



**KAPITAŁ LUDZKI**  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



**UNIA EUROPEJSKA**  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



# Cząstka Higgsa w LHC

## Fizyka I (Mechanika)

### Wykład XV:

- cząstki i fale
- spontaniczne łamanie symetrii i cząstka Higgsa
- jak działa akcelerator LHC
- poszukiwania cząstki Higgsa w LHC
  
- Informacje o egzaminie

# Świat cząstek elementarnych

## Model Standardowy

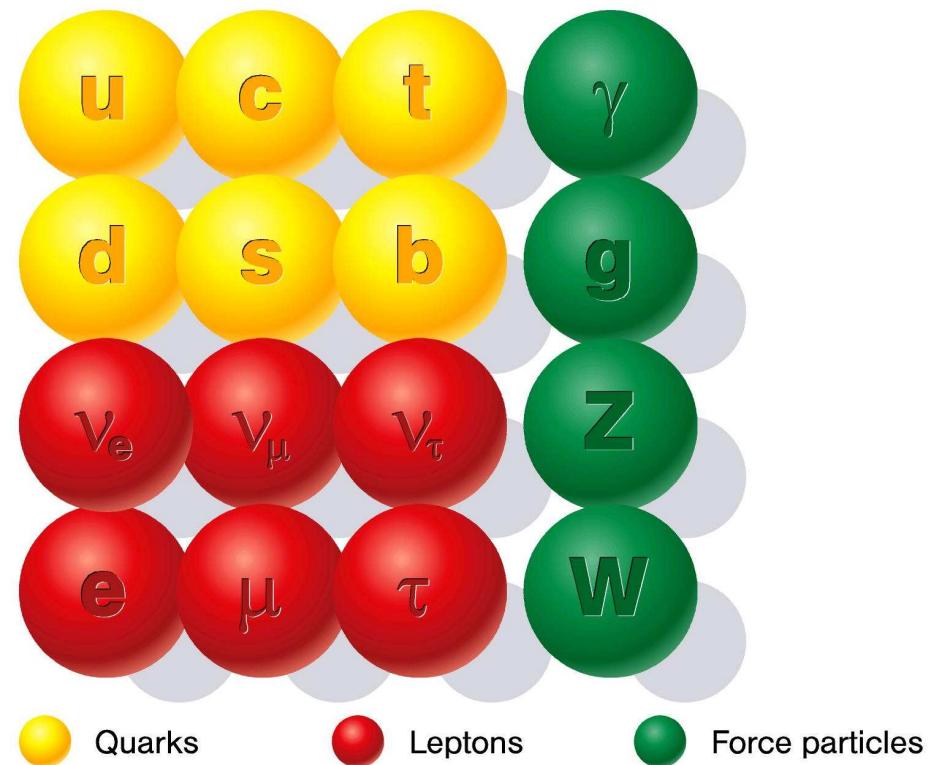
Całą naszą wiedzę doświadczalną na temat cząstek elementarnych bardzo dokładnie opisuje **Model Standardowy**

Łączy on teorie oddziaływań elektromagnetycznych, słabych i silnych.

Cząstkami modelu są

- cząstki materii  
kwarki i leptony
- nośniki oddziaływań  
 $\gamma$ ,  $g$ ,  $W^\pm$  i  $Z^0$

A ich oddziaływania opisane są w ramach tzw. **kwantowej teorii pola (QFT)**

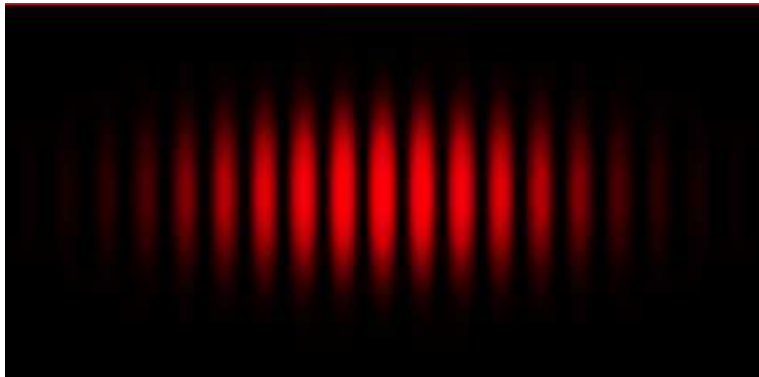


# Cząstki i fale

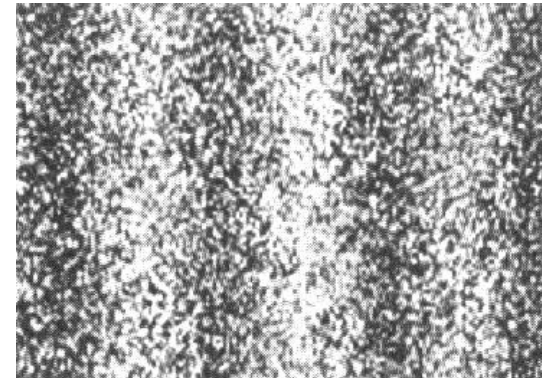
W roku 1923 Louis de Broglie wysunął hipotezę, że **wszystkie cząstki** powinny przejawiać własności **falowe** !

Obraz przy przechodzeniu przez dwie szczeliny:

Światło



Elektrony



Złożenie **fal**

70000 elektronów

⇒ **prążki interferencyjne**

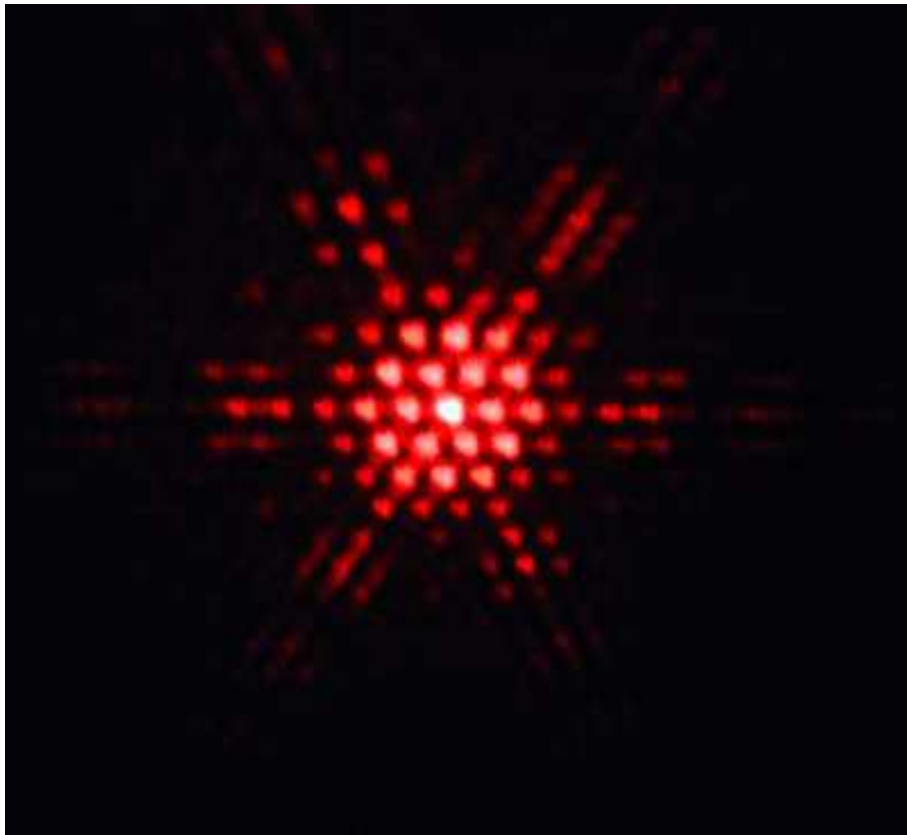
**Elektrony też zachowują się jak fale !**

**Doświadczenie potwierdziło hipotezę de Broglie'a.**

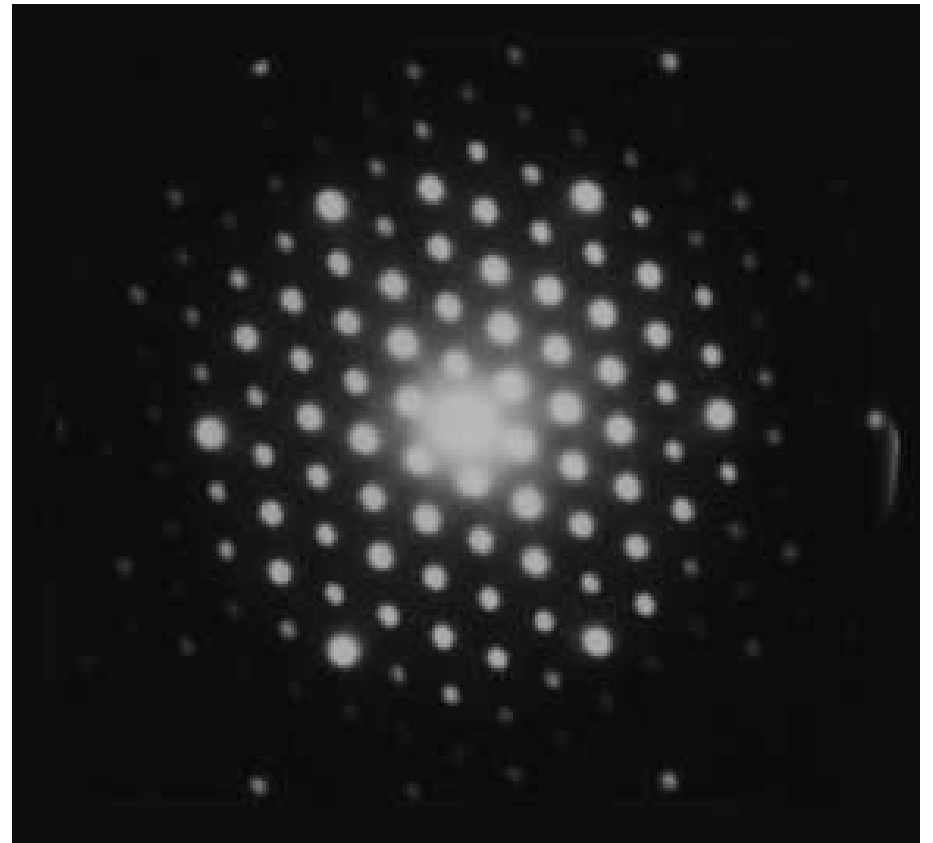
# Cząstki i fale

Dyfrakcja na strukturach heksagonalnych

Światło



Elektrony



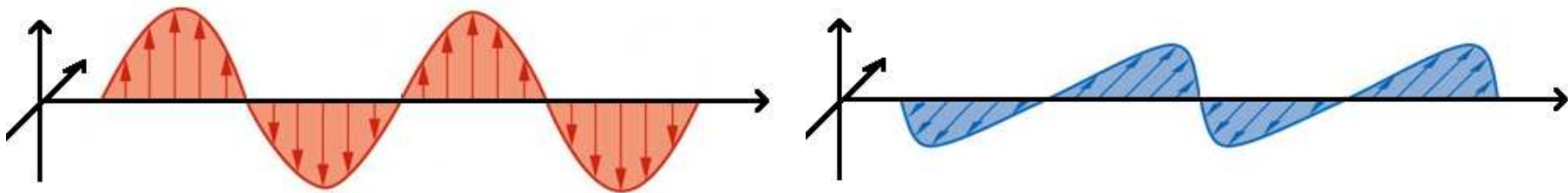
# Cząstki i fale

Mechanika kwantowa opisuje cząstki poprzez tzw. **funkcje falowe**.

Ruch cząstki opisujemy jako rozchodzenie się **“fal prawdopodobieństwa”**.

**Amplituda** tej fali opisuje **prawdopodobieństwo** znalezienia cząstki w danym miejscu i danej chwili czasu. Dopiero **pomiar** ujawnia nam gdzie faktycznie była cząstka.

**Fizycznie** mierzalny (wpływający na wynik pomiaru) jest tylko **kwadrat amplitudy** funkcji falowej. Jej **faza** (“polaryzacja fali”) jest **nieistotna** (nie wpływa na pomiar).



## Symetria cechowania

Niezmienniczość teorii względem zmiany fazy

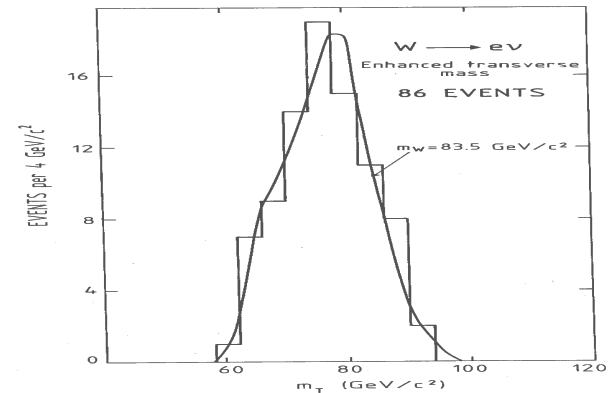
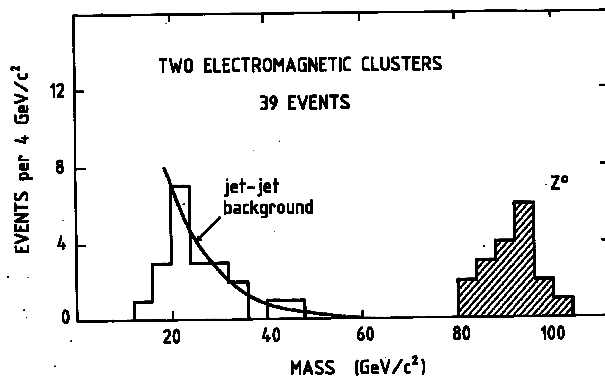
# Spontaniczne łamanie symetrii

Założenie **symetrii cechowania** pozwala na bardzo prosty i elegancki opis oddziaływań cząstek w Modelu Standardowym, w języku **kwantowej teorii pola**.

Z **symetrii** cechowania wynika jednak, że nośniki oddziaływań powinny być **bezmasowe**.  
“Fale oddziaływań” nie mają masy !

Z drugiej strony **doświadczenie** pokazuje, że bozony  $W^\pm$  i  $Z^0$  mają **niezerową masę**...

Odkrycie bozonów  $Z^0$  i  $W^\pm$  przez eksperymenty UA1 i UA2 (1983):



⇒ czy potrafimy pogodzić wymóg symetrii z doświadczeniem ?!

Czy w symetrycznym świecie mogą istnieć stany łamiące symetrię?

# Spontaniczne łamanie symetrii

## Analogia klasyczna

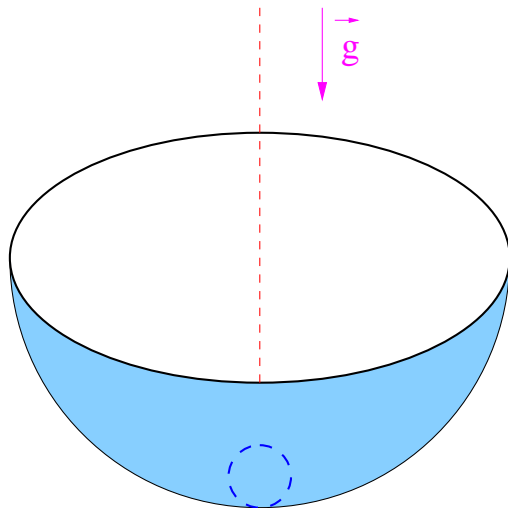
Podobny problem spotykamy rozważając kulkę w osiowo-symetrycznej czaszy (w jednorodnym polu grawitacyjnym).

Nawet jeśli **nie znamy kształtu** czaszy możemy oczekiwać, że **położenie równowagi** kulki znajduje się **na osi symetrii** czaszy.

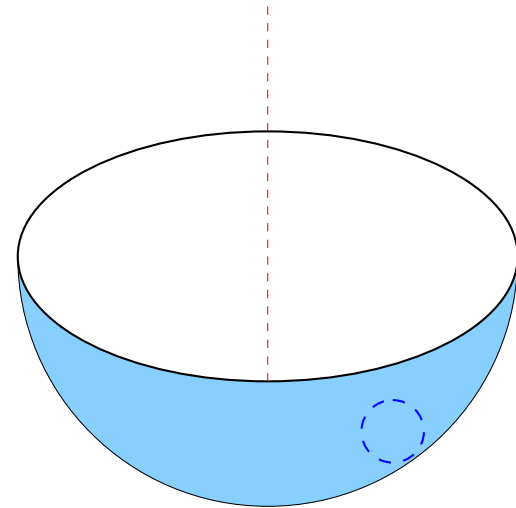
Niezależnie od warunków początkowych kulka powinna się tam w końcu znaleźć...

Jednak doświadczenie może wykazać, że kulka nie znajduje się na osi symetrii !...

Teoria



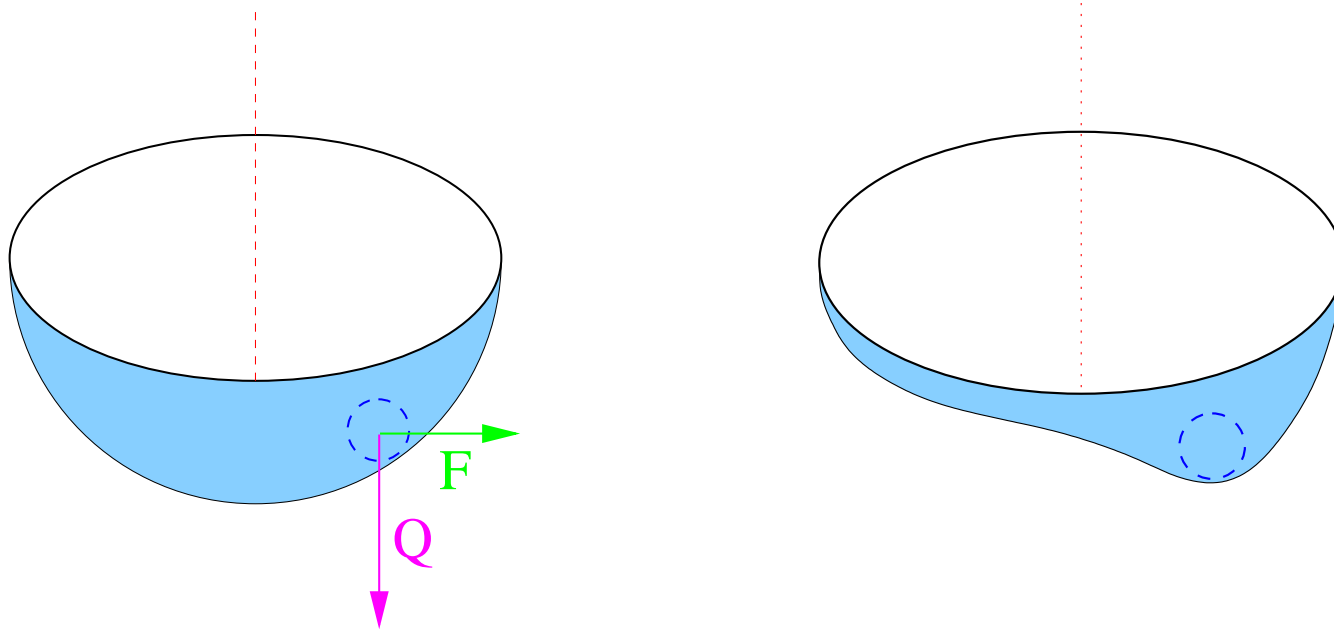
Pomiar



# Spontaniczne łamanie symetrii

Możliwe wytłumaczenia wyniku doświadczenia:

- na kulkę działa dodatkowa siła, skierowana **pod kątem** do osi
- czasza **nie ma symetrii** osiowej



⇒ w obu tych przypadkach musimy przyznać, że nasza symetria jest **“złamana”** (nie obowiązuje)

**Czyli musimy “wyrzucić do kosza” naszą teorię...**

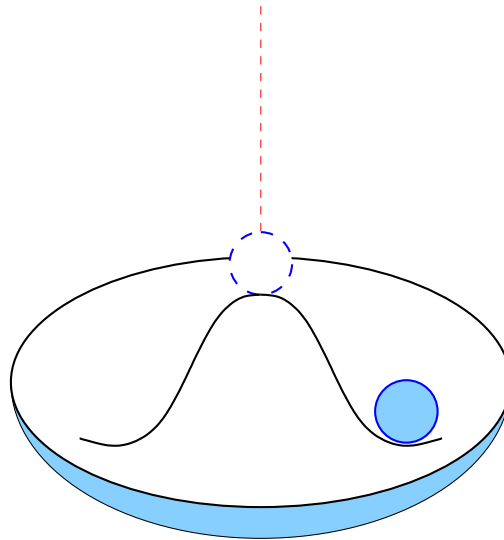


# Spontaniczne łamanie symetrii

Okazuje się, że można pogodzić teorię i doświadczenie

Czasza zachowuje symetrię osiową

ale położenie na osi nie jest stanem równowagi trwałej  $\Rightarrow$  kulka stacza się

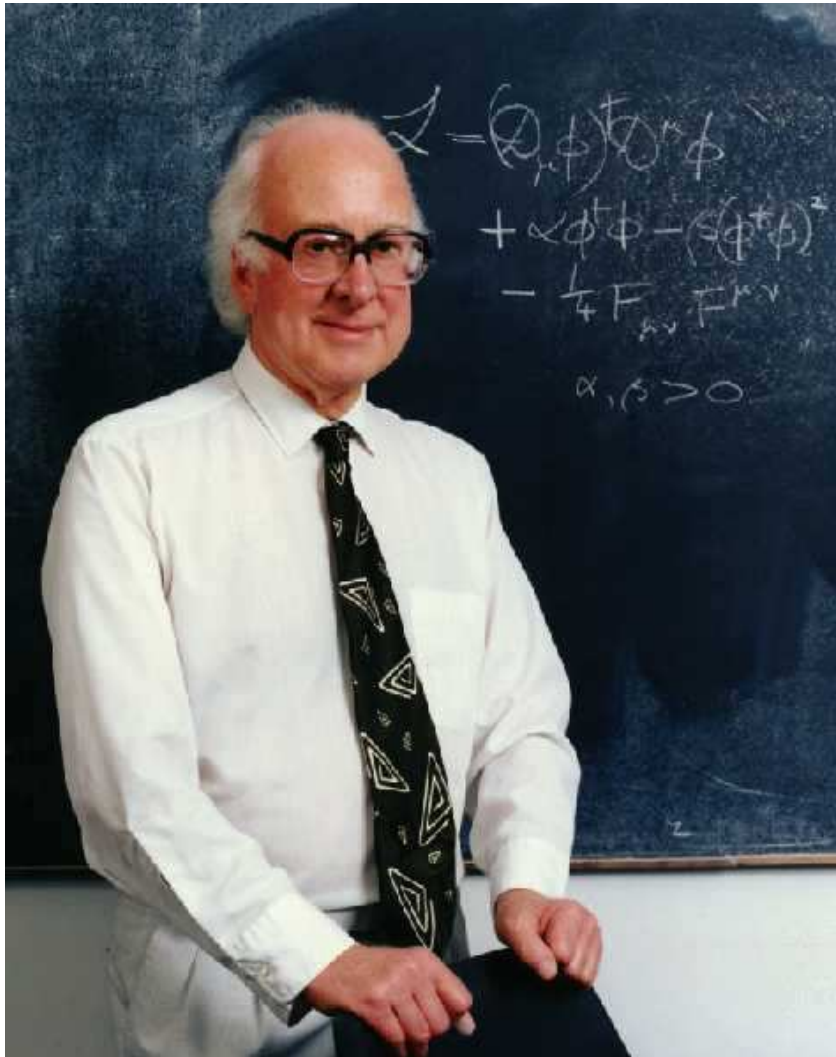


Staczająca się kulka wybiera jedno z **wielu możliwych** położeń równowagi  
(zbiór wszystkich tych położeń zachowuje symetrię teorii)

Stoczenie się kulki powoduje jednak **spontaniczne** złamanie symetrii!

Stan w jakim kulka się znalazła nie ma symetrii teorii

# Spontaniczne łamanie symetrii



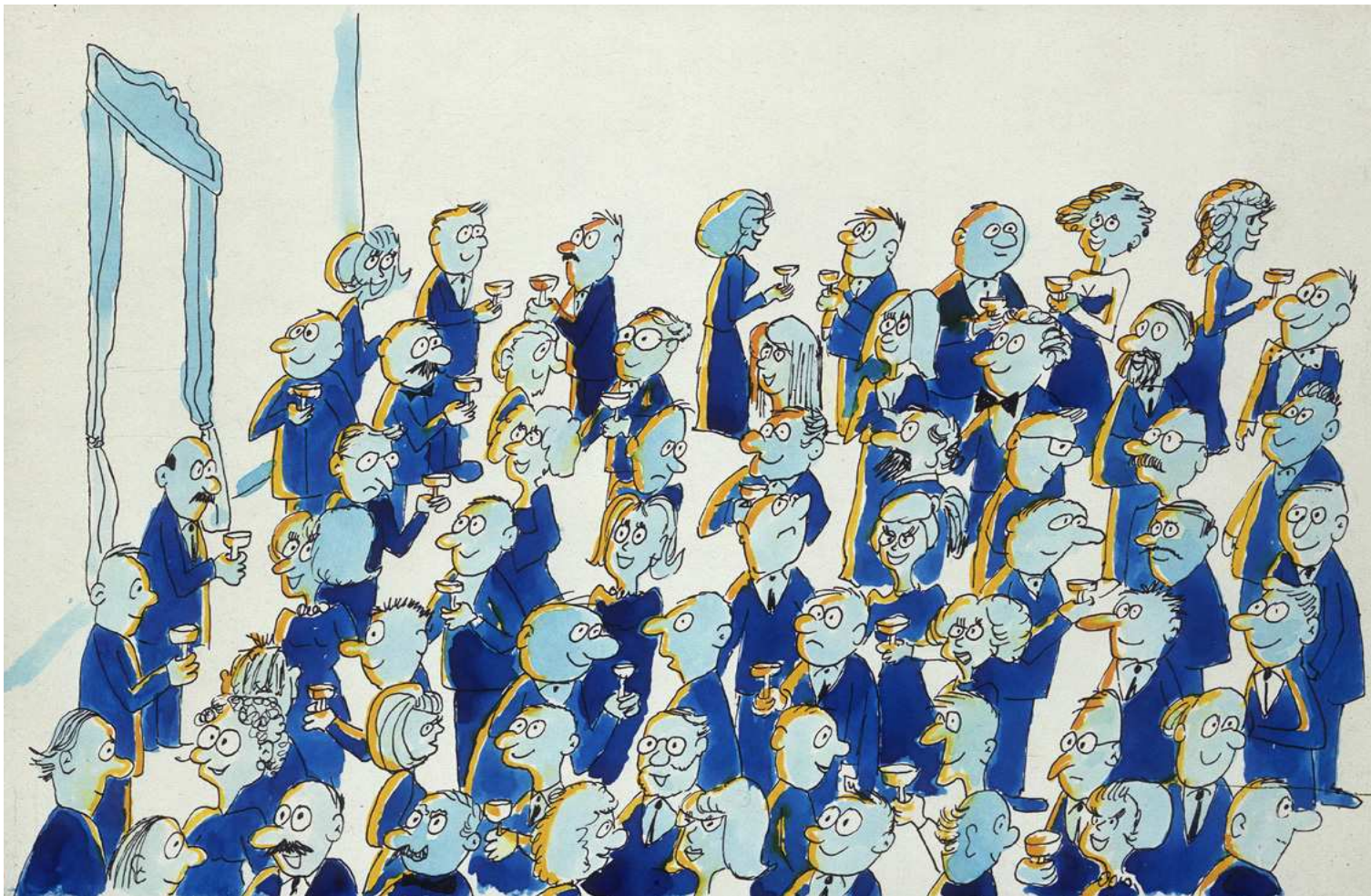
Na możliwość nadania mas nośnikom oddziaływań poprzez spontaniczne łamanie symetrii wskazał czterdzieści lat temu (1964) Peter W. Higgs.

Mechanizm spontanicznego łamania symetrii, zwany przez wiele lat **mechanizmem Higgsa** (obecnie Englerta-Brouta-Higgsa-Guralnika-Hagena-Kibble'a), jest podstawą współczesnej teorii oddziaływań elektroslabych.

Wszystkie cząstki uzyskują **masę** poprzez **oddziaływanie z polem Higgsa!**

# Mechanizm Higgsa

Wyobraźmy sobie salę bankietową  
równomiernie wypełnioną ludźmi (pole Higgsa)





# Mechanizm Higgsa

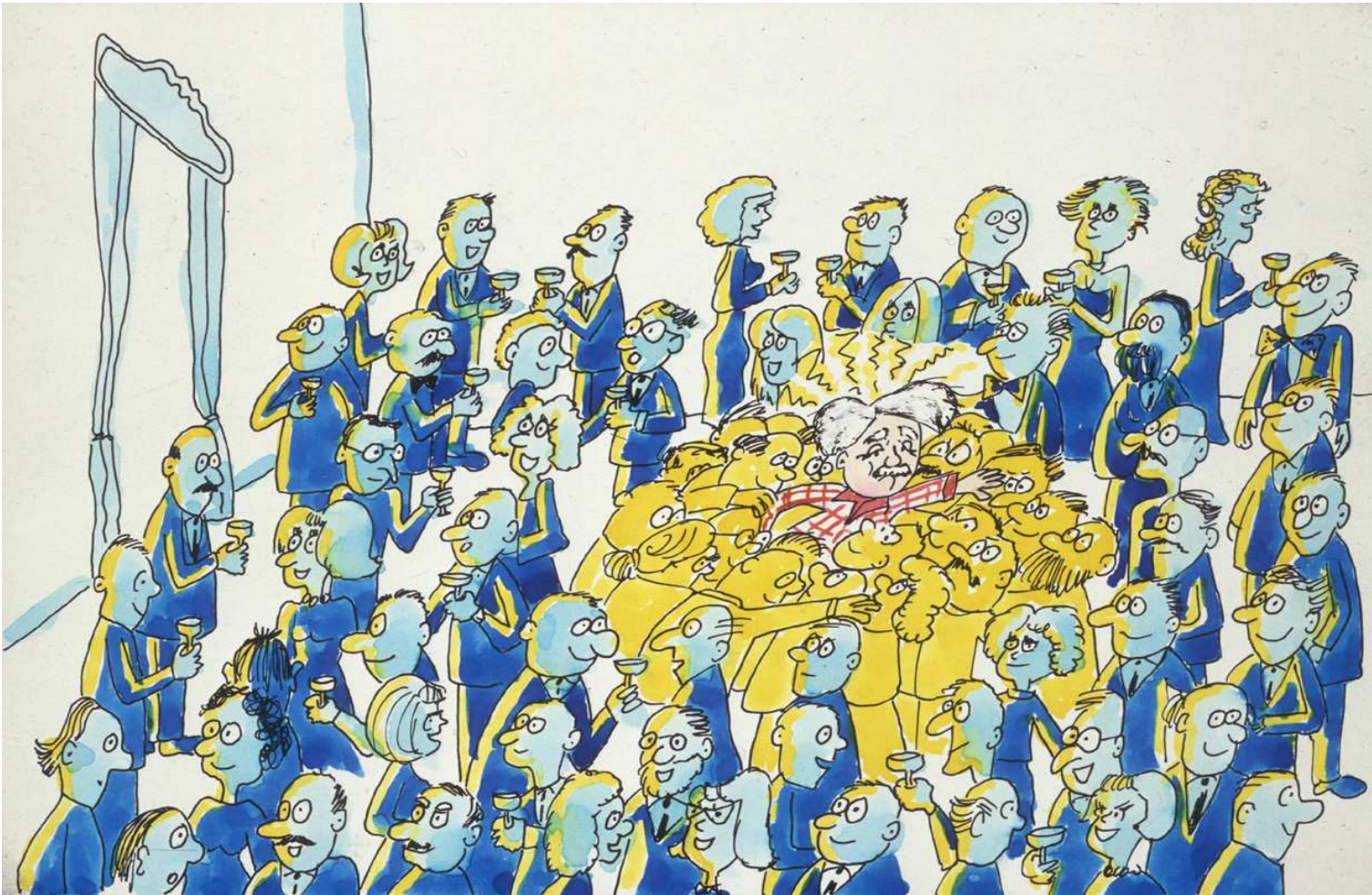
Pojawia się sławny naukowiec (bozon cechowania) przyciągając uwagę zebranych...





# Mechanizm Higgsa

Ludzie cisnący się wokół naukowca  
utrudniają mu poruszanie się (nadają mu masę)





# Cząstka Higgsa

Ludzie na bankiecie mogą też **spontanicznie** zbierać się, tworzyć “**zgęszczenia**” ⇒ oczekujemy istnienia dodatkowej **cząstki Higgsa**



# Cząstka Higgsa

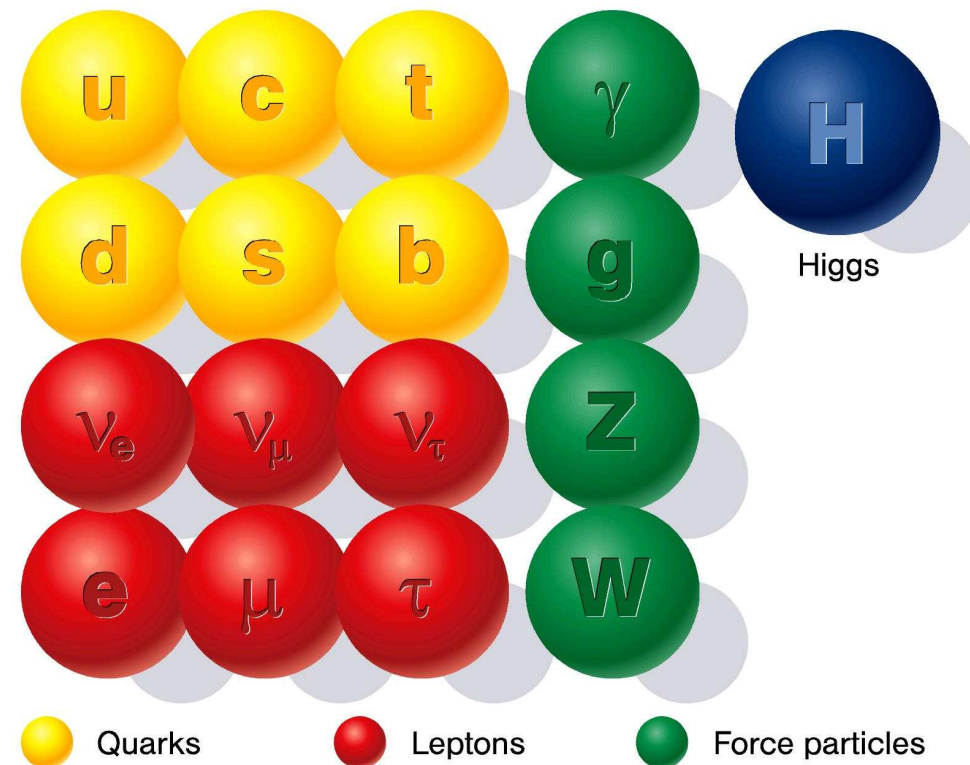
## Model Standardowy

Precyzyjnie opisuje cząstki elementarne i ich oddziaływania: elektromagnetyczne, słabe i silne.

Cząstkami modelu są

- cząstki materii  
kwarki i leptony
- nośniki oddziaływań  
 $\gamma$ ,  $g$ ,  $W^{\pm}$  i  $Z^0$
- bozon Higgsa  
konieczny dla spójności modelu

“Nadaje masy” wszystkim cząstkom



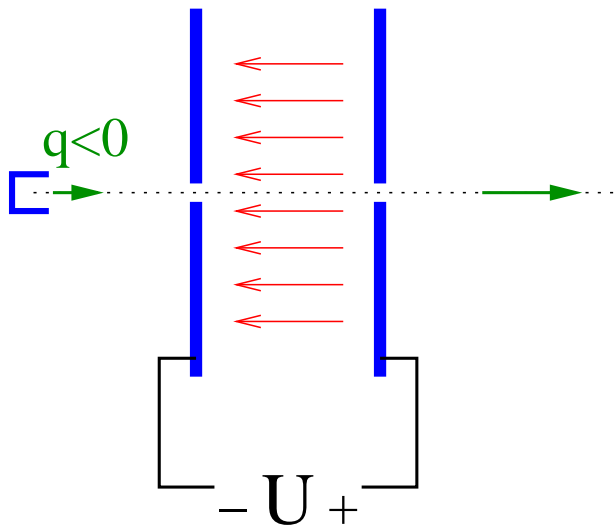
# Akceleratory

## Akceleratory elektrostatyczne

W 1919 roku Rutherford wskazał na korzyści z przyspieszania cząstek.

Najprostszym akceleratorem cząstek jest pole elektrostatyczne:

np. kondensator



Uzyskiwana energia:

$$E = E_0 + U \cdot q$$

Problemem jest uzyskanie odpowiednio wysokiej różnicy napięć.

generator Cockrofta-Waltona (1932)

generator Van de Graaffa (1931)

Obecnie uzyskujemy różnice napięć maksymalnie rzędu 30 MV

energia 30 MeV uzyskiwana przez cząstkę  $|Q|=1e$

W pewnych dziedzinach wciąż używane, ale zbyt mało dla fizyki cząstek.



# Akceleratory

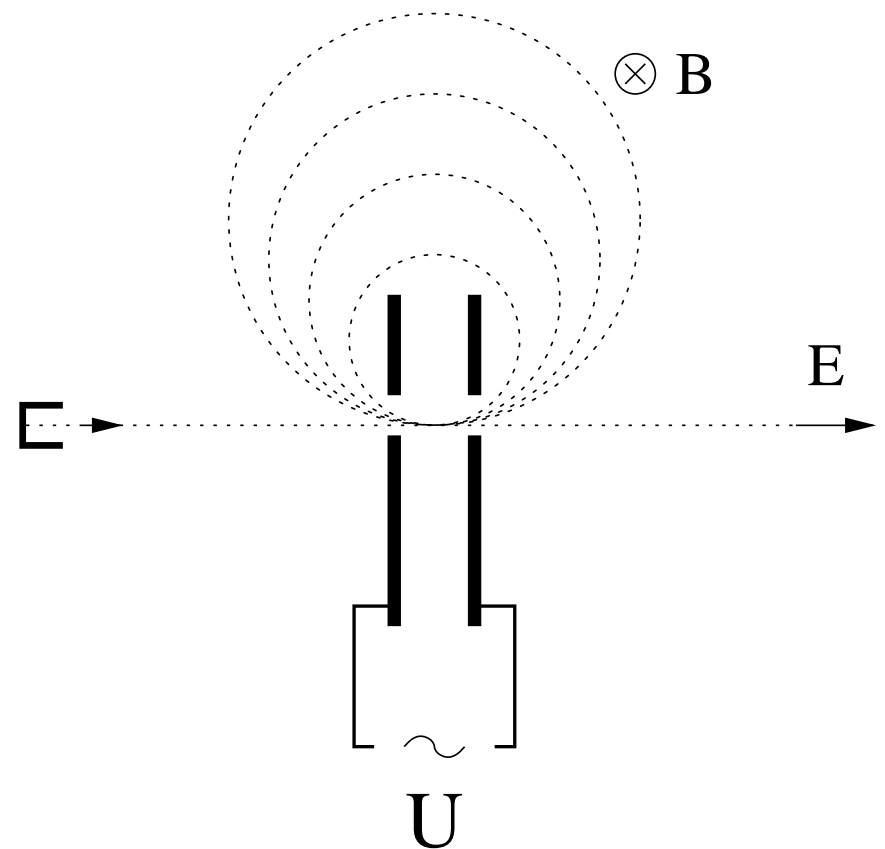
## Akcelerator kołowy

Zamiast używać wielu wnęk możemy wykorzystać pole magnetyczne do “zapętlenia” cząstki.

Cząstki mogą przechodzić przez wnękę przyspieszającą wiele razy...

Pierwszy tego typu akcelerator (**cyklotron**) zbudował w 1931 roku Ernest Lawrence

Schemat poglądowy:



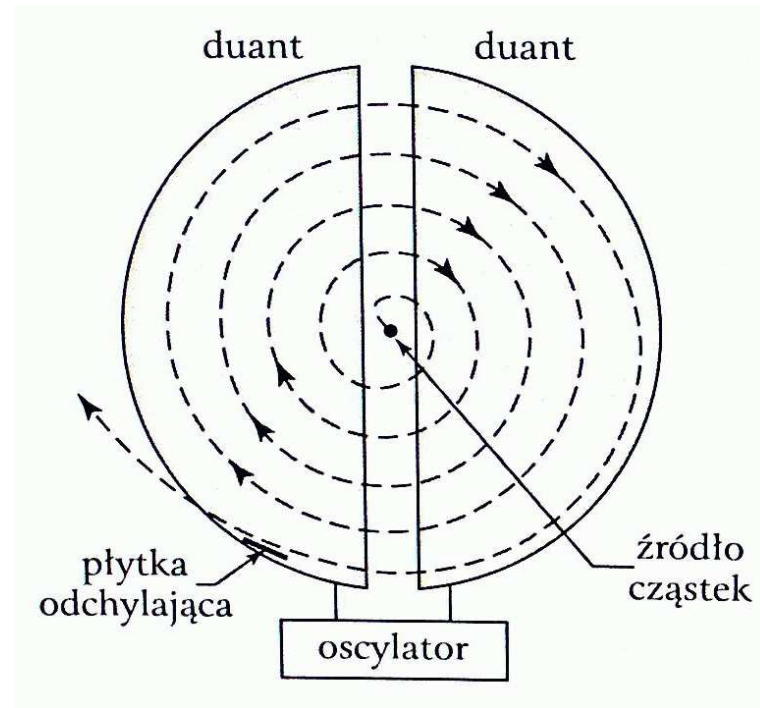
# Akcelerator

## Cyklotron

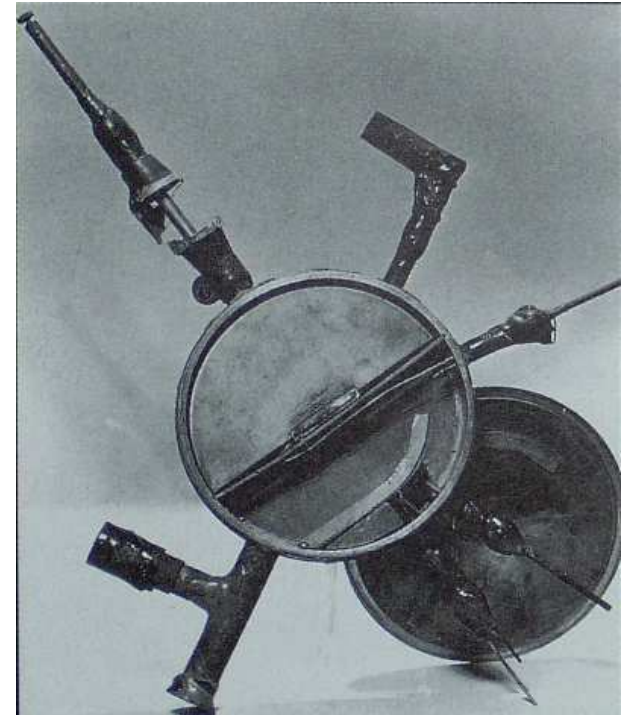
Ernest Lawrence



Schemat



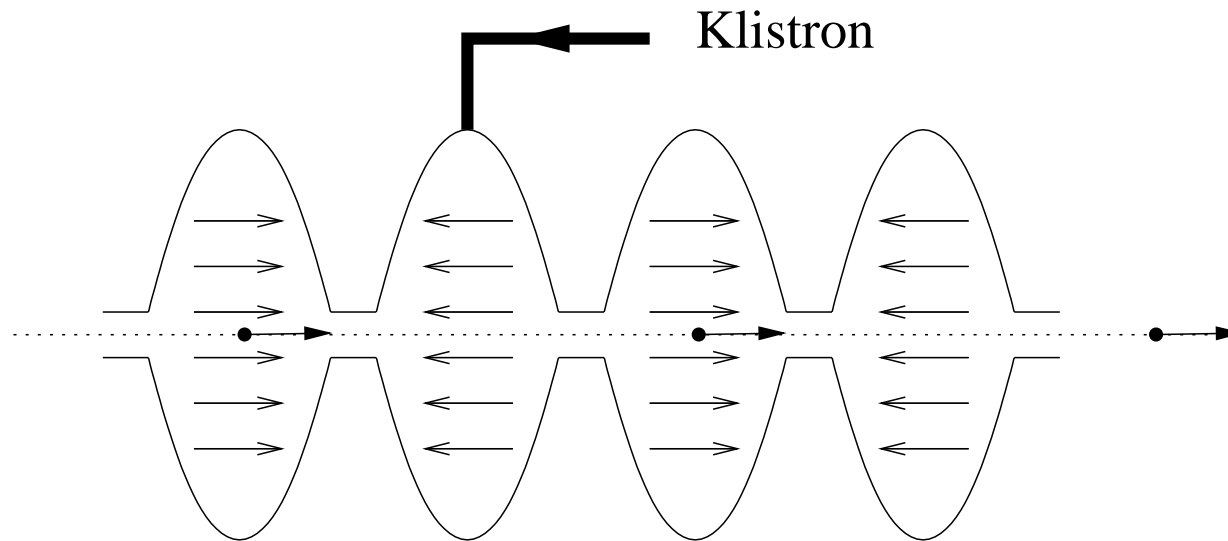
Pierwszy cyklotron



# Akceleratory

## Wnęka rezonansowa

Obecnie do przyspieszania cząstek wykorzystujemy wnęki rezonansowe:



Wewnątrz wnęki wytwarzana jest stojąca fala elektromagnetyczna.

Częstości rzędu 1 GHz - mikrofałe.

Wnęki rezonansowe pozwalają uzyskiwać natężenia pola rzędu 10 MV/m

W technologii CLIC wykorzystującej drugą wiązkę jako źródło fali: 100 MV/m

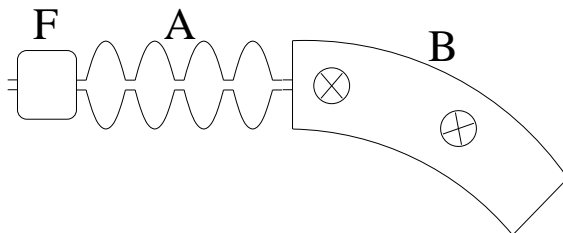
# Akceleratory

## Akcelerator kołowy

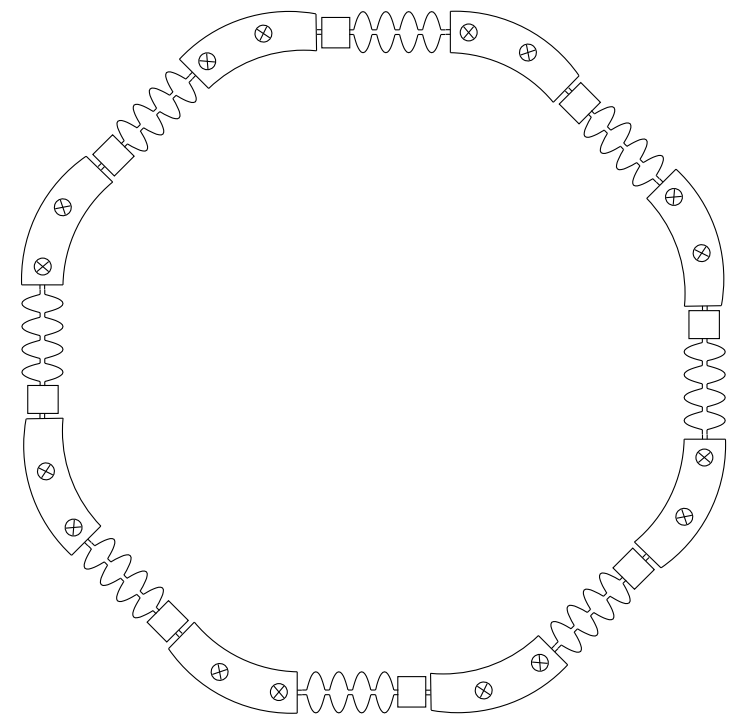
W praktyce akceleratory kołowe zbudowane są z wielu powtarzających się segmentów:

Każdy segment składa się z

- wnęk przyspieszających (A)
- magnesów zakrzywiających (B)
- układów ogniskujących (F)



Schemat akceleratora:



# Akceleratory

## LEP/LHC

Największy zbudowany dotąd akcelerator: **LEP** w CERN pod Genewą, obwód 27 km. Zderzał **przeciwbieżne wiązki elektronów i pozytonów** do energii  $\sim 100$  GeV.

W tym samym tunelu zbudowano następnie **LHC**, który zderza **przeciwbieżne** wiązki protonów o energii **3.5-4 TeV** (docelowo 7 TeV).

Docelowo 2800 "paczek" po  $10^{11}$  protonów.

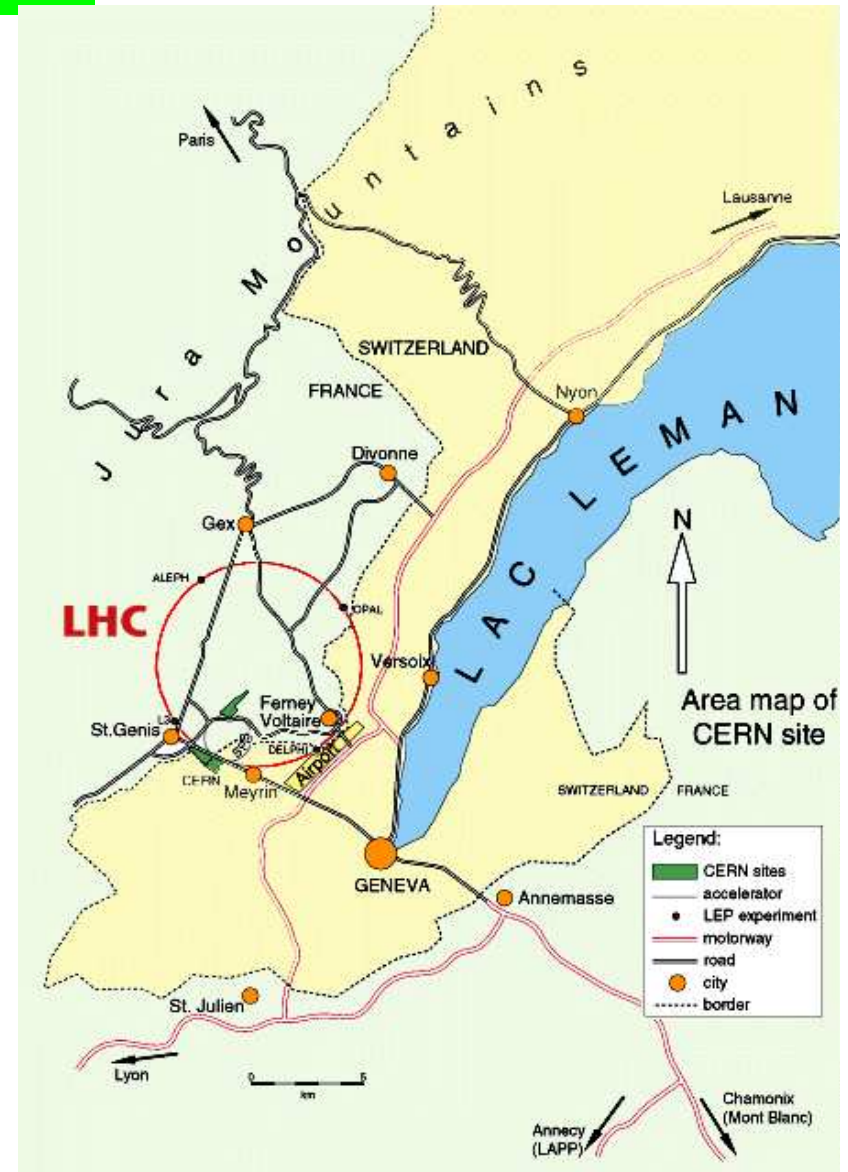
Energia jednej paczki:  $\sim 10^5$  J

Samochód osobowy jadący ok. 60 km/h

Całkowita energia wiązek:  $\sim 6 \cdot 10^8$  J

Energia pola magnetycznego:  $\sim 10^{10}$  J

Airbus A380 lecący z prędkością 700 km/h.





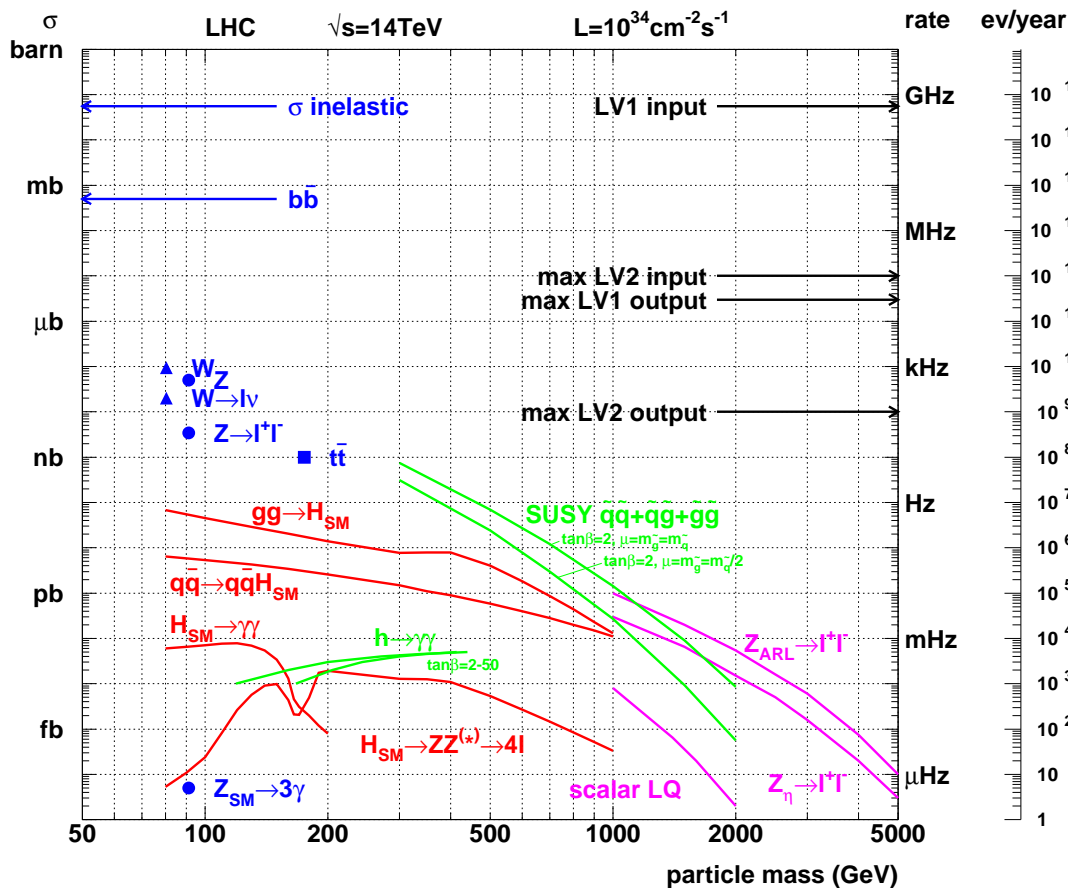
# LHC, CERN, Genewa





# Higgs w LHC

Cząstka Higgsa zajmuje bardzo **szczególne miejsce** w teorii i ma **szczególne własności**, jej **poszukiwanie** i **pomiar jej parametrów** jest jednym z głównych tematów badań w LHC



Jednak w zderzeniach  $pp$  mamy jest bardzo duże tło innych procesów, głównie z produkcją kwarków.

Bozon Higgsa rozpada się najchętniej na **najcięższe dostępne** cząstki, dla mas  $m_h < 135$  GeV dominuje rozpad na  $b\bar{b}$ .

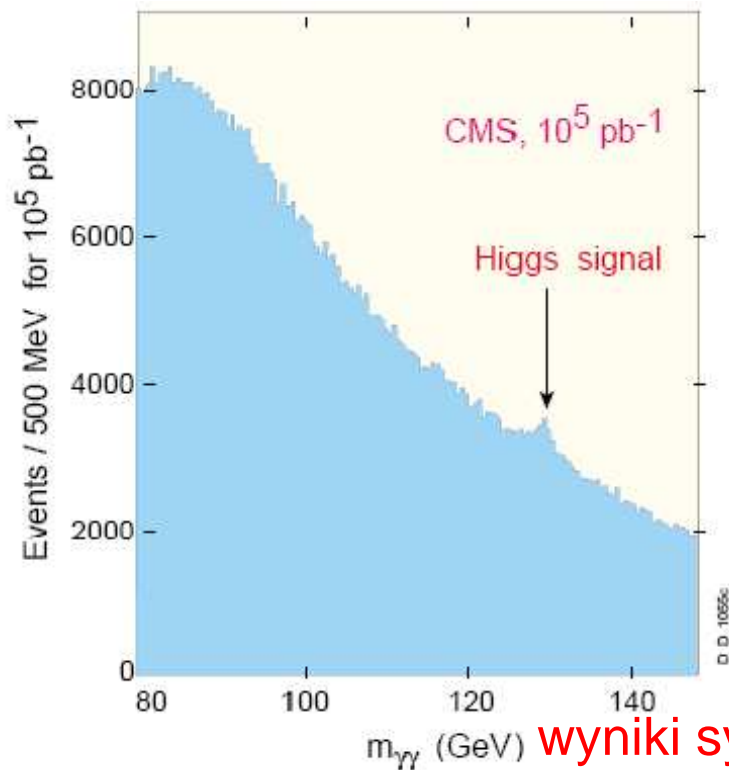
Musimy szukać kanałów o niskim tle...

# Higgs w LHC

Dla małych mas najlepszy kanał to

$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

Tło jest duże, ale powinniśmy zobaczyć Higgosa w rozkładzie **masy niezmienniczej**



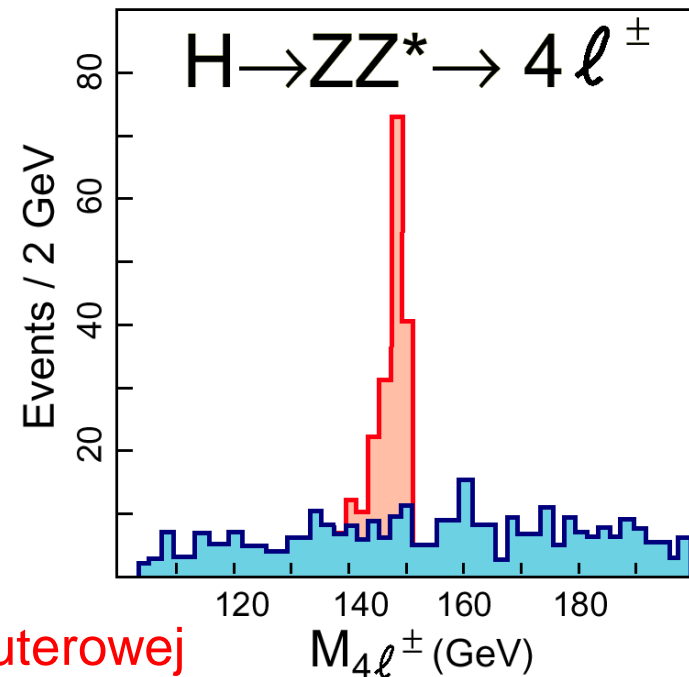
wyniki symulacji komputerowej

Obiecujący jest też kanał:

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

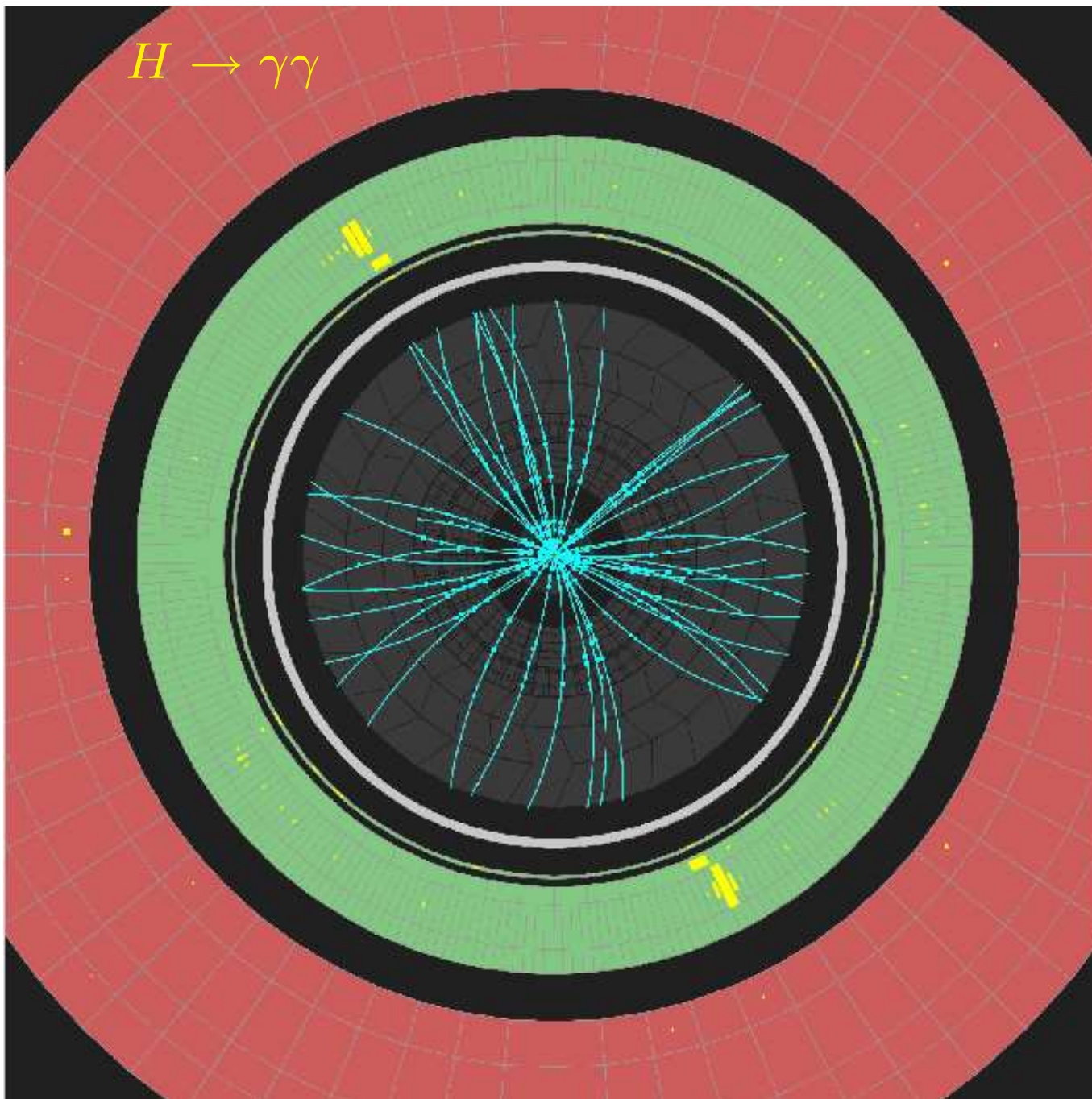
gdyż naładowane leptony ( $e^\pm$  i  $\mu^\pm$ ) można **łatwo zidentyfikować**.

Ale jest mało przypadków...



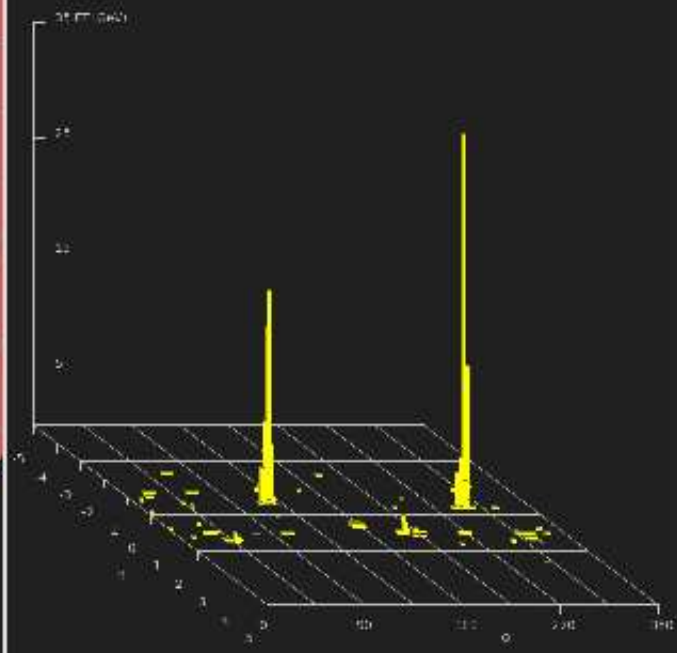


$H \rightarrow \gamma\gamma$



Run Number: 191426, Event Number: 86694500

Date: 2011-10-22 15:30:29 UTC



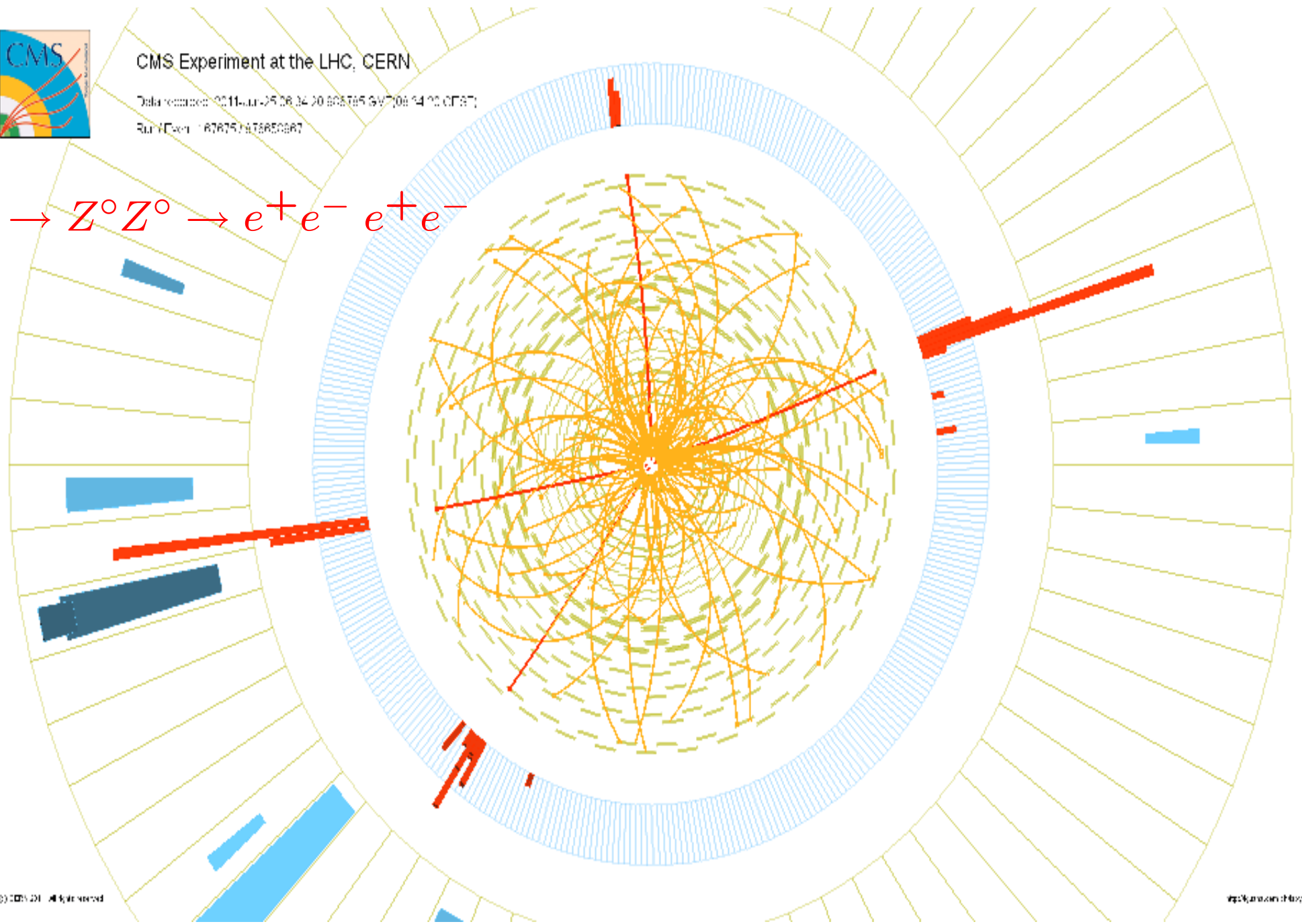


CMS Experiment at the LHC, CERN

Date recorded: 2011-Jul-25 06:34:20 (635745.6V7(06:34:20 CEST))

Run/Evt: 187675/476650987

$$H \rightarrow Z^0 Z^0 \rightarrow e^+ e^- e^+ e^-$$

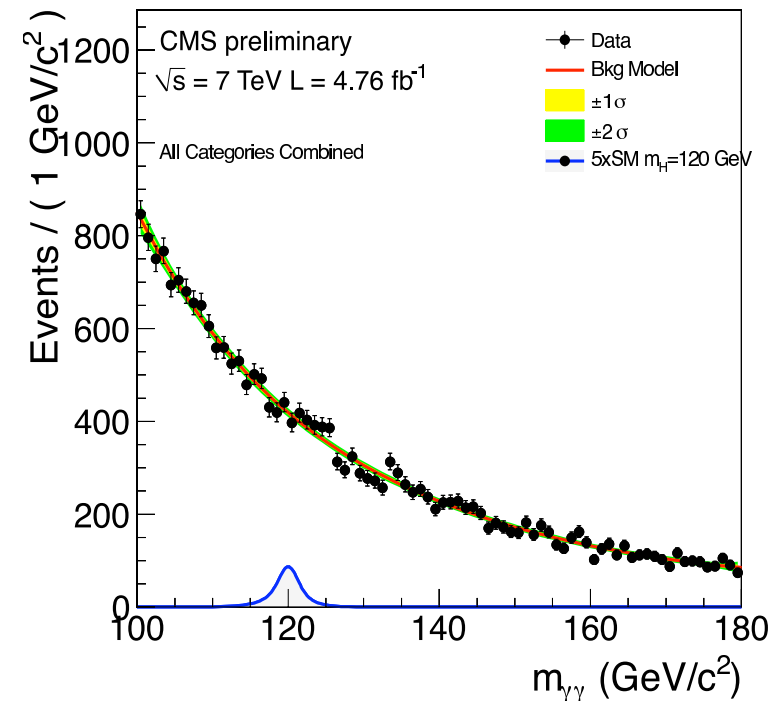
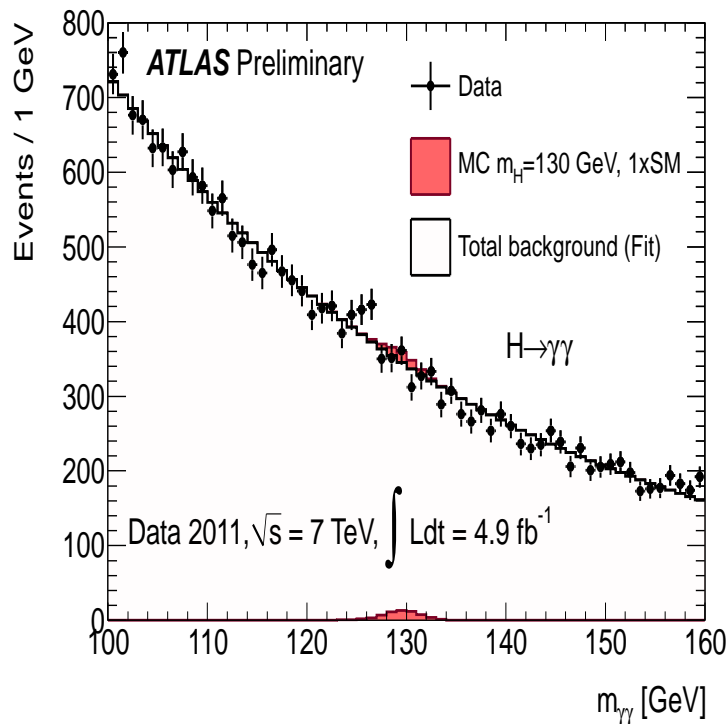


# Higgs w LHC

W grudniu 2011 eksperymenty **ATLAS** i **CMS** przy LHC przedstawiły pierwsze wyniki poszukiwania bozonu Higgsa w zebranej w latach 2010-2011 próbce danych.

Statystyki przypadków wciąż były bardzo małe

$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

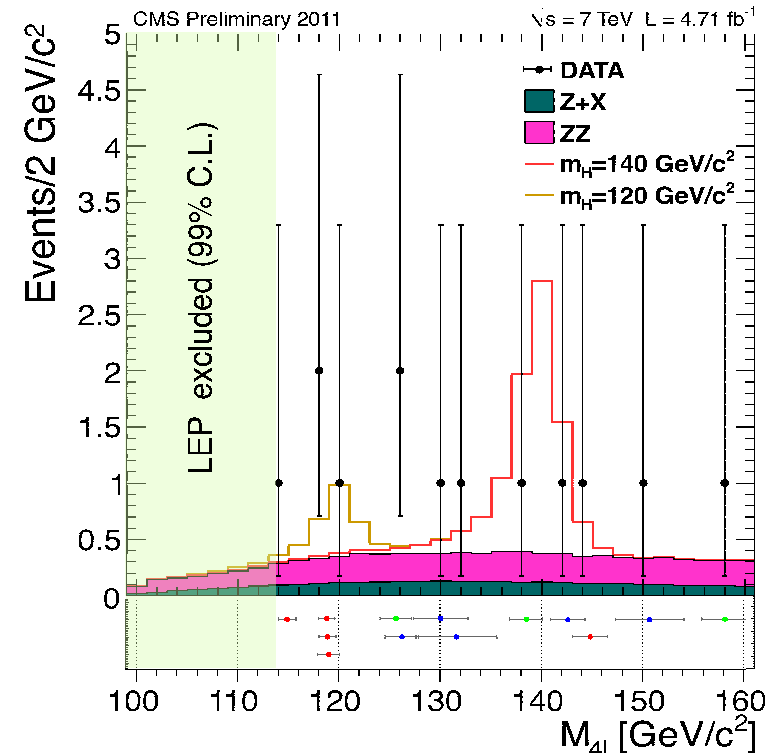
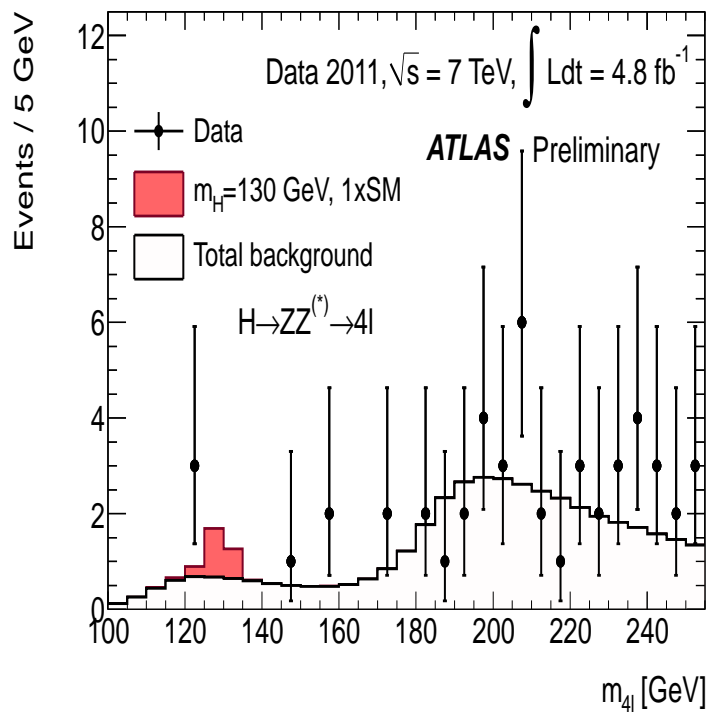


# Higgs w LHC

W grudniu 2011 eksperymenty **ATLAS** i **CMS** przy LHC przedstawiły pierwsze wyniki poszukiwania bozonu Higgsa w zebranej w latach 2010-2011 próbce danych.

Statystyki przypadków wciąż były bardzo małe

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



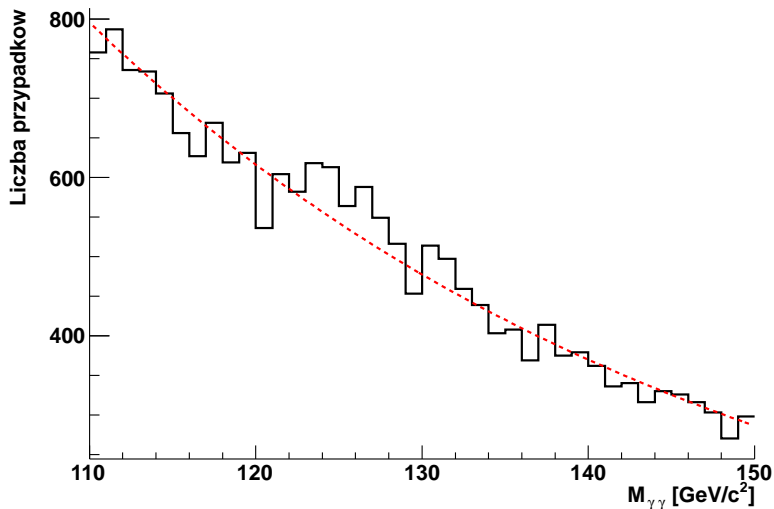
# Higgs w LHC

Przy tak małych statystykach musimy być bardzo ostrożni!

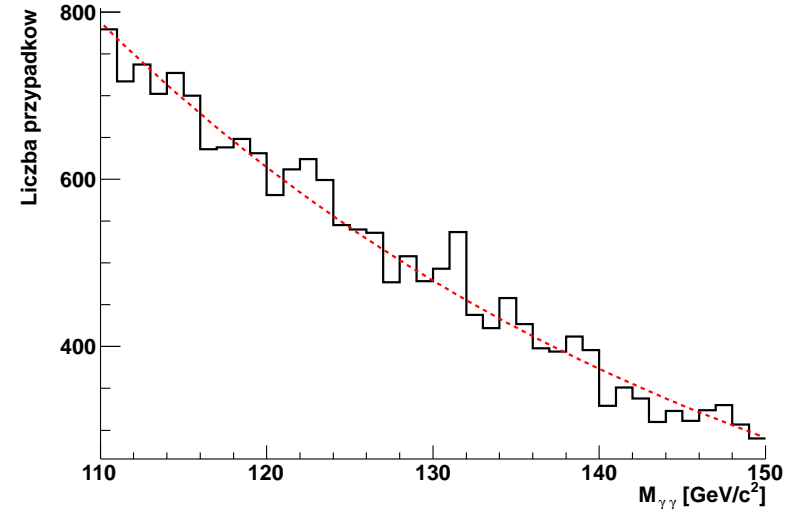
Nawet jeśli dla jakiejś masy widzimy nadmiar przypadków to może to być fluktuacja statystyczna, tym bardziej prawdopodobna, że szukamy jej w szerokim zakresie mas

Ilustracja w oparciu o symulację tzw. metodą Monte Carlo

Dwie próbki po 20'000 przypadków



1% przypadków produkcji Higgsa



samo tło

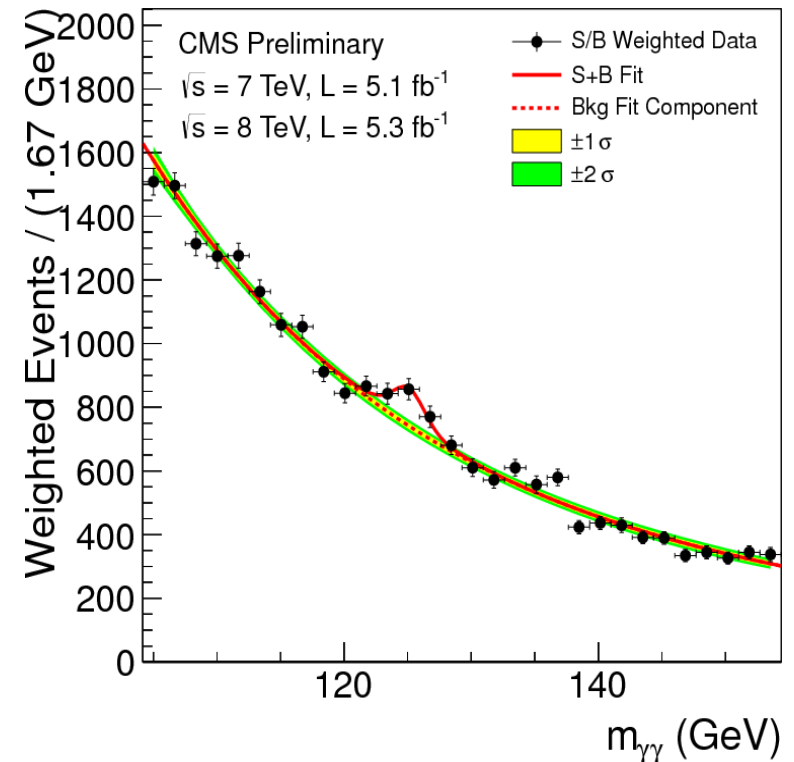
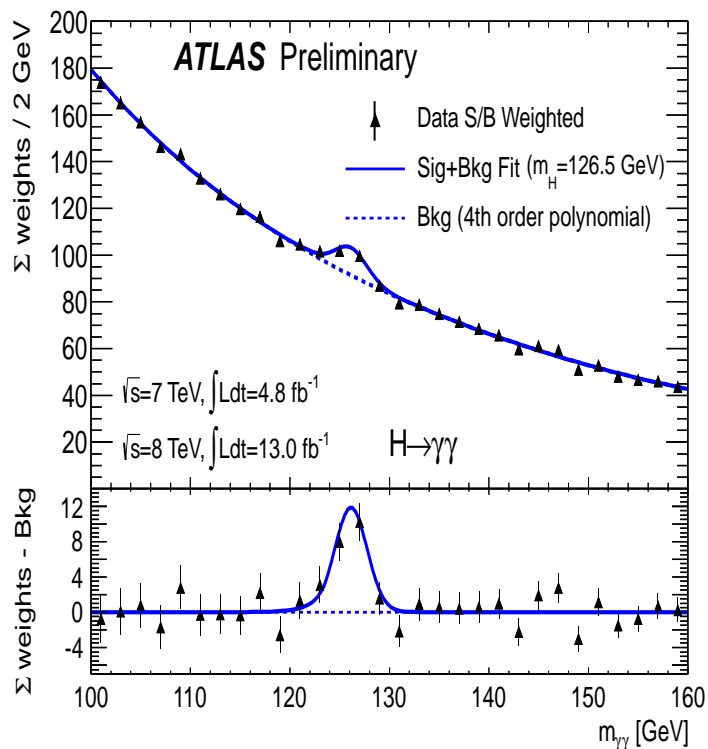


# Higgs w LHC

Nowe wyniki **ATLAS** i **CMS** przedstawione w listopadzie, po uwzględnieniu danych zebranych w roku 2012.

Ponad trzykrotny wzrost statystyki!

Sygnal widoczny ponad wszelką wątpliwość



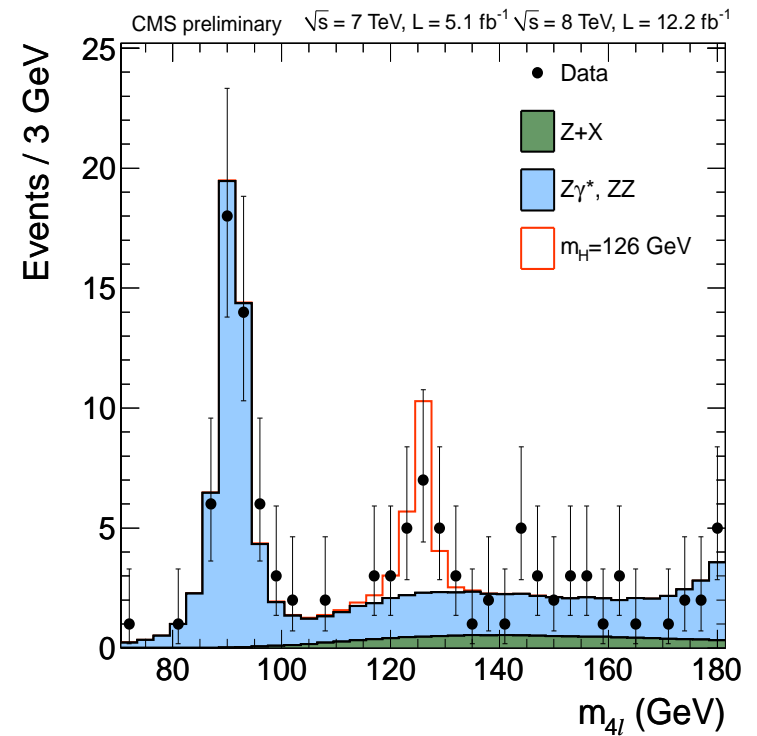
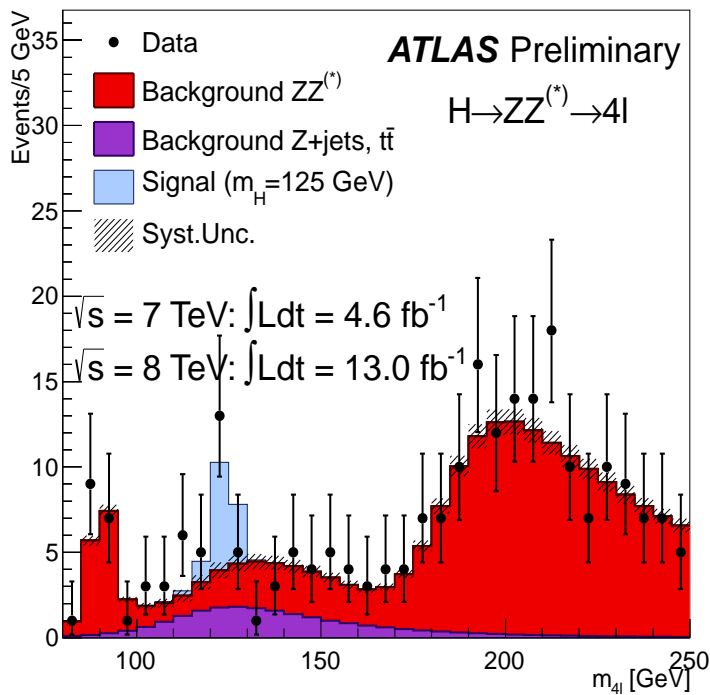
# Higgs w LHC

Nowe wyniki **ATLAS** i **CMS** przedstawione w listopadzie, po uwzględnieniu danych zebranych w roku 2012.

Ponad trzykrotny wzrost statystyki!

Sygnal widoczny ponad wszelką wątpliwość

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



# Higgs w LHC

## Podsumowanie

Rok 2012 był przełomowy dla fizyki cząstek elementarnych.

Eksperymenty **ATLAS** i **CMS** odkryły nową cząstkę, której właściwości odpowiadają poszukiwanemu od 40 lat **bozonowi Higgsa**.

Jest to sukces tysięcy naukowców, inżynierów i techników, którzy od **ponad 20 lat** przygotowywali eksperymenty przy LHC.

Jest to równocześnie **początek nowej ery badań**:

- musimy dokładnie zmierzyć własności odkrytej cząstki, **sprawdzić czy są takie jak teoria przewiduje**,
- będziemy szukać kolejnych nowych stanów, **w szczególności cząstek tzw. ciemnej materii**

**Ale to już temat na oddzielny wykład...**



# Podsumowanie wykładu

Najważniejsze elementy wykładu.

Co staraliśmy się Państwu pokazać/przekazać:

- uniwersalność praw fizyki  $\Leftrightarrow$  względność opisu  
musimy zawsze sprawdzić warunki stosowalności przyjętego modelu
- prostotę równań ruchu  
Dla fizyka są najważniejsze. Rozwiązywanie ich to już matematyka...
- potęgę praw zachowania  
Dzięki nim możemy znacznie uprościć rozważane zagadnienia...
- prostota i piękno transformacji Lorentza  
spójność opisu mimo wielu pozornych paradoksów  
nie można być fizykiem nie rozumiejąc szczególnej teorii względności !
- związki z fizyką współczesną  
Mechanika jest "fundamentem" całej fizyki...

# Podsumowanie wykładu

Najważniejsze zagadnienia wymagane na egzaminie ustnym:  
(na ocenę **dostateczną** i **dobrą**)

## Postawy fizyki

- Budowa materii
- Układ jednostek SI, jednostki pochodne
- Fizyka klasyczna, relatywistyczna i kwantowa
- Błędy pomiarowe

## Kinematyka

- Ruch, prędkość, przyspieszenie
- Ruch jednostajny, jednostajnie przyspieszony
- Ruch harmoniczny, po okręgu

# Podsumowanie wykładu

## Równania ruchu

- Zasady dynamiki w ujęciu Newtona
- Pojęcie układu inercjalnego
- Równania ruchu i zasada przyczynowości  
rozwiązywanie prostych przykładów
- Ruch w jednorodnym polu elektrycznym i magnetycznym
- Opory ruchu
- Więzy
- Wahadło matematyczne
- Układy nieinercjalne, siła odśrodkowa i siła Coriolisa

# Podsumowanie wykładu

## Prawa zachowania

- Zasady zachowania pędu i momentu pędu
- Zderzenia niesprężyste
- Siły zachowawcze i zasada zachowania energii
- Zderzenia elastyczne
- Prawa Keplera, tory ruchu w polu sił centralnych
- Ruch ciała o zmiennej masie
- Zderzenia niecentralne
- Doświadczenie Rutherforda

# Podsumowanie wykładu

## Bryła sztywna

- Równowaga bryły sztywnej
- Dynamika ruchu wokół ustalonej osi:  
moment bezwładności, równania ruchu, energia ruchu,  
rozwiązywanie prostych zagadnień, np. walec na równi pochyłej
- Żyroskop i precesja
- Tensor momentu bezwładności, osie główne

# Podsumowanie wykładu

## Szczególna Teoria Względności

- Transformacja położenia i czasu
- Dylatacja czasu i skrócenie Lorentza
- Interwał czasoprzestrzenny i przyczynowość
- Pęd i energia cząstki relatywistycznej
- Transformacja energii i pędu, masa niezmiennicza
- Wykres Minkowskiego
- Paradoks bliźniąt
- Zderzenia relatywistyczne, rozpady cząstek
- Foton jako cząstka, efekt Dopplera

# Egzamin

Uzyskanie pozytywnej oceny końcowej z wykładu możliwe jest po pozytywnym zaliczeniu części rachunkowej i zdaniu egzaminu **teoretycznego**.

## Część rachunkowa

Zaliczenie części rachunkowej odbywa się na podstawie **obecności** na ćwiczeniach, dwóch kolokwiów, punktów z kartkówek i części rachunkowej egz. pisemnego.

- **Obecność na ćwiczeniach obowiązkowa.**
- W ramach kolokwiów: po 3 zadania rachunkowe, maksymalnie po 5 punktów.
- Na ćwiczeniach: 10 kartkówek, maksymalnie 10 punktów.

Dopuszczenie do egzaminu pisemnego: łącznie przynajmniej 15 punktów (na 40).

- Egzamin pisemny: 4 zadania rachunkowe, maksymalnie po 5 punktów.

Do zaliczenia konieczne jest uzyskanie łącznie przynajmniej 25 punktów.

# Egzamin

## Egzamin pisemny

W dniu **29 stycznia 2013**, godz. **13<sup>00</sup> – 18<sup>00</sup>**,  
Sala Duża Doświadczalna + Aula (Hoża)

Lista osób dopuszczonych do egzaminu będzie wywieszona w internecie.  
Informacja o zaliczeniu ćwiczeń będzie też w systemie USOS.

**Bardzo prosimy o wcześniejsze sprawdzenie przydzielonej sali i punktualne przybycie!**

Egzamin będzie się składał z dwóch części:

- test “teoretyczny” ⇒ 45 minut  
krótka przerwa
- 4 zadania rachunkowe ⇒ 3 godziny 30 minut



# Egzamin

Test “teoretyczny” tak jak na kolowjach

30 pytań z materiału przedstawionego na wykładach  
(teoria, wzory, proste problemy rachunkowe)

W miarę możliwości równomiernie rozłożonych tematycznie (2-3 pytania na wykład)

Do każdego pytania 4 odpowiedzi, z czego **dokładnie jedna** prawidłowa.

Punktacja:

- dobra odpowiedź  $\Rightarrow +1$
- zła odpowiedź  $\Rightarrow -0.5$  (losowe skreślanie nie opłaca się)

Zadania rachunkowe tak jak na kolowjach

4 zadania z całego materiału przerabianego na ćwiczeniach

Materiał obowiązujący do obu kolokwiów (2 zadania)

+ teoria względności (2 zadania)

# Egzamin

## Zaliczenie części rachunkowej

Do egzaminu pisemnego dopuszczone będą tylko te osoby, które z kolokwiów uzyskały przynajmniej 15 punktów.

W przeciwnym wypadku, część rachunkowa egzaminu pisemnego będzie traktowana jako kolokwium poprawkowe (osoby te nie piszą testu).

W obu przypadkach warunkiem jest też wymagana obecność na ćwiczeniach.

Do zaliczenia części rachunkowej konieczne jest uzyskanie łącznie (kolokwia + część rachunkowa egzaminu) przynajmniej 25 punktów.

Zaliczenie części rachunkowej jest niezbędne do zdania egzaminu!

Osoby, które z kolokwiów uzyskały nie mniej niż 15 punktów, ale miały zbyt dużo nieobecności na ćwiczeniach będą dopuszczone do egzaminu w sesji poprawkowej.

# Egzamin

Po porównaniu wyników części rachunkowej (+kolokwia) oraz wyniku testu (+ testy kolokwialne) ⇒ propozycja oceny

Egzamin ustny 1 i 2 lutego,

Tylko dla osób, które zaliczyły część rachunkową, w przypadku gdy:

- wyniki nie pozwalają na jednoznaczną ocenę  
lub
- chcą poprawić zaproponowaną ocenę  
poprawiając wyniki testu teoretycznego
- nie ma możliwości poprawienia oceny w przypadku złych wyników obu części (rachunkowej i teoretycznej)

# Egzamin poprawkowy

## Egzamin pisemny

W dniu 4 marca 2013 (poniedziałek), godz. 8<sup>00</sup> – 12<sup>00</sup>

Organizacja jak w pierwszym terminie...

## Egzamin ustny

Prawdopodobnie 7 i ew. 8 marca...



**KAPITAŁ LUDZKI**  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

**UNIA EUROPEJSKA**  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Projekt współfinansowany ze środków Unii Europejskiej  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego