

# Testy Modelu Standardowego i odkrycie bosonu Higgsa

prof. dr hab. Aleksander Filip Żarnecki

Wszechświat Cząstek Elementarnych

## Wykład 10

- 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)

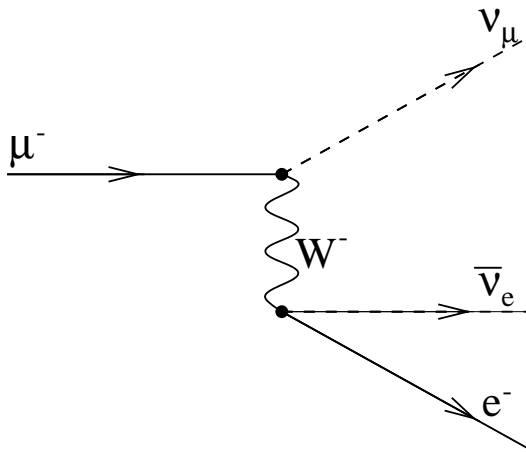
# Bozony $W^\pm$ i $Z^0$

## 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  $Z^0$ :

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

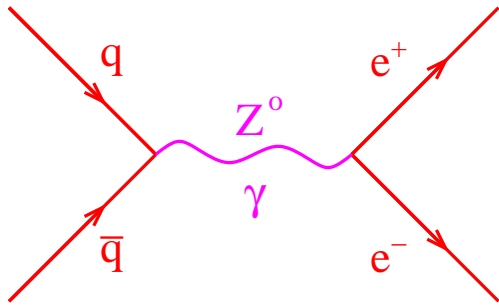
$$m_Z \sim 90 \text{ GeV}$$

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):

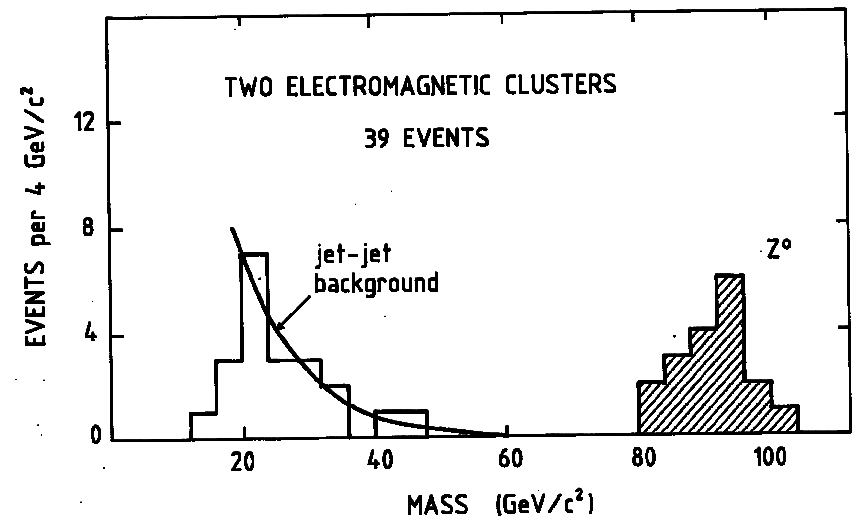
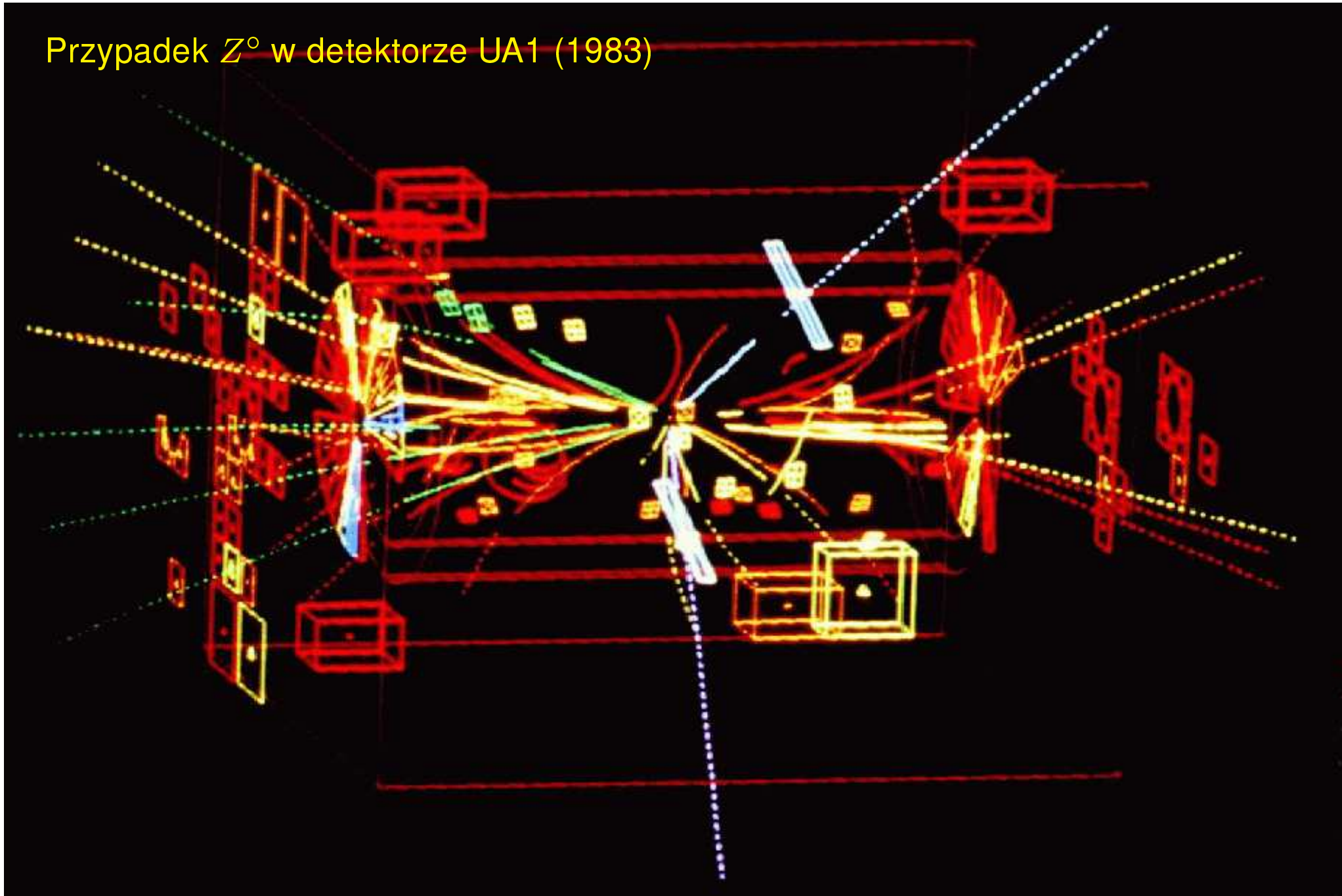


Fig. 1

# 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):

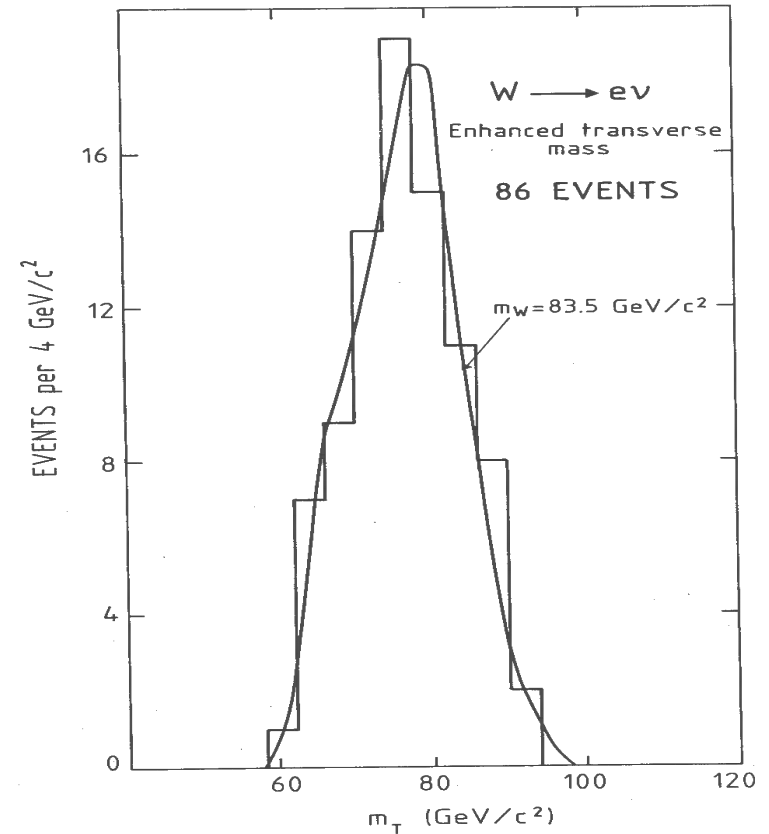
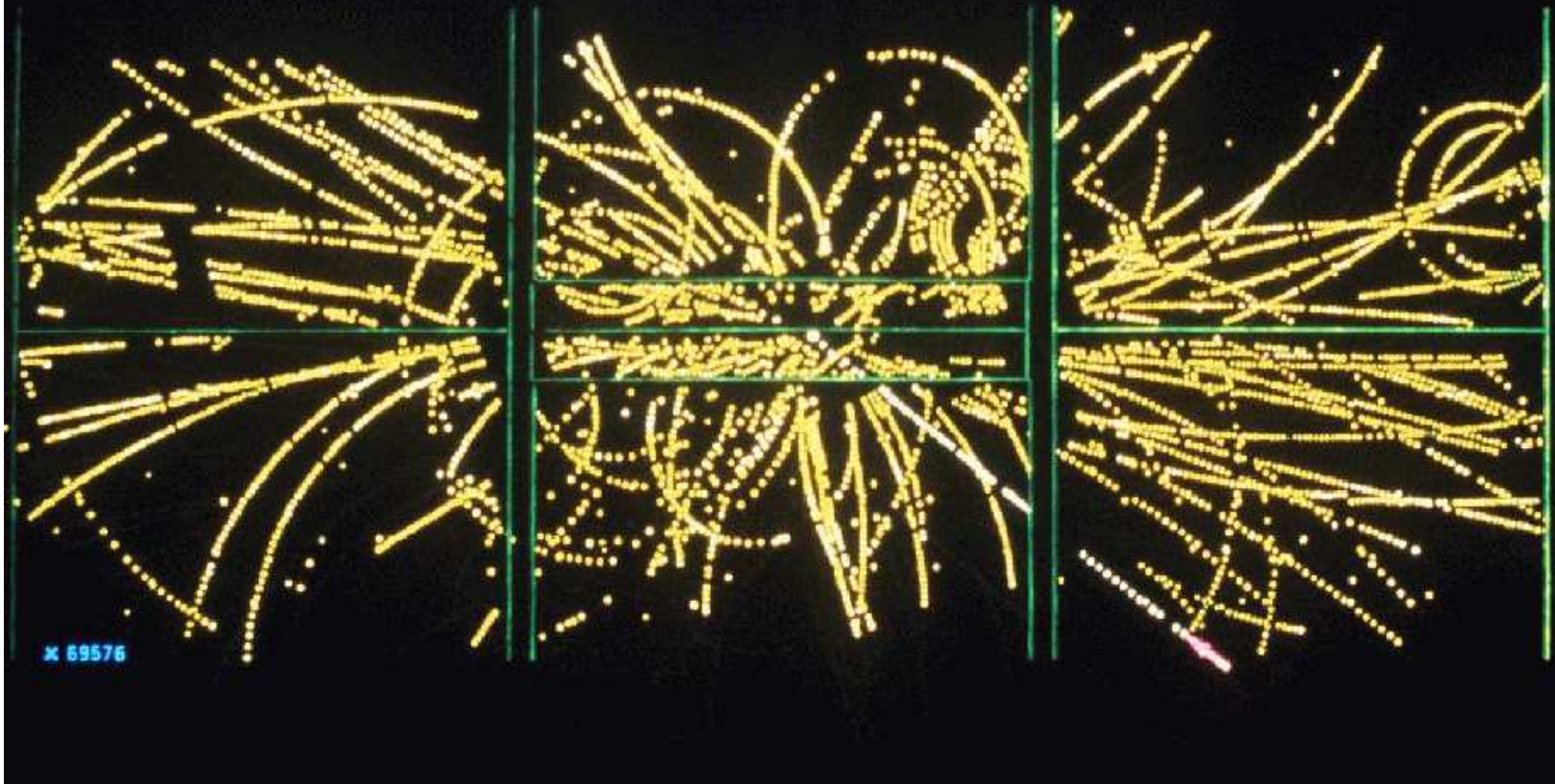


Fig. 3b



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





# LEP, CERN, Genewa

1989 - 2000: precyzyjne testy Modelu Standardowego





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

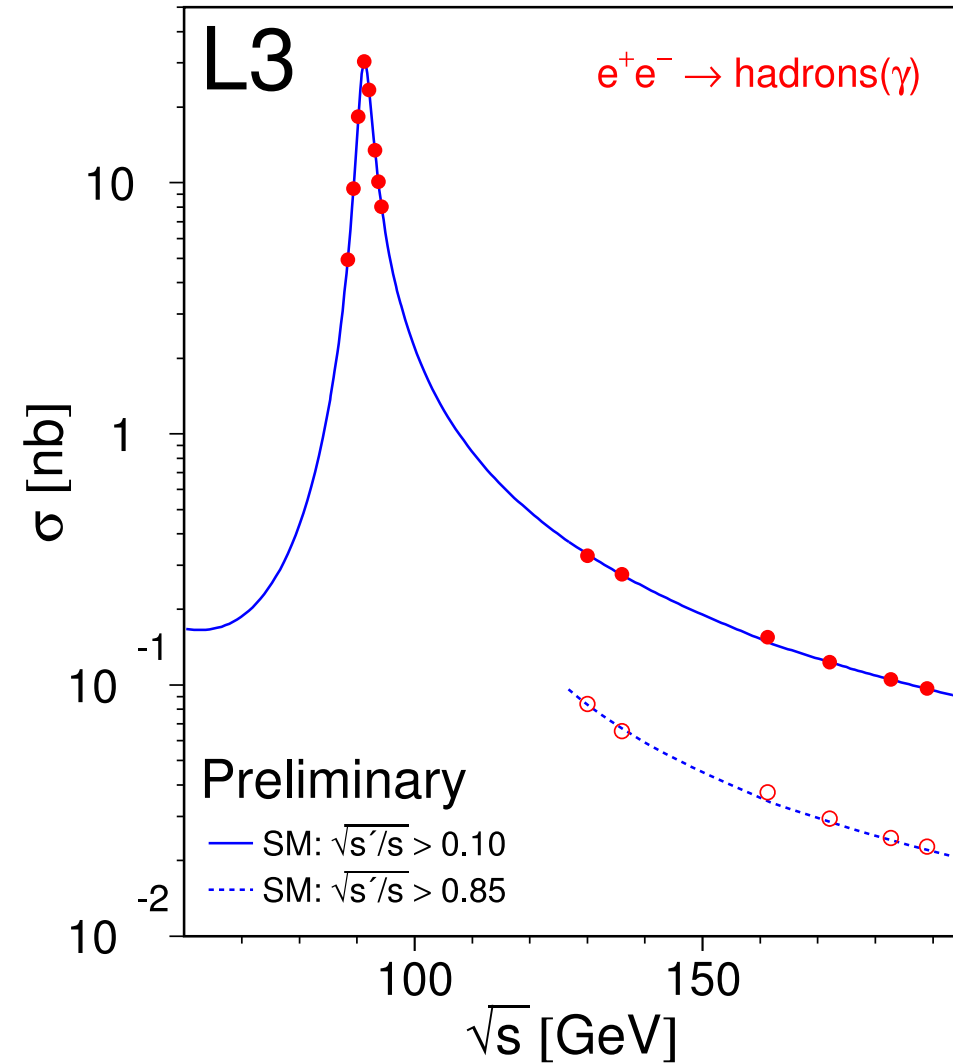
$$\underline{e^+e^- \rightarrow Z^0}$$

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  $Z^0$ .

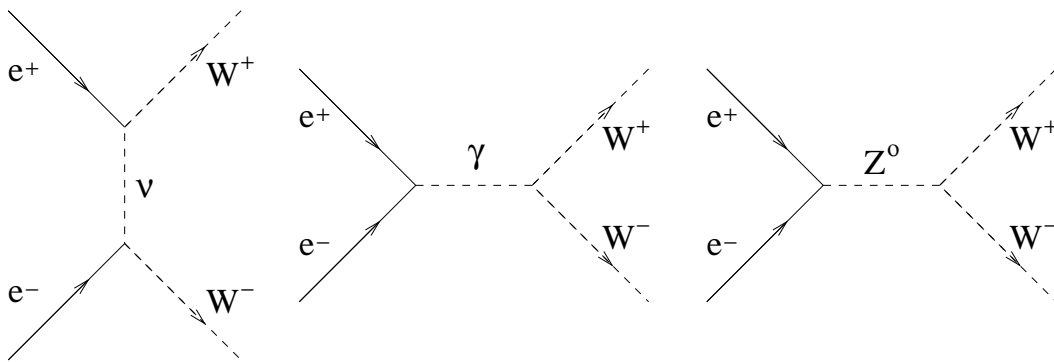
Ponieważ jest to cząstka niesłychanie krótkożyciowa, jej masa nie jest dokładnie określona...



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

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

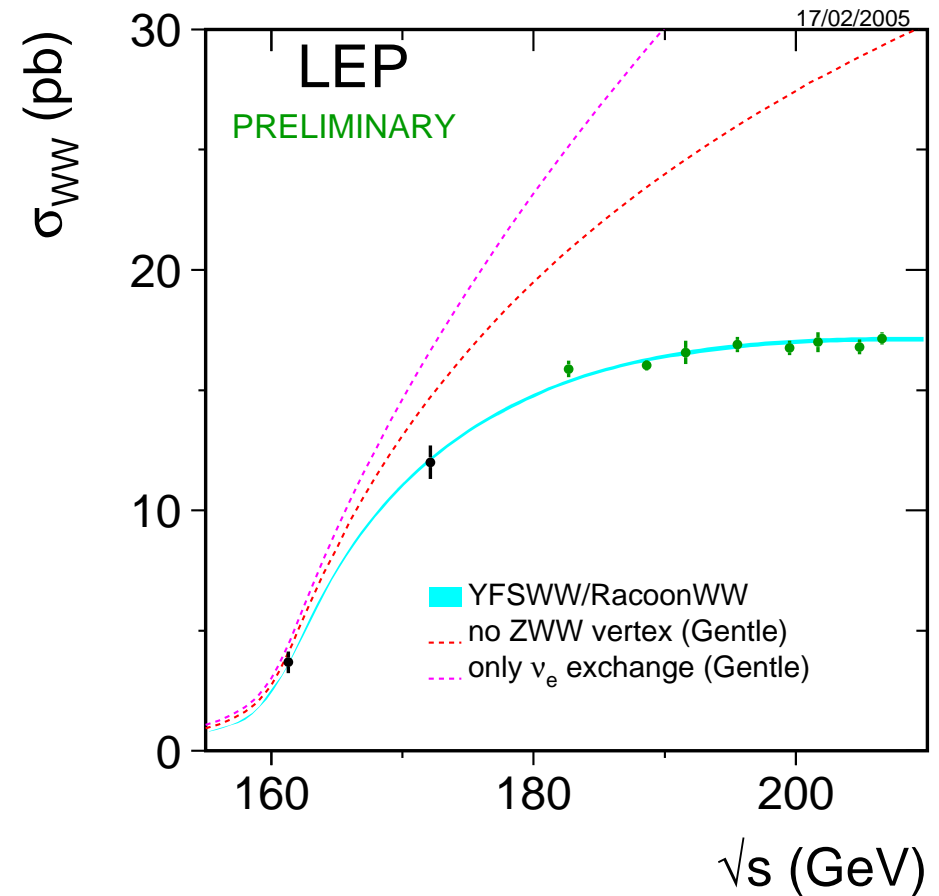
Produkcja bozonów  $W$  jedynie w parach,  
wkład od **trzech** różnych **procesów**:



**Sprzężenia** wynikają ze struktury **Modelu Standardowego**

$\Rightarrow$  **ściśle 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.  $\alpha_{em}$ ,  $G_F$ ,  $M_Z$  i dopasować ich wartości do danych.

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

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



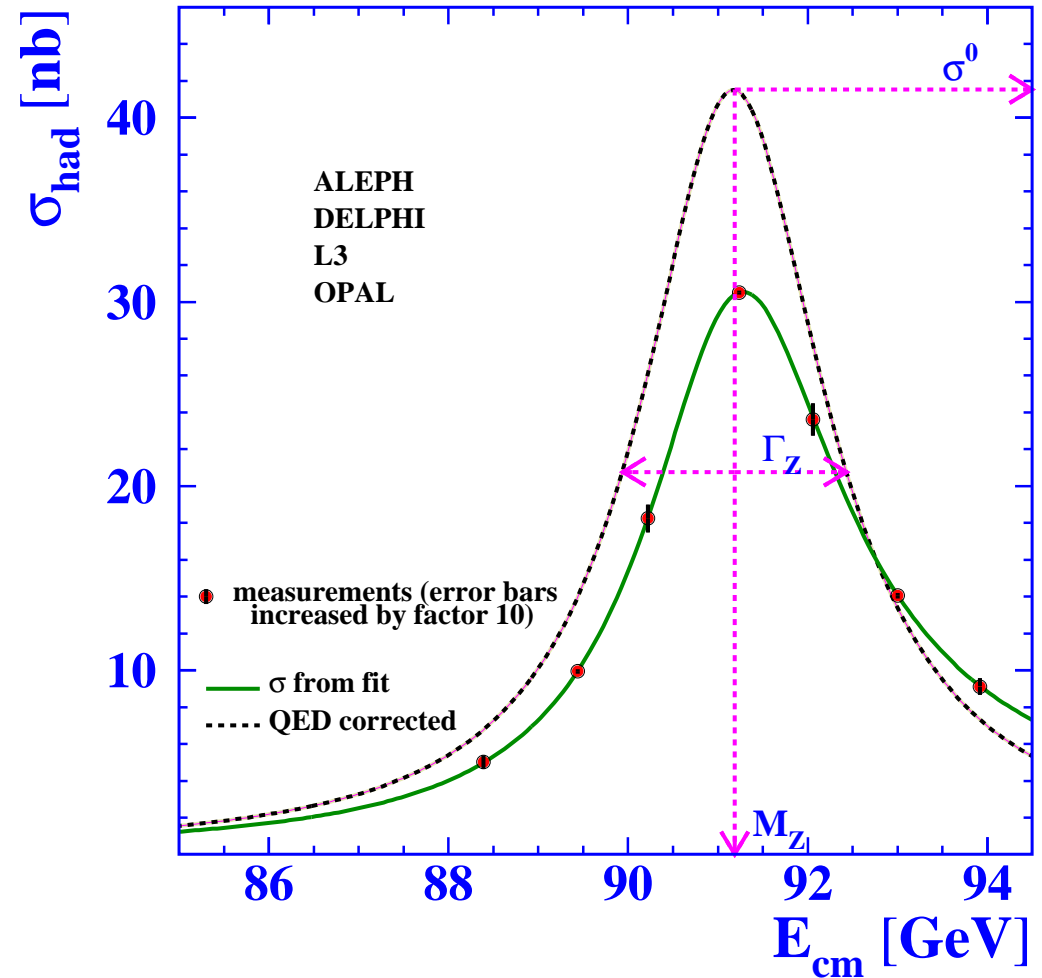
# Pomiary precyzyjne w LEP

## 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...

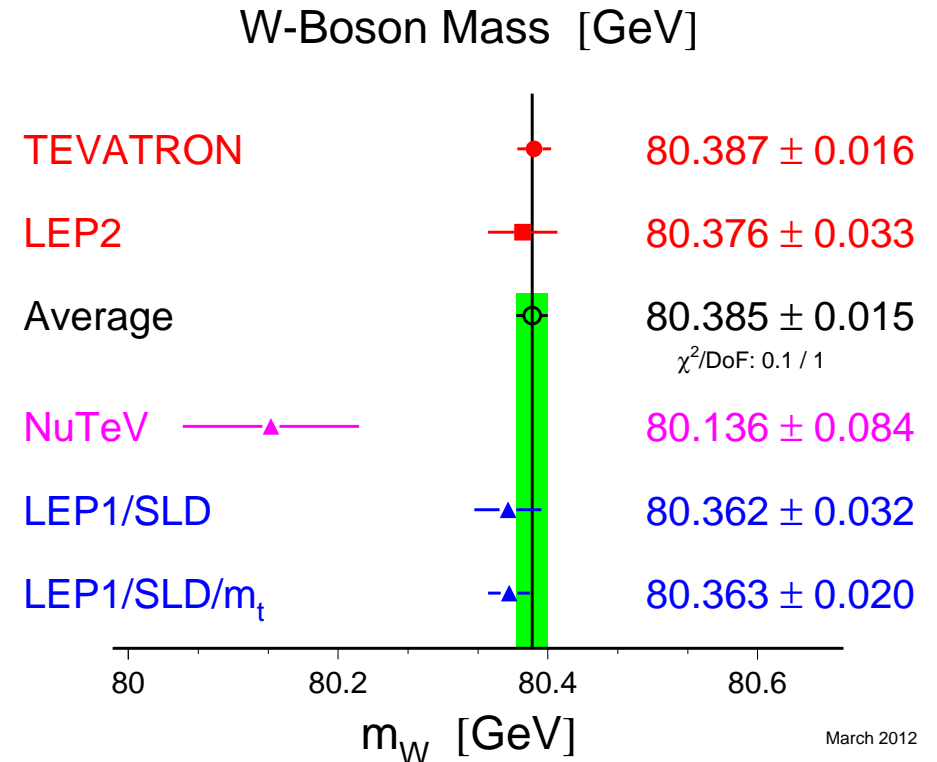
**Precyzyjne pomiary** w LEP i innych eksperymentach pozwalają **wnioskować** o **masach** tych cząstek, nawet jeśli ich bezpośrednio nie obserwujemy!



# 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.

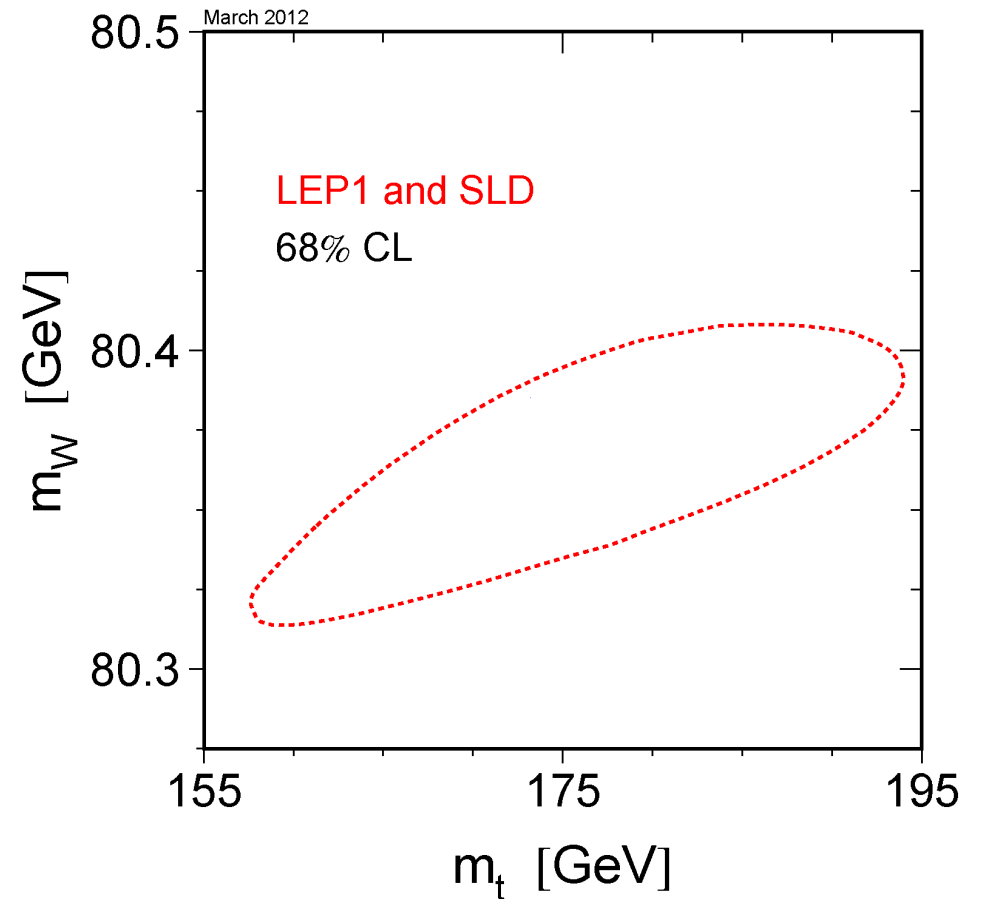
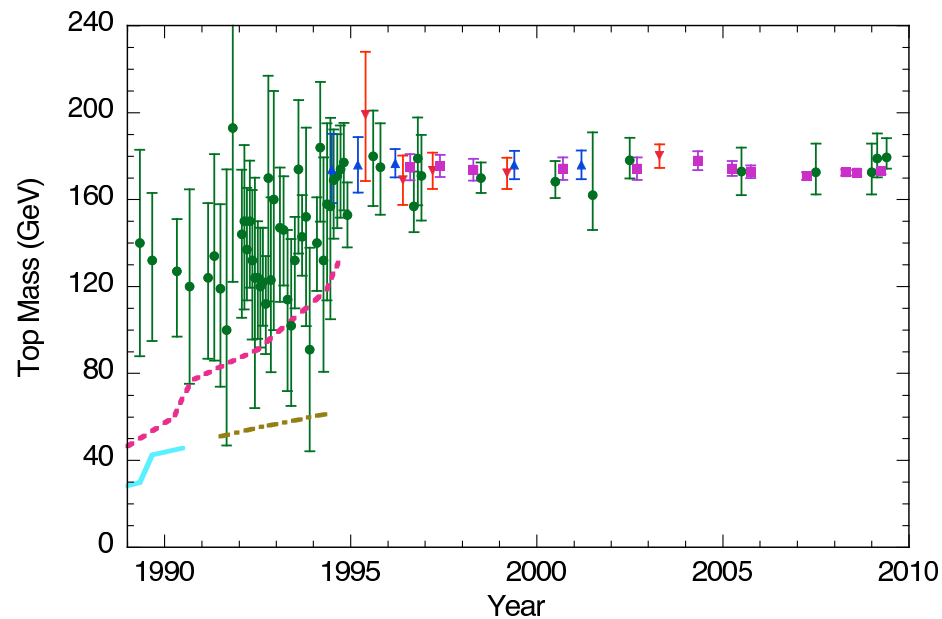


# Kwark $t$

## Przewidywania

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

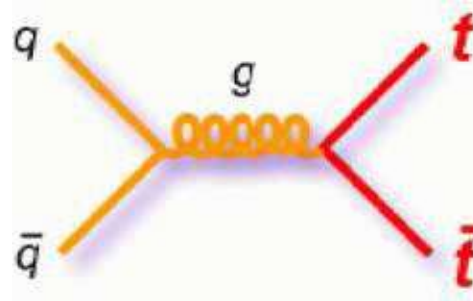
Dzisiejsze wyniki pośrednie:



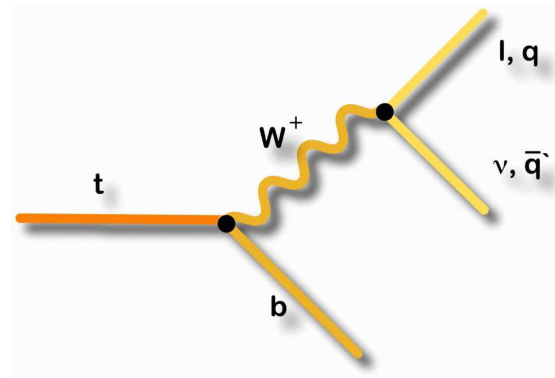
# Kwark $t$

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

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



Rozpada się prawie natychmiast (nie tworzy żadnych cząstek):

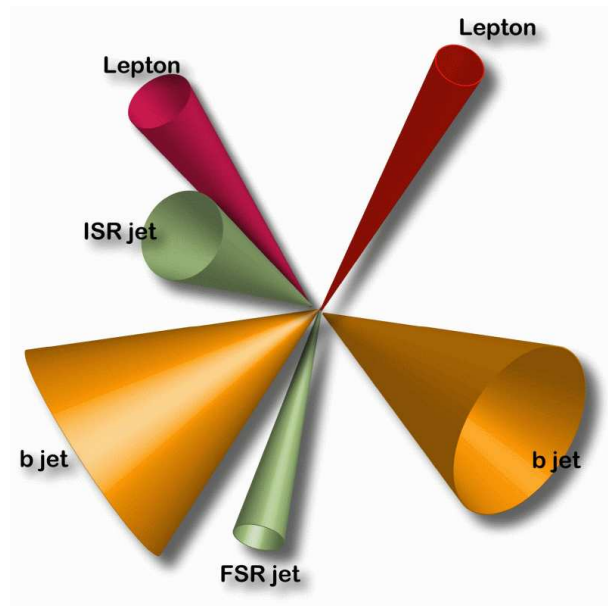


Obserwujemy powstający **kwark  $b$**  oraz **lepton** i **neutrino** (brakujący pęd poprzeczny) lub **parę jetów** o masie niezmienniczej odpowiadającej masie  $W$

# Kwark $t$

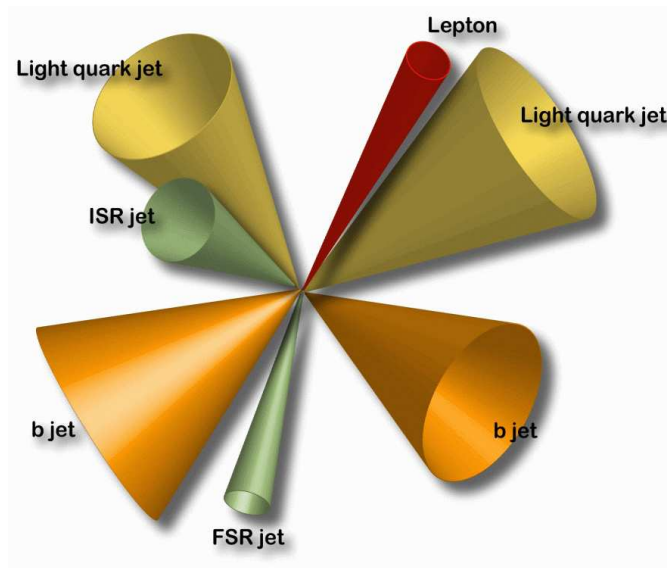
## Tevatron

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



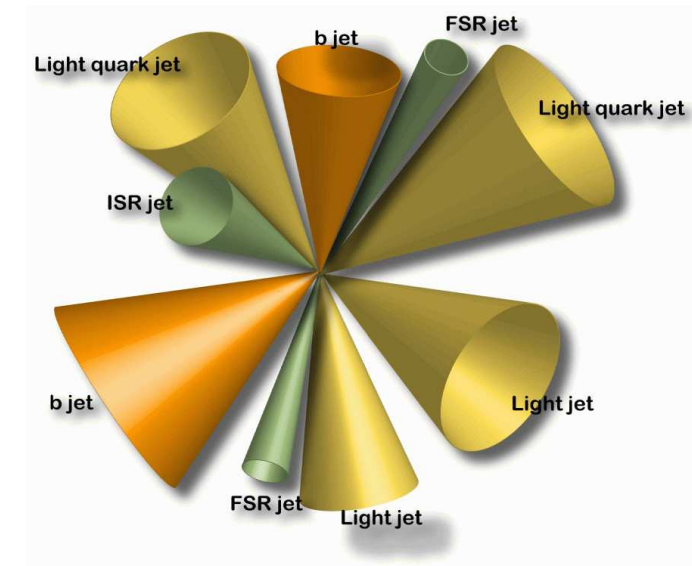
“złota próbka” ale tylko  
 $\sim 4\%$  przypadków  
( $e^+e^-$ ,  $\mu^+\mu^-$  i  $e^\pm\mu^\pm$ )

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

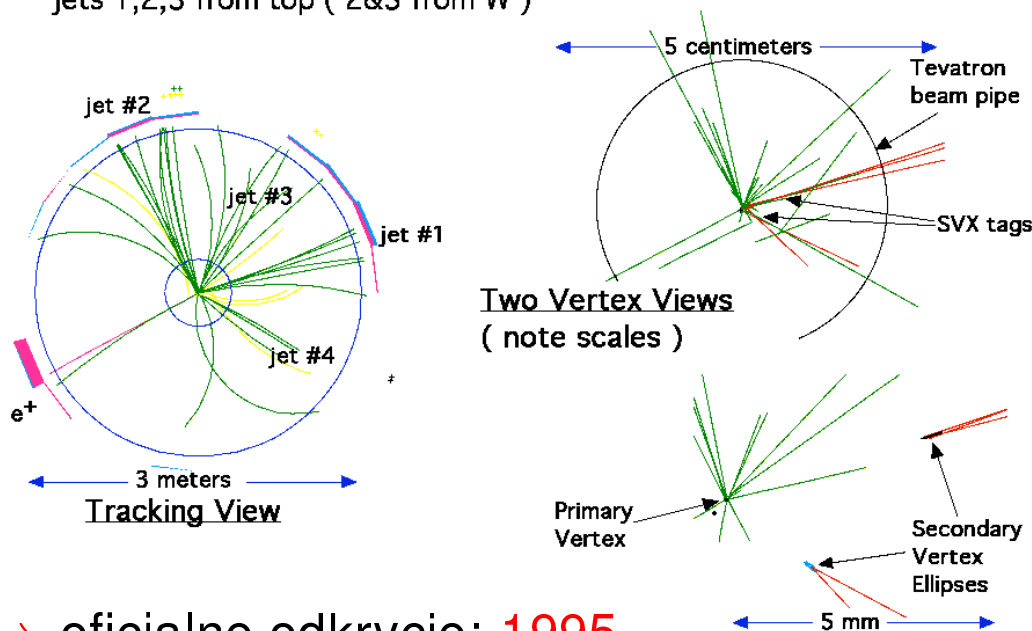
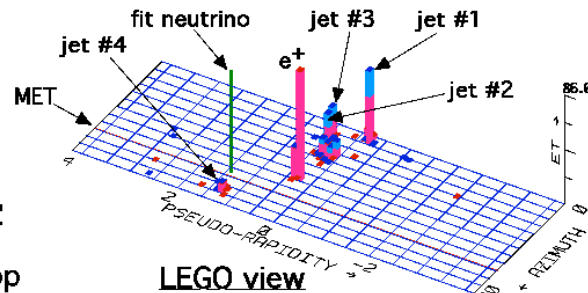
$e^+ + 4 \text{ jet event}$

40758\_44414  
24-September, 1992

TWO jets tagged by SVX

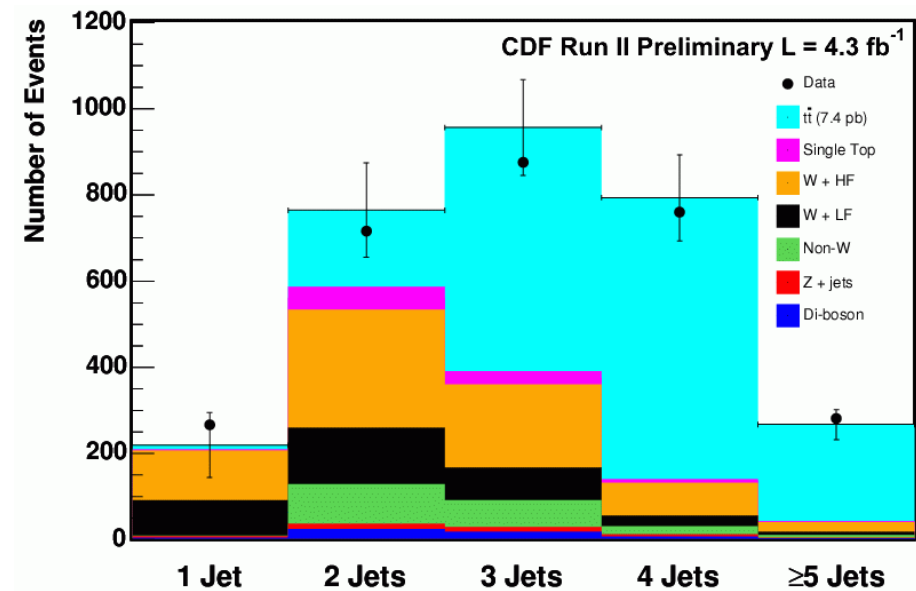
fit top mass is  $175 \pm 10 \text{ GeV}/c^2$

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



⇒ oficjalne odkrycie: 1995

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



Wybieramy lepton i  $\geq 3$  jety

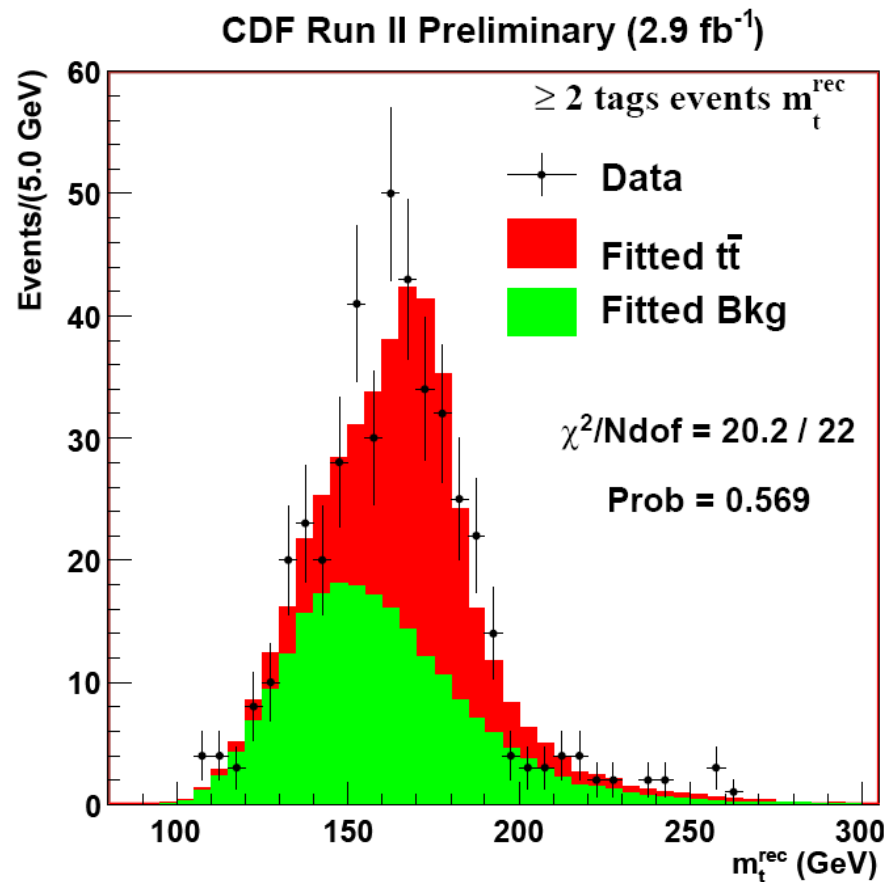
⇒ głównie przypadki  $t\bar{t}$

Zebrano tysiące przypadków...

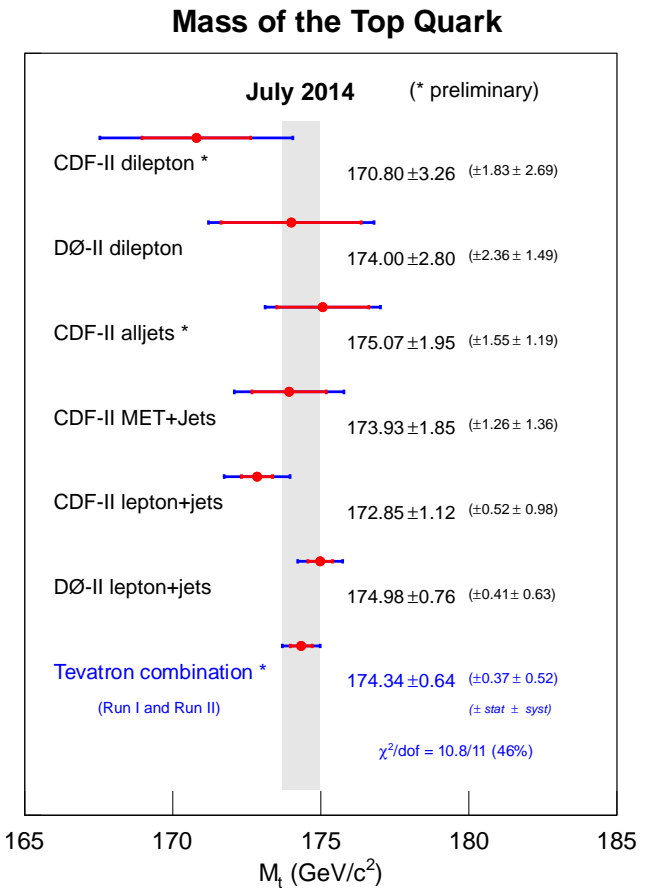
# Kwark $t$

## Tevatron

Rozkład rekonstruowanej masy kwarku  $t$   
w jednym z rozważanych kanałów



Porównanie wyników dla różnych próbek

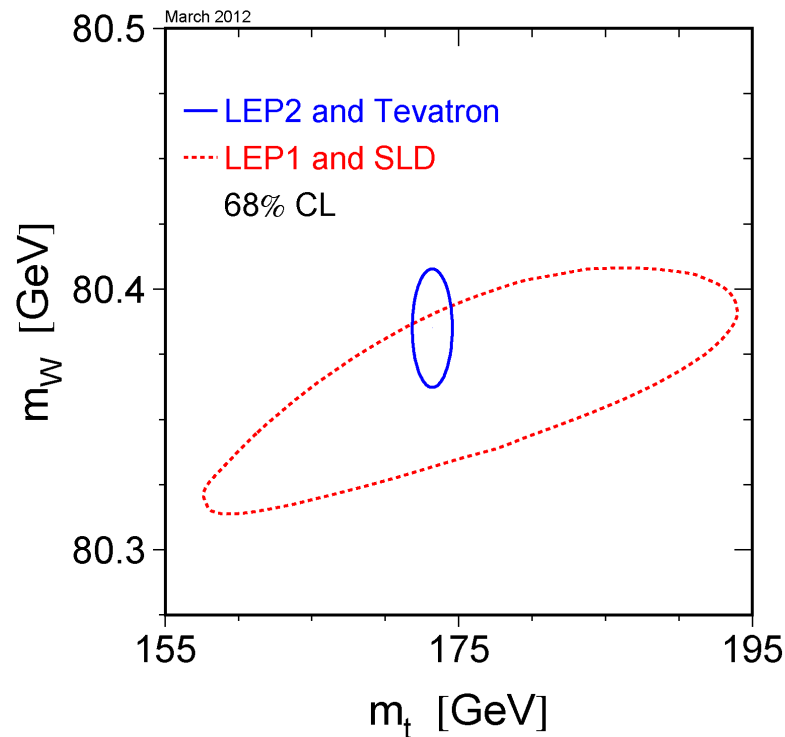


CDF + D0:  $m_t = 174.34 \pm 0.64 \text{ GeV}$

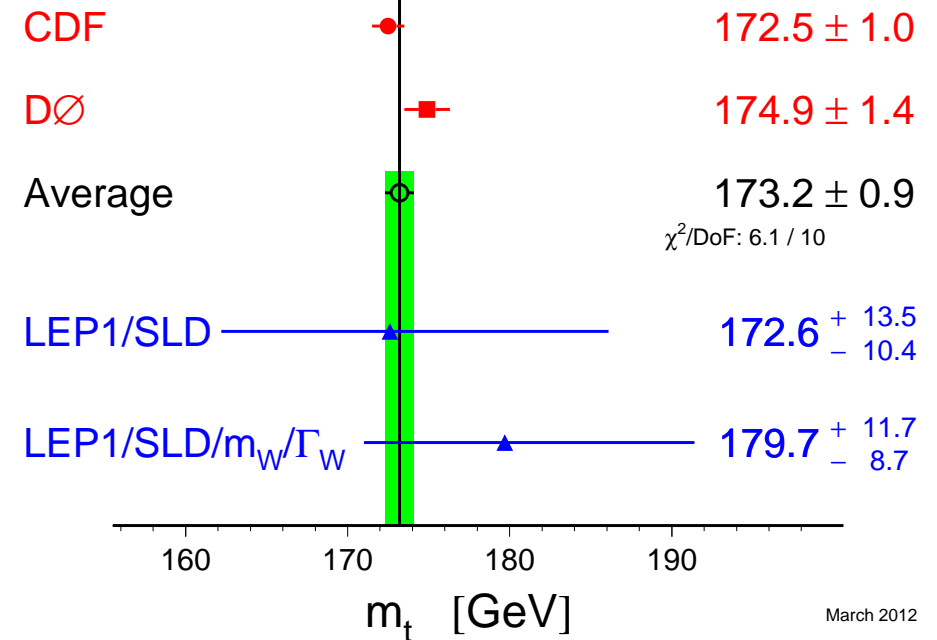
# Kwark $t$

## Porównanie

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



## Top-Quark Mass [GeV]



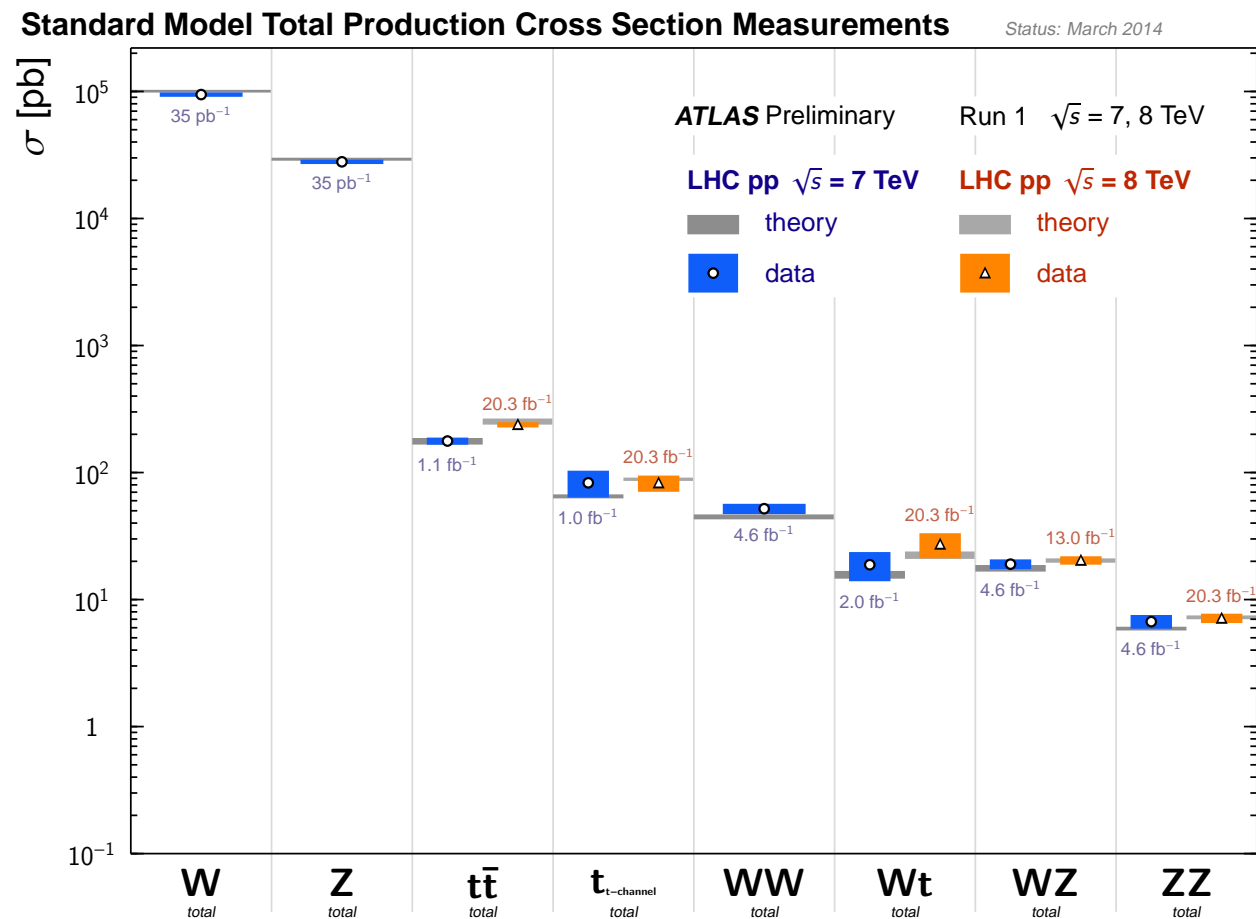
Pomiar bezpośredni zgodny w granicach błędów z przewidywaniami teorii opartymi na precyzyjnych pomiarach przy niższych energiach.



# Kwark $t$

## Eksperymenty przy LHC

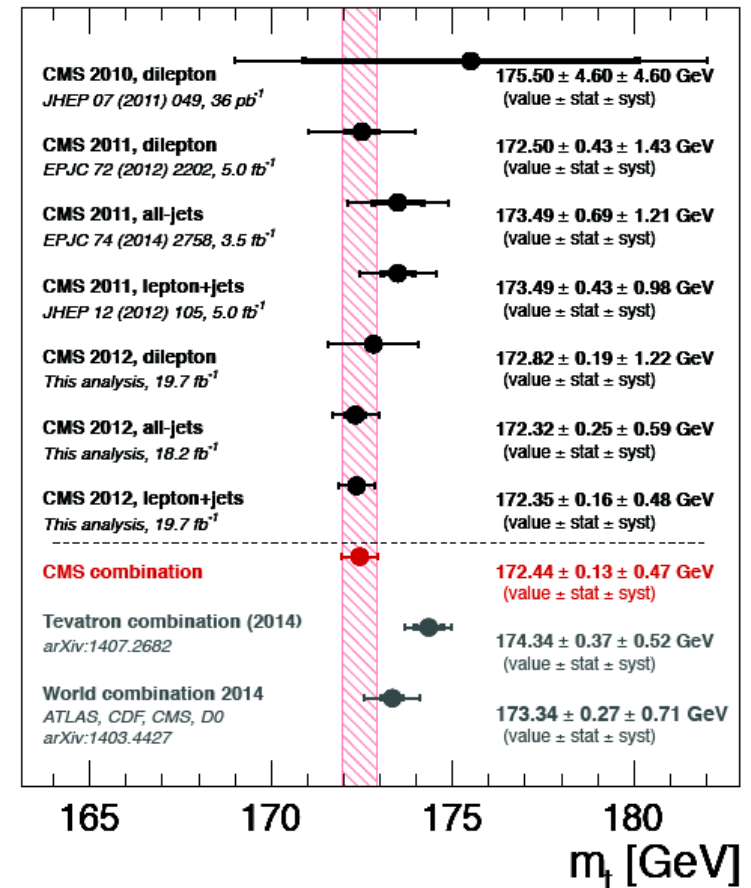
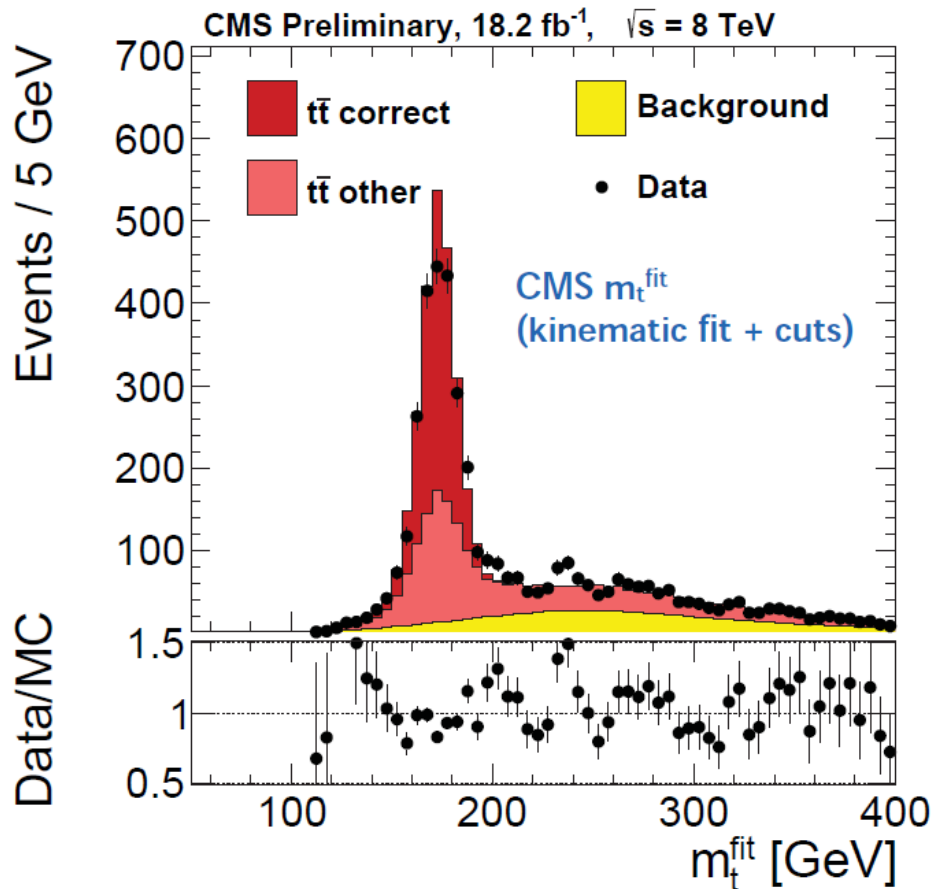
Bardzo szczegółowo badają procesy z produkcją bozonów  $W^\pm$  i  $Z^0$ , oraz kwarku  $t$ .  
Wszystkie dotychczasowe pomiary w znakomitej zgodności z SM. **Run 1:**



# 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 w okresie 2009-2012 (Run 1) liczba przypadków większa niż w Tevatronie...

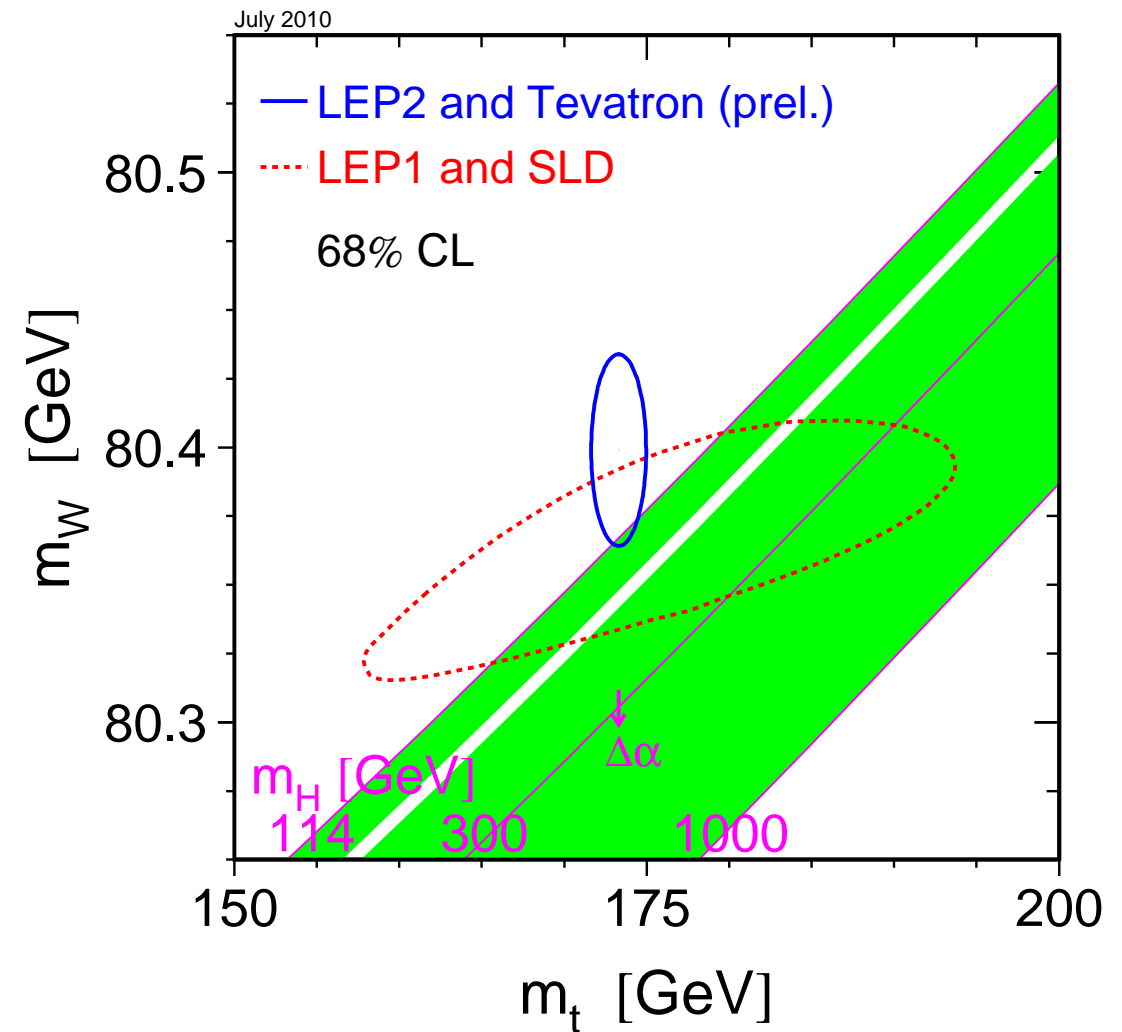
# Pomiary precyzyjne w LEP

## 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:

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

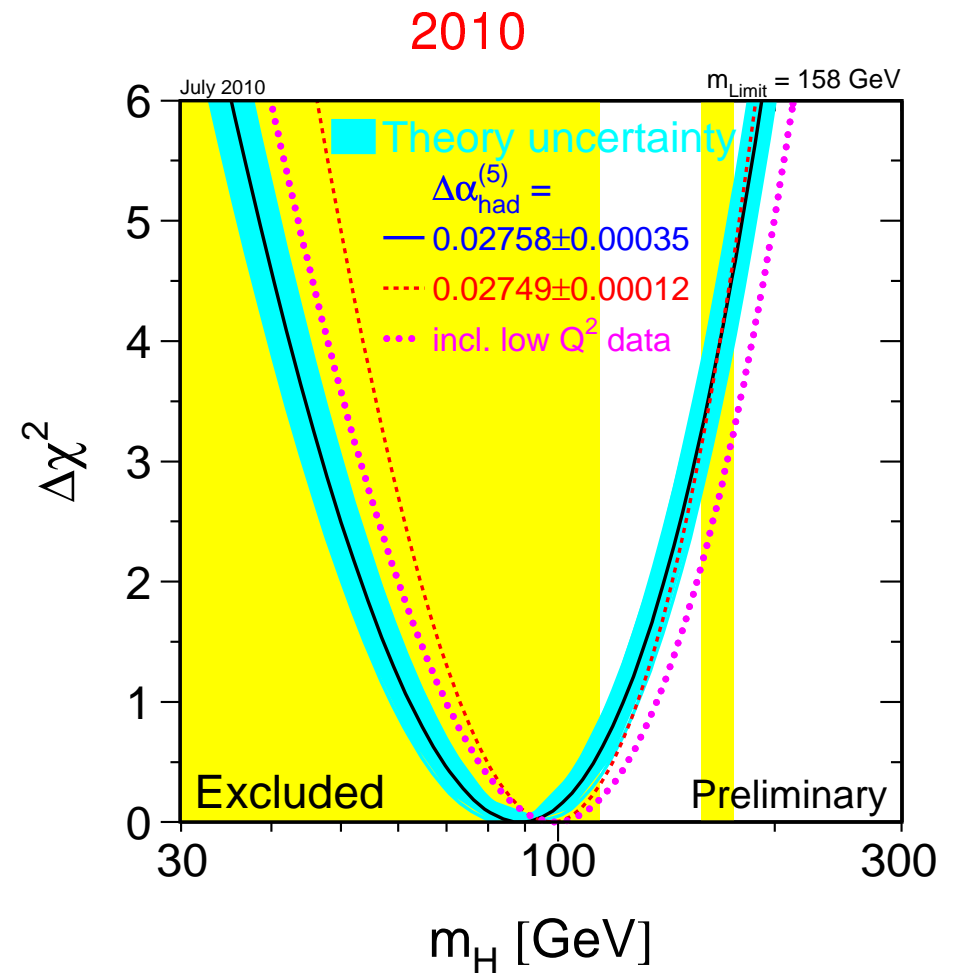
lub:  $m_h < 158 \text{ GeV}$  (95% CL)

Z bezpośrednich poszukiwań:

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

wszystkie dane LEP:

ALEPH + DELPHI + L3 + OPAL





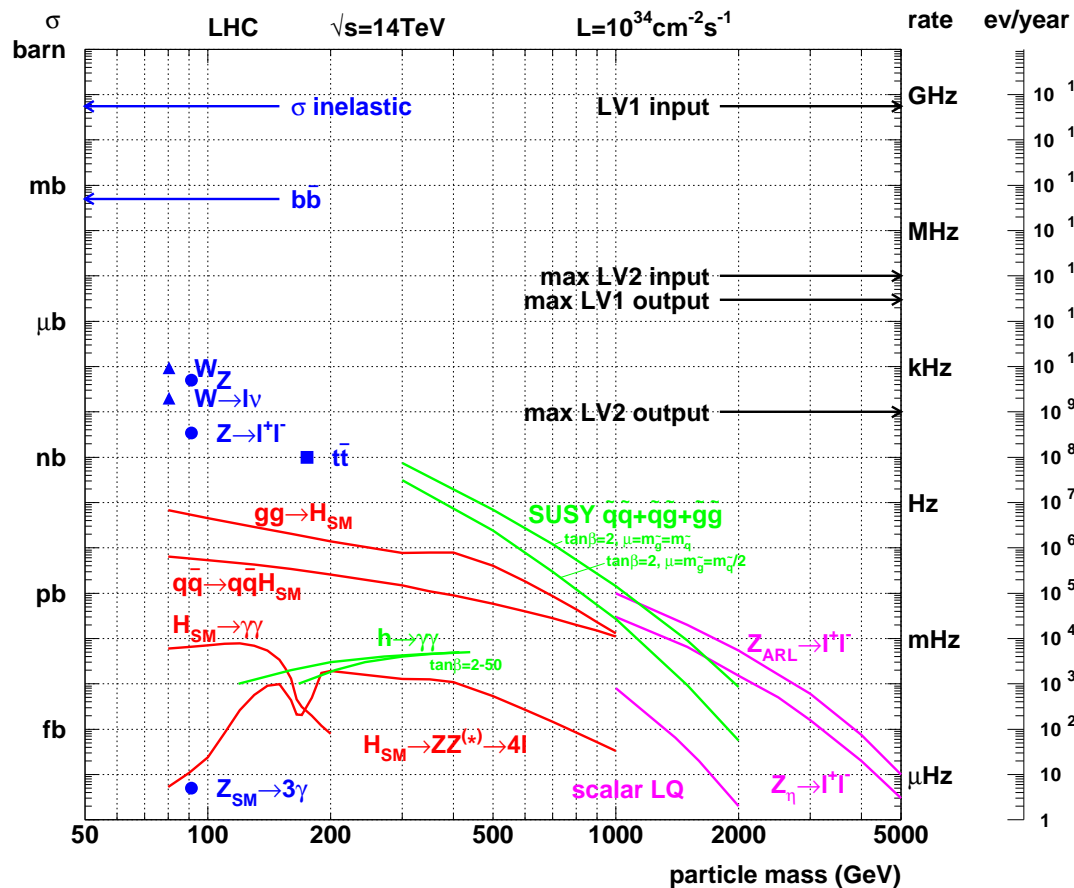
**LHC, CERN, Genewa**  
**Uruchomiony na jesieni 2009**





# 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  $b\bar{b}$ .

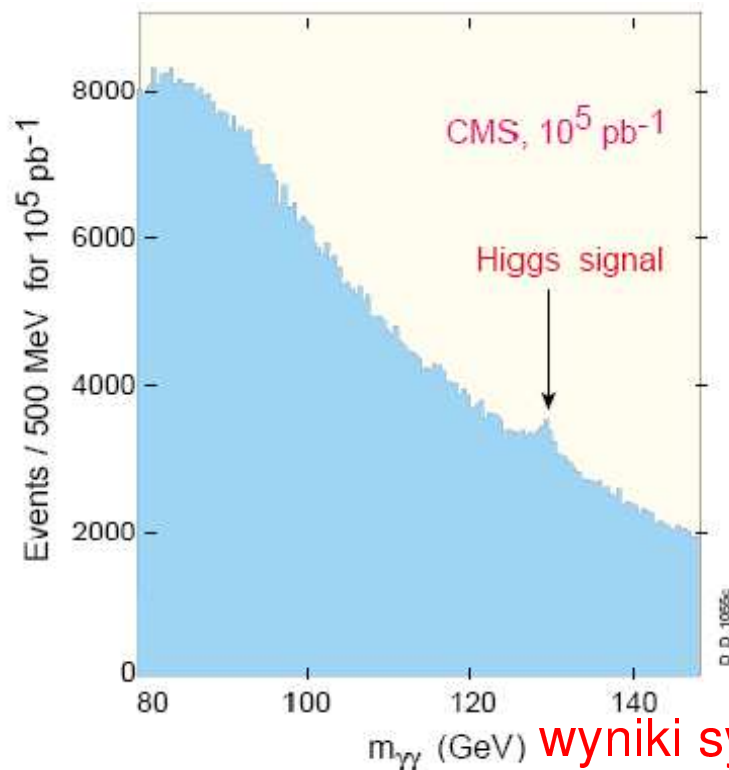
Musimy szukać kanałów o niskim tle...

# Higgs w LHC

Dla małych mas najlepszy kanał to

$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

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

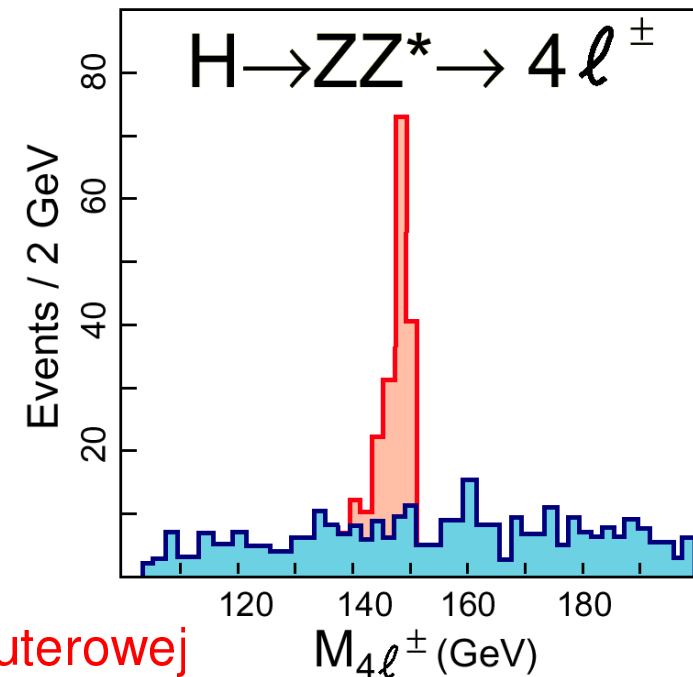


Dla dużych mas najlepszy jest kanał:

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

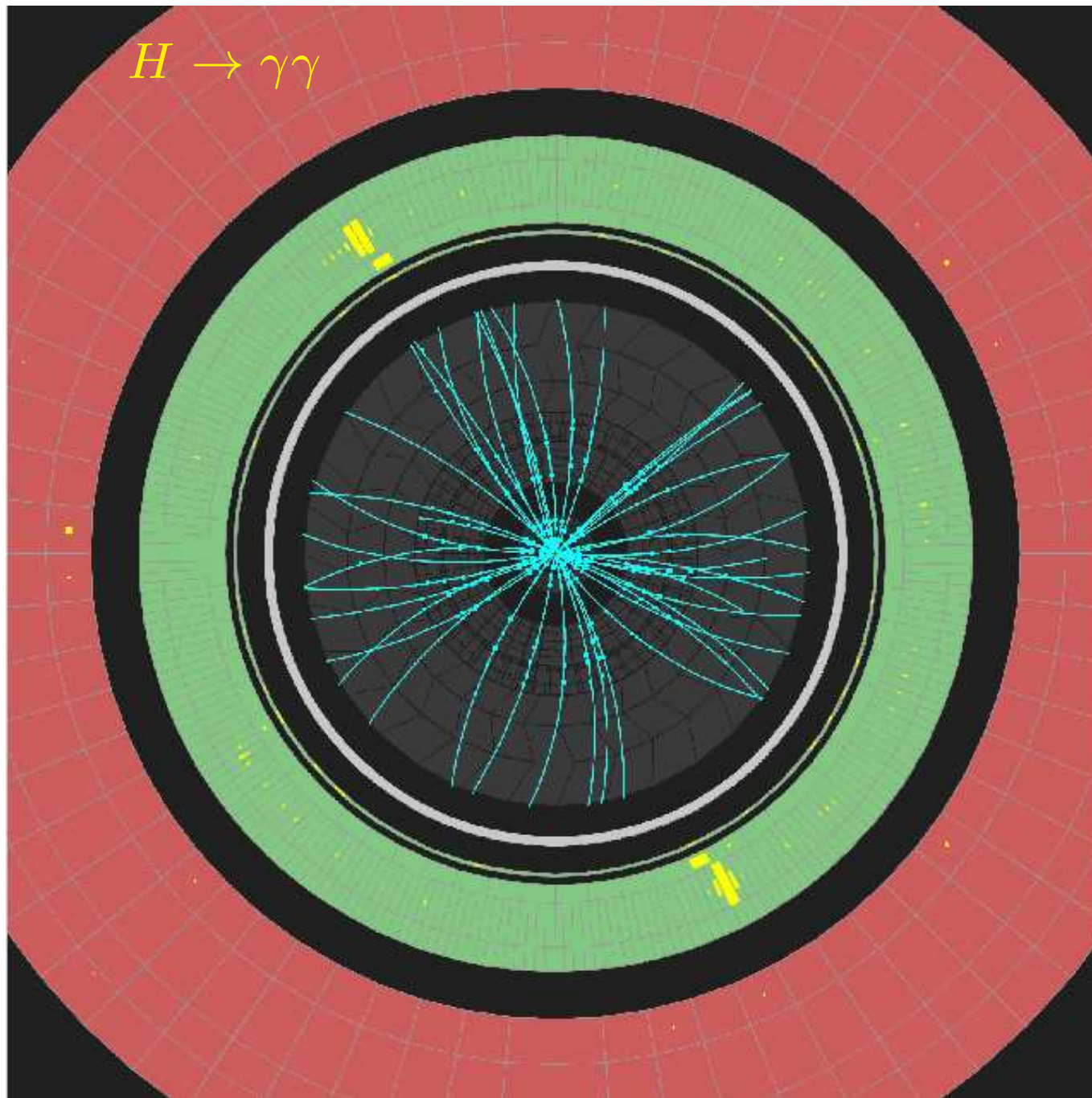
gdyż naładowane leptony ( $e^\pm$  i  $\mu^\pm$ ) można **łatwo zidentyfikować**.

Ale jest mało przypadków...



wyniki symulacji komputerowej

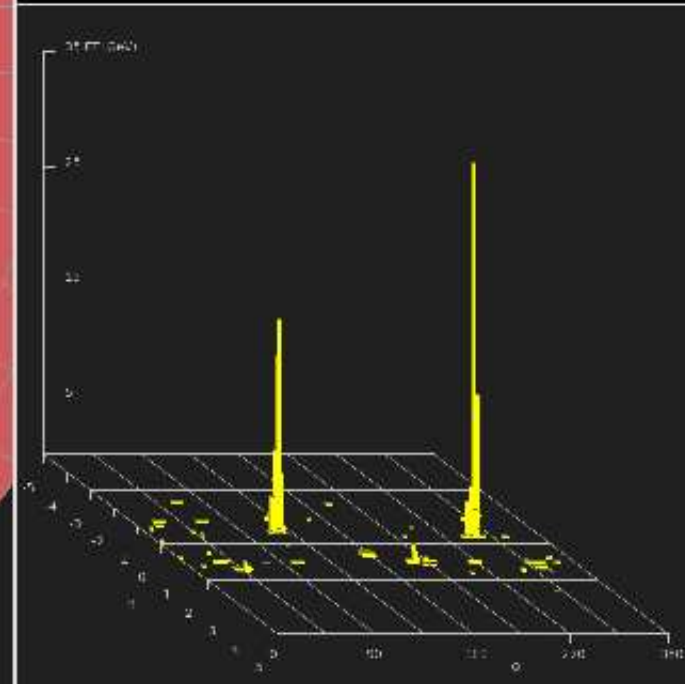
$H \rightarrow \gamma\gamma$



**ATLAS**  
**EXPERIMENT**

Run Number: 191426, Event Number: 86694500

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



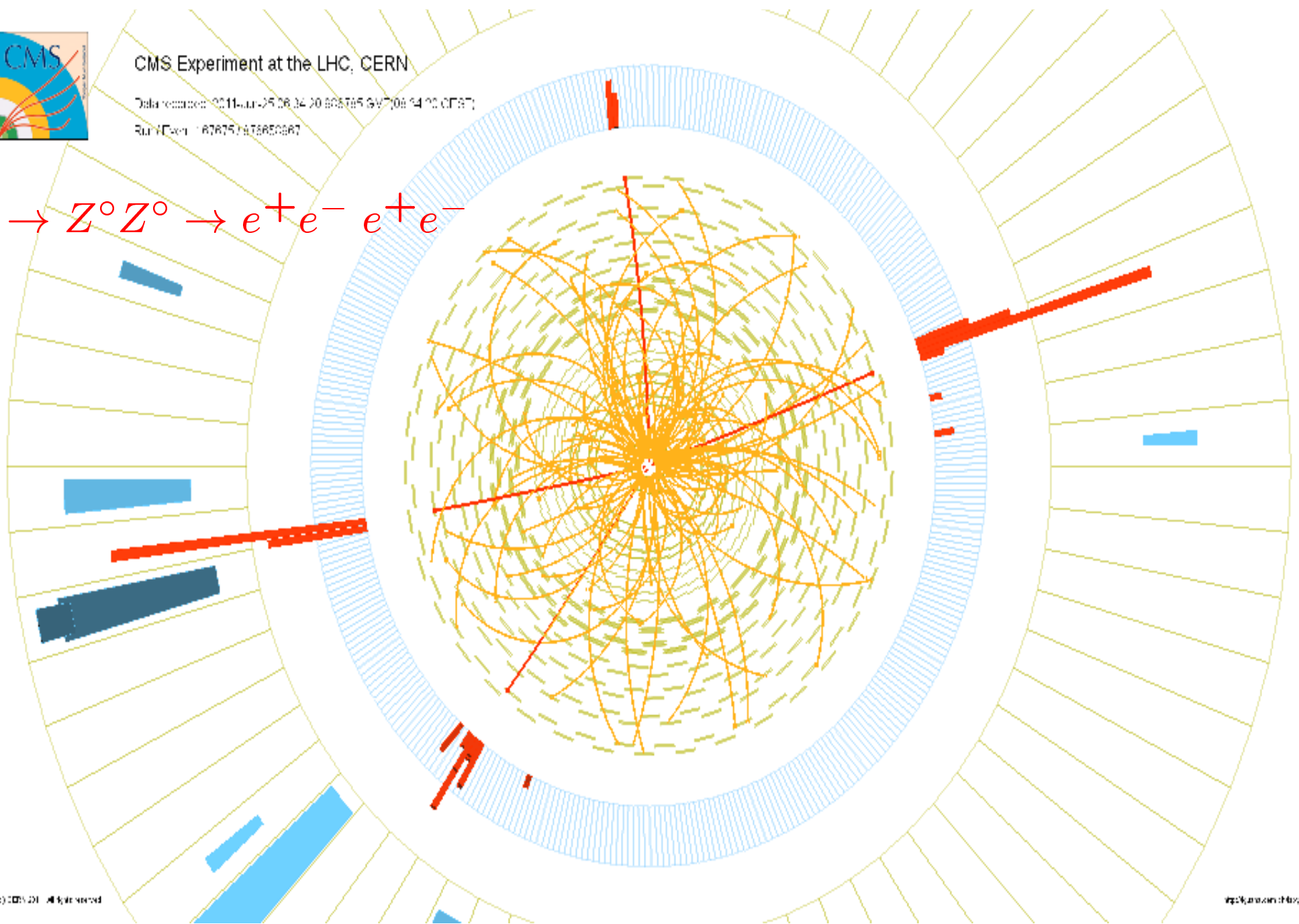


CMS Experiment at the LHC, CERN

Data recorded: 2011-Jul-25 08:34:20.605765.647708.14.00.CF371

Run/Evt: 167875/1916850967

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



# Pomiary precyzyjne w LEP

## Masa higgosa

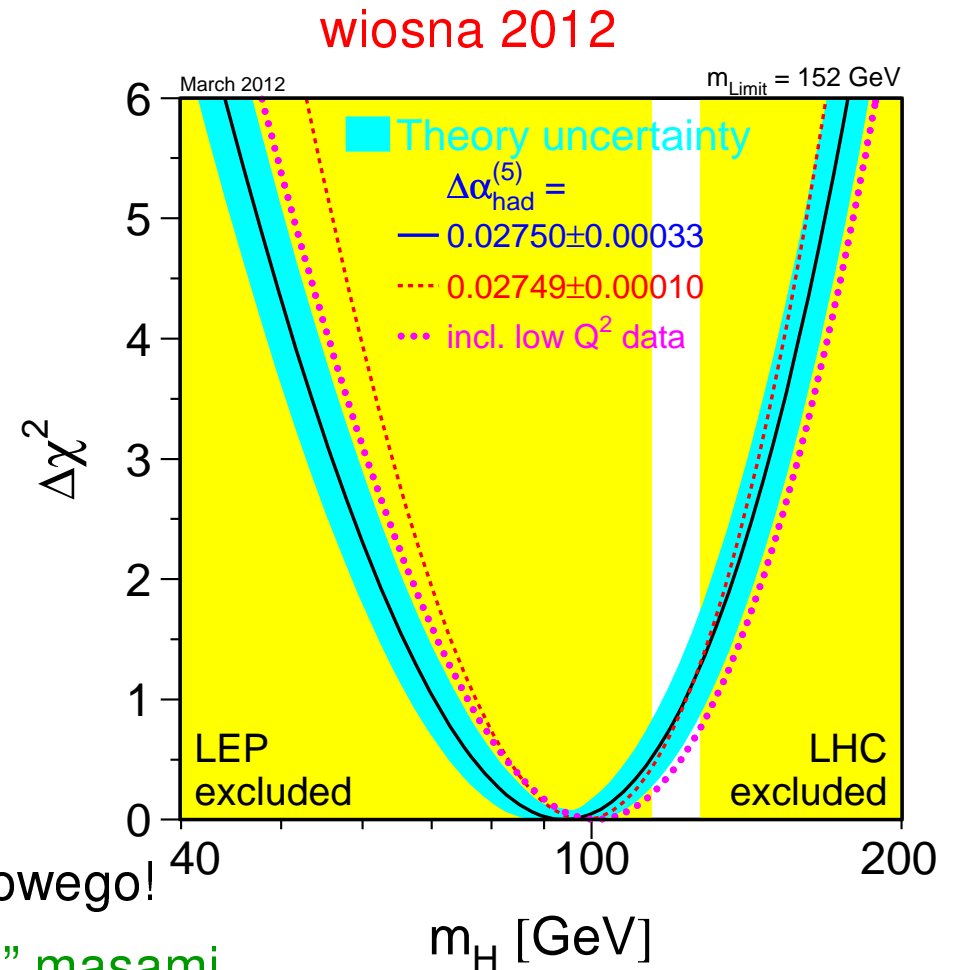
Analiza **wszystkich** dostępnych **danych** z LEP, Tevatron oraz pierwszych wyników z LHC (!).

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...



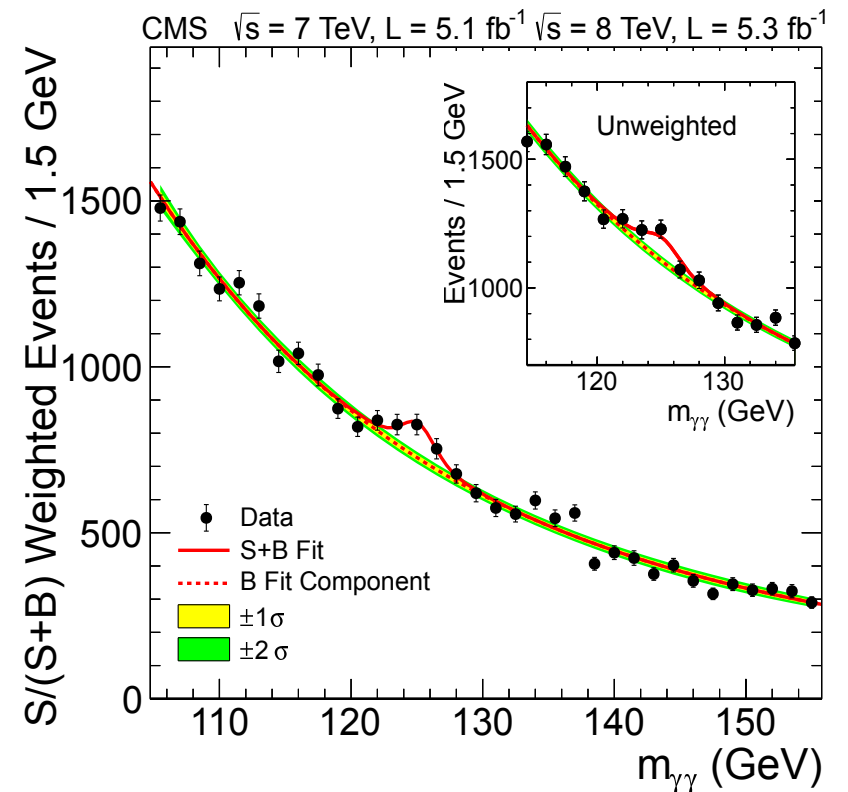
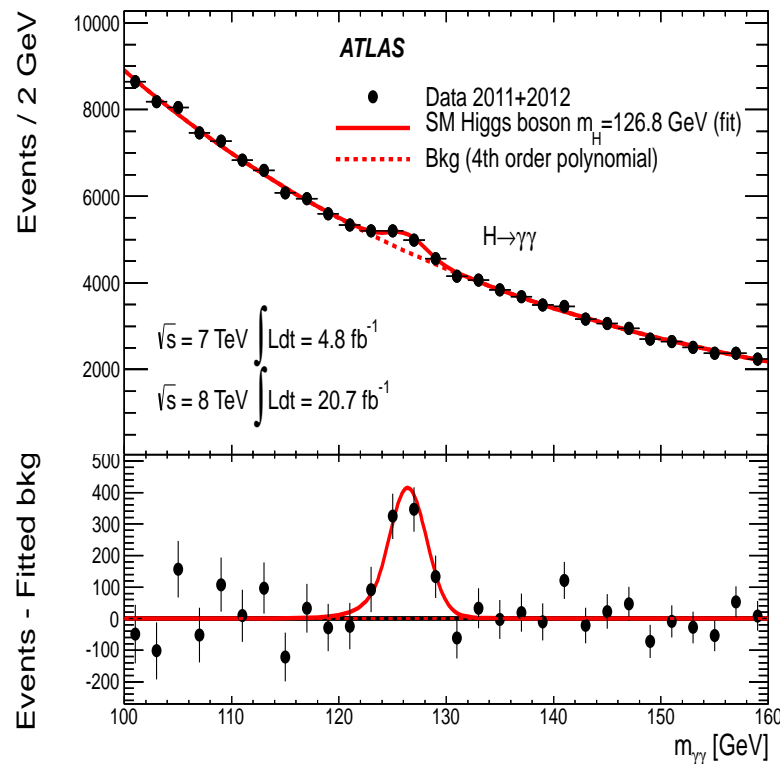


# Higgs w LHC

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

Sygnał widoczny ponad wszelką wątpliwość

$H \rightarrow \gamma\gamma$

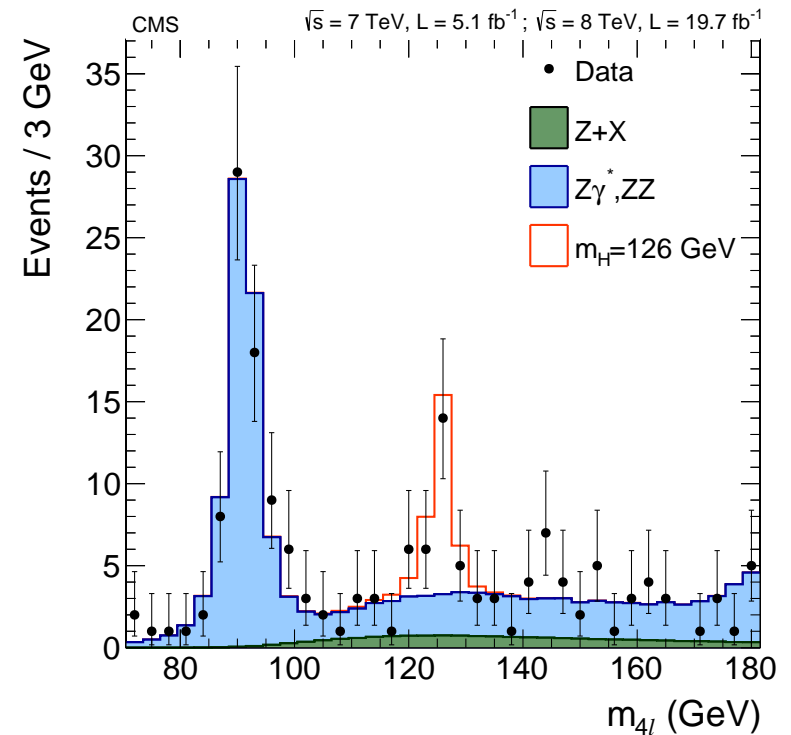
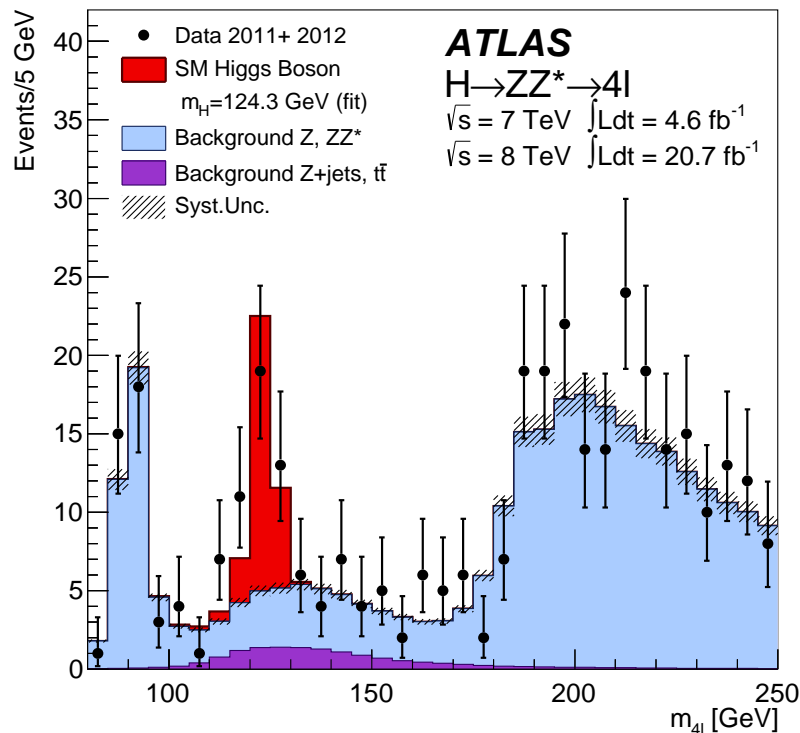


# Higgs w LHC

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

Sygnał widoczny ponad wszelką wątpliwość

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

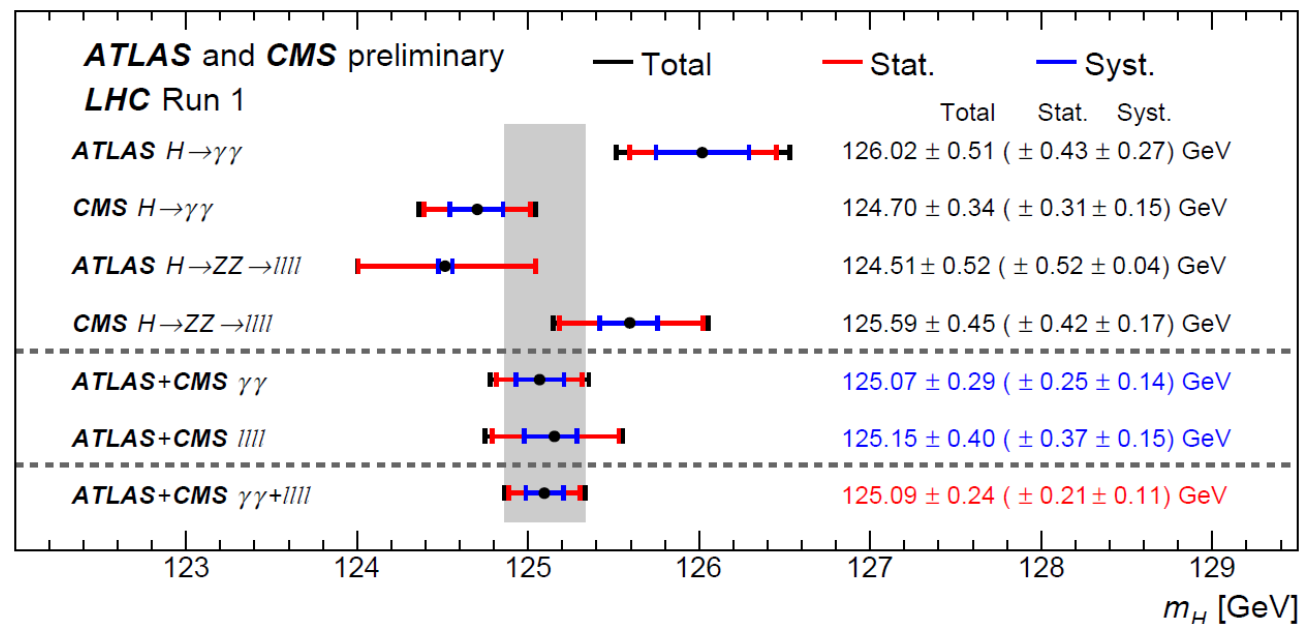


# Higgs w LHC

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):

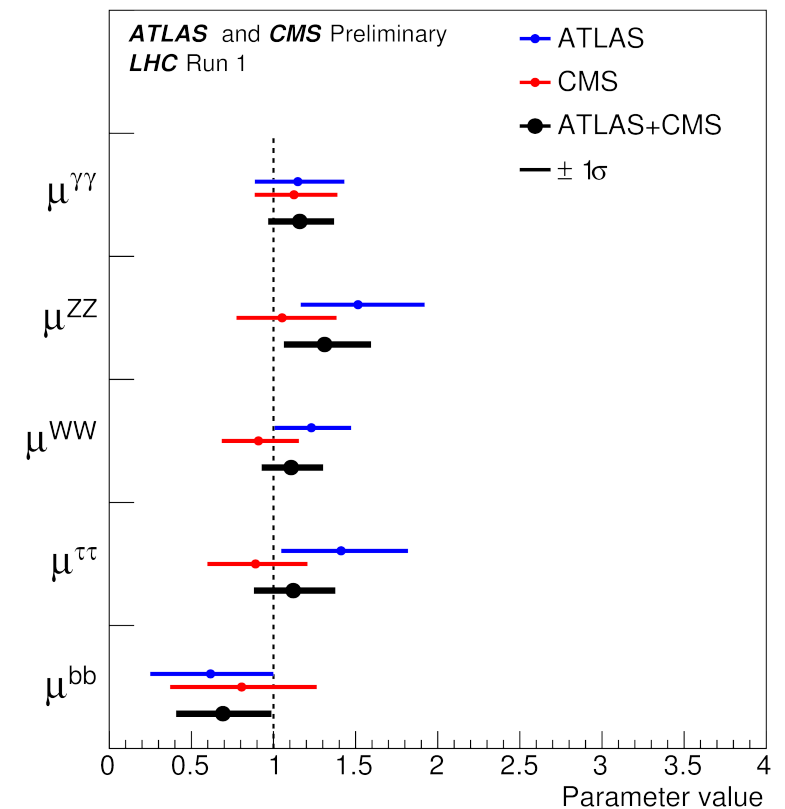
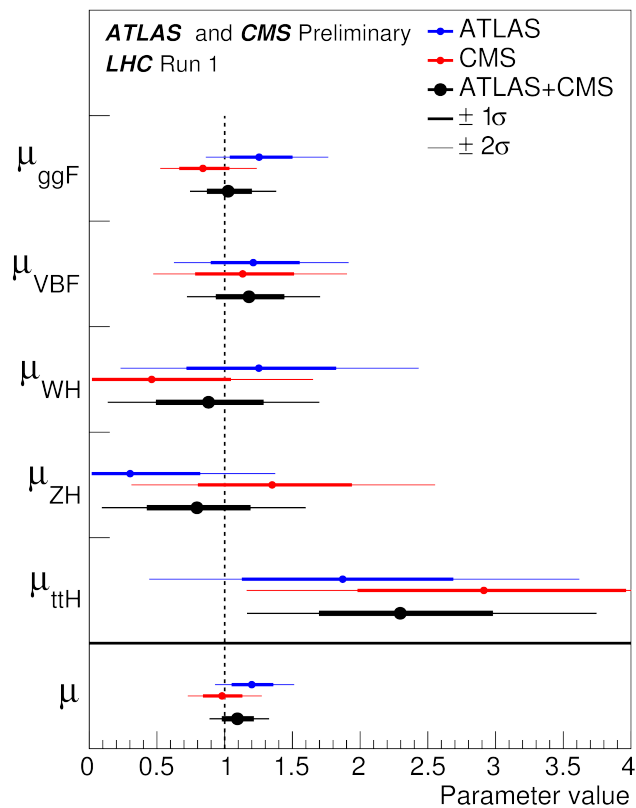
$$M_H = 125.09 \pm 0.24 \text{ GeV}$$



# 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

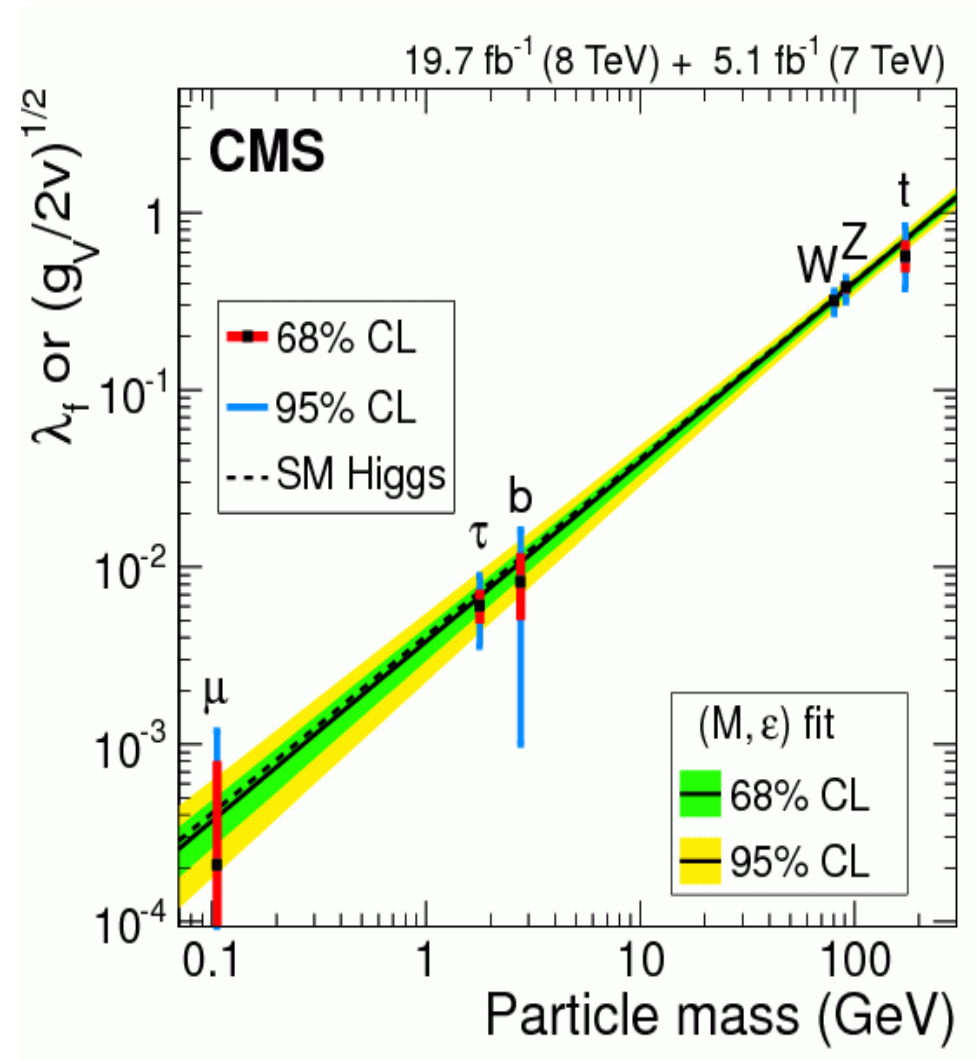
## Sprężenia bozonu Higgsa

Możliwa staje się weryfikacja podstawowego przewidywania modelu:

sprężenie bozonu Higgsa do cząstek jest proporcjonalne do ich masy

Błędy są wciąż bardzo duże!

Większa precyzja będzie osiągnięta po zebraniu dużej próbki danych przy energii  $\sqrt{s}=13-14$  TeV (Run 2 2015-2018).





## Plany dla LHC

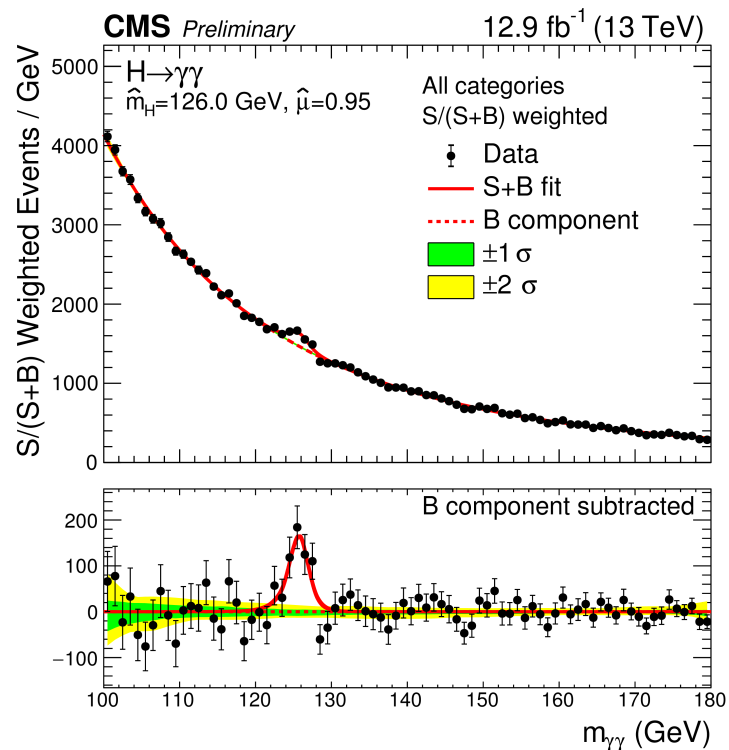
Projekt badań przy LHC jest rozpisany na wiele lat:

- 1984: pierwszy projekt akceleratora LHC
- 1989: uruchomienie LEP
- 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

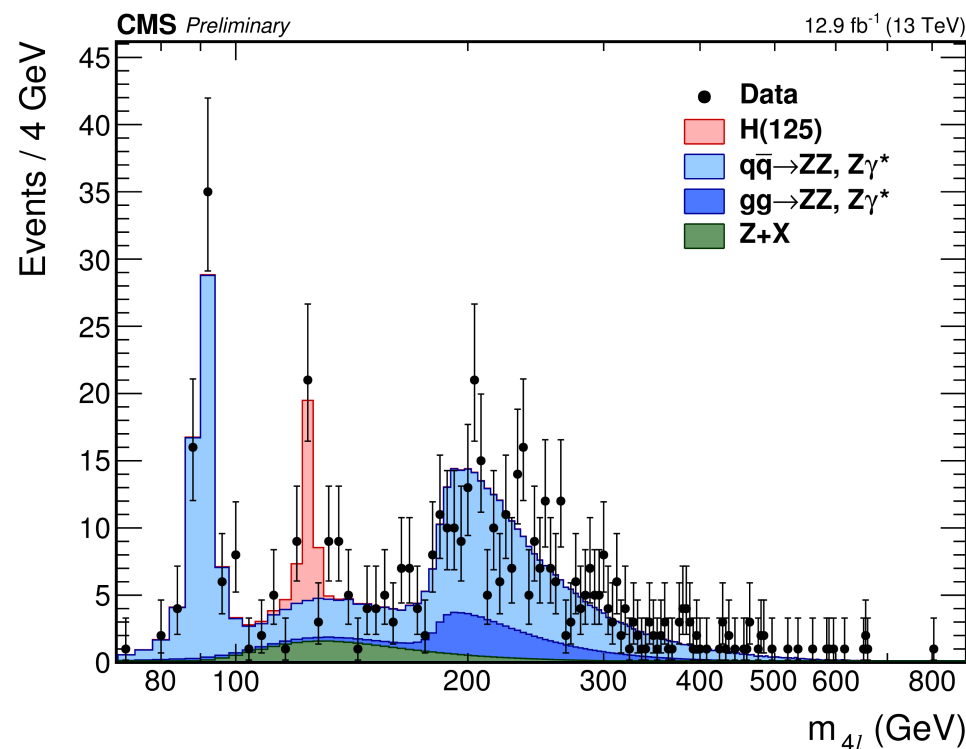
Wyniki CMS z pierwszego roku zbierania danych przy  $\sqrt{s}=13$  TeV

Rozpad bozonu Higgsa na 2 fotony



Dobra zgodność z przewidywaniami SM.

Rozpad bozonu Higgsa na 4 leptony

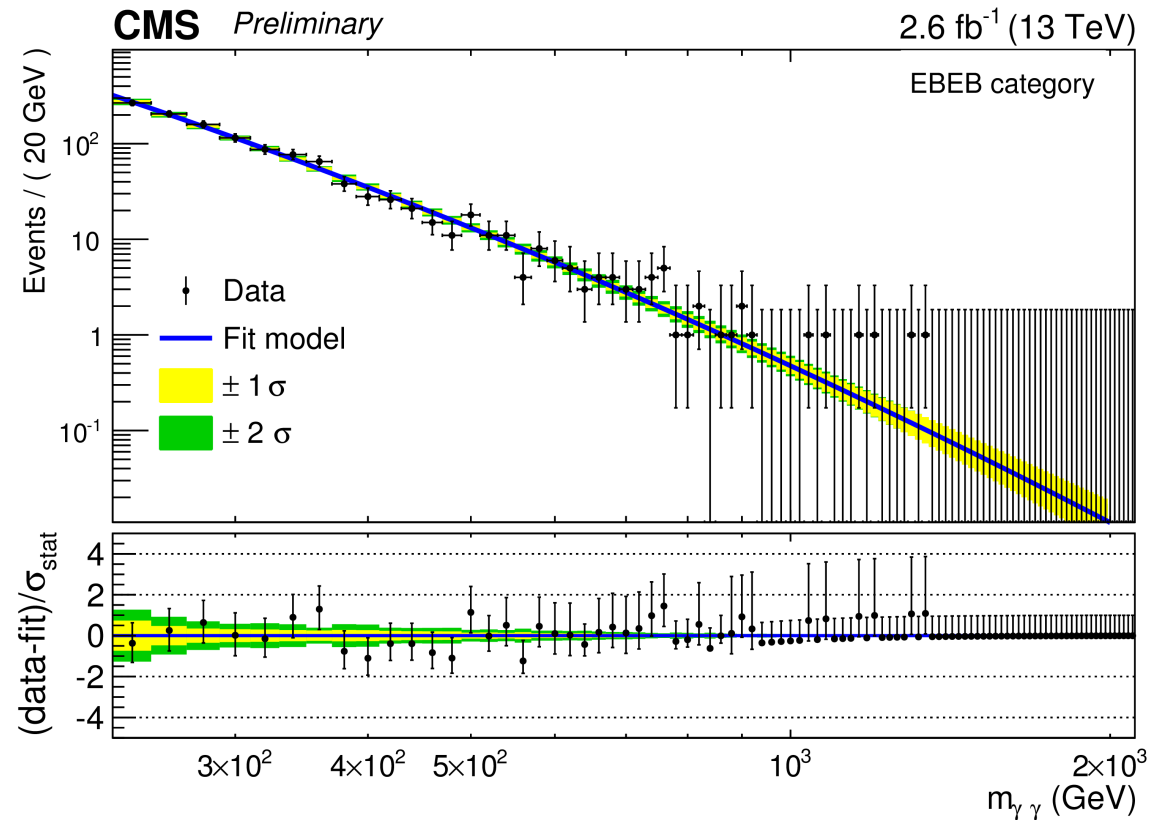
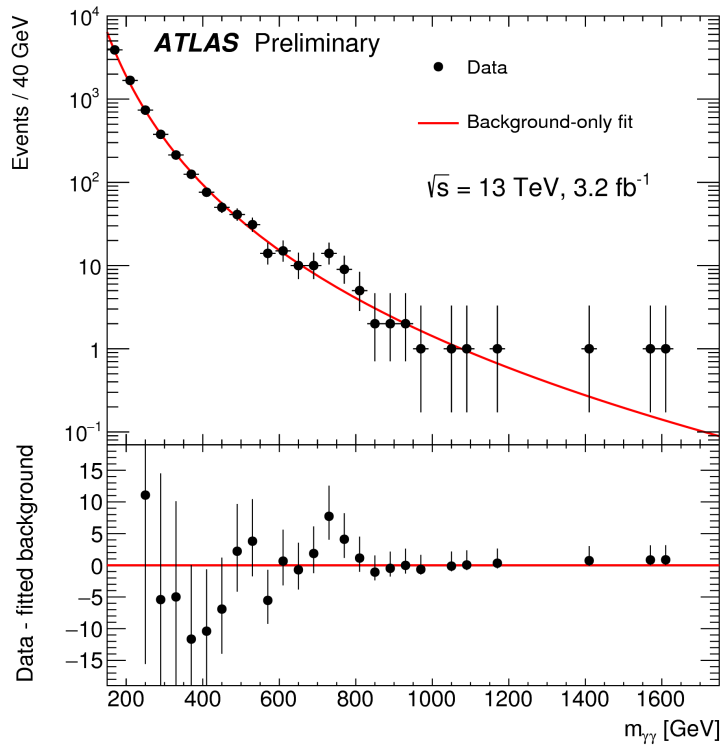


Wyniki konsystentne z wynikami Run 1.

## Run 2

W roku 2015 (pierwsze dane przy  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ ) zaobserwowano niewielką nadwyżkę przypadków w rozkładzie masy niezmienniczej dwóch fotonów:  $pp \rightarrow \gamma\gamma + X$ :

Mógłby to być sygnał produkcji nowej cząstki !



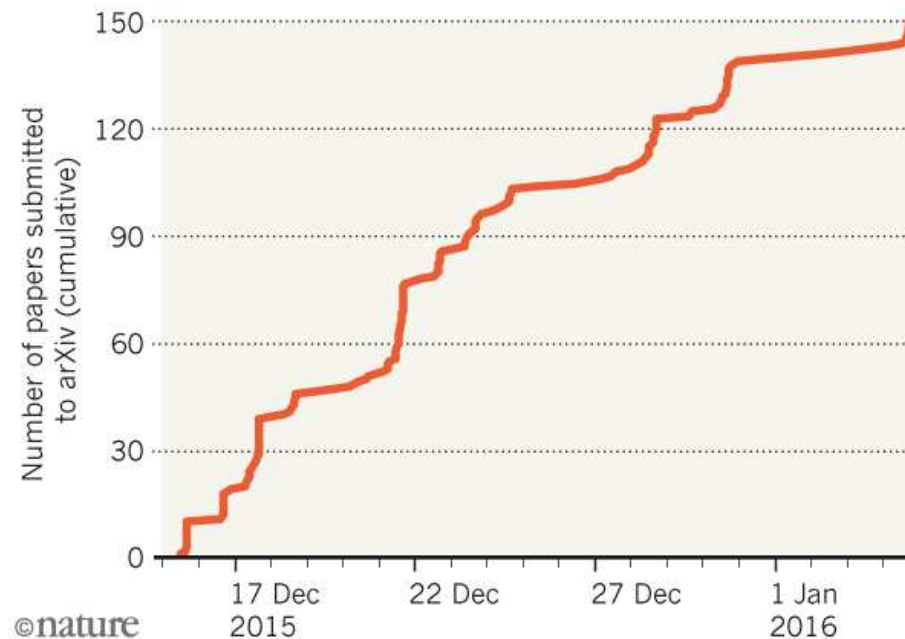
# LHC

## Run 2

Obserwacja “rezonansu 750 GeV” w LHC zelektryzowała fizyków na całym świecie  
Teoretycy rzucili się do pracy, produkując setki nowych modeli...

### HINT OF NEW BOSON SPARKS FLOOD OF PAPERS

In just 21 days, physicists have posted 150 papers on the arXiv preprint server about tantalizing results at the Large Hadron Collider.



Niestety “sygnał” znikł po zebraniu większej ilości danych w 2016...

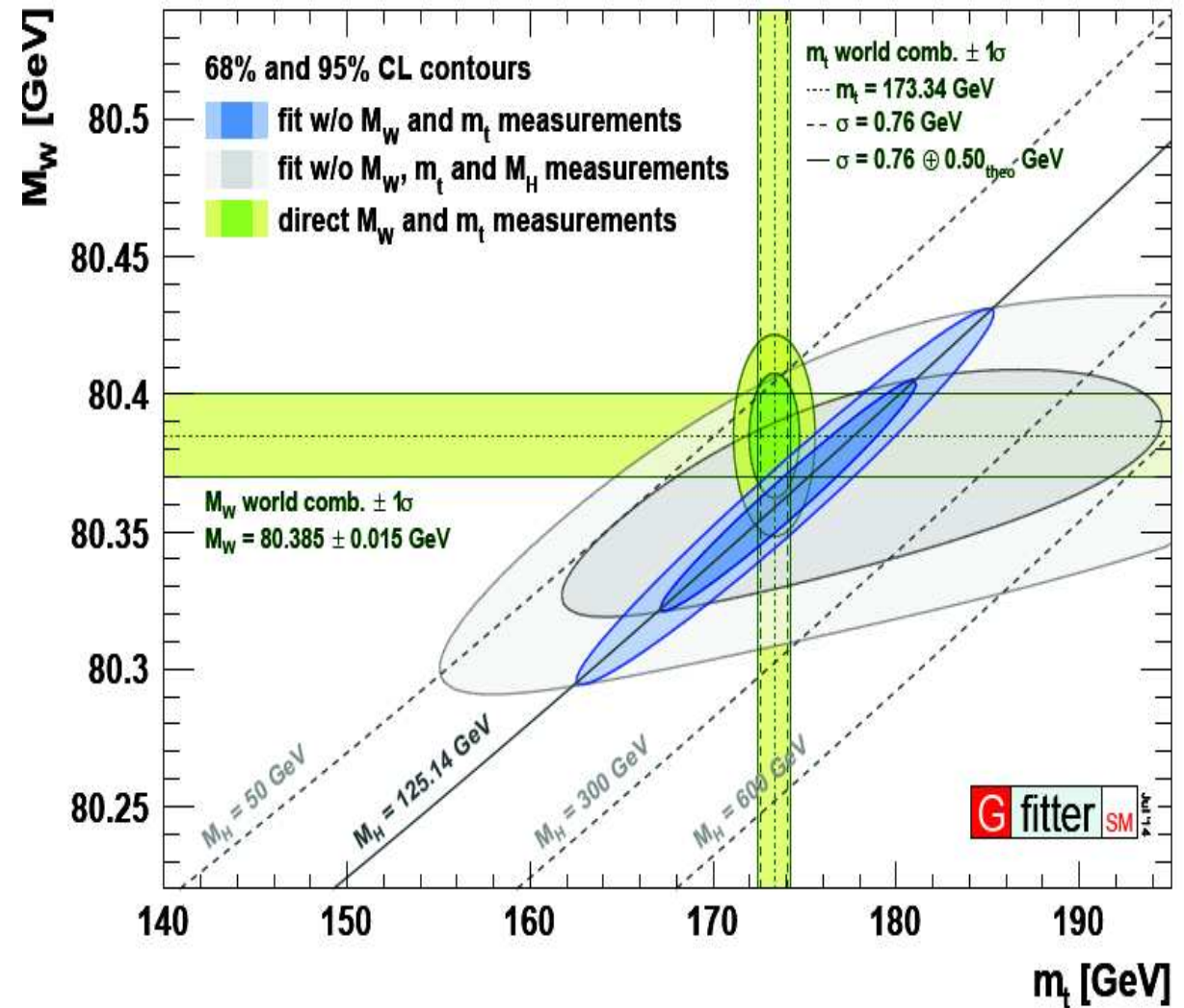
# Higgs w LHC

## 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.

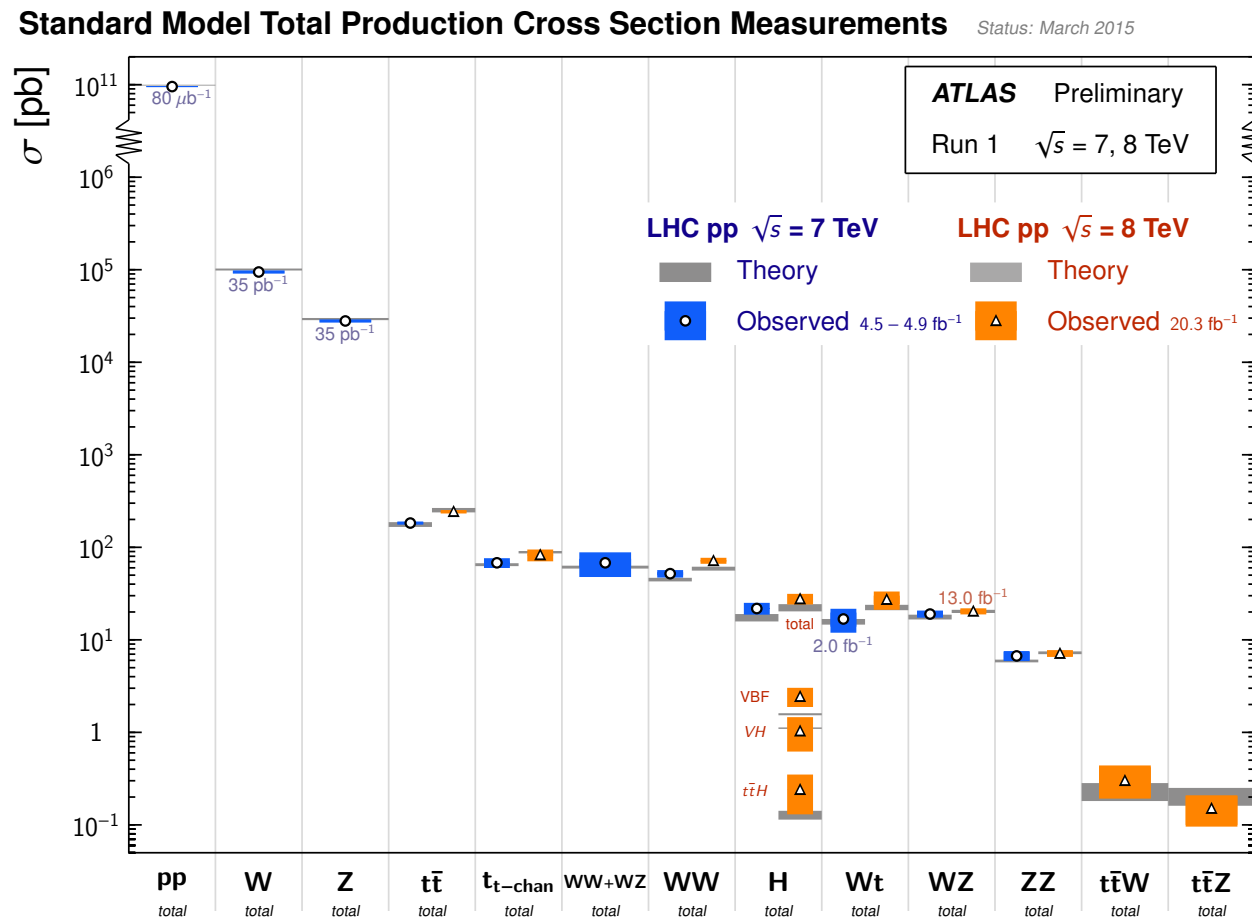
Wszystko się zgadza...



# 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:**

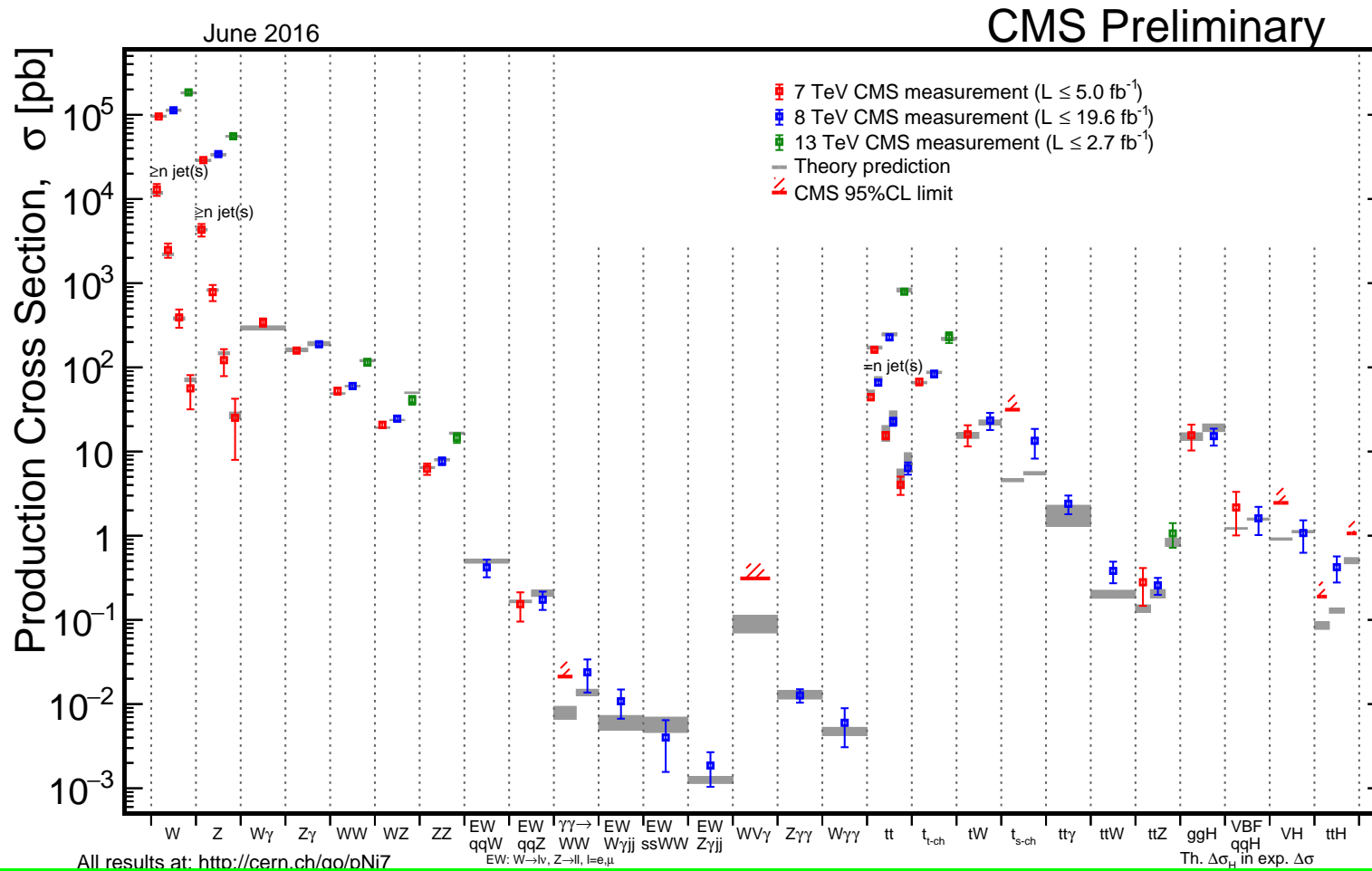




# Testy SM

## 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

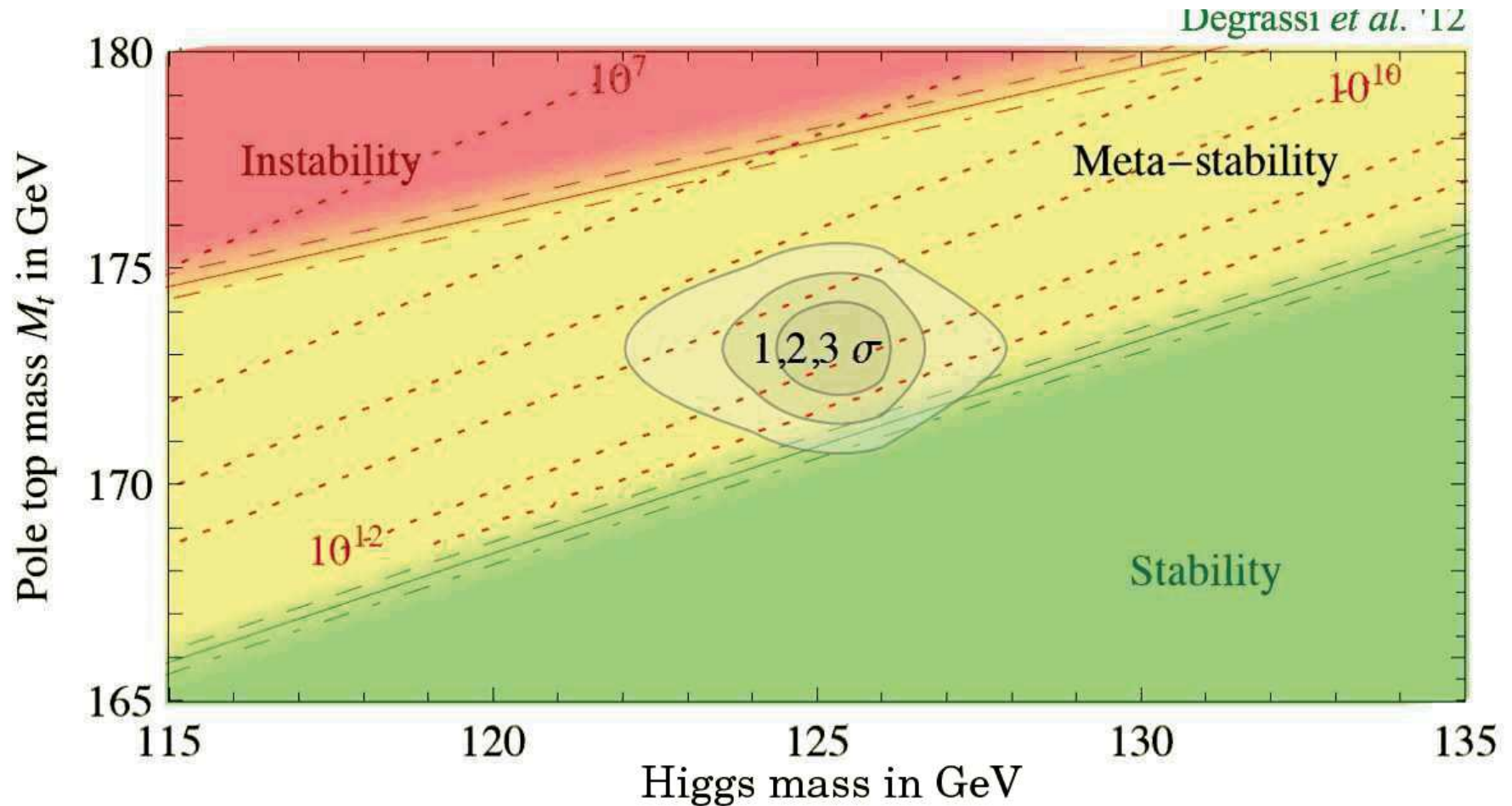


# Testy SM

## 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...

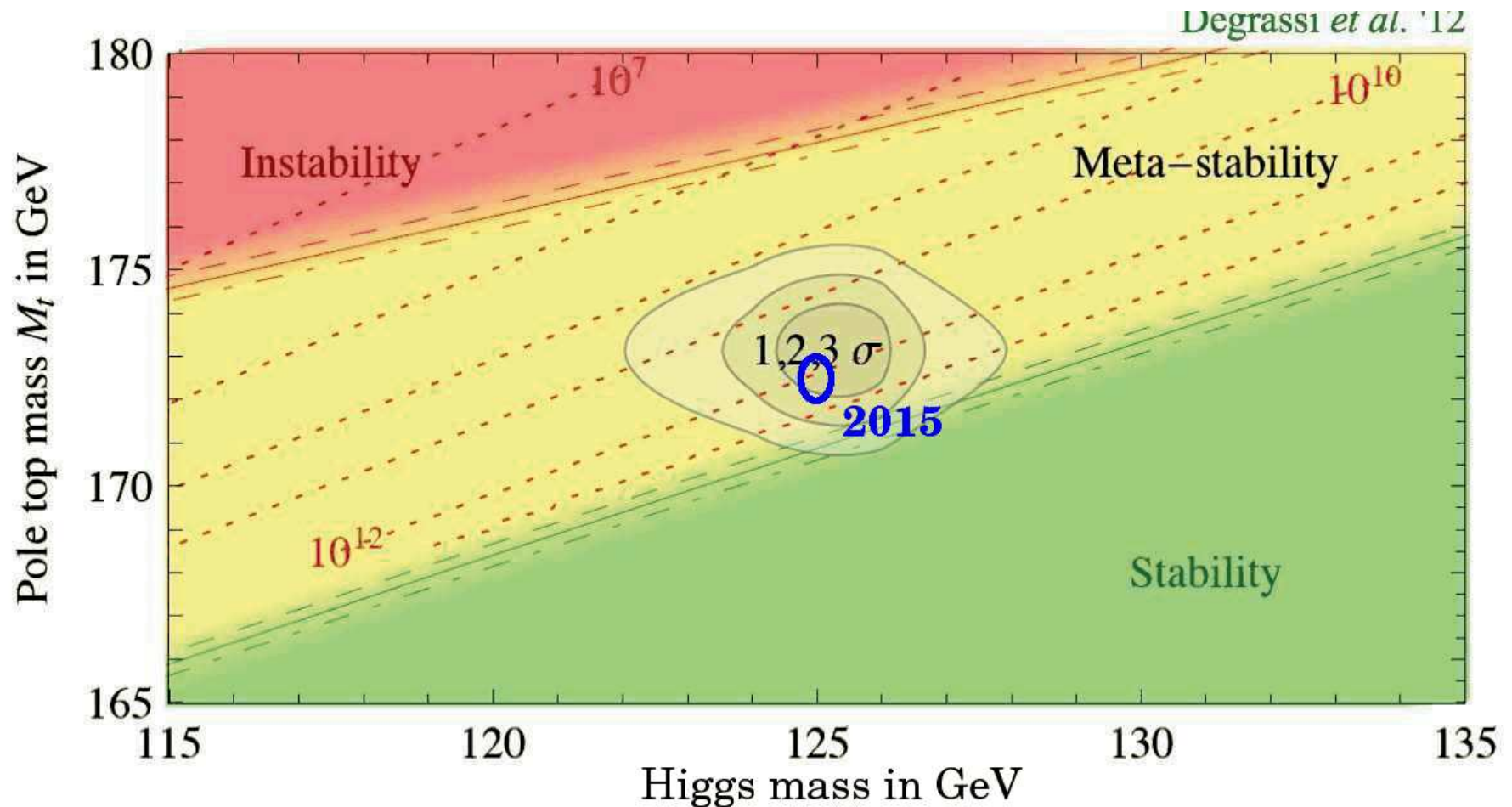


# Testy SM

## 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...**