Poziom 2 tworzą regionalne centra obliczeniowe i duże uniwersytety, które łączą się z węzłami poziomu 1 (oraz między sobą)

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 to około miliona procesorów, 400 PB dysków, dodatkowe 400 PB do archiwizacji

Bardzo szybkie łącza: możliwość “uwspólnienia” przetwarzanych danych

Zapotrzebowanie na moc obliczeniową i przestrzeń dyskową wynika nie tylko z objętości 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.

Dlaczego potrzebujemy symulacji?

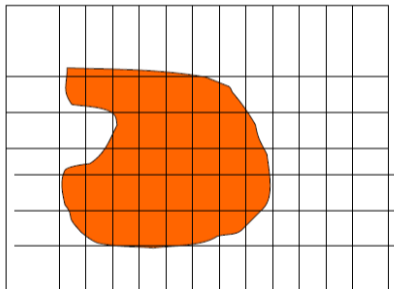
Symulacja nie jest sposobem na uproszczenie zagadnienia, czy “zakrycie” naszej niewiedzy.

Teoretycznie, wykorzystując posiadane informacje moglibyśmy przedstawić oczekiwane wyniki pomiaru w postaci **zbioru formuł** matematycznych.

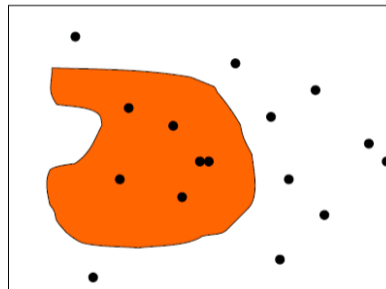
Ale ich policzenie w tradycyjny sposób byłoby praktycznie niemożliwe.

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

Jak policzyć pole powierzchni nieregularnej figury (np. opisanej skomplikowanym wzorem).
Są dwa podejścia: w obu musimy znać obszar w którym zawarta jest figura

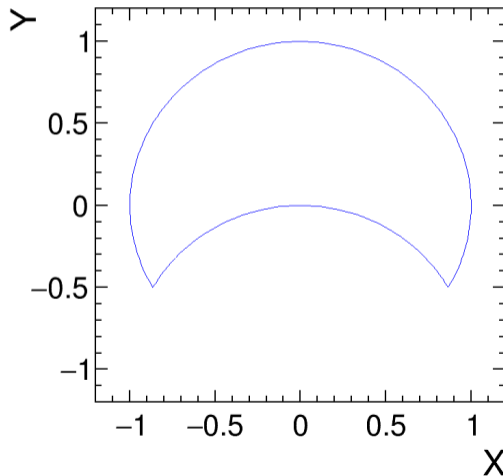


Sumować powierzchnię małych elementów należących do figury.

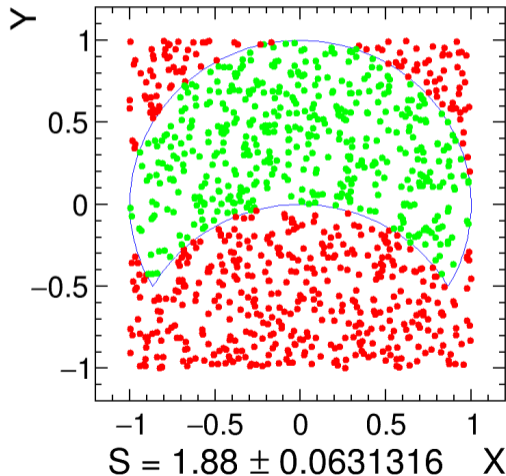


Policzyć jaki ułamek losowo wybieranych punktów znajduje się wewnątrz figury.

Wyznaczanie powierzchni metodą Monte Carlo

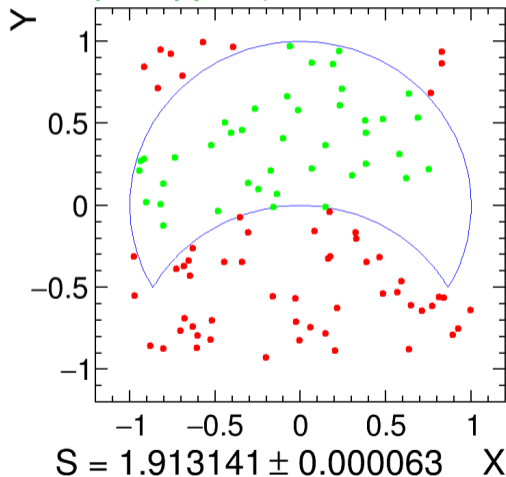


Wyznaczanie powierzchni metodą Monte Carlo



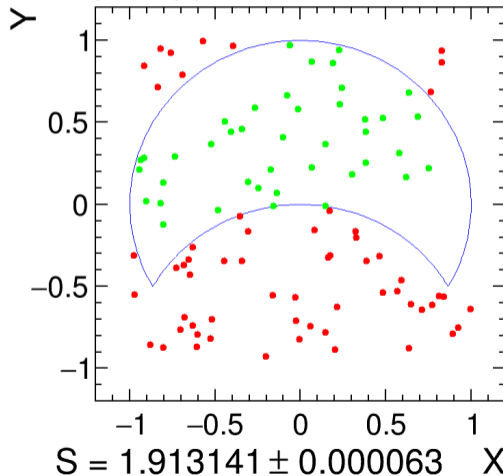
Wyznaczanie powierzchni metodą Monte Carlo

Rysowany jeden punkt na 10 milionów:



Wyznaczanie powierzchni metodą Monte Carlo

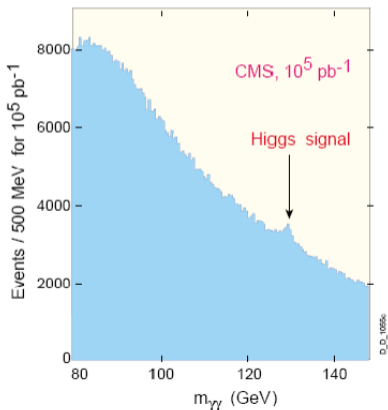
Rysowany jeden punkt na 10 milionów:



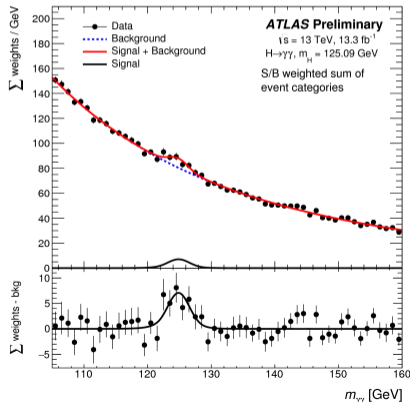
$$S = \frac{\pi}{3} + \frac{\sqrt{3}}{2}$$
$$\approx 1.91322296$$

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 danych CMS (100 fb^{-1})



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



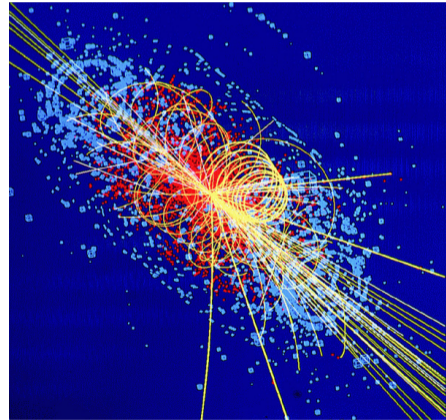
Przy każdym przecięciu paczek w LHC zderza się kilkadziesiąt par protonów.

W prawie każdym zderzeniu produkowanych jest wiele (kilkadziesiąt lub nawet kilkaset) cząstek.

Koło miliarda oddziaływań na sekundę!

Nie mamy szans zarejestrować (zapamiętać/zapisać) więcej niż ok. ~ 1000 zderzeń na sekundę!

Jak wybrać te ciekawe?



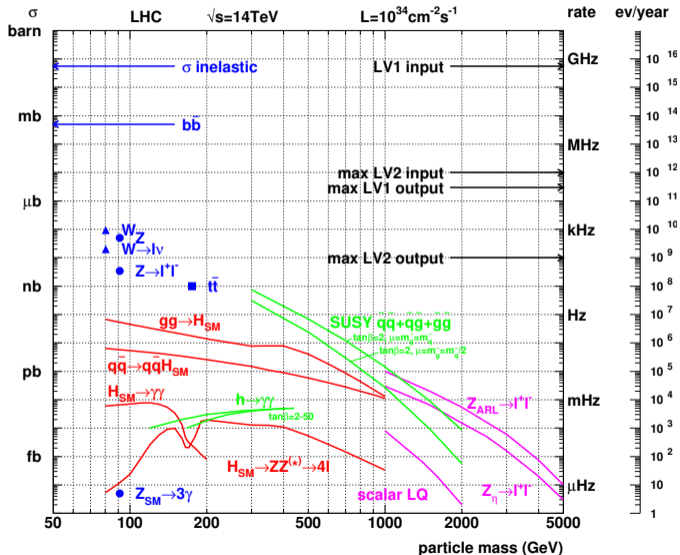
Układ wyzwalań

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

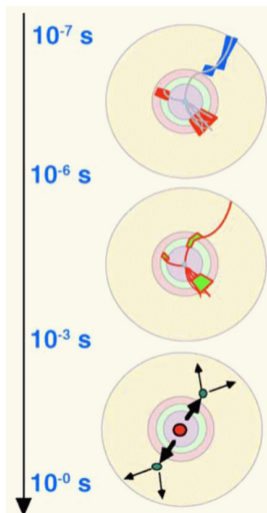
Tylko "ciekawe" sygnały są czytane z detektora przesyłane do sprawdzenia.

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

Zapisujemy tylko to, co ma szansę być wartościowe!



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
wybrane przypadki są zapisywane na trwałe

Układ wyzwania analogia z dnia codziennego

Na bardzo dużym parkingu szukamy konkretnego samochodu

Jeśli będziemy sprawdzać numery rejestracyjne wszystkich aut to potrwa to bardzo długo...

Układ wyzwania analogia z dnia codziennego

Na bardzo dużym parkingu szukamy konkretnego samochodu

Jeśli będziemy sprawdzać numery rejestracyjne wszystkich aut to potrwa to bardzo długo...

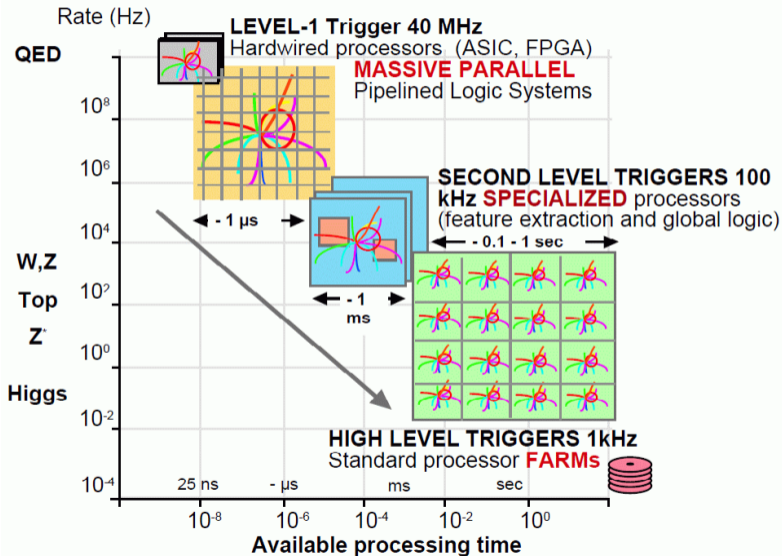
Dużo efektywniejsze jest podejście “wielostopniowe”

- wypatrujemy samochodu w określonym kolorze
kolor można określić bardzo szybko i z daleka
- sprawdzamy markę/model samochodu
często można rozpoznać na “pierwszy rzut oka”, zwłaszcza jeśli model jest “nietypowy”
- dopiero gdy kolor i model się zgadzają, sprawdzamy numery rejestracyjne...

⇒ to jest naturalne podejście do zagadnienia, minimalizuje wysiłek i czas poszukiwania...

Układ wyzwalań

Schemat



Układ wyzwalań

Najtrudniejszy Poziom 1.

Decyzję trzeba podjąć w *ok. 3 μs*
(przez tyle czasu dane są pamiętane
w rejestrach elektroniki odczytu).

Dominuje czas potrzebny na
przesyłanie informacji!

Prędkość światła jest skończona!

W 25 ns światło pokonuje "tylko" 7.5 m!
Sygnały elektryczne i impulsy w światłowodach
odpowiednio mniej...

