

Testy Modelu Standardowego i poszukiwanie bosonu Higgsa

prof. dr hab. Aleksander Filip Żarnecki

Wszechświat Cząstek Elementarnych

Wykład 11

- bozony W^\pm i Z^0
- kwark t
- poszukiwania bosonu Higgsa
- najnowsze wyniki LHC

Wprowadzenie

Nagrody Nobla

1979 - Sheldon L. **Glashow**, Abdus **Salam** i Steven **Weinberg**

Za model oddziaływań elektro-słabych oraz przewidzenie istnienia bozonów W^\pm i Z^0

1984 - Carlo **Rubia** i Simon **Van der Meer**

Za odkrycie bozonów W^\pm i Z^0

1999 - Gerardus 't **Hooft** i Martinus J.G. **Veltman**

Za wykazanie spójności modelu

2004 - David J. **Gross**, H. David **Politzer** i Frank **Wilczek**

Za stworzenie podstaw opisu oddziaływań silnych

2008 - Yoichiro **Nambu** oraz Makoto **Kobayashi** i Toshihide **Maskawa**

Za odkrycie mechanizmu **spontanicznego łamania symetrii**
oraz za opisanie **mieszania kwarków** i przewidzenie 3 generacji.

Model oddziaływań elektro-słabych + **chromodynamika kwantowa** (QCD):

Model Standardowy

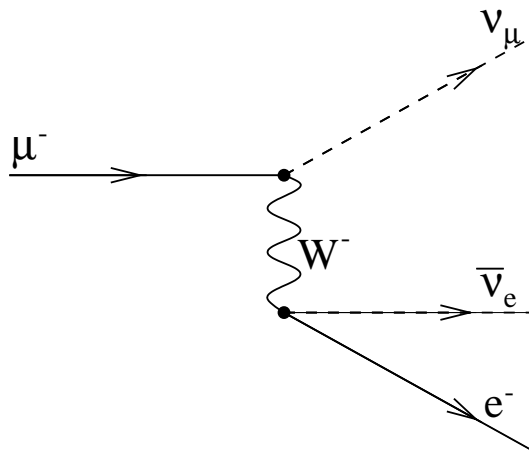
Bozony W^\pm i Z^0

Model Weinberg'a-Salam'a

Nowy model oddziaływań słabych (1968)

Oddziaływanie zachodzi przez wymianę bardzo masywnego bozonu W^\pm lub Z^0 .

Rozpad mionu:



“Słabość” oddziaływania nie wynika ze stałej sprzężenia a z **dużej masy bozonu**:

$$G_F \sim \frac{g^2}{m_W^2}$$

Przyjmując, że **sprzężenie** g powinno być takie jak dla oddziaływań **EM**, **Weinberg i Salam przewidzieli** masy W^\pm i Z^0 :

$$m_W \sim 80 \text{ GeV}$$

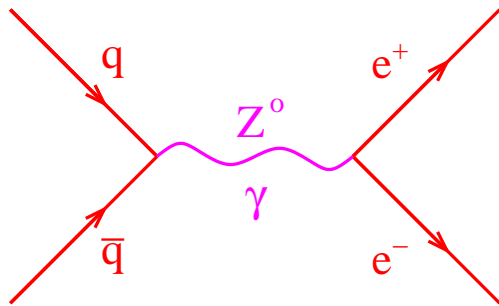
$$m_Z \sim 90 \text{ GeV}$$

Oddziaływania neutrin z wymianą bozonu Z^0 (tzw. **wymiana prądów neutralnych**) - 1973

Bozony W^\pm i Z^0

Odkrycie akcelerator SPS w CERN

W zderzeniach $p\bar{p}$ możliwa jest anihilacja pary $q\bar{q}$ w wirtualny foton lub bozon Z^0 , które następnie mogą się rozpaść na parę leptonów (e^+e^- , $\mu^+\mu^-$, $\tau^+\tau^-$):



Jest to tzw. process **Drela-Yana**. Wkład od wymiany $Z^0 \Rightarrow$ maksimum w **masie niezmienniczej** pary leptonów.

Wyniki UA1 (1983):

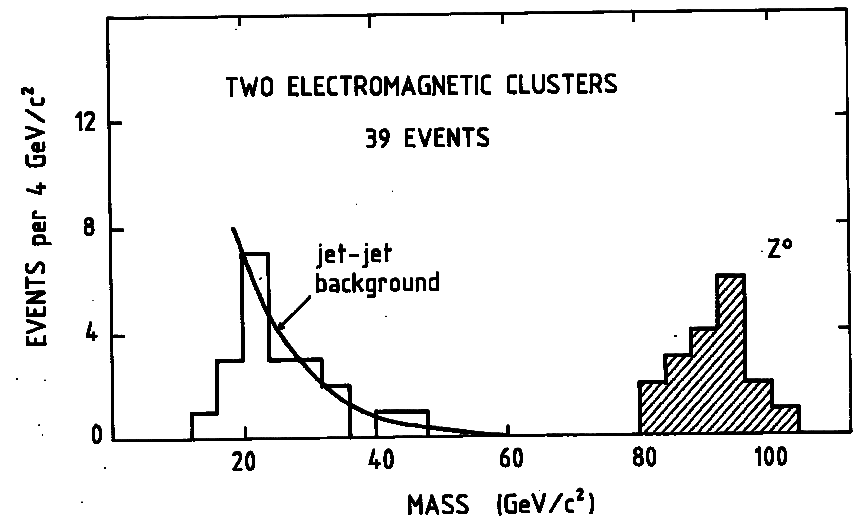
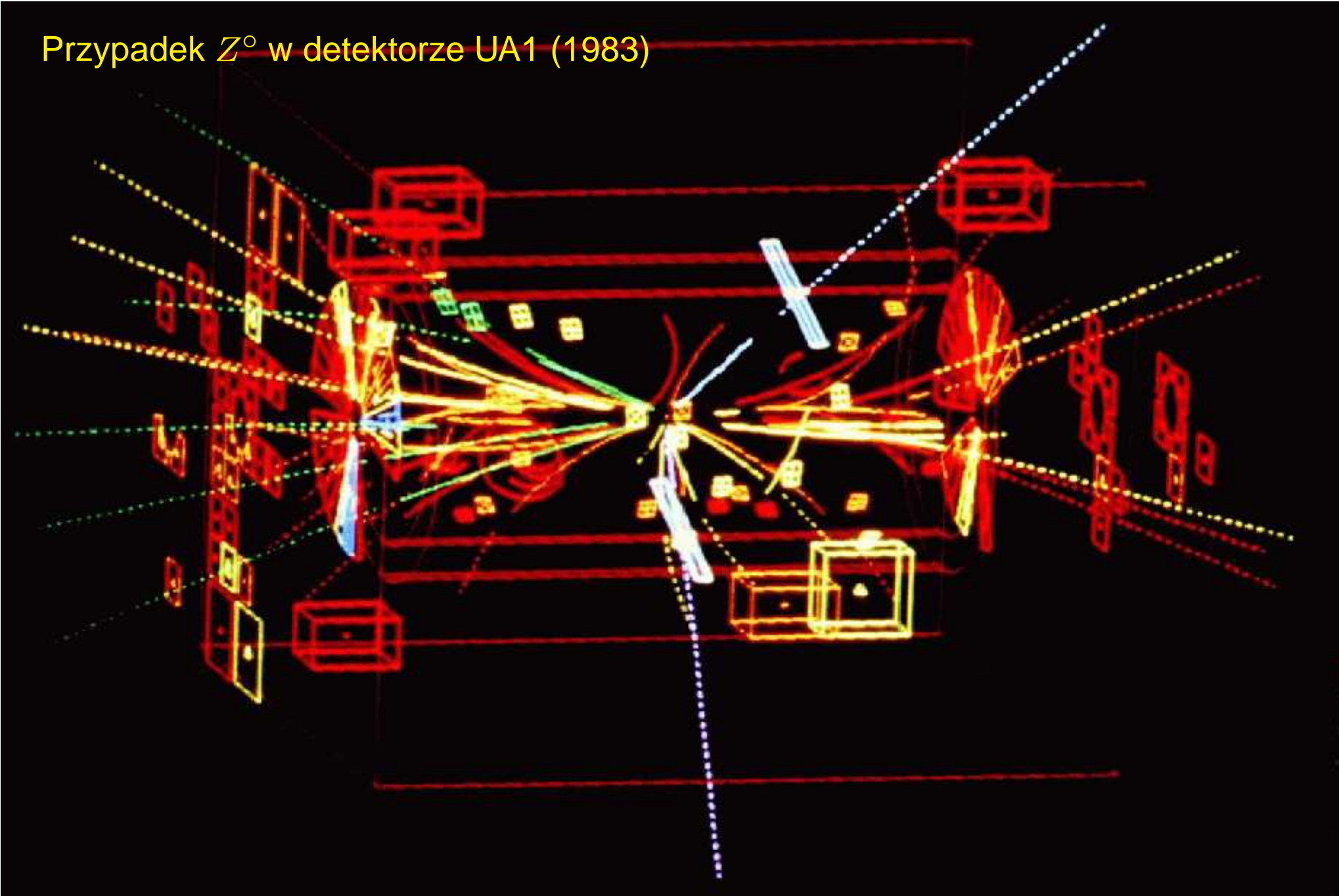


Fig. 1

Przypadek Z^0 w detektorze UA1 (1983)



Bozony W^\pm i Z^0

Odkrycie

W zderzeniach $p\bar{p}$ możliwa jest też “anihilacja” pary $q\bar{q}'$ w bozon W^\pm :

$$u\bar{d} \rightarrow W^+ \rightarrow e^+ \nu_e$$

Proces z **produkcją neutrina**

⇒ niezachowanie pędu poprzecznego

Odkrycie bozonów W^\pm i Z^0 przypisujemy eksperymentom **UA1** i **UA2** przy akceleratorze SPS w CERN.

Wyniki UA1 (1983):

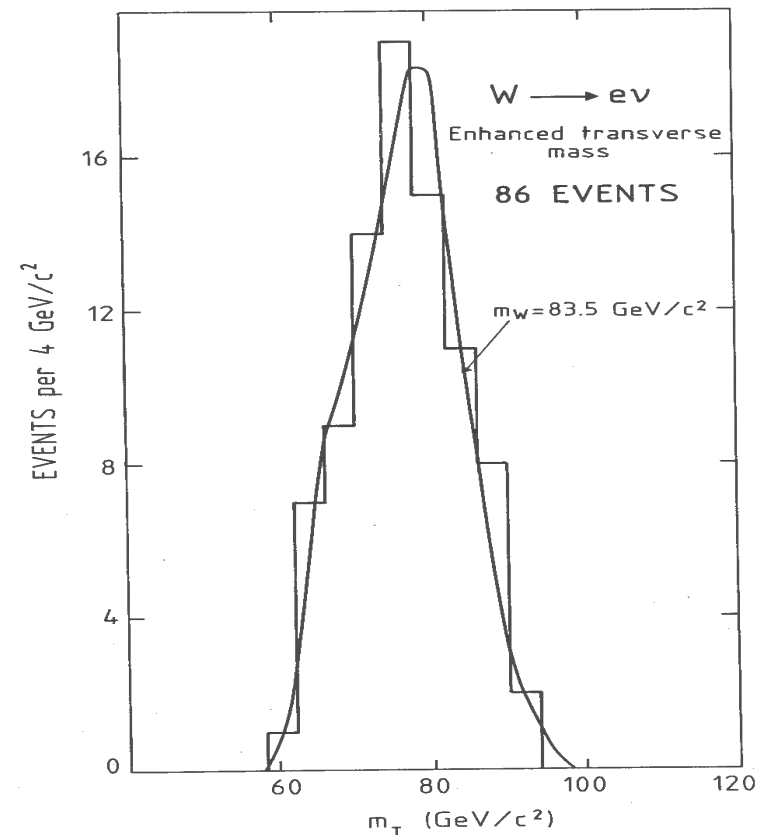
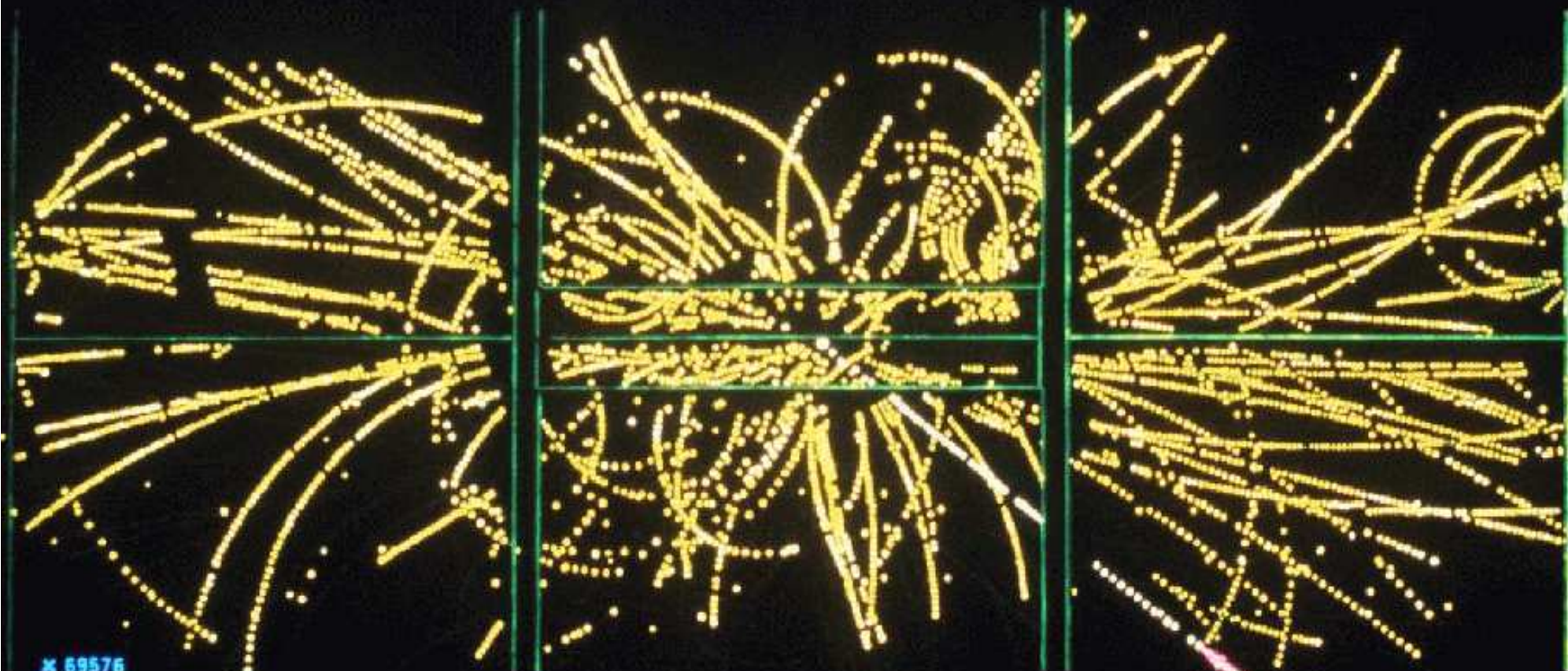


Fig. 3b

EVENT 2958. 1279. Przypadek W^- w detektorze UA1 (1983)



x 69576

LEP, CERN, Genewa

1989 - 2000: precyzyjne testy Modelu Standardowego



Bozony W^\pm i Z^0

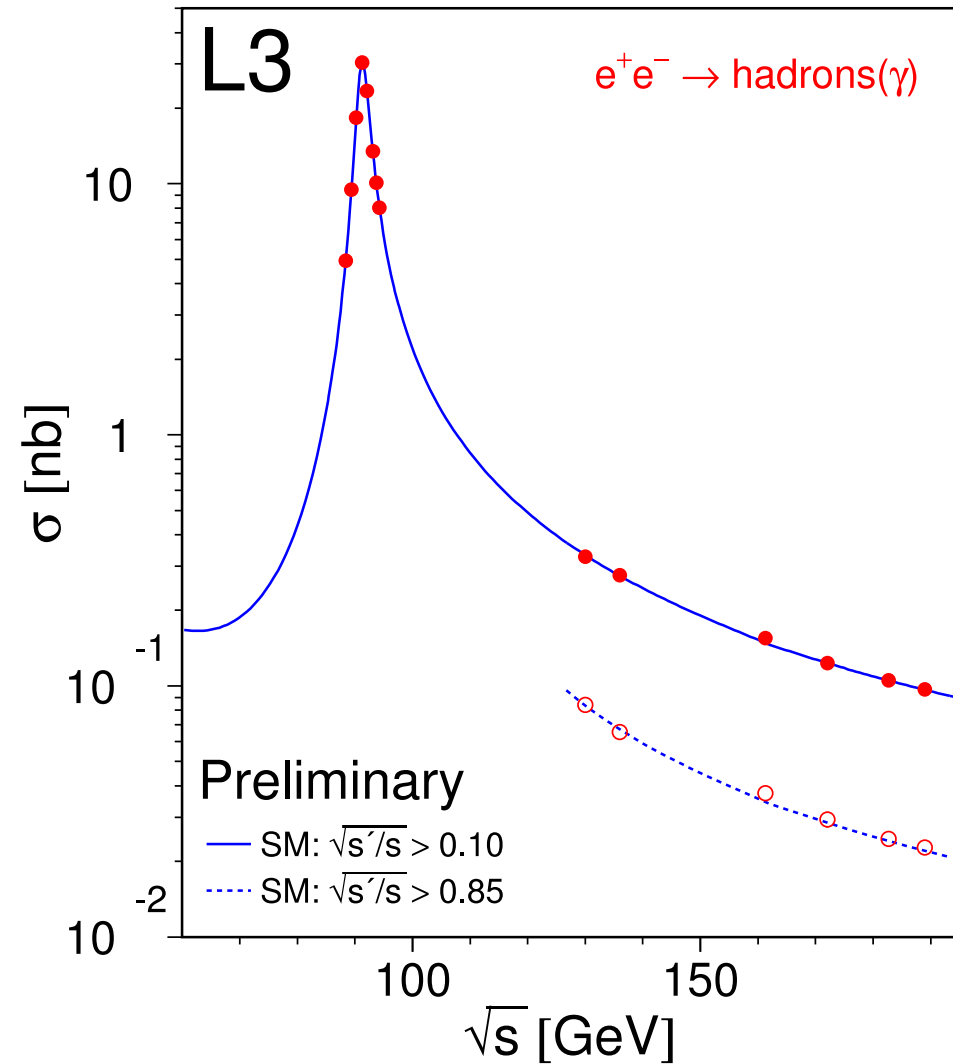


Model Standardowy został bardzo dokładnie przetestowany w zderzeniach e^+e^- w akceleratorach LEP i SLC (miliony przypadków).

W przekroju czynnym na produkcję hadronów widać wyraźne maksimum odpowiadające produkcji rzeczywistego Z^0 .

Szerokość maksimum odpowiada naturalnej szerokości bozonu Z^0 .

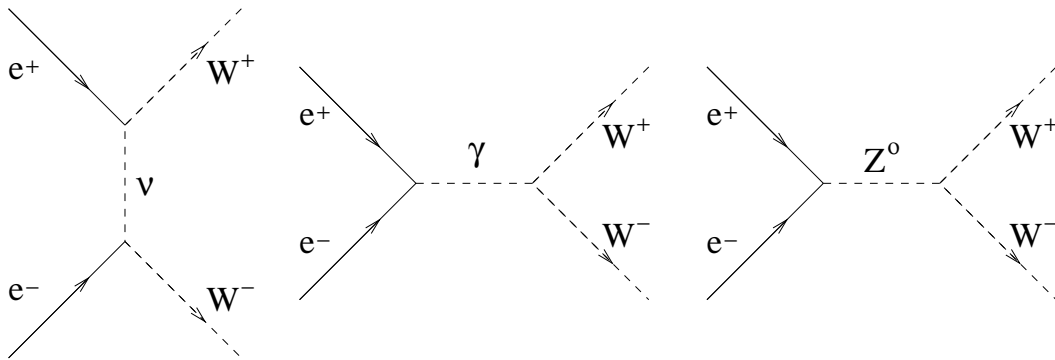
Ponieważ jest to cząstka niesłychanie krótkożyciowa, jej masa nie jest dokładnie określona...



Bozony W^\pm i Z^0

$$e^+e^- \rightarrow W^+W^-$$

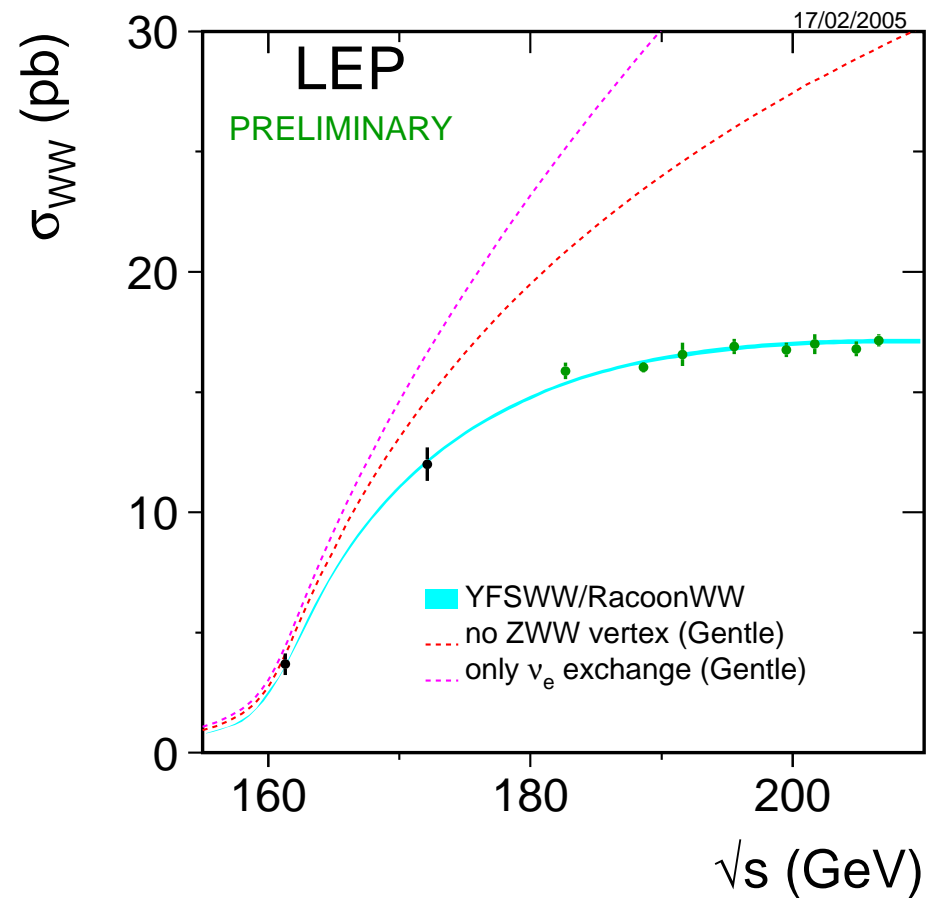
Produkcja bozonów W jedynie w parach, wkład od **trzech** różnych **procesów**:



Sprzężenia wynikają ze struktury **Modelu Standardowego**

\Rightarrow ścisłe przewidywania teoretyczne

Doświadczalnie potwierdzone **kasowanie wkładów** od różnych procesów \Rightarrow



Kwark t

Krótką historia

- 1964 - Gell-Mann i Zweig, koncepcja 3 kwarków: u, d, s
- 1970 - Glashow, Iliopoulos i Maiani proponują 4 kwarki: u, d, s, c
- 1973 - Kobayashi i Maskawa dodają 2 kwarki (t i b), żeby wytłumaczyć łamanie CP
- 1974 - Ting, Richter: odkrycie kwarku c
- 1977 - Lederman (Fermilab): odkrycie kwarku b

Własności kwarku b (ładunek, izospin, sprzężenia do bozonów cechowania) odpowiadają kwarkom “dolnym” (d i s) \Rightarrow musi istnieć “górnny” partner: **top**

Pierwsze przewidywania (reguła “3”):

$$m_s = 0.5 \text{ GeV} \quad m_c = 1.5 \text{ GeV} \quad m_b = 4.5 \text{ GeV} \quad \Rightarrow \quad m_t \sim 15 \text{ GeV}$$

Pierwsze “odkrycie”: CERN SPS, 1984, $m_t \sim 40 \text{ GeV}$ (potem odwołane)

Poszukiwany także w LEP i HERA, bez powodzenia...

Pomiary precyzyjne w LEP

Zestawienie

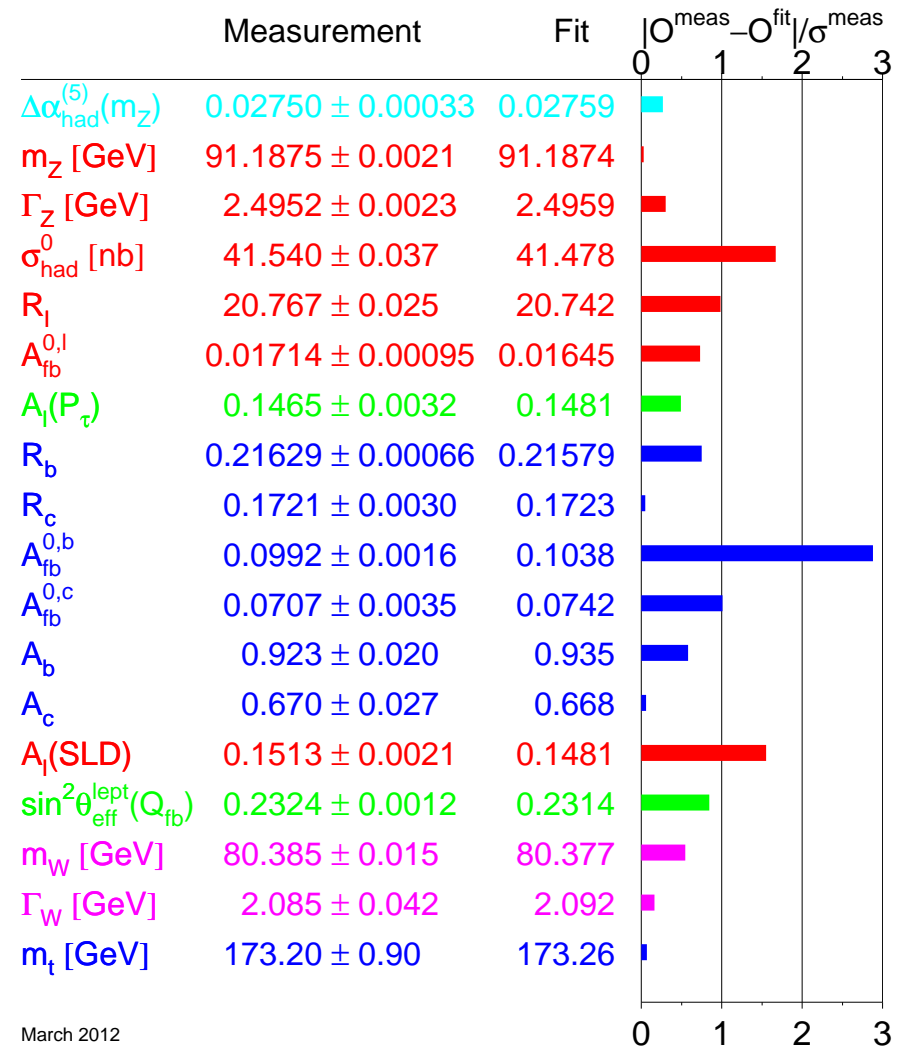
W LEP mierzono dziesiątki procesów.

Model Standardowy ma jedynie **trzy wolne parametry** opisujące oddziaływania (+ masy fermionów i Higgsa).

Można wybrać np. α_{em} , G_F , M_Z i dopasować ich wartości do danych.

Model tłumaczy wtedy **wyniki wszystkich** dotychczasowych **pomiarów** oddziaływań **elektrosłabych** !

$$\text{Miara zgodności: pull} \equiv \frac{|X_{meas} - X_{SM}|}{\sigma_X} \Rightarrow$$



March 2012

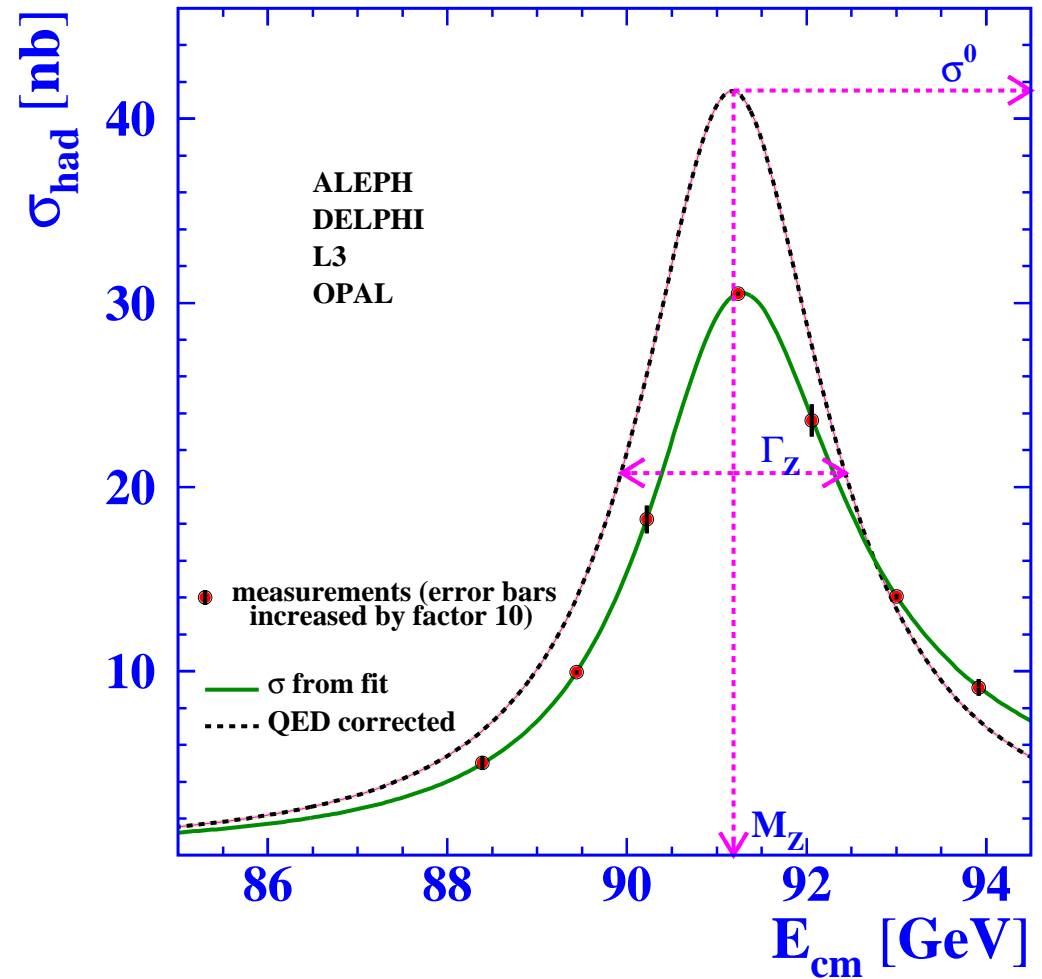
Pomiary precyzyjne w LEP

Poprawki

Wielkości fizyczne **zmierzone** w LEP **czułe** są na **poprawki** “**wyższych** **rzędów**”.

Poprawki pochodzą w szczególności od **procesów** z wirtualną wymianą **bozonu** W^\pm , **kwarku** t , **bozonu** Higgsa lub innych ciężkich cząstek...

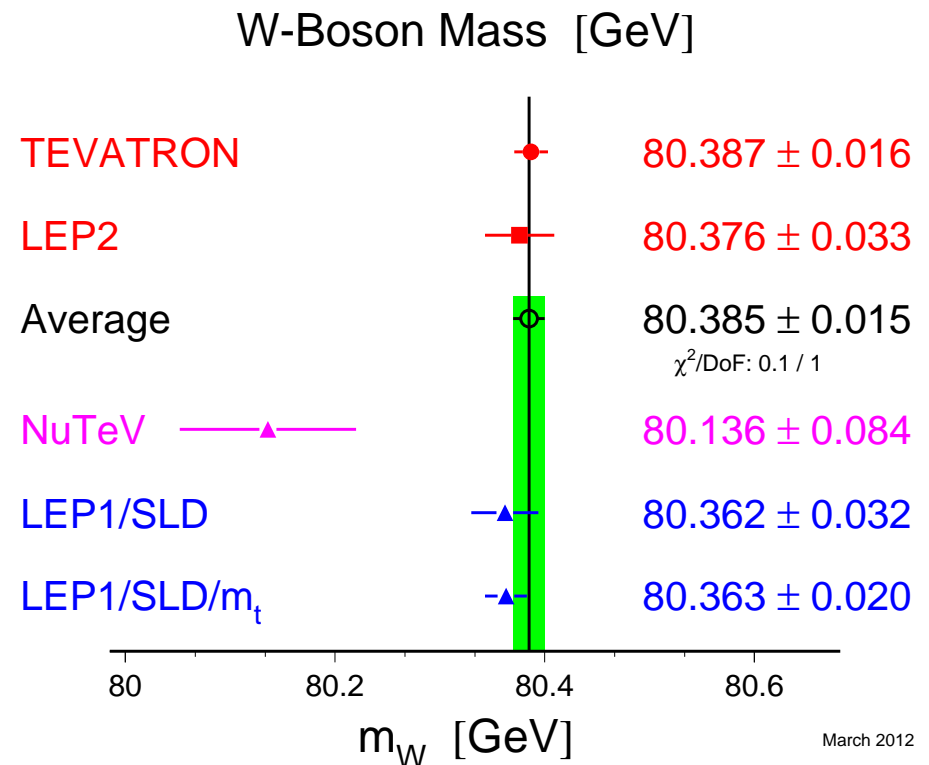
Precyzyjne pomiary w LEP i innych eksperymentach pozwalają **wnioskować** o **masach** tych cząstek, nawet jeśli ich bezpośrednio nie obserwujemy!



Pomiary precyzyjne w LEP

Poprawki

Możemy wyznaczyć **masy ciężkich cząstek** na podstawie analizy **precyzyjnych pomiarów** przy **niższych energiach**.



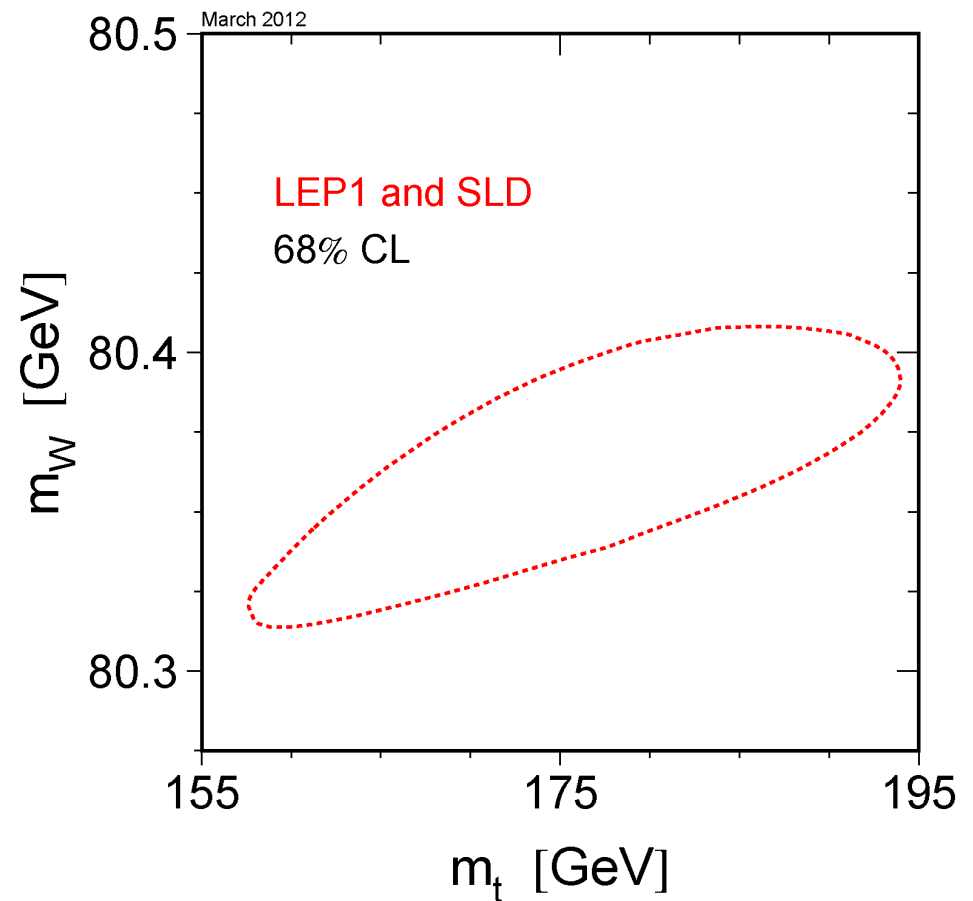
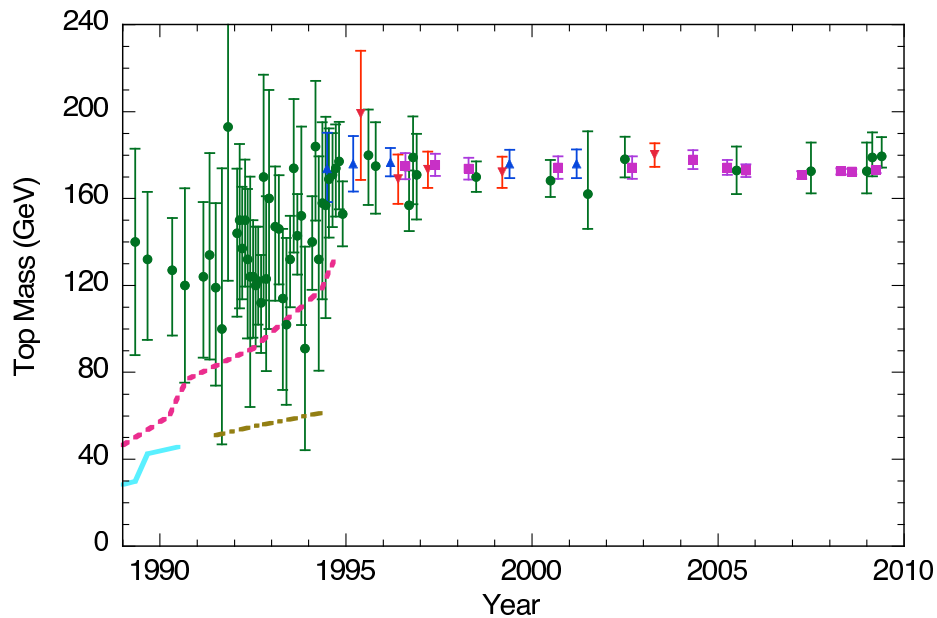
Pomiar bezpośredni zgodny z dokładnością do 0.03% z **przewidywaniami teorii** opartymi na precyzyjnych pomiarach przy niższych energiach.

Kwark t

Przewidywania

Na podstawie precyzyjnych pomiarów w LEP oczekiwano, że masa kwarku t powinna wynosić około 120-180 GeV.

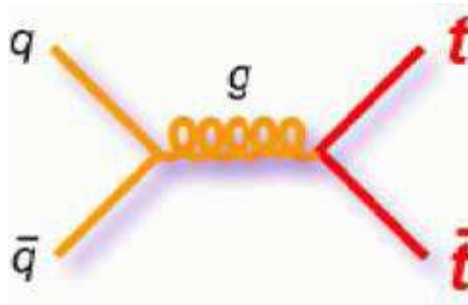
Dzisiejsze wyniki pośrednie:



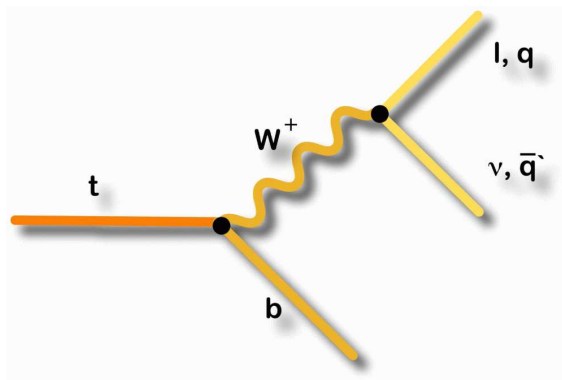
Kwark t

Tevatron zderzenia $p\bar{p}$ przy energii $\sqrt{s} \sim 2 \text{ TeV}$

Kwark t najczęściej produkowany w wyniku anihilacji kwark-antykwar:



Rozpada się prawie natychmiast (nie tworzy żadnych cząstek):



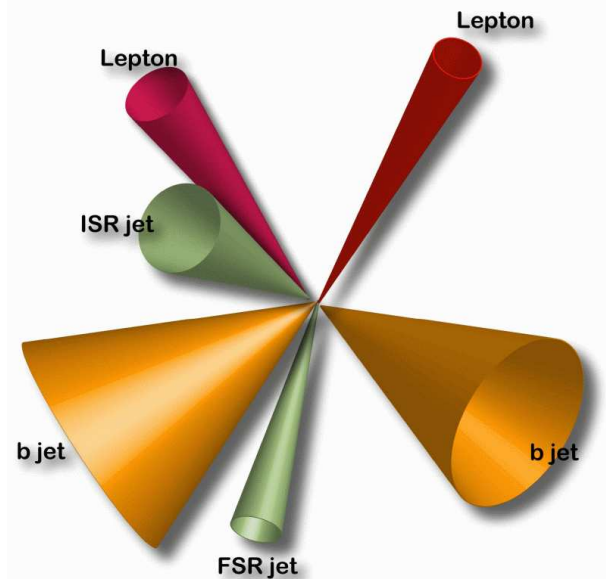
Obserwujemy powstający kwark b oraz lepton i neutrino (brakujący pęd poprzeczny) lub parę jetów o masie niezmienniczej odpowiadającej masie W

Kwark t

Tevatron

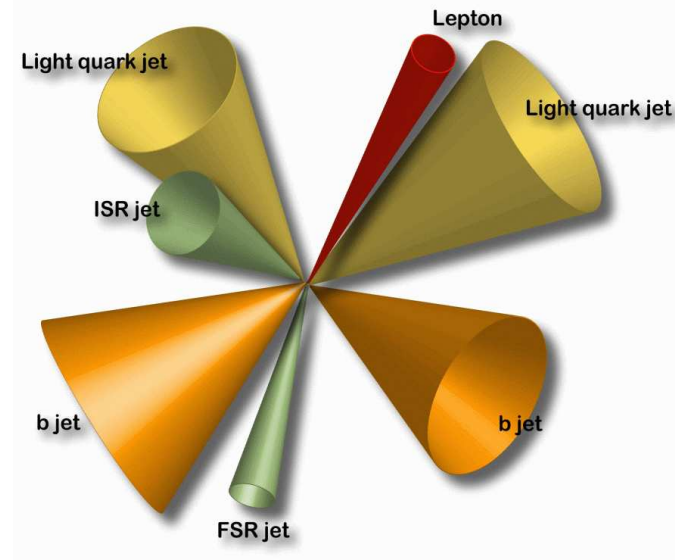
Ponieważ kwark t produkowany jest parami ($t\bar{t}$) mamy 3 możliwe klasy przypadków

leptonowe



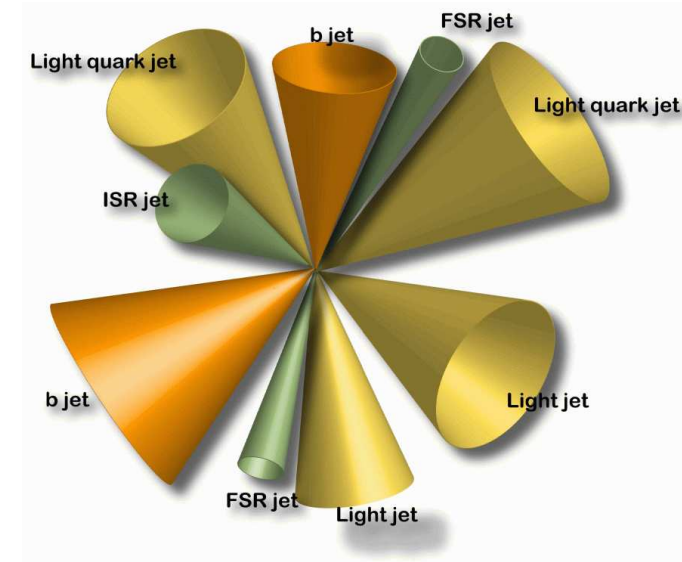
“złota próbka” ale tylko
 $\sim 4\%$ przypadków
 $(e^+e^-, \mu^+\mu^- \text{ i } e^\pm\mu^\pm)$

półleptonowe



$\sim 30\%$ przypadków
 (tylko e^\pm i μ^\pm)
 małe tło

hadronowe

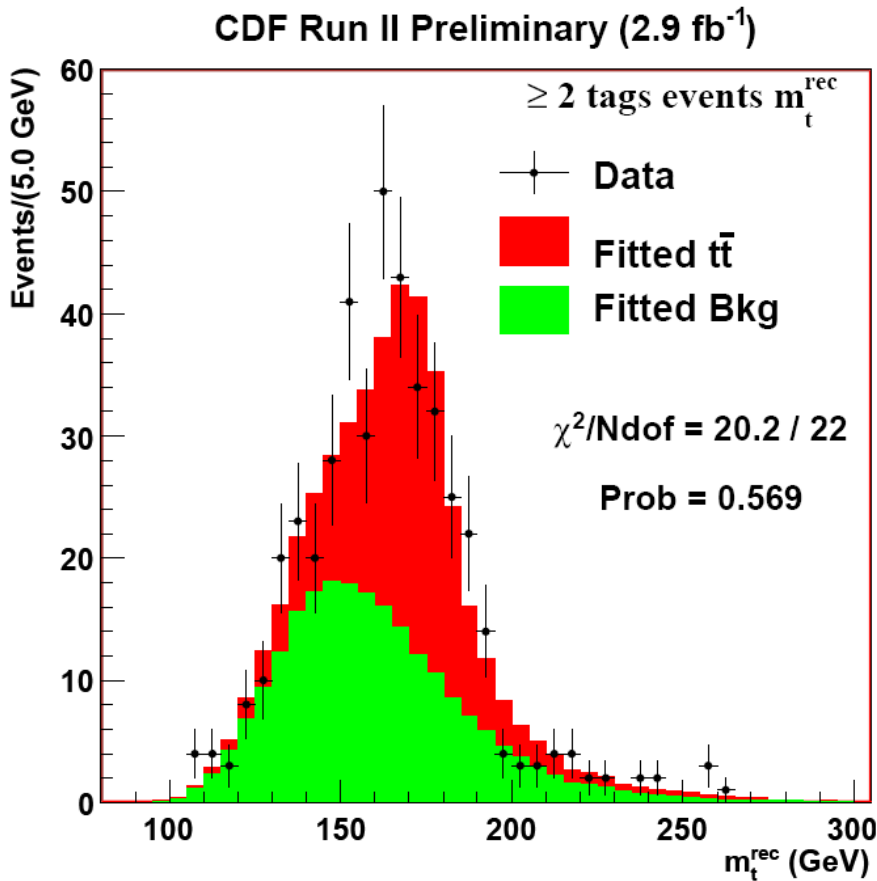


$\sim 46\%$ przypadków
 bardzo duże tło
 trudna identyfikacja

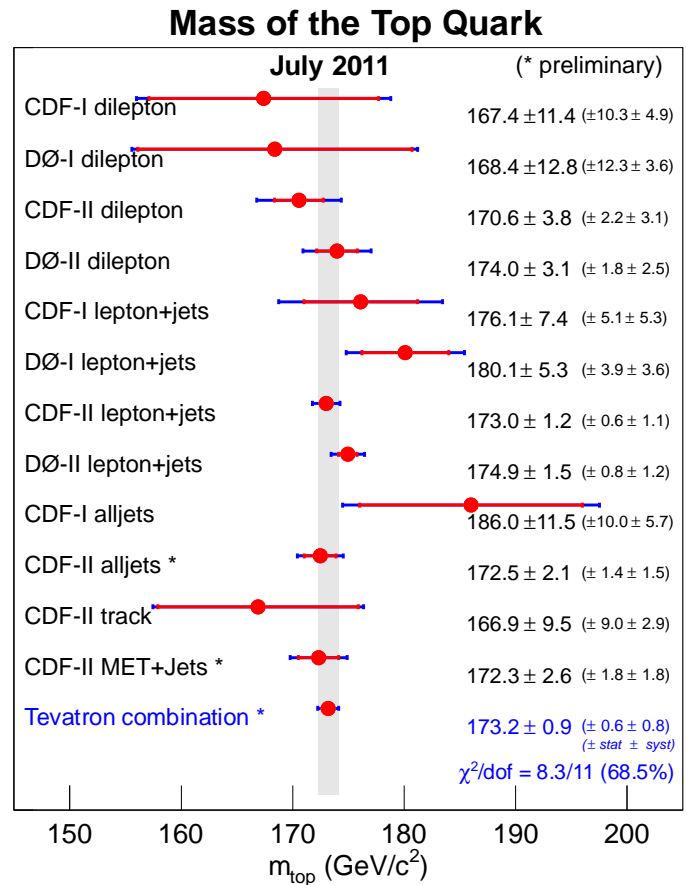
Kwark t

Tevatron

Rozkład rekonstruowanej masy kwarku t
w jednym z rozważanych kanałów



Porównanie wyników dla różnych próbek

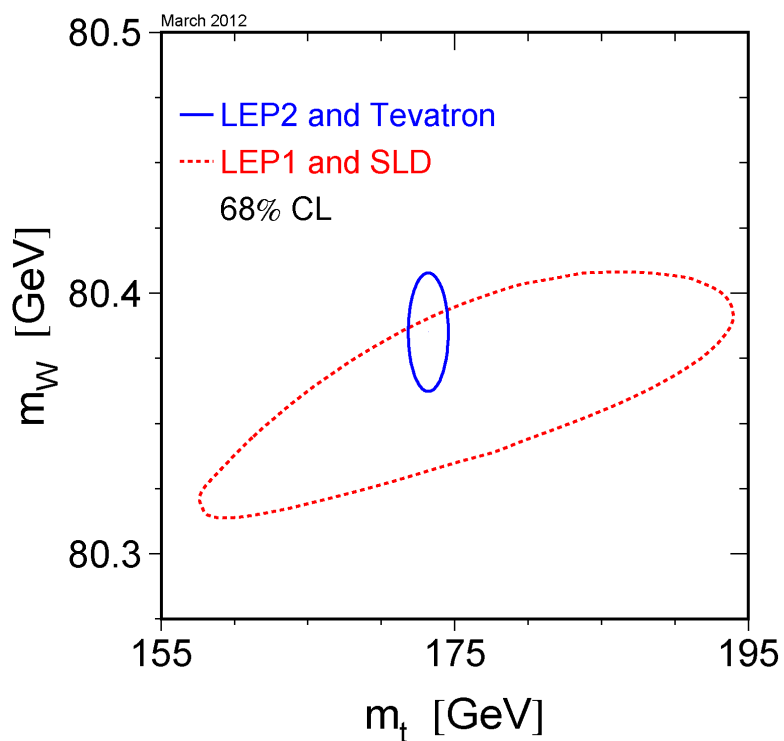


CDF + D0: $m_t = 173.2 \pm 0.9 \text{ GeV}$

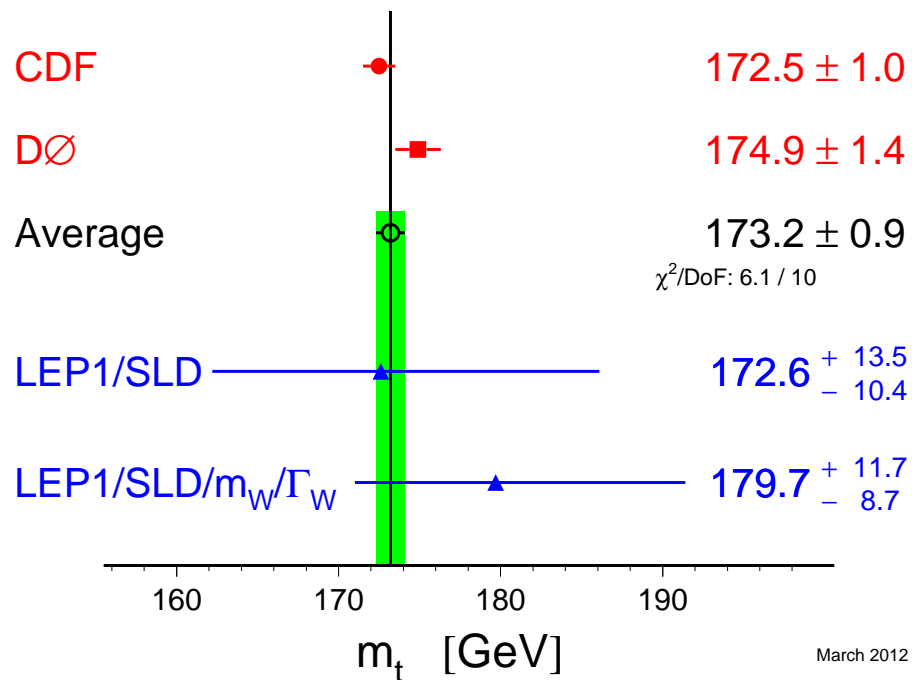
Kwark t

Porównanie

Wyniki pomiarów bezpośrednich porównane z ograniczeniami wynikającymi z precyzyjnych pomiarów przy niższych energiach.



Top-Quark Mass [GeV]

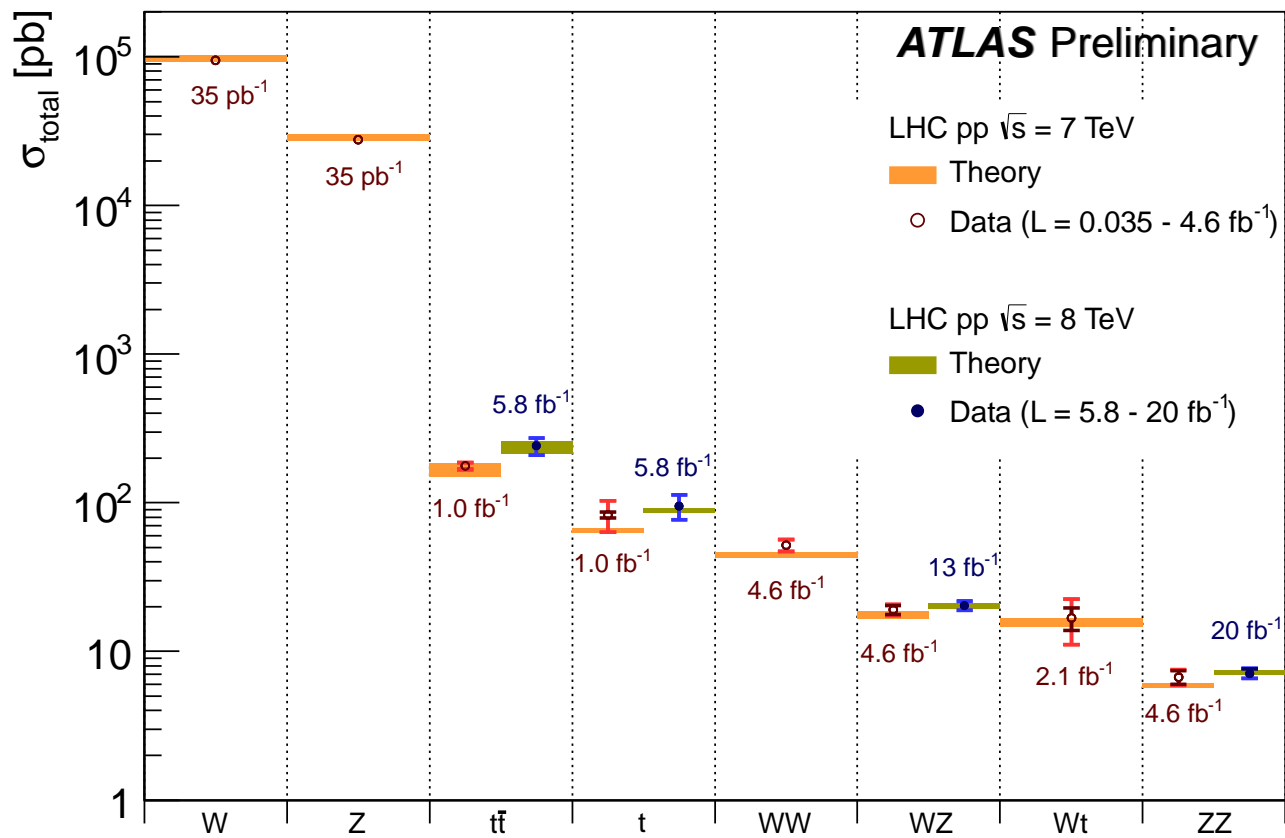


Pomiar bezpośredni zgodny w granicach błędów z przewidywaniami teorii opartymi na precyzyjnych pomiarach przy niższych energiach.

Kwark t

Eksperymenty przy LHC

Bardzo szczegółowo badają procesy z produkcją bozonów W^\pm i Z^0 , oraz kwarku t . Wszystkie dotychczasowe pomiary w znakomitej zgodności z SM.



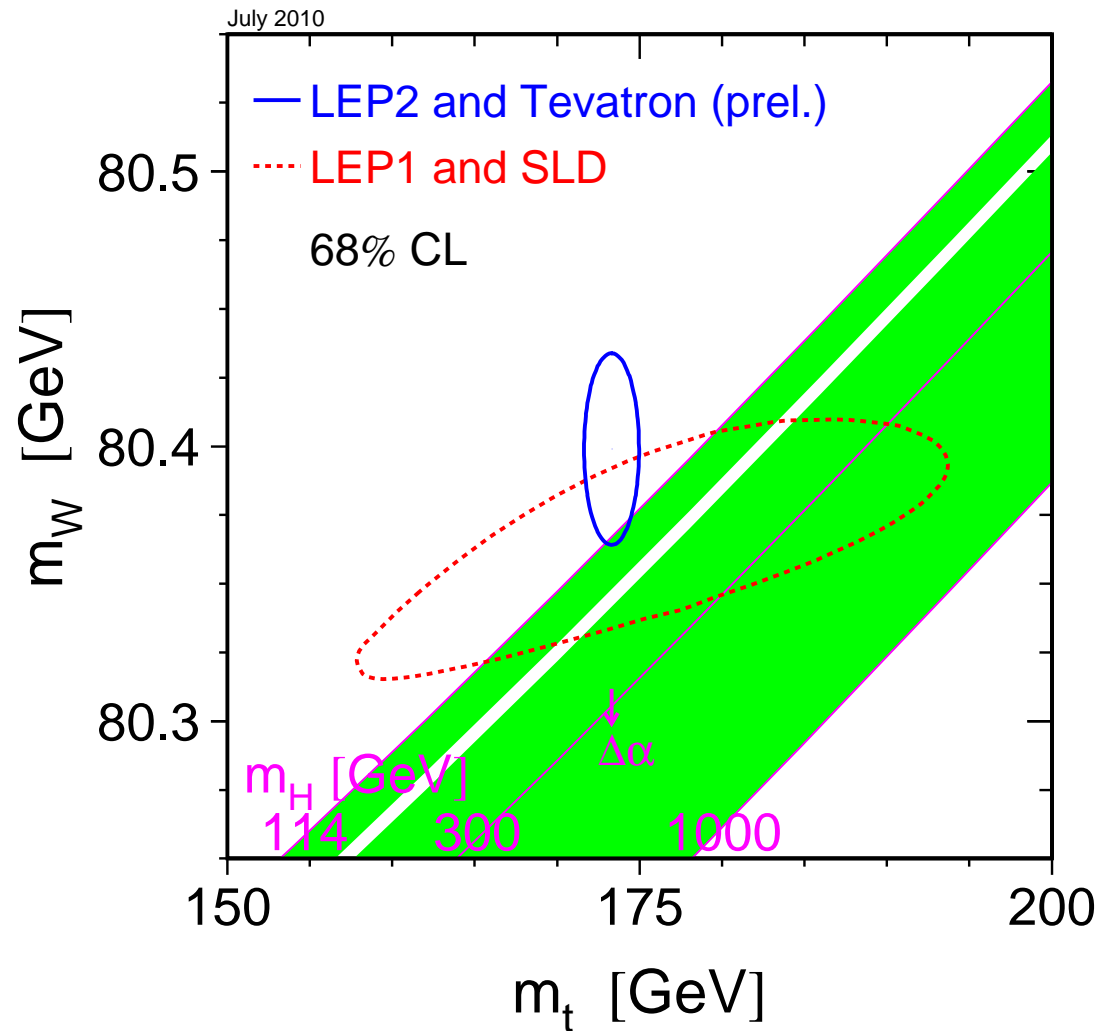
Pomiary precyzyjne w LEP

Poprawki

Możemy wyznaczyć **masy ciężkich cząstek** na podstawie analizy **precyzyjnych pomiarów** przy **niższych energiach**.

Dla bozonu W^\pm i kwarku t wyniki bardzo dobrze zgodziły się z **bezpośrednimi pomiarami**

⇒ możemy pójść **krok dalej** i zapytać się o masę cząstki, której jeszcze nie obserwowaliśmy...



Pomiary precyzyjne w LEP

Masa higgosa

Analiza **wszystkich** dostępnych **danych** wskazywała, że masa Higgosa powinna wynosić **około 100 – 200 GeV**

Wyniki z roku 2010:

$$m_h = 89^{+35}_{-26} \text{ GeV}$$

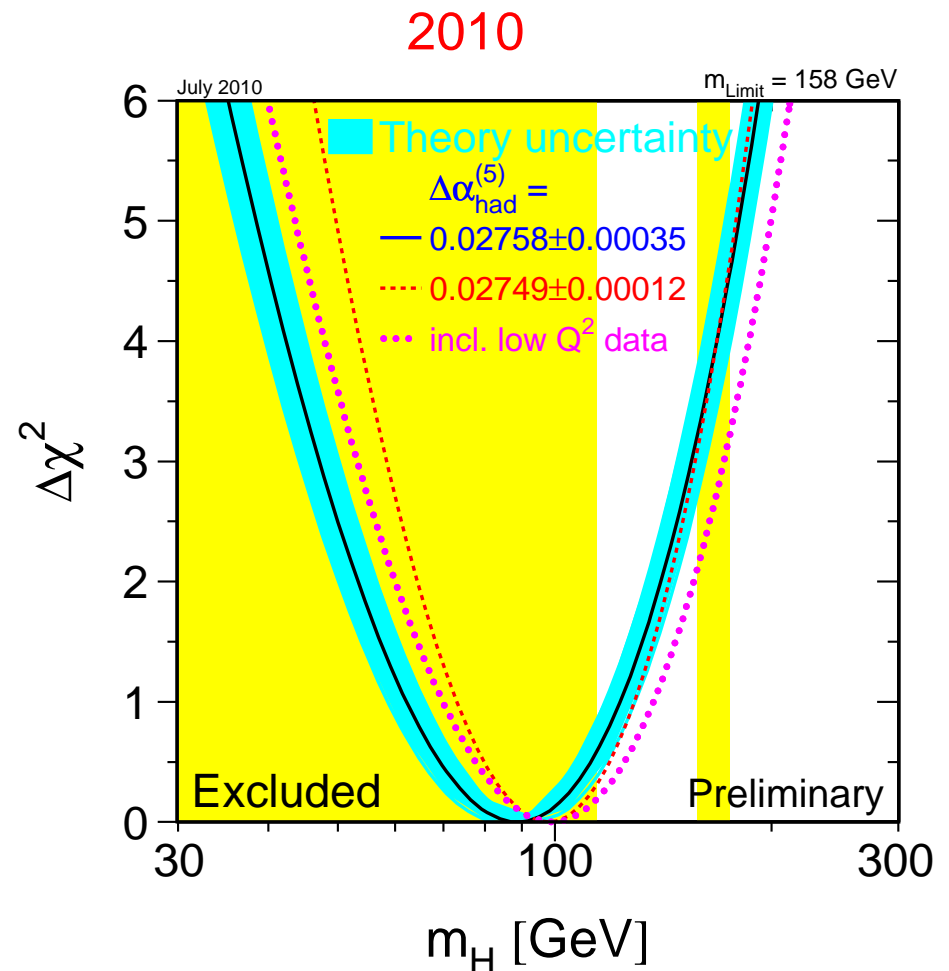
lub: $m_h < 158 \text{ GeV}$ (95% CL)

Z bezpośrednich poszukiwań:

$m_h > 114.4 \text{ GeV}$ (95% CL)

wszystkie dane LEP:

ALEPH + DELPHI + L3 + OPAL

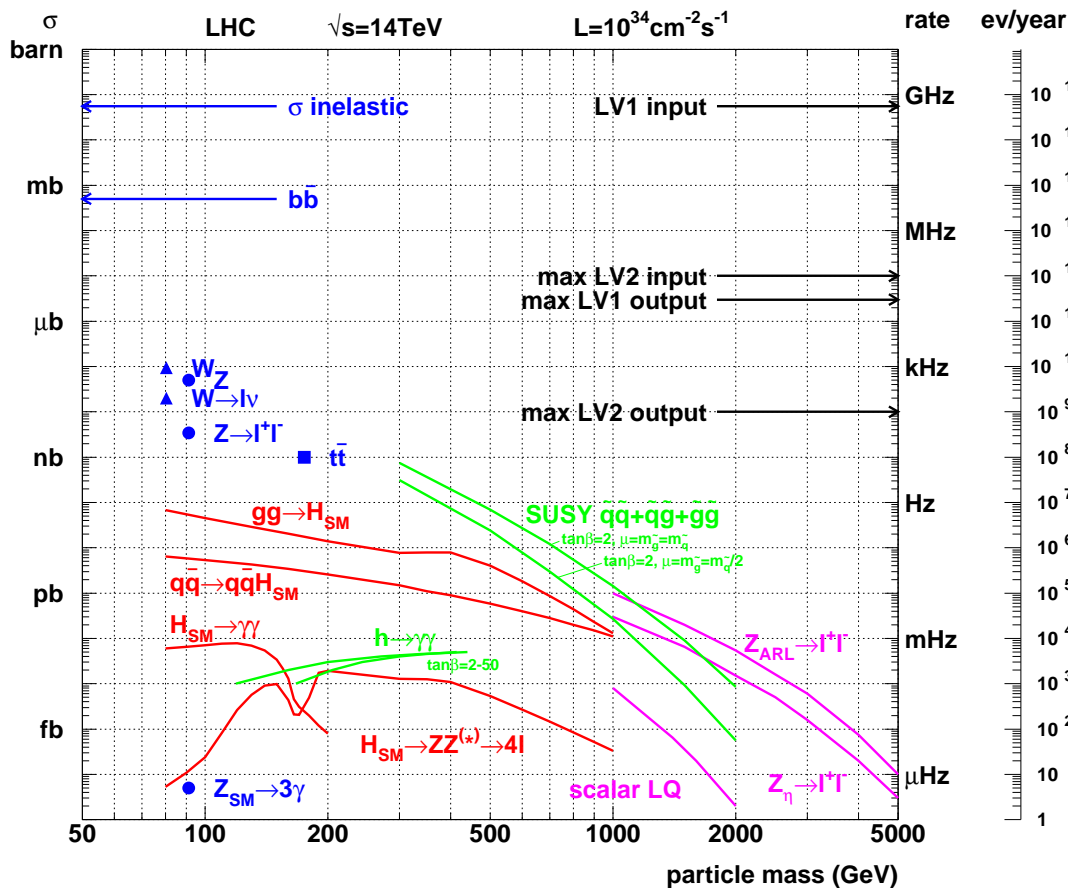


LHC, CERN, Genewa
Uruchomiony na jesieni 2009



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**



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

Jednak w zderzeniach pp mamy jest **bardzo duże tło** innych procesów, głównie z produkcją kwarków, w tym $b\bar{b}$.

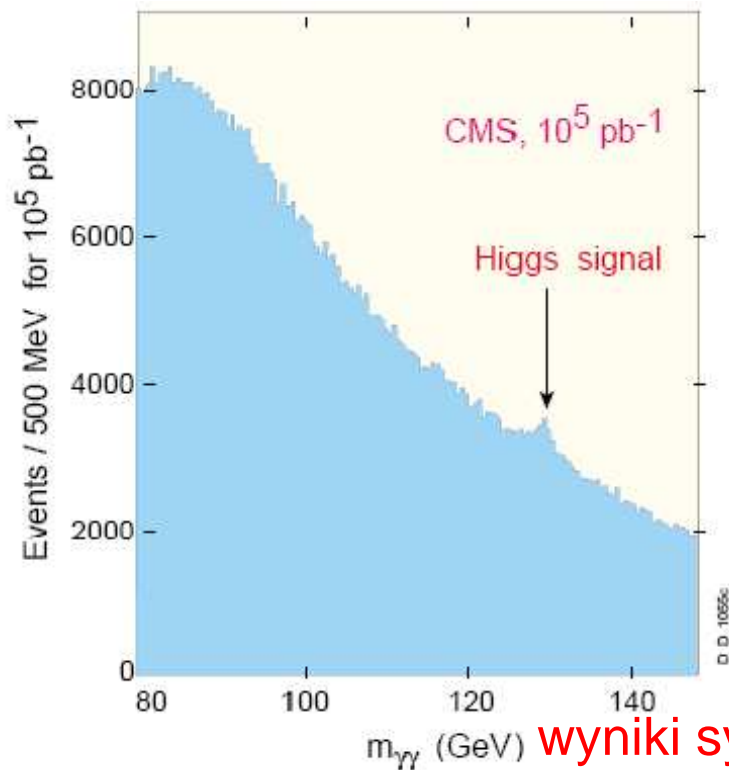
Musimy szukać kanałów o niskim tle...

Higgs w LHC

Dla małych mas najlepszy kanał to

$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

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

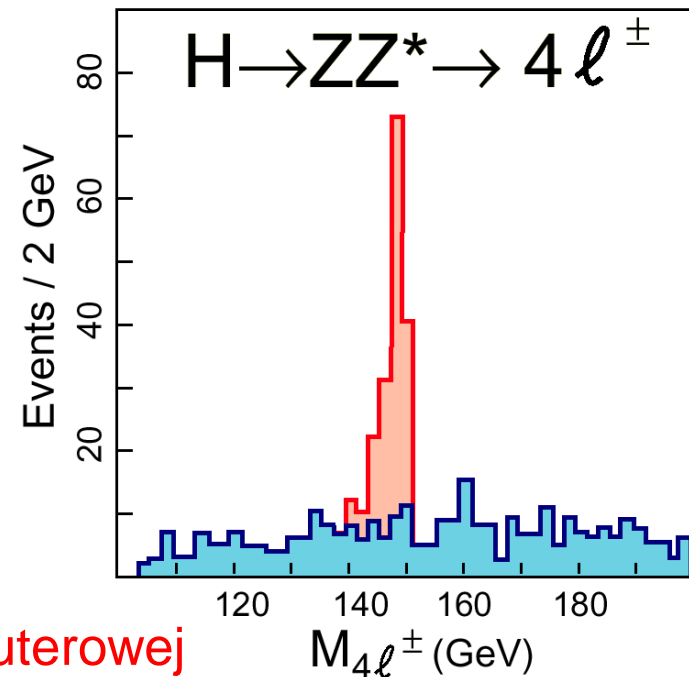


Obiecujący jest też kanał:

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

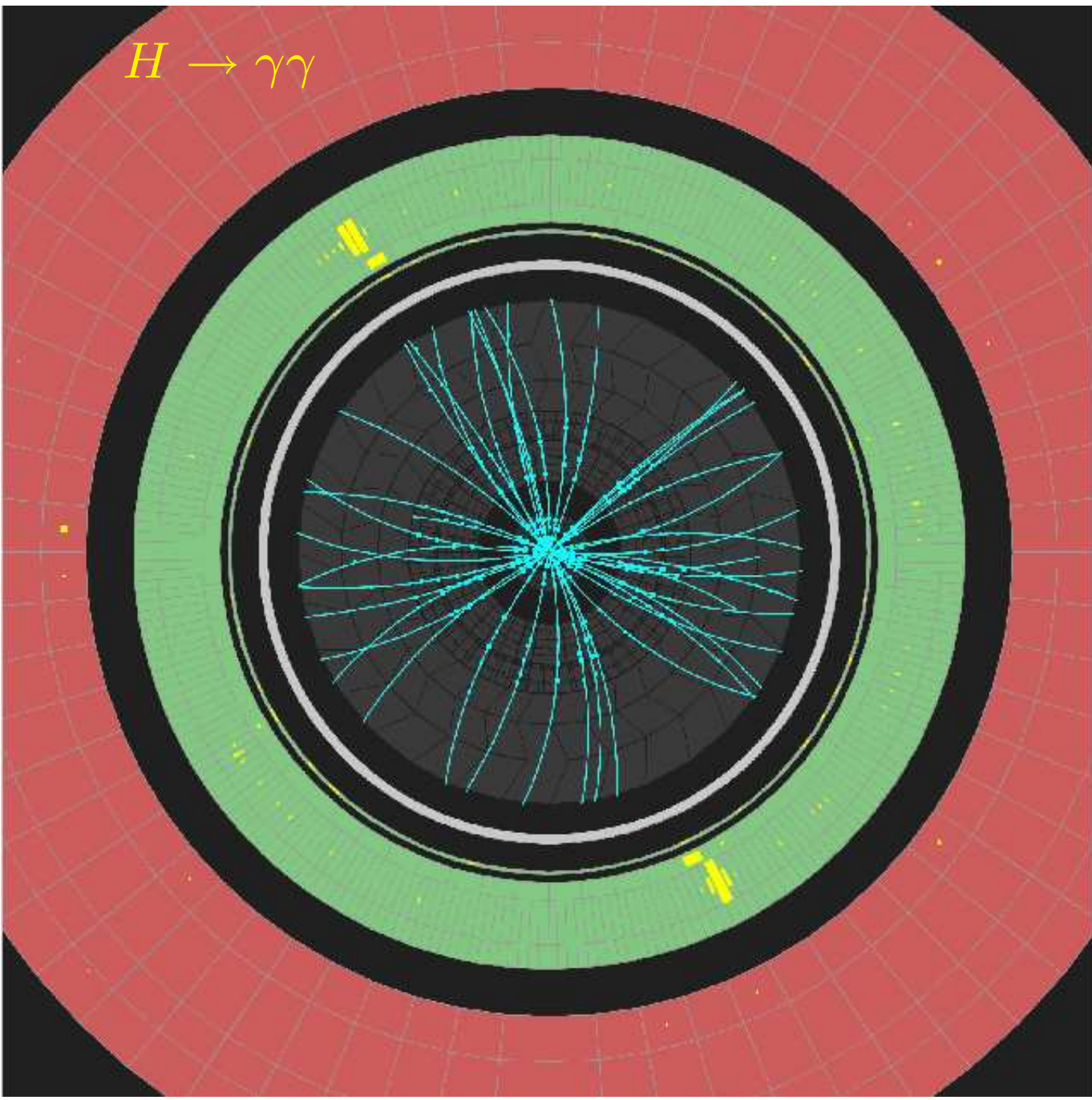
gdyż naładowane leptony (e^\pm i μ^\pm) można **łatwo zidentyfikować**.

Ale jest mało przypadków...



wyniki symulacji komputerowej

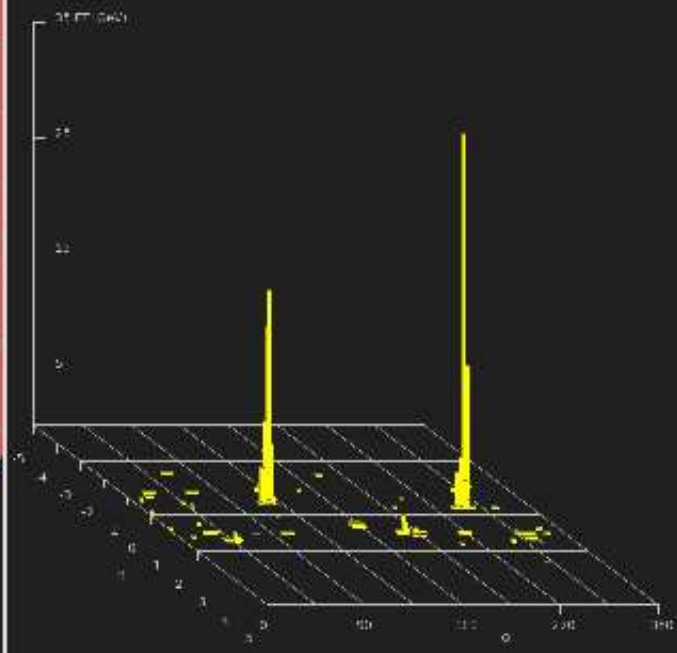
$H \rightarrow \gamma\gamma$



ATLAS EXPERIMENT

Run Number: 191426, Event Number: 86694500

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



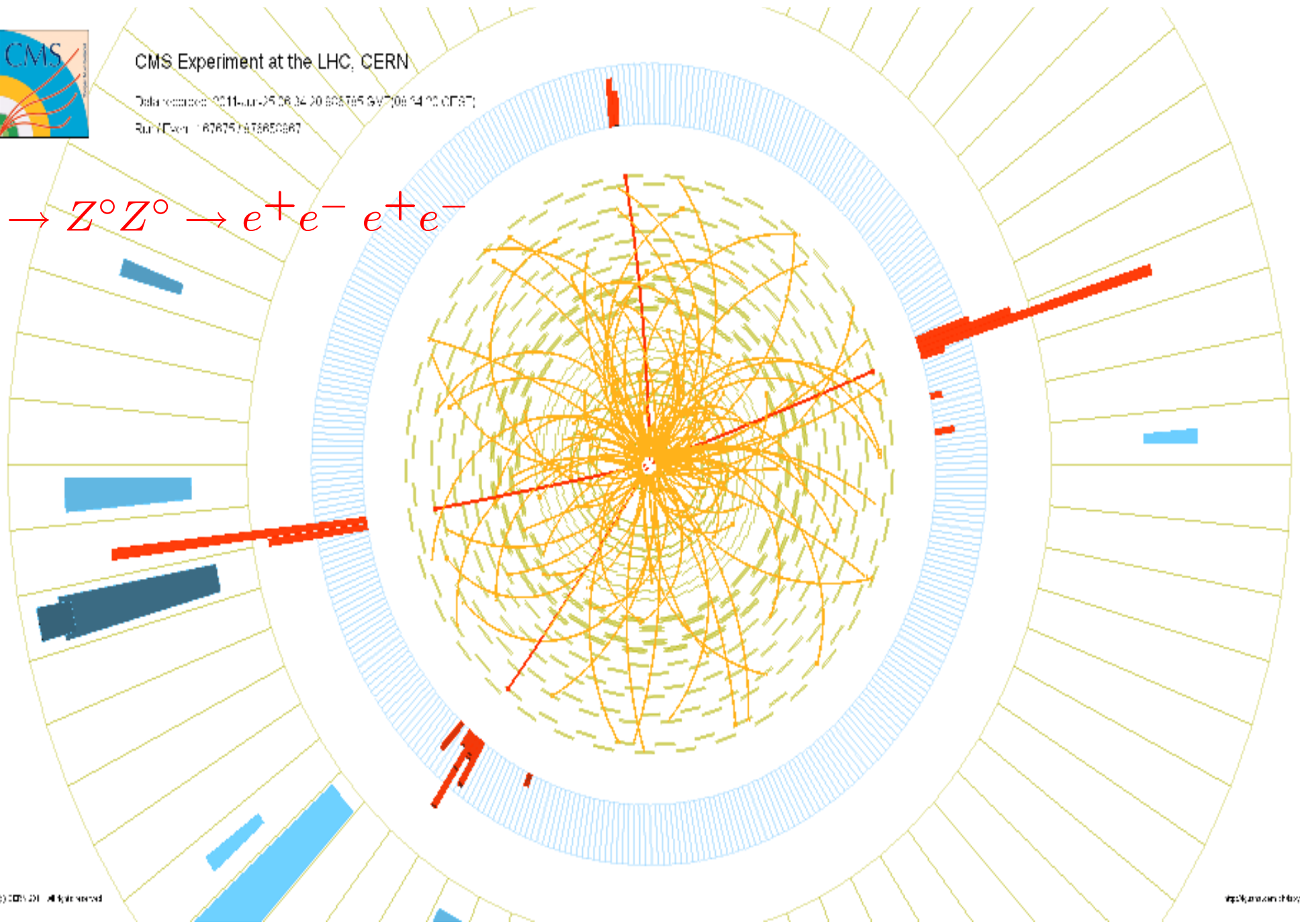


CMS Experiment at the LHC, CERN

Date recorded: 2011-Jul-25 06:34:20.605745 (V7.00.14.10.C167)

Run/Evt: 187675/1476650967

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

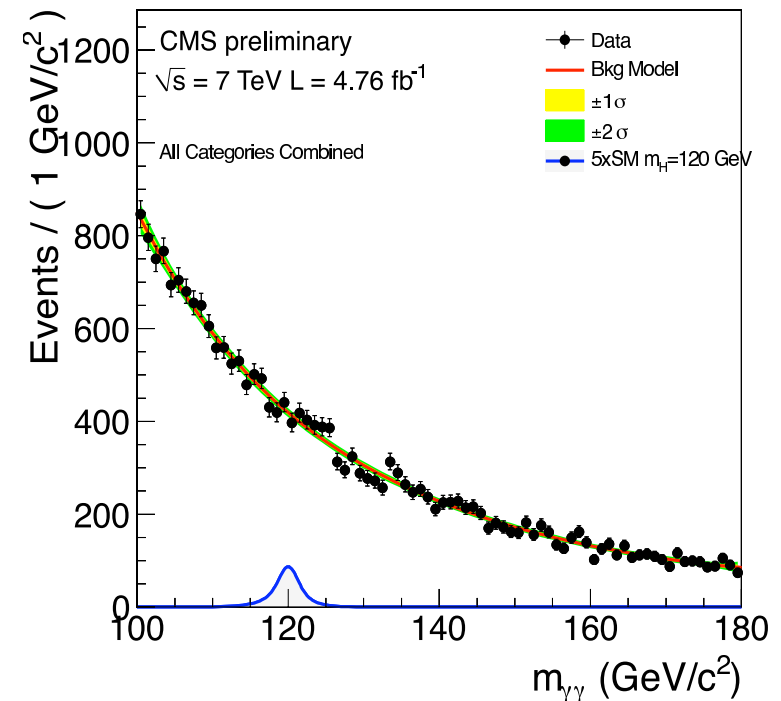
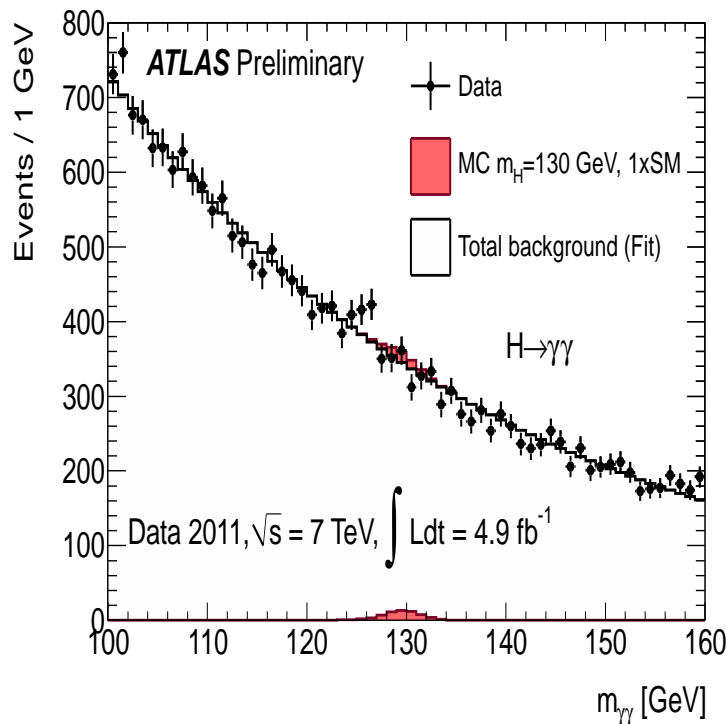


Higgs w LHC

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

$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

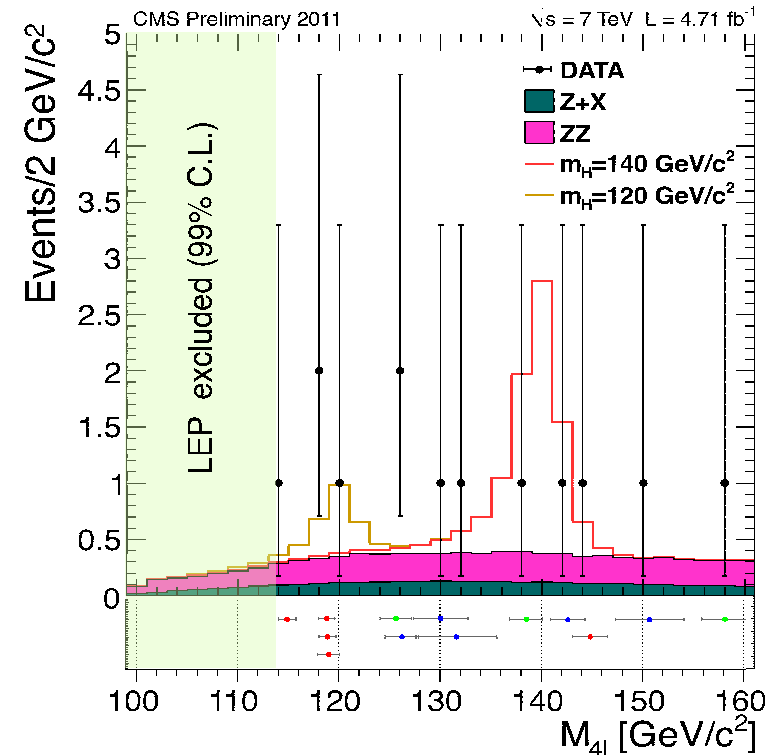
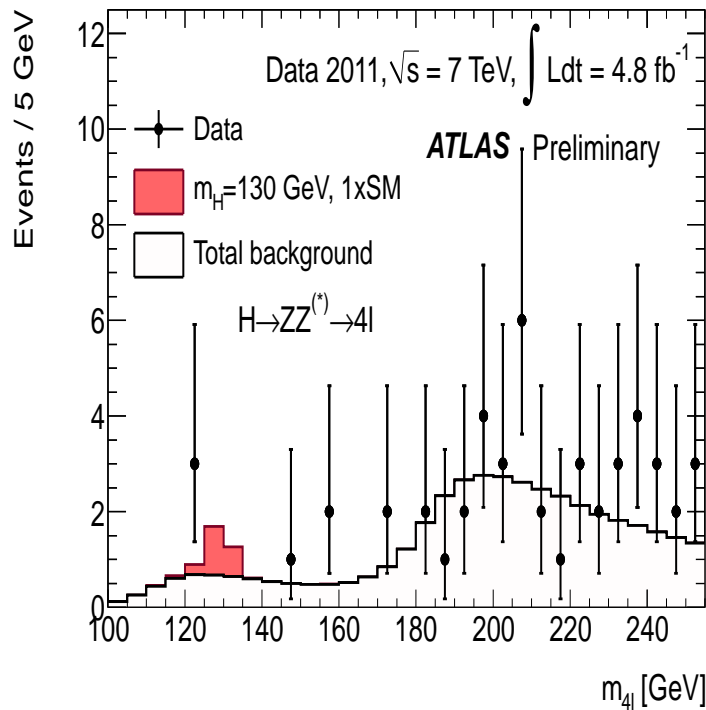


Higgs w LHC

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

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



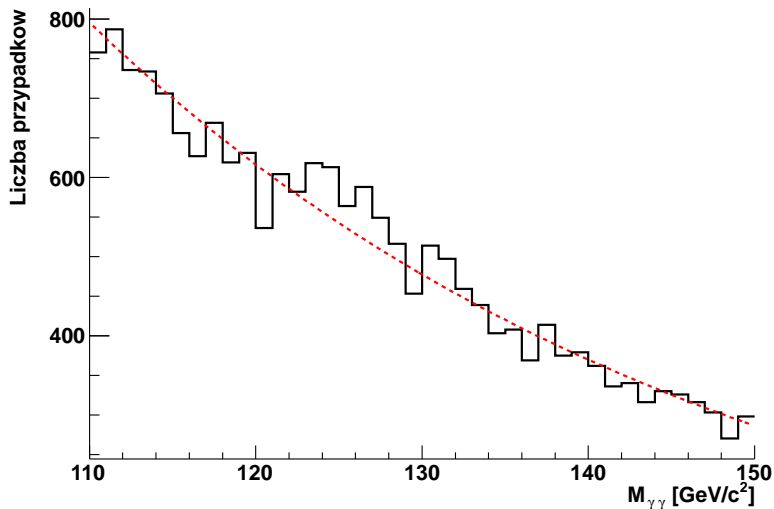
Higgs w LHC

Przy tak małych statystykach musimy być bardzo ostrożni!

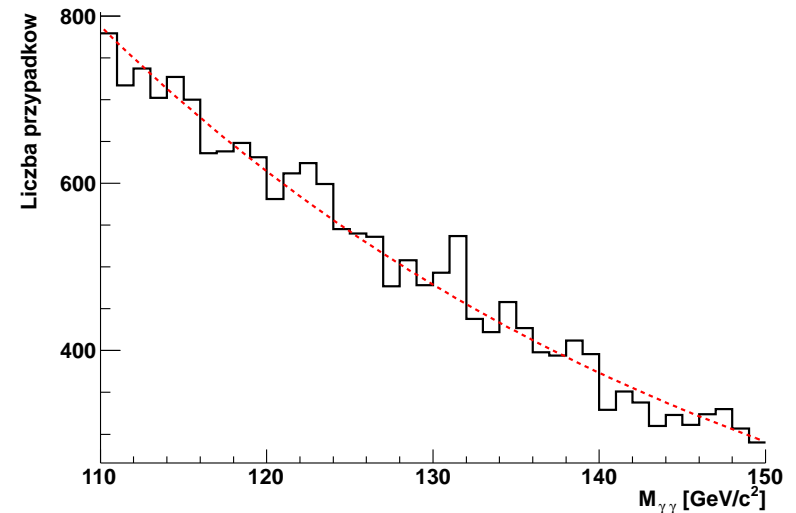
Nawet jeśli dla jakiejś masy widzimy nadmiar przypadków to może to być fluktuacja statystyczna, tym bardziej prawdopodobna, że szukamy jej w szerokim zakresie mas

Ilustracja w oparciu o symulację tzw. metodą Monte Carlo

Dwie próbki po 20'000 przypadków



1% przypadków produkcji Higgsa



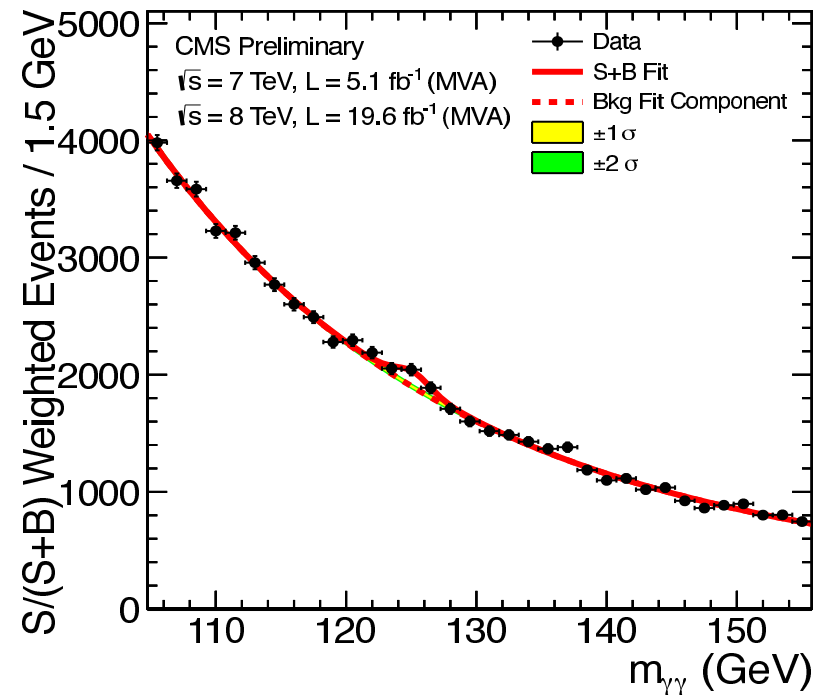
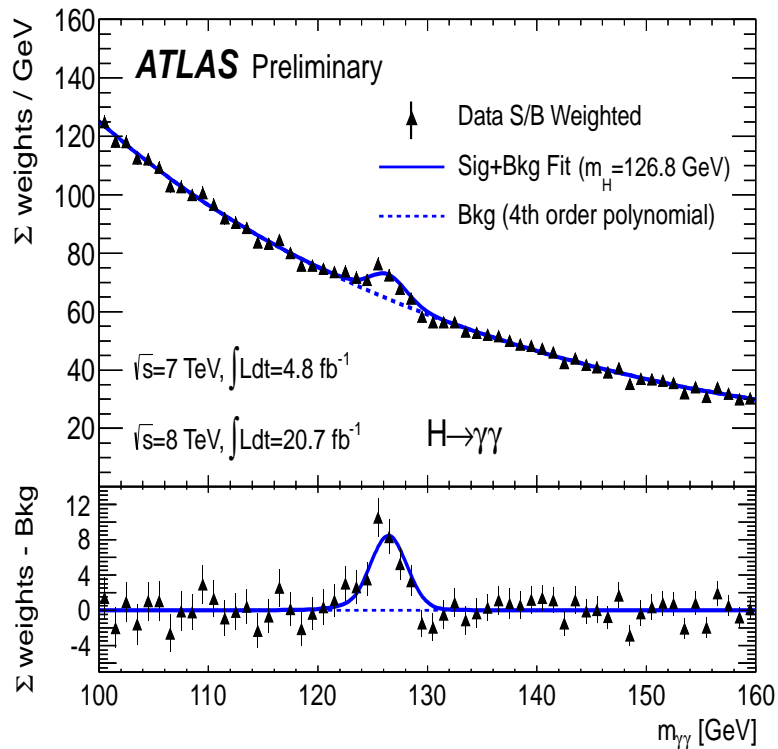
samo tło

Higgs w LHC

Nowe wyniki **ATLAS** i **CMS** przedstawione w marcu 2013, po uwzględnieniu danych zebranych w roku 2012.

Prawie pięciokrotny wzrost statystyki!

Sygnal widoczny ponad wszelką wątpliwość



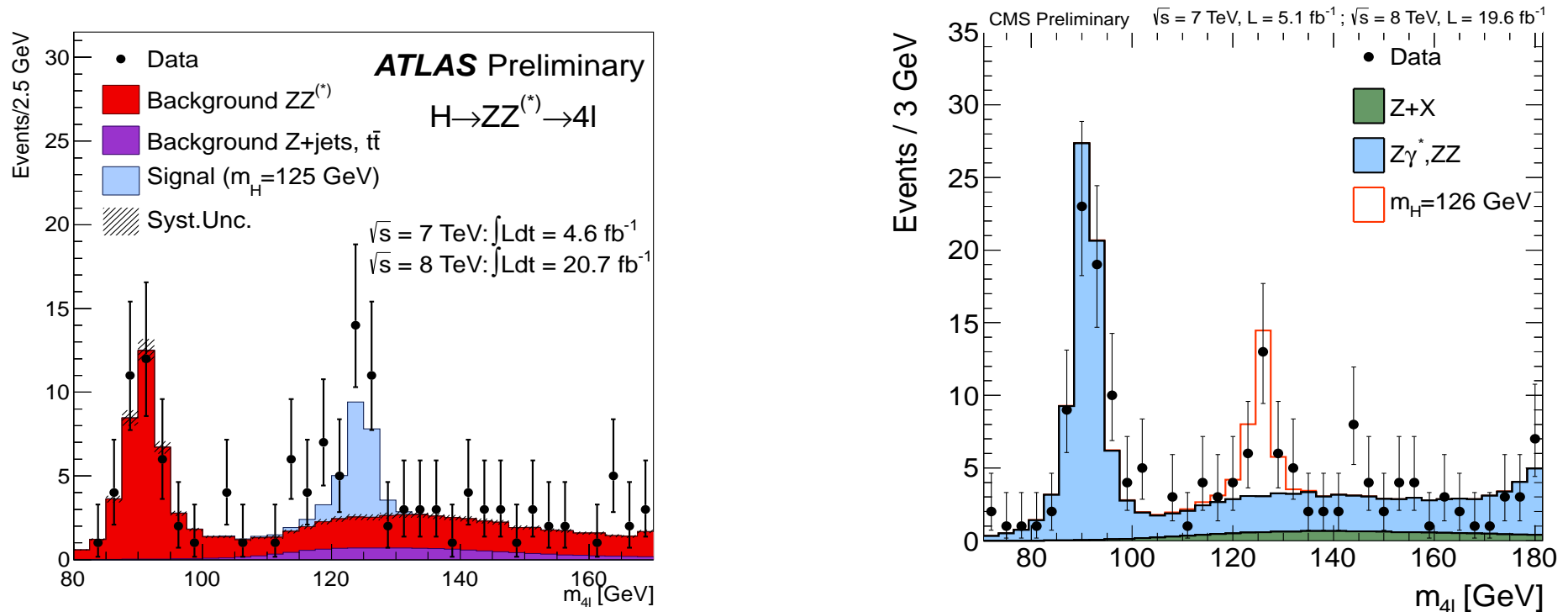
Higgs w LHC

Nowe wyniki **ATLAS** i **CMS** przedstawione w marcu 2013, po uwzględnieniu danych zebranych w roku 2012.

Prawie pięciokrotny wzrost statystyki!

Sygnal widoczny ponad wszelką wątpliwość

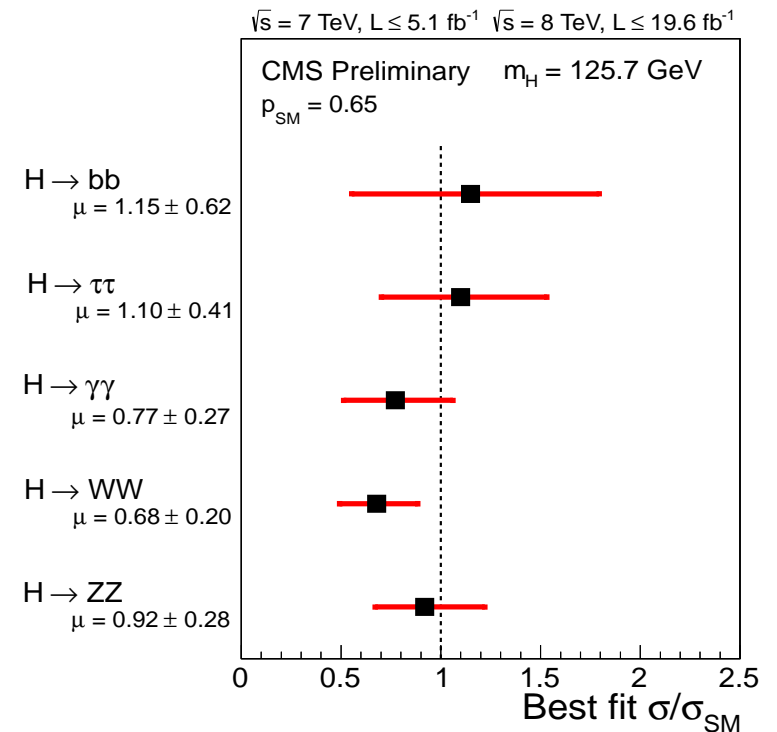
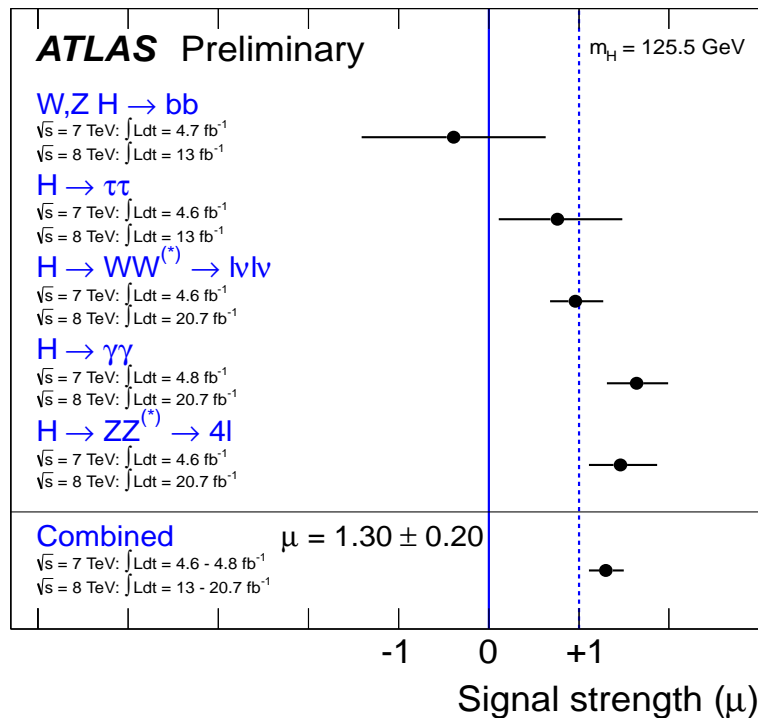
$$H \rightarrow Z^0 Z^0 \rightarrow l^+ l^- l^+ l^-$$



Higgs w LHC

Duża statystyka przypadków pozwoliła także na poszukiwanie innych kanałów rozpadów bozonu Higgsa.

Obserwowane liczby przypadków w dobrej zgodności z oczekiwaniami SM



Statystycznie przedział wartości błędu ($\pm 1\sigma$) zawiera wartość prawdziwą tylko w ok. 2/3 przypadków !

Higgs w LHC

Sprężenia bozonu Higgsa

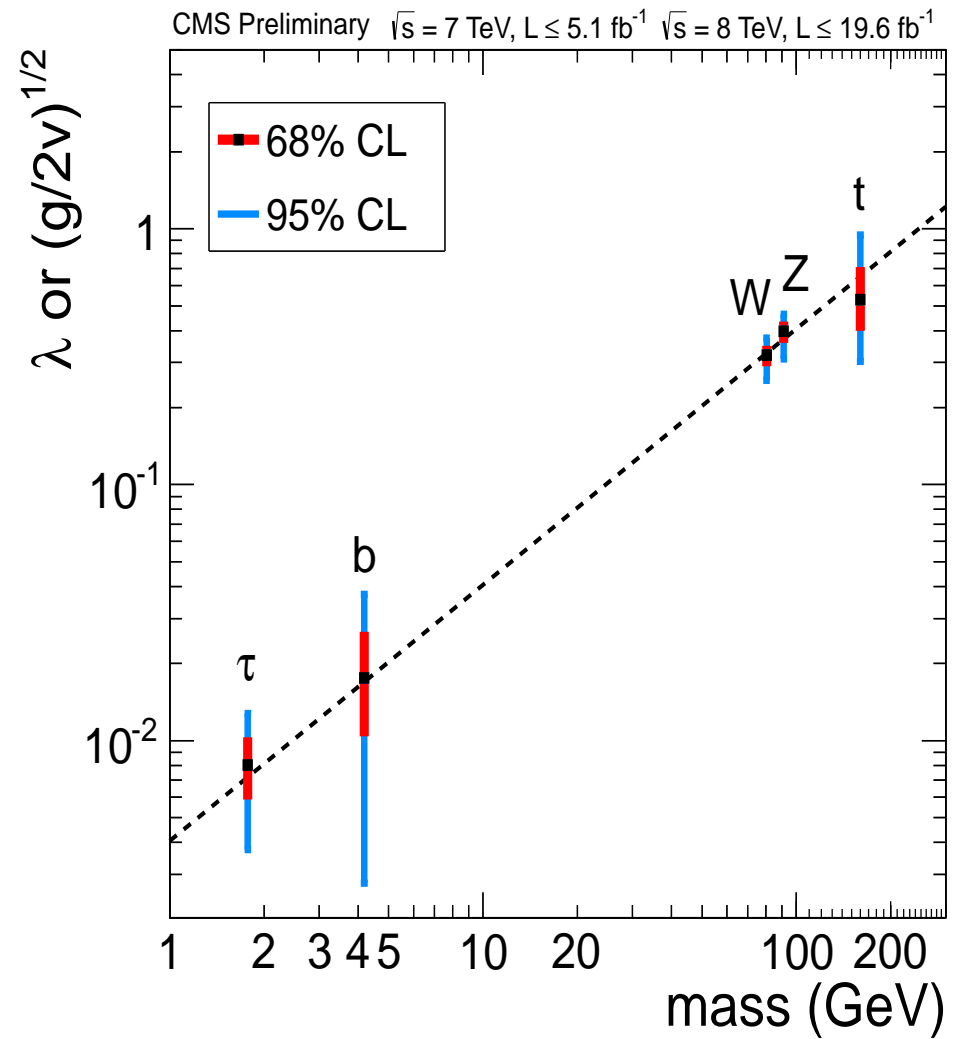
Możliwa staje się weryfikacja podstawowego przewidywania modelu:

sprężenie bozonu Higgsa do cząstek jest proporcjonalne do ich masy

Błędy są wciąż bardzo duże!

Precyzja będzie bardzo zwiększona po uruchomieniu LHC przy $\sqrt{s}=13\text{TeV}$ w 2015 roku.

Do roku 2020 planowane ponad dziesięciokrotne zwiększenie próbki danych



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**.

Triumf Modelu Standardowego!

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

Wszystkie dotychczasowe wyniki uzyskane przy kolajderach zgodne z SM!

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

- musimy dokładnie zmierzyć wszystkie 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 kolejne wykłady...