

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

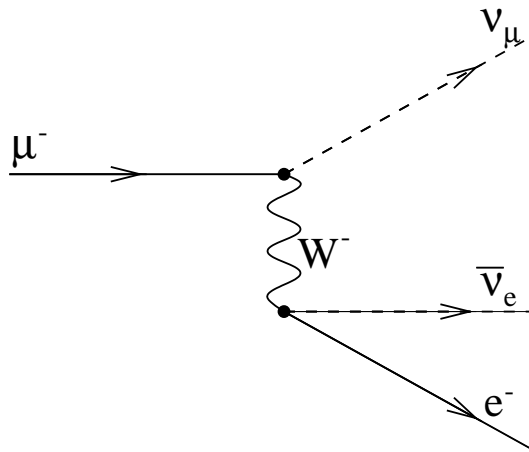
Bozony W^\pm i Z^0

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 :

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

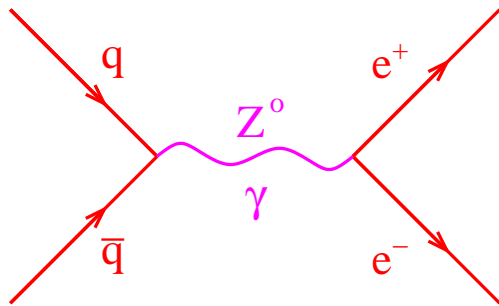
$$m_Z \sim 90 \text{ GeV}$$

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):

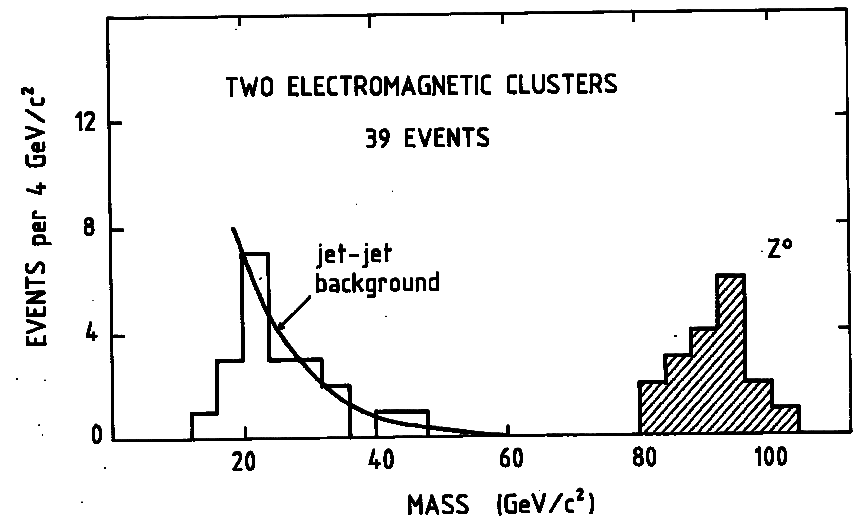
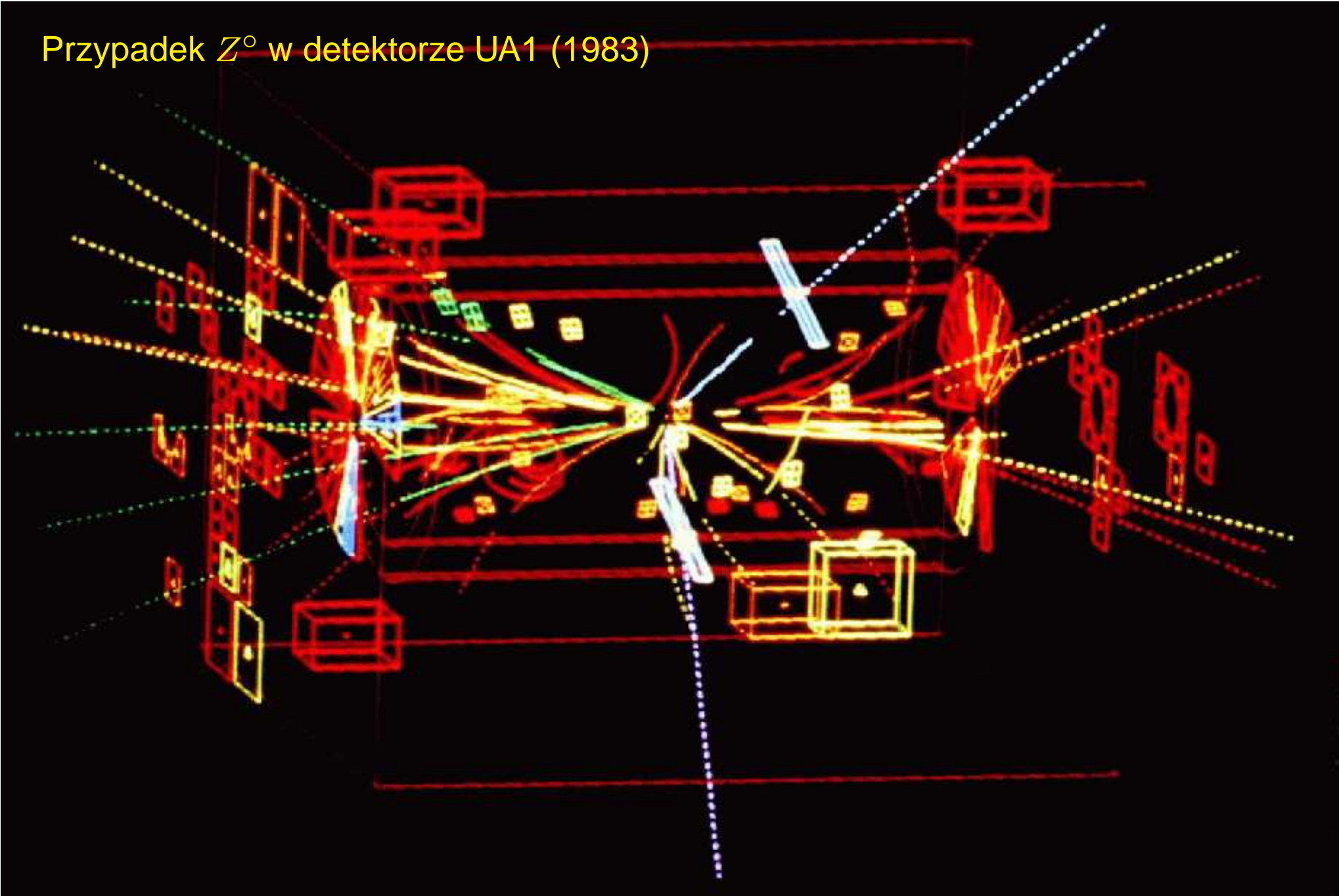


Fig. 1

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):

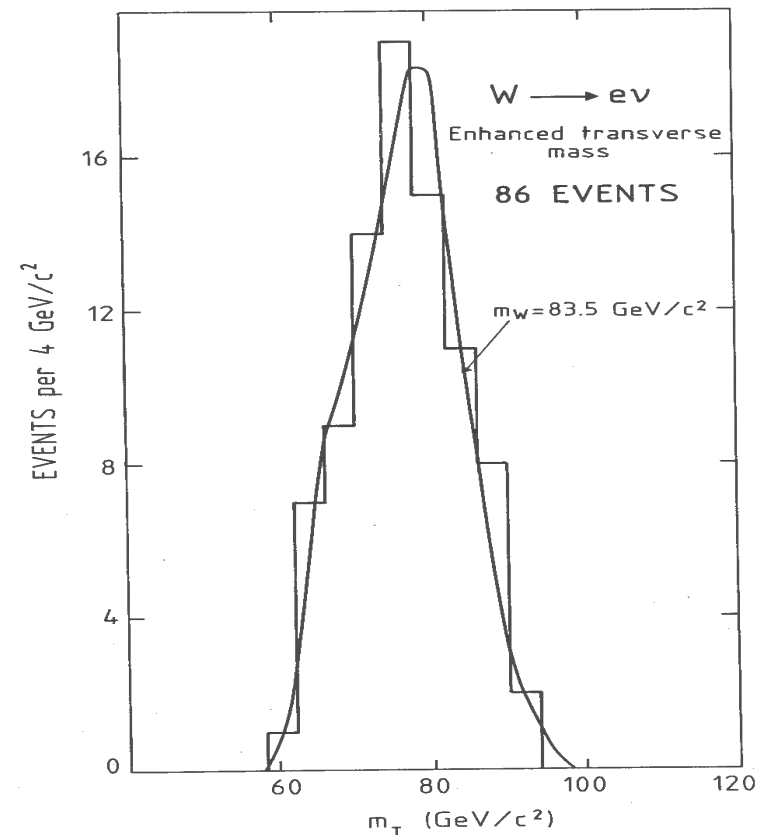
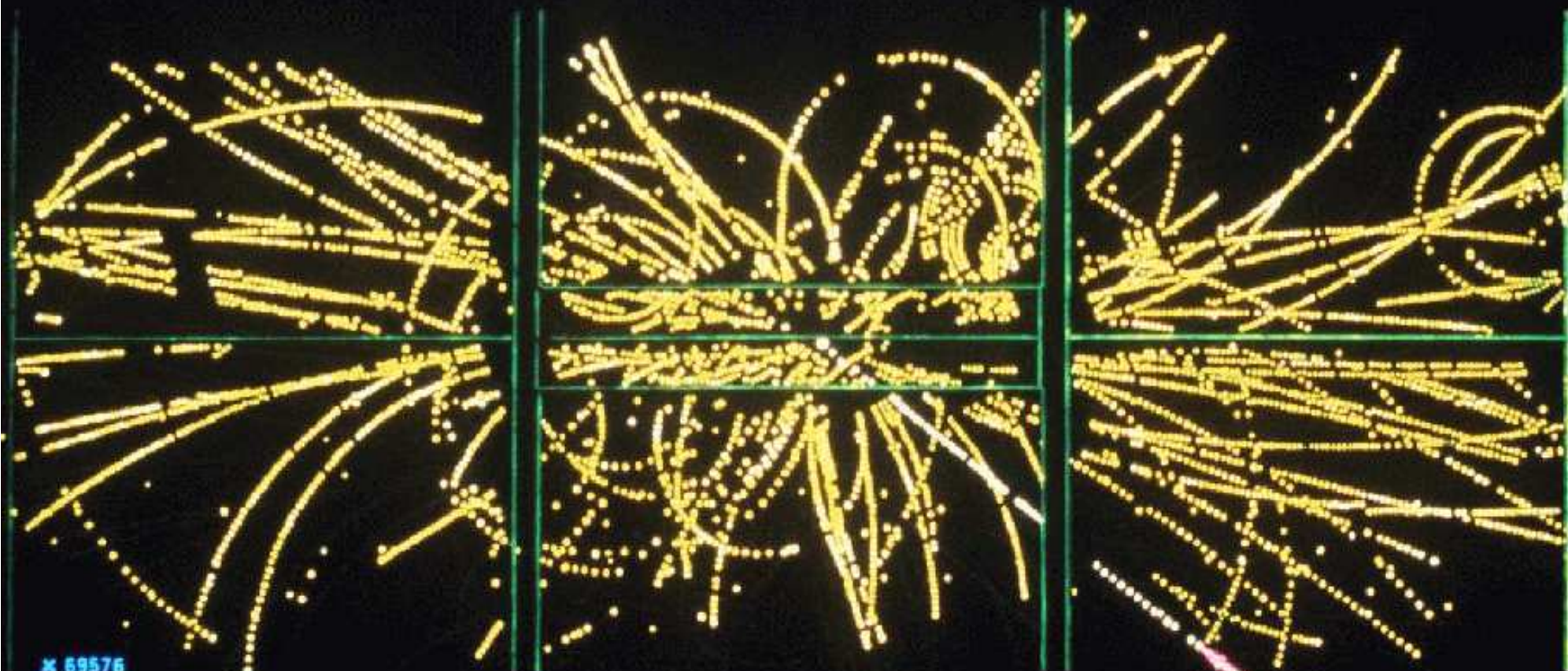


Fig. 3b

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

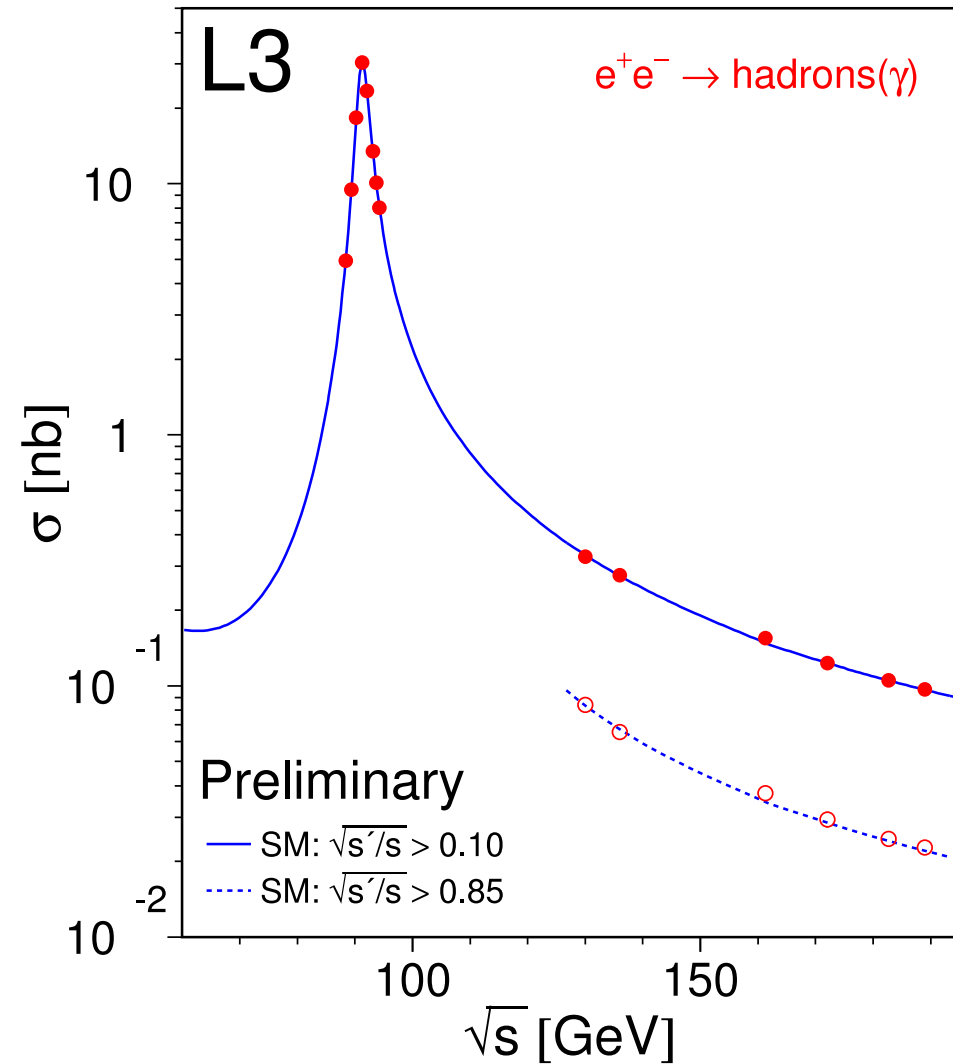


Model Standardowy został bardzo dokładnie przetestowany w zderzeniach e^+e^- w akceleratorach LEP i SLC (miliony przypadków).

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

Szerokość maksimum odpowiada naturalnej szerokości bozonu Z^0 .

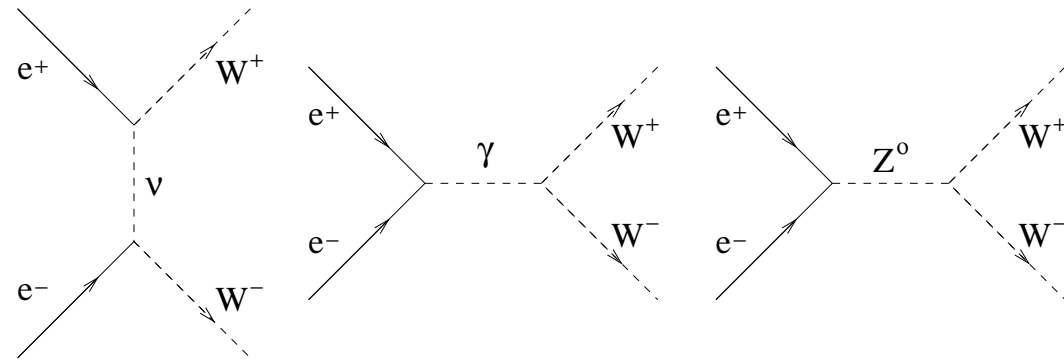
Ponieważ jest to cząstka niesłychanie krótkożyciowa, jej masa nie jest dokładnie określona...



Bozony W^\pm i Z^0

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

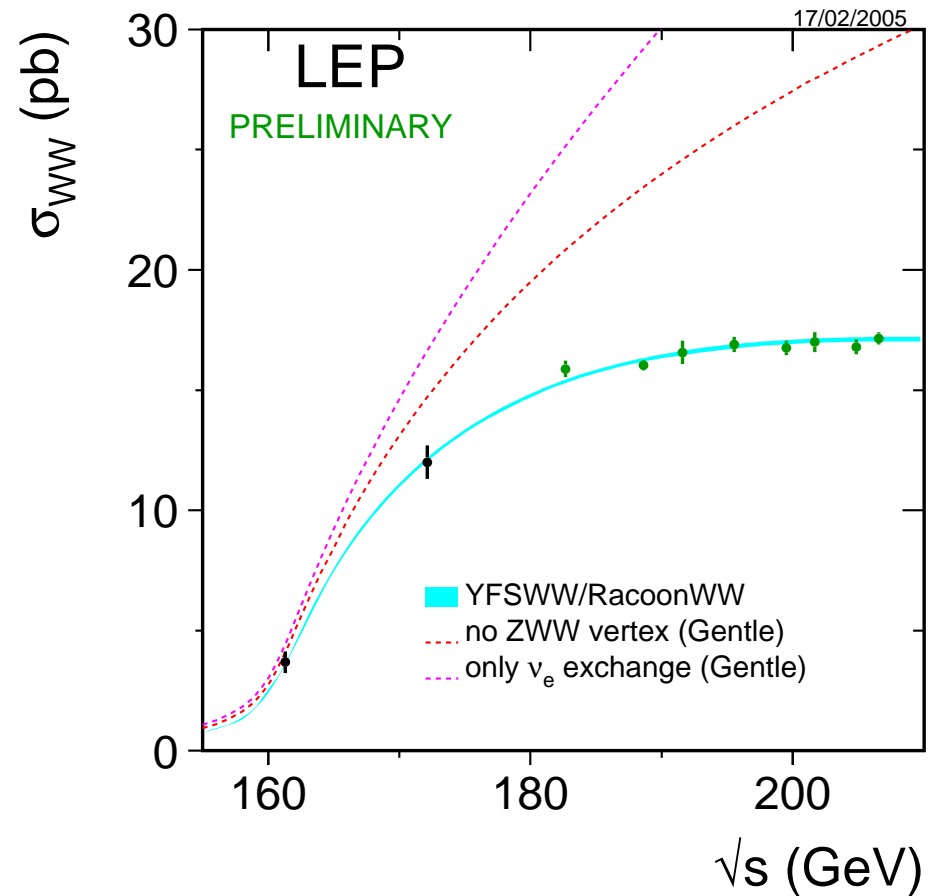
Produkcja bozonów W jedynie w parach, wkład od **trzech** różnych **procesów**:



Sprzężenia wynikają ze struktury **Modelu Standardowego**

\Rightarrow ścisłe przewidywania teoretyczne

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



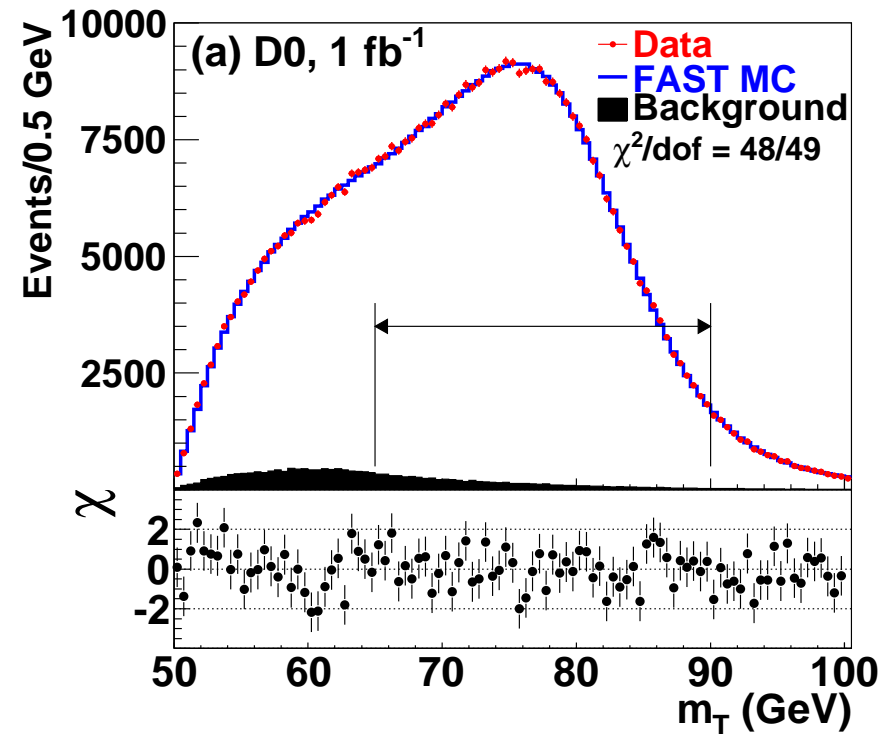
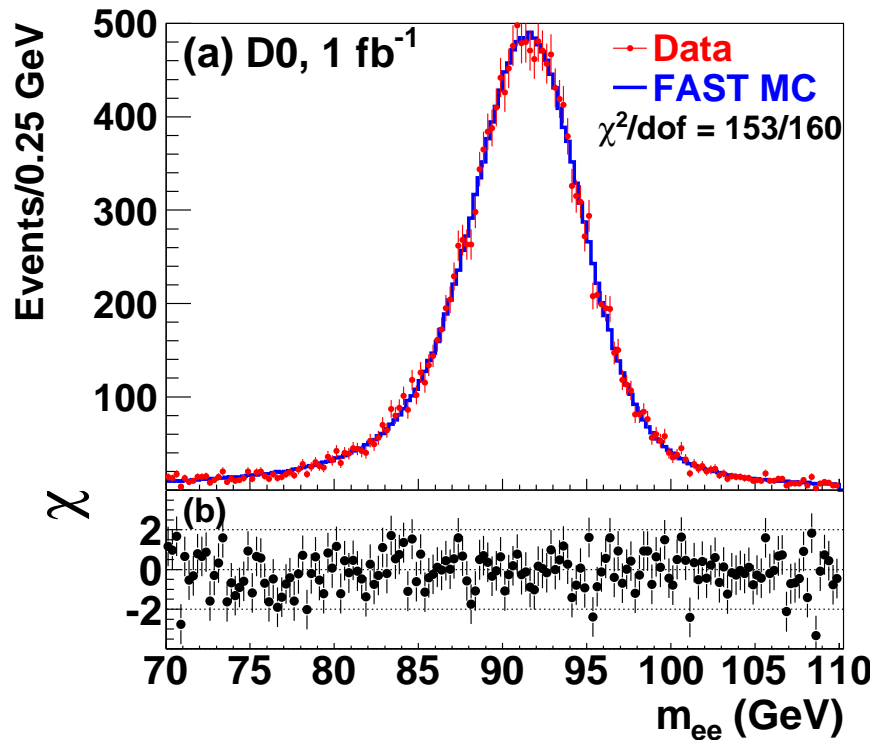
Bozony W^\pm i Z^0

Tevatron @ Fermilab

Tysiące Z^0 i W^\pm były produkowane do 2011 roku w eksperymentach D0 i CDF

Rekonstruowana masa $Z \rightarrow e^+e^-$

Tzw. masa poprzeczna $W^\pm \rightarrow e^\pm \nu_e$

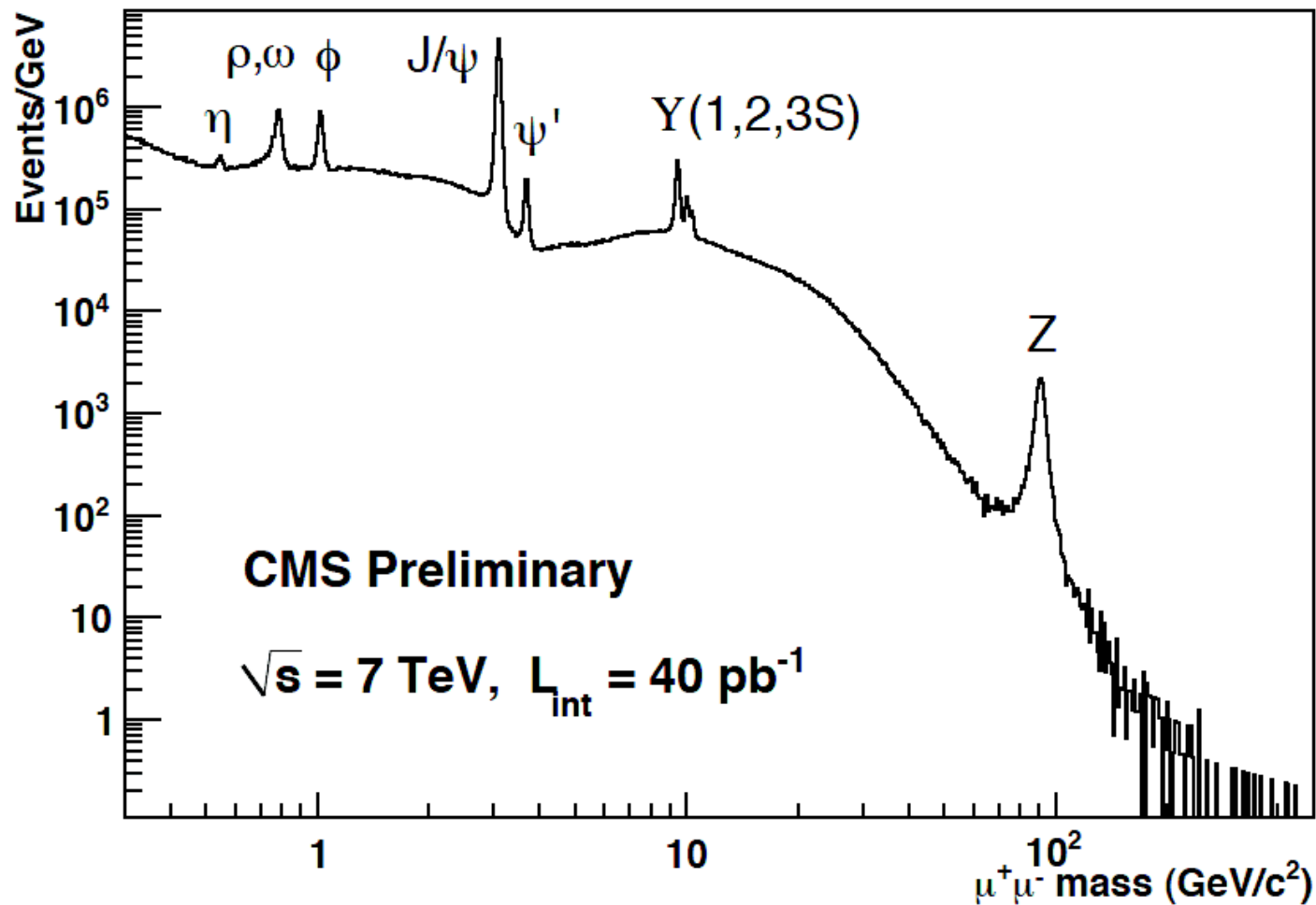


Bardzo dobra zgodność z teorią. Przypadki te służyły m.in. do kalibracji detektora !

Bozony W^\pm i Z^0

LHC @ CERN

Od jesieni 2009 Model Standardowy jest też ponownie “odkrywany” przy LHC

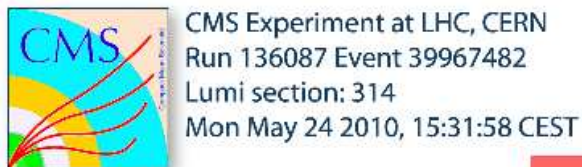


Bozony W^\pm i Z^0

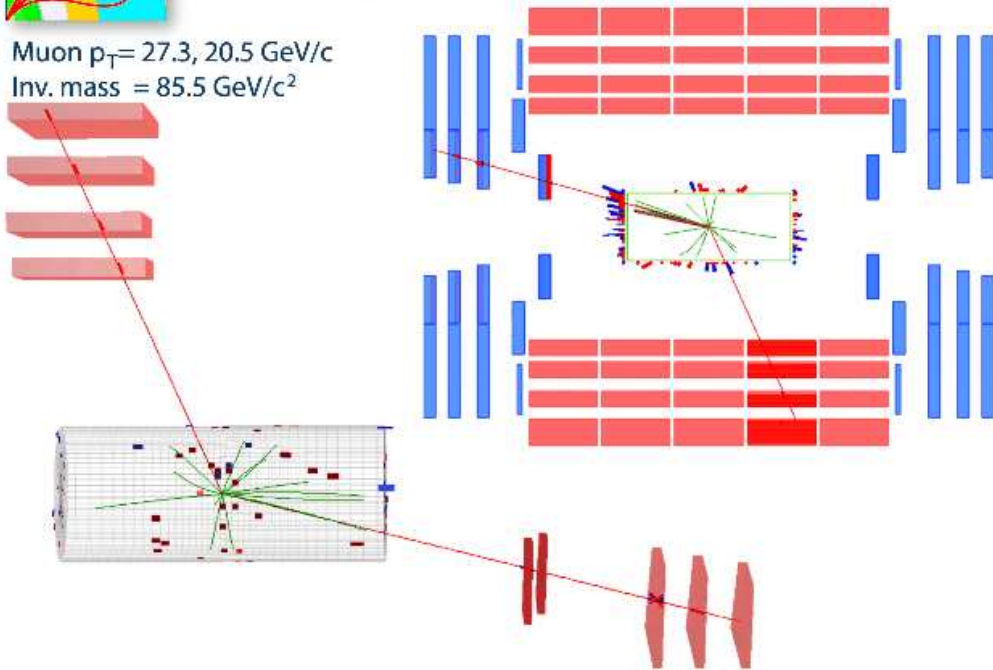
LHC

Przykładowe przypadki zarejestrowane przez eksperyment CMS:

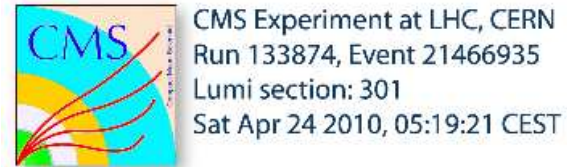
$$Z^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$$



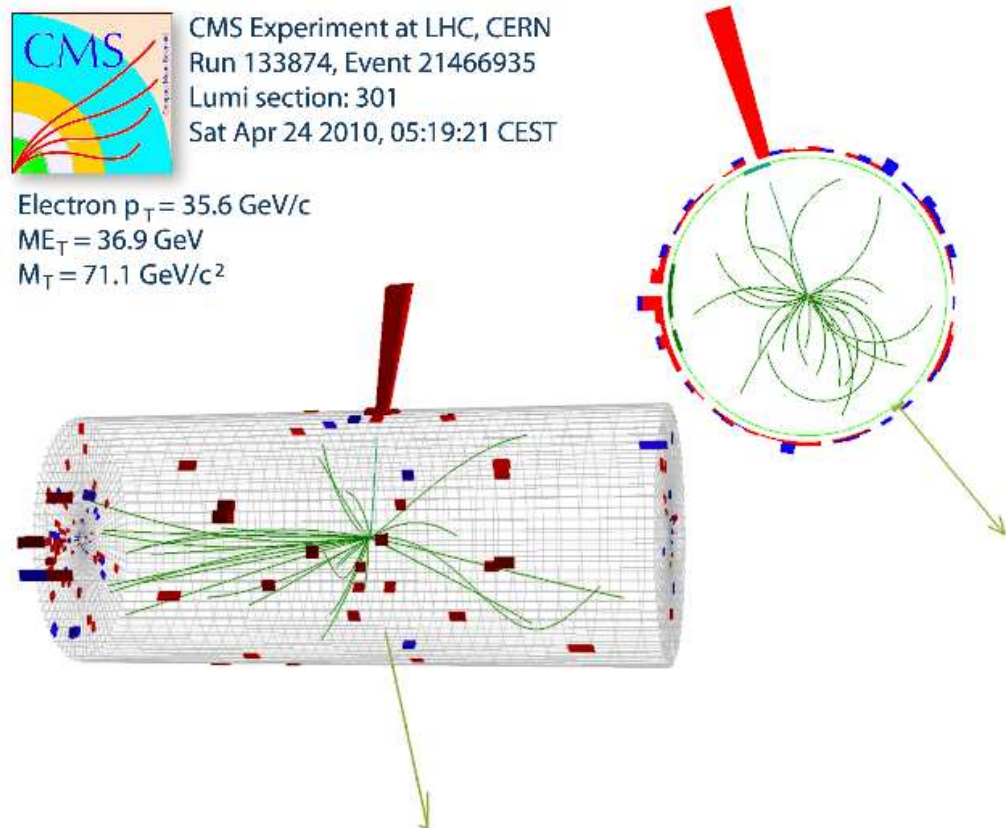
Muon $p_T = 27.3, 20.5$ GeV/c
Inv. mass = 85.5 GeV/ c^2



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



Electron $p_T = 35.6$ GeV/c
 $ME_T = 36.9$ GeV
 $M_T = 71.1$ GeV/ c^2



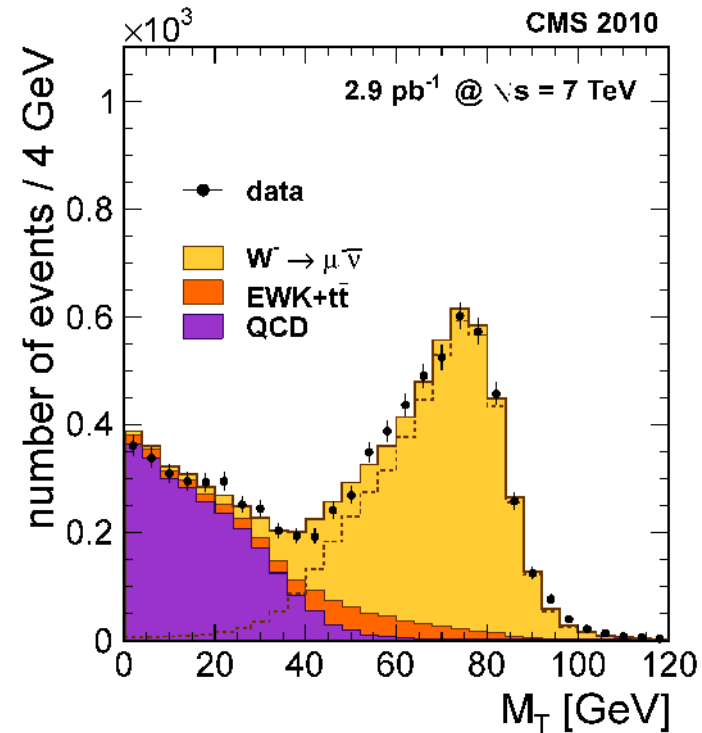
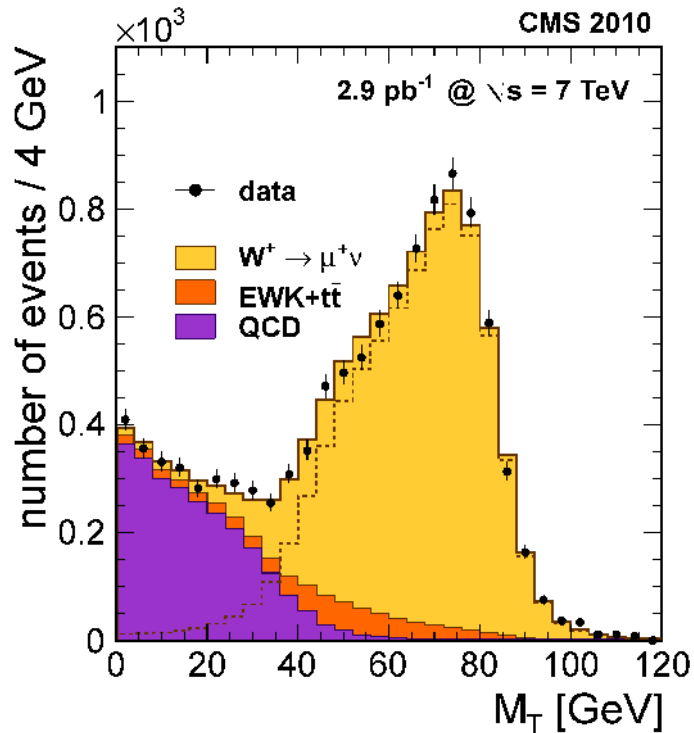
Bozony W^\pm i Z^0

LHC

W odróżnieniu od LEP (e^+e^-) i Tevatronu ($p\bar{p}$) zderzamy dwie cząstki dodatnie (pp)
 \Rightarrow naruszona symetria między produkcją W^+ i W^- :

$$W^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

$$W^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

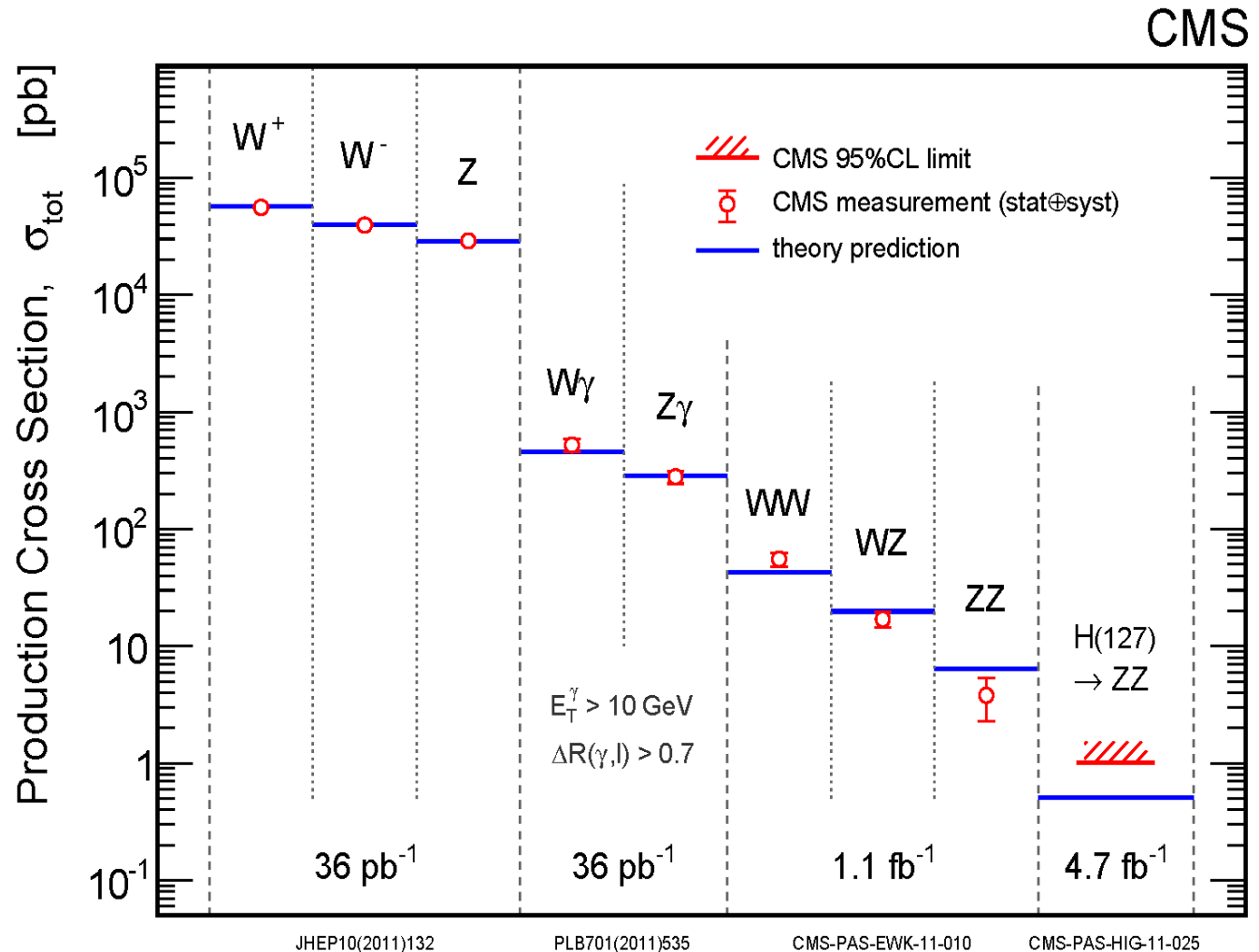


Mierzona asymetria w bardzo dobrej zgodności z przewidywaniami modelu

Bozony W^\pm i Z^0

LHC

Wszystkie pomiary LHC produkcji i rozpadów bozonów W^\pm i Z^0 w bardzo dobrej zgodności z przewidywaniami



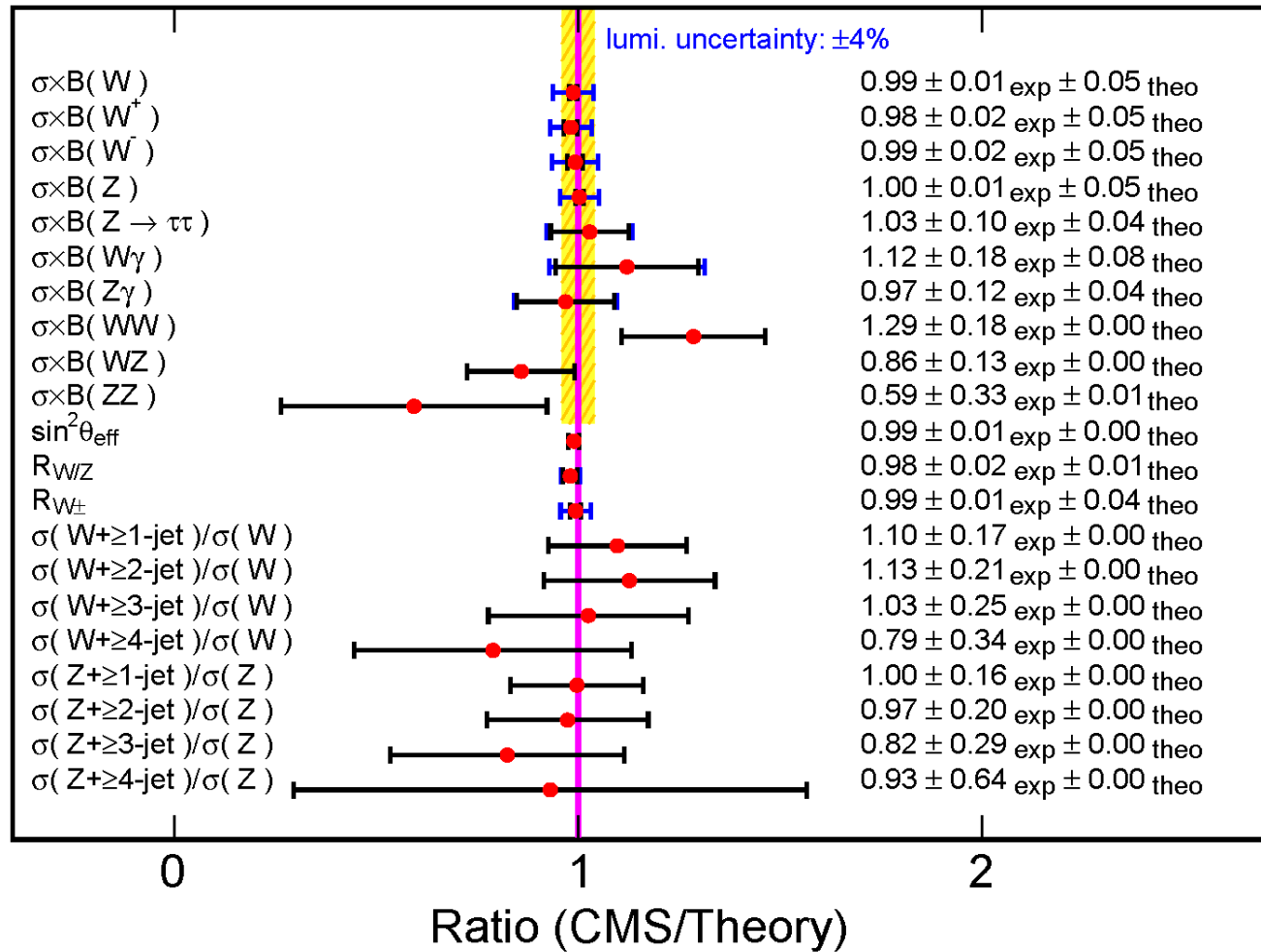
Bozony W^\pm i Z^0

LHC

Wszystkie pomiary LHC produkcji i rozpadów bozonów W^\pm i Z^0 w bardzo dobrej zgodności z przewidywaniami

CMS

$\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$



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

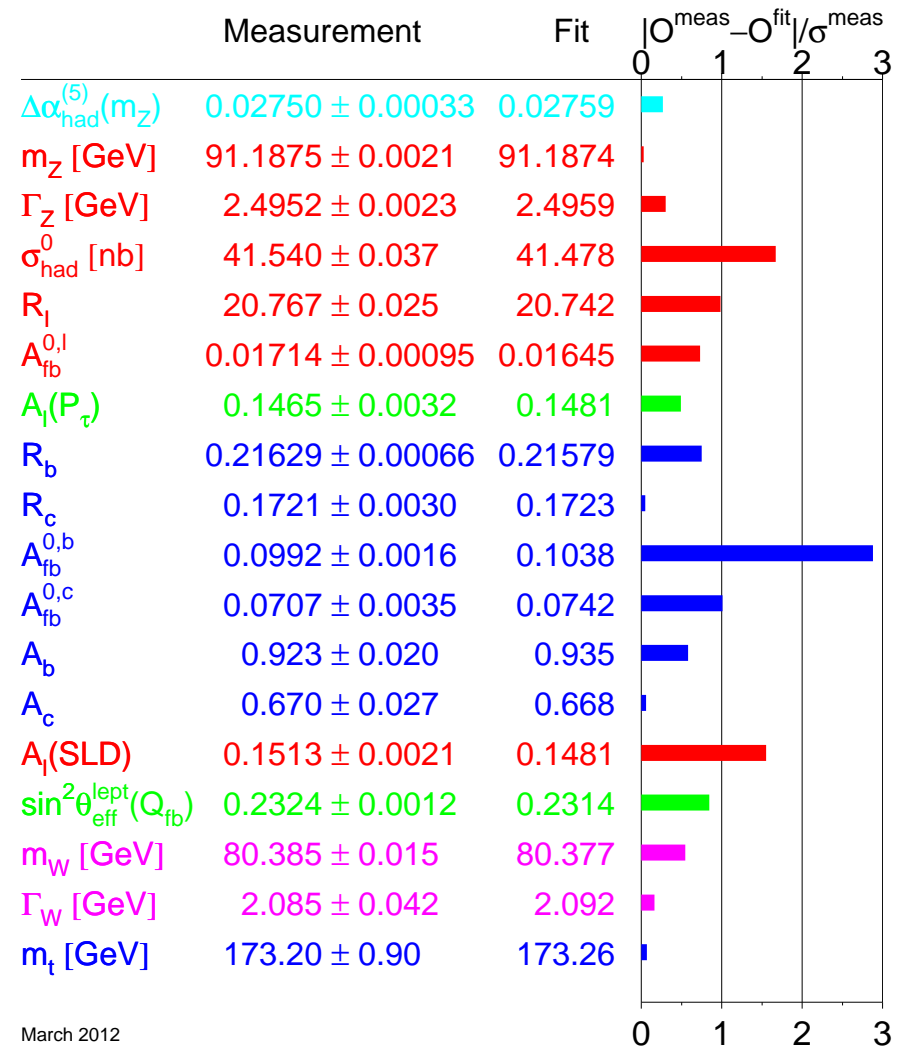
W LEP mierzono dziesiątki procesów.

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

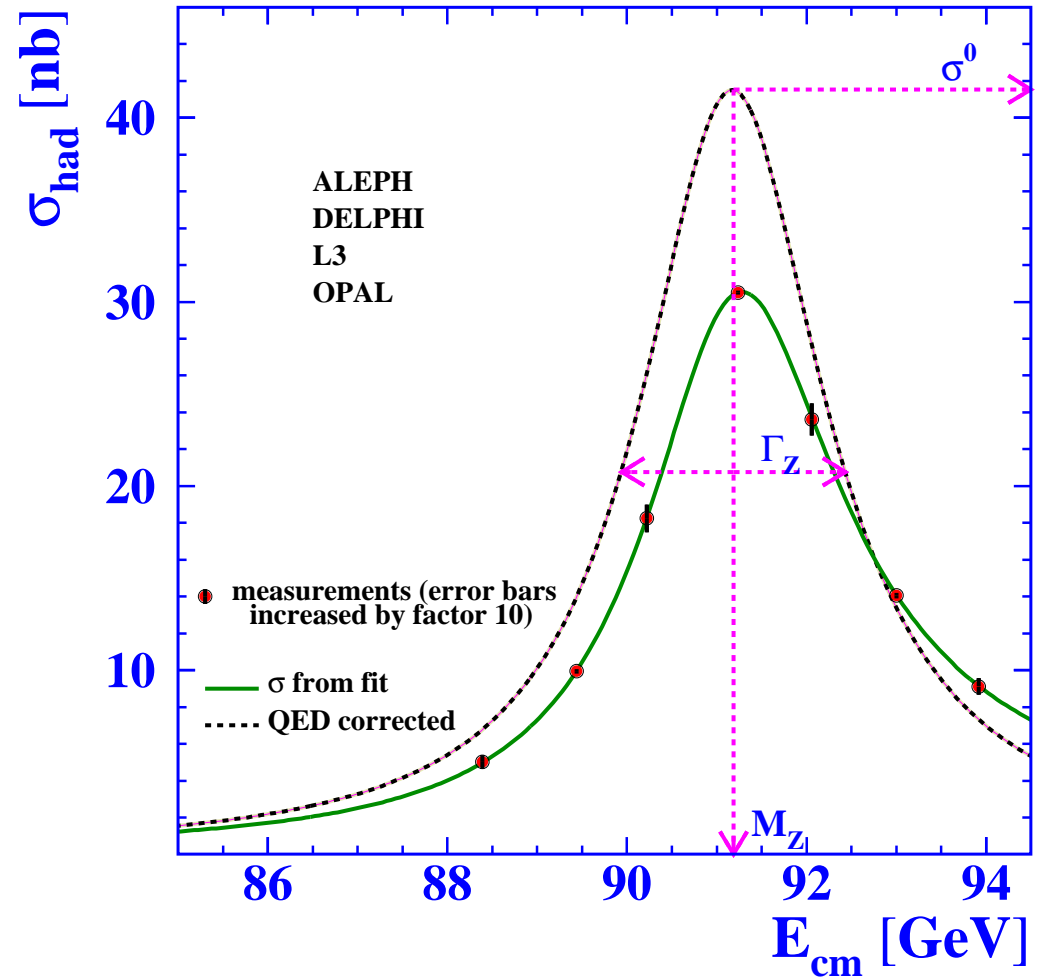
Pomiary precyzyjne w LEP

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...

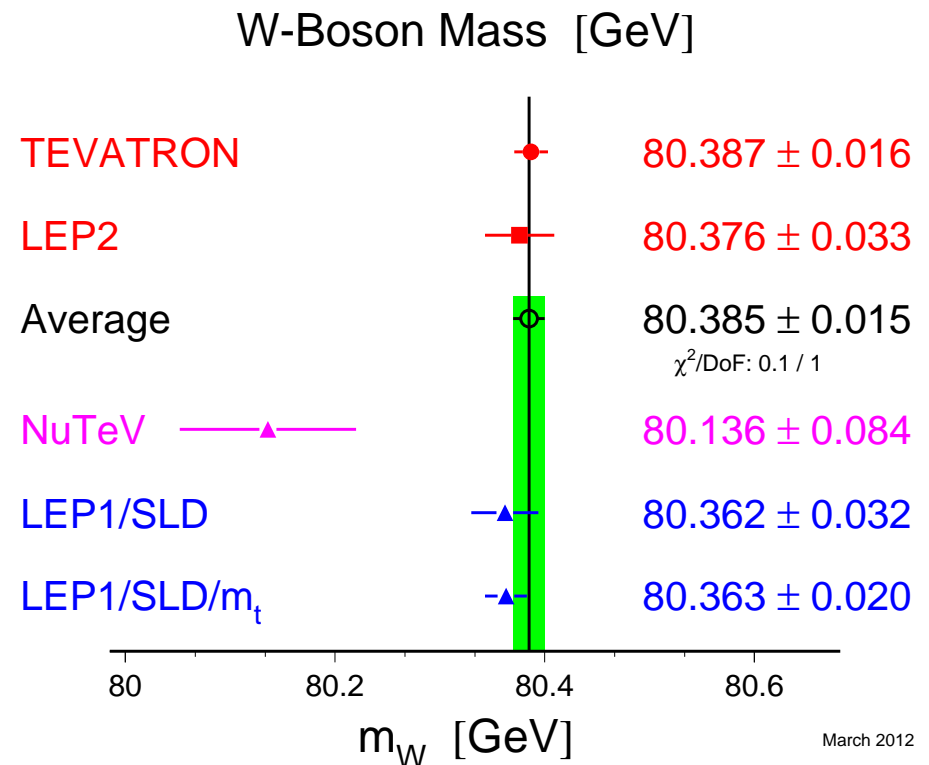
Precyzyjne pomiary w LEP i innych eksperymentach pozwalają **wnioskować** o **masach** tych cząstek, nawet jeśli ich bezpośrednio nie obserwujemy!



Pomiary precyzyjne w LEP

Poprawki

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



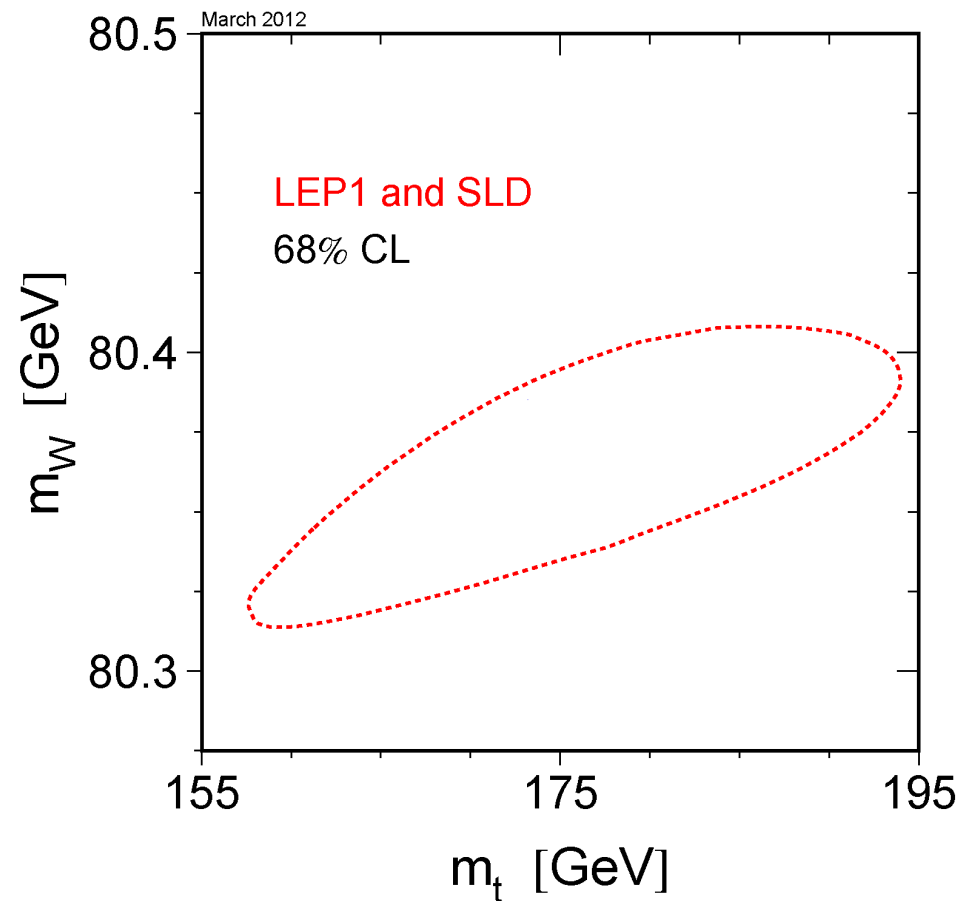
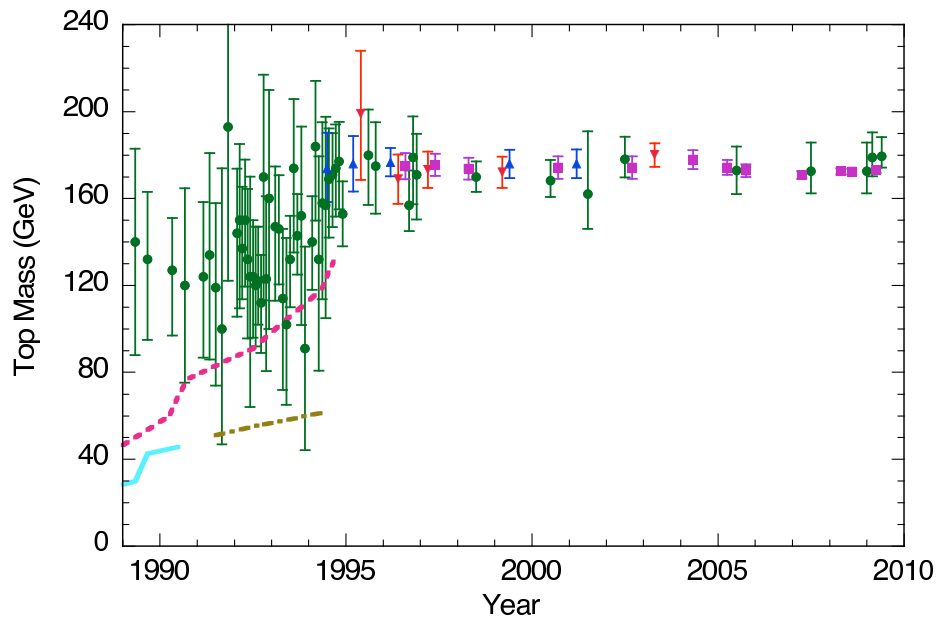
Pomiar bezpośredni zgodny z dokładnością do 0.03% z **przewidywaniami teorii** opartymi na precyzyjnych pomiarach przy niższych energiach.

Kwark t

Przewidywania

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

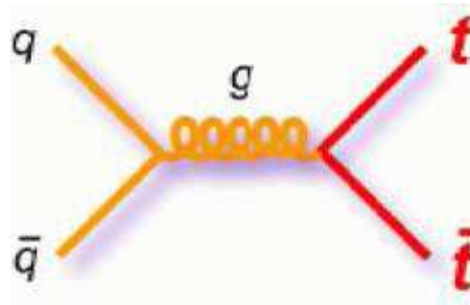
Dzisiejsze wyniki pośrednie:



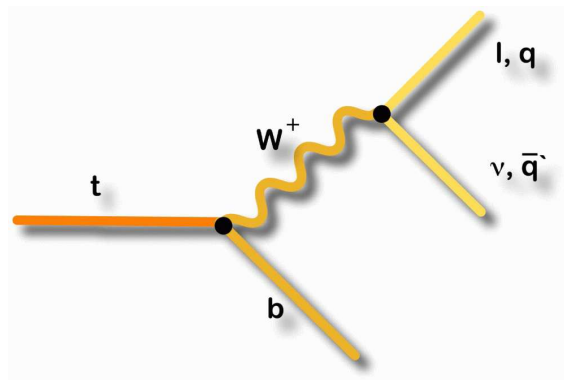
Kwark t

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):



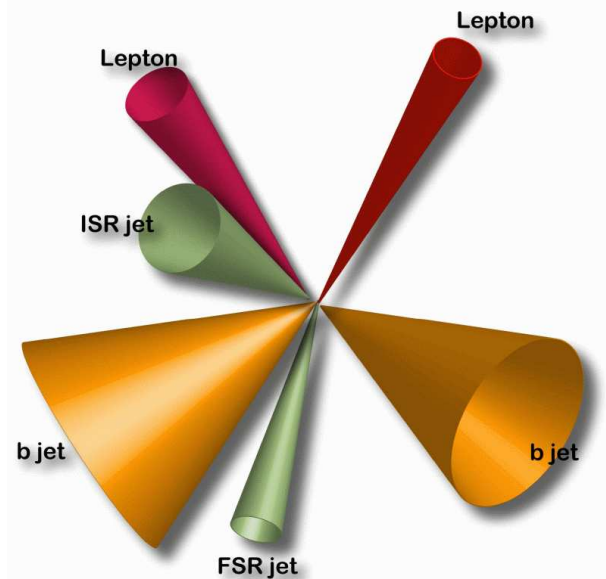
Obserwujemy powstający kwark b oraz lepton i neutrino (brakujący pęd poprzeczny) lub parę jetów o masie niezmienniczej odpowiadającej masie W

Kwark t

Tevatron

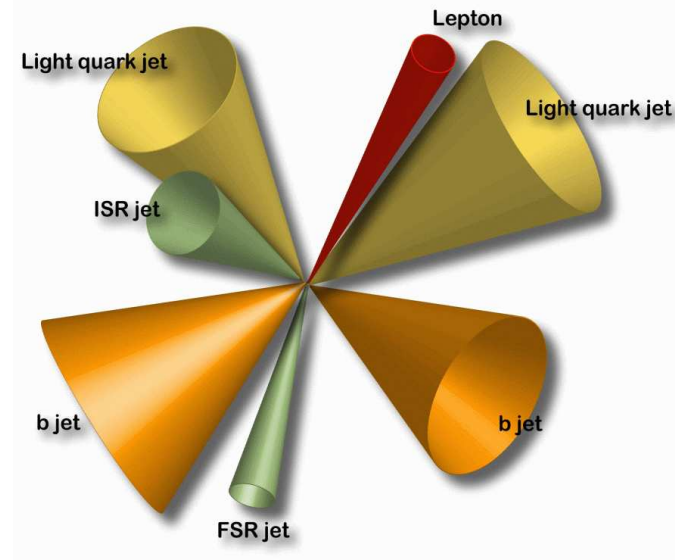
Ponieważ kwark t produkowany jest parami ($t\bar{t}$) mamy 3 możliwe klasy przypadków

leptonowe



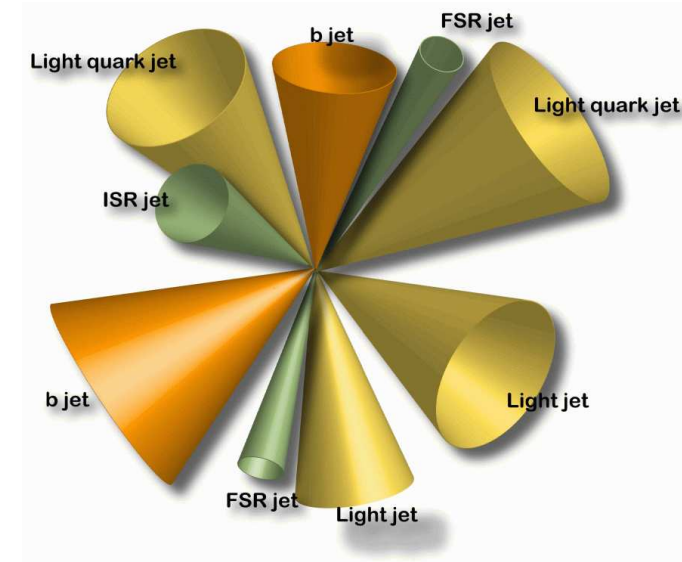
“złota próbka” ale tylko
 $\sim 4\%$ przypadków
 (e^+e^- , $\mu^+\mu^-$ i $e^\pm\mu^\pm$)

półleptonowe



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

hadronowe



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

Kwark t

Tevatron

Jeden z pierwszych przypadków

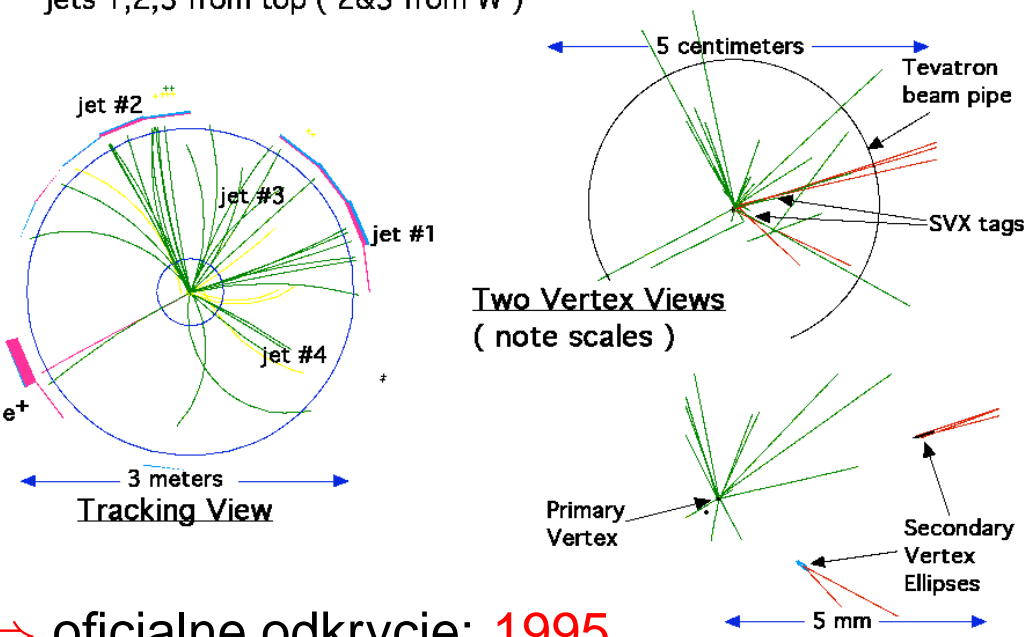
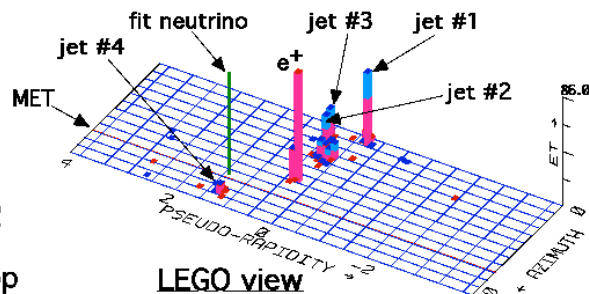
$e^+ + 4 \text{ jet event}$

40758_44414
24-September, 1992

TWO jets tagged by SVX

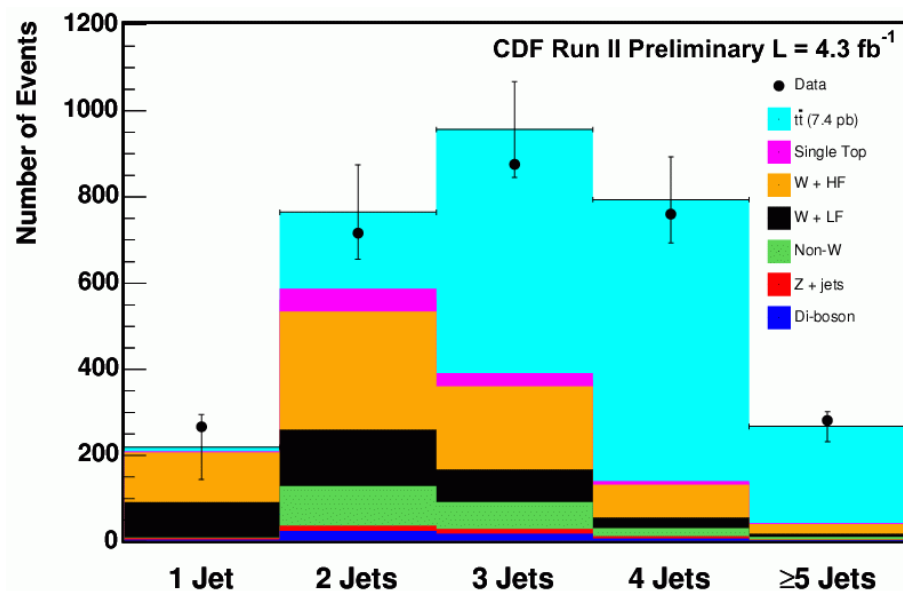
fit top mass is $175 \pm 10 \text{ GeV}/c^2$

e^+ , Missing E_T , jet #4 from top
jets 1,2,3 from top (2&3 from W)



⇒ oficjalne odkrycie: 1995

Liczba obserwowanych jetów dla przypadków z izolowanym leptonem (e^\pm, μ^\pm)



Wybieramy lepton i ≥ 3 jety

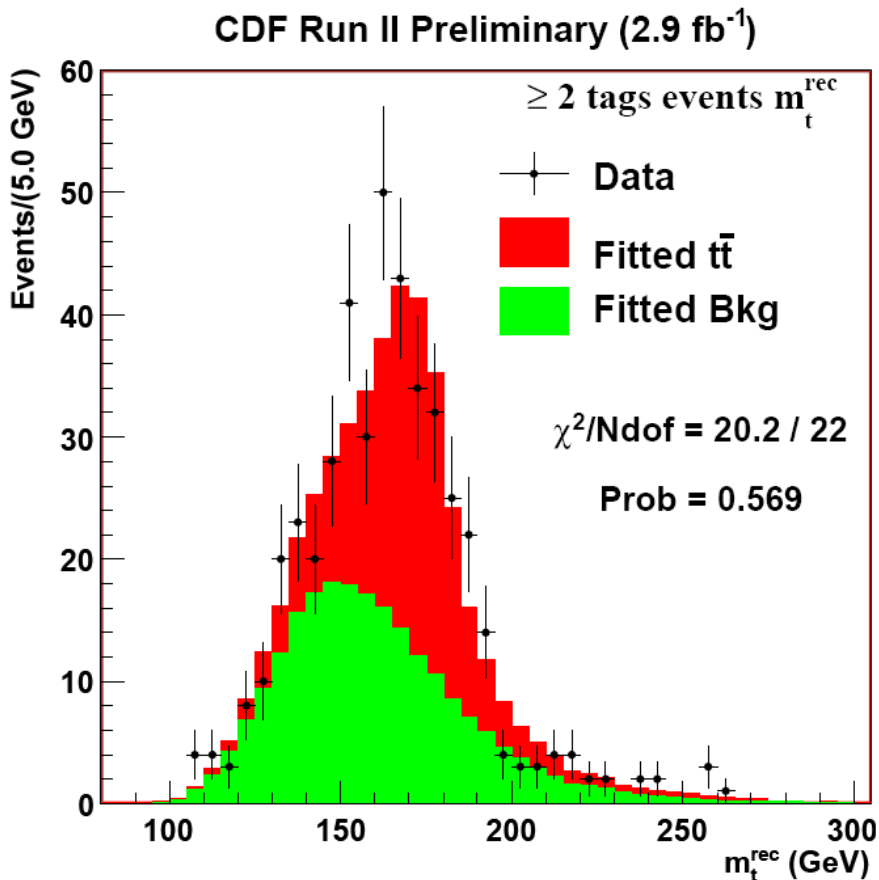
⇒ głównie przypadki $t\bar{t}$

Zebrano już tysiące przypadków...

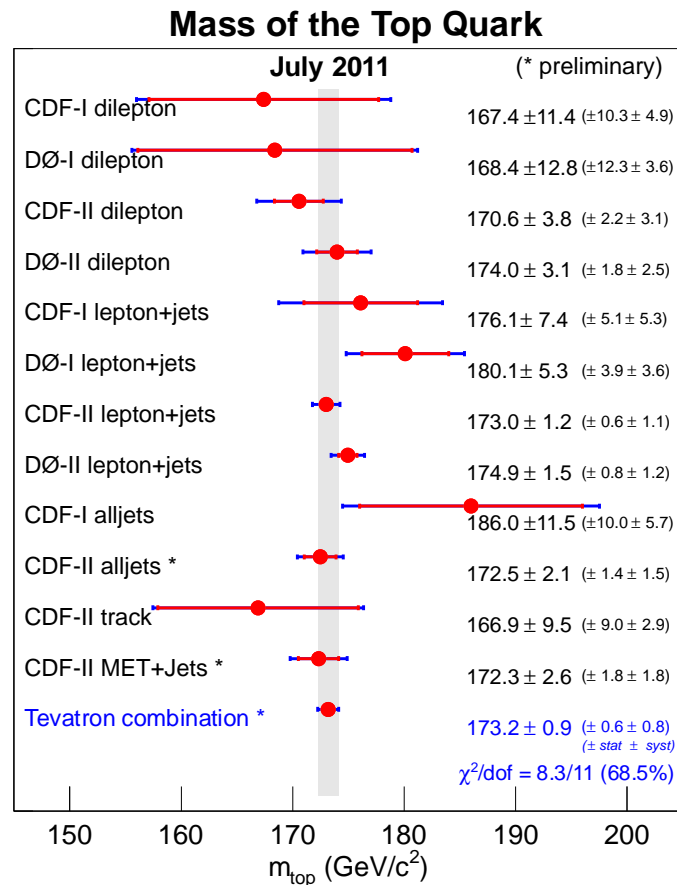
Kwark t

Tevatron

Rozkład rekonstruowanej masy kwarku t
w jednym z rozważanych kanałów



Porównanie wyników dla różnych próbek

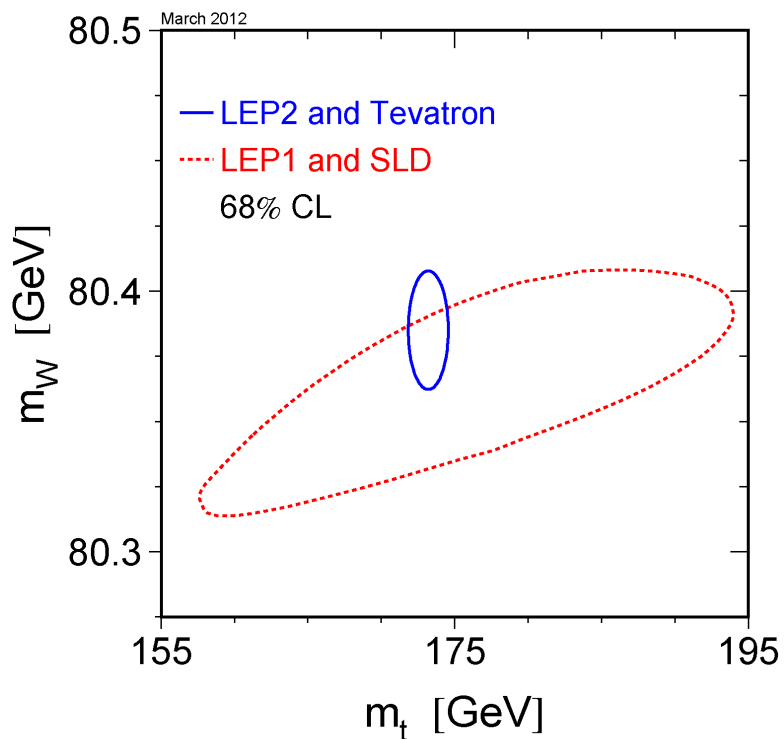


CDF + D0: $m_t = 173.2 \pm 0.9 \text{ GeV}$

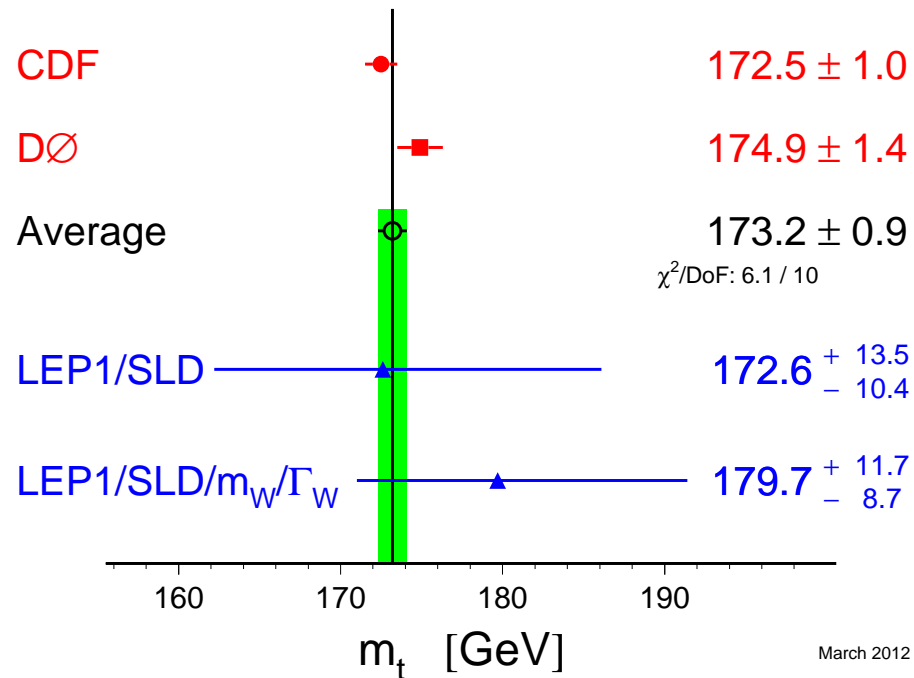
Kwark t

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.

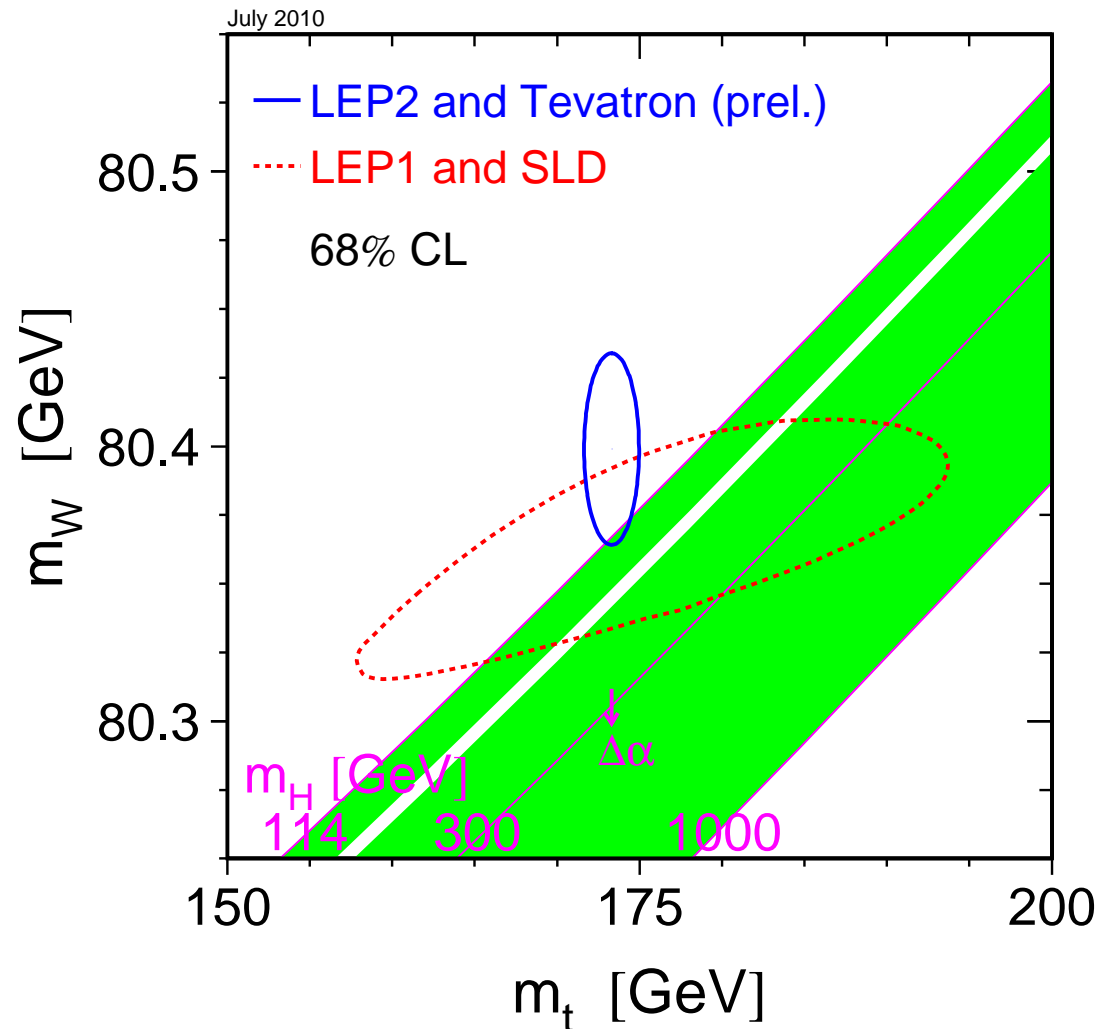
Pomiary precyzyjne w LEP

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** wskazuje, że masa Higgosa powinna wynosić **około 100 – 200 GeV**

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

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

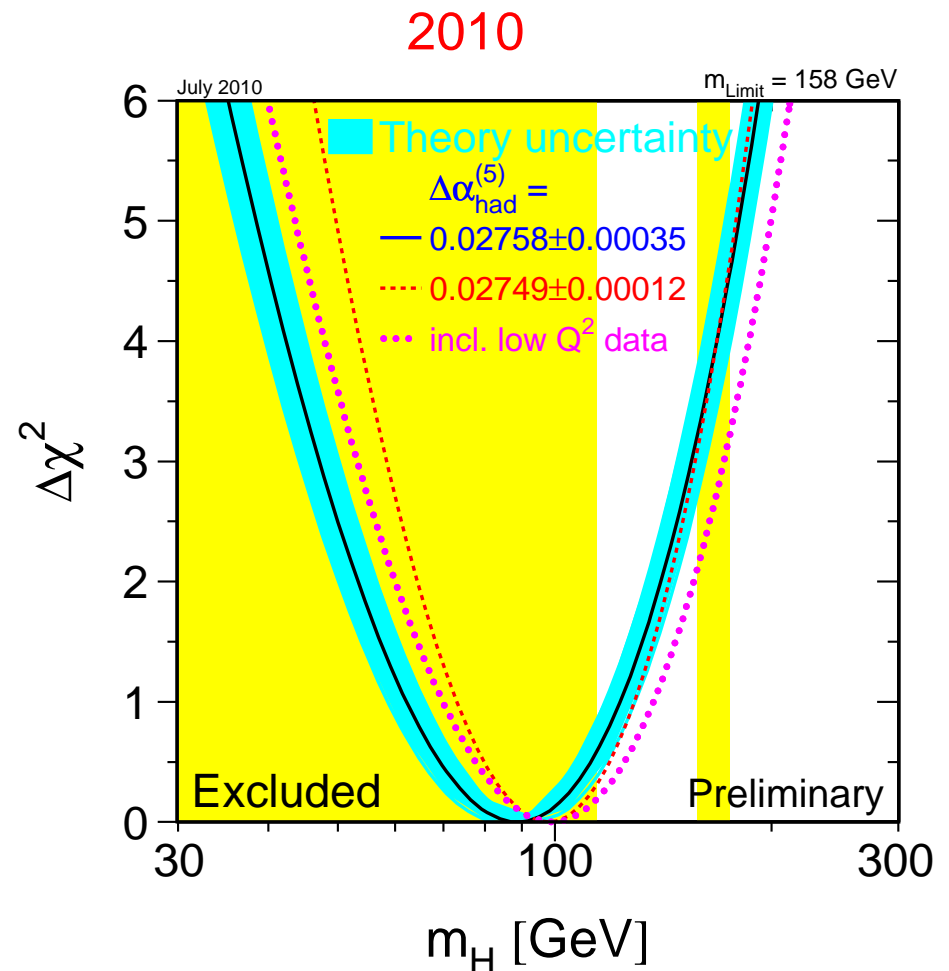
Dlaczego wciąż go nie widzimy ?...

Z bezpośrednich poszukiwań:

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

wszystkie dane LEP:

ALEPH + DELPHI + L3 + OPAL

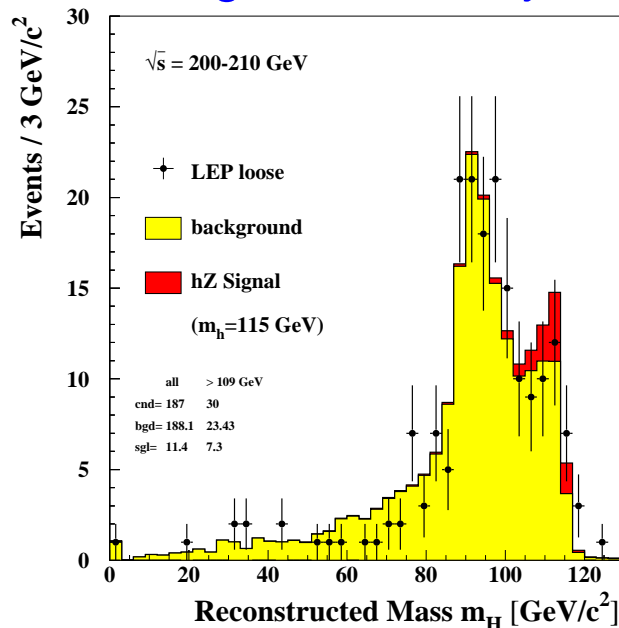


Poszukiwanie Higgosa w LEP

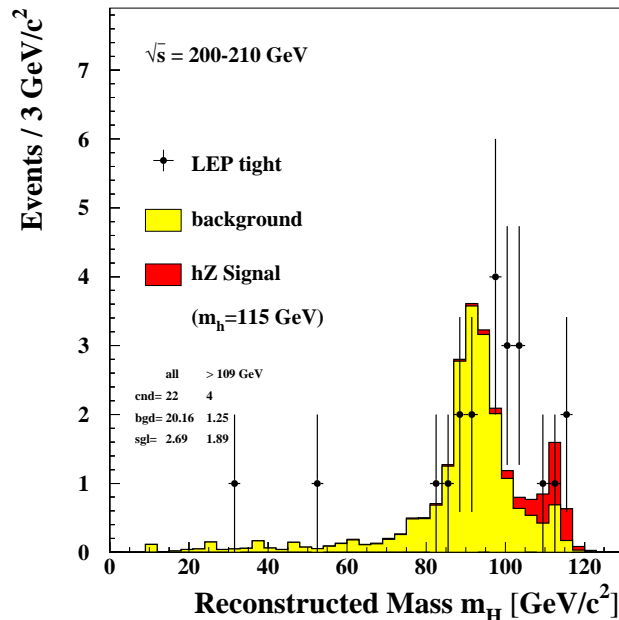
Rozkład masy

rozpad w pary $b\bar{b}$...

łagodna selekcja



ostra selekcja



W obszarze $m_h \sim 115$ GeV widać niewielki nadmiar przypadków, który może pochodzić od produkcji Higgosa

Niestety, jest to efekt na poziomie $\sim 2\sigma$

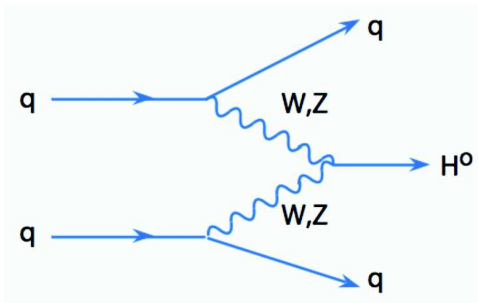
LEP wyłączono zanim zdołał wyjaśnić ten efekt...

Poszukiwanie Higgosa w Tevatronie

Ograniczenia

Produkcja Higgsa poszukiwana w **wielu kanałach**.

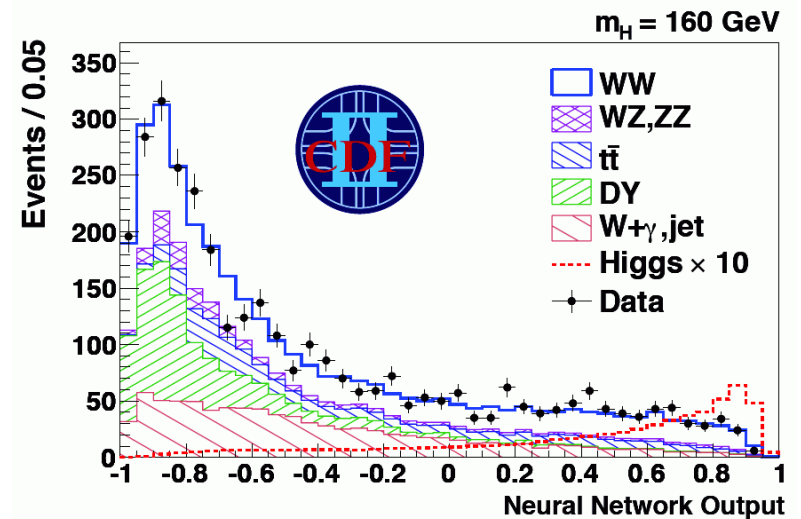
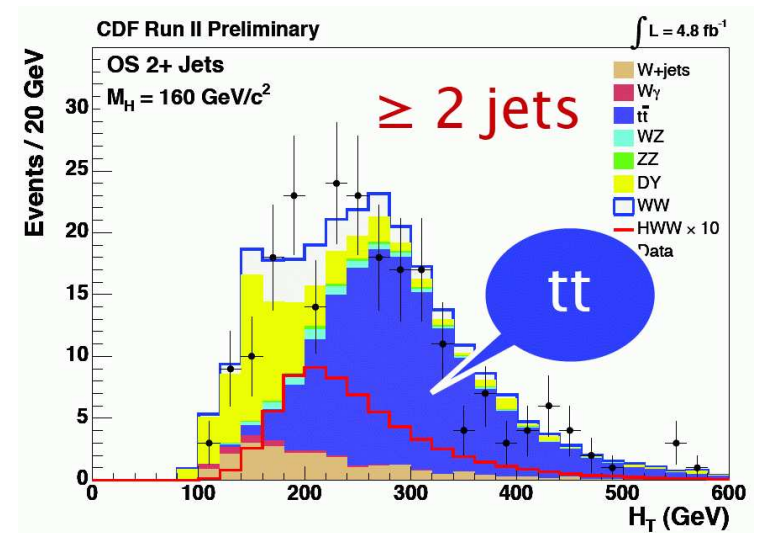
Jedną z możliwości: **“fuzja” bozonów W^\pm lub Z^0**



Najbardziej obiecujący dla $M_H \sim 160 GeV$ kanał rozpadu $H \rightarrow W^+W^-$. Dedykowane programy, tzw. **sieci neuralne (NN)**, analizują topologię przypadku i oceniają prawdopodobieństwo, że jest to **bozon Higgosa**.

Nie zaobserwowano nadwyżki przypadków.

Wykluczono $156 < M_H < 177 GeV \dots$



Poszukiwanie Higgsa

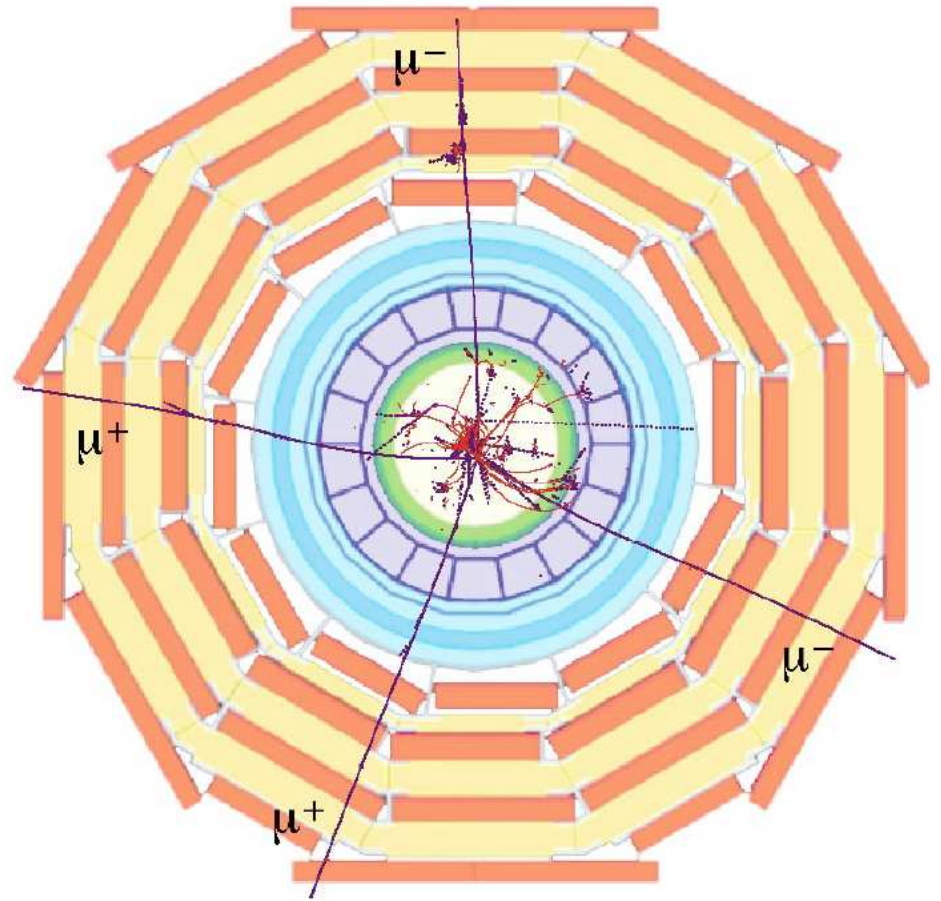
LHC

Poszukiwania **bozonu Higgsa** a następnie **pomiar** jego **parametrów** jest jednym z głównych tematów badań

W zderzeniach pp tło hadronowe jest bardzo duże. Najbardziej obiecujący jest **kanal**:

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

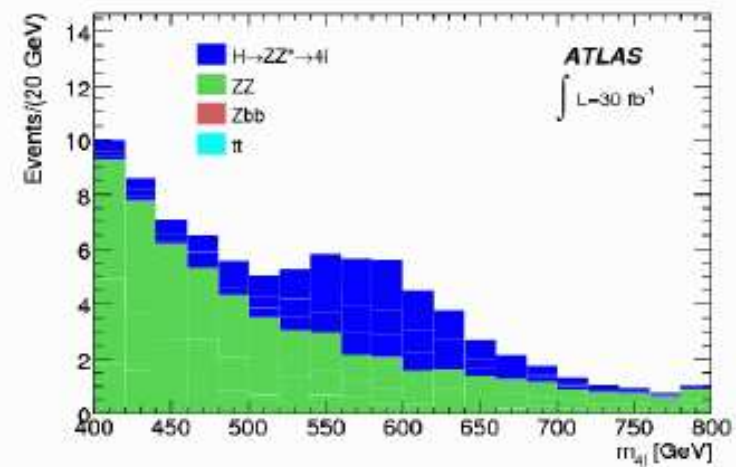
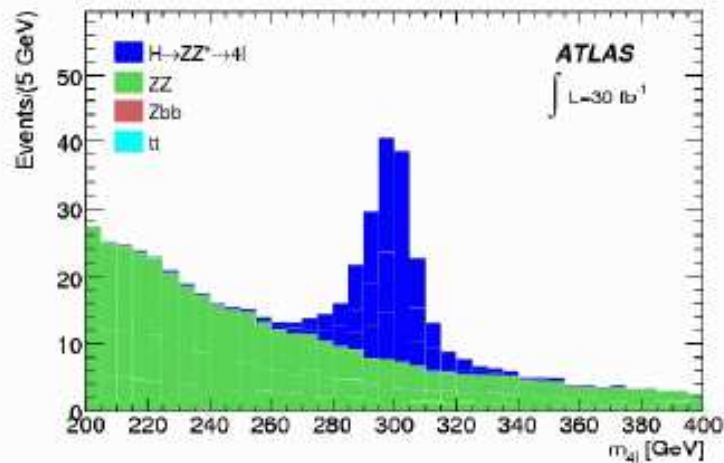
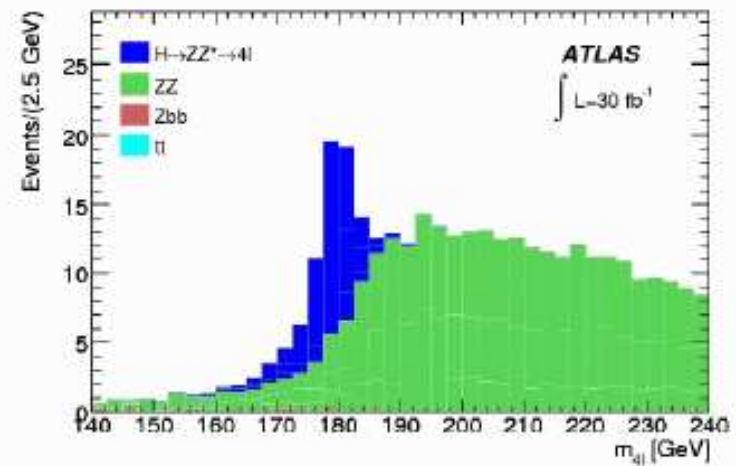
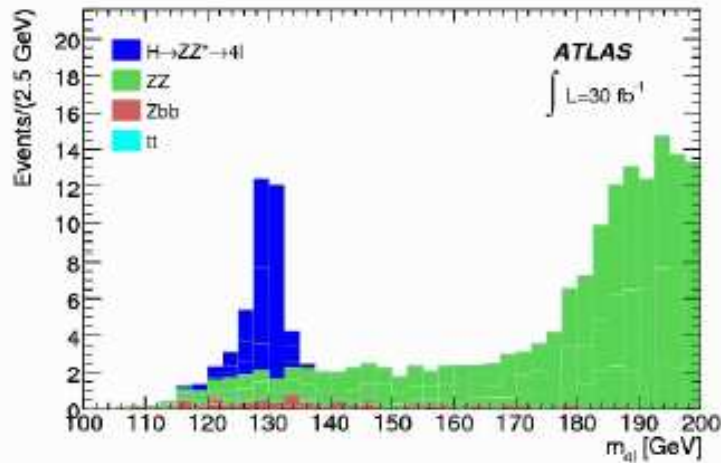
gdyż naładowane leptony (e^\pm i μ^\pm) można **łatwo zidentyfikować**



Poszukiwanie Higgsa

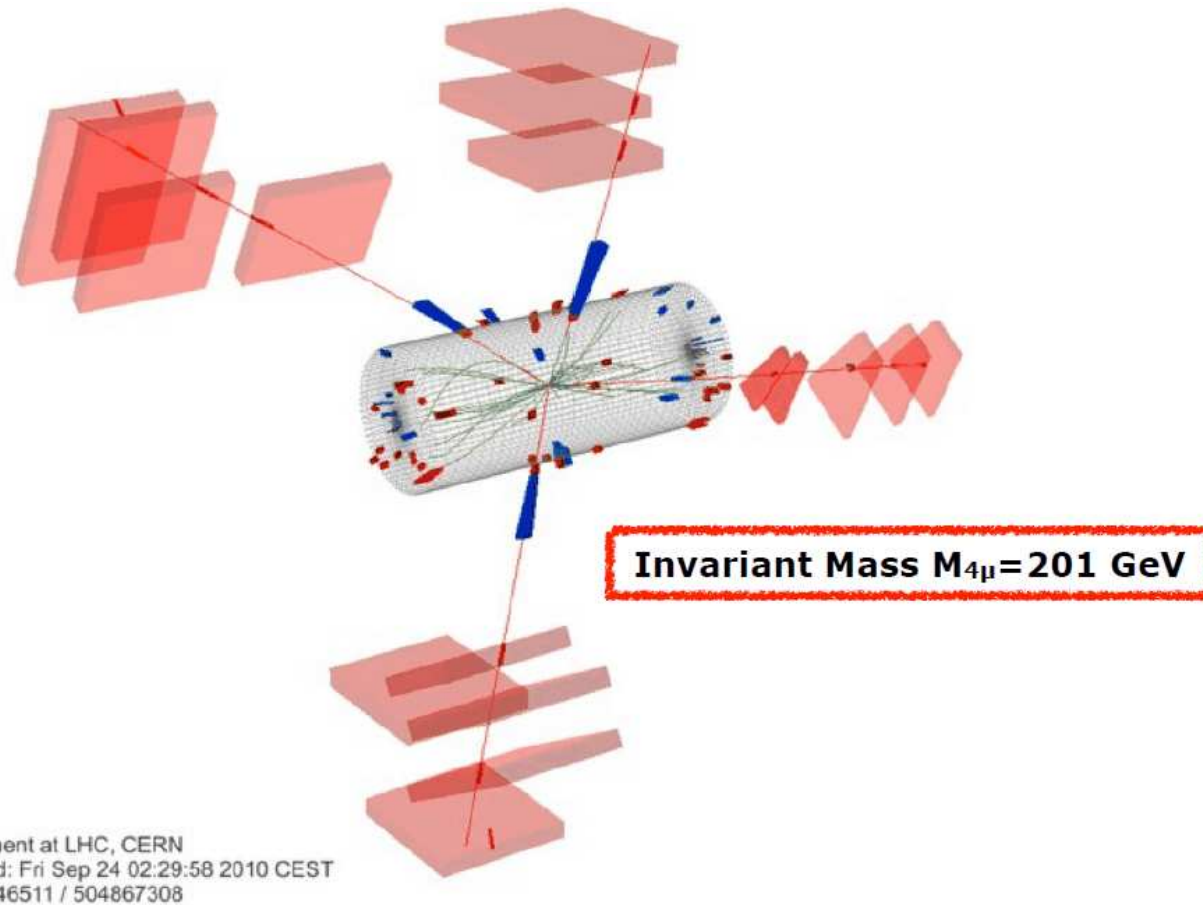
LHC

oczekiwany sygnał w detektorze ATLAS (dla różnych m_H)



Poszukiwanie Higgsa

Jeden z pierwszych “kandydatów” na Higgsa.



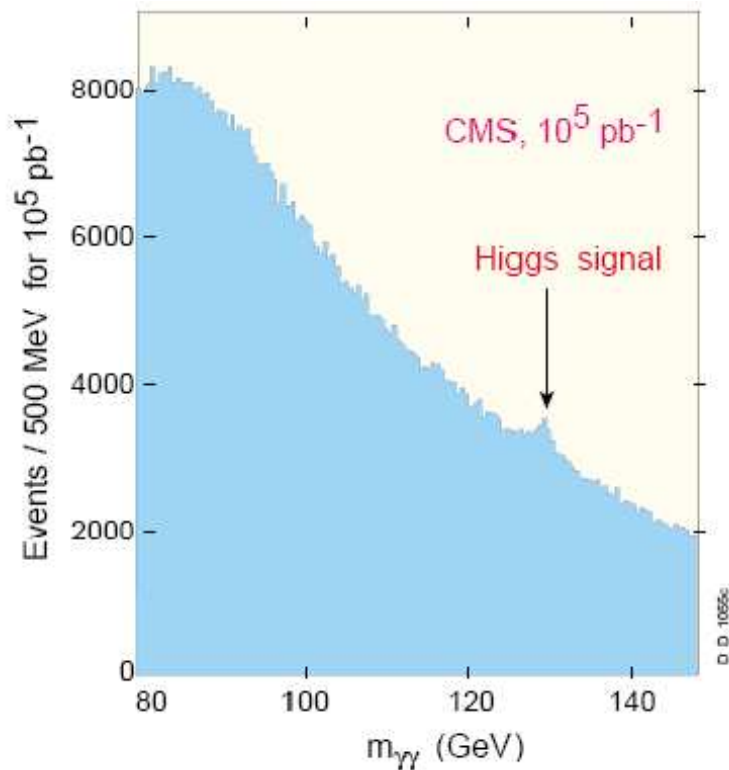
Niestety, w obszarze **dużych mas bozonu Higgsa**, $M_H > 160 \text{ GeV}$, nie znaleziono oczekiwanego sygnału - liczby przypadków zgodne z tłem.

Higgs w LHC

Dla **małych mas** najlepszy kanał to

$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

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

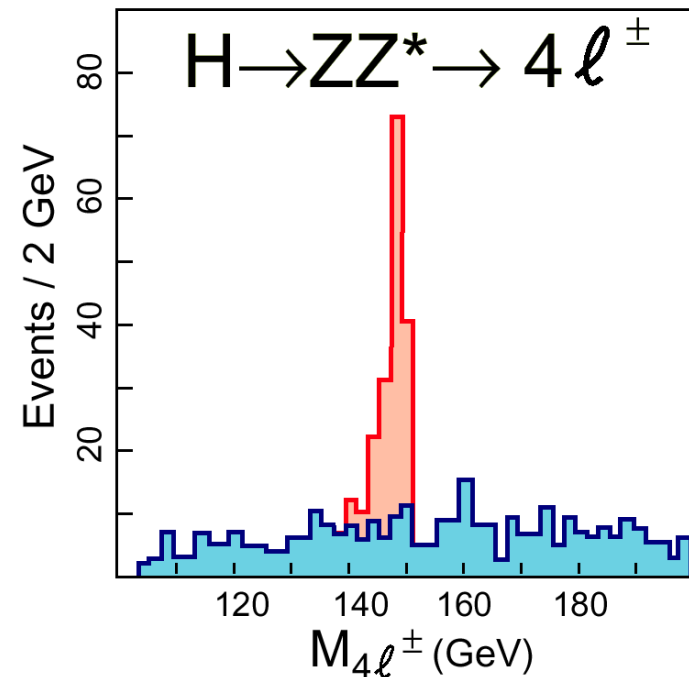


Obiecujący jest też kanał:

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

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

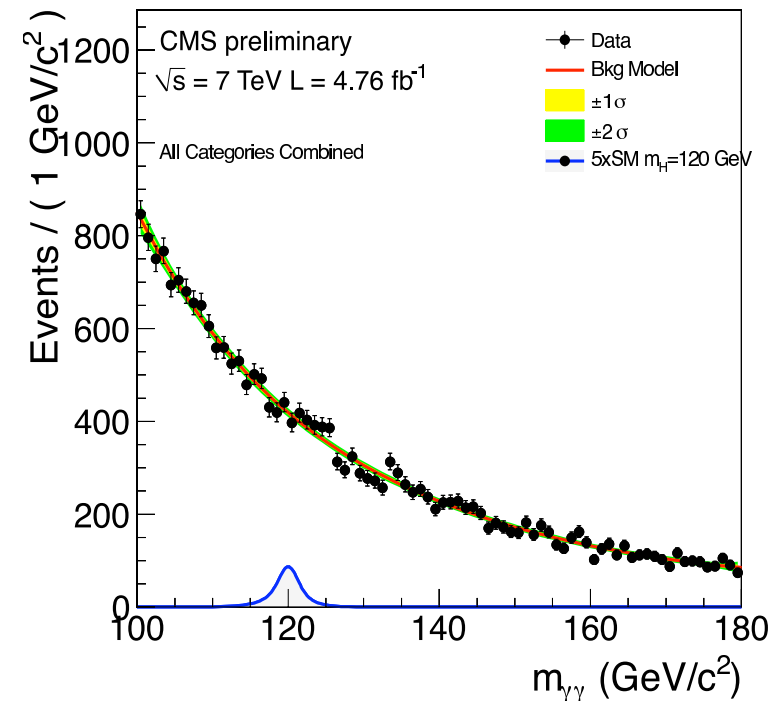
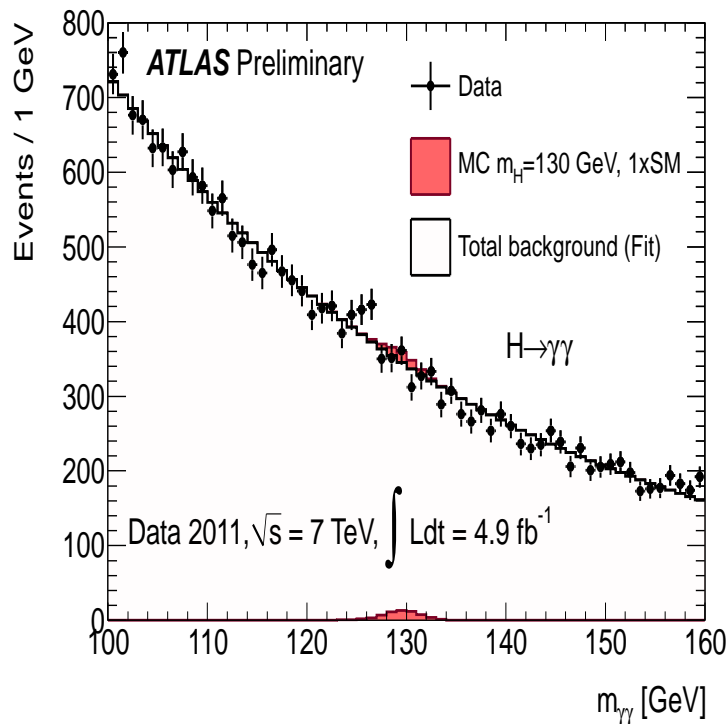
Ale jest mało przypadków...



Higgs w LHC

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

Niestety statystyki przypadków są bardzo małe

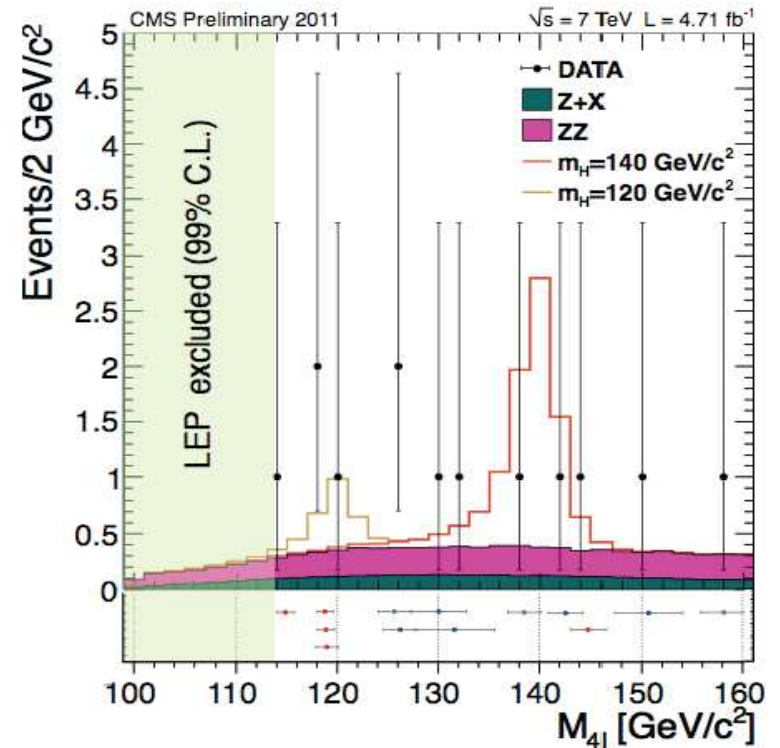
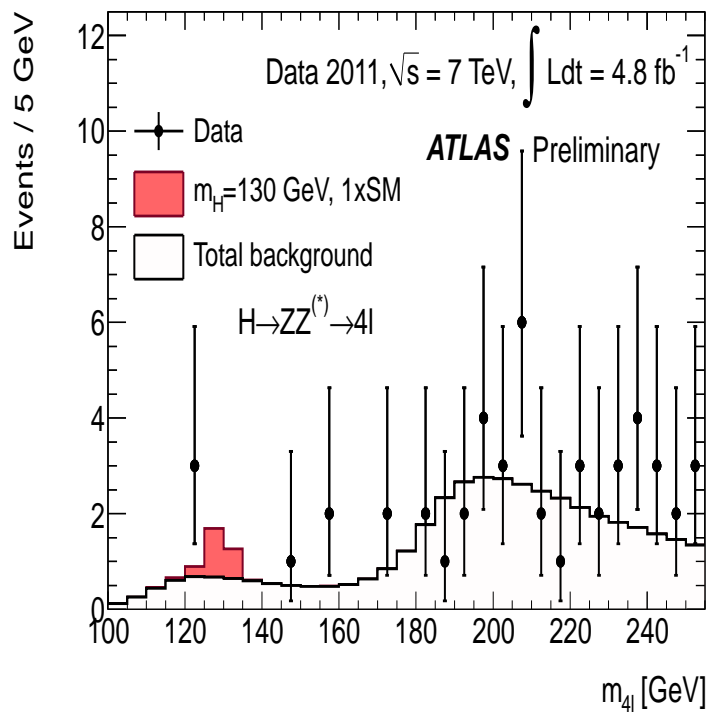


Higgs w LHC

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

Niestety statystyki przypadków są bardzo małe

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



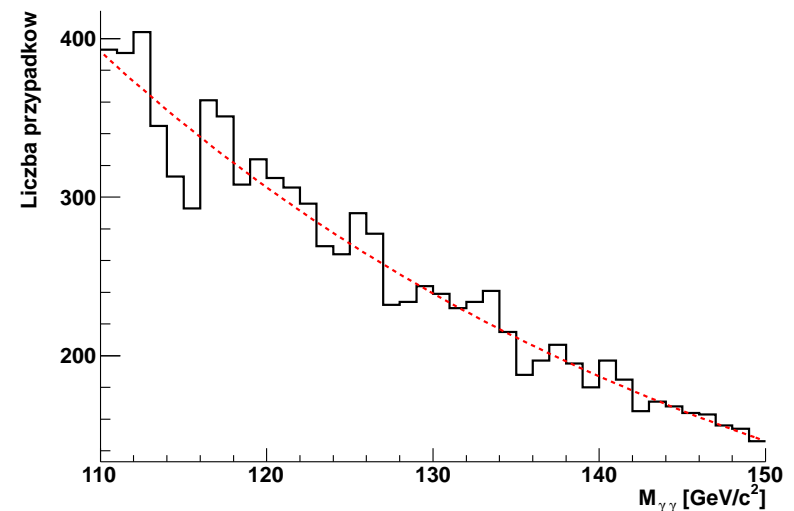
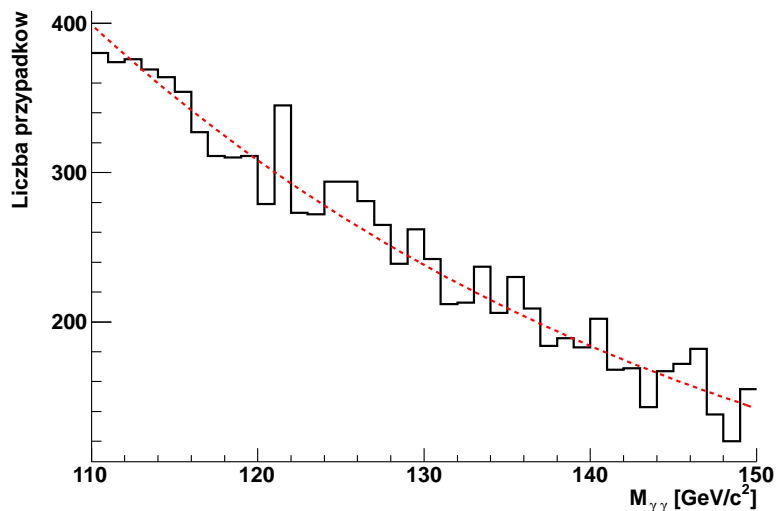
Higgs w LHC

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 10'000 przypadków



Gdzie jest Higgs?

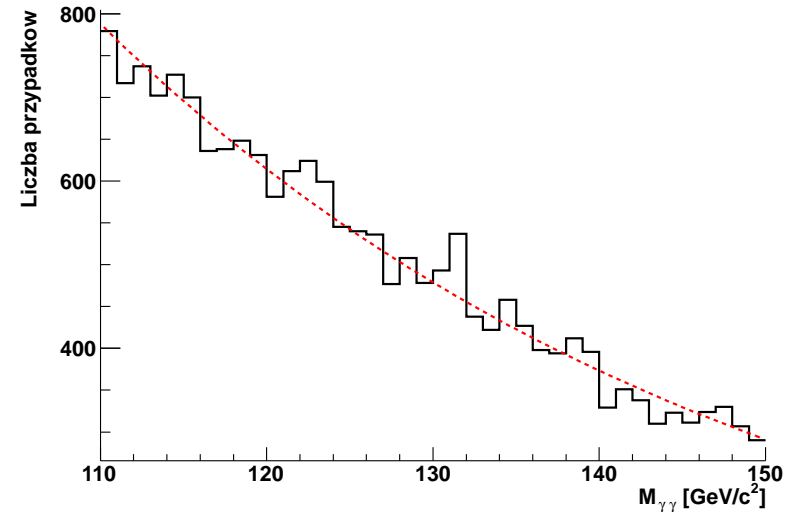
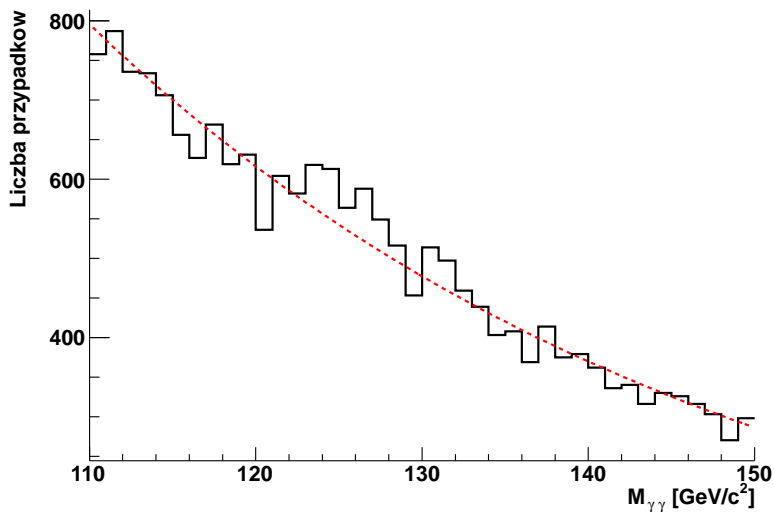
Higgs w LHC

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



Gdzie jest Higgs?

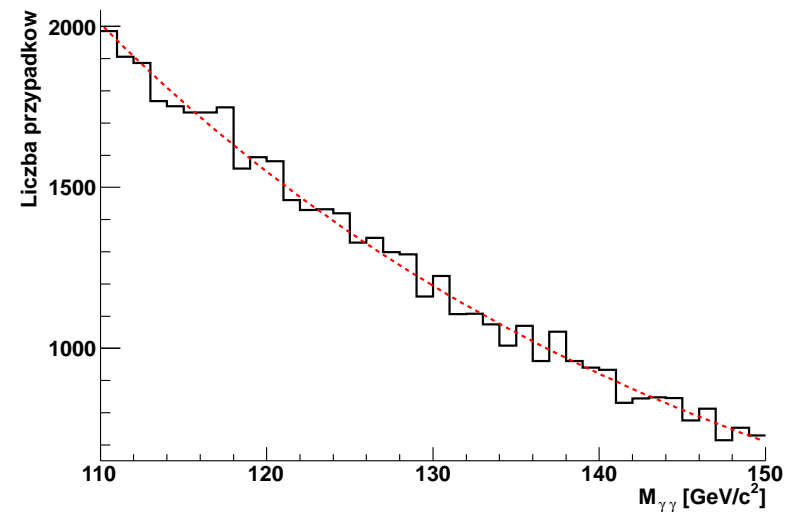
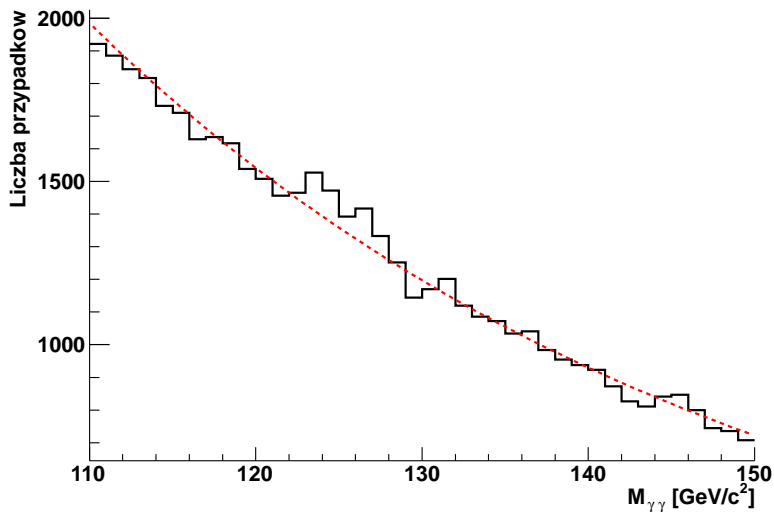
Higgs w LHC

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 50'000 przypadków



Gdzie jest Higgs?

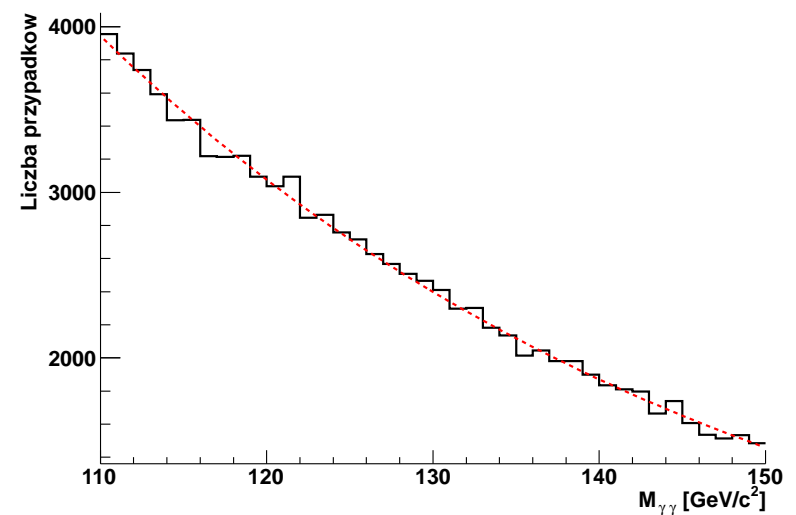
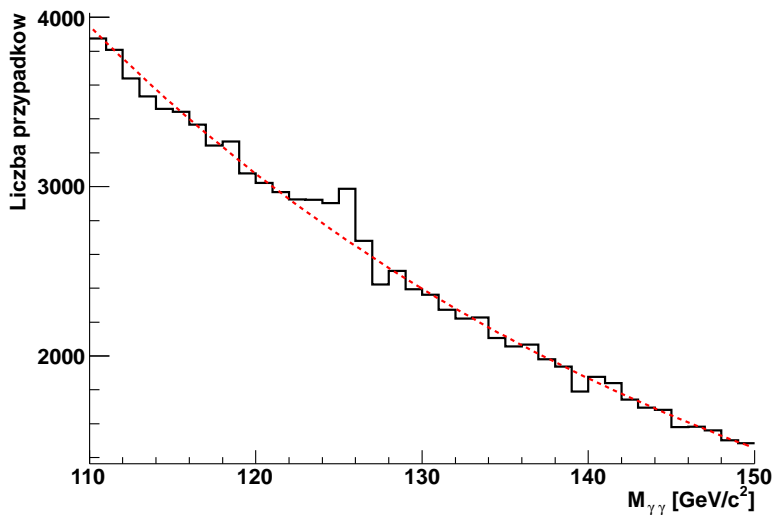
Higgs w LHC

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 100'000 przypadków



Gdzie jest Higgs?

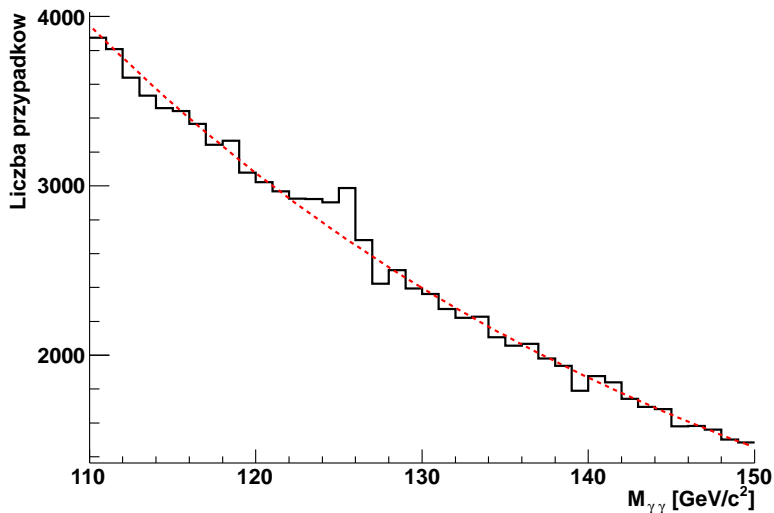
Higgs w LHC

Przy tak małych statystykach musimy być bardzo ostrożni!

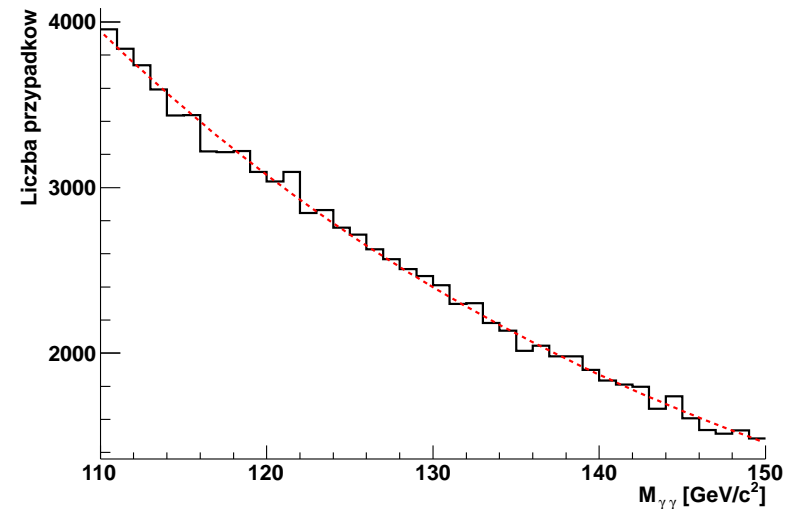
Nawet jeśli dla jakiejś masy widzimy nadmiar przypadków to może to być fluktuacja statystyczna, tym bardziej prawdopodobna, że szukamy jej w szerokim zakresie mas

Ilustracja w oparciu o symulację tzw. metodą Monte Carlo

Dwie próbki po 100'000 przypadków



1% przypadków produkcji Higgsa



samo tło

Higgs w LHC

Wyniki poszukiwań (grudzień 2011)

Wykluczono istnienie cząstki Higgsa w przedziale mas od 127 do 600 GeV
(w ramach Modelu Standardowego)

Wciąż dozwolone są masy od 114 do 127 GeV

Oba eksperymenty widzą nadmiar przypadków przy **masie około 125 GeV**
odchylenie od tła na poziomie 2.6σ w CMS i 3.6σ w ATLAS

Jednak biorąc pod uwagę szeroki zakres masy, w którym poszukiwano sygnału
odchylenia “globalne” odchylenie jest na poziomie 1.9σ w CMS i 2.3σ w ATLAS

Do odkrycia wymagamy obserwacji na poziomie 5σ ...

LHC działa coraz lepiej.

W roku 2011 dostarczyło 100 razy więcej danych niż w 2010.

Mamy nadzieję, że rok 2012 dostarczy jeszcze więcej danych i ostatecznej odpowiedzi...

Podsumowanie

Model Standardowy

Eksperymenty przy LEP, SLC, HERA i Tevatronie **potwierdziły** wszystkie przewidywania **Modelu Standardowego**.

Przez ostatnie 40 lat nie udało się znaleźć zjawiska, które by mu zaprzeczało.

Brak tylko **bozonu Higgsa**...

W ramach Modelu Standardowego dozwolone są już tylko masy od 114 do 127 GeV

