

# Wszechświat Cząstek Elementarnych dla Humanistów

## Testy Modelu Standardowego i odkrycie bosonu Higgsa

Aleksander Filip Żarnecki

Wykład ogólnouniwersytecki

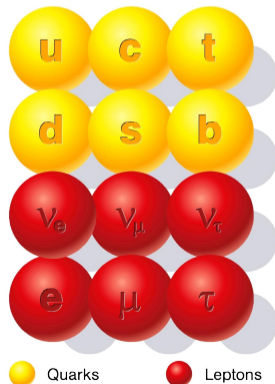


13 grudnia 2022

## Cząstki fundamentalne

Cząstki, które obecnie uważamy za **fundamentalne** w ramach tzw. **Modelu Standardowego** fizyki cząstek

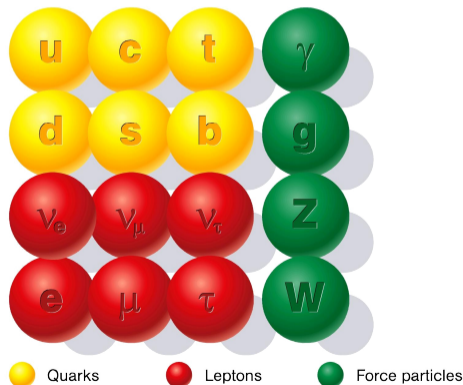
- cząstki materii  
    kwarki i leptony



## Cząstki fundamentalne

Cząstki, które obecnie uważamy za **fundamentalne** w ramach tzw. **Modelu Standardowego** fizyki cząstek

- cząstki materii  
kwarki i leptony
- nośniki oddziaływań  
 $\gamma$ ,  $g$ ,  $W^\pm$  i  $Z^0$



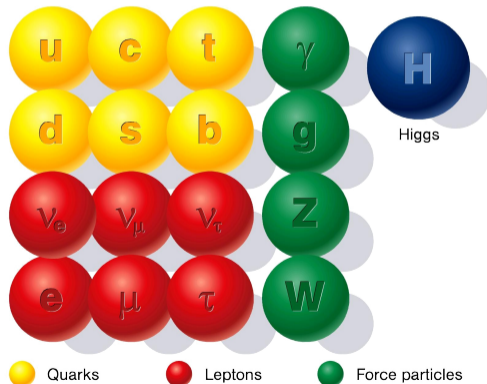
## Cząstki fundamentalne

Cząstki, które obecnie uważamy za **fundamentalne** w ramach tzw. **Modelu Standardowego** fizyki cząstek

- cząstki materii  
kwarki i leptony
- nośniki oddziaływań  
 $\gamma$ ,  $g$ ,  $W^\pm$  i  $Z^0$
- bozon Higgsa

konieczny dla spójności modelu

“Nadaje masy” wszystkim cząstkom



## Oddziaływania fundamentalne

Opis oddziaływań w Modelu Standardowym oparty jest na formalizmie kwantowych teorii pola (Quantum Field Theory, QFT).

## Oddziaływania fundamentalne

Opis oddziaływań w Modelu Standardowym oparty jest na formalizmie kwantowych teorii pola (Quantum Field Theory, QFT).

Podstawą tego opisu jest zawsze dostrzeżenie **lokalnych symetrii cechowania**

- symetria względem obrotu fazy funkcji falowej:  $U(1)$   
⇒ opis **oddziaływań elektromagnetycznych** (QED), foton

## Oddziaływania fundamentalne

Opis oddziaływań w Modelu Standardowym oparty jest na formalizmie kwantowych teorii pola (Quantum Field Theory, QFT).

Podstawą tego opisu jest zawsze dostrzeżenie **lokalnych symetrii cechowania**

- symetria względem obrotu fazy funkcji falowej:  $U(1)$   
⇒ opis **oddziaływań elektromagnetycznych** (QED), foton
- symetria względem zamiany kolorów cząstek:  $SU(3)$   
⇒ opis **oddziaływań silnych** (QCD), gluony

## Oddziaływania fundamentalne

Opis oddziaływań w Modelu Standardowym oparty jest na formalizmie kwantowych teorii pola (Quantum Field Theory, QFT).

Podstawą tego opisu jest zawsze dostrzeżenie **lokalnych symetrii cechowania**

- symetria względem obrotu fazy funkcji falowej:  $U(1)$   
⇒ opis **oddziaływań elektromagnetycznych** (QED), foton
- symetria względem zamiany kolorów cząstek:  $SU(3)$   
⇒ opis **oddziaływań silnych** (QCD), gluony
- symetria względem zamiany cząstek w dubletach:  $SU(2)$   
⇒ opis **oddziaływań słabych** (model Weinberg'a-Salam'a),  $W^\pm$ ,  $Z^0$



## Oddziaływania fundamentalne

Opis oddziaływań w Modelu Standardowym oparty jest na formalizmie kwantowych teorii pola (Quantum Field Theory, QFT).

Podstawą tego opisu jest zawsze dostrzeżenie **lokalnych symetrii cechowania**

- symetria względem obrotu fazy funkcji falowej:  $U(1)$   
⇒ opis **oddziaływań elektromagnetycznych** (QED), foton
- symetria względem zamiany kolorów cząstek:  $SU(3)$   
⇒ opis **oddziaływań silnych** (QCD), gluony
- symetria względem zamiany cząstek w dubletach:  $SU(2)$   
⇒ opis **oddziaływań słabych** (model Weinberg'a-Salam'a),  $W^\pm$ ,  $Z^0$

$$SM \equiv U(1) \times SU(2) \times SU(3)$$

## Oddziaływania fundamentalne

Opis oddziaływań w Modelu Standardowym oparty jest na formalizmie kwantowych teorii pola (Quantum Field Theory, QFT).

Podstawą tego opisu jest zawsze dostrzeżenie **lokalnych symetrii cechowania**

- symetria względem obrotu fazy funkcji falowej:  $U(1)$   
⇒ opis **oddziaływań elektromagnetycznych** (QED), foton
- symetria względem zamiany kolorów cząstek:  $SU(3)$   
⇒ opis **oddziaływań silnych** (QCD), gluony
- symetria względem zamiany cząstek w dubletach:  $SU(2)$   
⇒ opis **oddziaływań słabych** (model Weinberg'a-Salam'a),  $W^\pm$ ,  $Z^0$

$$SM \equiv U(1) \times SU(2) \times SU(3)$$

+ spontaniczne łamanie symetrii konieczne do wytłumaczenia mas...

- 1 Bozony  $W^\pm$  i  $Z^0$
- 2 Kwark  $t$
- 3 Bozon Higgosa
- 4 Precyzyjne testy Modelu Standardowego

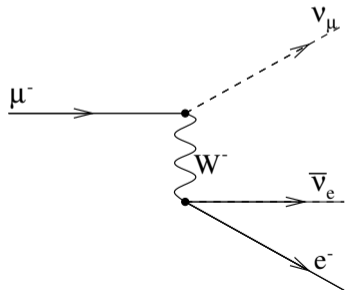
- 1979** - Sheldon L. **Glashow**, Abdus **Salam** i Steven **Weinberg**  
Za model oddziaływań elektro-słabych (z bozonami  $W^\pm$  i  $Z^0$ )
- 1984** - Carlo **Rubia** i Simon **Van der Meer**  
Za odkrycie bozonów  $W^\pm$  i  $Z^0$
- 1999** - Gerardus 't **Hooft** i Martinus J.G. **Veltman**  
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

- 1 Bozony  $W^\pm$  i  $Z^0$
- 2 Kwark  $t$
- 3 Bozon Higgosa
- 4 Precyzyjne testy Modelu Standardowego

## 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  $Z^0$ :

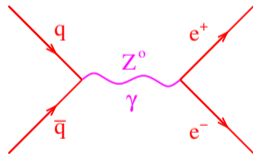
$$m_W \sim 80 \text{ GeV}$$

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

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

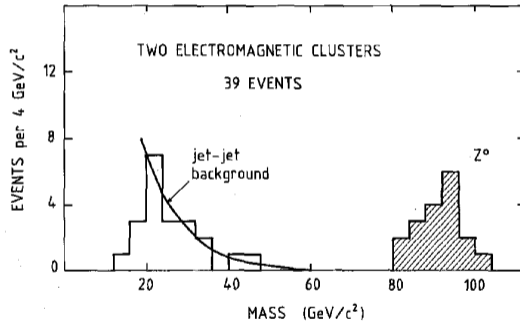
## Odkrycie akcelerator SPS w CERN

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

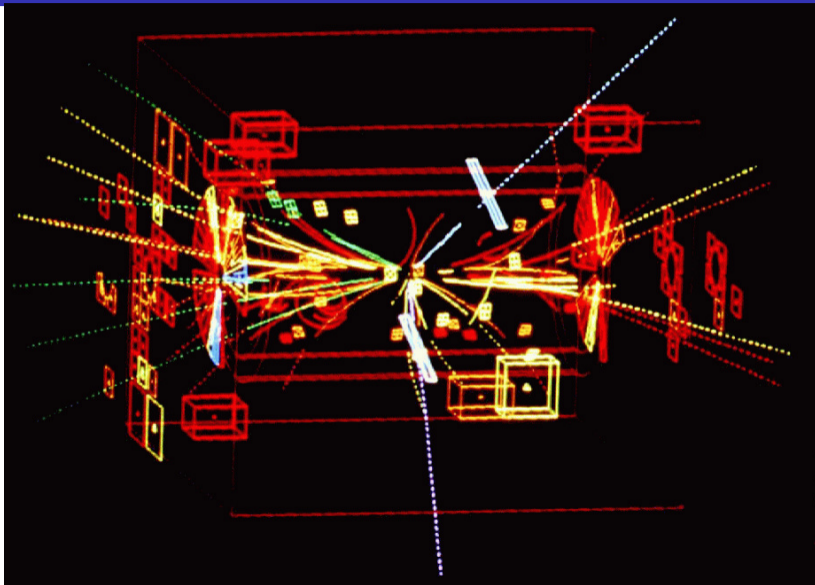


Jest to tzw. process **Drela-Yana**.

## Wyniki UA1 (1983):



Wkład od wymiany  $Z^0 \Rightarrow$  maksimum w rozkładzie **masy niezmienniczej** pary elektronów.





## Odkrycie

W zderzeniach  $p\bar{p}$  możliwa jest też “anihilacja” pary  $q\bar{q}'$  w bozon  $W^\pm$ :

$$u\bar{d} \rightarrow W^+ \rightarrow e^+ \nu_e$$

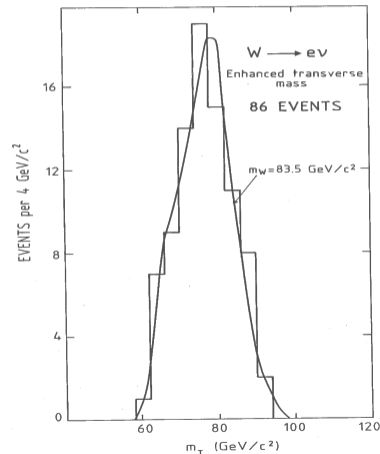
Proces z produkcją neutrina

⇒ niezachowanie pędu poprzecznego

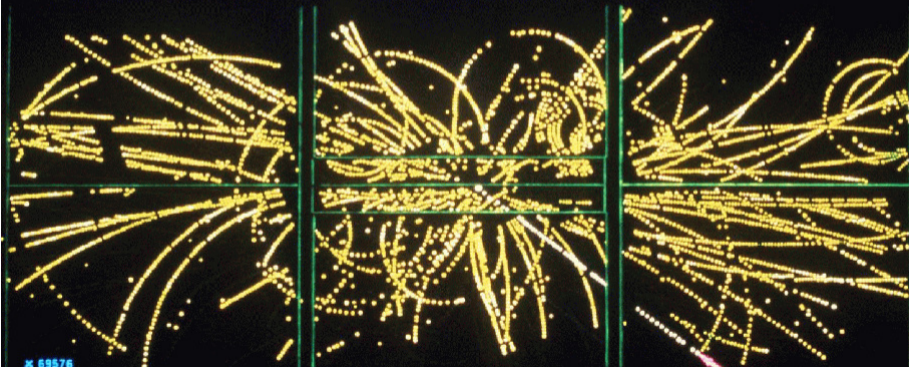
Zasady zachowania wciąż pozwalają nam wyznaczyć masę powstającego bozonu...

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

Wyniki UA1 (1983):



EVENT 2958. 1279.



LEP, CERN, Geneva

1989 - 2000: precyzyjne testy Modelu Standardowego



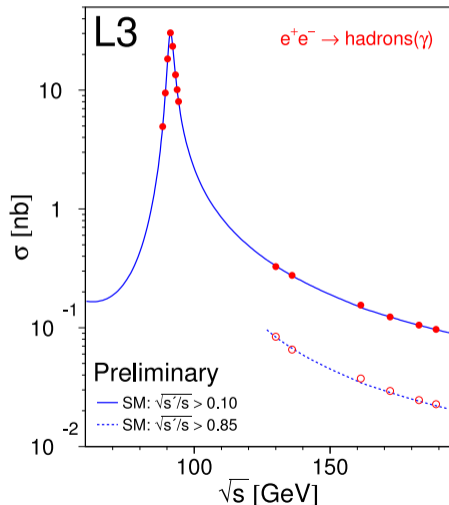
Model Standardowy został bardzo dokładnie **przetestowany** w zderzeniach  $e^+e^-$  w akceleratorach LEP i SLC (miliony przypadków).

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

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

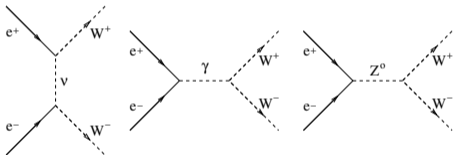
Szerokość maksimum odpowiada **naturalnej szerokości** bozonu  $Z^0$ .

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



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

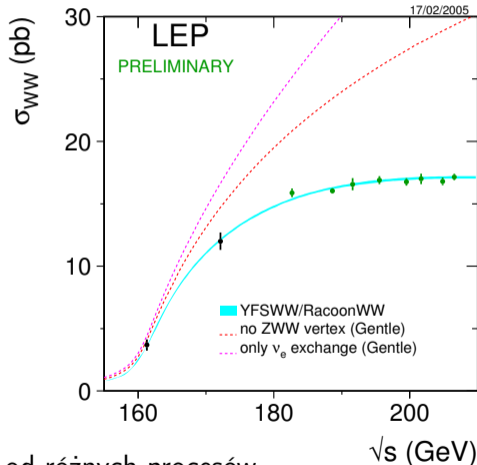
Produkcja bozonów  $W$  jedynie w parach, wkład od **trzech** różnych **procesów**:



**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 Precyzyjne 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  $b$

## 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”):

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



## 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 (marzec 2012)

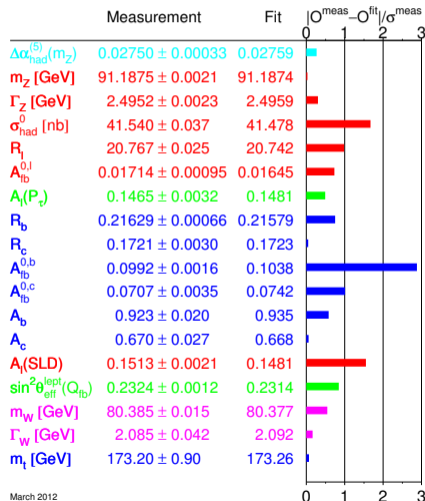
W LEP mierzono dziesiątki procesów.

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** !

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



March 2012

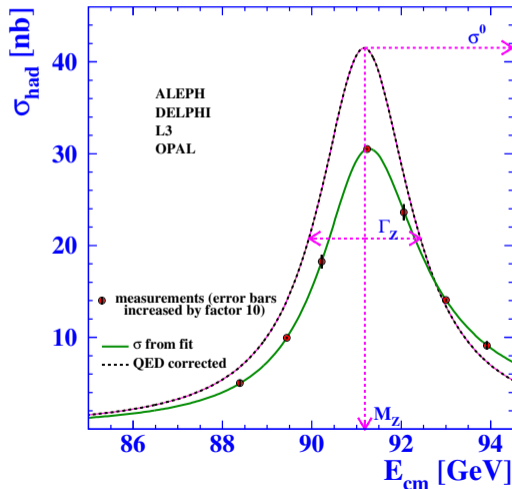
## Poprawki

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!

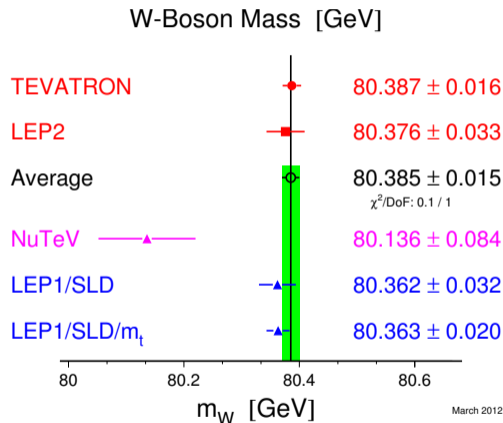
Porównanie przewidywań bez poprawek i z poprawkami wyższych rzędów:



## Poprawki

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

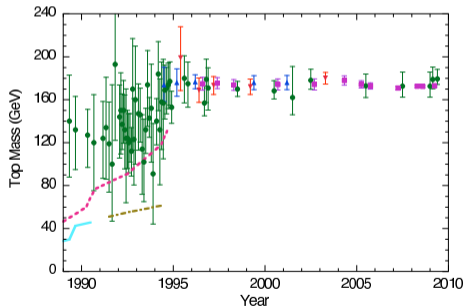
W przypadku bozonu  $W^\pm \Rightarrow$



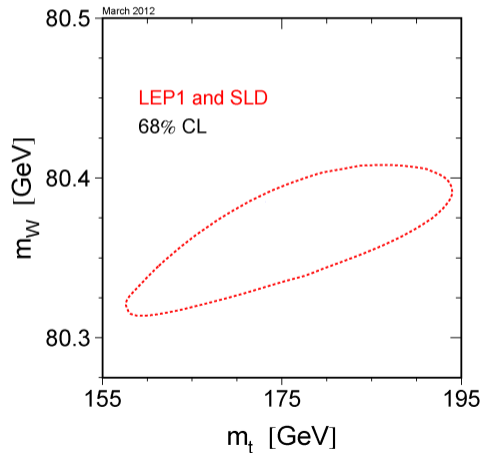
**Pomiar bezpośredni** zgodny z dokładnością do 0.03% z **przewidywaniami teorii** opartymi na precyzyjnych pomiarach przy niższych energiach.

## Przewidywania

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

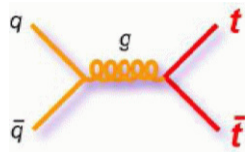


Wyniki pośrednich pomiarów:

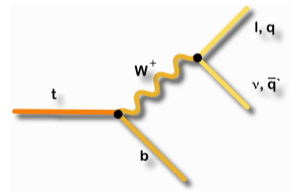


**Tevatron** zderzenia  $p\bar{p}$  przy energii  $\sqrt{s} \sim 2$  TeV

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



Rozpada się prawie natychmiast (nie tworzy żadnych cząstek):

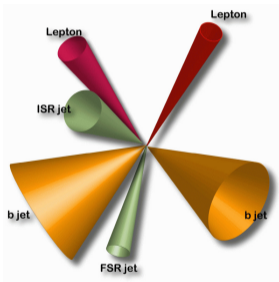


Obserwujemy powstający **kwark  $b$**  oraz **lepton** i **neutrino** (brakujący pęd poprzeczny) lub **parę jetów** o masie niezmienniczej odpowiadającej masie bozonu  $W$

## Tevatron

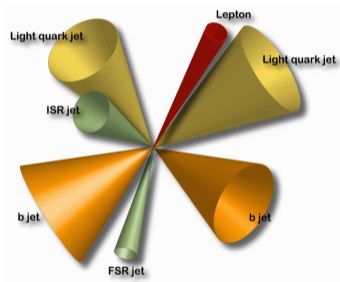
Ponieważ kwark  $t$  produkowany jest parami ( $t\bar{t}$ ) mamy 3 klasy przypadków

## leptonowe



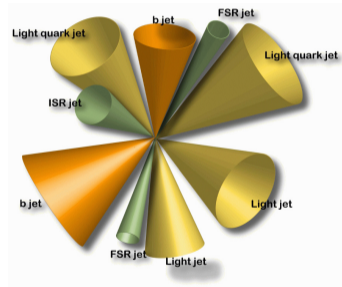
“złota próbka” ale  
tylko  $\sim 4\%$  przypadków  
( $e^+e^-$ ,  $\mu^+\mu^-$  i  $e^\pm\mu^\pm$ )

## pół-leptonowe



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

## hadronowe



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

# Tevatron

Jeden z pierwszych przypadków

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

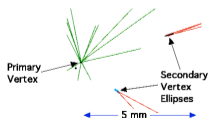
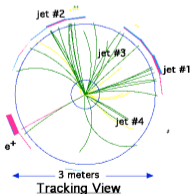
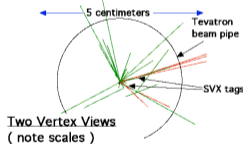
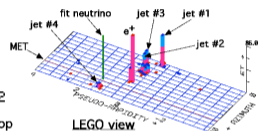
40758\_44414

24-September, 1992

TWO jets tagged by SVX

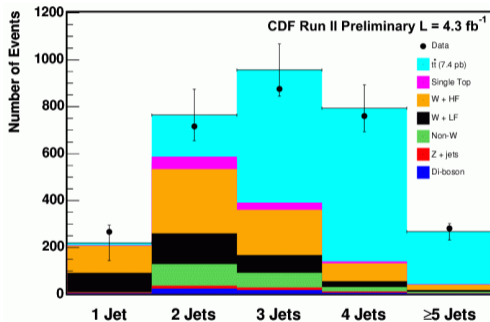
fit top mass is  $175 \pm 10 \text{ GeV}/c^2$

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



⇒ oficjalne odkrycie: 1995

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



Wybieramy lepton +  $\geq 3$  jety

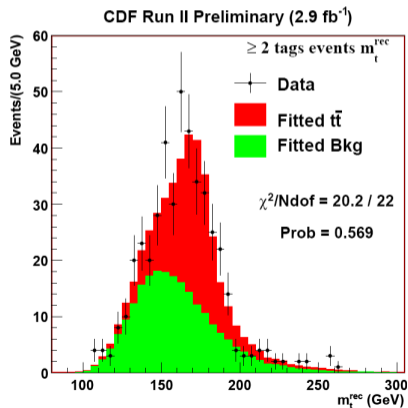
⇒ głównie przypadki  $t\bar{t}$

Zebrano tysiące przypadków...

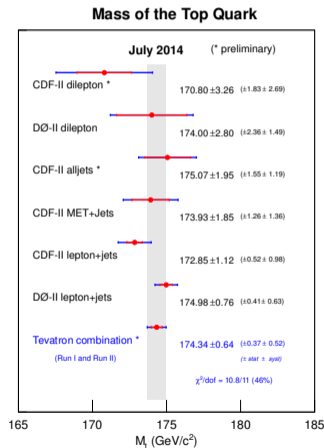


## Tevatron

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



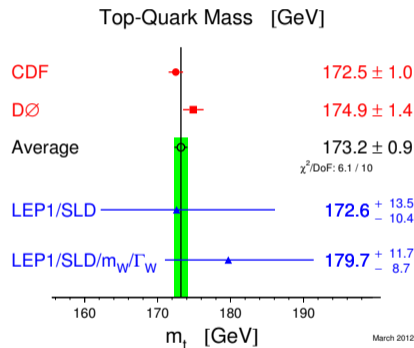
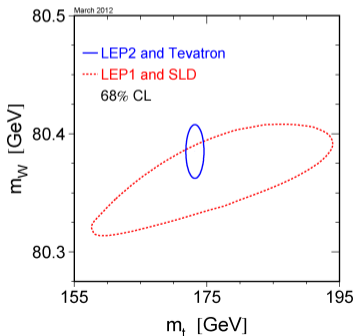
Porównanie wyników dla różnych próbek



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

## Porównanie

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

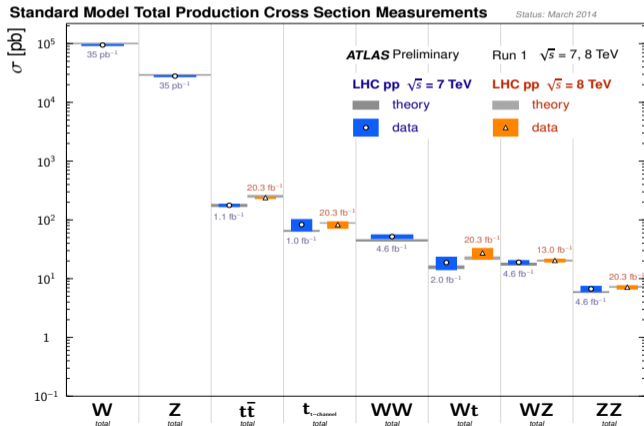


Pomiar bezpośredni zgodny w granicach błędów z przewidywaniami teorii opartymi na precyzyjnych pomiarach przy niższych energiach.

## Eksperymenty przy LHC

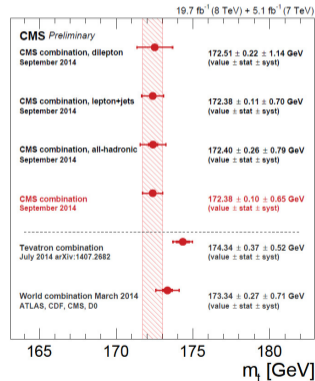
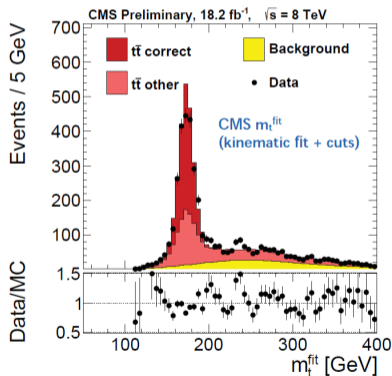
Bardzo szczegółowo badają procesy z produkcją bozonów  $W^\pm$  i  $Z^0$ , oraz kwarku  $t$ . Wszystkie dotychczasowe pomiary w znakomitej zgodności z przewidywaniami MS.

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 Higgosa**
- 4 Precyzyjne testy Modelu Standardowego

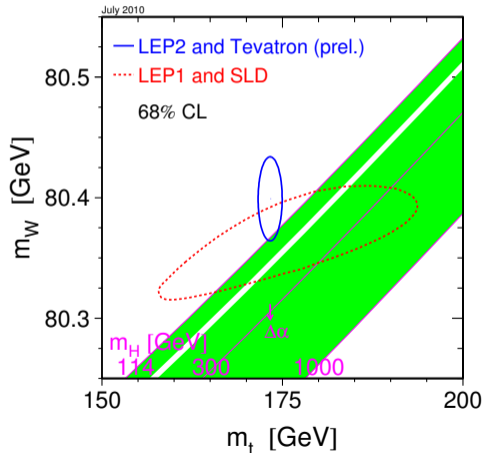
## Poprawki

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 Higgsa

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

Wyniki z roku 2010:

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

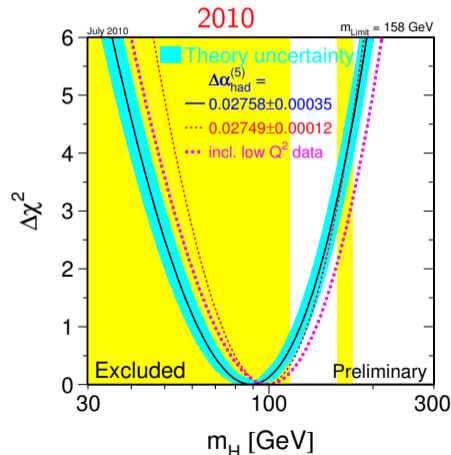
lub:  $m_h < 158 \text{ GeV}$  (95% CL)

Z bezpośrednich poszukiwań:

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

wszystkie dane LEP:

ALEPH + DELPHI + L3 + OPAL



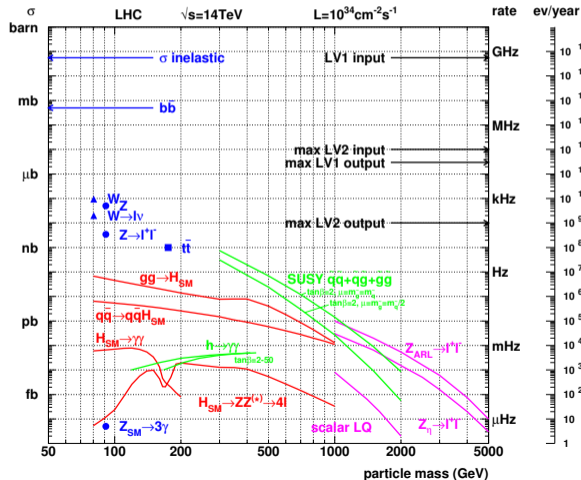
# LHC, CERN, Genewa

Run I: 2009-2012    Run II: 2015-2018





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

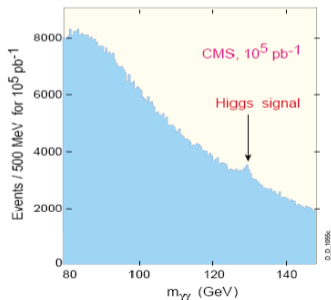
Jednak w zderzeniach  $pp$  mamy **bardzo duże tło** innych procesów, głównie z produkcją kwarków, także  $b\bar{b}$ .

Musimy szukać kanałów o niskim tle...

Dla małych mas najlepszy kanał to

$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

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

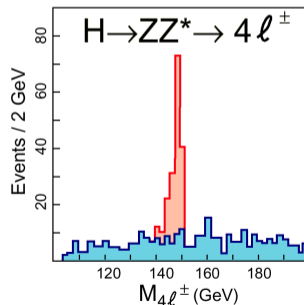


wyniki symulacji komputerowej

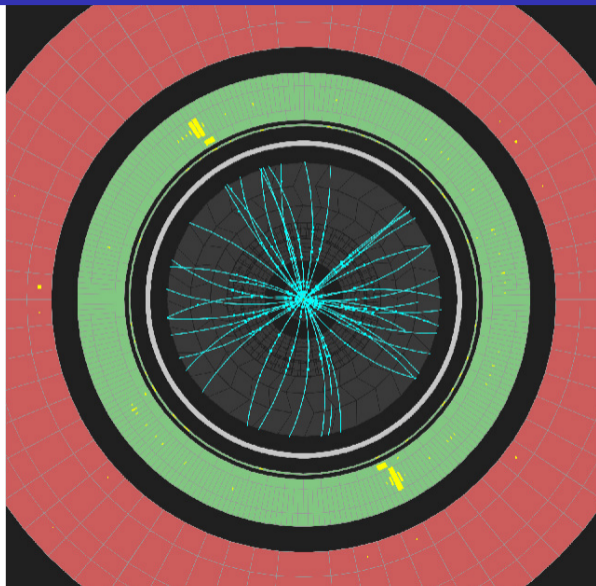
Dla dużych mas najlepszy jest kanał:

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

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



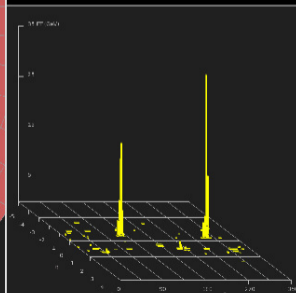
$H \rightarrow \gamma\gamma$



 **ATLAS**  
EXPERIMENT

Run Number: 191426, Event Number: 86694500

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



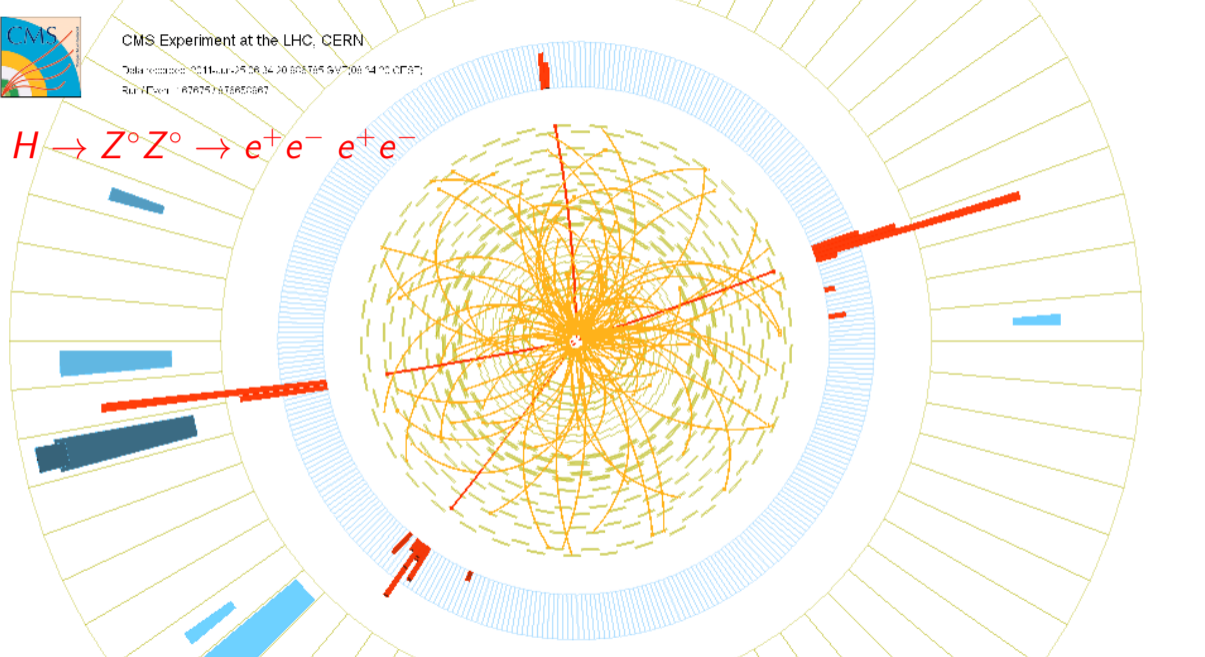


CMS Experiment at the LHC, CERN

Data recorded: 2011-Jun-25 08:34:20.895785.547708.1470.00877

Run/Evt: 187675/1876850867

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



## Masa bozonu Higgsa

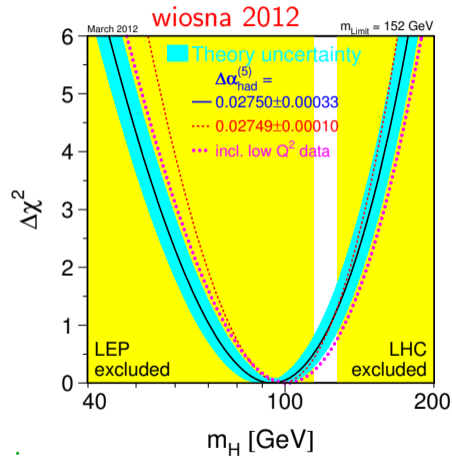
Analiza **wszystkich** dostępnych **danych** z LEP, Tevatron oraz pierwszych wyników z LHC (!).

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

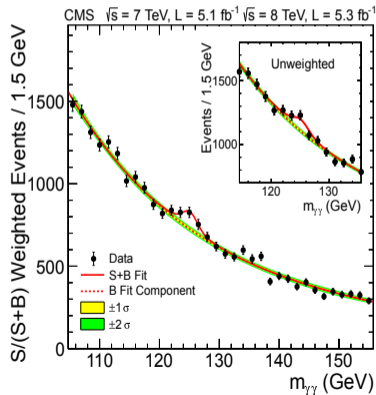
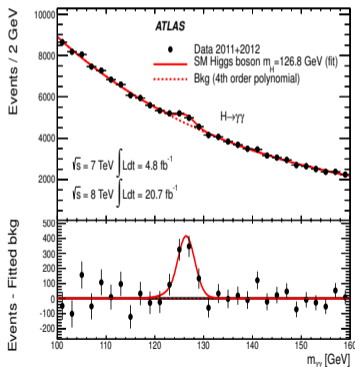
$$114.7\text{GeV} < m_H < 127\text{GeV}$$

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

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

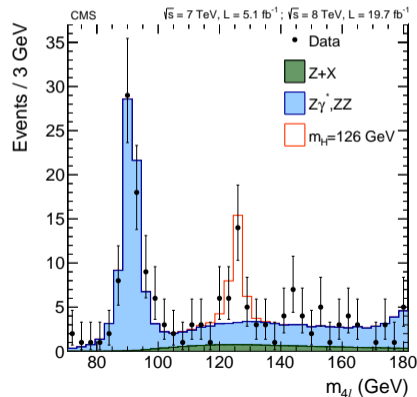
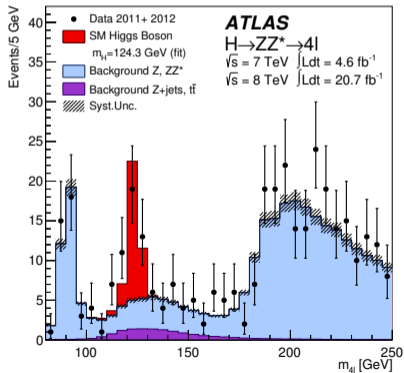


Wyniki przedstawione przez **ATLAS** i **CMS** w lipcu 2012, po uwzględnieniu danych 2009.  
**Sygnal widoczny ponad wszelką wątpliwość**



Wyniki przedstawione przez **ATLAS** i **CMS** w lipcu 2012, po uwzględnieniu danych 2009.  
**Sygnal widoczny ponad wszelką wątpliwość**

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

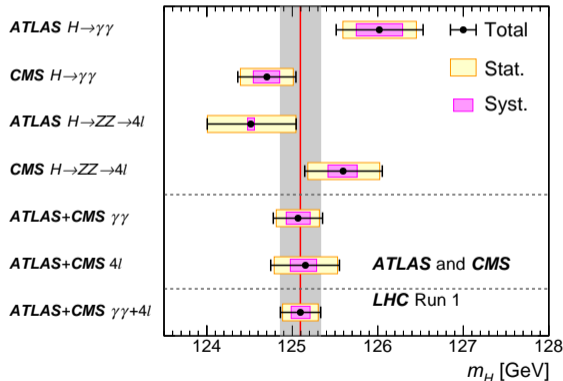


Wyniki przedstawione przez **ATLAS** i **CMS**,  
po uwzględnieniu wszystkich danych zebranych w tzw. Run I (2009-2012).

Dwa wymienione kanały dają także **najdokładniejszy pomiar masy** nowej cząstki.

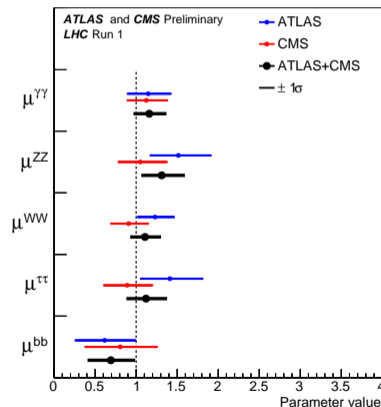
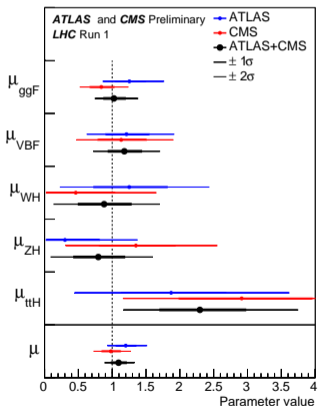
Wyniki łącznej analizy danych z dwóch kanałów i dwóch eksperymentów:

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





Duża statystyka przypadków pozwoliła na pomiar różnych kanałów **produkcji** i **rozpadów**.  
**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 !

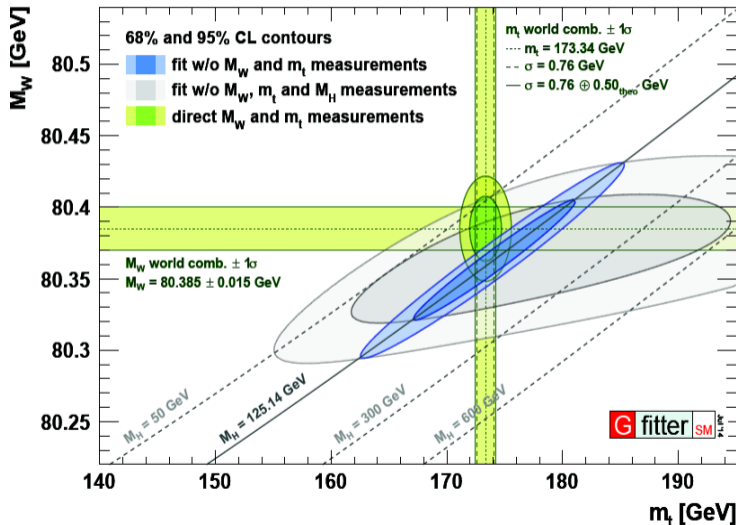
- 1 Bozony  $W^\pm$  i  $Z^0$
- 2 Kwark  $t$
- 3 Bozon Higgosa
- 4 Precyzyjne testy Modelu Standardowego

## Model Standardowy

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

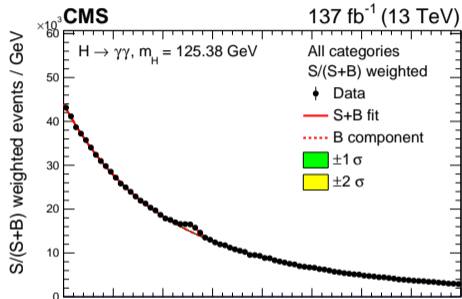
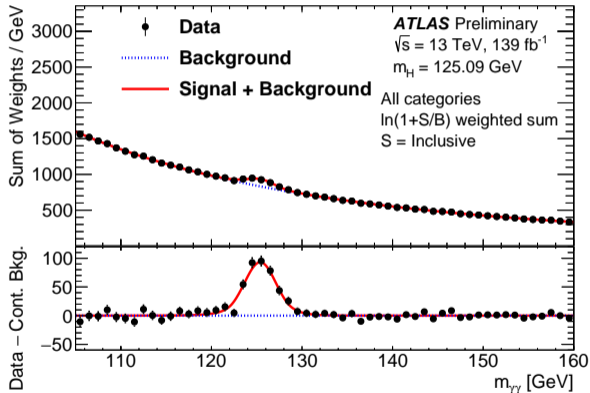
Zmierzona **masa bozonu Higgsa** zgodna z bezpośrednimi pomiarami mas  $W$  i  $t$  masses, oraz wynikami LEP.

Wszystko pasuje...



## Wyniki Run 2 (2015+2018)

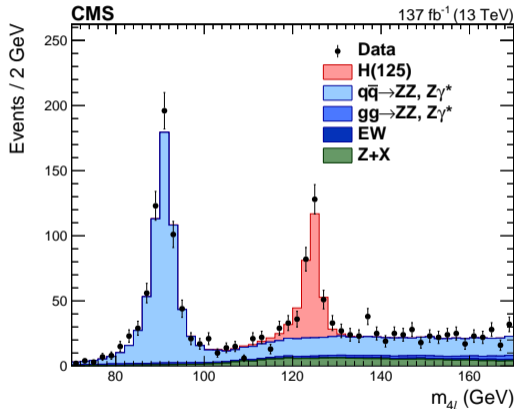
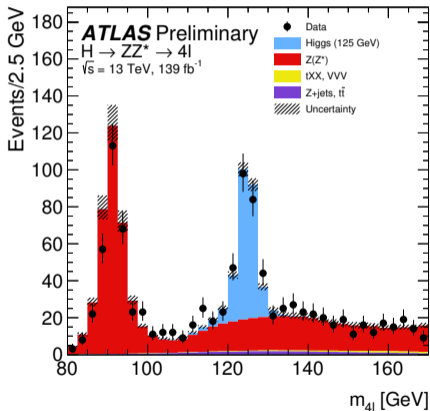
$H \rightarrow \gamma\gamma$



Pomiary zgodne z wynikami Run 1.

## Wyniki Run 2 (2015-2018)

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



Pomiary zgodne z wynikami Run 1.

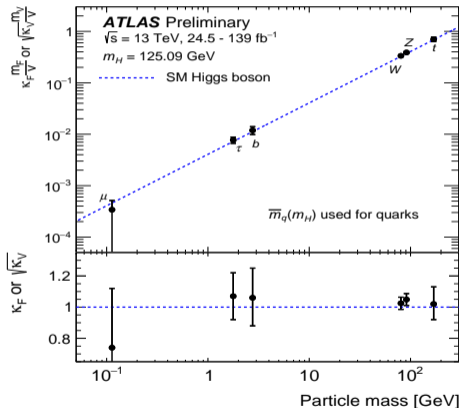
## Sprężenia bozonu Higgsa

Możliwa staje się weryfikacja podstawowego przewidywania modelu:

sprężenie bozonu Higgsa do cząstek jest proporcjonalne do ich masy

Błędy są wciąż duże!

Większa precyzja będzie osiągnięta po zebraniu większej próbki danych po 2022 roku (Run 3)



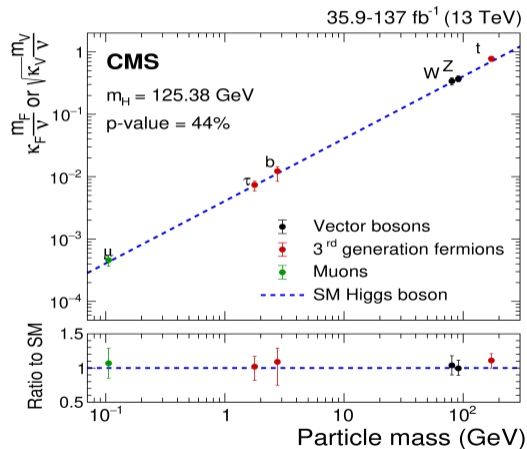
## Sprężenia bozonu Higgsa

Możliwa staje się weryfikacja podstawowego przewidywania modelu:

sprężenie bozonu Higgsa do cząstek jest proporcjonalne do ich masy

Błędy są wciąż duże!

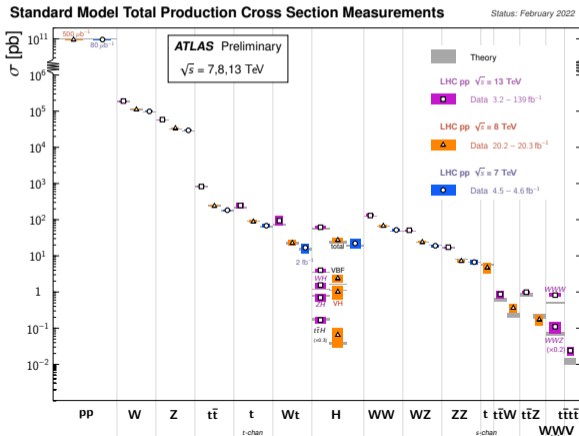
Większa precyzja będzie osiągnięta po zebraniu większej próbki danych po 2022 roku (Run 3)



## 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.

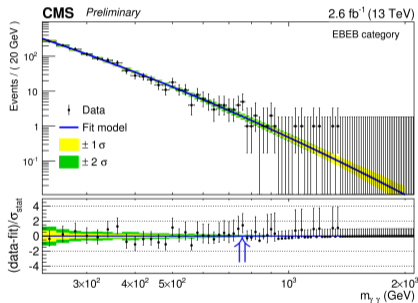
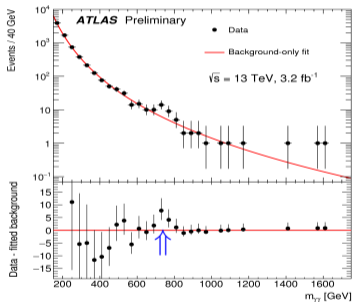
lutu 2022





## 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 !...

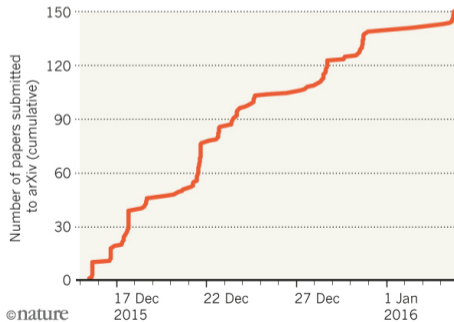
## Wyniki LHC

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

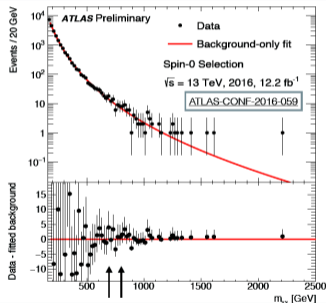
In just 21 days, physicists have posted 150 papers on the arXiv preprint server about tantalizing results at the Large Hadron Collider.



## Wyniki LHC

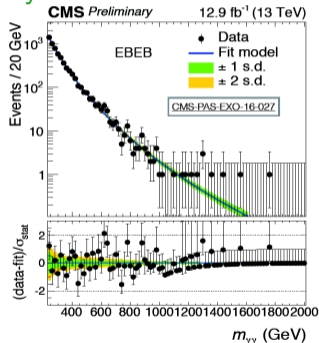
Obserwacja “rezonansu 750 GeV” w LHC zelektryzowała fizyków na całym świecie.

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
- 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 przy niższej niż nominalna energii

1989: uruchomienie LEP

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 przy niższej niż nominalna energii
- 2010-2012: zderzenia  $pp$  przy  $\sqrt{s}=7-8$  TeV (Run 1,  $\sim 25 \text{ fb}^{-1}$ )  
2013-2014: Long Shutdown 1 (LS1) - zamontowano dodatkowe zabezpieczenia
- 2015-2018: zderzenia  $pp$  przy  $\sqrt{s}=13$  TeV (Run 2,  $\sim 100 \text{ fb}^{-1}$ )  
2019-2022: Long Shutdown 2 (LS2) - modernizacja LHC i eksperymentów  
miał się skończyć w 2020, wydłużony z powodu Covid-19 !

1989: uruchomienie LEP

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 przy niższej niż nominalna energii
- 2010-2012: zderzenia  $pp$  przy  $\sqrt{s}=7-8$  TeV (Run 1,  $\sim 25 \text{ fb}^{-1}$ )  
2013-2014: Long Shutdown 1 (LS1) - zamontowano dodatkowe zabezpieczenia
- 2015-2018: zderzenia  $pp$  przy  $\sqrt{s}=13$  TeV (Run 2,  $\sim 100 \text{ fb}^{-1}$ )  
2019-2022: Long Shutdown 2 (LS2) - modernizacja LHC i eksperymentów
- 5 lipca 2022-2025: zderzenia  $pp$  przy  $\sqrt{s}=13.6$  TeV (Run 3, planowane  $450 \text{ fb}^{-1}$ )  
2026-2028: Long Shutdown 3 (LS3) - modernizacja LHC i eksperymentów
- 2029-2040?: zderzenia  $pp$  przy  $\sqrt{s} \approx 14$  TeV  
(High Luminosity LHC, planowane  $3000 - 4000 \text{ fb}^{-1}$ )

1989: uruchomienie LEP

## 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!**

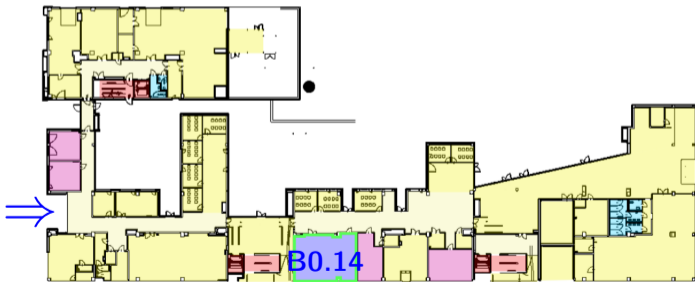
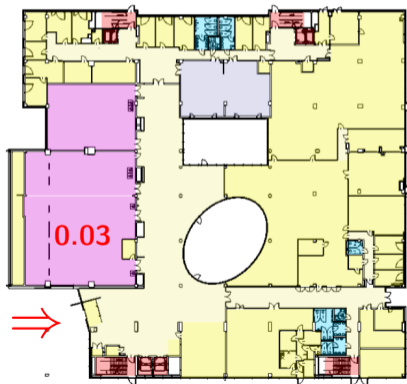
Jest to równocześnie **początek nowej ery badań**:

- 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 - opowiem o niej później**

**Wierzmy, że natura kryje jeszcze kolejne zagadki...**

## Zmiana sali!

Z powodu spotkania świątecznego organizowanego przez Zarząd Samorządu Studentów Wydziału Fizyki, wykład w dniu **20 grudnia** zostaje przeniesiony do **sali B 0.14**.



ulica Pasteura