

Astrofizyka cząstek

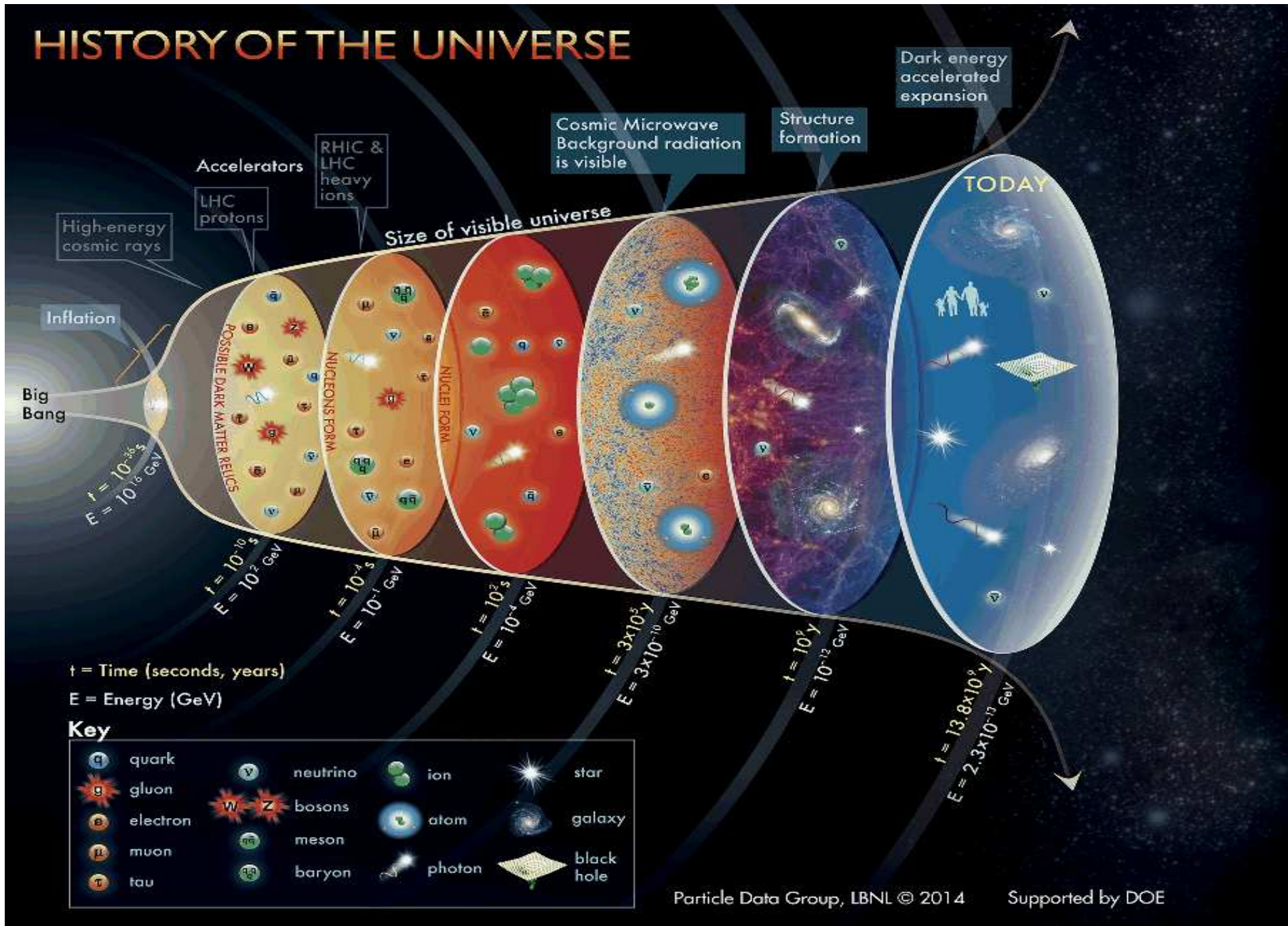
prof. dr hab. A.F.Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych IFD

Wykład I

- Wprowadzenie
plan wykładu, literatura, egzamin itp.
- Krótka historia rozwoju (astro)fizyki cząstek
- Model Standardowy AD2019
- 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 (dziś)
- oddziaływanie cząstek z materią i podstawowe metody detekcji
- ewolucja Wszechświata
- doświadczalne przesłanki istnienia Ciemnej Materii
- poszukiwanie cząstek Ciemnej Materii (3 wykłady)
- promieniowanie kosmiczne i jego pomiary (2 wykłady)
- kosmos w promieniowaniu gamma
- astronomia neutrin
- ewolucja gwiazd, supernowe, błyski gamma
- fale grawitacyjne (2 wykłady)

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

Wprowadzenie

Wykład

Wtorki 15¹⁵ – 17⁰⁰ w sali 2.21

Nominalnie przewidziane jest 14 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:
<https://www.isapp-schools.org/isapp-schools>
 - Materiały z konferencji (ICHEP'2018, ICRC'2017...)
- + materiały będą zamieszczane na stronie wykładu
<http://www.fuw.edu.pl/~zarnecki/app/>

Początki

Pierwsze odkrycia...

- 1895 – odkrycie promieni X przez Wilhelma Röntgena
- 1896 – odkrycie promieniotwórczości przez Henri Becquerel'a
- 1897 – odkrycie elektronu przez Josepha Thomsona
- 1897 – odkrycie efektu fotoelektrycznego przez Hertza

Początki

Pierwsze odkrycia...

- 1895 – odkrycie **promieni X** przez Wilhelma Röntgena
- 1896 – odkrycie **promieniotwórczości** przez Henri Becquerel'a
- 1897 – odkrycie **elektronu** przez Josepha Thomsona
- 1897 – odkrycie **efektu fotoelektrycznego** przez Hertza
- 1902 – badania efektu fotoelektrycznego przez Lenard'a
- 1903 – nagroda Nobla dla H.Becquerela, M.Skłodowskiej-Curie i P.Curie
 - E.Rutherford i F.Soddy: **promieniotwórczość** wynikiem **przemiany pierwiastków**
- 1905 – Albert Einstein zaproponował kwant światła, czyli foton
- 1909 – Robert Millikan wyznaczył **ładunek** elektronu, a następnie obliczył jego **masę**

Początki

Fotony

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

Energia fotonu:

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

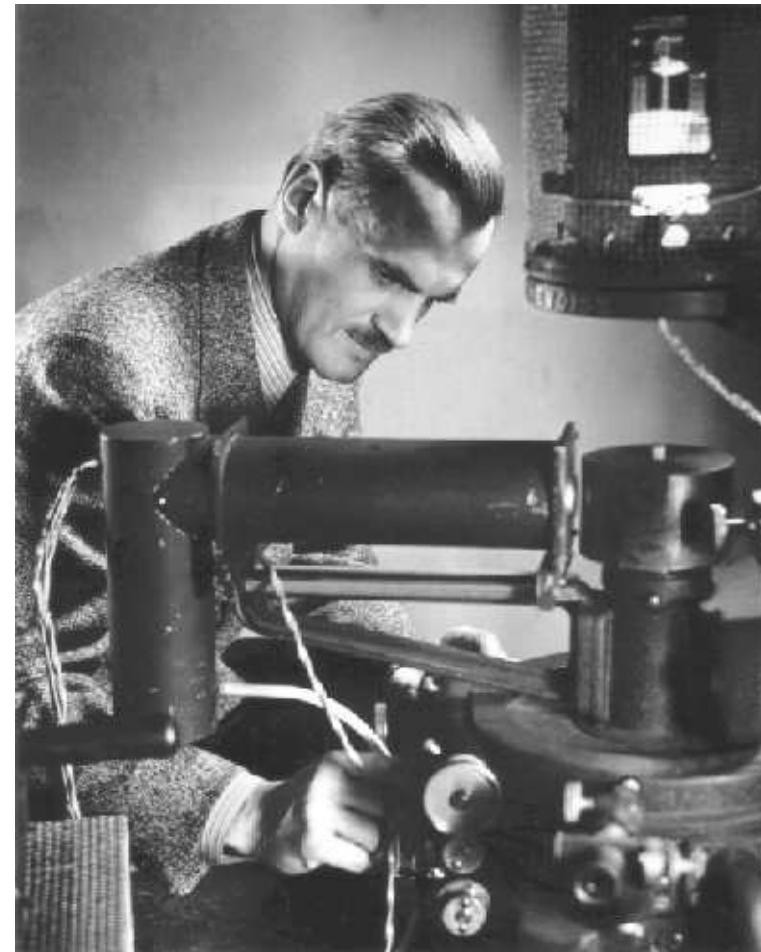
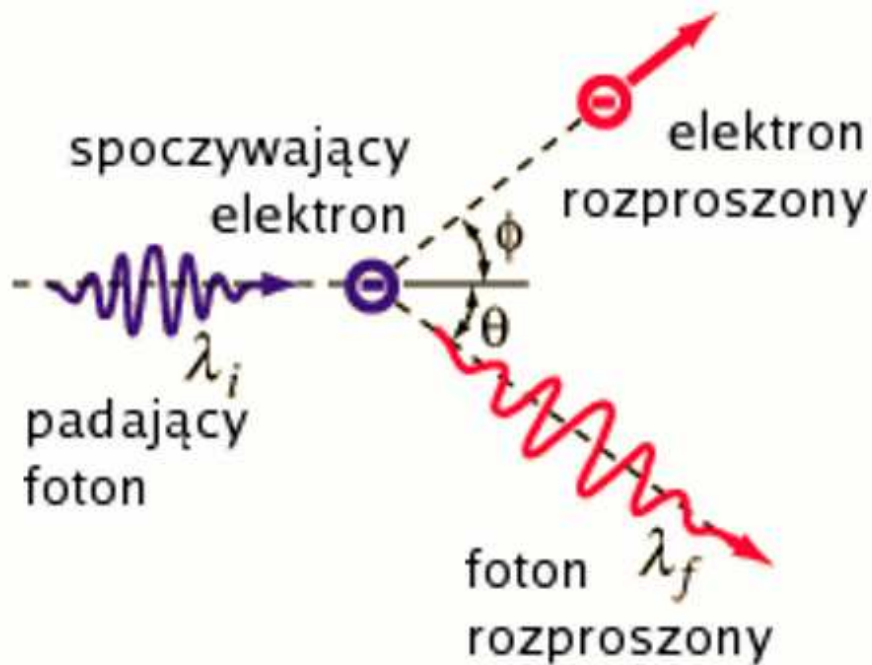
Aby wybić elektron z metalu E_{γ} musi być większa od tzw. **pracy wyjścia** \Rightarrow zależność od długości fali światła



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
- 1923 – doświadczenie Comptona
- 1928 – Paul Dirac formułuje relatywistyczne równanie falowe dla elektronu
- 1929 – akcelerator Van der Graaffa
- 1930 – Wolfgang Pauli wysuwa hipotezę neutrino
- 1931 – hipoteza Diraca istnienia antycząstek
 - James Chadwick odkrywa neutron
 - Ernest Lawrence buduje pierwszy cyklotron
- 1932 – Carl Anderson odkrywa pozytron w promieniowaniu kosmicznym

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.

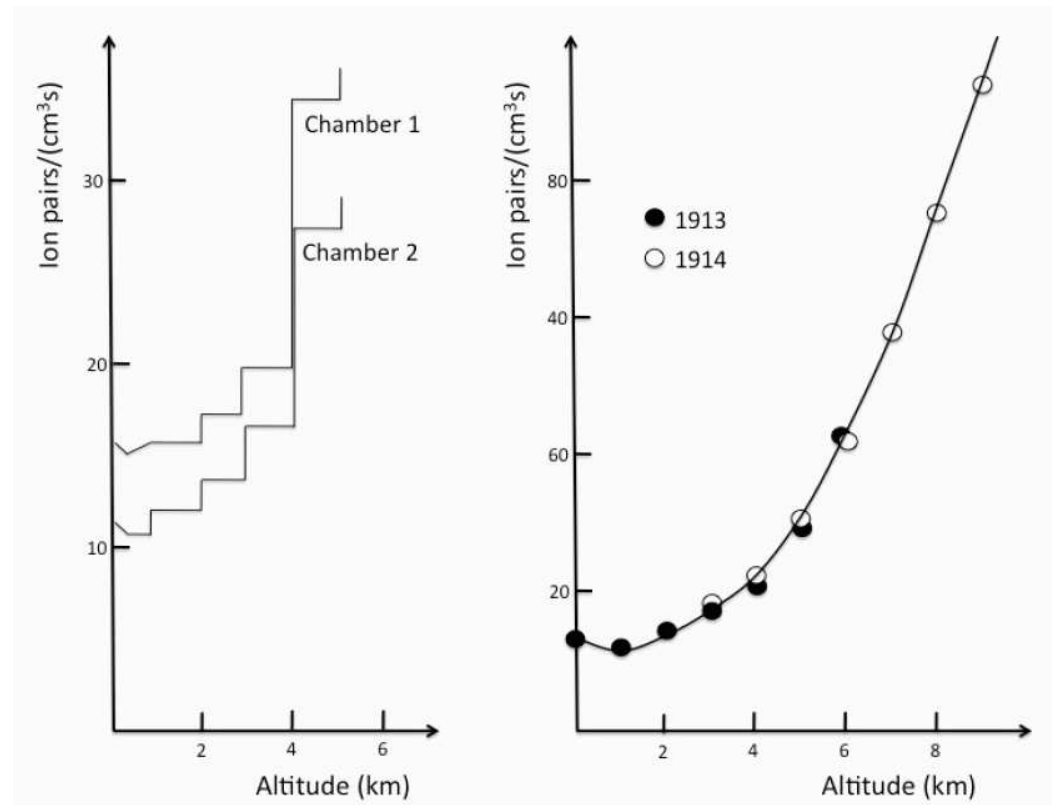
W **1912** roku **Victor Hess** przeprowadził pomiar jonizacji powietrza w funkcji wysokości nad powierzchnią Ziemi.

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

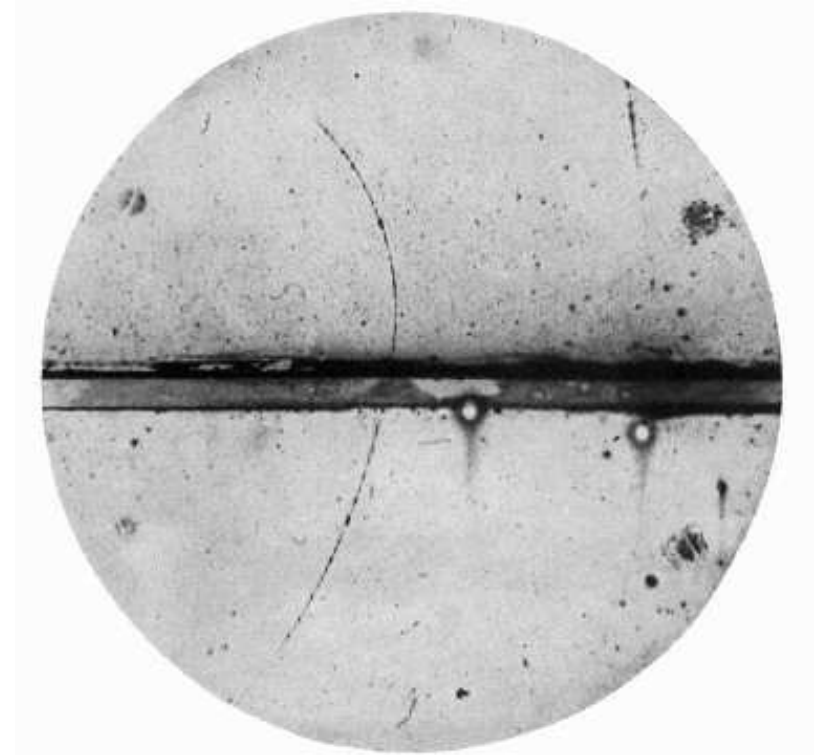
Źródła promieniotwórcze dawały energie tylko do ok. 50 MeV.

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^+)



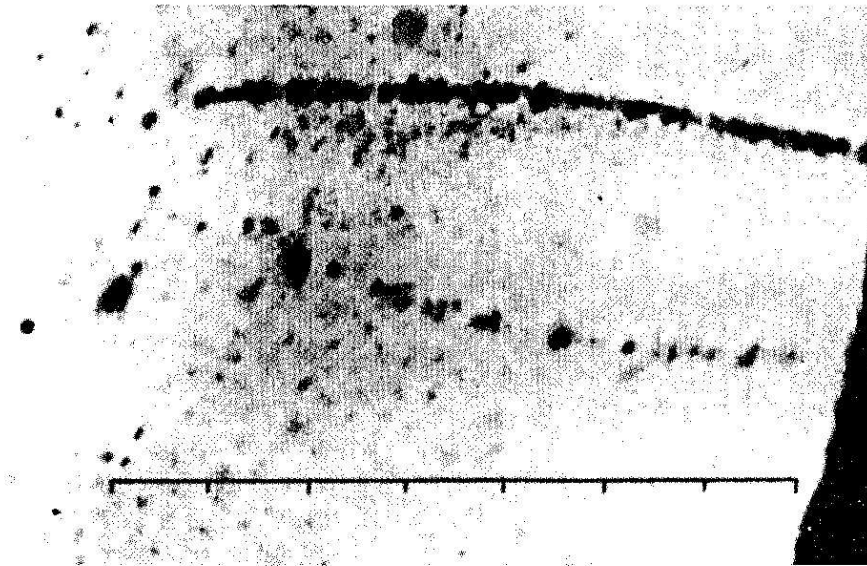
Promieniowanie kosmiczne

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 (μ^+)

⇐ elektron (e^-)

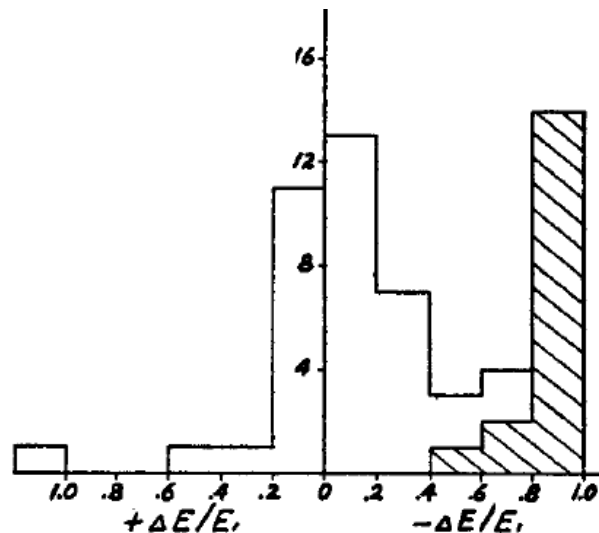
Promieniowanie kosmiczne

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

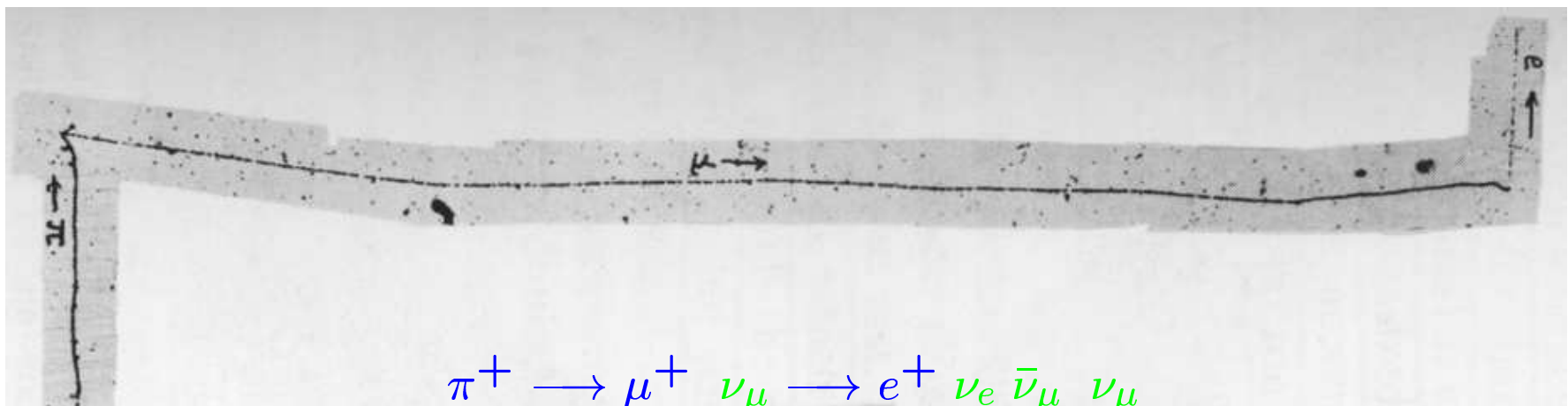
Odkrycie pionu

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

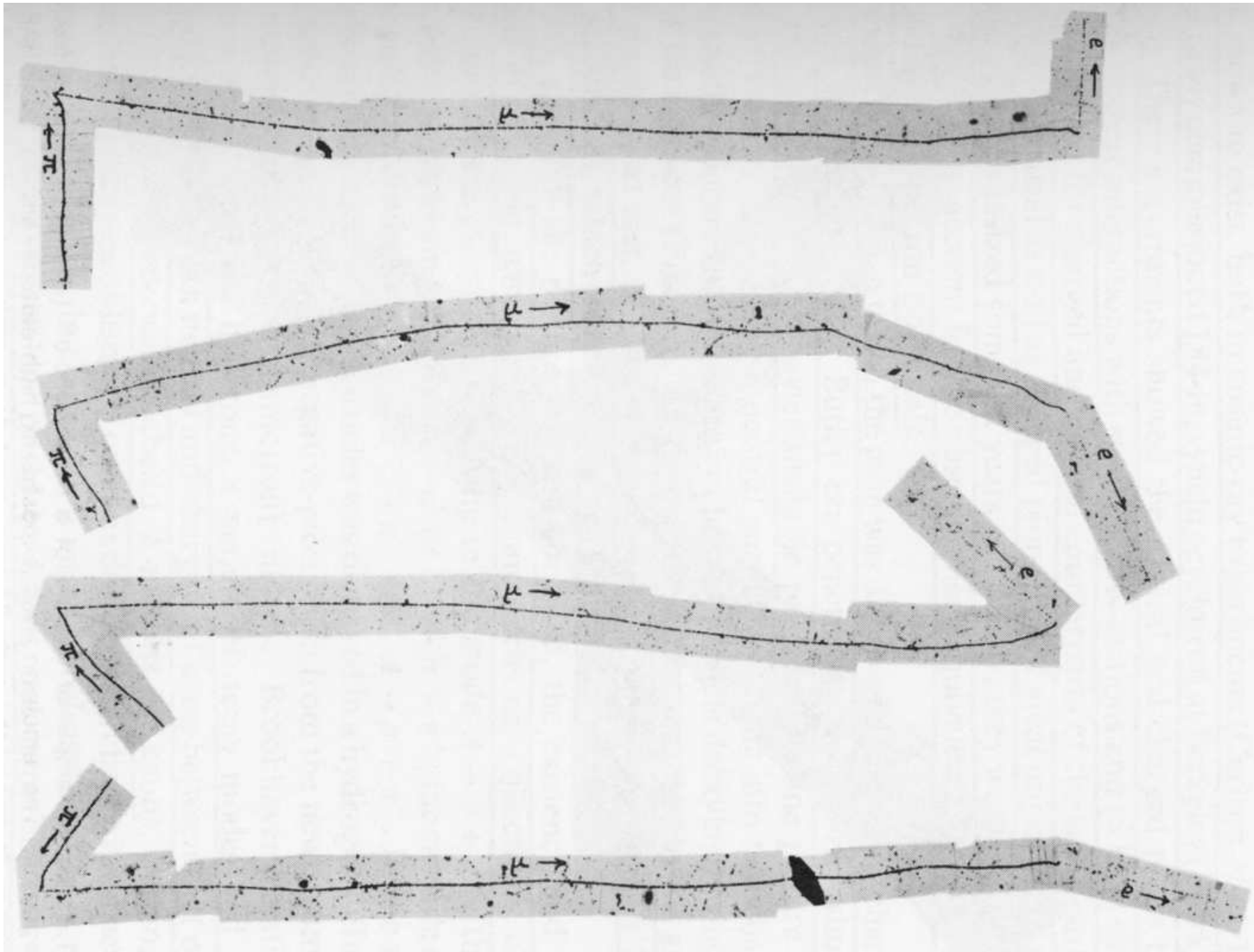
Odkryli, że miony (μ^\pm) są produkowane w rozpadach innych cząstek, pionów (π^\pm), które żyją jedynie setne części mikrosekundy.



Jeden ze zrekonstruowanych przypadków:



Odkrycie pionu



Promieniowanie kosmiczne

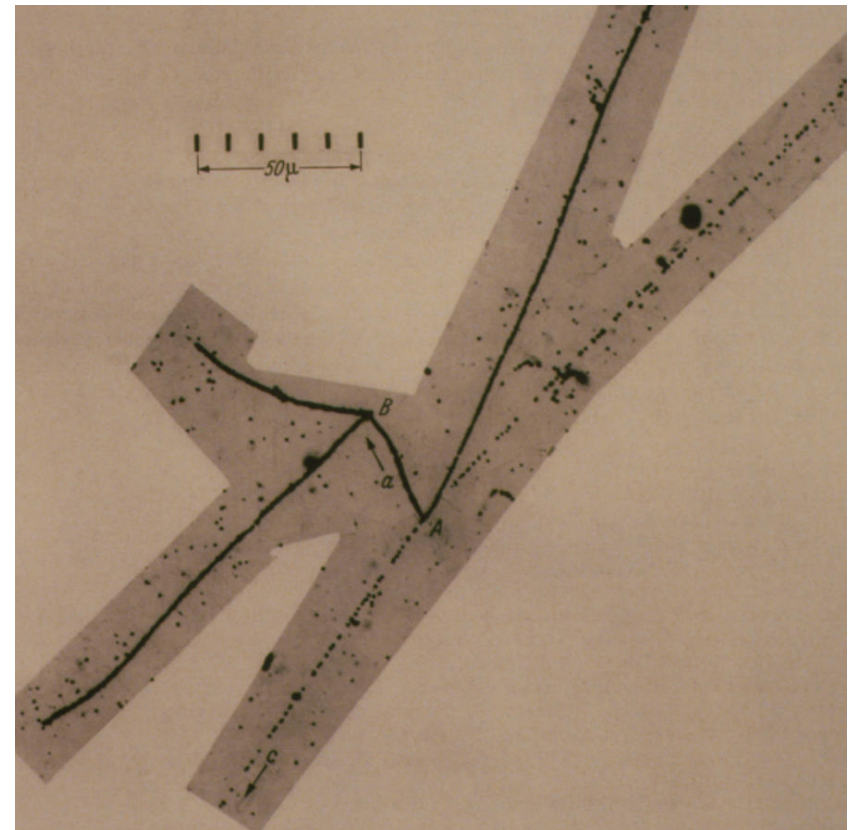
Cząstki dziwne

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

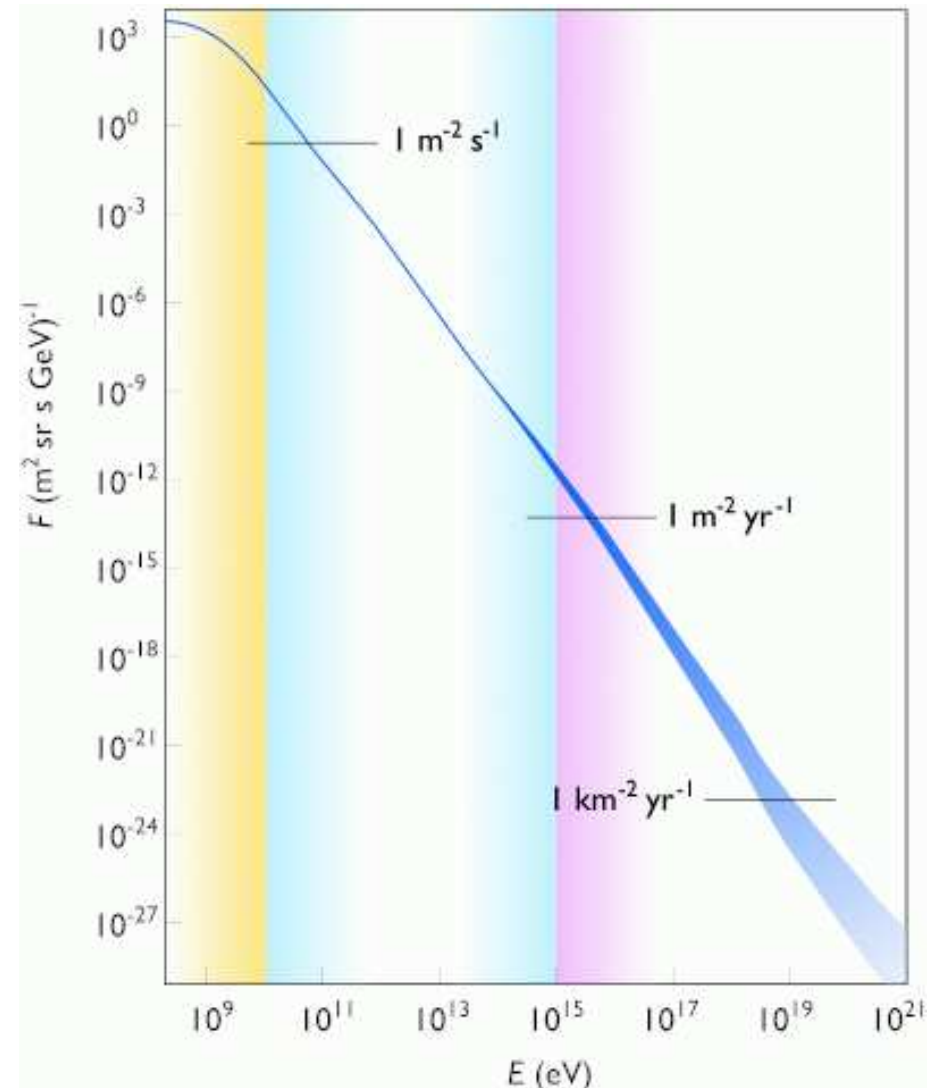
Promieniowanie obserwowane poza atmosferą ziemską

Skład:

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

Taki jak "skład Wszechświata"...

Pomijając neutrino i miękkie prom. EM...



Promieniowanie kosmiczne

Wtórne promieniowanie kosmiczne

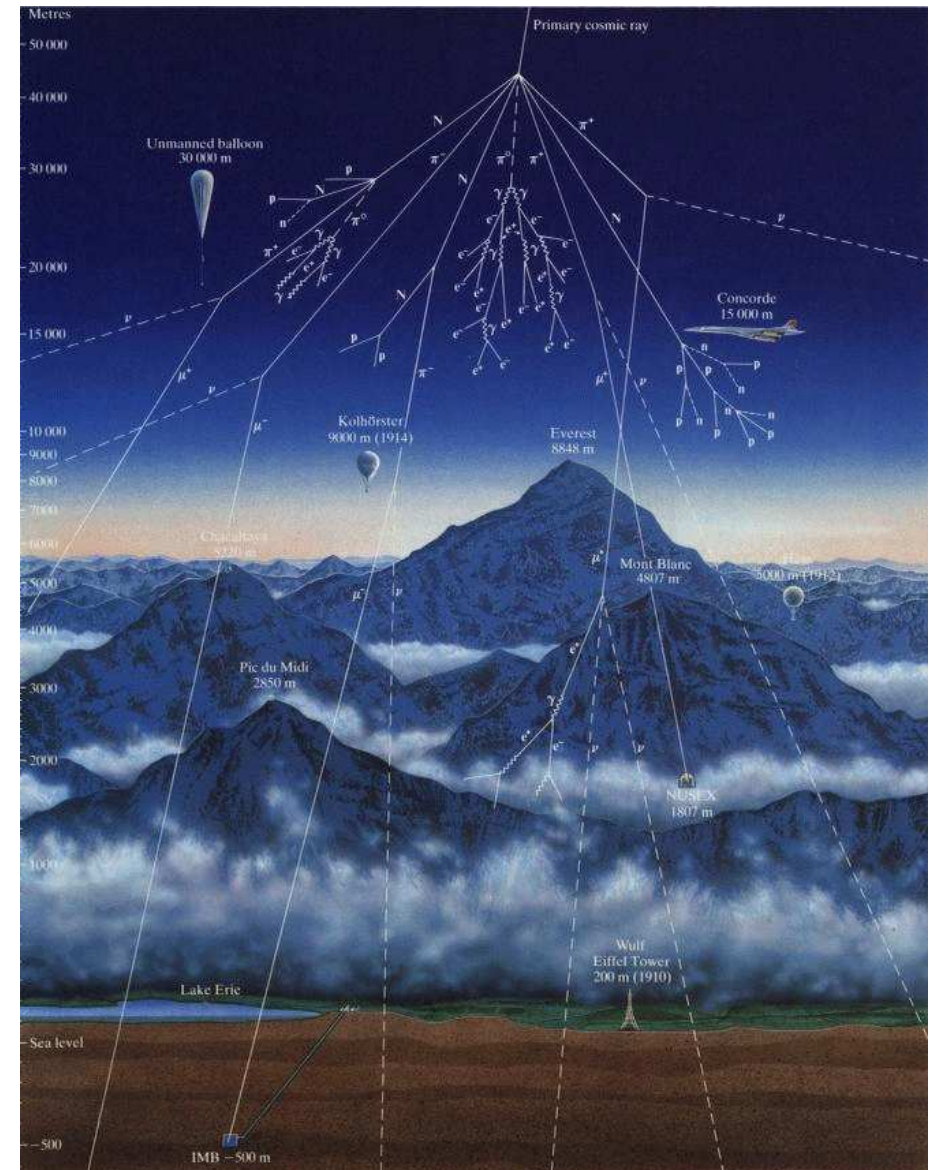
Promieniowanie pierwotne oddziałuje w atmosferze Ziemi. Produkowane są liczne cząstki wtórne, głównie **piony i kaony**, które następnie rozpadają się produkując głównie miony, a w dalszej kolejności elektrony.

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

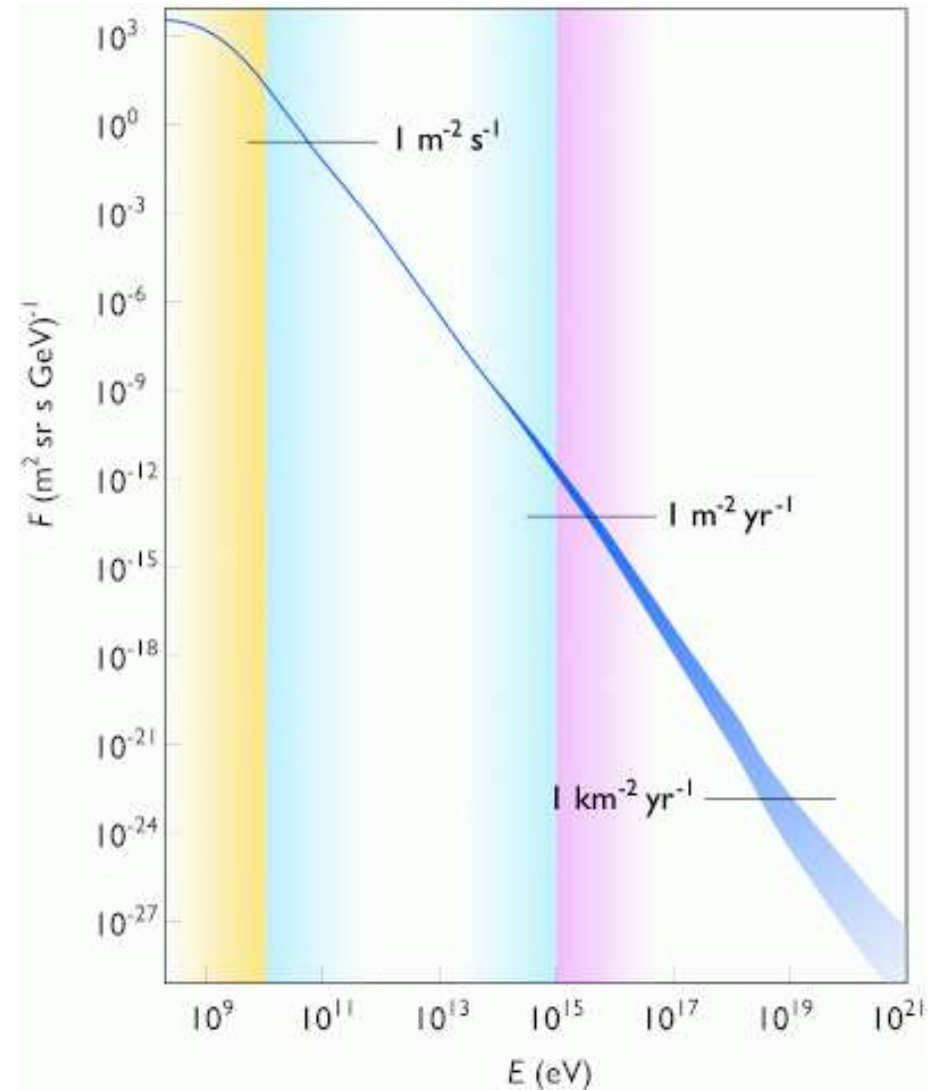
Do lat 50 XX w. badanie oddziaływań promieniowania kosmicznego z materią było jednym z głównych kierunków badań.

Wciąż pozostaje ważnym źródłem danych.

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

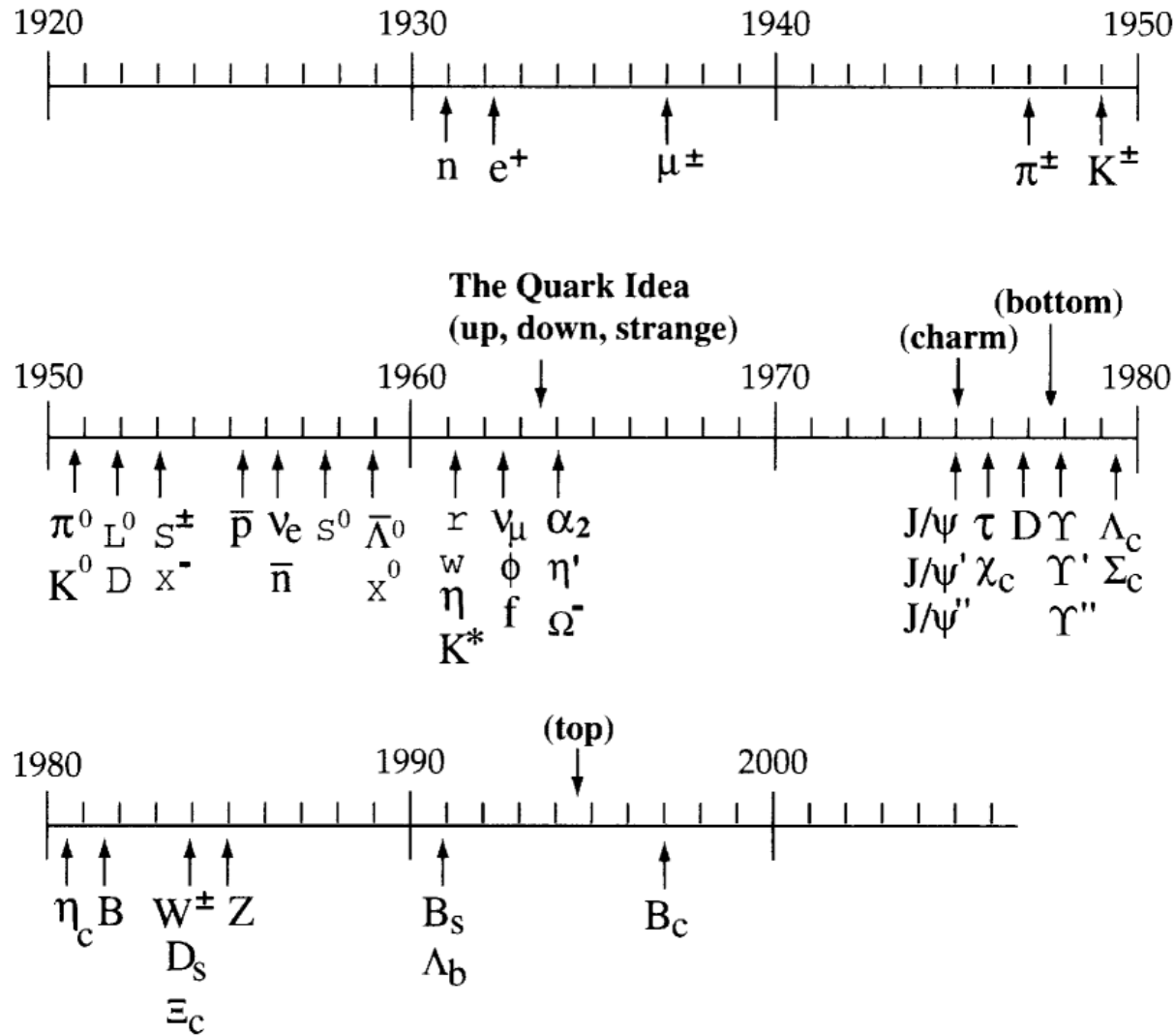
Niestety cząstek o najwyższych energiach jest ich bardzo mało...

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...

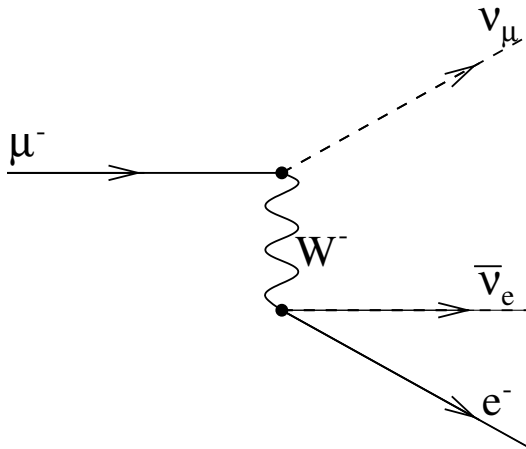
Bozony W^\pm i Z^0

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

Istnienie bozonów W i Z potwierdzone w 1983 \Rightarrow początki **Modelu Standardowego**

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

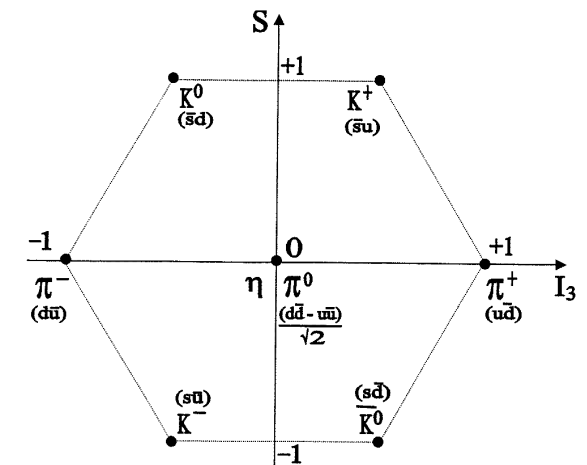
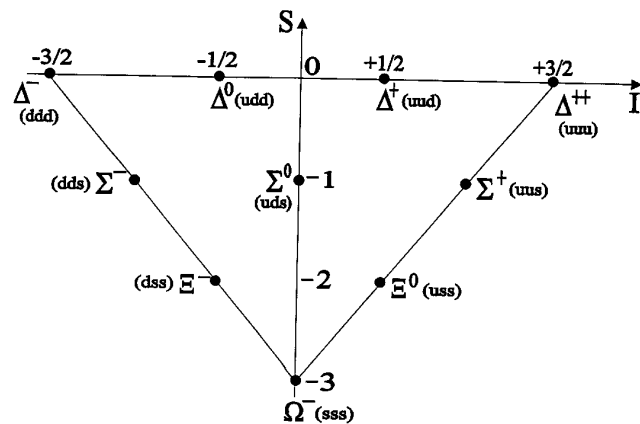
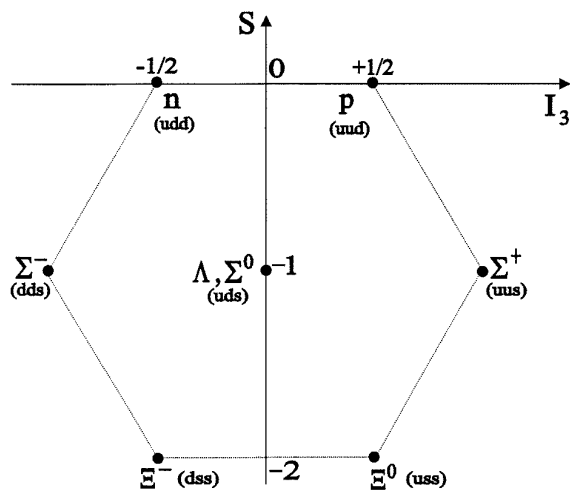
Fermiony

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

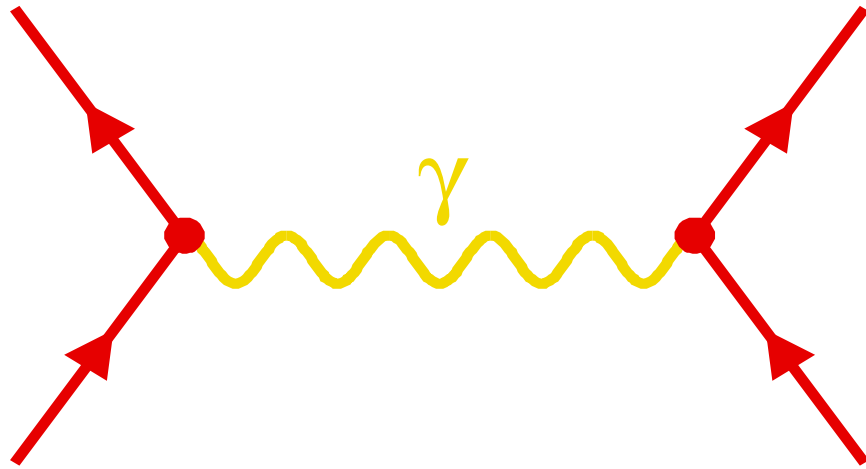
Bozony

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

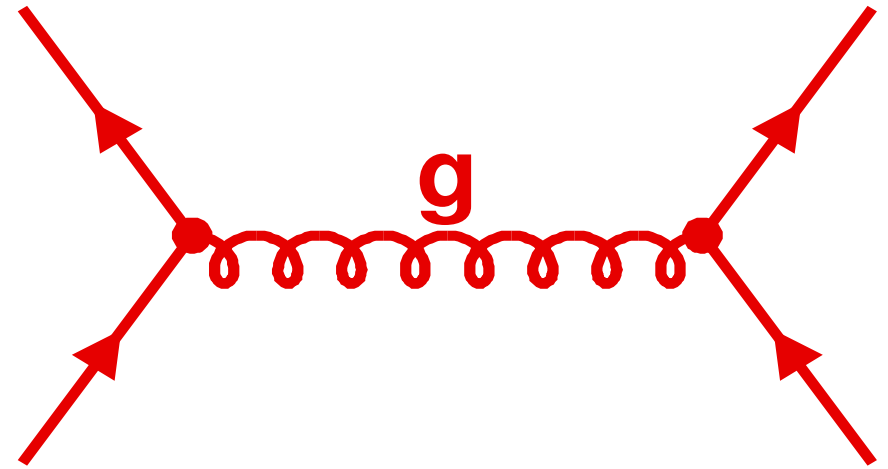
Nośnik przekazuje część energii i/lub pędu jednej cząstki drugiej cząstce

<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}

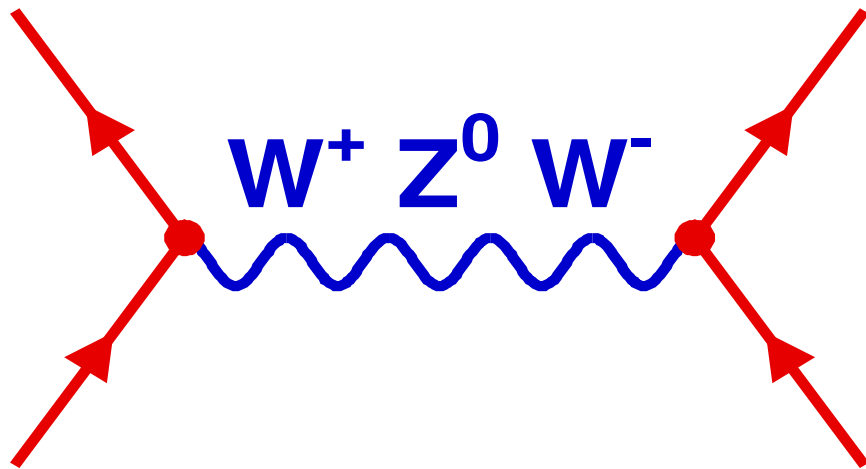
“moc” - przykładowe porównanie wielkości oddziaływań dla dwóch sąsiadujących protonów



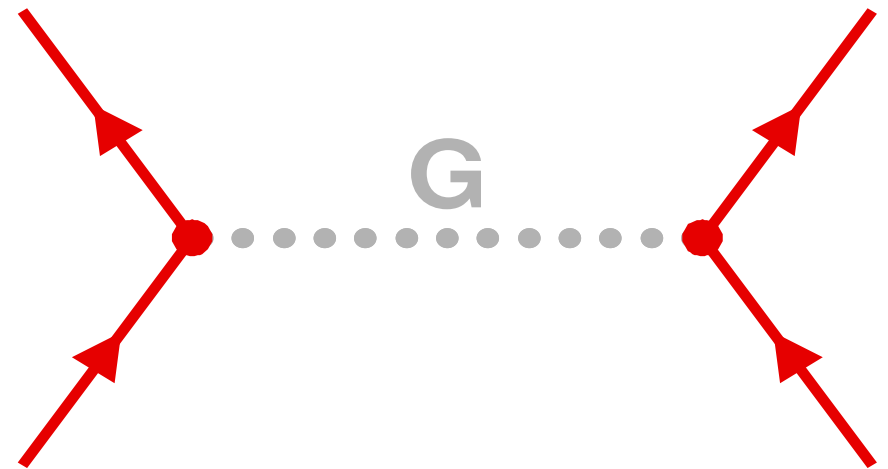
elektromagnetyczne



silne



slabe



grawitacyjne

Świat cząstek elementarnych

Diagramy Feynmana

Pozwalają zobrazować 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

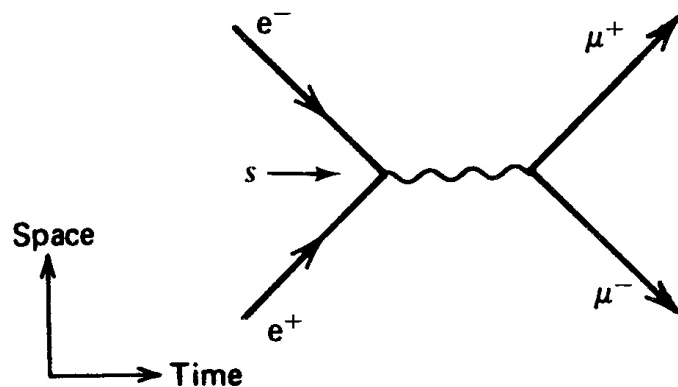
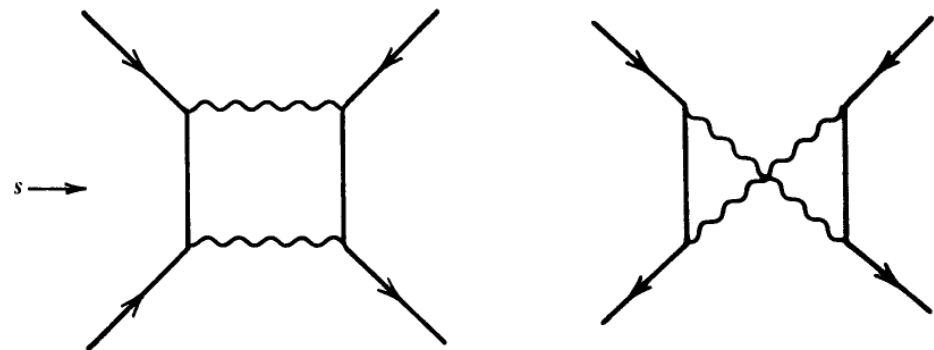


Diagram “drzewowy”

Kolejne diagramy (przykładowe)

next-to-leading order - NLO



Diagramy “pętlowe”

Świat cząstek elementarnych

Diagramy Feynmana

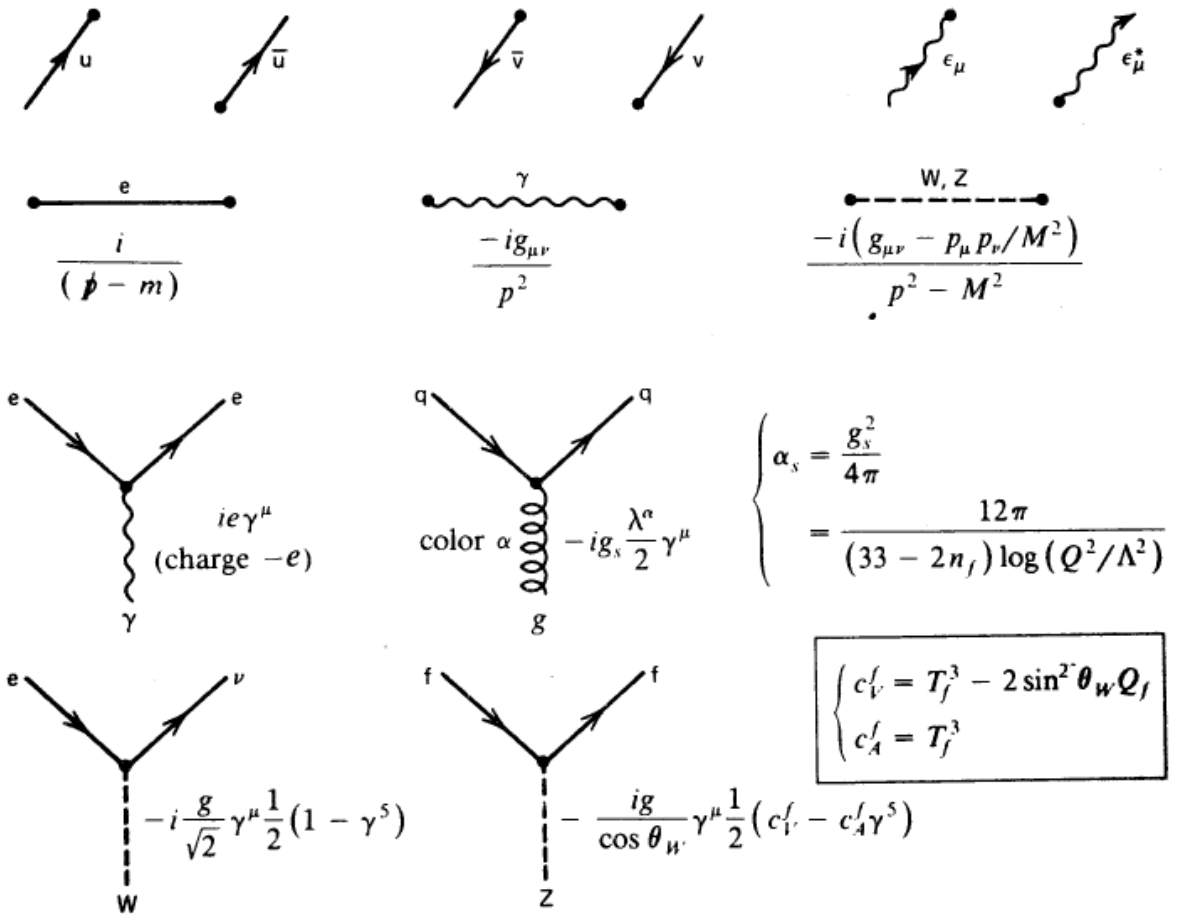
Każdemu diagramowi możemy przyporządkować wyrażenie na odpowiednią amplitudę rozpraszania.

Wierzchołki decydują o wielkości przekroju czynnego:

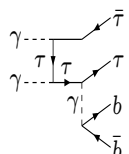
$$\alpha_s = \frac{g_s^2}{4\pi} \sim 0.1 - 0.2$$

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

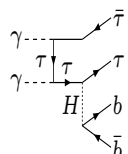
$$\alpha_{em} = \frac{e^2}{4\pi} \sim \frac{1}{137} \approx 0.0073$$



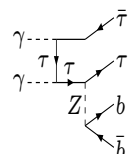
$$\gamma\gamma \rightarrow \tau^+ \tau^- b \bar{b}$$



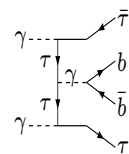
diagr.1



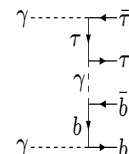
diagr.2



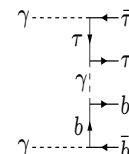
diagr.3



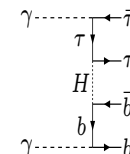
diagr.4



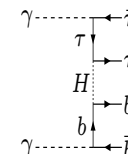
diagr.5



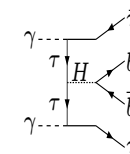
diagr.6



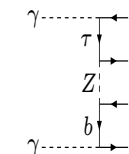
diagr.7



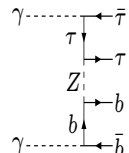
diagr.8



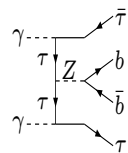
diagr.9



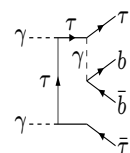
diagr.10



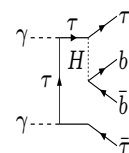
diagr.11



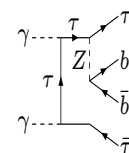
diagr.12



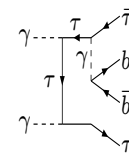
diagr.13



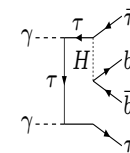
diagr.14



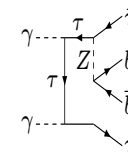
diagr.15



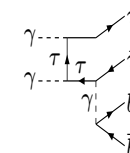
diagr.16



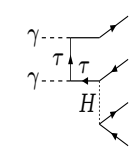
diagr.17



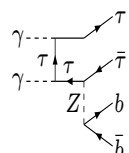
diagr.18



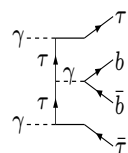
diagr.19



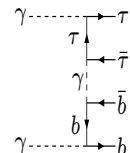
diagr.20



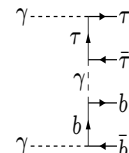
diagr.21



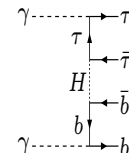
diagr.22



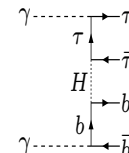
diagr.23



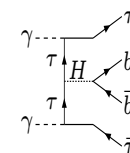
diagr.24



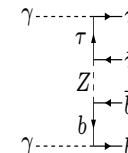
diagr.25



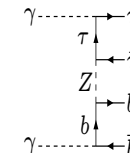
diagr.26



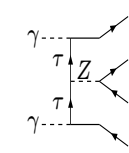
diagr.27



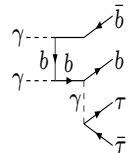
diagr.28



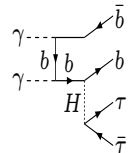
diagr.29



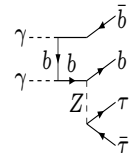
diagr.30



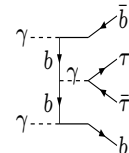
diagr.31



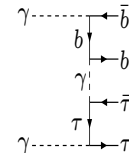
diagr.32



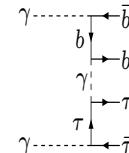
diagr.33



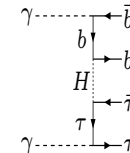
diagr.34



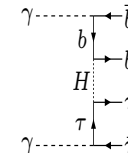
diagr.35



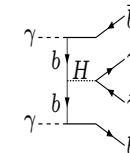
diagr.36



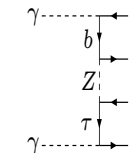
diagr.37



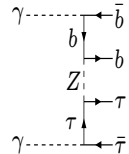
diagr.38



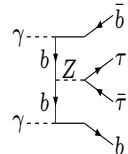
diagr.39



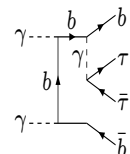
diagr.40



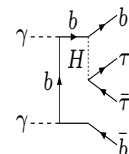
diagr.41



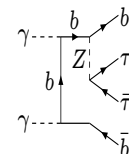
diagr.42



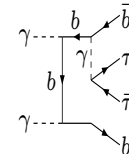
diagr.43



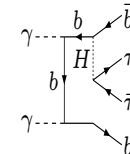
diagr.44



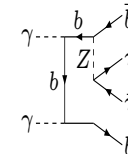
diagr.45



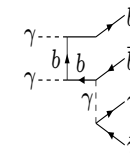
diagr.46



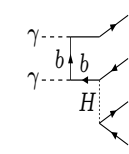
diagr.47



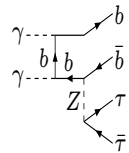
diagr.48



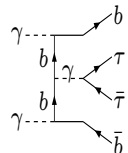
diagr.49



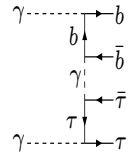
diagr.50



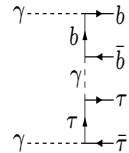
diagr.51



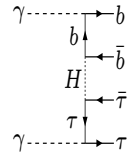
diagr.52



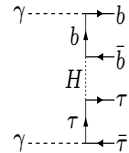
diagr.53



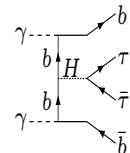
diagr.54



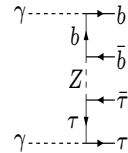
diagr.55



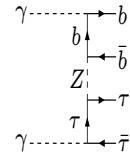
diagr.56



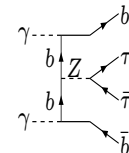
diagr.57



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...

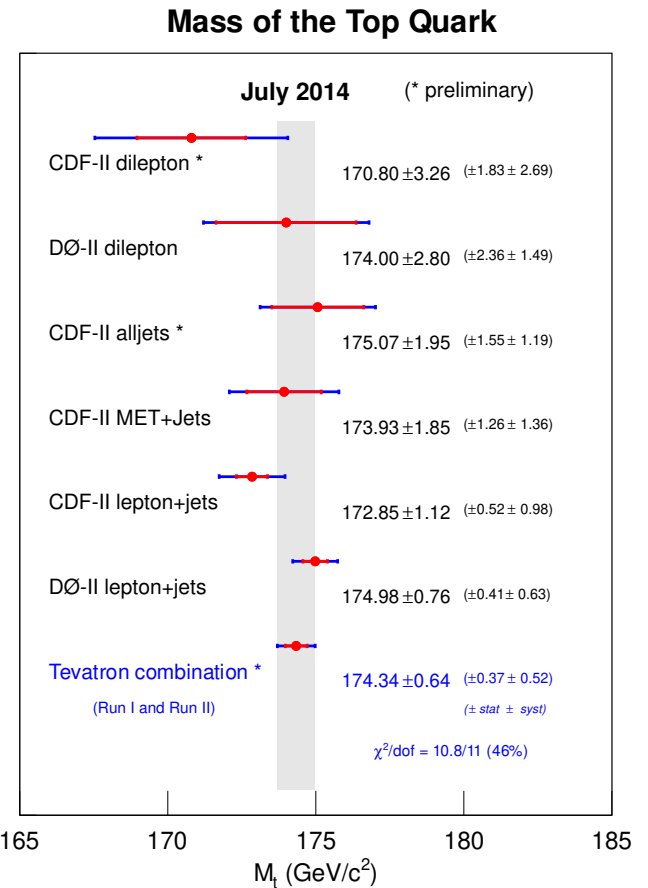
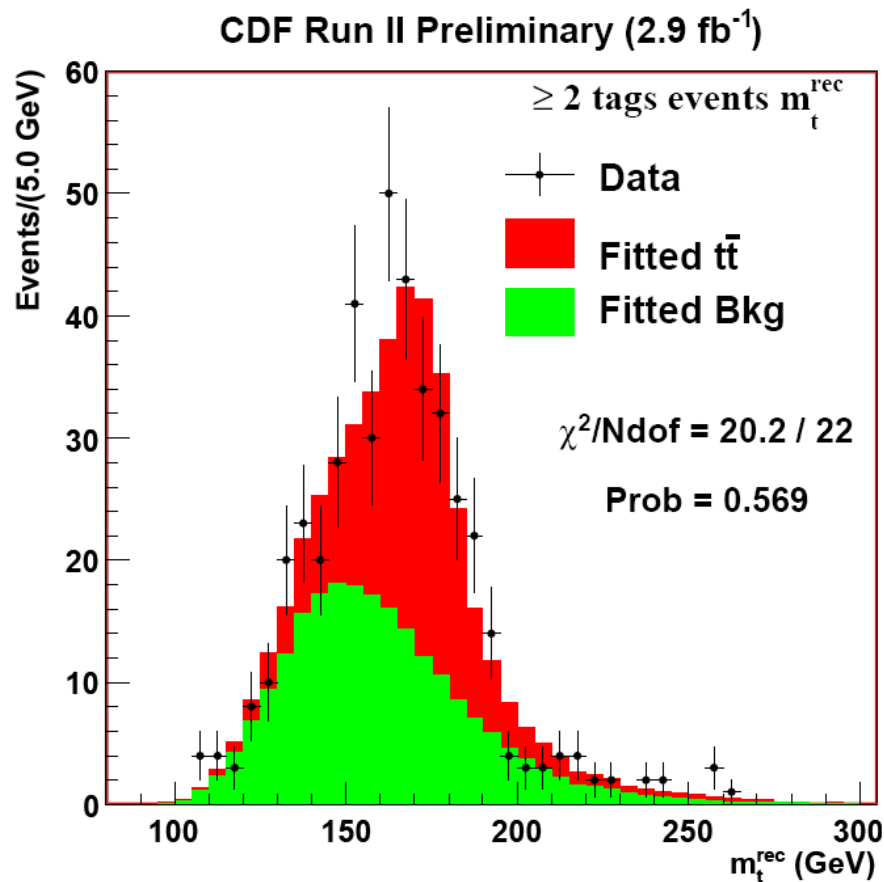
Kwark t

Tevatron

Odkrycie: 1995

Rozkład rekonstruowanej masy kwarku t
w jednym z rozważanych kanałów

Porównanie wyników dla różnych próbek

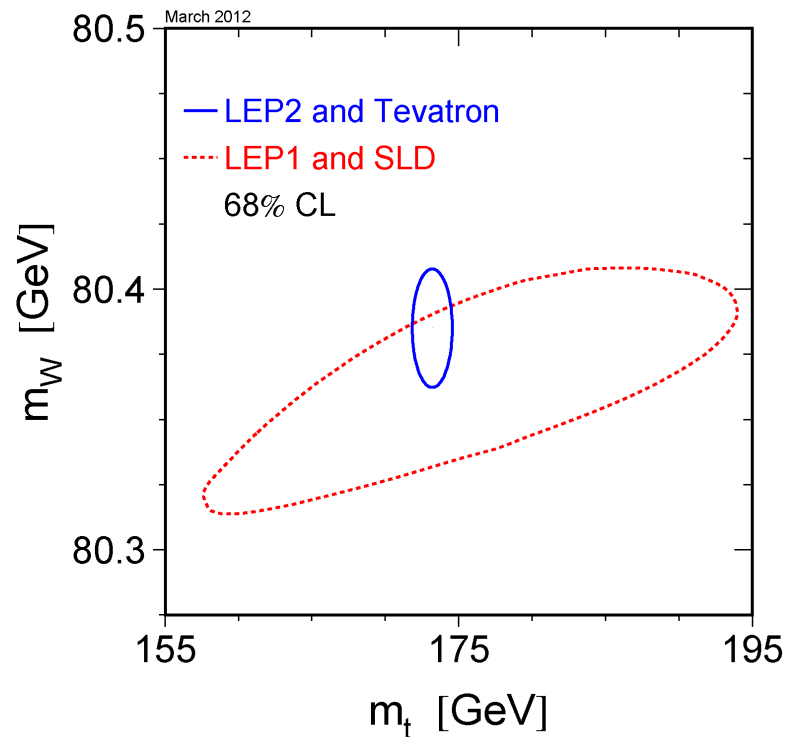


CDF + D0: $m_t = 174.34 \pm 0.64 \text{ GeV}$

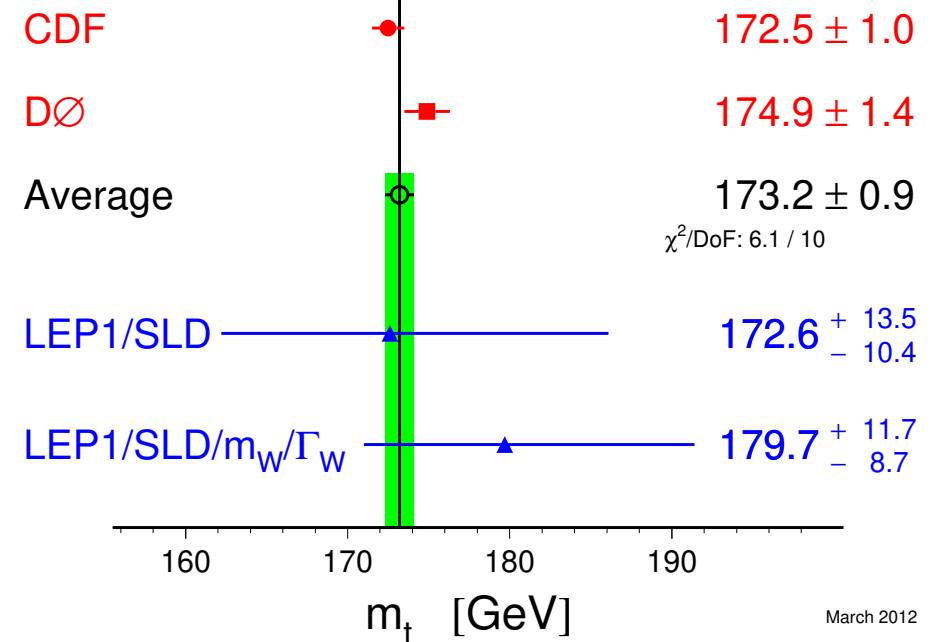
Kwark t

Porównanie

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



Top-Quark Mass [GeV]

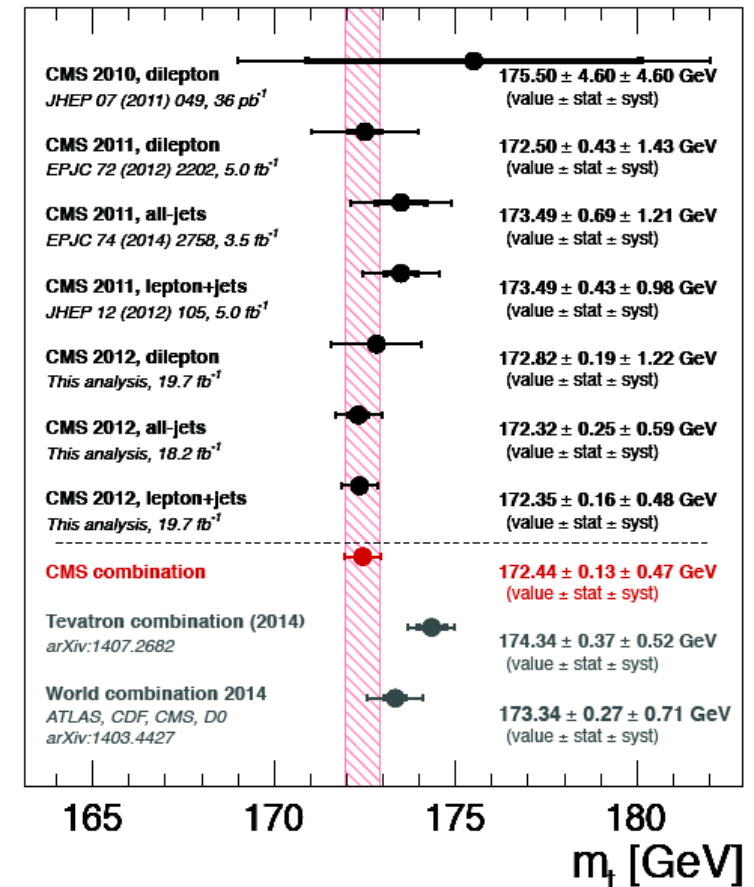
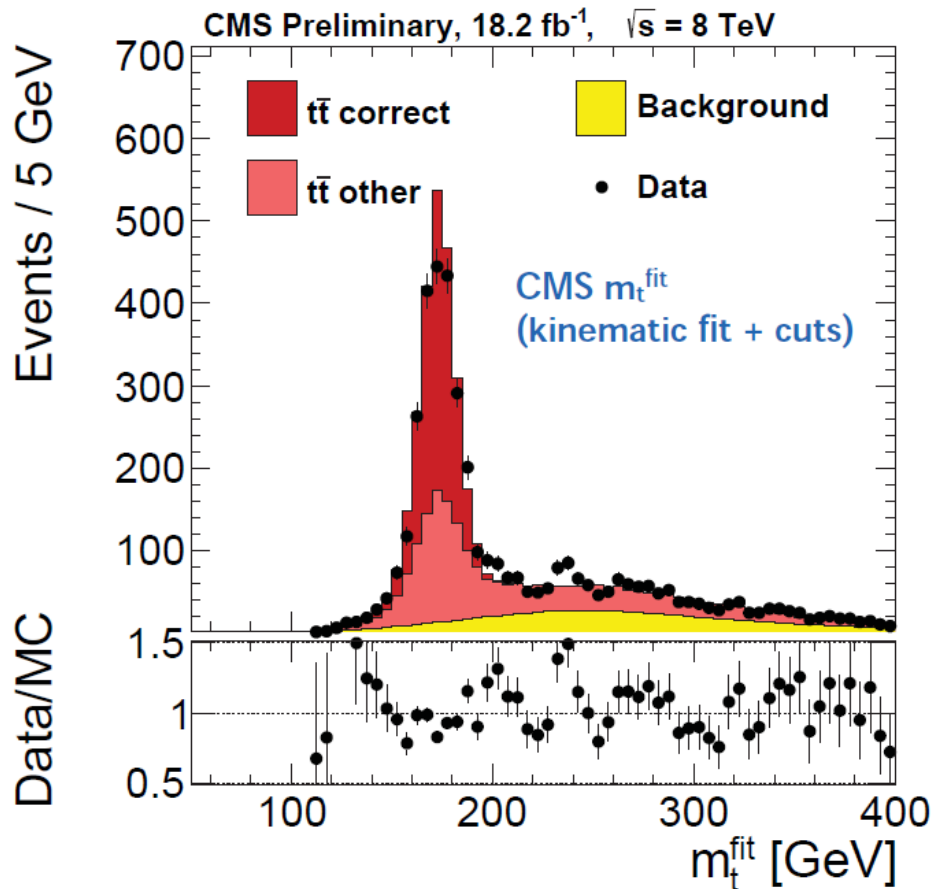


Pomiar bezpośredni zgodny w granicach błędów z przewidywaniami teorii opartymi na precyzyjnych pomiarach przy niższych energiach.

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

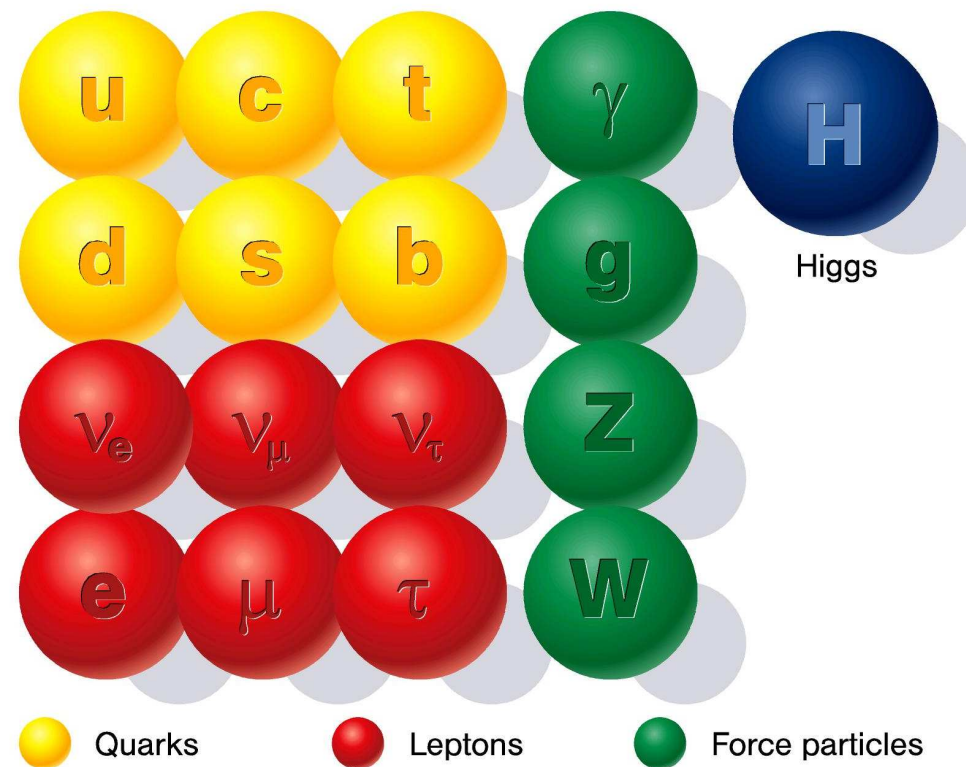
Model Standardowy

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

Cząstkami modelu są

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

“Nadaje masy” wszystkim cząstkom

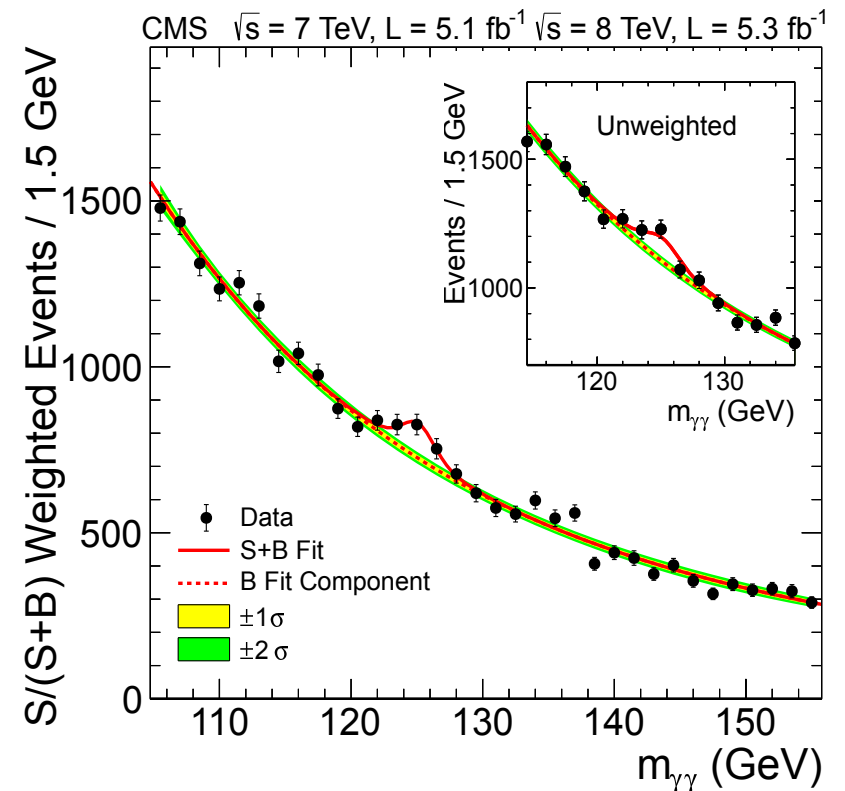
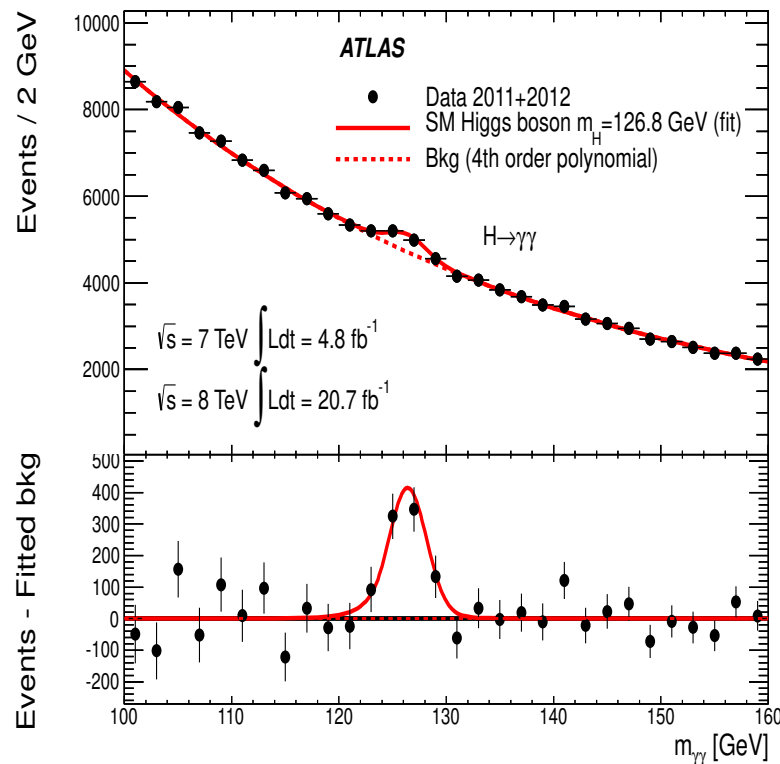


Higgs w LHC

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

Sygnał widoczny ponad wszelką wątpliwość

$H \rightarrow \gamma\gamma$

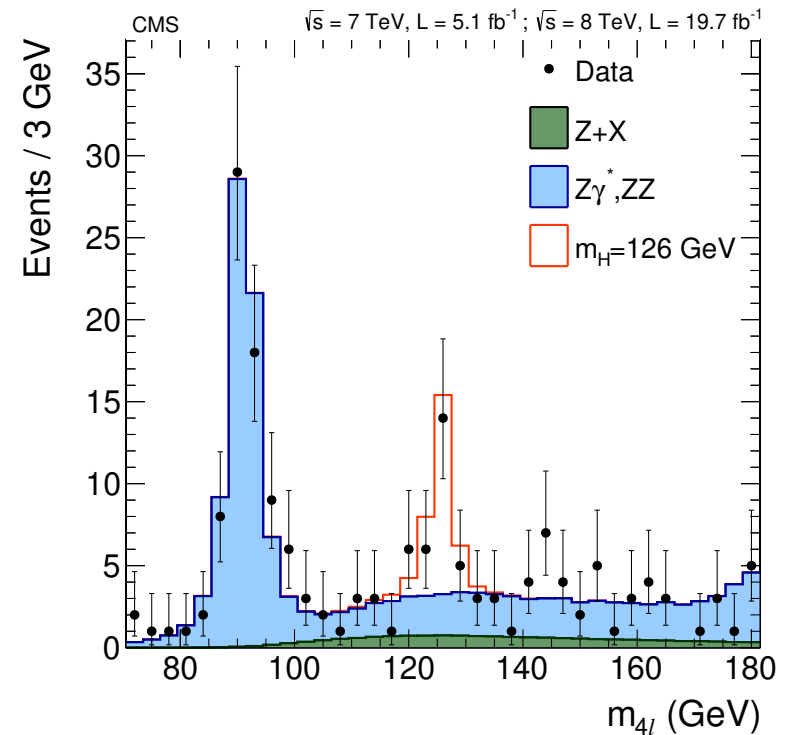
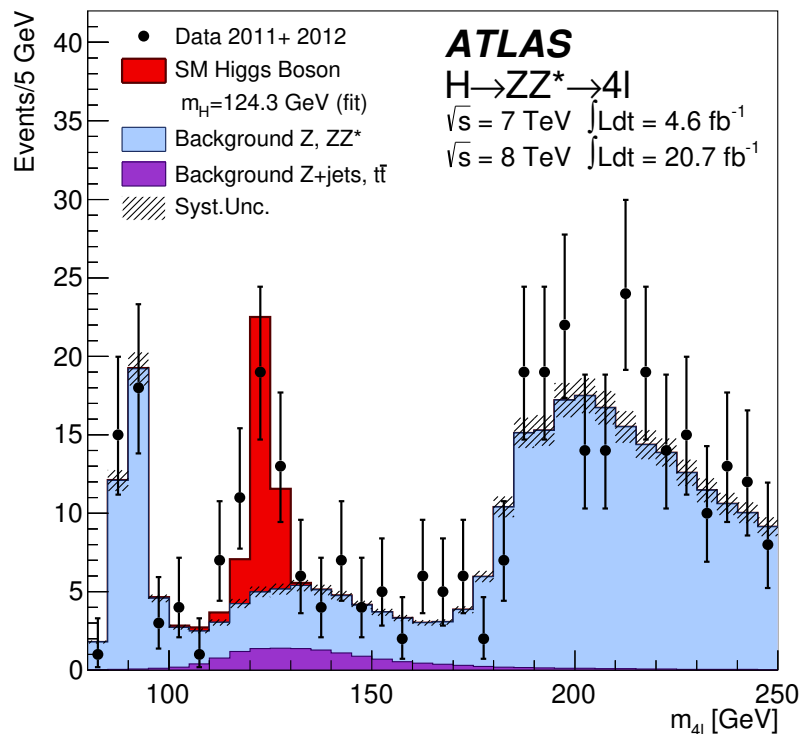


Higgs w LHC

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

Sygnał widoczny ponad wszelką wątpliwość

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



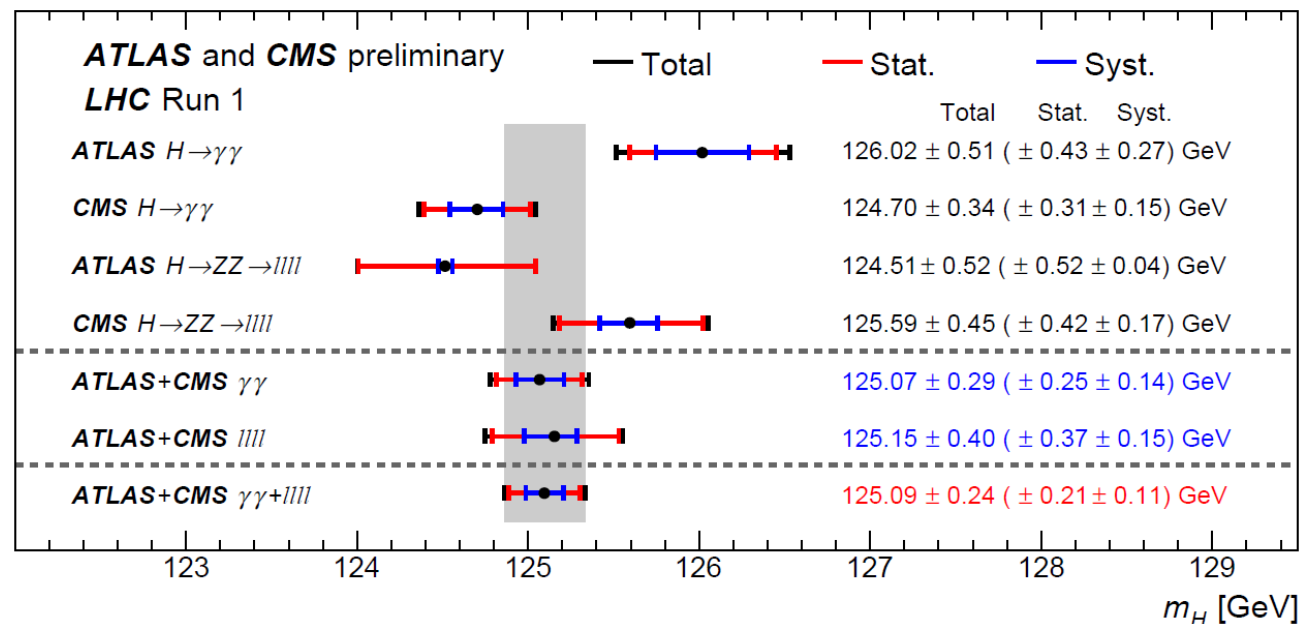
Higgs w LHC

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

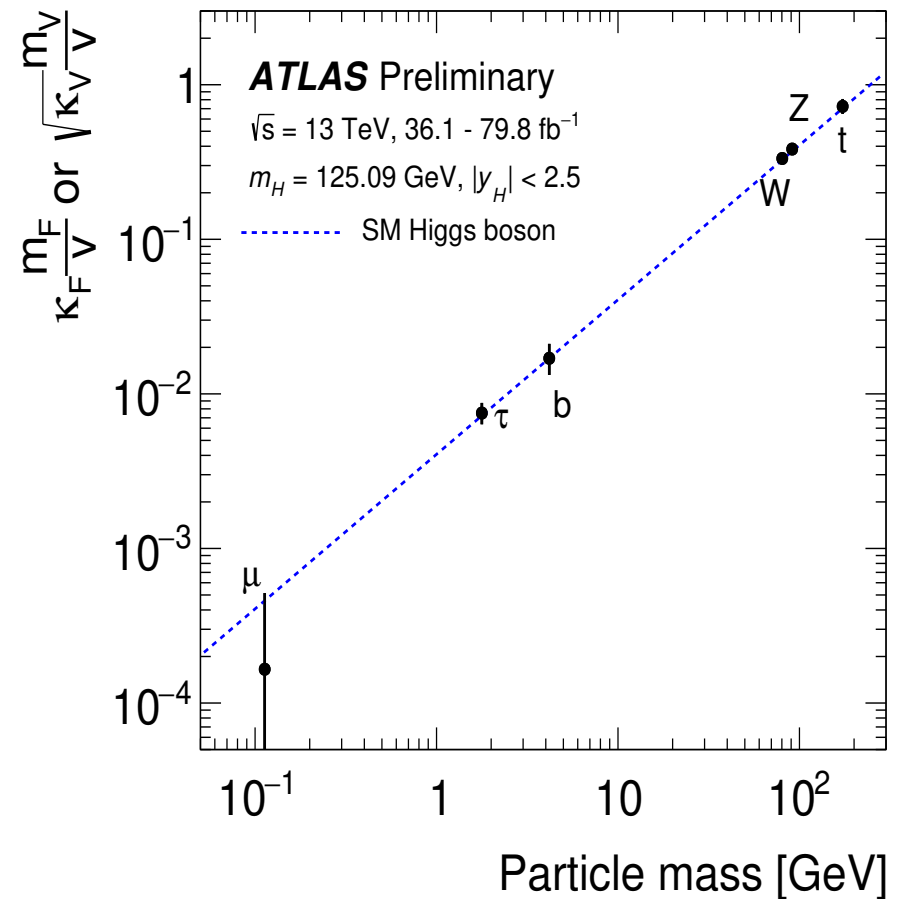
Sprężenia bozonu Higgsa

Możliwa staje się weryfikacja podstawowego przewidywania modelu:

sprężenie bozonu Higgsa do cząstek jest proporcjonalne do ich masy

Błędy są wciąż bardzo duże!

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



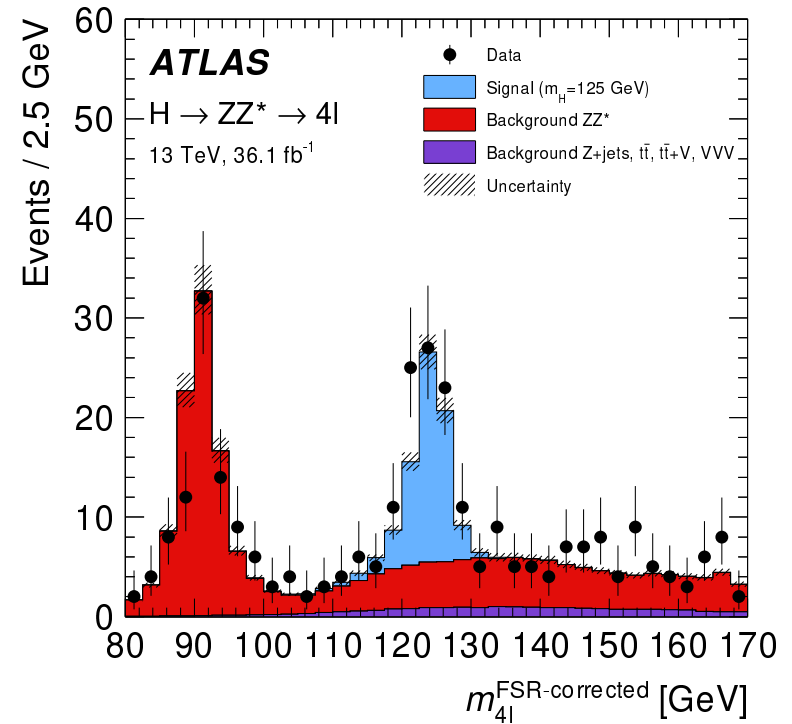
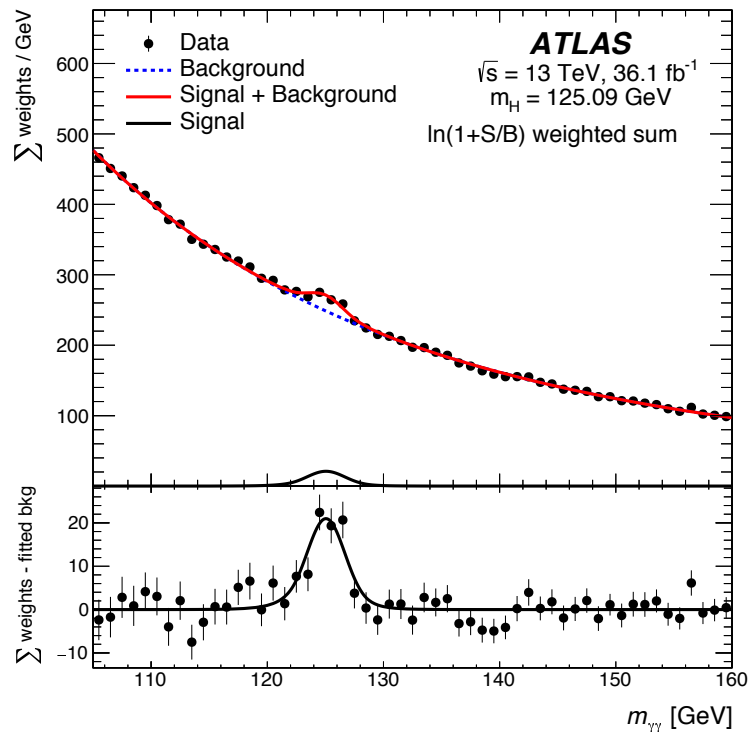
Higgs w LHC

Run 2 2015+2016

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.

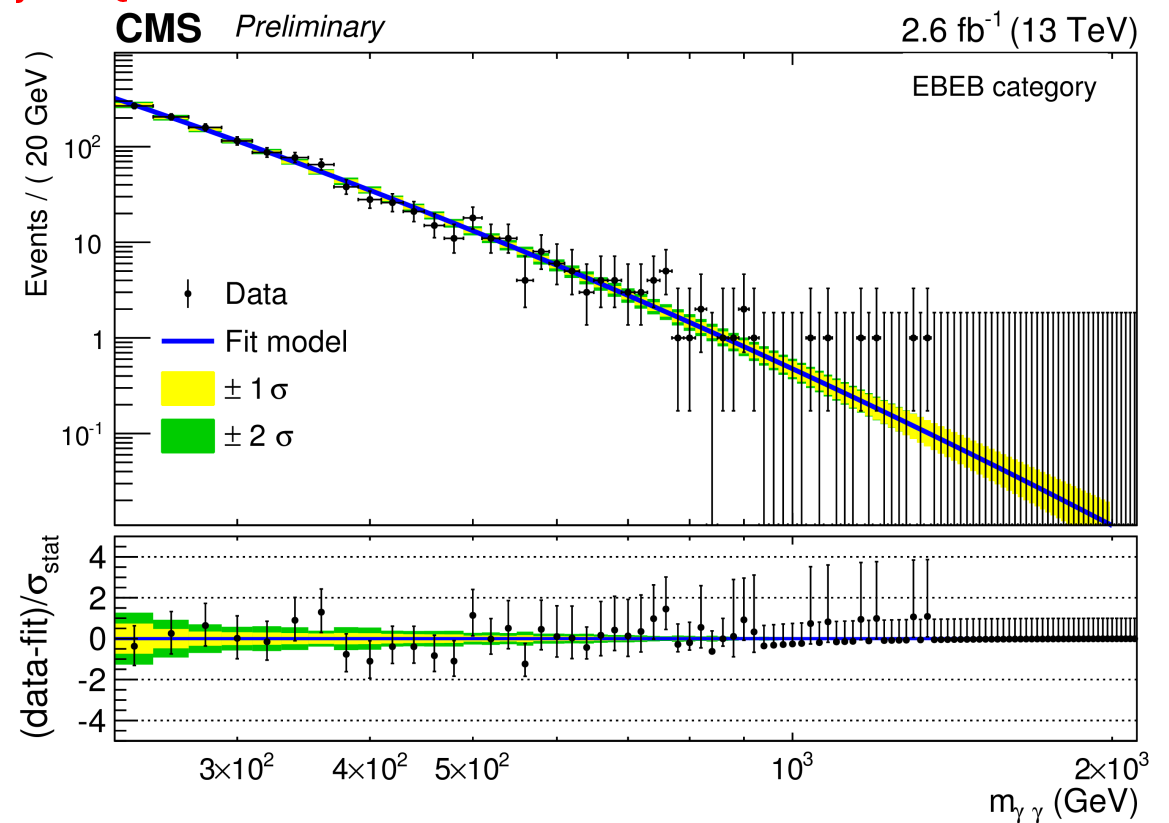
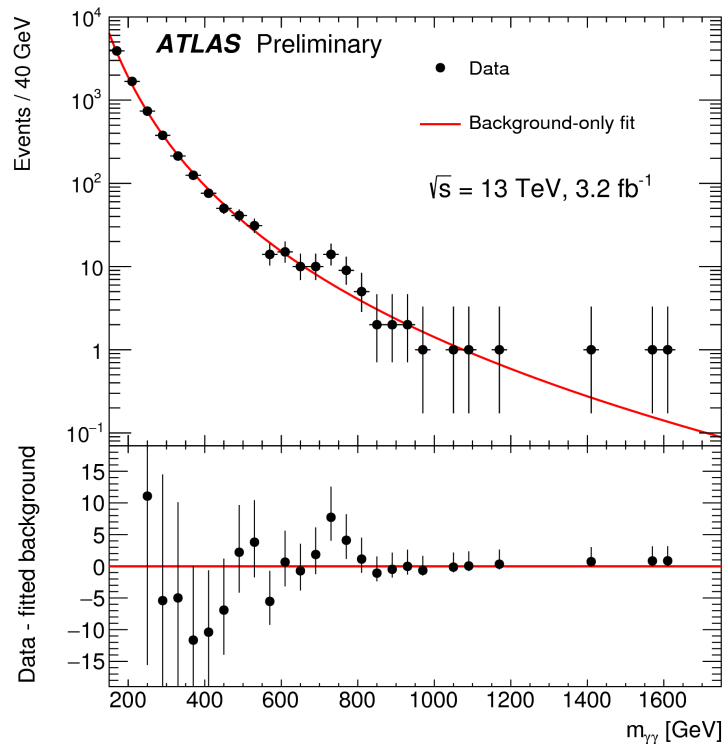
Wyniki konsyistentne z wynikami Run 1.

“Egzotyka” w LHC

Run 2

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

Mógłoby to być sygnał produkcji nowej cząstki !



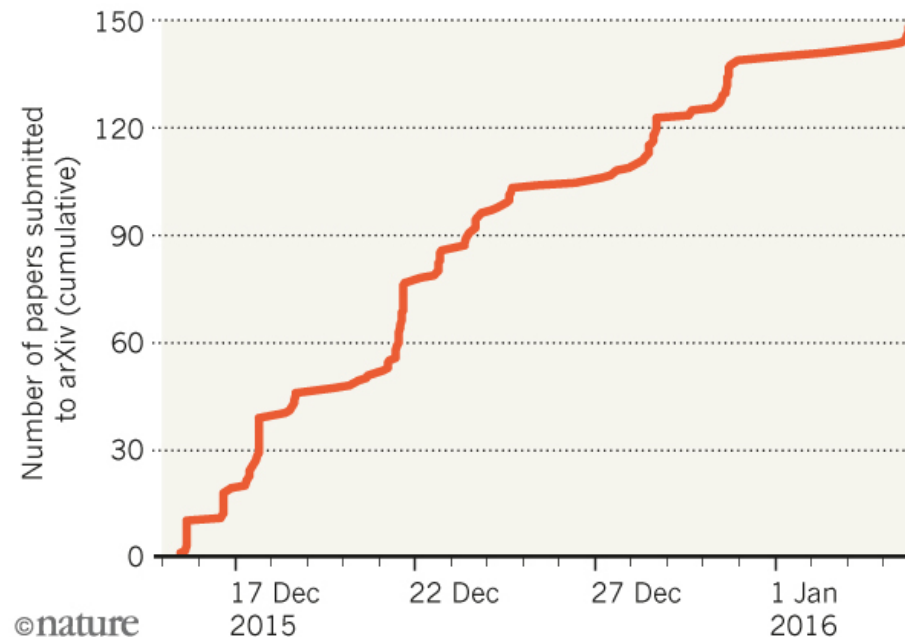
“Egzotyka” w LHC

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...

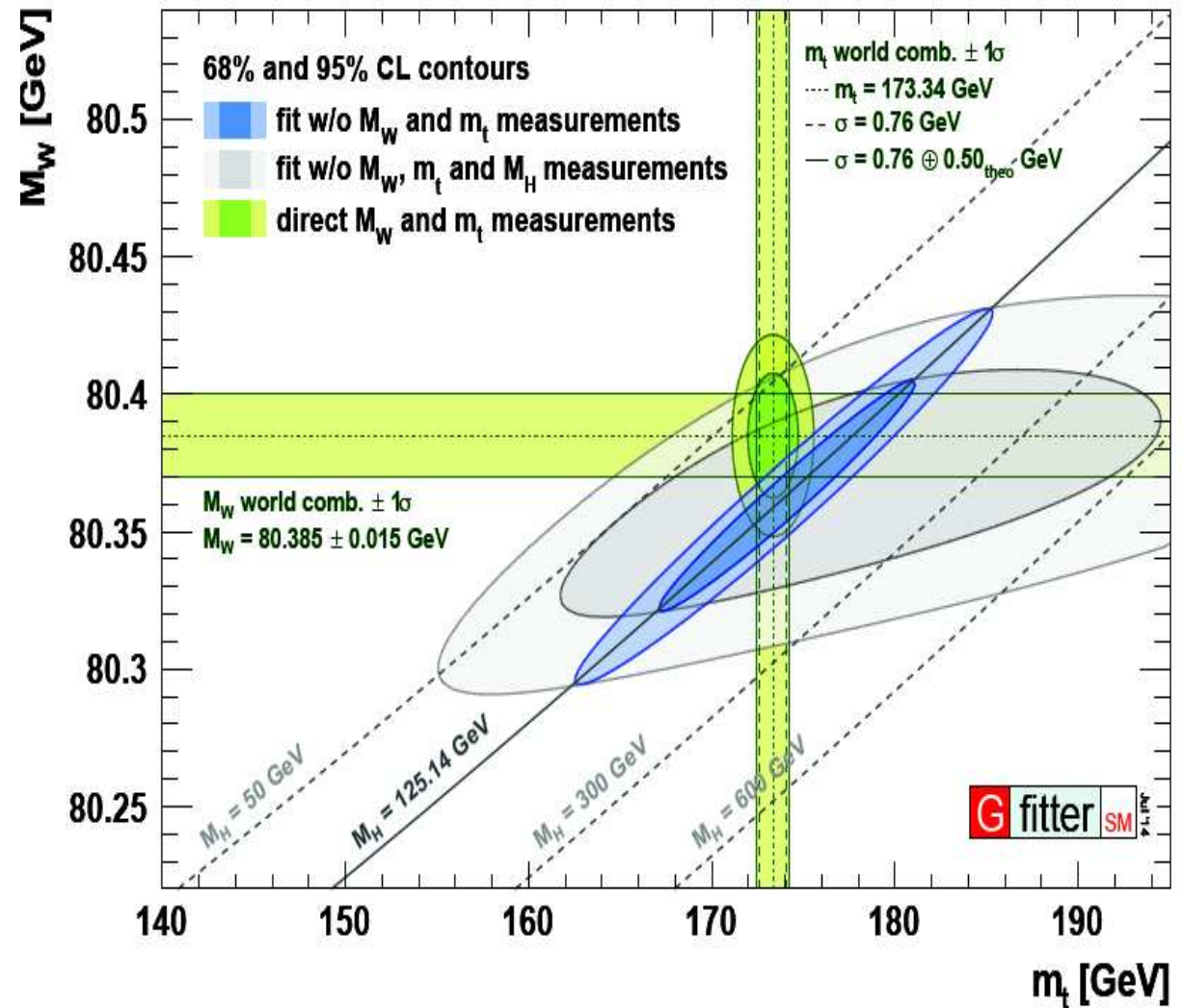
Higgs w LHC

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.

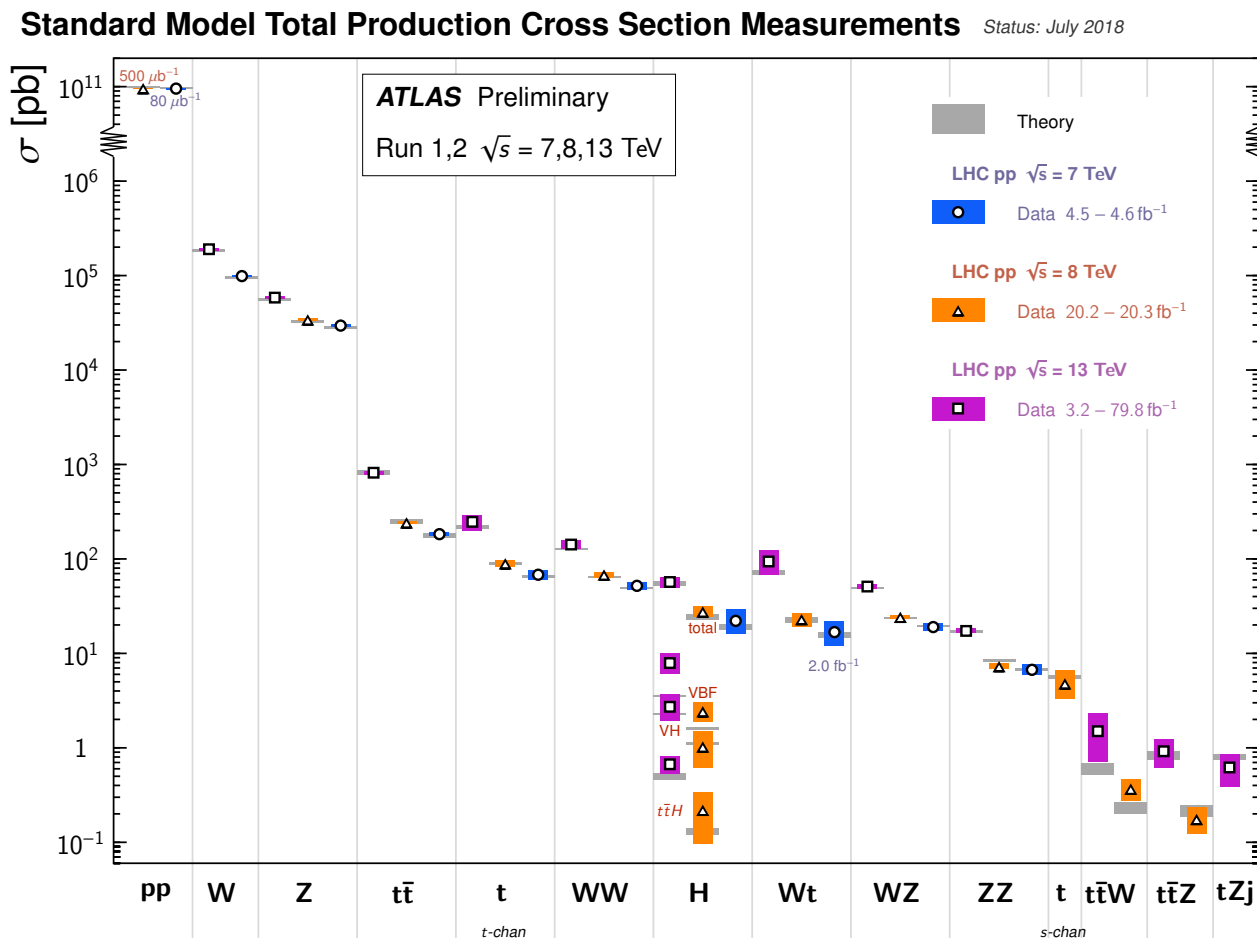
Wszystko się zgadza...



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!