

Testy Modelu Standardowego

prof. dr hab. Aleksander Filip Żarnecki

Wszechświat Cząstek Elementarnych

Wykład 11

- bozony W^\pm i Z^0
- kwark t
- kolor kwarków
- liczba neutrin
- pomiary precyzyjne
- poszukiwania bozonu Higgsa
- poszukiwanie “nowej fizyki” (poza Modelem Standardowym)

Wprowadzenie

Nagrody Nobla

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

Za stworzenie 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

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

Model Standardowy

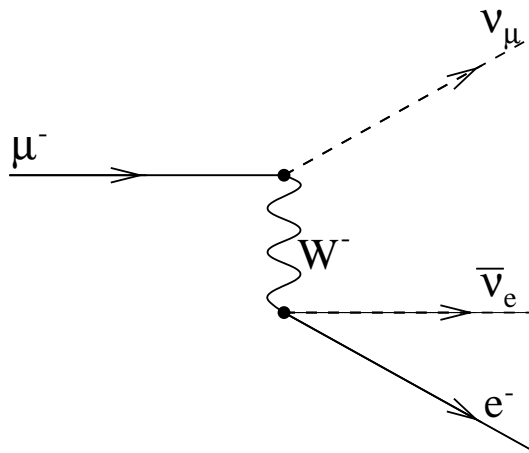
Bozony W^\pm i Z^0

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 :

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

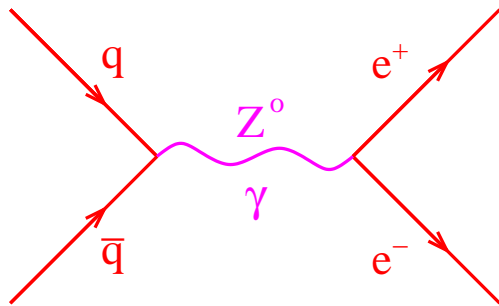
$$m_Z \sim 90 \text{ GeV}$$

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):

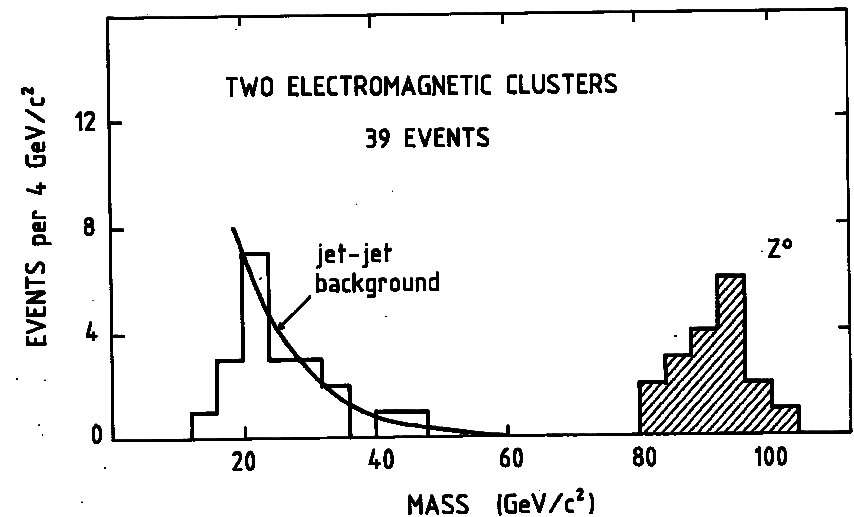
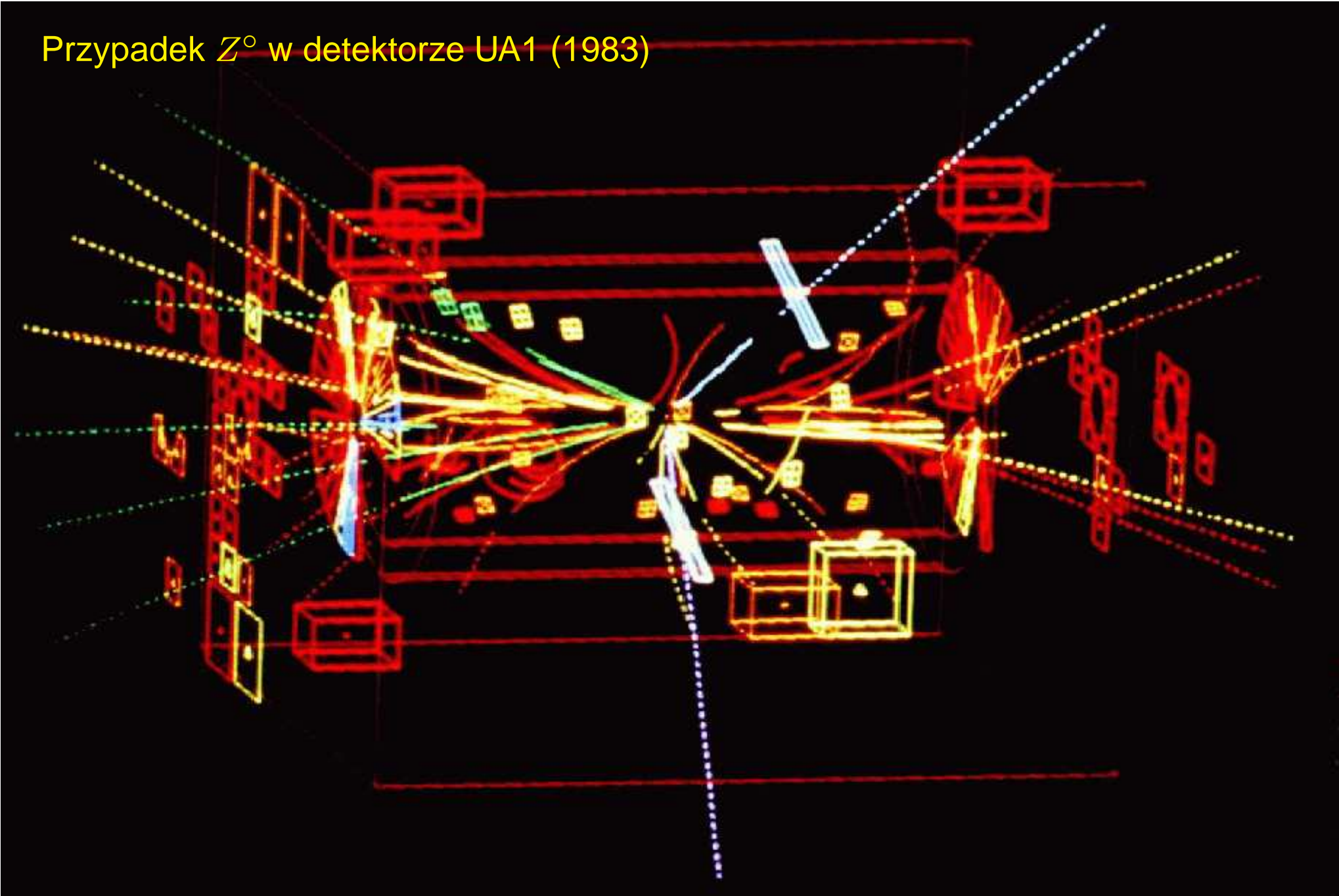


Fig. 1

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):

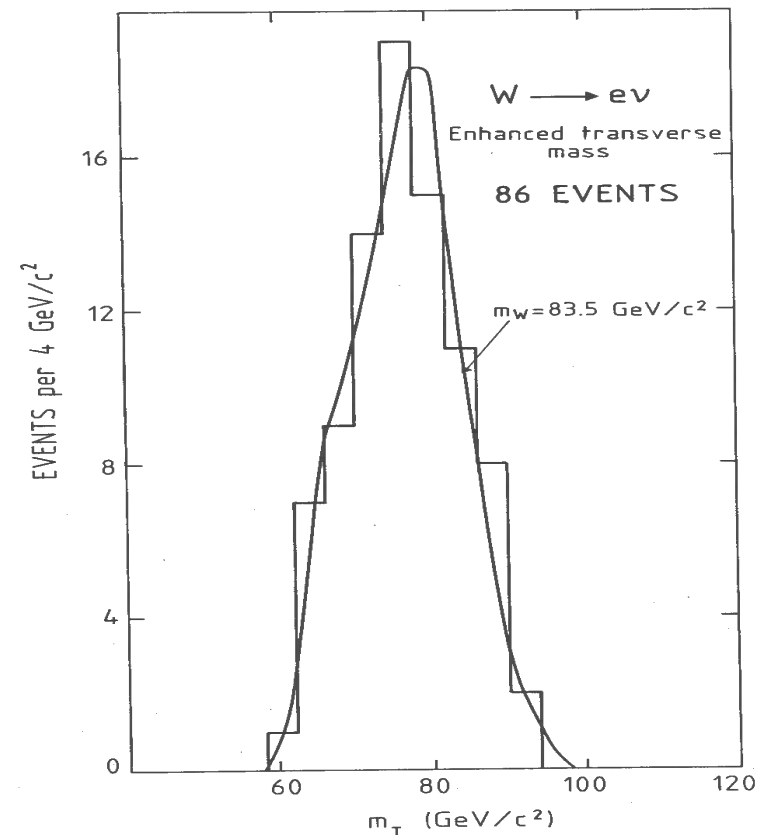
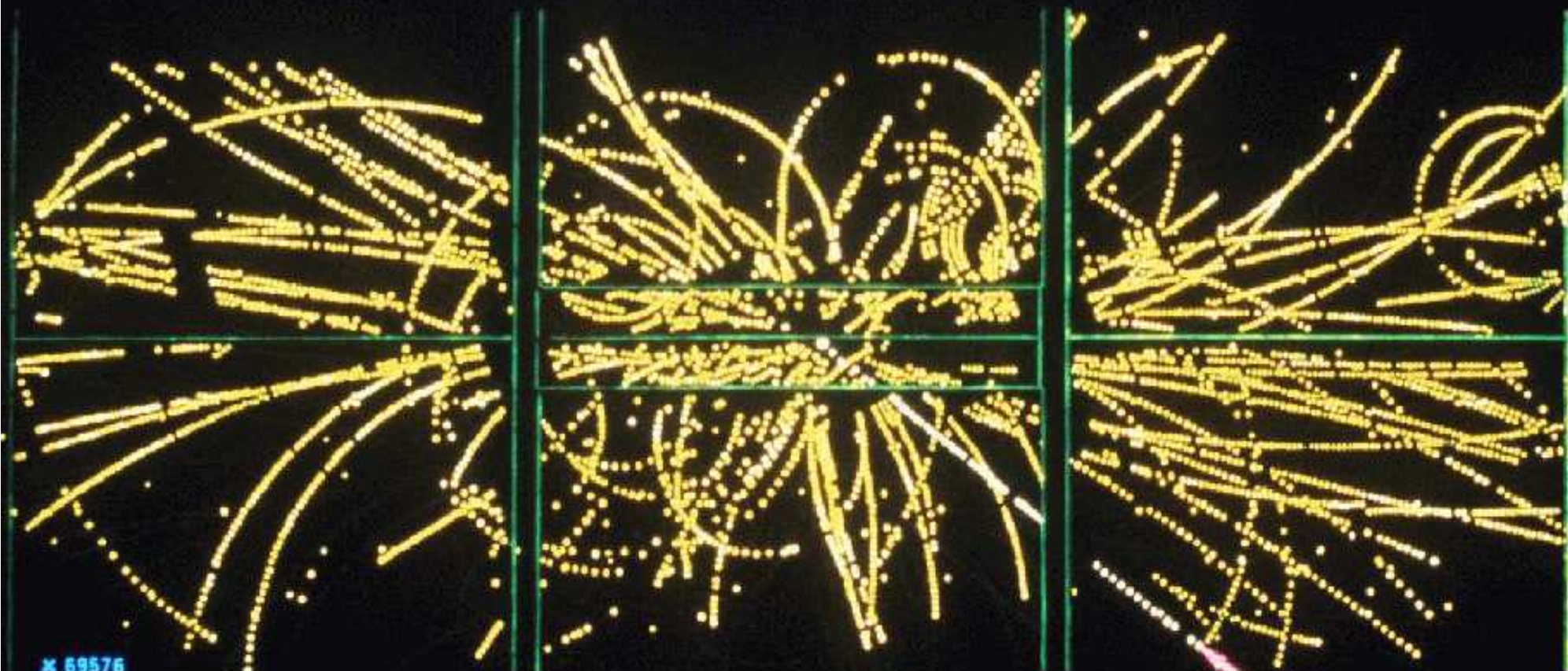


Fig. 3b

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



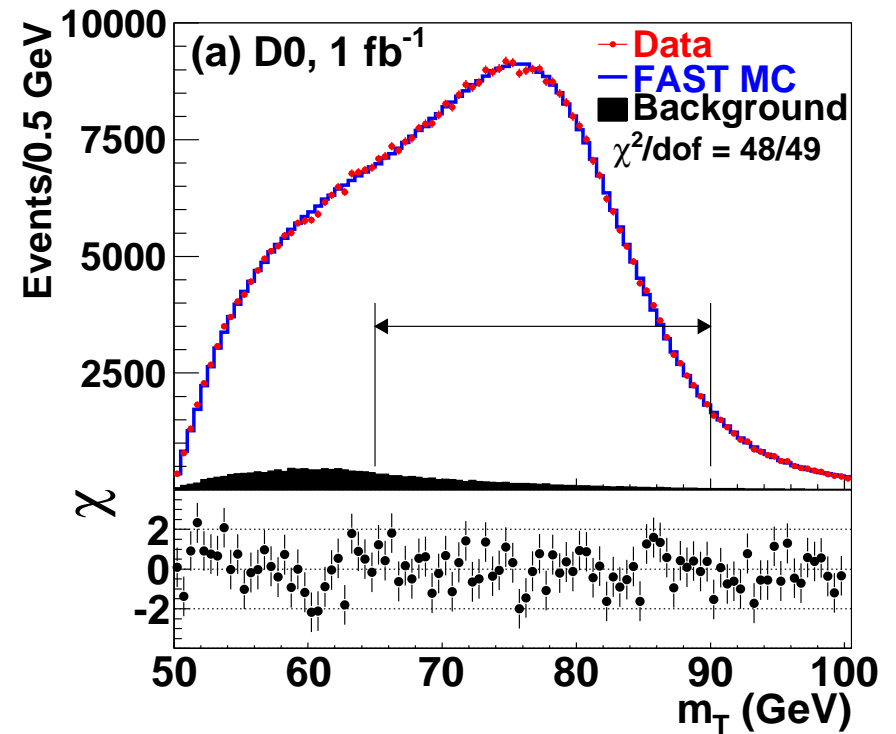
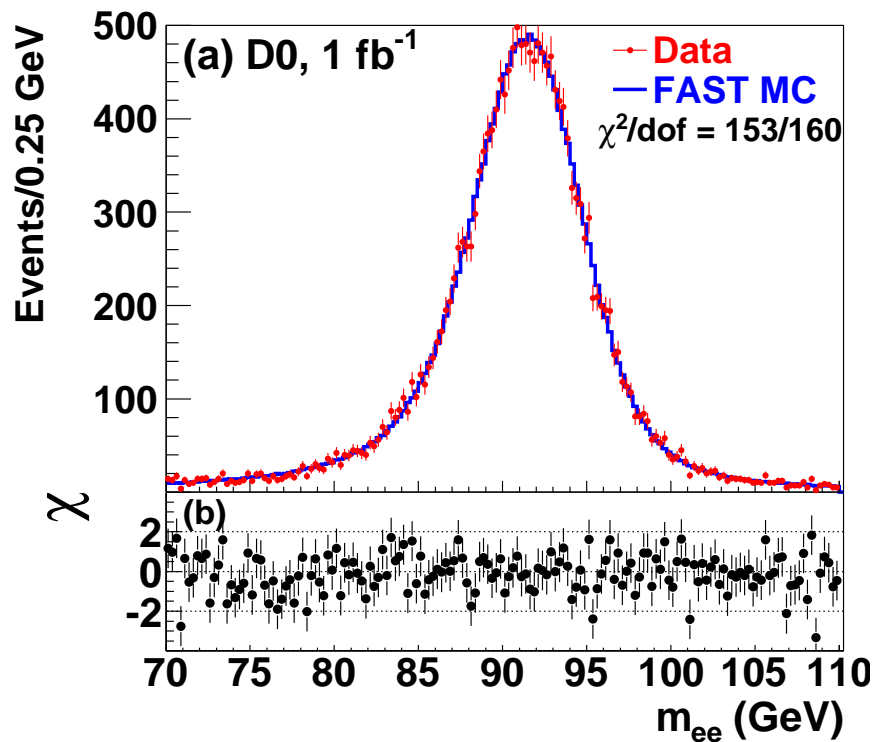
Bozony W^\pm i Z^0

Tevatron @ Fermilab

W ten sam sposób tysiące Z^0 i W^\pm są dziś produkowane 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. Dziś przypadki te służą m.in. do kalibracji detektora !

Bozony W^\pm i Z^0

Rozpraszanie elektron-proton

Q^2 - kwadrat przekazu czteropędu
skala energetyczna rozpraszania

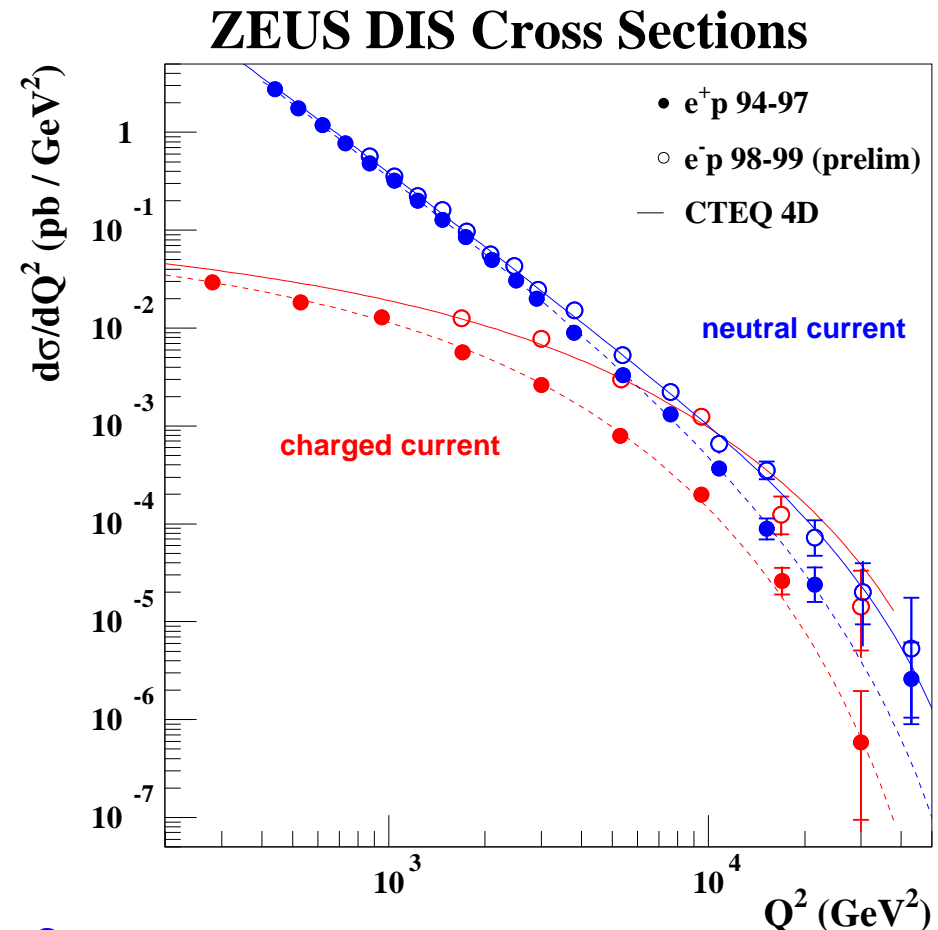
Wymiana prądów neutralnych (NC)
(dominuje wymiana γ):

$$\frac{d\sigma}{dQ^2} \sim \frac{1}{Q^4}$$

Dla wymiany W^\pm (CC):

$$\frac{d\sigma}{dQ^2} \sim \frac{1}{(M_W^2 + Q^2)^2}$$

W obszarze bardzo dużych Q^2 “unifikacja”:



Gdy $Q^2 \geq M_W^2$ oddziaływania słabe porównywalne z EM

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”):

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

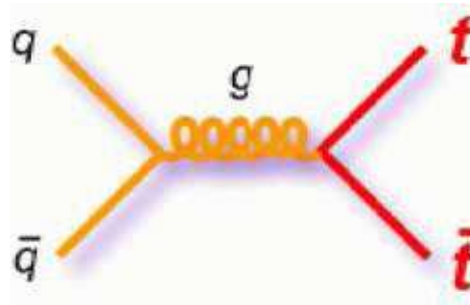
Pierwsze “odkrycie”: CERN SPS, 1984, $m_t \sim 40 \text{ GeV}$ (**potem odwołane**)

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

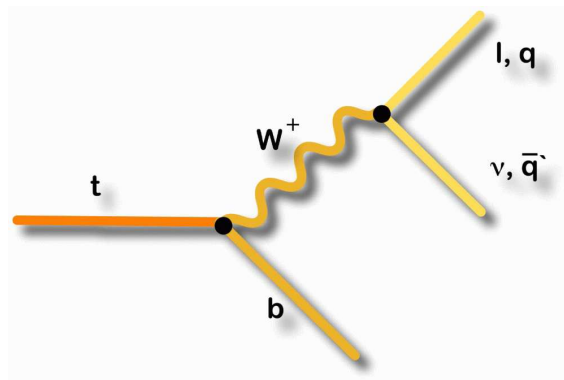
Kwark t

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

Kwark t najczęściej produkowany w wyniku anihilacji kwark-antykwar:



Rozpada się prawie natychmiast (nie tworzy żadnych cząstek):



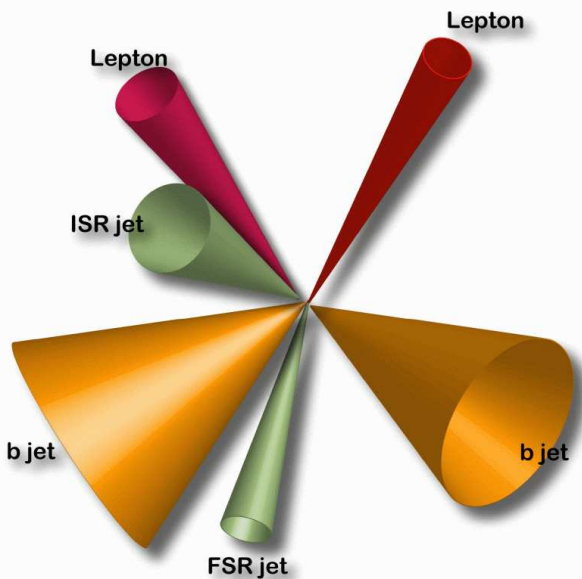
Obserwujemy powstający kwark b oraz lepton i neutrino (brakujący pęd poprzeczny) lub parę jetów o masie niezmienniczej odpowiadającej masie W

Kwark t

Tevatron

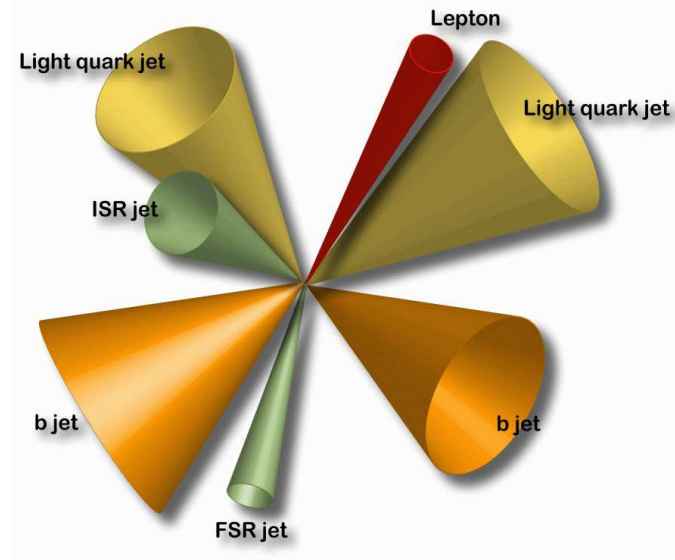
Ponieważ kwark t produkowany jest parami ($t\bar{t}$) mamy 3 możliwe klasy przypadków

leptonowe



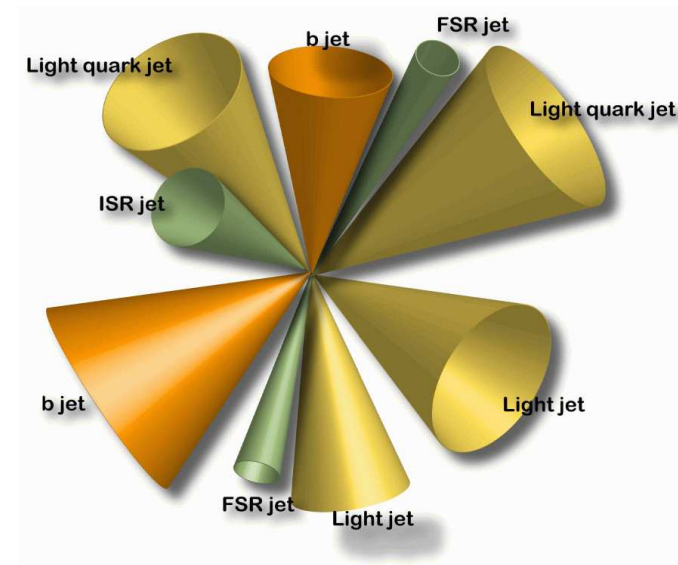
“złota próbka” ale tylko
~4% przypadków
(e^+e^- , $\mu^+\mu^-$ i $e^\pm\mu^\pm$)

półleptonowe



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

hadronowe



~46% przypadków
bardzo duże tło
trudna identyfikacja

Kwark t

Tevatron

Jeden z pierwszych przypadków

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

40758_44414

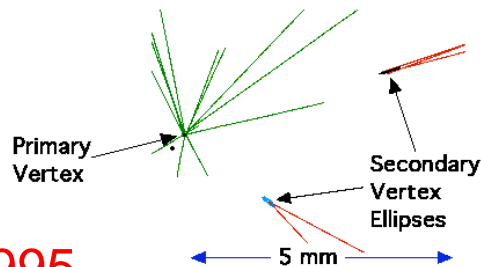
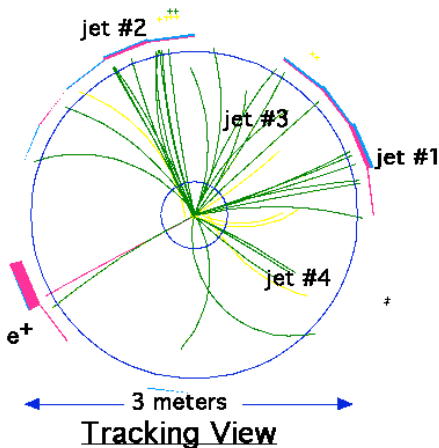
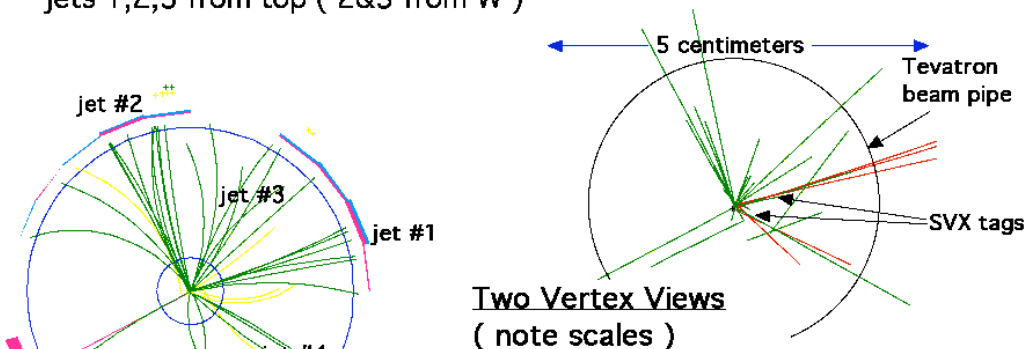
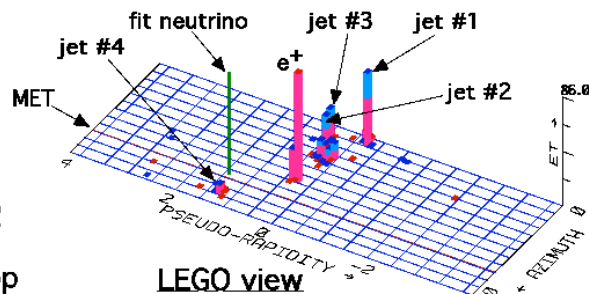
24-September, 1992

TWO jets tagged by SVX

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

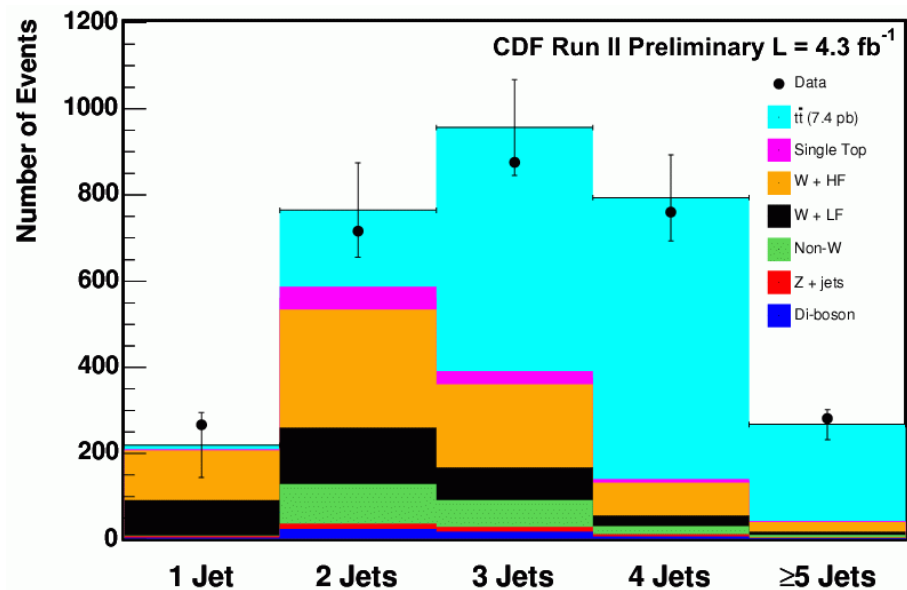
e^+ , Missing E_T , jet #4 from top

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

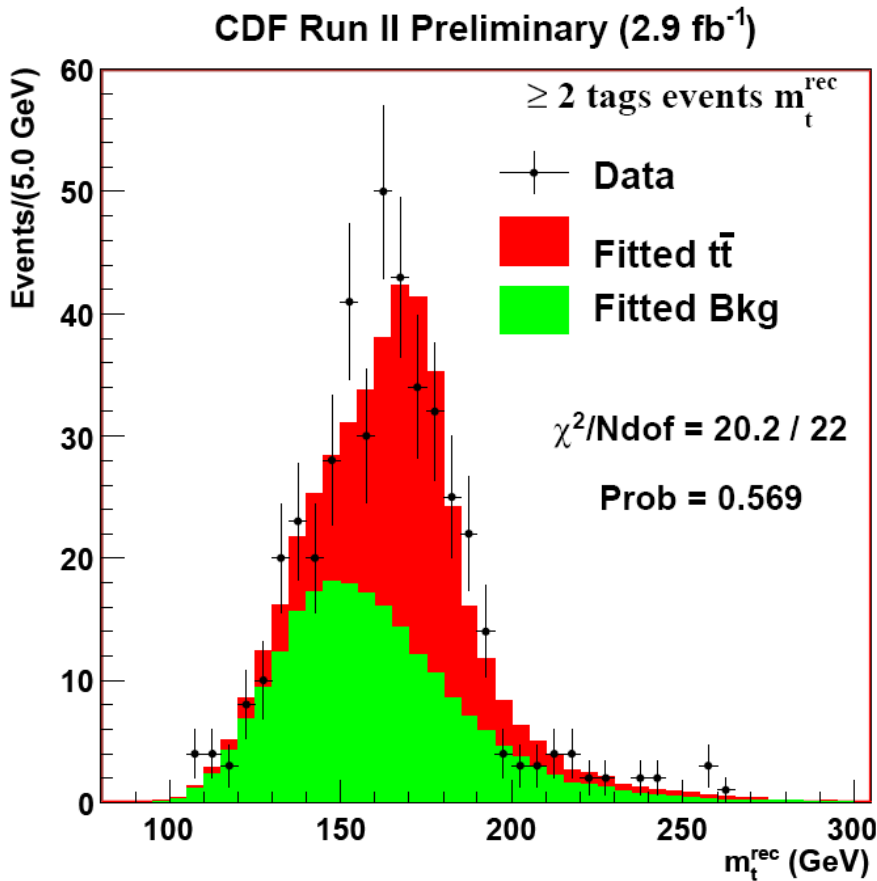
⇒ głównie przypadki $t\bar{t}$

Zbrano już tysiące przypadków...

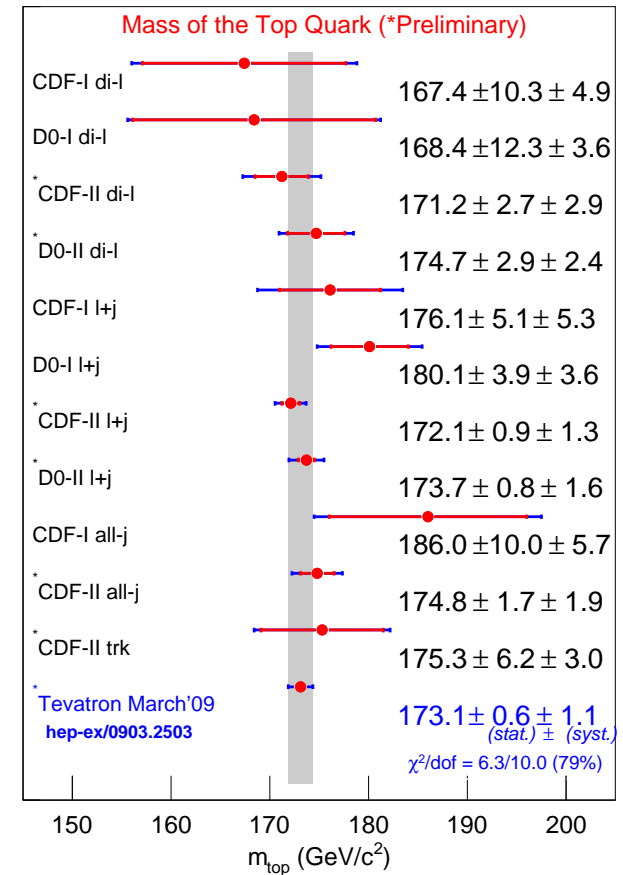
Kwark t

Tevatron

Rozkład rekonstruowanej masy kwarku t
w jednym z rozważanych kanałów



Porównanie wyników dla różnych próbek

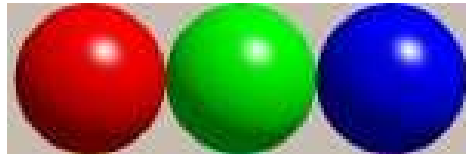


CDF + D0: $m_t = 173.1 \pm 1.3 \text{ GeV}$

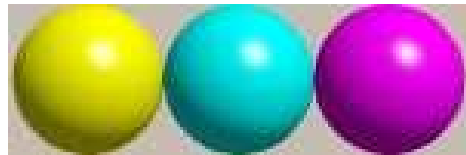
Kolor

Przypomnienie

Każdy z kwarków obdarzony jest ładunkiem kolorowym: R , G lub B .

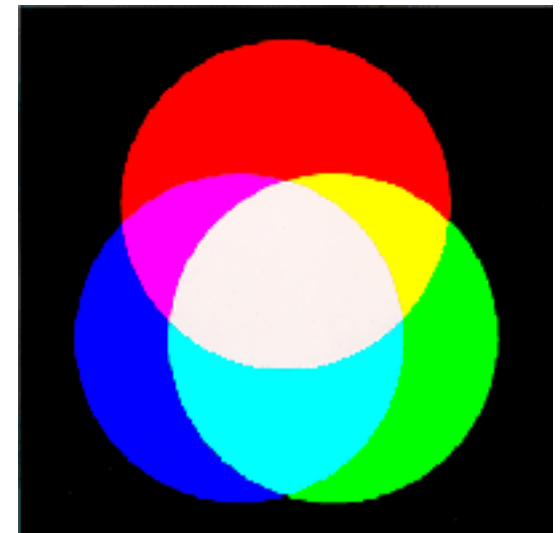


Antykwarki mają odpowiednio anty-kolory (kolory “ujemne”): \bar{R} , \bar{G} , \bar{B} .



Jako swobodne mogą istnieć tylko cząstki nie niosące netto ładunku kolorowego (cząstki “białe”):

$$\begin{aligned} R + G + B &= 0 \\ R + \bar{R} = G + \bar{G} = B + \bar{B} &= 0 \end{aligned}$$



Kolor

Liczenie kwarków

Wirtualny foton (lub bozon Z^0) powstający w wyniku anihilacji e^+e^- rozpada się na wszystkie dostępne cząstki. Liczbę kwarków można sprawdzić mierząc:

$$R^{e^+e^-} = \frac{N(e^+e^- \rightarrow \text{hadrony})}{N(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)} \approx \sum_q e_q^2$$

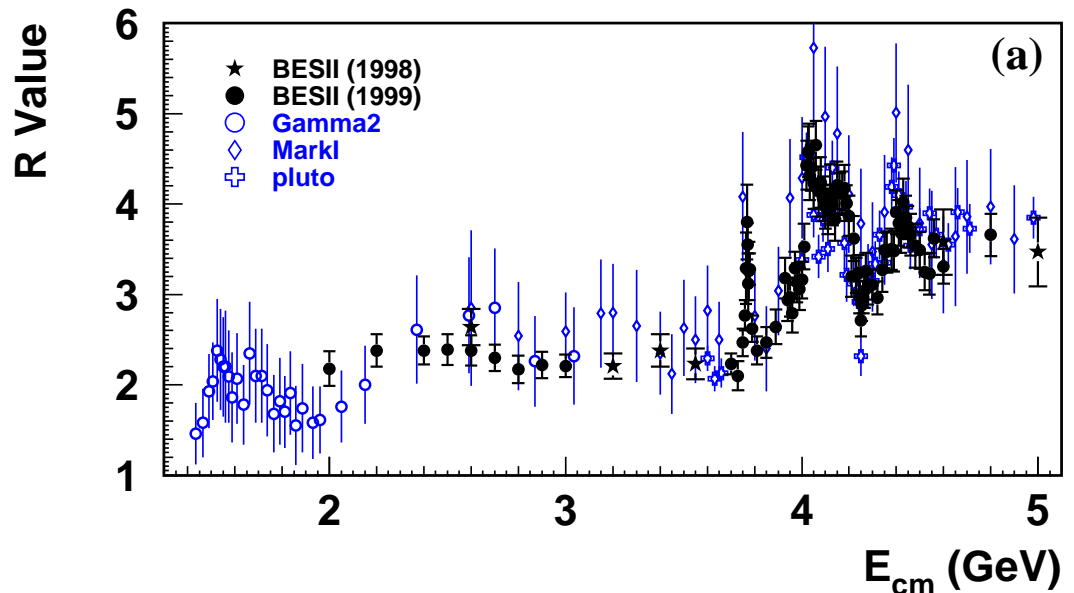
Oczekiwalibyśmy:

dla 3 kwarków (u,d,s): $R \approx \frac{2}{3}$

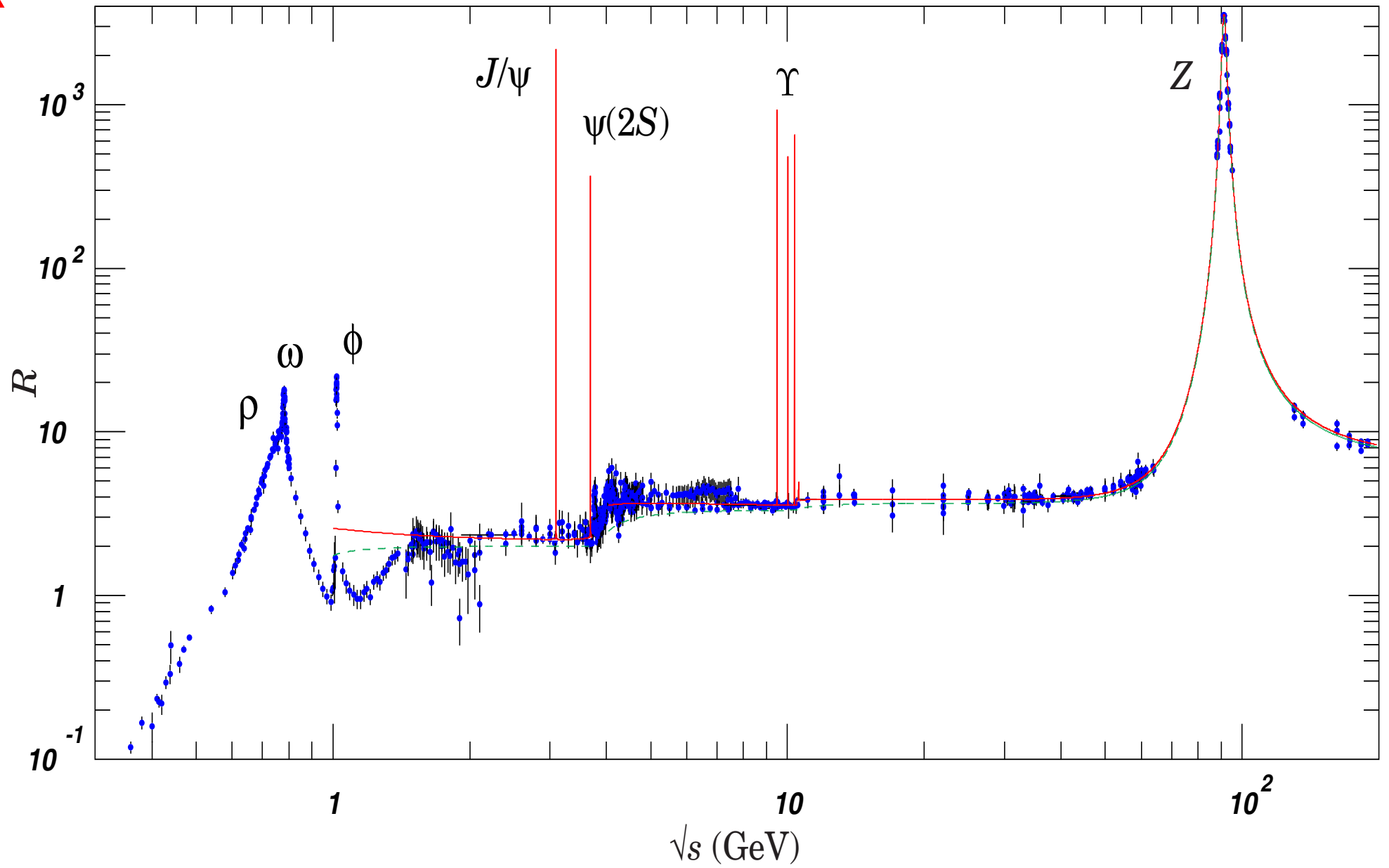
dla 4 kwarków (u,d,s,c): $R \approx \frac{10}{9}$
($E_{CM} > 4 \text{ GeV}$)

W doświadczeniu uzyskujemy wartości 3 razy większe!

⇒ każdy kwark w 3 kolorach !



R



LEP, CERN, Genewa

Niezwykle precyzyjne testy Modelu Standardowego



Pomiary precyzyjne w LEP

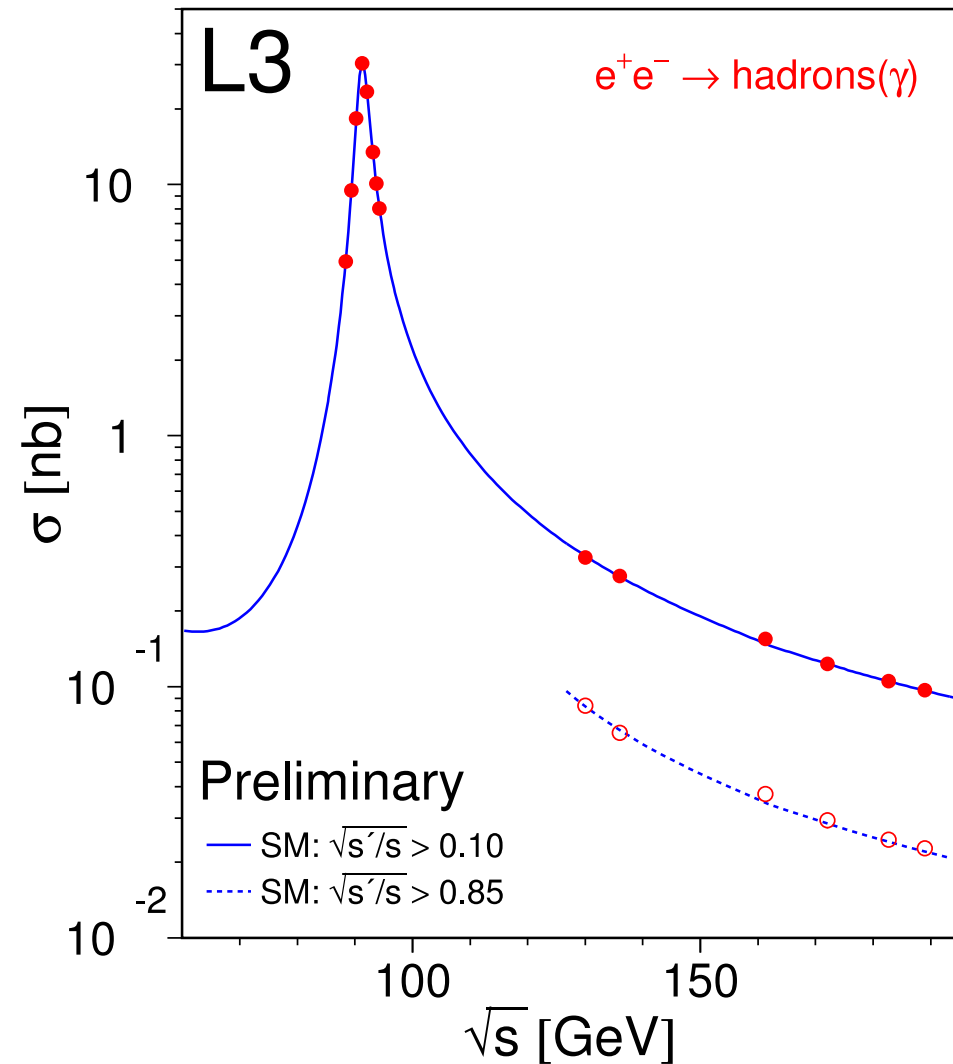


Model Standardowy został bardzo dokładnie przetestowany w zderzeniach e^+e^- w akceleratorach LEP i SLC.

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...

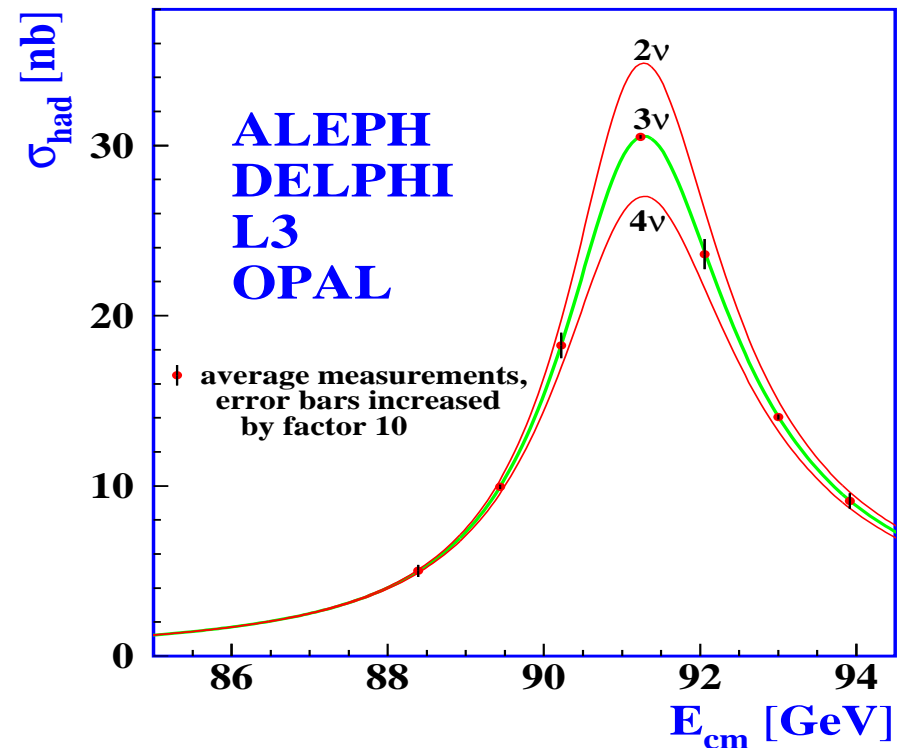


Pomiary precyzyjne w LEP

Liczba neutrin

Z^0 rozpada się na kwarki, naładowane leptony i neutrina. Stosunki rozpadów proporcjonalne są do liczby stanów. Im więcej neutrin tym mniej rozpadów na inne cząstki.

⇒ mierząc całkowity przekrój czynny w rezonansie Z^0 możemy wyznaczyć liczbę bezmasowych neutrin



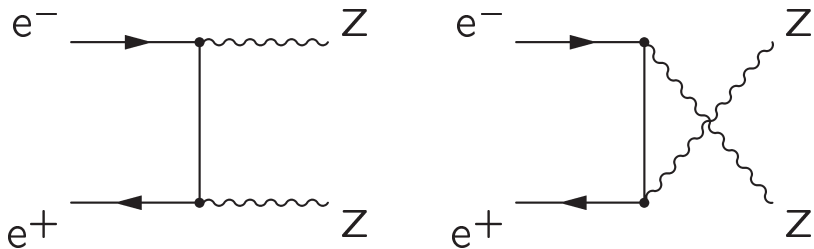
$$N_\nu = 2.9840 \pm 0.0082$$

final 2005 (LEP+SLC)

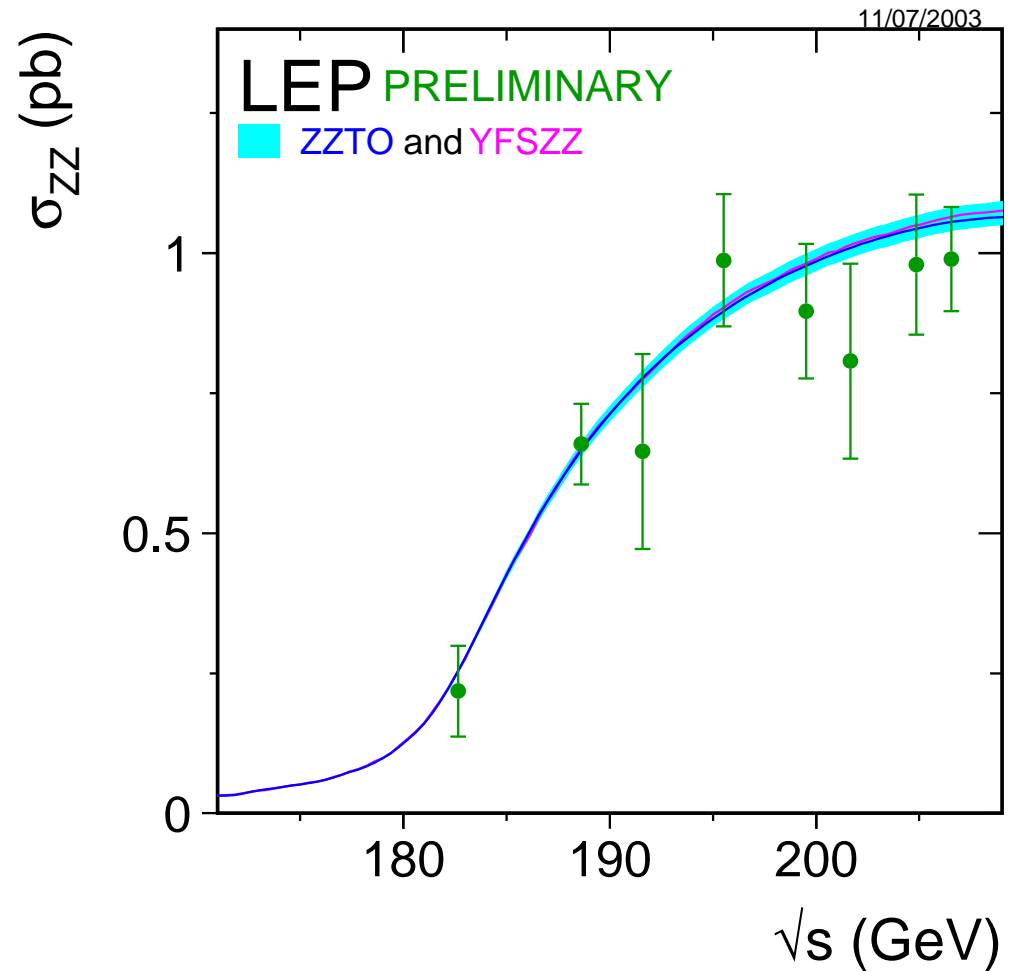
Pomiary precyzyjne w LEP

$$\underline{e^+e^- \rightarrow Z^0Z^0}$$

Dla $\sqrt{s} > 2M_Z$ możliwa jest produkcja pary bozonów Z^0



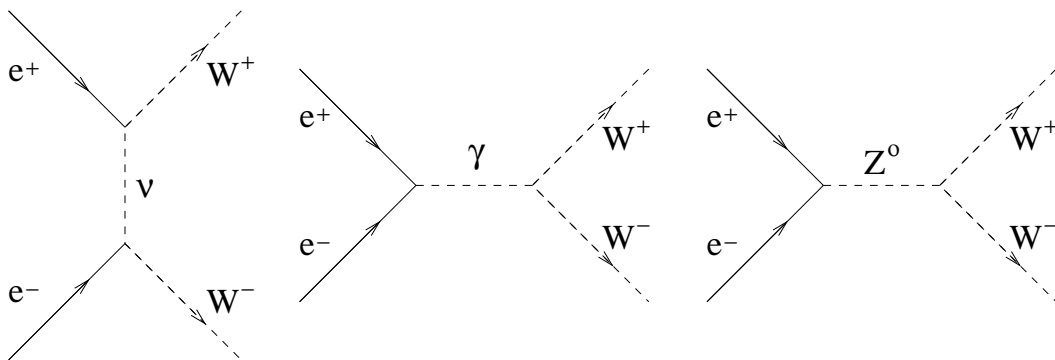
Bardzo dobra zgodność z przewidywaniami Modelu Standardowego \Rightarrow



Pomiary precyzyjne w LEP

$$\underline{e^+e^- \rightarrow W^+W^-}$$

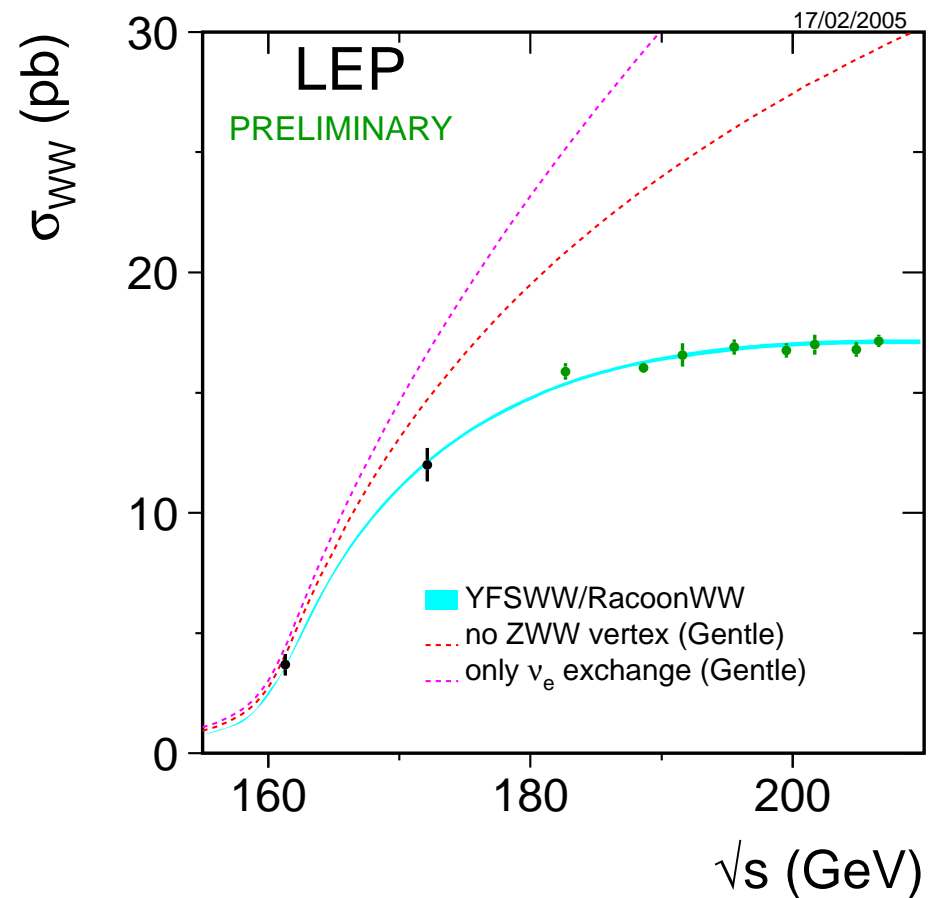
Wkład od **trzech** różnych **procesów**:



Sprzężenia wynikają z przyjętych **symetrii cechowania**

\Rightarrow **ściśle przewidywania modelu**

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



Pomiary precyzyjne w LEP

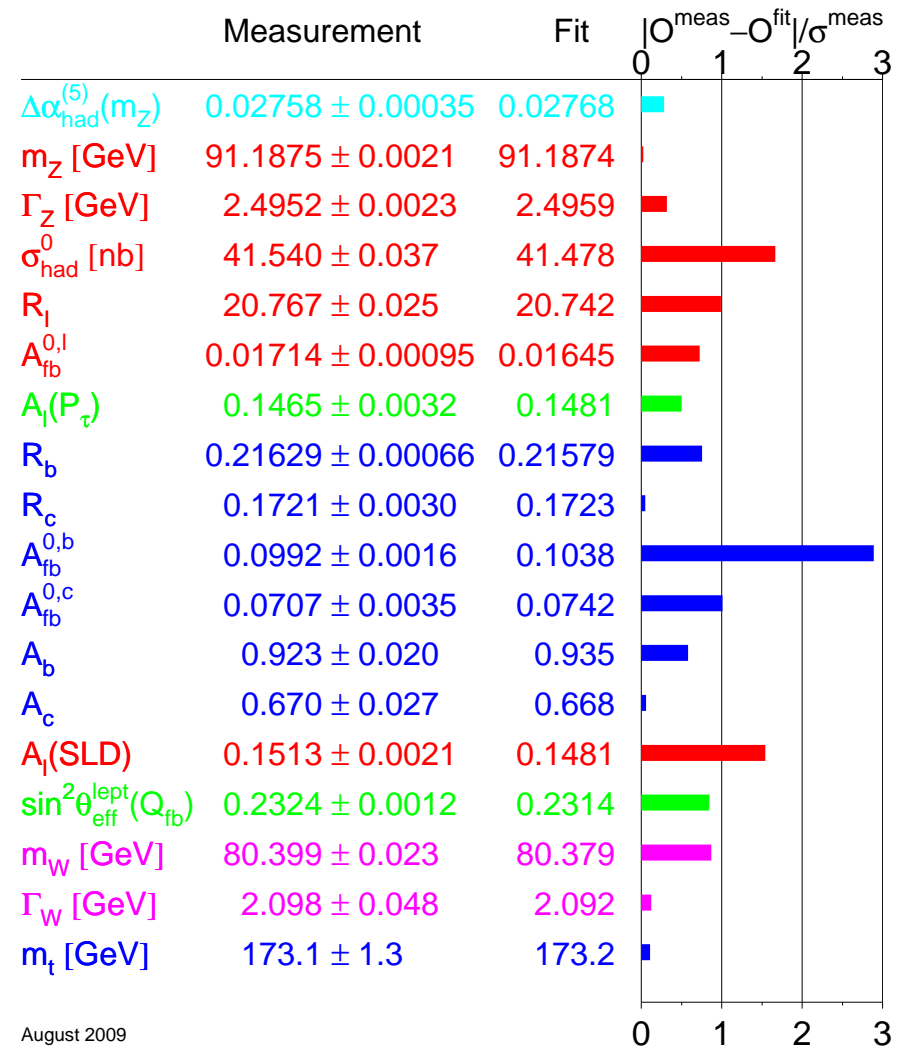
Porównanie

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

Można wybrać np. α_{em} , G_F i M_Z .

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

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



August 2009

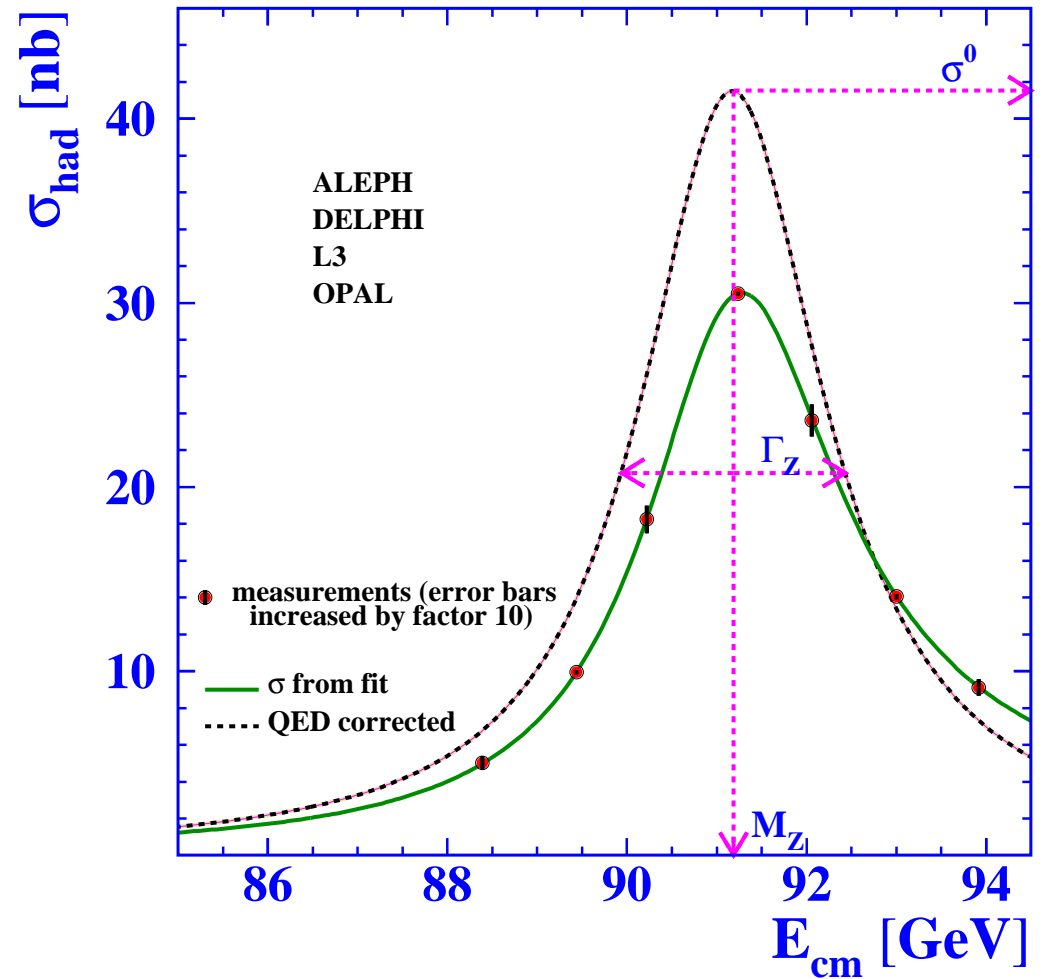
Pomiary precyzyjne w LEP

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...

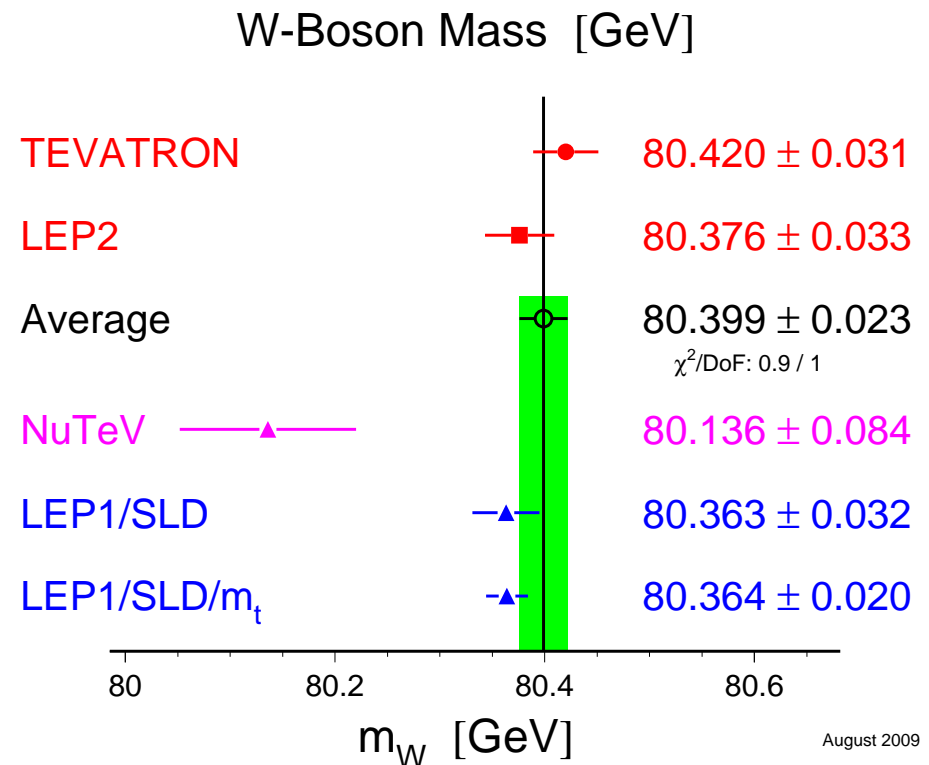
Precyzyjne pomiary w LEP i innych eksperymentach pozwalają **wnioskować** o **masach** tych cząstek, nawet jeśli ich bezpośrednio nie obserwujemy!



Pomiary precyzyjne w LEP

Poprawki

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

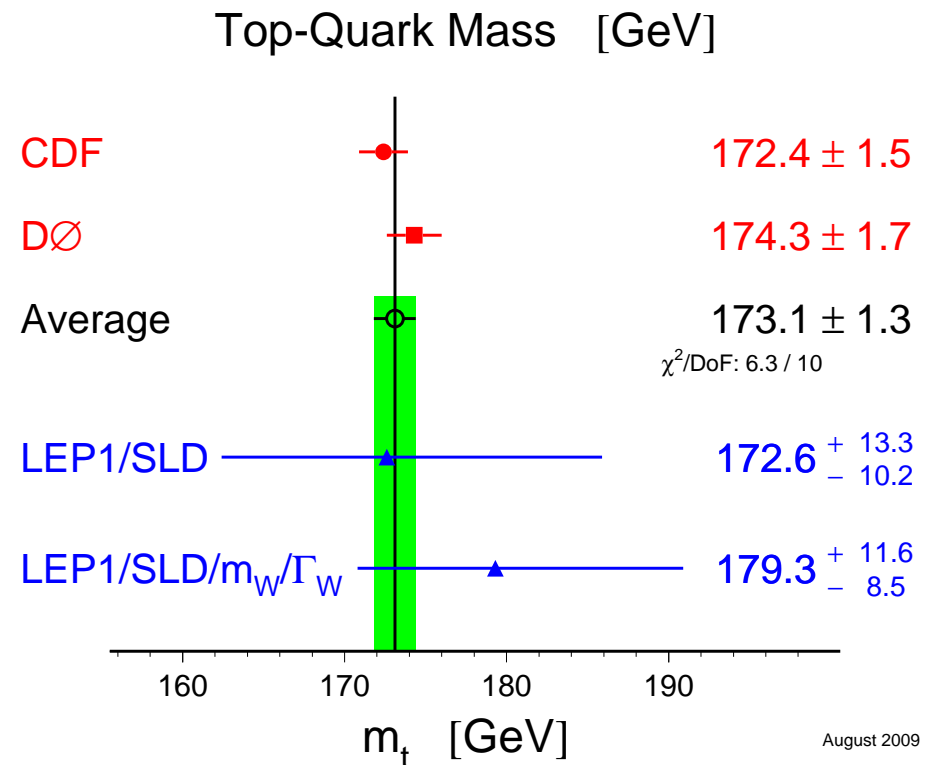


Pomiar bezpośredni zgodny z dokładnością do 0.05% z **przewidywaniami teorii** opartymi na precyzyjnych pomiarach przy niższych energiach.

Pomiary precyzyjne w LEP

Poprawki

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



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

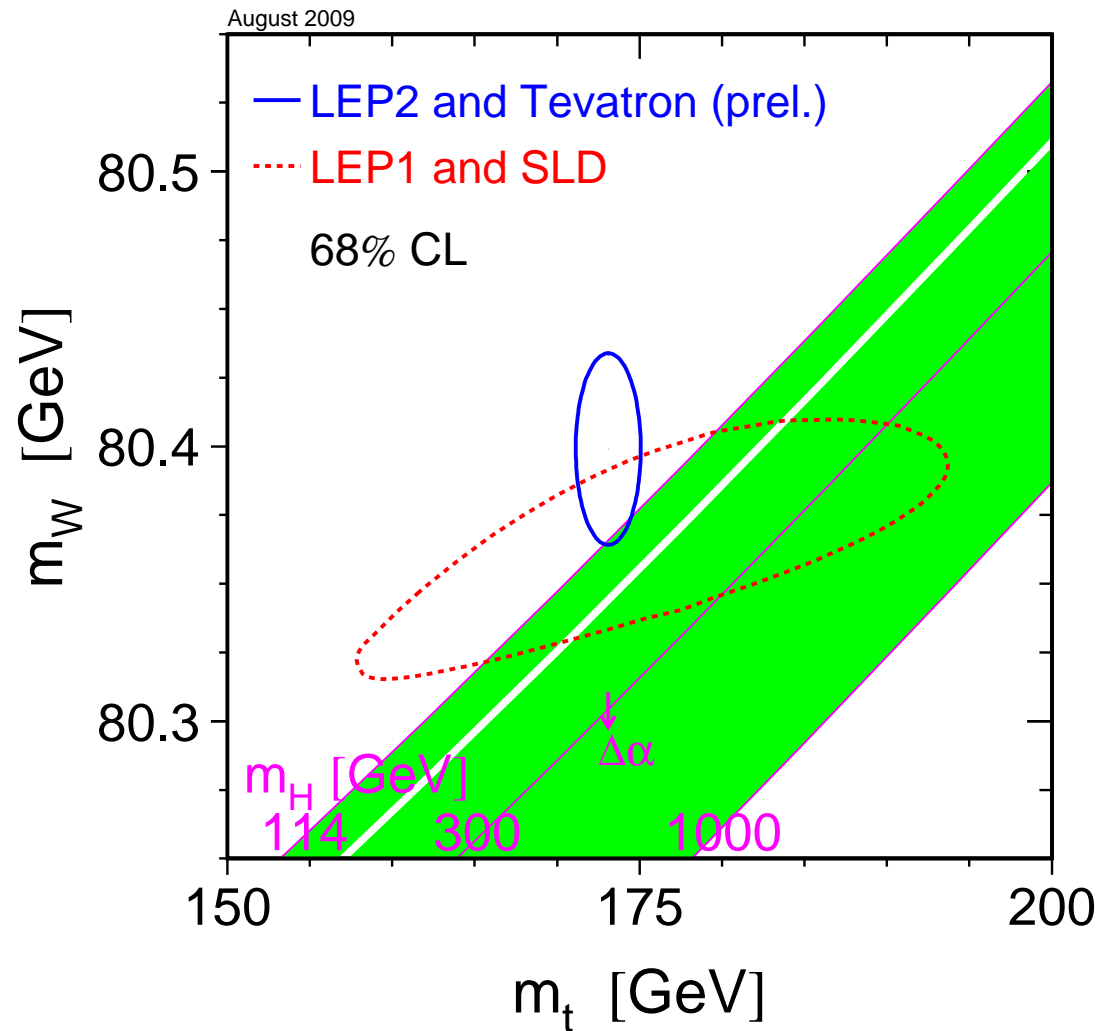
Pomiary precyzyjne w LEP

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**

$$m_h = 87^{+35}_{-26} \text{ GeV}$$

lub: $m_h < 157 \text{ GeV}$ (95% CL)

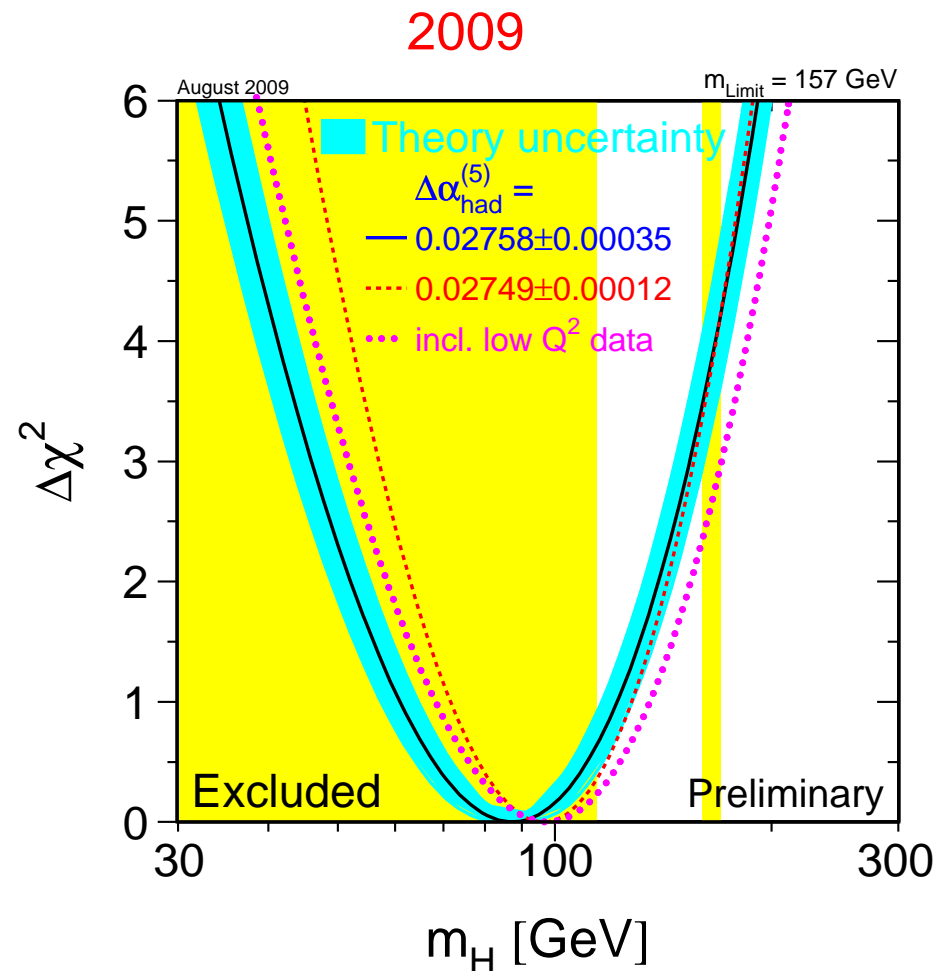
Dlaczego wciąż go nie widzimy ?...

Z bezpośrednich poszukiwań:

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

wszystkie dane LEP:

ALEPH + DELPHI + L3 + OPAL

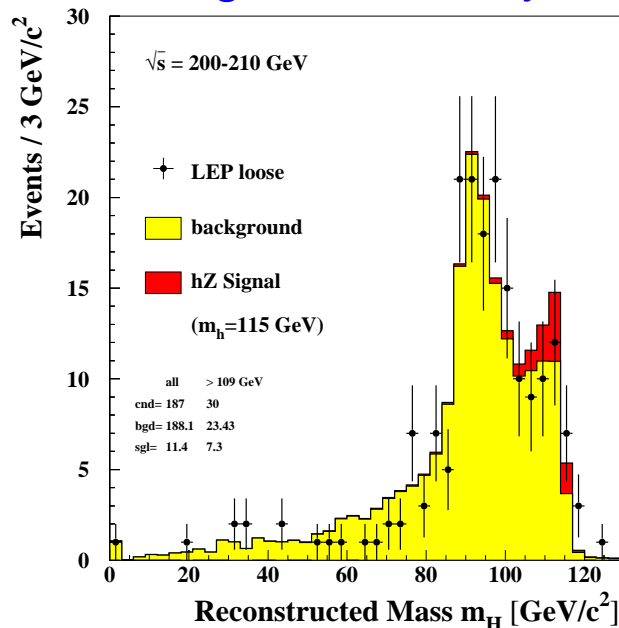


Poszukiwanie Higgosa w LEP

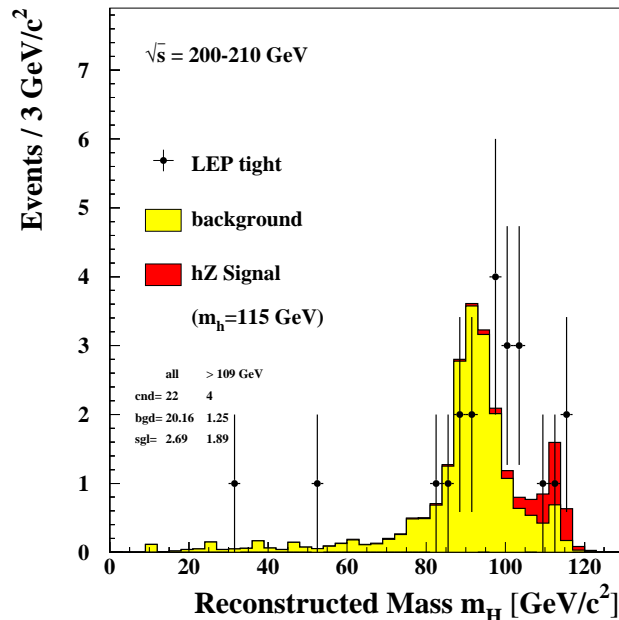
Rozkład masy

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

łagodna selekcja



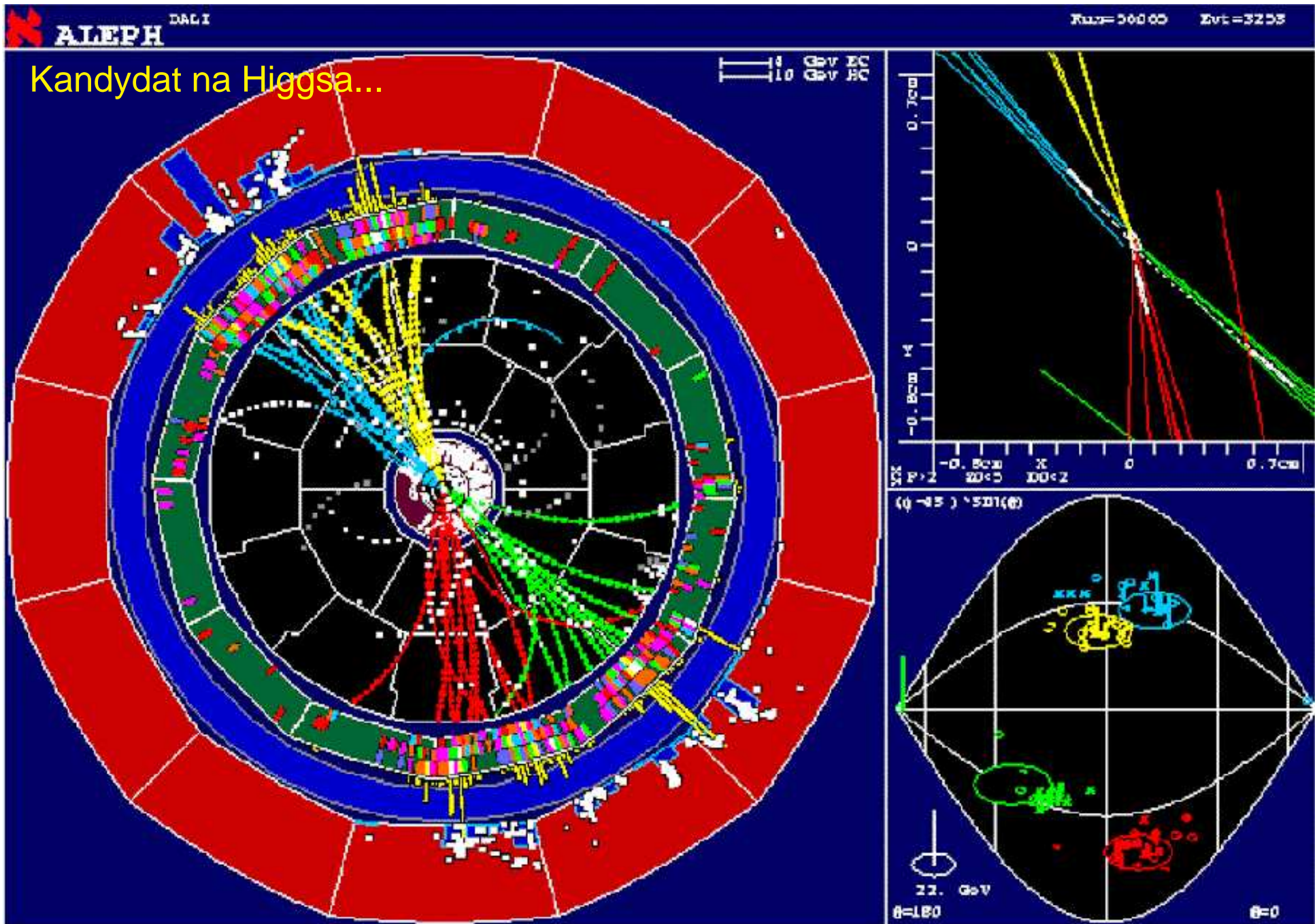
ostra selekcja



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

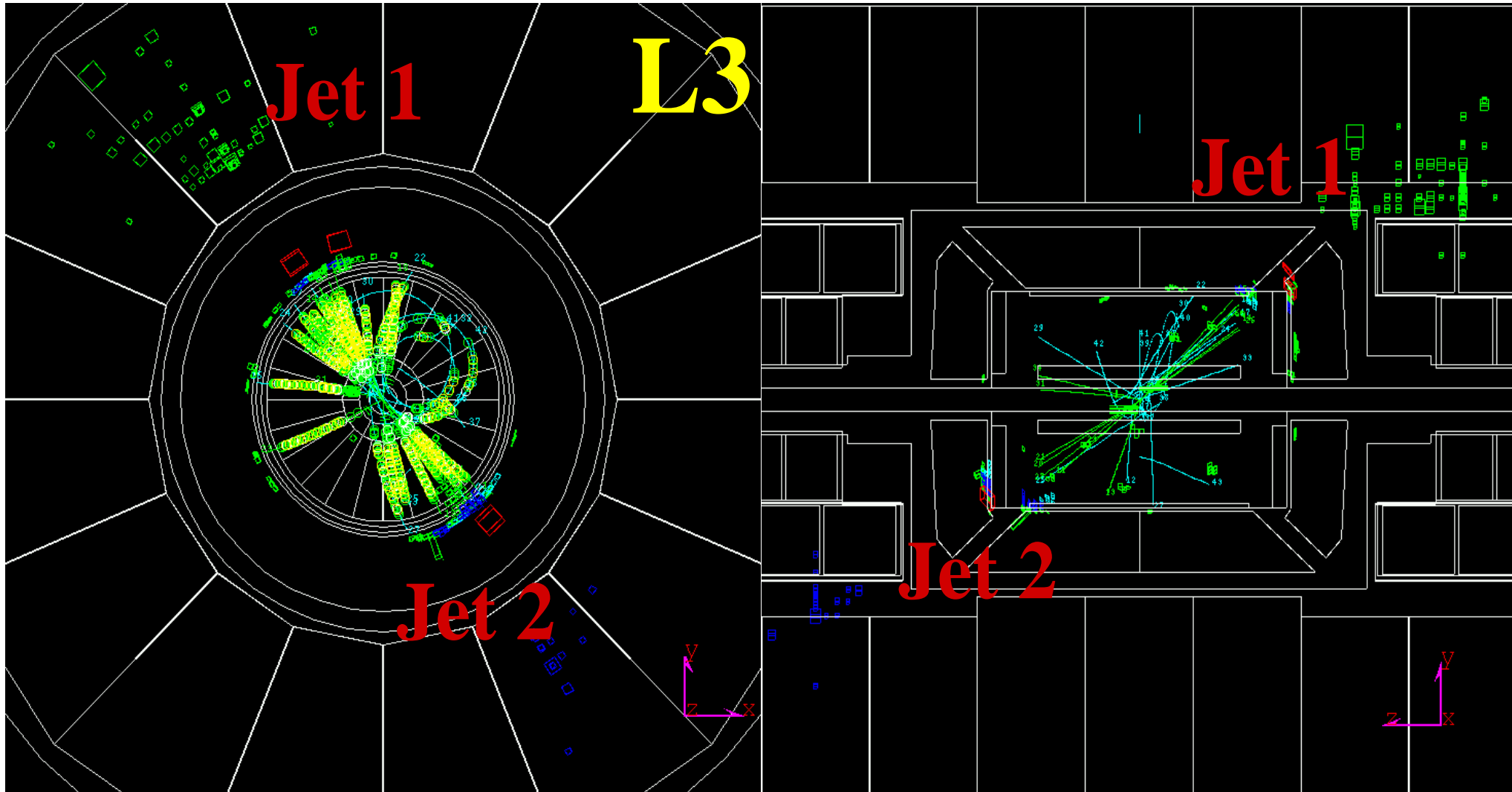
Niestety, jest to efekt na poziomie $\sim 2\sigma$

LEP wyłączono zanim zdołał wyjaśnić ten efekt...



candidate for

$e^+e^- \rightarrow H\nu\bar{\nu} \rightarrow 2 \text{ jets} + \text{missing energy}$



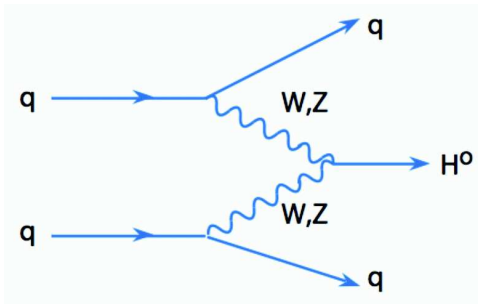
Poszukiwanie Higgsa

Tevatron

Zbieranie danych idzie “pełną parą”.

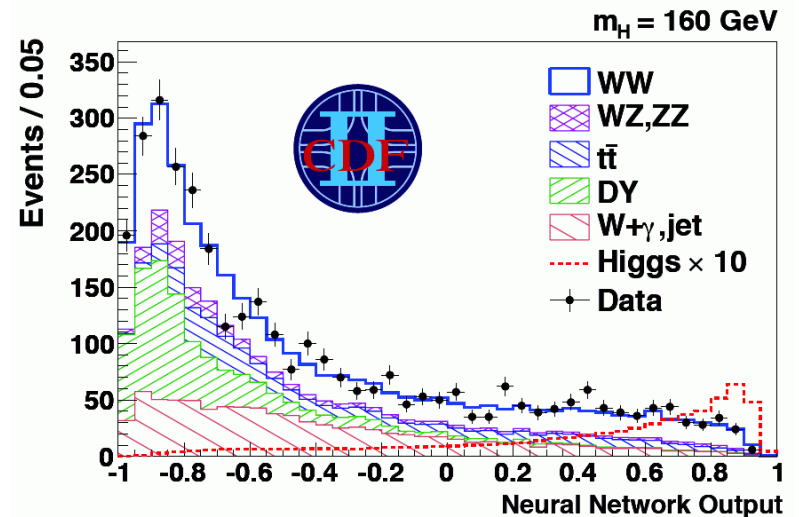
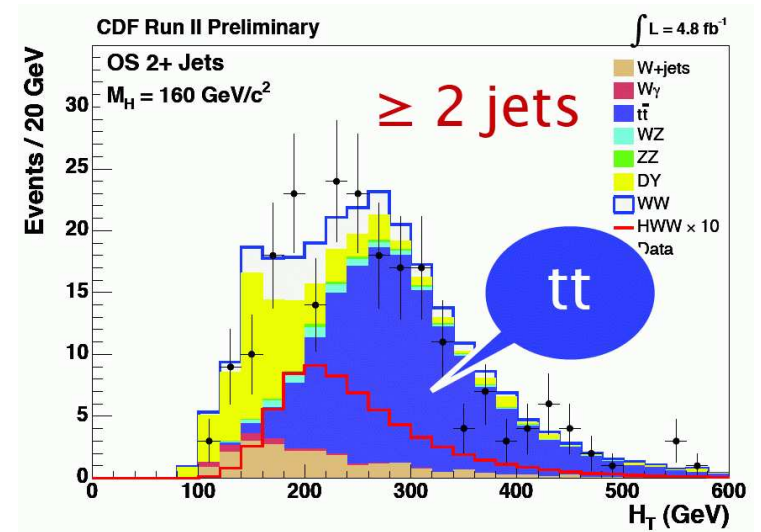
Produkcja Higgsa poszukiwana w wielu kanałach.

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



Dla $M_H \sim 160 \text{ GeV}$ rozpad $H \rightarrow W^+W^-$ prowadzi do przypadków podobnych do $t\bar{t}$ (tło !)

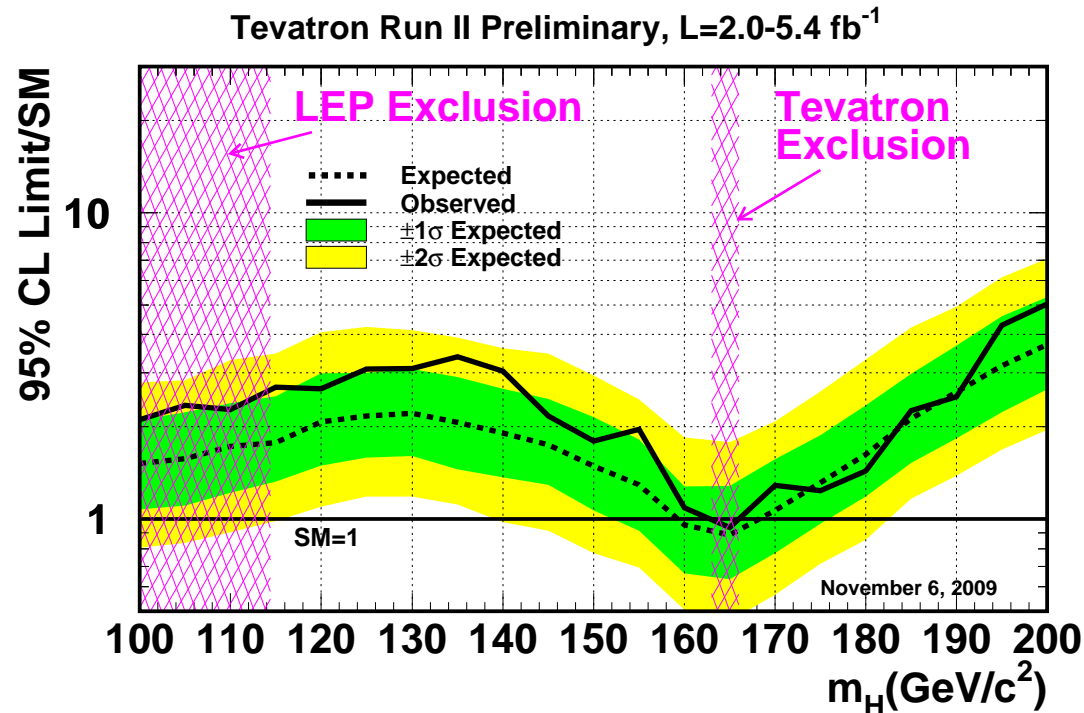
Dedykowane programy, tzw. sieci neuralne (NN), analizują topologię przypadku i oceniają prawdopodobieństwo, że jest to bozon Higgsa (zwracana wartość ~ 1) lub tło (wartość ~ -1).



Poszukiwanie Higgsa

Tevatron

Liczby przypadków zgodne z przewidywaniami dla procesów tła
⇒ ograniczenia na dostępny zakres mas bozonu Higgsa (w ramach SM)



Nie wykluczone, że Tevatron w końcu zobaczy “sygnał” (zbierając więcej danych)
Jeśli wykluczy cały zakres do 160 GeV będziemy mieli problem...

Poszukiwanie Higgosa

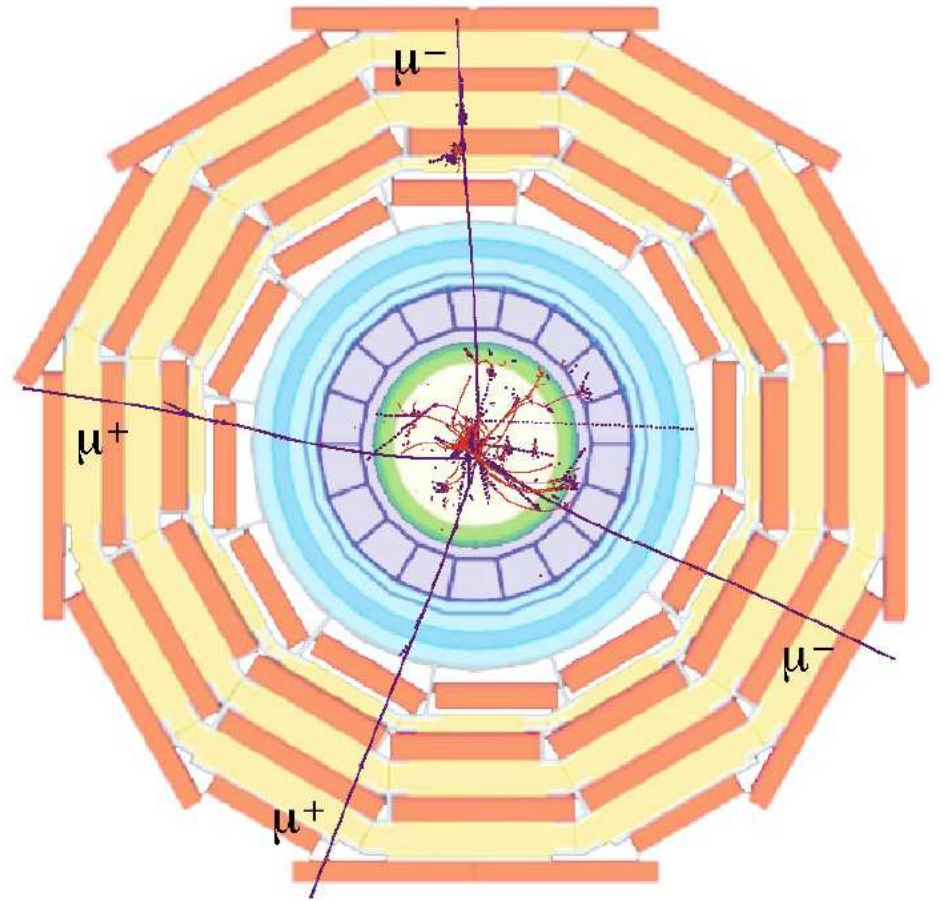
LHC

Poszukiwania **bozonu Higgosa** a następnie **pomiar** jego **parametrów** będzie jednym z głównych tematów badań

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

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

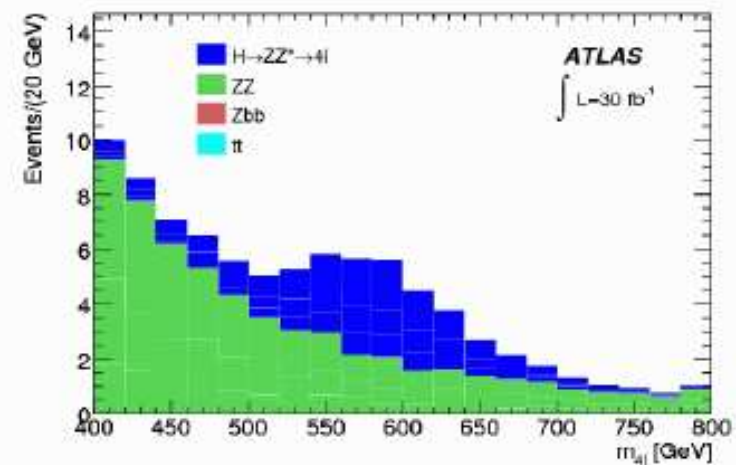
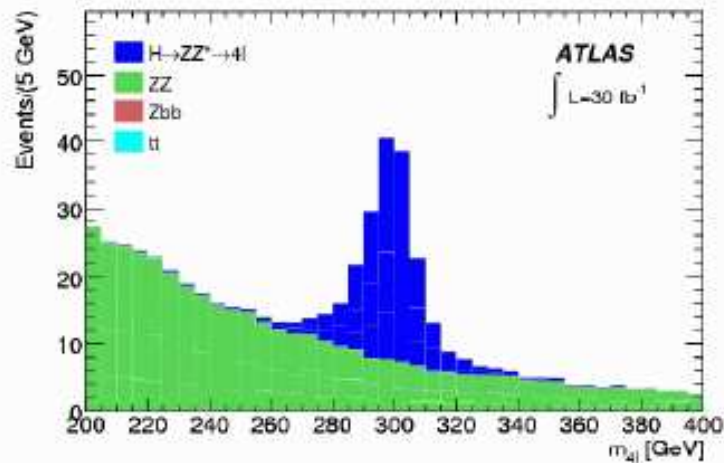
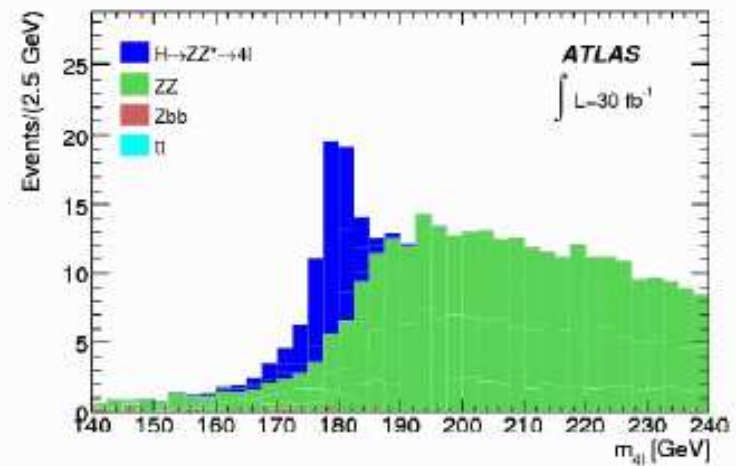
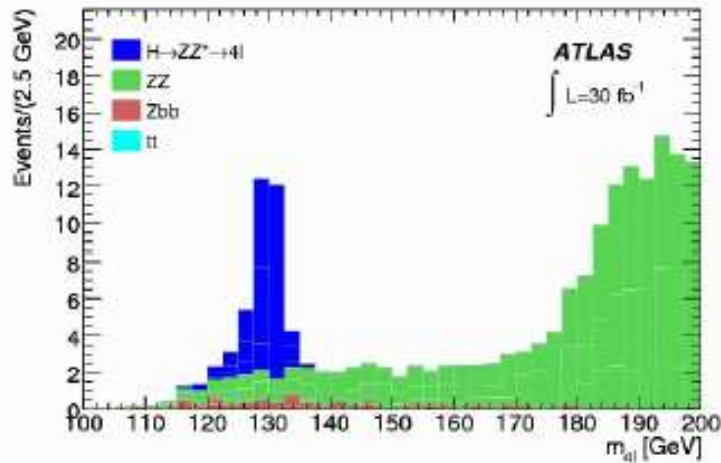
gdyż naładowane leptony (e^\pm i μ^\pm) można **łatwo zidentyfikować**



Poszukiwanie Higgsa

LHC

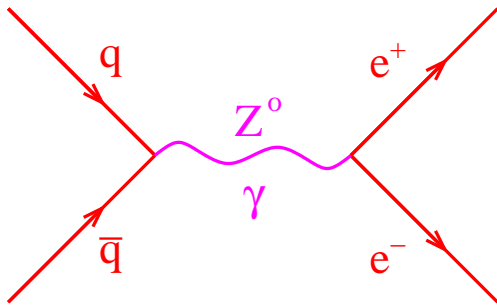
oczekiwany sygnał w detektorze ATLAS (dla różnych m_H)



Poza Modelem Standardowym

Poszukiwanie stanów rezonansowych

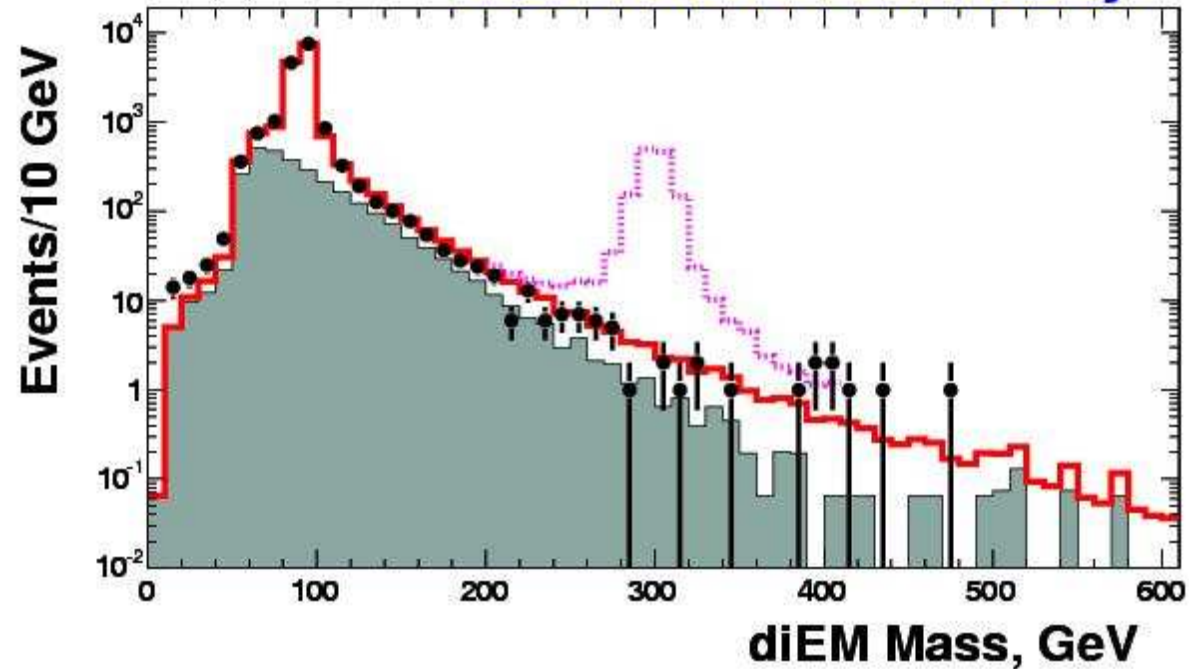
Tak jak produkowane są w Tevatronie bozony Z^0 mogłyby być produkowane ich ciężkie odpowiedniki: bozony Z' .



Przekrój czynny na proces Drell'a-Yan'a w Tevatronie

diEM Mass Spectrum

DØ Run II Preliminary



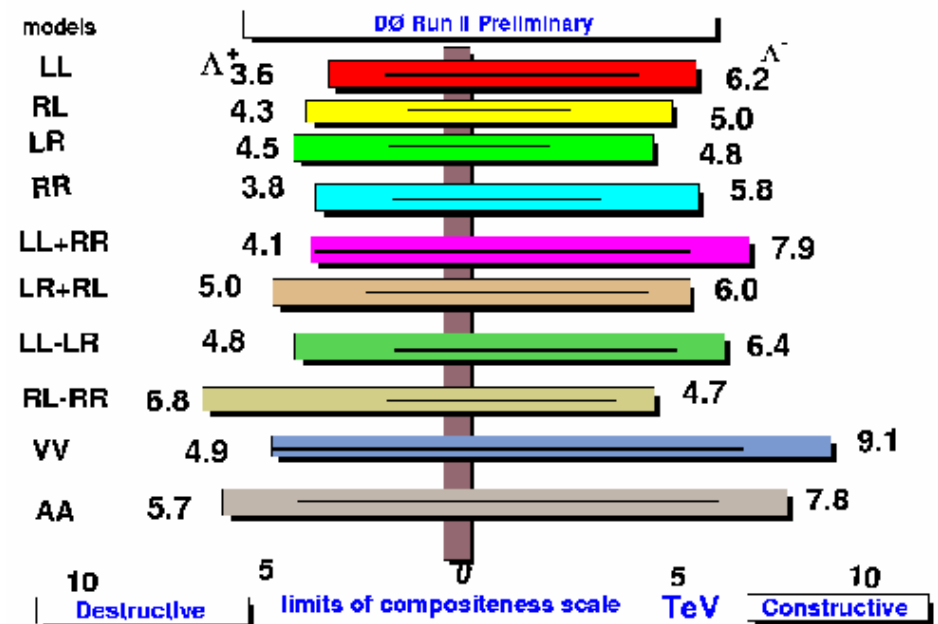
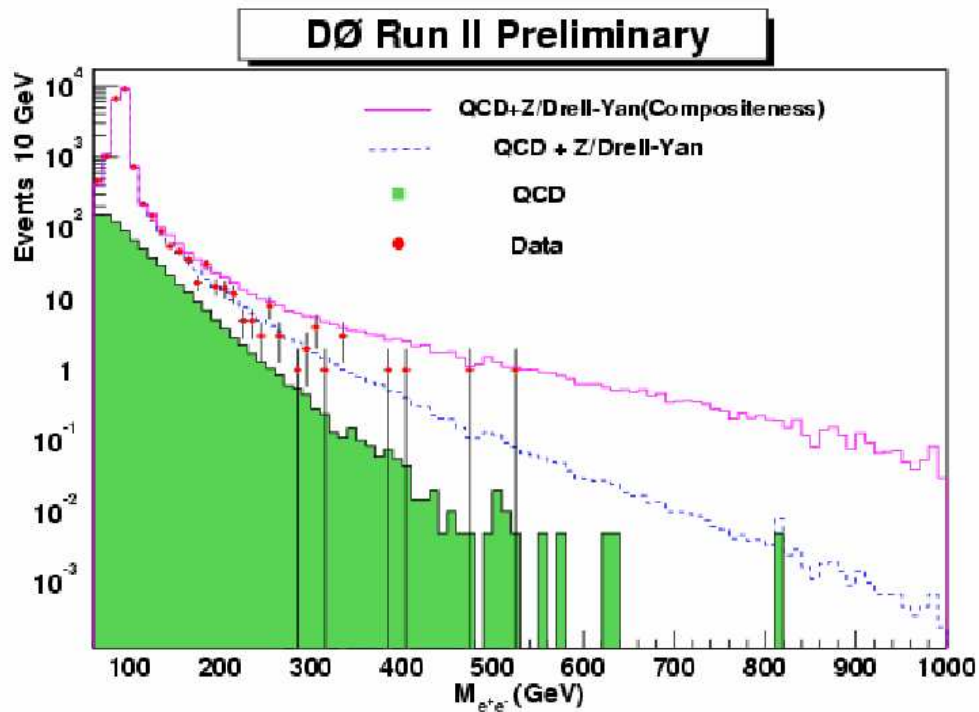
masa niezmiennicza e^+e^-

Obecnie Tevatron wykluczył istnienie tego typu stanów do mas rzędu 1 TeV.

Poza Modelem Standardowym

Poszukiwanie nowych oddziaływań

Wkład do procesu Drell'a-Yan'a mogły by też mieć nowe oddziaływania różnego typu



W tzw. modelu sprzężeń punktowych wykluczone nowe oddziaływania do ~ 10 TeV

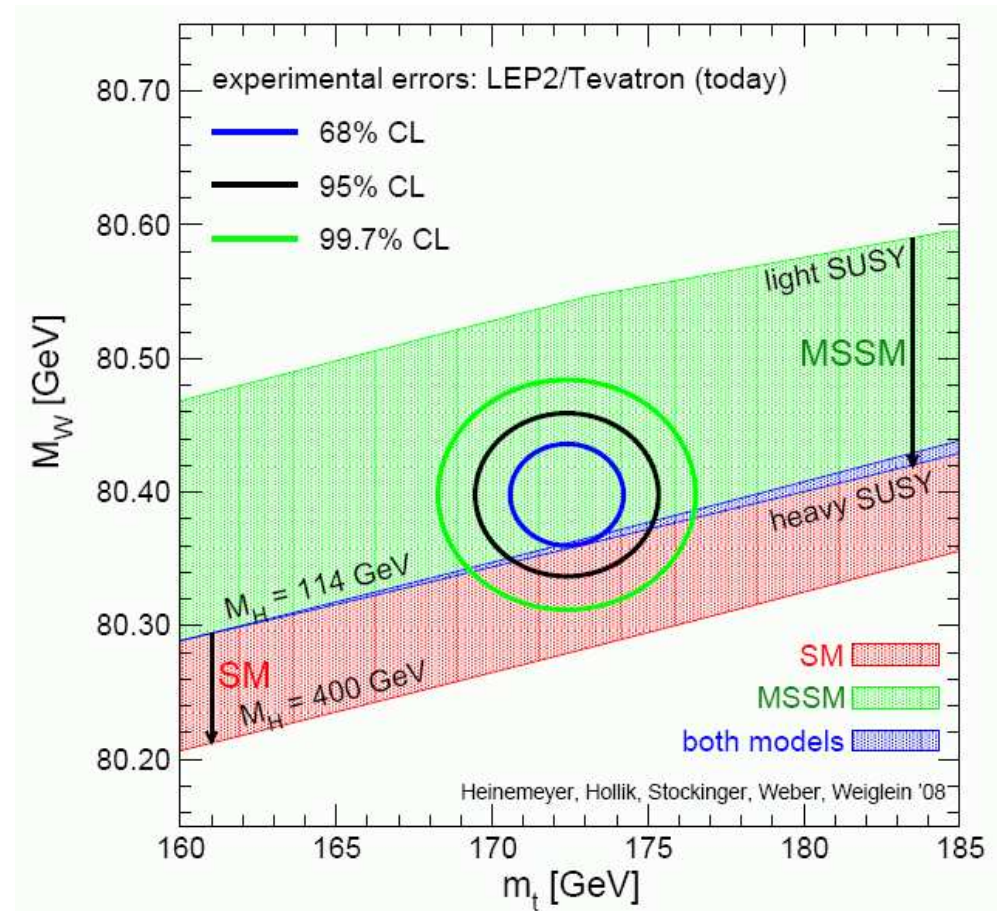
Poza Modelem Standardowym

SUSY

Choć wszystkie dostępne dane zgadzają się bardzo dobrze z SM to nie wyklucza to różnych jego rozszerzeń.

W szczególności tzw. modele supersymetryczne dają bardzo dobry opis danych...

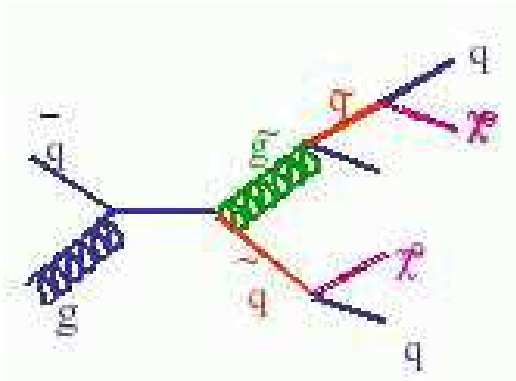
Porównanie mierzonych mas t i W z przewidywaniami SM i MSSM



Poza Modelem Standardowym

SUSY

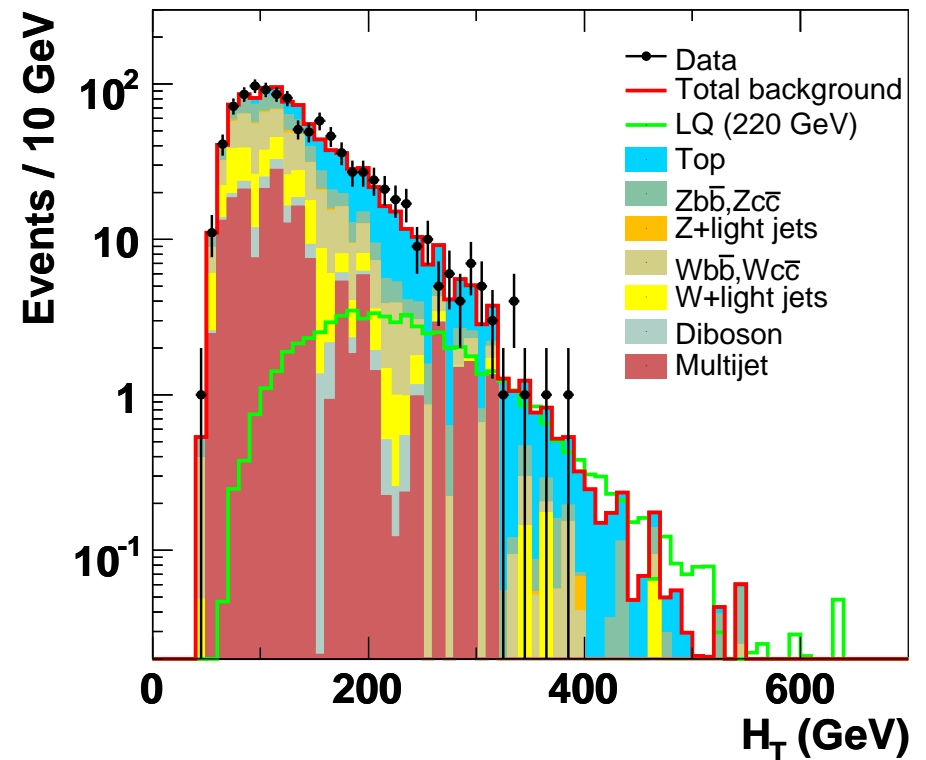
Intensywne poszukiwania w Tevatronie Dotychczas bez powodzenia



Sygnal: jety hadronowe
+ brakujący pęd poprzeczny

Najlżejsza cząstka supersymetryczna (LSP) zachowuje się jak neutrino - nie oddziałuje ze "zwykłą" materią

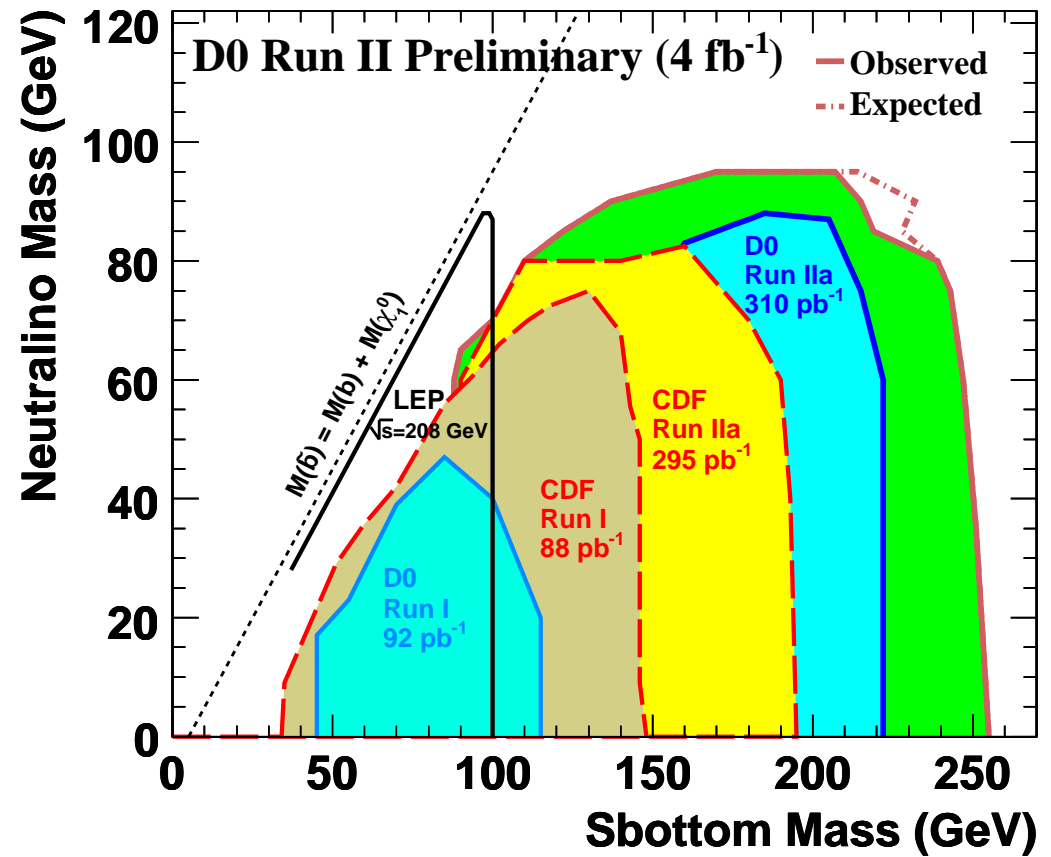
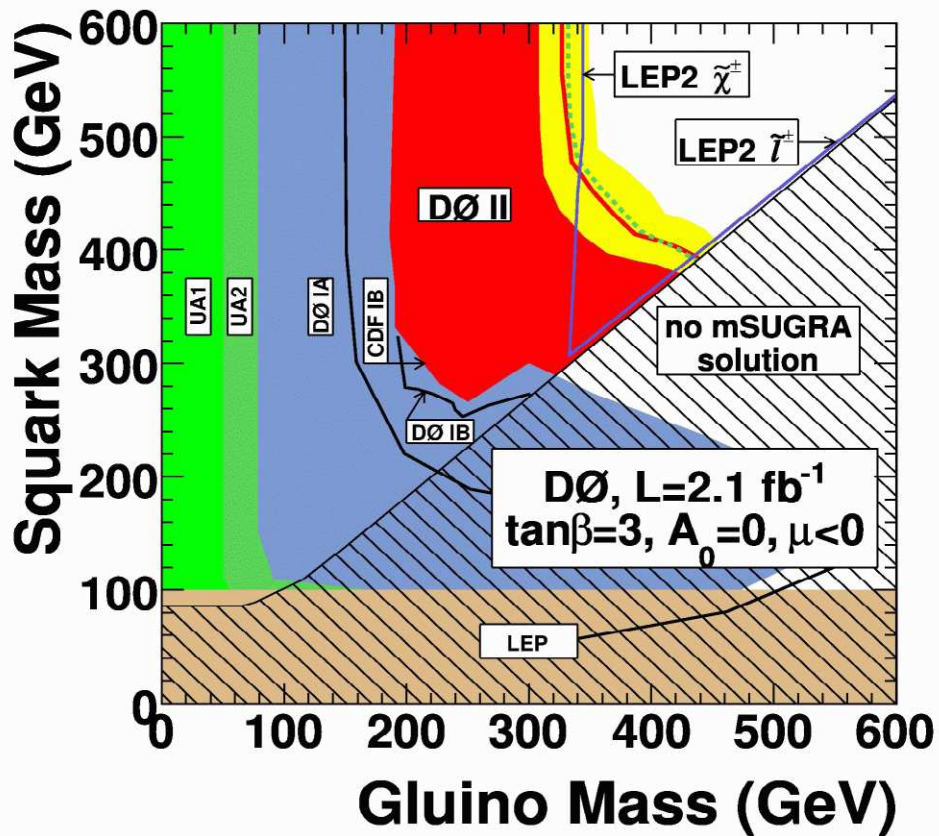
D0 Run II Preliminary (4 fb^{-1})



Poza Modelem Standardowym

SUSY

Wykluczone obszary mas cząstek (w ramach różnych modeli/analiz):



Podsumowanie

Model Standardowy

Eksperymenty przy LEP, 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**...

Pomiary zgodne z przewidywaniami SM przez 9 rzędów wielkości \Rightarrow

