

HADRONI

1. Barioni i mezoni

Hadroni su čestice koje osećaju jaku interakciju. Osim protona, sve su nestabilne. Čak i neutron, koji je sa protonom jedan od osnovnih konstituenata jezgra, ne ostaje dugo u slobodnom stanju. Raspada se sa srednjim vremenom života $\tau=887\pm 2$ s u proton, elektron i elektronski antineutrino prema poznatoj reakciji



Ostali poznati hadroni imaju mnogo kraći život koji je u opsegu od 10^{-8} s do $\approx 10^{-23}$ s. Hadroni su dati u Tabelama 1 i 2. U grupu hadrona uključeni su barioni, a to su fermioni čiji su najlakši članovi nukleoni (N neutron i proton). To je dublet čestica proton i neutron. Takođe su uključeni i mezoni, koji su bozoni, a najlakši među njima su pioni $\pi^{\pm,0}$. Svakom barionu odgovara anti barion, čije su osobine striktno povezane sa tim barionom. Mezoni takođe imaju antičestice. Međutim, u ovom slučaju, ako je mezon nenaelektrisan, mezon i anti mezon mogu biti iste čestice, kao u slučaju π^0 mezona.

Tabela 1. Stanja bariona sa najnižom masom

Naziv	T	S	C	Multiplet	Naelektrisanje	Vreme života ¹
N	1/2	0	0	Dublet	+1,0	>9 (2)
Δ	3/2	0	0	Kvartet	2,1,0,-1	<1(-23)
Λ	0	-1	0	Singlet	0	
Σ	1	-1	0	Triplet	1,0,-1	<1.5(-10)
Ξ	1/2	-2	0	Dublet	0,-1	$\approx 2(-10)$
Ω	0	-3	0	Singlet	-1	0.8(-10)

Tabela 2. Pioni, Kaoni, D i F mezoni

Simbol	Masa (MeV/c ²)	Q	T	T ₃	S	C	Vreme života
π^+	140	1	1	1	0	0	2.6(-8)
π^0	135	0	1	0	0	0	8.3(-17)
π^-	140	-1	1	-1	0	0	2.6(-8)
K^+	494	1	1/2	1/2	1	0	1.2(-8)
K^0	498	0	1/2	-1/2	1	0	²

¹ Sve u sekundama, i 2.6(-10) znači $2.6 \cdot 10^{-10}$ s, itd.

² K^0 i \bar{K}^0 nemaju dobro definisana vremena poluživota

\bar{K}^0	498	0	1/2	1/2	-1	0	³
K^-	494	-1	1/2	-1/2	-1	0	1.2(-8)
D^+	1869	1	1/2	1/2	0	1	$\approx 8(-13)$
D^0	1865	0	1/2	-1/2	0	1	$\approx 4(-13)$
\bar{D}^0	1865	0	1/2	1/2	0	-1	$\approx 4(-13)$
D^-	1869	-1	1/2	-1/2	0	-1	$\approx 8(-13)$
F^+	1970	1	0	0	1	1	$\approx 3(-13)$
F^-	1970	-1	0	0	-1	-1	$\approx 3(-13)$

2. Hadronski kvantni brojevi

Veruje se da hadroni nisu elementarne čestice, već su skup fundamentalnijih entiteta, nazvanih kvarkovi. Svaki barion je načinjen od tri kvarka i svaki mezon je izgrađen od kvarka i anti kvarka.

Ova hipoteza na prost i elegantan način objašnjava kvantne brojeve koji karakterišu hadrone i koji se očuvavaju u jakim interakcijama između hadrona. Ovi kvantni brojevi su dati u sledećem tekstu:

(a) Spin. Barioni sa najnižom masom imaju spin 1/2 ili 3/2, a mezoni najniže mase imaju spin 0 ili 1.

(b) Unutrašnja parnost. Da bi smo uveli koncept parnosti razmotrimo kretanje sistema čestica i uvedimo operator P koji deluje tako da položaj vektor svake čestice \mathbf{r} menja u $-\mathbf{r}$. Ako je $\psi(\mathbf{r})$ komponenta talasne funkcije koja zavisi od radijalnih koordinata

$$P\psi(\mathbf{r}) = \psi(-\mathbf{r}) \quad (2)$$

i

$$P^2\psi(\mathbf{r}) = \psi(\mathbf{r}) \quad (3)$$

Tako, ako je $\psi(\mathbf{r})$ svojstvena talasna funkcija operatora P, onda su svojstvene vrednosti ± 1 i jednačina (2) postaje

$$P\psi(\mathbf{r}) = \pm \psi(\mathbf{r}) \quad (4)$$

³ K^0 i \bar{K}^0 nemaju dobro definisana vremena poluživota ali njihova linearna kombinacija $(K^0 \pm \bar{K}^0)/\sqrt{2}$ ima dobro def. vremena i iznose $8.9 \cdot 10^{-11}$ s i $5.2 \cdot 10^{-8}$ s.

Funkcija sa svojstvenom vrednošću $+1$ je parna, a sa -1 je neparna. U slučaju centralne interakcije, komponenta talasne funkcije zavise od r čestice sa orbitalnim ugaonim momentom l i njegovom projekcijom m na z osu je

$$\psi(r) = \mathfrak{R}(r)Y_l^m(\theta, \Phi) \quad (5)$$

Kako transformacija $\mathbf{r} \rightarrow -\mathbf{r}$ odgovara $r \rightarrow r$, $\theta \rightarrow \pi - \theta$ i $\Phi \rightarrow \pi + \Phi$ imamo

$$Y_l^m(\pi - \theta, \pi + \Phi) = (-1)^l Y_l^m(\theta, \Phi) \quad (6)$$

tako da su stanja sa parnim l parna, a stanja sa neparnim l su neparna. Pored parnosti pridružene orbitalnom kretanju, čestice imaju unutrašnju parnost koja takodje može biti pozitivna ili negativna (tj. mogu biti parne ili neparne). Ovo se lako može razumeti na primeru hadrona, koji imaju unutrašnju strukturu, ali i čestice koje su zaista elementarne, kao leptoni ili kvarkovi, takodje imaju unutrašnju parnost koja je karakteristika te čestice. Anti čestice imaju suprotnu parnost u slučaju fermiona i istu parnost u slučaju bozona. Parnost sistema čestica je proizvod parnosti orbitalnih kretanja i unutrašnjih parnosti.

Očuvanje parnosti znači da se parnost sistema interagujućih čestica ne menja za vreme interakcije i ovo je ekvivalentno pretpostavci da proces ne zavisi od orijentacije koordinatnog sistema. Mnogi eksperimenti pokazuju da se parnost održava u jakoj, gravitacionoj i elektromagnetskoj interakciji. Ne održava se u slaboj interakciji.

Zakon očuvanja parnosti se koristi za određivanje nepoznate parnosti čestice koja učestvuje u interakciji ako je parnost ostalih čestica poznata. Obično se arbitrarno pozitivna parnost pridružuje protonima, neutronima i elektronima, a zatim se analizom reakcije određuju unutrašnje parnosti čestica. Parnost kvarkova je pozitivna, a antikvarkova negativna. Tako barioni najniže mase koji se sastoje od tri kvarka sa nultim relativnim ugaonim momentom, imaju pozitivnu unutrašnju parnost, dok mezoni najniže mase koji se sastoje od kvarka i anti kvarka imaju negativnu unutrašnju parnost (zapaziti da unutrašnja parnost mezona ne zavisi od proizvoljnog izbora parnosti protona i neutrona).

(c) Izotopski spin. Barioni i mezoni se pojavljuju kao članovi multipleta sa različitim naelektrisanjema, ali približno istom masom. Primer je triplet piona $\pi^{\pm 0}$, dublet nukleona i kvartet Δ . Ovo se na pogodan način opisuje pridruživanjem istog izotopskog spina (ili izospin) celom multipletu T , koji je povezan sa multipletnošću preko pravila $2T+1=M$. Različite projekcije T_ζ na treću osu u izospinskom prostoru se pridružuju raznim članovima multipleta. Broj članova hadronskog multipleta je ograničen; maksimalni broj je četiri tako da izotopski spin hadrona ne može da bude veći od $3/2$.

Član multipleta sa najvećim naelektrisanjem ima najveću vrednost T_ζ , a član sa najmanjim naelektrisanjem ima najmanje T_ζ . Tako u Δ kvartetu koji se sastoji od $\Delta^{++}, \Delta^+, \Delta^0$ i Δ^- niz T_ζ je $3/2, 1/2, -1/2$ i $-3/2$.

Izotopski spin nije samo matematička pogodnost za opisivanje članova multipleta: to je fundamentalni kvantni broj koji se očuvava u jakim interakcijama između hadrona. Ovo implicira da jaka interakcija između hadrona ne zavisi od treće komponente T , tako da je ista za sve hadrone u multipletu sa datim T . Kako članovi multipleta čestica sa istim T imaju različito naelektrisanje, ova osobina je poznata kao električna nezavisnost jake interakcije.

Koristeći treću komponentu izotopskog spina moguće je na vrlo pogodan način izraziti sve osobine čestica datog multipleta. Razmotrimo specijalni slučaju nukleonskog dubleta sa $T=1/2$. Treća komponenta T_ζ je $1/2$ za proton i $-1/2$ za neutron. Neka je sa G_p označena vrednost neke fizičke veličine protona, a sa G_n odgovarajuća veličina za neutron. Definišemo

$$a \equiv \frac{G_p + G_n}{2} \quad (7)$$

i

$$b \equiv \frac{G_p - G_n}{2} \quad (8)$$

Onda je vrednost iste fizičke veličine za nukleone data sa

$$G_N = a + 2T_\zeta b \quad (9)$$

U specijalnom slučaju električnog naelektrisanja, naelektrisanje nukleona je dato sa

$$q_N = \frac{e}{2}(1 + 2T_\zeta) \quad (10)$$

gde je e elementarno naelektrisanje. Ukupno naelektrisanje interagujućih nukleona je dato sa

$$Q = \frac{e}{2} \sum_{i=1}^A (1 + 2T_{\zeta i}) = e \left(\frac{A}{2} + T_\zeta^A \right) \quad (11)$$

gde je T_ζ^A treća komponenta ukupnog izotopskog spina T^A sistema nukleona. Tako očuvanje ukupnog naelektrisanja Q interagujućih čestica implicira očuvanje T_3^A .

(d) Pored izotopskog spina postoji skup kvantnih brojeva koji su karakteristični samo za hadrone. Prvi od njih je barionski broj β . Ostali koji zajedno sa izotopskim spinom grade *flavour* (miris) hadrona su *stranost* S , *charm* C , *beauty* B i *topness* T . Svakom barionu se pridružuje barionski broj $+1$, a svakom mezonu barionski broj 0 . Barioni mogu da imaju različite vrednosti stranosti i beauty, u opsegu od 0 do -3 dok su charm i topness u opsegu od 0 do 3 .

Mezoni takodje imaju flavour: oni mogu da imaju S,C,B i T koji su jednaki 0 ili ± 1 . Izotopski spin, stranost, charm, beauty i topness su striktno povezani kvantni brojevi. Ovo je objašnjeno sledećim činjenicama.

(1) Barioni koji nemaju S,C, B ili T grade samo dublete ili kvartete, oni koji imaju stranost, ali bez C,B ili T grade singlete ili triplete ako je $S=-1$, dublete ako je $S=-2$ i singlete ako je $S=-3$. Jedino su singleti i tripleti opaženi za barione sa $C=1$, bez stranosti B u T; dubleti su opaženi za barione sa $S=-1$ i $C=1$.

Mezoni koji ne poseduju S, C, B ili T grade samo singlete ili triplete. Oni koji imaju stranost -1 ili 1 bez C, B, ili T grade samo dublete. Oni koji imaju ne nultu stranost charm grade samo singlete.

(ii) Ako definišemo hipernaelektrisanje Y kao

$$Y = \beta + S + C + B + T \quad (12)$$

onda važi sledeća formula za naelektrisanje

$$Q/e = T_\zeta + Y/2 \quad (13)$$

koja omogućuje procenu naelektrisanja svakog poznatog hadrona u jedinicama elementarnog naelektrisanja e. Tako, u slučaju kvarteta Δ za koje je hipernaelektrisanje jednako 1 (jer β je 1, a S,C,B i T su 0) naelektrisanja članova kvarteta su $2e, e, 0$ i $-e$ za $T_\zeta = 3/2, 1/2, -1/2$ i $-3/2$. U slučaju tripleta piona sa hipernaelektrisanjem $T_\zeta = 1, 0$ i -1 , naelektrisanja članova su $e, 0$ i $-e$.

Ovi kvantni brojevi se mogu koristiti za definisanje osobina hadrona i anti hadrona. U Tabeli 1 date su familije bariona sa najnižim masama, i okarakterisani su raznim vrednostima T i S. Tabela 2 daje mezone najnižih masa.

Antibarioni imaju istu masu, spin i vreme života kao i odgovarajuće čestice ali i suprotno naelektrisanje, treću komponentnu spina, magnetski momenat i unutrašnju parnost β, S, C, B i T. Tako, barioni i anti barioni su različite čestice koje se anihiliraju kada dodju u kontakt. Isto važi i za anti mezone sa izuzetkom unutrašnje parnosti, koja je ista, tako da su neutralni mezoni isti kao i anti mezoni kao u slučaju π^0 .

Konzervacija barionskog broja znači da se ukupan broj bariona očuvava u reakcijama. Ako se ovo primeni na nuklearne reakcije na energijama nedovoljnim za kreiranje para nukleon - antinukleon, onda se očuvava ukupan broj nukleona. Barion se može anihilirati sa antibarionom bez povrede očuvanja β , a anti barion se može kreirati samo u paru sa barionom.

Činjenica da mezoni nemaju barionski broj znači da se oni mogu kreirati ili uništiti u bilo kojoj jakoj interakciji, pod uslovom da su ostali kvantni brojevi očuvani. Tako, mezoni se kreiraju u jakom raspadu hadrona, pod uslovom da ima dovoljno energije, kao što se ekscitovan atom deekscituje emisijom fotona ili se radioaktivno jezgro raspada emisijom lepton, anti lepton para.

Potreba za uvodjenjem stranosti kao novog kvantnog broja proistekla je prvo iz opažanja nekih čestica koje se obilato proizvode u interakcijama čestica preko jake interakcije i slično. Ove čestice su nazvane strane (strange) i u π^- -p interakciji proizvode se u paru sa drugom stranom česticom. Tipičan proces ove vrste (nazvan asociirana produkcija je)

$$\pi^- + p \rightarrow \Lambda^0 + K^0 \quad (14)$$

ili

$$\pi^- + p \rightarrow K^+ + \Sigma^- \quad (15)$$

Takvim česticama se pridružuje suprotna parnost (-1 za Λ^0 i Σ^- a +1 za K^0 i K^+ u prethodnim primerima).

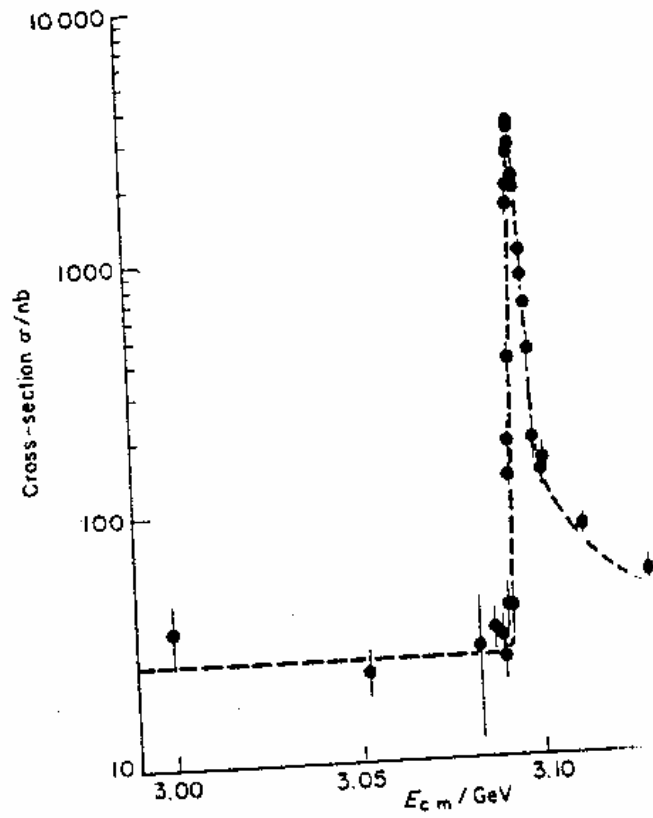
Eksperimentalna evidencija postojanja charma C je dobijena iz analize elektron pozitronskih sudara. U efikasnom preseku je nadjena oštra rezonanca pri ukupnoj energiji sudarajućih čestica 3.1 GeV. Takođe, u eksperimentima bombardovanja berilijimske mete sa 25 GeV protonima, proizvodnja elektron pozitronskog para je nadjena sa vrlo visokim prinosom i ugaonom i energetsom korelacijom koja odgovara raspadu čestice sa efektivnom masom od 3.1 GeV (Slika 1). Ova rezonanca je J/ψ čestica (koja je sada poznata kao 3S_1 stanje *charmonijuma*, mezona sačinjenog od charmed kvarka i anti kvarka $c - \bar{c}$) čije neočekivano dugo vreme života odgovara vrlo maloj merenoj širini rezonance u prethodno pomenutim elektron-pozitronskim sudarima. Ovo je indiciralo postojanje novog kvantnog broja koji zabranjuje mnoge raspade koji bi se u suprotnom slučaju odigrali, jer su bili dozvoljeni kvantnim brojevima poznatim do tada.

Kvark beauty je otkriven opažanjem rezonance na 9.5 GeV u reakciji

$$p + (Cu, Pt) \rightarrow \mu^+ + \mu^- + X \dots \quad (16)$$

Dalje poboljšanje rezolucije u eksperimentu je pokazalo da se ova rezonanca sastoji od tri komponente koje su članovi multiplleta stanja mezona sačinjenih od kvarka i antikvarka sa beauty $b - \bar{b}$.

Osobine hadrona koje su ukratko diskutovane ovde se mogu objasniti na prirodan način pretpostavkom da su svi hadroni građeni od elementarnijih čestica koje se nazivaju kvarkovi.



Slika 1. Presek σ za anihilaciju visoko energetskih elektrona i pozitrona koja rezultuje u stvaranju hadrona, u funkciji energije sudara E_{CM} elektrona i pozitrona, opaženo na SPEAR storage ring SLAC.