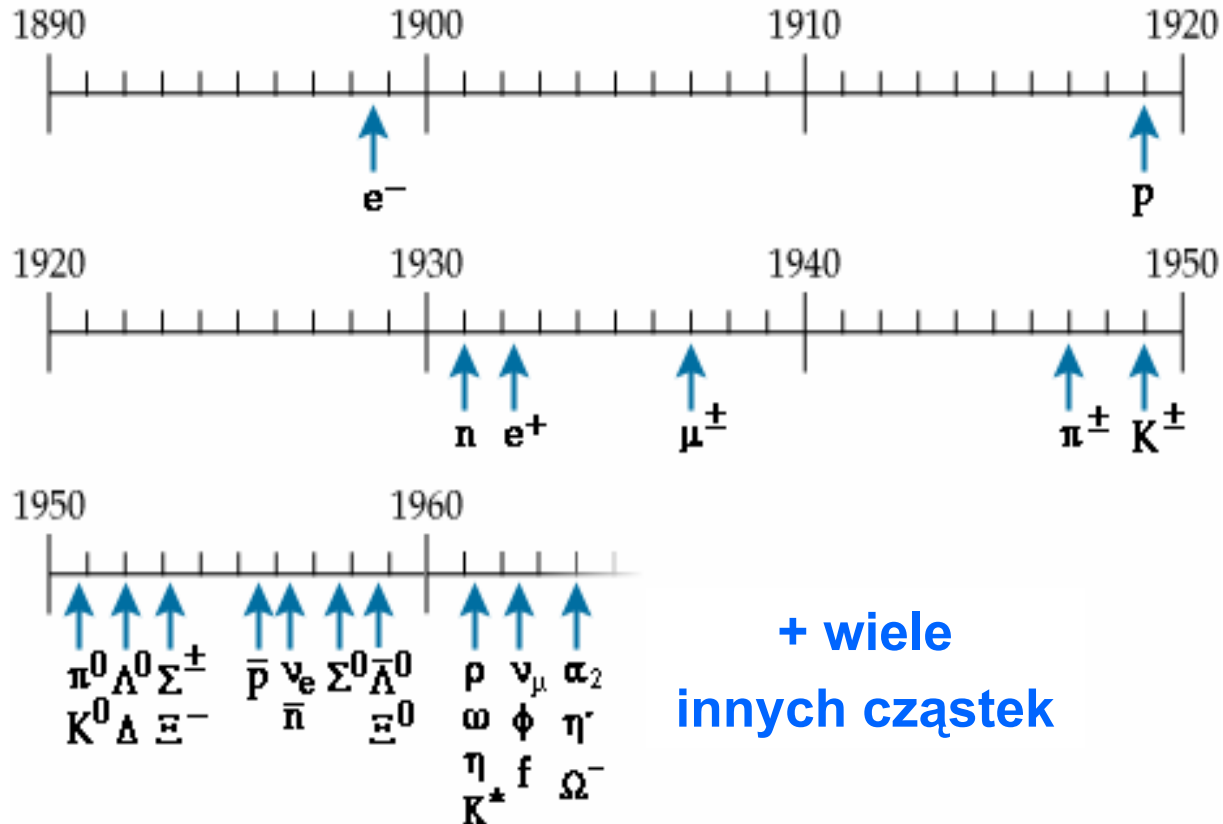


- Model kwarków
- Hadrony – liczby kwantowe
- Rezonanse
  - procesy formacji i produkcji
  - rezonans barionowy  $\Delta$
  - odkrycie mezonu wektorowego  $\omega$
- Kolor kwarków

# Model kwarków – trochę historii

## Początek lat sześćdziesiątych :

- ▶ silna ewidencja eksp. 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



# Model kwarków

- Regularności w widmie mas mezonów i barionów
- Przybliżona niezależność przekrojów czynnych od typu hadronu w procesach  $\pi N$ ,  $KN$



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

**hadrony**, cząstki oddział. silnie, **składają się z kwarków**  
są stanami związanymi kwarków w ramach zapachowej  
symetrii  $SU(3)$

$SU(3)$  - tylko lekkie kwarki u, d i s

bariony : trzy kwarki

mezony : kwark – antykwark

**kwarki mają ułamkowe ładunki elektryczne i spin 1/2**



## A SCHEMATIC MODEL OF BARYONS AND MESONS \*

M. GELL-MANN

*California Institute of Technology, Pasadena, California*

Received 4 January 1964

If we assume that the strong interactions of baryons and mesons are correctly described in terms of the broken "eightfold way" <sup>1-3</sup>, we are tempted to look for some fundamental explanation of the situation. A highly promised approach is the purely dynamical "bootstrap" model for all the strongly interacting particles within which one may try to derive isotopic spin and strangeness conservation and broken eightfold symmetry from self-consistency alone <sup>4</sup>). Of course, with only strong interactions, the orientation of the asymmetry in the unitary space cannot be specified; one hopes that in some way the selection of specific components of the F-spin by electromagnetism and the weak interactions determines the choice of isotopic spin and hypercharge directions.

Even if we consider the scattering amplitudes of strongly interacting particles on the mass shell only and treat the matrix elements of the weak, electromagnetic, and gravitational interactions by means

number  $n_t - n_{\bar{t}}$  would be zero for all known baryons and mesons. The most interesting example of such a model is one in which the triplet has spin  $\frac{1}{2}$  and  $z = -1$ , so that the four particles  $d^-$ ,  $s^-$ ,  $u^0$  and  $b^0$  exhibit a parallel with the leptons.

A simpler and more elegant scheme can be constructed if we allow non-integral values for the charges. We can dispense entirely with the basic baryon  $b$  if we assign to the triplet  $t$  the following properties: spin  $\frac{1}{2}$ ,  $z = -\frac{1}{2}$ , and baryon number  $\frac{1}{3}$ . We then refer to the members  $u^{\frac{2}{3}}$ ,  $d^{-\frac{1}{3}}$ , and  $s^{-\frac{1}{3}}$  of the triplet as "quarks" <sup>6</sup>)  $q$  and the members of the anti-triplet as anti-quarks  $\bar{q}$ . Baryons can now be constructed from quarks by using the combinations  $(qqq)$ ,  $(qqq\bar{q}\bar{q})$ , etc., while mesons are made out of  $(q\bar{q})$ ,  $(q\bar{q}\bar{q}\bar{q})$ , etc. It is assuming that the lowest baryon configuration  $(qqq)$  gives just the representations **1**, **8**, and **10** that have been observed, while the lowest meson configuration  $(q\bar{q})$  similarly gives just **1** and **8**.

“Praca z propozycją istnienia kwarków została przyjęta do druku w *Physics Letters* tylko dlatego, że autorem był Gell-Mann. Redaktor pomyślał sobie: ta praca jest zwariowana, ale jeśli ją zaakceptujemy i okaże się nonsensem, to blamaż spadnie na Gell-Manna, a nie na *Physics Letters*. Jeśli jednak ją odrzucimy a okaże się prawdziwa, to będą się z nas wyśmiewać.”

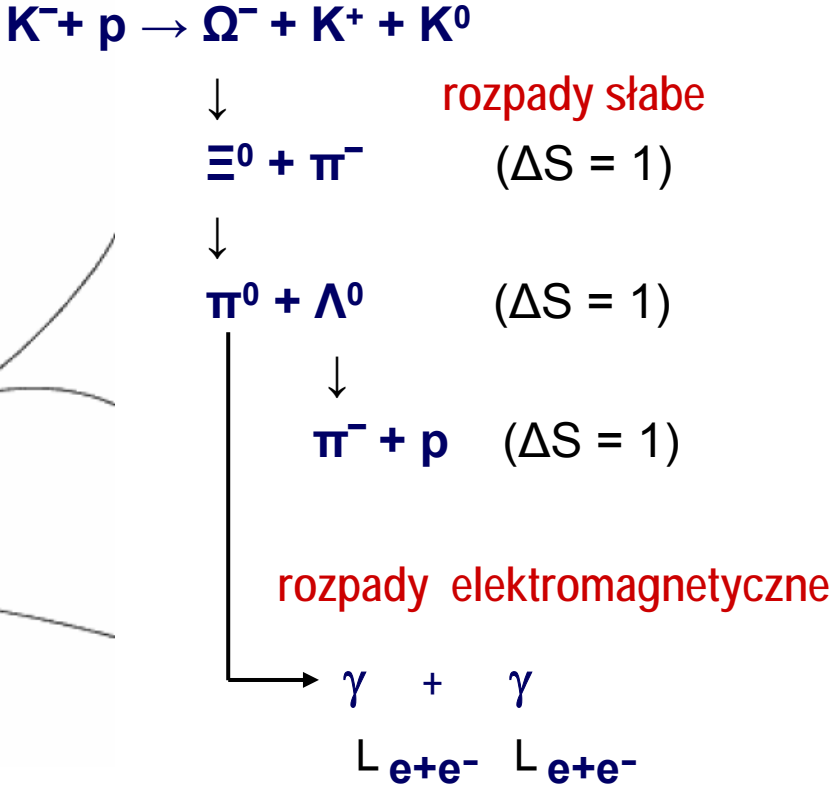
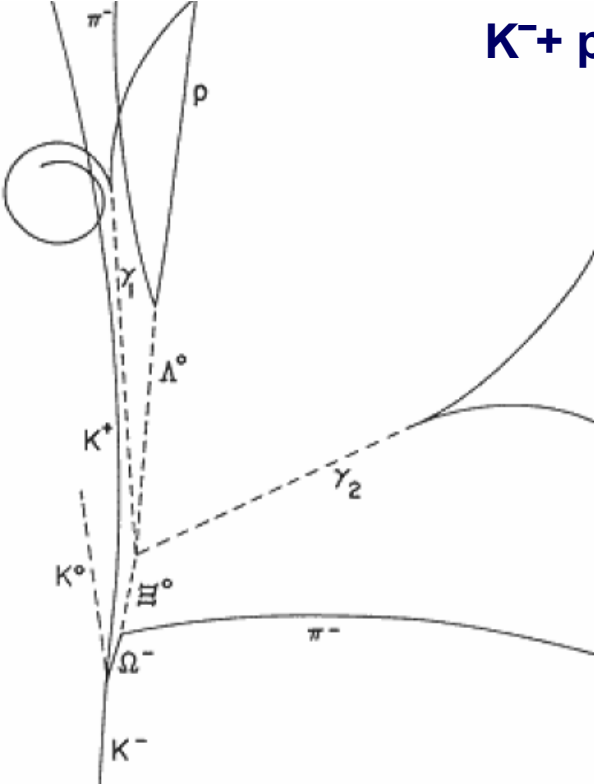
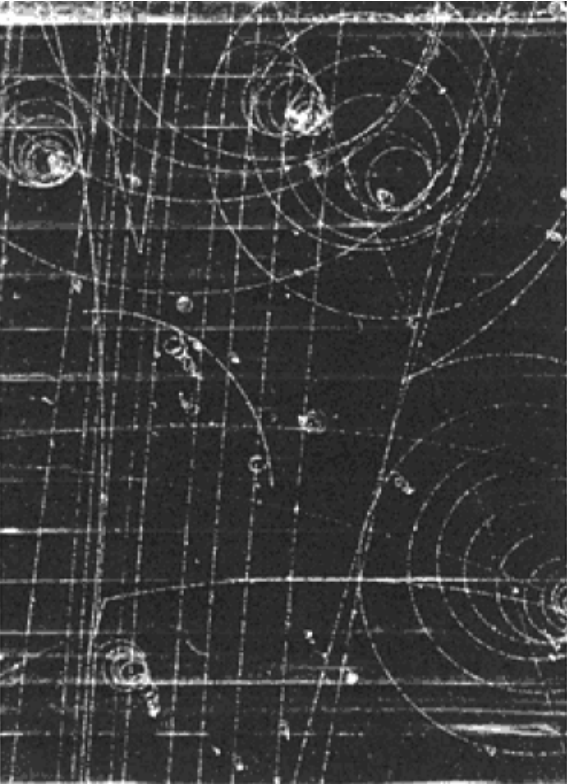


Harry Lipkin (1997)

Z wykładu AKW

• 1964 odkrycie cząstki  $\Omega^-$

**Model kwarków przewidział 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 (masy & liczby kwantowe) i służyły do ich klasyfikacji, traktowano je jako obiekty matematyczne.**

## Addytywne liczby kwantowe kwarków

Property \ Quark	$d$	$u$	$s$	$c$	$b$	$t$
Q – electric charge	$-\frac{1}{3}$	$+\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$+\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$+\frac{2}{3}$
I – isospin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	0	0	0
$I_z$ – isospin $z$ -component	$-\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{2}$	0	0	0	0
S – strangeness	0	0	-1	0	0	0
C – charm	0	0	0	+1	0	0
B – bottomness	0	0	0	0	-1	0
T – topness	0	0	0	0	0	+1

- **1964 r – prosty ( statyczny ) model kwarków**
- **Eksperymenty głęboko nieelastycznego rozpraszania leptonów na nukleonach ( pierwsze wyniki w 1968 r ) – nukleony są zbudowane z partonów, partony  $\equiv$  kwarki**  
 → **kwarki naprawdę istnieją !**
- **Ulepszony model partonowy (partony  $\equiv$  kwarki & gluony) dynamicznym modelem struktury hadronów**

- cząstki złożone składające się z kwarków i gluonów  
( kwarki = kwarki walencyjne i kwarki morza , valence quarks & sea quarks)
- biorące udział we wszystkich rodzajach oddziaływań, szczególnie w **oddziaływaniach silnych**
- w prostym **modelu kwarkowo – partonowym** ( *Quark Parton Model, QPM* ) liczby kwantowe hadronów określone są przez **kwarki walencyjne**
- w Naturze występują 3 typy związanych stanów kwarkowych :

▼ <b>bariony</b> spin $\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \dots$	– stany związane 3 kwarków ( $q_i q_j q_k$ ) liczba barionowa $\neq 0$
▼ <b>antybariony</b> spin $\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \dots$	– stany związane trzech antykwarków ( $\bar{q}_i \bar{q}_j \bar{q}_k$ ) liczba barionowa $\neq 0$
▼ <b>mezony</b> spin $0, 1, \dots$	– stany związane kwarka i antykwarka ( $q_i \bar{q}_j$ ) liczba barionowa = 0

$q_i$  – kwarki walencyjne, występują w różnych zapachach

Występowanie takich kombinacji kwarków wyjaśnia QCD.

Doświadczalno- teoretyczna ewidencja na istnienie innych dopuszczalnych stanów kwarkowych ( i gluonowych ) jest niewystarczająca.



# Hadrony

Każdy hadron jest scharakteryzowany przez :

- swoją **masę** (odp. poziomowi energetycznemu związanego stanu kwarkowego)
- **średni czas życia** ( lub szerokość rozpadu stanu niestabilnego)
- liczby kwantowe związane z symetriami czasoprzestrzeni  $J^P$  lub  $J^{PC}$  , I :  
**spin J**, **parzystość przestrzenna P**, dla cząstek będących swoimi antycząstkami  
**parzystość ładunkowa C** , **izospin I**
- wewnętrzne liczby kwantowe : **ładunek elektryczny Q** i **liczba barionowa  $\tilde{B}$**   
(zachowane we wszystkich oddziaływaniach) oraz liczby kwantowe związane z zapachem kwarków ( **dziwność S**, **powab C**, **piękno B** i **prawda T** ) zachowane w oddziaływaniach silnych i elektromagnetycznych

---

W Naturze liczba barionowa jest zachowana :

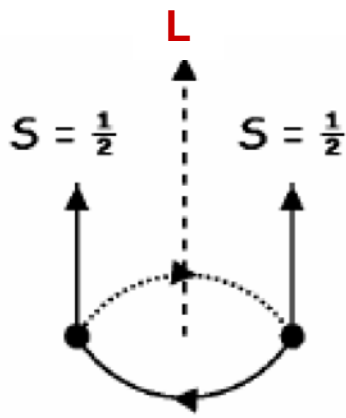
→ niektóre bariony są stabilne ( proton, jądra atomowe ! )

Żaden z mezonów nie jest stabilny.

# Hadrony

- Spin hadronu  $\mathbf{J} = \mathbf{L} + \mathbf{S}$ ,  $\mathbf{L}$  – orbitalny moment pędu kwarków  
 $\mathbf{S}$  – spin układu kwarków  
 ( porównaj wykład nt. spinu i momentu pędu w Modelu Kwarków )
- Stany podstawowe układu kwarków (  $L = 0$  ) – względnie stabilne hadrony ,  
 ( mezony o spinie  $J = 0$  i  $J = 1$  oraz bariony o spinie  $J = \frac{1}{2}$  i  $\frac{3}{2}$  )  
 rozpadające się przez oddziaływania słabe i elektromagnetyczne

- Stany wzbudzone hadronów ( układu kwarków ) – rezonanse  
 rozpady poprzez oddziaływania silne z **czasem życia**  $\tau \sim 10^{-22} - 10^{-23}$  s
- ✓ **wzbudzenia radialne** dla każdego  $\{ L, S, J \}$  ; opisane główną liczbą kwantową  $n$   
 ( *radial excitation* )
- ✓ **wzbudzenia orbitalne** ( *orbital excitation* ) ; wzbudzenia kwarków do wyższych  
 orbitalnych momentów pędu  $L > 0$



Orbitalny moment pędu  $L > 0$  m-dzy kwarkami systemu

$q \bar{q}$

$i$

$qqq$

mezony o spinie  $J = 2, 3, \dots$

$i$

bariony o spinie  $5/2, 7/2, \dots$

# Rezonanse

Wzbudzone stany hadronowe – taki sam skład kwarkowy,  
ale większy wewnętrzny moment pędu ( spin )

Rezonanse barionowe :  $p, n \rightarrow N^*, \Delta$  ;  $\Sigma, \Lambda \rightarrow \Sigma^*, \Lambda^*$

Rezonanse mezonowe :  $K^0, K^\pm \rightarrow K^*$  ;  $\pi^0, \pi^\pm \rightarrow \rho, \omega$

Rozpady przez oddziaływania silne , **czasy życia**  $\tau \sim 10^{-22} - 10^{-23}$  s.

**Średnia droga cząstki** poruszającej się z prędkością światła :  $3 \cdot 10^8 \cdot 10^{-23} \sim 3 \cdot 10^{-15}$  m  
→ **bezpośrednia detekcja niemożliwa** ( np. rekonstrukcja śladu cz. naładowanej )

Cząstka niestabilna nie ma ściśle określonej masy; jej średni czas życia w układzie spoczynkowym jest związany z rozmyciem energii stanu czyli nieokreślonością masy poprzez zasadę nieoznaczoności:

$$\Delta E \cdot \Delta t \approx \hbar = 6.6 \cdot 10^{-22} \text{ MeV s} \rightarrow \Delta E \approx \hbar / 10^{-23} = 6.6 \cdot 10^{-22} / 10^{-23} \approx 70 \text{ MeV}$$

$\Gamma$ , **szerokość rezonansu ( szerokość rozpadu )** :  $\Delta E \approx \Gamma \equiv 1 / \tau$

Dla izolowanego rezonansu rozkład masy niezmienniczej produktów jego rozpadu jest opisany przez **krzywą Breita – Wignera** :

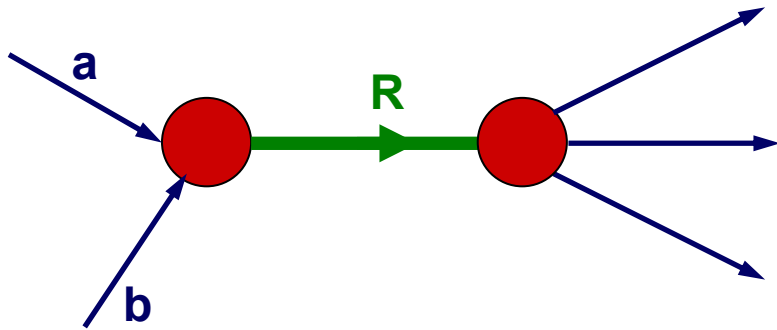
$$N(M) = \frac{K}{(M - M_R)^2 + \Gamma^2 / 4}$$

$M$  – masa niezmiennicza produktów rozpadu

$M_R, \Gamma$  – masa i szerokość rezonansu

Pełny wzór wymaga uwzględnienia efektów spinowych i relatywistycznych

# Procesy formacji i produkcji rezonansów



## Formacja rezonansu R

W wyniku oddziaływania cząstek a i b powstaje tylko rezonans R, który z kolei podlega rozpadowi

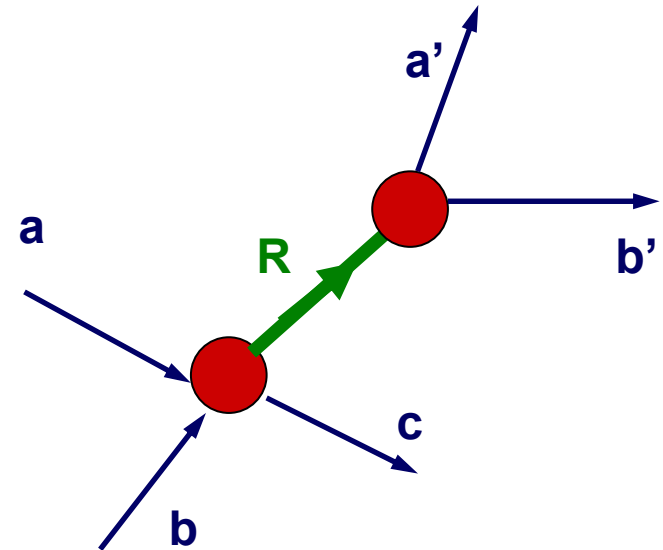


## Pomiar przekroju czynnego

w funkcji energii dostępnej w układzie środka masy cząstek a i b

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

Poszukiwanie maksimum w rozkładach całkowitego przekroju czynnego



## Produkcja rezonansu R

w reakcji  $a + b \rightarrow R + c$  i jego rozpad poprzez oddziaływania silne



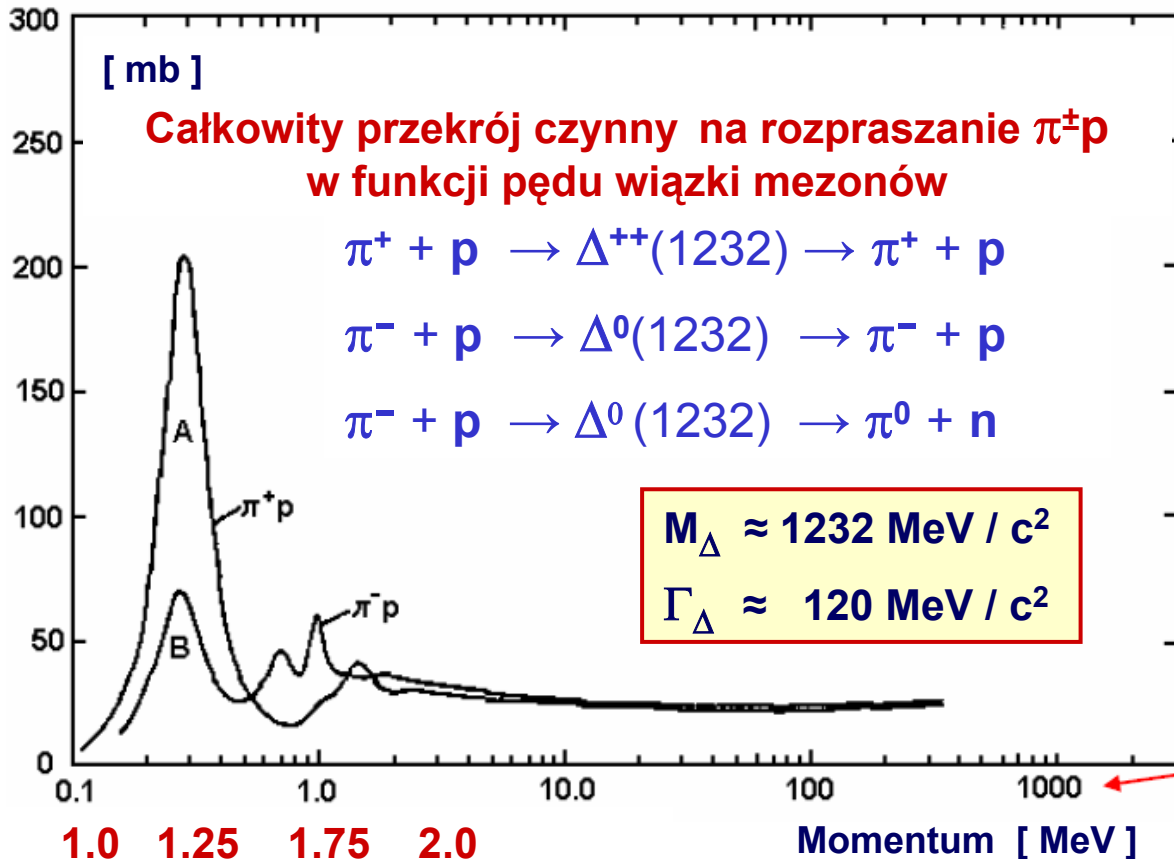
W badanym procesie powstaje **rezonans + inne cząstki**

Pomiar masy niezmienniczej układu cząstek, na które rozpada się rezonans

$$M_{\text{inv}}^2 = (\sum E_i)^2 - (\sum \vec{p}_i)^2$$

# Rezonanse barionowe

Pierwszy rezonans został odkryty przez Andersona i Fermiego w 1952 r na cyklotronie w Chicago – **formacja rezonansów barionowych  $\Delta$  w zderzeniach  $\pi^\pm p$**



**równoważna energia  $E_{CM}$  [ GeV ]**

**Przekrój czynny na rozpraszanie elastyczne**



**i reakcję wymiany ładunkowej**



**ma maksimum przy  $E_{CM}$  równej masie stanu rezonansowego  $\Delta$**

**Dopasowanie  $\sigma_{tot}$**

**do rozkładu Breita - Wignera**

**→ masy i szerokości  $\Delta^{++}$  i  $\Delta^0$  takie same**

**Zaobserwowano również rezonanse  $\Delta$  odpowiadające stanom ładunkowym**



# Rezonans barionowy $\Delta$

Rezonans  $\Delta$  : produkcja i rozpad poprzez oddziaływania silne

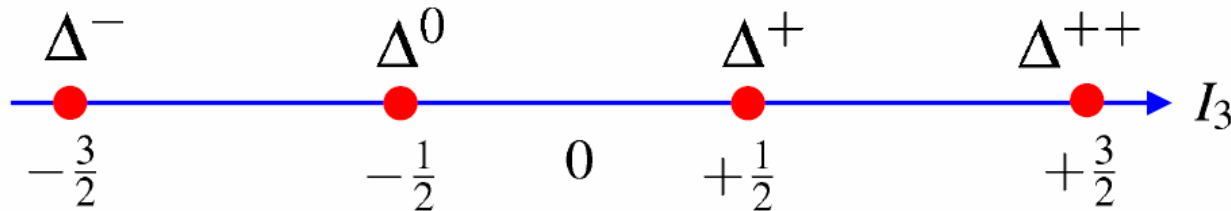
procesy formacji  $\pi^+ + p \rightarrow \Delta^{++} \rightarrow \pi^+ + p$  ,  $\pi^- + p \rightarrow \Delta^0 \rightarrow \pi^- + p$

Liczby kwantowe  $\Delta$  zdefiniowane przez liczby kwantowe stanu początkowego  $\pi p$

liczba barionowa  $\tilde{B} = 1$ ;  $S = C = B = T = 0$  ,  $Q = I_3 + \frac{1}{2}$

piony  $I = 1$ , protony  $I = \frac{1}{2}$   $\rightarrow \Delta$  ma izospin  $I = \frac{1}{2}$  lub  $\frac{3}{2}$   
4 stany ładunkowe  $\rightarrow I = \frac{3}{2}$

$\Delta^- = d d d$  ,  $\Delta^0 = u d d$  ,  $\Delta^+ = u u d$  ,  $\Delta^{++} = u u u$



Analiza rozkładów kątowych produktów rozpadu rezonansu  $\Delta \rightarrow J^P = 3/2^+$

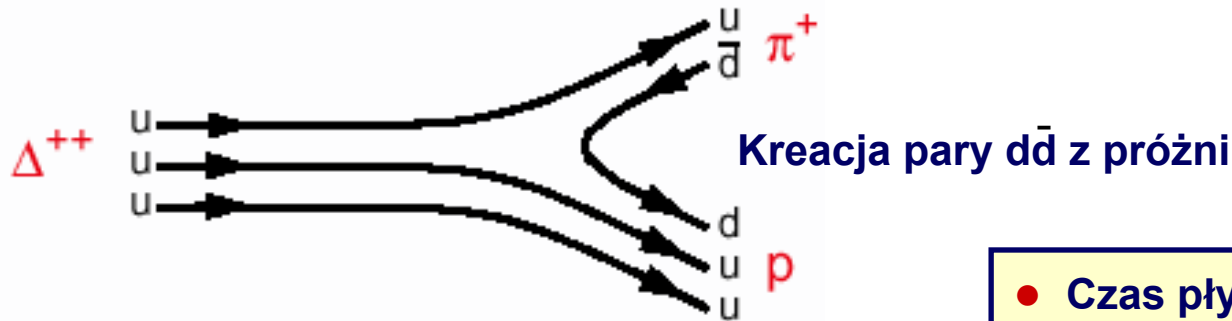
Nie ma lżejszej cząstki o takich samych liczbach kwantowych jak  $\Delta$  , która mogłaby się rozpadać przez oddz. elektromagnetyczne lub słabe  $\rightarrow \Delta$  jest rezonansem i równocześnie stanem podstawowym ( $L = 0$ )

Odkrycie rezonansu  $\Delta$  miało duże znaczenie dla hipotezy koloru kwarków

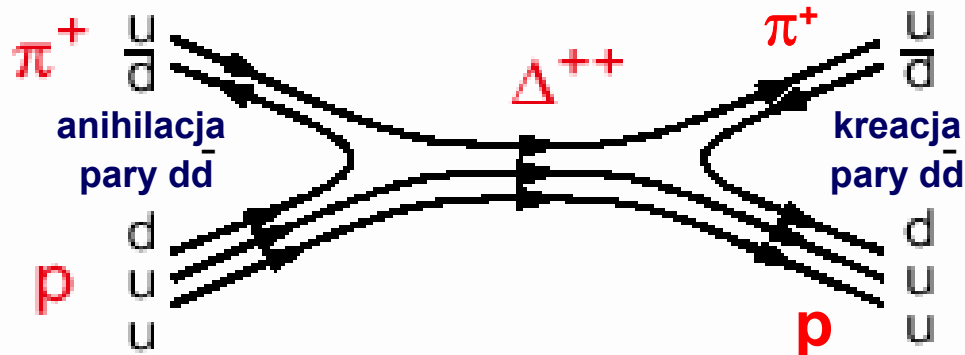
# Diagramy kwarkowe

## Prezentacja procesów na poziomie kwarkowym

**Rozpad**  $\Delta^{++} \rightarrow \pi^+ + p$ ;  $\Delta^{++} = uuu$ ,  $\pi^+ = u\bar{d}$ ,  $p = uud$ ;  $uuu \rightarrow u\bar{d} + uud$

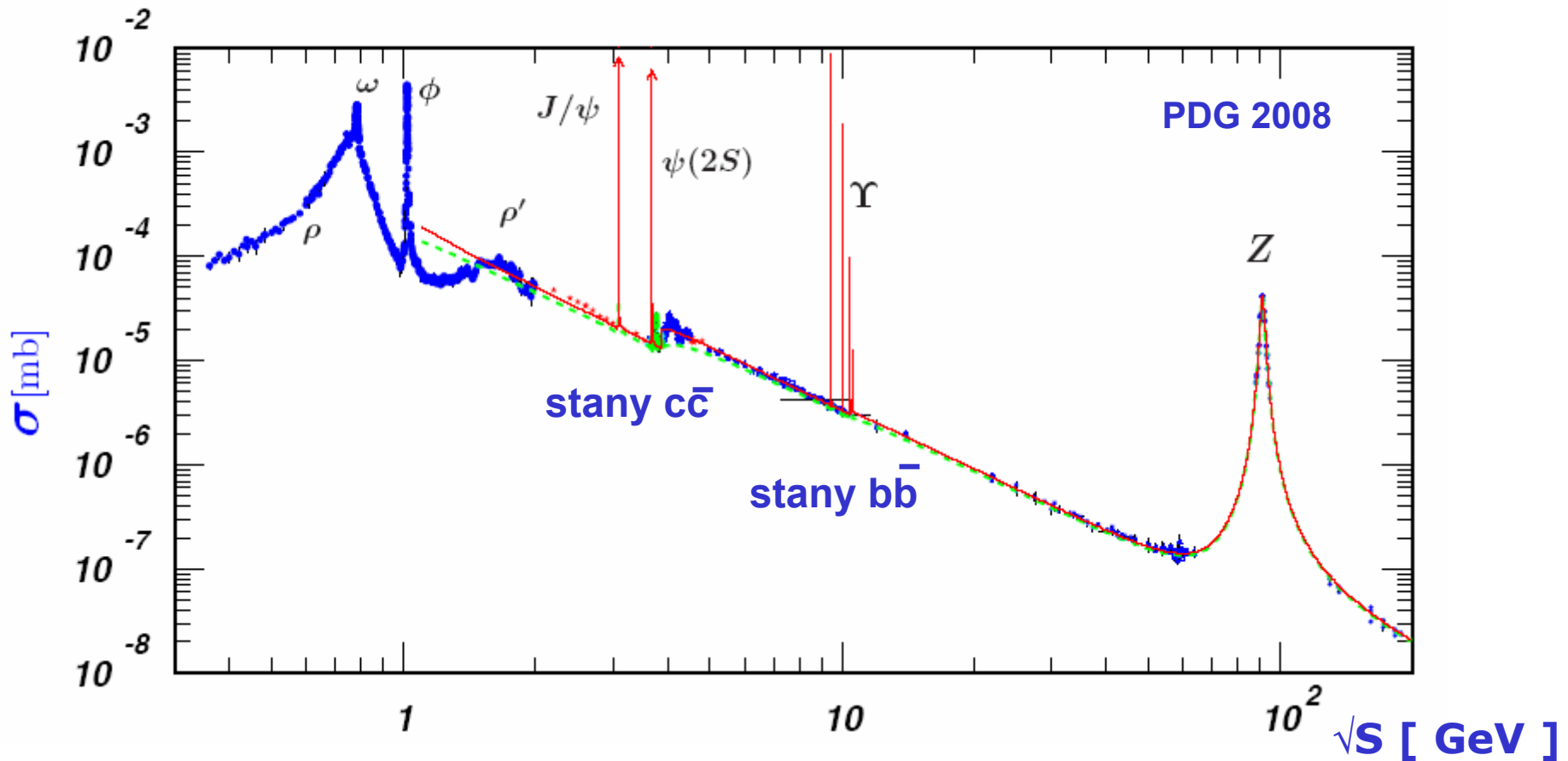


## Proces formacji i rozpadu rezonansu $\Delta^{++}$



- Czas płynie od lewej do prawej strony
- Linie kwarków i antykwarków oznaczone strzałkami skierowanymi odp. na prawo i na lewo
- W oddz. silnych kwarki i antykwarki mogą być kreowane / anihilowane tylko jako pary cząstka-antycząstka

# Formacja mezonów wektorowych ( $J^{PC} = 1^{--}$ ) w procesie $e^+ + e^- \rightarrow \text{hadrony}$



Całkowity przekrój czynny na proces  $e^+ + e^- \rightarrow \text{hadrony}$   
w funkcji energii w układzie środka masy  $e^+e^-$

Maksima w rozkładach przekroju czynnego  $\sigma_{\text{tot}}(e^+e^- \rightarrow \text{hadrony})$  odpowiadają formacji rezonansów wektorowych.



# Odkrycie mezonu wektorowego $\omega$

1961, B. C. Maglic, L. V. Alvarez et al. "Evidence for a  $I = 0$  three pion resonance"

- Zderzenia antyprotonów o pędzie  $1.6 \text{ GeV} / c$  z protonami w wodorowej komorze pęcherzykowej
- Selekcja przypadków z 5 pionami w stanie końcowym :

$\bar{p} + p \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^- + \pi^- + \pi^0$ ,  $\pi^0$  nie jest widoczne w komorze, ale jego energię i pęd można obliczyć z zachowania czteropędu

**Wyznaczenie masy niezmienniczej układu 3 pionów** dla różnych wartości ładunku elektrycznego

$$M_{\text{inv}}^2 = (\sum E_i)^2 - (\sum \vec{p}_i)^2$$

Rozkłady masy niezmienniczej 3 pionów o całkowitym ładunku  $Q = \pm 1, \pm 2$  nie wykazują żadnej struktury

$$\pi^+ + \pi^+ + \pi^-$$

$$\pi^- + \pi^- + \pi^+$$

$$\pi^+ + \pi^+ + \pi^0$$

$$\pi^- + \pi^- + \pi^0$$

Znaczące maksimum jest widoczne w rozkładzie masy niezmienniczej 3 pionów o całkowitym ładunku  $Q = 0$

$$\pi^+ + \pi^- + \pi^0$$

$$M_{\omega} = 790 \text{ MeV} / c^2, \Gamma = 12 \text{ MeV} / c^2$$

# Odkrycie mezonu wektorowego $\omega$

1961, B. C. Maglic, L. V. Alvarez et al.

PDG 2008 :

$$\omega \quad |^G ( J^{PC} ) = 0^-( 1^{--} )$$

$$M = 782.65 \pm 0.12 \text{ MeV}$$

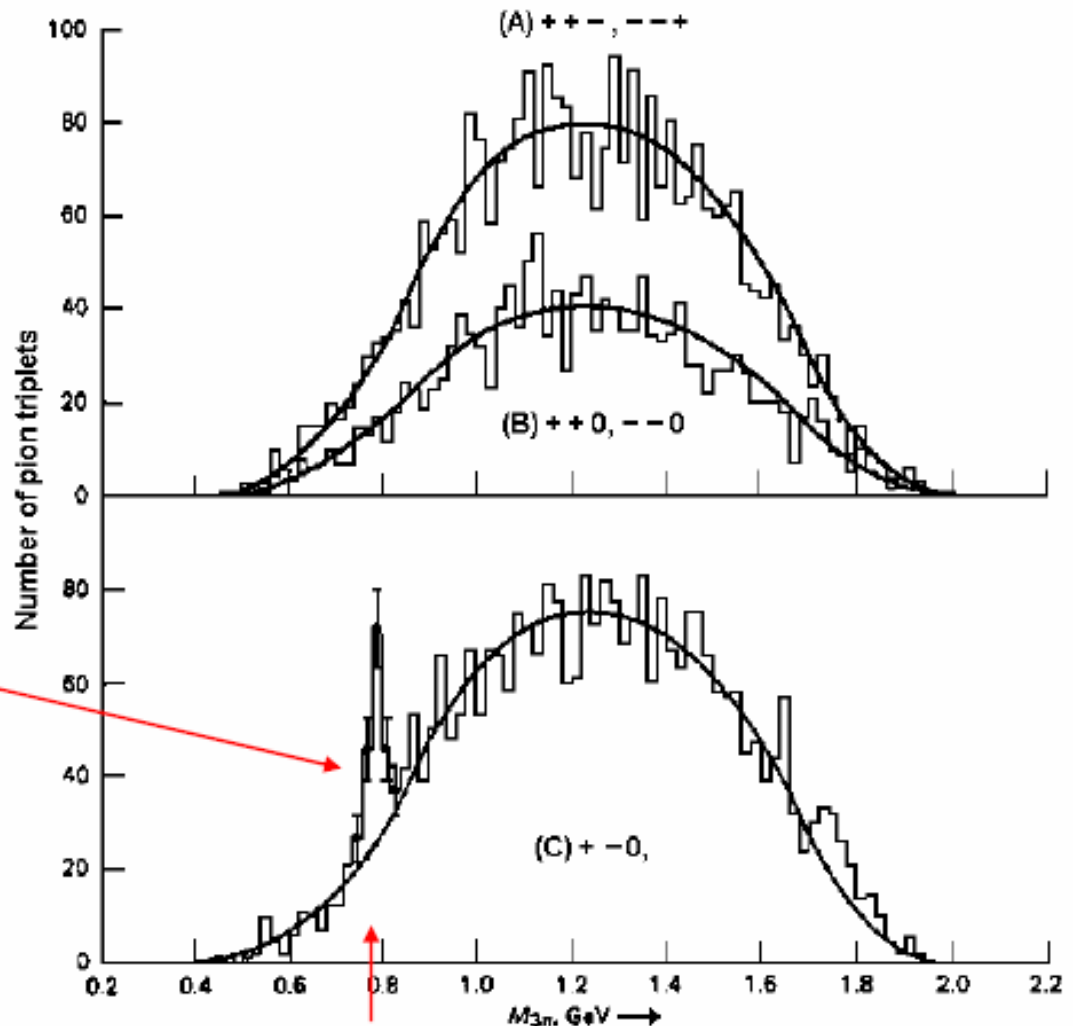
$$\Gamma = 8.49 \pm 0.08 \text{ MeV}$$

stosunki rozgałęzień :

$$\pi^+ \pi^- \pi^0 \quad 89.1 \%$$

$$\pi^0 \gamma \quad 8.9 \%$$

Maksimum w rozkładzie  
masy efektywnej  $\pi^+ \pi^- \pi^0$   
odp. rezonansowi  $\omega$



# Kolor kwarków

**Kolor** – nazwa ładunku, jakim obdarzone są kwarki, odpowiedzialnego za oddziaływania silne między nimi

- Kwarki o tym samym zapachu występują w trzech różnych kolorach ( umownie czerwonym, zielonym i niebieskim )
- Siły działające między kwarkami są niezależne od koloru  
– symetria względem grupy  $SU(3)_{\text{kolor}}$
- Hadrony zbudowane z kwarków mają całkowity kolor równy zero  
– hipoteza uwięzienia koloru ( w Naturze nie występują swobodne kwarki )

Kolor jako dodatkowy stopień swobody dla kwarków został wprowadzony przez O. W. Greenberga w roku 1964

prosty model kwarków  
jest niezgodny  
z zakazem Pauliego

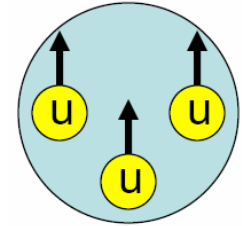


kwarki mają dodatkową  
liczbę kwantową  
ładunek kolorowy

# Kolor kwarków

**Rezonans  $\Delta^{++}(uuu)$  – barion o spinie  $3/2$ ,  $L = 0$** , składający się z trzech kwarków  $u$   
→ jednakowe ustawienie spinów 3 kwarków  $u\uparrow u\uparrow u\uparrow$

**Funkcja falowa**  $\psi(\Delta^{++}) = \psi(\mathbf{x}) \psi(\text{spin}) \psi(\text{zapach})$



**Stan podstawowy – ORBITALNY MOMENT PĘDU  $L = 0$**

→ przestrzenna część funkcji falowej  $\psi(\mathbf{x})$  jest symetryczna

$u\uparrow u\uparrow u\uparrow$  – spinowe i zapachowe części funkcji falowej są symetryczne

→ całkowita funkcja falowa  $\psi(\Delta^{++})$  jest symetryczna

**niezgodność z zakazem Pauliego**; funkcja falowa 3 identycznych kwarków (fermionów) musi być całkowicie antysymetryczna przy przestawieniu dowolnej pary kwarków

**Wprowadzenie dodatkowego stopnia swobody – koloru kwarka**

$\psi(\Delta^{++}) = \psi(\mathbf{x}) \psi(\text{spin}) \psi(\text{zapach}) \psi(\text{kolor})$

$\psi(\text{kolor})$  – kolorowa część funkcji falowej jest **antysymetryczna**





































Stany związane 3 kwarków są całkowicie antysymetryczne w kolorach kwarków

$$\psi_{\text{barion}}(\text{kolor}) = 1/\sqrt{6} ( \mathbf{rgb} + \mathbf{gbr} + \mathbf{brg} - \mathbf{grb} - \mathbf{rbg} - \mathbf{bgr} )$$

→ całkowita funkcja falowa  $\psi(\Delta^{++})$  jest antysymetryczna!

## kwarki

## antykwaraki

	R	G	B	$\bar{R}$	$\bar{G}$	$\bar{B}$	
u							$\bar{u}$
d							$\bar{d}$
c							$\bar{c}$
s							$\bar{s}$
t							$\bar{t}$
b							$\bar{b}$

Kwarki są obdarzone kolorem ,

antykwaraki antykolorem

Rysunki z wykładu AKW

# Uwięzienie koloru

Nie ma ewidencji doświadczalnej na istnienie swobodnych kwarków  
swobodne kwarki nie istnieją → hipoteza uwięzienia koloru ( kwarków ) :  
jako izolowane mogą jedynie występować cząstki kolorowo neutralne



Dozwolone kombinacje stanów kwarkowych :  
(dla stanów z liczbą barionową  $B \geq 0$ )

$$(3q)^p (q \bar{q})^n \quad p, n \geq 0 \quad (\text{zero lub całkowita liczba dodatnia})$$

- Hadrony o strukturze  $q\bar{q}$  i  $qqq$  są dozwolone i obserwowane eksperymentalnie
- Hadrony o strukturze  $qq, qq\bar{q}, qqqq, \dots$  z ładunkiem elektrycznym będącym ułamkiem ładunku elektronu są zabronione przez uwięzienie koloru
- Kombinacje  $qq\bar{q}\bar{q}$  i  $qqqq\bar{q}$  odp. egzotycznym mezonom i barionom są dozwolone , ale brak przekonującej ewidencji doświadczalnej na ich istnienie

W ostatnich latach wiele eksperymentów donosiło o odkryciu kandydatów na pentakwarki  $qqqq\bar{q}$  – dane te wymagają potwierdzenia / weryfikacji

QCD dopuszcza istnienie czystych stanów gluonowych ( glueballe ),  $gg$  i  $ggg$ , oraz stanów hybrydowych, składających się z kwarków i gluonów.

ładunek kolorowy ma trzy wartości  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$

$$\alpha + \beta + \gamma = 0$$

$$\alpha + \bar{\alpha} = 0$$

$$\beta + \bar{\beta} = 0$$

$$\gamma + \bar{\gamma} = 0$$

Nasuwa się analogia z optyką, gdzie

niebieski + zielony + czerwony = biel

niebieski + kolor dopełniający = biel itd.

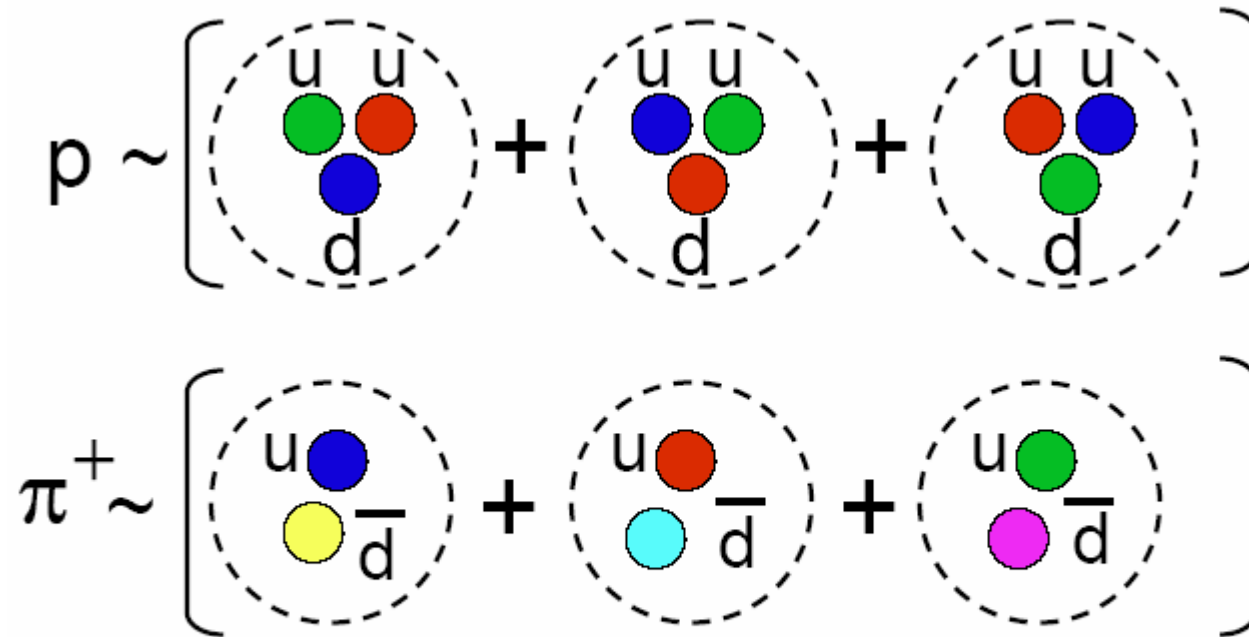
Dlatego zamiast ładunków  $\alpha$   $\beta$   $\gamma$  mówimy o trzech kolorach zasadniczych **B G R**

Kolorowa część funkcji falowej dla barionów jest antysymetryczna

$$\Psi_{\text{barion}}(\text{kolor}) = 1/\sqrt{6} ( \mathbf{rgb} + \mathbf{gbr} + \mathbf{brg} - \mathbf{grb} - \mathbf{rbg} - \mathbf{bgr} )$$

Kolorowa część funkcji falowej dla mezonów jest symetryczna

$$\Psi_{\text{mezon}}(\text{kolor}) = 1/\sqrt{3} ( \mathbf{r\bar{r}} + \mathbf{b\bar{b}} + \mathbf{g\bar{g}} )$$



etc.

Rysunki z wykładu AKW