

Testy Modelu Standardowego i odkrycie bosonu Higgsa

prof. dr hab. Aleksander Filip Żarnecki

Wszechświat Cząstek Elementarnych

Wykład 12

- bozony W^\pm i Z^0
- kwark t
- poszukiwania bosonu Higgsa
- 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.
- 2013** - François **Englert**, Peter **Higgs**
Za odkrycie mechanizmu wyjaśniającego pochodzenie masy cząstek,
który został ostatnio potwierdzony przez eksperymenty ATLAS i CMS.

Model Standardowy: oddziaływania elektrosłabe + **chromodynamika kwantowa** (QCD)

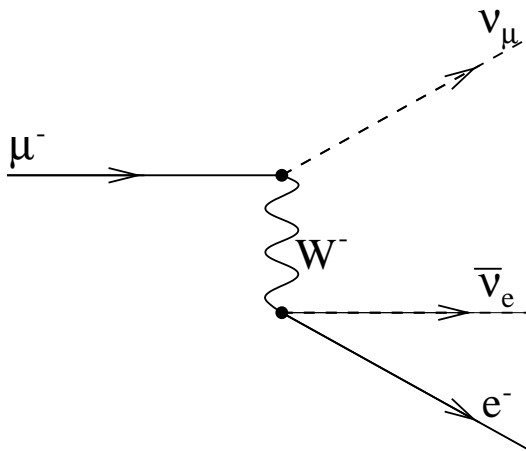
Bozony W^\pm i Z^0

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 :

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

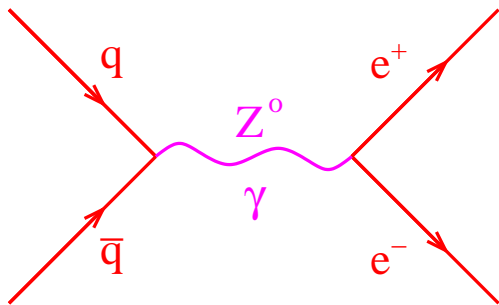
$$m_Z \sim 90 \text{ GeV}$$

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):

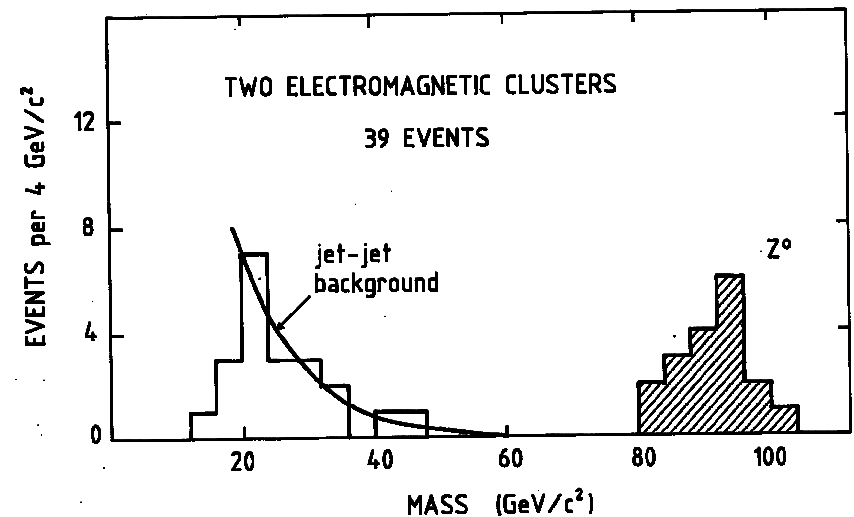
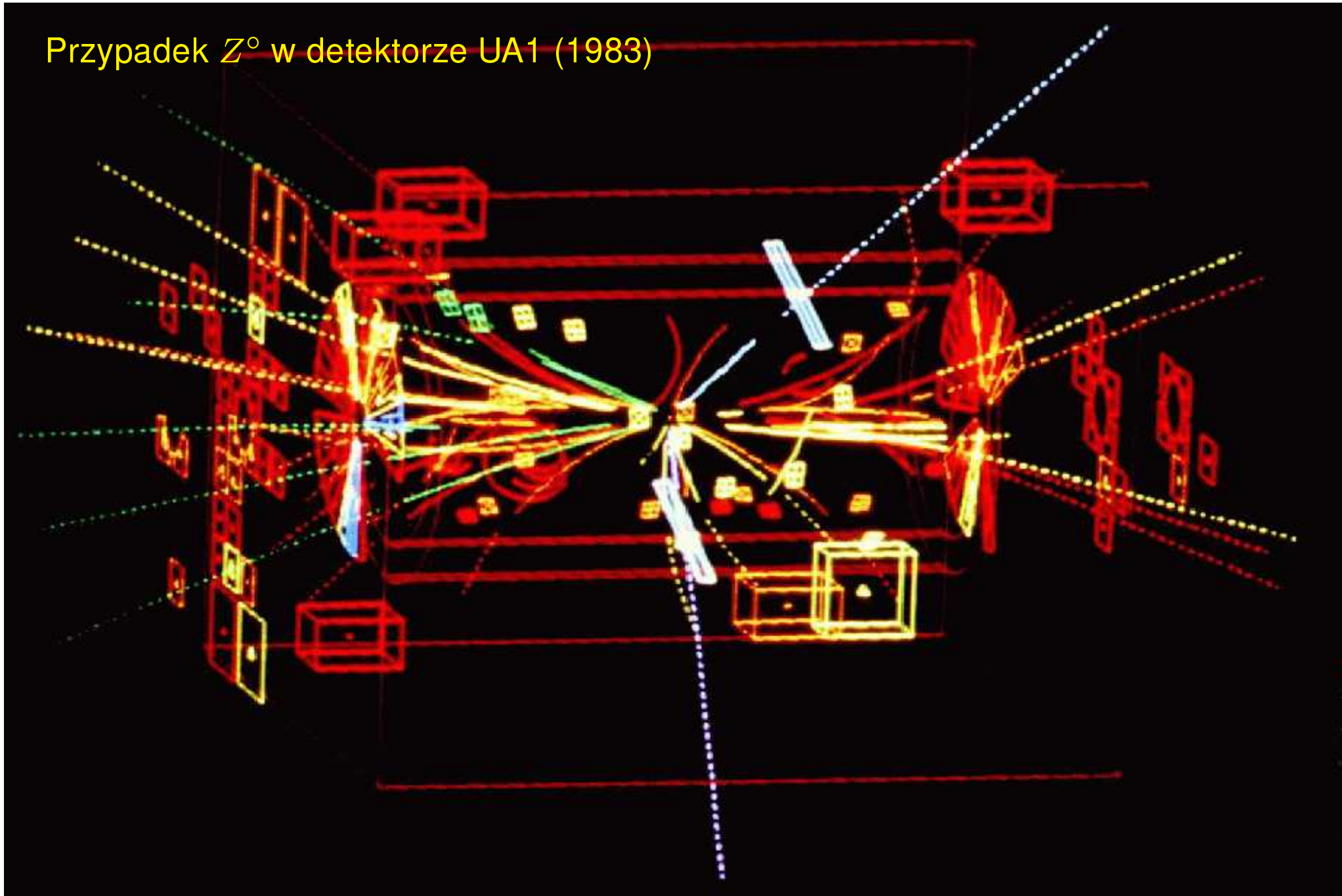


Fig. 1

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**

\Rightarrow niezachowanie pędu poprzecznego

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

Wyniki UA1 (1983):

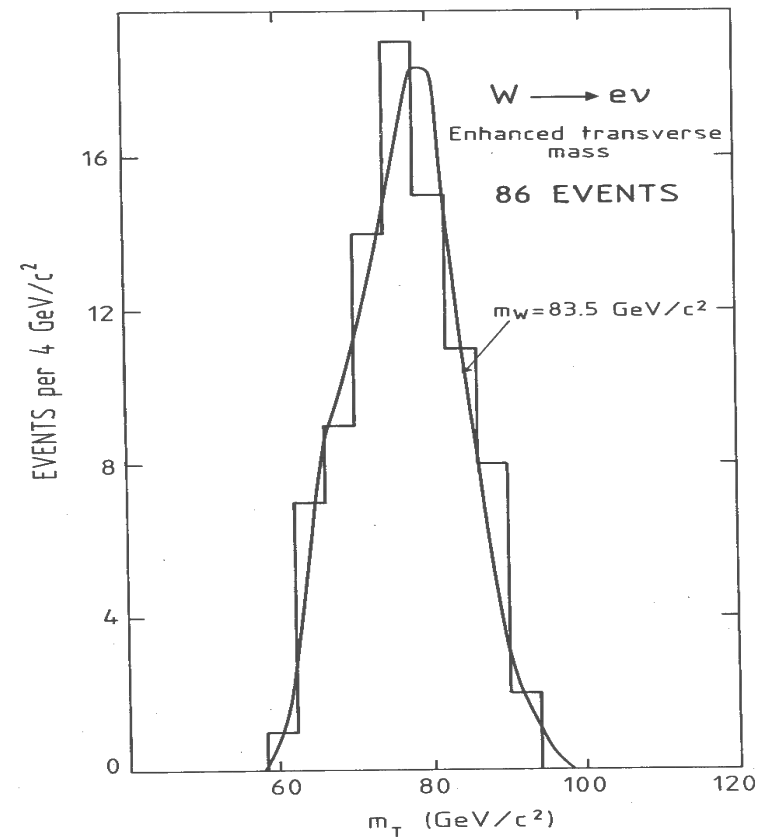
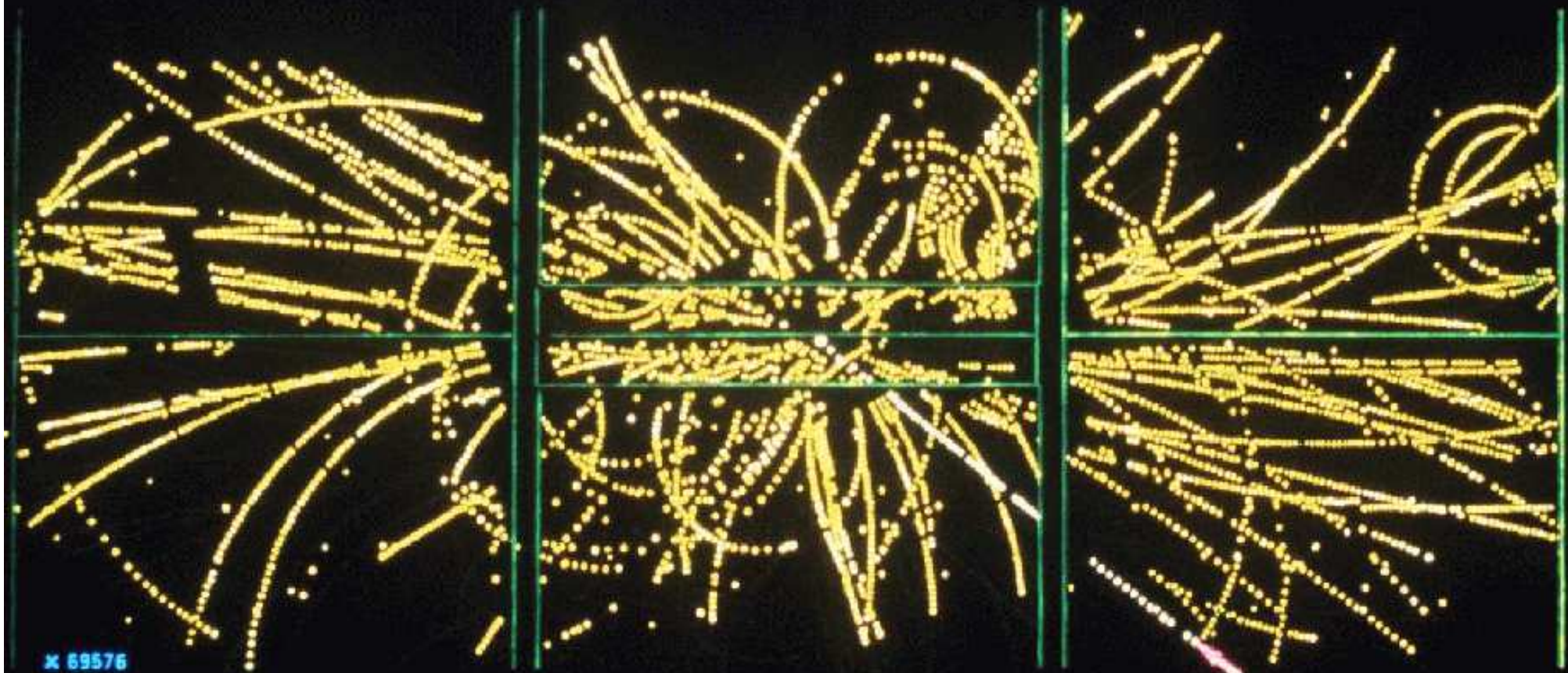


Fig. 3b

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



LEP, CERN, Genewa

1989 - 2000: precyzyjne testy Modelu Standardowego



Bozony W^\pm i Z^0

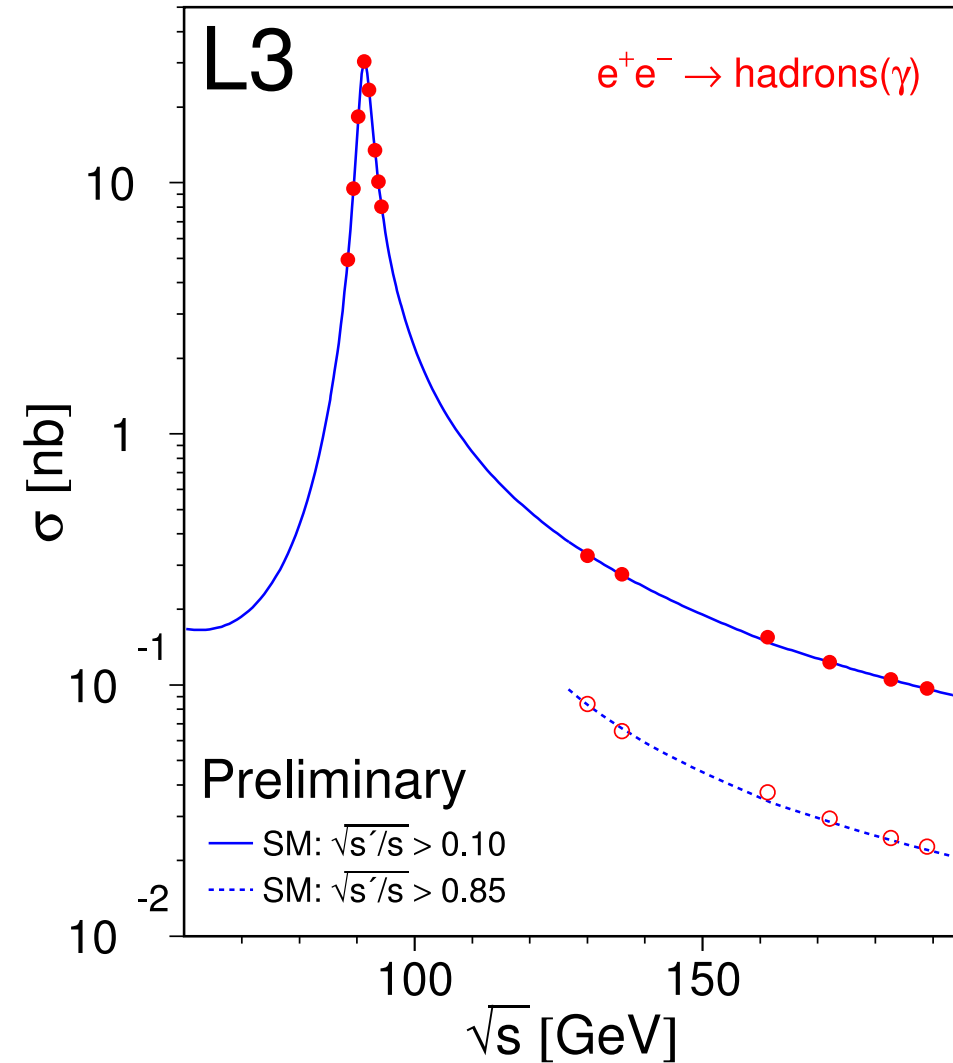


Model Standardowy został bardzo dokładnie przetestowany w zderzeniach e^+e^- w akceleratorach LEP i SLC (miliony przypadków).

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

Szerokość maksimum odpowiada naturalnej szerokości bozonu Z^0 .

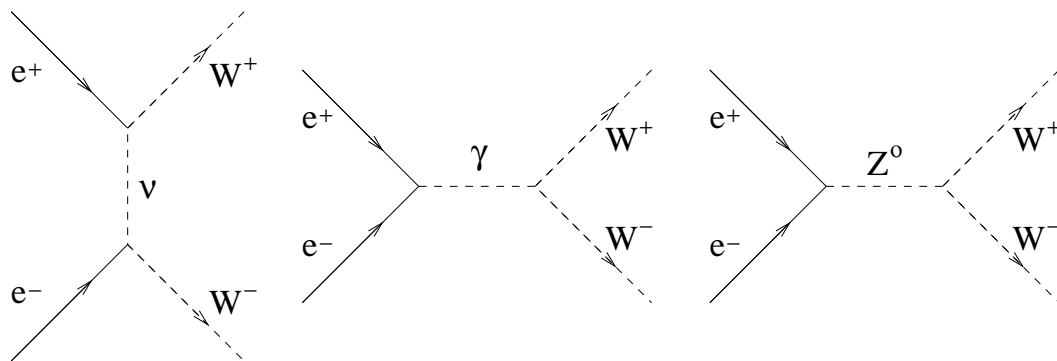
Ponieważ jest to cząstka niesłychanie krótkożyciowa, jej masa nie jest dokładnie określona...



Bozony W^\pm i Z^0

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

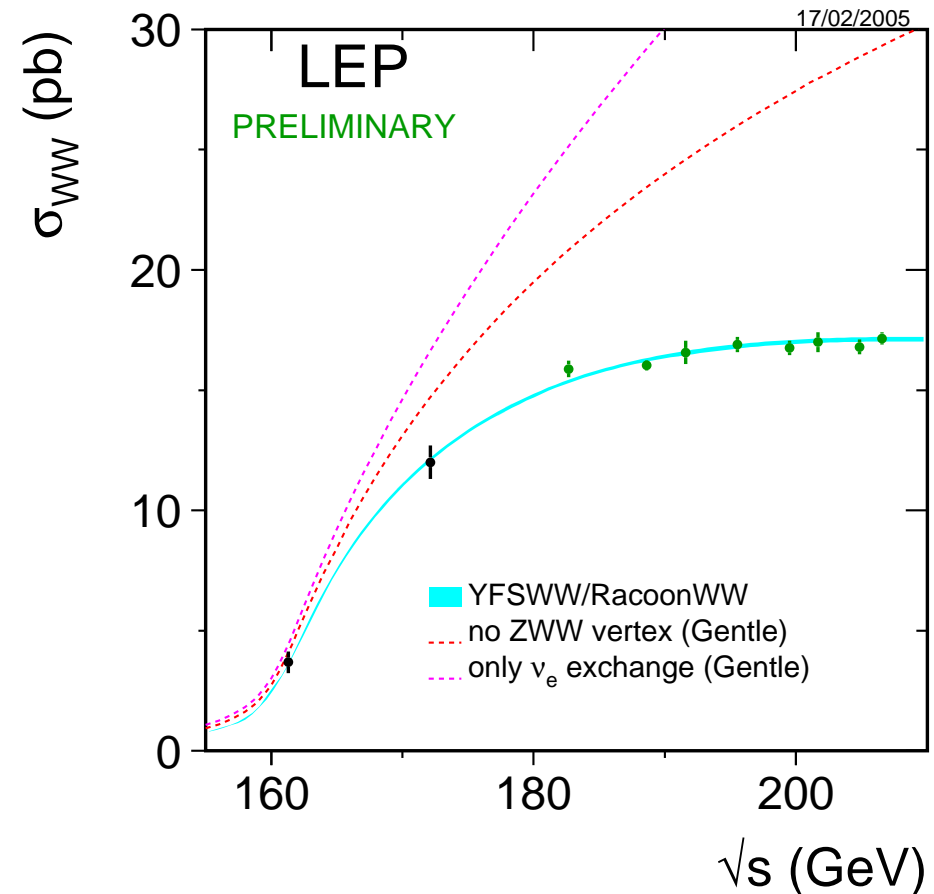
Produkcja bozonów W jedynie w parach, wkład od **trzech** różnych **procesów**:



Sprzężenia wynikają ze struktury **Modelu Standardowego**

\Rightarrow ścisłe przewidywania teoretyczne

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



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** !

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



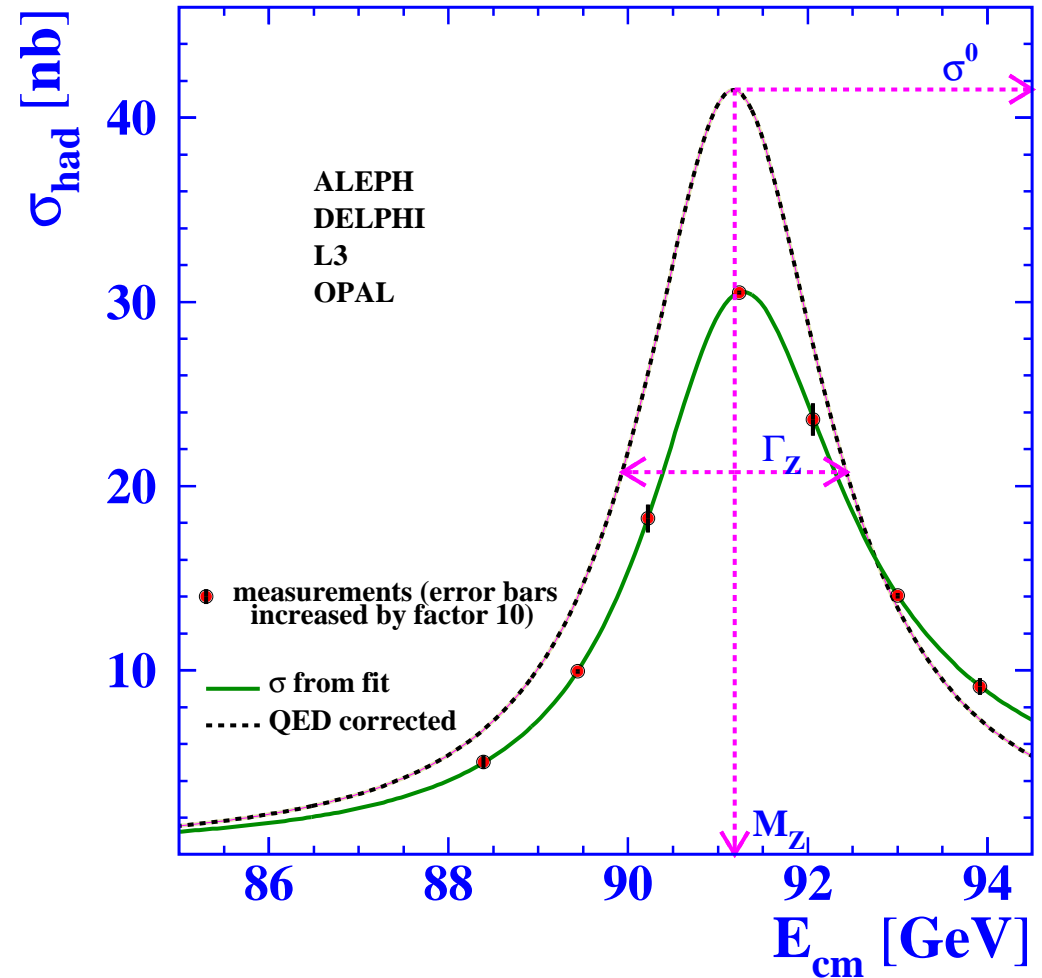
Pomiary precyzyjne w LEP

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...

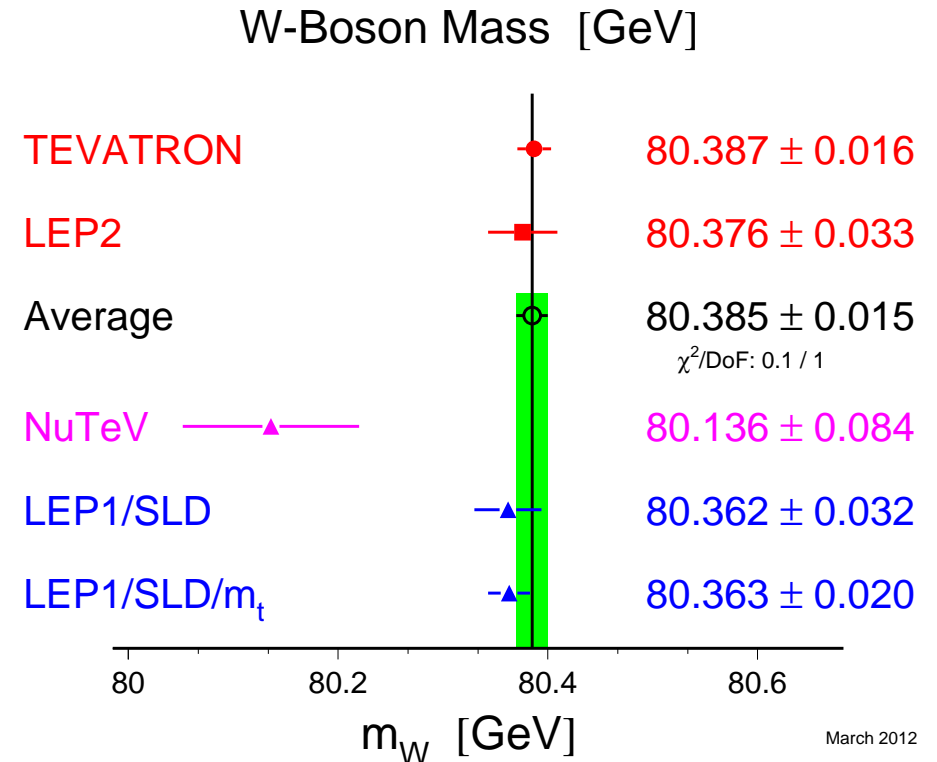
Precyzyjne pomiary w LEP i innych eksperymentach pozwalają **wnioskować** o **masach** tych cząstek, nawet jeśli ich bezpośrednio nie obserwujemy!



Pomiary precyzyjne w LEP

Poprawki

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



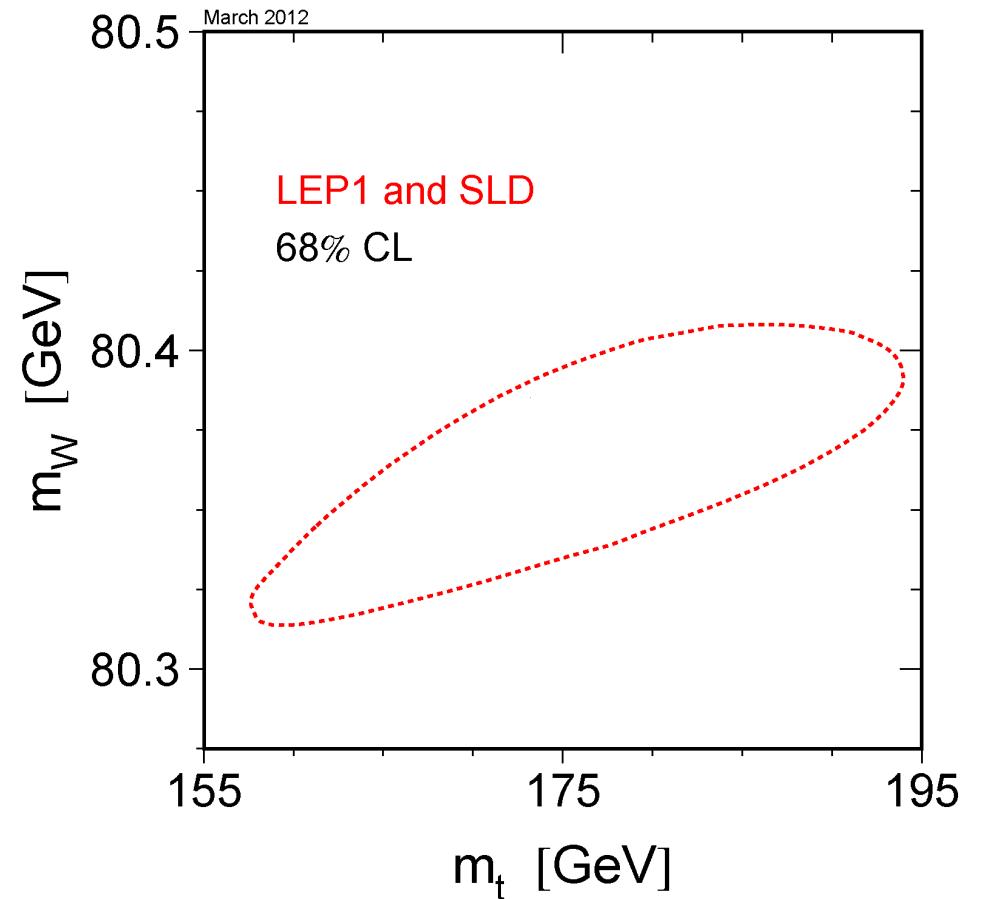
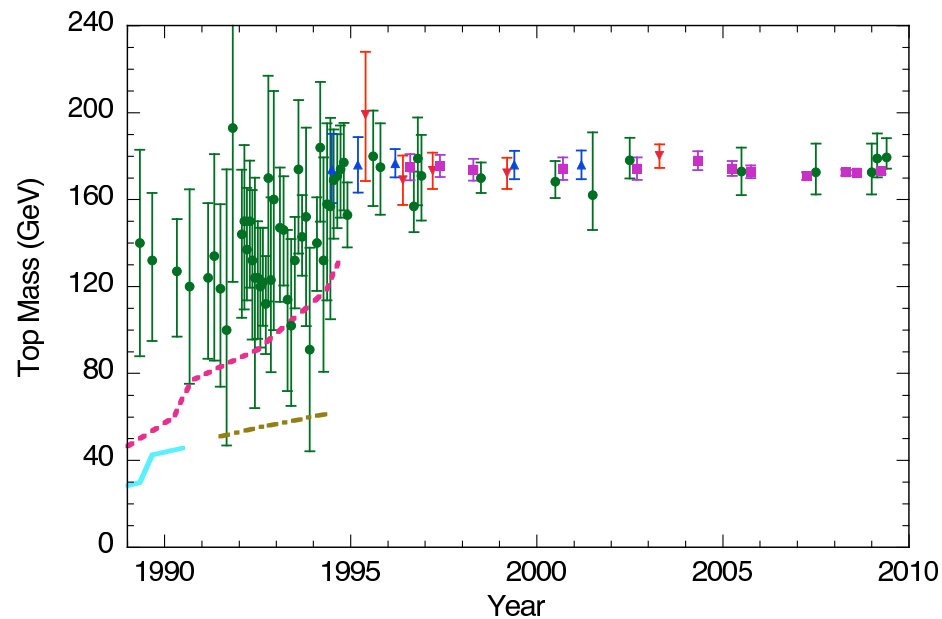
Pomiar bezpośredni zgodny z dokładnością do 0.03% z **przewidywaniami teorii** opartymi na precyzyjnych pomiarach przy niższych energiach.

Kwark t

Przewidywania

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

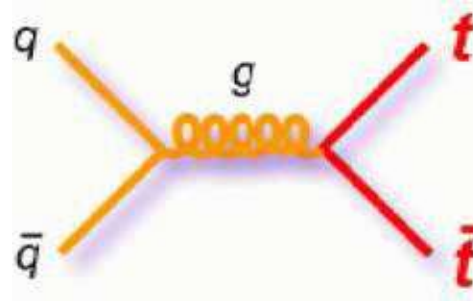
Dzisiejsze wyniki pośrednie:



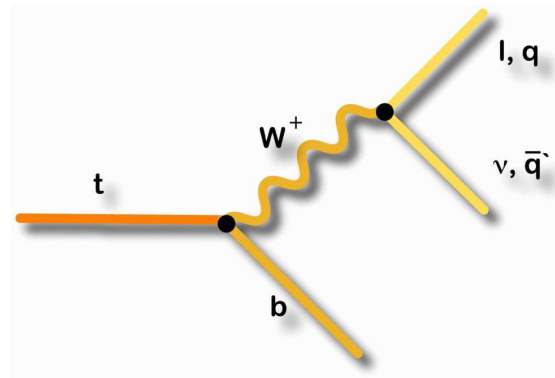
Kwark t

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

Kwark t najczęściej produkowany w wyniku anihilacji kwark-antykwar:



Rozpada się prawie natychmiast (nie tworzy żadnych cząstek):

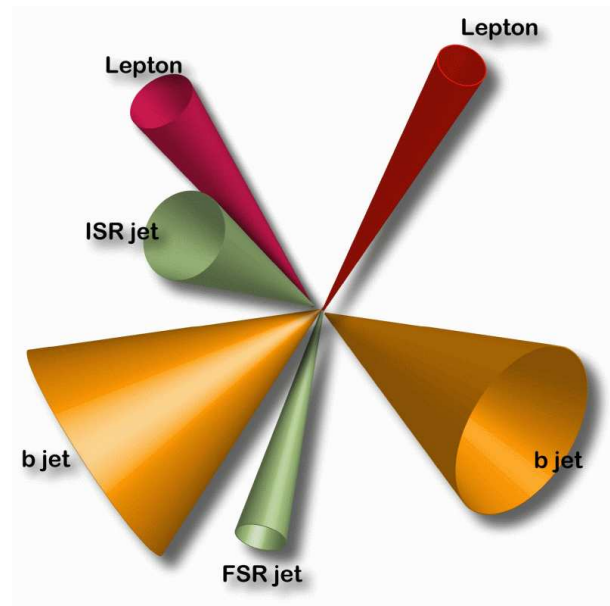


Obserwujemy powstający **kwark b** oraz **lepton** i **neutrino** (brakujący pęd poprzeczny) lub **parę jetów** o masie niezmienniczej odpowiadającej masie W

Kwark t

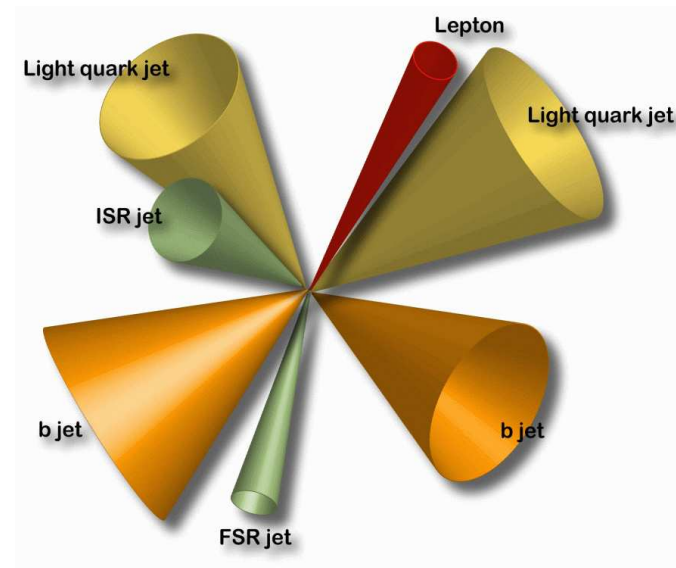
Tevatron

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



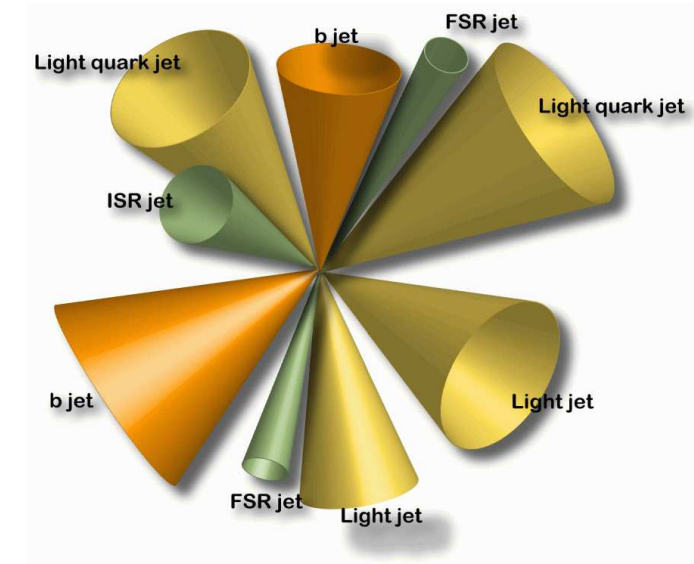
“złota próbka” ale tylko
~4% przypadków
(e^+e^- , $\mu^+\mu^-$ i $e^\pm\mu^\pm$)

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

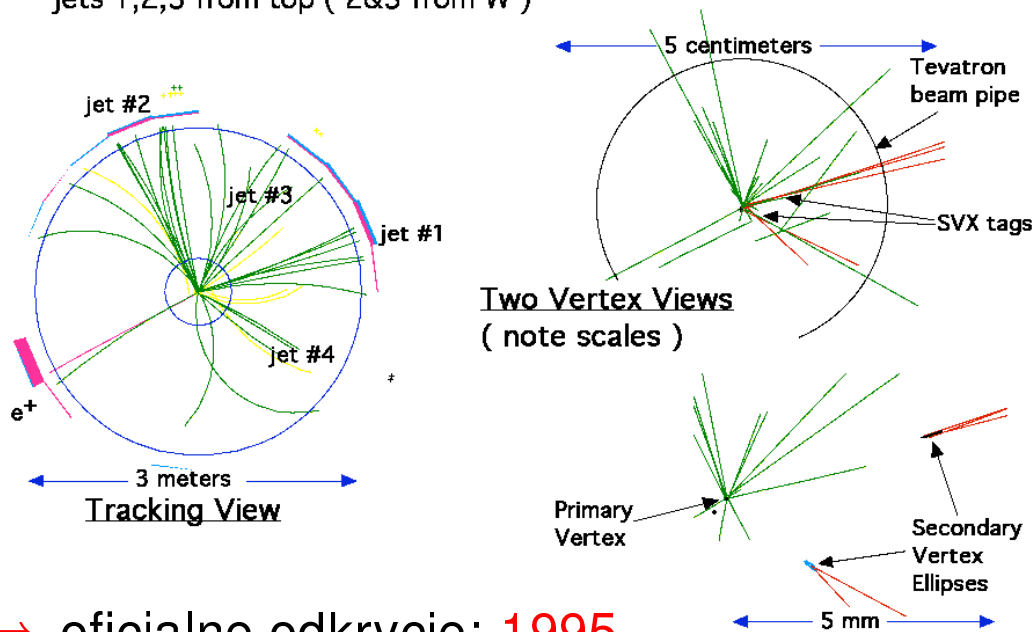
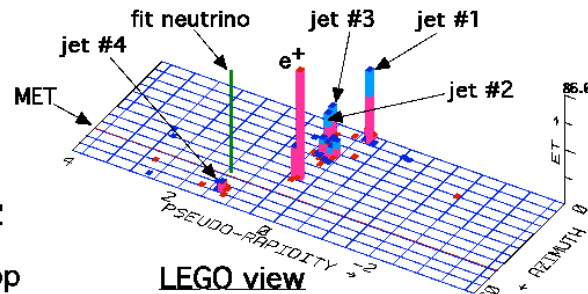
$e^+ + 4 \text{ jet event}$

40758_44414
24-September, 1992

TWO jets tagged by SVX

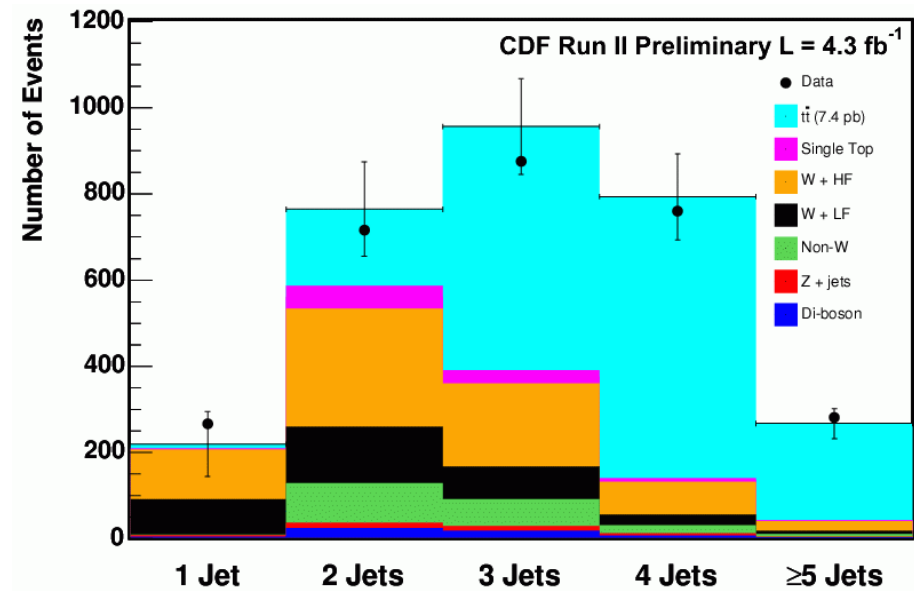
fit top mass is $175 \pm 10 \text{ GeV}/c^2$

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

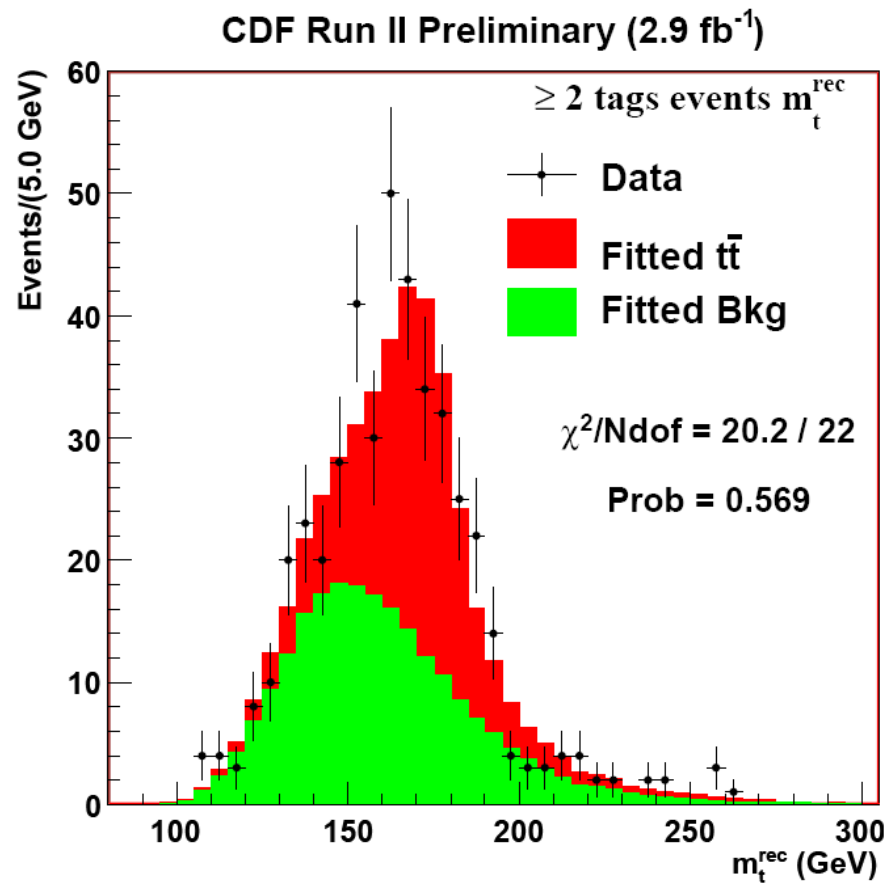
⇒ głównie przypadki $t\bar{t}$

Zebrano tysiące przypadków...

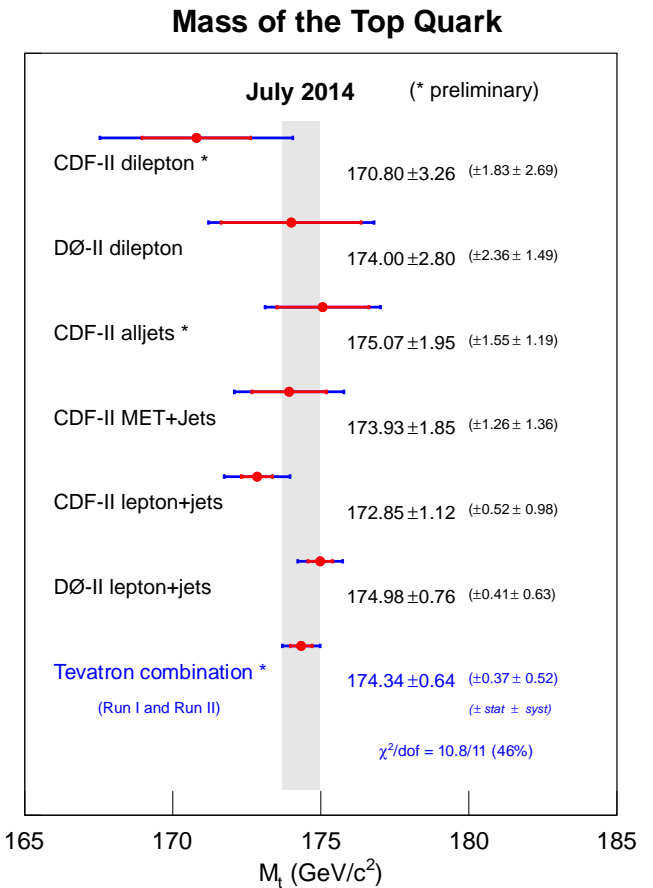
Kwark t

Tevatron

Rozkład rekonstruowanej masy kwarku t
w jednym z rozważanych kanałów



Porównanie wyników dla różnych próbek

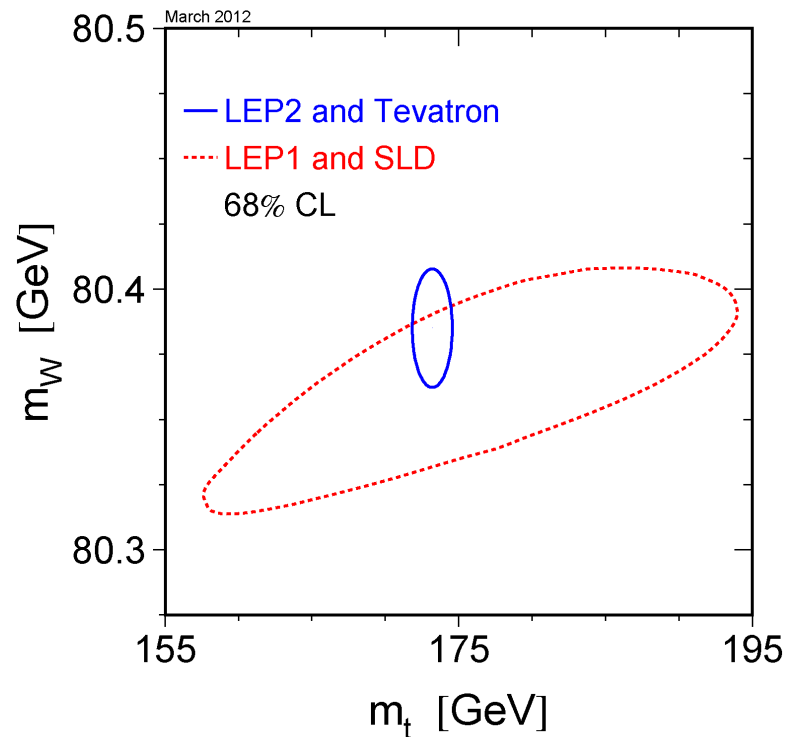


CDF + D0: $m_t = 174.34 \pm 0.64 \text{ GeV}$

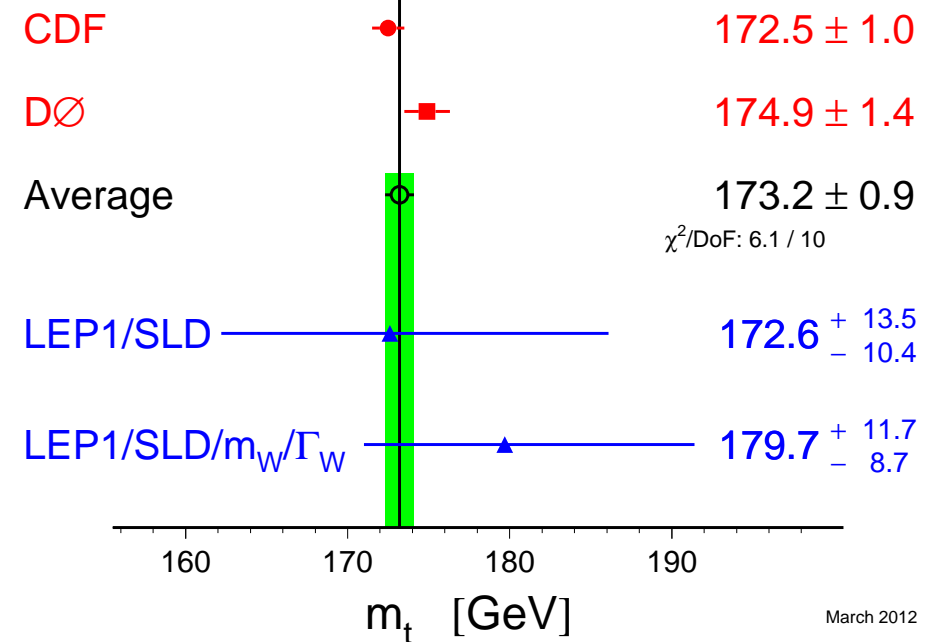
Kwark t

Porównanie

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



Top-Quark Mass [GeV]

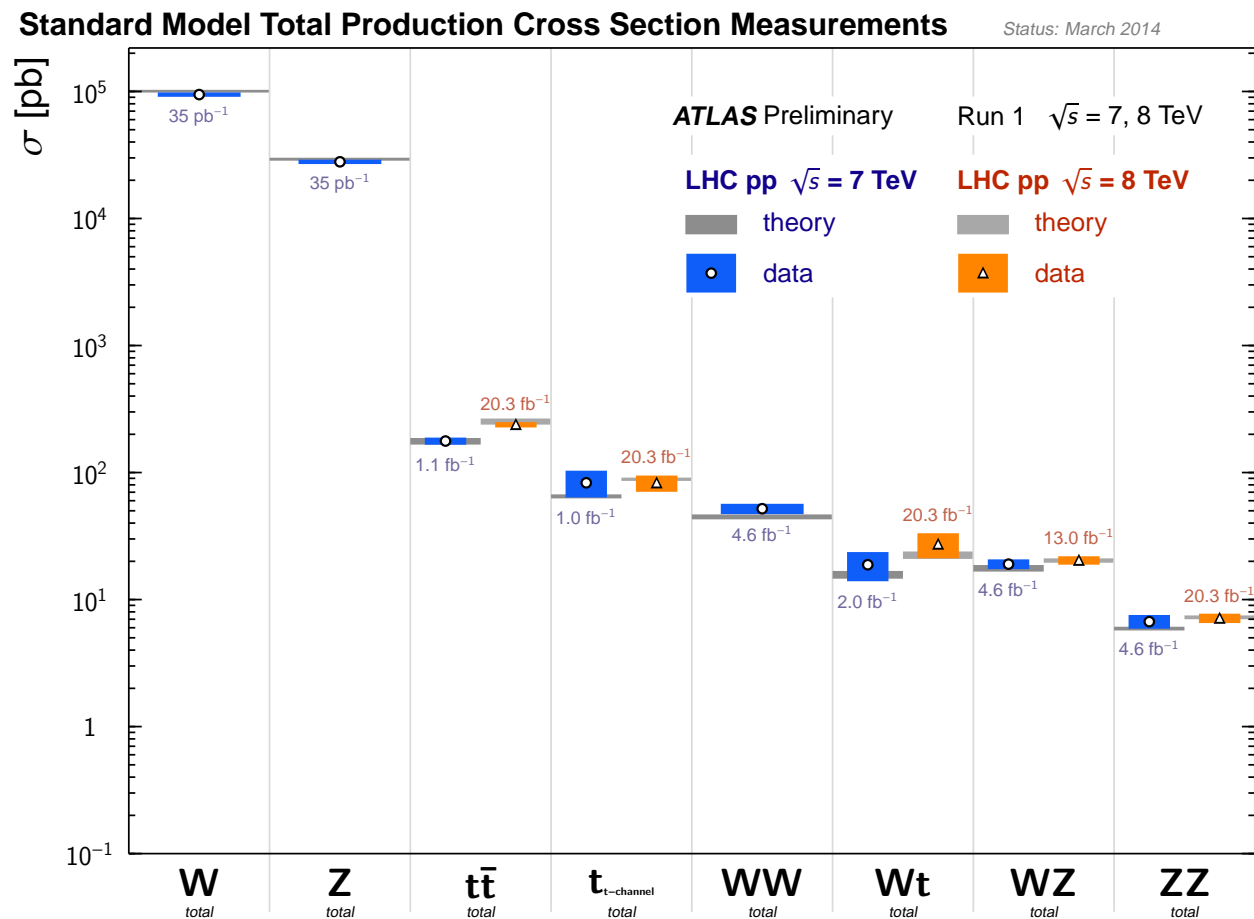


Pomiar bezpośredni zgodny w granicach błędów z przewidywaniami teorii opartymi na precyzyjnych pomiarach przy niższych energiach.

Kwark t

Eksperymenty przy LHC

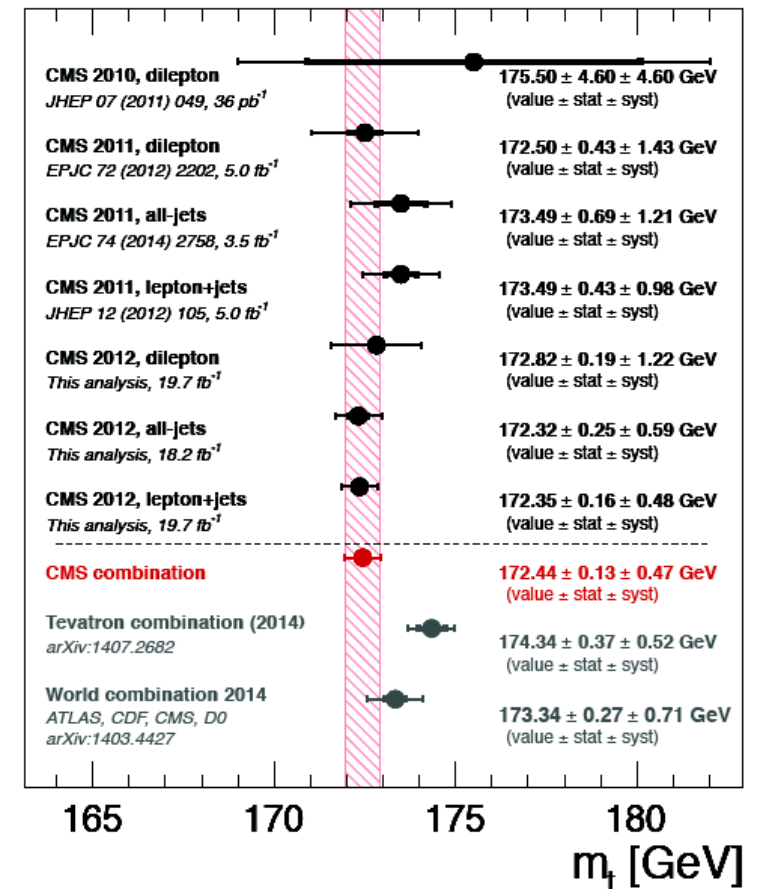
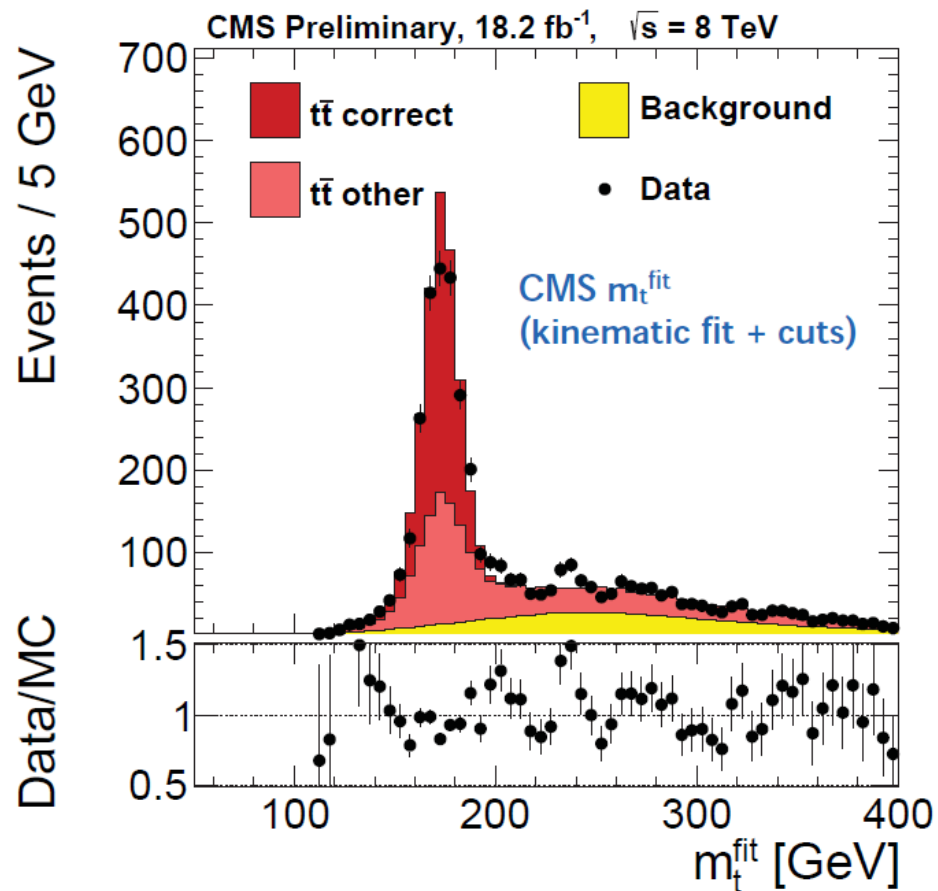
Bardzo szczegółowo badają procesy z produkcją bozonów W^\pm i Z^0 , oraz kwarku t .
Wszystkie dotychczasowe pomiary w znakomitej zgodności z SM. **Run 1:**



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. **Run 1:**



Już teraz liczba przypadków produkcji kwarku t w LHC większa niż w Tevatronie...

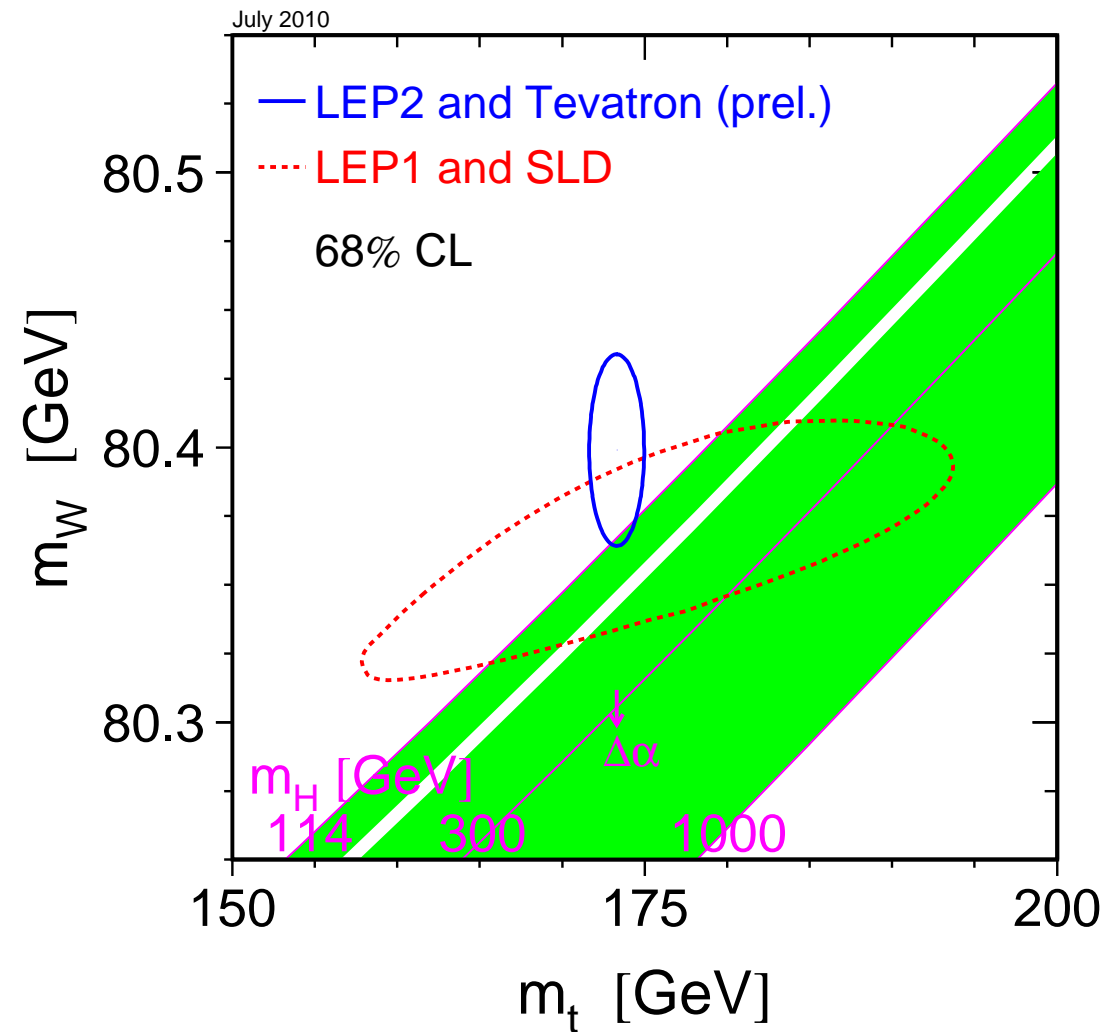
Pomiary precyzyjne w LEP

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:

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

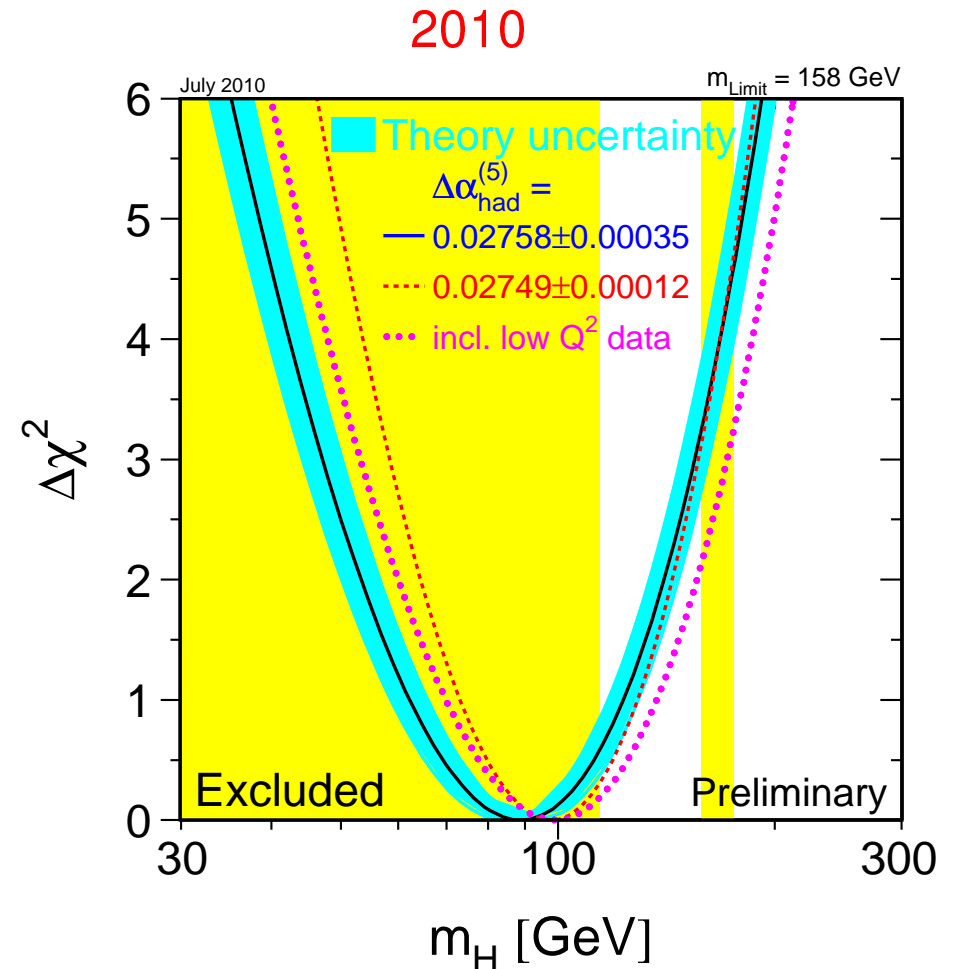
lub: $m_h < 158 \text{ GeV}$ (95% CL)

Z bezpośrednich poszukiwań:

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

wszystkie dane LEP:

ALEPH + DELPHI + L3 + OPAL

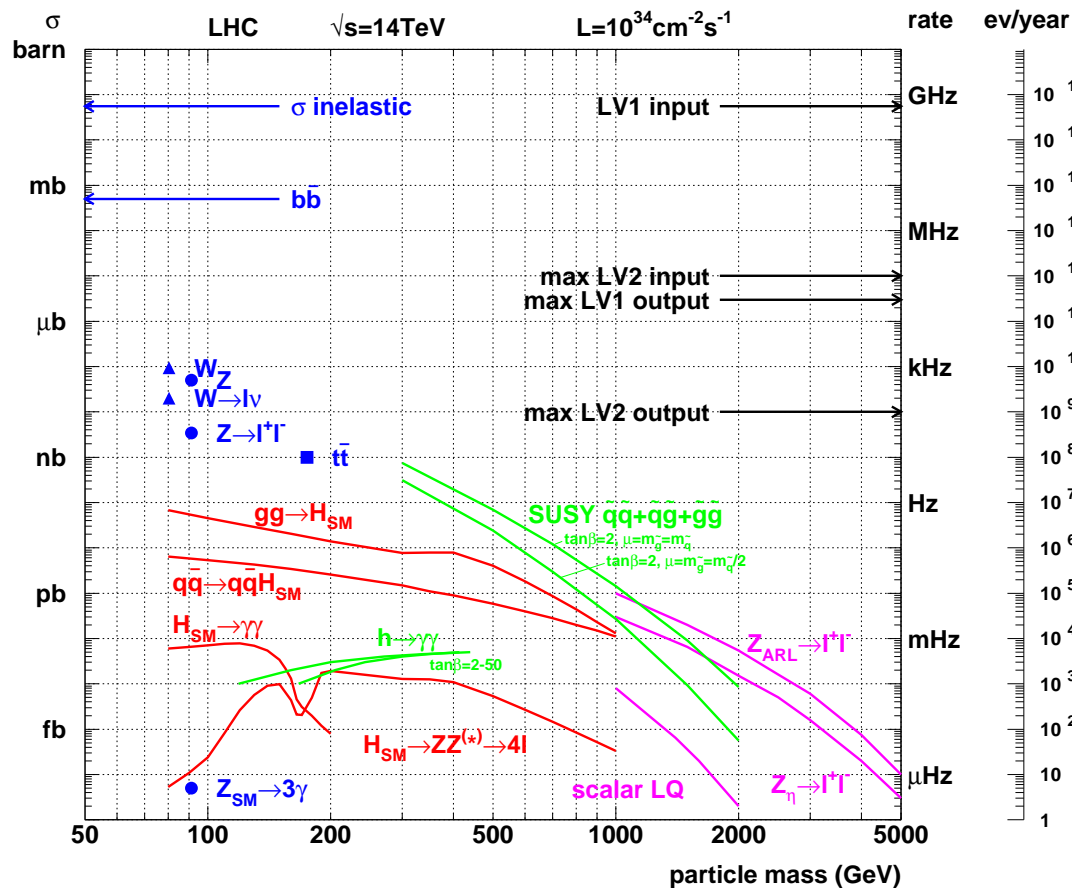


LHC, CERN, Genewa
Uruchomiony na jesieni 2009



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 $b\bar{b}$.

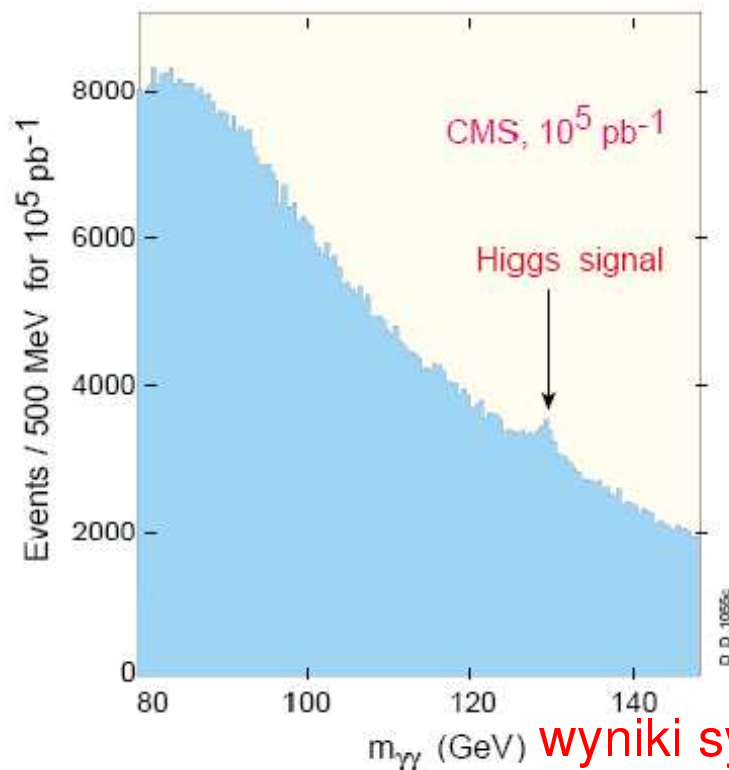
Musimy szukać kanałów o niskim tle...

Higgs w LHC

Dla małych mas najlepszy kanał to

$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

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

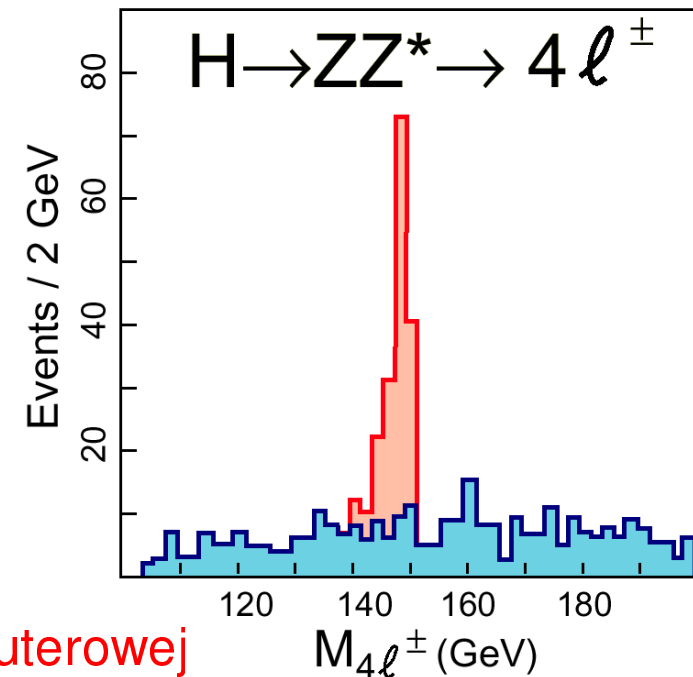


Dla dużych mas najlepszy jest kanał:

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

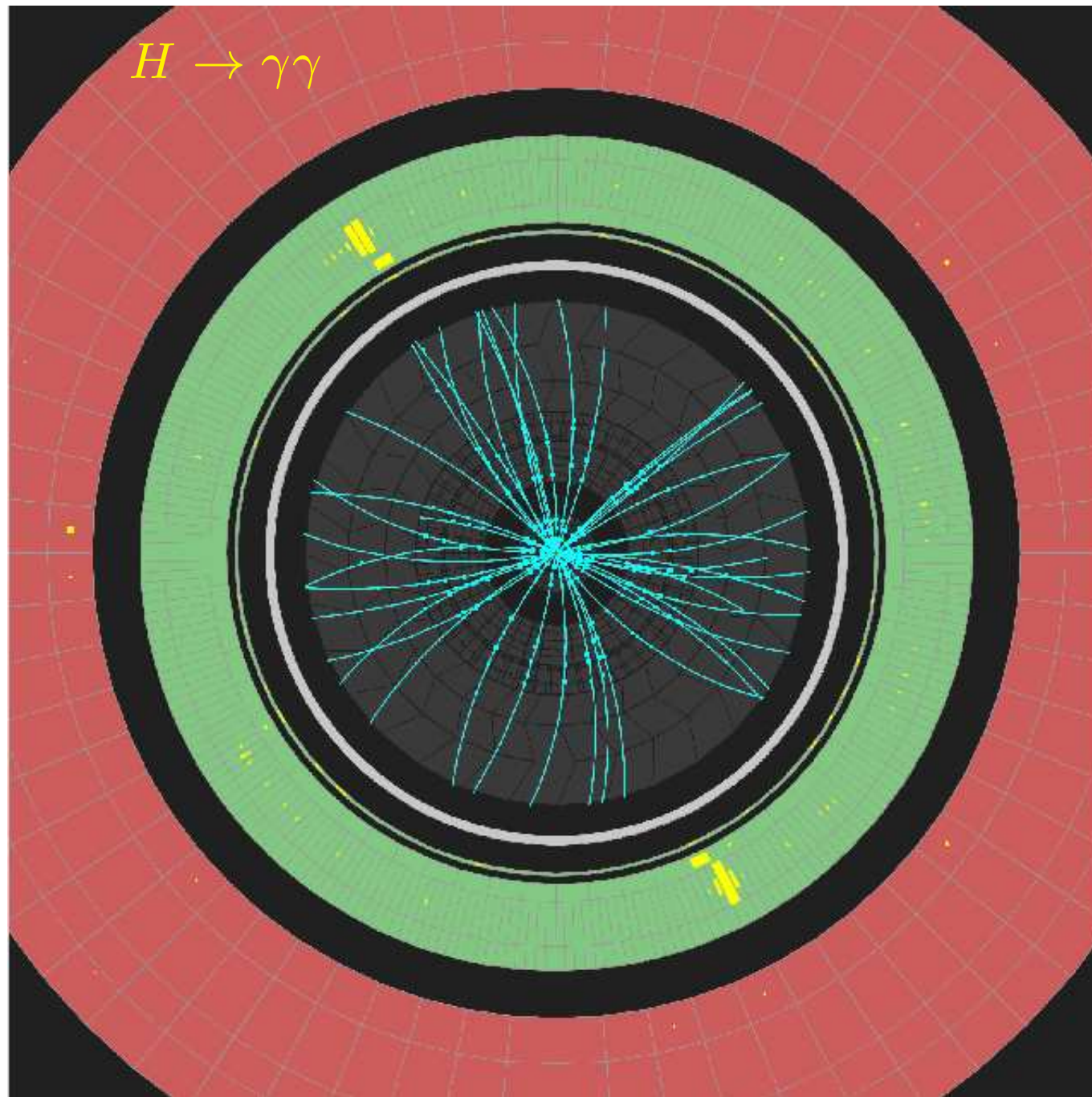
gdyż naładowane leptony (e^\pm i μ^\pm) można **łatwo zidentyfikować**.

Ale jest mało przypadków...



wyniki symulacji komputerowej

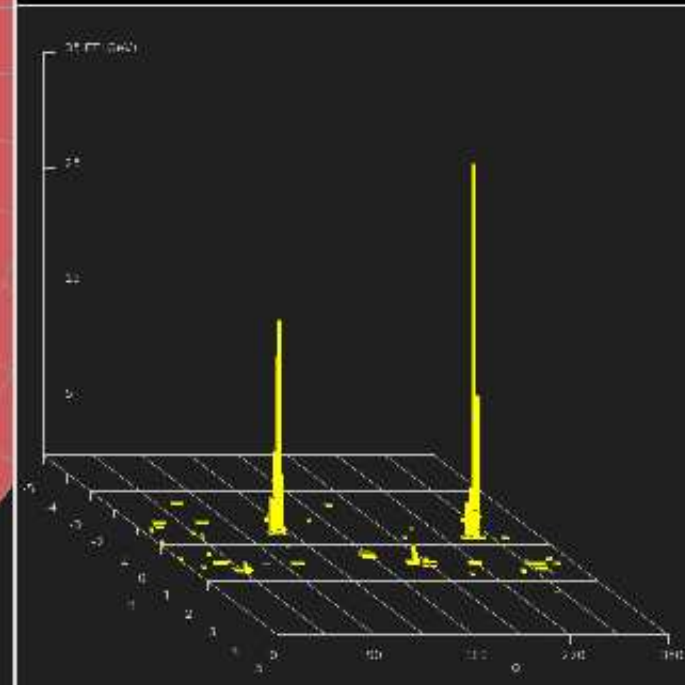
$H \rightarrow \gamma\gamma$



ATLAS
EXPERIMENT

Run Number: 191426, Event Number: 86694500

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



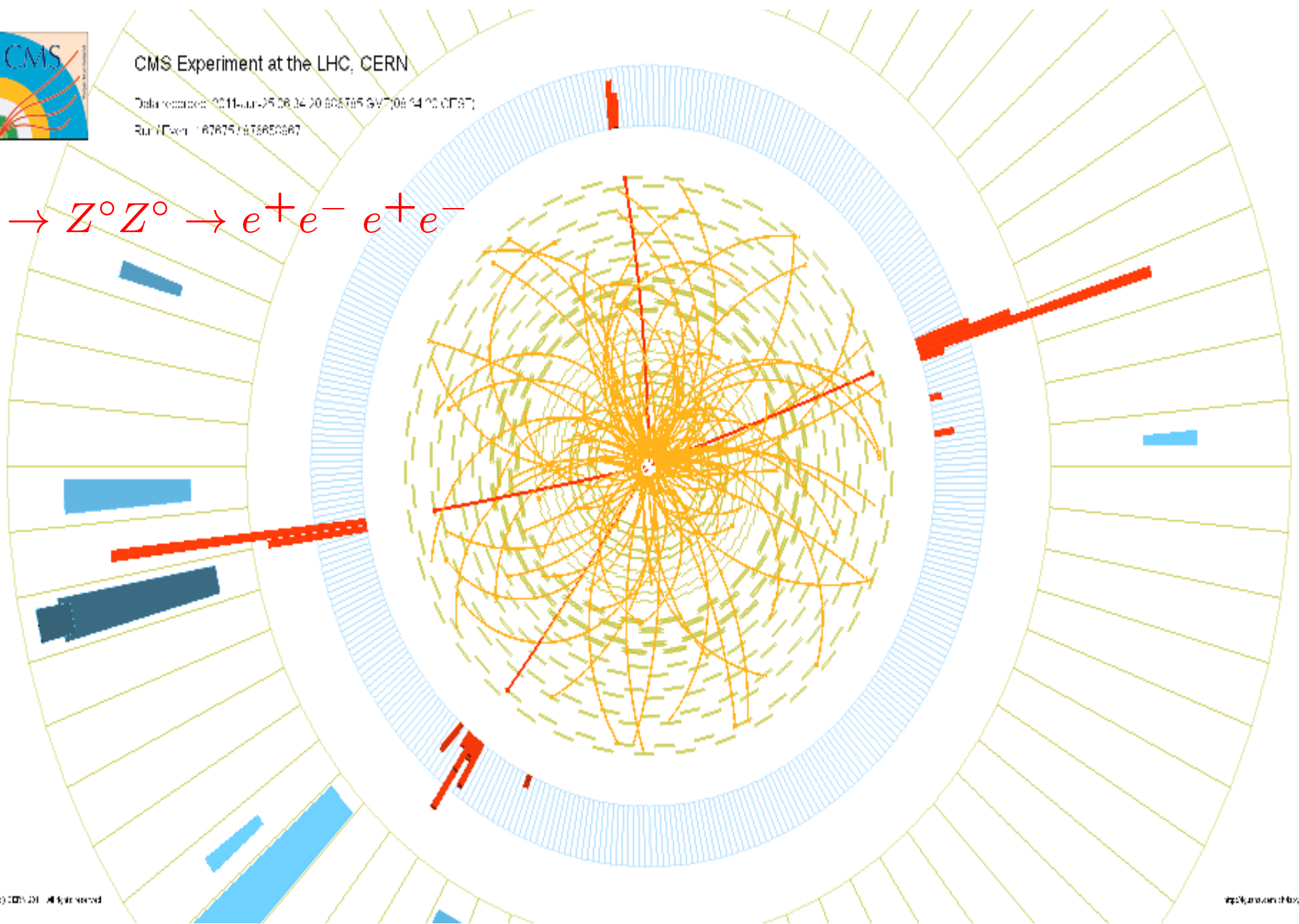


CMS Experiment at the LHC, CERN

Data recorded: 2011-Jul-25 08:34:20.605765 (64708:14:00:0737)

Run/Evt: 167675/1916850967

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



Pomiary precyzyjne w LEP

Masa higgosa

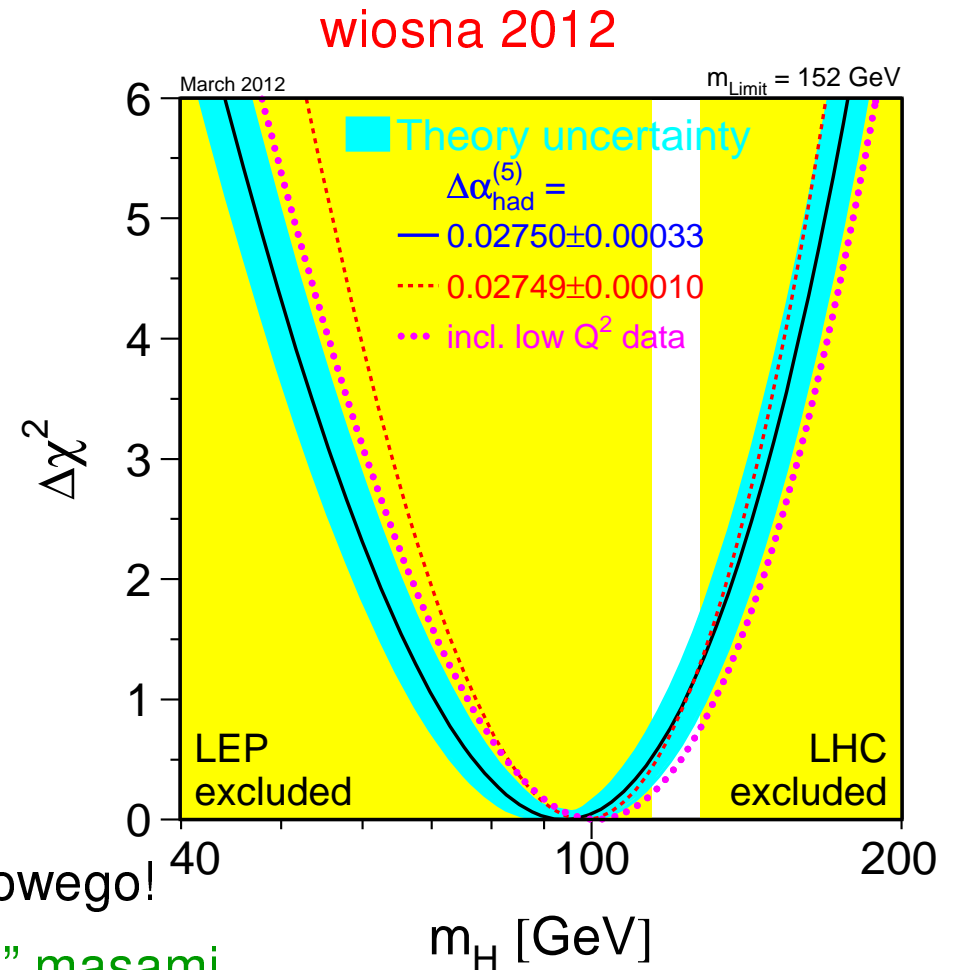
Analiza **wszystkich** dostępnych **danych** z LEP, Tevatron oraz pierwszych wyników z LHC (!).

Wiosną 2012 pozostało już tylko wąskie okno dostępnych wartości mas cząstki Higgosa:

$$114.7\text{GeV} < m_H < 127\text{GeV}$$

Gdyby to okno zostało “zamknięte”, oznaczałoby to **wykluczenie** Modelu Standardowego!

Obszar przejściowy między “małymi” i “dużymi” masami
⇒ dla masy ok. 120 GeV pomiar bozonu Higgosa najtrudniejszy...

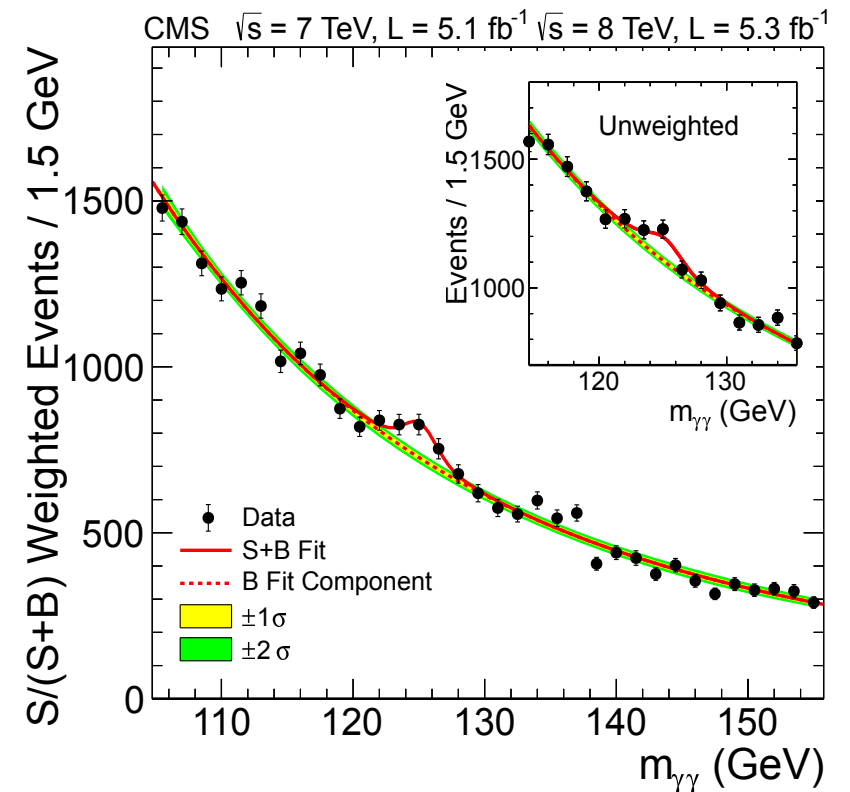
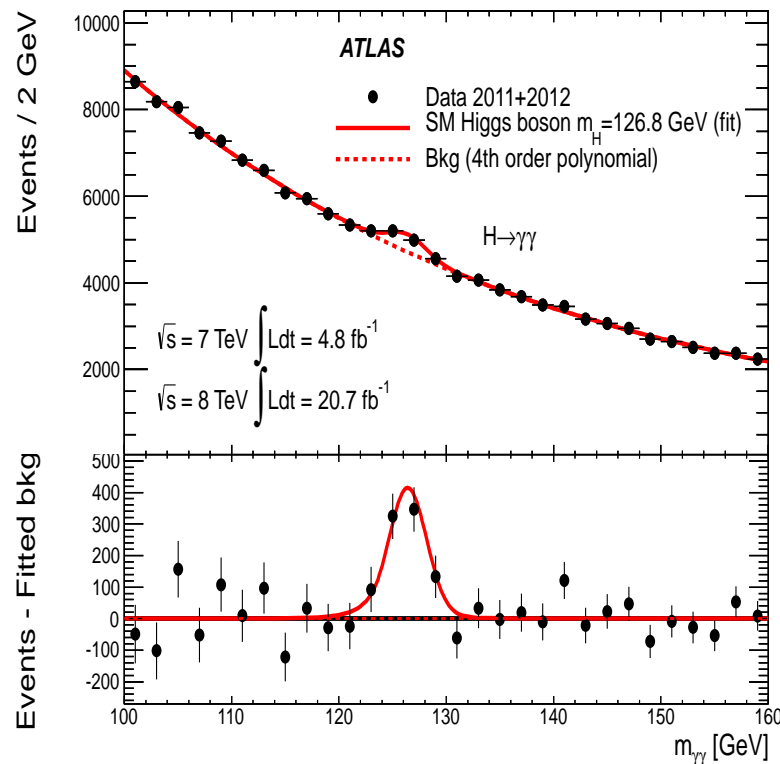


Higgs w LHC

Wyniki przedstawione przez **ATLAS** i **CMS**,
po uwzględnieniu danych zebranych w roku 2012.

Sygnał widoczny ponad wszelką wątpliwość

$H \rightarrow \gamma\gamma$

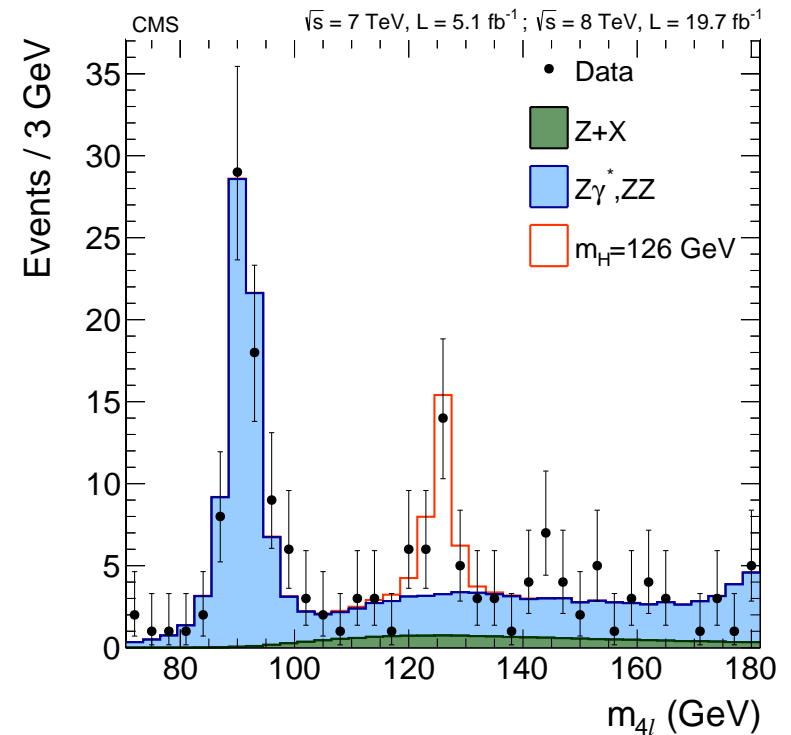
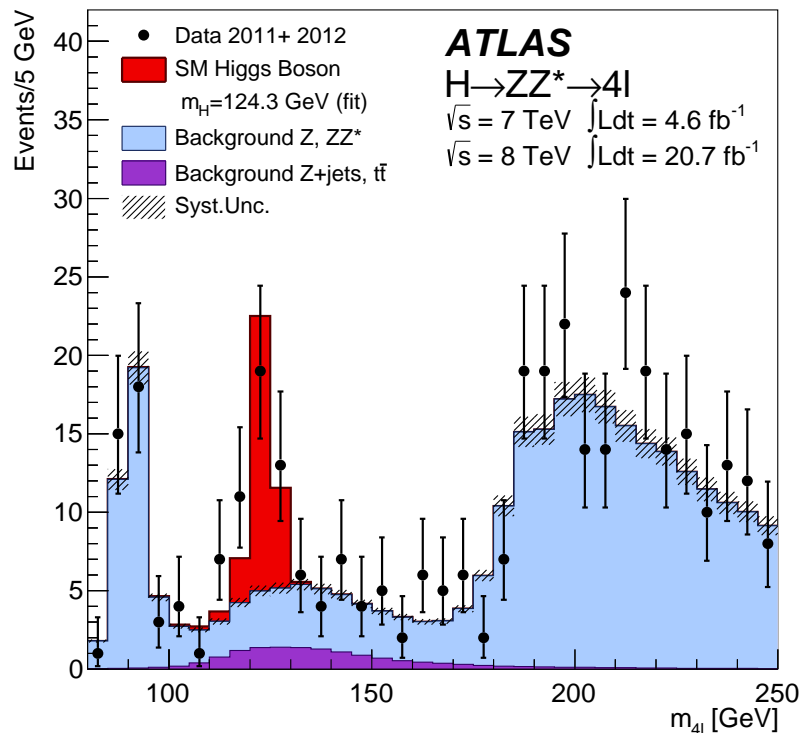


Higgs w LHC

Wyniki przedstawione przez **ATLAS** i **CMS**,
po uwzględnieniu danych zebranych w roku 2012.

Sygnał widoczny ponad wszelką wątpliwość

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

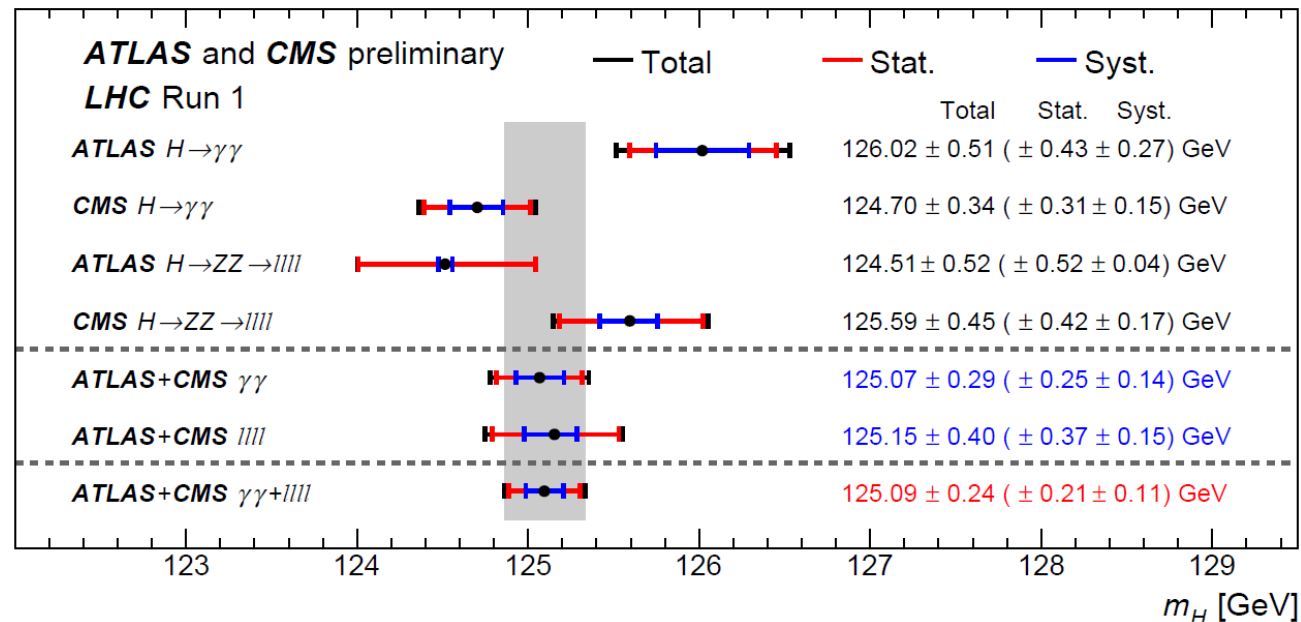


Higgs w LHC

Wyniki przedstawione przez **ATLAS** i **CMS**,
po uwzględnieniu danych zebranych w roku 2012.

Dwa wymienione kanały dają także **najdokładniejszy pomiar masy** nowej cząstki.
Wyniki analizy danych z pierwszego okresu działania LHC (Run I):

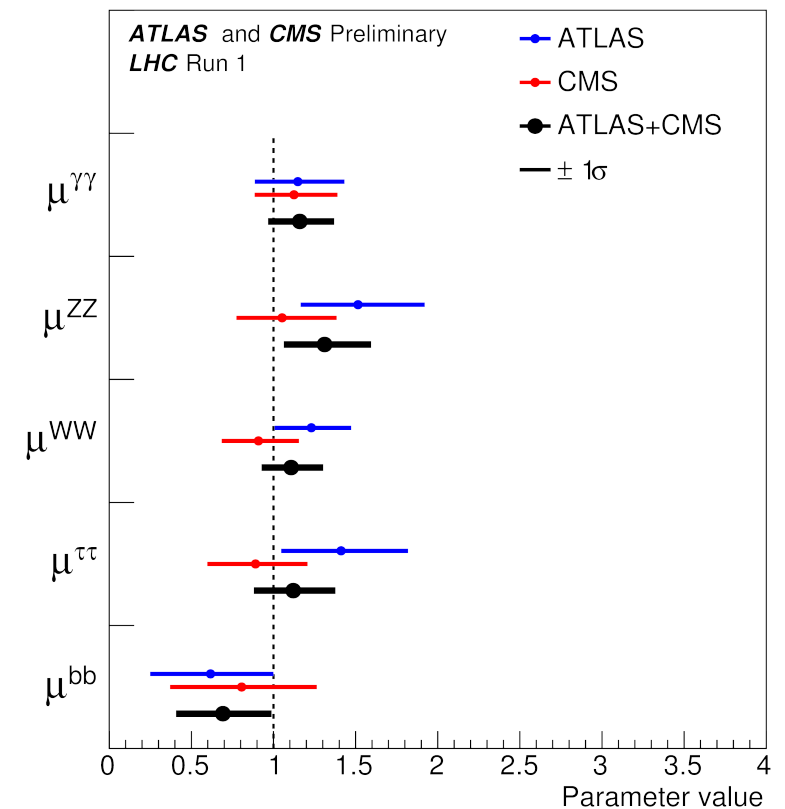
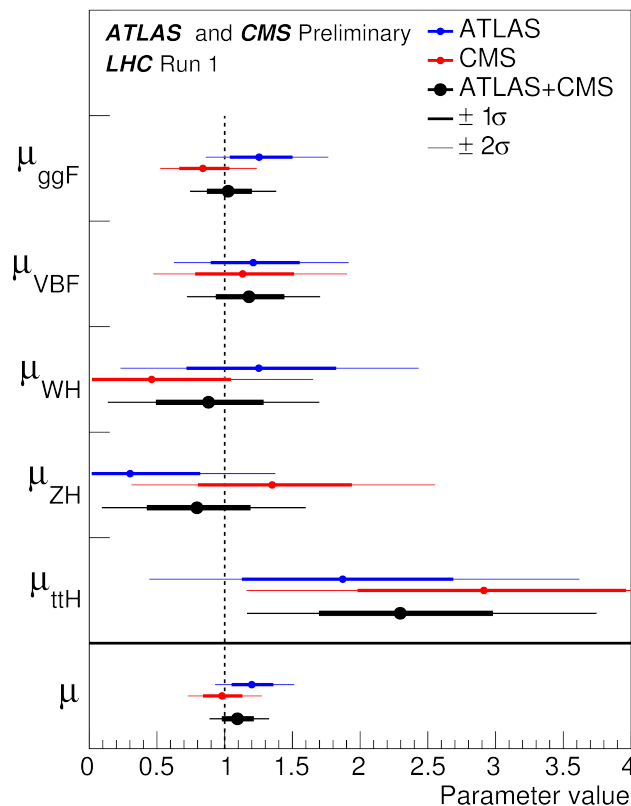
$$M_H = 125.09 \pm 0.24 \text{ GeV}$$



Higgs w LHC

Duża statystyka przypadków pozwoliła na pomiar różnych kanałów **produkcji** i **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

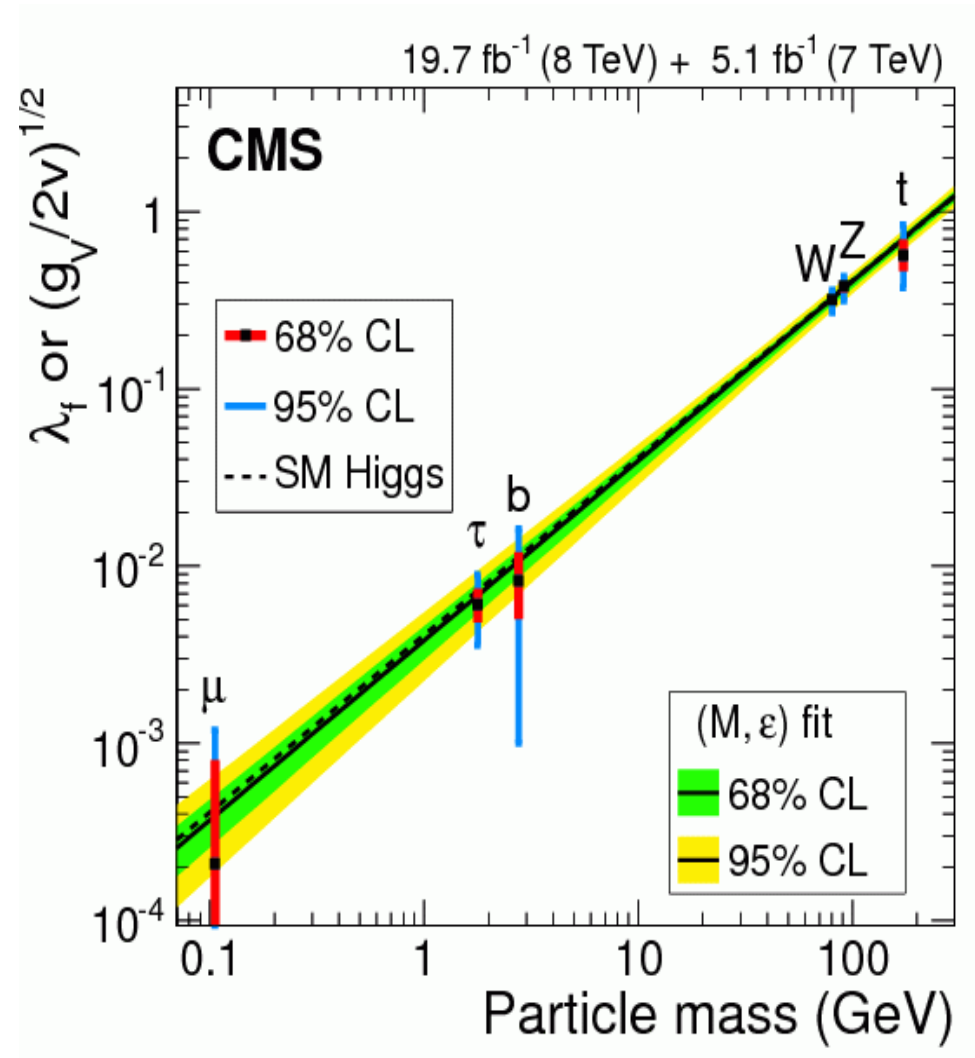
Możliwa staje się weryfikacja podstawowego przewidywania modelu:

sprężenie bozonu Higgsa do cząstek jest proporcjonalne do ich masy

Błędy są wciąż bardzo duże!

Większa precyzja może być osiągnięta po zebraniu dużej próbki danych przy energii $\sqrt{s}=13\text{--}14\text{ TeV}$

(Run 2 od 2015).



Plany dla LHC

Projekt badań przy LHC jest rozpisany na wiele lat:

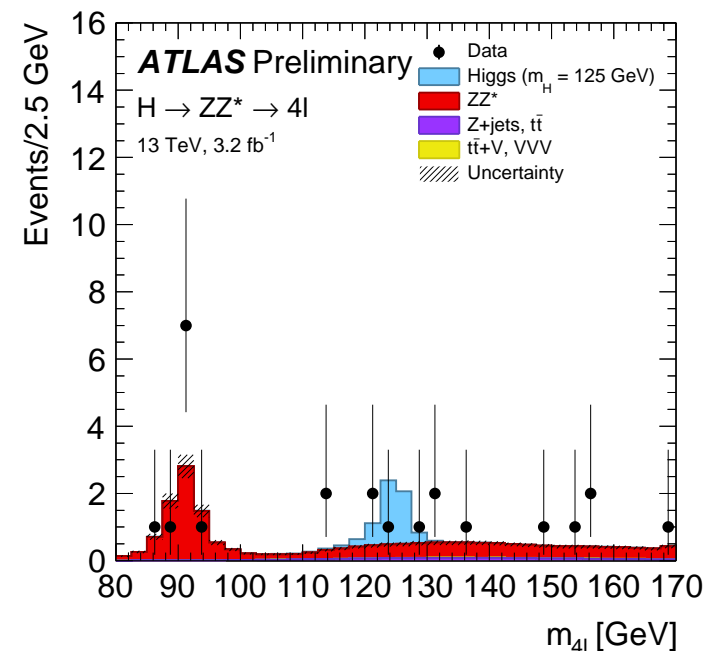
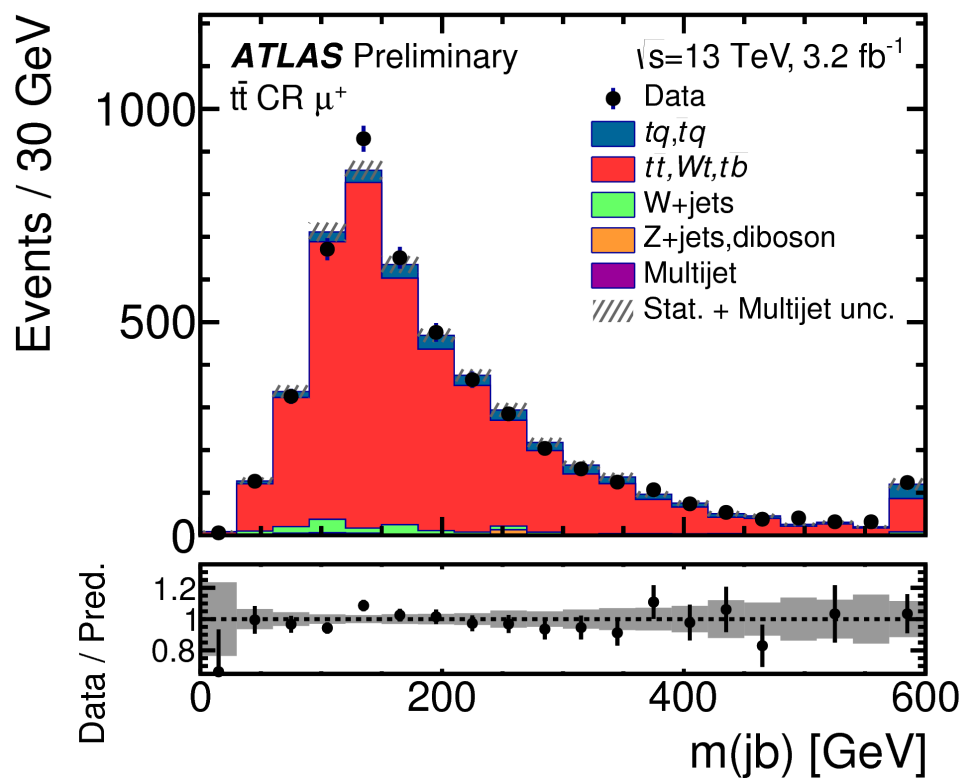
- 1984: pierwszy projekt akceleratora LHC
- 1992: propozycje eksperymentów ATLAS i CMS
- 1994: decyzja o budowie LHC, 1997: zatwierdzenie eksperymentów ATLAS i CMS
- 2008: pierwsze uruchomienie i awaria LHC
- 2009: ponowne uruchomienie LHC
- 2010-2012: zderzenia pp przy $\sqrt{s}=7-8$ TeV (Run 1, $\sim 25 fb^{-1}$)
 - 2013-2014: Long Shutdown 1 (LS1) - dodatkowe zabezpieczenia w LHC
- 2015-2018: zderzenia pp przy $\sqrt{s}=13-14$ TeV (Run 2, $\sim 100 fb^{-1}$)
 - 2019-2020: Long Shutdown 2 (LS2) - modernizacja LHC i eksperymentów
- 2021-2023: zderzenia pp przy $\sqrt{s}=14$ TeV (Run 3, $\sim 200 fb^{-1}$)
 - 2024-2026: Long Shutdown 3 (LS2) - modernizacja LHC i eksperymentów
- 2026-2035: zderzenia pp przy $\sqrt{s}=14$ TeV (High Luminosity LHC, $\sim 3000 fb^{-1}$)

Run 2

Pierwsze wyniki eksperymentu ATLAS z danych Run 2 przy $\sqrt{s}=13$ TeV

Rekonstrukcja przypadków produkcji par $t\bar{t}$

Rozpad bozonu Higgsa na 4 leptony



Oczekiwane 6.7

(120-130 GeV)

Obserwowane 4 przypadki

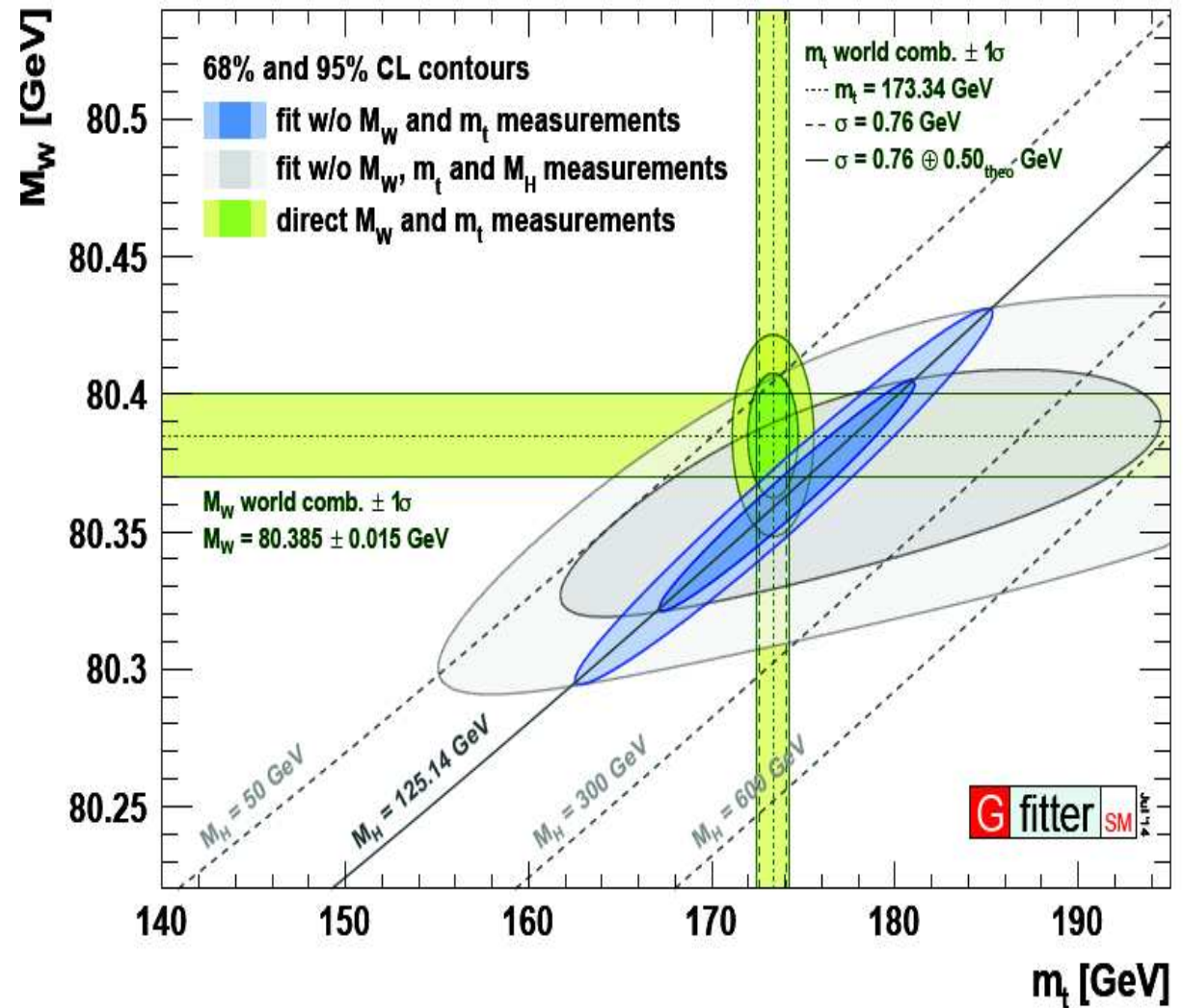
Higgs w LHC

Model Standardowy

W ramach modelu standardowego masa bozonu Higgsa jest związana z masami bozonu W i kwarku t poprzez poprawki pętlowe.

Wyniki pomiaru **masy bozonu Higgsa** w LHC **zgodne** z wynikami bezpośrednich pomiarów mas W i t oraz wynikami LEP.

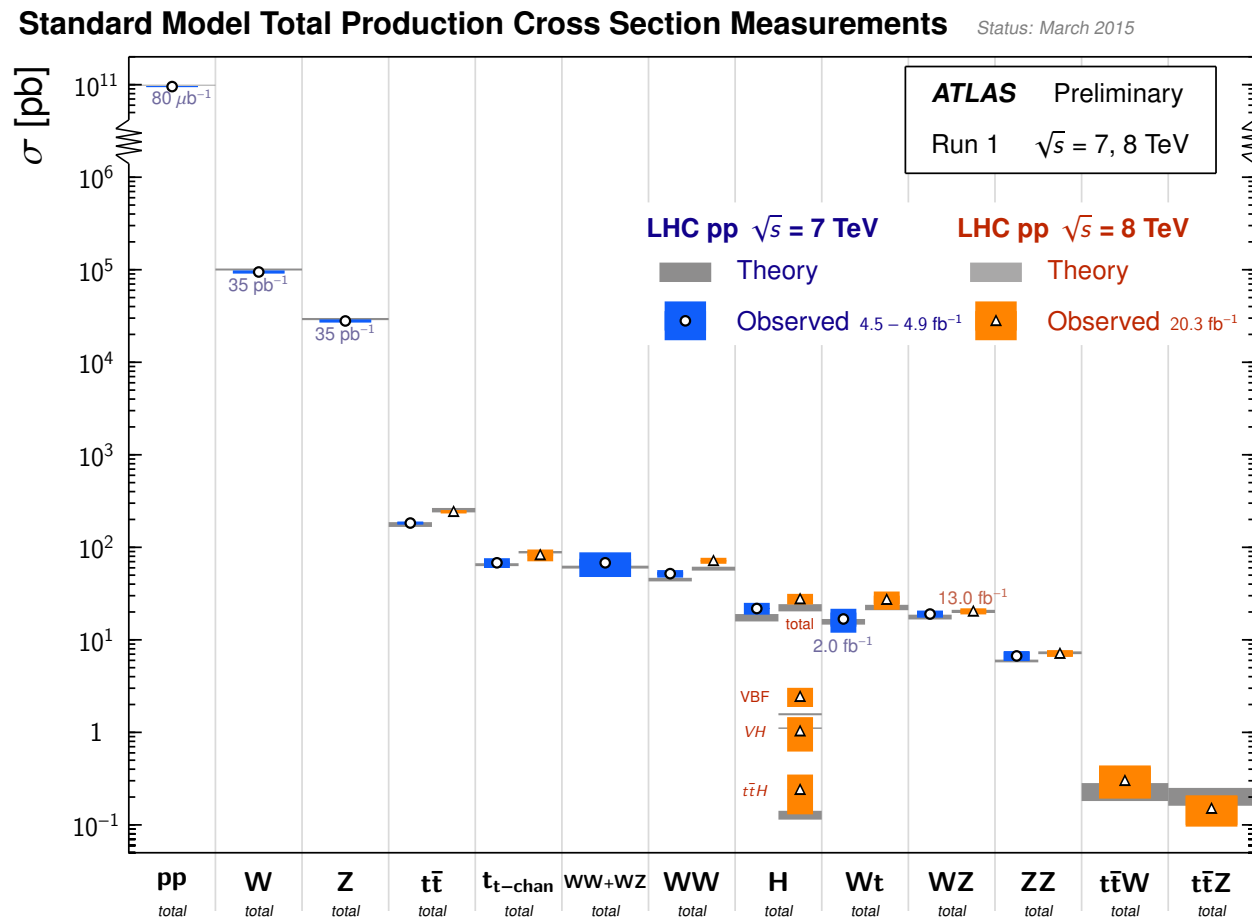
Wszystko się zgadza...



Testy SM

Eksperymenty przy LHC

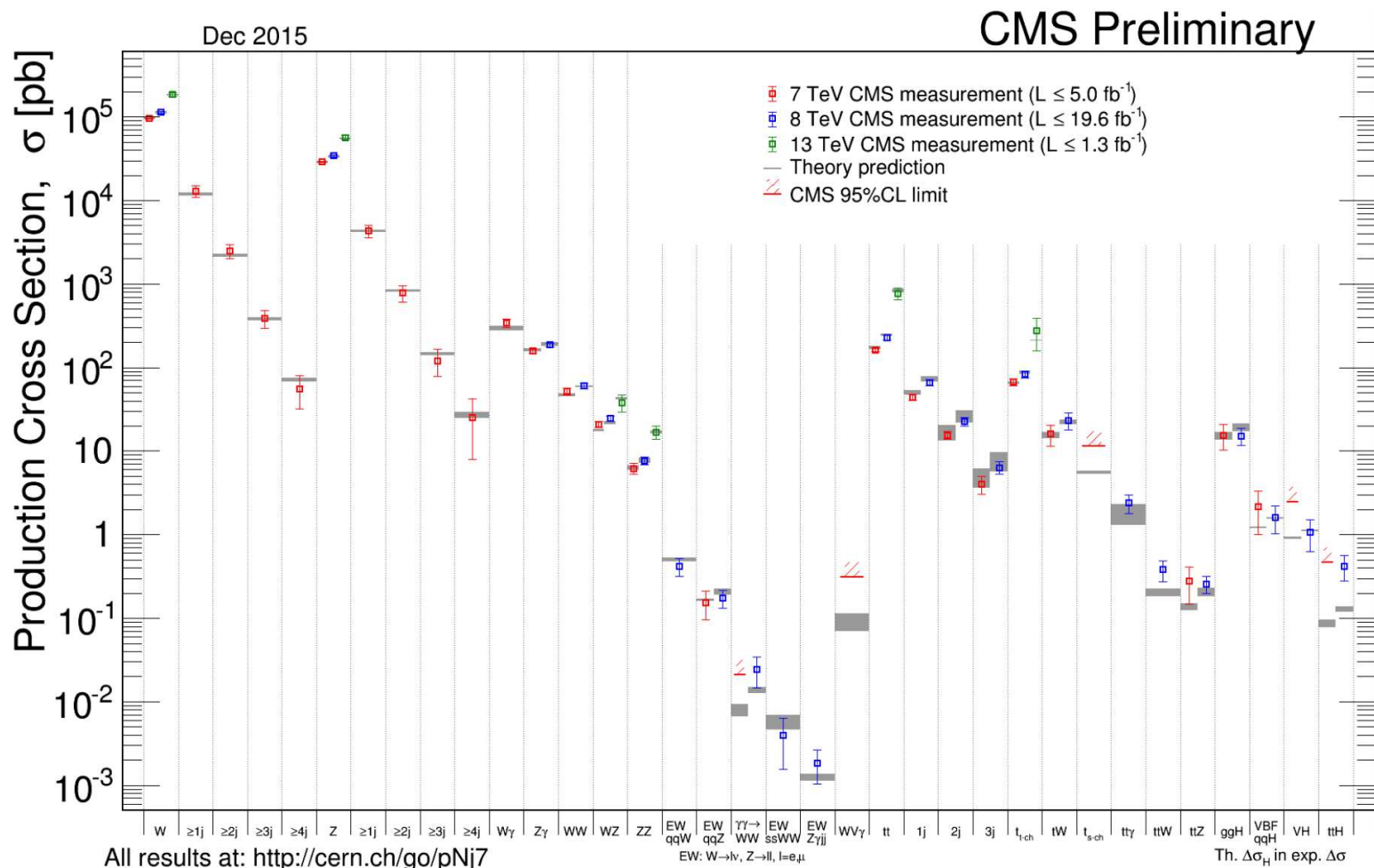
Bardzo szczegółowo badają procesy z produkcją bozonów W^\pm , Z^0 i H , oraz kwarku t .
Wszystkie dotychczasowe pomiary w znakomitej zgodności z SM. **Run 1:**



Testy SM

Eksperymenty przy LHC

Bardzo szczegółowo badają procesy z produkcją bozonów W^\pm , Z^0 i H , oraz kwarku t .
Wszystkie dotychczasowe pomiary w znakomitej zgodności z SM. **Run 1** + **Run 2**

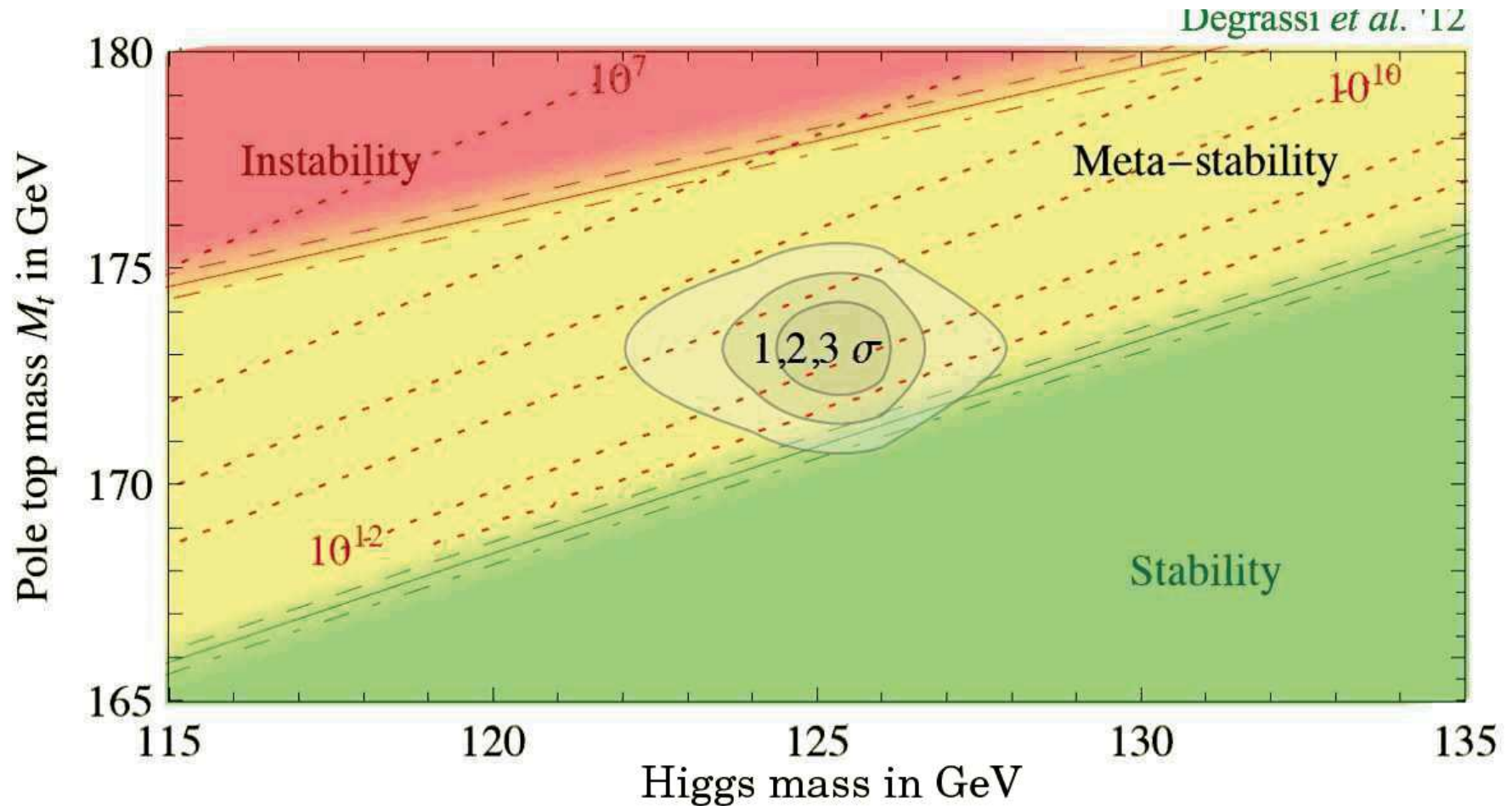


Testy SM

Stabilność próżni

Jednak bozon Higgsa jest jednak trochę za lekki (albo kwark t za ciężki).

Nasz Wszechświat (w Modelu Standardowym) wydaje się nie być stabilnym...

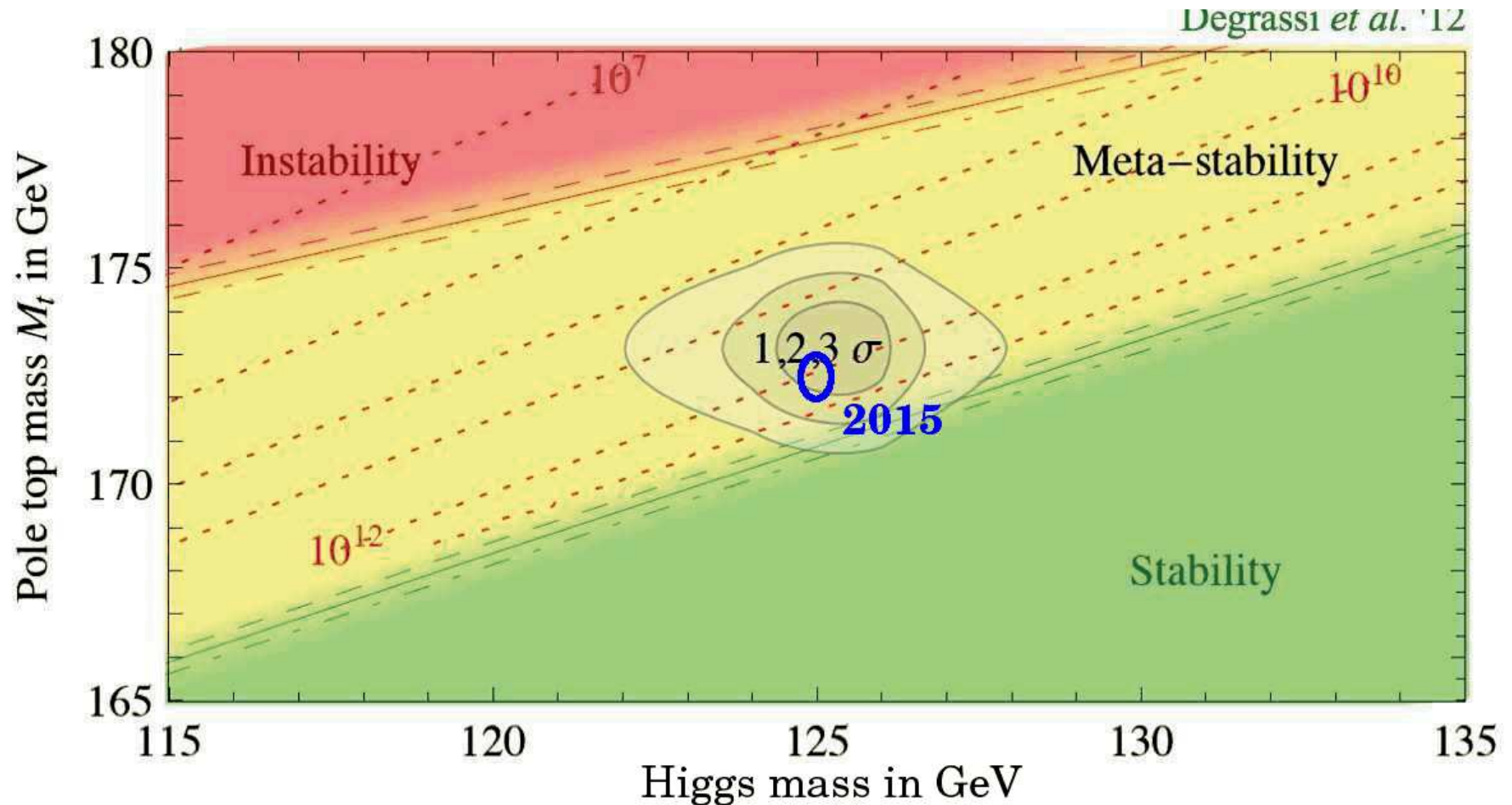


Testy SM

Stabilność próżni

Jednak bozon Higgsa jest jednak trochę za lekki (albo kwark t za ciężki).

Nasz Wszechświat (w Modelu Standardowym) wydaje się nie być stabilnym...



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**

Wierzimy, że natura kryje jeszcze kolejne zagadki...