

Wszechświat Cząstek Elementarnych dla Humanistów

Testy Modelu Standardowego i odkrycie bosonu Higgsa

Aleksander Filip Żarnecki

Wykład ogólnouniwersytecki

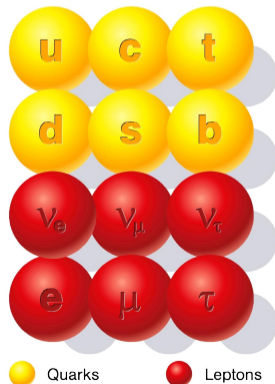


3 grudnia 2024

Cząstki fundamentalne

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

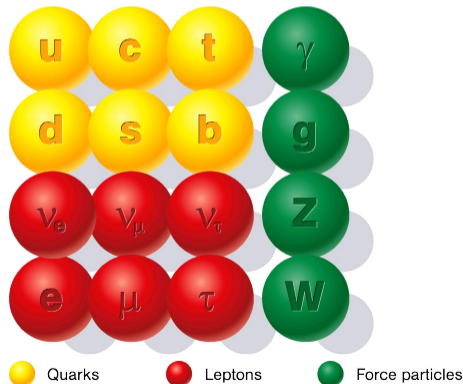
- cząstki materii
kwarki i leptony



Cząstki fundamentalne

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

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



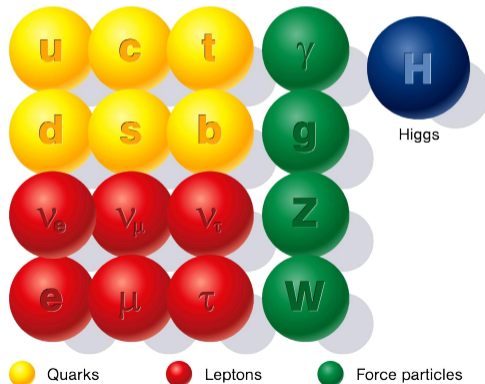
Cząstki fundamentalne

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

- cząstki materii
kwarki i leptony
- nośniki oddziaływań
 γ , 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 Higgsa
- 4 Precyzyjne testy Modelu Standardowego

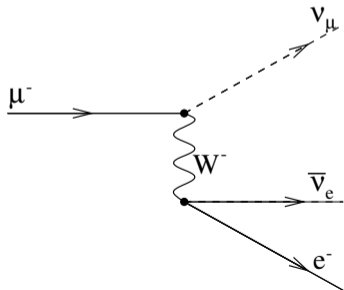
- 1979** - Sheldon L. **Glashow**, Abdus **Salam** i Steven **Weinberg**
Za model oddziaływań elektro-słabych (z bozonami W^\pm i Z^0)
- 1984** - Carlo **Rubia** i Simon **Van der Meer**
Za odkrycie bozonów W^\pm i Z^0
- 1999** - Gerardus 't **Hooft** i Martinus J.G. **Veltman**
Za wykazanie spójności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

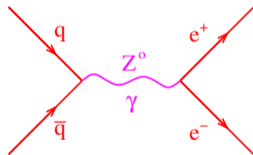
$$m_W \sim 80 \text{ GeV}$$

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

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

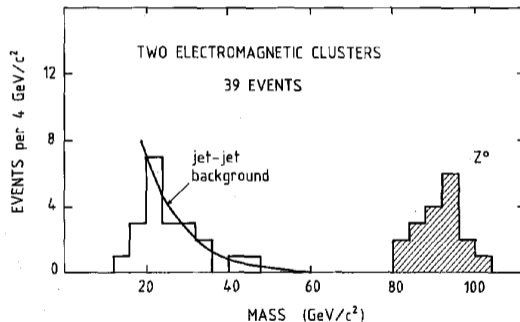
Odkrycie akcelerator SPS w CERN

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

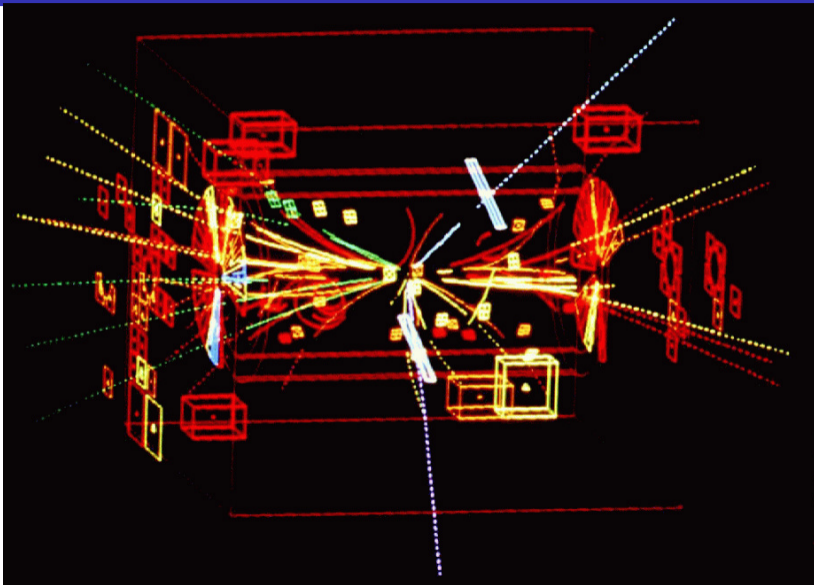


Jest to tzw. process **Drela-Yana**.

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 :

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

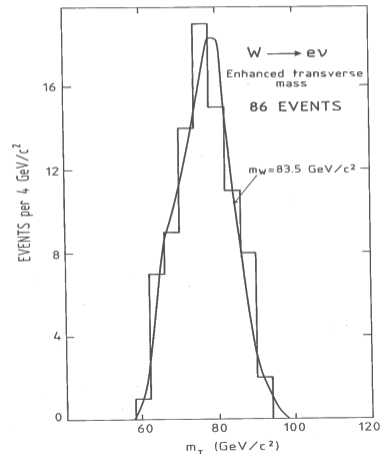
Proces z produkcją neutrina

⇒ niezachowanie pędu poprzecznego

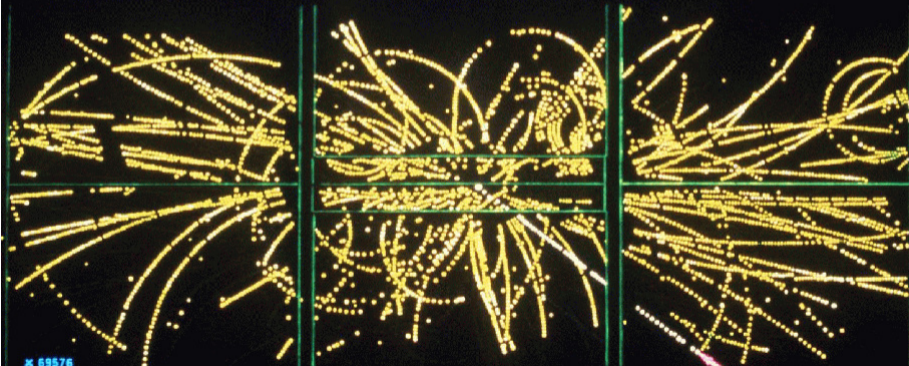
Zasady zachowania wciąż pozwalają nam wyznaczyć masę powstającego bozonu...

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

Wyniki UA1 (1983):



EVENT 2958. 1279.



x 69576

LEP, CERN, Geneva

1989 - 2000: precyzyjne testy Modelu Standardowego



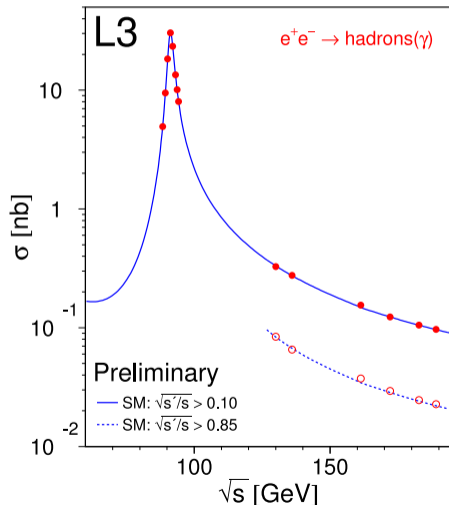
Model Standardowy został bardzo dokładnie **przetestowany** w zderzeniach e^+e^- w akceleratorach LEP i SLC (miliony przypadków).

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

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

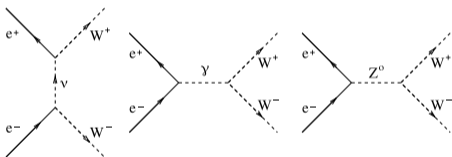
Szerokość maksimum odpowiada **naturalnej szerokości** bozonu Z^0 .

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



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

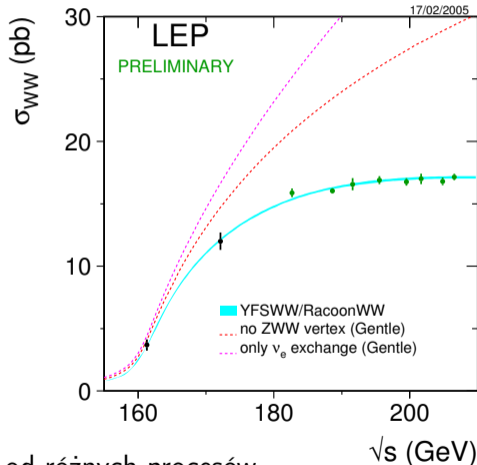
Produkcja bozonów W jedynie w parach, wkład od **trzech** różnych **procesów**:



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)

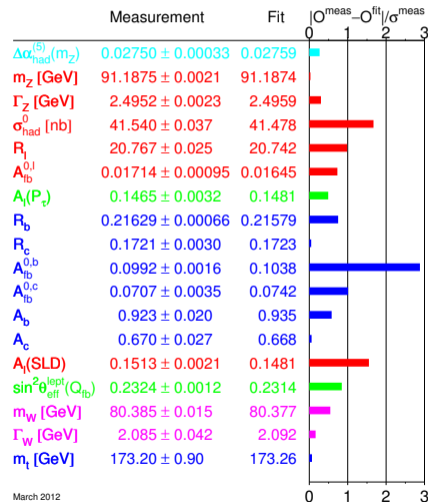
W LEP mierzono dziesiątki procesów.

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

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

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

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



March 2012

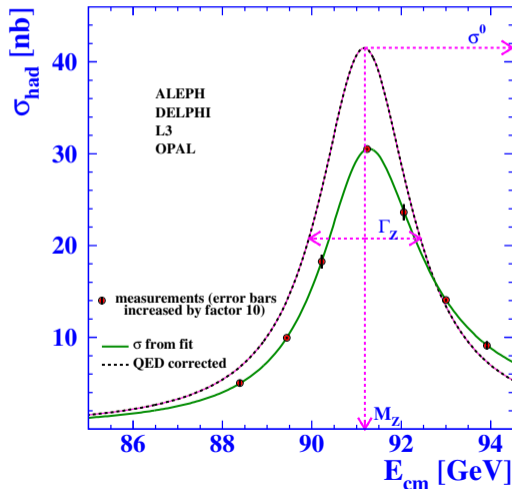
Poprawki

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!

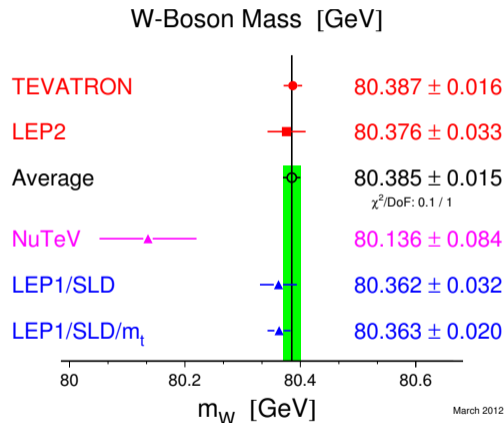
Porównanie przewidywań bez poprawek i z poprawkami wyższych rzędów:



Poprawki

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

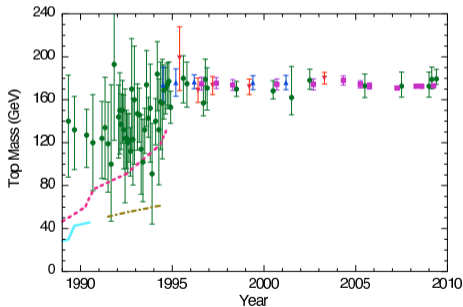
W przypadku bozonu $W^\pm \Rightarrow$



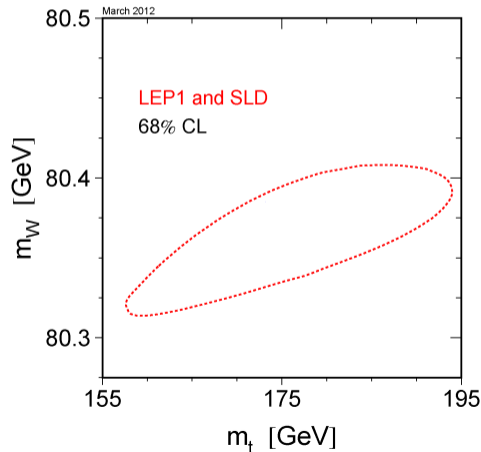
Pomiar bezpośredni zgodny z dokładnością do 0.03% z **przewidywaniami teorii** opartymi na precyzyjnych pomiarach przy niższych energiach.

Przewidywania

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

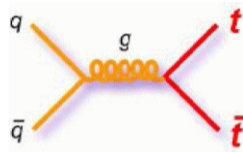


Wyniki pośrednich pomiarów:

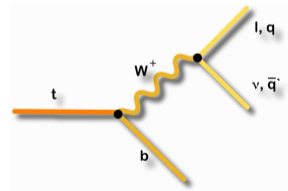


Tevatron zderzenia $p\bar{p}$ przy energii $\sqrt{s} \sim 2$ TeV

Kwark t najczęściej produkowany w wyniku anihilacji kwark-antykwar:



Rozpada się prawie natychmiast (nie tworzy żadnych cząstek):

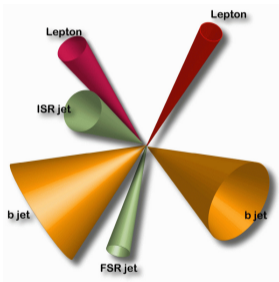


Obserwujemy powstający **kwark b** oraz **lepton** i **neutrino** (brakujący pęd poprzeczny) lub **parę jetów** o masie niezmienniczej odpowiadającej masie bozonu W

Tevatron

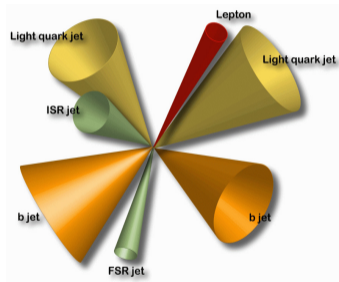
Ponieważ kwark t produkowany jest parami ($t\bar{t}$) mamy 3 klasy przypadków

leptonowe



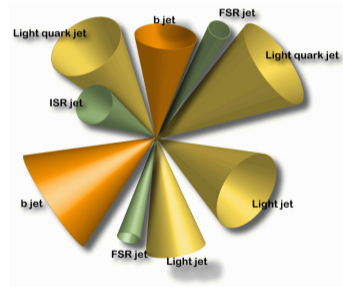
“złota próbka” ale
tylko $\sim 4\%$ przypadków
(e^+e^- , $\mu^+\mu^-$ i $e^\pm\mu^\pm$)

pół-leptonowe



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

hadronowe



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

Tevatron

Jeden z pierwszych przypadków

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

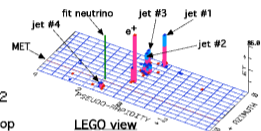
40758_44414

24-September, 1992

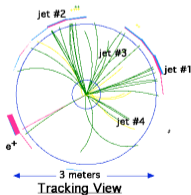
TWO jets tagged by SVX

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

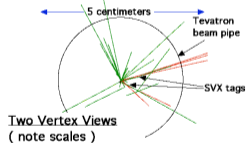
e^+ , Missing E_T , jet #4 from top
jets 1,2,3 from top (2&3 from W)



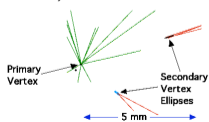
LEGO view



Tracking View



Two Vertex Views
(note scales)

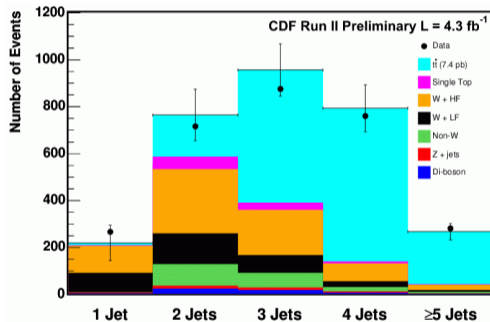


Primary Vertex

Secondary Vertex Ellipses

⇒ oficjalne odkrycie: 1995

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



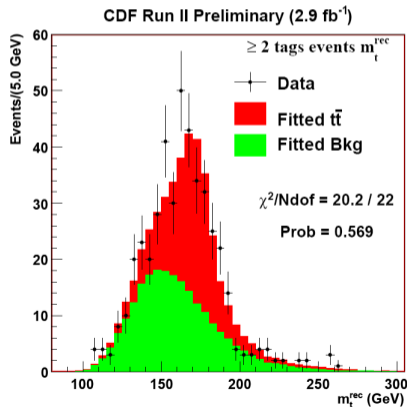
Wybieramy lepton + ≥ 3 jety

⇒ głównie przypadki $t\bar{t}$

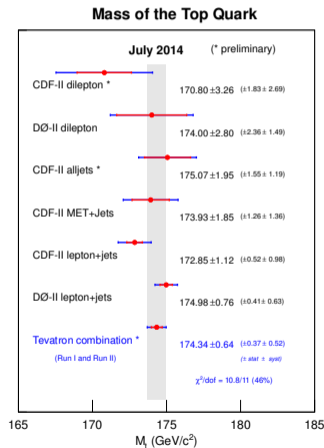
Zebrano tysiące przypadków...

Tevatron

Rozkład rekonstruowanej masy kwarku t
w jednym z rozważanych kanałów



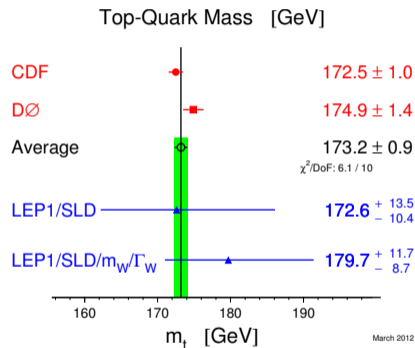
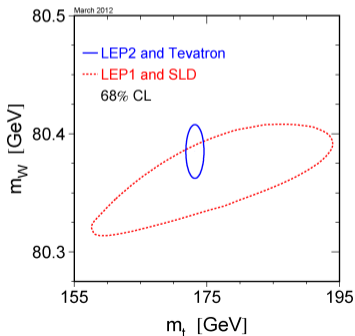
Porównanie wyników dla różnych próbek



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

Porównanie

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

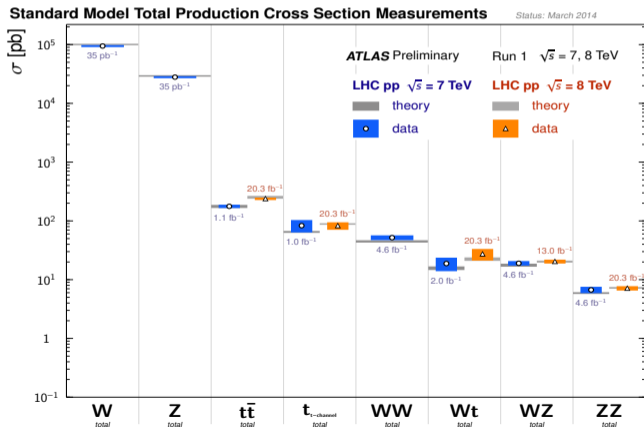


Pomiar bezpośredni zgodny w granicach błędów z przewidywaniami teorii opartymi na precyzyjnych pomiarach przy niższych energiach.

Eksperymenty przy LHC

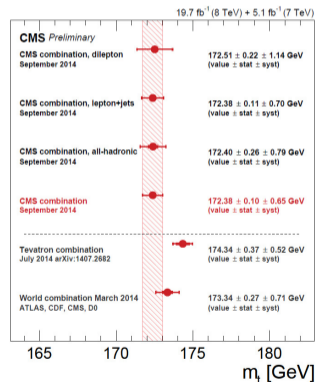
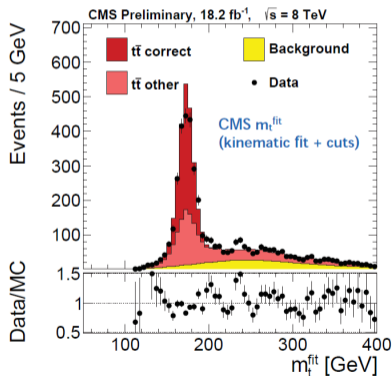
Bardzo szczegółowo badają procesy z produkcją bozonów W^\pm i Z^0 , oraz kwarku t . Wszystkie dotychczasowe pomiary w znakomitej zgodności z przewidywaniami MS.

Run 1:



Eksperymenty przy LHC

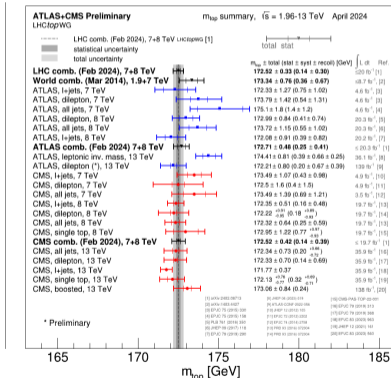
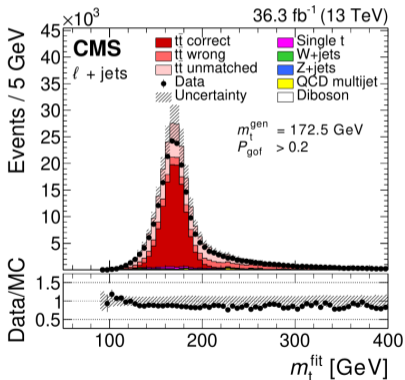
Bardzo szczegółowo badają procesy z produkcją bozonów W^\pm i Z^0 , oraz kwarku t .
Wyniki pomiaru masy kwarku t z danych Run 1 (2009-2012):



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

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 2 (2015-2018):



Dokładność pomiaru zdominowana przez tzw. efekty systematyczne (teoria, kalibracja, ...)

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

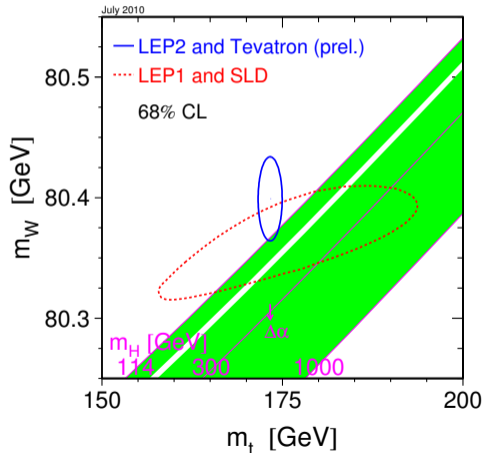
Poprawki

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:

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

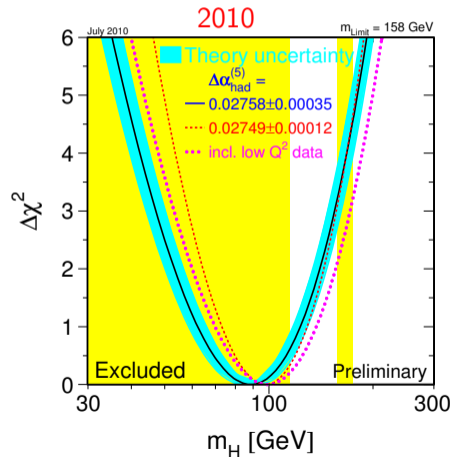
lub: $m_h < 158 \text{ GeV}$ (95% CL)

Z bezpośrednich poszukiwań:

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

wszystkie dane LEP:

ALEPH + DELPHI + L3 + OPAL



LHC, CERN, Genewa

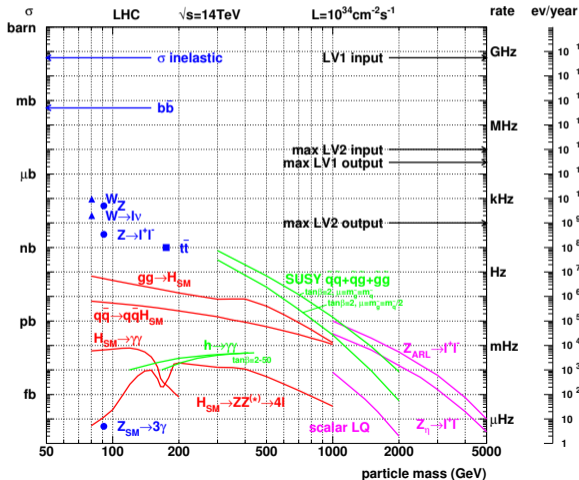
Run I: 2009-2012

Run II: 2015-2018

Run III: 2022-



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

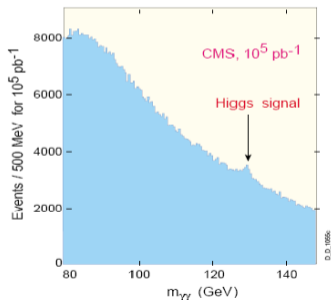
Jednak w zderzeniach pp mamy **bardzo duże tło** innych procesów, głównie z produkcją kwarków, także $b\bar{b}$.

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**

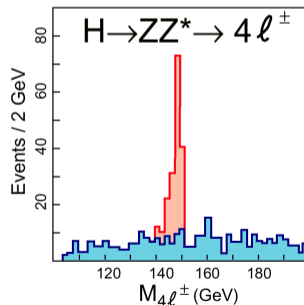


wyniki symulacji komputerowej

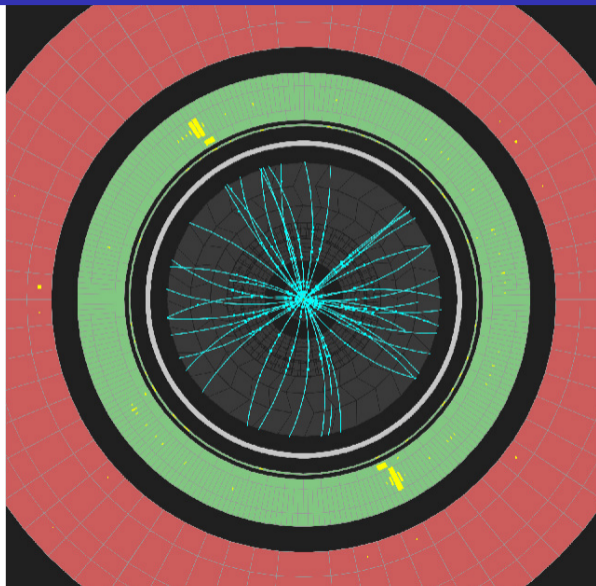
Dla dużych mas najlepszy jest kanał:

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

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



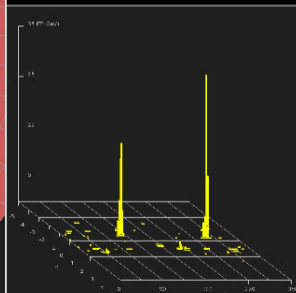
$H \rightarrow \gamma\gamma$



 **ATLAS**
EXPERIMENT

Run Number: 191426, Event Number: 86694500

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



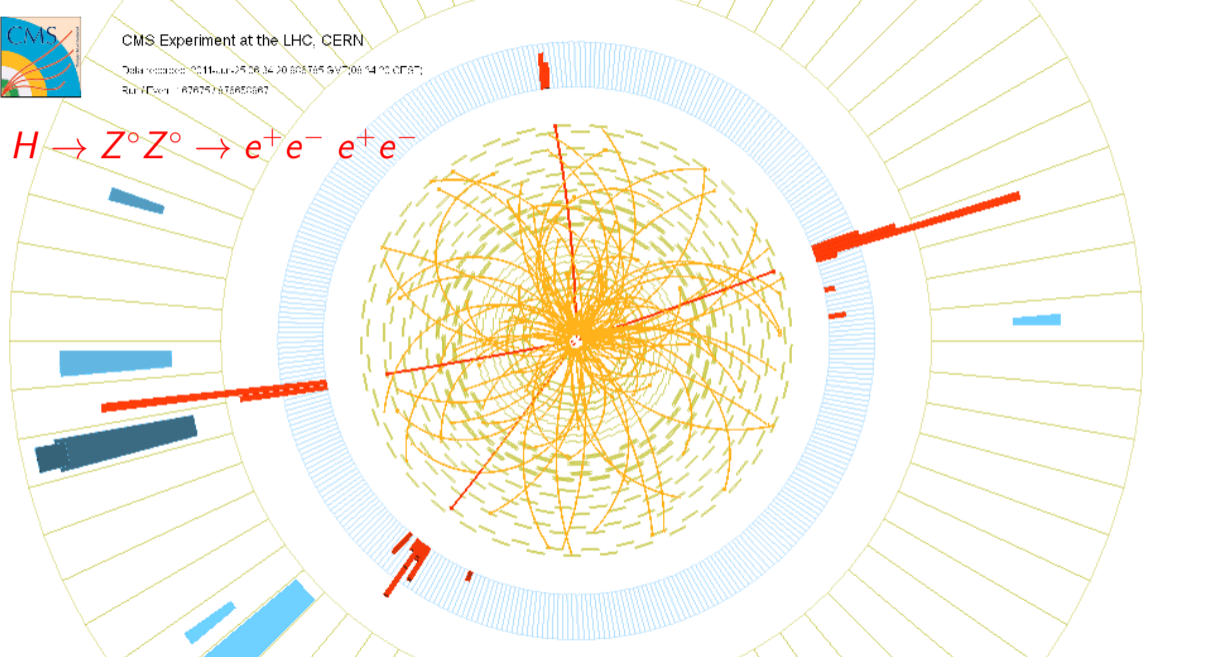


CMS Experiment at the LHC, CERN

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

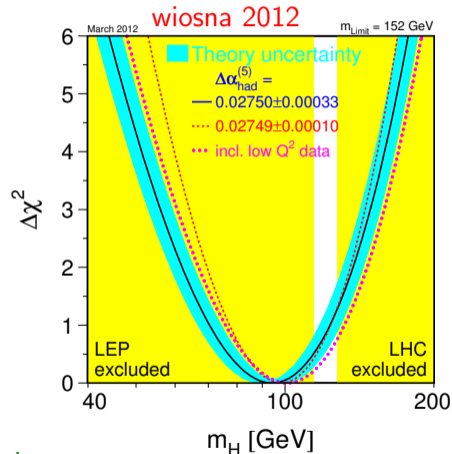
Analiza **wszystkich** dostępnych **danych** z LEP, Tevatron oraz pierwszych wyników z LHC (!).

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

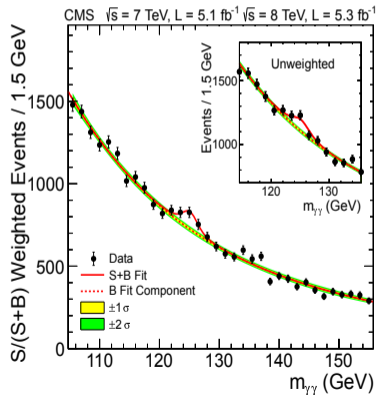
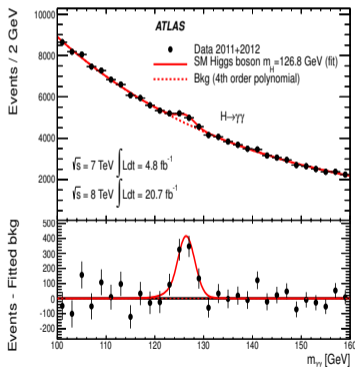
$$114.7 \text{ GeV} < m_H < 127 \text{ GeV}$$

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...

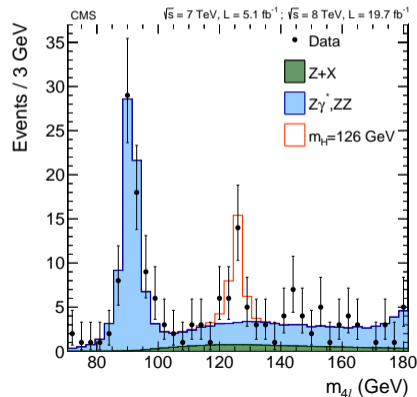
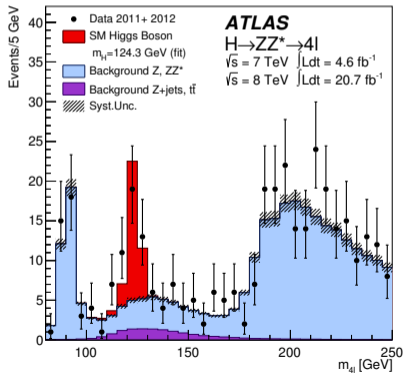


Wyniki przedstawione przez **ATLAS** i **CMS** w lipcu 2012, po uwzględnieniu danych 2009.
Sygnal widoczny ponad wszelką wątpliwość



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

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

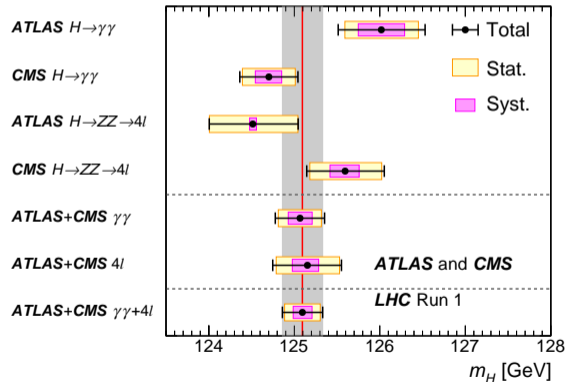


Wyniki przedstawione przez **ATLAS** i **CMS**,
po uwzględnieniu wszystkich danych zebranych w tzw. Run I (2009-2012).

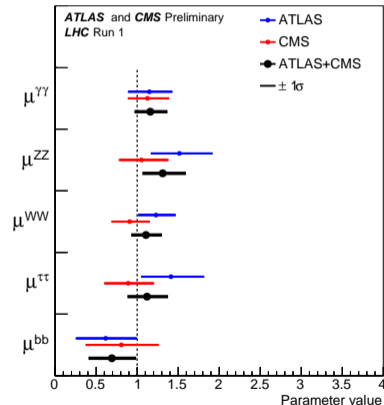
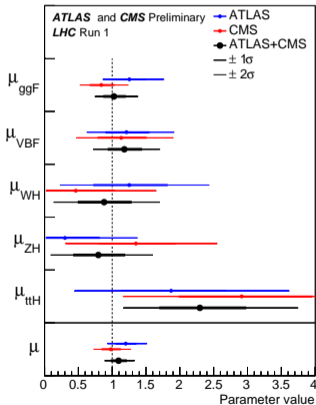
Dwa wymienione kanały dają także **najdokładniejszy pomiar masy** nowej cząstki.

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 !

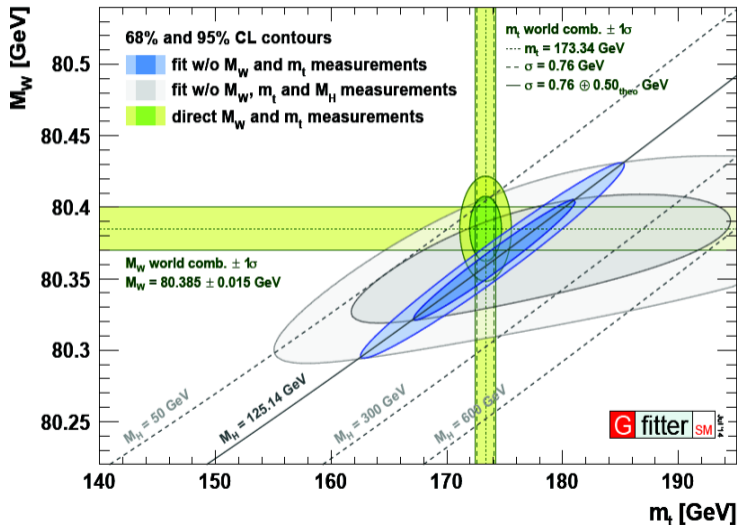
- 1 Bozony W^\pm i Z^0
- 2 Kwark t
- 3 Bozon Higgsa
- 4 Precyzyjne testy Modelu Standardowego

Model Standardowy

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

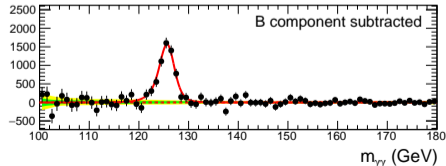
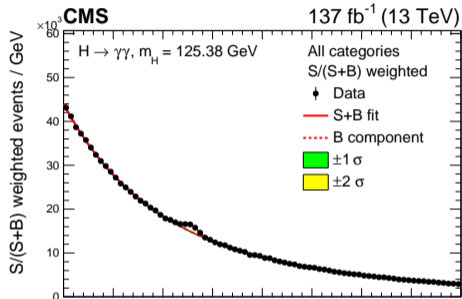
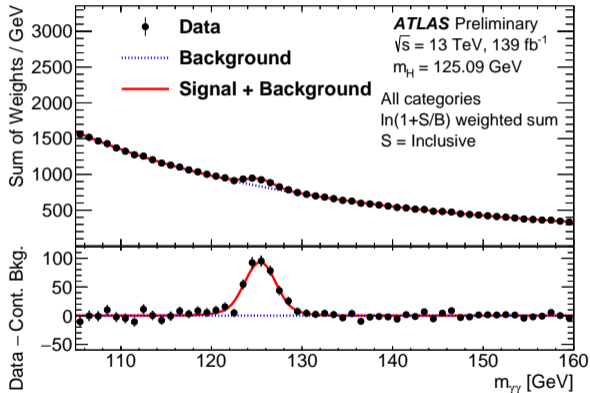
Zmierzona **masa bozonu Higgsa** zgodna z bezpośrednimi pomiarami mas W i t masses, oraz wynikami LEP.

Wszystko pasuje...



Wyniki Run 2 (2015-2018)

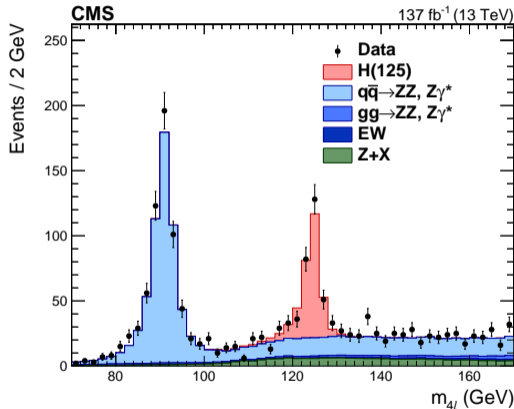
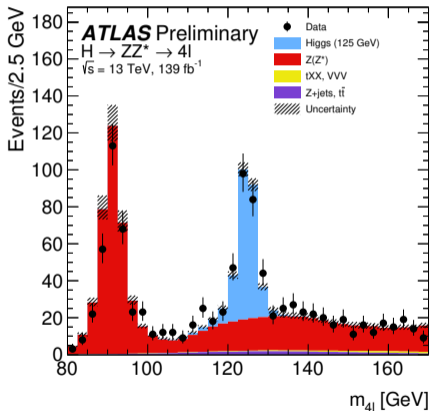
$H \rightarrow \gamma\gamma$



Pomiary zgodne z wynikami Run 1.

Wyniki Run 2 (2015-2018)

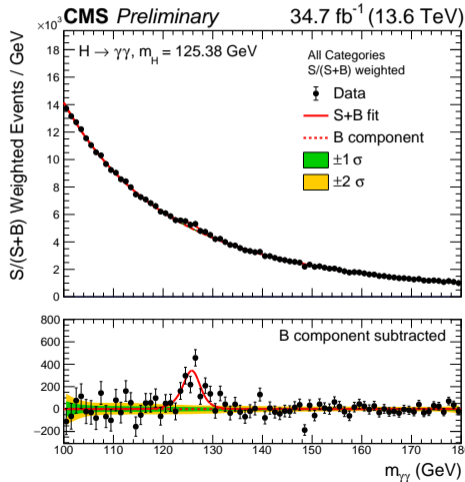
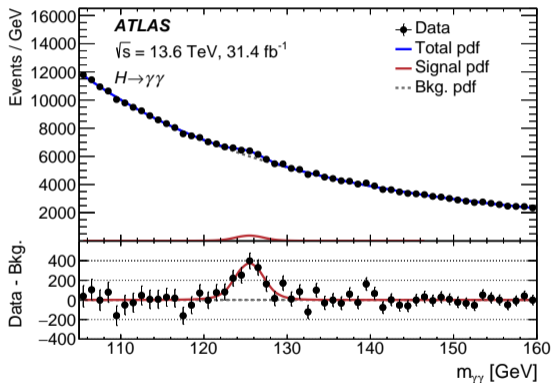
$$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$$



Pomiary zgodne z wynikami Run 1.

Wstępne wyniki Run 3 (rozpoczęty w 2022)

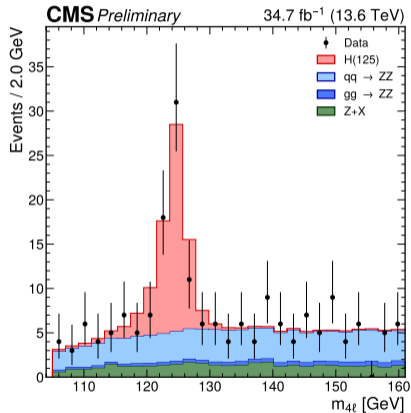
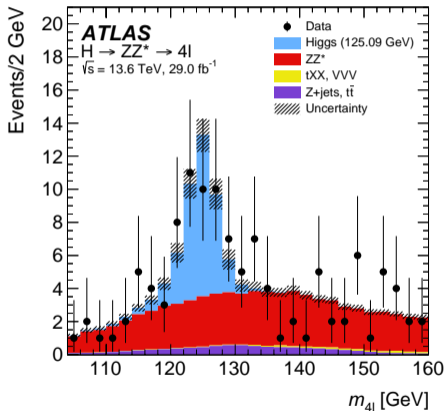
$H \rightarrow \gamma\gamma$



Pomiary zgodne z wynikami Run 1 i 2.

Wstępne wyniki Run 3 (rozpoczęty w 2022)

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



Pomiary zgodne z wynikami Run 1 i 2.

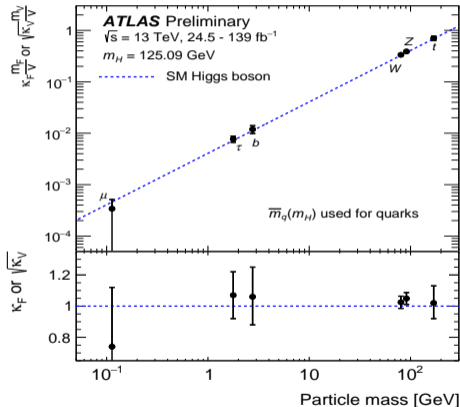
Sprężenia bozonu Higgsa Run 2

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 analizie większej próbki danych z Run 3 (2022-2026)



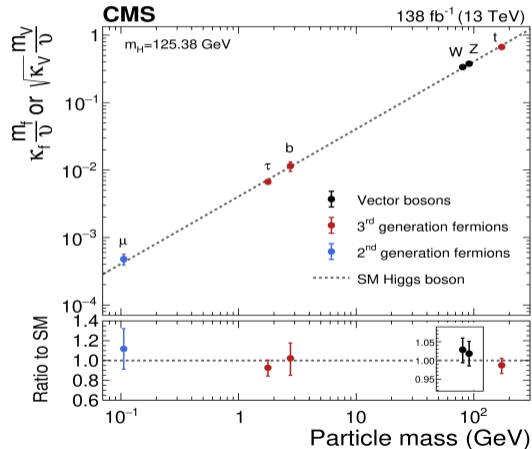
Sprężenia bozonu Higgosa Run 2

Możliwa staje się weryfikacja podstawowego przewidywania modelu:

sprężenie bozonu Higgosa do cząstek jest proporcjonalne do ich masy

Błędy są wciąż duże!

Większa precyzja będzie osiągnięta po analizie większej próbki danych z Run 3 (2022-2026)



Eksperymenty przy LHC

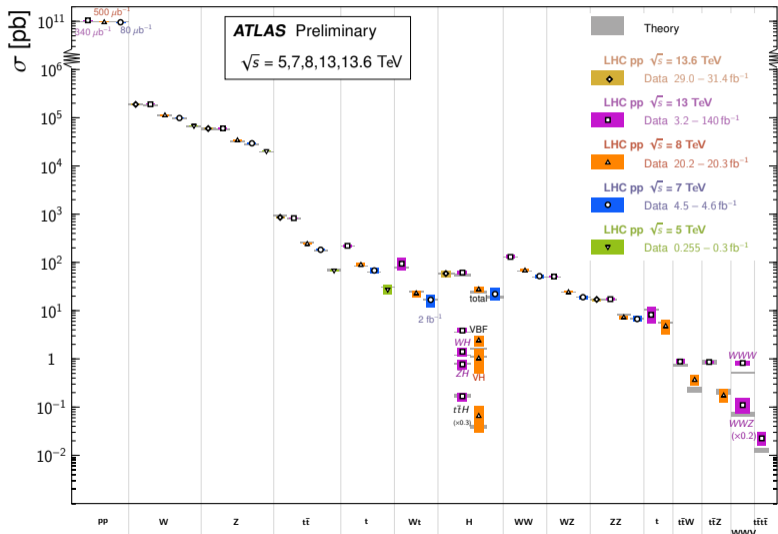
Bardzo szczegółowo badają procesy z produkcją bozonów W^\pm , Z^0 i H , oraz kwarku t .

Ogromna większość pomiarów w znakomitej zgodności z SM.

czerwiec 2024

Standard Model Total Production Cross Section Measurements

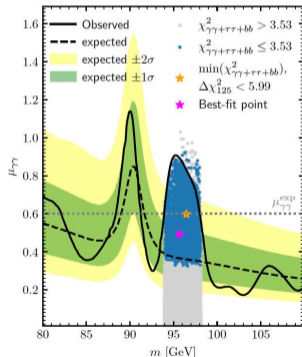
Status: June 2024



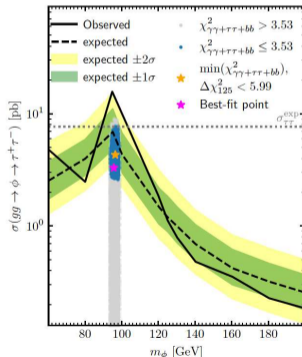
Niewielkie odstępstwa?

Wśród ogromnej liczby pomiarów znajdują się oczywiście takie, które nie do końca zgadzają się z przewidywaniami \Rightarrow ogromne zainteresowanie i liczne prace teoretyków...

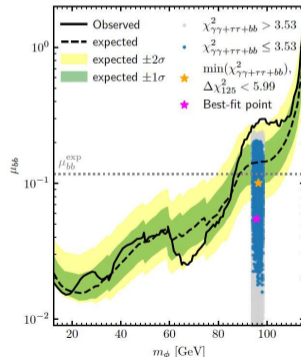
$$pp \rightarrow h_{95} \rightarrow \gamma\gamma$$



$$gg \rightarrow h_{95} \rightarrow \tau^+\tau^-$$



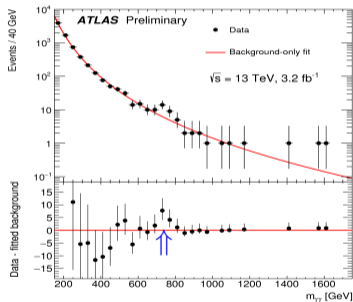
$$e^+e^- \rightarrow Zh_{95} \rightarrow Zb\bar{b}$$



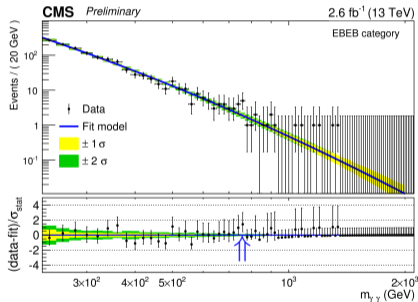
Sven Heinemeyer @ First ECFA Workshop on e^+e^- Higgs/EW/top factories, październik 2022

Poprzednie “sygnały”

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 !...

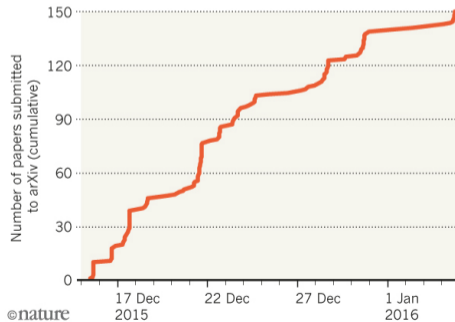
Poprzednie “sygnały”

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

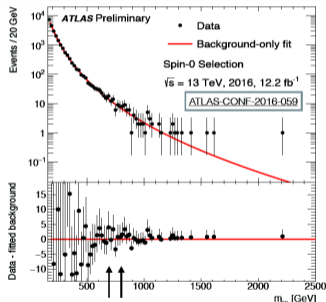
In just 21 days, physicists have posted 150 papers on the arXiv preprint server about tantalizing results at the Large Hadron Collider.



Poprzednie “sygnały”

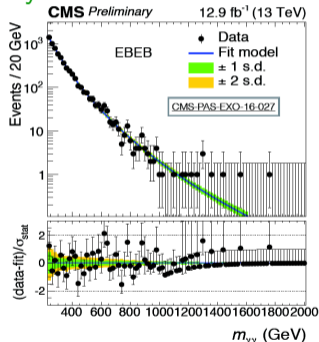
Obserwacja “rezonansu 750 GeV” w LHC zelektryzowała fizyków na całym świecie.

Teoretycy rzucili się do pracy, produkując setki nowych modeli...



Significance in 2015+2016:

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



$m=760$ 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
- 2022-2026: zderzenia pp przy $\sqrt{s}=13.6$ TeV (Run 3, planowane 450 fb^{-1})

1989: uruchomienie LEP

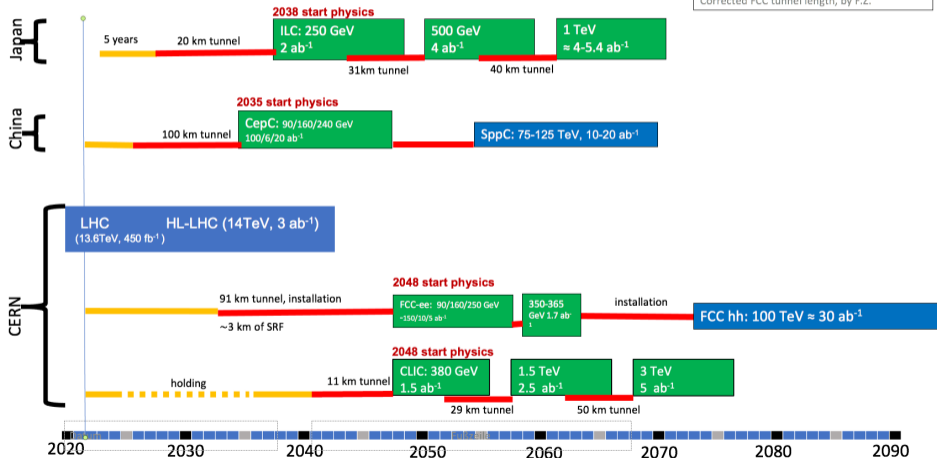
Projekt badań przy LHC jest rozpisany na wiele lat:

- 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
- 2022-2026: zderzenia pp przy $\sqrt{s}=13.6$ TeV (Run 3, planowane 450 fb^{-1})
2026-2029: Long Shutdown 3 (LS3) - modernizacja LHC i eksperymentów
- 2030-2042: zderzenia pp przy $\sqrt{s} \approx 14$ TeV High Luminosity LHC, planowane 3000 fb^{-1}
2034-2035: Long Shutdown 4 (LS4) - dalsze modernizacje eksperymentów

Indicative scenarios of future colliders [considered by ESG]

- Proton collider
- Electron collider
- Muon collider
- Construction/Transformation
- Preparation / R&D

Original from ESG by [Urusla Bassler](#)
 Updated July 25, 2022 by Meenakshi Narain
 Corrected FCC tunnel length, by F.Z.



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...