

Neobično antizasjenjenje naboja

Asimptotska sloboda i Nobelova nagrada za teoriju jake sile

Ivica Picek

Fizički odsjek, Prirodoslovno-matematički fakultet Sveučilišta u Zagrebu

Nobelovu nagradu iz fizike za 2004. godinu podijelili su *David J. Gross* s Kavli instituta za teorijsku fiziku Kalifornijskog sveučilišta u Santa Barbari, *H. David Politzer* s Kalifornijskog instituta za tehnologiju (Caltech) u Pasadeni i *Frank Wilczek* s Massachusettskog instituta za tehnologiju (MIT) u SAD, «za otkriće asimptotske slobode u teoriji jakog međudjelovanja». Riječ je o otkriću koje je s jedne strane dovelo do razumijevanja jake sile kao dijela «standardnog modela» kao opisa međudjelovanja temeljnih čestica prirode, a istodobno je potaknulo pokušaje još sveobuhvatnijeg, velikog ujedinjenog opisa temeljnih sila prirode.

Upoznavanje s temeljnom jakom silom

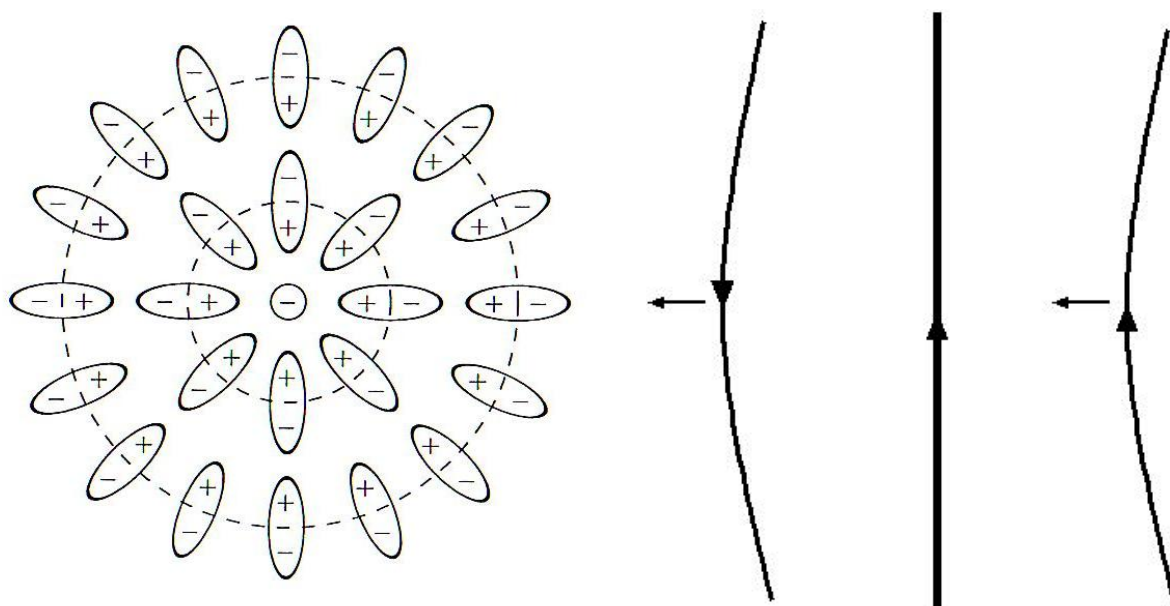
U našem svijetu na djelu je tek nekoliko temeljnih sila: gravitacija i elektromagnetizam, upoznate u makrosvjetu te subatomske, jaka i slaba sila (Slika 4-1). Ključno za razumijevanje svake od tih sila je poznavanje «naboja» iz kojega ona izvire. Za gravitacijsku silu koja drži na okupu Sunčev sustav ti «naboji» su mase planeta i Sunca, a za elektromagnetsku silu koja drži elektrone oko atomske jezgre to su električni naboji elektrona i protona.

Svojstvo \ Interakcija	Gravitacijska	Slaba (elektroslaba)	Elektromagnetska (elektroslaba)	Jaka	
	masa - energija	okus	električni naboj	fundamentalna	rezidualna
djeluje na:	masa - energija	okus	električni naboj	naboj boje	
čestice koje ju osjećaju	sve	kvarkovi, leptoni	električki nabijene	kvarkovi, gluoni	hadroni
čestice posrednici	graviton	W^+, W^-, Z^0	γ	gluoni	mezoni
jakost za dva kvarka na: 10^{-18} m (relativno prema elektromagnetskoj) $3 \cdot 10^{-17}$ m	10^{-41} 10^{-41}	0.8 10^{-4}	1 1	25 60	ne djeluje na kvarkove
za dva protona u jezgri	10^{-36} 10^{-36}	10^{-7}	1	ne djeluje na hadrone	20

Slika 4-1: Temeljne sile u prirodi

Pitanje postojanja novih naboja postavilo se na subatomskej razini, nakon spoznaje da su unutar atomske jezgre na djelu dvije nove sile: slaba sila odgovorna za radioaktivnost i jaka sila koja drži u jezgrama pozitivno nabijene protone i električki neutralne neutrone. Iz činjenice da jaka nuklearna sila ima kratki doseg (približno 10^{-15} m) japanski fizičar Hideki Yukawa (Nobelova nagrada za 1949) je predvidio pion kao česticu koja bi mogla biti njenim prijenosnikom. Otkriveni su još neki mezoni koji bi mogli sudjelovati u jakoj sili, no opis jake sile s takvim prijenosnicima nije se mogao svesti na *teoriju polja*, kao što je to postignuto za elektrodinamiku.

Teorija polja o kojoj je riječ, osim kvantne mehanike nezaobilazne u unutrašnjosti atoma, uključuje i Einsteinovu specijalnu teoriju relativnosti. Pri opisu elektromagnetizma teorija polja se proslavila kao čuvena «QED» (kvantna elektrodinamika, za koju je Nobelova nagrada dodijeljena 1965. godine Feynmanu, Schwingeru i Tomonagi). Činjenica da se mezonska teorija nije mogla svesti na teoriju polja, dovela je pod sumnju i teoriju polja elektrodinamike. Kao moguću slabu točku same elektrodinamike, Landau i Pomerančuk su uočili problem tzv. Landauvljevog zasjenjenja, tendencije da se oko električnog naboja neograničeno skupljaju virtualne čestice. Kvantno mehanički vakuum u kojemu sve vrvi od stvaranja virtualnih parova čestica i antičestica pokazuje svojstvo dielektričnog medija i time dovodi do problematičnog zasjenjenja već za relativno slabi elektromagnetizam (Slika 4-2 (a)). To zasjenjenje bi trebalo biti katastrofalno za *jaku* silu.

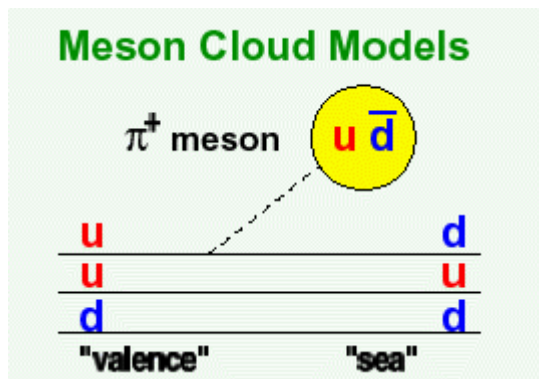


Slika 4-2: (a) Zasjenjenje električnog naboja, lijevo, pridruženo je dijamagnetskom svojstvu medija (b), desno

Uz to, akceleratori pokusi druge polovice prošlog stoljeća doveli su do tolikog mnoštva hadrona, čestica koje sudjeluju u jakoj interakciji, da se postavilo pitanje njihove elementarnosti. Elementarnost se mogla obnoviti uvođenjem temeljnijih čestica, *kvarkova*, koji bi gradili sve hadrone. Istodobno bi uvođenjem sile koja bi djelovala između kvarkova, vežući ih u hadrone, mogli doći do temeljne sile, podvrgnute teoriji polja. Tu temeljnu jaku silu razlikovat ćemo od one koja drži nukleone u atomskim jezgrama, preostale (rezidualne) jake sile. Budući da sila koja drži kvarkove na okupu mora biti puno snažnija od elektromagnetske, postavlja se pitanje dodatnog naboja kvarka iz kojeg izvire ta jaka sila.

Želimo li se pozabaviti silom o kojoj je riječ u ovogodišnjoj Nobelovoj nagradi, moramo se stoga spustiti u svijet kvarkova zatočenih unutar dimenzija čestica koje oni izgrađuju. Tako će proton biti izgrađen od dva «gornja» *u* kvarka (električnog naboja $2/3$) i jednog «donjeg» *d* kvarka (naboja $-1/3$). Slično, neutron će biti izgrađen od dva *d* kvarka i jednog *u* kvarka. Lako zamislimo (Slika 4-3) kako se nukleoni u atomskoj

jezgri okružuju oblakom mezona, primjerice piona (pion pozitivnog naboja bit će građen od u kvarka i $\bar{d}$ antikvarka naboja $1/3$).



Slika 4-3: Pion kao prijenosnik rezidualne jake sile

Pokusima do sada nije uspjelo izdvojiti kvark iz hadrona. Ulaganje energije za takvo razdvajanje kvarka i antikvarka rezultira stvaranjem novog mezona. To podsjeća na pokušaj razdvajanja polova magneta. Umjesto da razdvojimo magnetske polove, od jednog magneta nastaju dva. Jaka sila pokazuje porast pri pokušaju razdvajanja kvarkova. Zamislivo je da će takva sila među kvarkovima slabiti ukoliko se oni približavaju?

Neobično antizasjenjenje bojnog naboja

Rana proučavanja jake sile bila su usredotočena na pravilnosti (Reggeove polove) koje su opažane na niskim energijama (prijenosima impulsa). Činjenica da kvarkovi nisu opažani niti pri vrijednostima koje su deseterostruko premašivale prag njihove produkcije, podupirala je uvjerenje da je riječ o čisto matematičkim objektima, bez fizikalne realnosti. Kasnije je shvaćeno da će najvažnije informacije poteći iz «duboko neelastičnih» raspršenja na velikim prijenosima impulsa, gdje se ispituju kratke međukvarkovske udaljenosti. Pojava «skaliranja» koja je tu opažena mogla se objasniti teorijom polja samo ako kvarkovi nemaju interakcije. No kako možemo ugasiti interakciju između kvarkova, kad bi u tom slučaju očekivali da se hadroni razgrade na svoje kvarkovske sastavnice?

Ta su pitanja potaknula teorijske izračune vakuumske polarizacije za slučaj jake sile. Analogni račun za elektromagnetizam rezultirao je poznatim zasjenjenjem električnog naboja (Slika 4-2 (a)), očekivanim na temelju iskustva s dielektričkim sredstvima kojima smo okruženi.

U relativističkoj teoriji dielektrična konstanta ϵ može se izračunati pomoću magnetske permeabilnosti μ pomoću relacije $\epsilon \mu = 1$ (u jedinicama gdje je brzina svjetlosti $c=1$). U klasičnoj fizici, gdje su sva magnetska polja stvorena strujama, mediji su dijamagnetski: u tom slučaju struje istih smjerova se privlače, a suprotnih smjerova se odbijaju (Slika 4-2 (b)). Dijamagnetizam s $\mu < 1$ odgovara električnom zasjenjenju s $\epsilon > 1$.

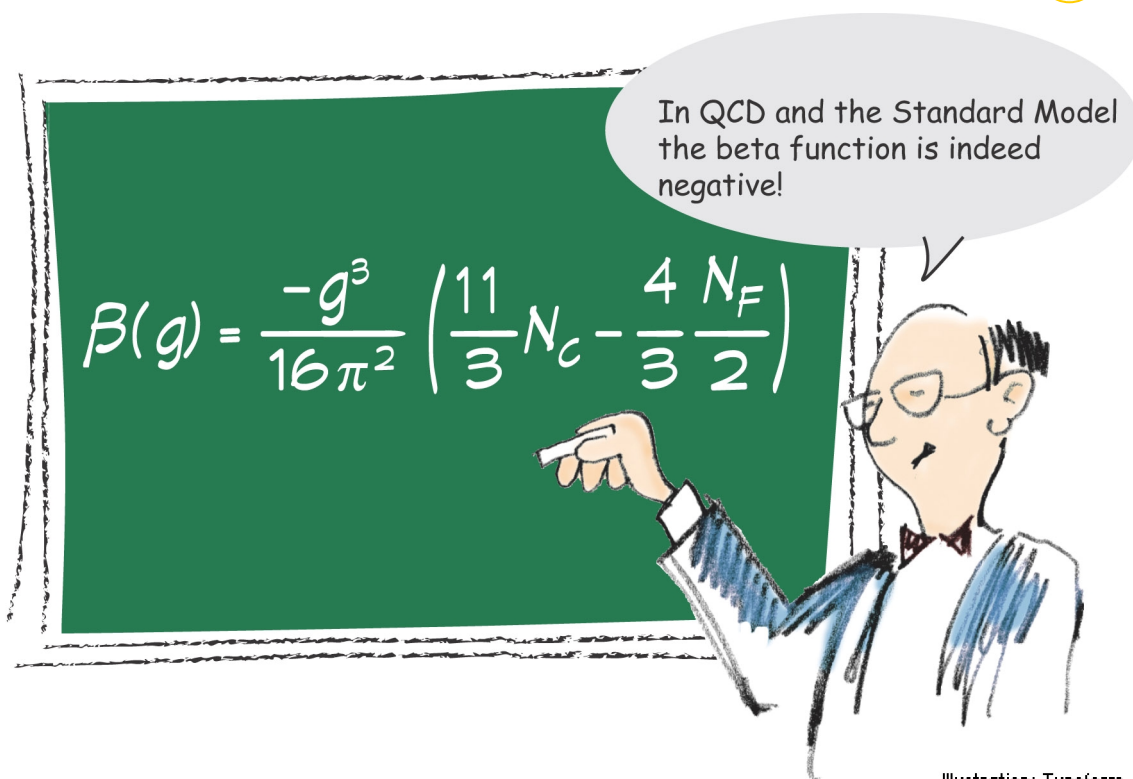


Illustration: Typoform

Slika 4-4: Budući da prvi član u zagradi prevladava, β funkcija kromodinamike je negativna

Naučili smo da je u kvantno-mehaničkim sustavima moguć i paramagnetizam, tj. da postoje permanentni magnetski dipoli koji se usmjeravaju paralelno s nametnutim magnetskim poljem i time ga povećavaju, dajući $\mu > 1$. Slutimo da bi u takvim situacijama mogli imati $\varepsilon < 1$, tj. antizasjenjenje. Fizikalni vakuum se pokazuje kao zanimljiv kvantno-mehanički sustav, kojega tek treba ispitati u odnosu na nove naboje još nedovoljno izučenih fundamentalnih sila.

Kao što se električni naboj e_0 u mediju okružuje električnim dipolima, slično se događa i u vakuumu. Naime, vakuum elektrodinamike je na račun virtualne produkcije parova elektrona i pozitrona snabdjeven električnim dipolima. Fizikalni vakuum se ponaša kao polarizabilni medij: naboj uronjen u vakuum proizvodit će polarizaciju vakuuma.

Ekvivalentno, medij u kojemu postoje virtualni električni dipoli vodit će na zasjenjenje naboja na vrijednost $e(r) = (e_0)/\varepsilon$, gdje dielektrična konstanta ε ovisi o frekvenciji (energiji), odnosno o udaljenosti r . U ovom slučaju, ukoliko se udaljavamo od naboja on će biti okružen sa sve više dipola, tako da $e(r)$ opada s udaljenošću. Za mjerenje takvog ponašanja uobičajeno je u teoriji polja uvesti tzv. β funkciju, kao «minus» derivacije logaritma naboja $\ln[e(r)]$ po $\ln(r)$. Obično se kaže da je promjena jakosti naboja određena «jednadžbom renormalizacijske grupe». Za elektrodinamiku ta β funkcija je pozitivna.

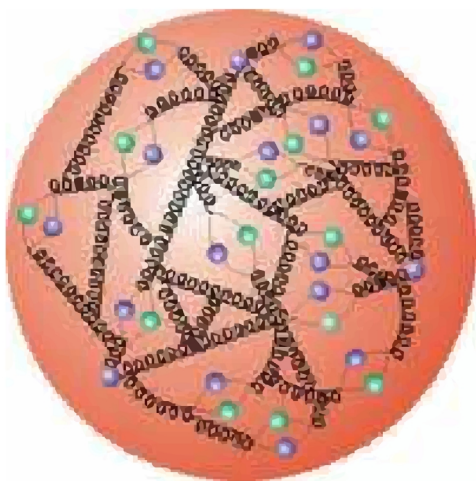
Za teoriju jake sile koja se temelji na naboju koji je nazvan «bojom» (otuda i naziv «kromodinamika») račun β funkcije je bio puno složeniji. Razlog tome leži u specifičnostima naboja boje. Bilo je više naznaka da se svaki od uvedenih kvarkova (u ,

d , s , ...) mora pojavljivati u tri vrste, tri «boje». Promicanje boje u izvor sile koji se oslanja na $SU(3)$ simetriju boje, zahtjeva da (za razliku od fotona) prijenosnici jake sile, «gluoni», i sami posjeduju bojni naboj. Račun polarizacije vakuuma za Yang-Millsove teorije kakva je $SU(3)_{\text{boje}}$ provele su neovisno dvije grupe teorijskih fizičara: D. Gross sa svojim studentom i suradnikom F. Wilczekom na Princetonu i D. Politzer koji je bio student Sidneya Colemana na Harvardu. Coleman je održavao kontakt s Princetonskom grupom i dva nezavisna proračuna β funkcije objavljena su istodobno, 1973., s rezultatom prikazanim na Slici 4-4.

Dva člana u tom rezultatu su u konkurenciji. Drugi član u zagradi potječe od doprinosa kvarkova i vodi na zasjenjenje. Za tri boje ($N_c = 3$) ukupni rezultat ovisi o predznaku izraza $(11/2 - N_F/3)$. Sve dok broj kvarkovskih okusa N_F ne prelazi brojku 16 prevladava učinak antizasjenjenja od gluona i kvantna kromodinamika je asimptotski slobodna. Gluoni pokazuju svojstvo permanentnih bojno-magnetskih dipola pa se antizasjenjenje kromodinamičkog vakuuma može razumjeti kao neobični paramagnetizam vakuuma.

Oživljavanje Einsteinovog originalnog svodenja mase na energiju

Rad iz 1905. u kojemu je postavljena Einsteinova ekvivalencije energije i mase u stvari je objavljen s naslovom: *Da li inercija tijela ovisi o njegovoj energiji?* Ekvivalencije energije i mase postavljena u tom obliku, $m = E/c^2$, pokušaj je da se porijeklo mase nađe u energiji. Upravo to je najočiglednije ostvareno u kvantnoj kromodinamici (Slika 4-5). Masa tvari kojom smo okruženi potječe gotovo u cjelosti od energije bezmasenih gluona.

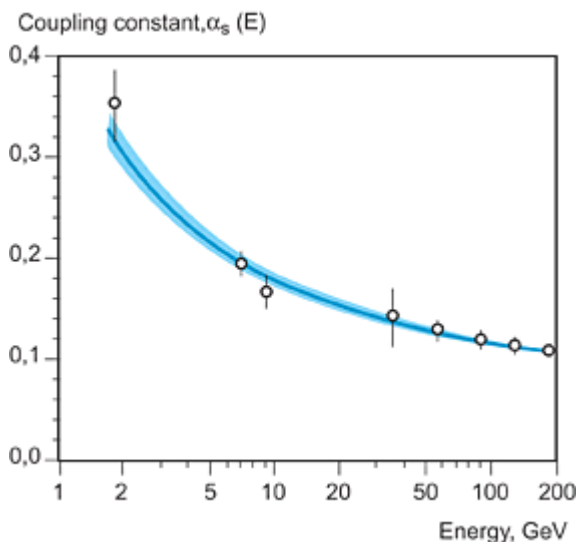


Slika 4-5: Protoni i neutroni od kojih su građene atomske jezgre sadrže bezmasene gluone i gotovo bezmasene kvarkove.

Dosezi otkrića asimptotske slobode

Na nužnost postojanja teorija polja s negativnom β funkcijom upozorio je Kurt Symanzik na konferenciji u Marseilleu u ljeto 1972. On sam je znao za jednu takvu teoriju sa skalarnim poljem, a Gerardus 't Hooft je pritom pokazao da poznaje takvu

negativnu β funkciju za Yang-Millsove baždarne teorije. No konkretnu važnost za jaku interakciju uočili su navedeni fizičari s Princetona i Harvarda. Oni su se pritom oslonili na baždarnu grupu SU(3) kakvu su godinu dana ranije predložili Harald Fritzsch i Gell-Mann na tragu SU(3) modela kojega je još davne 1965. godine izložio Y. Nambu. Asimptotska sloboda kromodinamike znači da jakost bojnog naboja opada prema višim energijama, što je danas dobro ustanovljeni eksperimentalni rezultat (Slika 4-6).

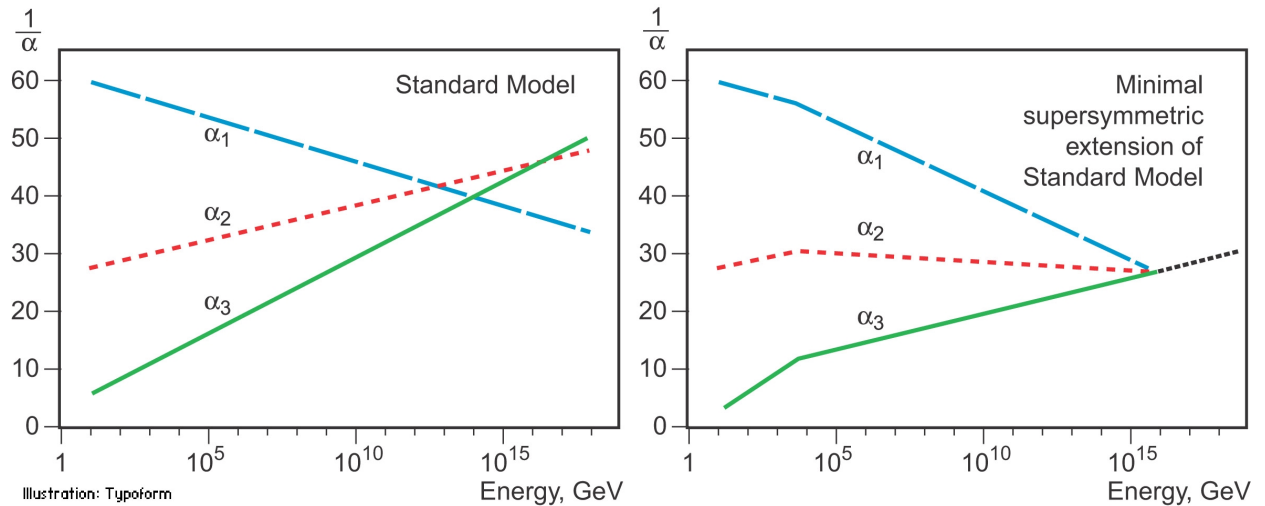


Slika 4-6: Opadanje jakog vezanja $\alpha_s = g^2 / (4\pi)$ kakvo daje krivulja asimptotske slobode potvrđeno je postojećim mjerenjima

Tom eksperimentalnom potvrdom teorija jakog međudjelovanja staje uz bok elektroslabe teorije okrunjene Nobelovom nagradom 1999. godine (vidjeti MFL 2/198, str. 74-80) i zajedno s njom čini standardni model za opis temeljnih čestica i sila u prirodi. Matematički je standardni model izražen umnoškom grupa $U(1) \times SU(2) \times SU(3)$, kao «grupom standardnog modela». Dva množitelja u toj grupi su nekomutirajuće (neabelovske) grupe, Yang-Millsove grupe SU(2) i SU(3).

Ustanovljavanje asimptotske slobode tih Yang-Millsovih komponenti grupe standardnog modela ima i dodatnu važnost. Zbog suprotnog ponašanja od Abelovog U(1) dijela, moguć je susret jakosti naboja abelovskog i neabelovskih dijelova. Time se otvara mogućnost velikog ujedinjenja sila na visokoj energiji unifikacije, kako je prikazano na Slici 4-7.

Umjesto tri vezanja g_1, g_2, g_3 , odnosno $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$, koja odgovaraju množiteljima u gornjem elektro-slabo-jakom umnošku (ovdje smo kromodinamičko vezanje g označili s g_3), na dovoljno visokim energijama postojalo bi jedinstveno vezanje (primjerice g_5 u SU(5) ujedinjenju, ili «supersimetričnoj» inačici kakva je prikazana na desnoj strani slike 4-4). Dodatna potpora takvim poopćenjima standardnog modela stiže iz mjerenja oscilacija neutrina koja upućuju na neutrine s masom (vidjeti MFL 3/211, str. 176-181 za otkriće nagrađeno Nobelovom nagradom za 2002. godinu). Naime, jednostavne grupe kao SU(5), SO(10), E_6 , ... koje sadrže grupu standardnog modela kao svoju podgrupu, vrlo lako ugrađuju u sebe masivne neutrine.



Slika 4-7: Susret naboja elektro-slabo-jakih sastavnica standardnog modela (ili njegove inačice obogaćene supersimetričnim česticama) označio bi novi, ujedinjeni opis sila.

Očigledno, otkriće asimptotske slobode nadilazi okvire same kromodinamike uz koju je najizravnije vezano. Ono se pokazuje nužnim uvjetom da bi temeljna međudjelovanja mogli opisivati konzistentnim teorijama polja. Uz novo shvaćanje samih naboja kao izvora sila, otkriće asimptotske slobode je unijelo i novo svjetlo na samo razumijevanje temeljnih sila u prirodi.

Literatura

<http://nobelprize.org/>

