

# 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 AD2014
- Wciąż aktualne pytania  
na które Model Standardowy nie daje nam odpowiedzi

# 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 (? jeśli starczy czasu)

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

# Wprowadzenie

## Wykład

Piątki 08<sup>15</sup> – 10<sup>00</sup> w sali SDT (N131).

Nominalnie przewidziane jest 14 wykładów.

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

## Egzamin

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

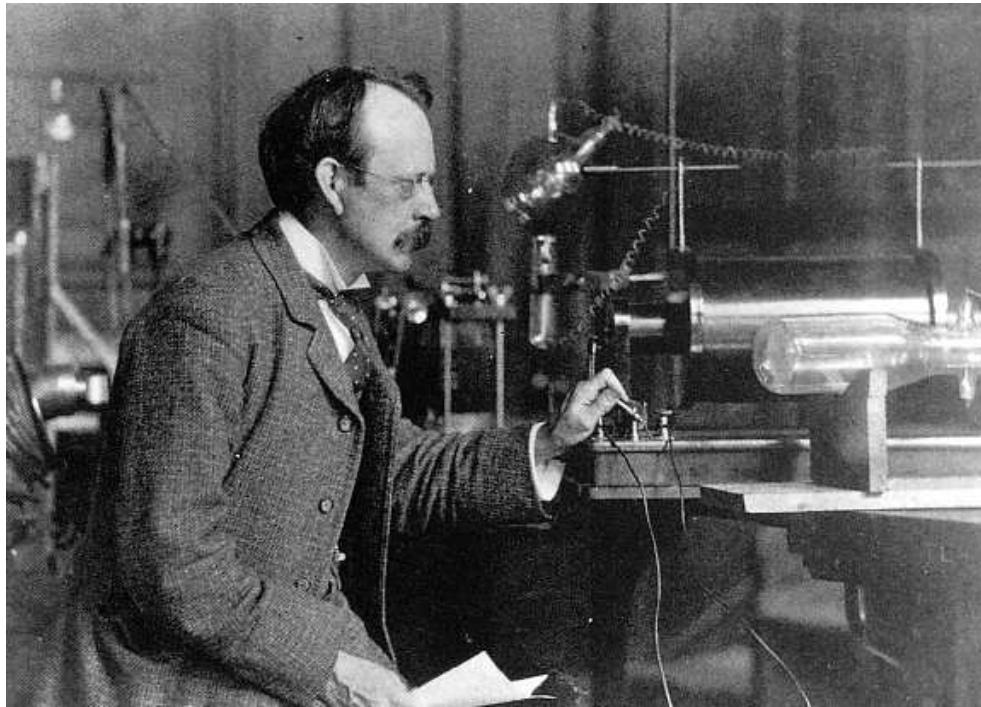
Lista zagadnień będzie udostępniona przed egzaminem.

## 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>
- + materiały będą zamieszczane na stronie wykładu  
<http://www.fuw.edu.pl/~zarnecki/app/>

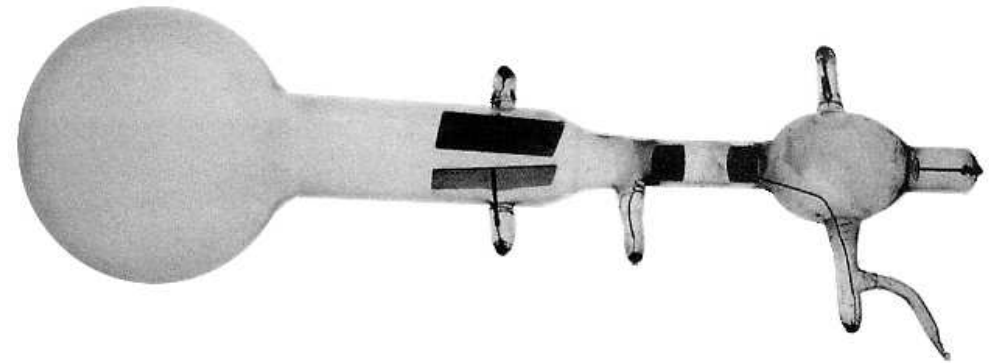
# Początki

## 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

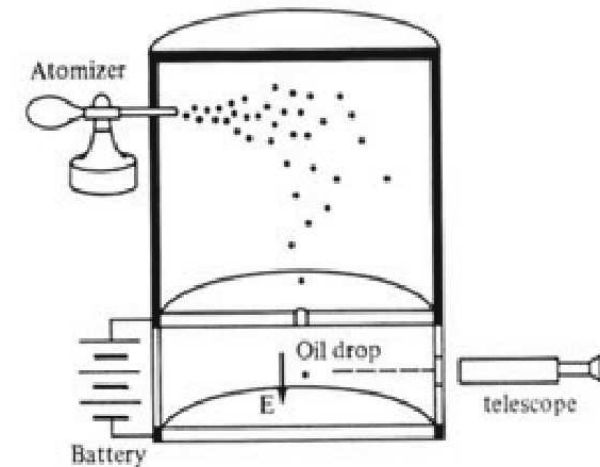
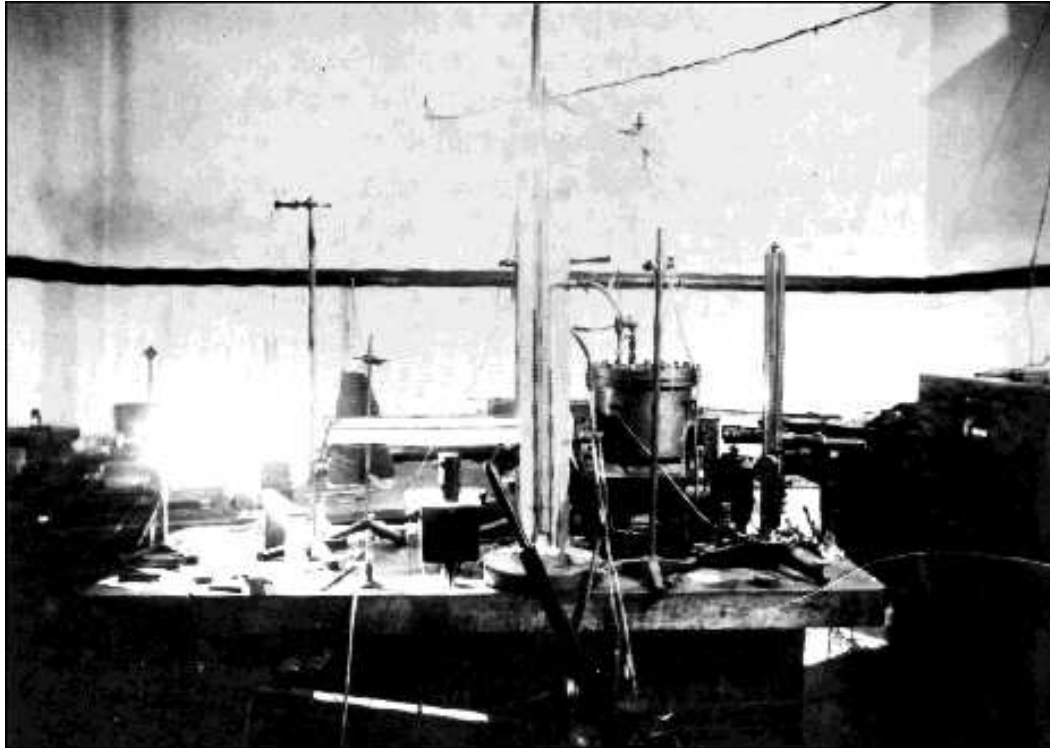
Wyznaczył stosunek ładunku do masy:

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

# Początki

Robert Millikan

1909



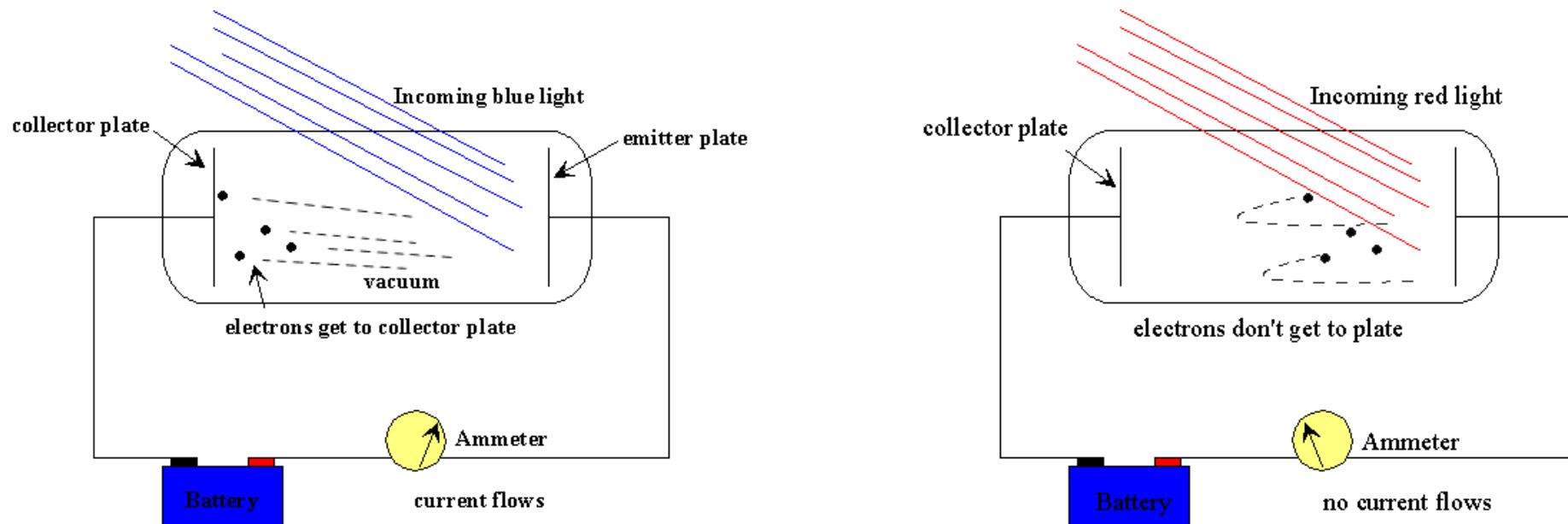
Mierząc opadanie maleńkich kropeł oliwy w powietrzu wyznaczył **ładunek** elektronu, a następnie obliczył jego **masę**:

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

# 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:

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

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

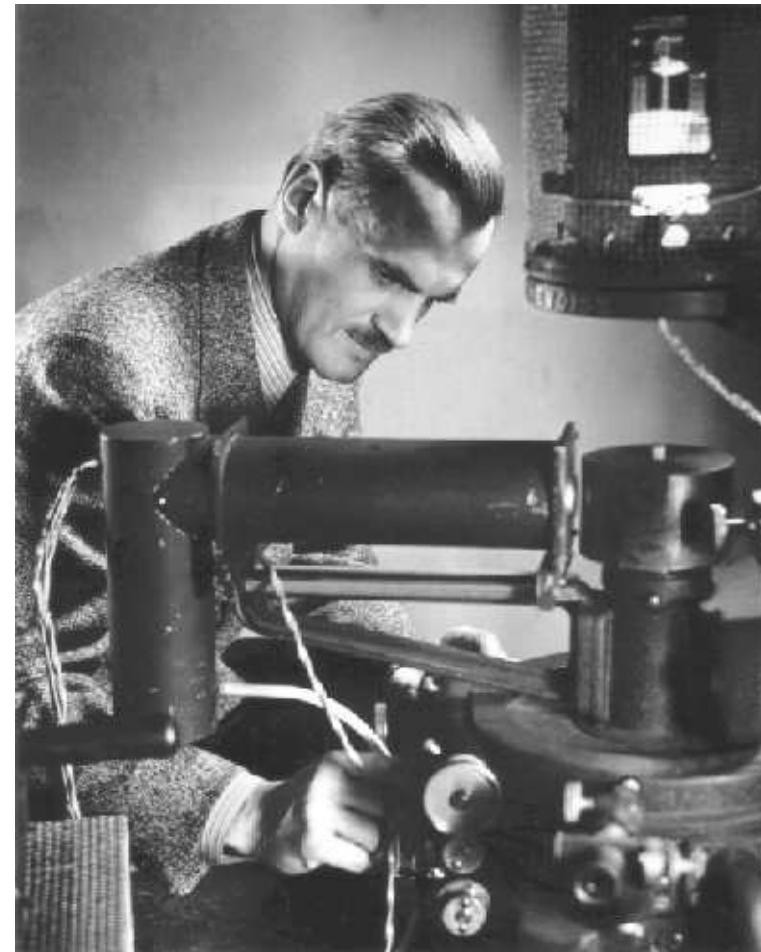
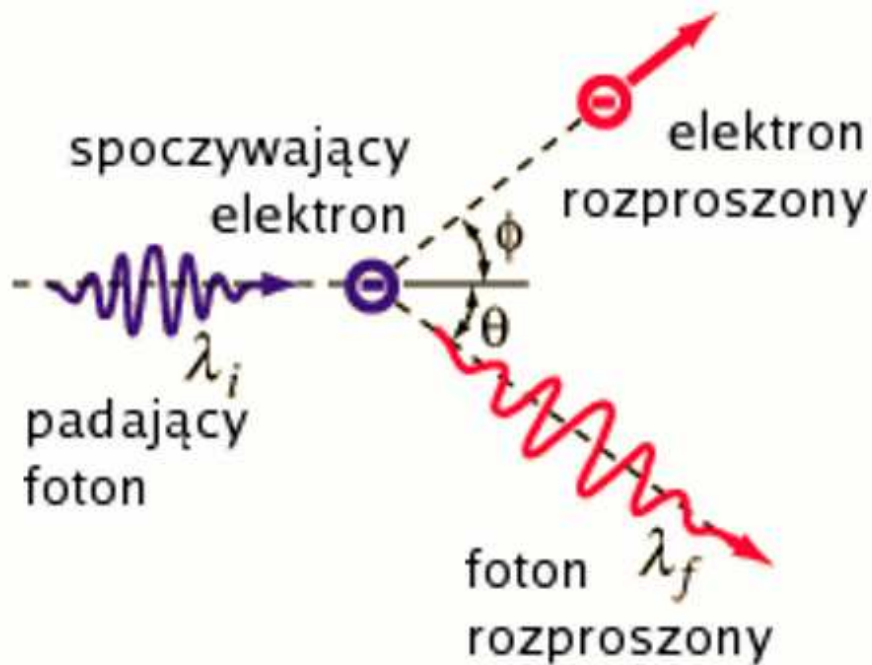




# Początki

## 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 **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...

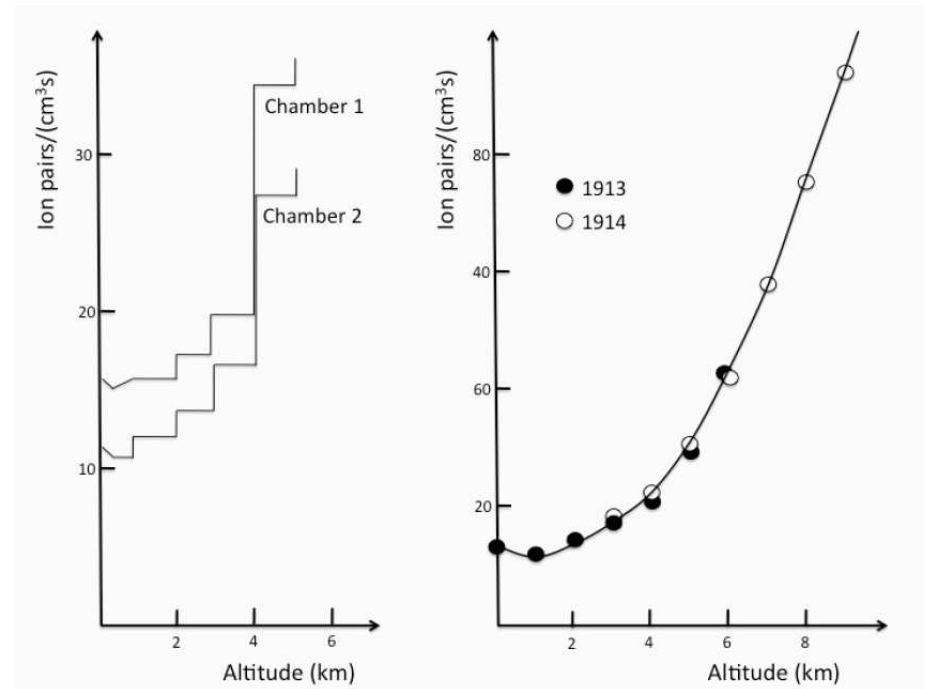
## Pierwotne promieniowanie kosmiczne

Promieniowanie obserwowane poza atmosferą ziemską

Skład (pomijając neutrina):

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

Taki jak "skład Wszechświata"...



# Promieniowanie kosmiczne

## Wtórne promieniowanie kosmiczne

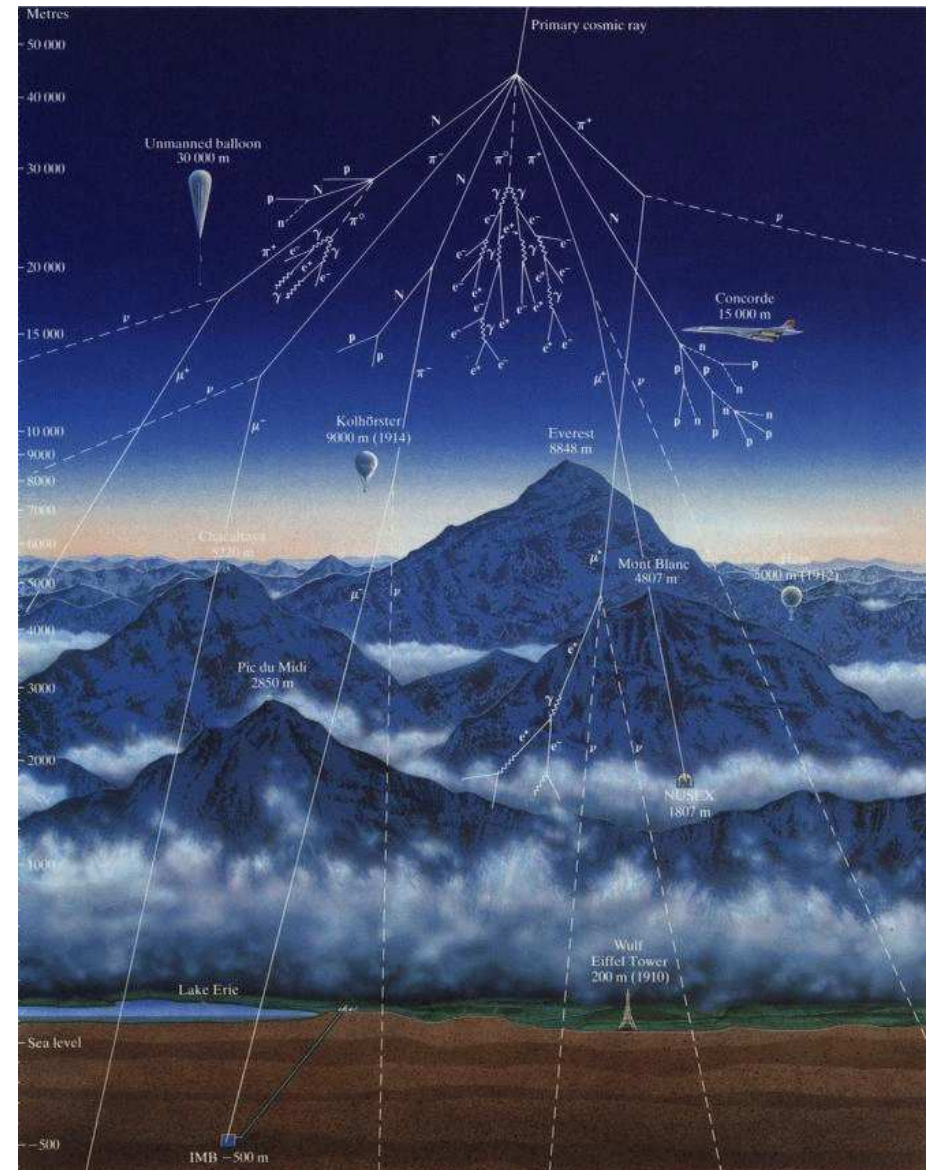
Promieniowanie pierwotne oddziałuje w atmosferze Ziemi. Produkowane są liczne cząstki wtórne, głównie **piony i kaony**, które następnie rozpadają się produkując głównie miony, a w dalszej kolejności elektrony.

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.

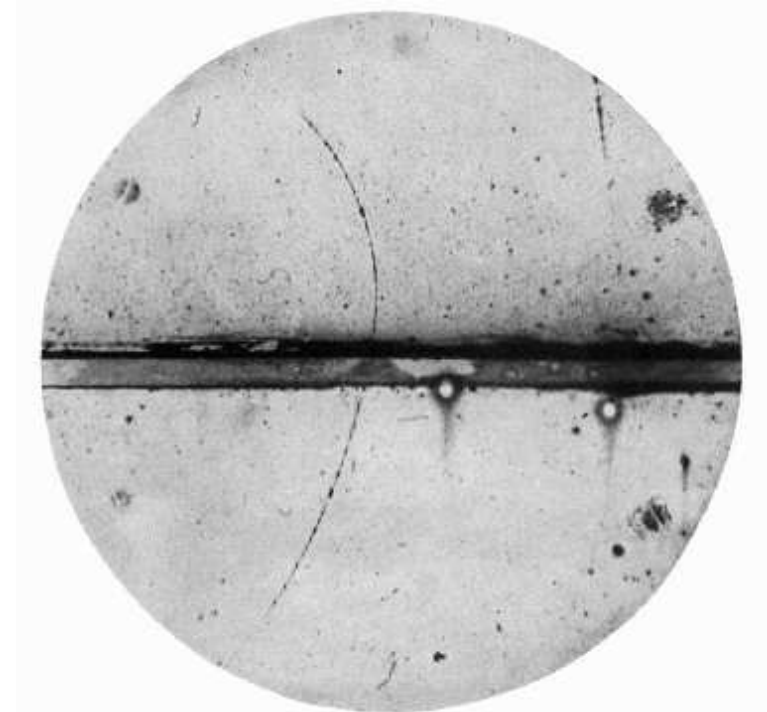
Doprowadziło do wielu przełomowych odkryć:

**1932** – odkrycie pozytonu: Carl Anderson

**1935** – Hipoteza Yukawy: piony

**1937** – odkrycie mionu  $\mu^\pm$

**1947** – odkrycie pionu





# Promieniowanie kosmiczne

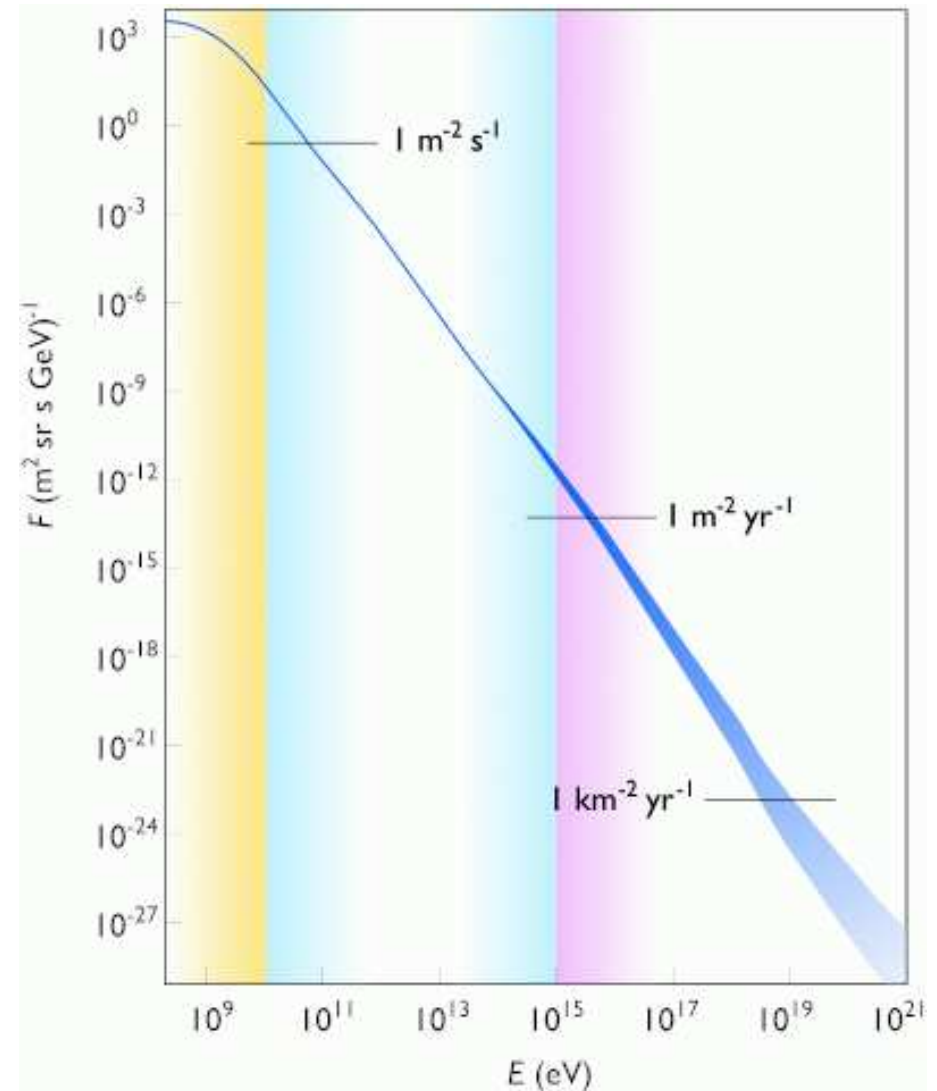
Do lat 50 XX w. badanie oddziaływań promieniowania kosmicznego z materią było jednym z głównych kierunków badań.

**Wciąż pozostaje ważnym źródłem danych.**

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

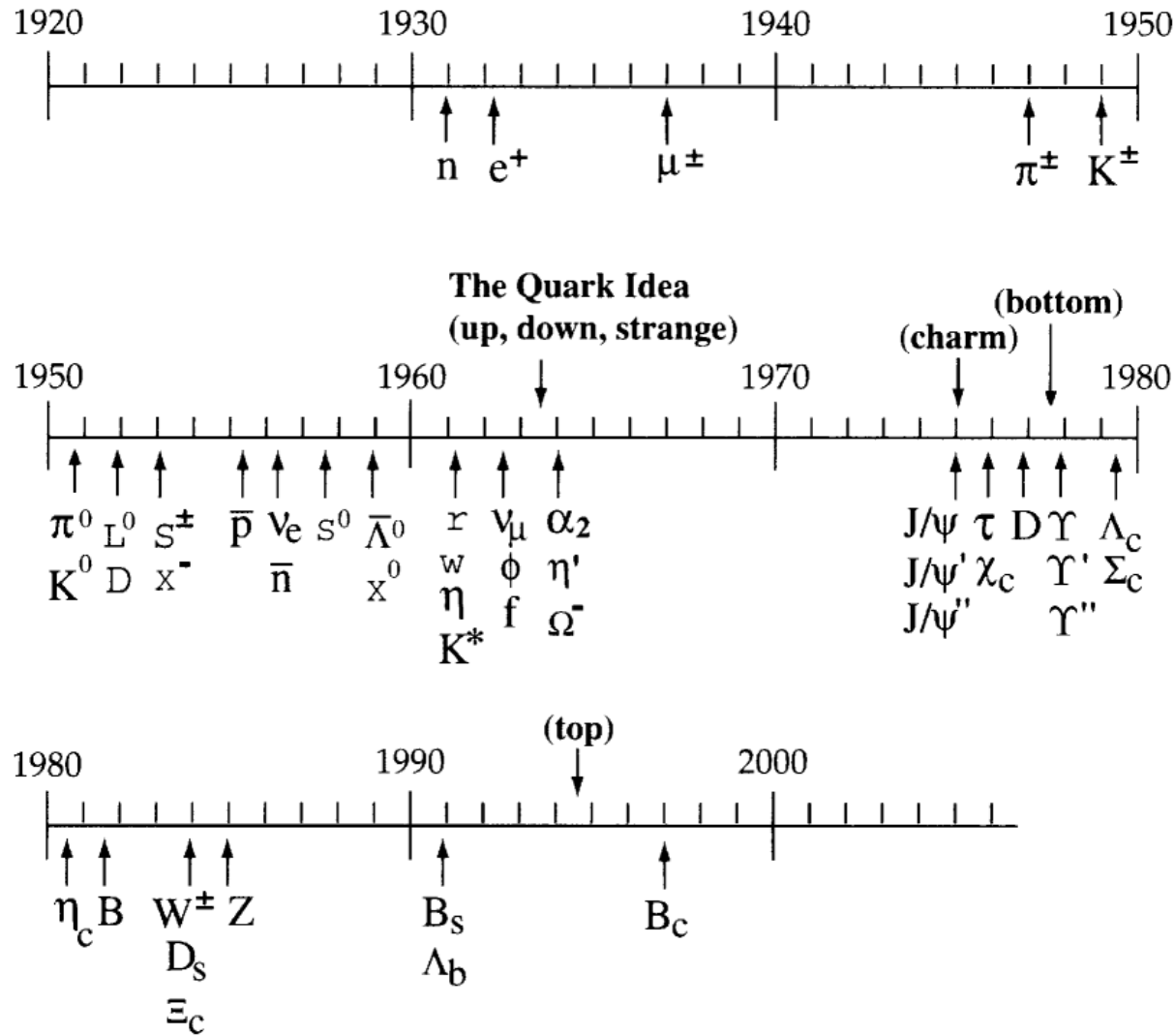
**Niestety cząstek o najwyższych energiach jest ich bardzo mało...**

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  $\Omega^-$ .
- 1969 – Richard Feynman proponuje model partonowy do opisu wyników rozpraszania elektronów na protonach.
- Dziś wiemy, że partony to w szczególności kwarki...

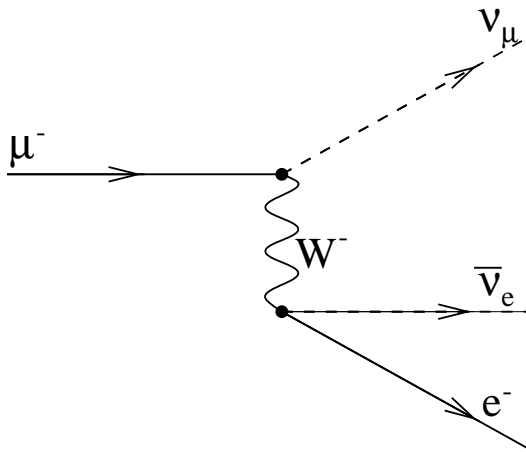
# Bozony $W^\pm$ i $Z^0$

## 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>	$\nu_e$ <i>neutrino el.</i>	$d$ <i>down</i>	$u$ <i>up</i>
pokolenie 2	$\mu$ <i>mion</i>	$\nu_\mu$ <i>neutrino mionowe</i>	$s$ <i>strange</i>	$c$ <i>charm</i>
pokolenie 3	$\tau$ <i>taon</i>	$\nu_\tau$ <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

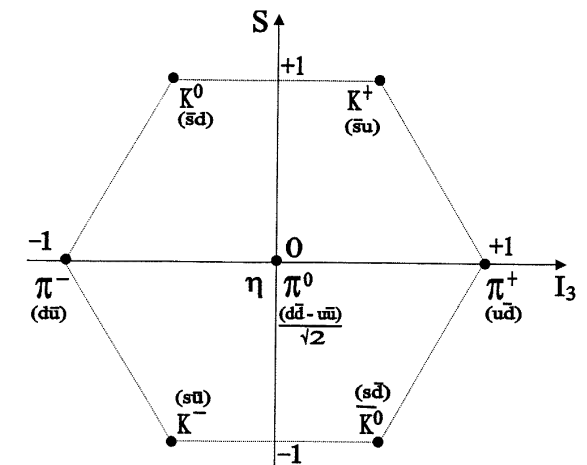
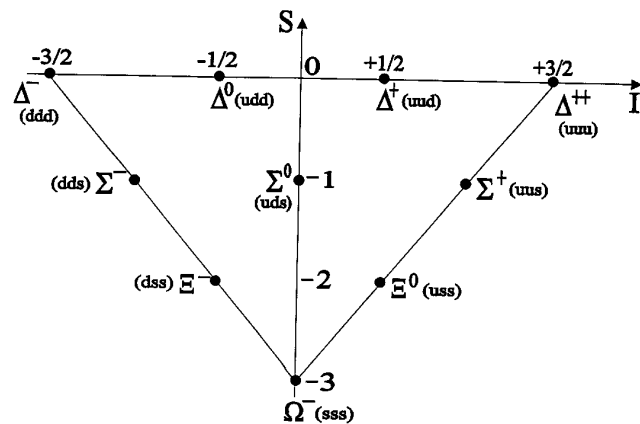
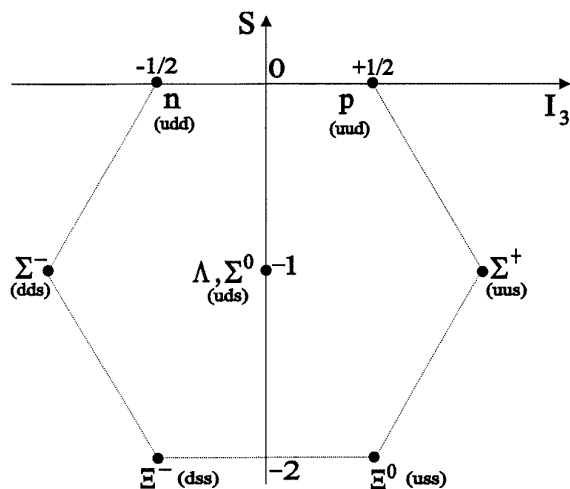
## Fermiony

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

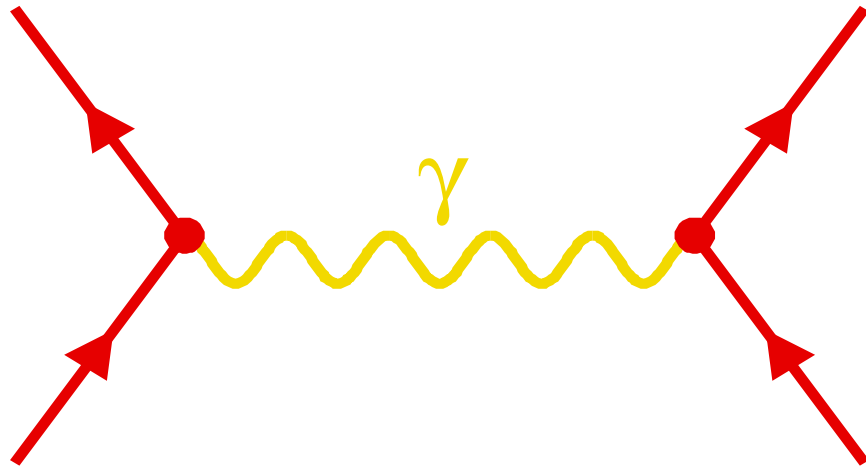
## Bozony

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

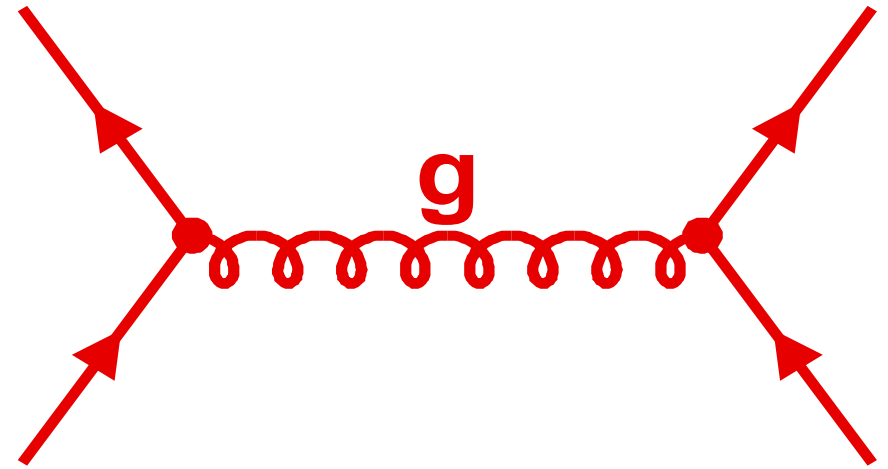
Nośnik przekazuje część energii i/lub pędu jednej cząstki drugiej cząstce

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

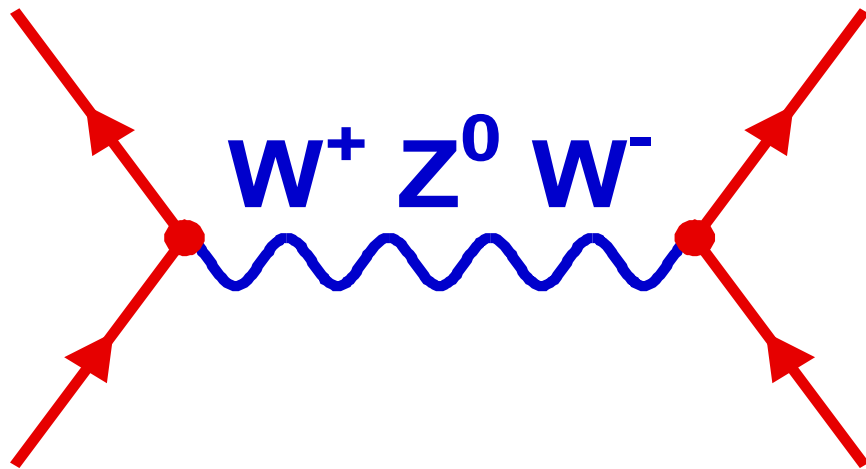
“moc” - przykładowe porównanie wielkości oddziaływań dla dwóch sąsiadujących protonów



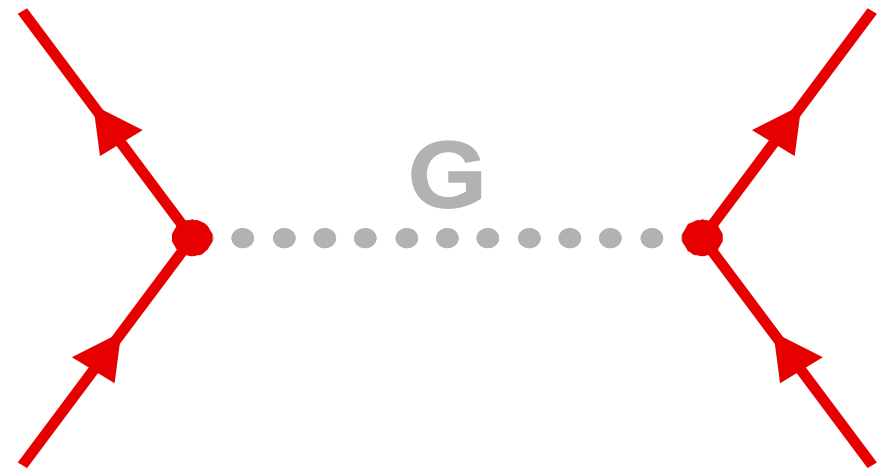
**elektromagnetyczne**



**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

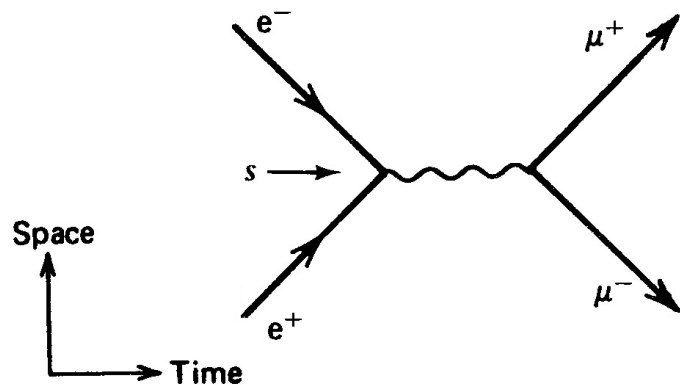
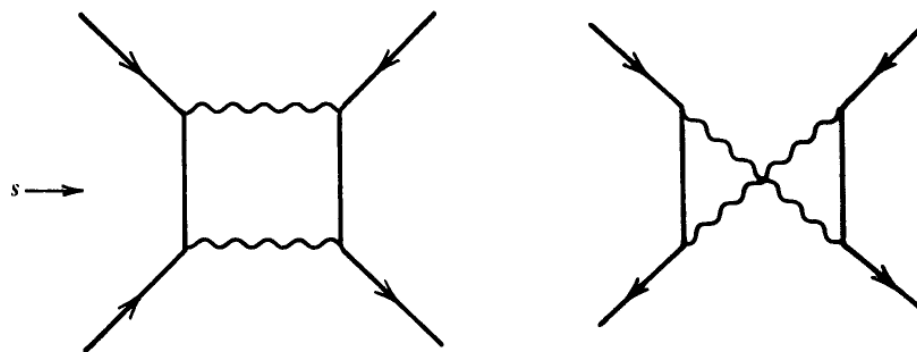


Diagram “drzewowy”

Kolejne diagramy (przykładowe)  
**next-to-leading order** - NLO



Diagramy “pętlowe”

# Świat cząstek elementarnych

## Diagramy Feynmana

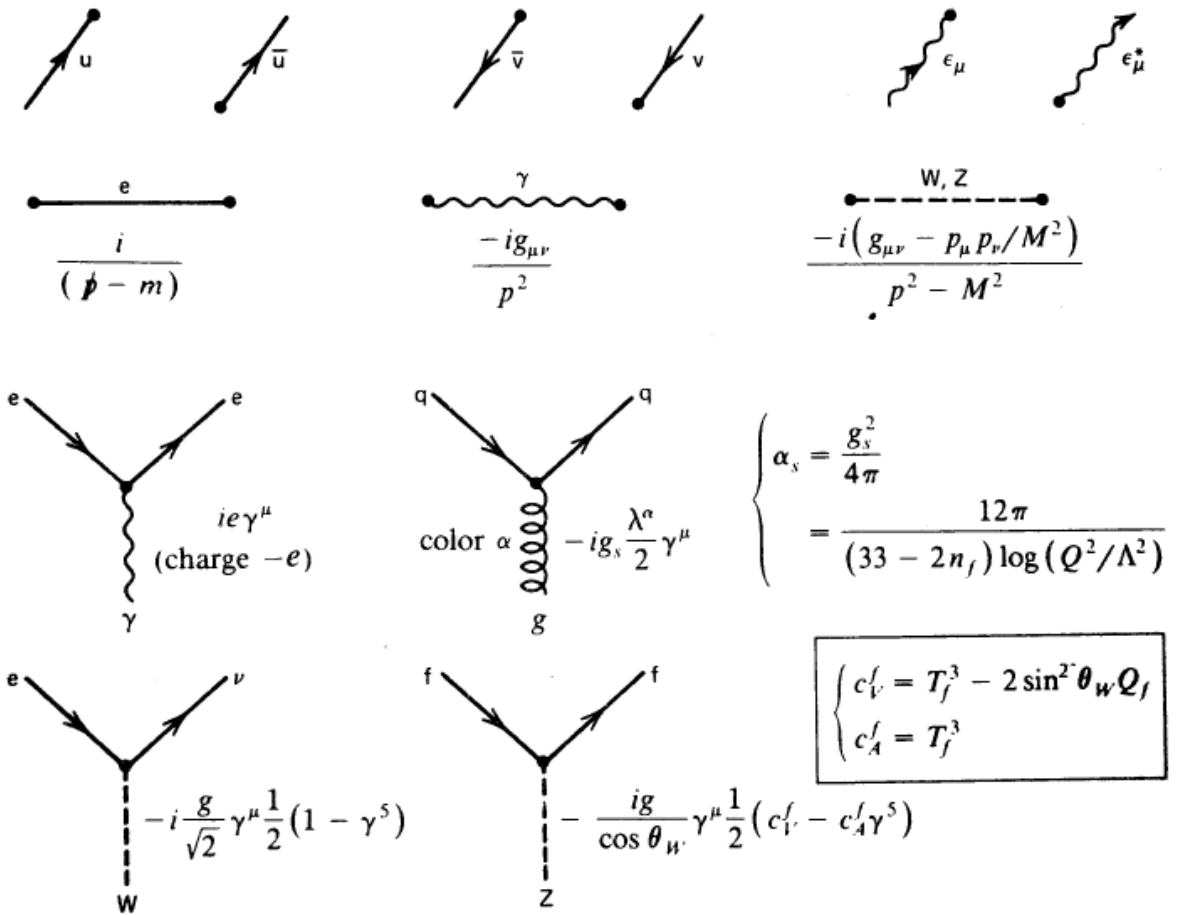
Każdemu diagramowi możemy przyporządkować wyrażenie na odpowiednią amplitudę rozpraszania

Wierzchołki decydują o wielkości przekroju czynnego:

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

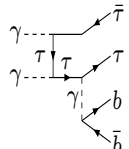
$$\frac{g^2}{4\pi} \sim 0.03$$

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

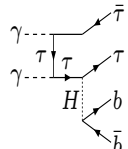




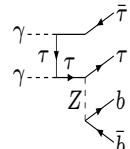
$$\gamma\gamma \rightarrow \tau^+\tau^- b\bar{b}$$



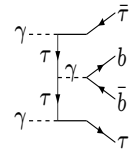
diagr.1



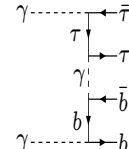
diagr.2



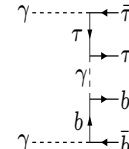
diagr.3



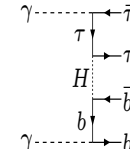
diagr.4



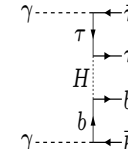
diagr.5



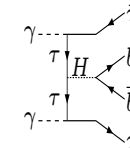
diagr.6



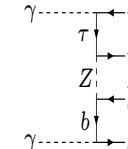
diagr.7



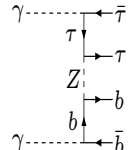
diagr.8



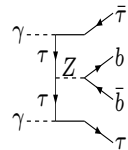
diagr.9



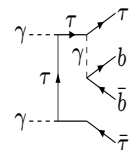
diagr.10



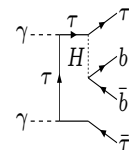
diagr.11



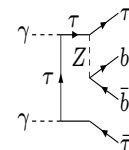
diagr.12



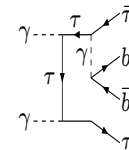
diagr.13



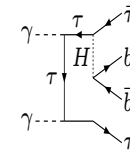
diagr.14



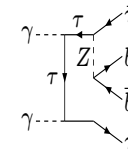
diagr.15



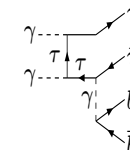
diagr.16



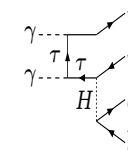
diagr.17



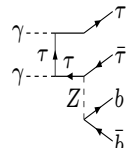
diagr.18



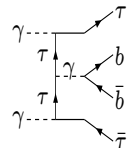
diagr.19



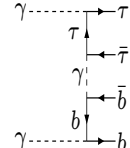
diagr.20



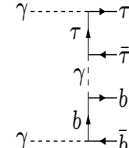
diagr.21



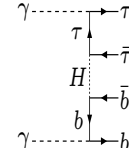
diagr.22



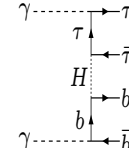
diagr.23



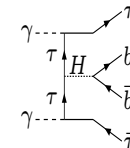
diagr.24



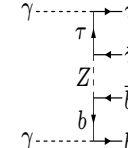
diagr.25



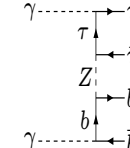
diagr.26



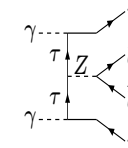
diagr.27



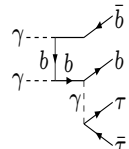
diagr.28



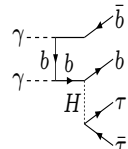
diagr.29



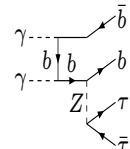
diagr.30



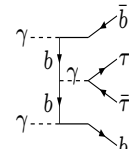
diagr.31



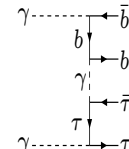
diagr.32



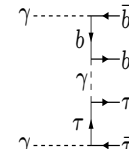
diagr.33



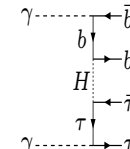
diagr.34



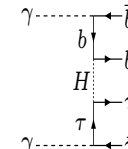
diagr.35



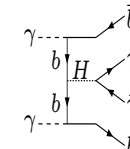
diagr.36



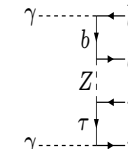
diagr.37



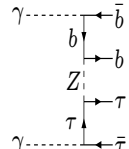
diagr.38



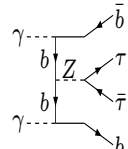
diagr.39



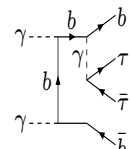
diagr.40



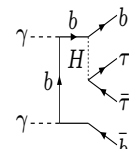
diagr.41



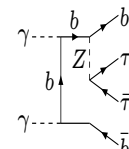
diagr.42



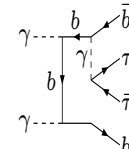
diagr.43



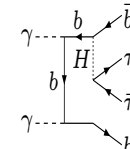
diagr.44



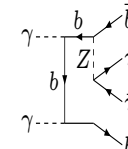
diagr.45



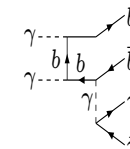
diagr.46



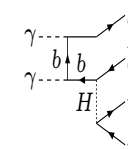
diagr.47



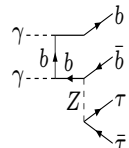
diagr.48



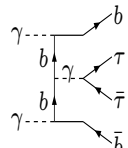
diagr.49



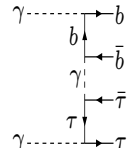
diagr.50



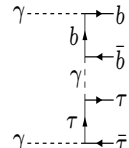
diagr.51



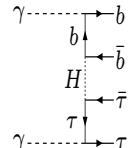
diagr.52



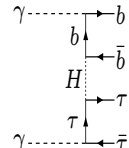
diagr.53



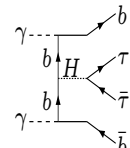
diagr.54



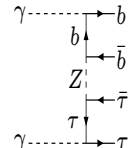
diagr.55



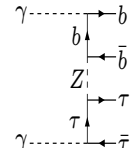
diagr.56



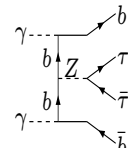
diagr.57



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...

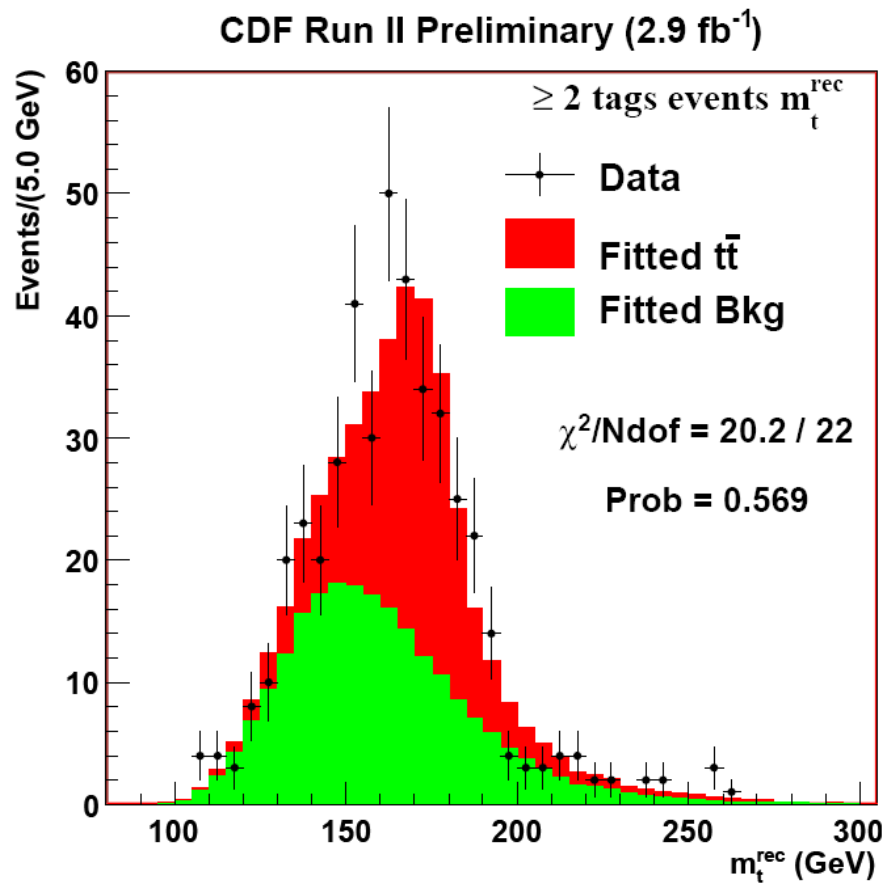
# Kwark $t$

Tevatron

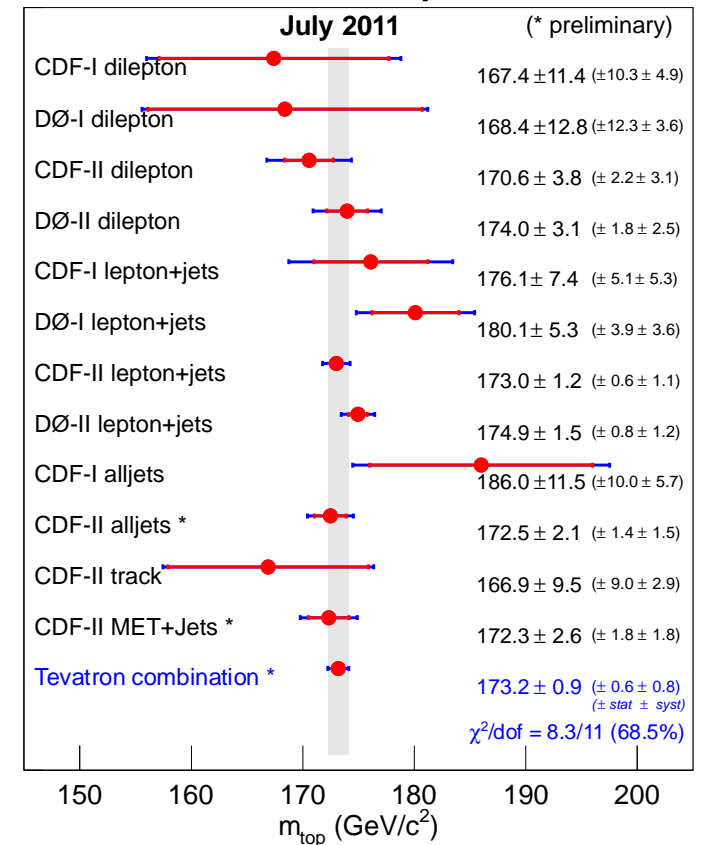
Odkrycie: 1995

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

Porównanie wyników dla różnych próbek



**Mass of the Top Quark**

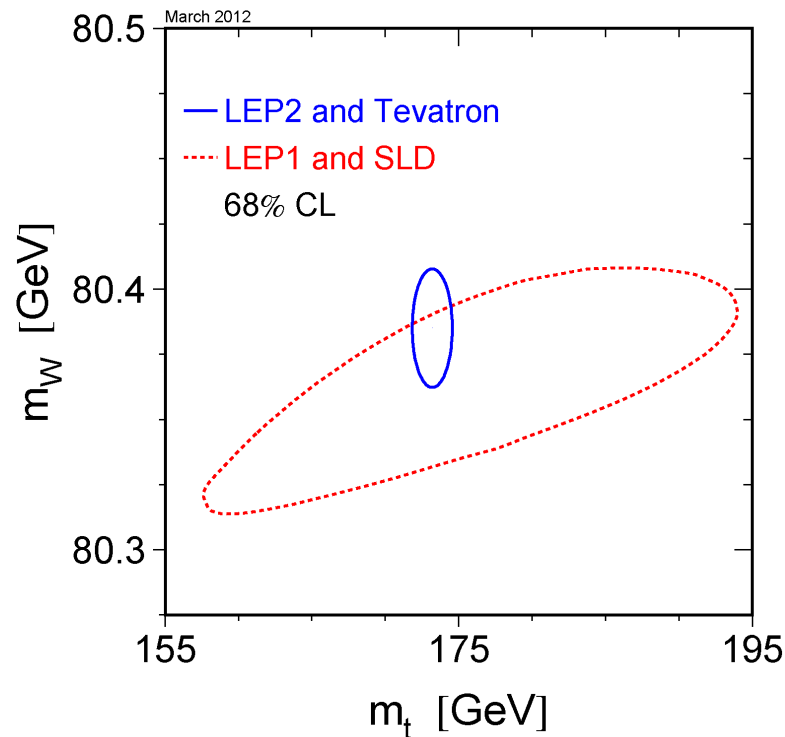


CDF + D0:  $m_t = 173.2 \pm 0.9 \text{ GeV}$

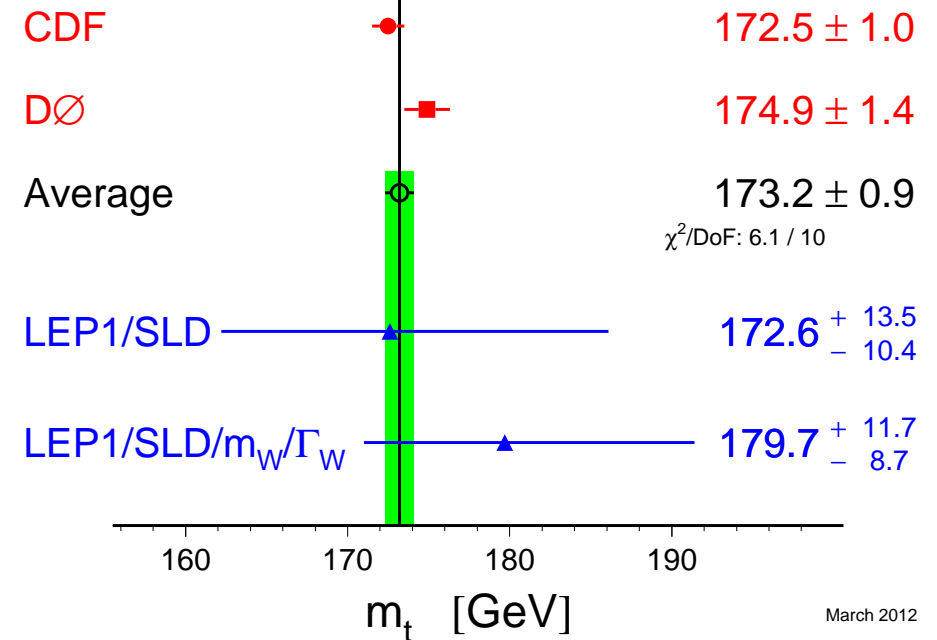
# Kwark $t$

## Porównanie

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



## Top-Quark Mass [GeV]

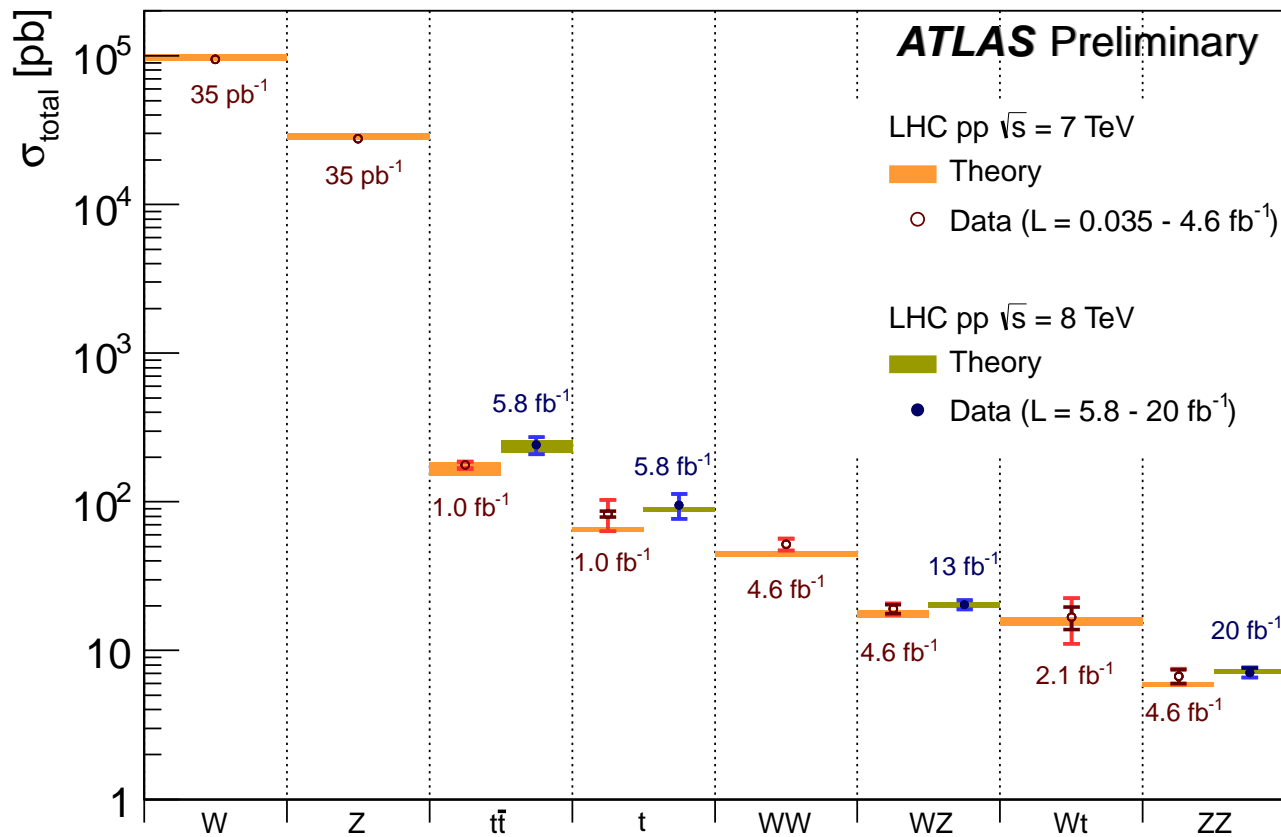


Pomiar bezpośredni zgodny w granicach błędów z przewidywaniami teorii opartymi na precyzyjnych pomiarach przy niższych energiach.

# 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.



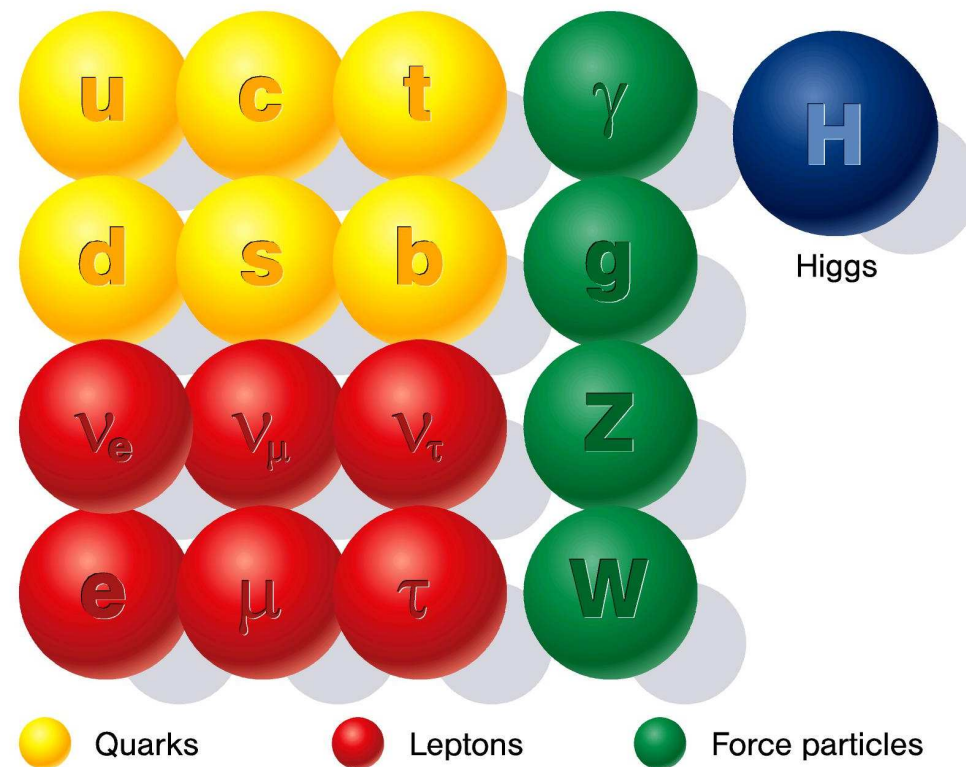
# Cząstka Higgsa

## Model Standardowy

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

Cząstkami modelu są

- cząstki materii  
kwarki i leptony
- nośniki oddziaływań  
 $\gamma$ ,  $g$ ,  $W^\pm$  i  $Z^0$
- bozon Higgsa  
konieczny dla  
spójności modelu  
“Nadaje masy” wszystkim cząstkom

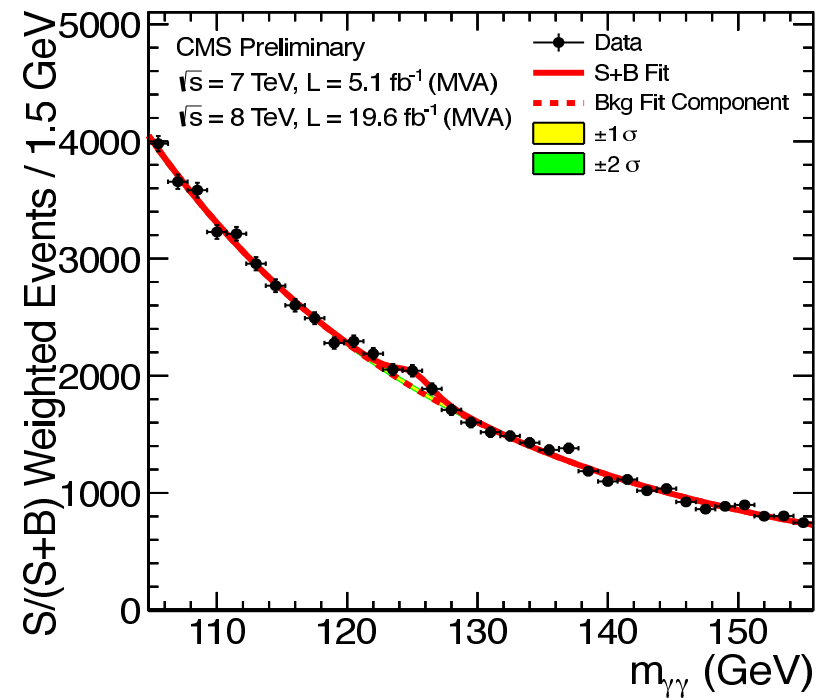
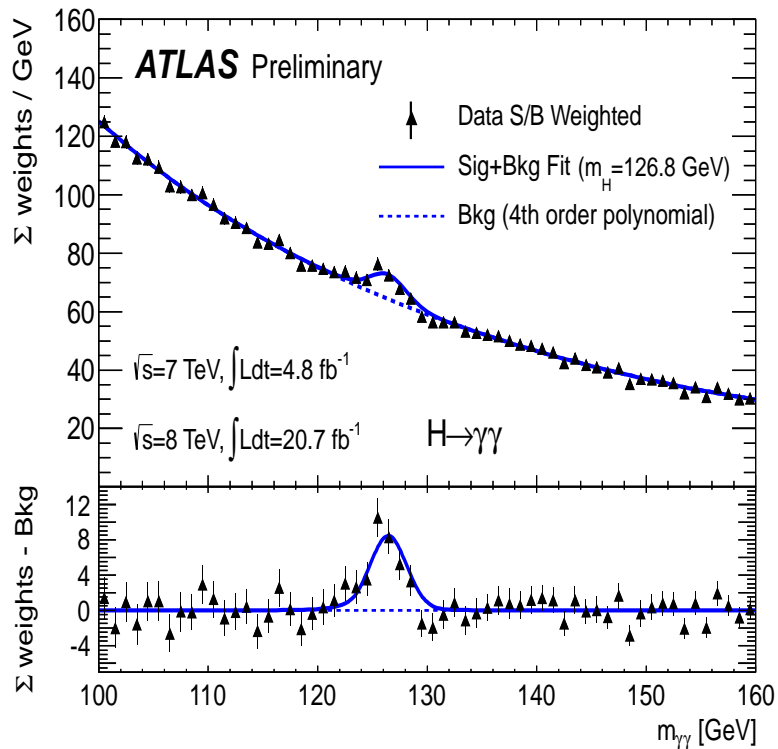


# Higgs w LHC

Nowe wyniki **ATLAS** i **CMS** przedstawione w marcu 2013, po uwzględnieniu danych zebranych w roku 2012.

**Ponad dwukrotny wzrost statystyki!**

w porównaniu z odkryciem w lipcu 2012.





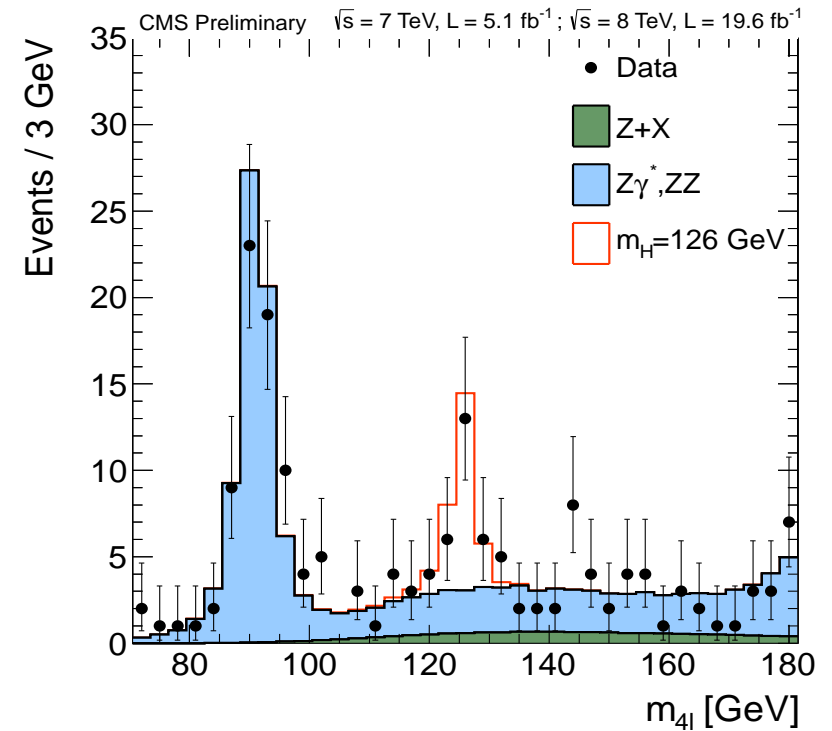
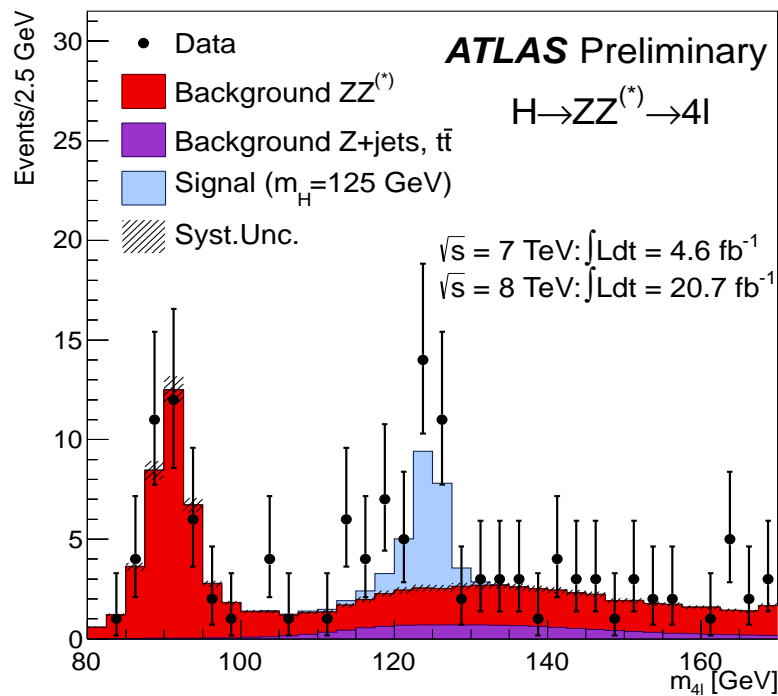
# Higgs w LHC

Nowe wyniki **ATLAS** i **CMS** przedstawione w marcu 2013, po uwzględnieniu danych zebranych w 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

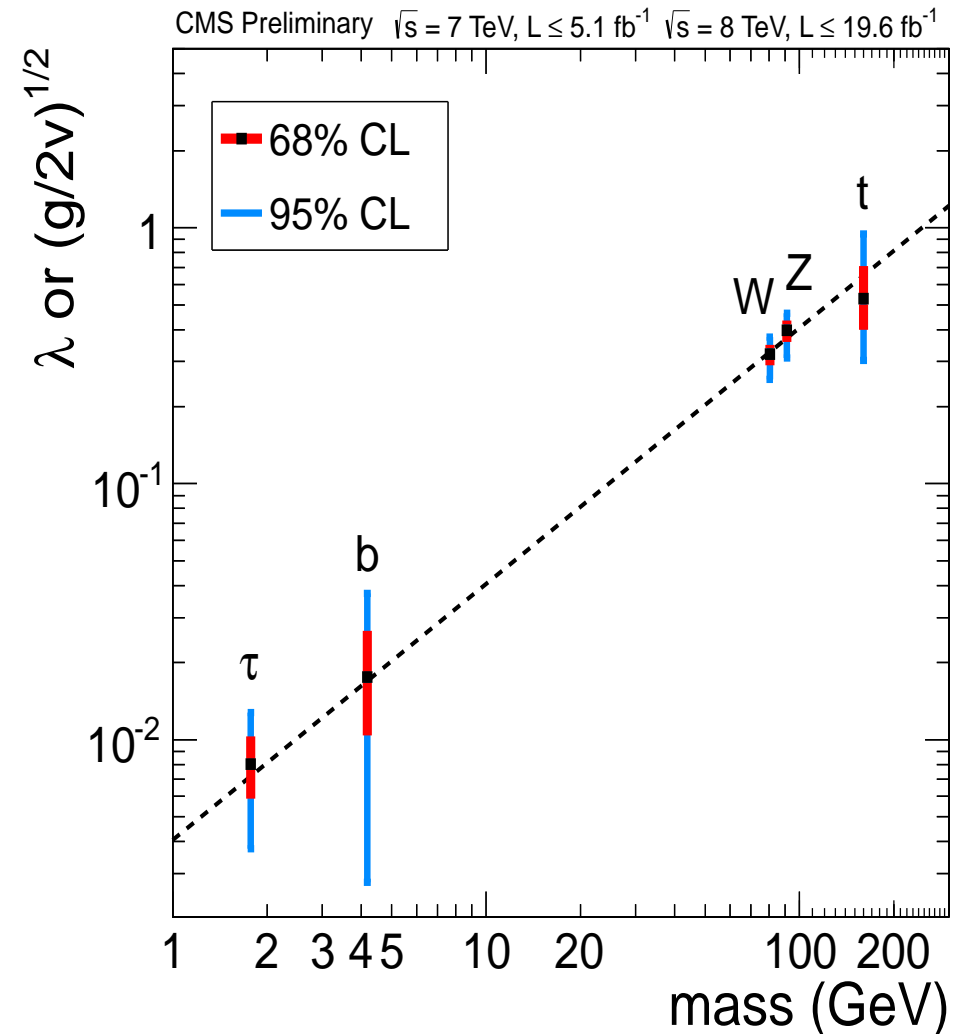
Możliwa staje się weryfikacja podstawowego przewidywania modelu:

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



# 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 **gravitacji**?

# 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!