

# Testy Modelu Standardowego

prof. dr hab. Aleksander Filip Żarnecki

## Wszechświat Cząstek Elementarnych

### Wykład 12

- 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

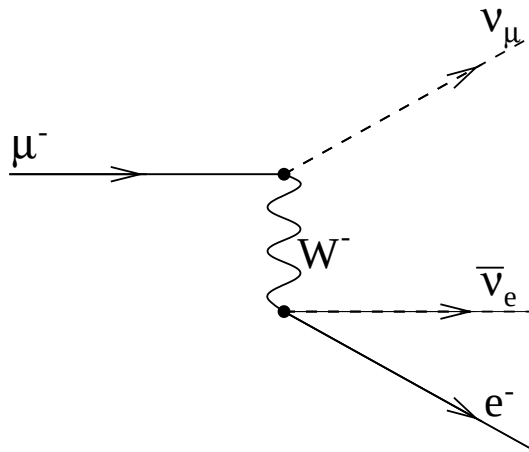
# Bozony $W^\pm$ i $Z^0$

## 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  $Z^0$ :

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

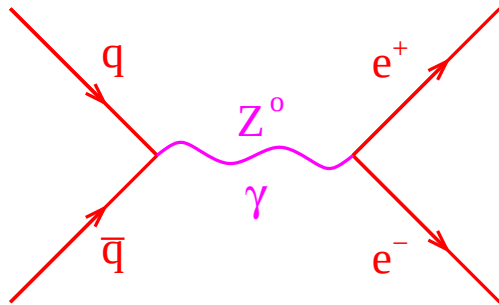
$$m_Z \sim 90 \text{ GeV}$$

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):

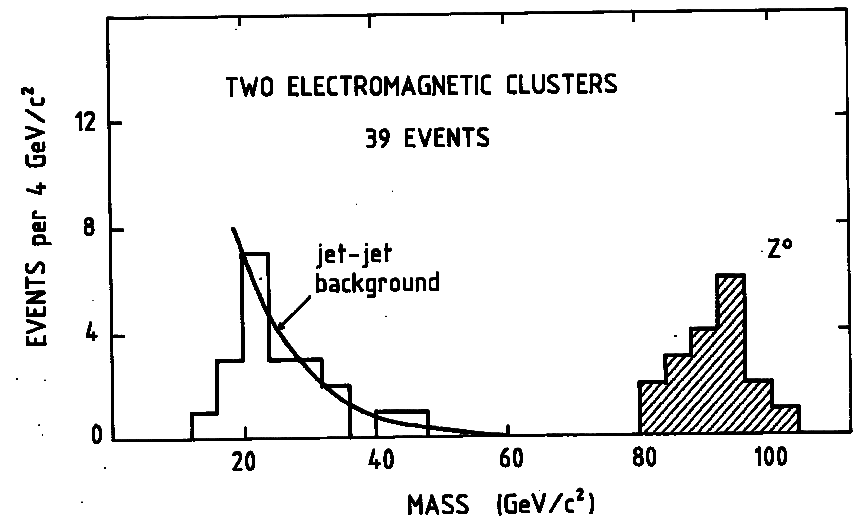
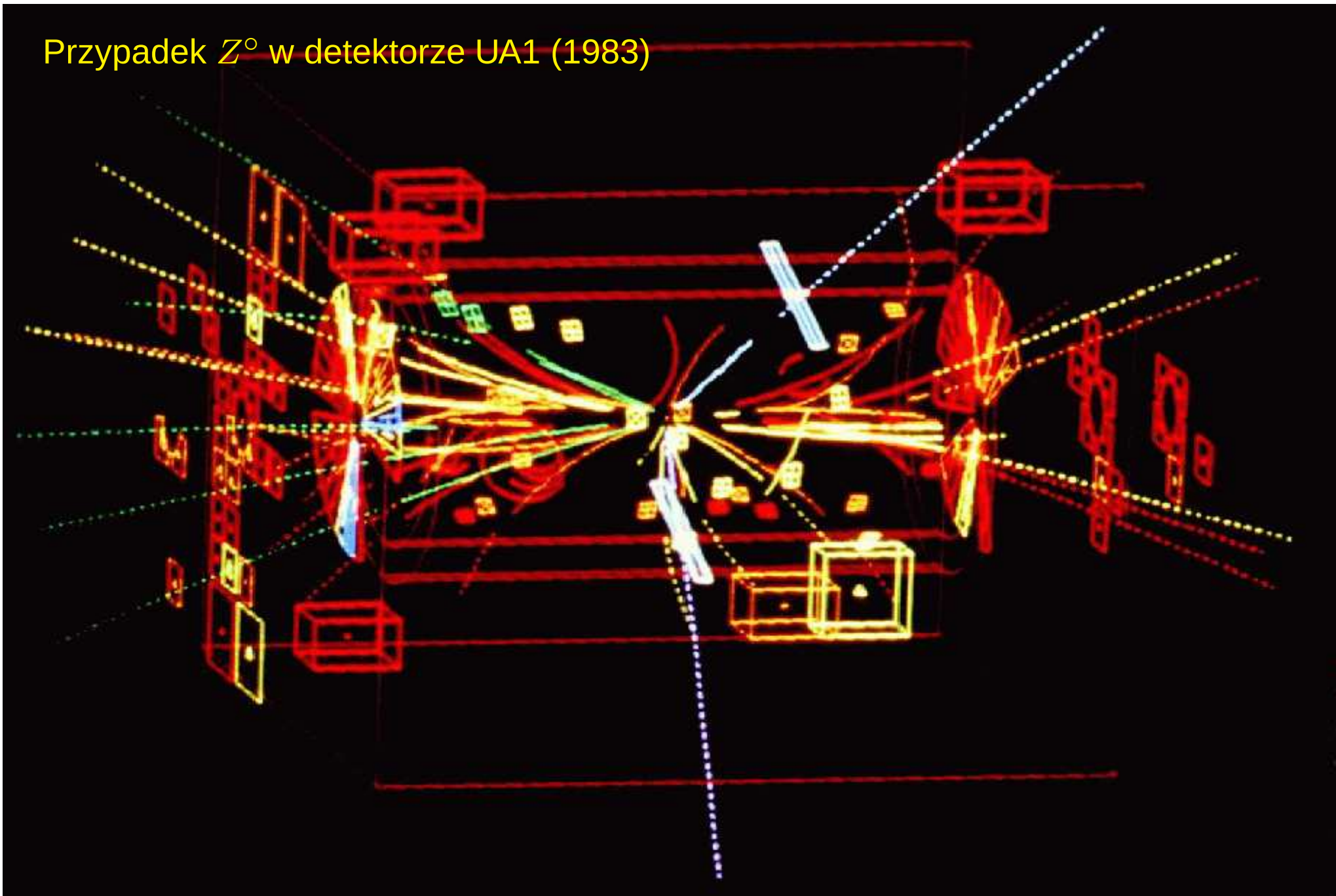


Fig. 1

## 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):

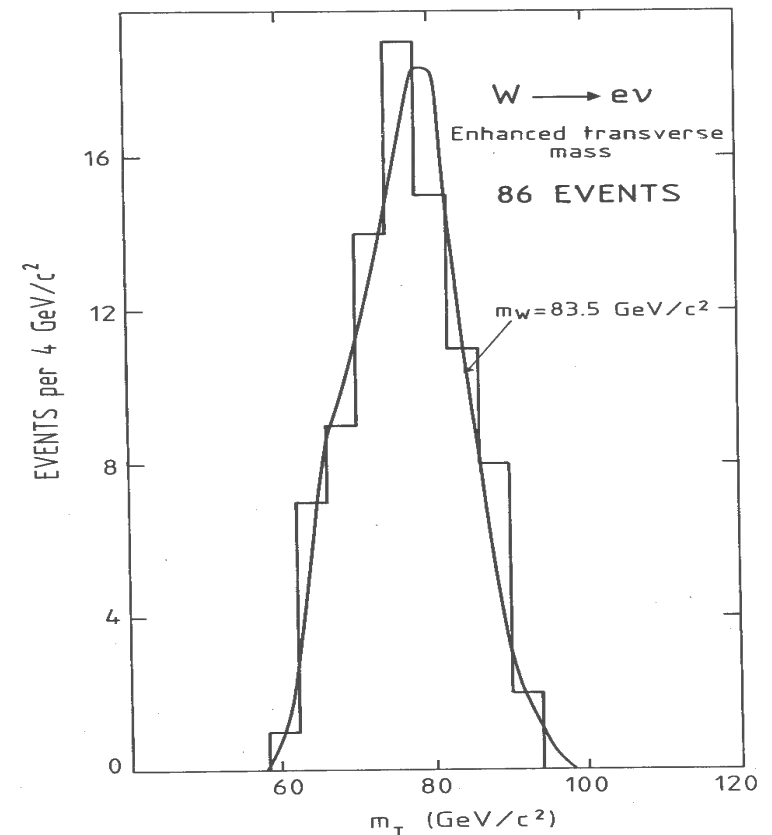
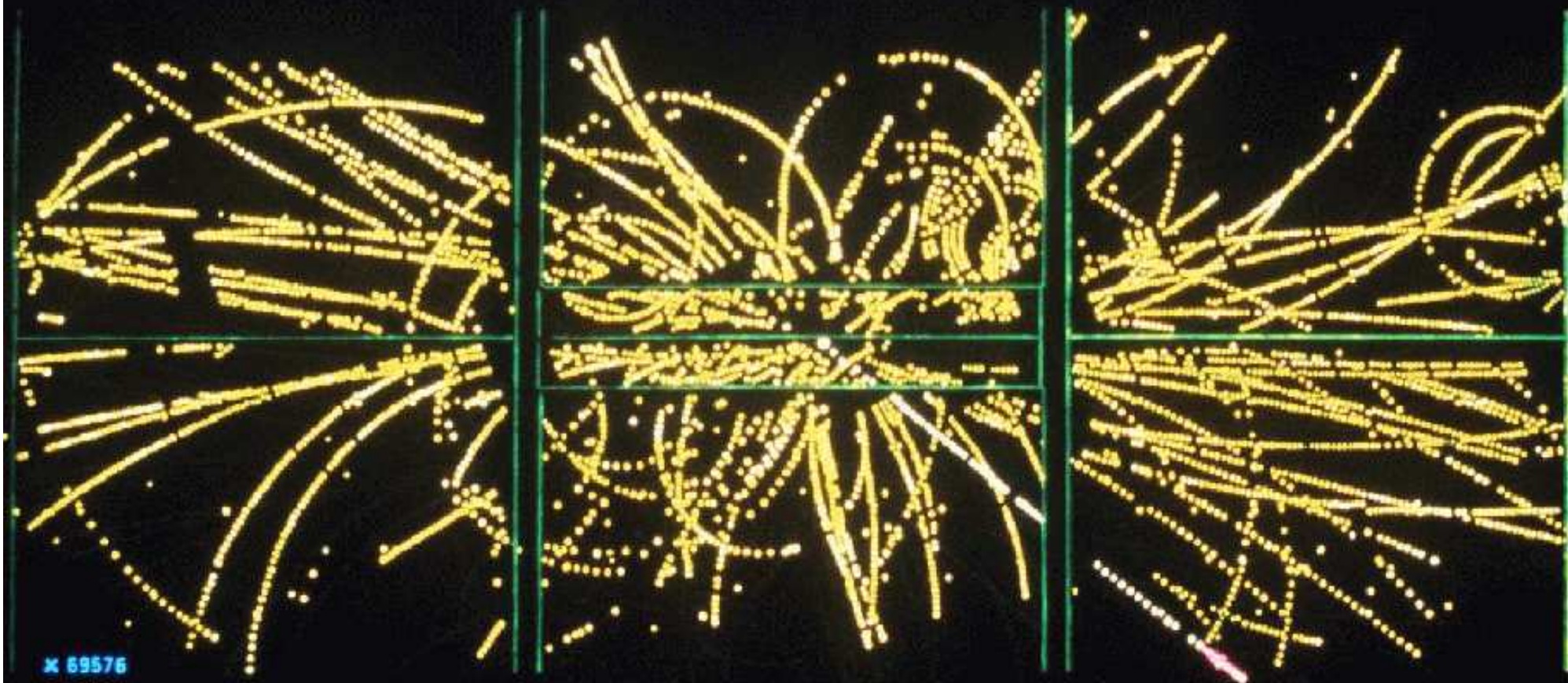


Fig. 3b



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



# Bozony $W^\pm$ i $Z^0$

## Rozpraszanie elektron-proton

$Q^2$  - kwadrat przekazu czteropędu  
skala energetyczna rozpraszania

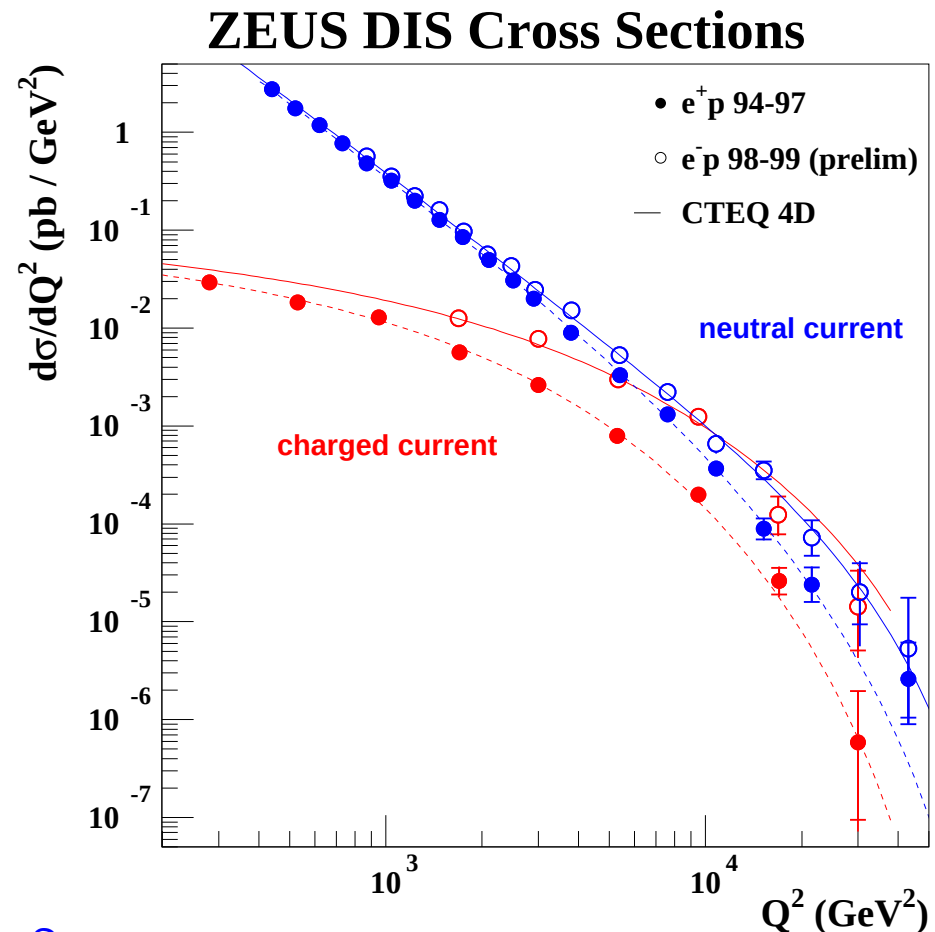
Wymiana prądów neutralnych (NC)  
(dominuje wymiana  $\gamma$ ):

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

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 “górny” partner: **top**

Pierwsze przewidywania (reguła “3”):

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

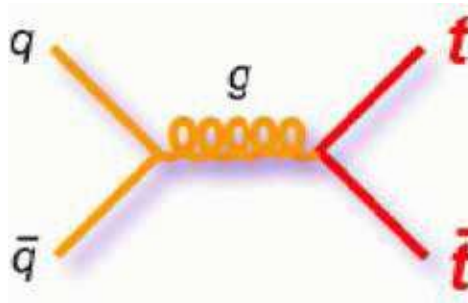
Pierwsze “odkrycie”: CERN SPS, 1984,  $m_t \sim 40 \text{ GeV}$  (potem odwołane)

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

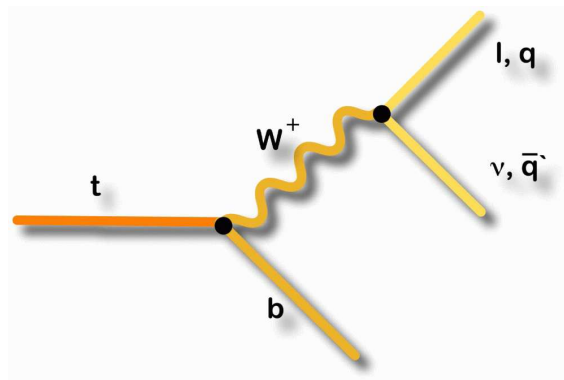
## Kwark $t$

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

Kwark  $t$  najczęściej produkowany w wyniku anihilacji kwark-antykwar:



Rozpada się prawie natychmiast (nie tworzy żadnych cząstek):



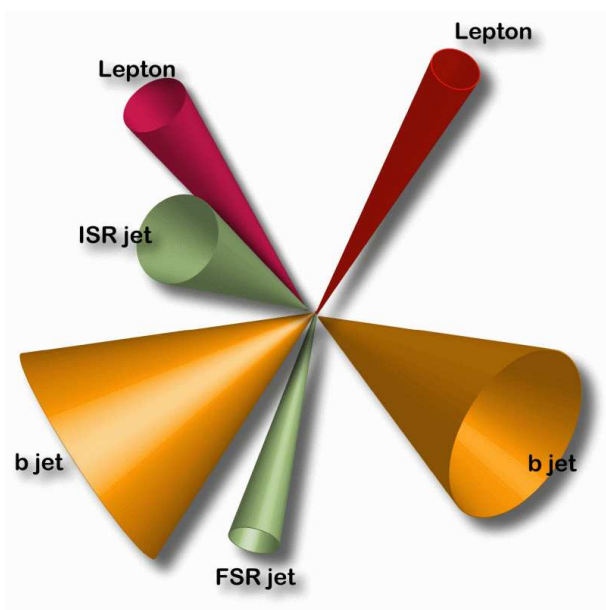
Obserwujemy powstający **kwark  $b$**  oraz **lepton** i **neutrino** (brakujący pęd poprzeczny) lub **parę jetów** o masie niezmienniczej odpowiadającej masie  $W$

# Kwark $t$

## Tevatron

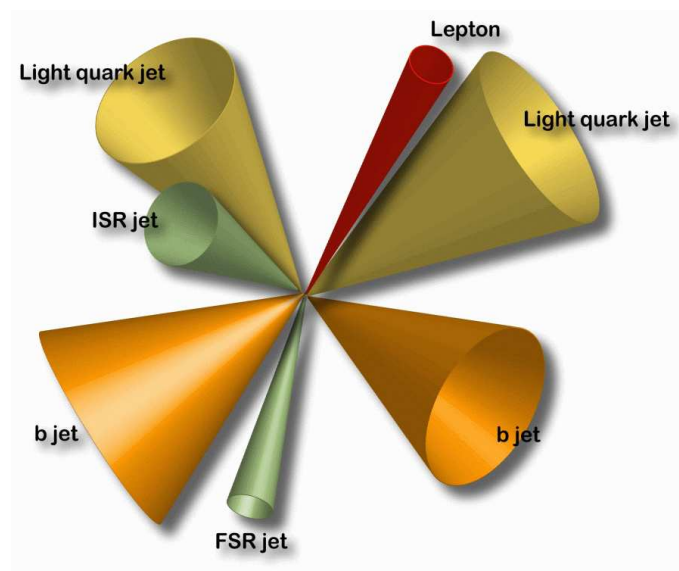
Ponieważ kwark  $t$  produkowany jest parami ( $t\bar{t}$ ) mamy 3 możliwe klasy przypadków

leptonowe



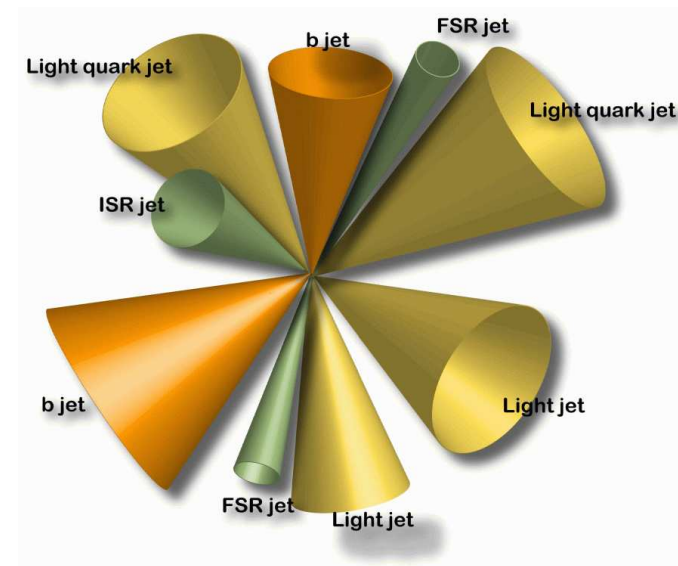
“złota próbka” ale tylko  
 $\sim 4\%$  przypadków  
 $(e^+e^-, \mu^+\mu^- \text{ i } e^\pm\mu^\pm)$

półleptonowe



$\sim 30\%$  przypadków  
 (tylko  $e^\pm$  i  $\mu^\pm$ )  
 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

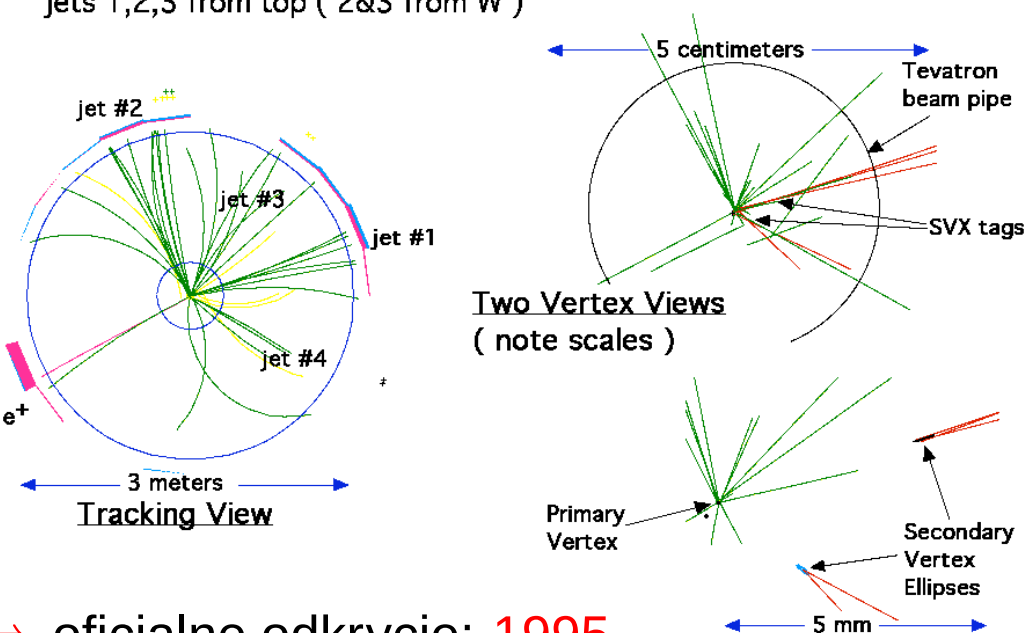
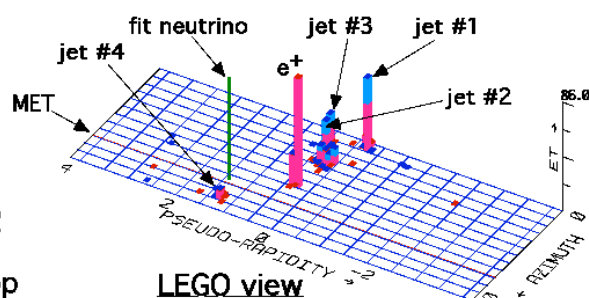
24-September, 1992

TWO jets tagged by SVX

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

$e^+$ , Missing  $E_t$ , jet #4 from top

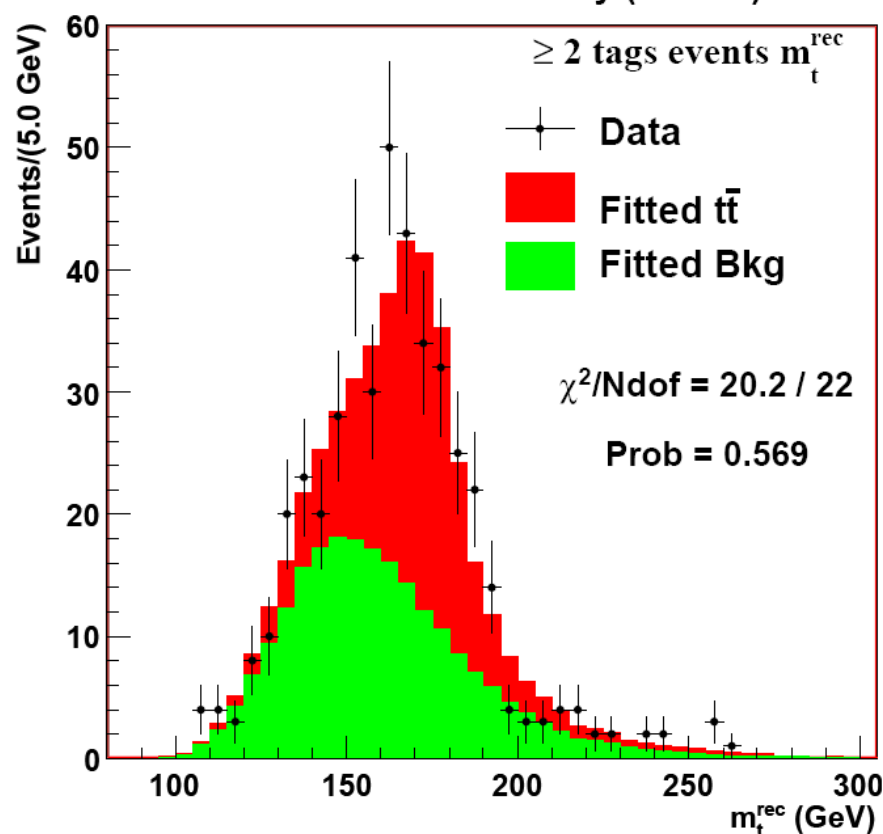
jets 1,2,3 from top ( 2&3 from W )



⇒ oficjalne odkrycie: 1995

Najnowsze dopasowanie masy

CDF Run II Preliminary ( $2.9 \text{ fb}^{-1}$ )

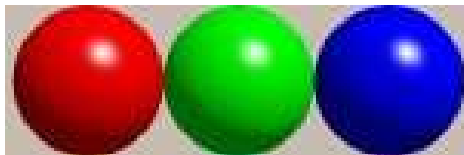


CDF + D0:  $m_t = 173.1 \pm 1.3 \text{ GeV}$

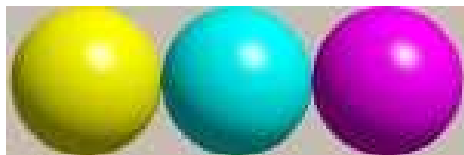
# Kolor

## Przypomnienie

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

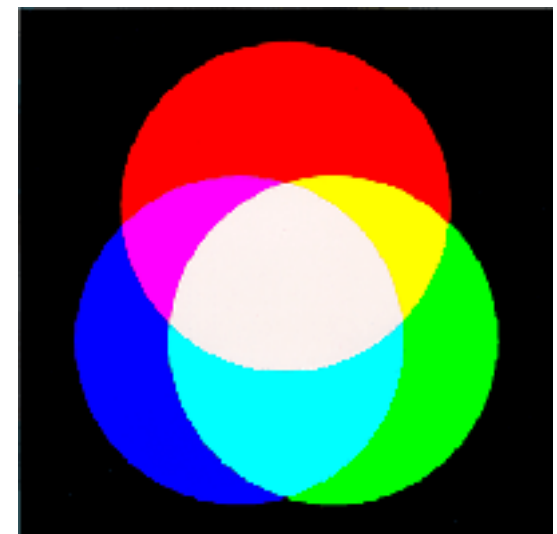


Antykwarki mają odpowiednio anty-kolory (kolory “ujemne”):  $\bar{R}$ ,  $\bar{G}$ ,  $\bar{B}$ .



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:

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

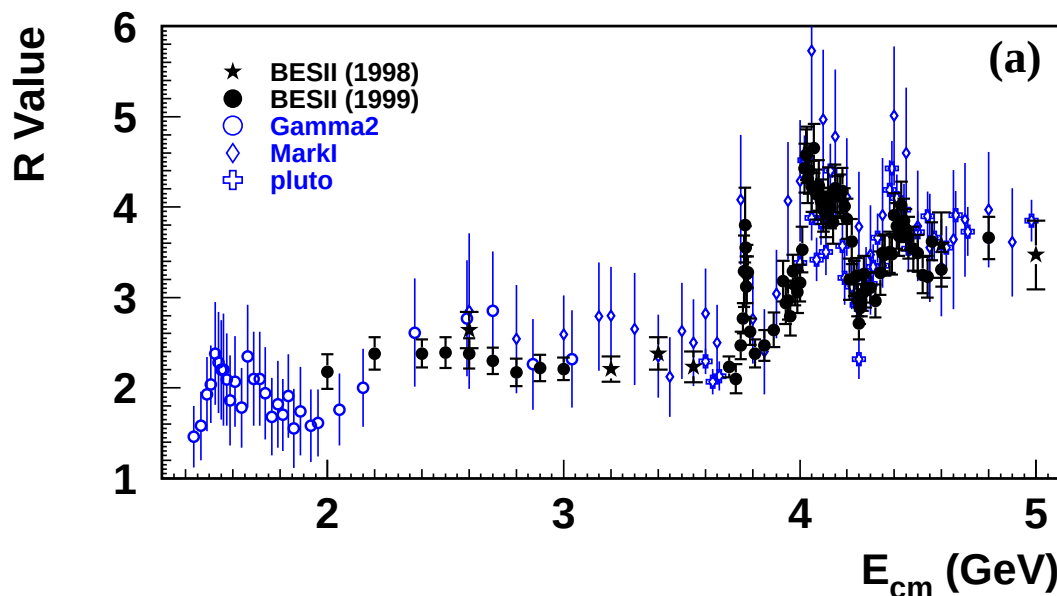
Oczekiwalibyśmy:

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

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

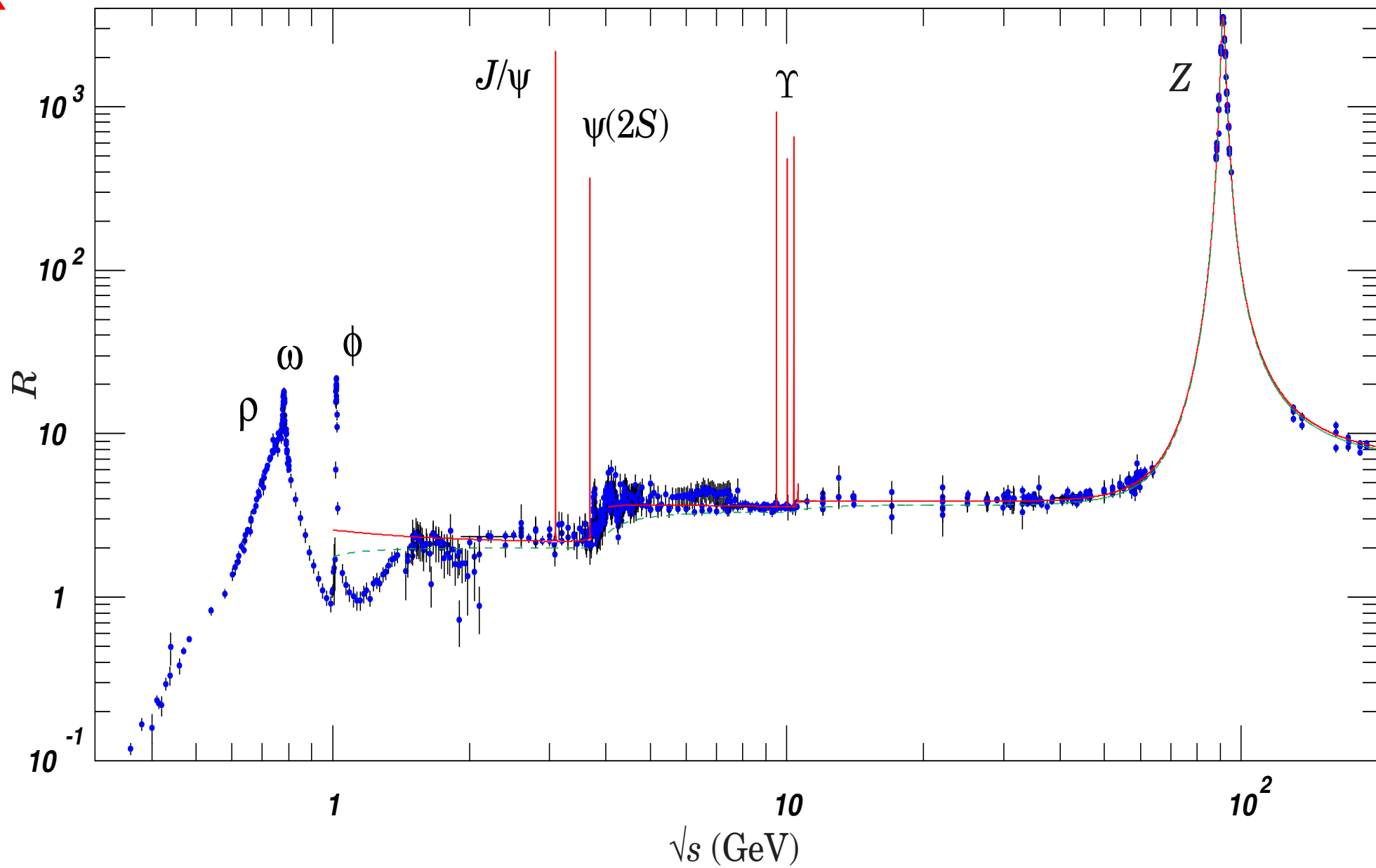
W doświadczeniu uzyskujemy wartości 3 razy większe!

⇒ każdy kwark w 3 kolorach !





R





# LEP, CERN, Genewa

Niezwykle precyzyjne testy Modelu Standardowego





# Pomiary precyzyjne w LEP

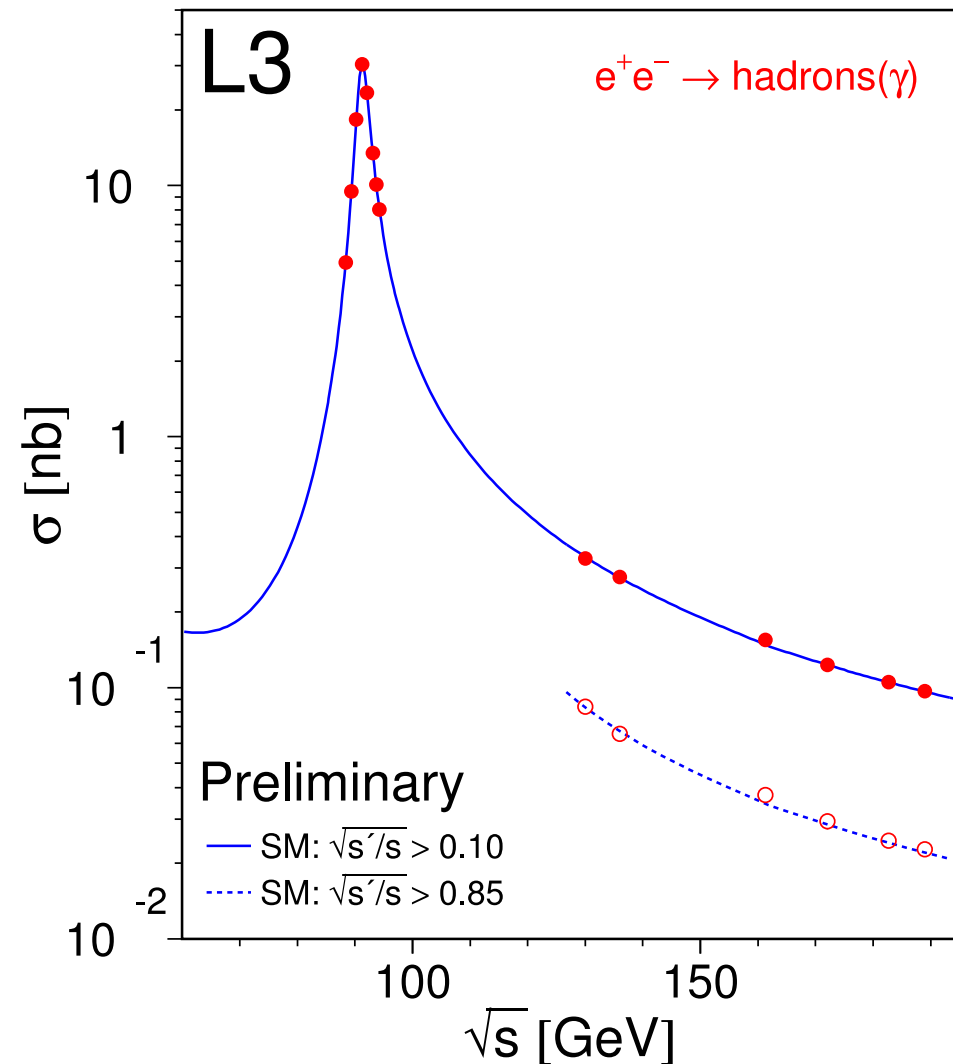
$$e^+e^- \rightarrow Z^0$$

**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...

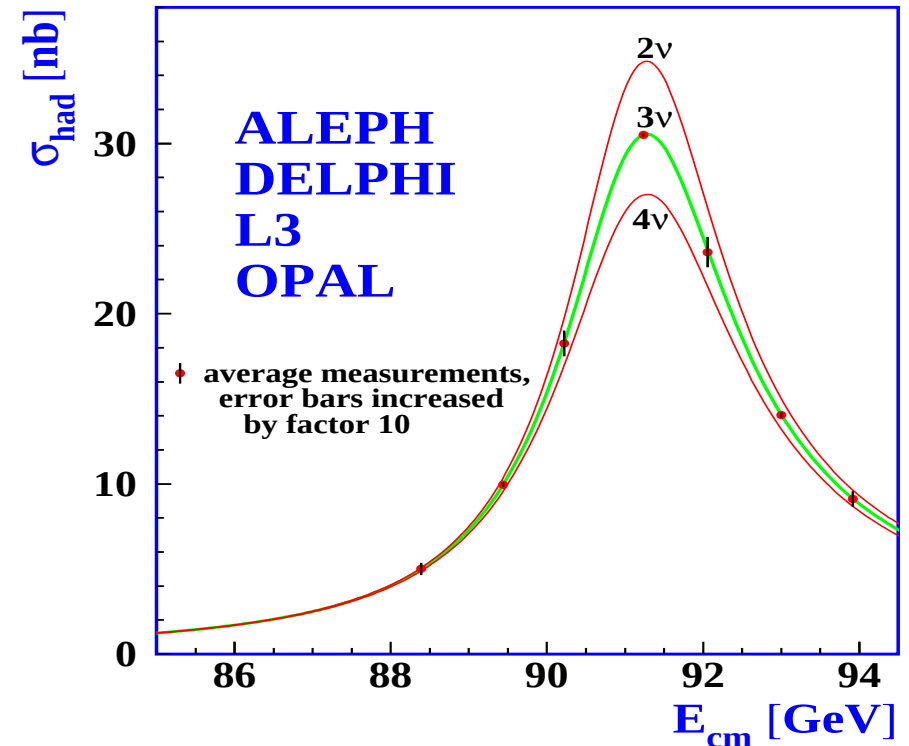


# Pomiary precyzyjne w LEP

## 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



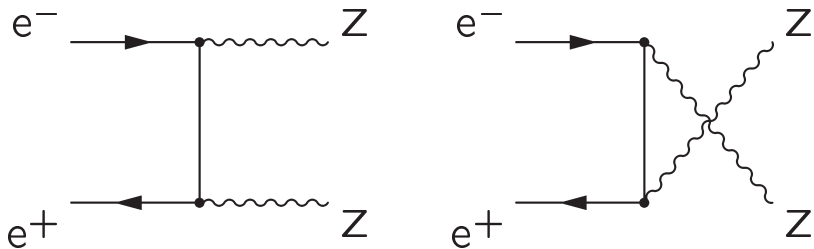
$$N_\nu = 2.9840 \pm 0.0082$$

final 2005 (LEP+SLC)

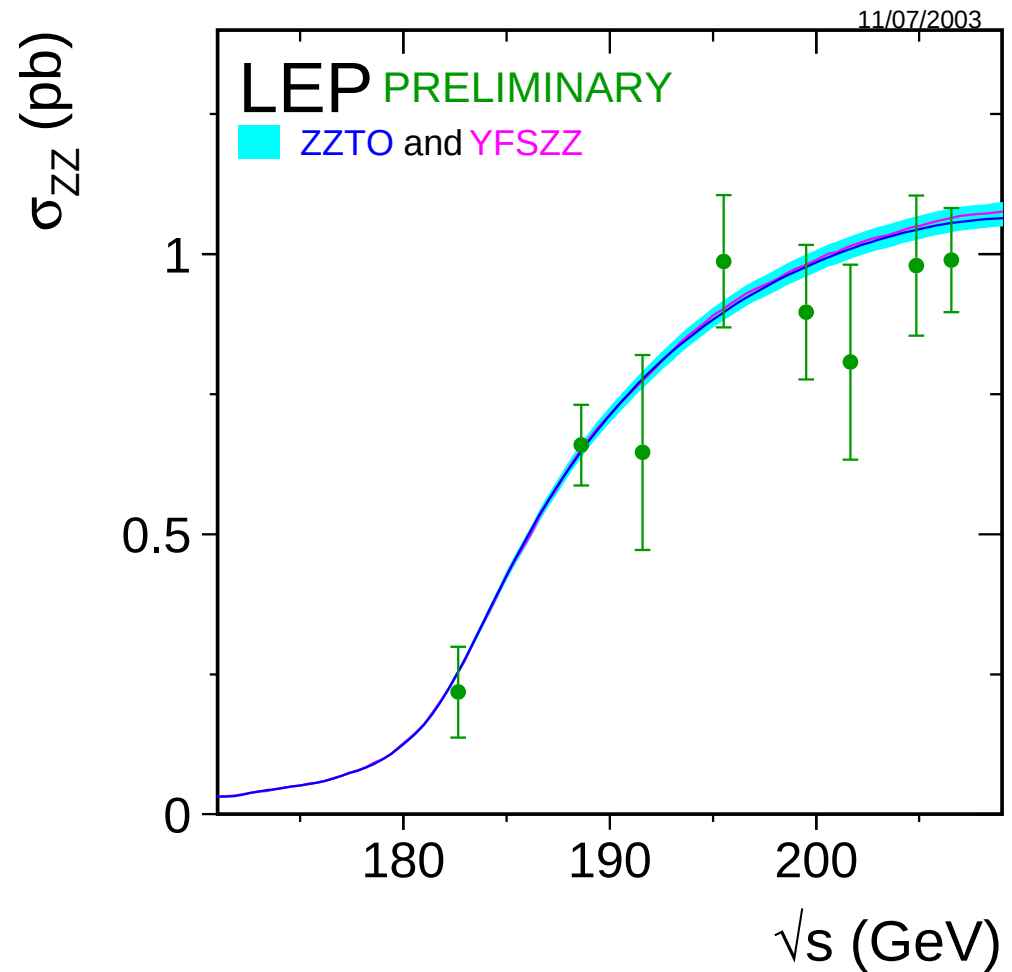
# Pomiary precyzyjne w LEP

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

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



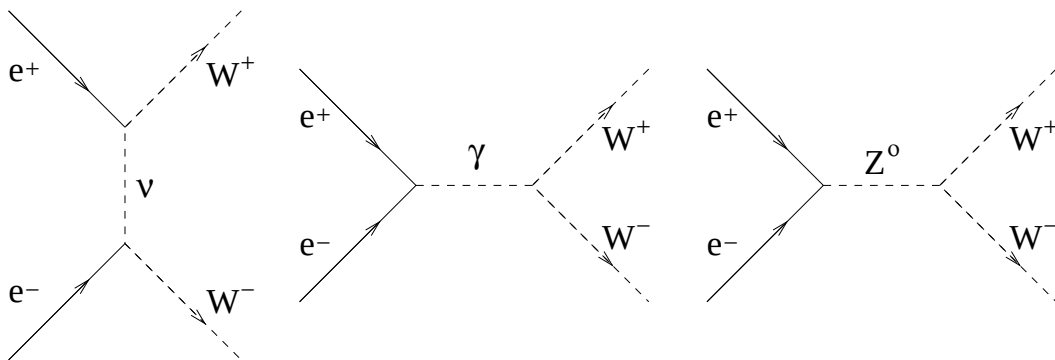
Bardzo dobra zgodność z przewidywaniami Modelu Standardowego  $\Rightarrow$



# Pomiary precyzyjne w LEP

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

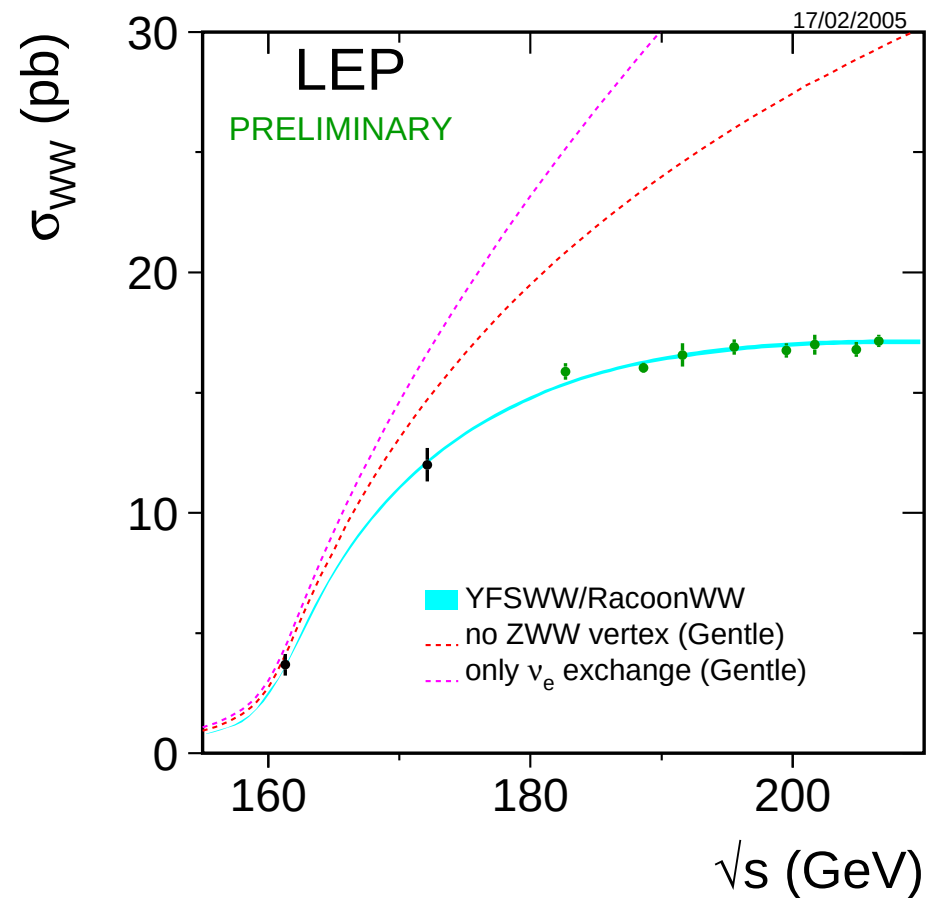
Wkład od trzech różnych procesów:



Sprzężenia wynikają z przyjętych symetrii cechowania

⇒ ścisłe przewidywania modelu

Doświadczalnie potwierdzone kasowanie wkładów od różnych procesów ⇒



# Pomiary precyzyjne w LEP

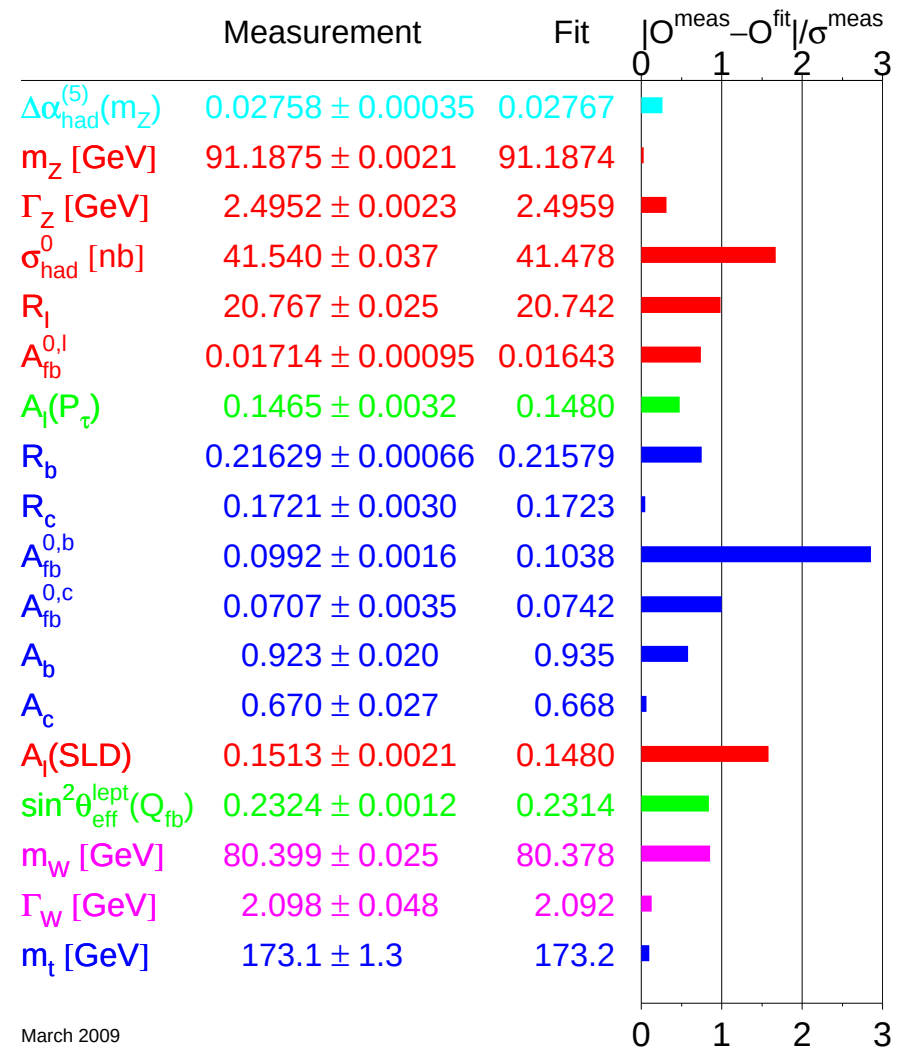
## Porównanie

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

Można wybrać np.  $\alpha_{em}$ ,  $G_F$  i  $M_Z$ .

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

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





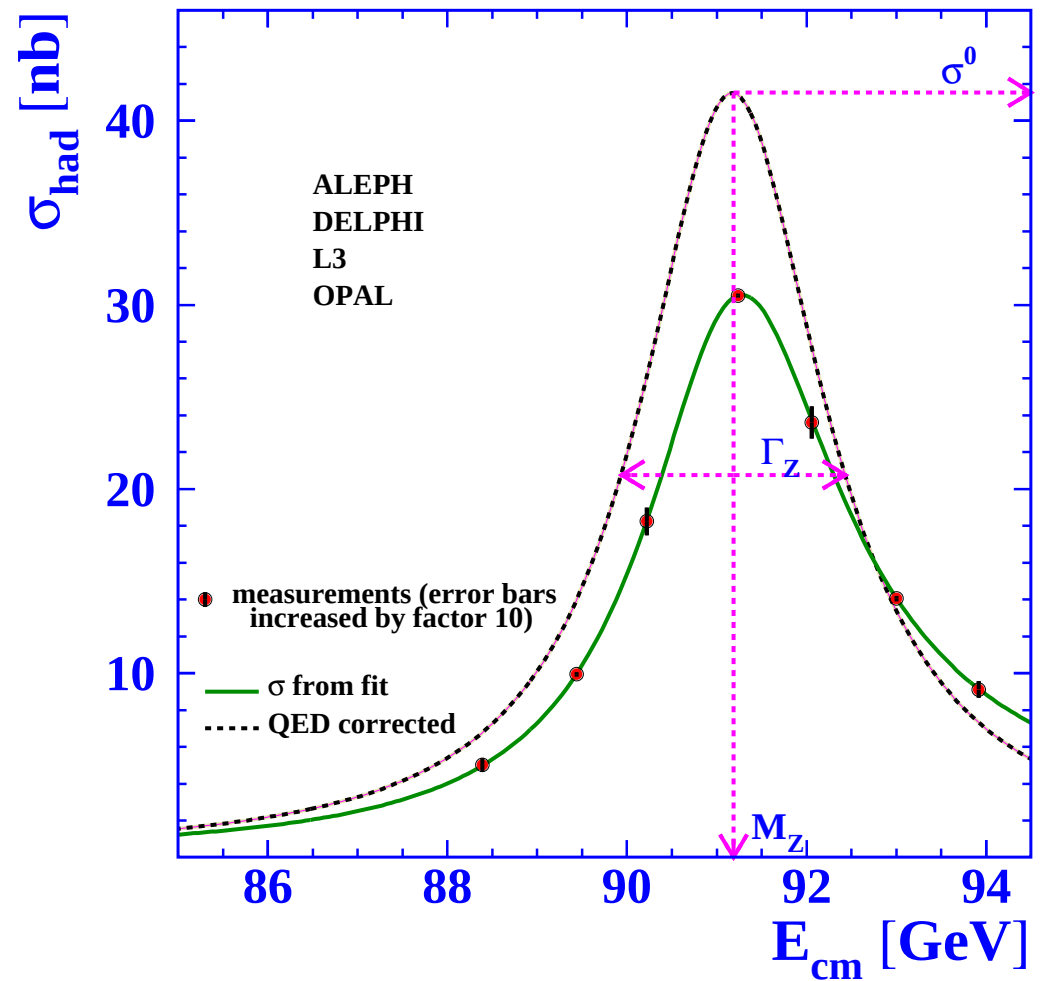
# Pomiary precyzyjne w LEP

## 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!

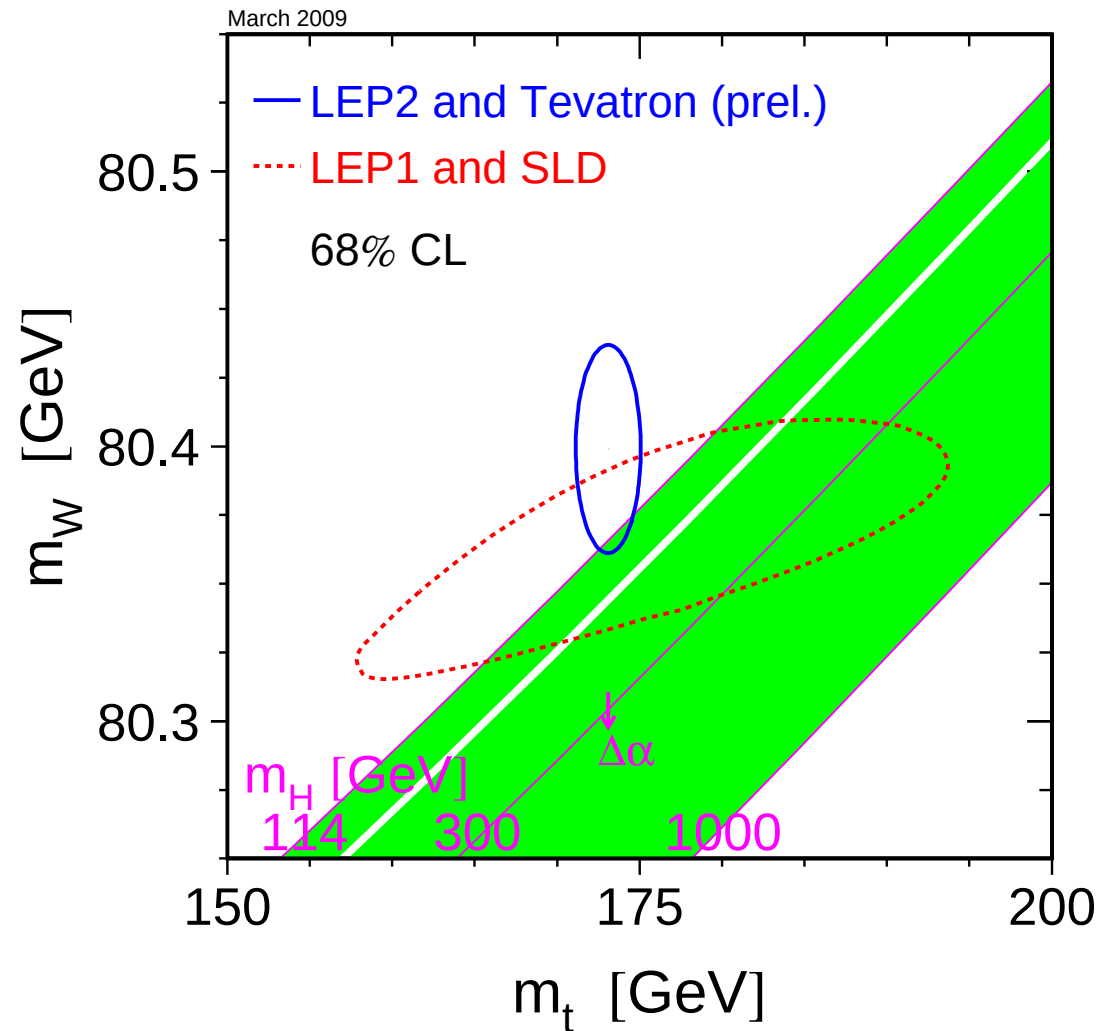


# Pomiary precyzyjne w LEP

## Poprawki

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

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



# Pomiary precyzyjne w LEP

## Masa higgsa

Analiza **wszystkich** dostępnych **danych** wskazuje, że masa Higgsa powinna wynosić **około 100 – 200 GeV**

$$m_h = 90^{+36}_{-27} \text{ GeV}$$

lub:  $m_h < 163 \text{ GeV}$  (95% CL)

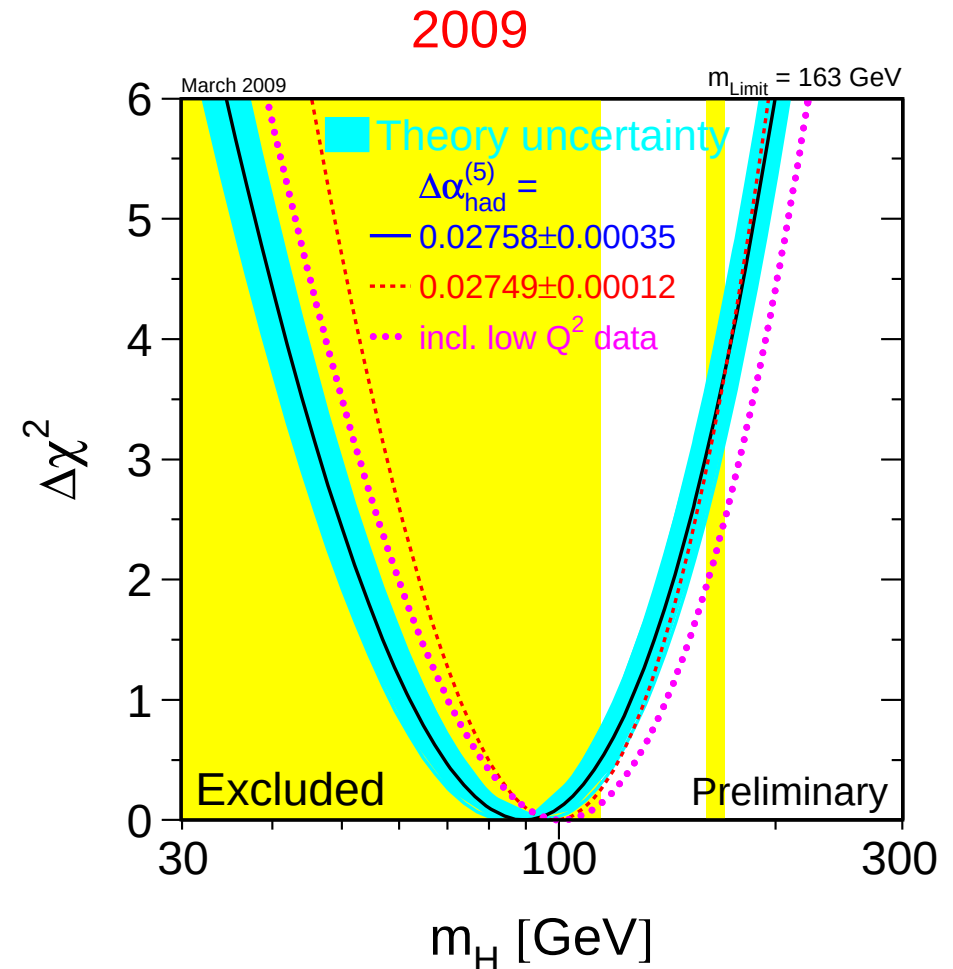
Dlaczego wciąż go nie widzimy ?...

Z bezpośrednich poszukiwań:

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

wszystkie dane LEP:

ALEPH + DELPHI + L3 + OPAL

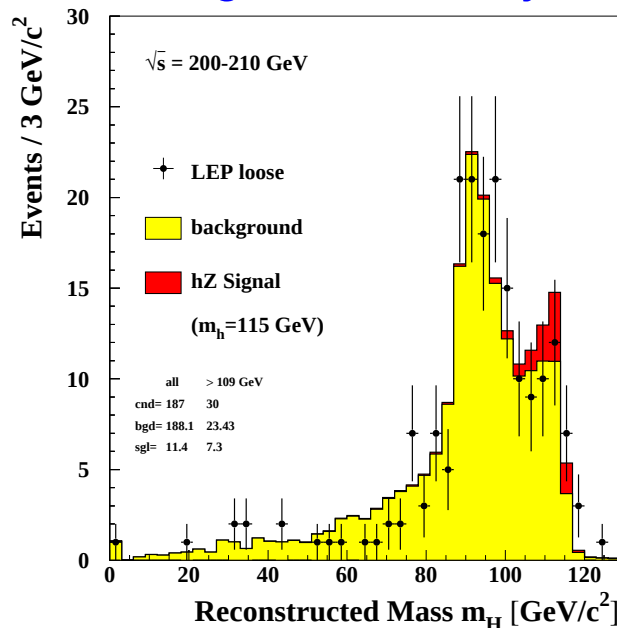


# Poszukiwanie Higgsa w LEP

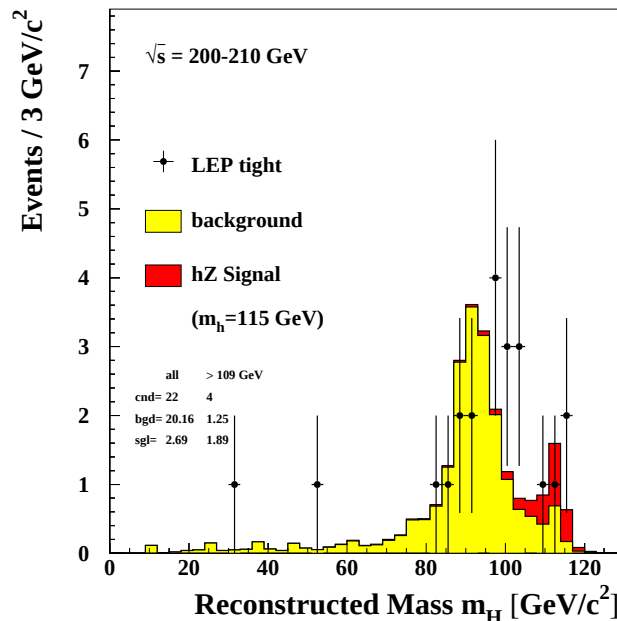
## Rozkład masy

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

łagodna selekcja



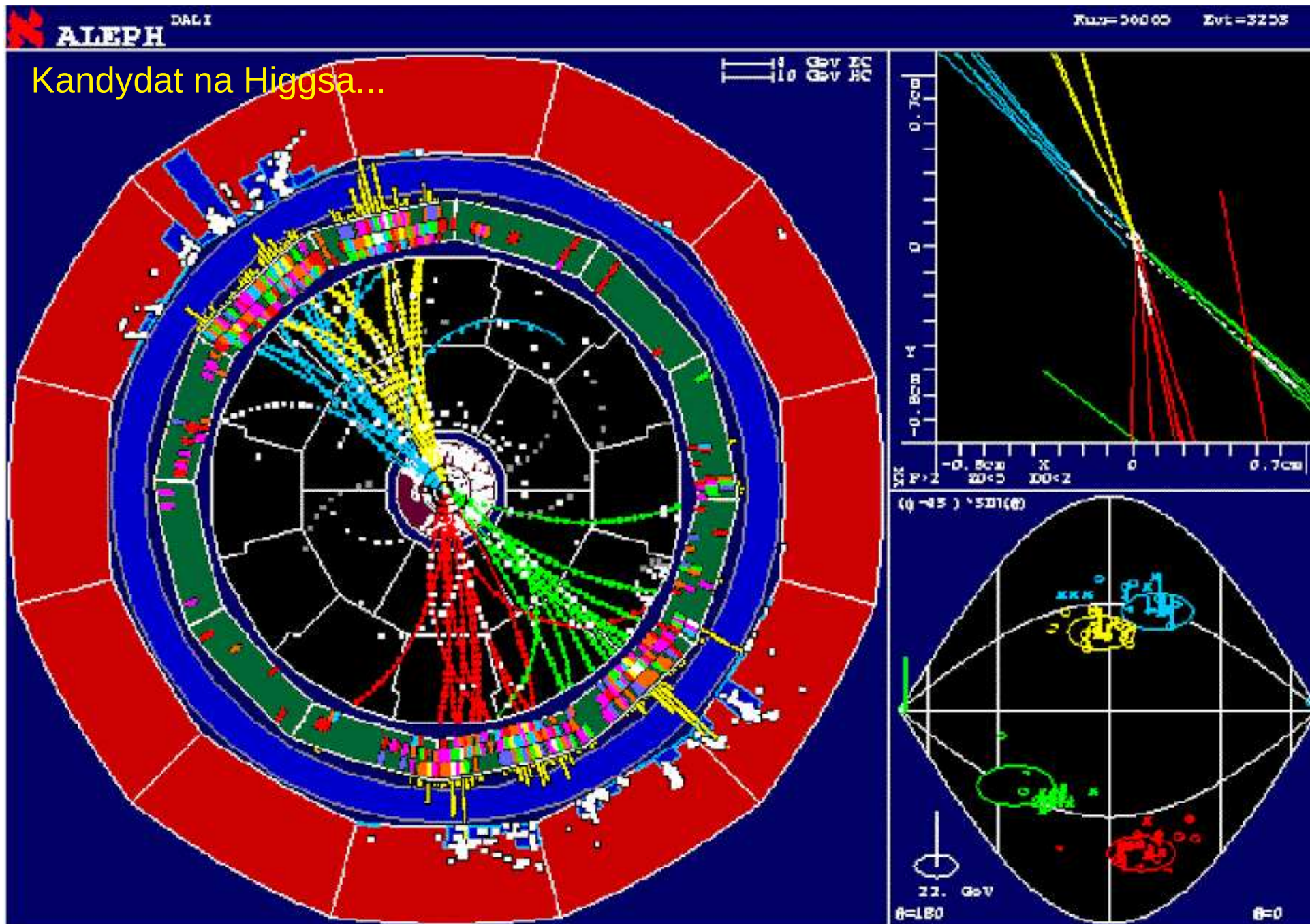
ostra selekcja



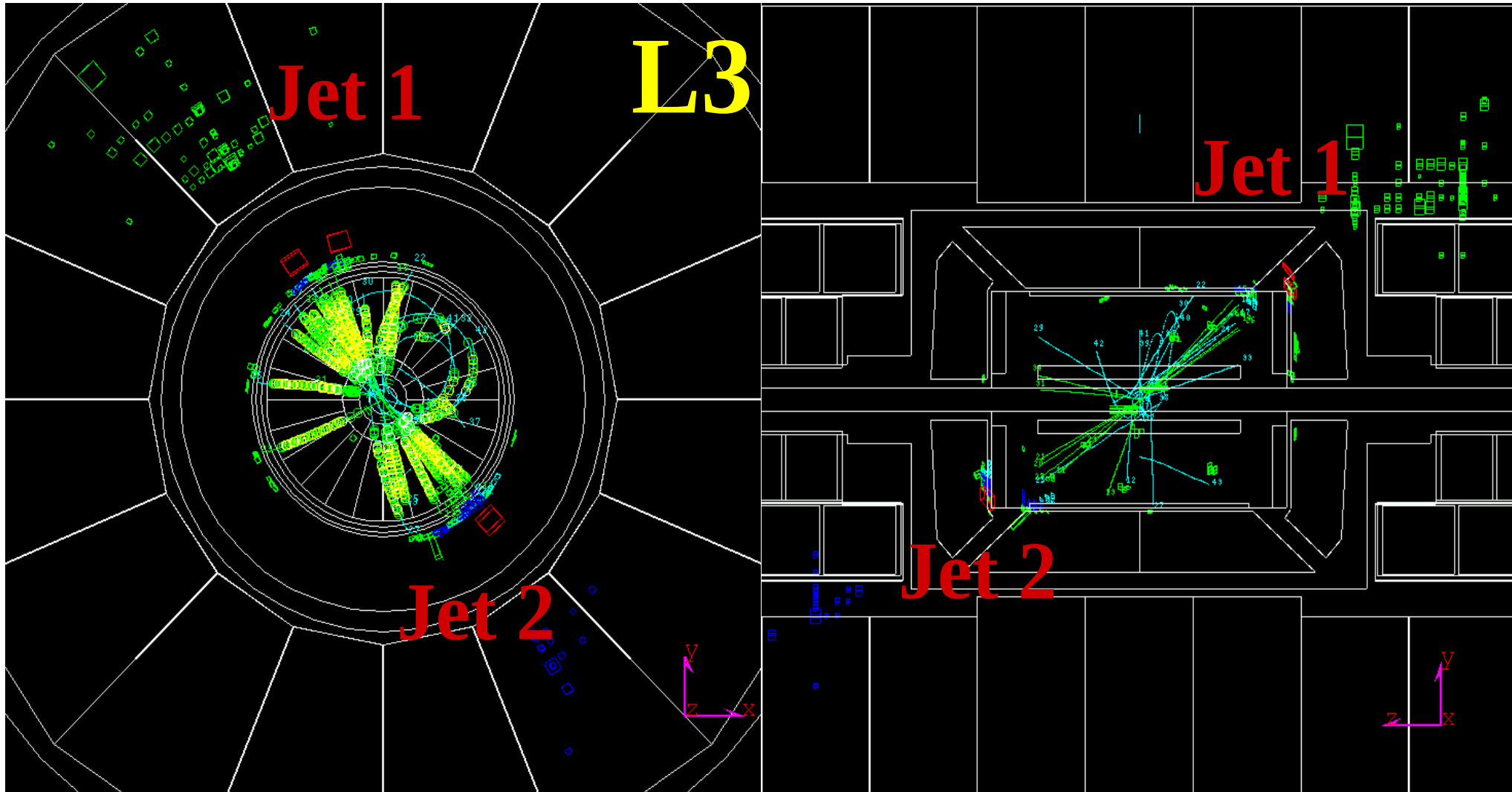
W obszarze  $m_h \sim 115$  GeV widać niewielki nadmiar przypadków, który może pochodzić od produkcji Higgsa

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

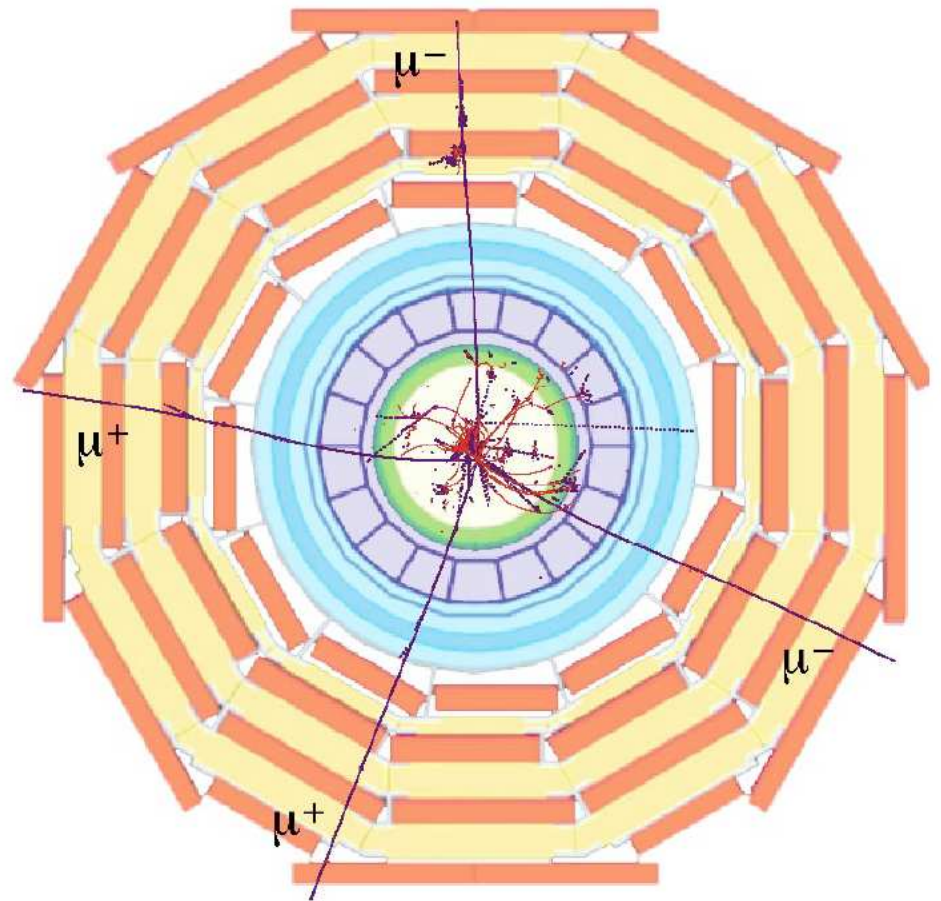
## LHC

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

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

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

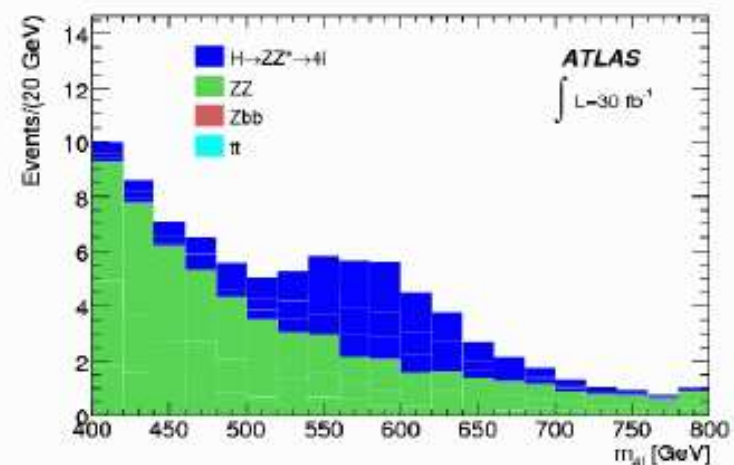
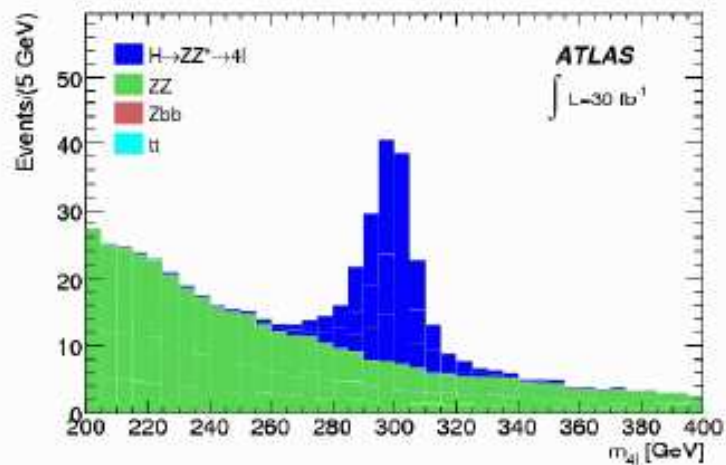
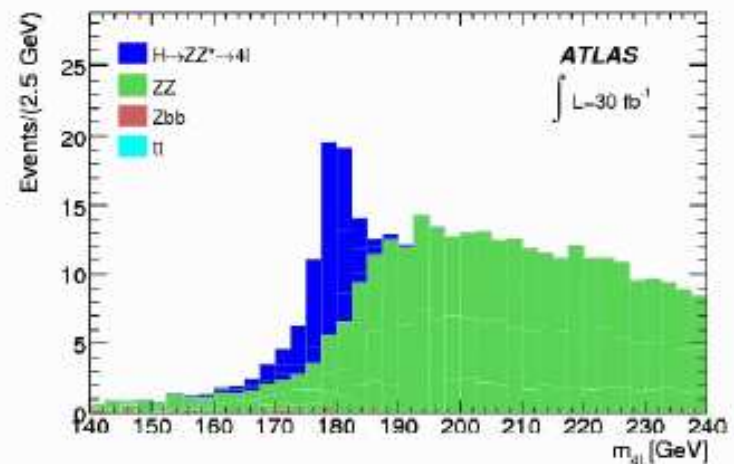
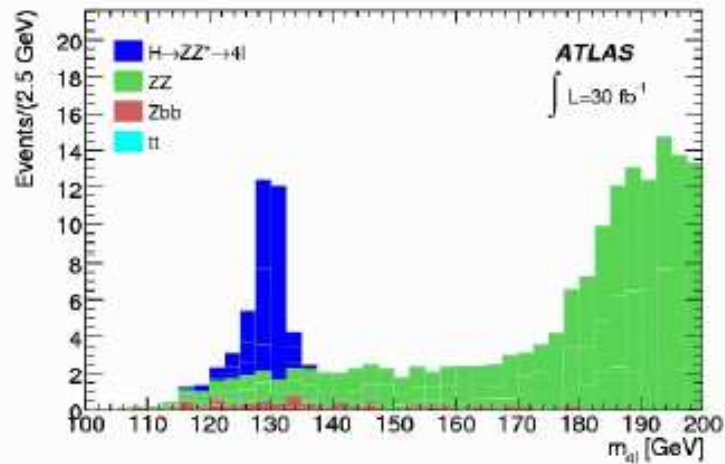
gdyż naładowane leptony ( $e^\pm$  i  $\mu^\pm$ ) można **łatwo zidentyfikować**



# Poszukiwanie Higgsa

LHC

oczekiwany sygnał w detektorze ATLAS (dla różnych  $m_H$ )

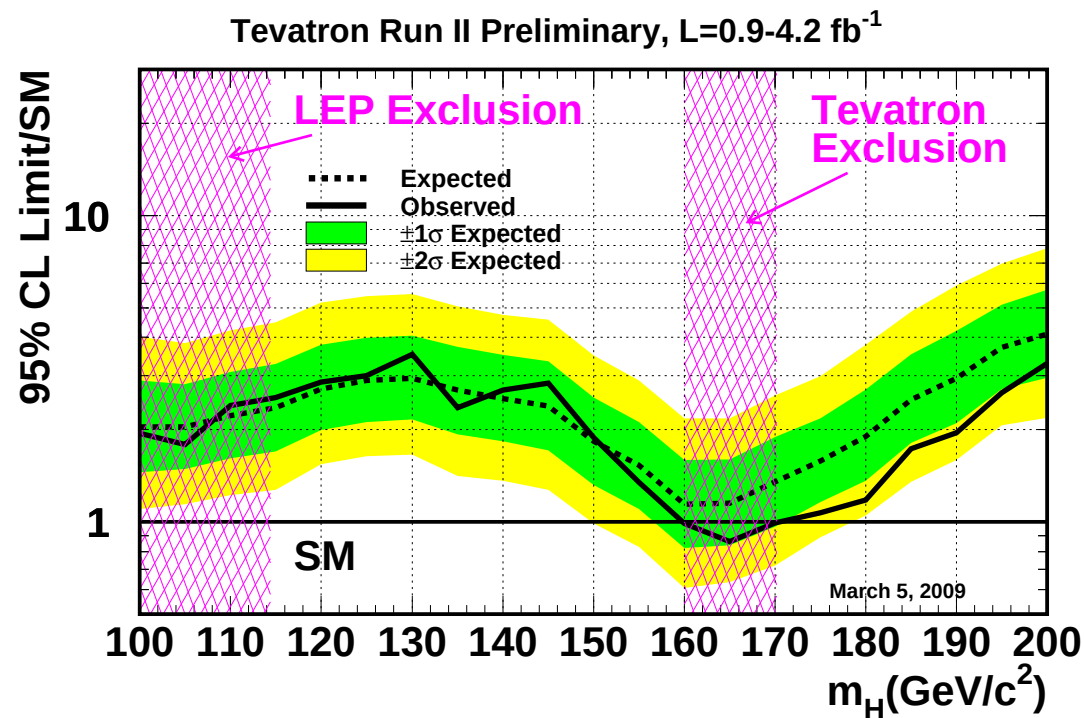


# Poszukiwanie Higgsa

## Tevatron

Zbieranie danych idzie “pełną parą”.

Ostatnio zaprezentowano pierwsze wyniki ograniczające dostępny zakres mas bozonu Higgsa (w ramach SM)



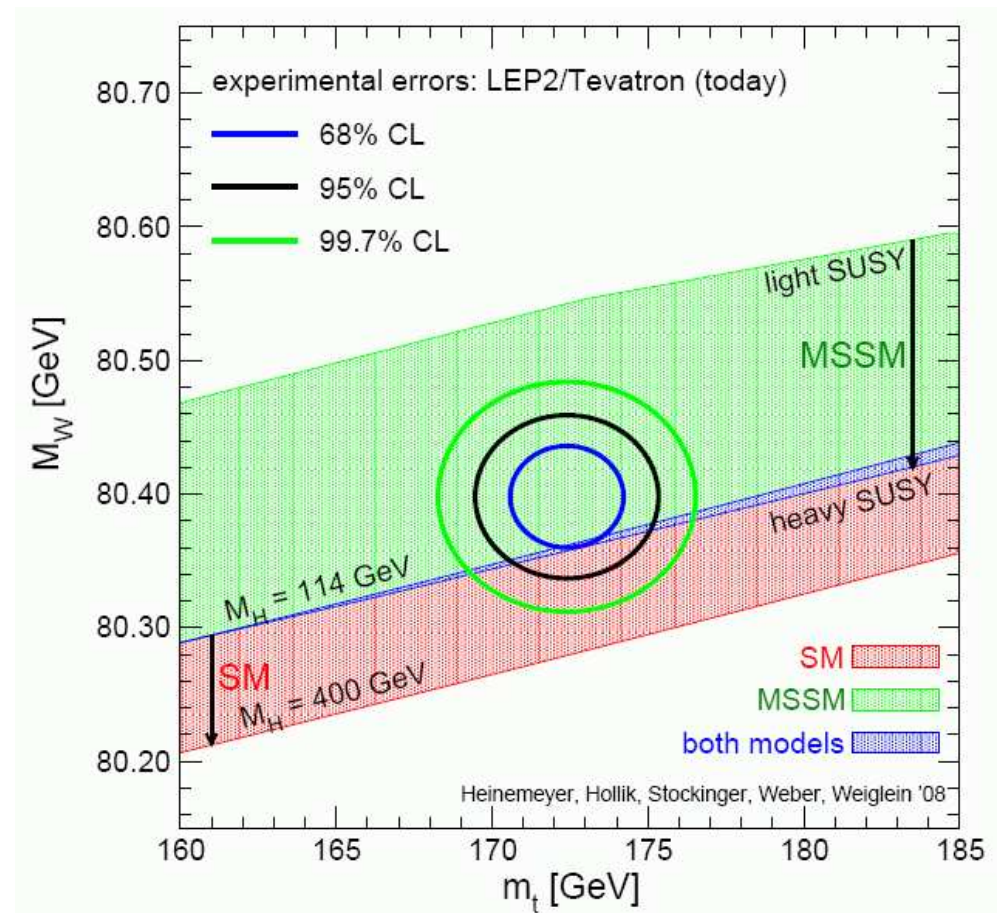
# Poza Modelem Standardowym

## SUSY

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

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

Porównanie mierzonych mas  $t$  i  $W$  z przewidywaniami **SM** i **MSSM**

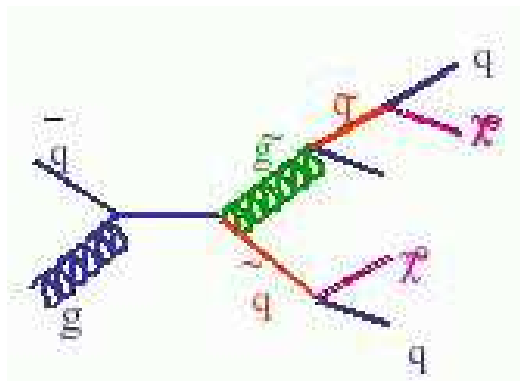




# Poza Modelem Standardowym

## SUSY

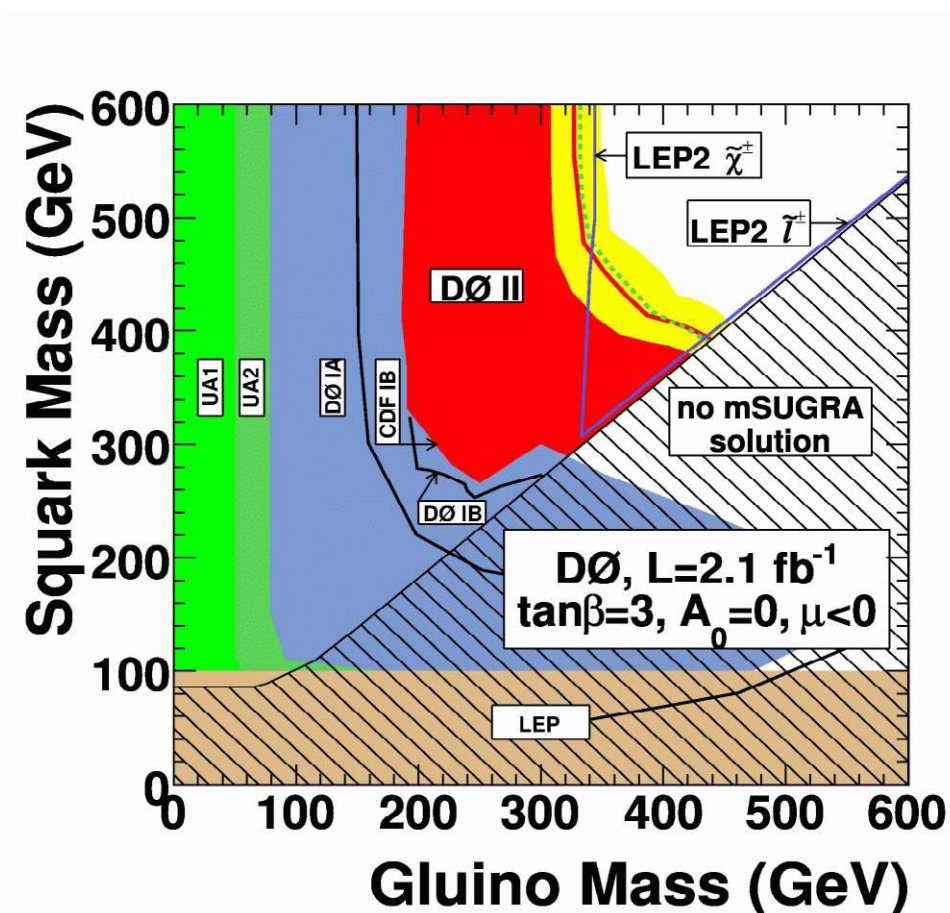
Intensywne poszukiwania w Tevatronie



Sygnał: jety hadronowe  
+ brakujący pęd poprzeczny

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

Dotychczas bez powodzenia  
Wykluczony obszar mas:

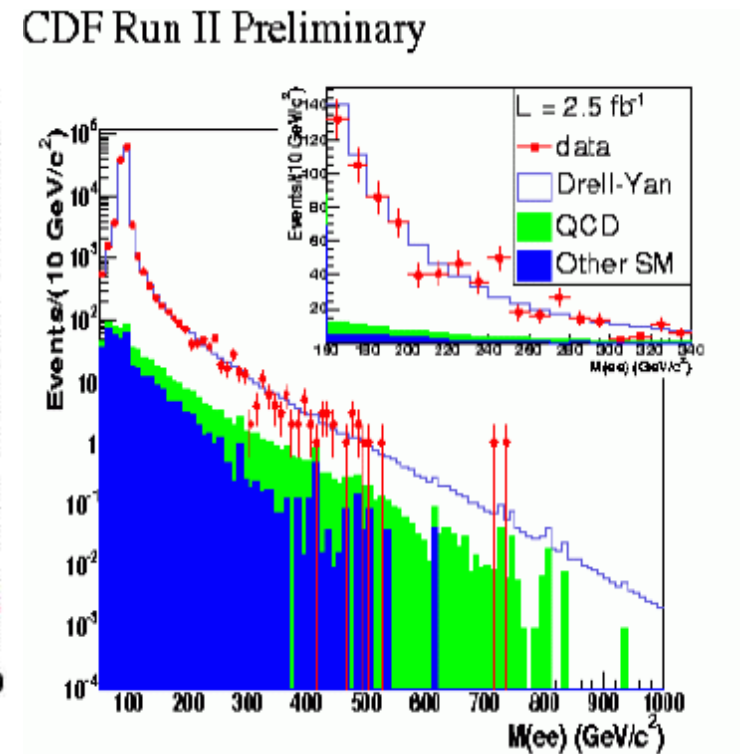
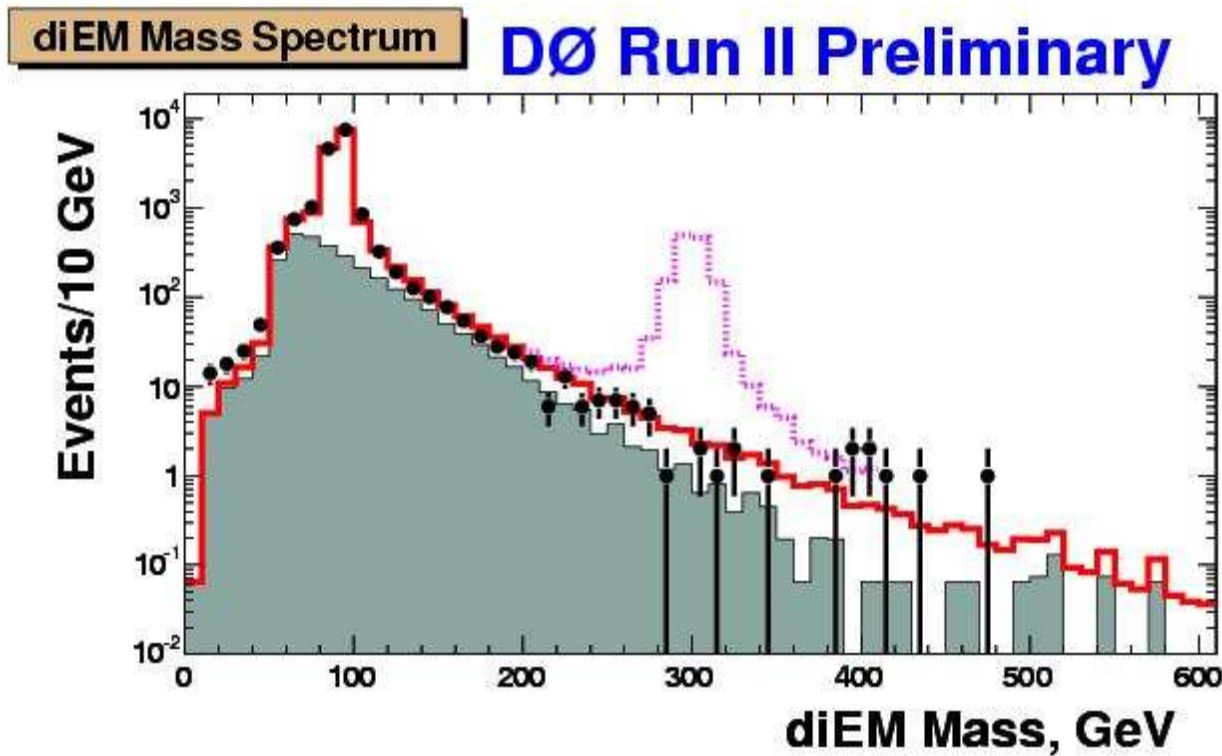


# Poza Modelem Standardowym

Poszukiwanie stanów rezonansowych

np. dodatkowych bozonów  $Z'$

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



masa niezmiennicza  $l^+l^-$

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