

# Asimptotska sloboda; neobični paramagnetizam vakuuma i Nobelova nagrada za teoriju jake sile

---

Picek, Ivica

Source / Izvornik: **Matematičko fizički list, 2005, 218, 91 - 95**

**Journal article, Published version**

**Rad u časopisu, Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:680278>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-02**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)





## Asimptotska sloboda; neobični paramagnetizam vakuuma i Nobelova nagrada za teoriju jake sile

Ivica Picek\*, Zagreb

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 (Caltecha) 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 i do zaokruživanja “standardnog modela” kao opisa međudjelovanja temeljnih čestica prirode, a istodobno potaknulo poduhvate velikog ujedinenog opisa svih sila u prirodi.

### Problemi s identifikacijom i opisom jake sile

Danas znamo da je ključno za razumijevanje neke sile poznavanje “naboja” iz kojeg ona izvire. Za gravitacijsku silu koja drži na okupu Sunčev sustav ti “naboji” su mase planeta i Sunca, a za elektromagnetsku silu koja drži na okupu atomsku jezgru i njezin elektronski omotač to su električni naboji elektrona i protona.

Pitanje postojanja novih naboja postavilo se na subatomskoj razini, nakon spoznaje da su unutar atomske jezgre na djelu dvije nove sile: slaba sila odgovorna za beta-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 mjeriti s onim postignutim u elektrodinamici u okviru “QED-teorije” (kvantne elektrodinamike, za koju je Nobelova nagrada dodijeljena 1965. godine Feynmanu, Schwingeru i Tomonagi). Mezonska se teorija nije mogla svesti na teoriju polja, što je shvaćeno kao udarac samoj teoriji polja. Stoga ne čudi da su zbog toga potražene i slabe točke same elektrodinamike. Posebice su u sovjetskoj fizici Landau i Pomerančuk inzistirali na njezinoj logičkoj nepotpunosti, koja se odražava na postojanju tzv. Landauvljevog pola, visokoj energiji na kojoj električni naboj poprima beskonačnu vrijednost. Uz to, nadolazeći akceleratori pokusi doveli su do takvog mnoštva hadrona, čestica koje sudjeluju u jakoj interakciji, da se postavljalo i pitanje što je s njihovom elementarnošću. Elementarnost se mogla postići ako se uvede svega nekoliko fundamentalnih čestica (kvarkova) od kojih bi bili građeni svi hadroni. Istodobno je

\* Autor je redoviti profesor teorijske fizike. Bavi se problemima fizike elementarnih čestica u pristupu teorije polja te dodirnim točkama fizike čestica i kozmologije, <http://www.phy.hr/~picek/>.

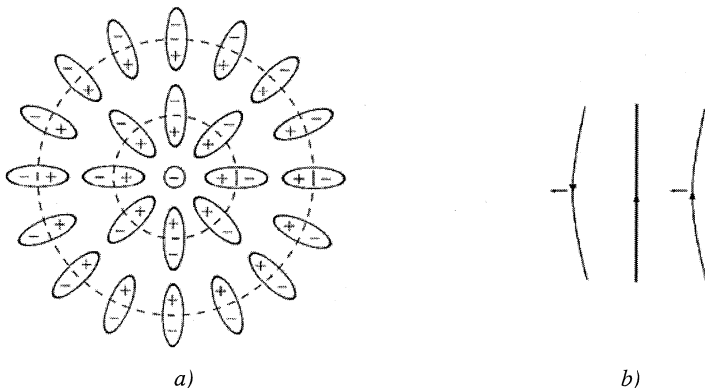
došlo i do spoznaje da temeljna jaka sila operira na razini kvarkova, gdje je odgovorna za njihovo vezanje u hadrone. Na silu koja drži nukleone u atomskim jezgrama od tada se gleda kao na preostalu (rezidualnu) jaku silu.

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  $-1/3$ ). 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. Iz takvog naboja izvire i sila koja veže i kvarkove i antikvarkove u mezonima, kao što je to slučaj sa spomenutim pionom (pion pozitivnog naboja bit će građen od  $u$  kvarka i  $\bar{d}$  antikvarka naboja  $1/3$ ). Pokusima dosad 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. Da li to znači da će 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 (sl. 1a), očekivan na temelju iskustva s dielektričkim sredstvima kojima smo okruženi.



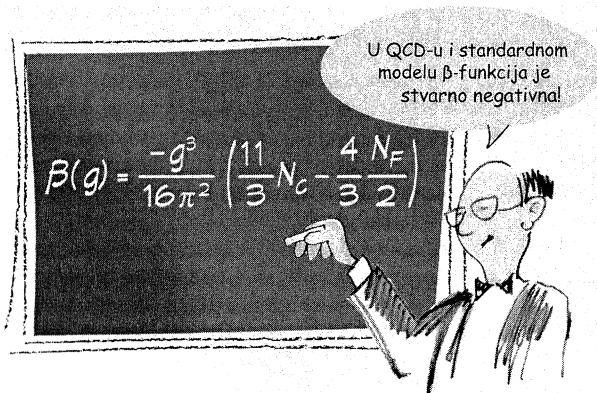
Sl. 1. Zasjenjenje električnog naboja a) pridruženo je dijamagnetskom svojstvu medija b).

U relativističkoj teoriji dielektrična konstanta  $\epsilon$  može se izračunati pomoću magnetske permeabilnosti  $\mu$  iz 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 (sl. 1b). Dijamagnetizam s  $\mu < 1$  odgovara električnom zasjenjenju s  $\epsilon > 1$ .

Naučili smo da je u kvantnomehničkim 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  $\epsilon < 1$ , tj. antizasjenjenje. Fizikalni vakuum se pokazuje kao zanimljiv kvantnomehnički sustav, kojeg tek treba ispitati u odnosu na nove naboje još neizučenihih 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 unonjen u vakuum proizvodit će polarizaciju vakuuma.

Ekvivalentno, medij u kojem postoje virtualni električni dipoli vodit će na zasjenjenje naboja na vrijednost  $e(r) = (e_0)/\epsilon$ , gdje dielektrična konstanta  $\epsilon$  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.  $\beta$ -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  $\beta$ -funkcija je pozitivna.

Za teoriju jake sile koja se temelji na naboju koji je nazvan “bojom” (otuda i naziv “kromodinamika”) račun  $\beta$ -funkcije je bio puno složeniji. Razlog tome leži u specifičnostima naboja boje. Bilo je više naznaka da se svaki od uvedenih kvarkova ( $u, d, s, \dots$ ) mora pojavljivati u tri vrste, tri “boje”. Promicanje boje u izvor sile koja se oslanja na  $SU(3)$  simetriju boje, zahtijeva da (za razliku od fotona) prijenosnici jake sile, “gluoni”, i sami posjeduju bojni naboj. Računa vakuumske polarizacije za Yang-Millsove teorije kakva je  $SU(3)_{\text{boje}}$  prihvatile su se neovisno dvije grupe: D. Gross sa svojim studentom-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  $\beta$ -funkcije objavljena su istodobno, 1973., s rezultatom prikazanim na sl. 2.

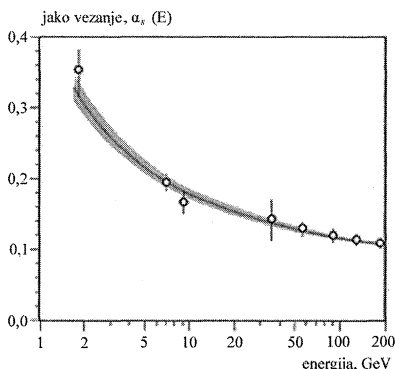


Sl. 2. Budući da prvi član u zagradi prevladava,  $\beta$ -funkcija kromodinamike je negativna.

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 bojnomagnetiskih dipola pa se antizasjenjenje kromodinamičkog vakuuma može razumjeti kao neobični paramagnetizam vakuuma.

### Dosezi otkrića asimptotske slobode

Na nužnost postojanja teorija polja s negativnom  $\beta$ -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  $\beta$ -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 Fritzsche i Gell-Mann na tragu  $SU(3)$  modela kojeg 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 (sl. 3).



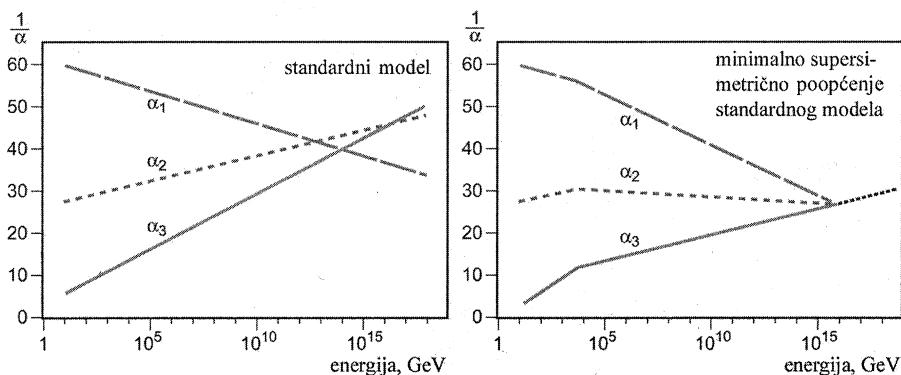
Sl. 3. Opadanje jakog vezanja  $\alpha_s = g^2/(4\pi)$  kakvo daje krivulja asimptotske slobode potvrđeno je postojećim mjerenjima.

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 sl. 4.

Umjesto tri vezanja  $g_1, g_2, g_3$ , odnosno  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ , koja odgovaraju množiteljima u gornjem elektroslabojakom 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 sl. 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.



Sl. 4. Susret naboja elektroslabojakih 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.

\*\*\*

PAŽNJA! — STARI BROJEVI — U našem skladištu ima starih brojeva, i to: god. XVI, br. 4; god. XXXII, br. 3; god. XXXIII, br. 4; god. XXXIV, br. 3, 4; god. XXXV, br. 3; god. XXXVI, br. 1, 2, 3, 4; god. XXXVII, br. 1, 4; god. XXXIX, br. 1, 2, 3, 4; god. XL, br. 2, 3, 4; god. XLI, br. 1, 2, 3, 4; god. XLII, br. 3-4; god. XLIV, br. 1, 2, 3, 4; god. XLV, br. 1, 2, 3, 4; god. XLVI, br. 1, 2, 3, 4; god. XLVII, br. 1, 2, 3, 4; god. XLVIII, br. 1, 2, 3, 4; god. XLIX, br. 1, 2, 3, 4; god. L, br. 1, 2, 3, 4; god. LI, br. 1, 2, 3, 4; god. LII, br. 1, 2, 3, 4; god. LIII, br. 1, 2, 3, 4; god. LIV, br. 1, 2, 3, 4.

Cijena pojedinog broja je 5 kuna.

Izvanredni broj (E) – zadaci iz matematike (cijena 20 kn); Izvanredni broj (F) – Rječnik matematičkih naziva – hrvatski, engleski, njemački (cijena 30 kn).