

# Astrofizyka cząstek

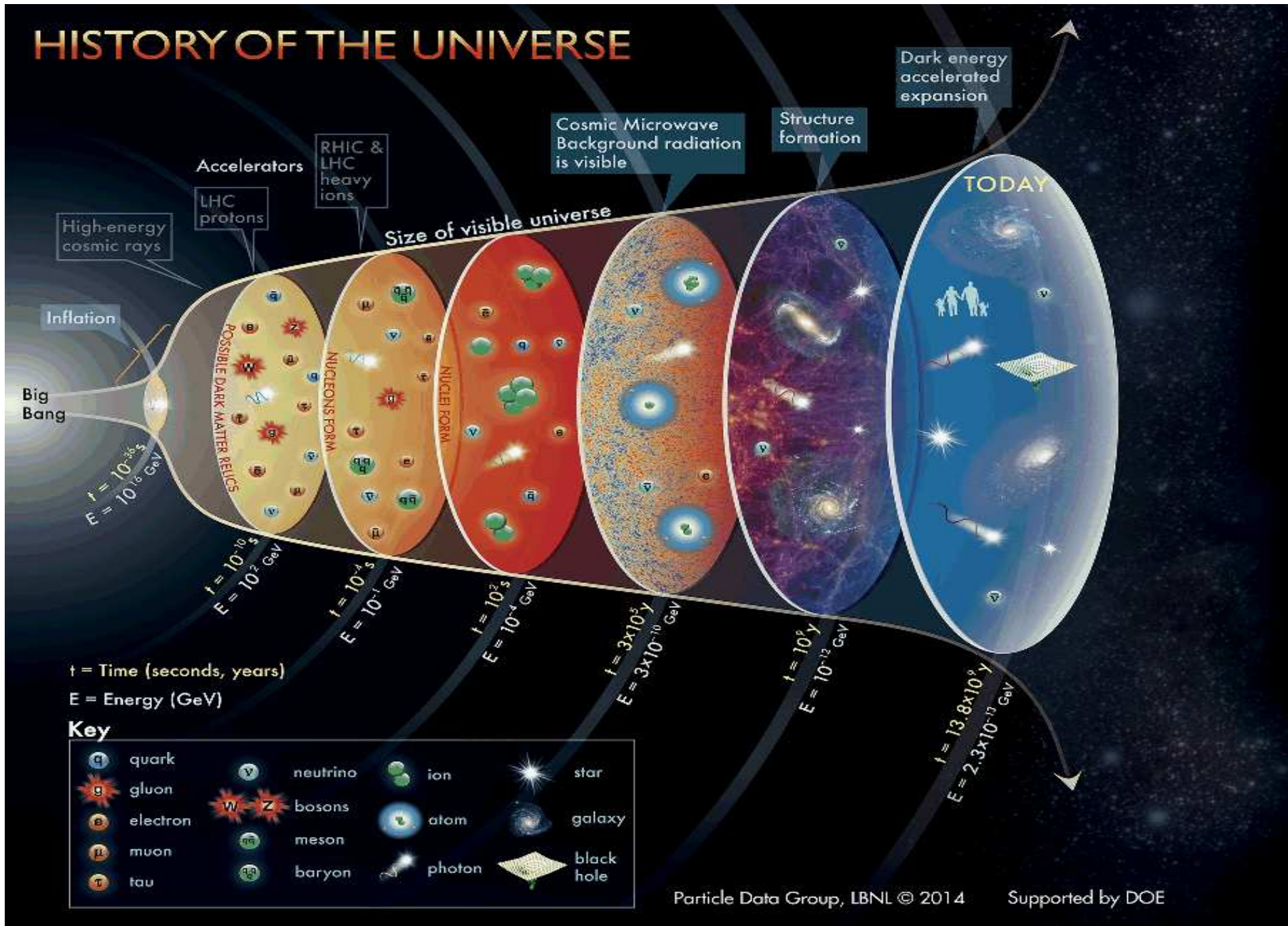
prof. dr hab. A.F.Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych IFD

## Wykład I

- Wprowadzenie  
plan wykładu, literatura, egzamin itp.
- Krótka historia rozwoju (astro)fizyki cząstek
- Model Standardowy AD2018
- 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 15<sup>15</sup> – 17<sup>00</sup> w sali 1.37.

Nominalnie przewidziane jest 15 wykładów.

## Egzamin

Proponowana forma: egzamin ustny.

W ramach egzaminu należy przedstawić dwa z trzech wylosowanych tematów.

Lista zagadnień będzie udostępniona przed egzaminem (zbliżona do zeszłorocznej).

## Literatura

- D.H. Perkins, Particle Astrophysics, Oxford University Press, 2009.
- Materiały z International School of Astroparticle Physics:  
<http://isapp.school.2014.to.infn.it/>  
<http://isapp2015.in2p3.fr/>  
<http://isapp2016.mib.infn.it/>  
<https://agenda.infn.it/conferenceDisplay.py?confId=11926>
- + materiały będą zamieszczane na stronie wykładu  
<http://www.fuw.edu.pl/~zarnecki/app/>

# Początki

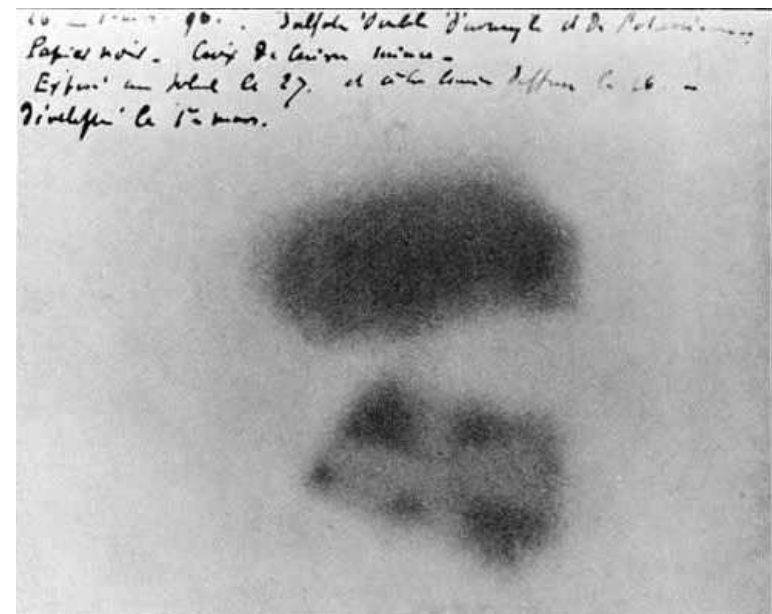
## Promieniotwórczość naturalna

Odkryta przez Henri Becquerela w 1896.

Badał hipotezę, że emisja promieniowania X przez sole uranu jest wynikiem fluorescencji - opóźnionej emisji po wcześniejszym napromieniowaniu substancji

Najsilniejszym źródłem promieniowania było wtedy... Słońce.

Niestety, pogoda była pochmurna w Paryżu, więc Becquerel schował próbkę uranu oraz nienaświetloną kliszę fotograficzną do szuflady...



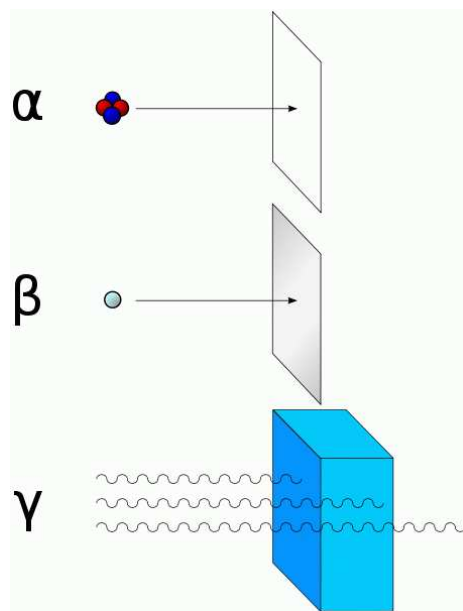
# Początki

## Promieniotwórczość naturalna

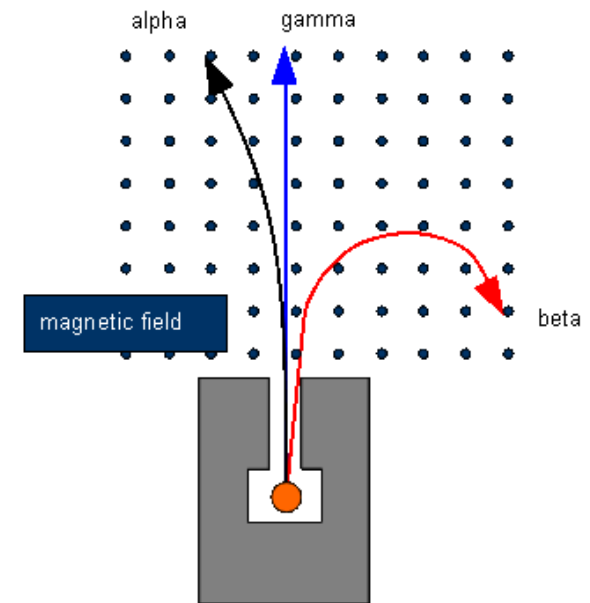
W kolejnych latach prowadzono bardzo intensywne badania nad promieniotwórczością.

Na początku XX wieku wyodrębniono **3 rodzaje** promieniowania, które różniły się:

pochłanianiem w materii



zakrzywieniem w polu magnetycznym



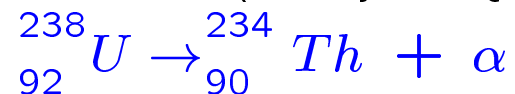
# Początki

1903

Nagroda Nobla dla H.Becquerela, M.Skłodowskiej-Curie i P.Curie

E.Rutherford i F.Soddy publikują wyniki potwierdzające, że promieniotwórczość jest wynikiem **przemiany pierwiastków**: jeden rodzaj atomu emitując promieniowanie zamienia się w atom innego pierwiastka:

- Promieniowanie  $\alpha$  (emisja cząstki  $\alpha$ , czyli jądra Helu)



- promieniowanie  $\beta$  (emisja elektronu)



- promieniowanie  $\gamma$  (emisja kwantu  $\gamma$  - wysokoenergetycznego fotonu)

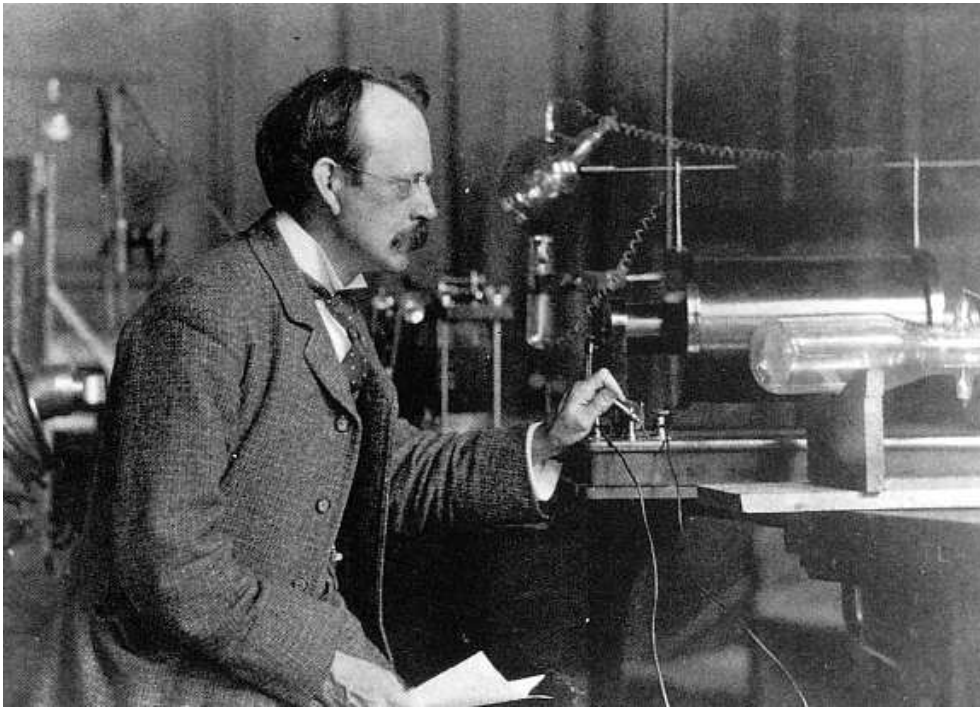


Choć w tym czasie atomy wciąż były traktowane jako niepodzielne...



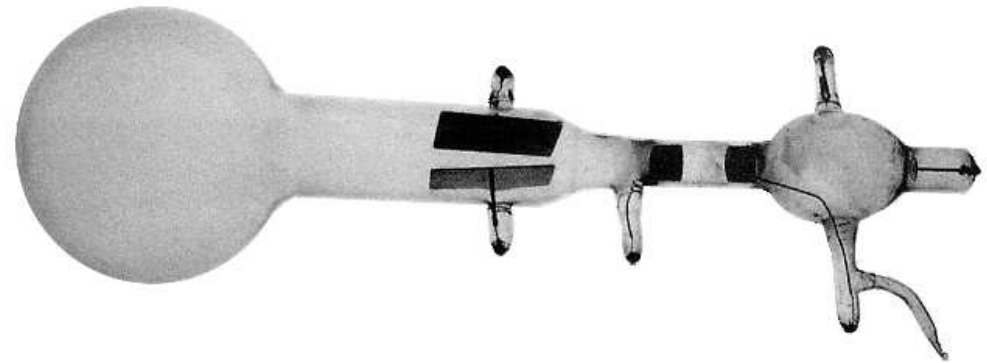
# Początki

## Odkrycie elektronu



Joseph Thomson 1897

Thomson badał tzw. promienie katodowe



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

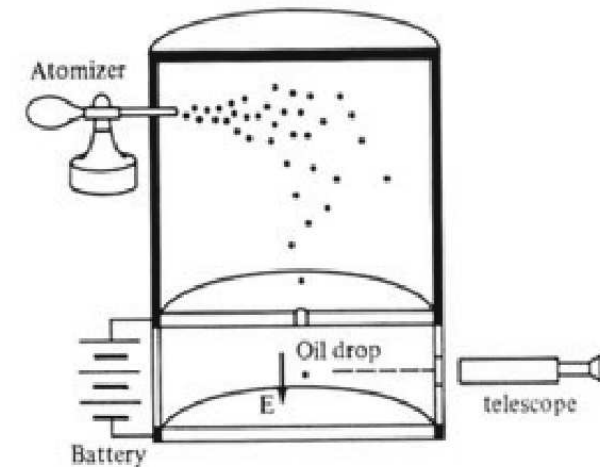
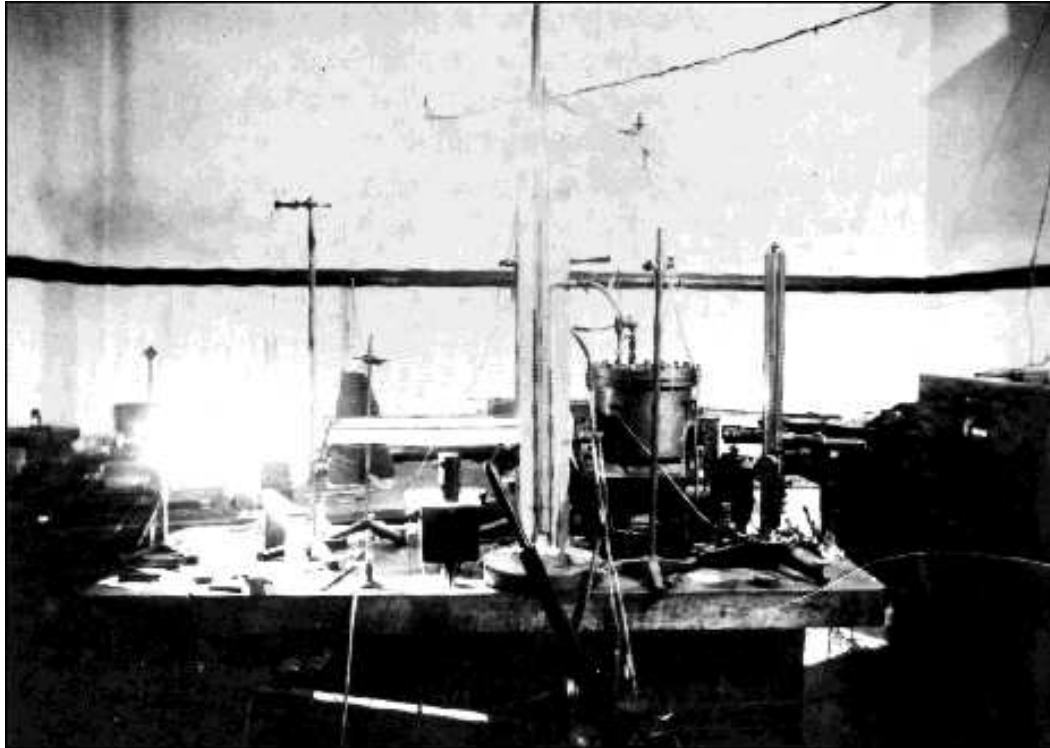
Wyznaczył stosunek ładunku do masy:

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

# Początki

Robert Millikan

1909



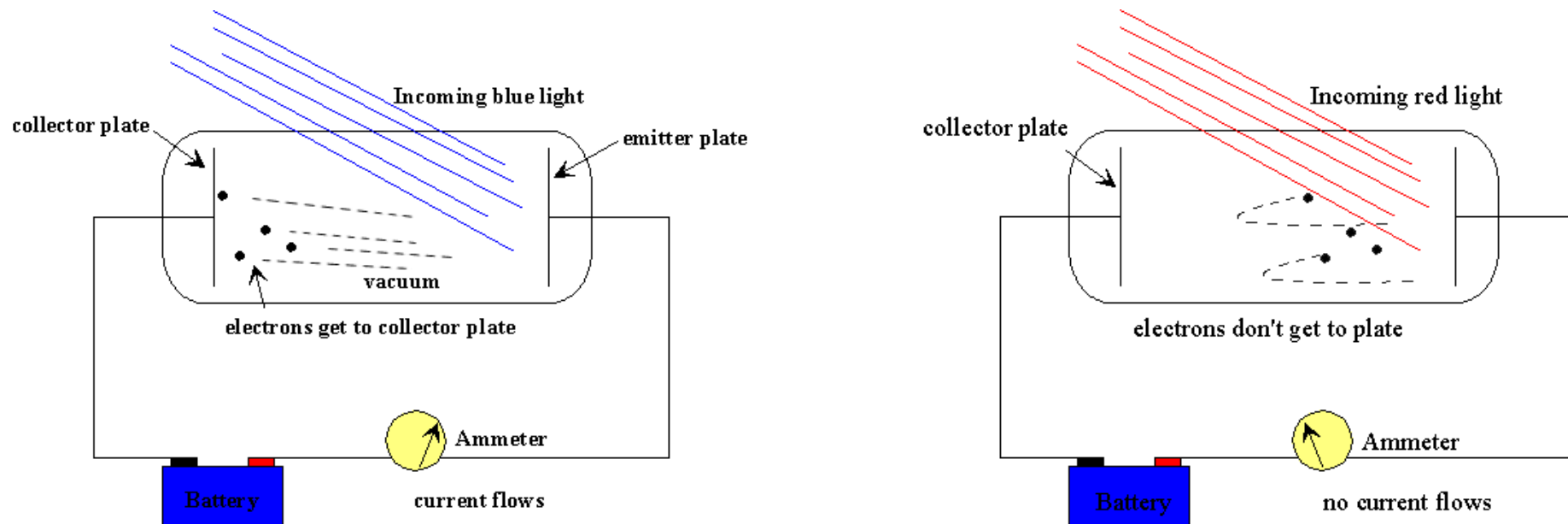
Mierząc opadanie maleńkich kropeł oliwy w powietrzu wyznaczył **ładunek** elektronu, a następnie obliczył jego **masę**:

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

# 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:

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

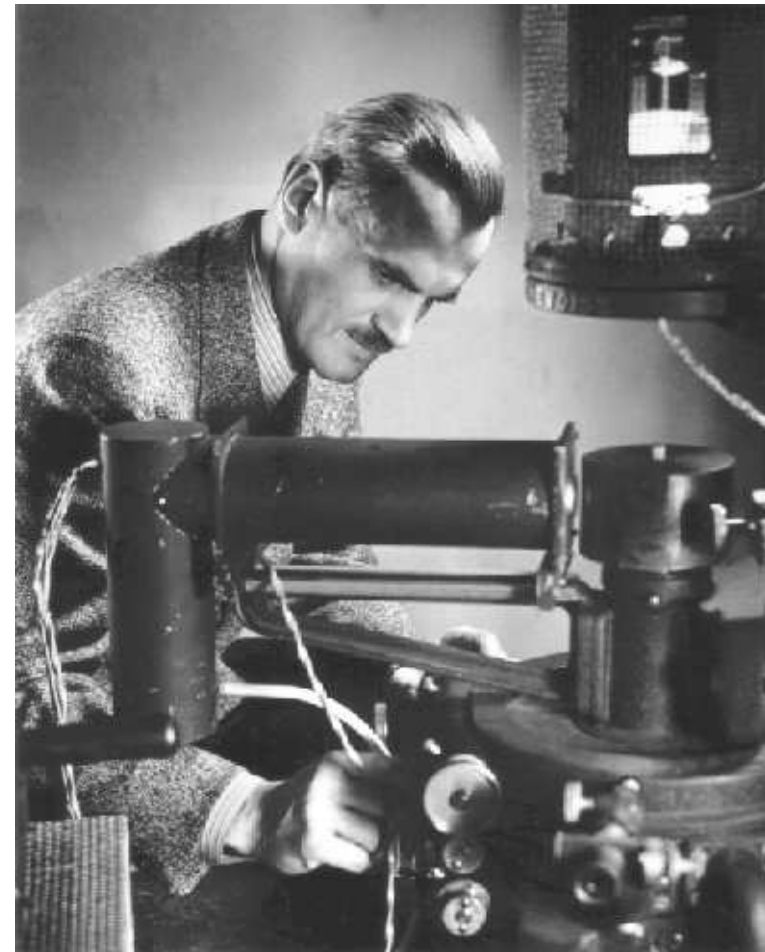
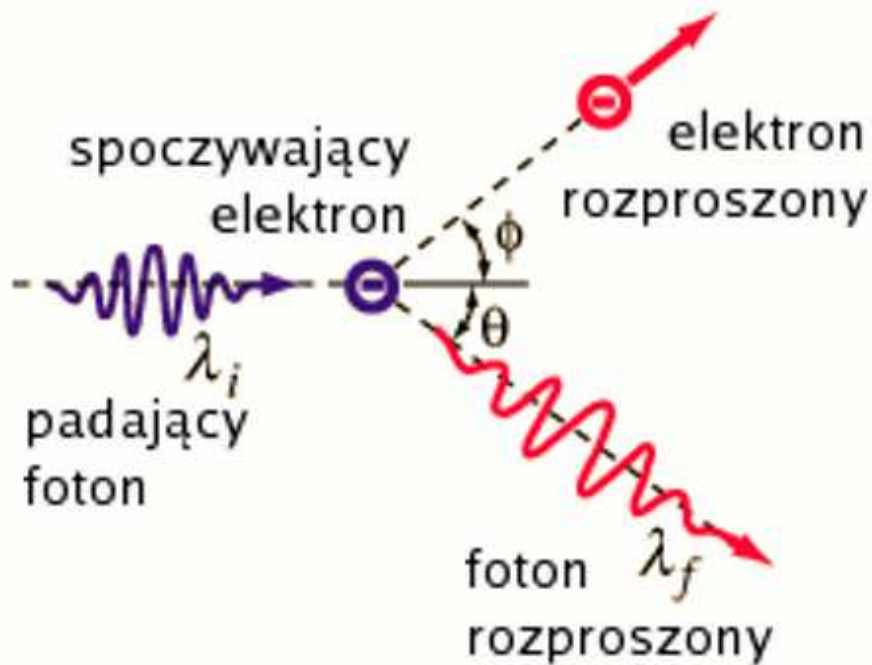
Aby wybić elektron z metalu  $E_{\gamma}$  musi być większa od tzw. **pracy wyjścia**  $\Rightarrow$  zależność od długości fali światła



# 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.

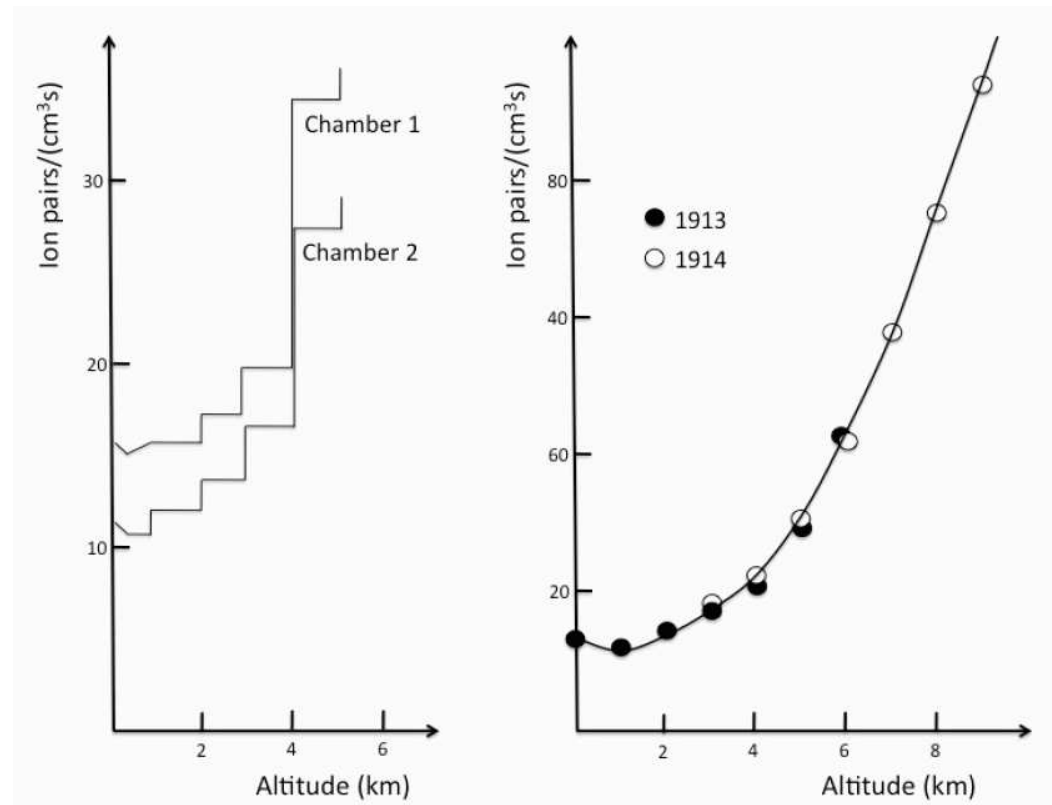
W **1912** roku **Victor Hess** przeprowadził pomiar jonizacji powietrza w funkcji wysokości nad powierzchnią Ziemi.

Pierwsze pomiary wykonane na Wieży Eiffla w Paryżu nie pokazały, że jonizacja **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 aż do roku 1932 spierano się czy są to cząstki naładowane, czy promieniowanie gamma...



# Promieniowanie kosmiczne

## Odkrycie pozytonu

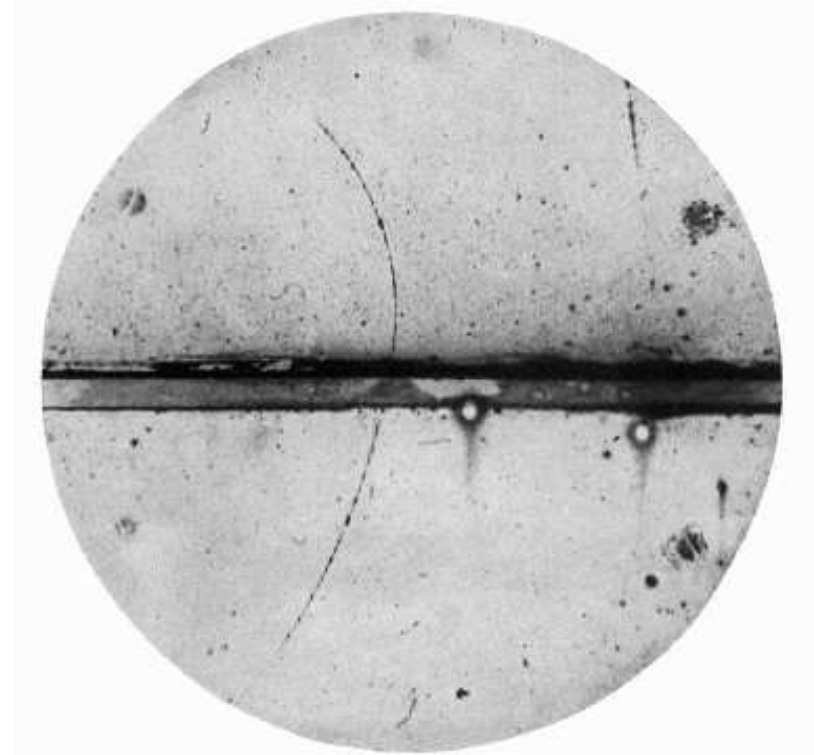
Źródła promieniotwórcze dawały energie tylko do ok. 50 MeV.

Dlatego w latach trzydziestych i czterdziestych XX wieku budowano wiele **eksperymentów balonowych** wykorzystujących promieniowanie kosmiczne.

Carl Anderson prowadził pomiary balonowe przy pomocy komorę Wilsona, którą umieścił w silnym **polu magnetycznym** i dodatkowo wstawił w środek cienką **płytkę ołowianą**

W 1932 zaobserwował cząstkę, która miała ładunek dodatni (jak proton), ale masę zbliżoną do masy elektronu.

⇒ **pozyton** ( $e^+$ )



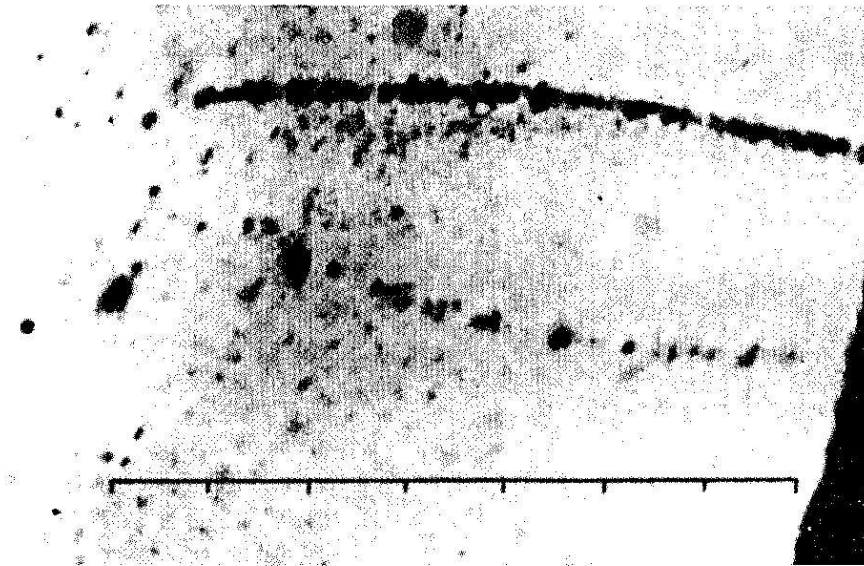
# Promieniowanie kosmiczne

## Odkrycie mionu

W tym samym roku (1932) Paul Kunze z Rostocku zaobserwował cząstkę o dodatnim ładunku, ale masie mniejszej od masy protonu i większej od masy elektronu (pozytonu)

⇒ mion

Obserwacja została opublikowana, ale nie została poprawnie zinterpretowana...



⇐ mion ( $\mu^+$ )

⇐ elektron ( $e^-$ )

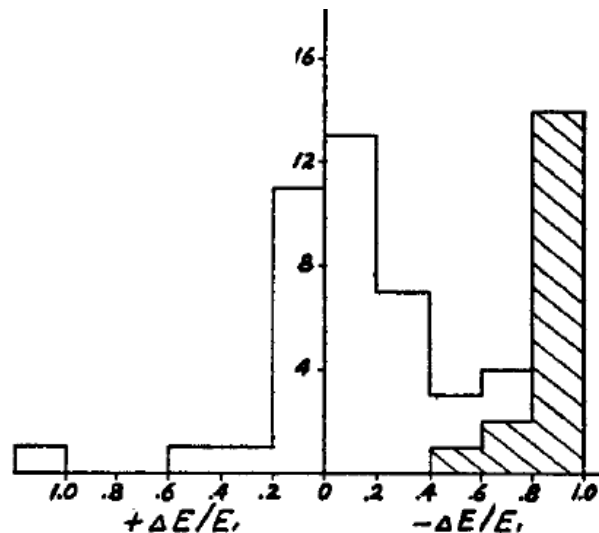
# Promieniowanie kosmiczne

## Odkrycie mionu

W 1936 amerykańscy fizycy Carl D. Anderson i Seth Neddermeyer przedstawili wyniki pomiaru dużej liczby cząstek promieniowania.

Doszli do wniosku, że wyniki wskazują na istnienie dwóch różnych typów cząstek:

- słabo przenikliwych, zatrzymujących się w 0.7 do 1.5 cm ołowiu  
⇒ ujemne lub dodatnie elektrony/pozytony
- bardziej przenikliwe, wolno tracące energię w ołowiu  
o masie mniejszej niż masa protonu ⇒ **nowa cząstka !**



Na początku przypuszczano, że jest to cząstka przewidziana przez japońskiego fizyka Yukawa Hideki w 1935, wymagana w jego teorii oddziaływań silnych, wiążąca protony i neutrony w jądrze atomowym

Ale odkryte cząstki nie oddziaływały dostatecznie silnie z materiałą...

# Promieniowanie kosmiczne

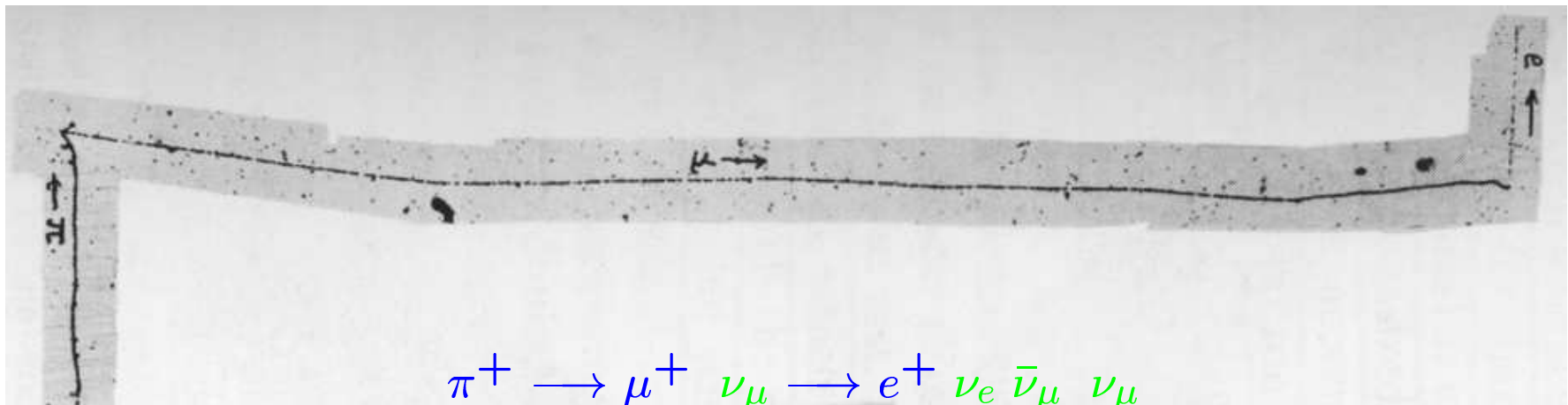
## Odkrycie pionu

W roku 1947, grupa Cecila Powella na Uniwersytecie w Bristolu prowadziła badania oddziaływań cząstek promieniowania kosmicznego w emulsji fotograficznej.

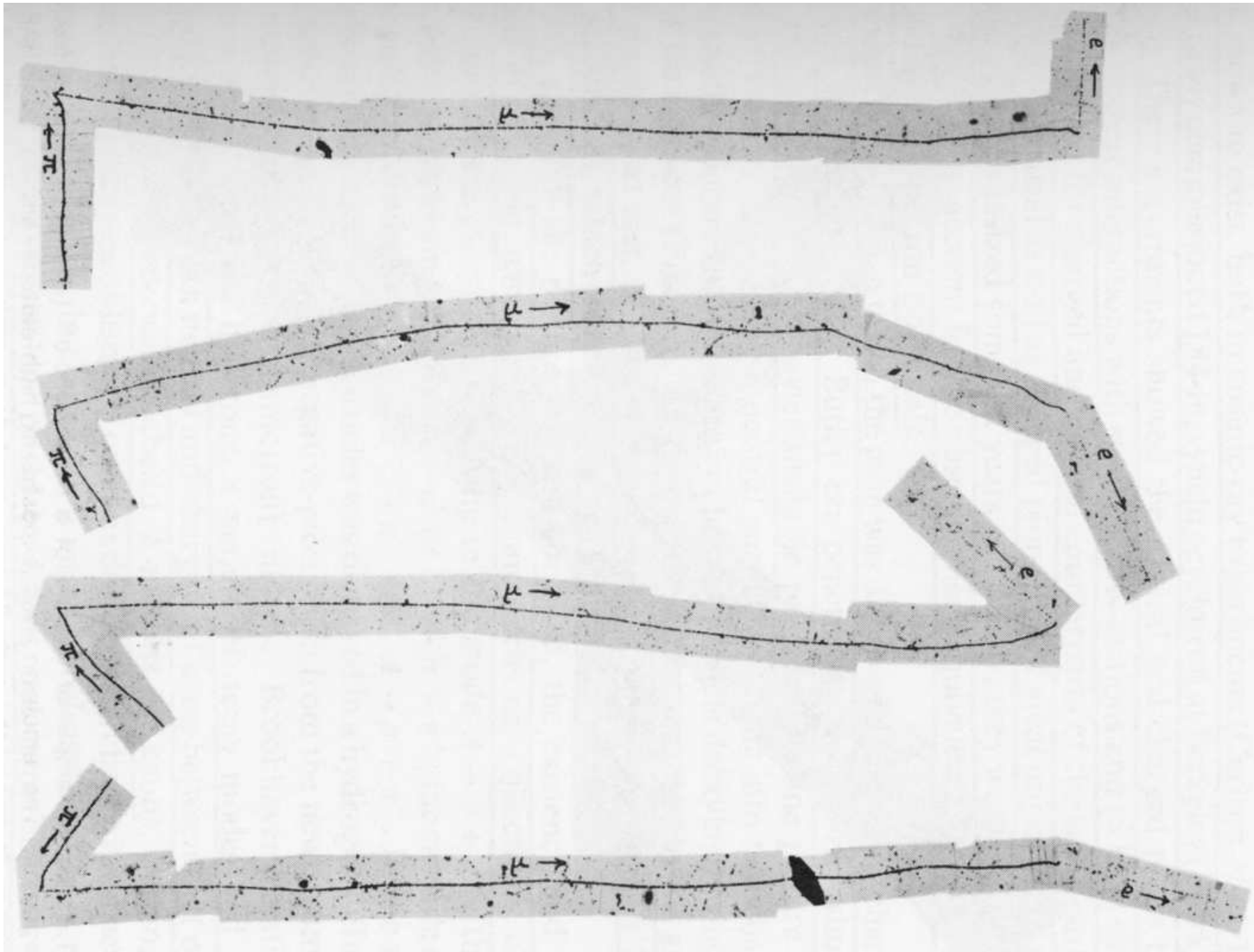
Odkryli, że miony ( $\mu^\pm$ ) są produkowane w rozpadach innych cząstek, pionów ( $\pi^\pm$ ), które żyją jedynie setne części mikrosekundy.



Jeden ze zrekonstruowanych przypadków:



# Odkrycie pionu



# Promieniowanie kosmiczne

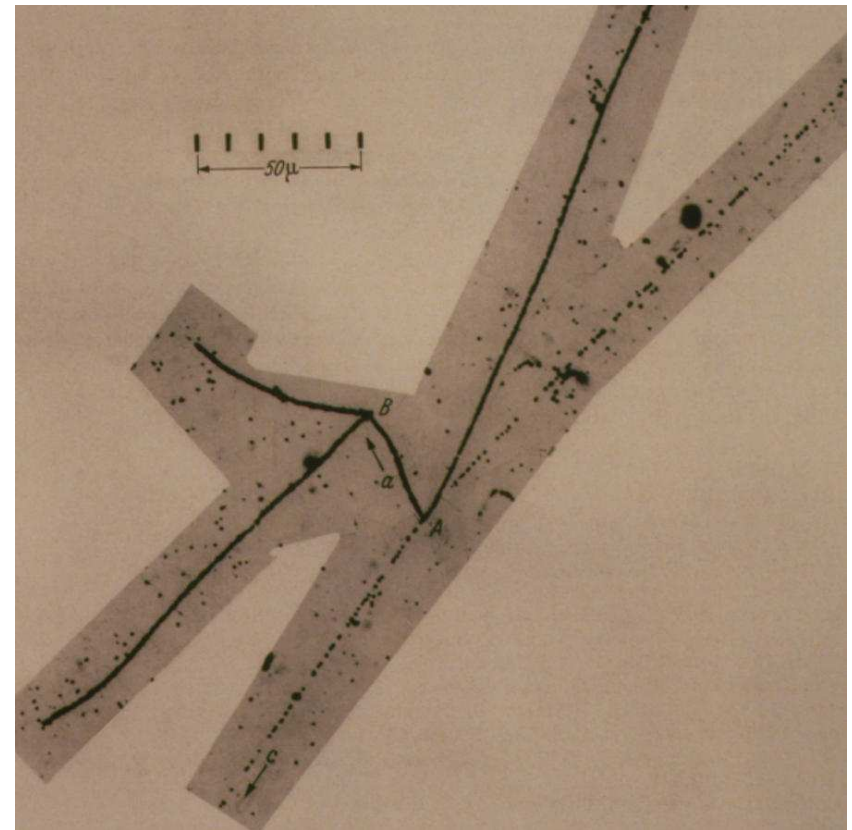
## Cząstki dziwne

W roku 1948, grupa Powella na Bristol University dokonała kolejnego odkrycia badając oddziaływania promieniowania kosmicznego w emulsji.

Zaobserwowali rozpad nieznanej cząstki (wlatuje z prawej-górnej strony) na trzy piony.



Kaon był pierwszą odkrytą cząstką z rodziny cząstek, które wkrótce zaczęto nazywać “dziwnymi” (strange).



# Promieniowanie kosmiczne

## Pierwotne promieniowanie kosmiczne

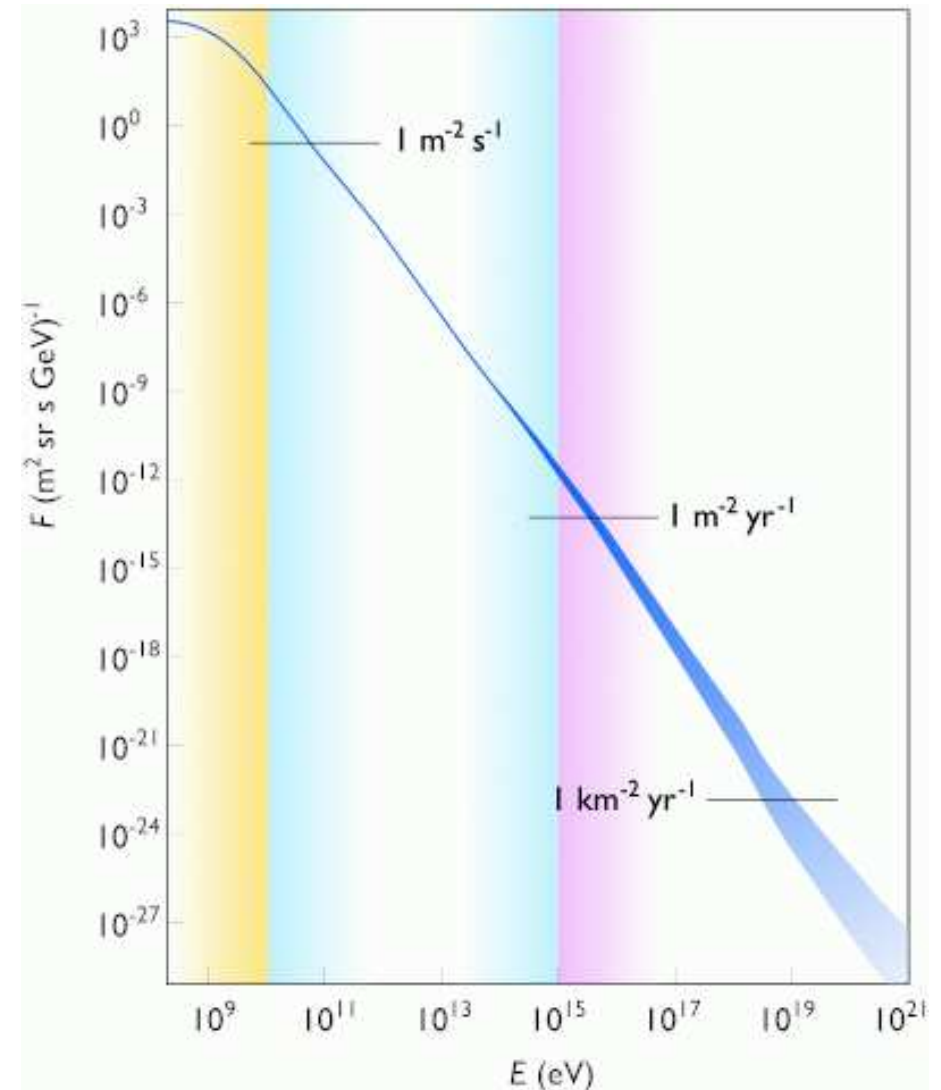
Promieniowanie obserwowane poza atmosferą ziemską

Skład:

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

Taki jak "skład Wszechświata"...

Pomijając neutrina i miękkie prom. EM...



# Promieniowanie kosmiczne

## Wtórne promieniowanie kosmiczne

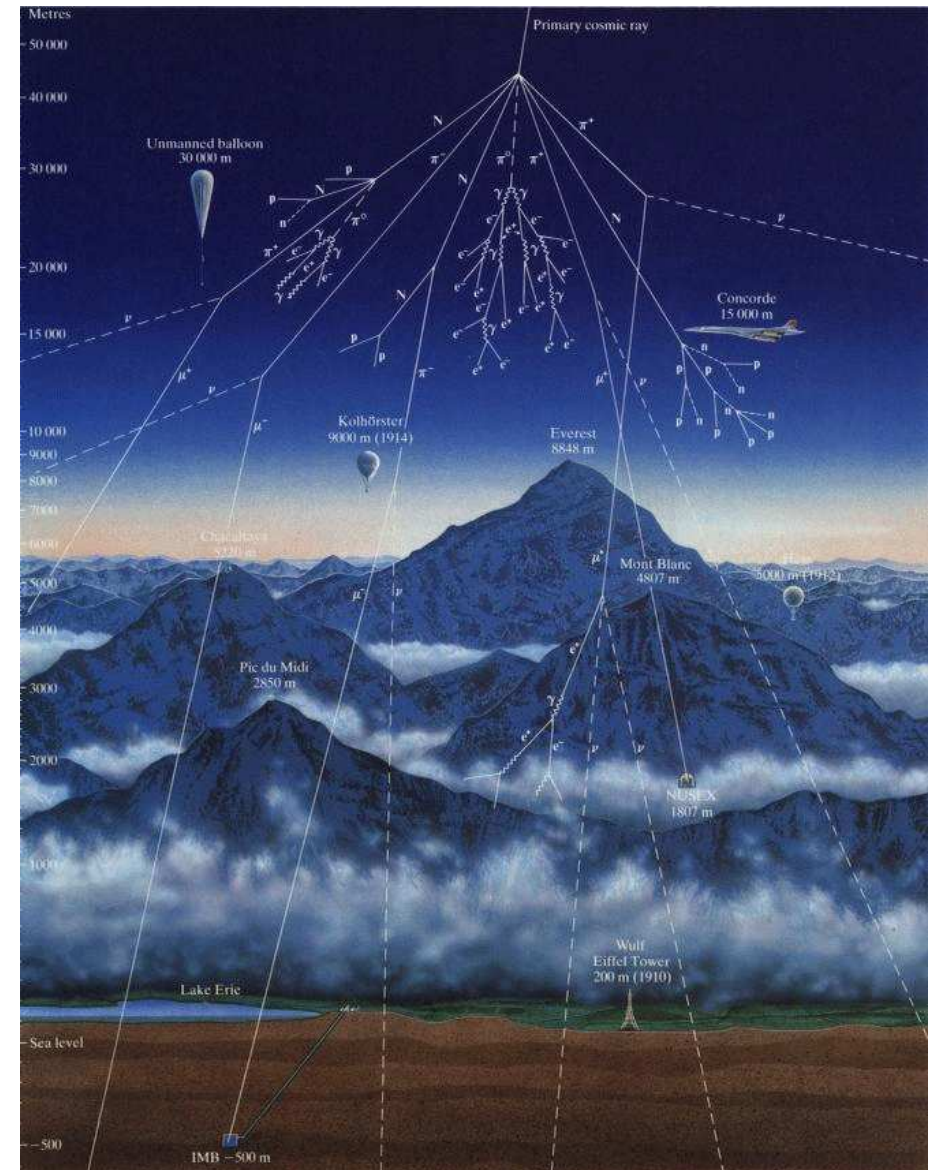
Promieniowanie pierwotne oddziałuje w atmosferze Ziemi. Produkowane są liczne cząstki wtórne, głównie **piony i kaony**, które następnie rozpadają się produkując głównie miony, a w dalszej kolejności elektrony.

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 neutronów i fotonów...





# Promieniowanie kosmiczne

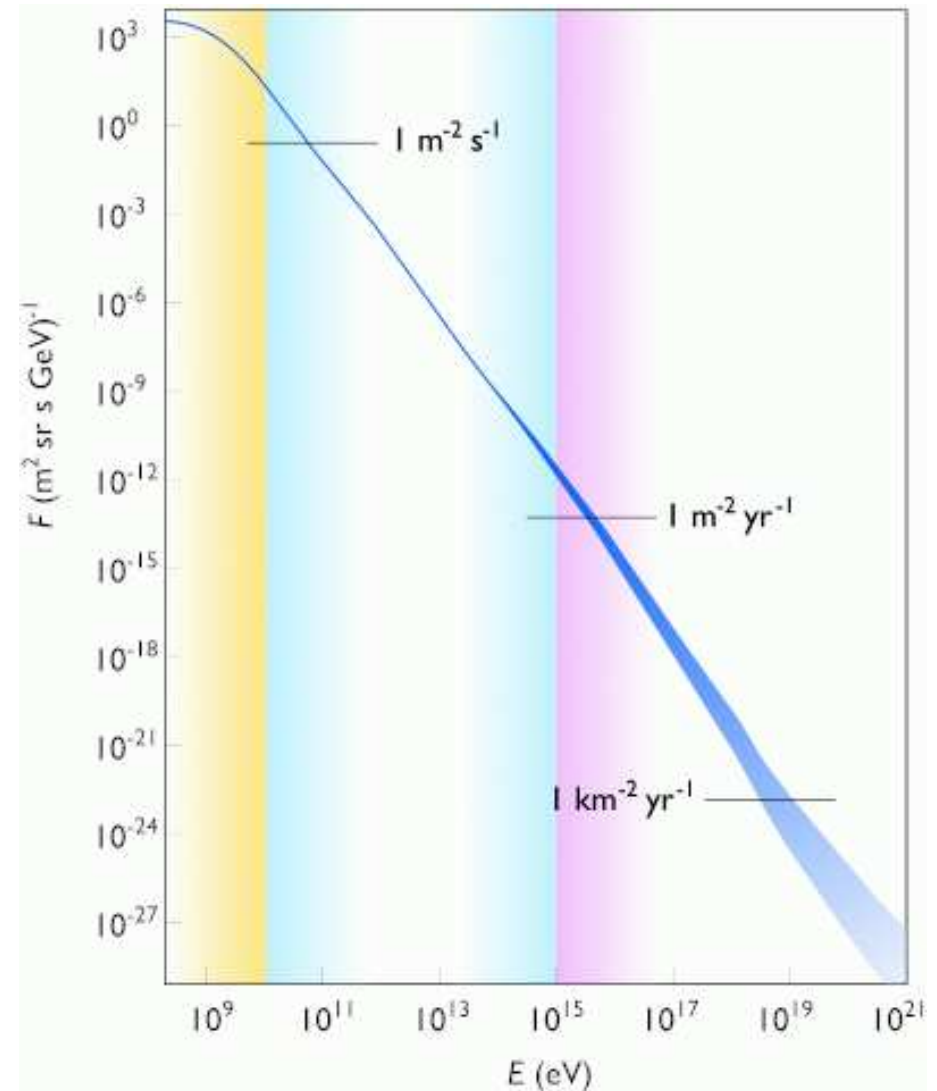
Do lat 50 XX w. badanie oddziaływań promieniowania kosmicznego z materią było jednym z głównych kierunków badań.

**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 (!!!).

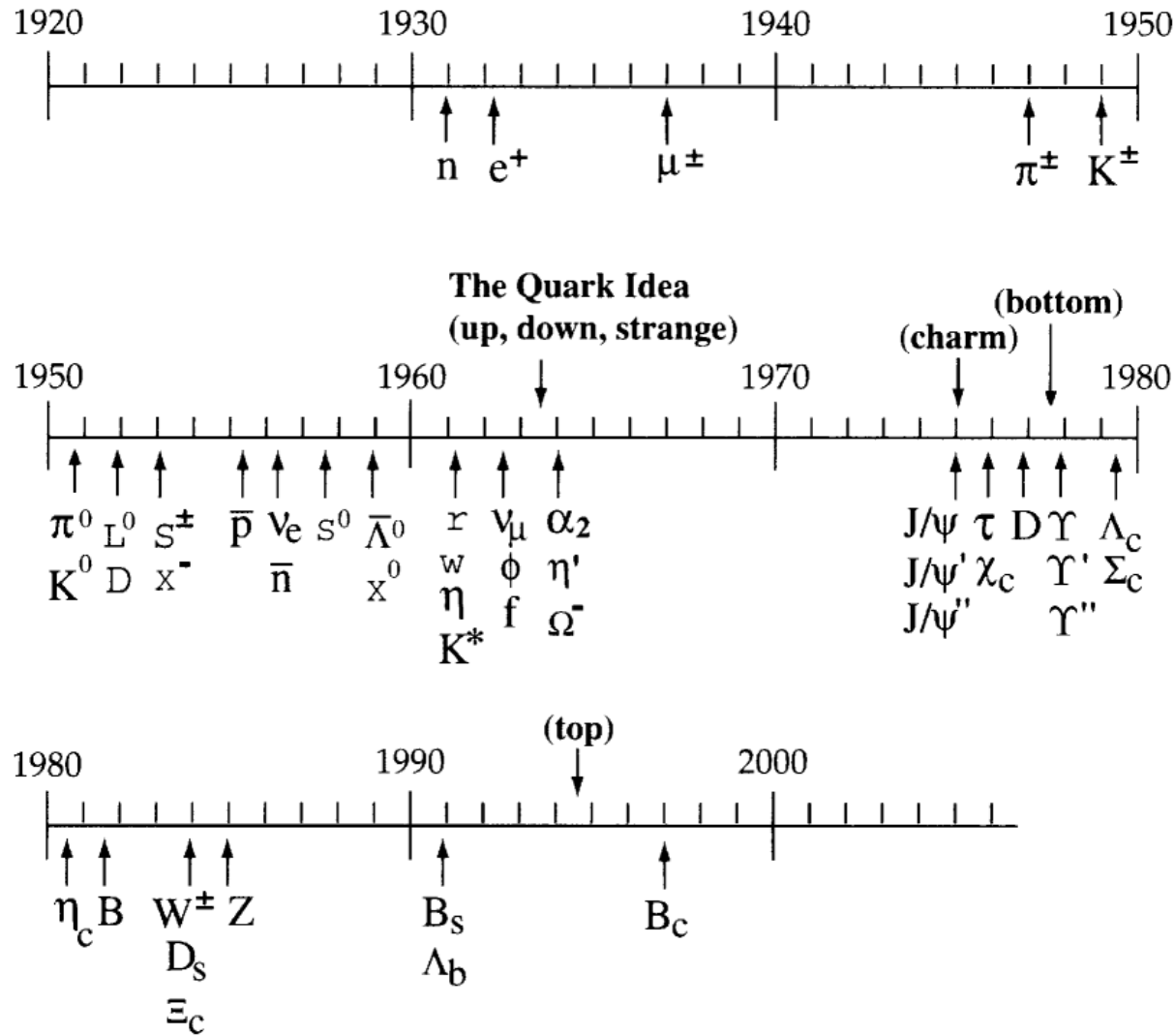
**Niestety cząstek o najwyższych energiach jest ich bardzo mało...**

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...

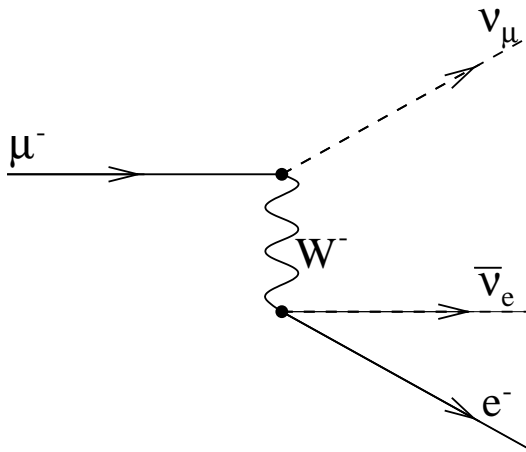
# Bozony $W^\pm$ i $Z^0$

## 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

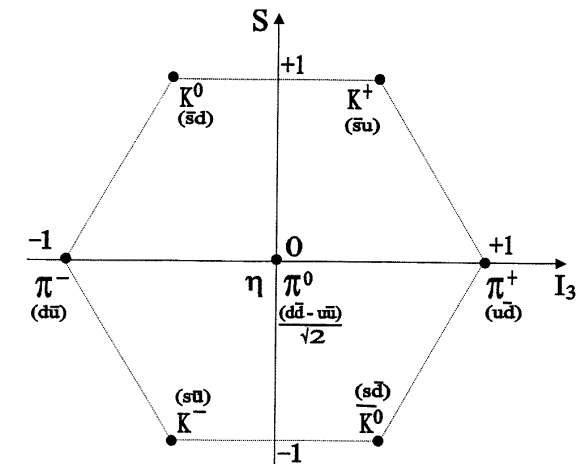
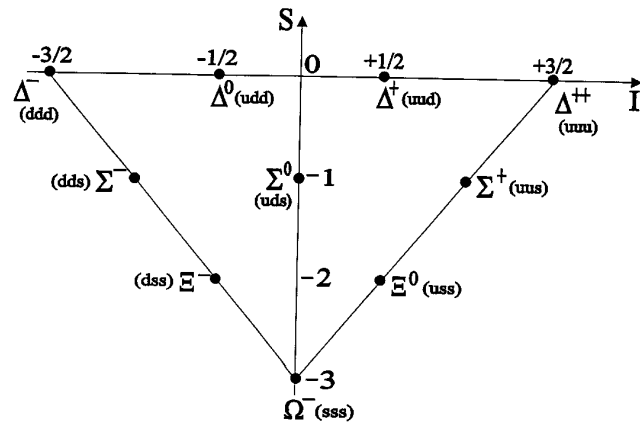
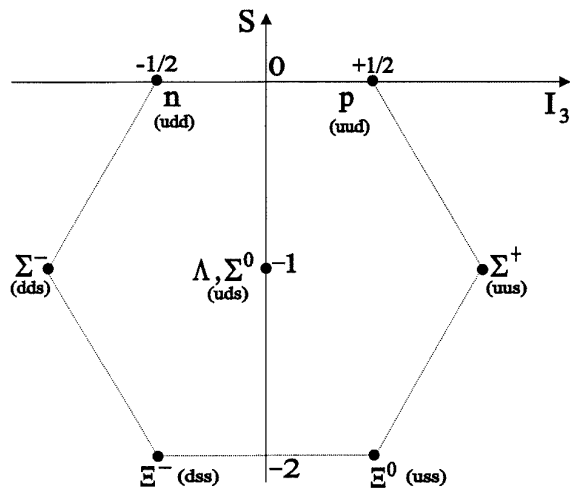
## Fermiony

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

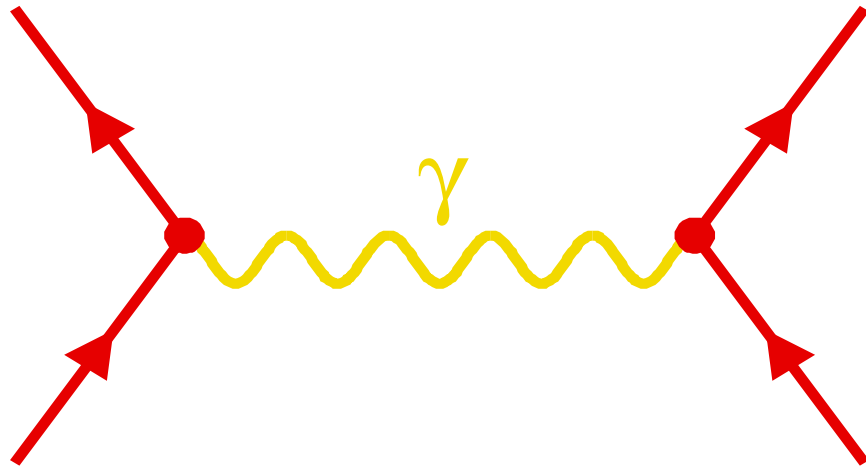
## Bozony

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

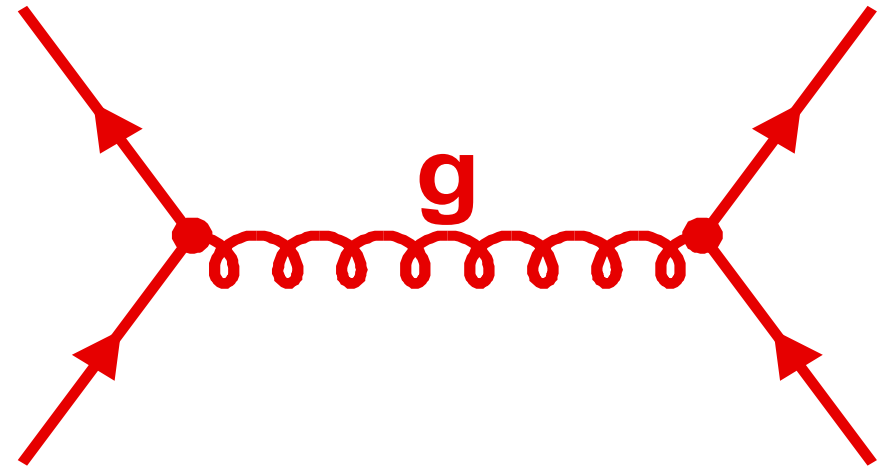
Nośnik przekazuje część energii i/lub pędu jednej cząstki drugiej cząstce

<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”	$W^{\pm}, Z^0$	$10^{-7}$

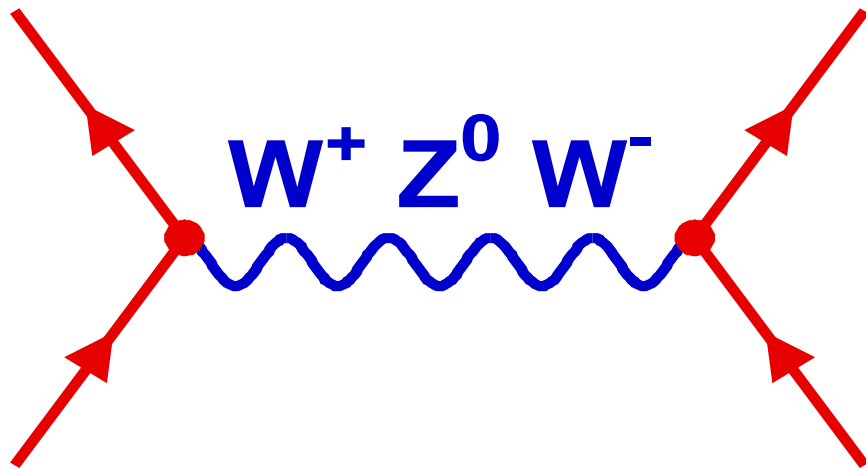
“moc” - przykładowe porównanie wielkości oddziaływań dla dwóch sąsiadujących protonów



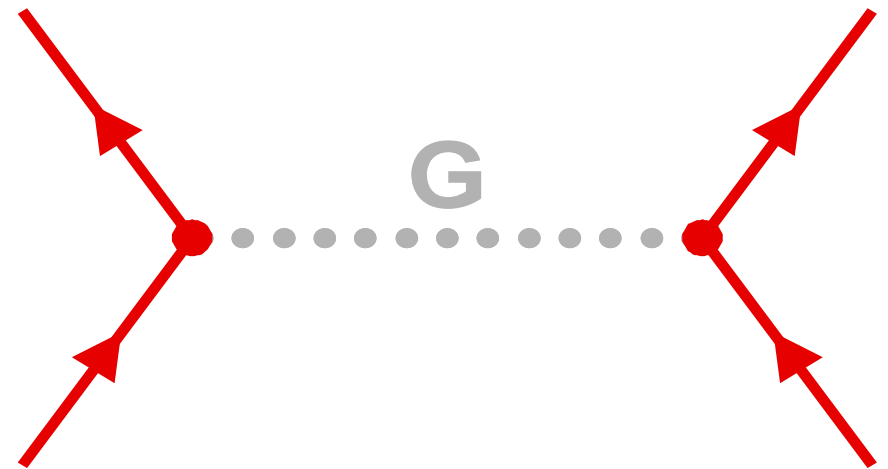
**elektromagnetyczne**



**silne**



**slabe**



**grawitacyjne**



# Świat cząstek elementarnych

## Diagramy Feynmana

Pozwalają zobrazować oddziaływania między cząstkami (opisane przez kwantowe teorie pola - QFT) biorąc pod uwagę możliwe sprzężenia elementarne (tzw. wierzchołki).

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

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

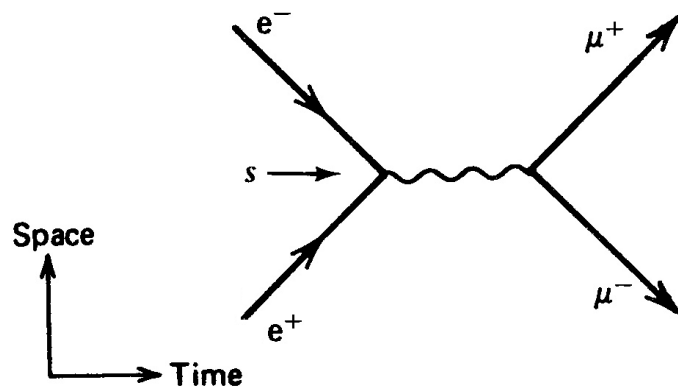
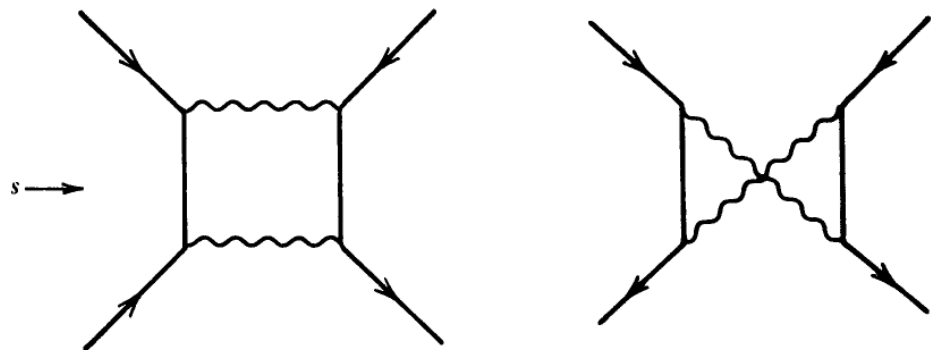


Diagram “drzewowy”

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



Diagramy “pętlowe”

# Świat cząstek elementarnych

## Diagramy Feynmana

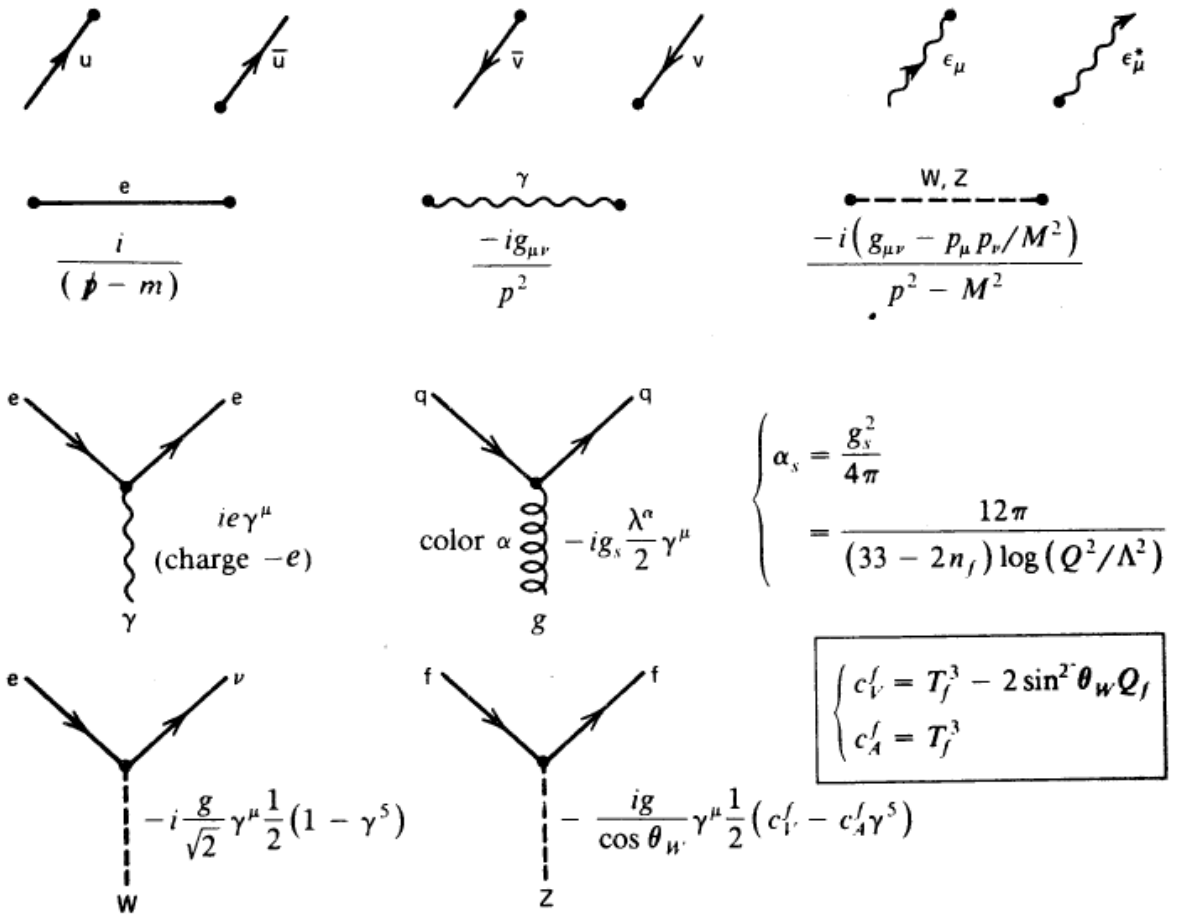
Każdemu diagramowi możemy przyporządkować wyrażenie na odpowiednią amplitudę rozpraszania.

Wierzchołki decydują o wielkości przekroju czynnego:

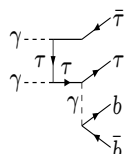
$$\alpha_s = \frac{g_s^2}{4\pi} \sim 0.1 - 0.2$$

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

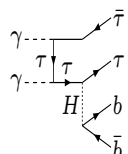
$$\alpha_{em} = \frac{e^2}{4\pi} \sim \frac{1}{137} \approx 0.0073$$



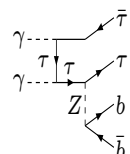
$$\gamma\gamma \rightarrow \tau^+\tau^- b\bar{b}$$



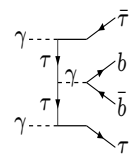
diagr.1



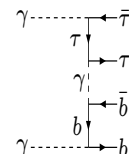
diagr.2



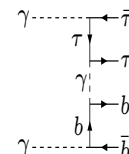
diagr.3



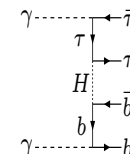
diagr.4



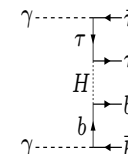
diagr.5



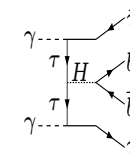
diagr.6



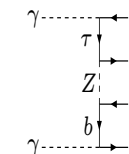
diagr.7



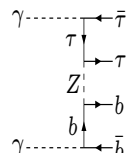
diagr.8



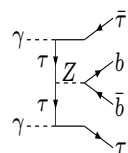
diagr.9



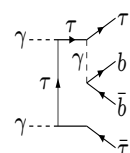
diagr.10



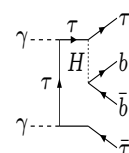
diagr.11



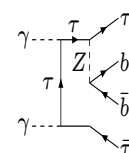
diagr.12



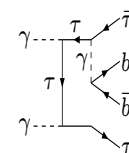
diagr.13



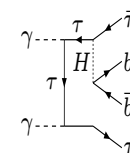
diagr.14



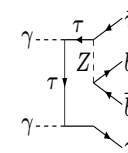
diagr.15



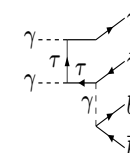
diagr.16



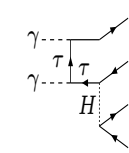
diagr.17



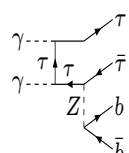
diagr.18



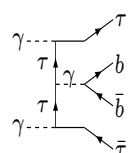
diagr.19



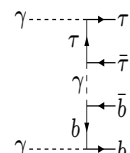
diagr.20



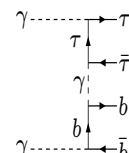
diagr.21



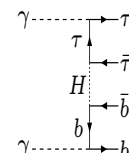
diagr.22



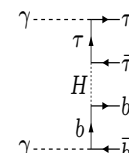
diagr.23



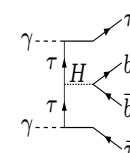
diagr.24



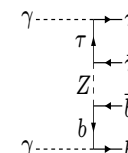
diagr.25



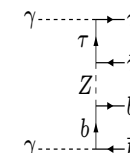
diagr.26



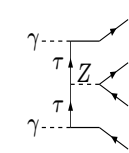
diagr.27



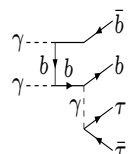
diagr.28



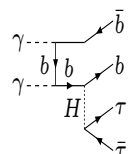
diagr.29



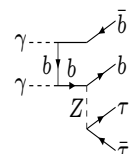
diagr.30



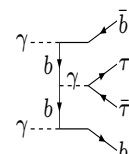
diagr.31



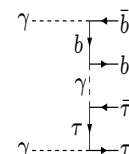
diagr.32



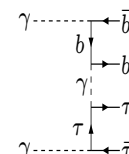
diagr.33



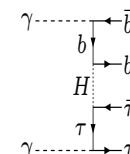
diagr.34



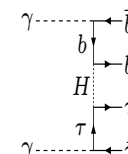
diagr.35



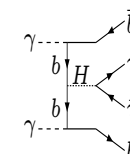
diagr.36



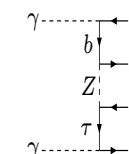
diagr.37



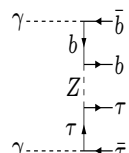
diagr.38



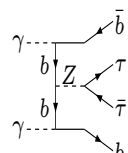
diagr.39



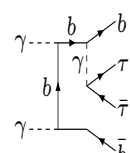
diagr.40



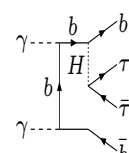
diagr.41



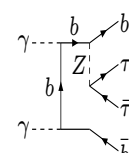
diagr.42



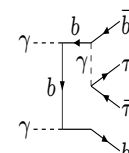
diagr.43



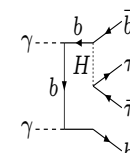
diagr.44



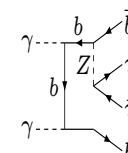
diagr.45



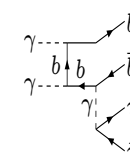
diagr.46



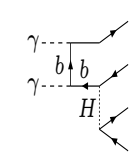
diagr.47



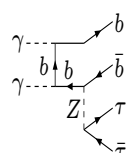
diagr.48



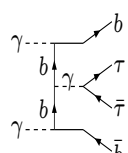
diagr.49



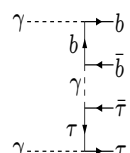
diagr.50



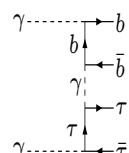
diagr.51



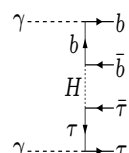
diagr.52



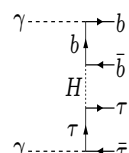
diagr.53



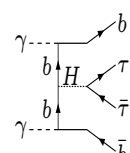
diagr.54



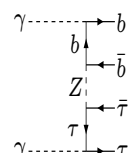
diagr.55



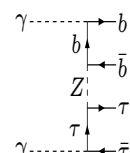
diagr.56



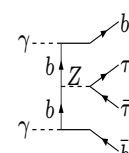
diagr.57



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.

**2013** - François **Englert** and Peter W. **Higgs**

Za odkrycie mechanizmu opisującego pochodzenie masy

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

# 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**)

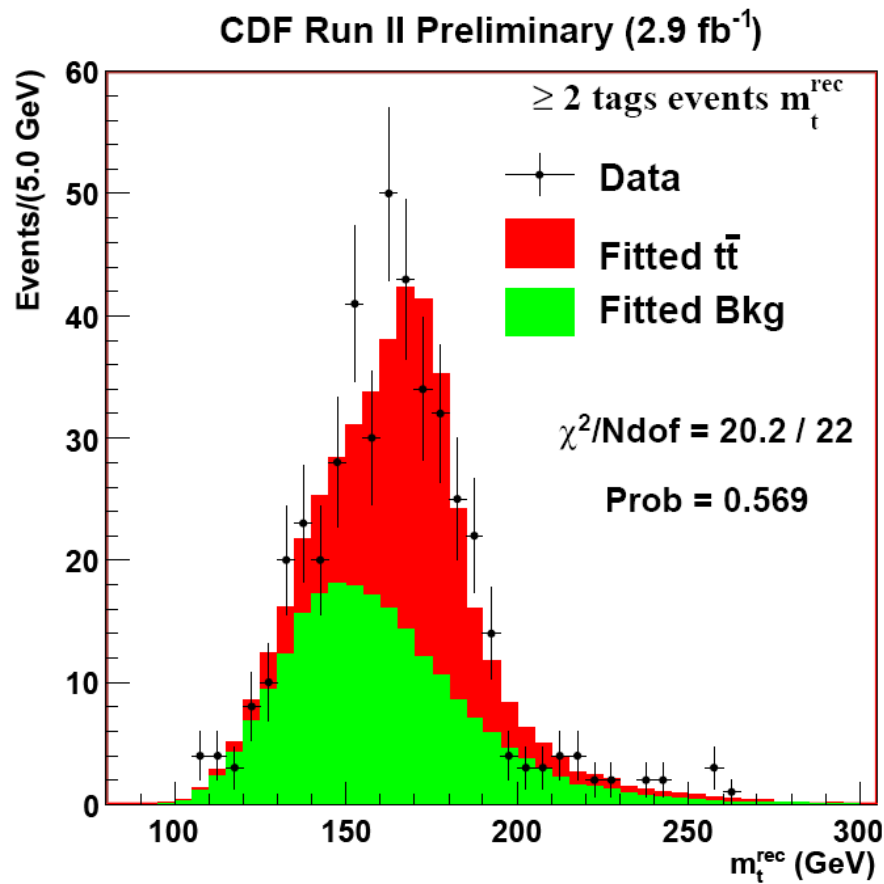
Poszukiwany także w LEP i HERA, bez powodzenia...

# Kwark $t$

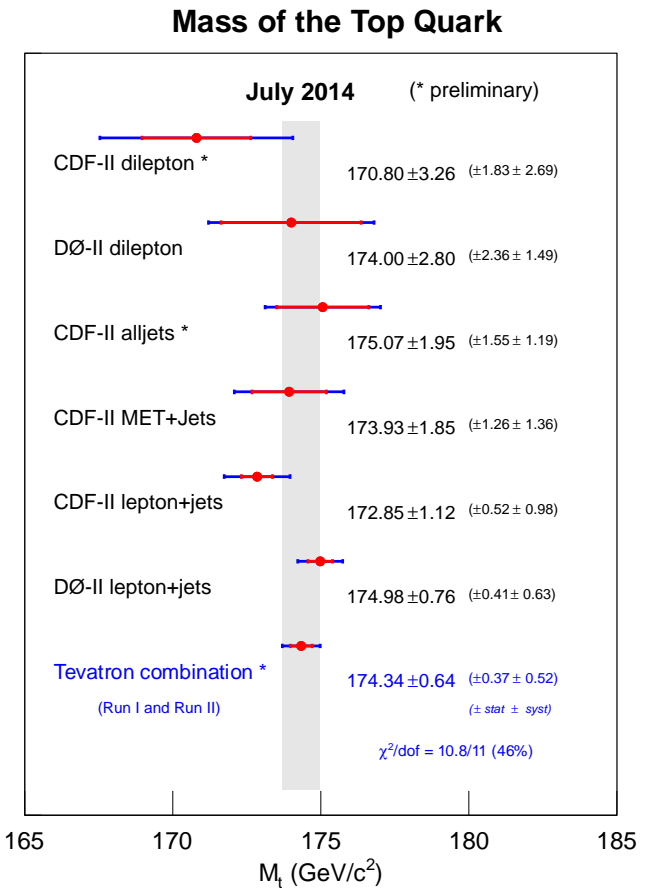
Tevatron

Odkrycie: 1995

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



Porównanie wyników dla różnych próbek

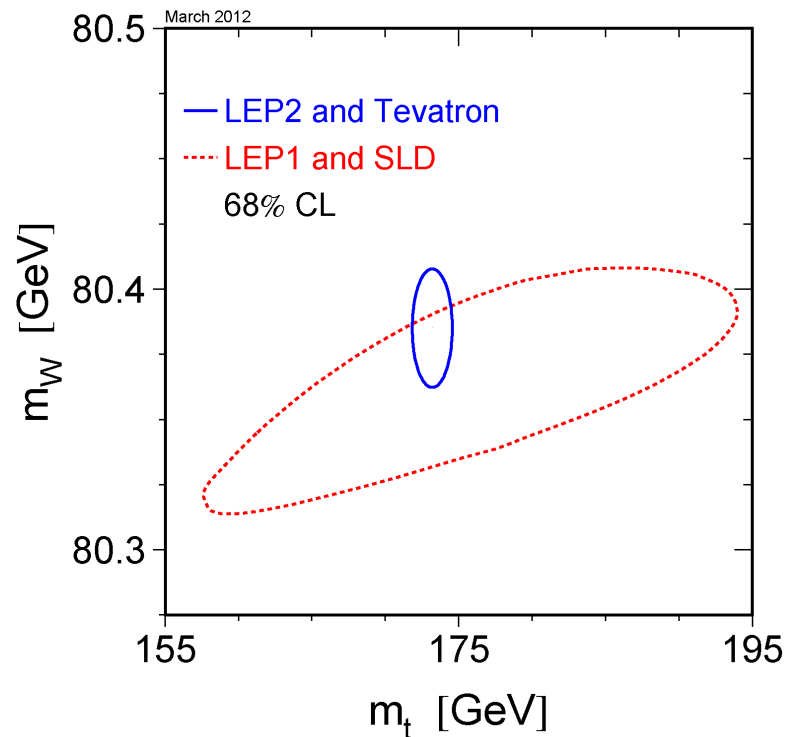


CDF + D0:  $m_t = 174.34 \pm 0.64 \text{ GeV}$

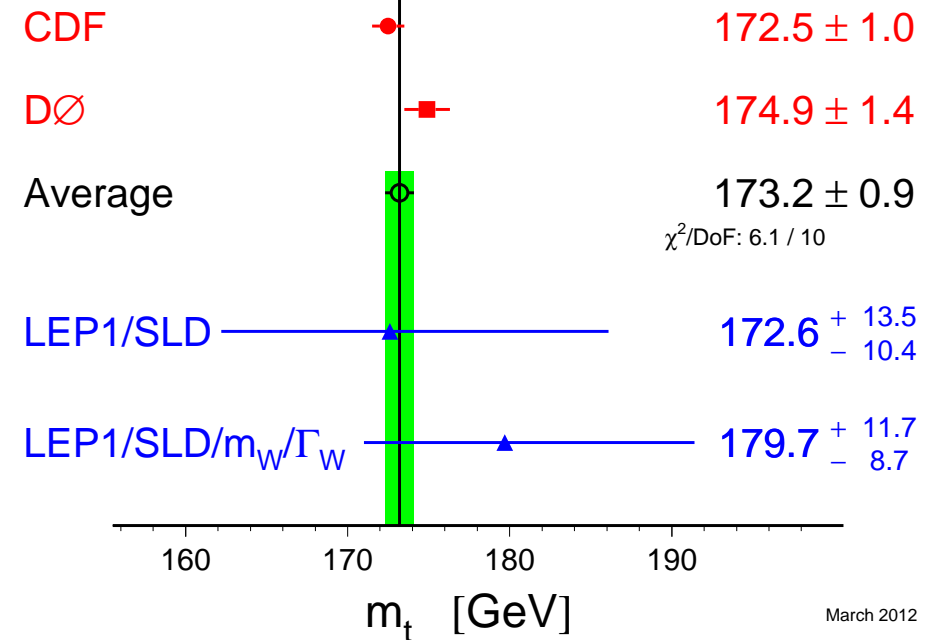
# Kwark $t$

## Porównanie

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



## Top-Quark Mass [GeV]

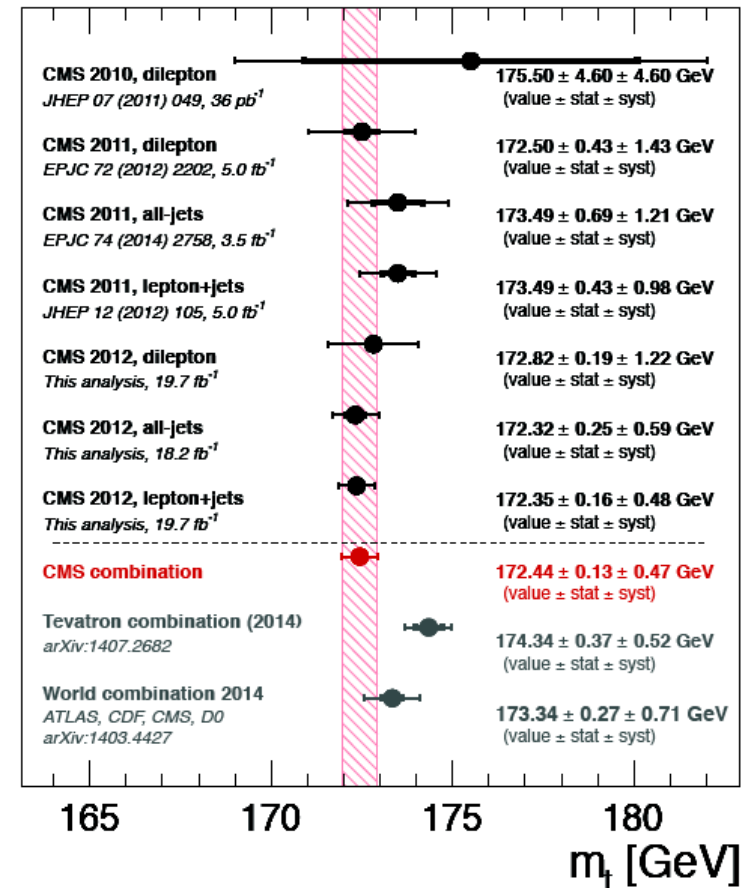
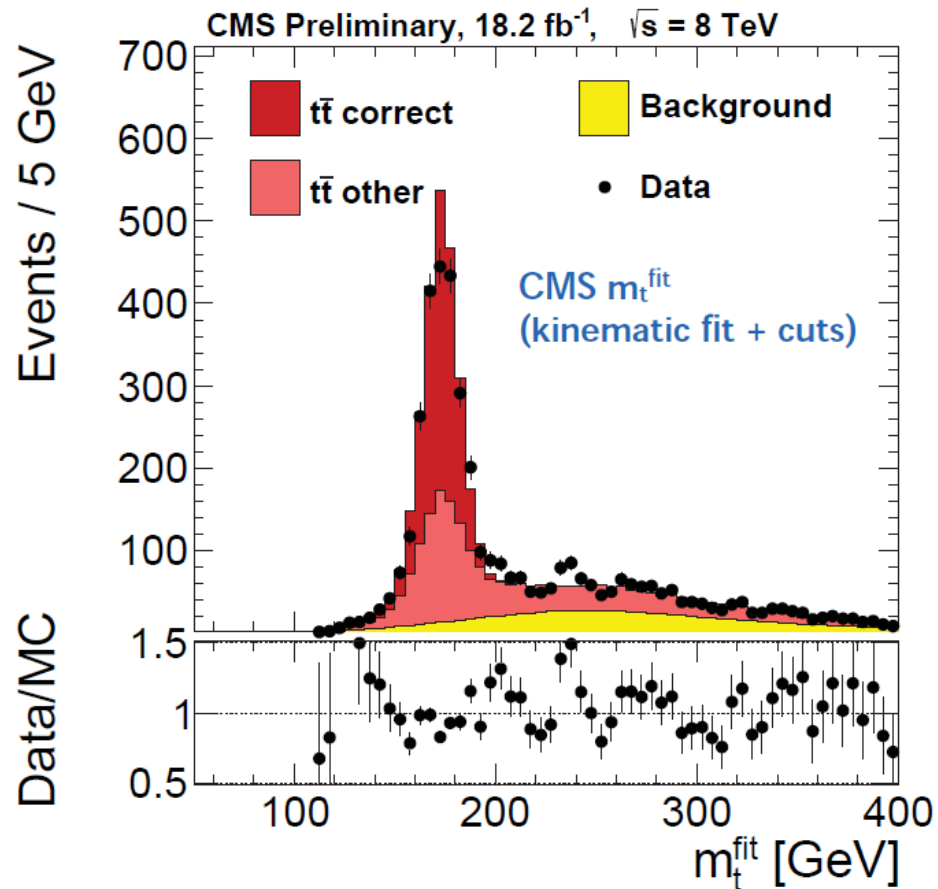


Pomiar bezpośredni zgodny w granicach błędów z przewidywaniami teorii opartymi na precyzyjnych pomiarach przy niższych energiach.

# 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. **Run 1:**



Już w okresie 2009-2012 (Run 1) liczba przypadków większa niż w Tevatronie...



# Cząstka Higgsa

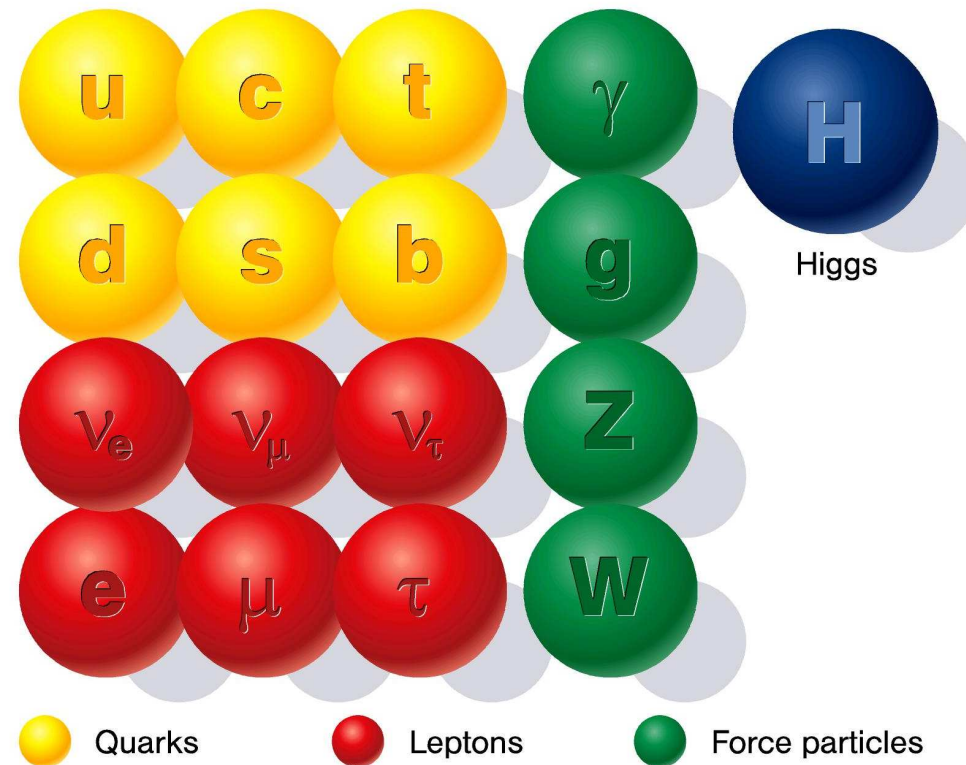
## Model Standardowy

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

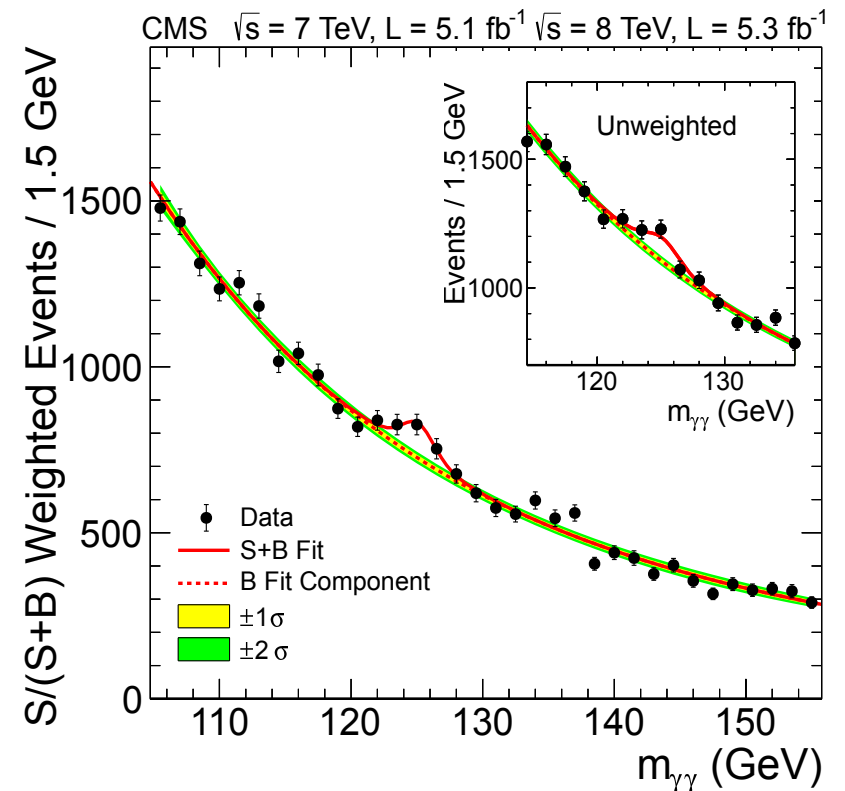
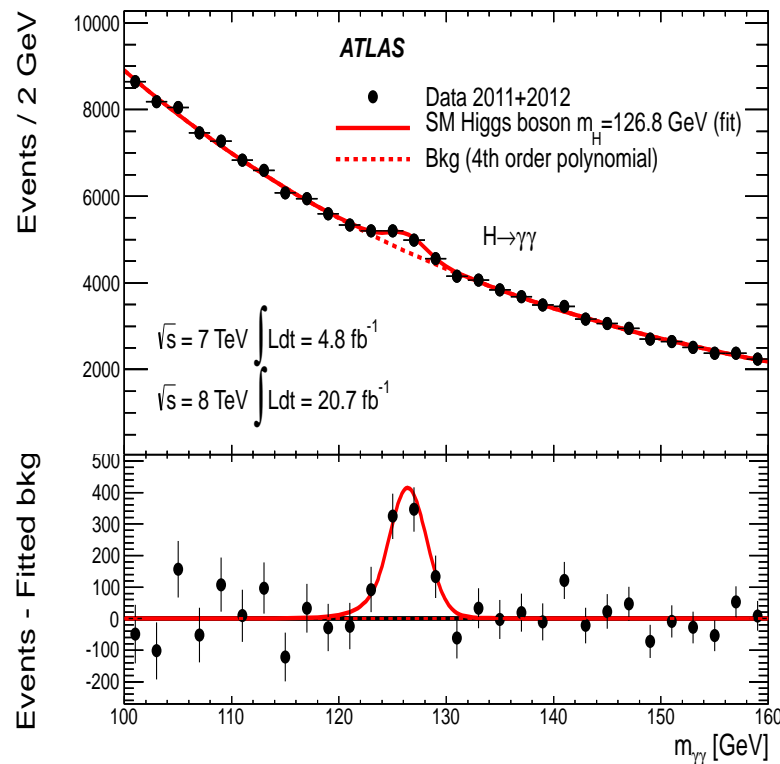


# Higgs w LHC

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

Sygnał widoczny ponad wszelką wątpliwość

$H \rightarrow \gamma\gamma$

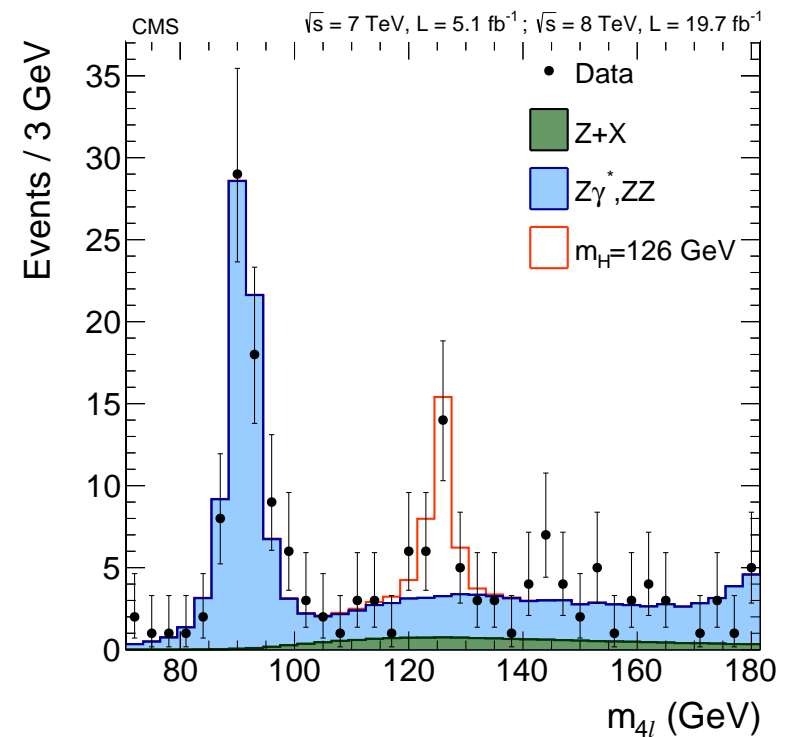
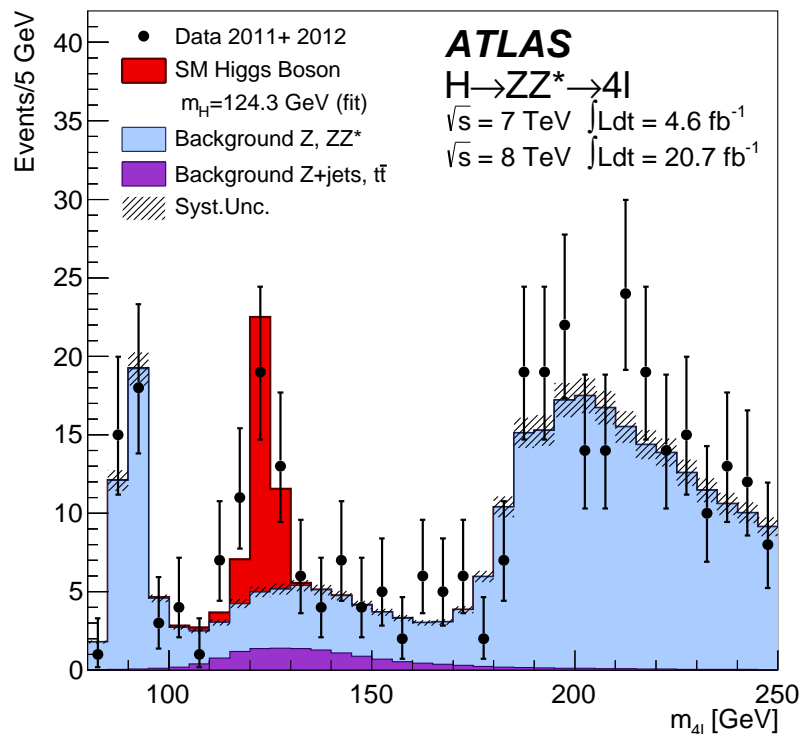


# Higgs w LHC

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

Sygnał widoczny ponad wszelką wątpliwość

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



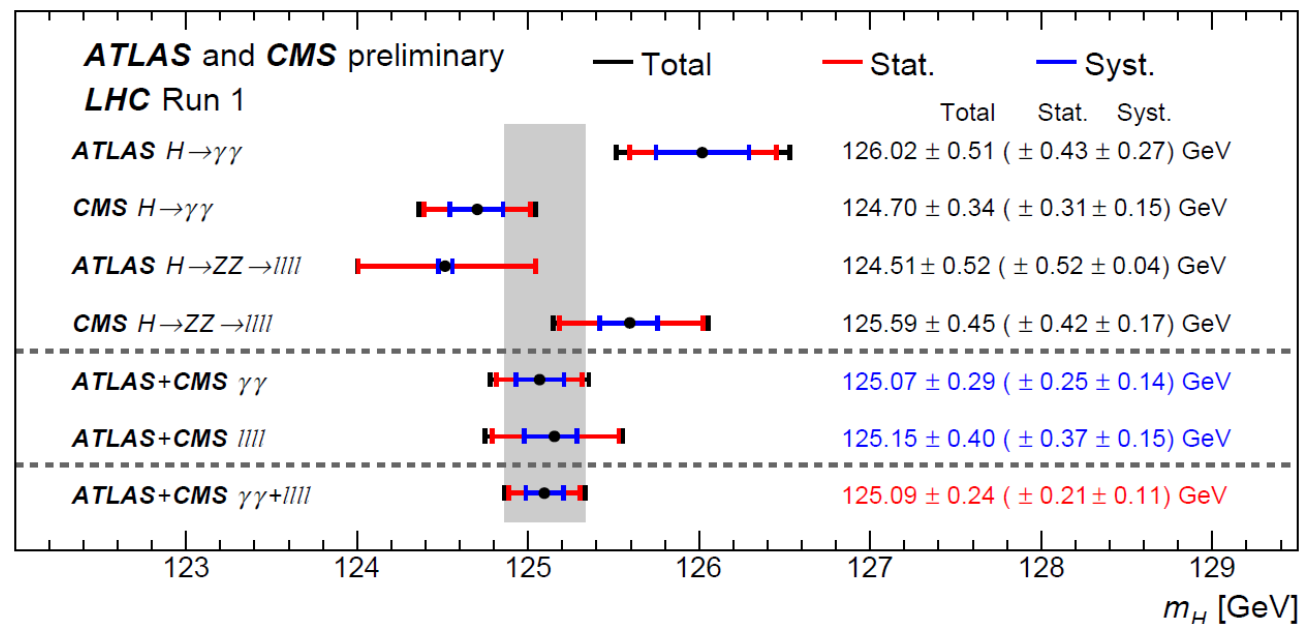
# Higgs w LHC

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

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

Wyniki analizy danych z pierwszego okresu działania LHC:

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



# Higgs w LHC

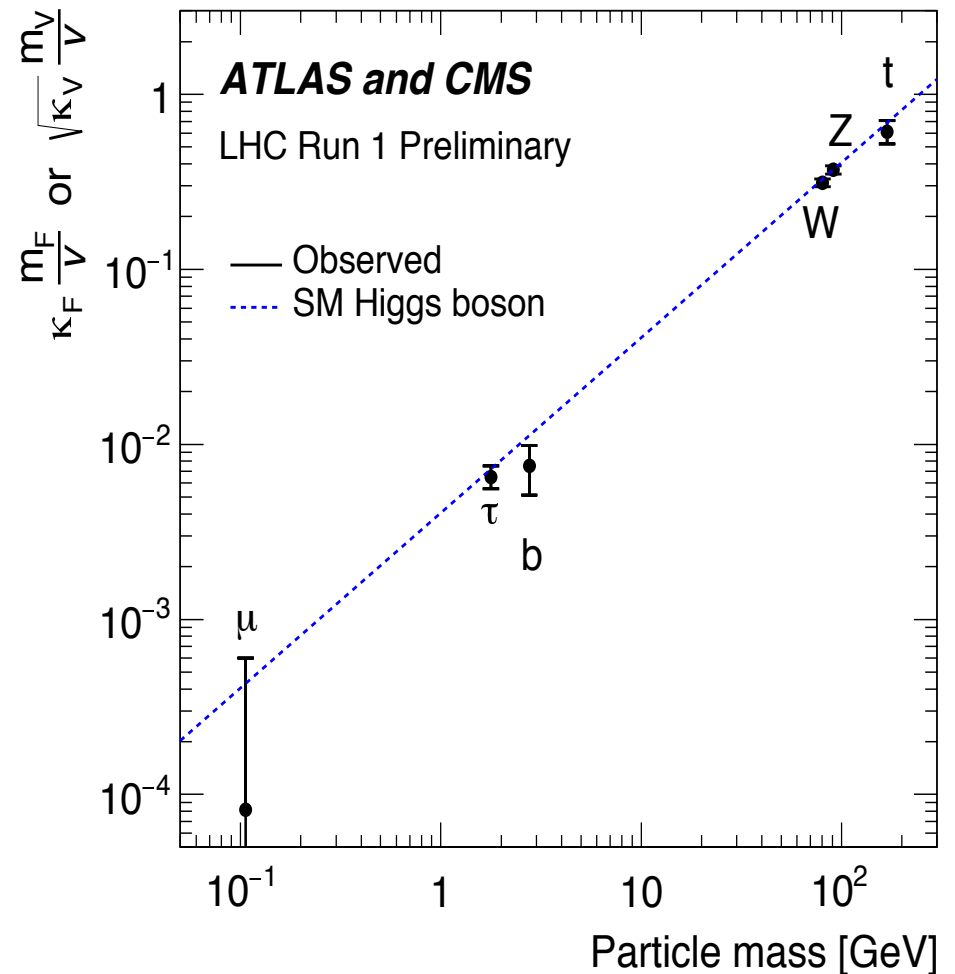
## Sprzężenia bozonu Higgsa

Możliwa staje się weryfikacja podstawowego przewidywania modelu:

sprzężenie bozonu Higgsa do cząstek jest proporcjonalne do ich masy

Błędy są wciąż bardzo duże!

Większa precyzja będzie osiągnięta po zebraniu pełnej próbki danych w obecnym Run 2 (2015-2018).



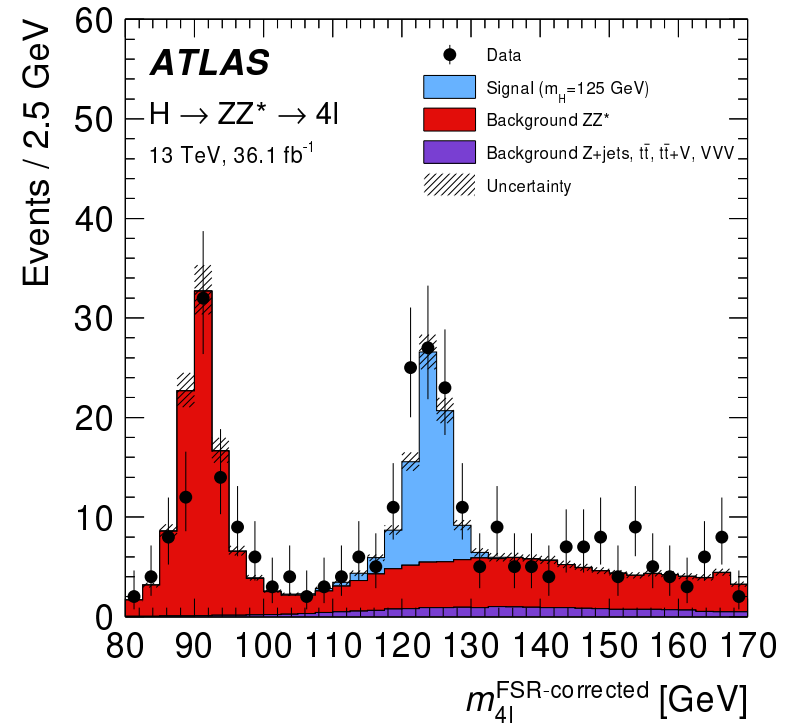
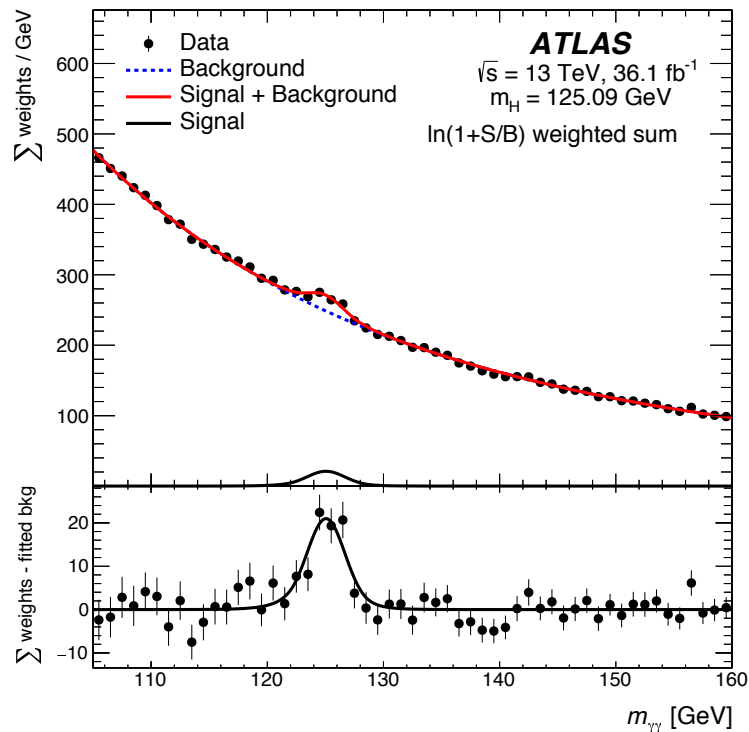
# Higgs w LHC

## Run 2 rozpoczęty w 2015

Wyniki ATLAS z pierwszych dwóch lat zbierania danych przy  $\sqrt{s}=13$  TeV

Rozpad bozonu Higgsa na 2 fotony

Rozpad bozonu Higgsa na 4 leptony



Dobra zgodność z przewidywaniami SM.

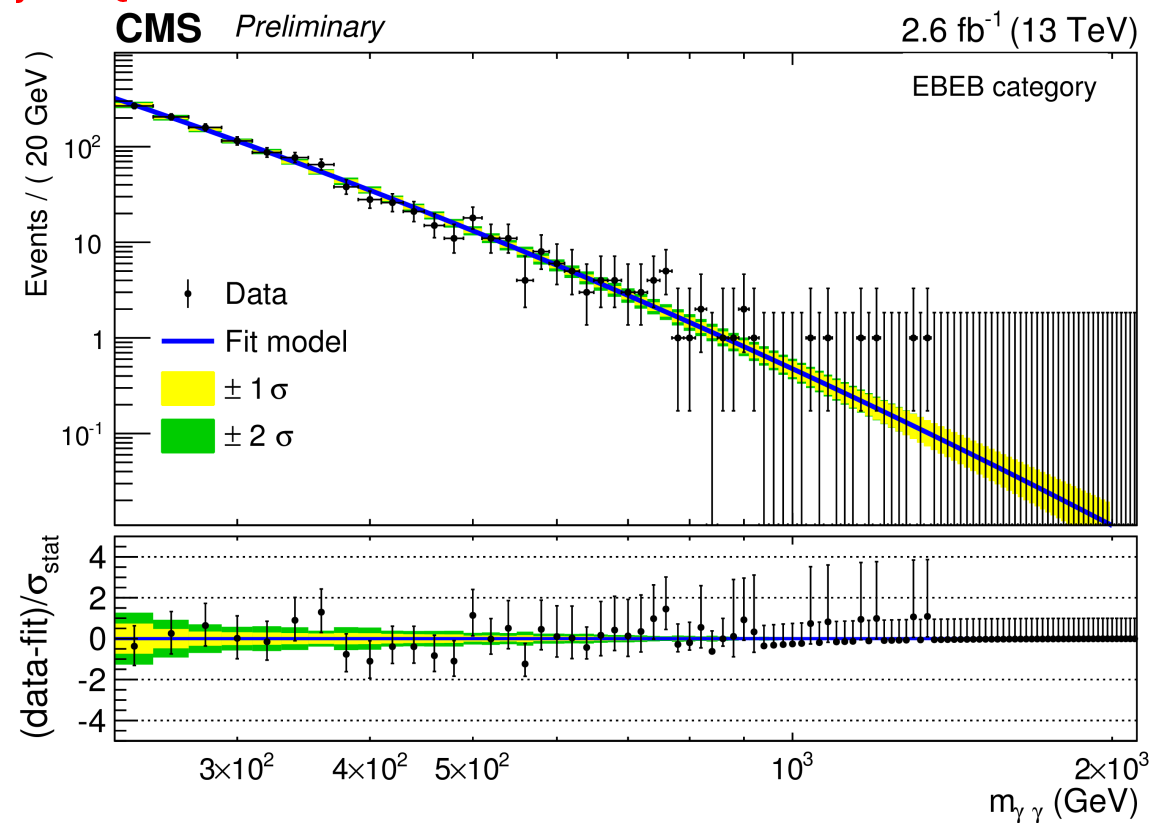
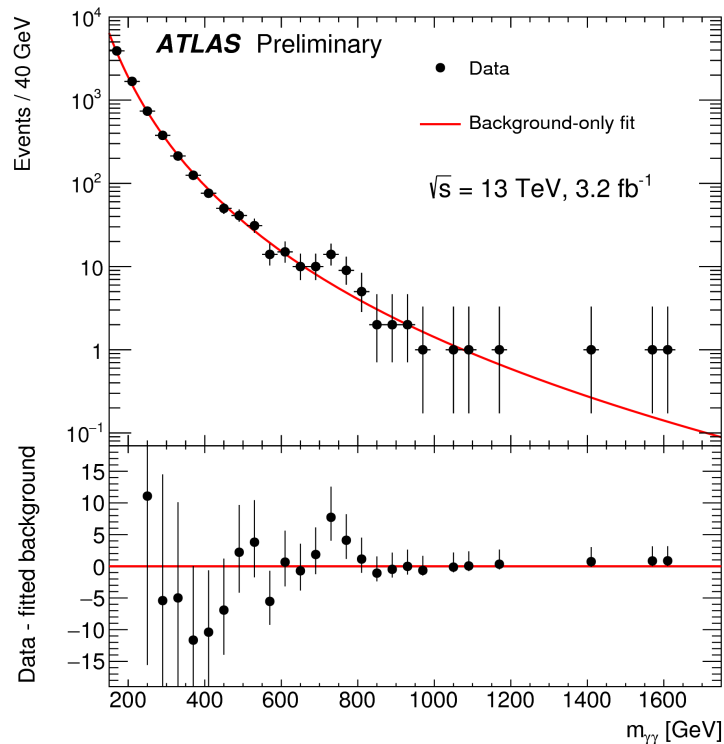
Wyniki konsyistentne z wynikami Run 1.

# “Egzotyka” w LHC

## Run 2

W roku 2015 (pierwsze dane przy  $\sqrt{s} = 13$  TeV) zaobserwowano niewielką nadwyżkę przypadków w rozkładzie masy niezmienniczej dwóch fotonów:  $pp \rightarrow \gamma\gamma + X$ :

Mógłby to być sygnał produkcji nowej cząstki !



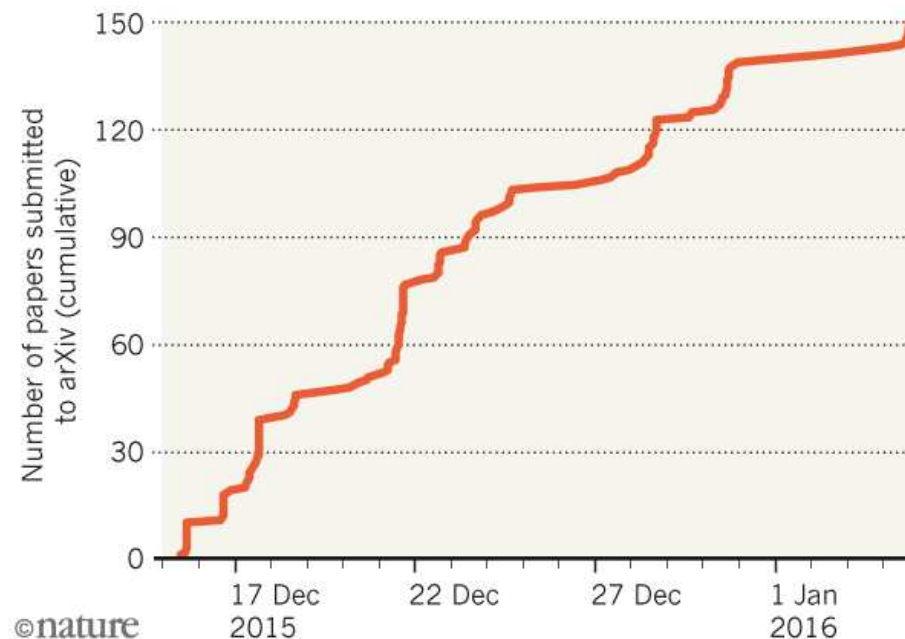
# “Egzotyka” w LHC

## Run 2

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.



Niestety “sygnał” znikł po zebraniu większej ilości danych w 2016...



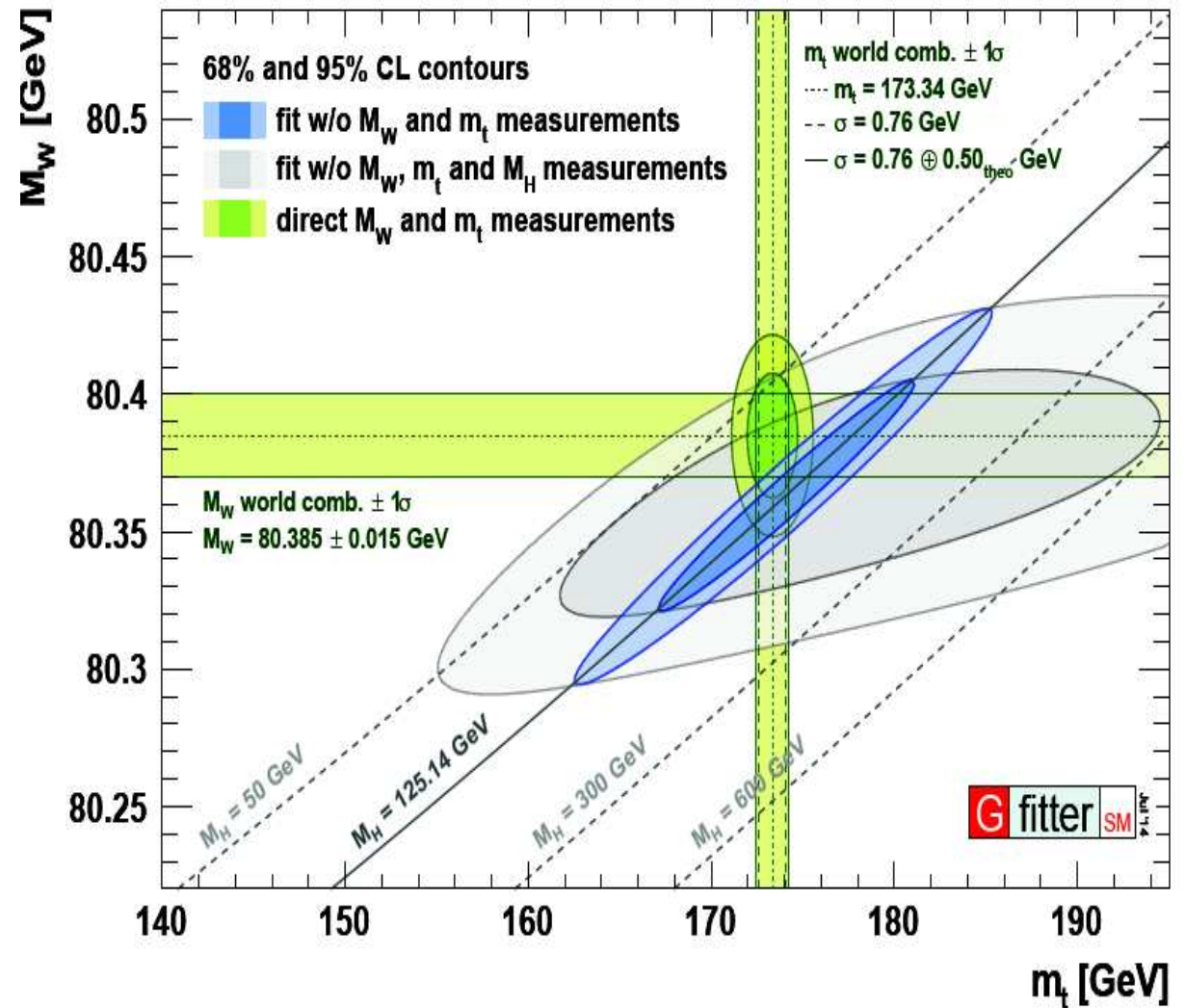
# Higgs w LHC

## Model Standardowy

W ramach modelu standardowego masa bozonu Higgsa jest związana z masami bozonu  $W$  i kwarku  $t$  poprzez poprawki pętlowe.

Wyniki pomiaru **masy bozonu Higgsa** w LHC **zgodne** z wynikami bezpośrednich pomiarów mas  $W$  i  $t$  oraz wynikami LEP.

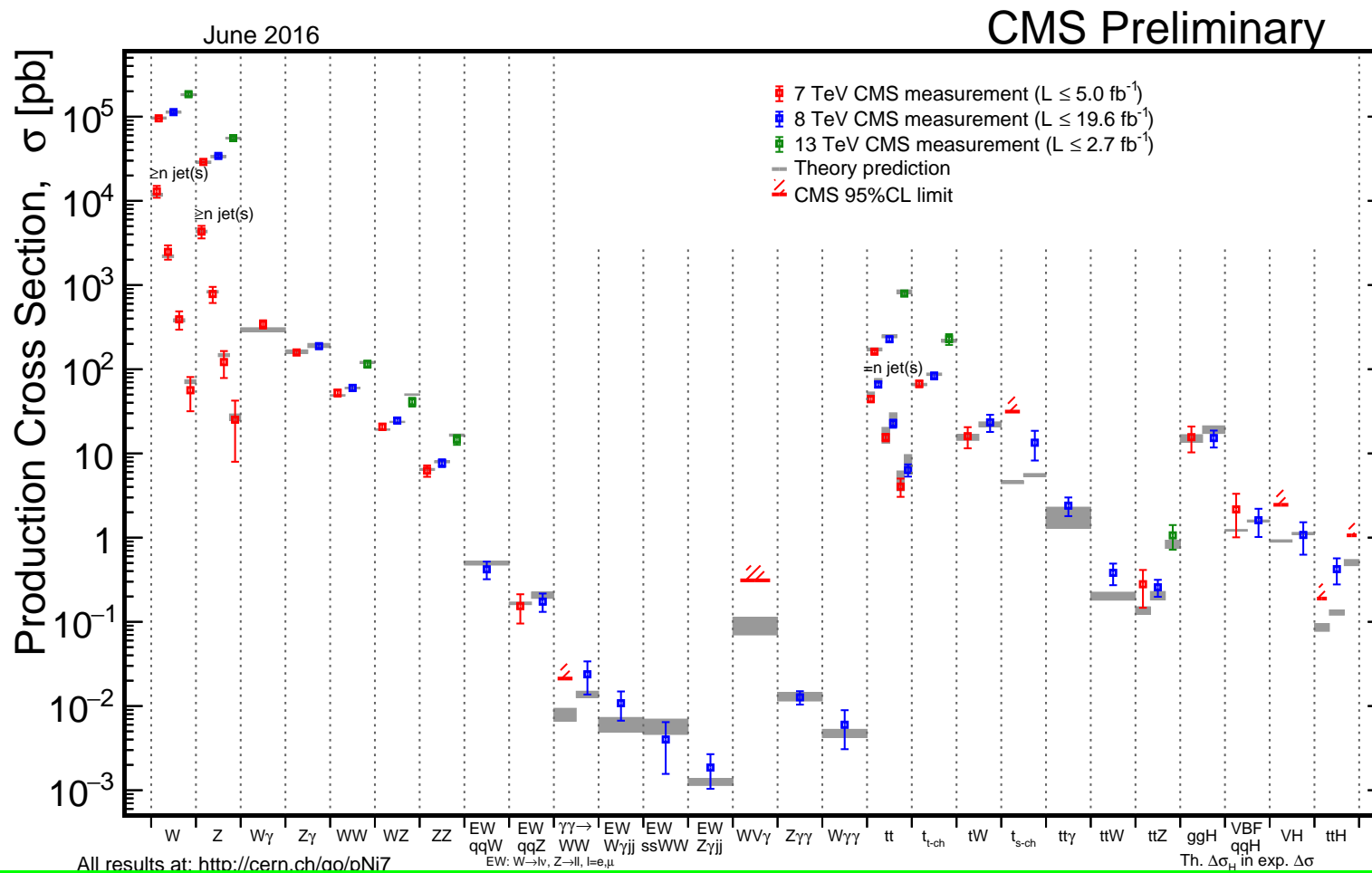
Wszystko się zgadza...



# Testy SM

## Eksperymenty przy LHC

Bardzo szczegółowo badają procesy z produkcją bozonów  $W^\pm$ ,  $Z^0$  i  $H$ , oraz kwarku  $t$ .  
 Wszystkie dotychczasowe pomiary w znakomitej zgodności z SM. Run 1 + Run 2



# Model Standardowy

## Pytania i problemy

Wszystkie\*  
wyniki LHC  
zgodne są z  
**Modelem  
Standardowym**

ale...

\* pewne “napięcia” w wynikach LHCb dotyczących uniwersalności leptonowej

- 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 **neutrino** ?
- Skąd się bierze **prom. kosmiczne** b. wysokich energii ?
- Co to jest “**ciemna materia**” ?
- Co to jest “**ciemna energia**” !?
- Jak włączyć opis **grawitacji**?

# 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!