

DO STANDARDNEGA MODELA

Janez Strnad

Fakulteta za matematiko in fiziko, Univerza v Ljubljani

Povzetek. - Dve veliki mednarodni raziskovalni skupini ob Velikem hadronskem trkalniku LHC v CERN-u sta zasledili delec z nekaterimi lastnostmi napovedanega Higgsovega bozona. Potrditev tega bi podprla zadnjo teoretično napoved standardnega modela delcev. Preden razčlenimo ozadje napovedi, orišimo razvoj našega znanja o zgradbi snovi. Standardni model delcev je eden od najpomembnejših dosežkov fizike dvajsetega stoletja. O tem pričajo tudi Nobelove nagrade.

Abstract. - Two great international collaborations at the Large Hadron Collider LHC at CERN observed a particle with some characteristics of the predicted Higgs boson. Confirmation would present the test of the last theoretical prediction of the Standard model of particles. Before analyzing the background of the prediction the development of our knowledge of the structure of matter is sketched. The Standard model is one of the most important achievements of twentieth century physics. This is witnessed also by the Nobel prizes.

ZAČETKI

Množico različnih snovi sestavljajo kombinacije majhnega števila nedeljivih atomov. Tako sta pred 2400 leti mislila Levkip in Demokrit v Abderi nasproti otoka Thasos v grški Trakiji. Tedaj so poznali štiri »elemente«: zemljo, vodo, zrak in ogenj. V Stari Grčiji so zgolj razmišljali, naravoslovje pa je razmišljanje povežalo z opazovanjem in merjenjem. Tako je današnje znanje le šibko povezano s starogrškim. Dandanes se osnovne zamisli navzamemo v osnovni šoli.

Robert Boyle je leta 1661 zagotovil, da je element vsaka snov, ki je ni mogoče razstaviti na preprostejše snovi. John Dalton je leta 1808 zamisel podprl in dodal, da elemente sestavljajo atomi. Vsi atomi kakega elementa so med seboj popolnoma enaki, a se razlikujejo od atomov drugih elementov. Spočetka so Daltonove atomske mase kemikom zadostovale, da so pojasnili, v kakšnem masnem razmerju se elementi vežejo drug z drugim. Proti koncu 19. stoletja pa so atomi v fiziki postali delci z maso in velikostjo.

Leta 1897 so odkrili *elektron*. Joseph John Thomson (Nn 1906, Nn pomeni Nobelova nagrada iz fizike) si zasluge za odkritje deli z drugimi fiziki. Vse je presenetilo, da ima elektron 1836-krat manjšo maso od vodikovega iona. Nosi negativni *osnovni naboj*, to je po absolutni vrednosti najmanjši prosti naboj v naravi, če izvajamo naboj nič. Elektron je bil prvi *osnovni delec* in še danes velja za nesestavljenega. V letu odkritja je Pieter

Zeeman ugotovil, da je valovna dolžina svetlobe odvisna od magnetnega polja, v katerem sevajo atomi, in Hendrik Antoon Lorentz je po tem sklepal, da elektroni sestavljajo atome (Nn 1902). Da so atomi sestavljeni, bi bilo mogoče domnevati že po *periodni preglednici elementov* Dmitrija Mendelejeva iz leta 1869. „Če je število ‘osnovnih delcev’ veliko in kažejo ti urejenost, so delci sestavljeni iz bolj osnovnih delcev.“ Ta izkušnja se je večkrat obnesla, čeprav je ne gre jemati za zakon narave.

Proti koncu 19. stoletja so natančno izmerili spekter črnega telesa. Max Planck ga je leta 1900 pojasnil z zamisljo, da črno telo energijo s sevanjem izmenjuje v obrokih, *energijskih kvantih* (Nn 1918). Delo v termodinamiki, posebej v zvezi z entropijo, mu je dalo pogum, da je sprejel nenavadno zamisel. Leta 1905 jo je Albert Einstein povzel in zatrdil, da energija v kvantih tudi potuje (Nn 1921). Pozneje so kvante elektromagnetnega polja imenovali *fotoni*.

ZGRADBA ATOMOV

Leta 1911 so v laboratoriju Ernesta Rutherforda (Nn 1908, kemija) opazovali odklon delcev α pri prehodu skozi zelo tanke kovinske lističe. Nekateri delci so se odklonili za velik kot. Po tem je Rutherford ugotovil, da je pozitivni naboj atoma zbran v *jedru*. Jedro je stotisočkrat manjše od atoma, a je v njem zbrana skoraj vsa masa atoma.

Niels Bohr je leta 1913 gibanje elektrona okoli jedra v vodikovem atomu opisal v kvantnem duhu (Nn 1929). Atom ima *stanja* z določenimi energijami in pri prehodih med njimi seva svetlobo. Pojasnil je valovne dolžine vodikovih spektralnih črt. Elektron ima pri gibanju okoli jedra določeno *vrtilno količino* in določeno *komponento vrtilne količine* v izbrani smeri, denimo v smeri magnetnega polja. Stanja atoma so opredelili s tremi *kvantnimi števili*, ki podajo energijo atoma ter vrtilno količino in njeno komponento. V naslednjem desetletju je Bohr pojasnil sestavo atomov z več elektroni in s tem ozadje periodne preglednice.

George Uhlenbeck in Samuel Goudsmit sta leta 1924 po spektrih svetlobe, ki jo sevajo atomi, prišla na misel, da se elektron vrti kot vrtavka. Pokazalo se je, da tega vrtenja ni mogoče pojasniti klasično. Vsi elektroni imajo enako veliko vrtilno količino, „se vrtijo enako hitro“. Njena komponenta kaže ali v smer magnetnega polja ali v nasprotno smer. Elektronu so priredili *spin* $1/2$. Stanja atomov po tem opredelimo s štirimi kvantnimi števili, od katerih četrto podaja komponento spina.

Wolfgang Pauli je po razvrstitvi atomov v periodno preglednico leta 1925 postavil *izključitveno načelo* ali *Paulijevo prepoved*. Vsako stanje v atomu zasede kvečjemu po en elektron. Do leta 1940 je ugotovil, da je od spina odvisno, kako se vede množica enakih delcev (Nn 1945). Prepoved velja za delce s spinom $1/2$, $3/2$, ..., ki jih imenujemo *fermioni*. Za delce s spinom 0, 1, ..., ki jih imenujemo *bozoni*, pa prepoved ne velja. Fotoni imajo spin 1 in so bozoni, tako da jih lahko veliko zasede dano stanje.

KVANTNA MEHANIKA

Svetloba, ki je veljala za zvezen pojav, je s fotoni dobila delčne lastnosti. Louis de Broglie je leta 1924 izhajal iz spoznanja, da posebna teorija relativnosti enakopravno obravnava delce s končno maso in delce z maso 0. Po simetriji je domneval, da elektroni, ki so veljali za delce, v curku kažejo tudi lastnosti valovanja (Nn 1929). Leta 1927 so domnevo podprli z opazovanjem elektronskih interferenc.

Werner Heisenberg (Nn 1932), Max Born ($1/2$ Nn 1954) in Pascual Jordan so po začetnem Heisenbergovem uspehu leta 1925 v tem in v naslednjem letu razvili notranje skladno teorijo. To je naredil tudi Erwin Schrödinger ($1/2$ Nn 1933) in se prepričal, da sta njegova teorija in teorija Borna in sodelavcev dva obraza *kvantne mehanike*.

Paul Dirac ($1/2$ Nn 1933) je leta 1928 združil zakone kvantne mehanike in posebne teorije relativnosti v dosleden kvantni opis elektronov. Iz tega je zrasla napoved, da obstaja *pozitron* ($1/2$ Nn 1933). Pozitron je *antidelec* elektrona z enako maso, a nasprotnim nabojem. Zaznal ga je leta 1932 Carl David Anderson ($1/2$ Nn 1936). Vsak delec ima svoj antidelec. Nekaterih antidelcev pa ni mogoče razločiti od njihovih delcev, na primer antifoton se ne razlikuje od fotona.

Pri radioaktivnem razpadu β jedro odda delec β , to je elektron. Z merjenjem so ugotovili, da je energija elektrona navadno manjša od predvidene. Zato je leta 1930 Pauli privzel, da pri razpadu nastane še *neutrino*, delec brez naboja in brez mase, ki uide, ne da bi ga zaznali. Elektron dobi toliko manjšo energijo, kolikor je odnese neutrino. Pravzaprav se pri razpadu β pojavi antidelec nevtrina, *antineutrino*. Paulija je skrbelo, da obstoja nevtrina ne bo mogoče podpreti s poskusi. To je uspelo Fredericku Reinesu ($1/2$ Nn 1996) in sodelavcu leta 1956.

Masno število elementa, to je do celega števila zaokrožena relativna atomska masa, je razen pri vodiku večje od vrstnega števila, to je zaporedne številke elementa v periodni preglednici. Najprej so to poskušali pojasniti z zamisljo, da jedra sestavljajo *protoni*, to je vodikova jedra, in elektroni. Mislili so na delce β , ki jih oddajajo nekatera radioaktivna jedra. Pozneje so spoznali, da jedro z električno silo elektrone veže v atom, a jih ne more vezati v veliko manjše jedro. Rutherford je že leta 1920 domneval, da se elektron z vodikovim jedrom veže v nevtralen delec in brez težav vstopi v jedro. Delec, ki so ga začeli imenovati *nevtron*, je v Rutherfordovem laboratoriju v naslednjih letih zamenjal James Chadwick. Leta 1930 so z delci α obstreljevali bor ali litij in dve leti zatem berilij. Učinek, ki ga ni zadržala plast svinca, so pripisali sevanju γ . Chadwick razlage ni sprejel in se je prepričal, da protone v ionizacijski celici precej daleč od berilijeve tarče izbijajo nevtralni delci. Tako je leta 1932 odkril nevtron (Nn 1935).

Tega leta je Heisenberg vpeljal količino, ki je pozneje dobila ime *izospin*. Nevtron je zelo podoben protonu, le da ne nosi električnega naboja. Od protona ga ne bi mogli razlikovati, če bi izključili naboj. Zato proton in nevtron opišemo kot dve stanji *nukleona*. Proton ima tretjo komponento izospina $t_3 = 1/2$ in nevtron $t_3 = -1/2$. Naboj nukleona je potem

$q = t_3 + 1/2$, če ga merimo v osnovnih nabojih. Nukleon je *izospinski dublet*. Matematično je izospin podoben spinu, le da je spin doma v navadnem prostoru, izospin pa v abstraktnem.

INTERAKCIJE

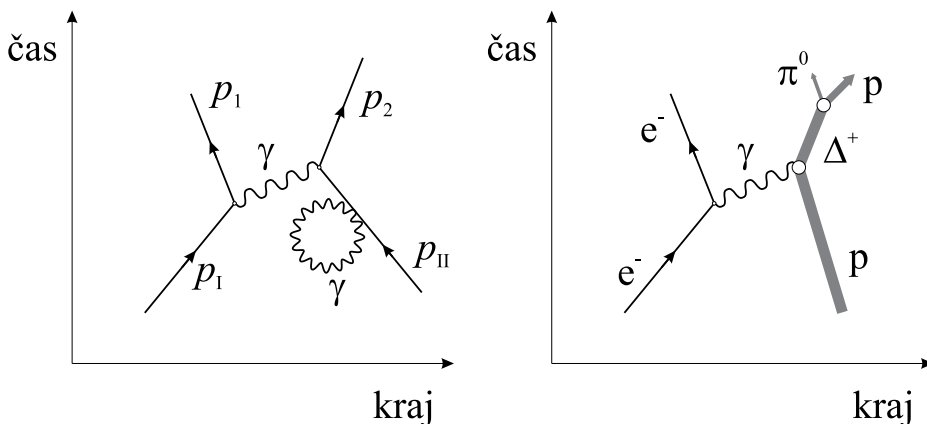
Med protonom in protonom, protonom in nevtronom ter nevtronom in nevtronom deluje privlačna *močna sila*. Sila je močnejša od elektromagnetne in prevlada nad to silo med protoni v jedru. Močna sila je neodvisna od izospina. Pri pojavih, ki jih povzroča močna sila, se izospin ohrani.

Enrico Fermi (Nn 1938) je leta 1933 sestavil prvo teorijo razpada β . To razmeroma počasno radioaktivno razpadanje povzroča *šibka sila*, ki je veliko šibkejša od elektromagnetne. Kot pri sevanju atoma zaradi elektromagnetne sile na račun energije atoma nastane foton, pri razpadu β zaradi šibke sile na račun energije jedra nastaneta elektron in antinevtrino, nevtron pa preide v proton.

Opis elektromagnetnega polja, *klasično elektrodinamiko*, je bilo treba prilagoditi kvantnim zahtevam. Prilagajanja so se lotili Heisenberg, Dirac in drugi. Ni šlo brez težav, ki so jih v letih po drugi svetovni vojni premagali Richard Feynman, Julian Schwinger in Sin-Itiro Tomonaga (Nn 1965). Tako je nastala *kvantna elektrodinamika*. V njej delovanje elektrona na elektron opišemo tako, da si mislimo, da elektron izseva delec elektromagnetnega polja foton. Drugi elektron foton absorbira in ga zopet izseva, prvi elektron foton zopet absorbira in tako dalje. Z izmenjavanjem enega, dveh in več fotonov izrazimo kako količino elektrona kot vsoto členov za izmenjavanje enega, dveh, treh ... fotonov. Členi postajajo vse manjši in rezultat vse natančnejši. Ni mogoče ugotoviti, kolikšno energijo imajo ti fotoni. Ne moremo jih neposredno zaznati, zaznamo samo vpliv elektrona na drug elektron. Govorimo o *virtualnih fotonih*. Zaznamo pa lahko prost foton in izmerimo njegovo energijo, če je na voljo dovolj energije, da na primer atom seva.

Virtualni delci polja si energijo »sposodijo« in jo »vrnejo«, preden bi bilo to mogoče ugotoviti z merjenjem. Čim večjo energijo si delec polja sposodi, tem hitreje jo mora vrniti in tem manj se lahko oddalji od delca snovi. Čim daljši je doseg, tem manjšo maso imajo delci polja, saj masi ustreza energija. Elektromagnetno polje sega zelo daleč in fotoni imajo maso 0. Tako smo z besedami opisali zapletene račune, ki pokažejo, kako naelektren delec deluje na naelektren delec. V tej zvezi govorimo o *elektromagnetni interakciji*, da opis razložimo od opisa z elektromagnetno silo.

Računanje ponazorimo s *Feynmanovimi diagrami* (Slika 1). Pri računanju se pojavijo izrazi, ki narastejo čez vse meje. Feynman, Schwinger in Tomonaga so v kvantni elektrodinamiki razvili postopek, s katerim je mogoče obvladati take izraze. Za vsak pozitivni izraz, ki naraste čez vse meje, obstaja negativni izraz te vrste in se oba izraza izravnata. Postopek je znan kot *renormalizacija*.



Slika 1. Feynmanova diagrama za sipanje elektrona na elektronu z izmenjavo enega fotona (levo). Vsaki črti in vsakemu presečišču črt ustreza določen matematični izraz. Narisana pentlja kaže, da elektron lahko izseva virtualni foton, ki ga takoj absorbira. Ustrezni izraz naraste čez vse meje. Težava ima korenine v klasični elektrodinamiki, ker energija točkastega naboja naraste čez vse meje. V kvantni elektrodinamiki se težave znebijo z renormalizacijo. Diagram za nastanek in razpad bariona Δ^+ pri sipanju elektrona na protonu (desno).

Hideki Jukava je že leta 1935 pojasnil *močno interakcijo* z izmenjavanjem delcev polja med nukleonoma (Nn 1949). Ker ima ta kratek doseg, imajo virtualni delci polja maso med masama elektrona in protona. Imenovali so jih *mezoni*. Lov na napovedane delce je najprej pripeljal do zmešnjave. Razpletla se je z odkritjem dveh vrst delcev. Mezoni π ali *pioni* z 272-krat večjo maso od elektrona imajo pozitiven ali negativen osnovni naboj ali so brez naboja in so Jukavovi delci, povezani z močno interakcijo. Pioni π^- , π^0 in π^+ sestavljajo izospinski triplet s tretjo komponento izospina -1, 0 in +1.

LEPTONI IN KVARKI

Mioni z negativnim osnovnim nabojem μ^- in s pozitivnim osnovnim nabojem μ^+ niso zmožni močne interakcije in so podobni elektronom in pozitronom. Imajo 206,8-krat večjo maso in niso obstojni, v povprečju razpadejo po 2,197 milijonine sekunde. Elektrone in mione zajame skupno ime *leptoni*, „lahki delci“.

Pri opazovanju reakcij med delci in njihovih razpadov so ugotovili, da se ohrani skupno *leptonsko število*. Vsakemu leptonu priredimo leptonsko število $L = 1$ in vsakemu antileptonu leptonsko število $L = -1$. Vsi drugi delci imajo leptonsko število 0. Vsota leptonskih števil udeleženih delcev pred reakcijo je enaka vsoti po njej. Jakov Zeldovič, George Marx in drugi so leta 1953 izrazili *zakon o ohranitvi števila leptonov*.

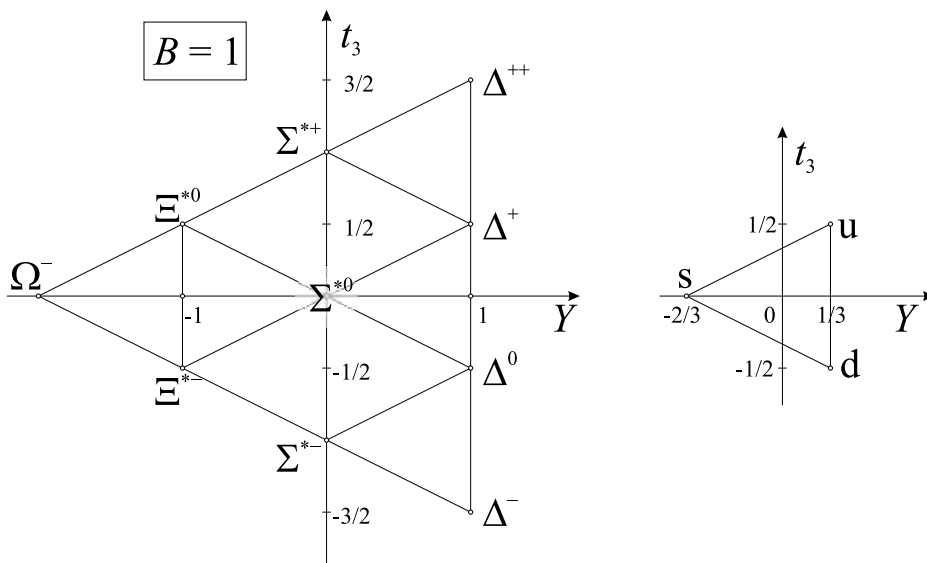
Od leptonov se razlikujejo *barioni*, „težki delci“, h katerim štejemo tudi proton in nevtron. Opazovanje jedrskih reakcij je pripeljalo do izkušnje, da se ohrani število nukleonov. Pokazalo se je, da je to poseben primer *zakona o ohranitvi števila barionov*. Vsakemu barionu priredimo *barionsko število* $B = 1$ in vsakemu antibarionu barionsko število $B = -1$. Mezioni in vsi drugi delci imajo barionsko število 0. Enačba $q = t_3 + \frac{1}{2}B$ velja za naboj barionov in mezonov. Leptoni imajo spin $\frac{1}{2}$, barioni spin $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{2}$, ... mezioni spin 0, 1, ...

Nekaj časa se je zdelo, da poznajo vse „osnovne“ delce in ima vsak od njih svojo vlogo. Po letu 1947 pa so začeli zaznavati nove delce. Nastajali so v parih. Imenovali so jih *čudni delci* in uvedli novo kvantno število *čudnost* S . Število znanih delcev se je močno povečalo. Naboj čudnih barionov in mezonov je $q = t_3 + \frac{1}{2}(B+S)$. Vsoto barionskega števila in čudnosti vpeljejo kot *hipernaboj* $Y = B + S$. Čudnost in hipernaboj se pri reakcijah med delci in razpadi delcev po močni in elektromagnetni interakciji ohranita, pri šibki interakciji pa ne. Mezona pozitivni kaon K^+ s komponento izospina $t_3 = \frac{1}{2}$ in nevtralni kaon K^0 s komponento izospina $t_3 = -\frac{1}{2}$ sestavljata izospinski dublet. Čudnost je enaka dvakratni razliki med težiščem naboja, to je povprečnim nabojem izospinskega multipleta, in $\frac{1}{2}$ pri barionih ali 0 pri mezonih. $\frac{1}{2}$ je težišče naboja nukleonov in 0 težišče naboja pionov, torej delcev s čudnostjo 0.

Leta 1962 so Leon Lederman, Melvin Schwartz in Jack Steinberger (Nn 1988) ugotovili, da antinevtrini, ki spremljajo elektrone, povzročajo drugačne reakcije kot nevtrini, ki spremljajo mione. Obstajata dve vrsti nevtrinov, *elektronski nevtrini* in *mionski nevtrini*.

Leta 1964 je Murray Gell-Mann izospinske multiplete delcev, ki so zmožni močne interakcije, to je barionov in mezonov, uredil v *supermultiplete* delcev z enakim spinom. Ob tem je napovedal obstoj bariona Ω^- in mezona η^0 . Napovedana delca so odkrili. Gell-Mann je supermultiplete pojasnil s trojico delcev, *kvarkov* u (up), d (down) in s (sideways ali strange), ki sestavljajo te delce (Nn 1969) (Slika 2). Jedra, ki imajo maso in naboj, sestavljajo delci dveh vrst, protoni in nevtroni, delce, ki imajo maso, naboj in čudnost, pa delci treh vrst. Proton sestavljajo kvarki uud , nevtron kvarki ddu . Mezone sestavljata kvark in *antikvark*, na primer negativni pion $d\bar{u}$. Spočetka je mislil, da so kvarki zgolj nekakšno računsko pomagalo.

Raziskovalna skupina, ki so jo vodili Jerome Friedman, Henry Kendall in Richard Taylor (Nn 1990), je med letoma 1969 in 1972 z elektroni z zelo veliko energijo obstreljevala tarče z vodikom in težkim vodikom. Merjenja so pokazala, da protone in nevtrone sestavljajo trojice točkastih kvarkov. Kvarki so delci snovi s spinom $\frac{1}{2}$. Kvark u nosi dve tretjini pozitivnega osnovnega naboja, kvarka d in s tretjino negativnega osnovnega naboja, kvark s ima čudnost -1 . Med kvarki deluje interakcija, ki je v veliki razdalji zelo močna, v majhni pa manj močna. Tako je mogoče v majhni razdalji kvarke obravnavati skoraj kot proste, ni pa jih mogoče razdružiti. Kvarki ne morejo obstajati prosti. Teoretično ozadje so leta 1973 pojasnili David Gross in Frank Wilczek ter David Politzer (Nn2004).



Slika 2. Gell-Mannov supermultiplet barionov s spinom $3/2$, ki je vseboval napoved bariona Ω^- . Povprečna masa izospinskih multipletov narašča linearno z manjšanjem hipernaboja Y . Supermultiplete pogosto primerjajo s periodno preglednico Mendelejeva. Podobno kot je ta uredila atome in napovedala lastnosti še neznanih atomov, so supermultipleti uredili delce in napovedali lastnosti še neznanih delcev (levo). Osnovna trojica kvarkov (desno).

Novo silo so povezali s kvantnim številom *barvni naboj* ali kratko *barva*. Razlog je v Paulijevi prepovedi. Trije enaki kvarki, na primer trije kvarki s v barionu Ω^- , ne morejo biti v istem stanju, če se ne razlikujejo po kakem kvantnem številu. Trem kvarkom v barionu so priredili tri vrednosti barvnega naboja: modro, zeleno in rdeče. Antikvarki nosijo rumen, vijoličnordeč (magenta) in zelenomoder (cian) barvni naboj. Barioni in mezoni so *brezbarvni*, če mislimo na aditivno mešanje barv. To je bolj zapleteno kot pri električnem naboju, ko je naboj antidelca enak naboju delca z negativnim znakom. Delci polja barvne sile so brezmasni *gluoni*, ki nosijo barvni naboj in antinaboj. Zaradi tega gluon močno deluje na gluon. To je drugače kot pri fotonih, ki ne nosijo naboja in ki tako ne delujejo drug na drugega. Obstaja osem različnih gluonov s spinom 1, ki med kvarki posredujejo barvno interakcijo. Močna interakcija v atomskih jedrih je šibek preostanek barvne interakcije.

Sheldon Glashow in nekateri drugi fiziki so že leta 1964 domnevali, da obstajajo štirje kvarki. Tedaj so poznali tri kvarke, a štiri leptone: elektron in mion ter njuna nevtrina. Pomislili so na možnost, da so kvarki in leptoni simetrični (Slika 3). Leta 1974 sta raziskovalni skupini, ki sta ju vodila Samuel Ting in Burton Richter, zaznali nov mezon (N_n 1976). Delec s 3,30-krat večjo maso od protona in z dvojnimi imenom J/ψ so pojasnili kot stanje povezanih četrtega kvarka c (charm) in njegovega antidelca $\bar{c}$. Tako je bilo kvarkov enako kot leptonov.

Delci snovi s spinom $\frac{1}{2}$ - fermioni

Rod	leptoni		antileptoni		kvarki		antikvarki	
1.	e^-	ν_e	e^+	$\bar{\nu}_e$	u	d	$\bar{u}$	$\bar{d}$
2.	μ^-	ν_μ	μ^+	$\bar{\nu}_\mu$	s	c	$\bar{s}$	$\bar{c}$
3.	τ^-	ν_τ	τ^+	$\bar{\nu}_\tau$	b	t	$\bar{b}$	$\bar{t}$

Delci polja s spinom 1 - bozoni

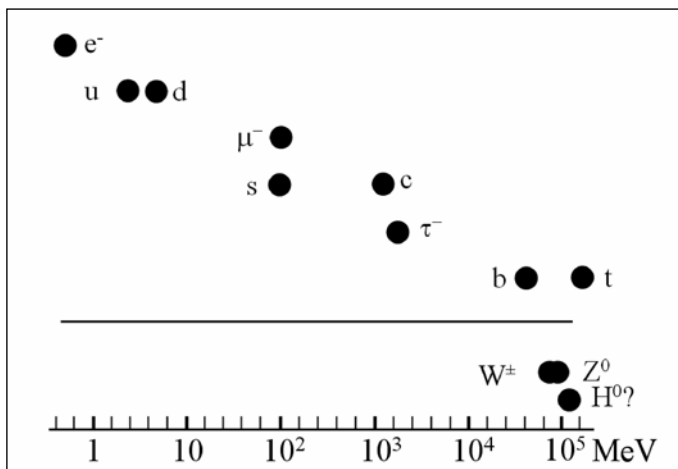
polje	delci
barvno	osem gluonov
elektromagnetno	foton γ
šibko	šibki bozoni W^-, W^+, Z^0
gravitacijsko	graviton ?

Slika 3. Delci snovi, leptoni in kvarki in njihovi antidelci, so simetrični. Ali precejšnje število delcev snovi in antidelcev, to je nesestavljenih fermionov, in njihova urejenost namiguje, da so ti delci sestavljeni. Pri kvarkih nismo upoštevali različnih barvnih nabojev. Dodani so delci polja.

Leta 1973 sta Makoto Kobajaši in Tošihide Maskava napovedala obstoj dveh novih kvarkov in dveh leptonov ($\frac{1}{2}$ Nn 2008). Med letoma 1974 in 1977 je skupina Martina Perla ($\frac{1}{2}$ Nn 1996) zaznala lepton τ^- . Negativni in pozitivni delec τ sta sorodna elektronu in in pozitronu. Njuna masa je 1,89-krat večja od mase protona. V povprečju lepton τ razpade po $2,906 \cdot 10^{-13}$ sekunde. Pričakovali so, da obstaja tudi z leptonom τ povezani nevtrino. Raziskovalna skupina Leona Ledermana je leta 1977 zaznala mezon Y z 10,08-krat večjo maso od protona.

Ta delec so pojasnili kot stanje povezanih petega kvarka b (bottom) in njegovega antidelca $\bar{b}$. Preostalo je še šesti kvark. Kvark t (top) so zaznali šele leta 1995. Njegova masa je 184-krat večja od mase protona. Ta kvark s svojim antidelcem ne tvori mezona z daljšim življenjskim časom. Tauonski nevtrino so po večletnem prizadevanju zaznali leta 2000. Tako smo opisali glavne korake v razvoju standardnega modela delcev [1], [2]. Razvoj teorije je tekel vzporedno z razvojem pospeševalnikov in trkalnikov [3] ter merilnikov in merilnih naprav. Sodelovalo je veliko število raziskovalcev, od katerih smo jih utegnili omeniti le peščico.

Steven Weinberg in Abdus Salam sta leta 1967 neodvisno drug od drugega na podlagi zamisli Glashowa iz leta 1961 razvila teorijo *elektrošibke interakcije* (Nn 1979). V njej jima je uspelo povezati elektromagnetno in šibko interakcijo. Nadaljevanje bo posvečeno tej teoriji.



Slika 4. Lastne energije delcev snovi - fermionov - po rodovih (od zgoraj navzdol) in (pod črto) delcev polja – bozonov. Narisan je tudi podatek za Higgsov bozon. Foton in gluoni so brez mase, nevtrini pa imajo zelo majhno maso, ki je ne poznamo dobro. Kvarki so vezani v barionih ali mezonih in mase, ki bi jo imeli kot prosti, ne poznamo natančno.

LITERATURA

- [1] J. Strnad, *Fizika, IV. del. Molekule, kristali, jedra delci*, DMFA – založništvo, Ljubljana 2010.
- [2] *The Rise of the Standard Model. Particle Physics in the 1960 and 1970s*, L. Hodgeson, L. Brown, M. Riordan, M. Dresden (uredniki), Cambridge University Press, Cambridge 1997.
- [3] J. Strnad, *Pospeševalniki*, Fizika v šoli **15** (2009) 66–74 (2); *Nakopičevalni obroči in trkalniki*, Fizika v šoli **16** (2010) 3–8 (1).
- [4] Particle Data Group, K. Nakamura in drugi, *Review of Particle Properties*, Journal of Physics G, Nuclear and Particle Physics **37** (2010) 1–1422. Podatki o delcih so navedeni po tem pregledu.