

**Model Standardowy** – oparta na teorii kwarków klasyfikacja znanych i nieznanych cząstek elementarnych i ich oddziaływań, opisuje kilkaset cząstek elementarnych [PDG](#)

Następne modele – np. „[teoria strun](#)” - są w trakcie tworzenia i badań podstawowych

## Oddziaływania fundamentalne ( $Mc^2 = 1 \text{ GeV}$ )

	grawitacyjne	elektromagnetyczne	slabe	silne
		elektrosłabe		
<b>kwant pola</b>	grawiton	foton	$W^{+/-}, Z$	gluon
$J^P$ (spin parzystość)	$2^+$	$1^-$	$1^- \ 1^+$	$1^-$
masa [GeV]	0	0	80.4, 91.2	0
<b>zasięg</b>	$\infty$	$\infty$	$10^{-18} \text{ m}$	$\leq 10^{-15} \text{ m}$ *)
<b>źródło</b>	masa	ładunek elektryczny (e) $\alpha = e^2 / 4\pi$ ( $\epsilon_0 = \mu_0 = \hbar=c=1$ )	“ładunek słaby” (g)	“ładunek kolorowy” ( $g_s$ ) $\alpha_s = g_s^2 / 4\pi$ ( $\epsilon_0 = \mu_0 = \hbar=c=1$ )
<b>stała sprzężenia</b>	$G_N M^2 / 4\pi\hbar c$ $= 5 \cdot 10^{-40}$	$\alpha = e^2 / 4\pi\epsilon_0 \hbar c$ $= 1/137$	$G(Mc^2)^2 / (\hbar c)^3$ $= 1.17 \cdot 10^{-5}$	$\alpha_s \leq 1$
<b>typowy przekrój czynny [<math>\text{m}^2</math>]</b>		$10^{-33}$	$10^{-39}$	$10^{-30}$
<b>typ. czas życia [s]</b>		$10^{-20}$	$10^{-10}$	$10^{-23}$
<b>działa na</b>	wszystko	kwarki, naładowane leptony, bozony W	kwarki i leptony	kwarki i gluony

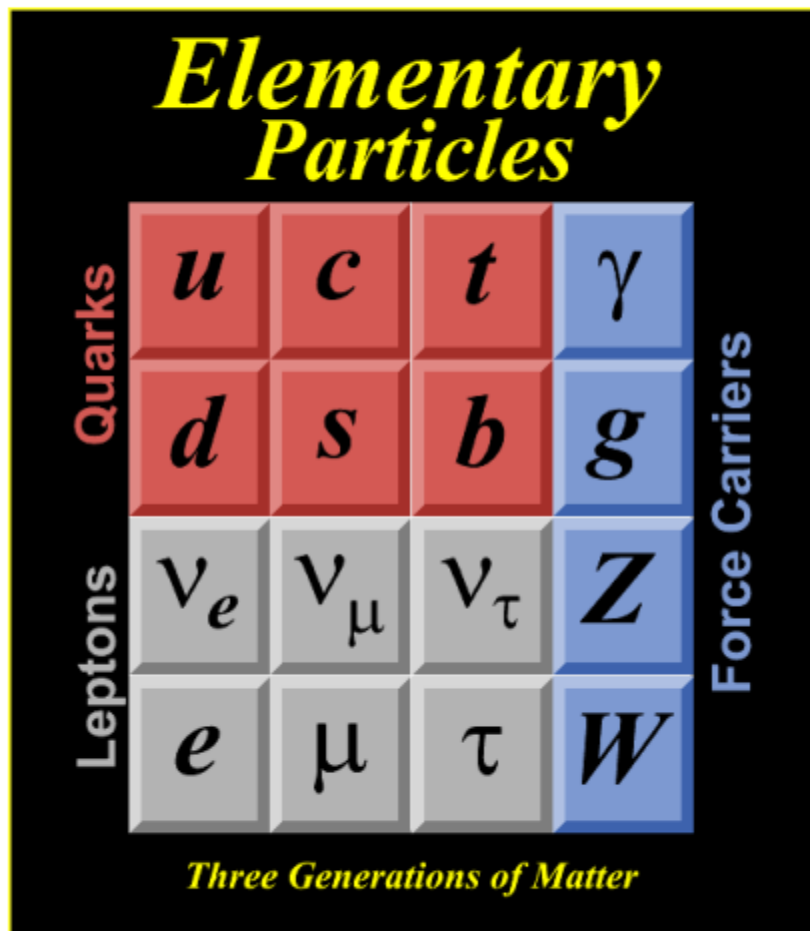
$G$  lub  $G_F$  – stała sprzężenia Fermiego

**QED** (*quantum electrodynamics*) – elektrodynamika kwantowa

**QCD** (*quantum chromodynamics*) – chromodynamika kwantowa (opis. oddział. silne)

\*) oddz. silne między 2 kwarkami można przedstawić jak naciągniętą strunę z kolorem; dla odległości powyżej  $\sim 1 \text{ fm}$  ( $10^{-15} \text{ m}$ ) struna pęka tworząc dodatkową parę kwarków (wykład 7)

Cząstki elementarne – podstawowe cegiełki  
 6 kwarków, 6 leptonów, 6 antykwarków, 6 antyleptonów i bozony  
 przenoszące oddziaływania



$u, c, t$  ładunek =  $+ 2/3$

$d, s, b$  ładunek =  $- 1/3$

neutrino ładunek =  $0$

$e, \mu, \tau$  ładunek =  $- 1$

antycząstki mają przeciwne ładunki

**Nośniki oddziaływań:**

**foton** – oddziaływania elektromagnetyczne

**$Z^0, W^+, W^-$**  - oddziaływania słabe

**gluon** – oddziaływania silne

**graviton** (nie odkryty!) – oddziaływania grawitacyjne

**dodatkowo: Higgs ???**

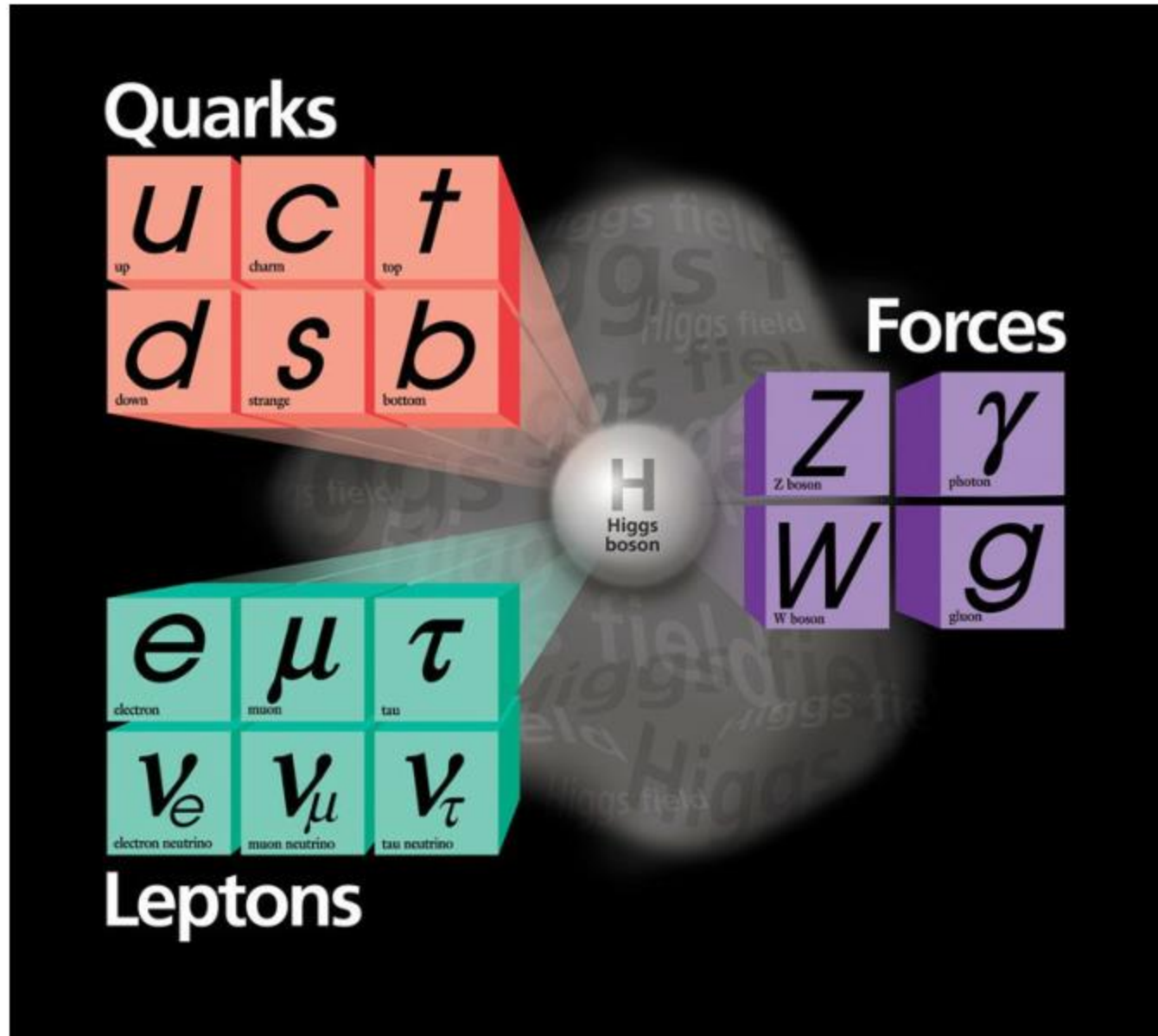
→ Masy cząstek elementarnych (kwarków, leptonów) generowane poprzez oddziaływanie z polem Higgsa

Rys. PA



- generacje

Różne masy cząstek byłyby miarą ich sprzężenia się z polem Higgsa (im silniejsze jest oddziaływanie z polem, tym większą masę uzyskuje cząstka).



Mimo tak wielu cząstek elementarnych cała stabilna materia Wszechświata składa się z kwarków u i d oraz elektronów

### Tablica kwarków:

zapach	<i>u (up)</i> <i>I generacja</i>	<i>d (down)</i> <i>I generacja</i>	<i>s (strange)</i> <i>II generacja</i>	<i>c (charmed)</i> <i>II generacja</i>	<i>b (bottom)</i> <i>III generacja</i>	<i>t (top)</i> <i>III generacja</i>
m (masa)	1.7-3.3 MeV	4.1-5.8 MeV	80-130 MeV	1.27 GeV	4.2 GeV	172 GeV
Q (ładunek)	+ 2/3 e	-1/3 e	-1/3 e	+ 2/3 e	-1/3 e	+ 2/3 e
I (izospin)	1/2	1/2	0	0	0	0
I <sub>3</sub> (izospin 3.)	1/2	-1/2	0	0	0	0
J (spin)	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2
B (l.barionowa)	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3
S (dziwność)	0	0	-1	0	0	0
C (powab)	0	0	0	1	0	0
b (piękno)	0	0	0	0	-1	0
t (prawda)	0	0	0	0	0	1

te dane często się zmieniają (PDG 2010)

odpowiednie antykwarki oznaczane  $\bar{u}, \bar{d}, \bar{s}, \bar{c}, \bar{b}, \bar{t}$  mają addytywne liczby kwantowe z przeciwnym znakiem np. anty-s ma Q=+1/3, B=-1/3, S=+1

kwarki i antykwarki są fermionami o spinie 1/2

d, u – dublet izospinowy I=1/2, pozostałe kwarki to singlety I=0

Kwarki niosą kolor a antykwarki antykolor



kwarki

antylkwarki

	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	●	●	●		●	●	●	$\bar{b}$

**Hadrony**  
(cząstki oddziałujące silnie;  
kolorowo obojętne)

mezony

$$q_i \bar{q}_j$$

bariony

$$q_i q_j q_k$$

antybariony

$$\bar{q}_i \bar{q}_j \bar{q}_k$$

Rys. AKW

w/w skład to tzw. kwarki walencyjne (*valence quarks*), oprócz tego istnieją także kwarki "morza": (*sea quarks*) czyli mnóstwo par kwark-antylkwark (o tym samym zapachu) – zarówno w mezonach jak i barionach

*proton = u u d + dużo  $u \bar{u}$  + dużo  $d \bar{d}$  + dużo  $s \bar{s}$  ...*

Model budowy hadronów nie wyklucza innych składów kwarkowych (byle całość była kolorowo obojętna)

glubole ( $ggg$ ,  $gg$ ), mezony hybrydowe ( $\bar{q} g q$ ), stany multikwarkowe ( $q q \bar{q} \bar{q}$ ,  $q q q q \bar{q}$ ,  $q q q \bar{q} \bar{q} \bar{q}$ , ...)

kilka lat temu – doniesienia o odkryciu tzw. **pentakwarków** (zob. slajdy dodatkowe)

Oryginalna praca  
w której zaproponowano  
kwarki

Inne kombinacje  
np. pentakwarki  
nie były w niej zabronione



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 of dispersion theory, there are still meaningful and important questions regarding the algebraic properties of these interactions that have so far been discussed only by abstracting the properties from a formal field theory model based on fundamental entities <sup>3</sup> from which the baryons and mesons are built up.

ber  $n_t - n_{\bar{t}}$  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  $\frac{1}{2}$ ,  $z = -\frac{1}{3}$ , 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  $(qqq)$ ,  $(qqq\bar{q})$ , etc., while mesons are made out of  $(q\bar{q})$ ,  $(q\bar{q}\bar{q})$ , 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**.

A formal mathematical model based on field theory can be built up for the quarks exactly as for  $p$ ,  $n$ ,  $\Lambda$  in the old Sakata model, for example <sup>3</sup> with all strong interactions ascribed to a neutral vector meson field interacting symmetrically with the three particles. Within such a framework, the electromagnetic current (in units of  $e$ ) is just

Praca z propozycją kwarków przyjęta do druku w Physics Letters tylko dlatego że autorem był Gell-Mann!  
Redaktor (Harry Lipkin) pomyślał: "ta praca jest zwariowana ale jeśli ją zaakceptujemy i okaże się nonsensem to blamaż spadnie na Gell Mann'a a nie na Phys. Lett. Jeśli jednak ja odrzucimy a okaże się prawdziwa to będą się z nas naśmiewać".

Jeszcze kilka słów o własnościach hadronów:

1. Wszystkie bariony z wyjątkiem protonów są niestabilne i rozpadają się na protony i leptony (proton jest najlżejszym barionem)

2. **Model Standardowy nie przewiduje możliwości rozpadu protonu (brak oddziaływań zamieniających barion w mezon lub lepton)**, mimo tego:

\* poszukiwania rozpadu protonu trwają

\* poszukiwania tzw. leptokwarków również

3. W przypadku hadronów złożonych z lekkich kwarków tylko bardzo niewielka część ich masy pochodzi od samych kwarków

proton (uud)

$$M = 0.003 + 0.003 + 0.006 \text{ GeV}$$

$$M_{\text{protonu}} = 0.938 \text{ GeV}$$

Większość masy pochodzi z energii kinetycznej i potencjalnej. Energie te zamieniane są na masę hadronu zgodnie ze wzorem  $E=mc^2$

**“Ubrana masa” >> “goła masa”** (jesteśmy zbudowani z niemal czystej energii)



# Bariony

## Nazewnictwo barionów:

Z trzema kwarkami pierwszej generacji

$\mathbf{N}$   $I = 1/2$  (w tej grupie również proton i neutron)

$\mathbf{\Delta}$   $I = 3/2$

Z dwoma kwarkami pierwszej generacji

$\mathbf{\Lambda}$   $I = 0$

$\mathbf{\Sigma}$   $I = 1$

Z jednym kwarkiem pierwszej generacji

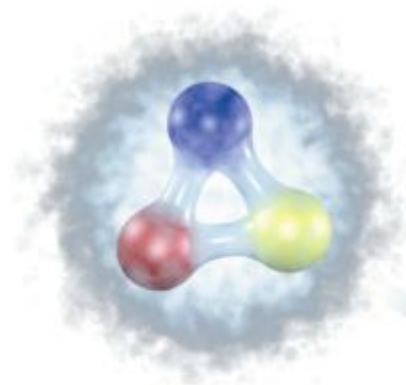
$\mathbf{\Xi}$   $I = 1/2$

Bez kwarków pierwszej generacji

$\mathbf{\Omega}$   $I = 0$

Zawartość kwarków c, b, t dana wskaźnikiem

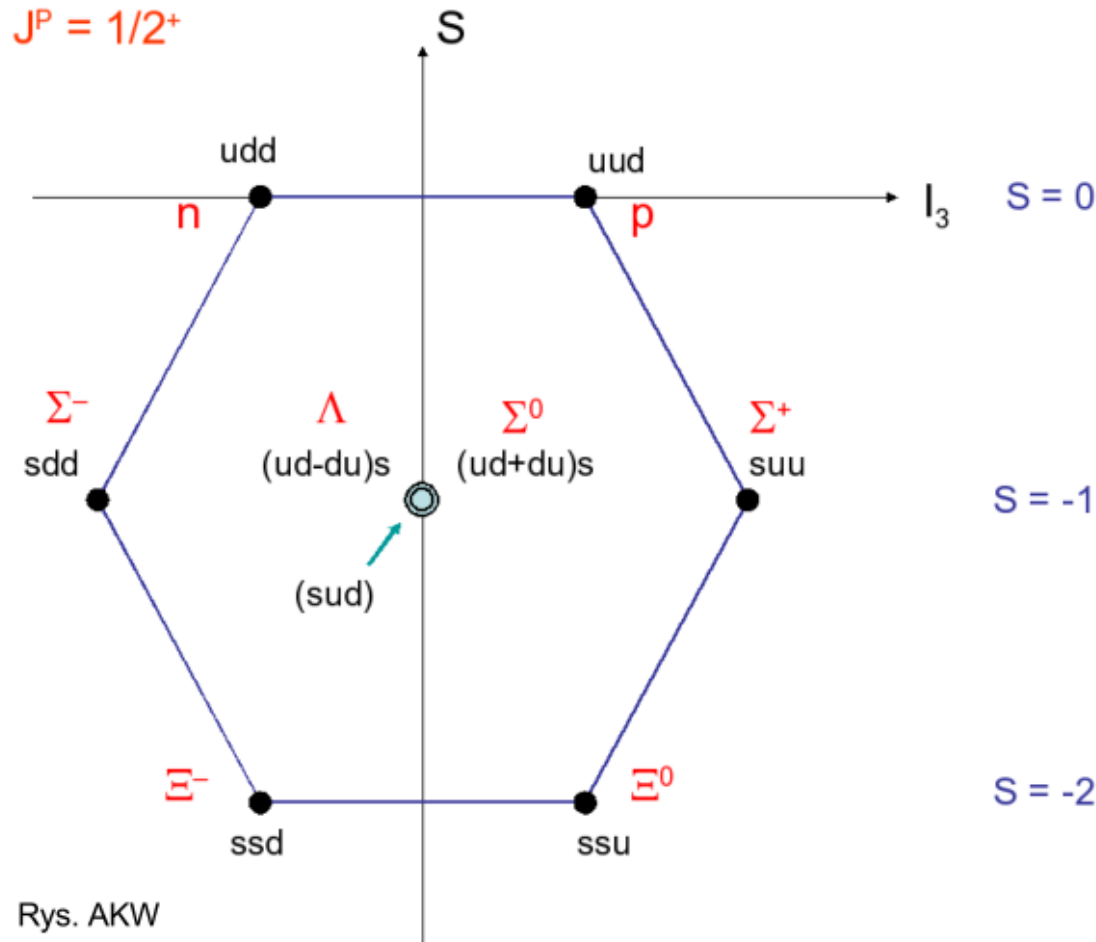
Na przykład:  $\mathbf{\Lambda}_c, \mathbf{\Sigma}_c, \mathbf{\Lambda}_b, \mathbf{\Xi}_c, \mathbf{\Xi}_{cb}, \mathbf{\Omega}_c, \mathbf{\Omega}_{ccc}$



# Multiplet $J^P = 1/2^+$

## Masy:

$p$  (938.3 MeV)    $n$  (939.6 MeV)  
 $\Lambda$  (1116 MeV)  
 $\Sigma^0$  (1193 MeV)  $\Sigma^-$  (1197 MeV)  $\Sigma^+$  (1189 MeV)  
 $\Xi^0$  (1315 MeV)  $\Xi^-$  (1322 MeV)



Rys. AKW

## Najczęstsze kanały rozpadów:

$p$  (stabilny)  $\tau > 10^{34}$  lat    $\text{anty-}p$  też  
 $n \rightarrow p e^- \text{ anti-}\nu_e$  BR około 100%  
 $\tau = 886$  s    $c\tau = 2.6 \cdot 10^8$  km

$\Lambda$ :  $\tau = 2.6 \cdot 10^{-10}$  s    $c\tau = 7.9$  cm  
 $\Lambda \rightarrow p \pi^-$  BR=63.9%  
 $\Lambda \rightarrow n \pi^0$  BR=35.8%

$\Sigma^+$ :  $\tau = 0.8 \cdot 10^{-10}$  s    $c\tau = 2.4$  cm  
 $\Sigma^+ \rightarrow p \pi^0$  BR=51.6%  
 $\Sigma^+ \rightarrow n \pi^+$  BR=48.3%

$\Sigma^-$ :  $\tau = 1.5 \cdot 10^{-10}$  s    $c\tau = 4.4$  cm  
 $\Sigma^- \rightarrow n \pi^-$  BR=99.8%

$\Sigma^0$ :  $\tau = 7.4 \cdot 10^{-20}$  s    $c\tau = 2.2 \cdot 10^{-11}$  m  
 $\Sigma^0 \rightarrow \Lambda \gamma$  BR=około 100%

$\Xi^0$ :  $\tau = 2.9 \cdot 10^{-10}$  s    $c\tau = 8.7$  cm  
 $\Xi^0 \rightarrow \Lambda \pi^0$  BR=99.5%

$\Xi^-$ :  $\tau = 1.6 \cdot 10^{-10}$  s    $c\tau = 4.9$  cm  
 $\Xi^- \rightarrow \Lambda \pi^-$  BR=99.9%

## Multiplet $J^P = 3/2^+$

### Masy:

$\Delta$  1231-1232 MeV

$\Sigma^{*0}$  1384 MeV

$\Sigma^{*+}$  1383 MeV

$\Sigma^{*-}$  1387 MeV

$\Xi^{*0}$  1532 MeV

$\Xi^{*-}$  1535 MeV

$\Omega^-$  1672 MeV

### Najczęstsze kanały rozpadów:

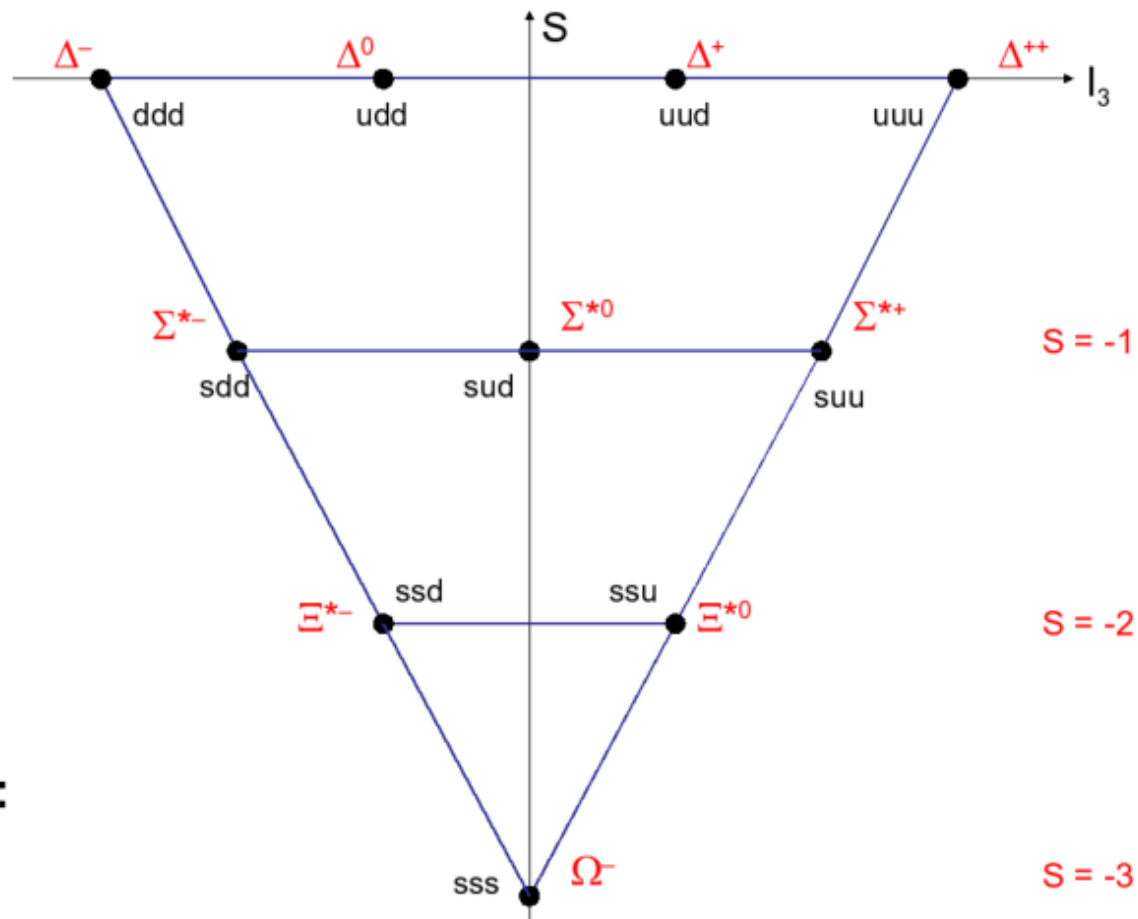
$\Delta \rightarrow N \pi$  BR około 100%

$\Omega^-$ :  $\tau = 0.8 \cdot 10^{-10}$  s  $c\tau = 2.5$  cm

$\Omega^- \rightarrow \Lambda K^-$  BR=67.8%

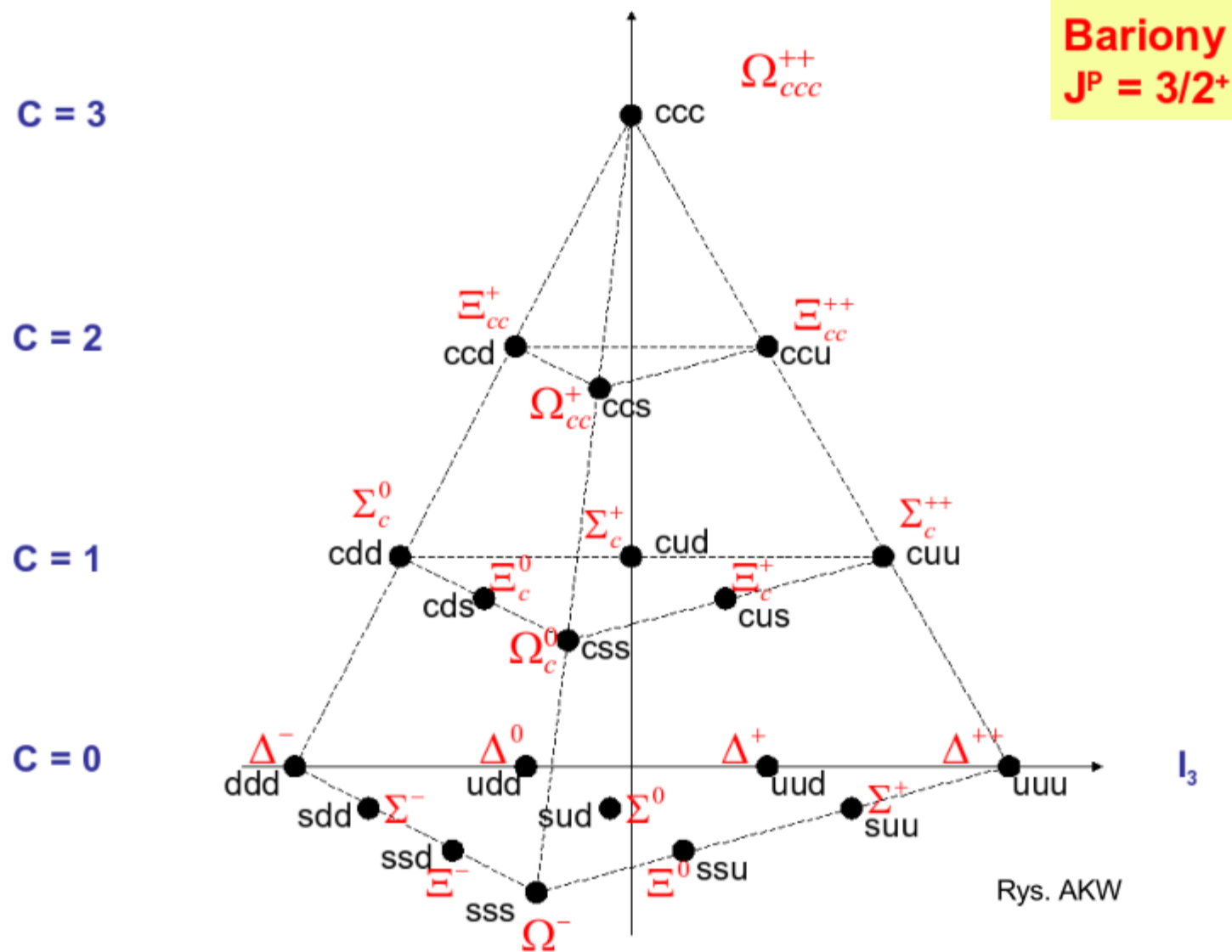
$\Omega^- \rightarrow \Xi^0 \pi^-$  BR=23.6%

$\Omega^- \rightarrow \Xi^- \pi^0$  BR=8.6%

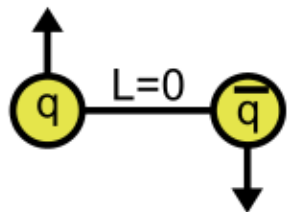


Rys. AKW

Dokładamy jeszcze jeden kwark (c)



**Multiplet  $J^P = 0^-$**   
mezony pseudoskalarne



**Masy:**

$\pi^+ \pi^-$	140 MeV
$\pi^0$	135 MeV
$K^0 \text{ anty}K^0$	498 MeV (rozpady na wykł. 2.)
$K^+ K^-$	494 MeV
$\eta$	548 MeV
$\eta'$	958 MeV

**Najczęstsze kanały rozpadów:**

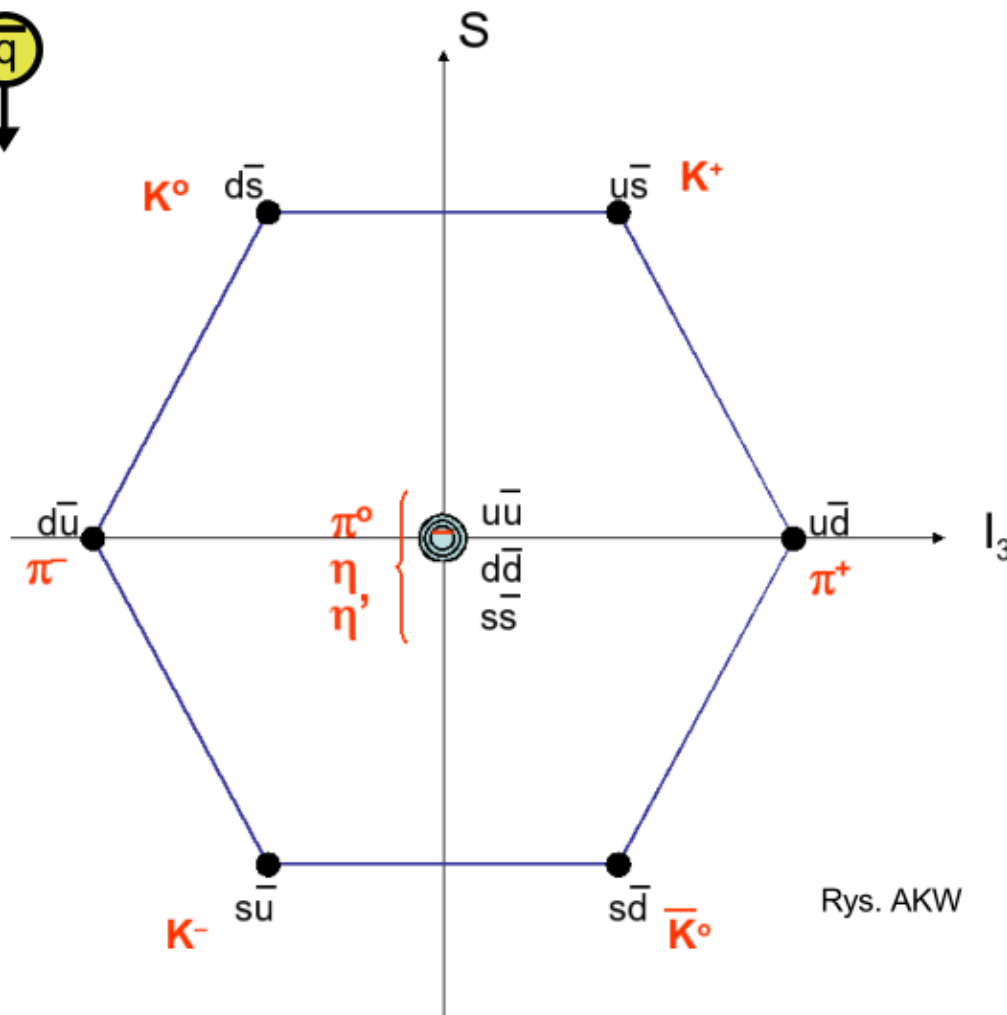
$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$  BR=99.99%  
 $\tau = 2.6 \cdot 10^{-8} \text{ s}$   $c\tau = 7.8 \text{ m}$

$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$  BR=98.82%  
 $\tau = 8.4 \cdot 10^{-17} \text{ s}$   $c\tau = 25.1 \text{ nm}$

$K^{+/-}$  ( $\tau = 1.24 \cdot 10^{-8} \text{ s}$   $c\tau = 3.7 \text{ m}$ )

$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$	BR=63.5%
$K^+ \rightarrow e^+ \nu_e \pi^0$	BR=5.1%
$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \pi^0$	BR=3.3%
$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$	BR=20.7%
$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-$	BR=5.6%

BR – *branching ratio*  
(współczynnik rozgałęzienia)  
czasami  $\Gamma_i / \Gamma_{\text{tot}}$



Rys. AKW

Main decay channels:

$\eta \rightarrow \gamma\gamma$	39%
$\eta \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0$	33%
$\eta \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$	23%
$\eta \rightarrow \pi^+ \pi^- \gamma$	4.6%

## Mezony

Multiplet  $J^P = 1^-$  mezony wektorowe

## Masy:

$\rho^+ \rho^-$	775.5 MeV
$\rho^0$	775.5 MeV
$K^{*0} \text{ anty}K^{*0}$	895.5 MeV ( $\Gamma_{\text{tot}} \approx 46 \text{ MeV}$ )
$K^{*+} K^{*-}$	892 MeV ( $\Gamma_{\text{tot}} \approx 51 \text{ MeV}$ )
=> $K^*$ mają czasy życia rzędu $1.3 \times 10^{-23} \text{ s}$	
$\omega$	783 MeV ( $\Gamma_{\text{tot}} = 8.5 \text{ MeV}$ )
$\phi$	1019.5 MeV ( $\Gamma_{\text{tot}} = 4.3 \text{ MeV}$ )

## Najczęstsze kanały rozpadów:

$$\omega \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 \quad \text{BR } (\Gamma_i / \Gamma_{\text{tot}}) = 89.2\%$$

$$\omega \rightarrow \pi^0 \gamma \quad \text{BR} = 8.3\%$$

$$\rho \rightarrow \pi \pi \quad \text{BR około } 100\%$$

$$K^* \rightarrow K \pi \quad \text{BR około } 100\%$$

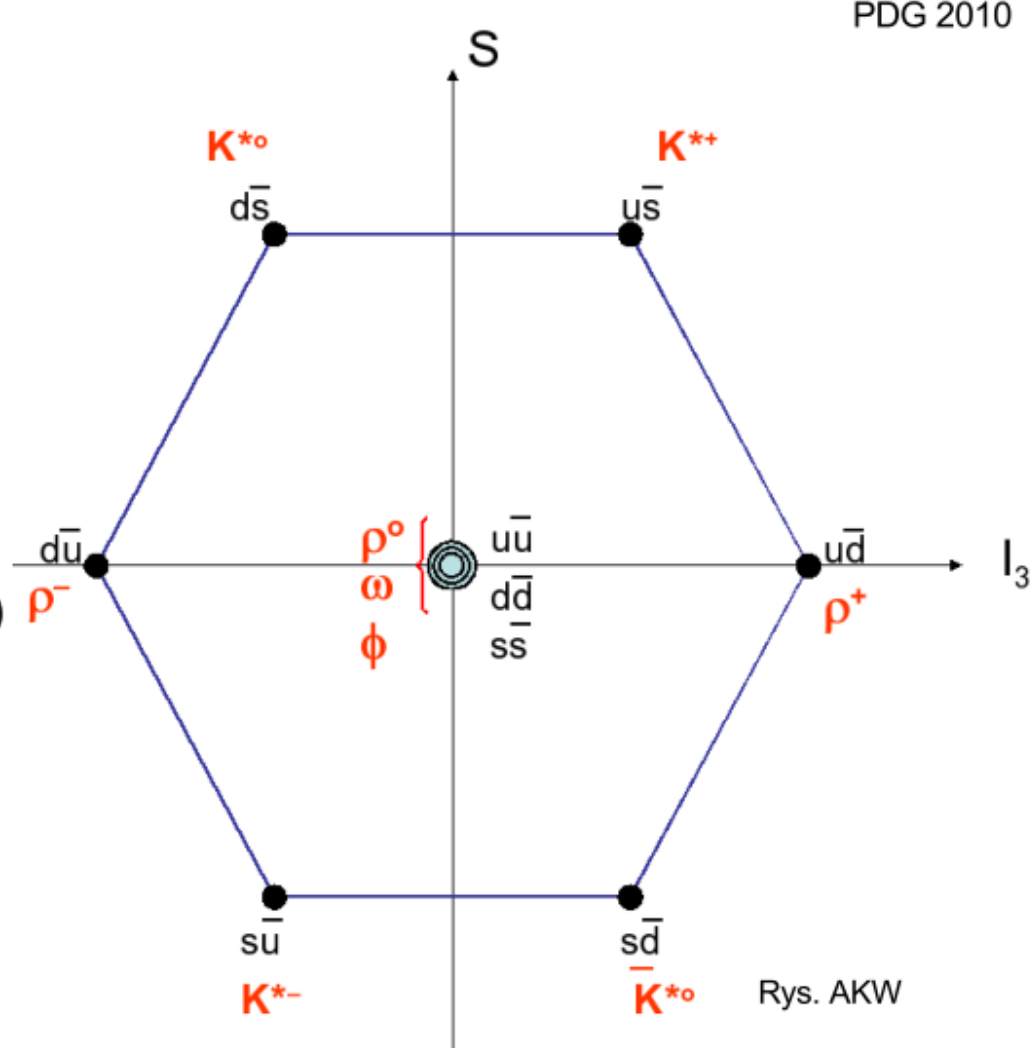
dwa w/w – kombinacje żeby zachować ładunek

$$\phi \rightarrow K^+ K^- \quad \text{BR} = 48.9\%$$

$$\phi \rightarrow K_s^0 K_L^0 \quad \text{BR} = 34.2\%$$

$$\phi \rightarrow \rho \pi \text{ (znaki!) } \pi^+ \pi^- \pi^0 \quad \text{BR} = 15.3\%$$

$$\phi \rightarrow \eta \gamma \quad \text{BR} = 1.3\%$$



Dla cząstek o krótkich cz. życia

$$\text{zamiast } \tau \text{ mamy } \Gamma = \frac{\hbar / (2\pi)}{\tau}$$

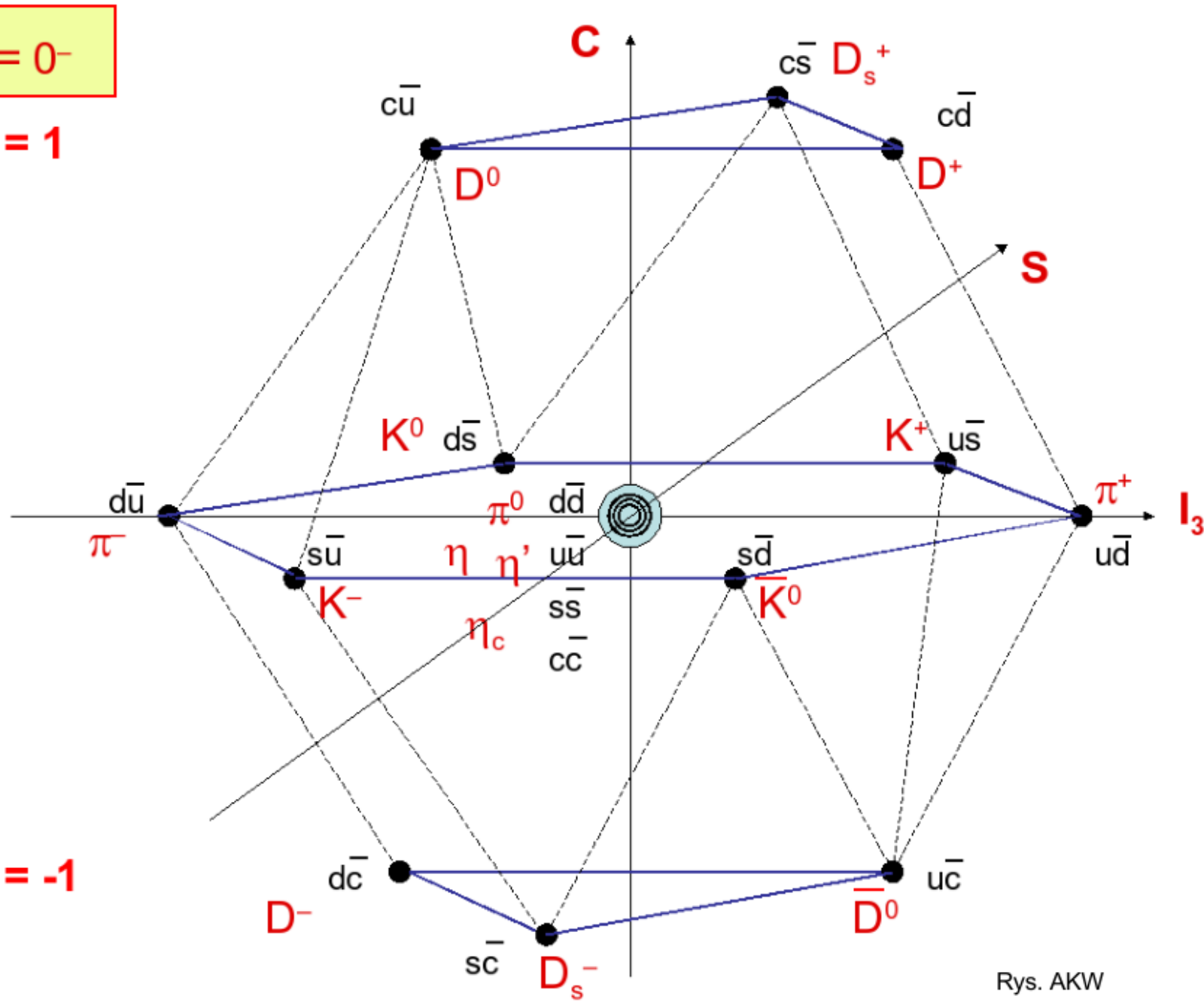
$$\hbar \equiv \hbar / (2\pi) = 6.582 \cdot 10^{-22} \text{ MeV} \cdot \text{s}$$

Mezony

$J^P = 0^-$

$C = 1$

$C = -1$

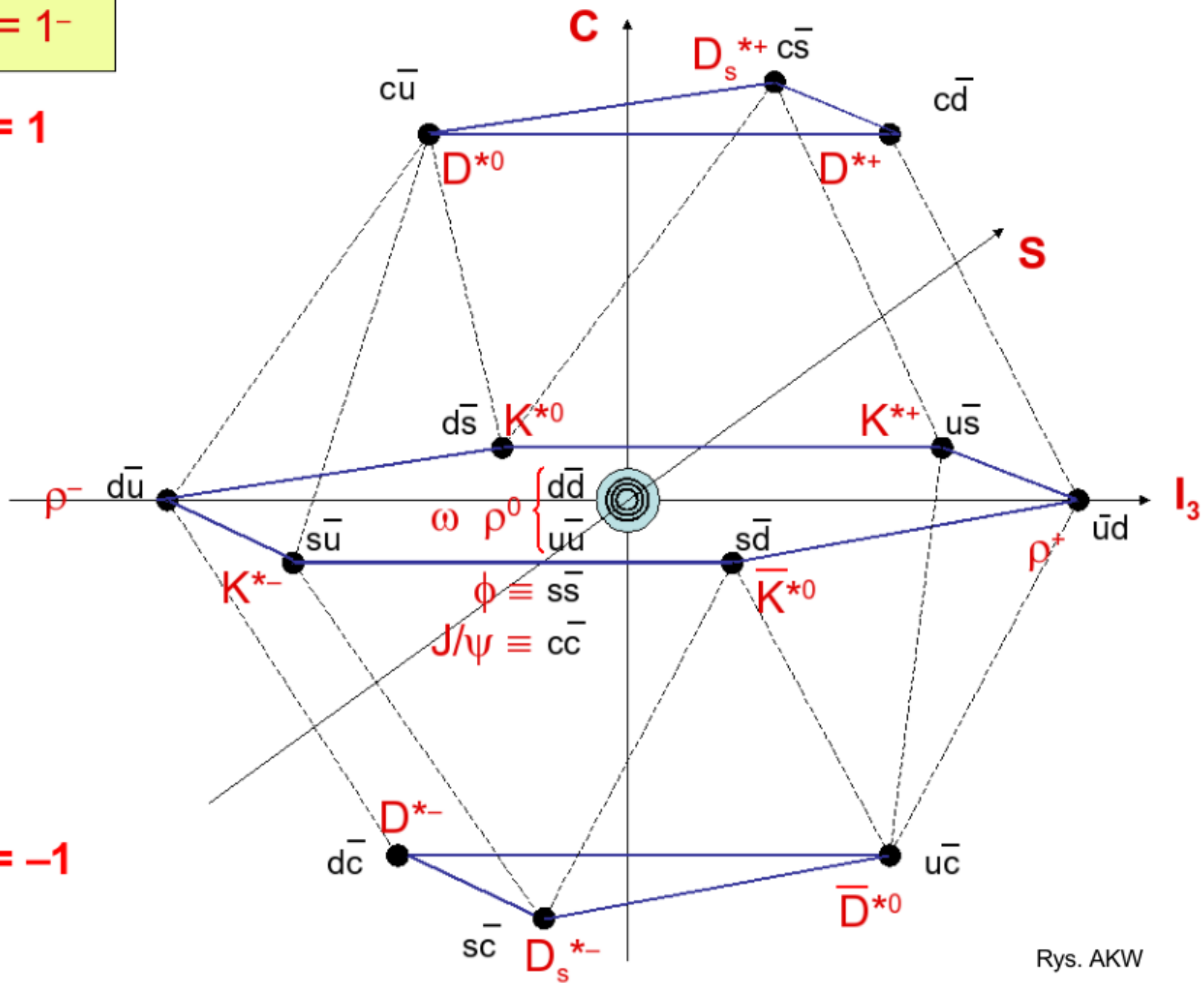


Mezony

$J^P = 1^-$

$C = 1$

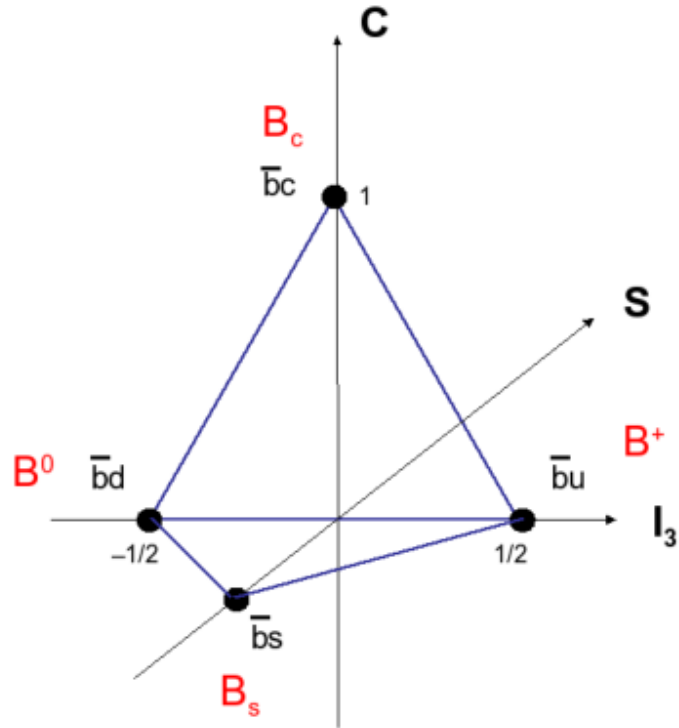
$C = -1$





# Mezony

Po dołożeniu kwarku b nie da się narysować nawet jako bryły (byłaby to bryła 4D) – tak więc rzutujemy na przestrzeń 3D

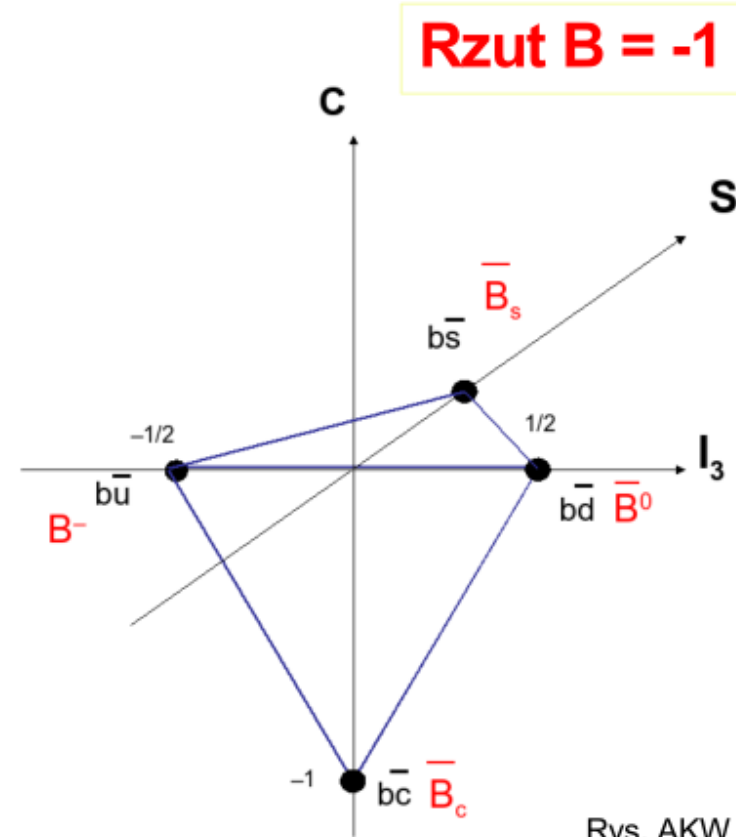


Rzut B = +1

$C = 1$   $C = 1$

$C = 0$   $C = 0$

$C = -1$   $C = -1$



Rzut B = -1

Rys. AKW

Rzut B = 0

●  $\bar{b}b$

← mezony  $\Upsilon (1^-)$  i  $\chi_b (0^+)$  (masy około 10 GeV)

## Tablica leptonów:

	$e^-$	$\mu^-$	$\tau^-$	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$
m (masa)	0.511 MeV	105.66 MeV	1776.8 MeV	< 2 eV < 3 eV (PDG 2004)	< 0.19 MeV (PDG 2004)	< 18.2 MeV (PDG 2004)
$\tau$	$> 4.6 \times 10^{26}$ lat	2.197 $\mu$ s	290.6 fs			
Q (ładunek)	-1	-1	-1	0	0	0
J (spin)	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2
$L_e$	1	0	0	1	0	0
$L_\mu$	0	1	0	0	1	0
$L_\tau$	0	0	1	0	0	1

odpowiednie antyleptony oznaczane  $e^+, \mu^+, \tau^+, \bar{\nu}_e, \bar{\nu}_\mu, \bar{\nu}_\tau$  mają addytywne liczby kwantowe z przeciwnym znakiem np.  $e^+$  ma  $Q=1, L_e = -1$

Kanały rozpadów mionu i taonu:

$$\mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu \quad \text{BR} = \text{około } 100\%$$

$$\tau^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau \quad \text{BR} = 17.4 \%$$

$$\tau^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau \quad \text{BR} = 17.8 \%$$

$$\tau^- \rightarrow \nu_\tau \text{ hadrons}$$

uwaga: ograniczenia na masy neutrin – ze starych danych (PDG 2004) bo po odkryciu oscylacji neutrin PDG podaje różnice mas i kąty mieszania

