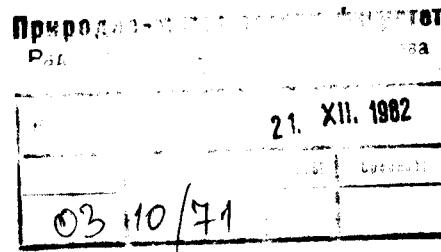


UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET
Institut za fiziku



214
60. -



D I P L O M S K I R A D

RAZVOJ FIZKE ČESTICA

Molnar Gabor

Novi Sad 1982.

Zahvaljujem se profesoru Dr. Milanu Nikoliću
na pomoći i sugestijama koje mi je pružio
prilikom izrade diplomskog rada.

SADRŽAJ

UVOD	
I OTKRIĆA U RAZUMEVANJU PRIRODE	2
II NEUTRINO	5
III KOSMIČKO ZRAČENJE I JUKAVINA ČESTICE	7
III- 1. Mioni	8
III- 2. Pioni	9
IV KAONI	12
V HIPERONI	15
VI PROBLEMI I PARADOKSI	20
VI- 1.Udružena produkcija i hijerarhija interakcija	20
VI- 2.Kompleks K - K i operacija konjugacije naboja	22
VII JAKE INTERAKCIJE	24
VII- 1.Efikasni presek	24
VII- 2.Rezonancije	27
VIII ELEKTROMAGNETNA INTERAKCIJA I STRUKTURA NUKLEONA	35
IX FIZKA NEUTRINA	41
IX- 1.Neodržanje parnosti i nanelektrisanja	41
IX- 2.Postojanje dva neutrina	43
IX- 3.Otkriće mionskog neutrina	45
X FENOMEN REGENERACIJE	47
X- 1.Neodržanje CP	48
XI KLASIFIKACIJA ČESTICA	50
XI- 1.Nova nomenklatura	50
XI- 2.Polovi i trajektorije Regge-a	51
XI- 3.Osmostruki put,SU/3/ simetrija	53
XI- 4.Začarani krug,Bootstrap	56
XI- 5.Model kvarkova	59
XII MODEL PARTONA	65
XIII U PRAVCU JEDNE UNIFIKACIONE TEORIJE INTERAKCIJA	69
XIV OTKRIĆE NEUTRALNIH STRUJA	72
XV NOVA GRUPA ČESTICA	75
XVI NOVA FIZIKA	78
EPILOG	81
HRONOLOGIJA	82
LITERATURA	86

UVOD

Poslednje četiri decenije svedoci smo nastanka i razvoja nove nauke, fizike elementarnih čestica, koja se naziva još i fizika visoke energije ili subnuklearna fizika. Kao i svaki naučni razvoj, i ona ima korene koji se pružaju u ranije godine a neki od njenih osnovnih ideja potiču iz daleke prošlosti. Ne postoji tačno određena granica koja razdvaja ovu granu fizike od drugih ali glavna otkrića poslednjih 45 godina mogu biti useta kao signal njenog sigurnog početka: otkriće prvog mesona, piona i formulacija kvantne elektrodinamike od strane Bethe-a, Feynmana, Schwinger-a, Tomonaga, Dysona i ostalih. Skoro u iste vreme, razvoj spektrosketskog modela jesgra, posebno nuklearnog "shell" modela, označava kraj ranijeg istraživačkog perioda i doprinosi razdvajaju od bliske oblasti nuklearne fizike.

U ovom radu će, po hronološkom redu, biti izmesena važnija otkrića koj su uticala na razvoj fizike elementarnih čestica sve do današnjih dana.

I OTKRIĆA U RAZUMEVANJU PRIRODE

Početkom ovog veka javile su se nove ideje koje su dovelе do radikalnih izmena u fizici. One su uslovile da se fizika razvija u jednom novom pravcu i da se, kasnije, fizika elementarnih čestica izdvoji kao posebna grana ove nauke. S obzirom da to da su ove poznate ideje već dovoljno puta opisivane kao posebne oblasti fizike u raznim stručnim literaturama, ovde će one biti samo spomenute.

Dve ideje su izvršile najveći prokret u fizici; to su bile teorija relativnosti i kvantna teorija.

Godine 1900. Planck je postavio temelje kvantne teorije, na osnovu koje se energija ne emituje i ne apsorbuje kontinualno, nego samo u nedeljivim jedinicama energije tzv. kvantima energije.

Osnove teorije relativnosti postavio je Einstein 1905. godine. Povod za ovu reviziju osnovnih pojmoveva klasične mehanike bio je Majklsonov eksperiment koji je pokazao da je brzina svetlosti konstantna. Teorija relativnosti izgradjena je na temeljima dva postulata:

- u svim sistemima, koji miruju ili se kreću jednolikom pravolinijski, važe isti fizički zakoni i

- brzina svetlosti u svim sistemima jednaka je u svim pravcima i nezavisna od kretanja sistema.

Ona je ukazala na kvantitativnu povezanost izmedju prostora i vremena i time ispravila pogrešna klasična shvatanja ovih pojmoveva.

Ovde moramo spomenuti i poznati Rutherford-ov eksperiment izvršen 1911. godine. On je ispitivao rasejanje α -čestica pri prolazu kroz tanku metalnu foliju i pri tom utvrdio da je glavna masa atoma skoncentrisana u njegovom centru. Ovaj eksperiment je, mnogo kasnije, poslužio kao primer za proveru modela partona.

Kvantna teorija je još od Planck-ovog zanivanja bila i ostala vrlo apstraktna ali glavnu snagu je crpela iz slaganja sa eksperimentalnim rezultatima. Situacija 1925. godine bila je takva ni klasična, niodotadašnaj kvantna mehanika nisu bile dovoljno dobre da objasne mnoštvo postavljenih i prividno jednostavnih problema/Štarkov efekat, atom vodonika u magnetnom i električnom polju/. Na osnovu analize eksperimentalnih rezultata Heisenberg, te iste godine, i Schrödinger, 1926. godine, postavljaju, nezavisno jedan od drugog, osnove kvantne mehanike. Heisenbergova matrična mehanika i Schrödingerova talasna mehanika toliko su se razlikovale da je u početku njihova matematička ekvivalentnost bila nepoznata. Tek kasnije je pokazano da su to dve potpuno ekvivalentne metode. Ova kvantna mehanika, međutim nije bila u stanju da opiše sva svojstva atoma/uzajamno dejstvo atoma sa mangetnim poljem, teorija složenih atoma/. To je u glavnom bilo zbog toga što se nisu uzimale u obzir osobine spina elektrona.

U toku daljeg razvoja kvantne mehanike nastala je 1928. godine Dirac-ova relativistička teorija. Te godine on postavlja jednačinu za opisivanje kako relativističkih tako i spinskih efekata elektrona u kretanju. Veliki uspeh njegove teorije predstavlja predviđanje prve antičestice, antielektrona ili pozitrona, koju je 1932. godine Anderson stvarno i otkrio u kosmičkom zračenju.

Eksperimentalno iskustvo dovelo je do pretpostavke da zakon o održanju energije, možda, ne važi kod radioaktivnih procesa. Da bi se izašlo iz poteškoće objašnjenja β -raspada, Pauli je 1931. godine došao do zaključka, da je potrebno postulirati postojanje jedne neutralne čestice. Paulievu ideju je podržao Fermi i, nakon otkrića neutrona/1932. Chadwick/, predložio naziv "neutrino" za novu česticu.

S obzirom na hipotezu neutrona i suštinu prirode protona i neutrona, Fermi je 1934. godine razradio savremenu teoriju β -raspada. Prema njegovoj teoriji, β -raspad je posledica interakcije nukleona i leptonskog polja. Jezgra atoma ne sdrže slobodne elektrone i pozitrone, već samo protone i neutrone. Elektroni i pozitroni, koje emituju atomska jezgra, nastaju samo pri procesu β -raspadanja usled transformacije neutrona i protona, analogno sa emisijom svetlosti atomskih sistema. U pogledu

prirode protona i neutrona, može se reći, da su to u suštini dva različita stanja jedne iste čestice. Dakle, obrazovanje elektrona ili pozitrona pri β -raspadu je u suštini rezultat promene unutrašnje energije jezgra. Na osnovu zakona o održanju energije pri ovoj procesu promene unutrašnje energije uslovljeno je i obrazovanje neutrina, luke čestice bez nadelektrisanja, koja ima spin β -čestice ali suprotnog smera. U teoriji β -raspada postoje dve vrste neutrina, jedan povezan sa emisijom pozitrona:



koji se naziva neutrino/ ν , i drugi vezan za emisiju elektrona:



nazvan antineutrino/ $\bar{\nu}$.

II NEUTRINO

Fermijevo prihvatanje neutrina u formulaciji teorije radioaktivnosti imalo je za rezultat da teoretisanje u vezi radioaktivnosti nije moglo da se održi bez neutrina. Lišen nanelektrisanja i vrlo verovatno mase i magnetnog momenta nije pertstavljaо fenomen koji se mogao opaziti/jonizacija.../.

Ipak je 1936., Leipuner primetio uzmak jezgra ^{11}B koji je poticao iz dezintegracije ^{11}C u gasovitom stanju; eksperiment od velikog istorijskog značaja koji je otvorio put celoj seriji sličnih pokušaja. Neodržanje impulsa je konstatovano 1938. od strane Crane-a i Halpern-a koji su uspešno merili impuls koji je nosilo jezgro uzmaknutog ^{38}Cl u Wilsonovoj komori koja je takođe pokazivala emitovani elektron.

Otkriće veštačke radioaktivnosti stavilo je na raspolaganje nuklearnim fizičarima znatan broj radioaktivnih jezgara emitora pozitivnih i negativnih elektrona i više stotina β spektara je proučavano da bi se proverila ispravnost Fermijeve teorije i njenih posledica; naročito da oblik većeg dela spektra zavisi od mase neutrina. Tačno određivanje ovog oblika nije bilo dovoljno precizno da bi se omogućilo dobro određivanje mase neutrina.

Drugo važno pitanje koje se tiče neutrina bilo je saznanje da je ova čestica dobijena jednačinom Majorana, u čijem slučaju nepostoji razlika izmedju čestice /neutrina/ i antičestice/antineutrina/, i Dirac-ovom jednačinom, prema kojoj se čestica razlikuje od antičestice.

Jedan prihvatljivi metod da se utvrdi ova razlika, predložio je Furry 1937., ona se satoji od merenja srednjeg života u dvostrukom β -raspadu, kao što se može prikazati elementarnim procesom:

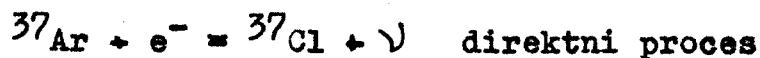
$$n \rightarrow p + e^- + \nu$$

proizvedenim dva puta uzastopno.

Račun je pokazao da u slučaju jedne Dirac-ove čestice, ona treba da sdrži oslobođenu energiju od ~ 2 MeV sa dugim

srednjim životom od 10^{20} godina. Ako se naprotiv radi o čestici Majorana, neutrino emitovan u toku prve faze mogao je biti apsorbovan u toku druge, emisijom samo dva elektrona i to sa srednjim životom od 10^{12} godina. Lako su se shvatile teškoće vezane za jedan takav eksperiment, međutim nekolikom poslednjih merenja išlo je u prilog Dirac-ovog neutrina.

Na kraju je Davis bio taj koji je postavio pitanje moguće razlike neutrina i antineutrina i pokušao da reši metodom, koju je deset godina prije predložio Pontecorvo za detekciju neutrina, pomoću njegovog zahvata u ^{37}Cl , koji dovodi do formiranja ^{37}Ar emisijom jednog elektrona. Antineutrino je bio dat definicijom čestice koja prati elektron pri β^- -raspadu, Davis je postavio pitanje na sledeći način: U toku dva procesa:



drugi nije mogao da se proizvede pomoću neutrina dobijenih iz jednog nuklearnog reaktora koji su u stvari antineutrini po definiciji. Davis je vršio proučavanje inverznog procesa ozračenjem 200 litara tetrahlorata ugljenika u reaktoru u Brookhaven-u koji je dao fluks od $/3 - 4/ \cdot 10^{11}$ antineutrina u sekundi.

On je zaključio da ovde nije bilo formiranog argona i da je efikasni presek inverznog procesa manji od $0,9 \times 10^{-45} \text{sm}^2$.

III KOSMIČKO ZRAČENJE I JUKAVINA ČESTICA

Jedini izvor za dobijanje novih čestica, prije otkrića odgovarajućih akceleratora, prestavljalo je kosmičko zračenje. Direktnim korišćenjem tehnika detekcije ustanovljeno je nekoliko tipova osnovnih čestica. U prvo vreme priroda kosmičkog zračenja ispitivala se preko apsorbcije totalnog zračenja u materijalu na površini mora. Fotografije u maglenim komorama pokazale su da na površini mora većina ionizujućih čestica nosi po jedno nanelektrisanje elektrona. Anderson je 1932. našao među tim česticama i neke sa pozitivnim nanelektrisanjem a sa masom elektrona, čestice koje su danas poznate kao pozitroni.

U cilju objašnjavanja prirode nuklearnih sile japanski fizičar Jukava /J.Yukawa/ je 1935. godine pretpostavio da se atomsko jezgro kao celina održava razmenskim uzajamnim dejstvom nukleona koje omogućava neka čestica čija je masa veća od mase elektrona a manja od mase protona.

Ova čestica sa intermedijarnom masom između elektrona i protona, koja je otkrivena u kosmičkim zracima 1936. godine, od strane Andersona i Nedermajera /S.H.Weddermeyer/ naziva se mezon.

Prema Jukavinoj teoriji mezonskog polja izlazilo je da se nuklearne sile mogu objasniti analogijom sa elektromagnetskim silama. Kao što se međusobno dejstvo dveju nanelektrisanih čestica prenosi preko elektromagnetskog polja koje ih okupljava pomoću kvanta fotona, Jukava je pretpostavio da postoji jedno slično polje, koje razvijaju nukleoni, u kome se posredstvom kvanta ovog polja prenosi uzajamno dejstvo među nukleonima. Ovi kvanti, za koje je Jukava predviđao da moraju imati masu oko 300 elektronskih masa, odgovaraju masi π -mezona.

Kemer / Kemmer / je 1938. godine dao važno proširivanje Jukavine teorije, pretpostavljajući postojanje neutralnog π -mezona.

Fotografije u ekspanzionoj komori pokazale su da se prodorna komponenta kosmičkog zračenja sastoji iz jednostruko nanelektrisanih čestica koje mogu da prodju kroz ploče olova a da ne izazovu elektromagnetne pljuskove ili nuklearne reakcije.

Oko 1939.godine započelo je sa izlaganjem nuklearnih emulzija na vrhovima planina. Što je otkrilo pojavu proizvodjenja nuklearnih "zvezda", koje sadrže tragove π^- -mezona. Povećanjem osetljivosti nuklearnih emulzija došlo se do toga da su Paul / C.F.Powell / i Okialini / G.P.S. Occhialini / 1947.godine otkrili π^- -mezone.

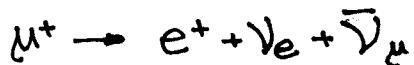
III - 1. MIONI

Za mione su, posle njihovog dobijanja iz kosmičkog zračenja /1936./, korišćeni akceleratori u cilju otkrivanja njihovih osobina. Rezultati ispitivanja pokazali su da postoje samo u dva stanja nadelektrisanja, μ^+ i μ^- .

Masa μ^+ -miona je određena uporedjivanjem sa masom π^+ u eksperimentima skretanja u magnetnom polju, a masa μ^- na osnovu zračenja iz μ^- -mezonskih atoma. Dobijeni rezultati su pokazali da im je masa ista.

Prvobitna merenja vremena života uradjena sa kosmičkim zračenjem znatno su dopunjena. Najnoviji eksperimenti koriste signale iz procesa proizvodnje miona: $\pi^+ \rightarrow \mu^+$ u scintilatoru, kao početni vremenski impuls, a signal od elektrona iz raspada kao završni / $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu$ /. Vremena života su takođe jednaka i iznose: $\Sigma_\mu = 2,2 \times 10^{-6}$ s.

Elektroni iz raspada pozitivnih miona, koji su dobijeni preko piona, ispitivani su i njihov karakterističan spektar je kontinualan pa obuhvata najmanje tri čestice. Prihvativljiv raspad obuhvata neutrina npr.:



Rezultati eksperimenta, kao što su načini raspada i hiperfini efekti kod μ -mionskog atoma, ukazuju da je kvantni broj spina miona $1/2$.

Galvni slabi proces koji je vezan za mion je njegov raspad ali postoji verovatnoća i da jezgra zahvate mion sa nižih orbita mionskih atoma. Bazični proces u jezgru je:



koji je nadjen u vodoniku. Slabe reakcije koje obuhvataju mione

ističu pojavu mionskog neutrina. Eksperimentom u Brookhaven-u nedvosmisleno je potvrđena razlika između elektronskog neutrina ν_e i mionskog neutrina ν_μ .

Postojenje dva tipa neutrina objašnjava rezloge zašto ne postoji način raspada: $\mu^+ \rightarrow e^+ + \gamma$
nego se transformacija dešava uz emisiju neutrina po Šemi:
 $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu + \gamma$
koja je poznata kao spontani raspad.

III - 2. PIONI

Uskoro posle otkrića π^- -mezona /1947./ u kosmičkom zračenju, Gardner i Lejts /Lattes/ veštacki su proizveli te čestice koristeći snop μ^- -čestica energije 380 MeV iz sinhrociklotrona u Berkeley - u. Negativni pioni identifikovani su preko nuklearnih zvezda koje proizvode u emulzijama, dok su π^+ -čestice identifikovane karakterističnim raspadom $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + e^-$ pri kraju njihovog dometa.

Godine 1950. takodje u Berkeley-u veštacki su proizvedeni neutralni π^0 -mezoni. Protoni iz sinhrociklotrona su udarali u metu od Be ili C, a visoko energetsko γ -zračenje se analiziralo magnetnim spektrometrom. Merenje doplerovog efekta kod energije fotona pri promeni prevca kretanja mezona, obrtanjem protonskog snopa u ciklotronu potvrđilo je poreklo γ -zračenja kod raspada neutralne čestice.

Veliki broj eksperimenata koji je usledio pokazao je osobine piona, pre svega jednakost masa π^+ i π^- , kao što je zahtevao opšti princip invarijantnosti, ako su u pitanju čestica i antičestica. Rezultati merenja pokazuju da su vremena života jednaka za π^+ i π^- dok za π^0 to vreme iznosi $/0,89 \pm 0,18/ \cdot 10^{-6}$ s.

Pouzdan podatak da je spin π^+ -mezona 0 /nula/ dobijen je uporedjivanjem efikasnog preseka za $p+p$ reakciju i njenu inverznu reakciju: $p+p \rightleftharpoons d + \pi^+$ pretpostavlja se da je vrednost spina π^- -mezona ista sa vrednosti π^+ . Spin neutralnog piona treba da je paran ako se on raspada na dva fotona, zbog transverzalne prirode elektromagnetskog polja.

Parnost mezona nalazi se iz eksperimenta usporavanja π^- -mezona i njegovog zahvata od strane deuterona. Na osnovu toga se do-

bija da pioni imaju neparnu parnost. S obzirom na paran spin piona zaključuje se da su oni bosoni.

Podaci koji su do sada izneti pokazuju da se pioni javljaju u vidu tri stanja nanelektrisanja sa identičnim spinom, parnosti i skoro istom masom.

Glavni način raspada pozitivnog piona dat je Šemon:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \bar{\nu}_\mu$$

Raspad negativnog piona nije nadjen u stanju mirovanja zbog toga što jezgra privlače te čestice kulenskom silom a postoji jaka nuklearna apsorbcija, pa se raspada:

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

dešava u letu,

Proizvodnja γ -mesona odigrava se na više načina:

1/ Foto-proizvodnja - Za stvaranje nanelektrisanih i neutralnih mezon procesima

$$\gamma + p \rightarrow \begin{cases} \pi^+ + n \\ \pi^- + p \end{cases}$$

$$\gamma + n \rightarrow \begin{cases} \pi^+ + n \\ \pi^- + p \end{cases}$$

u vodoniku, i u deuterijumu koristi se zakočno zraćenje iz elektronsin-hretrona.

2/ Sudari nukleona sa nukleonom - Ako se energija sistema dovoljno poveća, iznad praga za proizvodnju piona (~ 300 MeV), odigravaju se sledeći procesi:

$$\begin{aligned} p + p &\rightarrow p + p + \pi^\circ \\ p + p &\rightarrow p + n + \pi^+ \\ p + p &\rightarrow d + \pi^+ \end{aligned}$$

Za upadne energije blizu 600 MeV jedan od piona iz reakcije jedan nukleon mogu da formiraju pobudjeno stanje Δ /1236/:

$$p + p \rightarrow n + \Delta^{++}$$

3/ Sudari mezona sa nukleonom - Od posebnog su značaja procesi:

$$\begin{aligned} \pi^+ + p &\rightarrow p + \pi^+ + \pi^0 \\ \pi^+ + p &\rightarrow n + \pi^+ + \pi^+ \\ \pi^- + p &\rightarrow n + \pi^+ + \pi^- \end{aligned}$$

jer se u konačnom stanju javljaju dva piona. Nadjeno je da $\pi^+\pi^-$ stanja pokazuju israziti rezonantni efekat na masi 765 MeV. To osnovno stanje, Ω -meson, javlja se u tri razna stanja nanelektrisanja $\Omega^+, \Omega^-, \Omega^0$.

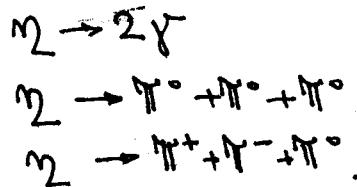
4/ Sudari pretona i antiprotona - Najverovatniji način anihilacije anti nukleona i nukleona je uz proizvodjenje piona, tipa:

$$p + \bar{p} \rightarrow n \pi^+ + n \pi^- + \pi^0$$

U slučaju tri piona, stanje sa multim nanelektrisanjem, poka-

zuje izraziti vrh na masi 790 MeV. Ovo stanje je nazvano ω -mezon.

- 5/ Ω^- -mezon - Nadjen je takođe kod analize tripleta piona ali sada kod reakcije: $\pi^+ + d \rightarrow p + p + \pi^+ + \pi^+ + \pi^0$
Primećuje se mali vrh na oko 500 MeV - Ω^- -mezon, koji se raspada elektromagnetsnim putem:



IV KAONI / ČESTICE K^+ , K^0 , K^-

Fizika čestica tipa K doživela je velike promene posle otkrića Ročester /Rochester/ i Batlera /Butler/ 1946., perioda u kojem je situacija počela da biva jasnija. Postepeno kako se broj dogadjaja povećavao, postalo je moguće da se klasificuju pozitivne i negativne \bar{K} čestice u dve klase, K čestice i H čestice /nazvane Y/ i isto je bilo za \bar{V}^0 , od kojih se razlikuju V_1^0 /hiperoni/ i V_2^0 /ili K^0 / $, tim pre što je izgledalo da postoji nekoliko stanja V^0 zvanih anomalnim, koje ne ulaze ni u jednu od ove dve kategorije i koje su označene sa V_3^0 , V_4^0 itd.$

U ovom prelaznom periodu /1947.-1957./ postojala je cela jedna šarolikost čestica tipa K sa velikim brojem načina raspada a čija masa i srednji život nisu bili određeni sa tačnošću dovoljnom da se odredi da li se radiće stvarno o različitim česticama ili o jednoj sa različitim načinima deintegracije. Tako se raslikuju, na osnovu vrste nadelektrisanja:

a/ Positivni kaoni / K^+ /

1/ $K_{T_1}^+ \rightarrow \pi^+ + \tau^+ + \eta^-$ nazvan takođe i Σ i opažen prvi put u Bristolu; druga dva primera bila su otkrivena odmah posle, zatim četvrti, čije su tri sekundarne čestice izgledale da su verovatno pioni; jedan drugi je nadjen u Rimu i na kraju je grupa iz Padova pronašla kompletan dogadjaj čije su se tri sekundarne čestice zaustavile u emulsiji, koji je u potpunosti dokazao ovaj način raspada.

2/ $K_{\mu_1}^+ \rightarrow \pi^+ + \mu^+ + \nu$ nazvan χ a od kojeg je poznate bilo 10 primera do 1954. Bio je otkriven preko svog visikeenergetskog miona koji potiče iz raspada $\pi \rightarrow \mu$; drugi primer je dao mion male energije / 5,9 MeV/, za koji se mislilo da je jedan način raspada na tri čestice, to je dokazano na ostalih osam primera. Bilo je teško identifikovati π^0 u to vreme, ali se mogao opaziti njegov način raspada $\pi^0 \rightarrow e^+ + e^- + \gamma$, koji predstavlja najverovatniju šemu.

3/ $K_{T_2}^+ \rightarrow \pi^+ + \eta^0$ nazvan takođe χ , potvrđen od grupe M.I.T. pomoći njegovog monoenergetskog γ i fotona iz raspada π^0 ili parova $e^- - e^+$.

4/ $K_{\pi_3}^+ \rightarrow \pi^+ + \eta^\circ + \eta^\circ$ ili Σ' , koju je predvideo Dalic /Dalitz/ a otkrila grupa Ročestera.

5/ $K_{\mu_2}^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$ otkrila je grupa Politehničke škole u sredini Vilsonove komore a potvrdila grupa M.I.T.

6/ $K_{\mu_2}^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$ nadjen u Bristolu zahvaljujući njegovom elektronu /90 MeV / c /; njegov način raspada je utvrđen mnogo kasnije.

Precizna merenja ostvarena pomoću akceleratora pokazavaju da sve čestice K^+ imaju istu masu, srednji život a različiti načine raspada.

b/ Neutralni kaoni / K^0 /

Kao za K^+ , proučavanje V_1^0 ili K^0 pokazalo je da oni poseduju razne raspada a posebno:

1/ $K_{\pi_2}^0 \rightarrow \eta^+ + \eta^-$ ili 0° . Ovaj način se najlakše identificira prisustvom dve nanelektrisane čestice komplanarne sa tačkom produkcije K^0 .

2/ $K_{\pi_2}^0 \rightarrow \eta^+ + \eta^-$ ili 0° . Ovaj način je utvrđen pomoću akceleratora detekcijom parova $e^+ - e^-$ materijalizacije fotona koji potiču iz raspada η^0 .

3/ K^0 ili više sekundarnih čestica od kojih dve nanelektrisane. Ot prilične 10% V^0 koji se nalazi u kosmičkom zračenju ne odgovara šemama raspada V_1^0 i V_2^0 ; oni se nazivaju anormalnim. Priroda raspada tih čestica nije dobro poznata, ali vrednost energije raspada Q^0 je izgledala rasuta između 6 i 300 MeV; smatralo se da bi ovi dogadjaji mogli biti mešavina različitih načina raspada na veće čestice i uočeni su sukcesivno najprostiji načini: $K_{\pi_3} \rightarrow \eta^\pm + e^\mp + \nu$

$$K_{\mu_3}^0 \rightarrow \eta^\pm + \mu^\mp + \nu$$

$$K_{\pi_3}^- \rightarrow \eta^+ + \eta^- + \eta^\circ, \text{ itd.}$$

Pitanje neutralnih K -mezona ostalo je nerazjašnjeno još dugo vremena, naročito zbog malog broja anormalnih dogadjaja; izgledalo je naime da postoje dve vrste sa različitim raspadima ali ništa nije ukazivalo na to da se radi o dve različite čestice ili o različitim načinima raspada jedne iste čestice.

Ovaj problem je mogao biti rešen nekoliko godina kasnije, sahvaljujući jednoj smeloj hipotezi koju su izneli Gell - Man i Pais /Gell - Mann i Pais/ o osobini neutralnih čestica pomoću operacije konjugacije nanelektrisanja koja transformiše česticu u njenu antičesticu. Vratićemo se na ovu hipotezu i njene eksperimentalne posledice ; zadovoljimo se sada sa znanjem da je ona brilijantno dokazana eksperimentom koji je omogućio da se pokazuje postojanje dva neutralna kaona sa različitim srednjim životima i načinima raspada.

c/ Negativni kaoni/ K^- /

Piatnje K^- je bilo na početku isto tako delikatno kao i za K^+ , naročito zbog malog broja opaženih dogadjaja i njegove jake interakcije sa materijom /absorbcija/. Uprkos svemu, određeni broj načina raspada je mogao da se istakne:

- 1/ $K_{\pi_1}^- \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \gamma$, dokazan u tesetak slučajeva, od kojih 4 pomoću akceleratora. To je suprotan slučaj od Σ^+ , nazvan i Ξ^- , i iste mase.
- 2/ $K_{\pi_2}^- \rightarrow \bar{\nu} + \eta^0$, opažen u bevatronu u Berkeley-u, identifikovan direktnim merenjem njegove mase i pomoću zvezde zahvata negativnog piona; naziva se i Θ^- .
- 3/ $K_{\pi_3}^- \rightarrow e^- + ??$, od kojeg je samo jedan primer opažen dajući jedan dobro određen elektron.
- 4/ Nekoliko drugih dogadjaja opaženih u Wilsonovoj komori, ostavili su sumnju u postojanje drugih načina raspada / $K_{\mu_x}^-, K_{\mu_y}^-$ /.

Masa i srednji život ovih K^- su identični sa onima za K^+ , uprkos velikoj disperziji pojedinačnih numeričkih vrednosti momenta.

V HIPERONI / Y /

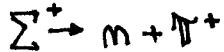
a/Pozitivni sigma hiperon / Σ^+ /

Prvi dogadjaj ovog tipa predstavile su na konferenciji u Banjereu / Bagnères/ grupe iz Ženeve i Milana koje su opazile u fotografskoj emulziji trag čestice mase $2330 \pm 800/m_e$, koja se zaustavila u emulziji i dala sekundarnu česticu sa priličnom energijom /sl.V.1/. Drugi slični dogadjaji bili su opaženi sa sekundarnim česticama koje su identifikovane kao mono-energetski pioni ili protoni male energije /oko 19 MeV/.

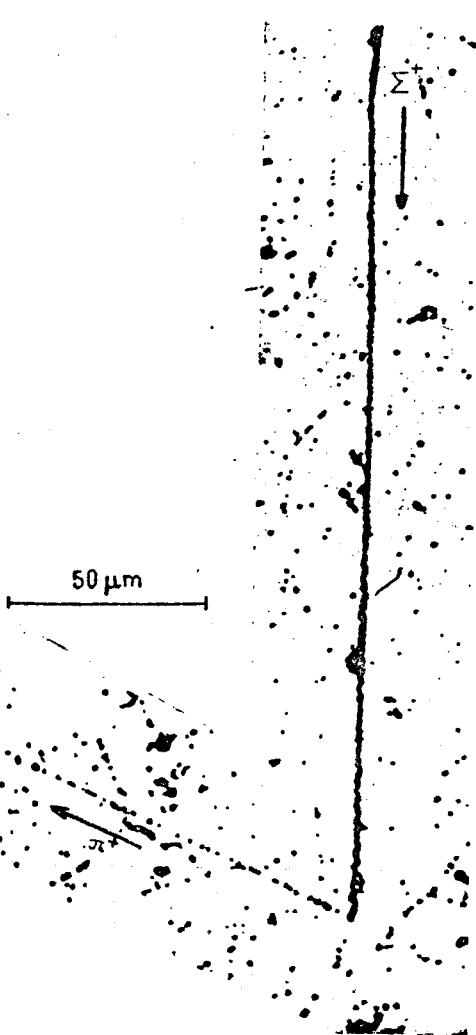
Dogadjaji sa protonom bili su dati raspadom:



a oni sa pionom, raspadom:



Ove dve šeme konačno su dokazane u brojnim slučajevima dobijenim pomoću akceleratora.



slika V.1

b/ Neutralni hiperoni

1 - Hiperon lambda-nula / Λ^0 /

Posle prvog otkrića V čestica, grupa iz Mančestera mogla je da istakne dva principijelna načina raspada V^0 :

$$V_1^o \rightarrow p + \pi^- \quad /V.1/$$

$$V_2^o \rightarrow \pi^+ + \pi^- \quad /V.2/$$

nazvanih respektivno i K ili O.

Proton iz raspada bio je lako identifikovan u 4 slučaja. Jedan drugi digadjaj bio je opažen u emulzijama i 4 druga u Vilsonovoj komori od strane Tomsona /Thompson/ i njegovi saradnika.

Šema /V.1/ bila je više puta dokazana procenom masa sekundarnih čestica i komplanarnošću sekundarnih sa tačkom uzetom za nastanak V^o ; vrednost Q raspada bila je jedinstvene i bliska 37 MeV /u 50 slučajeva dobijenih u Padovi, 1954.g./ Masa i srednji život su mogli biti određivani sa dosta velikom preciznošću.

Drugi način raspada:

$$\Lambda^o \rightarrow n + \pi^o$$

otkiven je detekcijom fotona iz raspada π^o , čiji spektar nije bio u saglasnosti sa načinom:

$$\Lambda^o \rightarrow n + \gamma$$

Napomenimo samo da ne postoji naelektrisana čestica sa istim osobinama kao Λ^o .

2 • Hiperon sigma - nula / Σ^o /

Predviđeli su ga taorijski Gel - Man i Nikišima /Nishijama/ i ovaj hiperon je trebao da se raspada brzo na sledeći način:

$$\Sigma^o \rightarrow \Lambda^o + \gamma$$

znači na dve neutralne čestice, koje se teško mogu identifikovati. To je razlog zbog kojeg je bio otkriven tek pomoću akceleratora, zahvaljujući reakciji udružene produkcije:

$$\pi^- + p \rightarrow \Sigma^o + \Lambda^o \quad /V.3/$$

/sl.V.2/. Može da se analizira kompletan ova reakcija.

U vodoničnoj mehurastoj komori, mogao se opaziti raspad Σ^+ , dobiten iz:

$$\Sigma^- + p \rightarrow \Sigma^o + n$$

$$\downarrow \rightarrow \Lambda^o + \gamma$$

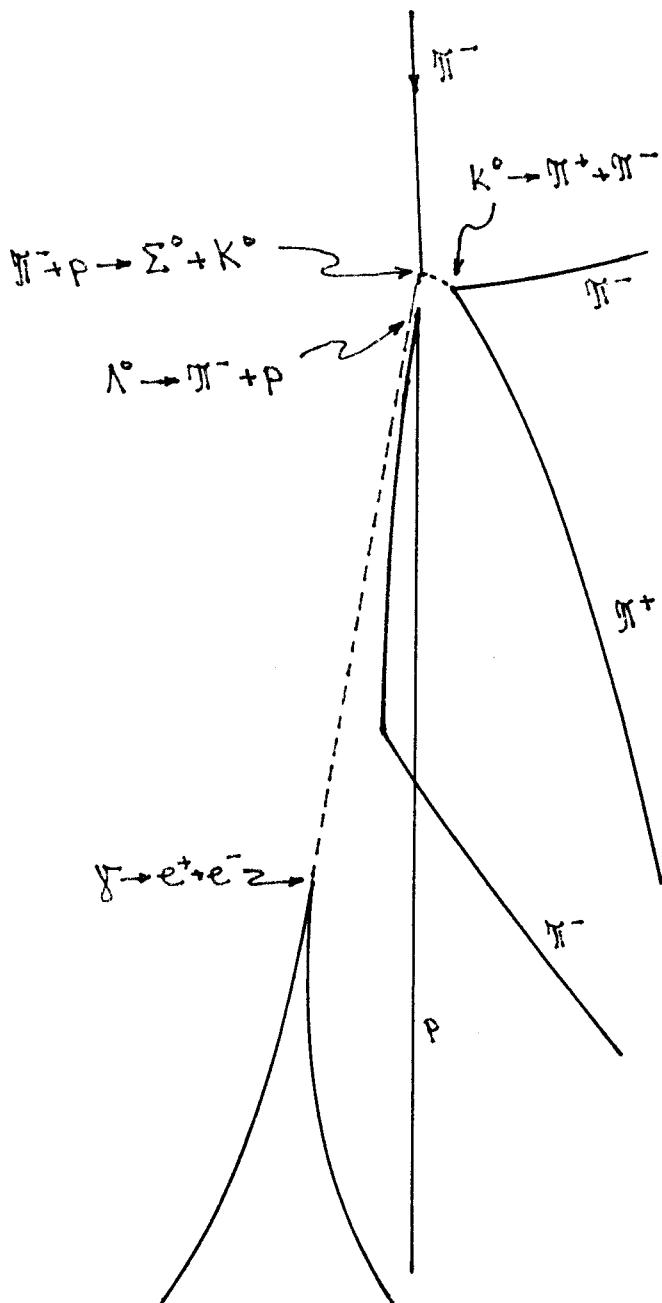
dok je lanac /V.3/ mogao da se opazi u mehurastoj komori sa teškom tečnošću. U Brookhaven-u je opažen jedan izuzetan događaj na osnovu reakcije /V.3/, kojeg je pratilo žanac:

$$\Sigma^o \rightarrow \Lambda^o + \gamma$$

$$\downarrow \rightarrow e^+ + e^-$$

$$i \quad K_2^+ \rightarrow \pi^\pm + \mu^\mp (e^\mp) + \nu$$

gde se K^0 raspadao u tri čestice.



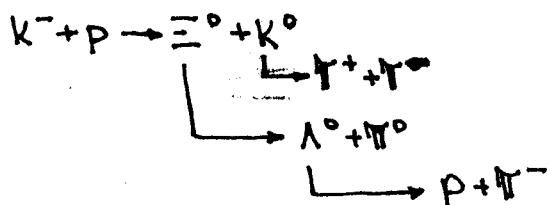
slika V.2

3 - Hiperon ksi + nula / Ξ^0 /

Na Medjunarodnoj konferenciji/Ženeva 1958./ grupa Pik de midi /Pic de Midi/ iz Politehničke škole prikazala je fotografiju koja je mogla predstavljati raspada jednog neutralnog hiperona:



na dve druge neutranle čestice. Narednih godina je grupa iz Berkeley-a dala definitivnu potvrdu postojanja jedne takve čestice, zahvaljujući reakciji:



Do 1959. je samo jedan takav dogadjaj bio poznat. Važno je pomenuti da je postojanje ove čestice bilo predviđeno pre toga.

c/ Negativni hiperoni

1 - Hiperon sigma - minus / Σ^- /

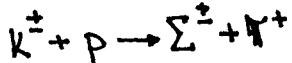
Medju hiperonima Σ^+ , postojao je i jedan negativan, čiji sekundarni pion se zaustavlja u emulziji dajući interakciju, koja je pokazala da se radi o negativnom pionu; sugerisano je postojanje jednog sigma - negativnog hiperona:



Mnogi drugi primeri nadjeni su pomoću akceleratora, u kojima su proizvedeni reakcijom:



ili preko:

2 - Hiperon ksi - minus / Ξ^- /

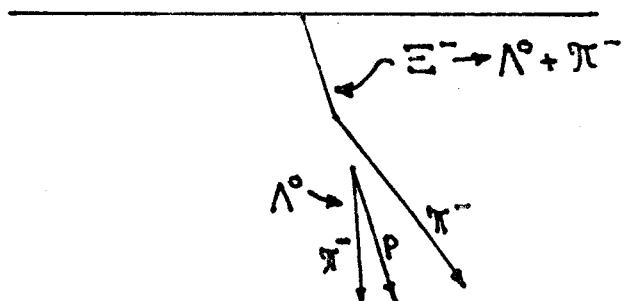
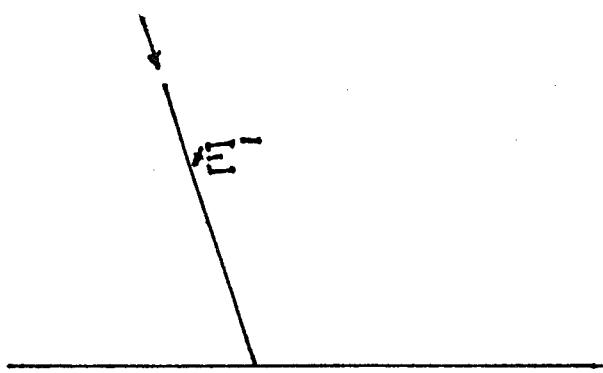
Godine 1952. grupa iz Mančestera signalizirala je postojanje jedne nestabilne negativne čestice, koja se raspadala na jedan V^0 i jedan laki negativan mezon niske energije /sl.V.3/. Pravac leta V^0 je polazio od tačke raspada primarne čestice, ali je bilo teško reći da se sigurno radi o Λ^0 . Na osnovu ove hipoteze, masa primarne čestice ocenjena je na /2500-2800/ m_e .

Dvanajstak primera je nadjeno što je dokazalo šemu raspada:

$$\Xi^- \rightarrow \Lambda^0 + \bar{\Gamma}^-$$

i odredilo masu i srednji život ove čestice.

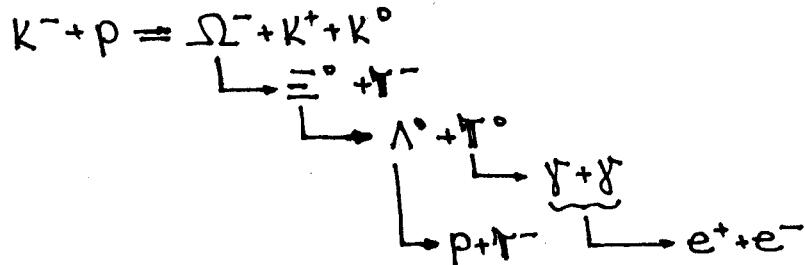
Napomenimo da do sada nije nadjena pozitivnaksi čestica.



slika V.3

3 - Hiperon omega - minus / Ω^- /

Ovo ime je predložio 1956. Gel - Man za negativni hiperon sa stranošču -3, sugerisan šemom "multipleta naboja" i koji se pre raspada na jedan ksi i jedan pion nego na jedan gama kvant. Otkriven je deset godina kasnije u Brookhaven-u reakcijom:



To je bio jedini hiperon otkriven pomoću akceleratora, a da ni jedan dogadjaj nije nadjen u kosmičkom zračenju 1954. metodom fotografske emulzije.

VI PROBLEMI I PARADOKSI

Otkriće velikog broja kaona i hiperona u toku kratkog vremena stvorilo je u fizici čestica jednu sasvim novu situaciju. Potreba za jednom klasifikacijom čestica sve se više osećala. S druge strane, nove čestice su pokazale određeni broj dosta čudnih osobina koje su se međusobno teško usaglašavale; njihova frekvencija je pokazivala da su one stvorene u velikom broju/dakle sa velikim efikasnim presekom/u nukleon-nukleonskim i pion-nukleonskim sudarima, međutim njihov srednji život / $>10^{-10}$ s/ je bio jako dugačak u odnosu na "nuklearno vreme" od 10^{-23} s, koje je jednoj relativističkoj čestici potrebno da prodje kroz jezgro.

Drugo, izgledalo je sigurno da postoji određena asimetrija između različitih neutralnih i nanelektrisanih V čestica, prve su bile brojnije od drugih. Osig toga, u nekim izolovanim slučajevima, dve V čestice su izgledale da potiču od iste interakcije, inače se identifikacija uzimala sa sigurnošću. Najzad ostale teškoće su se pojavile u vezi sa česticama Θ i Σ na koje ćemo se vratiti.

VI - 1 . UDRUŽENA PRODUKCIJAT I HIJERARHIJA INTREAKCIJA

U ovoj situaciji a u toku 1951., mnogi teoretičari su izneli svoje hipoteze za koje je M.G.K. Menon predložio naziv udružena produkcija. Prema Paiju ovde je trebao da obuhvati dve vrste V čestica /sa nabojem i neutralne/, s jedne starne teške fermione/mnogo teže od nukleona/ a s druge b̄zone. Fermioni su trebali najbolje da se pokoravaju zakonu, koju je uopštio Openhejmer / Oppenheimer/, konzervacije bariona/broj bariona-broj antibariona/.

Uprkos otsutnosti svakog sigurnog dogadjaja produkcije V čestica, Pai je predložio da : 1. V čestice se proizvode u parovima sa nekom teškom nestabilnom česticom i 2. sparivanja /vezivanja/ među različitim poznatim česticama su dvojaka, jaka i slaba, prvo je bilo odgovorno za mnogobrojnu produkciju V čestica a drugo daje broj sporih raspada ovih čestica.

Prvi primer udružene produkcije dobijen je u Brookhaven-u a mnogi drugi su ga ubrzo sledili/1952-1956/.

Postalo je neophodno da se utvrdi hierarhija interakcija od kojih razlikujemo četri vrste:

1/ Jaka interakcija - odgovorna za nuklearne sile, koja održava zajedno nukleone u jezgrima i koja prema tome odgovara za stabilnost materije; jeko ograničenog područja dejstva /reda 10^{-13} cm/, ali jednog jako velikog intenziteta, ona rukovodi fenomenima koji se dešavaju pri koliziji čestica koje ovde učestvuju/pioni, nukleoni, kaoni, hiperoni/ koje su nazvane, prema jednoj uspešnoj nomenklaturi koju je dao L. Okun, hadronima.

Nukleoni i hiperoni kao druge teške čestice dobili su zajedničko ime barioni/Pai i Gel-Man/, i dodeljen im je barionski broj +1; njihove antičestice nose berionski broj -1.

Nuklearna /jaka/ sila je najjača sila koja je poznata u prirodi.

2/ Elektromagnetna interakcija - otprilike 10^3 puta slabija od prethodne, upravlja velikom grupom elektromagnetskih fenomena i deluje na sve čestice koje poseduju naselektrisanje. Odgovorna je za veze izmedju atoma i molekula, i opada prema Kulonovom zakonu /sa $1/r^2$ /; ova interakcija se prenosi pomoću jedne neutralne čestice, fotona, nosiocem elektromagnetskog polja.

3/ Slaba interakcija - dometa manjeg od 10^{-14} cm je 10^{-11} puta slabija od jake interakcije. Ona upravlja fenomenima beta radioaktivnosti i raspada svih čestica sa jakom interakcijom /sa nekoliko izuzetaka/ i ona je odgovorna za čestice u potpunosti neosetljive na jake interakcije, koje su nazvane leptoni i nose leptonski broj; to su elektroni, mioni i neutrini. Ovi poslednji ne učestvuju ni u jednoj od prethodnih interakcija; oni su osjetljivina slabe interakcije.

Analogno sa ostalim interakcijama, teoretičari su uveli česticu koja je trebala da bude prenosnik slabe sile, intermedijarni bozon W, česticu koja je sve do sada izbegla eksperimentalne napore za detekciju; ostala je dakle hipotetična veličina.

4/ Gravitaciona interakcija - odgovorna za stabilnost svemira, potiče od Newtona /1666./, proporcionalna je mase i obrnuto proporcionalna kvadratu rastojanja i 10^{-39} puta je slabija od jake interakcije. Njeni uticaji na subatomsku oblast su zanemarljivi. Izgleda da se može objasniti pomoću gravitona, čestice nulte mase i spina 2, međutim čija detekcija je van granica sadašnjih eksperimenata.

Svakoj od tri interakcije koja nas interesuje, kako je elektromagnetnoj i slaboj, može da se pridruži jedno vreme interakcije reda 10^{-23} , 10^{-20} i 10^{-11} s respektivno.

Znatan napredak do sada je zabeležen u vezi slabih i elektromagnetskih interakcija i izgleda da bi u bliskoj budućnosti, nadsa Gel-Man-a da se sve interakcije svedu u jedan jedinstveni okvir mogla biti ostvarena.

VI - 2 KOMPLEKS $K^{\circ}\bar{K}^{\circ}$ I OPERACIJA KONJUGACIJE NABOJA

Otkriće V čestica dovelo je do pojave mnogobrojnih problema. Iznećemo neke teškoće koje se tiču neutralnih K čestica. Kao što smo videli, izgledalo je da postoji K° sa kratkim srednjim životom/reda 10^{-10} s / koji se raspada na dva piona i ostale, nazvane nenormalnim, koje se raspadaju na tri ili više čestica čiji srednji život nije bio tačno određen.

Godine 1953., Gel-Man je, pri postuliranju principa invarijantnosti na operaciju konjugacije naboja, koja transformiše česticu u njenu antičesticu, ukazao na intresantnu mogućnost u slučaju neutralnih čestica, prema kojoj antičestica može biti različita od čestice. Ovo je sigurno tačno za neutralne fermione /neutron je neminovno različit od antineutrona/, međutim pitanje izgleda drugačije za neutralne bozone: neutralni pion i foton očigledno su identični svojim antičesticama, ali ne postoji razlog da se pretpostavi da je ovo pravilo opšte; moguće je da postoje neutralni bozoni koji se razlikuju od svojih antičestica. Takav bi bio, na pr., slučaj sa K° .

Pitanje su ponovo razmatrali Gel-Man i Pais, koji su mogli da utvrde da, ako je neidentičnost čestice i antičestice osigurana za barione zakonom konzervacije barionskog broja, nepostoji nijedan razlog za isključenje postojanja antibozona

različitih od odgovarajućih bozona, jer u ovom slučaju, nepostoji zakon zabrane sličan onom za barione.

Tako se dakle raspada:

$$K^0 = \pi^+ + \pi^-$$

odigrava posredstvom slabe interakcije, u odsustvu zakona zabrane koji zabranjuje proces konjugacije naboja:

$$\bar{K}^0 = \pi^+ + \pi^-$$

trebao je biti takođe moguć, bar toliko koliko virtuelni proces, i trebao je dovesti do jednog dvopionskog stanja sa istim relativnim angуларним momentom i sa istom vrednošću kvantnog broja konjugacije naboja $C = /-1/$, sa $L=J=spin K=0$.

Slaba interakcija je dakle sposobna da proizvede virtuelne prelaze tipa:

$$K^0 \rightleftarrows \pi^+ + \pi^- \rightleftarrows \bar{K}^0$$

koji nisu mogući u slučaju neutrona-antineutrona.

U produkciji/jaka interakcija/ imamo dakle primarne /početne/ objekte K^0 i \bar{K}^0 , ali raspada je bolje opisan pomoću dva stanja K_1^0 i K_2^0 definisanih na sledeći način:

$$|K_1^0\rangle = (|K^0\rangle + |\bar{K}^0\rangle)/\sqrt{2}$$

$$|K_2^0\rangle = (|K^0\rangle - |\bar{K}^0\rangle)/\sqrt{2}$$

Ova dva nova stanja su sopstvena stanja operatora C , sa sopstvenom vrednošću $+1$ i -1 respektivno, i dovode do različitih šema raspada K_1^0 i K_2^0 , koje su prave čestice, sa različitim srednjim životima i eventualno različitim masama. Pojedinačno, samo K_1^0 može da se raspada na dva piona iste vrednosti $C=+1$; ovakav način je zabranjen za K_2^0 sa $C=-1$, ali se može raspasti na druge načine, kao na primer $3\pi, 2\pi + \gamma, \pi\eta$, itd.

Dakle čestice K^0 i \bar{K}^0 nisu prave čestice/nemaju jedinstveni srednji život/, nego mešavina /superpozicija stanja/ K_1^0 i K_2^0 koje su prave čestice, sa različitim srednjim životima. Samo plovina K^0 /ali ne više/ može da se raspada na dva piona.

Eksperiment sa mehurastom komorom/Brookhaven/punjenom propanom pokazao je da se 49% od svih K^0 produkovanih u reakciji:

$$\pi^- + p = \Lambda^0 + K^0$$

raspada na dva piona i nijedan K_1^0 nije primećen. Ista grupa je pronašla jedan K_1^0 , koji se raspao na udaljenosti koja odgovara 10 srednjih života K_1^0 .

VII JAKE INTERAKCIJE

VII - 1. EFIKASNI PRESEK

Ponovimo sada neke definicije. Razmotrimo u tu svrhu snop monoenergetskih čestica iste vrste preseka 1cm^2 od kojih određeni broj n prolazi u jedinici vremena ;neka prodju kroz metu preseka 1cm^2 bezkonačno male debljine dx i koja sadrži N difuzionih centara / jezgara/ pm cm^3 , od kojih svaki predstavlja jedan presek σcm^2 ; broj čestica iz snopa, koji ulazi u interakciju sa jezgrima mete /kolizijom/ u odnosu na broj čestica koje padaju na metu, dat je formulom:

$$-dn/n = \sigma N dx$$

veličina σ ima dimenzije površine/ cm^2 /, odakle potiče njegovo ime efikasni presek; on predstavlja verovatnoću kojom se proces može odigrati.

Efikasni presek za sve moguće procese predstavlja totalni efikasno presek i jednak je zbiru pojedinačnih efikasnih preseka raznih procesa/elastičnih i neelastičnih/.

Druga važna veličina je diferencijalni efikasni presek za jedan odredjeni proces/reakciju/, data brojem izlaznih čestica obuhavćenih uglom $d\Omega$ oko pravca θ u odnosu na osu snopa:

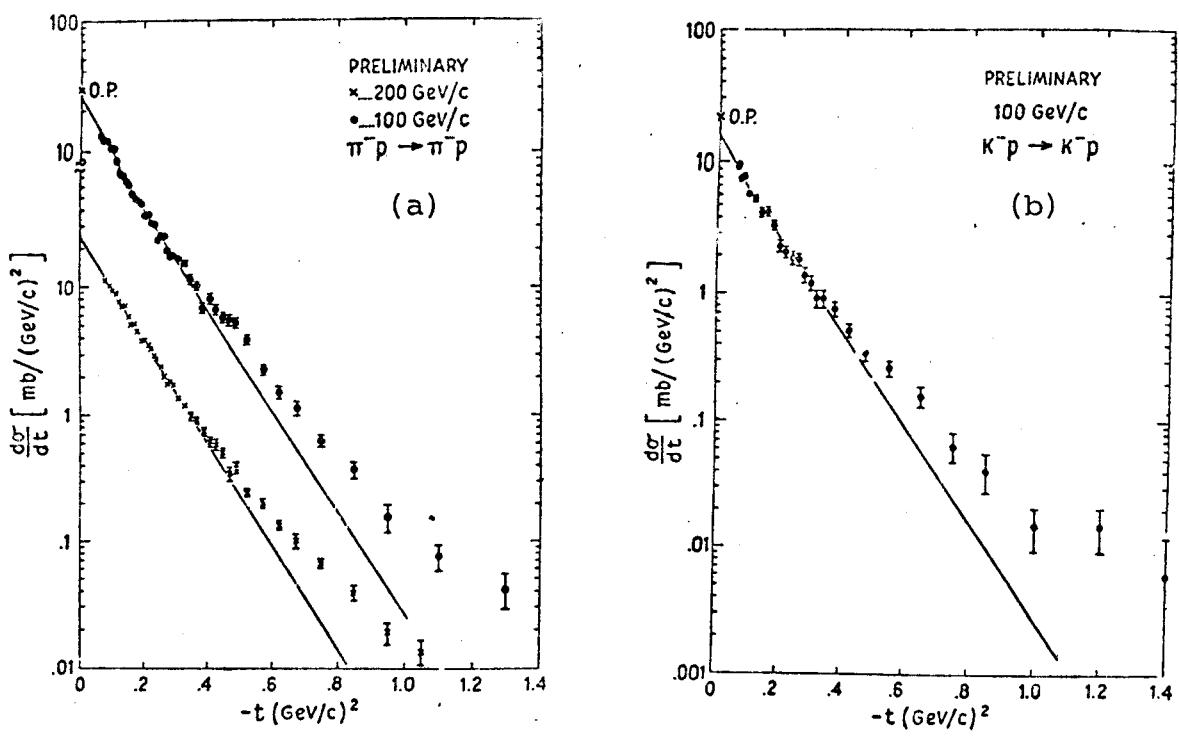
$$d\sigma/d\Omega$$

Suprotно onom što se pre verovalo, elastični diferencijalni efikasni presek ne pokorava se eksponencijalnom zakonu po t prema kojem je za manje vrednosti t jednaka $0,3/\text{GeV}/c^2$; on izgleda suprotno/sl.VII.1/ kao eksponencijal za male t i opada kontinualno sa t.

Za elastične diferencijalne preseke, pada u oči da eksperimentalni rezultati za male vrednosti t/izmedju 0,1 i $0,4/\text{GeV}/c^2$ / zadovoljavaju eksponencijalnu formulu oblika:

$$d\sigma/dt \propto \exp(-bt)$$

b u eksponentu je praktično konstanta, nezavisana od energije, za elastično pion-protonsko rasejanje, dok opisuje lagani porast za proton-protonsko rasejanje/porast od 10% izmedju 20 i 2000 GeV^2 .

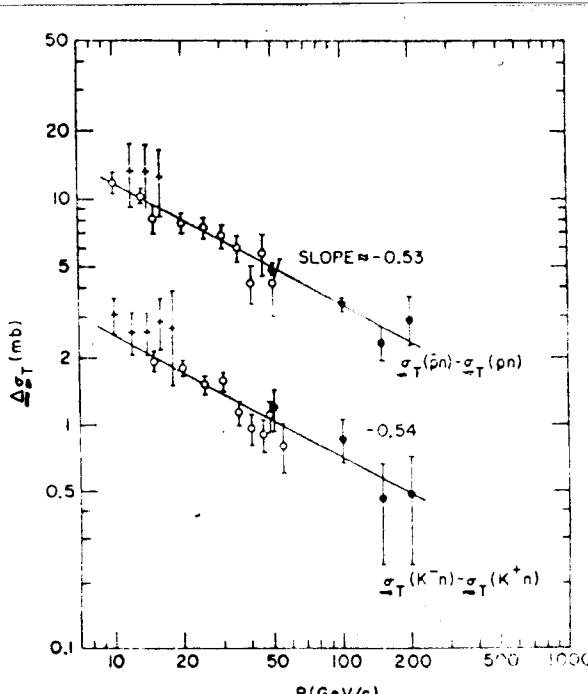


/a/

/b/

slika VII.1

Ako izuzmemo oblasti niskih energija/c - 3 GeV/c/ vidi se da totalni efikasni preseci opadaju na višim energijama i obrazuju plato oko 30 GeV /konstantan efikasni presek/. Slika VII.2 pokazuje razlike izmedju totalnih efikasnih preseka čestice - antičestice za dve proučavane reakcije do 200 GeV/c; vidi se da odredjene razlike postoje i da se efikasni preseci smanjuju po eksponencijalnom zakonu kad energija raste.



slika VII. 2

Zavisnost od energije koja je prikazana na slici VII.3 pokazuje činjenicu da neelastični efikasni presek raste sa energijom, dok elastični efikasni presek koji ima veliku vrednost za niske energije opada, a zatim ponovo raste. Zanemo da je ova razlika izmedju efikasnih preseka 10%. Mnogi modeli su predlagani za uklanjanje ovih razlika, ali u ovom trenutku situacija nije potpuno jasna.

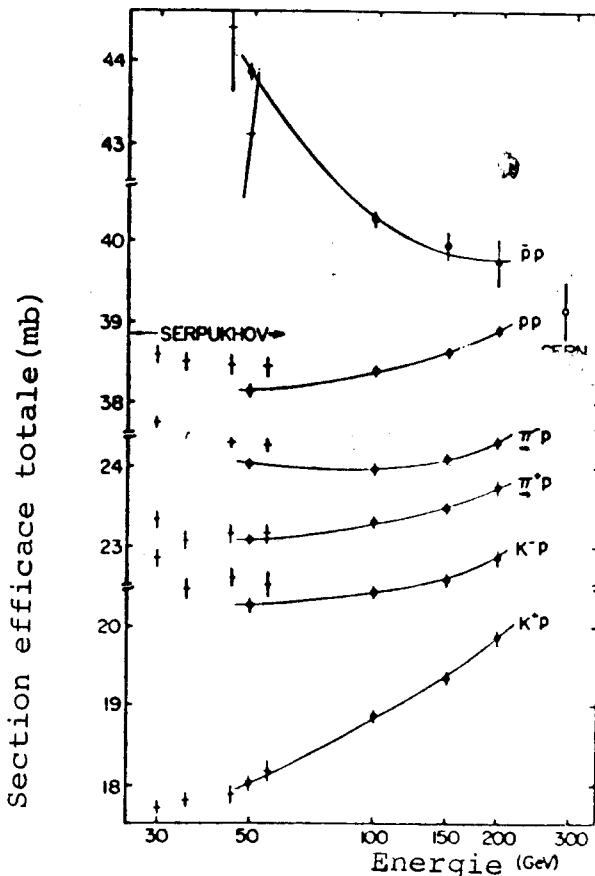
Veliko iznenadjenje u radu ISR-a u Cernu bilo je otkriće osobine ~~iznenadjuće~~ pri p-p koliziji na visokim energijama na kojima se zasniva dobijanje čestica emitovanih pri velikom uglu sa jednom velikom komponentom transverznog momenta p_t . Dugo vremena se zna da pri ovom efektu na niskim energijama/1-10 GeV/ transverzni moment čestica se smanjuje eksponencijalno a njena srednja vrednost iznosi približno:

$$\langle p_t \rangle = 0,33 \text{ GeV/c}$$

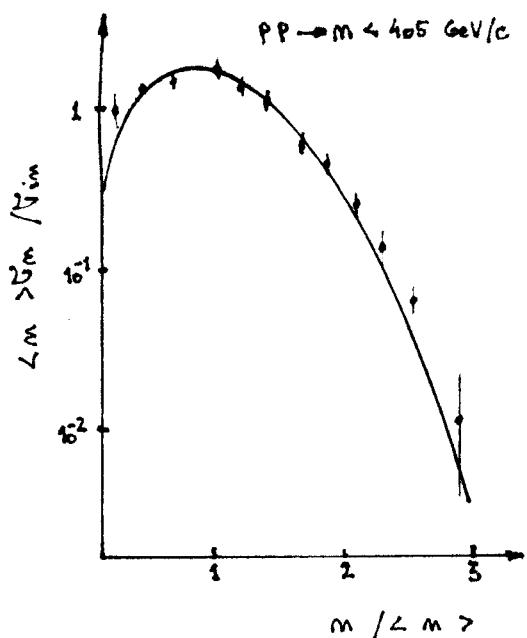
dakle iskustva ISR-a pokazala su da postoji mali broj čestica sa veoma velikim transverznim momentima koji mogu dostići vrednosti 3 - 5 GeV/c. Suprotno ovako velikim p_t , kod piona obično preovladavaju mali p_t , gubeći svoj karakter i postoji višak pozitivnih piona u odnosu na negativne/ $\sim 40\%$.

Ovaj fenomen je važan jer izgleda ulazi u unutrašnju strukturu nukleona/model partona/.

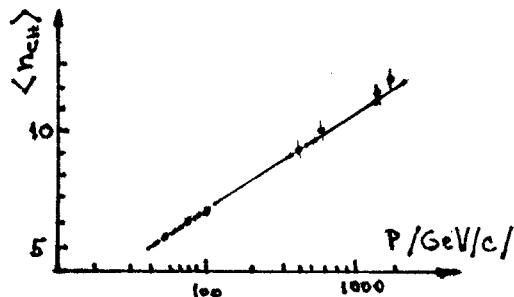
Veliki broj čestica sekundarno dobijenih prilikom kolizije izmedju hadrona pri velikim energijama bili su objekat velikog broja istraživanja. Jedan od opštih načina dobijanja čestica raste sa energijom; slika VII.4 pokazuje, na primer, da umnožavanje



slika VII. 3



slika VII.4



slika VII.5

naelektrisanih čestica raste linearne sa logaritamskom funkcijom impulsa upadnih čestica vrednosti izmedju 50 i 400 GeV/c i isto je za neutralne čestice. Slika VII.5 pokazuje distribuciju odnosa totalnog mutipliciteta prema srednjem mutiplicitetu za p-p koliziju pri 405 GeV/c; kriva crtana na osnovu tajaka dobijenih eksperimentalno je kriva računata po hipotezi po kojoj ovaj odnos dostiže jednu granicu nazvanu invarijantnost skale, prema kojoj ovaj odnos teži ka jednoj konstantnoj vrednosti nezavisnoj od energije.

VII - 2. REZONANCIJE

Sve do sada smo zanemarili, pri proučavanju efikasnih preseka, domen osnovnih energija niže od 3 GeV/; ovde ćemo da se vratimo na to da bi ukazali na jednu novu oblast fenomena koji se manifestuju naročito u ovoj oblasti a koji su kao rezultat imali otkriće velikog broja novih čestica, izvanredno nestabilnih i takođe mnogobrojnih.

Godine 1950., pod vodjstvom Fermija vršen je veliki broj eksperimenata u Čikagu i Kolumbijsi za merenje efikasnog preseka pion-nukleonske interakcije u funkciji od energije upadnih piona, međutim u to vreme energije piona su bile strogo ograničene/ 135 MeV za pozitivne pione i ~ 200 MeV za negativne pione/;

sa druge strane još se nije raspolagalo sa metom od čistog vodonika.I pored ovih teškoća prva iskustva Fernija su evidentirala suštinsku činjenicu da totalni efikasni presek $\gamma^+ - p$ raste sa energijom,fenomen koji je Fermi pripisao pojavi vezivanja $\pi^- p$ odgovornom za pion-nukleonsku interakciju.
Prvi pokušaj objašnjenja ovih rezultata odmah je predložio Brukner /Brueckner/ korišćenjem pojma nukleonske izobare/ izotopskog spina $I=3/2$ i angулarnog momenta $J=3/2$, pseudo-skalarnom teorijom jakog vezivanja Paulija i Dankofa /Dancof/.

Posle nekoliko godina napornih istraživanja,rezultate koje su sakupili istraživači u Čikašu analizirao je Fermi koji je došao do objašnjenja velikom defasažom $I=J=3/2$ koja ne prolazi kroz rezonanciju.Ispitivanje efikasnih preseka na 150 do 750 MeV pokazalo je postojanje jednog dobro izraženog pika,koji brzo opada posle 200 MeV,i koji nagoveštava jedan oblik efikasnog preseka rezonantnog tipa,jer se on izgleda dobro slaže sa teorijskom vrednošću efikasnog preseka jedne rezonancije $I=J=3/2$ za maksimum pika od $2\lambda^2/\pi$.

Poboljšanje snopa /brzo smanjivanje kontaminacije miona i dobra srednja rezolucija energije/ i konstrukcija mete od čistog vodonika/tečnog/ dovelo je do preciznijih merenja u oblasti rezonancija i do analiza defazovanja Bethea i saradnika koji su smatrali da je jedna rezonancija najbolje rešenog problema.

Ova prva rezonancija dobijena je na mestu piona sa energijom od 195 MeV,pripisana joj je masa sistema / $\pi^- p$ /od 1236MeV i nazvana je Delta.

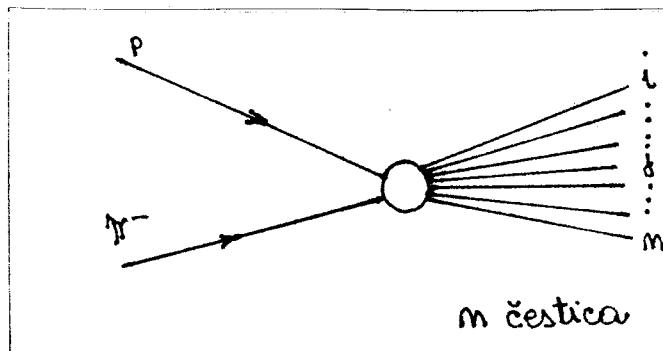
Sistematsko istraživanje oblasti efikasnih preseka na energijama nižim od 3 GeV,pokazalo je da postoji čitava jedna serija drugih rezonancija u pion-nukleonskom sistemu,Medjutim u to vreme /1955./ jedina poznata rezonancija bila je Delta; ostali pikovi otkriveni su mnogo kasnije/na kraju 1960./.

Teoretičari su dugo razmišljali o prirodi pion-nukleonske interakcije i nuklearnih sila,medjutim ona je ipak postala jasna oko 1960.godine pomoću jednog novog prilaza problemima prema kojem ih je trebalo izložiti eksperimentu.

Razni teoretičari su dokazali da se mnoge teškoće mogu prevazići postuliranjem postojanja vektorskih bozona, koji se raspadaju na dva ili više piona; eksperimentatori koji su ih prihvatili nisu tražili drugo nego da ovu hipotezu podvrgnu proveri.

Fejman /Feynman/ je posle dugog vremena predložio jedan prost račun da se efektivne mase ili invarijantne mase čestica grupišu dve po dve, tri po tri itd. Isto tako je Sakurai deset godina kasnije predložio računanje Q-a rakcije raspada jedne čestice na dve ili više drugih. Evo na čemu se zasniva ova metoda:

Posmatrajmo pion-protonsku interakciju za produkciju više čestica numerisanih od 1 do n/sl.VII.6/ ipretpostavimo



slika VII.6

da tehniku merenja zahvata istovremeno određivanje prirode i impulsa svake izlazne čestice; pretpostavimo još da i -ta i j čestica nisu u potpunosti nezavisne jedna od druge, ali su dobijene raspadom jedne druge čestice/rezonancije/mase M_{ij} , srednjeg života $\bar{\tau}$ koji je jako kratak/ $10^{-23} - 10^{-24}$ s/, sa impulsom p u trenutku produkcije. Jedna takva čestica sposobna je da predje u proseku rastojajinu $d = c\bar{\tau}\gamma$, prekratku za posmatranje/naime jedna $c\bar{\tau} = 2fm$ odgovara jednoj veličini mase čestice sa $\Gamma = h/2M\bar{\tau} \sim 100MeV$, dok je potrebno da put bude bar nekoliko milimetara za posmatranje čestice koja se raspadne/. Izračunajmo sada, sledeći predlog Fejmmana, efektivnu masu čestica i i j formulom:

$$M_{ij}^2 = /E_i + E_j/^2 - /p_i + p_j/^2$$

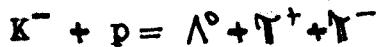
pošto su E i p merene vrednosti. Kad su čestice i i j nezavisne, ova distribucija mase ima oblik koji se može izračunati /fazni prostor/, međutim kad ove dve /ili tri, itd./ čestice ptiču od direktnog raspada jedne rezonancije i kada je eksperimentalna rezolucija dobra treba da se očekuje akumulacija

dogadjaja oko vrednosti mase rezonancije, akumulacija koja, za dobru rezoluciju/zanemarljive eksperimentalne greške/ treba da ima širinu direktno povezani sa srednjim životom rezonancije, preko četvrte Hajzenbergove/Heisenberg/relacije neodredjenosti.

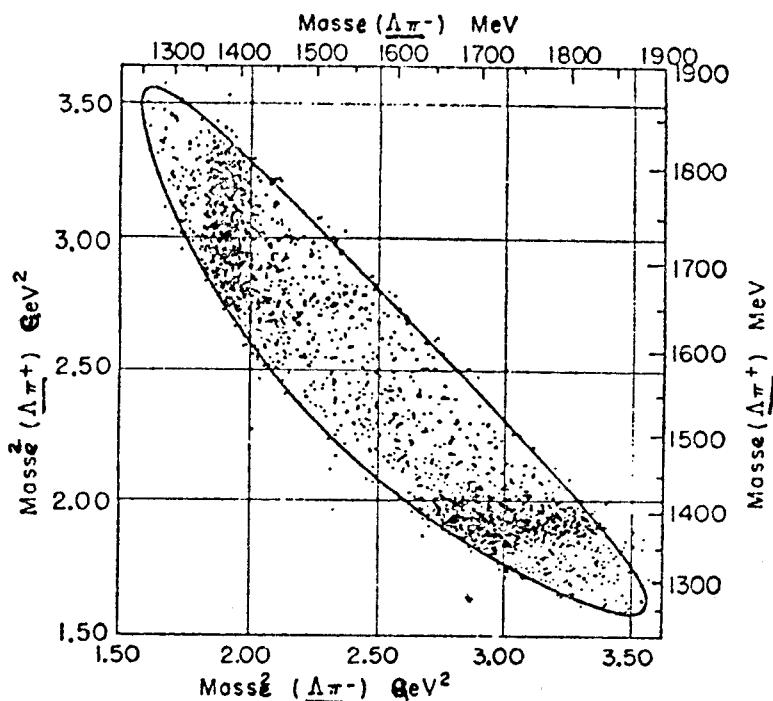
Postoje u principu dve metode istraživanja rezonancije, koje znamo:

- 1/ Metoda formacija koja se sastoji u sistematskom merenju totalnog efikasnog preseka od tačke do tačke u funkciji energije, pomoću dobro odredjene energije snopa; inače rizikuje da se ne vidi deo krive u okolini rezonancije, naročito kad je ona ovde uzana a rezolucija energije nije jako dobra.
- 2/ Metoda producije koja se sastoji od bombardovanja mete sncpom čestica i posmatranja onih koje izlaze. Meri se veliki broj dobro odredjenih dogadjaja i pomoću specijalnog programa omogućava proračunavanje različitog broja snimaka svake izlazne čestice i takodje jednog drugog programa izračunavanje efektivnih masa svih mogućih kombinacija ovih čestica dve po dve, tri po tri, itd.; umesto efektivnih masa mogu da se izračunavaju druge ekvivalentne veličine.

Prva rezonancija otkrivena ovom drugom metodom je jedna čudna barionska rezonancija, nazvana Υ^* , pronađena 1960. od strane Berkeley-a pomoću reakcije:

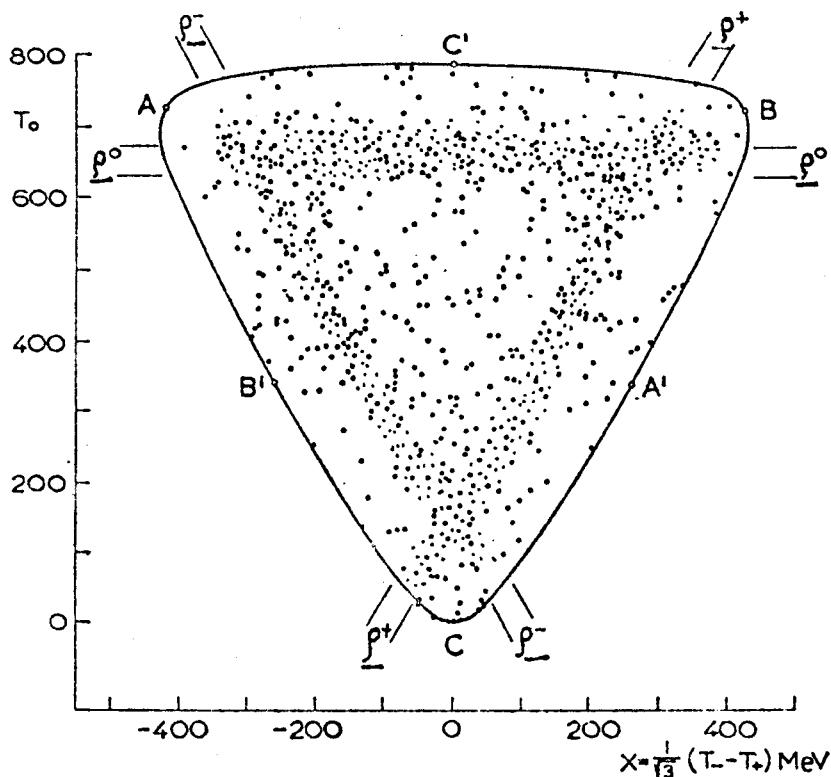


Nju je predviđao Gel-Man razmatranjem "globalne simetrije"/ista sila vezivanja za pion-barionski sistem/. Na osnovu tehnike, koju je uveo Dalic, uneseni su na jedan dvodimenzionalni dijagram kvadrati efektivnih masa $\Lambda\Upsilon^+$ i $\Lambda\Upsilon^-$ /sl.VII.7/; vidise jaka akumulacija dogadjaja u dve zone, jednu horizontalnu i jednu vertikalnu, iz kojih projekcije na odgovarajuće ose daju odmah kvadrate masa rezonancija i prema tome njihove mase kao njihove širine. Po novoj nomenklaturi ova rezonancija je dobila ime rezonancija Sigma/1385/, jer se, kao i sigma čestica, pojavljuje u obliku sa tripletnim izotopskim spinom. Njen srednji život, računat od njene širine, reda je veličine $0,6 \times 10^{-23}$ s; ona se dakle brzo



slika VII.7

dezintegriše. To je razlog zbog kojeg se stabilnim nazivaju čestice sa relativno dugim srednjim životom/ 10^{-6} - 10^{-10} s/ a nestabilnim rezonancije, čiji je srednji život mnogo kraći / 10^{-21} - 10^{-23} s/.



slika VII.8

Jedna druga rezonancija bozonske prirode otkrivena je malo kasnije, proučavanjem reakcija:

$$\pi^- + p = \Lambda + \pi^+ + \pi^-$$

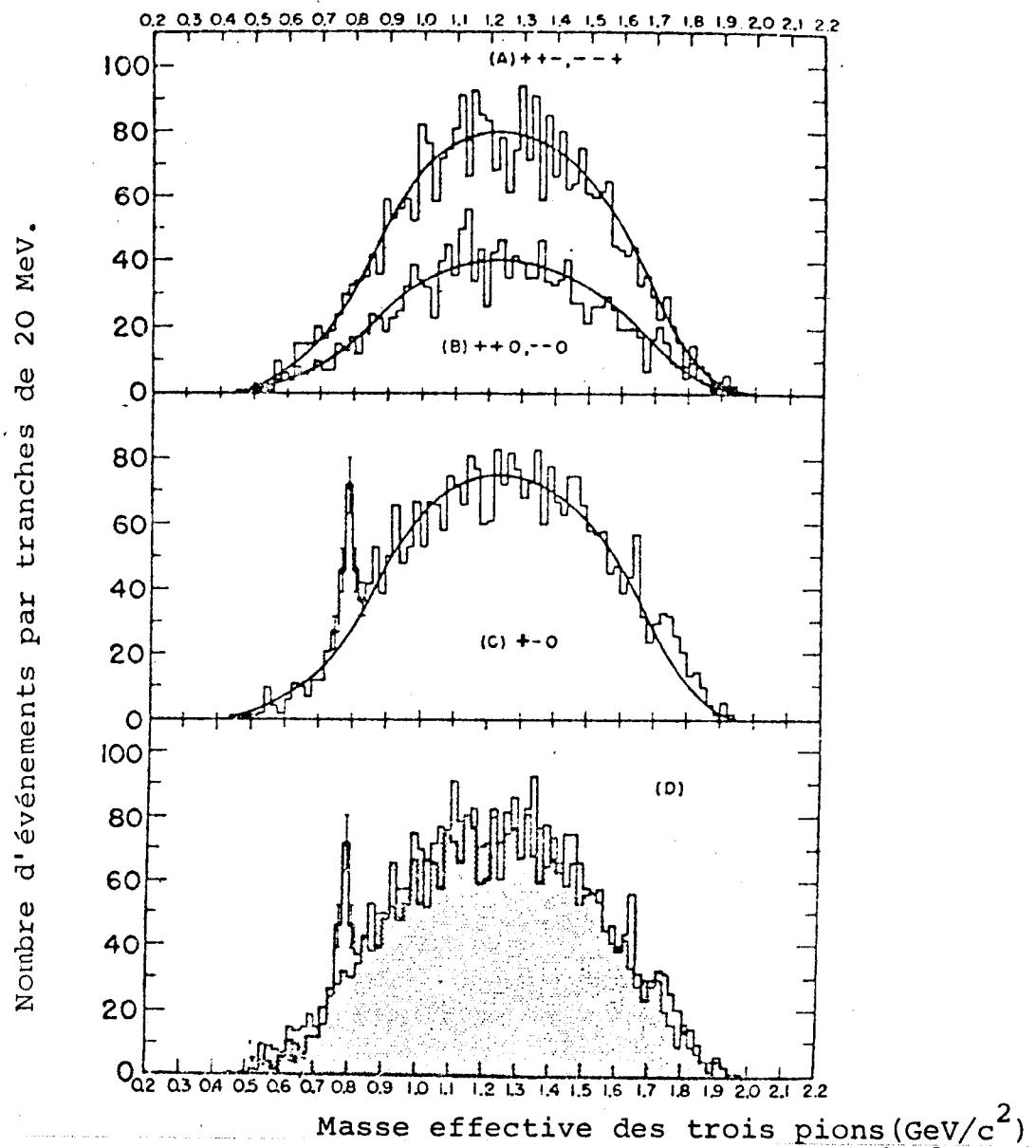
$$\pi^- + p = p + \pi^- + \pi^0$$

Mezon Λ se raspada na dva piona totalnog naboja +1, 0 ili -1. Slika VII.8 nije originalna koja odgovara ovom otkriću, nego je posebno pripremljena za uspešno posmatranje ova tri stanja naboja dobijena prilikom anihilacije antiprotona na sledeći način:

$$p + \bar{p} = \pi^+ + \pi^- + \pi^0$$

Interesantno je konstatovati da je postojanje jedne takve rezonancije medju pionima razmatrano od strane teoretičara mnogo pre njenog otkrića, bilo u vezi interpretacije ponašanja pion-nukleonskog totalnog efikasnog preseka, bilo u vezi sa elektromagnetskim form faktorom nukleona.

slika VII.9



Slika VII.9 je u vezi sa otkrićem neutralne pionske rezonancije koja se raspada na tri piona totalnog nanelektrisanja $\Omega^-/\pi^0\pi^+\pi^-$; dobijena je proučavanjem distribucije efektivne mase tri piona pri reakciji anihilacije:

$$p + \bar{p} = \pi^+ + \pi^+ + \pi^- + \pi^- + \pi^0$$

Kako postoji više mogućih kombinacija nanelektrisanja Q :

$$Q = \pm 1$$

4 kombinacije tipa A

$$Q = \pm 2$$

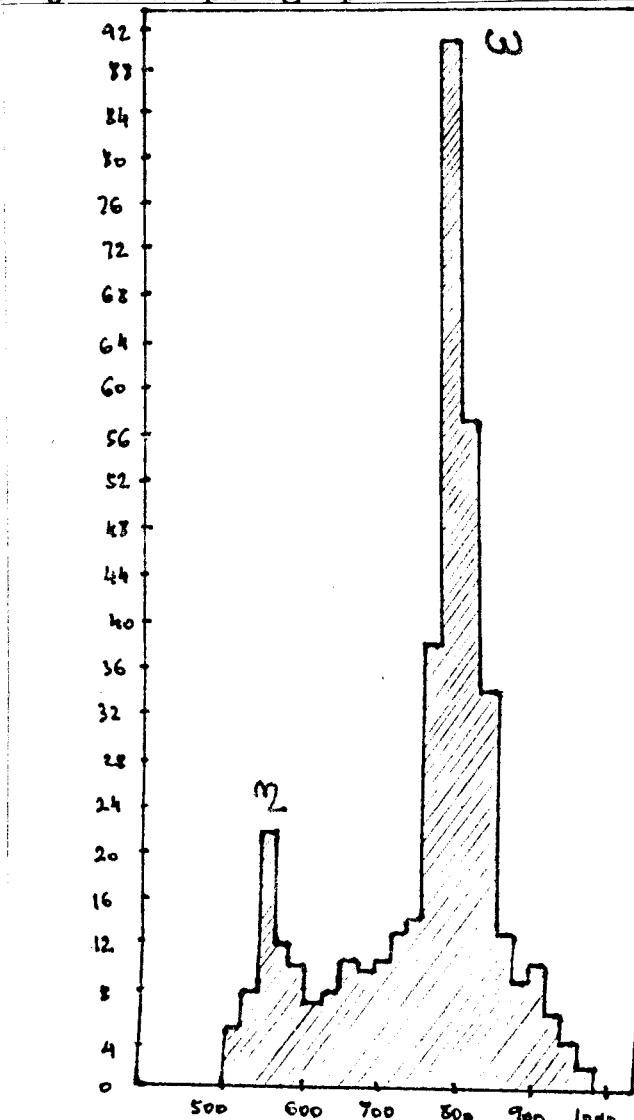
2 kombinacije tipa B

$$Q = 0$$

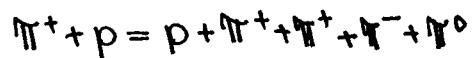
4 kombinacije tipa C

one su date na različitim graficima. Vidi se da kombinacije tipa A i B sude normalnu distribuciju/zvanu fazni prostor/, dok kombinacije tipa C imaju jedan uzan pik za vrednosti mase od 800 MeV. Treći grafik /D/ je jedna kombinacija /A - B/ uporedjena sa /C/. Grafik posebno ističe ulogu kontinualnog fona/fazni prostor/; naime samo 1/4 kombinacija/C/ može eventualno, ali ne uvek, formirati jednu Omega rezonanciju. Odsustvo rezonancije za kombinacije/A/ i /B/ ukazuje da je Omega singlet nelektrisanja izotopskog spina $I = 0$.

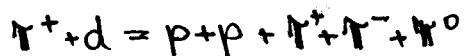
slika VII.10



Jasno je da jedna reakcija može slučajno dovesti do stvaranja više rezonancija odjedanput; takav je slučaj prikazan na slici VII.10, koji se slaže sa reakcijom:



gde se vidi istovremeno formiranje jedne ω i jedne η ; ova poslednja rezonancija η pronađena je pomoću reakcije:



i raspada se u elektrmagnetsnom raspadu na tri piona ili dva gama kvanta.

VIII ELEKTROMAGNETNA INTERAKCIJA I STRUKTURA NUKLEONA /Elektromagnetski form faktor/

Nešto posle teorije elektrona koju je formulisao Dirak, Mott je postavio teoriju difuzije brzih elektrona na jezgrima; uzimajući u obzir spin elektrona i u relativističkom slučaju / $v/c \sim 1,00$ /, Mott je dao difuzijonu formulu koja se nije razlikovala od one koju je dao Raderford osim za faktor $\cos^2 \frac{\theta}{2}$ i gjen autor je bio u potpunosti svestan da ona ne reprodukuje na zadovoljavajući način postojeće podatke o difuziji elektrona iz β - radioaktivnosti sa materijom. Mnogo godina kasnije, interakcija elektrona sa atomima, koju je predložio Guth kao uobičajeno ispitivanje atoma, pokazano je eksperimentalno i Rose je skrenuo pažnju na to da bi odredjena veličina jezgra mogla dovesti do odstupanja u odnosu na formulu Mott-a, kad je talasna dužina de Broglie-vih talasa elektrona reda veličine dimenzije jezgra, dajući tako mogućnosti određivanja oblika distribucije nanelektrisanja i veličine jezgara. Ovo je bio trenutak kad su, zahvaljujući novim akceleratorima, snopovi brzih elektrona postali raspoloživi. Kako je Rose pisao "jezgro mete nije moglo biti vidjeno kao tačkasti naboј, nego je trebalo biti predstavljeno raspodelom naboja u određenom opsegu, i oblik je mogao biti proučavan difuzijom elektrona koji se probijaju u unutrašnjost jezgra"; i dalje "sa hipotezom kulanove interakcije među nanelektrisanjima, moguće je da se eksplicitno odredi gustina nanelektrisanja u zavisnosti od nuklearnog form faktora posmatranog intenziteta difuzije."

Problem elektron-protonskog elastičnog rastojanja je obradivao Rozenblut /Rosenbluth/ koji je izrazio efikasnog preseka, uzimajući u obzir spin i magnetni moment. Formula Rosenbluta može da se izradi u obliku :

$$\frac{d\sigma/d\Omega}{(d\sigma/d\Omega)_{MOTT}} = F_1^2 + \frac{k^2}{4m^2} \frac{q^2}{C^2} (2(F_1^2 + kF_2^2) \tan^2(\theta/2) + k^2 F_2^2)$$

Prvi član ove formule predstavlja odnos efikasnog preseka koji je izračunao Rozenblut i onog koji se izračunao Mott za jedinično nanelektrisanje / tačkasté /; drugi član sadrži dva faktora,

F_1/q / koji je Dirakov form faktor koji opisuje Dirakovo n-a elektrisanje i magnetni moment protona, i F_2/q / koji je Pauliev form faktor, koji opisuje anomalni magnetni moment protona; konstanta $K=1,79$ je statička vrednost anomalnog magnetnog momenta/u nuklearnim magnetonima/. Ova dva form faktora su funkcije transfera/prenosa/ q energije-impulsa date sa :

$$q = \frac{2E/\hbar c / \sin^2\theta/2/}{\sqrt{1-2E/Mc^2 / \sin^2\theta/2/}}$$

gde je θ -ugao rasejanja, M- masa protona a E-energija.

Zatim se umesto faktora F_1 i F_2 koriste kombinacije:

$$G_e / q^2 / = F_1 / q^2 / - \gamma \mu F_2 / q^2 /$$

$$G_m / q^2 / = F_1 / q^2 / + \mu F_2 / q^2 /$$

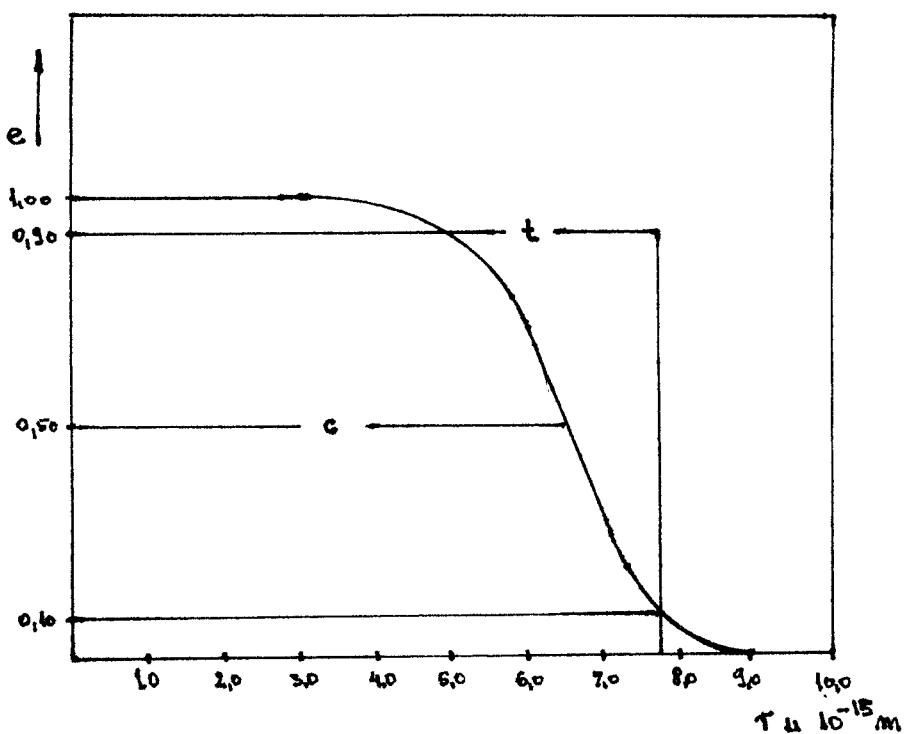
pri čemu je $\gamma = q^2/4M^2$ a $\mu = 1,793$ za proton i $\mu = -1,913$ za neutron. Ovo su respektivna električni i magnetni form faktori, čije statičke vrednosti su:

$$\left. \begin{array}{l} G_e / 0 / = 1,00 \\ G_m / 0 / = 2,793 \end{array} \right\} \text{za proton}; \quad \left. \begin{array}{l} G_e / 0 / = 0,00 \\ G_m / 0 / = -1,913 \end{array} \right\} \text{za neutron}$$

Prvi eksperimenti rasejanja elektrona na jezgru vršeni su tokom 1951. na univerzitetu u Illinois-u, sa elektronima od 15,7 MeV, kasnije, počev od 1953. u Stanfordu i Mičigenu, sa elektronima 10 puta veće energije/125-150MeV/. Dakle talasna dužina pridružena ovim elektronima je 12 - 13 fermija; nije dakle čudno što ovi prvi eksperimenti nisu dali podatke dovoljno precizne za istraživanje u dubini jezgra, čiji radius je dat klasičnom formulom:

$$R = r_0 A^{1/3} \text{ fm} \quad /VIII.1/$$

pri čemu je $r_0 = 1,40$. Kako su svi početni eksperimenti išli u prilog uniformne raspodele n-a elektrisanja u zapremini jezgra, eksperimenti u Mičigenu dali su jednu vrednost r_0 otprilike 20% manju od one date formulom /VIII.1/. Na mnogo višim energijama gustina n-a elektrisanja nije više mogla biti opisana samo pomoću parametra R. Minimum difrakcije omogućuje zaključivanje o raspodeli n-a elektrisanja u jezgru /sl.VIII.1/.



slika VIII.1

Ova raspodela nije uniformna i može biti opisana pomoću dva parametra:

- 1/ udaljenosti c centra od tačke u kojoj je gustina smanjena na polovinu i
- 2/ "širine sloja" t, za koju gustina opada sa 90% na 10% njene vrednosti:

$$c = 1,07 \text{ fm}^{\frac{1}{3}}$$

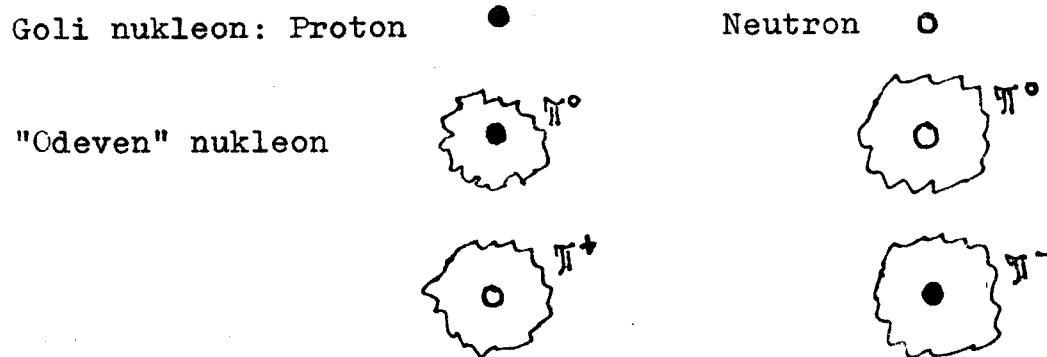
$$t = 2,4 \text{ fm}$$

Eksperiment Hofstadtera sa vodonikom, doveo je do srednjeg kvadrata radiusa protona od $1,07 \pm 0,08 \text{ fm}$.

U ovom periodu/1955./ jezgro se predstavilo dakle, sa aspekta elektrona, kao jedan skoro sferičan objekat okružen jednom vrstom "ljuske" konstantne debeljine, sa uniformnom gustinom mase /približno $0,8 \text{ nukleona/fm}^3$ / i promenljivom gustinom nanelektrisanja.

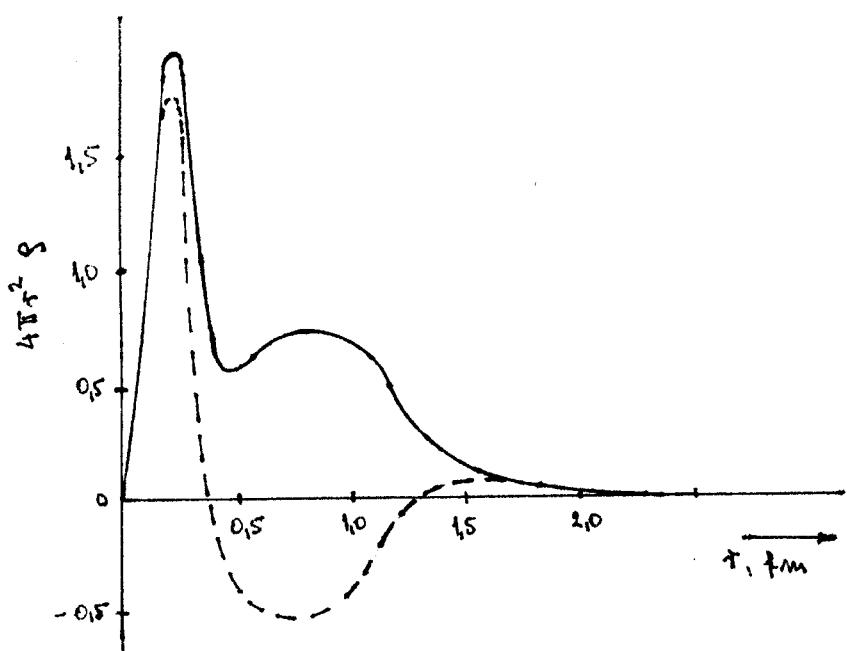
Vratimo se sada na sastojke jezgra, proton i neutron. Kako vidimo, prvi eksperimenti su dali osrednje rezultate zbor činjenice da je korišćena de Broglie-va talasna dužina elektrona bila mnogo veća od dimenzija nukleona. Proširivanje menja na energije od 200 - 550 MeV i na uglove difuzije od

$30^\circ - 135^\circ$, koje su vršili Hofstadter i njegovi saradnici, nije značajnije izmenilo prvobitne zaključke. U jednom članku časopisa autori su diskutovali eksperimentalne rezultate koje tiču jednog "fizčkog" nukleona, sastavljenog od golog nukleona okruženog pionima, koji ulaze u interakciju sa nukleonom tako da poštuju simetriju naelektrisanja/sli.VIII.2/.



slika VIII.2

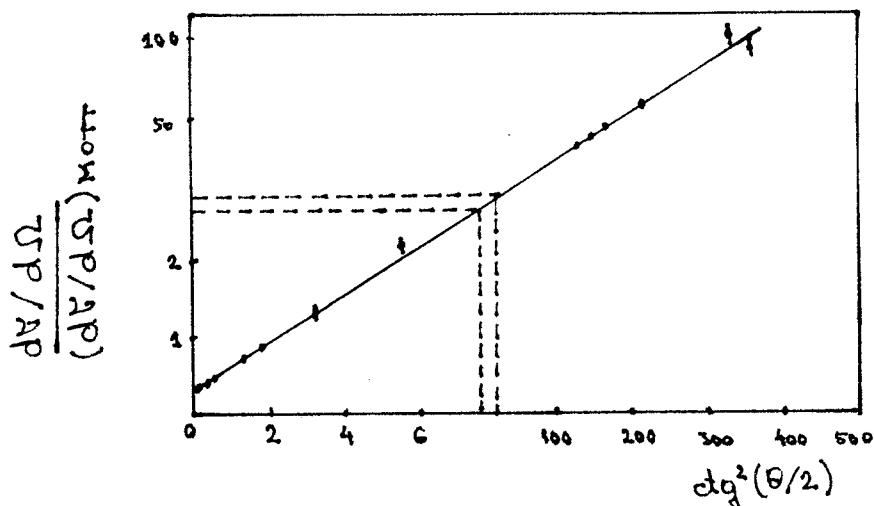
Teška sredina /jezgro/ radijusa od oko $0,2 \text{ fm}$, sadrži naelektrisanje od $\sim 0,35 \text{ e}$ i okružen je pionskim oblakom debeljine $\sim 0,8 \text{ fm}$ i naelektrisanja $\sim 0,5 \text{ e}$, eventualno pokrivenim jednim drugim pionskim oblakom od $\sim 1,4 \text{ fm}$ koji nosi naelektrisanje od $0,15 \text{ e}$.



slika VIII.3

Slika VIII.3 prikazuje mogući raspodelu nanelektrisanja nukleona u funkciji rastojanja od centra,vidi se naročito da je iznad 1,5 fm ova distribucija ista za proton i neutron,ali ovaj zadnji,koji ima nanelektrisanje jednako nuli,pokazuje na kratkom rastojanju nanelektrisanje koje se menja sa rastojanjem i čija je srednja vrednost jednaka nuli.

Ova vrsta eksperimenata nastavljena je tokom desetak godina u SAD sa energijama do $\sim 1,00$ GeV,ali od 1960.mnogo-brojne mašine /Kembriđ,Hamburg,Novosibirsk,.../stavljene su na raspolaganje fizičara sa snopovima sve viših i viših energija/1 - 6GeV/ a nova mašina u Stanfordu dostigla je 21 GeV. Nova serija eksperimenata je dakle započeta u cilju provere formule Rozenbluta i ekstrakcije elektromagnetskog form faktora nukleona.Slika VIII.4 pokazuje izuzetnu saglasnost eksperimenta sa formulom Rozenbluta.



slika VIII.4

Slični rezultati su dobijeni elastičnim rasejanjem miona.Oni su pokazali da se mion ponaša sasvim slično elektronu,to znači da je on jedan "težak elektron";to predstavlja nerešivu enigmu fizike miona.

Na osnovu Fejmanovog/R.Feynman/ dijagrama/sl.VIII.5/koji se zasniva na formuli Rozenbluta,jedna druga važna posledica teorije/u aproksimaciji samo jednog izmenjenog fotona/ je jednakost efikasnih preseka e^-p i e^+p /kao što je μ^-p i μ^+p /.

Najma relacije R odredjena sa:

$$R = (\bar{v}(e^+ p) - \bar{v}(e^- p)) / (\bar{v}(e^+ p) + \bar{v}(e^- p))$$

je u saglasnosti/jednaka/ sa nulom.

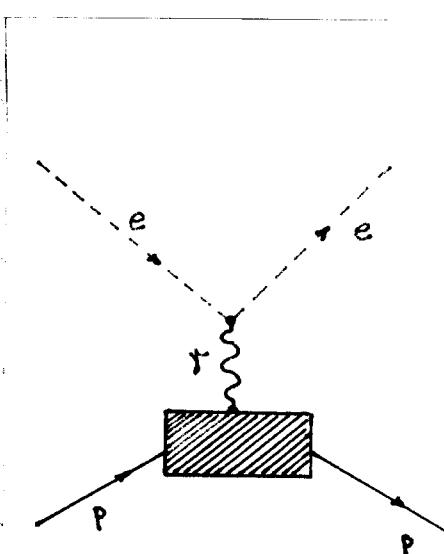
Rezultati sakupljeni tokom poslednjih godina pokazuju da pri dobroj aproksimaciji imamo:

$$G_e^p(q^2) \sim G_m^p \left(\frac{q^2}{\mu_p} \right) \sim G_m^m \left(\frac{q^2}{\mu_m} \right) \sim \sim 1 / \left(1 + \frac{q^2}{0.71} \right)^2$$

/VIII.2/

gde je q^2 izražen u GeV/c^2 a

$$G_e^n/q^2 \sim 0,0$$



slika VIII.5

Ipak poslednja relacija /VIII.2/ je jedna čisto empirijska relacija bez ijedne teorijske pretpostavke. Ove relacije su dobile ime "invarijantnost skale".

IX FIZIKA NEUTRINA

Prvi pokušaj direktnе detekcije antineutrina potiče iz 1953./govorilo se tada samo o neutrinu/, vremena u kojem su Reines i Cowan izneli proces:



Detektor je bio cilindar prečnika 75 cm i dužine 75 cm napunjen scintilacionom tečnošću/bogate vodonikom/ smešten u blizini reaktora/Hanfor/ u Los Alamosu i okružen parafinom i olovom. Fotomultiplikatori/90/su bili okrenuti ka cilindru radi registrovanja zakasnih kojincidencija koje su se razlikovale po impulsu koji potiče iz anihilacije pozitrona i onog koji potiče od radijativnog zahvata neutrona u scintilatoru naelektrisanim kadmiјumom. Naučnici su zaključili da su verovatno identifikovali slobodni neutrino/označen sa ν koji je u stvari antineutrino koji prati elektron pri β^- -radioaktivnosti/.

Ovaj čuveni eksperimenat, prvi koji je dokazao postojanje slobodnog antineutrina, ponovljen je 1958.da bi se odredio efikasni presek procesa/IX.1/, čija eksperimentalna vrednost od $/11,0 \pm 2,6 \times 10^{-44} \text{ cm}^2$ se izvrzano slaže sa vrednošću predviđenom dvokomponentnom teorijom neutrina.

Raspad neutrina ne treba da bude dakle predstavljen procesom:

$$n = p + e^- + \nu$$

nego:

$$n = p + e^- + \bar{\nu} \quad /IX.2/$$

relacijom koja predstavlja definiciju antineutrina/koja prati e^- ; neutrino je čestica koja je pratila e^- pri β^+ -radioaktivnosti.

IX - 1. NEODRŽANJE PARNOSTI I NAELEKTRISANJA

Tokom 1956.godine Li i Jang /T.D.Lee i C.N.Yang/su istakli mogućnost neodržanja parnosti pri slabim interakcijama. Na bazi neusaglašenosti kod θ i Σ načina raspada K^+ -mezona koja je ukazivala na postojanje različitih česticu kod iden-

tičnih kaona, zaključili su da parnost nije održana kod slabe interakcije. Masa i vreme života čestica koje se raspadaju na ova dva načina su isti, ali su pritom parnosti krajnjeg sistema različite. Oni su predložili eksperiment u cilju dokazivanja ove hipoteze.

Krajem iste godine, Wu je sa saradnicima izvela predloženi eksperiment, u kojem se ispitivala emisija β -zraka/korišćen je radioaktivni ^{60}Co / u pravcu orijentisanih jezgara. Nalaženje asimetrije β -emisije potvrdilo je predpostavku Lia i Janga o neodržanju parnosti.

Slična potvrda, za jedan drugi proces, dobijena je skoro istovremeno merenjem mezonskog raspada $\pi \rightarrow \mu \rightarrow e$. Garwin, Lederman i Weirich su detektovali asimetriju u smeru emisije elektrona iz miona u odnosu na osu polarizacije i time pokazali neodržanje parnosti.

Ovi eksperimenti su dokazali da slaba interakcija nije invarijantna pri operacijama izmene parnosti/P/i izmene na-elektrisanja/C/. Smatralo se da će se simetrija ponovo javiti ako se P i C operacije primene na raspad. Pod CP refleksijom jezgro koje emituje elektrone antiparalelno smeru spina jezgra, prelazi u antijezgro koje emituje pozitrone paralelno smeru spina. To je bilo u saglasnosti sa eksperimentom, te se zaključilo da je slaba interakcija kod β -raspada invarijantna pod CP. Smatralo se da se to odnosi i na neleptonski slabi raspad.

Kratko vreme nakon eksperimenta Wu-a i saradnika izmeren je helicitet neutrina i nadjen je da je negativan /i prema tome za antineutrino je pozitivan/, prilagodjen dvokomponentnoj teoriji na osnovu koje svaka od ovih čestica poseduje samo jedno stanje polarizacije, sa spinom paralelnim /anti-paralelnim/ impulsu, koja određuje smisao "desnog ili levog zavrtnja". Po konvenciji neutrino je "levi" a antineutrino "desni".

Posle otkrića miona i piona njihov raspad se obično prikazivao pomoću:

$$\begin{aligned} \tau^{\pm} &= \mu^{\pm} + \nu & /IX.3/ \\ \mu^{\pm} &= e^{\pm} + \nu + \gamma & /IX.4/ \end{aligned}$$

medjitim upoznavanjem razlike neutrina i antineutrina;

Šema /IX.4/ bila je zamenjena sa /IX.5/:

$$\mu^{\pm} = e^{\pm} + \gamma + \bar{\nu} \quad /IX.5/$$

Pripisivanjem leptonskog broja svakoj čestici procesa /IX.5/, kao što su Konopinski i Mahmud /1953./ primetili, smatrao se negativan elektron česticom/leptonski broj +1/ a pozitron antičesticom/leptonski broj -1/. Analogno tome, moglo se smatrati da je negativni mion čestica a pozitivan mion antičestica,a eksperimentalna razmatranja su ovo dokazala,proučavanjem oblika spektra elektrona iz raspada pozitivnog miona tako što je meren helicitet e^+ ,koji se dobro slagao sa +1.Kako je on trebao da bude isti za mion,sledilo je da je pozitivan mion stvarno antičestica.

IX - 2. POSTOJANJE DVA NEUTRINA

Moglo se postaviti pitanje dali je neutrino/antineutrino/ iz β -radioaktivnosti isti ili se stvarno razlikuje od onog koji ip potiče iz raspada miona.Naime mogao se tražiti razlog zbog kojeg se par neutrino - antineutrino iz procesa /IX.5/ ne anihilira.

Pontekorvo /Pontecorvo/, a zatim Švarc /Schwartz/ i Li i Jang su bili ti koji su rešili problem na pravi način.Pratćemo rezonovanje Pontekorva koje je posebno ispravno. Kako nije postojao ni jedan teorijski ili eksperimentalni argument u prilog postojanja ove dve čestice, Pontekorvo je uveo različito obeležavanje za svaku od njih,nazivajući sa ν_e i $\bar{\nu}_e$ neutrino iz β -radioaktivnosti i raspada miona respektivno.Na prvi pogled ovakvo razlikovanje je možda izgledalo kao nepotrebno komplikovanje,medjutim postoje argumenti koji idu u prilog ove hipoteze.Naime ako se smatra da mion najzad nije težak elektron,procesi:

$$\begin{aligned} \mu^{\pm} &= e^{\pm} + \gamma & /IX.6/ \\ \mu^{\pm} &= e^{\pm} + e^+ + e^- & /IX.7/ \\ \mu^- + p &= e^- + p & /IX.8/ \end{aligned}$$

treba da budu dozvoljeni .Ovde je trebalo dakle da postoji selekciono pravilo/različiti kvantni brojevi za elektron i neutrino/koje zabranjuje ove procese,hipoteza razmatrana od

Švingera/J.Schwinger/ i Nikišime koji su razlikovali dva vrste leptonskog naboja, dakle dva leptonска broja /elektronski i mionski/, posebno održana.

Pontekorvo je takođe zapazio da je sa uvođenjem intermedijarnih bozona i nelokalnosti procesa raspada niona koji vodika mogućnosti procesa/IX.6/, ovaj proces zabranjen ako su ν_e i ν_μ rasličiti. Ako je ovaj način posmatranja ispravan treba da se piše:

$$\begin{array}{ll}
 p = n + e^+ + \nu_e & \text{za } \beta^+ \text{-radioaktivnost} \\
 n = p + e^- + \bar{\nu}_e & \text{za } \beta^- \text{-radioaktivnost} \\
 \pi^+ = \mu^+ + \nu_\mu & \text{za raspad } \pi^+ \\
 \pi^- = \mu^- + \bar{\nu}_\mu & \text{za raspad } \pi^- \\
 \mu^+ = e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu & \text{za raspad } \mu^+ \\
 \mu^- = e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu & \text{za raspad } \mu^- \\
 \bar{\nu}_e + p = n + e^+ & \text{reakcija Reines-Cowan-a}
 \end{array}$$

Nasuprot tome procesi:

$$\begin{aligned}
 \nu_e + e^- &= \nu_\mu + \mu^- \\
 \bar{\nu}_e + p &= n + \mu^+ \\
 \bar{\nu}_\mu + p &= n + e^+ \\
 \bar{\nu}_\mu + e^- &= \bar{\nu}_e + e^-
 \end{aligned}$$

su zabranjeni.

Iz ovog proizilazi da su u neutrino-nukleonskoj interakciji mogući samo procesi:

$$\begin{array}{ll}
 \bar{\nu}_\mu + p = n + \mu^+ & \bar{\nu}_e + p = n + e^+ \\
 \nu_\mu + n = p + \mu^- & \nu_e + n = p + e^-
 \end{array}$$

To znači da mionski neutrini mogu da proizvedu mione /pozitivne ili negativne/ medjutim nikad elektrone; nasuprot tome neutrini i radioaktivnosti ne mogu proizvesti mione, nego samo elektrone/pozitivne ili negativne/.

Jedna velika teškoća je postojala: mali efikasni presek neutrina sa nukleonima. Naime za energiju od nekoliko MeV jedan neutrino od 10^{10} ima šansu da interaguje pri prolasku kroz zemlju.

IX - 3. OTKRIĆE MIONSKOG NEUTRINA

Prvi eksperiment sa neutrinom bio je ralizovan 1961/62.u Brookhaven-u,i bazirao se na sledećem principu: AGS iz Brookhaven-a proizvodio je veliki broj piona visoke energije.Neutrini koji su poticali iz raspada piona bili su proizvedeni sa mionima;oni su dakle bili mionskog tipa, Samo jedan zanemarljivi broj elektronskih neutrina je proizведен/dobijen iz raspada kaona/. Neutrini su ulazili u koliziju sa neutronima/i protonima/ uz dve moguće posledice.Da su neutrini bili samo jednog tipa,oni bri ulazili u interakciju sa neutronima uz proizvodjenje jednakog broja elektrona i negativnih miona.Ako bi postojale dve vrste neutrina,vrsta proizvedena u ovom eksperimentu bila bi nesposobna proizvesti elektrone i trebalo bi da se opaze samo mioni. Izbor uredjaja i energija mašine bile su propisane praktičnim razmatranjem zaštite i dužinom raspada piona.

Od septembra 1961.do juna 1962. a tokom 25 punih dana rada, 10^{14} neutrina je prošlo kroz detektor i proizvelo 51 dogadjaj /umesto 25 očekivanih/,od kojih 29 sa samo jednim mionom proizvedenim u detektoru a ostalih 22 sa mionom praćenim sa jednim ili sa više tragova.Zaključak je dakle bio jasan:Postoje dve vrste neutrina.Oni proizvedeni raspadom piona u ovom eksperimentu su mionski i ne mogu da stvore elektrone interakcijom sa neutronima. Za produkciju elektrona u ovoj reakciji bili su potrebni elektronski neutrini.

Jedna serija eksperimenata je započela u CERN-u tokom 1963.; one su snabdevale određeni broj važnih eksperimenata, sa fluksom slabo kontaminiranih neutrina a kao detektori su korišćene varnične komore i mehurasta komora sa teškom tečnošću/ CF_3Br /.

Ustanovljeno je razlika izmedju dva neutrina,koja je potrebna za uvodjenje dva različita leptonska broja, L_μ za mion i njegov neutrino i L_e za elektron i njegov neutrino,koji su ponosaob održani i imaju vrednosti:

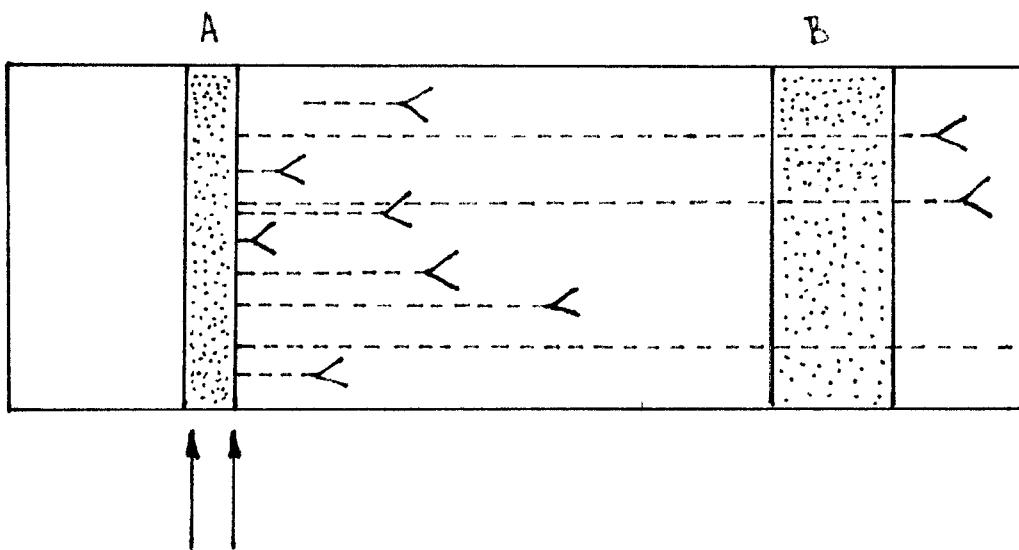
$L_\mu = +1$	za μ^- i ν_μ
$L_\mu = -1$	za μ^+ i $\bar{\nu}_\mu$
$L_e = +1$	za e^- i ν_e
$L_e = -1$	za e^+ i $\bar{\nu}_e$

Opšti zakon održanja totalnog leptonskog broja
 $\Sigma/L_\mu + L_e = \text{const.}$, nije u kontradiktornosti ni sa jednim eksperimentom.

Što se tiče mase ν_μ ona je manje više poznata kao i masa ν_e .
Njeno najnovije određivanje pokazuje da je ona manja od 1,2 MeV
i približno jednaka nuli kao i za ν_e .

X FENOMEN REGENERACIJE

Zamislimo sledeći eksperiment/prikazan na slici X.1/:



slika X.1

u mehurastoj komori su smeštena dva ekrana A i B udaljena jedan od drugogog i ,A je mnogo tanji od B;shop piona koji je dospeo /pao/ na ekran A mogao je da proizvede K° u pravcu normalnom na snop u mehurastoj komori.Ako je teorija Gel-Mana i Pais-a tačna,ovi K° su mešavina od 50% K_1° srednjeg života, $\tau_1=10^{10}$ s, i K_2° srednjeg života $\tau_2>\tau_1$; K_1° se raspadaju posle nekoliko santimetara na dva piona,sa srednjim životom koji nije jedinstven/jer svi upadni K° nisu iste energije/i,ako je ekran B smešten na dovoljnom rastojanju od A,samo će K_2° dospeti dovde,ali u obliku mešavine od 50% K° i \bar{K}° .Pretpostavimo dalje da je ekran B sposoban da apsorbuje u potpunosti komponentu \bar{K}° i da propušta/uz neznatno slabljenje/ komponentu K° ,koja je ponovo mešavina od 50% K_1° i K_2° .Sa druge strane ekrana bi se video raspad na dve piona koji odgovara komponenti K_1° .

Ovaj eksperiment su ostvarili Pais i Piccioni 1960.godine i u potpunosti dokazali teorijska predviđanja.

Druga važna posledica teorije Gel-Mana i Paisa je neobičan porast snopa čistih K^0 , koji jako zavisi od srednjeg života K_1^0 i od razlike mase $K_1^0 - K_2^0$. Najprecizniji eksperimenti su dali vrednosti:

$$\Delta m = /0,5403 \pm 0,0035/ \cdot 10^{10} \text{ ns}^{-1}$$

što je približno $3,8 \times 10^{-6}$ eV.

Iz slučaja neutralnih kaona sledi jedan od paradoksa kvantne mehanike, dugo vremena poznak pod imenom: Paradoks Rosen-Podolsky-Einstein-a. Razmotrimo, na primer, sledeću situaciju: jedna česticu koja nije čudna, negativne parnosti, raspada se dva neutralna kaona emitovana u suprotnim smerovima $+z$ i $-z$ u odnosu na česticu u mirovanju, i vidimo istovremeno dva proizvedena neutralna kaona; ako se to pripisuje njenoj interakciji sa materijom/jaka interakcija/zaključuje se da, ako je jedan od dva kaona K^0 , drugi mora da bude jedan \bar{K}^0 . Ni u jednom slučaju se nisu mogla videti $2K^0$ ili $2\bar{K}^0$. Ako se to pripisuje njenom raspadu/slaba interakcija/i ako je kaon emitovan u smeru $+z$ jedan K_1^0 , onaj emitovan u smeru $-z$ mora da je jedan K_2^0 ; nisu se nikada primetila $2K_1^0$ ili $2K_2^0$. Efektivna merenja jednog od kaona nose informaciju u vezi drugog.

Ako se sda kombinuju dva prvhodna merenja, nije više moguće odrediti u kojem stanju se nalazi opaženi kaon:, svi oni koji su emitovani u pravcu $+z$ su u stanju K_1^0 ili K_2^0 , u zavisnosti od tipa izvršenog merenja, ili u stanju K^0 ili \bar{K}^0 . Što se tiče raspada, kaon emitovan u smeru $-z$ treba da je jedan K_1^0 ili K_2^0 ; onaj emitovan u smeru $+z$ treba da je K_2^0 ili K_1^0 respektivno, ali ne obrnuto. Što se tiče interakcije sa materijom, prvi/-z/ je K^0 ili \bar{K}^0 a drugi /+z/ \bar{K}^0 ili K^0 respektivno, ali ne obrnuto. Proces merenja mora da odredi jedan od kaona koji se pojavljuju kao K^0 ili \bar{K}^0 /pa i kao K_1^0 ili K_2^0 /, ali u isto vreme utiče na drugi, koji se može naći na velikoj udaljenosti od prve.

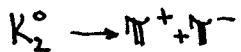
Neutralni kaoni, kao i nanelektrisani, stvorili su mnogo problema, koji su pretstavljali objekte mnogobrojnih istraživanja tokom više godina.

X - 1. NEODRŽANJE CP

Sve do 1964. godine smatralo se da se invarijantnost pod CP

odnosi i na neleptonski slabi raspad, ka je eksperiment pokazao suprotno.

U laboratoriji u Brookhaven-u je detektovan, pomoću varnične komore u koju je upadao snop K^0 -mezona, raspad K_2^0 -mezona na dva π :



Kod te reakcije nije očuvana CP jer K_2^0 čestica ima neparno CP;

$$CP|K_2^0\rangle = -|K_2^0\rangle$$

dok je $\pi^+\pi^-$ sistem paran u odnosu na CP. Samo K_1^0 mezon, kod kojeg je CP parno:

$$CP|K_1^0\rangle = |K_1^0\rangle$$

treba da pokaže taj raspad.

XI KLASIFIKACIJA ČESTICA

XI - 1. NOVA NOMENKLATURA

U toku prvog perioda istorije čestica/1947.-1957./bio je poznat jedan ograničen broj/tridesetak/čestica koje su se zvale elementarne čestice, ali posle otkrića prve rezonancije, potepeno kako se njihov broj povećavao pojavila se potreba za uvodjenjem jedne nove nomenklature koja će omogućiti ispravno grupisanje svih poznatih/postojećih/čestica iste vrste.

Razmatranja su dovela do ove nomenklature koja se bazira na raznim zakonima održanja/konzervacije/ i osobinama simetrije. Naime konzervacija odredjene fizičke veličine u toku različitih procesa omogućuje da se svakoj čestici pripše jedan skup kvantnih brojeva koji su obično celobrojni ili poluceli i koji su održani za odredjene interakcije a narušeni zaostale kao što se može videti na osnovu sledeće tabele,gde su veličine koje su održane obeležene sa + a veličine koje su neodržane sa -.

Fizička veličina	Simbol	Kvantni broj	Interakcija		
			jaka	e-m.	slaba
Energija- impuls	E,p		+	+	+
Angularni moment	J	0,1/2,3/2,1,	+	+	+
Naelektrisanje	Q	celobrojan	+	+	+
Parnost	P	-1	+	+	-
Konjugacija naboja	C	-1	+	+	-
Barionski broj	B	celobrojan	+	+	+
Izospin	I	0,1/2,3/2,1,	+	-	-
Hipernaboj	Y	celobrojan	+	+	-

tabela 1.

Nova nomenklatura se bazira na tri zadnja kvantna broja/uokvirena u tabeli 1./B,I i Y i pripisuje jedan poseban simbol svakoj

kombinaciji ova tri broja:

Za mezone su simboli:

Σ	za kombinaciju	$B=Y=I=0$
Ξ	za kombinaciju	$B=Y=0, I=1$
K	za kombinaciju	$B=0, Y=1, I=1/2$

Za barione na sličan način važe oznake:

Λ	za kombinaciju	$B=1, Y=I=0$
Σ	za kombinaciju	$B=1, Y=0, I=1$
N	za kombinaciju	$B=1, Y=1, I=1/2$
Ξ	za kombinaciju	$B=1, Y=-1, I=1/2$
Ω	za kombinaciju	$B=1, Y=2, I=0$
Δ	za kombinaciju	$B=1, Y=1, I=3/2$

Kao što smo već videli množitelj u svakoj kombinaciji je $2I+1$ čestica; imamo za N dve čestice, za Λ četiri čestice, itd.

Mogu se uočiti različiti pokušaji klasifikacije svih čestica, stim da obuhvataju i rezonancije.

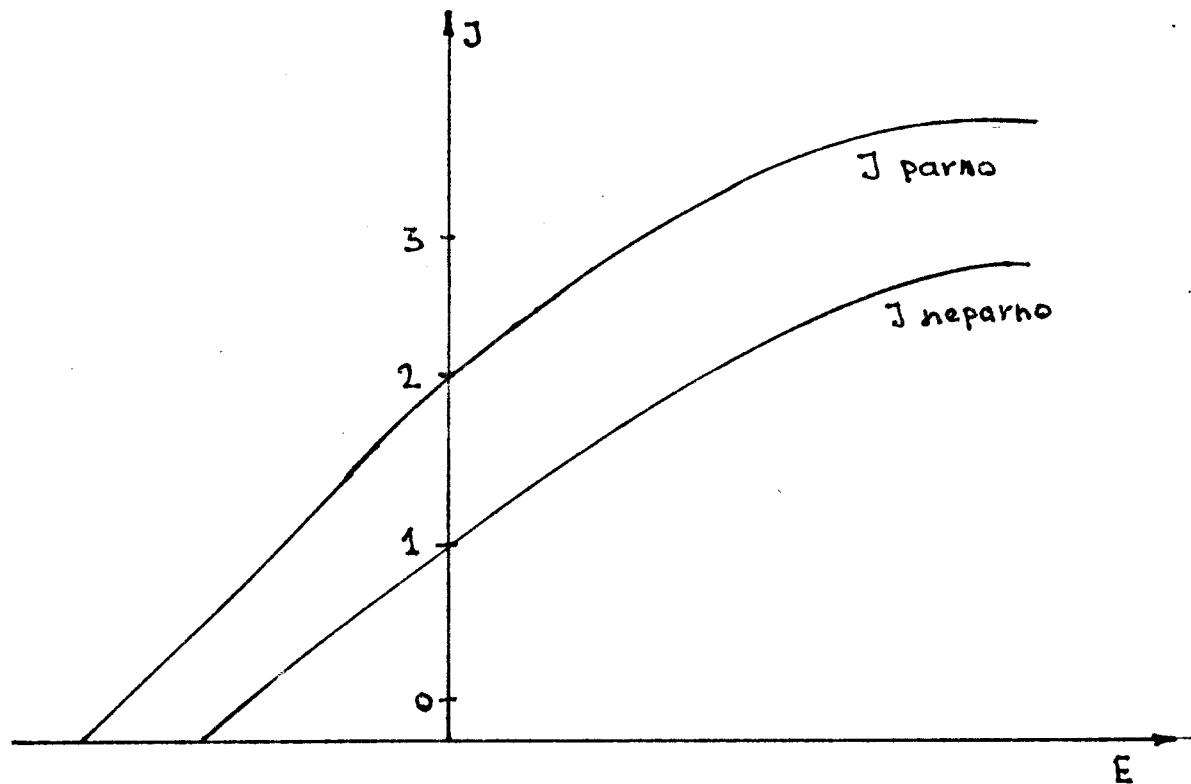
XI - 2. POLOVI I TRAJEKTORIJE REGGE-A

Prvi pojam koji je koriščen za jednu klasifikaciju čestica vraća na u vreme/1959/ kad su rezonancije još bile nepoznate i bio je postavljen u jednu relaciju izmedju mase i angулarnog momenta spina čestice, date od Redži-ja /T.Regge/.

Uprkos dobro poznatoj činjenici iz kvantne mehanike da angуларни момент J može uzimati ^{samo} diskretne vrednosti, Redži je došao na ideju da proučava karakteristike amplitude difuzije čestica/efikasne preseke/za kontinualne vrednosti i kompleksne ove promenljive. Ovde nije moguće ulaziti u matematičku analizu ovog postupka; osnovna ideja je da je svaka amplituda jedna analitička funkcija u kompleksnoj ravni angулarnog momenta, osim u singularnim tačkama, nazvanim polovima Redžija, čija se pozicija slično kompleksu J menja sa energijom opisujući tako jednu određenu krivu, nazvanu trajektorija Redžija. Svaki put kad vrednost realnog dela pola prodje jednu fizičku vrednost J dostignutu za jednu dobro određenu vrednost energije E_R , ona odgovara jednom osnovnom stanju sistema u interakciji kad je ova energija negativna a rezonanciji kad je pozitivna. Viša stanja se nalaze na jednoj istoj putanji, čineći jednu familiju, čiji članovi imaju iste unutrašnje kvantne brojeve/naboj, izospin, stranost, itd./sa izuzet-

kom angуларног момента J који узима узастопне вредности које се разликују за две јединице/ $\Delta J=2$.

Najниže стање носи назив original Redžija, виша стања распоредјена по две јединице од јесу рекуренсе Redžija и теоријски постaju безконачне/sl.XI.1/.



slika XI.1

Ova метода нуди добру могућност класификације честиче на основу вредности агуларног момента, сви остали квантни бројеви су исти. Важна особина једне трајекторије Redžija је њена ознака, нови квантни број који поседује следеће вредности:

$$\Sigma = -1^J \text{ за бооне /} J \text{ паран или непаран/}$$

$$\Sigma = -1^{J-1/2} \text{ за фермione /} J \text{ полисели и непаран/}$$

Класификација фермиона, нешто компликованија него за бооне, зависи такодје од парности; разликују се 4 категорије трајекторија:

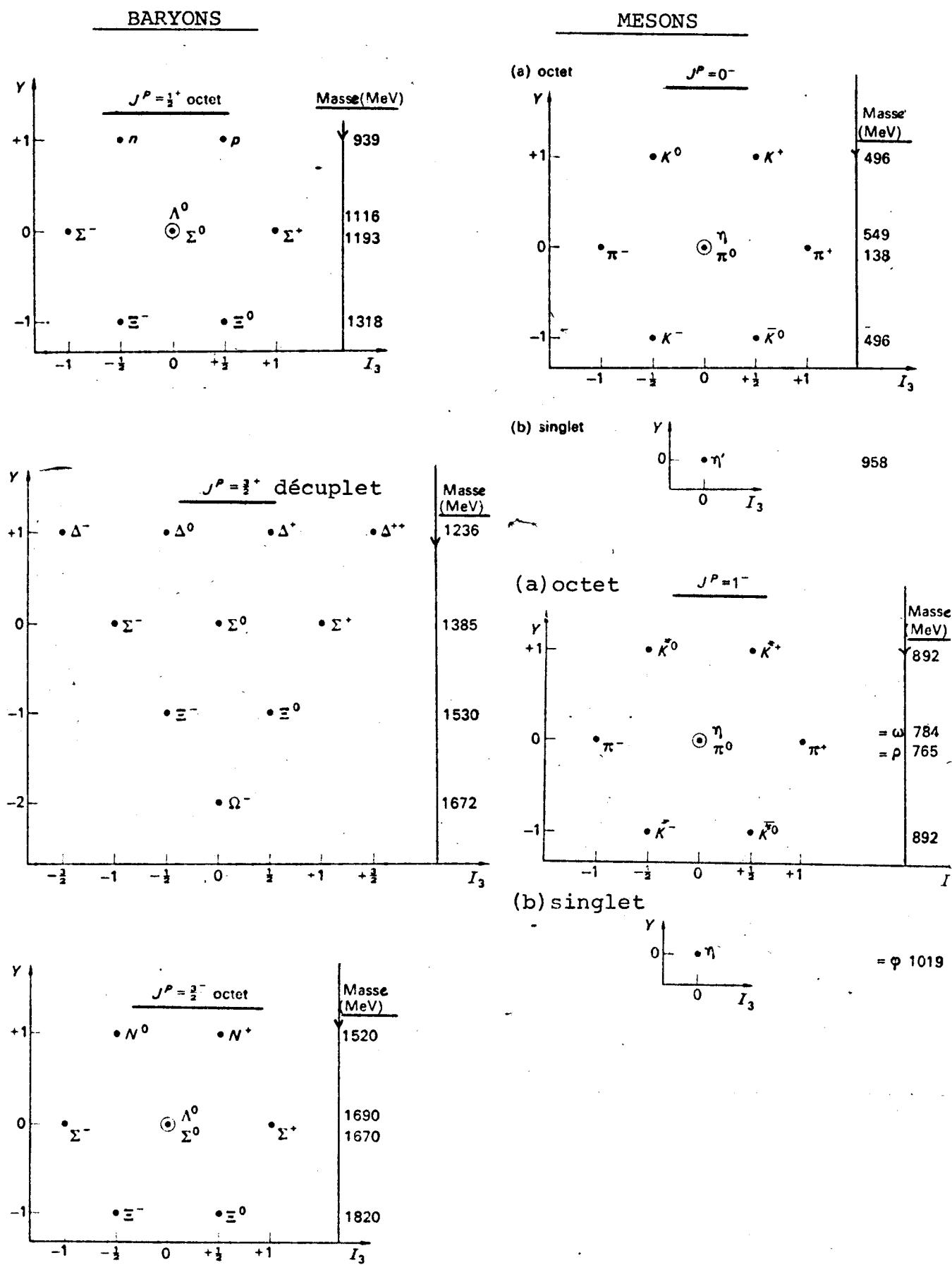
Trajektorije	Vrednosti J^P
$\lambda, \Sigma = +1$	$1/2^+, 15/2^+, 19/2^+, \dots$
$\beta = +1$	$1/2^-, 15/2^-, 19/2^-, \dots$
$\gamma = -1$	$13/2^-, 17/2^-, 11/2^-, \dots$
$\delta = -1$	$13/2^+, 17/2^+, 11/2^+, \dots$

XI - 3. OSMOSTRUKI PUT, SU/3/ SIMETRIJA

Drugu šemu klasifikacije čestica koja je imala veliki uspeh, zbog sjajnih predviđanja, otkrili su istovremeno i nezavisno jedan od drugog 1961. godine Gel-Man Ne'eman; ona se bazirala na jednoj relaciji između čestica iste spin-parnosti ali sa različitim vrednostima mase, izotopnog spina i hipernaboga. Treba se potsetiti da pojam izospina omogućuje razvrstavanje čestica na multiplete koje sadrže $2I + 1$ član; ali /SU₂/ simetrija kojoj se ova promenljiva pokorava je jedna približna simetrija; ona je, na primer, narušena elektromagnetnom interakcijom, čije uplitanje dozvoljava razlikovanje između neutrona i protona pomoću male razlike mase i nije ista za razne druge multiplete izotopskog spina. Pripisuje se, dakle, ovo delenje masa unutrašnjosti/unutrašnjoj gradji/ jednog istog multipleta pri narušavanju SU/2/simetrije elektromagnetnom interakcijom. Da pogledamo sada familiju bariona sa istom spin-parnošću, kao familiju /N, Λ, Σ, Ξ/ sa $J^P = 1/2^+$, vidi se da su razlike u masi najvažnije. Odatle ideja da će jedan zakon održanja, od kojih ovaj o izospinu, narušen jakom interakcijom, biti sposoban da grupiše skup u jedan supermultiplet barionskih multipleta iste J^P i sa različitim vrednostima izospina i hipernaboga. Narušenje ove simetrije jakom interakcijom može objasniti razlike mase u unutrašnjosti jednog istog supermultipleta, pomoću sepanja izazvanog elektromagnetnom interakcijom unutar jednog multipleta izospina. Treba istražiti koji zakon može to biti.

Bilo je potrebno osam godina za otkriće takve simetrije koja upotrebljava osam kvantnih brojeva istovremeno. To je SU/3/ simetrija, proširenje SU/2/, čiji jedan model je Osmostruki put.

Sa tačke gledišta matematike onaje zastnovana na pouzdanoj teoriji grupe Lie a najviše na trodimenzionalnim specijalnim unitarnim/unimodularnim/grupama, odakle njegovo ime. To je jedna grupa sastavljena od osam operatora/8 matrica 3×3 zavisnih od 8 realnih parametara/i ranga 2/dve generatrise koje se mogu



slika XI.2

dijagonalizovati/.Kao u slučaju izospina,definiše se jedna nova promenljiva,"unitarni spin" F sa osam komponenti/ I_1, I_2, I_3, Y, U -spin i V -spin svaka sa dve komponente/.Znamo delovanje svake od prve četiri,što se tiče ostala dva, V -spin ima efekat transformisanja jednog protona Lambda/izmenastranosti/, U -spina transformiše jedan neutron u Lambda/izmenastranosti/; ova dva operatora menjaju od-jedanput Y, I i Q .To je narušenje nova dva spina koji su odgovorni za cevanje mase u supermultipletu,sledeći formulu,poznatu pod imenom formula Gel-Man-a i Okubo-a:

$$m = m_0 + m_1 Y + m_2 /I/I+1/-Y^2/4/$$

Grupa $SU/3/$ ima reprezentaciju: $1, 3, \bar{3}, 6, \bar{6}, 8, \bar{8}, 10, \bar{10}, \dots$
ali model osmostrukog puta koristi samo odredjene brojeve $/1, 8, 10$ i $\bar{10}/$.

Prvi uspeh osmostrukog puta je bio klasifikacija 8 bariona N, Λ, Σ, Ξ , sa $J^P=1/2^+$ u reprezentaciji 8 koja je redovita reprezentacija $SU/3/$ /sl.XI.2/

Ovaj prvi uspeh postignut barionskim oktetom podstaknuo je istraživanje za ostale,posebno za mezone.Ali u ovo vreme /1961./ se znalo za 7 mezona/piona i kaona/ sa $J^P=0^-$;nedostajao je jedan za kompletiranje okteta koji je trebao imati masu približno 563MeV.U toku godine je otkriven i imao je masu 548MeV i $J^P=0^-$, kako se predviđalo.

Situacija je bila slična i za mezone sa $J^P=1^-$;nedostajao je jedan sa masom od 925MeV.Mnogo kasnije je pronađen jedan takav mezon,ali sa masom koja je bila mnogo manja,782MeV.Izgledalo je da pravilo za mase ima nedostatak.Na sreću u slučaju mezona 1^- postoji mogućnost jedne čestice u singletnom stanju sa $Y=I=0$;ako bi njegova masa bila približno 925MeV,samo jedno narušenje simetrije bi omogućilo razlikovanje između ove singletne čestice i ove oktetne koje treba da imaju praktično iste osobine.Jedna takva čestica je zaista otkrivena 1962.;ona je imala masu od 1020MeV.

Jedan mesonski oktet 2^- kompletiran je mnogo kasnije.

Za trenutak je situacija izgledala jako komplikovana za ostale barione zbog nedostataka/neotkrivene čestice/,ipak je Osmostruki put zabeležio veliki uspeh sa barionima sa $J^P=3/2^+$;
nazime najstarija rezonancija koja je poznata, Delta/1236/.

i sadrži 4 člana, nije pripadala ni jednom singletu, ni jednom oktetu; nasuprot tome reprezentacija 10 od SU/3/ je mogla dobro da se prilagodi kvartetu Delta, tripletu Sigma i dubletu Psi, ali nedostajao je jedan singlet Omega, mase 1676 MeV. Njegovo kasnije otkriće/mase 1672,2 MeV/ predstavljalo je jedan od najvećih uspeha ovog modela.

Dakle model osmostrukog puta je doveo do jedne elegantne i zadovoljavajuće klasifikacije čestica za jaku interakciju na oktete i dekuplete u kojima se mogu pronaći mesta za sve poznate čestice, uključujući i resonancije; istovremeno je bio u mogućnosti da napravi određeni broj važnih predviđanja.

U slučaju da se sve čestice pokoravaju dobro jednoj klasifikaciji na supermultiplete SU/3/-a, postalo bi moguće da se pretskaze postojanje drugih čestica jednog supermultipleta.

Zapazile su se određene razlike između okteta mezona/barionskog broja $B=0/$ i okteta bariona/ $B=1/$. Svi mezoni pripadaju bilo singletima, bilo oktetima, ali jedan istin oktet sadrži kako čestice tako i antičestice, dok postoje posebni okteti bariona i antibariona. s druge strane, kad postoji više multipleta SU/3/ istog J^P i B , članovi dva multipleta sa istim I, I_3 i Y , su pomešani interakcijom koja narušava simetriju/polu-jaka interakcija; tako se mezonski singlet sa $I=Y=0$ i član okteta sa $I=Y=0$ mešaju da daju novo stanje, kao γ i ϕ . Ovaj oblik mezonskog okteta 1^- koji možda izgleda kao jedan nonet ili čak jedan singlet i jedan oktet odvojeno, pripada jednoj redukovanoj SU/3/ reprezentaciji.

Dejstvo simetrije možda ipak nije ograničeno za čestice u jakoj interakciji; moguće je da postoji još jedan kvantni broj, još neotkriven, koji je održan u jakim interakcijama i koji ima vrednost 0 za sve poznate čestice. Ovakvo predviđanje je potvrđeno desetak godina kasnije otkrićem kvantnog broja šarma, uz pomoć nove generacije akceleratora.

XI - 4. ZAČARANI KRUG, BOOTSTRAP

Prva tendencija je išla u prilog demokratiji, koju su predstavljali Chew, Frautschi, Mandelstam i drugi. Prvi argument je proizilazio i spektroskopije čestica: leptoni imaju jako male mase /0- 100 MeV/ u odnosu na hadrone, od kojih najlakši ima masu

od 135 MeV a postoje i sa masom mnogo većom od 1000 MeV. Odatle ideja koju je zastupao Chew da se hadroni /čestice koje učestvuju u jakoj interakciji / nalaze u jednom odredjenom smislu dinamičkih struktura, koje duguju postojanje silama pomoću kojih ulaze u uzajamnu interakciju, silama koje prouzrokuju nedostatak kod leptona, u obliku njihovih čudnih masa.

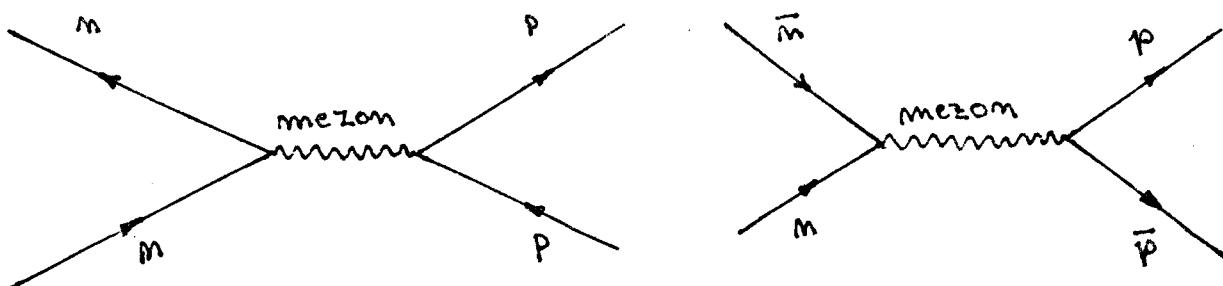
Drugi argument u prilog subnuklearne demokratije je teorijske prirode i sastojao se u proširivanju osobina efikasnih preseka na ekstremne posledice. Tako se došlo do zaključka da ne postoje čestice koje su elementarnije od drugih, nego sve treba da se uzmu u obzir kao složeni objekti, u smislu da sve čestice koje se mogu opažati efektivno u prirodi obrazuju zatvoren sistem u kojem svaka čestica zavisi od svake druge.

Uzmimo jedan primer:

Reakcija difuzije: $n+p \rightarrow n+p$ /a/
može biti opisana amplitudom $A(s,t,u)$, ali ova ista funkcija opisuje takodje i ukrštenu reakciju:

$$n+\bar{n} \rightarrow p+\bar{p} \quad /b/$$

znači ako se zna amplituda za reakciju /a/, može da se izračuna ista za reakciju /b/. Ove dve reakcije su ekvivalentne /sl. XI.3/.



slika XI-3

Medjutim dijagrami /a/ i /b/ predstavljaju dve različite interpretacije: na prvom, izmedju dve upadne čestice n i p , dolazi do izmene jednog mezona /neutralnog/ koji je odgovaran za silu izmedju čestica i obrazuje most izmedju upadnih i izlaznih čestica. Na dijagramu /b/ ta ista čestica /neutralni mezon / potiče iz kombinacije /virtuelne/ dve upadne čestice, n i \bar{n} , i obrazuje jedno intermedi-

jarno stanje koje povezuje dva člana reakcije.

Tako, prema filozofiji Bootstrap-a, nijedna čestica nije elementarna, svaka pomaže u proizvodnji ostalih koji joj, kad dodje na njih red, "daruju život".

Ideju bootstrapa koristio je R.Hagedorn za izradu termodinamičkog modela hadronske materije na visokim energijama. Sematski, kolizija dve čestice na visokoj energiji izvodjena je u unutrašnjosti jedne odredjene zapremine, u stanju koje se može opisati kao crna kutija/crno telo/ ili "vatrena kugla" hadronske materije.

Ovo je jedno pobudjeno stanje koje se posle 10^{-23} s raspada dajući ceo jedan spektar hadrona, čiji oblik teži ka građičnom obliku:

$$\rho/m = C^{te} \exp(m/T_0) / (1/m)^{5/2}$$

gde je T_0 najviša moguća temperatura ili temperatura ključanja hadronskog fluida/reda 160MeV ili $2 \times 10^{12}\text{K}$.

Svaki novi prinos energije u vatrenoj kugli povećava temperaturu fluida T dok $T < T_0$, što pretstavlja temperturni limit/univerzalna konstanta/. On pretstavlja dakle jednu vrstu bootstrapove asimptotije.

Napominjemo da ovaj model na zadovoljavajući način reprodukuje eksperimentalne podatke.

Model bootstrapa pretstavlja jednu nenaučnu ideju i, prema tome, nekompletну zbog činjenice da ne poseduje eksperimentalne potvrde. Teorija zahteva, naime, da sve čestice /naročito leptoni/ odgovaraju polovima Redžija, što je daleko od stavnosti. Zaista, mnogi barioni se mogu razvrstati kao Redžijeve rekurense, dok je situacija manje jasna u slučaju bozona; gde nije poznata, na primer, nikakva rekurensa piona.

Nasuprot Bootstrap-u je /anti-bootstrap/ filozofija fundamentalista, koji smatraju da su sve čestice sastavljene od malog broja fundamentalnih jedinki, kvarkova, o kojoj će još biti reči.

Pitanje "demokratije" ili "arostokratije" u domenu čestica dakle opet nije rešeno.

XI - 5. MODEL KVARKOVA

Industrija modela je doživela veliku ekspanziju otkrićem piona. Prvi pokušaj u ovom pravcu učinili su Fermi i Jang, koji su predložili model prema kojem hadroni predstavljaju vezana stanja nukleon-antinukleonska/ $\bar{\pi}^0 = M\bar{N}$, $\bar{\pi}^+ = \bar{M}p$, $\bar{\pi}^- = M\bar{p}$ /. Međutim ovaj model nije mogao reprodukovati broj čudnih čestica i bio je napušten. Tada je S. Sakata predstavio jedan novi elemenat simetrije, sa predlogom da je jedan fundamentalni triplet obrazovan od tri fizičke čestice: protona, neutrona i lambde, nazvane sakaton kao što je njegova konjugacija, antisakaton/ $\bar{p}, \bar{n}, \bar{\Lambda}$ /, koji poseduje odgovarajuće kvantne brojeve za konstrukciju ostalih hadrona:

$$\bar{\pi}^+ = \bar{M}p, \quad K^+ = p\bar{A}, \quad K^0 = M\Lambda, \quad \Sigma = p\bar{M}\Lambda, \quad \text{itd}$$

Ovaj model se takođe sukobio sa teškoćama koje se tiču bariona, jer predviđa veliki broj stanja koje ne postoje u prirodi.

Medjutim 1964. Gel-Man je vršio razmatranja u cilju dubljeg razumevanja grupe SU/3, iz koje vidimo da je fundamentalna reprezentacija 3 bila prazna, to znači da ona ne sadrži nijednu pozantu česticu. On je razmišljaо da dopuni ovu reprezentaciju 3 čija je konjugacija $\bar{3}$, pomuću jednog fundamentalnog tripleta sastavljenog od tri kvarka u, d i s, od kojih su sastavljeni svi hadroni. Kvantni brojevi kvarkova dati su u tabeli 2.

Simboli	I	I_3	S	B	Y	Q
p ili u	1/2	1/2	0	1/3	1/3	2/3
n ili d	1/2	-1/2	0	1/3	1/3	-1/3
λ ili s	0	0	-1	1/3	-2/3	-1/3

tabela 2

Antikvarkovi sadrže suprotne kvantne brojeve.

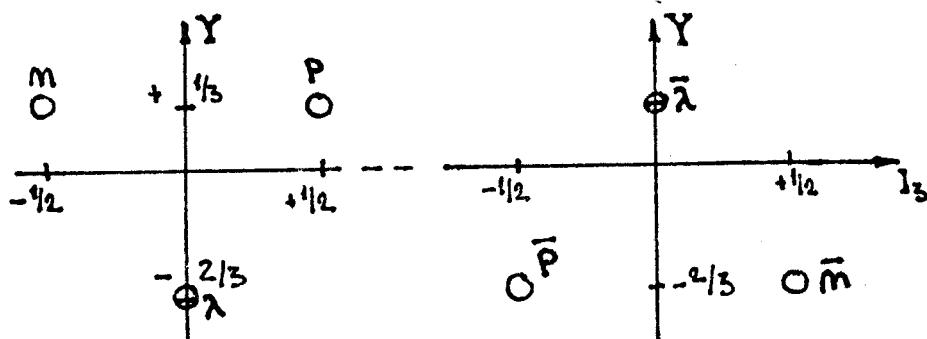
Može se zapaziti da su kvantni brojevi B, Y i Q razlomci, dakle potrebna su bar dva kvarka za dobijanje jednog mezona,

i bar tri za jedan barion.

Ekvivalentan model koji je izradio Zweig, naziva kečevima tri bitnosti baze.

Kada se radi o kvarkovima tj. kečevima, pošto mezoni imaju barionski broj $B = 0$, konstrukcija jednog mezona zahteva jedan kvark i jedan antikvark; nasuprot tome za barione je $B = 1$ i potrebna su tri kvarka. Pre nego što diskutujemo o ovoj konstrukciji, biće korisno da izložimo konstrukciju različitih reprezentacija $SU(3)$.

Tri kvarka su data, kako smo već rekli, u reprezentaciji 3, tri antikvarka reprezentacijom $\bar{3}$ i pomoću tabele 2 mogu da se konstruišu grafici kao na slici XI.4.

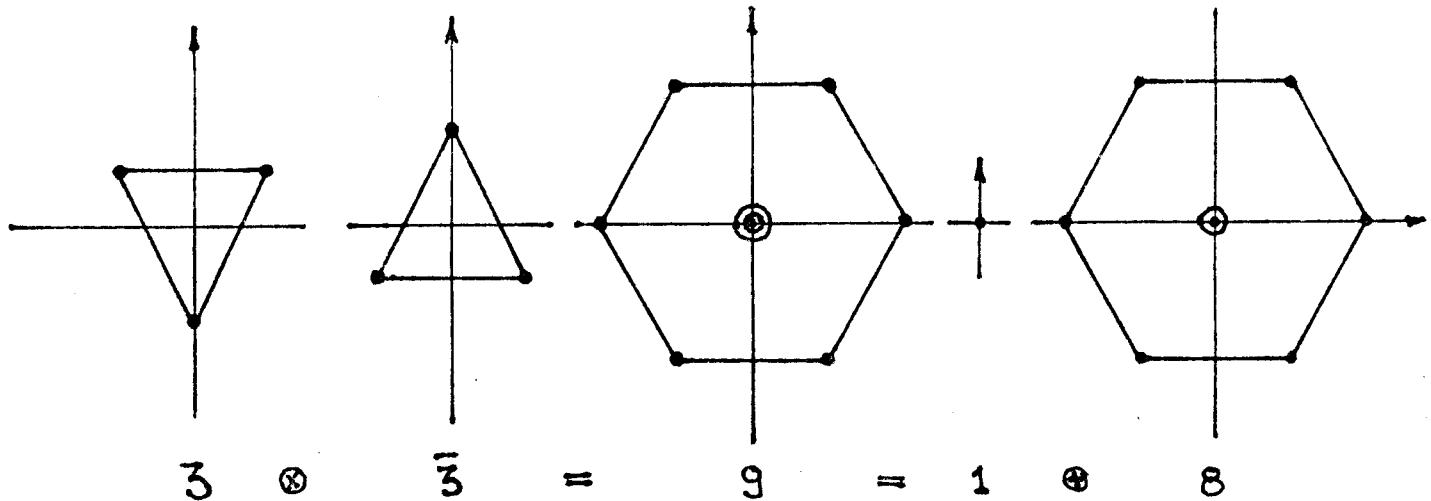


slika XI.4

Sa tačke gledišta čudnosti /stranosti/ λ /s/ kvark poseduje stranost, međutim na određeni način, može da se uzme kao stranost kvarkova p i n , kad se umesto definicije električnog naboja održanog relacijom $Q = I_3 + Y/2$, definiše jedna druga vrsta naboja $Q' = U_3 + Y/2$, gde je U – spin analogan izospinu i naziva se U -spin. Na ovaj način je kvark p koji pripada izospinskom dubletu /sa kvarkom n /, sada singlet U -spina, dok n i formiraju dublet i n poseduje stranost prema $Q' = 3/2$, ostala dva neposeduju stranost, $Q' = -1/3$.

Za formiranje mezona treba da se naprave različite kombinacije kvark-antikvarka, ili jezikom matematike da se izvrši proizvod reprezentacija 3 i $\bar{3}$: $3 \bar{3} = 108$.

Praktičan način za proveru ove relacije sastoji se u trostrukom superponiranju trougla antikvarka sa onim od kvarkova tako da se usaglašavaju težišta antitrougla sukcesivno sa tri vrha trougla uz održavanje paralelnosti strana/sli.XI.5/.



slika XI.5

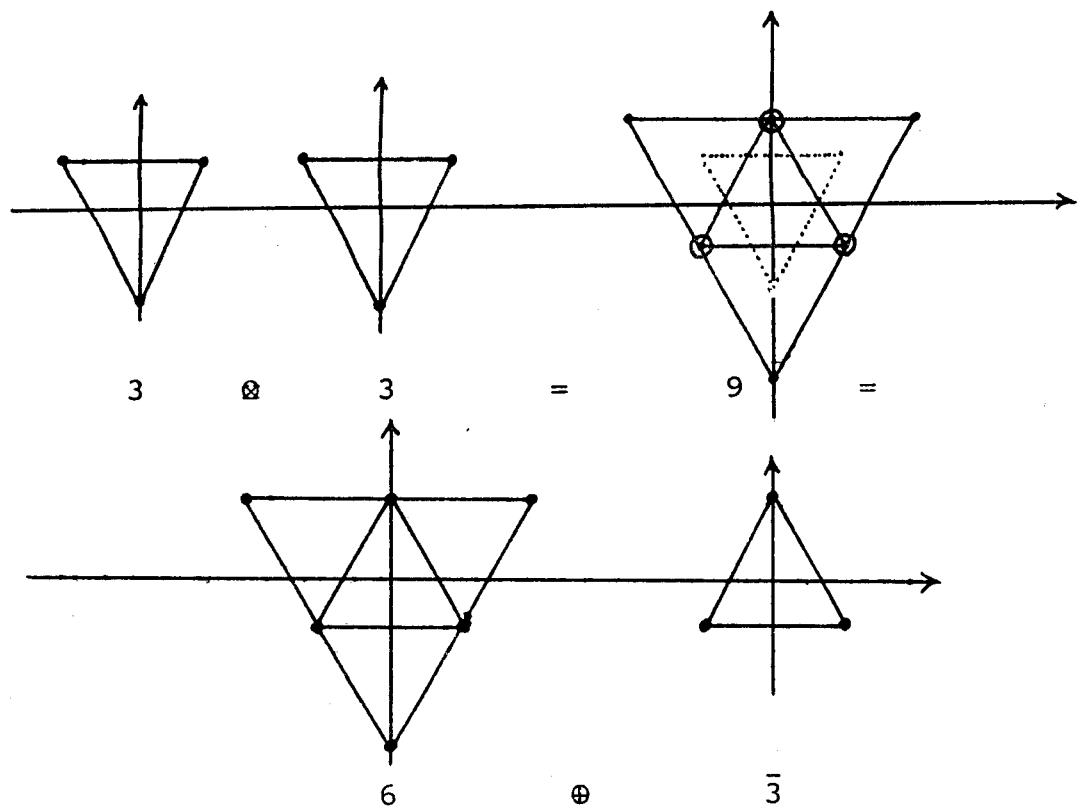
Dakle tako dobijamo 9 kombinacija kvark-antikvarka/centar dijagrama je trostruka tačka/, to znači jedan nonet mezona koji se raspadaju na jedan singlet i jedan oktet/vidi sliku XI.2/. Mogu se stvarno konstruisati dva takva dijagrama, jedan sadrži mezone sa spinom 1/2 i potiče od kvarka sa spinom +1/2 i anti-kvarka sa spinom -1/2/a drugi mezone sa spinom nula /+1/2,-1/2/, što je potpuno istovetno sa onim što smo videli kod Osmostrukog puta.

Što se tiče bariona, treba izvršiti množenje:

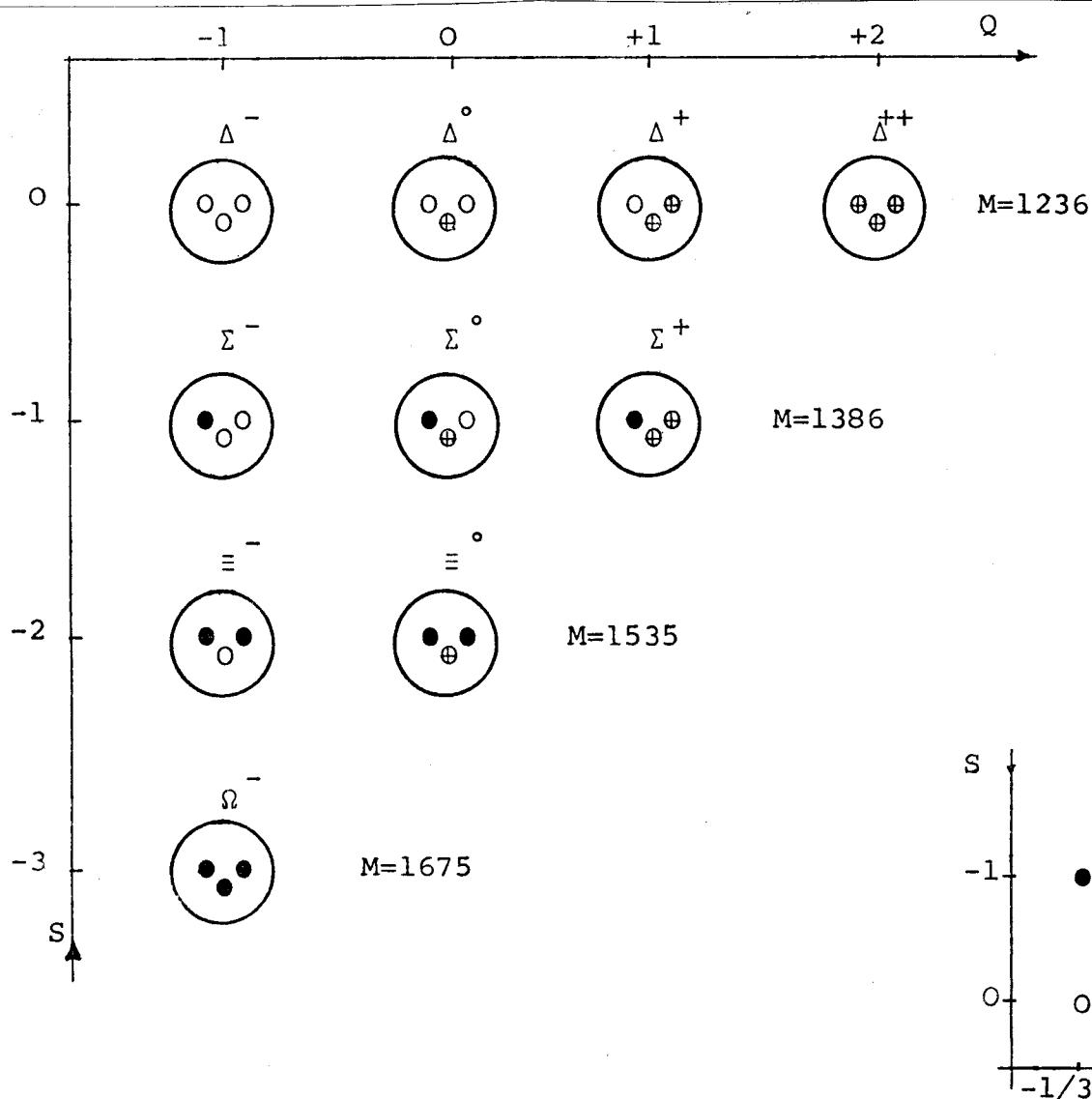
$$\cancel{3} \otimes \cancel{\bar{3}} = /6\cancel{3}/\cancel{3} = /6\cancel{3}/\cancel{3}\cancel{3}/ = 1 \oplus 8 \oplus 8 \oplus 10$$

jer $6\cancel{3} = 10 \oplus 8$ a $\cancel{3}\cancel{3} = 1 \oplus 8$, kao što se vidi na osnovu konstrukcije na slici XI.6.

Pogledajmo na primer barionski dekuplet/ $3/2^+$; njegov kvarkovski sadržaj je dat slikom XI.7, gde se vide posebno različiti kvarkovi koji obrazuju članove dekupleta. Kvarkovi d i u su verovatno iste mase, lako se vidi da 4 Delta čestice imaju bliske mase, jer nanelektrisanje malo utiče na mase/na pr. proton,



slika XI.6



slika XI.7

neutron/.

Model daje dakle dobre rezultate istovremeno za mase, stranosti i spinove čestica dekupleta. Što se tiče okteta, oni sa spinom $3/2$ se interpretiraju na isti način, dok je za oktet $/1/2^+$ spin jednog od tri kvarka suprotan u odnosu na spinove ostala dva.

Situacija je potpuno analogna u slučaju mezona.

Za barione sa spinom većim od $3/2$ /poznati su takvi koji imaju spinove $5/2, 7/2, \dots$ / neophodno je pretpostaviti da se kvarkovi kreću jedan oko drugog na takav način da rezultanta angуларног момента kombinovana sa spinom dovodi do spinova mnogo većih od $3/2$.

Prilikom razmišljanja o osobini kvarkova, u slučaju da su oni fizičke čestice odredjene mase umesto da budu čisto matematičke, Gel-Man je razmatrao mogućnost prema kojoj bi obična materija mogla da sadrži bar jedan kvark u blizini površine zemlje, koji bi bio stabilan i poticao iz neprekidnog delovanja kosmičkog zračenja. Brojna istraživanja izvodjena u cilju detekcije kvarkova dovele su do potpunog neuspeha, uključujući sva dosadašnja iskustva FNAL-u na 200 i 300 GeV.

Pretpostavimo sada, da bi objasnili ovu činjenicu, da kvarkovi imaju mnogo veće mase u odnosu na one koje je moguće dobiti u savremenim akceleratorima i prema tome oni su zadržani u česticama, silama veze koje su ogromne u odnosu na nuklearne sile. Tako se sada govori o "zatvaranju" ili o "zarobljenosti" kvarkova, koji uključuju nemogućnost posmatranja slobodnih kvarkova.

Triplet kvarkova sa frakcionim nabojem nije samo najekonomičniji; on je doveo takođe i do boljeg razumevanja simetrije $SU/3$, odakle je obrazovana fundamentalna reprezentacija $\bar{3}$ i doživela izvanredne uspehe u klasifikaciji čestica i predviđanjima važnim za praksu. Međutim frakcioni naboj kvarkova i neuspeh prakse u njegovom opažanju kao fizičke čestice, mnogi teoretičari/ osim Gel-Man-a/i eksperimentatori smatrali su velikim nedostatkom. Odatle veliki broj pokušaja konstrukcije modele kvarkova sa celobrojnim nabojem, koji je doživeo velik razvoj poslednjih godina s obzirom na izvesne teškoće koje se

tiču unifikacione teorije slabih i elektromagnetsnih interakcija.

Da bi se izbegli frankcijoni naboji potrebno je upotrebiti više od jednog fundamentalnog tripleta; to znači proširiti grupu $SU/3/$ na jednu višu simetriju, koja zahteva uvodjenje novih dopunskih kvantnih brojeva.

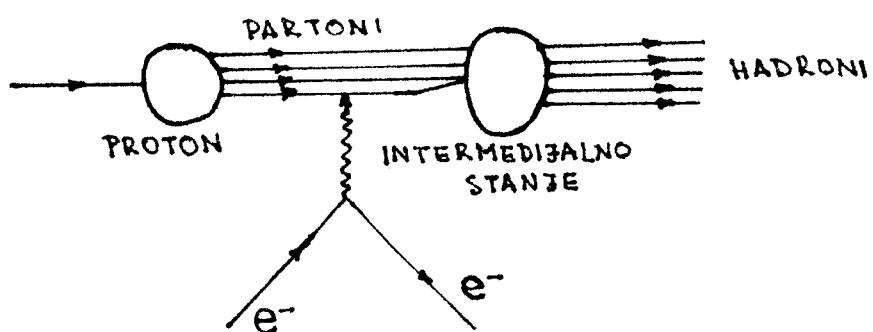
Godine 1963. uveden je novi kvantni broj poznat pod imenom supernaboj ili šarm. Proširivanjem grupe $SU/3/$ na $SU/4/$ uveden je četvrti kvark, obeležen sa p' ili c, sa istim nanelektrisanjem kao kvark p, koji nosi novi kvantni broj, šarm $c=1$, koji je nula za sve ostale kvarkove; ovaj novi kvark je jedan izus singlet/ $I = 0/$.

Drugi model koji je doživeo znatan uspeh je model obojenih kvarkova koji su izradili Gel-Man i Fritzsch odnosno Greenberg; radi se opet o kvarkovima sa frakcionim nabojima, ali ovaj put postoje od svake vrste po tri, koje se razlikuju po svojim bojama, ukupno 9. Prema ovome optički obične čestice će biti singleti boje.

XII -MODEL PARTONA

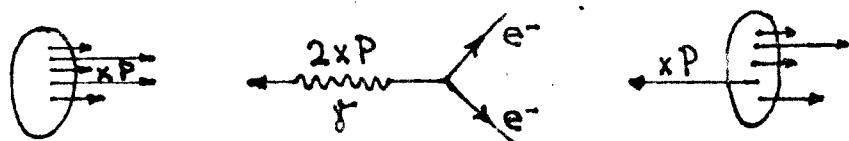
Ovaj model koji je postigao veliki uspeh tokom poslednjih godina, formulisao je R.Feynman 1969. da pokuša dati jedno objašnjenje eksperimentalnih činjenica primećenih pri neelastičnoj difuziji na visokim energijama. Teorija partona je bila zamišljena tako, da pokuša objasniti razlog zbog kojeg je, pri koliziji hadrona na visokoj energiji transferalna komponenta impulsa prdukovanih čestica strogo ograničena na male vrednosti / 400 MeV/c/. Posle prvih rezultata u SLAC-u sa duboko neelastičnim rasejanjem elektrona na protonima Feynman je primetio da ovi eksperimenti mogu identifikovati vrste partona i njihovu raspodelu.

Za partone je bilo predviđeno da budu osnovni sastojci materije; radi se dakle o tačkastim česticama, koje treba da odgovaraju kvantima implicitne teorije, koja je matematički konstruisana tako da reproducuje svaki posmatrani dogadjaj; utvrđena je na primer istovetnost hipotetičnih partona sa ne manje hipoteškim kvarkovima. Tako rasejanje jednog elektrona na protonu na jako visokim energijama može da se posmatra kao rasejanje elektrona na slobodnom partonu unutar protona. Na ovaj način u slučaju u kojem proton poseduje praktično bezkonačan impuls /kao u slučaju $\bullet - p$ rasejanja na visokoj energiji, u sistemu centra mase/, proton trpi Lorentz-ovu kontrakciju i elektron je odmah rasejan na partonu koji, u toku dilatacije vremena, vrši sporo kretanje ka unutrašnjosti protona /sl.XII .1/.



slika XII .1

Kako je vreme e^- - partonske interakcije jako kratko u odnosu na srednji život intermedijarnog/virtuelnog/ stanja, partoni se smatraju slobodnim u toku interakcije. Pošto partoni poseduju spin $1/2$ i kako je helicitet održan u toku interakcije, parton interagujući apsorbuje foton, obrće svoj pravac bez promene energije i parton, čiji pravac obrnut, apsorbuje jednu jedinicu angулarnog momenta zbog održanja svog heliciteta; nalazise dakle u situaciji kao na slici XII .2.



slika XII .2

Jedan takav parton ne može dakle doprineti longitudinalnom delu efikasnog preseka.

Svi partoni sa nabojem treba da imaju spin $1/2$.

Pošto se utvrdila istovetnost partona i kvarkova, moguće je teorijski izračunati broj kvarkova i antikvarkova u protonu; nadjeno je da je taj broj veoma blizak 3 za kvarkove. Kako je kvarkovski sastav protona i neutrona različit, to objašnjava razliku izmedju form faktora ovih čestica.

Proračuni pokazuju da je procentni udeo kvarkova tipa d 33% a tipa u 16% za proton koji je na taj način sastavljen od dva d kvarka i jednog u kvarka.

Došlo se takođe do proračuna, pomoću podataka elektro-prodукcije, da je naboj partona jako blizak $1/3$, što je dobar dokaz za poistovećivanje partona i kvarkova.

Ipak izgleda da naboji partona ne nose više od $\sim 50\%$ ukupnog impulsa; odatle potreba da se uvedu neutralni partoni koji ne ulaze u interakciju sa strujama, njihova funkcija nosi ostatak impulsa.

Ovi neutralni kvanti koji obezbeđuju spajanje tri kvarka u nukleon, da bi nosili ostatak impulsa, prihvaćeni su pod imenom

gluoni i poseduju/verovatno/spin 1.

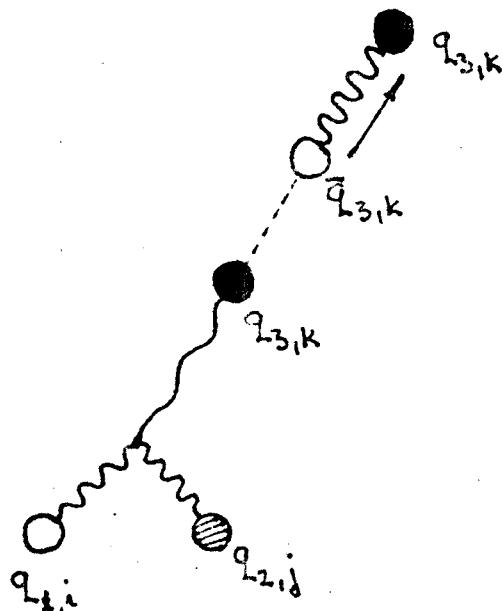
Broj ovih gluona može biti veoma veliki; pretpostavlja se da su tri kvarka/valentni kvarkovi/potopljena u gluonskom moru.

Na osnovu "bag" modela Kuti-Weisskopf-a nukleon sadrži tri valentna kvarka i jedno jezgro obrazovano od neodredjenog broja parova kvarkova i antikvarkova u slobodnom kretanju, medju koje je neophodno dodati neutralne gluone koji su kvantipolja medjukvarkovskih sila. Može da se zamisli da u unutrašnjosti jednog hadrona kvarkovi razmenjuju kontinualno gluone nulte mase; jedan kvark, otpuštajući jedan gluon menja boju bez promene prirode/kvark menja boju ali ne menja aromat/. Nasuprot tome slaba interakcija je u mogućnosti da promeni aromat bez promene boje kvarka. Tako interakcijom jednog neutrina sa jednim protonom može da se transformiše jedan d kvark u jedan c kvark, dajući mion i jednu čudnu čsticu.

Jedna principielna teškoća ovog modela je da kvarkovi i gluoni ne mogu da se detektuju uprkos velikom broju istraživanja. Pokušalo se da se otkrije mehanizam zarobljavanja koji je odgovoran za njihovo zatvaranje u nukleonu. Mnogi mehanizmi ove vrste su predloženi; svi oni su čisto teorijski.

Tako, prema Kogut-u i Susskind-u, može da se pretpostavi da sila/jaka interakcija/medju kvarkovima različitih boja, umesto da sa daljinom slabí, ostaje konstantna. U ovom stanju je veoma teško izolovati jedan obojeni kvark, koji zahteva veliki iznos energije/ $\sim 1000\text{GeV}/$. Jedan manji iznos energije je potreban za ostvarenje uvećanja potencijalne energije, počev od koje je moguće formirati kvark-antikvarkovski par. Dakle jedan takav par nije ništa drugo do jedan mezon/kvark i antikvark iste boje/; dakle nemoguće je posmatrati izolovani kvark. Stvari se mogu prikazati na sledeći način:

Tri kvarka su povezana u unutrašnjosti nukleona sa tri veze iste jačine; odredjeni iznos energije ima efekat još jačeg zatezanja jedne od veza skoro sve do raskida. U tom trenutku dolazi do formiranja jednog para kvark-antikvarka u zavisnosti od potencijalne energije; oni se udaljavaju u obliku mezona a veza opet uzima svoje početno stanje/sl.XII.3/.



slika XII .3

Tako se nalazimo, putem apstrakcije, pred veoma prostom grupom elementarnih čestica. Dva kvarka, d i u, elektron i njegov neutrino su dovoljne za izgradnju svih poznati vrsta materije. Ipak ništa ne garantuje da su kvarkovi i leptoni stabilne čestice bez ikakve strukture.

XIII U PRAVCU JEDNE UNIFIKACIONE TEORIJE INTERAKCIJA

Od pojave racionalnog razmišljanja čovečanstvo je težilo da nadje objašnjenje za sve fenomene koji se javljaju u prirodi, pomoću jedinstvene teorije. Poznato je da je u moderno doba Newton pokušao da objasni vse pojave pomoću univerzalnog privlačenja; velika sinteza električnih i magnetnih fenomena Faraday-a i Maxwell-a je drugi stepen pokušaja u pravcu unifikacije. Pojavom nuklearnih fenomena, Fermi sa jedne strane i Jukava sa druge, konstruisali su teorije interakcija među nuklearnim česticama, rukovodjeni neprestano analogijom sa elektrodinamikom. Videli smo, da su uspeli samo delimično, prvi za slabe interakcije a drugi za jake interakcije;

Teškoće predstavljene kvantnom elektrodinamikom su bile rešene na zadovoljavajući način 50-ih godina, zahvaljujući radovima Schwinger-a, Dyson-a, Fejmana i Tomonage, koji su smatrali da sva razmimoilaženja teorije mogu biti prevazidjena i da je moguće nastaviti merenja na svim nivoima jednom ponovnom definicijom mase i naboja elektrona/renormalizacijom/.

Rečeno je dakle da su teorije ove vrste renormalizabilne.

S druge strane zna se da je elektrodinamika teorija fezne invarijantnosti /divergencija struje je nula, što ima za posledicu konzervaciju nalektrisanja/. Fazna čestica je , u ovom slučaju, foton, čija je masa nula.

Nasuprot tome u slaboj interakciji nije održano nanelektrisanje/jedan neutron se transformiše u proton a neutrino u negativan lepton/ i nije invarijantna u odnosu na transformaciju parnosti. Fermijeva teorija je dala izvestan broj različitih procesa na osnovnim energijama, kao β -radioaktivnost, ali je dala i jedno razorno ponašanje efikasnih preseka na visokim energijama, narušenje granice unitarnosti iznad 300 GeV. Ona nije bila renormalizabilna i uprkos dobrim rezultatima koje je dala na osnovnoj energiji, ona nije drugo do jedna fenomenološka teorija.

Formulacija teorije u obliku strujno-strujne interakcije

koju su dali Fejman i Gel-Man, takođe ističe odredjenu analogiju sa kvantnom elektrodinamikom i uvodjenjem intermedijarnog bozona W , kao nosilaca slabe sile, umanjilo je nešto malo nepoželjnu osobinu efikasnih preseka na visokoj energiji.

Ovaj intermedijarni bozon pretstavlja veliki napredak ali i nedostatak; to je jedna vektorska čestica, kao foton, ali poseduje veliku masu/ $\sim 37 \text{ GeV}$. Ova velika masa ruši staru koncepciju tačkaste slabe interakcije u prilog jedne interakcije koja nije lokalna i koja je kratkog dometa.

Jedno srednje rešenje ove situacije predložili su Vajnberg i Salam /Weinberg i A. Salam/, koji su predložili da se foton i intermedijarni bozon W smatraju za kvante Jang-Mils-ovog vektorskog polja, koje se pokorava lokalnoj faznoj invarijantnosti, samo ako se teorija iza toga da renormalizovati. Kvanti Jang-Mils-ovog polja su bozoni sa masom nula/Goldston bozoni/ medjutim Higgs, Kibble i drugi su primetili da ove čestice mogu steći masu spontanim narušenjem simetrije. Ovaj Higgs-ov mehanizam može da objasni razliku u masi između fotona i W /foton pripada podgrupi eksaktne simetrije, pridružene konzervaciji nanelektrisanja/ i uz to daju mogućnost da se može konstruisati jedna renormalizabilna teorija. Zaista 't Hooft je pokazao 1971. da cela jedna klasa teorija, nazvana fazne teorije, mogu biti renormalizabilne Higgs-ovim mehanizmom.

Vajnberg je pored intermedijarnih bozona W^\pm , uveo nove teške neutralne bozone Z^0 i razume se foton. Ovaj model pretstavlja veliki napredak jer zavisi samo od jednog parametra, Vajnberg-ovog ugla θ_W koji meri relativnu jačinu elektromagnetne / e / i slabe / g / interakcije:

$$\sin^2 \theta_W = \frac{e^2}{2}$$

$\sin^2 \theta_W$ je određen u različitim eksperimentima i sve dobijene vrednosti su bliske srednjoj koja iznosi $0,23 \pm 0,2$.

Ova teorija Vajnberg-Salama, nazvana još i elektro-slaba /jer obuhvata elektromagnetnu i slabu interakciju/, predviđala je postojanje neutralnih struja, koje su stvarno otkrivene u CERN-u 1973. godine, što je pretstavljalo važnu eksperimentalnu podršku ove teorije.

Kako je sada formulisana, elekroslaba teorija je fazna teorija, sa faznom grupom $G_{ES} = SU(2) \times U(1)$. Postoje četiri polja: $W_\lambda^+, W_\lambda^-, W_\lambda^0$ i B_λ^0 , koja prenose interakcije. Tri / $W_\lambda^\pm, W_\lambda^0/$ pripadaju grupi $SU(2)$ /grupa unitarnih 2×2 matrica sa determinantom $1/$; one interaguju sa tri struje: $j_\lambda^\pm, j_\lambda^0$ konstantom sprege g. Četvrto polje B_λ^0 pripada $U(1)$ i spreže se sa strujom \tilde{j}_λ drugom konstantom sprege g. Tako je mešavina W_λ^0 i B_λ^0 polje Z_λ^0 , koje se spreže sa mešavinom \tilde{j}_λ i j_λ^0 — j_λ^N , i prenosi slabu interakciju neutralnih struja a slaba interakcija na elektrisanih struja se predosi poljima W_λ^\pm , spregnutim sa j_λ^- .

Invarijantnost teorije prema faznoj grupi G_{ES} važi samo kada su sve čestice od inetresa bez mase, kvarkovi i leptoni, kao i kvanti elektromagnetskog / A_λ / i slabih polja: $A_\lambda, W_\lambda^\pm, Z_\lambda^0$. To važi za kvante A_λ tj. fotone i možda neutrina. Međutim kvanti slabih polja W_λ^\pm i Z_λ^0 imaju masu te sledi da fazna invarijantnost elektroslabe teorije nesme biti egzaktna tj. njena invarijantnost je narušena simetrija.

Elektroslaba teorija je sposobna da predviđa mase slabih vektorskih bozona koje su relativno visoke:

$$M/W^\pm / \sim 78 \text{ GeV} \quad M/Z^0 / \sim 89 \text{ GeV}.$$

Ove mase su toliko velike da nijedan postojeći akcelerator nemože da proizvede slabe bozone. Ovo bi moglo postati moguće sa sudarajućim snopovima protona i antiprotona, sa energijama od po 270 GeV , u CERN-u. Ukoliko se ni tu ne budu mogli dobiti onda će to sigurno biti moguće u novom $e^+ - e^-$ akceleratoru/LEP-u/.

XIV OTKRIĆE NEUTRALNIH STRUJA

U svojim formulacijama teorije slobodnih interakcija, Fajman i Gel-Man namerno nisu vodili računa o neutralnim strujama/leptonским i barionskim/ tipa e^+, e^- , μ^+, μ^- , \bar{n}, n , itd., za čije postojanje nisu, u to vreme, imali nikakvu eksperimentalnu indikaciju. Li i Jang su bili ti koji su prvi put uočili struje neutralnog tipa na osnovu procesa:

$$\gamma + p \rightarrow \gamma + p$$

$$\gamma + n \rightarrow \gamma + n$$

U ovom slučaju neutralnih struja radi se o činjenici da čestice koje ovde učestvuju ne nose nanelektrisanje promenjeno pre i posle reakcije. Dakle, elektromagnetna struha je jedna neutralna struha, jer u :

$$e^- + e^- = e^- + e^-$$

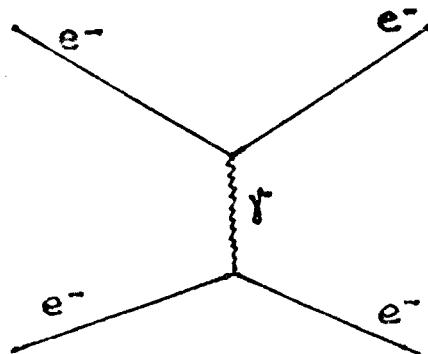
kao što je predstavljeno na Fajmanovom diagramu /sl.XIV.1/ elektromagnetna interakcija daje izmenu jednog fotona nultog nanelektrisanja izmedju dve struje koju prenosi svaki od elektrona.

Suprotno tome procesi /sl.XIV.2/:

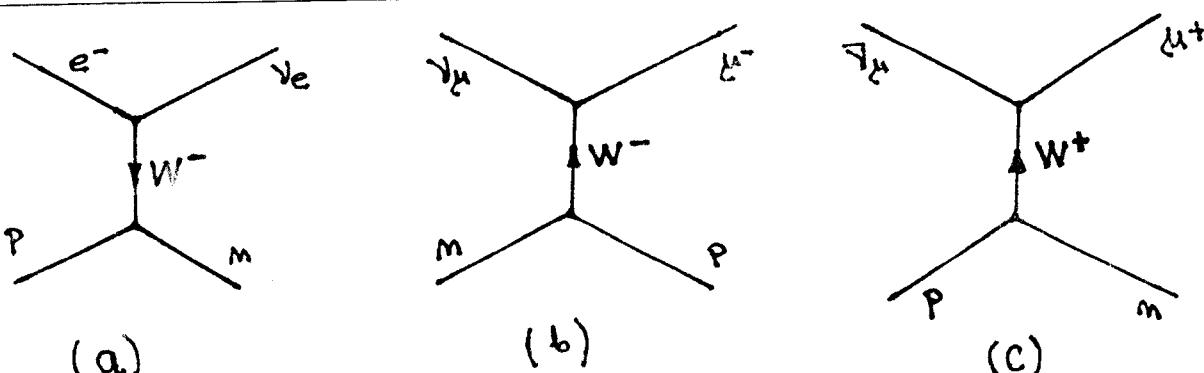
$$e^- + p \rightarrow \gamma_e + n$$

$$\gamma_\mu + n \rightarrow \mu^- + p$$

$$\bar{\gamma}_\mu + p \rightarrow \mu^+ + n$$



slika XIV.1

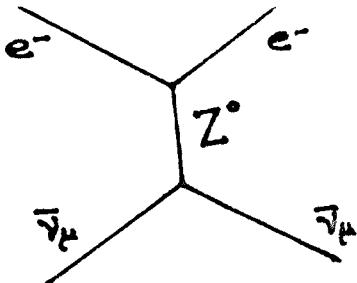


slika XIV.2

predstavljaju procese nanelektrisanih struja, jer čestice nemaju isto nanelektrisanje pre i posle interakcije koja se dešava razmenom jedne nanelektrisane čestice. Posebno, za slučaj sl.XIV.2 b i c, neutrino/antineutrino/se transformiše u nanelektrisani mion/leptonska nanelektrisana struja/a nuklearni takodje menja svoje nanelektrisanje/barionska nanelektrisana struja/. Imaćemo ovde jednu neutralnu leptonsku struju ako je moguće izvršiti eksperimentalni proces tipa:

$$\bar{\nu}_\mu + e^- = \bar{\nu}_\mu + e^-$$

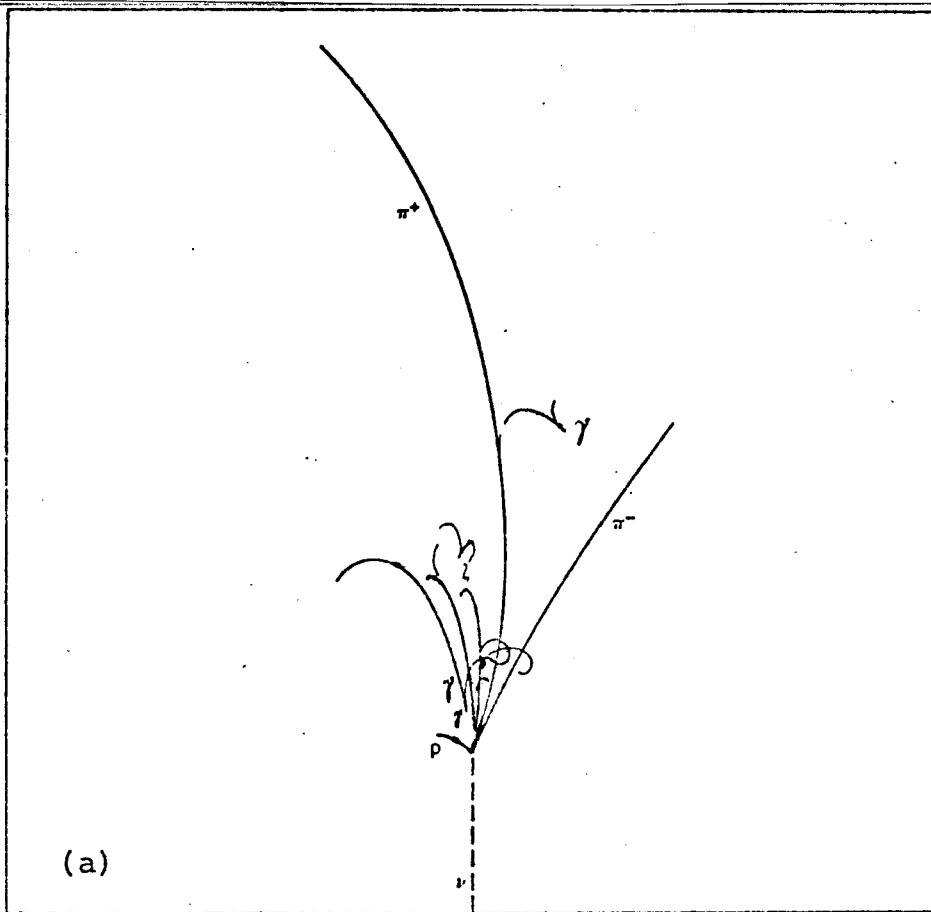
ili uopštenije proces u kojem se, posle interakcije, neutrino ponovo nalazi u stanju neutrina, bez transformisanja u mion/proces bez miona/. Reakcija se odigrava izmenom jedne neutralne čestice, W^0 ili Z^0 , /sl.XIV.3/.



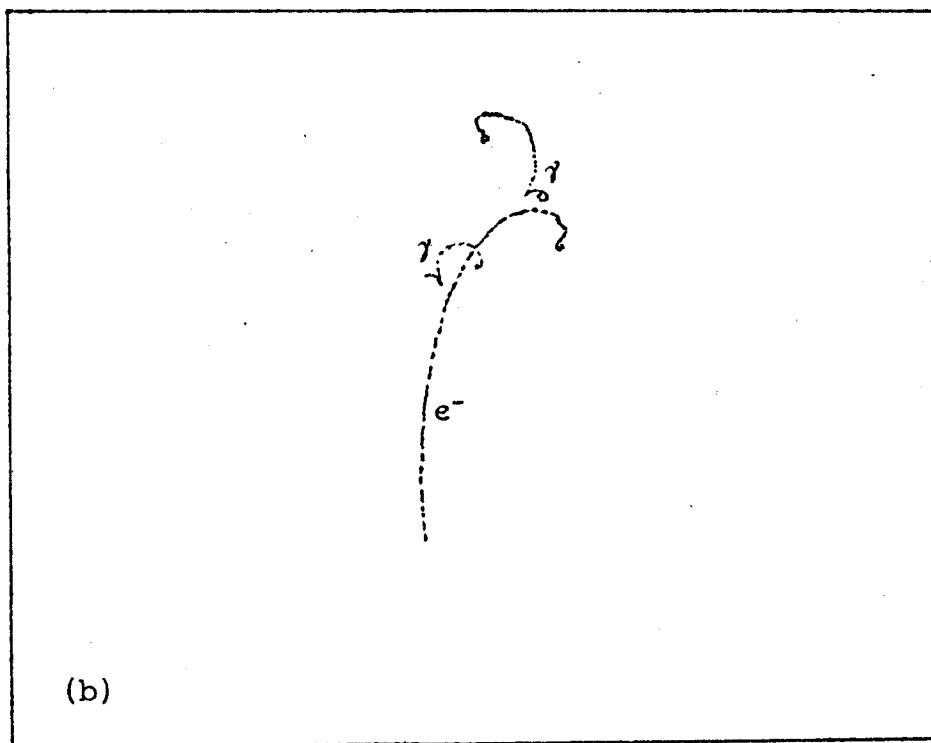
slika XIV.3

Bilo je veliko iznenadjenje za fizičare u CERN-u, kad je početkom 1973. godine u toku pregledanja jednog dela/više od 700.000/fotografija, dobijenih sa Gargamelle - om u snopu neutrina i jednom snopu antineutrina, otkriven slučaj tipa neutralne struje/sl.XIV.4 a/, praćen jednim drugim/sl.XIV.4 b/, dobijenim na snimku antineutrina. Ova dva dogadjaja su tumačena tako da potiču od leptonskih neutralnih struja. Oni su odmah potvrdjeni u mnogim drugim laboratorijama/Argonne, Brookhaven, Batavia/različitim tehnikama.

Neobična je činjenica, da ove neutralne struje, koje izgledaju otsutne u prirodi, obrazuju važan deo struja odgovornih za slabu interakciju/odnos neutralne struje prema nanelektrisanoj struji je $\sim 0,20$ u interakcijama neutrina a $\sim 0,45$ u interakcijama antineutrina/.



(a)



(b)

XV NOVA GRUPA ČESTICA

Godine 1970., su Lederman i njegovi saradnici, pri rasejanju snopa protona od 29 GeV na jezgru berilijuma, primetili da se stvaraju, izmedju ostalog, parovi pozitivnih i negativnih miona, čija je efektivna masa bila izmedju 1,00 i 6,7 GeV, sa efikasnim presekom koji se poveća za faktor 5 kada se energija upadnih protona kretala izmedju 22 i 29,5 GeV.

Prema tome je utvrđen opsežan program eksperimenata u Brookhaven-u, u cilju proučavanja produkcije leptona/miona i elektrona/pri p-p koliziji i otkrivanja mogućih novih čestica koje se stvaraju pri ovoj produkciji i raspadaju na jedan par leptona. Eksperimente je vršila grupa M.I.T. izučavajući procese /sl.XV.1 a/:

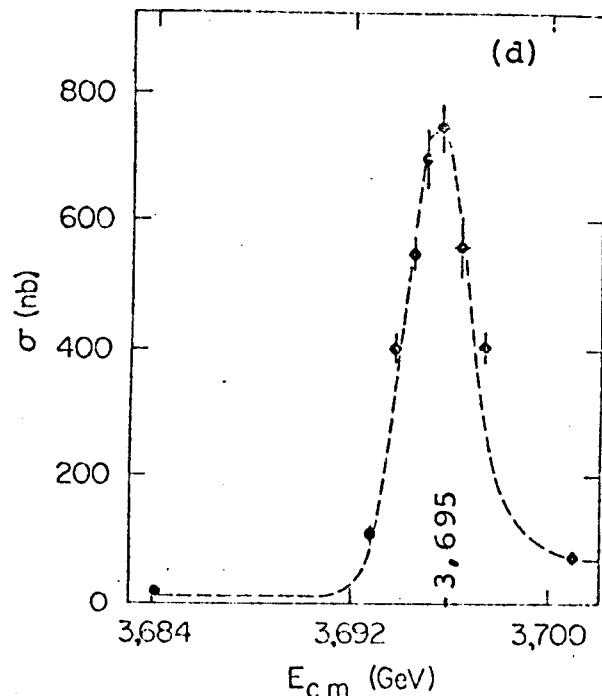
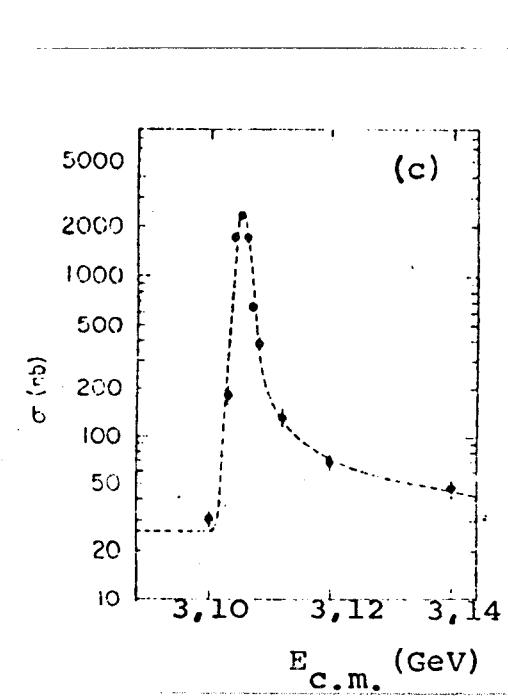
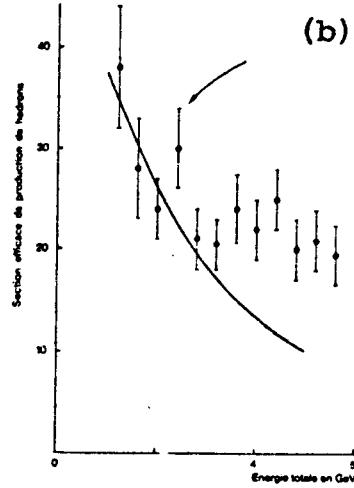
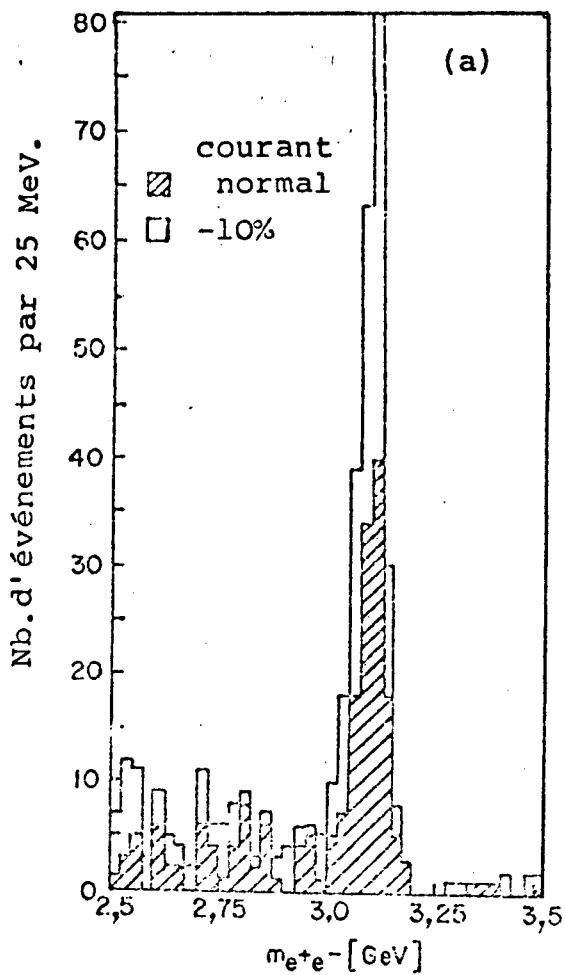


ne detektujući drugo do elektrone emitovane pod uglom 15° s obe strane upadnog snopa. U mesecu avgustu 1974. fizičari su konstatovali da je spektrometar registovao nenormalan broj novostvorenih parova e^+e^- , čija je efektivna masa bila oko $\sim 3,1$ GeV. Veliki broj provera ovih rezultata neočekivano je pokazao da se posmatrani efekat može dobro realizovati.

U Stanfordu je jedna grupa fizičara sprovedla merenja e^+e^- efikasnog preseka u funkciji od energije u kolisionim prstenovima SPEAR-a / $2 \times 2,5 = 5,0$ GeV/, a kasnije na najvišoj energiji SPEAR-a /na $2 \times 3,8 = 7,6$ GeV/. Umesto krive na slici XV.1 b efikasnji presek izmedju 3,10 i 3,11 GeV je bio umnogostručen za faktor 10. U savršavanjem merenja efikasnji presek je postigao $100 \times$ veću vrednost /sl.XV.1 c/.

Rezultati iz Stanforda uskoro su dokazani u drugim laboratorijama; radilo se o jednoj novoj rezonanciji mase $m = 3105$ MeV a čija eksperimentalana veličina od 1,9 MeV je saglasna nuli. Srednji život ove rezonancije je reda 10^{-20} s, dakle 1000 puta duži nego za obične rezonancije.

Ova nova rezonancija je nazvana J čestica.



Stanford je objavio jednu drugu rezonanciju iste vrste mase $m=3695$ MeV veličine reda $0,5$ MeV, rezonanciju koju istraživači u Brookhaven-u nisu našli u $p-p$ kolizijama.

Slika XV,1 d prikazuje rezultate iz Stanforda. Ova grupa fizičara je prihvatile oznaku Ψ' za J česticu i Ψ' za novu rezonanciju na $3,695$ GeV.

Merenja, u Stanfordu, efikasnog preseka: $e^+ + e^- = \text{hadroni}$ u domenu energije od $2,4$ do 5 GeV, pokazala su da postoji jedan pik na oko $4,15$ GeV, koji je mogao biti superpozicija dve ili više Jako uske rezonancije. Isto tako raspodjeljivanje pokazalo da se u velikom broju slučajeva /~ 32% / odvija prema sledećoj šemi:

$$\Psi' = \Psi + \pi^+ + \pi^-$$

i ekipa iz DORIS-a je uspela dokazati proces:

$$\begin{array}{c} \Psi' = X + \gamma \\ \downarrow \\ \Psi + \gamma \end{array}$$

proces koji prolazi kroz jedno intermedijsko stanje X ; dva emitovana γ -kvanta imaju energije koje se kreću od 200 do 400 MeV koje odgovaraju, po redu emitovanja, vrednostima $M_1 = 3500$ MeV ili $M_2 = 3270$ MeV.

Nešto kasnije je u Stanfordu utvrđena šema raspada:

$$\Psi' = X + \gamma$$

sa $X = \pi^+ \pi^- K^+ K^-$, $2\pi^+ 2\pi^-$, $3\pi^+ 3\pi^-$, $\pi^+ \pi^- K^+ K^-$.

X je opšta oznaka svih stanja vezanih radijacijom za Ψ' . Izgledalo je da postoje bar dva stanja X mase 3410 i 3500 MeV, od kojih je druga mogla da bude čestica identična sa $\Psi'/3500$ u DORIS-u.

Uskoro su se u DORIS-u pojavili nagoveštaji o postojanju još jednog stanja X mase $\sim 2,8$ GeV, koji su proizigli iz raspada:

$$\begin{array}{c} \Psi'/3100 = X + \gamma \\ \downarrow \\ \gamma + \gamma \end{array}$$

Činjenica koja je najviše iznenadila je velika masa Ψ' čestice /više od 3 puta veća od mase protona/, koja je u suprotnosti sa njihovom malom veličinom /1000 puta manja od one koju imaju rezonancije/, kojoj odgovara jedan veoma dug srednji život za jak raspad a veoma kratak za slab ili elektromagnetski raspad.

Bilo je prirodno u početku misliti da se radi o jednom intermedijskom bozonu, posle dugog bezuspešnog istraživanja,

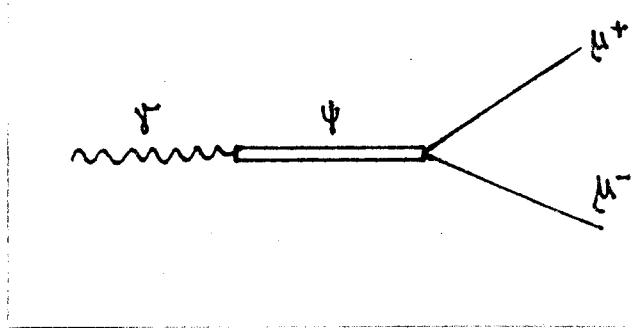
verovatniji raspad ψ na hadrone nego na leptone izbacio je ovu mogućnost. Ove čestice, s druge strane, dosta lako formiraju foto-producijom i uz to efikasni preseci su uporedivi sa onima za vektorske mezone Q, W, ϕ a njihova angularna distribucija sa raspadom na dva miona /samo ako je parnost održana/, se slaže sa jednom vektorskog česticom sa spinom l , $J^P = 1^-$ koji su takodje kvantni brojevi virtuelnog fotona/sl.XV.2/.

Pošto su opažene samo u neutralnom stanju, postoji dobro izgledi da im je izospin nula.

Izgleda dakle sigurno da se radi o česticama hronske prirode svrstanih u klasu koja ne ulazi u okvir simetrije $SU/3$; dokle potiče neophodnost uvođenja jednog novog kvantnog broja koji može biti šarm ili boja.

Model Rujula i Glašova/S.L.Glashow/ i njihovih saradnika se sastoji od razmatranja ψ čestice kao radikalnih i orbitalnih pobudjenih stanja atoma šarmonijuma, formiranog od kombinacije jednog kvarka i jednog antikvarka suprotnog šarma, c i \bar{c} , čije osnovno stanje predstavlja ψ . Jedan takav "atom" može da postoji u orto/paralelni spinovi/ i para/antiparalelni spinovi/ obliku.

Jednom rečju jedna nova spektroskopija; jer pored šarmonijuma koji je stanje sa skrivenim šarmom/potšo je $C = 0$ /, mogu da postoje brojna bozonska stanja sa šarmom/ $C = -1$ /, kombinovana od jednog kvarka koji poseduje šarm i jednog antikvarka bez šarma, i obrnuto.



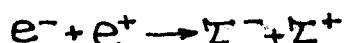
slika XV.2

XVI NOVA FIZIKA

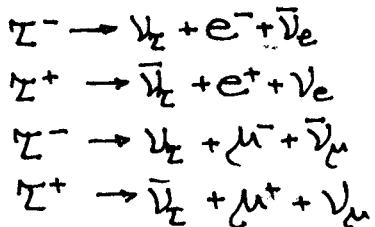
Otkrićem čestice J ili Ψ u Stanfordu i Brookhaven-u, otvoreno je novo poglavlje u fizici elementarnih čestica. Ovo poglavlje, nazvano "nova fizika", dovele je do velikog broja eksperimenta, u svim "visoko energetskim" laboratorijama.

U eksperimentima sa sudarajućim elektron-pozitronskim snopovima u SLAC-u, Pearl je 1975. godine otkrio tau lepton/ Σ /.

Negativni tau lepton i njegova antičestica-pozitivni tau lepton nastaju u sledećoj reakciji:



Eksperimentalno je utvrđeno da se svaki tau lepton raspara, sa srednjim vremenom života od $2,3 \times 10^{-12}$ s, na samo jednu lakšu, nanelektrisanu česticu tj. na elektron ili mion. Prividno narušavanje zakona održanja energije i leptonskog broja objašnjeno je pretpostavkom da u raspodu nastaju dva neutrina, koja u eksperimentu nisu bila registrovana zbog svoje slabe interakcije sa materijalom. Ispitivanje energetskih spektara nastalih elektrona i miona, koje je vršeno 1976. godine, potvrdilo je da je svaki takav raspod tao leptona tročestični, i da se može predstaviti na sledeći način:



Tako je predpostavljeno postojanje tau leptonskog neutrina i tau leptonskog antineutrina. Međutim, oni nisu direktno pokazani u eksperimentima.

Što se tiče kvarkova, peti kvark/b/nazvan "bottom"/dno/ ili "beauty"/lepota/, dobijen je pri Ledermanovim eksperimentima. On je detektovao novo stanje, nazvano Y, koje predstavlja vezano stanje petog kvarka/bb/. Rezultati ukazuju na nanelektrisanje od $-1/3$ za ovaj masivni ~ 5 GeV kvark.

Jedno mesto u tabeli kvarkova još je uvek prazno: šesti kvark/t/nazvan "tpp"/vrh/ili "truth"/istina/još nije otkriven. Postojanje ovog kvarka zahteva simetrija izmedju brojeva leptona i kvarkova, i taj šesti bi trebao da ima nanelektrisanje $2/3e$. Mnogi fizičari su ubedjeni da t kvark postoji i pretpostavljalo se da se može dobiti u $e^+ - e^-$ akceleratoru PETRA. Eksperimenti su pokazali da on ne leži u granicama raspoložive energije. Ako ga PETRA i PEP /Stanford/, čije energije bi trebalo da se nešto povećaju, neotkriju, tad će novi akcelerator LEP moći verovatno da detektuje t kvark ili da pokaže da nepostoji/kvarkovi i leptoni su dati u tabeli 3/.

Naziv kvarka	Simbol	Naziv leptona	Simbol
down/dole/	d	elektron	e^-
strange/strani/	s	negativni mion	μ^-
bottom/dno/ ili beauty/lepota/	b	neg. tau lepton	τ^-
up/gore/	u	elektronski neutrino	ν_e
charm/šarm/	c	mionski neutrino	ν_μ
top/vrh/ ili truth/istina/	t?	tau neutrino	ν_τ

tabela 3

U oblasti teorijske fizike postignut je značajan napredak u pravcu našeg razumevanja jakih interakcija. Ovi uspesi se tiču kvarkova, kao opštih sastojaka hadrona, sa teorijskim predlogom da se jake interakcije opišu takodje faznom teorijom, nazvanom kvantna hromodinamika/QCD/, analogno kvantnoj elektrodinamici/QED/. Fazna teorija jake interakcije u svojoj najelementarnijoj formi vezivanje kvarkova u hadronu tumači bojom kao nosiocem "jakog naboja" a sile izmedju kvarkova razmenom obojenih gluona nulte mase. Fazna grupa je $G_{QCD} = SU(3)$, grupa unitarnih 3×3 matrica, sa jediničnom determinantom. Kvarkovi pripadaju fundamentalnoj reprezentaciji ove grupe/koja ima dimenziju 3/, antikvarkovi kompleksno konjugovanoj - $\bar{3}$, a polja koja prenose jaku interakciju pripadaju pridruženoj reprezentaciji, koja ima dimenziju 8. Kvanti ovih 8 polja su gluoni. Oni podležu samo jaku interakciju pripadaju pridruženoj reprezentaciji, koja ima dimenziju 8. Kvanti ovih 8 polja su gluoni.

kao kvark-gluonska sprega, već i kao direktna sprega medju gluonima.

Prva značajna osobina QCD je odlika asimptotske prema kojoj efektivna kvark-gluonska sprega slabi prema $1/\ln Q^2 \sim -1$, za procese sa velikim Q^2 . Ova osobina QCD objašnjava kvazi-slobodno ponašanje kvarkova.

Druga značajna odlikam QCD je osobina zarobljenosti, zasad još nedokazana teorijski, ali eksperimentalno zahtevana činjenicom da ni jedan kvark nikad nije vidjen oslobođen u sudaru. Ovo se objašnjava osobinom da su jedina fizička stanja singleti boje/bela ili neutralna stanja/. Naj jednostavnija stanja ove vrste su sledeće kombinacije:

qqq - barioni

$q\bar{q}$ - mezoni

Postoji jednostavno fizičko razmatranje zarobljenosti. Kada kvark pokuša da pobegne, javiće se razdvajanje dva obojena subsistema. Ovom rastućem razdvajaju trebalo bi da se suprotstavlja privlačenje ova dva subsistema potencijalnom energijom gluonskog polja, koja nastaje na račun kinetičke energije. Ova potencijalna energija će se veoma lako pretvoriti u kvark-anti-kvark parove, u glavnom lake. Rezultat svega toga je kreiranje novog hadrona dok kvarkovi ostaju zarobljeni. Slično se očekuje u slučaju "bežećih" gluona.

Dakle svaki pokušaj da se hadron razbije u jednostavnije sastojke proizvodi još koplikovaniji više-hidroški sistem. Ovim prastari koncept razbijanja materije do najosnovnijih sastojaka gubi vrednost.

Medju fizičarima danas postoji duboko uverenje da je jedna fazna teorija sposobna da opiše sve interakcije pomoću samo jedne konstante vezivanja.

EPILOG

Ova razmatranja ukazuju da izgledi za budućnost moraju biti prilično različiti, zavisno dali se radi o eksperimentalnom ili teorijskom razvoju. Eksperimentalna fizika ima ogroman zadatak pred sobom i morala bi konkretno da testira osnovna predviđanja novih teorija. Najspektakularnija su ona po elektroslaboj teoriji. Odnose se, u glavnom, na slabe bozone, u prvom redu njihovo istinsko postojanje, vrednost masa i raspada, te njihove sprege, naročito međusobne $/W^+ W^- Z^0$ sprege/. Ovo se nemože postići postojećim akceleratorima, a daleko najbolje za to bi bile mašine sa sudarajućim $e^+ e^-$ snopovima, sa energijama i do reda 200 - 250 GeV tj. 50 - 100 GeV iznad praga proizvodnje $W^+ W^-$ para. Upravo ovo treba da bude Velika elektron-pozitronska mašina /LEP/ u CERN-u,

Teorija je, sa druge strane, pronašla veoma moćno orudje za napredak-neabelovske fazne teorije. Ekstrapolišući promenljive parametre sprege QCD-a i elektroslave teorije, nalazi se da se one polako približavaju i postaju jednake pri velikim prenosima energije-impulsa, reda 10^{15} GeV. Ovo ukazuje na mogućnosti opisivanja svih osnovnih interakcija. To zahteva veću faznu simetriju koja sadrži $SU(3)_C \times SU(2)_W \times U(1)_E$. Takva velika unifikacija može obezbediti odgovore na mnoga važna pitanja. U ovim šemama proton obično gubi svoju apsolutnu stabilnost, raspadajući se sa poluživotom od 10^{33} godina; današnja eksperimentalna granica je 10^{30} godina.

Iza toga leži daleko veći posao, ostavljen od Einstein-a, da se postigne unifikacija sa gravitacijom, silom koja uobičava svemir, ali je suviše slaba da bi se njeni efekti mogli preučavati na čestičnom nivou.

HRONOLOGIJA

1911. Pronalazak Wilsonove maglene komore.
Otkriće kosmičkih zraka.
1919. Lawrence pronalazi prvi ciklotron.
1922. A.Compton opaža Comptonov efekat/rasejanje X-zraka na elektronima/.
1927. Dirac kvantizira elektromagnetno polje, razmatrano kao superpozicija oscilatora.Na ovaj način objašnjava emisiju i apsorbciju svetlosti od strane atoma.
1930. Pauli postavlja hipotezu o neutrinu.
1932. Chadwick otkriva neutron što označava početak moderne nuklearne fizike.
Otkriće pozitrona u kosmičkom zračenju-C.D.Anderson.
1934. Jolijot-Curie otkrivaju veštačku radioaktivnost kao i emisiju pozitrona u β -raspadu.
1935. U analogiji sa elektrodinamikom,H.Yukawa iznosi pretpostavku da nuklearne sile zavise od promene jedne nepoznate čestice,mezona.Mezon mora postojati u stanjima sa dva nanelektrisanja,kojima odgovara γ^{\pm} .
1936. Anderson i Neddermeyer otkrivaju mione u kosmičkim zracima.
1938. Heitler i Kemmer pretskazuju postojanje T^0 .Ovo je već kompletan izospinski formalizam.
- Izmedju 1939.il1945.Powell pronalazi tehniku za detekciju čestica pomoću fotografске emulzije.Ovo će usloviti uspešnija istraživanja kosmičkih zrakova i dovešće do razlikovanja miona i piona.
1940. Wigner proučava unitarnu reprezentaciju Poincaré-ove grupe.
Pauli dokazuje vezu izmedju spina i statistike u teoriji polja.
1943. Heisenberg daje definiciju S-matrica.
1944. Leprince-Ringuet i Lhéritier otkrivaju znakove u kosmičkim zracima za postojanje čestice mase veće od $1000 m_e$.
1946. Pontecorvo predlaže radiohemski metod za detekciju niskoenergijskih neutrina.
1947. Lattes,Occhialini i Powel otkrivaju pion u kosmičkom zračenju.
Rochester i Butler otkrivaju trake V-oblika u emulzijama,prvi nagoveštaj novih čestica koje suprotno pionu, nisu očekivane.Nazvane su "čudne".

1948. Foley i Kusch odredjuju anomalni magnetni moment elektrona.
- Gardner i Lattes odredjuju masu i srednji život piona.
1949. Feynman objavljuje svoju teoriju elektrodinamike koja se bazira na Feynman-ovim dijagramima.
- Wigner ističe ideju o konzervaciji bariona.
- Otkriće Σ -mezona /tro-pionski oblik raspada K^- u kosmičkim zracima.
1951. Prvo proučavanje pion-nukleonskog rasejanja i $\pi^+ - d$ reakcije.
- Otkriće Λ^0 i Θ^0 /dvo-pionski oblik raspada K^- .
- Razlika izmedju izmerenim Θ^0 i Σ -masama postaju sve manje i dovode do predloga da parnost nije očuvana.
1953. Prvo opažanje slobodnih /anti/neutrina od strane Reines-a i Cowan-a.
- Gell-Mann i Nishijama otkrivaju izotopske multiplete hadrona i uvode stranost.
- Odredjivanje spina π^\pm .
- Prvi put se u laboratoriji dobijaju teške čestice u Brookhaven cosmotronu.Otkriće Σ^\pm i K^\pm u Θ obliku.
- Hofstadter meri form faktor protona tj.raspodelu nanelektrisanja.
1954. Otkriće oblika K -raspada: $K \rightarrow \mu^+ \nu$
- Lüders daje prvi dokaz PCT teoreme, uskoro dokazane od strane Paulija.
1955. Ustanovljena je parnost π^- .
- Konzervacija leptonskog broja.
- Otkriće i posmatranje antiprotona u Berkeley-u.
- Prvo primenjivanje disperzionih relacija.
1956. Lee i Yang ukazuju da je jednakost masa Θ i Σ objašnjena raspadom jedne iste čestice, u kojoj se parnost ne održava, čestice K^0 . Predlažu eksperiment da se potvrdi ova hipoteza.
1957. Sledeći predlog Lee-a i Yang-a, Wu je otkrila raspad ^{60}Co i dokazala neodržavanje parnosti u slabim interakcijama. Garwin, Lederman i Weinrich su ovo istovremeno otkrili kod Λ -raspada.
- Salam, Landau i Lee i Yang nezavisno jedni od drugih predlažu dvokomponentnu teoriju neutrina.
- Nambu ukazuje na postojanje bozonskih rezonancija za objašnjenje nukleonskog form faktora.

1959. Potvrđuje se parnost γ^0 .
Parnost K.
Regge otkriva polove angуларног момента амплитуде нерелативистичког расејања.
1960. Fadeev rešava проблем расејања три тела у квантној механици.
1961. Glashow iznosi теорију електро-слабих интеракција.
Regge-ова идеја о половима је применета на класификацију честича и расејање на високој енергији.
Otkriće $\Theta, \omega, \eta, K^*, \chi^*$.
Меренje разлике мase K^0 у експерименту који се базира на принципима предложеним од стране Pais-а и Piccioni-а. Gell-Mann i Ne'eman iznose мишљење да су јаке интеракције инваријантне у односу на групу SU/3/.
Prva varničnakomora постaje upotrebljiva.
1962. Prva анализа спина и парности χ rezонанције.
Otkriće Ξ, f^0 i χ' .
Доказ о постојању два нутрона: посебна конзервација електронског и мionskog броја.
1963. Otkriće ψ i B.
Teorijsko одредјивање шарма.
Примена SU/3/ на слабу интеракцију лептона.
1964. Gell-Mann objavljuje алгебру струја, повезујући векторске и алтијално-векторске струје слабих интеракција.
Otkriće нарушења PC дво-пионаским распадом дуживећих K^0 .
Otkriće Ω^- чије постојање и маса су предвидјени са SU/3/.
Gell-Mann i Zweig формулешу квark модел.
Greenberg iznosi теорију по којој сваки кварт има три боје.
Higgs iznosi механизам преко којег векторски меони добијају масу. Спонтано нарушење симетрије.
1966. Predviđanje постојања Regge трајекторија у пиона-нуклеонском систему.
Примењивање алгебре струја на слабе и јаке интеракције укључујући и емисију спорих пиона.
1967. Weinberg i Salam предлаže фазну теорију, која објединђује слабе и електромагнетне интеракције и предвиђају постојање нутралних струја.
1968. Меренje реакције $e^+ e^- \rightarrow \chi$
1969. Björken iznosi концепт инваријантности скале, Feynman концепт партона за објашњење ових резултата, покazu-

- jući zrnastu strukturu nanelektrisanja unutar protona.
1970. Glashow, Iliopoulos i Maiani predlažu da se Weinberg-Salam-ovom modelu doda kvantni broj šarm i četvrti "šarmantični" kvark.
1971. Renormalizaciju faznih teorija slabih i elektromagnetskih interakcija je pronašao t' Hooft.
1972. Eksperiment u Gargamelle-u sa neutrinom ukazuje na sličnost između form faktora slabih i elektromagnetskih interakcija.
- 1972-1980. Potvrda kvark-partonskog modela merenjem ν_μ i $\bar{\nu}_\mu$ dogadjaja iz nanelektrisanih struja u CERN-u.
1973. Rezultati u ISR-u ukazuju na porast preseka proton-protonskog reakcije pri porastu energije.
Otkriće slabih neutralnih struja.
Otkriće fenomena velikog transverznog momenta.
1974. Otkriće J/ψ čestica.
1975. U Batavia-u je utvrđeno da je masa intermedijskog bozona manja od 17 GeV.
U Brookhaven-u je dobiten prvi barion sa šarmom iz reakcije sa neutrinom u vodoničnoj mehurastoj komori.
Parovi $\mu^+ \mu^-$ dobiteni u $\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$ dogadjajima pokazuju nastanak čestica sa šarmom u reakcijama izazvanim neutrinima.
Detekcija leptona u SPEAR-u.
1976. Procesi $\nu_\mu + Z \rightarrow \mu^- + e^+ + \dots$ i $\nu_\mu + Z \rightarrow \mu^+ + e^- + \dots$ pokazuju nastanak čestica sa šarmom.
Masa ν_e je manja od 35 eV.
1977. Otkriće upsilon mezona u FERMILAB-u.
1978. Određivanje $\sin^2 \theta_W$ u SLAC-u.
Masa ν_μ je manja od 0,57 MeV.
1979. Srednji život čestica sa šarmom slaže se sa teorijskim predviđanjima/nekoliko puta 10^{-13} s/.

LITERATURA

1. W.E.Burcham, Nuklearna fizika - uvod /sa fizikom čestica/, Naučna knjiga, Beograd, 1974.
2. Y.Goldschmidt - Clermont, Thirty years of progress in elementary particle physics, Cern/EP/YGS/jr, Geneva, 7.May 1976.
3. L.Van Hove, High-energy physics after 25 years the discovery of the mesons, Cern 72-18, Geneva, 18.oct.1972.
4. L.Van Hove, Rewiev of recent advances in high energy physics, Computer physics Communication 22/1981/187-197, North-Holland publishing company.
5. D.M.Ivanović, Kvantna mehanika, Naučna knjiga, Beograd, 1974.
6. G.J.Kayas, Les particules elementaites de Thales à Gell-Mann, Ecole polytechnique, Palaiseau, 1976.
7. L.Marinkov, Osnovi nuklearne fizike, Novi Sad, 1976.
8. J.Mulvey, The new frontier of particle physics, Vol.278, Oxford, 29.march 1979.
9. R.Omnés, Introduction à l'étude des particules elementaires, Paris, 1970.
10. A.Zichichi, The role of theoretical and experimental physics in the understanding of nature, Cern, Geneva, 1973.
11. V.F.Weisskopf, The 1979 Bernard Gregory lecture, Cern, 80-03, Geneva, 27.febr.1980.
12. Savremena fizika i njene društvene implikacije, Institut "Boris Kidrič", Vinča, Beograd, 1981.
13. ФИЗИКА МИКРОМИРА - МАЛЕНКАЯ ЭНЦИКЛОПЕДИЯ, МОСКВА, 1980.