

Sl. 78. Stubište s bočno pomično oslonjenim međupodestima

Zgrade s vertikalnom ukrutom konstrukcijom fleksijskog tipa, npr. zgrade sa sustavom zidova ili s jezgrom, imaju relativne bočne pomake susjednih stropova zbog bočnog opterećenja, napose potresa, malene, pa stubištu ne prijeti oštećenje. Zgrade s vertikalnom ukrutom konstrukcijom posmičnog tipa, npr. s okvirom, mogu imati znatne relativne bočne pomake susjednih stropova, pa stubišta pri potresu mogu biti oštećena. Da se to spriječi, treba u analizi stubišta uzeti u obzir sile koje odgovaraju nametnutim bočnim pomacima ili, što je jednostavnije, međupodeste bočno pomično osloniti na ležaje i time spriječiti uvođenje bočnih sila u stubište (sl. 78).

R. Rosman

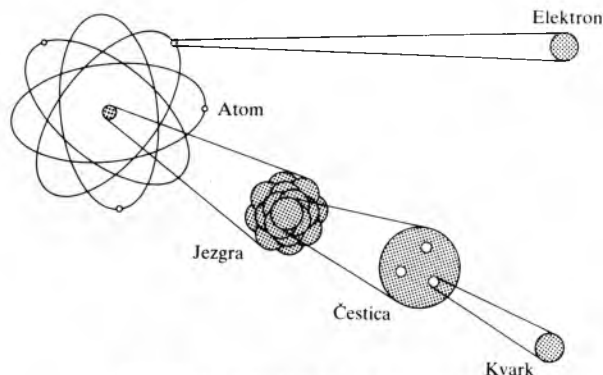
LIT.: F. Zbinden, Der Massiv-Hochbau. Kongress Verlag, Zürich 1947. – E. Neufert, Bau-Entwurfslehre. Ulsteinfachverlag, Berlin 1959. – P. Krstić, Arhitektonske konstrukcije 2. Naučna knjiga, Beograd 1963. – F. Schuster, Treppen aus Stein, Holz und Eisen. Julius Hoffman Verlag, Stuttgart 1965. – W. Fuchsteiner, Treppen. Beton-Kalender 1965, Teil II. W. Ernst & Sohn, Berlin-München 1965. – D. Smiljanić, Arhitektonske konstrukcije I. Univerzitet Sarajevo, 1967. – H. Schmidt, Hochbaukonstruktion. Otto Maier Verlag, Ravensburg 1970. – Đ. Peulić, Konstruktivni elementi zgrada II. Tehnička knjiga, Zagreb 1975. – S. Köseoglu, Treppen. Beton-Kalender 1980, Teil II. W. Ernst und Sohn, Berlin-München 1980.

R. Rosman Z. Vrkljan

SUBATOMNE ČESTICE (češće nazivane *elementarnim česticama*), osnovni djelići tvari što ih istražuje fizika elementarnih čestica. Ta su istraživanja danas među najvažnijim osnovnim znanstvenim usmjerenjima. Još uvijek nije jasno koje su to osnovne elementarne čestice. Očekuje se da će se o tome više doznati kad prorade novi veliki eksperimentalni uređaji.

Još je R. Bošković (1763) zamišljao da su atomi uglavnom prazni i sastavljeni od točkastih čestica među kojima djeluju daljinske sile. Ta je ideja plodno djelovala na engleske atomiste u XIX. st. (M. Faraday, 1846; W. Thomson, poslije lord Kelvin, 1880, 1889, 1905). Prve su eksperimentalne demonstracije o subatomnoj strukturi ostvarene tijekom triju godina u zadnjem desetljeću prošlog stoljeća. To su otkrića rendgenskog zračenja (W. K. Röntgen, 1895), radioaktivnosti (H. Becquerel, 1895) i elektrona (J. J. Thomson, E. Wiechert i W. Kaufmann, 1897). Rendgensko je zračenje roj fotona, čestica elektromagnetskog polja koje se od obične svjetlosti razlikuju samo kraćom valnom duljinom. Elektron je prva elementarna čestica koja je doista eksperimentalno opažena. Ime je već ranije predložio G. J. Stoney (1894), predviđajući da postoje čestice (korpuskule) negativnog elektriciteta. Otkriće radioaktivnosti bila je prva indicacija da u prirodi ima i drugih sila osim dotad poznate gravitacije i elektromagnetskih sila. Postojanje protona još je 1811. predvidio W. Prout. Proton je opažen 1897. (W. Wien) kad je otkriveno da tzv. kanalne zrake u katodnim cijevima sadrže čestice kojima je masa (točnije omjer m/e) mnogo veća od mase elektrona. Neutron je izravno opažen tek 1932. (J. Chadwick). Iste je godine W. Heisenberg proglasio neutrone i protone sastavnim djelićima atomske jezgre. Pretpostavio je da su nuklearne sile simetrične s obzirom na izmjene protona i neutrona i opisao grupu izotopnog spina kao prvu tzv. unutrašnju simetriju otkrivenu u prirodi. I ta je Heisenbergova predodžba tek približna. Promatraju li se, naime, protoni i neutroni pod dovoljnim povećanjem, što znači da se obasipaju česticama,

odnosno zračenjem vrlo kratke valne duljine, otkriva se da i oni imaju neku, grubo rečeno, zrnatu ili korpuskularnu strukturu (sl. 1). Da bi protumačio kako su energija i impuls vrtnje sačuvani pri nuklearnom β -raspadu, W. Pauli je teoretski predvidio (1930) postojanje čestice bez naboja (nazvane neutrino), bez mase i sa spinom 1/2. Neutrino je eksperimentalno opažen tek 1959. (F. Reines i C. L. Cowan). Pretpostavka o neutrino omogućila je E. Fermiju (1933) da razvije teoriju o slabim uzajamnim djelovanjima, koja je kvalitativno opisivala slabe raspade atomnih jezgara i elementarnih čestica i koja je (C. N. Yang i T. D. Lee, 1956) dobila svoju konačnu približnu formu, tj. da vrijedi pri niskim energijama, odnosno za ne suviše male udaljenosti. Potankim teorijskim i eksperimentalnim proučavanjem tih pojava spoznalo se šezdesetih godina (S. Weinberg, S. Glashow, A. Salam i mnogi drugi) da su slabe i elektromagnetske sile ujedinjene u elektroslabim poljima. To je prvo važno ujedinjenje nakon Maxwellova ujedinjenja elektriciteta i magnetizma (J. C. Maxwell i drugi ~1860) u elektromagnetsku teoriju. Elektroslaba teorija nije još uvijek sasvim dovršena, iako su 1983. otkriveni rodaci fotona vrlo velike mase, oko 80 puta veće od mase protona, tzv. bozoni W i Z.



Sl. 1. Pojednostavnjeni prikaz strukture tvari

U razvoju fizike elementarnih čestica važni su bili pokusi s kozmičkim zračenjem. Početno kozmičko zračenje sastoji se uglavnom od visokoenergetskih atomnih jezgara od vodika do urana. Zračenje se na Zemljinoj površini sastoji od čestica koje nastaju pri srazovima atomnih jezgara iz kozmičkog zračenja s atomima u zemaljskoj atmosferi. Proučavanjem svemirskog zračenja otkriven je pozitron, tj. pozitivni elektron (C. D. Anderson, P. M. S. Blackett i G. P. S. Occhialini, 1933). Ta prva eksperimentalno otkrivena antičestica bila je teoretski predviđena još 1928. (P. A. M. Dirac). Nešto poslije (1937) na isti je način otkriven *mion* kojemu je masa 206 puta veća od mase elektrona, dok su mu sva ostala svojstva i uzajamna djelovanja ista. Elektron (e^\pm) i mion (μ^\pm) pripadaju dvjema generacijama ili pokoljenjima čestica koje se zovu *leptoni*. Naziv generacija ili pokoljenje uveden je kao pogodna oznaka za sasvim nov pojam, i u fizici se elementarnih čestica rabi u sasvim novom značenju, koje nema veze s izvornim značenjem povezanim s ljudskim pokoljenjima. Postojanje više čestičnih pokoljenja, od kojih su zasad poznata tri, još je neriješena znanstvena zagonetka. Treće je pokoljenje lepton (τ^\pm), mase $m_\tau = 3490m_e$, gdje je m_e masa elektrona.

Želeći protumačiti jaka uzajamna djelovanja koja vežu nukleone u atomnu jezgru i koja su vrlo kratka dosega ($\sim 10^{-15}$ m), H. Yukawa (1935) postulirao je postojanje masivnog kvanta (tj. elementarne čestice) nuklearne sile. Kvantima s masom m odgovarala bi jednadžba

$$\Delta F - \frac{m^2 c^2}{\hbar^2} F = 0, \quad (1)$$

odakle, za $r > 0$ i $\kappa = mc/\hbar$, slijedi

$$F \approx \frac{\exp(-\kappa r)}{r}, \quad (2)$$

gdje je F sila, c brzina svjetlosti, r udaljenost, a \hbar (čitaj: h precrtano) Planckova konstanta podijeljena sa 2π .

Uvrste li se prirodne konstante, dobivaju se vrijednosti: $m = 197,3 \text{ MeV}/c^2$, $\kappa r = 1$, $r = 10^{-15}$ m. Često se mase elementarnih čestica iskazuju tako da se druga potencija brzine svjetlosti (c^2) ispušta, pa se navodi *energijski ekvivalent mase neke čestice*. Tako je energijski ekvivalent mase elektrona $m(e) = 0,511 \text{ MeV}$, a miona $m(\mu) = 105,7 \text{ MeV}$.

Poslije otkrića miona bilo je prirodno pretpostaviti da će biti opažen tzv. *Yukawin kvant* (kvant jakog međudjelovanja koji je predvidio H. Yukawa). Precizna su mjerenja (1947) pokazala da na mion ne djeluju jaka uzajamna djelovanja. Iste je godine zaključeno (R. Marshak i H. Bethe) da moraju postojati dva *mezona*. Tako su nazvani jer im je masa između mase elektrona i mase protona. Kvant je jakih uzajamnih djelovanja *pion* (π) kojemu je masa nešto veća, $m(\pi) = 139,6 \text{ MeV}/c^2$, a doseg mu je $r = 1,4 \cdot 10^{-15} \text{ m}$. On se preko slabih interakcija raspada na mion (μ^+) i neutrino (ν_μ):



Iste je godine opažen i raspad ($\tau \approx 10^{-8} \text{ s}$) i jako uzajamno djelovanje piona. Negativni pion biva naglo progutan od atomne jezgre, njegova se masa pretvara u energiju i taj višak energije uzrokuje raspad atomske jezgre. Čitava je ta postavka rekonstruirana prema proučavanju tragova nabijenih čestica u fotografskim emulzijama. Povijest je fizike danas prepuna sličnih postavki. Navedenom postavkom ne završava ni povijest piona ni Yukawina kvanta. Danas se zna da je pion vezano stanje stvoreno uzajamnim djelovanjima još elementarnijih polja, *kvarkova* i *gluona*. Jaka se uzajamna djelovanja prenose gluonima, koji su slični fotonima, no ima ih osam s tri različita naboja. Pravi je doseg jakih uzajamnih djelovanja beskonačan. Yukawine sile samo su efektivne sile koje se prividaju kad se radi o sustavima s mnogo tijela, odnosno o atomnim jezgrama. To je potpuno analogno molekularnoj fizici, gdje se također opažaju efektivne van der Waalove sile kratka dosega. *Prave* fundamentalne sile i u atomima i u molekulama jesu Coulombove (tj. elektromagnetske) sile beskonačna dosega. Prije tih zadnjih otkrića bilo je izvanredno mnogo fizikalnih tvorbi koje se nazivaju elementarnim česticama. U knjižici *Particle Properties* iz 1988, što je izdaje CERN, može se naći na stotine čestica (bariona i mezona). U atomnoj i molekularnoj fizici također je poznato vrlo mnogo spektralnih linija i sustava spektralnih linija koji se tumače i sustavno sređuju na osnovi elektronske strukture atoma. Očito da i stanje u fizici čestica, tj. mikroprocesi pri međusobnim udaljenostima sto tisuća puta manjima od dimenzija atoma (promjer je atoma $\sim 10^{-10} \text{ m}$, a protona $\sim 10^{-15} \text{ m}$), pokazuju postojanje neke finije strukture.

VRSTE ČESTICA I UZAJAMNO DJELOVANJE

Za sada se poznate čestice mogu svrstati u sljedeće skupine. To su: *leptoni* (+, +, -) *kvarkovi* (+, +, +), *bozoni* i *fotoni* (+, +, -), te *gluoni* (+, -, +), a možda i *graviton*, kvant gravitacijskog polja. Znakovi u zagradama znače da čestice (+) imaju ili (-) nemaju, redom, gravitacijsko, elektroslabo ili pak jako uzajamno djelovanje. Za gravitacijske i jake sile kaže se da imaju *beskonačan* doseg,

što znači da te sile opadaju razmjerno kvadratu udaljenosti. To vrijedi i za elektromagnetska polja koja su dio elektroslabih polja. U elektroslabim uzajamnim djelovanjima postoje i kvanti polja W odnosno Z kojima je energijski ekvivalent mase ~ 81 odnosno $\sim 92 \text{ GeV}$, tako da je doseg tih uzajamnih djelovanja $\sim 2 \cdot 10^{-18} \text{ m}$. Osim po dosegu, uzajamna djelovanja se razlikuju i po svojoj jakosti. Relativnu jakost različitih uzajamnih djelovanja pogodno je okarakterizirati različitim bezdimenzijskim kombinacijama pripadnih konstanata (tabl. 1). Te se kombinacije javljaju pri proračunavanju različitih procesa.

U vezi s gravitacijskom silom i kozmološkim razmatranjima često se spominje Planckova masa κ , koja se može naći iz zahtjeva za gravitacijsko djelovanje da bi ono bilo jako:

$$\frac{G_N \kappa^2}{\hbar c} = 1, \quad (4)$$

gdje je G_N gravitacijska konstanta, \hbar Planckova konstanta, a c brzina svjetlosti. Iz toga slijedi da je Planckova masa $\kappa = 1,22 \cdot 10^{19} \text{ GeV}/c^2$, a omjer je te mase i mase protona $\kappa/m_p = 1,3 \cdot 10^{19}$.

Fermijeva konstanta slabog uzajamnog djelovanja G_F izvedena je iz elektroslabog uzajamnog djelovanja drugog reda pri niskim energijama i odgovara procesu u kojemu je izmijenjeno jedno vektorsko polje W ($\sin^2 \vartheta_w = 0,23$):

$$G_F = \frac{\pi \alpha}{M_w^2 \sqrt{2}} \cdot \frac{1}{\sin \vartheta_w}, \quad (5)$$

gdje je M_w masa bozona, a α konstanta jakih uzajamnih djelovanja koja opisuje vezanje gluona s bojenim nabojima (obojima) kvarkova i ovisi o energiji (točnije o prijenosu impulsa q). Ta se konstanta može za razmjerno veliko q izraziti računom smetnje kao

$$\alpha_s(-q^2) = \frac{12\pi}{(33 - 2N) \ln\left(-\frac{q^2}{\lambda^2}\right)}, \quad (6)$$

gdje je N broj kvarkovnih vrsta, a $\lambda \approx 0,2 \text{ GeV}$ fundamentalna konstanta. Vrijednost α_s u tabl. 1 odgovara malom q^2 . Izraz (6) postaje besmislen za $q^2 \rightarrow 0$, pa približni račun smetnje više ne vrijedi.

Osim po masi, elementarne se čestice razlikuju i po spinovima ili vlastitim impulsima vrtnje. One imaju i različite kvantne brojeve, kao što su naboj, oboj, stranost, leptonski broj, barionski broj itd., koji su uglavnom povezani s načinima kako čestice djeluju jedna na drugu. Svaka čestica ima i pripadnu antičesticu (npr. elektron – pozitron), a svi njihovi kvantni brojevi, osim mase i spina, imaju suprotne vrijednosti.

Tablica 1
OSNOVNA UZAJAMNA DJELOVANJA

Uzajamno djelovanje		Vezna konstanta	Bezdimenzijska kombinacija (relativna jakost)	Doseg	Kvant uzajamnog djelovanja
Gravitacijsko		gravitacijska (Newtonova) konstanta $G_N = 6,672 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Nm}^2}{\text{kg}^2}$	$\frac{G_N m_p^2}{\hbar c} = 5,909 \cdot 10^{-39}$	beskonačan	graviton
Elektroslabo	Elektromagnetsko	elementarni naboj $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	konstanta fine strukture $\alpha^{-1} = \left(\frac{e^2}{\hbar c}\right)^{-1} = 137,036$	beskonačan	foton
	Slabo	Fermijeva konstanta $G_F = 1,16637 \cdot 10^{-5} \frac{(\hbar c)^3}{\text{GeV}^2}$	$\frac{G_F m_p^2 c}{\hbar^3} = 1,026 \cdot 10^{-5}$	malen ($\sim 10^{-17} \text{ m}$)	bozoni (W^+, W^-, Z^0)
Jako QCD			$\alpha_s \approx 1$	beskonačan	gluoni

m_p je masa protona, \hbar Planckova konstanta, c brzina svjetlosti (vrijednosti su konstanata zaokružene)

Leptoni. Elektron je prva čestica otkrivena u skupini leptona. Opširni podaci o leptonima navedeni su u tabl. 2. Poznati leptoni na osnovi načina kako ulaze u elektroslaba uzajamna djelovanja mogu se rasporediti u tri dubleta koji odgovaraju grupacijama nazvanim *pokoljenjima* (ili generacijama):

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Gornji član tih dubleta je neutrino (elektronski, mionski i τ -leptonski), koji nema naboja i osjeća samo slaba uzajamna djelovanja. Leptoni imaju spin 1/2, svaki ima svoju antičesticu i svakome se može pridati *leptonski broj* (L_e, L_μ, L_τ), koji iznosi +1 za svaki lepton u tom pokoljenju, a -1 za svaki antilepton. Leptonski broj ostaje sačuvan u svim poznatim procesima. Elektroslaba svojstva ponavljaju se iz generacije u generaciju tako da nabijeni lepton ima uvijek sve veću masu. Do danas nije poznat nijedan fizikalni zakon koji bi isključio otkriće još kojeg pokoljenja. Razlog za postojanje različitih pokoljenja je zagonetan. Nije jasno da li neutrini nemaju mase ili im je masa samo vrlo malena. Odgovor na to pitanje može biti veoma važan pri razmišljanju o postanku i stabilnosti svemira.

Iako elementarni kvark nikad nije opažen, eksperimentalna evidencija da hadroni imaju kvarkovnu strukturu vrlo je jaka i uvjerljiva. Jedva da je slabija od eksperimentalne potvrde za elektronsku strukturu atoma. Kvarkovna se struktura izravno opaža u elektroslabim procesima i u pretvorbama elementarnih čestica, te je potvrđena milijunima eksperimentalnih podataka skupljenih pri radu moćnih akceleratora. Do sada je definitivno ustanovljeno postojanje pet kvarkova, a postoje i neke indikacije za šesti, tzv. t-kvark. Njihovi nazivi i znakovi potječu iz engleskog, a u slobodnom prijevodu znače

u-kvark (engl. *up quark*, gornji kvark)
d-kvark (engl. *down quark*, donji kvark)
s-kvark (engl. *strange quark*, strani ili čudni kvark)
c-kvark (engl. *charmed quark*, čarobni kvark)
b-kvark (engl. *bottom quark*, niži kvark)
t-kvark (engl. *top quark*, vršni kvark).

Nazivi su kvarkova u vezi s položajem u dubletima

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix} \quad (8)$$

ili s osobitim kvantnim brojevima povezanim s određenim kvarkom. Tako se npr. *charm*, c, prevodi kao čarobnost, a

Tablica 2
OSNOVNA SVOJSTVA LEPTONA

Naziv i znak	Masa m MeV/c ²	Prosječno trajanje τ s	Naboj Q e	Leptonski broj			Raspad
				L_e	L_μ	L_τ	
Elektron, e^-	0,511	∞	-1	+1	0	0	stabilan
Mion, μ^-	105,7	$2,20 \cdot 10^{-6}$	-1	0	+1	0	$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$
Tau-lepton, τ^-	1784	$0,3 \cdot 10^{-12}$	-1	0	0	+1	$\tau^- \rightarrow \bar{\mu} + \bar{\nu}_\mu + \nu_e$ (17,8%) $\tau^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\tau$ (17,3%) $\tau^- \rightarrow (\text{hadroni}) + \nu_\tau$ (61,8%)
Elektronski neutrino, ν_e	$< 18 \cdot 10^{-6}$	∞	0	+1	0	0	stabilan
Mionski neutrino, ν_μ	$< 0,25$	$\infty?$	0	0	+1	0	stabilan
Tau-neutrino, ν_τ	< 35	?	0	0	0	+1	?

Za spin svakog od leptona vrijedi $J = \frac{1}{2} \hbar$. Antileptoni (pozitron e^+ itd.) imaju jednaka svojstva, samo naboje i leptonske brojeve suprotna predznaka.

Kvarkovi su početne čestice od kojih su izgrađene neke od subatomnih čestica. Oni nisu opaženi u slobodnom stanju i postoje teoretske spekulacije da se u prirodi pojavljuju uvijek u skupinama, tj. da su permanentno zarobljeni. Naziv *kvark* predložio je M. Gellmann (1964), koji je teoretski predvidio postojanje te čestice. Inspiracija za naziv bili su mu kvarkovi (engl. *quarks*), zli duhovi u romanu *Finnegans Wake* (Finneganovo bdijenje) J. Joycea.

Skupine kvarkova (njihova vezana stanja) zovu se *hadroni*. U tabl. 3 navode se neki hadroni, razvrstani na barione (s polovičnim spinom) i mezone (s cjelobrojnim spinom).

strangeness, s, po našoj već ustaljenoj tradiciji kao stranost (analogni sustav nazivlja može se naći i u ruskoj znanstvenoj literaturi, pa je to, čini se, prirodan izbor za slavenske jezike). Čarobnost i stranost nemaju, naravno, veze ni s čarom (ili šarmom) ni sa strancima iz svakidašnjeg života. U stručnoj literaturi je bilo i naziva *truth* (engl. istina) za t-kvark, odnosno *beauty* (engl. ljepota) za b-kvark. Najprikladnije je govoriti o u-kvarku, t-kvarku itd., uz upotrebu pojmova čarobnost i stranost. Tri dubleta iz (7) zajedno s tri dubleta iz (8) čine tri pokoljenja ili tri generacije. Tako su npr. prva generacija dubleti (ν_e, e^-) i (u, d) te njihove antičestice. Osnovna svojstva kvarkova navode se u tabl. 4.

Tablica 3
KVARKOVI I HADRONI

Kvarkovi u, d, s, c, b, t		
Hadroni*		
Barioni	Mezoni	Antibarioni
proton, p (uud)	pion, π^+ (u \bar{d})	antiproton, \bar{p} ($\bar{u}\bar{u}\bar{d}$)
neutron, n (udd)	pion, π^- ($\bar{u}d$)	antineutron, \bar{n} ($\bar{u}\bar{d}\bar{d}$)
lambda, Λ (uds)	kaon, K^+ (u \bar{s})	antilambda, $\bar{\Lambda}$ ($\bar{u}\bar{d}\bar{s}$)
.....	kaon, K^- ($\bar{u}s$)
.....

*Redom su navedeni naziv i znak hadrona, a u zagradi kvarkovni sastav

Tablica 4
OSNOVNA SVOJSTVA KVARKOVA

Naziv	Masa m MeV/c ²	Naboj Q e	Izotopni spin	Stranost S	Čarobnost C	Ljepota b
u-kvark	~ 4	2/3	1/2	0	0	0
d-kvark	~ 7	-1/3	-1/2	0	0	0
s-kvark	~ 150	-1/3	0	-1	0	0
c-kvark	~ 1500	2/3	0	0	1	0
b-kvark	~ 4500	-1/3	0	0	0	+1
t-kvark		2/3	0	0	0	0

Svi kvarkovi imaju spin $J = \frac{1}{2} \hbar$, barionski broj $B = \frac{1}{3}$ te potpuni oboj (1, 2 i 3). Antikvarkovi (\bar{u} -kvark itd.) imaju jednaka svojstva, a samo naboje i barionske brojeve suprotna predznaka.

Postojanje pokoljenja potiče na istraživanje o još fundamentalnijim česticama (rishoni, preoni, haploni) od kojih su građeni leptoni, kvarkovi, bozoni W i Z itd. Alternativno se pojava pokoljenja pokušava povezati sa svojstvima i strukturom prostora i vremena, gdje bi moglo postojati i više od četiri dimenzije (Kaluza-Kleinovi modeli, modeli sa suprastrunama).

Kvarkovne su mase u tabl. 4 približne. Budući da slobodni kvarkovi nikad nisu opaženi, procjena njihovih masa ovisi o teoretskom opisu hadrona. Poznata je i kvarkovna vrsta pod nazivom *flavor* F (amer. engl. miris, tek, okus ili aroma).

Kvarkovni oboj. Kvarkovima se pridjeljuje i svojstvo triju boja ili oboji; te su boje već prema ukusu pisca, nazvane crvena, bijela, plava ili crvena, zelena, žuta itd. Ti oboji odgovaraju trima nabojevima kojima se kvarkovi vežu na gluone. Gluoni su vektorska polja bez mase (gluon je izvedeno prema engl. *glue* ljepilo; zvuči dovoljno učeno da se zadrži, kao i u ruskome, umjesto nezgrapnih izraza kao ljepkon ili ljepljivac). Ima osam gluona ako dinamika zadovoljava simetriju SU(3) (v. *Nuklearna fizika*, TE 9, str. 456). Oni se vežu na tri oboja, a rezultirajuće uzajamno djelovanje, odgovorno za jake sile, poznato je kao kvantna kromodinamika (QCD, prema engl. *Quantum Chromodynamics*). Gluoni su također obojeni. I ovdje se pojam boje uvodi kao pogodno nazivlje koje nema veze s fiziološkim vidnim osjetom boje. Slobodni gluoni nisu opaženi, ali su u visokoenrgetskim procesima nađene brojne indikacije za njihovo postojanje.

Čini se da kod energija koje su dosad dosegnute priroda tolerira samo bezbojna stanja, tj. vezane sustave kvarkova i gluona kojima je ukupni oboj nula, odnosno koji se transformiraju kao singletne reprezentacije simetrije SU(3) (QCD).

U tablicama 5 i 6 navodi se niz takvih kvarkovnih stanja, grupiranih kao barioni i mezoni. Među stanjima je s najnižom masom mezonski oktet: pioni π^+ , π^- i π^0 , kaoni K^+ , K^0 , K^- i \bar{K}^0 te η -mezon. Poslije piona, što je već spomenuto, otkriveni su postepeno i nešto masivniji kaoni. Teoretski je predviđen η -mezon, kada je postalo jasno da se mezoni mogu klasificirati po simetriji SU(3) (F) s obzirom na čestične vrste. To je različita grupa od simetrije SU(3) (QCD), kojoj najnižu osnovnu reprezentaciju čine tri oboja, 1, 2, 3. Najniža

reprezentacija 3 u simetriji SU(3) (F) bili bi kvarkovi u, d, s (oboj bi se mogao simbolički označiti gornjim indeksom, npr. u^i , $i = 1, 2, 3$), dok bi antikvarkovi odgovarali reprezentaciji $\bar{3}$. Grupa simetrije jest produktna grupa:

$$SU(3) \text{ (QCD)} \otimes SU(3) \text{ (F)}. \quad (9)$$

S obzirom na tu grupu mezoni se klasificiraju kao (1, 8), tj. singlet i oktet, a oba se pojavljuju u redukciji:

$$3 \otimes \bar{3} = 1 \oplus 8. \quad (10)$$

U grupi simetrije SU(3) (QCD) realizirana je, čini se, uvijek samo prva mogućnost. Mezon se može shvatiti kao vezano stanje kvarka i antikvarka, npr.:

$$\begin{aligned} \pi^+ &\rightarrow u^i \bar{d}_i \\ K^+ &\rightarrow u^i \bar{s}_i \end{aligned} \quad (11)$$

i slično. Sumira se preko obojnih indeksa, tako da je SU(3) (QCD) skalar. Prostorno se svojstvo mezona može karakterizirati brojem $J^P = 0^-$, što znači da su ukupni kvarkovni spinovi vezani u spin 0 i da mezon ima negativnu parnost. To znači da mezonsko polje mijenja predznak ako se istodobno promijeni smjer svih prostornih koordinatnih osi u koordinatnom sustavu koji je upotrijebljen pri teoretskom opisu. Slika mezona kao vezanog stanja od dva valentna kvarka (npr. u, d), ili šest ako se računaju i oboji ($u^i \bar{d}_i = u^1 \bar{d}_1 + u^2 \bar{d}_2 + u^3 \bar{d}_3$), ponešto je pojednostavnjena. Eksperimenti pokazuju da

Tablica 6
OSNOVNA SVOJSTVA MEZONA

Naziv i znak	Masa m GeV/c ²	Prosječno trajanje τ , s	Naboj Q, e	Stranost S	Raspad
Pion, π^0	0,135	$83 \cdot 10^{-18}$	0	0	$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$ (98,8%) $\pi^0 \rightarrow \gamma + e^+ + e^-$ (1,2%)
Pion, π^\pm	0,139	$26 \cdot 10^{-9}$	± 1	0	$\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu$
η -mezon, η	0,549	($\Gamma = 1,08 \text{ keV}$)	0	0	$\eta \rightarrow \gamma + \gamma$ (39%) $\eta \rightarrow \pi^0 + \pi^0 + \pi^0$ (32%) $\eta \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^0$ (24%)
Strani mezoni					
Kaon, K^\pm	0,494	$12,4 \cdot 10^{-9}$	± 1	+1	$K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ (63,5%) $K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0$ (21,2%) $K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$ (5,6%)
Kaon, K^0	0,498	(50%) $89 \cdot 10^{-12}$	0	+1	$K_S^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ (68,6%) $K_S^0 \rightarrow \pi^0 + \pi^0$ (31,4%) $K_L^0 \rightarrow \pi^0 + \pi^0 + \pi^0$ (21,5%) $K_L^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^0$ (12,4%) $K_L \rightarrow \pi^\pm + \mu^\mp + \nu_\mu$ (27,1%) $K_L \rightarrow \pi^\pm + e^\mp + \nu_e$ (38,7%)
Kaon, \bar{K}^0	0,498	(50%) $52 \cdot 10^{-9}$	0	+1	
Čarobni mezoni					
D-mezon, D^\pm	1,869	$0,9 \cdot 10^{-12}$	± 1	0	$D^+ \rightarrow K^0 + \pi^+ + \pi^0$
D-mezon, D^0 (i \bar{D}^0)	1,863	$0,4 \cdot 10^{-12}$	0	0	$D^0 \rightarrow K^- + \pi^+ + \pi^0$
Čarobni strani mezon					
D_S -mezon, D_S^\pm	1,972	$0,4 \cdot 10^{-12}$	± 1	+1	
B-mezoni					
B-mezon, B_\pm	5271	$\sim 10^{-12}$	± 1	0	$B^+ \rightarrow \bar{D}^0 + \pi^+$ $B^+ \rightarrow D^- + \pi^+ + \pi^+$
B-mezon, B^0 (i \bar{B}^0)	5274	$\sim 10^{-12}$	0	0	$B^0 \rightarrow \bar{D}^0 + \pi^+ + \pi^-$ $B^0 \rightarrow D^- + \pi^+$

Tablica 5
OSNOVNA SVOJSTVA BARIONA

Naziv i znak	Masa m GeV/c ²	Prosječno trajanje τ , s	Naboj Q, e	Raspad
Proton, p	0,9383	$> 10^{38}$	1	
Neutron, n	0,9396	900	0	$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ (100%)
Strani barioni				
Lambda, Λ	1,116	$0,26 \cdot 10^{-9}$	0	$\Lambda \rightarrow p + \pi^-$ (64,2%) $\Lambda \rightarrow n + \pi^0$ (35,8%)
Sigma, Σ^+	1,189	$0,08 \cdot 10^{-9}$	1	$\Sigma^+ \rightarrow p + \pi^0$ (51,6%) $\Sigma^+ \rightarrow n + \pi^+$ (48,4%)
Sigma, Σ^0	1,192	$0,058 \cdot 10^{-18}$	0	$\Sigma^0 \rightarrow \Lambda + \gamma$ ($\sim 100\%$)
Sigma, Σ^-	1,197	$0,15 \cdot 10^{-9}$	-1	$\Sigma^- \rightarrow n + \pi^-$ ($\sim 100\%$)
Barioni sa S = -2				
Ksi, Ξ^0	1,315	$0,29 \cdot 10^{-9}$	0	$\Xi^0 \rightarrow \Lambda + \pi^0$ ($\sim 100\%$)
Ksi, Ξ^-	1,321	$0,16 \cdot 10^{-9}$	-1	$\Xi^- \rightarrow \Lambda + \pi^-$ ($\sim 100\%$)
Barioni sa S = -3				
Omega, Ω^-	1,672	$0,09 \cdot 10^{-9}$	-1	$\Omega^- \rightarrow \Lambda + K^-$ (68,6%) $\Omega^- \rightarrow \Xi^0 + \pi^-$ (23,4%) $\Omega^- \rightarrow \Xi^- + \pi^0$ (8%)
Čarobni barioni				
Lambda, Λ_c^+	2,282	$\sim 0,2 \cdot 10^{-12}$	+1	$\Lambda_c^+ \rightarrow p + K^- + \pi^+$ (2%) $\Lambda_c^+ \rightarrow \Lambda + ?$ (33%)

hadroni sadrže i brojne parove kvark-antikvark ($q\bar{q}$) i brojne gluone, tzv. *gluonsko more*.

Postoji i formalna mogućnost da se sagradi singlet s obzirom na simetriju SU(3) (F), koji bi bio

$$\bar{u}u + \bar{d}d + \bar{s}s. \quad (12)$$

Doista se i opažaju dva η -mezona. Eksperimentalno opažena stanja su mješavina simetrije SU(3) (F) okteta i singleta. Simetrija SU(3) (F) može samo približno vrijediti s obzirom na to da mase kvarkova u, d i s nisu jednake. Ako bi se razmatralo svih šest kvarkova, to bi vodilo u simetriju SU(6) (F). Spinovi kvarka mogli bi se vezati i u ukupni spin 1, što bi vodilo u stanje $J^P = 1^-$. Negativna je parnost posljedica toga što čestice i antičestice imaju uvijek suprotne parnosti. Otkriveno je, doista, devet vektorskih mezona 1^- :

$$\rho^+, \rho^-, \rho^0, K^{*+}, K^{*0}, K^{*0*}, \bar{K}^{*0*}, \quad \omega \subset 8 \text{ i } \varphi \subset 1. \quad (13)$$

I tu se eksperimentalno opažaju mješavine oktetnog stanja ω i singletnog stanja φ . Mezoni viših spinova, kao npr. $A_2(1320)$ $J^P = 2^+$, mogu se lako opisati kao stanja u kojima je orbitalni impuls vrtnje L različit od nule. Očito je $L = 1$ za A_2 , dok je za mezonskoantimezonske parove π^+ , ρ^+ itd. bilo $L = 0$. Ukupna hadronska valna funkcija mora imati spinske, prostorne, F i QCD dijelove. Shematski:

$$\Psi_H = \alpha(\text{spin}) \beta(\text{prostor}) \gamma(F) \delta(\text{QCD}). \quad (14)$$

Tako npr. i pseudoskalarni mezon π^+ i vektorski mezon ρ^+ imaju isti dio $\gamma(F)$, tj. $\gamma(u\bar{d})$, i isti $\delta(\text{QCD})$, tj. $\delta(q^i\bar{q}_i)$, i isti $\beta(\text{prostor})$, no razlikuju se u dijelu $\alpha(\text{spin})$.

Čarobni je kvark bio teoretski predviđen još 1970, da bi se objasnila odsutnost nekih elektroslabih procesa. Godine 1974. u dva je laboratorija, u dva različita eksperimenta istodobno primijećena vrlo uska rezonancija $J^P = 1^-$, koja bi odgovarala masi $\sim 3,1 \text{ GeV}/c^2$. Pokazalo se da ta rezonancija odgovara vezanom stanju c-kvarkova: $J/\Psi \sim c\bar{c}$, te je tako čarobnost opažena na skrovit način. Kasnije su nađeni i čarobni mezoni sa $J^P = 1^-$, to su D-mezoni (tabl. 6).

Barionsko se stanje može opisati s tri valentna kvarka. Protonu pripada funkcija:

$$p : \gamma(F) \sim uud. \quad (15)$$

Protonski spinski dio α opisuje spin 1/2, a njegova prostorna valna funkcija ima $L = 0$. Bez $\delta(\text{QCD})$ to bi dovelo do teškoća s Paulijevim principom, odnosno s Fermi-Diracovom statistikom. Najočiglednije se to može ilustrirati na primjeru Ω -rezonancije, koja je sastavljena od tri s-kvarka, a ima $J^P = 3/2^+$ i $L = 0$. Očigledno je funkcija

$$\gamma(s, s, s) = sss \quad (16)$$

simetrična na izmjene stranih kvarkova. Spinski dio $\alpha(3/2)$ također je simetričan na izmjenu kvarkovnih spinova. Simetričan je i prostorni dio. Ukupna bi valna funkcija, bez dijela QCD,

$$\Psi(3/2^+) = \alpha(3/2) \beta(L = 0) \gamma(s, s, s) \quad (17)$$

bila simetrična na izmjene kvarkova, što bi značilo da Paulijev princip ili ne vrijedi na razini kvarka ili da kvarkovi zadovoljavaju neku parastatistiku koja nije ni Bose-Einsteinova (cijeli spinovi) ni Fermi-Diracova (polovični spinovi). Takva su razmatranja i dovela do toga (O. W. Greenberg, 1964) da se za kvarkove predloži dodatni kvantni broj, tj. *oboj*, a otuda je konačno proisteklo i otkriće kvantne kromodinamike. Omjer R između udarnog presjeka za elektronsko-pozitronsku anihilaciju u hadrone prema udarnom presjeku za anihilaciju u mionski par

$$R = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{hadroni})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)} \quad (18)$$

ovisi o boji. Teoretska se vrijednost za R slaže s mjerenjem samo ako se pretpostavi da kvarkovi imaju tri oboja.

Tako se u glavnim crtama može shvatiti trokvarkovna struktura barionskog okteta $1/2^+$: p, n, Λ , Σ^+ , Σ^0 , Σ^- , Ξ^0 , Ξ^- . Kao i mezoni, tako i barioni sadrže uz valentne kvarkove i parove $q\bar{q}$ i gluonske komponente. Pomoćna simetrija u klasifikaciji i gradnji hadronskih stanja što ih karakteriziraju kvarkovi u, d i s jest:

$$SU(6) (S, F) \supset SU(2) (\text{spin}) \otimes SU(3) (F). \quad (19)$$

Reprezentacije su te unitarne grupe sastavljene od spinskih dijelova i F-dijelova. Mezonski oktet i vektorski mezoni čine reprezentaciju 35, a barioni $1/2^+$ i $3/2^+$ popunjavaju reprezentaciju 56.

Bozoni. Uzajamno se djelovanje elementarnih čestica odvija posredovanjem prijelaznih (intermedijarnih) čestica, *bozona*. To su foton, masivni bozon W^+ i njegova antičestica W^- , bozon Z^0 te gluoni (tabl. 7). Bozoni W^+ , W^- i Z^0 opaženi su 1983. Na postojanje gluonskog okteta navode mnogi pokusi, ali gluoni, kao i kvarkovi, nisu opaženi kao samostalne čestice.

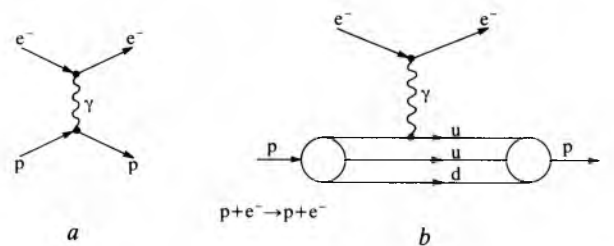
Tablica 7
OSNOVNA SVOJSTVA BOZONA

Naziv i znak	Masa m GeV/c^2	Trajanje	Naboj Q_e	Oboj	Raspad
Foton γ	0	stabilan	0	0	
Bozon W^+	81	$(\Gamma < 7 \text{ GeV})$	1	0	$W^+ \rightarrow \tau_\nu$ $W^+ \rightarrow \mu_\nu$ $W^+ \rightarrow e_\nu$
Bozon Z^0	92	$(\Gamma < 8,5 \text{ GeV})$	0	0	$Z^0 \rightarrow e^+ + e^-$ $Z^0 \rightarrow \mu^+ + \mu^-$
Gluon	0		0	(postoji)	

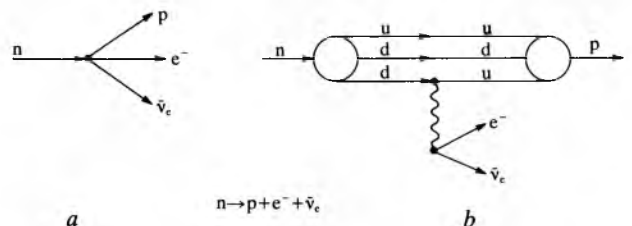
Spin je svih bozona $1\hbar$.

Električno se uzajamno djelovanje odvija fotonima (kvantima elektromagnetskog polja), slabo djelovanje masivnim bozonima W i Z, a jako gluonima. Gravitacijsko se uzajamno djelovanje prenosi teoretski predviđenim *gravitonima* (kvantima gravitacijskog polja). Njihova je masa mirovanja nula, a spin $2\hbar$. Gravitacijsko uzajamno djelovanje između elementarnih čestica visokih energija je zanemarivo.

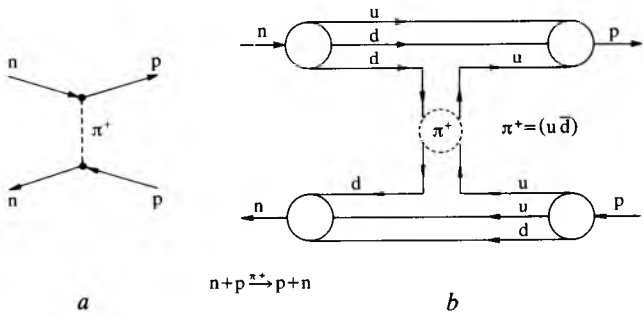
Uzajamno se djelovanje elementarnih čestica zorno prikazuje *Feynmanovim dijagramima* (R. P. Feynman). Na njima se čestice (barioni i leptoni) prikazuju crtama, mezoni isprekidanim crtama, a fotoni i ostali bozoni vijugama. Čvorovi označuju mjesta uzajamnog djelovanja, a strelice smjerove. Povezivanje kvarkova u nukleone označuje se kružnicom ili elipsom. Na sl. 2, 3 i 4 prikazani su primjeri



Sl. 2. Feynmanov dijagram raspršenja elektrona na protonu. a prikaz na hadronskoj razini, b prikaz na kvarkovnoj razini



Sl. 3. Feynmanov dijagram neutronskega β -raspada. a prikaz na hadronskoj razini, b prikaz na kvarkovnoj razini



Sl. 4. Feynmanov dijagram nukleonsko-nukleonskog raspršenja. a prikaz na hadronskoj razini, b prikaz na kvarkovnoj razini

nekih uzajamnih djelovanja na hadronskoj i detaljnijoj leptonsko-kvarkovnoj razini.

Stabilnost elementarnih čestica. Elementarne se čestice prema njihovu prosječnom trajanju τ (ili vremenu poluraspada $T = \tau \ln 2$) mogu svrstati u stabilne, gotovo stabilne (metastabilne) i nestabilne. Dosad nisu opaženi raspadni fotona, elektrona, protona i neutrina. Za proton se znade da je njegovo prosječno trajanje svakako veće od 10^{30} godina, što je mnogo više od procijenjene starosti svemira ($\sim 1,5 \cdot 10^{10}$ godina). U tablicama 5 i 6 i mezonski su i barionski oktet među stabilnim česticama. Tablice su sažete iz poznatih međunarodnih tablica CERN-Brookhaven (Particle Properties Data Booklet, 1988). Radi se dakle o općenito prihvaćenoj standardnoj klasifikaciji prema kojoj se čestice s prosječnim trajanjem τ većim od 10^{-10} s smatraju stabilnima. Taj red vrijednosti prosječnog trajanja karakterističan je za čestice koje se raspadaju pod utjecajem elektroslabih uzajamnih djelovanja.

Ako se čestica raspada na više načina, tada se govori o *frakciji* ili *dijelu* ili o *kanalu* za raspad. Prosječno trajanje odnosi se na sve mogućnosti raspada. Čestice koje su nestabilne prema elektromagnetskim uzajamnim djelovanjima traju još kraće, kao npr. pion π^0 i sigma Σ^0 . Slaba uzajamna djelovanja narušavaju stranost S , izospin I , brojeve b i t , parnost P itd. Elektromagnetska uzajamna djelovanja narušavaju izospin. U jakim uzajamnim djelovanjima svi ti kvantni brojevi bivaju sačuvani. Iako se npr. u raspadu bariona $\Sigma^+ \rightarrow p + \pi^0$ pojavljuju hadroni, dakle čestice koje imaju jaka uzajamna djelovanja, nesačuvanje stranosti (za barione Σ stranost je -1 , a za proton i pion 0) označuje da se tu radi o slabom procesu. U povijesnom razvoju fizike zaključivalo se i obrnuto. Relativna vrijednost prosječnog trajanja omogućila je da se razlikuju jaka i slaba uzajamna djelovanja. Postojanje nekih zakona koji su opisani uvođenjem novih kvantnih brojeva otkriveno je pri proučavanju reakcija među elementarnim česticama. Npr. ako bi se neutroni bombardirali pionima velike kinetičke energije, energijski bi bilo moguće proizvesti kaone prema relaciji:

$$\pi^+ + n \rightarrow K^+ + n, \quad (20a)$$

a relacija među stranostima u tom bi procesu bila

$$0 + 0 \rightarrow 1 + 0, \quad (20b)$$

pa bi promjena stranosti bila $\Delta S = 1$. Taj se proces ne opaža jer je u njemu stranost narušena. Proces koji uspijeva jest

$$\pi^+ + n \rightarrow K^+ + \Lambda, \quad (21a)$$

a stranost

$$0 + 0 \rightarrow 1 + (-1), \quad (21b)$$

pa je $\Delta S = 0$. Sustavnim proučavanjem takvih procesa ustanovljeni su i određeni kvantni brojevi kao što su izospin, zatim S , C , b itd., koji se katkada nazivaju i *unutrašnjim kvantnim brojevima*.

Raspadi u kojima svi ti kvantni brojevi bivaju sačuvani rezultat su jakih uzajamnih djelovanja, npr. vektorski mezon

se raspada na dva piona:

$$\rho^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^- \quad (22)$$

pa je tu prosječno trajanje τ toliko kratko da se ne može izravno mjeriti. Postojanje takvih stanja opaža se kao maksimum u udarnom presjeku, kada se energija koja je na raspolaganju u danom procesu približi (u sustavu *težišta*) masi nestabilne čestice. Kako se tu radi o rezonantnoj pojavi, te se čestice nazivaju i *rezonancijama* ($3/2^+$, 1^- itd.). Vektorski mezon ρ^0 opaža se kao rezonancija pri anihilaciji elektrona i pozitrona. Taj se proces odvija prema relaciji:

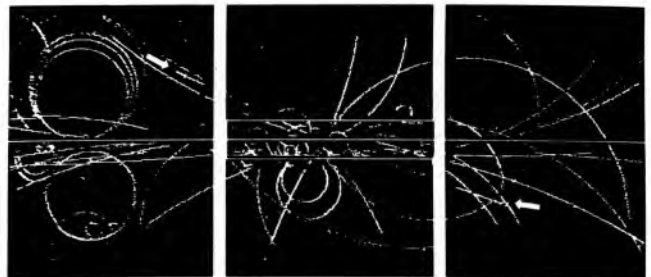
$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma \rightarrow \rho^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-. \quad (23)$$

Opaziti se može samo konačni pionski par, pri čemu se ne smije zaboraviti da je i pion nestabilan, tako da je njegov signal u eksperimentalnom uređaju niz raspada prema relacijama:

$$\pi^+ \rightarrow \begin{cases} \mu^+ + \nu_\mu \\ e^+ + \nu_\mu + \bar{\nu}_e \end{cases} \quad (24)$$

Ako se proučavaju energije i prostorna raspodjela konačnih stanja u nekom procesu, obično se može matematički rekonstruirati o kojem se procesu radilo. Može se reći da se u primjeru (23) vektorski mezon ρ^0 »opaža matematički«.

U podacima o nestabilnim česticama navodi se i širina Γ , što je, približno govoreći, širina rezonantne krivulje (koja je funkcija energije) na polovici njene visine. Za vektorski mezon ρ^0 širina je $\Gamma \approx 158$ MeV. Iz veze $\tau = \hbar/\Gamma$ može se procijeniti prosječno trajanje vektorskog mezona ρ^0 : $\tau \approx 4,2 \cdot 10^{-24}$ s. Vjerojatnost je da se nestabilna čestica kao što je mezon ρ^0 raspadne $\sim 10^{14}$ puta veća od vjerojatnosti da se raspadne tzv. stabilna čestica Σ^+ . Pri visokoenergetskim eksperimentima otkrivene su mnoge nestabilne čestice ili rezonancije.



Sl. 5. Tragovi elementarnih čestica registrirani višezračnim proporcionalnim brojačem i rekonstruirani pomoću elektroničkog računala. Strelica pokazuje elektronsko-pozitronski par nastao raspadom bozona Z^0 (eksperiment UA 1 u CERN-u)

Fizika je elementarnih čestica nezamisliva bez teoretskog formalizma kvantne teorije polja, bez golemih eksperimentalnih uređaja te suvremenih mjernih uređaja i postupaka. Na sl. 5 je primjer slikovnog prikaza tragova elementarnih čestica rekonstruiran na temelju električnih podataka iz mjernog uređaja pomoću elektroničkog računala.

LIT.: J. M. Jauch, F. Rohrlich, The Theory of Photons and Electrons. Addison-Wesley, Cambridge, Mass. 1955. - R. P. Feynman, Photon-Hadron Interactions. W. A. Benjamin Inc., Reading, Mass. 1972. - B. Б. Бегеветский, Квантовая электродинамика. Наука, Москва 1980. - C. Itzykson, J. B. Zuber, Quantum Field Theory. McGraw-Hill, New York 1980. - A. Zee, ed., Unity of Forces in the Universe. World Scientific 1982. - E. D. Commins, P. H. Bucksbaum, Weak Interactions of Leptons and Quarks. Cambridge Univ. Press, London 1983. - M. Chaichian, N. F. Nelipa, Introduction to Gauge Field Theories. Springer-Verlag, Berlin 1984. - T. P. Cheng, L. F. Li, Gauge Theory of Elementary Particle Physics. Oxford 1984. - Л. Б. Окунь, Физика элементарных частиц. Наука, Москва 1988.

D. Tadić