

(Fundamentalna) Fizika Elementarnih Čestica

Dan 03: Uvod u kvark model: vezana stanja,
konačne simetrije, izospin, $SU(3)_f$

Tristan Hübsch

Department of Physics and Astronomy, Howard University, Washington DC

Department of Mathematics, University of Maryland, College Park, MD

Department of Physics, Faculty of Natural Sciences, Novi Sad, Serbia

<https://tristan.nfshost.com/>

Elementarne čestice

Program za Danas

Ideja elementarnosti

- Elementarne čestice
- Fundamentalne interakcije
- Fuzija čestica i interakcija

Elementarne čestice

- Kratka istorija otkrivanja
- Principi i iskustva

Inventar elementarnih čestica

- Kvarkovi, leptoni (fermioni)
- Kalibracioni bozoni

Moderna verzija Demokritove ideje

Kvark model - vezana stanja

- Mezoni
- Barioni

Simetrizacija spina i ukusa

- Neposredna primena strukture grupa $SU(2)_{\text{izospin}}$ & $SU(3)_f$
(... nastaviće se...)

Demarkacija dve (pod)oblasti
Elementarne čestice
Hadroni (= vezana stanja)

nuklearna — atomska — molekularna fizika — ...
“AMO”

$$[m_\pi][c]/[\hbar] = (M)\left(\frac{L}{T}\right)\left(\frac{T}{ML^2}\right) = \frac{1}{L}$$

Elementarnost

Masa : domet

Moderna verzija Demokritove ideje

- Zbilja elementarne čestice su reda: $\sim 10^{-35} \text{ m}$
- ...jer za sitnije razlučenje treba sonda toliko visoke energije da (gravitaciona) interakcija sa metom postane zarobljavajuća
- Atom ($\sim 10^{-10} \text{ m}$) = sistem elektrona i jezgra.
- Coulomb-ova interakcija: $U_c \sim 1/r$.
- Jezgro ($\sim 10^{-15} \text{ m} = 1 \text{ fm}$) = sistem p^+ i $n^0 \dots$ (kao i π^\pm, π^0)
- Yukawa interakcija: $U_c \sim \frac{e^{-\mu r}}{r}, \quad \mu \propto m_\pi \propto 1/(1 \text{ fm})$.
- Pošto $m_{\pi^\pm} = 135$ ($m_{\pi^0} = 141$) MeV/ c^2 , $\mu = ?$ ($[\mu] = L^{-1}$)
- $\mu = m_\pi c/\hbar = 135(141) \text{ MeV}/\hbar c (= ? \text{ m}^{-1})$

$$[m_\pi][c]/[\hbar] = (M) \left(\frac{L}{T}\right) \left(\frac{T}{ML^2}\right) = \frac{1}{L}$$

Elementarnost

Masa : domet

Moderna verzija Demokritove ideje

- Zbilja elementarne čestice su reda: $\sim 10^{-35} \text{ m}$ ←
- ...jer za sitnije razlučenje treba sonda toliko visoke energije da (gravitaciona) interakcija sa metom postane zarobljavajuća
- Atom ($\sim 10^{-10} \text{ m}$) = sistem elektrona i jezgra.
- Coulomb-ova interakcija: $U_C \sim 1/r$.
- Jezgro ($\sim 10^{-15} \text{ m} = 1 \text{ fm}$) = sistem p^+ i $n^0 \dots$ (kao i π^\pm, π^0)
- Yukawa interakcija: $U_C \sim \frac{e^{-\mu r}}{r}$, $\mu \propto m_\pi \propto 1/(1 \text{ fm})$.
- Pošto $m_{\pi^\pm} = 135$ ($m_{\pi^0} = 141$) MeV/c², $\mu = ?$
- $\mu = m_\pi c/\hbar = 135(141) \text{ MeV}/\hbar c (= ? \text{ m}^{-1})$
- Nukleon (p^+ i n^0) = sistem od tri kvarka na razdaljinama $\leq 1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$
- ...

$$\begin{aligned} \frac{1}{\mu} &= \frac{\hbar c}{(m_\pi c^2)} \approx 1.464 \times 10^{-15} \text{ m} \\ &= \frac{(1.054 \times 10^{-34})(299792458)}{(135 \text{ ili } 141)(1.609 \times 10^{-19})} \end{aligned}$$

Ima mnogo „prostora“ do donje granice

Elementarnost

Unifikacija

Moderna verzija Demokritove ideje

- Fundamentalne interakcije

- „Novotarija“ (kasnog) XIX veka!

- Newton-ovi zakoni važe bez obzira na izvor i cilj sile.

- Prvi primer konkretnog ujedinjenja:

- (Univerzalnost Newton-ovog zakona gravitacije)

- ***Ujedinjenje prizemnih i nebeskih „objekata“ idejno/filozofska ujedinjenje — ne konkretnih modela***

I. Newton



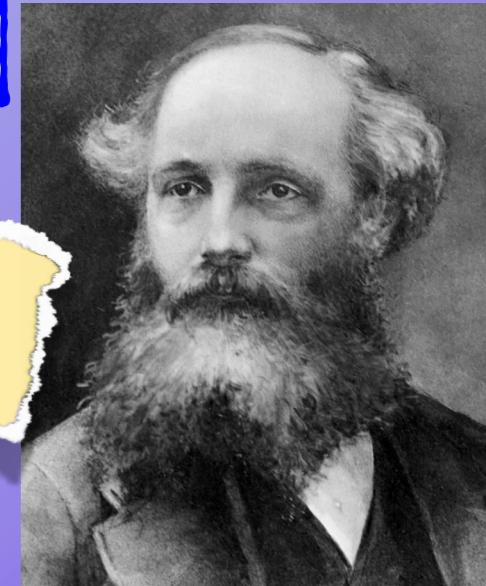
- Prvi primer konkretnog ujedinjenja:

- Elektrostatička interakcija

- Magnetostatička interakcija

- Elektromagnetna interakcija

J.C. Maxwell



- ***Ujedinjenje konkretnih matematičkih modela:* Gauss-ovih, Ampère-ovog i Faraday-evog zakona**

Elementarnost

Unifikacija

Moderna verzija Demokritove ideje

- Fundamentalne interakcije
 - Elektromagnetna interakcija (Maxwel-ove jednačine)
 - Jaka nuklearna interakcija
 - oko 1930: takvo nešto mora da postoji
 - posle 1970–'80: QCD
 - Slaba nuklearna interakcija
 - pre 1970–'80: Fermi-ev β -raspad i...
 - posle 1970–'80: slaba nuklearna interakcija
 - Gravitacija
 - Kalibracione (eichen/gauge) interakcije
 - „eichen“ = oceniti, baždariti, kalibrisati
 - sve te interakcije su posledica lokalne simetrije

H. Weyl, 1919

Posle 1980:
elektro-slaba
interakcija

jauge,
medir,
mértek,
βαθιδας,
калибровочная,
.....

Elementarnost

Čestice : polja

Fuzija pojma čestica i interakcija medju njima

- Jezgro i elektroni interaguju Coulomb-ovim poljem
- Coulomb-ovo polje se prilagodjava kretanju jezgra i elektrona
brzinom svetlosti
 - Jezgro i elektrone predočavamo kao čestice
 - Elektromagnetno polje — kao kontinuum
 - Kvantizacija polja = kvantizacija *promena u polju*
 - Samo polje je kontinuum, u kome su promene:
 - talasi, ako su usko lokalizovane u prosoru impulsa
 - čestice, ako su usko lokalizovane u pozicionom prostoru
 - Pozadinski kontinuum Coulomb-ovog polja može da se smatra (Bose-)kondenzatom elektromagnetskih čestica (fotona)
 - Pozadinski kontinuum fermionskih polja je 0 (Pauli-jev princip) a promene u tom polju = kvanti

kvanti = najmanja „količina“ promene u datom polju

Elementarnost

Čestice : polja

Fuzija pojma čestica i interakcija medju njima

• Kvant = $\min(\delta \text{ polja})$; Polje = kondenzat ∞ kvanta



*“Kvantna Teorija polja već jeste
ono što Führungsfeldtheorie hoće da postane kad poraste.”*

izvorno, Max Born 1926.

Elementarne čestice

Istorija

Ko istoriju ne uči, sam u nju upada.

- J.J. Thomson (1897): katodni zraci kroz ukršteno EM polje tako da nema zakrvljenja.
 - ⇒ i brzina i količnik nanelektrisanja prema masi
 - ⇒ „sastojci“ katodnog zraka (e^-) imaju vrlo malu masu
 - ⇒ atom se sastoji iz elektrona unutar pozitivno nanelektrisane lopte
- E. Rutherford (student JJT; 1909, & H. Geiger i E. Marsden): α -zračenje na foliju zlata; dokaz da je pozitivno nanelektrisanje atoma skoncentrisano u jezgru mnogo manjem od atoma. Imenovao je proton i stvorio planetarni model atoma.
 - ⇒ N. Bohr (1913–14): *ad hoc* kvantni model atoma:
 - Ugaoni momenat H-atoma je celobrojni umnožak \hbar .
 - Zašto? Zato što to daje korektan linijski spektar.

Elementarne čestice

Istorija

Ko istoriju ne uči, sam u nju upada.

- J. Chadwick (student ER i HG, 1932): eksperimentalno dokazao postojanje neutrona i imenovao ga.
- ≤ 1932: samo e^- , p^+ i n^0 i...
- Foton:
 - M. Planck (1900): kvantna emisija svetlosti
 - A. Einstein (1905): kvantna apsorpcija \Rightarrow EM zračenje = fotoni
 - A.H. Compton (1923): $\Delta\lambda = \lambda_c[1 - \cos(\theta)]$, $\lambda_c := h/mc$
 - Coulomb-ovo polje = „more“ fotona
(kondenzat, tj. **kolektiv** fotona koji se ponaša kao jedno)
 - Uopštenje koherentnih stanja, $|z\rangle := e^{-|z|^2/2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{z^n}{\sqrt{n!}} |n\rangle = e^{-|z|^2/2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(z\hat{a}^\dagger)^n}{n!} |0\rangle$
 - Ime „foton“ — Gilbert Lewis, 1926

Elementarne čestice

Istorija

Ko istoriju ne uči, sam u nju upada.

- Mezoni — za razliku od *leptona* (=laki) i *bariona* (=teški)
 - Yukawa: π^\pm i π^0 (135 i 141 MeV/c²), da „vežu“ jezgro
 - 1937: (Anderson i Neddermeyer + Street i Stevenson) čestice u kosmičkom zračenju koje odgovaraju opisu
 - 1946: te čestice slabo interaguju sa jezgrom
 - 1947 (Powell *et al.*): π^\pm i $\pi^0 \neq \mu^\pm$!
- Anti-čestice
 - 1927: Dirac-ova jednačina: „more“ i „šupljina“ = antičestica
 - H. Weyl: šupljina u moru čestica ima istu inerciju kao sama čestica
 - 1931 (Anderson): e^+ je eksperimentalno potvrđen
 - Ista „teorija“ (Dirac-ova jednačina) onda ukazuje na postojanje anti-čestice za svaki spin-½ fermion



Elementarne čestice – Istorija

„Alhemija“

Ko istoriju ne uči, sam u nju upada.

- Simetrija prelaza (crossing symmetry)

- Ako postoji proces $A + B \rightarrow C + D$, onda postoje i procesi

- $A \rightarrow \bar{B} + C + D$

- $A + \bar{C} \rightarrow \bar{B} + D$,

- $\bar{C} + \bar{D} \rightarrow \bar{A} + \bar{B}$, itd.

- Na primer:

- $\gamma + e^- \rightarrow \gamma + e^- \Rightarrow \gamma + e^+ \rightarrow \gamma + e^+$

- Princip detaljnog balansa (\sim okretanje toka vremena)

- $A + B \rightarrow C + D \Rightarrow C + D \rightarrow A + B$

- Ovi principi dozvoljavaju nove procese **dinamički**, mada su možda ti novi procesi **kinematicki** zabranjeni.
*(zakonima očuvanja naboja
(bez neodređenosti)
(naboji su svojstvene vrednosti
komutirajućih observabli)*

Uporediti!

(Heisenberg-ova zona)

Elementarne čestice – Istorija

Neutrini

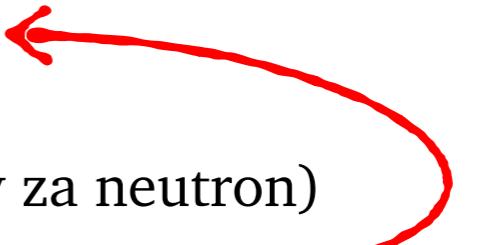
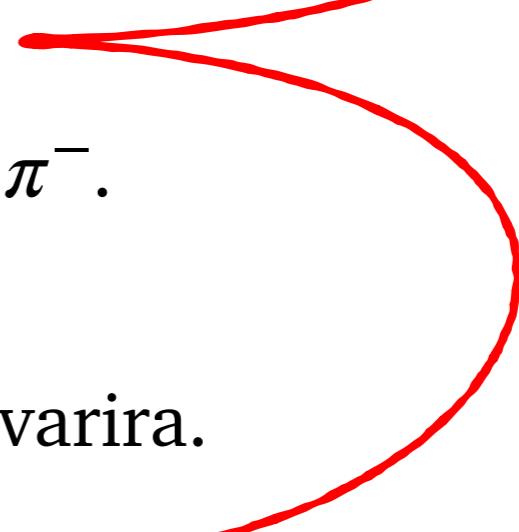
Ko istoriju ne uči, sam u nju upada.

- β -raspad: ${}_Z^A X \rightarrow {}_{Z+1}^A X' + e^-$
- Dvočestični raspad: $E_e = (m_X^2 - m_{X'}^2 - m_e^2) \mathbf{c^2} / (2m_X)$
- U eksperimentima, ovo je $\max(E_e)$, i E_e varira. 

Elementarne čestice – Istorija

Neutrini

Ko istoriju ne uči, sam u nju upada.

- β -raspad: ${}_Z^A X \rightarrow {}_{Z+1}^A X' + e^-$
- Dvočestični raspad: $E_e = (m_X^2 - m_{X'}^2 - m_e^2) c^2 / (2m_X)$
- U eksperimentima, ovo je $\max(E_e)$, i E_e varira.
- N. Bohr: možda očuvanje energije ne važi?
- W. Pauli: važi, samo postoji treća, nevidljiva čestica 
- ime „neutron“ je Chadwick već uzeo
- stoga E. Fermi imenuje: „neutrino“ (talijanski deminutiv za neutron)
- Takođe: $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$ i $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$ 
- U Powel-ovim slikama, μ^- ide 90° od smera π^- .
- Slično tome, e^- ide 90° od smera μ^- .
- U prvom raspadu je E_μ fiksno, u drugom E_e varira.
- Dakle, π^- -raspad je dvočestičan, a μ^- -raspad nije 

Elementarne čestice – Istorija

Neutrini

Ko istoriju ne uči, sam u nju upada.

- Cowan i Raines (u 1950-im) su tražili inverzni β -raspad,
 $\bar{\nu}_e + p^+ \rightarrow n^0 + e^+$ u ogromnoj cisterni vode.
(Izvor antineutrina: reaktor u Los Alamos-u.)
- Vrlo mala efikasnost, ali su razvili metodologiju za identifikaciju izlaznog pozitrona.
- Davis i Harmer: da li je neutrino = anti-neutrino?
 - Nije: $\nu_e + n^0 \rightarrow p^+ + e^-$ se događa, a $\bar{\nu}_e + n^0 \rightarrow p^+ + e^-$ se ne događa.
- 1953 (Konopinski i Mahmoud): ima smisla uvesti očuvani leptonski broj.
- Do 1962 se ustalilo:
 - leptoni (oni koji ne učestvuju u jakim interakcijama)
 - hadroni (oni koji učestvuju u jakim interakcijama).

Elementarne čestice – Istorija

Čudnost

Ko istoriju ne uči, sam u nju upada.

Čudne/strane čestice

- Stvaraju se u čestica-antičestica parovima i vrlo „brzo“ ($\sim 10^{-23}$ s)
- Raspadaju se, srazmerno, vrlo „sporo“ ($\sim 10^{-10}$ s)

$10^{13} \times$ sporije!

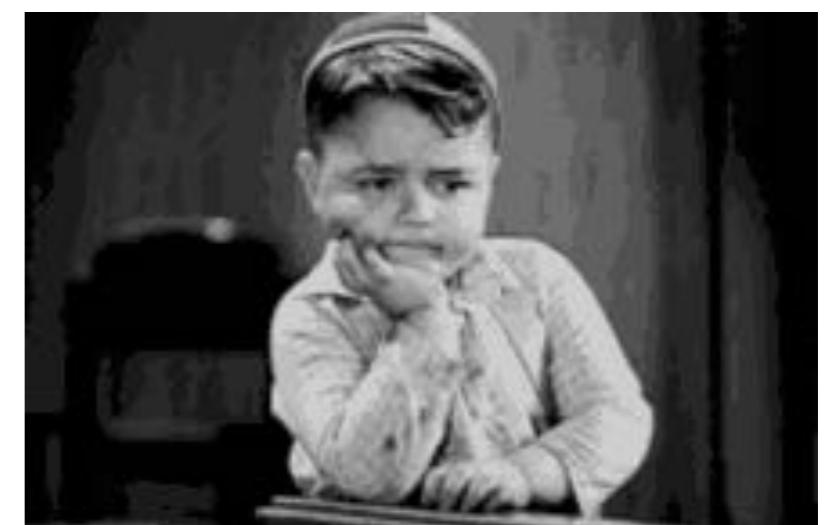
K^\pm, K^0, \bar{K}^0 (494 i 498 MeV/c²):

- Butler, 1947: $K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$.
- Powel, 1949: $K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$.
- Kasnije: $(K_S)^0 \rightarrow 2\pi$ ($\sim 10^{-10}$ s) ali $(K_L)^0 \rightarrow 3\pi$ ($\sim 10^{-8}$ s)
- Anderson, 1950: $\Lambda^0 \rightarrow p^+ + \pi^-$.

100 × sporije!

Zašto se $p^+ \rightarrow e^+ + \dots$ ne dogadja?

- Očuvani barionski broj (Stückelberg, 1938);
- Broj stranosti (Murray Gell-Mann, 1965):
 - očuvan pri stvaranju (jakom interakcijom),
 - nije očuvan pri raspadima (slabom interakcijom).



Elementarne čestice – Istorija

SU(3)_f

Ko istoriju ne uči, sam u nju upada.

- Osmostruki („eightfold“) put
- Slagalica čestica približno sličnih masa, po nabojima
 - naelektrisanje
 - stranost
- Predviđanje Ω^- bariona (M. Gell-Mann, rane 1960-te)
 - 1964: eksperimentalno otkriven
 - do oko 1963: „slagalice“ i predložene klasifikacione sheme su bile vrlo proizvoljne i različite
 - Konačan oblik korišćenjem SU(3) simetrije i kvarkova
 - Na primer, (sss) vezanog stanja (Ω^-)
 - nema u spin-1/2 “oktetu” (Ξp^+)
 - a ima ga u spin-3/2 “dekupletu”

Elementarne čestice – Inventar

Rezime

Mendeljejev, v.3.0

Važi Pauli-jev princip isključenja

• Fermioni

leptoni | kvarkovi **kopija ?!**

• Spin- $\frac{1}{2}$:

$\{(e^-, \nu_e), (u, d)\},$ najlakša
 $\{(\mu^-, \nu_\mu), (c, s)\},$ srednja
 $\{(\tau^-, \nu_\tau), (t, b)\}$ najteža

} „Supstancija“

• Bozoni Bose-kondenzat daje kontinualno (statično) polje

• Spin-0: Higgs

• Spin-1: $\gamma, W^\pm, Z^0, (8)$ gluona

• Spin-2: graviton

• i...?

} „Posrednici“

...i ništa više!

Elementarne čestice – Inventar

Rezime

Mendeljejev, v.3.0

- Tablica elementarnih čestica (kvanta) u Standardnom Modelu

Tablica 0.3: Sadržaj Standardnog Modela fizike elementarnih čestica; v. (0.46a)

Supstancija (spin- $\frac{1}{2}$ fermioni)					Interakcije (bozoni)	
Gen.	Leptoni	Kvarkovi				
1.	ν_e	e^-	u	d	γ	elektromagnetne (spin-1)
2.	ν_μ	μ^-	c	s	W^\pm, Z^0	slabe nuklearne interakcije (spin-1)
3.	ν_τ	τ^-	t	b	<i>gluoni</i>	jake nuklearne interakcije (spin-1)
			$\delta g_{\mu\nu}$		gravitacija	(spin-2)

Higgs-ov bozon (spin-0): daje masu česticama sa kojima interaguje

- Spin- $\frac{1}{2}$ fermioni = dve polarizacije, kao i spin-1, & 2 bozoni bez mase
- Masivni spin-1 bozoni = tri polarizacije, spin-0 = jedna
- Dakle, 96 fermionskih i 30 bozonskih stepeni slobode

Elementarne čestice – Inventar

Rezime

Ime / Energy	Spin	Q	$I_3^{(W)}$
ν_e ‐ 3 eV	ν_μ ‐ 0.19 MeV	ν_τ ‐ 18.2 MeV	$\pm \frac{1}{2}$
e .511 MeV	μ 106 MeV	τ 1.78 GeV	$\pm \frac{1}{2}$
u, u, u 1.5–4.5 MeV	c, c, c 1.0–1.4 GeV	t, t, t .17–.18 TeV	$\pm \frac{1}{2}$
d, d, d 5.0–8.5 MeV	s, s, s .08–.15 GeV	b, b, b 4.0–4.5 GeV	$\pm \frac{1}{2}$

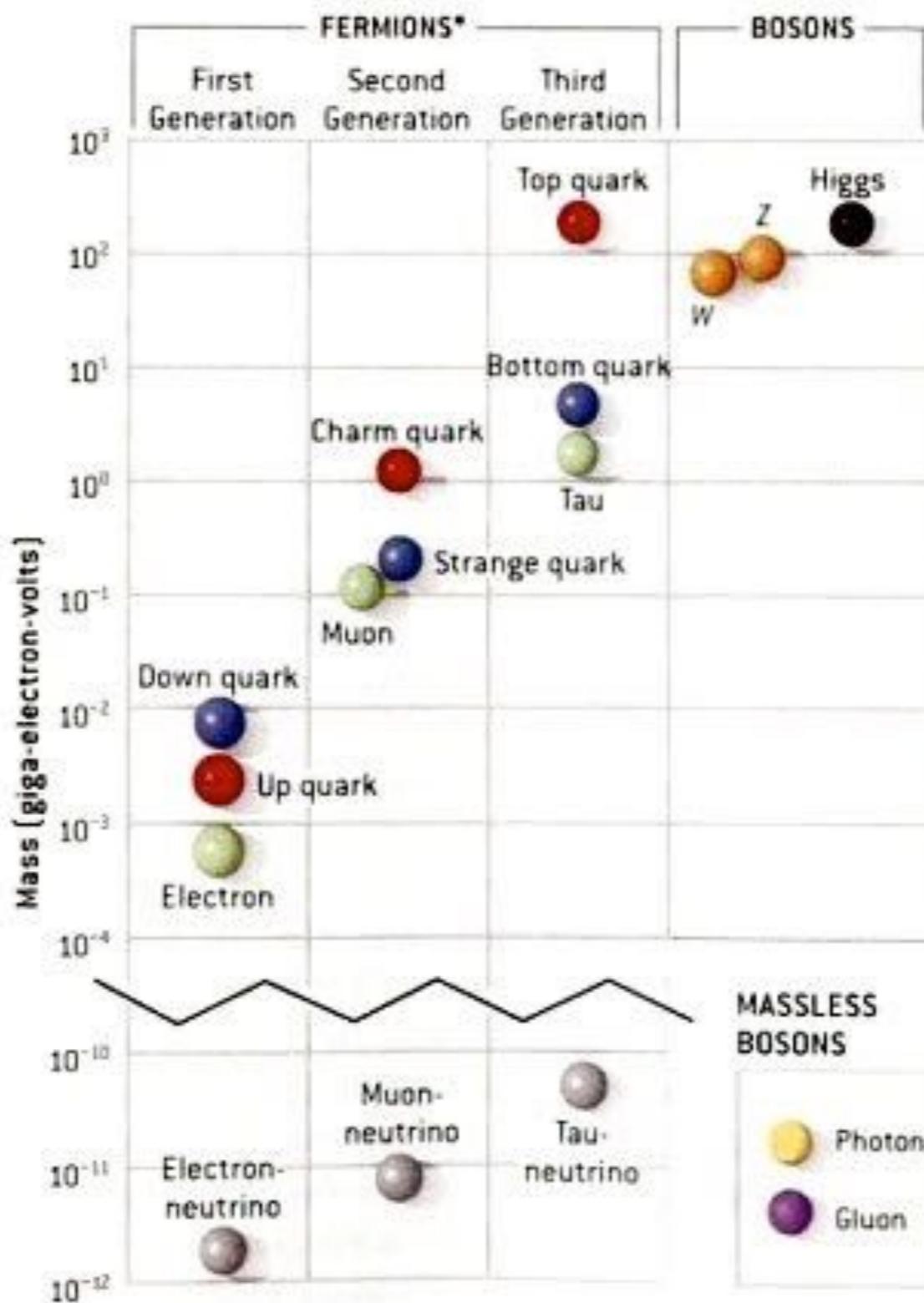
Zašto 3 ?!

Plus posrednici interakcija:
foton, W^\pm , Z^0 , gluoni i gravitoni.

i Higgs-ova čestica.

Elementarne čestice – Inventar

Rezime



<http://universe-review.ca/F15-particle.htm>

Elementarne čestice – Inventar

Rezime

Leptons

e, μ, τ
 ν_e, ν_μ, ν_τ

l

Photon

γ

Quarks

u, c, t
 d, s, b

q

g

Gluons

Interakcije

Higgs Boson

W^+/W^-

Z^0

W

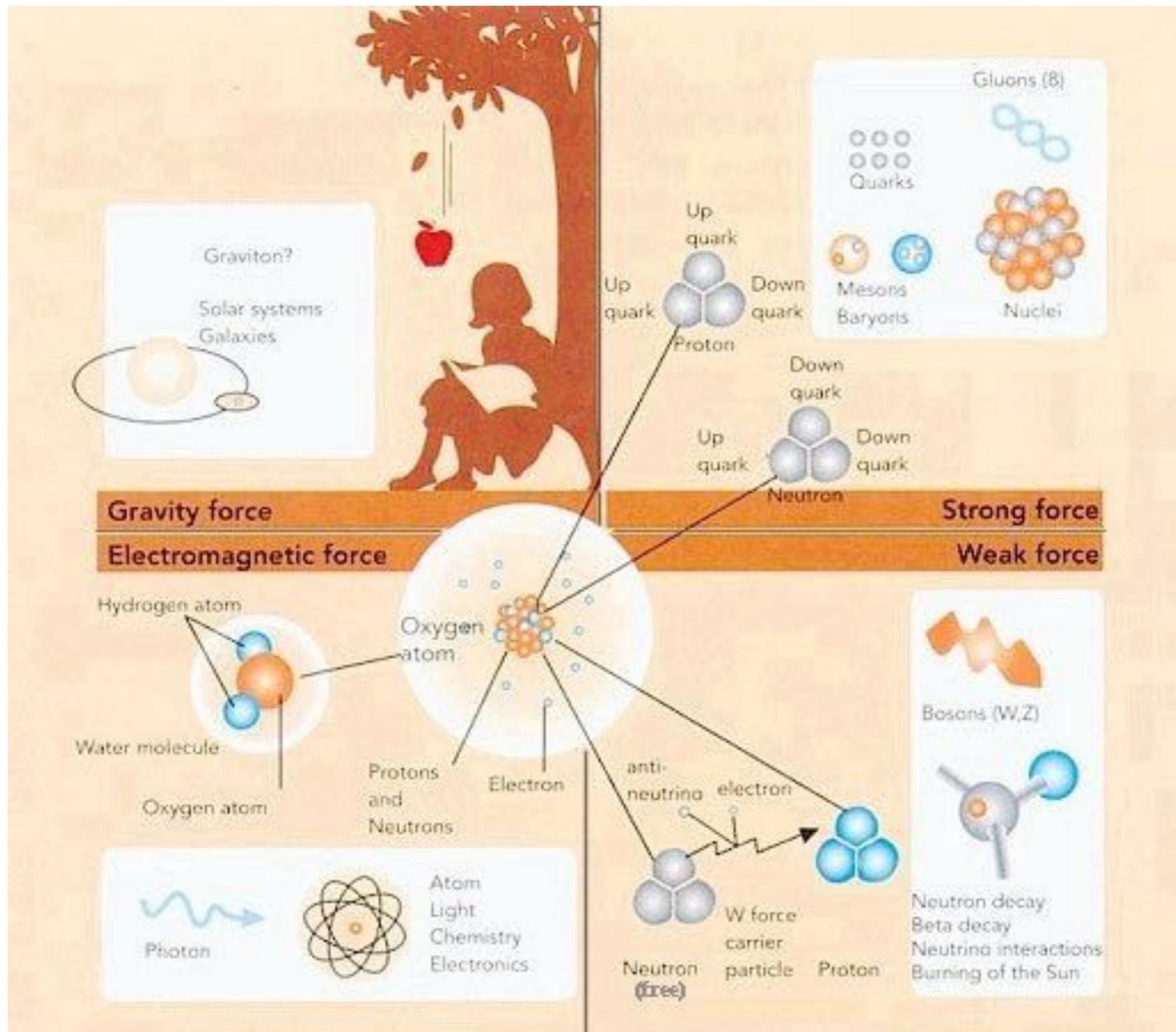
Z

H

<http://ebiquity.umbc.edu/blogger/wp-content/uploads/2008/07/socparticles1.png>

Elementarne čestice – Inventar

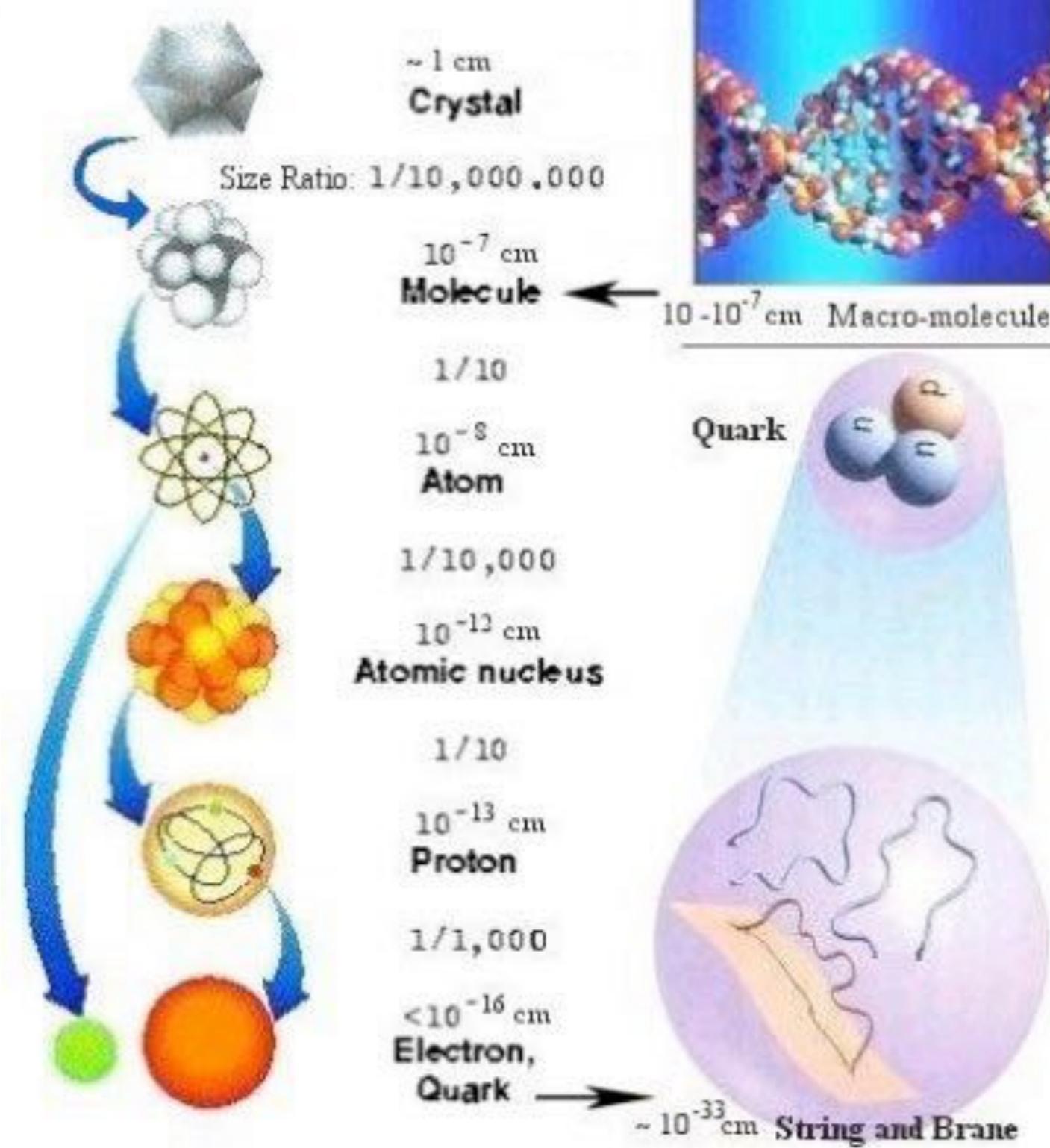
Rezime



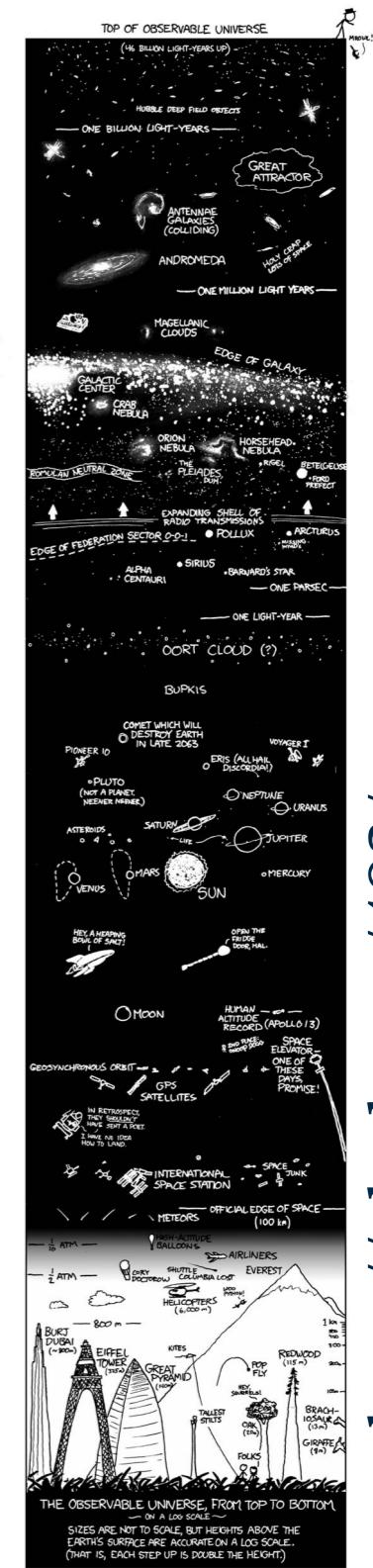
<http://universe-review.ca/F15-particle.htm>

Elementarne čestice – Inventar

Rezime



<http://universe-review.ca/F15-particle.htm>



<http://xkcd.com/482/>

Elementarne čestice – Inventar

Rezime

Studenti —kao vi— su, izvorno „peške“ merili i izračunavali trajektorije, zakriviljenosti, nanelektrisanja, mase, ...

Sada to uglavnom rade kompjuteri... ☺

...pa nema više prilike za malu usputnu zaradu... ☹

...osim u programiranju tih kompjutera... 😎

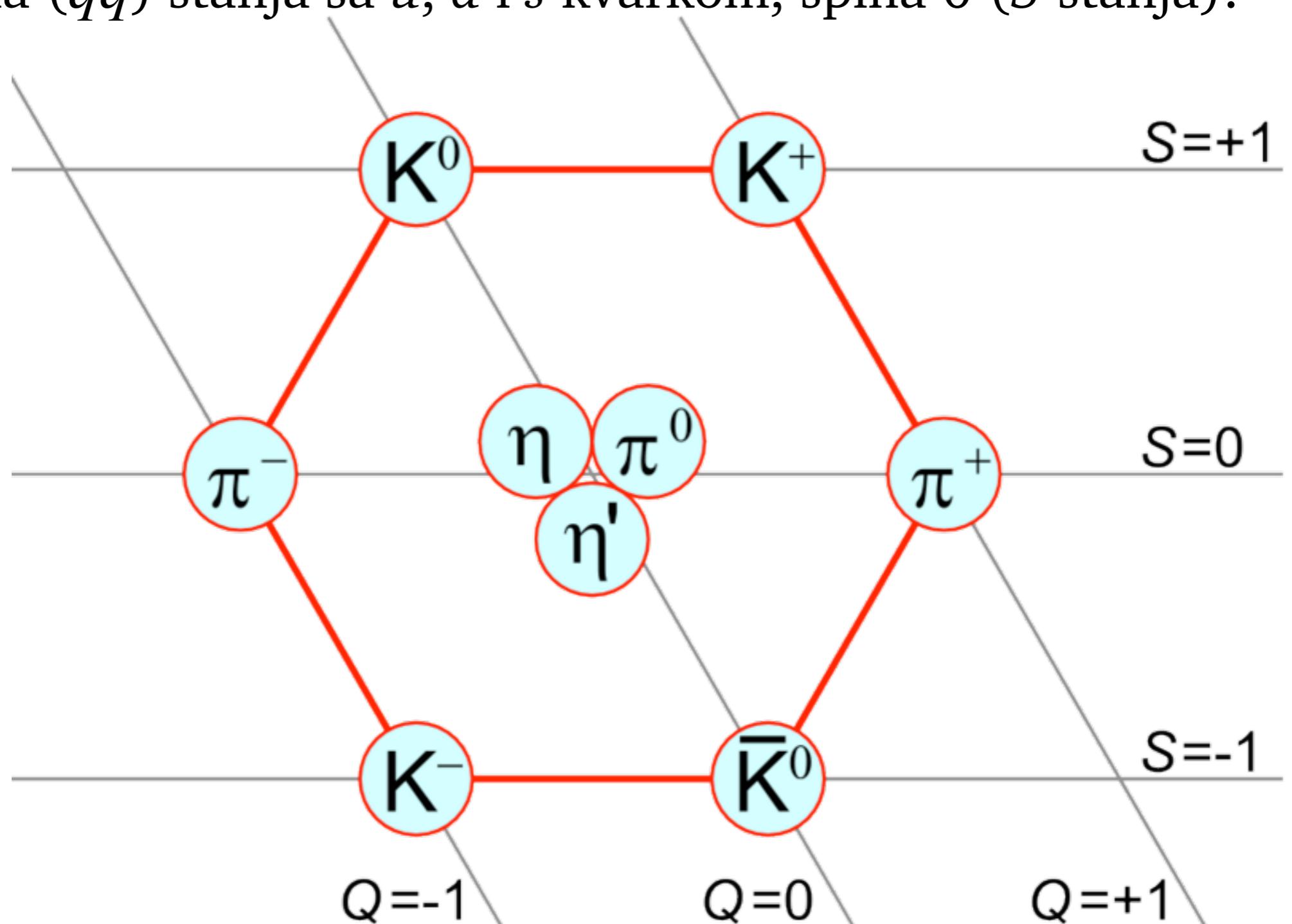
...“machine learning” je nova budućnost... 😍😘



Kvark Model

Kvarkovi i mezoni

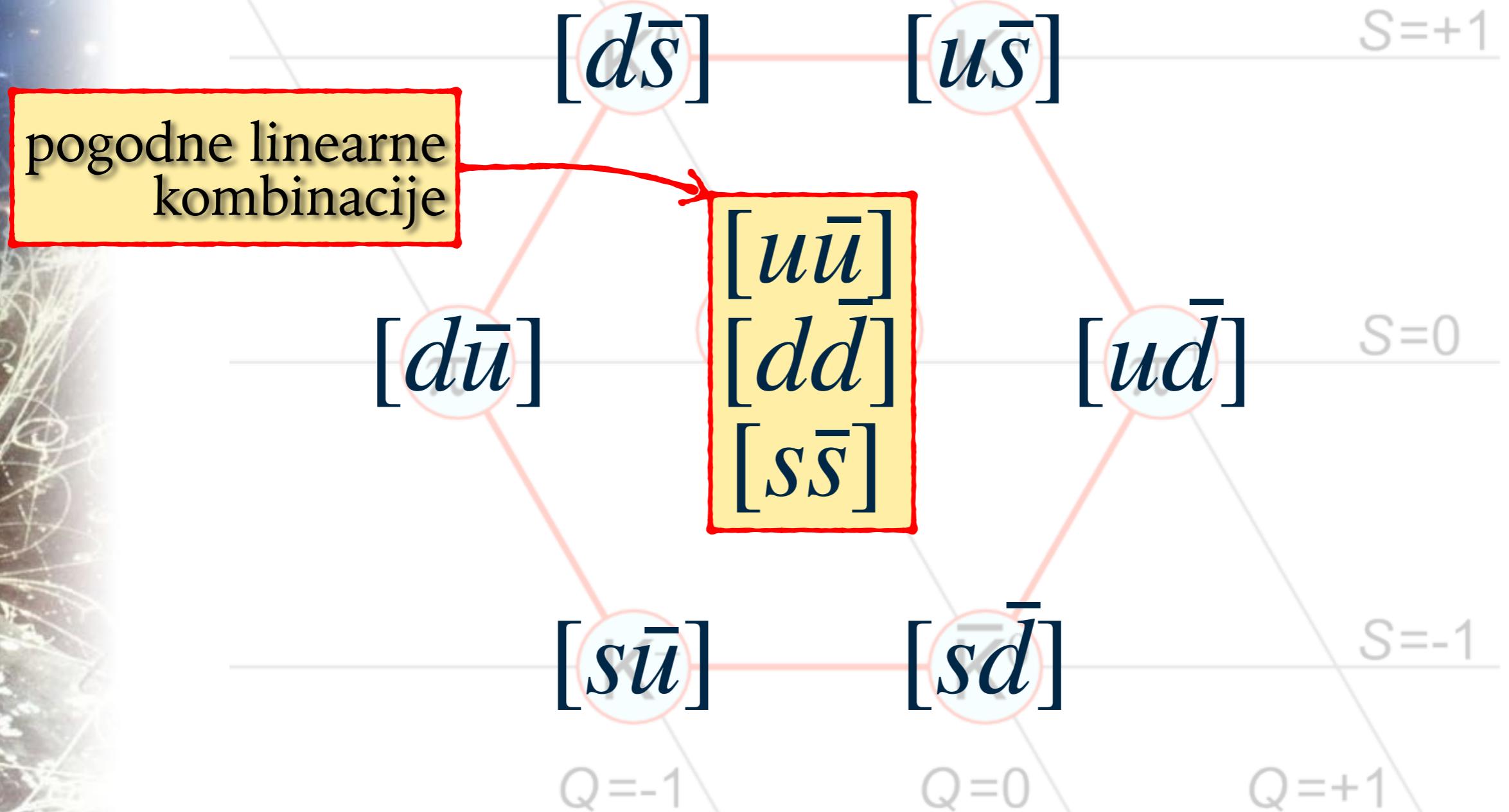
- Vezana ($q\bar{q}$) stanja sa u , d i s kvarkom, spina 0 (S -stanja):



Kvark Model

Kvarkovi i mezoni

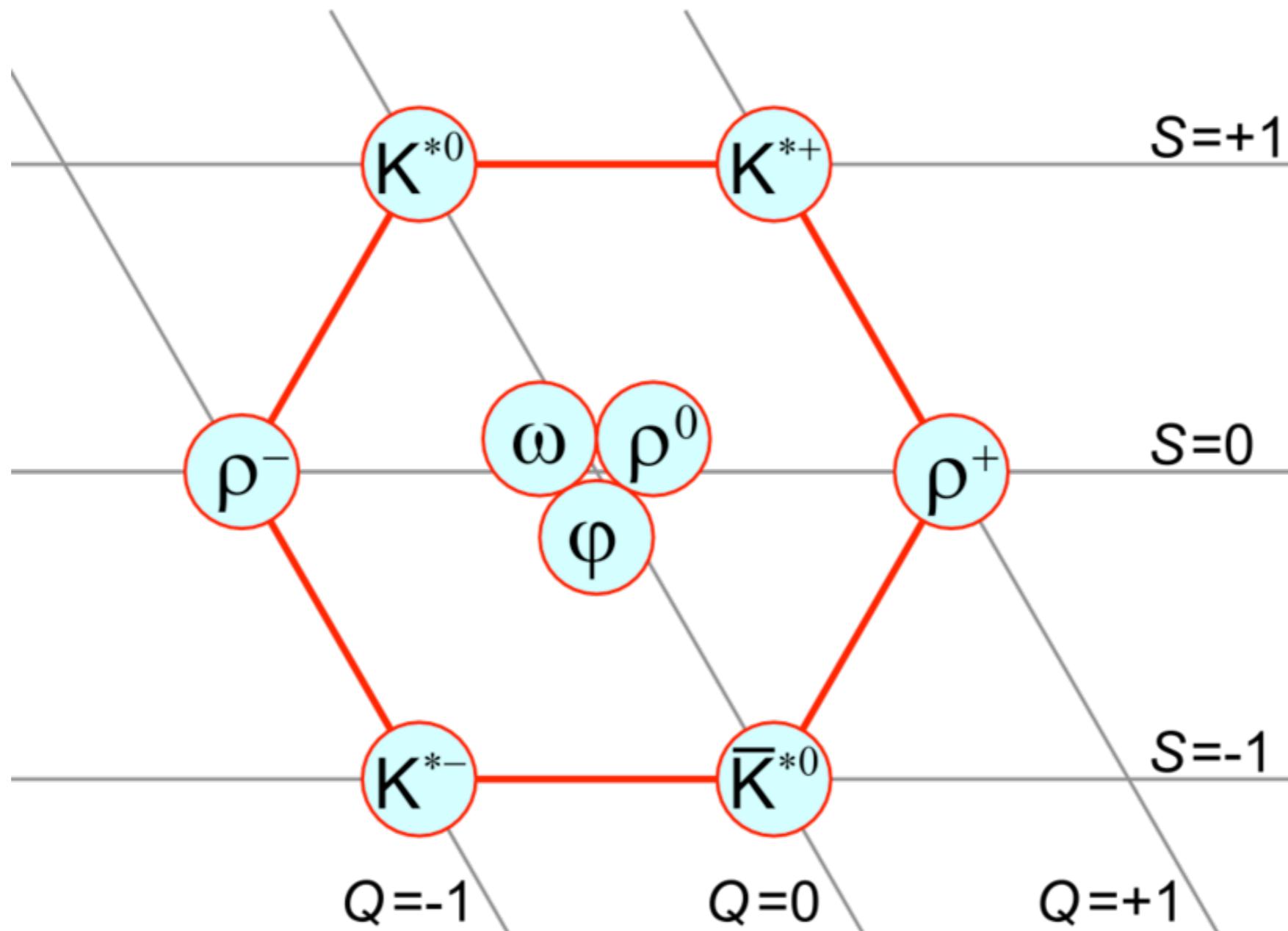
- Vezana ($q\bar{q}$) stanja sa u, d i s kvarkom, spina 0 (S -stanja):



Kvark Model

Kvarkovi i mezoni

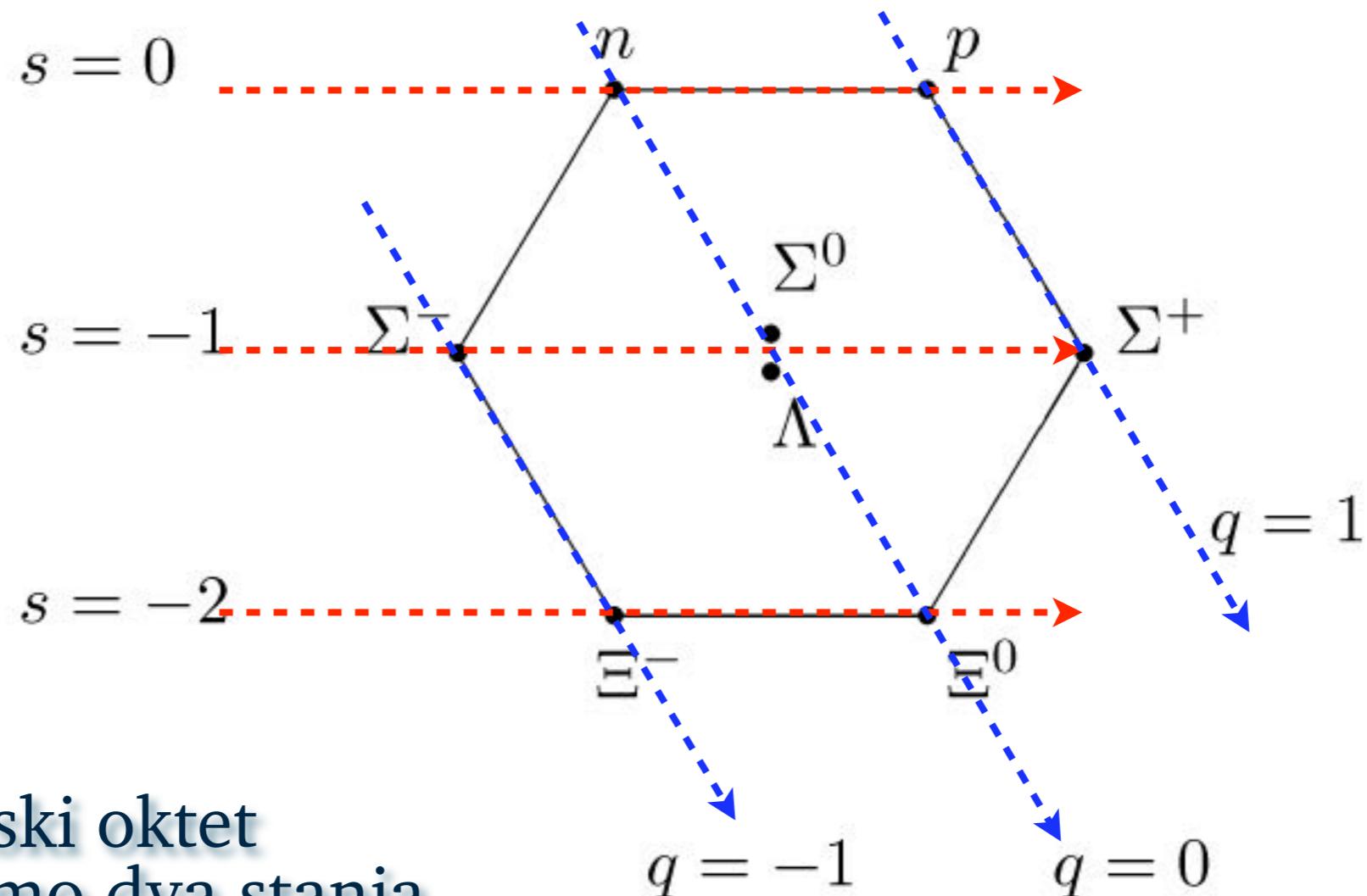
- Vezana ($q\bar{q}$) stanja sa u , d i s kvarkom, spina 1 (P -stanja):



Kvark Model

Kvarkovi i barioni

- Vezana (qqq) stanja sa u , d i s kvarkom, spina $1/2$:

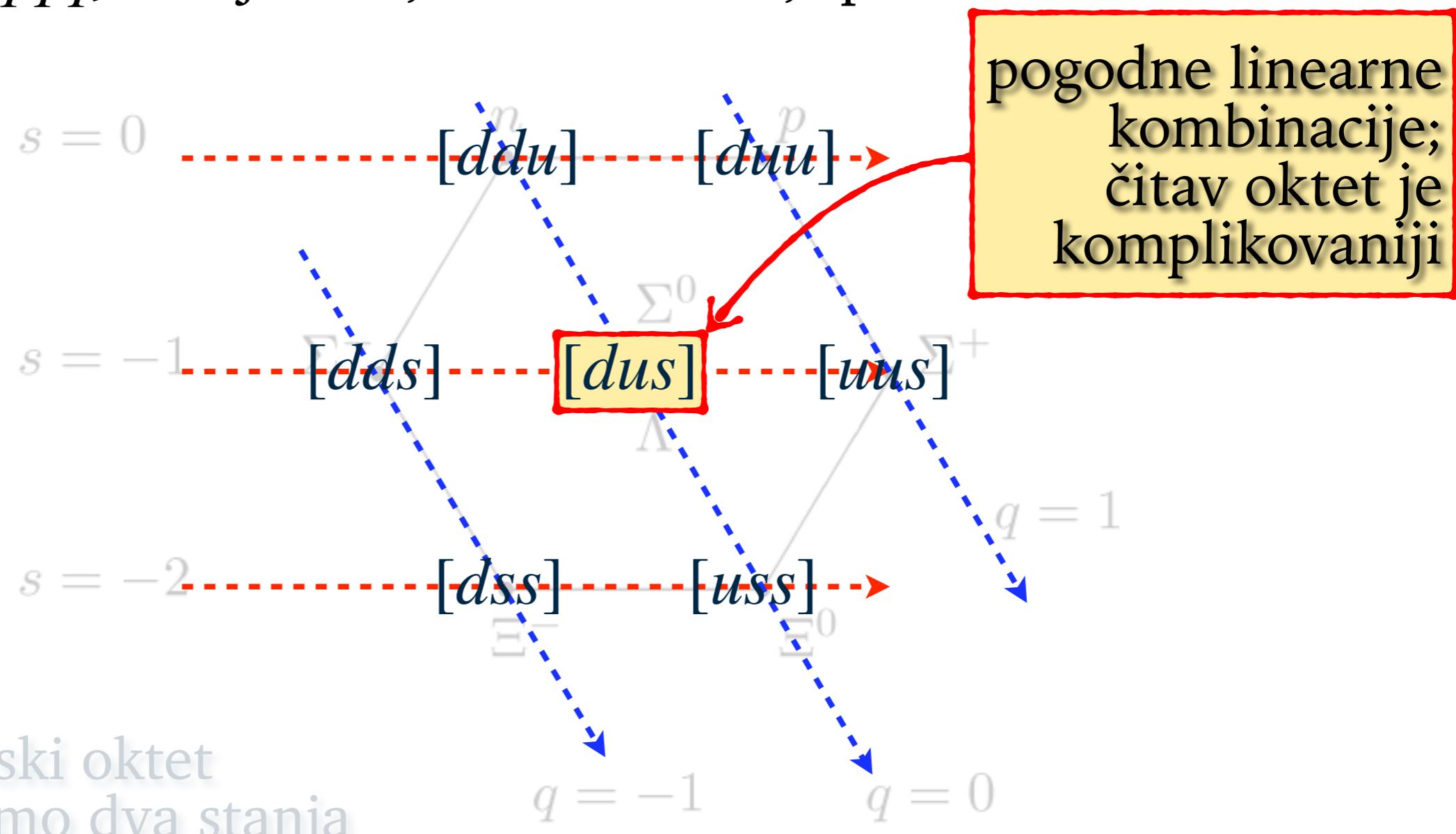


Barionski oktet
ima samo dva stanja
sa $s = -1$ i $q = 0$.

Kvark Model

Kvarkovi i barioni

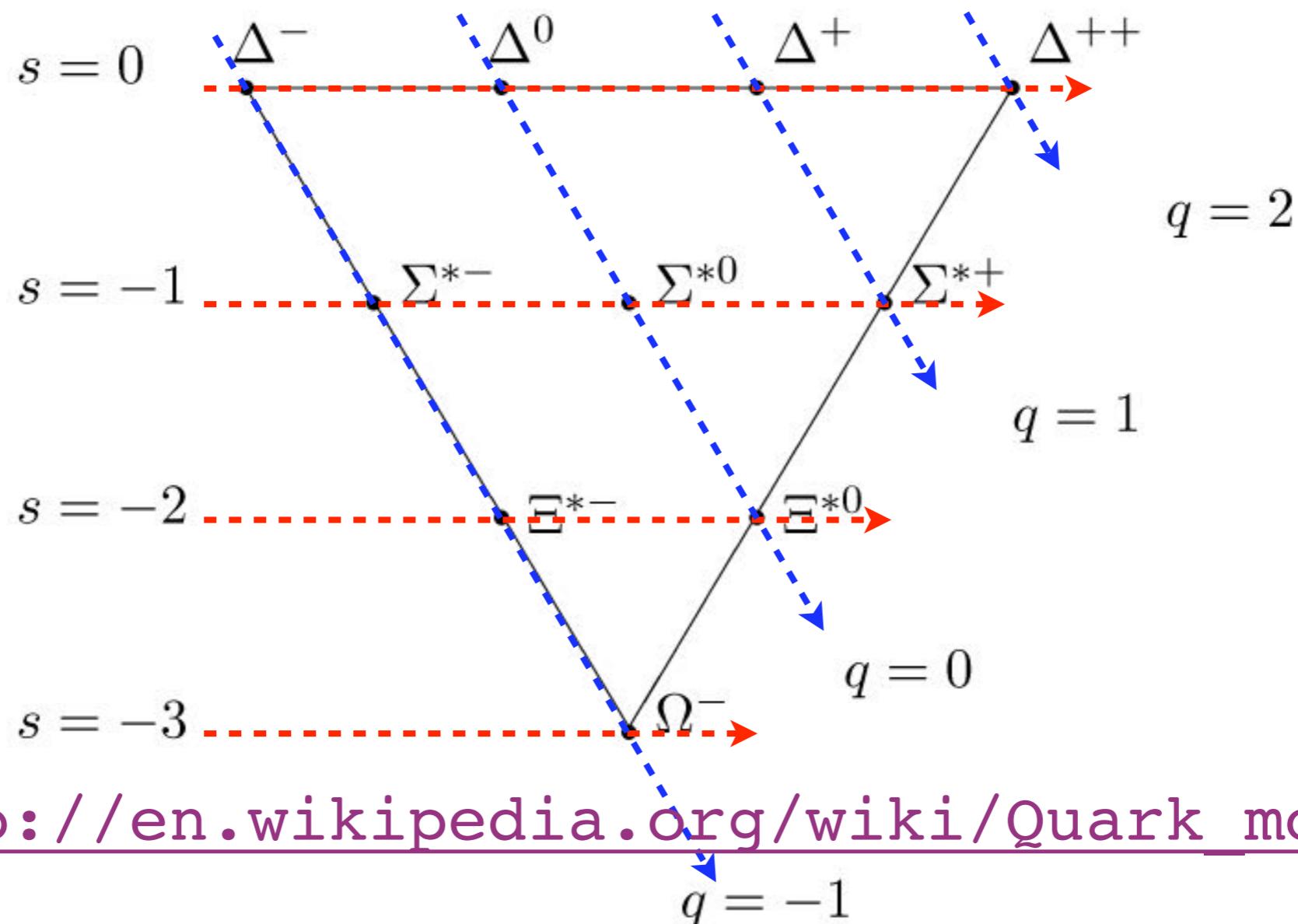
- Vezana (qqq) stanja sa u , d i s kvarkom, spina $1/2$:



Kvark Model

Kvarkovi i barioni

- Vezana (qqq) stanja sa u , d i s kvarkom, spina $3/2$:

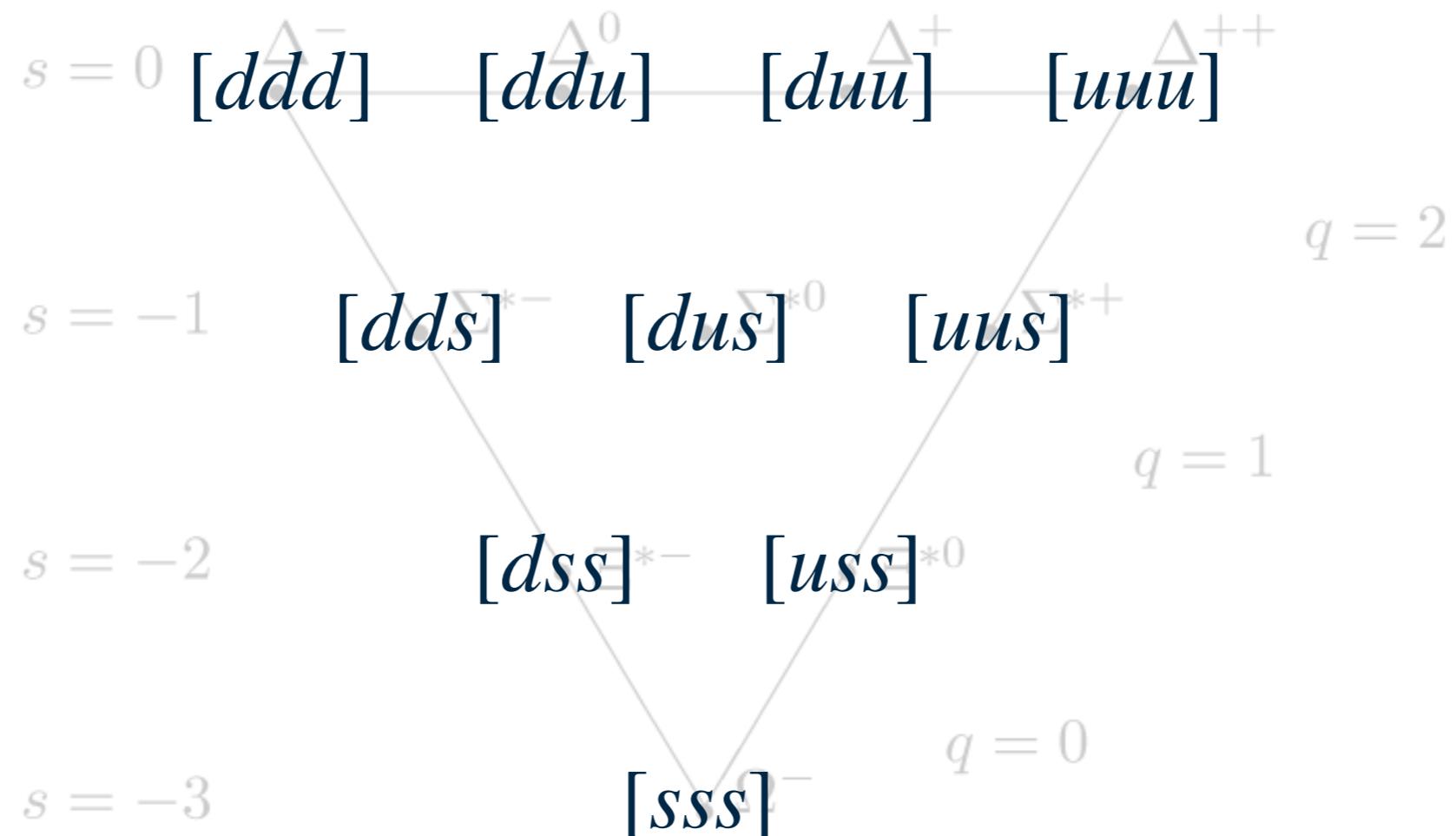


http://en.wikipedia.org/wiki/Quark_model

Kvark Model

Kvarkovi i barioni

- Vezana (qqq) stanja sa u , d i s kvarkom, spina $3/2$:



Konkretne 3-čestične talasne funkcije su prilično jednostavne.

$q = -1$

Kvark Model

Kvarkovi i barioni

Kao što faktorizujemo
 $\Psi(r, \theta, \phi) = \sum_{nlm} R_{nl}(r) Y_l^m(\theta, \phi)$

- Talasne funkcije vezanih stanja možemo faktorizovati
 - $\Psi(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \vec{r}_3) \chi_1(\text{spin}) \chi_2(\text{ukus}) \chi_3(\text{boja})$.
 - Osnovno stanje: faktor $\Psi(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \vec{r}_3)$ je sferno-simetričan, pa je dakle i simetričan u odnosu na $\vec{r}_i \leftrightarrow \vec{r}_j$ razmenu $\forall i, j$.
 - Faktor $\chi_3(\text{boja})$ je antisimetričan u odnosu na $i \leftrightarrow j$ razmenu $\forall i, j$.
 - \Rightarrow faktor $\chi_1(\text{spin}) \chi_2(\text{ukus})$ mora biti simetričan u odnosu na $i \leftrightarrow j$ razmenu $\forall i, j$.
- Ako je faktor $\chi_1(\text{spin}) = \text{totalno simetričan} \Rightarrow \text{spin-}^3/2$,
- onda je i $\chi_2(\text{ukus})$ totalno simetričan \Rightarrow desetorka

Simetrizacija spina i ukusa

Sabiranje spina

$SU(2)$ & $SU(3)$

- Označimo

$$|\uparrow\rangle := |\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}\rangle, \quad |\downarrow\rangle := |\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}\rangle; \quad |\uparrow\uparrow\rangle := |\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}\rangle \otimes |\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}\rangle, \text{ itd.}$$

- Onda imamo da je

$$|\frac{1}{2}, \pm \frac{1}{2}\rangle \otimes |\frac{1}{2}, \pm \frac{1}{2}\rangle = \left\{ \begin{array}{l} |\mathbf{1}, +1\rangle = |\uparrow\uparrow\rangle, \\ |\mathbf{1}, 0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\downarrow\rangle + |\downarrow\uparrow\rangle), \\ |\mathbf{1}, -1\rangle = |\downarrow\downarrow\rangle, \\ |\mathbf{0}, 0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle), \end{array} \right. \begin{array}{l} \text{triplet} \\ \text{singlet} \end{array}$$

- gde je „triplet“ simetričan u odnosu na razmenu dva faktora
- a „singlet“ antisimetričan u odnosu na razmenu dva faktora

Simetrizacija spina i ukusa

Dekuplet (10)

$SU(2) \text{ & } SU(3)$

- Spinski faktor, $\chi_1(\text{spin})$, je

$$|\frac{3}{2}, m_s\rangle := \left\{ |\uparrow\uparrow\uparrow\rangle, |\uparrow\uparrow\downarrow\rangle_{(123)}, |\uparrow\downarrow\downarrow\rangle_{(123)}, |\downarrow\downarrow\downarrow\rangle \right\}$$
$$m_S = \begin{matrix} +3/2 \\ +1/2, \\ -1/2, \\ -3/2 \end{matrix}$$

- gde je

$$|\uparrow\uparrow\downarrow\rangle_{(123)} := \frac{1}{\sqrt{3}}(|\uparrow\uparrow\downarrow\rangle + |\uparrow\downarrow\uparrow\rangle + |\downarrow\uparrow\uparrow\rangle) \quad m_S = +1/2$$

- Sve linearne kombinacije ovih stanja su totalno simetrične.

- Faktor ukusa (vrste) je analogno

$$\chi_2(\text{ukus}) := \left\{ |ddd\rangle, |ddu\rangle_{(123)}, \dots, |dus\rangle_{(123)}, \dots, |uss\rangle_{(123)}, \dots, |sss\rangle \right\}$$

$$|abc\rangle_{(123)} := \frac{1}{\sqrt{3!}}(|abc\rangle + |acb\rangle + |cab\rangle + |cba\rangle + |bca\rangle + |bac\rangle)$$

- ⇒ „dekuplet“ (desetorka), tj. 10 bazisnih stanja.

Simetrizacija spina i ukusa

Oktet (8)

$SU(2) \text{ & } SU(3)$

- Kada je faktor $\chi_1(\text{spin})$ mešovit:

$$|\frac{1}{2}, m_s\rangle_{[12]} := \{ |\uparrow\downarrow\uparrow\rangle_{[12]}, |\uparrow\downarrow\downarrow\rangle_{[12]} \} \quad |\uparrow\downarrow\bullet\rangle_{[12]} := \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\downarrow\downarrow\rangle_{[12]} - |\downarrow\uparrow\downarrow\rangle_{[12]})$$

- Onda postoje dva linearne nezavisna stanja:

$$\{ |\uparrow\downarrow\bullet\rangle_{[12]}, |\uparrow\bullet\downarrow\rangle_{[13]} \} \quad \text{pošto} \quad |\bullet\uparrow\downarrow\rangle_{[23]} = |\uparrow\bullet\downarrow\rangle_{[13]} - |\uparrow\downarrow\bullet\rangle_{[12]}$$

- Proizvod $|\uparrow\downarrow\bullet\rangle_{[12]} |du\star\rangle_{[12]}$ je onda *simetričan* pod $1 \leftrightarrow 2$, a

$$|\uparrow\downarrow\bullet\rangle_{[12]} |du\star\rangle_{[12]} + |\uparrow\bullet\downarrow\rangle_{[13]} |d\star u\rangle_{[13]} + |\bullet\uparrow\downarrow\rangle_{[23]} |\star du\rangle_{[23]}$$

- je totalno simetrično stanje.

Simetrizacija spina i ukusa

Oktet (8)

SU(2) & SU(3)

- U spin-ukus faktorima oblika

$$|\uparrow\downarrow\bullet\rangle_{[12]} |du\star\rangle_{[12]} + |\uparrow\bullet\downarrow\rangle_{[13]} |d\star u\rangle_{[13]} + |\bullet\uparrow\downarrow\rangle_{[23]} |\star du\rangle_{[23]}$$

- gde: „ $\uparrow, \downarrow, \bullet$ “ $\in \left\{ \left| \frac{1}{2}, +\frac{1}{2} \right\rangle, \left| \frac{1}{2}, -\frac{1}{2} \right\rangle \right\}$ a „ d, u, \star “ $\in \{d, u, s\}$,
- tako da imamo spin- $(\pm 1/2)$ barione: [ddu] [duu]

[dds] [dus] [uus]

[dss] [uss]

- gde su svih osam talasnih funkcija simetrizovane po obrascu datom gore.

Hvala na pažniji

Tristan Hübsch

Department of Physics and Astronomy, Howard University, Washington DC

Department of Mathematics, University of Maryland, College Park, MD

Department of Physics, Faculty of Natural Sciences, Novi Sad, Serbia

<https://tristan.nfshost.com/>