

Testy Modelu Standardowego

prof. dr hab. Aleksander Filip Żarnecki

Wszechświat Cząstek Elementarnych

Wykład 11

- bozony W^\pm i Z^0
- kwark t
- kolor kwarków
- pomiary precyzyjne
- poszukiwania bozonu Higgsa

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

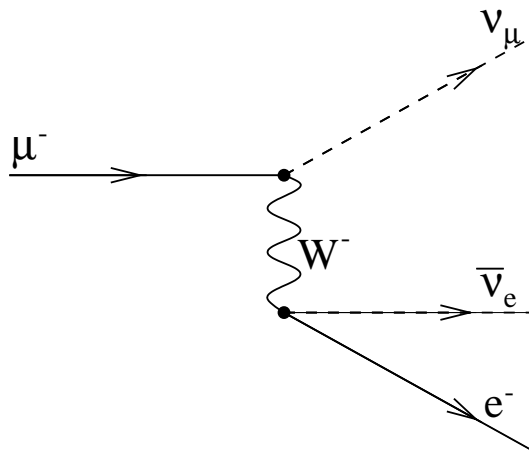
Bozony W^\pm i Z^0

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 :

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

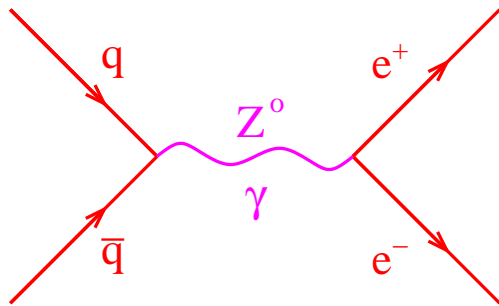
$$m_Z \sim 90 \text{ GeV}$$

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):

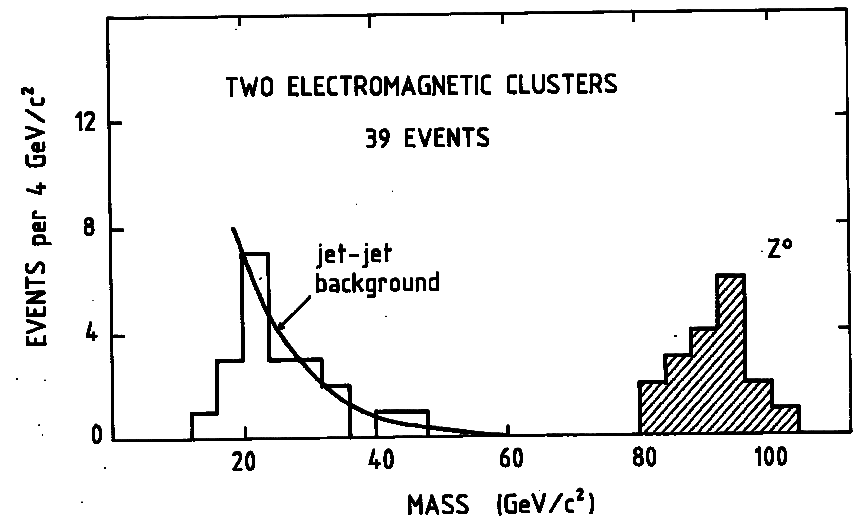
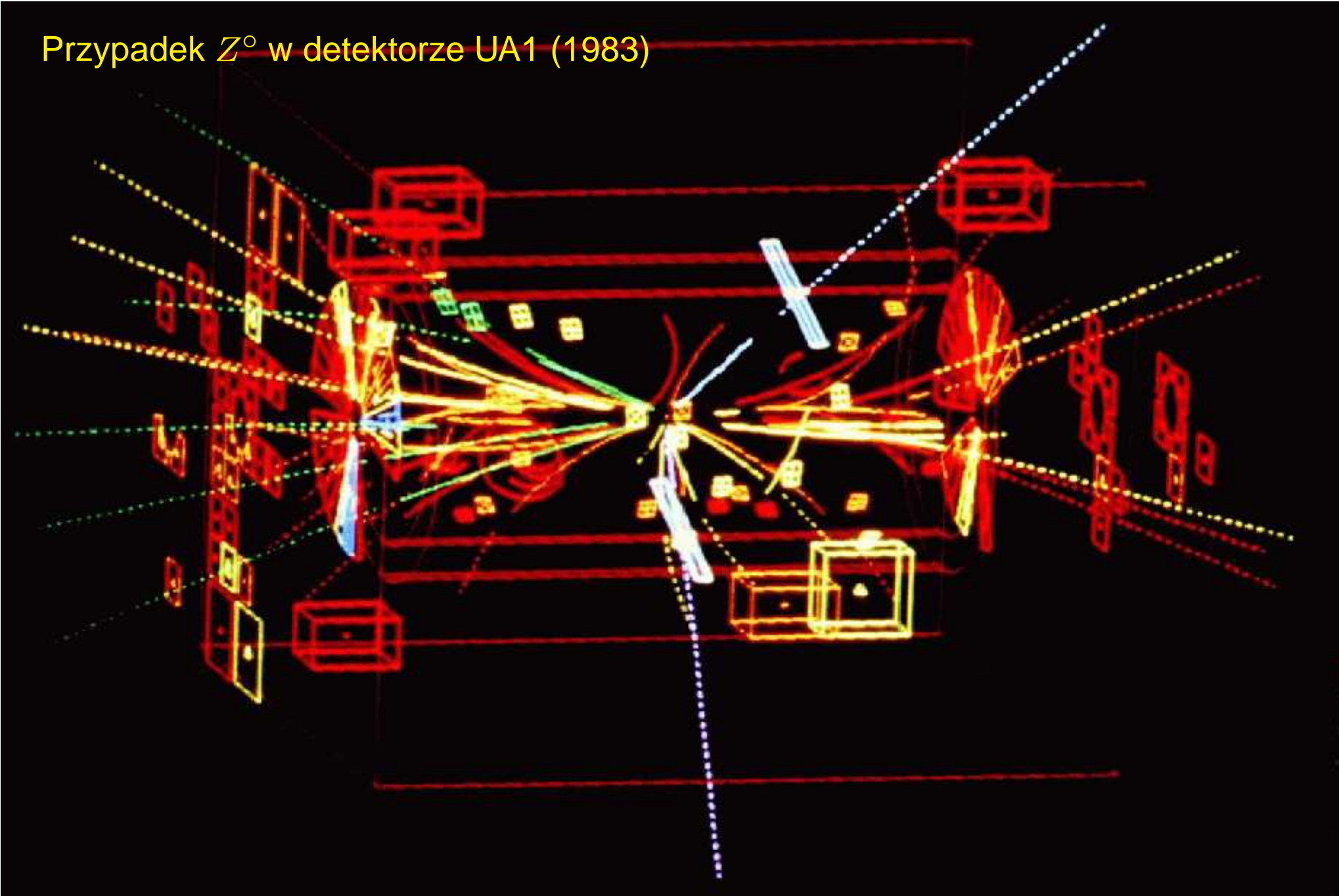


Fig. 1

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):

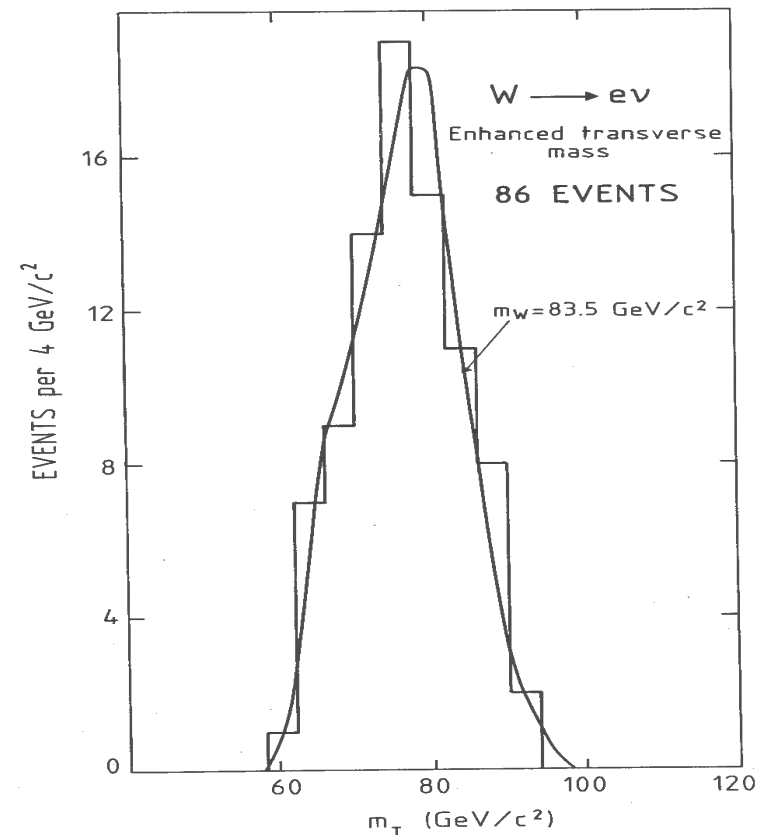
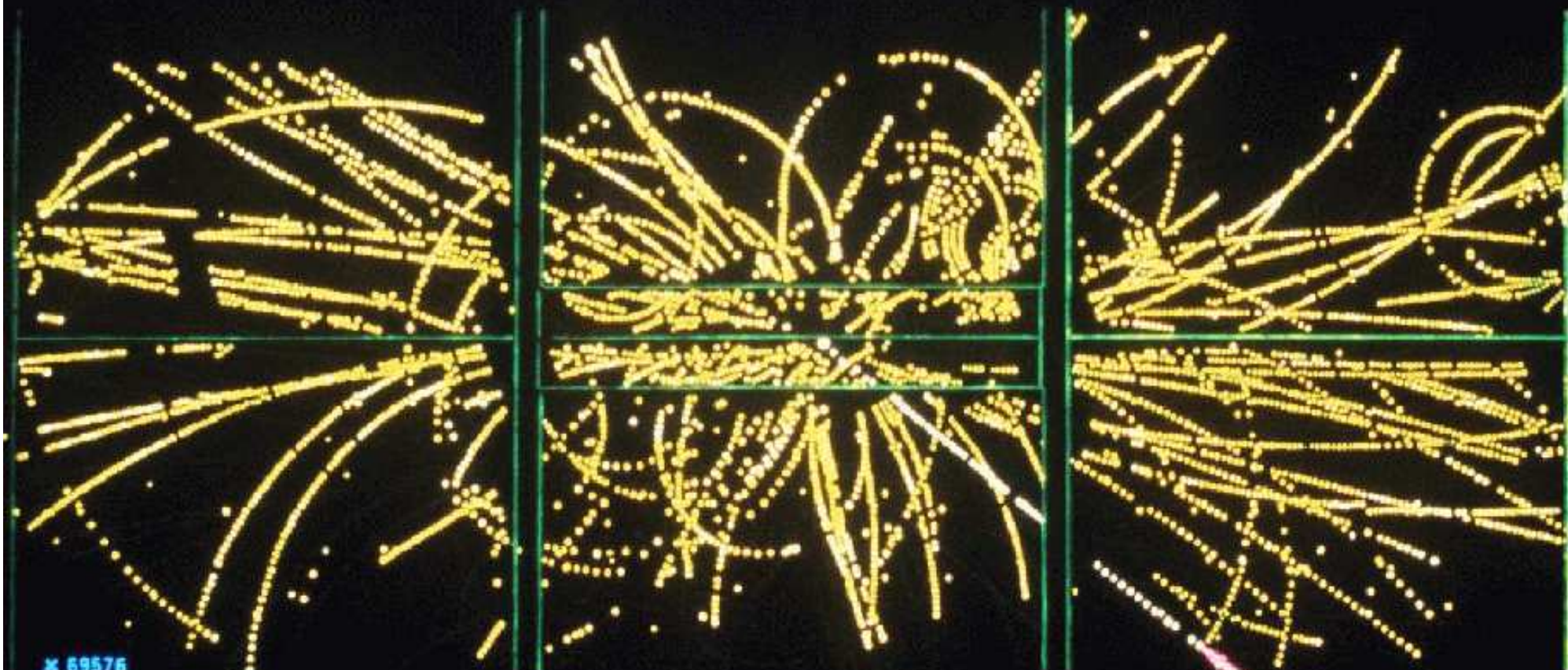


Fig. 3b

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



LEP, CERN, Genewa

1989 - 2000: precyzyjne testy Modelu Standardowego



Bozony W^\pm i Z^0

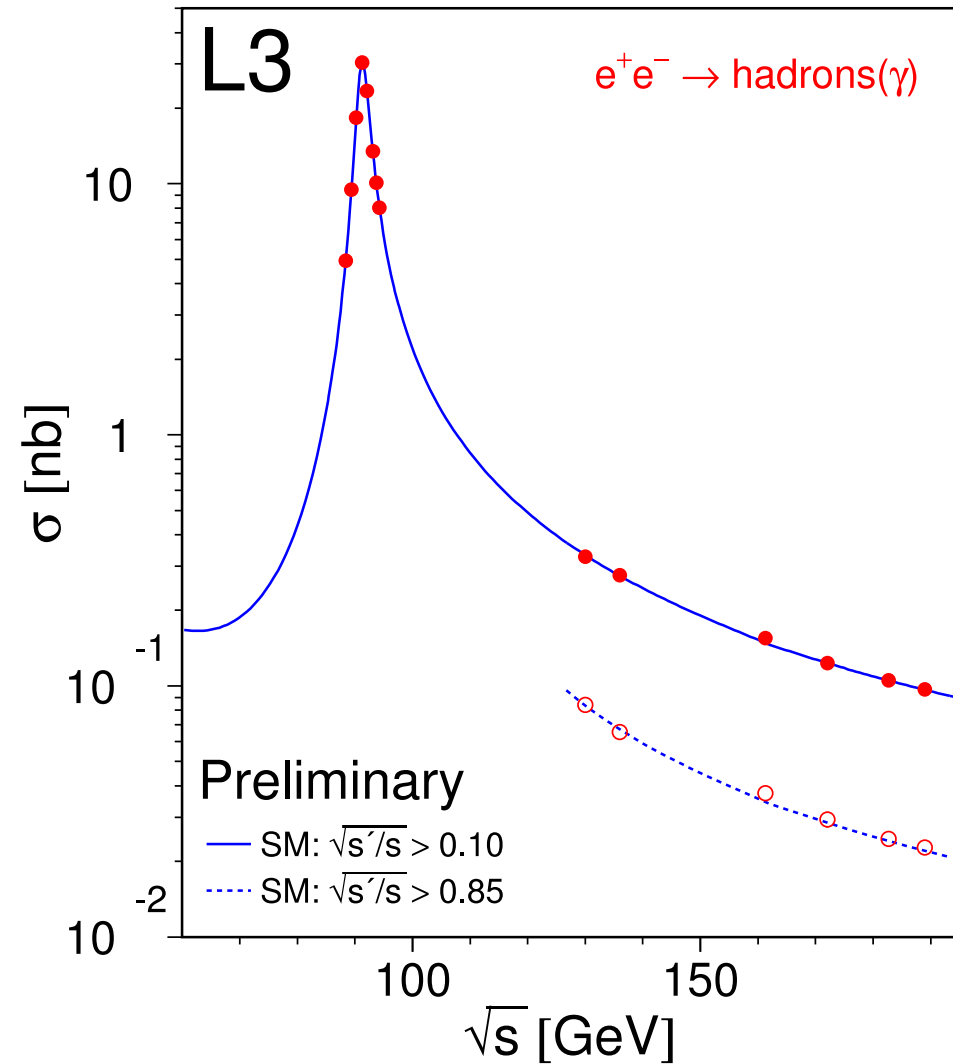


Model Standardowy został bardzo dokładnie przetestowany w zderzeniach e^+e^- w akceleratorach LEP i SLC (miliony przypadków).

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

Szerokość maksimum odpowiada naturalnej szerokości bozonu Z^0 .

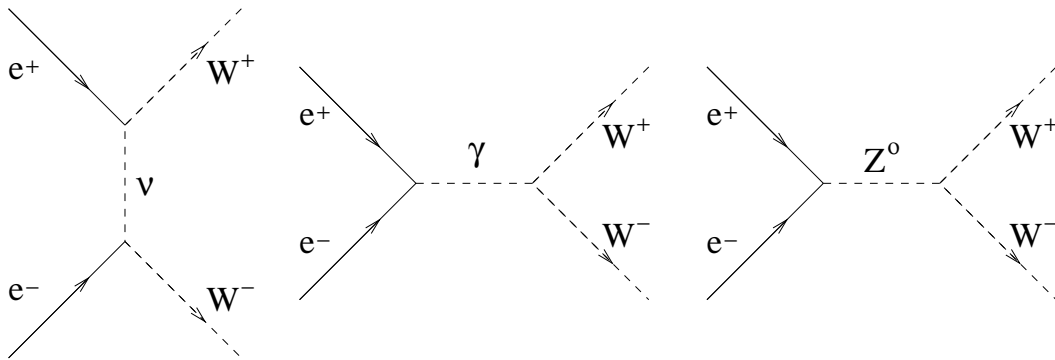
Ponieważ jest to cząstka niesłychanie krótkożyciowa, jej masa nie jest dokładnie określona...



Bozony W^\pm i Z^0

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

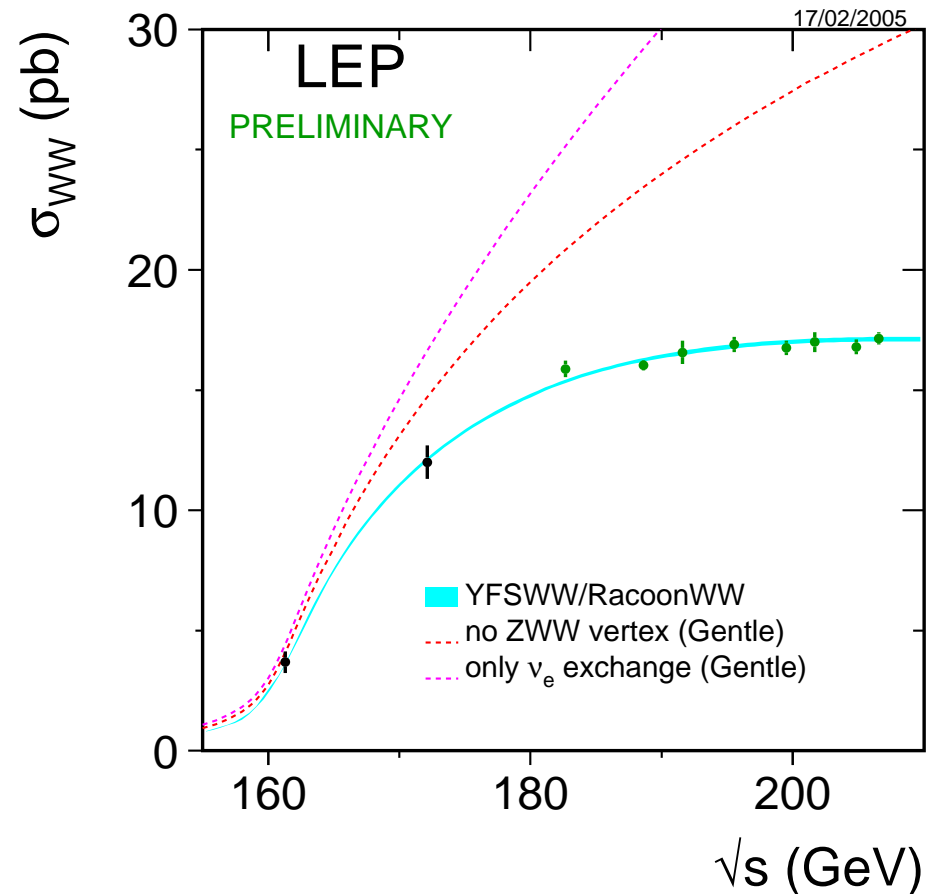
Produkcja bozonów W jedynie w parach, wkład od **trzech** różnych **procesów**:



Sprzężenia wynikają ze struktury **Modelu Standardowego**

\Rightarrow ścisłe przewidywania teoretyczne

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



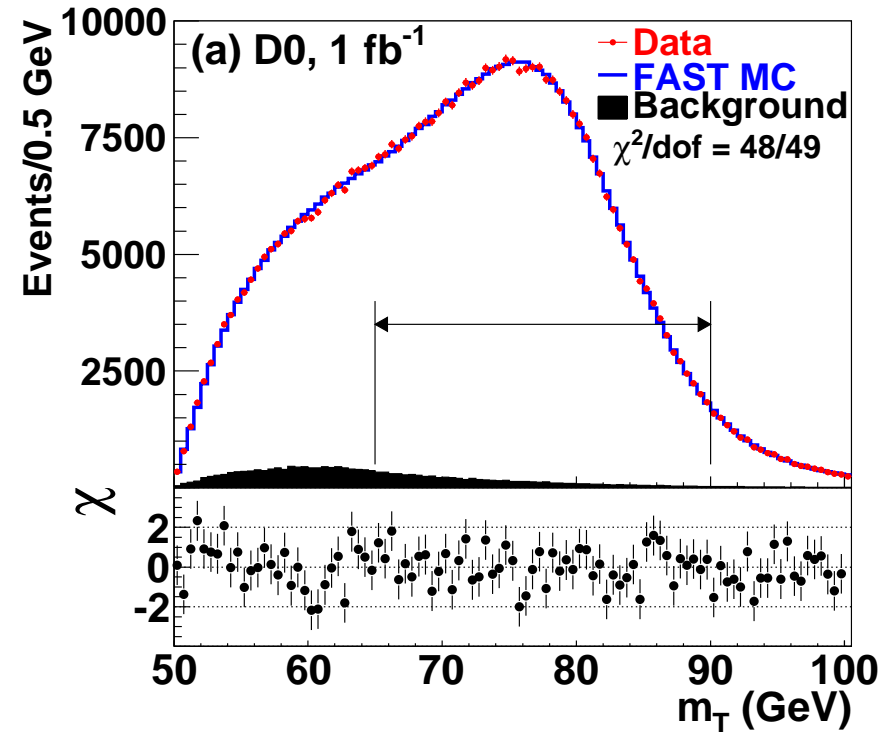
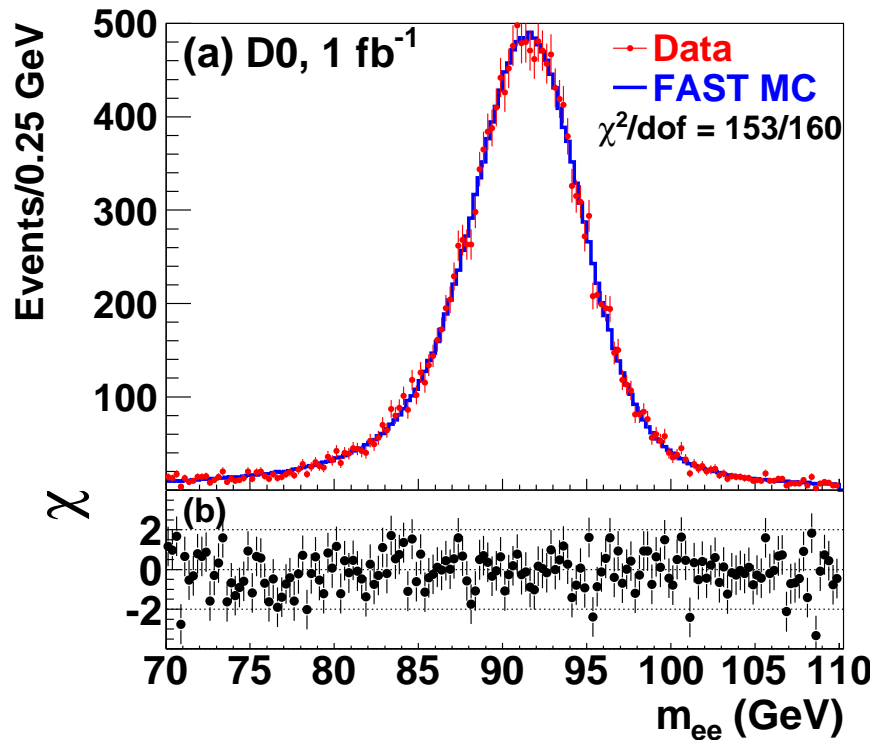
Bozony W^\pm i Z^0

Tevatron @ Fermilab

Tysiące Z^0 i W^\pm są dziś produkowane w eksperymentach D0 i CDF

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

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

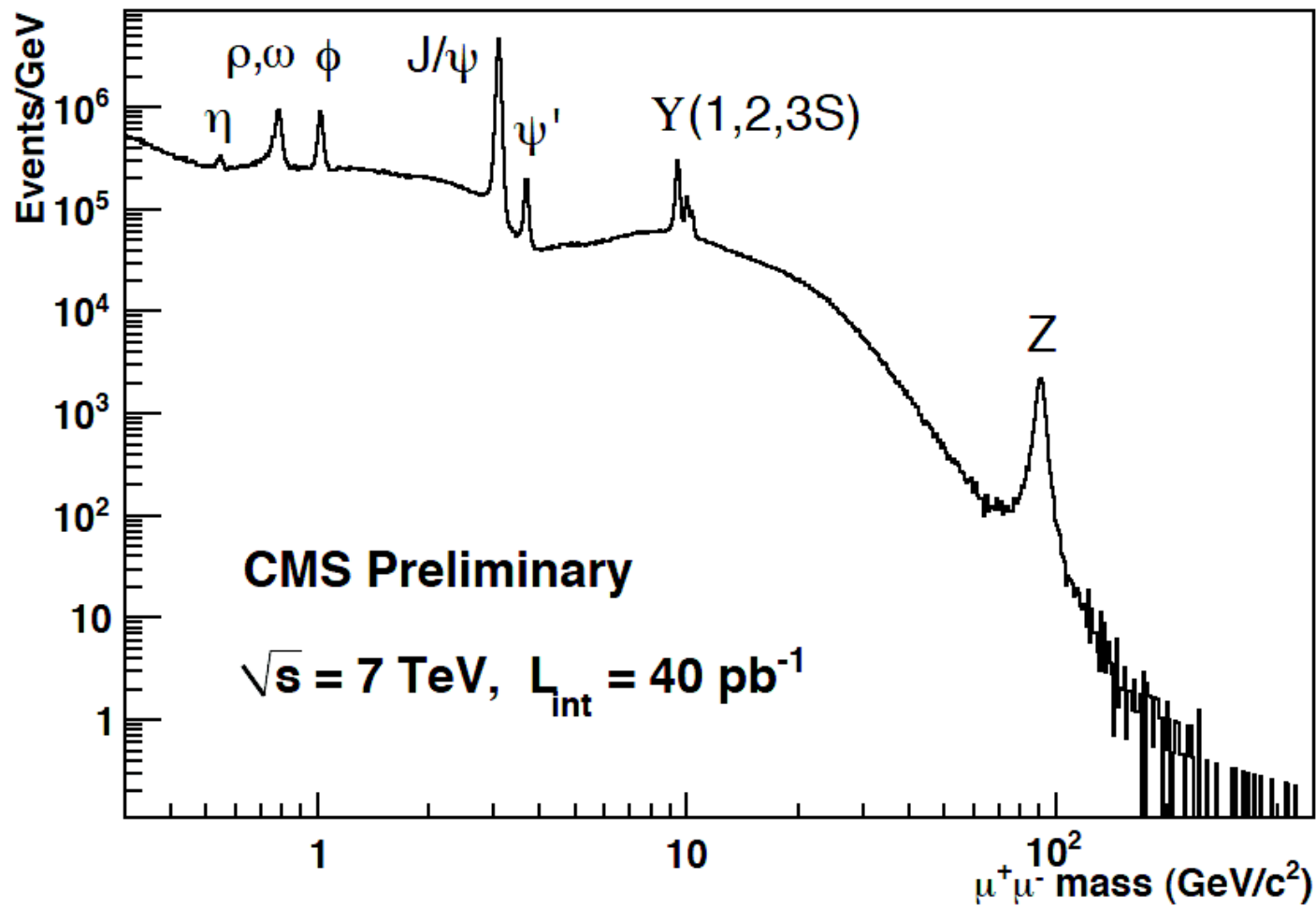


Bardzo dobra zgodność z teorią. Dziś przypadki te służą m.in. do kalibracji detektora !

Bozony W^\pm i Z^0

LHC @ CERN

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

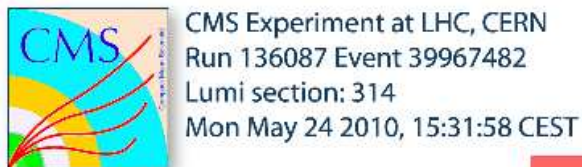


Bozony W^\pm i Z^0

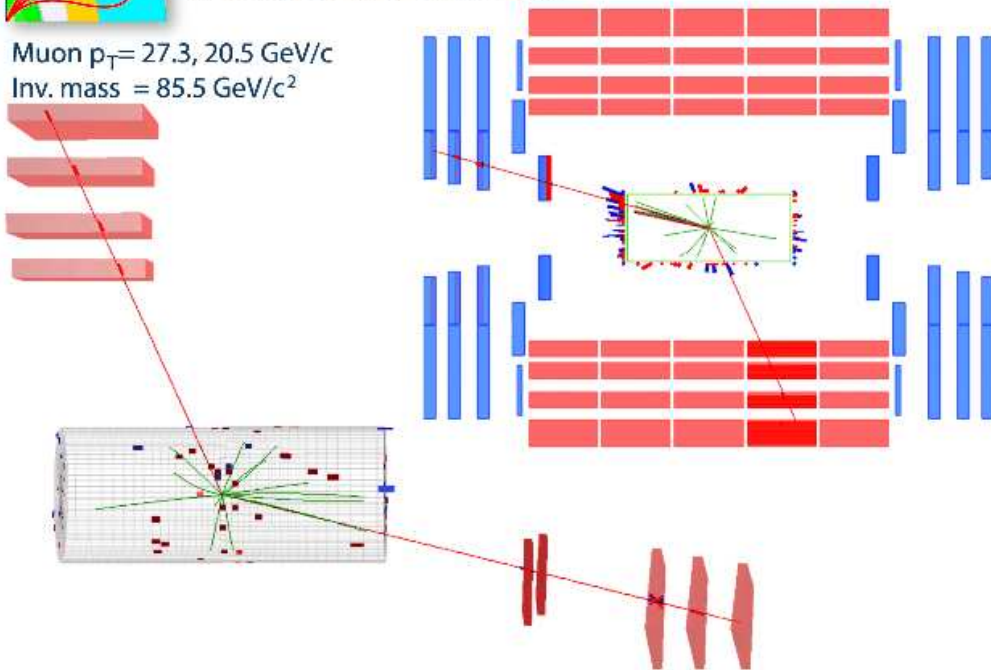
LHC

Przykładowe przypadki zarejestrowane przez eksperyment CMS:

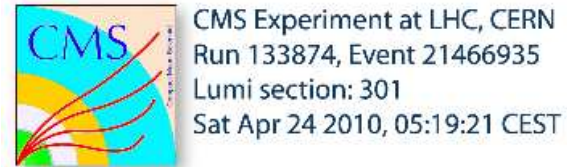
$$Z^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$$



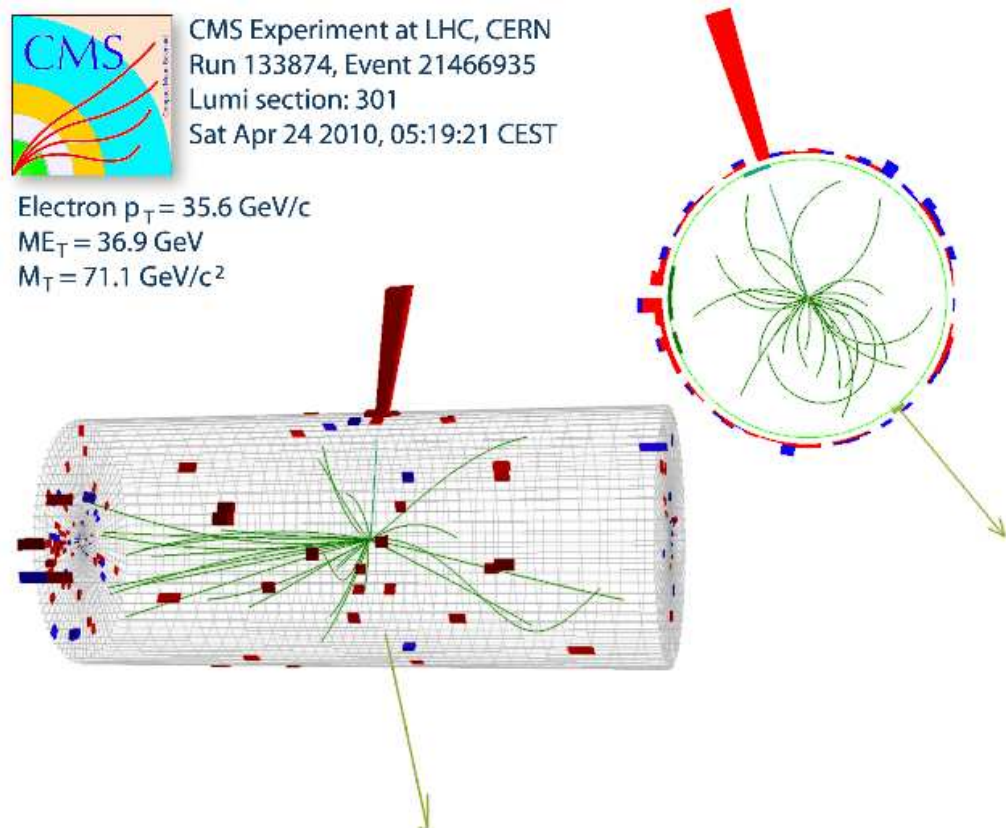
Muon $p_T = 27.3, 20.5$ GeV/c
Inv. mass = 85.5 GeV/ c^2



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



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



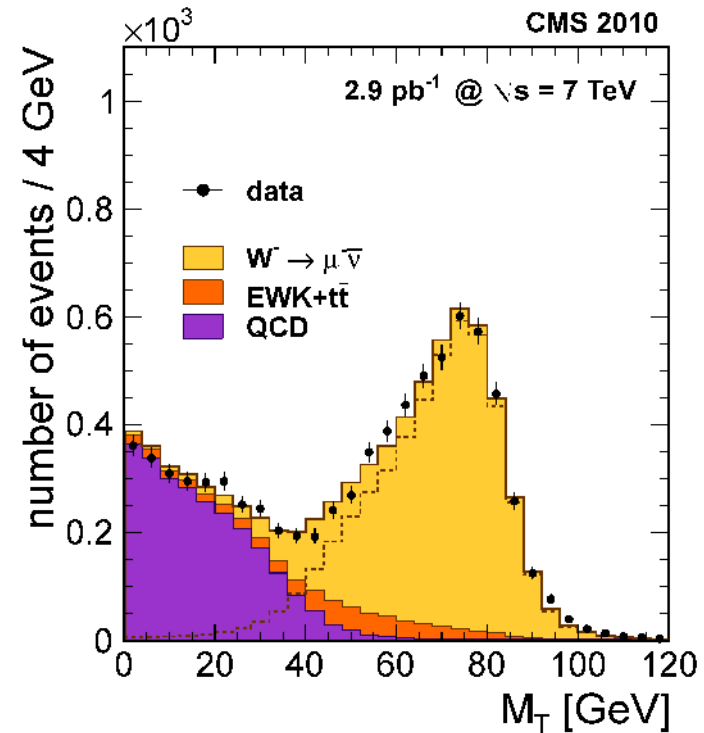
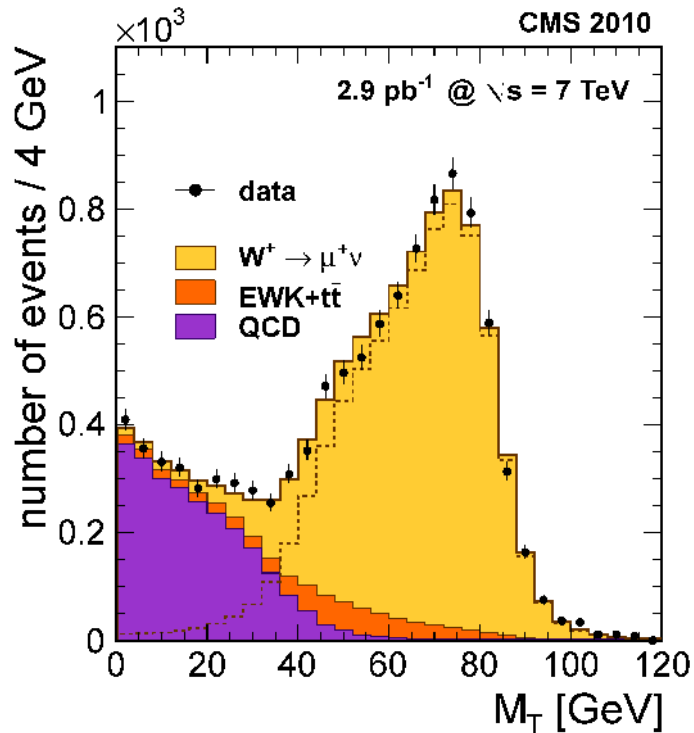
Bozony W^\pm i Z^0

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

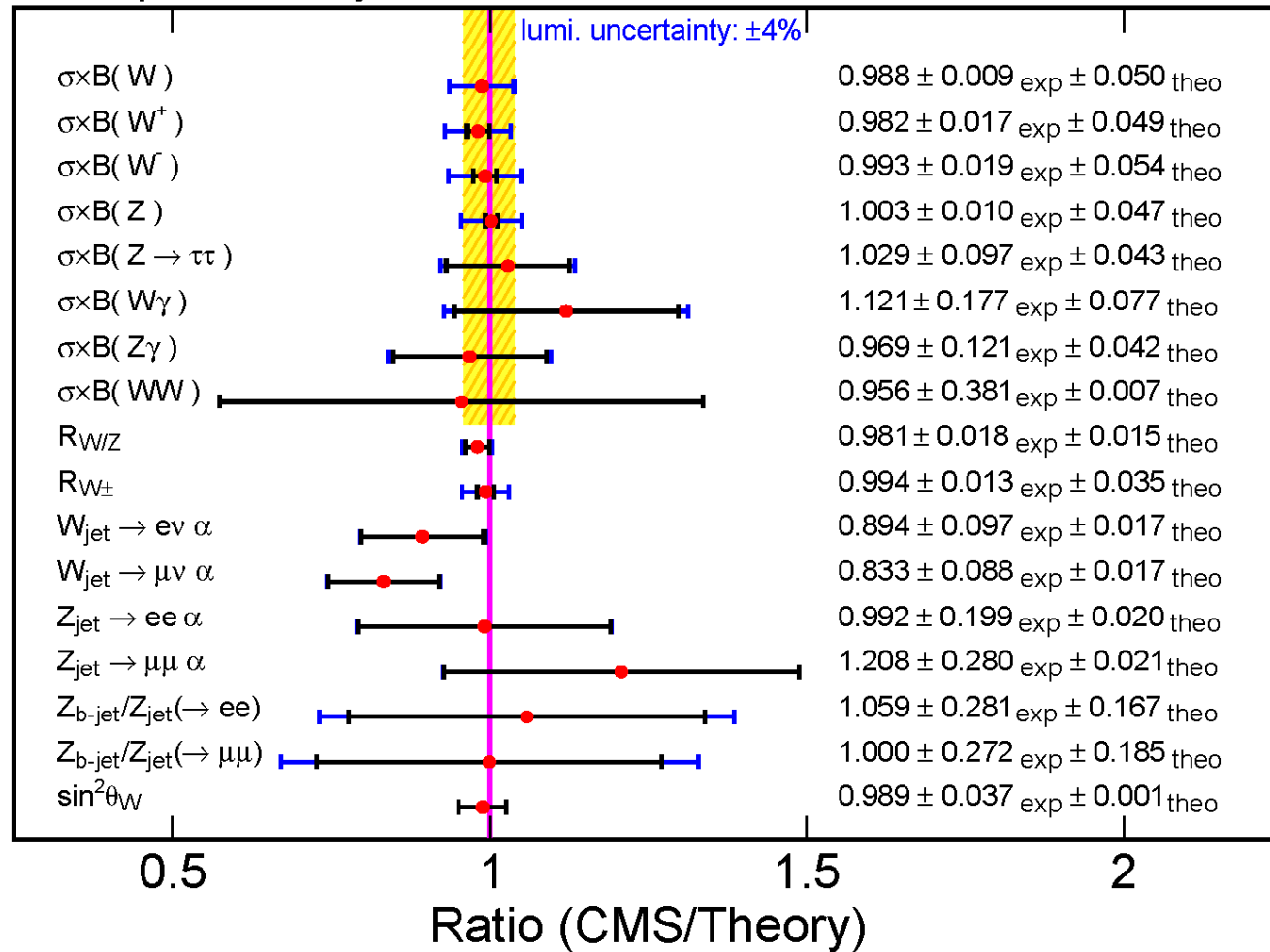
Bozony W^\pm i Z^0

LHC

Wszystkie pomiary w bardzo dobrej zgodności z przewidywaniami

CMS preliminary

36 pb⁻¹ at $\sqrt{s} = 7$ 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”):

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

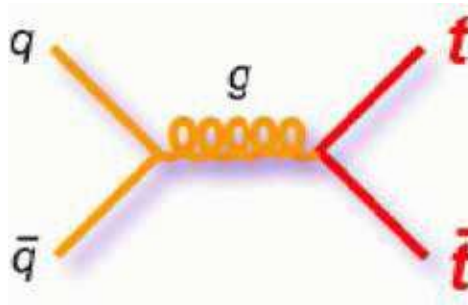
Pierwsze “odkrycie”: CERN SPS, 1984, $m_t \sim 40 \text{ GeV}$ (**potem odwołane**)

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

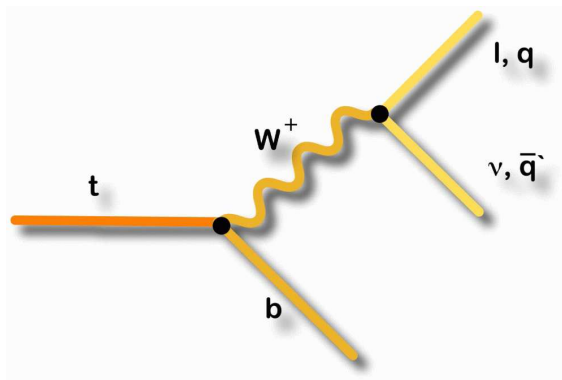
Kwark t

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):



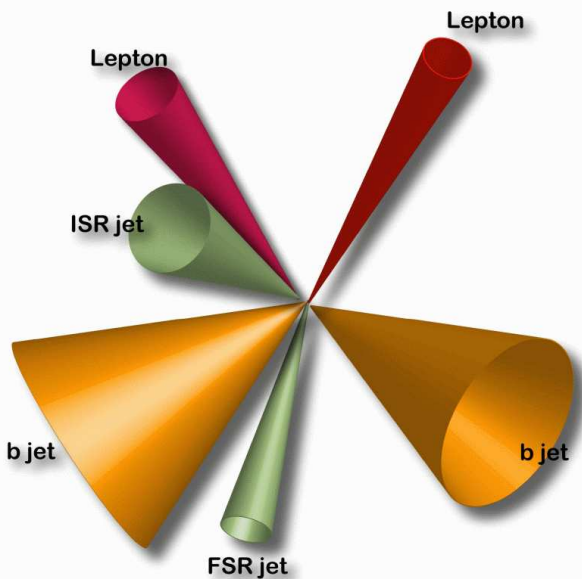
Obserwujemy powstający **kwark b** oraz **lepton** i **neutrino** (brakujący pęd poprzeczny) lub **parę jetów** o masie niezmienniczej odpowiadającej masie W

Kwark t

Tevatron

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

leptonowe

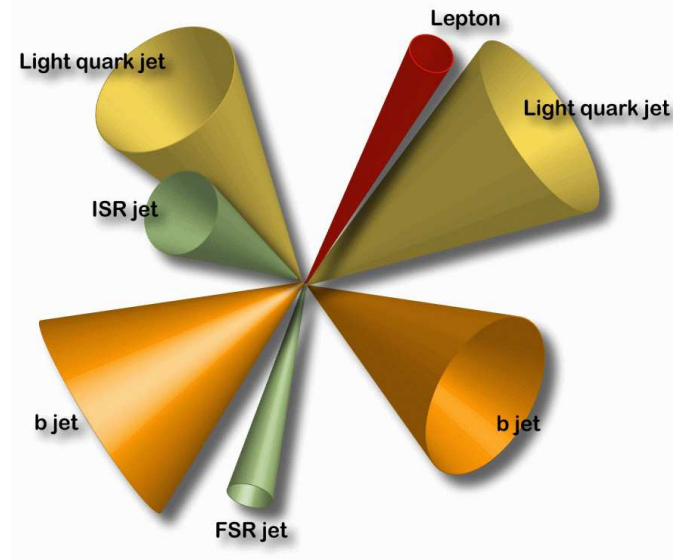


“złota próbka” ale tylko

~4% przypadków

(e^+e^- , $\mu^+\mu^-$ i $e^\pm\mu^\pm$)

półleptonowe

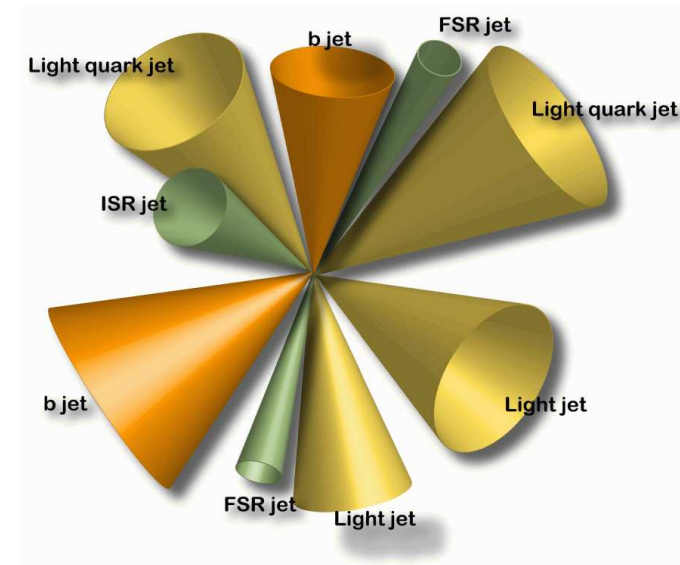


~30% przypadków

(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

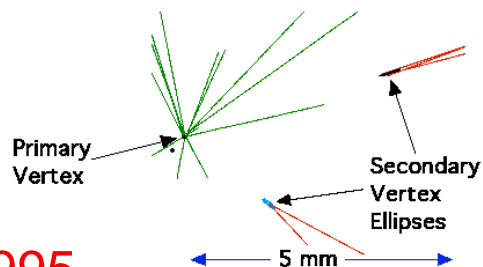
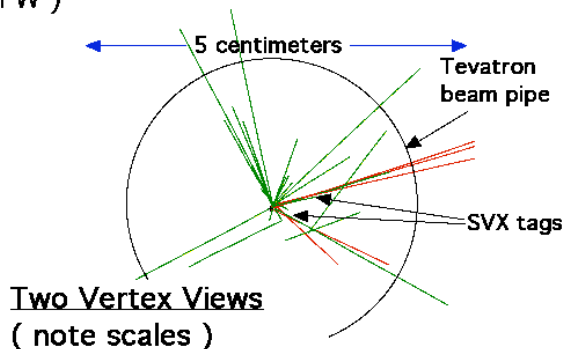
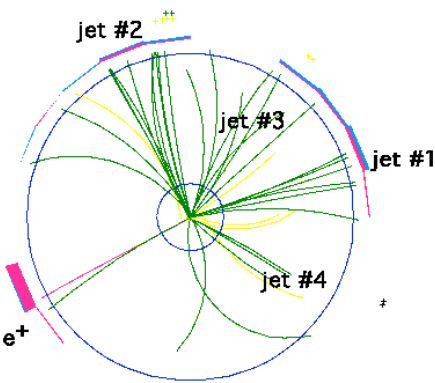
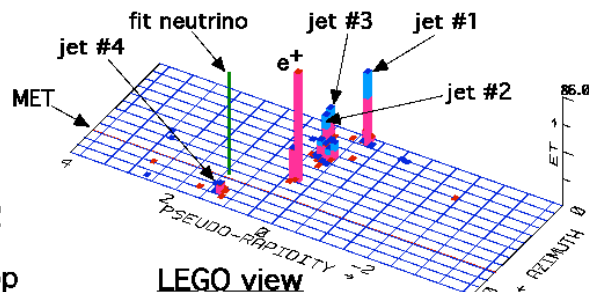
24-September, 1992

TWO jets tagged by SVX

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

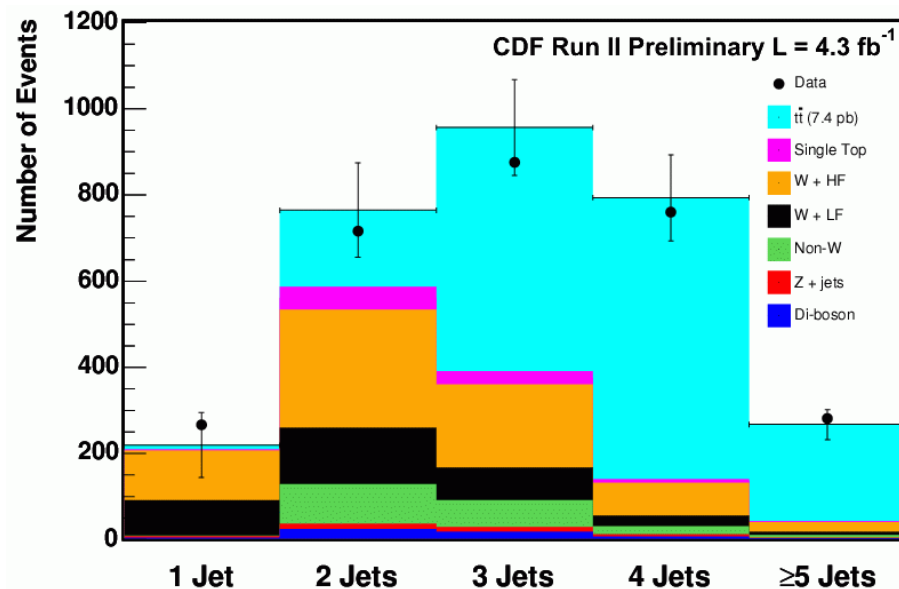
e^+ , Missing E_T , jet #4 from top

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

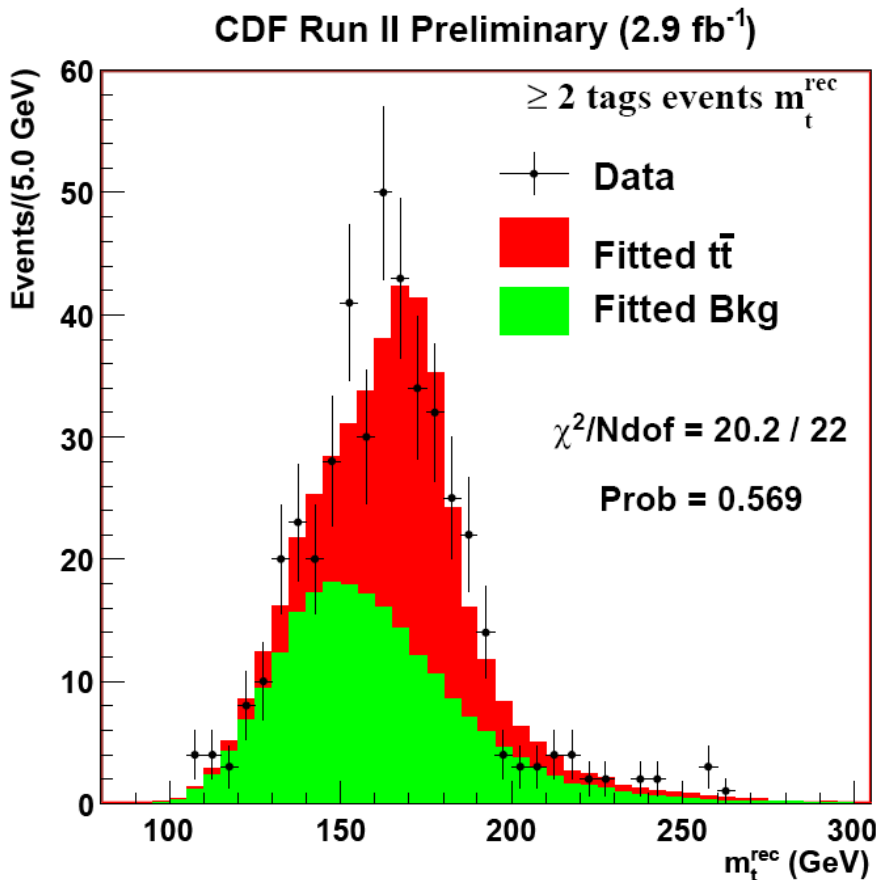
⇒ głównie przypadki $t\bar{t}$

Zbrano już tysiące przypadków...

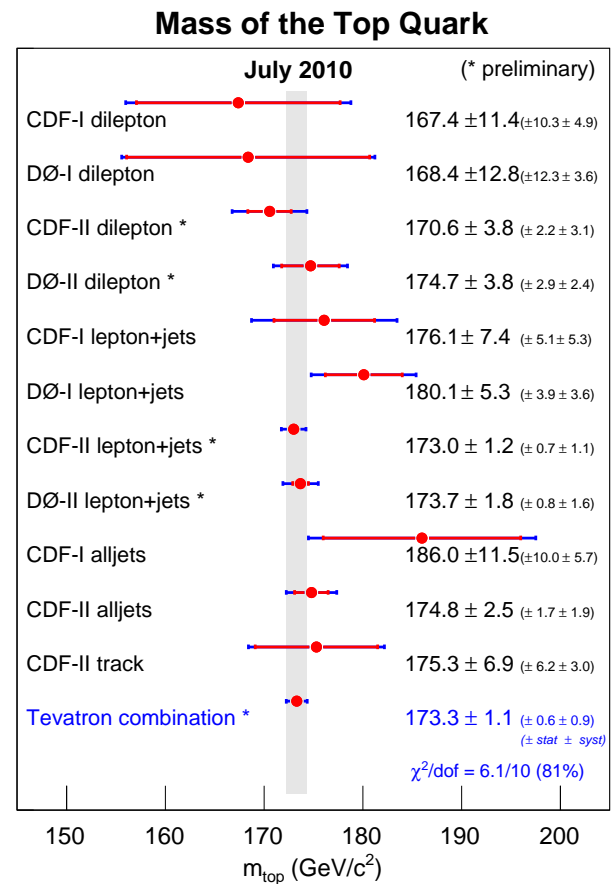
Kwark t

Tevatron

Rozkład rekonstruowanej masy kwarku t
w jednym z rozważanych kanałów



Porównanie wyników dla różnych próbek

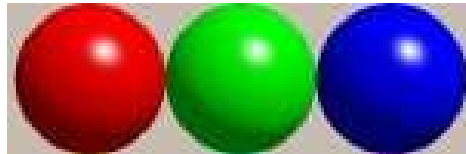


CDF + D0: $m_t = 173.3 \pm 1.1 \text{ GeV}$

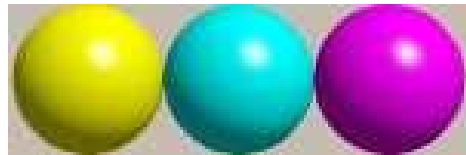
Kolor

Przypomnienie

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

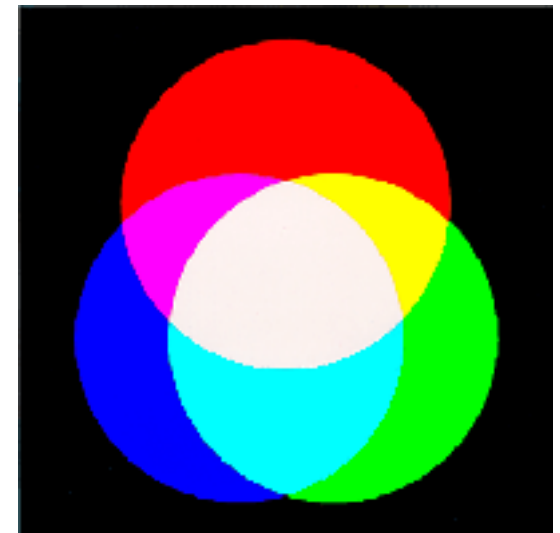


Antykwarki mają odpowiednio anty-kolory (kolory “ujemne”): \bar{R} , \bar{G} , \bar{B} .



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:

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

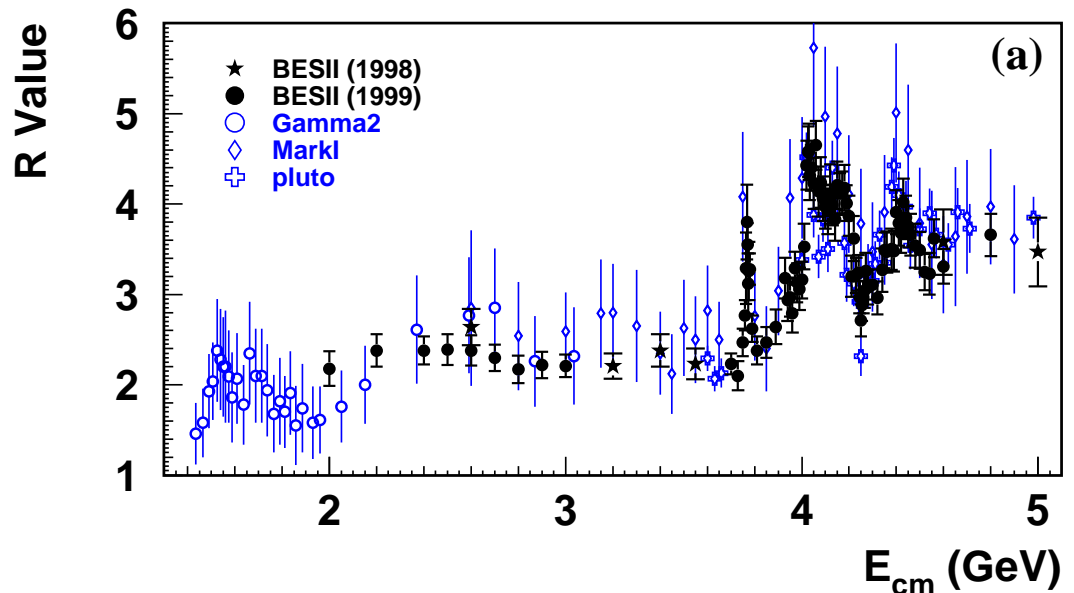
Oczekiwalibyśmy:

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

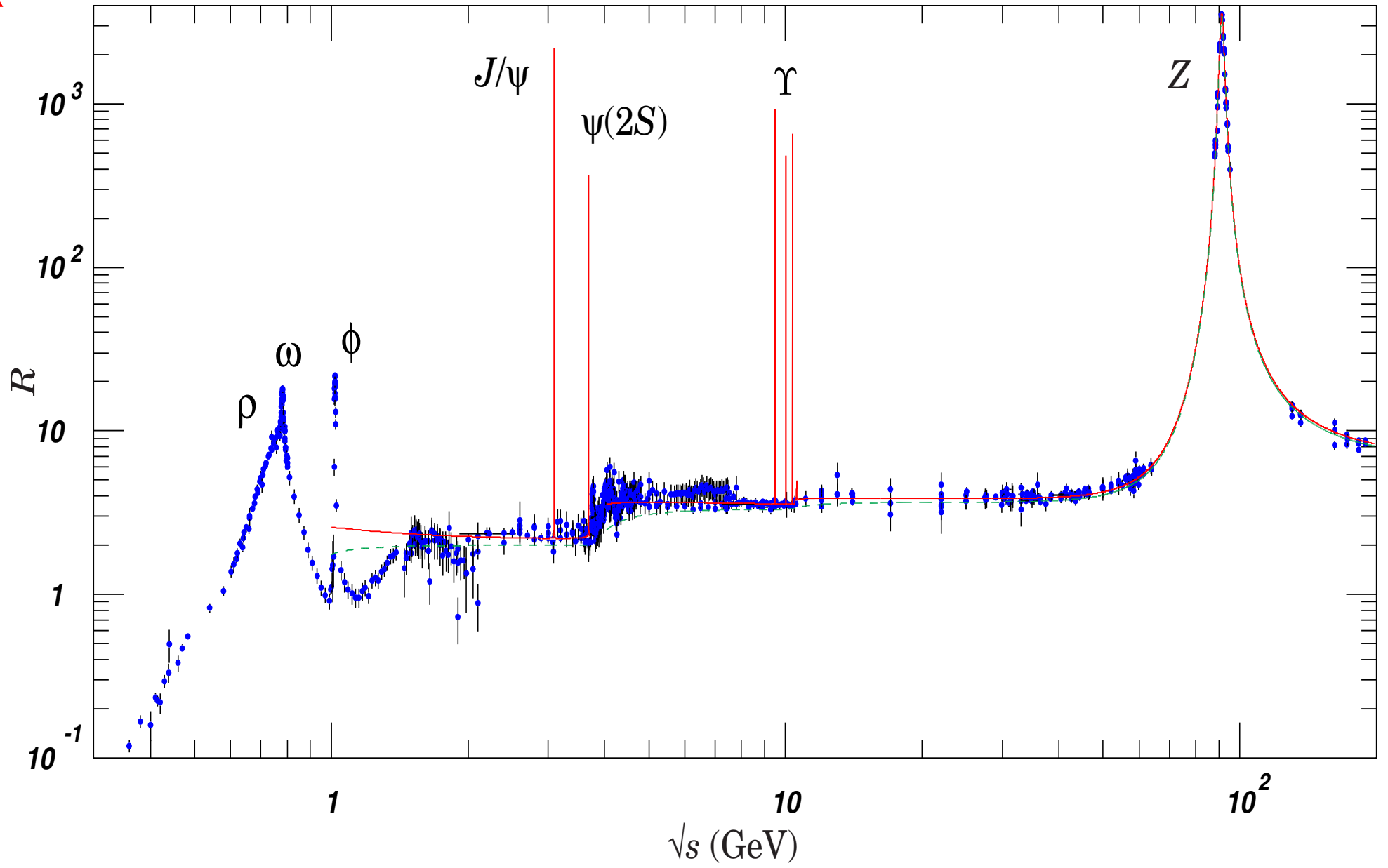
dla 4 kwarków (u,d,s,c): $R \approx \frac{10}{9}$
($E_{CM} > 4 \text{ GeV}$)

W doświadczeniu uzyskujemy wartości 3 razy większe!

⇒ każdy kwark w 3 kolorach !



R



Pomiary precyzyjne w LEP

Zestawienie

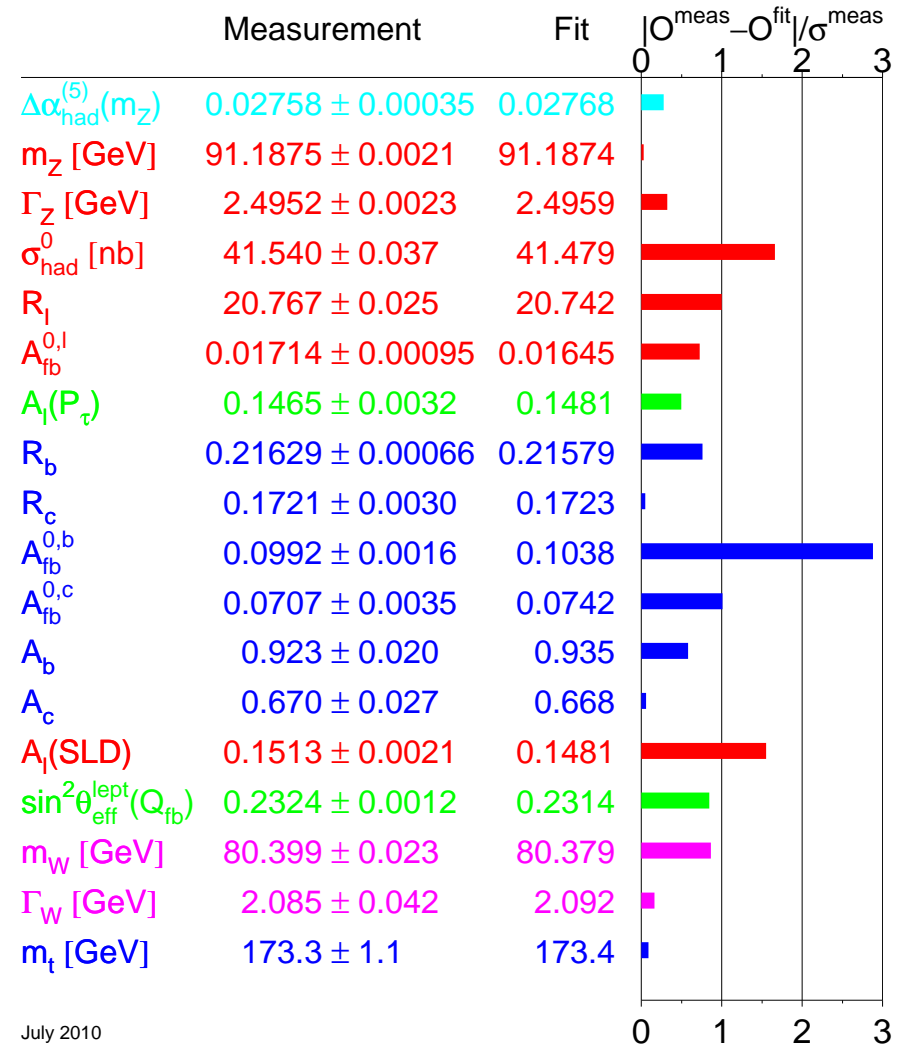
W LEP mierzono dziesiątki procesów.

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** !

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



July 2010

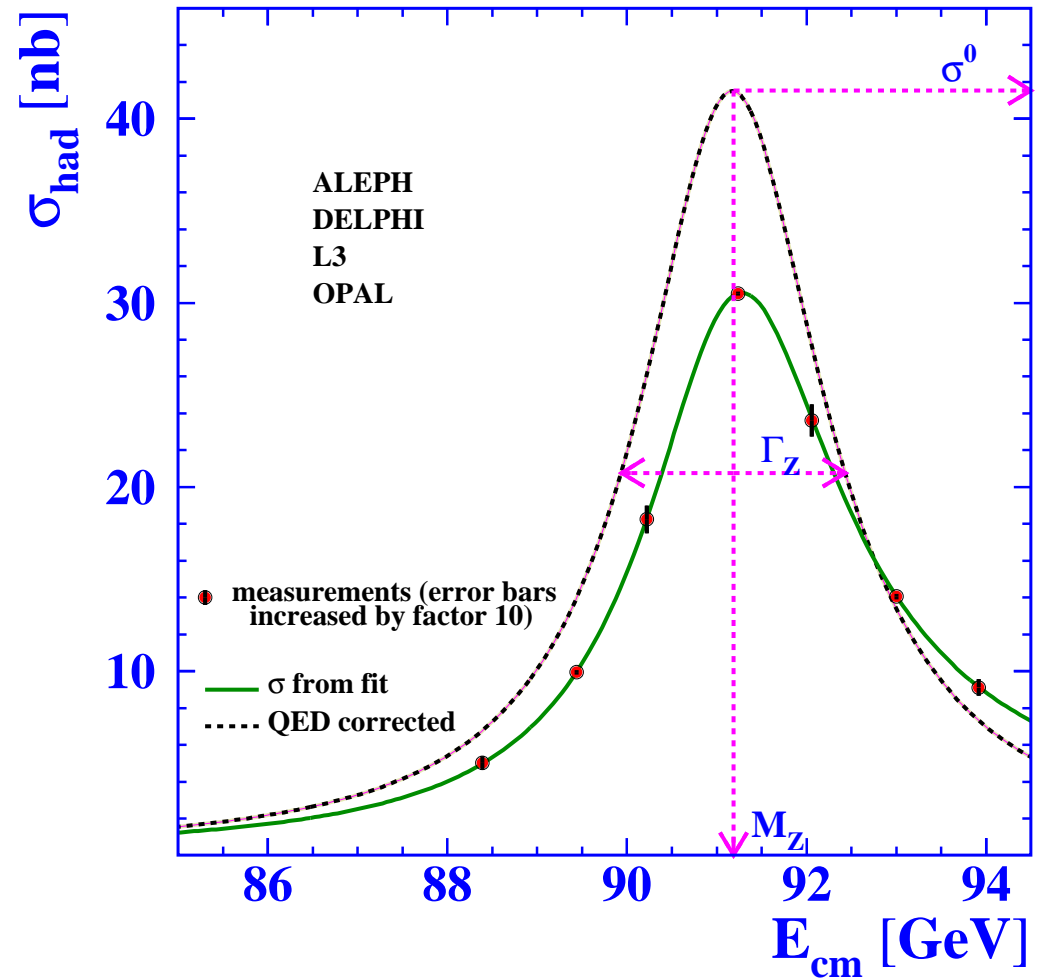
Pomiary precyzyjne w LEP

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...

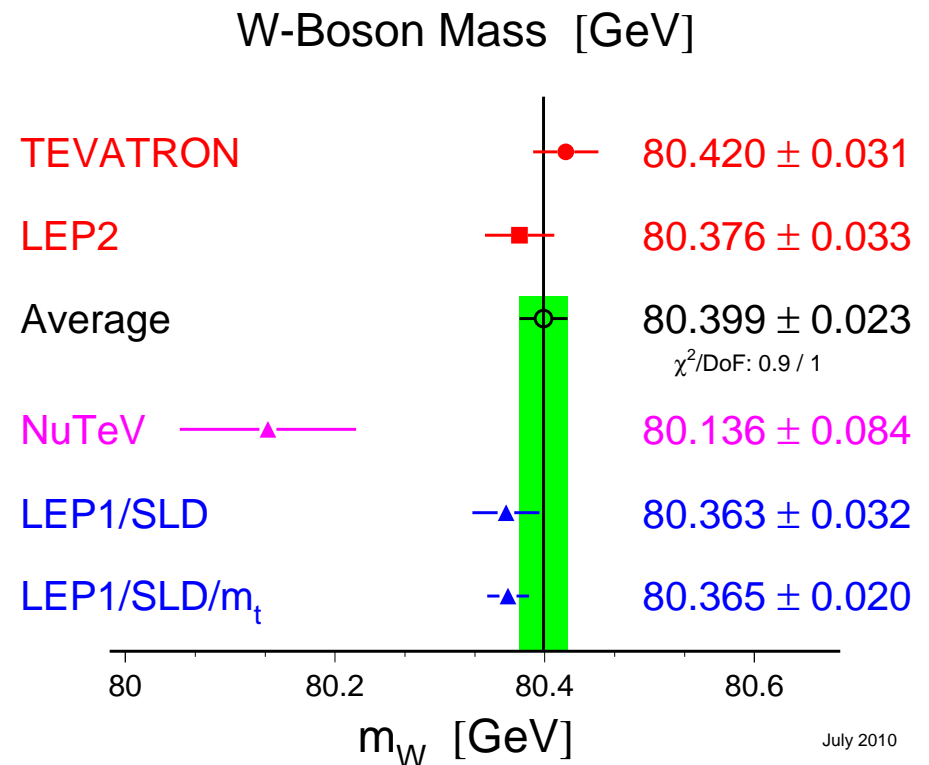
Precyzyjne pomiary w LEP i innych eksperymentach pozwalają **wnioskować** o **masach** tych cząstek, nawet jeśli ich bezpośrednio nie obserwujemy!



Pomiary precyzyjne w LEP

Poprawki

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

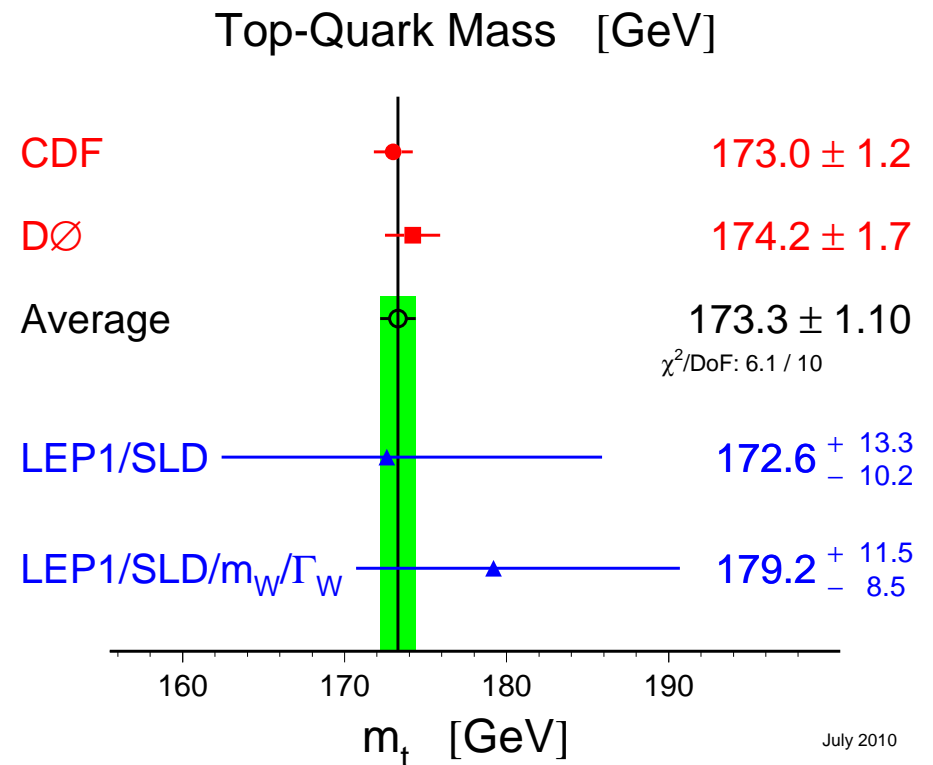


Pomiar bezpośredni zgodny z dokładnością do 0.05% z **przewidywaniami teorii** opartymi na precyzyjnych pomiarach przy niższych energiach.

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.

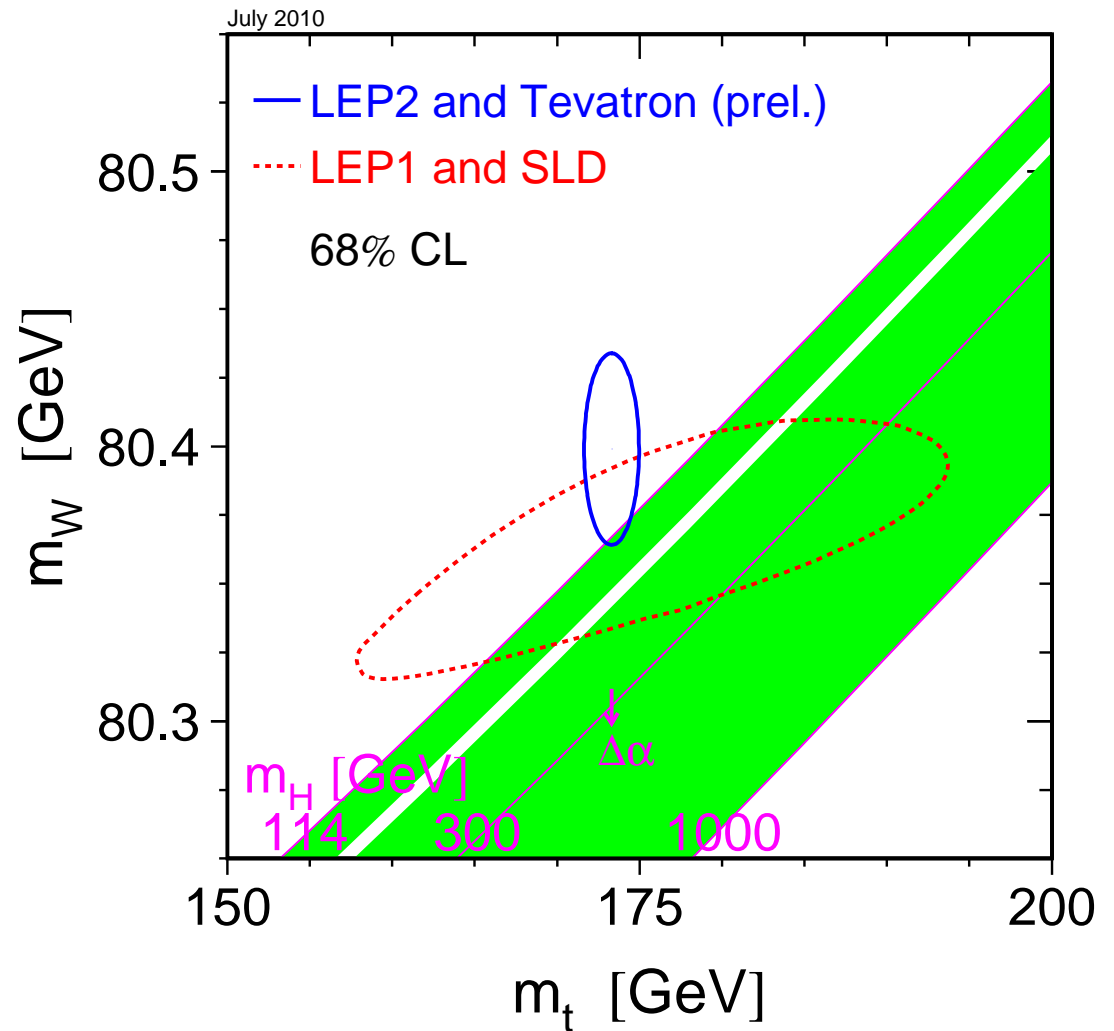
Pomiary precyzyjne w LEP

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**

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

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

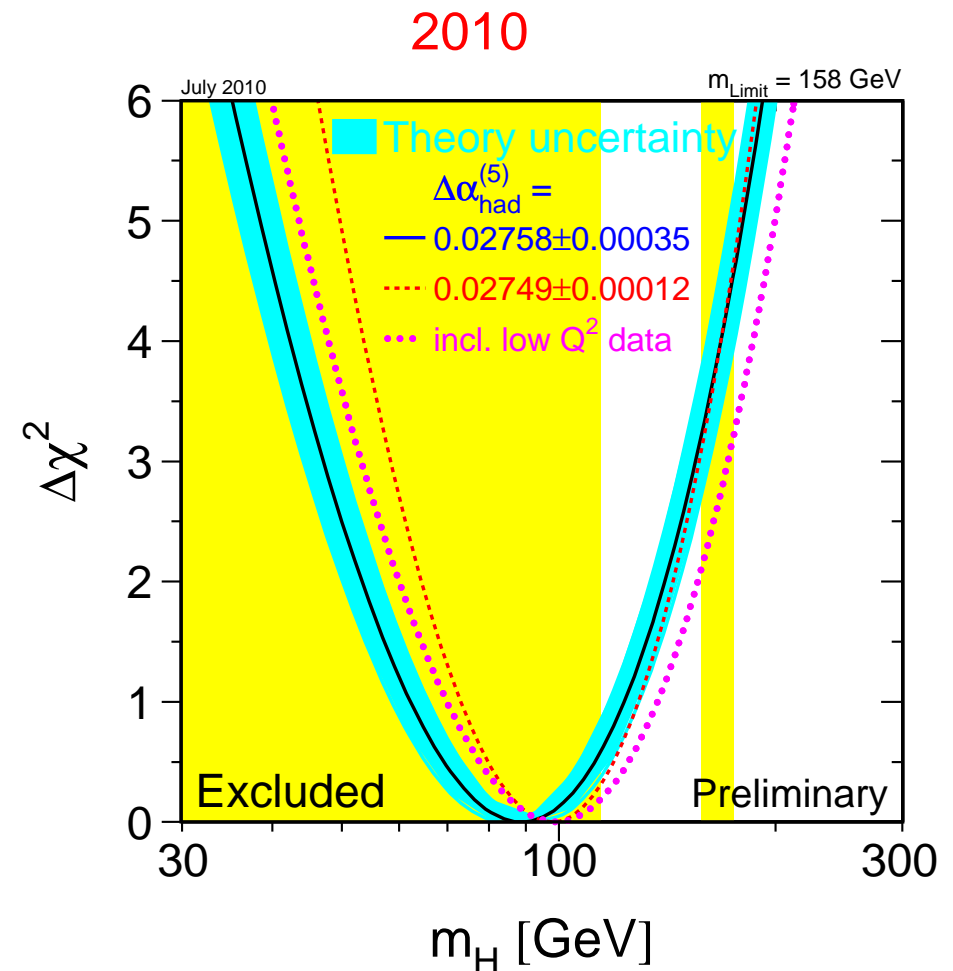
Dlaczego wciąż go nie widzimy ?...

Z bezpośrednich poszukiwań:

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

wszystkie dane LEP:

ALEPH + DELPHI + L3 + OPAL

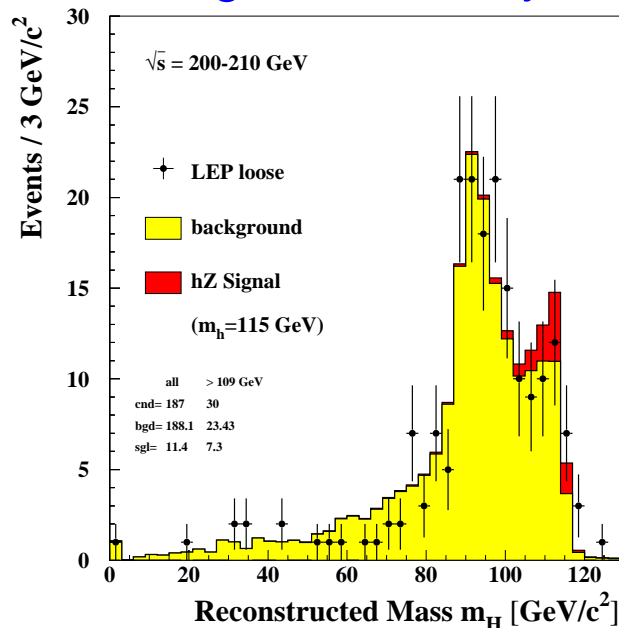


Poszukiwanie Higgosa w LEP

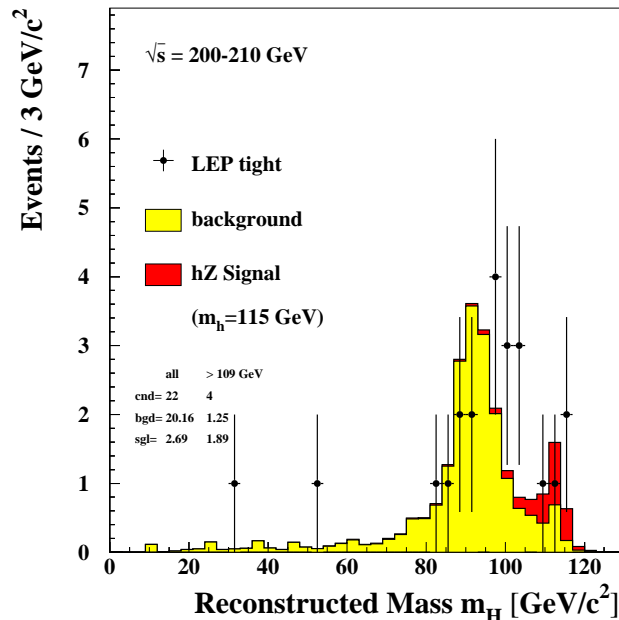
Rozkład masy

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

łagodna selekcja



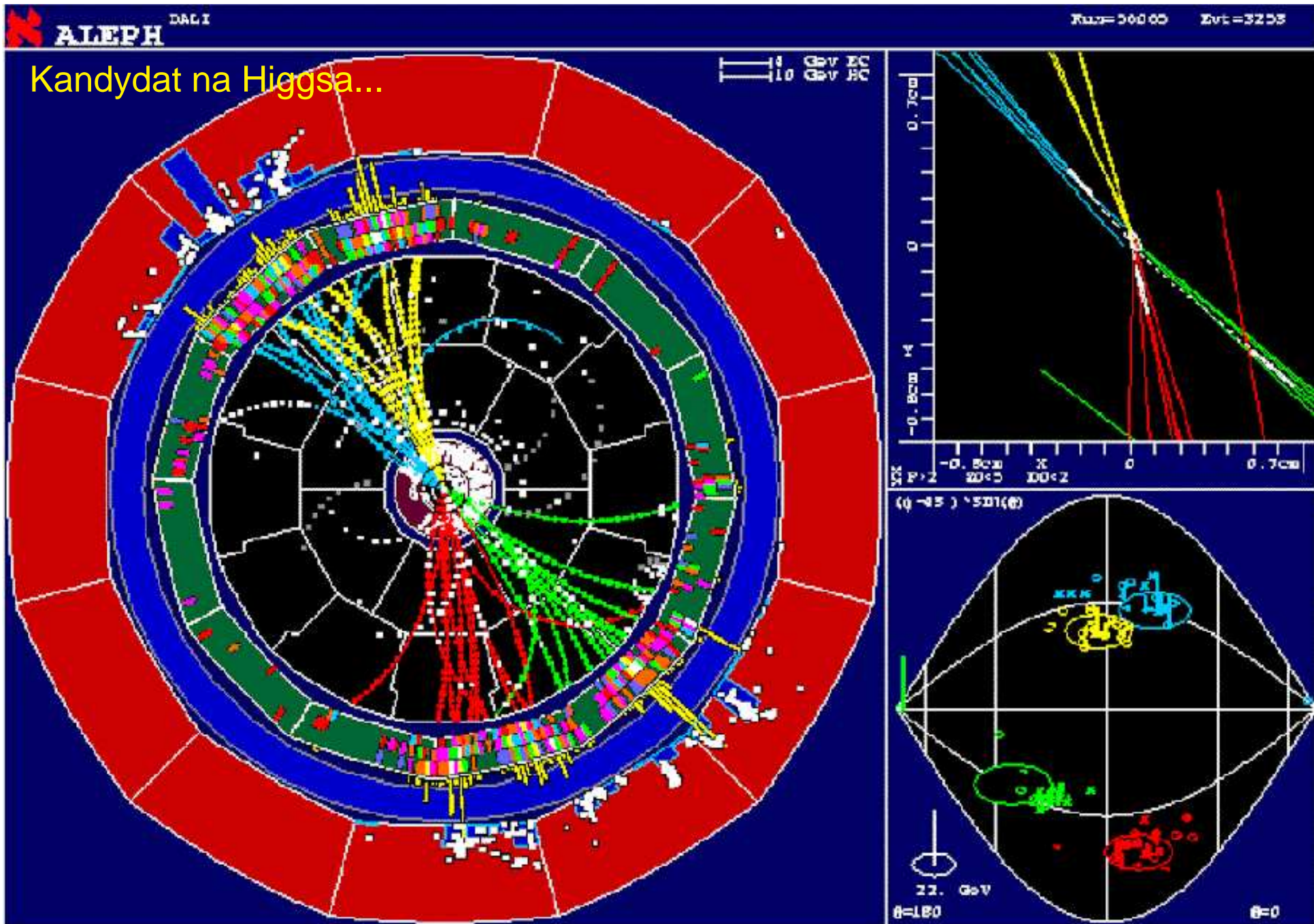
ostra selekcja



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

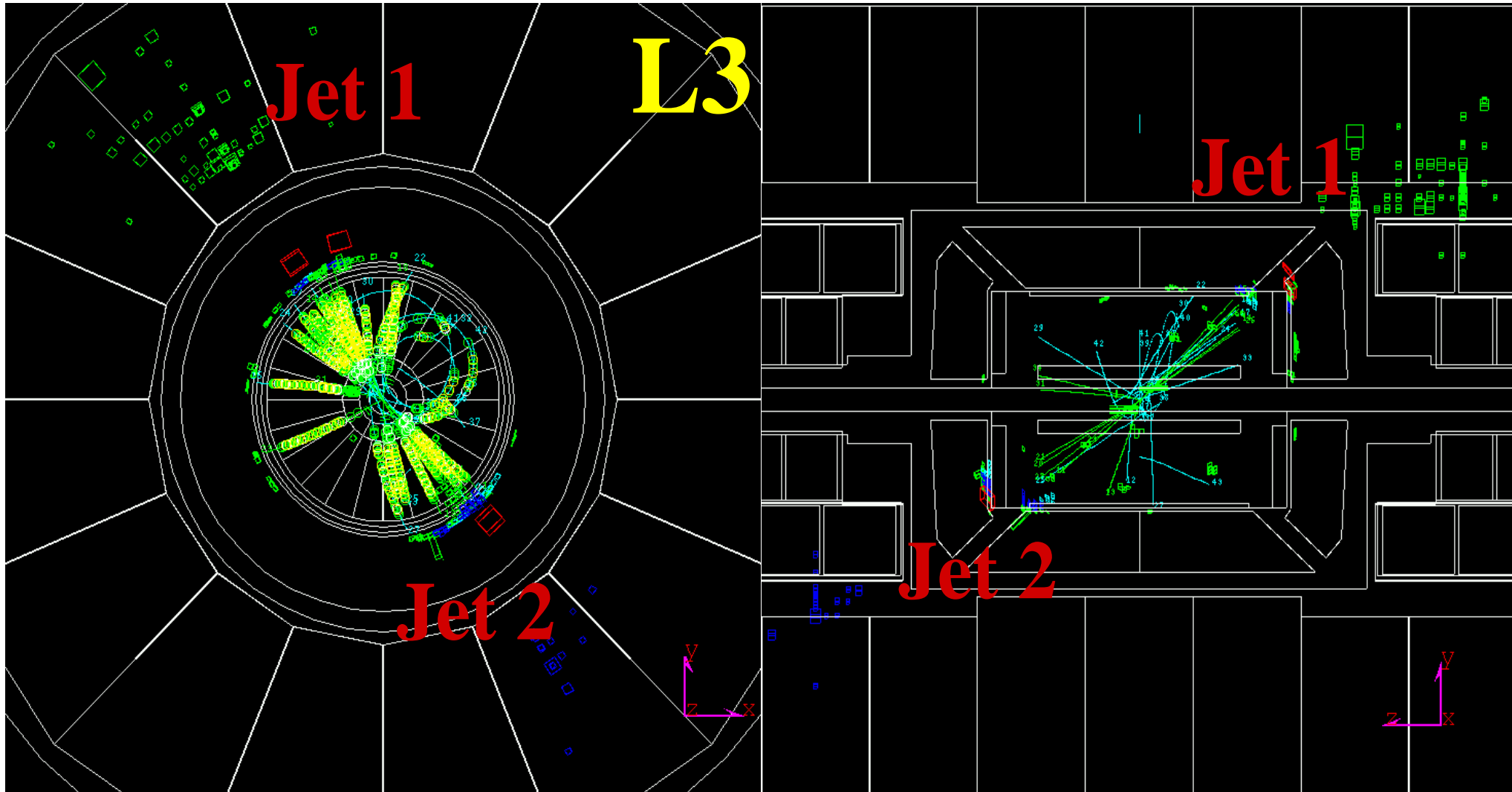
Niestety, jest to efekt na poziomie $\sim 2\sigma$

LEP wyłączono zanim zdołał wyjaśnić ten efekt...



candidate for

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



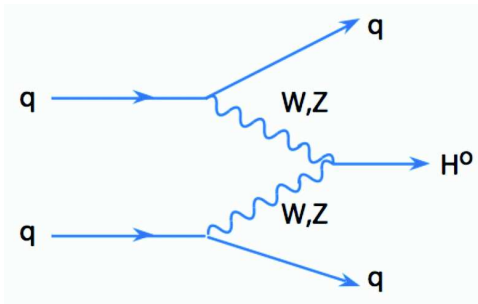
Poszukiwanie Higgsa

Tevatron

Zbieranie danych idzie “pełną parą”.

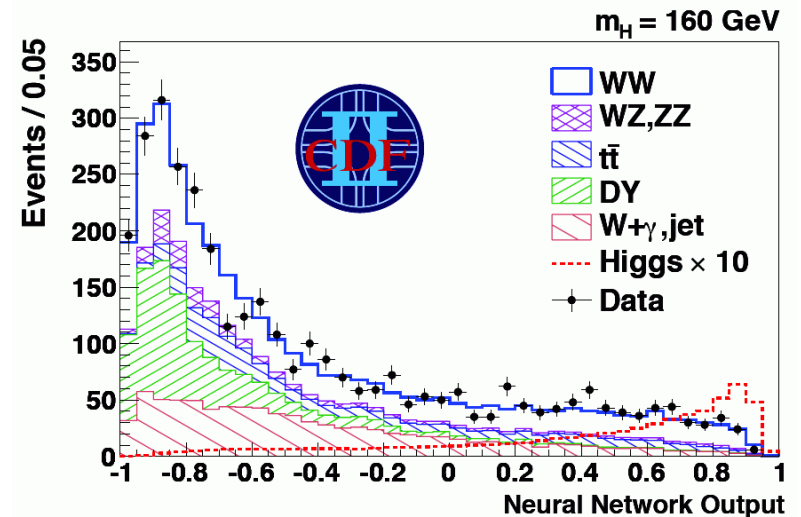
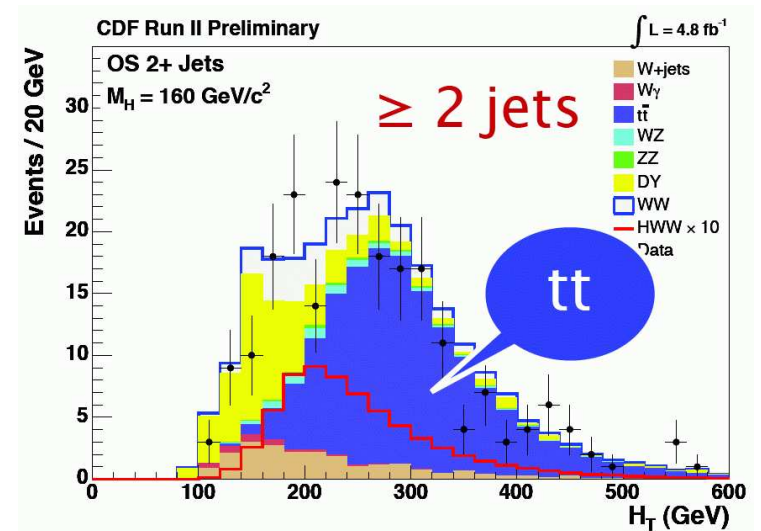
Produkcja Higgsa poszukiwana w wielu kanałach.

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



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

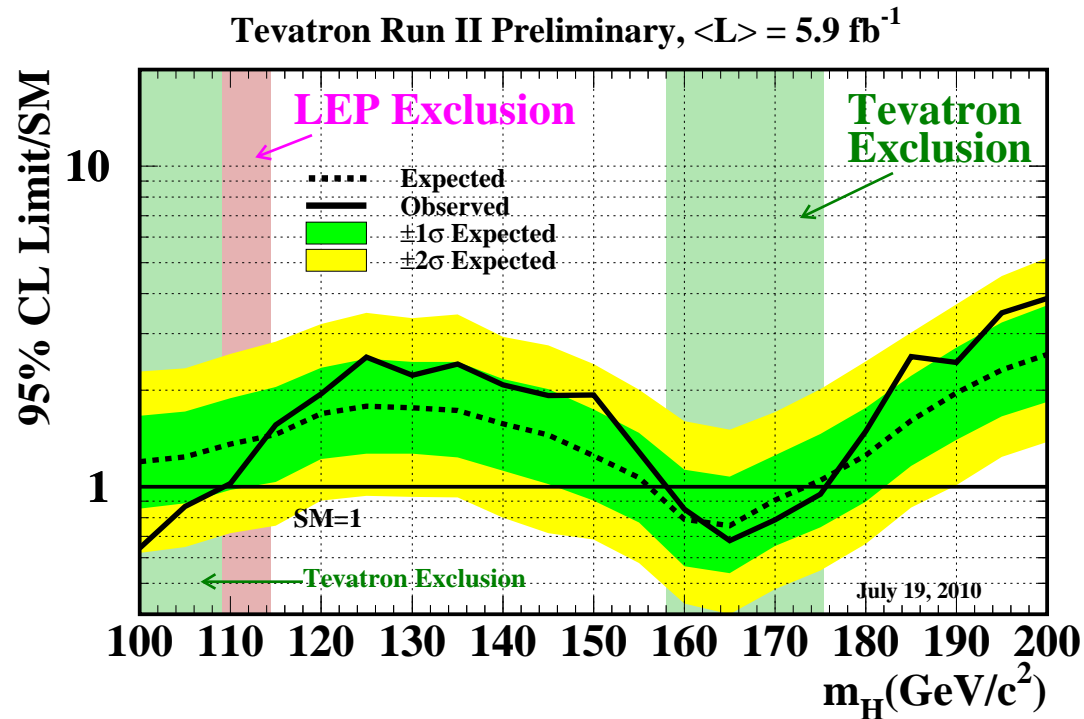
Dedykowane programy, tzw. sieci neuralne (NN), analizują topologię przypadku i oceniają prawdopodobieństwo, że jest to bozon Higgsa (zwracana wartość ~ 1) lub tło (wartość ~ -1).



Poszukiwanie Higgsa

Tevatron

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



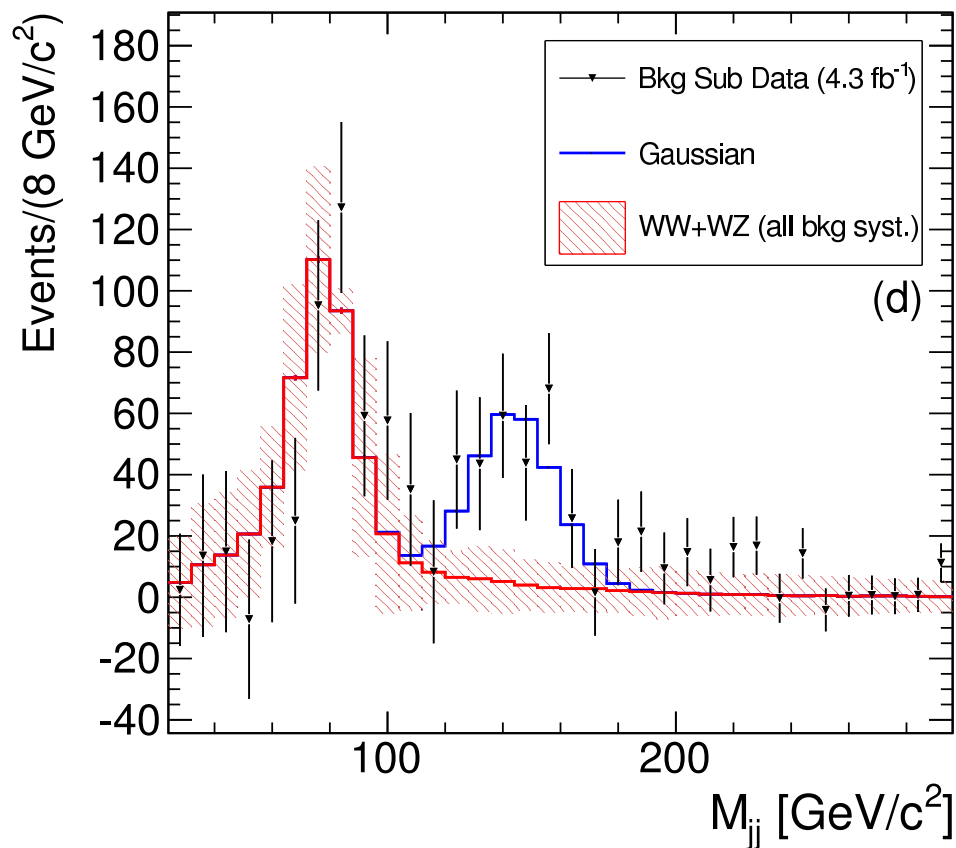
Tevatron ma już niestety mało czasu, żeby zobaczyć “sygnał”

W końcu roku 2011 planowane jest ostateczne zamknięcie akceleratora...

Poszukiwanie Higgsa

Tevatron

Na początku kwietnia 2011 eksperyment CDF przedstawił wyniki, które mogą świadczyć o istnieniu **nowej, nieznannej dotychczas cząstki**. Jest produkowana w parze z bozonem W i rozpada się na dwa jety:



Nie jest to bozon Higgsa z Modelu Standardowego.

Ale to tym bardziej ciekawe!

Choć wciąż może to być fluktuacja tła.

Czekamy na potwierdzenie tego wyniku przez eksperyment D0 i w LHC...

Poszukiwanie Higgosa

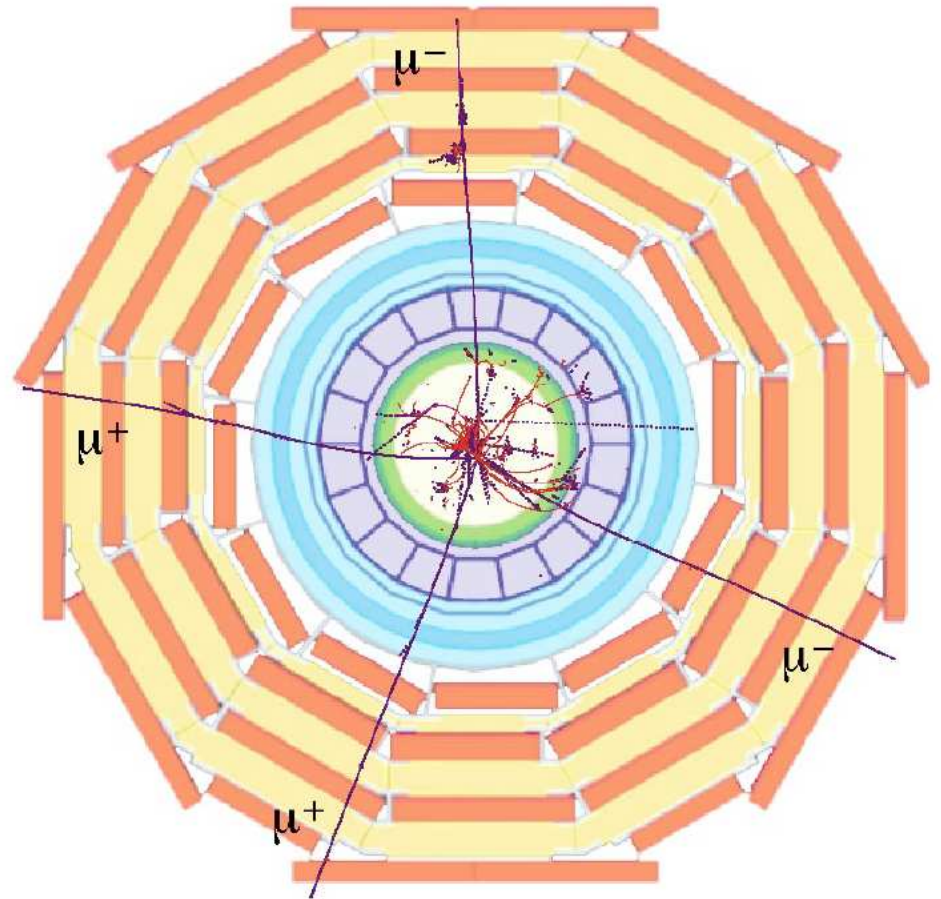
LHC

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**:

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

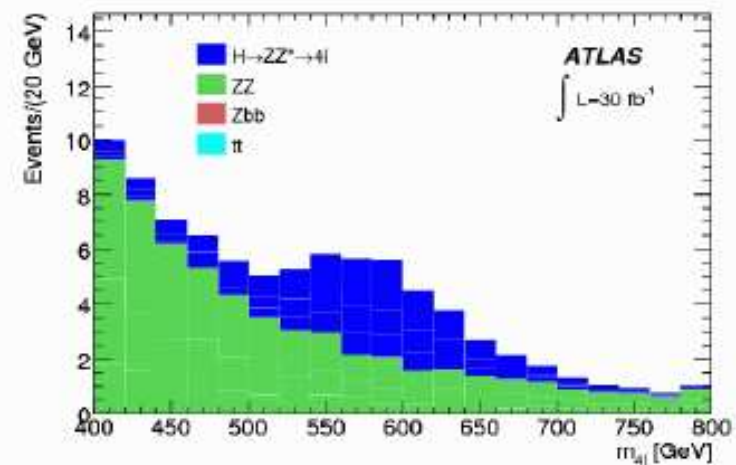
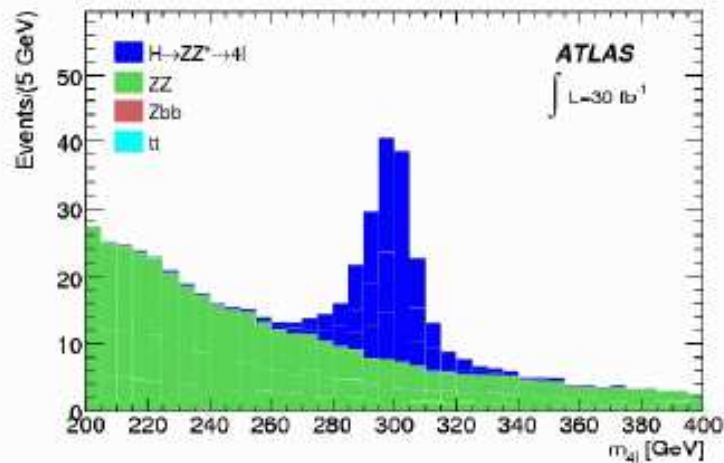
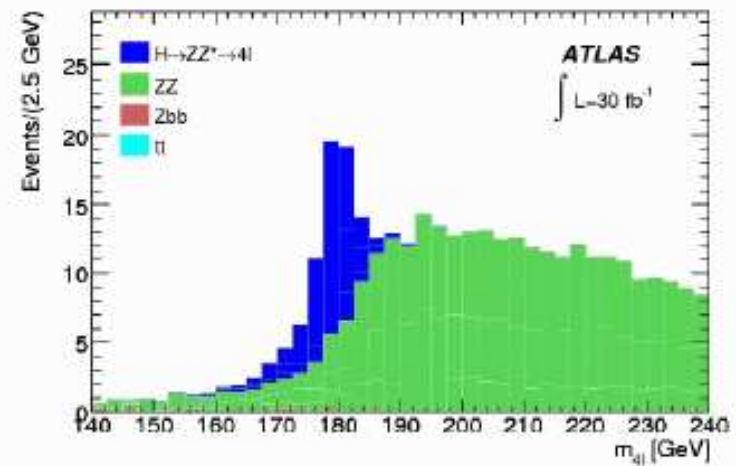
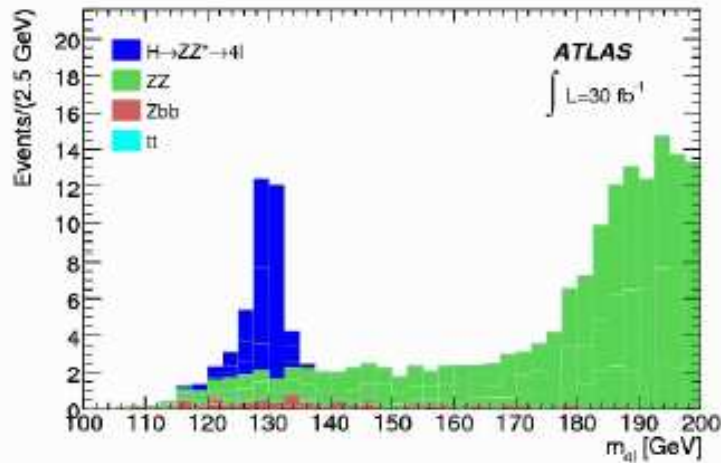
gdyż naładowane leptony (e^\pm i μ^\pm) można **łatwo zidentyfikować**



Poszukiwanie Higgsa

LHC

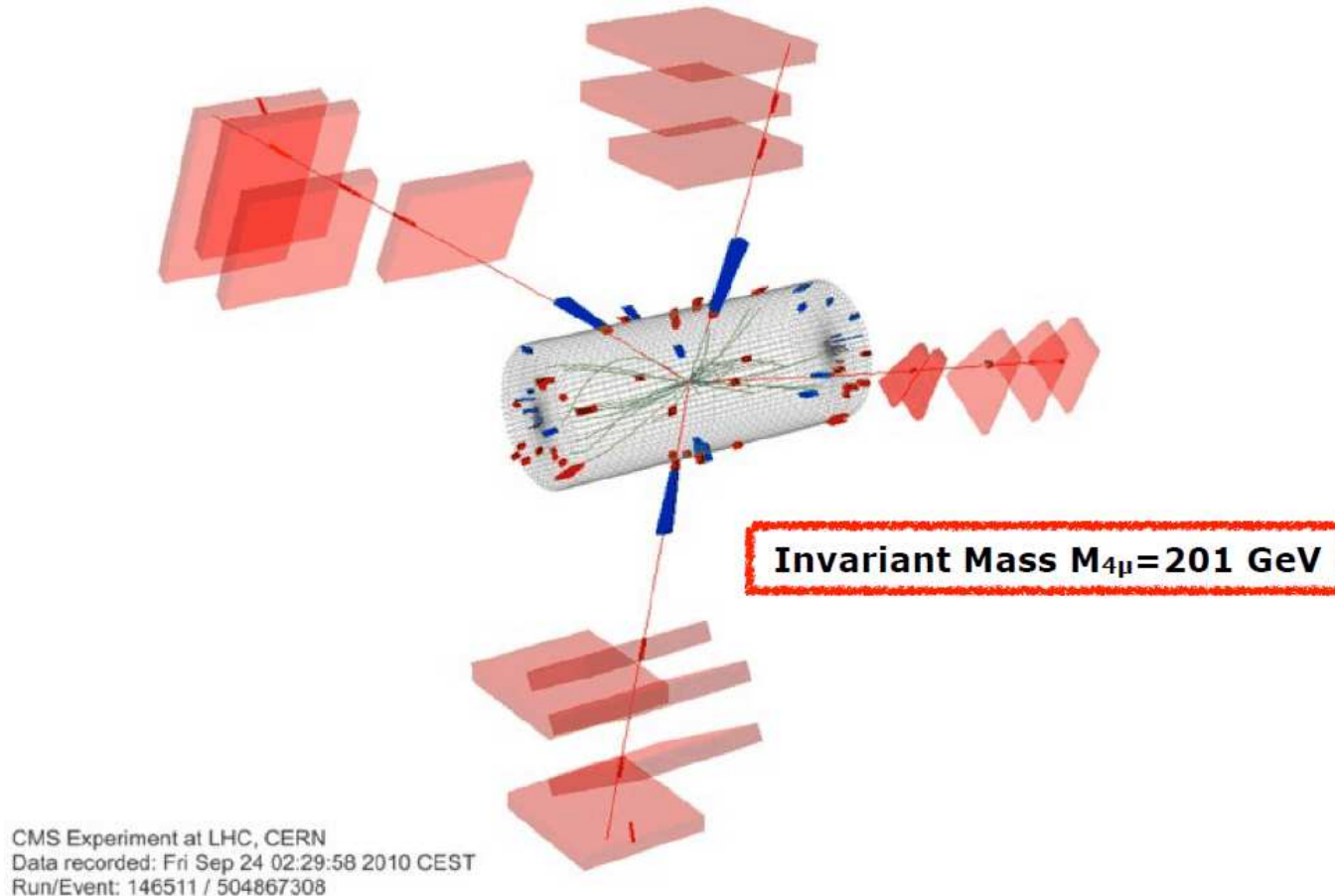
oczekiwany sygnał w detektorze ATLAS (dla różnych m_H)



Poszukiwanie Higgsa

LHC

Niestety, na razie znaleziono wyłącznie pojedynczych “kandydatów” na Higgsa.



Wykluczenie Higgsa (w ramach Modelu Standardowego) możliwe będzie w roku 2012.
Do odkrycia może być potrzebne jeszcze więcej danych...

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**...

Pomiary zgodne z przewidywaniami SM przez 9 rzędów wielkości \Rightarrow

