

Wszechświat Cząstek Elementarnych dla Humanistów

Testy Modelu Standardowego i odkrycie bosonu Higgsa

Aleksander Filip Żarnecki

Wykład ogólnouniwersytecki



10 grudnia 2019

- 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:

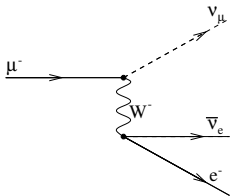
oddziaływania elektrosłabe + **chromodynamika kwantowa (QCD)**

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

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 :

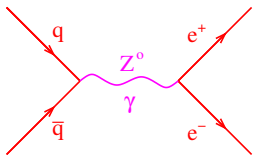
$$m_W \sim 80 \text{ GeV}$$

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

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

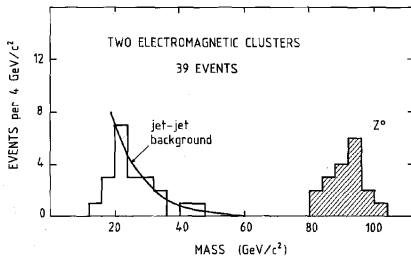
Odkrycie akcelerator SPS w CERN

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

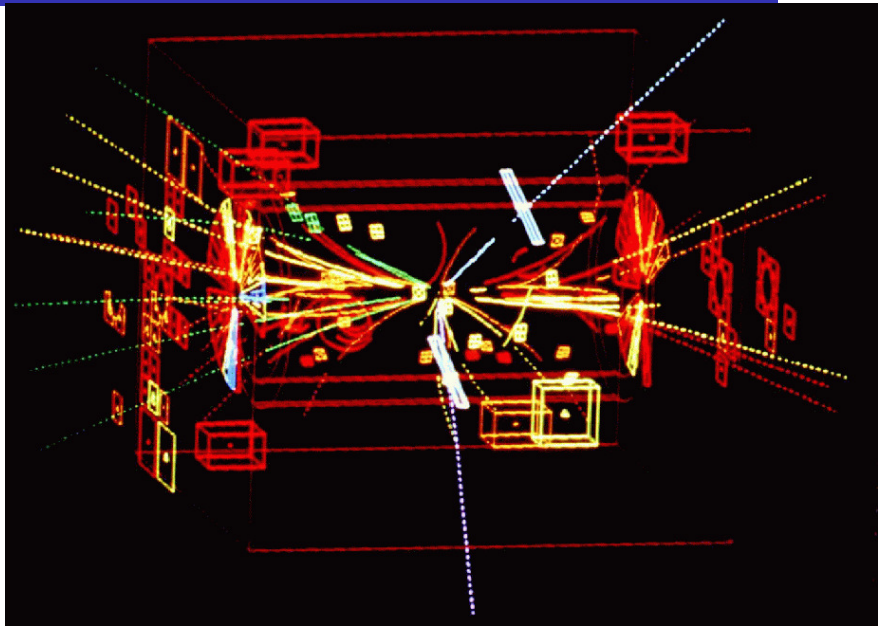


Jest to tzw. process **Drela-Yana**.

Wyniki UA1 (1983):



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



Odkrycie

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



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):

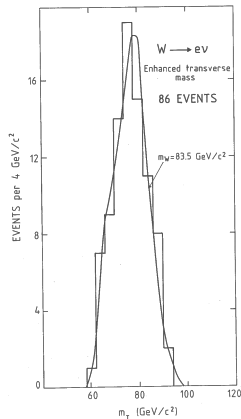


Fig. 3b



LEP, CERN, Geneva

1989 - 2000: precyzyjne testy Modelu Standardowego



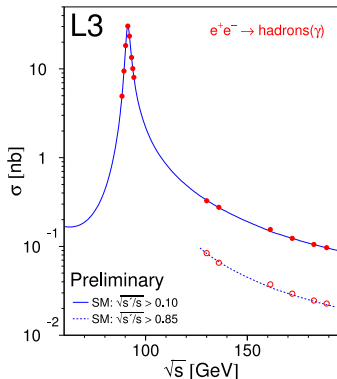
Model Standardowy został bardzo dokładnie **przetestowany** w zderzeniach e^+e^- w akceleratorach LEP i SLC (miliony przypadków).

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

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

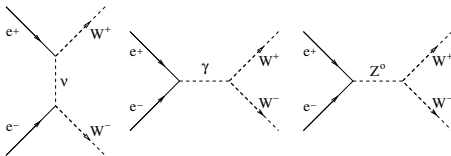
Szerokość maksimum odpowiada **naturalnej szerokości** bozonu Z^0 .

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



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

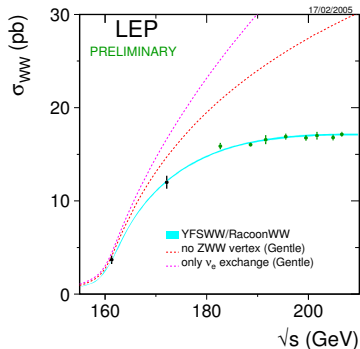
Produkcja bozonów W jedynie w parach, wkład od **trzech** różnych **procesów**:



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 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

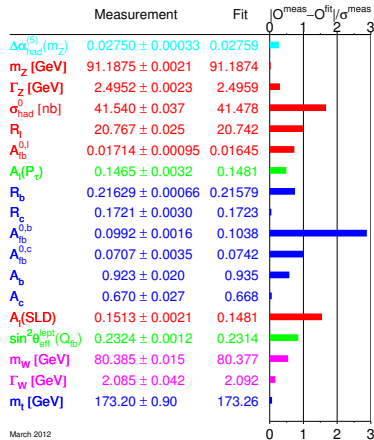
W LEP mierzono dziesiątki procesów.

Model Standardowy ma jedynie **trzy wolne parametry** opisujące oddziaływania (+ masy fermionów i 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** !

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



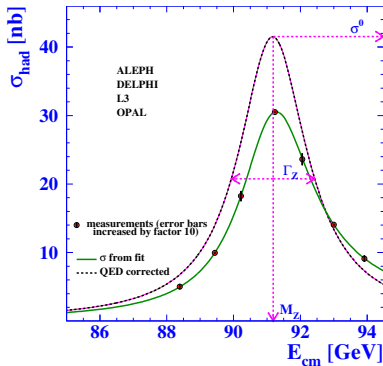
Poprawki

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!

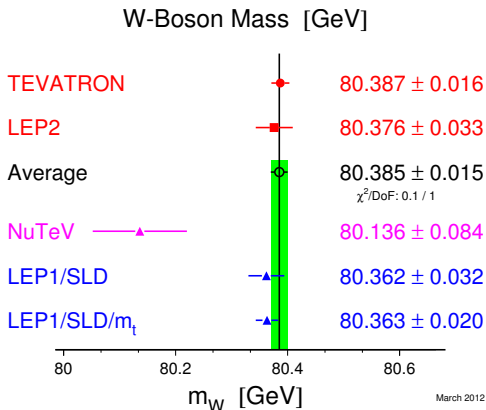
Porównanie przewidywań bez poprawek i z poprawkami wyższych rzędów:



Poprawki

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

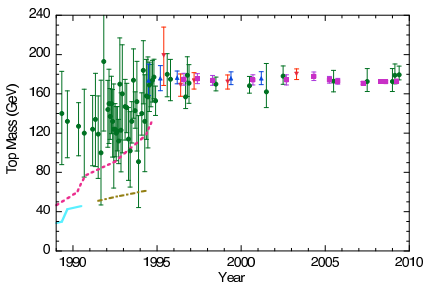
W przypadku bozonu $W^\pm \Rightarrow$



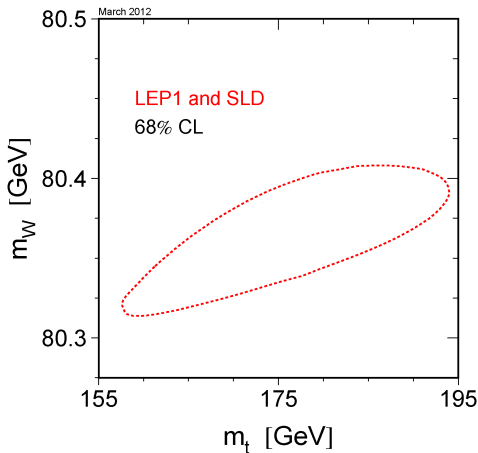
Pomiar bezpośredni zgodny z dokładnością do 0.03% z **przewidywaniami teorii** opartymi na precyzyjnych pomiarach przy niższych energiach.

Przewidywania

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

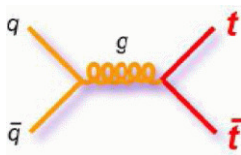


Dzisiejsze wyniki pośrednie:

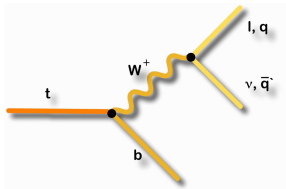


Tevatron zderzenia $p\bar{p}$ przy energii $\sqrt{s} \sim 2$ TeV

Kwark t najczęściej produkowany w wyniku anihilacji kwark-antykwar:



Rozpada się prawie natychmiast (nie tworzy żadnych cząstek):

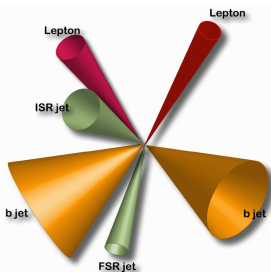


Obserwujemy powstający kwark b oraz lepton i neutrino (brakujący pęd poprzeczny) lub parę jetów o masie niezmienniczej odpowiadającej masie W

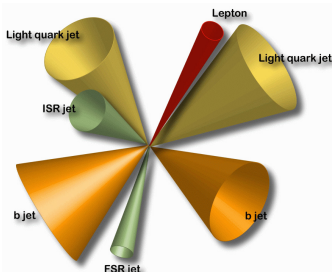
Tevatron

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

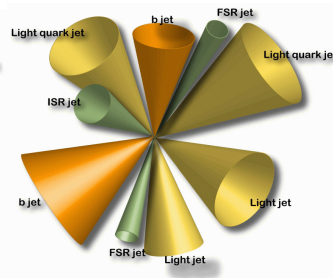
leptonowe



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 μ^\pm)
małe tło

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

Tevatron

Jeden z pierwszych przypadków

$e + 4$ jet event

40758_44414

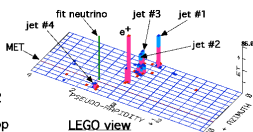
24-September, 1992

TWO jets tagged by SVX

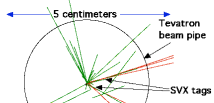
fit top mass is $175 \pm 10 \text{ GeV}/c^2$

e^+ , Missing E_T , jet #4 from top

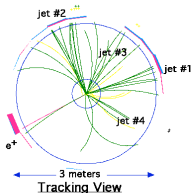
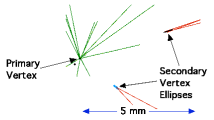
jets 1,2,3 from top (2&3 from W)



LEGO view



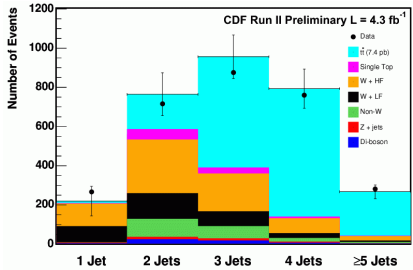
Two Vertex Views (note scales)



Tracking View

⇒ oficjalne odkrycie: 1995

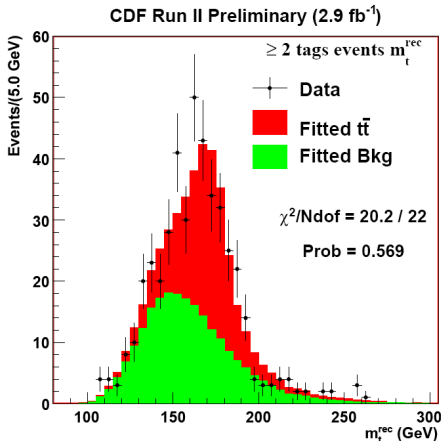
Liczba obserwowanych jetów dla przypadków z izolowanym leptonem (e^\pm, μ^\pm)



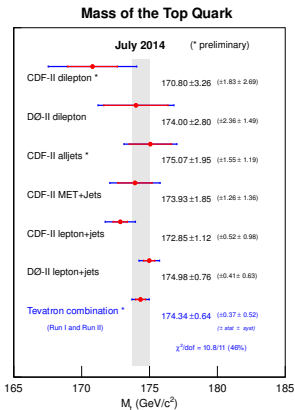
Wybieramy lepton + ≥ 3 jety
 ⇒ głównie przypadki $t\bar{t}$
 Zebrano tysiące przypadków...

Tevatron

Rozkład rekonstruowanej masy kwarku t w jednym z rozważanych kanałów



Porównanie wyników dla różnych próbek

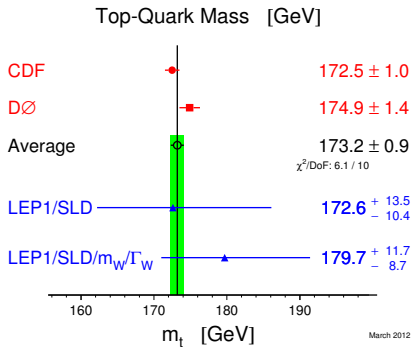
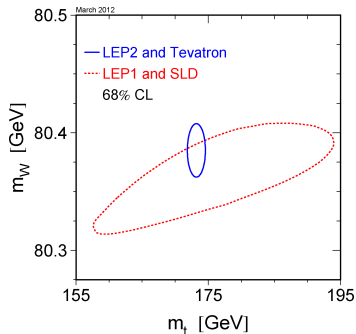


CDF + DØ:

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

Porównanie

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

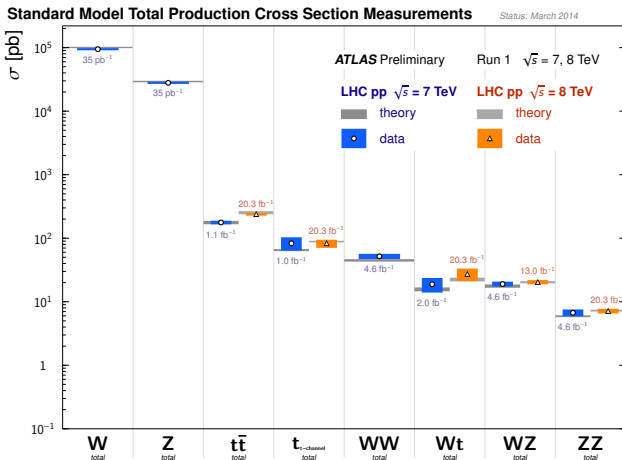


Pomiar bezpośredni zgodny w granicach błędów z przewidywaniami teorii opartymi na precyzyjnych pomiarach przy niższych energiach.

Eksperymenty przy LHC

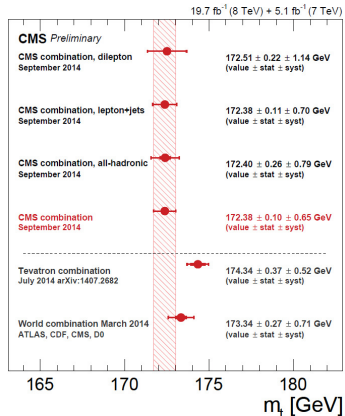
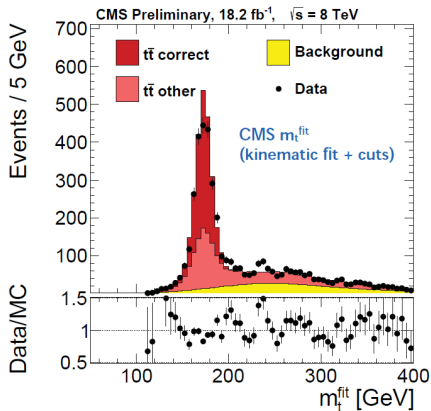
Bardzo szczegółowo badają procesy z produkcją bozonów W^\pm i Z^0 , oraz kwarku t . Wszystkie dotychczasowe pomiary w znakomitej zgodności z SM.

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

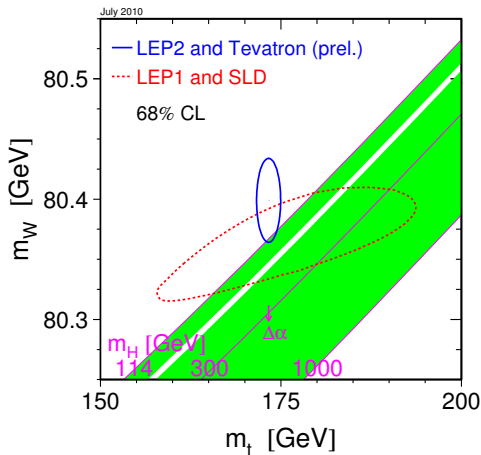
Poprawki

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 Higsa 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:

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

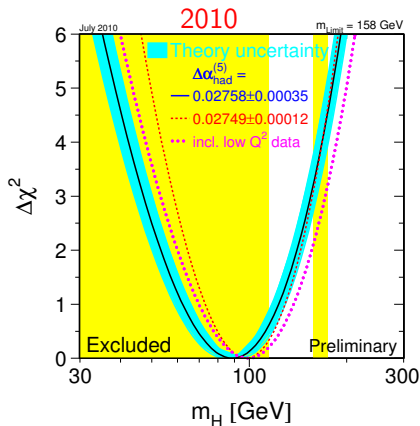
lub: $m_h < 158 \text{ GeV}$ (95% CL)

Z bezpośrednich poszukiwań:

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

wszystkie dane LEP:

ALEPH + DELPHI + L3 + OPAL

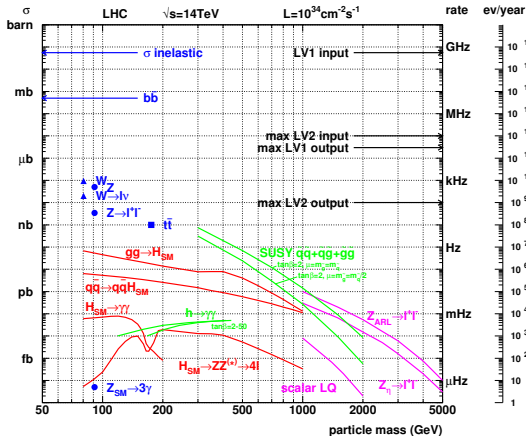


LHC, CERN, Genewa

Run I: 2009-2012 Run II: 2015-2018



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

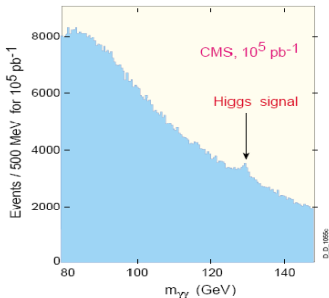
Jednak w zderzeniach pp mamy jest **bardzo duże tło** innych procesów, głównie z produkcją kwarków, także $b\bar{b}$.

Musimy szukać kanałów o niskim tle...

Dla małych mas najlepszy kanał to

$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

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



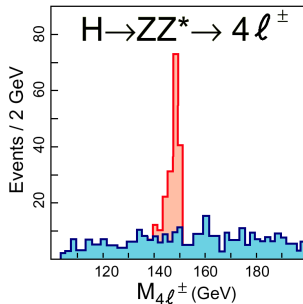
wyniki symulacji komputerowej

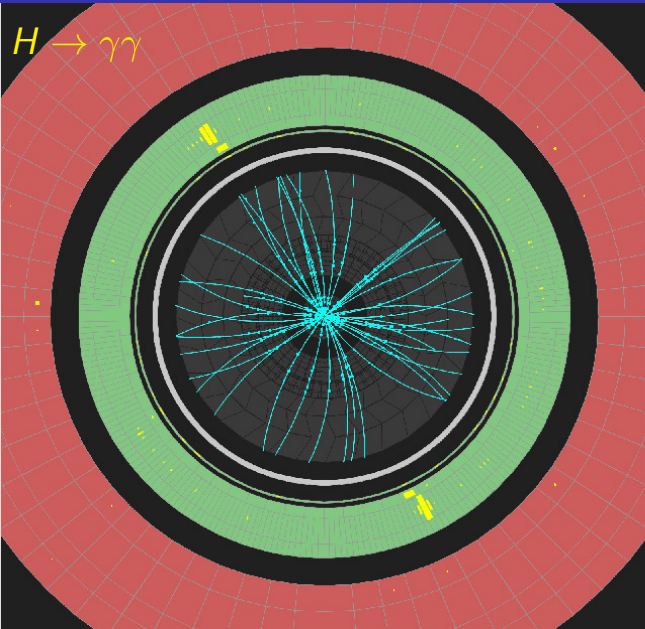
Dla dużych mas najlepszy jest kanał:

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

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

Ale jest mało przypadków...

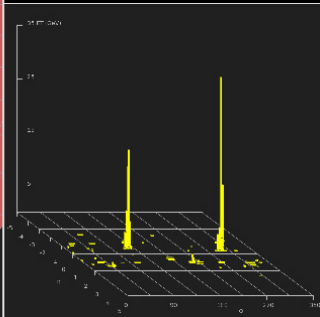




ATLAS EXPERIMENT

Run Number: 191426, Event Number: 86694500

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



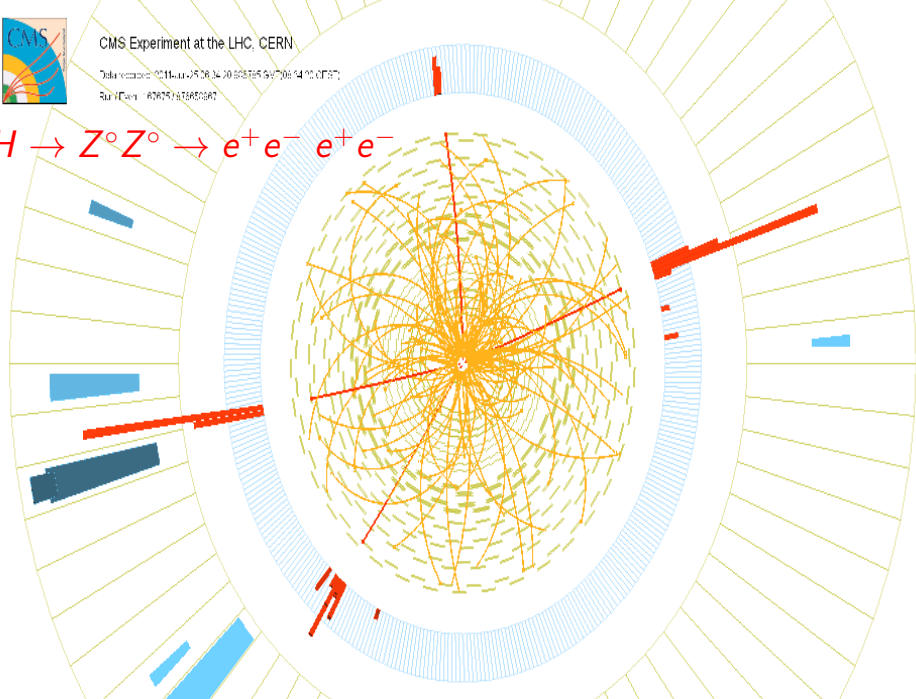


CMS Experiment at the LHC, CERN

Data recorded: 2011-01-25 06:34:20 6838765 647206 1470 01977

Run / Event: 167075 / 6176852867

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



Masa bozonu Higgsa

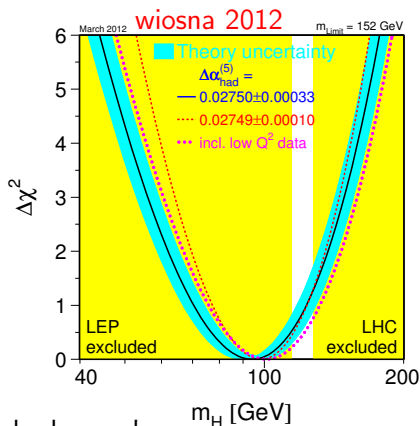
Analiza **wszystkich** dostępnych **danych** z LEP, Tevatron oraz pierwszych wyników z LHC (!).

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

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

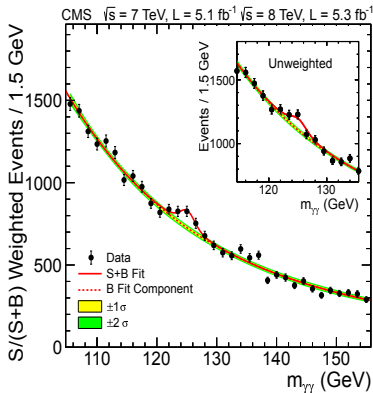
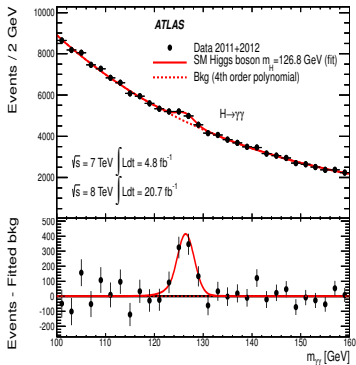
Gdyby to okno zostało “zamknięte”, oznaczałoby to **wykluczenie** Modelu Standardowego!

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



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

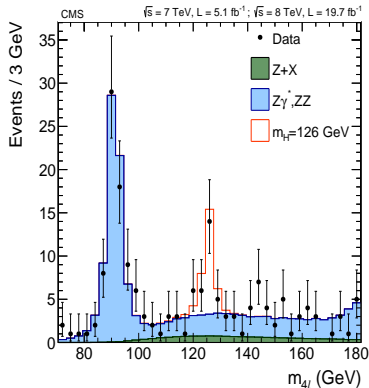
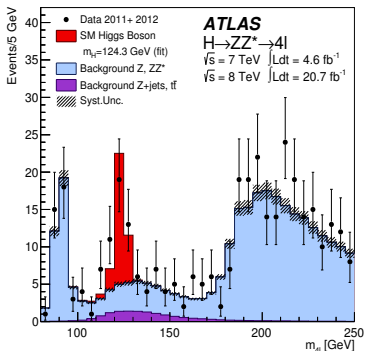
Sygnal widoczny ponad wszelką wątpliwość



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

Sygnał widoczny ponad wszelką wątpliwość

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

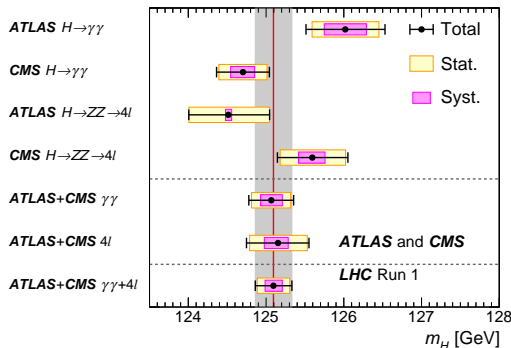


Wyniki przedstawione przez **ATLAS** i **CMS**,
po uwzględnieniu wszystkich danych zebranych w tzw. Run I (2009-2012).

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

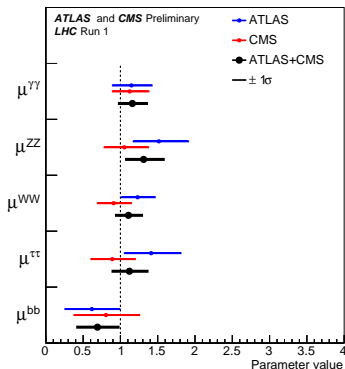
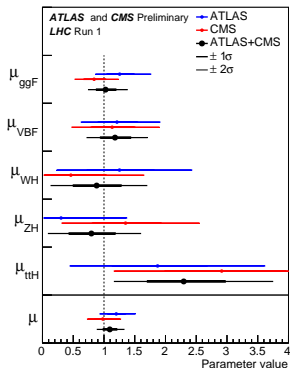
Wyniki łącznej analizy danych z dwóch kanałów i dwóch eksperymentów:

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



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**

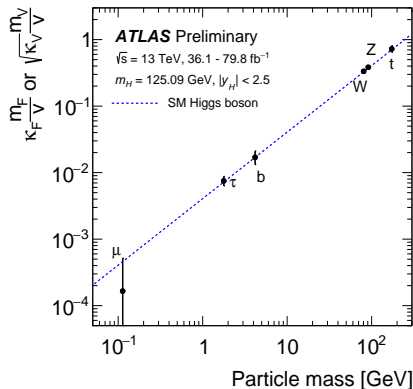
Sprzężenia bozonu Higgsa

Możliwa staje się weryfikacja podstawowego przewidywania modelu:

sprzężenie bozonu Higgsa do cząstek jest proporcjonalne do ich masy

Błędy są wciąż duże!

Większa precyzja będzie osiągnięta po zebraniu większej próbki danych po 2021 roku (Run 3)

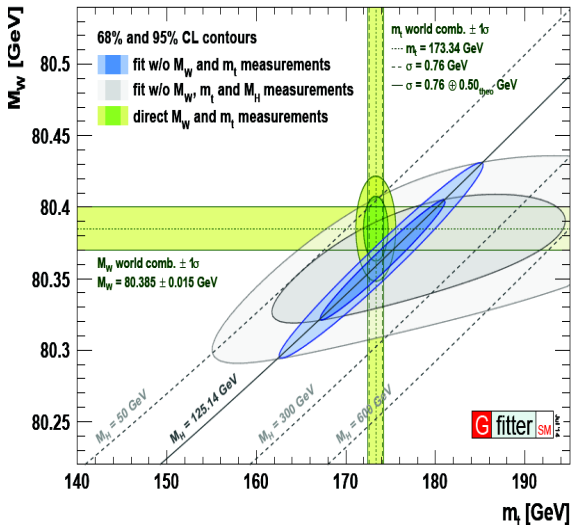


Model Standardowy

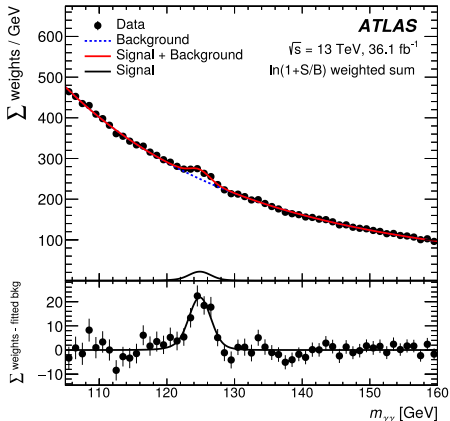
W ramach Modelu Standardowego masa bozonu Higgsa jest powiązana z masami W i t

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

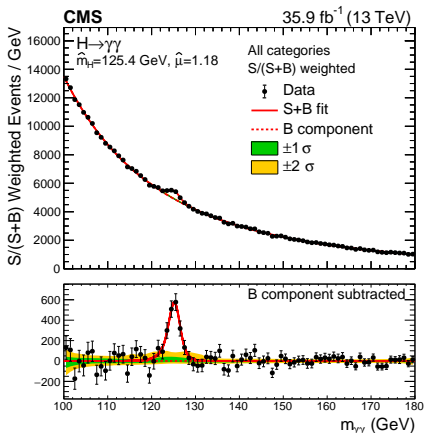
Wszystko pasuje...



Wyniki Run 2 (2015+2016)



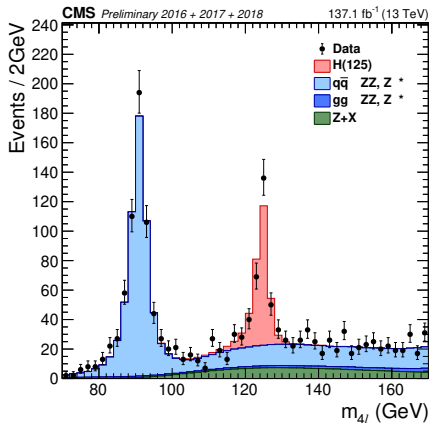
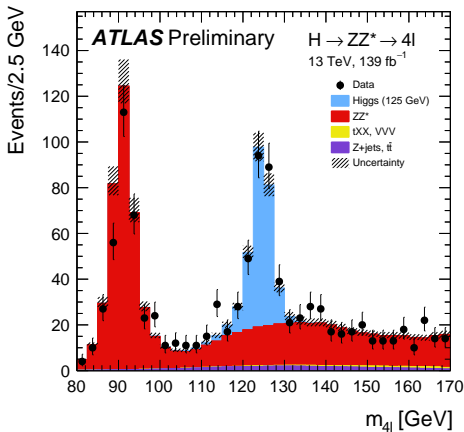
$H \rightarrow \gamma\gamma$



Pomiary zgodne z wynikami Run 1.

Wyniki Run 2 (2016-2018)

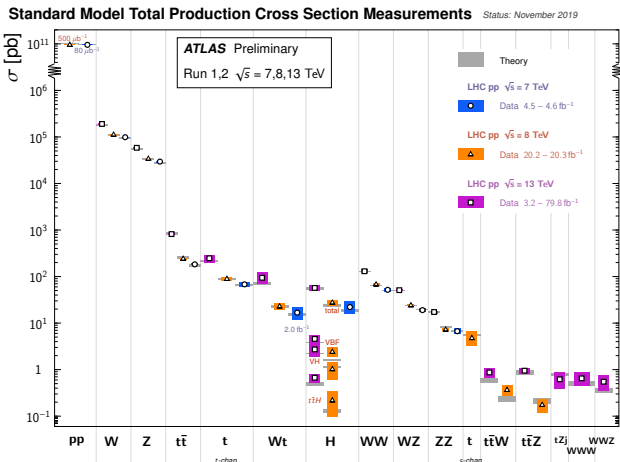
$$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$$



Pomiary zgodne z wynikami Run 1.

Eksperymenty przy LHC

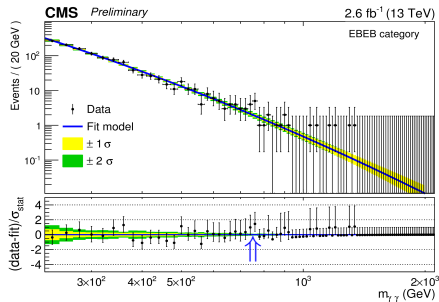
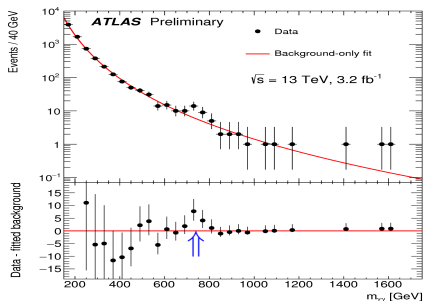
Bardzo szczegółowo badają procesy z produkcją bozonów W^\pm , Z^0 i H , oraz kwarku t . Wszystkie pomiary w znakomitej zgodności z SM. XI 2019



Wyniki LHC

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

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



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

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

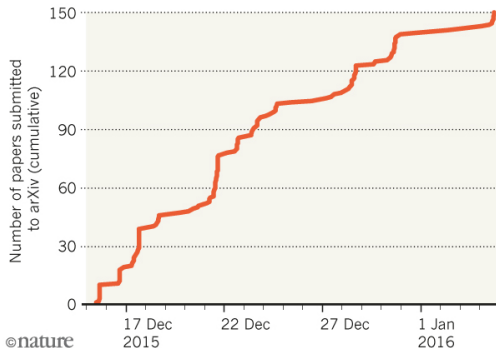
Mógłby to być sygnał produkcji nowej cząstki !...

Wyniki LHC

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

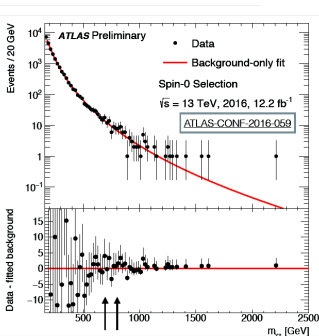
HINT OF NEW BOSON SPARKS FLOOD OF PAPERS

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



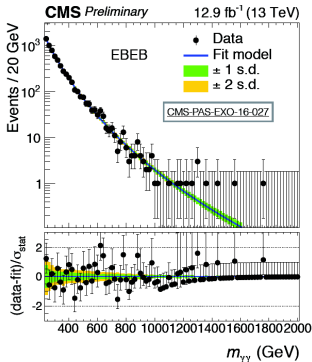
Wyniki LHC

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 $\sqrt{s}=13$ 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...