

# Petdeset let kvarkov

Janez Strnad

»Kvark« je veliko manj razširjena beseda kot »atom«, čeprav so kvarki pravzaprav »atomi zadnjega dela 20. stoletja«.

Po drugi svetovni vojni si nekaj časa ni bilo težko ustvariti pregleda nad »osnovnimi« delci. *Protoni* in *nevtroni* sestavljajo atomska jedra ter skupaj z *elektroni* atome. *Nevtrino* nastane pri radioaktivnem razpadu nekaterih jeder in delcev. *Fotoni* so kvanti elektromagnetnega polja, pozitivni, nevtralni in negativni *pioni* prenašajo silo med protoni in nevtroni. Vsak od naštetih delcev ima svoj antidelec z enako maso in enakim razpolovnim časom ter nasprotnim električnim nabojem. Foton je sam svoj antidelec in prav tako nevtralni pion, negativni pion pa je antidelec pozitivnega in pozitivni pion antidelec negativnega. To je bil *model dvanajstih delcev*. Vsak od delcev je imel svojo vlogo. Večino delcev so napovedali, preden so jih zaznali pri poskusih. Proton in nevtron so šteli med »težke« delce, *barione*, elektron in nevtrino med »lahke«, *leptone*, pion pa med »srednjetežke«, *mezone*.

Seznam je kmalu postal bolj zapleten. Leta 1947 so pri reakcijah delcev iz vesolja z atomskimi jedri v ozračju v meglični celici v magnetnem polju opazili sledi v obliki črke  $\Lambda$ . Nastal je neobstojni delec brez naboja in razpadel na pozitivni in negativni delec. Novi delci so bili dveh vrst. Eni so razpadli na proton in negativni pion in so sodili k barionom, drugi pa na pozitivni in negativni pion in so sodili k mezonom.

Leta 1952 se je za nove delce začel zanimati Murray Gell-Mann. Delci so imeli nenavadne lastnosti. Pri reakcijah so nastajali razmeroma pogosto zaradi močne interakcije, po domače sile, kakršna deluje med protoni in nevtroni. Razpadali pa so z razmeroma velikim razpo-

lovnim časom zaradi veliko šibkejše šibke interakcije. Pri reakcijah in razpadih delcev zaradi močne interakcije je veljalo *totalitarno načelo*: mogoče je vse, kar ni prepovedano. Kratek razpolovni čas nenavadnih novih delcev je torej moral biti prepovedan.

Protona in nevtrona sploh ne bi mogli razlikovati, če bi bilo mogoče izključiti električni naboj. Zato so proton in nevtron opisali kot en delec, *nukleon*, kot dvojček s težiščem naboja pri



*Murray Gell-Mann je bil rojen leta 1929 v New Yorku v judovski družini, ki se je priselila iz Galicije in Bukovine. Štirinajstleten se je vpisal na univerzo Yale in jo z osemnajstimi leti končal. Po diplomu je nadaljeval študij na Massachusettskem tehničnem inštitutu (MIT) in potem na Inštitutu za višje študije v Princetonu. Leta 1951 je opravil doktorat iz jedrske fizike in naslednje leto dobil mesto na univerzi v Chicagu. Leta 1955 je prešel na Kalifornijski tehnični inštitut Caltech v Pasadeni, na katerem je ostal do upokojitve leta 1992. Gostoval je na številnih univerzah in raziskovalnih ustanovah po svetu. Leta 1961 je dobil Nobelovo nagrado »za prispevke in odkritja o razvrstitvi osnovnih delcev in njihovih medsebojnih delovanjih«. Dobil je triindvajset pomembnih nagrad in priznanj. Leta 1984 je ustanovil Inštitut za raziskovanje kompleksnih sistemov v Santa Feju.*

*Vir: Wikipedia.*

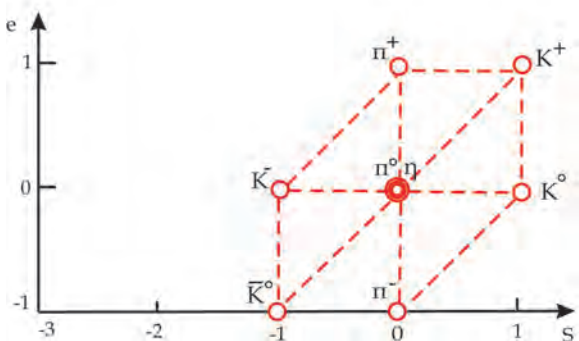
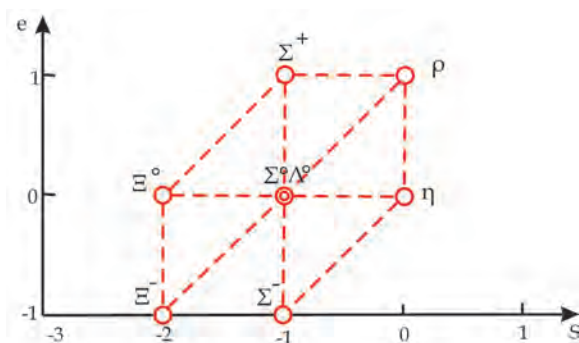
$\frac{1}{2}$ . Proton ima namreč naboj 1 in nevtron naboj 0, če naboj izrazimo z osnovnim nabojem. Po reakcijah med delci in razpadi so sklepali, da je nenavadni barion  $\Sigma$  trojček z naboji 1, 0 in -1 s težiščem naboja pri 0. To težišče je premaknjeno za  $-\frac{1}{2}$  proti težišču naboja nukleona, ki je navaden delec in ga vzamemo za osnovo. Pion ima težišče naboja pri 0, ker ga sestavlja trojček z naboji 1, 0 in -1. Nenavadni mezon K, *kaon*, sestavljata dva dvojčka. Prvi dvojček tvorita delec  $K^+$  z nabojem 1 in delec  $K^0$  z nabojem 0 s težiščem pri  $\frac{1}{2}$ , drugi dvojček pa delec  $K^-$  z nabojem -1 in delec  $\bar{K}^0$  z nabojem 0 s težiščem pri  $-\frac{1}{2}$ . Prvi dvojček ima težišče naboja premaknjeno za  $\frac{1}{2}$  in drugi za  $-\frac{1}{2}$  glede na pion, ki je navaden delec in ga vzamemo za osnovo.

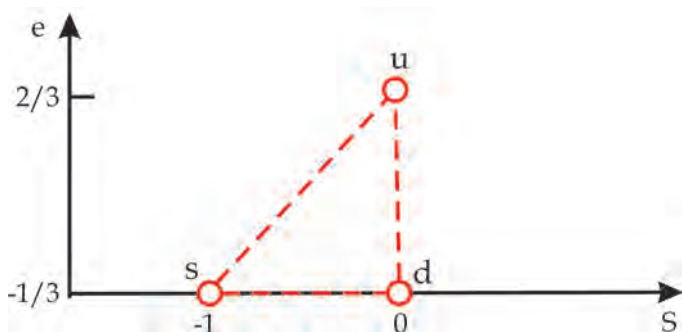
Gell-Mann je nenavadno vedenje novih delcev pojasnil z novim kvantnim številom – *čudnostjo* – in *ohranitvenim zakonom* zanj. Ime je našel v aforizmu Francisa Bacona: »Ni je dovršene lepote, ki ne bi imela neke čudnosti v razmerjih.« Ohranitveni zakon zahteva, da je vsota prispevkov h kaki količini pred reakcijo ali razpadom enaka vsoti prispevkov po reakciji ali razpadu. Čudnost je vpeljal kot dvakratni premik težišča naboja delcev skupine. Barion  $\Sigma$  je trojček s čudnostjo -1. Mezona  $K^+$  in  $K^0$  sestavljata dvojček s čudnostjo 1 in mezona  $K^-$  in  $\bar{K}^0$  dvojček s čudnostjo -1.

Pri reakciji navadnih delcev zaradi močne interakcije nastaneta delca s čudnostjo 1 in -1. Čudnost pred reakcijo je enaka nič in prav toliko je čudnost po reakciji, tako da se čudnost ohrani. Čudni delec pa razpade sam zaradi šibke interakcije na navadne delce. Pred razpadom je čudnost na primer enaka -1, po razpadu pa enaka nič, tako da se čudnost ne ohrani in se zaradi tega izrazito poveča razpolovni čas. Uganko so pomagali razvozlati tudi drugi fiziki. Od njih omenimo samo Japonca Kazuhika Nišidžimo, ki je neodvisno od Gell-Manna vpeljal novo kvantno število.

Trojčke in dvojčke delcev, ki se razlikujejo le po naboju in ki jih ne bi mogli med seboj razlikovati, če bi lahko izključili električni naboj, imenujemo *multiplieti*. Gell-Mann je leta 1961 multiplete povezal v večje skupine – *supermultiplete*. Nukleona s čudnostjo 0, trojček  $\Sigma$  in osamljeni delec  $\Lambda^0$  s čudnostjo -1 ter dvojček barionov  $\Xi$  s čudnostjo -2 je uredil v supermultiplet osmih barionov. Podobno je dvojček kaonov s čudnostjo 1, trojček pionov s čudnostjo 0, dvojček kaonov s čudnostjo -1 in mezon  $\eta$  brez naboja in s čudnostjo 0 uredil v supermultiplet osmih mezonov. Poleg tega je sestavil supermultiplet desetih barionov in še drugi supermultiplet osmih mezonov. Pri tem je izhajal iz teoretične osnove za simetrijo, ki jo matematiki zaznamujejo s  $SU(3)$ , in jo je imenoval *osmera pot* po nekem Budovem izreku. Napovedal je,

*Gell-Mannova supermultiplleta: osmerica mezonov in osmerica barionov. Na vodoravno os je nanesena čudnost S, na navpično pa električni naboj e.*





*Gell-Mannovi osnovni gradniki: kvarki u, d in s.*

da obstaja barion  $\Omega^-$  z določeno maso. Delec s skoraj natanko napovedano maso so zares zaznali. Po tem so Gell-Manna imenovali Mendelev dvajsetega stoletja. Kot je Mendelev s periodno preglednico razvrstil znane elemente in napovedal lastnosti neznanih, je Gell-Mann v preglednici razvrstil znane barione in mezone ter napovedal lastnosti neznanih. Tudi pri tem smo opisali samo glavne Gell-Mannove poteze. Izraelski fizik Yuval Ne'eman je neodvisno od njega prišel do osmere poti. Japonski fizik Susumo Okubo je neodvisno izpeljal enačbo, ki je napovedala maso članov supermultipletov. Gell-Mannove preglednice so kazale simetrijo, značilno za like, ki jih je mogoče sestaviti iz majhnih trikotnikov. Gell-Mann je leta 1964 majhnemu trikotniku priredil tri osnovne gradnike, ki jih je imenoval *kvarki*. Misli je na krik galeba, na tajinstvenost in trojnost. Pozneje je v *Finneganovem bedanju* Jamesa Joyceja naletel na vrstico: »Tri kvarke za mojstra Marka.« Že leta 1956 je Šoiči Sakata z japonsko raziskovalno skupino obravnaval barione kot sestavljene iz trojice delcev, ki je ustrezala protonu, nevtrону in delcu  $\Lambda$ . Pred tem sta leta 1949 Enrico Fermi in Čen Ning Jang domnevala, da pion sestavlja nukleon in njegov antidelec.

Gell-Mann je po legi v majhnem trikotniku imenoval kvark u, po angleškem up, gor, kvark d, down, dol, in kvark s, strange, čuden, ali sideways, vstran. Kvarki se od dotlej znanih delcev razlikujejo po nabojih, ki so deli osnovnega naboja. Kvark u ima naboj  $2/3$ , kvarka d in s pa naboj po  $-1/3$ . Barione sestavljajo trije kvar-

ki, na primer proton dva kvarka u in kvark d, nevtron pa dva kvarka d in kvark u. Mezone sestavljata kvark in antidelec kvarka, *antikvark*. Pozitivni pion na primer sestavljata kvark u in antikvark  $\bar{d}$ , pozitivni kaon pa kvark u in antikvark  $\bar{s}$ .

V članku, v katerem je vpeljal kvarke, je Gell-Mann zapisal: »Zabavno je razmišljati o tem, kako bi se vedli kvarki, če bi bili fizikalni delci s končno maso (in ne matematične tvorbe, kar bi bili v mejnem primeru, v katerem bi imeli neskončno maso).« Pripovedujejo, da se je uredniku evropske revije *Physics Letters* članek zdel nor, a ga je objavil zaradi Gell-Mannovega ugleda. Misli si je, da bodo krivdo pripisali Gell-Mannu, če se bo pokazalo, da je članek neumen. Če ga ne bi objavil in bi se pokazalo, da je članek tehten, pa bi krivdo pripisali njemu. Gell-Mann je do leta 1972 še večkrat zatrdil, da kvarki niso »realni«, da so »namišljeni« ali »matematični«. Zapisal je tudi: »Če kvarkov ne bodo našli, se spomnite, da nikoli nisem rekel, da jih bodo.« Ne gre spregledati, da so dotlej barione in mezone imeli za osnovne, sestavljene, in se je misel, da so sestavljeni, tedaj zdela prevratniška.

Preglednica osmerice mezonov navaja sestavo mezonov iz kvarkov in antikvarkov in maso v masah elektrona ter razpolovni čas v sekundah. \* Mezona  $\pi^0$  in  $\eta$  sta sestavljena iz dveh kombinacij  $u\bar{u}$ ,  $d\bar{d}$  in  $s\bar{s}$ . \*\* Mezona  $K^0$  in  $\bar{K}^0$  razpadata kot kratkoživa sestavina z razpolovnim časom  $6,19 \cdot 10^{-11}$  s in dolgoživa sestavina z razpolovnim časom  $3,58 \cdot 10^{-8}$  s.

### Osmerica mezonov

sestava masa razpolovni čas

|             |            |             |                        |
|-------------|------------|-------------|------------------------|
| $\pi^+$     | $u\bar{d}$ | 273,1 $m_e$ | $1,80 \cdot 10^{-8} s$ |
| $\pi^-$     | $d\bar{u}$ | "           | "                      |
| $\pi^0$     | *          | 264,1       | $5,82 \cdot 10^{-17}$  |
| $K^+$       | $u\bar{s}$ | 996,1       | $8,59 \cdot 10^{-9}$   |
| $K^-$       | $s\bar{u}$ | "           | "                      |
| $K^0$       | $d\bar{s}$ | 973,9       | **                     |
| $\bar{K}^0$ | $s\bar{d}$ | "           | **                     |
| $\eta$      | *          | 1071,4      | $3,85 \cdot 10^{-10}$  |

Preglednica osmerice barionov navaja sestavo barionov iz kvarkov in maso v masah elektrona ter razpolovni čas v sekundah

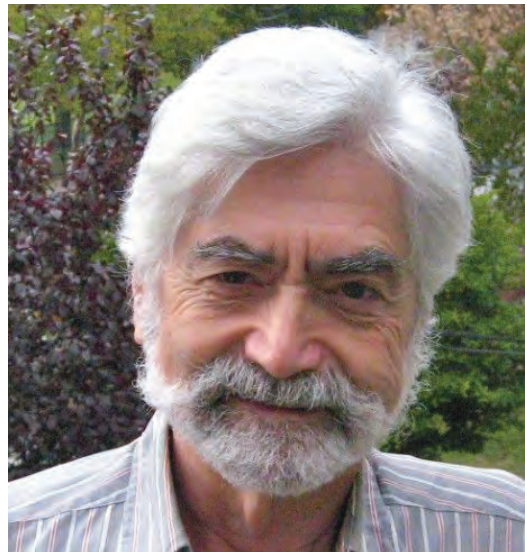
### Osmerica barionov

sestava masa razpolovni čas

|            |       |              |                       |
|------------|-------|--------------|-----------------------|
| $p$        | $uud$ | 1836,2 $m_e$ | obstojen              |
| $n$        | $udd$ | 1838,7       | 614,8 s               |
| $\Lambda$  | $uds$ | 2183,3       | $1,82 \cdot 10^{-10}$ |
| $\Sigma^+$ | $uus$ | 2327,5       | $5,94 \cdot 10^{-11}$ |
| $\Sigma^0$ | $uds$ | 2333,8       | $5,13 \cdot 10^{-20}$ |
| $\Sigma^-$ | $dds$ | 2343,3       | $1,03 \cdot 10^{-10}$ |
| $\Xi^0$    | $uss$ | 2573,2       | $2,01 \cdot 10^{-10}$ |
| $\Xi^-$    | $dss$ | 2585,7       | $1,14 \cdot 10^{-10}$ |

Kvarke so iskali v delcih iz vesolja in so merilnike namestili v balone in postavili na vrhove gora. Iskali so jih na dnu morja, v polarnem ledu, v prahu v zraku. Iskali so jih med delci, ki so nastali pri reakcijah hitrih nabitih delcev iz pospeševalnikov. Nikjer jih niso našli. Postopno so se sprijaznili z ugotovitvijo, da so kvarki le računsko pomagalo in ne obstajajo kot prosti delci.

Na podobno misel kot Gell-Mann je neodvisno od njega prišel George Zweig. V drugem letu podiplomskega študija na Caltechu mu je profesor za kvantno mehaniko svetoval, naj se oprime eksperimentalne fizike, češ da pozneje kot teoretik ne bo imel časa, da bi se ukvarjal z njo. Tako se je Zweig pridružil skupini Alvina Tollestrupa, ki je merila ob Bevatronu. To je bil protonski sinhrotron v Državnem laboratoriju Lawrence v Berkeleyju, ki je pospeševal protone do energije 6,2 GeV. (Elektronvolt, eV, je enota za merjenje energije delcev. Za 1 eV se poveča energija delca z enim osnovnim nabojem, ko v praznem prostoru preleti napetost 1 volt. Giga-



George Zweig je bil rojen leta 1937 v Moskvi. Oče in mati sta kot avstrijska državljana judovskega rodu živela v Nemčiji in leta 1933 odšla v Rusijo, kjer je oče kot inženir delal za vlado. Po izteku pogodbe so živeli na Dunaju, od koder so se leta 1938 izselili v Združene države Amerike. Zweig je študiral na univerzi Michigan in leta 1959 končal prvo stopnjo iz matematike. Nato je študiral fiziko na Caltechu. Po doktoratu je leta 1963 odšel za leto dni v CERN v Ženevo. Leta 1964 se je vrnil in čez tri leta postal profesor na Caltechu. Leta 1983 je prešel v Državni laboratorij v Los Alamosu. Začel je raziskovati v nevrobiologiji, kako polž v ušesu sprejema zvočne dražljaje. Sestavil je napravo, ki posnema mehanični odziv srednjega ušesa na zvok. Leta 1985 je ustanovil družbo, ki izdeluje tretjo različico naprave. Objavlja in sodeluje na strokovnih sestankih. Vir: Wikipedia.

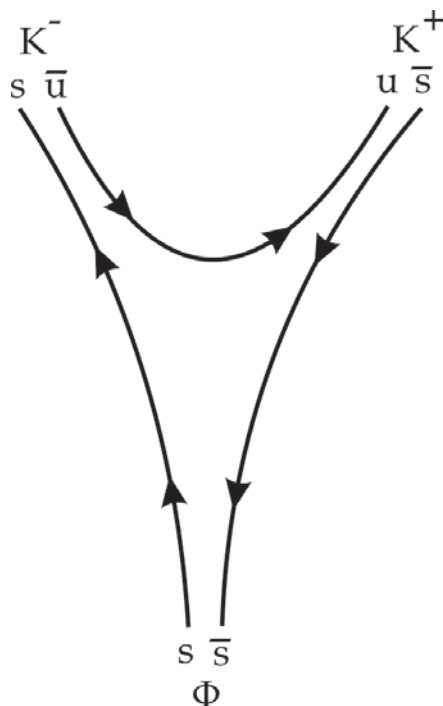
elektronvolt, GeV, je milijarda elektronvoltov.) Pri reakciji protonov z veliko energijo s protoni v jedrih tarče so nastali med drugimi delci tudi kaoni  $K^+$ . Skupina je raziskovala njihov razpad  $K \rightarrow \pi^+ + \pi^0 + \gamma$ . Zweig pa se je osredotočil na razpad  $K \rightarrow \mu^+ + \pi^0 + \nu$ . Do leta 1962 je zbral veliko posnetkov razpada z iskrnimi celicami. Iskal je razpade posebne vrste, a ni našel nobenega takega.

Na Tollestrupov predlog se je z Gell-Mannom večkrat pogovarjal o razpadu kaonov. Zdaj je Gell-Manna prosil, da bi bil njegov mentor pri doktoratu. Gell-Mann je odhajal na sobotno leto in ni mogel biti mentor. Zweiga pa je priporočil Richardu Feynmanu, ki je mentorstvo sprejel. Tako je Zweig leta 1963 opravil doktorat in nato za leto dni odšel v CERN v Ženevo.

Že med delom za doktorat je postal pozoren na članek o mezonu  $\phi$ . Mezon  $\phi$  je razpadel večinoma na par kaonov  $K^+ + K^-$  ali  $K^0$  in  $\bar{K}^0$ , medtem ko je Zweig pričakoval, da bo večinoma razpadel takole  $\phi \rightarrow \pi^+ + \pi^0 + \pi^-$ . Vse je kazalo, da je ta razpad prepovedan, če-

prav za to ni bilo videti nobenega razloga. Po dolgem razmišljanju se je Zweig domislil, da bi opazovani razpad pojasnil, če bi privzel, da so mezoni sestavljeni in da gradniki ob razpadu ne prenehajo obstajati. Po zgledu Fermija in Janga je vzel, da mezon  $\phi$  sestavljata gradnik in antidelec gradnika. Razvil je model z gradniki, ki jih je imenoval *asi*. Pri tem se je skliceval na simetrijo SU(3), osnovo osmere poti. Svoje ugotovitve je zbral v poročilu *Model SU(3) za simetrijo močne interakcije in njegov zlom*. Poročilo je izdelal v dveh tipkanih različicah, prvo januarja in na skoraj osemdesetih straneh drugo februarja.

V poročilih je Zweig razvil svoj model in zapisal veliko enačb, ki so povezovale mase delcev, ter rezultate nazorno ilustriral. Pri objavi pa je naletel na težave. Načelnik teoretične skupine CERN Leon van Hove je želel, da vsi članki iz CERN-a izidejo v evropskih revijah. Zweig pa je članek mislil objaviti v ameriški reviji. Prišlo je do spora in van Hove je celo tajnici prepovedal, da bi tipkala kaj Zweigovega. Pozneje kot



*Mezon po Zweigovi zamisli in Zweigovem pravilu razpade na določeni način. Na poenostavljeni risbi, tako imenovanem Feynmanovem diagramu, črte opišejo delce. Čas teče navpično navzgor, kraju pa ustreza vodoravna smer. Kvark opiše črta, usmerjena v prihodnost, antikvark pa črta, usmerjena v preteklost. Pri razpadu nastane nov par kvarka in njegovega antikvarka. Tako je Zweig pojasnil prevladujoči razpad mezona  $\phi$ .  $s$  in  $u$  označujeta kvarka,  $\bar{s}$  in  $\bar{u}$  pa antikvarka.*

urednik med ponatiske objav ni uvrstil nobene Zweigovega dela. Tudi sicer je Zweigova zamisel naletela na nasprotovanje. Zweig je zapisal: »Odziv skupnosti teoretičnih fizikov na model asov ni bil prijazen. Da bi objavil poročilo CERN-a v obliki, v kateri sem ga želel objaviti, je bilo tako težavno, da sem nazadnje odnehal. Ko so na oddelku za fiziko ene od vodilnih univerz razpravljali o moji namestitvi, je njihov glavni teoretik, najbolj cenjeni predstavnik teoretičnih fizikov, na sestanku fakultete preprečil namestitev, ko je s poudarkom trdil, da je model asov delo 'šarlatana'.« Neredko naletimo na trditev, da si je Zweig s svojim modelom otežil poklicno pot. Gell-Mann - najbrž zaradi ugleda - ni imel takih težav. Zweigovega dela pa tudi po obsegu ni mogoče primerjati z Gell-Mannovim. Sploh nismo omenili vseh Gell-Mannovih dosežkov. Nekateri menijo, da je Nobelov odbor Gell-Manna pravzaprav nagradil za življenjsko delo.

Z zakasnitvijo je Zweig vendarle doživel nekaj priznanja. Feynman, ki je leta 1965 dobil Nobelovo nagrado, je leta 1977 njega in Gell-Manna predlagal za Nobelovo nagrado. Česa podobnega Feynman ni naredil ne prej ne pozneje. Ni jih malo, ki mislijo, da se je Zweigu zgodila krivica, ker ga je Nobelov odbor spregledal.

Do danes se je pogled na kvarke dalje razvil in korenito spremenil. Zdaj veljajo kvarki sicer za osnovne delce, ki pa ne morejo obstajati prosti. Leta 1966 so z obstreljevanjem tarč iz vodika in težkega vodika z elektroni z energijo 20 GeV ugotovili, da je naboj v protonu in nevtronu zbran v treh točkastih delcih. Prosti kvarki ne obstajajo zaradi posebnosti sile med kvarki. Pri veliki energiji, ki ji ustreza majhna razdalja, sila med kvarki ni velika in se kvarki vedejo skoraj kot prosti. Pri majhni energiji, ki ji ustreza večja razdalja, pa med kvarki deluje velika sila. Pri veliki razdalji sila tudi ne poje ma z naraščajočo razdaljo. Zato kvarka ni mogoče iztrgati iz bariona ali mezona. Na račun

dovedene energije nastane nov mezon ali par bariona in antibariona in kvarki ostanejo *ujeti* v barionu ali mezonu. Pozneje so ugotovili, da obstajajo še drugi kvarki. Četrty kvark c, charm, čar, so zasledili leta 1974 (ta kvark je Zweig predvidel, v igri s kartami so štirje asi), peti kvark b, bottom, dno, tri leta pozneje in kvark t, top, vrh, leta 1994. Tudi število leptonov je naraslo na šest: elektron, mion, taun in elektronski nevtrino, mionski nevtrino in tauonski nevtrino, tako da obstaja simetrija med kvarki in leptoni. Šest kvarkov in šest leptonov za zdaj velja za nesestavljene, osnovne delce. Omenili smo le nekaj potez v razvoju modela kvarkov. Danes si *standardnega modela delcev* brez kvarkov sploh ne bi mogli zamisliti.

#### Literatura:

Strnad, J., 2000: *Fiziki, 3. del. Ljubljana: Modrijan. 193.*

Zweig, G., 2013: *Concrete quarks. The beginning of the end, CERN Colloquium, na spletu.*