

# Wszechświat Cząstek Elementarnych dla Humanistów

## Testy Modelu Standardowego i odkrycie bosonu Higgsa

Aleksander Filip Żarnecki

Wykład ogólnouniwersytecki



Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

5 grudnia 2017

- 1 Bozony  $W^\pm$  i  $Z^0$
- 2 Kwark  $t$
- 3 Bozon Higgsa
- 4 Testy Modelu Standardowego

- 1979** - Sheldon L. **Glashow**, Abdus **Salam** i Steven **Weinberg**  
Za model oddziaływań elektro-słabych (z bozonami  $W^\pm$  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 opisującego pochodzenie mas cząstek

**Model Standardowy:**

oddziaływania elektrosłabe + **chromodynamika kwantowa (QCD)**

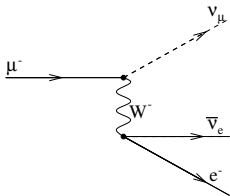
- 1 Bozony  $W^\pm$  i  $Z^0$
- 2 Kwark  $t$
- 3 Bozon Higgsa
- 4 Testy Modelu Standardowego

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

## Model Weinberg'a-Salam'a (1968)

Nowy model oddziaływań słabych  
 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  $Z^0$ :

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

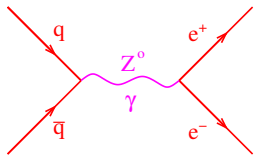
$$m_Z \sim 90 \text{ GeV}$$

⇒ Oddziaływania neutrin z wymianą bozonu  $Z^0$   
 (tzw. wymiana prądów neutralnych) - 1973

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

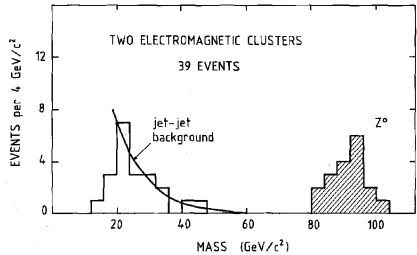
## Odkrycie akcelerator SPS w CERN

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 ( $e^+e^-$ ,  $\mu^+\mu^-$ ,  $\tau^+\tau^-$ ):



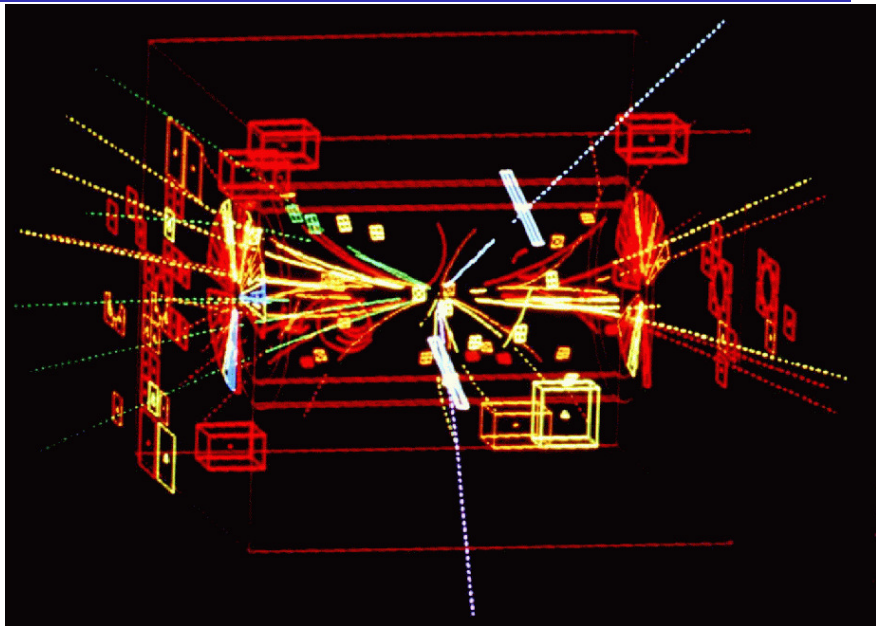
Jest to tzw. process **Drela-Yana**.

## Wyniki UA1 (1983):



Wkład od wymiany  $Z^0$   
 $\Rightarrow$  maksimum w **masie**  
**niezmienniczej** pary leptonów.

# 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  $W^\pm$ :



Proces z **produkcją neutrino**

⇒ niezachowanie pędu poprzecznego

Zasady zachowania wciąż pozwalają nam wyznaczyć masę powstającego bozonu...

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

Wyniki UA1 (1983):

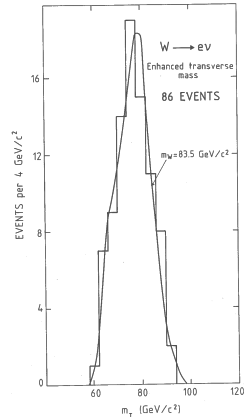


Fig. 3b



# Przypadek $W^-$ w detektorze UA1 (1983)



LEP, CERN, Geneva

1989 - 2000: precyzyjne testy Modelu Standardowego



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

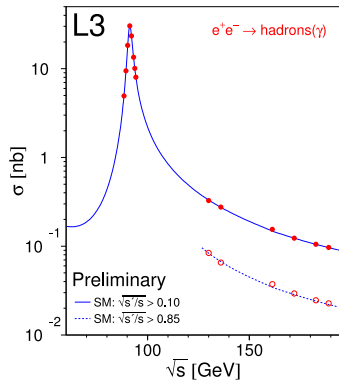
Model Standardowy został bardzo dokładnie przetestowany w zderzeniach  $e^+e^-$  w akceleratorach LEP i SLC (miliony przypadków).

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

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

Szerokość maksimum odpowiada naturalnej szerokości bozonu  $Z^0$ .

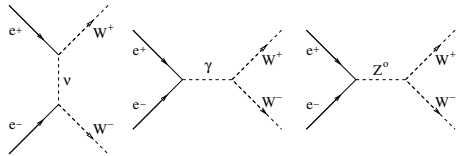
Ponieważ jest to cząstka niesłuchanie krótkożyciowa, jej masa nie jest dokładnie określona (zasada nieoznaczoności)...



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

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

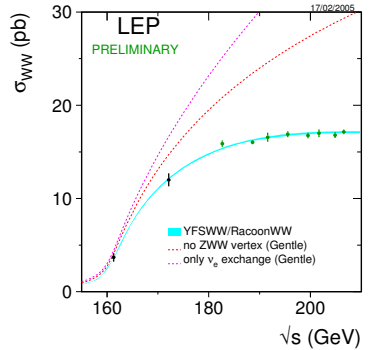
Produkcja bozonów  $W$  jedynie w parach, wkład od **trzech** różnych **procesów**:



**Sprężenia** wynikają ze struktury **Modelu Standardowego**

⇒ ścisłe przewidywania teoretyczne

Doświadczalnie potwierdzone **kasowanie wkładów** od różnych procesów



- 1 Bozony  $W^\pm$  i  $Z^0$
- 2 Kwark  $t$
- 3 Bozon Higgsa
- 4 Testy Modelu Standardowego

## 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...

## Zestawienie

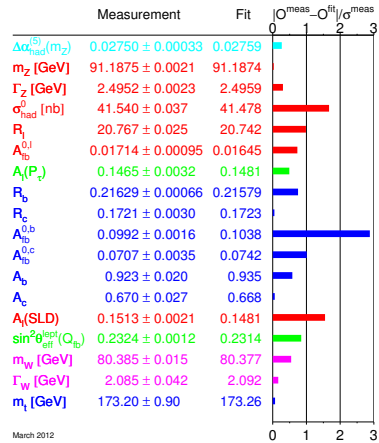
W LEP mierzono dziesiątki procesów.

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

Można wybrać np.  $\alpha_{em}$ ,  $G_F$ ,  $M_Z$  i dopasować ich wartości do danych.

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

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



March 2012

# Pomiary precyzyjne w LEP

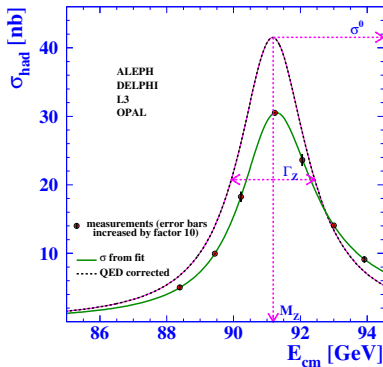
## Poprawki

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!

Porównanie przewidywań bez poprawek i z poprawkami wyższych rzędów:

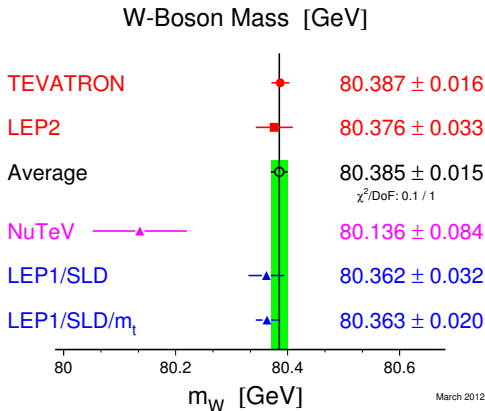




## Poprawki

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

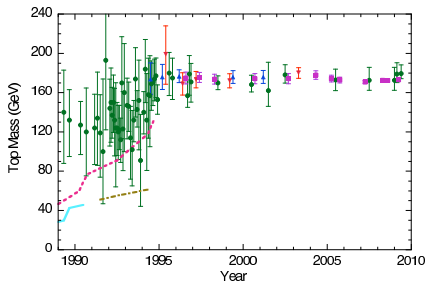
W przypadku bozonu  $W^\pm \Rightarrow$



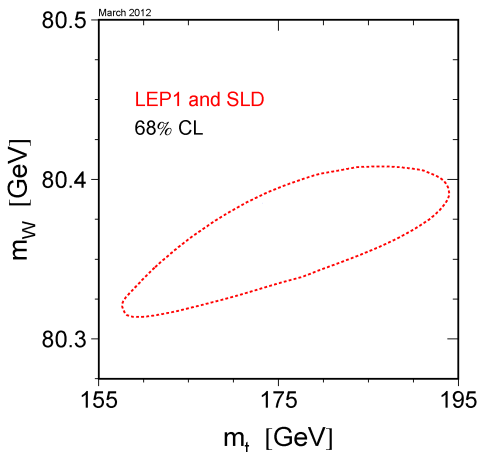
**Pomiar bezpośredni** zgodny z dokładnością do 0.03% z **przewidywaniami teorii** opartymi na precyzyjnych pomiarach przy niższych energiach.

## Przewidywania

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



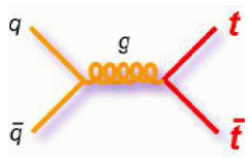
Dzisiejsze wyniki pośrednie:



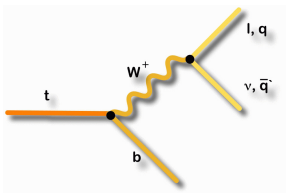
# Kwark $t$

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

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



Rozpada się prawie natychmiast (nie tworzy żadnych cząstek):

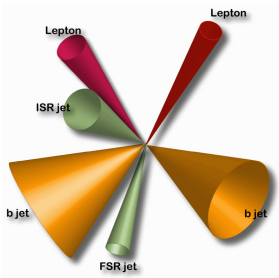


Obserwujemy powstający **kwark  $b$**  oraz **lepton** i **neutrino** (brakujący pęd poprzeczny) lub **parę jetów** o masie niezmienniczej odpowiadającej masie  $W$

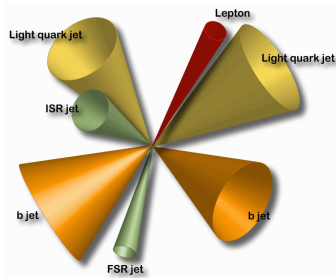
## Tevatron

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

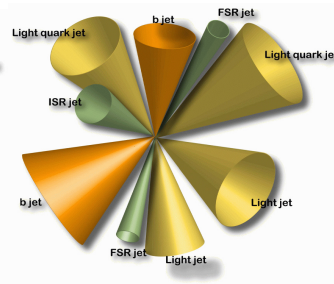
leptonowe



pół-leptonowe



hadronowe



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

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

$\sim 46\%$  przypadków  
bardzo duże tło  
trudna identyfikacja

## Tevatron

Jeden z pierwszych przypadków

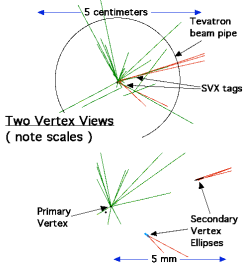
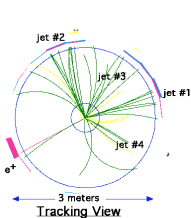
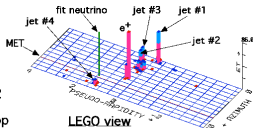
$e^- + 4 \text{ jet event}$

40758\_44414  
24-September, 1992

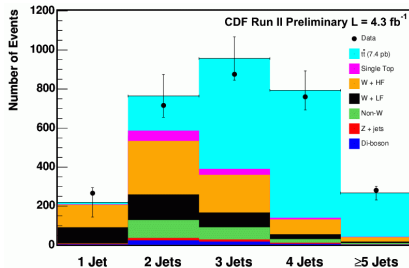
TWO jets tagged by SVX

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)



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



⇒ oficjalne odkrycie: 1995

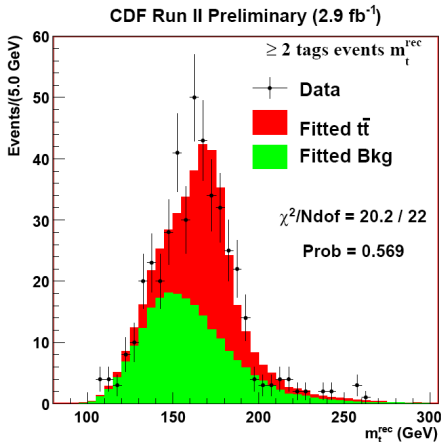
Wybieramy lepton +  $\geq 3$  jety

⇒ głównie przypadki  $t\bar{t}$

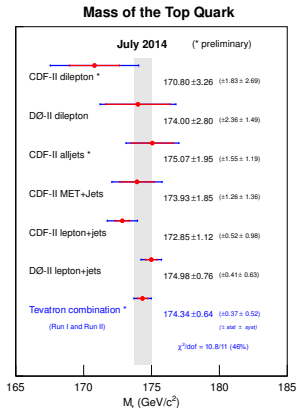
Zbrano tysiące przypadków...

## Tevatron

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



Porównanie wyników dla różnych próbek



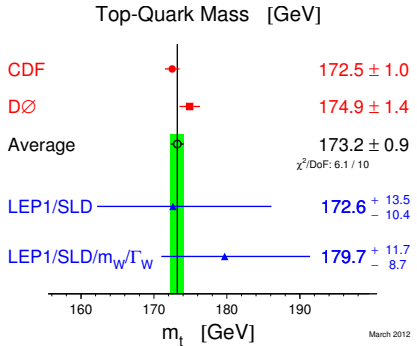
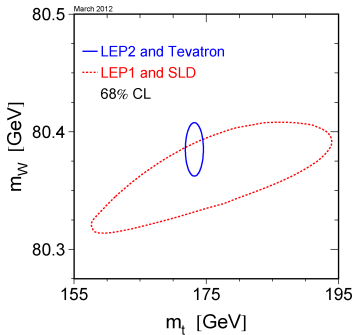
CDF + D0:

$$m_t = 174.34 \pm 0.64 \text{ GeV}$$

# Kwark $t$

## Porównanie

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

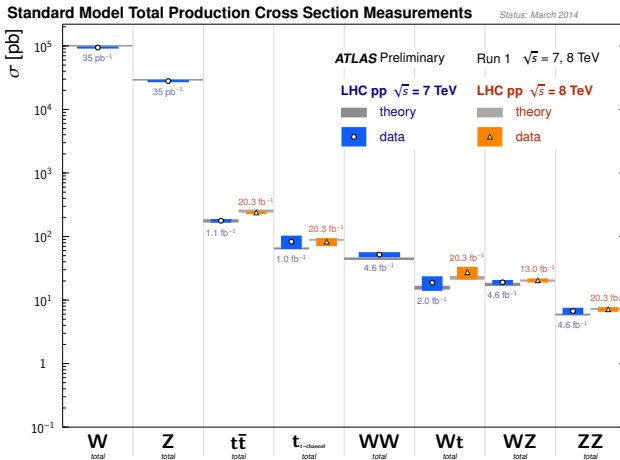


Pomiar bezpośredni zgodny w granicach błędów z przewidywaniami teorii opartymi na precyzyjnych pomiarach przy niższych energiach.

## 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.

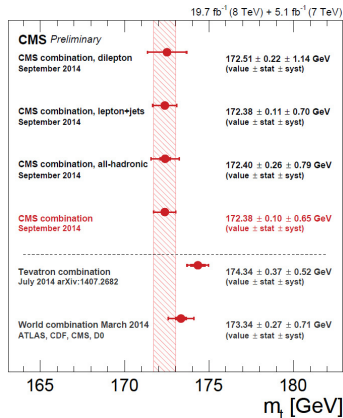
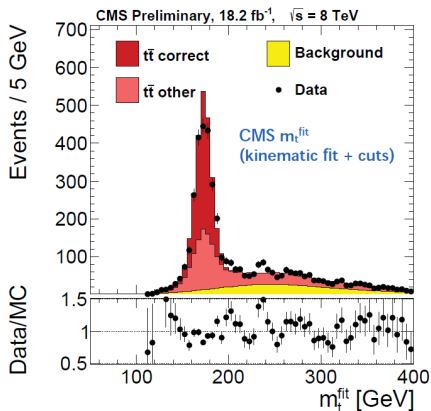
### Run 1:





## Eksperymenty przy LHC

Bardzo szczegółowo badają procesy z produkcją bozonów  $W^\pm$  i  $Z^0$ , oraz kwarku  $t$ . Wyniki pomiaru masy kwarku  $t$  z danych Run 1 (2009-2012):



Już w okresie 2009-2012 liczba przypadków większa niż w Tevatronie...

- 1 Bozony  $W^\pm$  i  $Z^0$
- 2 Kwark  $t$
- 3 Bozon Higgsa**
- 4 Testy Modelu Standardowego

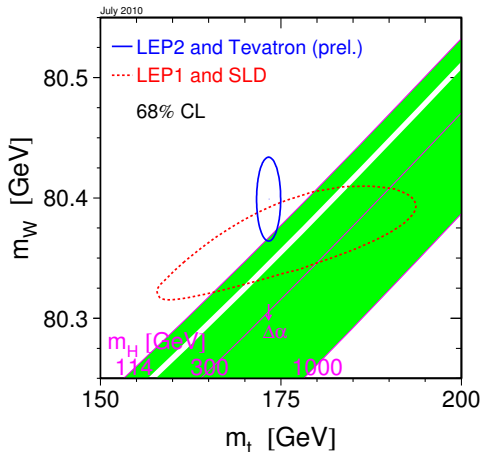
## Poprawki

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...

Masa bozonu Higgsa jest powiązana z innymi parametrami modelu



## Masa bozonu Higgosa

Analiza **wszystkich** dostępnych **danych** wskazywała, że masa Higgosa powinna wynosić **około 100 – 200 GeV**

Wyniki z roku 2010:

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

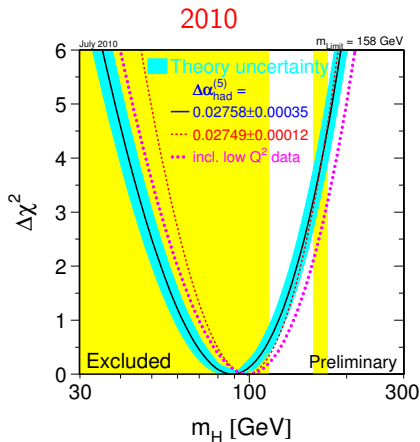
lub:  $m_h < 158 \text{ GeV}$  (95% CL)

Z bezpośrednich poszukiwań:

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

wszystkie dane LEP:

ALEPH + DELPHI + L3 + OPAL



# LHC, CERN, Genewa

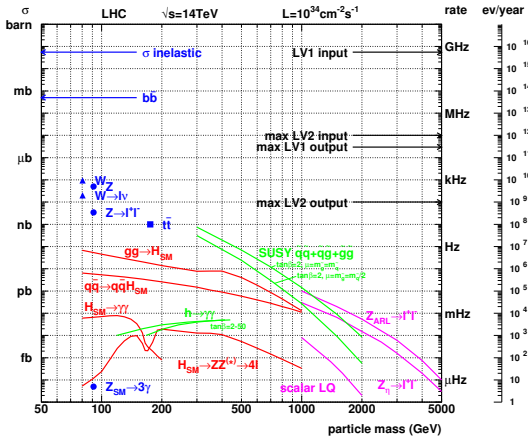
Run I: 2009-2012

Run II: 2015-2018(?)



# 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  $H \rightarrow b\bar{b}$ .

Jednak w zderzeniach  $pp$  mamy jest **bardzo duże tło** innych procesów, głównie z produkcją kwarków, także  $b\bar{b}$ .

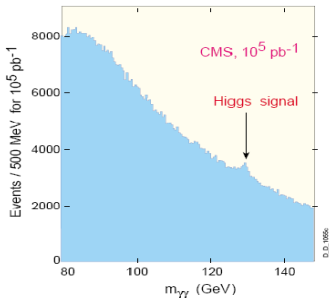
Musimy szukać kanałów o niskim tle...

# Higgs at LHC

Dla małych mas najlepszy kanał to

$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

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

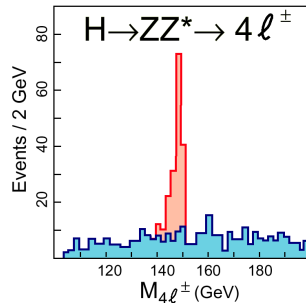


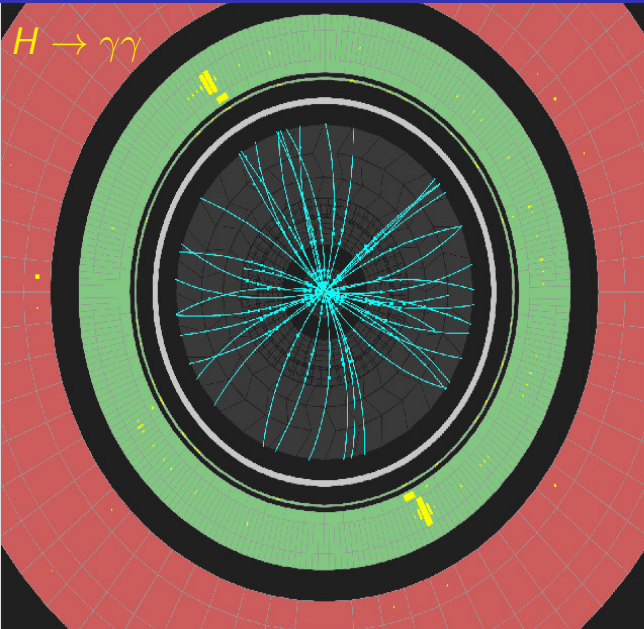
wyniki symulacji komputerowej

Dla dużych mas najlepszy jest kanał:

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

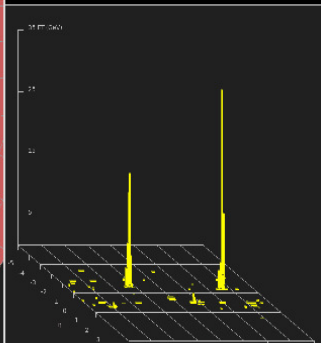
gdyż naładowane leptony ( $e^\pm$  i  $\mu^\pm$ ) można **łatwo zidentyfikować**.  
Ale jest mało przypadków...





Run Number: 191426, Event Number: 86694500

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





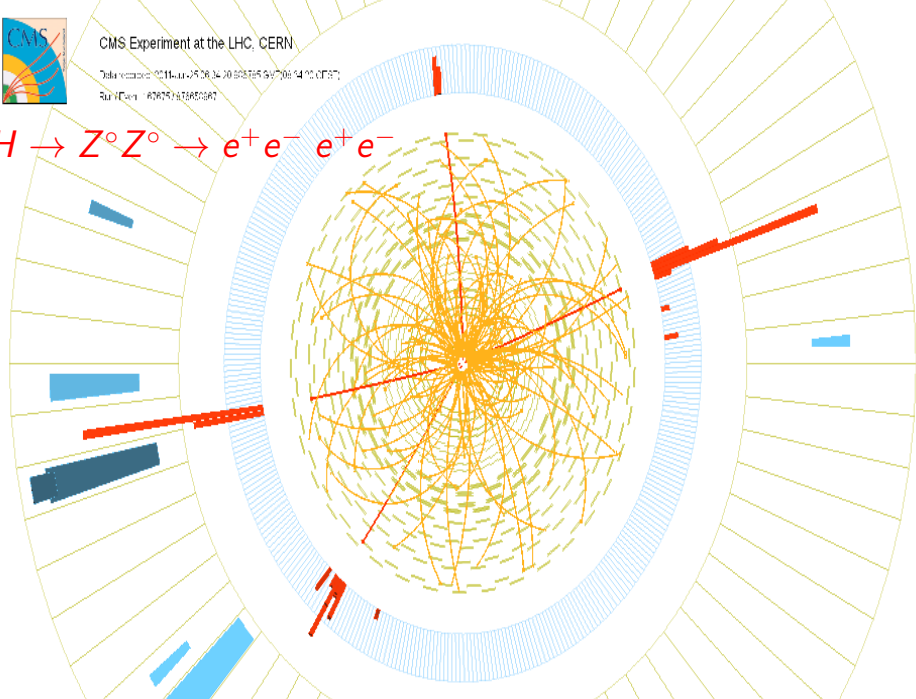


CMS Experiment at the LHC, CERN

Data recorded: 2011-01-25 06:34:20 6838765 647206 1470.07877

Run / Event: 167075 / 6176852867

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



## Masa bozonu Higgsa

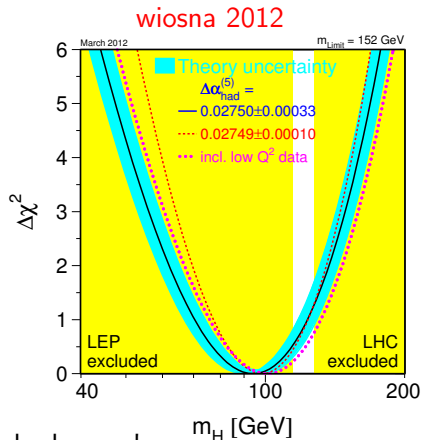
Analiza **wszystkich** dostępnych **danych** z LEP, Tevatron oraz pierwszych wyników z LHC (!).

Wiosną 2012 pozostało już tylko wąskie okno dostępnych wartości masy cząstki Higgsa:

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

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

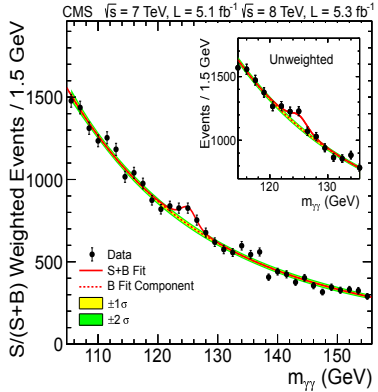
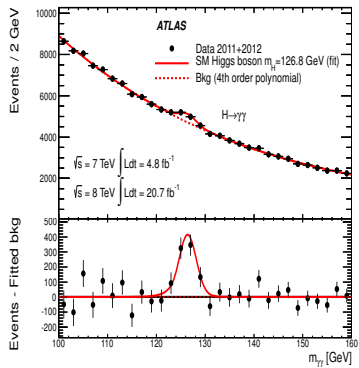
Obszar przejściowy między “małymi” i “dużymi” masami  
 ⇒ dla masy ok. 120 GeV pomiar bozonu Higgsa najtrudniejszy...



# Higgs w LHC

Wyniki przedstawione przez **ATLAS** i **CMS** w lipcu 2012,  
po uwzględnieniu danych zebranych od roku 2009.

Sygnał widoczny ponad wszelką wątpliwość

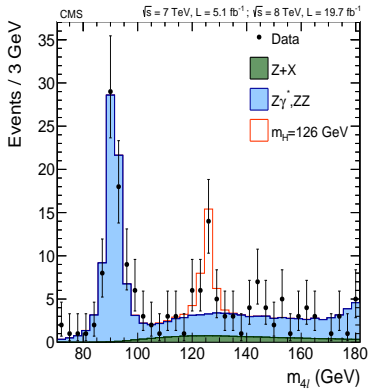
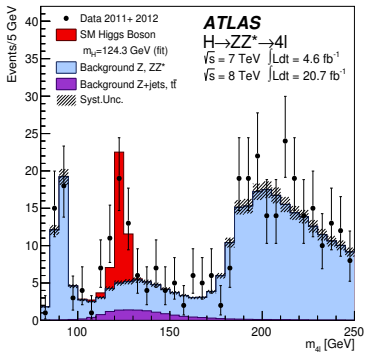


# Higgs wt LHC

Wyniki przedstawione przez **ATLAS** i **CMS** w lipcu 2012, po uwzględnieniu danych zebranych od roku 2009.

Sygnal widoczny ponad wszelką wątpliwość

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



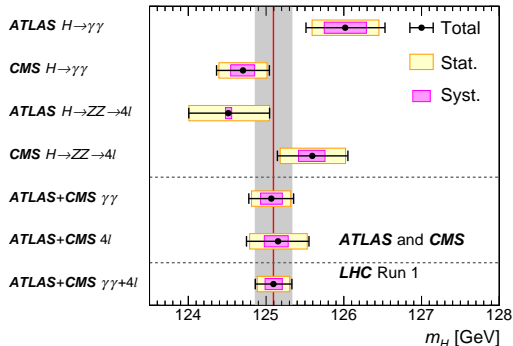
# Higgs w LHC

Wyniki przedstawione przez **ATLAS** i **CMS**,  
po uwzględnieniu wszystkich danych zebranych w tzw. Run I (2009-2012).

Dwa wymienione kanały dają także **najdokładniejszy pomiar masy**

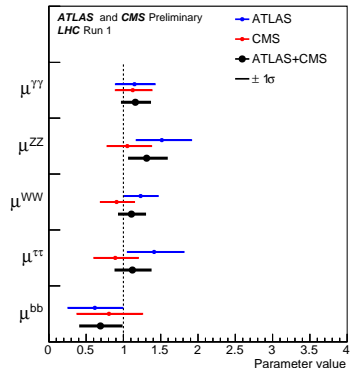
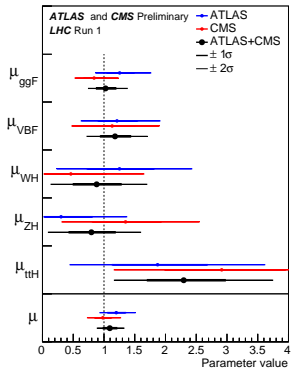
Wyniki łącznej analizy danych z dwóch kanałów i dwóch eksperymentów:

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



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 !

- 1 Bozony  $W^\pm$  i  $Z^0$
- 2 Kwark  $t$
- 3 Bozon Higgsa
- 4 Testy Modelu Standardowego

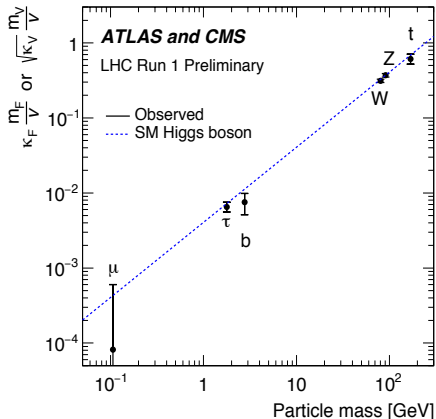
## Sprężenia bozonu Higgsa

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 większej próbki danych przy energii  $\sqrt{s}=13$  TeV





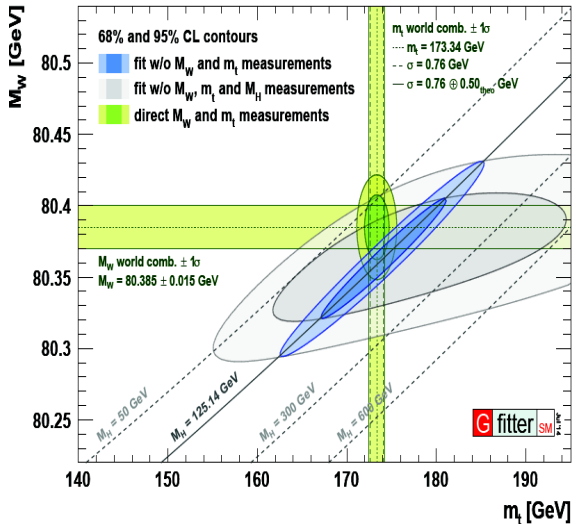
# Testy Modelu Standardowego

## Model Standardowy

W ramach Modelu Standardowego masa bozonu Higgosa jest powiązana z masami  $W$  i  $t$

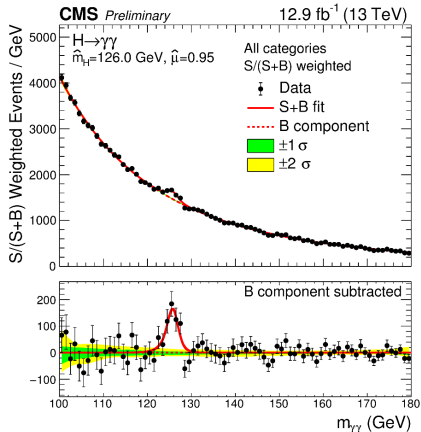
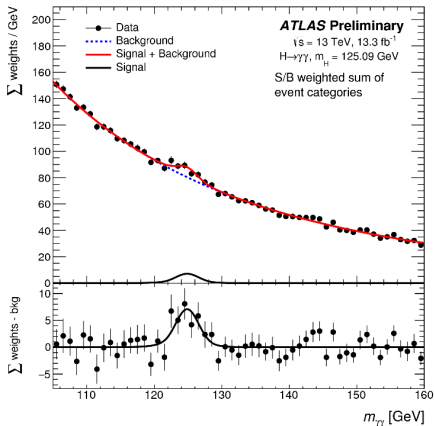
Zmierzona masa bozonu Higgs zgodna z bezpośrednimi pomiarami mas  $W$  i  $t$  masses, oraz wynikami LEP.

Wszystko pasuje...



## Wyniki Run 2 (2015+2016)

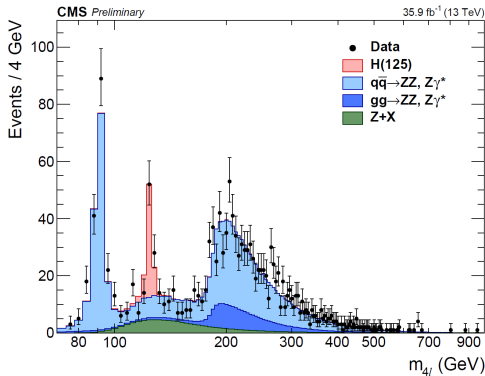
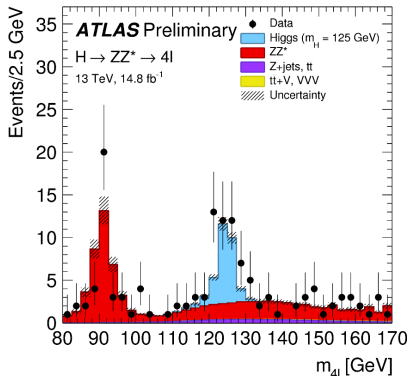
$H \rightarrow \gamma\gamma$



Pomiary zgodne z wynikami Run 1.

## Wyniki Run 2 (2015+2016)

$$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$$

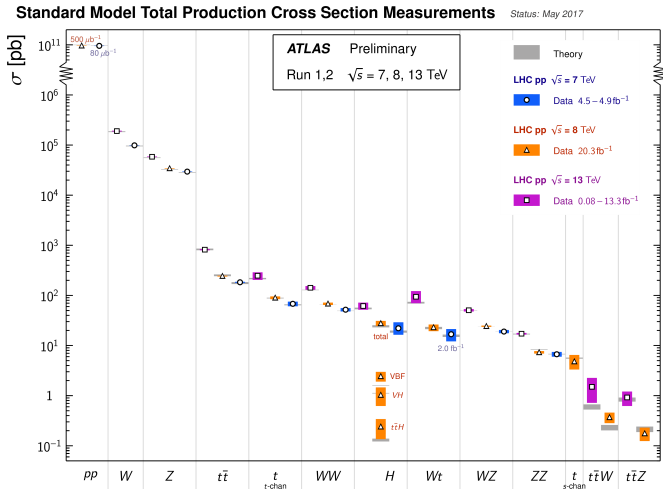


Pomiary zgodne z wynikami Run 1. Kolejne dane są analizowane...

# Testy Modelu Standardowego

## Eksperymenty przy LHC

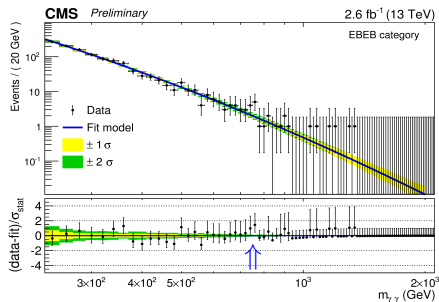
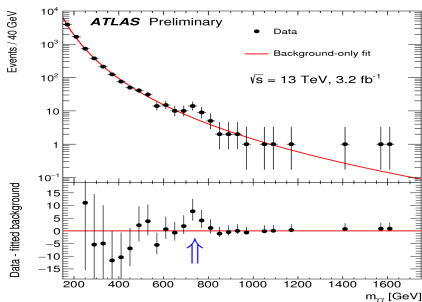
Bardzo szczegółowo badają procesy z produkcją bozonów  $W^\pm$ ,  $Z^0$  i  $H$ , oraz kwarku  $t$ . Wszystkie pomiary w znakomitej zgodności z SM. **May 2017**



## Wyniki LHC

W roku 2015 (pierwsze dane przy  $\sqrt{s} = 13$  TeV) zaobserwowano niewielką nadwyżkę przypadków w rozkładzie masy niezmienniczej dwóch fotonów

$pp \rightarrow \gamma\gamma + X$ :



$$m_{\gamma\gamma} = 750 \text{ GeV} \Rightarrow 3.6 \sigma \text{ (} 2.0\sigma \text{)}$$

$$m_{\gamma\gamma} = 760 \text{ GeV} \Rightarrow 2.6 \sigma \text{ (} 1.2\sigma \text{)}$$

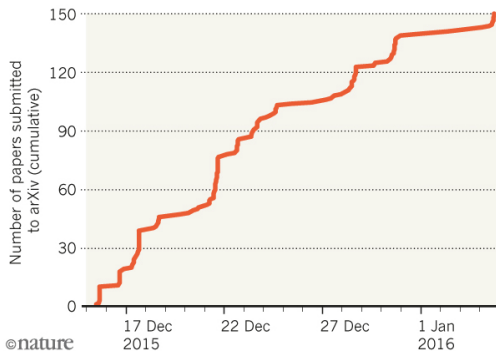
Mógłby to być sygnał produkcji nowej cząstki !...

## Wyniki LHC

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

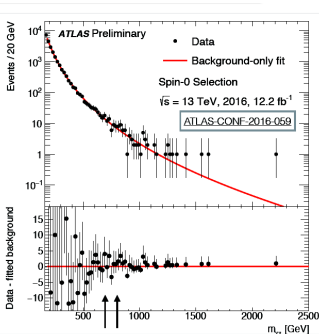
### HINT OF NEW BOSON SPARKS FLOOD OF PAPERS

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



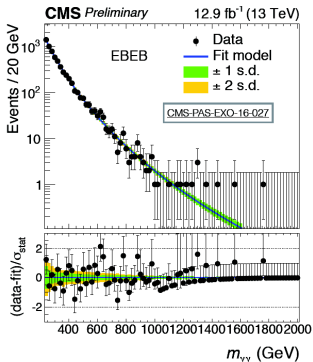
## Wyniki LHC

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



**Significance in 2015+2016:**

$m=710 \text{ GeV}$  ( $\Gamma/M=10\%$ )  
 $2.3\sigma(\text{local}) / <1\sigma(\text{global})$



$m=760 \text{ GeV}$  ( $\Gamma/M=1.4 \times 10^{-4}$ )  
 $<1\sigma(\text{local})$

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

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,  $\sim 25fb^{-1}$ )  
2013-2014: Long Shutdown 1 (LS1) - dodatkowe zabezpieczenia
- 2015-2018: zderzenia  $pp$  przy  $\sqrt{s}=13-14$  TeV (Run 2,  $\sim 100fb^{-1}$ )  
2019-2020: Long Shutdown 2 (LS2) - modernizacja LHC i eksp.
- 2021-2023: zderzenia  $pp$  przy  $\sqrt{s}=14$  TeV (Run 3,  $\sim 200fb^{-1}$ )  
2024-2026: Long Shutdown 3 (LS2) - modernizacja LHC i eksp.
- 2026-2035: zderzenia  $pp$  przy  $\sqrt{s}=14$  TeV  
(High Luminosity LHC,  $\sim 3000fb^{-1}$ )



## 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

Wierzmy, że natura kryje jeszcze kolejne zagadki...