

# **Eksperymentalna fizyka cząstek elementarnych**

---

- **Krótką historia fizyki cząstek**
  - wielkie odkrycia eksperymentalne
  - rozwój idei teoretycznych
- **Fundamentalne ( elementarne ) składniki materii**
- **Podstawowe oddziaływania**
  - kwantowy obraz oddziaływań
  - zasięg i siła poszczególnych oddziaływań
- **Pomiary przekrojów czynnych**
- **Rozpady cząstek – pomiary czasów życia cząstek niestabilnych**
- **Rachunek zaburzeń i diagramy Feynmana**

# **Eksperymentalna fizyka cząstek elementarnych**

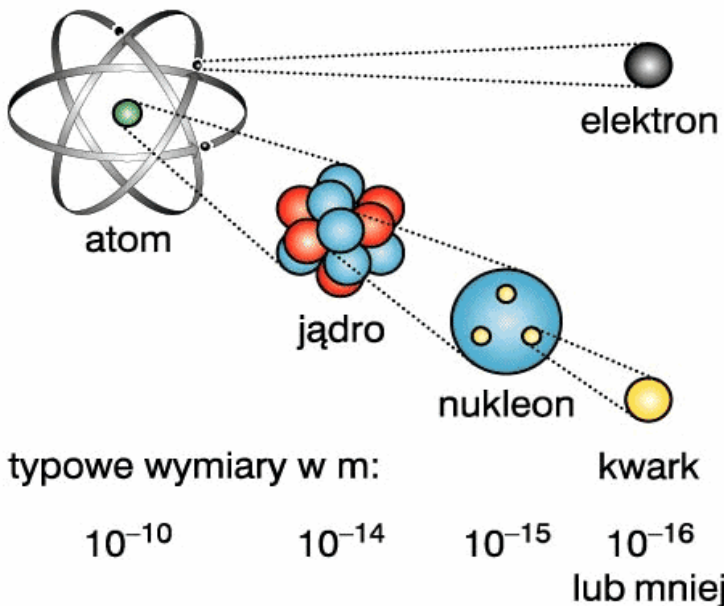
**Fizyka wysokich energii**

**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  $\Delta r$**   
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

- falowe własności materii

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

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



**wysoka zdolność rozdzielcza**

**Wysokie energie cząstek :**



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

# Elementarne składniki materii

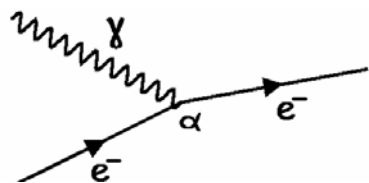
- **Cząstki elementarne :**  
są punktowe, nie posiadają wewnętrznej struktury ani stanów wzbudzonych
- Historycznie, **do początku lat 30-tych**, za cząstki elementarne uważano składniki atomów i jąder atomowych : **protony, neutrony i elektrony** oraz **fotony** (kwanty pola elektromagnetycznego) i **neutrino** (elektronowe), powstające w rozpadach  $\beta$  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  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $\gamma$  ,  
prom.  $\alpha$  - jądra helu,  $\beta$  - elektrony i  $\gamma$  - fotony o energii  $E > 100$  keV

- 1905** **Utożsamienie fotonu z kwantem pola elektromagnetycznego**



interpretacja zjawiska fotoelektrycznego przez **A. Einsteina**  
światło strumieniem niepodzielnych kwantów energii,  
nazywanych teraz fotonami

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

Rozpraszanie cząstek  $\alpha$  ( 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) :

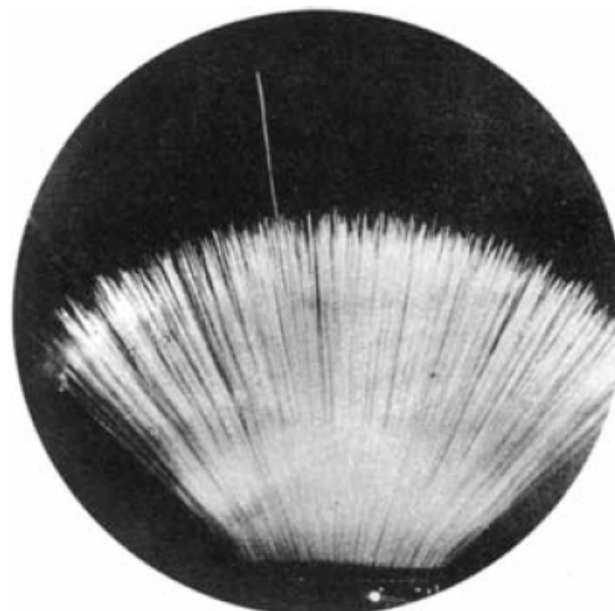
protony ( jądra atomów wodoru ) ~90%, jądra helu ~9%, jądra cięższych pierwiastków, śladowy strumień elektronów, pozytonów i antyprotonów ...

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  $\alpha$  ze źródła promieniotwórczego w komorze mgłowej**



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

Pierwsza obserwowana reakcja jądrowa – zderzenia cząstek  $\alpha$  z azotem  
 ${}^4\text{He} + {}^{14}\text{N} \rightarrow {}^1\text{H} + {}^{17}\text{O}$ , identyfikacja jąder wodoru w stanie końcowym

➡ **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  $\beta$  :

$$(Z, A) \rightarrow (Z+1, A) + e^- + \bar{\nu}_e$$

**A - liczba masowa**

$$(Z, A) \rightarrow (Z-1, A) + e^+ + \nu_e$$

**Z - liczba atomowa**

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

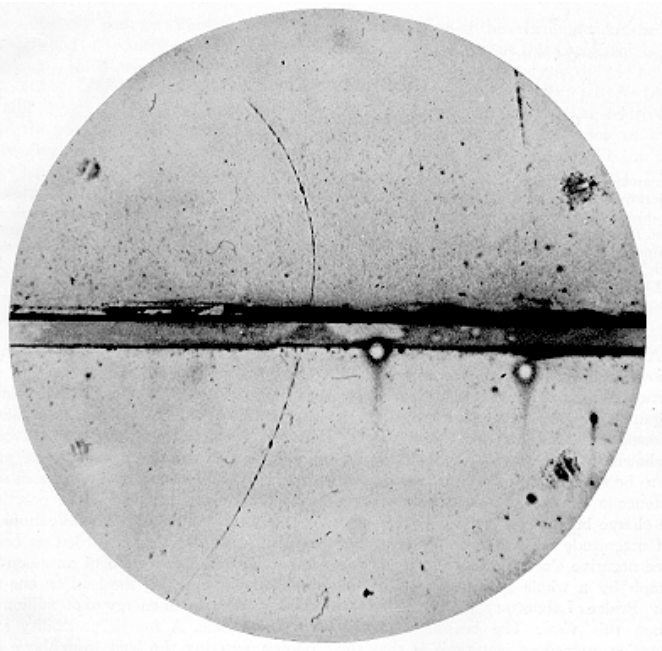
$$E_e = \Delta M = M(Z, A) - M(Z+1, A), \text{ gdzie zaniedbano energię odrzutu jądra.}$$

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.

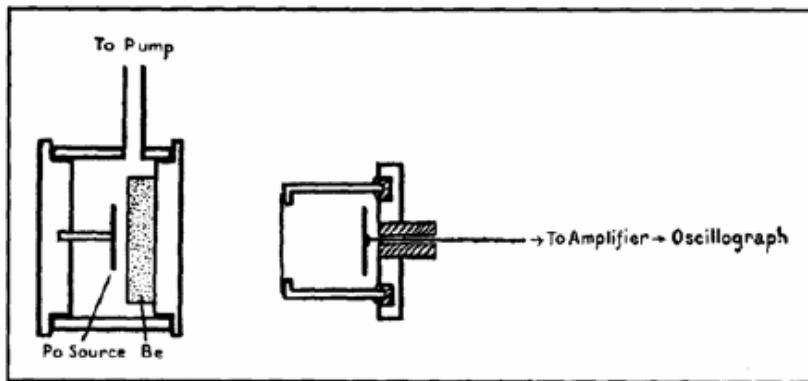
„Często spotyka się w literaturze stwierdzenie, że odkrycie pozytonu było konsekwencją jego teoretycznego przewidzenia przez Diraca, ale to nie jest prawda. Odkrycie pozytonu było całkowicie przypadkowe. Mimo tego, że podana przez Diraca relatywistyczna teoria elektronu była właściwą teorią dla pozytonu,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

Carl Anderson

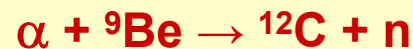
Cytat z wykładu AKW

## • 1932 Odkrycie swobodnego neutronu przez J. Chadwicka

Naświetlanie berylu cząstkami  $\alpha$  z rozpadu promieniotwórczego polonu prowadzi do emisji "promieniowania berylowego", bardziej przenikliwego niż zwykłe promieniowanie  $\gamma$



Obserwacja przejścia tego promieniowania przez komorę jonizacyjną  $\rightarrow$  zgodność z założeniem strumienia cząstek neutralnych, **neutronów**, o masie bliskiej masy protonu



Iwanienko, Heisenberg :

Protonowo-neutronowy model budowy jądra

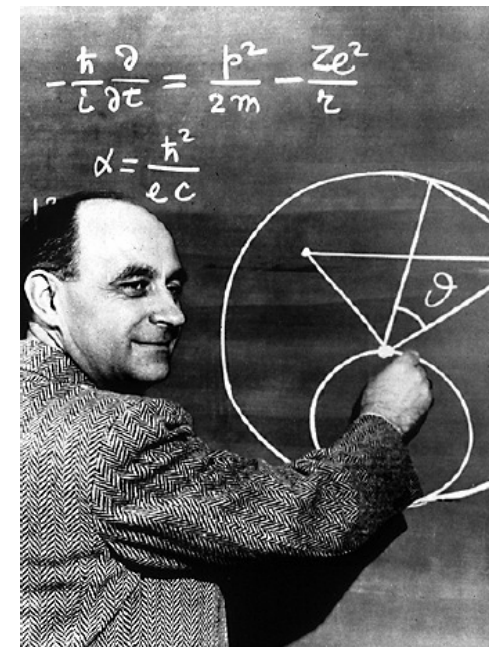
## • 1933 Teoria Fermiego jądrowego rozpadu $\beta$

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 neutrino)

- oddz. słabe zachodzi w jednym punkcie czasoprzestrzeni

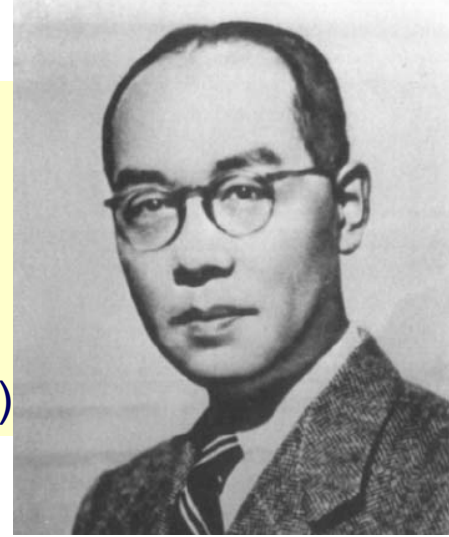


## • 1933 Teoria sił jądrowych Yukawy

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

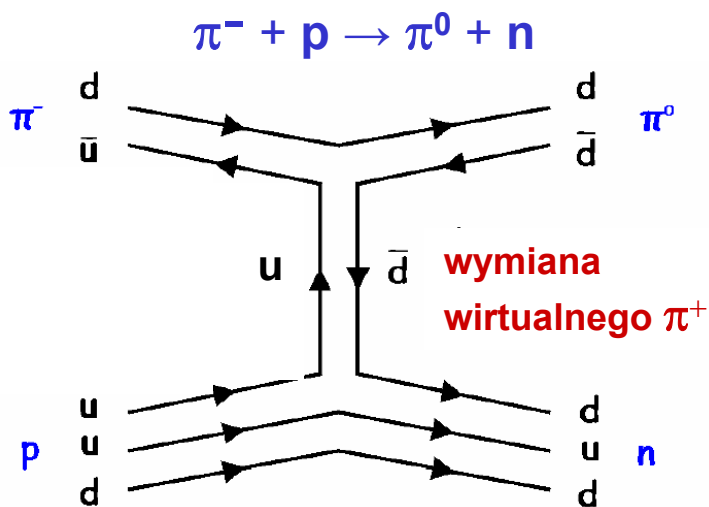
(" mezony Yukawy " o spinie zero i masie rzędu 100 MeV)

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.



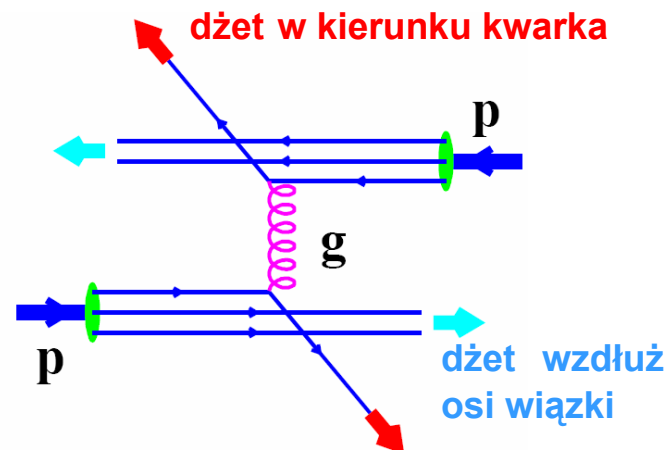
## Oddziaływania silne ( będziemy je później dokładnie omawiać )

- silnie oddziałują kwarki i gluony oraz zbudowane z nich hadrony
- oddziaływania silne odpowiadają za wiązania kwarków w hadronach, budowę jądra atomowego i reakcje jądrowe
  - ▶ wiązanie (neutralnych kolorowo) nukleonów w jądrach – **silne oddziaływanie resztkowe**, jest podobne do oddziaływań Van der Waalsa, które wiążą neutralne elektrycznie atomy w cząsteczki
- oddziaływania silne m-dzy hadronami ( np. protonów z protonami, neutronami, pionami ...) wynikają z oddziaływań między ich składnikami, kwarkami i gluonami



Oddziaływania hadronów przy małym przekazie czteropędu ( czyli na dużych odległościach ) można efektywnie opisać poprzez wymianę pionów

produkcja 2 dżetów o dużym pędzie poprzecznym w oddz.  $p - p$



oddziaływania hadronów przy dużych przekazach czteropędu – perturbacyjna QCD

- **1937      Odkrycie mionów przez C. Andersona i S. Nedermeyera**

Obserwacja w promieniowaniu kosmicznym za pomocą komory mgłowej

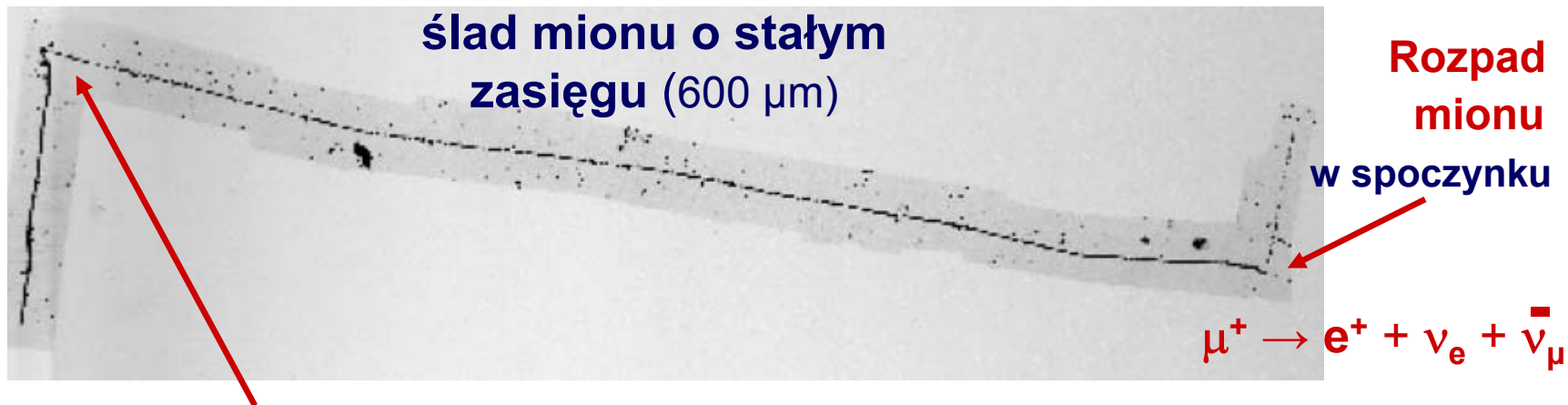
Początkowo uważano, że miony są przewidzianymi przez Yukawę mezonami

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  $\pi$ , 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  $\pi$  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

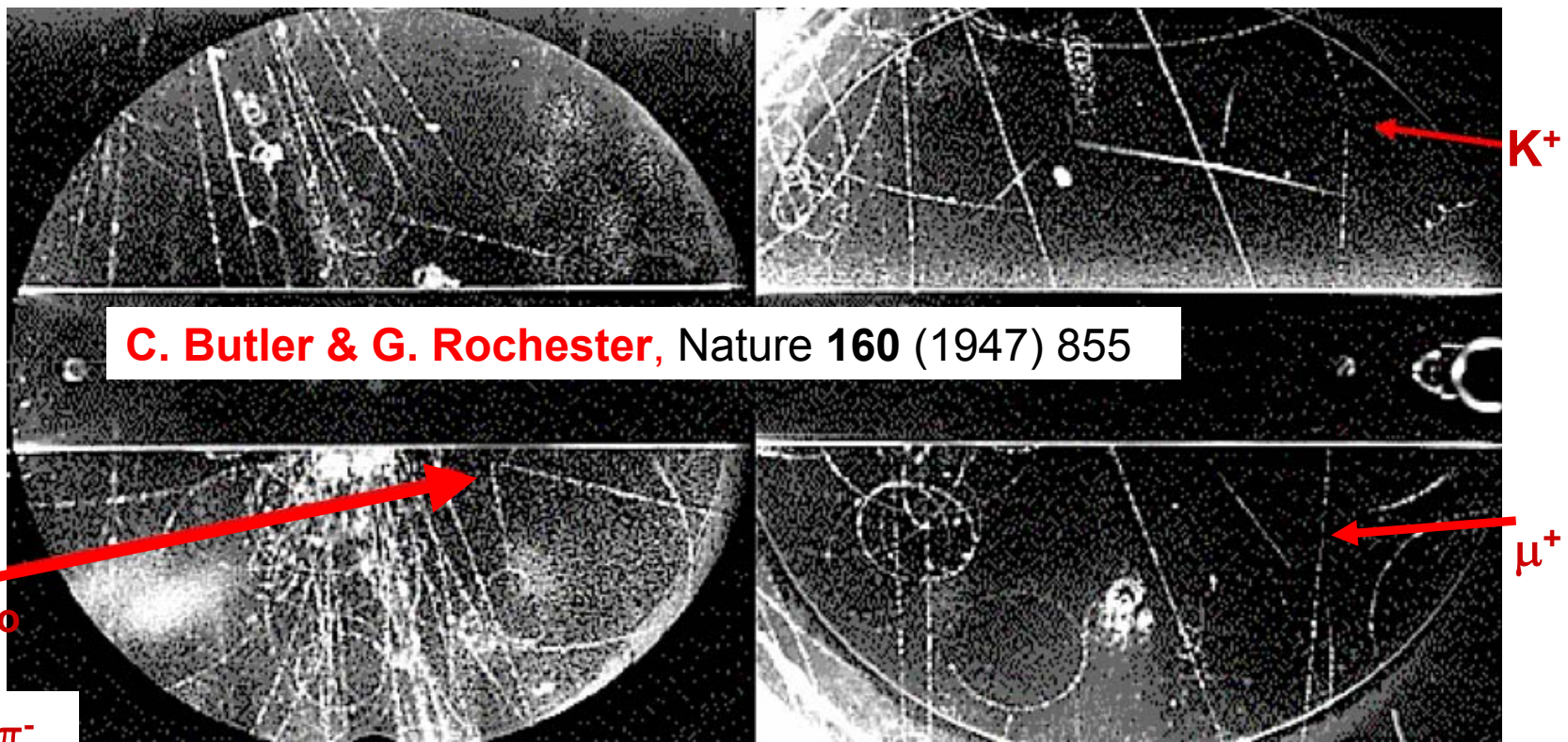
**Neutralne piony** odkryte trochę później (1950 ) rozpadają się na dwa fotony w procesie elektromagnetycznym,  $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$



• 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 :

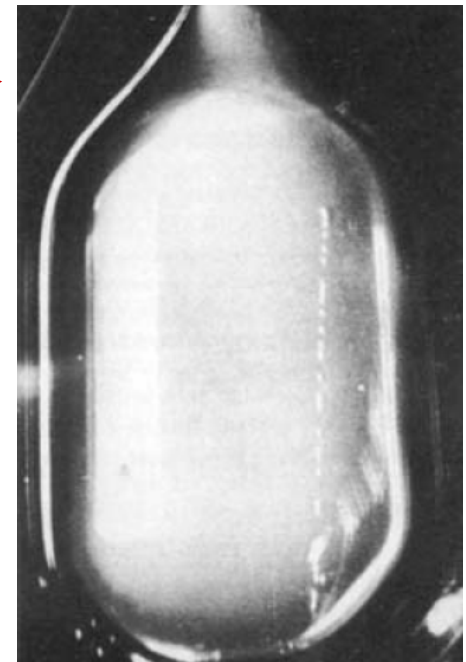
1952  $E_p = 3 \text{ GeV}$  Cosmotron w Brookhaven National Laboratory

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**



**QED** (**Q**uantum **E**lectro**d**ynamics) – kwantowa teoria pola opisująca oddziaływanie cząstek naładowanych elektrycznie poprzez wymianę kwantów pola elektromagnetycznego, fotonów

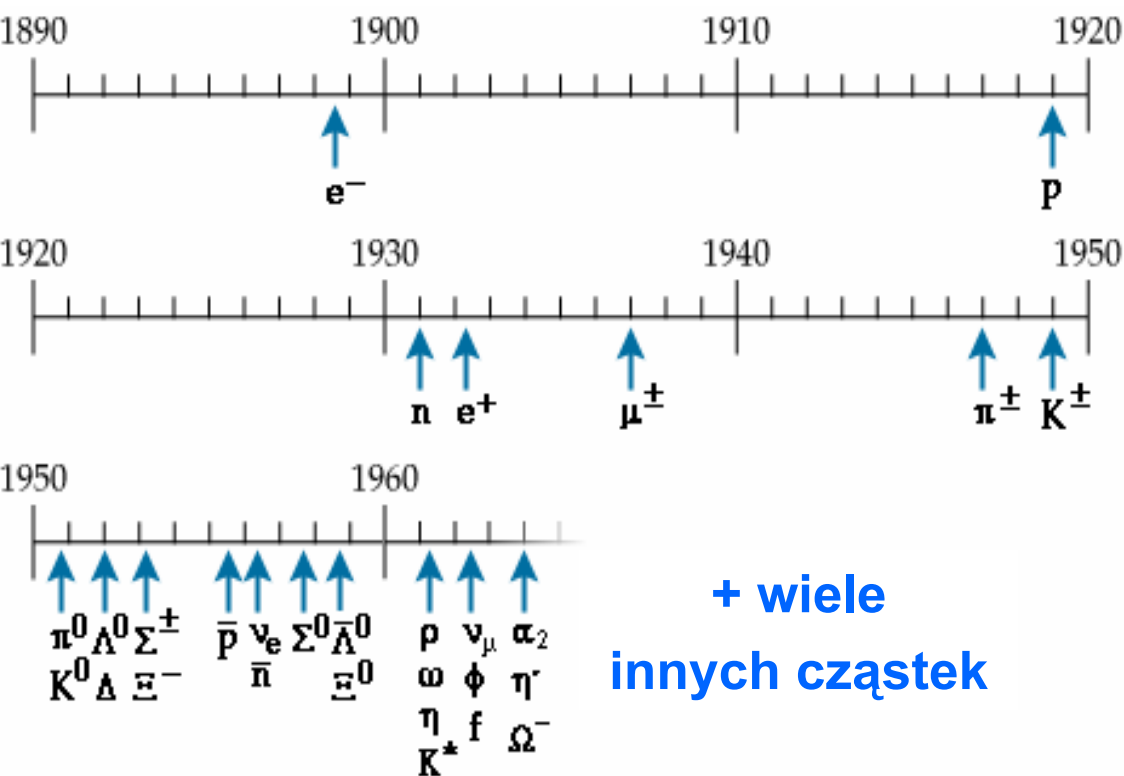
**1948 – 1951 J. Schwinger, R. Feynman i S. Tomonaga rozwinęli niezależnie nowy formalizm QED, stosując procedurę renormalizacji w celu uniknięcia nieskończoności w obliczeniach**  
( nagroda Nobla w 1965 r )  
**F. Dyson** wykazał, że te trzy formalizmy QED są równoważne



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 oddziaływania 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

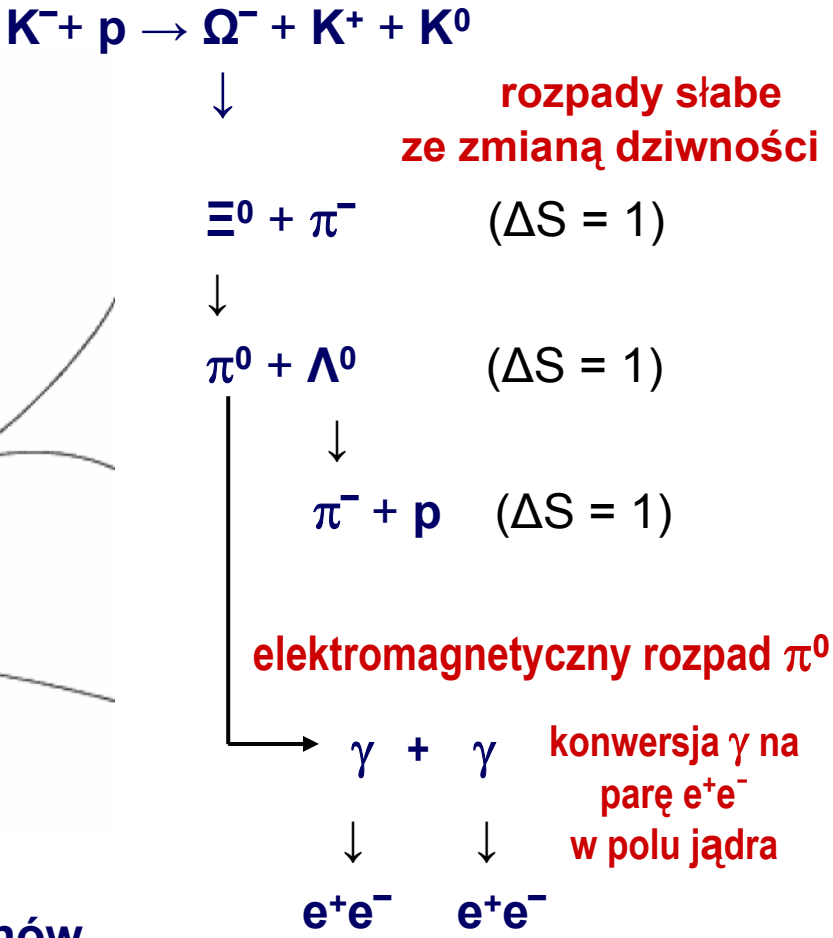
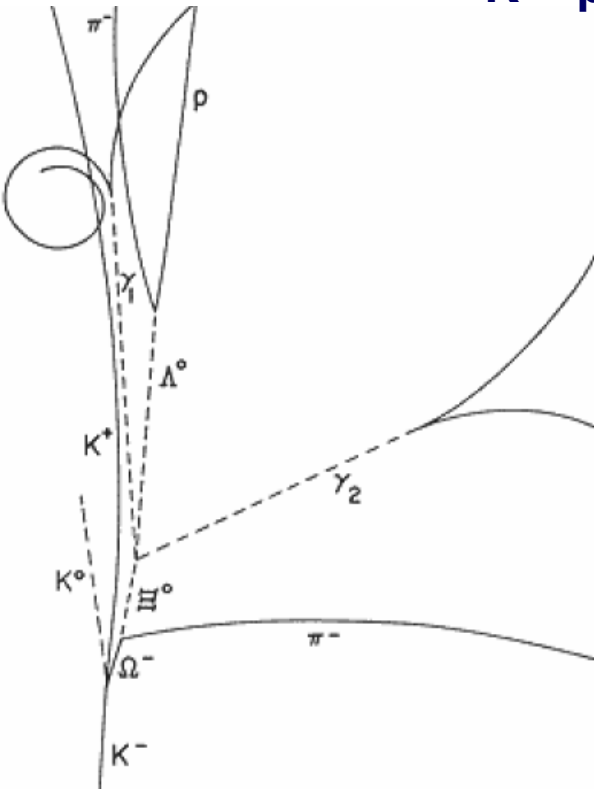
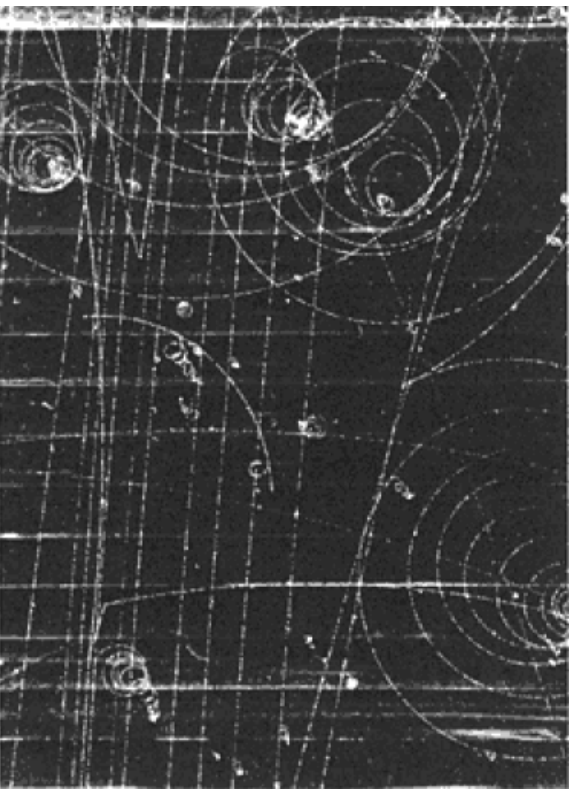
mezony : kwark – antykwark

**kwarki mają ułamkowe ładunki elektryczne i spin  $\frac{1}{2}$**



• 1964      odkrycie cząstki  $\Omega^-$

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.



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

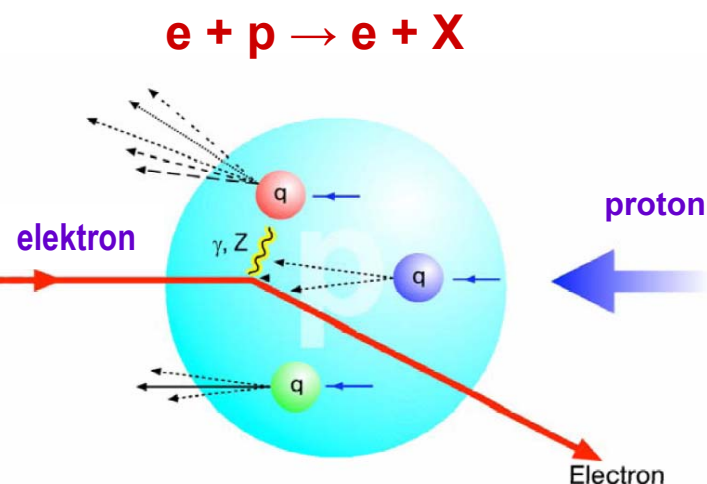
# • 1968 Odkrycie struktury partonowej protonu

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 ( Deep Inelastic Scattering – DIS )  
elektronów na protonach 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 ( uwzględniającą 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

( **QCD** – **Q**uantum **C**hromodynamics )



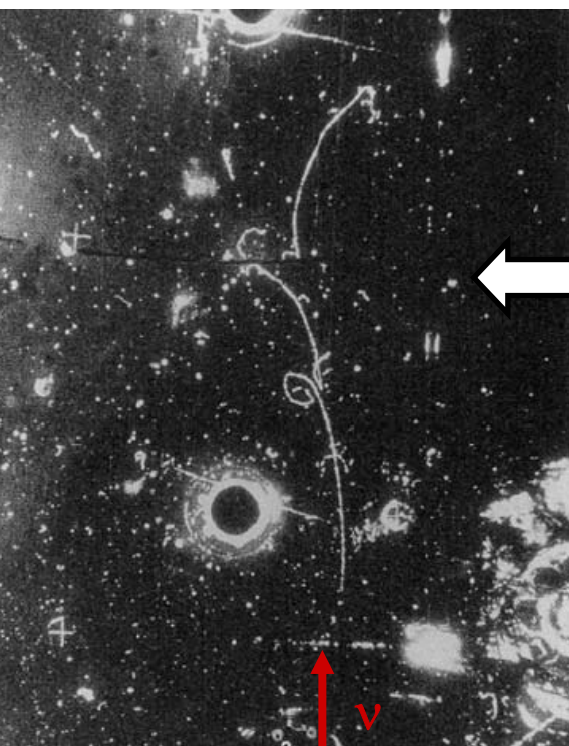
1961 – 1968

## Unifikacja oddziaływań elektromagnetycznych i słabych

### Teoria oddziaływań elektroslabych ( S. Glashow, A. Salam, S. Weinberg, Nobel 1979)

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

CERN - komora  
pęcherzykowa Gargamelle



1973 odkrycie słabych  
prądów neutralnych  
( wymiana  $Z^0$  )

$$\bar{\nu}_\mu + e^- \rightarrow \bar{\nu}_\mu + e^-$$

identyfikacja  $e^-$  :  
promieniowanie  
hamowania +  
kreacja par  $e^+e^-$

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

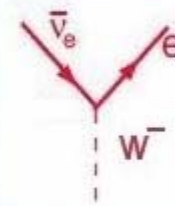
$$p + \bar{p} \rightarrow W^\pm + X, p + \bar{p} \rightarrow Z^0 + X$$

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

Sygnatura W – lepton z dużym  $p_T$



Nobel 1984



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 :

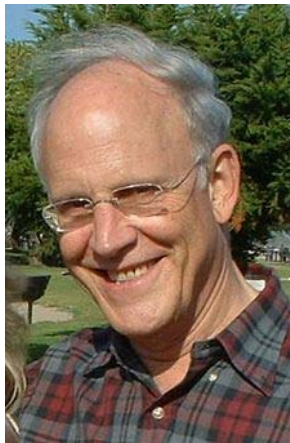
**klasyfikacja hadronów w modelu kwarków ( koncepcja koloru ) + eksp. DIS**

**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



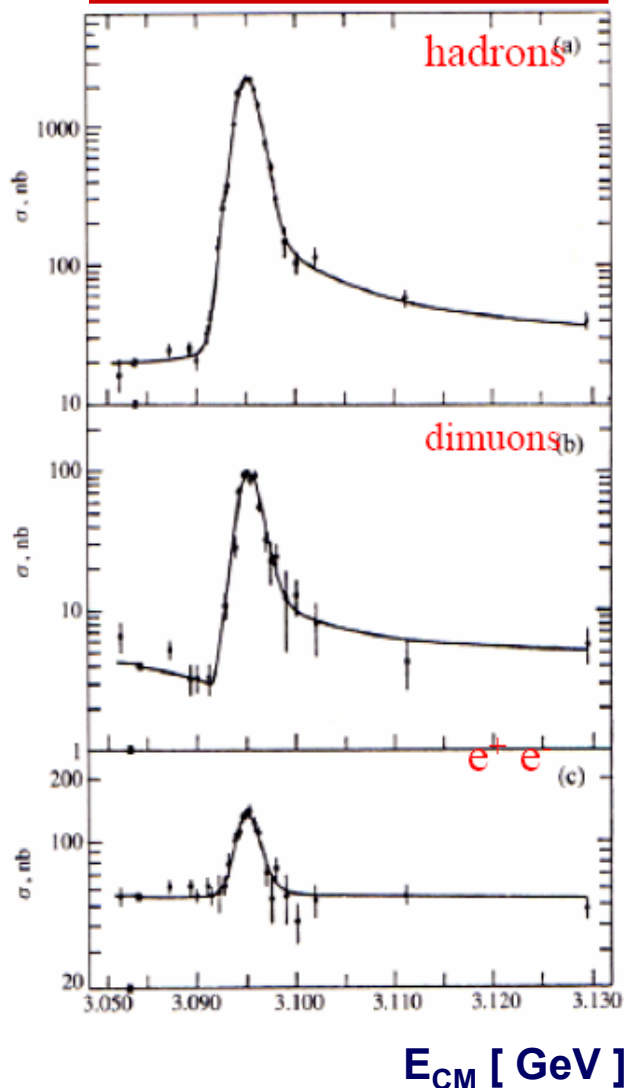
**Siła oddziaływania  
między kwarkami i gluonami  
maleje na małych odległościach**



# • 1974 Odkrycie cząstki $J/\psi$ ( "rewolucja listopadowa" )

SLAC ( B. Richter )

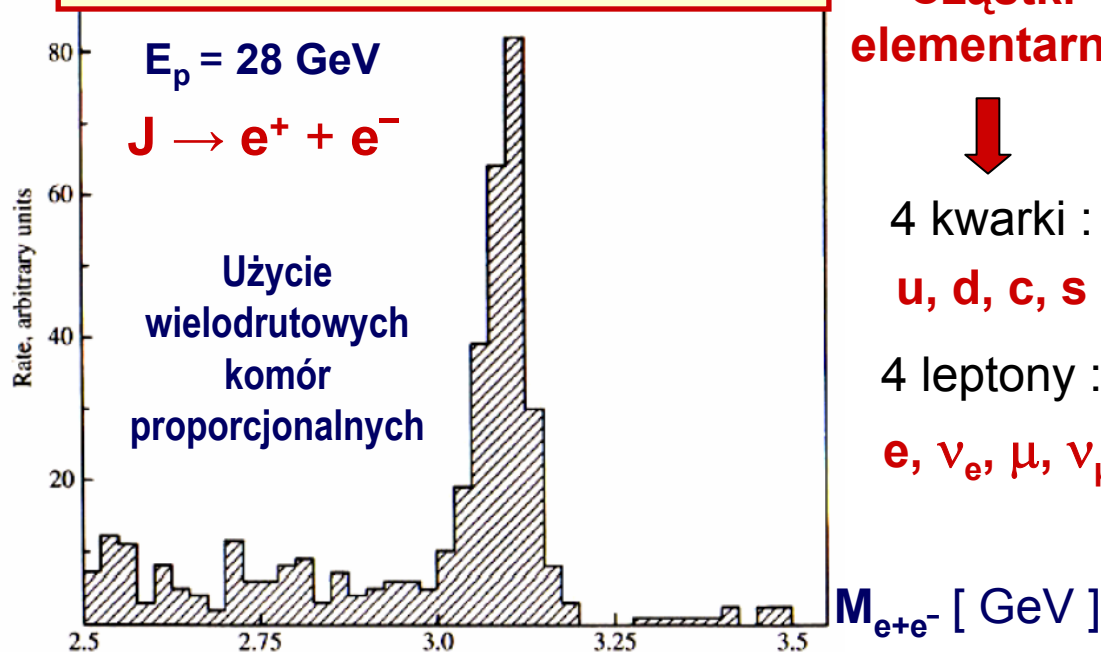
$$e^+ + e^- \rightarrow \psi$$



► 1970 hipoteza Glashowa, Iliopoulosa i Maianiego (GIM)  
o istnieniu czwartego kwarka ( **charmed quark** )  
wyjaśnia brak słabych prądów neutralnych  
zmieniających dziwność

Brookhaven (S. Ting)

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



Cząstki elementarne



4 kwarki :

**u, d, c, s**

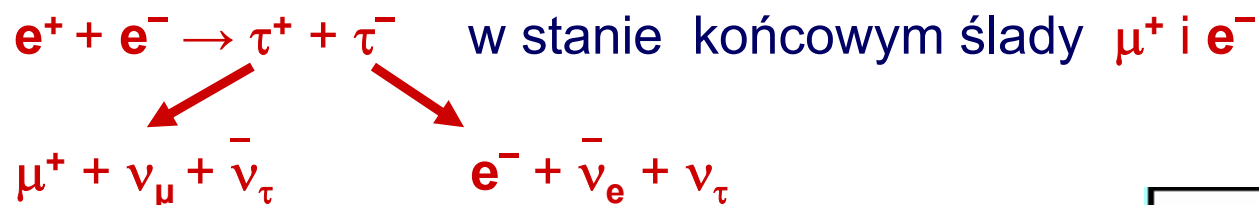
4 leptony :

**$e, \nu_e, \mu, \nu_\mu$**

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

# • 1975 Odkrycie ciężkiego naładowanego leptonu $\tau$

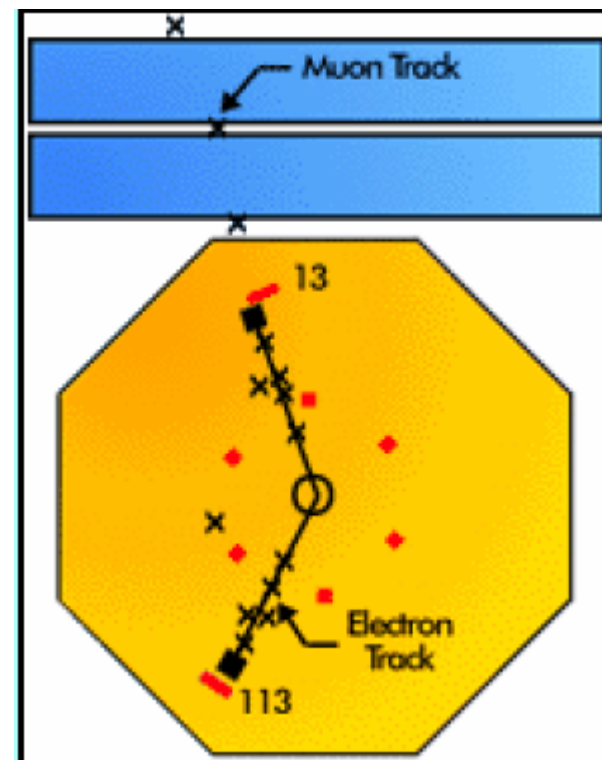
zderzacz  $e^+e^-$  w Stanford (SLAC), M. Perl



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

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

$\tau$  jest jedynym naładowanym leptonem, który oprócz rozpadów czysto leptonowych posiada również rozpady na hadrony

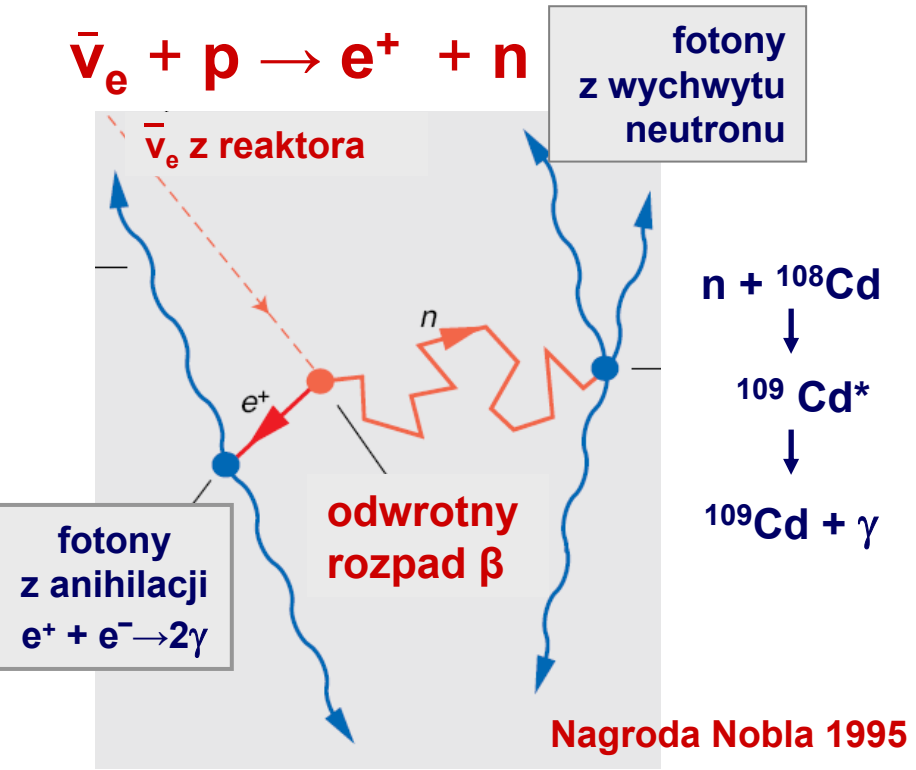


Odkrycie  $\tau$  wpłynęło na poszukiwania towarzyszącego mu neutrino taonowego i nadzieję na odkrycie kwarków trzeciej generacji

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

**1956 eksperyment Reinesa – Cowana**

**Detekcja oddziaływań antyneutrin elektronowych z reaktora jądrowego Savannah River w zbiorniku (  $\text{H}_2\text{O} + \text{CdCl}_2$  ) otoczonym licznikami scyntylacyjnymi**

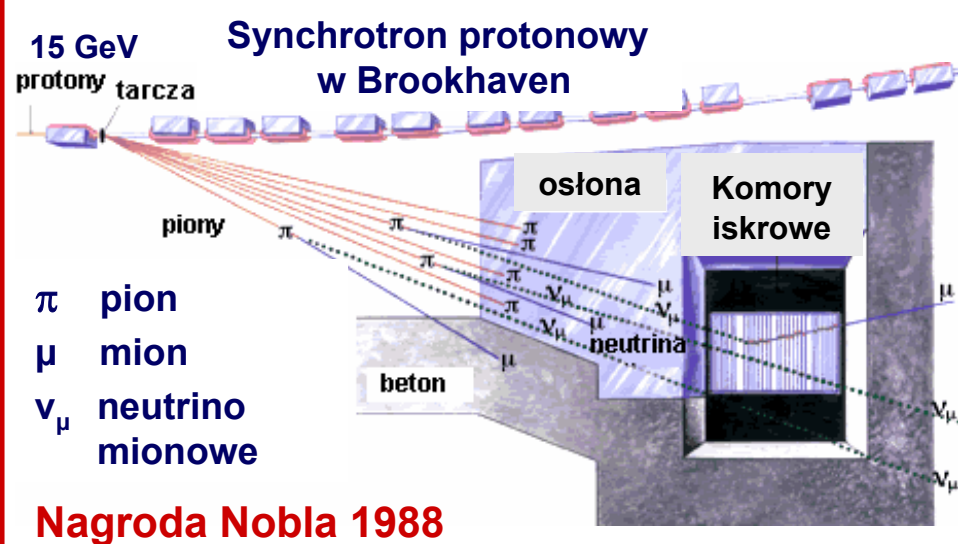


Detekcja fotonów z wychwytu neutronu  
5  $\mu\text{s}$  po sygnale anihilacji pozytonu

**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  $\pi$  ( $\nu_\mu$ ) różne od neutrina ( $\nu_e$ ) z rozpadu jądrowego  $\beta$**





Telegram Reinesa i Cowana  
do Pauliego 14 VI 1956 r.

**WESTERN UNION**

TELETYPE SERVICE

TO: Professor W. Pauli, Zurich University, Switzerland

DATE: 14 June 1956

FROM: Fred Reines, Cowan, New York

WE are happy to inform you that we have definitely detected neutrinos from previous fragmentary observations. The beta decay of particles observed in our experiment is in good agreement with the expected value. We have been able to measure the neutrino cross-section.

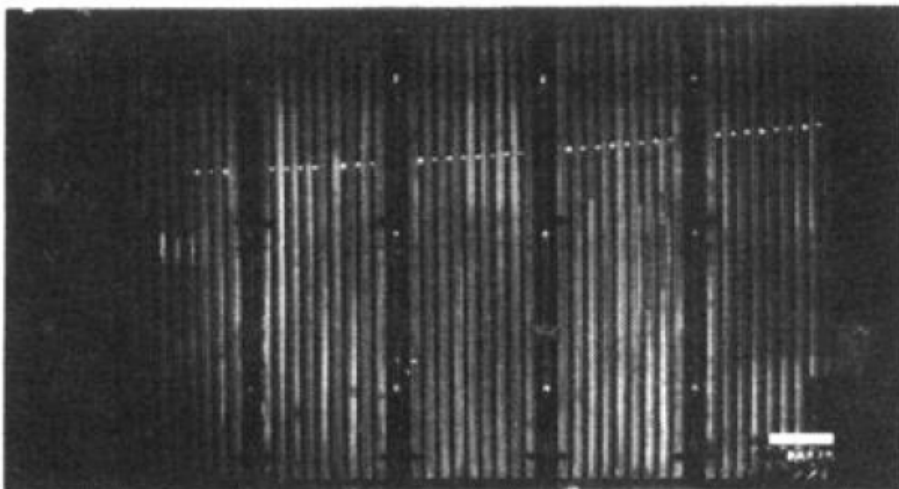
Fred Reines, Cowan, New York

„Jesteśmy radzi poinformować pana, że bezspornie 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.”

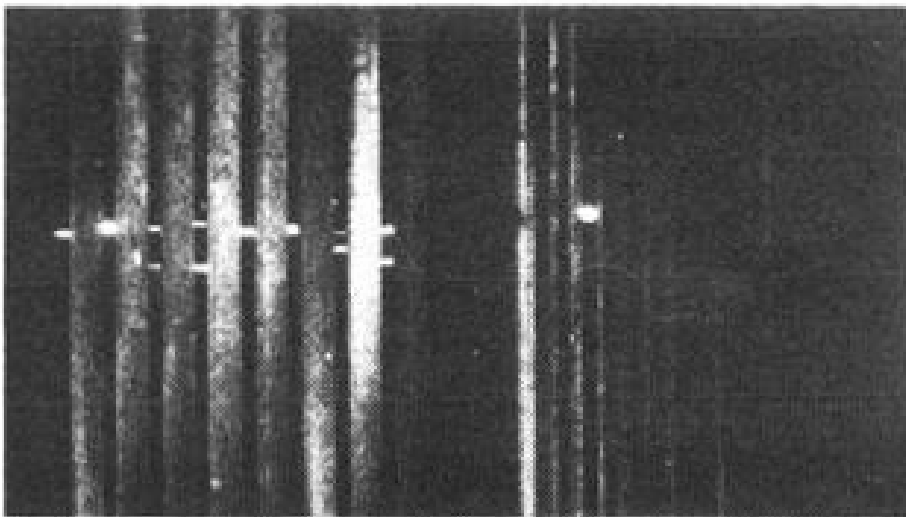




# Eksperyment Ledermana, Schwartza i Steinbergera $\nu_e \neq \nu_\mu$



**miony** przechodzą przez aluminiowe płyty komory prawie bez oddziaływania



**elektrony** z Cosmotronu (  $E = 400 \text{ MeV}$  )

Neutrina z rozpadów  $\pi^\pm$

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu, \quad \pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

produkują głównie miony

$$\nu_\mu + n \rightarrow \mu^- + p$$

$$\bar{\nu}_\mu + p \rightarrow \mu^+ + n$$

procesy nieelastyczne np.

$$\nu_\mu + n \rightarrow \mu^- + p + \pi^0$$

Jak rozróżnić miony od elektronów w komorze iskrowej ?

elektron pozostawia rozmyte rozproszone ślady iskrowe ( kaskada elektromagnetyczna )



● **Odkrycie neutrino taonowego ...**

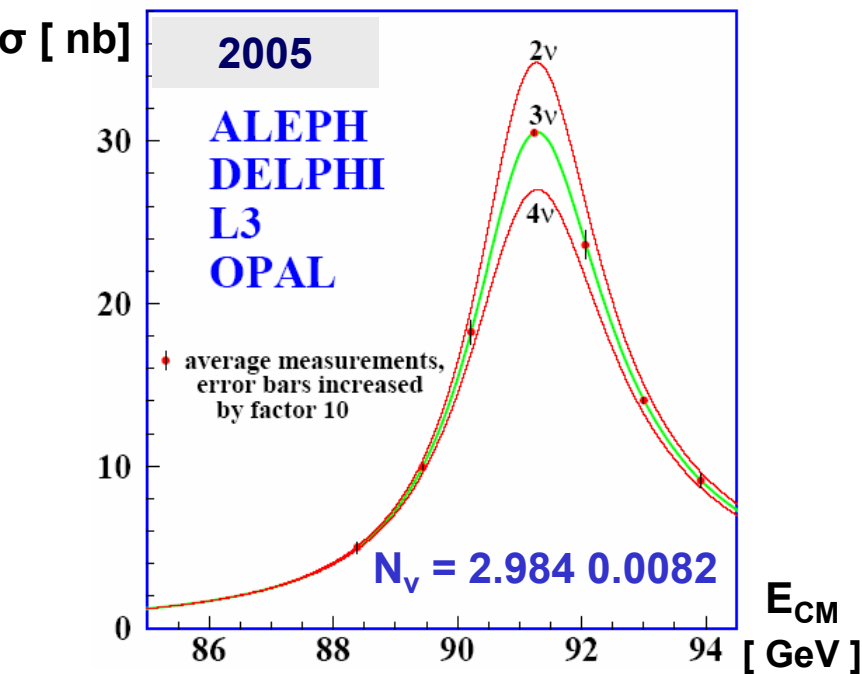
**1990      liczba zapachów lekkich neutrin**

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

**pomiar szerokości bozonu  $Z^0$**



**istnieją 3 zapachy lekkich neutrin**

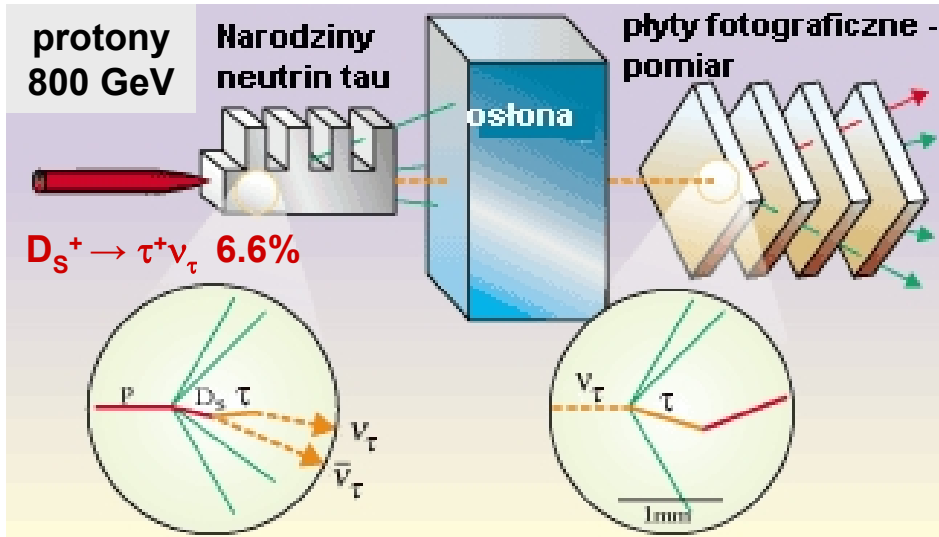


**przekrój czynny  $\sigma( e^+e^- \rightarrow Z^0 \rightarrow \text{hadrony} )$   
w funkcji energii w układzie środka masy**

**2000      eksp. DONUT w Fermilabie**  
**Direct Observation of Nu Tau**

Rejestracja oddziaływań  $\nu_\tau$  w tarczy z płyt  
żelaznych i bloków emulsyjnych

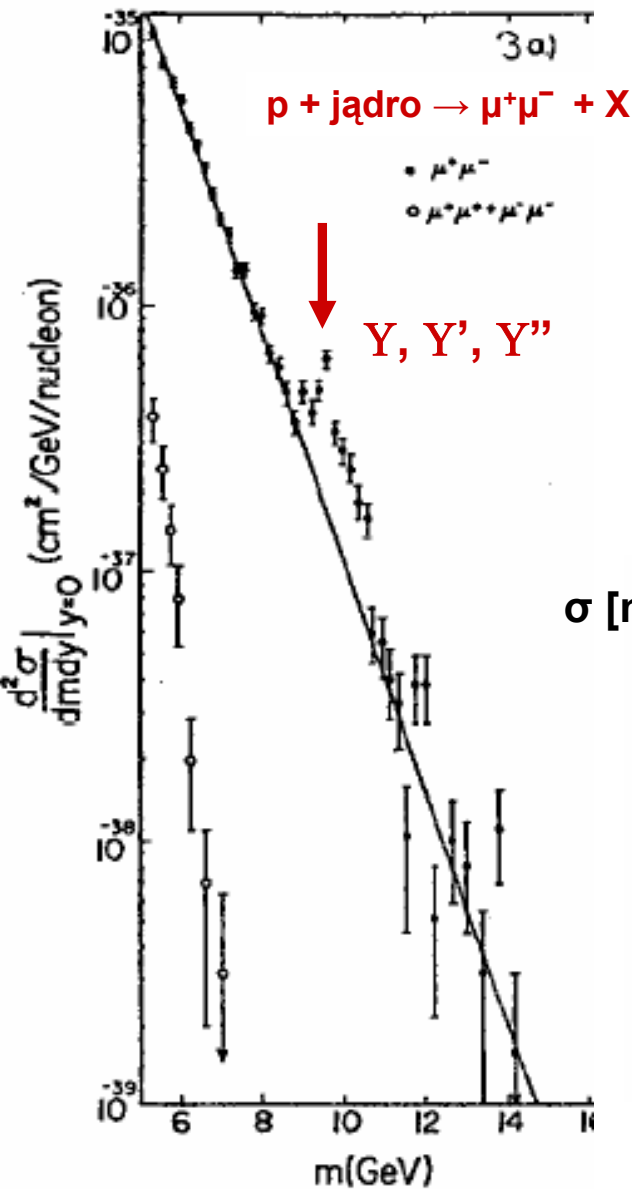
**$\nu_\tau + N \rightarrow \tau^- + X$**



**Sygnatura leptonu  $\tau$  : ślad długości  $\sim 1$  mm  
+ zakrzywienie odp. rozpadowi**  
 $\tau \rightarrow$  "1 prong" + cząstki neutralne ( $\sim 86\%$ )  
**Znaleziono 4 przypadki odpowiadające  
oddziaływaniom  $\nu_\tau$**

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

Fermilab (L. Lederman *et al.*)

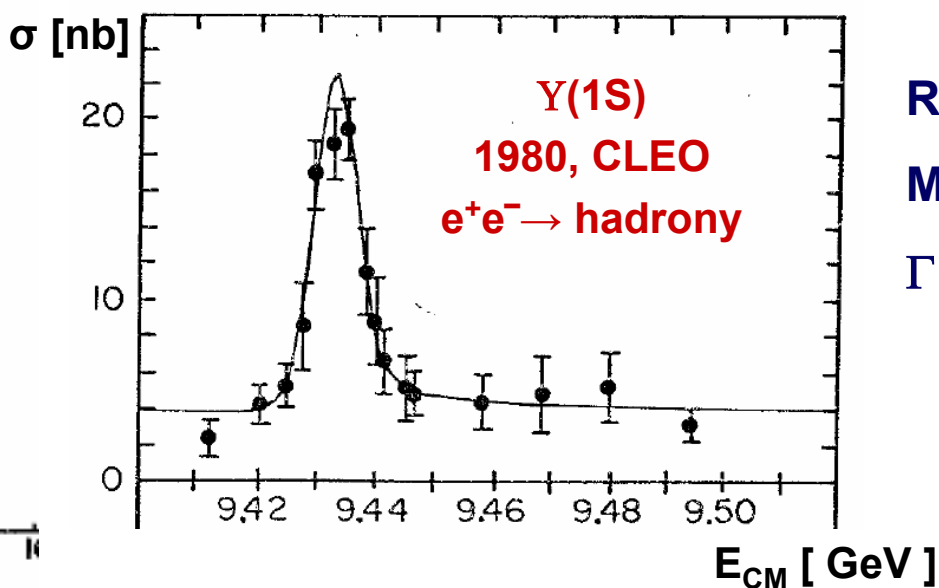


Zderzenia protonów (  $E = 400 \text{ GeV}$  ) z j\u0105drami (Be, Cu, Pt)

**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 (  $b\bar{b}$  )**



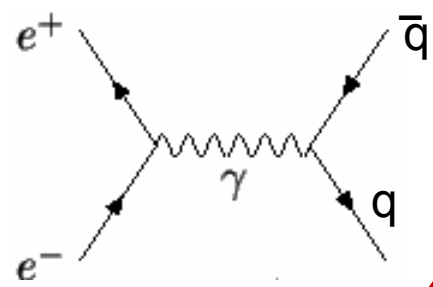
**Rezonans Y**  
 **$M = 9.46 \text{ GeV}$**   
 **$\Gamma = 0.053 \text{ MeV}$**

• 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

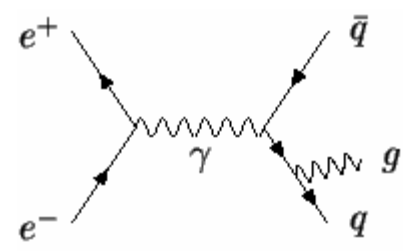
$e^+ + e^- \rightarrow q\bar{q}$



2 dżety kwarkowe

Proces  
hadronizacji

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



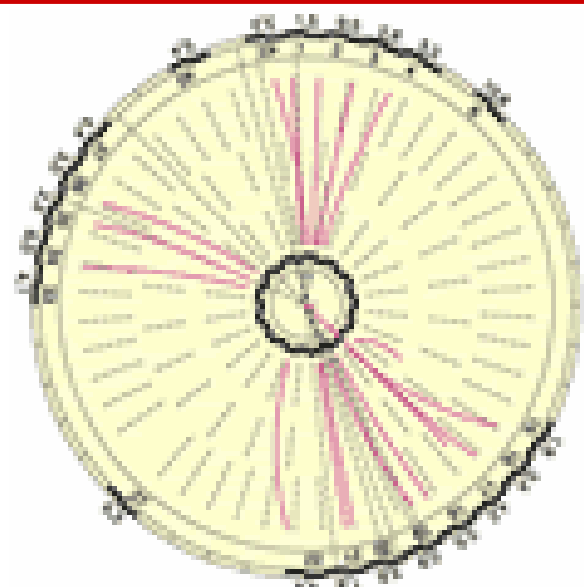
2 dżety kwarkowe + 1 dżet gluonowy

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

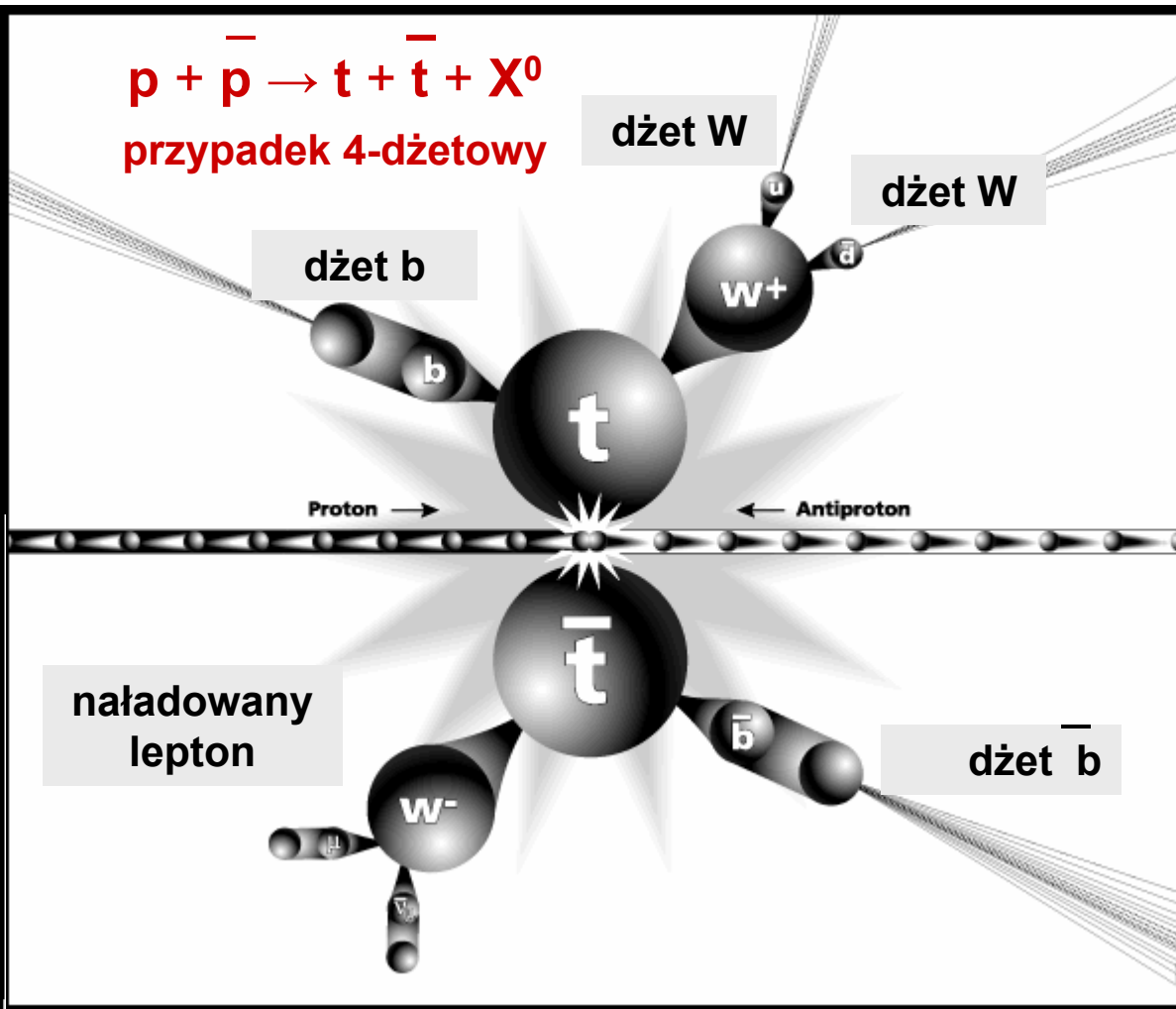
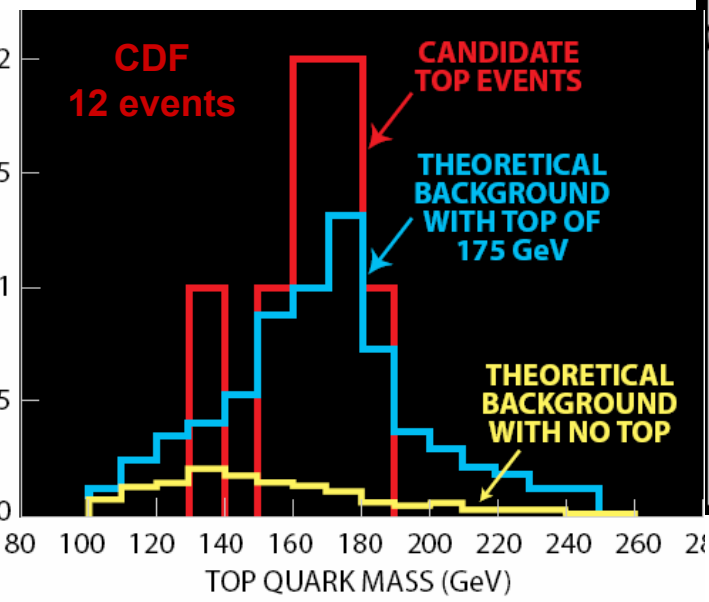


• 1995      **Odkrycie kwarka t** ( truth / top, trzecia generacja kwarków,  $Q = +2/3$  )

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

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

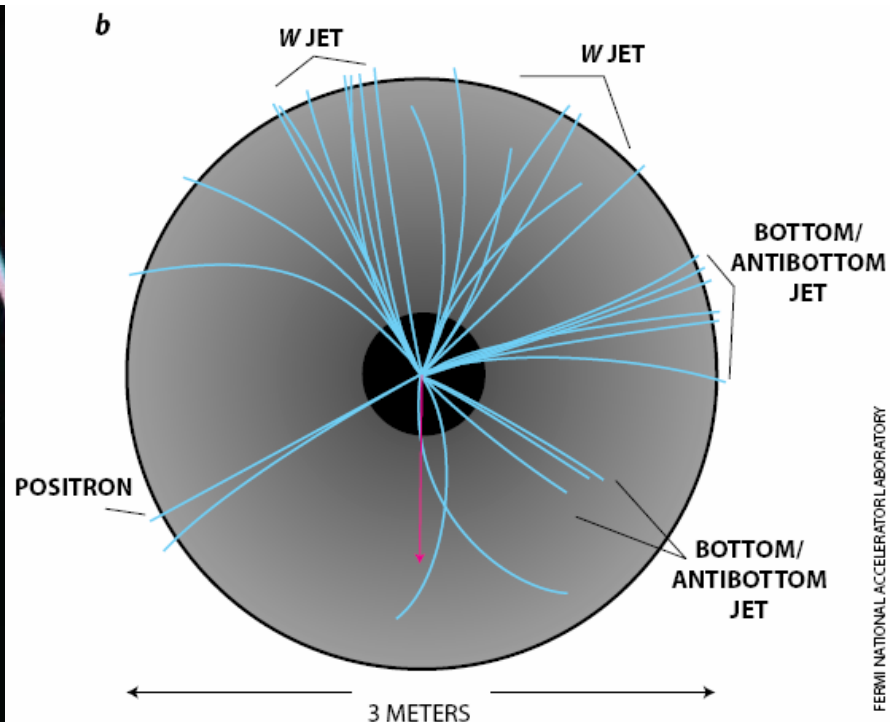
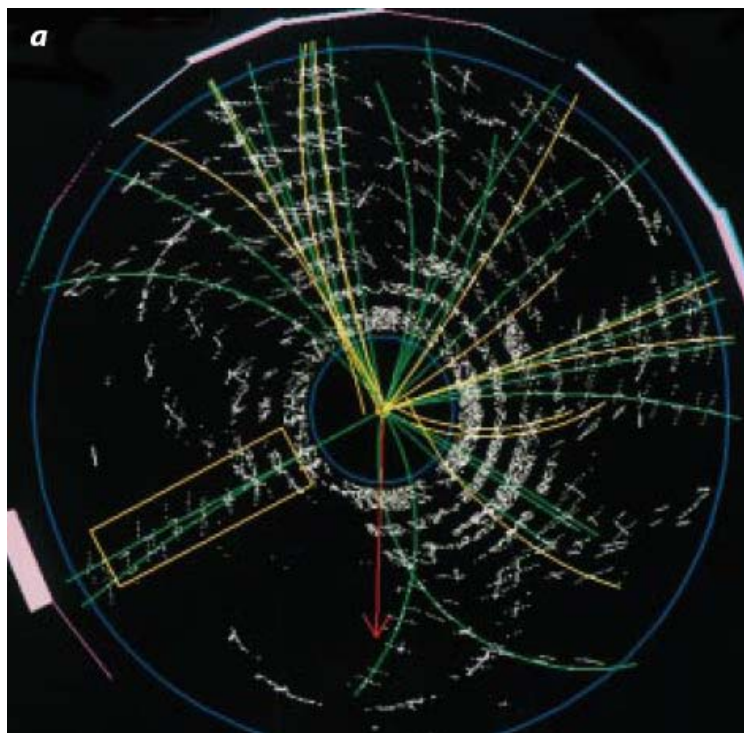
**Dominujący kanał rozpadu t**  
 $t \rightarrow b + W^+$  (  $m_t \gg m_W$  )  
**Rozpady  $W^+$**   
 $W^+ \rightarrow q_1 + \bar{q}_2$  i  $W^+ \rightarrow l^+ + \nu_l$



(2008)  $M_{top} = 170.9 \pm 1.1$  (stat)  $\pm 1.5$  (syst) **GeV /c<sup>2</sup>**

# 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

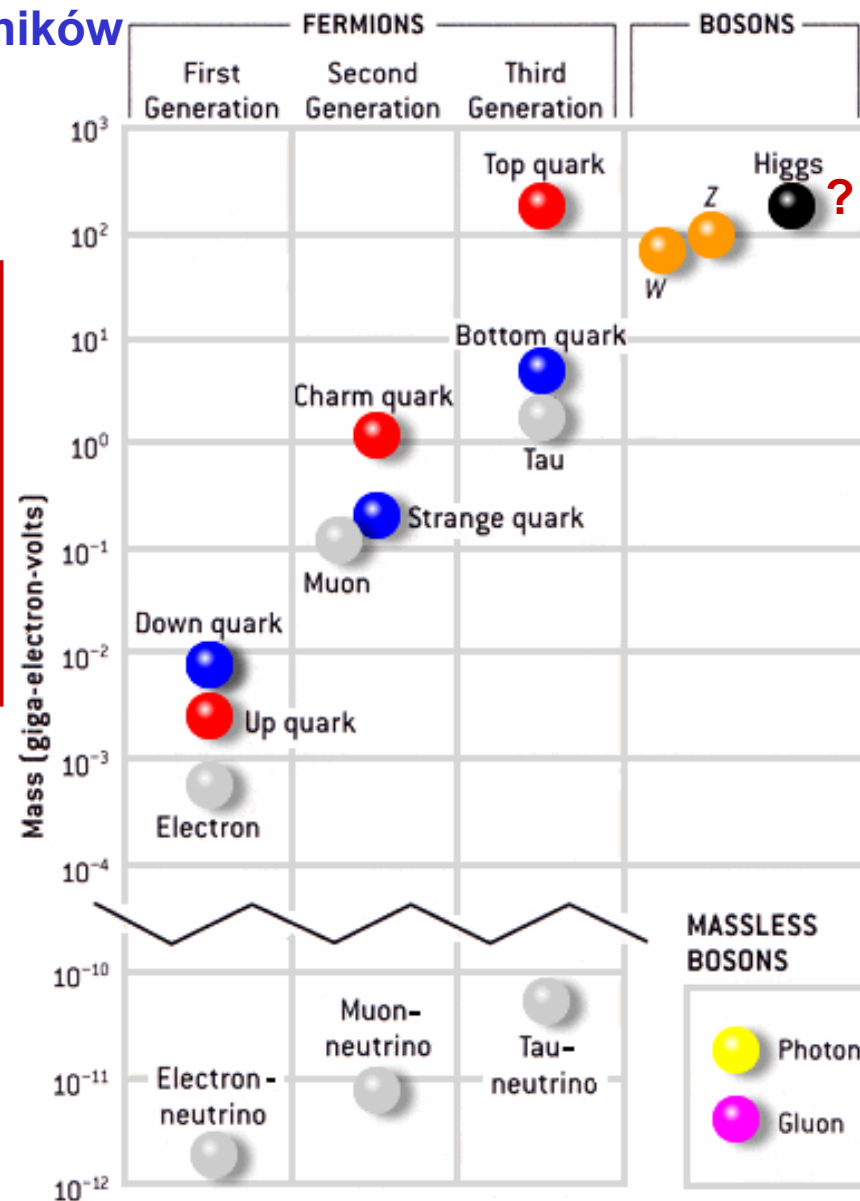
Poprawnie opisuje strukturę materii do odległości rzędu  $10^{-18}$  m  
i oddziaływania jej fundamentalnych składników

**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   | $u$<br>up                    | $c$<br>charm               | $t$<br>top                 |
|          | $d$<br>down                  | $s$<br>strange             | $b$<br>bottom              |
| Leptons  | $\nu_e$<br>electron neutrino | $\nu_\mu$<br>muon neutrino | $\nu_\tau$<br>tau neutrino |
|          | $e$<br>electron              | $\mu$<br>muon              | $\tau$<br>tau              |
|          |                              |                            | $\gamma$<br>photon         |
|          |                              |                            | $Z$<br>Z boson             |
|          |                              |                            | $W$<br>W boson             |
|          |                              |                            | $g$<br>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

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

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

# Elementarne składniki materii : 3 rodziny leptonów

- 3 generacje par leptonowych (naładowany i neutralny lepton) o spinie  $\frac{1}{2}$
- każdy typ (zapach) leptonów posiada odpowiednią liczbę leptonową  $L_e$ ,  $L_\mu$  i  $L_\tau$ , 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)

$M = 0.511 \text{ MeV}$ ,  $L_e = 1$

$\mu^-$  (mion)

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

$\tau^-$  (tau)

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

## Neutralne leptony (neutrino)

$\nu_e$

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

$\nu_\mu$

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

$\nu_\tau$

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

- 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**

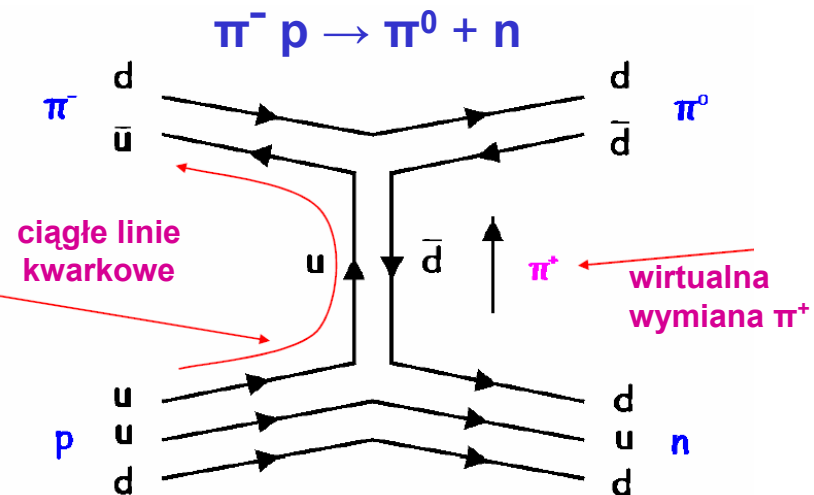
**Cząstka wirtualna** : kwadrat czteropędu takiej cząstki jest różny od kwadratu jej masy spoczynkowej, jej bardzo krótki czas życia określa zasada nieoznaczoności Heisenberga

# Oddziaływania

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

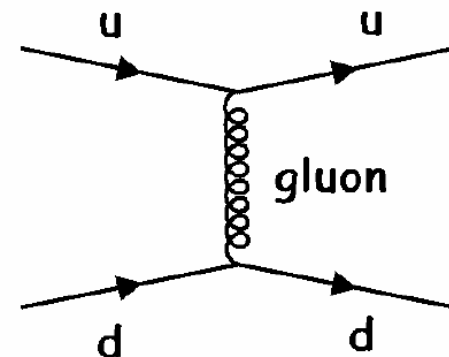
Na poziomie podstawowym oddziaływania między cząstkami wynikają z silnych, słabych i elektromagnetycznych oddziaływań m-dzy kwarkami i leptonami

- **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

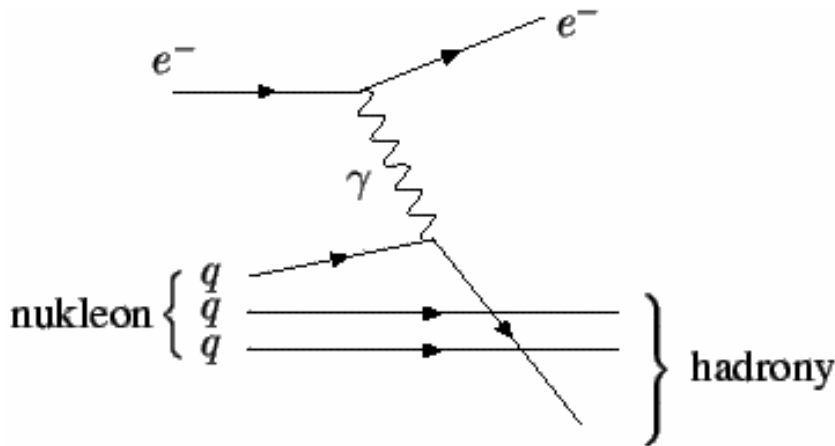


Oddziaływania hadronów przy małym przekazie czteropędu można efektywnie opisać poprzez wymianę pionów

# Oddziaływania

## • oddziaływania elektromagnetyczne

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

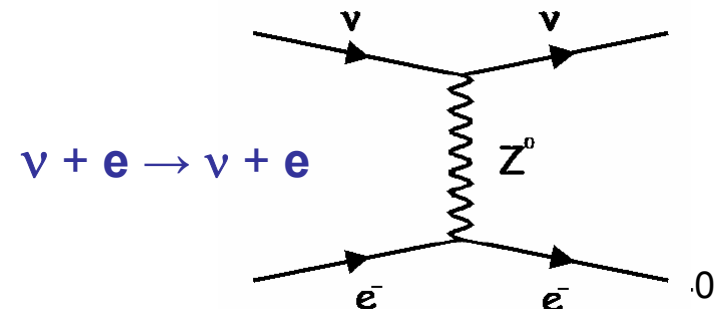
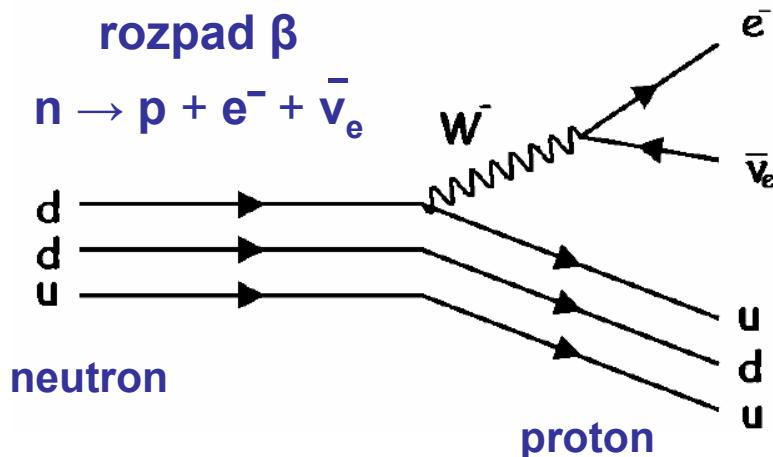


Głęboko nieelastyczne rozpraszanie elektronów na protonach  $e + p \rightarrow e + \text{cokolwiek}$  :

**rozpraszanie elektronów na kwarkach**

## • oddziaływania słabe

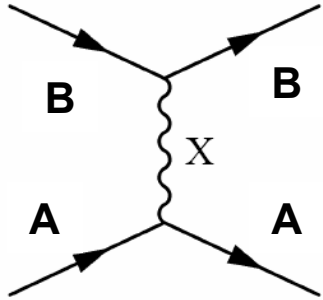
( procesy związane ze zmianą zapachu / typu kwarka np.  $u \leftrightarrow d \longrightarrow$  rozpady  $\beta$  jąder )  
bozony pośredniczące  **$W^\pm, Z^0$   $J^P = 1^-$**





# 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 m-dzy 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  $\Delta t$  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  $\pi$        $R \sim 1/m_\pi \sim 1 \text{ fm}$

# Oddziaływania cząstek elementarnych

- Cząstki elementarne i ich oddziaływania badamy w procesach zderzeń cząstek wytwarzanych w akceleratorach lub pochodzących z promieniowania kosmicznego  
( Do początku lat 50-tych ubiegłego wieku promienie kosmiczne stanowiły jedyne źródło cząstek wysokich energii, odkryto w nim wiele nowych cząstek niewystępujących w otaczającej nas materii )

- **Co mierzymy ?**

Podstawowe obserwable ( wielkości fizycznie mierzalne ) to :

- ▶ przekroje czynne dla badanych procesów zderzeń
- ▶ średnie czasy życia dla rozpadów cząstek



O rodzaju i sile oddziaływania odpowiedzialnego za badany proces wnioskujemy właśnie z tych pomiarów. Oprócz wielkości przekroju czynnego czy też czasu życia dla rozpadów cząstek ważną informacją są także

reguły wyboru dotyczące liczb kwantowych,

związane z **zasadami niezmienniczości / symetrii** poszczególnych oddziaływań

# Oddziaływania cząstek elementarnych

(Różniczkowy) **przekrój czynny dla procesu rozpraszania np.  $a + b \rightarrow c + d + \dots$** ,  
w którym w stanie końcowym powstaje pewna liczba cząstek o określonych pędach  
jest wyznaczony przez :

- kwadrat modułu odpowiedniej amplitudy prawdopodobieństwa **A** zajścia tej reakcji
- czynnik przestrzeni fazowej

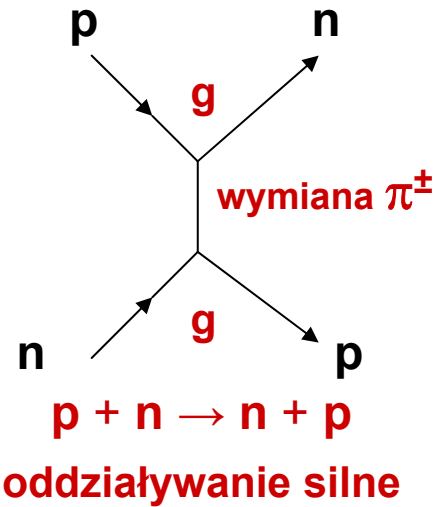
$$d\sigma(a + b \rightarrow c + d + \dots) \sim |A|^2 \cdot (\text{przestrzeń fazowa})$$

amplituda **A** jest obliczana  
w rachunku zaburzeń przy zastosowaniu  
techniki diagramów Feynmana

czynnik przestrzeni fazowej  
definiuje liczbę dostępnych  
stanów końcowych  
(uwzględnia zachowanie energii  
i pędu w procesie)

# Oddziaływania cząstek elementarnych

Niskoenergetyczny proces rozpraszania protonu i neutronu poprzez wymianę ładunkową



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

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

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

propagator bozonu  
odpowiada linii wymienianej  
wirtualnej cząstki

$q^2 = (\text{przekaz czteropędu})^2 = (p_{\text{in}} - p_{\text{f}})^2 < 0$ ,  $p_{\text{in}}$  ( $p_{\text{f}}$ ) czteropęd protonu (neutronu) w stanie początkowym (końcowym)

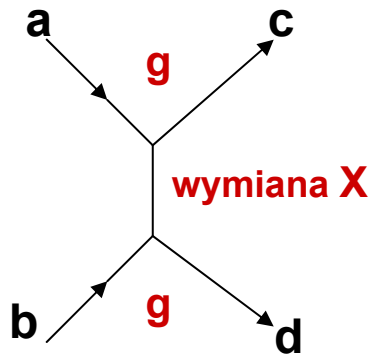
$q^2 = (\text{masa efektywna})^2$  wirtualnego bozonu jest ujemna

Oddziaływania silne hadronów przy małych przekazach czteropędu,  $|q^2| \leq m_p^2$  można efektywnie opisać poprzez wymianę pionów,  $g_{N\pi} \sim 14$ ;

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

Amplituda  $A$  wyznacza siłę tych oddziaływań

# Oddziaływania cząstek elementarnych



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

Amplituda rozpraszania  $A \sim g(q^2) \cdot \frac{1}{(q^2 - m_X^2)} \cdot g(q^2)$

bezwymiarowa stała sprzężenia

propagator bozonu

Siła poszczególnych oddziaływań opisana przez amplitudę  $A$  zależy od  $q^2$  poprzez „biegnącą” stałą sprzężenia  $g$  i czynnik propagatora.

## Oddziaływania elektromagnetyczne i słabe w obszarze niskoenergetycznym

Dominujący wpływ propagatora, dla uproszczenia zakładamy :  $g_{em} \sim g_{słabe}$

Małe przekazy czteropędu  $|q^2| \ll M_W^2$

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



# Rozpady cząstek

O sile poszczególnych oddziaływań możemy również wnioskować z pomiarów czasów życia cząstek niestabilnych

**Szybkość rozpadu cząstki a** – prawdopodobieństwo rozpadu jednej cząstki na jednostkę czasu dla zespołu statystycznego cząstek a ( kilka próbek zawierających N identycznych cząstek a w spoczynku) :

$$P_a = \frac{1}{N} \frac{\overline{\Delta N}}{\Delta t} = \frac{\Gamma_a}{\hbar}$$

$\Gamma_a$  – szerokość rozpadu cząstki a  
( ma wymiar energii )

Niezależna od czasu szybkość rozpadu → eksponencjalna zależność liczby cząstek od czasu :

$$N_a(t) = N_a(0) \exp(-t \Gamma_a / \hbar), \quad N(t) - \text{liczba cząstek w próbce w chwili } t$$

**Szerokość rozpadu  $\Gamma_a$  wiąże się ze średnim czasem życia cząstki  $\tau_a$**   
( czasem po którym liczba cząstek w próbce maleje e – krotnie )

$$\tau_a = \hbar / \Gamma_a$$

## Rozpady cząstek

Jeżeli w rozpraszaniu cząstek A i B formuje się **niestabilna cząstka a**,



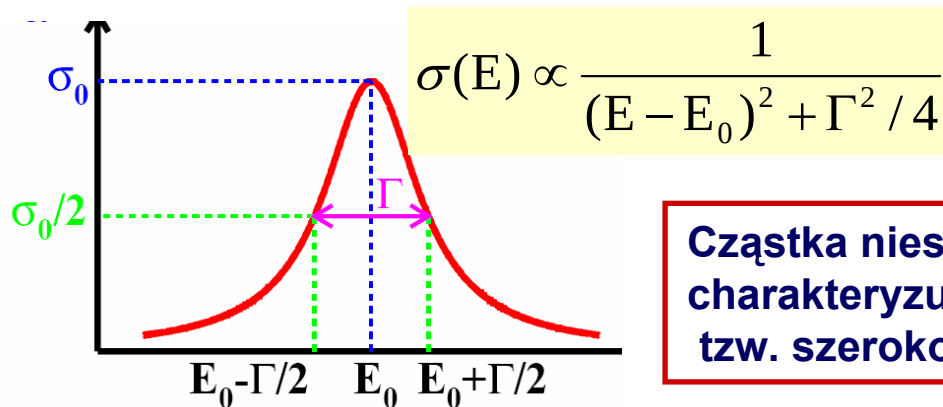
( formacja rezonansu )

to mierząc przekrój czynny na proces rozpraszania w funkcji energii dostępnej w układzie środka masy cząstek A i B,

$$\sigma_{\text{tot}}(AB) \text{ vs. } E_{\text{CM}}$$

obserwujemy jego wzrost dla energii  $E_{\text{CM}} \sim E_0 = m_a c^2$

Rezonansowy przekrój czynny jest opisywany wzorem Breit-Wignera



$\Gamma$  – szerokość rozkładu Breit-Wignera w połowie jego wysokości

Cząstka niestabilna nie ma ściśle określonej masy, charakteryzuje się naturalnym rozmyciem energii stanu, tzw. szerokością rezonansu  $\Gamma$



Ta nieokreśloność masy ( $\Gamma$ ) poprzez zasadę nieoznaczoności ( $\Delta E \cdot \Delta t \approx \hbar = 6.6 \cdot 10^{-22} \text{ MeV s}$ ) wiąże się ze średnim czasem życia cząstki  $\tau$ ,

$$\Delta E = \Gamma = \hbar / \tau$$

Czasy życia cząstek niestabilnych rozpadających się przez poszczególne oddziaływania :

- oddziaływania silne  $\tau \sim 10^{-22} - 10^{-24} \text{ s}$
- oddziaływania elektromagnetyczne  $\tau \sim 10^{-15} - 10^{-17} \text{ s}$
- oddziaływania słabe  $\tau \sim 10^{-6} - 10^{-12} \text{ s}$

Czasy życia dla cząstek "długożyciowych" z  $\tau \geq 10^{-16} \text{ s}$  możemy mierzyć bezpośrednio ( np. w oparciu o rekonstrukcję śladu cząstki). Szerokości rozpadów dla cząstek rozpadających się przez oddziaływania silne wyznaczamy badając rezonansowe zachowanie przekroju czynnego i rozkłady masy efektywnej produktów rozpadu cząstki.



# 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

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

M – amplituda rozpadu,

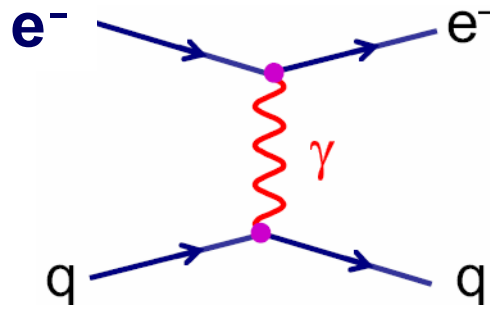
- Szybkość rozpadu  $\Gamma / \hbar$  w pierwszym rzędzie jest proporcjonalna do kwadratu stałej sprzężenia odpowiedniego oddziaływania;
- dla rozpadów cząstek  $\Sigma$  zbliżona przestrzeń fazowa

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

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

# Diagramy Feynmana

są graficznym przedstawieniem oddziaływań m-dzy cząstkami, zachodzących poprzez wymianę odpowiednich kwantów pól

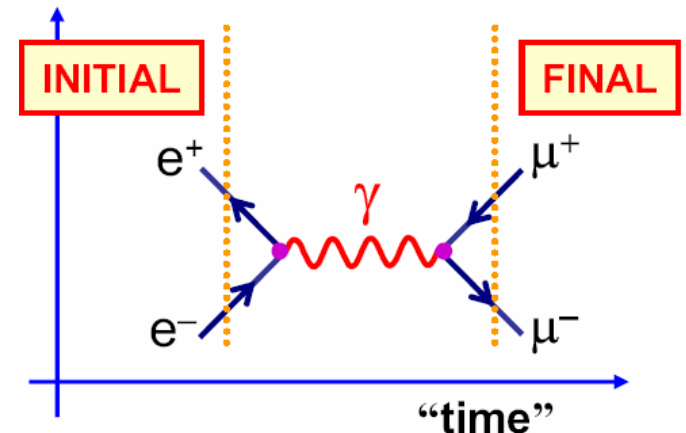


Elektromagnetyczny proces rozpraszania elektronu na kwarku

- Linie zewnętrzne wchodzące do diagramu – rzeczywiste swobodne cząstki w stanie początkowym
- Linie zewnętrzne wychodzące z diagramu – rzeczywiste swobodne cząstki w stanie końcowym
- Linie wewnętrzne łączące wierzchołki – cząstki wirtualne ( $E^2 \neq m^2 + p^2$ )

- Linie ciągłe odp. fermionom (kwarki, leptyony)
- Linie faliste odp. bozonom (QED - fotony, QCD – gluony, oddz. słabe  $W^\pm$  i  $Z$ )
- Strzałki na liniach wskazują kierunek ewolucji w czasie – czas rośnie z lewa na prawo
- Strzałka wskazująca na ruch cząstki wstecz w czasie odp. antycząstce poruszającej się do przodu w czasie
- Linie fermionowe i bozonowe spotykają się w wierzchołkach (vertex)
- W każdym wierzchołku zachowana jest energia pęd, moment pędu, ładunek, liczba barionowa

"space"

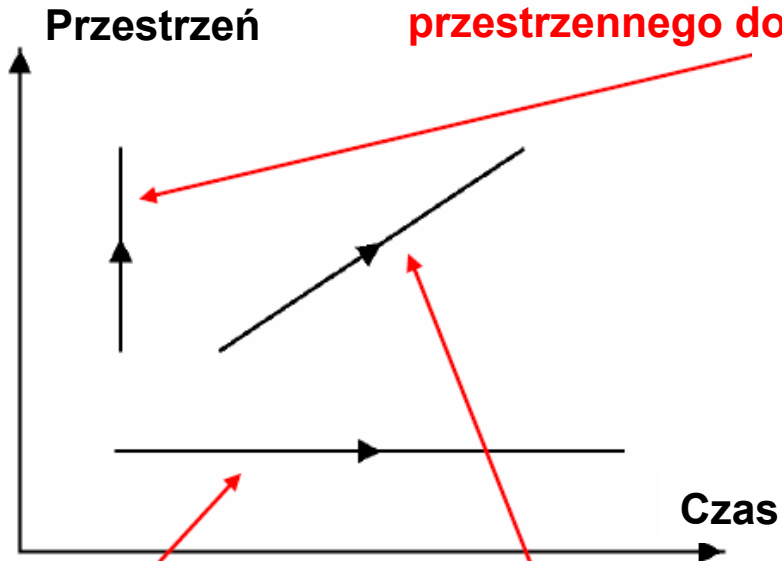


Elektromagnetyczny proces anihilacji pary  $e^+e^-$  w parę  $\mu^+\mu^-$

# Diagramy Feynmana

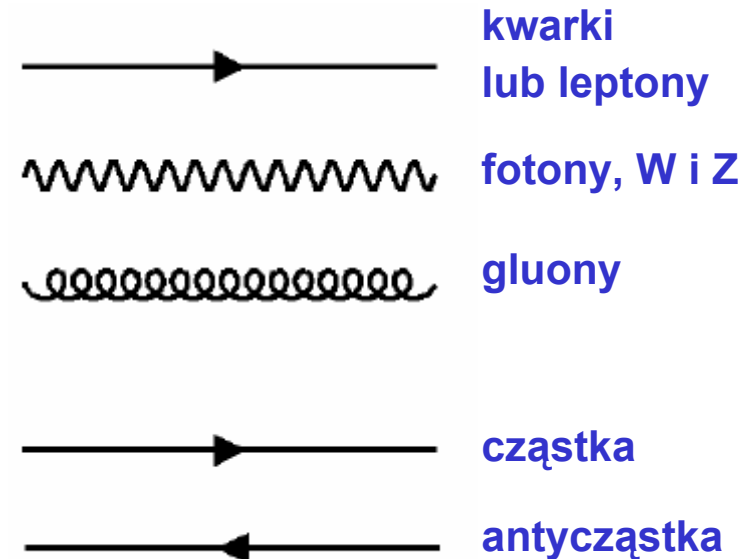
są graficznym przedstawieniem oddziaływań m-dzy cząstkami, zachodzących poprzez wymianę odpowiednich kwantów pól

Cząstka wirtualna przemieszczająca się nieustannie z jednego p-tu przestrzennego do drugiego



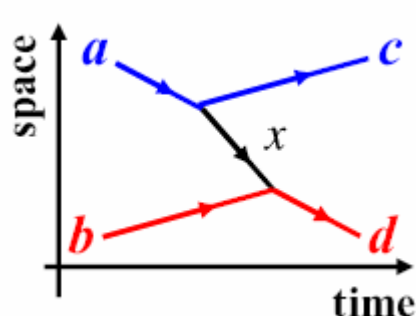
Cząstka w spoczynku

Cząstka przemieszczająca się do przodu w czasie i przestrzeni

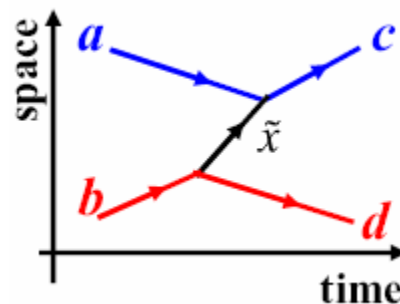


Proces  $a + b \rightarrow c + d$  zachodzący poprzez wymianę cząstki  $x$

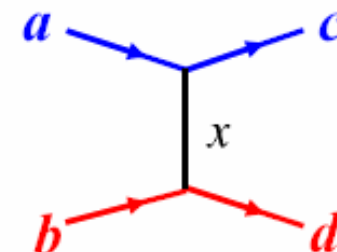
Suma diagramów z uporządkowaniem w czasie



+



=



$$E_x^2 - |\vec{p}_x|^2 = q^2 \neq m_x^2$$

Cząstka  $a$  emituje cząstkę  $x$ ,  
która z kolei jest absorbowana  
przez cząstkę  $b$

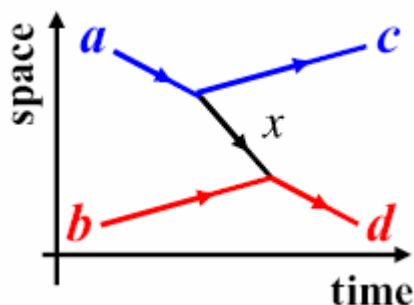
Cząstka  $b$  emituje cząstkę  $\tilde{x}$ ,  
absorbowaną przez cząstkę  $a$   
 $\tilde{x}$  jest antycząstką  $x$

Wymieniana cząstka  $x$   
"poza powłoką masy"  
(czteropęd) $^2 \neq m_x^2$   
cząstka wirtualna

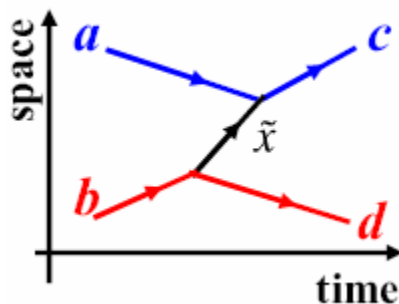
$a, b, c, d$  – mogą być kwarkami, antykwarkami, leptonami lub antyleptonami  
 $x$  – foton, gluon,  $W^\pm$  lub  $Z^0$  ( w zależności od rodzaju oddziaływania )



## Suma diagramów z uporządkowaniem w czasie



+



=

$$A = \frac{g_a g_b}{q^2 - m_x^2}$$

- Pęd jest zachowany w każdym wierzchołku
- Energia nie jest zachowana w wierzchołkach
- Wymieniana cząstka "na powłoce masy"

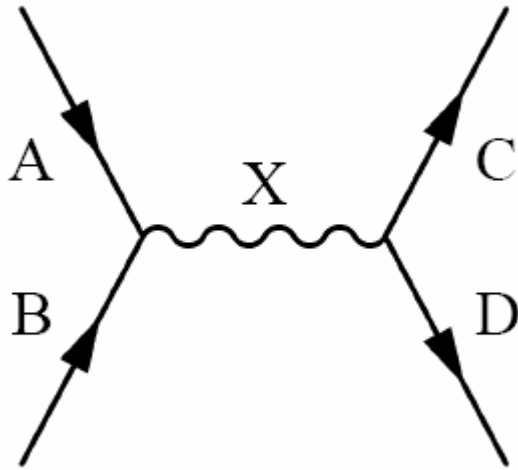
$$E_x^2 - |\vec{p}_x|^2 = m_x^2$$

- pęd i energia są zachowane w każdym wierzchołku
- wymieniana cząstka "poza powłoką masy" cząstka wirtualna

$$E_x^2 - |\vec{p}_x|^2 = q^2 \neq m_x^2$$

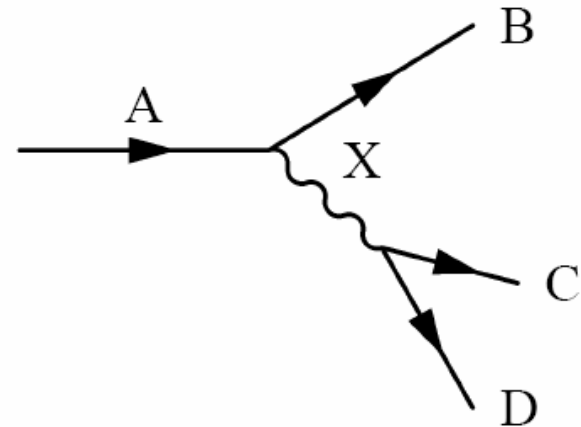
Propagator  $1/(q^2 - m_x^2)$  jest odwrotnie proporcjonalny do wielkości określającej jak bardzo wymieniana cząstka wirtualna jest poza powłoką masy. Im bardziej jest poza powłoką masy tym trudniej jest wyprodukować taki wirtualny stan.

## Diagram anihilacji / formacji



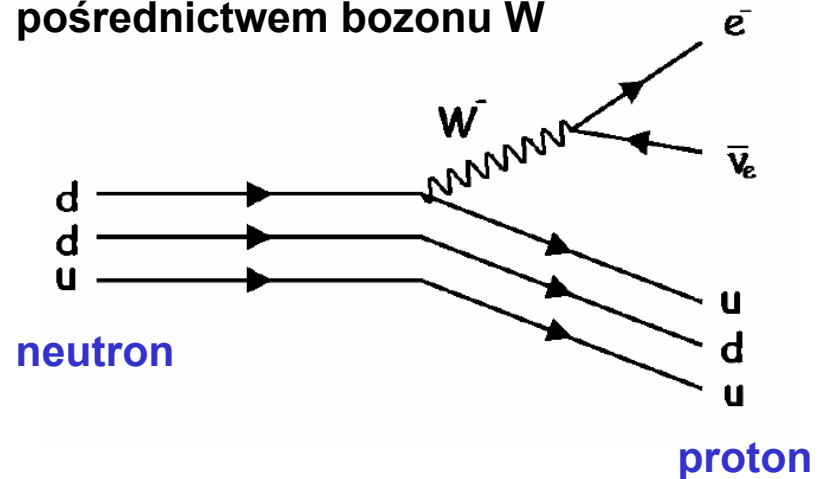
W wyniku oddziaływania cząstki A i B powstaje stan pośredni X, który z kolei rozpada się na cząstki C i D

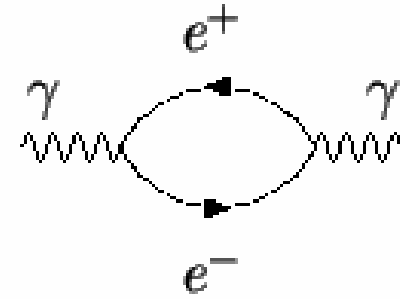
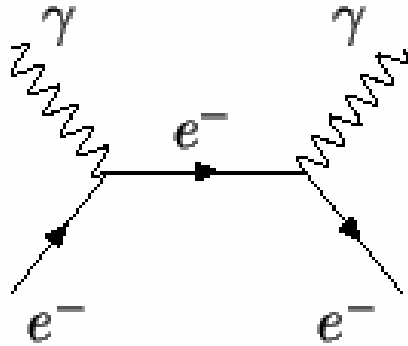
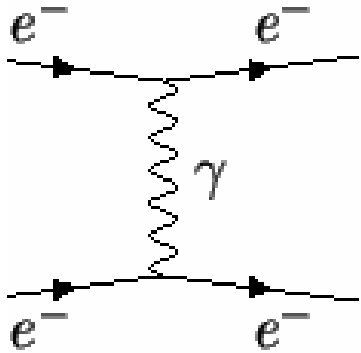
## Reakcja rozpadu $A \rightarrow B + C + D$



## Rozpad $\beta$ neutronu $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

Rozpad słaby – kwark d rozpada się za pośrednictwem bozonu W





## Przykładowe diagramy Feynmana

Oddziaływania fotonów z elektronami / pozytonami są opisane przez wymianę kwantów pól.

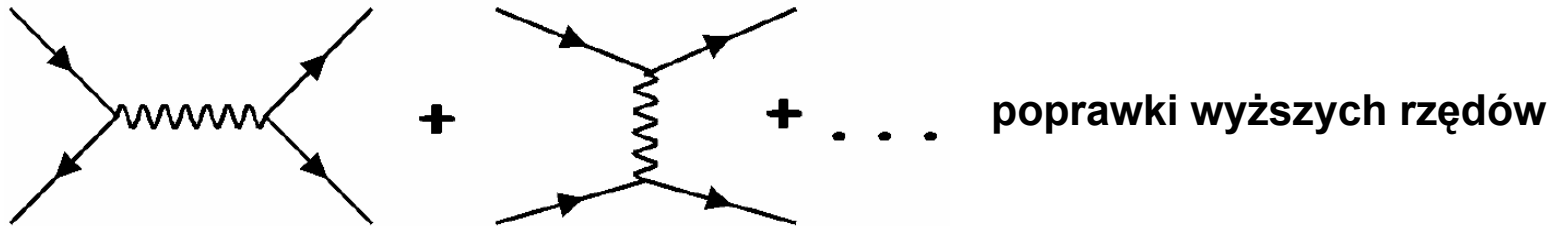
Każdy wierzchołek diagramu Feynmana oznacza elementarny akt emisji lub absorpcji fotonu.

# Rachunek zaburzeń – diagramy Feynmana

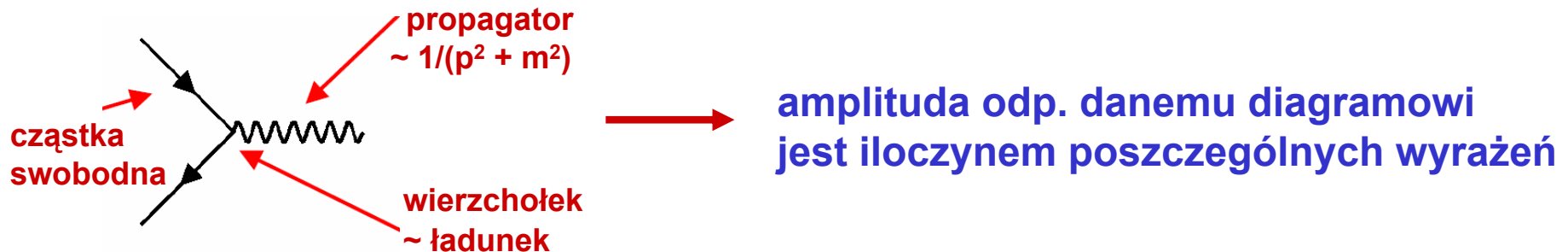
Podstawową metodą rachunkową w kwantowej teorii pola jest rachunek zaburzeń oparty na technice diagramów Feynmana → przekroje czynne badanych procesów, szybkości rozpadu cząstek

- dla danego procesu rysujemy wszystkie możliwe diagramy Feynmana :

np.



- każdej części diagramu odpowiada wyrażenie analityczne



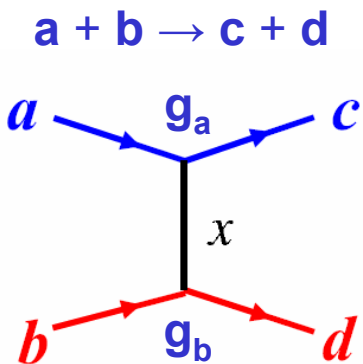
- $A_{\text{TOTAL}} = \sum A_i$ , całkowita amplituda jest sumą amplitud dla poszczególnych diagramów
- przekrój czynny ( lub szybkość rozpadu )  $\sim |A_{\text{TOTAL}}|^2 \cdot \text{przestrzeń fazowa}$  ( Złota reguła Fermiego )

# Diagramy Feynmana

Każdemu diagramowi odpowiada wyrażenie analityczne → przyczynik do amplitudy prawdopodobieństwa badanego procesu

Suma takich wyrażeń odp. wszystkim możliwym diagramom → amplituda prawdopodobieństwa zajścia badanego procesu

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



$$A = \frac{g_a g_b}{q^2 - m_x^2}$$

**A** – amplituda rozpraszania

element macierzowy przejścia ze stanu początkowego do stanu końcowego

$m_x$  - masa wymienianej cząstki

$q$  - czteropęd unoszony przez wirtualną cząstkę ( obliczamy z zachowania czteropędu w wierzchołkach )

$g_{a(b)}$  - stałe sprzężenia

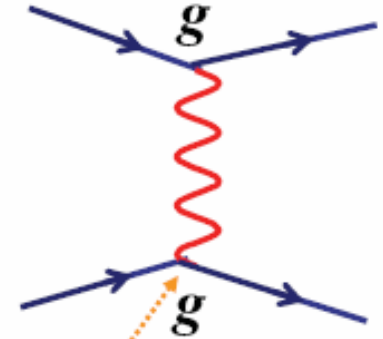
**Amplituda rozpraszania** dla procesu zachodz. przez wymianę pojedynczego bozonu  
**iloczyn dwóch stałych sprzężenia  $g_a$  i  $g_b$**  odpowiadających dwóm wierzchołkom oddziaływania

oraz **propagatora  $1/(q^2 - m_x^2)$**  odp. linii wymienianej wirtualnej cząstki

**Wartość stałej sprzężenia  $g_{a,b}$**  określa siłę oddziaływania w danym wierzchołku

W Modelu Standardowym oddziaływania elektromagnetyczne, słabe i silne zachodzą przez wymianę bozonów pośredniczących o spinie i parzystości  $J^P = 1^-$

| Oddziaływanie | Bozon pośredniczący | $J^P$ | Masa [ GeV ] |
|---------------|---------------------|-------|--------------|
| EM (QED)      | foton $\gamma$      | $1^-$ | 0            |
| SŁABE         | $W^\pm / Z^0$       | $1^-$ | 80 / 91      |
| SILNE (QCD)   | 8 gluonów           | $1^-$ | 0            |



**Siła oddziaływania jest określona przez ładunek  $g$**

- ładunek jest związany z bezwymiarową "stałą" sprzężenia  $\alpha$

**QED :**  $g_{em} = e = \sqrt{4\pi\alpha\epsilon_0\hbar c}$

- jednostki Heaviside'a – Lorentza  $\epsilon_0 = \hbar = c = 1$

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi} \approx \frac{1}{137}$$

**stała struktury subtelnej** określa wielkość rozszczepienia subtelnych widm atomowych wynikającego z oddz. spin – orbita

( $\alpha$  – bezwymiarowa kombinacja 3 podstawowych stałych przyrody : stałej Plancka, prędkości światła i ładunku elektronu)

- **b. precyzyjne pomiary  $\alpha = 1/ 137.035\ 999\ 11(46)$**  z pomiarów anomального momentu magnetycznego elektronu i kwantowego efektu Halla

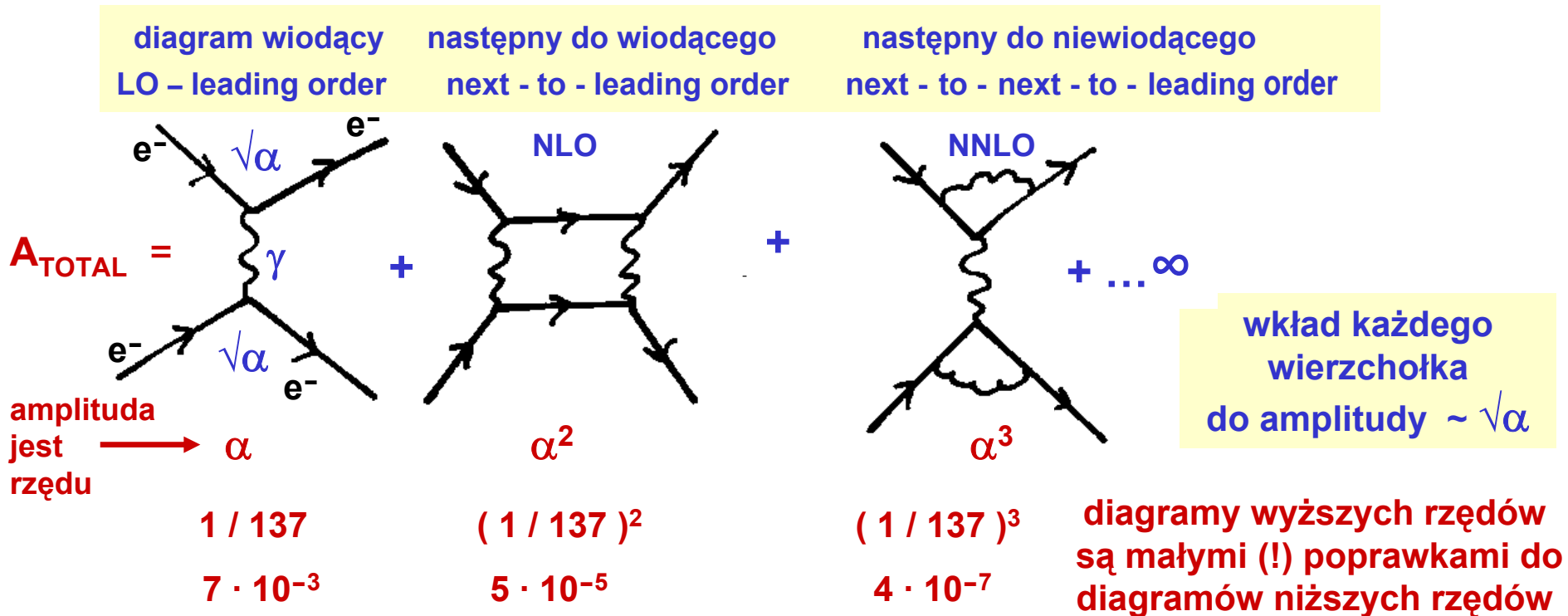
$e$  – ładunek elektryczny elektronu  
 $\epsilon_0$  – przenikalność elektryczna próżni

# QED - rachunek zaburzeń

Obliczając całkowitą amplitudę dla danego procesu należy zsumować przyczynki od wielu diagramów Feynmana, uwzględniających wszelkie możliwe stany pośrednie

→ wkłady od diagramów z coraz to większą liczbą wierzchołków oddziaływania

Rachunek perturbacyjny : amplituda jest szeregiem potęgowym w stałej sprzężenia



QED : dobrym przybliżeniem jest już pierwszy człon – przybliżenie Borna ( LO )

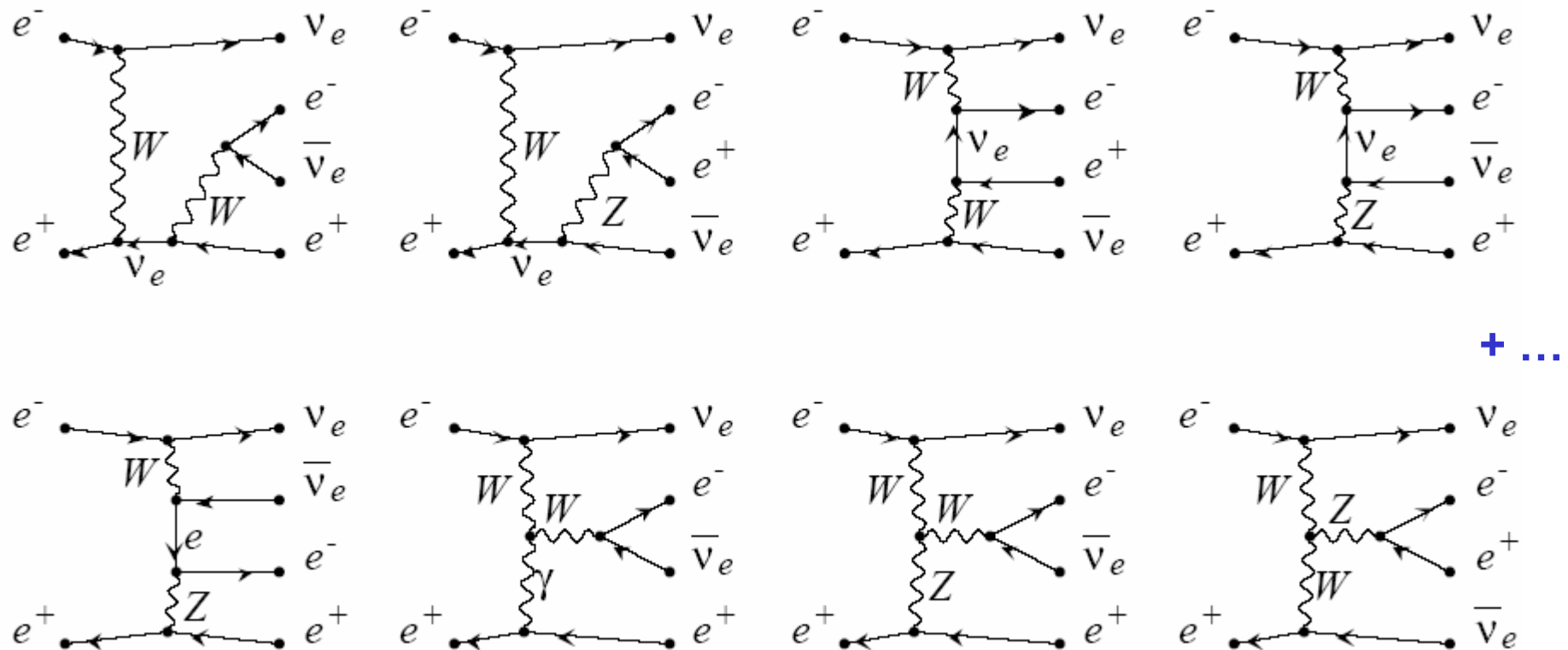
Rozwinięcie perturbacyjne daje dobre wyniki, ponieważ stała sprzężenia

jest mała

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



$$e^+e^- \rightarrow e^+e^-\nu_e\bar{\nu}_e$$



Kilka diagramów Feynmana w najniższym rzędzie dla badanego procesu<sub>61</sub>

$$e^+e^- \rightarrow e^+e^-\nu_e\bar{\nu}_e$$

