

KVARKOVI

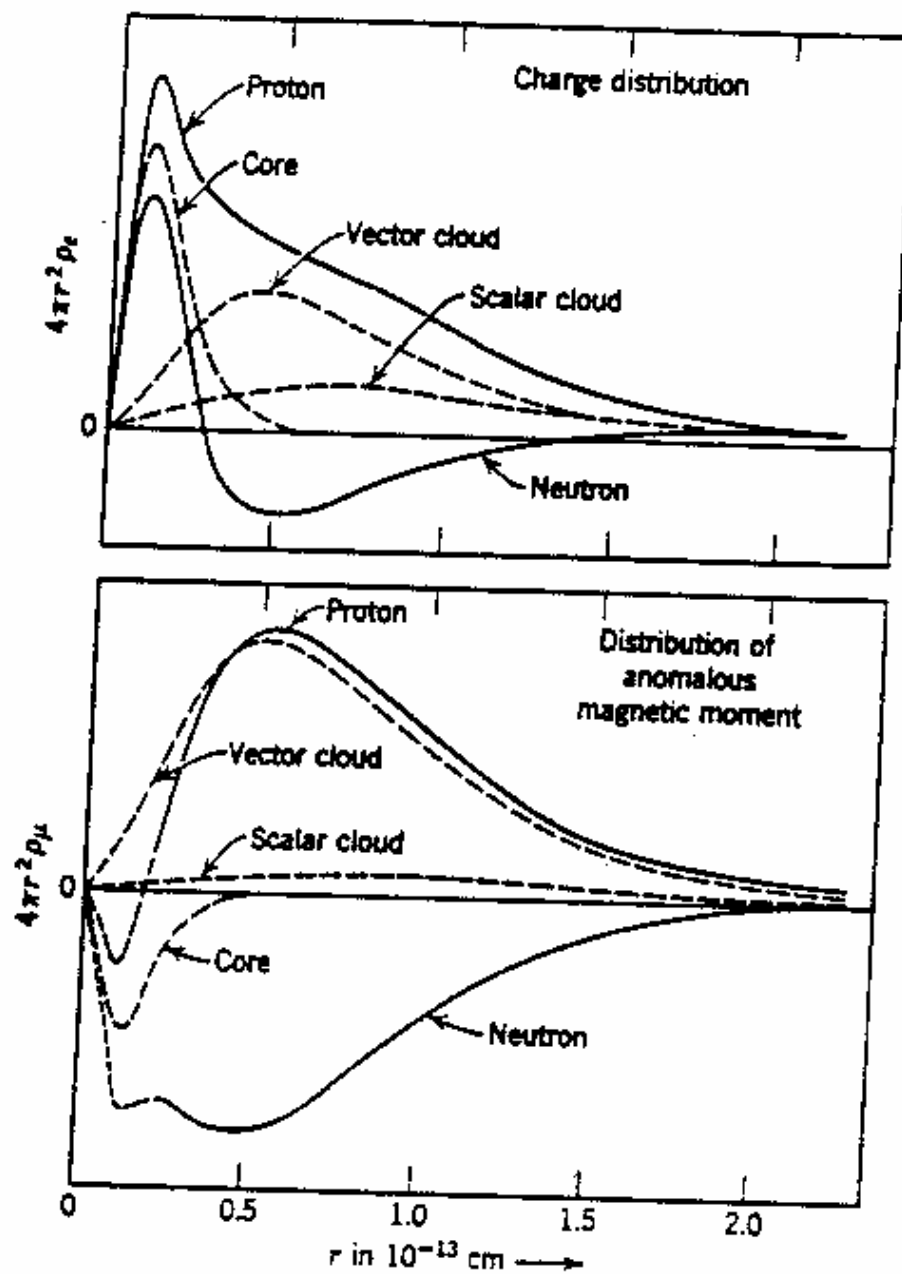
1. Kvarkovi

U prethodnom poglavlju razmatrali smo osobine hadrona, čestica koje osećaju jaku interakciju. Ove čestice su prvo smatrane elementarnim, kao što su to leptoni, ali je ubrzano otkrivanje velikog broja hadrona sugeriralo da oni nisu elementarni. Šta više, studija elastičnog rasejanja elektrona na energijama nekoliko GeV na nukleonima bacilo je novu svetlost na ovaj problem. Elektroni nisu predmet dejstva jake interakcije i prodiru duboko u nukleon, tako da ugaona distribucija rasejanih elektrona zavisi od raspodele električnog naelektrisanja i magnetskog momenta. Analiza ovih podataka daje raspodelu naelektrisanja protona i neutrona prikazanih na slici 1. Ove raspodele jasno pokazuju da nukleoni nisu tačkaste Dirakove čestice, već imaju radijus oko 0.8 fm. Proučavanje neelastičnih elektron-nukleon rasejanja na višim energijama je dalje sugerisalo da nukleoni imaju tačkaste konstituente, nazvane kvarkovi.

Sada znamo da se sve poznate osobine hadrona (kvantni brojevi, masa, naelektrisanje, magnetski moment) njihova ekscitovana stanja i osobine raspada, mogu objasniti pretpostavljajući da su mezoni sačinjeni od para kvark-antikvark, a barioni od tri kvarka, a anti barioni od tri anti kvarka. Da bi se sve ovo dobilo potrebna su nam šest kvarka koji se nazivaju, *up* (u), *down* (d), *charm* (c), *strange* (s), *top* (t) i *beauty* (b).

Medjutim, kvarkovi nikada nisu opaženi nasuprot mnogim sofisticiranim eksperimentima, i to je dovelo do hipoteze da oni moraju biti zatvoreni unutar hadrona. Ovo je zasnovano, pretpostavlja se, na osnovnim zakonima prirode. Činjenica da slobodan kvark nikada nije vidjen znači da nemamo direktnog znanja o njihovim osobinama, i da mi znamo samo o osobinama koje su potrebne za objašnjenje osobina hadrona. Tako, uvodeći osnovne postulate da interakcija između kvarkova ne zavisi od njihovog tipa, možemo izvesti da su kvarkovi sa najnižom masom *up* i *down*, jer oni grade barione najniže mase, proton i neutron. *Strange* i *charm* kvark imaju veće efektivne mase, za približno 150 i 1500 MeV/c². *Beauty* kvark ima bitno veću masu, od oko 4.5 GeV/c², dok je *top* kvark tako masivan da je tek nedavno otkriven (između 176 i 199 GeV/c²).

Svi kvarkovi su fermioni i imaju kvantne brojeve date u Tabeli 1. Pokažimo sada kako se ove osobine mogu jednostavno izvesti iz poznatih osobina hadrona.



Slika 1. Raspodela naelektrisanja i anomalnog momenta protona i neutrona izvedeno iz elektron-nukleon rasejanja.

Tabela 1. Osobine kvarkova, Masa top kvarka je procenjena

Tip (flavour)	down	up	strange	charm	beauty	top
Simbol	d	u	s	c	b	t
Spin	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2
Naelektrisanje	-1/3	2/3	-1/3	2/3	-1/3	2/3
Izospin (T)	1/2	1/2	0	0	0	0
T_z	-1/2	1/2	0	0	0	0
Stranost	0	0	-1	0	0	0
Charm	0	0	0	1	0	0
Beauty	0	0	0	0	-1	0
Topness	0	0	0	0	0	1
Barionski broj	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3
Efektivna masa GeV/c ²	0.31	0.31	0.5	1.8	4.5	>176

(a) Elektron-nukleon rasejanja sugerišu da čak i barioni sa najnižom masom, proton i neutron (nukleoni) nisu sačinjeni od jednog kvarka. Činjenica da su barioni fermioni implicira da su njihove komponente fermioni, i najjednostavnija je pretpostavka da ih ima tri u svakom nukleonu. Mezoni su bozoni, te su oni sačinjeni iz parnog broja kvarkova. Najlakši mezoni su lakši od nukleona, tako da broj kvarkova mora biti dva. Takodje postoji valjana evidencija da se kvarkovi mogu radjati ili uništavati samo u parovima zajedno sa antikvarkovima. Kako se mezoni lako proizvode i uništavaju u hadronskim interakcijama, ovo implicira da su oni sačinjeni od para kvark, antikvark. Ovo je takodje potvrđeno negativnom unutrašnjom parnošću mezona.

(b) Barioni i mezoni najnižih masa su sačinjeni od kvarkova i antikvarkova u stanju sa nultim relativnim ugaonim momentima. Tako, ako kvark ima spin 1/2, barion najniže mase mora imati spin 1/2 ili 3/2, a mezon najniže mase, 0 ili 1. Činjenica je da se upravo ovo eksperimentalno i potvrđuje.

(c) Unutrašnja parnost čestice se može definisati samo u odnosu na parnost drugih čestica. Kao što je pomenuto ranije, uzeto je da su parnosti nukleona pozitivne. Ovo implicira da su parnosti u i d kvarkova koji su konstituenti nukleona takodje pozitivne. Medjutim, parnosti najlakših mezona, ako su sačinjeni od kvarka i antikvarka morala bi biti negativna nezavisno od usvojene konvencije, jer fermion i antifermion imaju suprotne parnosti, i parnost mezona, ako je u stanju sa nultim relativnim angularnim momentom, je jednostavno proizvod parnosti konstituenata. Ovo je eksperimentalno dobro verifikovano jer svi mezoni sa masom manjom od 1 GeV/c² imaju negativnu parnost.

(d) Iz razloga koji će biti kasnije diskutovani, proton i neutron ne mogu biti sačinjeni od kvarkova jednog tipa. Kako su nukleoni najlakši barioni, oni su sačinjeni od najlakših kvarkova, u i d kvarkova, i pretpostavlja se da se proton sastoji od dva u i jednog d kvarka (talasna funkcija je $|uud\rangle$), dok je neutron sačinjen od jednog u i dva d kvarka, talasna funkcija je $|udd\rangle$. Sledi da naelektrisanje u kvarka mora biti $q_u=(2/3)e$ i da je naelektrisanje d kvarka $q_d=-(1/3)e$. Analogna razmatranja bariona veće mase, sugeriše da je $q_c=q_t=(2/3)e$ a da je $q_s=q_b=-(1/3)e$.

Takodje, najlakši mezoni su sačinjeni od u i d kvarkova, i njihovih antikvarkova, koji iz osobina anti-fermiona imaju suprotna naelektrisanja, $q_{\bar{u}} = -(2/3)e$ i $q_{\bar{d}} = (1/3)e$. Razmotrimo moguće kombinacije kvark- antikvark, za u i d kvarkove. Ima ukupno četiri kombinacija i to su $|u\bar{u}\rangle, |d\bar{d}\rangle, |d\bar{u}\rangle, |u\bar{d}\rangle$. Pretpostavlja se da su mase u i d kvarka jednake, kao i mase antikvarkova. Postoji jako mešanje stanja $|u\bar{u}\rangle, |d\bar{d}\rangle$ te tako najlakši mezoni grade triplet čestica (pioni) skoro jednakih masa sa naelektrisanjima $e, -e$ i 0 . Pored toga, dve od te tri čestice (π^+ i π^-) su jedna drugoj antičestice, dok je treća, π^0 istovremeno i čestica i antičestica. Ovo očekivanje se podudara sa onim šta znamo o ovim česticama.

e) Hadroni, mezoni kao i barioni, javljaju se kao multipleti čestica približno istih masa. Tako imamo: (i) π mezonski triplet, koji se sastoji od naelektrisanih piona sa masama $m_{\pi^\pm} = 139.57 \text{ MeV}/c^2$ i neutralnog piona sa masom $m_{\pi^0} = 134.96 \text{ MeV}/c^2$; (ii) nukleonski dublet koji se sastoji od protona i neutrona sa masama $m_p = 938 \text{ MeV}/c^2$ i $m_n = 939.57 \text{ MeV}/c^2$; (iii) Δ kvartet četiri čestice sa naelektrisanjama $2e, e, 0$ i $-e$ i masama $1232 \pm \text{MeV}/c^2$ i td. Da bi se objasnilo postojanje ovih multipleta po analogiji sa slučajem čestica spina \mathbf{J} koji ima degenerisana stanja koja se mogu cepati samo primenom magnetskog polja, pridružuje se novi kvantni broj T svakom članu multipleta. T se naziva izotopski spin i povezan je sa M , brojem članova multipleta preko relacije $M = 2T + 1$. Tako, za tri multipleta diskutovana ranije T je jednako $1, 1/2$ i $3/2$ resp.

Razmotrimo nukleonski dublet, za koji je $T = 1/2$. Ova vrednost se može objasniti pridruživanjem izotopskog spina jednakog $1/2$ u i d kvarkovima. Kako se oni kombinuju u neutronu i protonu i daju ukupan $T = 1/2$, treća komponenta T za u i d kvarkove mora da ima suprotan znak. Obično se pretpostavlja da je $T_\zeta = 1/2$ za u i $-1/2$ za d kvark. Sistem koji se sastoji od tri kvarka (u ili d) može takodje da ima i spin $3/2$ i biti deo kvarteta čestica kao u slučaju Δ .

Pretpostavimo sada da je jedan od u ili d kvarkova u sistemu od tri kvarka zamenjen s kvarkom, i pretpostavimo da s kvark ima novu osobinu koju nazivamo stranost, ali ne i izotopski spin. Izotopski spin ovih bariona može sada biti 0 ili 1 i tako mogu biti singleti ili tripleti čestica. Barionski singlet Λ i triplet Σ su opaženi sa osobinama različitim od nukleona ili Δ čestica jer oni sadrže s kvark. Ista vrsta rezonovanja dovodi do postulata o postojanju drugih tipova kvarkova.

Izotopski spin, stranost, charm, topness i beauty se nazivaju flavour kvarka. Konzervacija izotopskog spina, stranosti, charma i dr u jakim interakcijama znači da ova interakcija ne može da promeni flavour kvarka. Ovo znači da ona ne može da promeni u kvark u d kvark i obratno, i isto tako za sve ostale parove kvarkova. Takodje znamo da elektromagnetska interakcija ne menja flavour kvarkova, ali slaba interakcija to može da uradi. Na primer, promena u kvarka u d kvark događa se u β^+ raspadu nukleona. Ovaj raspad spontano menja jezgro ${}^Z A$ u jezgro ${}^{Z-1} A$ preko emisije e^+ ν_e para. Ovaj proces se obično opisuje sa

$${}^Z A \rightarrow {}^{Z-1} A + e^+ + \nu_e \quad (1a)$$

ali je odgovarajući elementarni proces promena u kvarka protona jezgra u d kvark emisijom pozitron neutrinog para

$$u \rightarrow d + e^+ + \nu_e \quad (1b)$$

Druga važna osobina kvarkova je da je jačina interakcije između dva kvarka nezavisna od njihovog flavoura. Ovo se naziva flavour nezavisnost jake interakcije

f) Konačno, svi barioni imaju barionski broj 1 i on se očuvava u svim interakcijama. Ova osobina dovodi do toga da se svakom kvarku pridružuje barionski broj 1/3 bez obzira na flavour i pretpostavlja se da se ukupan broj kvarkova održava, te da se kvarkovi uvek radjaju i anihiliraju u parovima kvark-antikvark.

Kako se osobine bariona objašnjavaju pretpostavkom da su sačinjeni od tri kvarka, tako se i osobine mezona lako mogu objasniti pretpostavljajući da su sačinjeni od para kvark-antikvark, i da antikvark ima istu masu, spin i izotopski spin kao i kvark, ali suprotno naelektrisanje, treću komponentu izotopskog spina, flavour i barionski broj. Tako mezoni sačinjeni od u i d kvarkova i anti kvarkova moraju da imaju izotopski spin 1 ili 0 i javljaju se u tripletima ili singletima. Ovo je pionski triplet sa masom oko 140 MeV/c², spinom i parnošću J^π=1⁻ što se naziva vektorski mezonski triplet, a singleti su η i ω mezoni sa spinom i parnošću respektivno jednakim J=0⁻ i 1⁻ i masama 548 i 783 MeV/c². Mezoni sačinjeni od s kvarka/antikvarka i nekog od u ili d kvarka/antikvarka mogu da imaju izotopski spin 1/2 i pojavljuju se kao dubleti. Ovo su dubleti K mezona, (K⁺ i K⁰) i (\bar{K}^0 i K⁻) sa masama oko 495 MeV/c² i spinom i parnošću 0⁻.

2. Hadronski supermultiplieti

Pretpostavljajući u prvoj aproksimaciji da su mase u, d i s kvarkova i njihovih antikvarkova jednake, mezoni najmanjih masa grade supermultiplet čestica. U slučaju mezona, očekujemo dva noneta mezona sa spinovima 0 i 1 pošto ima devet mogućih kombinacija kvarka i antikvarka tri tipa, $u\bar{d}, u\bar{s}, d\bar{u}, d\bar{s}, s\bar{u}, s\bar{d}, u\bar{u}, d\bar{d}, s\bar{s}$. Postoji međjutim jako mešanje stanja sa konfiguracijama $u\bar{u}, d\bar{d}, s\bar{s}$. Ovaj nonet je prikazan na slici 2a u prostoru S, T_z za spin 0 i 1.

Slično razmatranje se može sprovesti i za slučaj bariona i ovde očekujemo da nadjemo deкупlet bariona sa najnižom masom spina 1/2 i 3/2. Na suprot očekivanju, nalazimo deкупlet 3/2 bariona i samo oktet 1/2 bariona. Ovo dovodi do postuliranja novog kvantnog broja, colour, koji karakterišće kvarkove i može da ima tri različite vrednosti; pored toga, dok kvarkovi imaju ovaj kvantni broj, nema tog broja kod hadrona.

Razlozi za ovo su sledeći. Razmotrimo prvo barion sa spinom 3/2. Ima 10 ovih jer ima 10 mogućih kombinacija u, d, i s kvarkova, uključujući kombinacije tri kvarka sa istom flavourom, uuu, uud, uus, ddd, ddu, dds, sss, ssu, ssd i uds. Talasna funkcija svakog bariona se može predstaviti kao proizvod

$$\Psi = \Psi_{space} \Psi_{flavour} \Psi_{spin}$$

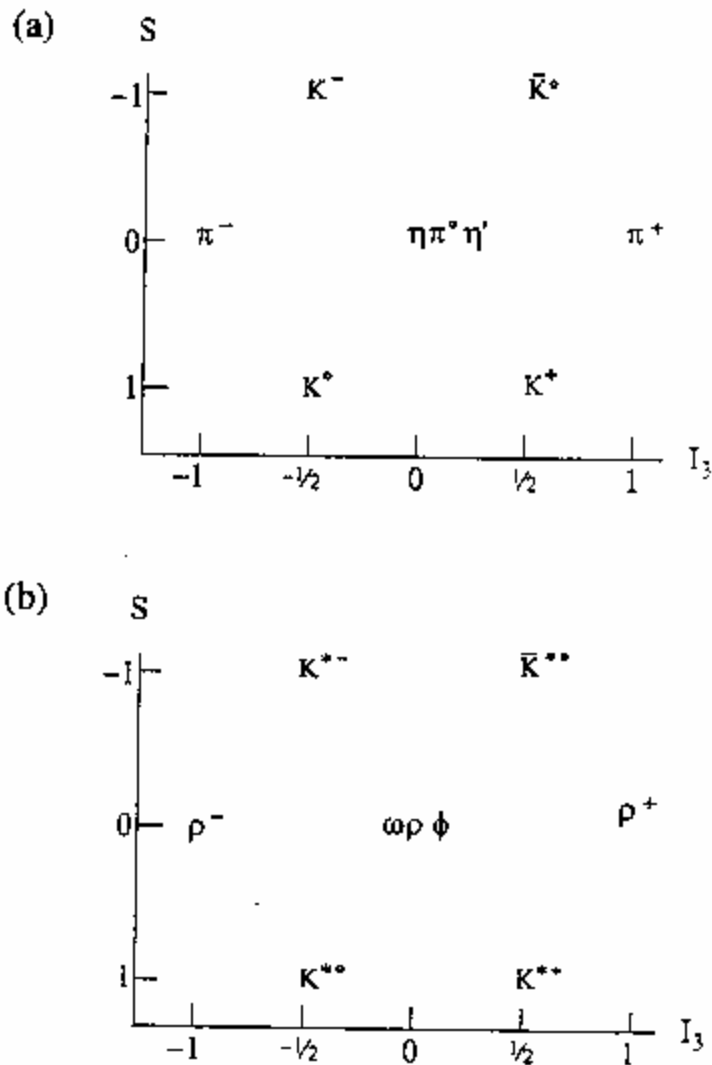


Fig. 2. Noneti: (a) pseudo-skalarnih mezona ($J^{\pi}=0^{-}$), i (b) vektorskih mezona ($J^{\pi}=1^{-}$).

(i) prostorne talasne funkcije, ψ_{space} koja opisuje kretanje kvarkova u stanju nultog relativnog ugaonog momenta koja je simetrična na promenu dva kvarka koja grada barion (ii) talasne funkcije ψ_{flavour} koja specificira flavour kvarka i (iii) spinsku talasnu funkciju. Spinskoj talasnoj funkciji odgovaraju tri paralelna spina jer je spin bariona $3/2$. Možemo da pišemo $\uparrow\uparrow\uparrow$ kao notaciju koja jasno pokazuje da je simetrična za izmenu bilo koja dva kvarka. Posmatrajući ψ_{flavour} možemo da opazimo tri slučaja koja odgovaraju barionima sačinjenim od kvarkova istog tipa (sss, ddd, uuu) ova komponenta je jasno simetrična i ima tačno 10 kompletno simetričnih talasnih funkcija u odnosu na flavour koordinate. Prirodno je pretpostaviti da je flavour komponenta

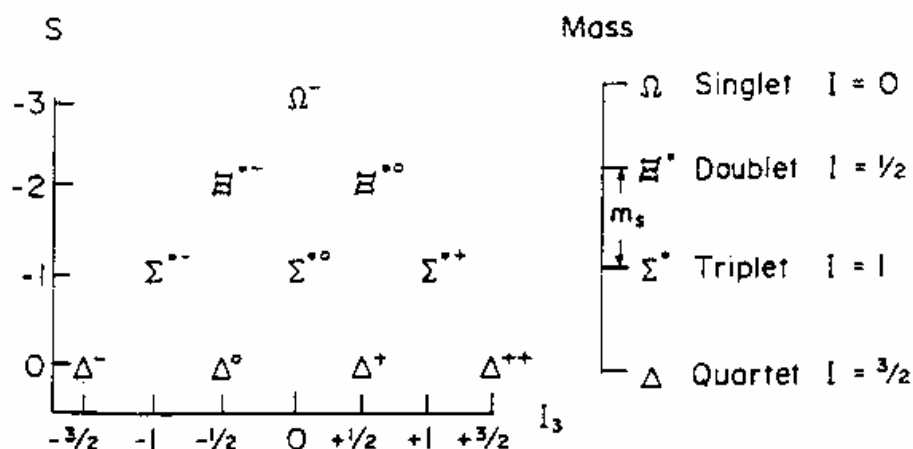
barionske talasne funkcije simetrična na izmenu dva kvarka. Članovi deкуплета ovih talasnih funkcija su

$$\begin{aligned}
\Delta^{++} &= (uuu) \\
\Delta^+ &= \frac{1}{\sqrt{3}}(uud + udu + duu) \\
\Delta^0 &= \frac{1}{\sqrt{3}}(ddu + dud + udd) \\
\Delta^- &= (ddd) \\
\Sigma^{++} &= \frac{1}{\sqrt{3}}(uus + usu + suu) \\
\Sigma^{*+} &= \frac{1}{\sqrt{6}}(uds + dus + usd) + dsu + sud + sdu \\
\Sigma^{*-} &= \frac{1}{\sqrt{3}}(dds + dsd + sdd) \\
\Xi^{*0} &= \frac{1}{\sqrt{3}}(uss + sus + ssu) \\
\Xi^{*-} &= \frac{1}{\sqrt{3}}(dss + sds + ssd) \\
\Omega^- &= (sss)
\end{aligned} \tag{2}$$

Tako, pošto se talasna funkcija sastoji iz tri simetrične komponente barionska talasna funkcija, suprotno očekivanju, je simetrična. Kako su barioni fermioni, po Paulijevom principu očekivalo bi se da je njihova talasna funkcija antisimetrična u odnosu na izmenu bilo koja dva sastavna kvarka. Tako, da bi bio zadovoljen Paulijev princip, prisiljeni smo da pretpostavimo postojanje još jednog kvantog broja koji karakteriše kvarkove. Ovo je colour (boja), i on može da ima tri vrednosti. Njegove moguće vrednosti su green, red i yellow (zelen, crven i žut). Nema indicija da barioni imaju kvantni broj ovog tipa. Onda se lako može napisati četvero komponentna barionska color funkcija

$$\frac{1}{\sqrt{6}}(g_1 r_2 y_3 - g_1 y_2 r_3 + y_1 g_2 r_3 - y_1 r_2 g_3 + r_1 y_2 g_3 - r_1 g_2 y_3), \tag{3}$$

gde indeksi 1, 2 ili 3 indiciraju prvi, drugi i treći kvark. Talasna funkcija 3 je ispisana da predstavi sve moguće kombinacije boja i kvarkova. Množeći prethodnu talasnu funkciju (prostor, flavour i spin) sa t.f. (3) konačno se dobija anti simetrična barionska funkcija. Barionski deкуплет, 3/2 je prikazan na slici 3 u (S, T_c) ravni.



Slika 3. Dekuplet bariona sa spinom 3/2. Cepanje po masi je približno jednako razlici efektivne mase s kvarka i u ili d kvarka.

Uvodjenje colour-a se čini na neki način *ad hoc*; međutim njegovo postojanje je takodje potrebno za objašnjenje opaženog okteta bariona sa spinom 1/2.

Ovi barioni su takodje sačinjeni od kvarkova sa nultim relativnim ugaonim momentima, i prostorna komponenta talasne funkcije je simetrična u odnosu na izmenu dva kvarka. Tako, proizvod flavoura i spinske komponente takodje mora biti simetrična. Kako su flavour i spin nezavisni kvantni brojevi, flavour-spin talasna funkcija ψ_{fs} bariona je linearna kombinacija proizvoda talasnih funkcija zavisna samo od flavoura i spina. Podsetimo se dalje da dve čestice sa suprotnim spinovima grade singlet sa antisimetričnom talasnom funkcijom, dok u slučaju da su spinovi paralelni oni su u simetričnom tripletnom stanju. Razmotrimo sada članove supermultiplleta sačinjenog od tri kvarka istog flavoura, na primer u kvarkova. Njihove talasne funkcije su istog tipa ($u\uparrow u\downarrow u\uparrow$). Međutim, ova talasna funkcija je antisimetrična u odnosu na izmenu prvog i drugog kvarka, jer izmena flavoura ne menja ništa, dok promena spina, menja znak talasne funkcije. Tako, ako talasna funkcija flavour-spin mora biti simetrična, barion sa spinom 1/2 sačinjen od ova tri kvarka sa istim flavour om ne može da postoji.

Razmotrimo dalje barione sačinjene od dva kvarka istog flavoura i trećeg kvarka sa različitim flavourom. Iz razloga diskutovanih gore, dva kvarka sa istim flavourom moraju biti u tripletnom stanju. Tako imamo sledeće barione

$$\begin{aligned}
 N^+ &= p = (u\uparrow u\uparrow d\downarrow) \\
 N^0 &= n = (d\uparrow d\uparrow u\downarrow) \\
 \Sigma^+ &= (u\uparrow u\uparrow s\downarrow) \\
 \Sigma^- &= (d\uparrow d\uparrow s\downarrow) \\
 \Xi^0 &= (s\uparrow s\uparrow u\downarrow) \\
 \Xi^- &= (s\uparrow s\uparrow d\downarrow)
 \end{aligned}
 \tag{4a}$$

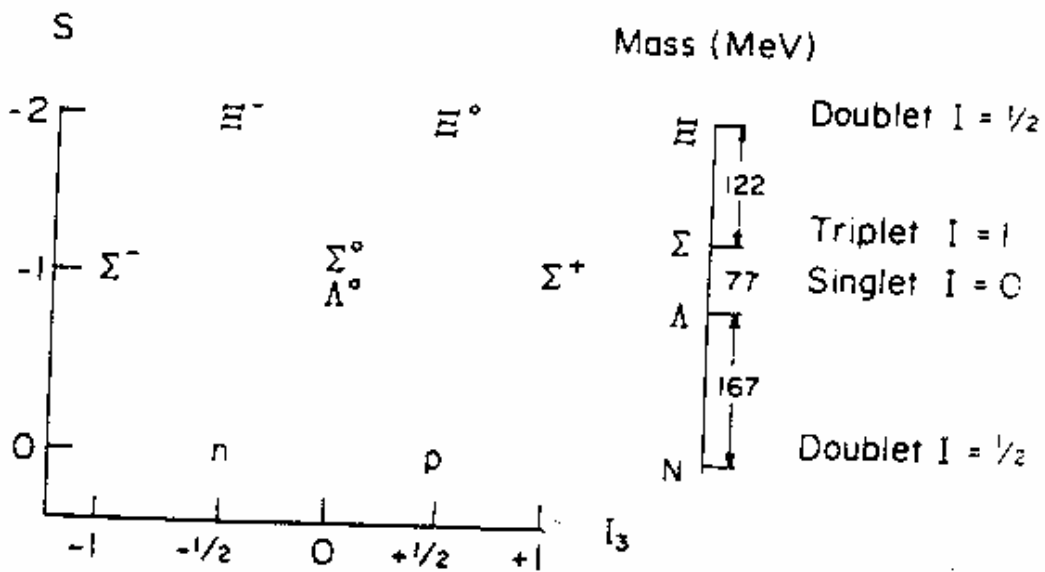
Konačno kada svi kvarkovi imaju različiti flavour, postoje dve linearno nezavisne talasne funkcije

$$\Sigma^0 = (u\uparrow d\uparrow s\downarrow) \quad (4b)$$

i

$$\Lambda^0 = (u\uparrow d\downarrow s\uparrow) \quad (4c)$$

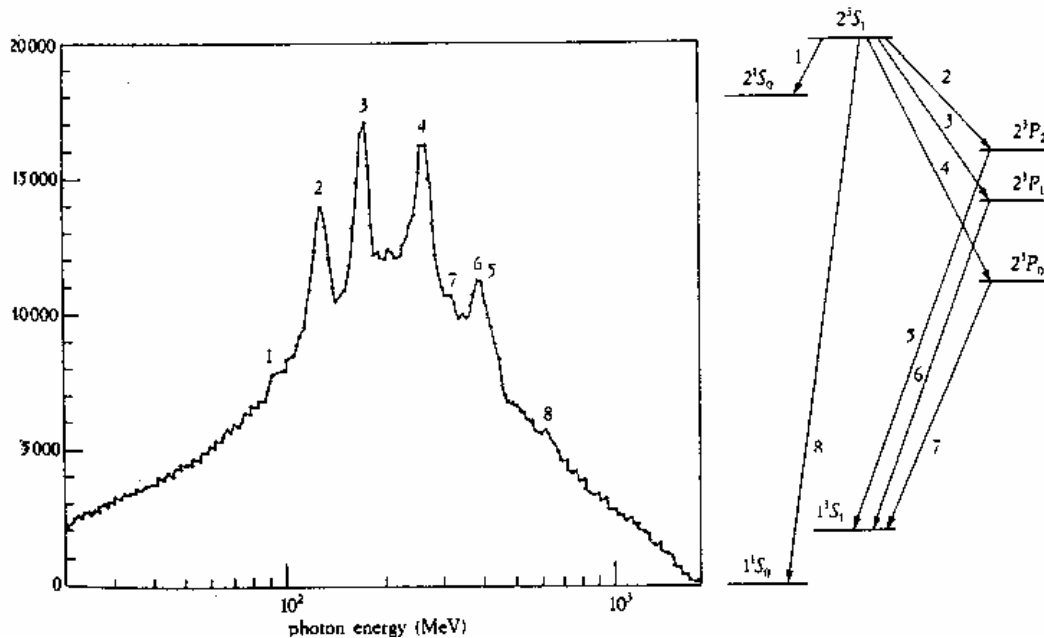
Barionski oktet $1/2$ je prikazan na slici 4 u (S, T_z) ravni.



Slika 4. Oktet bariona sa spinom $1/2$. Takodje je u ovom slučaju cepanje po masi je dato razlikom efektivne mase s kvarka u i d kvarka.

3. Potencijal interakcije izmedju masivnih kvarkova

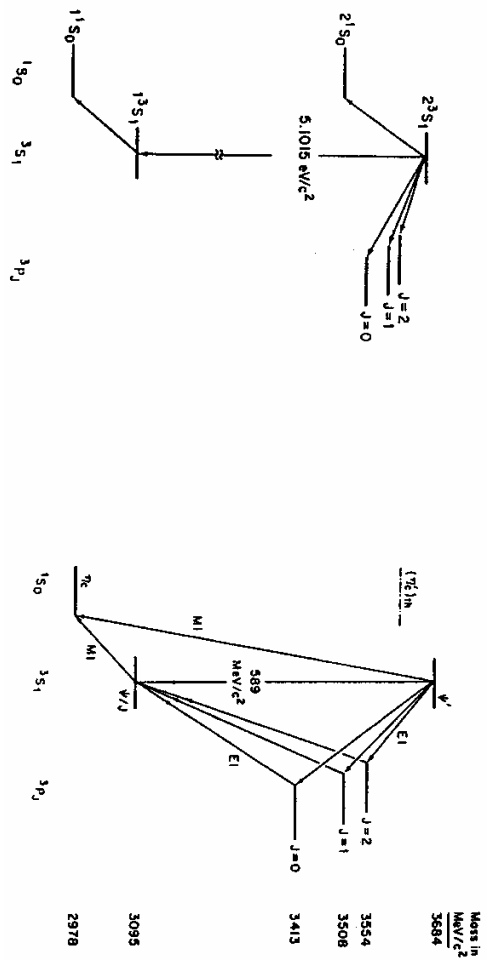
Interakcija izmedju dva kvarka i izmedju kvarka i antikvarka se prenosi kroz izmenu gluona. Teorija kvark-gluon polja je poznata kao kvantna hromodinamika i izvan je opsega opšteg kursa fizike. Može se pojednostavljeno razmatrati sistem masivnih kvarkova jer je njihovo kretanje nerelativističko i njihova interakcija se može razumno opisati potencijalom jame. Radi jednostavnosti razmotrimo sistem od dva tela, kao što je mezon. Do sada smo smatrali da je mezon sastavljen od kvarka i anti kvarka u njihovom najnižem energetskom stanju. Medjutim svaki mezon ima spektar, koji je niz stanja koja odgovaraju različitim relativnim kretanjima konstitutivnih kvarka i antikvarka.



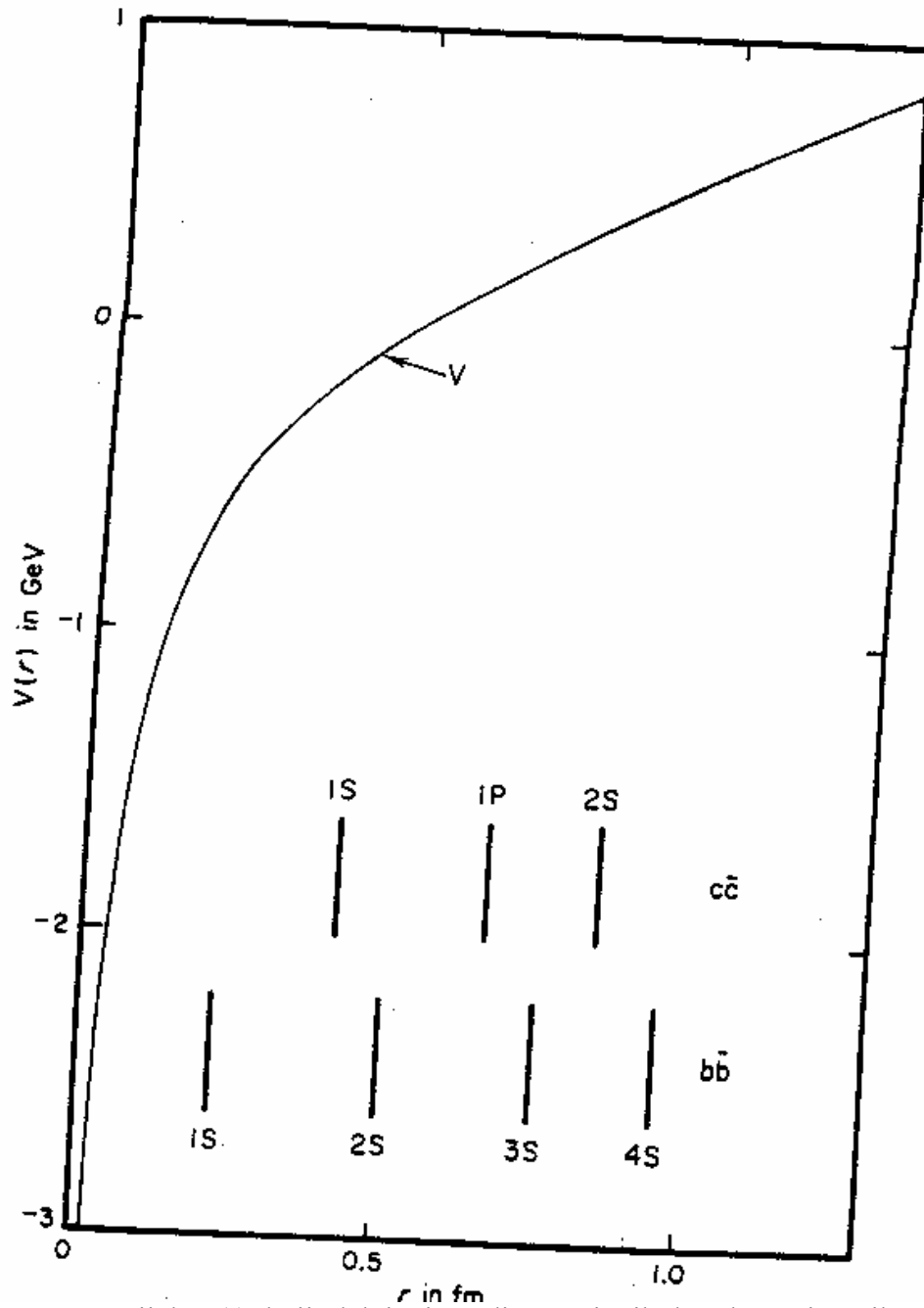
Slika 5. Levi deo slike pokazuje spektar fotona emitovanih u prelazima harmonijumskih stanja prikazanih na desnom delu slike.

Zavisnost kvark-antikvark potencijala od značajnih varijabli se može naslutiti poredjenjem spektra masivnog mezona, kao što je charmonium, sačinjen od $c - \bar{c}$ para (slika 5) sa dobro poznatim sistemom lepton- antilepton, pozitronijum, koji čine elektron pozitronski par. Njihovi energetski nivoi su vrlo slični Slika 6). Niz stanja i spinovi su isti za ova dva sistema, ali je glavna razlika na je energetski nivo; eV u slučaju pozitronijuma i stotine MeV u slučaju charmonijuma.

Ovo sugeriše da na kratkim rastojanjima (ispod 0.5 fm), potencijal se menja kao $1/r$, slično Kulonovom potencijalu. Međutim, na velikim rastojanjima, da bi se uzeo u obzir confinement kvarkova (zatvor kvarkova u mezonu), potencijal ne može da se smanjuje do nule, već mora da raste. Potencijal koji tačno reprodukuje spektar charmonijuma i mezona većih masa kao $b - \bar{b}$ i radijacione prelaze između stanja je prikazan na slici 7. Na vrlo kratkim rastojanjima (ispod 0.5 fm) on ima zavisnost $1/r$, dok na većim rastojanjima on raste linearno sa r . Spektar charmoniuma takodje pokazuje da je potencijal interakcije kvark-antikvark spinski zavisna tako da je interakcija jača u singletnom stanju, i tako da mora da sadrži član $\mathbf{L} \cdot \mathbf{s}$ koji cepa $^3P_{0,1,2}$ stanja.



Slika 6. Poredjenje energetskih nivoa (a) pozitronijuma i (b) harmonijuma. Harmonijumska stanja su ista kao na Slici 5, ali su neka od njih označena njihovim istorijskim imenima umesto spektroskopskom konfiguracijom.



Slika 7. Potencijal $V(r)$ koji deluje izmedju masivnih kvarkova i antikvarkova kao $c\bar{c}, b\bar{b}$. Vertikalni barovi daju koren srednjeg kvadrata sistema $c\bar{c}, b\bar{b}$ u stanjima relativnog kretanja koji su indicirani.