

Eksperymentalna fizyka cząstek elementarnych

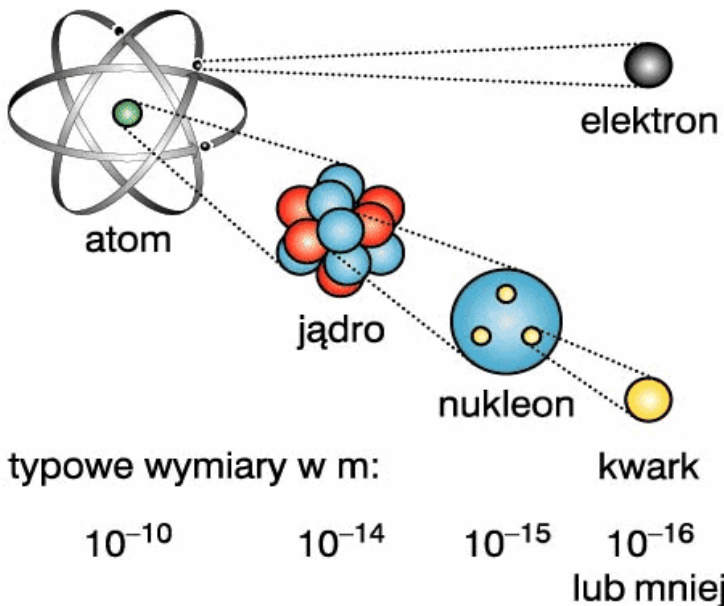
Fizyka wysokich energii

**Badania fundamentalnych / elementarnych składników materii
i ich oddziaływań**



Badanie struktury materii na coraz mniejszych odległościach

Złożona struktura materii



Procesy rozproszeniowe są tradycyjną metodą badania struktury materii

Przestrzenna zdolność rozdzielcza Δr

cząstki rozpraszanej na badanym obiekcie :

$$\Delta r \sim \hbar c / q$$

$\hbar \equiv h / 2\pi$ – zredukowana stała Plancka

($\hbar c = 0.197 \text{ GeV} \cdot \text{fm}$, $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$

c – prędkość światła)

q – przekaz (cztero)pędu pomiędzy
cząstką -"sondą" i badanym obiektem

Dualizm korpuskularno – falowy :

cząstkom o dużej energii odpowiadają małe długości fal de Broglie'a

$\lambda = h / p$ (dla cząstki o pędzie $(p \cdot c) = 1 \text{ GeV}$, $\lambda \sim 1 \text{ fm}$)



wysoka zdolność rozdzielcza

Wysokie energie cząstek :



**duża energia dostępna dla produkcji nowych cząstek,
także tych o dużej masie ($E = mc^2$)**

Elementarne składniki materii

- **Cząstki elementarne :**
są punktowe, nie posiadają wewnętrznej struktury ani stanów wzbudzonych
- Historycznie, **do początku lat 30-tych**, za cząstki elementarne uważano składniki atomów i jąder atomowych : **protony, neutrony i elektrony** oraz **fotony** (kwanty pola elektromagnetycznego) i **neutrino** (elektronowe), powstające w rozpadach β jąder.
- Według współczesnej wiedzy "naprawdę" **elementarne są kwarki i leptony** oraz tzw. **bozony pośredniczące** (**fotony, gluony i bozony $W^\pm$ i Z^0**), będące nośnikami oddziaływań m-dzy fundamentalnymi składnikami materii.
- Potocznie terminem cząstka elementarna określa się obiekty mikroświata niebędące atomami i jądrami atomowymi, większość z nich ma wewnętrzną strukturę i nie wchodzi w skład otaczającej nas (normalnej) materii.

Krótką historia fizyki cząstek

- Początek fizyki cząstek sięga odkryć :

promieni X przez **W. C. Roentgena** - 1895, promieniowanie elektromagnetyczne o energii w zakresie 120 eV – 120 keV,

elektronu przez **J. J. Thomsona** - 1897, eksp. z promieniami katodowymi,

promieniotwórczości naturalnej przez **A. H. Becquerela oraz Piotra Curie i**

Marię Curie - (1896 – 1898), promieniowanie α , β i γ ,

prom. α - jądra helu, β - elektrony i γ - fotony o energii $E > 100$ keV

- **1905** **Utożsamienie fotonu z kwantem pola elektromagnetycznego**
(interpretacja zjawiska fotoelektrycznego przez **A. Einsteina**)

- **1909 – 1911** **E. Rutherford, H. Geiger i E. Marsden**

Rozpraszanie cząstek α (pod dużymi kątami !) na foliach aluminiowych

➡ **odkrycie jądra atomowego**

Do roku 1932 powstało kilka elektronowo-protonowych modeli jądra
(ewolucja poglądów E. Rutherforda nt. ładunku jądra atomowego
- wg. wykładu prof. A. K. Wróblewskiego ” Fizyka XX wieku”)

Ewolucja poglądów Rutherforda o ładunku jądra atomu

„Zaczynam sądzić, że centralny rdzeń [atomu] jest naładowany ujemnie, ponieważ w przeciwnym wypadku prawo absorpcji promieni beta byłoby inne od tego, które obserwujemy.”

Rutherford w liście do W.H. Bragga, 9 II 1911 r.

„...atom składa się z centralnego punktowego ładunku elektrycznego...otoczonego przez równy co do wielkości ładunek przeciwnego znaku rozłożony równomiernie wewnątrz sfery...”

Abstrakt artykułu, 7 III 1911 r.

„...atom zawiera w środku ładunek $\pm Ne$ otoczony ładunkiem $\mp Ne$ rozłożonym równomiernie wewnątrz sfery o promieniu R ...”

Publikacja w Phil. Mag. 21, 669 (Maj 1911 r.)

„Zakładam, że atom składa się z dodatnio naładowanego jądra o małych rozmiarach.... Jądro jest otoczone przez elektrony, aby atom był jako całość obojętny elektrycznie...”

Publikacja w Phil. Mag. 27, 488 (Marzec 1914 r.)

- **1912 Odkrycie przez V. Hessa promieniowania kosmicznego ,**

promieniowania jonizującego docierającego do Ziemi z przestrzeni kosmicznej, w locie balonowym na wysokości ponad 5000 m

Skład promieni kosmicznych (dot. cząstek naładowanych) :

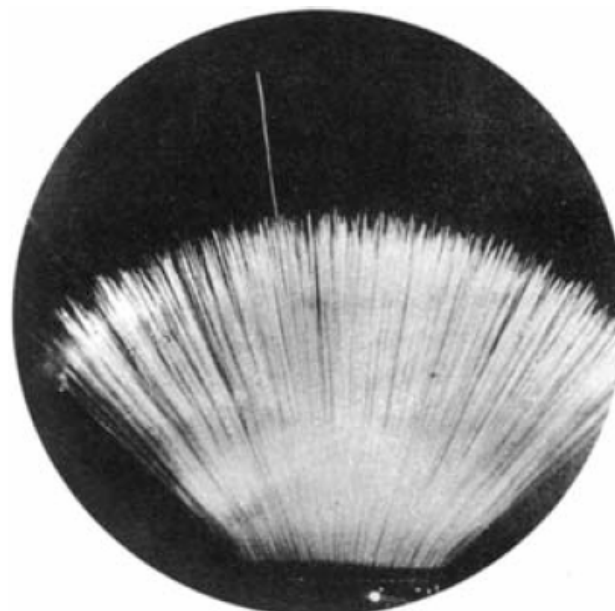
protony (jądra atomów wodoru) ~90%, jądra helu ~9%, jądra cięższych pierwiastków, śladowy strumień elektronów, pozytonów i antyprotonów ...

Do początku lat 50-tych promienie kosmiczne stanowiły jedyne źródło cząstek wysokich energii, odkryto w nim wiele nowych cząstek

- **1912 Zbudowanie komory mgłowej przez C. T. R. Wilsona**



Lądowanie Hessa w 1912 r



Tory cząstek α ze źródła promieniotwórczego w komorze mgłowej

• 1919 **Odkrycie protonu przez E. Rutherforda**

Pierwsza obserwowana reakcja jądrowa – zderzenia cząstek α z azotem

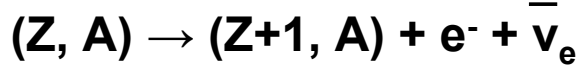


➡ **jądra wodoru $\equiv$ protony są elementarnymi składnikami jąder azotu**

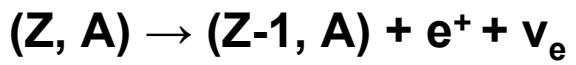
Rutherford postulował również istnienie w jądrze składników neutralnych
- neutronów

• 1930 **W. Pauli – hipoteza o istnieniu neutrina**

Obserwacja jądrowych rozpadów β :



A - liczba masowa



Z - liczba atomowa

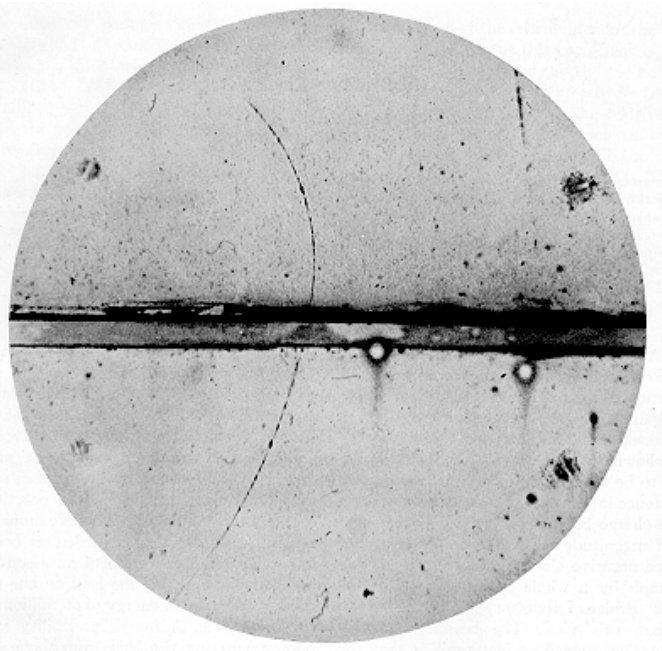
Gdyby neutrino nie pojawiało się w tych reakcjach, to rozpady β byłyby dwuciałowe i energia emitowanego elektronu byłaby stała, np.

$E_e = \Delta M = M(Z, A) - M(Z+1, A)$, gdzie zaniedbano energię odrzutu jądra.

Obserwowano ciągłe widmo energii elektronów ➡ **emisja nowej cząstki o zerowym ładunku elektrycznym, spinie $\frac{1}{2}$ i znikomej masie, słabo oddziałującej z materią.**

• 1932 Odkrycie pierwszej antycząstki, pozytonu, przez C. Andersona

Pozyton (ang. positron) jest antycząstką elektronu



Physical Review **43**, 491 (1933)

Ślad pozytonu z promieniowania kosmicznego zarejestrowany w komorze mgłowej umieszczonej w polu magnetycznym. Naładowana dodatnio cząstka porusza się do góry – po przejściu przez metalową płytę jej pęd ulega zmniejszeniu i dlatego krzywizna toru w górnej części komory jest większa. Długi zasięg górnego śladu wskazuje na to, że tor nie pochodzi od protonu. Oszacowanie masy : $m_+ \leq 20m_e \ll m_p$

Antycząstki – każdej cząstce elementarnej przyporządkowana jest antycząstka o takiej samej masie i czasie życia oraz mająca odwrotny znak wszystkich liczb kwantowych (np. ładunku elektrycznego, momentu magnetycznego, liczby barionowej, leptonowej, zapachu).

Dla cząstek o spinie $\frac{1}{2}$ (fermionów) **istnienie antycząstek zostało przewidziane w roku 1931 przez P. Diraca** i było konsekwencją zastosowania do opisu elektronu szczególnej teorii względności i mechaniki kwantowej.

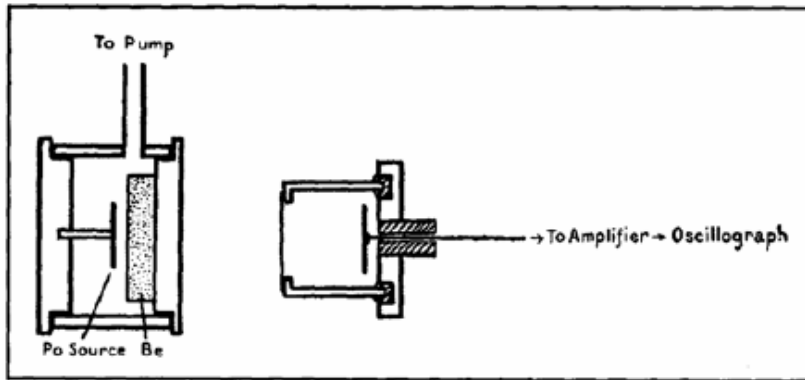
„Często spotyka się w literaturze stwierdzenie, że odkrycie pozytonu było konsekwencją jego teoretycznego przewidzenia przez Diraca, ale to nie jest prawda. Odkrycie pozytonu było całkowicie przypadkowe. Mimo tego, że podana przez Diraca relatywistyczna teoria elektronu była właściwą teorią dla pozytonu, oraz mimo tego, że niemal wszyscy fizycy wiedzieli o istnieniu tej teorii, nie odegrała ona absolutnie żadnej roli w odkryciu pozytonu.”

Carl Anderson

Cytat z wykładu AKW

• 1932 Odkrycie swobodnego neutronu przez J. Chadwicka

Naświetlanie berylu cząstkami α z rozpadu promieniotwórczego polonu prowadzi do emisji "promieniowania berylowego", bardziej przenikliwego niż zwykłe promieniowanie γ



Obserwacja przejścia tego promieniowania przez komorę jonizacyjną $\rightarrow$ zgodność z założeniem strumienia cząstek neutralnych, **neutronów**, o masie bliskiej masy protonu
 $\alpha + {}^9\text{Be} \rightarrow {}^{12}\text{C} + n$

Iwanienko, Heisenberg :

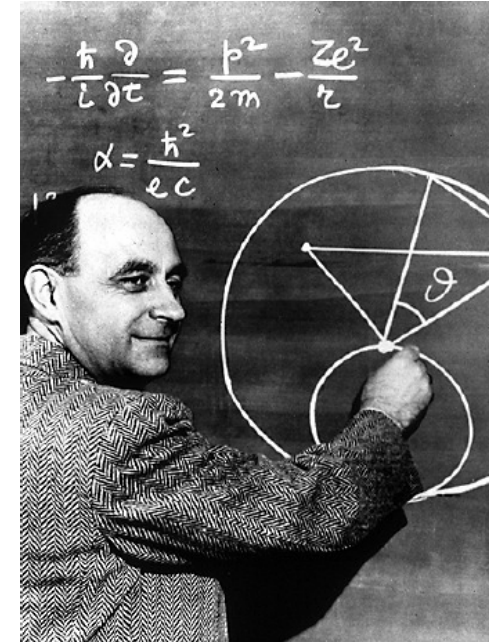
Protonowo-neutronowy model budowy jądra

• 1933 Teoria Fermiego jądrowego rozpadu β

Rozpad swobodnego neutronu lub związanego (w jądrze) neutronu / protonu poprzez oddział. słabe



- **pierwsza kwantowa teoria oddziaływań słabych** sformułowana dla nukleonów i leptonów (w tym hipotetycznego neutrina)
- oddz. słabe zachodzi w jednym punkcie czasoprzestrzeni

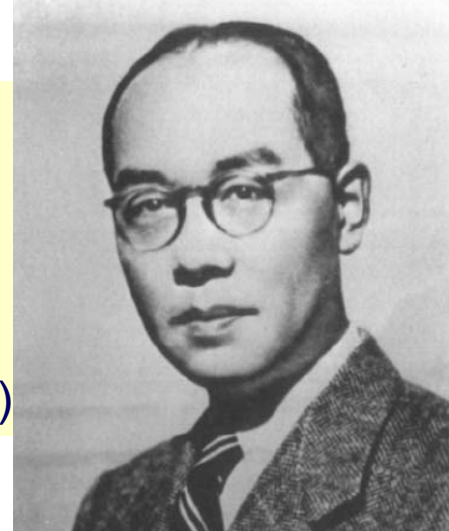


• 1933 Teoria sił jądrowych Yukawy

Krótki zasięg (~ 1 fm) silnych oddziaływań jądrowych wiążących nukleony (protony i neutrony) w jądrze **wynika z kwantowej wymiany m-dzy nimi cząstek obdarzonych masą .**

(" mezony Yukawy " o spinie zero i masie rzędu 100 MeV)

Opis naprawdę elementarnych oddziaływań silnych, zachodzących m-dzy kwarkami znajdującymi się w nukleonie jest o wiele bardziej skomplikowany niż zakładano 70 lat temu. Jednak wymiana pionów, cząstek elementarnych odkrytych w latach 40-tych i odpowiadających mezonom Yukawy, nadal jest uważana za źródło długozasięgowej części potencjału jądrowego.

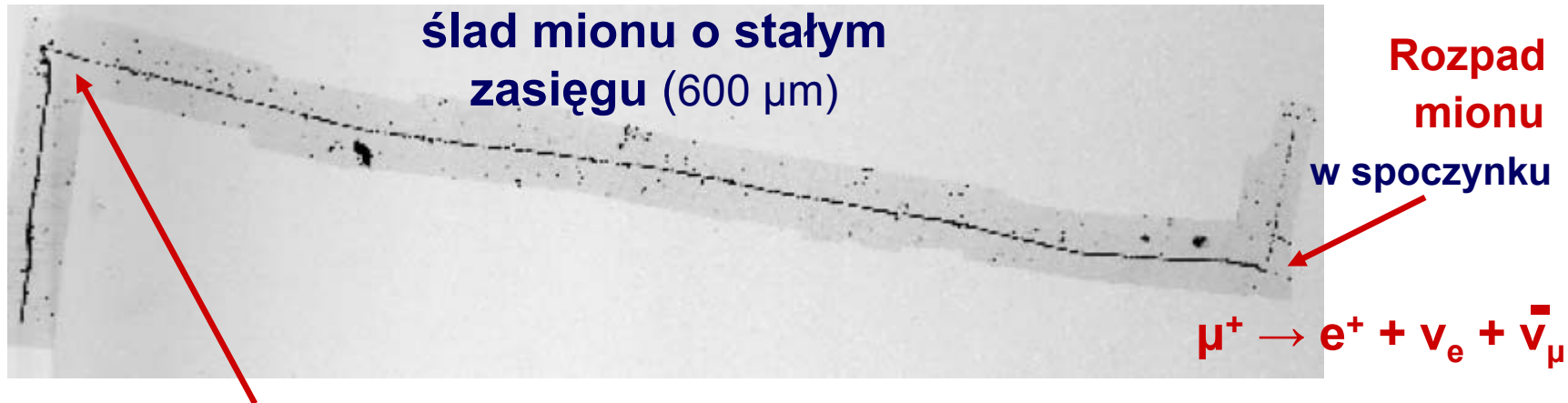


• 1937 Odkrycie mionów przez C. Andersona i S. Nedermeyera

Obserwacja w promieniowaniu kosmicznym za pomocą komory mgłowej
Początkowo uważano, że miony są przewidzianymi przez Yukawę mezonami
Później stwierdzono, że jak na cząstki Yukawy zbyt słabo oddziałują z materią i w spoczynku rozpadają się na elektrony, zamiast podlegać absorpcji w jądrach

Miony $\mu^\pm$ są niestabilnymi naładowanymi leptonami o masie $\approx 200 m_e$

• 1947 **Odkrycie naładowanych pionów, mezonów π , przez C. Powella**



Zachodzący w spoczynku **rozpad dodatniego pionu** w emulsji jądrowej poddanej działaniu promieniowania kosmicznego, $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$

Conversi, Pancini i Piccioni :

- mezony dodatnie zatrzymujące się w żelazie ulegają rozpadowi
- mezony ujemne są wychwytywane przez jądra żelaza

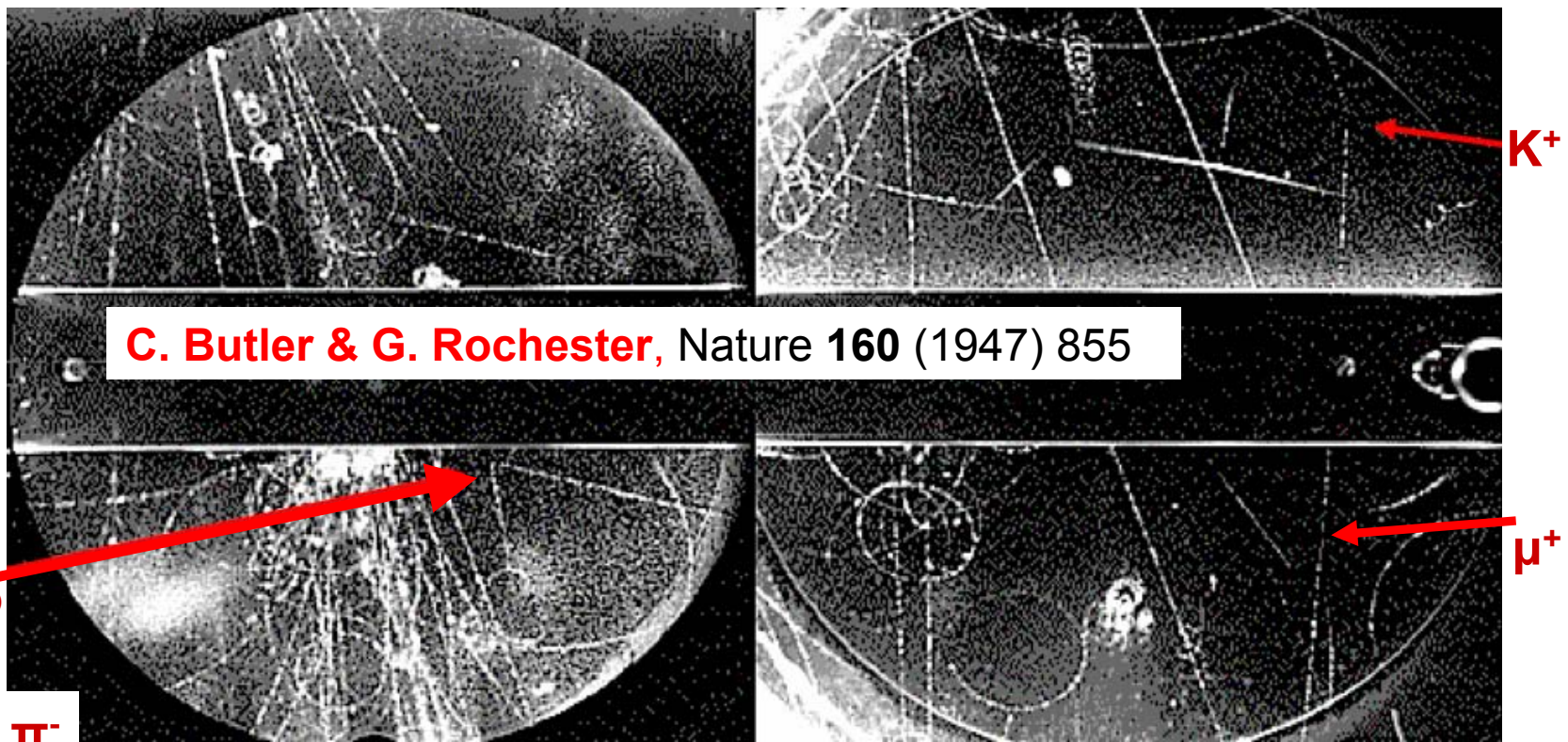
Odkrycie mezonów π było wielkim triumfem teorii Yukawy

Naładowane piony powstają w zderzeniach protonów promieniowania kosmicznego z jądrami atomów atmosfery ziemskiej i w większości rozpadają się w locie ($\tau_\pi = 25 \text{ ns}$) na miony i neutrino

Neutralne piony odkryte trochę później (1950) rozpadają się na dwa fotony w procesie elektromagnetycznym, $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$

• 1947 Odkrycie cząstek dziwnych

rozpad naładowanego kaonu
 $K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$



C. Butler & G. Rochester, Nature 160 (1947) 855

rozpad
neutralnego
kaonu

$K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$

Pierwsze **długożyciowe "cząstki V"** z prom. kosmicznego zarejestrowane w komorze mgłowej. Wkrótce w eksp. akceleratorowych stwierdzono, że **są produkowane tylko w parach** ➡ nowa liczba kwantowa **dziwność** (1953).

Cząstki dziwne produkują się z zachowaniem dziwności w oddziaływaniach silnych, natomiast rozpadają się poprzez niezachowujące dziwności oddziaływania słabe

~1950 **Renesans badań w fizyce cząstek elementarnych**

Odkrycie w promieniowaniu kosmicznym nowych cząstek elementarnych obdarzonych dziwnością (mezonów i barionów) wpłynęło na **budowę akceleratorów wysokich energii opartych na zasadzie synchrotronu**

Pierwsze synchrotrony protonowe w USA :

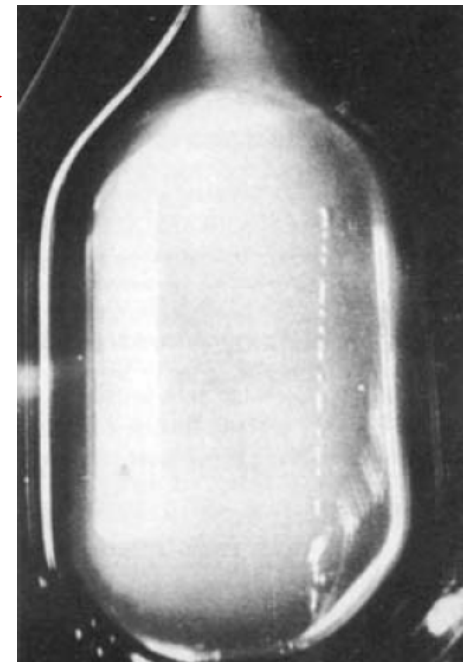
1952 $E_p = 3 \text{ GeV}$ Cosmotron w Brookhaven National Laboratory

1954 $E_p = 6 \text{ GeV}$ Bevatron w Lawrence Berkley Laboratory

1950 Budowa pierwszego licznika scyntylacyjnego, komory iskrowej oraz detektora półprzewodnikowego

1952 Pierwsza komora pęcherzykowa Glasera →

Tory
w wodorowej
komorze o
średnicy 3.5 cm



1952 Zasada silnego ogniskowania dla synchrotronów



Wielkie osiągnięcia teoretyczne : elektrodynamika kwantowa

QED – kwantowa teoria pola opisująca oddziaływanie cząstek naładowanych elektrycznie poprzez wymianę kwantów pola elektromagnetycznego, fotonów

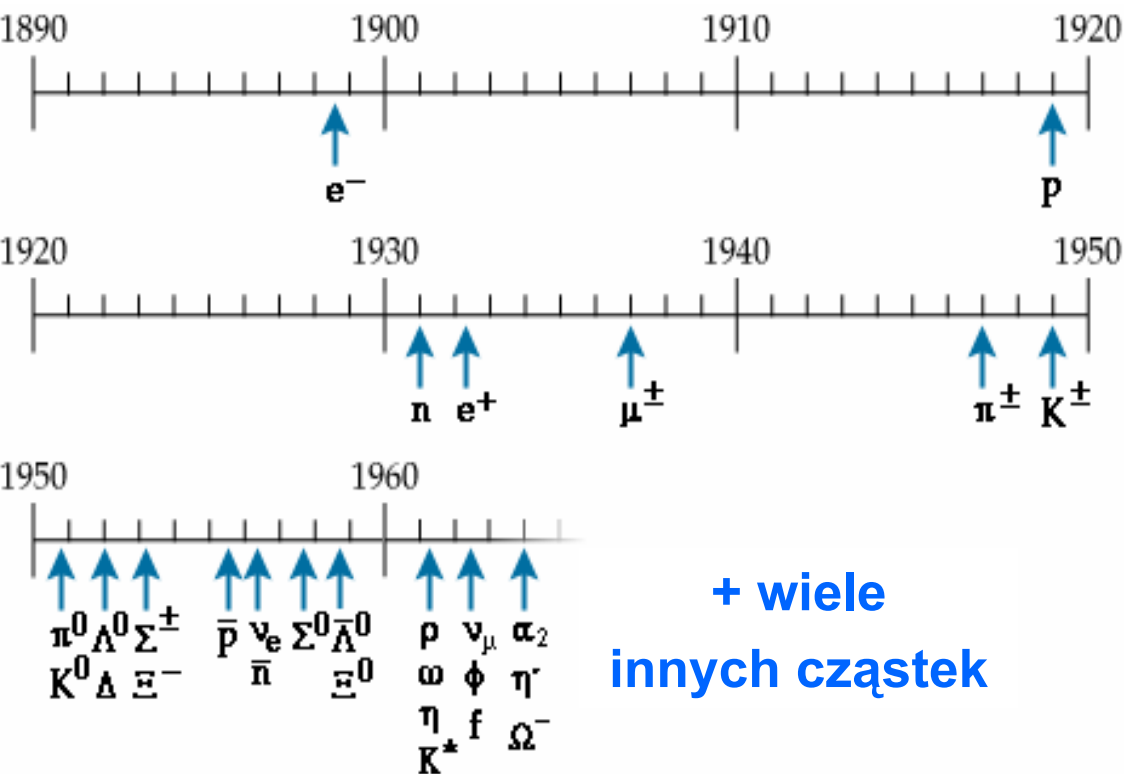
1948 – 1951 **J. Schwinger, R. Feynman i S. Tomonaga** rozwinęli niezależnie nowy formalizm QED, stosując procedurę renormalizacji w celu uniknięcia nieskończoności w obliczeniach
F. Dyson wykazał, że te trzy formalizmy QED są równoważne



QED jest modelowym przykładem kwantowej teorii pola
(renormalizowalność + niezmienniczość względem cechowania)

● Początek lat sześćdziesiątych

- ▶ silna ewidencja doświadczalna na **istnienie bardzo dużej liczby "cząstek elementarnych"**, zarówno długo- jak i krótkożyciowych (rozpadające się przez oddz. silne "rezonanse")
- ▶ **brak idei teoretycznej** porządkującej tą wiedzę i wyjaśniającej prawidłowości w stanach hadronowych



▶ **1964** przełomowa idea M. Gell-Mana i G. Zweiga

hadrony, cząstki oddział. silnie, składają się z **kwarków** (up, down, strange – u, d, s)

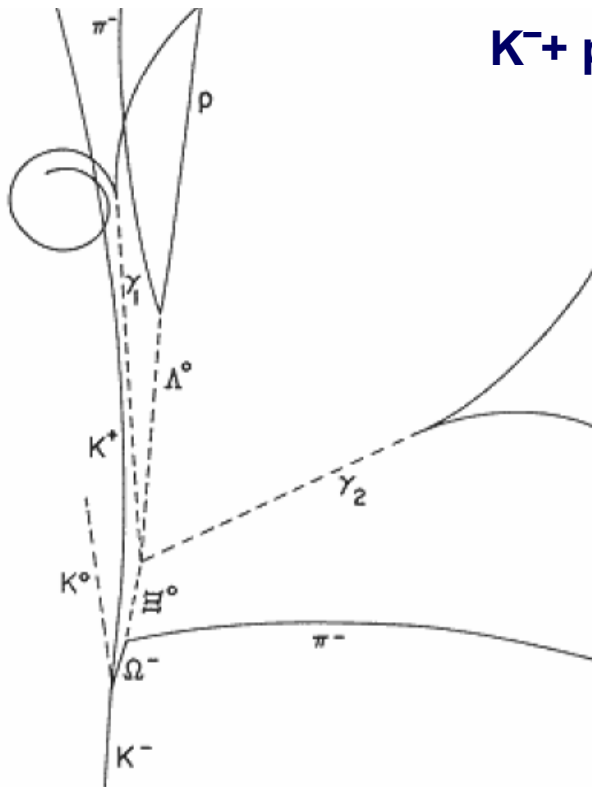
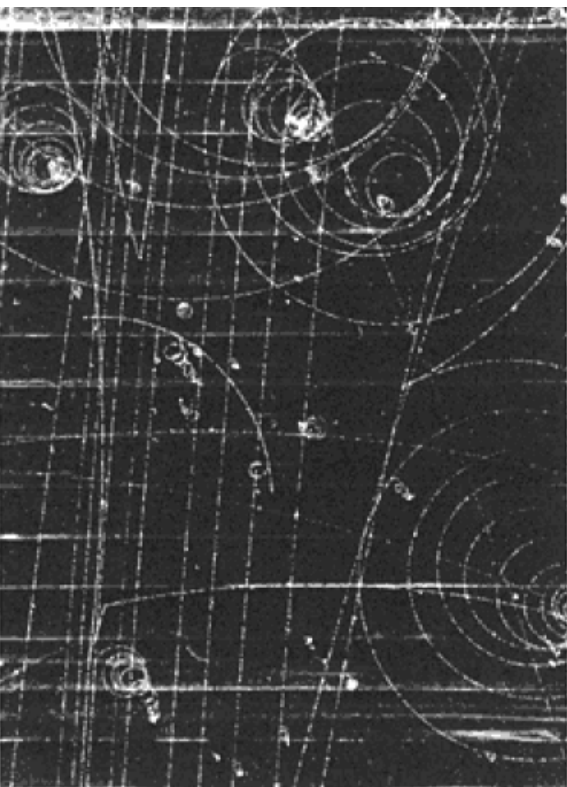
bariony : trzy kwarki

mezony : kwark – antykwark

kwarki mają ułamkowe ładunki elektryczne i spin 1/2

- 1964 odkrycie cząstki Ω^-

Model kwarków przewidywał istnienie nowego barionu składającego się z trzech kwarków dziwnych. Jego odkrycie w Brookhaven National Laboratory było dużym sukcesem tej teorii i przyczyniło się do jej akceptacji.



↓ rozpad słaby
 $\Xi^0 + \pi^-$ ($\Delta S = 1$)

↓
 $\pi^0 + \Lambda^0$ ($\Delta S = 1$)

$$\downarrow$$

$$\pi^- + p \quad (\Delta S = 1)$$

rozpady elektromagnetyczne

$$\rightarrow Y + Y$$

↓ ↓

e^+e^- e^+e^-

Kwarki wyjaśniały statyczne własności hadronów i służyły do ich klasyfikacji, traktowano je jako obiekty matematyczne.

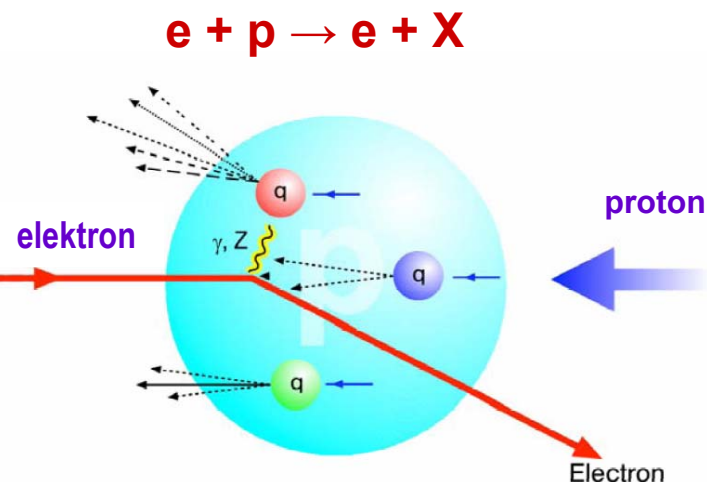
• 1968 Odkrycie struktury partonowej protonu

Eksperymenty w Stanford (SLAC)

Lata 50-te i 60-te elastyczne rozpraszanie elektronów na jądrach i protonach
(R. Hofstadter) ➡ promień / rozkład ładunku w jądrach i nukleonach

1968 głęboko nieelastyczne rozpraszanie elektronów na protonach (DIS)
i odkrycie skalowania Bjorkena

R. Feynman - model kwarkowo-partonowy : elektrony rozpraszają się niekoherentnie na punktowych, swobodnych składnikach protonu – partonach



Partony : kwarki, kwarki rzeczywiście istnieją !!

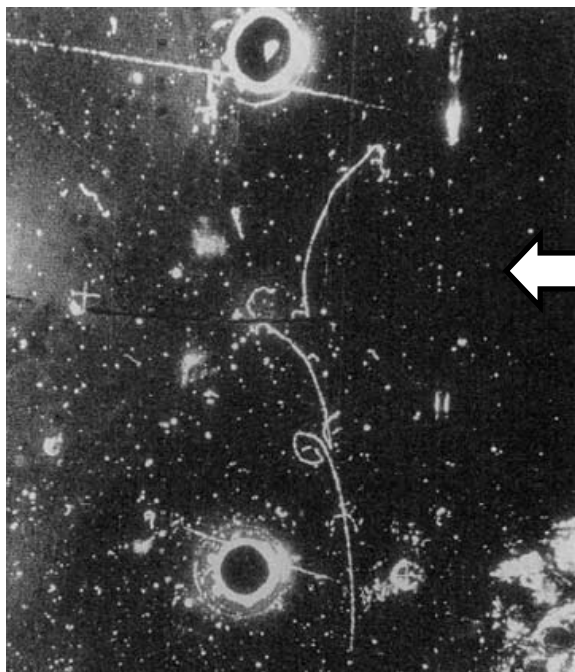
Model partonowy ulepszony przez współczesną teorię oddziaływań silnych (uwzględniając oddziaływania m-dzy kwarkami poprzez wymianę gluonów) - chromodynamikę kwantową (QCD)

➡ **partony : kwarki + gluony**

Badania procesów DIS w oddziaływaniach lepton – nukleon miały duży wpływ na rozwój i rozumienie QCD

Teoria oddziaływań elektroslabych (S. Glashow, A. Salam, S. Weinberg)

- Oddziaływania elektroslabe zachodzą poprzez wymianę wektorowych ($J^P = 1^-$) bozonów pośredniczących W^+ , W^- , Z^0 i γ .
- Symetria m-dzy oddziaływaniami słabymi i elektromagnetycznymi dla procesów przy bardzo dużych przekazach czteropędu
- Spontaniczne łamanie symetrii i mechanizm Higgsa



CERN
komora pęcherzykowa

1973 odkrycie słabych
prądów neutralnych
(wymiana Z^0)

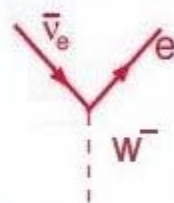
$$\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$$

sygnatura W
lepton z dużym p_T

1983 odkrycie bozonów $W^\pm$ i Z^0
na zderzaczu $p\bar{p}$ ($E_{CM} = 540 \text{ GeV}$)

$$p + \bar{p} \rightarrow W^\pm + X, p + \bar{p} \rightarrow Z^0 + X$$

$$W \rightarrow l + \nu_l, Z^0 \rightarrow l^+ + l^-$$



CERN



Chromodynamika kwantowa - współczesna teoria oddziaływań silnych

- Lata 60-te**
- bardzo duża ilość faktów doświadczalnych
 - brak powszechnie akceptowanego opisu teoretycznego oddziaływań silnych

Bardzo ważne dla rozwoju teorii okazały się :

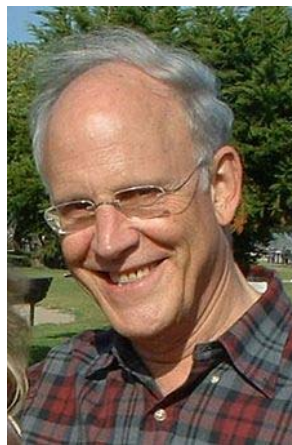
klasyfikacja hadronów w modelu kwarków (koncepcja koloru) + eksp. DIS

1973 chromodynamika kwantowa (QCD) – kwantowa teoria pola opisująca oddziaływania m-dzy kolorowymi kwarkami poprzez wymianę gluonów, 8 bezmasowych kwantów pola chromodynamicznego o spinie 1

1973 asymptotyczna swoboda QCD (D. Gross, H. Politzer, F. Wilczek)
obdarzone ładunkiem kolorowym gluony oddziałują ze sobą



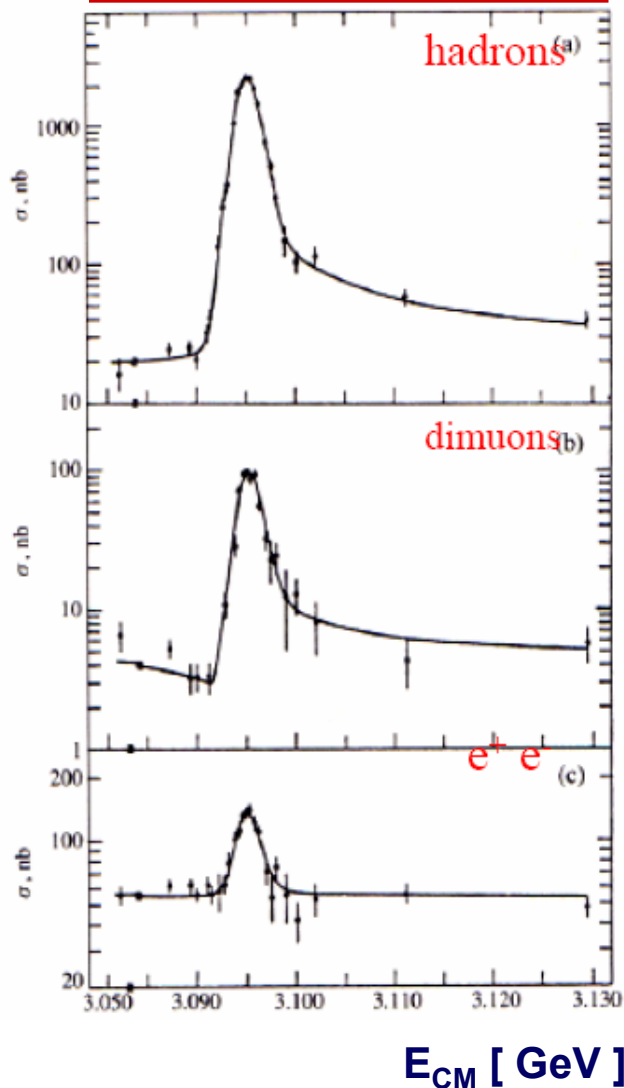
**Siła oddziaływania
między kwarkami i gluonami
maleje na małych odległościach**



• 1974 Odkrycie cząstki J/ψ ("rewolucja listopadowa")

SLAC (B. Richter)

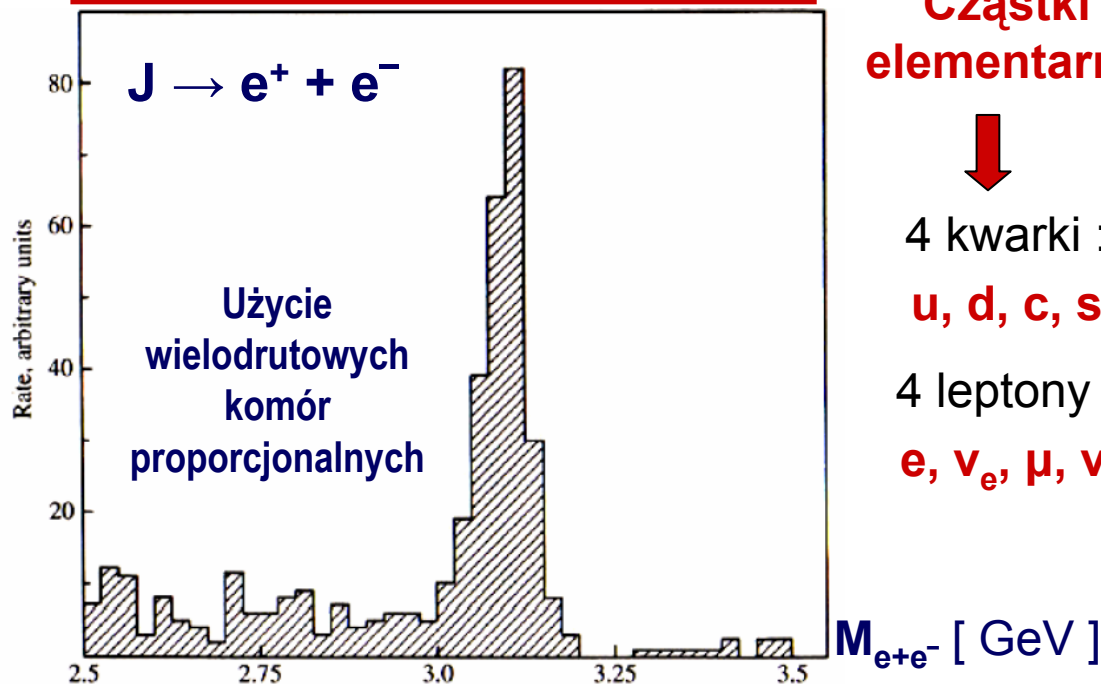
$$e^+ + e^- \rightarrow \psi$$



► 1970 hipoteza Glashowa, Iliapolousa i Maianiego o istnieniu czwartego kwarka (**charmed quark**)

Brookhaven (S. Ting)

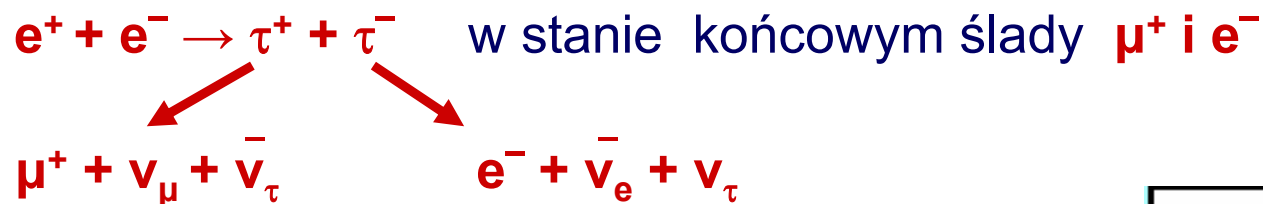
$$p + Be \rightarrow J + X$$



J/ψ $M = 3096 \text{ MeV}$, $\Gamma = 91 \text{ keV}$
 stan związany ciężkiego kwarka powabnego
 i jego antycząstki ($c\bar{c}$)

• 1975 Odkrycie ciężkiego naładowanego leptonu τ

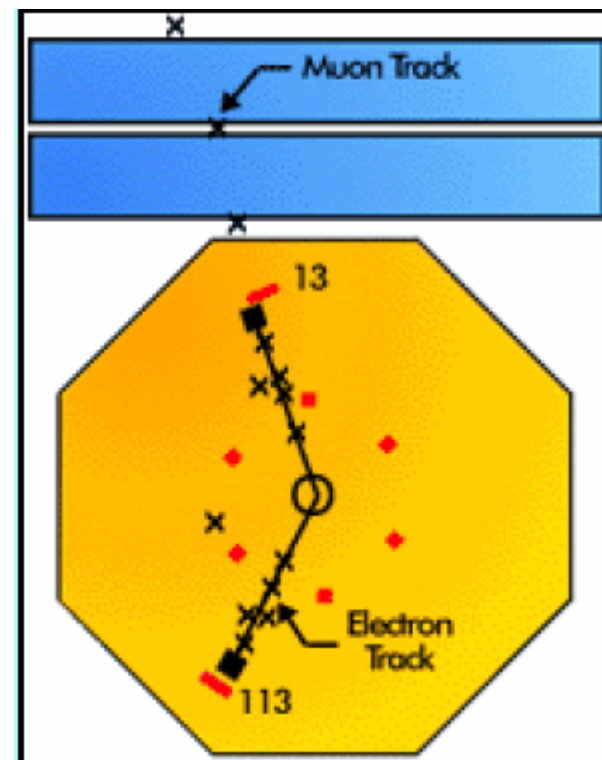
zderzacz e^+e^- w Stanford (SLAC), M. Perl



Zachowanie przekroju czynnego i jego wielkość zgodne z produkcją punktowej cząstki Diraca o spinie $\frac{1}{2}$

Masa $\tau \sim 1777 \text{ MeV} \sim 3480 m_e$

τ jest jedynym naładowanym leptonem, który oprócz rozpadów czysto leptonowych posiada również rozpady na hadrony

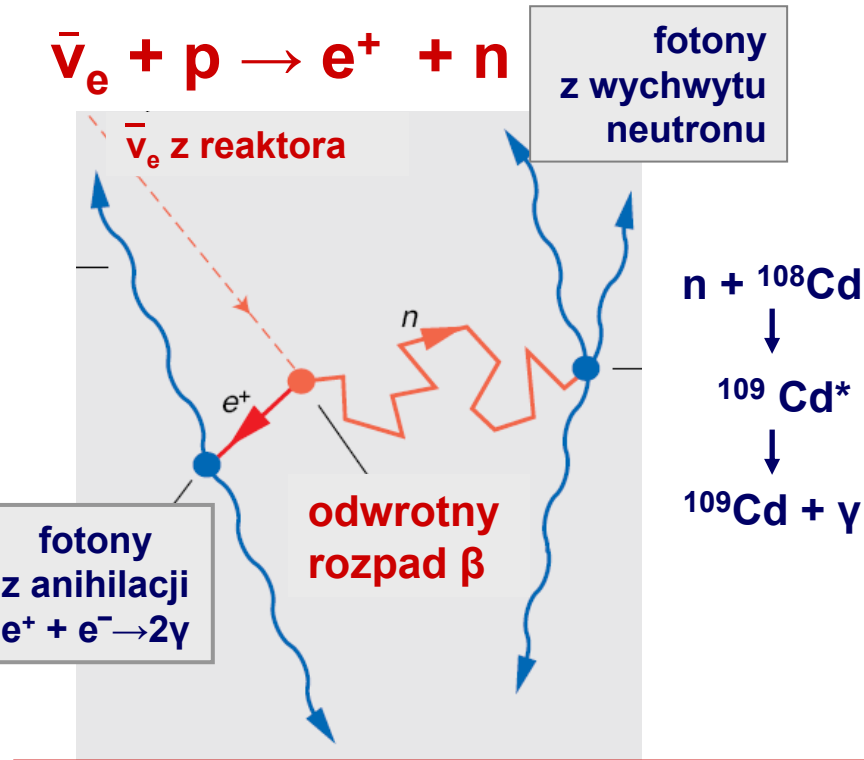


Odkrycie τ wpłynęło na poszukiwania towarzyszącego mu neutrino taonowego i nadzieję na odkrycie kwarków trzeciej generacji

• **Odkrycia neutrin elektronowych, mionowych i ...**

1956 eksperyment Reinesa – Cowana

Detekcja oddziaływań antyneutrin elektronowych z reaktora Savannah River w zbiorniku (H₂O + CdCl₂) otoczonym licznikami scyntylacyjnymi



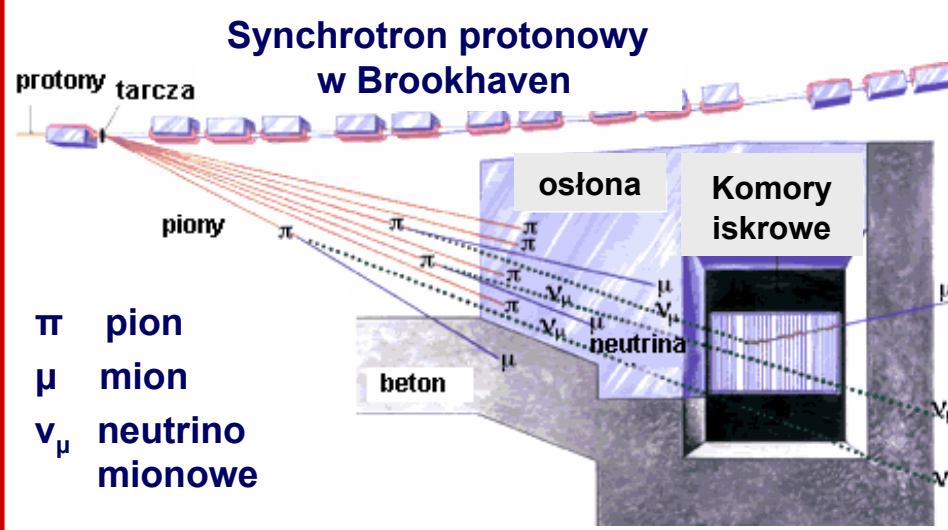
Detekcja fotonów z wychwytu neutronu 5 μ s po sygnale anihilacji pozytonu

1962 odkrycie neutrina mionowego

M. Lederman, M. Schwartz i J. Steinberger

brak rozpadu $\mu \rightarrow e + \gamma$ (foton)
➡ istnienie dwóch różnych neutrin ??

- **wysokoenergetyczna akceleratorowa wiązka neutrin z rozpadów $\pi \rightarrow \mu + \nu$**
 - **w wyniku oddziaływań tych neutrin z materią produkują się głównie miony**
- neutrino z rozpadu π (ν_μ) różne od neutrina (ν_e) z rozpadu jądrowego β**





Telegram Reinesa i Cowana
do Pauliego 14 VI 1956 r.

WESTERN UNION

TO: Professor W. Pauli
Zurich University
Switzerland

DATE: 14 June 1956

WE are happy to inform you that
we have definitely detected neutrinos
from a fragment of uranium
which beta decay of uranium
is a direct result of such
neutrino emission.

Yours truly,
Frederick Reines & Clyde Cowan
Box 1663 Los Alamos, New Mexico

„Jesteśmy radzi poinformować pana, że
bezsparnie zaobserwowaliśmy neutrina
z fragmentów rozszczepienia przez obserwację
odwrotnego rozpadu beta protonów.
Obserwowany przekrój czynny dobrze się zgadza
z przewidywaną wartością sześć razy dziesięć do
minus czterdziestej czwartej centymetra
kwadratowego.”



• **Odkrycie neutrino taonowego ...**

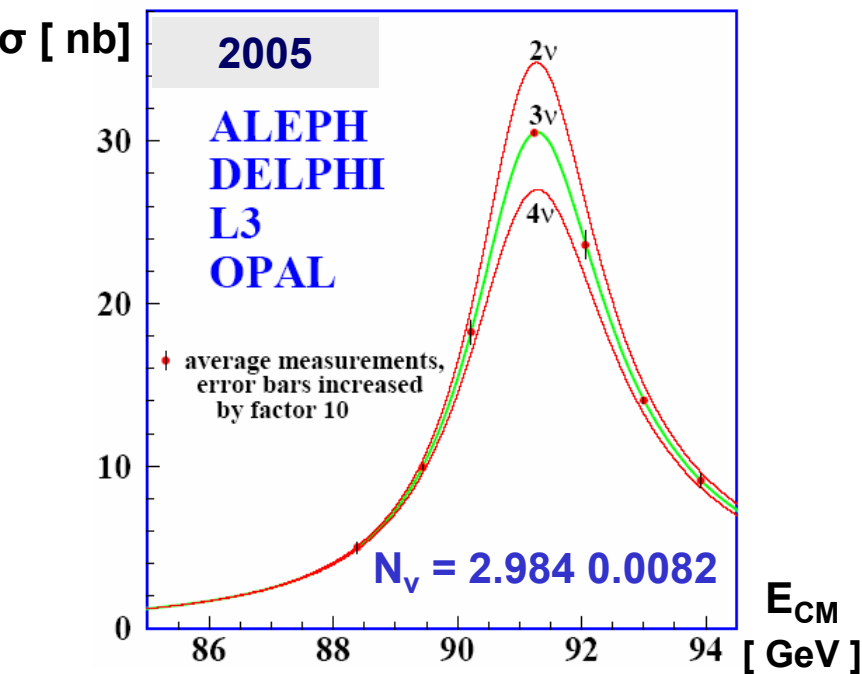
1990 liczba zapachów lekkich neutrino

Eksperymenty na wielkim zderzaczu e^+e^-
LEP w CERNie :

pomiar szerokości bozonu Z^0



istnieją 3 zapachy lekkich neutrino

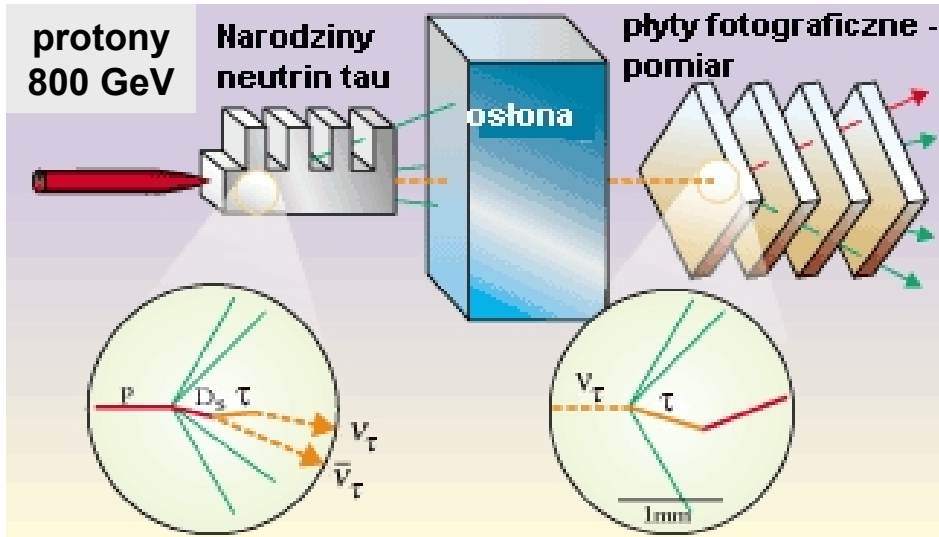


**przekrój czynny $\sigma(e^+e^- \rightarrow Z^0 \rightarrow \text{hadrony})$
w funkcji energii w układzie środka masy**

2000 eksp. DONUT w Fermilabie
Direct Observation of Nu Tau

Rejestracja oddziaływań ν_τ w tarczy z płyt
żelaznych i bloków emulsyjnych

$\nu_\tau + N \rightarrow \tau^- + X$



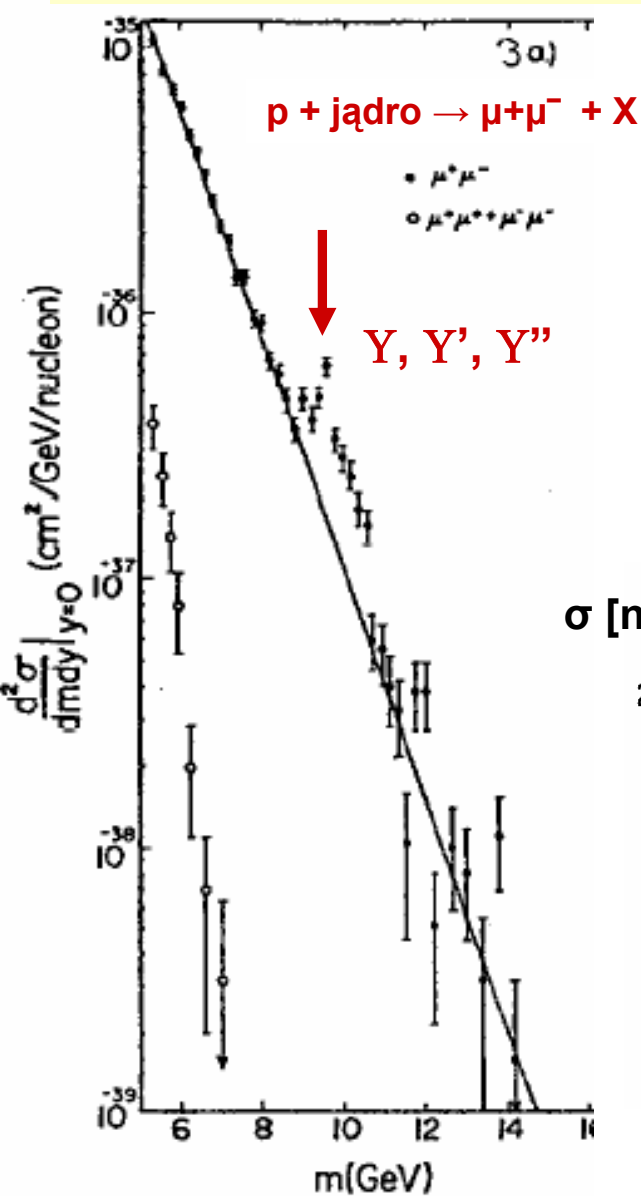
**Sygnatura leptonu τ : ślad długości ~ 1 mm
+ zakrzywienie odp. rozpadowi**

$\tau \rightarrow 1 \text{ prong} + \text{neutrals} \quad (\sim 86\%)$

**Znaleziono 4 przypadki odpowiadające
oddziaływaniom ν_τ**

• 1977 Odkrycie kwarka b (beauty / bottom, trzecia generacja kwarków, $Q = -1/3$)

Fermilab (L. Lederman *et al.*)

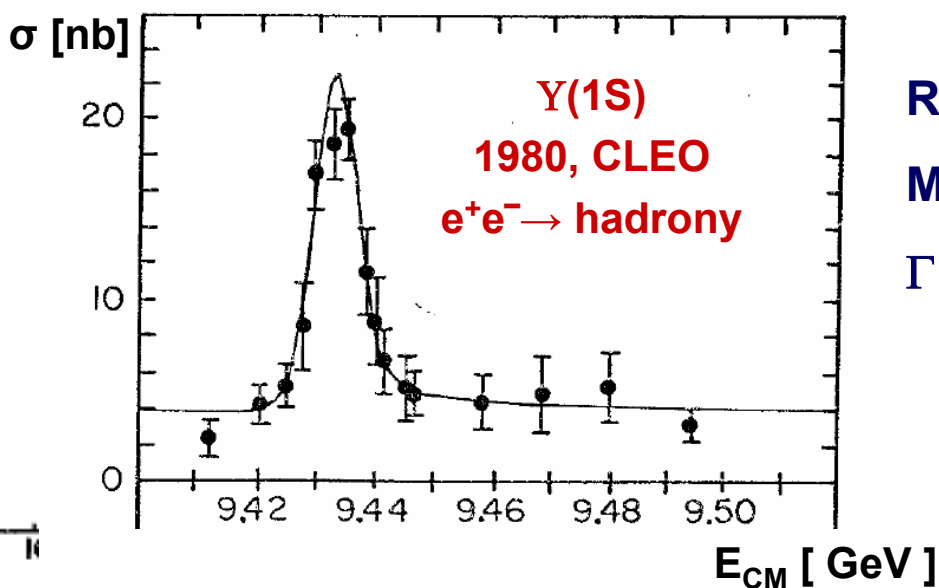


Zderzenia protonów ($E = 400 \text{ GeV}$) z j\u0105drami (Be, Cu, Pt)

Masa niezmiennicza pary mion\u00f3w – szerokie maksimum w okolicy 10 GeV

→ 2 lub 3 rezonanse o zbli\u017cyzonym masach

→ **stany zwi\u0105zane kwark\u00f3w pi\u0119knych bottomonium ($b\bar{b}$)**



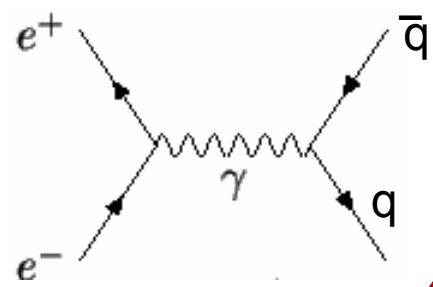
Rezonans Y
 $M = 9.46 \text{ GeV}$
 $\Gamma = 0.053 \text{ MeV}$

• 1979 odkrycie gluonów w DESY

Przewidywania chromodynamiki kwantowej : przy bardzo wysokich energiach w procesie anihilacji $e^+ + e^- \rightarrow \text{hadrony}$ ujawnia się substruktura hadronów

podstawowy proces ... + ... emisja "twardego" gluonu przez kwark

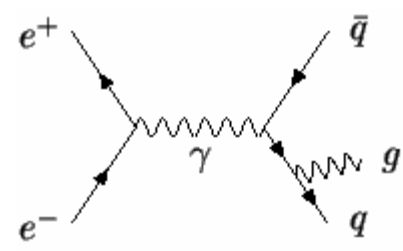
$e^+ + e^- \rightarrow q\bar{q}$



2 dżety kwarkowe

Proces
hadronizacji

$e^+ + e^- \rightarrow q\bar{q}g$



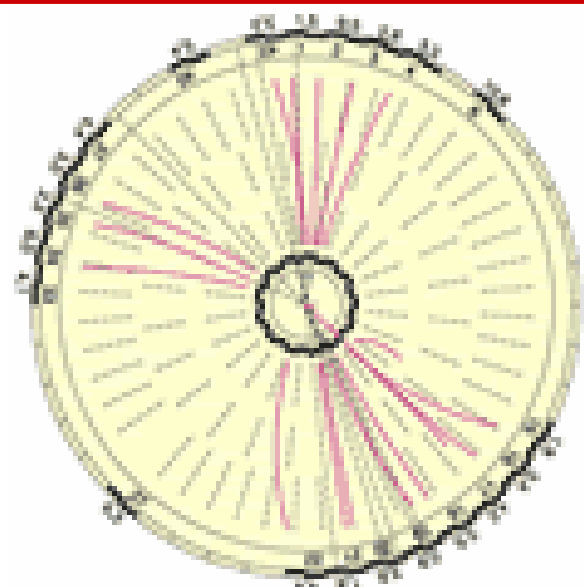
2 dżety kwarkowe + 1 dżet gluonowy

Zderzacz e^+e^- PETRA w DESY / Hamburg :
($E_{CM} = 27.4 \text{ GeV}$)

Pierwsza obserwacja przypadków 3-dżetowych
świadczących o istnieniu gluonów

Analiza rozkładów kątowych i energii dżetów

➡ gluony mają spin 1

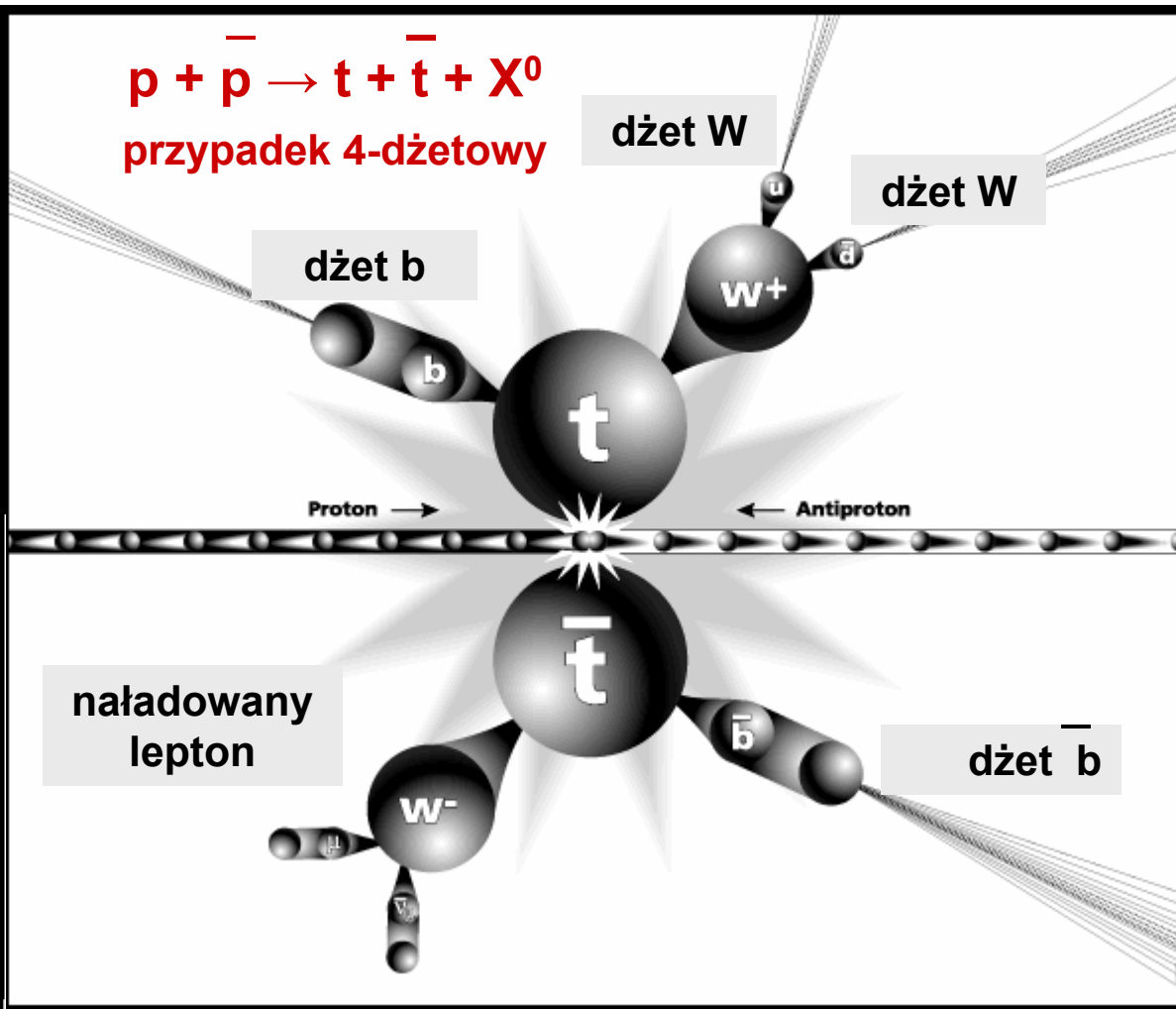
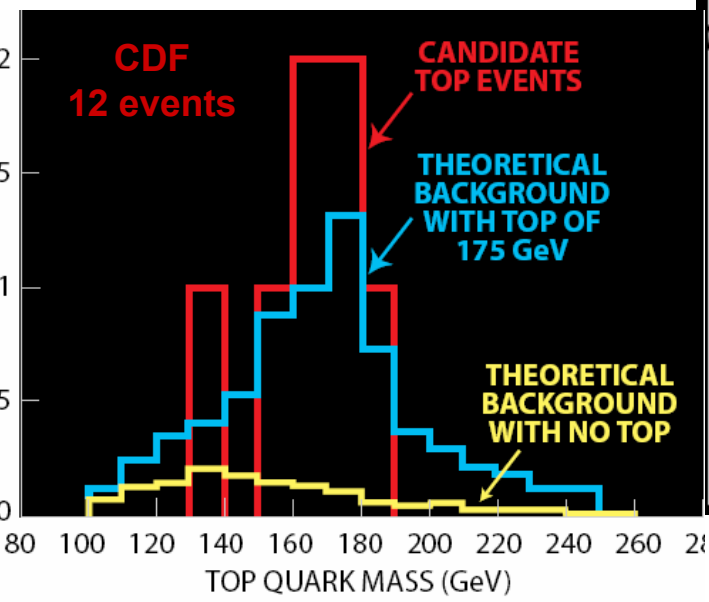


• 1995 Odkrycie kwarka t (truth / top, trzecia generacja kwarków, Q = +2/3)

Eksperymenty CDF i D0 na zderzaczu proton – antyproton w Fermilabie ($E_{CM} = 1.8 \text{ TeV}$)

Kwark t jest b. niestabilny
($\tau \sim 10^{-25} \text{ s}$) i po kreacji rozpada się zbyt szybko, aby utworzyć jakiegolwiek hadrony

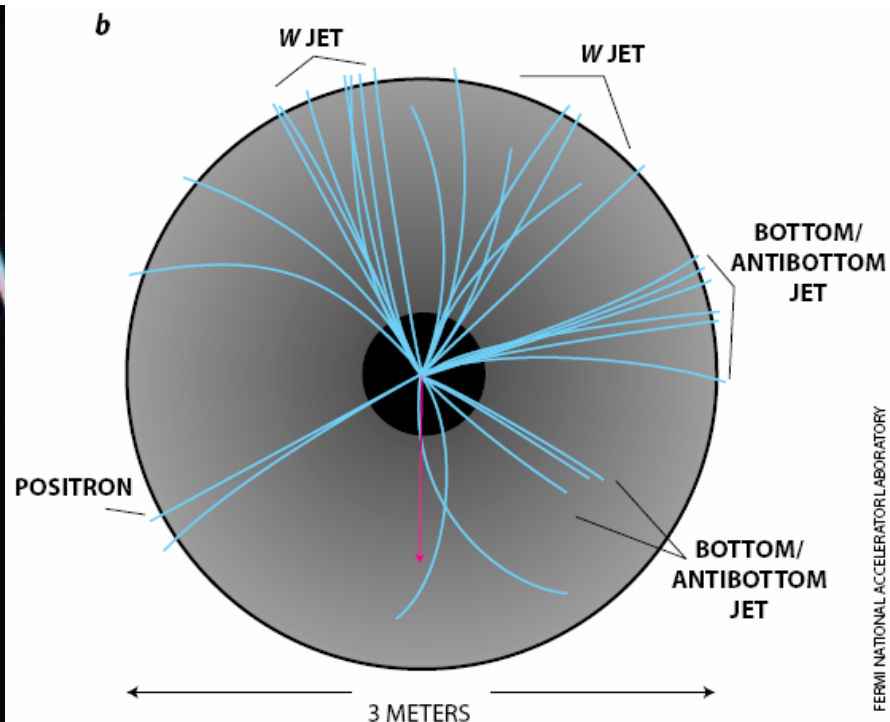
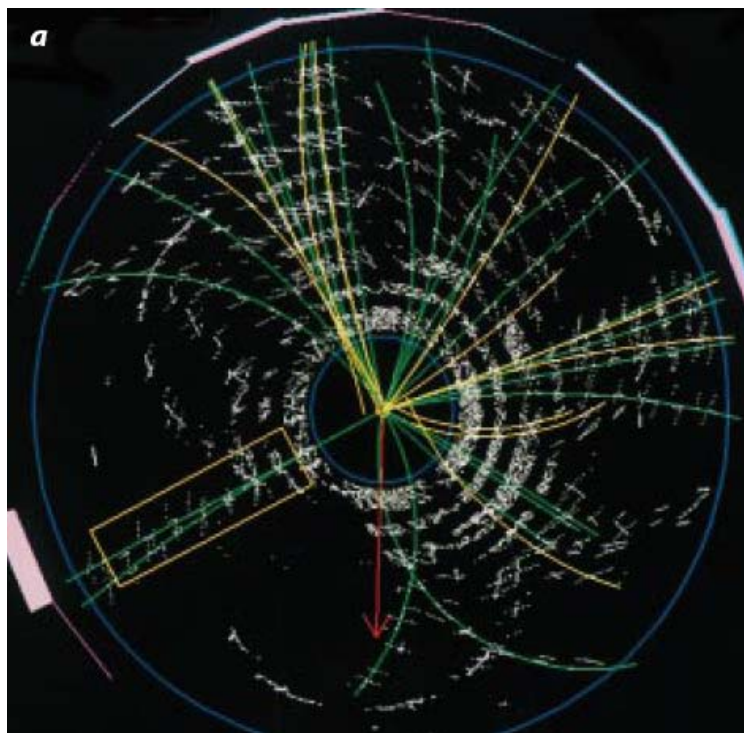
Dominujący kanał rozpadu t
 $t \rightarrow b + W^+$ ($m_t \gg m_W$)
Rozpady W^+
 $W^+ \rightarrow q_1 + \bar{q}_2$ i $W^+ \rightarrow l^+ + \nu_l$



(2008) $M_{top} = 170.9 \pm 1.1 \text{ (stat)} \pm 1.5 \text{ (syst)} \text{ GeV}/c^2$

Fermilab - odkrycie kwarka t

$$p + \bar{p} \rightarrow t + \bar{t} + X^0, t \rightarrow bW, W \rightarrow q\bar{q} \text{ lub } W \rightarrow l\nu_l$$



Model Standardowy = teoria oddziaływań elektroślabych + chromodynamika kwantowa

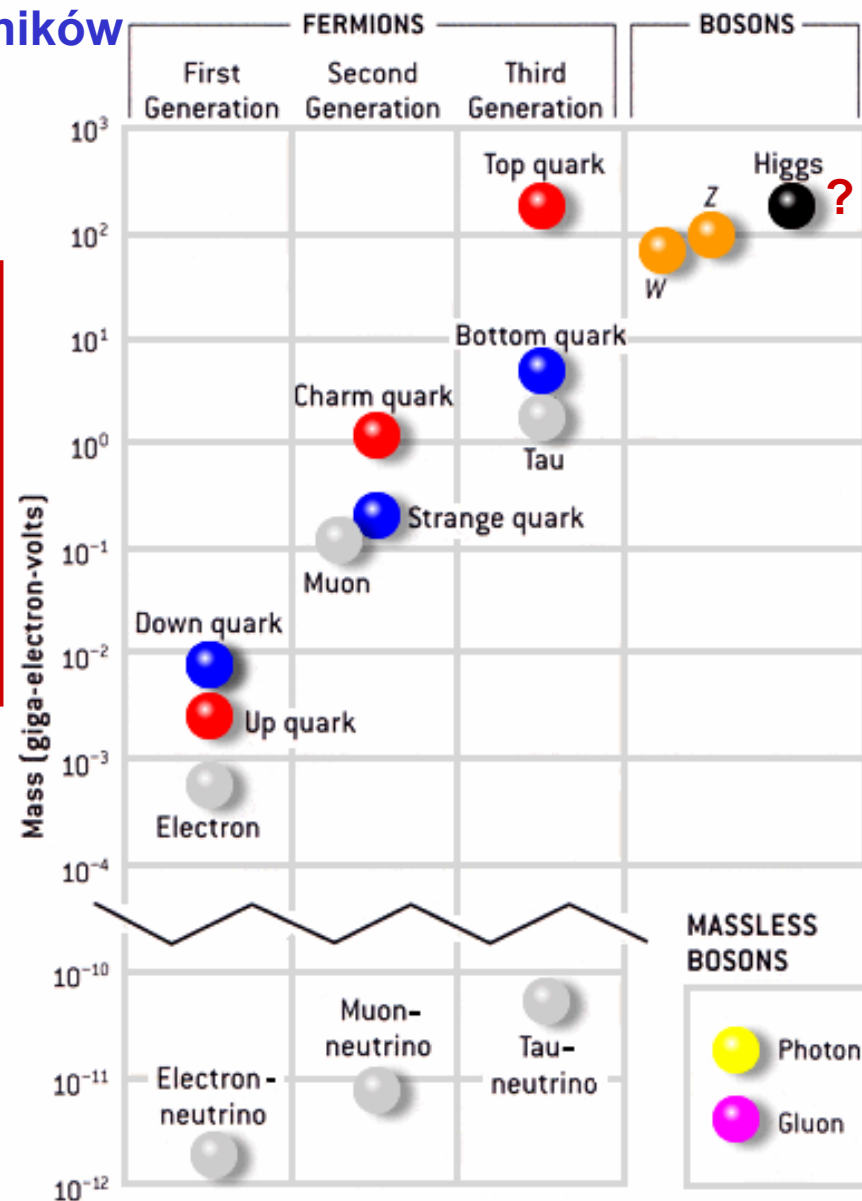
Poprawnie opisuje strukturę materii do odległości rzędu 10^{-18} m
i oddziaływania jej fundamentalnych składników

Podstawowe koncepcje : Szczególna Teoria
Względności + mechanika kwantowa, zasady
symetrii / mechanizmy naruszenia symetrii

Cząstki elementarne

- 3 rodziny (generacje) kwarków i leptonów fermiony (spin $\frac{1}{2}$)
- "nośniki" oddziaływań (spin 1)
(bozony pól cechowania)
- bozony Higgsa (spin 0)...

Fermions			Bosons
Quarks	u up	c charm	t top
	d down	s strange	b bottom
Leptons	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino
	e electron	μ muon	τ tau
			γ photon
			Z Z boson
			W W boson
			g gluon



Elementarne składniki materii : 3 rodziny kwarków

Terminologia :

kwark górny i dolny (up – down)

kwark powabny i dziwny (charm – strange)

kwark t (top) i b (piękny) (top/truth – beauty/bottom)

C, S, T, B - liczby kwantowe określające powab, dziwność, prawdę i piękno kwarka

Q - ładunek elektryczny w jednostkach ładunku elektronu

M (masa prądowa, *ang. current mass*)- masa, **I** - izospin

Up-Down $I = \frac{1}{2}$	Q = 2/3 u $M = 1.5 - 4.0 \text{ MeV}$	Q = -1/3 d $M = 4.0 - 8.0 \text{ MeV}$
Charm-Strange $I = 0$	c $M = 1.15 - 1.35 \text{ GeV}$ C = 1	s $M = 80 - 130 \text{ MeV}$ S = -1
Top-Bottom $I = 0$	t $M = 174 - 178 \text{ GeV}$ T = 1	b $M = 4.1 - 4.9 \text{ GeV}$ B = -1

Wszystkie kwarki
mają
liczbę barionową 1/3
i spin 1/2

Elementarne składniki materii : 3 rodziny leptonów (przypomnienie)

- 3 generacje par leptonowych (naładowany i neutralny lepton) o spinie $\frac{1}{2}$
- każdy typ (zapach) leptonów posiada odpowiednią liczbę leptonową L_e , L_μ i L_τ , która jest zachowana w Modelu Standardowym z bezmasowymi neutrinami
- Liczne eksperymenty neutrinowe (począwszy od 1998, SuperKamiokande) ewidencja na oscylacje neutrin $\rightarrow$ neutrino mają masę

Naładowane leptony

e^- Elektron

$M = 0.5 \text{ MeV}, \quad L_e = 1$

μ^- Mion

$M = 105.7 \text{ MeV}, \quad L_\mu = 1$

τ^- Tau

$M = 1.78 \text{ GeV}, \quad L_\tau = 1$

Neutralne leptony (neutrino)

ν_e

$M < 3 \text{ eV}, \quad L_e = 1$

ν_μ

$M < 0.19 \text{ MeV}, \quad L_\mu = 1$

ν_τ

$M < 18.2 \text{ MeV}, \quad L_\tau = 1$

Przypomnienie

- Wszystkie kwarki i leptyony uczestniczą w oddziaływaniach słabych
- Wszystkie naładowane cząstki biorą udział w oddziaływaniach elektromagnetycznych
- Wszystkie kwarki oddziałują silnie

	Oddz. słabe	Oddz. elektromagnet.	Oddz. silne
Kwarki	tak	tak	tak
Naładowane leptyony	tak	tak	nie
Neutralne leptyony	tak	nie	nie

Foton oddziałuje elektromagnetycznie, składające się z kwarków hadrony biorą udział we wszystkich oddziaływaniach

Oddziaływania

W przyrodzie istnieją **4 typy podstawowych oddziaływań** :

silne, elektromagnetyczne, słabe i grawitacyjne

Fizyka klasyczna : potencjał / pole wytwarzane przez cząstkę źródłową oddziałuje na odległość na inne cząstki. Pole przenika całą przestrzeń wokół źródła.

Kwantowy obraz oddziaływań

Kwantowa teoria pola : oddziaływanie pomiędzy dwoma obiektami mikroświata wynika z wymiany **bozonów pośredniczących**, cząstek o spinie całkowitym, charakterystycznych dla danego typu sił.

Oddziaływanie przez wymianę wirtualnych cząstek

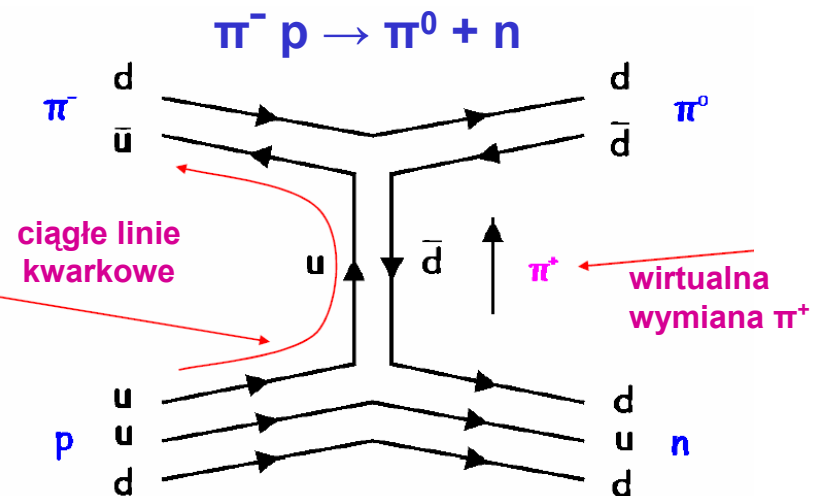
Cząstka wirtualna : kwadrat czteropędu takiej cząstki jest różny od kwadratu jej masy spoczynkowej, jej bardzo krótki czas życia określa zasada nieoznaczoności Heisenberga

Oddziaływania

- **oddziaływania grawitacyjne**, zaniedbywalne w eksperymentach FWE
(przyciągająca siła grawitacji m-dzy wszystkimi cząstkami o niezerowej masie)
bozon pośredniczący **grawiton $J^P = 2^+$**

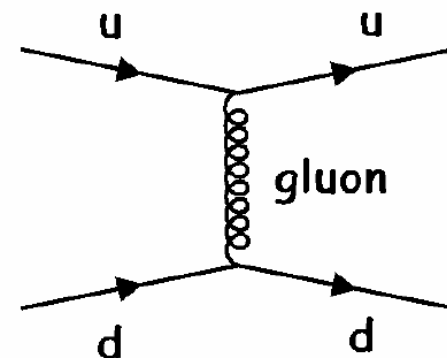
Na poziomie podstawowym oddziaływania między cząstkami wynikają z silnych, słabych i elektromagnetycznych oddziaływań m-dzy kwarkami i leptonami

- **oddziaływania silne**
(wiązanie kwarków w nukleonach i nukleonów w jądrach, oddziaływania silne hadronów wynikają z oddziaływań pomiędzy ich składnikami, kwarkami i gluonami)
bozon pośredniczący **gluon $J^P = 1^-$**



► wiązanie nukleonów w jądrach – silne oddziaływanie reszkowe (analogia do oddz. Van der Waalsa)

► oddziaływania hadronów przy dużych przekazach czteropędu – perturbacyjna QCD

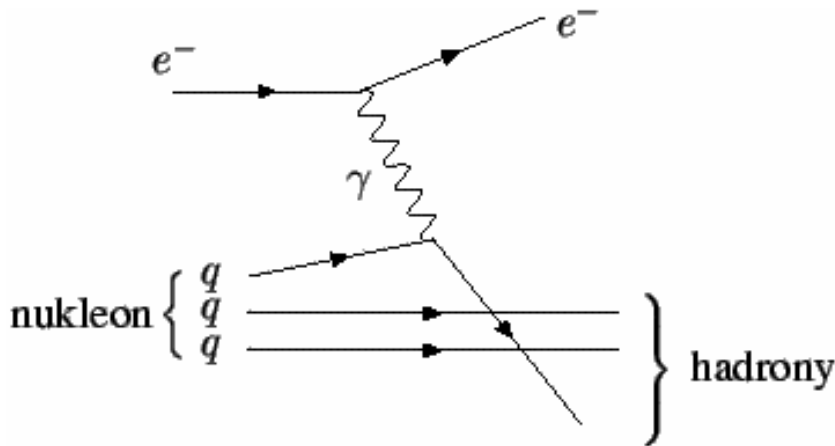


Oddziaływania hadronów przy małym przekazie czteropędu można efektywnie opisać poprzez wymianę pionów

Oddziaływania

• oddziaływania elektromagnetyczne

(budowa atomów / cząsteczek i ich wiązania, siły międzycząsteczkowe w cieczech i ciałach stałych)
bozon pośredniczący **foton $J^P = 1^-$**

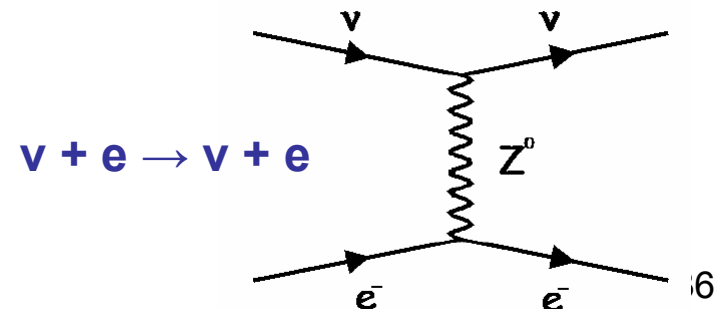
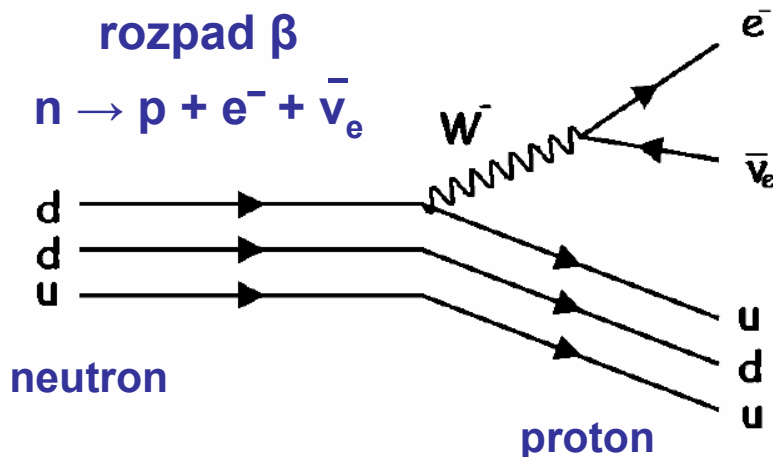


Głęboko nieelastyczne rozpraszanie elektronów na protonach $e + p \rightarrow e + \text{cokolwiek}$:

rozpraszanie elektronów na kwarkach

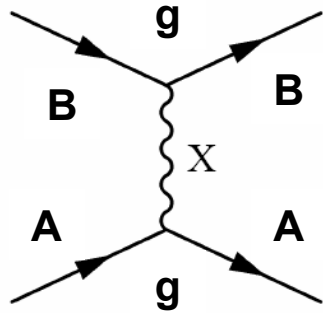
• oddziaływania słabe

(procesy związane ze zmianą zapachu / typu kwarka np. $u \leftrightarrow d \longrightarrow$ rozpady β jąder)
bozony pośredniczące **$W^\pm, Z^0$ $J^P = 1^-$**



Zasięg oddziaływań

Mechanika kwantowa : oddziaływanie jako wymiana wirtualnych cząstek / kwantów unoszących czteropęd oraz określone liczby kwantowe



Zasięg oddziaływań wiąże się z masą wymienianej cząstki

Rozpraszanie elastyczne $A + B \rightarrow A + B$ poprzez wymianę cząstki X

Układ spoczynkowy początkowej cząstki A, proces wirtualny odp.

dolnemu wierzchołkowi : $A (M_A c^2, 0) \rightarrow A (E_A, p) + X (E_X, -p)$

$$E_X = (p^2 c^2 + M_X^2 c^4)^{1/2} \text{ i } E_A = (p^2 c^2 + M_A^2 c^4)^{1/2}$$

Różnica energii między stanem końcowym i początkowym : $\Delta E = E_X + E_A - M_A c^2$

$\Delta E \rightarrow pc$ dla $p \rightarrow \infty$ oraz $\Delta E \rightarrow M_X c^2$ dla $p \rightarrow 0$, ponadto dla wszystkich p , $\Delta E \geq M_X c^2$

Emisja / absorpcja wirtualnego kwantu o energii $\Delta E \sim Mc^2$ zgodna z zasadą zachowania energii, jeżeli proces zachodzi w czasie Δt określonym przez zasadę nieoznaczoności dla energii i czasu : $\Delta E \cdot \Delta t \leq \hbar \longrightarrow \Delta t = \hbar / \Delta E$

W tym czasie wymieniany obiekt przed absorpcją przez cząstkę B może pokonać maksymalny dystans : $r = c \cdot \Delta t$

$$r = c \cdot \hbar / \Delta E = c \hbar / M_X c^2$$

zasięg oddziaływania

$$R \equiv \hbar c / M_X c^2$$

Zasięg oddziaływań

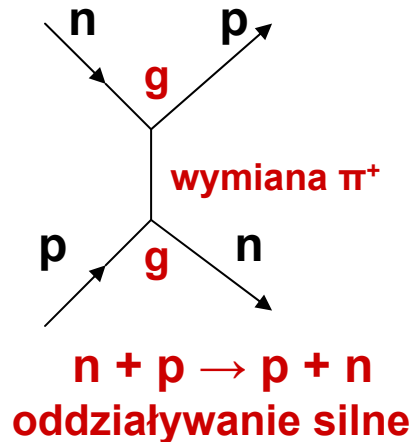
Zasięg oddziaływań wiąże się z masą wymienianej cząstki

$$R \equiv \hbar c / M_X c^2$$

- Oddziaływania długozasięgowe : grawitacja i elektromagnetyzm, przejawiają się już na poziomie makroskopowym
- **Oddz. elektromagnetyczne – wymiana bezmasowego fotonu** $R \rightarrow \infty$
W odpowiedniej granicy wymiana cząstki bezmasowej prowadzi do potencjału statycznego oddziaływania $V(r) \sim 1/r$
- **Wymiana cząstki masowej** $\rightarrow V(r) \sim (1/r) \exp(-r / \lambda_C)$,
 $\lambda_C = \hbar / M_X c$ – Comptonowska długość fali wymienianej cząstki
- **Oddziaływania słabe – wymiana bozonów $W^\pm$ i Z^0**
 $M_W = \sim 80 \text{ GeV}/c^2$, $M_Z = \sim 90 \text{ GeV}/c^2$ $R \sim 2 \cdot 10^{-3} \text{ fm}$
- **Oddziaływania silne** przy energiach rzędu masy nukleonu
wymiana mezonów π $R \sim 1/m_\pi \sim 1 \text{ fm}$

Siła poszczególnych oddziaływań

O sile oddziaływań wnioskujemy z pomiarów przekrojów czynnych badanych procesów i czasów życia cząstek



Przekrój czynny $\sigma \sim |A|^2 \cdot (\text{przestrzeń fazowa})$

Amplituda rozpraszania $A \sim g \cdot 1/(q^2 - m_\pi^2) \cdot g$

bezwymiarowa stała sprzężenia
wymienianego bozonu
w górnym i dolnym wierzchołku
(również zależy od q^2)

propagator bozonu
 $q^2 = (\text{przekaz czteropędu})^2$

Małe przekazy czteropędu $|q^2| \ll M_W^2$, dla uproszczenia zakładamy: $g_{em} \sim g_{słabe}$

► A (oddziaływania elektromagnetyczne) $\sim g^2 / q^2$

► A (oddziaływania słabe) $\sim g^2 / (q^2 - M_W^2) \sim q^2 / M_W^2$

(np. $q^2 = -1 \text{ GeV}^2$, $g^2 \sim 0.4$, $|A_{em}| \sim 0.4 \text{ GeV}^{-2} \gg |A_{słabe}| \sim 0.4 / M_W^2 \sim 0.4 \cdot 10^{-4} \text{ GeV}^{-2}$)

► Efektywna siła oddziaływań silnych $|A_{silne}| \sim (g_{N\pi})^2 / (q^2 - m_\pi^2) \sim 200 \text{ GeV}^{-2}$

Małe q^2 , wymiana π , $g_{N\pi} \sim 14$, $q^2 \ll -m_p^2$

Oszacowanie względnej siły oddziaływań z pomiarów czasu życia dziwnych barionów :

- (uds) spin = 1/2 $\Sigma^0(1192) \rightarrow \Lambda \gamma$, rozpad elektromagnetyczny, czas życia $\sim 10^{-19}$ s
 - (uus) spin = 1/2 $\Sigma^+(1189) \rightarrow p \pi^0$, rozpad słaby, czas życia $\sim 10^{-10}$ s
 - (uds) spin = 3/2 $\Sigma^0(1385) \rightarrow \Lambda \pi^0$, rozpad silny , czas życia $\sim 10^{-23}$ s
- (pierwsze radialne wzbudzenie stanu podstawowego)

Szerokość rozpadu cząstki

$\Gamma = \hbar / \tau \sim | M |^2 \cdot (\text{phase space}) \sim (\text{stała sprzężenia})^2 \cdot (\text{przestrzeń fazowa}),$

M – amplituda rozpadu w pierwszym rzędzie proporcjonalna do kwadratu stałej sprzężenia, dla rozpadów cząstek Σ zbliżona przestrzeń fazowa



$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} \propto \sqrt{\frac{\tau_2}{\tau_1}}$$

$$\alpha_s : \alpha_{em} : \alpha_{slabe} \sim 1 : 10^{-2} : 10^{-7}$$