

Astrofizyka cząstek

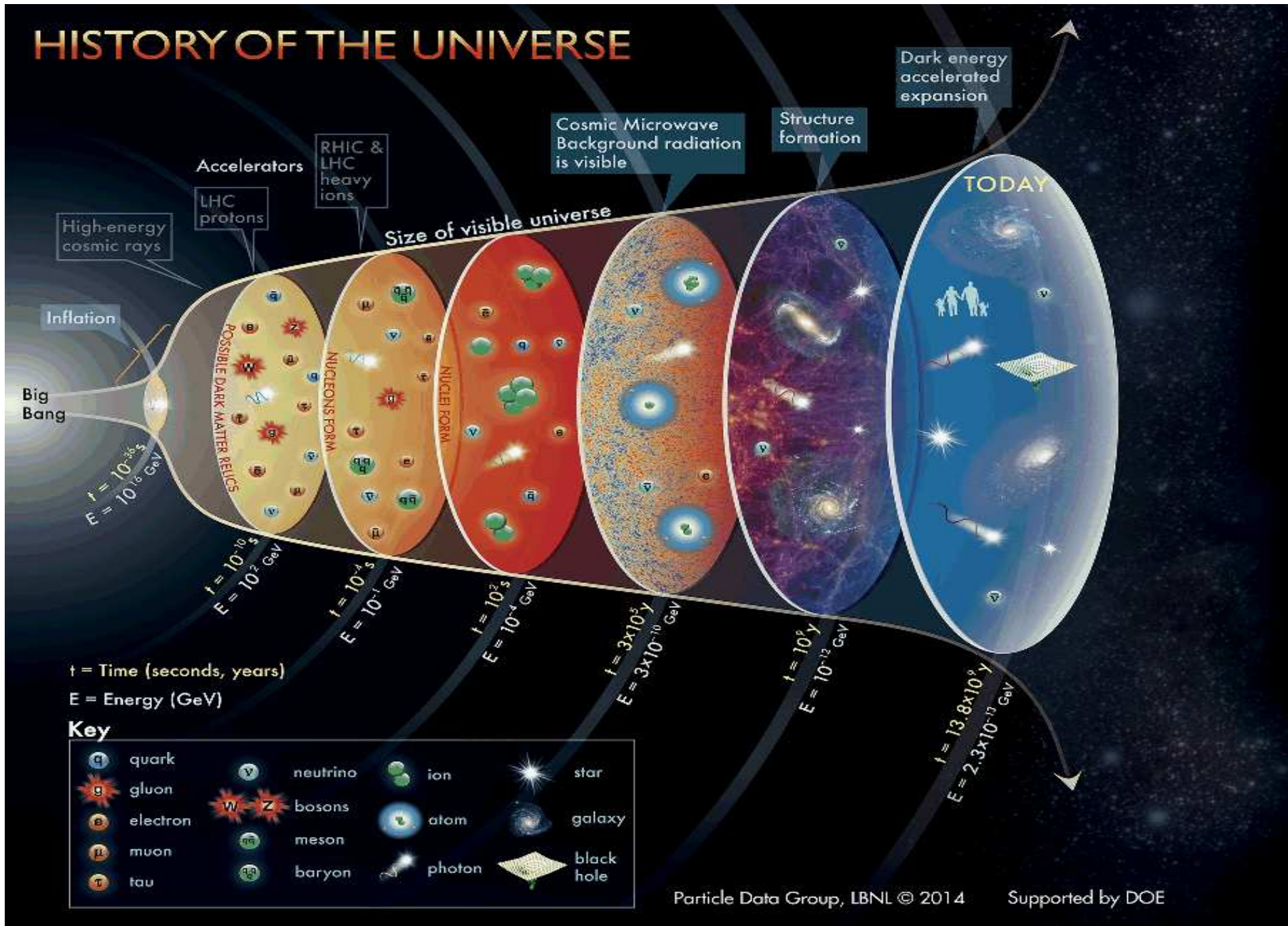
prof. dr hab. A.F.Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych IFD

Wykład I

- Wprowadzenie
plan wykładu, literatura, egzamin itp.
- Krótka historia rozwoju fizyki cząstek
- Model Standardowy AD2015
- Wciąż aktualne pytania
na które Model Standardowy nie daje nam odpowiedzi

HISTORY OF THE UNIVERSE



Wprowadzenie

Cel wykładu

Przybliżyć **nową dziedzinę badań**, która powstała na **styku** fizyki cząstek oraz astronomii, astrofizyki i kosmologii:

- Wiele zagadnień będących przedmiotem zainteresowania astrofizyków i kosmologów **nie da się opisać** bez wnikania w oddziaływania na poziomie **cząstek elementarnych**.
- **Szereg wyników** nie daje się wprost pogodzić z Modelem Standardowym fizyki cząstek, takim jaki znamy z doświadczeń w laboratoriach.
- Coraz też szerzej stosujemy **metody detekcyjne** fizyki cząstek w naziemnych i satelitarnych pomiarach astrofizycznych.

W ramach wykładu będę się starał przybliżyć **astrofizykę cząstek** głównie od strony **doświadczalnej**, koncentrując się na zagadnieniach bliskich fizyce cząstek elementarnych.

Astrofizyka cząstek - ang. Astroparticle Physics (APP)

Wprowadzenie

Plan wykładu

- **wprowadzenie**: Model Standardowy, trochę historii
- oddziaływanie cząstek z materią i podstawowe metody detekcji
- ewolucja Wszechświata
- doświadczalne przesłanki istnienia Ciemnej Materii,
- rozważane hipotezy i poszukiwanie cząstek Ciemnej Materii,
- promieniowanie kosmiczne i jego pomiary (cząstki naładowane)
- kosmos w promieniowaniu gamma
- badania neutrin
- fale grawitacyjne

Dobór zagadnień, jak też ich kolejność może jeszcze ulec zmianie...

Wprowadzenie

Wykład

Poniedziałki 15¹⁵ – 17⁰⁰ w sali 2.08.

Nominalnie przewidziane jest 15 wykładów.

Możliwe, że 1 albo 2 wykłady będą musiały być odrobione w innym terminie...

Egzamin

W formie egzaminu ustnego: wypowiedź na dwa z wcześniej przygotowanych tematów.

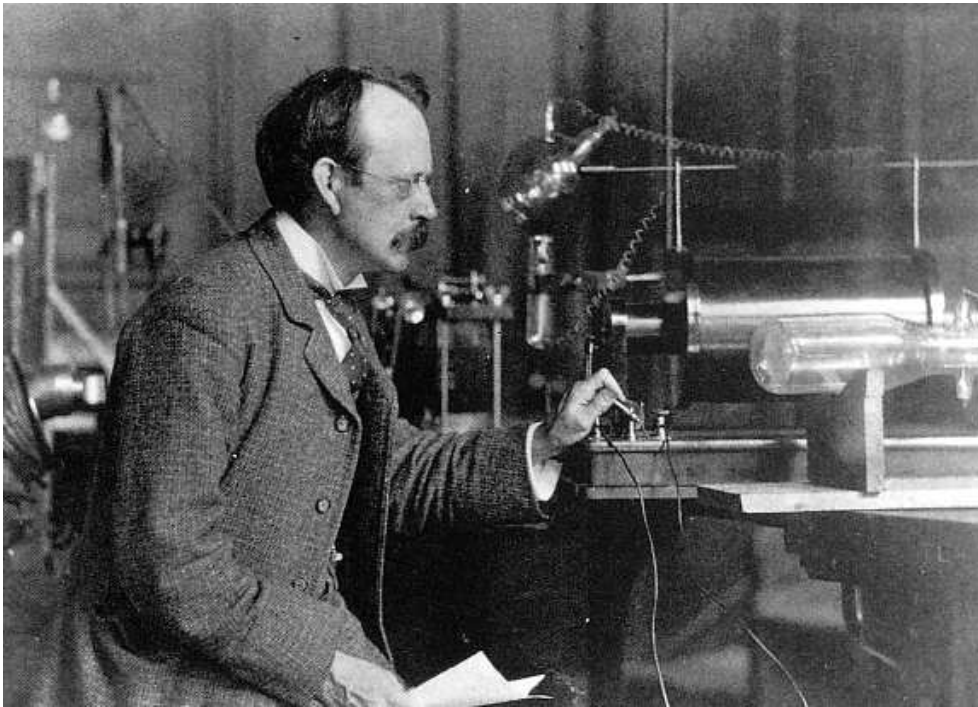
Lista zagadnień będzie udostępniona przed egzaminem.

Literatura

- D.H. Perkins, Particle Astrophysics, Oxford University Press, 2009.
- Materiały z International School of Astroparticle Physics:
<http://isapp2012paris.sciencesconf.org/resource/page?id=4>
<http://agenda.albanova.se/contributionListDisplay.py?confId=3647>
<http://isapp.school.2014.to.infn.it>
- + materiały będą zamieszczane na stronie wykładu
<http://www.fuw.edu.pl/~zarnecki/app/>

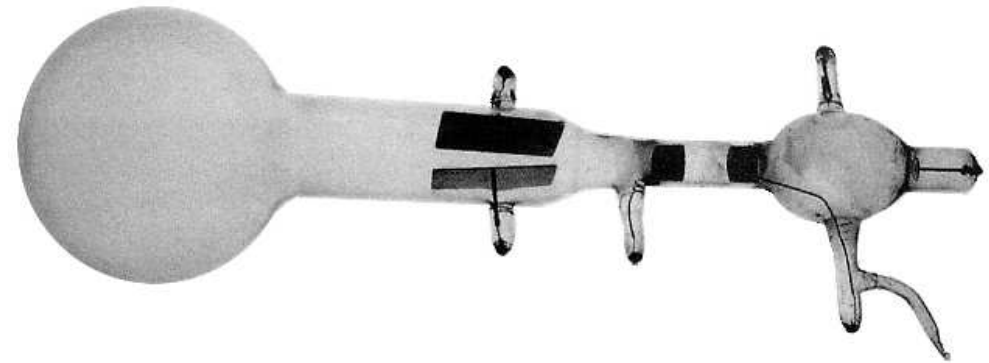
Początki

Odkrycie elektronu



Joseph Thomson 1897
początek nowej ery w fizyce...

Thomson badał tzw. promienie katodowe



pokazał, że promienie te odchylają się w polu elektrycznym \Rightarrow niosą ładunek

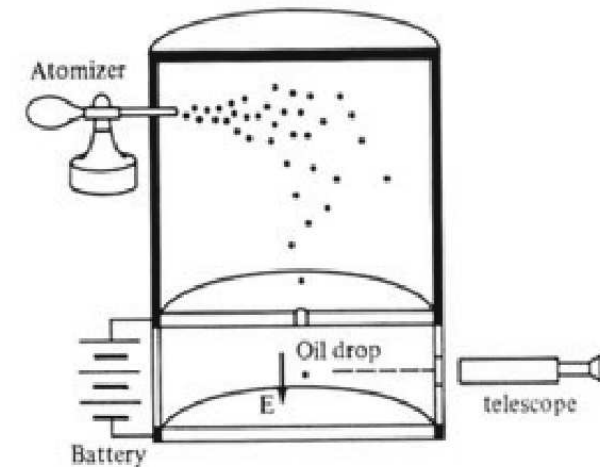
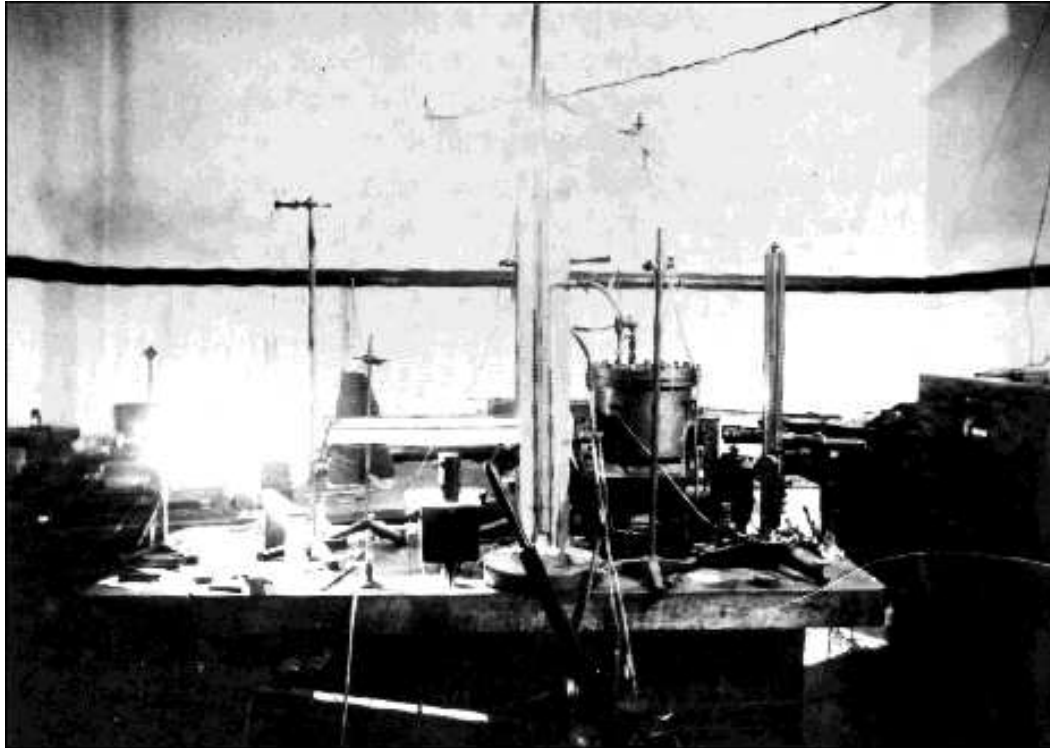
Wyznaczył stosunek ładunku do masy:

$$\frac{e}{m} \approx 2 \cdot 10^{11} \frac{C}{kg}$$

Początki

Robert Millikan

1909



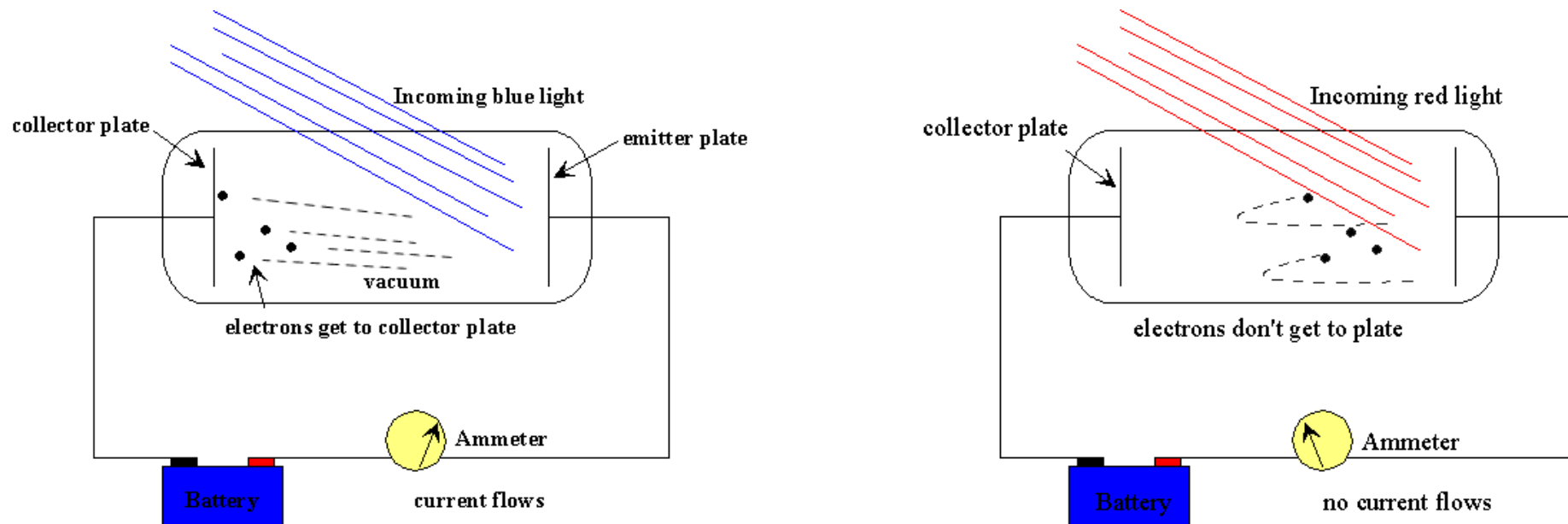
Mierząc opadanie maleńkich kropeł oliwy w powietrzu wyznaczył **ładunek** elektronu, a następnie obliczył jego **masę**:

$$m_e = \frac{1}{1837} m_H$$

Początki

Efekt fotoelektryczny

Odkryty przez Hertza w 1897: padające światło uwalnia elektrony z powierzchni metalu.
W 1902 Philipp Lenard pokazał, że efekt obserwujemy tylko dla wybranych **długości fali** światła:



Efektu tego nie można było wytłumaczyć w parciu o falową teorię światła

Początki

Fotony

W roku 1905, Albert Einstein wysunął hipotezę, że światło jest strumieniem niepodzielnych **kwantów** energii, które dziś nazywamy **fotonami**.

Energia fotonu:

$$E_{\gamma} = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

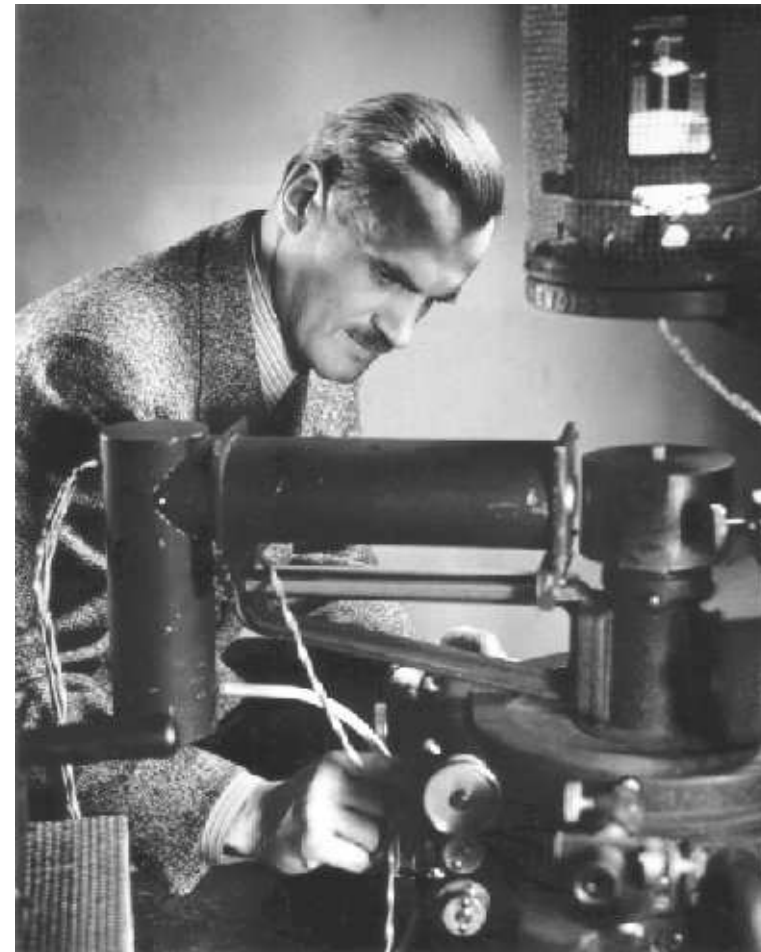
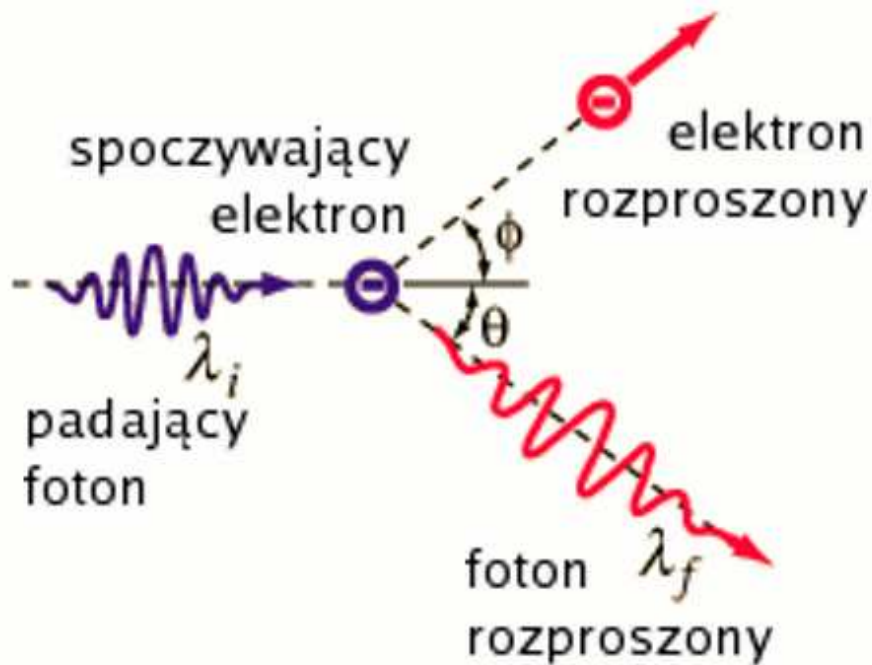
Aby wybić elektron z metalu E_{γ} musi być większa od tzw. **pracy wyjścia** \Rightarrow zależność od długości fali światła



Początki

Doświadczenie Comptona 1923

Rozpraszanie fotonów na elektronach



Compton pokazał, że fotony niosą nie tylko **energię**, ale i **pęd** \Rightarrow zachowują się jak **cząstki**

Początki

Kolejne odkrycia...

- 1911 – Ernest Rutherford wysuwa hipotezę jądra atomowego
 - Charles Wilson konstruuje komorę mgłową
- 1919 – Ernest Rutherford dostarcza pierwszych dowodów istnienia protonu
- 1929 – akcelerator Van der Graaffa
- 1930 – Wolfgang Pauli wysuwa hipotezę neutrino
- 1931 – James Chadwick odkrywa neutron
 - Ernest Lawrence buduje pierwszy cyklotron
- 1928 – Paul Dirac formułuje relatywistyczne równanie falowe dla elektronu
 - hipoteza istnienia antycząstki (1931)

Promieniowanie kosmiczne

Już Coulomb zauważył, że naładowana kula, nawet najlepiej odizolowana, traci z czasem swój ładunek. Nie potrafił tego wytłumaczyć...

W roku 1896 Henry Becquerel odkrywa promieniotwórczość naturalną.

W 1900 roku Charles Wilson odkrył, że powietrze jest w niewielkim stopniu **zjonizowane** - przypisał to naturalnej promieniotwórczości Ziemi.

W **1912** roku **Victor Hess** przeprowadził pomiar jonizacji powietrza w funkcji wysokości nad powierzchnią Ziemi.

Pierwsze pomiary wykonane na Wieży Eiffla w Paryżu nie pokazały, że jonizacja **nie maleje** z wysokością...



Promieniowanie kosmiczne

Pomiary przeprowadzone przez **Victora Hessa** w **1913** roku pokazał, że jonizacja szybko rośnie z wysokością - obserwowane promieniowanie pochodzi z kosmosu...

Jednak do roku 1932 spierano się czy są to cząstki naładowane, czy promieniowanie gamma...

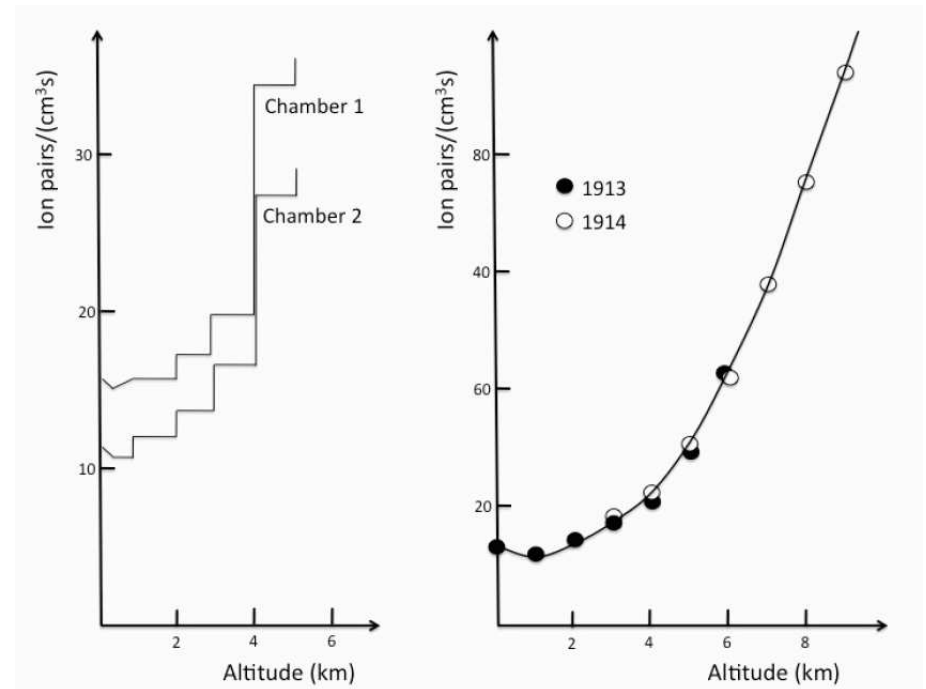
Pierwotne promieniowanie kosmiczne

Promieniowanie obserwowane poza atmosferą ziemską

Skład (pomijając neutrina):

- protony (jądra H) $\sim 86\%$
- cząstki α (jądra He) $\sim 13\%$
- cięższe jądra $\sim 1\%$
- neutrony, elektrony, fotony $\ll 1\%$

Taki jak "skład Wszechświata"...



Promieniowanie kosmiczne

Wtórne promieniowanie kosmiczne

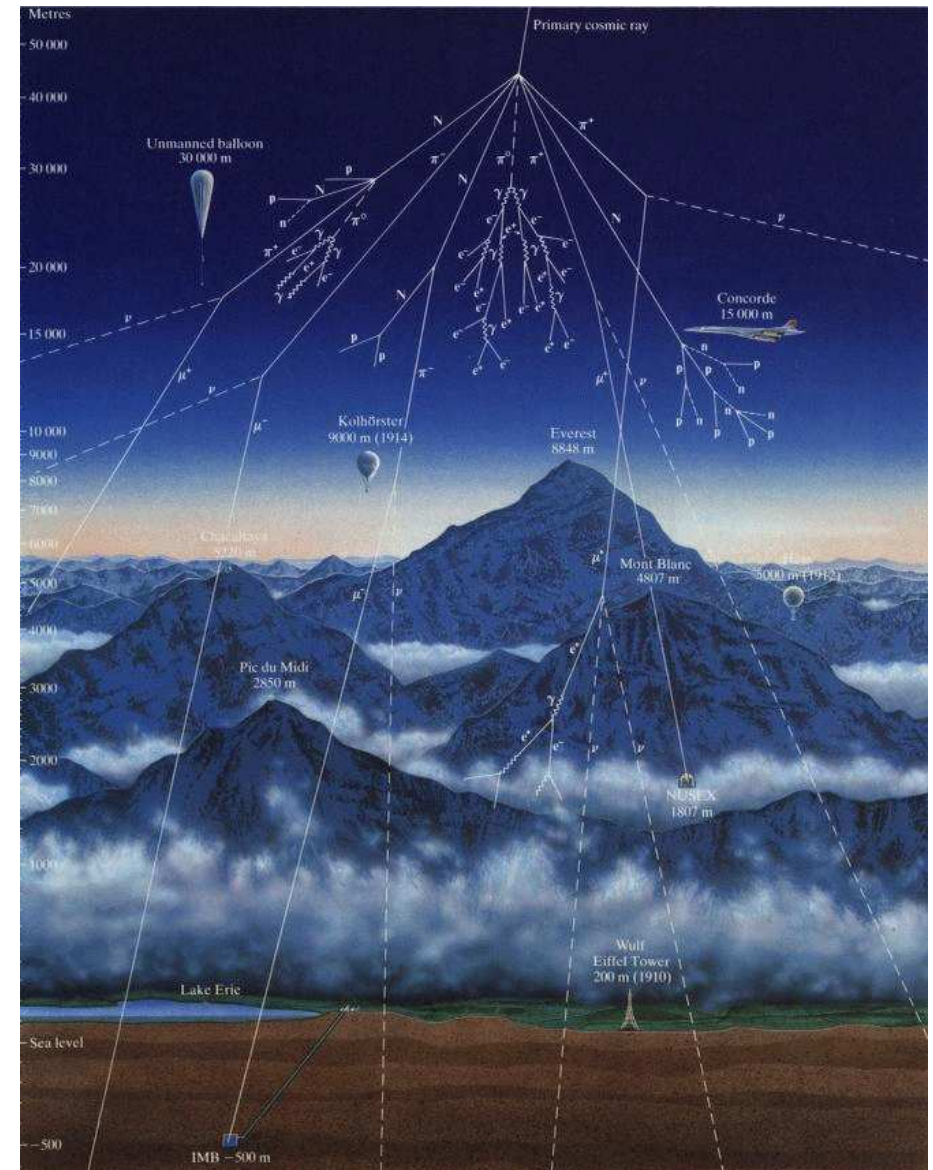
Promieniowanie pierwotne oddziałuje w atmosferze Ziemi. Produkowane są liczne cząstki wtórne, głównie **piony i kaony**, które następnie rozpadają się produkując głównie miony, a w dalszej kolejności elektrony.

Docierają do **powierzchni Ziemi**

- miony $\mu^{\pm} \sim 70\%$
- elektrony $e^{\pm} \sim 25\%$
- protony, piony $\pi^{\pm} \sim 3\%$

Łącznie około $180 \text{ na } m^2 \cdot s$

Nie licząc bardzo licznych neutrin, o których jeszcze będzie mowa...



Promieniowanie kosmiczne

Promieniowanie kosmiczne przez prawie pół wieku było głównym źródłem danych dla fizyki cząstek.

Doprowadziło do wielu przełomowych odkryć:

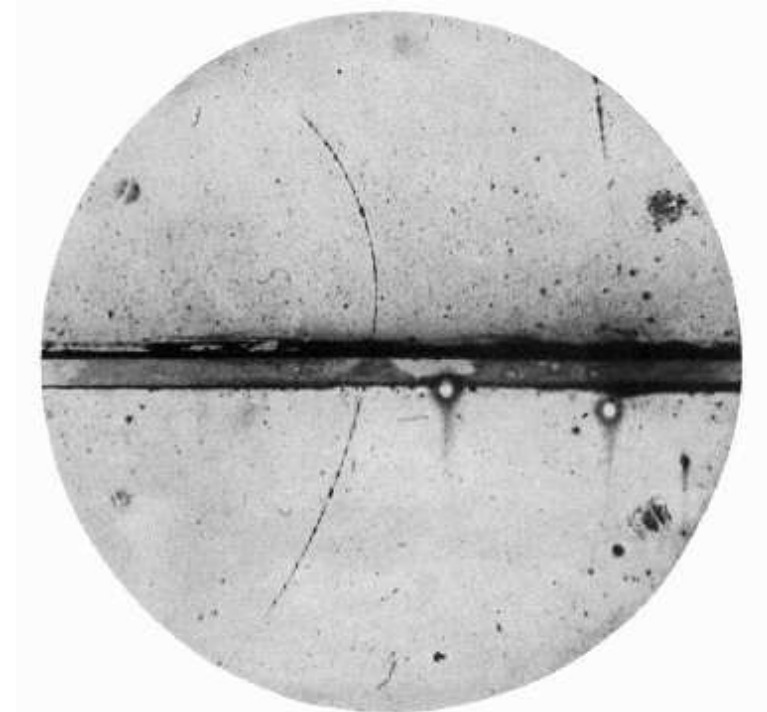
1932 – odkrycie pozytonu: Carl Anderson

1935 – Hipoteza Yukawy: piony

1937 – odkrycie mionu μ^\pm

1947 – odkrycie pionu

1949 – odkrycie kaonu
pierwszej “dziwnej” cząstki



Promieniowanie kosmiczne

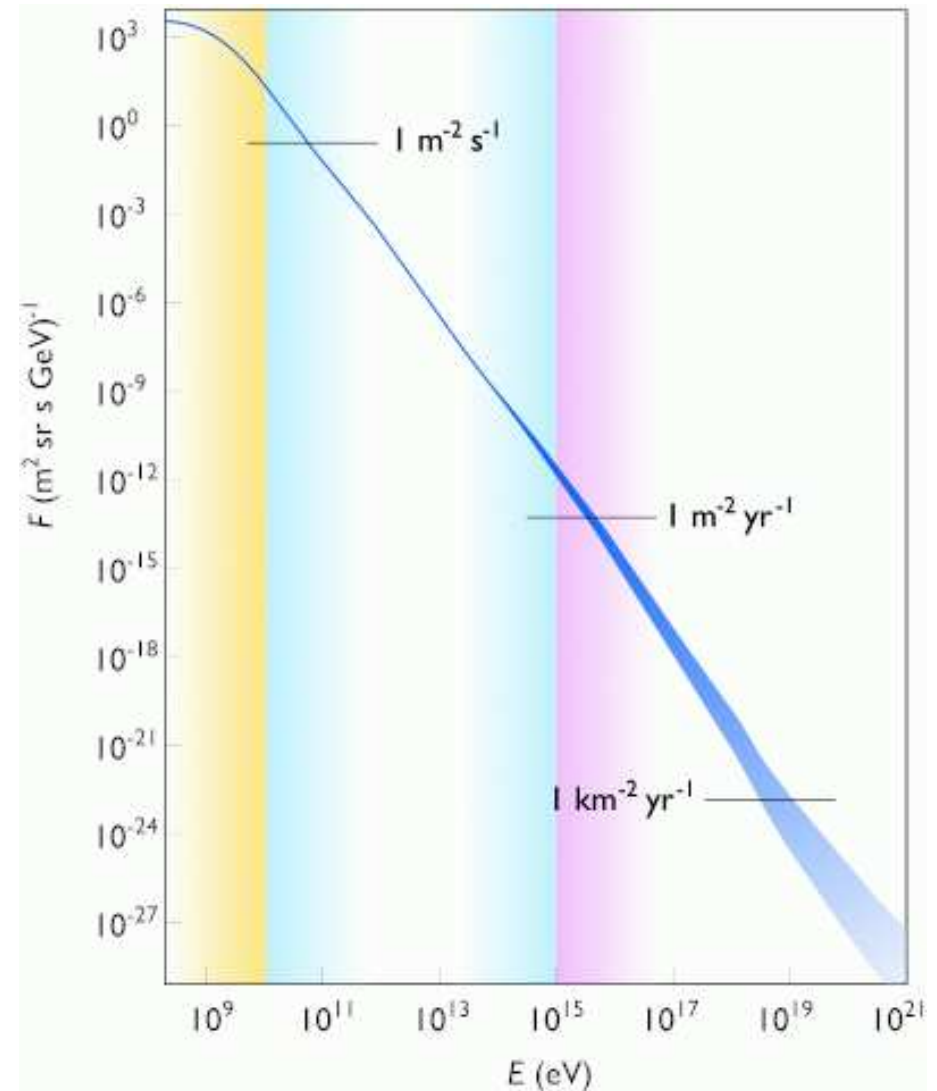
Do lat 50 XX w. badanie oddziaływań promieniowania kosmicznego z materią było jednym z głównych kierunków badań.

Wciąż pozostaje ważnym źródłem danych.

Okazuje się, że przestrzeń kosmiczna wypełniona jest cząstkami o energiach dochodzących do $5 \cdot 10^{19}$ eV ~ 10 J (!!!).

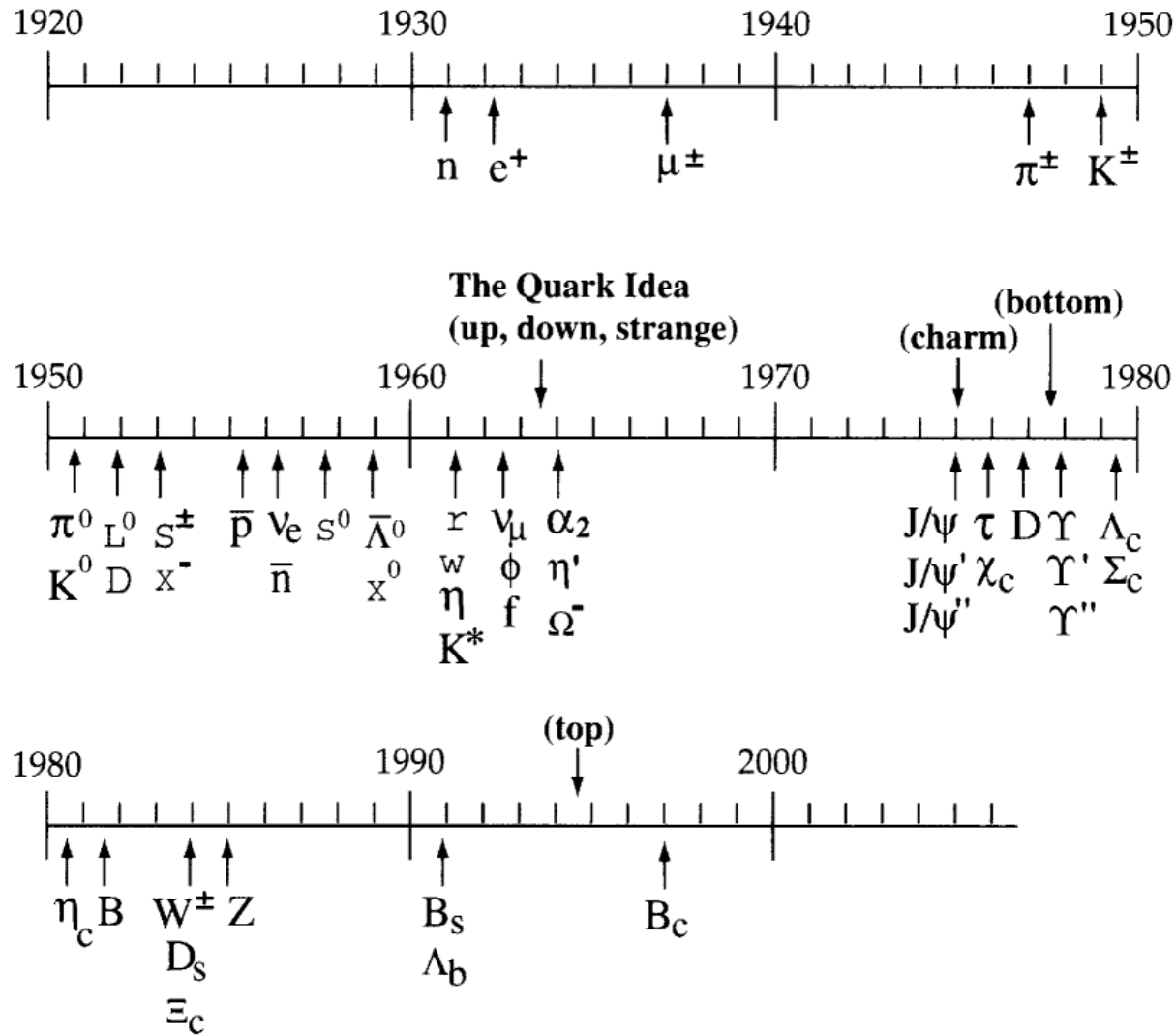
Niestety cząstek o najwyższych energiach jest ich bardzo mało...

Wciąż nie rozumiemy skąd to promieniowanie pochodzi i jak może powstawać...



Początki

Kolejne odkrycia...



1952

komora pęcherzykowa

1955

synchrotron

Początki

- 1964 – M.Gell-Mann i G.Zweig zapostulowali istnienie bardziej podstawowych cząstek materii zwanych kwarkami.
- Istnienie 3 kwarków (i 3 anty-kwarków) pozwalało opisać wszystkie znane cząstki oddziałujące silnie.
 - Pozwoliło przewidzieć istnienie (i przybliżoną masę) cząstki Ω^- .
- 1969 – Richard Feynman proponuje model partonowy do opisu wyników rozpraszania elektronów na protonach.
- Dziś wiemy, że partony to w szczególności kwarki...

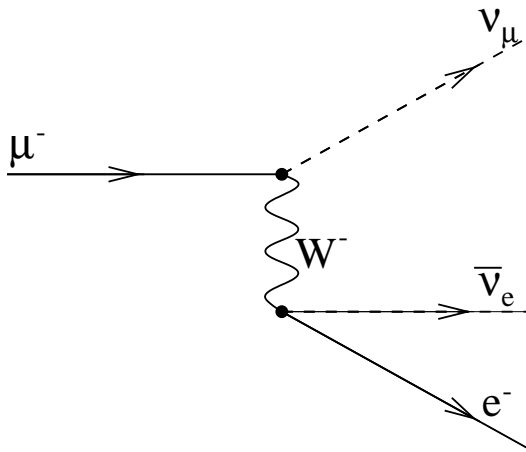
Bozony W^\pm i Z^0

Model Weinberg'a-Salam'a

Nowy model oddziaływań słabych (1968)

Oddziaływanie zachodzi przez wymianę bardzo masywnego bozonu W^\pm lub Z^0 .

Rozpad mionu:



“Słabość” oddziaływania nie wynika ze stałej sprzężenia a z **dużej masy bozonu**:

$$G_F \sim \frac{g^2}{m_W^2}$$

Przyjmując, że **sprzężenie** g powinno być takie jak dla oddziaływań **EM**, **Weinberg** i **Salam przewidzieli** masy W^\pm i Z^0 :

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

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

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

Świat cząstek elementarnych

Fermiony

świat “codzienny” zbudowany jest z 3 “cegielek” (elektron oraz kwarki u i d)

Fizyka cząstek znalazła już jednak 12 fundamentalnych “cegielek” materii, **fermionów** (cząstek o spinie $1/2$)

| | leptony | | kwarki | |
|-------------|------------------------|---------------------------------------|---|-------------------------------------|
| pokolenie 1 | e <i>elektron</i> | ν_e <i>neutrino el.</i> | d <i>down</i> | u <i>up</i> |
| pokolenie 2 | μ <i>mion</i> | ν_μ <i>neutrino mionowe</i> | s <i>strange</i> | c <i>charm</i> |
| pokolenie 3 | τ <i>taon</i> | ν_τ <i>neutrino taonowe</i> | b <i>beauty</i> <i>(bottom)</i> | t <i>top</i> <i>(truth)</i> |
| ładunek [e] | -1 | 0 | -1/3 | +2/3 |

+ anty-fermiony (kolejnych 12)

Świat cząstek elementarnych

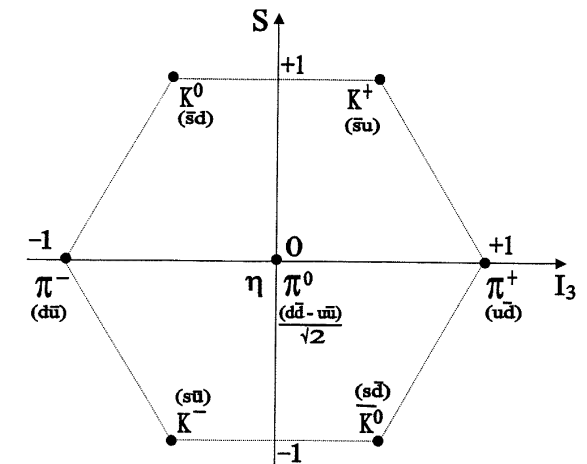
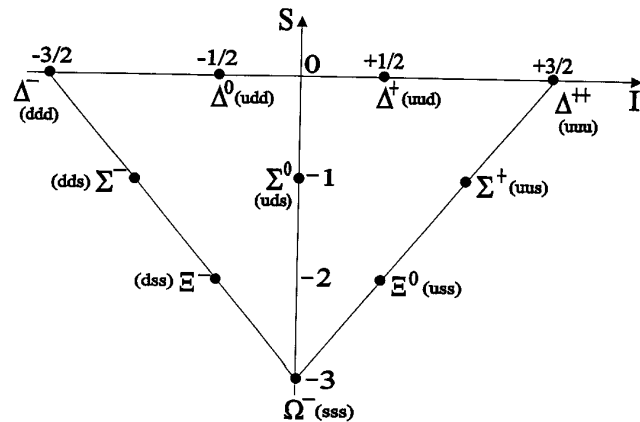
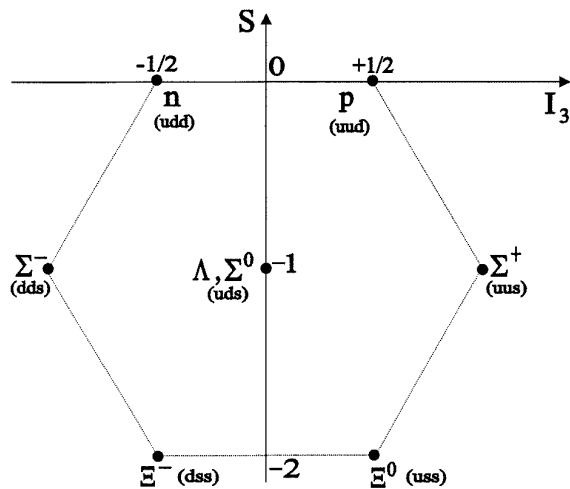
Fermiony

Wszystkie **leptony** obserwujemy jako cząstki **swobodne**.

Kwarki natomiast są “uwięzione” w **hadronach** (cząstkach oddziałujących silnie).

Trzy kwarki tworzą **bariony**:

Para kwark-antykwar **mezony**:



trzy **ant**kwarki \Rightarrow **ant**bariony

Świat cząstek elementarnych

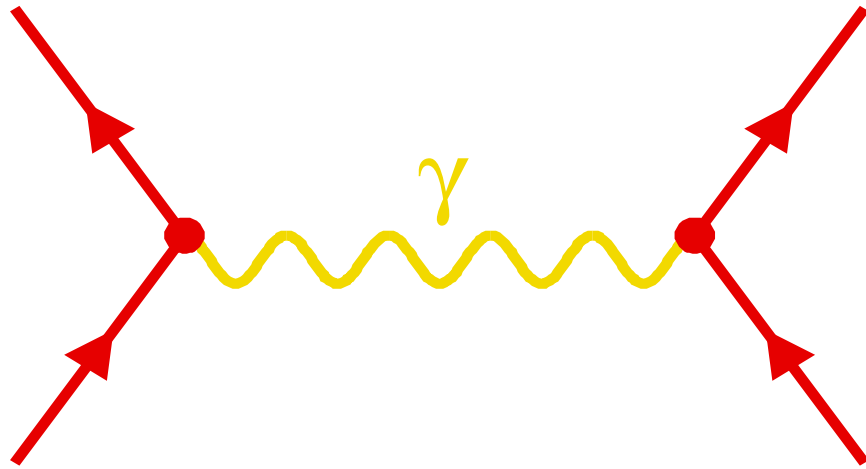
Bozony

“Cegielki” materii oddziałują ze sobą poprzez wymianę **nośników oddziaływań**

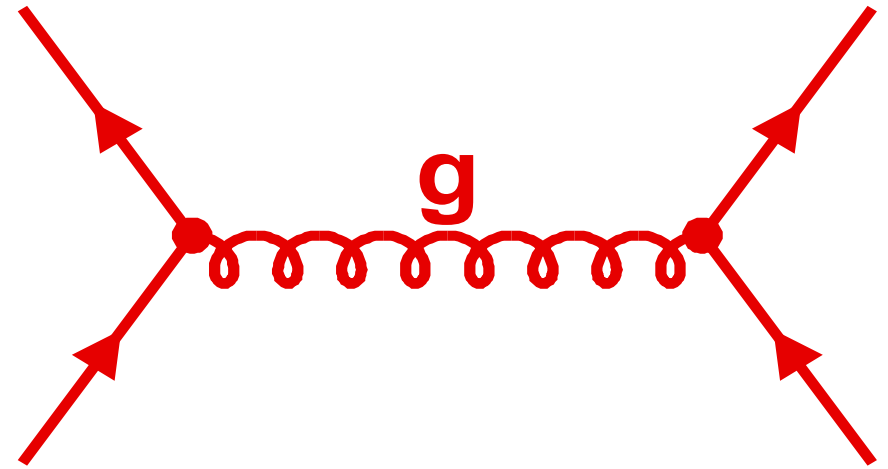
Nośnik przekazuje część energii i/lub pędu jednej cząstki drugiej cząstce

| <i>oddziaływanie</i> | <i>źródło</i> | <i>nośnik</i> | <i>moc</i> | |
|----------------------|-----------------|------------------------|----------------|------------|
| grawitacyjne | masa | grawiton | G | 10^{-39} |
| elektromagnetyczne | ładunek | foton | γ | 10^{-2} |
| silne | “kolor” | gluony | g | 1 |
| słabe | “ładunek słaby” | “bozony pośredniczące” | W^{\pm}, Z^0 | 10^{-7} |

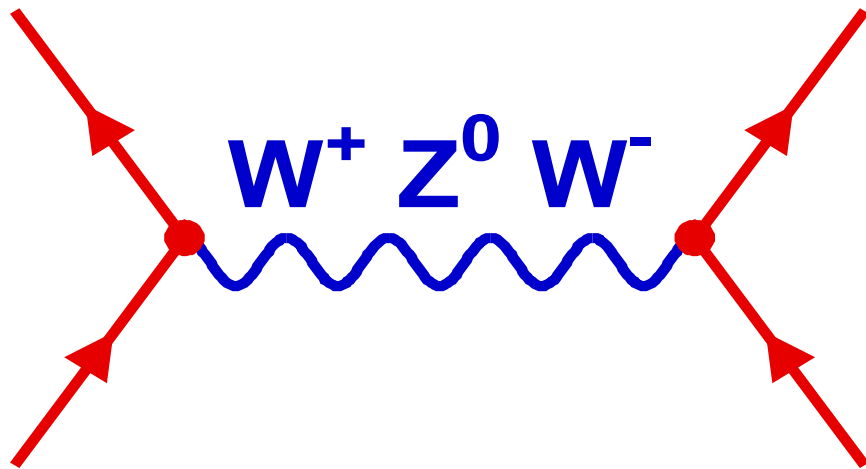
“moc” - przykładowe porównanie wielkości oddziaływań dla dwóch sąsiadujących protonów



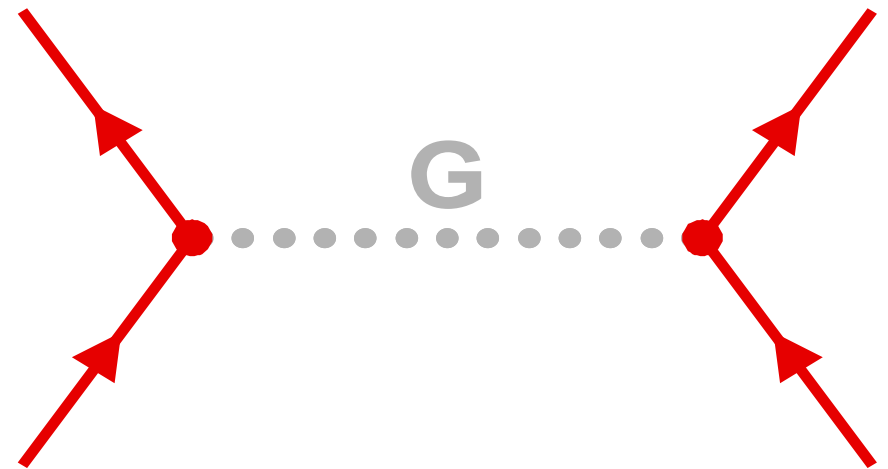
elektromagnetyczne



silne



slabe



grawitacyjne

Świat cząstek elementarnych

Diagramy Feynmana

Pozwalają zobrazować zachodzące oddziaływania między cząstkami, biorąc pod uwagę możliwe sprzężenia elementarne (wierzchołki).

Rozpraszanie $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$

Najprostszy diagram

“wiodący” rząd, **leading order** - LO

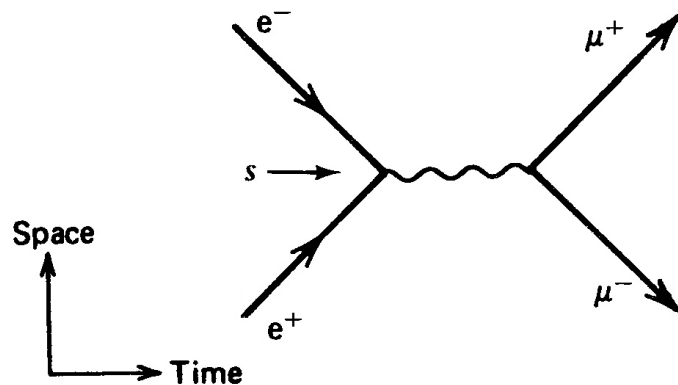
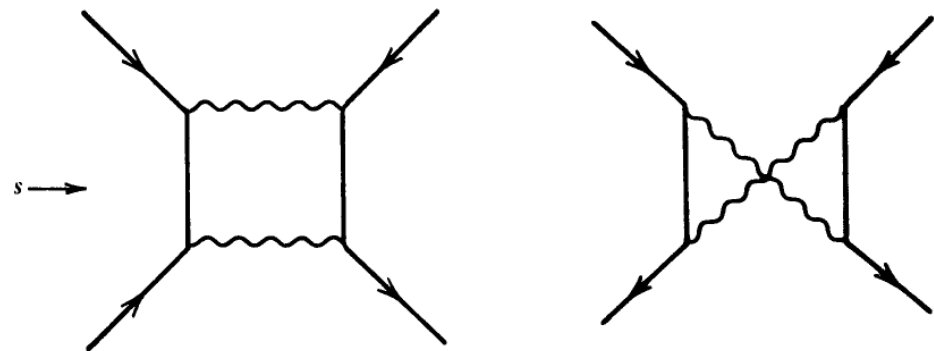


Diagram “drzewowy”

Kolejne diagramy (przykładowe)

next-to-leading order - NLO



Diagramy “pętlowe”

Świat cząstek elementarnych

Diagramy Feynmana

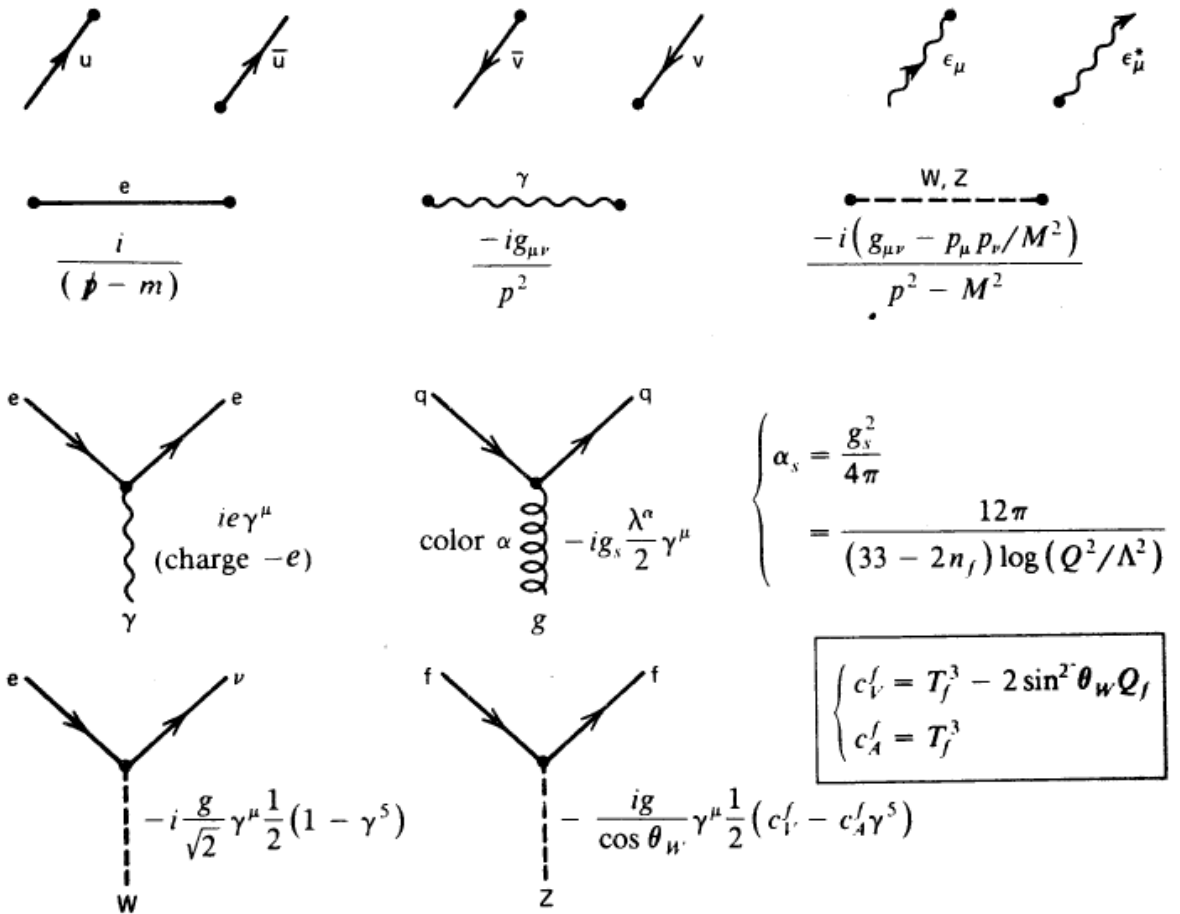
Każdemu diagramowi możemy przyporządkować wyrażenie na odpowiednią amplitudę rozpraszania

Wierzchołki decydują o wielkości przekroju czynnego:

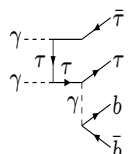
$$\alpha_s = \frac{g_s^2}{4\pi} \sim 0.1 - 0.2$$

$$\frac{g^2}{4\pi} \sim 0.03$$

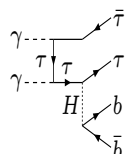
$$\alpha_{em} = \frac{e^2}{4\pi} \sim \frac{1}{137} \approx 0.0073$$



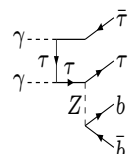
$$\gamma\gamma \rightarrow \tau^+ \tau^- b \bar{b}$$



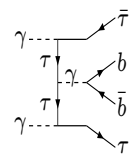
diagr.1



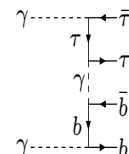
diagr.2



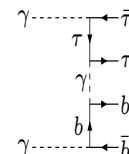
diagr.3



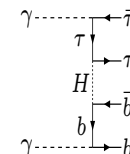
diagr.4



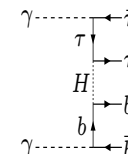
diagr.5



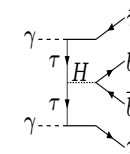
diagr.6



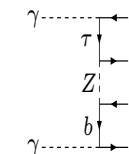
diagr.7



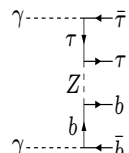
diagr.8



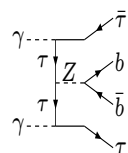
diagr.9



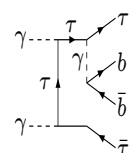
diagr.10



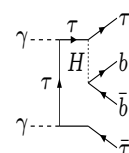
diagr.11



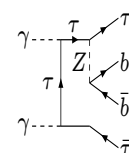
diagr.12



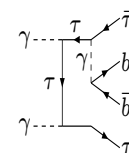
diagr.13



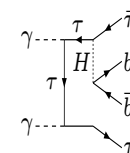
diagr.14



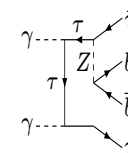
diagr.15



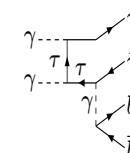
diagr.16



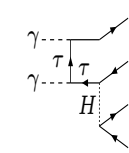
diagr.17



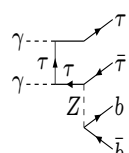
diagr.18



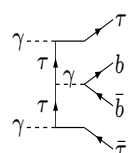
diagr.19



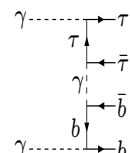
diagr.20



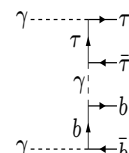
diagr.21



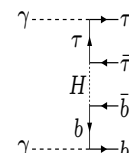
diagr.22



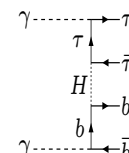
diagr.23



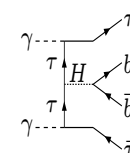
diagr.24



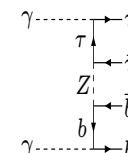
diagr.25



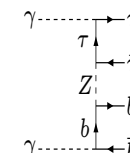
diagr.26



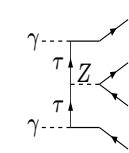
diagr.27



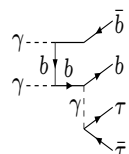
diagr.28



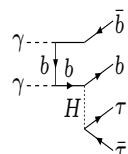
diagr.29



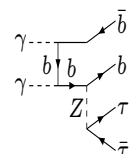
diagr.30



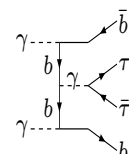
diagr.31



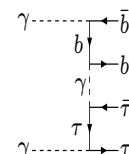
diagr.32



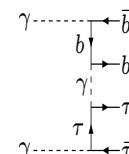
diagr.33



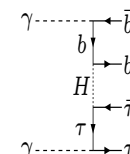
diagr.34



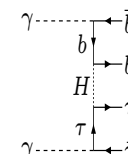
diagr.35



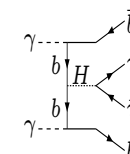
diagr.36



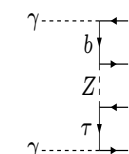
diagr.37



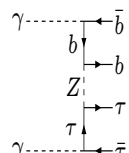
diagr.38



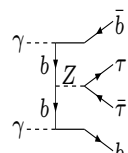
diagr.39



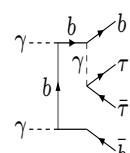
diagr.40



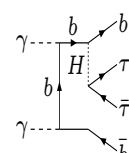
diagr.41



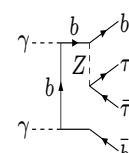
diagr.42



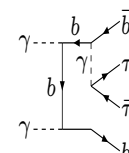
diagr.43



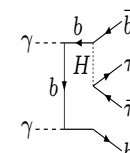
diagr.44



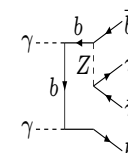
diagr.45



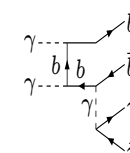
diagr.46



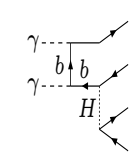
diagr.47



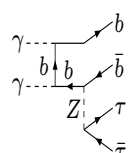
diagr.48



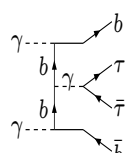
diagr.49



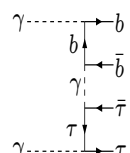
diagr.50



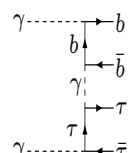
diagr.51



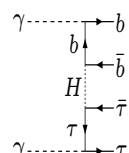
diagr.52



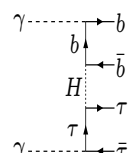
diagr.53



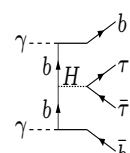
diagr.54



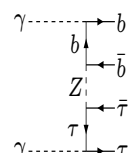
diagr.55



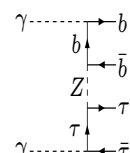
diagr.56



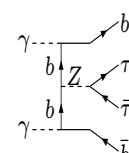
diagr.57



diagr.58



diagr.59



diagr.60

Model Standardowy

Nagrody Nobla

1979 - Sheldon L. **Glashow**, Abdus **Salam** i Steven **Weinberg**

Za model oddziaływań elektro-słabych oraz przewidzenie istnienia bozonów W^\pm i Z^0

1984 - Carlo **Rubia** i Simon **Van der Meer**

Za odkrycie bozonów W^\pm i Z^0

1999 - Gerardus 't **Hooft** i Martinus J.G. **Veltman**

Za wykazanie spójności modelu

2004 - David J. **Gross**, H. David **Politzer** i Frank **Wilczek**

Za stworzenie podstaw opisu oddziaływań silnych

2008 - Yoichiro **Nambu** oraz Makoto **Kobayashi** i Toshihide **Maskawa**

Za odkrycie mechanizmu **spontanicznego łamania symetrii**
oraz za opisanie **mieszania kwarków** i przewidzenie 3 generacji.

Model oddziaływań elektro-słabych + **chromodynamika kwantowa** (QCD):

Model Standardowy

Kwark t

Krótką historia

- 1964 - Gell-Mann i Zweig, koncepcja 3 kwarków: u, d, s
- 1970 - Glashow, Iliopoulos i Maiani proponują 4 kwarki: u, d, s, c
- 1973 - Kobayashi i Maskawa dodają 2 kwarki (t i b), **żeby wytłumaczyć łamanie CP**
- 1974 - Ting, Richter: odkrycie kwarku c
- 1977 - Lederman (Fermilab): odkrycie kwarku b

Własności kwarku b (**ładunek, izospin, sprzężenia do bozonów cechowania**) odpowiadają kwarkom “**dolnym**” (d i s) \Rightarrow musi istnieć “**górnny**” partner: **top**

Pierwsze przewidywania (reguła “3”):

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

Pierwsze “odkrycie”: CERN SPS, 1984, $m_t \sim 40 \text{ GeV}$ (**potem odwołane**)

Poszukiwany także w LEP i HERA, bez powodzenia...

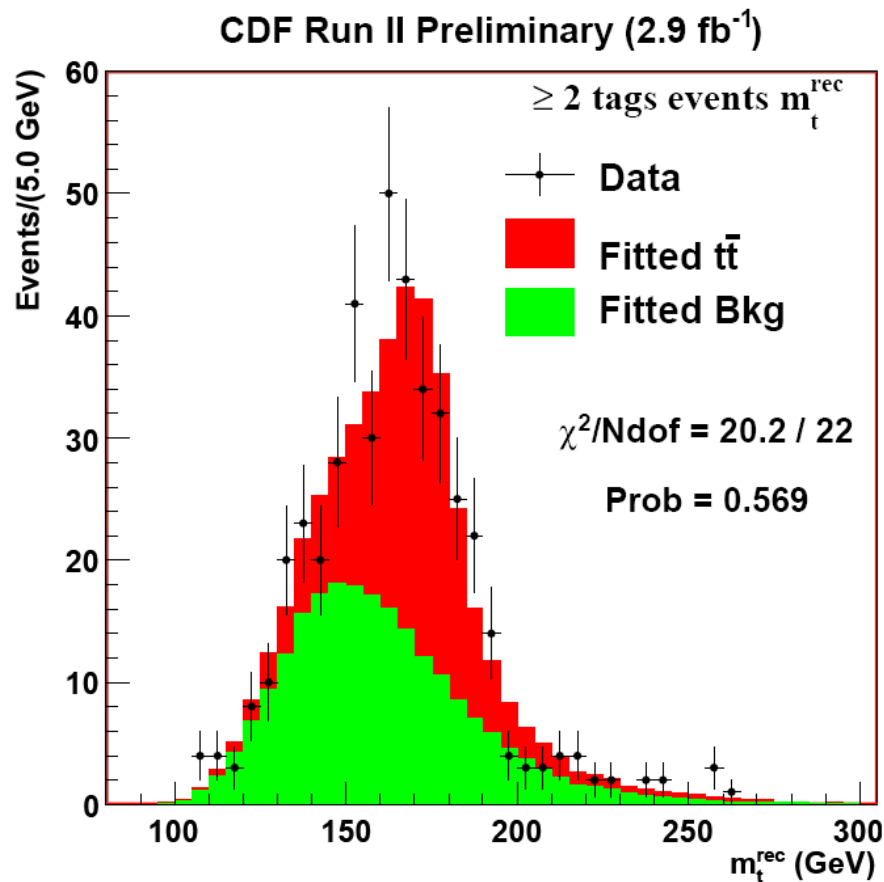
Kwark t

Tevatron

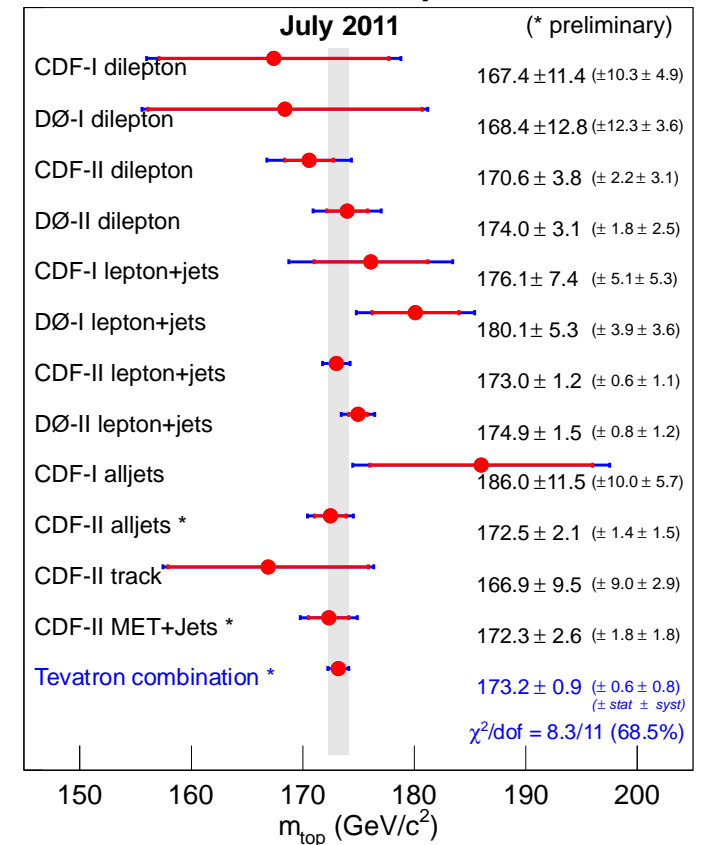
Odkrycie: 1995

Rozkład rekonstruowanej masy kwarku t
w jednym z rozważanych kanałów

Porównanie wyników dla różnych próbek



Mass of the Top Quark

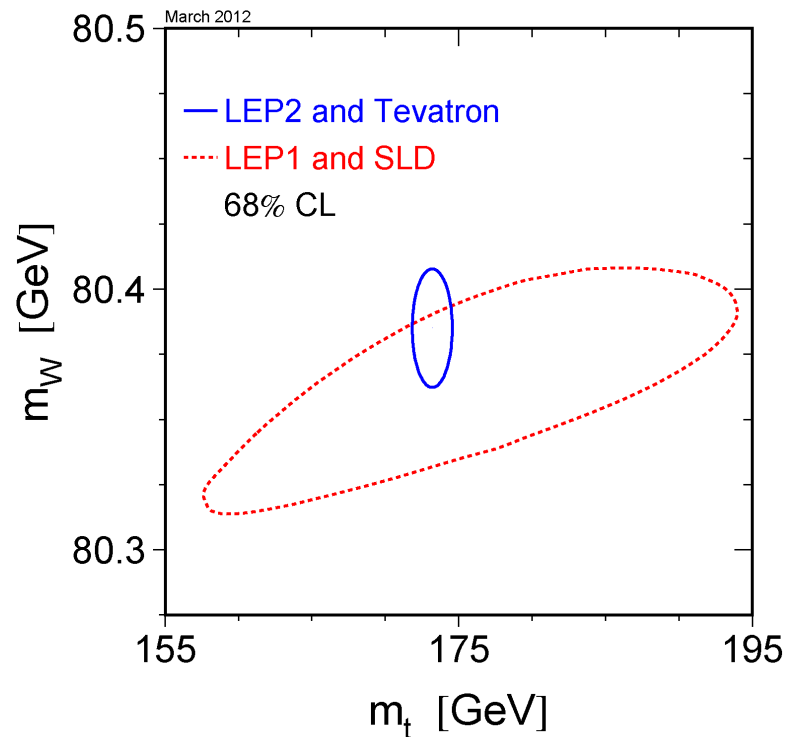


CDF + D0: $m_t = 173.2 \pm 0.9 \text{ GeV}$

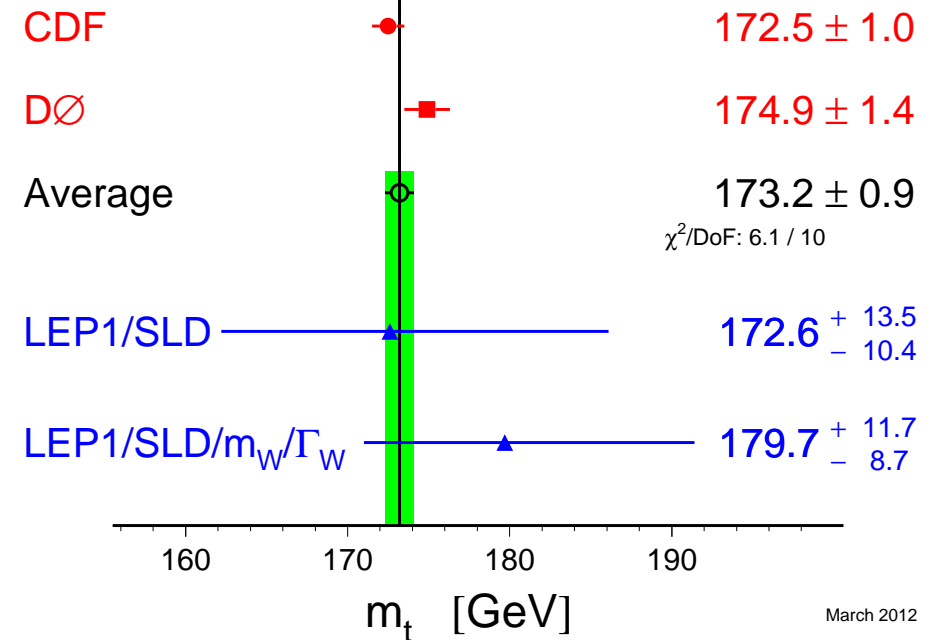
Kwark t

Porównanie

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



Top-Quark Mass [GeV]

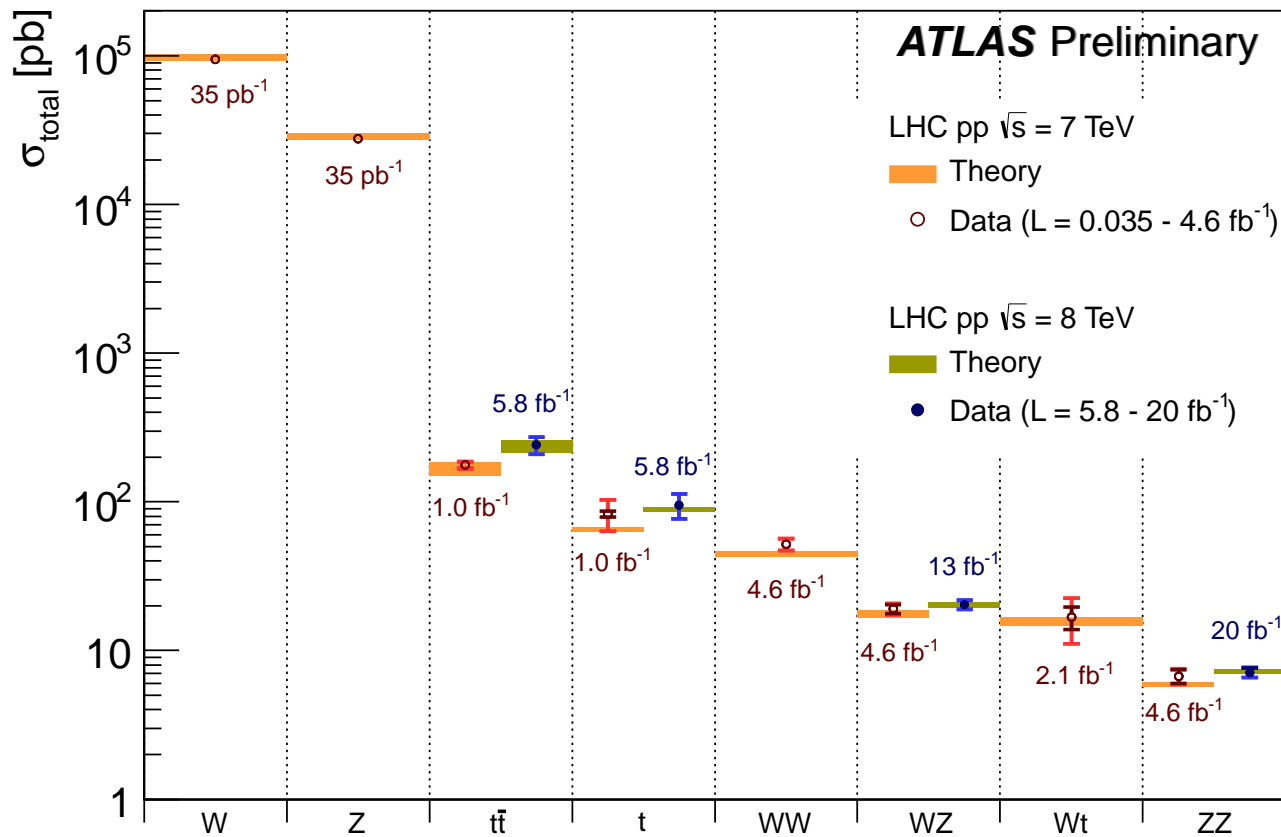


Pomiar bezpośredni zgodny w granicach błędów z przewidywaniami teorii opartymi na precyzyjnych pomiarach przy niższych energiach.

Kwark t

Eksperymenty przy LHC

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



Cząstka Higgsa

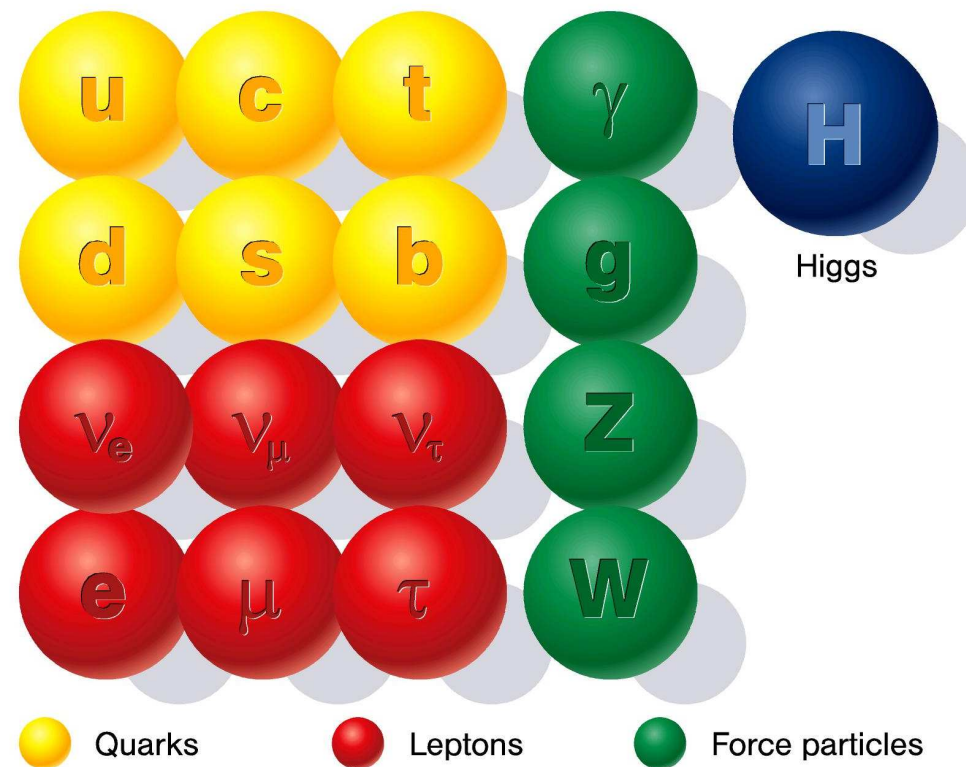
Model Standardowy

Precyzyjnie opisuje cząstki elementarne i ich oddziaływania: elektromagnetyczne, słabe i silne.

Cząstkami modelu są

- cząstki materii
kwarki i leptony
- nośniki oddziaływań
 γ , g , W^\pm i Z^0
- bozon Higgsa
konieczny dla spójności modelu

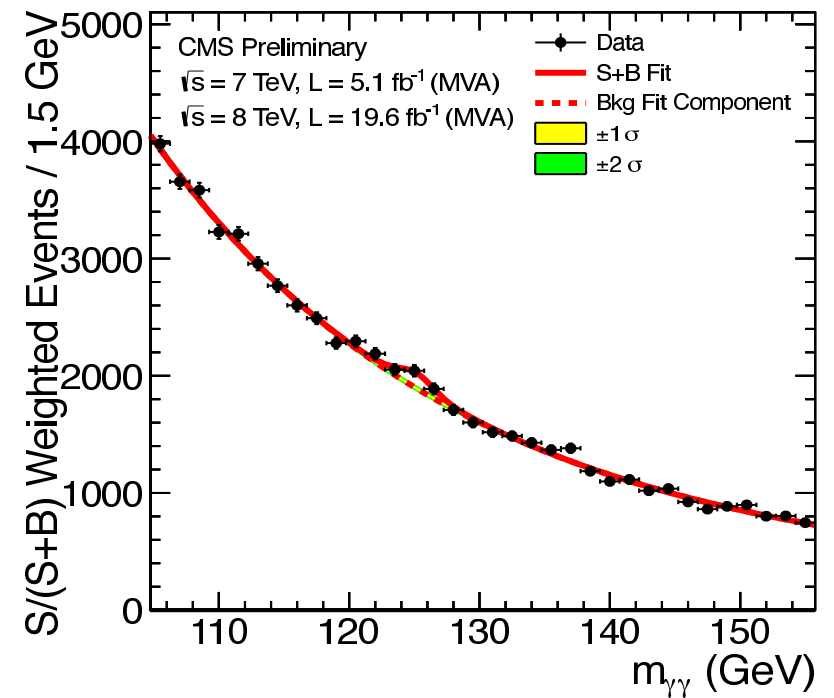
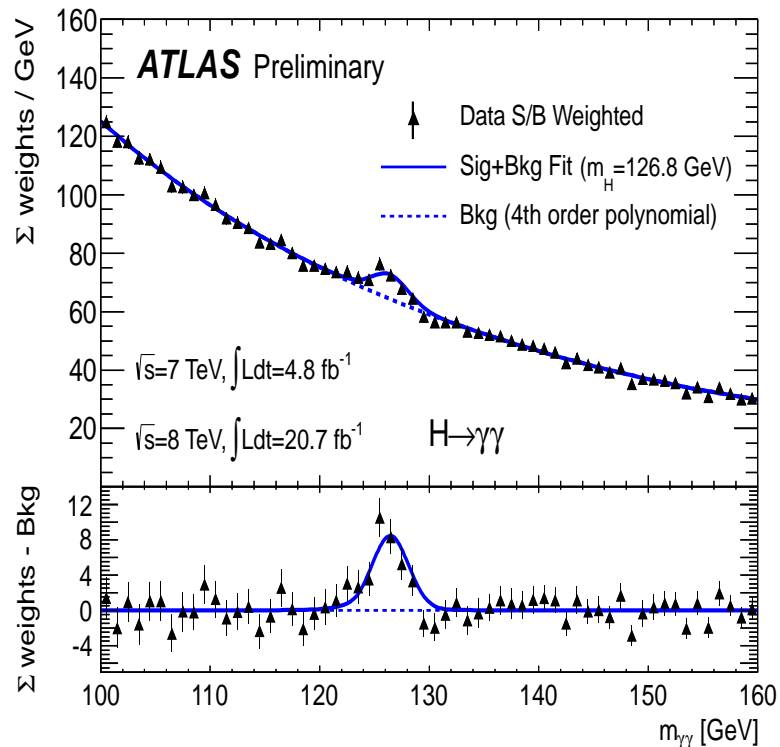
“Nadaje masy” wszystkim cząstkom



Higgs w LHC

Wyniki **ATLAS** i **CMS** przedstawione w marcu 2013,
po uwzględnieniu wszystkich danych zebranych do roku 2012.

Ponad dwukrotny wzrost statystyki w porównaniu z odkryciem w lipcu 2012.

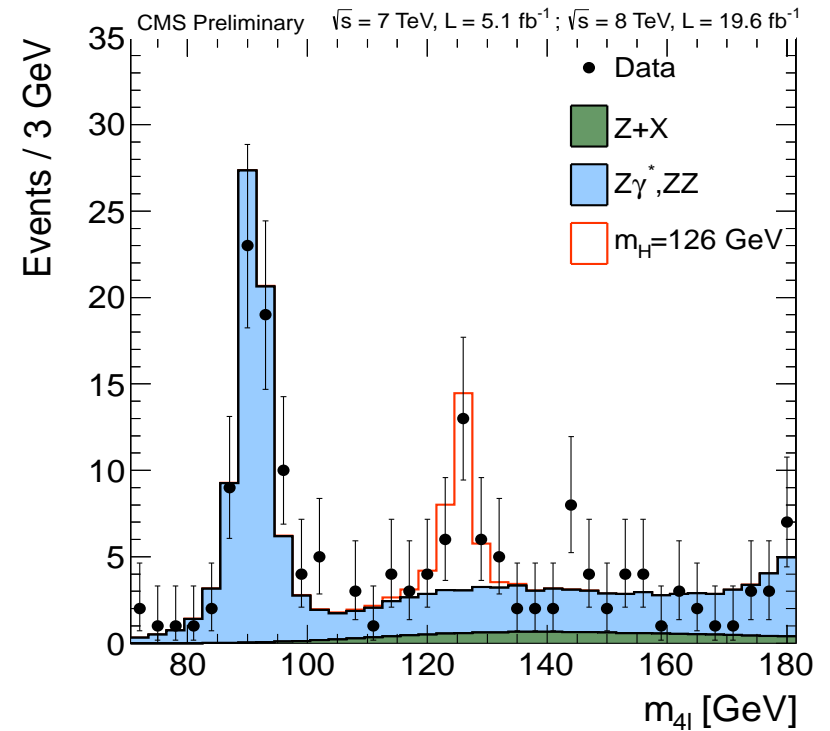
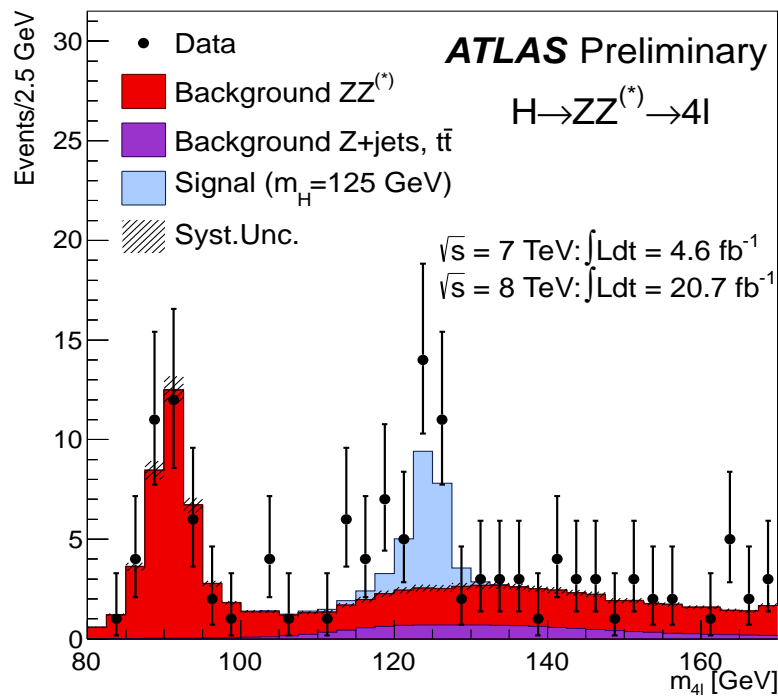


Higgs w LHC

Wyniki **ATLAS** i **CMS** przedstawione w marcu 2013,
po uwzględnieniu wszystkich danych zebranych do roku 2012.

Ponad dwukrotny wzrost statystyki w porównaniu z odkryciem w lipcu 2012.

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



Higgs w LHC

Sprężenia bozonu Higgsa

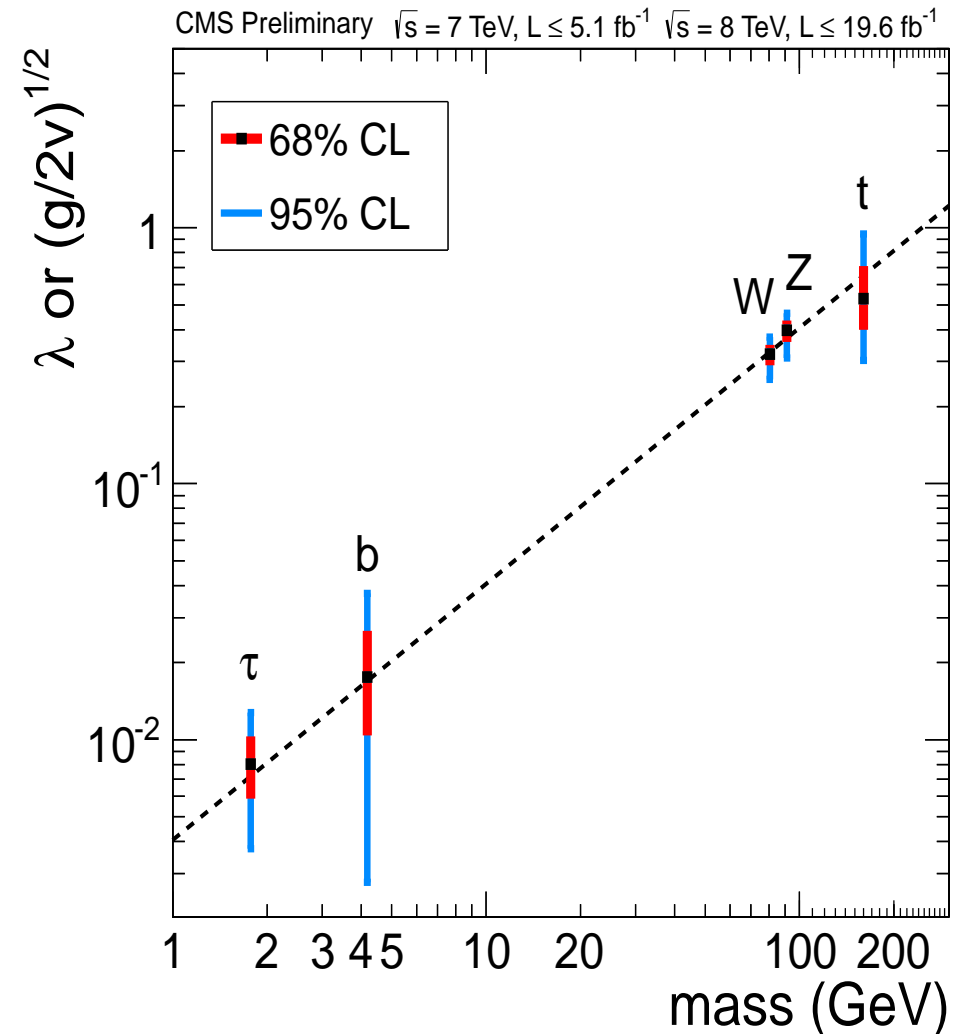
Możliwa staje się weryfikacja podstawowego przewidywania modelu:

sprężenie bozonu Higgsa do cząstek jest proporcjonalne do ich masy

Błędy są wciąż bardzo duże!

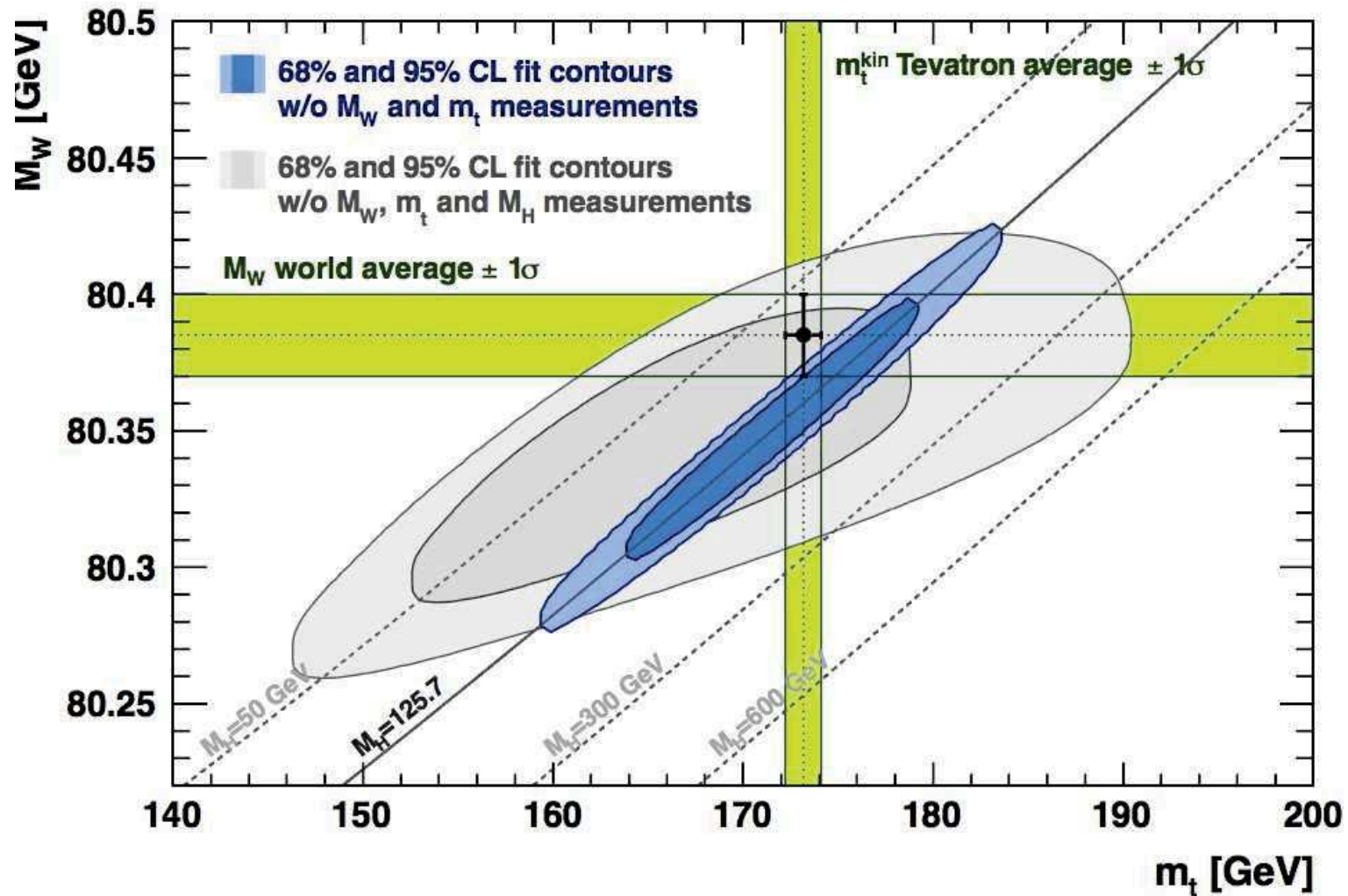
Precyzja będzie bardzo zwiększona po uruchomieniu LHC przy $\sqrt{s}=13\text{TeV}$ w 2015 roku.

Do roku 2020 planowane ponad dziesięciokrotne zwiększenie próbki danych



Higgs w LHC

Jak narazie wszystko zgodne z Modelem Standardowym...



Model Standardowy

Pytania i problemy

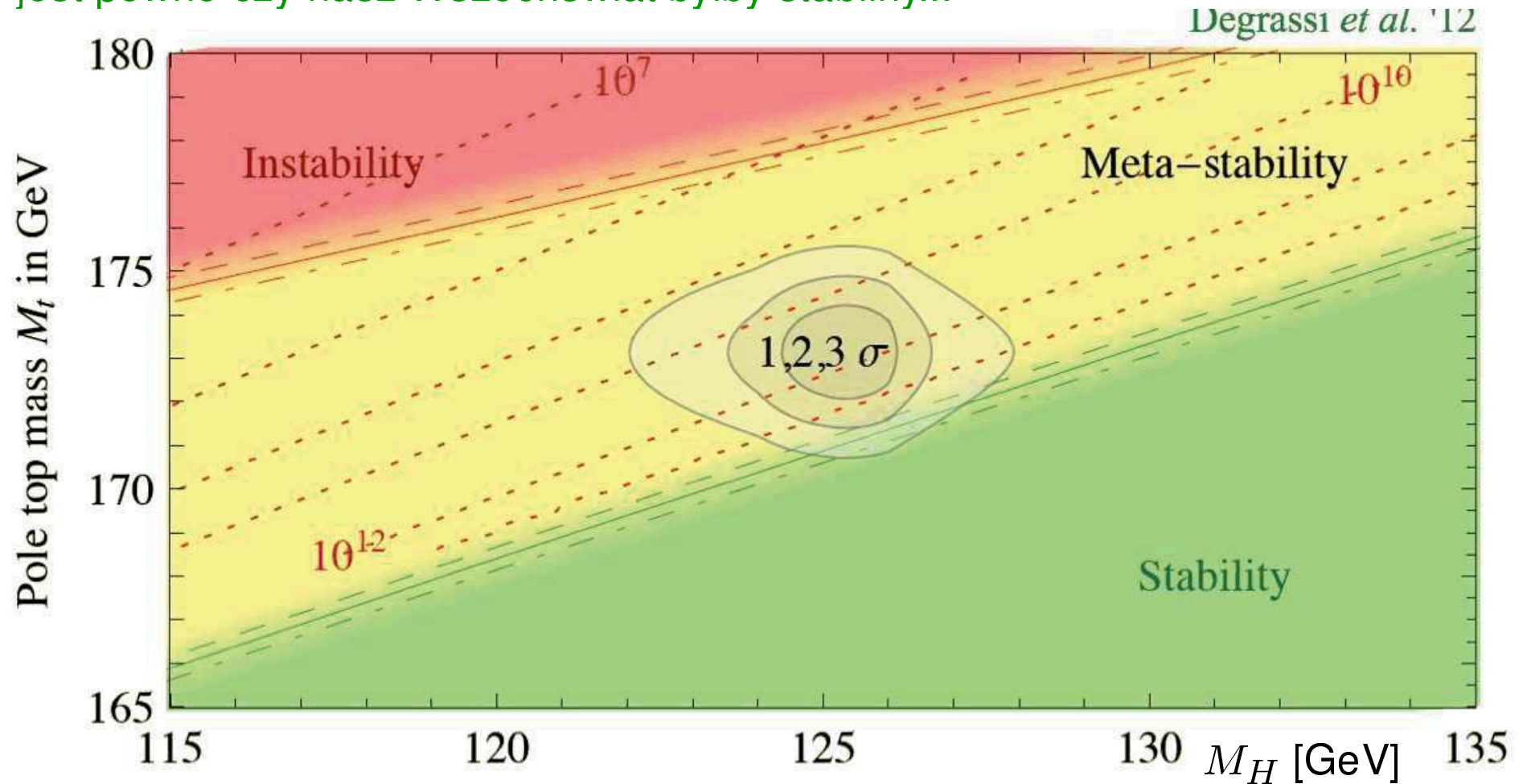
Wszystkie
obecnie
dostępne dane
zgodne są z
**Modelem
Standardowym**

ale...

- Dlaczego **materia** \equiv fermiony, **oddziaływania** \equiv bozony ?
- Dlaczego **3 pokolenia** kwarków i leptonów ?
- Dlaczego zachowane są **liczby leptonowe** i **barionowa**?
- Jaki jest powód **spontanicznego łamania symetrii** ?
- Rozbieżne poprawki - “**problem hierarchii**” ?
- Gdzie się podziała **antymateria** ?
- Jakie są źródła **łamania CP** ?
- Jaka jest natura **neutrin** ?
- Skąd się bierze **prom. kosmiczne** b. wysokich energii ?
- Co to jest “**ciemna materia**” ?
- Co to jest “**ciemna energia**” !?
- Jak włączyć opis **grawitacji**?

Model Standardowy

Czy Model Standardowy może być podstawową teorią?
Nie jest pewne czy nasz Wszechświat byłby stabilny...



Astrofizyka cząstek

Astrofizyka cząstek bada cząstki (i promieniowanie) przychodzące z kosmosu.

Pomiary te pozwalają one uzyskać dodatkowe informacje o cząstkach i ich oddziaływaniach przy **najwyższych energiach**.

Z drugiej strony **wykorzystanie technik fizyki cząstek** w pomiarach cząstek naładowanych, fotonów wysokiej energii lub neutrin otwiera nowe możliwości badawcze w astrofizyce.

Możemy porównywać wyniki badania zjawisk zachodzących w **warunkach ekstremalnych** w laboratoriach (LHC) i w kosmosie (Wielki Wybuch, czarne dziury, GRB).

Wiele z wymienionych pytań ma swoje źródło w obserwacjach astrofizycznych.

Ale też na wiele z nich tam też może szukać odpowiedzi!