Christoph Schiller

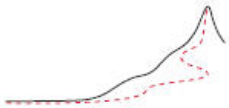
Preveo: Dragoš Vulović

PLANINA KRETANJA

PUSTOLOVINA FIZIKE – VOL VI

MODEL NITI

PREDPOSTAVKA OBJEDINJAVANJA



Naslov orginala:

Christoph Schiller

Motion Mountain

The Adventure of Physics

Volume VI

The strand Model –
a Speculation on Unification

Edition 28.1, available as free pdf
with films at www.motionmountain.net

Preveo sa engleskog
Dragoš Vulović
dvulovic@sbb.rs

Planina kretanja

Pustolovina fizike

Volumen VI

Model niti –
predpostavka objedinjavanja

Izdanje 28.1, dostupno kao besplatna pdf datateka
sa filmovima na www.motionmountain.net

Editio vicesima octava.

Proprietas scriptoris © Chrestophori Schiller

tertio anno Olympiadis trigesimae.

Omnia proprietatis iura reservantur et vindicantur.Imitatio prohibita sine auctoris permissione.Non licet pecuniam expetere pro aliqua, quaepartem horum verborum continet; liberpro omnibus semper gratuitus erat et manet.

Dvadesetosmo izdanje

Copyright © 1990–2016 by Christoph Schiller,

Od treće godine 24. Olimpijade

Do prve godine 31. Olimpijade.

Ova pdf datateka je licencirana preko Creative Commons Attribution-Noncommercial-No DerivativeWorks 3.0 Germany

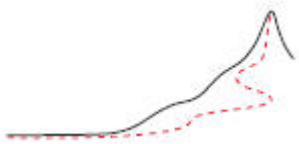
Licenca, čiji potpun tekst može da se nadje na veb stranici http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/de, uz dodatna ograničenja za reprodukciju, distribuciju i korišćenje, kako celine, tako i delova, za bilo koji proizvod ili bilo kakvu uslugu, komercijalnu ili ne, nije dozvoljeno bez pismenog dopuštenja vlasnika licence. Datateka pdf je bila i ostala besplatna za svakog u svrhu čitanja, memorisanja i štampanja za ličnu upotrebu i za elektronsku distribuciju. ali samo u neizmenjenom obliku i besplatno.

To Britta, Esther and Justus Aaron

τῷ ἐμοὶ δαὶμονι

Die Menschen stärken, die Sachen klären[1].

[1] Osnažite ljude, razjasnite stvari



PREDGOVOR

Ova knjiga je za svakog ko je jako radoznao u pogledu fizike. Zašto i kako se kreću stvari, ljudi, životinje, slike ili prazan prostor? Odgovor vodi do mnogih pustolovina, a ova knjiga predstavlja naljbolju od njih: traženje preciznog, jedinstvenog i konačnog opisa ***svih*** kretanja.

Cilj da se opišu ***sva*** kretanja – svakodnevna, kvantna i relativistička – podrazumeva da je to veliki prfojekt. Ovaj projekt može da se izvede korišćenjem dijagrama prikazanog na ***slici 1***. Predhodni delovi (I do V) pokrili su sve tačke iz ovog dijagrama – sve oblasti kretanja – osim one na vrhu. Ta preostala tačka sadrži ***konačan*** i ***jedinstven*** opis svih kretanja. Ova knjiga pred vama ukratko rezimira istoriju ove stare potrage i onda predstavlja začudjujuće, premda spekulativno rešenje zagonetke.

Potraga za konačnim, jedinstvenim opisom kretanja je priča sa puno iznenadjenja. Prvo, istraživanja iz dvadesetog veka pokazala su da u prirodi postoji najmanje rastojanje koje se može izmeriti, Plankova dužina. Tu se takodje pojavljuje da se na tom malom rastojanju ne može načiniti razlika izmedju materije i praznog prostora. Poslednje iznenadjenje datira iz tog veka: izgleda da su čestice i prostor načinjeni od ***niti***, umesto malih lopti ili tačaka. Ovaj tekst objašnjava kako da se postignu ovi iznenadjujući zakljuci. Naročito je pokazano da kvantna teorija polja, standardni model fizike čestica, opšta teorija relativnosti i kosmologija slede od niti. Pokazalo se da su usled niti tri interakcije merila, tri generiranja čestica i tri dimenzije prostora. Ustvari, izgleda da na sva otvorena pitanja u fizici dvadesetog veka o utemeljenju kretanja, uključujući poreklo boja i parametre standardnog modela, može da se odgovori na ovaj način.

Model niti, kako je prikazan u ovom tekstu, neočekivan je rezultat iz trostrukog cilja kojeg autor prati još od 1990. godine u prvih pet predhodnih delova ovog niza knjiga: da predstavi osnove kretanja na način koji je savremen, upečatljiv i jednostavan. Dok su nas predhodni delovi upoznavali sa ***utvrdjenim*** delovima fizike, ovaj deo predstavlja, na isti upečatljiv i zabavan način, ***razmišljanja*** o jedinstvenosti. Ništa u ovom delu još uvek nije ustanovljeno znanje. Ovaj deo je orginalno predstavljanje ove teme. U retrospektivi, cilj da se postigne najveća jednostavnost bila je centralni deo u izvođenju ovih predpostavki

Potraga za konačnom teorijom jedna je od najvećih pustolovina u životu: ona dovodi do granica razmišljanja. Potraga odbacuje nekoliko naših navika u razmišljanju o prirodi. Promeniti navike u razmišljanju zahteva hrabrost, ali pokreće jaka i lepa osećanja. Uživajte u njima.

Minhen, 30. juni 2016. godina

PREDGOVOR UZ PREVOD

Prevođenje na neki strani jezik predstavlja često tešku i opasnu probu opterećenja koju tekst orginala ponekad ne može da izdrži.
Ivo Andrić, *Nešto o prevođenju*

Serija od šest knjiga koju je napisao Chrisoph Schiller u vidu pustolovina koje očekuju čitaoce prilikom penjanja na Planinu Kretanja, jednostavno mora da pokrene čitaoca da krene ka vrhu. Svaka od šest pustolovina pruža jedinstvene osnove ne samo da se razume fizika, već i da nas oslobodi od straha pred njenim zagonetkama i da nam pokrene radoznalost za narednu pustolovinu.

Autor zaista ispunjava svoja obećanja i postiže sva tri postavljena cilja. Tekst je zaista ***jednostavan***, ***savremen*** i ***privlačan***. U svih šest knjiga, izuzetno nadahnuto, detaljno i jasno, i na duhovit način, izneta je ogromna količina podataka, izazova za razmišljanje, preporučene literature i biografskih podataka o ljudima koji su tokom 2 milenijuma istraživali i otkrivali i tajne života.

Poveden ovim kvalitetima započeo sam u septembru 2016. godine prevođenje šest knjiga Motion Mountain, izdanje 2016., samo nekoliko meseci od objavljivanja na internetu. Rezultat skoro trogodišnjeg rada nalazi se pred vama.

U početku imao sam nameru da prevod bude namenjen samo za lične potrebe i potrebe moje porodice. Međutim, što se prevođenje bližilo kraju, to sam sve više počeo da razmišljam da bi ovaj prevod mogao da pruži zadovoljstvo i drugima.

Prevod je nastao, između ostalog, zahvaljujući svesrdnoj podršci autora, Christoph Schiller-a. Neizmerno sam mu zahvalan za sve ono što je omogućilo da prevod bude deo družine Motion Mountain.

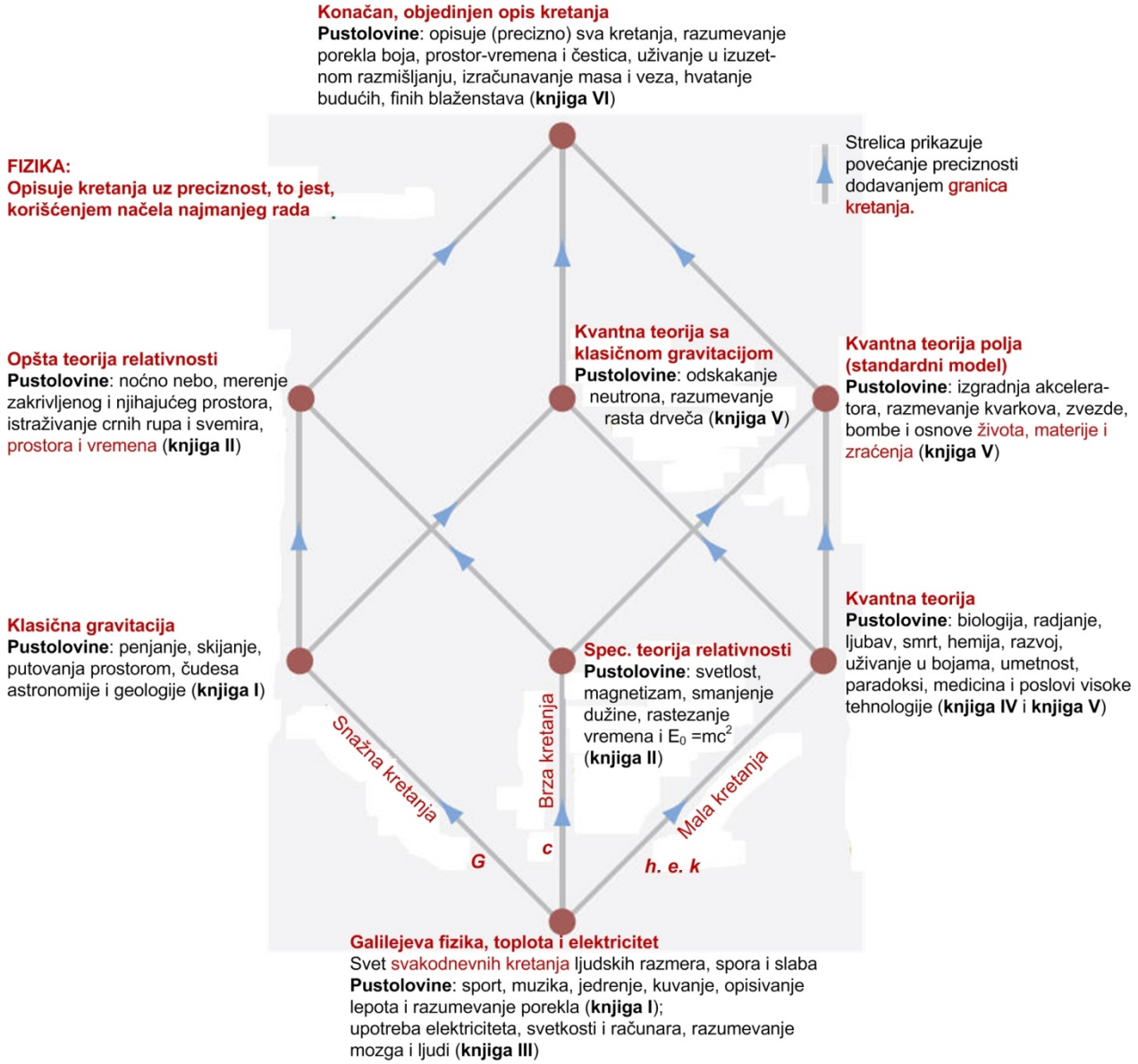
Unapred se zahvaljujem svim čitaocima koji me budu izvestili o svojim zapažanjima i svim mogućim poboljšanjima putem elektronske pošte dvulovic@sbb.rs. Time će doprineti da tekst prevoda postane još kvalitetniji.

Knjigu posvećujem:

mojim ćerkama: Ireni i Ivani, njihovoj deci, mojim unucima: Uni, Stevanu, Pavlu i Mariji.

Posebnu zahvalnost zaslužuje moja supruga, Nevenka. Njeno razumevanje i podrška doprineli su da predano radim na prevodu. Strpljivo je podnosila moju, bezmalo trogodišnju, preokupiranost penjanjem na Planinu Kretanja.

u Novom Sadu,
od septembra 2016. do maja 2019.



Slika 1 Kompletna mapa fizike, nauke o kretanju. Počinje na donjoj strani svakodnevnim kretanjima i prikazuje povezanosti sa oblastima savremene fizike: veze su definisane za velika i snažna kretanja preko gravitacijske konstante *G*, za brza kretanja preko brzine svetlosti *c*, a za mala kretanja preko Plankove konstante *h*, elementarnog naboja *e* i Bolzmanove konstante *k*

KORIŠĆENJE OVE KNJIGE

Napomene na levoj margini teksta odnose se na bibliografske reference, na neku drugu stranicu teksta ili na rešenje izazova. U izdanju u boji primedbe u levoj margini oznake za fusnote i veze sa veb stranama prikazani su zelenom bojom. Veze za internet imaju tendenciju da vremenom nestanu. Većina linkova može ponovo da se nađe na veb strani preprinta www.archive.org, gde su sačuvane kopije starijih stranica interneta.

U besplatnom izdanju, sve napomene i veze su povezane i može se na njih kliknuti. Izdanje u formatu .pdf sadrži takođe sve filmove; oni mogu da se pogledaju korišćenjem programa Adobe Reader[1]. Takođe je

[1] U tekstu ovog prevoda ova udobnost delimično je moguća. Prevod je urađen u programu Microsoft Word (ne po preporuci autora u LaTex-u), tako da su upućivanja na bibliografske podatke, na određenu stranicu ili na rešenje izazova, stavljena na odgovarajuća mesta u sam tekst i prikazana u zagradi ***koso, podebljano i crvenom bojom***.

Veze sa veb stranama iz orginalnog teksta prenete su u prevod.

Filmovi (QuickTime film) koji u orginalu mogu da se pokrenu klikom na sliku zamenjeni su u prevodu vezom sa odgovarajućim video zapisom u Youtube. (prim. prev.)

omogućeno stavljanje žutih primedbi. Poslednje pdf izdanje, sa ubačenim filmovima, besptatno je i tako će i ostati za učitavanje sa interneta.

Rešenja i saveti za izazove dati su u prilogu. Izazovi su razvrstani kao laki (e), standardnog nivoa studenata (s), teški (d) i nivo za istraživanje (r). Izazovi za koje nisu data rešenja ipak su obuhvaćena knjigom i obeleženi su sa (ny).

POVRATNE INFOMACIJE

Bilo bi dragocen prijem e-pošte od vas na fb@motionmountain.net, bilo o tome kako da se popravi tekst ili sa rešenjem nekog nagradnog izazova navedenog u www.motionmountain.net/prizes.html. Svaka povratna informacija biće iskorišćena da se popravi sledeće izdanje. Za posebno korisan doprinos bićete pomenuti – ukoliko to želite – u priznanjima, dobićete nagradu ili oboje.

PODRŠKA

Vaša donacija dobrotvornoj neprofitnoj organizaciji oslobodjenoj od oporezivanja, koja proizvodi, prevodi i objavljuje ovu seriju knjiga je dobrodošla! Za detalje, pogledajte veb stranu www.motionmountain.net/donation.html. Poreska služba Nemačke proverava pravilno korišćenje vaših donacija. Ukoliko to želite, vaše ime će biti stavljeno u listu sponzora. Hvala vam unapred za vašu pomoć u ime svih čitalaca širom sveta.

Izdanje ove knjige na papiru dostupno je, bilo u boji ili kao crno belo, na sledećim veb stranama www.amazon.com, www.createspace.com ili www.lulu.com. A sada, uživajte u čitanju

SADRŽAJ

1 OD MILENIJUMA FIZIKE DO OBJEDINJAVANJA 21
U susret konačnoj teoriji 23
Šta je bilo pogrešno u prošlosti 24
Zaključak: kako da nađemo konačnu teoriju kretanja 25

2 FIZIKA U ISKAZIMA OGRANIČENJA 27
Uprostimo fiziku što je moguće više 27
Svakodnevna ili Galilejeva fizika u jednoj rečenici 27
Specijalna teorija relativnosti u jednoj rečenici 27
Kvantna teorija u jednoj rečenici 28
TermodInamika u jednoj rečenici 29
Opšta teorija relativnosti u jednoj rečenici 30
Izvođenje opšte teorije relativnosti 31
Izvođenje zaključka o univerzalnom zakonu gravitacije 33
Veličina fizičkih sistema u opštoj teoriji relativnosti 33
Mehanička analogija za maksimalnu silu 34
Plankove granice za sva fizička opažanja 34
Fizika, matematika i jednostavnost 36
Granice za prostor, vreme i veličinu 36
Granice mase i energije 36
Virtualne čestice – nova odrednica 37
Zanimljivosti i zabavni izazovi o Plankovim granicana 37
Kosmološke granice za sva fizička opažanja 40
Zavisnost veličine i energije 40
Moment količine kretanja i rad 41
Brzina 41
Sila, snaga i sjajnost 42
Čudan šarm ograničenja entropije 42
Zanimljivosti i zabavni izazovi o ograničenjima opažanja zavisnim od sistema 43
Kosmologija u jednoj rečenici 44
Kosmološka ograničenja opažanja 45
Ograničenja preciznosti merenja i izazov za razmišljanje 45
Nema realnih brojeva 46
Vakuum i masa: dve strane istog novčića 46
Preciznost merenja i postojanje skupova 46
Zaključak o ograničenjima u prirodi 47

3 OPŠTA TEORIJA RELATIVNOSTI NASPRAM KVANTNE TEORIJE 49
Protivrečnosti 49
Poreklo protivrečnosti 51
Područje protivrečnosti: Plankove razmere 51
Rešavanje protivrečnosti 53
Poreklo tačaka 53
Zaključak sukobu između dve teorije 54

4 DA LI SE MATERIJA RAZLIKUJE OD VAKUUMA? 55
Opraštanje od trenutka vremena 55
Opraštanje od tačaka u prostoru 57
Uopštavanje relacije neodređenosti 58
Opraštanje od neprekidnosti prostor-vremena 58
Opraštanje od dimenzionalnosti 60
Opraštanje od mnogostrukosti prostor-vremena 61
Opraštanje od opažanja, simetrija i merenja 62
Može li prostor-vreme da bude rešetka? 62
Pogled na kvantnu geometriju 63

Opraštanje od tačkaste čestice ... 63
Opraštanje od osobina čestice ... 64
Ograničenje mase elementarnih čestica ... 65
Opraštanje od čestica sa masom i od vakuuma bez mase ... 66
Materija i vakuum su neraspoznatljivi međusobno ... 67
Zanimljivosti i zabavni izazovi o Plankovim razmerama ... 68
Zajednički sastavni delovi ... 70
Predviđanja za eksperimente ... 71
Zaključak o česticama i vakuumu ... 73

5 KAKVA JE RAZLIKA IZMEĐU SVEMIRA I NIČEG? ... 75
Kosmološke razmere ... 75
Maksimalno vreme ... 75
Da li je starost svemira određene? ... 76
Koliko precizvo može da bude merenje starosti? ... 77
Da li vreme postoji? ... 78
Kolika je greška u merenju starosti svemira? ... 78
Maksimalna dužina ... 81
Da li je svemir zaista veliko mesto? ... 81
Granica prostora – da li je nebo površina? ... 82
Ima li svemir početne uslove? ... 83
Da li svemir sadrži čestice i zvezde? ... 83
Ima li svemir masu? ... 84
Da li postoje simetrije u prirodi? ... 85
Ima li svemir granicu? ... 86
Da li je svemir skup? ... 86
Zanimljivosti i zabavni izazovi o svemiru ... 88
Hilbertov šesti problem je rešen ... 89
Savršena knjiga fizike ... 89
Da li svemir ima smisao? ... 90
Napuštanje skupova i diskretnosti otklanja protivrečnosti ... 91
Ekstremne razmere i otvorena pitanja u fizici ... 92
Da li je ekstremni identitet načelo prirode? ... 92
Zaključak o svemiru ... 93
Fizički aforizam ... 93

6 OBLIK TAČKE – PROŠIRENJA U PRIRODI ... 95
Veličina i oblik elementarnih čestica ... 96
Postoje li kutije? ... 96
Mogu li da pomognu Grci? – Ograničenja noževa ... 96
Da li su preseci konačni? ... 96
Možemo li da napravimo fotografiju tačke? ... 97
Kakav je oblik elektrona? ... 98
Da li je oblik elektrona ustaljen? ... 99
Zaključak o prvom dokazu proširenosti ... 99
Oblik tačaka u vakuumu ... 100
Merenje praznine ... 101
Koliko je najveći broj čestica koji staje u deo vakuuma? ... 101
Zaključak o drugom dokazu proširenosti ... 101
Veliko, malo i njihova povezanost ... 101
Da li je malo veliko? ... 102
Objedinjavanje i totalna simetrija ... 103
Zaključak o trećem dokazu propirenosti ... 103
Ima li priroda delove? ... 104
Da li svemir sadrži bili šta? ... 105
Ameba ... 105
Zaključak o četvrtom dokazu propirenosti ... 106
Entropija crnih rupa ... 106
Zaključak o petom dokazu proširenosti ... 107

Razmena tačaka prostora ili čestica u Plankovoj razmeri 108
Zaključak o šestom dokazu proširenosti 108
Značenje spina....109
Zaključak o sedmom dokazu proširenosti....109
Zanimljivosti i zabavni izazovi o proširenosti 110
Polni prioriteti u fizici 111
Provere proširenosti 111
Tekuča istraživanja zasnovana na proširenim sastojcima 112
Superstrune – proširenost i mreža dvojnosti 112
Zašto su superstrune i supermembrane tako primamljivi....113
Zbog čega je matematika superstruna tako teška 114
Provera superstruna: veze i mase 114
Stanje predpostavke superstruna 115
Zaključak o proširenosti u prirodi 115

7 OSNOVE MODELA NITI 117
Zahtevi za konačnu teoriju 117
Uvođenje niti....119
Od niti do savremene fizike 121
Vakuum....124
Opažanja i ograničenja....125
Čestice i polja....125
Zanimljivosti i zabavni izazovi o nitima 126
Da li niti objedinjuju? – Milenijumska lista otvorenih pitanja....127
Da li su niti konačne? – O uopštavanju i izmenjivosti 127
Zašto niti? – jednostavnost....129
Zašto niti? –osnovne kružne odrednice fizike....130
Levkovi – ekvivalentna alternativa nitima 132
Čvorovi i krajevi niti 133
Zaključak o osnovnom načelu modela nita – i neprekidnosti 133

8 KVANTNA TEORIJA MATERIJE IZVEDENA IZ NITI 135
Niti, vakuum i čestice....135
Obrtanje, spin 1/2 i trik sa opasačem 136
Trik sa opasačem nije jedinstven 139
Uzgred: trik sa opasačem spasava život....140
Fermioni i spin 141
Bozoni i spin 142
Spin i statistika....142
Funkcije zapleta: zamagljeni zapleti 144
Detalji o kolebanjima i prosecima....145
Funkcije zapleta su talasne funkcije....146
Izvođenje Šredingerove jednakosti iz zapleta 149
Masa iz zapleta....150
Potencijali....152
Kvantna interferencija iz zapleta....152
Izvođenje Paulijeve jednakosti iz zapleta 153
Obrtne strelice, interferencija i integrali putanja....154
Merenje i urušavanje talasne funkcije....155
Skrivene promenljive i Kohen-Špekerova teorema 156
Stanje sa više čestica i zaplitanje 157
Mešana stanja....159
Dimenzionalnost prostor-vremena 159
Operatori i Hajzenbergova slika....161
Lagranžijan i načelo najmanjeg rada....161
Specijalna teorija relativnosti: vakuum....162
Specijalna teorija relativnosti: invarijanta granice brzine 162
Dirakova jednakost izvedena iz zapleta 163
Prikaz spinora and Dirakova jednakost korišćenjem zapleta 165

Kvantna mehanika naspram kvantne teorije polja ... 167
Podsećanje: rešavanje tri paradoksa Galilejeve fizike ... 167
Zabavni izazovi o kvantnoj teoriji ... 168
Zaključak o kvantnoj teoriji materije: milenijumska pitanja i eksperimentalna predvidjanja ... 169

9 INTERAKCIJE MERILA IZVEDENE IZ NITI ... 171
Interakcije i promena faze ... 171
Izobličenja repa u odnosu na izobličenje jezgra ... 172
Elektrodinamika i prvi Rajdemajsterov potez ... 173
Niti i prvi Rajdemajsterov potez ... 174
Mogu li fotoni da se raspadnu, nestanu ili razbiju? ... 175
Električni naboj ... 175
Izazov: Koja invarijanta čvora je električni naboj? ... 176
Električna i magnetna polja i potencijali ... 176
Lagranžijan elektromagnetnog polja ... 178
U(1) invarijante merila izazvane I potezom Rajdemajstera ... 178
U(1) interakcije merila izazvane I potezom Rajdemajstera ... 179
Lagranžiajn kvantne elektrodinamike ... 180
Fajnmanovi dijagrami i renormalizacija ... 180
Anomalija magnetnog momenta ... 182
Maksvelove jednakosti ... 183
Zanimljivosti i zabavni izazovi o kvantnoj elektrodinamici ... 184
Zaključak o kvantnoj elektrodinamici i eksperimentalnim predviđanjima ... 184
Slaba nuklearna interakcija i drugi Rajdemajsterov potez ... 185
Niti, drugi Rajdemajsterov potez i SU(2) ... 185
Slab naboj i narušavanje pariteta ... 187
Slabi bozoni ... 188
Lagranžijan neprekinute SU(2) interakcije merila ... 188
Prekid SU(2) ... 190
Otvoreno pitanje: da li su W i Z zapleti tačni? ... 191
Elektroslab Lagranžijan ... 191
Slabi Fajnmanovi dijagrami ... 191
Zabavni izazovi i zanimljivosti o slaboj interakciji ... 192
Zaključak o slaboj interakciji i eksperimentalnim predviđanjima ... 192
Jaka nuklearna interakcija i treći Rajdemajsterov potez ... 194
Niti i treći Rajdemajsterov potez ... 194
Uvod u SU(3) ... 195
Od klizanja do SU(3) ... 198
Model niti za gluone ... 201
Lagranžijan gluona ... 203
Naboj boje ... 203
Osobine jake interakcije ... 204
Lagranžijan kvantne hromodinamike ... 205
Renormalizacija jake interakcije ... 205
Zanimljivosti i zabavni izazovi o SU(3) ... 205
Zaključak o jakoj interakciji i eksperimentalnim predviđanjima ... 206
Zaključak o milenijumskim pitanjima u vezi interakcija merila ... 207
Predviđanja o broju interakcija ... 207
Objedinjavanje interakcija ... 207
Nema neslaganja ... 208
Predviđanja o velikom objedinjavanju i supersimetriji ... 208
Nema novih opažanja efekata gravitacije u fizici čestica ... 208
Status našeg traganja ... 209

10 OPŠTA TEORIJA RELATIVNOSTI IZVEDENA IZ NITI ... 211
Ravan prostor, specijalna teorija relativnosti i njena ograničenja ... 211
Klasična gravitacija ... 211
Izvođenje univerzalne gravitacije iz osobina crne rupe ... 212
Zaključak o univerzalnoj gravitaciji iz niti ... 213

Zakrivljen prostor....214
Sastav horizonta i crnih rupa....215
Postoji li bilo šta iza horizonta?....215
Energija horizonta crne rupe....216
Priroda crnih rupa....216
Entropija vakuuma i materije....217
Entropija crnih rupa izvedena iz modela niti....217
Temperatura, zračenje i isparavanje crnih rupa....218
Granice crne rupe....219
Zakrivljenost oko crnih rupa....220
Oblik crnih rupa koje se ne obrću....220
Jednakosti polja opšte teorije relativnosti....221
Jednakosti bez jednakosti....222
Hilbertov rad u opšroj teoriji relativnosti....222
Pena prostor-vremena....222
Gravitoni, gravitacijski talasi i njihovo otkrivanje....223
Otvoren izazov: Popraviti dokaz za zaplet gravitona....223
Ostale greške u vakuumu....223
Gravitacija superpozicija....225
Torzija, zanimljivosti i izazovi o kvantnoj gravitaciji....225
Predviđanja modela niti o gravitaciji....227
Kosmologija....228
Konačnost svemira....228
Veliki prasak – bez inflacije....230
Kosmološka konstanta....230
Vrednost gustine materije....231
Otvoren izazov: Šta je tamna materija?....232
Topologija svemira....232
Predviđanja modela niti o kosmologiji....232
Zaključak o milenijumskim pitanjima relativnosti i kosmologije....233

11 SPEKTAR ČESTICA IZVEDEN IZ NITI....235
Čestice i kvantni brojevi iz zapleta....235
Čestice načinjene od jedne niti....235
Nevezane krive....236
Merni bozoni – i Rajdemajsterovi potezi....237
Otvoreni ili dugi čvorovi....238
Zatvoreni zapleti: čvorovi....238
Zaključak o zapletima načinjenih od jedne niti....239
Čestice načinjene od dve niti....240
Kvarkovi....241
Generisanje kvarkova....242
Graviton....243
Gluonske lopte....243
Problem praznine mase i Klej Matematički Insitut....244
Zagonetka....244
Zaključak o zapletima sa dve viti....244
Čestice načinjene od tri niti....245
Leptoni....245
Otvoren izazov: Nači bolji dokaz za zaplete leptona....247
Higsov bozon – pogrešan odeljak iz 2009. godine....247
Higsov bozon – ispravljen odeljak iz 2012. godine....248
Predviđanja o Higsu iz 2012. godine....250
Mezoni kvark-antikvark....250
Mezon oblikuje činioce....253
Mase mezona, pobuđeni mezoni i ograničavanje kvarkova....254
Narušavanje CP u mezonima....255
Ostali zapleti sa tri niti i gluonske lopte....255

Spin i čestice od tri niti ... 256
Zaključak o zapletima od tri niti ... 257
Zapleti od četiri i više niti ... 257
Barioni ... 257
Tetrakvarkovi i egzotični mezoni ... 259
Ostali zapleti načinjeni od četiri ili više niti ... 259
Zaključak o zapletima načinjenih od četiri ili više niti ... 259
Zanimljivosti i zabavni izazovi o zapletima čestica ... 260
Kretanje kroz vakuum – i brzina svetlosti ... 262
Zaključak o milenijumskim pitaljima čestica i vakuuma ... 264
Broj 3 ... 264
Predviđanja o tamnoj materiji, LHC (Large Hadron Collider) i svemiru ... 264

12 OSOBINE ČESTICA IZVEDENE IZ NITI ... 267
Mase elementarnih čestica ... 267
Opšte osobine vrednosti mase čestice ... 267
Mase bozona ... 268
Odnos masaW/Z bozona i ugao mešanja (u modelu čvora iz 2015. godine) ... 269
Odnos masa Higs/Z bozona ... 270
Odnos masa kvarkova ... 270
Odnos masa leptona ... 272
Odnos masa širom porodice čestica ... 273
Predviđanja o apsolutnoj vrednosti mase i punoj hijerarhiji mase ... 274
Fino podešavanje i prirodnost ... 276
Otvorena pitanja o izračunavanju mase ... 276
Zaključak o elementarnim česticama i milenijumskim pitanjima ... 277
Uglovi mešanja ... 277
Mešanje kvarka – eksperimentalni podaci ... 277
Mešanje kvarka – objašnjenje ... 278
Izazov ... 279
Narušavanje CP u kvarkovima ... 279
Mešanje neutrina ... 279
Narušavanje CP u neutrinima ... 280
Otvoren izazov: Ab initio izračunavanje uglova mešanja i faza ... 280
Zaključak o uglovima mešanja i milenijumskoj listi ... 280
Konstante veza i objedinjavanje ... 281
Niti podrazumevaju objedinjavanje ... 282
Opšta očekivanja o konstantama veza ... 283
Prvi nagoveštaj: kvantifikovanje naboja i topološki prevoj ... 283
Drugi nagoveštaj: energetska zavisnost fizičkih veličina ... 284
Treći nagoveštaj: promena konstanti veza na niskim energijama ... 285
Četvrti nagoveštaj: predviđanja na niskoj energiji, nezavisno pd sadržaja čestice ... 285
Promene konstanti veza u blizini Plankove energije ... 286
O proceni konstante fine strukture iz oblika čvora ... 286
Peti nagoveštaj: 3d prevoj ... 286
Šesti nagoveštaj: torzija ... 287
Sedmi nagoveštaj: brojevi povezivanja ... 288
Osmi nagoveštaj: procena konstanti veza korišćenjem nasumičnog obrtanja (verzija iz 2013.)288
Deveti nagoveštaj: procena konstante fine strukture iz statistike izobličavanja ... 289
Otvoren izazov: izračunajte konstante veza ab initio ... 289
Momenti električnog dipola ... 290
Zaključak o konstantama veza i milenijumskim pitanjima ... 290
Konačan zaključak o milenijumskim pitanjima ... 290
Eksperimentalna predviđanja modela niti ... 291

13 VRH PLANINE KRETANJA ... 295
Naša putanja do vrha ... 295
Svakodnevni život: vladavina beskonačnosti ... 295
Relativnost i kvantna teorija: odsustvo beskonačnosti ... 296

Objedinjavanje: odsustvo konačnosti 297
Novi pogledi 298
Lepota niti 299
Može li model niti da se uopšti? 299
Šta je priroda? 300
Kvantna teorija i priroda materije 300
Kosmologija 300
Mišljenja o objedinjavanju i nitima 301
Odbacivanje indukcije 304
Šta je još skriveno? 305
Put povratka: je ręve, donc je suis 305
Koje je poreklo boja? 307
Zaključak; šta je kretanje? 307

POGOVOR 309

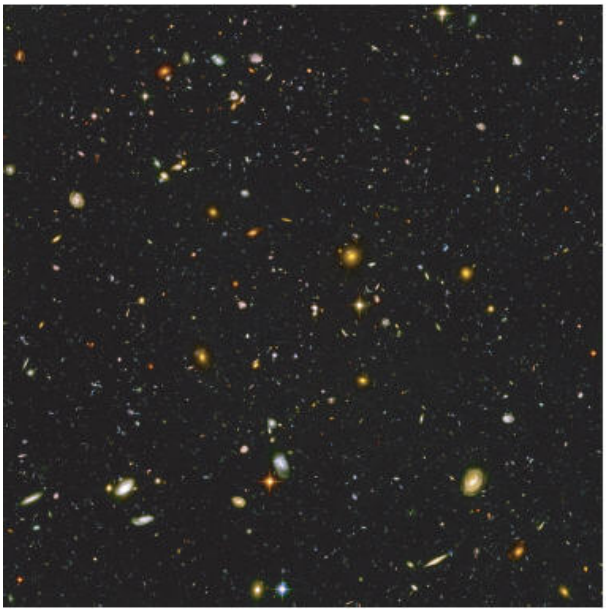
DODATAK A – GEOMETRIJA ČVORA 311

IZAZOVI, SAVETI I REŠENJA 313

BIBLIOGRAFIJA 319

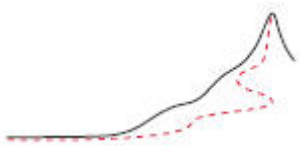
ZASLUGE 339

Priznanja 339
Zasluge za film 339
Zasluge za slike 340



Model niti – predpostavka objedinjavanja

U kome je, kombinacijom kvantne
mehanike i opšte teorije relativnosti, osvojen
vrh Planine Kretanja, a otkriveno je:
da se vakuum ne razlikuje od materije,
da postoji mala razlika između velikog i malog,
da priroda može da se opiše pomoću niti,
da čestice mogu da se modeliraju zapletima,
da se interakcije pojavljuju prirodno,
da su boje posledica zapleta i
da je moguć potpun opis kretanja.



Poglavlje 1

OD MILENIJUMA FIZIKE DO OBJEDINJAVANJA

Pogledate šta se sve dešava oko nas. Dete koje se smeje, slavuj koji peva, ljiljan koji se otvara; sve je u kretanju. Svaka senka, čak i ona nepokretna, nastaje usled kretanja svetlosti. Svaka planina se održava na mestu usled kretanja elektrona. Svaka zvezda poseduje svoj oblik i sjaji zbog kretanja materije i zračenja. Isto tako i tmina noćnog neba[1] je usled kretanja: ona je nastala zbog širenja svemira. Najzad, sve ljudske tvorevine su usled kretanja molekula, jona i elektrona u mozgu. Postoji li zajednički jezik za sa ova i ostala posmatranja u prirodi?

Postoji li ***jedinstveni*** o ***precizan*** način da se opišu sva kretanja? Kako? Da li je sve što se kreće, od ljudi do planeta, od svetlosti do praznog prostora, načinjeno od istih sastojaka? Koje je poreklo kretanja? Odgovori na ova pitanja tema su ovog teksta. Precizni odovori na pitanja definišu predmet ***fizike***. Tokom vekova istraživači su prikupili veliki broj preciznih opažanja o kretanju. Sada znamo kako se električni signali kreću u mozgu, kako insekti lete, zašto su boje promenljive, kako su se oblikovale zvezde, kako se razvijao život i mnogo više. Naša znanja o kretanju koristimo da bismo gledali u ljudsko telo i lečili bolesti; naša znanja o kretanju koristimo da pravimo elektroniku, da komuniciramo na velikim rastojanjima, da radimo za mir; naša znanja o kretanju koristimo da sačuvamo živote od mnogih opasnosti iz prirode, uključujući suše i oluje. Fizika, nauka o kretanju, pokazuje uvek iznova da je poznavanje kretanja i korisno i zadivljujuće.

Na kraju prošlog milenijuma ljudi su bili sposobni da opišu sva opažena kretanja uz veliku preciznost. Ti opisi se mogu sabrati u narednih šest iskaza:

1. Kretanje se događa u prirodi u prostoru sa tri dimenzije i opisano je načelom najmanjeg rada. Rad je fizička veličina koja pokazuje koliko se promena pojavilo u procesu. Načelo najmanjeg rada izražava: kretanje umanjuje promene. Između ostalog, načelo najmanjeg rada podrazumeva da je kretanje predvidivo, da je energija očuvana i da su rast i razvoj prirodni procesi, kao što je i opaženo. (***Ref. 1***) i (***Ref. 3***).

2. U prirodi postoji invarijanta maksimalne brzine energije, brzina svetlosti c. Ova invarijanta maksimuma podrazumeva ***specijalnu teoriju relativnosti***. Između ostalog, ona podrazumeva da su energija i masa ekvivalentni, kao što je i opaženo. (***Ref. 2***).

3. U prirodi postoji invarijanta najvećeg protoka količine kretanja, Plankova sila $c^4/4G$. Ova invarijanta maksimuma podrazumeva opštu teoriju relativnosti, kao što ćemo se podsetiti u daljem tekstu. (***Strana 30***). Između ostalog, opšta teorija relativnosti podrazumeva da tela padaju i da se prazan prostor krivi i kreće, kao što je i opaženo. (***Ref. 2***).

4. Razvoj svemira je opisan kosmološkom konstantom Λ. Ona određuje najveću udaljenost i najveću starost koja može da se opazi u sadašnjosti. (***Ref. 2***).

5. U prirodi postoji invarijanta promene vrednosti, različita od nule, kvant rada h. Ova invarijanta podrazumeva kvantnu teoriju. Između ostalog, ona objašnjava šta su život i smrt, zašto oni postoje i kako da uživamo u svetu. (***Ref. 4***).

6. U prirodi se materija i zračenje sastoje od kvantnih čestica. Materija se sastoji od ***fermiona***: šest kvarkova, tri leptona sa nabojem, tri neutrina i njihovih antičestica. Zračenje se sastoji od bozona: protona, tri srednje slabih vektorskih bozona i osam gluona. Osim toga, godina 2012. donela je otkriće Higsovog bozona. Fermioni se kreću i mogu da se pretvaraju jedni u druge. Pretvaranje je

[1] Na fotografiji na ***strani 19*** prikazan je udaljen deo svemira, stoga izuzetno mlad, sa svojim velikim brojem galaksija naspram crnog noćnog neba. (ljubaznošću NASA)

opisano elektromagnetnom interakcijom, slabom nuklearnom interakcijom i jakom nuklearnom interakcijom. Zajedno sa masama, kvantnim brojevima, uglovima mešanja i veza, ova pravila pretvaranja obrazuju takozvani ***standardni model fizike čestica***. Između ostalog, standardni model objašnjava kako se obrazuju munje, zašto se boje menjaju i kako su postali atomi u našim telima. (***Ref. 4***).

Ovih šest iskaza, milenijumski opis fizike, opisuju sve što znamo o kretanju do 2000. godine. (Ustvari, 2012. godina je precizniji datum, premda manje upečatlljiv.) Ovi iskazi opisuju kretanja ljudi, životinja, biljaka, predmeta, svetlosti, zračenja, zvezda, praznog prostora i svemira. Ovih šest iskaza opisuju kretanje toliko precizno da ni danas ***nema*** razlika između izračunavanja i opažanja, između teorije i prakse. To je skoro neverovatan rezultat, zbir napora desetine hiljada istraživača tokom proteklih vekova.

Međutim, mali skup opažanja još uvek nije potekao iz ovih šest iskaza. Poznat primer je poreklo boja. U prirodi su boje posledice takozvane ***konstante fine strukture***, zagonetne konstante prirode, čija je vrednost izmerena, i ona je 1/137,035999074(44). (***Ref. 5***). Kada bi imala drugu vrednost, sve bi boje bile drugačije.

Drugo neobjašnjeno opažanje je priroda tamne materije. Mi još uvek ne znamo šta je tamna materija. Sledeći neobjašnjen proces je način na koji se obrazuju misli u našem mozgu. Mi još uvek ne znamo detaljno kako misli slede iz gornjh iskaza, iako znamo da razmišljanje nije u suprotnosti sa njima. U slučaju tamne mateije to nije jasno: tamna materija bi mogla lak da bude u suprotnosti sa milenijumskim opisom prirode.

Drugim rečima, iako je milenijumski opis fizike precizan i uspešan, on nije potpun: postoje neka otvorena pitanja. Ustvari, gore naveden šesti iskaz sumira standardni model fizike čestica, on nije jednostavan kao što su predhodni. Zbog čega postoje ***tri*** interakcije, ***dvanaest*** elementarnih fermiona, ***trinaest*** elementarnih bozona i ***tri*** dimenzije? Kako se poreklo boja i priroda tamne materije uklapaju u to? Koje je poreklo mase čestica? Kako se standardni model odnosi prema pet predhodnih iskaza? I zašto kretanje postoji uopšte? Ova otvorena, neobjašnjena pitanja obrazuju zahtev za objedinjenje, izraženo konkretnim pojmovima.

Potpun popis svih ***temeljnih*** pitanja o kretanju koja su ***neobjašnjena*** do 2000. godine sačinjavaju kratku tabelu. Nju ćemo nazvati ***milenijumska pitanja***.

TABELA 1 Milenijumska lista: ***sve*** što standardni model i opšta teorija relativnosti ***ne mogu*** da objasne, dakle lista samo eksperimentalno dostupnih podataka za proveru konačnog, objedinjenog opisa kretanja.

Opažanje	**osobina neobjašnjena do 2000. godine**
Lokalne veličine koje ne opisuje standardni model osobina čestica	
$\alpha = 1/137,036(1)$	vrednost konstante elektromagnetne veze na maloj energiji
α_w ili θ_w	vrednost konstante slabe veze ili ugla slabog mešanja na maloj energiji
α_s	vrednost konstante jake veze na nekoj određenoj vrednosti energije
m_q	veličine masa 6 kvarkova
m_l	veličina masa 6 leptona
m_W	veličina mase W vektorskog bozona
m_H	veličina mase skalarnog Higsovog bozona
$\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23}$	veličine tri ugla mešanja kvarkova
δ	vrednost faze CP narušavanja za kvarkove
$\theta^v_{12}, \theta^v_{13}, \theta^v_{23}$	veličine tri ugla mešanja neutrina
$\delta^v, \alpha_1, \alpha_2$	vrednost tri faze CP narušavanja za neutrine
$3 \cdot 4$	broj generiranja fermiona i čestica u svakom generiranju
J, P, C itd	poreklo kvantnih brojeva za svaki fermion i svaki bozon
Lokalne matematičke strukture koje ne objašnjava standardni model	
$c, \hbar, k$	poreklo invarijantnih Plankovih jedinica kvantne teorije polja
3+1	broj dimenzija fizičkog prostora i vremena
SO(3,1)	poreklo Poenkareove simetrije, to jest, spina, položaja, energije i količine kretanja

S(n)	poreklo identiteta čestica, to jest, simetrije permutacije
simetrija merila	poreklo grupa merila, a posebno:
U(1)	poreklo grupe elektromagnetnog merila, to jest, kvantifikovanja električnog naboja, i nedostatak magnetnog naboja.
SU(2)	poreklo grupe merila slabe interakcije, njeno prekidanje i P narušavanje
SU(3)	poreklo grupe merila jake interakcije i njeno CP očuvanje
renorm. grupe	poreklo osobina renormalizacije
$\delta W = 0$	poreklo talasne funkcije i načela najmanjeg rada u kvantnoj teoriji
$W = \int \mathrm{L}_{\mathrm{SM}}\, \mathrm{d}t$	poreklo lagranžijana standardnog modela fizike čestica
Globalne veličine koje ne oblašnjava opšta teorija relativnosti i kosmologija	
0	opažena ravnost, to jest nedostatak zakrivljenosti u svemiru
$1,2(1)\cdot 10^{26}\,\mathrm{m}$	udaljenost horizonta, to jest "veličina" svemira (ako uopšte ima smisla)
$\rho_{\mathrm{de}} = \Lambda c^4/(8\pi G)$ $\approx 0,5\ \mathrm{nJ}/m^2$	vrednost i priroda opažene gustine energije vakuuma, tamne energije ili kosmološke konstante
$(5\pm 4)\cdot 10^{79}$	broj bariona u svemiru (ako to ima smisla), to jest srednja gustina vidljive materije u svemiru
$f_0\left(1,\ldots,c.10^{90}\right)$	početni uslovi za cca 10^{90} polja čestica u svemiru (ako ili sve to ima smisla), uključujući homogenost i izotropiju raspodele materije i kolebanje gustine u poreklu galaksija
ρ_{dm}	gustina i poreklo tamne materije
Globalne matematičke strukture koje ne objašnjava opšta teorija relativnosti i kosmologija	
c, G	poreklo invarijante Plankovih jedinica u opštoj teoriji relativnosti
$\delta\int \mathrm{L}_{\mathrm{GR}}\mathrm{d}t = 0$	poreklo načela najmanjeg rada i lagranžijana u opštoj teoriji relativnosti
$\mathrm{R}\times\mathrm{S}^3$	opažena topologija svemira

Milenijumska lista sadrži ***sve*** što fizika česstica i opšta teorija relativnosti ne mogu da objasne. Drugim rečima, popis sadrži ***sve*** ono što do 2000. godine nije objašnjeno u oblasti osnovnih kretanja. Popis je kratak, ali nije prazan. Prema tome, milenijumska lista traži odgovor na svako od ovih pitanja. Zahtev za objedinjavanje – i tema ovog teksta –zahtev je za ove odgovore. Možemo zato da kažemo da je ***konačna teorija kretanja*** ona teorija iz koje su odstranjena sva otvorena pitanja iz milenijumske liste.

U SUSRET KONAČNOJ TEORIJI

Znamo da konačna teorija postoji: to je ona teorija koja opisuje kako da se izračuna konstanta fine strukture α = 1/137,036(1). Teorija čini to isto za oko dva tuceta drugih konstanti, ali ova je je najpoznatija. Ukratko, konačna teorija je ona teorija koja objašnjava sve boje u prirodi.

Utvrđen popis dokaza se redovno ponavlja prema traženju konačne, jedinstvene teorije kretanja. Postizanje konačne teorije i uživanje u pustolovini jedino je moguće ako su ovi dokazi poznati – pa zatim nežno odgurnuti ustranu.

- Redovno se govori da konačna teorija ne može da postoji pošto je priroda beskonačna i misterije će uvek da postoje. Međutim, ovaj iskaz je pogrešan. Prvo, priroda nije beskonačna. Drugo, ćak i kada bi bila beskonačna, još uvek bi bilo moguće da se nešta zna i da se opiše. Treće, čak i kada bi bilo nemoguće da se nešta zna i da se opisuje, i ako bi misterije ostale prisutne, konačna teorija bi bila moguća. Konačna teorija ***nije*** korisna za ***svako*** pitanje iz svakodnevnog života, kao što je izbor vaše hrane iz jelovnika ili izbor vaše buduće profesije. Konačna teoija je prosto potpun opis temelja kretanja: konača teorija samo kombinuje i objašnjava fiziku čestica i opštu teoriju relativnosti.
- Ponekad se tvrdi da konačna teorija ne može da postoji zbog Godelove teoreme nepotpunosti ili zbog računske nesvodljivosti. Međutim, u takvim tvrdnjama obe teoreme se primenjuju na oblast u kojoj nisu valjane. Zbog toga je takvo razmišljanje pogrešno.
- Neki govore da nije jasno da li konačna teorija uopšte postoji. Iz iskustva svi znamo da je to pogrešno, iz prostog razloga: mi smo sposobni da govorimo o svemu. Drugim rečima, svako od

nas već ima "teoriju o svemu", ili konačnu teoriju prirode. Isto tako teorije u fizici način su da se govori o prirodi, i za konačnu teoriju potrebno je samo da potražimo one pojmove koji nam omogućavaju da govorimo o kretanju uz punu preciznost. Pošto tražimo način za govor, znamo da konačna teorija postoji. A potraga za njom je očaravajuća i uzbuđujuća, što će da povrdi svako ko bude učesnik u ovoj pustolovini.

- Neki tvrde da je traganje za konačnom teorijom redukcionistički (svođenje na delove) poduhvat i da ne može da dovede do uspeha, zato što je redukcionizam manjkav. (***Ref. 6***). Ova tvrdnja je pogrešna u tri tačke. Prvo, nije jasno da li je traganje redukcionistički poduhvat, kao što će to kasnije postati jasno. Drugo, ne postoji dokaz da je redukcionizam manjkav. Treće, čak i kada bi bio, nema razloga da se ne nastavi traganje. Tvrdnja ustvari poziva da se traži uz veću pažnju no što je to činjeno u proteklim decenijama – savet koji će se pokazati sasvim ispravnim.
- Neki tvrde da potraga za konačnom teorijom nema smisla sve dok nije rešen problem merenja u kvantnoj teoriji, ili se ne shvati svest, ili dok se ne shvati poreklo života. (***Ref. 7***). Pošto je problem merenja rešen preko dekoherencije (***Vol. IV, strana 113***), a kako se kombinovala fizika čestica sa opštom teorijom relativnosti, razumevanje detalja svesti ili porekla života nije neophodno. Takođe nije potrebno da se razume ili reši problem razvoja dece – premda bi to možda pomoglo.
- Neke osobe tvrde da je potraga za konačnom teorijom znak ludosti ili greh ponosa. Takve male i zavidne umove prosto treba ignorisati; neprijatniji primerci možda čak zaslužuju i da budu ismejani. Najzad, zahtev je samo traženje rešenja zagonetke.
- Neki veruju da razumevanje konačne teorije znači čitanje misli Boga, ili da se razmišlja kao Bog, ili da se bude kao Bog. (***Ref.8***). To je pogrešno, što ce da potvrdi svaki stručnjak za Boga. Ustvari, rešenje zagonetke ili čitanje udžbenika fizike ne pretvaraju ljude u bogove. To je nepovoljno, pošto bi takav efekt obezbedio izvanrednu reklamu.
- Neki se plaše da saznanje o konačnoj teoriji donosi ogromnu moć koja nosi ogromnu opasnost od zloupotrebe, ukratko, da bi saznanje o konačnoj teorija moglo promijeniti ljude u đavole. (***Ref. 9***). Međutim, ovaj strah je čista uobrazilja; on samo opisuje maštarije osobe koja ih izgovara. Zapravo, milenijumski opis fizike je već sasvim blizu konačne teorije i niko se ne boji onoga što se događa. Žalosno je što je još jedna mogučnost za reklamiranje otklonjena.
- Neki prigovaraju da su razni istraživači u prošlosti mislili da su pronašli konačnu teoriju, ali da su grešili i sa su mnogi veliki umovi pokušavali da nađu konačnu teoriju, no bez uspeha. To je tačno. Neki nisu uspeli pošto nisu imali neophodne alatke za uspešno traganje, drugi zbog toga jer su izgubili vezu sa stvarnošću, a još neki pošto su zalutali u predubeđenja koja su ograničavala njihov napredak. Mi samo treba da izbegnemo ove greške.

Ovi dokazi nam pokazuju da možemo doći do konačne jedinstvene teorije – čime ćemo se simbolićno postaviti na vrh Planine Kretanja – jedino ako se ne opteretino ideološkim i emotivnim prtljagom, Cilj kojeg smo postavili sebi zahteva izuzetno razmišljanje, to jest, razmišljanje do krajnjih granica. Pre svega, objedinjavanje predstavlja precizan opis svih kretanja. Prema tome objedinjavanje je zagonetka. Traženje objedinjavanja je razonoda. Najbolji pristup svakoj zagonetki je pristup uz lakoću koja je svojstvena igri. (***Ref. 10***). Život je kratak: treba da se igramo uvek kada možemo.

ŠTA JE BILO POGREŠNO U PROŠLOSTI

Dvadeseti vek je bio zlatna era fizike. Naučnici koji su tragali za konačnom teorijom isticali su kandidate kao što su bili teorija velike unifikacije, supersimetrija i mnoge druge mogućnosti. (***Vol. V, strana 201***). Ove kandidate ćemo razmatrati kasnije; svi su falsifikovani eksperimentima. Drugim rečima, uprkos velikom broju fizičara koji su radili na tom problemu, uprkos dostupnosti svim opširnim eksperimentalnim podacima i uprkos nekolikim decenijama istraživanja, nikakva konačna teorija nije nađena, Zašto?

Tokom dvadesetog veka mnogi uspešni opisi prirode bili su unakaženi u dogmatskom ubeđenju o objedinjavanju. Ovde su navedeni glavni primeri uz neke od njihovih najpoznatijih zagovornika:

- "Objedinjavanje zahteva uopštavanje postojećih teorija."
- "Objedinjavaje zahteva nalaženje viših simertija." (Verner Hajzenberg)
- "Objedinjavanje zahteva uopštavanje da elektroslabo mešanje obuhvati jaku interakciju i gravitaciju." (Abdus Salam)

- "Objedinjavanje ne zavisi od Plankovih prirodnih jedinica."
- "Objedinjavanje zahteva uvođenje aksioma." (Dejvid Hilbert)
- "Objedinjavanje zahteva jednakosti razvoja." (Verner Hajzenberg)
- "Objedinjavanje zahteva da prostor bude mnogostrukost." (Albert Ajnštajn)
- "Objedinjavanje zahteva potragu za lepotom." (Pol Dirak)
- "Objedinjavanje zahteva više dimenzija prostora." (Teodor Kaluza)
- "Objedinjavanje zahteva promenu topologije." (Džon Viler)
- "Objedinjavanje zahteva da se ode izvan standardnog modela fizike čestica (Sitven Vajnberg)
- "Objedinjavanje zahteva supersimetriju." (Stiven Vajnberg)
- "Objedinjavanje zahteva upotrebu složene matematike i rešavanje ogromnih pojmovnih teškoća." (Edvard Viten)
- "Objedinjavanje je samo za nekolicinu odabranih."
- "Objedinjavanje je izuzetno svrsishodno, važno i korisno."

Sva ova verovanja pojavila su se na isti način: prvo, najpre bi neki poznati naučnik – ustvari iz mnogo šire liste od ovde nabrojanih – objašnjavao ideju koja je vodila ka njegovim otkrićima; zatim su on i većina drugih istraživača počeli da veruju da je ideja vodilja više i od samog otkrića. Tokom dvadesetog veka ovakav stav je proizveo sva ubeđenja koja su nabrojana. Najštetnije je bilo verovanje da je objedinjavanje komplikovano i teško. Zapravo ovo verovanje i sva ostala mogu da se posmatraju kao poseban slučaj onog prvog. A slično tom prvom verovanju sva ona su bila pogrešna, kao što ćemo videti u tekstu koji sledi.

ZAKLJUČAK: KAKO DA NAĐEMO KONAČNU TEORIJU KRETANJA

Moramo da rešimo zagonetku: žeimo da precizno opišemo sva kretanja i da otkrijemo njihovo poreklo. Da bismo to postigli, potrebno je da nađemo konačnu teoriju koja rešava i objašnjava svako otvoreno pitanje navedeno u ***milenijumskoj listi***.

Nastavljamo u koracima. Prvo uprošćavamo kvantntnu teoriju i gravitaciju koliko god je to moguće, istražujemo šta se događa kada se njih dve kombinuju i zaključujemo ***popis zaheva*** koje svaka konačna teorija mora da ispuni. Tada izvodimo najjednostavniji mogući model koji ispunjava zahteve; proveravamo svojstva modela prema svakom eksperimentu koji je izveden do sada i prema svakom otvorenom pitanju iz milenijumske liste. Otkrivanjem da tu ne postoje neslaganja, da nijedna tačka nije ostala otvorena i da ne postoje alternative, znamo da smo našli konačnu teoriju. Našu pustolovinu za predloženi model završavamo ***popisom predpostavki*** koje mogu da se provere.

Ukratko, tri popisa čine našu potragu za konačnom teorijom: milenijumska lista, popis zahteva za konačnu teoriju i popis predpostavki koje treba da se provere. Za prelazak sa jednog popisa na sledeći, nastavljamo prema sledećim koracima.

1. Prvo uprošćavamo savremenu fiziku. Fizika dvadesetog veka izvela je nekoliko invarijantnih svojstava kretanja. Ove invarijante, kao što su brzina svetlosti ili kvant rada, nazvane su ***Plankove jedinice***. Invarijantne Plankove jedinice omogućavaju da kretanje može da se izmeri. Pre svega, ove invarijante smatraju se graničnim vrednostima koje važe za svaki primer kretanja.

2. Kombinovanjem kvantne teorije i opšte teorije relativnosti, otkrivamo da Plankove granice, prostor i čestice ***nisu opisane tačkama***. Nalazimo da je nemoguć jedinstven opis kretanja sve dok koristimo tačke za opis čestica i prostora i sve dok skupove i elemente koristimo za opis prirode.

3. Kombinacija kvantne teorije i opšte teorije relativnosti uči nas da prostor i čestice imaju ***zajedničke sastojke***.

4. Istraživanjem crnih rupa, spina i granica kvantne teorije i gravitacije, otkrivamo da su zajednički sastojci prostora i čestica proširen bez kraja, da su jednodimenzionalni i da su promenljivi: zajednički sastojci prostora i čestica su ***oscilujuće niti***.

5. Otkrivamo da bez neprekidnosti ne možemo ni da razmišljamo ili da govorimo. Da bismo opisali prirodu potebna nam je ***pozadina***. Zaključujemo da za razgovor o kretanju moramo da kombinujemo na pogodan način neprekidnost i prekidnost. To postižemo tako što zamišljamo da se oscilujuće niti kreću u neprekidnoj trodimenzionalnoj ***pozadini***. Na ovom mestu, posle prve

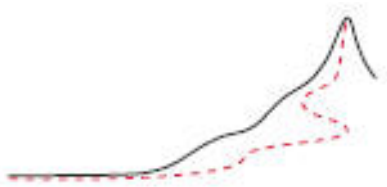
polovine naše pustolovine, dobili smo ***popis zahteva*** za konačnu teoriju. (***Strana 117***). Ovaj popis nam omogućava da nastavimo brže ka našem cilju, bez lutanja.

6. Otkrivamo prosta osnovna načela koja objašnjavaju kako najveća brzina c, najmanji rad h, najveća sila $c^4/4G$ i kosmološka konstanta Λ slede iz niti. Isto tako otkrivamo kako da iz niti izvedemo kvantnu teoriju, relativnost i kosmologiju.
7. Otkrivamo da niti prirodno daju postojanje tri prostorne dimenzije, ravan i zakrivljen prostor, crne rupe, kosmološki horizont, fermione i bozone. Nalazimo da su svi poznati fizički modeli načinjeni od niti. Isto tako procesi merenja i svi ostali procesi iz pozadine rezultat su niti,
8. Otkrivamo da fermioni emituju i apsorbuju bozone i da to čine uz tačno ona svojstva koja su opažena u elektromagnetici, slaboj i jakoj nuklearnoj interakciji. Ukratko, tri poznate interakcije merila – i njihovi pariteti očuvanje ili narušavanje – slede iz niti. Osim toga, otkrivamo da druge interakcije ne postoje.
9. Otkrivamo da niti prirodno daju poznate elementarne fermione i bozone, grupisane u ***tri generiranja***, sa svim svostvima koja su opažena. Druge elementarne čestice ne postoje. Na takav način obnavljamo standardni model elementarnih čestica.
10. Otkrivamo da nam osnovna načela omogućavaju da rešimo sva pitanja iz milenijumske liste, i da su sva svojstva izvedena iz niti u saglasnosti sa eksperimentima. Posebno, model niti omogućava nam da izračunamo konstantu fine strukture i ostale jačine merila veza. Dobija se opširan ***popis predviđanja*** koja se mogu proveriti. (***Strana 292***). Sva ova predviđanja biće proverena u godinama koje predstoje – eksperimentalno ili izračunavanjima.
11. Otkrivamo da je kretanje opažanje promene ukrštanja usled oscilovanja niti. Kretanje je nezbežna posledica posmatranja: kretanje je doživljaj kojeg imamo zato što smo mali, približan deo velike celine.

Na kraju ovog puta, mi ćemo zato imati rešenu misteriju kretanja. To je zaista posebna pustolovina. ***Međutim, budimo oprezni: skoro sve iz priče iznete ovde još uvek je predpostavljeno i zato otvoreno za pitanja***. Sve izneto što sledi saglasno je sa eksperimentima. Bez obzira na to, uz svaku rečenicu naći ćete najmanje jednog fizičara ili filozofa koji se ne slaže. To čini pustolovinu još interesantnijom.

Es ist fast unmöglich, die Fackel der Wahrheit durch ein Gedränge zu tragen, ohne jemandem den Bart zu sengen.[1]

Georg Kristof Lihtenberg (Georg Christoph Lichtenberg)



[1] "Skoro je nemoguće proneti baklja istine kroz gomilu, a da se nekom ne oprlji brada." Georg Kristof Lihtenberg (Georg Christoph Lichtenberg, 1742. Ober-Ramstadt – 1799. Gottingen) bio je poznat fizičar i pisac.

Poglavlje 2

FIZIKA U ISKAZIMA OGRANIČENJA

Fizika dvadesetog veka je zaključila nekoiko ***invarijantnih*** svojstava kretanja. Ove invarijante, kao što je brzina svetlosti ili kvant rada, određuju takozvane Plankove jedinice. Invarijantne Plankove jedinice važne su iz dva razloga: prvo, one omogućavaju da kretanje može da se izmeri; drugo, invarijante su ***granične vrednosti***. U stvari, Plankove jedinice daju veze za sve opažene veličine

Glavna lekcija savremene fizike je prema tome sledeća: kada prosta fizika nije više moguća, otkrivamo da su ***prirodne granice mogućnosti kretanja***. Takva ograničenja leže u poreklu specijalne teorije relativnosti, opšte teorije relativnosti i kvantne teorije. Zapravo, videćemo da priroda ograničava ***svaki*** aspekt kretanja. Istraživanje ovih ograničenja kretanja omogućiće nam da izvedemo nekoliko začuđujućih zaključaka. Ovi zakljuci su u suprotnosti sa svim što smo o prirodi naučili do sada.

UPROSTIMO FIZIKU ŠTO JE MOGUĆE VIŠE

Tokom zajedničkih večera fizičari redovno traže da sažmu fiziku u nekoliko rečenica. Korisno je imati nekoliko jednostavnih iskaza spremnih kao odgovore takvom zahtevu. Takvi iskazi nisu samo korisni jer teraju druge ljude da razmišljaju; oni su korisni takođe i u našoj potrazi za konačnom teorijom. Evo ih ovde.

SVAKODNEVNA ILI GALILEJEVA FIZIKA U JEDNOJ REČENICI

Svakodnevna kretanja opisana su Galilejevom fizikom. Ona sadrži samo jedan iskaz:

- Kretanje umanjuje promenu.

U prirodi se ***promena*** meri radom *W*. Još peciznije, promena se meri vremenski prosečnom razlikom između kinetičke energije *T* i potencijalne energije *U*. Drugim rečima, kretanje se pridžava takozvanog ***načela najmanjeg rada***, napisanog kao

$$\delta W = 0, \quad \text{gde je} \quad W = \int (T - U)\, \mathrm{d}t \tag{1}$$

Ovaj iskaz opisuje napor koji nam je potreban da pomerimo ili bacimo kamen, objašnjava zbog čege je automobilu potreban benzin, a ljudima hrana. Drugačije rečeno, ***priroda je lenja što je više moguće***. Lenjost prirode podrazumeva da je kretanje očuvano, relativno i predvidivo. (***Vol. I, strana 28***). Lenjost kretanja važi i kroz celu savremenu fiziku, za sva posmatranja, pod uslovom da joj se dodaju nekoliko ograničenja.

SPECIJALNA TEORIJA RELATIVNOSTI U JEDNOJ REČENICI

Korak od svakodnevne, ili Galilejeve fizike, do specijalne teorije relativnosti može da bude sažet u jedan ograničen iskaz o kretanju. Njega je popularizovao Hendrik Anton Lorenc (Hendrik Antoon Lorentz): (***Ref. 11***).

- U prirodi postoji maksimalna brzina *c* energije.

Za sve fizičke sisteme i za sve posmatrače, lokalna brzina *v* energije ograničena je na brzinu svetlosti *c*.

$$v \le c = 3{,}0 \cdot 10^8 \text{ m/s} \tag{2}$$

Svi rezultati jedinstveni za specijalnu teoriju relativnosti slede iz ovog načela. Nekoliko dobro poznatih činjenica obrazuju okvire rasprave koja sledi. Brzina *v* je manja ili jednaka brzini svetlosti *c* za sve sisteme

u fizici;[1] ovo ograničenje brzine naročito važi i za složene sisteme i za elementarne čestice. Nikada nije nađen nijedan izuzetak. (Pokušajte.) (***Izazov 1e***).

Granica brzine energije je ***invarijanta***: granica lokalne brzine energije važi za sve posmatrače. U ovom smislu bitno je da se zapazi da svaki posmatrač mora da bude fizički sistem i mora da bude u ***blizini*** energije koja se kreće. (***Vol. II, strana 80***).

Granicu brzine *c* postižu čestice i sistemi bez mase; posebno, nju postižu elektromagnetni talasi. Za materijalne sisteme brzina je uvek manja od *c*.

Samo za maksimalnu brzinu energije osigurano je da u prirodi mogu da se razlikuju uzrok i efekt, ili da može da se odredi redosled. Suprotne hipoteze, da je moguća brzina energije veća od c, što podrazumeva postojanje (realnih) tahiona, istraživane su i proveravane veoma detaljno; to je dovelo do brojnih sukobljavanja sa zapažanjima. Tahioni ne postoje.

Maksimalna brzina energije nas prisiljava da koristimo pojam ***prostor-vreme*** za opis prirode, pošto postojanje maksimalne brzine energije podrazumeva da su prostor i vreme ***pomešani***. (***Vol II, strana 26***). To isto tako podrazumeva koordinate prostora i vremena koje zavise od posmatrača, smanjenje dužine, istezanje vremena, ekvivalentnost mase i enegije, horizont za ubrzane posmatrače i ostale efekte koji karakterišu specijalnu teoriju relativnosti. Samo maksimalna brzina dovodi do načela maksimalne starosti koja upravlja specijalnom teorijom relativnosti; i samo ovo načelo dovodi do načela najmanjeg rada na . malim brzinama. Osim toga, jedino za konačnu granicu brzine moguće je da se odredi jedinica za merenje brzine koja važi na svim mestima i u svim vremenima. Kada nebi postojala opšta ograničenja brzine nebi postojao prirodni standard merenja brzine, nezavisan od svih interakcija; brzina nebi bila merljiva veličina.

Specijalna teorija relativnosti takođe ograničava veličinu sistema – bilo složenog, bilo elementarnog. Ustvari, ograničenje brzine podrazumeva da ubrzanje *a* i veličina *l* ne mogu da se povečavaju nezavisno bez ograničenja, pošto dva kraja sistema moraju da budu uzajamno neproniknuti. Najvažniji slučaj odnosi se na sisteme sa masom, za koje se ima

$$l \leq \frac{c^2}{a} \tag{3}$$

Ova ograničenja veličine prouzrokovana su brzinom svetlosti c; ona isto tako važi i za ***premeštanje*** *d* sistema, ako se koristi ubrzanje koje meri spoljni posmatrač. Konačno, granica brzine podrazumeva i relativističku "relaciju neodređenosti"

$$\Delta l \, \Delta a \leq c^2 \tag{4}$$

za neodrejenost dužine i ubrzanja. Možda ćete želeti da odvojite koji minut da biste ovu relaciju zaključili iz neodređenosti vremena i frekvencije? (***Izazov 2s***). Sve ovo je standardno znanje.

KVANTNA TEORIJA U JEDNOJ REČENICI

Razlika između Galilejeve fizike i kvantne teorije može da se sažme u jedan iskaz, zahvaljujući Nilsu Boru (***Ref. 12***)

- U prirodi postoji najmanja vrednost rada $\hbar$.

Za sve fizičke sisteme i za sve posmatrače, rad *W* se pridržava (***Vol. IV, strana 17***)

$$W \geq \hbar = 1{,}1 \cdot 10^{-34}\ \mathrm{Js} \tag{5}$$

Plankova konstanta $\hbar$ je najmanja opažena vrednost rada i najmanji opažen moment količine kretanja. Granica rada važi za sve sisteme, prema tome i za složene i za elementarne sisteme. Nikada nije opažen izuzetak. (Pokušajte.) (***Izazov 3e***). Načelo sadrži sve iz kvamtne teorije. Mi to nazivamo ***načelo rada različitog od nule***, kako bismo izbegli zbunjivanje sa načelom najmanjeg rada.

Granica rada različitog od nule $\hbar$ je ***invarijanta***: ona važi uz istu brojčanu vrednost za ***sve*** posmatrače. Ponavljamo, svaki takav posmatrač mora da bude fizički sistem.

---

[1] ***Fizički sistem*** je oblast u prostoru koji sadrži masa-energiju, čiji položaj može da se prati u vremenu i koji je u koherentnoj interakciji sa svojom okolinom. Brzina fizičkog sistema je prema tome ***brzina energije***. Opis fizičkog sistema obuhvata slike, geometrijske tačke ili nekompletne produžene situacije.

Granica rada je postignuta u mnogim fizičkim procesima, od apsorpcije svetlosti do obrtanja čestice sa spinom 1/2. Još preciznije, ograničenje rada je postignuto u mikroskopskim sistemima gde su procesom obuhvaćene pojedinačne čestice.

Granica rada različitog od nule navodi se manje često od granice brzine. To počinje od uobičajene odrednice za rad $W = \int(T - U)\, dt$ i izražava da između dva zapažanja izvršenih u vremenima t i $t+\Delta t$, čak i kada nije poznat razvoj sistema, izmeren rad iznosi najmanje $\hbar$. Pošto rad meri promenu stanja fizičkog sistema, postoji uvek minimalna razlika u stanjima između dva različita opažanja sistema.[1] Granica rada različitog od nule izražava temeljnu nejasnost prirode u mikroskopskoj razmeri.

Jednostavno može da se proveri da ne postoje zapažanja – bilo fotona, elektrona ili makroskopskih sistema – koji daju manju vrednost rada od $\hbar$. Granica rada različitog od nule bila je potvrđena za fermione, bozone, zrake lasera, naterijalne sisteme i za bilo koju njihovu kombinaciju. Suprotne predpostavke, uključujući postojanje proizvoljno malih promena, ispitane su detaljno; Ajnštajnova duga rasprava sa Borom, na primer, mogla bi da se posmatra kao ponovljeni Ajnštajnov pokušaj da se nađu eksperimenti koji bi omogućili merenja u prirodi proizvoljno malih promena ili rada. Bor je našao da u svakom slučaju to nebi moglo da se postigne. Svi naredni pokušaji bili su podjednako neuspešni.

Načelo rada različitog od nule može da se iskoristi kako bi se izvela relecija neraspoznatljivosti, tunelski efekt, izduženje, simetrije permutacije, pojava verovatnoće u kvantnoj teoriji, informacijsko-teorijska formulacija kvantne teorije i postojanje reakcija elementarnih čestica. (***Ref. 13***). Uvek kada pokušamo da pobedimo najmanju vrednost rada, ishod eksperimenata je verovatnoća. Najmanja vrednost rada takođe podrazumeva da u kvantnoj teoriji mora da se napravi međusobna razlika između tri pojma za stanje, operacije merenja i rezultata merenja; to se postiže pomoću takozvanog ***Hilberovog prostora***. (***Ref. 14***). Najzad, granica rada različitog od nule je osnova za Ajnštajn-Briljuen-Keler (Einstein–Brillouin–Keller) kvantifikovanje

Postojanje ograničenja rada različitog od nule bilo je poznato od samog početka kvantne teorije. Ona je u osnovama – i u potpunosti ekvivalentna – svim uobičajenim formulacijama kvantne teorije, uključujući mnogobrojne i informacijsko-teorijske formulacije.

Isto tako primećujemo da samo granica rada različitog od nule omogućava da se odredi merna jedinica za rad. Kada nebi postojala ograničena vrednost rada, nebi postojo prirodni standard merenja za rad: rad nebi bio merna veličina.

Gornja granica brzine i za rad za svaki fizički sistem, $v \leq c$ i $W \leq pd \leq mcd$, kada se kombinuju sa kvantom rada, podrazumevaju granicu razmeštanja d sistema između dva opažanja:

$$d \geq \frac{\hbar}{mc} \tag{6}$$

Drugim rećima (uprošćena) Komptonova talasna dužina kvantne teorije pojavljuje se kao donja granica pomeraja sistema, sve dok gravitacija nema uticaja. Pošto se ova granica kvantnog razmeštanja primenjuje takođe na elementarne sisteme, ona se takođe primenjuje na ***veličinu složenih*** sistema. Međutim, iz istog razloga ova granica ne važi za veličinu elementarnih čestica. (***Izazov 5e***).

Granica rada takođe podrazumeva dobro poznatu Hajzenbergovu relaciju neodređenosti za premeštanje d i količinu kretanja p fizičkih sistema (***Vol. IV, strana 24***).

$$\Delta d\ \Delta p \geq \frac{\hbar}{2} \tag{7}$$

Ova relacija važi kako za sisteme bez mase tako i za sisteme sa masom, Sve ovo je znanje iz udžbeika.

TERMODINAMIKA U JEDNOJ REČENICI

Termodinamika može takođe da se sažme u jednan iskaz o kretanju:

- U prirodi postoji najmanja vrednost entropije k.

Napisano simbolički

[1] Za sisteme koji izgledaju nepromenljivi u vremenu, kao što je obrtanje čestice ili sistem koji prikazuje kvantni Zenonov efekt, nalaženje najmanje promene je lukavstvo. Uživajte u izazovu. (***Izazov 4e***).

$$S \geq k = 1{,}3 \cdot 10^{-23}\ \text{J/K} \qquad (8)$$

Entropija je ograničena Bolcmanovom konstantom *k*. (***Ref. 15***). Nikada nije pronađen nijedan izuzetak. (Pokušajte.) (***Izazov 6e***). Ovaj rezultat je star skoro 100 godina; njega je izrazio najjasnije Leo Silard (Leo Szilard). Sve o termodinamici može da se zaključi iz ove relacije, zajedno sa kvantom rada.

Granica entropije je invarijanta i važi za sve posmatrače. Ponovimo, svi posmatrači moraju da budu fizički sistemi.

Granica entropije se postiže samo za fizičke sisteme koji su sastavljeni od pojedinačnih čestica. Drugim rečima, granica entropije je ponovo ostvarena samo za ***mikroskopske*** sisteme. Prema tome ograničenje entropije daje isto ograničenje dužine fizičkog sistema kao i ograničenje rada. Kao i sve druge iskaze za ograničenja koje smo ispitali, ograničenje entropije može da se izrazi kao relacija neodređenosti između temperatute *T* i energije *U*.

$$\Delta \frac{1}{T} \Delta U \geq \frac{k}{2} \qquad (9)$$

Ovu relaciju je prvi dao Nils Bor a zatim je o njoj raspravljao Verner Hajzenberg i mnogi drugi. (***Ref. 16).***

OPŠTA TEORIJA RELATIVNOSTI U JEDNOJ REČENICI

U ovom tekstu može više da se uživa ako se koristi kompaktan i nekonvencionalan opis opšte teorije relativnosti; to je predstavljeno u tekstu koji sledi. Međutim, zaključci ne zavise od takvog opisa; rezultati su valjani takođe ako se koristi uobičajen pristup opštoj teoriji relativnosti; to će biti prikazano kasnije. (***Strana 47***).

Najkompaktniji opis sažima korak od univerzalnog zakona gravitacije do opšte teorije relativnosti u jedan iskaz o kretanju:

- Postoje u prirodi vrednosti za maksimalnu silu i maksimalnu snagu.

$$F \leq \frac{c^4}{4G} = 3{,}0 \cdot 10^{43}\ \text{N} \quad \text{i} \quad P \leq \frac{c^5}{4G} = 9{,}1 \cdot 10^{51}\ \text{W} \qquad (10)$$

Nikada nije nađen nijedan izuzetak. (Pokušajte.) (***Izazov 7e***) Oba ova iskaza ograničenja sadrže i brzinu svetlosti *c* i gravitacijsku konstantu *G*; oni su prema tome kvalifikuju kao izrazi o relativističkoj gravitaciji.

Sila je promena količine kretanja; snaga je promena energije. Pošto su količina kretanja i i energija očuvane veličine, sila i snaga su protoci količine kretanja i energije ***kroz površinu***. (***Ref. 17***). Slično kao električna struja, sila i snaga opisuju promenu očuvane veličine u vremenu. Za električnu struju očuvana veličina je električni naboj, za silu je to količina kretanja, a za snagu je to energija. (***Vol. I, strana 171***). Drugim rečima, slično električnoj struji, sila i snaga teku kroz površinu. Ovo je prosto posledica jednakosti neprekidnosti. Kao posledica toga, svaka rasprava o maksimalnoj sili podrazumeva pojašnjavanje osnovne površine.

I sila i snaga ograničavaju stanje protoka količine kretanja ili energije kroz svaku ***fizičku površinu*** (pojam će biti objašnjen u daljem tekstu), bilo koje veličine. za svakog posmatrača, u svakom koordinatnom sistemu i nikada granična vrednost neće biti premašena. Posebno, granice sile i snage se ostvaruju samo na ***horizontu***. U svim ostalim slučajima, opažene vrednosti mnogo su manje od maksimalnih vrednosti.

Ograničenja vrednosti sile i snage su ***invarijante***: one važe za sve posmatrače i za sve interakcije. I ponovo, svaki posmatrač mora da bude fizički sistem i mora da se nalazi na površini koja se koristi za određivanje protoka količine kretanja ili energije, ili u njenoj blizini. (***Vol. II, strana 89***).

Vrednost granične sile je energija Švarcšildove (Schwarzschild) crne rupe podeljene sa njenim prečnikom; ovde je "prečnik" određen kao obim podeljen sa π. Vrednost granične snage se dobija kada se takva crna pretvori u zračenje u vremenu koje je potrebno da svetlost pređe dužinu koja odgovara njenom prečniku.

Objekt sa masom *m* koji ima veličinu sopstvenog Švarcšildovog poluprečnika $2Gm/c^2$, naziva se ***crna rupa***, pošto u skladu sa opštom teorijom relativnosti, nikakav signal niti svetlost iz unutrašnjosti Švarcšildovog poluprečnika ne može da dopre u spoljni svet. (***Ref. 18***). U ovom tekstu crne rupe obično nisu obrtne i obično su bez naboja; u ovom slučaju pojmovi "crna rupa" i "Švarcšildova crna rupa" su sinonimi.

Vrednost maksimalne sike, kao masa-energija crne rupe podeljena njenim prečnikom, takođe je površinska gravitacija crne rupe pomnožena njenom masom. Prema tome, ograničenje sile znači da nijedan fizički sistem određene mase ne moće da bude postavljen u prostor-vreme manje od takve mase crne rupe (koja se obrće). Ustvari, granica koncentracije masa-energija može jednostavno algebarski da se pretvori u granicu sile: one su ekvivalentne. (***Izazov 8e***).

Jednostavno može da se proveri da ograničenje maksimalne sile važi za sve sisteme opažene u prirodi, bilo da su oni mikroskopski, makroskopski ili astrofizički. Nikada nije nađeno da su ovo ograničenje prekoračili ni "gravitacijska sila" (sve dok je operativno određena), ni elektromagnetna ili nuklearna interakcija. (***Izazov 9e***).

Međutim, da li je moguće da se ***zamisli*** takav sistem koji premašuje ograničenje sile? Opširno razmatranje pokazuje da je to nemoguće. (***Vol. II, strana 87***). Na primer, ograničenje sile ne može da se premaši Lorencovom podrškom (boost). Može da se pomisli da pojačanje može za se odabere na takav način da vrednost 3-sile F u jednom sistemu bude transformisana u bilo koji vrednost sile F' u drugom, podržanom sistemu. Pokazalo se da je takvo razmišljanje pogrešno. U teoriji relativnosti 3-sila ne može da se poveća preko granice korišćenjem podrške (boost). (***Vol. II, strana 68***). U svim referentnim sistemima izmerena 3-sila nikada ne može da premaši pravu silu, to jest, vrednost 3-sile izmerene u pratećem sistemu.

Isto tako ni promene u ubrzanom sistemu ne pomažu da se premaši ograničenje sile, pošto za velike vrednosti ubrzanja a horizont se pojavljuje na udaljenosti a/c^2, a masa m ima najmanji prečnik koji je određen sa $l \geq 4Gm/c^2$.

Ustvari, ograničenja sile i snage ne mogu da se premaše ni u jednom misaonom eksperimentu, sve dok se u obzir uzimaju veličine posmatrača ili probne mase. (***Vol. II, strana 87***). Prividan izuzetak ili paradoks predpostavljaju postojanje tačkaste čestice ili posmatrača u obliku taćke, a takvi sistemi, međutim, nisu fizički: oni ne postoje u opštoj teoriji relativnosti.

Srećom po nas, retke su crne rupe u našoj blizini. Na nesreću, to znači da se ni granica sile ni granica snage ne ostvaruju u bilo kojem fizičkom sistemu, ni u svakodnevnim razmerama dužine, ni u mikroskopskom svetu, ni u astrofizičkim sistemima. Premda zamišljene granice sile i snage nisu nikada prekoračene, neposredna eksperimentalna potvrda ovih granica trajaće neko vreme.

Formulacija opšte teorije relativnosti kao posledice maksimalne snage nije uobičajena; zapravo, izgleda da je otkrivena tek posle 80 godina od kako je prvi put predložena opšta teorija relativnosti, (***Ref. 19***).

IZVOĐENJE OPŠTE TEORIJE RELATIVNOSTI[1]

U smislu da se sila i snaga podignu do načela prirode, moramo da pokažemo da opšta teorija relativnosti sledi iz maksimalne sile, kao što specijalna teorija relativnosti sledi iz iz maksimalne brzine.

Maksimalna sila i maksimalna snaga ostvaruju se samo na horizontima. (***Ref. 20***). Horizonti su područja u prostor-vremenu gde je zakrivljenost toliko velika da to ograničava mogućnost posmatranja. Naziv "horizont" je zbog analogije sa običnim horizontom iz svakodnevnog života, koji takođe ograničava daljinu do koje može da se gleda. Međutim, u opštoj teoriji reletivnosti horizonti su ***površine***, a ne linije. Ustvari, u opštoj teoriji relativnosti pojam horizonta možemo da odredimo kao područje maksimalne snage; jednostavno je za dokazivanje da je horizont uvek dvodimenzionalna površina i da je u suštini crn (osim za kvantne efekte).

Povezanost između horizonta i maksimalne sile ili snage omogučava nam da izvedemo jednakosti polja na jednostavan način. Prvo, uvek postoji protok energije na horizontu. Horizonti ne mogu da budu ravni, pošto bi ravan koja se prostire u beskonačnost podrazumevala i beskonačni protok energije. Da bismo odredili konačno prostiranje datog horizonta, koristimo njegov poluprečnik R i njegovu ukupnu površinu A.

Protok energije kroz horizont okarakterisan je energijom E i odgovarajućom dužinom L impulsa energije. Kada takav impuls energije protekne upravno kroz horizont, promena količine kretanja $\mathrm{d}p/\mathrm{d}t = F$ data je sa

$$F = \frac{E}{L} \tag{11}$$

[1] Ovaj odeljak može da se preskoči prilikom prvog čitanja.

Pošto smo na horizontu, potrebno je da uvrstimo najveće moguće vrednosti. U odnosu na površinu horizonta A i poluprečnik R, možemo ponovo da napišemo za granični slučaj

$$\frac{c^4}{4G} = \frac{E}{A} 4\pi R^2 \frac{l}{L} \tag{12}$$

gde imamo uvedenu maksimalnu silu i maksimalnu moguću površinu $4\pi R^2$ horizonta sa (maksimalnim lokalnim) poluprečnikom R. Odnos E/A predstavlja energiju po jedinici površine koja protiče kroz horizont.

Horizont se često opisuje takozvanom površinskom gravitacijom a umesto poluprečnikom R. U graničnom slučaju, te dve veličine se odnose kao $a = c^2/2R$. To dovodi do

$$E = \frac{1}{4\pi G} a^2 A L \tag{13}$$

Specijalna teorija relativnosti pokazuje da je na horizontu proizvod aL odgovarajuće dužine i i ubrzanja ograničeno vrednošću $c^2/2$. (***Ref. 21***). To dovodi do centralne relacije za protok energije na horizontu:

$$E = \frac{c^2}{8\pi G} a A \tag{14}$$

Ova ***relacija horizonta*** ističe tri tačke. Prvo, energija koja protiče kroz horizont je ograničena. Drugo, ta energija je srazmerna sa površinom horizonta. Treće, energija je srazmerna sa površinskom gravitacijom. Ove tri tačke su osnovni i karakteristični iskazi opšte teorije relativnosti. (Napominjemo, da su zbog osobina ograničenja horizonta jednaki protci energije ***u smeru*** horizonta upavo izvan njega, tok energije ***kroz*** horizont i energija ***unutar*** horizonta.)

Koristeći diferencijale, relacija horizonta može da se napiše kao

$$\delta E = \frac{c^2}{8\pi G} a \, \delta A \tag{15}$$

U ovom obliku, relacija između energije i površine može da se primeni na opšti horizont, u posebnom slučaju na one koji su ili nepravilno zakrivljeni ili zavise od vremena.[1]

U dobro poznatom dokumentu Jakobson je dao divan dokaz jednostavne povezanosti; ako je protok energije srazmeran površini horizonta za sve posmatrače i za sve horizonte, i ako je tačna konstanta srazmernosti, tada slede opštu teoriju relativnosti. (***Ref. 22***). Da bi se sagledala povezanost sa opštom teorijom relativnosti, uopštićemo relaciju horizonta (15) u opšti koordinatni sistem i opšti smer toka energije.

Dokaz koristi tenzorski zapis. Uvodimo opšti element površine $\mathrm{d}\Sigma$ i lokalno Kilingovo vektorsko polje podrške (boost) k koje generiše horizont (uz pogodnu normu). Tada levu stranu relacije (15) možemo ponovo da napišemo kao

$$\delta E = \int T_{ab} k^a \mathrm{d}\Sigma^b \tag{16}$$

gde je T_{ab} tenzor energija-količina kretanja. Ovo važi u proizvoljnim koorditatnim sistemima i za proizvoljan smer protoka energije. Jakobsonov glavni rezultat je da se desna strana relacije horizonta (15) može ponovo da napiše, korišćenjem (čisto geometrijski) Rajčaudhurijeve (Amal Kumar Raychaudhuri) jednakosti, kao:

$$a \, \delta A = c^2 \int R_{ab} k^a \mathrm{d}\Sigma^b \tag{17}$$

gde je R_{ab} Ričijev tenzor koji opisuje zakrivljenost prostor-vremena.

---

[1] Relacija horizonta (15) dobro je poznata, premda pod različitim nazivima za posmatrače. Pošto kroz horizont nije moguća nikakva komunikacija, nije takođe poznata detaljna sudbina energije koja je protekla kroz horizont. Energija čija je detaljna sudbina nepoznata često se naziva ***toplota*** i piše skraćenicom Q. Relacija horizonta (15) prema tome izražava da je toplota koja protiče kroz horizont srazmerna površini horizonta. Kada se u raspravu uključi kvantna teorija, površina horizonta može da se nazove "entropija" S, a njena površinsaka gravitacija može da se nazove "temperatura" T; relacija (15) tako može ponovo da se napiše kao $\delta Q = T\delta S$. Međutim, ovaj prevod relacije (15), koji zahteva i kvant rada, ovde je nepotreban. Ovo je samo naveseno da bi se pokazala povezanost između ponašanja horizonta i kvantne gravitacije.

Kombinujući ova dva koraka, nalazimo da se relacija energija-površina (15) može ponovo da se napiše kao:

$$\int T_{ab} k^a \mathrm{d}\Sigma^b = \frac{c^4}{8\pi G} \int R_{ab} k^a \mathrm{d}\Sigma^b \tag{18}$$

Jakobson je pokazao da ova jednakost, zajedno sa lokalnim očuvanjem energije (to jest, nestajanjem razilaženja tenzora energija-količina kretanja), može da bude zadovoljena samo ako je

$$T_{ab} = \frac{c^4}{8\pi G}\left(R_{ab} - \left(\frac{1}{2} R + \Lambda \right) g_{ab} \right) \tag{19}$$

pri ćemu je Λ konstanta integrisanja, čija vrednost nije određena problemom. Ovo su potpune jednakosti polja opšte teorije relativnosti, uključujući kosmološku konstantu Λ. Ipak, vrednost ove konstante ostaje neodređena.

Jednakosti polja ovde prikazanih važe na horizontu. Pošto je moguće, izborom pogodne transfotmacije koordinata, da se horizont postavi u bilo koji događaj prostor-vremena, jednakosti polja moraju da važe širom celog prostor-vremena. Pošto je moguće da se horizont ima u bilo kojem događaju u prostor vremenu, postoji ista maksimalno moguća sila (ili snaga) u svakom događaju u prirodi. Ova maksimalna sila (ili snaga) prema je tome konstanta prirode.

Drugim rečima, jednakosti polja opšte teorije relativnosti neposredne su posledice ograničenog protoka energije na horizontu, što je za uzvrat usled postojanja maksimalne sile ili snage. Možemo da govorimo o ***načelu*** maksimalne snage. Suprotno tome, jednakosti polja podrazumevaju maksimalnu snagu. Maksimalna sila i opšta teorija relativnosti prema tome su ekvivalentni.

Uzgred napomenimo, savremeni naučnici često izražavaju da opšta teorija relativnosti i gravitacija slede iz postojanja najmanje merljive dužine. Povezanost je već 1969. godine naveo Saharov. (***Ref. 29***). Ova povezanost je tačna, međutim nepotrebno je ograničavajuća. Maksimalna snaga, koja je obuhvaćena u minimalnoj dužini, dovoljna je da se podrazumeva gravitacija. Kvantna teorija – ili konkretno $\hbar$ – nije potrebna (očigledno) da se izvede zaključak o gravitaciji.

IZVOĐENJE ZAKLJUČKA O UNIVERZALNOM ZAKONU GRAVITACIJE

Univerzalni zakon gravitacije sledi iz granične vrednosti sile u slučaju kada su i sila i brzina mnogo manji od maksimalnih vrenosti. Prvi uslov podrazumeva $\sqrt{4GMa} \ll c^2$, drugi $v \ll c$ i $al \ll c^2$. (***Izazov 10e***). Primenimo to na specifičan slučaj. Posmatrajmo satelit koji kruži oko centralne mase M na rastojanju R uz ubrzanje a. Ovaj sistem, čija je dužina $l = 2R$, ima samo jednu karakterističnu brzinu. Uvek kada je brzina v mnogo manja od brzine svetlosti c, kvadrat brzine v^2 mora da bude stazmeran kako kvadratu brzine izračunatog iz $al = 2aR$, tako i kvadratu brzine izračunatog iz $\sqrt{4GMa}$. Uzeti zajedno, ova dva uslova podrazumevaju da je $a = fGM/R^2$, pri čemu je f brojni činilac. (***Izazov 11e***). Brza provera, za primer u kojem se koristi posmatrana vrednost brzine pobega, pokazuje da je $f = 1$.

Sile i brzine koje su mnogo manje od graničnih vrednosti podrazumevaju prema tome da se gravitacija menja obrnuto srazmerno kvadratu rastojanja, Drugim rečima, ograničenje sile u prirodi podrazumeva univerzalni zakon gravitacije. Drugi zakljuci o univerzalnom zakonu gravitacije preko graničnih vrednosti, dati su u tekstu koji sledi. (***strana 212***)

VELIČINA FIZIČKIH SISTEMA U OPŠTOJ TEORIJI RELATIVNOSTI

Opšta teorija relativnosti, slično kao druge teorije u savremenoj fizici, podrazumeva granicu ***veličine*** l sistema. Postoji granica za količinu materije koja može da se koncentriše u malu zapreminu:

$$l \geq \frac{4Gm}{c^2} \tag{20}$$

Granica veličine ostvaruje se samo za ***crne rupe***, one dobro poznate sisteme koje progutaju sve što se ubaci u njih. To je u potpunosti ekvivalentno sa granicom sile. Svi ***složeni*** sistemi u prirodi u skladu su sa donjom granicom veličine. Međutim, u ovom trenutku ostaje otvoreno pitanje da li elementarne čestice odgovaraju ovoj granici. Više o ovom pitanju biće rečeno u daljem tekstu. (***Strana 226***). Opšta teorija relativnosti takođe podrazumeva "relaciju neodređenosti" za greške merenja veličine l i energije E u sistemu (***Ref. 23***).

$$\frac{\Delta E}{\Delta l} \leq \frac{c^4}{4G} \qquad (21)$$

Eksperimentalni podaci dostupni su samo za složene sisteme; svi poznati sistemi u skladu su sa njima. (***Ref. 24***). Na primer, poslednja merenja za Sunce daju $GM_{\odot}/c^3$ = 4,925790947(1) μs; greška za E je prema tome manja nego (srazmerna) greška njegovog poluprečnika, koji je poznat uz mnogo manju preciznost. "Relacija neodređenosti" (21) nije toliko dobro poznata kao ona iz kvantne teorije. Ustvari, njena provera – na primer za binarne pulsare – mogla bi da napravi razliku između opšte teorije relativnosti i konkurentnih teorija. Još uvek ne možemo da kažemo da li ova nejednakost važi takođe i za elementarne čestice.

MEHANIČKA ANALOGIJA ZA MAKSIMALNU SILU

Maksimalna sila centralno je mesto opše teorije relativnosti. Zaista, njena vrednost (ukrašena činiocem 2π) pojavljuje se u jednakostima polja. Važnost maksimalne sile postaje jasna kada se vratimo na staru sliku prostor-vremena kao na dušek koi se izobličava. Kao svako materijalno telo, dušek je opisan materijalnom konstantom koja se povezuje vrednost izobličenja sa vrednošću primenjene energije. Slično tome, kao i svaki materijal, dušek je opisan maksimalnim naprezanjem koje može da podnese pre no što se pokida. Ove dve vrednosti opisuju sve materijale, od kristala do dušeka. U stvari, za savršene kristale (bez razmeštanja), ove dve konstante materijala su jednake.

Prazan prostor se donekle ponaša kao savršen kristal, ili kao savršen dušek: on ima konstantu izobličenje-energija koja je jednaka maksimalnoj sili koja može da se primeni na njega. Maksimalna sila opisuje elastičnost prostor-vremena. Gornja vrednost maksimalne sile govori nam koliko je teško da se prostor-vreme zakrivi.

Zatim, materijali nisu homogeni: kristali su načinjeni od atoma, a dušeci su načinjeni od mehurića pene. Kakva je odgovarajuća struktura prostor-vremena? To će biti centralno pitanje u ostatku naše pustolovine. Jedna stvar je sigurna: za razliku od kristala, vakuum nema predodređene smerove. Sada ćemo načiniti prvi korak u smeru odgovora o strukturi prostor-vremena i čestica spajajući sva ograničenja koja su do sada nađena.

PLANKOVE GRANICE ZA SVA FIŽIČKA OPAŽANJA

Postojanje maksimalne sile u prirodi je ekvivalentno opštoj teoriji relativnosti. Kao rezultat toga, veliki deo savremene fizike može za se prikupi u četiri jednostavna i osnovna iskaza ograničenja kretanja:

Kvantna teorija sledi iz ograničenja rada:	$W \geq \hbar$	
Termodinamika sledi iz ograničenja entropije:	$S \geq k$	
Specijalna teorija relativnosti sledi iz ograničenja brzine:	$v \leq c$	
Opšta teorija relativnosti sledi iz ograničenja sile:	$F \leq \frac{c^4}{4G}$	(22)

Ova Plankova ograničenja važe za sve fizičke sisteme, kako složene, tako i elementarne i za sve posmatrače. Primećujemo da granične vrednosti kvantne teorije, termodinamike, specijalne i opšte teorije relativnosti mogu takođe da se posmatraju kao desna strana relacija neodređenosti, Zapravo skup relacija neodređenosti (4, 7, 9, 21) u potpunosti je jednak sa ova četiri iskaza o granicama (22). (***Izazov 12e***).

Kombinovanjem osnovnih ograničenja možemo da dobijemo ograničenja za brojna fizička opažanja. Sledeća ograničenja važe uopšteno, kako za složene tako i za elementarne sisteme:

interval vremena:	$t \geq \sqrt{\frac{4G\hbar}{c^5}} = 1{,}1 \cdot 10^{-43}\,\mathrm{s}$	(23)
proizvod vreme-daljina:	$td \geq \frac{4G\hbar}{c^4} = 3{,}5 \cdot 10^{-78}\,\mathrm{ms}$	(24)
ubrzanje:	$a \leq \sqrt{\frac{c^7}{4G\hbar}} = 2{,}8 \cdot 10^{51}\ \mathrm{m/s^2}$	(25)
ugaona učestanost:	$\omega \leq 2\pi\sqrt{\frac{c^5}{2G\hbar}} = 5{,}8 \cdot 10^{43}\ /\mathrm{s}$	(26)

Ako dodamo znanje o tome da se prostor i vreme mogu mešati, dobijamo

rastojanje: $$d \geq \sqrt{\frac{4G\hbar}{c^3}} = 3,2 \cdot 10^{-35}\ \text{m} \qquad (27)$$

površina: $$A \geq \frac{4G\hbar}{c^3} = 1,0 \cdot 10^{-69}\ \text{m}^2 \qquad (28)$$

zapremina: $$V \geq \left(\frac{4G\hbar}{c^3}\right)^{\frac{3}{2}} = 3,4 \cdot 10^{-104}\ \text{m}^3 \qquad (29)$$

zakrivljenje: $$K \leq \frac{c^3}{4G\hbar} = 1,0 \cdot 10^{69}\ /\text{m}^2 \qquad (30)$$

gustina mase: $$\rho \leq \frac{c^5}{16G^2\hbar} = 3,2 \cdot 10^{95}\ \text{kg/m}^3 \qquad (31)$$

Naravno, brzina, rad, moment količine kretanja, entropija, snaga i sila takođe su ograničeni, kao što je već rečeno. Do numeričkog činioca, granica za svako fizičko posmatranje odgovara Plankovoj vrednosti. (Granične vrednosti su izvedene iz Plankovih konstanti koje se obično koriste prostom zamenom sa 4G umesto G.) Ove granične vrednosti su stvarne prirodne jedinice u prirodi. Zapravo, idealni bi slučaj bio da se ponovo odrede uobičajene Plankove vrednosti za sve opažanja na ove ekstremne vrednosti, postavljanjem brojnog cinioca 4 u odgovarajuće odrednice. U daljem tekstu granične vrednosti nazivaćemo ***ispravljene Plankove jedinice*** i predpostaviti da je brojni činilac 4 ispravno uključen. Drugim rečima, ***svaka prirodna jedinica ili (ispravljena) Plankova jedinica je granična vrednost za odgovarajuće opažanje u fizici***.

Većina ovih graničnih iskaza nalazi se rasuto širom literature istraživača (***strana 50***), premda je brojni činilac često različit. Svaka granica je privukla niz publikacija. Postojanje najmanjeg merljivog rastojanja i vremenskog intervala reda Plankovih vrednosti razmatrano je u svim pristupima kvantnoj gravitaciji. (***Ref. 25***). Maksimalna zakrivljenost bila je proučavana u kvantnoj gravitaciji (***Ref. 26***); to ima važne posledice za "početak" svemira, gde ona isključuje svako beskonačno veliko ili beskonačno malo opažanje. Maksimalna gustina mase pojavljuje se redovno u razmatranjima o energiji u vakuumu.

U ovome što sledi, često zbirku Plankovih granica nazivamo ***Plankove razmere***. Uskoro ćemo otkriti da se u Plankovim razmerama priroda razlikuje na mnogo načina od onoga što koristimo u svakodnevnim razmerama.

Primećujemo da različite dimenzije za četiri osnovna ograničenja (22) u prirodi znače da su ova četiri ograničenja ***nezavisna.*** Na primer, kvantni efekt ne može da se koristi za prekoračenje granične sile; slično tome, ograničenje snage ne može da se koristi za prekoračenje granice brzine. Ovo su prema tome četiri nezavisne granice za kretanje u prirodi.

> *Die Frage über die Gültigkeit der Voraussetzungen der Geometrie im Unendlichkleinen hangt zusammen mit der Frage nach dem innern Grunde der Massverhältnisse des Raumes. Bei dieser Frage, welche wohl noch zur Lehre vom Raume gerechnet werden darf, kommt die obige Bemerkung zur Anwendung, dass bei einer discreten Mannigfaltigkeit das Princip der Massverhältnisse schon in dem Begriffe dieser Mannigfaltigkeit enthalten ist, bei einer stetigen aber anders woher hinzu kommen muss. Es muss also entweder das dem Raume zu Grunde liegende Wirkliche eine discrete Mannigfaltigkeit bilden, oder der Grund der Massverhältnisse ausserhalb, in darauf wirkenden bindenden Kraften, gesucht werden.*[1]
>
> Bernhard Riman (Bernhard Riemann), *Über die Hypothesen, welche der Geometrie zu Grunde liegen*

[1] Pitanje o valjanosti pretpostavki geometrije u beskonačno malom povezano je sa pitanjem unutrašnjih osnova metričkih odnosa prostora. Kod ovog pitanja, koje i dalje može da se smatra da pripada proučavanju prostora, primenjuje se primedba načinjena gore; da su kod diskretnih mnogostrukosti principi njihovih metričkih odnosa sadržani već u uslovima ovih mnogostrukosti, ali za kontinualne moraju doći iz spoljašnosti. Zato mora ili da svarnost kojoj se podvrgava prostor obrazuje diskretnu mnogostrukost ili da principe njegovih metričkih odnosa traži izvan njega, u poveznim silama koje deluju.

FIZIKA, MATEMATIKA I JEDNOSTAVNOST

Četiri ograničenja prirode iz jednakosti (22) – o radu, entropiji, brzini i sili – začuđujuća su. Pre svega, ova četiri ograničenja su jednostavna. Tokom više decenija prećutna predpostavka zavodila je mnoge fizičare: da fizika zahteva ***tešku*** matematiku, a objedinjavanje zahteva još težu matematiku.

Na primer, tokom više od trideset godina Albert Ajnštajn tražio je svojom legendarnom energijom konačnu teoriju istražujući sve kompleksnije i kompleksnije jednakosti. To te radio čak i na samrtnoj postelji![1] Isto tako većina je teorijskih fizičara u 2000. godini imala predrasudu da objedinjenost zahteva tešku matematiku. Ova predpostavka posledica je nepravilnog učenja fizike tokom vekova. Nepravilno učenje je zato jedan od razloga što je traganje za konačnom teorijom tako dugo bilo neuspešno.

Sažimanje fizike iskazima ograničenja pokazuje da su priroda i fizika jednostavni. Ustvari, suština je da su važne fizičke teorije izuzetno jednostavne: specijalna teorija relativnosti, opšta teorija relativnosti, termodinamika i kvantna teorija, svaka od njih se zasniva na jednostavnim nejednakostima.

Sažimanje velikog dela fizike pomoću nejednakosti je sugestivno. Sažimanje čini da naš san o opisu preostalog dela fizike – polja merila, elementarne čestice i konačna teorija – može da bude podjednako jednostavan. Ovaj san je zato suprotan prećutnoj predpostavci da objedinjavanje zahteva tešku matematiku. Nastavimo da istražujemo tamo kuda nas vodi san o objedinjavanju.

GRANICE ZA PROSTOR, VREME I VELIČINU

Ovo su moji principi, a ako vam se oni ne dopadaju… pa dobro, imam i druge.

Gručo Marks (Groucho Marx)[2]

Četiri osnovna ograničenja prirode (22) imaju za posledicu minimalno rastojanje i minimalni interval vremena. Kako izrazi za ograničenja pokazuju, ovi minimalni intervali potiču neposredno iz ***jedinstva*** kvantne teorije i teorije relativnosti: oni se ne pojavljuju ako se teorije posmatraju odvojeno. Ukratko, jedinstvenost podrazumeva da u prirodi postoji najmanja dužina. Ovaj rezultat je važan: formulacija fizike kao skupa iskaza ograničenja pokazuje da ***model neprekinutih prostora i vremena nije u potpunosti tačan***. Neprekidnost i mnogostrukosti samo su približnosti, važe za velike vrednosti rada, male brzine i male snage. Zaključivanjem opšte teorije relativnosti i kvantne teorije pomoću iskaza ograničenja ovo postaje posebno jasno.

Postojanje ograničenja sile u prirodi podrazumeva da nijedan fizički sistem ne moža da bude manji od Švarcšildove crne rupe koja ima istu masu. Posebno, ***tačkaste čestice ne postoje***. Ograničenje gustine mase izražava isto to. Osim toga, predpostavljeno je da su elementarne čestice veće od ispravljene Plankove dužine. Do sada ova predpostavka nije proverena opažanjima, pošto su razmere koje su u pitanju toliko male da su ispod opsega eksperimenata. Otkrivanje veličina elementarnih čestica – na primer, merenjima električnog dipola – moglo bi da bude moguće da se provere neposredno sva ograničenja. (***Strana 50***)

GRANICE MASE I ENERGIJE

U svim ovim dokazima masa ima posebnu ulogu. Četiri ograničenja (22) ne omogućavaju da se izdvoji iskaz ograničenja za masu fizičkog sistema. Da bi se on našao, moramo unekoliko da suzimo naš cilj.

Plankova ograničenja koja su do sada pomenuta primenjuju se na ***sve*** fizičke sisteme, bilo složene, bilo elementarne. Ostala ograničenja primenjuju se samo na elementarne sisteme. Ograničenje rastojanja u kvantnoj teoriji granična je veličina samo za ***složene*** sisteme. Čestica je ***elementarna*** ako je njena veličina l manja od bilo koje merljive dimenzije. Posebno, ona mora da bude manja od uprošćene Komptonove talasne dužine:

$$\text{za elementarne čestice:} \quad l \leq \frac{\hbar}{mc} \tag{32}$$

Korišćenjem ovog ograničenja nalazimo dobro poznata ograničenja za masu, energiju i količinu kretanja koje važe samo za elementarne čestice:

---

[1] Interesantno, ali on je redovno pisao i suprotno, kao što je pokazano na ***strani 70***.

[2] Gručo Marks (Groucho Marx, 1890. New York City – 1977. Los Angeles), dobro poznati komičar

$$\text{za elementarne čestice:} \quad m \le \sqrt{\frac{\hbar c}{4G}} = 1{,}1 \cdot 10^{-8}\ \text{kg} = 0{,}60 \cdot 10^{19}\ \text{GeV/c}^2$$

$$\text{za elementarne čestice:} \quad E \le \sqrt{\frac{\hbar c^5}{4G}} = 9{,}8 \cdot 10^{8}\ \text{J} = 0{,}60 \cdot 10^{19}\ \text{GeV}$$

$$\text{za elementarne čestice:} \quad p \le \sqrt{\frac{\hbar c^3}{4G}} = 3{,}2\ \text{kg m/s} = 0{,}60 \cdot 10^{19}\ \text{GeV/c} \qquad (33)$$

Ova ograničenja za elementarne čestice su (ispravljene) ***Plankova masa***, ***Plankova energija*** i ***Plankova količina kretanja***. O njima je raspravljao 1968. godine Andrej Saharov, premda uz drugačije brojne činiloce. (***Ref. 27***). Ona se redovno navode u teoriji elementarnih čestica. Sva poznata merenja u skladu su sa njima,

VIRTUALNE ČESTICE – NOVA ODREDNICA

U stvari, postoje elementarne čestice koje premašuju sva tri ograničenja sa kojima smo se do sada sreli. Priroda ima čestice koje se kreću brže od svetlosti, koje iskazuju rad manji od kvanta rada i čija je ispoljena sila veća od ograničenja sile. Iz specijalne teorije relativnosti znamo da se razmenjene virtualne čestice u sudaru kreću brže od svetlosti. (***Vol. II, strana 60***). Iz kvantne teorije znamo da razmena virtualnih čestica podrazumva rad manji od minimalnog rada. Virtualne čestice takođe podrazumevaju trenutnu promenu količine kretanja; one zato prekoračuju granicu sile. (***Vol. IV, strana 149***).

Ukratko, virtualne čestice prekoračuju sva ograničenja koja važe za ***stvarne*** elementarne čestice.

ZANIMLJIVOSTI I ZABAVNI IZAZOVI O PLANKOVIM GRANICAMA[1]

Plankova ograničenja (ispravljena) predstavljaju iskaze o osobinama prirode. Ne postoji način, uz bilo kakvu vrstu eksperimenta, da se izmere vrednosti koje premašuju ove granice. Normalno, takva tvrdnja izaziva istraživanja za suprotne primere i dovodi do mnogih paradoksa.

* * *

Najmanji rad možda dolazi kao prvo iznenađenje, pošto moment količine kretanja i spin imaju iste merne jedinice kao i rad; a priroda sadrži čestice sa spinom 0 ili sa spinom 1/2 $\hbar$. Minimalni rad zaista podrazumeva minimalni moment količine kretanja. Međutim, moment količine kretanja koji je u pitanju predstavlja ***ukupni*** moment količine kretanja, koji sadrži deo kruženja u odnosu na posmatrača. Izmeren ukupan moment količine kretanja čestice nikada nije manji od $\hbar$, čak i kada je spin manji.

* * *

Što se tiče protoka mase, ograničenje snage podrazumeva da propusnost ograničava protok vode kroz cev. Rezultujuće ograničenje $\mathrm{d}m/\mathrm{d}t \le c^3/4G$ za promenu mase u vremenu čini se da nije zabeleženo u istraživačkoj literaturu u dvadesetom veku.

* * *

Još jedan način da se utvrdi minimalna dužina korišćenjem iskaza ograničenja, čija je struktura ova pustolovina, je sledeći. Opšta teorija relativnosti zasniva se na maksimalnoj sili u prirodi, ili drugačije iskazano, na maksimalnoj promeni mase u vremenu, čija je vrednost data sa $\mathrm{d}m/\mathrm{d}t = c^3/4G$. (***Vol. II, strana 87***). Kvantna teorija zasniva se na minmalnom radu W u prirodi, određenom sa $\hbar$. Pošto rastojanje d može da se izrazi kao

$$d^2 = \frac{W}{\mathrm{d}m/\mathrm{d}t} \qquad (34)$$

vidi se neposredno da minimalni rad i maksimalan odnos promene mase podrazumevaju minimalno rastojanje. Drugim rečima, kvantna teorija i opšta teorija relativnosti primoravaju nas da zaključimo kako u ***prirodi postoji najmanje rastojanje***. Drugim rečima, ***u Plankovim razmerama pojam "tačka u prostoru" nema ni teorijsku ni eksperimentalnu osnovu***.

* * *

Uz ograničenje pojedinačne čestice, ograničenje entropije dovodi do gornje granice temperature

[1] Odeljci koji nose naziv "Zanimljivosti" mogu da se preskoče prilikom prvog čitanja.

$$T \leq \sqrt{\frac{\hbar c^5}{4Gk^2}} = 0,71 \cdot 10^{32}\ \mathrm{K} \qquad (35)$$

To odgovara temperaturi pri kojoj je energija po stepenu slobode data (ispravljenom) Plankovom energijom $\sqrt{\hbar c^5/4G}$. Još stvarnija vrednost morala bi da uzme u obzir broj stepena slobode u Plankovoj energiji ćestice. To bi promenilo brojni činilac. Međutim, još uvek nije proučavan nijedan sistem koji je čak u blizini ove vrednosti temperature. Očekuje se da jedino horizont Plankove veličine ostvari granicu temperature, ali niko do sada nije uspeo da je istraži eksperimentalno.

* * *

Kako može maksimalna sila da odredi samo preko gravitacije, koja je interakcija najslabija? Pokazalo se da se u situacijama u blizini maksimalne sile ostale interakcije mogu zanemariti. To je razlog zbog kojeg gravitacija mora da se uključi u jedinstven opis prirode.

* * *

Na prvi pogled izgleda da električni naboj može da se koristi na takav način da ubrzanje naelektrisanog tela prema naelektrisanoj crnoj rupi poraste do granice kada umnogostručena masa premašuije granicu sile. Međutim, za crnu rupu sa nabojem, ovo sprečavaju promene na horizontu. (***Izazov 13e***).

* * *

Privlačenje dve mase usled gravitacije nikada ne daje vrednost sile dovoljnu da nadmaši ograničenje sile. Zašto? Pre svega, mase m i M ne mogu da se približe više no što je zbir njihovih poluprečnika. Korišćenjem izraza $F = GmM/r^2$, uz rastojanje r koje je dato kao prost zbir poluprečnika dve crne rupe kao $r = 2G(M + m)/c^2$, dobijamo silu

$$F \leq \frac{c^4}{4G} \frac{Mm}{(M+m)^2} \qquad (36)$$

koja nikada nije veća od ograničenja sile. Zato čak ni dve crne rupe koje se međusobno privlače ne mogu da premaše ograničenje sile – u obrnutoj srazmeri kvadrata približnosti univerzalnog zakona gravitacije. Ukratko, minimalna veličina mase znači da maksimalna sila ne može da se premaši.

* * *

Dobro je poznato da gravitacija zakrivljuje prostor. Prema tome, da bismo bili u potpunosti uvereni, naš proračun za dve crne rupe koje se privlače treba da bude ponovljen, uzimajući u obzir zakrivljenost prostora. Najprostiji način da se prouči sila kojom crna rupa deluje na probnu masu obešenu o žicu koja je spuštena prema horizontu crne rupe. Za ***nestvarnu tačkastu masu***, sila bi se razilazila na horizontu. (***Ref. 28***). U stvari, za tačku sa masom m spuštenu prema crnoj rupi sa masom M na (dogovorno određenom radijalnom) rastojanju d, sila bi bila

$$F = \frac{GmM}{d^2\sqrt{1 - \frac{2GM}{dc^2}}} \qquad (37)$$

Ovo se razilazi na $d = 0$, na položaju horizonta. Međutim, čak ni probna masa ne može bude manja od njenog sopstvenog gravitacijskog poluprečnika. Ukoliko želimo da se približimo horizontu sa stvarnom probnom masom, moramo da odaberemo malu probnu masu m: samo mala masa može da se približi horizontu. Za zanemarljivo malu masu, međutim, rezultujuća sila teži ka nuli. Zaista, ako se dopusti da rastojanje teži ka najmanjoj mogućoj vrednosti, tako što će se dopustiti da $d = 2G(m + M)/c^2 \rightarrow 2GM/c^2$, zahteva da $m \rightarrow 0$, što ćini da sila $F(m, d)$ nestane. Ako s druge strane ostanemo udaljeni od horizonta i potražimo maksimalnu silu koristeći masu toliko veliku da može verovatno da stane u raspoloživ prostor (izračunavanje je jednostavno), tada ponovo granica sile neće nikada biti pređena. Drugim rečima, za ***stvarne*** probne mase izraz (37) nikada nije veća od $c^4/4G$. Ako uzmmo u obzir minimalnu veličinu probne mase, videćemo da u gravitacijskim sistemima maksimalna sila ***nikada nije*** premašena.

* * *

Apsolutna granica snage podrazumeva ograničenje energije koja može da bude preneta u jedinici vremena kroz bilo koju zamišljenu površinu. Na prvi pogled, možda izgleda da bi kombinovana snaga emitovana iz dva izvora zračenja, od kojih svaki emituje 3/4 maksimalne vrednosti trebalo da daju 3/2 maksimalne vrednosti. Međutim, kombinacija obrazuje crnu rupu ili makar sprečava deo zračenja koji je emitovan, tako što ga proguta između dva izvora. (***Izazov 14e***)

* * *

Jedan moguć sistem koji se zaista približava Plankovoj granici snage je krajnja faza isparavanja crne rupe. (***Izazov 15e***). Međutim, čak i u tom slučaju granica snage neće biti premašena.

* * *

Ograničenje maksimalne sile izražava da tenzor naprezanje-energija, kada se integrira nad bilo kojom fizičkom površinom, ne premašuje graničnu vrednost. (***Ref. 19***). Nijedan takav integral nad bilo kojom fizičkom površinom, ili bilo koja komponenta tenzora u bilo kojem koordinatnom sistemu, ne može da premaši ograničenje sile, pod uslovom da je meri posmatrač u blizini ili probno telo sa stvarnom sopstvenom veličinom. Prema tome, ograničenje maksimalne snage primenjuje se na bilo koju komponentu svakog vektora sile, a takođe i na njegovu veličinu. Ono se primenjuje na gravitacijske, elektromagnetne i nuklearne sile i oni se primenjuje za svakog stvarnog posmatrača. Nije važno da li su sile realne ili fiktivne; niti da li raspravljamo o 3-silama iz Galilejeve fizike ili o 4-silama iz specijalne teorije relativnosti. Zapravo, ograničenje sile primenjeno na nultu komponentu 4-sile je ustvari ograničenje snage.

* * *

Ograničenje snage je interesantno ako se primeni na svemir u celosti. Zapravo, ono može da se koristi da bi se objasnio Olberov paradoks: nebo je tamno tokom noći pošto kombinovana sjajnost svih izvora svetlosti u svemiru ne može da bude svetlija od maksimalne vrednosti.

* * *

Ograničenje sile, i njena analogija čvrsto stanje, mogu se smatrati da je pojava materije možda prirodan način sprečavanja da se prostor pocepa. (***strana 33***). Ima li ova analogija smisla? (***Izazov 16s***).

* * *

Zapravo, povezanost između minimalne dužine i gravitacije nije nova. (***Ref. 29***). Već je 1967. godine Andrej Saharov istakao da minimalna dužina podrazumeva gravitaciju. Pokazao je da regularnost kvantne teorije polja na zakrivljenom prostoru, s prekidom na malim rastojanjima, izazvati suprotne uslove koji uključuju u najmanji rad kosmološku konstantu, a zatim rad Ajnštajn-Hilbert u opštoj teoriji relativnosti.

* * *

Postojanje najmanje dužine – i odgovarajućeg najkraćeg intervala vremena – podrazumeva da nijedna površina nije fizička ako bilo koji njen deo zahteva lokalizaciju u prostor-vremenu u razmeri manjoj od minimalne dužine. (Osim toga, fizička površina ne mora da preseca bilo koji horizont.) Samo ako se insistira na ovim uslovima mogu da se odbace nefizički primeri koji su u suprotnosti sa ograničenjima sile i snage. Na primer, ove uslove je prevideo Buso (Raphael Bousso) u ranoj raspravi o Bekenštajnovoj granici entropije – premda ne u skorije vreme. (***Ref. 30***).

* * *

Naša razmatranja o ograničenjima mogu da se prošire tako da obuhvate elektromagnetizam. Korišćenjem elektromagnetne konstante veze α (za male energije), konstante fine strukture, dobijamo sledeća ograničenja za fizičke sisteme koji su u elektromagnetnim interakcijama:

električni naboj:	$q \geq \sqrt{4\pi\varepsilon_0 \alpha c \hbar} = e = 0{,}16 \text{ aC}$	(38)
električno polje:	$E \leq \sqrt{\dfrac{c^7}{64\pi\varepsilon_0 \alpha \hbar G^2}} = \dfrac{c^4}{4Ge} = 1{,}9 \cdot 10^{62} \text{ V/m}$	(39)
magnetno polje:	$B \leq \sqrt{\dfrac{c^5}{64\pi\varepsilon_0 \alpha \hbar G^2}} = \dfrac{c^3}{4Ge} = 6{,}3 \cdot 10^{53} \text{ T}$	(40)
napon:	$U \leq \sqrt{\dfrac{c^4}{16\pi\varepsilon_0 \alpha G^2}} = \dfrac{1}{e}\sqrt{\dfrac{\hbar c^5}{4G}} = 6{,}1 \cdot 10^{27} \text{ V}$	(41)
induktivnost:	$L \geq \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0 \alpha}\sqrt{\dfrac{4G\hbar}{c^7}} = \dfrac{1}{e^2}\sqrt{\dfrac{4G\hbar^3}{c^5}} = 4{,}4 \cdot 10^{-40} \text{ H}$	(42)

Uz dopunske predpostavke da u prirodi makar jedna čestica može da zauzme jednu Plankovu zapreminu, dobijamo:

gustina naboja: $$\rho_e = \sqrt{\frac{\pi\varepsilon_0\alpha}{16G^3}}\frac{c^5}{\hbar} = e\sqrt{\frac{c^9}{64G^3\hbar^3}} = 4{,}7\cdot 10^{84}\ \text{C/m}^3 \qquad (43)$$

kapacitet: $$C \geq 4\pi\varepsilon_0\sqrt{\frac{4G\hbar}{c^3}} = e^2\sqrt{\frac{4G}{c^5\hbar}} = 2{,}6\cdot 10^{-47}\ \text{F} \qquad (44)$$

Za slučaj pojedinačnog kanala provodnosti, dobijamo:

električni otpor: $$R \geq \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\alpha c} = \frac{\hbar}{e^2} = 4{,}1\ \text{k}\Omega \qquad (45)$$

električna provodnost: $$G \leq 4\pi\varepsilon_0\alpha c = \frac{e^2}{\hbar} = 0{,}24\ \text{mS} \qquad (46)$$

električna struja: $$I \leq \sqrt{\frac{\pi\varepsilon_0\alpha c^6}{G}} = e\sqrt{\frac{c^5}{4\hbar G}} = 1{,}5\cdot 10^{24}\ \text{A} \qquad (47)$$

Ograničenje magnetnog polja je značajno u proučavanju ekstremnih zvezda i crnih rupa. Maksimalno električno polje ima ulogu u teoriji eksplozije gama zraka. (***Ref. 31***). Za struju, provodnost i otpornost u pojedinačnim kanalima, ograničenja i njihovi efekti obimno su proučavani 1980-ih i 1990-ih godina. (***Ref. 32***)

Posmatranja kvarkova i kolektivne pobuđenosti u poluprovodnicima sa nabojem e/3 ne mora neizbežno da negira ograničenje naboja za fizičke sisteme. Ni u jednom slučaju ne postoji fizički sistem sa nabojem e/3 – određen kao lokalna masa-energija koji je u nekoherentnoj interakciji sa okruženjem.

* * *

Opšta relacija koja za svaku vrednost ograničenja u prirodi ima odgovarajuću relaciju neodređenosti koja važi takođe i za elektricitet. Ustvari, postojii relacija neodređenosti za kondenzatore, u obliku

$$\Delta C\ \Delta U \geq e \qquad (48)$$

gde je e naboj pozitrona, C je kapacitet, a U potencijalna razlika, napon. Takođe postoji i relacija neodređenosti između električne struje I i vremena t

$$\Delta I\ \Delta t \geq e \qquad (49)$$

Obe ove relacije neodređenosti mogu da se nađu u literaturi istraživanja. (***Ref. 33***).

KOSMOLOŠKE GRANICE ZA SVA FIZIČKA OPAŽANJA

U našem traganju da razumemo kretanje, našu pažnju smo usmerili na četiri osnovna ograničenja u kojima je predmet kretanje. Specijalna teorija relativnosti postavlja granicu brzine, naime brzinu svetlosti c. Opšta teorija relativnosti postavlja granice sile i snage respektivno sa $c^4/4G$ i $c^5/4G$ (***Vol. II, strana 87***), a kvantna teorija uvodi najmanju vrednost za rad $\hbar$. Priroda nameće donju graničnu vrednost k za entropiju. Ako uključimo graničnu vrednost e za promenu električnog naboja, te granice uvode krajnje vrednosti za ***sva*** posmatranja u fizici, koja su data (ispravljenim) Plankovim vrednostima.

Iskrsava pitanje: da li priroda isto tako nameće ograničenja za fizička opažanja na suprotnom kraju razmere merenja? Na primer, postoje najveća sila i najveća snaga u prirodi. Postoje li takođe najmanja sila i najmanja snaga? Postoji li najmanja brzina?

Pokazaćemo da zaista postoje takva ogranićenja za sva opažanja. Daćemo opštu metodu za izvođenje takvih granica, i otkriti nekoliko primera. Ova istraživanja će nas odvesti do zanimljivih pregleda savremene fizike; počećemo sa izvođenjem ograničenja koja zavise od sistema, a zatim preći na kosmološka ograničenja.

ZAVISNOST VELIČINE I ENERGIJE

Dok tragamo za dodatnim ograničenjima u prirodi, zapažamo osnovnu činjenicu. Svaka gornja granica za moment količine kretanja i svaka donja granica za snagu, moraju da budu ***zavisne od sistema***. Takve granice neće da budu apsolutne, već će biti zavisne od osobina sistema. Zatim, fizički sistem je deo prirode

okarakterisan granicama i svojim sadržajem.[1] Prema tome, najprostije osobine, koje dele svi sistemi, jesu njegova veličina (u daljem tekstu okarakterisana prečnikom) L i njegova energija E. Sa ovim osobinama možemo da odredimo ograničenja koja zavise od sistema za svako fizičko opažanje. Opšta medoda je jednostavna: uzimamo poznate nejednakosti za brzinu, rad, snagu, naboj i entropiju, pa onda izdvajamo ograničenje za svako opažanje, umetanjem dužine i energije prema potrebi. Zatim moramo da odaberemo najstrožija ograničenja koja smo našli.

MOMENT KOLIČINE KRETANJA I RAD

Potreban je samo trenutak za proveru da odnos momenta količine kretanja D i energije E pomnožene dužinom L ima dimenziju inverzne vrednosti brzine, Pošto je brzina ograničena brzinom svetlosti, dobijamo (***Izazov 17e***)

$$D_{\text{system}} \leq \frac{1}{c} LE \tag{50}$$

Zaista, u prirodi neće biti nikakvih izuzetaka od ovog ograničenja momenta količine kretanja. Ni u jednom poznatom sistemu, od atoma do molekula, od klizača na ledu do galaksija, moment količine kretanja neče da prekoračuje ovu vrednost. Čak i objekti koji se najsnažnije obrću, takozvane ekstremne crne rupe ograničene su na moment količine kretanja $D \leq LE/c$. (***Ref. 34***). (Ustvari, ovo ograničenje je tačno za crne rupe samo ako se energija uzme kao nesvodljiva masa pomnožena sa c^2; ako se koristi uobičajena masa, ograničene je mnogo veće, za sačinilac 4.) Ograničenje izvedeno iz opšte teorije relativnosti, dato sa $D \leq L^2c^3/4G$, nije strože od onog upravo izvedenog. Uzgred, za moment količine kretanja ne može da se izvede donje ograničenje koje zavisi od sistema.

Maksimalna vrednost momenta količine kretanja je takođe zanimljiva ako se posmatra kao ograničenje rada. Rad je vremenski integral razlike između kinetičke i potencijalne energije. Pošto priroda uvek teži da se minimizira rad W, izgleda čudno da se traži za sistem, veličine L, da ***maksimizira*** rad. Možete i sami da proverite da ograničenje rada

$$W \leq \frac{LE}{c} \tag{51}$$

nije premašeno u bilo kojem fizičkom sistamu. (***Izazov 18e***).

BRZINA

Brzina pomnožena masom i pomnoženo dužinom je rad. Pošto je vrednost rada u prirodi sa donje strane ograničena sa $\hbar$, dobijamo ograničenje za brzinu sistema:

$$v_{\text{system}} \geq \hbar c^2 \frac{1}{LE} \tag{52}$$

Ovo nije nov rezultat; on je samo oblik relacije neodređenosti u kvantnoj teoriji. On daje minimalnu brzinu da bilo koji sistem sa energijom E i prečnikom L. Čak i izuzetno spora promena poluprečnika crne rupe pri isparavanju jedva da postiže ovu malu brzinu. (***Izazov 19e***).

Nastavljajući istom metodom nalazimo da ne dobijamo nove informacije za granicu izvedenu iz opšte teorije relativnisti, $v \leq (c^2/4G)(L/E)$. (***Izazov 20e***). Prema tome, ne postoji gornje ograničenje brzine ***zavisno od sistema*** – već samo opšte ograničenje c.

Slučajno, ova ograničenja nisu jedinstvena. Druga ograničenja mogu da se nađu na sistematski način. Gornja ograničenja mogu da se umnogostručuju, na primer, činiocem $(L/E)(c^4/4G)$ ili $(LE)(2/\hbar c)$ dajući manje stroga gornja ograničenja. Slični primeri mogu se dati i za donja ograničenja.[2]

---

[1] Kvantna teorija je precizirala ovu odrednicu: fizički sistem je deo prirode koji je osim toga u nekoherentnoj interakciji sa svojim okruženjem. (***Vol. IV, strana 118***). U razmatranju koje sledi mi ćemo predpostavljati da je ovaj uslov zadovoljen.

[2] Strožija gornja ograničenja su ona sa manjim izložiocem za dužinu, a strožija donja ograničenja su ona sa većim izložiocem za dužinu.

SILA, SNAGA I SJAJNOST

Videli smo da su sila i snaga centralni za opštu teoriju relativnosti. Sila koju ispoljava sistem je protok količine kretanja iz sistema; emitovana snaga sistema je protok energije iz sistema. Zahvaljujući povezanosti $W = FLT$ između rada W, sile F, dužine L i vremena T, možemo da zaključimo

$$F_{\text{system}} = \frac{\hbar}{2c}\frac{1}{T^2} \tag{53}$$

U eksperimentima nije dostignuto ovo ograničenje. Najmanje sile izmerene u prirodi su one u mikroskopima atomskih sila, gde su opažene vrednosti manje od 1 aN. Međitim, čak i te vrednosti su iznad donjeg ograničenja sile.

Snaga P koju emituje sistem veličine L i mase M ograničena je sa

$$c^3\frac{M}{L} \geq P_{\text{system}} \geq 2\hbar G\frac{M}{L^3} \qquad (54$$

Ograničenje na levoj strani nejednakosti je gornje ograničenje za bilo koji mašinu ili svetiljku, kao što je zaključeno iz teorije relativnosti; čak ga nije premašio ni svemir. Ograničenje na desnoj strani nejednakosti je minimalna snaga koju emituje bilo koji sistem preko efekata kvantne gravitacije. Ustvari, nijedan fizički sistem nije potpuno uzan. Zrače čak i crne rupe, sistemi sa najboljim sposobnošću da zadrže komponente u svojoj ogradi. Snaga koju izrače crne rupe treba tek da dostigne ovo ograničenje, pod uslovom da je za dužinu L uzet obim crne rupe. Prema tome, kvantna granica gravitacije tvrdi je da je snaga koja emituje crna rupa najmanja snaga koju emituje bilo koji složen sistem iste površine gravitacije. (Međutim, još uvek nisu dosledni brojni činioci koji se pojavljuju u stručnoj literaturi uz snagu crne rupe.)

ČUDAN ŠARM OGRANIČENJA ENTROPIJE

Bekenštajn (Jacob David Bekenstein, 1947. Mexico City – 2015. Helsinki) otkrio je 1973. godine poznato ograničenje koje povezuje entropiju S fizičkog sistema sa njegovom veičinom i masom. (***Ref. 35***). Nijedan sistem nema entropiju veću od one koja je ogranićena horizontom. Što je veća površina horizonta, veća je entropija. Pišemo

$$\frac{S}{S_{\text{limit}}} \leq \frac{A}{A_{\text{limit}}} \tag{55}$$

što daje

$$S \leq \frac{kc^3}{4G\hbar}A \tag{56}$$

gde je A površina sistema. Jednakost se ostvaruje samo za crne rupe. Staro pitanje porekla činioca 4 u entropiji crnih rupa ovde je na taj način dobilo odgovor: to je usled činioca 4 u granici sie ili snage u prirodi. Vreme će pokazati da li će ovo objašnjenje biti opšte prihvaćeno.

Možemo takođe da izvedemo uopšteniju relaciju ako koristimo tajanstvenu predpostavku, koju ćemo kasnije da razmotrimo. Predpostavimo da su ograničenja za vakuum suprotna onima za materiju. Možemo da napišemo za vakuum $c^2/4G \leq M/L$. Korišćenjem

$$\frac{S}{S_{\text{c.Planck}}} \leq \frac{M}{M_{\text{c.Planck}}}\frac{A}{A_{\text{c.Planck}}}\frac{L_{\text{c.Planck}}}{L} \tag{57}$$

dobijamo

$$S \leq \frac{\pi kc}{\hbar}ML = \frac{2\pi kc}{\hbar}MR \tag{58}$$

Ovo se naziva ***Bekenštajnova granica entropije***. Nijedan izuzetak nikada nije nađen ili konstruisan, uprkos mnogim pokušajima. (***Ref. 30***). I ponovo, sama vrednost ograničenja ostvariva je samo za crne rupe. Moramo da objasnimo čudnu predpostavku koju smo gore iskoristili. Istražujemo entropiju na horizontu. Horizont nije materija, već granica ka praznom prostoru. Entropija horizonata nastaje zbog velikog broja virtualnih čestica koje se nalaze u njima. Da bismo ustanovili poreklo maksimuma entropije u izrazu (57) moramo da koristimo svojstva vakuuma. Drugim rečima, ***ili*** čemo da koristimo odnos mase i dužine za

vakuum ***iznad*** Plankovog ograničenja, ***ili*** ćemo da koristimo Plankovu entropiju kao ***maksimalnu*** vrednost za vakuum.

Drugo, ekvivalentno ograničenje entropije može da se nađe ako se uvedu druge promenljive. Na primer, pošto odnos viskoznosti smicanja η i zapreminska gustina entropije (pomnoženo sa k) ima dimeziju rada, možemo neposredno da napišemo (***Ref. 36***)

$$S \leq \frac{k}{\hbar}\eta V \tag{59}$$

I opet, jednakost se postiže samo za slučaj crnih rupa. Bez sumnje, vremenom će popis sličnih granica da raste.

Postoji li takođe najmanja entropija zavisna od sistema? Do sada ne izgleda da postoji minimakna vrednost entropije koja zavisi od sistema: postojeći pristup ne daje izraze koji su veći od k. (***Izazov 21e***).

Uspostavljanje ograničenja entropije važan je korak kako bismo načinili doslednim naš opis kretanja. Ako prostor-vreme može da se kreće, kao što to daje opšta teorija relativnosti, onda ono ima entropiju. Kako bi entropija bila ograničena da je prostor-vreme neprekidno? Jasno, zbog postojanja minimalnog rastojanja i minimalnog vremena u prirodi, prostor-vreme ne može da bude neprekidno, ali mora da ima konačan broj stepena slobode, pa stoga i konačnu entropiju.

ZANIMLJIVOSTI I ZABAVNI IZAZOVI O OGRANIČENJIMA OPAŽANJA ZAVISNIM OD SISTEMA

Ograničenja vrednosti zavisnih od sistema, slično Plankovim vrednostima, takođe pokreću obilje zanimljivih pitanja. Proučićemo nekoliko primera.

* * *

Sadržina sistema nije okarakterisana samo njegovom masom i nabojem, već takođe njegovom čudnošću, izospinom, nabojem boje, nabojem i paritetom. Možete li izvesti ograničenja za ove kvanitete? (***Izazov 22r***).

* * *

U našem razmattranju ograničenja za crne rupe, prećutno je predpostavljeno da su one, kao i svaki toplotni sistem, u interakciji sa okruženjem na nekoherentan način. Koji rezultat iz ovog odeljka se menja ako ovaj uslov otpadne? (***Izazov 23s***). Koje ograničenje može da bude premašeno?

* * *

Možete li da nađete opštu metodu za izvođenje svih ograničenja opažanja? (***Izazov 24e***).

* * *

Bekenštajnova granica entropije dovodi do nekoliko interesantnih predpostavki. (***Izazov 25e***). Predpostavimo da sam svemir, budući da je okružen horizontima, udovoljava Bekenštajnovu granicu. Granica entropije određuje granicu za sve stepene slobode unutar sistema: ona nam kazuje da broj $N_{\text{d.o.f}}$ stepena slobode svemira iznosi približno

$$N_{\text{d.o.f.}} \approx 10^{132} \tag{60}$$

Uporedite ovu vrednost sa brojem $N_{\text{Pl.vol.}}$, Plankove zapremine u svemiru

$$N_{\text{Pl.vol.}} \approx 10^{183} \tag{61}$$

i sa brojem čestica i svemiru, N_{part}

$$N_{part} \approx 10^{91} \tag{62}$$

Vidimo da su čestice samo mali deo onoga što se kreće unaokolo. Većina kretanja mora biti kretanje prostor-vremena. Istovremeno, prostor vreme se kreće mnogo manje no što se možda naivno očekuje. Da se otkrije kako se sve to dešava predstavlja izazov objedinjenog opisa kretanja.

* * *

Donje ograničenje temperature toplotnog sistema može da se nađe ako se iskoristi ideja da je broj stepena slobode sistema ograničen njegovom površinom, ili preciznije, odnosom između površine i Plankove površine. Dobija se ograničenje

$$T \geq \frac{4G\hbar}{\pi kc}\frac{M}{L^2} \tag{63}$$

Alternativno, koristeći naveden model, možemo koristiti ograničenje toplotne energije $kT/2 \geq \hbar c/2\pi L$ (toplotna talasna dužina mora da bude manja od veličine sistema) zajedno sa ograničenjem mase, $c^2/4G \geq M/L$, i da dobijemo isti rezultat.

Već smo se sreli sa ograničenjem temperature: kada je sistem crna rupa, ograničenje daje temperaturu emitovnog zračenja. Drugim rečima, temperatura crne rupe je donje ograničenje za sve fizičke sisteme za koje temperatura može da bude određena, pod uslovom da oni dele istu graničnu gravitaciju. Kasniji uslovi imaju smisla: granična gravitacija je pristupačna sa spoljne strane i opisuje ceo fizički sistem, pošto on zavisi i od granice i njenog sadržaja. Do sada nije poznat nijedan izuzetak od ove tvrdnje, Svi sistemi iz svakodnevnog života u saglasnosti si sa tim, a takođe i sve zvezde. Čak i najhladniji poznati sistemi u svemiru, naime Boze-Ajnštajn kondenzati i druge hladne materije proizvedene u laboratorijama, mnogo su toplije od ograničenja (***Izazov 26s***), pa prema tome mnogo topliji od crnih rupa iste površinske gravitacije. (Ranije smo videli da konzistentna Lorencova transformacija nije moguća za temperaturu; tako da ograničenje minimalne temperature jedino važi za posmatrača koji je na istom gravitacijskom potencijalu kao i sistem koji se posmatra i nepokretan je u odnosu na njega.) (***Vol. II, strana 52***).

Ovde izgleda kao da postoji konzistentan način da se odredi gornje ograničenje za temperaturu koja zavisi od veličine. (***Izazov 27ny***). Ograničenja za ostale termodinamičke veličine mogu da se odrede, ali njih ovde nećemo da razmatramo.

* * *

Kada u sistemu ulogu ima elektromagnetizam, sistem treba da bude okarakterisan nabojem Q. Naša metoda daje sledeće donje ograničenje za električno polje E:

$$E \geq 4Ge\frac{M^2}{Q^2L^2} \tag{64}$$

Ograničenje polja pišemo u odnosu na elementarni naboj e, mada bi možda bilo pogodnije da ga pišemo koristeći konstantu fine strukture izražene preko $e = \sqrt{4\pi\varepsilon_0\alpha\hbar c}$. U posmatranjima nikada električno polje nije premašilo ograničenje.

Za magnetno poje dobijamo

$$B \geq \frac{4Ge}{c}\frac{M^2}{Q^2L^2} \tag{65}$$

Ponovo, ovo ograničenje zadovoljavaju svi poznati sistemi u prirodi.

Slična ograničenja mogu da se nađu i za ostala opažanja u elektromagnetici. Ustvari, nekoliko ograničenja dobijenih ranije menjaju se kada se uvrsti električni naboj. Da li se i ograničenje veličine menja kada se u obzir uzme električni naboj? (***Izazov 28s***). Zapravo, jedna cela oblast istraživanja posvećena je izvođenju i proveri najopštijih ograničenja koja važe u prirodi.

* * *

Mnogo kosmoloških ograničenja još uvek nije razmatrano ni ovde i bilo gde drugde. Sledeće bi bilo vredno da se objavi: Koje je ograničenje za količinu kretanja? Energiju? Zadovoljstvo? Ubrzanje? Promenu mase? Trajanje života?

KOSMOLOGIJA U JEDNOJ REČENICI

Nastavićemo sada naše istraživanje ograničenja za najveće moguće sisteme. Da bismo to učinili, moramo da pogledamo prosto kosmologiju.

Kosmologija proiziilazi iz jednakosti opšte teorije relativnosti kada se uvrsti kosmološka konstanta. Kosmologija može stoga da se sažme svakim dovoljno opštim iskazom u koji je uvrštena kosmološka konstanta Λ. Najjednostavniji iskaz može da se izvede iz posmatranja da je prisutna udaljenost R_0 horizonta noćnog neba približno $R_0 \approx 1/\sqrt{\Lambda}$. Iz ovoga možemo da prikažemo celu kosmologiju pomoću nejednakosti

$$l \leq \frac{1}{\sqrt{\Lambda}} \tag{66}$$

Ovaj izraz sadrži sve iz kosmologije; u ovom trenutku tačan brojni činilac nije važan. Izraz mora da bude dodat kao peti iskaz o fizici uz četiri osnovna Plankova ograničenja.

Uzgred, možete li da dokažete da je kosmološka konstanta invarijanta posmatrača? (***Izazov 29s***).

KOSMOLOŠKA OGRANIČENJA OPAŽANJA

Iz ograničenja koja zavise od sistema za brzinu, rad, silu i entropiju, možemo da izvedmo ograničenja koja zavise od sistema i za sva druga opažanja. Osim toga, primećujemo da ograničenja koja zavise od sistema mogu (obično) da se primene na svemir u celosti; potrebno je samo da se unesu veličina sadržaja energije za svemir. Obično to možemo da učinimo kroz proces ograničenja, mada sam svemir nije fizički sistem. Na taj način dobijamo apsolutna ograničenja za svako fizičko zapažanje koje sadrži kosmološku konstantu Λ i to je na suprotnom kraju Plankovih ograničenja za ta opažanja. Ova ograničenja ćemo nazvati ***kosmološka ograničenja***.

Najjednostavnije kosmološko ograničenje je gornje ograničenje dužine u svemiru. Pošto kosmološko ograničenje dužine podrazumeva takođe maksimalno moguću Komptonovu talasnu dužinu, dobijamo minimalnu masu čestice i energiju. Isto tako možemo dobiti kosmološko donje ograničenje za sjajnost itd.

Za ***pojedinačnu česticu***, nalazimo apsolutno donje ograničenje brzine, kosmološko ograničenje brzine, dato sa

$$v_{\text{part.}} \geq \frac{\sqrt{4G\hbar/c}}{L_{\text{univ.}}} = L_{\text{c.Planck}}\sqrt{\Lambda}\, c = 7\cdot 10^{-53}\ \text{m/s} \qquad (67)$$

Nijedno opažanje nikada nije dosignulo ili se približilo ovom ograničenju.

Negativna zapreminska gustina energije $-\Lambda c^4/4\pi G$, koju je uvela pozitivna kosmološka konstanta Λ, odgovara negativnom pritisku (obe veličine imaju istu dimenziju). Kada se pomnoži sa minimalnom površinom to daje vrednost sile od

$$F = \frac{\Lambda\hbar c}{2\pi} = 4{,}8\cdot 10^{-79}\ \text{N} \qquad (68)$$

Osim brojnog činioca, ovo je kosmološko ograničenje sile, najmanja moguća sila u prirodi. To je ujedno gravitacijska sila između dve ispravljene Plankove mase koje se nalaze na kosmološkom rastojanju $\sqrt{\pi/4\Lambda}$.

Fascinantna predpostavka, kao zapažanje, dovodi nas da je puna opšta teorija relativnosti određena kombinacijom maksimalne i minimalne sile u prirodi, uključujući kosmološku konstantu.

Druga primedba odnosi se na ograničenja crne rupe i na sam svemir. Zapažena srednja gustina mase svemira nije daleko od odgovarajućeg ograničenja crne rupe. Ograničenje vremena trajanja crne rupe moglo bi stoga da odredi gornje ograničenje za celo vreme trajanja svemira. Međutim, starost svemira je za veliki činilac daleko od ograničenja. (***Izazov 30e***). Ustvari, pošto se povećavaju veličina svemira i starost, ograničenje vremena trajanja potiskuje se u daleku budućnost svakom sekundom koja prorotekne. Svemir se razvija tako da bi izbegao sopstveni raspad.

Kao zaključak, ***priroda je obezbedila dva ograničenja za svako opažanje: Plankovo ograničenje i kosmološko ograničenje***. Postojanje dva ograničenja za svako opažanje, gornje i donje, i ima važnu posledicu koju ćemo sada da istražimo.

OGRANIČENJA PRECIZNOSTI MERENJA I IZAZOV ZA RAZMIŠLJANJE

Sada nam je poznato da u prirodi svako merenje u fizici ima donju i gornju granicu. Jedne od granica su kosmološka, ostala su data (ispravljenim) Plankovim jedinicama. Kao posledica toga, za svako opažanje najmanja relativna greška merenja moguća u prirodi, je odnos između Plankovog ograničenja i kosmološkog ograničenja. Osim toga, moramo da zaključimo da je ***preciznost ograničena za sva merenja***.

Sva ograničenja, ona za opažanja i ona za preciznost merenja, pojavljuju se samo kada se zajedno uzmu kvantna teorija i gravitacija, Međutim, postojanje ovih ograničenja, a posebno postojanje ograničenja preciznosti merenja, primoravaju nas da napustimo neke dragocene predpostavke.

NEMA REALNIH BROJEVA

Zbog osnovnih ograničenja na preciznost merenja, ***izmerene vrednosti fizičkog opažanja ne zahtevaju ceo skup realnih brojeva***. Ustvari, ograničena preciznost podrazumeva da izmerene vrednosti ne mogu da se opišu realnim brojevima! Ovaj zapanjujući rezultat se pojavluje kada se zajedno primene kvantna teorija i gravitacija. Međutim postoji još.

VAKUUM I MASA: DVE STRANE ISTOG NOVČIĆA

Postoji ograničenje preciznosti merenja dužine u prirodi. Ovo ograničenje važi i za merenje dužine u praznom prostoru i za merenje dužine materije (ili zračenja). Podsetimo se sada šta činimo kada merimo dužinu stola pomoću lenjira.

Da bismo našli ivicu stola, moramo da budemo sposobni da razlikujemo sto od okolnog vazduha. Preciznije rečeno, moramo da budemo sposobni da napravimo razliku između materije i vakuuma. Uvek kada želimo veliku preciznost merenja, moramo da se približimo Plankovim razmerama. Međutim, u Plankovim razmerama izmerene vrednosti i greške merenja imaju iste veličine. Ukratko, u Plankovim razmerama, sopstvena ograničenja merenja prirode podrazumevaju kako ne možemo da kažemo da li merimo vakuum ili materiju. Ovaj zaključak proverićemo detaljnije u daljem tekstu. (***Strana 50***).

U stvari, možemo da odaberemo bilo koje drugo opažanje u kojem se pravi razlika između vakuuma i materije – na primer, boju, masu, veličinu, naboj, brzinu ili mpment količine kretanja – i imaćemo isti problem: u Plankovim razmerama nemoguće je da se napravi razlika između materije i vakuuma. U Plankovim razmerama ne možemo reći da li je kutija puna ili prazna.

Da izrazimo zaključak najoštrijim mogućim oblikom: ***u Plankovim razmerama vakuum i materija se ne razlikuju***. Ovaj rezultat suprotan intuiciji jedna je od draži traganja za konačnom, objedinjenom teorijom. Ona je nadahnula mnoge istraživače u ovoj oblasti, a neki od njih su napisali o tome bestselere, Brajan Grin (Brian Randolph Green, 1963. New York City.) bio je posebno uspešan u predstavljanju ove strane kvantne geometrije široj javnosti. (***Ref. 37***).

Ograničena preciznost merenja takođe podrazumeva da je pri Plankovoj energiji nemoguće govoriti o tačkama, trenucima, događajima ili dimenzijama. Slično tome, na Plankovoj dužini nemoguće je da se napravi razlika između pozitivne i negativne vrednosti vremena: tako da u Plankovim razmerama čestice i antičestice ne mogu da se jasno razlikuju. Svi ovi zaključi su dalekosežni i moramo da ih detaljnije proverimo. To ćemo da uradimo ubrzo. (***Strana 67***).

PRECIZNOST MERENJA I POSTOJANJE SKUPOVA

Opšta je predpostavka da je u fizici priroda skup sastojaka. Za ove sastojke, kod matematičara pod nazivom ***elementi***, predpostavka je da se mogu odvajati jedan od drugog. Ova prećutna predpostavka uvodi se u tri glavne situacije: predpostavka je da se materija sastoji od odvojenih čestica, da se prostor-vreme sastoji od odvojenih događaja ili tačaka i da se skup iskaza sastoji od odvojenih početnih uslova. Sve do 2000. godine fizičari su gradili sve svoje opise prirode na ovom pojmu skupa.

Osnovno ograničenje za preciznost merenja podrazumeva da priroda nije skup takvih razdvojivih elemenata. (***Strana 50***). Ograničenje preciznosti podrazumeva da fizički subjekti mogu da se razlikuju samo ***približno***. Približno razlikovanje jedino je moguće pri energijama koje su mnogo manje od Plankove energije $\sqrt{\hbar c^5/4G}$. Kao ljudska bića mi zaista živimo sa takvim malim energijama i možemo sa sigurnošću da pravimo približnosti. U stvari, približnost je izvanredna u praksi; mi ne zapažamo bilo kakvu grešku. Međutim, na Plankovoj energiji, razlikovanje i razdvajanje u načelu nisu mogući. Posebno, na kosmičkom horizontu, pri velikom prasku i u Plankovim razmerama postaje nemoguće da se napravi bilo kakva razlika između dva događaja, dve tačke ili dve čestice.

Drugi način da se dođe do rezultata je sledeći. Razdvajanje dva subjekta zahteva ***različite rezultate merenja*** – na primer, različite položaje, različite mase ili različite brzine. Bilo koje opažanje da se odabere, na Plankovoj energiji razlikovanje postaje nemoguće, zbog velikih grešaka pri merenju, Jedino pri svakodnevnim vrednostima energije razlikovanje je približno moguće. Svako razlikovanje između dva fizička sistema – naprimer, izmeđuu čačkalice za zube i planine – moguće je samo približno: u Plankovim razmerama ne mogu da se nacrtaju granice. (***Strana 50***).

Treći dokaz je sledeći. Da bismo izbrojali bilo koje subjekte u prirodi – skup česica, diskretan skup tačaka ili bilo koji diskretan skup fizičkih opažanja – subjekti moraju da imaju svojstvo razdvajanja. Međutim, neizbežne greške pri merenju u suprotnosti su sa svojstvom razdvajanja. Zato je na Plankovoj energiji nemoguće da se izbroje precizno fizički objekti. ***Priroda nema delove***. (***Strana 50***).

Kao zaključak, u Plankovim razmerama u načelu je nemoguće razdvajanje. Ne možemo da razlikujemo opažanja. ***U Plankovim razmerama nije moguće razdvajanje prirode u posebne subjekte***. Elementi skupa

ne mogu da se odrede u prirodi. Nemoguća je konstrukcija ni diskretnog ni neprekidnog skupa. (***Strana 50***). ***Priroda ne sadrži skupove elemenata***.

Pošto su skupovi i elementi samo približnosti, pojam "skup", koji sadrži razdvojene elemente, isuviše je specijalizovan da bi opisao prirodu. Priroda ne može da se opiše u Plankovim razmerama – to jest uz punu preciznost – ukoliko bilo koji pojam koji se koristi za njen opis predpostavlja skupove. Međutim, svi pojmovi koji su korišćeni u proteklih 25 vekova za opis prirode – prostor, vreme, čestice, fazni prostor, opažanja, takasne funkcije, Hilbertov prostor, Fokov postor, Rimanov prostor, prostor čestice, prostor petlje ili modulski prostor – zasnivaju se na skupovima. Njih moramo da napistimo na Plankovoj energiji.

Ukratko, priroda je jedinstvo i nema delova. ***Nijedan ispravan matematički model prirode ne može da se zasniva na skupovina***. Međutim, nijedan pristup koji se koristio u dvadesetom veku u teorijskoj fizici nije napustio skupove. Ovaj zahtev je zato jako snažan; ustvari, on će nas odvesti da tražimo jedinstvo relativnosti i kvantne teorije. Zahtev će čak rešiti i Hilbertov šesti problem. (***Strana 89***).

ZAKLJUČAK O OGRANIČENJIMA U PRIRODI

Ako izuzmemo interakcije merila. ostatak fizike možemo da saberemo u nekoliko iskaza ograničenja.

- Ograničenje brzine je ekvivalentno sa specijalnom teorijom relativnosti.
- Ograničenje sile je ekvivalentno sa opštom teorijom relativnosti.
- Ograničenje rada je ekvivalentno sa kvantnom teorijom.
- Ograničenje entropije je ekvivalentno sa termodinamikom.
- Ograničenje udaljenosti je ekvivalentno sa kosmologijom.

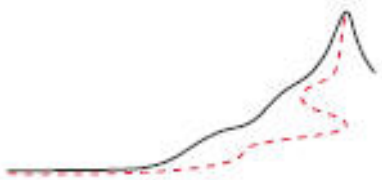
Sva ova ograničenja su invarijante posmatrača. Invarijante ograničenja navode na misaone eksperimente, od kojih nijedan nije doveo do njihovog narušavanja.

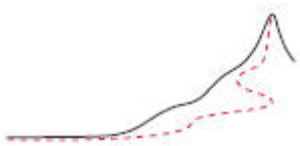
Invarijantnost ograničenja podrazumeva a je u prirodi svako opažanje ograničeno na jednoj strani odgovarajućom (ispravljenom) Plankovom jedinicom, a na drugoj strani kosmološkim ograničenjem. Svako opažanje u prirodi ina gornju i donju graničnu vrednost.

Posojanje donje i gornje granične vrednosti za sva opažanja, podrazumeva da je ograničena preciznost merenja. Kao posledica toga, ne može se napraviti razlika između materije i vakuuma, opis prostor-vremena kao neprekidne mnogostrukosti nije tačan i priroda može samo približno da se opiše pomoću skupova.

Pošto je precizno poznata većina teorije fizike, kvantna teorija i opšta teorija relativnosti, mogu da se svedu na iskaze ograničenja, postoje dobri izgledi da će konačna, objedinjena teorija fizike, zahevati podjednako jednostavan opis. Ograničenja prirode prema tome nagoveštavaju da će možda biti jednostavna i matematika konačne, objedinjene teorije. Osim toga, ograničenja prirode podrazumevaju da su Plankove jedinice ključ za konačnu teoriju.

Na ovom mestu naše pustolovine još uvek su otvorena mnoga pitanja. Odgovor na bilo koje otvoreno pitanje iz milenijumske liste (***strana 22***) izgleda da nam je izvan dometa. Međutim, ovaj utisak je isuviše pesimističan. Naše razmatranje podrazumeva da je samo potrebno da nađemo opis prirode koji je jednostavan i ***bez skupova***. A prirodan način da se izbegne upotreba skupova je opis praznog prostora, zračenja i materije kao da su sastavljeni od zajedničkih sastojaka. No, pre nego što istražimo ovu mogućnost, proverićemo zaključke iz ovog poglavlja na drugačiji način. Posebno, kao pomoć za konzervativnije fizičare, proverićemo zaključke do kojih smo do sada došli ***bez*** upotrebe načela maksimalne sile.





Poglavlje 3

OPŠTA TEORIJA RELATIVNOSTI NASPRAM KVANTNE TEORIJE

Man muß die Denkgewohnheiten durch Denknotwendigkeiten ersetzen.[1]

Albert Ajnštajn (Albert Einstein)

Dva pouzdana opisa kretanja dostupna 2000. godine, naime ono iz opšte teorije relativnosti i ono iz standardnog modela, bila su korisna i savršeno lepa. Ovaj milenijumski opis kretanja korisan je pošto su njegove posledice potvrđene u svim eksperimentima, do pune preciznosti pri merenjima. Sposobni smo da opišemo i shvatimo sve primere kretanja koji sa kojima smo se sretali. Mogli smo da koristimo to razumevanje da bismo sačuvali živote, obezbedili hranu i uživali u životu. Zato smo dospeli do značajne visine u našem usponu na planinu. Naš cilj za potpunim opisom kretanja nije daleko od postizanja.

Rezultati fizike u dvadesetom veku takođe su lepi. Pod tim fizičari misle da se oni mogu izraziti samo ***prostim*** pojmovima. (Ovo je jako jadna definicija lepote, ali fizičari su retko stručnjaci za lepotu. Bez obzira na to, ako fizičar ima neki drugi pojam u fizici za lepotu, izbegavajte ga, pošto on u tom slučaju zaista govori besmislice.) Jednostavnost fizike dvadesetog veka dobro je poznata: sva kretanja opažena u fizici minimiziraju rad. Pošto je u fizici rad merilo promena, možemo reći da sva kretanja opažena u prirodi ***minimiziraju promene***. Naročito, svaki primer kretanja usled opšte teorije relativnosti ili standardnog modela fizike čestica čestica minimizitaju rad; obe teorije zato mogu precizno da se opišu pomoću lagranžijana. (***Vol. I, strana 183***).

S druge strane, neki važni aspekti bilo koje vrste kretanja, mase elementarnih čestica koje učestvuju u kretanju i jačina njihove veze, nisu objašnjeni ni opštom teorijom relativnosti ni standardnim modelom fizike čestica. Isto to se može primeniti za poreklo svih čestiva u svemiru, njihovo početno stanje i za broj dimenzija prostor-vremena. Očigledno, milenijumski opis fizike još nije kompletan.

Preostali deo naše pustolovine biće jako zahtevan. Pri usponu na svaku visoku planinu glava postaje ošamućena usled nedostatka kiseonika. Konačan iznos energije koji nam je na raspolaganju zahteva da ostavimo svaki nepotreban prtljag i sve što nas usporava. Kako bismo utvrdili šta nam je nepotrebno, moramo se usredsredimo na ono šta želimo da postignemo. Naš cilj je precizan opis kretanja. Međutim, iako su opšta teorija relativnosti i kvantna teorija izuzetno precizne, korisne i jednostavne, mi nosimo teret: ove dve teorije i njihovi pojmove koji su ***protivrečni*** jedni drugima.

PROTIVREČNOSTI

U klasičnoj fizici i opštoj teoriji relativnosti vakuum, ili prazan prostor, je područje bez mase, bez energije i bez količine kretanja. Ako su prisutni čestice ili gravitacijska polja, gustina energije nije nula. prostor je zakrivljen i ne postoji potpun vakuum.

U svakodnevnom životu vakuum ima gustinu energije koja se ne može razlikovati od nule. Međutim, opšta teorija relativnosti predlaže način da se ovo proveri uz veliku preciznost: merimo prosečnu zakruvljenost prostora u svemiru. (***Ref. 38***). U današnje vreme merenja u svemiru izvršena pomoću namenskih satelita otkrila su srednju gustinu energije E/V međugalaktičkog "vakuuma" sa vrednošću (***Vol. II, strana 188***)

$$\frac{E}{V} \approx 0{,}5 \text{ nJ/m}^3 \qquad (69)$$

[1] "Moraju se navike razmišljanja zameniti neophodnostima razmišljanja." Albert Ajnštajn

Ukratko, kosmološki podaci pokazuju da gustina energije u međugalaktičkom prostoru nije tačno nula; bez obzira na to, izmerena vrednost je izuzetno mala i može da se zanemari u svim laboratorijskim eksperimentima.

S druge strane, kvantna teorija polja priča drugu priču o gustini energije vakuuma. (***Ref. 39***). Vakuum je područje sa kolebanjima nulte tačke. Energija sadržana u vakuumu je zbir energija nultih tačaka svih polja koje on sadrži. Zapravo, Kazimirov efekt "dokazuje" stvarnost ovih energija nulte tačke. (***Vol. V, strana 93***). Prema kvantnoj teoriji polja njegova gustina energije data je, unutar reda veličine, sa (***Vol. V, strana 97***):

$$\frac{E}{V} \approx \frac{4\pi h}{c^3} \int_0^{\nu_{\max}} \nu^3 \mathrm{d}\nu = \frac{\pi h}{c^3} \nu_{\max}^4 \qquad (70)$$

Približnost važi za slučaj u kojem je prekidna učestanost $\nu_{\max}$ mnogo veća od mase mirovanja m čestice koja odgovara posmatranom polju. Ograničena razmatranja data u predhodnom tekstu (***strana 37***) podrazumevaju da prekidna energija mora da bude reda Plankove energije $\sqrt{\hbar c^5/4G}$, oko $0{,}6 \cdot 10^{19}$ GeV = 1,0 GJ. To bi dalo gustinu energije vakuuma od

$$\frac{E}{V} \approx 10^{111}\ \mathrm{J/m^3} \qquad (71)$$

što je oko 10^{120} puta više od merenja u eksperimentima. Drugim rečima, u proračunu preko teorije polja[1] nešto je pomalo pogrešno.

Opšta teorija relativnosti i kvantna teorija prorivrečne su jedna drugoj i na druge načine. Gravitacija je zakrivljeno prostor-vreme. Opširna istraživanja pokazala su da kvantna teorija polja, koja opisuje elektrodinamiku i nuklearne sile, zataji u situacijama koje jako zakrivljuju prostor-vreme. (***Ref. 41***). U takvim slučajevima pojam "čestica" nije precizno određen. Kvantna teorija polja ne može da se proširi tako da dosledno obuhvati gravitaciju, pa tako da obuhvati opštu teoriju relativnosti. Bez pojma čestice kao izdvojenog subjekta, takođe gubimo sposobnost da izvršavamo izračunavanja perturbacija – a ona su jedina moguća izračunavanja u kvantnoj teoriji polja. Ukratko, kvantna teorija deluje samo tako što ona predpostavlja da gravitacija ne postoji. Zaista, gravitacijska konstanta G ne pojavljuje se ni u jednoj doslednoj kvantnoj teoriji polja.

S druge strane, opšta teorija relativnosti zanemaruje pravila razmene između fizičkih veličina otkrivena u eksperimentima u mikroskopskoj razmeri. Opšta teorija relativnosti predpostavlja da su smisleni klasično obeležavanje položaja i količine kretanja materijalnih objekata. Ona zato zanemaruje Plankovu konstanu $\hbar$, i deluje samo tako što odbacije kvantne efekte.

Pojam ***merenje*** takođe se razlikuje. U opštoj teoriji relativnosti, kao i u klasičnoj fizici, podrazumeva se da je moguća proizvoljna preciznost merenja – na primer, korišćenjem sve finijih i finijih podeoka lenjira. (***Vol. V, strana 215***). U kvantnoj mehanici, s druge strane, preciznost merenja je ograničena. Relacija neraspoznavanja određuje granice koje slede iz mase M uređaja za merenje. (***Vol. V, strana 38***).

Protivrečnosti se tiču takođe pojma ***vreme***. Saglasno relativnosti i klasičnoj fizici, vreme je ono što se očitava na časovniku. Međutim, kvantna teorija kaže da precizni časovnici ne postoje, posebno ako se u obzir uzme gravitacija. Šta znači "čekati 10 minuta", ako časovnik prelazi u kvantno-mehaničku super-poziciju kao rezultat njegovog spajanja sa geometrijom prostor-vremena? (***Strana 55***). Ne znači ništa.

Slično tome, opšta teorija relativnosti podrazumeva da prostor i vreme ne mogu da se razlikuju, dok kvantna teorija podrazumeva da materija pravi razliku između njih. Povezna razlika je sledeća. Kvantna teorija je teorija – očigledno čudno – lokalnih opažanja.. U opštoj teoriji relativnosti ne postoje lokalna opažanja, kao što pokazuje dokaz Ajnštajnove crvotočine. (***Vol.II, strana 220***).

Protivrečnosti između dve teorije najdramatičnije se pokazuje kroz neuspeh opšte teorije relativnosti da opiše stvaranje parova čestica sa spinom 1/2, tipičnog i suštinskog kvantnog procesa. (***Ref. 42***) i (***Ref. 43***). Džon Viler (John Wheeler)[2] i drugi tvrdili su da se u tom slučaju topologija prostora mora neizbežno da se

---

[1] Vredno je naglasiti da „pomalo pogrešno" leži u oblasti kvantne teorije polja. Ne postoji greška i nema misterije , u opštoj teoriji relativnosti uprkos mnogim suprotnim tvrdnjama, časopisima i lošim člancima istraživača. (***Ref. 40***). Ta dobro poznata tačka posebno je razjašnjena kod Bjanšija (Bianchi) i Rovelija (Rovelli)

[2] John Archibald Wheeler (1911–2008), bio je fizičar i značajan predavač koji je radio na opštoj teoriji relativnosti

menja (***Ref. 44***) i (***Ref. 45***); u opštoj teoriji relativnosti, međutim, toplogija prostora je ustaljena. Ekvivalentno tome, kvantna teoija kazuje da je materija sastavljena od fermiona, ali fermioni ne mogu da se pripoje u opštu teoriju relativnosti.[1]

Sledeću upečatljivu protivrečnost naglasio je Jirgen Elers (Jürgen Ehlers). (***Ref. 46***). Kvantna teorija je izgrađena na tačkastim česticama, a tačkaste čestice se kreću po ***vremenskim*** svetskim linijama. Međutim, sledeći opštu teoriju relativnosti, tačkaste čestice imaju singularitet unutar njihovog horizonta crne rupe; a singulariteti se kreću uvek po ***prostornim*** svetskim linilama. Ove dve teorije stoga su protivrečne na malim rastojanjima.

Nijedan opis prirode koji sadrži protivrečnosti ne može da dovede do objedinjenog opisa ili do potpuno ispravnog opisa. Da bismo odstranili protivrečnosti, potrebno je da shvatimo njihovo poreklo.

POREKLO PROTIVREČNOSTI

Sve protivrečnosti između opšte teorije rejativnosti i kvantne mehanike imaju isto poreklo. (***Ref. 47***). Fizika dvadesetog veka opisuje kretanja pojmovima objekata sastavljenih od ***čestica***, a prostor-vreme sastavljeno od ***događaja***. Pogledajmo kako su ova dva pojma definisana.

Čestica – i uopšteno svaki objekt – definisana je kao očuvani subjekt koji ima svoj položaj i može da se kreće. Ustvari, etimologoja reči ***objekt*** u vezi je sa kasnijim svojstvima. Drugim rečima, čestica je mali entitet sa očuvanom masom, nabojem, spinom i tako dalje, čiji se položaj može menjati u vremenu.

Događaj je tačka u prostoru i vremenu. (***Ref. 48***). U svakom tekstu iz fizike, vreme je definisano pomoću objekata koji se kreću, obično nazvanim "časovnici", ili pokretne čestice, kao što su one koje su emitivane iz izvora svetlosti. Slično tome, i ***dužina*** je definisana pojmovima objekata, bilo starinskim lenjirom ili pojmom kretanja svetlosti, koje je i samo kretanje čestica.

Savremena fizika je izoštrila definicije čestice i prostor-vremena. Kvantna mehanika predpostavlja da je prostor-vreme dato (kao simetrija Hamiltonijanu) i proučava svojstva čestica i njihovog kretanja kako za materiju, tako i za zračenje. Kvantna teorija je izvela ceo popis osobina koji određuju česticu. Opšta teorija relativnosti, a posebno kosmologija, pridržava se suprotnog pristupa; obe predpostavljaju da su date osobine materije i zračenja (na primer, preko njihovih jednakosti stanja), a opisuje u detalje prostor-vreme koje proističe iz njih, naročito njegovu zakrivljenost.

Međutim, tokom svih ovih napredaka jedna činjenica ostaje nepromenjena: u milenijumskom opisu prirode ***dva pojma čestice i prostor-vremena definisani su jedan uz pomoć drugog***. Da bi se odstranila protivrečnost između kvantne mehanike i opšte teorije relativnosti, i da bi se formulisala kompletna teorija, moramo da izbacimo kružne definicije.

PODRUČJE PROTIVREČNOSTI: PLANKOVE RAZMERE

Uprkos njihovoj protivrečnosti i kružnoj definiciji u osnovi, i opšta teorija relativnosti i kvantna teorija uspešne su teorije za opis prirode; one se slažu sa svim podacima. Kako je to moguće?

Svaka teorija savremene fizike daje kriterijum za opisivanje kada je neophodno i kada klasična Galilejeva fizika ne može više da se primenjuje. Ovi kriterijumi su osnova za više dokaza u narednim poglavljima.

Opšta teorija relativnosti pokazuje da je ***neophodno*** da se uzima u obzir zakrivljenje praznog prostora[2] i prostor-vreme uvek kada prilazimo objektu mase m do unutar rastojanja reda Švarcšildovog poluprečnika r_S, datog sa

$$r_S = 2gm/c^2 \qquad (72)$$

Gravitacijska konstanta G i brzina svetlosti c deluju kao konstante pretvaranja. Zaista, kada se objektu priđe na rastojanje Švarcšildovog poluprečnika, razlika između opšte teorije relativmosti i klasičnog opisa gravitacije sa $1/r^2$, postaje sve veća i veća. Naprimer, jedva merljivo gravitacijsko skretanje svetlosti zbog Sunca nastaje usled prilaženja svetlosti Suncu na rastojanje do $2{,}4\cdot10^5$ puta Švarcšildov poluprečnik. (***Ref. 42***) i (***Ref. 49***). Obično smo primorani da ostanemo udaljeni od objekta na rastojanju koja je čak i veći

[1] Kao što ćemo videti u daljem tekstu, standardni model obezbeđuje način da se fermioni pripoje u izuzetno pouzdanu približnost opštoj teoriji relativnosti, bez zahteva da se menja topologija. To efektno poništava Vilerovu raspravu.

[2] U daljem tekstu pojmove "vakuum" i "prazan prostor" podjednako ćemo da koristimo

umnožak Švarcšildovog poluprečnika, kao što pokazuje ***Tabela 2***. Samo iz tog razloga je opšta teorija relativnosti nepotrebna u svakodnevnom životu. Sećamo se da su objekti čija je veličina određena njihovim Švarcšildovim poluprečnikom crne rupe; manji objekti ne mogu da postoje (***Izazov 31e***).

TABELA 2 Švarcšildov poluprečnik i Komptonova talasna dužina za neke objekte koji se javljuju u prirodi. Dužina pod znacima navoda nema fizički smisao, kao što je u tekstu objašnjeno.

Objekt	**prečnik** ***d***	**masa** ***m***	**Švarcšildov poluprečnik** r_S	**Odnos** d/r_S	**Komptonova tal. dužina** λ_C **(umanj.)**	**Odnos** d/λ_C
galaksija	≈ 1 Zm	$\approx 5\cdot10^{40}$ kg	≈ 70 Tm	$\approx 10^{7}$	"$\approx 10^{-83}$ m"	$\approx 10^{104}$
neutronska zvezda	10 km	$2{,}8\cdot10^{30}$ kg	4,2 km	2,4	"$1{,}3\cdot10^{-73}$ m"	$8\cdot10^{76}$
Sunce	1,4 Gm	$2\cdot10^{30}$ kg	3,0 km	$4{,}8\cdot10^{5}$	"$1{,}0\cdot10^{-73}$ m"	$8\cdot10^{81}$
Zemlja	13 Mm	$6\cdot10^{24}$ kg	8,9 mm	$1{,}4\cdot10^{9}$	"$5{,}8\cdot10^{-68}$ m"	$2{,}2\cdot10^{74}$
čovek	1,8 m	75 kg	0,11 ym	$1{,}6\cdot10^{25}$	"$4{,}7\cdot10^{-45}$ m"	$3{,}8\cdot10^{44}$
molekul	10 nm	0,57 zg	"$8{,}5\cdot10^{-52}$ m"	$1{,}2\cdot10^{43}$	$6{,}2\cdot10^{-19}$ m	$1{,}6\cdot10^{10}$
atom (^{12}C)	0,6 nm	20 yg	"$3{,}0\cdot10^{-53}$ m"	$2{,}0\cdot10^{43}$	$1{,}8\cdot10^{-17}$ m	$3{,}2\cdot10^{7}$
proton p	2 fm	1,7 yg	"$2{,}5\cdot10^{-54}$ m"	$8\cdot10^{38}$	$2{,}0\cdot10^{-16}$ m	9,6
pion π	2 fm	0,24 yg	"$3{,}6\cdot10^{-55}$ m"	$5{,}6\cdot10^{39}$	$1{,}5\cdot10^{-15}$ m	1,4
gornji kvark u	< 0,1 fm	$5\cdot10^{-30}$ kg	"$7\cdot10^{-57}$ m"	$< 1\cdot10^{40}$	$7\cdot10^{-14}$ m	< 0,001
elektron e	< 4 am	$9{,}1\cdot10^{-31}$ kg	"$1{,}4\cdot10^{-572}$ m"	$< 3\cdot10^{39}$	$3{,}9\cdot10^{-13}$ m	$<1\cdot10^{-5}$
neutrino υ_e	< 4 am	$< 3\cdot10^{-36}$ kg	"$< 5\cdot10^{-63}$ m"	n.a	$> 1\cdot10^{-7}$ m	$< 3\cdot10^{-11}$

Slično tome, kvantna mehanika pokazuje da Galilejeva fizika mora da se napusti i da ***moraju*** da se u obzir uzmu kvantni efekti uvek kada se objektu priđe unutar razmaka reda (umanjene) Komptonove talasne dužine λ_C, date sa

$$\lambda\!\!\!^{-}_{C} = \frac{\hbar}{mc} \qquad (73)$$

U ovom slučaju Plankova konstanta $\hbar$ i brzina svetlosti c deluju kao činioci pretvaranja za transformaciju mase m u razmeru dužine. Naravno, ova dužina je relevantna samo ako je objekt manji od njegove sopstvene Konptonove talasne dužine. U ovoj razmeri dobijamo relativističke kvantne efekte, kao što su stvaranje parova čestica-antičestica ili poništavanje. ***Tabela 2*** pokazuje da je rastojanje prilaska ili u blizini ili je nanje od Komptonove talasne dužine samo u mikroskopskom svetu, tako da se ovakvi efekti ne opažaju u svakodnevnom životu. Samo iz tog razloga nije nam potrebna kvantna teorija polja za opisivanje običnih opažanja.

Kombinacija pojmova kvantne teorije polja i opšte teoreme relativnosti zahteva se u situacijama gde su oba uslova ispunjena istivremeno. Potrebna udaljenost prilaska u takvim situacijama izrčunava se tako što se stavi $r_S = 2\lambda_C$ (činilac 2 se uvodi radi jednostavnosti). Nalazimo da je to u slučajima kada su dužine ili vremena – unutar činioca reda 1 – reda

$$l_{Pl} = \sqrt{\hbar G/c^3} = 1.6\cdot10^{-35}\ \text{m}, \qquad \textbf{\textit{Plankova dužina}},$$

$$t_{Pl} = \sqrt{\hbar G/c^5} = 5{,}4\cdot10^{-44}\ \text{s}, \qquad \textbf{\textit{Plankovo vreme.}} \qquad (74)$$

Uvek kada se približavamo oblektu u ovim razmeranma, uloge imaju i opšta teorija relativnisti i kvantna mehanika, a javljaju se efekti kvantne gravitacije. Pošto su vrednosti Plankovih domenzija izuzetno male, ovaj nivo prefinjenosti nepotreban je u svakodnevnom životu, u astronomiji, pa čak ni u fizici čestica.

U milenijumskom opisu prirode sve protivrečnosti, pa takođe i upravo pomenuta kružna definicija, deluju samo u Plankovim razmerama. To možete i sami da proverite. (***Izazov 32e***). To je razlog što opšta teorija relativnosti i kvantna teorija tako dobro deluju u praksi.

Međutim, da bismo odgovortili na pitanja postavljena na početku – zašto živimo u tri dimenzije, zbog čega postoje tri interakcije i zašto je proton 1836,15 puta teži od elektrona – potreban nam je potpun opis prirode. Da bismo odgovorili na ova pitanja moramo da shvatimo fiziku u Plankovim razmerama.

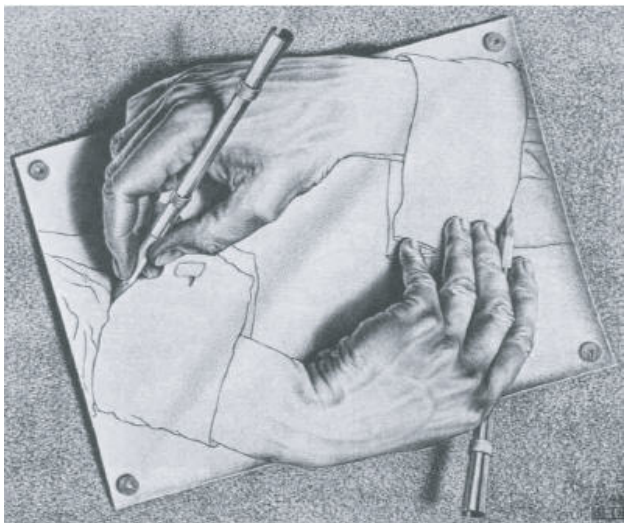
Ukratko, opšta teorija relativnosti i kvantna teorija zaista su jedna drugoj protivrečne. Međutim, oblasti u kojima te protivrečnosti imaju ulogu, u Plankovim razmerama, nisu dostupne u eksperimentima. Kao

posledicu toga, protivrečnosti i naše nepoznavanje kako se priroda ponaša u Plankovim razmerama, ima samo jedan efekt: mi ne sagledavamo rešenja iz milenijumskih pitanja.

Primećujemo da neki ljudi tvrde da Plankove razmere određuju samo jednu od više oblasti prirode, dok se kvantna mehanika i opšta teorija relativnosti primenjuju istovremeno. Oni pominju da su horizonti i veliki prasak posebne oblasti. Međutim, mnogo je prikladnije da se tvrdi da su horizonti i veliki prasak situacije gde su Plankove razmere suštinske.

REŠAVANJE PROTIVREČNOSTI

Protivrečnost između opšte teorije relativnosti i kvantne teorije ima male praktične posledice. Prema tome, dugo vremena ove protivrečnosti su bile prevazilažene tako što su se ove dve teorije držale odvojeno. Često može da se čuje iskaz da kvantna mehanika važi u malim razmerama,a da opšta teorija relativnosti važi u velikim razmerama. Ovaj stav je prihvatljiv sve dok ostajemo daleko od Plankove dužine. Međutim, ovaj stav prilagođavanja isto tako nas sprečava da rešimo kružnu definiciju, protivrečnost, pa prema tome i milenijumska pitanja.



Slika 2 “Crtanje” od Moric Ešera (Maurits Escher), 1948 – metafora za način na koji se obično definišu “čestica” i “prostor-vreme”: jedno pomoću drugog (© M.C. Escher Heirs)

Situacija podseća na dobro poznat crtež, ***slika 2***, Morica Ešera (Maurits Escher (b. 1898. Leeuwarden – 1972. Hilversum) na kojem dve ruke, a svaka drži olovku, izgledaju kao da crtaju jedna drugu. Ako se uzme da je jedna ruka simbol vakuuma, a duga da je simbol čestica, uz čin crtanja uzet kao čin definisanja, slika prikazuje fiziku dvadesetog veka. Očigledna kružna definicija rešava se prepoznavanjem da dva pojma (dve ruke) oba potiču od trećeg, skrivenog pojma. U slici, treći aspekt je ruka umetnika. U fizici je treći pojam zajedničko poreklo vakuuma i čestica.

Prema tome, zaključujemo da se protivrečnosti u fizici i kružna definicija rešavajuu ***zajedničkim sastojcima*** za vakuum i materiju. Da bismo našli šta su to zajednički sastojci, a šta nisu, moramo da istražimo ponašanje prirode u Plankovim razmerama.

POREKLO TAČAKA

Opšta teorija relativnosti izgrađena je na ***predpostavci*** da je prostor neprekidnost tačaka. Već u školi su nas naučili da su linije, površine i oblasti sastavljeni od tačaka. Mi smo to prihvatii kao samo po sebi razumljivo, pošto smo zamišljali da su uvek moguća sve finija i finija merenja. I svi eksperimenti su bili u skladu sa predpostavkom. Činjenica je: u tom razmišljanju mi smo prvo idealizovali lenjir za merenje – koji je načinjen od materije – a potom “zaključili” da u prostoru postoje tačke.

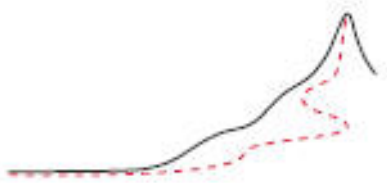
Kvantna teorija je izgrađena na na ***predpostavci*** da su elementarne čestice tačkaste. To smo primili kao samo po sebi razumljivo, pošto smo zamišljali da su mogući sudari pri sve većim energijama koji omogućavaju elementarnim česticama da se što više približe. I svi eksperinenti do sada su bili u skladu sa predpostavkom. Činjenica je: u tom razmišljanju prvo smo zamislili beskonačne vrednosti energije i količine kretanja – što je iskaz o svojstvima vremena i prostora – a potom “zaključili” da postoje tačkaste čestice.

Ukratko, samo kružna definicija prostora i materije dopušta nam da definišemo tačke i tačkaste čestice! Ovo nas stavlja u čudnu situaciju. S jedne strane, eksperimenti nam kazuju da funkcioniše opisivanje prirode pomoću tačaka i tačkastih čestica. S druge strane, razum nam govori da je to zabluda i da ne može bude tačno u Plankovim razmerama. Potrebno nam je rešenje.

ZAKLJUČAK O SUKOBU IZMEĐU DVE TEORIJE

Opšta teorija relativnosti i kvantna teorija protivrečne su međusobno. U praksi se to, međutim, događa samo u Plankovim razmerama. Razlog za protivrečnost je insistiranje na kružnoj definiciji prostora i čestica. Samo takva kružna definicija dozvoljava nam da definišemo prostor i tačkastu česticu.

Da bismo rešili ovu protivrečnost i da bismo razumeli prirodu u Plankovim rezmerama, moramo da uvedemo ***zajedničke*** sastojke prostora i čestica. Međutim, zajednički sastojci umaju jednu važnu posledicu: zajednički sastojci nas promoravaju da prestanamo da koristimo tačke da bismo opisali prirodu. Sada ćemo ovu povezanost da istražimo.



Poglavlje 4

DA LI SE MATERIJA RAZLIKUJE OD VAKUUMA

Pojava kvanta rada u opisu prirode dovodi do ograničenja u svim merenjima: Hajzenbergove relacije neodređenosti. (***Vol. II, strana 24***). Relacija neodređenosti, kada se kombinuje sa efektima gravitavije, podrazumeva skoro neverovatan niz posledica na ponašanje prirode u Plankovim razmerama. Najvažnije posledice su neophodnost da se napuste tačke, trenuci i događaji, kao i ekvivalentnost vakuuma i materije. Ovi iznenađujući i važni zakljuci slede iz prostih dokaza zasnovanih na relaciji neodređenosti, Komptonove talasne dužine i Švarcšildovog poluprečnika.

OPRAŠTANJE OD TRENUTKA VREMENA

Vreme je sastavljeno od atoma vremena… koji su zapravo nevidljivi.

Mamonides[1]

Ograničenja merenja pojavljuju se jasno kada istražujemo svojstva časovnika i lenjira za merenje. Da li je moguće da se konstruiše časovnik koji bi mogao da meri vremenske intervale kraće od Plankovog vremena? (***Ref. 50***) i (***Ref. 51***). Iznenađujuće je, ali odgovor je: ne, premda izgleda da ako u neodređenosti vreme-energija $\Delta E \Delta t \geq \hbar$ uzmemo ΔE dovoljno veliko, da može Δt da bude proizvoljno malo.

Svaki časovnik je uređaj sa nekim delovima koji se kreću. Ti delovi mogu da budu mehanički točkovi, čestice materije u kretanju, promena elektromagnetnog polja (to jest fotona) ili raspad radioaktivnih čestica. (***Ref. 52***) i (***Ref. 53***). Za svaki pokretan deo časovnika primenjuje se relacija neodređenosti. (***Ref. 54***). Kako je najjasnije objasnio Majkl Rajmer (Michael Raymer) relacija neodređenosti za dve nezamenljive promenljive opisuje dve različite, ali srodne situacije: daje iskaz o standardnim ***odstupanjima odvojenih*** merenja u ***više*** identičnih sistema; ali opisuje i ***preciznost zajedničkog*** merenja za ***pojedinačni*** sistem. U tekstu koji sledi mi ćemo se baviti samo sa drugom situacijom.

Da bi časovnik bio od koristi, potrebno je da poznajemo i vreme i energiju svake kazaljke. U suprotnom to nebi bio uređaj za beleženje. Još opštije, časovnik mora da bude klasičan sistem. Potrebno je da da kombinujemo poznavanje nezamenljivih promenljivih za svaki pokretan deo časovnika. Usredsredimo se na sastavni deo sa najvećim vremenom neodređenosti Δt. Očigledno je da najmanji vremenski iterval δt koji može da bude izmeren pomoću časovnika uvek je veći od vremena neodređenosti Δt za većinu "nesigurnih" sastavnih delova. Zato imamo

$$\delta t \geq \Delta t \geq \frac{\hbar}{\Delta E} \qquad (75)$$

gde je ΔE energija neodređenosti za pokretni sastavni deo, a isto tako ΔE mora da bude manje od ukupne energije $E = c^2 m$ samog sastavnog dela.[2] Osim toga, časovnik obezbeđuje informaciju, pa signal mora da bude sposoban da ga napusti. Prema tome, časovnik ne sme da bude crna rupa: njegova masa mora da bude manja mase crne rupe njegove veličine, to jest $m \leq c^2 l/G$, gde je l veličina časovnika (zanemarujući činilac reda jedinice). Najzad, za osetljiva merenja intervala vremena δt veličina l časovnika mora da bude manja od $c\delta t$, pošto u suprotnom različiti sastavni delovi časovnika nebi mogli usaglašeno da rade kako bi dali isti prikaz vremena.[3] Ako sve ove uslove kombinujemo, dobijamo

---

[1] Mojsije Mamonid (*Moše Ben Majmon* na hebrejskom, *Musa ben Mejmun* na arapskom, 1135. Cordoba – 1204. Egypt) bio je lekar, filozof i uticajam teolog.

[2] U fizičkom smislu ovaj uslov znači da budemo sigurni da postoji samo jedan časovnik; ako bi bilo $\Delta E > E$, bilo bi nemoguće napraviti razliku između pojedinčnog časovnika i para časovnik-antičasovnik stvorenog iz vakuuma, ili sastavnih delova zajedno sa dva takva para, i tako dalje.

[3] Zabavno je da se ispita kako bi časovnik veći od $c\delta t$ prestao da radi usled gubitka krutosti svojih delova (***Izazov 33s***).

$$\delta t \geq \frac{\hbar g}{c^5 \delta t} \tag{76}$$

ili

$$\delta t \geq \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}} = t_{\mathrm{Pl}} \tag{77}$$

Ukratko, iz tri prosta svojstva svakog časovnika – naime da je to pojedinačni časovnik, da možemo da očitavamo njegovo pokazivanje i da on daje razumna očitavanja – zaključili smo da ***časovnik ne može da meri intervale vremena kraća od Plankovog vremena***. Primetimo da je ovaj dokaz nezavisan od prirode mehanizma časovnika. Bilo da časovnik radi na gravitacijski, električni, mehanički, pa čak i nuklearni način, primenjuje se ovo ograničenje.[1]

Do istog zaključka može da se dođe i na drugi način. (***Ref. 59***). Na primer, svaki časovnik koji je dovoljno mali da može da meri male intervale vremena, zbog relacije neodređenosti neizostavno ima izvesnu neodređenost energije. U međuvremenu, na osnovu opšte teorije relativnosti, svaka gustina energije izaziva izobličenje prostor-vremena, pa signali iz izobličene oblasti stižu sa izvesnim zakašnjenjem zbog tog izobličenja. (***Vol. II, stana 129***). Neodređenost energije izvora dovodi do neodređenosti u izobličenju, pa time i do neodređenosti kašnjenja. Izraz iz opšte teorije relativnosti za izobličenje vremenskog dela linijskog elementa usled mase m je $\delta t = mG/lc^3$. (***Ref. 49***). Iz relacije masa-energija vidimo da se širenje energije ΔE izaziva neodređenost za Δt u kašnjenju:

$$\Delta t = \frac{\Delta E\, G}{lc^5} \tag{78}$$

Ovo određuje preciznost časovnika. Osim toga, neodređenost energije časovnika utvrđena je relacijom neodređenosti za vreme i energiju $\Delta E \geq \hbar/\Delta t$, koja zauzvrat utvrđena tačnošću časovnika. Kombinacijom sveg ovog ponovo nalazimo relaciju $\delta t \geq t_{\mathrm{Pl}}$ za najmanje vreme koje može da se izmeri.

Naterani smo da zaključimo da ***u prirodi postoji mimimalni interval vremena***. Drugim rečima, ***u Plankovim razmerana pojam "trenutak vremena" nema ni teorijsku ni eksperimentalnu osnovu***. No, da nastavimo. Specijalna teorija relativnosti, kvantna mehanika i opšta teorija relativnosti sve one se oslanjaju na ideju da vreme može da bude određeno za sve tačke u datom referentnom sistemu. Međutim, dva časovnika udaljena na rastojanje l ne mogu da budu sinhronizovana uz proizvoljnu tačnost. Pošto rastojanje između dva časovnika ne može da se izmeri uz grešku manju od Plankove dužine l_{Pl}, a prenos signala je neophodan za sinhronizaciju, nije moguće sinhronizovati dva časovnika uz bolju preciznost od $l_{\mathrm{Pj}}/c = t_{\mathrm{Pl}}$, to jest Plankovim vremenom. Dakle, korišćenje pojedinačne ***koordinate vremena*** za ceo referentni sistem samo je približnost. ***Referentni sistemi u Plankovim razmerama nemaju pojedinačne koordinate vremena***.

Osim toga, pošto razlika vremena između događaja ne može da bude izmerena unutar Plankovog vremena, za dva događaja razmaknuta u vremenu za ovaj red veličine, nemoguće je da se kaže uz potpunu sigurnost koji od ta dva događaja predhodi drugom. (***Ref. 60***). Ali ako događaji ne mogu da se poređaju, tada je i sam pojam vremena, koji je uveden u fiziku da bi se opisali redosledi, nema smisla u Plankovim razmerama. Drugim rečima, posle odbacivanja ideje i zajedničkoj koordinati vremena za ceo referentni sistem, prinuđeni smo da odbacimo i ideju o vremenu kao pojedinačnu "tačku". ***Pojam "tačno vreme" u Plankovim razmerama gubi svoj smisao***.

[1] Ovde je suština gravitacija. Iznet dokaz se razlikuje od dobro poznatog proučavanja ograničenja časovnika i njegovog merenja vremena (***Ref. 55***) i (***Ref. 56***) usled njegove mase, kojeg su objavili Sleker (Salecker) i Vigner (Wigner), a za pedagoški oblik obradio Cimerman (Zimmerman). U našem slučaju obuhvaćene su i kvantna mehanika i gravitacija, pa je prema tome nađeno drugaćije, niže i osnovnije ograničenje. Isto tako otkriće zračenja crne rupe ne menja dokaz: bez obzira na zračenje crne rupe, uređaji za merenje ne mogu da postoje unutar crne rupe. (***Ref. 57***) i (***Ref. 58***)

OPRAŠTANJE OD TAČAKA U PROSTORU

Naše najveće pretvaranjeje izgrađeno ne da sakrijemo zlo i ružno u nama, već našu prazninu. Najteže je da se sakrije nešto što nije tu.

Erik Hofer (Eric Hoffer)[1], *The Passionate State of Mind*

Na sličan način možemo da zaključimo da je nemoguće napraviti lenjir za merenje ili bilo koje dugi uređaj za merenje dužine koji bi davao mogućnost da se mere dužine kraće od Plankove dužine. (***Ref. 23***). Očigledno, to možemo već da zaključimo iz $l_{Pl} = ct_{Pl}$, ali nezavisan dokaz takođe je moguć.

Za bilo kakvo merenje dužine neophodno je spajanje merenja položaja i količine kretanja. Najjednostavniji način da se izmeri udaljenost između dve tačke je da se na oba položaja postavi neki objekt koji miruje. Zatim, minimalna dužina δl koja može da se izmeri mora da bude veća od neodređenosti položaja dva objekta. Iz relacije neodređenosti znamo da ne može da bude određen položaj objekta uz preciznost veću od Δl koja je data sa $\Delta l \Delta p = \hbar$, gde je Δp neodređenost količine kretanja. Zahtev da na oba kraja bude samo po jedan objekt (da bi se izbeglo stvaranje parova iz vakuuma) znači da je $\Delta p < mc$; svi zajedno, ovi zahtevi daju

$$\delta l \geq \Delta l \geq \frac{\hbar}{mc} \tag{79}$$

Osim toga, merenje ne može da se izvrši ako signali ne mogu da napuste objekte, stoga oni ne mogu da budu crne rupe. Prema tome, njihove mase moraju da budu dovoljno male za njihov Švarcšildov poluprečnik $r_S = 2Gm/c^2$ da bi bile manje od rastojanja δl koje ih razdvaja. Ponovo izbacivanjem činioca 2, dobijamo

$$\delta l \geq \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} = l_{Pl} \tag{80}$$

Merenje dužina ograničena su Plankovom dužinom.

Drugi način da se odredi ovo ograničenje vraća ulogu opšte teorije relativnosti i kvantne teorije. Da bi se izmerilo rastojanje između dva objekta, moramo da lokalizujemo prvi objekt u odnosu na drugi unutar izvesnog intervala Δx. Odgovarajuća neodređenost energije daje $\Delta E = c\left(c^2 m^2 + (\Delta p)^2\right)^{1/2} \geq c\hbar/\Delta x$. Međutim, opšta teorija relativnosti pokazuje da mala zapremina ispunjena energijom menja zakrivljenost prostor-vremena (***Ref. 42*** i ***Ref. 49***), pa se time menja metrika prostora u okruženju. (***Ref. 23***). Za dobijenu promenu udaljenosti Δl, upoređenu sa praznim prostorom, nalazimo izraz $\Delta l \approx G\Delta E/c^4$. (***Ref. 61***). Ukratko, ako prvu česticu lokalizujemo u prostoru uz tačnost Δx, udaljenost do druge čestice je poznata samo uz preciznost Δl. (***Ref. 62*** i ***Ref. 63***). Minimalna dužina δl koja može da se izmeri očigledno je veća od bilo kojeg od ovih subjekata; stavljajući izraz za ΔE, ponovo nalazimo da je najmanja merljiva dužina δl određena Plankovom dužinom. (***Ref. 25***).

Primećujemo da svako merenje dužine zahteva da se spoje merenja položaja i količine kretanja. To je posebno očigledno ako objektu približimo lenjir, međutim, to je ekvivalentno tačno i za svako merenje dužine.

Primećujemo da je Plankova dužina, najkraća moguća dužina. Ne može da postoji nijedno osmatranje kvantno-mehaničkih efekata za situaciju u kojoj je odgovarajuća DeBroljijeva ili Komptonova talasna dužina manja od Plankove dužine. U sudaruima proton-proton opaženo je i stvaranje parova i efekti interferencije objekata. Nasuprot tome, Plankova ograničenja podrazumevaju da u svakodnevnom životu, kao što su sudari automobil-automobil, ne možemo da opažamo stvaranje parova embrion-antiembrion i kvantne efekte interferencije.

Drugi način da ubedimo sebe da tačka nema nikakav smisao je da posmatramo da je tačka subjekt sa zapreminom koja nestaje; međutim, moguća minimalna zapremina u prirodi je Plankova zapremina $V_{Pl} = l_{Pl}^3$.

[1] Erik Hofer (Eric Hoffer, 1902. New York City – 1983. San Francisco), filozof.

Zaključujemo da Plankove jedinice ne samo da daju ***prirodne*** jedinice; one daju takođe – uz činioc reda jedan – ***granične*** vrednosti za intervale prostora i vremena.

Ukratko, iz dva prosta svojstva, zajednička za sve uređaje merenja dužine, naime da su oni diskretni i da mogu da se očitavaju, dolazimo do zaključka da ***ne mogu da se mere dužine manje od Plankove dužine***. Bilo koji postupak da se koristi, bilo lenjir ili merenje proteklog vremena, ne možemo da premašimo ovo osnovno ograničenje. Ono sledi pošto ***pojam "tačka u prostoru" nema eksperimentalnu osnovu***.

Ograničenje merenja dužine podrazumeva da ne može da se govori o kontinualnom prostoru, osim u približnom smislu. Kao rezultat nepostojanja preciznosti merenja u Plankovim razmerama, pojmovi prostorne uređenosti, invarijanti prenosa, izotropnosti vakuuma i opštim koordinatnim sistemima nemaju eksperimentalnu osnovu.

UOPŠTAVANJE RELACIJE NEODREĐENOSTI

Ograničenja vrednosti za dužinu i merenje vremena često se izražavaju takozvanom ***uopštenom relacijom neodređenosti*** (***Ref. 23***)

$$\Delta p \Delta x \geq \frac{\hbar}{2} + f \frac{G}{c^3} (\Delta p)^2 \tag{81}$$

ili

$$\Delta p \Delta x \geq \frac{\hbar}{2} + f \frac{l_{\mathrm{Pl}}^2}{\hbar} (\Delta p)^2 \tag{82}$$

gde je f brojni činilac reda jedinice. Sličan izraz važi za relaciju neodređenosti vreme-energija. Prvi član na desnoj strani je uobičajena kvantno-mehanička neodređenost. Drugi član je zanemarljiv za svakodnevne vrednosti energije, i on ima značaj jedino u blizini Plankovih energija; to je zbog promena u prostor-vremenu izazvanih gravitacijim pri ovim velikim energijama. (***Izazov 34e***). Treba da ste sposobni da pokažete da princip uopštavanja (81) podrazumeva da Δx ne može nikada da bude manje od $f^{1/2} l_{\mathrm{Pl}}$.

Uoštena relacija neodređenosti izvedena je na tačno isti način na koji je Hajzenberg izveo orginalnu relaciju neodređenosti $\Delta p \Delta x \geq \hbar/2$, naime proučavajući rasipanje svetlosti objekta ispod mikroskopa. (***Ref. 23***). Pažljiva ponovljena procena procesa, uzimajući u obzir ovog puta gravitaciju, dala je jednakost (81). (***Ref. 64*** i ***Ref. 65***). Iz tog razloga svi opisi koji objedinjuju kvantnu mehaniku moraju da daju ovu relaciju, i zaista, svi pristupi to i čine. (***Ref. 66***), (***Ref. 67***), (***Ref. 68***)

OPRAŠTANJE OD NEPREKIDNOSTI PROSTOR-VREMENA

Ich betrachte es als durchausmöglich, dass die Physik nicht auf dem Feldbegriff begründet werden kann, d.h. auf kontinuierlichen Gebilden. Dann bleibt von meinem ganzen Luftschloss inklusive Gravitationstheorie nichts bestehen.[1]

Albert Ajnštajn (Albert Einstein), 1954, u pismu za Michele Besso.

Sećamo se da kvantna mehanika počinje saznanjem da klasičan pojam rada čini da rad vrednosti manje od $\hbar/2$ gubi smisao; slično tome, jedinstvene teorije počinju saznanjem da klasični pojmovi vremena i dužine gube smisao ispod Plankovih razmera. Međutim, opis prirode iz 20. veka stvarno sadrži takve male vrednosti: on uvodi intervale manje od najmanjih merljivih. Prema tome, ***opis prostor-vremena kao neprekidnog mora da se napusti*** u korist mnogo pogodnijeg opisa.

Minimalna razdaljina dužine, minimalni interval vremena i ekvivalentna nova uopštena relacija neodre-đenosti koja se pojavljuje u Plankovim razmerama, pokazuje da prostor, vreme, a posebno prostor-vreme nisu dobro opisani kao neprekidni. (***Ref. 69***). Stavljajući $c\Delta p \geq \Delta E \geq \hbar/\Delta t$ u jednakost (81), dobijamo

[1] "Smatram da je sasvim moguće da se fizika ne može zasnivati na pojmu polja, to jest. na kontinualnim strukturama. U tom slučaju, ništa ne ostaje od mojih kula u vazduhu, uključujući i teoriju gravitacije."

$$\Delta x \Delta t \geq \frac{\hbar G}{c^4} = l_{\mathrm{Pl}} t_{\mathrm{Pl}} \tag{83}$$

što naravno nema svoj par u standardnoj kvantoj mehanici. To pokazuje da takođe ***ne postoje događaji*** prostor-vremena. Pojam nekog "događaja", kombinacije "tačke u prostoru" i "trenutka vremena" gubi svoj smisao za opis prirode u Plankovim razmerama..

Zanimljivo, stav da se neprekidnost mora da napusti star je skoro sto godina. Već je 1917. godine Albert Ajnštajn napisao u pismu Verneru Dalenbahu (Werner Dällenbach) (***Ref. 70***):

> *Wenn die molekulare Auffassung der Materie die richtige (zweckmässige) ist, d.h. wenn ein Teil Welt durch eine endliche Zahl bewegter Punkte darzustellen ist, so enthalt das Kontinuum der eutigen Theorie* ***zu viel*** *Mannigfaltigkeit der Möglichkeiten. Auch ich glaube, daß dieses zu viel daran schuld ist, daß unsere heutige Mittel der Beschreibung an der Quantentheorie scheitern. Die Frage scheint mir, wie man uber ein Diskontinuum Aussagen formulieren kann, ohne ein Kontinuum (Raum-Zeit) zu Hilfe zu nehmen; letzteres ware als eine im Wesen des Problems nicht gerechtfertigte zusätzliche Konstruktion, der nichts "Reales" entspricht, aus der Theorie zu verbannen. Dazu fehlt uns aber leider noch die mathematische Form. Wie viel habe ich mich in diesem Sinne schon geplagt!*
>
> *Allerdings sehe ich auch hier prinzipielle Schwierigkeiten. Die Elektronen (als Punkte) wären in einem solchen System letzte Gegebenheiten (Bausteine). Gibt es überhaupt letzte Bausteine? Warum sind diese alle von gleicher Grösse? Ist es befriedigend zu sagen: Gott hat sie in seiner Weisheit alle gleich gross gemacht, jedes wie jedes andere, weil er so wollte; er hätte sie auch, wenn es ihm gepasst hätte, verschieden machen konnen. Da ist man bei der Kontinuum-Auffassung besser dran, weil man nicht von Anfang an die Elementar-Bausteine angeben muss. Ferner die alte Frage vom Vakuum! Aber diese Bedenken müssen verblassen hinter der blendenden Tatsache: Das Kontinuum ist ausführlicher als die zu beschreibenden Dinge...*
>
> *Lieber Dällenbach! Was hilft alles Argumentieren, wenn man nicht bis zu einer befriedigenden Auffassung durchdringt; das aber ist verteufelt schwer. Es wird einen schweren Kampf kosten, bis man diesen Schritt, der uns da vorschwebt, wirklich gemacht haben wird. Also strengen Sie Ihr Gehirn an, vielleicht zwingen Sie es.*[1]

Druga polovina ovog teksta predložiće način da se pojavi izazov. Na ovom mestu, međutim, najpre ćemo da dovršimo istraživanje ograničenja fizike kontinuiteta. U fizici 20. veka tačke u prostor-vremenu idealizacija su događaja – ali ova idealizacija je nepodesna. Upotreba pojma "tačka" je slična upotrebi pojma "eter" pre jednog veka: nemoguće je ni da se izmeri, ni da se otkrije.

- Isto kao "eter", tako i "tačke" odvode razum na stranputicu.

---

[1] "*Ako je molekularni pogled na materiju pravi (pogodan), to jest. ako deo sveta bude predstavljen konačnim brojem pokretnih tačaka, tada neprekidnost važeće teorije sadrži previše mnogostrukih mogućnosti. Takođe verujem da je ovo "suviše sjajno" odgovorno za naše neuspešno sadašnje sredstvo opisivanja u kvantnoj teoriji. Izgleda mi pitanje kako može da se formuliše iskaz o diskontinuitetu bez upotrebe kontinuuma (prostor-vreme) kao pomoći; ovo bi trebalo da bude proterano iz teorije kao dodatna konstrukcija koja nije opravdana suštinom problema, što odgovara ničem "stvarnom". Ali, nažalost, i dalje nam nedostaje matematički oblik. Koliko sam se već mučno u tom smislu!*

Ipak, vidim i teškoće principa. Elektroni (kao tačke) bili bi u takvom sistemu poslednji uslovi (građevinski blokovi). Postoje li uopšte poslednji građevinski blokovi? Zašto su svi oni iste veličine? Da li je zadovoljavajuće reći da ih je Bog, u svojoj mudrosti, načinio sve jednakih veličina, svakog kao i svakog drugog, jer je tako hteo; mogao je, ako mu se svidi, da ih načini različitim. Sa gledišta kontinuiteta bolje je, jer ne morate zadavati osnovne građevinske blokove od početka. Zatim, staro pitanje vakuuma! Ali ova razmišljanja moraju da izblede naspram zaslijepljujuće činjenice: neprekidnost je detaljnija od stvari koje opisuje…

Dragi Dalenbah! Šta pomaže sva rasprava, ako se ne postignu zadovoljavajući pojmovi; ali to je đavolski teško. To će biti teška borba dok zaista ne načinimo taj korak koji nam je na umu. Stoga, stisnite vaš mozak, možda možete da ga primorate."

Uporedite ovo pismo sa onim što napisao Ajnštajn skoro pre dvadeset i skoro četrdeset godina kasnije. (***Strana 70***).

Svi paradoksi su posledica beskonačne deljivosti prostora i vremena, kao što je Zenonov dokaz da je nemoguće raspoznavanje kretanja od mirovanja, i paradoks Banah-Tarski, koji se sada ne navode. Možemo odmah da ih odbacimo zbog njihove netačne predpostavke u vezi prirode prostora i vremena.

Posledice Plankovih ograničenja u merenjima vremena i prostora mogu da se izraze i na drugi način; često se kaže da za date bilo koje dve tačke u prostoru, ili za bilo koja dva trenutka vremena, postoji između njih i treća tačka odnosno treći trenutak. Fizičari ovo svojstvo površno nazivaju neprekidnost, dok ga matematičari nazivaju gustina. Međutim, u Plankovim razmerama ovo svojstvo nije održivo, pošto ne postoje intervali manji od Plankovog vremena. Prema tome, tačke i trenuci nisu gusti i

- Između dve tačke ne postoji uvek i treća.

Ova posledica ponovo znači da ***prostor i vreme nisu neprekidni***. Naravno, u većim razmerama oni su neprekidni – samo približno, na isti način kao što komad gume i tečnost izgledaju neprekidni u svakodnevnim razmerama, iako to nisu u malim razmerama. Međutim, u prirodi prostor, vreme i prostor-vreme nisu neprekidni aspekti.

Međutim, sada dolazi još. Samo postojanje minimalne dužine u suprotnosti je sa specijalnom teorijom relativnosti, u kojoj je pokazano da dužina podleže Lorencovom skupljanju kada se menja referentni sistem. Postoji samo jedan zaključak: specijalna teorija relativnosti (i opšta teorija relativnosti) ne mogu da budu tačne na veoma malim rastojanjima. Prema tome,

- Prostor-vreme nije Lorencova invarijanta (niti invarijanta difeomorfizma) u Plankovim razmerama.

Sve simetrije koje su u osnovama specijalne i opšte teorije relativnosti važe samo približno u Plankovim razmerama.

Nepreciznost u merenjima podrazumeva da veoma poznati pojmovi koji se koriste za opisianje prostornih odnosa postaju beskorisni. Na primer, pojam ***metrike*** gubi svoju upotrebljivost u Plankovim razmerana, pošto rastojanja ne mogu da se izmere precizno. Tako je nemoguće da se kaže da li je prostor ravan ili zakrivljen Nemogućnost da se tačno izmeri dužina ekvivalentna je kolebanju zakrivljenosti, a sa tim i gravitacije. (***Ref. 23*** i ***Ref. 71***).

Ukratko, prostor i prostor-vreme nisu glatki u Plankovim razmerama. Ovaj zaključak ima značajne posledice. Na primer, zaključak podrazumeva da izvesna matematička rešenja koja se nalaze u knjigama o opštoj teoriji relativnosti, kao što su Edington-Finkelštajn (Eddington-Finkelstein) koordinate i Kruskal-Sekereš (Kruskal-Szekeres) koordinate, koje tvrde da prostor-vreme odlazi ***iza*** horizonta crne rupe, zasnivaju se na ideji da je postor-vreme posvuda glatko. Međutim, kvantna fizika pokazuje da da prostor-vreme nije glatko na horizontu, već da se tamo divlje koleba. Ukratko, kvantna fizika potvrđuje ono što znamo iz zdravog razuma, iza horizonta ništa ne može da se osmotri, i zato tamo nema ničeg.

OPRAŠTANJE OD DIMENZIONALNOSTI

Čak ni broj dimenzija nema smisla u Plankovim razmerama. Podsetimo se kako smo taj broj odredili eksperimentlno. Jedan mogući način je da se odredi koliko možemo da odaberemo u prostoru tačaka takvih da su sva rastojanja između nih jednaka. Ukoliko možemo da nađemo najviše n takvih tačaka, prostor ima $n - 1$ dimenziju. Međutim ako nije moguće u Plankovim razmerama pouzdano merenje dužina, ne postoji način da se pouzdano odredi broj dimenzija prostora ovim postupkom.

Drugi način da se provere tri prostorne dimenzije je da se napravi čvor na pertlama cipela i da se krajevi pertle zalepe jedan uz drugi: pošto ostaju vezane, znamo da prostor ima tri dimenzije, jer postoji matematička teorema da u prostoru sa više ili sa manje od tri dimenzije ne mogu da postoje čvorovi. I opet, u Plaknovim razmerama ne možemo da kažemo da li je nit vezana u ćvor ili nije, pošto ograničenje merenja na ukrštanju čini da je nemoguće reći koja nit leži iznad druge.

Postoji još mnogo drugih postupaka da se odredi broj dimenzija prostora.[1] U svim slučajevima odrednica za dimenzionalnost zasniva se na preciznom određivanju pojma susedstva. U Plankovim razmerama,

[1] Na primer, možemo odrediti broj dimenzija korušćenjem samo topoloških svojstava prostora. Ako prekrijemo topološki prostor takozvanim ***pokrivačem***, otvorenim skupom, postoje uvek tačke koje su elementi više skupova u pokrivaču. Naka p bude maksimalan broj skupova u kojima tačka može da bude element u datom pokrivaču. Najmanja vrednost p nad svim mogućim pokrivačima, umanjeno za jedan, daje broj dimenzija prostora.

Ustvari, fizički prostor nije mnogostrukost, različiti postupci za određivanje dimenzionalnosti mogu da daju razlićite odgovore. U stvari, za linearne prostore bez normiranja, broj dimenzija ne može da se odredi na jedinstven način. Različite odrednice su takođe moguće (fraktalne dimenzije, Ljapunove dimenzije, itd.)

međutim, merenja dužina ne dozvoljavaju da se kaže da li je data tačka unutar ili izvan date oblasti. Ukratko, bilo koji postupak da primenimo, nepostojanje preciznih merenja dužina znači da ***u Plankovim razmetrama nije određena dimenzionalnost fizičkog prostora***.

OPRAŠTANJE OD MNOGOSTRUKOSTI PROSTOR-VREMENA

Razlog za probleme sa prostor-vremenom postaju najuočljiviji kada se setimo Euklidove dobro poznate odrednice: "Tačka je ono što nema delove." (***Ref. 72***). Kao što je Euklid dobro razumeo, fizička tačka, kao idealizacija položaja, ne može da bude određena bez nekih postupaka merenja. Matematička tačka, međutim, može da bude određena bez upućivanja na metriku. One su samo elementi skupa obično pod imenom "prostor". ("Merljivi" ili "metrički" prostor je skup tačaka opremljenih merom ili metrikom.)

U slučaju fizičkog prostor-vremena pojmovi merenje i metrika joj šu osnovniji no oni kod tačke. Zabuna između fizičke i matematičke tačke iskrsava iz greške u razlikovanju matematičke metrike u odnosu na merenje dužine u fizici.[1]

Verovatno najlepši način da se ukaže na ovu tačku je teorema Banah-Tarski (***Vol. I, strana 50***), koja jasno pokazuje ograničenje pojma zapremina. (***Ref. 73***). Teorema počinje iskazom da lopta sastavljena od matematičkih tačaka može da se iseče na pet delova na takav način da delovi uzeti zajedno mogu da obrazuju dve lopte, svaku iste zapremine kao početna lopta. Međutim, neophodno "sečenje" je beskonačno zakrivljeno i detaljno: delovi su nepredvidivo nepovezani. Za fizičku materiju kao što je zlato, na nesreću – ili srečom – postojanje minimalne dužine, naime rastojanje atoma, onemogućava da se izvrše takva sečenja. Za vakuum se zagonetka ponovo javlja. Na primer, energija kolebanja nulte tačke određena je gustinom pomnoženom sa zapreminom; prema teoremi Banah-Tarski sadržaj energije nulte tačke pojedinačne lopte trebalo bi da bude jednak energijama nultih tačaka dve slične lopte od kojih svaka ima istu zapreminu kao i početna lopta. Paradoks je rešen Plankovom dužinom koja predviđa osnovnu razmeru dužina čak i za vakuum, pa time čini da je nemoguće beskonačno složeno sečenje. Prema tome, pojam zapremine jedino je dobro određen u Plankovim razmerama ako se uvede minimalna dužina.

Ukratko:

- Fizički prostor-vreme ne može da bude skup matematičkih tačaka.

Međutim, postoji još iznenajenja. Pošto je u Plankovim razmerama narušen i vremenski i prostorni poredak, ne postoji način da se kaže da li je rastojanje između bliskih oblasti prostor-vremena prostorno ili vremensko.

- U Plankovim razmerama ne može da se napravi razlika između vremena i prostora.

Osim toga, ne možemo da odredimo da li je topologija prostor-vremena ustaljena, kao što to podrazumeva opšta teorija relativnosti. Pomenuta promena topologije je potrebna da bi reakcija čestica postala moguća. Na taj način je rešena i druga protivrečnost između opšte teorije relativnosti i kvantne teorije.

Kao zaključak, u Plankovim razmerama prostor-vreme nije neprekidno, nije uređeno, nije obdareno metrikom, nema četiri dimenzije i nije sastavljeno od tačaka. Ono ne zadovoljava nijedno određeno svojstvo mnogostrukosti.[2] Zaključujemo da ***pojam mnogostrukost prostor-vremena nije opravdan u Plankovim razmerama***. Ovo je dubok rezultat. Iako i opšta teorija relativnosti i kvantna mehanika koriste neprekidno prostor-vreme, kombinovana teorija to ne čini.

---

[1] Gde netačna ideja o kontunualnom prosor-vremenu ima svoje korene? U svakodnevnom životu, a isto tako i u fizici, prostor-vreme je knjigovodstveni pojam uveden radi opisa opažanja. Njegova svojstva su izdvojene iz svojstava opažanja. Pošto opažanja mogu da se sabiraju i množe, slično brojevima, mi smo zaključili da ona mogu da uzimaju kontinualne vrednosti, a posebno, proizvoljno male vrednosti. Tada je moguće da se odrede tačke kao skupovi tačaka. Posebna oblast matematike, topologija, pokazuje kako da se počne od skupa tačaka i konstruisati, uz pomoć relacija susedstva i svojstava razdvajanja, prvo ***topološki prostor,*** a zatim, uz pomoć metrike, ***metrički prostor***. Uz podesne relacije kompaktnosti i povezanosti može da se konstruiše ***mnogostrukost***, koju karakterišu njegove dimenzije, metrika i topologija.

[2] Mnogostrukost je nešto što izgleda ***lokalno*** kao Euklidov prostor. tačna odrednica može da se nađe u predhodnom delu knjige. (***Vol. V, strana 270***)

OPRAŠTANJE OD OPAŽANJA, SIMETRIJA I MERENJA

Ako prostor i vreme nisu neprekidni, nijedna veličina određena u odnosu na prostor ili vreme nije precizno određena. Brzina, ubrzanje, količina kretanja, energija i tako dalje, određeni su ispravno pod predpostavkom neprekidnosti. Ona važna alatka, jednakost evolucije, zasniva se na izvodima i ne može da se koristi ubuduće. Prema tome, jednakosti Šredingera i Diraka gube svoje osnove. U Plankovim razmerama gube svoje značenje pojmovi kao što su "izvod", "bez rasipanja" i "bez izvora".

Sva opažanja u fizici određena su korišćenjem merenja dužine i vremena. Svaka fizička jedinica je proizvod jedinica dužine i vremena (i mase) podignuto na neki stepen. (U sistemu SI jedinica električne veličine imaju drugu bazu veličine, amper, ali dokaz je još uvek održiv: amper je određen pojmom sile, koja se meri korišćenjem tri osnovne jedinice, dužine, vremena i mase.) Pošto vreme i dužina nisu kontinualni, ***u Plankovim razmerama opažanja ne mogu da se opišu realnim brojevima***.

Osim toga, ako prostor i vreme nisu neprekidni, uobičajen izraz za polje posmatranja $A(t, x)$ nema smisla: moramo da nađemo pogodnili opis. ***U Plankovoj razmeri ne mogu da postoje fizička polja***. Kvantna mehanika se takođe odnosi i na mogućnost sabiranja talasnih funkcija; to se ponekad naziva ***načelo superpozicije***. Bez fizičkih polja i superpozicija celokupna kvantna mehanika se raspada.

Otsustvo realnih brojeva ima nekoliko posledica. Ono čini da nema smisla određivanje množenja opažanja realnim brojevima. Između ostalih posledica to znači da opažanja ne obrazuju linearnu algebru. ***U Plankovim razmerama opažanja nisu opisana operatorima***. Posebno, najvažnija opažanja su potencijali metrike. Pošto ona ne obrazuju algebru, simetrija merila ne važi u Plankovim razmerama. Čak i bezazlen izraz kao što je $[x_i, x_j] = 0$. za $x_i \neq x_j$, što su koreni kvantne teorije polja, postaju besmisleni u Plankovim razmerama. Pošto u ovim razmerama superpozicije ne mogu da se potkrepe eksperimentima, ne može da važi čak ni čuvena Viler-DeVit (Wheller-DeWitt) jednakost, često korišćena za opis kvantne gravitacije.

Slično tome, simetrija permutacije temelji se na predpostavci da možemo da razlikujemo dve tačke preko njihovih koordinata, a zatim da razmenimo čestice između ovih položaja. Kao što smo upravo videli, to nije moguće ako je rastojanje između te dve čestice veoma malo. zaključujemo da ***simetrija permutacije nema eksperimentalnu podršku u Plankovim razmerama***. Čak ni diskretne simetrije, kao što su konjugacija naboja, inversnost prostora i preokret vremena ne mogu da budu tačne u ovoj oblasti, pošto na postoji način da se tačno potvrde nerenjima. ***Simetrija CPT*** (charge, parity, time reversal) ***prestaje da važi u Plankovim razmerama***.

Najzad primećujemo da sve vrste relacija razmere prestaju da važe pri malim razmerama, zbog postojanja najmanje dužine. Kao rezultat je da ***grupa renormalizacije prestaje da važi u Plankovim razmerama***.

Kao zaključak, usled nemogućnosti pouzdanih merenja sve simetrije prestaju da važe u Plankovim razmerama. (Na primer, supersimetrija ne može da važi u Plankovim razmerama.) Svi ovi rezultati su dosledni: ako u Plankovim razmerama nema simetrija, onda nema ni opažanja, pošto opažanja u fizici predstavljaju grupe simetrije. Ustvari, ograničenje merenja vremena i dužine podrazumeva da ***pojam merenja nema nikakav značaj u Plankovim razmerama***.

MOŽE LI PROSTOR-VREME DA BUDE REŠETKA?

Hajde da odahnemo. Može li rešetka prostor-vremena da bude alternativa za neprekidnost? Diskretan model prostor-vremena bio je razmatran pre 1940-ih godina. (***Ref. 74***). U skorije vreme ideja da bi prostor-vreme moglo da se opiše kao rešetka (***Ref. 75***) – kao kristal – pre svega su istraživali David Finkelštajn (David Finkelstein) i Gerard't Huft (Gerard't Hooft). (***Ref. 76***). Ideja za prostor-vreme kao rešetku zasniva se na ideji da, ako postoji minimalno rastojanje, tada su sva rastojanja umnožak ovog minimuma. (***Ref. 77***).

Da bismo dobili izotropnu i homogenu situaciju za velike, svakodnevne razmere, struktura prostor-vremena ne može da bude periodična, već mora da bude ***nasumična***. Međutim, ne samo što mora da bude nasumična u prostoru, ona mora i da se ***koleba u vremenu***. (***Ref. 78***). Zapravo, svaka ustaljena struktura za prostor-vreme narušava rezultat da ne postoje dužine manje od Plankove dužine: kao rezultat Lorencovog skraćivanja, svaki posmatrač koji se kreće nalazio bi da su razmaci rešetke manji od Plankove vrednosti. Još gore, ideja o ustaljenoj rešetki protivrečna je opštoj teoriji relativnosti, posebno invarijanti difeomorfizma vakuuma.

Stoga ***prostor-vreme ne može da bude rešetka***. U prirodi postoji minimalno rastojanje; međutim, ne smemo da se nadamo da su sva ostala rastojanja prosto njihov umnožak. Kasnije ćemo da otkrijemo još dokaza za ovaj negativan zaključak.

Ali zapravo, više diskretnih modela prostora i vremena imaju mnogo veća ograničenja. Svaki takav model mora da odgovori na jednostavno pitanje: Gde je čestica u toku preskoka sa jedne tačke rešetke na drugu? Ovo jednostavno pitanje odbacuje najnaivnije modele prostor-vremena.

POGLED NA KVANTNU GEOMETRIJU

Obzirom da prostor-vreme nije skup tačaka ili događaja, ono mora da je nešta drugo. U ovom trenutku imamo tri nagoveštaja. Prvi je onaj da u smislu ispravke našeg opisa kretanja moramo da napustimo "tačke", a time ga napustimo lokalni opis prirode. I kvantna mehanika i opšta teorija relativnosti predpostavljaju da fraza "osmatranja u tački" ima precizno značenje. Pošto je nemoguće da se prostor opiše kao mnogostrukost, ovaj izraz nije više upotrebljiv. Objedinjenje opšte teorije relativnosti i kvantne fizike pimorava da se u Plankovim razmerama usvoji nelokalni opis prirode. Ovo je prvi nagoveštaj.

Postojanje minimalne dužine podrazumeva da ne postoji način da se fizički napravi razlika između položaja koji su međusobno bliski. Pokušali smo da zaključimo da se ne može razlikovati par položaja, čak i kada su na jedan metar udaljenosti, pošto na svakoj putanji koja spaja dve tačke ne može da se napravi razlika između dva položaja koji su međusobno u blizini. Problem je sličan pitanju o veličini oblaka ili atoma. Ako merimo gustinu vode ili gustinu elektrona, nalazimo na nekoj udaljenosti od centra oblaka ili atoma vrednosti koje ne nestaju; međutim, stvarna veličina ipak može da se odredi, jer je malo verovatno da se efekti prisustva oblaka ili atoma mogu videti na rastojanjima znatno većim od ove efektivne veličine. Slično tome, možemo da nagađamo da dve tačke u prostor-vremenu na makroskopskoj međusobnoj udaljenosti mogu da se razlikuju pošto verovatnoća da će one biti zamenjene brzo opada sa povećanjem rastojanja. Ukratko, to nas stoga vodi u opis prostor-vremena ***uz verovatnoću***. To je drugi nagoveštaj. Prostor-vreme postaje makroskopsko opažanje, ***statističko*** ili ***termodinamičko ograničenje*** nekog makroskopskog subjekta. To je naš drugi nagoveštaj.

Primećujemo da struktura prostor-vremena koja se koleba takođe izbegava problem ustaljenih struktura sa Lorencovom invarijantom. Ukratko, eksperimentalna zapažanja specijalne teorije relativnosti – Lorencova invarijanta, izotropija i homogenost – zajedno uz primedbu minimalne udaljenosti, ukazuju na opis prostor-vremena kao ***kolebljivog***. To je treći nagoveštaj,

Više nezavisnih istraživačkih napora u oblasti kvantne gravitacije potvrdili su da ***nelokalni*** i ***kolebljiv*** opis prostor-vremena u Plankovim razmerama rešavaju protivrečnosti između opšte teorije relativnosti i kvantne teorije. (***Ref. 26***). Ovo su naši pvi rezultati u kvantnoj geometriji. Da bi se pitanje razjasnilo, vraćamo se na pojam čestice.

OPRAŠTANJE OD TAČKASTE ČESTICE

U svakom primeru kretanja umešan je neki objekt. Jedno od najvažnijih otkrića u prirodnim naukama bilo je ono da su svi objekti sastavljeni od malih sastavnih delova, nazvanih ***elementarne čestice***. Kvantna teorija pokazuje da svi ***složeni***, neelementarni objekti, imaju konačnu veličinu koja ne nestaje. Zdrav razum kazuje: čestica je elementarna ako se ponaša kao tačkasta čestica. U ovom času ustanovljeno je da su elementarni samo leptoni (elektron, mion, tau i neutrini), kvarkovi, kvantovi zračenja elektromagnetnih, slabih i jakih nuklearnih interakcija (foton, W i Z bozon i gluon) i Higsov bozon. (***Vol. V, strana 195***). Protoni, atomi, molekuli, ljudi, galasije i tako dalje, sve su to složeni objekti, kao što to pokazuje ***Tabela 2***. (***Strana 52***).

Premda je odrednica "elementarna čestica" prema zdravom razumu načinjena kao tačkasta čestica, sve što nam je potrebno za dokaz koji sledi, odrednica nije precizna. Izgleda kao da je ostavljena otvorena mogućnost da bi budući eksperimenti mogli da pokažu da elektroni ili kvarkovi nisu elementarni. To nije tako! Ustvari, precizna odrednica je sledeća: svaka čestica je elementarna ako je ***manja od sopstvene Komptonove talasne dužine***. (***Vol. IV, strana 85***). Ako bi takva mala čestica bila složena, tada bi u njoj postojala lakša čestica, koja bi mogla da ima veću Komptonovu talasnu dužinu nego li složena čestica. To je nemoguće, jer veličina složene čestice mora da bude veća od Komptonovih talasnih dužina njenih sastavnih delova. (Alternativna mogućnost, to jest da su svi sastavni delovi teži od složenog objekta, ne dovodi do zadovoljavajućih fizičkih svojtava: na primer to dovodi do suštinski nestabilnih sastavnih delova.) (***Ref. 79***).

Veličine objekata, kao što su one date u ***Tabeli 2***, određene su kao dužine pri kojima su opažena razlikovanja od tačkastih osobina. Veličina *d* objekta određena je merenjem kako on rasipa zrak čestica sonde. Na primer, poluprečnik atomskog jezgra određen je prvi put u eksperimentu Raderforda

(Rutherford), koristeći rasipanje alfa čestica. U svakodnevnom životu, kada pogledamo predmet, koristimo rasipanje fotona. Uopšte, da bi se koristilo rasipanje, efektivna talasna dužina $\lambda = \hbar/mv$ sonde mora biti manja od veličine objekta d. Zato je potrebno $d > \lambda = \hbar/mv \geq \hbar/mc$. Osim toga, da bi eksperiment sa rasipanjem bio moguć, objekt ne sme da bude crna rupa, inače, kada bi bio, ona bi prosto progutala svaku dolazeću česticu. To znači da njihova masa m mora da bude manja od mase crne rupe iste veličine; drugim rečima, iz jednakosti (72) moramo imati $m < dc^2/G$. Kombinujući ovo sa predhodnim uslovom dobijamo relaciju za velićinu d nekog objekta

$$d > \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} = l_{\mathrm{Pl}} \tag{84}$$

Drugim rečima, ako je objekt manji od Plankove dužine ne postoji način za opažanje. Prema tome, u načelu ***ne postoji način da zaključimo iz opažanja da je čestica tačkasta***. Pojam "taćkasta čestica" uopšte nema smisla.

Naravno, postoji relacija između postojanja najmanje dužine za prazan prostor i postojanja najmanje dužine za objekte. Ako je pojam "tačka prostora" besmislen, tada je i pojam "tačkasta čestica" takođe besmislen. I ponovo, donja granica veličine čestice rezultat je kombinacije kvantne teorije i opšte teorije relativnosti.[1]

Minimalna veličina čestice može da se proveri. Svojstvo povezano sa veličinom je moment električnig dipola. To opisuje odstupanje njene raspodele naboja od loptastog oblika. Neke ***predpostavke*** iz standardnog modela elementarnih čestica daju nam vrednost gornje granice momenta dipola elektrona d_e (***Ref. 80***)

$$\frac{|d_e|}{e} < 10^{-39}\ \mathrm{m} \tag{85}$$

gde je e električni naboj elektrona. Ova predpostavljena vrednost je deset hiljada puta manja od Plankove dužine l_{Pl}. Pošto je Plankova dužina najmanja moguća dužina, izgleda kao da ovde imamo protivrečnost. (***Ref. 81***). Međutim, pažljivije skorašnje predpostavke iz standardnog modela izražavaju samo

$$\frac{|d_e|}{e} < 3 \cdot 10^{-23}\ \mathrm{m} \tag{86}$$

što nije protivrećno sa minimalnom dužinom. (***Ref. 82***) Eksperimentalno ograničenje u 2013. godini je

$$\frac{|d_e|}{e} < 8{,}7 \cdot 10^{-31}\ \mathrm{m} \tag{87}$$

U godinama koje predstoje eksperimentalno ograničenje prići će Plankovoj dužini. Ukratko, nisu poznati ni tačkasta čestica ni čestica manja od Plankove dužine.

OPRAŠTANJE OD OSOBINA ČESTICE

Plankove razmere imaju i druge čudne posledice. U kvantnoj teoriji polja razlika između virtualne čestice i realne čestice je da realna čestica "u ljusci" ispunjava uslov $E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$, dok su virtualne čestice "van ljuske". Usled osnovnih ograničenja za preciznost merenja, ***u Plankovim razmerama ne možemo da odredimo da li je čestica realna ili virtualna.***

To nije sve. Antimaterija može da se opiše kao materija koja se kreće unazad u vremenu. Pošto u Plankovim razmerama ne može da se odredi razlika između unapred i unazad, ***u Plankovim razmerama ne može da se napravi razlika između materije i antimaterije***.

Svaka čestica je okarakterisana njenim spinom. Spin opisuje dva svojstva čestice: njeno ponašanje pri obrtanju (a time, ako je čestica naelektrisana, njeno ponašanje u magnetnim poljima) i njeno ponašanje pri razmeni čestica. Talasna funkcija čestice sa spinom 1 ostaje invarijantna pri obrtanju za 2π, dok se onoj za čestice sa spinom 1/2 promenio znak. Slično tome, kombinovana talasna funkcija dve čestice sa spinom 1 ne menja znak pri razmeni čestica, dok se za dve čestice sa spinom 1/2 znak menja.

[1] Primećujemo da u kvantnoj teoriji postojanje najmanje dužine za čestice nema nikakve veze sa nemogućnošću, da se lokaalizuje čestica unutar manje od njene Komptonove talasne dužine.

Vidimo neposredno da proučavanja obe transformacije nisu moguća u Plankovim razmerama. S obzirom na ograničenje u merenju položaja, položaj ose obrtanja ne može pouzdano da se odredi, pa postaje nemoguće da se razlikuje obrtanje od translacije. Slično tome, nepreciznost položaja onemogućava da se odrede precizno razdvojeni položaji u eksperimentima razmene; u Plankovim razmerama nemoguće je da se kaže da li se dogodila razmena čestica ili nije i da li je talasna funkcija promenila znak ili ne. Ukratko, ***u Plankovim razmerama spin ne može da se odredi ili izmeri, a ne može da se odrede ili izmere ponašanja ni fermiona ni bozona***. Ovo naročito podrazumeva da simetrije ne mogu da važe u Plankovim razmerama.

Usled ograničenja pri merenjima u Plankovim razmerama takođe ne može da se odredi ili izmeri prostorni paritet. (***Izazov 35e***).

Time smo pokazali da u Plankovim razmerama čestice ne mogu da budu u lokalnoj interakciji, da nisu tačkaste, da ne mogu da se razlikuju u odnosu na antičestice, da ne mogu da se razlikuju u odnosu na virtualne čestice, da nemaju određen spin i da nemaju određen prostorni paritet. Zaključujemo da ***čestice ne postoje u Plankovim razmerama***. Istražimo još preostali pojam: masu čestica.

OGRANIČENJE MASE ELEMENTARNIH ČESTICA

Veličina d bilo koje čestice mora prema odrednici da bude manja od njene sopstvene (umanjene) Komptonove talasne dužine $\hbar/mc$. Štaviše, veličina čestice uvek je veća od Plankove dužine: $d > l_{\mathrm{Pl}}$. Kombinujući ova dva zahteva i izbacivanjem veličine d, dobijamo ograničenje za masu m bilo koje elementarne čestice, naime

$$m < \frac{\hbar}{c l_{\mathrm{Pl}}} = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} = m_{\mathrm{Pl}} = 2,2 \cdot 10^{-8}\ \mathrm{kg} = 1,2 \cdot 10^{19}\ \mathrm{GeV/c^2} \qquad (88)$$

Ograničena masa m_{Pl}, takozvana ***Plankova masa***, odgovara otprilike masi ljudskog embriona starog deset dana, ili ekvivalentno, masi male buve. Ukratko, ***masa bilo koje elementarne čestice mora da bude manja od Plankove mase***. Ovu činjenicu je Andrej Saharov zapazio kao "dobro poznatu" već 1968. godine[1] on je objasnio da su ovo zamišljene čestice, ponekad nazivane "maksimoni". (***Ref. 27***). I zaista, sve poznate elementarne čestice imaju masu manju od Plankove mase. (Ustvari, pitanje zbog čega je njihova masa mnogo manja od Plankove mase predstavlja jedno od najvažnijih pitanja fizike velikih energija. Vratićemo se na njega.)

Slika 3 Andrej Saharov (1921 – 1989)

Postoji i mnogo drugih načina a se dođe do ograničenja mase čestica. Na primer, da bismo izmerili masu rasipanjem – a to je jedini način za veoma male objekte – Komptonova talasna dužina rasipanja mora da bude veća od Švarcšildovog poluprečnika, inače će sonda biti progutana. Ubacivanjem odrednice za dve velićine i zanemarujući činilac 2, ponovo dobijamo ograničenje $m < m_{\mathrm{Pl}}$. Zapravo, ovo je opšte svojstvo opisa prirode da minimalni intervali prostor-vremena dovode do gornje granice mase elementarnih čestica. (***Ref. 83***).

[1] Andrej Dmitrevič Saharov, sovjetski nuklearni fizičar (1921. Moscow – 1989. Moscow). Jedan od najoštroumnijih mislioca u fizici, Saharov je između ostakog osmislio Tokamak, upravljao konstukcijama nuklearnih bombi, i objasnio nesimetričnost materija-antimaterija u prirodi. Kao i mnogi drugi, kasnije je vodio kampanju protiv nuklearnog naoružanja, što je uzrokovalo njegovo hapšenje i izgnanstvo, zajedno sa njegovom suprugom Jelenom Boner. Dobitnik je Nobelove nagrade za fiziku 1975. godine.

OPRAŠTANJE OD ČESTICA SA MASOM I OD VAKUUMA BEZ MASE

Plankova masa podeljena sa Plankovom zapreminom, to jest Plankova gustina, data je sa

$$\rho_{\mathrm{Pl}} = \frac{c^5}{G^2\hbar} = 5{,}2\cdot 10^{96}\ \mathrm{kg/m^3} \tag{89}$$

a to je korisan pojam u ovome što sledi. Jedan od načina da se odredi (gravitacijska) masa M zatvorena u loptu veličine R, te približno zapremine R^3, je da se oko nje postavi probna čestica u orbitu na istom rastojanju R. Opšti zakon gravitacije daje tada za masu M izraz $M = Rv^2/G$, gde je v brzina obrtanja probne čestice. (***Izazov 36e***). Iz principa $v < c$, zaključujemo da je $M < c^2R/G$; pošto je Plankovo rastojanje minimalna vrednost za R, dobijamo (ponovo zanemaruući činioce reda jedinica) ograničenje za gustinu mase, naime

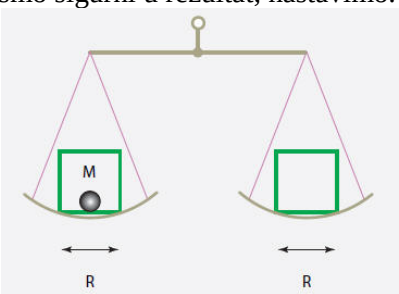
$$\rho < \rho_{\mathrm{Pl}} \tag{90}$$

Drugim rečima, ***Plankova gustina je najveća moguća vrednost gustine mase***. Zanimljiva stvar se događa kada pokušamo da nađemo grešku merenja ΔM mase u Plankovoj zapremini. Vratimo se na merenje mase obrtne sonde. Diferenciranjem relacije $GM = rv^2$ dobija se da je $G\Delta M = v^2\Delta r + 2vr\Delta v > 2vr\Delta v = 2GM\Delta v/v$. Za grešku Δv pri merenju brzine imamo relaciju neodređenosti $\Delta v \geq \hbar/m\Delta r + \hbar/MR \geq \hbar/MR$. Stavljanjen ovog u pedhodnu nejednakost i ponovo zanemarujući činilac 2, nalazimo da je greška ΔM merenja mase zatvorene u zapreminu veličine R, podleže uslovu

$$\Delta M \geq \frac{\hbar}{cR} \tag{91}$$

Primetimo da je u svakodnevnim situacijama ova greška izuzetno mala, dok su ostale greške, na primer, tehnička ograničenja ravnoteže, mnogo veća.

Da bi se ovaj rezultat proverio, istražićemo drugu situaciju. Koristimo relativističke iskaze, da bismo pokazali da rezultati ne zavise od detalja situacije ili približnosti. Zamislimo da imamo masu M u kutiji veličine R i da merimo kutiju pomoću vage. (Predpostavlja se ili da kutija nema masu ili da se njena masa oduzima na vagi. Greška mase je data sa $\Delta M = \Delta E/c^2$, pri čemu je ΔE usled neodređenosti kinetičke energije mase unutar kutije. Korišćenjem izraza $E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$, dobijamo da je $\Delta M \geq \Delta\rho/$, što se opet svodi na jednakost (91). Sada, pošto smo sigurni u rezultat, nastavimo.



Slika 4 Misaoni ekspeiment pokazuje da u Plankovim razmerama, ako je isuviše mala veličina kutije u koju je zatvorena masa, ne mogu da se razlikuju materija i vakuum

Iz jednakosti (91) zaključujemo da za kutiju Plankovih dimenzija, ***greška*** merenja mase je određena Plankovom masom. Ali iz onog iznetog u gornjem tekstu takođe znamo da masa koja se stavlja u takvu kutiju ne sme da bude veća od Plankove mase. Prema tome, za kutiju Plankovih dimenzija greška merenja mase veća je (ili bar jednaka) sa masom koja je sadržana u njoj: $\Delta M \geq M_{\mathrm{Pl}}$. Drugim rečima, ako na vagu postavimo dve kutije Plankove veličine, jednom praznom i jednom punom, kao što je prikazano na ***slici 4***, priroda neće moći da se odlući na koju stranu vaga će da se nagne! Zapazimo da ni ponavljana ni neprekidna merenja neće rešiti situaciju: vaga će menjati nagib nasumice, prosečno ostajući vodoravno.

Dokaz može da se drugačije izrazi na sledeći način. Najveća masa koju možemo da stavimo u kutiju veličine R je crna rupa sa Švarcšildovim poluprečnikom iste veličine; najmanja masa prisutna u takvoj kutiji – odgovara onom što nazivamo vakuum – je usled relacije neodređenosti i data je masom sa Komptonovom talasnom dužinom koja odgovara veličini kutije. Drugim rečima, unutar svake kutije veličine i imamo masu m, čija je granica data sa:

$$\underbrace{\frac{c^2R}{G}}_{\text{puna kutija}} \geq m \geq \underbrace{\frac{\hbar}{cR}}_{\text{prazna kutija}} \tag{92}$$

Vidimo neposredno da se ove dve granice podudaraju za veličine R reda Plankovih razmera; drugim rečima, u takvom slučaju ne može da se razlikuje puna kutija od prazne kutije.

Da bismo bili sigurni u ovaj čudan rezultat, proverićemo da li se isto događa ako umesto da merimo gravitacijsku masu, kao što smo upravo učinili, merimo inercijsku masu. Inercijska masa za male objekte određuje se tako što se ona dodirne: govoreći fizički, izvođenjem eksperimenta rasipanja. Da bi se odredila inercijska masa unutar oblasti R, sonda mora da ima manju talasnu dužinu od R i odgovarajuću veliku energiju. Velika energija znači da sonda takođe privlači čestice usled gravitacije. (Stoga nalazimo međurezultat da ***u Plankovim razmerama gravitacijska i inercijska masa ne mogu da se razlikuju***. Čak i eksperiment sa vagom, prikazan na ***slici 4***, to pokazuje: u Plankovim razmerana dve vrste masa uvek su neraskidivo povezane.) Osim toga, u svakom eksperimentu rasipanja, na primer u Komptonovom eksperimentu, merenje mase se vrši merenjem promene talasne dužine $\delta\lambda$ sonde pre i posle rasipanja. Neodređenost mase je data sa

$$\frac{\Delta M}{M} = \frac{\Delta\delta\lambda}{\delta\lambda} \tag{93}$$

Da bismo odredili masu u Plankovoj zapremini, sonda mora da ima talasnu dužinu Plankove dužine. Ali iz iznetog u predhodnom tekstu znamo da uvek postoji neodređenost minimalne talasne dužine, data Plankovom dužinom l_{Pl}. Drugim rečima, za Plankovu zapreminu greška talasne dužine – pa time i greška mase – uvek je toliko velika koliko i sama Plankova masa: $\Delta M \geq M_{\mathrm{Pl}}$. Ponovo je ovo ograničenje neposredna posledica ograničenja merenja dužine i prostora.

Ovaj rezultat ima začuđujuću posledicu. U ovim primerima, greška merenja ne zavisi od mase rasipanja: da li je to isto ili nije, počećemo sa situacijom u kojoj postoje čestice u orginalnoj zapremini. Na taj način smo pronašli da je u zapremini Plankove veličine nemoguće da se kaže postoji li nešta tamo ako se sondira pomoću zračenja!

MATERIJA I VAKUM SU NERASPOZNATLJIVI MEĐUSOBNO

Ove rezultate možemo da izrazimo i na drugi način. S jedne strane, ako merimo masu dela vakuuma veličine R, rezultat je uvek najmanje $\hbar/cR$: ne postoji moguć način da se u eksperimentu postigne savršen vakuum. S druge strane, ako merimo masu čestice, nalazimo da je rezultat nezavisan od veličine: u Plankovim razmerama to se približava Plankovoj masi za svaku vrstu čestice, bilo da je materijalna ili zračenje.

Da ilustrujemo drugačije, kada dve čestice priđu jedna drugoj na razmak reda Plankove dužine, neodređenost merenja dužine onemogućava da se kaže da li između dva objekta postoji nešto ili ništa. Ukratko, materija i vakuum razmenjivi su u Plankovim razmerama. Ovo je važan rezultat: pošto masa i prazan prostor ne mogu da se razlikuju, potvrđujemo da su oni načinjeni od istog "tkanja", od istih sastojaka. Ova ideja, već pedložena u predhodnom tekstu, sada je uobićajena za sve pokušaje da nađemo objedinjen opis prirode.

Ovaj pristup potkrepljuju pokušaji da se kvantna mehanika primeni u jako zakrivljenom prostor-vremenu, gde je nemoguće da se napravi razlika između vakuuma i čestica, kao što je pokazano u Fuling-Dejvis-Unru efektu. (***Ref. 84***). Ubrzavani posmatrač i bilo koji posmatrač u gravitacijskom polju, otkriće da ga čestice pogađaju, iako se nalazi u vakuumu. (***Vol. V, strana 89***). Efekt pokazuje da u zakrivljenom prostor-vremenu ne važi ideja o vakuumu kao prostoru bez čestica. Pošto u Plankovim razmerama nije moguće reći da li je prostor ravan ili nije, nemoguće je reći da li sadrži čestice ili ne.

Ukratko, dokazi dovode do istog zaključka: ***vakuum, to jest prazan prostor-vreme, u Plankovim razmerama ne može da se razlikuje od materije***. Drugi uobičajen način da se izrazi ovo stanje stvari je da se kaže da kada čestice sa Plankovom energijom putuju kroz prostor one će se rasipati usled kolebanja samog prostor-vremena, isto kao kod materije, a ta dva stanja ne mogu da se razlikuju. Ovaj iznenađujući rezultat odnosi se na jednostavnu činjenicu: bilo koju odrednicu za masu da koristimo, ona se uvek meri kombinacijom dužine i vremena. (Ovoje čak slučaj i za normalne vage za merenje: masa se meri preko otklona nekog dela uređaja.) ***Merenje mase je nemoguće u Plankovim razmerama***. Greška u takvim merenjima mase čini da nije moguće da se razlikuju vakuum i materija. Posebno, ***pojam čestice ne može da se primenjuje u Plankovim razmerama***.

ZANIMLJIVOSTI I ZABAVNI IZAZOVI O PLANKOVIM RAZMERAMA

Ne postoji ništa na svetu osim materije u kretanju, a materija u kretanju ne može da se pomera drugačije nego u prostoru i vremenu.

Lenjin, *Materialism and empiriocriticism.*

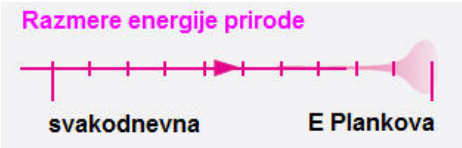
Kao i obično Lenjin nije u pravu. I to ne toliko pošto svet sadrži kretanje materije, kretanje zračenja, kretanje vakuuma i kretanje horizonta, što nije baš tačno ono što tvrdi Lenjin. Pre svega, u Plankovim razmerama nema materije, nema zračenja, nema horizinta, nema prostora i nema vremena. Ovi pojmovi se javljaju samo pri malim energijama. Ostatak naše pustolovine razjasnjava kako.

* * *

Posmatrači su načinjeni od materije. Posmatrači nisu načinjeni od zraćenja. Posmatrači nisu načinjeni od vakuuma. Posmatrači su zato pristrasni, pošto oni imaju određeno stanovište. Međutim, u Plankovim razmerama vakuum, zračenje i materija ne možemo da razlikujemo. Iz toga slede dve posledice: prva, samo u Plankovim razmerama bio bi opis oslobođen svake pristrasnosti u korist materije. Drugo, s druge strane, posmatrači uopšte ne postoje na Plankovoj energiji. Fizika je stoga moguća samo ispod Plankove energije.

* * *

Ako merenja postaju nemoguća u blizini Plankove energije, ne možemo čak ni da nacrtamo dijagram sa osom energije koja dostiže tu vrednost. Izlaz je prikazan na ***slici 5***. Energija elementarnih čestica ne može da dostigne vrednost Plankove energije.



Slika 5 Plankovi efekti čine da je osa energije približnost

* * *

Po standardima fizike čestica, Plankova energija je prilično velika. Predpostavimo da želimo za prenesemo ovu vrednost energije protonu koristeći ubrzivač čestica. Koliko mora da bude veliki ***Plankov akcelerator***? (***Izazov 37s***).

* * *

Prema standardima svakodnevnog života, Plankova energija je prilično mala. Mereno u litrima benzina, koliko goriva joj odgovara? (***Izazov 38s***).

* * *

Uobičajeni pojmovi materije i zračenja nisu primenljivi u Plankovim razmerama. Obično se predpostavlja da se materija i zračenje sastoje od elementarnih čestica u interakciji. Pojam elementarne čestice podrazumeva subjekt koji je diskretan, sličan tački, stvaran, a ne virtualan, da ima određenu masu i određen spin, da se razlikuje od antičestice i, pre svega, da se razlikuje od vakuuma, za koji se predpostavlja da ima nultu masu. Sva ova svojstva se gube u Plankovim razmerama. ***U Plankovim razmerama pojmovi "masa", "vakuum", "elementarna čestica", "zračenje" i "materija" nemaju nikakava smisao***.

* * *

Da li velike greške pri merenju mase podrazumevaju da bi u Plankovoj energiji masa mogla da bude negativna? (***Izazov 39s***).

* * *

Sada imamo novi odgovor na staro pitanje: zašto radije postoji nešta nego li ništa? u Plankovim razmerama ***ne postoji*** razlika uzmeđu nešta i ništa. Možemo zato iskreno da kažemo o sebi da smo načinjeni ni od čega.

* * *

Specijalna teorija relativnosti podrazumeva da ni dužina ni energija ne mogu da budu invarijantne. Pošto smo došli do zaključka da su Plankova energija i Plankova dužina invarijantne, čini se da da moraju postojati odstupanja od Lorencove invarijante pri velikim energijama. Kakvi efekti bi sledili? (***Izazov 40r***) Kojom vrstom eksperimenta bi moglo da se oni izmere? Ako imate predlog, objavite ga! Istraživano je nekoliko pokušaja. (***Ref. 85***). Kasnije ćemo rešiti ovu zagonetku, uz neke zanimljive uvide. (***Strana 211***).

* * *

Sama kvantna mehanika daje, preko Hajzenbergove relacije neodređenosti, donju granicu širenja merenja, ali, čudno inače, ne i njenu preciznost, to jest, ne u broju sigurnih cifara. (***Ref. 86***). Volfgang Jauh (Wolfgang Jauch) navodi jedan primer: konstante atomskih rešetaka poznate su uz mnogo veću preciznost nego li neodređenost položaja pojedinih atoma unutar kristala. (***Ref. 67***).

Ponekad se tvrdi da je moguća manja neodređenost merenja od Plankovih vrednosti za dovoljno veliki broj čestica. Možete li da pokažete zbog čega je ovo netačno, bar za prostor i vreme. (***Izazov 41s***).

* * *

Naravno, ideja da vakuum nije prazan nije nova. Pre više od dve hiljade godina, Aristotel se zalagao za ispunjen vakuum, premda su njegove tvrdnje bile netačne, posmatrano iz današnje perspektive. Isto tako u četrnaestom veku bilo je puno razmatranja da li je prazan prostor sastavljen od nevidljivih subjekata, ali je rasprava ponovo zamrla.

* * *

Čestice sa Plankovom energijom koje padnu u gravitaciono polje dobile bi energiju. Međum, Plankova energija je najveća energija u prirodi. Sta podrazumeva ova prividna protivrečnost? (***Izazov 42s***).

* * *

Jedan način da se uopšte ovde predstavljeni rezultati je da se predpostavi da je priroda ***simetrična u pogledu događaja*** na Plankovoj energiji, to jest simetrična pri zameni bilo koja dva događaja. (***Ref. 59***). Ova ideja, koju je razvio Fil Gibs (Phil Gibbs), daje dodatnu formulaciju za čudno ponašanje prirode na velikim razmerama.

* * *

Pošto u prirodi postoji minimalna dužina, takozvani ***singulariteti*** ne postoje. (***Vol. II, strana 212***). Ovo pitanje je razmatrano u debatama tokom decenija u dvadesetom veku i postalo nezanimljivo.

* * *

Pošto su masa i gustina energije ograničeni, svaki objekt konačne zapremine ima samo konačan broj stepena slobode. (***Vol. V, strana 110***). Izračunavanja entropije crnih rupa već su pokazala da su vrednosti entropija uvek konačne. Ovo podrazumeva da savršeno kupatilo ne postoji. Kupatila imaju važnu ulogu u termodinamici (koja zbog toga mora da se posmatra kao približnost), a isto tako u snimanju i mernim uređajima: kada uređaj meri, on prelazi iz neutralnog stanja u stanje u kojem pokazuje rezutat merenja. Da se nebi vratio u neutralno stanje, uređaj mora da bude povezan sa kupatilom. (***Ref. 87***). Bez kupatilla nebi postojala pouzdana merenja, pošto priroda postavlja ograničenja za svoju sposobnost skladištenja.

* * *

Ako vakuum i materija ne mogu da se razlikuju, ne možemo da napravimo razliku između predmeta i njegove okoline. (***Vol. I, strana 25***). Međutim, to je bila jedna od polaznih tačaka našeg putovanja. Neke zanimljive pustolovine još uvek nas očekuju!

* * *

Ranije smo videli da je karakterizacija prirode kao tvorevine od čestica i vakuuma stvara probleme kada su uljučene interakcije. S jedne strane, interakcije su razlikovanja između čestica u celosti, dok s druge strane, u saglasnosti sa kvantnom terorijom, interakcije su razmena čestica. (***Vol. III, strana 233***). Ova prividna protivrečnost može da se koristi da bi se pokazalo da je nešta ubrojano dva puta u uobičajenoj karakterizaciji prirode. Međutim, pošto su i materija i prostor-vreme načinjeni od istih sastojaka, protivrečnost je rešena.

* * *

Da li postoji najmanja moguća vrednost količine kretanja? (***Izazov 43d***). A najmanja greška količine kretanja?

* * *

Obzirom da vreme postaje približnost u Plankovim razmerama, možemo li još uvek da govorimo da je priroda ***deterministička***?

Vratimo se na osnove. Možemo da odredimo vreme, pošto promene u prirodi nisu nasumične, nego postepene. Kakva je situacija sada kada znamo da je vreme samo približnost? Da li su moguće promene koje nisu postepene? Da li je energija očuvana? Drugim rečima, da li u prirodi postoje iznenađenja?

Ispravno je da se kaže da vreme nije određeno u Plankovim razmerema, pa je zbog toga determinizam neodređen pojam, ali to još uvek nije zadovoljavajući odgovor. Šta se događa u "svakodnevnim" razmerama? Jedan od odgovora je da je u našim svakodnevnim razmerama verovatnoća iznenađenja toliko mala da je svet zaista efektivno deterministički. Drugim rečima, priroda nije stvarno deterministička, ali udaljavanje od determinizma nije merljivo, pošto svako merenje i opažanje, prema odrednici, podrazumeva deterministički svet. Odsustvo iznenađenja bilo bi usled ograničenja u prirodi ljudi – još preciznije, usled naših čula i mozga.

Možete li da zamislite drugačiju mogućnost? (***Izazov 44s***). Istina, u ovom trenutku nije moguće dokazati ovaj odgovor, premda će ostatak naše pustolovine to da omogući. (***Strana 302***). Moramo imati na umu sve mogućnosti, te tako zadržimo sposobnost da proveravamo odgovore.

* * *

Ako se materija i vakuum ne razlikuju, tada svaki od njih ima osobine onog dugog. Na primer, pošto je prostor-vreme proširen subjekt, materija i zračenje su takođe prošireni subjekti. Osim toga, pošto je prostor-vreme subjekt koji pri ispitivanju dospeva do granice, čestice moraju takođe to da čine. Ovo je naš prvi nagoveštaj za proširenje materije, a mi ćemo ovaj dokaz uskoro detaljnije da istražimo. (***Strana 95***)

* * *

Nemogućnost da se napravi razlika između materije i vakuuma podrazumeva nepostojanje informacija u Plankovim razmerama. Zauzvrat, to podrazumeva u Plankovim razmerama sostvenu osnovnu entropiju povezanu sa svakim delom svemira. Na ovu temu ćemo se vratiti uskoro, kada budemo razmatrali entropiju crnih rupa. (***Strana 217***).

* * *

Kada mogu materija i vakuum da se razlikuju? (***Izazov 45s***). Pri kojoj energiji? Ovo pitanje bi možda moglo da se uporedi sa sledećim pitanjem: Možemo li da napravimo razliku između tečnosti i gasa posmatrajući samo pojedinačni atom? Ne, već samo posmatranjem mnogo njih. Slično tome, ne možemo da napravimo razliku između materije i vakuuma posmatranjem u jednoj tački, već posmatranjem mnogih. Moramo uvek da razmišljamo o proseku. Međutim, čak ni prosek nije u potpunosti zadovoljavajući. Razlikovanje materije od vakuuma je kao razlikovanje oblaka od vedrog neba: ali kao ni oblaci, tako ni materija nema precizne granice.

* * *

Ako dimenzionalnost prostora nije određena u Plankovim razmerama, šta to znači za superstrune? (***Izazov 46e***).

* * *

Pošto vakuum, čestice i polja ne mogu da se raspoznaju u Plankovim razmerama, u tim razmerama takođe gubi se razlikovanje između stanja i stalnih, sopstvenih osobina fizičkih sistema. (***Vol. I, strana 27***). Ovo je jako strog iskaz: razlikovanje je polazna tačka našeg istraživanja kretanja; razlikovanje nam omogućava da prepoznamo sistem u odnosu na okolinu.

Drugim rečima, u Plankovim razmerama ne možemo da govorimo o kretanju. Ovo je takođe strog iskaz. Međutim nije neočekivan. Tražili smo poreklo kretnja, pa smo pripremljeni da se sretnemo i sa ovakvim teškoćama.

ZAJEDNIČKI SASTAVNI DELOVI

Es ist allerdings darauf hingewiesen worden, dass bereits die Einfuhrung eines raum-zeitlichen Kontinuums angesischts der molekularen Struktur allen Geschehens im Kleinen möglicherweise als naturwidrig anzusehen sei. Vielleicht weise der Erfolg von HeisenbergsMethode auf eine rein algebraische Methode der Naturbeschreibung, auf die Ausschaltung kontinuierlicher Funktionen aus der Physik hin. Dann aber muss auch auf die Verwendung des Raum-Zeit-Kontinuums prinzipiell verzichtet werden. Es ist nicht undenkbar, dass der menschliche Scharfsinn einst Methoden finden wird, welche die Beschreitung dieses Weges möglich

machen. Einstweilen aber erscheint dieses Projekt ahnlich dem Versuch, in einem luftleeren Raum zu atmen.[1]

Albert Ajnštajn, 1936., in *Physik und Realität*

Mogu se dati dobri razlozi zašto stvarnost uopšte ne može biti predstavljena kontinualnim poljem. Iz kvantnih fenomena izgleda da sa sigurnošću sledi da se konačni sistem sa konačnom energijom može u potpunosti da se opiše konačnim skupom brojeva (kvantnim brojevima). To izgleda da nije u skladu sa teorijum neprekidnosti, te mora da dovede do pokušaja da se pronađe čisto algebarska teorija za opis stvarnosti. Ali niko ne zna kako da dobije osnove za takvu teoriju

Albert Einstein, 1955, poslednja rečenica u *The Meaning of Relativity – Including the Relativistic Theory of the Non-Symmetric Field*, fifth edition. Ovo su bile takođe njegove poslednje objavljene reči.

U ovom brzom putovanju mi smo uništili sve eksperimentalne stubove kvantne teorije: superpoziciju talasnih funkcija, simetriju prostor-vremena, simetriju metrike, simettriju renormalizacije i simetriju permutacije. Isto tako smo uništili temelje specijalne i opšte teorije relativnosti, naime pojmove mnogostrukost, polja, čestice i masa. Čak smo videli da materija i vakuum ne mogu da se razlikuju.

Izgleda kao da smo izgubili svaki pojam koji smo koristili za opis kretanja, te time učinili da je njegov opis nemoguć. Izgleda kao da smo uništili naše obe "kule u vazduhu": opštu teoriju relativnosti i kvantnu teoriju. (***Strana 58***). I izgleda kao da pokušavamo da dišemo u prostoru bez vazduha. Da li je takvo pesimističko viđenje ispravno, ili možemo situaciju da spasemo?

Pre svega, pošto se materija i zračenje ne razlikuju od vakuuma, potraga za objedinjenjem u opisima elementarnih čestica ispravna je i neophodna. Ne postoji alternativa rušenju kula i produženja disanja.

Drugo, i posle rušenja kula, invarijante Plankovih ograničenja c, $\hbar$ i $c^4/4G$ i dalje ostaju kao temelji.

Treće, posle rušenja kula, pojavljuje se važan rezultat. Pošto pojmovi "masa", "vreme" i "prostor" ne mogu međusobno da se razlikuju, potreban nam je nov, pojedinačni subjekt ili pojam da bi se odredili i čestice i prostor-vreme. Ukratko, vakuum i čestice mora da su napravljeni od ***istih sastavnih delova***. Drugim rečima, nismo u prostoru bez vazduha i otkrili smo temelje koji su preostali posle rušenja kula u vazduhu. Pre no što pređemo na istraživanje ovih zajedničkih sastavnih delova, proverićemo šta smo zaključili do sada preko eksperimenata.

PREDVIĐANJA ZA EKSPERIMENTE

Trka se nastavlja i u eksperimentalnoj i u teorijskoj fizici: ko će biti prvi da predloži i ko će biti prvi da izvede eksperiment koji će da otkrije efekt kvantne gravitacije. (***Izazov 47r***). Evo nekoliko predloga.

U Plankovim razmerama prostor osciluje. Možda mislimo da bi oscilovanje prostora moglo da zamuti sliku udaljenih galaksija ili da uništi odnos faze između fotona. Međutim, nije opažena nikakva zamućenost i prva ispitivanja pokazuju da svetlost iz izuzetno udaljenih galaksija još uvek interferira. Precizna predviđanja o efektu pranja faze još uvek važi (***Ref. 88***); bez obzra na tačan ishod, efekt je isuviše mali da bi mogao da se meri.

Druga ideja je da se brzina svetlosti sa udaljenih bleskova svetosti meri na različitim učestanostima. Postoje prirodni izvori bleskova, pod nazivom eksplozije gama zraka, koji imaju izuzetno širok spektar, od

[1] "Međutim, istaknuto je da čak i uvođenje prostorno-vremenske neprekidnosti, povezane sa molekularnom strukturom svih događaja u malom obimu, moguće je smatrati suprotnim prirodi. Možda uspeh Hajzenbergovog metoda ukazuje na čisto algebarski metod opisivanja prirode, na eliminaciju nepreekidnih funkcija iz fizike. Ali onda, u principu, takođe treba izbegavati korišćenje neprekidnosti prostor-vremena. Nije nezamislivo da će ljudska genijalnost jednog dana naći metode koji će omogućiti hodanje ovom stazom. Međutim, za sada se čini da ovaj projekat pokušava da diše u vakuumu."

Pogledati takođe šta je Ajnštajn mislio dvadeset godina ranije. (***Strana 59***). Nova tačka je da on veruje da je neophodan algebarski opis. On ovu tačku ponavlja u narednom citatu.

100 GeV naniže do vidljive svetlosti n oko 1 eV. Ovi bleskovi često potiču sa kosmoloških udaljenosti *d*. Koristeći kratke eksplozije gama zraka, stoga je moguće da se proveri precizno da li kvantna priroda prostor-vremena utiče na rasipanje signala svetlosti kada oni putuju kroz svemir. (***Ref. 92***) i (***Ref. 91***). Kvantna gravitacija Plankovih razmera ***mogla*** bi da proizvede rasipanje. Otkrivanje rasipanja moglo bi da potvrdi da se Lorencova simetrija raspada u Plankovim razmerama.

Razlika u vremenu stizanja Δt između dva fotona sa energijama E_1 i E_2 određuje se se karakterističnom energijom

$$E_{\text{char}} = \frac{(E_1 - E_2)d}{c\Delta t} \tag{94}$$

Vrednost ove energije je je $1{,}4 \cdot 10^{19}$ GeV i preko 10^{22} GeV za najbolje merenje izvršeno do danas. (***Ref. 89*** i ***Ref.90***). To je između malo iznad Plankove energije i preko hiljadu puta više od Plankove energije. (***Ref. 90***). Međutim, uprkos ovoj velikoj vrednosti klasične energije, ***nije otkriveno rasipanje***: čak ni posle putovanja od deset hiljada miliona godina, sva svetlost stiže unutar jedne ili dve sekunde.

Sledeći kandidat za eksperiment je neposredno otkrivanje oscilacija rastojanja između tela. (***Ref. 92*** i ***Ref. 93***). Detektori gravitacijskih talasa osetljivi su na izuzetno male signale šuma u merenjima dužina. Trebalo bi da postoji signal šuma usled oscilacija rastojanja izazvanih Plankovom energijom. Predpostavlja se da bi neodređenost u merenju dužine *l* bila (***Ref. 94***)

$$\frac{\Delta l}{l} \geq \left(\frac{l_{\text{Pl}}}{l}\right)^{2/3} \tag{95}$$

Ovaj izraz je izveden prostom kombinacijom ograničenja merenja lenjirom iz kvantne teorije , uz zahtev da lenjir ne sme da bude crna rupa. (***Strana 56***). Potreban nivo osetljivosti detektora na šum možda će biti postignut kasnije u toku 21. veka. Takođe se predpostavlja da će šim proizveden efektom kvantne gravitacije dovesti do kvantne dekoherencije i oscilacija vakuuma koji mogu da se otkriju detektorom.. Međutim, još uvek nije nađen takav efekt.

Sledeći kandidat za eksperiment za efekte kvantne gravitacije je nestanak CPT simetrije pri velikim energijama. Posebno u slučaju raspada izvesnih elementarnih čestica, kao što su kaoni, preciznost merenja u eksperimentu približava se detekciji efekata Plankovih razmera. Međutim, još uvek nije nađen takav efekt.

Sledeća mogućnst je da efekti kvantne gravitacije mogu da promene energiju praga pri kojoj izvesne reakcije čestice postaju moguće. (***Ref. 96***). To bi moglo da bude da fotoni ili kosmički zraci sa izuzetno velikom energijom učine mogućim da se dokaže da je Lorencova invarijanta zaista prekinuta u Plankovim razmerama. Međutim, još uvek nije nađen takav efekt.

Takođe je predpostavljeno u oblasti atomske fizike da efekti kvantne gravitacije izazovu gravitacijski Štarkov efekt i gravitacijski Lambov pomeraj u atomskim prelascima. (***Ref. 95***). Međutim, još uvek nije nađen takav efekt.

Sledeći kandidat eksperimenta za merenje efekta kvantne gravitacije je otkrivanje gubitka CPT simetrije na višim energijama. Posebno u slučaju raspada izvesnih elementarnih čestica, kao što su neutralni kaoni, preciznost merenja u eksperimentu približava se otkrivanju efekata Plankove razmere. (***Ref. 92***). Međutim, do sada nije nađen nijedan takav efekt.

Druga mogućnost je da efekt kvantne gravitacije može da promeni energiju praga na kojem postaje moguća reakcija nekih čestica. (***Ref. 96***). Moguće je da će fotoni izuzetno visoke energije ili kosmički zraci omogućiti da se dokaže da je Lorencova invarijantnost zaista prekinuta na Plankovim razmerama. Međutim, do sada nije nađen nijedan takav efekt.

Ostali predlozi polaze iz prepoznavanja da granica merljivosti ili opažanja takođe postavlja granicu za ***preciznost*** merenja svakog opažanja. Ova granica nema značaja u svakodnevnom životu, ali je bitna kod Plankove energije. Jedan od predloga je da se traži minimalan šum pri merenjima dužine, to jest u detektorima gravitacijskih talasa. Međutim, još uvek nije nađen takav šum.

Kao zaključak, eksperimentalno otkrivanje efekata kvantne gravitacije ***možda*** bi bilo moguće, uprkos njene slabosti, u neko vreme tokom 21. veka. Uspešno predviđanje i otkrivanje takvih efekata bilo bi jedan od vrhunaca fizike, pošto bi to bio izazov uobičajenom opisu postora i vremena, čak veći no što je učinila

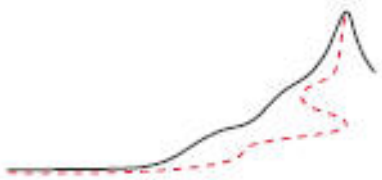
opšta teorija relativmosti. (***Ref. 97***). S druge strane, večina objedinjenih modela u fizici predviđaju odsustvo bilo kojeg efekta kvantne gravitacije.

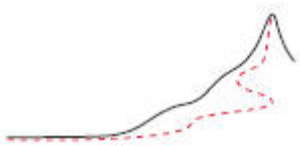
ZAKLJUČAK O ČESTICAMA I VAKUUMU

Kobinacija kvantne teorije i opšte teorije reletivnosti, dovodi nas do nekoliko važnih rezultata u opisu prirode:

- Vakuum i čestice su pomešani u Plankovim razmerama, jer ne postoji pouzdan način da se napravi razlika da li je oblast Plankovih veličina deo čestice ili prazan prostor. Materija, zračenje i vakuum ne mogu da se razlikuju u Plankovim razmerama. Na isti način prazan prostor i čestice sastavljeni su od ***oscilirajućih zajedničkih sastavnih delova***. (***Ref. 98***).
- Sastavni delovi vakuuma i čestica ***ne mogu biti tačke***. Ne postoji pouzdan način da se proveri da li tačke postoje, pošto je najmanje merljivo rastojanje u prirodi Plankova dužina.
- Čestice, vakuum i kontinualan prostor ***ne postoje*** u Plankovim razmerama. Oni nestaju u još nejasnoj mešavini Planlove razmere.
- Tri nezavisna Plankova ograničenja c, $\hbar$ i $c^4/4G$ ostaju da važe takođe i u oblasti gde su kombinovane kvantna teorija i opšta teorija relativnosti.

Svi ovi rezultati moraju da budu deo konačne teorije koju tražimo. Uopšteno govoreći, došli smo do istih zaključaka koje smo već našli i poglavlju o iskazima ograničenja. (***Strana 47***). Zato nastavljamo duž iste putanje koju smo ranije odredili: istražujemo svemir u celosti.





Poglavlje 5

KAKVA JE RAZLIKA IZMEĐU SVEMIRA I NIČEG

Die Grenze ist der eigentlich fruchtbare Ort der Erkenntnis.[1]

Paul Tilih (Paul Tillich), *Auf der Grenze*.

Ovo čudno pitanje tema je ove etape penjanja na planinu. U predhodnom odeljku istraživali smo prirodu u blizini Plankovih razmera. Ustvari, drugo ograničenje, naime opis kretanja u velikim, kosmološkim razmerama, isto toliko je začuđujuće. Kako budemo nastavljali, pojavljivaće se mnogi neverovatni rezultati, a na kraju ćemo otkriti iznenađujući odgovor na pitanje postavljeno i naslovu.

KOSMOLOŠKE RAZMERE

Hic sunt leones.[2]

Antika

Opis kretanja zahteva primenu opšte teorije relativnosti uvek kada je razmera d situacije reda Švarcšijdovog poluprečnika, to jest uvek kada je

$$d \approx r_S = \frac{2Gm}{c^2} \tag{96}$$

Ovo je jednostavno za dokazivanje, jer je ovaj uslov zaista ispunjen uz uobičajeno navedenu masu m i veličinu d bilo čega vidljivog u svemiru. (***Izazov 48s***). Kada govorimo o celosti prirode nije nam potrebna opšta teorija relativnosti, pa time ni zakrivljeno prostor-vreme..

Slično tome, kvantna teorija je potrebna za opis kretanja objekta uvek kada mu se približimo toliko da je rastojanje d reda (umanjene) Komptonove talasne dužine $\lambda\!\!\!^{-}_C$, to jest uvek kada je

$$d \approx \lambda\!\!\!^{-}_C = \frac{\hbar}{mc} \tag{97}$$

Očigledno je da za ukupnu masu u svemiru ovaj uslov nije ispunjen. Međutim, nas ne interesuje kretanje samog svemira; nas interesuje kretanje njegovih sastavnih delova. U opisu ovih sastavnih delova, neophodna je kvantna teorija uvek kada uloge imaju proizvodnja parova i poništavanje (nihilacija). Ovo je slučaj u istoriji ranog svemira i u blizini horizonta, to jest, za najudaljenije događaje koje možemo da opažamo u prostoru i vremenu.

Pošto su nam u kosmološkim razmerama neophodne i kvantna teorija i opšta teorija relativnosti, naše istraživanje ćemo započeti proučavanjem vremena, prostora i mase, postavljanjem istih pitanja za velike razmere koja smo postavljali u predhodnom tekstu za Plankove razmere.

MAKSIMALNO VREME

Da li je moguće da se izmere intervali vremena svake zamišljene veličine? Opšta teorija relativnosti pokazuje da u prirodi postoji maksimalan interval vremena, sa vrednošću od oko četrnaest hiljada miliona godima ili 430 Ps, što daje gornju granicu merenja vremena. Ona se naziva ***starost svemira***, a bila je izvedena iz merenja u dva skupa: iz širenja prostor-vremena i iz starosti materije.

Svi smo upoznati sa časovnikom koji otkucava već dugo vreme: sa atomima vodonika u našim telima. Svi atimi vodonika stvoreni su odmah posle velikog praska. Skoro možemo da kažemo da elektroni u tim

[1] "Granica je zapravo plodno mesto spoznavanja." Paul Tilih (Paul Tillich, 1886. Starzedel – 1965. Chicago), teolog, socijalist i filozof.

[2] "Ovde su lavovi." Ovo je napisano na drevnoj mapi preko nepoznate i opsane oblasti.

atomima obilaze oko njihovih atomskih jezgara još od praskozorja vremena. Ustvari, kvarkovi u protonima ovih atoma kreću se nekoliko stotina hiljada godina duže od elektrona.

Prema tome, imamo gornju granicu vremena za svaki časovnik napravljen od atoma. Čak i "časovnici" izrađeni od zračenja (možete li da ih opišete – ***Izazov 49s***) daju slično maksimalno vreme. Proučavanje širenja svemira dovodi do iste maksimalne starosti. Nijedan časovnik ili merni uređaj neće kuckati duže od ovog maksimalnog vremena i niti bi ijedan časovnik mogao da daje pokazivanja za to.

Ukratko, nije moguće da se izmeri interval vremena veći od maksimalnog, bilo da se koristi istorija prostor-vremena ili istorija materije ili zračenja.[1] Naravno, ovo nije nova ideja; ali detaljno posmatranje pitanja starosti otkriva neka iznenađenja.

DA LI JE STAROST SVEMIRA ODREĐENA?

Nikad ne treba verovati ženi koja govori o svojoj stvarnoj starosti. Žena koja bi to rekla, rekla bi i bilo šta.

Oskar Vajld (Oscar Wild)[2]

U svetlu svih merenja, možda bi izgledalo smešno pitati za starost svemira. Vrednost starosti se nalazi u mnogim kljigama i tabelama (***Vol. II, strana 239***), a njeno precizno određivanje jedno je od važnijih pitanja savremena astrofizike. Međutim, ima li ovo pitanje smisla?

Da bismo izmerili trajanje kretanja ili starost sistema, potreban nam je časovnik koji je ***nezavisan*** od tog kretanja, ili od sistema, pa stoga ***izvan*** sistema. Međutim, ne postoji časovnik koji je izvan svemira, a nijedan časovnik unutar svemira nije nezavisan. Ustvari upravo smo videli da nijedan časovnik unutar svemira ne može da radi tokom cele istorije svemira, naročito tokom ranije istorije.

Vreme može da bude određeno ako je moguće da se napravi razlika između materije i prostora. S obzirom na ovu razliku možemo da govorimo ili o starosti ***prostora***, predpostavljajući da je za mateiju obezbeđen pogodan i nezavisan časovnik – što je učinjeno u opštoj teoriji relativnosti – ili o starosti ***materije***, kakve su zvezde ili galaksije, predpostavljajući da je za širenje prostor-vremena, ili moguće i neke druge materije, obezbeđen dobar časovnik. Obe mogućnosti bile su eksperimentalno istražene u savrememoj astrofizici – i obe su dale isti rezultat, od oko četrnaest hiljada miliona godina, što je i pomenuto u predhodnom tekstu. Uprkos ovoj saglasnosti, za svemir u ***celosti***, starost ***ne*** može da se odredi, pošto ne postoji časovnik izvan njega.

Pitanje početne tačke vremena čini ovu teškoću još očiglednijom. Možemo da zamislimo da vraćanje kroz vreme dovodi do dve mogućnosti: ili je početni trenutak $t = 0$ deo vremena ili nije. (U matematičkom smislu to znači da li je segment koji predstavlja vreme zatvoren ili otvoren.) Obe ove mogućnosti podrazumevaju da je moguće da se izmere proizvoljno male vrednosti; međutim, znamo iz kombinacije opšte teorije relativnosti i kvantne teorije da to ***nije*** slučaj. Drugim rečima, nijedna mogućnost nije ispravna: početak ne može da ***bude*** deo vremena, niti da ***ne bude*** njegov deo. Postoji samo jedno rešenje ove protivrečnosti: početak nije uopšte postojao.

U stvari, minimalna dužina, ili ekvivalentno, najmanji rad, podrazumevaju da postoji maksimalna zakrivljenost prostor-vremena. Zakrivljenost može da se meri na različite načine: na primer, površinska zakrivljenost je inversno područje. Uz činilac reda jedan, nalazimo

$$K < \frac{c^3}{G\hbar} = 0.39 \cdot 10^{70}\ \mathrm{m}^{-2} \qquad (98)$$

za granicu površinske zakrivljenosti K u prirodi. Drugim rečima, svemir nikada nije bio tačka, nikada nije imao starost jednaku nuli, nikada nije imao bekonačnu gustinu i nikada nije imao beskonačnu zakrivljenost. Nije teško da se dobije slično ograničenje za temperaturu ili bilo koju drugu fizičku veličinu u blizini velikog praska. (***Izazov 50s***). Ukratko, pošto događaji ne postoje, veliki prasak nije mogao da

[1] Ovo podrazumeva da takozvani modeli "oscilujućeg svemira" u kojima se tvrdi da "pre" velikog praska nisu postojale druge pojave, ne mogu da se podešavaju na osnovama prirode ili opažanja. Oni se zasnivaju na ubeđenjima.

[2] Oskar Vajld (Oscar Wilde, 1854. Dublin – 1900. Paris), pesnik i dramski pisac, podednako poznat i po svojoj pameti.

bude događaj. Nikada nije postojao početni singularitet ili početak svemira. Sažeto, situacija je dosledno zamućena. Niti starost svemira, niti njegov početak nemaju smisla. Šta je tu pošlo naopako? Ili radije, ***kako*** su stvari postale pogrešne? Šta se događa ako umesto da skočimo direktno u veliki prasak, prilazimo mu što je moguće bliže? Najbolji način da se razjasni pitanje je da se zapitamo o ***greški*** merenja u našem iskazu da je svemir star četrnaest hiljada miliona godina. Pokazalo se da je to interesntna tema.

KOLIKO PRECIZNO MOŽE DA BUDE MERENJE STAROSTI.

Nijedna žena nikad ne bi bila sasvim tačna o svojoj starosti. To izgleda tako proračunato.

Oskar Vajld (Oscar Wild)

Prvi način da se izmeri starost svemira[1] je da se pogleda na časovnik u uobičajenom smislu sveta, naime na časovnik izrađen od ***materije***. Kako je objašnjeno u predhodnom delu o kvantnoj teoriji, Zaleker (Salecker) i Vigner (Wigner) su pokazali da časovnik izrađen da meri ukupno vreme T, uz preciznost Δt ima najmanju masu m datu sa (***Ref. 55***) i (***Ref. 56***)

$$m > \frac{\hbar}{c^2}\frac{T}{(\Delta t)^2} \tag{99}$$

Prost način da se uključi opšta teorija relativnosti u ovaj rezultat, predložili su Ng i Van Dam. (***Ref. 94***). Svaki časovnik sa masom m ima najmanju rezoluciju Δt usled zakrivljenosti koju on stvara, datu sa

$$\Delta t > \frac{Gm}{c^3} \tag{100}$$

Ako se izbaci m, ove dve jednakosti podrazumevaju da časovnik preciznosti Δt može samo da izmeri vreme T do izvesne maksimalne vrednosti, naime

$$T < \frac{(\Delta t)^3}{t_{\mathrm{Pl}}^2} \tag{101}$$

gde je $t_{\mathrm{Pl}} = \sqrt{\hbar G/c^5} = 5{,}4 \cdot 10^{-44}$ s Plankovo vreme. (Kao i obično, mi smo ovde izbegli činioce reda jedan, kao i iz svih rezultata koji slede u ovom poglavlju.) Drugim rečima, što je veća tačnost časovnika, utoliko je krače vreme u toku kojeg radi pouzdano. Preciznost časovnika nije samo ograničena troškovima izrade, već takođe i samom prirodom. Uprkos tome, lako se može proveriti da se za časovnike koji se koriste u svakodnevnom životu ovo ograničenje ni izdaleka nije dostignuto. (***Izazov 51e***). Na primer, možda želite da izračunate koliko precizno može da se odredi vaša starost.

Kao posledica nejednakosti (101), časovnik koji pokušava da postigne tačnost od jednog Plankovog vremena može to da učini samo najduže u toku jednog Plankovog vremena. ***Stvarni časovnik ne može da postigne tačnost Plankovog vremena***. Ako pokušamo da odemo iza ograničenja iz (101), oscilacije prostor-vremena ometaju rad časovnika i onemogućavaju veću preciznost. Svakim Plankovim vremenom u vremenu koje prolazi, časovnik akumulira grešku merenja od najmanje jednog Plankovog vremena. Prema tome, ukupna greška merenja velika je bar toliko koliko i samo merenje. Ovaj zaključak važi takođe i za časovnike na bazi zračenja.

Ukratko, merenje starosti pomoću časovnika uvek sadrži greške. Uvek kada pokušamo da smanjimo ove greške na najmanji mogući nivo, na Plankov nivo, časovnik postale jako neprecizan u dužem vremenu, tako da merenje starosti postaje nemoguće.

---

[1] Imajte na umu da starost t_0 nije isto što i Hablovo vreme $T = 1/H_0$. Hablovo vreme je samo računska veličina i (skoro) uvek veća od starosti; odnos između njih zavisi od vrednosti kosmološke konstante, gustine i drugih svojstava svemira. Na primer, za standardni scenario "vreli veliki prasak", to jest model Ajnštajn-deSiter u kojem preovladava materija, imamo jednostavan odnos $T = (3/2)\, t_0$. (***Ref. 99***).

DA LI VREME POSTOJI?

Vreme je gubljenje novca.
Oskar Vajld (Oscar Wild)

Od kada su ljudi počeli da izučavaju fiziku, pojam "vreme" bilo je označeno kao ono što se meri časovnikom. (***Vol. I, strana 38***). Međutim, jednakost (101) za maksimalno vreme časovnika podrazumeva da savršeni časovnici ne postoje, pa time vreme postaje približan pojam: savršeno vreme ne postoji. Zato u prirodi ne postoji "ideja" o vremenu, u Platonovom smislu. Ustvari, razmatranja do sada mogla bi da se posmatraju kao dokaz da kombinovane kvantna teorija i opšta teoprija relativnosti, zbog posledičnih grešaka merenja, onemogućavaju postojanje savršenih ili "idealnih" primera svakog klasičnog opažanja ili bilo kojeg svakodnevnog pojma.

Vreme ne postoji. Iako je to koristan pojam u svakodnevnom životu. Ključ da se to razume je ***merenje energije***. Svaki časovnik – ustvari, svaki sistem u prirodi – okarakterisan je prostim brojem, naime najvišim odnosom njegove kinetičke energije u odnosu na ostatak energije njegovih sastavnih delova. (***Izazov 52e***). U svakodnevnom životu ovaj odnos je oko 1 eV/10 GeV = 10^{-10}. Takav sistem male energije dobro je prilagođen izradi časovnika. Tačnije kretanje glavnog pokretnog dela – kazaljke časovnika – može da se održava neprekidnim i da se nadzire, što je veća preciznost časovnika. Da se postigne vrlo velika preciznost, kazaljka mora imati vrlo veliku masu. Ustvari, u svakom časovniku, i položaj i brzina kazaljke moraju da se mere, a dve greške merenja su u relaciji neodređenosti $\Delta v \Delta x > \hbar/m$ kvantne mehanike. Veća masa podrazumeva manje sopstveno oscilovanje. Osim toga, da bi se zaštitila kazaljka od spoljašnjih uticaja, porebna je još veća masa. Ova povezanost između mase i tačnosti objašnjava zbog čega su tačni časovnici obično mnogo skupi.

Standardna relacija neodređenosti $m\Delta v \Delta x > \hbar$ važi samo za svakodnevne vrednosti energije, međutim, ne možemo da postižemo sve veću preciznost jednostavnim povećavanjem mase bez ograničenja, pošto opšta teorija relativnosti menja relaciju neodređenosti u $\Delta v \Delta x > \hbar/m + G(\Delta v)^2 m/c^3$. (***Strana 50***). Dodati član na desnoj strani, koji je zanemarljiv u svakodnevnim razmerama, srazmeran je sa energijom. (***Strana 58***). Povećavanjem mase za velike vrednosti ograničava dostižnu preciznost časovnika. (***Izazov 53e***). Pokazalo se da je Plankovo vreme najmanje vreme koje se može izmeriti.

Sažeto, vreme postoji kao dobra približnost samo za sisteme sa ***malom energijom***. Svako povečanje preciznosti iznad određenih ograničenja zahteva povećanje energije sastavnih delova; na Plankovoj energiji ovo povećanje sprečava povećanje preciznosti.

KOLIKA JE GREŠKA U MERENJU STAROSTI SVEMIRA?

Sada je jednostavno da se primeni naše razmtranje o merenju vremena na starost svemira. Nejednakost (101) podrazumeva da je najveća moguća preciznost za časovnik oko 10^{-23} s, ili oko vremena potrebnog da svetlost prođe kroz proton. (***Izazov 54e***). Konačna starost svemira takođe daje maksimalnu relativnu preciznost merenja. Nejednakost (101) može da se napiše kao

$$\frac{\Delta t}{T} > \left(\frac{t_{Pl}}{T}\right)^{2/3} \qquad (102)$$

Uvrštavanjem starosti svemira T, nalazimo da nema intervala vremena koje može da bude izmereno uz preciznost sa više od 40 decimala.

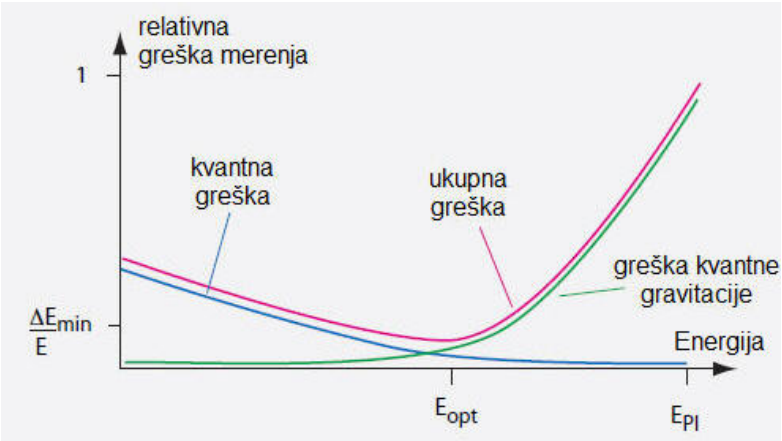
Da se pitanje razjasni, možemo izračunati grešku merenja kao funkciju energije opažnja E_{meas}, energiju sonde merenja. Postoje dva granična slučaja. Za ***male*** energije, greška nastaje usled kvantnog efekta i data je sa

$$\frac{\Delta t}{T} \sim \frac{1}{E_{meas}} \qquad (103)$$

koja se smanjuje pri porastu energije merenja. Međutim, za ***velike*** energije greška nastaje usled efekata gravitacije i data je sa

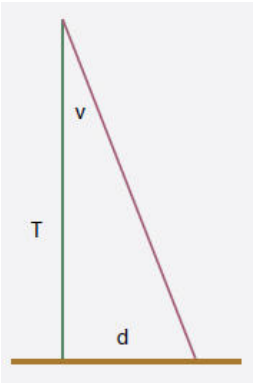
$$\frac{\Delta t}{T} \sim \frac{E_{meas}}{E_{Pl}} \qquad (104)$$

tako da se ukupna greška kreće saglasno prikazu na ***slici 6***. Osim toga, veoma velike energije ne smanjuju greške merenja: svaki pokušaj da se smanje greške merenja za starost svemira ispod 10^{-23} zahtevao bi tako velike energije da bi se dospelo do granice prostor-vreme, što bi samo merenje učinilo nemogućim. Do ovog zaključka došli smo preko dokaza zasnovanog za časovnik izrađen od delova. Videćemo u daljem tekstu da pokušaj da se odredi starost svemira preko širenja dovodi do istog ograničenja.



Slika 6 Greške merenja u funkciji energije merenja

Zamislite posmatranje stabla drveta koje je palo na drugo stablo, kao posledica neke oluje ili jakog vetra, dodirnuši ga na samom vrhu, kako je prikazano na ***slici 7***. Moguće je odrediti visine oba stabla merenjem njihovog razdvajanja i uglova pri osnovi. ***Greška*** u visini zavisi od grešaka pri merenjima razdvajanja i uglova.



Slika 7 Stabla i galaksija

Slično tome, starost svemira može da se izračuna iz sadašnje udaljenosti i brzine objekata – kao što su galaksije – opaženih na nočnom nebu. Sadašnja udaljenost d odgovara razdvajanju stabala u nivou zemlje, a brzini v odgovara ugao između dva stabla. Hablovo vreme T svemira (za koje se obično predpostavlja da je veće od starosti svemira) onda odgovata visini na kojoj su se dva stabla dodirnula. Ova starost – u naivnom smislu vreme od kada su se galaksije "odvojile" – dato je unutar činioca reda jedan, sa

$$T = \frac{d}{v} \tag{105}$$

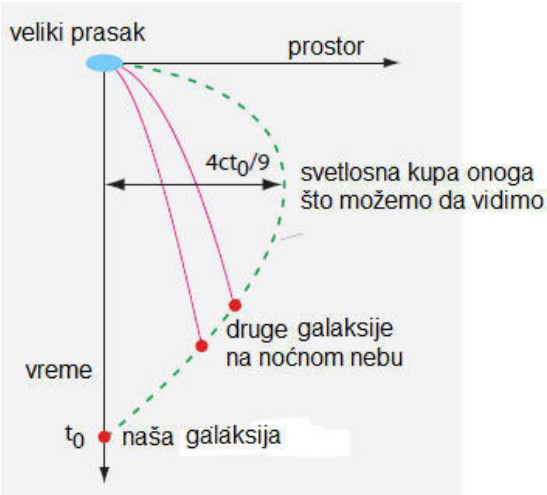
Jednostavno rečeno, to je metoda korišćena da se odredi starost svemira preko širenja prostor-vremena, za galaksije sa pomakom u crveno ispod jedinice.[1] Pozitivna greška merenja ΔT postaje

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta v}{v} \tag{106}$$

Vredno je truda da se ovo istraži mnogo detaljnije. Za svako merenje T moramo da odaberemo objekt, to jest udaljenost d, kao i vrene opažanja Δt, ili, ekvivalentno tome, energiju opažanja $\Delta E = 2\pi\hbar/\Delta t$. Sada ćemo istražiti posledice ovih izbora za jednakost (106), uvek uzimajući u obzir kvantnu teoriju i opštu teoriju relativnosti.

[1] Pri većem pomaku u crveno u igru ulazi brzina svetlosti kao i detalji širenja. Da bi se nastavilo sa sličnošću sa stablima, nalazimo da stabla nisu prava sve do vrha i da rastu na padini, kao što je predloženo na ***slici 8***.

Pri svakodnevnim energijama, rezultat određivanja starosti svemira t_0 je $(13{,}8 \pm 0{,}1)\cdot 10^9$ Ga. Ova vrednost je dobijena merenjem pomaka u crveno, to jest, brzine i udaljenosti, korišćenjem zvezda i galaksija u opsegu udaljenosti od nekoliko hiljada svetlosnih godina do pomaka u crveno od oko 1. Merenje pomaka u creveno neće proizvesti veliku grešku brzine. Glavni izvor eksperimentalne greške je teškoća u određivanju udaljenosti galaksija.



Slika 8 Brzina i udaljenost dalekih galaksija.

Kolika je najmanja moguća greška u udaljenosti? Očigledno, nejednakost (102) podrazumeva da je

$$\frac{\Delta d}{T} > \left(\frac{l_{\mathrm{Pl}}}{d}\right)^{2/3} \tag{107}$$

te zato daje istu neodređenost starosti svemira kao što je dobijeno u predhodnom tekstu u slučaju materijalnog časovnika. (***Izazov 55e***).

Možemo da pokušamo da smanjimo grešku starosti na dva načina: izborom objekta koji je ili mali ili je na većoj udaljenosti. Počnimo sa malim udaljenostima. Da bismo postigli veliku preciznost na malim udaljenostima, potrebna je velika energija opažanja. (***Izazov 56e***). Prilično je očigledno da za energiju opažanja u blizini Plankove energije, $\Delta T/T$ prilazi jedinici. U stvari, oba člana na desnoj strani jednakosti (106) dobijaji vrednost jedan. Na ovim energijama Δv približava se c, a maksimalna vrednost za d približava se Plankovoj dužini, iz istog razloga zbog kojeg je na Plankovoj energiji maksimalno merljiivo vreme, to jest Plankovo vreme. Ukratko, ***u Plankovim razmerama nemoguće je da se kaže da li je svemir star ili mlad***.

Razmotrimo drugu krajnost, naime objekte koji su izuzetno udaljeni, recimo za koji imaju pomeraj u crveno od $z \gg 1$. Relativistička kosmologija zahteva da se prikaz na slici 7 zameni realističnijim prikazom sa ***slike 8***. "Lukovica svetlosti" zamenjena je poznatom kupom svetlosti iz specijalne teorije relativnosti (***Ref. 99***): svetlost stremi ka istoj tački u blizini velikog praska. U takvom slučaju greška merenja starosti svemira takođe zavisi od grešaka merenja i udaljenosti i brzine. Na najvećoj mogućoj udaljenosti signali koje objekt emituje moraju da imaju veliku energiju, pošto emitovana talasna dužina mora da bude manja od samog svemira. Time se neizbežno postiže Plankova energija. Medutim, videli smo da u situacijama sa tako velikom energijom ne mogže da se napravi razlika emitovanog zračenja i samog objekta od pozadine prostor-vremena. Drugim rečima signal pomeren ka crvenom kojeg bismo opažali danas mogao bi imati talasnu dužinu veliku kao svemir, uz odgovarajuću nisku učestanost.

Postoji i drugi način da se opiše situacija. Na Plankovoj energiji ili u blizini horizonta, izvorni signal ima grešku iste veličine kao i sam signal. Kada se meri u današnje vreme, signal sa pomerajem u crveno ima još uvek grešku iste veličine kao i signal. Kao rezultat toga, greška u udaljenosti horizonta postaje velika isto kolika je i vrednost koja se meri.

Ukratko, iako se koriste širenje prostor-vremena i velike razmere, trenutak takozvanog početka svemira ne može da se odredi uz grešku manju od same starosti svemira: rezultat kojeg smo našli i pri Plankovim udaljenostima. Ako ciljamo na savršenu tačnost, nalazimo samo da je svemir star 13,8 ± 13,8 hiljada miliona godina! Drugim rečima, ***u obe krajnje situacije nemoguće je reći da li svemir ima starost koja ne nestaje.***

Moramo da zaključimo da antropocentrični pojam "starosti" nema nikakvog smisla za svemir u celosti, Uobičajena vrednost iz udžbenika korisna je samo za vremensko razdroblje, prostor i energiju u kojima se materija i prostor-vreme jasno razlikuju, naime, pri svakodnevnim energijama ljudskih razmera; vrednost nema više opšti smisao.

Možda volite da istražite pitanje ***sudbine*** svemira koristeći ista razmatranja? (***Izazov 57ny***). Međutim, mi ćemo nastaviti našom putanjom naglašenom na početku ovog poglavlja; sledeća tema na toj putanji je merenje dužine.

MAKSIMALNA DUŽINA

Opšta teorija relativnosti pokazuje da je ***udaljenost horizonta***, to jest udaljenost do objekata sa beskonačnim pomerajem ka crvenom, konačna. U uobičajenom kosmološkom modelu, za hiperbolički (otvoren) i parabolički (ograničen) razvoj svemira, podrazumeva se da je veličina svemira beskonačna.[1] (***Vol. II, strana 188***). Za eliptični razvoj, ukupna veličina je konačna i zavisi od zakrivljenosti. Medutim, u takvom slučaju prisutno ograničenje merenja daje minimalnu veličinu svemira mnogo puta veću od udaljenosti horizonta.

Kvantna teorija polja, s druge strane, zasnovana je na ravnom i beskonačnom prostor-vremenu. Pogledajmo šta se događa kada se ove dve teorije kombinuju. Šta možemo da kažemo o merenju dužine u takvom slučaju? Na primer, da li bi bilo moguće da se konstruiše i koristi lenjir kojie bi moglo da izmeri dužinu veću od udaljenosti horizonta?

Doduše, ne bismo imali vremena da poguramo lenjir do horizonta, pošto se u standardnom modelu velikog praska horizont udaljava od nas brzinom većom od brzine svetlosti. (***Ref. 99***). (Trebalo je da počnemo da koristimo lenjir upravo u času velikog praska.) No, tek šale radi, predpostavimo da smo ustvari uspeli da to uradimo. Koliko daleko možemo da očitavamo udaljenosti? Zapravo, pošto je svemir u prošlosti bio manji, i pošto je svako opažanje na nebu opažanje iz prošlosti, ***slika 8*** pokazuje da je maksimalna prostorna udaljenost na kojoj možemo da vidimo objekt udaljena od nas samo $4ct_0/9$. Očigledno, za interval prostor-vremena maksimum ostaje ct_0.

Prema tome, u svim slučajevima pokazalo se da bi bilo nemoguće da se izmeri dužina veća od udaljenosti horizonta, premda opšta teorija relativnosti predviđa takve velike udaljenosti. Ovakav rezultat nije iznenađujući, a u očiglednoj je saglasnosti sa postojanjem ograničenja za merenja intervala vremena. Pravo iznenađenje tek dolazi.

DA LI JE SVEMIR ZAISTA VELIKO MESTO?

Astronomi i holivudski filmovi odgovaraju potvrdno na ovo pitanje. (***Ref. 100***). Ustvari, udaljenost do horizonta svemira često je stavljena u tabele. (***Vol. II, strana 239***). Kosmološki model određuje da činilac razmere R, koji određuje udaljenost do horizonta, raste sa vremenom t¸ za slučaj standardnog modela u kome preovladava masa, modela Ajnštajn-deSiter, to jest za kosmološku konstantu koja nestaje i ravan prostor, imamo

$$R(t) = C\,t^{2/3} \tag{108}$$

gde brojna konstanta C povezuje opšte prihvaćenu udaljenost horizonta sa opšte prihvaćenom starošću. Ustvari, opažanja pokazuju da je svemir velik i da postaje sve veći. Međutim, istražimo šta se događa kada u ovaj rezultat iz opšte teorije relativnosti dodamo malo kvantne teorije. Da li je zaista moguće da se izmeri udaljenost do horizonta? Pogledajmo prvo situaciju sa velikim energijama (sonde). Videli smo u predghodnom tekstu da se materija i vakuum ne razlikuju u Plankovim razmerama. Prema tome, pri Plankovoj energiji ne možemo da odredimo da li su objekti ***lokalizovani*** ili nisu. U Plankovim razmerama, razlika između materije i vakuuma – tako utemeljena u našem razmišljanju – nestaje.

Drugi način da se to izrazi je da ne možemo da tvrdimo da je prostor-vreme ***prošireno*** u Plankovim razmerama. Naš pojam proširenosti izveden je iz mogućnosti merenja udaljenosti i intervala vremena i iz

---

[1] Potrebno je da u kosmologiji napravimo razliku između činioca razmere R, Hablovog poluprečnika $c/H = cR/\dot{R}$, udaljenosti horizonta h i veličine svemira d. Hablov poluprečnik je računska veličina koja određuje udaljenost na kojoj se objekti udaljavaju brzinom svetlosti. Hablov poluprečnik je uvek manji od udaljenosti horizonta, na kojoj se u standardnom modelu Ajnštajn-deSiter, na primer, objekti udaljavaju ***dva puta*** većom brzinom od brzine svetlosti. (***Ref. 99***). Međutim, sam horizont udaljava se ***tri puta*** većom brzinom od brzine svetlosti.

opažanja sposobnosti da se nekoliko objekata poravnaju jedan iza drugog. Takva opažanja nisu moguća u Plankovim razmerama i energijama, zbog nesposobnosti sonde da pruži iskoristive podatke. Ustvari, sva svakodnevna opažanja iz kojih smo zaključili da je prostor proširen, nisu moguća u Plankovim razmerama, u kojima ***nestaju osnovne razlike između vakuuma i materije, naime između proširenja i lokalizacije***. Kao posledica toga, pri Plankovoj energiji veličina svemira ne može da se izmeri. Ne može čak ni da se nazove većom od kutije šibica.

Problemi koji nastaju sa velikim energijama sonde imaju drastične posledice na merenje veličine svemira. Svi dokazi navedeni u predhodnom tekstu za greške u merenjima starosti mogu da se ponove za udaljenost horizonta. (***Izazov 58e***). Da bi se smanjile greške merenja. merne sonde moraju da imaju velike energije. Međutim, pri velikom energijama greške merenja približavaju se rezultatima merenja. Na velikim udaljenostima i pri Plankovoj energiji greške merenja imaju istu veličinu kao i vrednosti merenja. Ukoliko pokušamo da odredimo veličinu svemira uz veliku preciznost, uopšte ne dobijamo preciznost.

Nemogućnost da se dobiju precizne vrednosti za veličinu svemira nebi trebalo da bude neočekivana. Za pouzdano merenje standard mora da bude drugačiji, nezavisan i izvan sistema koji se meri. Za svemir je to nemoguće.

Proučavanje veličine velikog praska isto tako proizvodi čudne rezultate. Rečeno je da je svemir mnogo manji u blizini velikog praska, jer se u proseku sva materija udaljava od druge materije. Međutim, ako pokušamo da pratimo putanju materije u prošlosti uz veliku preciznost, upotrebom sonde sa Plankovom energijom, ulazimo u teškoće: pošto su greške merenja velike koliko i podaci merenja, ne možemo da tvrdimo da je svemir bio manji u blizini velikog praska no što je danas: ne postoji način da se pouzdano razlikuju vrednosti veličina.

Postoje i druge potvrde. Ako imamo lenjir koji se proteže preko celog svemira, čak i iza horizonta, sa nultim podeljkom na mestu na kojem se nalazimo, koliko bi grešku merenja proizveo horizont? (***Izazov 59e***). Ne treba dugo vremena da se utvrdi da proširenje prostor-vremena, od Plankovih razmera do sadašnje veličine, podrazumeva povećavanje greške od Plankove veličine do dužine reda sadašnjeg rastojanja do horizonta. Ponovo, greška je velika koliko i rezultat merenja. I ponovo se pokazalo da veličina svemira ne može biti smislena osobina.

Pošto se ovo rezonovanje takođe primenjuje ako merimo prečnik svemira umesto njegovog poluprečnika, nemoguće je reći da li su antipodi na nebu zaista udaljeni međusobno!

Možemo sažeti situaciju napominjući da bilo šta što je rečeno o veličini svemira ograničeno je svim što je rečeno o njegovoj starosti. ***Visina neba zavisi od energije opažanja***. Ako počnemo da opažamo nebo sa standardnom energijom opažanja, i pokušamo da povećamo preciznost merenja udaljenosti horizonta, greška merenja se povećava preko svih granica. Na Plankovoj energiji zapremina svemira ne može da se razlikuje od Plankove zapremine – i obratno.

GRANICA PROSTORA – DA LI JE NEBO POVRŠINA?

Horizont svemira – suštinski, crni deo noćnog neba – začuđujući je subjekt. Svi koji su zainteresovani za kosmologiju žele da znaju šta se tamo događa. U novinama se horizont ponekad naziva ***granica prostora***. Neki novi uvidi – koji još uvek nisu objavljeni u novinama – pojavljuju se kada kombinujemo opštu teoriju relativnosti i kvantnu mehaniku.

Videli smo da su greške merenja udaljenosti horiznta značajne. One podrazumevaju da ne možemo da se pretvaramo kako su sve tačke na nebu podjednako udaljene od nas. Stoga se ne može reći da je nebo površina; moglo bi biti zapremina. Ustvari, ne postoji način da se odredi dimenzionalnost horizonta, niti dimenzionalnost prostor-vremena u blizini horizonta.[1]

Prema tome, merenja nam ne dopuštaju da odredimo da li je granica tačka, površina ili linija. Možda je vrlo složenog oblika, čak vezana u čvor. Ustvari, kvantna teorija nam govori da s vremena na vreme može biti sve od ovoga: da ***nebo varira u visini i obliku***.

---

[1] Greške merenja takođe podrazumevaju da ništa ne možemo da kažemo o prelaznoj simetriji u kosmološkim razmerama. Možete li to da potvrdite? (***Izazov 60ny***). Osim toga, na horizontu je nemoguće razlikovati prostornu udaljenost od vremenske udaljenosti. Još gore, pojmovi kao što su "masa" ili "količina kretanja" na horizontu postaju nejasni. To znači da, kao i za Plankovu energiju, nemamo mogućnost da napravimo razliku između objekta i pozadine i između stanja i sopstvenih osobina. Stoga potvrđujemo tačku iz predhodnog teksta. (***Strana 70***).

Ukratko, greške merenja onemogućavaju određivanje topologije neba. Zapravo, to nije nov rezultat. Kao što je dobro poznato, opšta teorija relativnosti nesposobna je da objasni stvaranje para čestica-antičestica sa spinom 1/2. Razlog za ovu nemogućnost je promena topologije prostor-vremena zahtevanog za ove procese; svemir je prepun ovog i mnogih drugih kvantnih procesa; oni podrazumevaju da je nemoguće da se odredi makroskopska topologija za svemir, a naročito za horizont. Možete li da nađete najnanje dva druga dokaza da bi se potvrdio ovaj zaključak? (***Izazov 61s***).

Još gore, kvantna teorija pokazuje da prostor-vreme nije kontinualno na horizontu: to može lako da se zaključi upotrebom dokaza Plankovih razmera iz predhodnog odeljka. (***Strana 50***). Vreme i prostor nisu određeni na horizontu.

Konačno, ne postoji način da se merenjem odredi da li se različite tačke na horizontu razlikuju jedana od druge. Na horizontu su greške merenja istog reda velićine kao i horizont. Rastojanje između dve tačke na noćnom nebu nije određeno. Prema tome nejasno je šta je ***prečnik*** horizonta.

Kao sažetak, horizont nema ni određenu udaljenost ni oblik. Horizont, pa stoga i svemir, ne može da se prikaže kao da je mnogostrukost. Obaj neočekivani rezultat dovodi nas do sledećeg pitanja.

IMA LI SVEMIR POČETNE USLOVE?

Često se čita o traganju za početnim uslovima svemira. (***Ref. 101***). No pre što se pridružimo ovom traganju, treba da se zašitamo ***da li*** i ***kada*** takvi početni uslovi imaju ikakav smisao.

Očigledno je da naš svakodnevni opis kretanja zahteva poznavanje početnih uslova, koji opisuju stanje sistema, to jest one vidove koji ga odvajaju od sistema sa istim sopstvenim svojstvima. Početni uslovi – kao i stanje – obeležja su sistema od strane spoljnog posmatrača.

Kvantna teorija nam kazuje da početne uslove, ili stanje sistema, može da odredi spoljni posmatrač u odnosu na okruženje. Već je dovoljno teško da se bude izvan svemira – ali čak i unutar svemira stanje može da se odredi samo ako materija može da se razlikuje od vakuuma. To je nemoguće na Plankovoj energiji, u blizini velikog praska ili na horizontu. Zato svemir nema početne uslove. To takođe znači da on ***nema talasnu funkciju***.

Ograničenja koja nameću Plankove vrednosti potvrđuju zaključak na drugi način. (***Strana 50***). Pre svega ona pokazuju da veliki prasak nije bio singularitet sa beskonačnom zakrivljenošću, gustinom ili temperaturom, pošto beskonačno velike vrednosti ne posoje u prirodi. Drugo, pošto trenuci vremena ne postoje, nemoguće je da se odredi stanje bilo kojeg sistema u određenom vremenu. Treće, pošto ne postoje trenuci vremena, kao ni događaji, pa tako ni veliki prasak nije bio događaj, svemiru ne mogu da se pripišu ni početni uslovi ni početna talasna funkcija. (Zapazite da to takođe znači da svemir nije mogao ni da bude stvoren.)

Ukratko, za svemir ne postoje početni uslovi. (***Strana 230***). Početni uslovi imaju smisao samo za podsisteme, i to samo daleko od Plankovih razmera. Stoga, za početne uslove koji postoje, sistem mora da bude daleko od horizonta i mora da se razvija izvesno vreme "posle" velikog praska. Samo kada su ova dva uslova ispunjena, objekt može da se ***kreće*** u prostoru. Naravno, u svakodnevnom životu to je uvek slučaj. Odsustvo početnih uslova znači da smo rešili prvo pitanje iz milenijumske liste. (***Strana 22***).

U ovoj tački našeg uspona na planinu, gde ni vreme ni dužina nisu jasno određeni u kosmološkom razmerama, ne bi trebalo da nas iznenadi da postoje slične teškoće koje se tiču pojma mase.

DA LI SVEMIR SADRŽI ČESTICE I ZVEZDE?

Ukupan broj zvezda u svemiru, od oko $10^{23\pm1}$, uvršten je u svaku knjigu o kosmologiji. (***Vol. II, strana 239***). Manji broj može da se izbroji u vedroj noći. Međutim, koliko je ovaj iskaz pouzdan?

Isto pitanje možemo da postavimo o česticama umesto o zvezdama. Najčešće citirani brojevi su $10^{80\pm1}$ bariona i $10^{89\pm1}$ fotona. Međutim, pitanje nije jednostavno. Same za sebe, ni kvantna teorija ni opšta teorija relativnosti ne prave predpostavke o broju čestica, ni unutar ni izvan horizonta. Šta se događa kada se ove dve teorije kombinuju?

Da bismo odredili broj čestica u oblasti, kvantna teorija pre svega svega zahteva da bude određeno stanje vakuuma. Broj čestica se određuje upoređivanjem sistema sa vakuumom. Ako odbacimo ili izbegnemo opštu teoriju relativnosti predpostavljajući ravno prostor-vreme, ovaj postupak ne postavlja nikakav problem. Međutim, ukoliko uključimo opštu teoriju relativnosti, a time i zakrivljenost prostor vremena,

posebno čudnog ponašanja na horizontu, odgovor je jednostavan: ***ne postoji*** stanje vakuuma sa kojim bismo mogli da uporedimo svemir, i to iz dva razloga. Prvo, niko ne može da objasni na šta bi bio nalik prazan svemir. Drugo, i mnogo važnije, ne postoji način da se odredi stanje svemira. Broj čestica u svemiru stoga postaje neodređen. (***Vol. IV, strana 91***). Jedino pri svakodnevnim vrednostima energije i za konačne dimenzije u stanju smo da govorimo o približnom broju čestica.

U slučaju svemira upoređenje sa vakuumom je nemoguće takođe i iz čisto praktičnih razloga. Posmatrač koji broji čestice morao bi da bude izvan sistema. (Možete li da potvrdite to?) (***Izazov 62e***). Osim toga, nemoguće je da se čestice izdvoje iz svemira.

Nemogućnost da se odredi stanje vakuuma, pa zato ni broj čestica u svemiru nije iznenađenje. To je zanimljiva vežba da se istraže greške merenja koje se pojavljuju kada pokušamo da odredimo broj čestica uprkos ovoj osnovnoj nemogućnosti. (***Izazov 63s***).

Možemo li da izbrojimo zvezde? U načelu, primenjuje se isti zaključak kao za čestice. Međutimn, pri svakodnevnim energijama zvezde mogu da se izbroje ***razvrstavanjem***, to jest, bez izdvajanja iz zapremine kojom su okružene. Na primer, to je moguće ako su zvezde različitih masa, boje ili bilo koje druge posebne osobine. Jedino u blizini Plankove energije ili u blizini horizonta ove metode su neprimenljive. Ukratko, broj zvezda može jedino da se odredi sve dok je energija opažanja mala, to jest, sve dok smo udaljeni od Plankove energije i od horizonta.

Zato, uprkos pojavljivanju u ljudskim razmerama, ***broj čestica u svemiru nije određen***. Svemir ne može da se razlikuje od vakuuma brojanjem čestica. Iako su čestice neophodne za naše sopstveno postojanje i delovanje, ne može da se izvrši potpuno prebrojavanje čestica.

Ovaj zaključak je toliko čudan da bi trebalo da pokušamo da mu se suprostavimo. Iskoristimo drugi postupak za određivanje sadržaja materije u svemiru: umesto da prebrojavamo čestice, izmerimo svemir.

IMA LI SVEMIR MASU?

Masa čini razliku između objekata i vakuuma. Prosečna gustina mase svemira od oko 10^{-26} kg/m^3 često se navodi u tekstovima. (***Vol. II, strana 239***). Da li je to različito od vakuuma? Kvantna teorija pokazuje da, kao rezultat relacije neodređenosti, čak i prazna zapremina veličine R ima masu. Za foton sa nultom masom unutar takvog vakuuma imamo $E/c = \Delta p > \hbar/\Delta x$, tako da u zapremini veličine R postoji minimalna masa od najmanje $m_{\min}(R) = \hbar/cR$. Za zapreminu oblika lopte postoji stoga minimalna gustina mase približno data sa

$$\rho_{\min} \approx \frac{m_{\min}(R)}{R^3} = \frac{\hbar}{cR^4} \qquad (109)$$

Kada se za svemir unese standardna udaljenost horizonta R_0 od 13800 miliona svetlosnih godina, dobija se vrednost od oko 10^{-142} kg/m^3. Ovo opisuje gustinu vakuuma. Drugim rečima, svemir sa gustinom mase iz knjiga od 10^{-26} kg m^3 izgleda da se jasno razlikuje od vakuuma. Ali, jesmo ji sigurni?

Upravo smo zaključili da je poluprečnik horizonta neodređen: u zavisnosti od energije opažanja on može da bude mali kao Plankova dužina. To podrazumeva da gustina mase svemira leži negde između najmanje moguće vrednosti, date za upravo pomenutu gustinu vakuuma $\rho_{\min}$ i najveće moguće vrednosti, naime Plankove gustine.[1] Ukratko, ukupna masa svemira zavisi od energije posmatrača.

Drugi način da se izmeri masa svemira mogla bi da se primeni izvorna odrednica mase data u klasičnoj fizici (***Vol I, strana 82***) ili kao prilagođena specijalnoj teoriji relativnosti (***Vol. II, strana 55***). Stoga pokušajmo da sudarimo standardni kilogram sa svemirom. Nije teško da se uvidi da bilo šta da učinimo, koristeći malu ili veliku energiju za standardni kilogram, masa svemira ne može da se ograniči ovom metodom. (***Izazov 65e***). Bilo bi potrebno da proizvedemo ili izmerimo promenu brzine Δv za ostatak

---

[1] Ustvari, za svakodnevne vrednosti energije gustina mase svemira leži na polovini između ove dve vrednosti, što daje čudnu relaciju (***Izazov 64e***)

$$\frac{m_0^2}{R_0^2} \approx \frac{m_{\mathrm{Pl}}^2}{R_{\mathrm{Pl}}^2} = \frac{c^4}{G^2} \qquad (110)$$

Ali ova začuđujuća relacija nije nova. (***Vol. V, strana 109***). Približna jednakost može se izvesti iz jednakosti 16.4.3 (strana 620) kod Stivena Vajberga (Steven Weinberg) *Gravitation and Cosmology*, Wiley, 1972, naime $Gn_b m_p = \ = 1/t_0^2$. Relacija zahteva nekoliko kosmoloških modela.

svemira posle sudara. Da pogodimo celu masu u svemiru u isto vreme, potrebna nam je velika energija, ali tada smo ometeni efektima Plankove energije. Osim toga ispravno izvedeno merenje sudara zahtevalo bi masu izvan svemira, što je prilično teško da se postigne.

Još jedan način da se izmeri masa bio bi da se odredi gravitacijska masa svemira putem direktnog merenja. Međutim, nepostojanje tereta izvan svemira čini, u najmanju ruku, da je ovo rešenje nepraktično.

Drugi način je da se iskoristi najpreciznija odrednica mase data opštom teorijom relativnosti, takozvana ***ADM*[1] *masa***. Međutim, njena odrednica zahteva određeno ponašanje u beskonačnosti, to jest pozadinu, koja nedostaje u svemiru.

Tada nam preostaje druga metoda opšte teorije relativnosti: određivanje mase svemira merenjem njegove prosečne zakrivljenosti. (***Vol. II, strana 147***). Uzmimo izraz za odrednicu prosečne zakrivljenosti κ za područje R, naime

$$\kappa = \frac{1}{r^2_{\text{curvature}}} = \frac{3}{4\pi}\frac{4\pi R^2 - S}{R^4} = \frac{15}{4\pi}\frac{4\pi R^3/3 - V}{R^5} \qquad (111)$$

Moramo da uvrstimo poluprečnik horizonta R_0 i ili njegovu površinu S_0 ili njegovu zapreminu V_0. Međutim, s obzirom na granice greške u poluprečniku i zapremini, posebno na Plankovoj energiji, ponovo ne nalazimo ***pouzdan*** rezultat za poluprečnik zakrivljenosti. (***Izazov 66e***).

Ekvivalentna metoda počinje sa uobičajenim izrazom kojeg je dao Rozenfeld za neodređenost $\Delta\kappa$ u skalarnoj zakrivljenosti područja veličine R, naime (***Ref. 102***)

$$\Delta\kappa > \frac{16\pi l_{\text{Pl}}^2}{R^4} \qquad (112)$$

Međutim, ovaj izraz takođe pokazuje da se greška u poluprečniku krivine ponaša kao greška u udaljenosti do horizonta.

Nalazimo da se ***pri Plankovoj energiji srednji poluprečik zakrivljenosti u prirodi nalazi između beskonačne i Plankove dužine***. To podrazumeva da se gustina mase svemira nalazi između minimalne vrednosti i Plankove vrednosti. Ne postiji metoda kojim bi se odredila masa svemira na Plankovoj energiji. (Možete li da nađete jednu?) (***Izazov 67s***).

Ukratko, merenje mase svemira menja se sa razmerom energije. I na najmanjoj i na najvećoj energiji nije moguće da se precizno odredi vrednost mase. Pojam masa ne može da se primeni na svemir u celosti: ***svemir nema masu***.

DA LI POSTOJE SIMETRIJE U PRIRODI?

Već smo videli da se na horizontu prekida simetrija prevođenja prostor-vremena. Pogledajmo nakratko ostale simetrije.

Šta se događa sa simetrijim permutacije? Permutacija je operacija na objektima u prostor-vremenu. Ona zbog toga zahteva da je moguće razlikovati materiju, prostor i vreme. Ako ne možemo da razlikujemo položaje, ne možemo da govorimo o razmeni čestica. Prema tome, na horizontu opšta teorija relativnosti i kvantna teorija, primenjene zajedno, onemogućavaju da se odredi simetrija permutacije.

Istražimo CPT simetriju. Kao rezultat grešaka merenja ili ograničenja maksimalnih i minimalnih vrednosti, nije moguće da se napravi razlika između orginalnih i transformisanih situacija. Zbog toga ne možemo da tvrdimo da je CPT simetrija prirode na razmerama horizonta. Drugim rečima, na horizontu ne mogu da se razlikuju materija i antimaterija.

Isto tako simetrija merila ne važi u razmeri horizonta, što možda želite detaljno i sami da proverite. (***Izazov 68e***). Za njeno određivanje, pojam polje merila zahteva da se napravi razlika između vremena, prostora i mase; na horizontu je to nemoguće. Stoga takođe zaključujemo da na horizontu pojmovi kao što su algebre opažanja ne mogu da se koriste za opis prirode. Isto tako prekida se i renormalizacija.

[1] Skraćenica ADM je dobijena iz početnih slova prezimena trojice naučnika: Richard **A**rnowitt, Stanley **D**eser i Charles W. **M**isner (prim.prev).

Sve simetrije prirode prekidaju se na horizontu. Nijedan rečnik koji smo koristili da govorimo o opažanjima – uključujući pojmove "magnetno polje", "električno polje", "potencijal", "spin", "naboj" ili "brzina" – ne može da se koristi na horizontu.

IMA LI SVEMIR GRANICU?

Uobičajeno je da se "granica" i "horizont" uzimaju za sinonime u slučaju svemira, pošto su u praktične svrhe jedno te isto. Poznavanje matematike ovde nam ne pomaže: svojstva matematičkih granica – na primer, da one same nemaju granica – nisu primenljive na svemir, pošto prostor-vreme nije neprekidno. Potrebni su nam drugačiji, fizički dokazi.

Predpostavja se da granica svemira predstavlja granicu između ***nešto*** i ***ništa***. Postoje tri moguća predstavljanja pojma "ništa":

- "Ništa" bi moglo da znači "nema materije". Međutim, upravo smo videli da ova razlika ne može da sa napravi u Plankovim razmerama. Tako ili granica neće da postoje uopšte, ili će obuhvatati horizont kao i ceo svemir.
- "Ništa" bi moglo da znači "nema prostor-vremena". Tada moramo da potražimo ona područja u kojima prostor-vreme prestaje da postoji. To se događa u Plankovim razmerama i na horizontu. I ponovo, ili granice neće da postoje ili će da obuhvate ceo svemir.
- "Ništa" bi moglo da znači "nema ni prostor-vremena ni materije". Jedina mogućnost je granica koja obuhvata područja izvan Plankovih razmera i izvan horizonta; međutim, ponovo bi takva granica obuhvatala sve u prirodi.

To je jako zagonetno. Kada se kombinju kvantna teorija i opšta teorija relativnosti, ne izgleda da smo sposobni da nađemo odrednicu horizonta koja se razlikuje od onoga šta ona uključuje. (***Izazov 69s***). Razlikovanje je moguće u samoj opštoj teoriji relativnosti i u samoj kvantnoj teoriji; ali čim smo njih dve kombinovali, granica je postala neprepoznatljiva u odnosu na njen sadržaj. ***Unutrašnjost svemira ne možemo da razlikujemo od njegovog horizonta***. ***Ne postoji*** granica svemira.

Teškoća da se napravi razlika između horizonta i njegovog sadržaja predpostavlja da je priroda možda ***simetrična*** pod transformacijom koja razmenjuje unutrašnjost i granice. Ova ideja se naziva ***holografija***, pošto nejasno podseća na delovanje holograma na kreditnim karticama Ona je jako istraživano polje u fizici velikih energija. (***Ref. 103***)

Primećujemo da ako unutrašnjost i granica svemira ne mogu da se razlukuju, sastavni delovi prirode ne mogu da budu ni tačke ni mali objekti bilo koje vrste. Sastavni delovi moraju da budu ***prošireni***. Međutim, pre no što istražimo ovu temu, nastavićemo da tražimo razlike između svemira i ničeg. Traganje nas dovodi do sledećeg pitanja.

DA LI JE SVEMIR SKUP?

Domina omniumet regina ratio.[1]

Cicero

Koristili smo razmišljanje o svemiru kao zbiru celokupne materije i celog prostor-vremena. Čineći to, podrazumevamo da je svemir skup međusobno različitih sastavnih delova. Ova ideja je predpostavljena u tri situacije: u tvdnji da se materija sastoji od čestica; da se prostor-vreme sastoji od događaja (ili tačaka) i da se različita stanja sastoje od različitih početnih uslova. Medutim, naše razmatranje pokazuje da svemir ***nije*** skup takvih elemenata koji se razlikuju. Sreli smo se sa različitim dokazima: na horizontu, pri velikom prasku i pri Plankovim razmerama, postalo je nemoguće da se napravi razlika između događaja, između čestica, između opažanja i između prostor-vremena i materije. U ovim oblastima postaje nemoguće razlikovanje bilo koje vrste. Našli smo da je razlikovanje između dva subjekta. na primer, čačkačice i planine –samo ***približno*** moguće. Približnost je moguća pošto mi živimo na energijama dosta ispod Plankove energije. Približnost je tako dobra da mi ne primećujemo grešku kada pravimo razliku između automobila i ljudi i čačkalice. Bez obzira na to, naše razmatranje o situaciji pri Plankovoj energiji pokazuje da u naćelu nije moguće savršeno razlikovanje. ***Nemoguće je podeliti svemir na posebne delove***.

[1] "Gospodarica i kraljica svih stvari je razlog" *Tusculanae Disputationes*, 2.21.47. Marko Tulije Ciceron (106. – 43. pne), bio je uticajan pravnik, govornik i političar pri kraju Rimske republike

Drugi način da se postigne ovaj rezultat je sledeći. Razlikovanje između dva subjekta zahteva različite rezultate merenja: na primer, različitih položaja, masa ili veličina. Bilo koju veličinu da uzmemo, u Plankovoj energiji, razlikovanje postaje nemoguće. Samo na svakodnevnim energijama moguća je približnost.

Ukratko, pošto svemir ne sadrži nikakve delove koji se razlikuju, u prirodi ne postoje ***elementi***. Prosto uzeto: ***svemir nije skup***. Ovu mogućnost koju smo već ranije predviđali (***Vol. III, strana 237***) sada je potvrđena. Pojmovi "element" i "skup" već su isuviše specijalizovani da bi opisali svemir. ***Svemir mora da bude opisan matematičkim pojmom koji ne sadrži bilo koji skup***. Nov pojam mora da bude uopšteniji no onaj o skupu.

Ovo je snažan rezultat: precizan opis svemira ne može da koristi bilo koji pojam koji predpostavlja postojanje skupova. Međutim, svi pojmovi koje smo koristili do sada za opis prirode, kao što su prostor-vreme, metrika, fazni prostor, Hilbertov prostor i njegovo uopštavanje, zasnivali su se na elementima skupa. Oni svi moraju da se napuste na Plankovoj energiji i u svakom preciznom opisu.

Elementi i skupovi moraju da se napuste. Primećujemo da je ovaj korenit zaključak izveden iz samo dva iskaza: neophodnosti da se koristi kvantna teorija uvek kada su dimenzije reda Komptonove talasne dužine i korišćenja opšte teorije relativnosti uvek kada su dimenzije reda Švarcšildovog poluprečnika. Zajedno uzeti, oni znače da nijedan precizan opis prirode ne može da sadrži elemente i slupove. Teškoće u usaglašavanju ovih rezultata objašnjavaju zbog čega objedinjavanje ove dve teorije nije do sada bilo uspešno. Ne samo da objedinjavanje zahteva da prestanemo da koristimo prostor, vreme i masu za opis prirode; ono takođe zahteva da sva razlikovanja, bilo koje vrste, treba da budu samo približna. Međutim, svi fizičari su školovani na načelima tačno suprotnog verovanja!

Mnoga predviđanja u prošlosti o konačnom objedinjavanju opisa prirode zavise od skupova. Posebno, ***skupove predpostavljaju*** sva proučavanja kvantnih fluktuacija, matematičkih kategorija, mesta, uključujući matematički prostor, programe računara, Turingovih mašina, Godelove teoreme nepotpunosti, svih vrsti stvaranja, rešetke prostor-vremena, kvantne rešetke i Bomovih neprekinutih celina. (***Ref. 104***). Osim toga, sve predpostavke kosmologa o poreklu svemira predpostavljaju skupove. Međutim, pošto sve ove predpostavke predpostavljaju skupove, one su pogrešne. Možda ćete takođe poželeti da proverite svoja verska objašnjenja koja znate protiv ovog kriterijuma. (***Izazov 70e***). Zapravo, nijedan pristup koji su teoretski fizičari koristili do 2000. godine nije zadovoljavao zahtev da se moraju napustiti elementi i skupovi.

Zadatak da se skupovi napuste nije jednostavan. To se može pokazati prostom proverom: da li znate bar jedan pojam koji se ne zasniva na elementima skupa? (***Izazov 71s***).

Ukratko, svemir nije skup. Osim toga, ***svemir nije ni fizički sistem***. Tačnije, on nema stanje, nema sopstvene osobine, nema talasnu funkciju, nema početne uslove, nema gustinu, nema masu, nema entropiju i nema kosmološku konstantu. U termodinamičkom pogledu svemir nije ni zatvoren ni otvoren; i ne sadrži informaciju. Sve termodinamičke veliine, kao što su entropija, temperatura i slobodna energija, određene su korišćenjem ***celina***. Celine su ograničenja sistema koji su u pogledu termodinamike ili otvoreni ili zatvoreni. Pošto svemir nije ni otvoren ni zatvoren, za njega ne može da se odredi nijedna termodinamička veličina.[1] Sva fizička svojstva su određena samo za delove prirode koji su približnost ili idealizacija skupova, pa su stoga fizički sistemi.

[1] Neki ljudi su to znali mnogo pre fizičara, Na primer, verovanje da je svemir informacija ili da je sadrži, ismejano je potpunosti u popularnoj parodiji naučne fantastike od Daglas Adamsa (Douglas Adams), *The Hitchhiker's Guide to the Galaxy*, 1979, i njenim nastavcima.

ZANIMLJIVOSTII I ZABAVNI IZAZOVI O SVEMIRU

Insofern sich die Sätze der Mathematik auf die Wirklichkeit beziehen, sind sie nicht sicher, und sofern sie sicher sind, beziehen sie sich nicht auf die Wirklichkeit.[1]

Albert Ajnštajn (Albert Einstein)

Die ganzen Zahlen hat der liebe Gott gemacht, alles andere ist Menschenwerk.[2]

Leopold Kroneker (Leopold Kronecker)

U matematici je 2 + 2 = 4. Ovaj iskaz je idealizacija iskaza kao što je dve jabuke više dve jabuke su četiti jabuke. Međutim, znamo da pri Plankovoj energiji iskaz sa jabukama nije ispravan iskaz o prirodi. Na Plankovoj energiji objekti ne mogu da se prebroje pa čak ni da se odrede, jer u tim razmerama nije moguče razdvajanje objekata. Mi možemo da prebrojavamo objekte samo zato što živimo na energijama koje su mnogo manje od Plankove energije.

Iskaz Kronekera zato mora da se odbaci. Pošto su svi celi brojevi samo približnosti na malim energijama, a pošto mi uvek koristimo približnosti na malim energijama kada govorimo ili razmišljamo, zaključujemo: ljudi su takođe načinili cele brojeve.

* * *

Ako ne može da se napravi razlika između vakuuma i materije ili zračenja, a svemir se ne razlikuje od ničeg, onda nije tačno da se tvrdi da se "svemir pojavio iz ničeg". Naivna ideja o stvaranju je logička nemogućnost. "Stvaranje" je rezultat nedostatka mašte.

* * *

Set Lojd (Seth Lloyd) je 2002. godine procenio koliko informacija može da sadrži svemir, i koliko je izračunavanja svemir izvršio pre velikog praska. (***Ref. 105***). Ova procena se temelji na dve ideje: da je broj čestica u svemiru dobro određena veličina i da je svemir računar, to jest fizički sistem. Mi sada znamo da su obe predpostavke netačne. ***Svemir ne sadrži informacije***. Zaključci kao što je ovaj, pokazuju moć merila koje smo izveli za bilo koji tačan ili potpuni opis kretanja.

* * *

Astronomi redovno prave snumke kosmičkog zračenja iz pozadine i njegovih promena. Da li je moguće da če ove fotografije da pokažu da su tačke u jednom smeru neba potpuno iste u dijametralno suprotnom smeru? (***Izazov 72s***).

* * *

Čuveni naučnik i mislilac Lajbnic (Gottfried Wilhelm (von) Leibniz, 1646. Leipzig – 1716, Hannover) objavio je 1714, godine svoje delo *Monadalogie*. U njemu on objašnjava šta on naziva "prosta supstanca", koju opisuje kao supstancu koja nema delove. On je naziva ***monada*** i opisuje neka njena svojstva. (***Ref. 106***). Međutim, uglavnom zahvaljujući njegovom netačnom zaključku pojam nije uopšteno prihvaćen. Koji je fizički pojam u bliskoj vezi onom o monadi? (***Izazov 73s***).

* * *

Obično govorimo o svemiru, podrazumevajući da postoji samo jedan. Ipak postoji jednostavan slučaj da je "svemir" pojam koji zavisi od posmatrača, pošto je ideja da je "sve" zavisno od posmatrača. Da li to znači da postoji više svemira ili "mnogosvemir"? (***Izazov 74s***).

* * *

Da li je "poluprečnik" svemira invarijanta opažanja? (***Izazov 75e***).

* * *

Da li je kosmološka konstanta invarijanta opažanja? (***Izazov 76e***).

* * *

---

[1] "Ako se matematički iskazi odnose na stvarnost, oni nisu sigurni, a ako nisu sigurni, oni nisu opis stvarnosti."

[2] "Cele brojeve je načinio dragi Bog, a sve ostalo je delo ljudi", Leopold Kroneker (Leopold Kronecker, 1823. Liegnitz – 1891. Berlin) bio je dobro poznat matematičar. Između ostalog po njemu su nazvani Kroneker delta i Kronekerov proizvod.

Ako bi se sve čestice uklonile (pod predpostavkom da se zna gde se stave) nebi mnogo preostalo od svemira. Da li te ti tačno? (***Izazov 77s***).

* * *

Možete lo da pokažete da razlikovanje između materije i antimaterije nije moguće na kosmičkom horizontu? A razlikovanje između stvarnih i virtualnih čestica? (***Izazov 78e***).

* * *

Na Plankovoj energiji ne mogu da se odrede interakcije. Prema tome ne može da se odredi "postojanje". Ukratko, na Plankovoj energiji ne možemo da kazemo da li čestice postoje. Da li je to tačno? (***Izazov 79s***).

HILBERTOV ŠESTI PROBLEM JE REŠEN

David Hilbert (David Hilbert)[1] (***Vol. III, strana 205***) održao je 1900. godine čuveno predavanje u kojem je nabrojao 23 velika izazova sa kojima će se suočiti matematičari dvadesetog veka. (***Ref. 107***). Većina njih je donela izazove mnogim matematičarima decenijama kasnije. Nekoliko još uvek nije rešeno, među njima je šesti, koji predstavlja izazov za matematičare u fizičare da nađu ***aksiomski*** tretman fizike. Od tog vremena problem je ostao u pameti mnogih fizičara.

Kada kombinujemo kvantnu teoriju i opštu teoriju relativnosti, moramo da napustimo pojmove tačkaste čestice, tačke u prostoru i događaje. Matematički rečeno. kada kombinujemo kvantnu teoriju i opštu teoriju relativnosti nalazimo da priroda ne sadrži skupove i da svemir nije skup. Međutin, ***svi*** matematički sistemi – bilo da su algebarski sistemi, sistemi redova, topološki sistemi ili njihove mešavine – zasnivaju se na elementima i skupovima. Matematičari nemaju aksiomske sisteme bez elemenata i skupova. Razlog za to je prost: svaki (matematički) ***pojam*** sadrži najmanje jedan element i skup. Međutim, priroda je drugačija. Pošto priroda ne sadrži skupove, ***nemoguć*** je aksiomski opis prirode.

Svi pojmovi korišćeni u fizici pre 2000. godine zavisili su od elemenata i skupova. Za ljude je teško čak i da ***razmišljaju*** pre no što odrede skup mogućnosti. Priroda ipak ne sadrži skupove. Ne postoji aksiomatski opis prirode. Pošto je aksiomatska formulacija fizike nemoguća, zaključujemo da konačna objedinjena teorija ne može da se zasniva na aksiomima. U prvom trenutku to je iznađujuće, pošto su ***mogući*** aksiomatski tretmani za kvantnu teoriju i za opštu teoriju relativnosti. Međutim, ***aksiomatski sistemi u fizici uvek su približni***. Potreba da se napuste aksiomi jedan je od razloga zašto je postizanje objedinjenog opisa prirode izazov.

Nemogućnost aksiomskog sistema za fiziku potvrđuje se i na drugi način. Fizika počinje ***kružnom*** odrednicon: prostor-vreme i vakuum određeni su uz pomoć objekata, a objekti su određeni pomoću prostor-vremena i vakuuma. (***Vol. I, strana 313***). Zapravo, fizika ***nikada neće*** biti aksiomska! Fizičari će uvek morati da žive sa kružnim odrednicama!

Situacija je slična dečjem opisu neba kao "napravljen od vazduha i oblaka", Posmatrano iz blizine, otkrivamo da su oblaci sastavljeni od vodenih kapljica. Nalazimo i da postoji vazduh u oblaku i da postoji takođe i vodena para izvan oblaka. Kada se oblaci i vazduh pogledaju kroz mikroskop, ne postoji jasna granica između njih. Ne možemo da odredimo ni pojam "oblak" ni pojam "vazduh" bez pomoći drugog.

Kao oblaci i vazduh, tako se ne mogu razlikovati objekti i vakuum. Virtualne čestice se nalaze u vakuumu, a vakuum se nalazi unutar objekata. U Plankovim razmerama ne postoji jasna granica između ova dva pojma; ne možemo da odredimo ni pojam "čestica" ni pojam "vakuum" bez onog drugog. Međutim, uprkos nedostatku odrednice, i uprkos logičkim poblemima koji mogu da nastanu, u oba slučaja opis deluje uspešno u velikim, svakodnevnim razmerama.

Ukratko, aksiomski opis prirode je nemoguć. Posebno, konačna objedinjena teorija mora da sadrži kružne odrednice. Kasnije ćemo da pronađemo kako da se ostvari ovaj zahtev. (***Strana 167***).

SAVRŠENA KNJIGA FIZIKE

Savršena knjiga fizike opisuje celokupnu prirodu. Posebno, savršena knjiga fizike opisuje sebe samu, svoju sopstvenu proizvodnju, svog sopstvenog pisca, svoje sopstvene čitaoce i svoj sopstven sadržaj. Može li da postoji takva knjiga?

---

[1] David Hilbert (David Hilbert, 1862. Königsberg – 1943. Göttingen) bio je najveći matematičar svog vremena. Njegovi udbenici se još uvek štampaju.

Pošto svemir nije skup, savršena knjiga fizike ***može*** da postoji, jer ona nije u protivrečnosti ni sa jednim svojstvom svemira. Pošto svemir nije skup i pošto ne sadrži informacije, nestaje paradoks savršene knjige fizike. (***Vol. I, strana 313***). Međutim, tu se pojavljuje novo pitanje.

DA LI SVEMIR IMA SMISAO?

Drum hab ich mich der Magie ergeben, [...] Daß ich erkenne, was die Welt Im Innersten zusammenhalt.[1]

Johan Volfgang fon Gete (Johann Wolfgang von Goethe), Faust.

Da li je svemir zaista zbir materije-energije i prostor-vremena? Ili čestica i vakuuma? Ovakve iskaze tako često čujemo da možda zaboravljamo da ih proverimo. Nije nam potrebna magija, kako misli Faust: potrebno je samo da nabrojimo ono što smo do sada otkrili, posebno u ovom odeljku, u odelku o Plankovim razmerama i u poglavlju o mozgu i jeziku. (***Vol. II, strana 183***). U ***Tabeli 3*** navedeni su rezultati.

TABELA 3 Fizički iskazi o svemiru kada se istraži uz naveću preciznost, to jest u Plankovim razmerama

Svemir nema starost.	Svemir nema početak.
Svemir nema velićinu.	Svemir nema zapreminu.
Svemir nema oblik.	Svemir nema određen broj čestica.
Svemir nema masu.	Svemir nema energiju.
Svemir nema gustinu.	Svemir ne sadrži materiju.
Svemir nema kosmološku konstantu.	Svemir nema početne uslove.
Svemir nema stanje.	Svemir nema talasnu funkciju.
Svemir nije fizički sistem.	Svemir ne sadrži informaciju.
Svemir nije izolovan.	Svemir nije otvoren.
Svemir nema granica.	Svemir ne može da stupi u interakciju.
Svemir ne može da se izmeri.	Ne može da se kaže da svemir postoji.
Svemir ne može da se razlikuje od ničeg.	Svemir ne može da se razlikuje od pojedinačnog dogajaja.
Svemir ne sadrži količinu kretanja.	Svemir nije složen.
Svemir nije skup.	Svemir nije pojam.
Svemir ne može da se opiše.	Imenica “svemir” nema množinu.
Svemir ne može da se razlikuje od vakuuma.	Svemir nije stvoren.

Ne samo da ne možemo da izjavimo da je svemir sastavljen od prostor-vremena i materije, ne možemo da kažemo bilo šta o svemiru uopšte! Nije čak moguće ni reći da svemir postoji, jer je nemoguće biti u interakciji sa njim. Pojam “svemir” ne dopušta da se o njemu načini jedan jedini smisleni iskaz. (Možete li da nađete jedan?) (***Izazov 80r***). Možemo samo da nabrojimo osobine koja svemir ***nema***. Ne možemo da nađemo nijednu osobinu koje svemir ***ima***. Prema tome, svemir nema osobine! Ne možemo da kažemo čak ni da li je svemir nešto ili ništa. ***Svemir nije ništa posebno***. Pojam svemir ***nema*** sadržaj.

Uzgred, postoji drugi dobro poznat, nefizički pojam o onome o čemu ne može ništa sa se kaže. Mnogi naučnici su ga detaljno istražili. Koji je taj pojam? (***Izazov 81s***).

Ukratko, pojam “svemir” uopšte nije koristan za opis kretanja, Potvrdu o ovom čudnom zaključku možemo da dobijemo u ranijim poglavljima. Tamo smo našli da svaki pojam iziskuje određen sadržaj, određene granice i određenu oblast primene. (***Vol. III, strana 205***). U ovom odeljku smo našli da pojam “svemir” nema nijedno od toga; stoga takav pojam ne postoji. Ako neko upita zašto svenir postoji, odgovor je: ne samo da upotreba reči “zašto” pogrešno ukazuje na to da nešto može postojati izvan svemira, pružajući razlog za to i na taj način protivrečno određuje pojam “svemir”; ali je još važnije, svemir ne postoji, jer ne postoji takav pojam kao što je "svemir".

[1] “Zato sam se predao magiji, […] da razumem šta u dubini duše drži svet na okupu.” Johan Volfgang von Goethe (Johann Wolfgang von Goethe, 1749. Frankfurt – 1832. Weimar) bio je nemački pesnik

Sažeto rečeno, ***svaki iskaz koji sadrži reč "svemir" je besmislen***. Samo izgleda da reč nešto izražava, ali nije tako.[1] Ovaj zaključak može da bude zanimljiv, čak i čudesno lep, ali da li nam pomaže da preciznije razumemo kretanje? Da, pomaže nam.

NAPUŠTANJE SKUPOVA I DISKRETNOSTI OTKLANJA PROTIVREČNOSTI

Naše razmatranje pojma "svemir" pokazuje da pojam ne može da sadrži bilo koji element ili skup. A to isto moze da se primeni na pojam "priroda". Priroda ne može da se sastoji od atoma. Priroda ne može da bude napravljena od tačaka prostor-vremena. Priroda ne može da bude napravljena od odvojenih, posebnih i diskretnih subjekara.

Teškoća u davanju izoštrene odrednice "svemira" takođe pokazuje da pomodan pojam "mnogosvemir" nema smisla. Ne postoji način da se odredi takav pojam, pošto ne postoji empirijski način, pa tako ni logički način, da se napravi razlika između "jednog" svemira i "drugog": svemir nema granicu.

Uzimajući u obzir ograničenja dužine, vremena, mase i ostalih veličina sa kojima smo se sreli, došli smo do brojnih skoro bolnih zaključaka o prirodi. Međutim, u zamenu smo i dobili nešto: rešene su sve protivrečnosti između opšte teorije relativnosti i kvantne teorije, koje smo pomenuli na početku ovog poglavlja. (***Izazov 82e***). ***Zamenili smo protivrečnosti kružnim odrednicama***. Iako smo morali da ostavimo mnoge dragocene navike iza nas, u zamenu imamo obećanje o opisu prirode bez protivrećnosti. Ali dobijamo još i više.

TABELA 4 Osobine prirode u maksimalnim, svakodnevnim i minimalnim razmerama

Fizičko svojstvo prirode…	**Razmere horizonta**	**Svakodnevne razmere**	**Plankove razmere**
zahteva kvantnu teoriju i opšu reoriju relativnosti	tačno	netačno	tačno
intervali mogu precizno da se izmere	netačno	tačno	netačno
intervali dužine i vremena se pojavljuju	ograničeno	neograničeno	ograničeno
prostor-vreme nije neprekidno	tačno	netačno	tačno
ne mogu da se razlikuju tačke i događaji	tačno	netačno	tačno
prostor vreme nije mnogostrukost	tačno	netačno	tačno
prostor ima 3 dimenzije	netačno	tačno	netačno
neprepozvatljivi su prostor i vreme	tačno	netačno	tačno
početni uslovi imaju smisla	netaćno	tačno	netačno
kolebanje prostor-vremena	tačno	netačno	tačno
simetrije Lorenca i Poenkarea	ne primenjuje se	primenjuje se	ne primenjuje se
CPT simertrija	ne primenjuje se	primenjuje se	ne primenjuje se
renormalizacija	ne primenjuje se	primenjuje se	ne primenjuje se
simetrija permutacije	ne primenjuje se	primenjuje se	ne primenjuje se
interacije i simetrije merila	ne postoji	postoji	ne postoji
broj čestica	neodređeno	određeno	neodređeno
algebra opažanja	neodređeno	određeno	neodređeno
neprepoznatljivost materije i vakuuma	tačno	netačno	tačno
postoje granice	netačno	tačno	netačno
priroda je skup	netačno	tačno	netačno

[1] Naravno, pojam "svemir" još uvek ima smisla ako se odredi u ućžem smislu, na primer, kao što je sve u interakciji sa određenim ljudskim ili životinjskim posmatračem u svakodnevnom životu. Ali takva odrednica koja izjednačava "svemir" i "okruženje" nije korisna u našoj potrazi, pošto joj nedostaje preciznost neophodna za opis kretanja.

Uzgred, pošto pojam "svemir" nema sadržaj, pojam "mnogosvemir" ima ga još mnje. Ovaj poslednji pojam je stvoren samo da zavara medije i razne agencije za finansiranje.

EKSTREMNE RAZMERE I OTVORENA PITANJA U FIZICI

Na početku ovig poglavlja nabrojali smo osnovne osobine prirode koje ne objašnjavaju ni opšta teorija relativnosti ni kvantna teorija. Nazvali smo ih milenijumska lista. (***Strana 22***). Rezultati iz ovog poglavlja snabdevaju nas iznenađujućim iskazima o mnogim pitanjima. U stvari, mnogi iskazi nisu uopšte novi, već su začuđujuće poznati. Uporedimo sistematski iskaze o svemiru iz ovog poglavlja u Plankovim razmerama sa onima iz predhodnih poglavlja. Upoređivanje je dato u ***Tabeli 4***.

Prvo, ***Tabela 4*** pokazuje da svaka neobjašnjena osobina navedena u njoj nije objašnjena u oba ograničenja prirode, u maloj i u velikoj razmeri. Još gore, mnoga od ovih neobjašnjenih opštih osobina čak ***nemaju smisla*** u dva ograničenja prirode.

Drugo, i još važnije, priroda se ponaša na isti način u razmerama horizonta i u Plankovim razmerama.. U stvari, ne nalazimo bilo kakvu razliku između ova sva slučaja. (Možete li da nađete jednu?) (***Izazov 83r***). To nas dovodi do predpostavke da priroda ne pravi razliku između velikog i malog. Izgleda da prirodu karakteriše ***ekstremni identitet***.

DA LI JE EKSTREMNI IDENTITET NAČELO PRIRODE?

Ideja ekstremnog identiteta obuhvata neke prilično opšte tačke:

- Sva otvorena pitanja o prirodi pojavljuju se u obe ekstremne veličine.
- Svi opisi prirode zahtevaju i opštu teoriju relativiteta i kvantnu teoriju.
- Priroda ili svemir nisu skupovi.
- Početni uslovi i jednakosti razvoja nemaju smisla na granicama prirode.
- Postoji povezanost između lokalnih i globalnih pitanja pirode.
- Pojam “svemir” nema sadržaj.

Ekstremni identitet zato izgleda kao korisna predpostavka u traženju objedinjenog opisa prirode. Da bi se bilo malo provokativniji, izgleda da je ekstremni identitet možda jedina predpostavka koja pripaja ideju da svemir nije skup. Prema tome, ekstremni identitet izgleda da je suština u potrazi objedinjavanja.

Ekstremni identitet je divan u svojoj jednostavnosti, u svojoj neočekivanosti i u bogatstvu svojih posledica. Možda ćete uživati istražujući ga sami. (***Izazov 84e***). Zapravo, istraživanje ekstremnog identiteta, mada često pod različitim nazivima, trenutno je subjekt velikih aktivnosti teorijskih fizičara. (***Ref. 108***)

Najprostiji pristup ekstremnom identitetu – zapravo je tako jednostavan da bi bio ispravan – je ***inverzija***. Zaista, ekstremni identitet izgleda da podrazumeva vezu kao što je

$$r \leftrightarrow \frac{l_{\mathrm{Pl}}^2}{r} \quad \text{ili} \quad x_\mu \leftrightarrow \frac{l_{\mathrm{Pl}}^2\, x_\mu}{x_\mu x^\mu} \tag{113}$$

povezujući rastojanje r ili koordinate x_μ sa njihovim inversnim vrednostima, koristeći Plankovu dužinu l_{Pl}. Može li ovo preslikavanje da bude simetrija prirode? U bilo kojoj tački prostora? Na primer, ako se unese udaljenost horizonta, relacija (113) podrazumeva da se dužine manje od $l_{\mathrm{Pl}}/10^{61} \approx 10^{-96}$ m ne pojavljuju nikada u fizici. Da li je to slučaj? (***Izazov 85s***). Šta bi podrazumevala inverzija velikog praska?

Mnogo zamršeniji pristup ekstremnom identitetu dolazi pod nazivom ***dvojnost prostor-vremena*** i ***holografija***. (***Ref. 103***). On je subjekt intenzivnih proučavanja. Brojna začuđujuća pitanja sadržana su u ekstremnom identitetu; postoji puno zabave pred nama.

Pre svega, potrebno je da se nađe ispravna verzija relacije inverzije (113). Inverzija niti je dovoljna niti tačna. Ona nije dovoljna jer ne objašnjava nijedno preostalo milenijumsko pitanje koje je otvorila opšta teorija relativnosti i kvntna teorija. Ona samo povezuje neka od njih, ali ***ne rešava*** nijedno. (Možda želite i sami da ovo proverite.) (***Izazov 86e***). Drugim rečima, potrebno je da nađemo precizne opise kvantne geometrije i elementarnih čestica.

Međutim, inverzija je jednostavno takođe pogrešna. Inverzija nije ispravan opis ekstrenmog identiteta jer ne ostvaruje glavni rezultat otkriven u predhodnom tekstu (***strana 70***): ona ne spaja ***stanja*** sa ***sopstvenim osobinama***, već ih drži odvojeno. Naročito, inverzija ne uzima u obzit ***interakcije***. A većina otvorenih pitanja na ovom mestu našeg uspona na planinu odnosi se na osobine i na pojave interakcija

ZAKLJUČAK O SVEMIRU

Istraživanje svemira omogućava nam da formulišeno nekoliko dodatnih zahteva za konačnu teoriju za kojom tragamo:

- Uvek kada se kombinuju opšta teorija relativnosti i kvantna teorija, svemir nas uči da on nije skup delova. Iz tog razloga uvek kada se zahteva puna preciznost besmislena je svaka rečenica ili izraz koji sadrže reč "svemir".
- Takođe smo naučili da opis prirode bez skupova rešava protivrečnosti između opšte teorije relativnosti i kvantne teorije.
- Isto tako našli smo ponovo, da uprkos protivrečnostima između kvantne teorije i opšte teorije relativnosti, ostaju da važe Plankova ograničenja c, $\hbar$ i c^4/G.
- Zatim smo našli intrigantnu vezu između Plankovih razmera i kosmološkig razmera: čini se da predstavljaju isti izazov njihovom opisu. Postoji u prirodi uska povezanost između velikih i malih razmera.

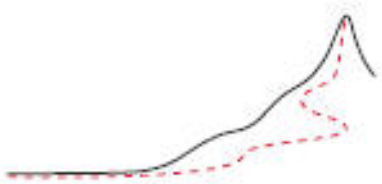
Da bi se odgovorilo na pitanje u naslovu poglavlja, izgleda da je mala razlika – ako uopšte postoji – između svemira i ničeg. Zbunjenost i napetost rastu. Ali zapravo mi smo se približili našem cilju i vredno je pažnje da se nastavi.

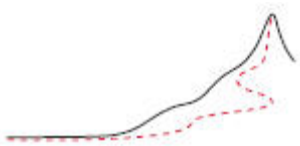
FIZIČKI AFORIZAM

Ovde je humoristički "dokaz" da smo zaista blizu vrha Planine Kretanja. Saleker (Salecker) i Vigner (Wigner), a zatim i Zimerman (Zimmermann), (***Ref. 55***), (***Ref.56***) formulisali su osnovno ograničenje za preciznost merenja τ koje može da postigne časovnik mase M. Ona je data sa $\tau = \sqrt{\hbar T / c^2 M}$, gde je T vreme koje se meri. Mi potom postavljamo pitanje: koje vreme T može da se izmeri uz preciznost Plankovog vremena t_{Pl}, uzimajući da časovnik ima masu celog svemira? Dobijamo maksimalno vreme od

$$T = \frac{t_{\mathrm{Pl}}^2 c^2}{\hbar} M \qquad (114)$$

Ako unesemo vrednosti, dobijamo dosta precizno da je vreme T sadašnja starost svemira. (***Izazov 87s***). Uz pravu dozu humora možemo ovaj rezultat da sagledamo kao znak da je sada dozrelo, posle toliko čekanja, da razumemo svemir prema Plankovim razmerama. Zato smo se pribižili vrhu Plnine Kretanja. Budite spremni za još puno zabave.





Poglavlje 6

OBLIK TAČKE – PROŠIRENJA U PRIRODI

Nil tam difficile est, quin quaerendo investigari possiet.[1]

Terencije (Terence)

Uzeti zajedno uobičajeni izraz za umanjenu Komptonovu talasnu dužinu $\lambda = \hbar/mc$ i izraz za Švarcšildov poluprečnik $r_S = 2Gm/c^2$, podrazumevaju zaključak da na Plankovim energijama ono što nazivamo "tačka prostora" i "tačkasta čestica" mora ustvari da se opišu kao ***prošireni*** sastojci koji su po veličini beskonačni i kolebljivi. Pokazaćemo ove rezultate uz sledeće dokaze.

1. Svaki eksperiment koji nastoji da uz veliku preciznost izmeri veličinu ili oblik elementarne čestice neizostavno dovede do rezultata da je bar jedna dimenzija čestice makroskopske veličine.
2. Ne postoji dokaz da je prazan prostor neprekidan, ali je puno dokaza da nije. Osim toga, da bi se napravio neki subjekt, kao što je vakuum, koji se proteže u tri dimenzije, sastojci moraju biti prošireni.
3. Postojanje minimalnog merljivog rastojanja i vremenskih intervala podrazumeva postojanje dvojnosti prostor-vremena: simetričnosti između veoma velikih i veoma malih rastojanja. Dvojnost prostor-vremena zauzvrat podrazumeva da su osnovni sastojci od kojih su napravljeni vakuum i materija prošireni.
4. Sastojci svemira, pa prema tome i vakuuma, materije i zračenja, ne mogu da obrazuju (matematički) skup. Međutim, svaki precizan opis prirode bez skupova mora da koristi proširene sastojke.
5. Izraz Bekenštajn-Hoking (Bekenstein-Hawking) za entropiju crnih rupa – posebno zavisnosti njihovih površina – potvrđuje da su i vakuum i čestice sastavljeni od proširenih sastojaka.
6. Pokušaj proširenja statističkih svojstava u Plankove razmere pokazuje da se i čestice i tačke u prostoru ponašaju kao prošireni sastojci na visokim energijama, naime kao pletenice i zapleti.
7. Trik sa opasačem daje model fermiona koji je usaglašen sa opažanjima i ponovo nagoveštava proširene sastojke u materiji.

Završavamo nekim eksperimentalnim i teorijskim proverama proširenja i pregledom sadašnjih istraživačkih napora

Also, die Aufgabe ist nicht zu sehen, was noch nie jemand gesehen hat, sondern über dasjenige was jeder schon gesehen hat zu denken was noch nie jemand gedacht hat.[2]

Ervin Šredinger (Erwin Schrödinger)

---

[1] "Ništa nije toliko teško da nebi moglo da bude istraženo." Terencije je Publije Terencije Afer (Publius Terentius Afer, cca 190. pne Cartagho – 159. pne Greece), značajan Rimski pesnik. Ovo je napisao u svom komadu *Heauton Timorumenos*, stih 675.

[2] „Dakle, zadatak nije da se vidi ono što niko nikad nije video, već da se o onome što je svako već video razmišlja kako niko nikad nije razmišljao." Ervin Šredinger (Erwin Schrödinger. 1887. Wien – 1961. Wiem), tvorac jednakosti koja mu je donela međunarodnu slavu i Nobelovu nagradu za fiziku.

VELIČINA I OBLIK ELEMENTARNIH ČESTICA

Veličina je dužina vakuuma koju zauzima objekt. Ova odrednica dolazi prirodno iz svakodnevnog života, kvantne teorije i teorije relativnosti. Da bi izmerili veličinu objekta tako malog kao što je čestica, potrebna nam je visoka energija. Što je energija veća, to je veća preciznost uz koju merimo veličinu.

Međutim, u blizini Plankove energije vakuum i materija ne mogu da se razlikuju (***strana 73***); nemoguće je da se odredi granica između njih, pa je zato nemoguće da se odredi veličina objekta. Kao posledica toga, svaki objekt, a posebno svaka elementarna čestica, postaje u vakuumu proširen! Ne postoji uopšte preciznost merenja u Plankovim razmerama. Možemo li da spasemo situaciju? Vratimo se korak unazad. Da li merenja dopuštaju makar da kažemo da li čestice mogu naći unutar malih lopti?

POSTOJE LI KUTIJE?

Prvi i najjednostavniji način da se odredi veličina kompaktne čestice, kao što je lopta, ili da se bar nađe gornja granica, je da se izmeri veličina kutije u koju ona staje. Da budemo sigurni da je čestica unutar kutije, moramo najpre da budemo sigurni da je kutija zaptivena: to jest, da li bilo šta (kao što su materija ili zračenje) ne može da izađe iz kutije.

Međutim, ne postoji način da se uverimo da kutija ne sadrži otvore! Iz kvantne fizike znamo da je svaki zid konačna potencijalna prepreka i da je tunelski efekt uvek moguć. Ukratko, ne postoji način da se napravi potpuno zaptivena kutija.

Proverimo ovaj rezultat. U svakodnevnom životu nazivamo čestice "malim" ako one mogu da se zatvore. U svakodnevnom životu zatvaranje je moguće, jer su zidovi neprobojni. Ali zidovi su neprobojni samo za materijalne čestice do oko 10 MeV i za fotone do oko 19 keV. Ustvari, kutije čak i ne postoje na srednjim energijama. Tako da sigurno ne možemo da proširimo ideju "kutije" u Plankovoj energiji.

Pošto ne možemo da zaključimo da su čestice kompaktne veličine korišćenjem kutija, potrebno je da pokušamo drugom metodom.

MOGU LI DA POMOGNU GRCI? – OGRANIČENJA NOŽEVA

Stari Grci su zaključili da postoje atomi napominjući da materija ne može da se deli beskonačno. Mora da postoje čestice koje se ne ***mogu seći***, koje su oni nazvali ***atomi***. Dvadeset pet vekova kasnije eksperimenti u oblasti kvantne fizike potvrdili su zaključak, ali su ga malo izmenili: u današnje vreme elementarne čestice su "atomi" materije i zračenja. Uprkos velikom uspehu pojma elementarna čestica, na Plankovoj energiji imamo drugačiju situaciju. Upotreba noža, kao i svakog drugog procesa sečenja, je postavljanje zidova. Zidovi i noževi su potencijalne prepreke. Sve potencijalne prepreke su konačne visine i dopušaju tunelski efekt. Prema tome, zid nikada nije savršen, pa prema tome ni nož. Ukratko, svaki pokušaj da se materija podeli neuspešan je kada se približimo Plankovim razmerama. Na Plankovoj energiji svaka podpodela je nemoguća.

Ograničenje noževa i zidova podrazumevaju da na Plankovoj energiji pokušaj rezanja ne dovodi obavezno do dva odvojena dela. Na Plankvoj energiji nikada ne možemo da izjavimo da li su dva dela zaista i potpuno odvojena: mogućnost sićušne veze dva dela na desnoj i levoj strani sečiva ne može nikada da se isključi. Ukratko, u Plankovoj razmeri nikada ne možemo da dokažemo kompaktnost odrezanih objekata.

DA LI SU PRESECI KONAČNI?

Da zaključimo: uprkos svim pokušajima, ne možemo da pokažemo da su elementarne čestice tačkaste. Ali, jesu li bar konačne veličine?

Da bismo odredili veličinu čestice moramo da pokušamo da odredimo njeno odstupanje od sličnosti sa tačkom. Otkrivanje ovog odstupanja zahteva rasipanje. Na primer, možemo da postavimo česticu u klopku, pa zatim da upucavamo u nju sondu. Šta se događa u eksperimentu rasipanja na visokim energijama? Ovo pitanje je proučavao Leonard Suskind (Leonard Susskind) sa svojim saradnicima. (***Ref. 109***). Kada pogodimo česticu sondom visoke energije proces rasipanja je okarakterisan vremenom interakcije. Izuzetno kratka interakcija podrazumeva osetljivost na veličinu i kolebljivost oblika usled kvanta rada. Izuzetno kratko vreme interakcije za visoke energije takođe obezbeđuje prekid oblika i kolebanja veličine, pa stoga određuje veličinu merenja. Kao rezultat, veličina izmerena za bilo koji mikroskopski, ali proširen objekt, povećava se kada energija sonde raste ka Plankovoj energiji. Ukratko, čak i za izuzetno dostižne

vrednosti energije veličina eklementarne čestice uvek je manja od ograničenja merenja, a kada se približavamo Plankovoj energiji, veličina čestice raste preko svih granica. Dakle, za visoke energije ne možemo da odredimo gornju granicu veličine čestice – osim samog svemira. Drugim rečima, pošto čestice nisu tačkastog oblika pri svakodnevnim energijama, na Plankovoj energiji one su ogromne:

- Kvantne čestice su proširene.

Ovo je potpun iskaz. Da li čestice zaista nisu konačne, ograničene veličine? Odmah na početku našeg uspona na planinu, napravili smo razliku između objekta i njegove okoline. (***Vol. I, strana 25***). Objekti su prema odrednici lokalizovani, ograničeni i kompaktni. Svi objekti imaju ***granicu***, to jest površinu koja sama za sebe nema ograničenje. Objekti su takođe ograničeni i na apstraktan način.: isto tako je ograničen skup simetrija objekta, kao što je geometrijska simetrija, grupna ili simetrija merila. Nasuprot tome, okruženje nije lokalizovano, već prošireno i neograničeno. Međutim, sve ove osnovne predpostavke ne uspevaju nam u Plankovim razmerama. Na Plankovoj energiji nije moguće da se odredi da li je nešta ograničeno ili kompaktno. Kompaktnost i lokalitet samo su približne osobine; one nisu primenljive na visokim energijama. Naročito ideja o tačkastoj čestici je približan pojam, koji važi samo na niskim energijama.

Zaključujemo da su čestice u Plankovim razmerama proširene kao i vakuum. Izvršimo drugačiju proveru.

MOŽEMO LI DA NAPRAVIMO FOTOGRAFIJU TAČKE?

Καιρὸν γνῶθι.[1]

Pittacus

Ljudska bića – ili bilo koja druga vresta posmatrača – može da opaža svet uz konačnu rezoluciju u vremenu i prostoru. U tom smislu ljudi su slični filmskoj kameri. Svaka kamera ima ograničenu rezoluciju: može da razlikuje dva događaja ako su na određenoj udaljenosti i razdvojena nekim minimalnim vremenom. Koja je najveća moguća rezolucija? Vrednost je (skoro) otkrivena 1899. godine (***Ref. 110***): Plankovo vreme i Plankova dužina. Ni ljudi, ni filmska kamera i nijedan uređaj ne mogu da izmere prostor ili vremenski interval koji su manji od Plankovih vrednosti. (***Ref. 47*** i ***Ref. 23***). Ali šta se događa ako načinimo fotografiju sa vremenom okidača koja je približna Plankovom vremenu?

Zamislite da imate najbrži okidač na svetu i da snimate fotografije sa kratkim i sve kraćim vremenom. ***Tabela 5*** daje pregled mogućnosti. Kada se vreme okidača smanjuje, fotografije postaju tamnije i oštrije. kada vreme okidača dostigne vreme oscilacije svetlosti, događaju se čudne stvari: svetlost je onemogućena da prođe neometeno; signal i šum postaju neraspoznatljivi; a pokretni okidač će proizvesti pomake boje. Nasuprot našem svakodnevnom iskustvu, fotografija će postati zamućenija i neoštra pri izuzetno kratkim vremenima okidača. Fotografisanje nije moguče ne samo pri dugim, već i pri kratkim vremenima okidača.

Teškoća da se napravi fotografija ne zavisi od talasne dužine svetlosti koja se koristi. Granica se pomera, ali ne nestaje. Uz vreme okidaća τ, fotoni sa energijom $\hbar/\tau$ ne mogu da prođu kroz okidač neometeni.

Ukratko, u svakodnevnom životu zamućenist se smanjuje kada se vreme okidača skraćuje, ali se ***povećava*** kada se vreme okidača skraćuje dalje prema Plankovom vremenu. Kao rezultat toga, ne postoji način da se otktije ili potvrdi postojanje tačkastih objekata snimanjem. Tačka u prostoru, kao i trenutak vremena, ***zamišljeni*** su pojmovi: oni ne spadaju u precizan opis prirode.

Pri Plankovom vremenu okidača kroz okidač mogu da prođu samo signali sa Plankovom energijom. Pošto na tim energijama ne mogu da se razlikuje materija od zračenja ili praznog prostora, svi objekti, svetlost i vakuum izgledaju isto. Nije moguće da se kaže čemu je slična priroda pri veoma kratkim vremenima okidača.

Ali situacija je gora i od toga: Plankov okidač ne može uopšte da postoji, jer bi morao da bude mali reda Plankove dužine. Kamera koja bi ga koristila nebi mogla da se napravi, pošto sočiva nebi radila na toj energiji, pošto bi efekti rasipanja učinili da je snimanje nemoguće. Drugim rečima, ideja da bi pri kratkim vremenima okidača fotografija prirode prikazivala zamrznutu sliku svakodnevnog života, kao što je zaustavljen film, potpuno je pogrešna. Zapravo, okidač ne postoji čak ni na srednjim energijama: okidač, slično zidu, prestale da postoji već pri oko 10 MeV. U pojedinom trenutku vremena priroda uopšte nije

[1] "Prepoznaj pravi trenutak." Takođe se navodi i "Prepoznaj svoju priliku." Pitak (Πιττακος) iz Mitilene, (oko 650. – 570. pne) bio je tiranin i zakonodavac na ostrvu Lezbos; on je bio jedan od "sedam mudraca" drevne Grčke.

ukočena. Zenon je kritikovao ovu ideju u svojim raspravama o kretanju, premda ne tako jasno kako mi to možemo da činimo danas. Pri kratkom vremenaima okidača priroda je zamućena. Osim toga tačkaste čestice ne postoje.

TABELA 5 Efekt raznih brzina okidača na fotografiju

Trajanje	Zamućenje	Mogućnosti opažanja i efekti
1 h	visoko	sposobnost da se vide bledi kvazari u noći ako je kompenzovano kretanje
1 s	visoko	svakodnevna kretanja u potpunosti zamućena
20 ms	niže	prekidanje očnim kapcima; male promene koje je nemoguće videti
10 ms	niže	efktivno vreme okidača oka/mozga; tenisku loptu je nemoguće videti dok se udara
0,25 ms	niže	najkraće vreme okidanja komercijalnih kamera, sposobnost snimanja brzih automobila
1 μs	vrlo nisko	sposobnost fotografisanja metka u letu; potrebno jako osvetljenje bleskalice
cca 10 ps	najniže	proučavanje molekularnih procesa, sposobnost snimanja svetlosnih impulsa; potreban laser za dovoljnu osvetljenost
1 fs	više	nemoguće svetlosno fotografisanje zbog talasnih efekta
100 zs	visoko	nemoguče fotografisanje rentgenovim zracima, ostalo je samo snimanje gama zracima
kraće vreme	vrlo visoko	fotografija postaje tamnija sa porastom osvetljenosti; znatni efekti gravitacije
10^{-43} s	najviše	nikakvo snimanje nije moguće

Ukratko, uvek kada bi sopstven oblik mogao da bude ono što mazivamo "taćka", znamo da je to pre svega oblak, budući da je uvek zamućen. Bilo koji postupak da koristi za snimanje elementarne čestice, slika je uvek proširena. Radi toga proučimo oblik detaljnije.

KAKAV JE OBLIK ELEKTRONA?

Pošto čestice nisu slične tački, one imaju oblik. Kako možemo da ga odredimo? Oblik svakodnevnog predmeta određujemo ***dodirujući*** ga sa svih strana. To uspeva sa biljkama, ljudima ili mašinama. To uspeva čak i sa molekulima, kao što je molekul vode. Stavimo ga u (približno) mirovanje, na primer u ledu, pa potom rasipamo njegove male delove. Rasipanje je je samo vrsta dodirivanja sa visokim energijama. Međutim, rasipanje ne može da odredi oblike objekata manje od talasne dužine upotrebljene sonde. Da bismo odredili oblik objekta malog kao što je elektron, moramo raspolagati najvišim energijama. Međutim, već znamo šta se događa kada se prilazi Plankovim razmerama: oblik čestice postaje oblik svega u prostoru koji je okružuje. Ukratko, oblik elektrona ne može da bude određen na ovaj način.

Drugi način da se odredi oblik je da se napravi zaptivena kutija oko sistema koji se istražuje i da se napuni istopljenim voskom. Porom se ostavi da se vosak ohladi i osmatraju se šuplji delovi. Međutim, u blizini Plankove energije kutije ne postoje. Nismo u mogunosti da odredimo oblik ni na taj način.

Treći način da se izmeri oblik nekog objekta je da se izreže na delove a potom da se proučvaju delovi. Kao što je dobro poznato, pojam "atom" već znači "nereziv" ili "nedeljiv". Neđutim, ne postoje ni nedeljiv atom ni čestice. Ustvari, ***rezanje*** je samo verzija procesa rasipanja na niskim energijama. Prema tome, ne postoji način da se dokaže da je objekt nedeljiv u Plankovim razmerama. Naša svakodnevna intuicija vodi nas do potpune zablude u Plankovim razmerama.

Mogli bismo da pokušamo da napravimo razliku između podužnog i poprečnog oblika, u odnosu na smer kretanja. Međutim, za poprečni oblik dobijamo isti problem kao sa rasipanjem: poprečni oblik se razlikuje na visokim energijama. A da bismo odredili podužni oblik, potrebna su nam najmanje dva zida beskonačno visoke energije. Već znamo da je to nemoguće.

Sledeći, indirektan način merenja oblika je merenje momenta inercije. Konačna veličina momenta inercije znači kompaktan, konačan oblik. Međutim, kada se energija merenja povećava prema Plankovim razmerama, obrtanje, linearno kretanje i razmena postaju pomešani. (***Ref. 47***). Ne mogu se dobiti smisleni rezultati.

Još jedan način da se odrede oblici je da se izmeri entropija zbirke čestica koje žeimo da proučimo. Time se omogućava određivanje dimenzionalnosti i broj unutrašnjih stepena slobode. Međutim, na visokim energijama zbirka elektrona bi postala crna rupa. Mi ćemo posebno da proučimo ovo pitanje u tekstu koji sledi, ali ponovo nećemo da nađemo nikakvu informaciju.

Da li ovi dokazi drže vodu? Predpostavljamo tri dimenzije u svim razmerama, pa je oblik same čestice ustaljen. Možda ove predpostavke ne važe u Plankovim razmerama? Proverimo ostale mogućnosti. Već smo pokazali da usled osnovnih ograničenja merenja dimenzionalnost prostor-vremena ne može da se odredi u Plankovim razmerama. (***Ref. 47***). Čak i kada bismo napravili savršene trodimenzionalne kutije, rupe bi mogle da ostanu u ostalim dimenzijama. Nije potrebno mnogo da bi se sagledalo da svi dokazi protiv kompaktnosti važe čak i ako prostor-vreme ima dodatne dimenzije. (***Izazov 83e***).

DA LI JE OBLIK ELEKTRONA USTALJEN?

Samo objekt koji se sastoji od lokalizovanih sastojaka, kao što su kuća ili molekul, može imati ustaljen oblik. Što je sistem manji, to kvantna kolebanja imaju veću ulogu. Nema malog subjekta konačne veličine – posebno, ne elementarnih čestica – koji ima ustaljen oblik. U svakom misaonom eksperimentu koji uključuje konačan oblik, sam oblik se koleba. Međutim, možemo da kažemo i više.

Razlikovanje između čestica i okoline počiva na ideji da čestice imaju ***unutrašnje*** osobine. Zapravo, sve unutrašnje osobine, kao što su spin, masa, naelektrisanje i paritet su lokalizovana. (***Strana 70***). Ali videli smo da nijedna unurtrašnja osobina ne može da se izmeri i odredi u Plankovim razmerama. Stoga nije moguće razlikovati čestice od okoline. Na Plankovim razmerama čestice takođe imaju sve osobine koja ima i okolina. Osim toga, čestice su proširene.

Ukratko, ne možemo dokazati eksperimentima da na Plankovoj energiji elementarne čestice imaju konačni veličinu u svim pravcima. Ustvari, svi eksperimenti koje možemo da zamislimo u saglasnosti su sa proširenim česticama, sa "beskonačnom" veličinom. Još preciznije, čestice pri istraživanju uvek dostižu granicu oblasti prostor-vremena. Prosto rečeno, možemo takođe da kažemo da čestice imaju ***repove***.

Ne samo da su čestice proširene, već njihov oblik ne može da se odredi metodama koje su upravo istražene. Jedina preostala mogućnost je da se predpostavi prema kvantnoj teoriji: ***oblik čestice je kolebljiv***.

Do istog zaključka dolazimo za čestice zračenja. Dokaz sa kutijom pokazuje da su isto tako čestice zračenja proširene i kolebljive.

Slučajno, mi smo takođe postavili važno pitanje o ***elementarnim*** česticama. Već smo videli da je svaka čestica mora biti elementarna, ako je manja od sopstvene Komptonove talasne dužine. (***Vol. IV, strana 85***). Ako bi bile složene, u njima bi bili lakši sastojci; ove lakše čestice imale bi veću Komptonovu talasnu dužinu od složene čestice. To je nemoguće, pošto veličina složene čestice mora da bude veća od Komptonove talasne dužine sastojaka.[1]

Međutim, elementarna čestica može da ima sastojke, pod uslovom da nisu kompaktni. Probleme kompaktnih sastojaka opisao je Andrej Saharov 1960. godine (***Ref. 27***). Ako su sastojci prošireni, predhodni dokaz je neprimenljiv, pošto prošireni sastojci nemaju lokalizovanu masu. Kao rezultat toga, ako je strela u letu – Zenonov poznat primer – napravljena od proširenih sastojaka, nebi moglo da se kaže da je na određenom položaju u određeno vreme. Skraćivanjem vremena opažanja ka Plankovom vremenu učinilo bi da strela nestane u oblaku koji čini prostor-vreme.[2]

ZAKLJUČAK O PRVOM DOKAZU ZA PROŠIRENOST

Ukratko, tačkaste čestice ne postoje u Plankovim razmerama. U Plankovim razmerama svi misaoni eksperimenti predlažu da su materija i zračenje načinjeni od ***proširenih i kolebljivih sastojaka beskonačne veličine***.

Primećujemo neposredno da je za proširene sastojke zadovoljen zahtev nelokalnog opisa; osim toga, za kolebljive sastojke zadovoljen je zahtev statističkog opisa vakuuma. (***Ref. 47***). Dokaz koji zabranjuje sastav elementarnih čestica je zaobiđen, jer prošireni sastojci nemaju masu. Prema tome, pojam Komptonove talasne dužine ne može da se odredi ili da se primeni na proširene sastojke, a elementarne čestice mogu da imaju sastojke, ukoliko su sastojci prošireni. Međutim, ako su sastojci poširenі, kako su od njih obrazovane kompaktne tačkaste čestice? (***Izazov 89e***). Uskoro ćemo da potražimo nove mogućnosti.

---

1 Primeri su neutron, pozitronijum ili atomi. Primećujemo da se dokaz ne menja kada su same elementarne čestice nestabilne, kao što je mion. Mogućnost da su svi sastojci teži od složene celine, što bi izbeglo ovaj dokaz, ne izgleda da vodi ka zadovoljavanju fizičkih svojstava: na primer, to vodi do suštinski nestabilnih složenosti.

2 Prema tome, u Plankovim razmerama ne postoji kvantni Zenonov efekt. (***Ref. 111***).

OBLIK TAČAKA U VAKUUMU

Stoga, budući da ne postoji mogućnost da [konačne] količine budu izgrađene od spojeva i tačaka, neophodno je da postoje nedeljivi materijalni elementi i [konačne] količine. (***Ref.112***)

Aristotel (Aristotle),[1] *Of Generation and Corruption.*

Koristili smo ideju da je prazan prostor načinjen od prostornih tačaka. Međutim, u Plankovim razmerama nijedno merenje ne može da daje nultu dužinu, nultu masu, nultu površinu ili nultu zapreminu. Ne postoji način da se izrazi da li je nešto u prirodi tačka bez protivrečnih eksperimentalnih rezultata.

Osim toga, ideja o tački je ekstrapolacija nečeg što se nalazi u malim praznim kutijama koje postaju sve manje i manje. Međutim, upravo smo videli da na visokim energijama ne može da se kaže da su male kutije prazne. Ustvari, kutije i ne postoje uopšte, pošto one nikada ne mogu da imaju neprobojne zidove pri visokim energijama.

Isto tako, ideja o tački kao ograničavajućoj podpodeli praznog prostora je neodrživa. Na malim rastojanjima prostor ne može da se dodatno podeli, pošto podela zahteva neku vrstu zidova podele, što je nemoguće.

Ne može da se primeni čak ni ideja o još jednoj umetnutoj tački između druge dve. Pri visokim energijama nemoguće je da se kaže da li je tačka tačno na liniji koja spaja dve spoljne tačke; i u blizini Plankove energije ne postoji uopšte način da se nađe tačka između njih dve. Ustvari, pojam "između" nema smisla u Plankovim razmerama,

Zbog toga nalazimo da tačke prostora ne postoje, baš kao što ne postoje tačkaste čestice. Međutim, postoje i drugi razlozi zašto prostor ne može da bude načinjen od tačaka. Da bi obrazovale prostor tačke je potrebno držati na neki način ***razdvojene***. Zapravo, matematičari imaju jak dokaz zbog kojeg fizički prostor ne može da bude načinjen od matematičkih tačaka: svojstva matematičkih prostora opisanih paradoksom Banah-Tarski (***Ref. 47***) potpuno su različita od onih za fizički vakuum. Paradoks Banah-Tarski izražava da se lopta načinjena od matematičkih tačaka može raseći na pet delova koji mogu da se ponovio sastave u dve lopte, svaku sa istom zapreminom kao orginalna lopta. Matematički, postoje skupovi tačaka za koje pojam zapremine nema smisla. Fizički govoreći, zaključujemo da pojam zapremine ne postoji u neprekidnom prostoru; on je jedino određen ako postoje ***unutrašnje dužine***. U stvari, u prirodi postoji unutrašnja dužina za materiju i vakuum: Plankova dužina. I bilo koji pojam sa unutrašnjom dužinom mora da bude opisan jednim od nekoliko proširenih sastojaka.[2] Ukratko, da bismo izgradili prostor poterbni su nam ***prošireni*** sastojci.

Isto tako je problematičan i broj dimenzija prostora. Matematički je nemoguće odrediti dimenziju skupa tačaka samo na osnovu strukture skupa. Svaki kompaktni jednodimenzionalni skup ima toliko mnogo tačaka koliko i svaki kompaktni trodimenzionalni skup – zapravo koliko i svaki kompaktni skup sa bilo kojim brojem dimenzija većim od nule. Da bismo izgradili fizički trodimenzionalni vakuum, potrebni su nam sastojci koji će ***organizovati*** svoje susede. Osnovni sastojci moraju posedovati neku vrstu sposobnosti da oblikuju granice, koji će konstruisati ili ispuniti tačno tri dimenzije. Granice zahtevaju proširene sastojke. Zbirka upletenih sastojaka proširenih do maksimalne razmere područja koje se razmatra radila bi savršeno. Naravno, precizan oblik osnovnih sastojaka još uvek nije poznat. U svakom slučaju, nalazimo ponovo da bilo koji sastijci fizičkog trodimenzionalnog prostora moraju da budu ***prošireni***.

Ukratko, proširenost nam je potrebna da bismo odredili dimenzionalnost i da odredimo zapreminu. Ovaj rezultat nije iznenđujući. Zaključili smo predhodnom tekstu da su sastojci čestica prošireni. Pošto se vakkum ne razlikuje od materije, očekivali bismo da sastojci vakuuma takođe budu prošireni. Jednostavno izraženo, ako elementarne čestice nisu tačkaste, onda isto tako ne mogu da budu ni tačke u vakuumu.

---

1 Aristotel (384/3. Stageira – 322. pne Chalkis), grčki filozof i naučnik.

2 Predstavljanje vakuuma kao zbirke kompaktnih sastojaka, kao što su lopte, sa Plankovom veličinom u svim pravcima izbegavalo bi paradoks Banah-Tarski (***Ref. 113***), ali nam nebi dopuštalo da odredimo broj dimenzija za prosor i vreme. To bi takođe bilo u protivrečnosti sa ostalim rezultatima oz ovog odeljka. (***Izazov 90s***). Prema tome, ubuduće ga nećemo istraživati.

MERENJE PRAZNINE

Radi potvrde da li su sastojci vakuuma prošireni, izvedimo nekoliko dodatnih misaonih eksperimenata. Prvo, izmerimo veličinu tačke i prostoru. Najjasnija odrednica veličine je u pojmovima porečnog preseka. Kako možemo da odredimo poprečni presek tačke? Možemo da odredimo poprečni presek dela vakuuma, a zatim da odredimo broj tačaka u njemu. Međutim, na Plankovoj energiji dobijamo prost rezultat: poprečni presek zapremine praznog prostora nezavisan je od dubine. Na Plankovoj energiji vakuum ima površinu, ali ne i dubinu. Drugim rečima, na Plankovoj energiji možemo samo da izrazimo da Plankov nivo prekriva površinu područja. Ne možemo ništa da kažemo o njegovoj unutrašnjosti. Jedan način da se oslika ovaj rezultat je da se kaže da ono što nazivamo "tačka prostora" ustvari su dugačke cevi.

Drugi način da se odredi veličina tačke je da se prebroje tačke koje se nalaze u datoj zapremini prostor-vremena. Jedan od pristupa je da se izbroje svi mogući položaji tačkastih čestica u zapremini. Međutim, na Plankovoj enetgiji tačkaste čestice su proširene i neprepoznatljive u odnosu na vakuum. Na Plankovioj energiji broj tačaka je određen površinom područja zapremine podeljene Plankovom površinom. Ponovo zavisnost od površine nagoveštava da su čestice i sastojci prostora dugačke cevi.

KOLIKI JE NAJVEĆI BROJ ČESTICA KOJI STAJE U DEO VAKUUMA?

Drugi pristup za prebrojavanje broja tačaka u zapremini je da se deo vakuuma napuni tačkasim česticama.

Maksimalna masa koja staje u deo vakuuma je crna rupa. Međutim u tom slučaju isto tako maksimalna masa zavisi samo od površine datog područja vakuuma. Maksimalna masa se povećava brže od zapremine. Drugim rečima, broj fizičkih tačaka unutar područja prostora jedino je srazmeran površini područja. Prinuđeni smo da zaključimo da vakuum mora da je načinjen od proširenih sastojaka koji se protežu u celom području, nezavisno od negovog oblika.

ZAKLJUČAK O DRUGOM DOKAZU PROŠIRENOSTI

Ukratko, Plankove razmere podrazumevaju da je ***prostor načinjen od proširenih sastojaka beskonačne veličine***. Prostor nije načinen od tačaka već od tkanja.

Pre više od dve hiljade godina drevni Grci su tvrdili da materija mora da je načinjena od čestica (***Vol. I, strana 247***), pošto so može da se rastopi u vodi i pošto riba može da pliva kroz vodu. (***Ref. 114***). Sada pošto znamo više o Plankovim razmerama, moramo ponovo da razmotrimo ovaj dokaz. Slično ribi koja pliva kroz vodu, čestice mogu da se kreću kroz vakuum; ali pošto vakuum nema granica i ne može da se razlikuje od materije, vakuum ne može da bude načinjen od lokalizovanih čestica. Međutim, druga mogućnost dopušta kretanje čestca kroz vakuum: i vakuum i čestice mogli bi da budu načinjeni od tkanja proširenih sastojaka. Proučimo ovu mogućnost detaljnije.

VELIKO, MALO I NJIHOVA POVEZANOST

Mogao bih da budem zatvoren u orahovoj ljusci i da smatram sebe kraljem beskrajnog prostora, kada ne bih imao ružne snove.

Vilijan Šekspir (William Shakespeare)[1], *Hamlet*.

Ako dva opažanja ne mogu da se razlikuju, postoji transformacija simetrije koja ih spaja. Na primer, promenom sistema koji se opaža, električno polje može (delimično) da se promeni u magnetno polje. Transformacija simetrije znači da možemo promeniti tačku posmatranja (na primer, sistem opažanja) na takav način da je isto opažanje opisano jednom veličinom sa jedne tačke posmatranja i odgovarajućom veličinom sa druge tačke posmatranja.

Kada se meri dužina u Planlkovim razmerama nije moguće da se kaže da li merimo dužinu dela vakuuma, Komptonovu talasnu dužinu tela ili Švarcšildov prečnik tela. Na primer, maksimalna veličina elementarnog objekta je njegova Komptonova talasna dužina. Minimalna veličina elementarnog objekta je njegov Švarcšildov poluprečnik. Stvarna veličina elementarnog objekta nalazi se negde između. Ako želimo da izmerimo veličinu precizno, moramo da odemo do Plankove energije; ali tada su sve ove

[1] Viljem Šekspir (William Shakespeare, 1564. Stratford upon Avon – 1616. Stratford upon Avon) napisao je pozorišne komade koji su dragulji svetske literature

veličine jednake. Drugim rečima, u Plankovim razmerama postoji transformacija simetrije između Komptonove talasne duine i Švarcšildovog poluprečnika. Ukratko, ***u Plankovim razmerama postoji simetrija između mase i inverzne mase***.

Kao sledeća posledica, u Plankovim razmerama postoji simetrija između veličine i inverzne veličine. Neraspoznatljivost materija-vakuum znači da postoji u Plankovim razmerama simetrija između dužine i inverzne dužine. (***Ref. 115***). Ova simetrija se naziva u istraživačkoj literaturi superstruna[1] ***dvojnost prostor-vremena*** ili ***T-dvojnost***. Dvojnost prostor-vremena je simetrija između situacija u razmeri $n\, l_{\mathrm{Pl}}$ i u razmeri $f l_{\mathrm{Pl}}/n$, ili, drugim rečima, između R i $(f l_{\mathrm{Pl}})^2/R$, pri čemu se činilac f podesi tako da se dobiju vrednosti negde između 1 i 1000.

Dvojnost je pravi neperturbativni efekt. On ne postoji na niskim energijama, pošto dvojnost automatski povezuje energije E i $E_{\mathrm{Pl}}^2/E = \hbar c^3/GE$, to jest povezuje energije ispod i iznad Plankovih razmera. Dvojnost se ne može primetiti u svakodnevnom životu. To je kvantna simetrija, pošto u svoju odrednicu uključuje Plankovu konstantu. Ona je takođe i efekt opšte teorije relativnosti, pošto uključuje gravitacijsku konstantu i brzinu svetlosti. Proučimo detaljnije dvojnost.

DA LI JE MALO VELIKO?

*[Zenon iz Eleje je podržavao:] Ako je postojeće veliko, neophodno je da istovremeno postoje i malo i veliko, tako malo da nema veličinu i tako veliko da bi bilo bez granica. (**Ref. 116**).*

Simplikije (Simplicius)[2]

Da bi se istražile posledice dvojnosti možemo da je uporedimo sa simetrijom obrtanja u svakodnevnom životu. Svaki objekt iz svakodnevnog života simetričan je pri punom obrtu za 2π. Za obrtanje posmatrača uglovi imaju smisla sve dok su manji od 2π. Ako bi posmatrač koji se obrće insistirao na razlikovanju uglova od 0, 2π, 4π itd, dobijao bi novu kopiju svemira pri svakom punom obrtu.

Slično je i u prirodi, između razmera R i l_{Pl}^2/R ne može da se napravi razlika. Dužine nemaju smisla ako su manje od l_{Pl}. Međutim, ako insistiramo na korišćenju ipak manjih vrednosti i pri razlikovanju njih od velikih, dobijamo novu kopiju svemira u ovim malim razmerama. Takvo insistiranje je deo standardnog neprekidnog opisa kretanja, u kojem se predpostavlja da su prostor i vreme opisani realnim brojevima, koji su određeni proizvoljno malim intervalima. Uvek kada se koristi (približan) opis neprekidnosti uz beskonačno proširenje, pojavljuje se simetrija $R \leftrightarrow l_{\mathrm{Pl}}^2/R$.

Dvojnost podrazumeva da invarijanta difeomorfizma važi samo na srednjim razmerama, ne i na onom krajnjim. Na krajnjim razmerama mora na pravilan način da se u obzir uzme kvantna teorija. Još uvek ne znamo kako to da uradimo.

Dvojnost prostor-vremena znači da uvođenje dužina manjih od Plankove dužine (kao kada se odrede tačke u prostoru, čija je veličina nula) istovremeno znači uvođenje stvari sa veoma velikom ("beskonačnom") vrednošću. Dvojnost prostor-vremena znači da su za svaku dovoljno malu loptu unutrašnjost i spoljašnost jednake.

Dvojnost znači da ako sistem ima malu dimenziju, on isto tako ima i veliku, i obratno. Stoga u prirodi nema malih objekata. Tako je dvojnost prostor-vremena saglasna sa idejom da su osnovni sastojci prošireni.

---

1 Postoji takođe i ***S-dvojnost*** koja povezuje velike i male konstante veze, kao i ***U-dvojnost*** koja je kombinacija S- i T-dvojnosti.

2 Simplikije iz Kilikija (Simplicius of Cilicia, 499. – 560.), filozof, neoplatonista.

OBJEDINJAVANJE I TOTALNA SIMETRIJA

Do sada smo videli da na Plankovoj energiji ne mogu da se razlikuju vreme i dužina i da vakuum i materija ne mogu da se razlikuju. Dvojnost pokazuje da masa i inverzna masa ne mogu da se razlikuju. Kao posledicu toga, zaključujemo da dužina, vreme i masa ne mogu međusobno da se razlikuju na svim energijama i u ***svim*** razmerama! A pošto je svako opažanje kombimacija dužine, mase i vremena, ***dvojnost prostor-vremena znači da postoji simetrija između svih opažanja***. To nazivamo ***totalna simetrija***.[1]

Totalna simetrija podrazumeva da postoji mnogo posebnih vrsta dvojnosti, po jedna za svaki par veličina koje se istražuju. Zaista, broj vrsti dvojnosti povećava se svake godine. Između ostalih one uključuju poznatu dvojnost elektricitet-magnetizam sa kojom smo se sreli u elektrodinamici (***Vol. III, strana 72***), dvojnost konstante veza, dvojnost površina-zapremina, dvojnost prostor-vreme i mnogo više. (***Ref. 117***). To sve potvrđuje da postoji ogromna količina simetrija u Plankovim razmerama. Ustvari, slične simetrije su bile poznate odmah na poćetku istraživanja kvantne gravitacije. (***Ref. 115***).

Mnogo važnije, totalna simetrija podrazumeva da gravitacija može da se posmatra kao ekvivalent svim silama. Dvojnost prostor-vreme stoga pokazuje da je moguće objedinjavanje. Fizičari su oduvek sanjali o objedinjavanju. Dvojnost nam kazuje da ovaj san može zaista da se ostvari. Možda izgleda da je totalna simetrija potpuno protivrečna svemu što smo rekli u predhodnom odeljku, gde smo tvrdili da se sve simetrije gube u Plankovim razmerama. Koji je rezultat tačan? Očigledno, oba su tačna.

U Plankovim razmerama sve simetrije niskih energija zaista se gube. Ustvari, gube se sve simetrije koje podrazumevaju ***ustaljenu*** energiju. Međuim, dvojnost i njeno uopštavanje kombinuju i male i velike dimenzije, ali i male i velike energije. Većina standardnih simetrija fizike, kao što su merilo, permutacija i simetrija prostor-vremena, važe na svim ustaljenim energijama posebno. Međutim, priroda nije napravljena na takav način. Precizan opis prirode zahteva od nas da razmotrimo istovremeno velike i male energije. U svakodnevnom životu to ne činimo. Fizika svakodnevnog života je približnost prirode koja važi na niskim i ustaljenim energijama. U velikom delu dvadesetog veka fizičari su nastojali da postignu sve više i više energije. Verujemo da se preciznost povećava sa porastom energije. Međutim, kada kombinujemo kvantnu teoriju i gravitaciju prinuđeni smo da menjamo ovakav pristup. Da bi se postigla visoka preciznost, moramo istovremeno da uzmemo u obzir i visoku i nisku energiju.[2]

Velika razlika između pojava koje se javljaju na niskim i visokim energijama glavni su razlog zbog kojeg je objedinjavanje teško. Mi smo koristili podelu prirode prema razmerama energija; fizika visokih energija, atomska fizika, hemija, biologija itd. Međutim, nije nam dopušteno da i dalje razmišljamo na taj način. Moramo istovremeno da uzmemo u obzir sve energije. To nije lako, ali ne smemo ni da očajavamo. Bitan pojmovni napredak načinjen je u poslednjoj dekadi dvadesetog veka. Osim toga, sada znamo da nam je potreban ***samo jedan sastojak*** za sve stvari koje mogu da budu izmerene.

Pošto postoji samo jedan sastojak, automatski je zadovoljena totalna simetrija. A pošto postoji samo jedan sastojak, postoji više načina da se on proučava. Možemo da počnemo od bilo kojeg pojma (niske energije) u fizici i da istražujemo kako on izgleda i kako se ponaša kada se približimo Plankovim razmerama. U ovom odeljku mi smo posmatrali pojam "tačka". Očigledno je da zaključak mora da bude isti, bez obzira sa kojim pojmom počinjemo, bilo da je to električno polje, spin, ili bilo koji drugi. (***Izazov 91d***). Takvo proučavamje daje proveru rezultata iz ovog odeljka.

ZAKLJUČAK O TREĆEM DOKAZU PROŠIRENOSTI

Objedinjavanje podrazumeva da se razmišlja u pojmovima dvojnosti i pojmovima koji iz njih slede. Veliko i malo su povezani. Dvojnost ukazuje na jedinstvenu vrstu proširenih sastojaka koji određuju sva fizička opažanja.

Još uvek je potrebno da tačno shvatimo šta se događa sa dvojnošću kada se ograničimo na niske energije, kao što to činimo u svakodnevnom životu. (***Izazov 92e***). To ćemo da istražimo sada.

---

[1] Simetrija između veličine i Švarcšildovog poluprečnika, to jest simetrija između dužine i mase, dovodi do opšte teorije relativnosti. Osim toga, na Plankovoj energiji postoji simetrija između veličine i Komptonove talasne dužine. Drugim rečima, postoji simetrija između dužine i inverzne mase. To podrazumeva simetriju između koordinata i talasnih funkcija, to jest simetriju izmedu stanja i opažanja. To dovodi do kvantne teorije.

[2] Renormalizacija energije povezuje različite energije, ali na neispravan način, posebno što ona ne uključuje dvojnost.

DA LI PRIRODA IMA DELOVE?

Pluralitas non est ponenda sine necessitate.[1]
Vilijam iz Okama (William of Occam)

Drugi dokaz, nezavisan od onih iznetih do sada, ukazuje u pravcu modela prirode koji se zasniva na proširenim sastojcima. Znamo da je svaki pojam kod kojeg možemo da razlikujemo delove opisan skupom. Obično opisujemo prirodu kao skup objekata, položaja, trenutaka itd. Najpoznatiji opis prirode sa opisom teorije skupova, poznat je odavno, dao ga je Demokrit. (***Ref. 118***):

> "Svet je načinjen od nevidljivih čestica i praznina."

Ovaj opis je bio izuzetno uspešan u prošlosti: nisu postojala odstupanja od opažanja. Međutim, posle 2500 godina očigledne su pojmovne teškoće kod ovog opisa.

Znamo da Demokrit nije bio u pravu, pre svega, jer se vakuum i materija ne mogu da razlikuju u Plankovim razmerama. Zbog toga je već greška reč "i" u rečenici. Drugo, zbog toga što zbog postojanja minimalnih razmera praznina ne može da bude načinjena od "tačaka", kao što se obično predpostavlja. Treće, opis otpada pošto čestice nisu kompaktni objekti. Konačno, totalna simetrija podrazumeva da ne možemo da razlikujemo delove u prirodi. Ništa ne može da se razlikuje od nečeg dugog uz potpunu preciznost, pa zato čestice ili tačke u prostoru, koje su činile naivan model sveta, ne mogu da postoje.

Ukratko, kvantna teorija i opšta teorija relativnosti, uzete zajedno, pokazuju da su u prirodi sve podele i sve razlike samo približne. Ništa zaista ne može da se razlikuje od bilo čega drugog uz potpunu preciznost. Drugim rečima, ne postoji način da se odredi "deo" prirode, bilo da je materija, prostor, vreme ili zračenje. ***Priroda ne može da bude skup***. Zaključak da priroda nije skup ne treba da dolazi kao iznenađenje. Već smo se sreli sa drugim razlogom za dvoumljenje da je priroda skup. Bilo koju odrednicu da koristimo za pojam "čestica", Demokrit ne može da bude u pravu iz čisto logičkih razloga. Opis koji je on dao ***nije potpun***. Svaki opis prirode koji prirodu opisuje kao skup delova otkazuje u objašnjenju ***broja*** tih delova. Posebno, broj čestica i broj dimenzija prostor-vremena moraju da budu određeni ako opisujemo prirodu kao da je napravljena od čestica i vakuuma. (***Vol. III, strana 237***). Na primer, vidimo da je prilično opasno da se pravi šala sa poznatom izrekom Artura Edingtona (Arthur Eddington)

> "Verujem da postoji 15,747,724,136,275,002,577,605,653,961,181,555,468,044,717,914,527,116, 709, 366, 231, 425,076,185,631,031,296 protona u svemiru i isti vroj elektrona." (***Ref. 119***).

Ustvari, praktično svi fizičari dele ovo verovanje, iako se oni ili obično pretvaraju da su naklonjeni nekom drugom broju, ili još gore, smatraju da je broj neodređen.

U savremenoj fizici mnogi specijalizovani skupovi se koriste za opis prirode. Koristili smo vektorske prostore, linearne prostore, topološke prostore i Hilbertove prostore. Međutim, do sada smo dosledno odustajali, kao i svi fizičari, da se zapitamo o poreklu njihovih veličina (matematički rečeno, o njihovoj dimenzionslnosti ili kardinalnosti). Ustvari, isto tako je nezadovoljavajuće da se kaže da svemir sadrži određeni broj atoma, kao i da se kaže da je prostor-vreme sastavljeno od događaja poput tačaka raspoređenih u 3+1 dimenziju. Oba su izraza o veličini skupova u širem smislu. U celosti, objedinjen opis prirode od broja najmanjih čestica i broja tačaka prostor-vremena ne sme da bude unapred ustanovljen, već mora da bude ***rezultat*** opisa.

Svaki deo prirode je po odrednici manji od celine prirode i različit od ostalih delova. Kao rezultat toga, nijedan opis prirode preko skupa ne može sa sigurnošću da daje broj čestica ili dimenzionalnost prostor-vremena. Sve dok budemo nastojali da koristimo prostor-vreme ili Hilbertov prostor za opis prirode, ***ne možemo*** da razumemo broj dimenzija ili broj čestica.

To nije previše loše, jer već znamo da priroda nije sastavljena od delova. Znamo da su delovi samo približni pojmovi. Ukratko, ako bi priroda bila izgrađena od delova, ona nebi bila jedinstvena, ili "jedna".

S druge strane, Ako je priroda jedinstvena, ona ne može da ima delove.[1] Priroda ne može tačno da bude razdeljena. Ona ne može da bude sastavljena od delova.

---

[1] "Mnoštvo ne treba da se uvodi bez potrebe". Ovo čuveno načelo je obično nazivano ***Okamova britva***. Viljem iz Okama (William of Ockham, 1285/1295 Ockham - 1349/50 München), ili Occam u uobičajenom latinskom pisanju, bio je jedan od najvećih mislilaca svog vremena. U njegovoj čuvenoj rečenici on izražava da samo onaj pojam koji je strogo potreban treba da se uvede radi objašnjavanja opažanja. Međutim, u ovoj etapi našeg uspona na planinu to ima još neposrednije izražavanje: postojanje ***bilo kojeg*** mnoštva u prirodi je upitno.

Ukratko, priroda ne može da bude skup. Skup je lista elemenata koji se razlikuju, Kada se ujedine opšta teorija relativnosti i kvantna teorija, priroda pokazuje da nema elemenata: ***priroda prestaje da bude skup u Plankovim razmerama***. Ovaj rezultat pojašnjava razmatranje koje smo započeli ranije u okviroima klasične fizike. Tamo smo otkrili da su materijalni objekti određeni korišćenjem prostora i vremena, a da su prostor i vreme određeni pomoću objekata. Uporedo sa rezultatima kvantne teorije ovo podrazumeva da su u savremenoj fizici čestice određene pojmovima vakuuma, a vakuum pojmovima čestica. Kružnost nije dobra ideja, međutim, mi živimo uz nju – na niskim energijama, Međutim, na Plankovoj energiji vakuum i čestice ne mogu da se razlikuju jedno od drugog. Čestice i vakuum – pa prema tome sve – isto je. Moramo da napustimo kružnu odrednicu. To je zadovoljavajuči ishod; međutim to isto tako podrazumeva da priroda nije skup.

Takođe i dvojnost prostor-vremena podrazumeva da prostor nije skup. Dvojnost prostor-vremena podrazumeva da događaji ne mogu da se razlikuju jedan od drugog, te da stoga ne obrazuju elemente nekog prostora. (***Ref. 121***). Fil Gibs (Phill Gibbs) je dao ovom svojstvu prirode naziv ***simetrija događaja***. Ovaj naziv, koji izaziva razmišljanje, sadrži takođe pojam "događaj", naglašavajući nemogućnost da se skup koristi za opis prostor-vremena.

Ukratko, ***priroda ne može da bude napravljena od vakuuma i čestica***. To je neobičan rezultat. Atomisti, od Demokrita do Galileja bili su zbog toga proganjani tokom istorije. Da li su sve njihove bitke bile uzaludne? Nastavimo da bistrimo naša razmišljanja.

DA LI SVEMIR SADRŽI BILO ŠTA?

Da bi se iskazalo da svemir sadrži nešta podrazumeva da imamo mogućnost da razlikujemo svemir od njegovog sadržaja. Međutim. znamo da ie precizno razdvajanje nemoguće. Ako priroda nije načinjena od delova, pogrešno je reći da svemir ***sadrži*** nešta.

Krenimo dalje. Potreban nam je opis prirode koji nam dopušta da izrazimo da na Plankovoj energiji ništa ne može da se razlikuje od bilo čega drugog. Na primer, mora da bude nemoguće da se napravi međusobna razlika između čestica ili vakuuma. Postoji samo jedno rešenje: sve – ili najmanje ono što u svakodnevnom životu nazivamo "sve" – mora da bude načinjeno od istih pojedinačnih sastojaka. Sve čestice su načinjene od jednog "dela". Svaka tačka u prostoru, svaki događaj, svaka čestica i svaki trenutak vremena mora da budu napravljeni os istog pojedinačnog sastojka.

AMEBA

Teorija o svačemu koja opisuje ništa, nije bolja od teorije o ničemu koja opisuje sve.

Anonymous

Ustanovili smo da su delovi približni pojmovi. Delovi prirode nisu strogo manji od same prirode. Kao posledica toga svaki "deo" mora da bude proširen. Pokušajmo da izdvojimo neke dodatne informacije o sastojcima prirode.

U svakoj objedinjenoj teoriji svi pojmovi koji se pojavljuju moraju da budu približni delovi celine. Prema tome potreban nam je subjekt Ω koji opisuje prirodu, koji nije skup, ali koji može da se približno zameni jednim. Ovo je čudno. Veoma rano u nešem životu mi smo ubeđeni da smo ***deo*** prirode. Naša čula nas snabdevaju ovim informacijama. Nismo navikli da razmišljamo drugačije. Ali moračemo.

Odstranimo odmah nekoliko mogučnosti za Ω. Jedan od pojmova bez delova je prazan skup. Možda treba da konstruišemo opis prirode iz praznog skupa? Međutim, prazan skup ima jedino smisla kao suprotnost od nekog potpunog skupa. (***Vol. III, strana 211***). Tako da prazan skup nije kandidat za Ω.

Drugi moguć način da se odrede približni delovi je da se oni konstruišu iz višestrukih kopija Ω. Međutim, na takav način mi bismo kroz zadnja vrata uveli nov skup. Osim toga, novi pojmovi određeni na takav način nebi bili približnosti.

---

[1] Kao neobičnost, praktično isto razmatranje može da se nađe u Platonovom *Parmenidu*, napisanom u četvrtom veku pre nove ere. (***Ref- 120***). U njemu Platon metodično razmatra različite dokaze o tome da li priroda jeste ili bi mogla da bude ***jedinstvo*** ili ***mnoštvo***, to jest skup. Izgleda da se tekst zasniva na stvarnoj Parmenidovoj i Zenonovoj poseti Atini. (Njihov rodni grad, Eleja, bio je u blizini Napulja.). Platon nije došao do zaključka. Međutim, savremena fizika jeste.

Treba da budemo maštovitiji. Kako možemo da opišemo celinu koja nema delove, ili čiji su delovi približni? Hajde da ponovimo. Svet mora a bude opisan jedinstvenim subjektom, koji deli sva svojstva sveta, ali koji može da bude približan kao skup delova. Na primer, približnost treba da prikaže skup tačaka prostora i skup čestica. Ali takođe, uvek kada pogledamo bilo koji "deo" prirode, bez ikakve približnosti, treba da nam je omogućeno da ga razlikujemo od sveta u celosti. Složeni objekti nisu uvek veći od svojih sastojaka. S druge strane, složeni objekti moraju uvek da ***izgledaju*** veći od svojih sastojaka. Na primer, "tačke" prostora ili "tačkasta" čestica su male, iako su samo približnosti. Koji pojam bez granica može biti njihovo poreklo? Korišćenje uobičajenih pojmova, svet je svuda u isto vreme; ako prirodu opisuje pojedinačni sastojak, takav subjekt mora da bude proširen.

Subjekt mora da bude samo jedan, ali mora po izgledu da bude višestuk: mora da bude približno višestruk, pošto priroda pokazuje višestruke vidove. Subjekt mora da bude nekako naboran. Mora da bude mogućno da se preklapanja prebroje, ali samo približno. (Analogija je pitanje koliko postoji žlebova na LP gramofonskoj ploći ili disku CD: u zavisnosti od gledišta, lokalnog ili globalnog, dobiće se različiti odgovori.) Prebrojavanje nabora odgovara merenju dužine.

Najednostavniji model bio bi aspekt koji je proširen i kolebljiv, koji dostiže prostornu beskonačnost, dopušta približnu lokalizaciju, pa stoga dopušta približnu odrednicu delova i tačaka.[1] U živopisnijim slikama priroda bi mogla da se opiše nekim subjektom koji može da se izobliči, naboran je i zapetljan: divovskom vezanom amebom. Ameba klizne između prstiju uvek kada sa pokuša da se uhvati njen deo. Savršena ameba pliva oko noža kada se pokuša da se preseče. Jedini način da se drži bio bi da se ona uhvati u celosti. Međutim, to je nemoguće za nekog ko je napravljen od niti amebe. On može da je uhvati samo približno, hvatanjem njenih delova i približno da ih zadrži, na primer, upotrebom malih rupa, tako da je za bežanje potrebno dugo vremena.

ZAKLJUČAK O ČETVRTOM DOKAZU PROŠIRENOSTI

Odsustvo čestica i skupova u prirodi dovodi do opisa prirode jedinstvenim sastojkom. priroda je zato modelirana objektom koji je ***jedan jedini "objekt"*** (da bi se izbacila neprepoznatljivost), koji je ***proširen*** (da bi se izbegla lokazibilnost) i koji se ***koleba*** (da bi se osigurao približan kontinuitet). Priroda je dalekosežan, kolebajuči zaplet. Priroda je slična amebi. Zapetljani krakovi amebe dopuštaju da se dužina odredi prebrojavanjem preklopa. Na taj način mogu takođe da se ostvare ***diskretnosti*** prostora, vremena i čestica; sledi kvantifikovanje prostor-vremena, materije i zračenja. Svaki subjekt koji je savitljiv i može da se izobliči savršen je kandidat za ostvarenje invarijante difeomorfizma, kao što zahteva opšta teorija relativnosti.

Prost kandidat za proširen nabor je slika kolebajuće savitljive ***cevi*** Plankovog prečnika. Prebrojavanje cevi podrazumeva određivanje rastojanja ili površina. Minimalno moguće prebrojavanje (jedan) daje minimalno rastojanje, iz kojeg je izvedena kvantna teorija. Ustvari, na ovom mestu možemo da za model uzmemo bilo koji savitljiv objekt malih dimenzija, kao što je cev, tanak list papira, lanac lopti ili izatkanu zbirku prstenova. Ove mogućnosti biće istražene u daljem tekstu (***strana 117***).

ENTROPIJA CRNIH RUPA

Mi još uvek prikupljamo dokaze za bismo odredili oblik osnovnih sastojaka. Drugi pristup je proučavanje situacije u kojoj se čestice pojavljuju u velikom broju. Sistemi sastavljeni od mnogo čestica ponašaju se drugačije u zavisnosto od toga da li su čestice tačkaste ili proširene. Posebno je različita njihova entropija. Proučavanjem entropije velikih brojeva zato dopušta da se odredi oblik sastojaka. Najizraženije situacije su one u kojima je veliki broj čestica sabijen u malu zapreminu. Prema tome, dovedeni smo do proučavanja entropije crne rupe. U stvari, crne rupe nam govore mnogo o osnovnim sastojcima prorode.

Crna rupa je telo čija je gravitacija toliko jaka da čak ni svetlost ne može da pobegne. To se lako izvodi iz opšte teorije relativnosti kada se telo čija je masa *m* stavi unutar takozvanog Švarcšildovog poluprečnika

$$r_S = 2Gm/c^2 \qquad (115)$$

dobija se crna rupa. Crna rupa može sa se obrazuje kada se cela zvezda uruši usled sopstvene gravitacije. Takva crna rupa je makroskopski objekt, sa velikim brojem sastojaka. Prema tome, on ima entropiju. Entropiju *S* makroskopske crne rupe odredili su Bekenštajn (Bekenstein) i Hoking (Hawking) i data je sa (***Ref. 57***) i (***Ref. 58***)

---

1 Ovo je najjednostavniji model, međutim, da li je to jedini način da se opiše pritoda? (***Izazov 93r***).

$$S = \frac{k}{4l_{\mathrm{Pl}}^2} A = \frac{kc^3}{4\hbar G} A \quad \text{ili} \quad S = k\frac{4\pi G m^2}{\hbar c} \tag{116}$$

gde je k Bolcmanova konstanta, a $A = 4\pi r^2$ je površina horizonta crne rupe.

Ovaj važan tezultat može da se izvede na više različitih načina. (***Ref. 122***). Različita izvođenja potvrđuju da su prostor-vreme i materija jedno te isto: ona pokazuju da vrednost entropije može da se prikaže ili kao entropija materije ili kao entrorija prostor-vremena. U trenutnom značenju, dve glavne tačke koje nas interesuju, jesu da je entropija ***konačna*** i da je ***srazmerna sa površinom*** horizonta crne rupe.

U pogledu postojanja minimalne dužine i vremena, konačnost entropije nije iznenađujuća,; ona potvrđuje ideju da je materija sastavljena od konačnog broja diskretnih sastojaka po datoj zapremini (ili površini). Ona takođe pokazuje da se ovi sastojci ponašaju statistički: oni se kolebaju. Zapravo, kvantna gravitacija podrazumeva konačnu entropiju za svaki objekt, ne samo za crne rupe. (***Ref. 35***). Jakob Bekenštajn je pokazao da je entropija objekta uvek manja od entropije (neke vrste) crne rupe iste mase.

Entropija crne rupe srazmerna je površini njenog horizonta. Zašto? Ovo pitanje bilo je tema niza publikacija.[1] (***Ref. 123***), Prost način da se shvati srazmernost entropija-površina je da se pogledaju ostali sistemi u prirodi, čija je entropija srazmerna površini sistema umesto zapremini sistema. Uopšte, entropija zbirke savitljivih jednodimenzionalnih objekata, kao što su lanci polimera, deli ovo svojstvo. (***Ref. 125***). Ustvari, entropija lanca polimera sastavljenog od N monomera, svakog dužine a čiji se krajevi drže odvojeni rastojanjem r, data je sa (***Ref. 126***)

$$S(r) = k\frac{3r^2}{2Na^2} \quad \text{za} \quad Na \gg \sqrt{Na} \gg r \tag{117}$$

Ovaj obrazac može da se izvede u nekoliko redova iz svojstava proizvoljnog prolaska kroz rešetku, koristeći dve predpostavke: lanci su prošireni i imaju svojstvenu unutrašnju dužinu a određenu najmanjim pravim odsečkom. Izraz (117) važi samo ako su polimeri stvarno beskonačni: drugim rečima, ako su dužina lanca Na i ***izduženje*** $a\sqrt{N}$ mnogo veći od poluprečnika r oblasti koja nas zanima. Ako je dužina lanca uporediva ili manja od oblasti koja nas zanima, dobija se uobičajena proširena entropija, koja zadovoljava $S \sim r^3$. Zato ***samo savitljivi prošireni sastojci daju zavisnost*** $S \sim r^2$.

Međutim, postoji teškoća. Iz izraza za entropiju crne rupe zaključili smo da je izduženje $a\sqrt{N}$ dato izrazom $a\sqrt{N} \approx l_{\mathrm{Pl}}$; stoga je mnogo manje od poluprečnika opšte makroskopske crne rupe, koja može da ima prečnik od nekoliko kilometara. S druge strane, obrazac za dugačke sastojke važi samo kada su lanci duži od rastojanja r između krajnjih tačaka.

Ova teškoća nestaje kada se setimo da je prostor u blizini crne rupe jako zakrivljen. Sve dužine moraju da se izmere u istom koordinatnom sistemu. Dobro je poznato da za spoljnog posmatrača svaki objekt konačne veličine koji upadne u crnu rupu izgleda kao da prekrije na dugo vreme ukupan horizont (dok je za posmatrača koji je vezan za predmet koji pada u crnu rupu izvorne veličine). (***Ref. 109***) Ukratko, prošireni sastojak može da ima pravu dužinu u Plankovim razmerama, ali da ipak, kada ga opaža spoljni posmatrač, bude dugačak kao horizont crne rupe. Stoga nalazimo da su crne rupe načinjene od proširenih sastojaka.

Drugačija tačka gledišta može da potvrdi ovaj rezultat. Entropija je (srazmerna) sa brojem pitanja da-ne potrebnih da se sazna tačno stanje sistema. Ali ako je sistem određen njegovom površinom, kao što je crna rupa, njegovi sastojci moraju da budu prošireni.

Konačno, zamišljene crne rupe kao tvorevine od proširenih sastojaka, takođe su u saglasnosti sa takozvanom ***teoremom bez dlaka***: svojstva crnih rupa ne zavise od onoga što u njih upadne, pošto su sve materije i zračenja načinjeni od istih proširenih sastojaka. Konačno stanje zavisi samo od broja sastojaka.

ZAKLJUČAK O PETOM DOKAZU PROŠIRENOSTI

Entropija crne rupe najbolje je razumljiva kao posledica proširenih sastojaka koji su zapleteni i kolebljivi. (***Strana 217***). Entropija crne rupe takođe potvrđuje da su vakuum i čestice načinjene od zajedničkih sastojaka.

---

[1] Rezultat može da se izvede samo iz kvantne statistike. (***Ref. 124***). Međutim, takvo izvođenje nebi dalo sačinilac srazmere.

RAZMENA TAČAKA PROSTORA ILI ČESTICA U PLANKOVOJ RAZMERI

Obratimo pažnju na ponašanje razmene osnovnih sastojaka u prirodi. Videli smo u predhodnom tekstu da "tačka" u prostoru mora da bude napuštena u korist sastojaka, kolebajućih sastojaka zajedničkih za prostor, vreme i materiju. Da li je takav sastojak bozon ili fermion? Ako razmenimo dve tačke u praznom prostoru u svakodnevnom životu ne događa se ništa. U stvari, u osnovi kvantne teorije polja je odnos

$$[x, y] = xy - yx = 0 \tag{118}$$

između bilo koje dve tačke sa koordinatama x i y, što ih čini bozonima. Međutim, u Plankovim razmerama, usled postojanja minimalnih udaljenosti i površina, ovaj odnos mora najmanje da se izmeni u

$$[x, y] = l_{Pl}^2 + \cdots \tag{119}$$

To znači da "tačke" nisu ni bozoni ni fermioni.[1] "Tačke" imaju kompleksnija svojstva razmene. Ustvari, član na desnoj strani biće zavisan od energije u sve većoj meri što se više približavamo Plankovim razmerama. Posebno, kao što smo videli, gravitcija podrazumeva da dvostruka razmena ne dovodi ponovo do početne situacije u Plankovim razmerama. (***Ref. 47***).

Sastojci koji se pridržavaju ove ili sličnih relacija bili su proučavani u matematici dugi niz godina: oni se nazivaju ***pletenice***. (***Ref. 127***). Prema tome, u Plankovim razmerama prostor nije načinjen od tačaka, već od pletenica ili njihovog uopštavanja, naime zapletenosti. Ponovo nalazimo da kvantna teorija i opšta teorija relativnosti uzete zajedno podrazumevaju da vakuum mora da je načinjen od proširenih sastojaka.

Vraćamo se česticama. Sve čestice u prirodi ponašaju se na sličan način: znamo da su na niskim, svakodnevnim energijama čestice iste vrste ***identične***. Eksperimenti osetljivi na kvantne efekte pokazuju da ne postoji način da se ustanovi razlika između njih: svaki sistem od više identičnih čestica ima simetriju permutacije. S druge strane, znamo da na Plankovoj energiji nestaju sve simetrije niskih energija. Isto tako znamo da na Plankovoj energiji permutacija ne može da se sprovede, pošto ona podrazumeva razmenu položaja dve čestice. Na Plankovoj energiji ništa nije različito od vakuuma: prema tome, ne može da se pokaže da dva subjekta imaju jednaka svojstva. Zapravo, ne može da se pokaže da su dve čestice neprepoznatljive, jer ne može čak ni da se pokaže da su razdvojene.

Šta se događa kada se polako prilazi Plankovoj energiji? Na svakodnevnim energijama je simetrija permutacije određena relacijama komutacije ili antikomutacije između operatora stvaranja čestica

$$a^\dagger b^\dagger \pm b^\dagger a^\dagger = 0 \tag{120}$$

Na Plankovoj energiji to ne može da bude tačno. Efekti kvantne gravitacije menjaju desnu stranu jednakosti: oni dodaju član zavisan od energije, a koji je zanemarljiv na energijama dostupnim za eksperiment, ali koji postaje bitan na Plankovoj energiji. Znamo iz našeg iskustva sa Plankovim razmerama da, nasuprot svakodnevnom životu, razmena čestica izvedena dva puta ne može da vodi natrag na početnu situaciju. (***Ref. 47***). Dvostruka razmena na Plankovoj energiji ne može da ima efekt, pošto su na Plankovoj energiji takvi izrazi nemogući. Najjednostavnije proširenje relacije komutacije (120) za koje ne nestaje desna srana je simetrija pletenice. (***Ref. 127***). Ovo ponovo predpostavlja da su čestice sastavljene od proširenih sastojaka.

ZAKLJUČAK O ŠESTOM DOKAZU PROŠIRENOSTI

Ekstrapolacijom i tačaka i čestica neprepoznatljivih u Plankovim razmerama predpostavljaju proširene, upletene ili zamršene sastojke

[1] Isto zaključivanje primenjuje se na takozvane fermionske ili Grasmanove (Grassmann) koordinate koje se koriste u supersimetriji. One ne mogu da postoje na Plankovim energijama.

ZNAČENJE SPINA

Kao poslednji dokaz pokazaćemo da proširenje čestica ima smisla čak i na svakodnevnim energijama. Svaka čestica deo je svemira. Deo je nečeg što je različito od svega ostalog. Biti "različit" znači da razmena ima nekakav efekt. ***Različitost znači mogućnost razmene***. Drugim rečima, bilo koji deo svemira takođe je opisan ***ponašanjem razmene***.

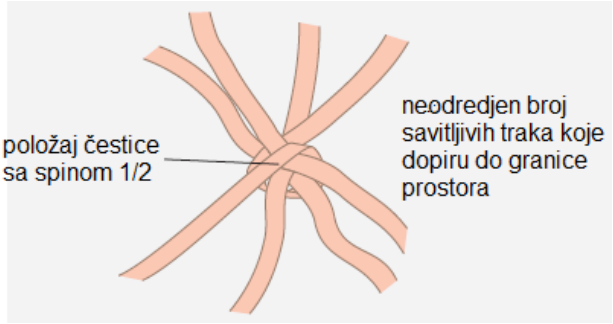
U prirodi se razmena sastoji od obrtanja. Drugim rečima, delovi prirode opisani su njihovim ponašanjima obrtanja. Zato su razmene za mikroskopske čestice određene spinom. Spinovi prave razliku čestica od vakuuma.[1]

Primećujemo da zapremina ne razlikuje vakuum od čestica; niti mase mirovanja ili naboje: priroda daje čestice bez merljive zapremine, mase mirovanja ili naboja, kao što su fotoni. Jedina opažanja po kojima mogu da se razlikuju čestice od vakuuma su spin i količina kretanja. Zapravo, linearna količina kretanja je samo granični slučaj momenta količine kretanja. Zato ponovo nalazimo da su obrtna ponašanja osnovni oblici po kojima se razlikuju čestice od vakuuma.

Ako je spin glavna osobina po kojoj se razlikuju čestice od vakuuma, od najveće je važnosti nalaženje modela spina. Međutim, ne moramo da ga tražimo dugo. Model spina 1/2 deo je folklora fizike već skoro jedan vek. Svaki trik sa opasačem daje primer, kao što smo razmatrali detaljno kada smo istraživali simetriju permutacije. (***Vol. IV, strana 89***). Svaka lokalizovana struktura sa bilo kojim brojem repova pričvršćenih na nju – repovi koji dosežu granicu oblasti prostora koja se posmatra – ima ista svojstva kao i čestice sa spinom 1/2. Jedini uslov je da se sami repovi ***ne mogu opažati***. To je poznata vežba koja pokazuje da takav model, prikazan na ***slici 9***, zaista je invarijantan pri obrtanju za 4π, ali ne i pri obrtanju za 2π, i da dve čestice postanu upetljane pri razmeni, a raspetljavaju se kada se razmene dva puta. Takav ***model sa repovima*** ima čak iste probleme sa jako zakrivljenim prostorom koji imaju i čestice sa stvarnim spinom 1/2. Ubrzo ćemo detaljnije da istražimo ovo pitanje. (***Strana 135***).

Model sa repovima prema tome potvrđuje da je obrtanje delimična razmena. Još zanimljivije, on pokazuje da obrtanje podrazumeva vezu sa granicom prostora. (***Ref. 128***). Proširene čestice mogu da se obrću. Čestice mogu da imaju spin 1/2 pod uslovom da imaju repove koji dopiru do granice prostora. Ako repovi ne dopiru do granice, model ne funkcioniše. Spin 1/2 izgleda da zato čak ***zahteva*** proširenje.

Nije teško da se ova ideja proširi tako da obuhvati i čestice sa spinom 1. (***Izazov 94e***). Ukratko, i bozoni i fermioni mogu da se modeliraju pomoću proširenih sastojaka.



Slika 9 Moguć model čestice sa spinom 1/2.

ZAKLJUČAK O SEDMOM DOKAZU PROŠIRENOSTI

Istraživanje osobina spina čestice predpostavlja proširene sastojke u elementarnim fermionima. Primećujemo da gravitacija nije izrazito korišćena u dokazu. Međutim, ona se koristi implicitno u odrednici lokalnog ravnog prostor-vremena i približnog prostora do kojeg dopiru repovi.

[1] Uz ravnu (ili drugačiju) pozadinu moguće je da se odredi lokalni tenzor količine kretanja. Zato čestice mogu da se odrede. Bez pozadine ovo nije moguće i mogu da se odrede samo globalne veličine. Bez pozadine ne mogu da se odrede čak ni čestice. Prema tome, u ovom odeljku je predpostavljeno da postoji pozadina prostor-vremena koja se menja sporo.

ZANIMLJIVSTI I ZABAVNI IZAZOVI O PROŠIRENJU

Nema problema toliko velikih ili komplikovanih da od njih ne može da se pobegne

Čarls Šulc (Charles Schulz)

U slučaju sa ovaj odeljak nije obezbedio dovoljno hrane za razmišljanje, ovde je dato malo više.

* * *

Kvantna teorija podrazumeva da čak i kada postoje čvrsti zidovi, poklopac kutije napravljen od njih ne može nikada da se čvrsto zatvori. Možete li da pružite dokaz? (***Izazov 95s***).

* * *

Možete li da date dokaz protiv ideje o proširenim sastojcima u prirodi? (***Izazov 96e***). Ako imate, objavite ga.

* * *

Da li dvojnost podrazumeva da su kolebanja pozadine svemira (u poreklu galaksija i jata) ista kao kolebanja vakuuma? (***Izazov 97s***).

* * *

Da li dvojnost podrazumeva da je sistem sa dve male mase koji se sudaraju ekvivalentan sistemu sa dve velike mase koje gravitiraju? (***Izazov 98s***).

* * *

Izgleda da je u svim dokazima koje smo izveli do sada pedpostavljeno da je vreme neprekidno, iako znamo da nije. Da li to menja zaključke? (***Izazov 99d***).

* * *

Dvojnost takođe podrazumeva da su u nekom smislu velika i mala masa ekvivalentne. Masa m sa poluprečnikom r ekvivalenta masi m_{Pl}^2/m sa poluprečnikom l_{Pl}^2/r. Drugim rečima dvojnost pretvara gustinu mase ρ u $\rho_{\mathrm{Pl}}^2/\rho$. Vakuum i najveća gustina su ekvivalentni. Vakum je stoga dvojnost crnih rupa.

* * *

Totalna simetrija i dvojnost prostor-vremena, primenjeni zajedno, podrazumevaju da postoji simetrija između svih vrednosti preduzetih opažanja. Da li se slažete? (***Izazov 100s***).

* * *

Svaki opis je preslikavanje iz prirode u matematiku, to jest, od opaženih razlika (i odnosa) u razmišljanja o razlikama (i odnosa). Kako to možemo da uradimo pouzdano, ako su razlike samo približne? Da li je to kraj fizike? (***Izazov 101s***).

* * *

Dvojnost podrazumeva da pojam početnih uslova za veliki prasak nema smisla, kao što smo videli ranije kada smo razmatrali minimalna rastojanja. Dvojnost podrazumeva simetriju između velikih i malih energija, te sam veliki prasak postaje nejasan pojam. Šta još prošireni sastojci podrazumevaju za veliki prasak? (***Izazov 102d***).

* * *

Da li možete da pokažete da je prelazak na visoke energije ili izbor područja veličine Plankove veličine prostora-vremena ekvivalentan poseti velikog praska? (***Izazov 103d***).

* * *

Andrea Gregori je 2002. godine načinio iznenađujuće predviđanje za svaki model koji koristi proširene sastojke koji dopiru do granice svemira: ako su čestice proširene na takav način, njihova masa bi trebalo da zavisi od veličine svemira. (***Ref. 129***). Zato bi masa čestica trebalo da se menja sa vremenom, posebno u okolini velikog praska. Da li je ovaj zaključak neizbežan? (***Izazov 104s***).

* * *

Šta je pogrešno u sledećem dokazu? Da bismo odredili područje, potrebne su nam linije, a područje nam je potrebno da bismo odredili linije. To podrazumeva da u Plankovim razmerama ne mogu da se razlikuju područja od dužina u Plankovim razmerama. (***Izazov 105e***).

* * *

Potreban nam je opis širenja svemira u pojmovima proširenih sastojaka. (***Ref. 129*** i ***Ref. 130***). Istraživani su različiti pristupi. Možete li da nagađate rešenje? (***Izazov 106s***).

POLNI PRIORITETI U FIZICI

Zašto se proširenost pojavila toliko kasno u istoriji fizike? Ovde je dat ***ne isuviše ozbiljan*** odgovor. Kada smo razmatrali opis prirode kao tvorevine od malih lopti koje se kreću u praznini, mi smo to nazvali tipično muškom idejom. (***Vol. I, strana 247***). To podrazumeva da ženski deo nedostaje. Koji bi to bio deo?

Sa opšte tačke gledišta, ženski deo fizike možda je kvantni opis vakuuma, posude za sve stvari. Možemo nagađati da ako bi žene razvijale fiziku, redosled njihovih otkrića bio bi možda sasvim drugačiji. Umesto da prvo proučavaju materiju, kao što su činili muškarci, žene bi možda prvo proučavale vakuum. I ženama možda nebi bilo potrebno 2500 godina da shvate da priroda nije načinjena od praznina i malih lopti, već da je sve i prirodi načinjeno od proširenih sastojaka. Čudno je da je (muškoj) fizici bilo potrebno toliko dugo vreme za ovo otkriće.

PROVERE PROŠIRENOSTI

Ideja da je priroda opisana proširenim sastojcima uzima se zdravo za gotovo u svim tekućim istraživačkim pristupima objedinjavanja. Kako onda možemo da budemo sigurni da je proširenost tačna? Dokazi koji su predstavljeni do sada pružaju više mogućih provera. Počinjemo sa nekoliko mogućnosti za ***teorijsko*** falsifikovanje.

- Svako objašnjenje entropije crne rupe ***bez*** proširenih sastojaka obezvredilo bi potrebu za proširenim sastojcima.
- Pojedinačni misaoni eksperimenti koji bi obezvredili proširene sastojke dokazali bi da je proširenje pogrešno. (***Izazov 107e***).
- Prošireni sastojci moraju da se pojave ako počnemo od bilo kojeg fizičkog pojma (niske energije) – ne samo od merenja dužine – i proučavamo kako se taj pojam ponaša u Plankovim razmerama.
- Obezvređivanje zahteva vrhunskog identiteta, ili dvojnosti, obezvredilo bi potrebu za proširenim sastojcima. (***Strana 91***). Edvard Viten (Edward Witten) voleo je da kaže kako svaki jedinstveni model prirode mora da uključi dvojnost.
- Ako bi merenje dužine moglo a pokaže da ***nije povezano*** sa brojanjem nabora proširenih sastojaka, proširenje bi postalo nepotrebno.
- Nalaženje bilo kojeg svojstva prirode koji je u ***protivrečnosti*** sa proširenim sastojcima ispisao bi kraj proširenosti.

Svaka od ovih mogućnosti najavljivala bi kraj skoro svih trenutnih pokušaja objedinjavanja. Srećom, još uvek se nije pojavilo teorijsko falsifikovanje. Međutim, fizika je nauka eksperimenata. Koja vrsta ***podataka*** bi mogla da falsifikuje ideju proširenih sastojaka?

- Opažanje pojedinačne čestice u kosmičkom zračenju sa energijom iznad ispravljene Plankove energije obezvredilo bi granice invarijanti i stoga takođe i proširenost. Međutim, zabeležena sadašnja energija čestice, od oko 0,35 ZeV, milion puta je niža od Plankove energije. (***Ref. 131***).
- Pol Mende (Paul Mende) predložio je brojne provere kretanja proširenih objekata u prostor-vremenu. (***Ref. 132***). On je tvrdio da se prošireni objekt i tačka sa masom kreću različito; različitost bi se primetila u rasipanju ili disperziji svetlosti u blizini mase.

Eksperimentalna falsifikovanja proširenosti još uvek se nisu pojavila. Ustvari, eksperimentalna falsifikovanja su dosta teška. Izgleda da je jednostavnije i produktivnije da se proširenost ***potvrdi***. Potvrđivanje je dobro određen poduhvat: ono podrazumeva izvođenje svih onih aspekata prirode koji su navedeni u milenijumskoj listi neobjašnjenih osobina. (***Strana 22***). Između ostalog, potvrđivanje zahteva da se nađe konkretan model elektrona, zasnovan na proširenim sastojcima, mion, tau neutrino i kvarkovi. Potvrđivanje takođe zahteva da se koriste prošireni sastojci za ostvarenje starog sna fizike čestica: da se utvrde porekla vrednosti za konstantu veze i masu čestica. Pre no što pokušamo da ovo zaključimo, moramo da pogledamo i neke druge pokušaje.

TEKUĆA ISTRAŽIVANJA ZASNOVANA NA PROŠIRENIM SASTOJCIMA

Da shvatimo jeste da sagledavamo obrasce.[1]
Ajzaja Berlin (Isaiah Berlin)

Grci su izveli zaključak postojanja atoma iz opažanja da riba može da pliva kroz vodu. (***Ref. 114***). Oni su tvrdili da samo ako je voda sastavljena od atoma može riba da pliva kroz nju, potiskujući atome ustranu. Možemo da postavimo slično pitanje o plivanju čestica kroz vakuum: zbog čega su u stanju da to čine? Vakuum ne može da bude tečnost ili čvrsto telo načinjeno od malih sastojaka, pošto njegova dimenzionalnost tada nebi bila ustaljena. Preostaje samo jedna mogućnost: i vakuum i čestice sastavljeni su od mreža proširenih sastojaka.

Ideja o opisu materije kao tvorvine proširenih sastojaka potiče iz 1960-ih godina. Ona o opisu prirode kao tvorevine "beskonačno" proširenih sastojaka potiče iz 1980-ih godina. Osim toga uz dokaze prikazane do sada, tekuća istraživanja daju nekoliko drugih pristupa koja dovode do istog zaključka.

* * *

Bozonizacija, konstruisanje fermiona korišćenjem beskonačnog broja bozona, glavni je oblik savremenih pokušaja objedinjavanja. (***Ref. 133***). Oni takođe podrazumevaju dvojnost veza, pa prema tome proširenje osnovnih sastojaka.

* * *

Istraživanje u oblasti kvantne gravitacije – posebno proučavanje mreža spina, pene spina i petlje kvantne gravitacije – pokazala su da vakuum može da se zamisli kao zbirka proširenih sastojaka. (***Ref. 134*** i ***Ref. 135***).

* * *

Dirk Krajmer (Dirk Kreimer) je 1960-ih godina pokazao da su Fajnmanovi dijagrami QED (kvantne elektrodinamike) višeg reda povezani sa teorijim čvorova. (***Ref. 136***). On je stoga dokazao da proširenost dolazi na zadnja vrata čak i kada je elektromagnetizam opisan pojmovima tačkastih čestica.

* * *

Popularna tema u fizici čestica, "holografija", povezuje površinu i zapreminu fizičkih sistema na visokim energijama. (***Ref. 137***). Ona podrazumeva proširene sastojke prirode.

* * *

Već je dugo poznato da se urušavanje talasne funkcije može posmatrati kao rezultat proširenih sastojaka. (***Vol. IV***, ***strana 123***). Detalje ćemo da istražimo u daljem tekstu.

* * *

Na početku dvadeset prvog veka pojavili su se brojni novi pristupi da bi se opisale elementarne čestice (***Ref. 138*** i ***Ref. 139***), kao što su modeli zasnovani na mreži struna (***Ref. 140*** i ***Ref. 141***), modeli zasnovani na vrpcama, modeli zasnovani na trakama i modeli na bazi čvorova. (***Ref. 142*** i ***Ref. 143***). Svi ovi modeli koristili su proširene sastojke. Neke od njih razmotrićemo detaljnije u tekstu koji sledi. (***Strana 260***).

Uprkos primeni proširenosti, nijedan od ovih pokušaja nije rešio nijedan problem iz milenijumske liste. Jedan od pristupa – posebno popularan u godinama 1984. i 2010. – zaslužuje da se pogleda pobliže.

SUPERSTRUNE – PROŠIRENOST I MREŽA DVOJNOSTI

Bacite fiziku psima; ja to neću.
Vilijam Šekspir (William Shakespeare), *Macbeth*.

Superstrune i ***supermembrane*** – često prosto nazivane ***strune*** i ***membrane*** – prošireni su sastojci u većini istraživačkih predpostavki fizike. (***Ref. 144***). Prisup sadrži maksimalnu brzinu, minimalni rad i maksimalnu silu (ili naprezanje). Pristup zato obuhvata specijalnu teoriju relativnosti, kvantnu teoriju i opštu teoriju relativnosti. Ovaj pokušaj da se dobije konačan opis prirode koristi četiri ideje koje idu preko standadne opšte teorije relativnosti i kvantne teorije.

1. Predpostavlja se da su čestice ***proširene***. Izvorno je predpostavljano da su čestice jednodimenzionalne ***oscilujuće superstrune***. U narednim uopštavanjima predpostavljeno je da su čestice kolebajuće supermembrane viših dimenzija.

[1] Ajzaja Berlin (Isaiah Berlin, 1909. Riga – 1997. Oxford) bio je uticajan politički filozof i istoričar ideja

2. Predpostavka koristi ***više dimenzije*** za obedinjavanje interakcija. Broj dimenzija prostor-vremena veći od 3+1, obično 10 ili 11, neophodan je za dosledan matematički opis superstruna i membrana.
3. Pretpostavka se zasniva na ***supersimetriji***. Supersimetrija je simetrija koja povezuje materiju sa zračenjem, ili ekvivalentno, fermione i bozone. Supersimetrija je najopštija lokalna simetrija interakcije koja može da se konstruiše matematički. Supersimetrija je razlog za nastanak pojmova "superstruna" i "supermembrana"
4. Predpostavka ***dvojnosti*** otežava korišćenje. (***Ref. 145***). U smislu fizike visokih energija, dvojnosti su simetrije između malih i velikih vrednosti fizičkih opažanja. Važniji primeri su dvojnost prostor-vremena i dvojnost konstante veza. Dvojnosti su globalne interakcije i simetrije prostor-vremena. One su suština za obuhvatanje interakcije merila i gravitacije u kvantnoteorijski opis prirode. Dvojnosti takođe izražavaju osnovnu jednakost između prostor-vremena i materija-zračenje. Dvojnosti takođe podrazumevaju i sadrže holografiju, ideju da su fizički sistemi kompletno utvrđeni stanjem na njihovin graničnim površinama.

Uvođenjem ove četiri ideje, ***predpostavka superstrune*** – tako je nazvo Brajan Grin (Brian Greene), jedan od prvih njenih bitnih istraživača – dobija brojna primamljiva svojstva. (***Ref. 146***).

ZAŠTO SU SUPERSTRUNE I SUPERMEMBRANE TAKO PRIMAMLJIVE

Pre svega, predpostavka superstrune je jedinstvena: lagranžijan je jedinstven i nema podesivih parametara. Osim toga, kao što bismo očekivali od opisa koji obuhvata proširene sastojke, predpostavka uključuje gravitaciju. Pored toga, predpostavka opisuje interakcije: ona opisuje polja merila. Predpostavka stoga proširuje teoriju kvantnog polja, dok zadržava sve njene suštinske tačke. Na taj način predpostavka ispunjava većinu zahteva za objedinjen opis kretanja koje smo do sada izveli. Na primer, čestice nisu tačkaste, postoji minimalna dužina i minimalni intervali vremena, a pojavljuju se sve druge granične veličine. (Premda zahtev za nepostojanje skupova izgleda da nije ispunjen.)

Predpostavka superstruna ima puno velikih simetrija, koje iskrsavaju iz njenih mnogih dvojnosti. Ove simetrije povezuju mnoge situacije koje intuitivno izgledaju korenito različite: to čini predpostavku izuzetno začuđujućom, no takođe i teškom za predstavljanje.

Predpostavka pokazuje posebna ukinuća nenormalnosti i drugih nedoslednosti. Istorijski, prvi primer je bio ukinuće Grin-Švarcova (Green-Schwarz) nenormalnosti; superstrune takođe rešavaju ostale nenormalnosti i izvesne nedoslednosti kvantne teorije polja.

Edvard Viten (Edward Witten), centralna ličnost u ovoj oblasti, govorio je kako kvantna teorija leči beskonačnost koja se pojavljuje u e^2/r kada rastojanje r prilazi nuli; na isti način superstrune leče beskonačnost koja se pojavljuje u m^2/r kada rastojanje r prilazi nuli.

Isto tako, prema Vitenu, u predpostavci superstrune, interakcije slede iz odrednice čestice: interakcije ne moraju da se dodaju. To je ono zbog čega superstrune predviđaju gravitaciju, teoriju merila, supersimetriju i supergravitaciju.

U vezi gravitacije, jedan od lepih rezultata predpostavke superstrune je onaj da se superstrune i crne rupe međusobno dopunjuju. (***Ref. 147***). To su tvrdili Polčinski (Joseph Polchinsky), Horovic (Vladimir Samojlović Horovic) i Saskind (Leonard Susskind).

Kao što se ošekivalo, superstrune objašnjavaju entropiju crnih rupa. (***Ref. 122***). Stromindžer (Andrew Strominger) i Vafa (Cumrun Vafa) pokazali su ovaj važan rezultat 1996. godine.

Predpostavka superstrune prirodno uključuje ***holografiju***, ideju da su stepeni slobode fizičkog sistema određeni negovim granicama. Holografija posebno daje duboku dvojnost između teorije merila i gravitacije. Preciznije, postoji usaglašenost između kvantne teorije polja u ravnom prostoru i predpostavke superstrune u izvesnim prostorina viših dimenzija koji sadrže anti-de Siterov prostor.

Ukratko, predpostavka superstruna podrazuneva začuđujuću matematiku. Konformna invarijanta ulazi u lagranžijan. Pojmovi kao što je algebra Virasoro (Miguel Virasoro), teorija konformnih polja, teorija topoloških polja i mnoge slične ideje daju ogromno i fascinantno uopštavanje kvantne teorije polja.

ZBOG ČEGA JE MATEMATIKA SUPERSTRUNA TOLIKO TEŠKA

Predpostavka superstrune, slično svim savremenim opisima fizike, opisana je lagranžijanom. Lagranžijan je konstruisan počevši od lagranžijana za kretanje klasične superstrune materije. Zatim je izgrađen lagranžijan za odgovarajuće kvantna polja superstrune, a zatim se pripajaju viša dimenzija, supersimetrija, dvojnosti i membrane. Ovakva formulacija predpostavke superstrune uzima zdravo za gotovo postojanje pozadine prostor-vremena.

Lagranžijan predpostavke superstrune izuzetno je složen, previše složen da bi se ovde napisao. On nije tako jednostavan kao što je lagranžijan standardnog modela fizike čestica ili lagranžijan opšte teorije relativnosti. Međutim, složenost lagranžijana nije jedini razlog zbog kojeg je proučavanje predpostavke superstrune teško.

Pokazalo se da izuzetno zamršeno istraživanje kako da se poznate 4 dimenzije prostor-vremena ugrade u 10 ili 11 dimenzija predpostavke superstrune. Topologija i veličina dodatih dimenzija je nejasna. Postoji samo nekoliko osoba koje su sposobne da proučavaju ove mogučnosti.

U stvari, pre nekoliko godina slušali su fizičar i matematičar razgovor o superstrunama, pune procesa koji se pojavljaju u jedanaest dimenzija. Matematičar je intenzivno slušao i očigledno uživao u razgovoru. Fizičar nije razumeo baš ništa i postajao je sve uznemireniji. Na kraju, fizičar je imao groznu glavobolju, dok je matematičar bio prepun pohvala. “Kako ste mogli da razumete ovu građu?”, zapitao je fizičar. “Jednostavno, stvorim sliku u glavi!” odgovorio je matematičar. “Ali kako ste tačno zamislili stvar u jedanaest dimenzija?” “Prosto! Prvo je zamislim u *N* dimenzija, a zatim pustim da *N* bude jedanaest.”

PROVERA SUPERSTRUNA: VEZE I MASE

Jedan od glavnih rezultata kvantne hromodinamike, ili QCD, teorija jakih interakcija, je objašnjenje odnosa masa, kao što je (***Ref. 148***)

$$m_{\text{proton}} \sim e^{-k/\alpha_{\text{Pl}}} m_{\text{Pl}} \quad \text{gde je:} \quad k = 11/2\pi \ \text{ i } \ \alpha_{\text{Pl}} = 1/25 \tag{121}$$

Ovde je vrednost konstante jake veze α_{Pl} uzeta na Plankovoj energiji. Drugim rečima, opšte shvatanje masa ograničenog stanja jake interakcije, kao što je proton, zahteva nešta više od poznavanja Plankove energije i konstante veze na toj energiji. Približna vrednost α_{Pl} = 1/25 je empirijska vrednost na bazi eksperimentalnih podataka. (***Strana 281***).

Svaka objedinjena teorija mora da omogućava da se izračunaju tri konstante veza merila kao funkcije energije, što uključuje vrednost α_{Pl} na Plankovoj energiji. Trenutno, većina istraživača smatra da je u pogledu traganja za stanjem vakuuma – precizna ugradnja četiri dimenzije u ukupno deset – glavna teškoća s kojom se suočava pretpostavka superstruna. Bez poznavanja stanja vakuuma nisu moguća izračunavanja konstanti veza ili masa.

Očekuje se da će stanje vakuuma iz predpostavke superstruna da bude jedan od već uključenih skupova topološki razlikovanih mnogostrukosti. (***Ref. 149***). Procenjeno je da postoji oko 10^{500} kadidata za stanje vakuuma. Svemir sadži 10^{80} atoma; izgleda da je lakže pronaći određen atom u svemiru nego li da se nađe tačno stanje vakuuma. Prednost koja je nastala usled objedinjenog lagranžijana time je izgubljena.

Možemo da opišemo problem pomoću izračunavanja masa čestica na sledeći način. Predpostavka super strune predviđa stanja sa Plankovom masom i sa nultom masom, Često se misli da su čestice sa nultom masom, koja je malo uporediva sa Plankovom masom, dobile svoju stvarnu masu preko Higsovog mehanizma. Međutim, Higsov mehanizam i njegova numerička svojstva još uvek nisu izvedena iz superstruna.

STANJE PREDPOSTAVKE SUPERSTRUNA

Es ist nichts Großes ohne Leidenschaft vollbracht worden, noch kann es ohne solche vollbracht werden.[1]

Fridrih Hegel (Friedrich Hegel), *Enzyklopädie*.

Procena je da je od 1984. do 2010. godine uloženo više d 10.000 čovek-godina u istraživanje predpostavke superstrune: uporedite ti sa oko desetak čovek-godina za elektrodinamiku, desetak čovek godina za opštu teoriju relativnosti ili desetak čovek-godina za utemeljenje kvantne teorije.

U stvari, pošteno je da se kaže da su u današnje vreme istraživači superstruna u škripcu. Uprkos ogromnim združenim naporima, nije načinjeno nijedno jedino izračunavanje niti ***eksperimentalno merljiva*** vrednost. Na primer, predpostavka superstruna nije predvidela masu nijedne elementare čestice, niti vrednost bilo koje konatante veze, niti broj interakcija merila. Ustvari. ***nijedno*** od otvorenih pitanja fizike koje je navedeno i milenijumskoj listi (***strana 22***) nije rešeno preko predpostavke superstruna. Ova razočaravajuća situacija razlog je što su mnogi naučnici, uključujući nekoliko dobitnika Nobelove nagrade, u potpunosti odbacili predpostavku superstruna. (***Ref. 150***).

Koji je razlog da je predpostavka superstruna bila neuspešna, slično nekolicini drugih pristupa zasnovanih na proširenim sastojcima? Superstrune i supermenbrane su ***komplikovane***: supersttrune i supermembrane kreću se u više dimenzija, nose masu, imaju naprezanje i nose polja. Ustvari, precizna matematička odrednica superstrune ili supermembrane i njihovih svojstava toliko je složena da je već razumevanje odrednice iznad sposobnosti većine fizičara. Međutim velika kompleksnost uvek neguje sumnju da se neke od osnovnih predpostavki ne odnose na prirodu.

Superstrune nisu jednostavni subjekti. nijedan istraživač ne trudi se da ih učini jednostavnim. Stavljeno u različite pojmove, predpostavka superstrune nije bila uspešna pošto njeni ***osnovni principi*** nikada nisu bili razjašnjeni. Nepostojanje jasnih osnova redovno podvlače čak i oni koji podržavaju predpostavku superstruna, kao što je Mari Gel-Man (Murray Gell-Mann). Uprkos ovoj praznini, ni danas ne postoji nijedan dokument istraživanja o osnovnim principima.

ZAKLJUČAK O PROŠIRENOSTI U PRIRODI

Wir müssen wissen, wir werden wissen.[2]

David Hilbert

Istraživali smo prirodu na njenim granicama: proučavali smo Plankova ograničenja, istraživali trodimenzionalnost, zakrivljenost, oblik čestice, renormalizaciju, spin i bozonizaciju; istraživali smo problem kosmološke konstante i tragali za opisom prirode "oslobođenog od pozadine". (***Ref. 151***). Kao rezultat toga, našli smo da u Plankovim razmerama sva ova istraživanja dovode do istih zaključaka:

- tačke i skupovi ne opisuju tačno prirodu;
- materija i vakuum samo su dve strane iste medalje;
- a ono što obično nazivamo tačkama prostor-vremena i tačkaste čestice ustvari su načinjeni od zajedničkih, a pre svega, ***proširenih*** sastojaka.

Mogli smo da dođeno do zaključaka čak i na jednostavniji način. Šta zajedničkog imaju kvantna teorija i crne rupe? Obe one navode da je priroda načinjena od proširenih sastojaka. Mi ćemo potvrditi u daljem tekstu da i Dirakova jednakost i entropija crne rupe podrazumevaju da su čestice, prostor i horizont izgrađeni od proširenih sastojaka.

Uprkos upotrebe proširenosti kao osnovnog subjekta i uprkos mnogim interesantnim rezultatima, sva nastojanja iz dvadesetog veka, uključujući predpostavku superstrune i različite modele kvantne gravitacije, nisu bila uspešna za shvatanje ili opis prirode u Plankovim razmerama. Razlozi izostajanja uspeha bili su nejasne relacije u Plankovim razmerama., nepostojanje jasnih načela, korišćenje pogrešnih predpostavki, a

[1] "Ništa veliko nije postignuto bez strasti, niti može da bude postignuto bez nje." Hegel, uticajan filozof, napisao je ovo pri kraju trećeg i poslednjeg dela njegove *Enzyklopädie der philosophischen Wissenschaften im Grundrisse*, §474, 296.

[2] "Moramo znati, mi ćemo znati." To je bio Hilbertov lični princip.

pre svega, nejasne povezanosti sa eksperimentima.[1] Da bismo bili uspešni, potreban je drugačiji pristup proračunavanjima sa proširenim sastojcima. Potreban nam je pristup izgrađen na Plankovim jedinicama, zasnovan na jasnim načelima, koji ima nekoliko dobrih predpostavki i da je održiv prema eksperimentalnim proverama.

U našem traganju za konačnom teorijom fizike, jedan od načina za unapređenje je postavljanje sledećeg pitanja. Osnova za najistraživani pristup u kasnim godinama dvadesetog veka, predpostavke superstrune, oblikovan je na četiri predpostavke: proširenost, dvojnost, više dimenzije i supersimetrija. Možemo li da izostavimo bilo koju od njih? Osim toga, dvojnost je usko povezana sa proširenošću, za šta postoji dovoljno teoretskih i eksperimenalnih dokaza, što smo potvrdili u predhodnom tekstu. S druge strane, izrazi za Švarcšildov poluprečnik i za Komptonovu talasnu dužinu podrazumevaju da su dimenzionalnost prostora i statistika čestica u Plankovim razmerama ***neodređeni***, kao što smo našli u predhodnom tekstu. (***Strana 60***) i (***strana 64***). Drugim rečima priroda nema u Plankovim razmerama ni više dimenzija ni supersimetriju. (***Strana 62***) i (***strana 64***). I svi poznati eksperimenti potvrdili su ovaj zaključak. U našem traganju za konačnom teorijom kretanja mi ćemo zato da odbacimo dve netačne predpostavke i da nastavimo našu pustolovinu.

Preostalo traganje možemo da izrazimo na sledeći način:

- Kako se tri interakcije merila odnose prema osnovnim konstantama: c, $\hbar$, k i G?

Ovo pitanje retko se postavlja. Pokušaji da se odgovori još su ređi. (Možete li da nađete još jedan?) (***Izazov 108e***). Nalaženje porekla interakcije merila značilo bi nalaženje konačne teorije. A da bismo bili uspešni u tom traganju, potrebna su nam dva alata: proširenost i jednostavnost.

[1] Godine 2014. tokom Konferencije o superstrunama, postalo je jasno da je zajednica istraživača superstruna tiho odustala od potrage za objedinjenom teorijom uz pomoć superstruna ili supermembrana. Istraživaći sada traže druge mikroskopske modele prirode.

Poglavlje 7

OSNOVE MODELA NITI

Mi nemamo novac, tako da moramo da mislimo.[1]
Ernest Raderford (Ernest Rutherford)

Dva uzuzetno precizna opisa kretanja koji su otkriveni u dvadesteom veku – kvantna teorija polja i opšta teorija relativnosti – niskoenergetske su približnosti ponašanja prirode u Plankovim razmerama. Do sada su ta ponašanja nepoznata. Da bi se razumela priroda u Plankovim razmerama i stoga da se nađe objedinjen i konačan opis kretanja, pratimo metodu koja je bila najefektivnija tokom istorije fizike: tražimo ***najjednostavniji*** moguć opis. Jednostavnost je bila uvek uspešna, na primer, u otkrivanju specijalne teorije relativnosti, u otkrivanju kvantne teorije i u otkrivanju opšte teorije relativnosti. Prema tome, koristimo smernice koje daje jednostavnost da izvedemo objedinjenu i konačnu teoriju kretanja.

Glavni zahtev za svaki objedinjen opis je da se on izvodi iz Plankovih razmera, pa prema tome od Plankovih jedinica do kvantne teorije polja, preko standardnog modela elementarnih ćestica do opšte teorije relativnosti. Jednostavnim pojmovima, kao što je opisano u tekstu koji sledi (***strana 127***), objedinjeni opis mora da važi za ***sva opažanja*** i da pruža ***potpinu preciznost.***

Iz predhodnih poglavlja već znamo pomalo o objedinjemom opisu. Naročito da svaki objedinjeni opis opšte teorije relativnosti i kvantne teorije mora da koristi ***proširene*** sastojke. Otkrili smo brojne razloge da su oni ključni za ovaj zaključak. Svi ovi razlozi pojavljuju se samo kada se kombinuju kvantna teorija i opšta teorija relativnosti. Prvo, samo sastojci koji su prošireni omogućavaju da se izvede entropija crne rupe. Drugo, samo prošireni sastojci omogućavaju nam da napravimo model da elementarne čestice nisu tačkaste ili da fizički prostor nije načinjen od tačaka. Treće, samo proširene čestice omogućavaju nam da napravimo model najmanjeg merljivog prostora i vremenskog intervala. Četvrto, samo prošireni sastojci omogućavaju nam da napravimo model spina 1/2 u lokalnom ravnom prostor-vremenu.

Međtim, mi ne tražimo samo objedinjenu teoriju; tražimo takođe ***konačnu*** teoriju. To podrazumeva drugi zahtev: konačna teorija ne sme da bude promenljiva. Kao što ćemo da vidimo u tekstu koji sledi (***strana 129***), ako kandidat za konačnu teoriju može da bude promenljiv, ili uopšten, ili primenljiv samo u posebnim slučajevima, ili da se menja na drugi način, on nije konačan.

ZAHTEVI ZA KONAČNU TEORIJU

U našem traganju za konačnom, objedinjenom teorijom već smo utvrdili u predhodnim poglavljima više zahteva koji ova teorija mora da ispuni. Svi zahtevi koje smo utvrdili navedeni su u ***Tabeli 6***. Izvesni zahtevi slede iz osobina da opis mora da bude konačan, ostali iz osobina da mora da bude objedinjen, a ostali iz osobina da mora da opiše prirodu. (***Izazov 109e***). Još određenije, svaki zahtev pojavljuje se kada se kombinuju Komptonova talasna dužina i Švarcšildov poluprečnik. Tabela se do sada ne nalazi nigde drugde u istraživačkoj literaturi.

Popis zahteva naveden u ***Tabeli 6*** može da bude znatno skraćen. Skraćenje popisa zahteva moguće je pošto su različiti zahtevi međusobno konzistentni. Ustvaru, skraćenje je moguće pošto detaljna provera potvrđuje sumnju koja je iskrsla u toku poslednjeg poglavlja: proširenost sama za sebe dovoljna je da bi objasnila sve one zahteve koji izgledaju delimično iznenađujući ili uobičajeni, kao što je nepostojanje tačaka ili nepostojanje aksioma. (***Izazov 110e***) Takav skraćen popis takođe zadovoljava naš nagon za jednostavnošću. Posle skraćivanja, dva zahteva za konačnu teoriju glase:

[1] Ernest Raderford (Ernest Rutherford, 1871. Brightwater – 1937. Cambridge) bio je značajan fizičar i istraživač; obitnik je Nobelove nagrade za hemiju za njegov rad sa atomima i radioaktivnosti.

- ***Konačna teorija mora da opiše prirodu*** na Plankovim razmerama i ispod Plankovih razmera[1] kao ***napravljenu od proširenih satojaka koji se kolebaju u pozadini***. Prošireni sastojci moraju da objasne čestice, postor i horizont.
- U konačnoj teoriji ***kolebanje*** proširenih sastojaka ***mora da objasni sva kretanja***. Kolebanje u Plankovim razmerama mora da objasni sve primere svakodnevnih opažanja, kvantnih i relativističkih kretanja, uz potpunu preciznost, podrazumevajući sve pojmove fizike, i da objasni sve osnovne konstante

TABELA 6 Opšti zahtevi za konačan i objedinjen opis prirode i kretanja

Gledište	**Zahtevi za konačan i objedinjen opis**
Preciznost	mora da bude potpuna; objedinjeni opis mora da opiše precizno sva kretanja – svakodnevna, kvantna i relativistička – i da objasni sva otvorena pitanja iz milenijumske liste, date (ponovo) na ***strani 127***.
Izmene	moraju da budu ***onemogućene***, kao što je opisano na ***strani 129***
Osnovna načela	moraju da budu jasna. (U suprotnom, objedinjeni opis ne može da se proveri.)
Vakuum i čestice	ne smeju da se ***razlikuju*** u Plankovim razmerama zbog ograničenja preciznosti merenja; vakuum i čestice zato moraju da budu opisani zajedničkim proširenim sastojcima.
Osnovni sastojci	moraju da određuju sva opažanja
	moraju da budu što je moguće jednostavniji, da zadovolje Okamovu britvu.
	moraju da budu prošireni i da se kolebaju, kako bi objasnili entropiju crne rupe, spin, minimalne intervale merenja, homogenost prostor-vremena i izotropnost prostora.
	moraju da budu subjekti koji ***ne mogu*** da se ***opaze***. (Ako bi mogli da se opaze, teorija nebi bila konačna, pošto bi osobine subjekta zahtevale objašnjenje; ako bi postojali drugi neopazivi subjekti, teorija bi bila fiktivna, nenaučna.)
Nelokalnost	mora da bude deo opisa; nelokalnost mora da bude zanemarljiva u svakodnevnim razmerama, ali bitna u Plankovim razmerama.
Fizičke tačke i skupovi	ne smeju da postoje u Plankovim razmerama usled ograničenja preciznosti merenja; tačke i skupovi postoje kao približnosti samo u svakodnevnim razmerama.
Jednakost razvoja	ne sme da postoji u Plankovim razmerama, zbog nepostojanja tačaka i skupova.
Fizički sistemi	ne smeju da postoje u Plankovim razmerama, zbog ograničenja preciznosti merenja; sistemi postoje kao približnost samo u svakodnevnim razmerama
Svemir	ne sme da bude sistem, zbog ograničenja preciznosti merenja.
Veliki prasak	ne sme da bude događaj, pa stoga ni početak, pošto bi to bilo protivrečno nepostojanju tačaka i skupova u prirodi.
Singulariteti	ne smeju da postoje, zbog ograničenja preciznosti merenja.
Plankove prirodne jedinice	moraju da budu ***granične vrednosti*** za svako opažanje (uz činilac reda jedan); ne smeju da postoje merenja beskonačno velikih ili malih vrednosti.
Opis Plankovih razmera	mora da podrazumeva kvantnu teoriju polja, standardni model fizike čestica, opštu teoiju relativnosti i kosmologiju.
Plankove prirodne jedinice	moraju da definišu sva opažanja, uključujući konstante veza.
Odnos sa eksperimentima	moraju da budu što je moguće jednostavniji, da zadovolje Okamovu britvu.
Zavisnost pozadine	potrebna je, pošto je nezavisnost pozadine logička nemogućnost
Pozadina prostor-vremena	mora biti ***jednaka*** sa fizikom prostor-vremena u svakodnevnim razmerma, ali mora da je globalno ***različita*** u Plankovim razmerama.
Kružnost odrednica	fizičkih pojmova mora da bude deo konačnog, objedinjenog opisa, kao posledica da se bude "precizan u govoru o prirodi".
Aksiomski opis	moraju da budu nemogući, jer priroda nije opisana skupovima; šesti problem Hilberta ne sme da ima rešenje
Dimenzionalnost prostora	mora da bude ***neodređena*** u Plankovim razmerama, jer je postor tamo neodređen
Simetrije	moraju da budu ***neodređene*** u Plankovim razmerama, zbog ograničenja preciznosti merenja
Velike i male razmere	moraju da budu ***slične***, zbog ograničenja preciznosti merenja

[1] Konačna teorija ne sme da opiše prirodu izvan Plankovih razmera. Opušteniji zahtev je da predviđanja teorije moraju biti nezavisna od bilo kakvih maštarija o onome što bi moglo da se desi izvan Plankovih razmera.

Ova dva sažeta zahteva rezultat su naše dosadašnje pustolovine. Oni obrazuju polaznu tačku za poslednju etapu naše pustolovine. Ukoliko se ne slažete sa ova dva zahteva, odmorite se i istražite vaša neslaganje u svim njegovim detaljima. (***Izazov 111e***).

Posmatrajući tabelu zahteva za konačnu teoriju – i onu potpunu i onu skraćenu – primećujemo nešta začuđujuće. Iako se svi zahtevi pojavljuju kada se kombinuju kvantna fizika i opšta teorija relativnosti, svaki od ovih zahteva ***protivrečan*** je i kvantnoj fizici i opštoj teoriji relstivnosti. Konačna teorija zato mora da bude ***različita*** od oba potporna stuba savremene fizike. Konačna teorija ne može da se nađe ako ostajemo zarobljenici ili kvantne teorije ili opšte teorije relativnosti. Jasno rečeno, svaki od zahteva za konačnu teoriju proivrečan je svim rezultatima fizike dvadesetog veka! Ovaj neočekivani zaključak glavni je razlog što su protekli pokušaji bili neuspešni u otkrivanju konačne teorije. Ustvari, većina pokušaja nisu ispunjavala zahteve, pošto razni naučnici otvoreno nisu bili saglasni sa nekima od njih.

Zahtev ***proširenosti*** osnovnih sastojaka glavni je rezultat osobina konačne teorije. Konačna teorija mora da daje iskaz o ovim sastojcima. Osnovni sastojci, takođe nazivani ***osnovni stepeni slobode***, moraju da objasne sve što opažamo ili znamo o prirodi. Posebno, sastojci moraju da objasne zakrivljenost prostora, entropiju crnih rupa i spektar, masu i druge osobine svih elementarnih čestica. I ovi sastojci moraju da budu prošireni. Proširenost je razlog što je konačna teorija protivrečna i opštoj teoriji relativnosti i kvantnoj teoriji – ali ipak dopušta ove teorije kao izvanredne približnosti. Ukratko, proširenost je ključ za nalaženje konačne teorije.

Sažeti zahtevi koji podrazumevaju kolebajuće proširene sastojke nastali su iz naših poriva za izuzetnom jednostavnošću. Sa ovim sažetim zahtevima potraga za kandidatom konačne teorije neće da traje dugo. (***Ref. 152***). Od nekolicine kandidata koji ispunjavaju zahteve za konačnu teoriju, izgleda da je najjednostavniji onaj koji je na bazi ***kolebejućih niti bez osobina***. (***Strana 129***). U ovom ptistupu se predpostavlja da su, ***niti***,[1] a ne tačke, osnovni sastojci vakuuma, horizonta, materije i zračenja.

UVOĐENJE NITI

Model niti počinje jednostavnom idejom:

- Priroda je sastavljena od neopazivih, kolebajućih, niti koje nemaju osobine.

Otkrićemo da je sve što opažamo u prirodi – vakuum, fermioni, bozoni i horizont – načinjeno od niti. Niti su zajednički i prošireni sastojci svega. Iako se niti ne mogu opažati i nemaju osobine, sva opažanja su usled niti. Za opis svih opažanja model niti koristi samo ***osnovna načela***:

- ***Plankove jedinice*** su određene ***promenama ukrštanja*** niti (engleski ***crossing switch***).

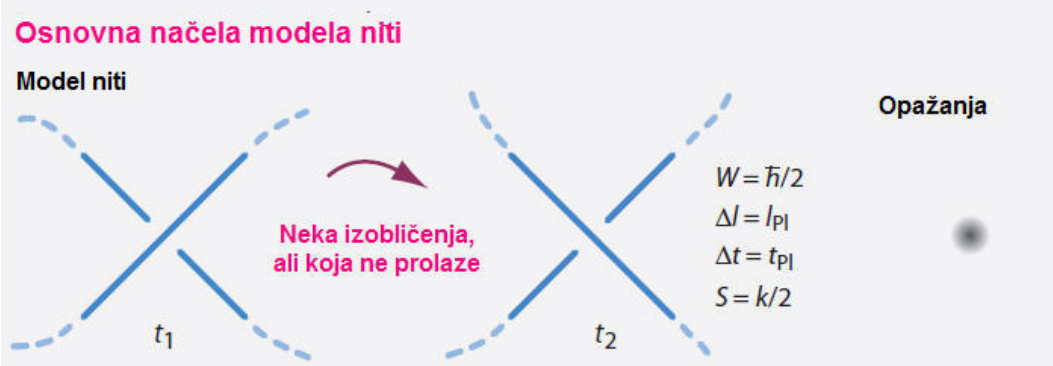
Odrednice Plankovih jedinica pomoću promena ukrštanja prikazane su na ***slici 10***. Sva merenja posledica su ove definicije. Osnovna načela prema tome određuju zašto i kako su Plankove jedinice ***prirodne jedinice*** u prirodi. Naročito su četiri osnovne Plankove jedinice povezane na sledeći način:

- ***Plankov kvant rada*** $\hbar/2$ pojavljuje se kao vrednost rada povezana sa promenom ukrštanja. Rad $\hbar$ odgovara dvostrukoj promeni ukrštanja, ili punom obrtu jednog segmenta niti oko drugog.[2]
- (Ispravljena) ***Plankova dužina*** $l_{\mathrm{Pl}} = \sqrt{4G\hbar/c^3}$ pojavljuje se kao stvarni prečnik niti. Pošto je Plankova dužina granica koja ne može da se dostigne merenjima, niti takvog prečnika ostaju neopažene.[2]
- ***Plankova entropija***, to jest Bolcmanova konstanta k, je prirodna jedinica povezana sa preboja-vanjem i statistikom ukrštanja.[2]
- (Ispravljeno) ***Plankovo vreme*** $t_{\mathrm{Pl}} = \sqrt{4G\hbar/c^5}$ pojavljuje se kao najkraće moguće vreme trajanja promene ukrštanja.[2]

---

[1] Pojam ***niti (***engleski ***strands)*** uveo je u fiziku autor – Christoph Schiller. Ovaj nov pojam određen je u rečnicima: holandskom; *draden - žice*, francuskom: *fils - dugačak i fini deo tekstilnog materijala*, nemačkom *Fäden - niti*, italijanskom: *fili - žice*. Na srpski je preveden u saglasnosti sa odrednicim iz rečnika Merriam Webster: "*one of the wires twisted together or laid paralel to form wire, rope or cable*". Prema tome, prevod "niti" treba shvatiti u smislu "niti konopca" ili "niti koje čine uže". (Prim. prev.)

[2] Drugim rečima, model niti postavlja $\hbar = l_{\mathrm{Pl}} = t_{\mathrm{Pl}} = k = 1$. Čudni brojevi koje ove konstante imaju u SI sistemu, međunarodnom sistemu jedinica, tada slede automatski iz definicija za metar, sekundu, kilogram i kelvin.

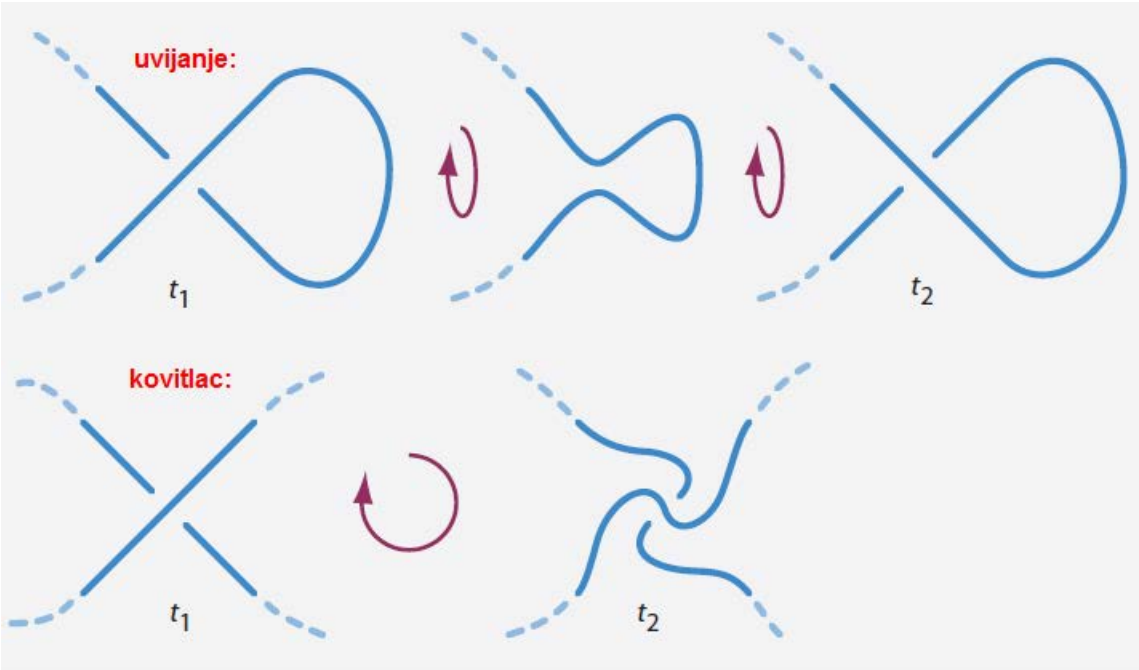


Slika 10 Osnovna načela modela niti: najjednostavnije opažanje u prirodi, "tačkasti" događaj, definisan je promenom ukrštanja u tri prostorne dimenzije. Promena ukrštanja određuje, rad $\hbar/2$, Plankovu dužinu, Plankovo vreme i Bolcmanovu konstantu.

Promene ukrštanja koje su brže od Plankovog vremena ne igraju ulogu, jer se oni ne mogu opažati niti meriti. Pogledajmo zašto.

Kako možemo da zamislimo minimalni interval vremena u prirodi? Promena ukrštanja mogla bi da bude proizviljno brza, zar ne? Dakle kako se pojavljuje Plankovo vreme? Da bismo odgovorili, moramo da se podsetimo uloge posmatrača. Posmatrač je fizički sistem, takođe načinjen od niti, Posmatrač ne može da definiše zaista neprekidnu pozadinu prostor-vremena. Pažljivo razmatranje nam kazuje da je prostor-vreme koje definiše posmatrač unekoliko nejasno: ono efektivno ***podrhtava***. Prosečna amplituda drhtanja, u najboljem mogućem slučaju, reda je Plankove dužine i Plankovog vremena. Prema tome, promene ukrštanja brže od Plankovog vremena posmatrač načinjen od niti ne može da opaža.[1]

Niti su ***neprobojne***; promena ukrštanja stoga uvek zahteva kretanje segmenata niti, jednog ***oko*** svih dugih. Najprostiji primer izobličenja koji dovodi do promene ukrštanja prikazuje ***slika 11***.



Slika 11 Primer izobličenja niti koji dovodi do promene ukrštanja (gore) i primer koji ne dovodi do promene ukrštanja (dole)

Možete li da izvedete proces niti za Plankovu količinu kretanja, Plankovu silu i Plankovu energiju? (***Izazov 113s***).

[1] Pitanje vremena ostaje prefinjeno takođe i u modelu niti. Zahtev za doslednošću sa makroskopslim iskustvom, koje se ostvaruje drhtanjem prostora ili prostor-vremena, omogućava nam da otklonimo problem. Alternativni pristup mogao bi da oslika promenu ukrštanja i njena kolebanja u 4 dimenzije prostor-vremena, te da prikaže kako je minimalni interval vremena povezan sa minimalnim rastojanjem To bi bilo vredno istraživanja. (***Izazov 112r***). Međutim, i u ovakvom pristupu nejasnost usled drhtanja je zasnovana na minimalnom vremenu.

Istraživanjem procesa niti nalazimo: osnovni načela podrazumevaju da je svaka Plankova jedinica ***granična vrednost*** invarijantnog posmatrača. (***Izazov 114e***). Prema tome, osnovna načela prirodno sadrže specijalnu i opštu teoriju relativnosti, kvantnu teoriju i termodinamiku. (***strana 34***). U teoriji su ovi dokazi dovoljni da pokažu da osnovna načela sadrže sve ove delove fizike dvadesetog veka. U praksi, međutim, fizičari ne menjaju svoje navike razmišljanja; zato moramo detaljnije da prikažemo ove rezultate.

U modelu niti, svaka interakcija, svako merenje i svaki fizički proces, takođe je redosled događaja. Zato zaključujemo da su događaji procesi.

- ***Događaj*** je promena ukrštanja između dva segmenta niti.

Pokazaćemo da opis događaja i interakcija uz pomoć promene ukrštanja dovodi, bez dvoumljenja, do ***potpunog*** standardnog modela fizike čestica, sa svim njegovim poznatim interakcijama merila i svim njegovim poznatim spektrima čestica.

Posebno ćemo pokazati:

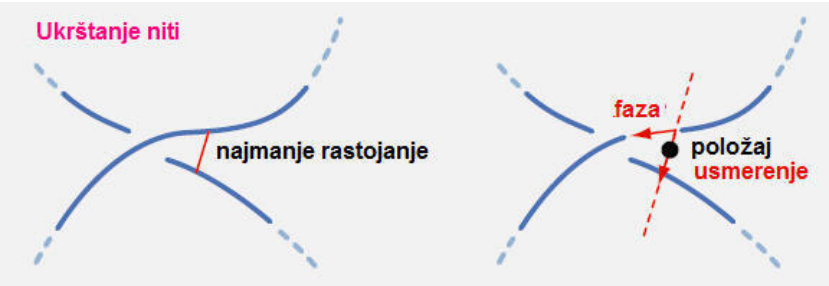
- ***Elementarni električni naboj*** e i ***konstanta fine strukture*** α = 1/137,036(1) nastaju usled promene ukrštanja.

Vrednost konstante fine strukture i standardni model ***nisu očigledne*** posledice osnovnog načela; ipak, one su ***prirodne*** posledice – kao što ćemo pronaći.

OD NITI DO SAVREMENE FIZIKE

Svako opažanje je redosled promena ukrštanja niti koje se ne mogu opažati. Nasuprot tome, promene ukrštanja automatska su posledice kolebanja oblika niti. Pokazaćemo u daljem tekstu da su sve neprekidne veličine koje smo do sada koristili – fizički prostor, fizičko vreme, polja merila i talasne funkcije – posledica ***prosečnih*** promena ukrštanja preko prostora pozadine. Glavni pojmovni alati neophodni ubuduće su:

- Ukrštanje niti je lokalni minimum rastojanja niti. Položaj, usmerenost i faza prelaska određeni su prostornim vektorom koji odgovara lokalnom minimalnom rastojanju, kao što je prikazano na ***slici 12***.



Slika 12 Definicija ukrštanja, njegov položaj, njegovo usmerenje, i njegova faza

Položaj, usmerenje, i faza ukrštanja dovešće nas, kao što je pokazano kasnije (***strana 135***), do položaja, usmerenja i faze talasnih funkcija. Predznak usmerenja određen je proizvoljnim izborom jedne niti kao početne. Još veća proizvoljnost u određivanju faze biće još značajnija kasnije: ona podrazumeva postojanje tri poznate grupe merila.

- ***Promena ukrštanja*** je obrtanje usmerenja prelaska za ugao π na ***određenom položaju***. Još preciznije, promena ukrštanja je inverzija usmerenja na određenom položaju.

Napominjemo da odrednice koriste sve tri dimenzije prostora; prema tome, broj ukrštanja i promena ukrštanja nezavisan je od smera posmatranja. Ovo je suprotno odrednici ukrštanja koja se koristi u dvodimenzionalnom prikazu čvora; u takvoj dvodimenzionalnoj projekciji broj ukrštanja zavisi od smera projekcije.

Napominjemo da u kolebanju niti nije očuvan broj ukrštanja; usled kolebanja ukrštanja nestaju, pojavljuju se i nestaju povremeno. Pokazaće se da je ovo pojavljivanje i nestajanje u vezi sa virtualnim česticama.

Osnovni priincipi naglašavaju da događaji nisu tačke na mnogostrukostima; umesto toga:

- ***Događaji*** su primetne promene ukrštanja neprimetljivih niti.

Pošto su sva opažanja događaji, sva opažanja u eksperimentima treba sa slede iz odredice događaja preko niti. To ćemo da potvrdimo u ostatku ovog teksta. (***Strana 264***). Ustvari model niti naglašava:

- ***Priroda*** je načinjena od kolebajućih niti bez osobina.

Niti su bez osobina: one nemaju masu, nemaju naprezanje, nemaju čvrstinu, nemaju ogranke, nemaju utvrđenu dužinu, ne mogu da se preseku ili potisnu jedne u druge. Niti nemaju uopšte merljivih osobina: niti se ne mogu opažati. Mogu se opažati samo promene ukrštanja. Niti bez osobina zato su među najjednostavnijim mogućim proširenim sastojcima. Koliko su jednostavne? To ćemo uskoro da razmatramo. (***strana 129***).

- ***Niti*** su jednodimenzionalne krive u trodimenzionalnom prostoru koje dopiru do granice prostora.

U praksi ***granica prostora*** ima jedno od dva moguća značenja. Uvek kada se predpostavi da je prostor ravan, granica prostora prostorno je beskonačna. Kada se u obzir uzmu osobine svemira u celosti, granica prostora je kosmički horizont. Zamišljajući niti kao da imaju Plankov prečnik, to čini da se one ne mogu opažati, pošto takvo merenje ne može da se ostvari. (Sećamo se da je Plankova dužina donja granica svakog merenja dužine.) U situacijama sa niskom energijom dobra približnost je da prečnik niti nestaje.

- U odrednici jezičkih čistunaca, purista, niti bez osobina nemaju prečnik – ni Plankove dužine ni nulti. Njih je najbolje zamišljati kao ***duge tanke oblake***.

Niti ne mogu da se opažaju i nemaju osobine, pa prema tome nemaju ni prečnik. Usled kolebanja oblika, ili ekvivalentno, usled drhtanja prostor-vremena, niti se mogu zamisljati kao da imaju stvarni prečnik, sličan prečniku dugog tankog oblaka; međutim, ovaj zamišljeni prečnik samo je vodič za naša razmišljanja. Pošto je to usled drhtanja pozadine prostor vremena, prečnik niti je invarijanta pri podršci (boost). Levkovi, pomenuti u tekstu koji sledi (***strana 132***), kod jezičkih čistunaca možda su bolji prikaz odrednice niti. Da bismo ovaj uvod održali što je moguće intuitivnijim, mi ćemo da se držimo ideje da niti imaju stvaran invarijantan Plankov prečnik.

Model niti pravi razliku između ***fizičkog prostora*** i ***prostora pozadine***. Pokazaćemo uskoro (***strana 130***) zbog čega su nam potrebna ova dva pojma. Uz ovo razlikovanje model niti najavljuje da su materija i zračenje, vakuum i horizont, izgrađeni od ***kolebajućih niti*** u ***neprekinutoj pozadini***. Prvo da razjasnimo ova dva osnovna pojma.

- ***Neprekinuti prostor pozadine*** uvodi posmatrač da bi mogao da opiše opažanja. Svaki posmatrač uvodi sopstvenu pozadinu. Međutim, svaka pozadina je neprekinuta i ima tri prostorne i jednu vremensku dimenziju.

Na ovom mestu razmatranja mi ćemo prosto da predpostavimo prostor pozadine. Kasnije ćemo videti zašto se pojavljuje prostor pozadine (***strana 159***) i zašto je ***potrebno*** da bude trodimenzionalan. Predpostavlja se da je prostor pozadine velik; veći no bilo koja fizička razmera koja se razmatra. U većini situacija u svakodnevnom životu, kada je prostor ravan, prostor pozadine i fizički prostor su podudarni. Međutim, razlikuju se u situacijama kada postoji zakrivljenost i na Plankovoj energiji.

- ***Kolebanja*** menjaju položaj, oblik i dužinu niti; stoga kolebanja menjaju položaj, usmerenje i fazu ukrštanja niti. Međutim, kolebanja nikada de dopuštaju da jedna nit prođe kroz drugu.

Moguća su sva kolebanja niti sve dok su niti neprobojne. Na primer, za niti ne postoji granica brzine. Uvek kada kolebanje niti dovede do promene ukrštanja, to uzrokuje efekte opažanja – bilo da je kolebanje vakuuma, reakcija čestice ili kolebanje horizonta.

- Kolebanja su posledica ugradnje niti u neprekinutu pozadinu.

U modelu niti čak su i izolovani fizički sistemi okruženi kupatlom kolebajučih niti vakuuma. Osobine kolebanja, kao što je njihov spektar, njihova gustina itd. utvrđeni su za jednom za sva ugrađivanja. Kolebanja su potrebna za samodoslednost modela niti.

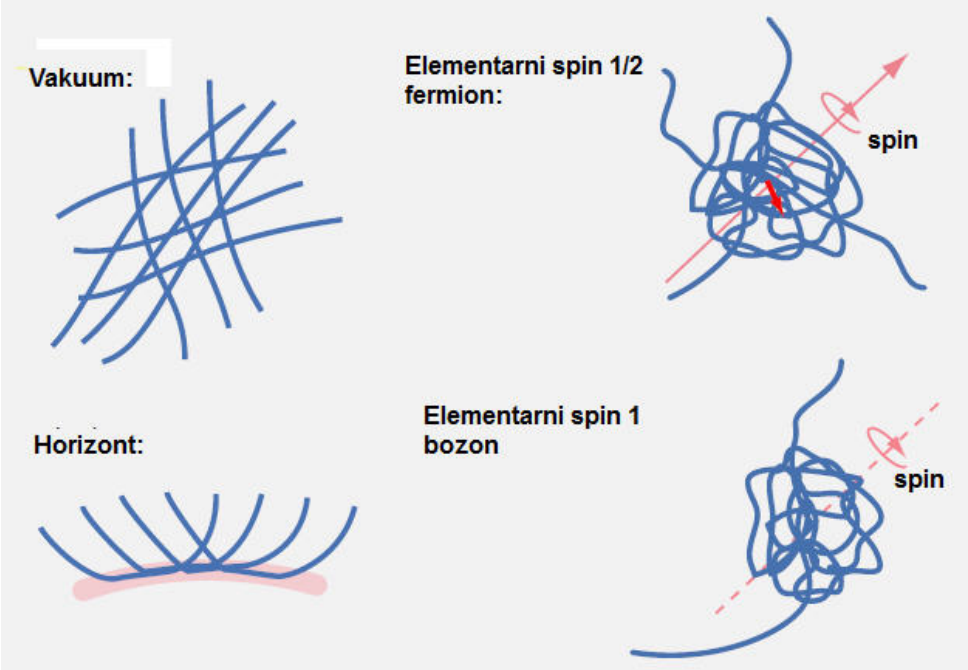
Zbog neprobojnosti niti – koja je sama po sebi posledica ugrađivanja u neprekinutu pozadinu – ***rasprostranjuje se*** svaki poremećaj niti vakuuma na jednom položaju. Videćemo u tekstu koji sledi koji poremećaji postoje i kako se razlikuju od kolebanja.

Niti koje se kolebaju dovode do promene ukrštanja i objašnjavaju sve što se ***dogada*** i objašnjavaju sve što se ***ne događa***. Naš glavni cilj u onome što sledi jeste da razvrstamo sva moguća kolebanja niti i sve moguče konfiguracije niti, naročito sva stanja koja se razlikuju od ravnog stanja vakuuma. Čineći to, bićemo sposobni da razvrstamo svaki proces i svaki sistem koje opažamo u prirodi.

Otkrićemo da svi ***fizički sistemi*** mogu da se konstruišu pomoću niti. ***Tabela 7*** daje prvi pregled kako vakuum, čestice i horizont potiču iz ***zapleta*** niti.

- ***Zaplet*** je konfiguracija jedne ili više niti koje su povezane ili vezane u čvor. Zaplet je okarakterisan svojom topologijom, to jest preciznim načinom na koji su niti povezane ili vezane.

Neki primeri bitnih zapleta dat je na ***slici 13***. Oni će biti razmatrani detaljno u tekstu koji sledi. Između ostalog, otkrićemo da čvorovi i niti vezane u ćvor nemaju značaj u modelu niti.



Slika 13 Prvi prikazi osnovnih fizičkih sistema koji se nalaze u prirodi, biće istraženi detaljno u tekstu.

Primećujemo da su vakuum, materija i zračenje načinjeni od istih osnovnih sastojaka, kao što zahteva konačna teorija. U daljem tekstu (***Strana 235***) otkrićemo da klasifikacija lokalizovanih zapleta prirodno dovodi do elementarnih čestica koje čine standardni model fizike čestica – i do nijedne druge elementarne čestice.

TABELA 7 Povezanost između svih poznatih fizičkih sistema i matematičkih zapleta

Fizički sistem	**Sadržaj niti**	**Vrsta zapleta**
Vakuum i tamna energija	više nevezanih i nezapletenih beskrajnih niti	nepovezano, trivijalno
Gravitacija	dve beskrajne uvijene niti	racionalna nit
Gravitacijski talas	više beskrajnih uvijenih niti	više racionalnih nit
Horizont	više upletenih beskrajnih niti	tkanje niti, slično mreži
Elementarni vektorski bozon (zračenje)	jedna beskonačna nit	bilo koja iz porodice zapletenih krivih
Klasičan elektromagnetni talas (zračenje)	više beskrajnih niti	više helikoidnih izobličenih zapetljanih krivih
Elementarni kvark (materija)	dve beskrajnih niti	racionalna nit
Elementarni lepton (materija)	tri beskrajne niti	upletena nit

Isto tako ćemo da otkrijemo da kolebanja niti i izazvane promene ukrštanja u svakom fizičkom sistemu dovode do jednakosti razvoja i lagranžijana kvantne teorije polja i opšte teorije relativnosti. Na taj način niti opisuju svaki fizički proces opažen u prirodi, uključujući sve poznate interakcije i svaku vrstu kretanja.

Osnovna načela povezuju promene ukrštanja i opažanja. (***Strana 119***). Osnovna načela su otkrivena zbog toga što de javljaju kao jedine proste odrednice Plankovih jedinica koje s jedne strane daju prostor-vreme, uz njegovu neprekidnost, lokalnu izotropnost i zakrivljenost, a s druge strane ostvaruju poznate veze između kvanta rada, spina i obrtanja.

VAKUUM

Sada konstruišemo pomoću zapleta, korak po korak, sve bitne fizičke sisteme, pojmove i procese. Počećemo sa najbitnijim.

- Vakuum, ili fizički prostor, obrazovan je vremenskim prosekom više nevezanih kolebajućih niti

Ova odrednica prikazanaje na ***slici 14***. U tekstu koji sledi vakuum i fizički prostor uvek će se koristiti kao sinomimi; istraživanje će da pokaže da je to najsmislenija upotreba ova dva pojma.[1] Međutim, kao što je pomenuto, model niti pravi razliku između ***fizičkog*** prostora i prostora ***pozadine***. Osim toga, nemoguće je da se govori o fizičkom prostoru na lokaciji materije, pošto su materija i vakuum načinjeni od istih sastojaka. Na lokaciji materije jedino je moguće da se koristi pojam prostora pozadine.

Slika 14 Šematski prikaz modela niti za vakuum

Kada je kolebanje niti u ravnom vakuumu posmatrano u vremenskom proseku ne postoje promene ukrštanja. Ekvivalentno tome, ako upotrebimo pojam koji će uskoro da bude uveden, ravan vakuum pokazuje da u vremenskom proseku ne postoje ni čvorovi ni zapleti, tako da se on opaža kao praznina bez materije i zračenja. Povremeni zapleti, koji se pojavljuju kratkotrajno kroz kolebanje vakuuma, kasnije će se pokazati da predstavljaju virtualne čestice. (***Strana 181***).

Primećujemo da je stanje ravnog vakuuma, koje se pojavljuje posle vremenskog proseka ukrštanja niti, ***neprekidno***, ***invarijanta Lorenca*** i ***jedinstveno***. Ovo su važne tačke za doslednost modela. Kasnije čemo takođe da otkrijemo (***strana 211***) da zakrivljenost i horizont imaju prirodan opis pojmovima niti; istraživanje njih daće jednakost polja opšte teorije relativnosti. Model niti stoga zamenjuje ono što smo nekada nazivali "pena prostor-vremena" ili "kvantna pena".

Isto tako primećujemo da ***slika 14*** podrazumeva, uprkos prividu, da je vakuum ***izotropan***. Da bi se to sagledalo, moramo da se setitmo da se mogu opažati promene ukrštanja, ne i niti, a da je opažanje izotropnosti vakuuma rezultat izotropnosti vremenskog proseka kolebanja niti.

- Nećemo da pravimo bilo koji islaz o brojnoj gustini niti u vakuumu, ili ekvivalentno tome, o njihovom prosečnom razmaku. Pošto niti ne mogu da se opažaju, takav iskaz nije razuman. Naročito, pošto niti u vakuumu nisu tesno zapakovane.

Uz odrednicu vakuuma kao vremenskog proseka, model niti daje istovremeno minimalnu dužinu i neprekinuti vakuum. Na taj način miruju mnoga pitanja o navodnoj protivrečnosti između neprekidnosti i minimalne dužine. Fizički prostor u osnovi nije diskretan, posebno, pošto se pojavljuje minimalna dužina iako je ona svojsvena samo u oblastima gde je fizički prostor neodređen. S druge strane, neprekidnost fizičkog prostora nastaje iz prosečnog procesa. Prema tome, fizički prostor u osnovi nije neprekidan; model niti opisuje fizički prostor kao homogenu raspodelu promena ukrštanja. To je verzija niti Vilerove (Wheeler) ideje pene prostor-vremena.

OPAŽANJA I OGRANIČENJA

Osnovno načelo podrazumeva sledeće odrednice osnovnih opažanja:

- ***Rastojanje*** između dve čestice je maksimalan broj promena ukrštanja koji može da se izmeri između njih. Merenje dužine prema tome je određeno kao prebrojavanje Plankovih dužina.

[1] Sećamo se da je više od jednog veka pojam etera nepotreban, jer ne može da se razlikuje od pojma vakuuma.

- ***Interval vremena*** između dva događaja je maksimalan broj promena ukrštanja koji može da se izmeri između njih. Merenje vremena prema tome je određeno kao prebrojavanje Plankovih vremena.
- Fizički ***rad*** fizičkog sistema koji se razvija od početnog do krajnjeg stanja broj je promena ukrštanja koji može da se izmeri. Merenje rada je prema tome određeno kao prebrojavanje promena ukrštanja. Fizički rad je prema tome merenje ***promena*** koje je sistem pretrpeo.
- Entropija bilo kojeg fizičkog sistema povezana je sa logaritmom broja mogućih izmerenih promena ukrštanja. Merenje entropije određeno je prema tome prebrojavanjem promena ukrštanja. Model niti zato predpostavlja da svaki fizički sistem ima entropiju – bilo da je načinjen od materije, zračenja, praznog prostora ili horizonta.

Dobro je poznato da su sva ostala fizička opažanja određena korišćenjem ovih osnovnih četiri. Drugim rečima, ***sva*** fizička opažanja određena su promenama ukrštanja. Takođe napominjemo da iako prebrojavanje uvek daje ceo broj, rezultat merenja u fizici često je prosek više procesa prebrojavanja. Kao rezultat proseka i kolebanja, izmerene vrednosti mogu da budu necelobrojni umnožak Plankovih dužina. Prema tome, prostor, vreme, rad, entropija i sva ostala opažanja efektivno su realni brojevi, pa prema tome neprekidni. Neprekidnost je zato pomirena sa postojanjem minimalne merljive dužine i intervala vremena. Konačno, napominjemo da određivanje opažanja uz pomoć promena ukrštanja automatski čini da su Plankove jedinice c, $\hbar$, c^4/G i k, kao i sve njihove kombinacije i ***invarijante posmatrača*** i ***granične vrednosti***. Svi ovi zaključi u saglasnosti su odgovarajućim zahtevima za konačnu teoriju prirode. (***Strana 117***).

ČESTICE I POLJA

Niti takođe određuju čestice, kao što je prikazano na ***slici 15***:

- ***Kvantna čestica*** je zaplet kolebajućih niti. Jezgro zapleta, oblast gde su niti povezane ili vezane, određuje položaj, brzinu, fazu i spin čestice. Repovi zapleta dosežu do granice prostora.

Kao što će uskoro detaljnije da se pokaže (***strana 136***), ova odrednica kvantnih čestica daje, u zavisnosti od detalja zapleta, ili fermionsko ili bozonsko ponašanje i prikazuje teoremu statistike spina.

Bozonski zaplet omogućava nam da modeliramo jačinu polja. Bozonski zapleti posebno dopuštaju da se izvede elektromagnetno polje i dva nuklearna polja, kao i odgovarajuće simetrije merila standardnog modela fizike čestica. (***Strana 171***).

Slika 15 Model zapleta za česticu sa spinom 1/2. Više detalja u daljem tekstu (***strana 135***)

Modeliranje fermiona kao niti omogućiće da se izvede Dirakova jednakost za relativističke kvantne čestice. (***Strana 163***). Još kasnije, (***strana 235***) razvrstavanjem svih mogućih zapleta, otkrićemo da postoji samo ***konačan*** broj elementarnih čestica, a da ***topološka vrsta*** zapleta određuje masu, mešanja, kvantne brojeve, naboj i veze svake elementarne čestice. Džon Viler (John Wheeler) je 1960-ih godina izjavio da objedinjeni opis prirode mora da objasni "masu bez mase, naboj bez naboja, polje bez polja". Model niti ostvaruje taj cilj.

Pre no što zaključimo ovu temu iz savremene fizike, napravićemo pauzu i istražiti neka opšta pravila i pitanja modela niti.

ZANIMLJIVOSTI I ZABAVNI IZAZOVI O NITIMA

Zbog čega promene ukrštanja imaju glavnu ulogu u modelu niti? Intuitivno objašnjenje sledi iz njihove uloge u određivanju opažanja. Sva merenja su elektromagnetna – bilo da su merenja položaja, brzine, mase ili bilo kojeg drugog opažanja. Drugim rečima, sva merenja u prirodi u krajnjoj liniji su detektovanje fotona. Model niti pokazuje da su apsorpcija i detekcija fotona tesno povezani sa promenom ukrštanja, kao što ćemo otkriti u tekstu koji sledi. (***Strana 173***).

* * *

Da li postoji ograničenje kolebanja niti? I da i ne. S jedne strane "brzina" kolebanja je neograničena. S druge strane, kolebanja sa "poluprečnikom zakrivljenosti" manjim od Plankove dužine ne dovode do efekata opažanja. Primetimo da su pojmovi "brzina" i "poluprečnik" pod znacima navoda zbog toga što se ne mogu opažati. Potrebna je pažnja kada se govori o nitima i njihovom kolebanju.

* * *

Od čega su načinjene niti? Ovo pitanje proverava da li smo zaista sposobni da izdržimo osnovne kružnosti neodređenih opisa. Niti su bez karakteristika. One nemaju merljivih osobina: one nemaju grane, ne nose polja, a naročito ne mogu da se podele na delove. "Sastojak" od kojeg su načinjene niti nema osobine. Prema tome, niti nisu načinjene iz bilo čega. To najpre izgleda iznenađujuće. Niti su proširene, i zamišljamo ih prirodno kao redosled tačaka. Međutim i to je pogrešno. S obzirom na način na koji su određeni zapažanja i događaji, ne postoji način da se opažaju, da se obeleže ili da se razlikuju tačke na niti. Promene ukrštanja ne dozvoljavaju da se to učini, što može jednostavno da se proveri: matematičke tačke koje zamišljamo na niti nisu fizičke tačke. (***Izazov 115e***). Tačke na niti ne mogi da se opažaju: one prosto ne postoje.

Međutim, ako možda insistiramo, niti moraju da su izrađene od nečeg. Kasnije ćemo da saznamo (***strana 228***) da je svemir u modelu niti načinjen od pojedinačne niti smotane na komplikovan način. Priroda je jedna nit. Prema tome, niti nisu napravljene od nečeg, one su napravljene od svačeg. Sastojak niti je sama priroda.

* * *

Šta su čestice? U modelu niti elementarne čestice su (porodica) ***zapleta*** niti. Drugim rečma, elementarne čestice nisu osnovni građevinski elementi materije – to su niti. Ako bi čestice ***zaista*** bile elementarne, bilo bi nemiguće da se shvate njihove osobine.

U modelu niti čestice nisu zaista elementarne, ali nisu ni složene u uobičajenom smislu. Čestice su zapleti niti koje se ne mogu opažati. Na taj način model niti zadržava korisne aspekte ideje elementarnih čestica, ali ih oslobađa njihovih ograničenja. U tom smislu, model niti može da se sagleda kao odstranjivanje pojmova elementarnosti i čestice. To potvrđuje i ostvaruje drugi zahtev kojeg smo postavili ranije. (***Strana 64***).

* * *

Može li da se uopšte pojavi makroskopski determinizam iz nasumičnog kolebanja niti? (***Izazov 116e***).

* * *

Da li dve paralelne niti oblikuju ukrštanje? (***Izazov 117e***).

* * *

Da li dve udaljene niti oblikuju ukrštanje? (***Izazov 118s***).

* * *

Da li je promena ukrštanja određena u više od tri dimenzije? (***Izazov 119s***).

* * *

Možete li da nađete način za uopštavanje ili izmene modela niti. (***Izazov 120s***).

* * *

Gledajući unazad, mogli bismo da primetimo povezanost između modela niti i vizije "It from Qubit", koju je širio David Dojč (David Deutsch). Kakva je razlika između osnovnog načela i qubit-a? (***Izazov 121e***).

* * *

Da li su model niti potvrdili drugi, nezavisni istraživači? Da, nekoliko godina posle pojave modela niti, to je počelo da se događa. Na primer, u dugačkom članku koji istražuje malu strukturu prostor-vremena iz različitih istraživačkih perspektiva u opštoj teoriji relativnosti, Stiven Karlip (Steven Carlip) dolazi do

zaključka da sve ove perspektive ukazuju na zajednički rezultat da "prostor u fiksnom vremenu su stoga brzo promenljive linije". (***Ref. 153***). To je tačno ono što izražava model niti.

Drugi teorijski pristupi koji potvrđuju model niti, pomenuti su kasnije na raznim mestima u tekstu. Uprkos takvim razvojima, suštinska tačka ostaje da se proveri kako model niti da se uporedi sa eksperimentima. Obzirom da se pokazalo da je model niti neizmenljiv, ne postoji način da se menjaju predviđanja koja su se pokazala kao pogrešna. Ako bi se jedna jedina predpostavka u modelu niti pokazala kao pogrešna, model je osuđen na propast. Do sada, nijedno eksperimentalno predviđanje modela niti nije protivrečno eksperimentima. (***Strana 292***).

DA LI NITI OBJEDINJUJU? – MILENIJUMSKA LISTA OTVORENIH PITANJA

Da li model niti ponavlja sve paradoksalne rezultate koje smo našli u prvim poglavljima? Da, ponavlja. Model niti podrazumeva da se vakuum ne razlikuje od materije u Plankovim razmerama: i jedno i drugo je načinjeno od niti. (***Strana 55***). Model niti podrazumeva da opažanja nisu realni brojevi u Plankovim razmerama. (***Strana 62***). Model niti podrazumeva da su svemir i vakuum jedno te isto ako se istražuju uz veliku preciznost: oboje su načinjeni od niti. (***Strana 75***). Model niti takođe podrazumeva da broj čestica u svemiru nije jasno određen i da priroda nije skup. (***Strana 104***). Možete sami da proverite da se svi ostali paradoksi pojavljuju automatski. (***Izazov 122e***). Osim toga, ispunjeni su skoro svi zahtevi za konačnu teoriju nabrojani u ***Tabeli 6***. Samo dva zahteva iz tabele moraju da se razmotre detaljnije: zahtev za potpunu preciznost i zahtev za neizmenljivost. Počećemo sa potpunom preciznošću.

Ako niti opisuju ***sve*** u prirodi, moraju da objasne zavisnost obrnute srazmere kvadrata rastojanja elektrostatičke i gravitacijske interakcije. Međutim, to nije dovoljno. Ako je model niti konačan, objedinjen opis, on mora da ima ***potpunu*** preciznost. Ovo zahteva, pre svega, da model opisuje ***sve*** eksperimente. Kao što će biti pokazano u daljem tekstu, ovo zaista i jeste slučaj, pošto model niti sadrži i opštu teoriju relativnosti i standardni model fizike čestica. Ali, kao drugo, i mnogo važnije, model mora takođe da postavi sva ona pitanja koja su ostala bez odgovora u osnovnoj fizici dvadesetog veka. Pošto su pitanja toliko bitna, ***milenijumska lista*** otvorenih pitanja data je ponovo u ***Tabeli 8***.

Otvorena pitanja u milenijumskoj listi moraju da budu rešena u svakom konačnom, objedinjenom modelu prirode, pa tako takođe i u modelu niti. Otvorena pitanja mogu da se saberu u dve opšte tačke:

- Prikazivanje kvantne teorije, standardnog modela, opšte teorije relativnosti i kosmologije.
- Objašnjavanje mase, uglova mešanja i konstanti veza.

Naravno, samo druga tačka je ***nedvosmislena provera*** konačnog, objedinjenog opisa. Međutim, isto tako je neophodna i prva tačka.

DA LI SU NITI KONAČNE? – O UOPŠTAVANJU I IZMENJIVOSTI

Glavna atrakcija teorije leži u njenoj logičkoj celovitosti. Ako jedan od zaključaka izvučen iz nje dokazuje da je pogrešna, mora da se napusti; izmena bez uništavanja cele strukture izgleda nemoguće.

Albert Ajnštajn (Albert Einstein),*The Times*, 28. 11. 1919.

Ako se za opis kretanja tvrdi da je ***konačan***, on mora da objasni sve vidove kretanja. Da bi objašnjenje bilo potpuno, takav opis mora ne samo da bude logičan i eksperimentalno upotpunjen, on ne sme da bude podložan ***izmenama***. Iako je Ajnštajn dao smisao za opštu teoriju relativnosti, ovaj važan aspekt retko se razmatra sa jasnoćom. Svako neizmenljivo objašnjenje ima naročito dve glavne osobine: prvo, ono može da se uopšti i drugo, ono samo po sebi nije uopštavanje.

Može li ***konačan*** opis prorode da ima uopštavanja? Odgovor je: ***ne***. U stvari, ako bi bilo moguće da se uopšti konačan opis, on bi izgubio sposobnost da objasni bilo koje milenijumsko pitanje. Ako bi kandidat za objedinjenu teoriju mogao da se uopšti, nebi bio konačan. Ukratko, ako je model niti konačan opis,

napori teorijskih i matemaričkih fizičara, koji su upravo opisani, morali bi svi da budu nemogući. Do sada isrtraživanja potvrđuju ovo predviđanje: još uvek nije pronađeno uopštavanje modela niti.

TABELA 8 Milenijumska lista: sve što ne mogu da objasne standardni model i opšta teorija relativnosti: prema tome, takođe i lista jedinih dostupmih eksperimentalnih podataka za proveru konačnog, objedinjenog opisa kretanja.

Opažanje	**osobine neobjašnjene do 2000. godine**
Lokalne veličine koje ne opisuje standardni model osobina čestica	
$\alpha = 1/137,036(1)$	vrednost konstante elektromagnetne veze na maloj energiji
α_{w} ili θ_{w}	vrednost konstante slabe veze ili ugla slabog mešanja na maloj energiji
α_{s}	vrednost konstante jake veze na nekoj određenoj vrednosti energije
m_{q}	veličine masa 6 qvarkova
m_{l}	veličina masa 6 leptona
m_{W}	veličina mase W vektorskog bozona
m_{H}	veličina mase skalarnog Higsovog bozona
$\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23}$	veličine tri ugla mešanja kvarkova
δ	vrednost faze CP narušavanja za kvarkove
$\theta^{\nu}_{12}, \theta^{\nu}_{13}, \theta^{\nu}_{23}$	veličine tri ugla mešanja neutrina
$\delta^{\nu}, \alpha_1, \alpha_2$	vrednost tri faze CP narušavanja za neutrine
$3 \cdot 4$	broj generisanja fermiona i čestica u svakom generisanju
J, P, C itd	poreklo kvantnih brojeva za svaki fermion i svaki bozon
Lokalne matematičke strukture koje ne objašnjava standardni model	
$c, \hbar, k$	poreklo invarijantnih Plankovih jedinica kvantne teorije polja
$3+1$	broj dimenzija fizičkog prostora i vremena
SO(3,1)	poreklo Poenkareove simetrije, to jest,spina, položaja, energije i količine kretanja
S(n)	poreklo identiteta čestica, to jest, simetrije permutacije
simetrija merila	poreklo grupa merila, a posebno:
U(1)	poreklo grupe elektromagnetnog merila, to jest, kvantifikovanja električnog naboja, i nepostojanje magnetnog naboja.
SU(2)	poreklo grupe merila slabe interakcije, njeno prekidanje i P narušavanje
SU(3)	poreklo grupe merila jake interakcije i njeno CP očuvanje
renormal. grupe	poreklo osobina renormalizacije
$\delta W = 0$	poreklo talasne funkcije i načela najmanjeg rada u kvantnoj teoriji
$W = \int \mathrm{L}_{\mathrm{SM}}\, \mathrm{d}t$	poreklo lagranžijana standardnog modela fizike čestica
Globalne veličine koje ne oblašnjava opšta teorija relativnosti i kosmologija	
0	opažena ravnost, to jest nedostatak zakrivljenosti u svemiru
$1,2(1) \cdot 10^{26}\,\mathrm{m}$	udaljenost horizonta, to jest "veličina" svemira (ako to ima smisla)
$\rho_{\mathrm{de}} = \Lambda c^4/(8\pi G)$ $\approx 0,5\ \mathrm{nJ}/m^2$	vrednost i priroda opažene gustine energije vakuuma, tamne energije ili kosmološke konstante
$(5 \pm 4) \cdot 10^{79}$	broj bariona u svemiru (ako to ima smisla), to jest srednja gustina vidljive materije u svemiru
$f_0(1, \ldots, c.10^{90})$	početni uslovu za cca 10^{90} polja čestica u svemiru (ako ili sve dok to ima smisla), uključujući homogenost i izotropiju raspodele materije i kolebanje gustine u poreklu galaksija
ρ_{dm}	gustina i poreklo tamne materije
Globalne matematičke strukture koje ne objašnjava opšta teorija relativnosti i kosmologija	
c, G	poreklo invarijante Planlovih jedinica u opštoj teoriji relativnosti
$\delta \int \mathrm{L}_{\mathrm{GR}}\, \mathrm{d}t = 0$	poreklo načela najmanjeg rada i lagranžijana u opštoj teoriji relativnosti
$\mathrm{R} \times \mathrm{S}^3$	opažena topologija svemira

Odakle dolazi ta sklonost ka uopštavanju? Uopštavanje je često u istoriji fizike vodilo ka napretku i otkrićima. U prošlosti su uopštavanja često dovodila do opisa koji su imali ***širi opseg*** valjanosti. Kao rezultat, uopštavanje je postalo način traganja za novim otkrićima. Zaista, u istoriji fizike, stare teorije bile su samo ***posebni slučaji*** nove teorije. Ovaj odnos bio je tako često uobičajen, približnost i ***poseban slučaj*** korišćeni su kao sinonimi. Ova povezanost dovodi do druge tačke.

Opšta teorija relativnosti i standardni model fizike čestica zaista moraju da budu približnosti konačne teorije. Međutim, mogu li opšta teorija relativnosti ili standardni model da budu konačna, objedinjena teorija? Ili ekvivalentno tome: može li objedinjena teorija sama za sebe da bude uopštavanje postojećih teorija. Ponovo je odgovor: ***ne***. Pošto ni opšta teorija relativnosti ni standardni model fizike čestica ne mogu da objasne milenijumska pitanja, ni bilo koje njihovo uopštavanje isto tako nebi moglo. Uopštavanje nema moć obrazlaganja. Ako bi objedinjena teorija bila uopštavanje ove dve postojeće teorije, ona nebi moglo da objasni bilo koje od milenijumskih pitanja iz ***Tabele 8***! Prema tome, opšta teorija relativnosti i standardni model fizike čestica moraju da budu približnosti, ali ne i posebni slučajevi konačne teorije. Posebno, ako je model niti konačan opis, moraju postojati ***približnosti*** modela niti, ali ne smeju da postoje ***posebni slučaji***. Kao što ćemo saznati, ovo i jeste slučaj.

Kao zaključak, konačna teorija mora da bude ***objašnjenje*** svih opažanja. Objašnjenje nekog opažanja je prepoznavanje ***bez alternative*** da je ono nedvosmisleno sledi iz opštih osobina prirode. Zaključujemo da konačan, objedinjen opis kretanja, ne sme da dopusti uopštavanje niti sme da bude uopštavanje ni standardnog modela ni opšte teorije relativnosti. Objedinjena teorija ne može da bude uopštena i ne može da bude "specijalizovana"; objedinjena teorija mora da bude ***neizmenjiva***.[1] Ovaj zahtev je veoma strog; možete da proverite da odbacije veećinu ranijih pokušaja za objedinjavanje (***Izazov 123e***). Na primer, ovaj zahtev odbacuje veliku unifikaciju, supersimetriju i više dimenzionalnosti kao vidove za konačnu teoriju: u stvari, sve ove ideje ***uopštavaju*** standardni model elementarnih čestica i one su ***izmenljive***. Prema tome, tim idejama nedostaje moć obrazlaganja.

Konačna i objedinjena teorija mora da bude ***neizmenjivo objašnjenje*** opšte teorije relativnosti i standardnog modela. Pošto ni supersimetrija ni predpostavka superstruna ni petlja kvantne gravitacije ne objašnjavaju standardni model fizike čestica, one nisu objedinjene teorije. Pošto su ovi modeli izmenjivi, oni nisu konačne teorije. Ustvari najmanje jedan od ovih uslova nedostaje svakom kandidatu za konačnu teoriju predloženom u dvadesetom veku.

Otkrićemo u daljem tekstu da je ***model niti neizmenjiv***. Njegova osnovna načela ne mogu da se menjaju na bilo koji način bez narušavanja potpunosti opisa. Zaista, do sada nije nađena nijedna izmena modela niti ili osnovnih načela. Takođe ćemo otkriti da model niti ***objašnjava*** standardni model fizike čestica i da objašnjava opštu teoriju relativnosti. Model niti je stoga kandidat za konačnu teoriju.

ZAŠTO NITI – JEDNOSTAVNOST

Simplex sigillum veri.[2]

Antiquity

Predpostavimo da još ne znamo da li model niti može da se izmeni ili ne. Dva druga razloga još uvek nas izazivaju da istražujemo niti bez osobina kao osnovu objedinjenog opisa. Prvo, niti bez osobina najjednostavniji je poznati model koji objedinjuje kvantnu teoriju polja i opštu teoriju relativnosti. Drugo, niti bez osobina ***jedini su poznat*** model koji ostvaruje bitan zahtev: objedinjeno objašnjenje ne sme da bude zasnovano na tačkama, skupovima ili bilo kojeg aksiomskog sistema. (***Strana 86***). Objasnimo najpre pitanje jednostavnosti.

Da bi se prikazao trodimenzionalni prostor, Plankove jedinice, spin i entropija crne rupe, osnovni sastojci moraju da budu ***prošireni*** i ***kolebajući***. Ovaj rezultat smo zaključili detaljno u predhodnom poglavlju. (***Strana 95***). Proširenost mora da bude jednodimenzionalna, jer je to najjednostavnija mogućost, a to je takođe jedini izbor usklađen sa trodimenzionalnim prostorom. Jednodimenzionalne niti zaista opisuju tri

---

[1] U međuvremenu autor je doznao da je David Dojč (David Deutsch) ima sličan stav sa njegovim kriterijumom da je objašnjenje jedino tačno ako ga je ***teško izmeniti***. (***Ref. 154***). Upotrebljeno u slučaju konačne teorije, možemo da kažemo da konačna teorija mora da bude ***objašnjenje*** opšte teorije relativnosti i standardnog modela. To podrazumeva da konačna teorija mora da bude teško izmenljiva. To je u saglasnosti sa zaključkom u tekstu da konačna teorija mora da bude neizmenjiva.

[2] "Jednostavnost je pečat istine" Antika

dimenzije prostora, pošto zapleti jednodimenzionalnih niti postoje ***samo*** u tri dimenzije prostora. U četiri, ili više dimenzija, svaki zaplet ili čvor mogli bi da se razvežu; u tri prostorne dimenzije to je nemoguće

Nije moguć nijedan jednostavniji model od niti bez osobina. (***Ref. 140***). Svi ostali prošireni sastojci koji su bili istraživani (***Ref. 155***) – vrpce, trake, strune, membrane, poseti (**p**artially **o**rdered **set** – delimično uređen skup), razgranate linije, mreže, kristali i kvantni čvorovi – samo povećavaju složenost modela. (***Ref. 156***). U stvari, ovi sastojci povećavaju složenost na dva načina: oni povećavaju broj osobina osnovnih sastojaka i oni čine da je složeno preslikavanje sa modela na opažanja. (***Ref. 157***).

Prvo, nijedan drugi model zasnovan na proširenosti ne koristi sastojke ***bez osobina***. U svim drugim modelima osnovni sastojci imaju osobine, kao što su naprezanja, vrednosti polja, koordinate, kvantne brojeve, oblik, uvijanja, usmerenje, netrivijalne topološke informacije itd. U nekim modelima prostor-vreme je nekomunikativno ili fermionsko. Sve ove osobine su ***predpostavljene***; one su modelu pridodata naredbom. Kao takve, one omogućavaju alternative i teške su, ako ne i nemoguće za opravdavanje. Osim toga, ove osobine povećavaju složenost mogućih procesa. Nasuprot tome, model niti nema problem sa opravdavanjem i nema problem složenosti.

Drugo, veza imeđu komplikovanijih modela i eksperimenta često je zamršena, a ponekad nije ni jedinstvena. Kao primer. dobro su poznate teškoće da se povežu superstrune sa eksperimentima. (***Ref. 150***). Nasuprot tome, model niti tvrdi da se eksperimentalno dostupna Dirakova jednakost kvantne teorije polja i eksperimentalno dostupne jednakosti polja opšte teorije relativnosti pojavljuju neposredno iz postupka uvođenja vremenskog proseka promena ukrštanja. Zapravo, model niti predlaže da se ove dve polovine fizike objedine uz samo jedno osnovno načelo: promene ukrštanja određuju Plankove jedinice. Ustvari, saznali smo da model niti ne samo da opisuje vakuum i materiju, već takođe interakcije merila i osobine čestica kao ***prirodne*** posledice sastava prirode u Plankovim razmerama. Slične ideje kod ostalih modela mnogo su složenije.

Zapazili smo da je izgradnja trodimenzionalnog fizičkog prostora pomoću niti čak jednostavnija od njegove izgradnje od tačaka! Da bi se izgradio trodimenzionalni prostor od tačaka, potrebni su nam pojmovi kao što su skupovi, susedstvo, topološke strukture i strukture merila. I uprkos svim ovim zamršenim pojmovima, pojam prostora određenog na ovaj način, još uvek nije odredio fižičku razmeru dužine; ukratko, on ***nije*** isti kao fizički prostor. Nasuprot tome, da bi se izgradio trodimenzionalni fizički prostor od ***niti***, nisu nam potrebne osnovne tačke, skupovi ili metričke strukture, Potrebno nam je samo prosek niti tokom dugog vremena i njihove promene ukrštanja. Razmera dužine je ugrađena.

Sve ovo predlaže da bi model niti, zasnovan na jednodimenzionalnim sastojcima i bez osobina, mogao da bude model za objedinjavanje uz najmanji broj pojmova, što zadovoljava Okamovu britvu. U stvari, otkrićemo da su niti zaista najjednostavniji način da se modeliraju čestice, interakcije i vakuum., pošto ispunjavaju zahteve konačne teorije.

Jednostavnost modela pomaže na dva načina. Prvi, što je model jednostavniji, on je slobodniji u pogledu ideologije, predrasuda i uverenja. Drugi, što je model jednostavniji, lakše može da se proveti u odnosu na opažanja. Jednostavan model posebno omogućava prostu proveru njegovih rešenja paradoksa. Pre svega, možemo da rešimo najbitnije paradokse fizike.

ZAŠTO NITI? – OSNOVNE KRUŽNE ODREDNICE FIZIKE

Bez pojmova mesto, praznina i vreme, ne može biti promena. […] Prema tome je jasno […] da se mora izvršiti njihovo istraživanje, proučavajući posebno svakog od njih.

Aristotel (Aristotle) *Physics*, Book III, part 1

Model niti opisuje niti kao kolebajuće u pozadini prostor-vremena od tri plus jedne dimenzije. Pozadinu prostor-vremena uvodi posmatrač. Pozadina je zato različita za svakog posmatrača; međutim, sve takve pozadine imaju tri dimenzije prostora i jednu dimenziju vremena. Posmatrač – bilo da je mašina, životinja ili ljudsko biće – i sam je načinjen od niti, tako da je ustvari prostor pozaine i sam proizvod niti.

Prema tome, imamo osnovnu kružnu odrednicu: niti opisujemo pomoću pozadine, a pozadinu pomoću niti. ***Niti stoga ne daju aksiomski sistem u matematičkom smislu***. Ovo ispunjava jedan od zahteva za objedinjeni opis. (***Strana 88***).

Zbog čega se pojavila osnovna kružna odrednica? Fizičari govore (i misle) o prirodi kretanja. Objedinjeni model fizičara govori o kretanju uz najveću preciznost, To podrazumeva da s jedne strane, dok govorino, moramo da koristimo ***pojmove koji nam onogućavaju da govorimo***. Govor i razmišljanje zahtevaju da koristimo neprekinute i prostor i vreme; ukratko, moramo da koristimo ***pozadinu***. Pozadina mora da bude neprekinuta, bez minimalne dužine. S jedne srane, da bi se govorilo uz preciznost, moramo da imamo minimalnu dužinu i da koristimo ***niti***. Ne postoji način da prevaziđemo ovaj dvostruki i prividno protivrečan zahtev. Više takvih protivrečnosti nabrojano je u ***Tabeli 9***, A pošto ne postoji način da se prevaziđu ovi protivrečni zahtevi, za opis prirode ***nećemo da upotrebljavamo i neprekinutu pozadinu i diskretne niti***.

TABELA 9 Razlike između prirode i svakog opisa.

Priroda	**Opis**
Priroda nije skup	Opisima su potrebni skupovi da bi se razgovaralo i razmišljalo.
Priroda nema događaje, tačke ni neprekidnost	Opisima su potrebni događaji, tačke i neprekinuto prostor-vreme sa 3+1 dimenzijom da bi se odredili.
Priroda nema tačkaste čestice	Opisima su potrebne tačkaste čestice da bi se razgovaralo i razmišljalo.
Priroda nije lokalna	Opisima je potrebna lokalnost da bi se razgovaralo i razmišljalo
Priroda nema pozadinu	Opisima je potrebna pozadina da bi se razgovaralo i razmišljalo
Priroda pokazuje nešta srodno $R \leftrightarrow 1/R$ dvojnosti	Opisima je potreban prekid dvojnosti da bi se razgovaralo i razmišljalo
Priroda nije aksiomska, ali sadrži kružne odredmice	Potrebni su aksiomski opisi za precizan razgovor i razmišljanje

U nekoliko reči: Objedinjeni model fizike omogućava razmišljanje o kretanju uz veliku preciznost. Ovaj zahtev nas primorava da ***istovremeno*** koristimo i neprekinuto prostor-vreme i diskretne niti. Ova dvostruka upotreba nije protivrečnost, već je rezultat ***kružnih odrednica***, kao što je upravo objašnjeno. Pošto smo mi. kao govornici, deo prirode, objedinjeni model znači da mi, kao govornici, govorimo sami o sebi.[1]

Mi ne tvrdimo da ***prostor pozadine*** i vreme postoje ***a priori***, kao što je tvrdio Imanuel Kant (***Ref. 158***), već samo da su prostor pozadine i vreme neophodni za razmišljanje i razgovor, kao što je tvrdio Aristotel. U stvari, fizički prostor i vreme rezultat su niti, te prema tome ne postoje a priori; međutim, prostor pozadine i vreme pojmovi su koji se zahtevaju za bilo koji opis ili opažanje, pa su zato potrebni za razmišljanje i za razgovor. ***Slika 16*** prikazuje rešenje koje predlaže model niti.

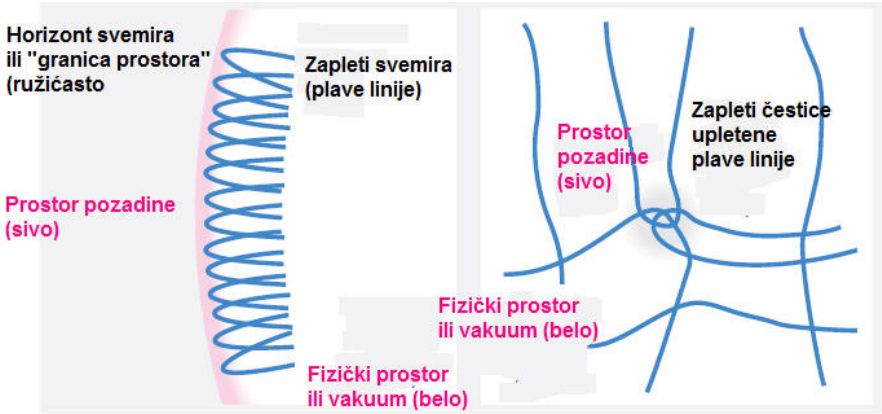
Uvek moramo da pazimo da u ***našem umu*** imamo osnovnu kružnu odrednicu niti i pozadine. Svako pokušavanje da se reši, zavarava. Na primer, ako pokušamo da odredimo ***skupove*** ili ***elemente*** (ili tačke) uz pomoć merenja, sakrivamo ili zaboravljamo osnovnu kružnost. U tvari, mnogi fizičari su konstruisali ili još uvek konstruišu aksiomske sisteme za ovu oblast. Osnovna kružnost podrazumeva da su aksiomski sistemi mogući za delove fizike, ali ne i za fiziku u celosti. Zaista, postoje aksiomski opisi klasične mehanike, elektrodinamike, kvantne teorije, pa čak i opšte teorije relativnosti. Međutim, aksiomski sistem za celinu fizike – to jest, za opis svih kretanja – ne postoji i ne može da ga bude. (***Strana 88***).

U ovom kontekstu mora da se razmotri i sledeće pitanje. Kao što je pomenuto, niti se kolebaju u prostoru pozadine, a jedino promene ukrštanja mogu da se opažaju. Naročito se pod tim podrazumeva da se ne mogu opažati matematićke tačke prostora pozadine. Drugim rečima, uprkos korišćenju matematičkih tačaka za opis prostora pozadine (i samih niti) nijedno od njih nema fizički značaj. ***U modelu niti ne postoje fizičke tačke***. Fizički položaj događaja je usled promene ukrštanja, a najbolje može da se lokalizuje unutar Plankove dužine. Isto ograničenje primenjuje se na fizičke događaje i na fizčku lokaciju u vremenu. Nelokalnost prirodne Plankove razmere ugrađena je u model. To ostvaruje sledeći zahtev koji mora da ispunjava svaki objedinjen opis.

Zato je za fizičare koji rade na objedinjavanju situacija teža – i još začuđujuća – nego na primer, za biologe. Biolozi govore o živim sistemima. I sami biolozi su živi sistemi. Međutim, u slučaju biologa ovo ne dovodi do kružne odrednice. Biolozi ne koriste pojmove koji sadrže kružne definicije: živo biće nema

[1] Suština je da se na ovu situaciju, uprkos ovoj kružnosti, ne može da se primeni Gedelova (Kurt Gödel) teorema nekompletnosti. Zapravo, teorema ne može da se primeni ni na jednu objedinjenu teoriju fizike. Teorema nekompletnosti primenjuje sa samo na samoreferentne iskaze, ne i na kružne oderednice. (***Vol. III, strana 224***). Samoreferentni iskazi ne pojavljuju se u fizici, ni u smislenoj matematici, ni u modelu niti.

problema kada opisuje ***druga*** živa bića. Čak i neurobiolozi, čiji je cilj da ispituju funkcionisanje mozga, nisu suočeni sa osnovnim ograničenjima radeći to, iako oni istražuju ljuski mozak koristeći sopstveni mozak: mozak nema problema da opiše druge mozgove. Nasuprot tome, fizičari koji rade na objedinjavanju treba da žive uz kružnost: temeljni, precizan opis kretanja zahteva da budemo svesni naših sopstvenih ograničenja kao bića koje opisuje. (***Ref. 159***). A naše glavno ograničenje je da ne možemo da mislimo bez neprekinutih prostora i vremena, iako se ovi pojmovi ne primenjuju na prirodu.



Slika 16 U modelu niti fizički prostor – ili vakuum – i prostor pozadine različiti su i u blizini horizonta i u blizini čestica.

Zaključujemo: ***Objedinjeni opis ne može da bude aksiomski, ne može da se zasniva na opaženim fizičkim tačkama, mora da razlikuje fizički prostor od prostora pozadone i ne sme da bude nezavisan od pozadine***. Mnogi modeli koji se zasnivaju na proširenim sastojcima koriste takođe pozadine. Međutim, većina modela takođe dopušta određivanje skupova i aksiomskih opisa. Takvi modeli stoga ne modu da budu kandidati za objedinjeni opis prirode. Nasuprot tome, model niti zadržava netaknutu osnovnu kružnost fizike; on ne dopušta aksiomsku formulaciju osnovne fizike, ali dopušta samo tačke ili skupove kao približne pojmove.

LEVKOVI – EKVIVALENTNA ALTERNATIVA NITIMA

Druga vrsta sastojaka takođe ispunjava sve uslove za objedinjeni opis. Kao što je prikazano na ***slici 17***, kao alternativu za kolebajuće niti možemo da koristimo kolebajuće ***levkove*** kao osnovne sastojke. U opisu pomoću levkova priroda podseća na kompikovan zaplet trodimenzionalnog prostora koji je projektovan nazad u tri dimenzije.

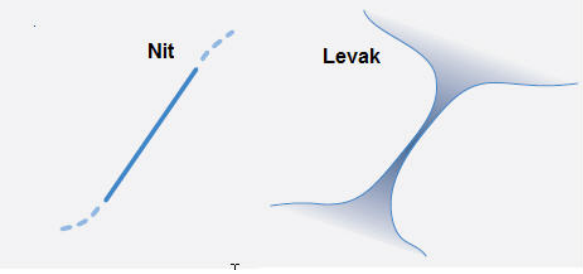
Levkovi pokazuju da samo model niti zahteva da je Plankova dužina efektivni ***minimalni*** prečnik niti; oni mogu imati isto tako i druge prečnike. Levkovi isto tako pokazuju da zbog promenljivog prečnika, usled svog njihanja niti mogu da budu bukvalno bilo gde u prostoru i da stoga efektivno ***ispune*** prostor, čak i kada je njihova gustina mala.

Levkovi podsećaju na mnoge druge istražene teme. Levkovi su slični crvotočinama; međutim, oba njihova kraja vode na granici prostora "u običan trodimenzionalni prostor". Levkovi su takođe slični D-branama[1], osim što su oni ugrađeni u tri prostorne dimenzije, a ne u deset. Levkovi takođe podsećaju na deo egzotične mnogostrukosti projektovan u trodimenzionalni prostor. Kolebajući levkovi takode nas podsećaju na amebu pomenutu u prehodnom tekstu. (***Strana 105***). Međutim malo pomažu sličnosti sa crvotočinom, sa D-branom ili sa egzotičnom mnogosrtukošću: do sada nijedan od ovih pristupa nije doveo do održivog modela objedinjavanja. Prva provera pokazuje da alternativa sa levkovima izgleda potpuno ekvivalentna nitima.[2] Možda ćete uživati u proveri da svi zaključi usvojeni na narednim stranicama ostaju neizmenjeni ako se niti zamene levkovima. (***Izazov 125e***). Konkretno i levkovi nam omogućavaju da izvedemo kvantnu teoriju polja, standardni model i opštu teoriju relativnosti. Usled stroge ekvivalentnosti između niti i levkova izbor jedne od ovih alternativa je stvar ukusa ili predstavljanja, a nije stvar fizike. U daljem tekstu mi ćemo da koristimo niti jer su jednostavnije za crtanje.

---

[1] Brana je proširen objekt sa bilo kojim brojem dimenzija, čije su strune u teoriji struna primeri sa jednom dimenzijom. Naš svemir je 3-brana (prim. prev.)

[2] Dva predmeta rasprave koji ovu ekvivalenciju dovode u pitanje su završni levkovi i ponašanje prečnika pri podršci (boost). Prvo pitanje je predmet istraživanja, ali se očekuje da neće da predstavlja problem. Drugo pitanje ublažava drhtanje prostora pozadine.



Slika 17 Ekvivalentan prikaz osnovnih sastojaka prirode: niti i levkovi.

ČVOROVI I KRAJEVI NITI

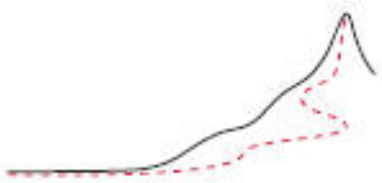
U orginalnom modelu niti, razvijenom 2008. godine, niti koje sadrže čvorove bili su deo dopuštenih konfiguracija. To ima nedostatak jer obrazovanje čvorova zahteva najmanje jedan slobodan kraj koji je provučen kroz konfiguraciju niti. Takvi slobodni krajevi, međutim, suprotni su cilju najveće moguće jednostavnosti objedinjenog modela. Kasnije, tokom 2015. godine, postalo je jasno da su niti bez čvorova dovoljne za oporavak savremene fizike.To je pokazano u tekstu koji sledi. Iz tog razloga krajevi niti ne igraju više ulogu u modelu; cilj najveće moguče jednostavnosti je sada dostignut.

ZAKLJUČAK O OSNOVNOM NAČELU MODELA NITI – I NEPREKIDNOSTI

Uveli smo kolebajuće ***niti*** bez osobina kao opšte sastojke prostora, materije, zračenja i horizonta. Sva ***opažanja*** u fizici određena su uz pomoć Plankovih jedinica, koje su posledica promena ukrštanja niti. Odrednice svih fizičkih opažanja preko Plankovih jedinica uz pomoć promena ukrštanja niti su ***osnovno načelo***. Upotreba osnovnog načela, neprekidnosti bilo koje vrste – prostora, polja ili vremena – proizilazi iz vremenskog proseka promena ukrštanja.

Model niti ispunjava opšte zahteve za konačan i objedinjen opis naveden u ***Tabeli 6*** (***strana 117***) ***pod uslovom*** da on opisuje sva kretanja uz punu preciznost i da je neizmenjiv.

Prema tome, na ovom mestu moramo započeti upoređivanja sa eksperimentima. Potrebno je da proverimo da li niti opisuju ***sva*** kretanja uz ***potpunu*** preciznost. Srećom, zadatak je ograničen: potrebno je samo da proverimo da li niti rešavaju svako od pitanja iz milenijumske liste navedenih u ***Tabeli 8***. (***Strana 128***). Ukoliko ne mogu, model niti ne zavređuje pažnju.



Poglavlje 8

KVANTNA TEORIJA MATERIJE IZVEDENA IZ NITI

Pokazaćemo u ovom poglavlju da kolebajuće niti bez osobina, zajedno sa osnovnim načelom – koje promena ukrštanja određuje kao $\hbar/2$ – podrazumeva bez alternative da je materija opisana kvantnom teorijom. Još preciznije, zaključićemo da zapleti kolebajućih niti prikazuju ponašanje spina 1/2 materijalnih čestica, što nam omogućava da odredimo talasne funkcije i podrazumevaju Dirakovu jednakost za kretanje materije. Osim toga, pokazaćemo da niti podrazumevaju načelo najmanjeg rada, pa prema tome, da su kolebajuće niti opisane lagranžijanom relativističkih kvantnih čestica. Model niti je jedini mikroskopski model relativističke kvantne teorije dostupan u istraživačkoj literaturi.

U ovom poglavlju mi ćemo da izvedemo kvantnu teoriju ***materije*** i pokazaćemo da niti prikzauju sva opažanja o fermionima i njihovom kretanju. Za kasnije ostavljamo izvođenje kvantne teorije svetlosti i nuklearnih interakcija, standardnog modela elementarnih čestica i kvantni opis gravitacije. Kao i obično, u kvantnoj teoriji radimo u ***ravnom*** prostor-vremenu.

Slika 18 Fermion je opisan zapletom dve ili tri niti. Ukrštanja u jezgru zapleta i njihova svostva posle uvođenja proseka dovode do talasne funkcije i verovatnoće gustine

NITI, VAKUUM I ČESTICE

Čestice se u prirodi kreću u vakuumu. Vakuum je bez materije i energije. U modelu niti

- ***Vakuum*** je je zbirka kolebajućih, nevezanih i nezapetljanih niti.

Vakuum je prikazan na ***slici 14*** (***strana 124***). Vremenski prosek nevezanih i nezapetljanih niti nema energiju niti sadrži materiju, pošto – prosečno u vremenu – ***ne postoje ni*** promene ukrštanja ni zapleti. Povremena pojava promena ukrštanja, koji mogu da se pojave zbog kolebanja vakuuma, pokazaće se da su to virtualne čestice; njih ćemo da objasnimo u tekstu koji sledi (***Strana 181***). Primećujemo da je fizički vakuum ***neprekidan***, budući da je vremenski prosek. Ravan fizički vakuum takođe ***jedinstven***: on je isti za sve posmatrače. Model niti stoga sadrži i minimalnu dužinu i neprekinut vakuum. Ova dva pojma nisu jedan drugom protivrečna.

Kvantne čestice se u prirodi ***kreću***: kvantne čestice menjaju položaj i fazu u vremenu. Zbog toga moramo da odredimo ovaj pojam. U ovoj fazi mi se usredsređujemo na kvantne materijalne čestice, a ostavljamo za kasnije kvantne čestice zračenja. Kao što je prikazano na ***slici 18*** i na ***slici 19***, određujemo:

- Elementarna ***čestica materije*** ili ***fermion*** zaplet je dve ili više niti koje ostvaruju trik sa opasačem.

Detalji ove odrednice postaće uskoro jasni, uključujući i važnost odnosne ***porodice*** zapleta. U svakom zapletu važna struktura je ***jezgro zapleta***, uvezan deo zapleta koji sadrži sve veze. Jezgro je povezano sa granicom prostora preko ***repova*** zapleta.

- ***Položaj*** čestice je određen centrom prosečnog jezgra zapleta. Položaj čestice je prosek svih položaja ukrštanja.
- ***Faza*** materijalne čestice određen je polovinom ugla koji opisuje usmerenost jezgra zapleta oko ose spina. Faza čestice je prosek svih faza ukrštanja.
- ***Usmerenost spina*** materijalne čestice određen je obrtanjem ose jezgra. Usmerenost jezgra je prosek svih usmerenosti ukrštanja.
- ***Talasna funkcija*** materijalne čestice je zamagljeno predstavljanje ukrštanja njenih kolebajućih niti. (***Strana 142***).

Ove odrednice su prikazane na ***slici 18***, a biće istražene detaljno u tekstu koji sledi. Primećujemo da sve ove odrednice podrazumevaju prosek u kratkom vremenu kolebanja zapleta. (***Strana 142***). Uz ove odrednice dobijamo:

- ***Kretanje*** bilo koje kvantne čestice je promena položaja i usmerenosti njenog jezgra zapleta.

Kretanje kvantne čestice u prirodi opisano je ***kvantnom teorijom***. Osnovna osobina kvantne teorije je pojava invrijantnog kvanta rada $\hbar$. U modelu niti je $\hbar/2$ opisano pojedinačnom promenom ukrštanja; vrednost kvanta rada je prema tome invarijanta prema odrednici.

Sada ćemo da istražimo koliko precizno kvant rada $\hbar$ određuje kretanje kvantne čestice. Pokazaćemo posebno da kolebanje zapleta prikazuje uobičajenu kvantnu teoriju iz udžbenika. Kao zaključak unapred, pojašnjavamo da

- ***Kretanje slobodne kvantne čestice*** nastaje usled kolebanja repova zapleta. Izobličenja jezgra zapleta nisu bitna za slobodno kretanje, pa možemo da ih zanemarimo u takvom slučaju.

Drugim rečima, kada istražujemo kvantnu teoriju približno su jezgra zapleta ***kruta***. Proučićemo ***izobličenja*** jezgra u sledećem poglavlju, u kojem ćemo da pokažemo da ju ona povezana sa ***interakcijama***. (***Strana 171***). Izobličenje jezgra dovešće nas do ***kvantne teorije polja***. U ovom poglavlju proučavaćemo izobličenja repova niti; one proizvode kretanje ***slobodnih*** (i stabilnih) kvantnih čestica. Izobličenje repova dovodi do kvantne mehanike. Istraživanjem kvantne mehanike, prvo ćemo da proučimo obrtanje, a zatim razmeštanje slobodnih materijalnih čestica.

OBRTANJE, SPIN 1/2 I TRIK SA OPASAČEM

Kvantne čestice u prirodi opisane su svojim ponašanjem pri ***obrtanju*** i svojim ponašanjem pri ***razmeni***. Ponašanje čestice pri obrtanju opsano je vrednošću spina, njenom osom spina i fazom. Ponašanje kvantne čestice pri razmeni može biti dvojako: kvantna čestica može da bude fermion ili bozon. U prirodi su ***čestice sa celobrojnim spinom bozoni, a čestice sa spinom polovine celog broja su fermioni***. To je ***teorema statistike spina***.

Sada ćemo da pokažemo da sve osobine u obrtanju čestice i razmeni slede iz modela niti. Počinjemo sa slučajem čestice sa spinom 1/2 i prvo ćemo da razjasnimo prirodu obrtanja čestice. (Držimo se uobičajene konvencije da koristimo “spin 1/2" kao skraćenicu za “z-komponentu spina vrednosti $\hbar/2$”.)

Nekada se tvrdilo da spin ***nije*** usled obrtanja. Ova pogrešan iskaz posledica je dva argumenta koji su tako često ponavljani da su retko kad ispititivani. Prvo, rečeno je da čestica sa spinom 1/2 ne može da se modelira kao mali kamen koji se obrće. Drugo, navodno nije moguće da se zamisli obrtna raspodela električnih naboja sa brzinom obrtanja manjom od brtzine svetlosti i elektrostatičkom energijom manjom od opaženih masa čestica. Ovi iskazi su tačni. Uprkos tome što su tačni, postoji način da se oni izbegnu; u ovoj fazi, usmerićemo pažnju na prvi iskaz: pokazaćemo da spin ***može*** da se modelira kao obrtanje.

U modelu niti za sve kvantne čestice imamo:

- ***Spin*** je obrtanje jezgra.

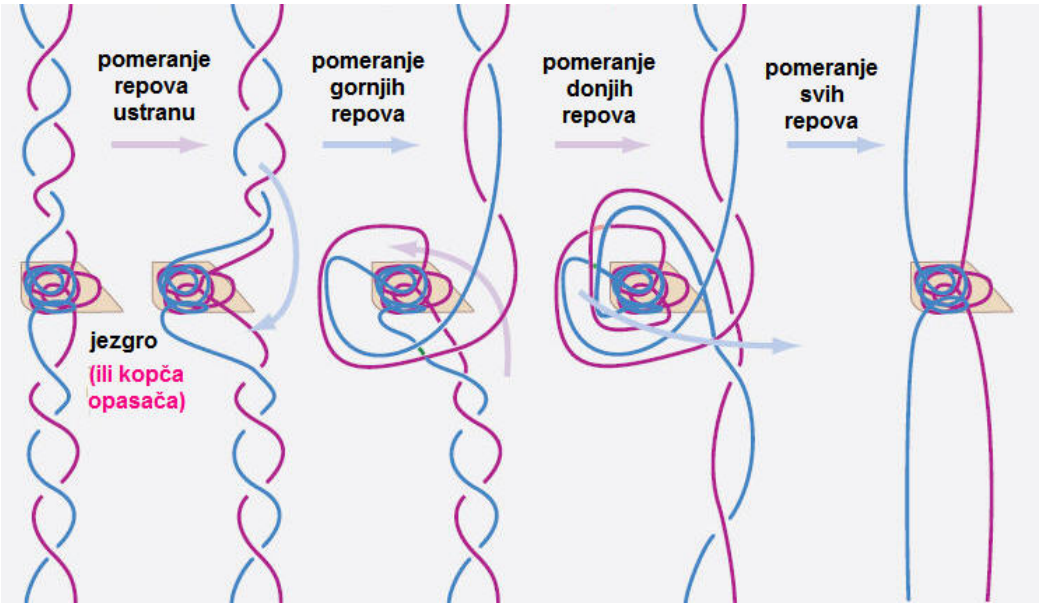
U stvari, u modelu niti, sve kvantne čestice, uključujući i one sa spinom 1/2, ***razlikuju se*** od svakodnevnih objekata, kao što je kamen, a suštinska razlika nastaje usled proširenosti:

- ***Kvantne čestice*** su čestice čiji se repovi ne mogu zanemariti.

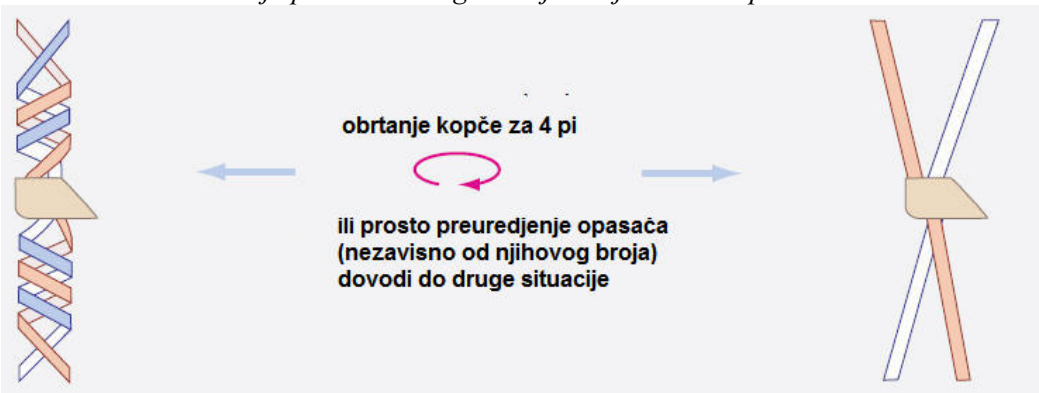
Za kamenje i druge svakodnevne objekte repovi nemaju bitniju ulogu, pošto su svakodnevni objekti mešovitog stanja, a ne karakteristično stanje momenta količine kretanja. Ukratko, kod svakodnevnih objekata mogu repovi da budu zanemareni. Prema tome, svakodnevni objekti nisu ni fermioni ni bozoni. Međutim,

za kvantne čestice repovi su suštinski. Korak po korak i mi ćemo videti da repovi kvantnih čestica objašnjavaju njihovo ponašanje u spinu, njihovo ponašanje u razmeni i njihovo talasno ponašanje. Isto tako ćemo videti da su u modelu niti talasne funkcije ***zamagljeni*** zapleti; zato ćemo istražiti opšta ponašanja talasnih funkcija istraživanjem ponašanja zapleta.

Trik sa opasačem ili trik sa strunom ili trik sa tanjirom ili trik sa makazama objašnjava mogučnost neprekidnog obrtanja jezgra sa bilo kojim brojem repova. Obrtanje za 4π je isto je kao da nema obrtanja



Isto to je pikazano u orginalnoj verziji trika sa opasačem



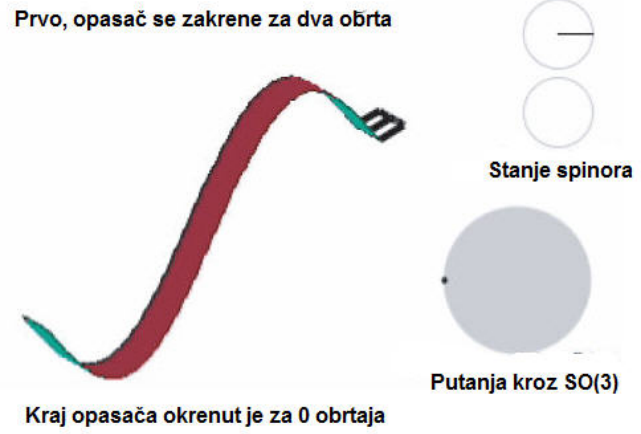
Slika 19 Trik sa opasačem – ili trik sa strunom ili trik sa tanjirom ili trik sa makazama – pokazuje da obrtanje za 4π centralnog objekta sa tri ili više repova (ili jednom ili više vrpci) pričvršćenih za beskonačnost prostora, ekvivalentno je kao da obrtanja nije ni bilo. Ova ekvivalentnost dopušta obešenom objektu, kao što je kopča opasača ili jezgro zapleta da se obrću neprestano. Trik sa opasačem stoga pokazuje da se jezgra zapleta načinjenog od dve ili više niti ponašaju kao čestice sa spinom 1/2.

Poznato je već skoro ceo vek da takozvani ***trik sa opasačem*** – prikazan ***na slici 19***, ***slici 20***, ***slici 21*** i ***slici 22*** – može da se koristi, zajedno sa njegovim varijacijama, kao model ponašanja čestica sa spinom 1/2 pri obrtanju. Trik sa opasačem je opažanje da kopča opasača obrnuta za ***dva*** puna obrta može da se dovede u početno stanje bez pomeranja kopče – za razliku od kopče obrnute samo za ***jedan*** pun obrt; potrebno je samo kretanje opasača. (***Ref. 160***). Trik sa opasačem naziva se takođe ***trik sa makazama***, ***trik sa pločom***, ***Filipinski vinski ples*** ili ***Balinežanski ples sa svećom***. On se ponekad pogrešno pripisuje Diraku.

Ttrik sa opasačem je od centralnog značaja u modelu niti za čestice sa spinom 1/2. Sve čestice sa spinom 1/2 u modelu niti sastoje se od dve (ili više) zapletenih niti, pa zato imaju četiri (ili više) repova do "granice", kao što je prikazano na ***slici 19***. Za takve zaplete obrtanje jezgra zapleta za 4π – prema tome za dva puna obrta – može da vrati zaplet u početno stanje, pod uslovom da repovi mogu da se kolebaju. Svaki sistem koji se vraća u svoje početno stanje posle obrtanja za 4π opisan je spinom 1/2. (Ustvari, repovi moraju da se ne opažaju da bi se održala ova ekvivalentnost; u modelu niti repovi su jednostavno niti i zato

se zaista ne opažaju.) Pokazaćemo u daljem tekstu da međustanje, obrtanje za 2π odgovara množenju talasne funkcije za -1, ponovo kako se i očekuje od čestice sa spinom 1/2. (***Strana 153***).

Slika 20 Trik sa opasačem: dva obrta kopče opasača isto je kao da nema obrtanja; ova animacija pokazuje jedan od načina na koji može da se izvede trik sa opasačem. Nije prikazano: trik sa opasačem moguć je sa bilo kojim brojem opasača vezanih za kopču. (QuickTime film © Greg Egan) videti na www.gregegan.net/APPLETS/21/21.html



Slika 21 Ponovo trik sa opasačem: ova animacija pokazuje drugi način – drugi smer – na koji može da se izvede trik. Trik sa opasačem moguć je sa bilo kojim brojem opasača vezanih za kopču. (QuickTime film © Greg Egan) Videti na www.gregegan.net/APPLETS/21/21.html

Uzgred, sistemi sa repovima jedini su mogući sistemi koji ostvaruju osobinu spina 1/2. Samo sistemi sa repovima do beskonačnosti prostora imaju osobinu da je obrtanje za 4π ekvivalento stanju kao da obrtanja nije bilo uopšte. (Možete li to da pokažete?) (***Izazov 126e***). Ova osnovna povezanost između spina 1/2 i proširenja jedna je od osobina koje su dovele do modela niti.

Animacija pokazuje da trik sa opasačem radi sa jednim ili sa dva opasača pričvršćenih za kopče. Ustvari, trik sa opasačem radi ***sa bilo kojim brojem*** opasača pričvršćenih za kopče. Zapravo, trik sa opasačem radi i sa beskonačno mnogo opasača, pa čak i sa ***punim dvodimenzionalnim listom***. Lep video zapis Gareta Tejlora (Gareth Taylor) na veb strani www.youtube.com/watch?v=UtdljdoFAwg i malo različitija animacija sa ***slike 23***, prikazuju ovu situaciju. Lopta zalepljena za savitljiv list može da se obrće koliko god to želite: ako to radite ispravno, ***neće*** postojati zaplet, a to možete da nastavite zauvek.

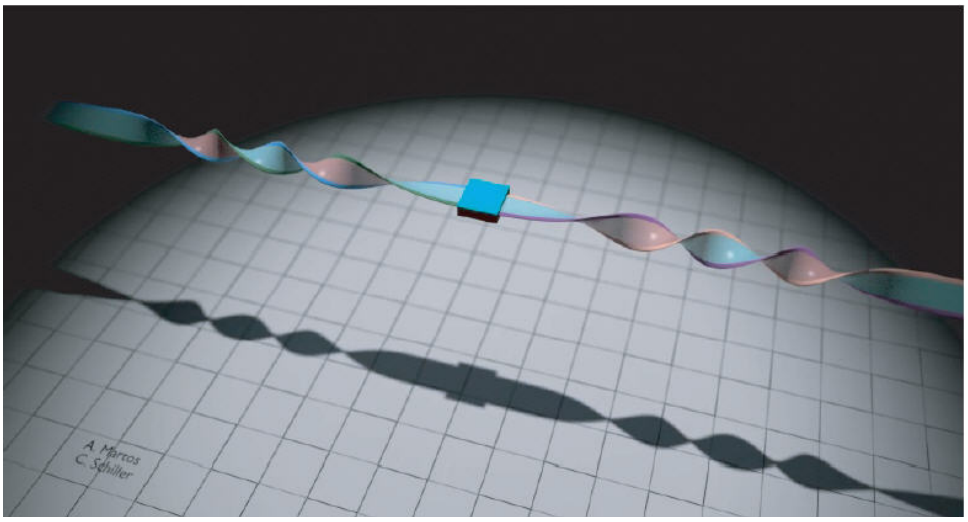
Animacije sa trikom opasača dovode nas do iskaza o nitima i zapletima koji je centralni u modelu niti:

- Objekt ili jezgro zapleta koji je pričvršćen preko (tri ili više) repova za granicu prostora može da se obrće ***neprekidno***.

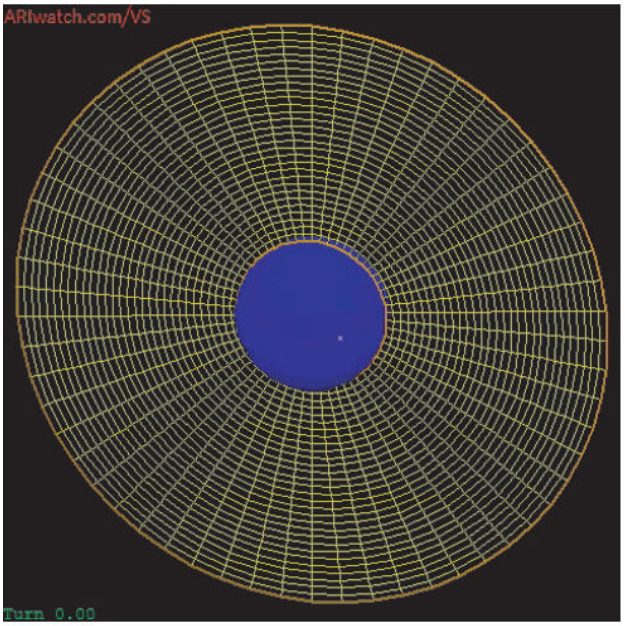
Ovde smo napravili korak od opasača do niti. Drugim pojmovima rečeno, mogućnost neprekidnog obrtanja omogućava nam da opišemo čestice sa spinom 1/2 pomoću obrtnih zapleta. Drugim rečima:

- Spin modelira obrtanje zapleta.

Kolebanje koje je potrebno za preuređenje repova posle dva puna obrta može da se posmatra kao model prosečne ***precesije*** ose spina. Zato potvrđujemo da su spin i obrtanje jednaki za čestice sa spinom 1/2.



Slika 22 Predpostavimo da trik sa opasačem ne može da se opazi, ali da četvrtast predmet može; i da on predstavlja ćesticu. Animacija tada prikazuje da takva čestica (četvrtasti predmet) može da se vrati u početni položaj posle obrtanja za 4π (ali ne i za 2π). Takva čestica "opasač" prema tome ispunjava određenu osobinu čestice sa spinom 1/2: obrtanje za 4π isto je kao da nije ni bilo obrtanja. Trik sa opasačem stoga predstavlja talasnu funkciju spinora; (***strana 153***). Na primer, obrtanje za 2π dovodi do uvrtanja, što znači promenu predznaka talasne funkcije. Obrtanje za 4π nema nikakvog uticaja na talasnu funkciju. Trik možete da ponovite kod kuće pomoću trake papira. (QuickTime film © Antonio Martos) (Na www.youtube.com/watch?v=ICEIgznuHmg) moze da se posmatra animacija)



Slika 23 Trik sa opasačem izveden kao lopta koja se obrće pričvršćena za list (QuickTime film © www.ariwatch.com/VS/Algorithms/DiracStringTrick.htm

TRIK SA OPASAČEM NIJE JEDINSTVEN

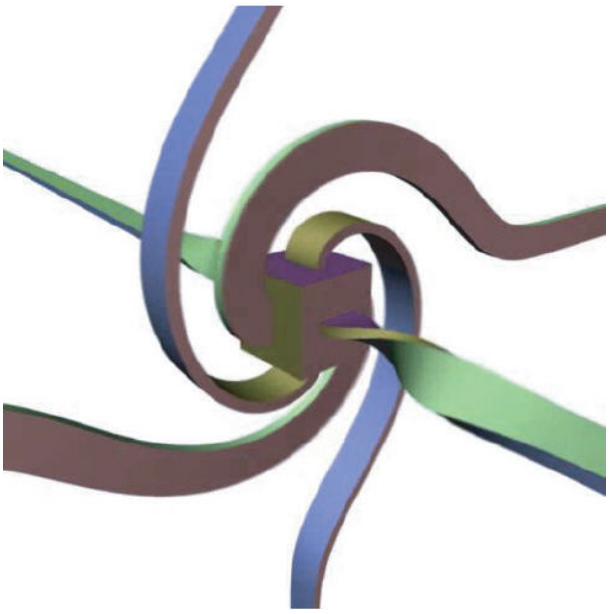
Jedan vid trika sa pasačem izgleda da nije pominjan u istraživačkoj literaturi: posle obrtanja kopče opasača ili jezgra zapleta za 4π, postoji nekoliko mogućnosti da se razmrsi zaplet. ***Ref. 160***). Dva različita načina prikazana su na ***slici 20*** i ***slici 21***. Ovo možete i sami da proverite, koristeći pravi kaiš. (***Izazov 127e***). Ukratko, postoje ***dva*** krajnja načina da se izvede trik sa opasačem, i neprekinute mogućnosti između njih. Ove mogućnosti biće kasnije od centralnog značaja: ove mogučnosti zahtevaju opis fermiona sa ***četiri*** kompleksne funkcije. Indirektno, različite opcije trika sa opasačem prema tome su u vezi sa razlikom između materije i antimaterije i sa narušavanjem pariteta slabe interakcije.

UZGRED: TRIK SA OPASAČEM SPASAVA ŽIVOT

Bez trika sa opasačem ***aparat za aferezu***, koji se nalazi u mnogim bolnicama, nebi mogao da radi. Kada osoba daje krvne pločice (trombocite), krv se neprekidno uzima iz jedne ruke i uvodi u vreču centrifuge, u kojoj se krvne pločice zadržavaju. Krv bez krvnih pločica tada se vraća nazad u drugu ruku davaoca. Ovo se događa bez prekida tokom jednog ili dva sata. Da bi bilo sve sterilno, cevčice i vreća koriste sa samo jednom, i zapravo su iz jednog dela, kao što je prikazano ***slici 24***. Aparatima za aferezu potrebno je povezano obrtanje da bi radili. Topološki je ovaj uređaj identičan zapletu fermiona: svaka cevčica odgovara jednom opasaču, ili krajevima dve niti, a obrtanje vreće odgovara obrtnom jezgru. U takvim aparatima za aferezu centrifugiranje centralne vreće dešava se sa preko 100 obrtaja u sekundi, na način prikazan na ***slici 25***. Da bi se izbeglo zapetljavanje cevčica sa krvlju, nosač pomera cevčice tokom svakog obrta, naizmenično gore i dole. Ovaj takozvani ***mehanizam protiv uvrtanja*** pravi precizno kretanja po kojima se kreće opasač kada se raspliće posle obrtanja kopće za 4π. Aparat za aferezu prema tome izvodi trik sa opasačem 59 puta u svakoj sekundi, pri svakom obrtaju centrifuge. Usled cetrifugiranja lakše krvne pločice ostaju u vreći, a teži sastojci krvi upumpavaju se nazad davaocu. Zadržane krvne pločice potom se koriste za postupak lečenja pacijenata sa leukemijom ili velikih gubitaka krvi uled povreda. Jedno davanje krvi radi krvnih ploćica može da sačuva nekoliko života.

Ukratko, bez trika sa opasačem, davanje krvi radi krvnih pločica nebi bilo sterilno, te stoga i nemoguće. Jedino trik sa opasačem, ili povezano obrtanje, omogućava sterilno davanje krvnih pločica koje spasavaju živote drugih ljudi.

Slika 24 U aparatu za aferezu centralna vreća obrće se velikom brzinom uprkos što je povezana cevčicama sa pacijentom; to se događa pomoću mehanizma koji neprestano izvodi trik sa opasačem (phoro © Wikimedia)



Slika 25 Osnova rada aparata za aferezu – i još jedan prikaz trika sa opasačem, ovde sa 6 opsasača (QuickTime film © Jason Hise) (ovu animaciju autor je postavio na internet i može da se posmatra na veb strani www.youtube.com/watch?v=JaIR-cWk_-o)

FERMIONI I SPIN

Fermioni su u prirodi određeni kao one čestice čija talasna funkcija menja predznak pri njihovoj razmeni. Da li model niti prikazuje takvo opažanje?

Videćemo u daljem tekstu da su u modelu niti talasne funkcije zamagljeni zapleti. Stoga možemo da istražimo osobine razmene kvantnih čestica i njihove talasne funkcije istraživanjem osobina razmene njihovih zapleta. Zatim, ako razmenimo dva jezgra zapleta ***dva puta***, dok zadržavamo neizmenjene sve veze repova, kolebanja repova mogu da vrate situaciju ponovo do početnog stanja! Osobine razmene zapleta sa spinom 1/2 mogu jednostavno da se provere igrajući se nekim delom kanapa ili trake, kao što je prikazano na ***slici 27*** ili ***slici 28***.

Slika 26 Verzija mehanizma protiv uvrtanja, ili trik sa opasačem, sa 96 opasača pričvršćenih za belo-crnu loptu koja se neprestano obrće (QuickTime film © Jason Hise). (Ova animacija se može videti na veb strani youtube/LLw3BaliDUQ)

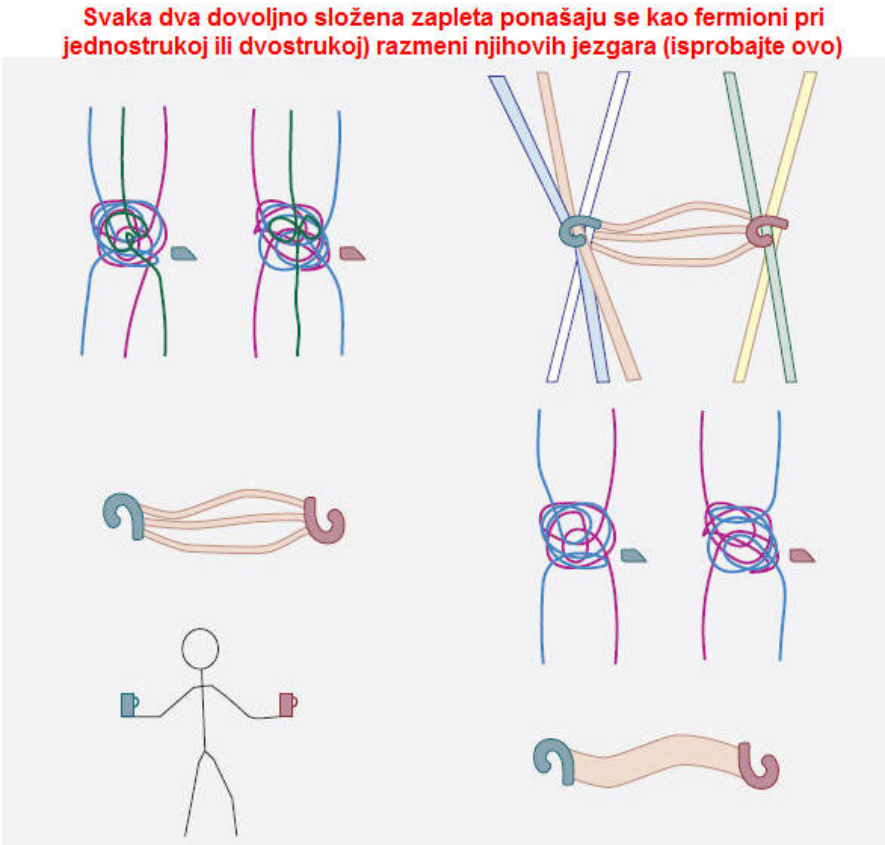
Najednostavnija moguća verzija eksperimenta je sledeća: Uzmite dve šoljice za kafu, po jednu u svaku ruku, i prekrstite ruku preko ruke (jednom). Zadržavajući neizmenjeno usmerenje šoljica u prostoru, raskrstite ruke krećući ih oko šoljica. Ovo je moguće, ali rezultat je da su obe ruke uvrnute. Ako ste neumorni, možete da ponovite ovo sa dve (ili više osoba koje pridržavaju šoljice. A možete i da proverite razliku sa onim što je moguće posle dvostrukog ukrštanja ruke: u tom slučaju sve se vraća u početno stanje.)

Svi ovi eksperimenti pokazuju:

- ***Prosta*** razmena dve čestice sa spinom 1/2 (ili zapleta, ili ruke sa šoljicama, ili kopči opasača) jednako je množenju sa -1, ***uvrnurih*** zapleta ili opasača.
- Nasuprot tome, ***dvostruka*** razmena dve čestice sa spinom 1/2 može uvek da se raspetlja i jednaka je kao da razmene nije ni bilo.

Čestice sa spinom 1/2 stoga su fermioni. Drugim rečima model niti prikazuje teoremu statistike spina za spin 1/2: Sve materijalne ćestice su fermioni. Ukratko, jezgro zapleta od dve ili više upletenih niti ponaša se – i pri obrtanju i pri razmeni – kao čestica sa spinom 1/2.

Primećujemo da se ponekad tvrdi da pojava spina 1/2 može da bude modelirina samo uz pomoć promene topologije ili prostor-vremena. Različite animacije trkova sa opasačem navedeni u predhodnom tekstu dokazuju da to nije tačno: spin 1/2 može da se modelira u tri dimenzije u svim njegovim oblicima. Nije potrebna promena topologije. Možda ćete požleti da modelirate stvaranje para čestica-antičestica sa spinom 1/2 kao konačan dokaz. (***Izazov 128e***)



Slika 27 Kada se dva zapleta sa spinom 1/2, svaki načinjen od nekoliko niti ili traka, razmene dva puta, moguće je da se njihovi krajevi preurede tako da daju početnu situaciju. Ovo nije moguće ako su zapleti samo preuređeni jednom. Zapleti sa spinom 1/2 stoga su fermioni. Na slici su predstavljeni najčešći sistemi koji prikazuju takvo ponašanje.

BOZONI I SPIN

Za zaplete napravljene od samo jedne niti – stoga sa dva repa na granici – obrtanje jezgra za 2π ponovo uspostavlja početno stanje. Takav zaplet, prikazan na ***slici 29***, ponaša se stoga kao čestica sa spinom 1. Slika takođe prikazuje talasnu funkciju nastalu iz vremenskog proseka ukrštanja.

Bozoni su čestice čije kombinovano stanje ne menja fazu kada se dve čestice razmene. (***Vol. IV, strana 93***). Primećujemo neposredno da je to nemoguće sa zapletom koji je prikazan na ***slici 29***, poduhvat je moguć samo ako je zaplet bozona načinjen od ***nevezanih*** niti sa karakterističnim izobličenjem, kao što je prikazano ma ***slici 30***. Elementarne čestice sa masom mogu da budu samo bozoni ako imaju nevezan zaplet u porodici zapleta koje ih predstavljaju.

Najjednostavniji model niti za svaki elementarni bozon – to jest, foton, W bozon, Z bozon, gluon i Higsov bozon (***strana 248***) – mora zato da bude načinjen od nevezanih niti. Mi ćemo u daljem tekstu, u poglavlju o spektru čestice, da izvedemo precizne zaplete. (***Strana 235***). Zaplet za hipotetički graviton – takođe bozon, ali u tom slučaju sa spinom 2 i invarijantom pri obrtanju jezgra za π – biće uveden u poglavlju o opštoj teoriji relativnosti. (***Strana 211***).

Ukratko, nevezani zapleti pokazuju teoremu statistike spina za čestice sa celobrojnim spinom: čestice zračenja, koje imaju celobrojni spin automatski su bozoni.

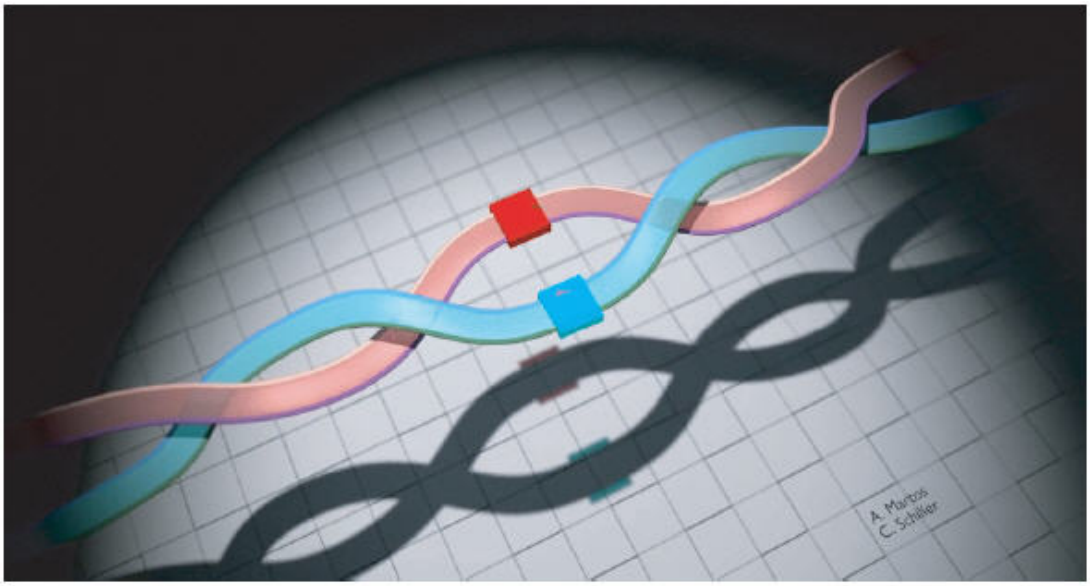
SPIN I STATISTIKA

Kolebajuće niti prikazuju teoremu statistike spina za fermione i za bozone, pa stoga za sve elementarne čestice, ukoliko se upotrebe odgovarajući zapleti. Pored ovih osovnih rezultata model niti takođe podrazumeva da nisu mogući spinovi manji od $\hbar/2$, kao i da su vrednosti spina uvek celobrojni umnožak $\hbar/2$. (***Izazov 129e***). Sve ovo slaže se sa opažanjima.

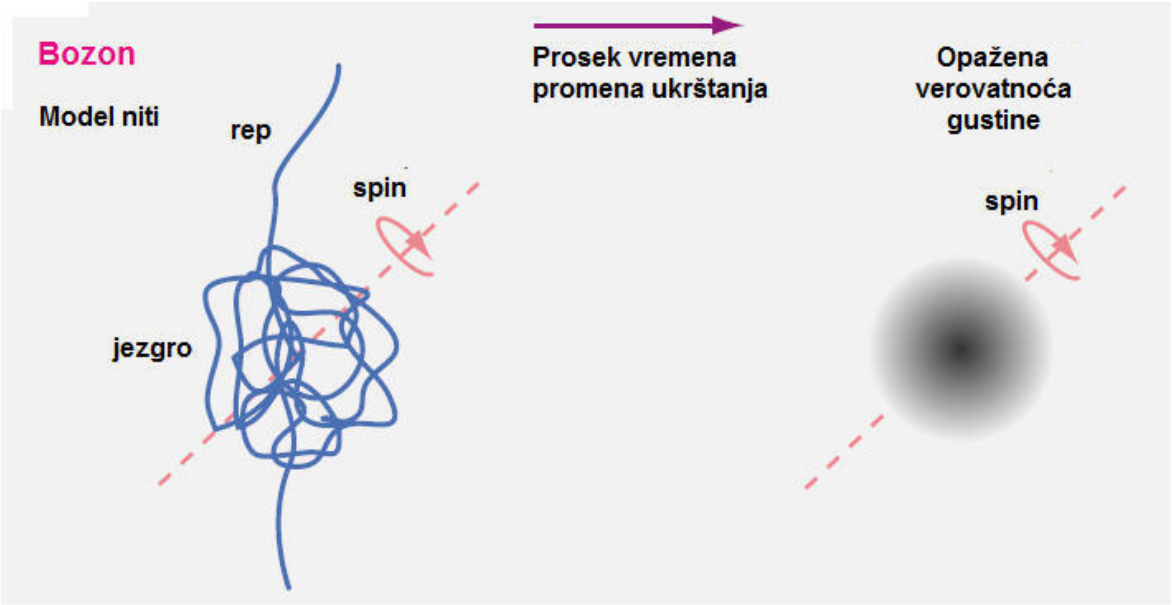
U modelu niti privremeni razvoj i reakcije čestice ***očuvaju*** spin, pošto je u svim interakcijama očuvan broj niti i repova. Detalji očuvanja postaće jasniji u daljem tekstu. I ponovo, rezultat se slaže sa opažanjima.

Model niti zato objašnjava poreklo permutacije simetrije u prirodi: permutacija simetrije čestice je usled mogućnosti razmene jezgara zapleta identičnih čestica; a identične čestice imaju jezgra zapleta istih topologija. Na taj način već smo izbrisali jednu stavku iz milenijumske liste (***strana 128***) neobjašnjenih osobina prirode..

Ukratko, model niti prikazuje obrtanje, spin i ponašanje pri razmeni elementarnih kvantnih čestica – i fermiona i bozona – u svim opaženim detaljima. Sada nastavljamo sledećim korakom: translatornim kretanjem.

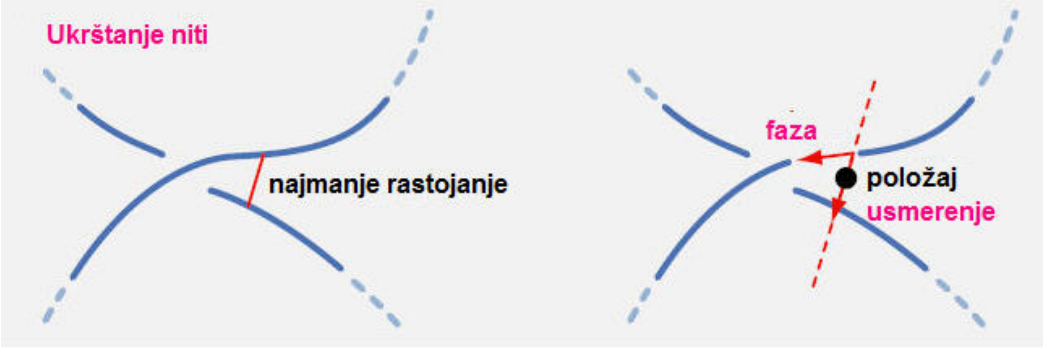


Slika 28 Predpostavimo da opasači ne mogu da se opažaju, ali da kvadratne kopče mogu, i da one predstavljaju čestice. Iz predhodnog teksta znamo da se kopče opasača ponašaju kao čestice sa spinom 1/2. Animacija predstavlja da se takve dve čestice vraćaju u početnu situaciju ako su promenile položaj dva puta (ne jednom). Takve čestice prema tome ispunjavaju ponašanje određeno za ***fermione***. (Za suprotan slučaj, onaj za bozone, jednostruka razmena dovodi do iste situacije.) Ovaj trik možete da ponovite kod kuće, koristeći trake papira. Ovde je prikazana ekvivalentnost sa dva opasača po čestici, ali ovaj trik uspeva uz bilo koji pozitivni broj opasača vezanih za svaku kopču. Ova animacija je suštinski deo dokaza da su čestice sa spinom 1/2 fermioni. To se naziva teorema statistike spina. (QuickTime film © Antonio Martos). (Animacija može da se vidi na veb strani vimeo.com/62143283)



Slika 29 Cestica sa masom i spinom 1 u modelu niti (levo) i opažena verovatnoća gustine posle uvođenja proseka njenog ukrštanja tokom duže vremenske razmere (desno)

Slika 30 U modelu niti nevezani zapleti bozona mogu da promene stanje bez nastajanja ukrštanja, pa stoga i bez promene predznaka faze.



Slika 31 Određivanje ukrštanja, njegovog položaja, njegovog usmerenja i njegove faze

FUNKCIJE ZAPLETA: ZAMAGLJENI ZAPLETI

Kretanje čestica u modelu niti nastaje usled kretanja jezgara zapleta. Međutim u saglasnosti sa osnovni načelom, niti i zapleti se ne opažaju. Jedino se opažaju promene ukrštanja. Da bi se objasnio odnos između promena ukrštanja i kretanja, prvo da se podsetimo šta je ukrštanje.

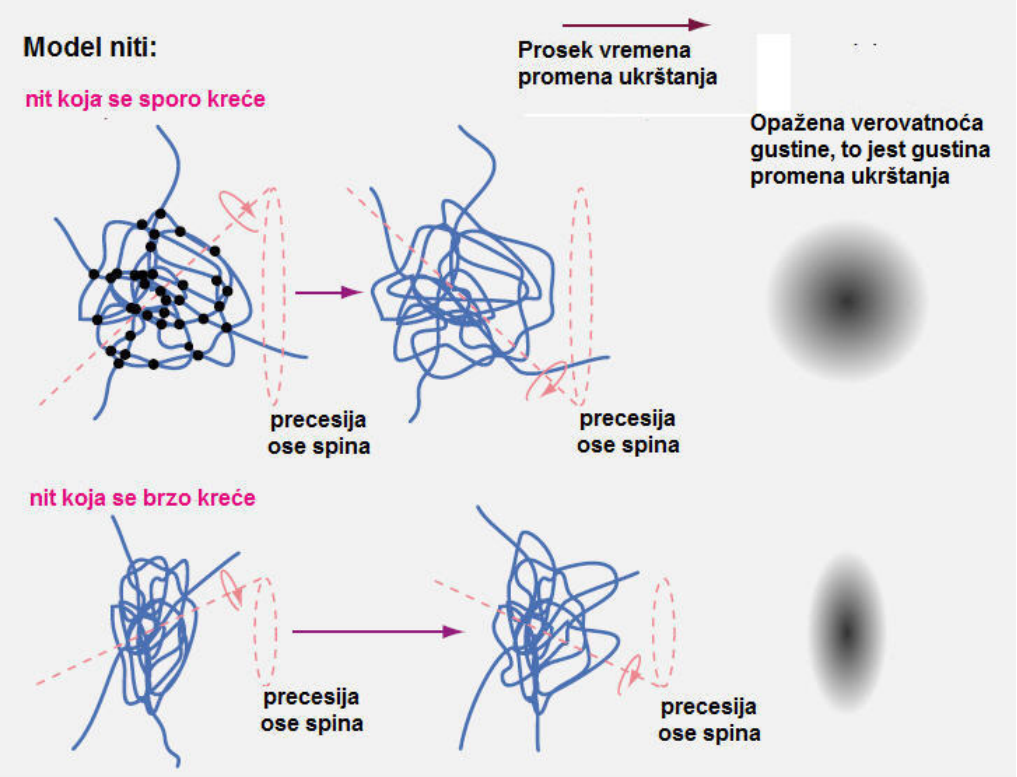
- ***Ukrštanje*** niti je lokalni minimum rastojanja niti. Položaj, usmerenje i faza ukrštanja određeni su prostornim vektorom koji odgovara lokalnom minimalnom rastojanju, kao što je prikazano na ***slici 31***. Predznak usmerenja određen je proizvoljno izborom jedne niti kao početne niti. Još veća proizvoljnost u odrđivanju faze biće od velike važnosti kasnije, a dovešće do invarijante merila.

Da bi se opisalo kretanje zapleta, potreban nam je pojam koji nam omogućava da načinimo korak od opštih kolebanja niti do kretanja jezgara zapleta. Kao matematički alat za opisivanje kolebanja ukrštanja, određujemo:

- ***Funkcija zapleta*** sistema opisanog zapletima je prosek u kratkom vremenu položaja i usmerenja ukrštanja (i prema tome ***ne*** promena ukrštanja i ***ne*** samih niti).

Funkcija zapleta može da se nazove "usmerena gustina ukrštanja" ili prosto "zamagljen zaplet". Kao takva, funkcija zapleta je kontinualna funkcija prostora, slična oblaku; videćemo u daljem tekstu na šta liči njen precizan matematički opis. Funkcija zapleta obuhvata kratkotrajan prosek svih mogućih kolebanja zapleta. Za zaplet načinjen od dve niti ideja je prikazana na ***slici 32***. Međutim, na desnoj strani slike nije prikazana sama funkcija zapleta, već njena verovatnoća gustine. Videćemo uskoro da je verovatnoća gustine (kvadrat) gustina ***položaja*** ukrštanja, dok je funkcija zapleta gustina koja opisuje i položaj i orijentaciju ukrštanja.

Funkcija zapleta u bilo koje dato vreme ***ne može*** da se opaža, pošto se njena odrednica ne zasniva na promenama ukrštanja već samo na ukrštanjima. Međutim, pošto se promene ukrštanja pojavljuju samo na mestima sa ukrštanjima, funkcija zapleta je korisan alat za proračunavanje opažanja. Ustvari, pokazaćemo da je funkcija zapleta samo drugi naziv za ono što obični nazivamo ***talasna funkcija***. Ukratko, za funkciju zapleta, to jest usmerenu gustinu ukrštanja, pokazaće se da opisuje ***kvantno stanje*** sistema.



Slika 32 Neke konfiguracije niti, neke od njihovih kratkotrajnih kolebanja i odgovarajuća verovatnoća gustine, što je posledica proseka promena ukrštanja u vremenu. (Crne tačke nisu potpuno tačno nacrtane.)

Postoje ***dva načina*** da se zamisli kolebanje zapleta i da se izvede kratkotrajan prosek iz datog zapleta. Prvi, jednostavan način da se u napravi u kratkom vremenu prosek svih mogućih kolebanja niti. ***Svaki deo niti*** može da izmeni oblik, a kao posledicu toga, dobijamo oblak. To je uobičajena Šredingerova slika talasne funkcije i kvantne nehanike. Drugi, alternativni način da se napravi prosek je da se zamisli da ***jezgro zapleta kao celina*** menja nasumično položaj i usmerenost. To je lakše ako se zamisli da je jezgro sa svim njegovim ukrštanjima sabijeno u malu, skoro "tačkastu" oblast. Tada su i sva opažanja takođe lokalizovana u toj oblasti. Često je prostije da se zamisli prosek kolebanja svih položaja i usmerenja u takvom sabijenom jezgru, nego li da se zamisli prosek svih mogućih kolebanja niti. Ovaj alternativni pogled dovodi do onog što fizičari nazivaju ***integralna formulacija putanje*** kvantne mehanike. (Možete li da pokažete da su ekvivalentna ova dva postupka za proseke?) (***Izazov 130e***). Naravno u oba slučaja krajnji rezultat je da je funkcija zapleta oblak, to jest amplituda verovatnoće.

Ukratko, funkcija zapleta je zamućena slika zapleta – uz važan detalj da su zamućena ukrštanja, a ne niti.

- Za određivanje funkcije zapleta, ***kratkotrajni prosek*** ukrštanja preuzima tipičnu rezoluciju vremena posmatrača. To je vreme koje je mnogo ***duže*** od Plankovog vremena, ali je takođe i mnogo ***kraće*** od tipičnog vremena razvoja sistema. Vremenska rezolucija je stoga ono što posmatrač naziva "trenutak" vremena. Tipično – a i u svim poznatim eksperimentima – ono će biti 10^{-25} s ili više; tipičnan prosek će stoga premašiti vremenski interval vrednosti između 10^{-43} s, što je Plankovo vreme, i oko 10^{-25} s.

DETALJI O KOLEBANJIMA I PROSECIMA

Kolebanja niti čestica u modelu niti poseledica su ugradnje svih čestica u pozadinu koja je i sama načinjena od kolebajućih niti vakuuma. Kolebanja nasumice dodaju obilaznice nitima čestica i nasumično pomeraju položaj jezgra. Kolebanja ne održavaju dužinu niti stalnom. Oblik niti, ni bilo koja druga osobina niti, nisu očuvani pri kolebanju, pošto ne postoji mehanizam koji bi sprovodio takva pravila. Kolebanja niti su zato sasvim divlja. Šta onda može da se kaže o detaljima prosečnog postupka kolebanja niti?

Kolebanja vakuuma su takva kolebanja niti koja dovode do odrednice prostora pozadine. Ova odrednica je moguća na dosledan način samo ako su kolebanja homogena i izotropna. Stanje vakuuma može zato da se odredi kao stanje u kojem su kolebanja (lokalno) homogena i izotropna. Postojanje homogenog i

izotropnog prostora pozadine tako podrazumeva očuvanja energije, linearne količine kretanja i momenta količine kretanja čestica koje putuju kroz njega. Osim toga, kolebanja podrazumevaju

- Ravan vakuuma ima funkciju zapleta koja svuda nestaje.

Dokaz je zanimljiva vežba. (***Izazov 131e***).

Kolebanje zapleta posle uvođenja proseka, dovodi do funkcije zapleta, to jest, kako ćemo videti, do talasne funkcije. Očuvanja energije i količine kretanja podrazumevaju da su u proseku vremena kolebanja zapleta takođe očuvane ove veličine.

Prema tome, možemo da nastavimo naše razmatranje bez poznavanja preciznih detalja o samim kolebanjima zapleta. (Ove detalje ćemo dati u tekstu koji sledi, u odeljku o opštoj teoriji relativnosti.) (***Strana 222***). Ovde samo zahtevamo da se prosek kolebanja ponaša na takav način da je ***dosledan*** odrednici pozadine koju koristi posmatrač. Na taj način izričito koristimo uverenje da je nemoguć opis prirode bez pozadine (***strana 88***) i da osnovni opis prirode mora da sadrži kružnu odrednicu koja čini da je nemoguć aksiomski opis prirode. (***Strana 130***). S druge strane, kružna odrednica mora da bude ***samodosledna***.

Isto tako ćemo pokazati da odrednica funkcije zapleta ne uvodi nove promenljive, (***strana 156***) uprkos tome što na prvom utisku možda izgleda suprotno. Ustvari, moguće je da se odredi nešto što je slično jednakosti razvoja niti. Međutim, to neće da produbi naše razumevanje jednakosti razvoja talasne funkcije.

FUNKCIJE ZAPLETA SU TALASNE FUNKCIJE

U ovome što sledi, pokazaćemo da je funkcija zapleta zamagljena slika ukrštanja zapleta, isto ono što obično nazivamo talasna funkcija. Podsećamo se onoga što znamo iz udžbenika o kvantnoj teorji:

- ***Talasna funkcija*** pojedinačne čestice je, uopšteno govoreći, ***rasut oblak koji se obrće***.

Obrtanje opisuje razvoj faze, a ***rasutost*** opisuje razvoj gustine. Sada ćemo da pokažemo da funkcija zapleta ima ova i sve ostale poznate osobine talasnih funkcija. Nastavljamo sa izvođenjem svih osobina iz odrednice funkcije zapleta. Podsećamo se, budući na kratkotrajan prosek, da je funkcija zapleta kontinualna funkcija u prostoru i vremenu.

- Koristeći funkciju zapleta, određujemo ***gustinu položaja ukrštanja***, ili ***gustinu ukrštanja*** za svaku tačku u prostoru, odbacujući informacije o usmerenju, prebrojavanjem ukrštanja u zapremini i primenom kvadratnog korena. Gustina ukrštanja – ili preciznije njen kvadratni koren – je pozitivan broj, još preciznije, pozitivna realna funkcija $R(x, t)$ prostora i vremena.

Uskoro ćemo videti da je gustina položaja ukrštanja kvadratni koren onoga što obično nazivamo ***verovatnoća gustine***.

- Funkcija zapleta takođe određuje ***prosečnu usmerenost ukrštanja*** i ***prosečnu fazu*** za svaku tačku u prostoru. Prosečna gustina ukrštanja i prosečna faza povezani su sa ***usmerenjem*** spina i ***fazom***. talasne funkcije. Matematički opis ovih veličina zavisi id korišćene približnosti.

Najprostija približnost za funkciju zapleta je da se predpostavi, u fizičkoj situaciji koja se proučava, da je pravac spina ***nezavisan*** od položaja u prostoru i da se zbog toga ne uzima u obzir; ova približnost dovodi do Šredingerove jednakosti. U ovoj najjednostavnijoj približnosti, u svakoj tački u prostoru lokalna prosečna usmerenost kolebanja jezgra zapleta biće opisana samo ***pojedinačnim uglom***. Ova kvantna faza je funkcija vremena i prostora, a opisuje koliko se lokalna prosečna faza obrće oko ustaljenog usmerenja spina.

- ***Kvantna faza*** fermiona je ***jedna polovina*** ugla α obrtanja jezgra.

Bez zanemarivanja spina, a posebno kada ose spina mogu da se menjaju u prostoru, opis proseka usmerenja i i faze zahteva više detalja; ove slučaje posebno će biti proučene u tekstiu koji sledi. Oni će da dovedu do nerelativističke Paulijeve jednakosti i do relativističke Dirakove jednakosti.

Ukratko, u prostoj približnosti u kojoj mogu efekti spina da se zanemare, vrednost lokalne funkcije zapleta može da se opiše jednim realnim brojem R i jednom kvantnom fazom α. Funkcija zapleta zato može da bude opisana kompleksnim brojem ψ u svakoj tački prostora i vemena:

$$\psi(x,t) = R(x,t)e^{i\frac{\alpha(x,t)}{2}} \qquad (122)$$

Ako se sistem menja u vremenu, menja se i funkcija zapleta; što dovodi do promena ukrštanja; prema tome, očekuje se da će razvoj u vremenu da bude opažen preko ovih promena ukrštanja. Kao što ćemo ubrzo videti, ovo dovodi do jednakosti razvoja za funkciju zapleta.

Ovde postoji zabavan izazov: kako se odnosi najmanje rastojanje između niti, za ukrštanje na lokaciji x i t prema veličini talasne funkcije, to jest apslutnoj vrednosti $R(x,t)$? (***Izazov 132s***).

Primećujemo da ako treba da se opiše više čestica, funkcija zapleta za više čestica određuje posebnu gustinu ukrštanja za svaki zaplet čestice. (***Strana 156***).

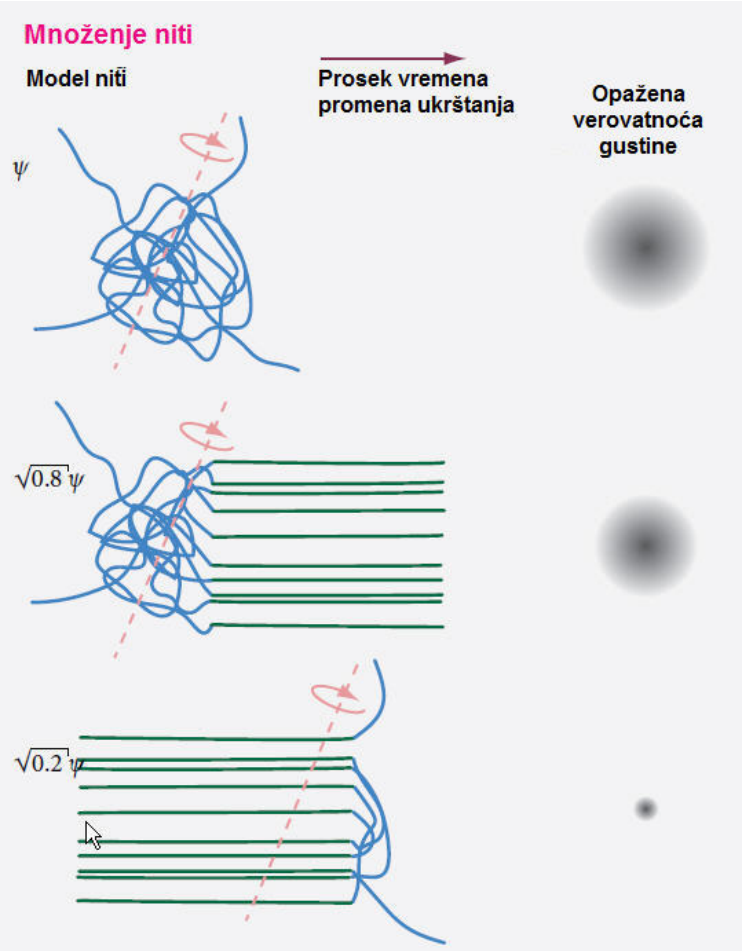
Funkcije zapleta obrazuju vektorski prostor. Da bi se to pokazalo, potrebno je da ***odredimo linearnu kombinaciju*** ili ***superpoziciju*** $\chi = a_1\psi_1 + a_2\psi_2$ dve funkcije zapleta. To zahteva da se odrede dve operacije: skalarno množenje i sabiranje. To možemo da uradimo na dva načina. Prvi način je da se direktno odrede operacije za funkcije zapleta, kao što je urađeno u kvantnoj mehanici:

- Prva, dosadna odrednica: ***skalarno množenje*** $a\psi$ i ***sabiranje*** $\psi_1 + \psi_2$ kvantnih stanja dobija se primenom odnosnih operacija sa kompleksnim brojevima u svakoj tački prostora, to jest sa lokalnim vrednostima funkcije zapleta.

Drugi način da se zaključi vektorski prostor je zabavniji, pošto će nam on pomoći da vizualno prikažemo kvantnu mehaniku. Isto tako možemo da odredimo sve operacije za zaplete i da zanislimo da je prosek vremena uzet ***posle*** izvođenja operacija sa zapletima.

- Druga, zabavna odrednica: ***skalarno množenje*** $a\psi$ kompleksnim brojem $a = re^{i\delta}$ oblikovano je uzimanjem u obzir zapleta koji je osnova funkcije zapleta, prvo se obrne jezgro zapleta za ugao 2δ, a zatim se potisne razlomak $1–r$ zapleta do granice prostora, čime se zadržava razlomak r početnog zapleta na konačnim rastojanjima. Prosek vremena tada dovodi do funkcije zapleta $a\psi$.

Skalarno množenje niti prikazano je na ***slici 33***. Gore pomenuta odrednica skalarnog množenja određena je za činioce $r \leq 1$. Ustvari, nikada se u fizičkim sistemima nije pojavio nijedan drugi činilac (pod uslovom da su sve talasne funkcije normalizovane), tako da skalarno množenje ne zahteva druge skalare.



Slika 33 Skalarno množenje lokalizovanog zapleta, prikazom skalarnog množenja talasne funkcije

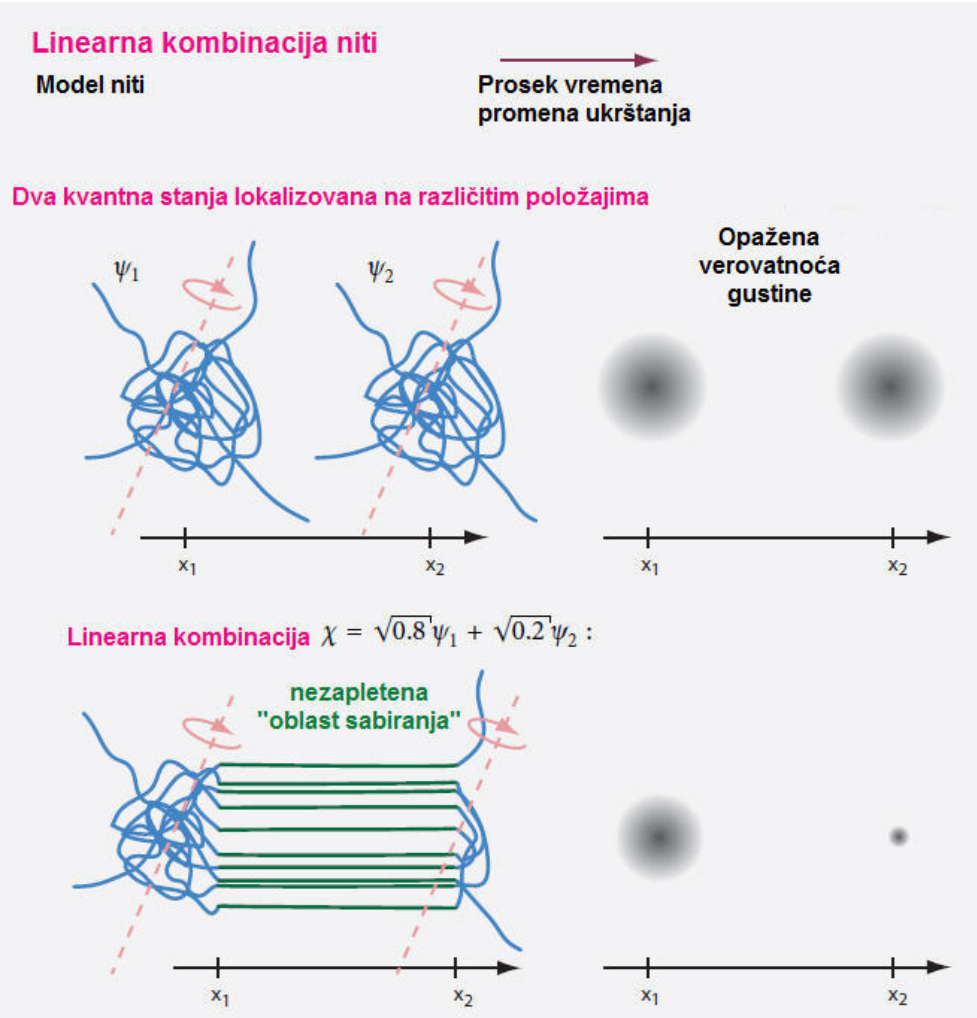
Verzija skalarnog množenja niti je ***jedinstvena***; zapravo, iako postoji izbor kojim se razlomkom r zaplet zadržava i kojim se razlomkom $1 - r$ on šalje na granicu prostora, nastala funkcija zapleta, određena kao prosek kolebanja, nezavisna je od ovog izbora.

Skalarno množenje niti ponaša se prema očekivanju za 1 i 0, Konstrukcijom je verzija niti skalarnog množenja asocijativna: imamo da je $a(b\psi) = (ab)\psi$. Množenje niti sa -1 određeno je kao obrtanje celog jezgra za ugao 2π.

Potrebno je takođe da odredimo operaciju sabiranja koja se javlja pri linearnoj kombinaciji dve funkcije zapleta. To je jednostavno kompleksno sabiranje u svakoj tački prostora. I ponovo, zabave radi, isto tako određujemo operacije na samim zapletima, pa uzimamo prosek vremena koji posle toga dovodi do funkcije zapleta.

- Druga zabavna odrednica: Sabiranje dva zapleta $a_1\psi_1$ i $a_2\psi_2$, pri čemu ψ_1 i ψ_2 imaju iste topologije i gde je $a_1^2 + a_2^2 = 1$, određeno je spajanjem onih repova koji su dospeli do granice prostora i odbacivanjem svih delova zapleta koji su bili potisnuti do granice prostora. Prosek vremena potom dovodi do funkcije zapleta superpozicije $\chi = a_1\psi_1 + a_2\psi_2$.

Da bi se sagledali rezultati sabiranja i superpozicije, najlakše je da se zamisli da niti koje su dospele do granice prostora moraju da se kolebaju nazad do konačnih rastojanja. To je moguće, pošto prema odredinici ovi spojevi nisu povezani. Primer superpozicije prikazan je na ***slici 34*** za slučaj dva kvantna stanja na različitim položajima u prostoru. Primećujemo da u operaciji sabiranja, uprkos izrečenoj odrednici, nijedna nit nije zapravo presečena i ponovo spojena.



Slika 34 Linearna kombinacija niti, u ovom slučaju dva stanja koji predstavljaju čestice na dva različita položaja u prostoru, prikazuju linearnu kombinaciju talasnih funkcija

Odrednica linearne kombinacije zahteva da konačna nit χ ima istu topologiju i istu normu kao i svaka od dve niti ψ_1 i ψ_2 koje se kombinuju. U fizičkom smislu to znači da se mogu sabirati samo stanja istih čestica i da je očuvan broj čestica; to automatski uvodi takozvana ***pravila superselekcije*** kvantne teorije. Ovo je

lep rezultat, pošto u uobičajenoj kvantnoj mehanici pravila superselekcije moraju da se dodaju ručno. U modelu niti to je nepotrebno.

Zbir dve funkcije zapleta je ***jedinstven***, iz istih razloga koji su dati u slučaju skalarnog množenja. Odrednica sabiranja može isto tako da se proširi na više od dva pojma. Sabiranje je asocijativno i komutativno, a postoji i nulto stanje, ili element identiteta koji uopšte nema niti. Odrednica sabiranja takođe podrazumeva distributivnost u pogledu sabiranja stanja i u pogledu sabiranja skalara. Isto tako je moguće da se prošire odrednica množenja skalara i odrednica sabiranja na sve kompleksne brojeve i na nenormirana stanja, ali bi to odvelo isuviše daleko od naše priče. (***Izazov 133e***).

Ukratko, funkcije zapleta obrazuju vektorski prostor. Sada ćemo da odredimo skalarni proizvod i verovatnoću gustine na isti način kao kod talasnih funkcija.

- ***Skalarni proizvod*** dva stanja φ i ψ je $\langle\varphi|\psi\rangle = \int \bar{\varphi}(x)\,\psi(x)\,\mathrm{d}x$
- ***Norma*** stanja je $\|\psi\| = \sqrt{\langle\psi|\psi\rangle}$
- ***Verovatnoća gustine*** ρ je $\rho(x,t) = \bar{\psi}(x,t)\psi(x,t) = R^2(x,t)$. Ovo zato zanemaruje usmerenja ukrštanja i preedstavlja ***gustinu položaja ukrštanja***.

Skalarni proizvod i verovatnoća gustine mogu da se ***opažaju***, posto njihove odrednice mogu da se predstave pojmovima promene ukrštanja. U stvari, skalarni proizvod $\langle\varphi|\psi\rangle$ može da se posmatra kao (povoljno normiran) broj promena ukrštanja potrebnih da se transformiše zaplet $\bar{\varphi}$ u zaplet ψ, pri čemu je zaplet $\bar{\varphi}$ oblikovan iz zapleta φ promenom usmerenja svakog ukrštanja. Slična interpretacija moguća je i za verovatnoću gustine, koja je prema tome istovremeno kvadrirana gustina ukrštanja i gustina promene ukrštanja. Ove dokaze ćemo prepustiti čitaocu za zabavu. (***Izazov 134e***).

Isto tako je moguće da se odredi skalarni proizvod, norma i verovatnoća gustine korišćenjem zapleta umesto korišćejem funkcija zapleta. To se kao zagonetka takođe prepušta čitaocu. (***Izazov 135e***).

Ukratko, pokazali smo da funkcije zapleta oblikuju ***Hilbertov prostor***. Sledeći korak je sada očigledan: moramo prvo da pokažemo da se funkcije zapleta povinuju Šredingerovoj jednakosti. Zatim, moramo da proširimo odrednicu kvantnih stanja uključivanjem spina i posebne teorije relativnosti, te pokazati da se one povinuju Dirakovu jednakost.

IZVOĐENJE ŠREDINGEROVE JEDNAKOSTI IZ ZAPLETA

Šredingerova jednakost, kao i sve jednakosti razvoja u kvantnoj oblasti, nastaje kada se odrednica talasne funkcije kombinuje sa odnosom energija – količina kretanja. Kao što je već pomenuto, Šredingerova jednakost za kvantne čestice predpostavlja takođe da je usmerenje spina čestice konstantno za sve položaje i u svim vremenima. U tom slučaju spin može da se zanemari, a funkcija zapleta je pojedinačan kompleksni broj za svaku tačku u prostoru i vremenu, obično beležena kao $\psi(x, t)$. Kako se funkcija zapleta razvija u vremenu? Da bi se odgovorilo na ovo pitanje, potrebno nam je osnovno načelo da promena ukrštanja određuje kvant rada $\hbar$.

Počećemo od slobodne čestice. Predpostavljamo ustaljen, ali ***neodređen*** smer obrtanja njenog zapleta. U modelu niti je lokalizovana čestica sa konstantnim spinom opisana lokalizovanim zapletom koji se obrće i napreduje. Drugim rečima, kolebanje niti proizvodi vršnu verovatnoću gustine koja menja položaj stalnom brzinom.

Svako obrtanje zapleta dovodi do promena ukrštanja. Brzo okretanje zapleta dovodi do više promena ukrštanja u vremenu, a sporo obrtanje do manje promena ukrštanja po vremenu. Osnovno načelo nam sada kazuje da je promena ukrštanja po vremenu prirodno izmeren rad u vremenu, ili ***energija***. Drugim rečima, obrtanje zapleta povezano je sa energijom zapleta.

- Čestice sa ***visokom*** energijom imaju zaplete koji se obrću ***brže***.
- Čestice sa ***niskom*** energijom imaju zaplete koji se obrću ***sporije***.

Energija zapleta koji se obrće je broj promena ukrštanja po vremenu. Obtanje jezgra zapleta dovodi do pojave promena ukrštanja u njegovim repovima. Kinetička energija čestice E u modelu niti povezana je sa (efektivnom) ugaonom učestanošću ω obrtanja jezgrara sa

$$E = \hbar\omega \tag{123}$$

Lokalna faza funkcije zapleta ψ menja se sa obrtanjem. To podrazumeva da je

$$\omega = i\partial_t \psi \tag{124}$$

Ubrzo će nam ova relacija biti potrebna.

Linearno kretanje zapleta podrazumeva da takoje ima smisla da se obrati pažnja na broj promena ukrštanja po rastojanju.

- Zapleti koji se brzo kreću pokazuju više promena ukrštanja po rastojanju.
- Zapleti koji se sporo kreću pokazuju manje promena ukrštanja po rastojanju

Osnovno načelo nam kazuje da je prirodno opažanje za merenje promena ukrštanja po dužini rad po dužini, ili ***količina kretanja***. Linearno kretanje zapleta je prema tome povezano da količinom kretanja: ***Količina kretanja zapleta koji se kreće je broj promena ukrštanja po dužini***. Količina kretanja p prema tome je povezana sa (efektivnim) talasnim brojem $k = 2\pi/\lambda$ kretanja jezgra preko

$$p = \hbar k \tag{125}$$

Lokalna faza funkcije zapleta ψ menja se pri kretanju. To podrazumeva

$$k = -i\partial_x \psi \tag{126}$$

Ovim je završen opis talasne funkcije materije bez spina.

Trik sa opasačem za kolebajuće repove sada ima začuđujuću posledicu. Da bi se trik sa opasačem takođe omogućio i za veliku linearnu količinu kretanja, što se više povećava količina kretanja, to više mora osa obrtanja spina da se poravnava sa smerom kretanja. To je prikazano na ***slici 35***. Ovo dovodi do povećanja promena ukrštanja sa kvadratom količine kretanja p: jedan činilac za p je usled povećavanja brzine obrtanja, drugi činilac je usled povećavanja poravnavanja. Zato dobijamo

$$E = \frac{p^2}{2m} \quad \text{i} \quad \omega = \frac{\hbar}{2m}k^2 \tag{127}$$

Ovo je relacija rasipanja za mase koje se kreću brzinama manjim od brzine svetlosti. Relacija se slaže sa eksperimenrima. Konstantna m je činilac srazmernosti koji zavisi od jezgra zapleta. Sada možemo da koristimo isti dokaz kojeg je već koristio Šredinger. Zamenom relacije zapleta u relaciji rasipanja, dobijamo jednakost razvoja za funkciju zapleta ψ datu sa

$$i\hbar\partial_t \psi = -\frac{\hbar^2}{2m}\partial_{xx}\psi \tag{128}$$

Ovo je poznata Šredingerova jednakost za slobodnu česticu (napisana za samo jednu dimenziju, radi jednostavnosti). Time smo izveli jednakost iz modela niti pod uslovom da spin može da bude zanemaren i da su brzine male u odnosu na brzinu svetlosti. Na takav način izveli smo takođe, indirektno, Hajzenbergovu ***relaciju neodređenosti***.

Time smo završili dokaz da je u slučaju zanemarljivog efekta spina i malih brzina funkcija zapleta zaista talasna funkcija. Ustvari, funkcije zapleta su talasne funkcije i u opštijim slučajevima, međutim njihov matematički opis mnogo je zamršeniji, što ćemo uskoro da vidimo. Možemo da sažmemo ovu situaciju u nekoliko reči: ***talasne funkcije su zamagljeni zapleti***.

MASA IZ ZAPLETA

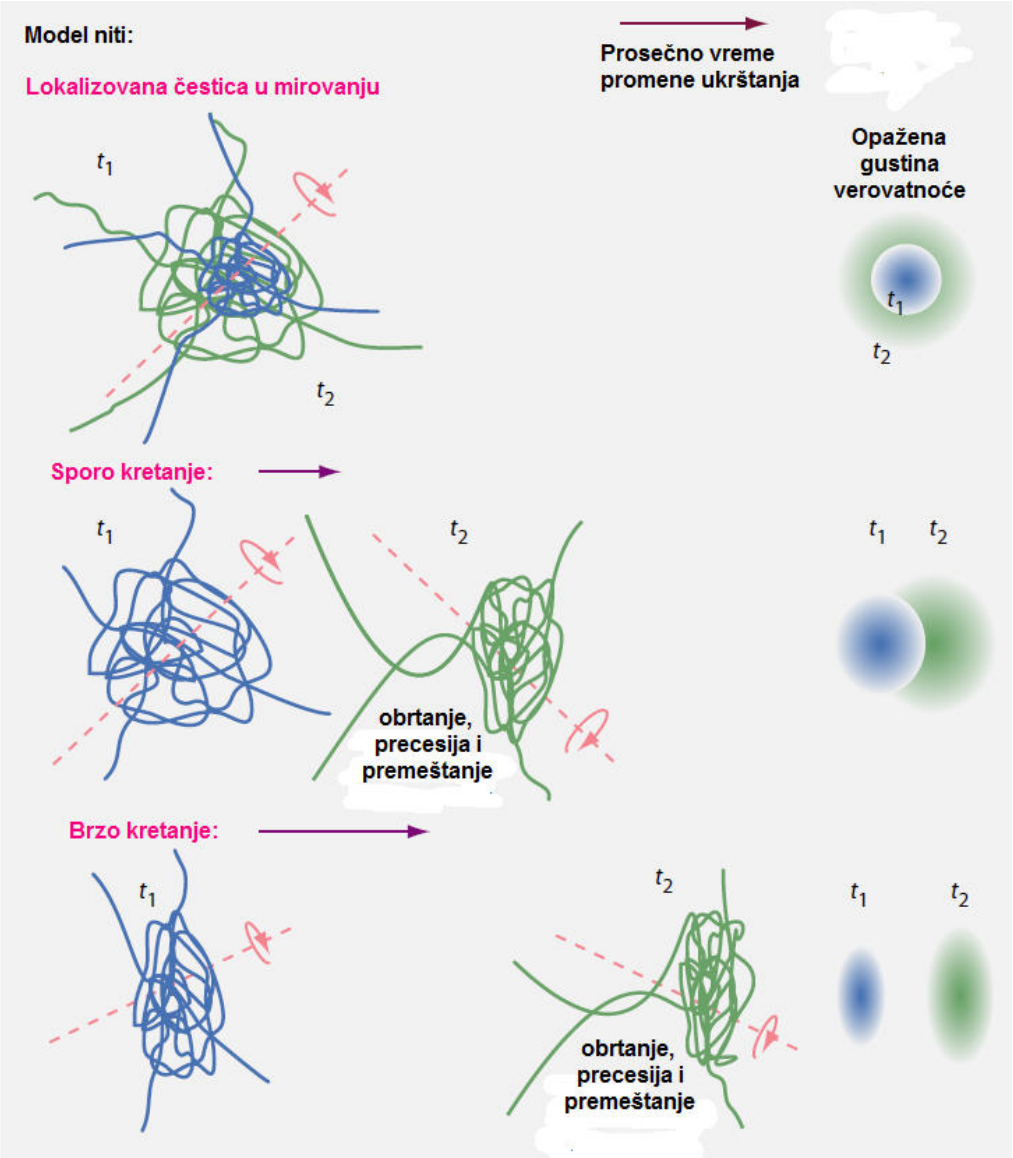
U kvantnoj teoriji čestice imaju spin dok se kreću. Veza između obrtanja i translacije ima ime: ona se naziva ***masa*** čestice. Videli smo da srednja ugaona učestanost ω opisuje obrtanje, a da talasni broj k opisuje translatorno kretanje. Sačinilac srazmernosti $m = \hbar k^2/2\omega = p^2/2E$ prema tome je veličina koja povezuje učestanost obrtanja i talasni broj. U kvantnoj teoriji (inercijalna) masa m prema tome povezuje translaciju sa rotacijom. Primećujemo da velika vrednost mase podrazumeva i sporu translaciju i sporo obrtanje.

Translacija i obrtanje čestice u modelu niti modelirani su translacijom i obrtanjem jezgra zapleta. Model niti sada pravi tačku koja prevazilazi uobičajenu kvantnu teoriju. Model niti objašnjava ***zbog čega*** su

povezani translacija i obrtanje jezgra. Kada se jezgro kreće kroz vakuum, niti vakuuma i jezgro efikasno se guraju međusobno, usled njihove neprobojnosti. Rezultat je kretanje koje podseća na kretanje nesimetričnog tela u viskoznom fluidu.

Kada se nesimetrično telo kreće kroz viskozni fluid ono počinje da se obrće. Na primer, to de događa kada kamen pada kroz vodu ili med. Obrtanje nastaje usled nesimetričnog oblika tela. (***Ref. 161***). Sva jezgra zapleta elementarnih čestica su nesimetrična. Prema tome, model niti predviđa da se jezgra zapleta obrću kada se kreću kroz vakuum. Drugim rečima, model niti predviđa da

- Vezani zapleti imaju masu.
- Nevezani zapleti, kao što su oni kod fotona, predviđa se da su bez mase.



Slika 35 Primeri zapleta slobodnih čestica koji se kreću

Isto tako zaključujemo da što je složeniji zaplet to je veća vrednost mase. Pored geometrijskog uticaja usled jezgra, koji važi za bozone i fermione velikih masa, obrtanje fermiona izazvano je takođe zbog repova. Efektivna zapremina koja se zahteva za trik sa opasačem uticaće na vezu između translacije i obrtanja. Ova efektivna zapremina zavisi od topologije jezgra zapleta i od broja njegovih repova. Ponovo zaključujemo da za dati broj repova složenija topologija jezgra podrazumeva veću vrednost mase. (***Strana 267***).

Drugim rečuma, model niti povezuje masu m čestice sa topologijom zapleta: ***veća jezgra zapleta imaju veću masu***. Model niti prema tome predviđa

- Mase čestica se ***mogu izračunati*** – ako je poznata topologija zapleta.

Ovo je uzbudljiva mogućnost! Sažeto rečeno, model niti predviđa da eksperimenti u viskoznom tečnostima mogu da dovedu do dubljeg razumevanja masa elementarnih čestica. Model zapleta takođe podrazumeva da će mase elementarnih čestica – prema tome čestica načinjenih od nekoliko niti – biti mnogo manje od Plankove mase. (***Izazov 136e***). To je prvi nagoveštaj da model niti rešava takozvani ***problem hijerarhije masa*** u fizici čestica. (***Strana 268***).

Međutim, na ovom mestu mi smo još uvek u tami u vezi preciznog porekla vrednosti masa čestica. Bez obzira na to, nedostajući koraci su jasni: prvo, potrebno je da odredimo topologiju zapleta za svaku elementarnu česticu; zatim je potrebno da zaključimo njenu vrednost mase. To je glavni cilj u onome što sledi.

POTENCIJALI

U kvantnoj mehanici interakcije su opisane potencijalima. ***Električhi potencijal*** $V(x, t)$ menja ukupnu energiju čestice naelektrisanja q na položaju x, pošto u kvantnoj mehanici električni potencijali utiču na brzinu obrtanja talasne funkcije. Kao rezultat toga, uz električni potencijal, leva strana Šredingerove jednakosti (128), član energije, menja se od $\hbar\omega\psi(x, t)$ u $(\hbar\omega - qV)\psi(x, t)$.

Druga mogućnost je potencijal koji ne menja brzinu obrtanja, ali koji menja talasnu dužinu naelektrisane čestice. Takav ***magnetni vektorski potencijal*** $A(x, t)$ menja stoga član količine kretanja $\hbar\mathbf{k}$ na desnoj strani Šredingerove jednakosti u $(\hbar\mathbf{k} - q\mathbf{A})\psi(x, t)$. Ova dvostruka zamena, takozvana ***minimalna povezanost***, ekvivalentna je iskazu da kvantna elektrodinamika ima U(1) simetriju merila. To ćemo detaljnije da izložimo u narednom poglavlju. (***Strana 178***).

U modelu niti kvantne mehanike potencijali su uvedeni na potpuno isti način kao u uobičajenu kvantnu mehaniku, tako da se dobija potpuna Šredingerova jednakost za naelektrisane čestice:

$$\left(i\hbar\partial_t - qV\right)\psi = \frac{1}{2m}\left(-i\hbar\nabla - qA\right)^2\psi \qquad (129)$$

Ova jednakost je najjednostavnija formulacija kvantne teorije. Videli smo u četvrtom delu knjige da ona opisuje i objašnjava veličinu atoma i molekula, pa prema tome svih predmeta oko nas; i videli smo da ona takođe objašnjava (relativne) boje svih predmeta. Jednakost takođe objašnjava interferenciju, tunelski efekt i raspad.

Ukratko, nerelativistički kolebajući zapleti prikazuju potpunu Šredingerovu jednakost. Očigledno pitanje je: kako model niti objašnjava uticaj interakcija na brzinu obrtanja i na talasnu dužinu zapleta? Drugim rečima, zašto niti podrazumevaju minimalnu povezanost? Odgovor na ovo pitanje biće dato u sledećem poglavlju, u interakciji merila. (***Strana 171***).

KVANTNA INTERFERENCIJA IZ ZAPLETA

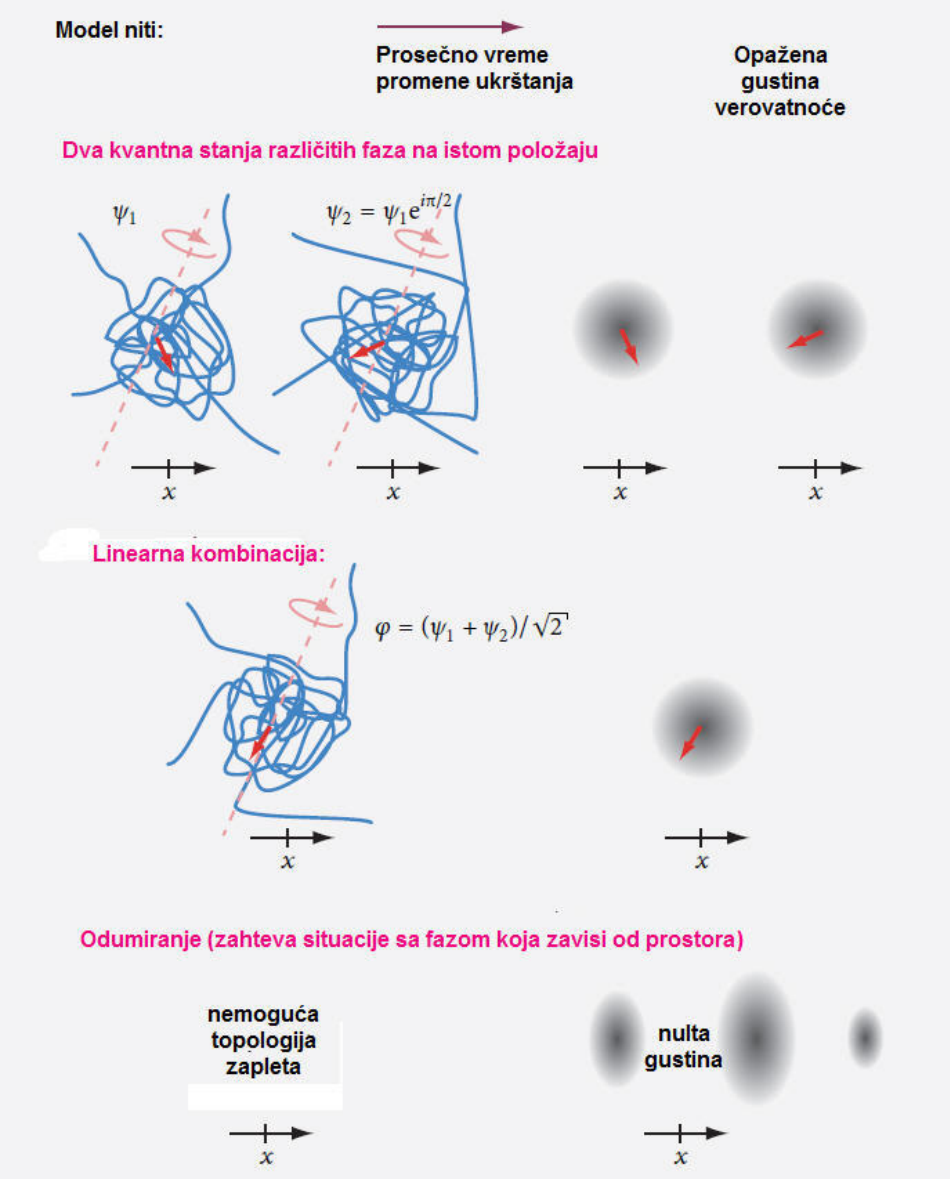
Opažanje ***interferencije*** kvantnih čestica je usled linearne kombinacije stanja sa različitim fazama na istom mestu u prostoru. Funkcije zapleta, budući da su talasne funkcije, reprodukuju efekt. I ponovo, mnogo je i zabavnije i mnogo je poučnije da se interferencija objasni pomoću zapleta.

Kao što je pomenuto u predhodnom tekstu čista promena faze stanja ψ određena je množenjem sa kompleksnim brojem jedinične norme, kao što je $e^{i\beta}$. (***Strana 148***). To odgovara obrtanju jezgra zapleta za ugao 2β, pri čemu je činilac 2 uveden zbog trika sa opasačem sa ***slike 19***. (***Strana 137***).

Da bi se zaključila interferencija, jednostavno ćemo iskoristiti gornju odrednicu linearnih kombinacija zapleta. To dovodi do rezultata prikazanog na ***slici 36***. Na primer, nalazimo da simetrični zbir zapleta i isti zaplet sa fazom koja je zakrenuta za $\pi/2$ (dakle jezgra koja su zakrenuta za π) rezultira zapletom čija faza je obrnuta polovinom ugla, to jest, za $\pi/4$.

Najinteresantniji slučaj interferencje je ***izumiranje***. Skalarno množenje funkcije zapleta sa -1 daje negativnu funkciju zapleta, dodatnu inverznu $-\psi$. Zbir funkcije zapleta i njene negativne vrednosti je nula. To daje izumiranje u uobičajenoj kvantnoj teoriji. Proverimo ovaj rezultat u modelu niti, koristeći odrednicu linearnih kombinacija zapleta. Videli smo u predhodnom tekstu da je negativ zapleta zaplet čije je jezgro zakrenuto za 2π. Korišćenjem odrednice linearnih kombinacija zapleta, nalazimo da je ***topološki neizvodljivo*** da se nacrta ili konstruiše lokalizovan zaplet zbira kvantnog stanja sa njegovim negativom. Rezujtujući zaplet čestice prema tome mora da ima gustinu ukrštanja koja nestaje u oblasti prostora gde je

pokušana ova operacija. Ukratko, zapleti čestica objašnjavaju izumiranje. A kako se i očekivalo od kvantnih čestica, objašnjenje izumiranja direktno uključuje strukturu zapleta.



Slika 36 Interferencija: limearna kombinacija niti različitih faza, ali koje se nalaze na istom položaju

IZVOĐENJE PAULIJEVE JEDNAKOSTI IZ ZAPLETA

Kao što smo videli, Šredingerova jednakost opisuje kretanje kvantne čestice kada se zanemari njen spin, predpostavljajući da je spin konstantan u prostoru i vremenu. Zato je sledeći korak da se uvrste varijante spina u prostoru i vremenu. Pokazalo se da je to sasvim jednostavno.

U modelu niti spin je modeiran neprekidnim obrtanjem zapleta. Videli smo takođe da dobijamo talasnu funkciju iz zapleta ako uzmemo prosek u kratkotrajnoj razmeri. U datom položaju u prostoru funkcija zapleta će imati lokalnu prosečnu gustinu ukrštanja, lokalnu prosečnu fazu i novo, lokalno prosečno usmerenje ose obrtanja zapleta. Da bismo opisali osu i usmerenje jezgra zapleta, koristimo Ojlerove uglove α, β i γ. To daje opis funkcije zapleta kao (***Ref. 162***)

$$\psi(x,t) = \sqrt{\rho}\, e^{i\alpha/2} \begin{pmatrix} \cos(\beta/2)\, e^{i\gamma/2} \\ i\sin(\beta/2)\, e^{-i\gamma/2} \end{pmatrix} \tag{130}$$

što je prirodan opis zapleta koji obuhvata usmerenje ose. Kao i ranije, gustuna ukrštanja je kvadratni koren gustine verovatnoće $\rho(x, t)$. Ugao $\alpha(x, t)$ opisuje fazu kao i ranije, to jest (jednu polovinu) ***obrtanja*** oko ose. Lokalno usmerenje ose opisano je matricom sa dva elementa i koristi dva ugla, $\beta(x, t)$ i $\gamma(x, t)$. Zbog trrika sa opasačem izraz za funkciju zapleta sadrži samo ***polovine*** uglova. I zaista, zbog polovina uglova matrica

sa dva elementa nije vektor, već je ***spinor***. (Pojam spinor je kovanica dobro poznatog fizičara Pola Erenfesta (Paul Ehrenfest) prema analogiji sa "vektor" i "tenzor"; engleski izgovor je "spinnor".) Za vrednosti $\beta = \gamma = 0$ dobija se predhodna talasna funkcija ψ.

Srugi sastojak koji nam je potreban je opis kretanja zapleta u spinu. Nasuprot slučaju sa Średingerom, samo kretanje u spinu mora da bude dodato u opis. Zaplet u spinu podrazumeva da je prostiranje talasa opisano proizvodom vektora talasa $\boldsymbol{k}$ i spin operatora $\boldsymbol{\sigma}$. ***Spin operator*** $\boldsymbol{\sigma}$ za upravo datu talasnu funkciju određen je kao vektor od tri matrice

$$\boldsymbol{\sigma} = \left(\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \right) \tag{131}$$

Ove tri matrice dobro su poznate ***Paulijeve matrice***.

Sada uzimamo opis usmerenja ose i opis spinovanja i unosimo ih oba, kao što smo činili za Średingerovu jednakost, u nerelativističku relaciju rasipanja $\hbar\omega = p^2/2m = \hbar^2 k^2/2m$. Potom dobijamo talasnu jednakost

$$i\hbar\partial_t \psi = -\frac{\hbar^2}{2m}(\sigma\nabla)^2 \psi \tag{132}$$

Ovo je ***Paulijeva jednakost*** za razvoj slobodne kvantne čestice sa spinom 1/2. Kao poslednji korak, uključujemo električni i magnetni potencijal, isto kako smo to učinili u slučaju Średingerove jednakosti. Ponovo koristimo minimalnu povezanost, zamenjujuči $i\hbar\partial_t$ sa $i\hbar\partial_t - qV$ i $-i\hbar\nabla$ sa $-i\hbar\nabla - q\boldsymbol{A}$, čime uvodimo električni naboj q i potencijale V i $\boldsymbol{A}$. (***Izazov 137s***). Malo algebre radi uvođenja spin operatora potom dovodi do poznatog potpunog oblika Paulijeve jednakosti.

$$(i\hbar\partial_t - qV)\psi = \frac{1}{2m}(-i\hbar\nabla - q\boldsymbol{A})^2 \psi - \frac{q\hbar}{2m}\boldsymbol{\sigma}\boldsymbol{B}\psi \tag{133}$$

gde se sada magnetno polje $\boldsymbol{B} = \nabla \times \boldsymbol{A}$ pojavljuje eksplicitno. Jednakost je, između ostalog, poznata zbog opisa kretanja atoma srebra koji imaju spin 1/2 u Štern-Gerlahovom eksperimentu. (***Vol. IV, strana 67***). Ovo je usled novog, poslednjeg člana na desnoj strani, koji se ne pojavljuje u Średingerovoj jednakosti. Novi član je čist spin efekt i predviđa g-faktor 2. U zavisnosti od usmerenja spina, predznak poslednjeg člana je ili pozitivan ili negativan; ovaj član stoga deluje kao potencijal zavisan od spina. Dve mogućnosti za usmerenje spina tako proizvode gornji i donji zrak atoma srebra koji su opaženi u Štern-Gerlahovom eksperimentu.

Ukratko, nerelativistički zaplet, koji se obrće kontinualno, ponavlja Paulijevu jednakost. Ovakav zaplet posebno predviđa da je za fermion sa elementarim nabojem g-faktor jednak 2.

OBRTNE STRELICE, INTERFERENCIJA I INTEGRALI PUTANJA

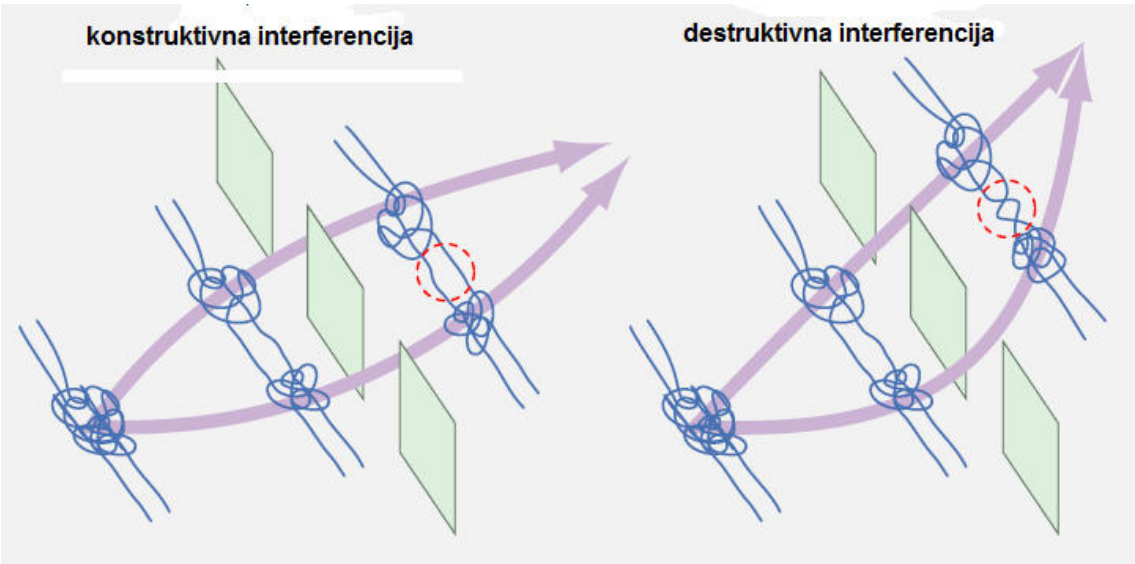
Drugi jednostavan način da se vizualno prikaže ekvivalentnost između modela niti i Paulijeve jednakosti koristi formulaciju kvantne teorije pomoću integrala putanje. Sećamo se da repovi zapleta ne mogu da se opažaju, a da jezgro zapleta određuje položaj i fazu kvantne čestice. Kretanje jezgra prema tome opisuje "putanju" čestice. Različite putanje nastaju usled različitih kretanja jezgra.

Kontinualno obrtanje jezgra zapleta odgovara obrtanju Fajnmanovih (Richard Feynman) malih strelica u njegovoj poznatoj popularnoj knjizi kvantne elektrodinamike. (***Ref. 163***).

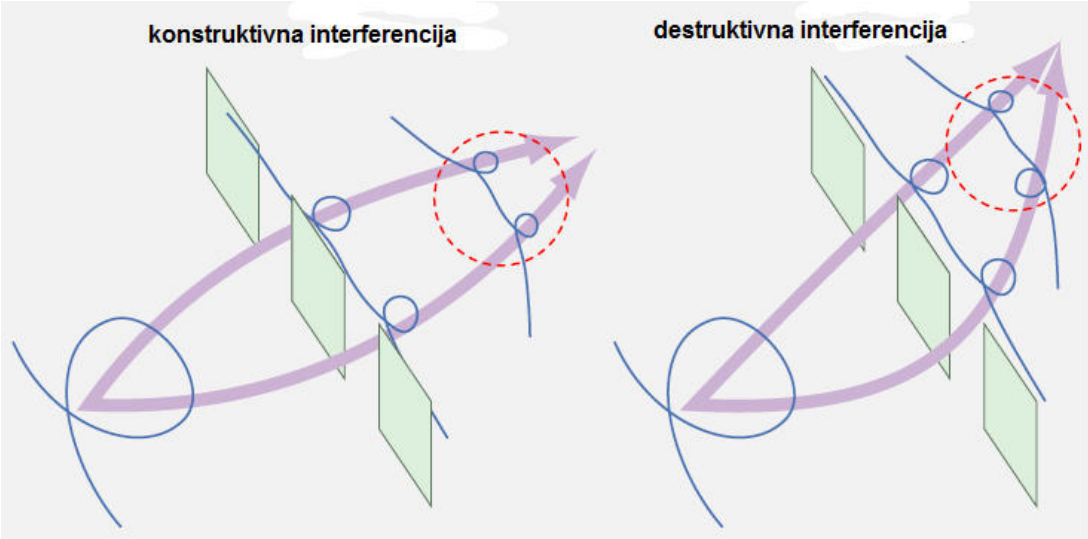
- Zbog svojih repova zaplet fermiona podvrgnut je statistici spinora i ponašanju obrtanja spinora.

Isto tako interferencija može da bude vizualno prikazana pomoću niti, korišćenjem osobina Hilbertovog prostora koja su određena u predhodnom tekstu. Interferencija fermiona prikazana je na ***slici 37***, a interferencija fotona na ***slici 38***. To dovodu do pravilnog ponašanja intereferencije za čestice sa spinom 1/2.

Kao što je otkrio Fajnman, kvantna teorija može da se posmatra kao rezultat interferencije svih mogućih putanja jezgra zapleta. Opisujući čestice sa masom kao jezgra koja se obrću, dovodi nas neposredno do poznatog opisa integrala putanje u kvantnoj teoriji.



Slika 37 Zaplet fermiona prolazi kroz dvostruki prorez: konstruktivna interferencija (levo) i destruktivna interferencija (desno)



Slika 38 Eksperiment sa dvostrukim prolazom i fotonom: konstruktivna interferencija (levo) i destruktivna interferencija (desno)

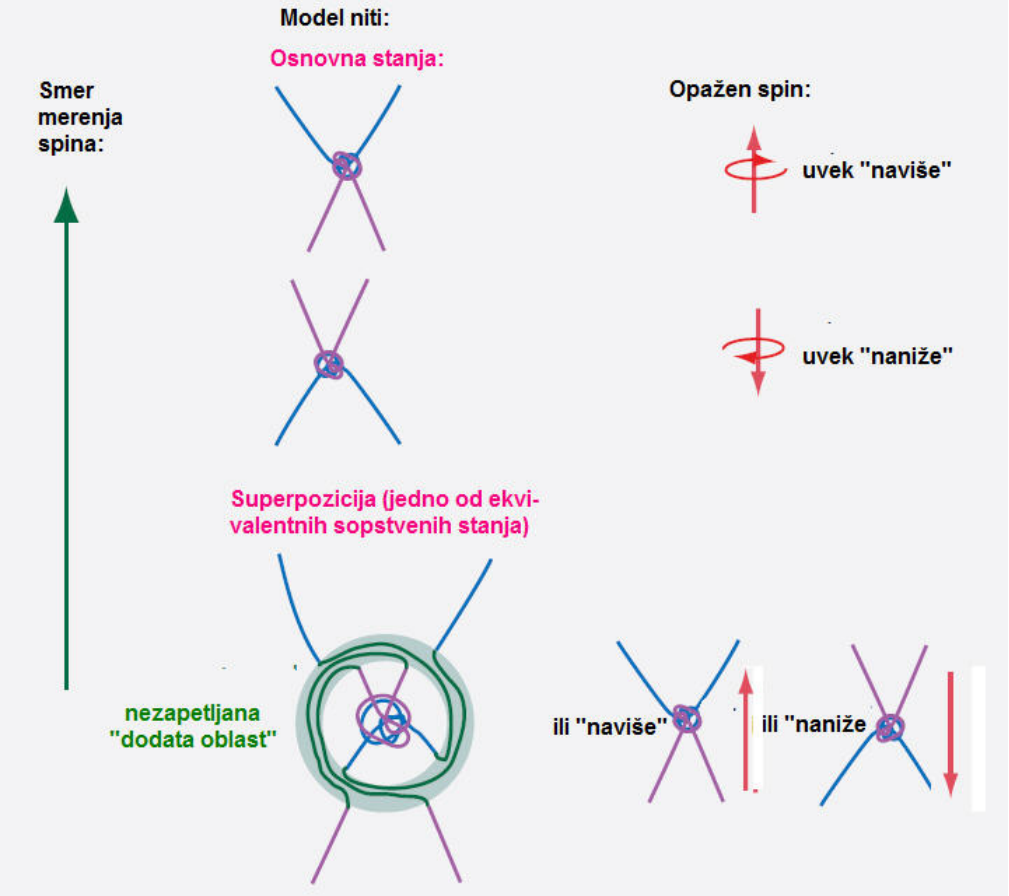
MERENJE I URUŠAVANJE TALASNE FUNKCIJE

Merenje kvantnog sistema u superpoziciji opaženo je da u prirodi daje jedno od mogućih spostvenih vrednosti i da priprema sistem u odgovarajuću sopstvenu vrednost. Verovatnoća svakog ishoda merenja u prirodi zavisi od sačinoica ove sopstvene vrednosti u superpoziciji.

Da bi se postavio problem u kontekst, ovde je mali podsetnik iz kvantne mehanike. (***Vol. IV, strana 113***). Svaki merni aparat pokazuje rezultate merenja. Prema tome, svaki merni aparat je uređaj sa pamćenjem. (Ukratko, on je ***klasičan***.). Svi uređaji sa pamćenjem sadrže kupatilo. Stoga svaki merni aparat spaja kupatilo sa sistemom kojeg meri. Spajanje određuje i zavisi od opažanja koje se meri aparatom. Svako spajanje kupatila sa ***kvantnim*** sistemom dovodi do dekoherencije. Dekoherencija dovodi do urušavanja verovatnoća i talasne funkcije. Ukratko, urušavanja i verovatnoće merenja neophodni su automatski i u kvantnoj teoriji.

Model niti opisuje proces merenja na precizno isti način kao i standardna kvantna teorija; osim toga, on proces predstavlja ***vizualno.***

- Merenje je modelirano kao izobličenje niti uzrokovano uređajem merenja koji "vuče" zaplet prema rezultujućoj sopstvenoj vrednosti.
- Ovo vučenje niti modelira i vizualno pokazuje ***urušavanje*** talasne funkcije.



Slika 39 Merenje superpozicije spina: dodata oblast nestaje ili prema spoljnoj ili prema unutrašnjoj strani

Primer merenja prikazan je na ***slici 39***. Kada je merenje izvedeno na superpoziciji, ***nezapletena "dodata oblast" može da se zamisli da se skuplja do nestajanja***. Da bi se to dogodilo, jedno od osnovnih sopstvenih stanja mora da "pojede" drugo: to je urušavanje talasne funkcije. U primeru na slici, dodata oblast može da nestane ili prema spoljnoj ili prema unutrašnjoj strani. Izbor je nastao usled kupatila koje se spojilo sa sistemom u toku merenja; kupatilo stoga određuje ishod merenja. Isto tako zaključujemo da će verovatnoća merenja posebnog sopstvenog stanja da zavisi od (izmerene) zapremine koju će sopstveno stanje da zauzme u superpoziciji.

Ova vizualna predstava urušavanja talasne funkcije takođe pojašnjava da urušavanje nije ograničeno bilo kojom brzinom, pošto se ne prenose ni energija ni informacije. Ustvari, urušavanje se događa usled premeštenih ukrštanja, ali ne proizvodi bilo koje promene ukrštanja.

Ukratko, model niti opisuje merenje na potpuno isti način kao obična kvantna teorija. Osim toga, niti ***prikazuju urušavanje talasne funkcije kao izobličenje oblika usled superpoziciju zapleta na osnovni zaplet***.

SKRIVENE PROMENLJIVE I KOHEN-ŠPEKEROVA TEOREMA

Na prvi pogled izgleda da model niti upada u klopku pri uvođenju skrivenih promenljivih u kvantnu teoriju. Može se zaista tvrditi da oblici (i kolebanja) miti imaju ulogu kod skrivenih promenljivih. S druge strane, dobro je poznato da su nestandardne skrivene promenljive u kvantnoj teoriji nemoguće, kao što polazuje Kohen-Špekerova teorema (za dovoljan broj dimenzija Hilbertovog prostora). (***Ref. 166***). Da li je model niti pogrešan? Nije.

Sećamo se da niti ne mogu da se opažaju. Naročito nisu fizička opažanja oblici niti, pa stoga nisu ni fizičke veličine. Čak i kada bismo pokušali da proglasimo oblike niti za fizičke promenljive, razvij oblika niti mogao bi da se opaža preno posledičnih promena ukrštanja. A promene ukrštanja se razvijaju usled uticaja okoline, koja se sastoji od svih ostalih niti u prirodi, uključujući i one samog prostor-vremena. Prema tome

- Razvoj oblika niti i promene ukrštanja je ***smislen***.

Prema tome, model niti nije protivrečan Kohen-Špekerovoj teoremi. Rečeno jednostavnim jezikom, u kvantnoj teoriji skrivene promenljive nisu problem, ako su osobine okoline, a ne samog kvantnog sistema. To je preciznno slučaj za model niti. Za kvantni sistem model niti ne daje skrivene promenljive. Ustvari, model niti za kvantni sistem ne daje nikakve promenljive više od onih uobičajenih u kvantnoj teoriji. I kako se očekuje i zahteva od svakog modela koji prikazuje dekoherenciju, model niti dovodi do smislenog-opisa prirode na bazi verovatnoće.

Ukratko, uprkos korišćenju kolebajućih zapleta kao osnovne strukture, model niti je ekvivalentan uobičajenoj kvantnoj teoriji. Model niti ne sadrži ništa više i ništa manje no uobičajena kvantna teorija.

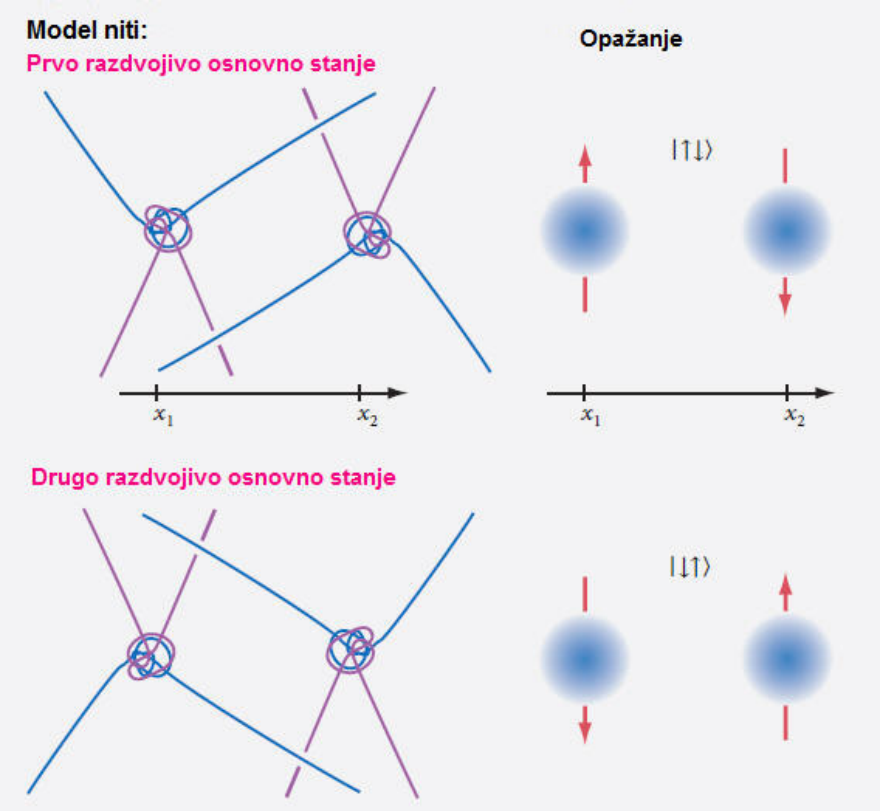
STANJE SA VIŠE ČESTICA I ZAPLITANJE

Kvantna stanja u prirodi sa dve ili više čestica mogu da budu ***zapletena***. Zapletena stanja su stanja sa više čestica koje se ne mogu razdvajati. Zapletena stanja, jedna od najzačuđujućih kvantnih pojava, posebno u slučaju makroskopskog zapleta, još uvek se istražuju u mnogim eksperimentima. Otkrićemo da model niti njih prikazuje jednostavno i jasno.

Da bi se opisalo zaplitanje najpre je potrebno da se razjasni prikazivanje stanja sa više čestica. U modelu niti

- ***Stanje sa više čestica*** je sastavljeno od nekoliko zapleta.

Na takav način talasna funkcija *N* čestica određuje *N* vrednosti u svakoj tački prostora, po jednu vrednost za svaku česticu. Ovo je moguće pošto je u modelu niti svaki svaki zaplet čestice odvojen od svih ostalih.



slika 40 Dva primera razdvojenih čestica sa spinom u razdvojivom stanju: opažanje i model niti

Obično je talasna funkcija N čestica opisana funkcijom jedinstvene vrednosti u 3*N* dimenzija. Manje je poznato da je talasna funkcija jedinstvene vrednosti za *N* čestica u 3*N* dimenzija ekvivalentna talasnoj funkciji sa *N* vrednosti u tri dimenzije. Obično se ne razmatraju funkcije sa *N* vrednosti; osećamo se neprijatno uz ovaj pojam. Međutim, model niti prirodno određuje vrednosti *N* talasne funkcije u svakoj tački u prostoru: svaka čestica ima sopstven zaplet, a svaki zaplet daje za svaku tačku u pristoru, preko uprosečavanja u kratkom vremenu, jednu kompleksnu vrednost sa veličinom i fazom. Na taj način je model niti sposoban da opiše *N* čestica u samo tri dimenzije.

Drugim rečima, model niti ne opisuje *N* čestica sa jednom funkcijom u 3*N* dimenzija; on opisuje stanje sa više čestica sa *N* funkcija u tri dimenzije. Na taj način model niti ostaje blizak svakodnevnom životu što je

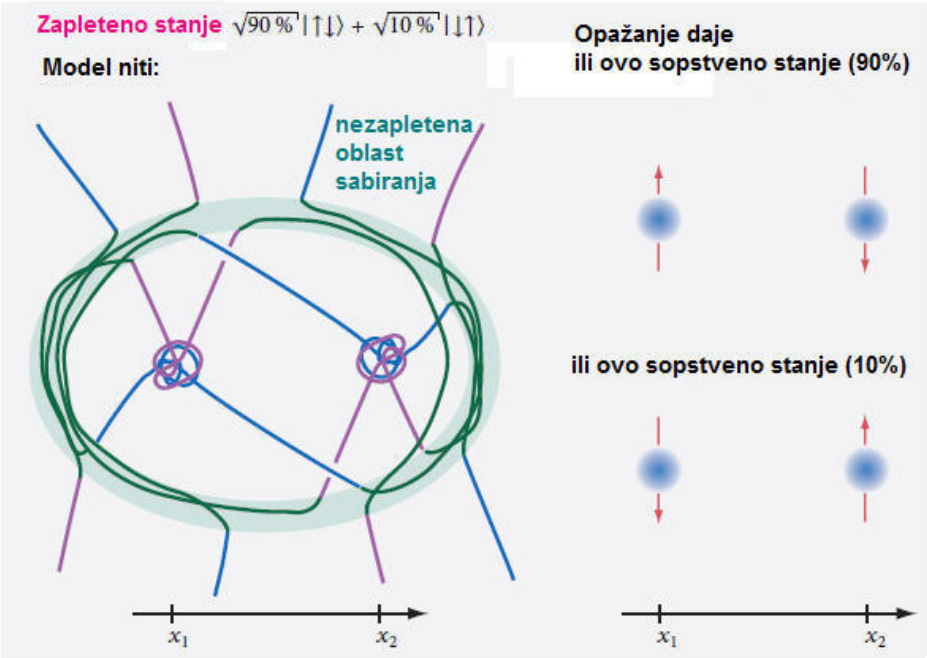
moguće više. U literaturi se mogu naći mnogi netačni iskazi, mnogi autori netačno tvrde da je u tri dimenzije nemoguća kvantna teorija za više čestica. Neki autori čak tvrde, suprotno eksperimentima, da nije moguće prikazivanje u tri dimenzije stanje sa više čestica. Svi ovi dokazi ne razmatraju mogućnost određivanja potpuno odvojenih talasnih funkcija za svaku česticu u tri dimenzije. (Mora sa se kaže da je ova neobična mogućnost teško zamisliva ako su talasne funkcije opisane kao neprekidne funkcije.) Međutim, bistri mislioci, kao što je Ričard Fajnman (Richard Feynman), uvek predstavljaju talasnu funkciju za više čestica u tri dimenzije. (***Ref. 163***). Takođe i u toj oblasti model niti daje osnovnu sliku za Fajnmanov pristup. To je druga situacija u kojoj model niti odbacuje navike netačnog razmišljanja i podržava naivno viđenje kvantne teorije.

Sada kada imamo određeno stanje sa više čestica možemo da odredimo i zapletena stanja.

- ***Zapetljano stanje*** je nerazdnojiva superpozicija razdvojivih stanja više čestica. Stanje je razdvojivo kada njegovi zapleti mogu da se povlače, a da se njihovi repovi ne zapetljaju.

Sada ćemo da pokažemo da su u predhodnom tekstu iznete odrednice za superpozicije i za merenja uz korišnje niti, dovoljne da se opiše zaplitanje.

Kao prvi primer istražujemo zapetljana stanja spinova dva razmaknuta fermiona sa masom. To je poznat primer koji je predložio David Bom (David Bohm). U modelu niti su dve razmaknute čestice sa spinom 1/2 u ***razdvojenom*** stanju modelirane kao dva razmaknuta posebna zapleta identičnih topologija. ***Slika 40*** prikazuje dva razdvojena osnovna stanja, naime dva stanja sa spinom 0 data sa $|\uparrow\downarrow\rangle$ i sa $|\downarrow\uparrow\rangle$. Takva stanja mogu da se ponove i u eksperimentima. Primećujemo da radi ostvarivanja spina 0 moraju repovi da budu zamišljeni kako se negde ukrštaju, kao što je na slivci prikazano.

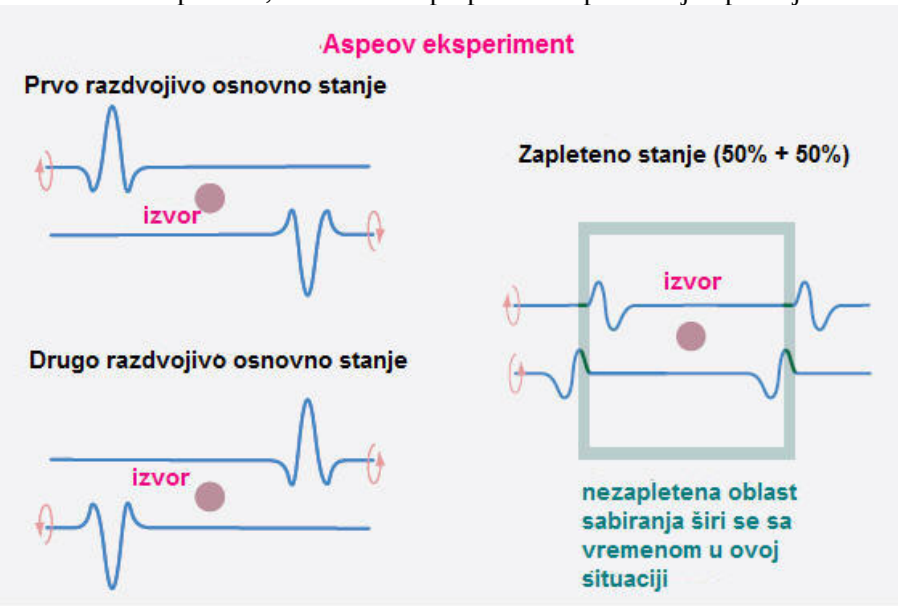


Slika 41 Zapleteno stanje spina dve razdvojene čestice

Sada možemo da nacrtamo superpoziciju $\sqrt{90\%}|\uparrow\downarrow\rangle + \sqrt{10\%}|\downarrow\uparrow\rangle$ dva osnovna stanja sa spinom 0. Jednostavno koristimo odrednicu sabiranja i nalazimo stanje koje je prikazano na ***slici 41***. Zatim možemo da koristimo odrednicu merenja da bismo proverili da li je stanje zaista zapleteno. Ako merimo usmereenost spina jedne od dve čestice, nezapletena dodata oblast nestaje. Rezultat merenja biće stanje ili unutar dodate oblasti ili stanje izvan nje. A pošto su repovi dve čestice povezani, nezavisno od ishoda posle merenja, spin dve čestice biće uvek usmeren u suprotnim smerovima. To se događa za svako rastojanje čestica. Uprkos ovom urušavanju izuzetno brzom i prividno bržem od svetlosti, nikakva energija ne putuje brže od svetlosti. Model niti stoga prikazuje tačno opaženo ponašanje zapetljanih stanja spina 1/2.

Drugi primer je zaplitanje dva fotona, dobro poznat Aspeov (Alain Aspect) eksperiment. Isto tako u ovom slučaju jako su interesantna zapletena stanja sa spinom 0, to jest zapletena stanja fotona sa suprotnih helikoidnosti (spin). I ponovo, model niti pomaže da se situacija vidno predstavi. Ovde koristimo model niti za foton koji ćemo usvojiti tek kasnije. (***Strana 174***). ***Slika 42*** prikazuje model niti dva razdvojena

osnovna stanja i model niti zapletenog stanja. Merenje helikoidnosti fotona u zapletenom stanju ponovo će da dovedu do jednog od dva osnovna stanja. A čim se izmeri helikoidnost fotona, helikoidnost njegovog pratioca urušava se na suprotnu vrednost, nezavisno od rastojanja! Eksperimentalno, efekt je bio opažen i na rastojanju od više kilometara. (***Ref. 164***). Uprkos izuzetno brzom urušavanju, ponovo nema energije koja putuje brže od svetlosti. I ponovo, model niti u potpunosti reprodukuje opažanja.



Slika 42 Osnovna stanja i zapleteno stanje dva udaljena fotona koji putuju u suprotnim smerovima, sa ukupnim spinom 0.

MEŠANA STANJA

Mešana stanja su statističke celine čistih stanja. U modelu niti,

- ***Mešano stanje*** je (izmerena) privremeno smenjivanje čistih stanja.

Mešana stanja su važna u razmatranju termodinamičnih veličina. Njih smo pomenuli da bismo dovršili ekvivalentnost stanja koja se pojavljuju u kvantnoj teoriji uz one koje daje model niti. Ovu temu nećemo da pratimo dalje.

DIMENZIONALNOST PROSTOR-VREMENA

"Priroda se sastoji od čestica koje se kreću u praznom prostoru." Ovo je rekao Demokrit pre 2500 godina. Danas znamo da je to uprošćen opis polovine fizike: to je uprošćavanje opisa kvantne teorije. Zapravo, Demokritov iskaz zajedno sa nitima, dopušta nam da tvrdimo da fizički prostor ima tri dimenzije, što ćemo da uvidimo sada.

Zaključivanje broja dimenzija fizičkog prostora iz prvog načela star je i težak problem. Teškoću predstavlja takođe i nepostojanje alternative. Naše istraživanje o osnovama modela niti pokazalo je da ljudi, životinje i mašine koriste uvek tri dimenzije prostora da bi opisali svoju okolinu. (***Strana 130***). Oni i ne mogu drugačije. Ljudi, životinje i mašine ne mogu da razgovaraju ni da misle bez tri dimenzije kao prostora pozadine.

Međutim, kako možemo da pokažemo da je ***fizički prostor*** – ***ne prostor pozadine*** koji nam je potreban za razmišljanje – trodimenzionalan i da mora da bude takav? Potrebno je da pokažemo da: 1) svi eksperimenti prikazuju taj rezultat i 2) da nijedan drugi broj dimenzija ne daje dosledan opis prirode.

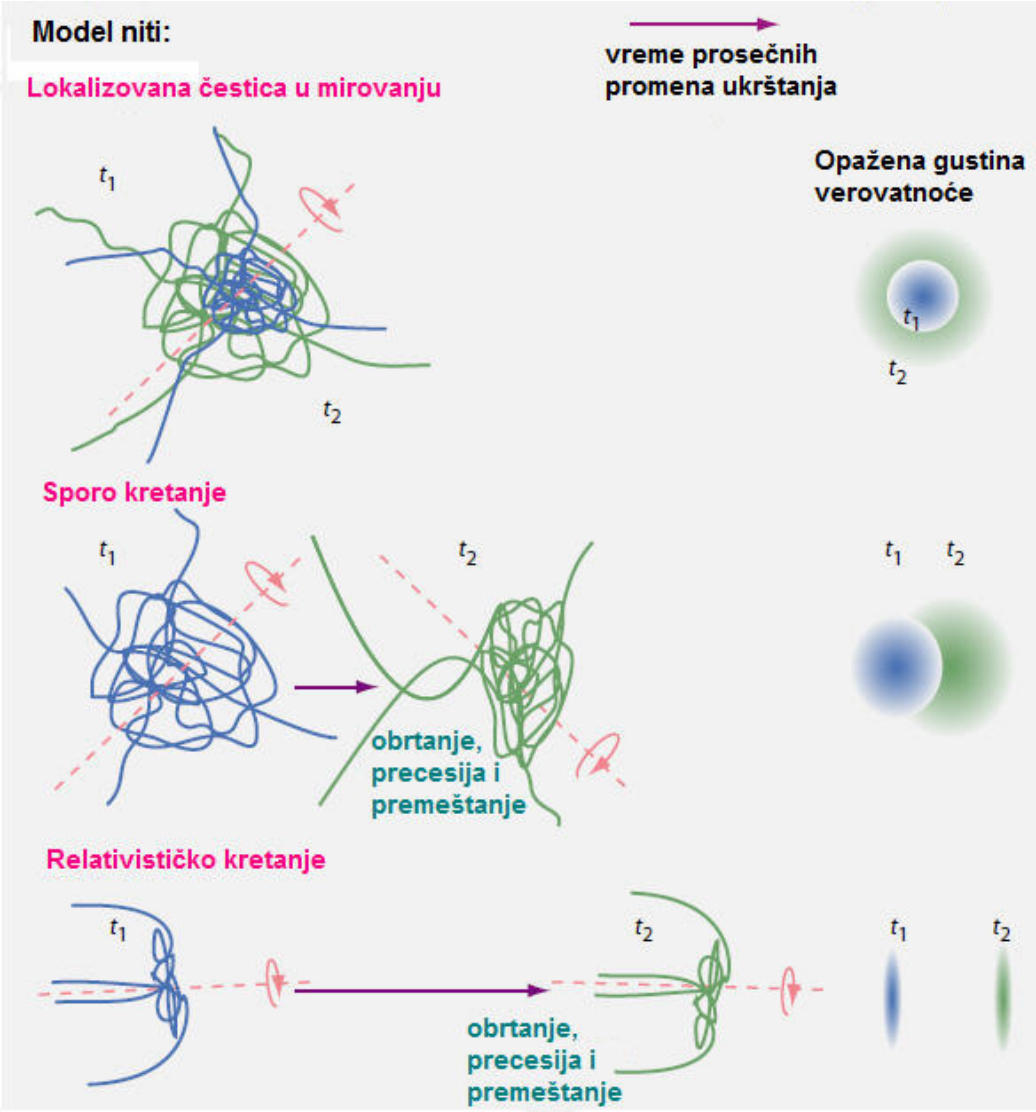
U prirodi, a takođe i u modelu niti, sve dok čestice mogu da se odrede one mogu da se obrću jedne oko drugih mogu i da se razmenjuju. Nijedan eksperiment nije bilo kada izvršen, ili da je predložen, koji bi izmenio ovo opažanje. Opažene osobine obrtanja, spina 1/2, razmene čestica i sva druga opažanja potvrđuju da prostor ima tri dimenzije. Položaj i usmerenost čestice u modelu niti u suštini su trodimenzionalne veličine; fizički prostor je prema tome trodimenzionalan i svim situacijama u kojima može da bude određen. (Jedina situacija u kojoj je ova odrednica nemoguća su horizonti i Plankova razmera.) Ukratko, nalazi se da su i priroda i model niti trodimenzionalni u svim eksperimentalno dostupnim

razmerama energije. Nasuprot tome, otkrivanje dodatne dimenzije prostora direktno bi učinio model niti nevažećim.

Priroda ima tri dimenzije. Jedini način da se predvidi ovaj rezultat je da se pokaže kako nijedan drugi broj dimenzija nije moguć. Broj dimenzija prostora može da nastane samo iz dokaza samodoslednosti. A zanimljivo je, model niti proizvodi takav dokaz.

U modelu niti čvorove i zaplete nije moguće konstruisati u fizičkim prostorima čije su dimenzije ***drugačije*** od tri. Zapravo, matematičari mogu da pokažu da u prostoru sa četiri dimenzije nijedan čvor i nijedan zaplet ne mogu da se razvežu. (U ovom dokazu vreme nije i ne može da se ubroji kao četvrta dimenzija, a za niti se predpostavlja da su jednodimenzionalni objekti.) Još gore, u modelu niti spin ne može da postoji u prostorima koji imaju više ili manje od tri dimenzije. Isto tako vakuum i njegova kvantna kolebanja ne mogu da postoje u više od tri dimenzije. Štaviše, u drugom broju dimenzija nije moguće da se formuliše osnovno načelo. Ukratko, model niti za materiju i za opažanja, bilo životinja, ljudi ili mašina, moguća su samo u tri dimenzije prostora Nikakav opis prirode sa pozadinom ili fizičkim prostorom sa više ili manje od tri dimenzije nije moguć pomoću niti. Nasuprot tome, konstruisanje takvog opisa učinio bi model niti nevažećim.

Ista vrsta dokaza može da se prikupi za jednodimenzionalnost fizičkog vremena. Može da bude zabavno da se istraže – radi skraćivanja vremena. (***Izazov 138e***). Ukratko, model niti funkcioniše samo u 3+1 dimenziji prostor-vremena; on de dopušta bilo koji drugi broj dimenzija. Prema tome, ovim smo prectrali drugo pitanje iz milenijumske liste. (***Strana 128***)



Slika 43 Zapleti u mirovanju, pri maloj brzini i pri relativističkoj brzini

OPERATORI I HAJZENBERGOVA SLIKA

Ermitski operatori u kvantnoj teoriji imaju važnu ulogu. U modelu niti ***ermiteani*** ili samoadjungovani operatori su operatori koji ostavljaju invarijantnom topologiju zapleta. U kvantnoj teoriji unitarni operatori takođe imaju važnu ulogu. U modelu niti ***unitarni operatori*** su operatori koji izobličavaju zapleta na način u kojem odgovarajuća talasna funkcija zadržava normu, to jest, takvi zapleti zadržavaju svoju topologiju.

Fizičari znaju dva načina da opišu kvantnu teoriju. Jedan način je da se opiše razvoj pomoću kvantnog stanja nezavisnog od vremena – ***Šredingerovom slikom***, koju ovde koristimo – i drugi način je da se opiše razvoj pomoću operatora zavisnih od vremena. U ovoj, takozvanoj ***Hajzenbergovoj slici***, razvoj u vremenu je opisan operatorima.

Dve slike kvantne teorije su ekvivalentne. U Hajzenbergovoj slici, osnovno načelo, ekvivalentnost promena ukrštanja sa $\hbar$, postaje iskaz o ponašanju operatora. (***Ref. 165***). Još 1987. godine Luj Kaufman (Louis Hirsch Kauffman) je tvrdio da je relacija operatora komutacije za količinu kretanja i položaj

$$px - xp = \hbar i \tag{134}$$

povezana sa promenom ukrštanja. U ovom poglavlju nalazi se potvrda ove predpotavke.

U kvantnoj mehanici relacija komutacije sledi iz odrednice za operator količine kretanja $p = \hbar k$, $k = -i\partial_x$, budući da su operatori vektori talasa. Činilac $\hbar$ određuje jedinicu količine kretanja. Vektor talasa prebrojava broj bregova talasa. Zatim, u modelu niti, stanje obrtanja za ugso π opisan je množenjem sa i. Prebrojavanje bregova talasa jedino je moguće korišćenjem činioca i, pošto je ovaj činilac jedina osobina koja razlikuje bregove od dolina. Ukratko, relacija komutacije sledi iz osnovnog načela modela niti.

LAGRANŽIJANI I PRINCIP NAJMANJEG RADA

Pre no što smo izveli Dirakovu jednakost, pokazali smo da model niti prirodno dovodi do opisa kretanja pomoću lagranžijana.

Rad je u prirodi opažanje mereno umnošcima prirodne jedinice rada, kvanta rada $\hbar$. Rad je osnovno opažanje u prirodi, jer je ***rad mera ukupnih promena koje se događaju u procesu***.

U modelu niti,

- ***Rad*** W u fižičkom procesu je opažen broj promena ukrštanja niti. Vrednosti rada su umnošci $\hbar$.

Primećujemo da ovi umnošći, ako se uzme njihov prosek, ne moraju da budu celobrojni umnošci. Napominjemo da je zbog ove odrednice ***rad invarijanta za posmatrača***. Ova važna osobina je zato automatska u modelu niti.

U prirodi je energija rad u vremenu. Zato u modelu niti imamo:

- ***Energija*** u sistemu je broj promena ukrštanja u vremenu.

Kada se u prirodi kvantne čestice kreću, njihova faza se menja linearno u vrremenu. Drugim rečima, "strelice" predstavljaju fazu slobodne čestice koja se obrće konstantnom ugaonom učestanošću. Videli smo da je u modelu niti "strelica" predstavljena kao (polovina) ugla usmerenja jezgra zapleta, kao i da je obrtane strelice (polovina) obrtanja jezgra zapleta.

- ***Kinetička energija*** T čestice je broj promena ukrštanja u vremenu izazvana kolebanjem oblika jezgra zapleta koje se neprekinuto obrće.

Mi ćemo sa $\mathcal{T}$ da označimo odgovarajuću zapreminsku gustinu kinetičke energije: $\mathcal{T} = T/V$. Lagranžijan je praktična veličina za opis kretanja u prirodi. Za slobodnu česticu gustina lagranžijana $\mathcal{L} = \mathcal{T}$ je prosto gustina kinetičke energije, a rad $W = \int \mathcal{L} \mathrm{d}V\mathrm{d}t = Tt$ proizvod je kinetičke energije i vremena. U modelu niti slobodna čestica se konstantno obrće i zaplet napreduje. Direktno vidimo da ovaj konstantni razvoj minimizira rad W za česticu, s obzirom na stanja na početku i na kraju.

Ova pojava je interesantnija za čestice u interakciji. Interakcije mogu da se opišu potencijalnom energijom U, koja je, uopštenije govoreći, energija polja koje proizvodi interakciju. U modelu niti

- ***Potencijalna energija*** U je broj promena ukrštanja u vremenu koje izaziva polje interakcije.

Sa $\mathcal{U}$ ćemo označitiodgovarajuću zapreminsku gustinu potencijalne energije: $\mathcal{U} = U/V$. Ukratko, u modelu niti interakcija menja stepen obrtanja i linearnog kretanja zapleta čestice.

U modelu niti ***razlika*** između kinetičke i potencijalne energije je prema tome veličina koja opisuje koliko se sistem sastoji od ***promena*** zapleta i polja u datom vremenu. Ukupna promena je vremenski integral svih trenutnih promena. Drugim rečima, u modelu niti imamo:

- ***Gustina lagranžijana*** $\mathcal{L} = \mathcal{T} - \mathcal{U}$ je broj promena ukrštanja po zapremini i u vremenu, prosečno u više Plankovih razmera.
- ***Fizički rad*** $W = \int L\mathrm{d}t = \iint \mathcal{L}\mathrm{d}V\mathrm{d}t$ u fizičkom procesu je opažen broj promena ukrštanja niti. Vrednost rada W_{if} između početnog stanja ψ_i i krajnjeg stanja ψ_f data je sa

$$W_{if} = \langle \psi_i | \int \mathcal{L}\,\mathrm{d}t | \psi_f \rangle = \langle \psi_i | \int (\mathcal{T} - \mathcal{U})\,\mathrm{d}t | \psi_f \rangle \tag{135}$$

Pošto je energija povezana sa promenama ukrštanja, prirodno je da ***imaju prednost*** kolebanja niti koja ***ne*** izazivaju promene ukrštanja. Ukratko, model niti izražava

- Razvoj zapleta ***minimizira rad W***.

U modelu niti ***načelo najmanjeg rada pojavljuje se prirodno***. U modelu niti razvoj ima najmanji rad kada se pojavljuje uz najmanji broj promena ukrštanja. Uz ovu povezanost može da se pokaže da model niti podrazumeva Švingerovo (Julian Schwinger) načelo kvanta rada. (***Izazov 139e***).

Da bi se izračunalo kvantno kretanje uz načelo najmanjeg rada, potrebno je da odredimo kinetičku i potencijalnu energiju u pojmovima niti. Postoje razne mogućnosti za gustine Lagranžijana za datu jednakost razvoja; međutim, sve su one ekvivalentne. U slučaju slobodne Šredingerove jednakosti jedna od mogućnosti je:

$$\mathcal{L} = \frac{i\hbar}{2}\left(\bar{\psi}\,\partial_t\psi - \partial_t\bar{\psi}\psi\right) - \frac{\hbar^2}{2m}\nabla\bar{\psi}\nabla\psi \tag{136}$$

Na ovaj način princip najmanjeg relovanja može da se koristi da bi se opisao razvoj Šredingerove jednakosti. Ista je mogućnost za situacije sa potencijalima, za Paulijevu jednakost i za sve druge jednakosti razvoja kvantnih čestica.

Na taj način zadržavamo da model niti objašnjava načelo najmanjeg delovanja.

SPECIJALNA TEORIJA RELATIVNOSTI: VAKUUM

Postoji u prirodi invarijantna granica brzine energije *c*, naime brzina svetlosti i svih ostalih zračenja bez mase. Specijalna teorija relativnosti je opis posledica ovih opažanja, za slučaj ravnog prostor-vremena.

Napominjemo da specijalna teorija relativnosti koja podrazumeva i zahteva da ravan vakuum izgleda isto za sve inercijske posmatrače. U modelu niti ideja ravnog vakuuma kao skupa kolebajućih niti bez osobina koje nisu vezane ni povezane, automatski podrazumeva da za svakog inercijskog posmatrača ravan vakuum nema materijalni sadržaj, nema sadržaj energije, da je izotropan i daje homogen. Model niti stoga ispunjava osnovne zahteve specijalne teorije relativnosti.

Primećujemo da je u modelu niti vakuum jedinstven, a energija vakuuma, ravnog beskonačnog vakuuma, je tačno nula. U modelu niti nema razlike u energiji vakuuma i ne postoji stoga doprinos kosmološkoj konstanti iz kvantne teorije polja. Naročito ne postoji potreba za supersimetrijom da bi se objasnila mala gustina energije vakuuma.

SPECIJALNA TEORIJA RELATIVNOSTI: INVARIANTA GRANICE BRZINE

U modelu niti čestice bez mase nevezane su i nezapletene. Iako ćemo da izvedemo model niti za fotone tek kasnije, koristimo ga već ovde, kako bismo ubrzali razmatranje. U modelu niti foton je opisan jednostrukom, spiralno izobličenom nevezanom niti, kao što je prikazano na ***slici 50***. (***Strana 174***). Prema tome, možemo da odredimo:

- Plankova brzina *c* je opažena prosečna brzina promena ukrštanja usled fotona.

Pošto odrednica koristi promene ukrštanja i čestice bez mase, brzina svetlosti *c* je ***brzina energije***. Brzina svetlosti *c* takođe je prosek u dugom vremenu. U stvari, kao što je dobro poznato iz kvantne teorije polja (***Ref. 167***), zbog relacije neodređenosti, pojedinačni fotoni mogu da putuju brže ili sporije od svetlosti, međutim, verovatnoća velikih odstupanja je izuzerno mala.

Linearno kretanje helikoidno izobličene niti fotona kroz niti vakuuma slično je kretanju vadićepa kroz plutu. Razlikuje se od linearnog kretanja zapleta materije kroz vakuum, koje koristi trik sa opasačem. Trik sa opasačem usporava fermione, premda detalji nisu jednostavni, kao što ćemo da otkrijemo u daljem tekstu. Ukratko, saznaćemo da se zapleti materije kreću uvek ***mnogo sporije od svetlosti***. (***Strana 262***). Brzina *c* je ***granična brzina***.

Brzina *c* je određena kao prosek, pošto, kao što je dobro poznato u kvantnoj teoriji polja, postoji mala verovatnoća da se svetlost kreće brže ili sporije od *c*. Ali prosečan rezultat *c* biće isti za svakog posmatrača. Vrednost brzine c je prema tome ***invarijanta***.

Ajnštajn je 1905. godine pokazao da tri pomenute osobine: brzina svetlost-energie, granična brzina i invarijanta brzine – podrazumevaju Lorencove transformacije. Posebno tri osobine brzine svetlosti *c* podrazumevaju da je energija *E* čestice sa masom *m* u vezi sa njenom količinom kretanja *p* kao

$$E^2 = m^2c^4 + c^2p^2 \quad \text{ili} \quad \hbar^2\omega^2 = m^2c^4 + c^2\hbar^2k^2 \tag{137}$$

Ovaj rezultat rasipanja stoga važi takođe za čestice sa masom načinjene od zapletenih niti – premda masu zapleta ne možemo da izračunamo. (To ćemo učiniti kasnije.) (***Strana 267***).

Treba li da budemo iznenađeni rezultatom? Ne. U osnovnom načelu, u odrednicu za promenu ukrštanja, mi smo umetnuli brzinu svetlosti kao odnos između Plankove dužine i Plankovog vremena. (***Strana 119***). Prema tome, određivanjem promene ukrštanja, kako smo učinili, mi smo posredno izrazili invarijantnost brzine svetlosti.

Kolebajuće niti podrazumevaju da za svakog inercijskog posmatrača ravan vakuum nema ni materiju niti sadrži energiju. Usled kolebanja niti ravan vakuum je takođe homogen i izotropan za svakog inercijskog posmatrača. Prema tome, pored 3+1 dimenzije prostor-vremena zaključene u predhodnom tekstu (***strana 159***), mi smo sada pokazali da ravan vakuum ima Poenkareovu simetriju. Time je rešeno još jedno pitanje iz milenijumske liste. (***Strana 128***).

Međutim, jedan problem je ostao otvoren: kako se zapravo zapleti kreću kroz mrežu kojom je opisan vakuum? To ćemo razjasniti u daljem tekstu. (***Strana 262***).

Relativistička relacija rasipanja (***strana 150***) razlikuje se od nerelativističkog slučaja na dva načina. Prvo, razmera energije je pomerena i sada obuhvata i energiju mirovanja $E_0 = c^2m$. Drugo, precesija spina nije više nezavisna od od brzine čestice; za relativističke čestice spin leži u blizini smera kretanja. Oba efekta slede iz postojanja granične brzine.

Ako spin zanemarimo, možemo da koristimo relaciju relativističkog rasipanja da bismo direktno izveli dobro poznatu jednakost Klajn-Gordona (Klein-Gordon) za razvoj talasne funkcije

$$-\hbar^2\partial_{tt}\psi = m^2c^4 - c^2\hbar^2\nabla^2\psi \tag{138}$$

Drugim rečima, model niti podrazumeva da relativistički zapleti slede Klajn-Gordonovu jednakost. Sada se nadovezujemo na ovaj rezultat kako bismo izveli Dirakovu jednakost za relativističko kvantno kretanje.

DIRAKOVA JEDNAKOST IZVEDENA IZ NITI

Relativistička jednakost Klajn-Gordona predpostavlja da su efekti spina zanemarljivi. Ova privbližnost podbacuje pri opisu većine eksperimenata. Precizan opis relativističke elementarne čestice mora da obuhvata i spin.

Do sada smo izvodili Šredingerovu jednakost koristeći relaciju između faze i kvanta rada, koristeći nerelativističku relaciju energija-količina kretanja i zanemarujući spin. U sledećem koraku mi ćemo da izvedemo Paulijevu jednakost uključujući osobinu spina 1/2. U koraku koji sledi izvodimo jednakost Klajn-Gordona koristeći opet relaciju između faze i kvanta rada, ovog puta relativističku relaciju energija-količina kretanja, ali predpostavljajući da je spin nula. Konačan i tačan opis elementarnog fermiona, Dirakova jednakost, rezultat je kombinacije sva tri sastojka: 1) relacija između kvanta rada i faze talasne funkcije, 2) relativistička relacija masa-energija i 3) elekt spina 1/2. To sada možemo to da uradimo pošto su sva tri sastojka prikazana modelom niti.

Podsetimo se izvođenja Dirakove jednakosti koje se nalazi u udžbenicima. Glavna opažanja o spinu u relativističkom smislu je postojanje stanja hiralnosti desne ruke i leve ruke: spin može da ima precesiju u dva suprorna smisla oko ose količine kretanja, Osim toga, za čestice sa masom dva stanja hiralnosti su

pomešana. Postojanje dve hiralnosti zahteva opis čestice sa spinom pomoću talasne funkcije koja ima ***četiri*** kompleksne komponente, stoga ***dva puta više*** od broja komponenti koje se javljaju u Paulijevoj jednakosti. U stvari, Paulijeva jednakost implicitno pretpostavlja samo jedan, dati znak za hiralnost, iako to ne naznačava. Ovaj prost opis moguć je zbog nerelativističkih situacija, koje izražavaju različite hiralnosti koje se ne mešaju.

Doslednost zahteva da svaka od četiri komponente talasne funkcije čestice sa relativističkim spinom moraju da slede relativističku relaciju energija-količina kretanja, te prema tome jednakost Klajn-Gordona. (***Ref. 168***). Poznato je da je ovaj zahtev dovoljan da se izvede Dirakova jednakost. (***Ref. 169***). Jedno od jednostavnijih izvođenja dao je Lerner; ovde ćemo da ga sumiramao.

Kada se objekt koji ima spin kreće relativistički, moramo da uzmemo u obzir obe hiralnosti. Označićemo sa *u* negativno stanje hiralnosti, a sa *v* pozitivno stanje hiralnosti. Svako stanje je oisano sa dva kompleksna broja koja zavise od od prostora i vremena. 4-vektor za verovatnoću i struju postaje:

$$J_\mu = u^\dagger \sigma_\mu u + v^\dagger \sigma_\mu v \tag{139}$$

Sada uvodimo četverokomponentni spinor φ i 4×4 matricu spina a_μ

$$\varphi = \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \quad \text{i} \quad a_\mu = \begin{pmatrix} \sigma_\mu & 0 \\ 0 & \bar{\sigma}_\mu \end{pmatrix} \qquad (140$$

gde je $\sigma_\mu = (I, \boldsymbol{\sigma})$, $\bar{\sigma}_\mu = (I, -\boldsymbol{\sigma})$, a I je 2×2 matrica identiteta. 4-struja može potom da se napiše kao

$$J_\mu = \varphi^\dagger a_\mu \varphi \tag{141}$$

Tri zahteva za očuvanje struje, Lorencova invarijanta i linearnost tada daju jednakost razvoja (***Ref. 169***)

$$\mathrm{i}\hbar\partial^\mu \left(a_\mu \varphi\right) + mc\gamma_5 \varphi = 0 \tag{142}$$

To je Dirakova jednakost u (manje uobičajenom) spinornom predstavljanju.[1] Poslednji član pokazuje da su zbog mase pomešane leva i desna hiralnost. Jednakost može da se proširi tako da obuhvata potencijale koristeći minimalnu povezanost, na isti način kao što je učinjeno u predhodnom tekstu za Šredingerovu i Paulijevi vednakost.

Ovo navedeno izvođenje Dirakove jednakosti iz udžbenika iz uobičajene kvantne teorije može da se ponovi i prikaže vizualno pomoću niti. Ne postoje razlike. Ovo izvođenje su prvi put izveli 1980. godine Bati-Prat (Battey-Pratt) i Raci (Racey). (***Ref. 170***). Oni su istražili centralni objekt povezan za granicu nevidljivim nitima (ili "repovima"), kao što je prikazano na ***slici 44***. U njihovom pristupu centralni objekt plus repovi odgovarao je kvantnoj čestici. Predpostavljeno je da se centralni objekt neprestano obrće. (U modelu niti centralni objekt postaje jezgro zapleta.) Bati-Prat i Raci potom su istraživali relativističko kretanje objekta sa obe hiralnosti. Pokazali su da opis takvog objekta zahteva četiri kompleksna polja, Proučavanje razvoja faza i osa za objekte sa hiralnošću daje Dirakova jednakost. Izvođenje Bati-Prat i Raci matematički je ekvivalent za izvođenje po udžbeniku koje je upravo dato.

Ukratko, zapleti u potpunosti prikazuju i obrtanje i linearno kretanje elementarnih fermiona. Prema tome, model niti omogućava nov pogled na jednakosti razvoja u kvantnoj teoriji. Uz pojmove modela niti Šredingerova jednakost opisuje razvoj gustine ukrštanja. Jednakost Klajn-Gordona opisuje razvoj gustine ukrštanja u relativističkom slučaju. Dirakova jednakost opisuje razvoj gustine ukrštanja u relativističkom slučaju, kada je uključen trik sa opasačem. U stvari, niti vizualno prikazuju ove relacije na do sada najkonkretniji način.

---

1 Matrica γ_5 je određena kao:

$$\gamma_5 = \begin{pmatrix} 0 & I \\ I & 0 \end{pmatrix} \tag{143}$$

gde je I matrica identiteta. 2×2

PRIKAZ SPINORA I DIRAKOVA JEDNAKOSTI KORIŠĆENJEM ZAPLETA

Uprkos svojoj prividnoj kompleksnosti, Dirakova jednakost pravi samo nekoliko iskaza: čestice sa spinom 1/2 su fermioni, pridržavaju se relacije energija-količina kretanja, zadržavaju invarijantnost kvanta rada i zbog toga se ponašaju kao talas. Svaki od ovih iskaza prikazan je vizualno modelom zapleta fermiona: zapleti se ponašaju kao spinori, ugrađena je relacija energija-količina kretanja, zadržano je osnovno načelo i obrtanje zapleta prikazuje razvoj faza. Pogledajmo detalje.

Kratkotrajno kolebanje kod datog zapleta čestice dovodi, posle uvođenja proseka, do talasne funkcije. Model niti fermiona daje ***prikaz spinora*** talasne funkcije. Zaista, u svakoj tački prostora talasna funkcija ima sledeće paramerte:

- Postoji prosečna gustina $\rho(x, t)$; u fizičkom smislu to je gustina verovatnoće. U modelu niti je to lokalna gustina ukrštanja.
- Postoji skup od tri Ojlerova ugla α, β i γ; u fizičkom smislu oni opisuju prosečnu lokalnu usmerenost i fazu ose spina. U modelu niti to je prosečno lokalno usmerenje i faza jezgra zapleta.
- Postoji drugi skup od tri parametra $\boldsymbol{v} = (v_x, v_y, v_z)$; u fizičkom smislu oni opisuju, prema sopstvenom izboru, ili prosečnu lokalnu Lorencovu podršku (boost) ili drugi skup od tri Ojlerova ugla. U modelu niti ovi parametri opisuju lokalno prosečno izobličenje jezgra nastalo usled Lorencove podrške. To se može takođe da se posmatra kao ose oko kojih se izvodi trik sa opasečem.
- Postoji faza δ; u fizičkm smislu ona predstavlja relativnu važnost gustine čestice i antičestice. U modelu niti ova faza opisuje uz koju verovatnoću se izvodi prosečan lokalni trik sa opasačem udesno ili ulevo.

Ukupno postoji osam realnih parameara; oni odgovaraju jednom pozitivnom realnom broju i sedam faza. To dovodi zo opisa talasa spinora kao (***Ref. 171***)

$$\varphi = \sqrt{\rho} e^{i\delta} L(\boldsymbol{v}) R(\alpha/2, \beta/2, \gamma/2) \tag{144}$$

gde je proizvod *LR* skraćenica za podržan i obrtni jedinični spinor, a svi parametri zavise od prostora i vremena. Ovaj izraz je ekvivalentan opisu sa četiri kompleksna parametra koji se koristi u mnogim udžbenicima. Ovaj opis funkcije talasa spinora i odnosna fizička vizualizacija njene gustune i njenih prvih šest faza datiraju još od 1960-ih godina. (***Ref. 171***). Vizualizacija može da se dobije iz proučavanja relativističkih spinskih kovitlanja ili relativističkih tečnosti. Međutim, obrtni zapleti su realističniji. Nasuprot svim dosadašnjim prikazima, model sa obrtnim zapletima objašnjava takođe i poslednju fazu, to jest fazu koja opisuje materiju i antimateriju, objašnjava pojavu kvanta rada $\hbar$ i objašnjava ponašanje fermiona.

Ukratko, jedino obrtni zapleti zajedno sa osnovnim načelom daju jednostavno, potpuno i precizno prikazivanje funkcije talasa spinora i njen razvoj. Model sa zapletima za kvantne čestice je prosto proširenje Fajnmanove ideje da se kvantne čestice predstave kao obrtne strelice. (***Ref. 163***). Strelice mogu da se zamisle kao da su zakačene za obrtno jezgro zapleta. Repovi su potrebni kako bi prikazali ponašanje fermiona. Određena vrsta jezgra zapleta određuje vrstu čestice. Zamagljenje ukrštanja određuje talasnu funkciju. Obrtne strelice opisuju nerelativističku kvantnu fiziku; obrtni zapleti opisuju relativističku kvantnu fiziku.

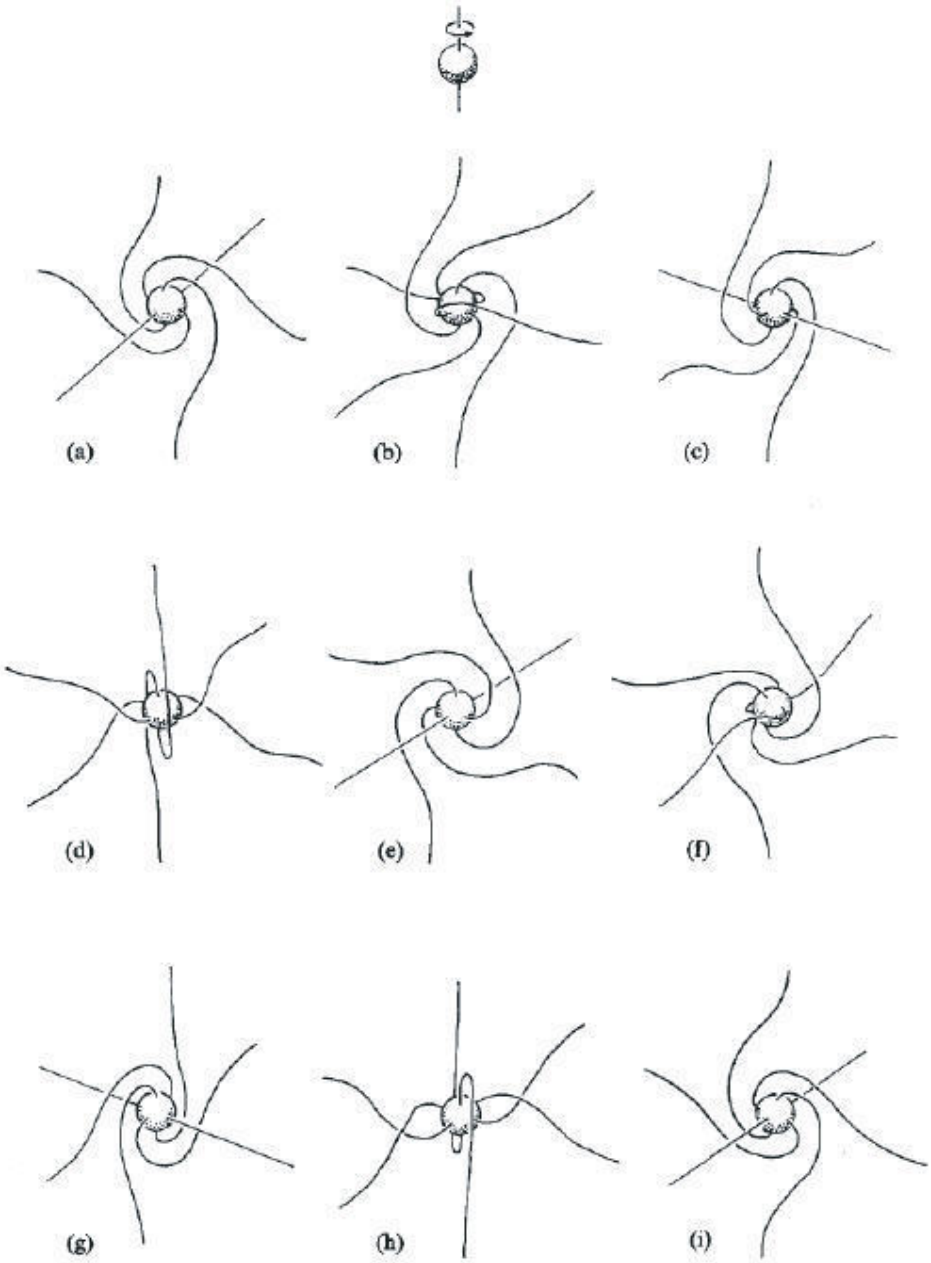
Prikazivanje spinora funkcije talasa pomoću zapleta pomaže da se shvati Dirakova jednakost na više načina.

1. Zapleti podržavaju i u relativističkom slučaju sliku da su elementarne čestice mali obrtni subjekti. (***Ref. 171***). Ova činjenica je tokom godina isticana od strane više naučnika. Model niti obezbeđuje dosledno prikazivanje ovih razmatranja.
2. Trik sa opasačem može da se posmatra kao mehanizam koji je podložan poznatom podrhtavanju (Zitterbewegung) koji je deo Dirakove jednakosti. (***Ref. 172***). Ograničenja u opažanju trika sa opasačem prenose se neposredno u teškoće opažanja podrhtavanja (Zitterbevegung).
3. Trik sa opasačem takođe prikazuje zbog čega operator brzine za relativističku česticu ima sopstvenu vrednost $\pm c$.

4. Komptonova dužina često se posmatra kao tipična dužina pri kojoj se događaju efekti kvantnog polja. U modelu sa zapletima to bi moglo da odgovara prosečnoj veličini koja je potrebna za trik sa opasačem. Model niti stoga predpostavlja da je masa čestice u vezi sa prosečnom veličinom potrebnom za trik sa opasačem.

5. Zapleti podržavaju – na prvi pogled – čudnu sliku elementarne čestice kao malog naelektrisanja koje se obrće oko centralne mase. (***Ref. 173***). U stvari, u modelu zapleta obrtanje čestice zahteva pravilnu primenu trika sa opasačem sa ***slike 19*** (***strana 137***), a trik sa opasačem može da se predstavi kao izazvano obrtanje naelektrisanja, određeno jezgrom zapleta, oko centralne mase, određene prosečnim položajem jezgra. Može da bude od pomoći da se koristi model niti kako bi se ovaj opis prikazao.

6. Model sa zapletom može da se posmatra kao opravdanje programa stohastičkog istraživanja kvantifikacije (***Ref. 174***); kvantno kretanje je rezultat osnovnih kolebanja. Na primer, sličnost Šredingerove jednakosti i jednakosti rasprostiranja je modelirana i objašnjena modelom niti: pošto ukrštanja mogu da se obrću, rasprostiranje ukrštanja dovodi do imaginarne jedinice koja se pojavljuje u Šredingerovoj jednakosti.



Slika 44 Trik sa opasačem za telo koje se obrće sa mnogo repova, kao što su ga koristili Bati-Prat i Raci za izvođenje Dirakove jednakosti (© Springer Verlag, iz ***Ref. 170***)

Ukratko, zapleti koji se obrću ispravan su osnovni model rasprostiranja fermiona. A do sada, zapleti su takođe jedini ispravan model ***propagatora modela zapleta***. Ovakvo modeliranje moguće je zbog rezultata samo tri sastojka Dirakove jednakosti:

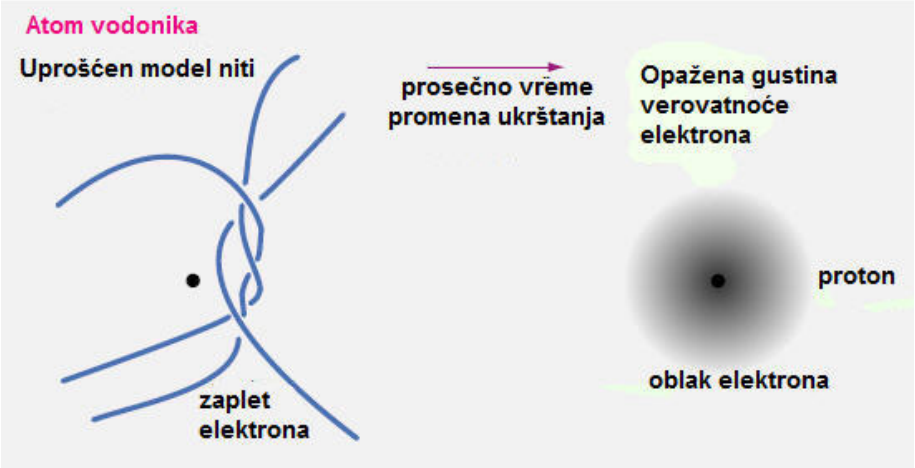
- odnosa između kvanta rada i faze talasne funkcije (ponašanje kao talasa),
- odnosa između kvanta rada i spinorskog ponašanja (ponašanje razmene),
- i odnosa masa-energija iz specijalne teorije relativnosti (ponašanje kao čestice), samo usled osnovnog naćela.

Sva tri sastojka su prikazana u modelu niti. Videli smo da prividna složenost Dirakove jednakosti krije njenu osnovnu jednostavnost. Model niti prikazuje sastojke Dirakove jednakosti, prikazuje samu jednakost i svedoči o njenoj jednostavnosti. Zapravo, možemo da kažemo:

➢ Dirakova jednakost opisuje relativističku infinitezimalu trika sa opasačem.

Trik sa opasačem osnova je za razumevanje Dirakove jednakosti. U modelu niti obrtanje jezgra menja se u dve dimenzije, a to isto čini i trik sa opasačem. (***Strana 139***). Nastale četiri kombinacije oblikuju četiri komponente Dirakovog spinora i Dirakove jednakosti.

Ukratko, zapleti mogu da se koriste za precizno prikazivanje i objašnjenje kvantne fizike. Talasne funkcije, takođe i one za fermione, zamućeni su zapleti – uz detalje koji nisu niti, već nihova zamagljena ukrštanja.



Slika 45 Uprošćen kvantnomehanički izgled atoma vodonika.

KVANTNA MEHANIKA NASPRAM KVANTNE TEORIJE POLJA

Kvantna mehanika je približnost kvantnoj fizici u kojoj su polja kontinualna, a čestice su nepromenljive. U modelu niti prema tome je kvantna mehanika približnost u kojoj su čestice opisane zapletima sa oblikom koji je ***stalan*** u vremenu. Ova približnost omogućava da izvedemo Dirakovu jednakost, Klajn-Gordonovu jednakost, Proka jednakost, Paulijevu jednakost i Šredingerovu jednakost. U ovoj približnosti model niti za elektron u atomu vodonika prikazan je na ***slici 45***. Ova približnost još će nam omogućiti da izvedemo postojanje tri interakcije merenja, kao što ćemo da saznamo u sledećem poglavlju.

Nasuprot tome, ***kvantna teorija polja*** je opis u kojem su sama polja opisana bozonima, a vrste čestica se pretvaraju jedne u druge. Model niti nam dozvoljava da izvedemo postojanje svih poznatih merila bozona, kao što je pokazano u narednom poglavlju. U opisu kvantne teorije polja pomoću modela niti čestice nisu zapleti sa stalnim oblikom jezgra, već se za svaku česticu oblik ***menja***. Promene dovode do emisije i apsorpcije merila bozona.

PODSEĆANJE: REŠAVANJE TRI PARADOKSA GALILEJEVE FIZIKE

U svim opisima fizike prostor i vreme su mereni, objašnjeni i određeni korišćenjem materije. To se događa, na primer, uz pomoć metrarske trake i časovnika. S druge strane, materija se meri, objašnjava i određuje korišćenjem prostora i vremena. To se događa, na primer, ako se prati lokalizovano telo u prostoru i vremenu. Kružnost ove dve odrednice, pomenuta u predhodnom tekstu (***strana 88***), prirodna je posledica modela niti. Pokazalo se da su i materija i prostor-vreme približnosti sastavljene od istih blokova građenja;

ovo zajedničko poreklo objašnjava kružno zaključivanje u Galilejevoj fizici. Pre svega, model niti menja ga od paradoksa u neophodnost.

Model niti određuje vakuum, pa prema tome fizički prostor, kao posledici prosečnih ukrštanja niti. Prostor je prema tome ***relativan*** pojam. Njutonov eksperiment sa kofom ponekad se posmatra kao protivan dokaz ovog zaključka i kao dokaz za apsolutan prostor. Međutim, model niti pokazuje da je svaki obrtni objekt povezan sa ostatkom svemira pomoću svojih repova. Ova povezanost čini da je svako obrtanje primer relativnog kretanja. Obrtanje se prema tome uvek izvršava relativno u odnosu na horizont svemira. S druge strane, otkrivanje zapleta duž repova omogućava ***lokalno*** određivanje stanja obrtanja, kao što se i opaža. Niti zato potvrđuju da su obrtanje i prostor relativni pojmovi. Zato niti takođe objašnjavaju zbog čega možemo da se okrenemo na ledu, bez spoljnje pomoći, ako obrnemo ruke iznad glave. Niti se slažu sa ostatkom svih problema u vezi kofe koja se obrće.

Pre mnogo vremena Zenon iz Eleje postavio je jedan od svojih paradoksa – strela u letu koja ne može da stigne do mete – predpostavka koja se obično prihvata kao takva: on je izrazio nemogućnost da se u kratkom vremenu načini razlika slike (ili stanja) tela u ***kretanju*** od slike (ili stanja) tela u ***mirovanju***. Ravnanje uključenih zapleta pokazuje da je predpostavka netačna; kretanje i mirovanje se razlikuju, čak i na (snimljenim) fotografijijama sa vrlo kratkim vremenima okidača. Dokaz Zenona zato nije moguć, pa paradoks nestaje.

ZABAVNI IZAZOVI U VEZI KVANTNE TEORIJE

Urlaub ist die Fortsetzung des Familienlebens unter erschwerten Bedingungen.[1]

Diter Hildebrant (Dieter Hildebrandt)

Da li odrednice za sabiranje i množenje funkcije Šredingervih talasa, navedene u predhodnom tekstu, važe i za funkcije spinorskih zapleta? (***Izazov 140s***).

* * *

Odrednice funkcije zapleta, ili talasne funkcije, ne uzimaju u obzir ukrštanja vakuumskih niti, već samo onih koji pripadaju zapletu čestica. Zbog čega je ovo dozvoljeno? (***Izazov 141e***).

* * *

Modeliranje merenja rada na nivou kvanta kao prebrojavanja obrtaja točka, dobro je poznata ideja koju su koristili dobri predavači da bi otklonili misteriju sa kvantne fizike. Model niti prikazuje ovu ideju pridružujući kvant rada $\hbar$ punom obrtu jednog segmenta niti oko drugog. (***Izazov 142e***).

* * *

Da li je aksiomski sistem kvantne teorije protivrečan modelu niti? (***Izazov 143s***).

* * *

U modelu niti energija zapleta u vezi je sa obrtanjem jezgra zapleta. Kakva je razlika između ugaone učestanosti zapleta u nerelativističkom i relativističkom slučaju? (***Izazov 144s***).

* * *

Ukoliko ne volite zaključke kvantne mehanike koji su ovde navođeni, postoji alternativa (***Ref. 175***): možete izvesti kvantnu mehaniku na način koji je Švinger (Schwinger) radio na predavanjima, koristeći načelo kvanta rada.(***Izazov 145e***).

* * *

Savremeno učenje Dirakove jednakosti zamenjuje spinorsku sliku vektorskom slikom. (***Ref. 176***). Hrvoje Nikolić[2] je pokazao da vektorska slika značajno uprošćava Lorencovu kovarijantu Dirakove jednakosti. Kako vektorska slika pojašnjava odnos između trika sa opasačem i Dirakove jednaksti? (***Izazov 146r***).

* * *

[1] "Odmor je nastavak porodičnog života u pod otežanim uslovima." Diter Hildebrant (Dieter Hildebrandt, 1927. Bunzlau – 2013. München) bio je kaberetski umetnik, glumac i pisac.

[2] Hrvoje Nikolić dr.sc. je viši naučni saradnik u Institutu Ruđer Bošković u Zagrebu u Odeljenju za teorijsku fiziku, hrvoje@thphys.irb.hr (prim. prev.)

U opisu kvantne mehanike modelom niti niti su neprobojne: one ne mogu da prođu jedna kroz druge (na konačnom rastojanju). Može li kvantna mehanika isto tako da se izvede ako se model izmeni i dozvoli ovaj proces? Da li se još uvek nalazi zaplitanje? (***Izazov 147s***).

* * *

Zagonetka: Da li je trik sa opasačem moguć u kontinualnoj sredini koja se izobličava – kao što je čaršav ili dušek – u koje je obešena obojena lopta? (***Izazov 148e***). Da li je trik sa opasačem moguć sa neprebrojivo beskonačnim brojem repova?

* * *

Na prvi pogled šema aparata za aferezu sa ***slike 24*** (***strana 140***) predpostavja da bi, korišćenjem trika sa opasačem, životinje mogle da se razvijaju i da koriste točkove umesto nogu, pošto točkovi koji se obrću mogu da se snabdevaju krvlju i da se povežu nervima. Zašto se točkovi ipak nisu razvili? (***Izazov 149s***).

ZAKLJUČAK O KVANTNOJ TEORIJI MATERIJE: MILENIJUMSKA PITANJA I EKSPERIMENTALNA PREDVIĐANJA

U ovom poglavlju koristili smo onovna načela – promene ukrštanja određivala su kvant rada $\hbar$ i ostale Plankove jedinice – da bismo zaključili da su čestice zapleti niti i da su talasne funkcije proseci vremena zapleta koji se obrću. Prosto rečeno:

- I nerelativističke i relativističke talasne funkcije su ***zamućeni obrtni zapleti***.

Još preciznije, talasna funkcija se pojavljuje iz zamagljenih ukrštanja zapleta. Isto tako zaključujemo da se zamagljeni zapleti se pridržavaju načela najmanjeg rada i Dirakove jednakosti. Drugim rečima, prikazivanje kvanta rada kao promena ukrštanja podrazumevaju kvantnu teoriju. Model niti potvrđuje Borov iskaz: kvantna teorija je zaista posledica kvanta rada. Tačnije, model niti stoga pokazuje da su svi kvantni efekti ***posledice proširenja*** i ***posledice tri dimenzije prostora***. Posebno, model niti potvrđuje da je

- Dirakva jednakost u suštini infinitezimalna verzija trika sa opasačem (ili trika sa nitima).

Drugim rečima, pokazali smo da niti prikazuju relativističku gustinu lagranžijana $\mathcal{L}$ naelektrisanog, elementarnog, relativističkog fermiona u spoljnom elektromagnetnom polju $\boldsymbol{A}$.

$$\mathcal{L} = \bar{\varphi}\left(i\hbar c \not{D} - c^2 m\right)\varphi \tag{145}$$

gde je:

$$\not{D} = \gamma^\sigma \mathrm{D}_\sigma = \gamma^\sigma\left(\partial_\sigma - iqA_\sigma\right) \tag{146}$$

Stoga zaključujemo da ***niti prikazuju kvantnu teoriju materije***.

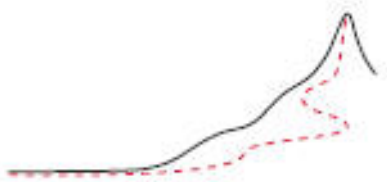
Model niti predviđa odstupanje od relativističkog lagranžijana materije, pa stoga i od Dirakove jednakosti samo u tri slučaja: prvi, kada kvantni aspekti elektrodinamičkog polja imaju ulogu, drugi, kada nuklearne interakcije imaju ulogu i treći, kada ima ulogu zakrivljenost prostora, odnosno jaka gravitacija. Takva odstupanja nisu trenutno dostupna eksperimentalno. Sve ovo je u saglasnosti sa opažanjima.

Mi ćemo u narednom poglavlju izvesti opise kvantne elektrodinamike i nuklearnih interakcija. Model niti u slučaju gravitacije predviđa da se odstupanja od kvantne teorije javljaju samo kada se energija-količina kretanja elementarne čestice približava Plankovoj vrednosti, to jest pri stvarno jakoj gravitaciji. Ovu situaciju ćemo da istražimo u narednom poglavlju.

Osim toga, model niti predviđa da su u prirodi Plankove vrednosti za količinu kretanja i energiju granične vrednosti koje kvantna čestica ne može da prekorači. (***Strana 36***). Svi eksperimenti su u saglasnosti sa ovim predviđanjem.

Izvođenje kvantne teorije iz niti navedena ovde, trenutno je jedino mikroskopsko objašnjenje kvantne fizike. Do sada nije nađen nijedan mikroskopski model, nijedno drugačije objašnjenje niti bilo koje drugo izvođenje kvantne teorije Plankovim razmerama. Posebno je proširenje osnovnih entiteta ključ za razumevanje kvantne fizike.

Procenimo situaciju. U našem traganju za objašnjenjem otvorenih pitanja iz milenijumske liste (***strana 128***), objasnili smo poreklo Plankovih jedinica, poreklo talasne funkcije, poreklo načela najmanjeg rada, poreklo dimenzija prostor vremena, Lorencove i Poenkareove simetrije, poreklo identiteta čestica i jednostavniji deo lagranžijana kvantne teorije polja, naime lagranžijan slobodnih fermiona, kao što je elektron, i onih fermiona u neprekinutom stranom polju. Prema tome, u sledećoj etapi mi ćemo se okrenuti ka najvažnijem delu standardnog modela lagranžijana koji još uvek nedostaje: onog usled interakcija merila.



Poglavlje 9

INTERAKCIJE MERILA IZVEDENE IZ NITI

Šta su interakcije? Na početku ovog dele knjige, kada smo svodili u kakvom su odnosu Plankove jedinice prema relativnosti i kvantnoj teoriji, naglasili smo da je u Plankovim razmerama priroda interakcija još uvek nerasvetljena. (***Strana 21***). Godine 2000., bilo je poznato već više decenija da su suštinska svojstva elektromagnetne, slabe i jake nuklearne interakcije njihove respektivne simetrije merila: sve tri interakcije su ***interakcije merila***. Međutim, razlozi za ove osobine još uvek su nepoznati. (***Ref. 177***).

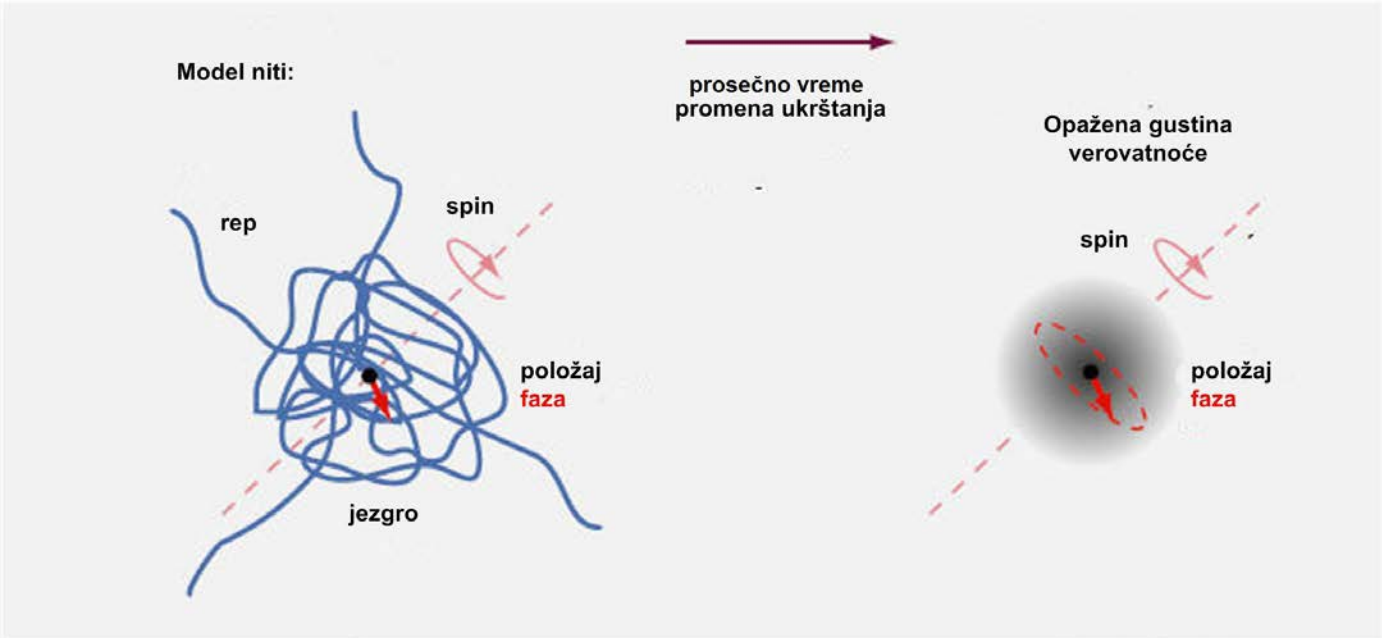
U ovom poglavlju mi ćemo otkriti da kolebajuće niti u tri prostorne dimenzije objašnjavaju postojanje preciznosti tri simetrije merila, svaku uz preciznu simetriju merila koja je opažena. To je prvi put da je takvo objašnjenje moguće. (***Ref. 178).*** Drugim rečima, mi ćemo izvesti kvantnu teoriju polja preko niti. Zaista, niti daju prirodni mehanizam za interakcije koje objašnjavaju i podrazumevaju Fajnmanovi dijagrami. Pojam "mehanizam" treba da se prihvati ne više no kao prstohvat soli, pošto tu nije uključeno ništa mehaničko; no bez obzira na to, pojam nije pogrešan, pošto ćemo otkriti iznenađujuće jednostavan rezultat: ***interakcije merila i simetrije merila nastaju usled izobličenja niti***.

U ovom poglavlju mi ćemo da radimo u ***ravnom*** prostor-vremenu, kao što smo uvek činili u kvantnoj teoriji polja. Ostavićemo kvantni aspekt ***zakrivljenog*** prostor-vremena i gravitacije za sledeće poglavlje. Zato ćemo početi istraživanjem negravitacijskih interakcija u kvantnoj oblasti.

INTERAKCIJE I PROMENA FAZE

Eksperimenti u kvantnoj oblasti pokazuju da interakcije ***menjaju fazu*** talasne funkcije. Ali kako se to precizno događa? Model niti daje nam prost odgovor: emisija i apsorpcija mernih bozona jedino su moguće ***zajedno*** sa promenom faze. Da bismo objasnili ovu povezanost, potrebno je da proučimo detaljnije fazu ***jezgra*** zapleta.

Kada smo istraživali spin i njegovu povezanost sa trikom sa opasačem, mi smo prikazali obrtanje jezgra zapleta na isti način kao obrtanje kopče opasača. (***Strana 136***). Predpostavili smo da se jezgro zapleta obrće kao ***kruti*** predmet; obrtanje se završava tek kroz kolebanje oblika repova. Zašto smo to predpostavili?



Slika 46 U poglavlju o kvantnoj teoriji faza je bila određena predpostavkom krutog obrtnog jezgra; ova približnost je takođe iskorišćena u opisu pomeranja čestica

U Fajnmanovom opisu kvantne teorije ***slobodne čestice su obrtne strelice koje napreduju***. (***Ref. 163***). U modelu niti kretanje ***slobodne*** čestice je modelirano kao promena položaja jezgra zapleta, a ***spina*** kao obrtanje jezgra. Drsko smo predpostavili da jezgro ostaje kruto, da vezuje strelicu faze za sebe i opisuje spin kao obrtanje jezgra sa njegovim pričvršćenim sttrelicama, kao što je prikazano na ***slici 46***. Ovo drsko uprošćavanje dovodi nas do Dirakove jednakosti. Ukratko, predpostavka je da kruto jezgro funkcioniše.

Međutim, problem smo počistili pod tepih: šta se događa ako jezgro ***nije*** kruto? Pokazalo se da odgovor na ovo pitanje automatski vodi do postojanja mernih interakcija. Iz uobičajene kvantne teorije znamo

- Interakcija je proces koji menja fazu talasne funkcije, ali razlikuje se od obrtanja.

U modelu niti promene oblika jezgra zapleta dovode takođe do promena faze. Zapravo, otkrićemo da izobličenja jezgra automatski dovode do precizno one tri interakcije koje opažamo u prirodi.

IZOBLIČENJA REPA U ODNOSU NA IZOBLIČENJE JEZGRA

Možemo da sumiramo predhodno poglavlje o slobodnom kretanju zapleta materije, kao poglavlje u kojem je pažnja bila usmerena ha kolebanje oblika ***repova***. Zaista, trik sa opasačem upotpunio je dokaz da

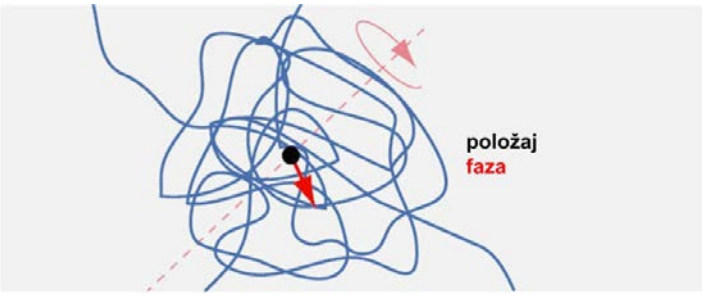
- Sve ***simetrije prostor-vremena*** nastaju usled izobličavanja repova.

Sve simetrije prostor-vremena – pomeranje, obrtanje, podrška (boost), spin i razmena čestica – nastaju usled izoblićenja repova; u takvim izobličenjima repova podrazumeva se da jezgro ostaje neizmenjeno i kruto (u njihovom sopstvenom sistemu mirovanja).

Nasuprot tome, u ovom poglavlju pažnja je usmerena na kolebanje oblika u ***jezgrima zapleta***.[1] Otkrićemo da

- ***Simetrije merila*** nastaju usled izobličenja ***jezgra***.

Istražimo jezgro zapleta u više detlja. ***Slika 47*** pokazuje povećan izgled jezgra i njegovih strelica faze. Faza jezgra rezultat je faza svih njegovih ukrštanja. Prema tome, slika objašnjava da će strelica faze da bude osetljiva na kolebnje oblika i izobličenja segmenata niti od kojih je sačinjeno jezgro.



Slika 47 Povećanje jezgra zapleta pokazuje da faza može takođe da se promeni usled ***izobličenja*** jezgra; takva izobličenja jezgra dovode do ***interakcija merila***

U prirodi svaka promena faze talasne funkcije, koja nije nastala usled simetrije prostor-vremena, nastala je usled interakcije. Za model niti ova povezanost podrazumeva

- Kada se faza jezgra izmeni usled ***krute promene usmerenja***, govorimo o ***obrtanju jezgra***.
- Kada se faza jezgra izmeni usled ***promene oblika jezgra***, govorimo o ***interakciji***.

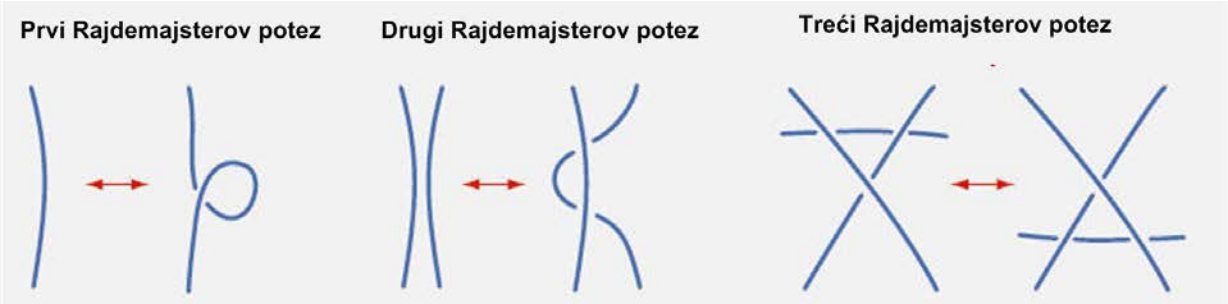
Potrebno je zato da razumemo dve stvari: Prvo, kakve vrste izobličenja jezgra postoje? Drugo, koliko precizno na fazu – to jest određivanje svake strelice – utiče izobličenje jezgra? Posebno, moramo da proverimo odgovore i zaključke eksperimentima.

Prvo pitanje o razvrstavanju izobličenja jezgra malo je teže no što izgleda. (***Ref. 178***). Osnovno načelo – da su događaji promene ukrštanja niti – podrazumeva da se izobličenja zapažaju samo ako izazivaju promene ukrštanja. Ostala izobličenja nemaju nikakav fizički učinak. (Naravno, izvesna izobličenja će imati promene ukrštanja za jednog posmatrača a ne i za drugog. Ovu činjenicu ćemo uzeti u obzir.) Već je 1926.

[1] Suprotnost između izobličenja repova i izobličenja jezgra ima udaljenu sličnost sa dvojnošću gravitacija/merilo, ili sa predstavljanjem Ads/CFT (anti-de Sitter/Conformal Field Theory) i sa dvojnošću prostor-vremena. (***Ref. 179***). Na primer, u modelu niti tri poteza Rajdemajstera (Kurt Reidemeister) u jezgrima zapleta predstavljaju tri interakcije merila, dok tri Rajdemajsterovih poteza u vakuumu predstavljaju (takođe) gravitacijske efekte.

godine matematičar Kurt Rajdemajster razvrstao sva ova izibličenja zapleta koja dovode do promena ukrštanja. (***Ref. 180***). Razvrstavanje daje tačno tri klase izobličenja, koja se danas nazivaju ***Rajdemajerovi potezi***. Oni su prikazani na ***slici 48***.

- ***Prvi Rajdemajsterov potez***, ili ***kretanje I vrste***, je postavljanje uvijanja na nit ili uklanjanje sa nje.
- ***Drugi Rajdemajsterov potez***, ili ***kretanje II vrste*** je dodavanje, postavljanje ili uklanjanje krivine niti ispod (ili iznad) druge niti.
- ***Treći Rajdemajsterov potez***, ili ***kretanje III vrste***, klizanje, je premeštanje jednog segmenta niti ispod (ili iznad) ukrštanja druge dve niti.



Slika 48 Rajdemajsterovi potezi: tri tipa izobličenja koja mogu da izazovu promene ukrštanja – ukoliko su potezi pravilno određeni u tri dimenzije.

Redni broj svakog Rajdemajsterovog poteza takođe je i broj niti koje učestvuju. Otkrićemo da uprkos prividnosti, svaki Rajdermajsterov potez sadrži promenu ukrštanja. Da bi se našla ova povezanost moramo da uopštimo izvorne Rajdermajsterove poteze, koji su određeni u dvodimenzionalnoj projecijskoj ravni, u trodimenzionalne situacije jezgra zapleta.

Pokazalo se da su tri Rajdermajsterova poteza u vezi sa tri merne interakcije:

- Prvi Rajdermajsterov potez odgovara ***elektromagnetizmu***.
- Drugi Rajdermajsterov potez odgovara ***slaboj nuklearnoj interakciji***.
- Treći Rajdermajsterov potez odgovara ***jakoj nuklearnoj interakciji***.

Mi ćemo da dokažemo ove povezanosti u tekstu koji sledi.

Za svaki Rajdermajsterov potez istražićemo dve vrste procesa izobličenja jezgra: jedna vrsta izobličenja je ***kolebanje jezgra***, što odgovara, kao što ćemo da vidimo, emisiji i apsorpciji virtualnih bozona u interakciji. Druga vrsta izobličenja su ***poremećaji jezgra izazvani spolja***, što odgovara emisiji i apsorpciji ***stvarnih*** bozona u interakciji. Kao prvi korak, mi ćemo pokazati da su i kolebanje i smetnje u prvom Rajdermajsterovom koraku, uvijanju, povezani sa elektromagnetnom interakcijom.

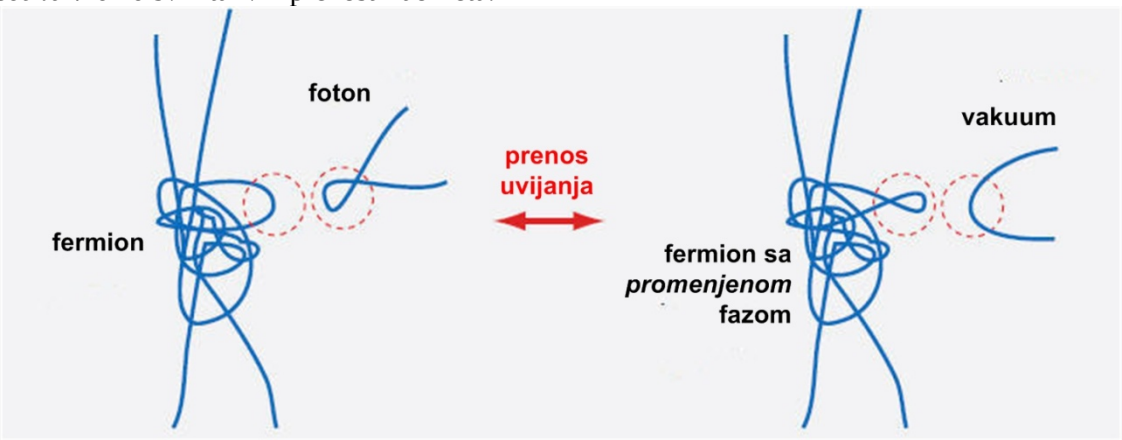
ELEKTRODINAMIKA I PRVI RAJDEMAJSTEROV POTEZ

Eksperimenti pokazuju da su sve četiri osnovne interakcije opisane potencijalima. Isto tako eksperimenti pokazuju da potencijali menjaju fazu, učestanost obrtanja i broj talasa u talasnoj funkciji. Eksperimenti pokazuju da su interakcije rezultat apsorpcije i emisije baždarnih bozona. Posebno, za elektromagnetizam potencijali nastaju usled protoka stvarnih ili virtualnih nenaelektrisanih fotona sa spinom 1 i bez mase. Fotoni su emitovani iz naelektrisanih elementarnih čestica ili ih one apsorbuju; neutralne elementarne čestice ne emituju i ne apsorbuju fotone. Postoje dve vrste naelektrisanja: pozitivno i negativno. Privlačenje ili odbijanje statičkih naelektrisanja smanjuje se obrnuto srazmerno kvadratu rastojanja. naelektrisanja su očuvana. Sve naelektrisane čestice imaju masu i kreću se sporije od svetlosti. Lagranžijan materije povezan sa elektromagnetnim poljem ima U(1) simetriju merila. Elektromagnetizam ima poseban osnovni Fajnmanov dijagram. Elektromagnetna konstanta veze na maloj energiji, takozvana konstanta fine strukture, izmerena je i iznosi 1/137,035999074(44); zavisnost njene energije opisana je renormalizacijom.

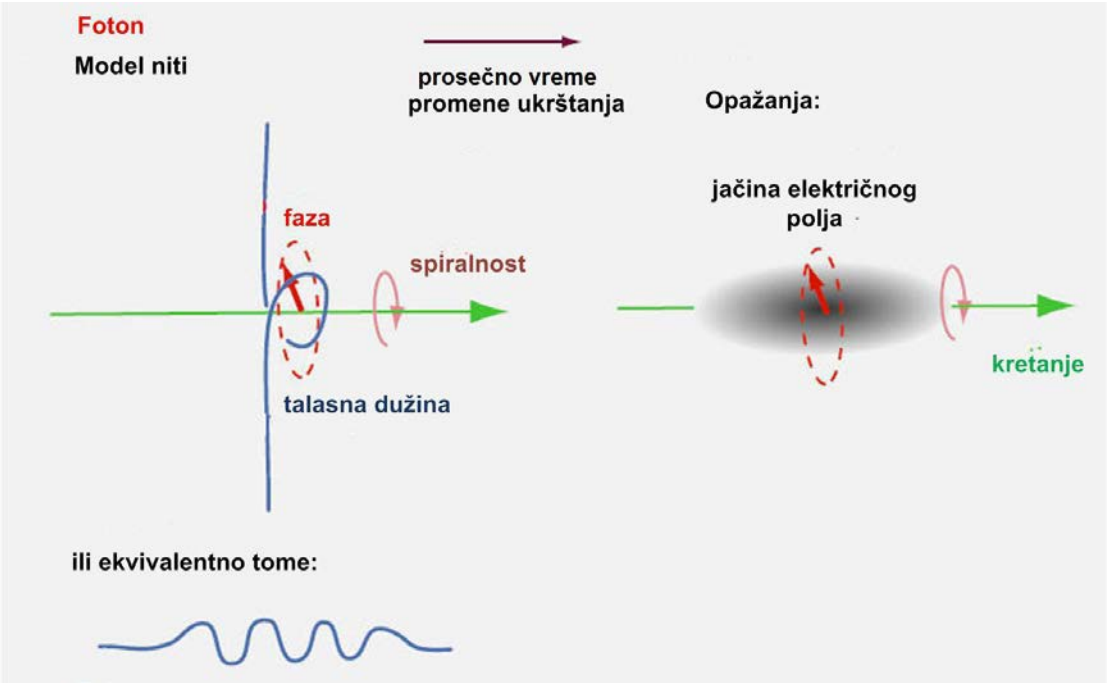
Predhodni pasus sadrži sve što je poznato o elektromagnetnim interakcijama. Na primer, Maksvelove jednakosti polja slede iz Kulonove relacije obrnute srazmere kvadrata rastojanja, njenog relativističkog uopštavanja i očuvanja naelektrisanja. Još preciznije, sva eksperimentalna opažanja u elektricitetu i magnetizmu slede iz lagranžijana kvantne elektrodinamike, ili QED. Ukratko, nije potrebno da pokažemo da lagranžijan kvantne elektrodinamike sledi iz modela niti.

NITI I PRVI RAJDEMAJSTEROV POTEZ

U modelu niti za elektromagnetizam, bozoni sa spinom 1 i bez mase, kao što su fotoni, načinjeni su od pojedinačnih niti. Kako pojedinačna nit može da izmeni fazu zapleta? Odgovor je dat na ***slici 49***: uvijena petlja u pojedinačnoj niti imaće uticaja na obrtanje zapleta, pošto ona menja moguća kolebanja jezgra zapleta. Usled neprobojnosti niti približavanje ka okrenutoj petlji ponekad će preneti njen zaokret na zaplet i zbog toga promeniti njegovu fazu. Opažen efekt elektromagnetnog polja na fazu naelektrisanog fermiona je ***prosečno vreme*** svih takvih prenosa zaokreta.



Slika 49 Pojedinačna nit menja obrtanje jezgra: prenos uvijanja je osnova elektromagnetizma u modelu niti. Nijedna nit nije presečena i ponovo zalepljena; prenos se statistički pojavljuje kroz uklonjenu zapreminiu usled neprobojnosti niti



Slika 50 Foton u modelu niti

Pojedinačna nit predstavlja bozon, kao što smo videli u predhodnom tekstu. (***Strana 136***). Uvijene petlje su pojedinačne niti i mogu da imaju dva smera uvijanja, ili dve polatizacije. Pojedinačne, uvijene i ***nezapletene*** niti nemaju masu; drugim rečima, uvijene petlje stvarno se kreću brzinom svetlosti. A uvijene petlje, budući da su zakrivljene, nose energiju.

Približavanje uvijenoj petlji promeniće fazu, to jest usmerenje zapleta materije. Uvijene petlje odgovaraju lokalnom obrtanju segmenta niti za ugao π. Međutim, uvijanje može da bude uopšteno za proizvoljni ugao. Takva uopštena uvijanja mogu da se povežu u lanac. Pošto su ona opisana pojedinačnim uglom i pošto je dvostruko uvijanje ekvivalentno kao da uvijanja nema, uvijanja oblikuju U(1) grupu. To ćemo uskoro da prikažemo. (***Strana 179***)

Ukratko, uvijanja se ponašaju kao ***fotoni*** u svim svojim svojstvima. Prema tome, model niti predlaže:

- ***Foton*** je uvrnuta nit. Prikaz je dat na ***slici 50***.

- ***Elektromagnetna interakcija*** je prenos uvijanja, to jest prenos prvog Rajdemajsterovog poteza, između dve čestice, kao što je prikazano na ***slici 49***.

Prenos uvijanja sa pojedinačne niti na jezgro zapleta prema tome modelira apsorpciju fotona. Ponovo naglašavamo da je takav prenos rezultat načina na koji niti jedne drugima ometaju kretanje usled njihove neprobojnosti. Nijedna nit nikada nije presečena ili nanovo zalepljena.

MOGU LI FOTONI DA SE RASPADNU, NESTANU ILI RAZBIJU?

Model niti fotona, kakav je prikazan na ***slici 50***, možda izgleda kao da fotoni mogu da nestanu. Na primer, ako se nit fotona ispravi povlačenjem krajeva spiralnog izobličenja, spirala bi mogla da nestane. Spirala bi nestala takođe pri kolebanju oblika.

Potpuna slika fotona uključuje takođe niti vakuuma oko fotona. Energija fotona u modelu niti, lokalizovana je u konfiguraciji koju oblikuju nit fotona i niti vakuuma koje okružuju foton. Energija je lokalizovana u modelu niti u oblasti zakrivljenosti niti. Ako nestanu spiralne niti, umesto njih zakrivljene su, ili još jače su zakrivljene, niti vakuuma u okruženju, i energiju preuzimaju zakrivljene niti u okruženju. Neto rezultat je da se spirala prenosi, trajno ili u kratkom vremenu, na drugu nit. Drugim rečima, u modelu niti fotoni takođe mogu da se kreću preskakanjem sa jedne niti na sledeću. (***Strana 262***).

Jedini način na koji foton može u potpunosti da nestane je prenos njegove energije u zaplet. Takav proces se naziva ***apsorpcija*** fotona od strane naelektrisane čestice. Pojedinačna nit fotona ne može da se pokida na ***više*** niti fotona manjeg prečnika spirale ili različitih učestanosti obrtanja. Takav proces je sprečen osnovnim načelom. (***Izazov 150e***).

Ukratko, usled energije i topoloških ograničenja, model niti sprečava raspad, nestajanje ili cepanje fotona, sve dok nije prisutan električni naboj. Očuvanje linearne količine kretanja i momenta količine kretanja dovode takođe do istog zaključka. U modelu niti fotoni su ***stabilne*** čestice.

ELEKTRIČNI NABOJ

Okruženi kupatilom fotonskih niti neće svi zapleti fermiona da izmene svoju fazu. Zaplet koji je predmet slučajnog približavanja virtuelnim fotonima osećaće u vremenu neto efekat samo ako nedostaje određena simetrija. Drugim rečima, biće naelektrisani samo zapleti kojima nedostaje određena simetrija. Kakva bi to bila simetrija?

U kupatilu niti fotona, stoga u kupatilu koji uključuje nasumične I poteze Rajdermajstera, očekuje se da će pod uticajem biti samo sami ***hirijalni*** zapleti fermiona. Drugim rečima:

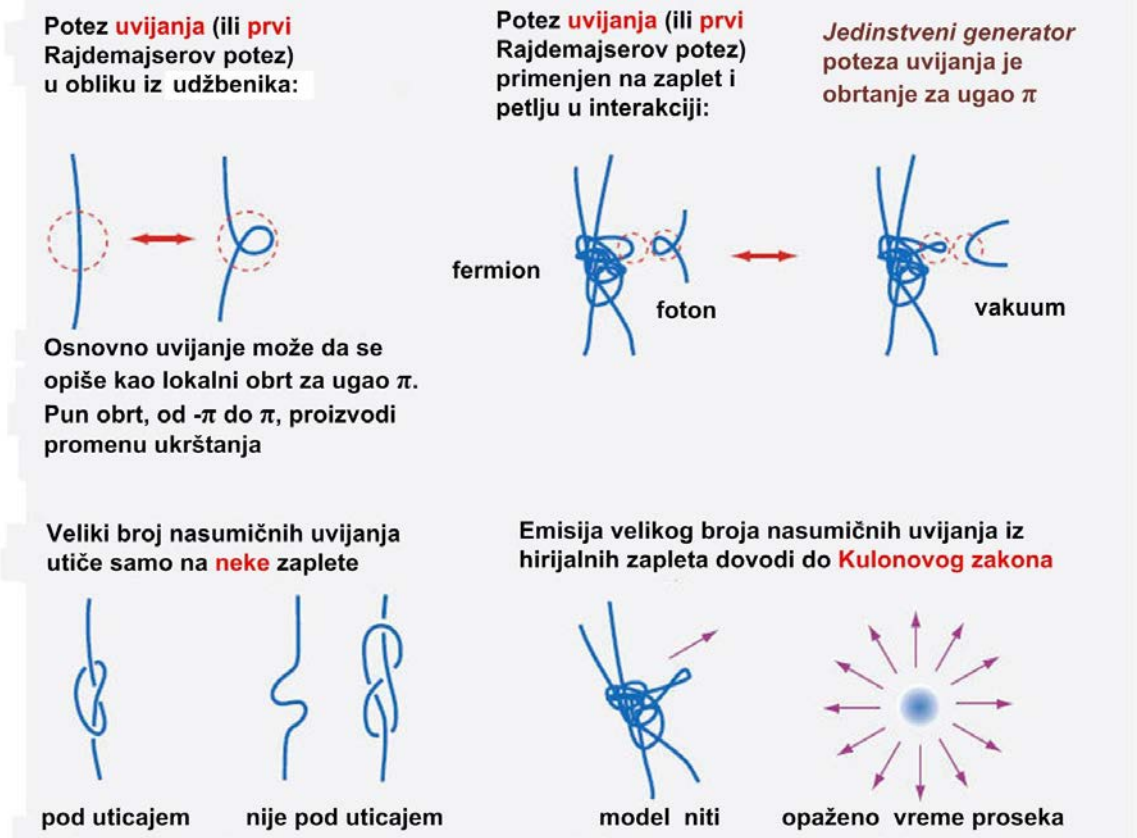
- ***Električni naboj*** nastaje usled hirijalnosti zapleta.

Nasuprot tome, imamo:

- ***Čestice sa električnim nabojem*** nasumično emituju uvijene niti. Usled hirijalnosti zapleta, nasumična emisija će dovesti do blage asimetrije, tako da će desno uvijanje biti mnogobrojnije za čestice jednog naelektrisanja, a levo uvijanje će biti mnogobrojnije za čestice suprotnog naelektrisanja.

Izjednačavanje električnog naboja i hirijalnosti zapleta omogućava da se modeliraju važna opažanja. Prvo, pošto hirijalnost može da bude desna ili leva, postojaće pozitivno i negativno naelektrisanje. Drugo, pošto niti u modelu niti nikad nisu presečene ili ponovo zalepljene, hirijalnost, pa prema tome i električni naboj, je ***očuvana veličina***. Treće, hirijalnost je moguća samo za zaplete koji su lokalizovani, pa prema tome imaju masu. Zato se hirijalni zapleti – naelektrisane čestice – kreću uvek sporije od svetlosti. Četvrto, hirijalni zapleti u mirovanju izazivaju oko sebe gustinu uvijenih niti koja se menja sa $1/r^2$, kao što je prikazano na ***slici 51***. Konačno, fotoni nisu naelektrisani; zbog toga na njih ne utiču ostali fotoni (u prvom redu).

Ukratko, sva svojstva električnih naboja koja se nalazi u prirodi prikazan je modelom niti. Sada ćemo ovo da istražimo detaljnije.



Slika 51 Elektromagnetizam u modelu niti: elektromagnetna interakcija, električni naboj i Kulonov zakon obrnute srazmernosti kvadrata

IZAZOV: KOJA INVARIJANTA ČVORA JE ELEKTRIČNI NABOJ?

Hirijalnost objašnjava predznak električnog naboja, ali ne i njegovu veličinu u jedinicama elementarnog naboja e. Potpuna odrednica električnog naboja mora da uključuje i ovaj aspekt.

Matematičari imaju odrednicu raznih topoloških invarijanti za čvorove i zaplete. ***Topološke invarijante*** su osobine koje su nezavisne od oblika čvora ili zapleta, ali omogućavaju da se čvorovi ili zapleti razlikuju na način kojim su vezani. Nekoliko invarijanti su kandidati kao blokovi za izgradnju električnog naboja: ***hirijalnost*** c, koja može da bude +1 ili -1, ***najmaji broj ukrštanja*** n ili ***topološko uvijanje*** w, to jest broj ukrštanja određen predznakom. (***Strana 311***).

Odrednicu za električni naboj koju je predložio Klaus Ernst (Claus Ernst) je, $q = c\ (n \bmod 2)$. Druga mogućnost za odrednicu naboja je $q = w/3$. Ekvivalentne odrednice koriste povezane brojeve. Na ovom mestu našeg istraživanja, ovo pitanje ostaje otvoreno. Vratićemo se kasnije na detaljnu povezanost između naboja, hiralnosti i topologije zapleta. (***strana 283***).

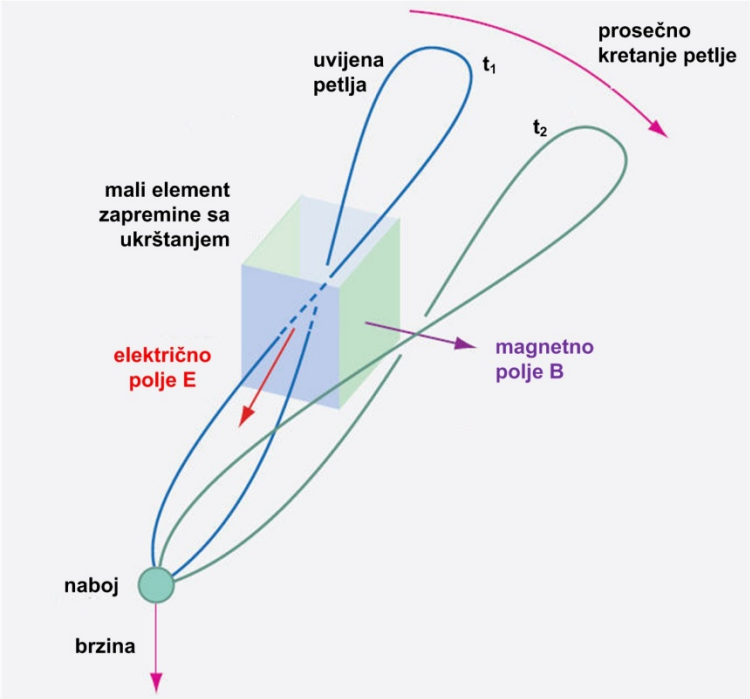
ELEKTRIČNA I MAGNETNA POLJA I POTENCIJALI

Odrednica fotona uz uvijene niti dovodi do sledećih odrednica:

- ***Električno polje*** je zapreminska gustina (usmerenih) ukrštanja uvijenih petlji.
- ***Magnetno polje*** je gustina protoka (usmerenih) ukrštanja uvijenih petlji.
- ***Električni potencijal*** je gustina uvijenih petlji.
- ***Magnetni potencijal*** je gustina protoka uvijenih petlji.

Najlakši način da se provere ove odrednice je da se zapazi da nasumična emisija uvijenih petlji usled električnih naboja zadovoljava Kulonovu obrnutu srazmeru kvadrata rastojanja: sila između dva statička loptasta naelektrisanja menja se obrnuto srazmerna kvadrata rastojanja. Model niti podrazumeva da je u tom slučaju ***gustina ukrštanja srazmerna kvadratu gustine petlji***; jednom reči, potencijal opada obrnoto srazmerno rastojanju, a električno polje obrnuto srazmerno kvadratu rastojanja.

Odrednica magnetnog polja sledi prosto iz one za električno polje promenom u referentni sistem kretanja. Ove dve odrednice prikazane su na ***slici 52***.



Slika 52 Uvijanje koje se kreće omogućava nam da odredimo električna polja – kao gustinu ukrštanja uvijenih petlji – i magnetnog polja – kao odgovarajući protok

Zapažamo da je električno polje određeno skoro na isti način kao talasna funkcija: i jedno i drugo su usmerene gustine ukrštanja. (***Strana 142***). Međutim, električno polje je određeno gustinom ukrštanja ***uvijenih petlji***, dok je talasna funkcija određena gustinom ukrštanja ***zapleta***. Odrednice se razlikuju samo po topologiji osnovnih struktura niti.

Energija, ili rad u vremenu, u modelu niti je broj promena ukrštanja ***u vremenu***. Energija magnetnog polja po zapremini je zato data kao gustina promena ukrštanja u vremenu koja nastaje usled uvijenih petlji. Tako model niti podrazumeva da gustina promena ukrštanja u vremenu je data kao ***polovina kvadrata gustine ukrštanja plus polovina kvadrata gustine protoka ukrštanja***. (***Izazov 151e***). Za uvijene petlje stoga dobijamo da je gustina energije polovina kvadrata električnog plus polovina kvadrata magnetnog polja. Uvrštavanjem sačinilaca srazmernosti koji vodi od Plankovih jedinica do SI jedinica dobijamo dobro poznat izraz

$$\frac{E}{V} = \frac{\varepsilon_0}{2} E^2 + \frac{1}{2\mu_0} B^2 \qquad (147)$$

Model niti prema tome predstavlja elektromagnetnu energiju.

Slika 53 Određivanje faze ili usmerenosti pojedinačnog ukrštanja nije jedinstveno: postoji sloboda izbora

Zapažamo da u modelu niti odrednica za polja predpostavlja da u prirodi ne postoji ***magnetni naboj***. To je u saglasnosti sa opažanjima.

Model niti predpostavlja granične vrednosti za sva opažanja. Ona se pojavljuju kada su niti zapakovane što je moguće gušće. To podrazumeva maksimalnu vrednost električnog polja $E_{max} = c^4/4Ge \approx 1{,}9 \cdot 10^{62}$ V/m i maksimalnu vrednost magnetnog polja $B_{max} = c^3/4Ge \approx 6{,}3 \cdot 10^{53}$ T. Predviđa se da će svi fizički sistemi –

uključujući sve astrofizičke objekte, kao što su izvori gama zraka ili kvazari – biti u skladu sa ovom granicom. Ova predviđanja su takođe u saglasnosti sa opažanjima

LAGRANŽIJAN ELEKTRIČNOG POLJA

U klasičnoj elektrodinamici gustina energije elekrtomagnetnog polja koristi se za izvođenje njene gustine lagranžijana. Gustina lagranžijana opisuje sopstvenu promenu, nezavisnu od posmatrača, koja se pojavljuje u sistemu. Osim toga, gustina lagranžijana mora da bude kvadratna u polju i da je Lorencov skalar.

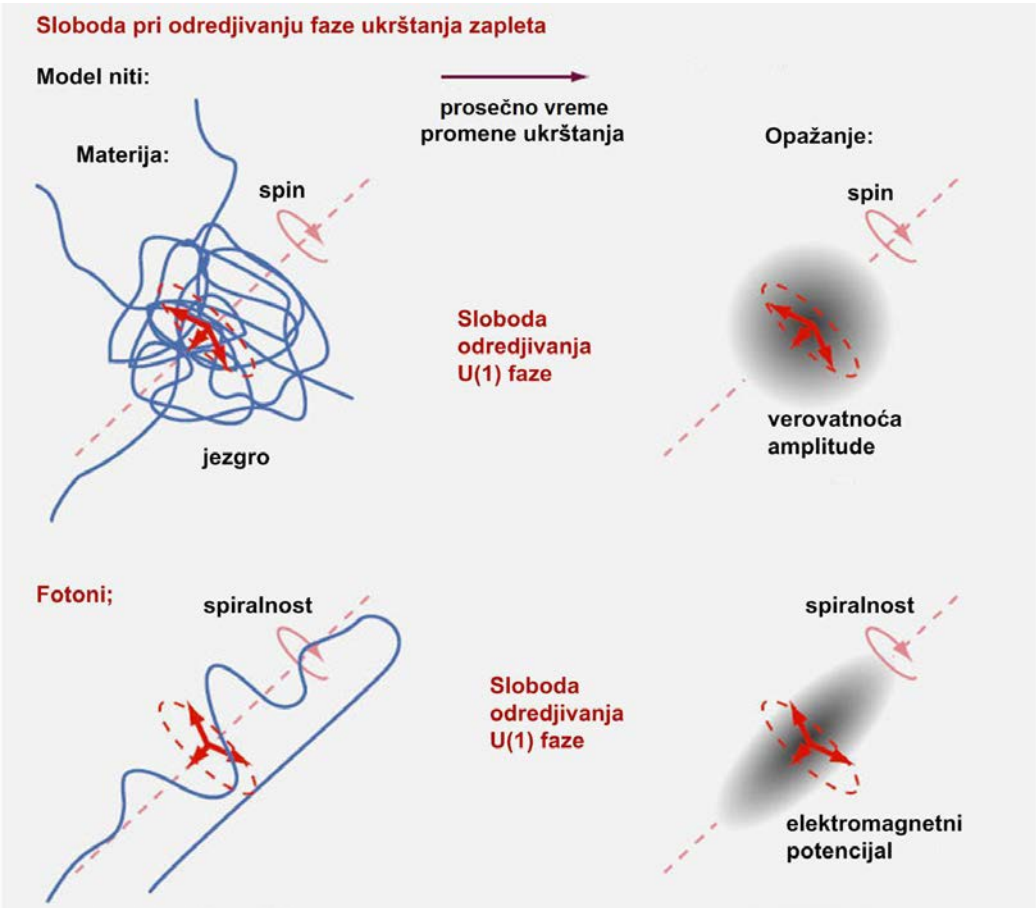
Precizna verzija ovog dokaza dovodi do gustine lagranžijana elektromagnetnog polja F:

$$\mathcal{L}_{EM} = \frac{\varepsilon_0}{2} E^2 - \frac{1}{2\mu_0} B^2 = \frac{1}{4\mu_0} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \tag{148}$$

dok je elektromagnetno polje F određeno elektromagnetnim potencijalom A, kao

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu \tag{149}$$

Pošto model niti prikazuje elektromagnetnu energiju, on isto tako prikazuje lagranžijan klasične elektrodinamike. Osim toga, Maksvelove jednakosti za elektromagnetno polje slede iz ove gustine lagranžijana. Maksvelove jednakosti polja stoga su posledica modela niti. Očigledno, to ništa nije novo, pošto svaki model koji prikazuje Kulonovu relaciju obrnute srazmere sa kvadrstom rastojanja i ostavlja brzinu svetlosti kao invarijantu, automatski sadrži Maksvelove jednakosti polja.



Slika 54 Sloboda pri određivanju faze ukrštanja dovodi do invarijante merila elektromagnetizma

U(1) INVARIJANTE MERILA IZAZVANE I POTEZOM RAJDEMAJSTERA

Elektromagnetni potencijal A_μ nije jedinstveno određen u prirodi: kaže se da postoji sloboda izbora merila. Promena iz jednog merila u drugo je ***transformacija merila***. Transformacija merila je prema tome transformacija elektromagnetnog potencijala koji nema efekta na opažanja. Transformacija merila posebno s jedne strane ostavlja nepromenjene sve jačine polja i energije polja, a s druge strane verovatnoće čestica i energiju čestica.

Sva ova opažanja mogu da se prikažu pomoću niti. U modelu niti prirodne su sledeće odrednice:

- ***Izbor merila*** za ***zračenja*** i za ***materiju*** je izbor određivanja respektivne strelice faze.
- ***Transformacija merila*** je promena određivanja strelice faze.

U slučaju elektrodinamike sloboda izbora merila posledica je dopuštanja izbora faze koja leži u ravni oko usmerenja ukrštanja. (Ostale interakcije slede iz ostalih mogućnosti izbora faza.) Izbor faze može da bude različit za svaku tačku u prostoru. Promena (lokalnog) određivanja faze je (lokalna) transformacija merila. Promena određivanja faze za pojedinačno ukrštanje podrazumeva promenu faze talasne funkcije i elektromagnetnih potencijala. Šematski prikaz izbora merila dat je na ***slici 54***.

Zapažamo da transformacije nemaju uticaja na gustinu ili protok ukrštanja i promena ukrštanja. Drugim rečima, transformacije merila ostavljaju jačinu elektromagnetnog polja i energiju elektromagnetnog polja kao invarijante, kao što se opaža. Obrtanje za 4π ne menja fazu, nezavisno od toga kakvo je određivanje faze odabrano. Prema tome, transformacija merila ostavlja nepromenjene gustine verovatnoće, pa čak i razlike opaženih faza. Ovo je u saglasnosti sa eksperimentima.

Transformacija merila u talasnoj funkciji takođe podrazumeva i transformaciju merila u elektrodinamičkom potencijalu. Model niti zbog toga podrazumeva da su te dve transformacije povezane, kao što se i opaža. Ova povezanost se naziva minimalna veza. Ukratko, minimalna veza posledica je modela niti.

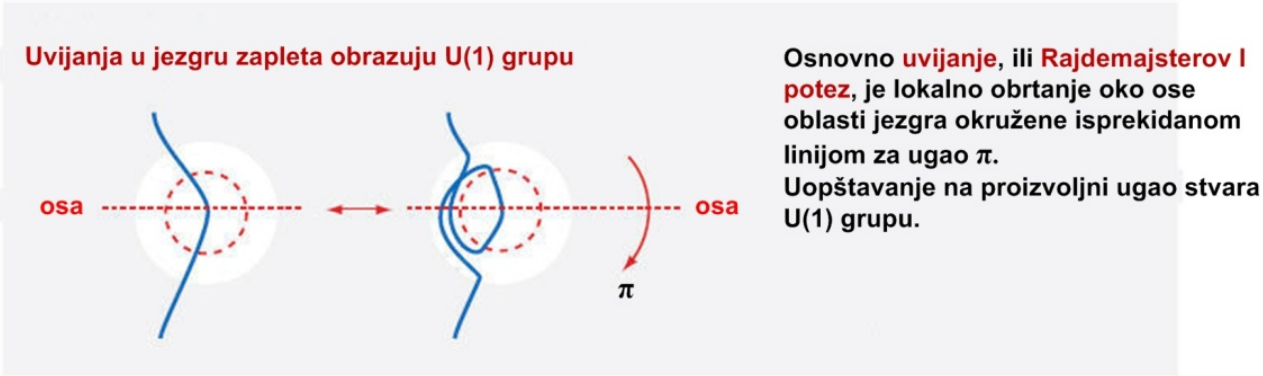
U(1) INTERAKCIJE MERILA IZAZVANE I POTEZOM RAJDEMAJSTERA

Postoji samo mali korak od ***izbora*** merila do ***interakcije*** merila. Podsećamo se:

- ***Interakcija merila*** je promena faze koja nastaje od izobličavanja niti u jezgru čestice.

Posebno, elektromagnetizam je rezultat prenosa uvijanja. Uvijanje je jedno od tri vrste izobličenja jezgra koje dovodi do promene ukrštanja

Osnovno uvijanje, ili prvi Rajdemajsterov potez, odgovara lokalnom obrtanju nekog segmenta niti u jezgru za ugao π, kao što je prikazano na ***slici 55***. Uvijanje može da se uopšti na proizvoljni ugao: jednostavno odredimo uopšteno uvijanje kao lokalno obrtanje odsečka niti za proizvoljan ugao. Osa obrtanja je odabrana kao što pokazuje ***slika 55***. Uopštena uvijanja mogu da se povežu u lanac, a postoji i identitet uvijanja – uopšte ne postoji lokalno obrtanje. (***Izazov 152e***). Uopštena uvijanja prema tome obrazuju grupu. Osim toga, uopšteno uvijanje za ugao 2π ekvivalentno je kao da uopšte nije ni bilo uvijanja, kao što može da se proveri uz pomoć komada konopca: držite središnji deo i ono nestaje povlačenjem krajeva, nasuprot uvijanju za π. Ova svojstva jedinstveno određuju grupu U(1). Ukratko, ***slika 55*** prikazuje da uopštena uvijanja određuju grupu U(1), koja ima topologiju kružnice.



Slika 55 Kako skup uopštenih uvijanja – skup svih lokalnih obrtanja pojedinih delova niti oko ose – oblikuje U(1) grupu merila

Ukratko, dodavanje uvijanja u zaplet fermiona ili u nit fotona, menja njihovu fazu, pa stoga predstavlja mernu interakciju. Pokazli smo da kolebanja jezgra izazvanih uvijanjima proizvode U(1) simetriju merila. Energija elektromagnetnog polja i energija čestice invarijante su U(1). Ukratko, model niti podrazumeva da je ***U(1) grupa merila kvantne elektrodinamike***. Uz ovaj rezultat sada smo u mogučnosti da izvedemo potpun lagranžijan kvantne elektrodinamike.

LAGRANŽIJAN KVANTNE ELEKTRODINAMIKE

S obzirim na U(1) invarijantnost opažanja, lagranžijan kvantne elektrodinamike, ili QED, dobija se direktno, pošto je invarijanta merila U(1) ekvivalentna minimalnoj vezi. Počećemo od gustine lagranžijana $\mathcal{L}$ neutralnog, slobodnog i relativističkog fermiona u elektromagnetnom polju. Ona je data sa

$$\mathcal{L} = \bar{\Psi}\left(i\hbar c\not{\partial} - c^2 m\right)\Psi = \frac{1}{4\mu_0} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \tag{150}$$

Izveli smo član fermiona u poglavlju o kvantnoj teoriji (***strana 169***), a tek sada izvodimo elektromagnetni član preko svojstava uvijenih petlji.

Kao što smo videli, model niti podrazumeva minimalnu vezu. To menja gustinu lagranžijana za naelektrisan relativistički fermion u elektromagnetnom polju, to jest koji je u interakciji, u gustinu lagranžijana kvantne elekrtodinamike:

$$\mathcal{L}_{QED} = \bar{\Psi}\left(i\hbar c\not{D} - c^2 m\right)\Psi - \frac{1}{4\mu_0} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \tag{151}$$

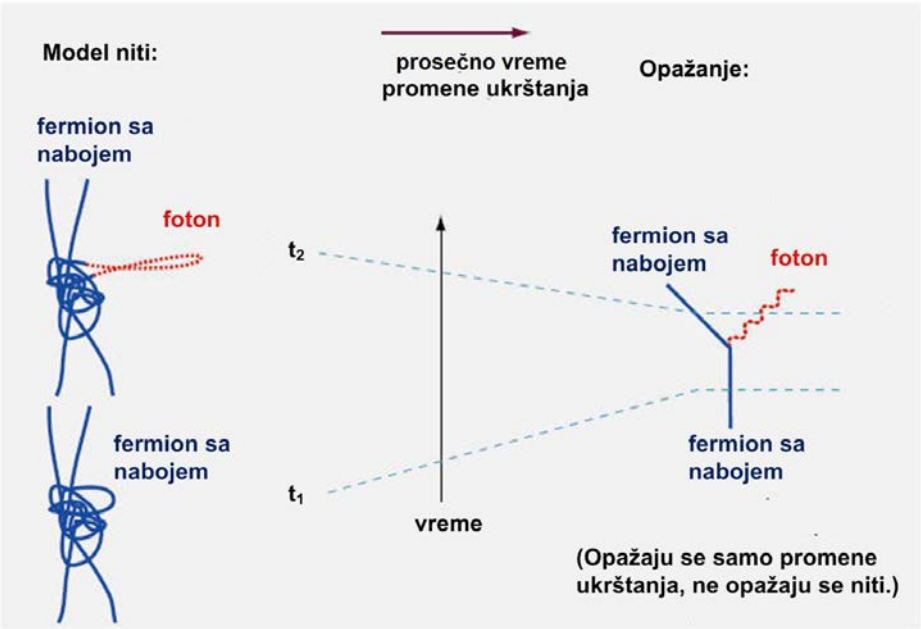
Ovde je $\not{D} = \gamma^\sigma D_\sigma$ kovarijantni izvod merila, koji je određen preko minimalne veze sa nabojem q:

$$D_\sigma = \partial_\sigma - iqA_\sigma \tag{152}$$

Minimalna veza podrazumeva da je gustina lagranžijana kvantne elektrodinamike invarijanta pri transformaciji merila U(1). Mi ćemo kasnije da razmotrimo detalje naboja q. (***Strana 281***). Time smo ponovo preko niti došli do gustine lagranžijana kvantne elektrodinamike. Niti stoga najpreciznije prikazuju proverenu teoriju fizike.

FAJNMANOVI DIJAGRAMI I RENORMALIZACIJA

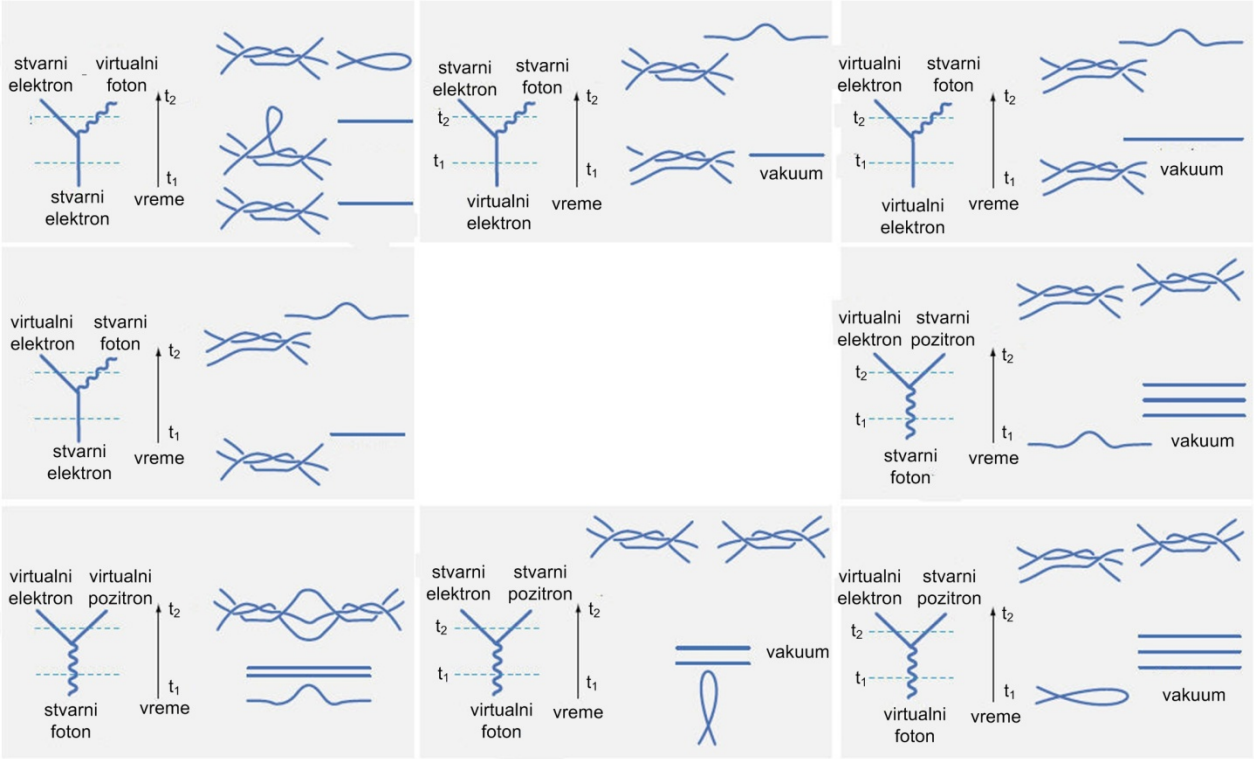
Fajmanovi dijagrami su skraćenja obrazaca za izračunavanje efekata kvantne elektrodinamike u ekspanziji smetnji. Fajnmanovi dijagrami slede iz lagranžijana kvantne elektrodinamike. Svi Fajnmanovi dijagrami kvantne elektrodinamike mogu da se konstruišu iz osnovnog dijagrama, koji je prikazan na desnoj strani ***slike 56***. Važniji Fajnmanovi dijagrami su prikazani na levim stranama ***slike 57*** i ***slike 58***.



Slika 56 Osnovni Fajnmanov dijagram kvantne elektrodinamike i njegova verzija i obliku zapleta

Osnovni Fajnmanov dijagram u modelu niti može da se vizuuelno prikaže direktno kroz pojmove niti, kao što je prikazano na levoj strani ***slike 56***. To je isti dijagram kojeg smo istražili odmah na početku odeljka o elektrodinamici, kada smo elektrodinamiku odredili kao razmenu uvijanja. (***Strana 173***). (Precizni zapleti za naelektrisane fermione biće izvedeni kasnije.) (***Strana 255***). Pošto su svi Fajnmanovi dijagrami konstruisani iz osnovnog dijagrama, model niti omogućava nam da sve moguće Fajnmanove dijagrame

predstavimo kao dijagrame niti. Na primer, model niti podrazumeva da je vakuum prepun virtualnih parova čestica-antičestica, kako je prikazano na ***slici 58***.



Slika 57 Različiti oblici osnovnog Fajnmanovog dijagrama kvantne elektrodinamike i njihove verzije u obliku zapleta

U kvantnoj teoriji polja lagranžijan mora da bude ne samo invarijanta Lorenca i merila, već mora da se renormalizuje. Model niti pravi nekoliko iskaza po ovom pitanju. Na ovom mestu mi ćemo da se usmerimo samo na kvantnu elektrodinamiku; ostale interakcije merila obradićemo u daljem tekstu. Model niti prikazuje lagranžijan kvantne elektrodinamike koji može da se renormalizuje. Renormalizacija je prirodna posledica modela niti u granicama kada su prečnici niti zanemarljivi. Razlog za mogućnost renormalizacije je u tome što model niti prikazuje pojedinačan, osnovni Fajnmanov dijagram kvantne elektrodinamike, ne dopuštajući druge vrste dijagrama.

Izobličavanje uvijanja koje je osnova modela niti za kvantnu elektrodinamiku, takođe predlaže nove načine za izračunavanje Fajnmanovih dijagrama višeg reda. Takvi načini su od koristi u izračunavanju *g*-činilaca naelektrisanih čestica, kao što je pokazano u narednom odeljku. Osim toga, model niti za kvantnu elektrodinamiku, kako je pokazano na ***slici 56***, podrazumeva da su dijagrami višeg reda kvantne elektrodinamike prosto ***izobličenja niti*** dijagrama nižeg reda. Uzimajuću statistički prosek izobličenja niti do određenog broja ukrštanja, omogućava nam zato da izračunamo efekte kvantne elekrtodinamike do određenog reda u spoju. Model niti stoga predlaže da su u kvantnoj elektrodinamici moguća neperturbacijska izračunavanja. Međutim, u ovom tekstu nećemo da pratimo ovu temu.

Model niti takođe nagoveštava da je razlika između renormalizovane i nenormalizovane mase i naboja u vezi sa razlikom između minimalnog i neminimalnog broja promena ukrštanja, ili ekvivalentno tome, između izobličenja zapleta sa malo ili sa više ukrštanja, pri čemu se niti izobličuju u razmeri manjeg rastojanja. Drugačije izraženo, nerenormalizovane veličine – takozvane gole veličine pri Plankovoj energiji – mogu da se zamisle kao one koje su izvedene kada se zapleti tesno povuku, to jest povuku do Plankovih rastojanja, dok su renornalizovane mase i vrednosti naboja one koje su izvedene za čestice okružene velikim kolebanjima.

Ukratko, model niti daje novu osnovnu sliku ili mehanizam za Fajnmanove dijagrame. Model niti ne menja bilo koji fizički rezultat na bilo kojoj dostupnoj energetskoj razmeri. Posebno, model niti prikazuje izmerenu promenu energije konstante fine srukture (***strana 283***) i masu čestica sa nabojem, budući da su prikazani svi redovi Fajnmanovih dijagrama do energije ispod Plankovih razmera. Odstupanja između kvantne elektrodinamile i modela niti očekuku se samo u blizini Plankove energije, kada su zapleti Plankovih prečnika jako zategnuti.

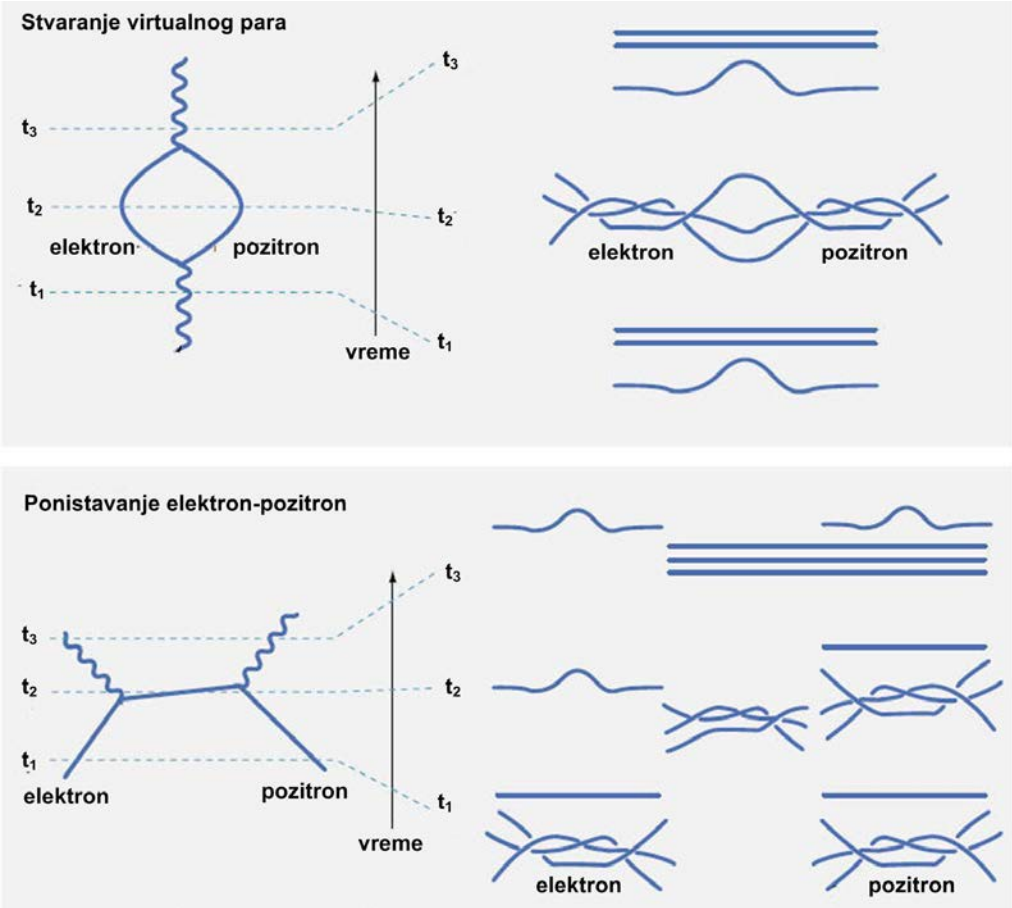
ANOMALIJA MAGNETNOG MOMENTA

Nenormalni magnetni moment *g* elektrona i miona dat je dobro poznatim izrazom

$$\frac{g}{2} = 1 + \frac{\alpha}{2\pi} - O\left(\alpha^2\right) \tag{153}$$

gde je *g*/2 polovina takozvanog g-činioca, čija je izmerena vrednost 1,00116(1), a α je konstanta fine strukture, čija je izmerena vrednost 1/137, 036(1). Ovu jednakost je 1948. gpdine otkrio Džulijan Švinger (Julijan Seymour Schwinger); izvršena izračuunavanja koja su dovela Švingera do ovog i sličnih rezultata u kvantnoj teoriji polja, donela su mu 1965. godine Nobelovu nagradu za fiziku. Rezultat je takođe ispisan na memorijalnoj oznaci u blizini njegovig groba na groblju Mount Auburn Cemetery. Model niti nudi jednostavno objašnjenje ovog rezultata.

Činilac *g*/2 opisuje odnos između učestanosti "mehaničkog" obrtanja – obrtanja mase čestice koje dovodi do spina – i učestanosti "magnetnog" obrtanja – obrtanja naboja čestice koje dvodi do magnetnog momenta.



Slika 58 Neki Fajnmanovi dijagrami kvantne elektrodinamike i njivove verzije sa zapletom

U modelu niti je mehaničko obrtanje naelektrisane elementarne čestice nastalo usled obrtanja jezgra zapleta kao krute celine, dok magnetno obrtanje takođe obuhvata promene faze nastale usled izobličenja jezgra zapleta. (***Strana 172***). Magnetno obrtanje naelektrisane elementarne čestice osim toga uključuje promene faza usled emitovanja i reapsorpcije virtualnog fotona, to jest uvijene petlje.

Verovatnoća emisije i reapsorpcije fotona određena je u prirodi konstantom fine strukture. Ovaj proces dovodi do dotatnog ugla koji čini da se ugao "magnetnog" obrtanja razlikuje od ugla "mehaničkog" obrtanja. Pošto konstanta fine strukture opisuje obrtanje faze usled razmene virtualnih fotona, emisija i reapsorpcija virtualnog fotona dovodi do razlike ugla, a ova razlika ugla je data usled same konstante fine strukture. Odnos između čisto mehaničke i čisto magnetne učestanosti obrtanja prema tome nije jedan, već je povećan za odnos između tog dodatnog ugla i 2π. To je Švingerov obrazac.

Model niti takođe podrazumeva da Švingerov obrazac važi za sve naelektrisane elementarne čestice, nezavisno od njihove mase, kako je zapravo i opaženo. Ukratko, model niti prikazuje Švingerov

proslavljeni obrazac skoro u tančine. Ispravke višeg reda takođe se pojavljuju prirodno. (***Izazov 153e***). Konačno, model niti podrazumeva da potpun izraz, sa uključenim svim redovima, mora da konvergira, pošto ukupan rezultat nastaje usled oblika i dinamike jezgra zapleta. Razmatranja o postojanju granice perturbacije u kvantnoj elektrodinamici stoga su stavljena u mirovanje.

Osim toga, opis obrtanja čestise pomoću niti predlaže način da se izračuna konstanta fine strukture. To ćemo da istražimo u daljem tekstu. (***Strana 288***).

MAKSVELOVE JEDNAKOSTI

Model niti isto tako omogućava da se neposredno provere Maksvelove jednakosti polja klasične elektrodinamike. Ove jednakosti su:

$$\nabla \boldsymbol{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$
$$\nabla \boldsymbol{B} = 0$$
$$\nabla \times \boldsymbol{E} = -\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t}$$
$$\nabla \times \boldsymbol{B} = \frac{1}{c^2}\frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial t} + \mu_0 \boldsymbol{J} \qquad (154)$$

- Prva od ovih jednakosti je zadovoljena bez obzira na to kakav može da bude precizan mehanizam na osnovi emisije uvijenih petlji električnog naboja. Zapravo, bilo koji mehanizam u kojem se naboj nasumično šalje ili prima, daje zavisnost $1/r^2$ za elektromagnetno polje i zahtevanu povezanost između naboja i divergencije električnog polja. Ovo nije dubokouman rezultat: svaki sistem sa simetrijom lopte koji nasumično emituje i prima neki subjekt daje ovu jednakost, uključujući zavisnost od obrnute srazmere kvadrata rastojanja. Rezultat može da se potvrdi takođe na drugi, dobro poznat način. U svakoj interakciji razmene između dva naelektrisanja, vreme razmene je srazmerno dužini njihovih rastojanja r; osim toga, kvantna teorija izražava da je razmenjena količina kretanja obrnuto strazmerna rastojanju r. Prema tome, sila, količina kretanja u jedinici vremena, menja se sa $1/r^2$. Ova relacja važi nezavisno od osnovnog kretanja uvijene petlje. pošto prostor ima tri dimenzije: svi lokalni izvori automatski ispunjavaju zavisnost obrnute srazmere kvadrata.

  Konstanta na desnoj strani prve jednakosti sledi iz odrednice za jedinicu; na jeziku modela niti konstanta određuje stepen emisije uvijene petlje za elementarnu česticu.

- Druga jednakost polja (154) izražava nepostojanje magnetnog naboja. Ova jednakost model niti automatski zadovoljava, jer odrednica magnetnog polja preko niti ne dopušta postojanje bili kojih magnetnih izvora. Zapravo, niti predpostavljaju da nijedan lokalizovan subjekt ne može imati magnetni naboj. Isto tako ova jednakost važi nezavisno od detalja kretanja niti. I ponovo, to je efekt topologije.

- Treća jednakost polja povezuje privremenu promenu magnetnog polja sa koncentičnim krugovima električnog polja. Ovo je prirodno zadovoljeno u modelu niti, pošto krugovi u električnom polju konstrukcijom podrazumevaju promene magnetnog polja, kao šro je prikazano na ***slici 52***. Ponovo, ova relacija je nezavisna od detalja kretanja niti, sve dok se uzme da je prosečna razmera dovoljno velika da bi omogućila odrednice električnog i magnetnog polja.

- Najinteresantnija jednakost je posledna od četiri Maksvelovih jednakosti (154): naročito drugi član na desnoj strani, zavisnost od struje naboja. U opisu elektrodinamike struja naboja $\boldsymbol{J}$ pojavljuje se sa pozitivnim predznakom i bez brojčanih činioca. (To je u suprotnosti sa linearizovanom gravitacijom, gde stuja ima brojčani činilac i negativan predznak.) Pozitivan predznak znači da veća struja proizvodi jače magnetno polje. Model niti prikazuje ovu činjenicu: niti dovode do efekta koji je srazmeran i naboju (pošto više elementarnih naelektrisanja proizvode više protoka ukrštanja) i brzini kretanja naboja (veća brzina naboja dovodi do većeg protoka). Zbog ovog rezultata ponovo se dobija spin klasičnog fotona, koji je određen kao L/ω, i koji određuje brojčani činilac, naime 1, koji se pojavljuje ispred struje naboja $\boldsymbol{J}$. Isto tako ova povezanost očigledno je nezavisna od preciznog kretanja osnovnih niti.

  Prvi član na desnoj strani četvrte jednakosti, koji predstavlja povezanost između promenljivog električnog polja i koncentričnih krugova magnetnog polja, automatski je u skladu sa modelom. To možemo ponovo da proverimo na ***slici 52*** – i ponovo, to je topološki efekt, koji važi za svako

osnovno kolebanje niti. Kao primer toga, kada se napuni kondenzator, između njegovih ploča skreće igla kompasa. U modelu niti akumulisan naboj u pločama dovodi do magnetnog polja. Poslednja Maksvelova jednakost takođe je potvrđena modelom niti.

Ukratko, model niti prikazuje Maksvelove jednakosti. Međutim, to nije veliko dostignuće. Jednakosti slične Maksvelovim pojavljuju se na mnogim mestima u teoriji polja, na primer, u fizici čvstih stanja i hidrodinamici. Matematički fizičari toliko su naviknuti na pojavu jednakosti sličnih Maksvelovim u drugim oblastima, tako da im retko posvećuju pažnju. Prava provera svakog modela elektrodinamike, kvantne ili klasične, su odstupanja koje model predviđa u elektrodinamici, posebno pri visokim energijama.

ZANIMLJIVOSTI I ZABAVNI IZAZOVI O KVANTNOJ ELEKTRODINAMICI

Možete li da potvrdite da model niti kvantne elektrodinamike ne remeti konjugaciju C i paritet P naboja pri bilo kojoj energiji? (***Izazov 154e***).

* * *

Možete li da potvrdite da je u modelu niti kvantne elektrodinamike očuvana boja i slab naboj na svim energijama? (***Izazov 155e***).

* * *

Mozete li da odredite da li je ovde izvedena grupa merila U(1) ona iz elektrodinamike ili ona iz slabog hipernaboja? (***Izazov 156e***).

* * *

Možete li da nađete merljivo odstupanje modela niti od kvantne elektrodinamike? (***Izazov 157s***).

ZAKLJUČAK O KVANTNOJ ELEKTRODINAMICI I EKSPERIMENTALNIM PREDVIĐANJIMA

Fotoni su u modelu niti pojedinačne, spiralno uvijene niti, nasumićno razmenjene između naboja; naboji su hirijalnni zapleti, pa prema tome oni efektivno emituju ili apsorbuju stvarne ili virtualne fotone. To je potpun opis kvantne elektrodinamike korišćenjem niti.

Pokazali smo posebno da I potez Rajdemajstera – ili uvijanje jezgra zapleta – dovodi do do U(1) invarijante merila, do Kulonove relacije obrnute srazmere kvadrata, do Maksvelovih jednakosti i do Fajnmanovih dijagrama. Ukratko, mi smo izveli sva eksperimentalna svojstva kvantne elektrodinamike, osim jednog: jačine veze. Uprkos ovom otvorenom pitanju. mi smo rešili jedan red iz milenijumske liste otvorenih pitanja (***strana 128***): znamo poreklo elektromagnetne interakcije i njenih svojstava.

Postoji li razlika između modela niti i kvantne elektrodinamike? Precizan odgovor je: postoje ***nemerljive*** razlike između modela niti i kvantne elektrodinamike. Na primer, *g*-činilac elektrona ili miona predviđen u kvantnoj elektrodinamici nije promenjen u modelu niti. Simetrija merila U(1) i celina kvantne elektrodinamike važi na svim energijama. Ne postoje magnetni naboji. Ne postoje druge grupe merila. Kvantna elektrodinamika ostaje tačna u svim slučajevima – sve dok ulogu nema gravitacija.

Nepostojanje viših simetija merila koje predviđa model niti je uznemirujući. Zato ***ne postoji*** velika unifikacija u prirodi; u prirodi ne postoji opšta grupa merila, bilo to SU(5), SO(10), E(6), E(7), E(8), SO(32) ili bilo koja druga. Ovakav rezultat indirektno isključuje supersimetriju i supergravitaciju. Ovaj nepopularan rezultat u protivrečnosti je sa mnogim omiljenim navikama ili mišljenjima,

Ekvivalentnost Fajnmanovih dijagrama i dijagrama niti u modelu niti podrazumeva da mogu da se očekuju odstupanja modela niti od kvntne elektrodinamike ***samo*** kada gravitacija počne da ima ulogu. Model niti predviđa da će se to dogoditi samo u blizini Plankove energije $\sqrt{\hbar c^5/4G}$. Na nižim energijama predviđa se da ostaje da važi kvantna elektrodinamika.

Model niti potvrđuje takođe da kombinacija gravitacije i kvantne teorije stavlja sve Plankove jedinice u njihove granične vrednosti, pošto postoji maksimalno ukrštanje niti u prirodi, usled osnovnog načela. Model niti posebno potvrđuje maksimalnu vrednost električnog polja od $E_{max} = c^4/4Ge \approx 1{,}9\cdot 10^{62}$ V/m i maksimalnu vrednost magnetnog polja od $B_{max} = c^3/4Ge = 6{,}3\cdot 10^{53}$ T. Do sada ova predviđanja nisu bila u suprotnosti sa opažanjima.

Zato model niti predviđa da su jedine mogućnosti da se opaze odstupanja od kvantne elektrodinamike približavanje graničnim vrednostima električnog ili magnetnog polja – datih kvantnom gravitacijom. Međutim, merenja nisu moguća u ovim oblastima. Prema tome, možemo da kažemo da ne postoje merljive razlike između modela niti i kvantne elektrodinamike.

U našem istraživanju kvantne elektrodinamike ostale su otvorene samo dve tačke: izračunavanje elektromagnetne veze i određivanje spektra mogućih zapleta za elementarne čestice. Pre no što ove tačke pojasnimo, pogledalmo sledeći Rajdemajsterov potez.

SLABA NUKLEARNA INTERAKCIJA I DRUGI RAJDEMAJSTEROV POTEZ

Slaba interakcija u prirodi rezultat je apsorpcije i emisije bozona sa masom i spinom 1 koji obrazuju porušen triplet. W i Z bozone emituju ili asorbuju čestice sa slabim nabojem; to su levostrani fermioni ili desnostrani antifermioni. Drugim rečima, slaba interakcija maksimalno prekida P paritet. W bozon ima jedinični električni naboj, dok Z bozon ima električni naboj koji nestaje. Emisija i apsorpcija W bozona menja vrstu čestice fermiona koji ućestvuje. Slabi bozoni su takođe i u međusobnoj interakciji. Sve čestice sa slabim nabojem imaju masu i kreću se sporije od svetlosti. Lagranžijan materije povezan sa slabim poljem prekida SU(2) simetiju merila. (***Strana 178***). Postoje osnovni Fajnmanovi dijgrami sa trostrukim ili četvorostrukim vrhuncima. Konstanta slabe veze je određena konstantom elektromagnetne veze i slabom masom bozona; njena zavisnost od energije određena je renormalizacijom.

U predhodnom pasusu sabirana su glavna opažanja o slaboj interakciji. Preciznije, sva opažanja povezana sa slabom interakcijom opisana su preko lagranžijana. Preme tome, potrebno je da proverimo da li lagranžijan slabe interakcije sledi iz modela niti.

NITI, DRUGI RAJDEMAJSTEROV POTEZ I SU(2)

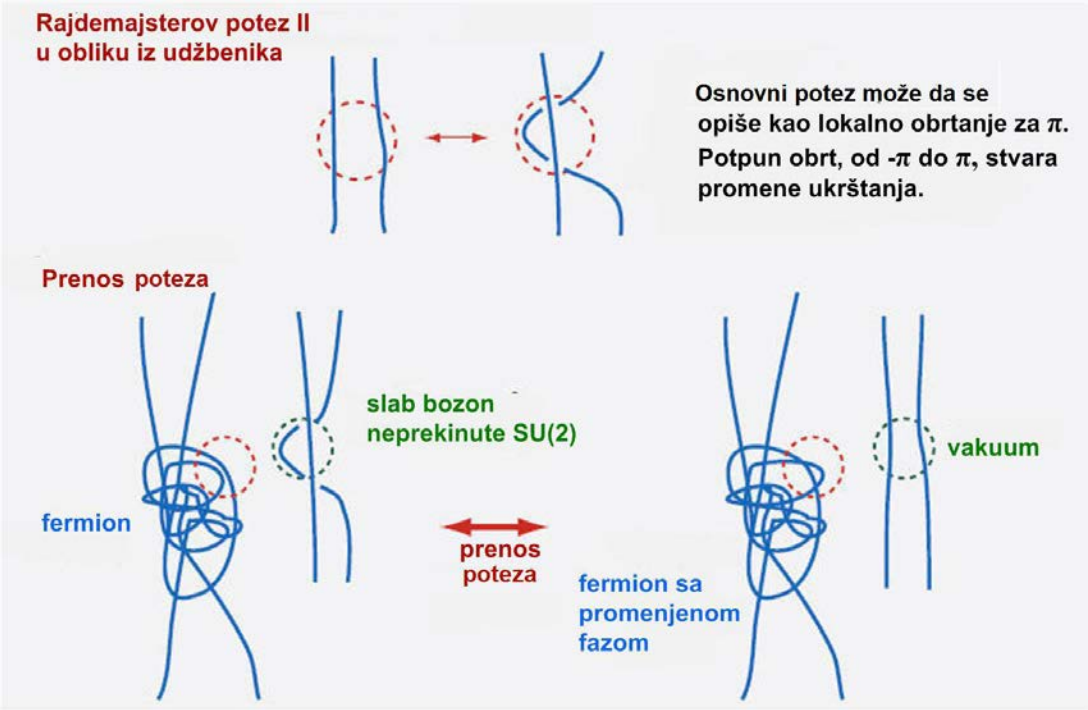
Kao što je objašnjeno u predhodnom tekstu (***strana 171***), svaka interakcija merila koja uključuje fermion je izobličenje jezgra zapleta koje menja fazu i obrtanje zapleta fermiona. Počećemo direktno glavnom odrednicom.

- Slaba interakcija je prenos II Rajdemajsterovog poteza, između dve čestice. Ilustracija je data na ***slici 59***. U ovom procesu niti se ne seku; one prosto prenose izobličenje kao rezultat njihove neprobojnosti.
- Niti opisuju slabu interakciju kao razmenu II Rajdemajsterovog poteza. Osnovni Rajdemajsterovi II potezi izazivaju u jezgru zapleta lokalna obrtanja za ugao π, kao što je prikazano na ***slici 60***: svaki osnovni Rajdemajsterov II potez obrće oblast zaokruženu kružnicom prikazanu isprekidanom linijom. Postoje ***tri*** osnovna poteza, linearno nezavisna, u tri međusobno ortogonalna pravca. Tri osnovna poteza τ_x, τ_y i τ_z deluju na lokalnu oblast na isti način kao tri moguća međusobno ortogonalna delovanja obrtanja kopče opasača. Radi upotpunjavanja, zapažamo da sledeći dokazi ne zavise od toga da li su dve niti uključene u potez paralelne, ortrogonalne ili pod opštim uglom. Sledeći dokazi takođe ne zavise od toga da li su potezi predstavljeni izobličavanjem ***dve*** niti ili samo ***jedne*** niti. (***Izazov 158e***). Oba slučaja dovode do promene ukrštanja, za svaku moguću vrstu Rajdemajsterovog II poteza.

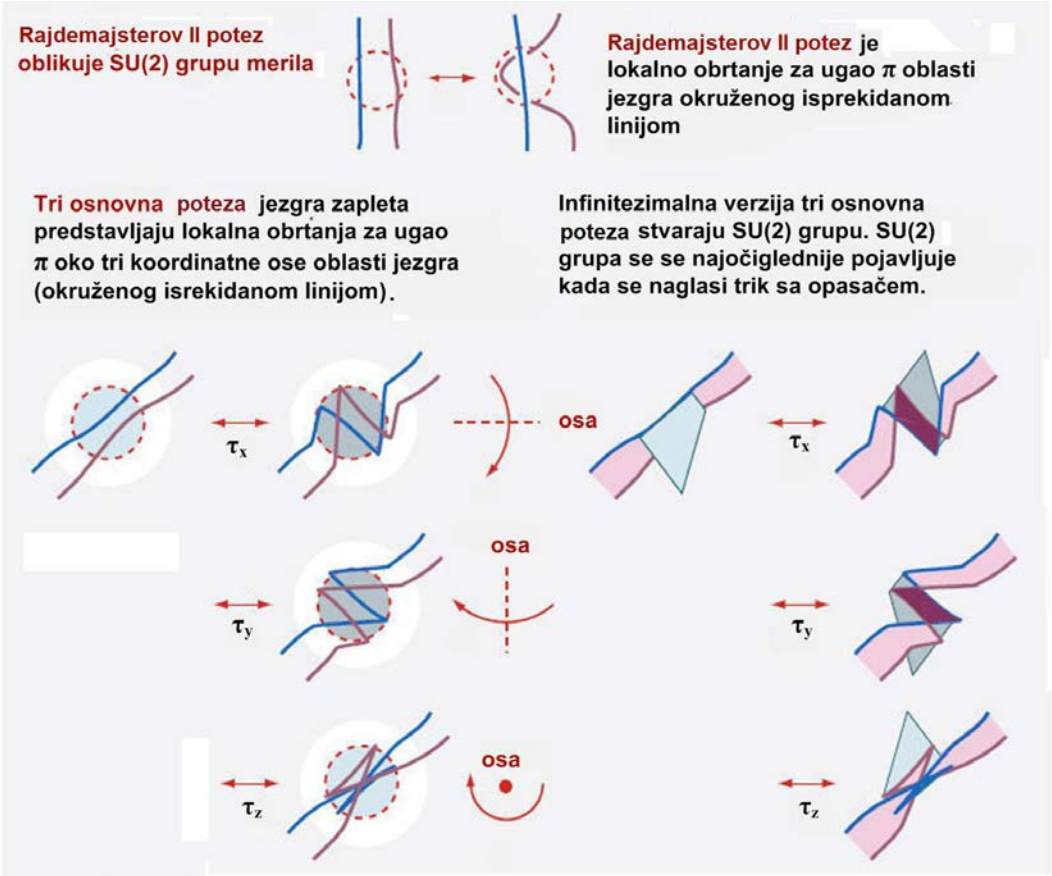
Slika 60 prikazuje da proizvod dva različita osnovna poteza daje treći osnovni potez (***Izazov 159e***), zajedno sa predznakom – koji zavisi da li je sekvenca ciklična ili nije – i sa činiocem *i*. Korišćenje odrednice za -1 kao lokalnog obrtanja oblasti kopče za ugao 2π (***strana 148***), nalazimo takođe da je koren svakog osnovnog poteza –1 . Detaljno, možemo da pročitamo iz sledeće tabele množenja za tri osnovna guranja.

$\cdot$	τ_x	τ_y	τ_z
τ_x	-1	$i\tau_z$	$-i\tau_y$
τ_y	$-i\tau_z$	-1	$i\tau_x$
τ_z	$i\tau_y$	$-i\tau_x$	-1

(155)



Slika 59 Prenos ***guranja*** je osnova slabe interakcije u modelu niti. Nijedna nit nije presečena i ponovo zalepljena; prenos se događa kroz odstranjenu zapreminu usled neprobojnosti niti.



Slika 60 Kako skup svih Rajremajsterovih II poteza – skup svih izobličenja koji utiču na jezgra zapleta slabom interakcijom – oblikuju SU(2) grupu merila: tri poteza dovode do trika sa opasačem, koji je ovde prikazan tačkastom kopčom i dva opasača. Da bi bilo jasnije, prikaz je sa dve niti, umesto sa pojedinačnom niti

Drugim rečima, tri osnovna ppoteza – a posebno njihovi infinitezimalni oblici – ponašaju se kao generatori grupe SU(2). Pošto potezi mogu da se posmatraju kao lokalna obrtanja oblasti kopče, ona mogu da budu uopštena na proizvoljne uglove. Takvi proizvoljni potezi mogu da se spoje u lanac. Stoga nalazimo da

proizvoljni II potezi Rajdemajstera oblikuju potpunu SU(2) grupu. To je razlog za njihovu ekvivalentnost sa kopčom opasača.

Drugi izbori merila za čestice nisu prikazani na ***slici 60***. Izbor merila proizilazi iz drugačijih načina na koje se osnovni potezi τ_x, τ_y i τ_z mogu da se pridruže skupu izoblićenja koji opisuje trik sa opasačem.

Sabrano, možemo da izrazimo da u svakoj odrednici faze zapletenog jezgra fermiona postoji SU(2) sloboda merila; osim toga, postoji interakcija sa SU(2) simetrijom merila. Drugim rečima, model niti podrazumeva, preko II Rajdemajsterovog poreza, da ***postoji neprekinuta slaba interakcija sa grupom merila SU(2)***.

SLAB NABOJ I NARUŠAVANJE PARITETA.

Čestica ima slab naboj ako se pojave prosečne promene faze različite od nule, kada je čestica subjekt u više nasumičnih II poteza Rajdemajstera. Okruženi koritom niti kojeg neprekidno izazivaju naumični potezi, neće svi zapleti promeniti svoje faze u proseku dužeg vremena: promeniće je samo zapleti koji su izgubili simetriju. Jedna simetrija koja mora da nedostaje je simetrija lopte. Prema tome, samo zapleti čijim jezgrima nedostaje ***simetrija lopte*** imaju šansu da na njih utiču nasumični II potezi Rajdemajstera. Pošto svim zapletima sa vezanim ili upletenim jezgrima nedostaje simetrija lopte, svi takvi zapleti, to jest, sve čestice sa masom, kandidati su da se na njih utiče, a to su svi kandidati za čestice slabog naboja. Zbog toga ih istražujemo detaljnije.

Ako je zaplet načinjen od dve ili više vezane ili upletene niti, on predstavlja česticu sa masom i spinom 1/2 (osim za prosto uvijanje, koje predstavlja gravitaciju). (***Strana 222***). Svim takvim jezgrima fermiona nedostaje simetrija lopte ili valjka. Kada je fermion u spinu, događaju se dve stvari: jezgro se obrče i nastaje trik sa opasačem kojim se raspliću repovi. Upoređujući sa smerom kretanja, obrtanja i rasplitanja mogu da budu ili levostrana ili desnostrana. (***Strana 167***).

Svaki potez je transformacija oblika u prioritetnom smeru, levom ili desnom. Važnost hirijalnosti je u sledećem.

Čestica ima slab naboj ako nasumična guranja vode ka dugotrajnoj promeni faze. Da bi se osetio bilo koji prosečan efekt kada se dogodi veliki broj nasumičnih poteza, jezgro mora da se podvrgne različitim efektima za potez i njegov obrnuti učinak. Kako je već pomenuto, ovo zahteva nepostojanje simetrije jezgra. Uvek kada jezgro nema simetriju pojaviće se efekt nekompenzovane faze: ako se jezgro obrće uz rasplitanje svojih repova, a potez je u istom smeru obrtanja, faza će se povećavati, dok će za suprotan smer obrtanja faza da se smanjuje, ali nešto manje.

- Za fermione ***slab naboj*** koji ne iščezava pojavljuje se samo za jezgra zapleta čiji smer obrtanja dovodi do prosečnog efekta II poteza Rajdemajstera.

Drugim rečima, model niti predviđa da će nasumični potezi delovati na jezgro samo ako su smer obrtanja jezgra i nasumično primenjen trik sa opasačem ***istog*** smera obrtanja. Fizičkim pojmovima, nasumični potezi će delovati samo na čestice levog smera ili na antičestice desnog smera. Prema tome, model niti predviđa da ***slaba interakcija maksimalno narušava paritet***. To je tačno kako je i opaženo. Drugim rečima, slab naboj i narušavanje pariteta slabe interakcije posledice su trika sa opasačem. Ova relacija je sumirana na ***slici 61***.

Ako je elementarna čestica opisana pomoću ***dve zapletene*** niti, očekujemo da na nju utiču prosečni II potezi Rajdemajstera. Takva jezgra zapleta su bozoni sa spinom 1; njihovom jezgru nedostaje simetrija lopte ili valjka. Obrtanje jezgra će izazvati nesimetriju levo-desno, koja će dovesti do jačeg efekta poteza nego njegove suprotnosti. Čestice od dve niti predviđene su prema tome da nose slab naboj. Zato očekujemo da kvarkovi – što će biti objašnjeno u daljem tekstu – i sami slabi bozoni imaju slabu interakciju.

Zbog toga što slabi bozoni imaju slabu interkciju, model niti podrazumeva da je slaba interakcija neabelijska teorija merila, kao što je i opaženo.[1]

---

[1] Neabelijsku teoriju merila uveo je Volfgang Pauli (Wolfgang Pauli). On je objasnio 1950-ih godina teoriju u seriji razgovora. Dva fizičara Jang Čen Ning (Yang Chen Ning) i Robert Mils (Robert Mills) potom su zapisali uvu ideju. Jang je dobio Nobelovu nagradu za fiziku sa Li Cung Dao (Lee Tsung Dao) za drugu temu, naime za narušavanje pariteta slabe interakcije.

Ako je zaplet načinjen od ***pojedinačne nevezane*** niti, na njega neće uticati nasumični potezi. Model niti zato predviđa da foton nema slab naboj, kao što je i opaženo. To se isto važi i za gluone.

Odrednica slabog naboja pomoću niti dovodi do dva zaključka koji mogu da se provere eksperimentima. Prvi, sve čestice sa električnim nabojem – koje imaju jezgra koja su hirijalna, pa im stoga nedostaje simetrija valjka – predviđeno je da su slabog naboja. Drugi, u modelu niti samo su čestice sa masom u slaboj interakciji; zapravo, ***sve*** čestice sa masom imaju slabu interakciju, pošto njihovim jezgrima nedostaje simetrija valjka. Drugim rečima, sve čestice slabog naboja kreću se sporije od svetlosti i obratno. Oba zaključka su u saglasnosti sa opažanjima.

Ukratko, sva svojstva slabog naboja koji se nalazi u prirodi prikazana su modelom zapleta.

Slika 61 Tri osnovna Rajdemajsterova II poteza i slab naboj u modelu niti

SLABI BOZONI

Baždarni bozoni su one čestice koje se razmenjuju između fermiona u interakciji: baždarni bozoni izazivaju promene faza fermiona. To podrazumeva da su (neprekinuti) slabi bozoni čestice[1] koje izazivaju tri II poteza Rajdemajstera:

- Slabi srednji bozoni opisani su dvostrukim nitima. Prikaz je dat na ***slici 62***.

Pojedinačne niti koje izazivaju promenu faza u fermionima imaju slabu interakciju što je prikazano na levoj strani ***slike 62***. One odgovaraju trima osnovnim II potezima Rajdemajstera, τ_x, τ_y i τ_z. Zapažamo dve dodatne stvari. Pre svega, da bi (neprekinuti) bozoni sa spinom 1 mogli da se opišu kretanjem pojedinačne niti u grupi niti. To ih čini česticama sa spinom 1.

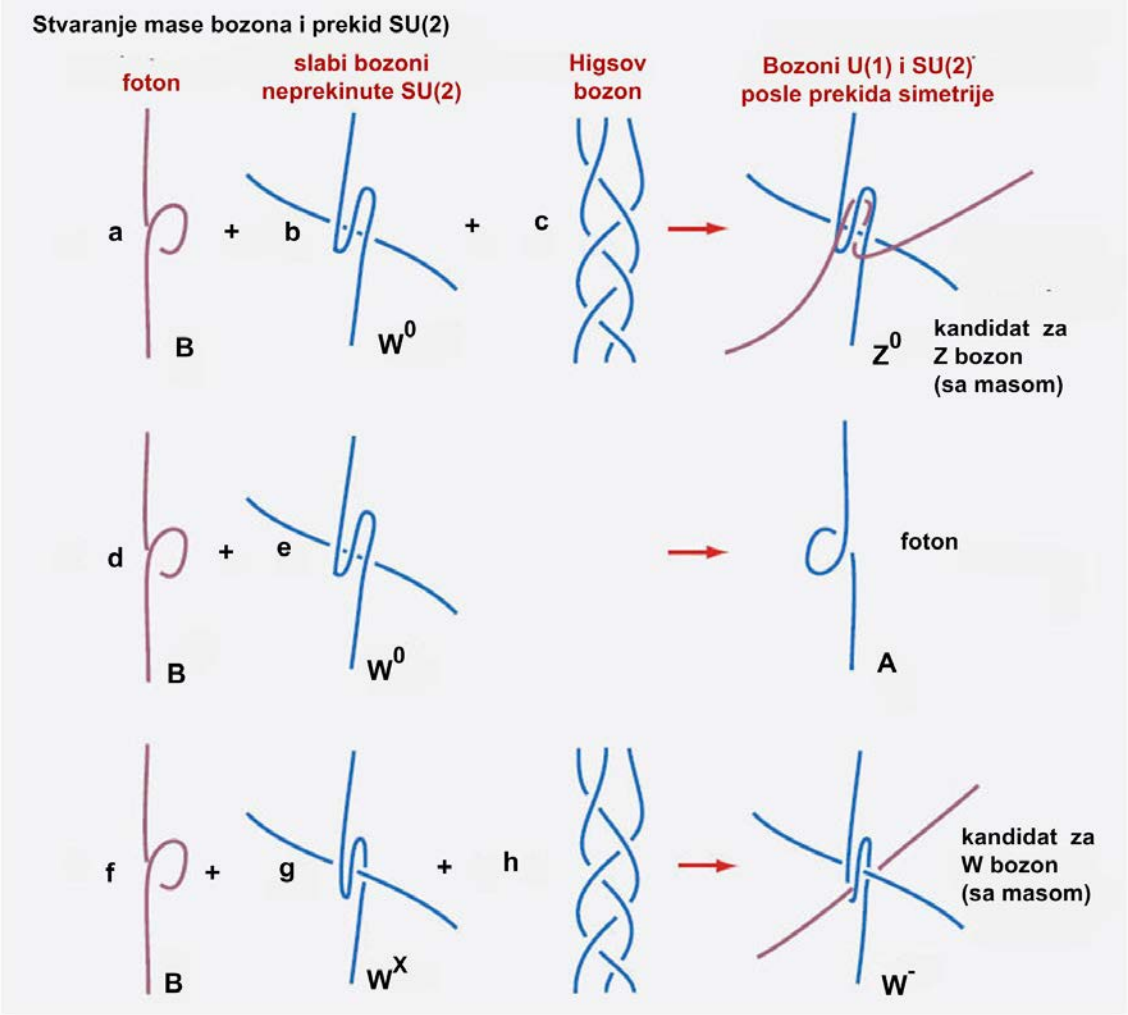
Osim toga, nevezani zapleti ***nemaju masu***. U modelu niti zapleti koji izazivaju poteze ***razlikuju*** se od slabih srednjih bozona sa masom, što je prikazano na desnoj strani ***slike 62***. Ova razlika je usled ***prekida*** SU(2) simetrije merila, kao što ćemo uskoro da saznamo.

LAGRANŽIJAN NEPREKINUTE SU(2) INTERAKCIJE MERILA

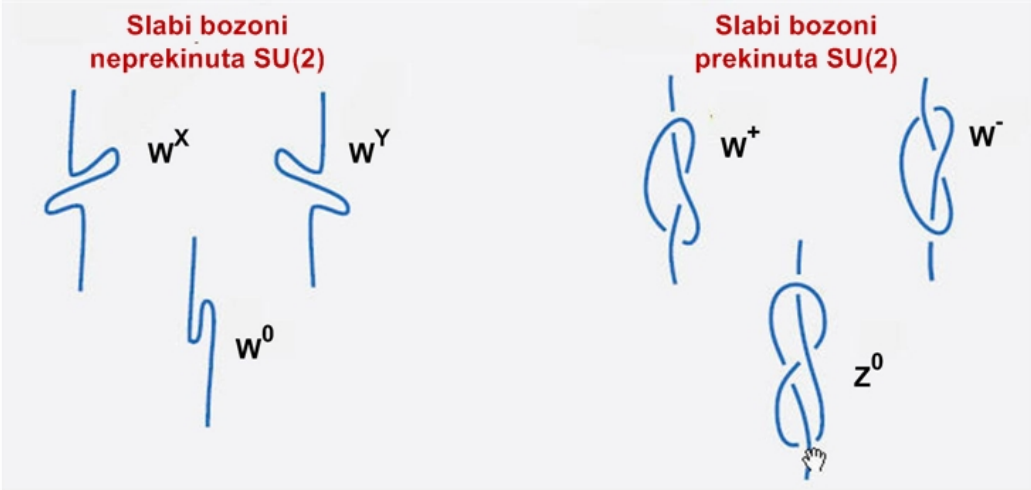
Energija slabog polja data je gustinom niti slabih mernih bozona. Sve dok nije prekinuta SU(2) simetrija, energija slabog polja i energija fermiona su invarijante SU(2). Kao posledica toga, sada smo sposobni da izvedemo veliki deo lagranžijana slabe interakcije, naime lagranžijan za slučaj kada je simetrija SU(2) neprekinuta.

Sve dok nije prekinuta simetrija SU(2), vektorski bozoni su opisani kao nevezani zapleti koji izazivaju II poteze Rajdemajstera, kao što je prikazano na levoj strani ***slike 62***. Postoje tri takva bozona. Pošto oni mogu da se opišu pojedinačnom niti koja se kreće, oni imaju spin 1: pošto nisu vezani oni imaju nultu masu i električni naboj.

[1] Ovaj preuređen model niti za W i Z bozone pojavio se 2015. godine.



Slika 62 Rajdemajsterov II potez koji izaziva kretanje niti (levo) postaje slab vektorski zaplet sa masom (desno) preko prekida simetrije i uplitanja repova. Uplitanja repova povezana su sa Higsovim bozonom, čiji će model zapleta biti objašnjen kasnije.



Slika 63 Predpostavljeni modeli za bozone slabog merila iz 2008. godine, sada se smatraju netačnim

Energija je broj promena ukrštanja u vremenu. Sve dok simetrija SU(2) nije prekinuta i slabi bozoni su bez mase, energija polja slabih bozona, a stoga i njihova gustina lagranžijana, data je istim izrazom kao energija polja fotona. (***Strana 178***). Model niti posebno podrazumeva da je gustina energije kvadratna u jačini polja. Samo moramo da saberemo energije sva tri bozona da dobijemo:

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}\sum_{a=1}^{3} W^{a}_{\mu\nu}\, W_{a}^{\mu\nu} \qquad (156)$$

Izraz je invarijanta SU(2) merila. U stvari, transformacija SU(2) merila nema uticaj na broj promena ukrštanja usled slabih bozona ili kretanja guranja. Prema tome, transformacija merila ostavlja kao invarijante jačine polja i stoga energiju slabog polja, kao što je i opaženo.

Sada možemo da napišemo lagranžijan za fermione sa slabim nabojem koji su u interakciji sa slabim vektorskim bozonima. Počevši od ideje da izobličenja jezgra zapleta dovode do ponovnog određivanja faze, našli smo da II potezi Rajdemajstera podrazumevaju da je gustina neprekinutog slabog lagranžijana za polja materije i zračenja invarijanta SU(2) merila. Paralelno sa elektrodinamikom dobijamo stoga lagranžijan

$$\mathcal{L}_{\text{unbr.weak}} = \sum_f \bar{\Psi}_f \left(i\hbar c \not{D} - m_f c^2 \right) \Psi_f - \frac{1}{4} \sum_{a=1}^{3} W^a_{\mu\nu} W_a^{\mu\nu} \qquad (157)$$

gde je sada $\not{D}$ kovarijantni izvod SU(2) merila, a prva suma je izvršena nad svim fermionima. U ovom lagranžijanu samo su levostrani fermioni i desnostrani antifermioni nosioci slabog naboja. Međutim, ovaj laranžijan ***ne opisuje*** prirodu: nedostaje opažen prekid SU(2).

PREKID SU(2)

Slaba interakcija u prirodi ***nema*** SU(2) simetriju merila. Simetrija je samo približna: kaže se da je ***prekinuta***. Glavni efekt prekida SU(2) simetrije su mase koje ne nestaju – i različite su –za W i Z bozone i stoga slabost i kratak opseg slabe interakcije. Osim toga, prekid simetrije podrazumeva ***mešavinu*** slabe i elektromagnetne interakcije: to daje takozvanu ***elektroslabu*** interakciju. (***Strana 192***). Ova mešavina često se naziva elektroslabo "objedinjavanje". Model niti predlaže sledeći opis:

- ***Generisanje mase*** za bozone i odgovarajući ***prekid simetrije*** SU(2) nastaju usled ***uplitanja repova*** na granici prostora. ***Slika 62*** prikazuje ovu ideju.

U ovom opisu se predpostavlja da se uplitanje repova[1] pojavljuje na rastojanju izvan domašaja opažanja; u takvoj oblasti – koja može da bude takođe granica fizičkog prostora – gde uplitanje repova ***nije*** zabranjeno i ***može*** da se dogodi. Verovatnoća uplitanja repova je mala, pošto ukrštanja moraju prvo da se kolebaju na tu udaljenost, a onda da se kolebaju natrag. Uprkos tome, proces uplitanja repova može da se dogodi.

Uplitanje repova javlja se samo u slaboj interakciji. Ne pojavljuje se u druge dve interakcije merila, pošto ostali potezi Rajdemajstera ne utiču na procese na granici prostora. To je razlog što je u modelu niti prekinuta samo SU(2) u prirodi. Ukratko, prekid SU(2) je prirodna posledica II poteza Rajdemajstera.

Uplitanje repova pretvara neupletene niti II poteza Rajdemajstera, pa prema tome bez mase, u upletene, pa zato u W i Z niti sa masom. Uplitanje repova dovodi do jezgra čestica: to je zato proces pojave mase. Precizna vrednost mase koju oni stvaraju biće određena u daljem tekstu. (***Strana 267***). Model niti zato potvrđuje da je pojava mase povezana sa prekidom slabe interakcije.

Uplitanje meša W^0 sa orginalnim fotonima. To je prikazano na ***slici 62***. Mešanje nastaje usled topološke sličnosti dve čestice u modelu niti. Rezultujući Z bozon je nehirijalan, pa stoga električki neutralan, kako je i opaženo. Zapažamo da postojanje Z bozona sa masom podrazumeva da se u prirodi javlja elastično rasipanje neutrina, kao što je opaženo prvi put 1974. godine. Pošto bilo koja čestica sa električnim nabojem ima takođe i slab naboj (***strana 182***) postojanje Z bozona podrazumeva da bilo koje dve naelektrisane čestice mogu da budu u interakciji i razmenom fotona i razmenom Z bozona. Drugim rečima, prekid SU(2) podrazumeva elektroslabo mešanje, ili elektroslabo "objedinjavanje", kako se obično kaže. (***Strana 192***).

Uplitanje repova se događa u nekoliko procesa interakcije, kao što je prikazano na ***slici 65***. (***Strana 193***). Uplitanje repova zato može da promeni topologiju čestice, pa zato i vrstu čestice.. Model niti zato predviđa da slaba interakcija ***menja*** (vrstu) ukusa, kao što je i opaženo. Ustvari, model niti takođe predviđa da ***samo*** slaba interakcija ima ovo svojstvo. Ovo je takođe opaženo.

S jedne strane, u modelu niti nikada se niti ne seku i ne lepe se ponovo, čak ni u slaboj interakciji. Kao reziultat toga, model niti predviđa da su u slaboj interakciji očuvani električni naboj, spin, i naboj boje, kao što ćemo videti u daljem tekstu (***strana 238***), barionski broj i leptonski broj. Sve ovo je i opaženo.

Uplitanje repova takođe podrazumeva da zapleti za Z bozon i za W bozon, prikazani gore, samo su najjednostavniji zapleti pridruženi svakom bozonu; komplikovaniji zapleti su stanja viših redova prostiranja istih

[1] U orginalnom modelu niti slabih bozona iz 2008. godine ulogu uplitanja repova preuzelo je preplitanje niti.

osnovnih otvorenih čvorova. (***Strana 267***). To će kasnije imati veliki značaj za dokaz da su već danas poznati svi merni bozoni u prirodi.

Sumirano, II potez Rajdermajstera dovodi do uplitanja repova; uplitanje repova dovodi do opaženog prekida simetrije SU(2). Ekvivalentno tome, model niti podrazumeva da najjednostavniji zapleti bozona slabe interakcije pokazuju SU(2) simetriju, dok složeniji, vezani zapleti, prekidaju tu simetriju.) Vrednost ugla mešanja i mase čestica moraju tek da se odrede. To će biti učinjeno u daljem tekstu. (***Strana 267***).

OTVORENO PITANJE: DA LI SU W I Z ZAPLETI TAČNI?

Sergej Fadejev je 2014. godine pokrenuo pitanje: Kada bi verzije W i Z zapleta moge da budu nađene, i nebi sadržavale bilo koji čvor i zahtevale stvarni proces preplitanja u prostornoj beskonačnosti, model niti bi postigao jednostavnost i eleganciju. Razmišljajući o ovom pitanju postaje jasno da bi se takav zaplet mogao pojaviti kada bi bile uključene niti vakuuma, kao što je pokazano u predhodnom tekstu.

Nasuprot tome, u prvoj verziji modela niti iz 2008. godine, W bozon posle prekida simetrije zamišljen je kao otvoren prost čvor, a Z bozon kao otvoren osmični čvor.

Moglo bi biti da prikazan model niti za dva srednja vektorska bozona još uvek nije tačan. (***Izazov 160ny***). Ova mogućnost ostaje izazivajuća i dobar razlog da još treba da se traži rešenje zagonetke.

ELEKTROSLAB LAGRANŽIJAN

Sada možemo da iskoristimo rezultate prekida simetrije SU(2) da izvedemo elektroslabu gustinu lagranžijana. Videli smo da prekid simetrije ostavlja fotone bez mase, ali da uvodi masu za slabe vektorske bozone, kao što je prikazano na ***slici 62***. Masa bozona M_W i M_Z koja ne nestaje, uvodi u lagranžijan kinetičke članove za odgovarajuća polja.

Zbog prekida simetrije izazvane uplitanjem repova, Z bozon je rezultat mešanja sa (neprekinutim) fotonom. Model niti predviđa da mešanje može da bude opisano uglom, takozvanim uglom slabog mešanja θ_W. Model niti posebno podrazumeva da je $\cos \theta_W = M_W/M_Z$.

Čim je prekid simetrije opisan pomoću ugla mešanja usled uplitanja repova, dobija se poznati elektroslab lagranžijan, premda najpre bez članova zbog Higsovog bozona. (Na Higsov bozon ćemo se vratiti kasnije.). (***Strana 247***). Nećemo da napišemo lagranžijan slabe interakcije kojeg predviđa model niti, ali članovi su isti kao oni nađeni u standardnom modelu elementarnih čestica. Postoji jedna bitna razlika: tako izveden lagranžijan još uvek ne sadrži mešanje kvarka i leptona. Zapravo, eksperimenti pokazuju da sopstveno stanje slabog fermiona nije isto kao sopstveno stanje jakog ili elektromagnetnog: kvarkovi se mešaju, a to isto čine i neutrini. Razlog za ovo opažanje, i za uticaj koji mešanje ima na slab lagranžijan, postaće jasan pošto budemo odredili zaplete za svaki fermion. (***Strana 277***).

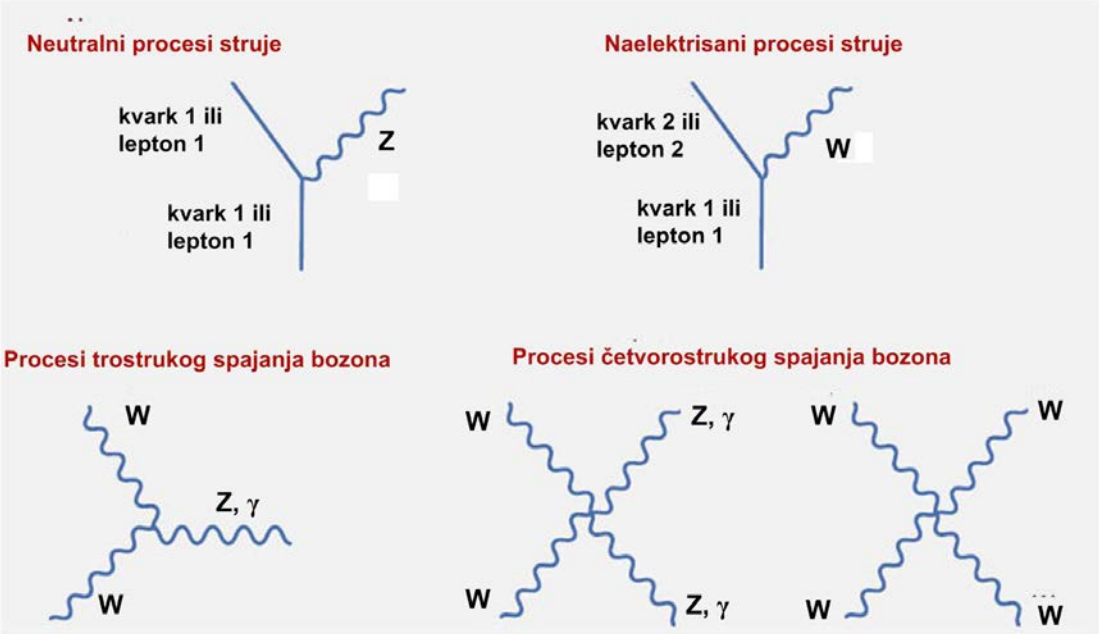
Ukratko, model niti podrazumeva veći deo lagranžijana slabe interakcije. Pitanje Higsovog bozona još uvek je otvoreno, a elektroslab lagranžijan sadrži brojne konstante koje još uvek nisu objašnjene. Ove neobjašnjene konstante su brojevi obuhvaćenih elementarnih čestica, njihove mase, spajanja, uglovi mešanja i CP narušavanje faza, kao i vrednosti ugla slabog mešanja.

SLABI FAJNMANOVI DIJAGRAMI

Slaba interakcija u prirodi opisana je malim brojem osnovnih Fajnmanovih dijagrama. Oni ne sadrže Higsov bozon, prikazan na ***slici 64***. Ovi Fajnmanovi dijagrami kodiraju odgovarajuće lagranžijane slabe interakcije.

U modelu niti II potezi Rajdemajstera dovode prirodno do osnovnog Fajnmanovog dijagrama u verziji niti. To se dešava kako je prikazano na ***slici 65***. Vidimo ponovo da model niti prikazuje slabu interakciju: svaki Fajnmanov dijagram je nastao od dijagrama niti za koji su u obzir uzete samo promene ukrštanja iza koje je Plankova veličina približna nultoj veličini. Model niti naročito ne dopušta bilo koje ***druge*** osnovne dijagrame za slabu interakciju. (***Izazov 161e***).

Konačan i mali broj mogućih dijagrama niti, pa stoga i Fajnmanovih dijagrama, podrazumeva da je slaba interakcija ***renormalizujuća***. Na primer, promena ili "tok" slabog spajanja sa energijom prikazano je u modelu niti, pošto tok može da bude određen preko odgovarajućih Fajnmanovih dijagrama. (***Strana 283***).



Slika 64 Osnovni Fajnmanovi dijagrami slabe interakcije u kojima nije uključen Higsov bozon

ZABAVNI IZAZOVI I ZANIMLJIVSTI O SLABOJ INTERAKCIJI

Za W bozon i njegovu antičesticu opaženo je da se poništavaju preko elektromagnetne interakcije, stvarajući dva ili više fotona. Model niti slabih bozona ima više prednosti u odnosu na model čvora: poništavanje je lakše za razumevanje. (***Izazov 162e***).

* * *

Model niti, slično standardnom modelu fizike čestica, predviđa da je poznato sve o slaboj interakciji. Bez obzira na to, najpoznatiji slab proces, ***raspad neutrona***, istraživan je u mnogim preciznim eksperimentima. Model niti predviđa da nijedan od ovih eksperimenata neće doneti nikakvo iznenađenje.

* * *

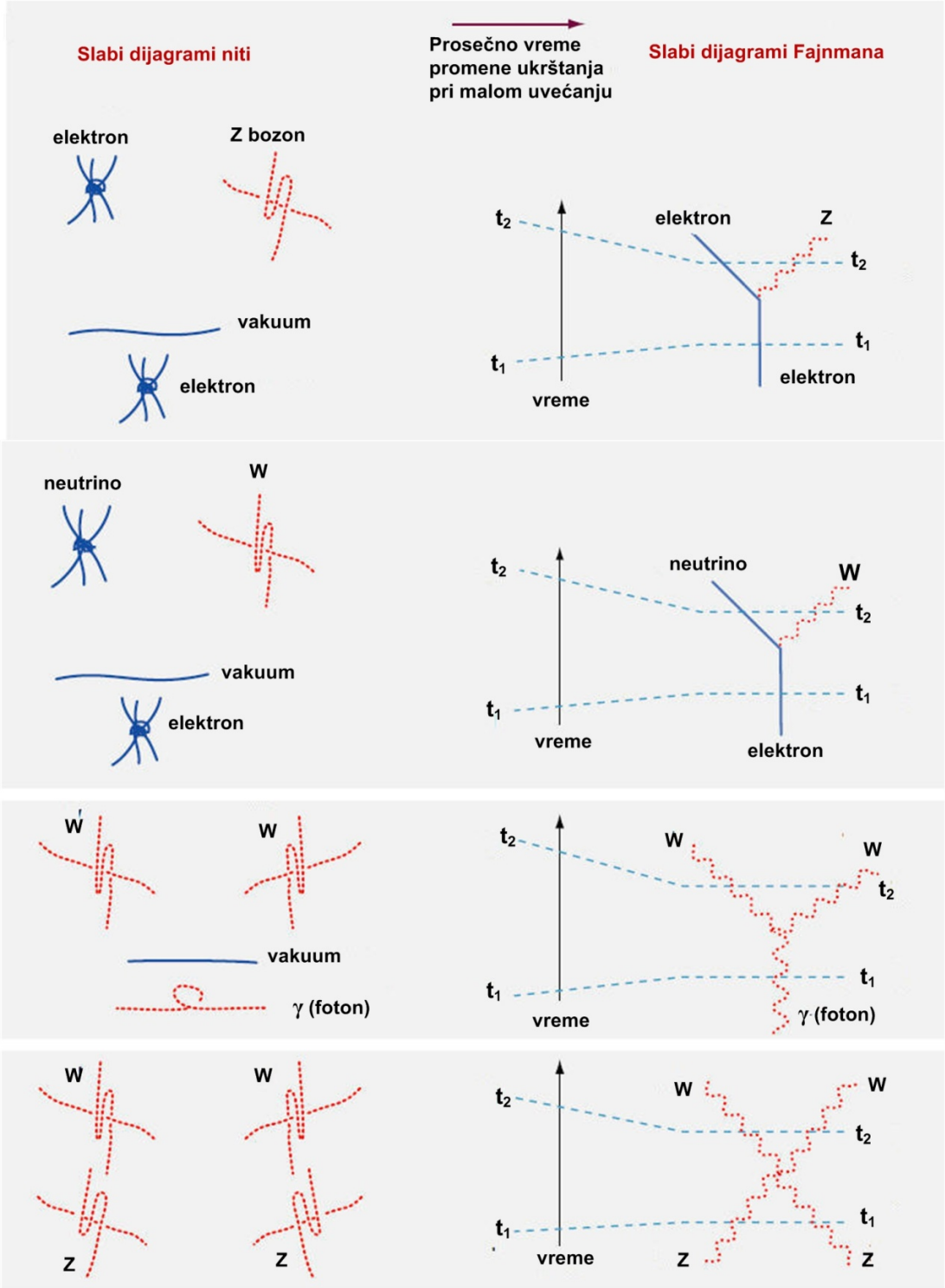
Model niti čini jasnim da su slaba interakcija i elektromagnetna interakcija ***pomešane***, ali nisu objedinjene. Postoji samo elektroslabo mešanje, ali ***ne*** i elektroslabo objedinjavanje, uprkos suprotnoj tvrdnji Komiteta Nobelove nagrade i mnogih drugih fizičara. Ustvari, Šeldon Glašov (Sheldon Glashow), koji je dobio Nobelovu nagradu za ovo navodno "objedinjavanje", slaže se sa ovom ocenom. (***Ref. 181***). Isto tako Ričard Fajnman (Richard Feynman), a pre svih, Martin Veltman (Martin Veltman) koji je takođe umešan u rezultat; on je to jako istakao u svom obraćanju prilikom dodele Nobelove nagrade. Pogrešan običaj da se elektroslabo mešanje naziva "objedinjavanjem" bio je jedan od glavnih razloga za neuspešne ranije pokušaje objedinjavanja: to je pažnju istraživača usmeravalo u suprotnom pravcu.

Mešavina elektromagnetne i slabe interakcije u modelu niti može da se posmatra kao posledica geometrije čvora: generatori Rajdemajsterovog II poteza slabe interakcije takođe sadrže uvijanja, to jest, takođe sadrže generatore elektromagnetne interakcije. Nasuprot tome, generatori ostalih Rajdemajsterovih poteza me mešaju se međusbno ili sa II potezom; i zaista, nijedna druga vrsta mešanja interakcija nije opažena u prirodi.

ZAKLJUČAK O SLABOJ INTERAKCIJI I EKSPERIMENTALNA PREDVIĐANJA

Izveli smo glavna svojstva slabog lagranžijana iz modela niti. Pokazali smo da II potez Rajdemajstera u jezgrima zapleta dovodi do prekida grupe merila SU(2) i do slabih bozona sa masom. Našli smo da je odstupanje jezgra zapleta od loptastog oblika i hirijalnosti slab naboj i da je slaba interakcija neabelijska. Isto tako smo pokazali da slaba interakcija prirodno maksimalno prekida paritet i meša se sa elektromagnetnom interakcijom. Ukratko, izveli smo glavne eksperimentalne osobine slabe interakcije.

Postoji li razlika između modela niti i elektroslabog lagranžijana standardnog modela fizike čestica? Pre no što potpuno odgovorimo na pitanje o odstupanjima između modela niti i standardnog modela, moramo da rešimo pitanje Higsovog bozona. To je učinjeno u daljem tekstu. (***Strana 247***).



Slika 65 Model niti osnovnih Fajnmanovjh dijagrama za slabu interakciju. Zapleti za fermione biće uvedeni kasnije

U svakom slučaju, model niti predviđa da prekinuta SU(2) simetrija merila ostaje da važi pri svim energijama. Nijedna druga grupa merila ne pojavljuje se u prirodi. Model niti stoga predviđa ponovo da ne postoji velika unifikacija, pa stoga ni veća grupa merila, bilo da je to SU(5), SO(10), E6, E7, E8, SO(32) ili bilo koja druga grupa. Ovaj rezultat indirektno odbacuje supersimetriju i supergravitaciju.

Model niti predviđa takođe da kombinacija gravitacije i kvantne teorije pretvara sve Plankove jedinice u granične vrednosti, pošto postoji maksimalna gustina promena ukrštanja u prirodi, usled osnovnog načela Prema tome, model niti predviđa ***maksimalnu vrednost slabog polja*** datog Plankovom silom podeljenom sa najmanjim slabim nabojem. Svi fizički sistemi – uključujući sve astrofizičke objekte, kao što su neutronske zvezde, počeci kvarka, izvori gama zraka ili kvazari – predviđa se da se pridržavaju ovih

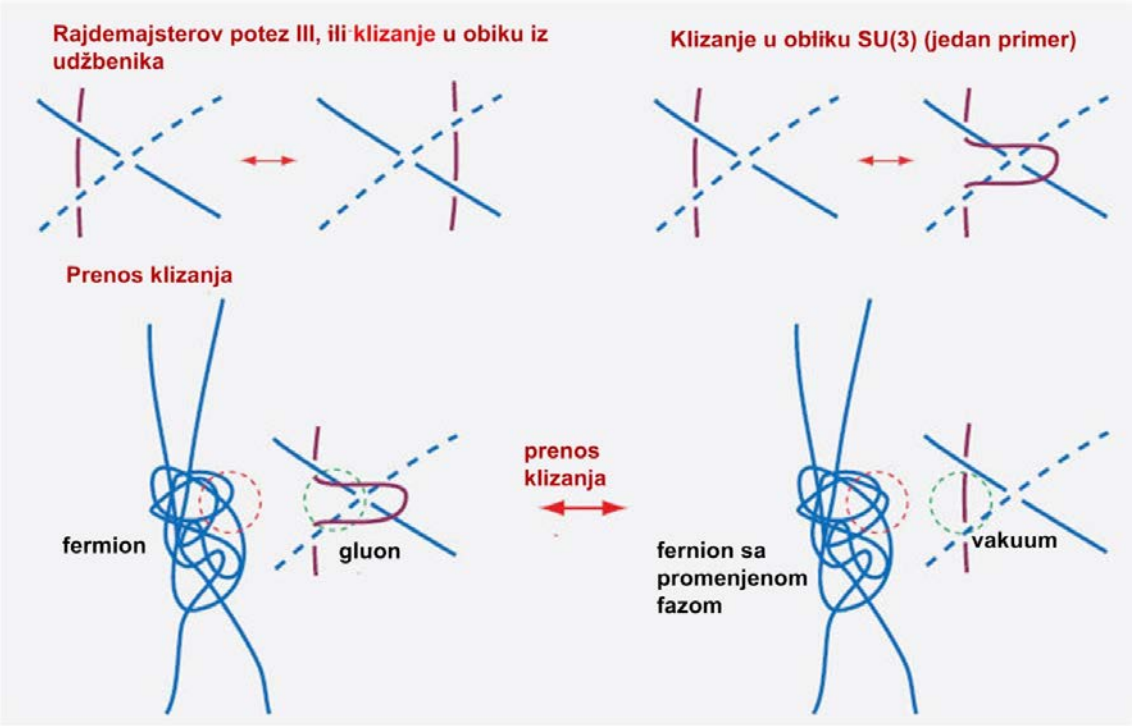
granica. Do sada nijedna opažena vrednost polja nije ni blizu ove granice, tako da predviđanja nisu protivrečna opažanjima.

Do sada nas je naše istraživanje slabe interakcije ostavilo sa nekoliko otvornih pitanja: moramo da izračunamo konstantu slabe veze i da odredimo zaplete za svaku česticu standardnog modela, uključujući Higsov bozon. Međutim, takođe treba da objasnimo slabo mešanje fermiona, CP narušavanje i mase svih čestica. Uprkos ovim tačkama, rešili smo drugi red iz milenijumske liste (***strana 128***): znamo poreklo slabe interakcije i njena glavna svojstva. Pre objašnjenja otvorenih pitanja ispitajmo III potez Rajdemajstera.

JAKA NUKLEARNA INTERAKCIJA I TREĆI RAJDEMAJSTEROV POTEZ

Jaka interakcija u prirodi rezultat je apsorpcije i emisije baždarnih bozona bez električnog naboja, bez mase, sa spinom 1, koji se nazivaju ***gluoni***. Gluoni su u interakciji sa kvarkovima, jedinim fermionima sa nabojem ***boje***. Fermioni mogu da imaju tri različita naboja boje, a antifermioni tri različite antiboje. Gluoni obrazuju oktet. Sami sebi prave naboje boje i prema tome u međusobnoj su interakciji. Lagranžijan kvarka spojenog sa poljem gluona ima neprekinutu SU(3) simetriju merila. Postoje tri osnovna Fajnmanova dijagrama: jedan za interakciju kvark-gluon i dva za interakcije gluon-gluon: trostruki i četvorostruki vrhunac gluona. Konstanta jakog spajanja je oko 0,5 pri niskim energijama. Njena zavisnost od energije određena je renormalizacijom.

Predhodni odeljak je sumirao glavna opažanja u vezi jake interakcije. Sva poznata opažanja u vezi sa jakom interakcijom sadržana su u njenom lagranžijanu, bez bilo kojeg poznatog izuzetka. Prema tome, treba da pokažemo da lagranžijan jake interakcije sledi iz modela niti.



Slika 66 Gluon menja fazu zapleta: prenos klizanja je osnova jake interakcije u modelu niti. Tokom interakcije niti nisu presecane i ponovo lepljene; prenos se događa čisto putem odstranjene zapremine što je rezultat neprobojnosti niti.

NITI I TREĆI RAJDEMAJSTEROV POTEZ

Kao što je objašnjeno u predhodnom tekstu (***strana 171***), interakcije fermiona su izobličenja jezgra zapleta koja menjaju njihovu fazu. Počećemo neposredno predstavljanjem modela niti za jaku interakciju.

- ***Jaka interakcija*** je prenos III poteza Rajdemajstera, između gluona i čestice. Kao što je prikazano na ***slici 66***, niti nisu presecane u ovom procesu; one prosto prenose izobličenja kao rezultat njihove neprobojnosti.

Takav prenos poteza uticaće na fazu zapleta čestice na koju deluje. Prema tome, prenosi poteza zaista su vrsta interakcije.

UVOD U SU(3)

Pre no što pokažemo da su III potezi Rajdemajstera odgovorni za jaku nuklearnu interakciju, sumiraćemo matematička svojstva Lijeve grupe SU(3). Lijeva grupa je struktura generisana jediničnim matricama 3×3 sa determinantom +1. To je ***grupa***, pošto matrice mogu pravilno da se množe, pošto je uključena jedinična matrica, a postoji takođe inversna matrica. SU(3) je takođe mnogostrukost; brza provera pokazuje da ona ima osam dimenzija. (***Izazov 163e***). Ukratko, SU(3) je ***Lijeva grupa***: njeni elementi ponašaju se kao tačke u mnogostrukosti koje mogu da se množe. Lijev braket je komutator. Opšti element E grupe SU(3) može da se napiše kao eksponent, na dobro poznat način:

$$E = e^{\sum_{n=1}^{8} \alpha_n i \lambda_n / 2} \tag{158}$$

gde osam realnih parametara α_n može da se zamisli kao osam koordinata elemenata mnogostrukosti grupe. Pošto je SU(3) kompaktna i jednostavna, ove koordinate je najbolje prikazati kao uglove. Naravno, i je imaginarna jedinica. Generatori λ_n su kompleksne neusmerene i ermitske matrice 3×3; one se koriste za određivanje osnove elemenata grupe. Samih osam generatora ***nisu*** elementi grupe. Oni opisuju strukturu mnogostrukosti grupe u blizini jedinične matrice; ova lokalna struktura određuje za Lijevu grupu potpunu mnogostrukost grupe. Kao i sve druge osnove, tako i skup od osam generatora λ_n nisu jedinstveni. Od mnogih mogućih izbora za generatore, ***Gel-Manove matrice*** λ_1 do λ_8, najčešće se koriste u fizici,

Gel-Manove matrice λ_n, odgovarajući elementi grupe D_n za opšte uglove i elementi grupe E_n za konaćan ugao π dati su sa:

$$\lambda_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad D_1(\alpha) = e^{i\alpha\lambda_1/2} = \begin{pmatrix} \cos\alpha/2 & i\sin\alpha/2 & 0 \\ i\sin\alpha/2 & \cos\alpha/2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$E_1 = e^{i\pi\lambda_1/2} = \begin{pmatrix} 0 & i & 0 \\ i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_2 = \begin{pmatrix} 0 & -i & 0 \\ i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad D_2(\alpha) = e^{i\alpha\lambda_2/2} = \begin{pmatrix} \cos\alpha/2 & \sin\alpha/2 & 0 \\ -\sin\alpha/2 & \cos\alpha/2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$E_2 = e^{i\pi\lambda_2/2} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad D_3(\alpha) = e^{i\alpha\lambda_3/2} = \begin{pmatrix} \cos\alpha/2 + i\sin\alpha/2 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha/2 - i\sin\alpha/2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$E_3 = e^{i\pi\lambda_3/2} = \begin{pmatrix} i & 0 & 0 \\ 0 & -i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_4 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad D_4(\alpha) = e^{i\alpha\lambda_4/2} = \begin{pmatrix} \cos\alpha/2 & 0 & i\sin\alpha/2 \\ 0 & 1 & 0 \\ i\sin\alpha/2 & 0 & \cos\alpha/2 \end{pmatrix},$$

$$E_4 = e^{i\pi\lambda_4/2} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & i \\ 0 & 1 & 0 \\ i & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_5 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -i \\ 0 & 0 & 0 \\ i & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad D_5(\alpha) = e^{i\alpha\lambda_5/2} = \begin{pmatrix} \cos\alpha/2 & 0 & \sin\alpha/2 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\alpha/2 & 0 & \cos\alpha/2 \end{pmatrix},$$

$$E_5 = e^{i\pi\lambda_5/2} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_6 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad D_6(\alpha) = e^{i\alpha\lambda_6/2} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha/2 & i\sin\alpha/2 \\ 0 & i\sin\alpha/2 & \cos\alpha/2 \end{pmatrix},$$

$$E_6 = e^{i\pi\lambda_6/2} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & i \\ 0 & i & 0 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_7 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -i \\ 0 & i & 0 \end{pmatrix}, \quad D_7(\alpha) = e^{i\alpha\lambda_7/2} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha/2 & \sin\alpha/2 \\ 0 & -\sin\alpha/2 & \cos\alpha/2 \end{pmatrix},$$

$$E_7 = e^{i\pi\lambda_7/2} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & i \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_8 = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -2 \end{pmatrix},$$

$$D_8(\alpha) = e^{\sqrt{3}i\alpha\lambda_8/2} = \begin{pmatrix} \cos\alpha/2 + i\sin\alpha/2 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha/2 + i\sin\alpha/2 & 0 \\ 0 & 0 & \cos\alpha - i\sin\alpha \end{pmatrix},$$

$$E_8 = D_8(\pi) = \begin{pmatrix} i & 0 & 0 \\ 0 & i & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \tag{159}$$

Osam matrica Gel-Mana λ_n su ermitske, bez traga[1] i ortogonalnog traga. Odgovarajući elementi grupe D_n i E_n mogu da se zamisle kao nenornirani i normirani osnovni vektori mnogostrukosti grupe. Primećujemo da se odrednica za E_8 razlikuje od onih za ostale elemente grupe E_n: ona sadrži poseban činilac $\sqrt{3}$. Četvorostruko povezivanje svake matrice $i\lambda_n$ je jedinična matrica – osim za slučaj $i\lambda_8$.Umesto toga, generator λ_8 komutira sa λ_1, λ_2 i λ_3 – premda ne i sa ostalim generatorima.

Ne postoji deveta i deseta matrica Gel-mana. Takve matrice nebi bile linearno nezavisne od onih osam prvih. Ustvari, dve matrice izvedene iz λ_3 korišćenjem razmatranja simetrije, naime

$$\lambda_9 = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad D_9(\alpha) = e^{i\alpha\lambda_9/2} = \begin{pmatrix} \cos\alpha/2 - i\sin\alpha/2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \cos\alpha/2 + i\sin\alpha/2 \end{pmatrix},$$

$$E_9 = D_9(\pi) = \begin{pmatrix} -i & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & i \end{pmatrix}$$

[1] Trag matrice je zbir elemenata u glavnoj dijagonali kvadratne matrice. (Izvor Wikipedia)

$$\lambda_{10} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}, \quad D_{10}(\alpha) = e^{i\alpha\lambda_{10}/2} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha/2 + i\sin\alpha/2 & 0 \\ 0 & 0 & \cos\alpha/2 - i\sin\alpha/2 \end{pmatrix},$$

$$E_{10} = D_{10}(\pi) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & i & 0 \\ 0 & 0 & -i \end{pmatrix} \qquad (160)$$

linearne su kombinacije λ_3 i λ_8; posebno, imamo da je $\lambda_3 + \lambda_9 + \lambda_{10} = 0$ i $\sqrt{3}\,\lambda_8 + \lambda_9 = \lambda_{10}$. Prema tome, λ_9 i λ_{10} ***nisu*** matrice Gel-Mana. (Takođe mogu da se odrede i dve naredne matrice koje odgovaraju λ_8 u druge dve trojke. Zbir ove tri matrice isto tako je 0.)

Svojstva množenja Gel-Manovih generatora λ_1 do λ_8 navedeni su u ***Tabeli 10***. Da bi trostruku simetriju učinili vidljivom, u tabeli su navedeni proizvodi koji sadrže linearno zavisne matrice λ_9 i λ_{10}. Pisanje ***Tabele 10*** sa komutatorima direktno bi pokazalo da generatori obrazuju Lijevu algebru. (***Vol.V, strana 167***).

TABELA 10 Tabela množenja za generatore λ_1 do λ_8 i za dve dodate, linearno zavisne matrice $\lambda_9 = -\lambda_3/2 - \lambda_8\sqrt{3}/2$ i $\lambda_{10} = \lambda_3/2 + \lambda_8\sqrt{3}/2$, koje nisu generatori. Zapaziti da uprkos izgledu $\lambda_4^2 = \lambda_5^2 = \lambda_9^2$ i $\lambda_6^2 = \lambda_7^2 = \lambda_{10}^2$

	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_9	λ_6	λ_7	λ_{10}	λ_8
λ_1	$2/3 + \lambda_8/\sqrt{3}$	$i\lambda_3$	$-i\lambda_2$	$\lambda_6/2 + i\lambda_7/2$	$-i\lambda_6/2 + \lambda_7/2$	$-\lambda_1/2 + i\lambda_2/2$	$\lambda_4/2 + i\lambda_5/2$	$-i\lambda_4/2 + \lambda_5/2$	$\lambda_1/2 + i\lambda_2/2$	$\lambda_1/\sqrt{3}$
λ_2	$-i\lambda_3$	$2/3 + \lambda_8/\sqrt{3}$	$i\lambda_1$	$i\lambda_6/2 - \lambda_7/2$	$\lambda_6/2 + i\lambda_7/2$	$-i\lambda_1/2 - \lambda_2/2$	$-i\lambda_4/2 + \lambda_5/2$	$-\lambda_4/2 - i\lambda_5/2$	$-i\lambda_1/2 + \lambda_2/2$	$\lambda_2/\sqrt{3}$
λ_3	$i\lambda_2$	$-i\lambda_1$	$2/3 + \lambda_8/\sqrt{3}$	$\lambda_4/2 + i\lambda_5/2$	$-i\lambda_4/2 + \lambda_5/2$	$-1/3 - \lambda_3/3 + \lambda_9/3$	$-\lambda_6/2 - i\lambda_7/2$	$i\lambda_6/2 - \lambda_7/2$	$-1/3 + \lambda_3/3 + \lambda_{10}/3$	$\lambda_3/\sqrt{3}$
λ_4	$\lambda_6/2 - i\lambda_7/2$	$-i\lambda_6/2 - \lambda_7/2$	$\lambda_4/2 - i\lambda_5/2$	$2/3 + \lambda_3/2 - \lambda_8/2\sqrt{3}$	$-i\lambda_9$	$i\lambda_5$	$\lambda_1/2 + i\lambda_2/2$	$i\lambda_1/2 - \lambda_2/2$	$-\lambda_4/2 - i\lambda_5/2$	$-\lambda_4/2\sqrt{3} - i\sqrt{3}\lambda_5/2$
λ_5	$i\lambda_6/2 + \lambda_7/2$	$\lambda_6/2 - i\lambda_7/2$	$i\lambda_4/2 + \lambda_5/2$	$i\lambda_9$	$2/3 + \lambda_3/2 - \lambda_8/2\sqrt{3}$	$-i\lambda_4$	$-i\lambda_1/2 + \lambda_2/2$	$\lambda_1/2 + i\lambda_2/2$	$i\lambda_4/2 - \lambda_5/2$	$i\sqrt{3}\lambda_4/2 - \lambda_5/2\sqrt{3}$
λ_9	$-\lambda_1/2 - i\lambda_2/2$	$i\lambda_1/2 - \lambda_2/2$	$-1/3 - \lambda_3/3 + \lambda_9/3$	$-i\lambda_5$	$i\lambda_4$	$2/3 + 2\lambda_3/3 + \lambda_9/3$	$\lambda_6/2 - i\lambda_7/2$	$i\lambda_6/2 + \lambda_7/2$	$-1/3 - \lambda_9/3 + \lambda_{10}/3$	$-1 + \lambda_{10}$
λ_6	$+\lambda_4/2 - i\lambda_5/2$	$i\lambda_4/2 + \lambda_5/2$	$-\lambda_6/2 + i\lambda_7/2$	$\lambda_1/2 - i\lambda_2/2$	$i\lambda_1/2 + \lambda_2/2$	$\lambda_6/2 + i\lambda_7/2$	$2/3 - \lambda_3/2 - \lambda_8/2\sqrt{3}$	$i\lambda_{10}$	$-i\lambda_7$	$-\lambda_6/2\sqrt{3} - i\sqrt{3}\lambda_7/2$
λ_7	$i\lambda_4/2 + \lambda_5/2$	$-\lambda_4/2 + i\lambda_5/2$	$-i\lambda_6/2 - \lambda_7/2$	$-i\lambda_1/2 - \lambda_2/2$	$\lambda_1/2 - i\lambda_2/2$	$-i\lambda_6/2 + \lambda_7/2$	$-i\lambda_{10}$	$2/3 - \lambda_3/2 - \lambda_8/2\sqrt{3}$	$i\lambda_6$	$i\sqrt{3}\lambda_6/2 - \lambda_7/2\sqrt{3}$
λ_{10}	$-\lambda_1/2 + i\lambda_2/2$	$-i\lambda_1/2 - \lambda_2/2$	$-1/3 + \lambda_3/3 - \lambda_{10}/3$	$\lambda_4/2 + i\lambda_5/2$	$-i\lambda_4/2 - \lambda_5/2$	$-1/3 - \lambda_9/3 + \lambda_{10}/3$	$i\lambda_7$	$-i\lambda_6$	$2/3 - \lambda_3/3 + \lambda_9/3$	$1 + \lambda_9$
λ_8	$\lambda_1/\sqrt{3}$	$\lambda_2/\sqrt{3}$	$\lambda_3/\sqrt{3}$	$-\lambda_4/2\sqrt{3} + i\sqrt{3}\lambda_5/2$	$-i\sqrt{3}\lambda_4/2 - \lambda_5/2\sqrt{3}$	$-1 + \lambda_{10}$	$-\lambda_6/2\sqrt{3} + i\sqrt{3}\lambda_7/2$	$-i\sqrt{3}\lambda_6/2 - \lambda_7/2\sqrt{3}$	$1 + \lambda_9$	$2/3 - \lambda_8/\sqrt{3}$

Centar SU(3) je Z3, podgrupa koja se razmenjuje sa svim ostalim elementima grupe; njena trostruka simetrija je korisna u detaljnijem razumevanju ponašanja elemenata grupe i generatora.

Elementi grupe E_1 do E_8, prikazani u predhodnom tekstu, dele svojstva da su njihovi četvrti stepeni $(E_n)^4$ jedinične matrice. Prva trojka matrica E_1, E_2 i E_3, druga trojka E_4, E_5 i E_9 i treća trojka E_6, E_7 i E_{10} svaka za sebe obrazuju podgrupu SU(2). Odražavajući trostruku simetriju svog centra, grupa SU (3) sadrži tri linearno nezavisne SU (2) podgrupe. Element grupe E_8 razmenjuje se sa prvom trojkom E_1, E_2 i E_3; prema

tome, ova četiri elementa proizvode podgrupu U(2) grupe SU(3). Ova podgrupa U(2), često površno označavana kao SU(2)xU(1), data je sa onim 3×3 matricama koje sadrže jediničnu matricu 2×2 levo gore, sadrže nule u ostala četiri elemenata van dijagonale i sadrže inversnu vrednost determinante matrice 2×2 u preostalom, donjem desnom elementu dijagonale. Ukratko, SU(3) sadrži tri linearno nezavisne U(2) podgrupe.

SU(3) je okarakterisana na način kako su povezane trojke SU(2). Posebno je proizvod $E_3E_9E_{10}$ jedinična matrica, odražavajući linearnu nezavisnost tri odgovarajuća generatora λ_n. Takođe imamo da je proizvod $E_8E_9 = E_{10}$. Isto tako je jedinična matrica proizvod E_8 sa njegovim prijateljima iz ostale dve trojke.

Najzad, proizvod $(E_kE_l)^3$ za svako k uzeto iz skupa (1, 2, 4, 5, 6, 7) i za svako l iz istog skupa, ali iz ***različite*** trojke takođe je jedinična matrica. Ovo svojstvo trećeg stepena – uzeto zajedno sa trostrukom simetrijom centra – može da se posmatra kao suštinsko svojstvo po kojem se grupa SU(3) razlikuje od drugih Lijevih grupa.

OD KLIZANJA DO SU(3)

Klizanje, ili ***III potez Rajdemajstera***, obuhvata tri niti. Verzija iz udžbenika III poteza Rajdemajstera – koji je obeležen sa E_0 i prikazan na ***slici 67*** - pomera ili "kliza" jednu nit, prikazanu na slici kao vodoravnu i plave boje, naspram ukrštrene druge dve niti. Isto tako možemo da kažemo da klizanje gura dve niti preko plave vodoravne niti koja stoji u mestu. Ovo klizanje iz udžbenika – ovde ga nazivamo takođe ***čisto klizanje*** – ne sadrži bilo koju promenu ukrštanja; prema osnovnom načelu modela niti, ono se stoga ne opaža, ili, jednostavnije rečeno, bez ikakvog je fizičkog značaja. Međutim, postoje srodna kretanja niti koja sadrže promene ukrštanja.

Slika 67 Udžbenička verzija E_0 poteza klizanja, ili III poteza Rajdemajstera, ne može da se opaža, jer ne sadrži promene ukrštanja.

Uvodimo osam ***uopštenih klizanja***, ili klizanje-obrtanje, za konfiguraciju od tri niti; ona su pokazana na ***slici 68***. Neposredno nazivamo ova uopštena klizanja E_1 do E_8, pošto će se pokazati da ona odgovraju elementima grupe SU(3) pod istim imenima kaoja su uvedene u predhodnom tekstu. Drugim rečima, pokazaćemo da su ***uopštena klizanja*** E_n elementi Lijeve grupe SU(3); posebno ona ispunjavaju svojstva koja se očekuju od korespodencije sa SU(3) generatorima λ_n u izboru Gel-Mana:

$$E_n = e^{i\pi\lambda_n/2} \tag{161}$$

Generatori λ_n u modelu niti opisuju razliku između infinitezimalnog uopštenog klizanja – prema tome klizanje-obrtanje sa obrtanjem za infinitezimalni ugao – i jedinične matrice. Spajanje u lanac za klizanja je ekvivalentno množenju grupe, kao što se i očekuje. Klizanja oblikuju grupu. Sada ćemo da pokažemo da generatori klizanja ispunjavaju pravila iz tablice množenja date u ***Tabeli 10***.

Da bismo videli kako tablica množenja SU(3) sledi iz ***slike 68***, prvo primećujemo da početna konfiguracija niti Rajdemajsterovog III poteza sadrži istu trostruku simetriju kao centar SU(3), ako se uzme u obzir prostorna konfiguracija. Posebno, poput generatora i osnovnih vektora SU (3), takođe klizanja na slici mogu da se grupišu u tri trojke.

Sada pažnju usmeravamo na prvu trojku, onu koju oblikuju tri klizanja E_1, E_2 i E_3.

Da bi se stvari pojasnile, ovi potezi mogu da se prikažu kombinovano kao izobličenja i klizanja crvene i zelene niti u odnosu na plavu vodoravnu liniju. Ove poteze možemo da zamislimo kao one u triku sa opasačem, ali da deluju na ***zamišljenu kopču***, koja je oblikovana samo od crvene i zelene niti. Ova uopštena klizanja sadrže promene ukrštanja; prema tome, ona se mogu opažati i imaju važnost u fizici.

Zapažamo da "klizanje" nije savršen pojam za uopštena izobličavanja E_1 do E_8; ustvari možda bismo ih radije nazvali klizanje-obrtanje, pošto su klizanja-obrtanja za ugao π koji se primenjuje na zamišljenu kopču opasača. Uprkos uvedenoj konstrukciji, ova uopštena kretanja koja mogu da se opažaju, ostaju model za klizanje E_0 iz udžbenika; osim toga, ona zahtevaju ***tri*** segmenta niti. Uopštena kretanja koja su upravo određena i koja se mogu opažati, ***razlikuju*** se od Rajdemajsterovih I i II poteza razmatranih u predhodnom tekstu, u odeljku o elektromagnetnoj i slaboj interakciji. Kao rezultat toga, mi ćemo nastaviti da nazivamo klizanjem uopštena kretanja koja mogu da se opažaju.

Radi jednostavnosti, predposavljamo – slično onom što smo učinili u razmatranju o slaboj interakciji – da su segmenti tri niti (grubo) u ravni. To je idealizovana situcija; zapravo, dokazi izneti u ovome što sledi primenjuju se takođe i na sve ostale trodimenzionalne konfiguracije tri niti. Posebno, isti rezultat se pojavljuje i kada su segmenti sve tri niti međusobno upravni, umesto da leže u ravni.

Zapažamo da ose obrtanja uopštenih klizanja E_1 i E_2 nisu ni poravnate niti upravne na ravan papira. Još preciznije, ose obrtanja E_1, E_4 i E_6 upravne su na stranice kocke. E_2, E_5 i E_7 upravne su na njih. Za prvu trojku, ose obrtanja E_1, E_2 i E_3 obrazuju upravne i normalizovane osnove; isto važi i za ostale dve trojke. Sada ćemo da pokažemo da klizanja prve trojke određuju SU(2) grupu.

Opažanja, uopštena klizanja u trojci E_1, E_2 i E_3 mogu da se povežu u lanac. Razlikujemo dva slučaja. Prvi slučaj je povezivanje svakog takvog klizanja sa samim sobom. Rezultat odgovara obrtanju za 2π odabranog para niti i njihove zamišljene kopče opasača, pa stoga izaziva odgovarajuću veličinu uvijanja repova. Ustvari kada se svako klizanje u trojci poveže ***četiri*** puta samo sa sobom, rezultat je operacija identiteta. Upoređujući dvostruko i četvorostruko povezivanje, vidimo da se ona razlikuju samo u zaplitanju, ili algebarski, u znaku minus za zamišljenu kopču. To već ostvaruje polovinu trika sa opasačem koji prikazuje SU(2).

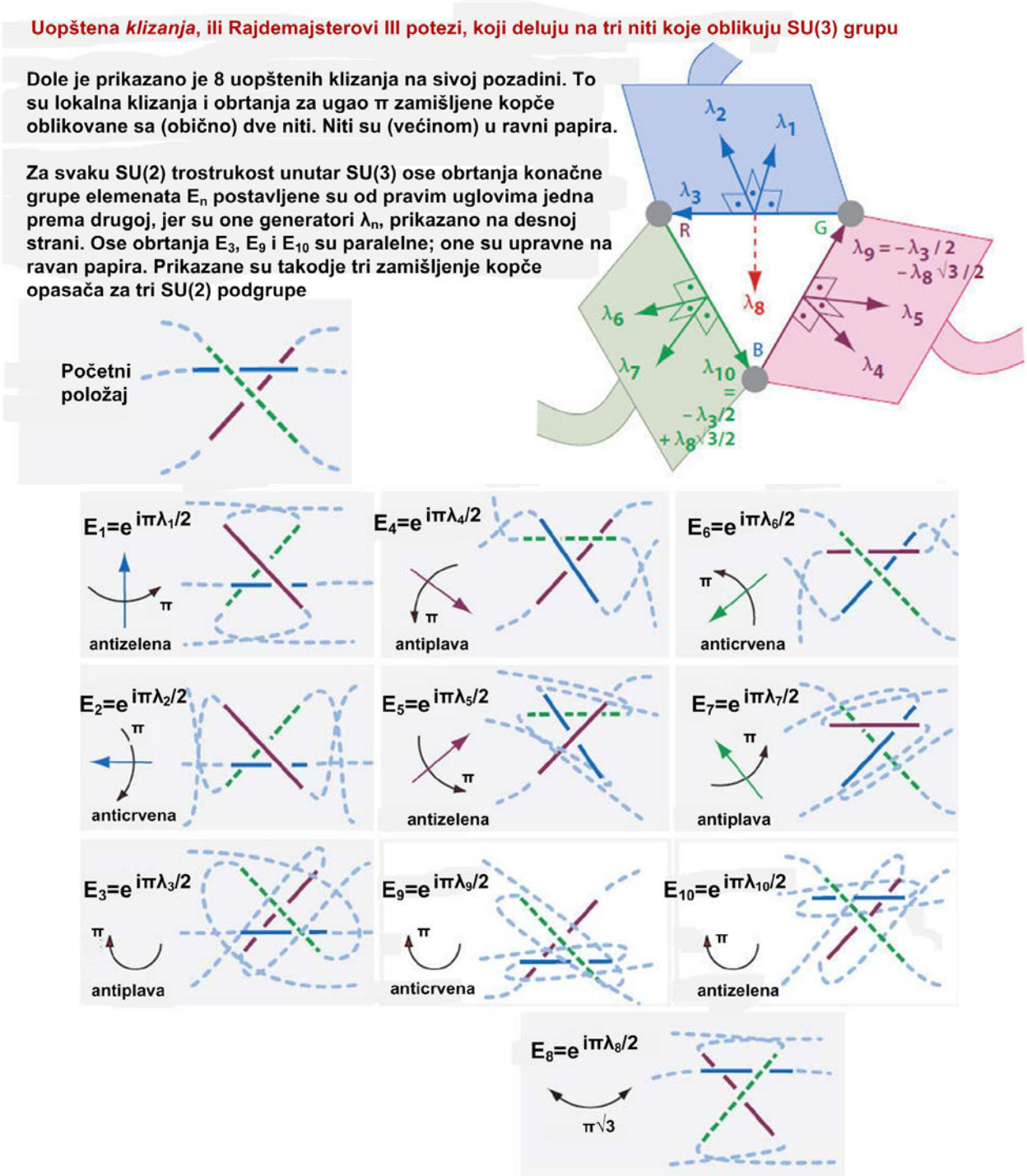
Drugi slučaj koji treba da se proveri je povezivanje različitih klizanja u trojci. Rezultat je uvek treće klizanje u trojci (do znaka koji zavisi od toga da li je kombinacija ciklična ili nije). Ovo ponašanje ostvaruje drugu polovini trika sa opasačem. Ukratko, pokazali smo da trojka koja sadrži prva tri uopštena klizanja određuje SU(2) grupu. Još preciznije, infinitezimalna klizanja-obrtanja λ_1, λ_2 i λ_3 odgovaraju konačnim SU(3) elementima E_1, E_2 i E_3 stvaraju SU(2) Lijevu algebru SU(2) Lijeve grupe. Podgrupa SU(2) koja je upravo nađena samo je jedna od tri linearno nezavisne SU(2) podgrupe u SU(3). Generatori prve trojke klizanja zato prikazuju devet rezultata gore levo u ***Tabeli 10***. (***Strana 197***). Stoga tvrdimo da možemo zaista da prikažemo prva tri uopštena klizanja pomoću tri međusobno upravna obrtanja za ugao π zamišljene kopče opasača načinjene od crvenih i zelenih niti.

Za prikazivanje SU(3) suština je da se podsetimo da se u trodimenzionalnom prostoru smer vektora koji prikazuje λ_n i onog koji prikazuje E_n razlikuju međusobno. To je već slučaj za U(1)

Ostala uopštena klizanja moguća u konfiguraciji sa tri niti lako se konstruišu koriščenjem trostruke simetrije; ona su prikazana na ***slici 68***. Za svaki od tri segmenta niti postoji trojka opaženih klizanja; to daje ukupno devet mogućih uopštenih klizanja za posmatrača kojeg određuje ravan papira. U drugoj trojci klizanja koja odgovaraju E_1 *i* E_2 obeležena su sa E_4 *i* E_5, a u trećoj trojci ona su obeležena sa E_6 *i* E_7. Za treća klizanja koja odgovaraju E_3 – obeležavamo ostala dva sa E_9 *i* E_{10} – ***samo dva*** generatora linearno su nezavisna. U stvari, slika pokazuje da je $E_3E_9E_{10}$ – čije su sve tri ose paralelne – jedinična matrica. Tri operacije E_3, E_9 i E_{10} takođe se razmenjuju sa svim ostalim operacijama; stoga one obrazuju centar grupe određene sa svakim E. Drugo linearno nezavisno uopšteno klizanje E_8, takođe je prikazano na slici; ono je linearna kombinacija E_9 i E_{10}. Zapažamo da model niti takođe prikazuje činilac $\sqrt{3}$ u odrednici za E_8. Dobijamo ukupno ***osam*** linearno nezavisnih uopštenih klizanja. Sva klizanja, osim *E8*, deluju na zamišljenu kopču opasača obrazovanu od dve niti.

Videli smo da generatori koji odgovaraju klizanjima E_1, E_2 *i* E_3 daju podgrupu SU(2). Isto važi za odgovarajuću trojku E_4, E_5 i linearnu kombinaciju $E_9 = -E_3/2 - E_8\sqrt{3}/2$ (koja odgovara *E3*) i za trojku E_6, E_7 i $E_{10} = - E_3/2 + E_8\sqrt{3}/2$. Za svaki od ovih klizanja četvorostruko spajanje daje identitet; i unutar svake trojke povezivanje dva različita klizanja daje umnožak trećeg klizanja. Ukratko, za svaku trojku odgovarajuća infintezimalna klizanja daju SU(2) grupu. Ove tri SU(2) grupe linearno su nezavisne. Time smo

pokazali važan deo strukture SU(3). Osim toga, našli smo prikazivanje SU(3); pošto svaka SU(2) grupa može da se prikaže odvojenim zamišljenim kopčama opasača, grupa SU(3) može da se prikaže pomoću tri zamišljene kopče – u mnogim, ali ne i u svim aspektima. Gore desno na ***slici 68*** prikazana je ova vizualizacija.



Slika 68 Prikaz uopštenog poteza klizanja E_n pomoću niti. Odgovarajući generatori λ_n dovode do strukture SU(3), kako je pokazano u tekstu. Zapažamo da se vektori obrtanja za generatore λ_n i za uopšten potez klizanja E_n razlikuju međusobno. Radi pojašnjenja slike prikazuju komplementarna izobličenja druge dve niti, umesto izobličenja niti koja se posmatra.

Povezanost klizanja i tablice množenja dalje se povećava ako neznatno promenimo odrednicu prve trojke. U ovoj prvoj trojci možemo da uzmemo kao zamišljenu kopču skup od ***sva tri*** centralna segmenta. Kretanje sve tri niti zajedno uprošćava prikaz, pošto je za prvu trojku plava nit zarobljena između ostale dve niti. Na takav način uopšteno klizanje još uvek se sastoji od obrtanja praćenog klizanjem. I još uvek imamo SU(2) podgrupu za prvu trojku.

Klizanje E_2 razlikuje se od ostalih klizanja, kao što se i očekuje od SU(3). Ono opisuje kretanje koje obrće crvenu i zelenu nit u suprotnim smerovima; to je prikazano na ***slici 68***. Klizanje E_8 stoga nije dobro opisano pomoću zamišljene kopče opasača. Jednostavno je da se proveri da klizanje E_8 komutira sa E_1, E_2, E_3 i očigledno samo sa sobom. Zajedno, E_8 i prva trojka zato obrazuju U(2) Lijevu grupu, kao što je i očekivano. Osim toga, nalazimo da E_8 komutira sa E_9 i E_{10} i da je $E_8E_9 = E_{10}$, kako se i očekuje od SU(3). Model niti takođe podrazumeva da je proizvod E_8 i njegova dva duplikata iz ostalih trojki jedinična matrica, kao što je i očekivano od SU(3).

Poslednji korak da se pokaže jednakost kizanja i SU(3) zahteva od nas da potvrdimo svojstva množenja – između klizanja E_n ili između generatora λ_n – iz ***različitih*** trojki. Zapravo, zbog trostruke simetrije centra, potrebno je da proverimo dva rezultata množenja klizanja iz različitih trojki: jedan koji sadrži ili λ_3 ili λ_8 i jedan koji ne sadrži.

Počećemo proizvodom koji sadrži λ_3 i jedan od prva dva elementa druge trojke. Takav proizvod daje ponderisan zbir generatora trojke. Lako je da se provere svojstva ovog proizvoda korišćenjem odnosa između konačnih elemenara grupe $E_5E_3E_4 = E_3$. Primećujemo da samo ova posebna permutacija 5, 3 i 4 daje ovaj rezultat. Igranje sa modelom niti potvrđuje relaciju. Slična zapažanja odnose se na $E_6E_3E_7 = E_3$ – i odgovarajući proizvod koji uključuje E_9, kao $E_1E_9E_2 = E_9$, ili E_{10}, kao $E_1E_{10}E_2 = E_{10}$ – kao i $E_4E_8E_5 = E_8$ i $E_6E_8E_7 = E_8$. Model niti omogućava svakom da proveri da su zadovoljene ove relacije.

Nastavljamo sa izuzetnim proizvodom $\lambda_5\lambda_7$, respektivno E_5E_7. Primećujemo osnovnu razliku između proizvoda sličnim $\lambda_5\lambda_7$ i bilo kojeg proizvoda dva generatora iz iste trojke. Proizvod $\lambda_5\lambda_7$ – slično ostalim povezivanjima generatora iz različitih trojki – ne daje pojedinačni generator, već daje kombinaciju, to jest ***zbir*** generatora. Kombinacije je teško prikazati pomoću niti; lakši način je da se proveri SU(3) algebra korišćenjem svojstava proizvoda E_5E_7.

Kao što je pomenuto u predhodnom tekstu, u SU(3), za proizvode koji uključuju prva dva člana iz različitih trojki, ***trostruko povezivanje*** $(E_iE_j)^3$ ***je identitet***. Zaista, ***slika 68*** potvrđuje da su identiteti $(E_2E_4)^3$ ili $(E_5E_7)^3$. Slično tome, mogu da se provere takođe ostali proizvodi pomoću tri niti.

Koristeći prikazivanja sa tri niti mi smo stoga potvtdili sve proizvode generatora iz dve različite trojke koji se pojavljuju u ***Tabeli 10***. Primećujemo da ***slika 68*** takođe prikazuje da tri klizanja E_2, E_5 i i E_7 stvaraju SO(3) grupu, grupu obrtanja u tri dimenzije. Da bismo to videli, opažamo da infinitezimalne verzije tri klizanja proizvode sva moguća obratanja u tri dimenzije centralnog trougla. Grupa SO(3) takođe se pojavljuje za klizanja 1, 4 i 7, za klizanja 1, 5 i 6 i za klizanja 2, 4 i 6. Ovo su četiri osnovne SO(3) pod-grupe grupe SU(3). Preostale kombinacije za tri operacije iz triju različitih trojaka – kao što su 1, 4 i 6 ili kombinacija 1, 5 i 7, ili kombinacija 2, 4 i 7 ili kombinacija 2, 5 i 6 – ***ne proizvode*** bilo koju podgrupu. To može da se potvrdi istraživanjem odgovarajućih kretanja niti.

Možemo da zaključimo: u oblasti u kojoj se tri niti međusobno ukrštaju, osam linearno nezavisnih, uopštenih klizanja koja mogu da se primene na tu oblast, određuju grupu SU(3). Drugim rečima, ***grupa SU(3) sledi iz Rajdemajsterovog trećeg poteza***.

Na isti način kao za ostale merne grupe, nalazimo da čestice čiji model niti sadrži konfiguraciju sa tri segmenta niti mogu da budu predmet SU(3) merne interakcije. U eksperimentima ova interakcija naziva se ***jakom nuklearnom interakcijom***. jaka interakcija je usled III poteza Rajdemajstera. Slično drugim interakcijama, čestice će stupiti u jaku interakciju samo ako zaplet nije previše simetričan, pošto u slučaju prosečne simetričnosti u vremenu neće postojati nikakva čista interakcija. Pojasnićemo detalje u daljem tekstu, kada budemo razmatrali specifične zaplete i naboje bojom za razne elementarne čestice materije. (***Strana 235***)

MODEL NITI ZA GLUONE

U fizičkom smislu, osam klizanja koja odgovaraju Gel-Manovim matricama, predstavljaju delovanja osam gluona, srednjih vektorskih bozona jake interakcije, koji mogu da deluju na česticu.

- Obzirom da osam klizanja E_1 do E_8 predstavljaju delovanja osam gluona, ona takođe predstavljaju i same gluone.

Interakcije su prenosi procesa zapleta na drugi zaplet.

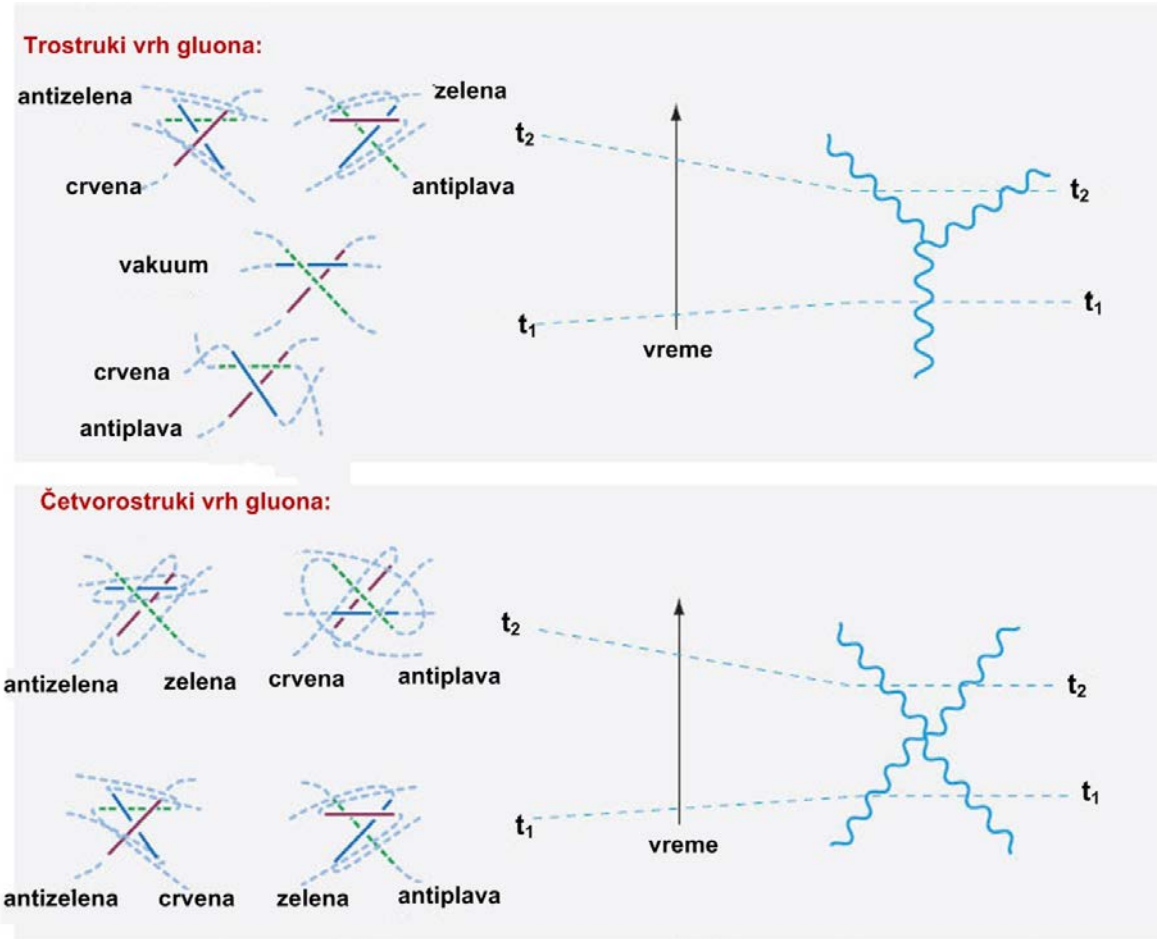
- Apsorpcija gluona ja klizanje koje je preneto na drugu česticu.
- Emisija gluona je klizanje koje je preneto na tri niti vakuuma.

Da bi se malo više vizualno prikazao pojam gluona, možemo da kažemo da svaki gluon može da bude opisan kao struktura niti koja neprestano izvodi SU(3) operaciju, to jest uopšteno klizanje koje se neprestano ponavlja. Nalazimo slično predstavljanje za druge interakcije merila. U slučaju elektromagnetne interakcije, srednji vektorski bozon, foton, može da se opiše kao nit koja neprestano izvodi operaciju U(1), to jest obrtanje. U slučaju slabe interakcije slab srednji vektorski bozon može da se opiše kao nit koja neprestano izvodi operaciju SU(2), to jest operaciju iz trika sa opasačem. To je najupečatljivije vidljivo u neprekinutoj verziji slabih bozona.

Svaki gluon može takođe da se posmatra kao izobličenje pojedinačne niti koje povlači za sobom njeno okruženje. (***Izazov 164e***). Ovaj opis gluona sa pojedinačnom niti podrazumeva da gluoni imaju masu i naboj koji iščezavaju. Takav opis gluona kao pojedinačne niti podrazumeva takođe da oni imaju spin 1, kao što je i opaženo. Model niti gluona takođe podrazumeva da bi slobodni gluoni imali ogromnu energiju.

Tablica množenja SU(3) potvrđuje da se osam gluona pretvaraju u saglasnosti sa adjungovanom (i vernim) predstavljanjem SU(3). Prema tome, svaki red ili kolona u matrici Gel-Mana odgovara jednoj od tri boje jake interakcije. Istraživanje povezivanja klizanja takođe pokazuje da dva uopštena klizanja ne komutiraju ne antikomutiraju. Grupa SU(3) ***nije abelijska***. To podrazumeva da su gluoni u međusobnoj interakciji. I tablica množenja i model niti za gluone podrazumevaju da dva gluona u interakciji mogu da daju ili jedan ili dva nova gluona, i ništa više. To je prikazano na ***slici 69***. Stoga model niti, preko svog stvaranja SU(3), podrazumeva da su gluoni u međusobnoj interakciji, ali samo u trostrukim ili četvorostrukim vrhovima gluona.

Klizanja – to jest, emisija ili apsorpcija gluona – nikada ne menja topologiju zapleta, a posebno ne zaplete materije. Prema tome, model niti predviđa da su u jakoj interakciji očuvani električni naboj, barionski broj, slab izospin, ukusi, spin i sve čestice. To je zaista i opažano. Posebno, postoji prirodno nepostojanje C, P i CP narušavanja pri klizanju. To je tačno ono što se opaža kod jake interakcije. Pošto gluoni ne menjaju topologiju zapleta čestica na koje deluju, već samo menjaju njihov oblik, predviđa se da su u modelu niti gluoni bez mase, iako su u međusobnoj interakciji. A zbog toga što du gluoni u međusobnoj interakciji, predviđa se da se slobodni gluoni ne pojavljaju u prirodi. I naravno, svi ovi zaključci u saglasnosti su sa eksperimentima.



Slika 69 Dve vrste međusobne interakcije gluona u modelu niti

Ukratko, pokazali smo da se u modelu niti jaka nuklearna interakcija i sva njena svojstva pojavljuju automatski iz klizanja, to jest, III poteza Rajdemajstera. Posebno, model niti podrazumeva da lagranžijan fermiona u jakoj interakciji ima SU(3) invarijantu merila, koja je posledica uopštenog izobličenja klizanja.

LAGRANŽIJAN GLUONA

Gluoni su čestice bez mase sa spinom 1. Kao posledica toga jačina polja i lagranžijan određeni su na isti način kao za fotone: gustina energije je kvadrat gustine ukrštanja, tojest, "kvadrat" jačine polja. Pošto postoji 8 gluona, gustina lagranžijana postaje

$$\mathcal{L}_{gluona} = -\frac{1}{4}\sum_{a=1}^{8} G^a_{\mu\nu} G^{\mu\nu}_a \tag{162}$$

gde je jačina polja gluona sa ***dva*** grčka indeksa, data prirodno kao

$$G^a_{\mu\nu} = \partial_\mu G^a_\nu - \partial_\nu G^a_\mu - g f^{abc} G^b_\mu G^c_\nu \tag{163}$$

a f^{abc} su konstante strukture SU(3) koje mogu da se izvedu iz tablice množenja date u predhodnom tekstu. Veličine G^a_μ, sa jednim grčkim indeksom su vektorski potencijali gluona. Poslednji član u odrednici jačine polja odgovara trostrukom ili četvorostrukom vrhu u Fajnmanovim dijagramima interakcije gluona. Oni su prikazani na ***slici 69***. Lagranžijan je prosto prirodno uopštavanje iz slučaja U(1) za fotone u slučaj SU(3) za gluone. Ukratko, dobijamo uobičajeni lagranžijan slobodnog gluona iz modela niti. (***Strana 178***).

NABOJ BOJE

Okruženi kupatilom gluona koji nasumično izazivaju klizanja svih vrsta, neće sva jezgra fermiona da promene stanje svog obrtanja. Uopšteno govoreći, čestice imaju boju ako kupatilo slučajnih gluona menja njihovu fazu. Samo zapleti koji izgube neku simetriju zbog toga će imati naboj boje. Zapleti koji su simetrični biće neutralni, ili "beli". Koja simetrija je ovde bitna?

Videli smo neposredno da zapleti ***fotona*** nisu osetljivi na kupatilo gluona. Isto važi i za W i Z bozone. Ovi zapleti su previše jednostavni. Model niti predpostavlja da su ove čestice neutralne boje, to jest one su "bele", kako je i opažano.

S druge strane, svojstva množenja navedena u predhodnom tekstu, pokazuju da su gluoni međusobno u interakciji i zato oni imaju naboj boje. Ustvari, teorija grupe pokazuje da se njihova svojstva najbolje opisuju ako se kaže da gluoni imaju boju i antiboju; To je najprostiji način da se opiše predstavljanje kojem pripadaju. Ukratko, model niti gluona automatski podrazumeva da oni nose i boju i antiboju.

Fermioni se ponašaju različito. U modelu niti fermion ima naboj boje ako na odgovarajući trostruki model opasača deluje veliki broj nasumičnih gluona. Prvi zapleti koji nam padaju na pamet su zapleti načinjeni od tri niti, kakvi su jednostavni zapleti prikazani na ***slici 68***. Međutim, kratko istraživanje pokazuje da su takvi zapleti neutralne boje, ili "beli". U daljem tekstu ćemo videti da to podrazumeva da su leptoni neutralne boje, ili "beli". Nasuprot tome, zaplet racionalnog fermiona načinjen od dve niti ne deli ovu sudbinu. U kupatilu niti gluona koji izazivaju klizanja, to jest III potez Rajdemajstera, očekuje se da opšti ***racionalni zaplet*** načinjen od dve niti bude pod uticajem, pa stoga da ima naboj boje.

Racionalni zapleti načinjeni od dve niti najjednostavniji su mogući zapleti sa bojom. Zaplet se naziva ***racionalnim*** ako se on može razpetljati samo okolnim kretanjem repova. Primer racionalnog zapleta prikazan je na ***slici 71***. Takvi zapleti prekidaju trostruku simetriju strukture tri opasača, pa zato imaju naboj boje. U daljem tekstu ćemo videti kako se ovakvi zapleti odnose na ***kvarkove***. Zato možemo reći:

- Zaplet fermiona ima ***naboj boje*** ako njegov model tri opasača nije simetričan pri uglu obrtanja za ±2π/3.

Obojeni racionalni zapleti automatski imaju ***tri*** moguće boje:

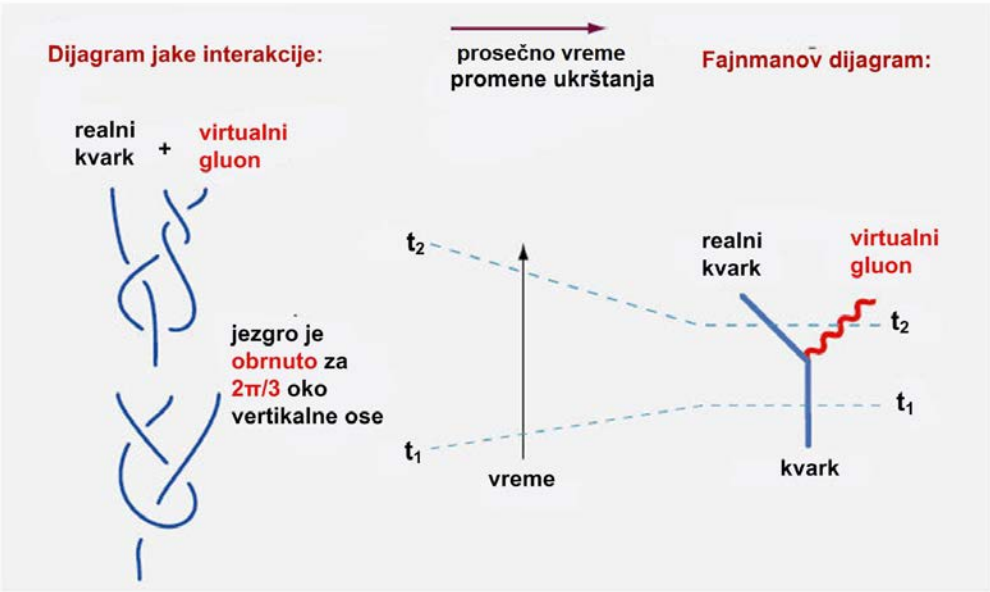
- Naboji tri boje tri su mogućnosti da se preslika zaplet u model tri opasača.[1] Svaka boja je stoga posebno usmerenje u običnom prostoru.

[1] Možete li da odredite geometrijsku ili čak topološku invarijantu čvora koja prikazuje naboj boje. (***Izazov 165ny***)

Ako istražimo složenije vrste zapleta od dve niti, kao što su glavni zapleti ili lokalno vezani zapleti, nalazimo da njihova boja zavisi od njihove strukture. (***Strana 238***). Model niti zbog toga predviđa da su racionalni zapleti načinjeni od dve niti osnovna stanja boje. U stvari, u prirodi su kvarkovi jedini fermioni koji imaju naboj boje.

Možemo rezimirati da je naboj boje povezan sa usmerenjem u prostoru. Tri moguće boje i tri antiboje posledice su mogućih usmerenja duž tri dimenzije prostora.

Slika 70 Zapleti sa promenom boje i bez promene



Slika 71 Fajnmanov dijagram jake interakcije kvarka. Gornja trostrukost repova odgovara triku sa tri opasača.

OSOBINE JAKE INTERAKCIJE

Sve interakcije u modelu niti su ***izobličenja*** jezgra zapleta. Posebno je jaka interakcija usled razmene ***klizanja***. Čestice imaju jak naboj, ili boju, ako su njihovi zapleti izgubili simetriju tri opasača, koja je upravo određena. U slučaju fermiona sa bojom, ***promena boje*** je promena preslikavanja modela tri opasača, to jest promena usmerenja zapleta u prostoru.

Ako koristimo niti za odrednicu jake interakcije, vizualno pretraživanje pokazuje nam da su razmene klizanja, a time i razmene gluona, izobličenja u kojima je topologija očuvana; prema tome, u razmeni gluona boja je očuvana. Pošto je u jakoj interakciji očuvana topologija svih obuhvaćenih zapleta i čvorova, u jakoj interakciji takođe su očuvani električni naboj, paritet i svi ostali kvantni brojevi, kako ćemo videti u daljem tekstu, osim, naravno, same boje. Svi ovi rezultati odgovaraju opažanjima.

LAGRANŽIJAN KVANTNE HROMODINAMIKE

Počeli smo od ideje da izobličenja jezgra zapleta dovode do novog određivanja faze. Potom smo našli da klizanja podrazumevaju da je lagranžijan jake interakcije za materiju i za polja zračenja invarijanta merila SU(3). Ako uključimo ove dve invarijante merila u gustinu lagranžijana fermiona iz jednakosti Diraka, dobijamo

$$\mathcal{L}_{QCD} = \sum_q \overline{\Psi}\left(i\hbar c \not{D} - m_q c^2 \delta_{qq'}\right)\Psi_{q'} - \frac{1}{4}\sum_{a=1}^{8} G^a_{\mu\nu} G^{\mu\nu}_a \tag{164}$$

gde indeks q prebrojava fermione sa bojom, to jest kvarkove. U ovoj gustini lagranžijana $\not{D}$ je sada kovarijantni izvod SU(3) merila

$$\not{D} = \not{\partial} - g\gamma^\mu G^a_\mu \lambda_a \tag{165}$$

pri čemu je g veza merila, λ_a su generatori SU(3), to jest, Gel-Manove natrice navedene u predhodnom tekstu, a G^a_μ su, kao i ranije, vektorski potencijali gluona. Posledni član u kovarijantnom derivatu odgovara Fajnmanovom dijagramu i dijagramu niti na ***slici 71***. To je gustina lagranžijana kvantne hromodinamike.

Da zaključimo: model niti prikazuje kvantnu hromodinamiku. Međutim, još uvek nismo izveli broj i mase q_m za kvarkove, niti spoj jakog merila g.

RENORMALIZACIJA JAKE INTERAKCIJE

Opis poteza klizanja jake interakcije podrazumeva da su moguća samo tri Fajnmanova dijagrama: jedan Fajnmanov dijagram kvantne hromodinamike moguć je za kvarkove, a samo trostruki ili četvorostruki vrhovi mogućai su za gluone. Ograničen opseg mogućnosti takođe je suština ***renormalizacije*** kvantne hromodinamike. Model niti stoga automatski osigurava da se renormalizuje jaka interakcija.

Ukratko, model niti obezbeđuje novu osnovnu sliku za Fajnmanove dijagrame jake interakcije, ali ne menja fizičke rezultate u bilo kojoj razmeri energije dostupne u laboratoriji. Posebno, prikazuje se tok merenja konstante jake veze. (***Strana 283***). U stvari, u modelu niti veze između kvarkova, slične cevima upliva, pojavljuju se automatski, kao što ćemo videti kada budemo istraživali hadrone. (***Strana 256***) i (***strana 257***). Na velikim kinetičkim energijama veze imaju mali efekt, tako da se kvarkovi ponašaju više kao slobodne čestice. Ukratko. nalazimo da model niti prikazuje asimptotsku slobodu i da takođe daje dokaz ograničenja kvarka. Na detalje ovog pitanja vratićemo se u daljem tekstu. (***Strana 254***).

ZANIMLJIVOSTI I ZABAVNI IZAZOVI O SU(3)

Izvođenje Lijeve grupe SU(3) iz trodimenzionalnog modela nov je rezultat. (***Vol. V, strana 216***). Posebno je novo izvođenje merne grupe SU(3) kao ***izobličenja grupe merila***. Frank Vilček (Frank Wilczek, Alfred Šapere (Alfred Shapere), Alden Mid (Alden Mead), Džeri Marsden (Jerry Marsden) i mnogi drugi potvrdili su i pre ovog otkrića da se samo geometrijska Lijeva grupa SO(3) i njene podgrupe nalaze u izobličenjima. (***Ref. 182***). Osnovno načelo modela niti pokazuje svoju snagu u prevazilaženju ovih ograničenja. (Očigledno niko nije čak ni shvatio da trik sa opasačem već podrazumeva mogućnost SU (2) merne grupe za izobličenja.)

* * *

Razmatrali smo izibličenja oblika koja dovode do SU(3) grupe. Međutim, kakvi su precizni ***izbori faza*** za ukrštanja koja dovode do invarijante SU(3)? (***Izazov 166ny***).

* * *

Da li dva linearno nezavisna gluona sa poravnarim repovima imaju ista svojstva kao ostalih šest gluona? (***Izazov 167ny***).

* * *

Tri niti mogu da se međusobno ukrštaju i na drugačiji način, takav da su tri niti zabravljene. Zašto je u ovom odeljku ova situacija zanemarena? (***Izazov 168s***).

* * *

Izvođenje Lijevih grupa U(1), SU(2) i SU(3) neposredno iz osnovnih načela protivrečno je jednom starom snu. Mnogi naučnici su se nadali da tri merne grupe imaju neku vezu sa sekvencom kompleksnih brojeva,

kvaternionima i oktonionima. Model niti je ugasio ovu nadu – ili bar izmenio na skoro neprepoznatljiv način.

* * *

Zapleti za W i Z bozone nemaju naboj boje. Možete li to da potvrdite? (***Izazov 169e***).

* * *

Lijeva grupa SU(3) takođe je grupa simetrije za trodimenzionalni harmonični oscilator. Kakva je geometrijska povezanost sa Lijevom grupom SU(3) izazvane klizanjima? (***Izazov 170ny***).

* * *

Potvrdite da model niti nije u suprotnosti Koleman-Mandula (Coleman-Mandula) teoremi u mogućim očuvanim veličinama kvantne teorije polja. (***Izazov 171e***).

* * *

Potvrdite da model niti nije u suprotnosti Vajnberg-Viten (Weinberg-Witten) teoremi za moguće čestice bez mase u kvantnoj teoriji polja. (***Izazov 172e***).

* * *

Da li model niti sa interakcijama ispunjava ***Vajtmenove aksiome*** (Arthur Wightman) za kvantnu teoriju polja? A Hag-Kastlerove aksiome (Haag-Kastler)? Da li je zaobiđena Hagova teorema? (***Izazov 173d***) .

* * *

Pokazati da relacije BCFW[1] rekurzije (***Ref. 183***) za rasipanje gluona slobodnog nivoa slede iz modela niti. (***Izazov 174ny***).

ZAKLJUČAK O JAKOJ INTERAKCIJI I PREDVIĐANJIMA EKSPERIMENATA

Izveli smo gustinu lagranžijana kvantne hromodinamike iz modela niti pomoću klizanja, III poteza Rajdemajstera. Postoji li razlika između modela niti i kvantne hromodinamike? Ne, sve dok ulogu nema gravitacija. Model niti predviđa da gravitacija ulazi u igru samo u blizini Plankove energije $\sqrt{\hbar c^5/4G}$. I zaista, eksperimenti u ubrzivaču čestica još uvek nisu našli bilo koji efekt koji je protivrećan kvantnoj hromodinamici, pa prema tome nijedan efekt koji je protivrečan modelu niti jake interakcije.

Model niti takođe predviđa da je jaka interakcija prirodna CP invarijanta. To znači da su nepotrebni ***aksioni***[2] – čestice uvedene da bi se objasnile invarijante: kao što je pokazano u daljem tekstu (***strana 264***), model niti čak predviđa da one ne postoje. Oba predviđanja saglasna su sa eksperimentima.

Model niti jake interakcije predviđa da SU(3) merna simetrija važi na svim energijama. Nijedna druga merna grupa nema ulogu u jakoj interakciji. Model niti zato ponovo predviđa da u prirodi ne postoji velika unifikacija, pa stoga ni više grupe merila. Predviđa se da često razmatrane grupe kao što su SU(5), SO(10), E6, E7, E8 ili SO(32) nisu prisutne u prirodi. Ovo predviđanje takođe nije u suprotnosti sa eksperimentima.

Osim toga, model niti predviđa da kombinacija gravitacije i kvantne teorije pomera sve Plankove jedinice na ***granične*** vrednosti. Model niti zato predviđa maksimalno veliku vrednost polja datu Plankovom silom podeljenom jakim nabojem kvarka. Predviđa se da su svi fizički sistemi – uključujući i sve astrofizičke objekte, kao što su neutronske zvezde, zvezde kvarkova, eksplozije gama zraka, i kvazari – usklađeni sa ovim graničnim poljem. Do sada je ovo predviđanje vrednovano u eksperimentima.

Rezimirano, pokazali smo da III potezi Rajdemajstera – ili klizanja – u jezgrima zapleta dovode do SU(3) merne invarijante i lagranžijana koji prikazuje jaku interakciju. Promena boje je povezana sa topologijom izvesnih racionalnih zapleta. Na takav način, mi smo izveli poreklo i većinu opaženih svojstava jake interakcije. Stoga smo rešili još jedno pitanje iz milenijumske liste. (***Strana 121***). Međutim, još uvek treba da izvedemo zaplete i broj kvarkova, njihove mase i jačinu jakog spoja.

---

[1] **BCFW** je skraćenica načinjena od početnih slova prezimena autora rekurzijskih relacija: **B**ritto (Ruth), **C**achazo (Fredy), **F**eng (Bo) i **W**itten (Edward). To je skup rekurzivnih (ponavljajućih) relacija na ljusci u kvantnoj teoriji polja. Koristi se za izračunavanje amplitude rasipanja.

[2] **Aksion** (oznaka A^0) je zamišljena čestica koju predviđa teorija Pecel-Kvin (Peccel-Quinn) kako bi se u kvantnoj hromodinamici rešio težak problem CP simetrije. Aksion je takođe verovatno sastavni deo tamne materije u svemiru.

ZAKLJUČAK O MILENIJUMSKIM PITANJIMA U VEZI MERNIH INTERAKCIJA

Na ovom mestu naše pustolovine izveli smo teoriju merila i tri poznate interakcije merila preko niti. Koristeći samo osnovno načelo (***strana 119***), objasnili smo dimenzije prostor-vremena, Plankove jedinice, načelo najmanjeg rada, pojavu grupe merila U(1), prekinute simetrije SU(2) i SU(3) renormalizacije, Lorencove simetrije i simetrije permutacije. Prema tome, izveli smo sve pojmove i sve matematičke strukture koje su neophodne da bi se ***odredio*** standardni model elementarnih čestica.

Model niti posebno daje opise i objašnjenja za tri interakcije merila u Plankovim razmerama koje se zasnivaju na ***izobličenjima*** niti. Izvođenje tri interakcije merila date u ovom tekstu, uz pomoć Rajdemajsterovih poteza, prvo je, i u ovom trenutku ***jedino***, objašnjenje tri sile merila. Nijedno drugo objašnjenje ili izvođenje nije nikada ranije prikazano.

Pokazali smo da je kvantna teorija polja približnost modela niti. Približnost se pojavljuje kada se zanemari prečnik niti; kvantna teorija polja je stoga valjana pri energijama ispod Plankove razmere. Drugim rečima, nasuprot većini drugih pokušaja objedinjavanja, model niti ***nije uopštavanje*** kvantne teorije polja. Model niti za tri interakcije merila takođe je nepromenljiv. Ova svojstva u saglasnosti su sa našim popisom zahteva za konačnu teoriju. (***Strana 117***).

Mi još uvek nismo izveli potpun standardni model: još uvek treba da pokažemo koje čestice postoje, koja svojstva imaju i kakve veze proizvode. Međutim, odredili smo da model niti objašnjava sve matematičke strukture iz milenijumske liste (***strana 128***) koje se pojavljuju u kvantnoj teoriji polja i u standardnom modelu fizike čestica. U stvari, objašnjenje modelom niti za poreklo merniih interakcija omogućava nam da načinimo nekoliko važnih iskaza.

PREDVIĐANJE O BROJU INTERAKCIJA

Još je 1926. godine Kurt Rajdemajster dokazao važnu teoremu o mogućim izobličenjima čvorova ili zapleta koji dovode do promena ukrštanja. Kada se zapleti opišu pomoću dijagrama u dve dimenzije, sva noguća izobličenja mogu da se svedu na tačno tri poteza, koji se u današnje vreme nazivaju po njemu. (***Ref. 180***). Dvodimenzionalni dijagram zapleta u modelu niti opisuju šta posmatrač ***vidi*** u fizičkom sistemu. Zajedno sa ekvivalencijom interakcija kao izoblićenja promenom ukrštanja, Rajdemajsterova teorema zato dokazuje da u prirodi postoje ***samo tri merne interakcije***. Predviđeno je neuspešno traganje za drugim mernim interakcijama. I zaista, sve do sada ono je bilo neuspešno.

OBJEDINJAVANJE INTERAKCIJA

Isto tako možemo da kažemo da ustvari postoji samo jedan Rajdemajsterov potez. (***Ref. 142***). Ovo postaje posebno jasno ako istražujemo trodimenzionalni oblik čvora umesto dvodimenzionalnog dijagrama: sva tri Rajdemajsterova poteza mogu da se izvedu iz istog izobličenja pojedinačne niti. Jedino projekcija na dvodimenzionalni dijagram pravi razlike između tri poteza. U pojmovima modela niti to znači da su sve interakcije merila u stvari vidovi jednog osnovnog procesa, kolebanja oblika niti, a da se tri interakcije merila razlikuju samo po njihovim projekcijama. Na takav način, modelom niti tri interakcije merila su ***objedinjene***.

Ravan projekcije koja se koristi u dijagramu niti određuje preslikavanje sa kolebanja niti na Rajdemajsterove poteze. Ravan projekcije određuje posmatrač, to jest referntni sistem. U zavisnosti od ravni projekcije, uopšteno izobličavanje preslikava se u različite Rajdemajsterove poteze. Na prvi pogled priroda interakcije – bilo elektromagnetne, slabe ili jake – izgleda da zavisi od posmatrača. Međutim u prirodi nije takav slučaj. Ova protivrečnost je samo prividna. U modelu niti priroda interakcije čestice potiče od vrste nesimetričnosti jezgra zaplera. Izvesna izobličenja niti ne dovode do interakcija, pošto su njihovi efekti potisnuti prosečnim kratkotrajnim kolebanjima, koji su osnova svakog opažanja. Drugim rečima, prosečan proces na osnovi opažanja takođe osigurava da su na niskim energijama interakcije efektivno nezavisne od posmatrača.

Ukratko, model niti predpostavlja prirodno ***objedinjavanje*** interakcija. (***Strana 282***). I ovo objedinjavanje interakcija u potpunosti se razlikuje od svakog predloga u prošlosti. Konačna provera, naravno, može da bude izvršena samo u eksperimetima.

NEMA NESLAGANJA

Model niti podrazumeva da ne postoje neslaganja u kvantnom opisu prirode. Ovo odsustvo neslaganja pojavljuje se pošto su fizičke vrednosti nastale posle primene proseka efekata niti. Kao što je pomenuto u predhodnom tekstu, efekti niti na prostor-vreme nestaju kroz "drhtanje", a efekti niti na čestice nestaju preko talasnih funkcija. (***Strana 119***)

Premda je smisao oćigledan, vredi ga naglasiti. U modelu niti nijedna interakcija ne podrazumeva niti sadrži neslaganje: ni gravitaciju ni interakcije merila. Ne postoje niti ultraljubičasta niti infracrvena neslaganja. Ukratko, model niti od samog početka izbegava neslaganja, beskonačnosti i singularitete bilo koje vrste.

PREDVIĐANJA O VELIKOM OBJEDINJAVANJU I SUPERSIMETRIJI

Tri merne interakcije nastaju usled Rajdemajsterovih poteza. Prema tome, model niti ističe da ne postoji pojedinačna merna grupa za sve interakcije: ***ne postoji*** takozvana ***velika unifikacija***. Nepostojanje velike unifikacije podrazumeva odsustvo velikog stepena rapada protona, odsustvo drugih, još neotkrivenih baždarnih bozona, odsustvo oscilacija neutron-antineutron i odsustvo znatnog električnog momenta dipola u elementarnim česticama. Sva ova istraživanja trenutno su u toku; model niti predviđa da će ona dati kao ***rezultat nulu***. (***Strana 289***).

Rajdemajsterovi potezi su ograničeni na tri prostorne dimenzije. U stvari, model niti je zasnovan da tačno tri prostorne dimenzije. Ne postoji nikakve druge, neotkrivene dimenzije. Ne postoji supersimetrija ni supergravitacija. Model niti stoga predviđa nepostojanje svih predpostavljenih "superčestica". Model niti takođe predviđa nepostojanje nekomutativnog prostor-vremena, premda, uz malo mašte, niti mogu da se posmatraju kao da su izdaleka u vezi sa ovim pristupom. (***Strana 261***). Model niti takođe predviđa nepostojanje različitih vakuuma: vakuum je jedinstven. Ukratko, model niti se razlikuje kako eksperimentalno, tako i teorijski od mnogih predloga objedinavanja načinjenih tokom dvadesetog veka.

Jednostavno rečeno, model niti predviđa odsustvo dodatnih simetrija i dodatnih svojstava prostor-vremenana visokim energijama. Model niti predviđa da objedinjavanje nije postignuto traženjem viših simetrija, niti za više dimenzija, niti za pojmove koji sadrže oba. Ovo nepostojanje kompleksnih matematičkih ili pojmova simetrije u prirodi je razočaravajuće; predviđa se da su nade i istraživački radovi u poslednjih pedeset godina bili pogrešni. Drugim rečima, nepopularna su predviđanja modela niti. (***Strana 117***). Međutim, predviđanja se slažu sa našom listom zahteva za konačnu teoriju; do sada su sva ova predviđanja u saglasnosti sa eksperimentina. (***Strana 292***)

NEMA NOVIH OPAŽANJA EFEKATA GRAVITACIJE U FIZICI ČESTICA

U strukturi "kocke" fizike prikazane na ***slici 1*** (***strana 9***), prelazak sa konačnog, objedinjenog opisa kvantne teorije polja događa se uz zanemarivanje gravitacije, to jest, predpostavkom ravnog prostor-vremena. Isti prelazak se događa u modelu niti, gde se osim zanemarivanja gravitacije zahteva i zanemarivanje prečnika niti. Na takav način gravitacijska konstanta G u potpunosti nestaje iz opisa prirode.

Možemo takođe da sažmemo naše pronalaske u kvantnoj teoriji polja i na sledeći način:

- Model niti predviđa da su mase jedino efekt opažanja gravitacije u kvantnoj fizici i fizici čestica.

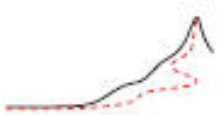
Ovaj rezultat će biti upotpunjen u daljem tekstu drugim, podjednako ograničavajućim rezultatom koji ograničava opažene kvantne efekte u proučavanju gravitacije. (***strana 233***). Ukratko, model niti drži skoro potpuno međusobno razdvojene fiziku čestica i opštu teoriju relativnosti. To je posledica različitih efekata izobličenja repova i izobličenja jezgara. Takođe, predviđanja modela niti o nepostojanju dodatnih efekata gravitacije u fizici čestica u skladu je sa svim eksperimentima do sada.

STATUS NAŠEG TRAGANJA

U ovom poglavlju zaključili smo da niti predviđaju tačno tri interakcije, pošto su interakcije izobličavanja jezgara zapleta i pošto postoje samo tri klase takvih izobličavanja jezgara. Tri klase izobličavanja određene su sa tri Rajdemajsterova poteza. Zbog osobina Rajdemajsterovih poteza, tri interakcije opisane su respektivno sa U(1), prekinutom SU(2) i SU(3) simetrijom merila.

Niti takođe pokazuju da su tri interakcije renormalizirajuće, relativistički invarijantne i da slede načelo najmanjeg rada. Niti takođe podrazumevaju tri lagranžijana interakcija standardnog modela fizike čestica. Osim toga, niti predviđaju odsustvo drugih interakcija, simetrija i struktura prostor-vremena.

Ako pogledamo popis otvorenih pitanja osnova fizike u milenijumskoj listi (***strana 128***), mi smo sada rešili sva pitanja vezana za matematičke strukture koje se pojavljuju u kvantnoj teoriji polja i u standardnom modelu fizike čestica. ***Sve matematičke strukture koje se nalaze u kvantnoj fizici rezultat su osnovnog načela modela niti datog u predhodnom tekstu***. (***Strana 119***). To je rezultat koji izaziva da nastavimo istraživanje. Samo su još dve grupe pitanja nerešena: teorija opšte teorije relativnosti i spektar elementarnih čestica. Nastavljamo tim redosledom.



Poglavlje 10

OPŠTA TEORIJA RELATIVNOSTI IZVEDENA IZ NITI

Opšta teorija relativnosti opisuje izobličenja vakuuma. U svakodnevnom životu gravitacija jedini je takav efekt koga opažamo. Međutim, u astronomskim razmerama gravitacija pokazuje više pojava: vakuum može da skrene svetlost, da proizvede gravitacijsko sočivo, može da oscilira, dajući gravitacijske talase i može da ubrzava, uzrokujući tamno nebo i začuđujuće crne rupe. Sva ova opažanja za svoj opis zahtevaju opštu teoriju relativnosti. Prema tome, opšta teorija relativnosti mora da bude deo svakog objedinjenog opisa prirode.

U ovome što sledi, objašnjavamo postojanje gravitacije kao posledice niti. Potom preko modela niti izvodimo jednakosti polja opšte teorije relativnosti, entropiju crnih rupa i relativističku kosmologiju. Isto tako predviđamo ishode mnogih eksperimenata kvantne gravitacije. Konačno, izvodimo posledice niti na kosmologiju, uključujući nova predviđanja eksperimenata. Od svih modela prostora ili prostor-vremena u Plankovim razmerama, niti izgledaju najjednostavnije za davanje ovih zaključaka.

RAVAN PROSTOR, SPECIJALNA TEORIJA RELATIVNOSTI I NJENA OGRANIČENJA

U predhodnom teksti videli smo da svaki posmatrač automatski uvodi 3+1 dimenziju ***pozadine*** prostor-vremena. (***Strana 159***). Isto tako smo videli da u slučaju kvantne teorije ***fizičko*** prostor-vreme, prostor-vreme koje je oblikovano kolebanjem niti vakuuma, prirodno ima 3+1 dimenziju i ravno je. U odsustvu gravitacije podudarni su fizički prostor i prostor pozadine.

Korišćenjem niti izveli smo invarijanthu granicu c za sve brzine energije i pokazali da je ona ostvarena samo za slobodne čestice bez mase, kao što su fotoni. (***Strana 162***) Niti nam isto tako pokazuju da se čestice sa masom kreću mnogo sporije od svetlosti. Ukratko, niti prikazuju specijalnu teoriju relativnosti.

Model niti prema tome predviđa da je ***čista*** specijalna teorija relativnosti ispravna u svim situacijama i na svim energijama u kojima ulogu nemaju gravitacija i kvantna teorija. Model niti takođe predviđa da kada ulogu nemaju gravitacija i kvantni efekti, u obzir ***mora*** da se uzme opšta teorija relativnosti ili kvantna teorija. To znači da ne postoji oblast u prirodi u kojoj su valjani međuopisi.

Ponekad se predlaže da bi invarijantna granica Plankove energije za elementarne čestice mogla da dovede do "dvostruke specijalne teorije relativnosti" koja pri višim energijama odstupa od specijalne teorije relativnosti. (***Ref. 85***). Međutim, ovaj predlog se zasniva na dve predpostavke: da su na Plankovoj energiji ***tačkaste mase*** održive približnosti čestica i da se na Plankovoj energiju ***razlikuju vakuum i materija***. U prirodi, a takođe u modelu niti, obe predpostavke su ***netačne***. Priroda, kao što pokazuje opšta teorija relativnosti, ne dozvoljava postojanje tačkastih masa: objekti najveće gustine u prirodi su crne rupe, a one nisu slične tački za bilo koju vrednost mase. Osim toga, na Plakovoj energiji materija i vakuum ne mogu da se razlikuju. (***Strana 55***). Jednostavno rečeno, nijedan sistem na Plankovoj energiji ne može da se opiše bez opšte teorije relativnosti ili bez kvantne gravitacije. (***Ref. 184***). Ukratko, model niti predviđa da pristup "dvostruke specijalne teorije relativnosti" ne može da bude ispravan.

KLASIČNA GRAVITACIJA

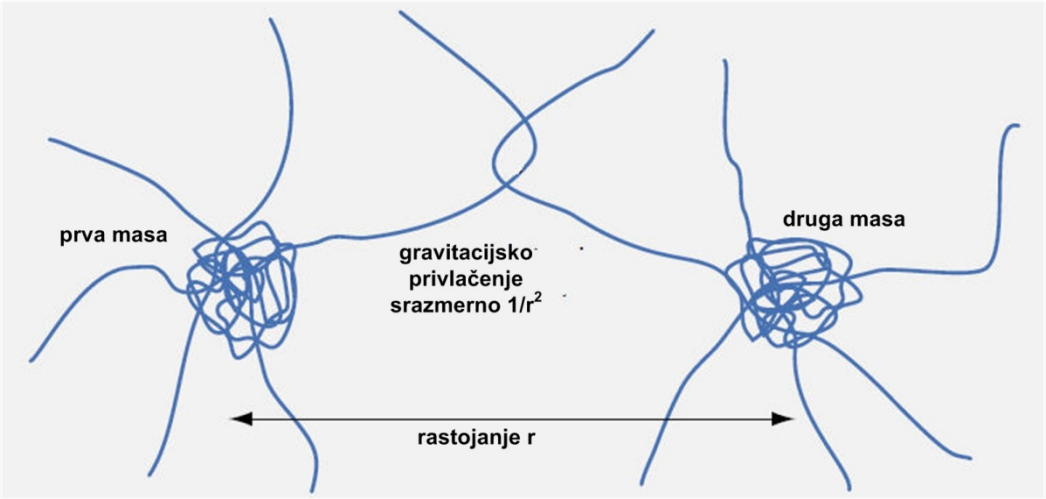
Pri malim brzinama u prirodi i u granicama ravnog prostora opaža se da gravitacija dovodi do ubrzanja a probnih masa koje se menja obrnuto srazmerno sa kvadratom rastojanja masa koje gravitiraju;

$$a = G\frac{M}{R^2} \tag{166}$$

Ovo ubrzanje se naziva ***univerzalna gravitacija*** ili ***klasična gravitacija***. To je divna približnost za Sunčev sistem i za mnoge sisteme zvezda širom svemira.

U modelu niti svaki efekt prostor-vremena, uključujući gravitaciju, nastaje usled ponašanja repova zapleta. U modelu niti svaka masa, to jest svaki sistem zapleta povezan je repovima sa granicom prostora. Što je masa bliža drugoj masi to je učestanije ukrštanje u zaplitanje repova dvaju masa. ***Slika 72*** prikazuje situaciju. Model niti izražava:

- Gravitacija nastaje usled kolebanja ukrštanja repova.



Slika 72 Gravitacijsko privlačenje kao rezultat niti

Ukrštanja repova se kolebaju; uzeta u proseku vremena kolebanja dovode do gustine promena ukrštanja. Nastala gustina energije – pri čemu je energija broj promena ukrštanja u vremenu – menja se sično obrnuto srazmerno rastojanju od centralne mase. (***Izazov 175e***) To je razlog zavisnosti $1/r$ gravitacijskog potencijala i $1/r^2$ zavisnosti gravitacijskoh ubrzanja. (Primenjuje se u svim onim slučajevima gde je zakrivljenost zanemarljiva.) Jednostavno rečeno, u modelu niti obrnuta srazmera od kvadrata rastojanja gravitacijskog ubrzanja nastaje usled trodimenzionalnog prostora kombinovanog sa nitima koje imaju jednu dimenziju.

Model niti takođe pokazuje da su mase i energije uvek pozitivne: svaki zaplet ima repove. Model takođe kvalitativno pokazuje da veče mase proizvode jače ubrzanje, a one u opštem slučaju imaju više repova. Pokazaćemo u daljem tekstu da je efektivni broj gustine repova zaista srazmeran masi. (***Strana 267***).

U modelu niti promene ukrštanja ne odnose se samo na energiju; one su povezane sa entropijom. Pomalo različito – ali ekvivalentno – pogled na gravitaciju prema tome pojavljuje se kada stavimo naglasak na entropijski aspekt.

IZVOĐENJE UNIVERZALNE GRAVITACIJE IZ OSOBINA CRNE RUPE

Crne rupe imaju entropiju, što podrazumeva univerzalnuu ravitaciju. Postoje najmanje dva načina da se objasni ova veza.

Posebno jasno objašnjenje nedavno je dao Erik Verlinde. (***Ref. 185***). U tom pogledu ***gravitacija se pojavljuje pošto bilo koja masa M stvara efektivnu temperaturu vakuuma oko nje***. Gravitirajuća masa M privlači probnu masu pošto se tokom ***pada*** probne mase ukupna entropija ***smanjuje***. Nije teško da se ove ideje opišu kvantitativno.

Obzirom da loptasta površina A koja obuhvata gravitacijsku masu u svom centru, ubrzanje a probne mase koja se nalazi bilo gde na površini data je lokalnom temperaturom vakuuma T:

$$a = T\frac{2\pi kc}{\hbar} \qquad (167)$$

gde je k Bolcmanova konstanta. Ova relacija se naziva ***Fuling-Dejvis-Unru efekt*** i povezuje temperaturu vakuuma i lokalno ubrzanje. Prema tome, inercijska masa, ili masa u slobodnom padu (ili posmatrač), mere temperaturu vakuuma koja nestaje.

U modelu niti temperatura vakuuma na površini lopte koja ga okružuje data je promenama ukrštanja izazvanih repovima koji počinju kod mase. Možemo da odredimo temperatutu vakuuma deljenjem energije E sadržane unutar lopte sa dvostrukom vrednošću maksimalno moguće entropije S za ovu loptu. Ova

maksimalna vrednost je entropija koju bi lopta mogla da ima kada bi bila na horizontu crne rupe; ona može da se izračuna preko modela niti, kao što ćemo uskoro da objasnimo. (***Strana 217***). Ovaj proračun daje izraz

$$T = \frac{E}{2S} = \frac{M}{A}\frac{2G\hbar}{kc} \tag{168}$$

Zanemarujući prostornu zakrivljenst, možemo da postavimo $A = 4\pi R^2$; to daje temperaturu na lopti koja okružuje masu

$$T = \frac{M}{R^2}\frac{G\hbar}{2\pi kc} \tag{169}$$

Stavljajući ovaj izraz u gornji izraz (167) za Fulihg-Dejvis-Unru ubrzanje, dobijamo

$$a = G\frac{M}{R^2} \tag{170}$$

Ovo je univerzalna gravitacija onakva kakvu je otkrio Robert Huk (Robert Hooke), a popularizovao je Isak Njutn (Isaac Newton). Pošto je zamenarena zakrivljenost prostora i predpostavljeno da centralna masa M miruje, ovaj izraz važi samo za velika rastojanja i za male brzine. Mi smo tato izveli univerzalnu gravitaciju preko efekata gravitiracije masa na temperaturi vakuuma. U daljen tekstu mi ćemo uopštiti ovu rečenicu dokaza na relativistički slučaj i izvesti jednakosti polja opšte teorije relativnosti. (***Strana 221***).

Uporedno izvođenje univerzalne gravitacije iz entropije crne rupe je sledeće. Sila gravitacije F koja deluje na probnu masu data je temperaturom vakuuma T, koju je izazvala centralna masa M i promena entropije S po dužini koju je izazvalo kretanje probne mase

$$F = T\frac{\mathrm{d}S}{\mathrm{d}x} \tag{171}$$

Promena entropije po dužini $\mathrm{d}S/\mathrm{d}x$ kada se masa m kreće na rastojanju x, može da se izvede iz modela niti na jednostavan način. Kada se u modelu niti masa m kreće uz (umanjenu) Komptonovu talasnu dužinu, masa se obrne za pun obrt: promena entropije je $2\pi k$ po (umanjenoj) Komptonovoj talasnoj dužini. Prema tome, imamo

$$\frac{\mathrm{d}S}{\mathrm{d}x} = m\frac{2\pi kc}{\hbar} \tag{172}$$

Korišćenjem temperature T, određene u jednakosti (169), dobijamo izraz za silu gravitacije datu sa

$$F = G\frac{Mm}{R^2} \tag{173}$$

To je ponovo univerzalna gravitacija. Ovog puta mi smo prema tome izveli gravitaciju preko entropije i temperature koje stvaraju gravitirajuće mase.

Zapažamo da su temperatura i entropija crnih rupa granične vrednosti. Prema tome, možemo da kažemo da je univerzalna gravitacija posledica graničnih vrednosti u prirodi. (***Strana 31***).

ZAKLJUČAK O UNIVERZALNOJ GRAVITACIJI IZ NITI

Univerzalna gravitacija nastaje usled temperature i entropije crnih rupa i vakuuma. U modelu niti, vrednosti ove temperature i entropije posledice su osnovnih promena ukrštanja, što ćemo uskoro da otkrijemo. (***Strana 217***). Univerzalna gravitacija se prema tome (ponovo) pojavljuje kao efekt promena ukrštanja izazvanog masama.

Prema tome, imamo nekoliko objašnjenja univerzalne gravitacije korišćenjem niti. Izveli smo univerzalnu gravitaciju preko energije niti, preko temperature niti i preko entropije niti. Takođe smo izveli univerzalnu gravitaciju i preko maksimalne sile, koju niti takođe zadovoljavaju. Ukratko, niti objašnjavaju poreklo univerzalne gravitacije.

Uzgred, modeliranje mase kao izvora promena ukrštanja niti izdaleka podseća na model gravitacije Žorža-Luja Lesaža (Georges-Louis Lesage) iz osamnaestog veka. (***Ref. 186***). Lesaž je predpostavio da gravitacija nastaje zbog mnogo malih, nevidljivih tela koja guraju mase da se sjedine. Ustvari, kao što ćemo uskoro da

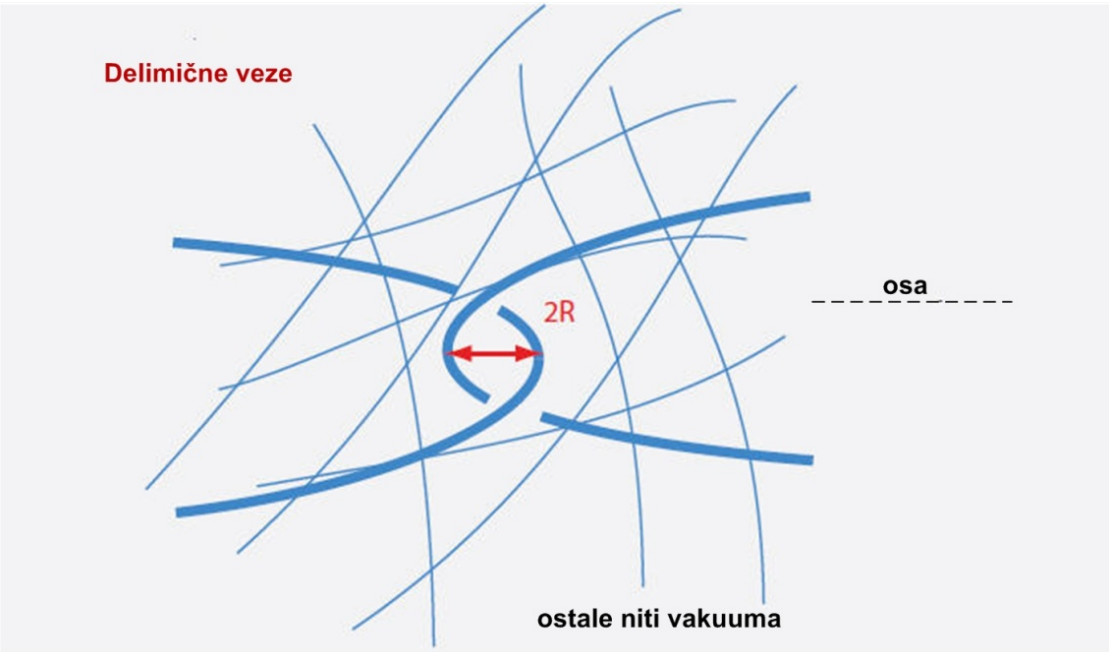
vidimo, postoji izvesna sličnost između ovih predpostavljenih malih tela i virtualnig gravitiona. I zanimljivo je, sve kritike Le Sažovog modela (***Vol. I, strana 162***) postaju neodržive. Prvo, ne postoji usporavanje slobodnih masa u inercijskom kretanju, zahvaljujući svojstvenoj invarijantnosti posebne teorije relativnosti. Drugo, ne postoji zagrevaje masa, pošto zapleteni repovi predstavljaju virtualne gravitone koji se elastično rasipaju. Treće, i najvažnije, zamenom Lesažovih ***corpuscules ultra-mondains*** virtualnim gravitonima – i konačno nitima – može da se predskaže poseban efekt gravitacije koji nije opisan obrnutom srazmerom kvadrata rastojanja: zbog zakrivljenosti prostor vremena.

ZAKRIVLJEN PROSTOR

Opažanja pokazuju da fizički prostor u prirodi nije ravan u okolini masa, to jest, u prisustvu gravitacije. U blizini mase i energije fizički prostor je ***zakrivljen***. Opažanja pokazuju takođe da zakrivljen prostor zadržava 3+1 dimenziju. Opažanje ove vrste zakrivljenosti predskazano je mnogo pre no što je izmereno, zato što zakrivljenost sledi nedvosmisleno kada se kombinuju invarijanta brzine svetlosti od posmatrača i invarijanta gravitacijske konstante *G* od posmatrača.

Nastavljamo direktno modelom niti zakrivljenosti prostora i pokazaćemo da se prikazuju sva opažanja.

- Zakrivljenost (fizičkog prostor-vremena) nastaje usled jednostavnih, nevezanih i slabo lokalizovanih grešaka u zapletima koje sačinjavaju vakuum. Primer je prikazan na ***slici 73***.
- U slučaju zakrivljenosti, ***fizičko*** prostor-vreme, koje je nastalo usled prosečnih promena ukrštanja, ***razlikuje*** se od ravne ***pozadine*** prostor-vremena koja obično odgovara tangenti asimptote prostor-vremena. Na ***slici 73*** siva boja pozadine može da se uzme kao prikazivanje pozadine prostora.
- ***Masa*** je lokalizovana greška u prostoru i nastaje usled vezanih ili zapetljanih niti. Zato masa zakrivljuje prostor oko sebe.
- ***Energija*** u zapremini je broj promena ukrštanja u jedinici vremena. Kao posledica toga, masa je ekvivalentna energiji. Kao drugi rezultat, energija takođe zakrivljuje prostor.
- ***Gravitacija*** je zakrivljenost prostor vremena proisteklog od kompaktnog područja sa masom ili energijom.



Slika 73 Šematski model osnovne greške, pa zato i osnovne vrste zakrivljenosti: delimična povezanost

Ova prirodna odrednica pokazuje da zakrivljenost nastaje usled konfiguracija niti. Posebno, zakrivljenost je sačinjena od nevezanih ***grešaka*** – to jest, bez mase. Greške bez mase dovode da su zakrivljenosti obično dinamične: one se razvijaju i menjaju. Takve greške zakrivljenosti – virtualni gravitoni – potiču iz područja koja sadrže masu ili energiju. Ustvari, zakrivljenost prostora oko masa prirodan je rezultat kolebanja niti od kojih su načijeni zapleti materije. (***Strana 267***).

Zapažamo da je zakrivljen prostor ***neprekidan*** i ***jedinstven***, budući da je prosek u vremenu. Vakuum, ili preciznije, zakrivljen prostor, razlikuje se zato od prostora pozadine, koji je ravan (i na slikama prikazan sivom bojom.

Uzgred, razlika između fizičkog prostora i prostora pozadine takođe izbegava Ajnštajnovo razmatranje rupe; ustvari, razlika omogućava da se to razmatra jasno, pošto prirodu opisuje samo fizički prostor. (***Vol. II, strana 220***).

SASTAV HORIZONTA I CRNIH RUPA

U opšoj teoriji relativnosti osnovnu ulogu igra drugi pojam. U modelu niti imamo:

- ***Horizont*** je usko jednostrano tkanje niti.

Prema tome, iza horizonta ne postoje niti. To podrazumeva da iza horizonta ne postoji materija, ne postoji svetlost, nema prostora i nema vremena – samo ***ništa***. Zaista, to je doživljaj svakog posmatrača o horizontu. Horizont je stoga struktura kojom je ograničen fizički prostor. On ne ograničava prostor pozadine.

Posebna vrsta horizonta dobro je poznata.

- ***Crna rupa*** je usko, jednostrano i zatvoreno tkanje niti.

U načelu, zatvoren horizont može da ima bilo koji oblik. Najjednostavniji slučaj je loptast horizont koji se ne obrće, koji određuje Švarcšildovu crnu rupu. Ona je prikazana na desnoj stani ***slike 74***.

Slika 74 Šematski model opšteg i loptastog horizonta kao uskog tkanja, kako ga oslikava udaljeni posmatrač. U modelu niti iza horizonta ne postoji ***ništa***, nema niti, pa stoga nema ni prostora.

Ako je posmartač lociran izvan loptastog horizonta, model niti izražava da ništa ne postoji ***unutar*** horizonta: ni materija, ni svetlost ni vakuum. Model niti zato daje jednostavan i drastičan izgled horizonta crne rupe. ***Slika 74*** takođe prikazuje da pojmu poluprečnika (ili veličine) crne rupe treba da se pristupi uz (dobro poznatu) pažnju. U opštem slučaju, veličina strukture načinjene od niti je broj ukrštanja koji se otkriva kada se prolazi kroz njih. Međutim, posmatrač ne može da prolazi ***kroz*** crnu rupu: ne postoje niti unutar nje, stoga tamo nema ni vakuuma. Prema tome, veličina crne rupe mora da se odredi indirektno. Najjednostavniji način je da se za poluprečnik uzme kvadratni koren područja podeljen sa 4π. Prema tome, model niti, slično opštoj teoriji relativnosti, zahteva da se veličina kompaktnog horizonta odredi kretanjem oko njega. Primećujemo da model niti takođe daje intuitivno objašnjenje za razlike između crnih rupa koje se obrću i koje se ne obrću.

POSTOJI LI BILO ŠTA IZA HORIZONTA?

Crtež tkanja horizonta, kakav je onaj na ***slici 74***, jasno ističe razliku između prostora pozadine i fizičkog prostora. ***Prostor pozadine*** je prostor koji nam je potreban za razmišljanje i prostor u koji se postavlja crtež. ***Fizički prostor*** je onaj koji se pojavljuje kao posledica proseka ukrštanja niti. Fizički, zakrivljen prostor postoji samo na strani posmatrača – obično izvan horizonta. Fizički prostor oko crne rupe je zakrivljen; on je u saglasnosti sa prostorom pozadine samo na beskonačnoj udaljenosti od horizonta. Unutar horizonta ne postoji prostor pozadine, ali ne postoji ni fizički prostor. Ukratko, model niti podrazumeva – za posmatrača koji je u prostornoj beskonačnosti – da ne postoji ***ništa*** u horizontu crne rupe, čak ni singularitet.

- Unutar horizonta ne postoji fizički prostor, ni materija ni singularitet.

Horizont je zavisan od posmatrača. I postojanje i oblik horizonta zavise od posmatrača. Kao što ćemo videti, to se događa na precizno isti način kao i u opštoj teoriji relativnosti. U modelu niti ne postoje protivrečnosti između posmatrača na prostornoj beskonačnosti koji kaže da iza horizonta ne postoji ***ništa***, čak ni fizički prostor, i drugog posmatrača koji pada i koji ne opaža horizont, pa kaže da tamo postoji ***nešto***. U modelu niti ova dva iskaza prirodno se pretvaraju jedan u drugog pri promeni tačke posmatranja. U stvari, pretvaranje izneđu ove dve tačke posmatranja sadrži izobličenja niti koje učestvuju.

Primećujemo da ekvivalentnost tačaka posmatranja i iskaza da iza horizonta ne postoji ništa, zasniva se na kombinaciji opšte teorije relativnosti i kvantne teorije. Ako nastavimo da razmišljamo da su prostor i vreme mnogostrukost tačaka – čime bi se zanemarila kvatna teorija – nebi sledili ovi iskazi.

Kao zaključak, jednostrana uska tkanja ***prirodna*** su odrednica horizonta.

ENERGIJA HORIZONTA CRNE RUPE

Model niti omogućava nam da izračunamo sadržaj energije zatvorenog horizonta. Energija je rad u jedinici vremena. Energija loptastog horizonta koji se ne obrće, prema tome je u modelu niti data kao broj N_{cs} promena ukrštanja u jedinici vremena. U uskom tkanju promene ukrštanja ne dešavaju se paralelno, već se dešavaju redosledno. Kao rezultat toga, promene ukrštanja "prenose" se do susednog Plankovog područja površine. Pošto je tkanje horizonta usko, a brzina širenja je jedno ukrštanje za vreme jedne promene ukrštanja, ovo se događa na brzini svetlosti. Sve promene ukrštanja događaju se za vreme T koje traje dok svetlost obiđe loptasti horizont. Prema tome, imamo (***Izazov 176e***)

$$E = \frac{N_{cs}}{T} = \frac{4\pi R^2}{2\pi R}\frac{c^4}{2G} = R\frac{c^4}{2G} \qquad (174)$$

Stoga niti podrazumevaju dobro poznatu relaciju između energije (ili mase) i poluprečnika Švarcšildove crne rupe.

Kako se promene ukrštanja događaju na horizontu crne rupe? Ovu zanimljivu zagonetku prepuštamo da reše čitaoci. ***Izazov 177e***).

Model uskog tkanja horizomta oslikava takođe i potvrđuje ***Penrouzovu*** (Roger Penrose) ***predpostavku***. Za datu masu, usled minimalne veličine ukrštanja, loptasti horizont ima najmanji moguć prečnik u poređenju sa svim ostalim oblicima. To podrazumeva da su za datu masu crne rupe zaista objekti sa najvećom gustinom u prirodi.

PRIRODA CRNIH RUPA

Model niti prirodno podrazumeva ***teoremu bez dlaka***[1]. Pošto su sve niti jednake, nezavisno od vrste materije koja obrazuje ili upadne u horizont, crna rupa nema drugih karakteristika osim mase, momenta koliline kretanja i naboja. Ovde koristimo rezultate iz narednog poglavlja, kada će postati jasno da su sve elementarne čestice zaista načinjene od istih niti bez osobina, Uzimajući taj rezultat kao poznat, zaključujemo da kvantni brojevi ukusa i brojevi čestica nemaju smisla za crne rupe. Isto tako zaključujemo da slabi i jaki naboji nisu određeni za crne rupe. Niti objašnjavaju prirodno zbog čega se ne razlikuju neutralne crne rupe sastavljene od antimaterije i neutralne crne rupe sastavljene od materije. Ukratko, model niti prirode podrazumeva teoremu bez dlaka: ***niti, ne dlaka***.

Horizonti i crne rupe granične su linije sistema između prostora i materije. Ove osobine granične linije mora da ispunjava svaka konačna teorija. Model niti ispunjava ove zahteve: u modelu niti crne rupe mogu da se opišu ili kao zakrivljen prostor ili kao čestica u slobodnom padu.

---

[1] ***Teorema bez dlaka*** postulira da sva rešenja za crne rupe iz jednakosti Ajnštajn-Maksvel za gravitaciju i elektromagnetizam u opštoj teoriji relativnosti mogu potpuno da se karakterišu samo tri spolja opažanih klasičnih parametra: masa, električni naboj i moment količine kretanja. Sve ostale informacije (za koje su "dlake" metafora) o materiji koja obrazuje crne rupe ili koja upadne u njih, "nestaju" iza horizonta događaja crne rupe i zato su trajno nepristupačne za spoljnog posmatrača. Fizičar Džon Arčibald Viler (John Archibald Wheeler) izrazio je ovu ideju frazom „crne rupe nemaju dlaka", koja je poreklo ovog naziva. U kasnijem intervjuu Džon Viler je rekao da je Jakob Bekenštajn (Jacob Bekenstein) iskovao ovu frazu. (izvor: Wikipedia)

ENTROPIJA VAKUUMA I MATERIJE

I vakuum i materija su načinjeni od kolebajućih niti. Neposredno primećujemo:

- Ravan i beskonačan vakuum ima entropiju ***koja nestaje***, pošto je broj promena ukrštanja u proseku nula.

Istovremeno je,

- Zakrivljen prostor i horizont imaju entropiju koja ***ne nestaje***.

Entropija vakuuma i horizonta razlikuje se od entropije za materiju. U ***odsustvu gravitacije***, broj mikro stanja materije je određen – kao u običnoj termodinamici (termostatici) – ponašanjem ***jezgra*** zapleta.

U ***jakoj gravitaciji***, gde razlikovanje između materije i vakuuma nije toliko očigledno, broj mikrostanja određen je mogućim promenama ukrštanja niti. U jakoj gravitaciji ulogu imaju samo ***repovi***. Ovo postaje jasno kada se izračuna entropija crnih rupa.

Slika 75 Entropija crnih rupa rezultat je broja mogućih promena ukrštanja

ENTROPIJA CRNIH RUPA IZVEDENA IZ MODELA NITI

Uprkos gustom tkanju, niti koje obrazuju horizont kolebaju se i kreću: oblik tkanja koleba se i sve vreme ukrštanja se menjaju. Ova kolebajuća kretanja razlog su zašto horizonti imaju entropiju – posebno oni crnih rupa.

Model tkanja horizonta, prikazan detaljno na ***slici 74***, omogućava nam da izračunamo pripadajuću entropiju. Pošto je horizont gusto tkanje, postoji ukrštanje u svakoj Plankovoj oblasti. U prvoj približnosti, u svakoj (ispravljenoj) Plankovoj oblasti horizonta niti mogu da se ukrste na ***dva*** različita načina. Osnovno načelo modela niti zato daje dva mikrostanja po Plankovoj oblasti. Broj Plankovih oblasti N određen je sa $N^2 = Ac^3/4G\hbar$. Broj koji se dobija za mikrostanja crne rupe je 2^{N^2}. Entropija je data kao prirodni logaritam broja mogućih mikrostanja pomnoženo sa k. To daje entropiju horizonta od

$$S = A\frac{kc^3}{4G\hbar}\ln 2 \qquad (175)$$

To je dobro poznata prva približnost entropije crne rupe: jedan bit po ispravljenoj Plankovoj oblasti. (***Ref. 187***). Zato je u modelu niti srazmernost entropije i područja direktna posledica ***istezanja*** niti. Međutim, u ovom pristupu manje je očigledan odnos između srazmernosti područja i istezanja.

Za Švarcšildove crne rupe vrednost entropije iz izraza (175) ***nije*** tačna. U modelu niti ova netačna vrednost objašnjava se kao zanemarivanje efekata repova niti. Zaista, ostali doprinosi entropiji pojavljuju se na konačnom rastojanju od horizonta, usled ukrštanja repova na svoj način do granice prostora, kao što je prikazano na ***slici 75***. Stvarna entropija će stoga biti veća od prve približnosti, ali će još uvek biti srazmerna sa područjem A.

Tačan sačinilac srazmernosti između područja i entropije crne rupe dobija se kada se u obzir uzmu repovi niti. (Sačinilac srazmernosti naziva se u istraživačkoj literaturi o kvantnoj teoriji ***Barbero- Imirzi*** (Barbero-Immirzi) ***parametar***.) Izračunavanje je jednostavnije za Švarcšildove crne rupe. Prema konstrukciji, crna rupa sa makroskopskim poluprečnikom R, budući da je gustog tkanja, ima R/l_{Pl} repova. Za svako dato Plankovo područje, osim osnovnih ili nižih ukrštanja, postoje dodatna ukrštanja "iznad", duž radijalnog

smera, kao što je prikazano na ***slici 75***. Ova dodatna ukrštanja nastaju usled repova iz susednog i udaljenog Plankovog područja.

Uzimanjem uticaja svih repova niti omogućava nam da izračunamo prosečan broj ukrštanja ***iznad*** datog Plankovog područja. Najvažnije je da se ovo izračuna za sve one repove koji započinju u kružnoj traci Plankove širine centrirane oko Plankovog područja koji se posmatra. Tada dodajemo verovatnoće za sve moguće kružne trake. Jedna takva kružna traka prikazana je na ***slici 75***.

Odrednica horizonta kao gustog tkanja podrazumeva da je horizont sa N^2 Plankovih područja načinjen od N niti. To znači da za svaku kružnu traku sa poluprečnikom nl_{Pl} postoji samo jedna nit koja tu započinje i kao rep dostiže prostornu beskonačnost.

Za taj rep prosečna verovatnoća p da ona prelazi preko središnjeg Plankovog područja koje se posmatra iznosi (***Izazov 178e***)

$$p = \frac{1}{n!} \tag{176}$$

Sabiranjem svih traka, to jest iznad svih vrednosti n, dobijamo ukupno $\sum_{n=0}^{\infty} 1/n! = e = 2,71828...$ mikrostanja na i iznad središnjeg Plankovog područja koje koje se posmatra. Stoga broj e zamenjuje cifru 2 iz prve približnosti: broj mikrostanja horizonta Švarcšildove crne rupe nije 2^{N^2} već e^{N^2}. Kao posledica toga, entropija makroskopskog Švarcšildovog horizonta postaje

$$S = A\frac{kc^3}{4G\hbar} \tag{177}$$

Ovo je Bekenštajn-Hokingov (Bekenstein-Hawking) izraz za entropiju Švarcšildovih crnih rupa. Model niti prema tome ponavlja ovaj dobro-poznat rezultat. Ovim objašnjenjem razlike između 2 i e = 2,71828… model niti potvrđuje staru ideju:

- Entropija crne rupe locirana je ***na horizontu i u njegovoj blizini***.

Međutim, ovo izračunavanje prebrojava neka stanja više no jednom. Topološki, identični loptasti horizonti mogu da se razlikuju po smeru njihovog severnog pola i njihovom stanju obrtanja oko ose sever-jug. Ako je loptasti horizont načinjen od N niti, on za severni pol ima N^2 mogućih fizičkih usmerenja i N mogućih ugaonih usmerenja oko ose sever-pol. Stvaran broj mikrosranja je zato e^{N^2}/N^3. Korišćenjem odnosa N^2 i površine područja A, naime $A = N^2 4G\hbar/c^3$, dobijamo konačan rezultat

$$S = A\frac{kc^3}{4G\hbar} - \frac{3k}{2}\ln\frac{Ac^3}{4G\hbar} \tag{178}$$

Prema tome, model niti pravi posebnu predpostavku za logaritamsku ispravku entropije Švarcšildove crne rupe. Ova konačna predpostavka modela niti u saglasnosti je sa mnogim (ali ne i sa svim) izračunavanjima koja koriste superstrune ili druge pristupe kvantne gravitacije. (***Ref. 188***).

Kao zaključak, vrednosti entropije crne rupe iz (177) i (178), respektivno nastaju zbog ***istezanja*** osnovnih subjekata u modelu niti i ***tri dimenzije*** prostora. Ako bilo koja od ovih osobina nebi bila ispunjena, nebi se dobila entropija crnih rupa. Ovo nije iznenađenje: isto tako naše izvođenje kvantne teorije zasnivalo se samo na dva svojstva. Ukratko: kao svaki kvantni efekt, tako i entropija crnih rupa rezultat je proširenja i tri dimenzije. Samo trodimenzionalni opisi prirode u saglasnosti su sa opažanjima.

TEMPERATURA, ZRAČENJE I ISPARAVANJE CRNIH RUPA

Oblik niti od kojih je načinjen horizont koleba se. Pošto svaki horizont sadrži energiju, kolebanja oblika podrazumevaju kolebanja energije. Drugim rečima, predviđa se da horizonti imaju temperaturu. Vrednost temperature može da se izvede iz modela niti uz napomenu da je karakteristična veličina koja se koleba poluprečnik horizonta. Prema tome, imamo

$$kT = \frac{\hbar c}{2\pi R} \tag{179}$$

Koristeći odrednicu površinske gravitacije $a = c^2/R$, dobijamo

$$T = \frac{\hbar a}{2\pi kc} \tag{180}$$

Model niti predviđa da horizonti imaju temperaturu srazmernu svojoj površinskoj gravitaciji. (***Ref. 57***), (***Ref. 58***). Ovaj rezultat je poznat još od 1973. godine

Sva topla tela zrače. Model niti zato predviđa da Švarcšildove crne rupe ***zrače*** toplotno zračenje temperature horizonta, snagom i talasnom dužinom

$$P = \frac{2\pi\hbar c^2}{R^2}, \quad \text{i} \quad \lambda \approx R \tag{181}$$

Ovo potvrđuje dobro poznatu posledicu temperature crnih rupa.

Kao i svi toplotni sistemi horizonti prate termodinamiku. U modelu niti, zračenje i isparavanje crne rupe javlja se kao smanjenje broja niti od kojih je načinjena crna rupa. Model niti stoga predviđa da crne rupe ***isparavaju u potpunosti***, sve dok ne ostanu elementarne čestice. Model niti osim toga podrazumeva da pri zračenju crne rupe ne postoji gubljenje ***nijedne*** informacije.

Ukratko, model niti prikazuje sve aspekte isparavanja crne rupe. Model niti takođe pokazuje da u tom procesu nema gubljenja informacija.

GRANICE CRNE RUPE

Na više načina crne rupe su ekstremni fizički sistemi. Ne samo što su crne rupe granični sistemi opšte teorije relativnosti, crne rupe takođe ostvaruju i razne druge granice. Kao takve, crne rupe podsećaju na svetlost koja postiže graničnu brzinu. Ovde ćemo da istražimo neke od tih granica.

Za opšte fizičke sisteme, koji nisu neophodno ograničeni horizontom, odrednice energije i entropije pomoću niti omogućavaju neke interesantne zaključke. Entropija sistema je rezultat broja verovatnoća ukrštanja. Energija sistema je broj promena ukrštanja u jedinici vremena. Velika entropija je stoga jedino moguća ako sistem pokazuje mnogo promena ukrštanja u vremenu. pošto je tipično vreme sistema određeno obimom sistema, entropija fizičkog sistema je prema tome ograničena sa:

$$S \leq \frac{ER2\pi k}{\hbar c} \tag{182}$$

Ova reacija je poznata kao ***Bekenštajnova granica entropije***; to tako sledi i iz modela niti. Jednakost se postiže samo za crne rupe.

U modelu niti horizonti su uska jednostrana tkanja. Na primer, to podrazumeva da su u suštini ravni samo zapleti koji se susretnu sa horizontom. Zbog ravnih zapleta i istezanja repova, najviše jedna Plankova masa može da pređe horizont u toku Plankovog vremena. To daje granicu odnosa mase

$$\frac{\mathrm{d}m}{\mathrm{d}t} \leq \frac{c^3}{4G} \tag{183}$$

što važi u opštoj teoriji relativnosti i u prirodi.

Crna rupa može da se obrće. Model niti izražava da postoji najveća moguća ugaona učestanost; ona se pojavljuje kada se ekvator crne rupe obrće brzinom svetlosti. Kao rezultat toga moment količine kretanja $\mathcal{J}$ crne rupe ograničen je na

$$\mathcal{J} < \frac{2GM^2}{c} \tag{184}$$

Ova granica je dobro poznata iz opšte teorije relativnosti. (***Ref. 189***).

Električni naboj crne rupe takođe je ograničen. Granica sile u prirodi podrazumeva da električne sile između dve crne rupe sa nabojem moraju da budu manje od njihove gravitacijske interakcije. To znači da

$$\frac{Q^2}{4\pi\varepsilon_0 r^2} \leq \frac{GM^2}{r^2} \tag{185}$$

ili

$$Q^2 \leq 4\pi\varepsilon_0 GM^2 \tag{186}$$

Ovo je dobro poznata granica naboja za (statičke) crne rupe koju određuje Rajzner-Nordstrom (Reissner-Nordstrom) metrika. Maksimalni naboj crne rupe srazmeran je njenom poluprečniku. To sledi direktno iz načela maksimalne sile.

Da bismo objasnili granicu naboja, zaključujemo da je ekstremna gustina površinskog naboja Q/A crne rupe srazmerna $1/R$. Što je veća zakrivljenost horizonta, to je moguć veći naboj po Plankovom području. U modelu niti horizont je gusto tkanje niti. To nas dovodi do predpostavke da je u Plankovim razmerama električni naboj povezan sa i ograničen zakrivljenjem niti. Ovu povezanost ispitaćemo detaljnije u daljem tekstu. (***Strana 281***).

Model niti ograničava gustinu energije na Plankovu energiju po Plankovoj zapremini, ili na vrednost $c^7/(16G^2\hbar)$. Ovo ograničenje podrazumeva nižu granicu veličine za crne rupe; prema tome, model niti ne dopušta singularitete, bilo obučene ili gole. I zaista, nikada nije opažen nijedan singularitet.

Kao zaključak, model niti prikazuje poznata svojstva granice horizonta. I svi ovi rezultati nezavisni su od preciznih detalja kolebanja niti.

ZAKRIVLJENOST OKO CRNIH RUPA

Repovi crne rupe protežu se do granice prostora; gustina repova najgušća je na horizontu. Prema tome crna rupa je okružena delimičnim vezama na svakom ***konačnom*** rastojanju od horizonta. Drugim rečima, prostor oko crne rupe je ***zakrivljen***. Vrednost zakrivljenosti prostor-vremena povećava se sa približavanjem horizontu, zbog načina na koji se delimične veze međusobno ometaju u njihovom kretanju. Što su bliže horizontu, to se više međusobno ometaju. Zakrivljenost stoga izgleda da je srazmerna gustini delimičnih veza i njihovij prosečnoj zakrivljenosti niti.

Na horizontu je poluprečnik zakrivljenosti jednak poluprečniku horizonta R. Prema konstrukciji, broj repova koji polaze iz crne rupe koja se ne obrće srazmeran je R. Prostorna zakrivljenost određena je gradijentom prosečne gustine ukrštanja. Otuda je na radijalnom rastojanju r od statične crne rupe, prostorna zakrivljenost K

$$K \sim \frac{R}{r^3} \tag{187}$$

Tako je na samom horizontu zakrivljenost K (njen red veličine) obrnuto srazmeran kvadratu poluprečnika horizonta; sa udaljavanjem ona opada ubrzano, sa trećim stepenom rastojanja. Ovaj rezultat je dobro poznato svojstvo Švarcšildovog rešenja i nastaje usled istezanja niti. Ubrzano opadanje sa poluprečnikom razlog je što u svakodnevnim situacijama ne postoji primetna zakrivljenost prostor vremena. Ukratko, niti nam omogućavaju da izvedemo tačnu zakrivljenost prostor-vremena oko crnih rupa i loptastih masa.

OBLIK CRNIH RUPA KOJE SE NE OBRĆU

Model niti takođe objašnjava i oslikava važnost loptastih horizonta u prirodi. Pre svega, niti oslikavaju nepostojanje (bez naboja) jednodimenzionalnih ili torusnih horizonta u 3+1 prostornoj dimenziji. Takve konfiguracije su nestabilne, naročito u pogledu poprečnog smicanja i preuređenja niti.

Model niti isto tako podrazumeva da su zatvoreni horizonti koji se ne obrću loptasti. Očigledno, lopte su tela sa najmanjom površinom za datu zapreminu. Minimum površine horizonta nastaje pošto se niti, usled njihovog kolebanja, efektivno "izlvače" u svakom Plankovom području horizonta. Kao rezultat, svi makroskopski horizonti koji se ne obrću razvijaju se u loptastu situaciju u nekoliko Plankovih vremena. (Odstupanja od loptastog oblika pojavljuju se uglavnom u blizini Plankovih razmera.) Uz odrednicu gravitacijskih talasa koji će biti dati u narednom tekstu, postaje takođe jasno da jako izobličeni, makroskopski i neloptasti horizonti nestabilni su prema emisiji gravitacijskih talasa ili drugih čestica. Ukratko,

- Nestabilni su svi horizonti koji se ne obrću i različiti od lopte..

Model niti prema tome potvrđuje da su loptasti horizonti favorizovani i da su najkompaktnija tela sa datom masom. Razmišljanje može da se proširi i na horizonte koji se obrću, dajući dobro poznate oblike.

Kao zaključak, niti prikazuju sva kvalitativna i kvantitativna svojstva horizinta i crnih rupa, pa stoga i opštih sistema sa jakim poljem gravitacije. Sva predviđanja modela niti u saglasnosti su sa opažanjima i sa svim ostaim pristupima kvantnoj gravitaciji. Ove naznake već nagoveštavaju da niti podrazumevaju jednakosti polja.

JEDNAKOSTI POLJA OPŠTE TEORIJE RELATIVNOSTI

Jednakosti polja mogu da se izvedu iz osnovnog načela na dva različita, ali povezana načina. Suštinski, oba izvođenja ponavljaju razmišljanje o univerzalnoj gravitaciji, navedeno u predhodnom tekstu (***strana 211***) i proširuju ga na relativistički slučaj. Prvo izvođenje jednakosti polja zasniva se na starom dokazu termodinamike prostor-vremena. (***Ref. 22***). Niti pokazuju da horizonti imaju tri termodinamička svojstva:

- povezanost područje-entropija datu sa: $S = Akc^3/4G\hbar$,
- povezanost zakrivljenost-temperatura, datu sa: $T = a\hbar/2\pi kc$,
- povezanost između toplote i entropije, datu sa: $\delta Q = T\delta S$

Korišćenjem ova tri svojstva i korišćenjem jednakosti

$$\delta Q = \delta E \tag{188}$$

koja važi samo za slučaj horizonta, dobijamo prvo načelo mehanike horizonta

$$\delta E = \frac{c^2}{8\pi G} a\, \delta A \tag{189}$$

Iz ove relacije, korišćenjem jednakosti Rajčaudhurija (Amal Kumal Raychaudhuri), dobijamo jednakosti polja u opštoj teoriji relativnosti. Ovo izvođenje je dato u predhodnom tekstu.[1] (***Strana 31***).

Drugim rečima, jednakosti polja rezultat su termodinamike niti. Vredno je primeriti da je rezultat nezavisan od detalja kolebanja, sve dok važe tri upravo data termodinamička svojstva. (To je uslov koji mora da bude ispunjen u svakom modelu prostor-vremena; i zaista, nekoliko konkurentnih modela tvrde da su ovi uslovi ispunjeni.)

Ovu povezanost između kolebanja i niti možemo da iskoristimo za rešavanje pitanja pomenutog u predhodnom tekstu, u odeljku o kvantnoj teoriji. (***Strana 145***). Kolebanje niti mora da ispunjavaju svojstva termodinamike da bi omogućilo određivanje prostor-vremena. Ako su ispoštovana ova svojstva, onda postoji prostor-vreme i zakrivljuje se i saglasnosti sa opštom teorijom relativnosti.

Drugo izvođenje jednakosti polja opšte teorije relativnosti prati još bliže duh modela niti. Niti podrazumevaju da su sve fizičke veličine ograničene odgovarajućim Plankovim granicama. Ove granice nastaju usled granice osnovnog načela, drugim rečima, one nastaju usled ograničenja pakovanja niti. Osnovno načelo posebno ograničava silu na $F \leq c^4/4G$ i snagu na $P \leq c^5/4G$. (***Ref. 19***). U predhodnom tekstu već smo pokazali da ova ograničenja podrazumevaju jednakosti polja. (***Strana 31***).

Kao zaključak, model niti ističe da se jednakosti polja pojavljuju kao posledica kolebanja niti, koje su neprobojne i bez svojstava. Model niti podrazumeva posebno da se horizont i gas čestica ne razlikuju na Plankovoj energiji. Međutim, vrednost kosmološke konstante nije predpostavljena termodinamikom niti.

---

[1] Ovde je dat dokaz u nekoliko redova. Prvo načelo mehanike horizonta može ponovo da se napiše korišćenjem tenzora energija-količina kretanja T_{ab}, kao

$$\int T_{ab} k^a \mathrm{d}\Sigma^b = \frac{c^2}{8\pi G} a\, \delta A$$

gde je $\mathrm{d}\Sigma^b$ opšti element površine, a k je Kilingov (Killing) vektor koji generiše horizont. Jednakost Rajčaudhurija omogućava nam da desnu stranu napišemo kao

$$\int T_{ab} k^a \mathrm{d}\Sigma^b = \frac{c^4}{8\pi G} \int R_{ab} k^a \mathrm{d}\Sigma^b$$

gde je R_{ab} Ričijev (Ricci) tenzor koji opisuje zakrivljenost prostor-vremena. Ova jednakost podrazumeva da je

$$T_{ab} = \frac{c^4}{8\pi G}\left(R_{ab} - \left(R/2 + \Lambda\right) g_{ab}\right)$$

pri čemu je Λ neodređena konstanta integriranja. Ovo su Ajnštajnove jednakosti polja u opštoj teoriji relativnosti. Jednakosti polja važe svuda i u svim vremenima, pošto transformacijom koordinata horizont može da postavi u bilo koju tačku i u bilo koje vreme.

JEDNAKOSTI BEZ JEDNAKOSTI

Model niti naglašava da jednakosti polja opšte teorije relativnosti nisu rezultat druge, osnovnije jednakosti razvoja, već da su direktan rezultat osnovnog načela. Da se to kaže neuvijeno, jednakosti polja su izvedene iz crteža – osnovni principi prikazani na ***slici 10***. (***Strana 120***). Ovaj važan, skoro neverovatan iskaz, nastaje usled posebnog svojstva jednakosti polja i dva svojstva modela niti.

Najzad, jednakosti polja posledica su pre svega termodinamike prostor-vremena. U modelu niti termodinamička svojstva su izvedena kao posledica kolebanja niti. Ovo izvođenje ne zahteva polazne jednakosti razvoja; jednakosti polja slede iz statističkog ponašanja niti.

Drugo, suštinsko svojstvo modela niti je njegova nezavisnost od polaznih kretanja niti. U modelu niti dobijamo jednakosti razvoja vakuuma – jednakosti polja opšte teorije relativnosti – bez njihovog izvođenja iz drugih jednakosti. Nije nam potrebna jednakost razvoja za oblik niti; izvođenje jednakosti polja važi za svako osnovno ponašanje oblika niti, sve dok su prisutna termodinamička svojstva kolebanja niti.

Treće, i posledne suštinsko svojstvo koje nam dopušta da izvedemo jednakosti polja direktno iz crteža, a ne iz druge jednakosti, je povezanost crteža i prirodnih fizičkih jedinica. Povezanost sa prirodnim jedinicama, posebno sa kvantom rada $\hbar$ i Bolcmanovom konstantom k, osnova su uspešnosti modela niti.

Kao zaključak, osnovno načelo modela niti sadrži suštinska svojstva potrebna za izvođenje jednakosti polja opšte teorije relativnosti. Zapravo, dosadašnje razmatranje pravi drugu važnu tačku: jedinstvene, polazne, osnovnije jednakosti razvoja ***ne mogu*** da postoje. Postoje dva razloga. Prvi, polazna jednakost zahtevala bi i sama izvođenje, stoga nebi bila zadovoljavajuće rešenje za objedinjavanje. Drugo, i još važnije, jednakosti razvoja su diferencijalne jednakosti; one predpostavljaju glatko prostor-vreme dobrog ponašanja. U Plankovim razmerama je to nemoguće.

- Svako načelo koje omogućava izvođenje jednakosti polja ne može samo po sebi da bude jednakost razvoja.

HILBERTOV RAD U OPŠTOJ TEORIJI RELATIVNOSTI

Upravo smo pokazali da model niti podrazumeva jednakosti polja opšte teorije relativnisti. Isto tako smo u predhodnom tekstu (***strana 161***) pokazali da je u modelu niti načelo najmanjeg rada prirodno svojstvo svakog kretanja niti. Kombinacijom ova dva rezultata, nalazimo da je prirodan način opisa kretanja prostor-vremena (proširen) ***Hilbertov rad***, dat sa

$$W = \frac{c^4}{16\pi G}\int \left(R - 2\Lambda\right) \mathrm{d}V \qquad (190)$$

gde je R Ričijev skalar, $\mathrm{d}V = \sqrt{\det g}\ \mathrm{d}^4x$ je invarijanta elementa 4-zapremine od metrike g, a Λ je kosmološka konstanta, čija vrednost još uvek nije određena. Kao što je dobro poznato, opis razvoja pomoću rada ne dodaje ništa u jednakosti polja; oba opisa su ekvivalentna.

Za zakrivljen trodimenzionalni prostor, Ričijev skalar R je srednja vrednost u datoj tački prostora, kojim zakrivljenost odsupa od nule ravnog prostora. U modelu niti to dovodi do prostog iskaza, koji je već podrazumevan na ***slici 73*** (***strana 214***)

- Ričijev skalar je srazmera dodatnih ili nedostajućih ukrštanja po prostornoj zapremini, u poređenju sa ravnim prostorom.

Kao i obično, prosek je načinjen nad svim prostornim usmerenjima. Sličan iskaz bi mogao da se načini i za kosmološku konstantu Λ. Ukratko, možemo da kažemo: Hilbertov rad sledi direktno iz osnovnog načela modela niti.

PENA PROSTOR-VREMENA

Kvantna fizika podrazumeva da se u razmerama u blizini Plankove dužine i Plankovog vremena prostor-vreme jako koleba. Džon Viler (John Wheeler) nazvao je tu situaciju ***pena prostor-vremena***; isto tako se koristi i pojam ***kvantna pena***. U tom smislu, kvantna gravitacija može da se odredi kao opis pene prostor-vremena.

Postojalo je u istoriji mnogo predpostavki o detaljima pene prostor-vremena. Odvojeno od njenog kolebanja istraživači su predpostavljali o pojavi topoloških promena – kao što su mikroskopske crvotočine

– o pojavi dodatnih dimenzija prostora – između šest i dvadesetdve – ili o pojavi drugih neobičnih svojstava – kao što su mikroskopska područja negativne energije, mrežna i petljasta struktura.

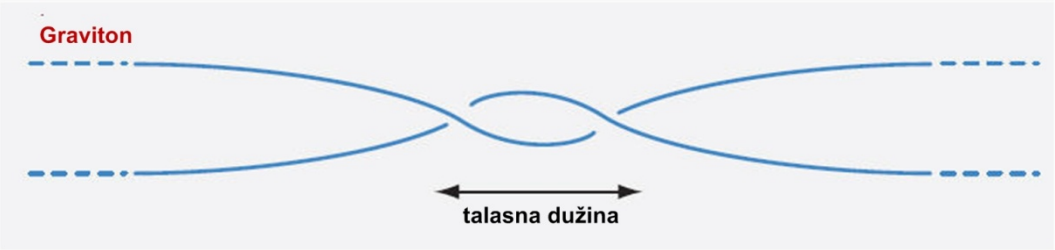
Model niti pravi jednostavnu predpostavku koja ju u protivrečnosti sa većinom predhodnih predpostavki

- Pena prostor-vremena načinjena je od kolebajućih niti.

U svakodnevnim razmerama pena se ne primećuje, pošto prostor pozadine i fizički prostor ne mogu da se razlikuju. U Plankovim razmerama prostor-vreme nije u osnovi različito od svakodnevnog prostor-vremena. U Plankovim razmerama ne pojavljuju se ni neuobičajena topologija, ni dodatne dimenzije, niti neuobičajene osobine. Pre svega, model niti predviđa da ne postoje efekti pene prostor-vremena koji mogu da se opaze; na primer, ne postoji "šum prostor-vremena" ili "difuzija čestica". (***Ref. 190***). Pena prostor-vremena u modelu niti je i jednostavna i nezanimljiva.

GRAVITONI, GRAVITACIJSKI TALASI I NJHOVO OTKRIVANJE

U modelu niti gravitoni mogu da izgledaju kao posebna vrsta delimičnih veza. Primer je prikazan na ***slici 76***. Kao uvrnut par paralelnih niti graviton se vraća na početno stanje posle obtranja za π; stoga se ponaša, po potrebi, kao bozon sa spinom 2.



slika 76 Graviton u modelu niti

Mogu li gravitoni da se opaze? Model niti predpostavlja da apsorpcija pojedinačnog gravitona od strane elementarne čestice menja njen spin ili položaj. Međutim, takva promena ***ne može*** da se razlikuje od kvantnog kolebanja. Osim toga, model niti predviđa da gravitoni ne mogu da budu u interakciji sa fotonima, pošto nemaju električni naboj. Kao zaključak, model niti predviđa:

- Pojedinačni graviton ***ne može*** da se otkrije.

Situacija se menja za gravitacijske talase. Takvi talasi su koherentna superpozicija velikog broja gravitona i mogu da se opažaju klasično. U takvom slučaju ne primenjuje se dokaz protiv otkrivanja pojedinačnog gravitona. (***Izazov 179e***). Ukratko, model niti predviđa da gravitacijski talasi mogu da se opažaju. (Ovu predpostavku načinili su mnogi još 1915. godine i ponavlja se u ovom tekstu, zasnovana na modelu niti iz 2008. godine, a postala je stvarnost u februaru 2016. godine.) (***Ref. 191***).

OTVOREN IZAZOV: POPRAVITI DOKAZ ZA ZAPLET GRAVITONA

Dokaz koji dovodi do zapleta gravitona previše maše rukama. Možete li da uradite da je dokaz ubedljiviji? (***Izazov 180ny***). Mogu li četiri repa da oblikuju krst i stoga da obuhvate ravan?

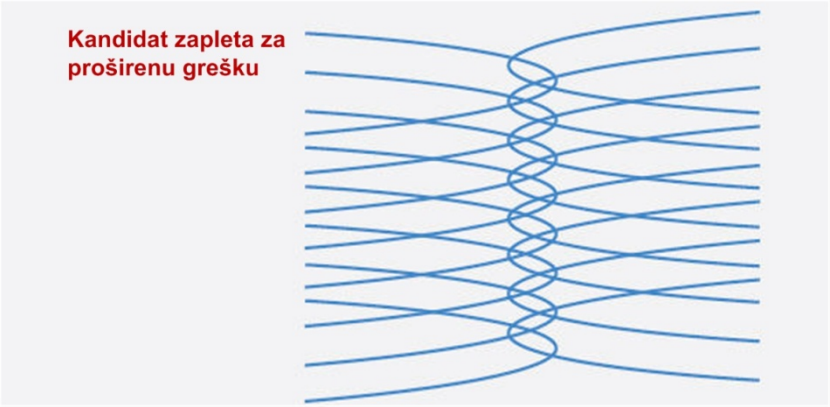
OSTALE GREŠKE U VAKUUMU

Model niti prdviđa kvantni opis gravitacije. Model niti to čini objašnjenjem fizičkog prostora kao proseka promena ukrštanja izazvanih kolebanjem niti među nezapletenim nitima. Materija, zračenje i horizonti otkriveni su "u moru" nezapletenih niti.

Do sada smo se bavili česticama, to jest lokalizovanim greškama nulte dimenzije i sa horizontima, to jest greškama u dve dimenzije. Zatim, modeliranje vakuma kao skupa nezapletenih niti predpostavlja takođe mogućnost postojanja grešaka u ***jednoj dimenziji***– ekvivalentnih razmeštajima i disklinacijama u čvrstim materijama – ***dodatnih*** dvodimenzionalnih grešaka ili ***trodimenzionalnih*** grešaka. Takve greške mogu da naprave model kosmičkih struna, zidova oblasti, crvotočina, torusnih crnih rupa, vremenskih petlji i područja sa negativnom energijom.

Jedan primer je prikazan na ***slici 77***. Prikaz može da se posmatra kao slika jednodimenzionalne greške ili kao presek dvodimenzionalne greške. Da li su takve greške stabilne prema kolebanjima? Model niti predpostavlja da nisu. Očekuje se da se ovakve greške raspadnu u mešavinu gravitona, crnih rupa, materije

i čestica zračenja. Međutim, ovo pitanje još uvek je tema istraživanja i neće biti obuhvaćeno u ovom tekstu.



Slika 77 Vrlo šematski predpostavljen model model kosmičke strune, kao jednodimenzionalna greška u prostor-vremenu

Istraživanje stabilnosti crvotočine, vremenske petlje i torusnih crnih rupa dovodi do sličnih rezultata. Izgleda da model niti ne treba da dozvoli vremenske petlje makroskopskih veličina, pošto bilo koja konfiguracija koja ne može lokalno da se ugradi u tri ravne prostorne dimenzije je ili čestica ili crna rupa. Isto tako bi se urušile makroskopske vremenske petlje zbog kolebanja niti. Na isti način, crvotočine ili crne rupe sa netrivijalnom topologijom trebalo bi da budu nestabilne u odnosu na uobičajene strukture niti, kao što su čestice ili crne rupe.

Isto tako primećujemo da model niti ne dozvoljava zapreminske greške (budući da su crne rupe površinske greške). Tipovi zapreminskih grešaka o kojima se najviše raspravlja, su makroskopska područja negativne energije. Budući da je energija rad u jedinici vremena i budući da je rad povezan sa promenana ukrštanja, model niti ne dopušta da se konstruiše područje sa manjom energijom od njegove okoline, kao u Kazimirovom efektu, postavljanjem ograničenja na talasnu dužinu fotona.

Model niti stoga predpostavlja odsustvo dodatnih grešaka i vrsta zapleta. Konačna i opšta veza između vrsti zapleta i grešaka prikazana je (ponovo) u ***Tabeli 11***. U sledećem poglavlju biće dati detalji zapleta koji odgovaraju pojedinim česticama.

TABELA 11 Povezanosti između fizičkih sistema i matematičkih zapleta

Fizički sistem	**Niti**	**Vrsta zapleta**
Vakuum	više beskrajnih nezapletenih niti	nepovezan
Tamna energija	više kolebajućih beskonačnih niti	nepovezan
Elementarni vektorski bozon	jedna beskonačna nit	krivina
Kvark	dve beskonačne nitu	racionalan zaplet
Lepton	tri beskonačne niti	upleten zaplet
Mezon, barion	tri ili više beskonačnih niti	složeni racionalni zapleti
Fermion višeg reda prostiranja	dve ili više beskonačnih niti	opšti racionalan zaplet
Virtualne čestice	otvorene ili nevezane niti	prost zaplet
Složeni sistemi	više niti	razdvojivi zapleti
Graviton	dve beskonačne uvijene niti	poseban racionalan zaplet
Gravitacijski talas	mnogo beskonačnih uvijenih niti	više zapleta gravitona
Horizont	mnogo gusto tkanih beskonačnih niti	racionalan zaplet u vidu tkanja
Mladi svemir	zatvorena nit (niti)	čvor (veza)

Kao zaključak, model niti prikazuje rezultate savremene kvantne gravitacije i predviđa da se u prirodi ***ne pojavljuju*** spektakularne greške predpostavljane u prošlosti – linearne greške, kao što su kosmičke strune, površinske greške, kao što su crvotočine, i zapreminske greške, kao što su područja sa negativnom energijom.

GRAVITACIJA SUPERPOZICIJA

Kakvo je gravitacijsko polje kvantnog sistema u makroskopskoj superpoziciji? Ovo pitanje su pokretali mnogi naučnici kao važan korak u pravcu razumevanja kako da se kombinuju gravitacija i kvantna teorija.

Model niti obezvređuje važnost pitanja. Model pokazuje – ili predviđa, ako vam se tako više dopada – da je gravitacijsko polje superpozicije vremenski i prostorni prosek kvantnog sistema u razvoju, moguće uz uključenje dekoherencije. (***Vol. IV, strana 113***).

Kakvo je gravitacijsko polje pojedinačne kvantne čestice u eksperimentu sa dvostrukim prorezom? Kao što ***slika 38*** (***strana 155***) pokazuje, gravitacijsko polje skoro uvek se pojavljuje u oba proreza, a vrlo retko samo na jednom prorezu.

Ukratko, u modelu niti kombinacija gravitacije i kvantne teorije mnogo je jednostavnija no što su očekivali mnogi istraživači. Tokom više decenija predpostavljano je da je kombinacija skoro nedostižan cilj. Zapravo, u modelu niti možemo skoro da kažemo da se dva opisa kombinuju prirodno.

TORZIJA, ZANIMLJIVOSTI I IZAZOVI O KVANTNOJ GRAVITACIJI

S jedne strane, model niti odbacuje postojanje bilo kojeg efekta torzije gravitacije. (***Ref.192***). Na drugoj strani model niti materije opisuje spin pomoću trika sa opasačem. Trik sa opasačem je zato pojava u nitima koja je najbliža ideji o torziji. Prema tome, malo preuvelićavajiči u drugom pravcu, moglo bi takođe da se tvrdi da je u modelu niti efekt torzije takođe efekt kvantne teorije polja.

* * *

Model niti opisuje trodimenzionalni prostor kao da je načinjen od zapletenih niti. Mnogi slični modeli predlagani su u prošlosti.

Model prostora kao ***nematičkog svetskog kristala*** ističe se kao najsličniji. Ovaj model predložio je Hagen Klajnert (Hagen Kleinert) 1980-ih godina. (***Ref. 193***). Inspiraciju je dobio iz poznate analogije Ekeharta Kronera (Ekkehart Kroner) između jednakosti elastičnosti krutijh tela u okolini linijskih grešaka o jednakosti opšte teorije relativnosti. (***Ref. 194***).

Takođe je 1980-ih godina pomenuti predlog (***Ref. 155***) bio predlagan kao osnovna struktura prostora. (***Ref. 195***). Razni modeli za kvantnu gravitaciju od 1990-ih, inspirisani mrežom spina, penom spina i sličnh sistema, opisivali su prazan prostor kao tvorevinu proširenih sastojaka. Ovi prošireni sastojci su zaplitani, ili razdvajani, ili bili povezani, ili ponekad sve to istovremeno. U zavisnosti od modela, sastojci su bili linije, kružnice ili trake. U nekim modelima njihov oblik se kolebao, u drugim nije.

Oko 2000. godine drugu vrstu modela kristala u Plankovoj razmeri za vakuum predložio je Dejvid Finkel-štajn (David Finkelstein). (***Ref. 156***). Godine 2008. poseban model prostora, kristalnu mrežu spojenih linija razdvajanja, predložio je Gerard ‘t Hoft. (***Ref. 196***).

Svi ovi modeli opisuju prostor kao da je načinjen od neke vrste proširenih sastojaka u trodimenzionalnoj pozadini. Svi ovi modeli izvode opštu teoriju relativnosti iz ovih sastojaka nekom prosečnom procedurom. Pouka je jasna: ***nije teško*** da se izvede opšta teorija relativnosti iz modela postora u Plankovoj razmeri. ***Nije teško*** da se objedine gravitacija i kvantna teorija. Kao što je Luka Bombeli (Luca Bombelli) rekao već ranih 1990-h godina, izazov za model prirode u Plankovoj razmeri nije da se izvede gravitacija ili opšta teorija relativnosti; izazov je da se izvedu ostale interakcije. Do sada izgleda da je model niti jedini model koji je omogućio takvo izvođenje.

* * *

Plankova sila je vrednost sile neophodne za stavaranje promene $\hbar$ u Plankovom vremenu duž Plankove dužine. (***Izazov 181e***). Plankova sila se zato skoro isključivo pojavljuje na horizontima.

* * *

Već je 1990-ih godina Leonard Suskind (Leonard Susskind) predpostavljao da crne rupe mogu da se oblikuju pomoću pojedinačne uvijene strune. (***Ref. 197***). Niti se razlikuju od struna; one se razlikuju po broju dimenzija, po svojim unutrašnjim osobinama, po svojim svojstvima simetrije, po polju koje nose i po načinu na koji stvaraju entropiju. Bez obzira na to, zanimljiva je sličnost sa modelom niti crnih rupa.

* * *

U septembru 2010. godine, dve godine po pojavi modela niti, nezavisni istraživači potvrdili su njegov opis fizičkog prostora, kao što je već pomenuto u predhodnom tekstu. (***Strana 127***). U opširnom članku opisao

je Stiven Karlip (Steven Jonathan Carlip) strukturu prostora u malim razmerama iz perspektive nekoliko različitih istraživanja opšte teorije relativnosti i došao do zaključka da svi ovi pogledi predpostavljaju zajedničku ideju da je "prostor u stalnom vremenu stoga predstavljen linijama koje se brzo kolebaju". (***Ref. 153***).

Isto tako nezavisno, 2011. godine je Marčelo Bota Kantšef (Marcelo Botta Cantsheff) modelirao prostor kao statistički sastav jednodimenzionalne "strune". (***Ref. 198***). On je opisao glavne osobine prostora, uključujući termodinamička svojstva crnih rupa.

* * *

Prva verzija modela niti predpostavljala je da prostor nije određen na kosmičkom horizontu, pa stoga, neprobojnost niti tamo ne važi. Isto se mislilo da se javlja na horizontima crnih rupa. Izgleda da u novijim verzijama modela niti nije potreban ovaj izuzetak neprobojnosti. Možete li da objasnite entropiju crne rupe bez toga? (***Izazov 182e***).

* * *

Model niti takođe omogučava odgovor na pitanje da li su crne rupe čestice? Ne, nisu. (***Strana 33***). Kvantne čestice su zapleti, kao što su i crne rupe, ali čestice ***nemaju*** horizonte. Kao sporedan rezultat, masa svih čestica manja je od Plankove mase, ili preciznije, manja od Plankove mase crne rupe.

Niti podrazumevaju da je gravitacija slabija od tri interakcija merila. Ova posledica, kao i upravo pomenuta mala masa čestica, nastaje usled različitih porekla gravitacije i interakcija merila. Gravitacija nastaje usled repova niti, dok interakcije merila nastaju usled jezgara zapleta. Zato je gravitacija najslabija interakcija u svakodnevnom životu. Iskaz o slabosti gravitacije u razmeri svakodnevnog života ponekad se naziva slaba predpostavka gravitacije. (***Ref. 199***). Ona prirodno važi u modelu niti.

* * *

Za posmatrača u prostornoj beskonačnosti horizont crne rupe prosečno je gusto tkanje niti. Kakav bi bio doživljaj posmatrača u slobodnom padu? Pitanje će zaokupljati maštu još mnogo godina. Takav posmatrač će takođe da vidi niti; pre svega, posmatrač u slobodnom padu neće nikada pogoditi bilo koju singularitet. Detalji pada su toliko komplikovani da se oni ovde neće razmatrati, pošto pad utiče i na izgled crne rupe i na posmatrača.

* * *

Može li radijacija crne rupe da se posmatra kao rezultat pokušaja da se vakuum razdvoji? Da i ne. Odgovor je ne, pošto fizički vakuum ne može da se razdvoji, usled načela maksimalne sile. Međutim, odgovor je takođe u izvesnom smislu i da, pošto je maksimalna sila najbliži pokušaj ove ideje koja može da se ostvari ili zamisli.

* * *

Model niti ističe da zapetljavanje i vakuum – a time i kvantna gravitacija – imaju istu prirodu: oba su usled niti koje se ukrštaju. Ova ideju nezavisno je istraživao Mark van Ramsdonk (Mark van Raamsdonk). (***Ref. 200***).

* * *

Kao što smo videli, model niti ne predviđa nikakvo narušavanje Lorencove invarijante koje se može opaziti – premda predviđa njeno narušavanje u Plankovim razmerama. Niti predviđaju odsustvo rasipanja, dvolomnosti i neprozirnost vakuuma. Niti predviđaju da vakuum ima tri dimenzije, bilo kada da se opaža i tako je jedinstven, bez prelaza faza. Već smo pomenuli nemogućnost otkrivanja pojedinih gravitona.

Sva ova negativna predviđanja primeri su "bezuspešnih" nagađanja:

- Efekti kvantne gravitacije ne mogu da se razlikuju od običnih kvantnih kolebanja.

Uprkos više pokušaja da se ospore, svi dosadašnji eksperimenti potvrđuju predpostavku. Pošto i efekti kvantne gravitacije i kvantni efekti nastaju usled kolebanja repova, izgleda da model niti podrazumeva predpostavku.

* * *

Model niti crne rupe takođe potvrđuje rezultat Zureka (Zurek) i Torna (Thorn) iz 1980-ih godina: entropija crne rupe je logaritam broja načina na koji može da se napravi. (***Ref. 201***).

* * *

Raspravlja se da zbog modela niti nijedna crna rupa ne može da ima masu ispod (ispravljene) Plankove mase, oko 11 μg, i zato ***mikroskopske crne rupe*** ne postoje. (***Izazov 183s***). Možete li naći veće donje ograničenje za ovu masu?

* * *

Da li atomi ili elementarni fermioni koji se kreću unutar materije emituju gravitacijsko zračenje i zašto? Ovo pitanje je pokrenuo Albert Ajnštajn 1916. godine. Model niti odgovara na pitanje na isti način kao i udžbenici fizike. Elementarne čestice u atomima – u osnovnom stanju – ne emituju gravitacijske talase iz istog razloga iz kojeg ne emituju elektromagnetne talase: za atome u osnovnom stanju ne postoji niže stanje u kojem mogu da se raspadaju. Pobuđena stanja atoma ne emituju gravitacijske talase zbog izuzetno niske verovatnoće emitovanja; to je usled izuzetno male vrednosti mase kvadripola.

* * *

Mikhail Šapošnjikov i Krisof Veterih (Christof Wetterich) 2009. godine su tvrdili (***Ref. 202***) da ako je gravitacija "asimptotski sigurna", ne postoji fizika iza standardnog modela i Higsova masa mora da bude oko 126 GeV – tačno ona vrednost koja je nađena eksperimentalno nekoliko godina posle toga. Kvantna teorija polja naziva se ***asimptotski sigurna*** ako ima stalnu tačku pri izuzetno visokim energijama. Zar model niti ne podrazumeva da je gravitacija asimptotski sigurna – možda samo efektivno? (***Izazov 184ny***).

* * *

Često se izražava da opšta teorija relativnosti ne dopušta opisivanje fermiona ako se topologija prostora održava neizmenjenom. (***Strana 50***). To je pogrešno: standardni model pokazuje da fermioni mogu da se uzmu u obzir u slučaju da se prostor posmatra kao prosek proširenih osnovnih subjekata.

* * *

Sledeći osnovno načelo modela niti, G je osnovna konstanta koja opisuje gravitaciju. Model niti predviđa da je gravitacija jednaka u svim energetskom razmerama; drugim rečima, ne očekuje se da se konstanta G menja sa energijom. To je u saglasnosti sa nedavnim rezultatima iz kvantne gravitacije. (***Ref. 203***).

PREDVIĐANJA MODELA NITI O GRAVITACIJI

Kao što je već izneto, model niti pravi u opštoj teoriji relativnosti i kvantnoj gravitaciji nekoliko predviđanja koja se mogu proveriti.

- Maksimalna brzina energije u prirodi je c, u svim energetskim razmerama, u svim smerovima, u svako vreme, na svim položajima i za svakog posmatrača. To je u saglasnosti sa opažanjima.
- Nikakva odstupanja od specijalne teorije relativnosti ne pojavljuju se u bilo kojoj razmeri merljive energije, sve dok gravitacija nema ulogu. Nije u prirodi održiva "dvostruka" ili "izobličena specijalna teorija relativnosti", premda u prirodi postoji maksimalna energija-količina kretanja za elementarne čestice. To je u saglasnosti sa opažanjima.
- Postoje u prirodi maksimalna snaga sjajnosti $c^5/4G$, maksimalna sila ili protok količine kretanja $c^4/4G$ i stepen promene maksimalne mase $c^3/4G$. To je u saglasnosti sa opažanjima, ali su podaci iz eksperimenata daleko od ovih graničnih vrednosti.
- Postoje u prirodi minimalni razmak i minimalni interval vremena. Postoji maksimalna zakrivljenost i maksimalna gustina mase. Ne postoje singulariteti u prirodi. Sve ovo je u saglasnosti sa opažanjima, ali podaci iz eksperimenata daleko su od iscrpnih.
- Ne postoje odstupanja od opšte teorije relativnosti, kao što opisuje Hilbertov rad, u svom merljivim razmerama. Jedino odstupanje se pojavljuje u situacijama sa nekoliko niti, to jest u situacijama gde je neophodna kvantna teorija. To je u saglasnosti sa opažanjima, ali podaci iz eksperimenata daleko su od dovoljnih.
- Važi uobičajena entropija crne rupe koju su dali Bekenštajn i Hoking. Vrednost nikada nije izmerena, ali se dosledno nalazi u svim proračunima izvedenim do sada.
- Ne postoji izmenjena Njutnova dinamika ili MOND (Modified Newton Dynamics), sa jednakostima razvoja različitim od onih iz opšte teorije relativnosti. To je u saglasnosti sa novijim opažanjima u galaksijama, ali neophodno je više eksperimentalnih podataka.
- Ne postoji efekt torzije koji menja opštu teoriju relativnosti. To je u saglasnosti sa opažanjima.
- Ne postoji efekt viših izvoda metrike kretanja tela. To je u saglasnosti sa opažanjima, ali podaci iz eksperimenata daleko su od dovoljnih.

- Opažanja su nezavisna od preciznih kolebanja niti. Matematička doslesledost provere ovog predviđanja je moguća.
- Ne postoje crvotočine, područja sa negativnom energijom i vremenske petlje. To je u saglasnosti sa opažanjima, ali podaci iz eksperimenata daleko su od potpunih.
- Važi Penrouzova predpostavka. Ovde je moguća provera matematičke doslednosti.
- Ne postoje kosmičke strune ni zidovi oblasti. To je u saglasnosti sa opažanjima, ali podaci iz eksperimenata daleko su od iscrpnih.
- Gravitoni imaju spin 2; oni se vraćaju u početno stanje posle obrtanja za π i oni su bozoni. To je u saglasnosti sa očekivanjima.
- Gravitoni ne mogu da se otkriju usled neraspoznatljivosti od običnog kvantnog kolebanja detektora. Do sada je to u saglasnosti sa podacima.
- Atomi ne emituju gravitacijske talase ili gravitone.
- Gravitacijski talasi postoje i mogu da se otkriju. To je u saglasnosti sa eksperimentima.
- Gravitacijska konstanta *G* ne menja se sa energijom –sve dok može da se zanemari prečnik niti. U toj oblasti *G* se ne renormalizuje. Ovo predviđanje je u saglasnosti sa očekivanjima i sa podacima, premda su retki raspoloživi podaci.

Sva navedena predviđaja nisu predpostavljena; ona su načinjena takođe i drugim pristupima koja sadrže opštu teoriju relativnosti i kvantnu gravitaciju kao granične slučaje. Model niti posebno, kao i mnogi drugi pristupi, predviđa:

- Uz izuzetak kosmološke konstante (***strana 230***) ***nijedan drugi efekt kvantne gravitacije neće biti opažen***.,

Gravitacija nikada neće dati nove merljive kvantne efekte.

Drugim rečima, u oblasti kvantne gravitacije ***nismo našli neočekivana*** eksperimentalna predviđanja iz modela niti. (***Ref. 97***). Ali to nije iznenađenje. Zbog "nekorisnih" predpostavki očekivali smo neočekivana predviđanja samo u dve oblasti: kosmologiji (uključujući i vrednost kosmološke konstante) i fizici čestica. Ostatak ovog poglavlja bavi se kosmologijom. Poglavlje koje sledi bavi se fizikom čestica.

KOSMOLOGIJA

Kosmologija je aktivno polje istraživanja, a novi podaci se prikupljaju sve vreme. Počećemo od kratkog sažetka.

Nebo je tokom noći crno. Ovo, i opažanja o pomaku u crveno, pokazuju da je svemir okružen horizontom i da je konačne veličine i starosti. Precizna merenja pokazuju da je starost svemira oko 13.800 miliona godina. Svemir se širi: širenje je opisano u jednakostima polja opšte teorije relativnosti. Širenje svemira se ubrzava; ubrzanje je opisano ***kosmološkom konstantom*** Λ – nazvanom takođe ***tamna energija*** – koja ima malu pozitivnu vrednost. Svemir se opaža kao da je ravan, i u proseku u velikim razmerama homogen i izotropski. Opažena prosečna gustina materije u svemiru je oko 18 puta manja od gustine energije usled kosmološke konstante. Osim toga, postoji velika količina materije oko galaksija koja ne zrači; priroda ove ***tamne materije*** nije jasna. Oblikovanje galaksija počelo je od ranih kolebanja gustina; poznate su tipična velićina i amplitude kolebanja. Topologija prostora je opažena kao jednostavna.

Model niti, kao i svaki objedinjeni opis prirode, mora da prikaže i da objasni ove rezultate merenja. U suprotnom, model niti je pogrešan.

KONAČNOST SVEMIRA

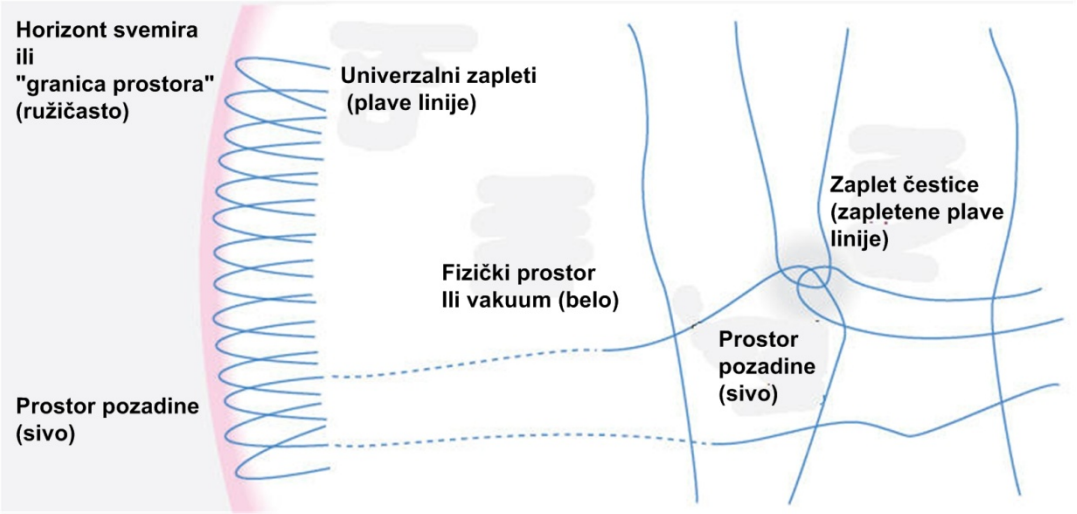
Kosmologija se u modelu niti zasniva na sledećoj ideji:

- ***Svemir*** se sastoji od ***jedne*** niti koja se koleba. Kolebanje povećava kompleksnost zaplitanja u vremenu.

Postojanje konačne veličine i konačne starosti tada slede automatski:

- Horizont svemira pojavljuje se u starosti ili na rastojanju na kojem ukrštanja niti ne mogu više da se ugrade u uobičajen trodimenzionalni prostor pozadine. Horizont se vremenom širi.

Model niti stoga ima jednostavno objašnjenje za konačnost svemira i kosmički horizont koji ga okružuje. Šematski prikaz kosmičkog horizonta dat je na ***slici 78.***



Slika 78 U modelu niti svemir je ograničen horizontom, kako je ovde šematski prikazano. Fizički prostor (belo) odgovara prostoru pozadine (sivo) samo unutar horizonta. Prema tome, fizički prostor postoji jedino u kosmičkom horizontu.

Model niti predviđa da je kosmički horizont horizont događaja, kao onaj kod crne rupe. (***Ref. 204***). Sve do 1998. godine ova mogućnost je bila pod znakom pitanja; međutim, 1998. godine otkriveno je da se širenje svemira ubrzava. (***Ref. 205***). Ovo otkriće podrazumeva da je kosmički horizont zaista horizont događaja, kako ga predviđa model niti.

Model niti ustvari predviđa da su ***svi*** horizonti u prirodi ***iste*** vrste. To znači takođe da je svemir predodređen da zasiti granicu Bekenštajnove entopije. (***Strana 230***). Još preciznije, model niti predviđa da je svemir neka vrsta ***preokrenute crne rupe***. Slično mnogim situacijama koje uključuju horizont, model niti stoga ne dopušta da se prave iskazi o svojstvima "pre" velikog praska ili "izvan" horizonta. Kao što je objašnjeno u predhodnom tekstu (***strana 215***), iza horizonta ne postoji ništa..

Model niti naročito podrazumeva da materija koja se pojavljuje na kosmičkom horizontu tokom razvoja svemira, pojavljuje se kroz Bekenštajn-Hoking zračenje. Ova je u suprotnosti "klasičnom" objašnjenju iz opšte teorije relativnosti da se nova materija pojavljuje prosto stoga pošto postoji predhodno iza horizonta, a onda prođe horizont u "vidljivi deo" svemira.

Primećijemo da modeliranje svemira kao pojedinačne niti podrazumevada da ona sadrži zaplete. Drugim rečima, model niti pravi predpostavku da svemir ne može da bude prazan, već da mora da sadrži čestice. Kosmologija u modelu niti takođe potvrđuje da pitanje o početim uslovima svemira (***strana 83***) zaista nema smisla: čestice se pojavljuju na horizontu..

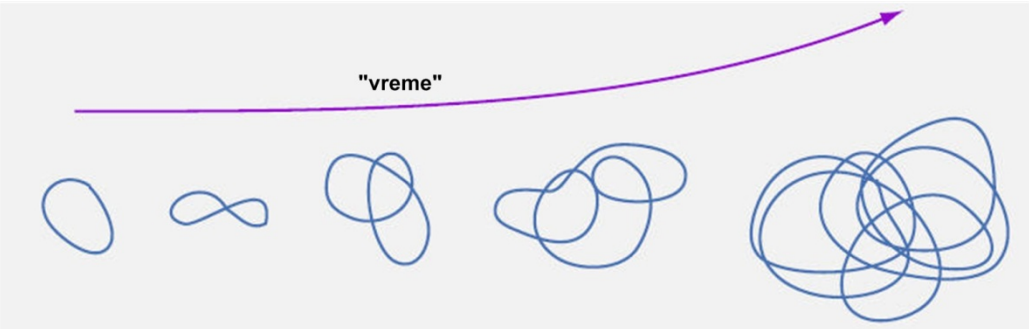
Napominjemo da je prirodno opisivati svemir kao da je načinjen od pojedinačne niti, međutim ponešto neobičan način je da se obuhvati ono što fizičari čestica i kosmolozi vole da nazovu ***holografija***. Holografija je ideja da svi posmatrači fizičkog sistema budu određeni na granici koja obuhvata sistem. Drugim rečima, ako bismo znali u Plankovoj razmeri sve što se dešava na zidovima sobe, znali bismo sve što se dešava u sobi. Umesto holografija možemo to nazvati i ***NSA san*** (NSA – **N**o **S**trings **A**ttached). Holografija je posleica proširenja osnovnih sastojaka prirode i prirodna je posledica modela niti. Kao posledica toga, kosmologija niti prirodno prikazuje holografsku kosmologiju – premda ne u potpunosti, što je lako da se proveri. (***Izazov 185e***).

Sada ova veza ili prilagođavanje svih stvorenih stvari svakom i od svakog ostalima, znači da svaka prosta supstanca ima odnose koji izražavaju sve ostale, i posledično, to je trajno živo ogledalo svemira.

Gotfrid Vilhelm Lajbnic (Gottfried Wilhelm Leibniz), *Monadologie*, 56

VELIKI PRASAK – BEZ INFLACIJE

Svaka raspodela proširene homogene i izotropne materije imala je predhodno stanje manje veličine i veće gustine. (***Ref. 206***). Isto tako je i svemir u prošlosti bio topliji i veće gustine. Međutim, model niti takođe izražava da se u prirodi ne pojavljuju singulariteti, pošto je to najveća moguća gustina energije. (***Strana 220***). Kao rezultat toga, veliki prasak bi mogao da se zamisli kao što je prikazano na ***slici 79***. Očigledno, u blizini te situacije fizički prostor i vreme nisu dobro određeni, tako da sliku treba uzeti slično prstohvatu soli. Bez obzira na to, ona pokazuje kako razvoj svemira može da se posmatra kao rezultat povećanja zaplitanja niti koje sačinjavaju prirodu.



Slika 79 Jako pojednostavljeno gledište kako se svemir razvijao u blizini velikog praska. U toj situaciji fizički prostor "još uvek" nije određen

Predpostavlja se da razvoj niti svemira upravo posle velikog praska automatski dovodi do homogene i izotropne raspodele materije i do ravnog prostora.

Isto tako invarijanta razmere ranog kolebanja gustine izgleda prirodno u modelu niti. Ukratko, model niti izgleda kao obećavajuća alternativa za inflaciju: predpostavka inflacije postaje nepotrebna u modelu niti, pošto kosmologija niti neposredno pravi predviđanje koje izgleda zagonetno u klasičnoj kosmologiji. Ova tema još uvek je predmet istraživanja.

KOSMOLOŠKA KONSTANTA

Energija vakuuma ili ***tamna energija*** u modelu niti je usled kosmološke konstante, koja je sama po sebi nastala usled kolebanja niti. (***Strana 162***). Kao što smo videli u predhodnom tekstu, model niti predviđa da kosmološka konstanta Λ iščezava za beskonačno proširen ravan prostor, pošto u tom slučaju iščezava gustina energije vakuuma. Međutim, model niti takođe predviđa da za ***konačna*** proširenja kosmološka konstanta ***ne iščezava***. Zaista, u modelu niti da konačne veličine ograničavaju kolebanja niti. Kolebanja sa veličinama većim od veličine prostora se zamrzavaju; to dovodi do efektivnog odbijanja niti koje za uzvrat dovodi do kosmološke konstante date sa (kvadratom) proširenja prostora:

$$\Lambda = \frac{1}{R_{\max}^2} \tag{191}$$

Posebno, model niti predviđa malu ***pozitivnu*** kosmološku konstantu, to jest konstantu koja dovodi do malog odbijanja masa.

Odnos između kosmološke konstante i poluprečnika svemira može da se odredi uz drugi, precizniji dokaz, zasnovan na holografiji, kojeg su dali Balaž (Balazs Nandor) i Sapudi (Szapudi Andras). (***Ref. 207***). Bekenštajnova holografska entropija koja ograničava stanja za sve sisteme veličine R i energije E je

$$S \le ER\frac{2\pi k}{\hbar c} \tag{192}$$

Za loptaste sisteme to daje

$$S \le A\frac{kc^3}{4G\hbar} \tag{193}$$

Primena ove nejednakosti na svemir je holografska predpostavka Fišler-Suskind (Fischler-Susskind). (***Ref. 208***). Korišćenjem odnosa energija-entropija $E = TS$, koji važi za svaki holografski sistem, i uvođenjem gustine energije ρ_E, dobijamo granicu datu sa

$$\rho_E \leq \frac{T}{R}\frac{3kc^3}{4\hbar G} \tag{194}$$

Korišćenjem obrasca za temperaturu horizonta $T = \hbar c/2\pi kR$ – izvedenu u predhodnom tekstu (***strana 218***) – dobijamo

$$\rho_E \leq \frac{1}{A}\frac{3c^4}{2G} = \frac{1}{4\pi R^2}\frac{3c^3}{2G} \tag{195}$$

Model niti predviđa da svemir ***zasićava*** granicu entropije. Drugim rečima, predpostavljajući da je R pomnožena sa c starost svemira t_0, model niti predviđa da je ukupna gustina energije svemira jednaka takozvanoj ***kritičnoj*** gustini energije.

Jednakost izmerene ukupne gustine energije i kritične gustine dobro je poznata. (***Ref. 209***). Ova merenja pokazuju da je prisuta ukupna gustina energije svemira oko

$$\rho_{\text{Evac}} \approx 8{,}5 \cdot 10^{-10}\,\text{J/m}^3 \quad \text{ili} \quad \rho_{\text{mvac}} = 0{,}94(9) \cdot 10^{-26}\,\text{kg/m}^3$$

Drugim rečima, model niti, kao holografski dokaz, predviđa da je kosmološka konstanta ograničena sa

$$\Lambda \leq \frac{3}{c^2 t_0^2} \tag{197}$$

Rezultat potvrđuje rezultat izraza (191). Savremena merenja dala su 74% maksimalno moguće vrednosti. (***Ref. 209***).

Dokaz za vrednost kosmološke konstante može da se dobije za bilo koju starost svemira. Prema tome, model niti predviđa da se kosmološka konstanta Λ ***smanjuje*** pri povećanju poluprečnika svemira. (***Ref. 210***). Posebno, ne postoji potreba za skalarnim poljem koje smanjuje kosmološku konstantu; smanjivanje je prirodan rezultat modela niti. Model niti izražava da se kosmološka konstanta pojavljuje u jednakostima polja kao kvantni efekt zbog konačne veličine svemira. Model niti zato podrazumeva da ne postoje posebne jednakosti kretanja za kosmološku konstantu, ali da se konstanta pojavljuje kao prosek velikih razmera kvantnih efekata, sve dok je veličina svemira ograničena.

Sažeto, model niti predviđa ne samo jednakosti polja opšte teorije relativnosti, već isto tako i količinu tamne energije, širenje svemira i njegovo ubrzavanje potiču od kolebanja niti. Kosmološka konstanta se menja približno obrnuto srazmerno kvadratu vremena. Model niti naročito podrazumeva da efekt kojeg je predložio Viltšir (Wiltshire) – da je kosmološka konstanta veštačka tvorevina nehomogenosti raspodele materije – nije temeljna, ali da može najviše da utiče na vrednost. (***Ref. 211***). (Da li bi mogla razlika između maksimalno moguće i izmerene vrednosti kosmološke konstante da bude usled ovog efekta?) (***Izazov 186s***).

VREDNOST GUSTINE MATERIJE

Model niti predviđa da horizonti emituju čestice. Kao posledica toga, model niti predviđa gornju granicu N_b bariona koji bi mogao da emituje kosmički horizont tokom svog širenja. Za horizont koji sija tokom cele starosti svemira t_0 dok emituje maksimalnu snagu $c^5/4G$, dobijamo

$$N_{b0} \leq \frac{t_0 c^5/4G}{m_b c^2} = 2{,}6 \cdot 10^{70} \tag{198}$$

Jednakost bi mogla samo da se postigne ako bi mogao da bude zanemaren doprinos fotona, elektrona, neutrina i tamne materije. Ukratko, korišćenjem starosti od t_0 = 13,8 Ga, model niti predviđa da u ovom trenutku u svemiru postoji najviše $2{,}6 \cdot 10^{79}$ bariona. Savremena merenja zaista daju vrednosti oko ove granice. (***Ref. 209***).

Drugim rečima, model niti izražava da je zbir svih energija čestica u svemiru najviše $t_0 c^5/4G$, ili 50% kritične vrednosti; što uključuje opaženu materiju kao i tamnu materiju. Eksperimentalne vrednosti za ukupnu gustinu materije su oko 26% kritične gustine. (***Ref. 209***). U posmatranjima je 4% gustine materije opaženo, a 22% je tamna. Prirodu tamne materije razmatraćemo kasnije, (***Strana 264***).

Model niti takođe pravi jasan iskaz o promeni gustine materije sa vremenom. Kako je upravo objašnjeno, predviđa se da se broj bariona povećava sa vremenom t, usled njihove pojave na horizontu. Isto tako će se sa vremenom povećavati (približno) poluprečnik; kao rezultat toga

- Model niti predviđa da se gustina materije smanjuje približno kao $1/t^2$.

Ovo neočekivano predviđanje u protivrečnosti je uobičajenoj predpostavljenoj zavisnošti $1/t^3$ u svemiru u kojem preovladava materija. Predviđanje mora tek da bude provereno u opažanjima. Napominjemo da dokazi niti podrazumevaju da je odnos između gustine materije i gustine energije vakuuma povezana sa detaljima povećanja poluprečnika u toku istorije svemira.

OTVOREN IZAZOV: ŠTA JE TAMNA MATERIJA?

Da li u navedenim dokazima u predhodnom tekstu nedostaje činilac reda 2 koji izaziva netačne zaključke o gustini tamne materije? (***Izazov 187ny***). Možda je predviđanje, posle ispravke ovim nedostajućim brojnim činiocem, da se tamna materije povećava, smanjuje ili čak nestaje?

Dogovorno se tvrdi da ***hladna*** tamna materija postoji iz dva razloga: Prvo, neophodno je da se brzo povećju kolebanja gustine kosmičke mikrotalasne pozadine kako bi se postigle današnje visoke vrednosti. Drugo, potrebno je da se daju opažene amplitude za akustičke vrhove oscilacija pozadine svemira. Može li model niti da promeni ove dokaze?

Kako predviđanje tamne materije modelom niti objašnjava krive obrtanja galaksija? Pitanje povezano sa ovim je sledeće: mogu li se efekti zapleta u razmerana cele galaksije dovesti u vezu sa tamnom materijom? (***Izazov 188ny***).

TOPOLOGIJA SVEMIRA

Fizičko prostor-vreme u modelu niti, bilo kada da je određeno, ne može da bude višestruko spojeno. Isto tako i svi pristupi kvantne gravitacije prave ovu predpostavku, a model niti je potvrđuje: pošto je fizičko prostor-vreme rezultat prosečnih promena ukrštanja, netrivijalna topologija (osim za crne rupe) ne pojavljuje se kao rešenje. Na primer, model niti predviđa da crvotočine ne postoje. U oblastima gde je prostor-vreme neodređeno – na horizontu i iza njega – nema smisla da se govori o topologiji prostor-vremena. U takvim oblastima kolebanje niti svemira određuje opažanja. Ukratko, model niti predviđa da sva traženja netrivijalnih makroskopskih (i mikroskopskih) topologija svemira, i na visokoj i na niskoj energiji, daju negativne rezultate. Do sada, ovo predviđanje je saglasnosti sa svim opažanjima.

PREDVIĐANJA MODELA NITI O KOSMOLOGOJI

Model niti u oblasti kosmologije čini sledeća predviđanja koja se mogu proveriti.

- Svemir nije prazan. (U saglasnosti je sa opažanjima.)
- Njegova integrisana sjajnost zasićuje granicu snage $c^5/4G$. (U saglasnosti je sa opažanjima.)
- Gustina energije svemira zasićuje granicu entropije. (U saglasnosti je sa opažanjima.)
- Ne postoje singulariteti u prirodi. (U saglasnosti je sa opažanjima.)
- Postoji tamna energija i nastaje iz kolebanja niti vakuuma. (U saglasnosti je sa opažanjima.)
- ***Tamna energija ili energija vakuuma potpuno je opisana kosmološkom konstantom Λ koja je pozitivna i menja se sa poluprečnikom R svemira kao $1/R^2$.*** (Ova predpostavka razlikuje se od uobičajenog kosmološkog modela, u kojem se predpostavlja da je Λ stalno ili da se menja vremenom na drugačije načine. Predviđanje modela niti moglo bi da se proveri u bliskoj budućnosti proverom da li se minimum ubrzanja oko galaksija menja sa rastojanjem – ako je ovaj minimum u vezi sa Λ.)
- Broj bariona u prirodi ograničen je proizvodom maksimalne sjajnosti i starosti svemira. Sadašnja gornja granica je $2{,}6\cdot10^{79}$ bariona. (U saglasnosti je sa opažanjima.)
- Gustina materije svemira smanjuje se sa starošću, približno kao $1/t^2$. (Provera je u toku. Ovo predviđanje razlikuje se od uobičajenih kosmoloških modela.)
- Ne postoji ništa iza kosmičkog horizonta. Materija, energija i prostor pojavljuju se na horizontu. (U saglasnosti je sa opažanjima i zahtevima logike.)
- Kolebanja rane gustine invarijanta je razmere. (U saglasnosti je sa opažanjima.)
- Svemir je ravan i homogen. (U saglasnosti je sa opažanjima.)

- Osim kosmološke konstante Λ, sve ostale temeljne konstante su konstantne u vremenu i prostoru. (U saglasnosti je sa opažanjima, uprkos redovnom tvrdnjama u suprotno.)
- Inflacija je nepotrebna.
- Topologija svemira je trivijalna. (U saglasnosti je sa opažanjima.)
- Gore navedeni iskazi nezavisni su od preciznih detalja kolebanja. (Mogu da se provere matematičkim istraživanjima.)

Sva ova predviđanja mogu i biće provereni u narednim godinama, bilo opažanjima, bilo proračunima na računaru.

ZAKLJUČAK O MILENIJUMSKIM PITANJIMA RELATIVNOSTI I KOSMOLOGIJE

Izveli smo specijalnu teoriju reletivnosti, opštu teoriju relativnosti i kosmologiju iz modela niti. Osnovna načela modela niti podrazumevaji invarijantu Plankovih jedinica, lagranžijana i rada, opšte teorije relativnosti, konačnost svemira i entropiju crnih rupa.

Pena prostor-vremena zamenjena je modelom niti vakuuma: prazan prostor je vremenski prosek nezapletenih niti. Još preciznije, prostor je termodinamički prosek promena ukrštanja koja nastaju usled kolebanja zapletenih niti.

Model niti – a posebno model niti vakuuma – objašnjava broj dimenzija prostor-vremena, gustinu energije vakuuma, gustinu materije i konačnost svemira. Kosmološka konstanta je posledica konačne veličine svemira. Pitanje početnih uslova svemira je odbačeno. Makroskopska i mikroskopska topologija svemira je razjašnjena. Za tamnu materiju je predpostavljeno da je kombinacija uobičajene materije i crnih rupa, kao što će biti pokazano u narednom poglavlju. (***Strana 264***).

Najvažnija predviđanja modela niti su smanjenje kosmološke konstante sa vremenom i odsustvo inflacije. U godinama koje slede razni eksperimenti će proveriti ove predpostavke. Do sada, merenja nisu protivrečna ovim predviđanjima.

Model niti potvrđuje da su brzina svetlosti c i ispravljena Plankova sila $c^4/4G$ ***granične*** vrednosti. Model niti takođe predviđa da ne postoje i prostoru i vremenu odstupanja c, G i $\hbar$, i k, što može da se otkrije, pošto oni određuju sve merne jedinice.

Model niti predviđa da su kosmološka konstanta i mase elementarnih čestica samo kvantni efekti koji će biti posmatrani u proučavanju gravitacije. (***Strana 208***). Niti čvrsto predpostavlju da se ne mogu izmeriti dodatni efekti kvantne gravitacije. Osim toga, nisu opaženi efelkti pene prostor-vremena.

Model niti u sadašnjosti je najednostavniji – ali ne i jedini – poznat model kvantne gravitacije koji omogućava izvođenje svih ovih rezultata. Naročito je objašnjenje entropije crne rupe modelom niti daleko najprostije poznato objašnjenje.

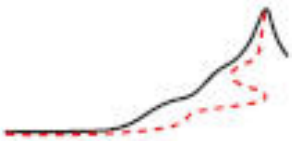
Opšta teorija relativnosti je približnost modelu niti. Približnost se pojavljuje kada su zanemareni kvant rada, a naročito prečnik niti. Prema tome, predviđa se da opšta teorija relativnosti važi za sve energije ispod Plankove energije. Drugim rečima, model niti nije uopštavanje opšte teorije relativnosti, nasuprot ostalim pokušajima objedinjavanja. To potvrđuje pregled zahteva za konačnu teoriju. (***Strana 117***).

U "kocki" strukture fizike prikazane na ***slici 1*** (***strana 9***), prelaz sa konačne, objedinjene teorije na opšti teoriju relativnosti, pojavljuje se kada se zanemare kvantni efekti, to jest kada se predpostavi $\hbar$ kao 0. U modeli niti prelaz sa opisa pomoću niti na opis sa kontinualnim promenljivim: zanemarivanjem niti u modelu niti – ili preciznije, uprosečavanjem prelaza ukrštanja niti sa prečnikom nula – dovodi do opšte teorije relativnosti i kosmologije.

Ako pogledamo u milenijumsku listu (***strana 128***) otvorenih pitanja u fizici, vidimo da su rešena sva pitanja iz opšte teorije relativnosti i kosmologije – osim pitanja tamne materije. Model niti objašnjava matematički opis zakrivljenog prostor-vremena i opšte teorije relativnosti. Model niti daje takođe jednostavan model kvantne gravitacije – verovatno najjednostavniji. (***Strana 207***). Već smo pokazali u predhodnom tekstu da model niti objašnjava sve matematičke strukture koje se pojavljuju u kvantnoj teoriji i fizici čestica. Zajedno sa rezultatima iz ovog poglavlja možemo sada da kažemo: ***model niti objašnjava sve matematičke strukture koje se pojavljuju u teoriji fizike***. Model niti objašnjava naroćito metriku,

zakrivljenost, talasne funkcije, jačine polja – i ponašanje svakog od njih sa stanovišta verovatnoće. Svi oni su rezultat prosečnih promena ukrštanja.

Sažeto, počevši od osnovnog načela modela niti mi smo shvatili da su niti poreklo gravitacije, opšte teorije relativnosti, kvantne gravitacije i kosmologije. Isto tako smo shvatili matematički opis prirode koji se nalazi u svim udžbenicima. Ovi rezultati ohrabruju nas da nastavimo traganje. U stvari, šta još nismo uradili: potrebno je još da utvrdimo poreklo mogućih elementarnih čestica i da objasnimo njihove osobine.



Poglavlje 11

SPEKTAR ČESTICA IZVEDEN IZ NITI

Nijedan problem ne može da izdrži napad neprekidnog razmišljanja.

Volter (Voltaire)[1] (***Ref. 212***)

Niti opisuju kvantnu teoriju, interakcije merila i opštu teoriju relativnosti. Međutim, da li niti rešavaju isto tako i sva pitanja koja su ostala otvorena u fizici dvadesetog veka? Da li rešavaju poreklo svih elementarnih čestica? Kako beskonačan broj mogućih zapleta dovodi do konačnog broja elementarnih čestica? I najzad, da li niti objašnjavaju konstante veza? U milenijumskoj listi otvorenih pitanja u osnovnoj fizici (***strana 128***) postoje još neka nerešena pitanja. Model niti je tačan samo ako se ova pitanja reše.

U ovom poglavlju pokazujemo da model niti zaista objašnjava poznat spektar elementarnih čestica, uključujući tri generisanja kvarkova i leptona. Model niti je prvi pristup savremene fizike koji daje takvo objašnjenje.

ČESTICE I KVANTNI BROJEVI IZ ZAPLETA

U prirodi opažamo tri subjekta: vakuum, horizonte i čestice. Od ovih (kvantnh) ***čestica lokalizovani*** su subjekti sa posebnim ***unutrašnjim*** osobinama, to jest svojstvima koji ne zavise od njihovog kretanja.

Sve unutrašnje osobine svake čestice u prirodi, svaki predmet i svaka slika potpuno su opisani sa tri osnovne osobine: (1) elementarnim česticama koje sadrže, (2) njihovim ponašanjem pri transformaciji prostor-vremena i (3) njihovom interakcijom. Potpuna lista ovih osnovnih unutrašnjih osobina data je u ***Tabeli 12***. Obzirom na osnovna svojstva bilo koje elementarne čestice, fizičari mogu da zaključe sve one osobine koja nisu navedene; primeri su: vreme poluraspada, način raspadanja, odnosi razdvajanja, moment električnog dipola, T-paritet, žiromagnetni odnos, ili električna polarizacija. Naravno, osnovne osobine isto tako omogućavaju fizičarima da izvedu svaku osobinu svakog predmeta ili slike, kao što su veličina, oblik, boja, gustina, elastičnost, sjajnost, magnetizam ili provodnost.

Ukratko, razumevanje svih osobina materije i slika stoga zahteva jedino razumevanje ***osnovnih*** osobina kvantnih čestica; a razunevanje ***osnovnih*** osobina kvantnih čestica zahteva jedino razumevanje ***osnovnih*** osobina ***elementarnih*** čestica.

Model niti izražava da su sve elementarne (i sve složene čestice) zapleti niti. (***Strana 135***). To dovodi do pitanja: Kakav zaplet pripada svakoj od elementarnih čestica? Koje vrste elementarnih čestica su moguće? Da li ovi zapleti prikazuju za svaku elementarnu česticu opažene vrednosti osnovnih svojstava navedenih u ***Tabeli 12***?

Pokazalo se da model niti dopušta samo ***ograničen broj*** elementarnih čestica. Osim toga, zapleti ovih elementarnih čestica imaju unutrašnje osobine koje ***odgovaraju*** opaženim osobinama. Da bi se dokazao ovaj strog iskaz, podsetimo se najpre da su sve elementarne čestice sa masom predstavljene ***beskonačnim redosledom*** zapleta. Zatim objašnjavamo zaplete prema broju niti od kojih su načinjeni.

ČESTICE NAČINJENE OD JEDNE NITI

Sve čestice u modelu niti načinjene od ***jedne*** niti imaju spin 1, elementarne su i bozoni su. (***Strana 136***). Suprotno tome, svi elementarni bozoni bez mase sa spinom 1 mogu da imaju samo dva repa, pa stoga mora da su načinjeni od pojedinačne niti. Takvi zapleti jedne niti vraćaju se u početno stanje posle obrtanja jezgra za 2π. Elementarni bozoni sa masom i spinom 1 mogu imati jednu ili više niti. Zapleti sa više od

[1] Volter (Voltaire, François-Marie Aruet, 1694. Paris – 1778. Paris) bio je uticajan filozof, političar i često pisac satira.

jedne niti mogu imati samo spin 1 ako predstavljaju elementarne ili složene čestice sa nasom. Ukratko, svrstavanje zapleta od jedne niti omogučava svrstavanje svih elementarnih mernih bozona.

Matematičari su već svrstali zaplete od jedne niti: oni se obično nazivaju ***otvoreni čvorovi*** ili ***dugi čvorovi***. Da bi se dobio pregled navodimo po jedan primer svake klase zapleta od jedne niti na levoj strani ***slike 80***. Radi potpunosti, zatvorene krive su prikazane na desnoj strani slike. Zatim istražujemo svaku od ovih klasa krivih.

TABELA 12 Potpun popis osnovnih unutrašnjih osobina kvantnih čestica, iz kojih mogu da se zaključe sve ostale opažene osobine čestica, predmeta i slika.

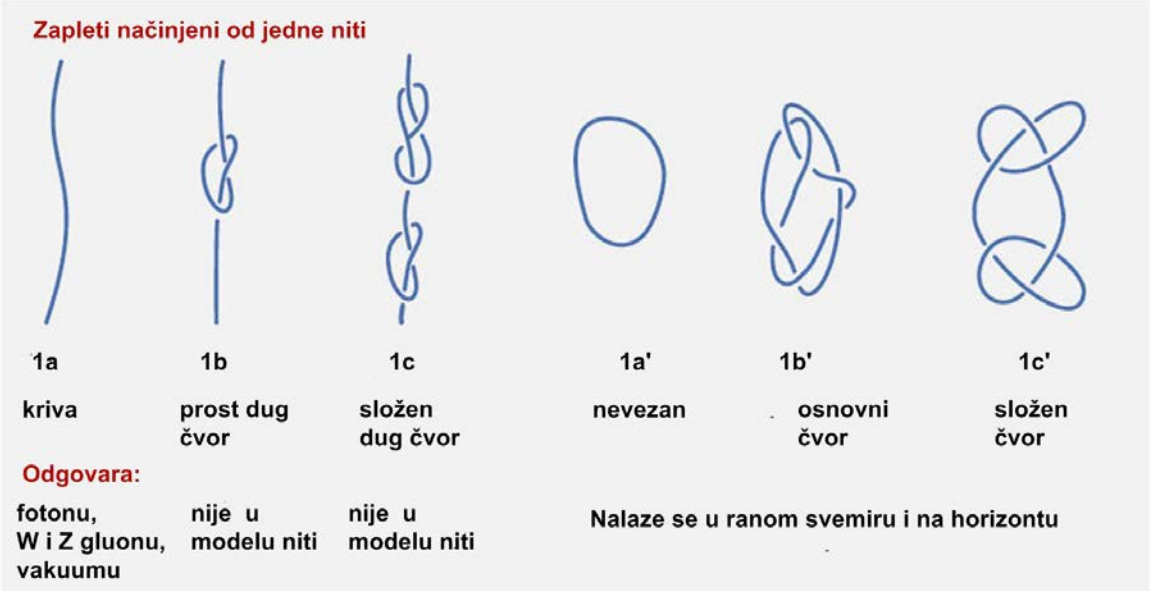
Osobina	**Moguća vrednost**	**Određuje**
Kvantni brojevi usled simetrije prostor-vremena		
Spin S ili J	celobrojni ili polucelobrojni umnožak $\hbar$	statistiku, ponašanja obrtanja, očuvanje
P paritet	parni (+1) ili neparni(-1)	ponašanje pri odbijanju, očuvanje
C paritet	parni (+1) ili neparni(-1)	ponašanje pri spajanju naboja, očuvanje
Svojstva inerakcije		
Masa M	između 0 i Plankove mase	gravitaciju, inerciju
Električni naboj Q	celobrojni umnožak 1/3 naboja elektrona ili protona	Lorencovu silu, spajanje sa fotonima, očuvanje
Slab naboj	racionalan umnožak konstante slabe veze	slabo rasipanje i raspad, spajanje sa W i Z, delimično očuvanje.
Uglovi mešanja	između 0 i $\pi/2$	mešanje kvarkova i neutrina, promenu ukusa
CP narušavanje faza	između 0 i $\pi/2$	stepen CP narušavanja u kvarkovima i neutrinima
Jak naboj, to jest boja	racionalan umnožak konstante jake veze	ograničenje, spajanje sa gluonima, očuvanje
Kvantni brojevi ukusa, koji opisuju sadržaj elenentarne čestice		
Leptonski broj (brojevi) L'	ceo broj (brojevi)	očuvanje u jakoj i elektromagnetnoj interakciji
Barionski broj B	ceo broj pomnožen sa 1/3	očuvanje u sve tri merne interakcije
Izospin I_z ili I_3	+1/2 ili -1/2	sadržaj gornjih i donjih kvarkova, očuvanje u jakoj i elektromagnetnoj interakciji
Čudnost (Strangeness) S'	ceo broj	sadržaj čudnih kvarkova, očuvanje u jakoj i elektromagnetnoj interakciji
Šarm (Charmness) C'	ceo broj	sadržaj šarnantnih kvarkova, očuvanje u jakoj i elektromagnetnoj interakciji
Dno (Bottomness) B'	ceo broj	sadržaj donjih kvarkova, očuvanje u jakoj i elektromagnetnoj interakciji
Vrh (Topness) T'	ceo broj	sadržaj gornjih kvarkova, očuvanje u jakoj i elektromagnetnoj interakciji

NEVEZANE KRIVE

Najjednostavnija vrsta zapleta načinjena od jedne niti je nevezana kriva, prikazana kao 1a na ***slici 80***. Proučavanje mernih interakcija pokazalo je da su nevezane niti, zavisno od njihovih prosečnoh oblika, ili niti vakuuma ili niti mernih bozona. (***Strana 189***).

Nit vakuuma prosečna u vremenu je prava. Pojedinačna nit predstavlja česticu, ako oblik niti prosečne u vremenu nije prava linija.

U modelu niti niti vakuuma u ravnom prostoru u proseku vremena su prave. Po ovom svojstvu niti vakuuma razlikuju se od baždarnih bozona, koji su proseku imaju krive niti, te stoga nose energiju.



Slika 80 Primeri za svaku klasu zapleta načinjenih od jedne niti

MERNI BOZONI I RAJDEMAJSTEROVI POTEZI

Baždarni bozoni su noseće čestice interakcije. U modelu niti interakcije merila nastaju usled Rajdemajsterovih poteza. Elektromagnetna, slaba i jaka interakcija odgovaraju respektivno prvom, drugom ili trećem Rajdemajsterovom potezu. Kao što smo u predhodnom tekstu videli, kada tri Rajdemajsterova poteza izobliče jezgro zapleta oni stvaraju U(1), SU(2) i SU(3) simetrije merila. Detaljna istraživanja prikazivanja izobličenja zapleta i teorije merila dovode nas do zapleta mernih bozona prikazanih na ***slici 81***. Svi baždarni bozoni – pre prekida simetrije, ako je primenljiva – pojedinačne su krive niti. (***Strana 171***).

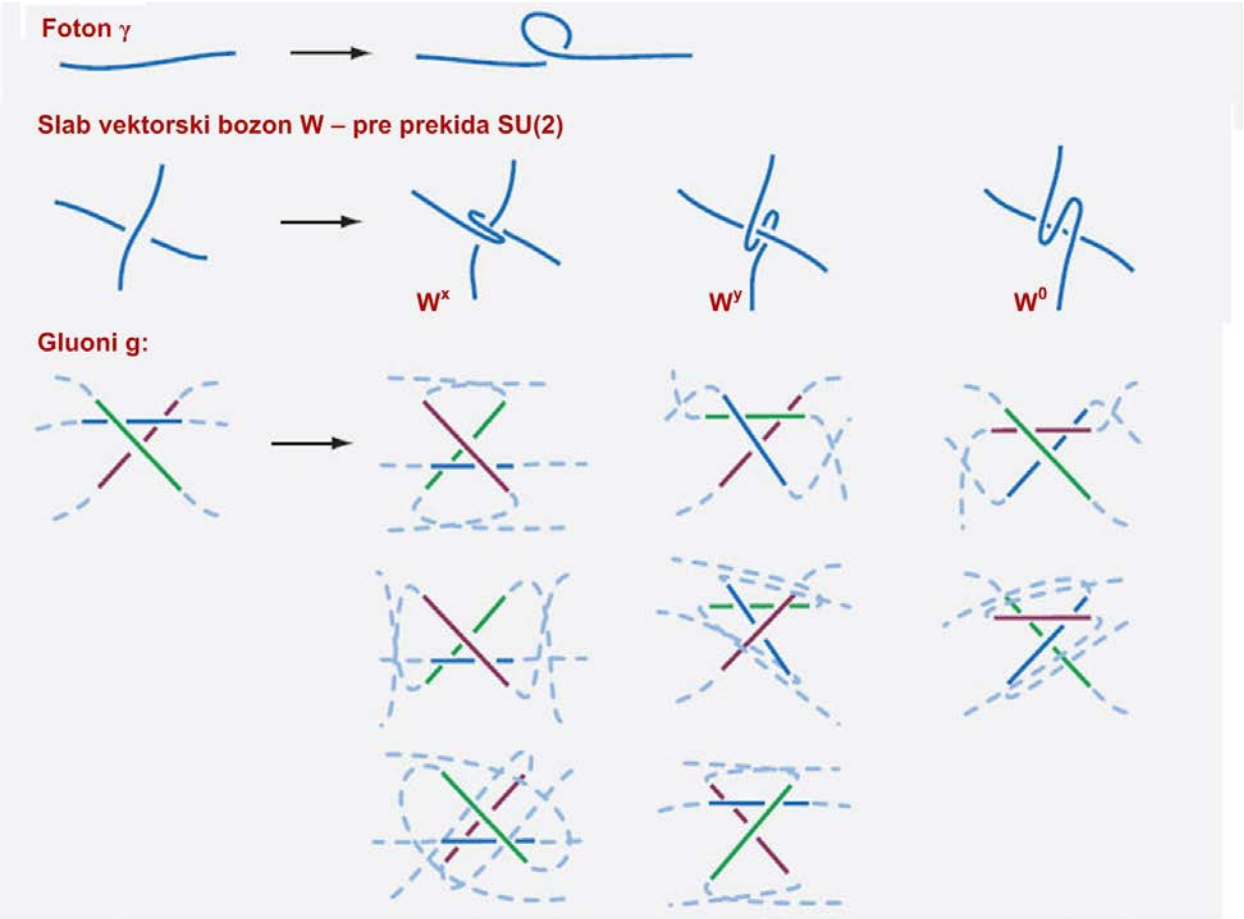
Pojedinačna nit prestavlja česticu ako oblik niti u proseku vremena nije prava linija. Nit koja predstavlja česticu prema tome može da bude prava sa ispupčenjem ili nit čiji repovi nisu poravnati duž prave linije.

Kao što je objašnjeno u predhodnom tekstu (***strana 173***), ***prvi*** potez Rajdemajstera, dovodi do prikaza fotona kao spiralne niti. Prema tome, fotoni imaju masu koja nestaje i dve moguće polarizacije. Fotoni nemaju članove rodbine koji su uvezani; oni su bez mase. Njihov neuvezan i uvijen oblik niti podrazumeva takođe da fotoni stvaraju abelijsku teoriju merila i da fotoni nisu u međusobnoj interakciji. Automatski sledi da fotoni nemaju ni slab ni jak naboj. Model niti dalje podrazumeva da fotoni imaju negativan P paritet i C paritet, kao što je i opaženo.

Proučavanje ***drugog*** poteza Rajdemajstera (***strana 185***) pokazuje da izobličenja uzrokovana ovim potezima mogu takođe da uključe uplitanje repova zapleta; to dovodi do prekida simetrije u slaboj interakciji. Kao rezultat toga, opažene niti W i Z bozona postaju niti sa masom. Zaplet W je hirijalan, pa je prema tome električno nabijen; zaplet Z je nehirijalan i stoga je električno neutralan. Budući da su uvezani, W i Z nose takođe slab naboj i stoga su u međusobnoj interakciji, stvarajući neabelijsku teoriju merila. Model niti podrazumeva takođe da W i Z nemaju P paritet, ni C paritet ni naboj bojom, kao što je i opaženo.

Proučavanje ***trećeg*** poteza Rajdemajstera, ***klizanja*** (***strana 194***), dovodi nas do postojanja osam gluona. Osam gluona su nevezane niti, pa stoga oni nemaju masu, nemaju električni naboj i nemaju slab naboj. Svaki zaplet gluona ima dve moguće polarizacije. Model niti gluona podrazumeva takođe da oni imaju negativan P paritet, a nemaju C paritet, kao što je i opaženo. Zapleti gluona su nosioci boje i u međusobnoj su interakciji, pa stoga stvaraju neabelijsku mernu teoriju. Nasuprot drugim dvema interakcijama, slobodni, pojedinačni gluoni imaju kratko vreme trajanja, pošto njihova struktura izaziva brzu hadronizaciju: kada gluon deluje na vakuum, stvara se par kvark-antikvark. Gluoni nemaju vezane članove porodice; oni su bez mase u granici visoke energije, pri čemu su njihovi repovi poravnati.

Radi potpunosti, pominjemo da se po pridruživanju svi baždarni bozoni razlikuju od vakuuma po pojedinačnoj zakrivljenoj niti, nestajanja leptonskog i barionskog broja, a time takođe i odsustva svih kvantnih brojeva ukusa. Sve to je kao što je opaženo.



Slika 81 Model niti mernih bozona. Sve se razlikuju od vakuuma jednom krivom niti – mada, da bi bilo jasno, gluoni su ovde prikazani kao dopunski potezi dve niti.

Model niti objašnjava odsustvo ***klasičnih SU(2) talasa polja*** kao posledicu prekinute simetrije SU(2) i posledične mase slabih bozona. Niti objašnjavaju odsustvo ***klasičnih SU(3) talasa***, poznatih takođe pod imenom ***gluonski talasi***, kao posledicu topološke nemogućnosti stvaranja takvih talasa, što je u vezi sa beskonačnom masom slobodnih gluona.

Ponekad u površnom izražavanju možemo da kažemo da su oblik i efekti fotona jednodimenzionalni, oni kod prekinuih slaboh bozona dvodimenzionalni, a oni kod gluona trodimenzionalni. To je suštinski razlog da oni prikazuju U(1), SU(2) i SU(3) grupe, i da više grupe merila ne postoje u prirodi.

Sažeto, Rajdemajsterova teorema podrazumeva da je lista poznatih mernih bozona sa spinom 1 potpuna. Međutim, još nismo završili, lista mogućih zapleta načinjena od pojedinačne niti mnogo je šira.

OTVORENI ILI DUGI ČVOROVI

Niti mogu da sadrže takođe vezana područja. U predhodnom tekstu objasnili smo (***strana 190***) da sve takve mogućnosti – matematički govoreći, svi takozvani ***otvoreni čvorovi*** ili ***dugi čvorovi*** – nemaju veze sa česticama. U modelu niti oni ne mogu da se pojave i zato nemaju nikakvu ulogu. Početni model niti iz 2008. godine obuhvatao je i takve konfiguracije kao čestice (na primer kao W i Z bozone), međutim, sada izgleda da je to uvrštavanje nepotrebna komplikacija.

ZATVORENI ZAPLETI: ČVOROVI

Na desnoj strani ***slike 80*** pokazani su primeri za svaku klasu ***zatvorenih*** zapleta od jedne niti, to jest zapleta ***bez repova***. Oni se obično u matematici nazivaju ***čvorovi***. U modelu niti čvorovi mogu da se pojave samo u ranom svemiru, a možda i u blizini horizonta. Izgleda da oni nemaju fizički značaj i njih ovde više nećemo da istražujemo.

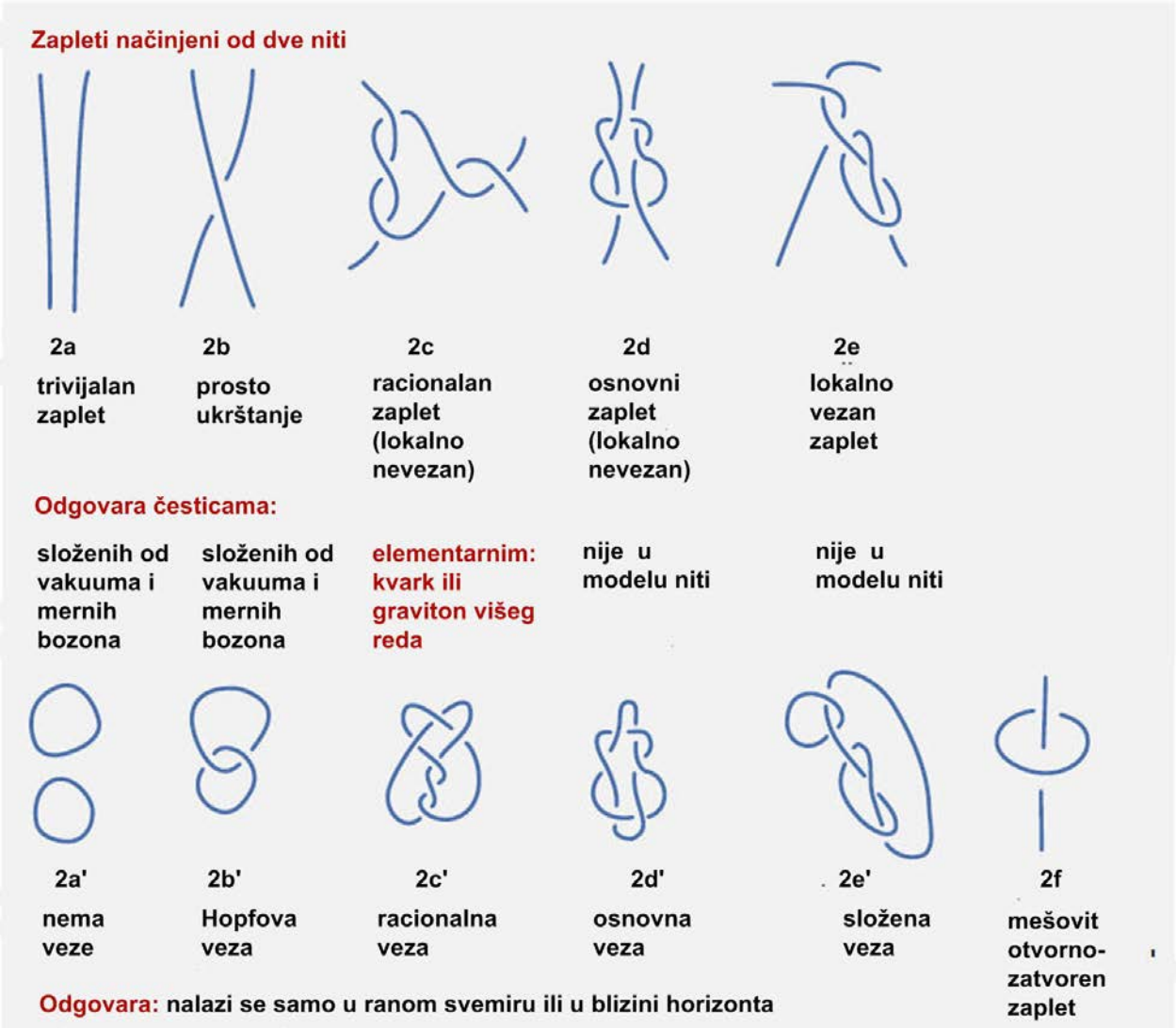
ZAKLJUČAK O ZAPLETIMA NAČINJENIH OD JEDNE NITI

Sažeto, svi zapleti načinjeni od jedne niti predstavljaju elementarne čestice sa spinom 1, prema tome, elementarne vektorske bozone. Pojedinačna nit predstavlja česticu ako oblik niti u proseku nije prava linija. Ovo pravi razliku između niti vakuuma i niti čestice. Nit čestice može stoga da bude nit sa izbočinom ili nit čiji repovi nisu poravnati duž prave linije.

Elementarne čestice bez mase sa spinom 1 načinjene su od jedne niti, jer ostali zapleti ne predstavljaju pri obrtanju ponašanje sa masom nula i spinom 1: samo zapleti od jedne niti vraćaju se u početno stanje posle obrtanja jezgra za 2π dok dopuštaju nestajanje mase.

U modelu niti ***svi*** zapleti koji sadrže jednu zakrivljenu nit pripisuju se ***poznatim*** mernim bozonima. Model niti ispravno prikazuje i zato objašnjava spektar mernih bozona i kvantni broj svakog mernog bozona. Ukratko, nema prostora za dodatne merne bozone.

Drugim rečima, model niti predviđa da su svi merni bozoni, pa stoga sve interakcije već poznate. Zato imamo drugi dokaz – posle nepostojanja drugih mernih grupa – da iskažemo da u prirodi ne postoji druga merna interakcija. (***Strana 207***). (Oba dokaza protiv postojanja druge merne interakcije su u vezi: oba nastaju usled trodimenzionalnosti prostora.) Osim toga, ponovo nalazimo da velika unifikacija i supersimetrija u prirodi nisu dopuštene.



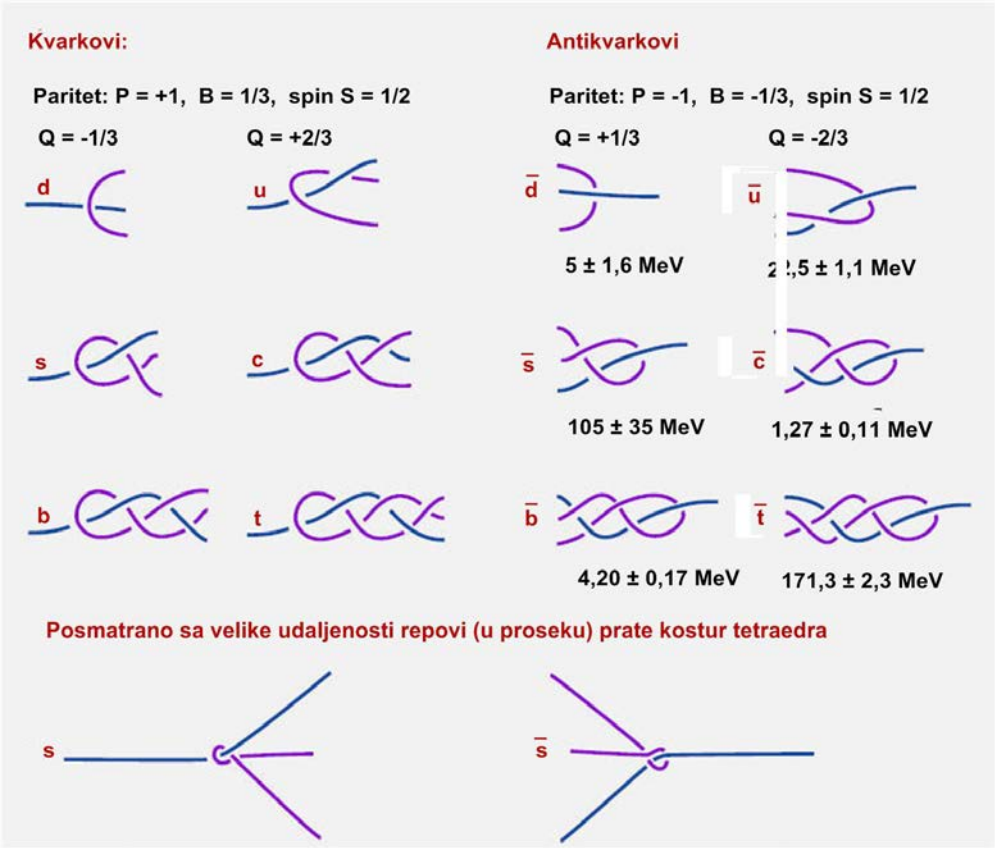
Slika 82 Mogući zapleti načinjeni od dve niti

ČESTICE NAČINJENE OD DVE NITI

U modelu niti zapleti čestica mogu takođe da budu načinjeni od ***dve*** niti. Primeri za sve klase zapleta od dve niti dati su na ***slici 82.*** Svaka klasa je dodeljena fizičkoj čestici.

- Najjednostavniji zaplet naćinjen od dve niti je ***trivijalan*** zaplet, prikazan kao primer 2a na ***slici 82.*** Trivijalan zaplet u modelu niti, kao i svi odvojivi zapleti, je ***složen*** sistem. Svaka od dve niti može da se predstavi ili kao vakuum ili kao baždarni bozon. Prosto rečeno, trivijalan zaplet od dve niti nije elementarna čestica.
- Najjednostavniji netrivijalni zaplet načinjen od dve niti je ***prosto ukrštanje***, prikazano kao 2b na ***slici 82***. U modelu niti, ukrštanja se javljaju kao deo W i Z bozona; osim toga, za neke konfiguracije repova, mogu da predstavljaju graviton ili najjednostavnije stanje donjeg kvarka, kao što ćemo videti u daljem tekstu.
- Nova klasa zapleta su ***racionalni zapleti***, predstavljeni kao 2c na slici. Racionalni zaplet je zaplet je takav zaplet koji može da se razpetlja samo kretanjem njegovih repova ***unaokolo***. (Takođe je primer 2b racionalan zaplet.) Racionalni zapleti se razlikuju od osnovnih i od lokalno uvezanih zapleta, prikazanih kao 2d i 2e, koji zahtevaju čupanje repova iz zapleta da bi se raspleli. Racionalni zapleti su zato slabo zapleteni. Kao što ćemo videti, racionalni zapleti predstavljaju graviton ili kvarkove; razmatraćemo ih detaljno u naredna dva odeljka. Složeniji racionalni zapletu viša su stanja prostiranja jednostavnijih zapleta.
- Sledeća klasa zapleta su ***osnovni zaplet*** za kojeg je primer 2d. Kao i kod složenijih zapleta od jedne niti, zaključujemo da osnovni zapleti nisu deo modela niti.
- Još jedna klasa zapleta su ***lokalno vezani zapleti***, prikazani kao primer 2e. Isto tako ova klasa ne pripada modelu niti.
- Konačno, ***zatvoreni zapleti***, ***veze*** i ***mešoviti zapleti*** prikazani u donjem redu na ***slici 82*** nemaju nikakvu ulogu u modelu niti – osim možda tokom vrlo ranog svemira ili u blizini horizonta.

Ukratko, jedini zapleti načinjeni od dve niti koji nas zanimaju u modelu niti jesu racionalni zapleti. Sada ćemo da ih detaljno istražimo.



slika 83 Prost zaplet pripisan kvarku i antikvarku. Radi reference date su takođe eksperimentalne vrednosti mase.

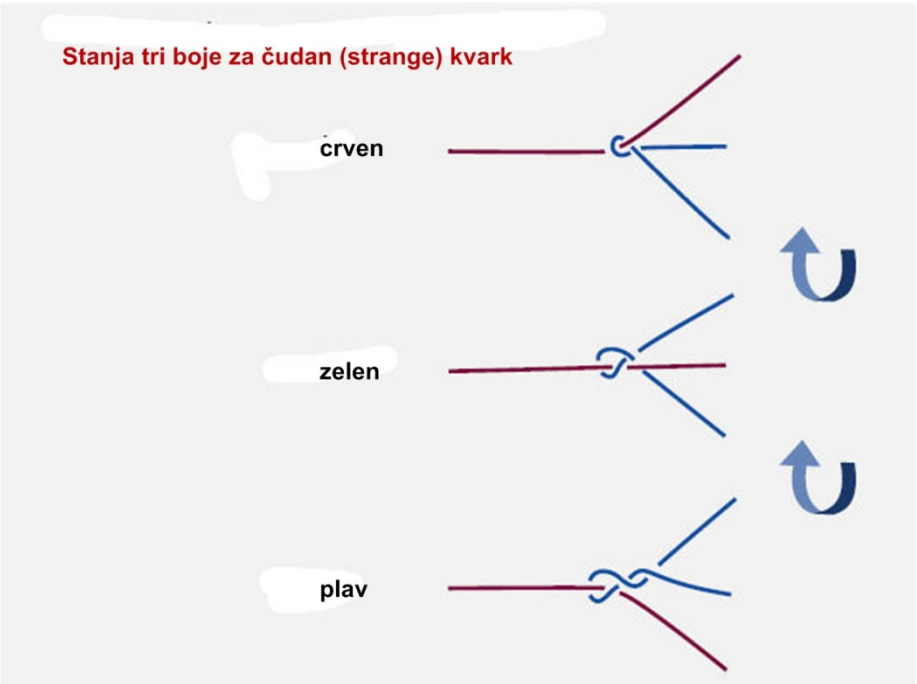
KVARKOVI

Istraživanja modela niti i jake interakcije pokazala su: zapleti fermiona sa bojom (***strana 203***), prema tome kvarkova, moraju biti racionalni, moraju pokazati tri opcije boja i moraju da prekinu simetriju tri opasača.

Najjednostavniji zaplet koji ispunjava ove zahteve prikazan je na ***slici 83***: zapleti kvarka su ***racionalni zapleti*** načinjeni od ***dve*** niti. Više generacije kvarka imaju veći broj ukrštanja. Četiri repa obrazuju kostur tetraedra. Čestica sa dve niti zapletena se na takav način automatski ima spin 1/2. Električni naboji kvarkova su 1/3 i -2/3, pridruživanje koje je posebno očigledno za gornje i donje kvarkove i koje će kasnije postati jasno, pri proučavanju hadrona. Paritet je prirodno dodeljen kao što je prikazano na ***slici 83***. Barionski broj i ostali kvantni brojevi ukusa – izospin, čudnost, šarmantnost, gornjost, donjost – prirodno su dodeljeni kao obično. Kvantni brojevi ukusa prosto "prebrojavaju" broj odgovarajućih zapleta kvarkova. Kao i svi lokalizovani zapleti, kvarkovi imaju slab naboj. Slab naboj ćemo istražiti sa više detalja u daljem tekstu. (***Strana 281***). Antikvarkovi su slika u ogledalu zapleta i imaju suprotne kvantne brojeve. U daljem tekstu (***strana 250***) i (***strana 257***) videćemo da ovo dodeljivanje prikazuje opažene kvantne brojeve svih mezona i bariona, kao i njihova ostala svojstva.

Primećujemo da je prosto ukrštanje jednostavnija verzija donjeg kvarka; bez obzira na to, on se razlikuje od svoje antičestice, pošto prosto ukrštanje meša sa pletenicom od 7 ukrštanja, 13 ukrštanja itd.; Ovo mešanje je zbog trika sa kožom, kao što je prikazano u daljem tekstu. Za svaki tip kvarka ove komplikovane pletenice razlikuju se od onih za njihove antičestice. (***Strana 242***).

Za svaki kvark četiri repa oblikuju kostur tetraedra. Na ***slici 83*** i ***slici 84*** kostur tetraedra je nacrtan sa jednim repom u ravni papira; od ostala tri repa za onaj srednji je predpostavljeno da je ***iznad*** ravni papira, a ostala dva repa su ***ispod*** ravni papira. To je bitno radi kasnijeg crtanja složenih kvarkova. Tri repa nam omogućavaju da prikažemo jaku interakciju i naboj bojom kvarkova: svaka boja je jedno od tri moguća usmerenja u prostoru; još preciznije, tri boje potiču od tri moguća načima preslikavanje zapleta kvarka u tri strukture opasača. (***Strana 201***). Svaka boja odgovara drugačijem izboru za rep koji leži iznad ravni papira, kao što je prikazano na ***slici 84***. Interakcije boje kvarka biće razvrstane u odeljku o mezonima. (***Strana 250***).

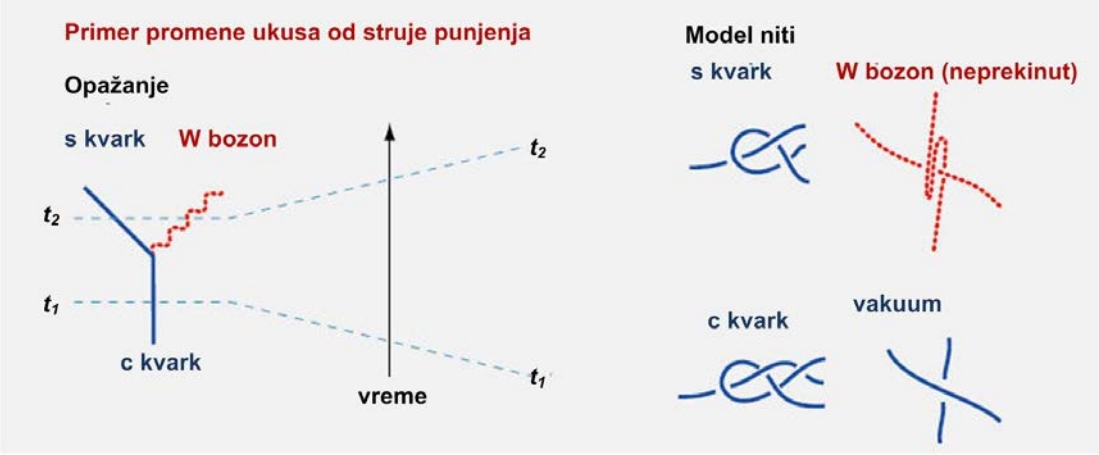


Slika 84 Tri naboja boje odgovaraju trima mogućim usmerenjima u prostoru; centralni rep na desnoj strani uvek je iznad ravni papira, ostala dva repa na desnoj strani su ispod ravni papira.

Zapleti kvarka u modelu niti stoga nose ***boju***. U prirodi nije opažena nijedna obojena čestica. model niti prikazuje ovo opažanje na više načina. Pre svega, svi leptoni i barioni neutralni su u pogledu boje., kao što čemo uskoro da vidimo. Drugo, samo zaplet slobodnog kvarka, kao što je pokazano na ***slici 83***, imaju određeno stanje boje, jer imaju stalno usmerenje u prostoru. Treće, stanja slobodnih kvarkova, stoga stanja kvarkova u konfiguraciji tetraedra sa ***slike 83***, ne uklapaju se u vakuum čak i na velikim udaljenostima od jezgra; prema tome, kvarkovi nose beskonačno veliku energiju. To praktično znači da se stanja slobodnog kvarka ne pojavljuju u prirodi. Zaista, slobodan obojen zaplet kvarka može da smanji svoju energiju

interakcijom sa jednim ili više drugih kvarkova. Rezultat je jako privlačenje boje između kvarkova što dovodi do bezbojnih složenosti.

Ukratko, u modelu niti takođe postoje samo bezbojne složenosti kvarkova kao stabilne slobodne čestice. (***Strana 250***). Mi ćemo uskoro detaljno da istražimo složenosti kvarkova i pitanje ograničenja kvarkova. (***Strana 254***)



Slika 85 Apsorpcija ili emisija W bozona menja ukus kvarka.

U prirodi su kvarkovi sa slabim nabojem i u interakciji sa W bozonima. U modelu niti apsorpcija i emisija W bozona je operacija koja uzima zaplet kvarka i dodaje mu, ili oduzima, od njega upleten korak. Ovaj proces je prikazan na ***slici 85***, koja prikazuje operaciju uplitanja (rasplitanja) koja odgovara emisiji (apsorpciji) W bozona pre prekida simetrije. Jednostavno je da se proveri da ova operacija ispunjava sve zakone održanja i osobine koje su opažene kod ovih takozvanih ***struja naboja promene ukusa***. Apsorpcija ili emisija (neprekinutog) Z bozona nema efekt uplitanja. Zato model niti prikazuje rezultat da samo slab bozon sa nabojem može da promeni ukus kvarka, kao što je i opažano.

Radi potpunosti, pominjemo da kvarkovi, budući da su zapleti od dve niti, imaju leptonski broj koji iščezava. U stvari, kao što ćemo videti u tekstu koji sledi (***strana 244***), zapleti leptona načinjeni su od ***tri*** niti.

Sažeto, svi kvantni brojevi kvarkova prikazani su u modelu niti, sve dok su kvarkovi modelirani kao pletenica od dve niti sa krajevima usmerenim duž temena tetraedra.

GENERISANJE KVARKOVA

Naglašavamo da zapleti kvarkova prikazani na ***slici 83*** predstavljaju najjednostavnije zaplete za svaki od kvarkova. Pre svega, preslikane su duže pletenice za svaki od šest kvarkova. To je u vezi sa trikom pletenice od kožom[1] prikazanom na ***slici 86***. Ovaj trik je poznat svim ljudima koji rade u trgovini sa kožom: ako pletenica od tri niti ima $n \geq 6$ ukrštanja, ona može da se izoblići u pletenicu sa n – 6 ukrštanja. Zbog trika sa kožom ne postoji način da se uvede više od 6 kvarkova u model niti. Drugim rečima, model niti za kvarkove podrazumeva da postoji samo 6 kvarkova, to jest samo tri generacije.

Slika 86 Trik sa kožom je proces izobličavanja koji menja ove dve strukture jednu u drugu; to ograničava strukture načinjene od tri niti na šest osnovnih vrsta.

Ustvari, dokaz trika sa kožom predpostavlja da se kraj pletenice – te stoga i krajevi svih niti – može kretati kroz pletenicu. U modelu niti to se događa na horizontu, području gde prostor (i vreme) nije dobro određen i gde takva postupci mogu da postanu mogući. Mala verovatnoća takvog procesa biće bitna pri određivanju masa kvarkova. (***Strana 270***).

[1] Video prikaz trika sa pletenicom od kože može se videti na youtube www.youtube.com/watch?v=E0nQRuFZ_w4

Prostije je da se predpostavi da su pletenice sa većim brojem ukrštanja preslikane sa modulom 6 (ostatak deljenja sa 6) u pletenice sa manjim brojem ukrštanja. To je dosledno, pošto je pletenica sa 6 dodatnih ukrštanja preslikana u česticu zajedno sa virtualnim Higsovim bozonom. Pravilo modula 6 stoga prevodi Jukavin (Yukawa) mehanizam generisanja mase u modelu niti. (***Strana 248***).

Sažeto, u modelu niti svaki kvark nije samo predstavljen zapletom prikazanom na ***slici 83***, već takođe zapletima sa 6 dodatnih ukrštanja, sa 12 dodatnih ukrštanja itd.

Kao matematičku proveru, možemo se zapitati da li su ***svi*** racionalni zapleti preslikani u kvarkove. Racionalni zapleti veće složenosti pojavljuju se uzastopnim uvijanjem bilo kojeg para repova zapleta kvarka. Ovaj proces proizvodi beskonačan broj složenih zapleta od dve niti. U modelu niti takvi zapleti su okruženi virtualnim česticama. Ekvivalentno tome, možemo reći da su složeni racionalni zapleti koji se ne pojavljuju na ***slici 83*** ono što proširuje kvarkove višeg reda. (***Izazov 189e***).

GRAVITON

Jedan racionalan zaplet načinjen od dve niti je poseban. (***Strana 222***) Ovaj poseban zaplet prikazan je (ponovo) na ***slici 87***. On se razlikuje od zapleta kvarka po jednom svojstvu: repovi su paralelni (i blizu) jedan drugom, pa zato leže u ravni, Njegovo jezgro zapleta vraća se u početno stanje posle obrtanja za π, i zato modelira ćesticu sa spinom 2. Zaplet nije vezan i nije lokalizovan; zato nema masu, nema električni ni slab naboj. On nema takođe ni naboj boje, kao što se i očekuje od gravitona. Slični zapleti sa većim brojem uvrtanja predstavljaju više redove u teoriji poremećaja gravitacije.

U poglavlju o gravitaciji (***strana 211***) već je pokazano kako gravitoni dovode do zakrivljenosti, horizonata i jednakostima polja opšte teorije relativnosti

Slika 87 Graviton prikazan u modelu niti

GLUONSKE LOPTE

Još uvek ne postoje dokazi opažanja gluonskih lopti, premda simulacije kvantne hromodinamike na rešetkama predpostavljaju postojanje nekoliko takvih stanja u opsegu masa na 1,5 GeV/c^2. (***Ref. 213***), (***Ref. 214***). Nepostojanje eksperimentalnog dokaza obično se objašnjava jakom šumom pozadine u reakciji koja proizvodi gluonske lopte i očekivanim jakim mešanjem sa mezonima sličnih kvantnih brojeva, Eksperimentalna traganja za gluonskim loptama još uvek su u toku

Očekuje se da je gluonska lopta najmanje mase sastavljena od dva gluona. U modelu niti gluonska lopta načinjena od dva gluona bila bi načinjena od dve krive niti. Međutim, izgleda da model niti gluona ne dopušta takav zaplet.

Može li situacija, u kojoj su dva gluona povezana na takav način da su četiri repa uzajamno normalna i razapeta nad prostorom, dovesti u proseku do spina vrednosti nula? Pitanje gluonskih lopti zahteva mnogo preciznije istraživanje.

Bilo kakva da bi mogla da bude situacija sa gluonskim loptama, model niti gluona izgleda protivrečno modelu gluonskih lopti kao čvora koji su predložili Buniy i Kephart (***Ref. 215***) ili Niemi (***Ref. 217***). Ovi modeli se zasnivaju na ***zatvorenim*** čvorovima, a ne na zapletima sa repovima. Izgleda da model niti ne dopušta realne čestice sa ***spinom nula*** koje su sastavljene od gluona. S druge strane, ako su zatvoreni čvorovi na neki način u modelu niti mogući, oni bi podrazumevali postojanje gluonslih lopti.

Sažeto, pitanje gluonskih lopti nije rešeno; konačno rešenje bi možda dovelo do dodatnih provera modela niti. (***Izazov 190ny***).

PROBLEM PRAZNINE MASE I KLEJ MATEMATIČKI INSTITUT

Matematički institut Klej (Clay Mathematics Institute) nudi veliku nagradu svakom ko dokaže sledeći iskaz: ***Za svaki prostu neabelijsku grupu merila postoji kvantna teorija merila u neprekinutom četvoro-dimenzionalnom prostor-vremenu i proizvodi prazninu mase***. (***Ref. 216***). Ovo je jedan od njihovih takozvanih ***milenijumskih problema***.

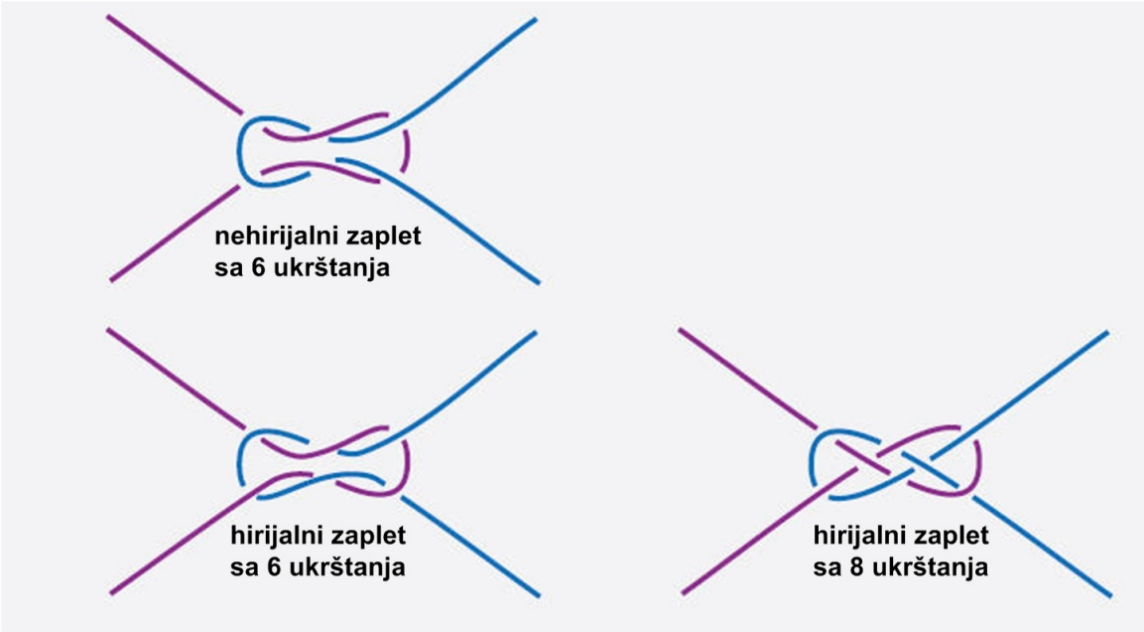
Model miti ne dopušta proizvoljne grupe merila u kvantnoj teoriji polja. Prema modelu niti jedina prosta neabelijska grupa merila koja nas zanima je SU(3), grupa merila jake nuklearne interakcije. A pošto izgleda da model niti ne dozvoljava gluonske lopte, predpostavlja se za SU(3) efektivna praznina mase reda Plankove mase. (Ako bi gluonske lopte postojale u modelu nitu, praznina mase bi ipak postojala, ali bi bila manja.) U stvari, model niti objašnjava kratak opseg jake interakcije kao posledicu detalja III poteza Rajdemajstera i topologije zapleta kvarka.

Model niti osim toga izražava sa su prostor-vreme i grupe merila približnosti niske energije, pošto ne postoje ni tačke ni polja na osnovnom nivou; tačke i polja su približnosti nitima. Prema modelu niti kvantna svojstva prirode rezultat su proširenja niti. Kao posledica toga, model niti negira postojanje ***bilo koje kvantne*** teorije merila kao posebne, tačne teorije ***neprekinutog*** prostor-vremena.

Sažeto, model niti ne predviđa prazninu mase za SU(3); međutim, model niti takođe negira postojanje kvantne teorije merila za bilo koju drugu kompaktnu prostu neabelovu grupu merila. Čak i u slučaju SU(3) on negira – kao i za bilo koji drugu grupu merila – postojanje kvantne teorije merila u neprekinutom prostor-vremenu. Kao što je izvedeno u predhodnom tekstu (***strana 207***), model niti dopušta samo tri poznate grupe merila i dopušta njihovo postojanje samo u diskretnom modelu niti prostor-vremena. Ukratko, nemoguće je da se ispuni želja matematičkog instituta Klej.

ZAGONETKA

Tema zapleta od dve niti zahteva takođe da se reši zagonetka sa ***slike 88***. Kojem fizičkom stanju odgovaraju tri prikazana zapleta? (***Izazov 191s***).



Slika 88 Koja stanja čestice su opisana ovim zapletima.

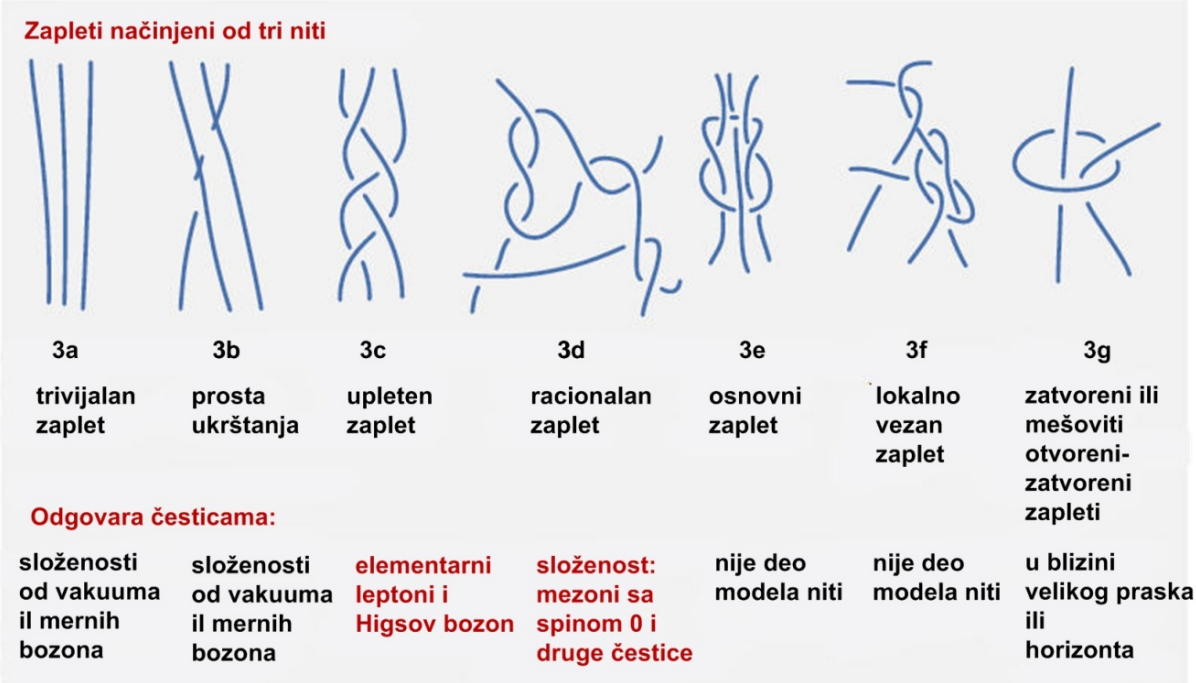
ZAKLJUČAK O ZAPLETIMA SA DVE NITI

Sažeto, model niti predviđa da osim šest kvarkova i gravitona u prirodi ne postoje druge čestice načinjene od dve niti. Što se tiče složenih čestica, pitanje gluonskih lopti načinjenih od dve niti nije rešeno u potpunosti, ali ukazuje u pravcu nepostojanja.

Kvarkovi i gravitoni, elementarne čestice načinjene od dve niti, ***racionalni*** su zapleti. Njihov model niti stoga nije zapleten na složen način, već je zapleten na ***najmanje moguć složen*** način. Ova povezanost će biti bitna u našoj potrazi za elementarnim česticama koje još nisu okrivene.

ČESTICE NAČINJENE OD TRI NITI

Sledeća grupa čestica u modelu niti načinjena je od ***tri*** niti. Primeri za sve klase zapleta od tri niti dati su na ***slici 89***. Pokazalo se za nekoliko klasa zapleta od tri niti da su složenosti čestica načinjenih od dve niti. Međutim, brojni zapleti su novi i predstavljaju elementarne čestice.

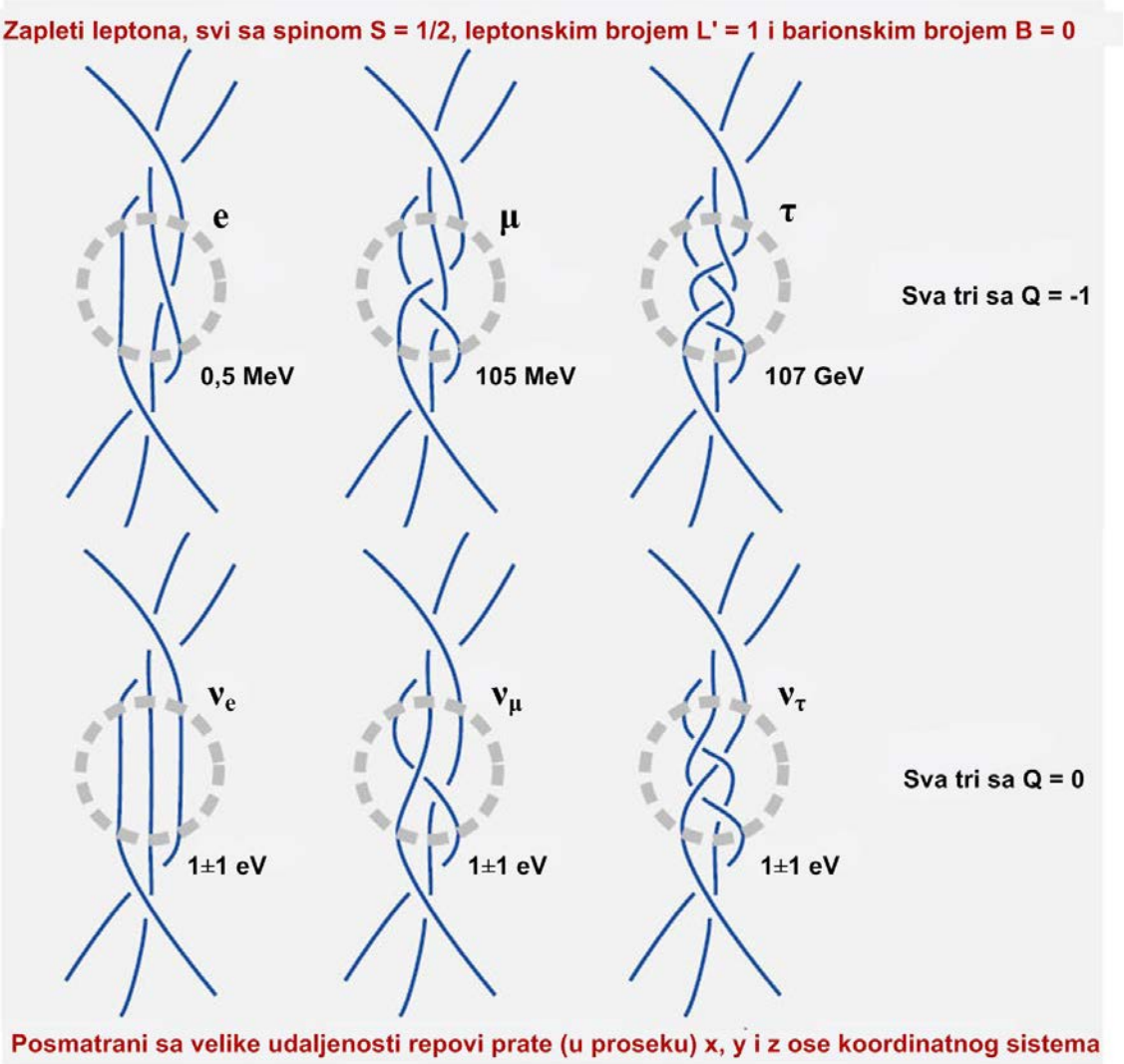


Slika 89 Primeri za sve klase zapleta načinjenih od tri niti

LEPTONI

Kandidati zapleta za leptone su najprostiji mogući netrivijalni zapleti od tri niti. Kandidati zapleta prikazani su na ***slici 90***. Zapleti leptona jednostavne su pletenice sa repovima koji dosežu do granice prostora. Šest repova je upereno duž koordinatnih osa. Ovi upleteni zapleti imaju sledeća svojstva.

- Svaki lepton je lokalizovan. Svaki lepton ima masu i ima spin 1/2, te stoga prati Dirakovu jednakost. Svali lepton ima dve hirijalnosti (usmerenje spina) i slab naboj.
- Leptoni i antileptoni se razlikuju. Naročito se razlikuju neutrini i antineutrini i – ponovo – predviđa se da oba ispoljavaju obe hirijalnosti.
- Tri od ovih zapleta su hirijalni, prema tome električno nabijeni, a ostala tri zapleta su nehirijalni, pa stoga bez naboja.
- Prostorni paritet zapleta leptona sa nabojem suprotan je od onog za njegovu antičesticu.
- Budući da su načinjeni od niti, zapleti leptona imaju naboj bojom koji nestaje i barionski broj koji nestaje.
- Nasuprot kvarkovima, zapleti leptona mogu da se umetnu u vakuum korišćenjem lokalizovane, to jest konačne količine energije, i zato se predpostavlja da postoji kao slobodna čestica
- Tri leptonska broja (ukusi) mogu da se dodele kao i obično; leptonski brojevi očuvani su u reakcijama, osim efekta mešanja neutrina, kao što ćemo videti u daljem tekstu.
- Model niti predviđa da je elektron, zaplet sa nabojem i najmanjom masom, stabilan, pošto ne postoji način da se on raspadne i sačuva naboj i spin. Za ostale dve generacije predviđa se da su nestabilne, usled slabog raspada koji uprošćava njihovu topologiju.
- Broj generacija je prikazan modelom niti, jer svaka komplikovanija pletenica može da se posmatra kao ekvivalent jednoj od prvih šest pletenica, uz isti dokaz Higsovog trika sa kožom koji ograničava broj kvarkova.



Slika 90 Najjednostavniji zapleti leptona, dati sa eksperimentalnim vrednostima masa. Antileptoni su slika zapleta u ogledalu.

- Postoji prirodno preslikavanje između šest kvarkova i šest leptona koje se pojavljuje ako je krajnji zavoj "dugačke" niti kvarka produžen do granice prostora, čime pretvara pletenicu kvarka od dve niti u pletenicu leptona od tri niti. Zato dobijamo zajedničku generaciju za kvarkove i leptone.
- Niti neutrina razlikuju se po uplitanju repova; model niti predviđa stoga slabu interakciju mešanja neutrina.
- Svi zapleti leptona razlikuju se međusobno. Zato je vrednost mase različita za svaki lepton.
- Usled male količine zaplitanja, model niti predviđa da su mase leptona mnogo manje od onih za W i Z bozon. To je zaista i opaženo. (To predpostavlja povezanost između mase i ukupne zakrivljenosti tesnog zapleta.)
- Najjednostavnija nit za elektronski neutrino takođe predpostsvlja da je vrednost mase elektronskog neutrina prirodno mala, pošto njegov zaplet skoro da i nije zapleten.
- Model niti predviđa da se leptoni povećavaju sa brojem generacija. Pošto mase neutrina još uvek nisu precizno poznate, ovo predviđanje ne može još da bude provereno.

Sažeto, zapleti od tri niti imaju tačno kvantne brojeve i svojstva leptona. Model niti posebno predviđa tačni tri generacije leptona, a za neutrine se predviđa da su Dirakove čestice (***Ref. 218***). Time se podrazumeva da traganje za dvostrukim beta raspadom bez neutrina treba da daje negativne rezultate, da bi magnetni momenti neutrina trebalo da imaju prekomerno male vrednosti preedviđene standardnim modelom fizike čestica, te da bi retki mioni u drugi raspadi trebalo da se pojave u manjoj meri predviđenoj u standardnom modelu. (***Ref. 219***).

OTVOREN IZAZOV: NAĆI BOLJI DOKAZ ZA ZAPLETE LEPTONA

Dokaz koji dovodi do zapleta leptona je nejasan. Rasporedi zapleta možda zahtevaju ispravke.. (Popravljeni zapleti možda rešavaju različite odrednice naboja za leptone koji su pomenuti u daljem tekstu.) (***Strana 283***). Možete li da popravite situaciju? (***Izazov 192ny***).

HIGSOV BOZON – POGREŠAN ODELJAK IZ 2009. GODINE

Postojanje Higsovog bozona predpostavljeno je iz standardnog modela fizike elementarnih čestica korišćenjem dva dokaza. Pre svega, Higsov bozon sprečava narušavanje jedinstva u uzdužnom rasejavanju W-W i Z-Z bozona. Drugo, Higsov bozon potvrđuje mehanizam prekida simetrije SU(2) i povezanog mehanizma generisanja mase fermiona. Kvantna teorija polja predviđa da Higsov bozon ima spin 0, da nema električni ili jak naboj i ima pozitivne C i P paritete. Drugim rečima, za Higsov bozon predviđena su, osim njegovog slabog naboja, isti kvantni brojevi kao za vakuum.

slika 91 Zaplet kandidat za Higsov bozon u modelu niti: otvorena verzija (levo) i odgovarajuća zatvorena verzija (desno). Za levu verziju repovi se približavaju u do 6 koordinatnih osa u beskonačnosti.

U modelu niti izgleda da je jedini moguč zaplet, kandidat za Higsov bozon, prikazan na levo na ***slici 91***. Zaplet ima pozitivan C i P paritet, ima električni i jak naboj koji nestaju. Zaplet takođe odgovara zapletu dodatog trikom kože; zato može da se posmatra kao prikaz kako Higsov bozon daje masu kvarkovima i leptonima. Međutim, postoje i dva pitanja u vezi ovog kandidata. Prvo, zaplet je izobličena verzija višeg reda zapleta elektronskog neutrina. Drugo, vrednost spina nije 0. Ustvari, uopšte ne postoji način da se u modelu niti konstruiše zaplet sa spinom 0. Ova pitanja dovode do preispitivanja dokaza za postojanje Hugsovog bozona u celini.

Videli smo da model niti predlaže jasan mehanizam za generaciju mase. (***Strana 189***).

- Masa nastaje usled uplitanja niti.

Ovaj mehanizam, nastao usled slabe interakcije, objašnjava odnose masa W i Z bozona, kao što ćemo videti u daljem tekstu. (***Strana 269***). Trik sa kožom koji objašnjava mase fermiona može da se posmatra kao dopuna šestostrukom uplitanju repova. Retkost procesa uplitanja posebno objašnjava zašto su mase čestica toliko manje od Plankove mase. Ukratko, model niti objašnjava mase ***bez*** Higsovog bozona.

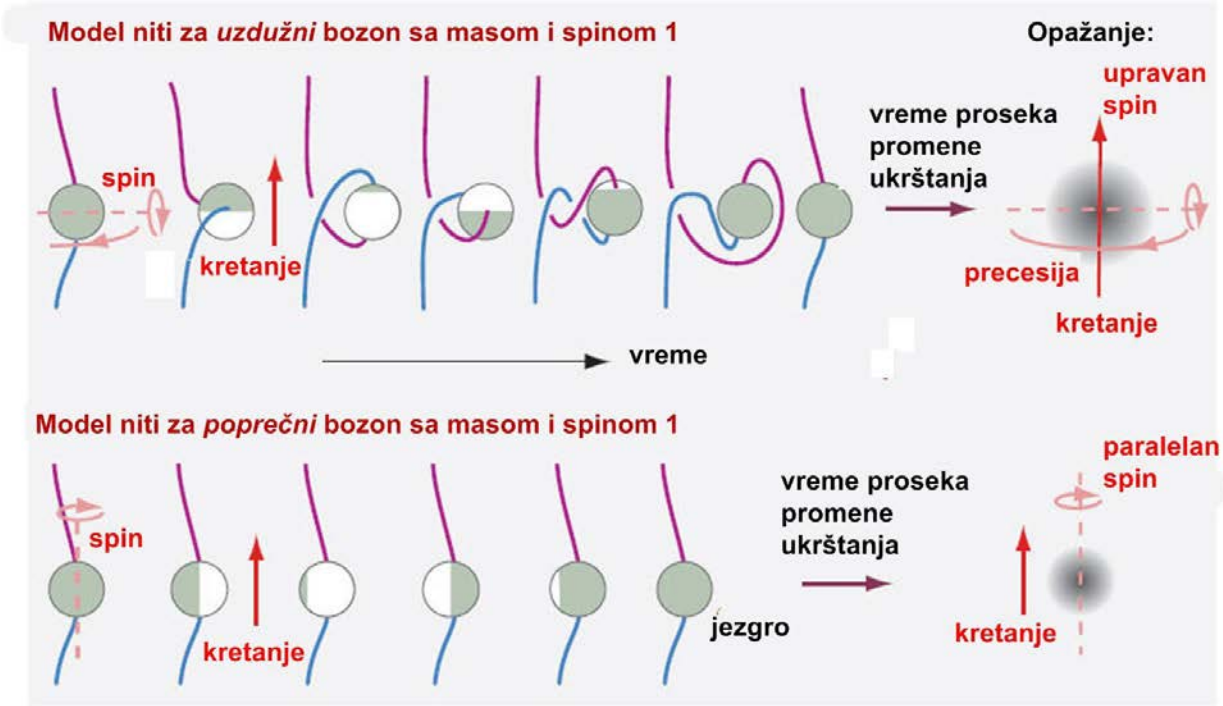
Ako Higsov bozon ne postoji, kako se održava jedinstvenost uzdužnog rasipanja W i Z bozona? Model niti izražava da su interakcije zapleta pri sudaru čestica opisane izobličanjem zapleta. Izobličenja zapleta su za uzvrat opisane jediničnim operatorima. (***Strana 161***). Prema tome, model niti predviđa da jedinstvenost nikada nije narušena u prirodi. Posebno, model niti automatski predviđa da uzdužno rasipanje W i Z bozona ne natušava jedinstvenost.

Drugim rečima, model niti predviđa da konvencionalni dokazi o narušavanju jedinstvenosti, koji zahtevaju Higsov bozon, mora da se pogrešni. Kako je to moguće? Postoje bar dve nedoslednosti dostupne u istraživačkoj literaturi, a model niti prepoznaje obe. (***Ref. 220***).

Prva poznata nedoslednost je pojava neperturbativnih efekata. Poznato je već duže vreme da neperturbativni efekti mogu da oponašaju postojanje Higsovog bozona u uobičajenim približnostima poremećaja. U tom slučaju bi model niti mogao da ostaje važeći pri visokim energijama bez Hihsove oblasti. (***Ref. 221***). Ova vrsta prekida elektroslabe simetrije dovodila bi do uzdužnog rasipanja W i Z bozona što nebi narušavalo jedinstvenost.

Druga nedoslednost u dokazu jedinstvenosti pojavljuje se kada istražujemo detalje procesa uzdužnog rasejavanja. U modelu niti uzdužni i poprečni W ili Z bozoni modelirani su kao što je prikazano na ***slici 92***. Za uzdužne bozone spin i njegova precesija dovode do različite situacije no za poprečne bozone: uzdužni bozoni su ***više razmešteni*** no poprečni bozoni. To nije isti slučaj kao za fermione, gde trik sa opasačem dovodi do istog razmeštanja za uzdužnu i poprečnu polarizaciju. Zanimljivo je takođe da je već dugo vremena poznato da različita razmeštanja za uzdužne i poprečne bozone zadržavaju jedinstvo rasipanja, i

da je u slučaju razmeštanja pogrešan uobičajen dokaz za neophodnost Higsovog bozona. (***Ref. 222***). To su dobro poznate posledice takozvane ***nelokalne regularizacije*** u kvantnoj teoriji polja. Model niti zato daje specifičan model za ovu nelokalnost, a istovremeno objašnjava zbog čega se javlja samo za uzdužne W i Z bozone.



Slika 92 Poprečni i uzdužni bozoni različiti su u modelu niti. (Primedba dodana 2012. godine: iskaz je pogešan.

Pitanje različitog ponašanja rasipanja za uzdužne i poprečne slabe bozone takođe postavlja pitanje da li su mase uzdužnih i poprečnih bozona potpuno jednake. Mogućnost, pokrenuta ***slikom 92***, možda na prvi pogled izgleda privlačno za rešenje problema objedinjavanja. Model niti, međutim, zabranjuje takve različitosti masa. U modelu niti masa nastaje usled kolebanja zapleta, ali ne zavisi od smera spina.

Drugim rečima, model niti predviđa da je rasipanje uzdužnih W i Z bozona prvi sistem koji će pokazati efekte specifične za model niti. Takva preciznost eksperimenta rasipanja možda je moguća u LHC (Large Hadron Colider) u Ženevi.

Ovi eklsperimeti će omogućiti proveru ***neperturbativnih efekata*** i ***efekara regularizacije*** koji predpostavlja model niti. Na primer, model niti predviđa da se talasna funkcija uzdužno i poprečno polarizovanog W ili Z bozona istih energija razlikuje u preseku.

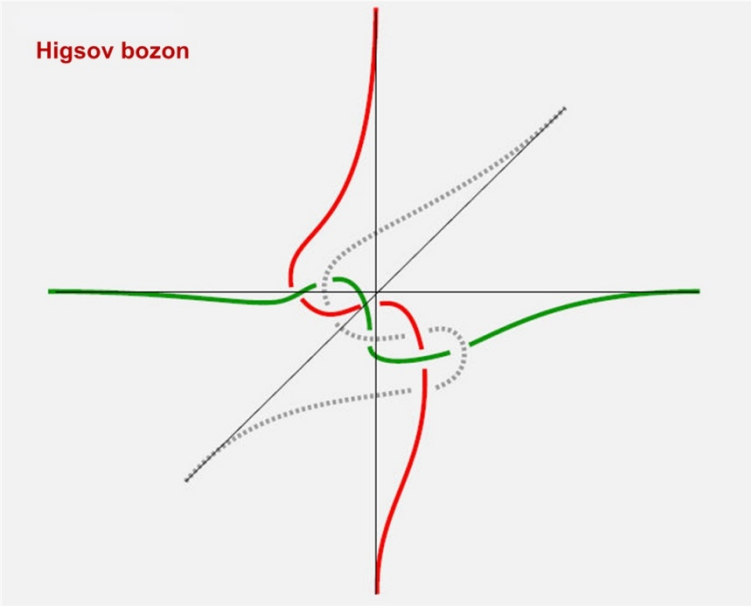
Sažeto, model niti predviđa amplitudu rasipanja dobrog ponašanja za uzdužni W i Z bozon rasute u opsegu TeV, zajedno sa odsustvom Higsovog bozona.[1] Model niti objašnjava stvaranje mase i nepostojanje narušavanja jedinstvenosti u rasipanju uzdužnih W ili Z bozona kao posledicu uplitanja repova, to jest, kao neperturbativne u nelokalne efekte, a ne kao posledicu elementarnog Higsovog bozona sa spinom 0. Predstojeći eksperimenti u Large Hadron Collider u Ženevi proveriće ove predpostavke.

HIGSOV BOZON – ISPRAVLJEN ODELJAK IZ 2012. GODINE

U julu 2012. godine istraživači CERN-a objavili su opažanja iz dva odvojena eksperimenta novog neutralnog bozona sa masom od 125 GeV. Dodatnim analizama podataka pokazalo se da taj bozon ima spin 0 i pozitivan paritet. Sve eksperimentalne provere potvrdile su da se bozon ponaša kao Higsov bozon, kojeg su predpostavili 1964. godine Piter Higs (Peter Higgs) i brojni drugi istraživači.

---

[1] Ako se dokazi protiv Higsovoh bozona pokažu kao netačni, tada model niti može da se spase prljavim trikom: mogli bismo da se raspravljamo da zaplet na levoj strani ***slike 91*** možda efektivno ima spin 0. U tom slučaju dužina užeta Boromeovih prstenova, 29,03, zajedno sa dužinom užeta slabih bozona, dovodi do predviđanja Higsove mase, u prvom redu, u opsegu od $(29.03/10,1)^{1/3} \cdot 80,4$ GeV = 114 GeV do $(29.03/13,7)^{1/3} \cdot 91,2$ GeV = 117 GeV plus ili minus nekoliko procenata



Slika 93 Zaplet Higsovog bozona u modelu niti. Spin 0 se pojavljuje zbog toga što repovi mogu da budu usmereni u različitim smerovima, tako da vremenski prosek ima loptastu simetriju. Zaplet ima 9 ukrštanja: 3 ukrštanja se javljaju već u vakuumskoj konfiguraciji tri niti, a ostalih 6 ukrštanja nastaju usled Higsovog bozona

Rezultati su doveli u pitanje nekoliko iskaza načinjenih 2009. godine u predhodnom odeljku.

- Da li je zaplet na levoj strani ***slike 91*** zaista verzija višeg reda elektronskog neutrina?. Izgleda da je iskaz pogrešan: nasuprot zapletu za neutrino, zaplet na ***slici 91*** je nehirijalan.
- Da ji zaplet ***sa slike 93*** ima spin 1/2 ili 0? Kao što je već pomenuto 2009. godine efektivan spin 0 možda je moguć, na sličan način na koji je moguć za mezone sa spinom 0. Ponašanje spina 0 pojavljuje se zato što zaplet može da se usmeri u različitim smerovima; vremenski prosek ovih usmerenja ima loptastu simetriju.
- Da li zaplet sa ***slike 93*** ima ispravne vrednosti C i P pariteta koje se očekuju od Higsovog bozona? Izgleda da ima.
- Da li je pomenuti nelokalni efekt za W i Z bozone stvaran? Ako bi efekt bio stvaran, on bi trebalo da se pojavi i za ostale čestice sa spinom 1. U modelu niti vrednost mase nebi trebalo da zavisi od usmerenja spina, već samo od topologije jezgra zapleta. Iskaz načinjen 2009. godine o delokalizaciji i uzdužnom rasipanju izgleda pogrešan posmatran retrospektivno.
- Da li pridruživanje zapleta sa slike Higsovom bozonu može da se proveri? Da; svako pridruživanje zapleta mora da daje opaženu vrednost mase i opažene stepen uplitanja i stope raspada. To je predmet istraživanja. Međutim, već na kvalitativnom nivou predložena struktura zapleta Higsovog bozona predpostavlja raspade u leptone što je slično onome što je opaženo u CERN-u.
- Da li je zaplet sa ***slike 93*** elmentaran? Jeste.
- Postoje li drugi mogući zapleti za Higsov bozon? Pitanje je otvoreno. Struktura pletenice izgleda da je najprivlačnija struktura, pošto ona realizuje efekt uplitanja repova, efekt koji je bitan za pojavu mase. (***Strana 274***).
- Da li su čvorovi i veze, to jest, zatvoreni zapleti, zaista zabranjeni? Razmatranja o Higsovom bozonu usmerena su na otvorene zaplete prikazane na ***slici 93***, a ne na Boromeove veze prikazane na desnoj strani ***slike 91***. Do sada ne postoji dokaz za zatvorene zaplete u modelu niti. Takav dokaz bi značio napuštanje ideje da je priroda pojedinačna nit.
- Da li pitanje Higsovog bozona stavlja upitnik na model niti u celosti? Pre svega, prekid simetrije SU(2) je van uticaja. Drugo, pogrešno pripisivanje zaplet-ćestica može da bude smešteno u model niti; nove sile ili simetrije ne mogu. Zbog toga model niti nije doveden u pitanje.
- Može li da postoji nekoliko vrsta Higsovih bozona, možda i sa nabojem? Nijedan takav zaplet ne izgleda moguć – sve dok zaplet sa dve niti Higsovoih jezgara sa ***slike 93*** u redosledu nisu različite čestice.

- Da li je neki drugi efekt modela niti propušten? Mogu li da postoje druge elementarne ili složene čestice? Na primer, struktura Higsovog bozona mogla bi da se posmatra kao da predpostavlja da se porodica leptona ponovo pojavljuje (grubo) na svakih 125 GeV. Da li je to slučaj? Pitanje nije još uvek rešeno. Izgleda verovatnije da ovi zapleti viših redova prosto daju ispravku Higsove mase.

Ukratko, postojanje standardnog modela Higsovog bozona izgleda da je u skladu sa modelom niti. Greške iz 2009. godine u vezi modela Higsovog bozona pokazuju takođe da istraživanje modela niti nije još dovršeno. Posebno pošto model niti nije bio falsifikovan otkričem Higsovog bozona.

Pod predpostavkom da je Higsov zaplet na ***slici 93*** tačan, imamo intuitivan predlog za mehanizam koji proizvodi masu, naime uplitanje repova. Predložen Hihsov zaplet takođe omogućava brojna eksperimentalna predviđanja.

PREDVIĐANJA O HIGSU IZ 2012. GODINE

- Higsov zaplet podrazumeva Higsov bozon sa nabojem koji nestaje i pozitivnim paritetom, budući da je elementaran – što je i opaženo.
- Higsov zaplet dopušta nam da odredimo odnos mase Higs/Z. Korišćenjem početnog modela čvora za W i Z bozone, procene su u oblasti opaženih vrednosti. Određivanje procena još uvek je tema istraživanja.
- Higsov zaplet i model niti podrazumeva da je standardni model tačan do Plankove energije, a da vrednost Higsove mase treba to da odražava. Opažena Higsova masa od 125 GeV slaže se sa ovim očekivanjima.
- Prema tome, model niti predpostavlja da nebi trebalo da postoje odstupanja između standardnog modela i podataka koji su ikad opaženi u bilo kojem eksperimentu.
- Model niti ponovo i dosledno predviđa odsustvo supersimetrije.
- U slučaju da postoji nekoliko Higsovih bozona ili da ne može da se primeni Higsov zaplet, model niti je u problemu.
- U slučaju da se opažaju efekti, čestice ili interakcije izvan standardnog modela, model niti je u problemu.

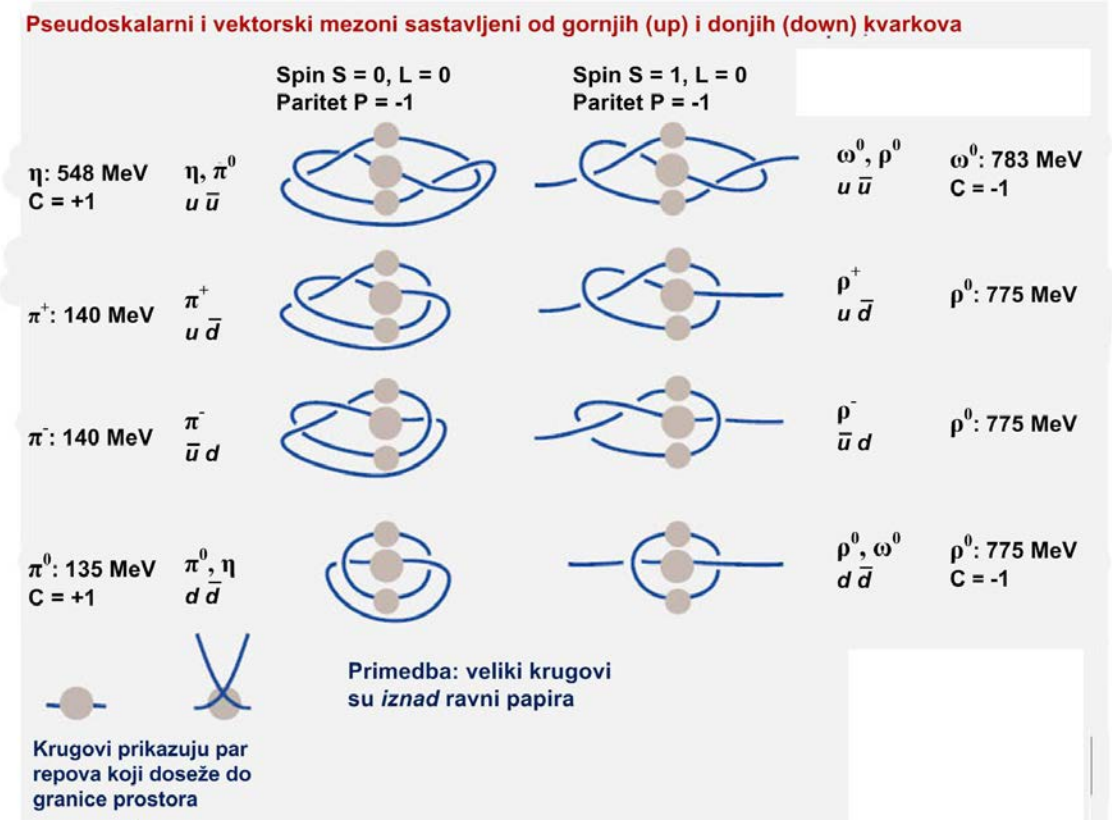
MEZONI KVARK-ANTIKVARK

U modelu niti svi zapleti sa tri niti, osim za leptone, kao i svi zapleti sa četiri niti, predstavljaju ***složene*** čestice. Prvi primer su ***mezoni***.

Racionalni zapleti sa tri niti u modelu niti su kvark-antikvark mezoni sa spinom 0. Zaplet kvarka daje prost model ovih ***pseudoskalarnih*** mezona, prikazanih na levim stranama ***slike 94***, ***slike 96*** i ***slike 97***. Na desnim stranama ovih slika prikazani su ***vektorski*** mezoni, stoga sa spinom 1, koji se sastoje od ***ćetiri*** niti. Svi zapleti su racionalni. Unutar mezona, kvarkovi i antikvarkovi "povezani" su u tri tačke koje obrazuju trougao usmeren upravno na usmerenost veze i na ravan papira. Da bi se povećala jasnost, "veza" je na slikama nacrtana kao krug; međutim, ona se sastoji od dva ukrštena (vezana) repa posmatranih niti koje dopiru do granice prostora, kao što je prikazano na ***slici 95***.

Uz ovu konstrukciju, mezoni načinjeni od dva kvarka mogući su jedino za tip $\bar{q}\,q$. Ostale kombinacije kao što su $q\,q$ ili $\bar{q}\,\bar{q}$ pokazalo se da su nepovezane. (***Ref. 223***). Primećujemo neposredno da ovaj model mezona podseća na početni model niti hadrona iz 1973. godine (***Ref. 224***), ali takođe i na Lungov model niti i nedavni model niti kvantne hromodinamike. (***Ref. 225***).

Da bi se uporedila struktura mezona sa podacima iz eksperimenata, istražićemo nastale kvantne brojeve. Kao u kvantnoj teoriji , tako i u modelu niti paritet čestice proizvod je unutrašnjeg pariteta i pariteta talasne funkcije. Stanja sa momentom količine kretanja $L = 0$ najniža su stanja. Eksperimentalno, najlakši mezoni imaju kvantne brojeve $J^{PC} = 0^{+-}$, pa su zato pseudoskalari, ili imaju $J^{PC} = 1^{--}$, pa su zato vektorski mezoni. Model niti prikazuje ove opažene kvantne brojeve. (Primećujemo da je spin svake složene čestice, kao što je mezon, veličina niske energije; da bi se to odredilo iz složenog jezgra, repovi koji prave veze – nacrtani kao krugovi na slikama – moraju da se odbace. Kao rezultat, spin niske energije mezona i bariona tačno je prikazan modelom niti.)

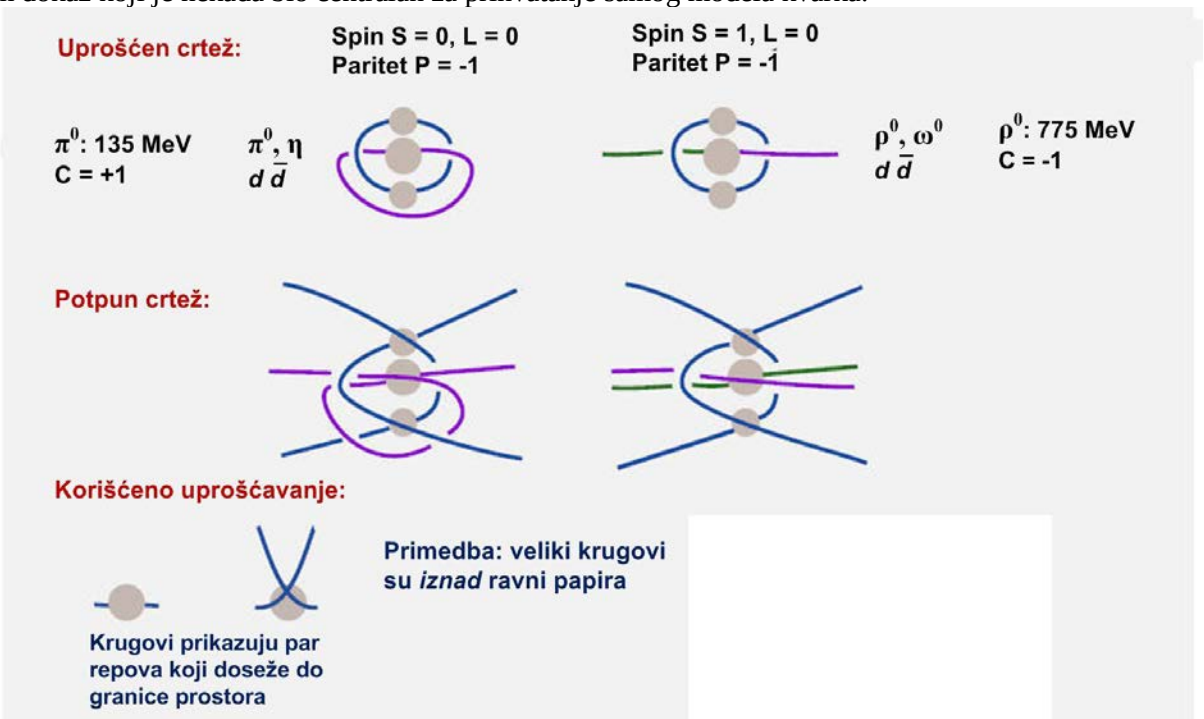


Slika 94 Najjednostavniji model niti za lake pseudoskalarne i vektorske mezone (krugovi predstavljaju ukršten par repova koji doseže do granice prostora), zajedno sa opaženim vrednostima mase.

U modelu niti, prema konstrukciji, stanje mezona je neutralne boje, ili "belo", pošto kvark i antikvark u svim usmerenjima uvek imaju suprotne boje koje se dopunjuju do nule.

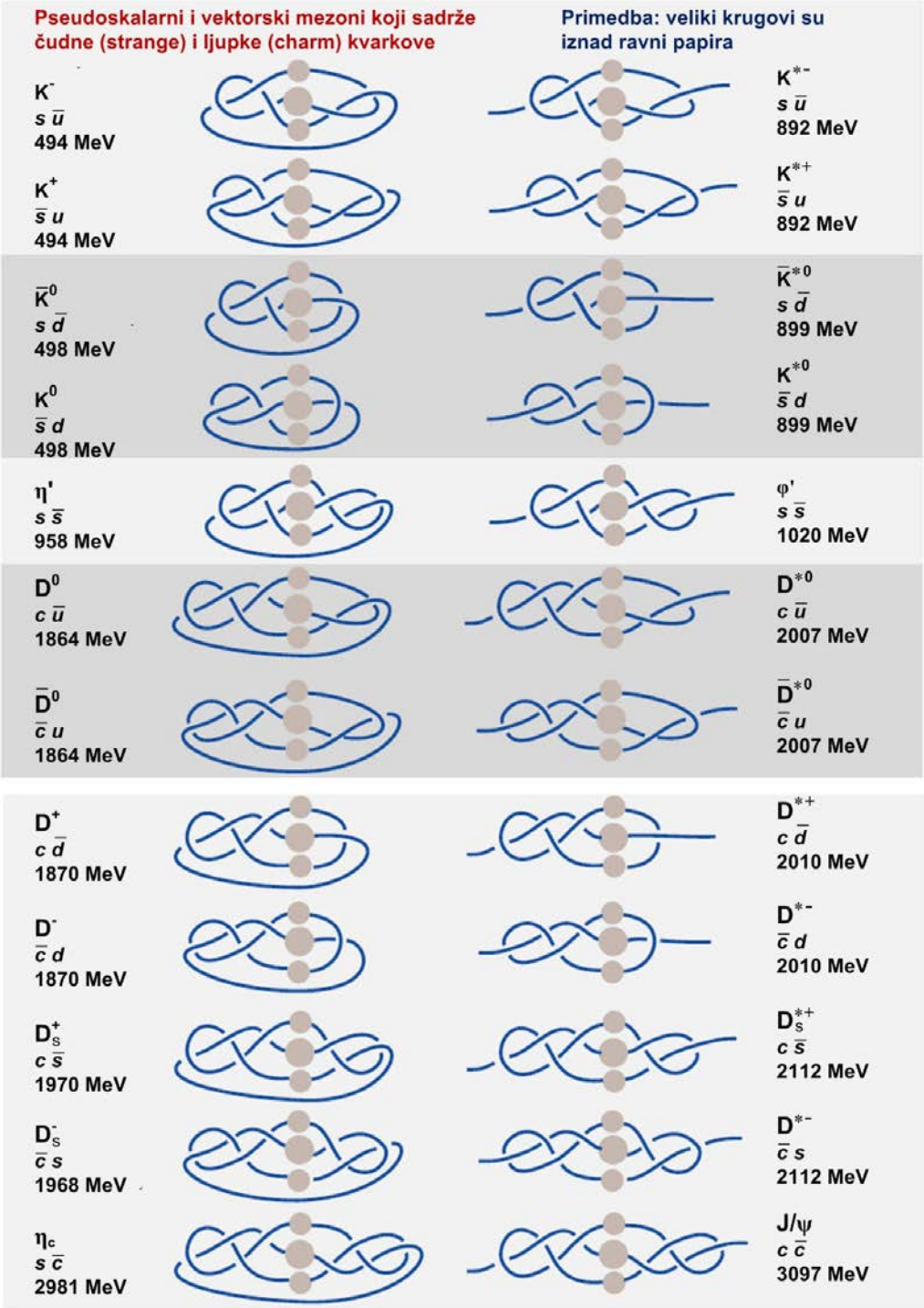
U modelu niti električni naboj za sve mezone je celobrojan. Hirijalni zapleti imaju naboj, nehirijalni zapleti su bez naboja. Vrednosti naboja izvedene iz modela niti stoga prikazuju one koje su opažene.

Nije u eksperimentima opažen nijedan mezon sa kvantnim brojevima 0^{--}, 0^{+-} ili 1^{+-}. Takođe su ova opažanja prikazana zapletima kvarka, što se lako proverava direktim pregledom. Na taj način model niti prikazuje sam dokaz koji je nekada bio centralan za prihvatanje samog modela kvarka.



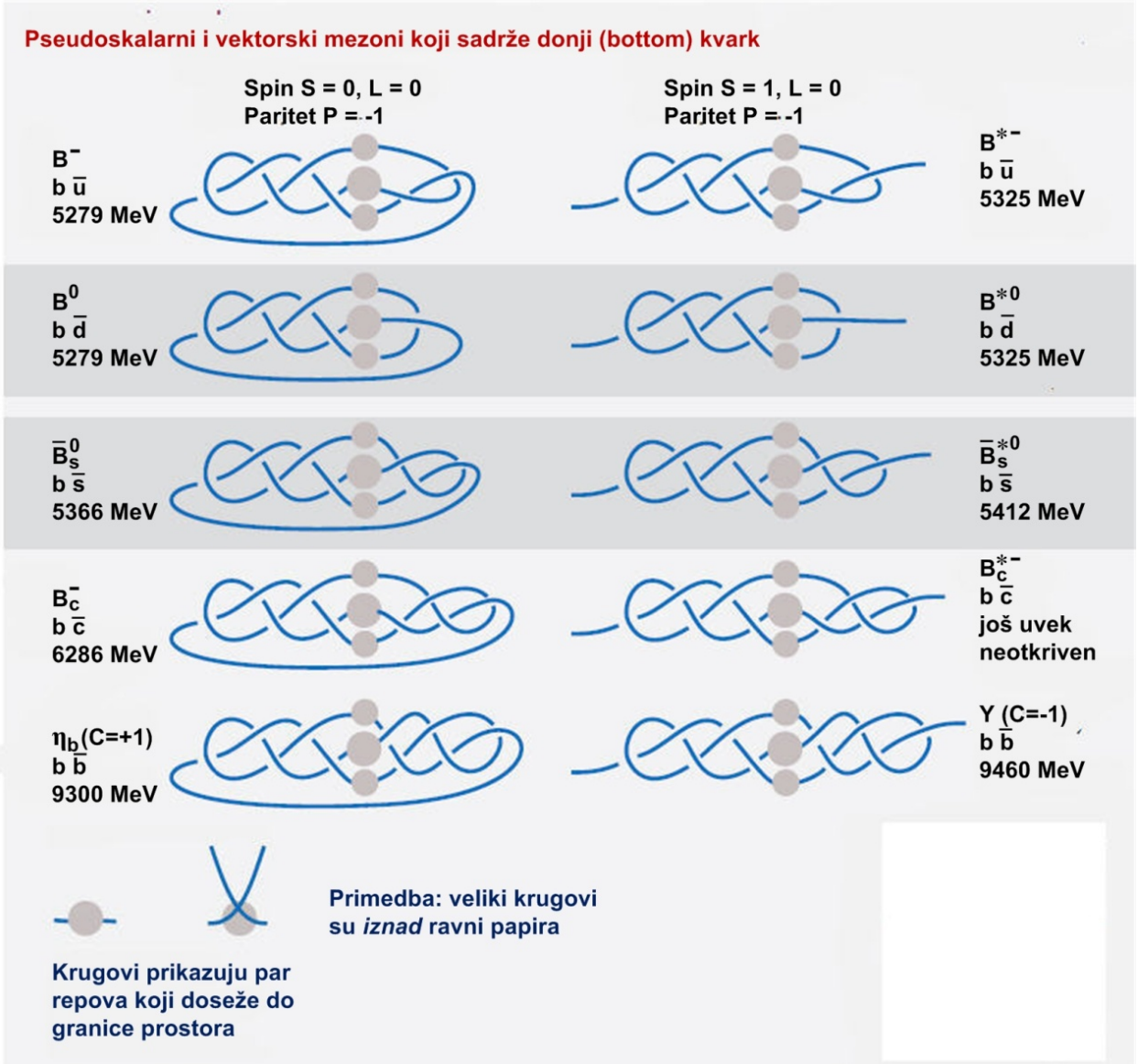
Slika 95 Znaćenje krugova korišćenih u crtežima zapleta mezona i bariona

Važno je da se shvati da je u modelu niti svaki mezon predstavljen ***porodicom zapleta*** sastavljenih od ***nekoliko*** struktura zapleta. Za ovo postoje tri razloga. Prvo, "krugovi" mogu da se kombinuju na različite načine. Na primer, i $u\bar{u}$ i $d\bar{d}$ imaju kao alternativne strukture liniju plus prsten. Ova zajednička struktura posmatra se kao osnovni razlog da se strukture ova dva kvarka mešaju, kao što je zaista i opaženo. (Ista struktura takođe je moguća i za $s\bar{s}$, i zaista, potpun opis ovih mezona mora da sadrži takođe mešavinu sa ovim stanjem.) Drugi razlog da mezoni imaju nekoliko struktura je pomenuta, komplikovanija struktura pletenice moguća za za svaki kvark, naime sa 6, 12 itd. dodatnih ukrštanja pletenice. Treći razlog za dodatne strukture zapleta su pojave višeg reda Fajnmanovih dijagrama slabe interakcije, koje dodaju još jednu grupu komplikovanije topologije koja takođe pripada svakom mezonu.



Slika 96 Najjednostavniji modeli niti za čudne (s-strange) i ljupke (c-charming) mezone sa momentom količine kretanja koji nestaje. Mezoni na levoj strani imaju spin 0 i negativan paritet, mezoni na desnoj strani imaju spin 1 i takođe negativan paritet. Krugovi predstavljaju par ukrštenih repova koji dosežu do granice prostora; sivi pravougaonici prikazuju zaplete koji su pomešani sa njihovim antičesticama i za koje se stoga predviđa da predstavljaju CP narušavanje.

Ukratko, strukture mezona sa ***slike 94***, ***slike 96*** i ***slike 97*** samo su ***najjednostavniji*** zapleti za svaki mezon. Bez obzira na to, svi zapleti, i najjednostavniji i komplikovaniji zapleti mezona, prikazuju vrednosti spina, paritete i sve ostale kvantne brojeve mezona. U stvari, u modelu niti komplikovaniji zapleti automatski dele kvantne brojeve onih jednostavnijih.



Slika 97 Najjednostavniji modeli niti za neke teške pseudoskalarne i vektorske mezone, zajedno sa njihovim eksperimentalnim vrednostima mase. Antičestice nisu nacrtane, njihov zaplet je slika u ogledalu zapleta čestice. Krugovi prikazuju ukršten par repova koji doseže do granice prostora; sivi pravougaonik prikazuje zaplete koji su pomešani sa svojim antičesticama i za koje je predviđeno da pokazuju CP narušavanje.

MEZON OBLIKUJE ČINIOCE

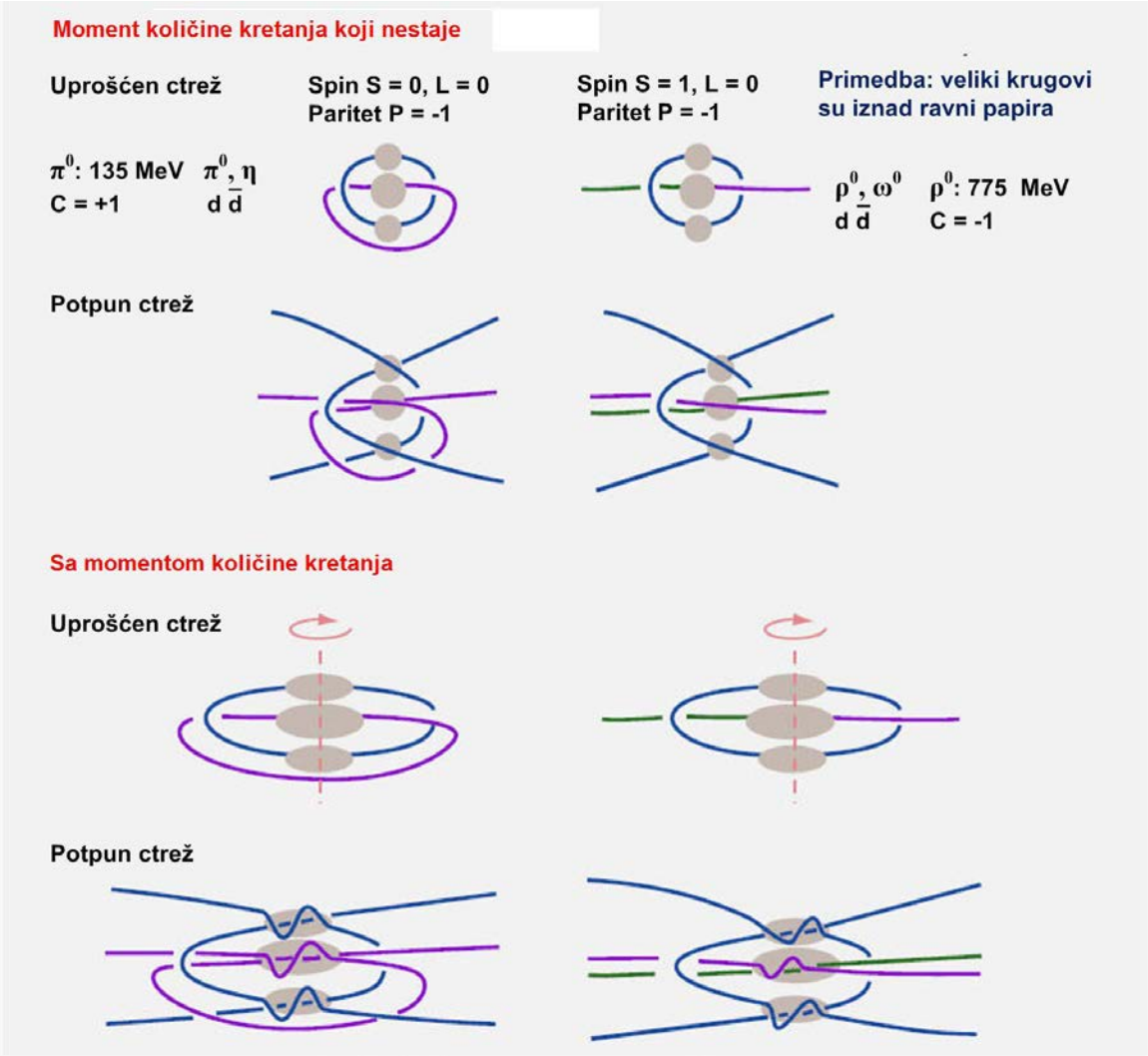
Model niti takođe predviđa direktno da su mezoni sa ***slike 94***, ***slike 96*** i ***slike 97*** izduženi, zapravo svi mezoni sa momentom količine kretanja koji nestaje. Ovaj rezultat (koji ne iznenađuje) u saglasnosti je sa opažanjima (***Ref. 226***). Predviđa se da su takođe izduženi i mezoni sa momentom količine kretanja koji ne nestaje. Ova poslednja predpostavka o obliku mezona načinjena je takođe iz druguh modela mezona, ali još uvek nisu provereni eksperimentalno.

Postoji i drugi način da se iskaže ono što smo do sada otkrili. Model niti pravi sledeću pedpostavku: Kada su zapleti mezona posmatrani u proseku u vremenu, gustina ukrštanja prikazuje prostorno izmerene ukuse kvarkova, spina i boje dela talasne funkcije mezona. Ovo predviđanje može da se proveri u odnosu na izmerene činioce oblika i prema rešetki izračunavanja kvantne hromodinamike.

MASE MEZONA, POBUĐENI MEZONI I OGRANIČAVANJE KVARKOVA

Model niti takođe omogućava da shvatimo mase mezona. Podsećamo se da ***topološki složen*** zaplet podrazumeva ***veliku*** masu. Uz ovaj odnos, ***slika 94*** predviđa da π^0, η i $\pi^{+/-}$ imaju različite mase i prema opaženom redosledu masa mezona su $m(\pi^0) < m(\pi^{+/-}) < m(\eta)$. Ostali redosledi masa mogu da se provere pomoću ***slike 94***, ***slike 96*** i ***slike 97***; ne postoje protivrečnosti sa opažanjima. Međutim, postoji granični slučaj: model niti predviđa različite mase za ρ^0, ω i $\rho^{+/-}$. Do sada su opažanja samo delimično potvrdila opažanja. Noviji precizni eksperimenti izgleda da predpostavljaju da ρ^0 i $\rho^{+/-}$ imaju razlićite mase; ovaj rezultat još uvek nije bio potvrđen. (***Ref. 227***).

Preciznije određivanje mase biće moguće uz numerička izračunavanja. Ovo će biti objašnjeno detaljnije u daljem tekstu. (***Strana 267***). U svakom slučaju, model niti za mezone predpostavlja da mase kvarkova nisu toliko bitne za određivanje masa mezona, već su bitni detalji veza kvark-antikvark. Ustvari, mase lakih mezona i bariona su mnogo veće od masa kvarkova u sastavu.



Slika 98 Model niti za mezone bez momenta količine kretanja (gore) i sa momentom količine kretanja (dole)

Relativna nevažnost masa kvarkova za mase mnogih mezona takođe je potvrđena u slučaju ***pobuđenih*** mezona, to jest mezona koji imaju moment količine kretanja L. Dobro je poznato da mezoni sa momentom količine kretanja koji ne nestaje, mogu da se svrstaju u skup koji ima isti sadržaj kvarkova, ali drugačiji ukupni moment količine kretanja $J = L + S$. Ove porodice su opažene da prate dobro poznat odnos između ukupnog momenta količine kretanja J i mase m, poznat kao ***Ređijeve*** (Tullio Regge) ***trajektorije***:

$$J = \alpha_0 + \alpha_1 m^2 \qquad (199)$$

sa skoro nepromenljivim činocem α_1 od oko 0,9 GeV/fm za skoro sve mezone. (***Ref. 228***). Ovi odnosi, poznate ***Ređijeve trajektorije***, objašnjene su u kvantnoj elektrodinamici i priozilaze iz linearnog porasta sa rastojanjem efektivnog potencijala između kvarkova, stoga iz svojstava relativističkog harmonijskog

oscilatora. Sam linearni potencijal obično se posmatra kao posledica veza sličnih cevima upliva između kvarkova.

U modelu niti veze slične cevima upliva između kvarkova ugrađene su automatski, kao što je prikazano na ***slici 98***, Svi mezoni imaju tri spojne "veze", a ove tri veze mogu da se posmatraju kao da oblikuju jednu zajedničku cev niti. Na uprošćenom crtežu veza cevi niti je područje koje sadrži krugove. U kružno pobuđenim mezonima očekuje se da će se tri veze izdužiti i da stoga stvaraju dodatne promene ukrštanja, dalje dodatnu efektivnu masu. Model niti takođe predpostavlja ***linearni*** odnos. Pošto se očekuje da je mehanizam sličan za sve mezone, koji svi imaju tri kruga veze, model niti predviđa isti nagib Rađijevih trajektorija za sve mezone (i barione). To je zaista i opaženo.

Sažeto, model niti prikazuje redosled masa mezona i ograničenje kvarkova u opštim svojstvima.

NARUŠAVANJE CP U MEZONIMA

U slaboj interakciji obično je očuvan proizvod CP C i P pariteteta. (***Ref. 229***). Međutim, opaženi su retki izuzeci pri raspadu K^0 mezona kao i u raznim procesima koji uključuju B^0 i B_s^0 mezone. U svakom od ovih izuzetaka nađeno je da se mezon meša sa sopstvenom antičesticom. (***Ref. 227***). Narušavanje CP bitno je za objašnjenje asimetrije materija-antimaterija u svemiru.

Model niti omogućava da se zaključi da li je mešavina mezona sa sopstvenom antičesticim moguća ili nije. Kao što je očekivano, samo neutralni mezoni su kandidati za takve mešavine, zbog očuvanja naboja. U modelu niti mešavina čestica-antičestica moguća je na ***dva*** načina: uzimanjem lika u ogledalu zapleta mezona ili pomeranjem položaja poveznih niti. Svi mezoni za koje je ovo moguće prikazani su u sivim pravougaonicima na s***lici 94***, ***slici 96*** i ***slici 97***. Model niti takođe pojašnjava da takve mešavine zahtevaju pomeranje veza; to je proces male verovatnoće koji nastaje usled slabe interakcije. Model niti stoga predviđa da slaba interakcija narušava invarijantnost CP u mezonima koji se mešaju sa svojim antičesticama.

Pošto je jak raspad mezona sa spinom 1, a zbog čega im vreme trajanja nije dovoljno dugo, mali efekt CP narušavanja zapravo je opažen samo kod pseudoskalarnih mezona sa spinom 0. Model niti stoga predviđa CP narušavanje i mešavine koje se opažaju za parove mezona $K^0 - \bar{K}^0$, $D^0 - \bar{D}^0$, $B^0 - \bar{B}^0$ i $B_s^0 - \bar{B}_s^0$. Ovo predviđanje modela niti odgovara precizno onim sistemima za koje je narušavanje CP zapravo opaženo. (***Ref. 227***). (Narušavanje CP kod D mezona konačno je otkriveno u CERN-u 2011. godine, pošto je predpostavljeno kako u standardnom modelu, tako i u modelu niti, u ranijim izdanjima ovog dela.)

Mešavina mezon-antimezon moguća je u modelu niti pošto su razni kvarkovi upletene niti. Zbog ovih upletenih struktura, postojanje mezon-antimezon mešavine posledica je postojanja tri generacije kvarkova. Struktura mezona takođe pojašnjava da takve mešavine nebi bile moguće ako nebi bilo treće generacije kvarka. Model niti zato prikazuje uobičajeno objašnjenje narušavanja CP kao rezultat tri generacije kvarka.

Za jaku i za elektromagnetnu interakcijuu model niti predviđa da ne postoji mešavina i nema narušavanja CP, pošto gluoni i fotoni ne menjaju topologiju čestice. Prema tome, model niti predpostavlja odsustvo aksiona. Nepostojanje pogodnog zapleta za aksione, prikazno u daljem tekstu (***strana 264***), pokazaće da ova predpostavka postaje predviđanje.

Sažeto, postojanje narušavanja CP i slabim interakcijama i odsustvo narušavanja CP u jakoj interakciji prirodne su posledice modela niti.

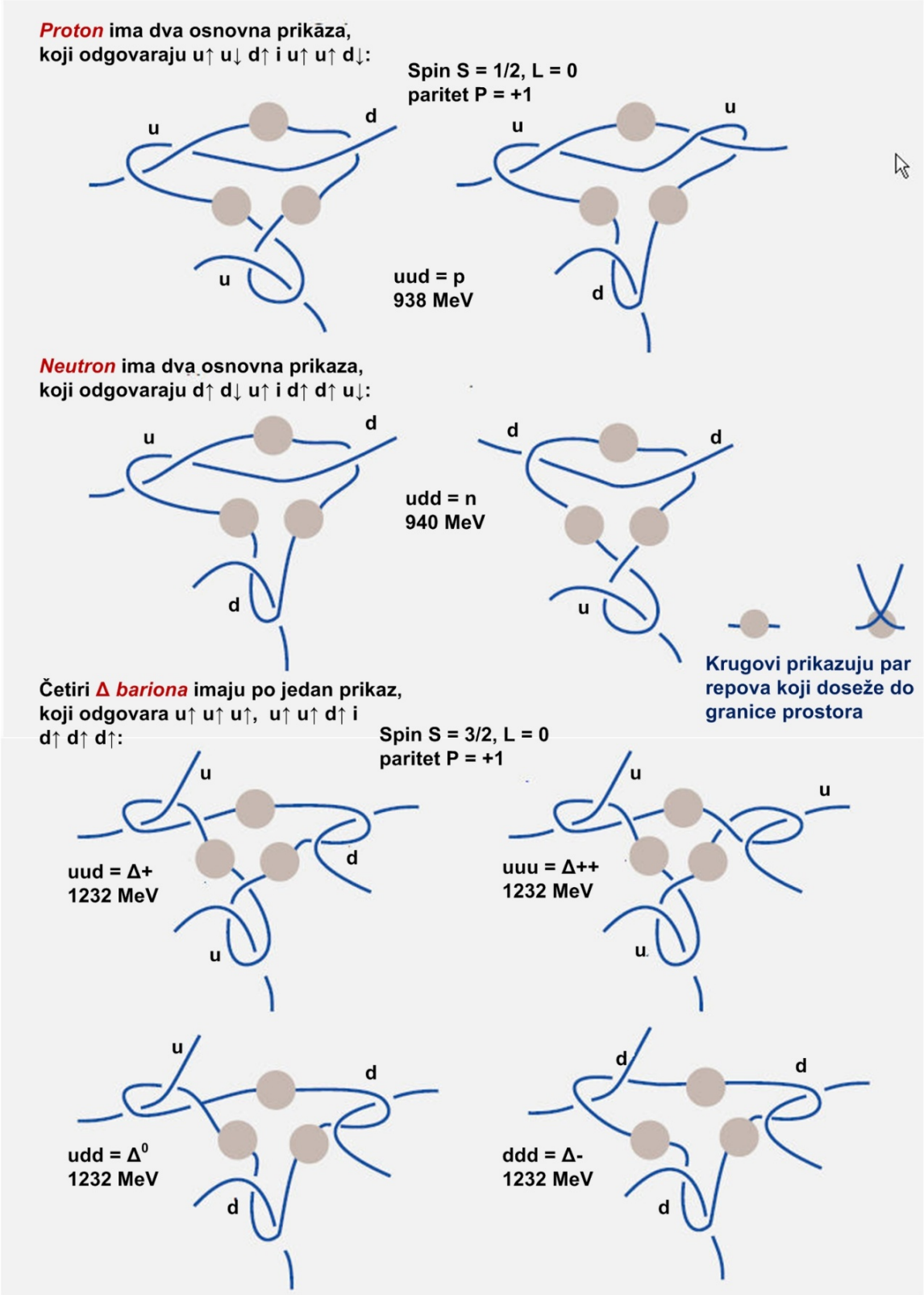
OSTALI ZAPLETI SA TRI NITI I GLUONSKE LOPTE

Složeni zapleti načinjeni od tri niti u modelu niti su ili višeg reda verzija prostiranja zapleta upravo predstavljenih složenosti od jedne niti ili čestica od dve niti.

Često predpostavljana gluonska lopta može takođe da bude načinjena od tri gluona. Takva struktura u modelu niti bila bi prost zaplet načinjen od tri niti. Međutim, odsustvo mase gluona izgleda da ne dozvoljava takav zaplet. Ali dokaz ne drži vodu, a pitanje je još uvek predmet istraživanja, kao što je pomenuto u predhodnom tekstu. (***Strana 243***).

SPIN I ČESTICE OD TRI NITI

Zbog čega tri niti ponekad obrazuju čestice sa spinom 0, kao što je elementaran Higsov bozon, ponekad čestice sa spinom 1/2, kao što je elementarni elektron, a ponekad čestice sa spinom 1, kao što je složen mezon? Odgovor zavisi od toga kako su niti slobodne da se kreću međusobno. Možete li da specificirate detalje? (***Izazov 193ny***).



Slika 99 Najjednostavniji modeli niti za najlakše barione načinjene od gornjih (up) i donjih (down) kvarkova (krugovi prikazuju povezan par repova koji doseže do granice prostora) zajedno sa izmerenim vrednostima mase.

ZAKLJUČAK O ZAPLETIMA OD TRI NITI

Upoređujući zaplete od dve niti, pojavljuje se ***nova vrsta elementarnih*** čestica od tri niti; nova vrsta je ponešto manje zapletena no opšti racionalni zapleti ali još uvek više zapletena od trivijalnog zapleta vakuuma: ***upletenih zapleta***. Upleteni zapleti predstavljaju Higsov bozon i leptone; zapleti prikazuju sva tri opažena kvantna broja. Upleteni zapleti takođe podrazumevaju da se razlikuju neutrini i antineutrini, imaju masu i Dirakove su čestice.

Model niti (ispravljen 2012. godine) takođe predviđa da u prirodi ne postoje druge elementarne čestice načinjene od tri niti osim šest leptona i Higsovog bozona. (***Strana 248***).

U slučaju ***složenih*** čestica načinjenih od tri niti, model niti predpostavlja zaplete za sve pseudoskalarne mezone; posledični kvantni brojevi i redosledi masa uklapaju se u opažene vrednosti. U spektru složenih čestica pitanje gluonskih lopti nije u potpunosti rešeno.

ZAPLETI OD ČETIRI I VIŠE NITI

Ako u zaplet od tri niti dodamo jednu ili više niti, neće se pojaviti nova klasa zapleta. Klase zapleta ostaju iste kao u slučaju sa tri niti. Drugim rečima, ***ne pojavljuju se dodatne elementarne čestice*** u modelu niti. Da bi se to pokazalo počećemo istraživanje od ***racionalnih*** zapleta.

Videli smo u predhodnom tekstu da racionalni zapleti od četiri niti predstavljaju vektorske mezone. Njih smo već istraživali uz skalarne mezone. Međutim, izvesni složeniji racionalni zapleti takođe su bitni u prirodi, pošto se mi sastojimo od njih.

BARIONI

U modelu niti racionalni zapleti načinjeni od pet ili šest niti su barioni. Zapleti kvarkova modela nita daju zaplete za barione na prirodan način, kao što pokazuje ***slika 99***. Ponavljamo, nisu moguće sve kombinacije kvarkova. Pre svega, zapleti kvarkova ne dopuštaju mešavine struktura $q q \overline{q}$ ili $q \overline{q} \overline{q}$, već samo $q q q$ ili $\overline{q} \overline{q} \overline{q}$. Osim toga, zapleti ne dopuštaju (potpuno simetrična) stanja spina 1/2 za $u u u$ ili $d d d$, već samo stanja sa spinom 3/2. Model takođe prirodno previđa da postoje samo dva bariona sa spinom 1/2 načinjena od u i d kvarkova. Sve ovo odgovara opažanjima. Zapleti najjednostavnijih bariona prikazani su na ***slici 99***.

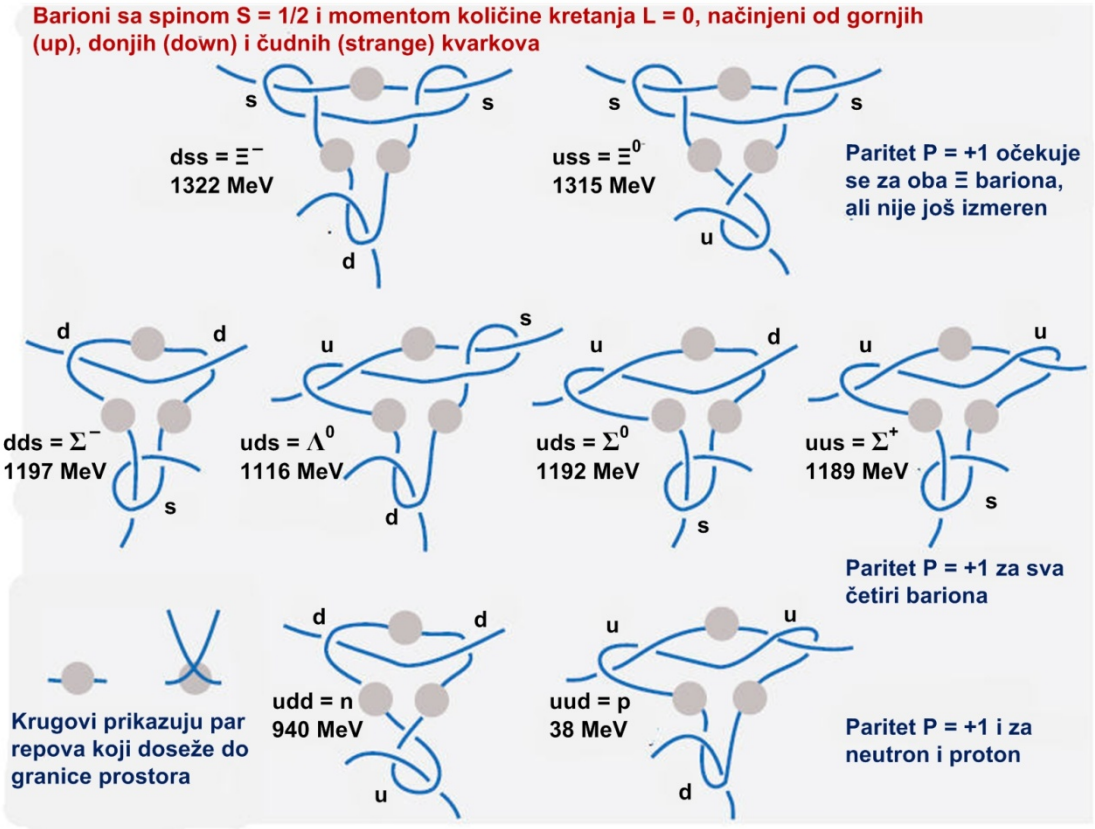
Prikazani su električni naboji bariona. Osim toga, topologije zapleta podrazumevaju da proton ima isti naboj kao i pozitron. Neutralni barioni imaju topološki nehirijalne strukture; bez obzira na to, neutron se razlikuje od njegove antičestice, kao što može da se zaključi ***sa slike 99***, preko njegovog trodimenzionalnog oblika. Δ barioni imaju različite električne naboje, u zavisnosti od njihovog previjanja. (***Strana 283***).

Barioni du prirodno neutralne boje, kako je i opaženo. Model takođe pokazuje da talasna funkcija bariona obično ne može da se razloži na deo spina i deo kvarka: nukleonima je potrebno ***dva*** grafa da ih opišu, a ulogu igra oblik zapleta. Pariteti bariona se reprodukuju; neutron i antineutron se razlikuju. Sve ovo odgovara poznatom ponašanju bariona. Takođe opaženi oblici bariona (drugim rečima, momenti kvadripola bariona) prikazani su u modelu niti. (***Ref. 226***).

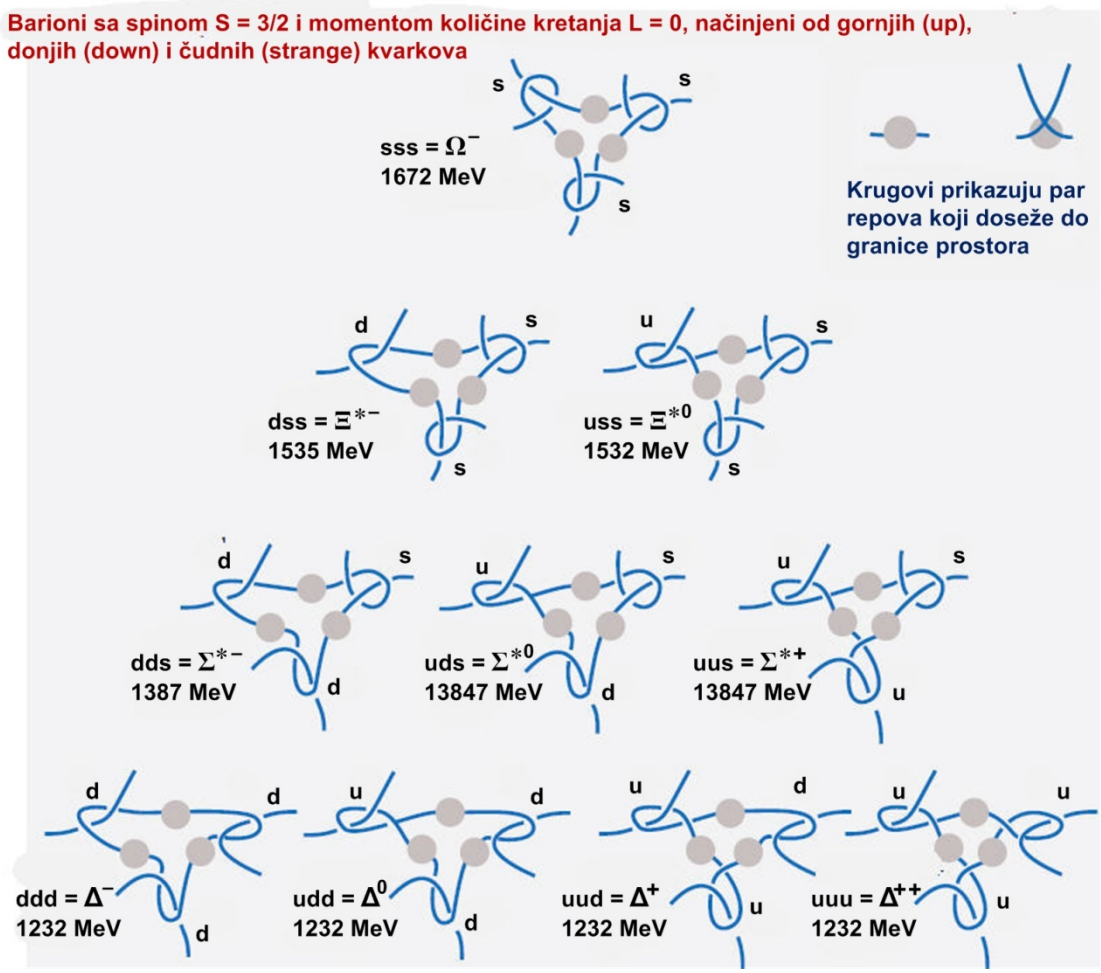
Mase protona i neutrona su različite, jer se razlikuju njihove topologije. Međutim, topološke razlike su "male", kao što se vidi sa ***slike 99***, tako da je razlika masa mala. Topološke razlike između različitih Δ bariona čak su i manje, i zaista, u eksperimentima razika njihovih masa jedva je primetna.

Model niti prirodno daje oktet ili dekuplet bariona, kao što je prikazano na ***slici 100*** i ***slici 101***. Uopšteno, složeniji zapleti bariona imaju veću masu od prostih, kao što je na slikama predstavljeno; takođe je to slučaj i sa barionima koji nisu ovde prikazani, koji uključuju druge kvarkove. I kao za mezone, Ređijeve trajektorije nastaju usled "rastezanja" i zapetljavanja povezanih niti. Pošto su veze svakog kvarka ponovo (većinom) tri, model kvalitativno predstavlja opažanje da je Ređijev nagib za sve barione isti i jednak onom za mezone. Primećujemo da to takođe podrazumeva da mase kvarkova imaju samo malu ulogu u stvaranju masa hadrona; ovaj stari rezultat iz kvantne hromodinamike stoga je prikazan i modelom niti.

Dokazi koji su izneti do sada prikazuju redoslede masa, ne i vrednosti mase. Stvarno izračunavanje mase hadrona moguće je iz modela niti: neophodno je da se izračuna broj promena ukrštanja koje proizvodi svaki zaplet. Postoji mogućnost, ali nije izvesna, da li bi takva izračunavanja bila jednostavnija za primenu no ona iz rešetke kvantne hromodinamike.



Slika 100 Jedan zaplet (samo) za svaki barion u najnižem $J = L + S = 1/2$ oktetu bariona (krugovi povezuju par repova do granice prostora), zajedno sa izmerenim vrednostima mase.



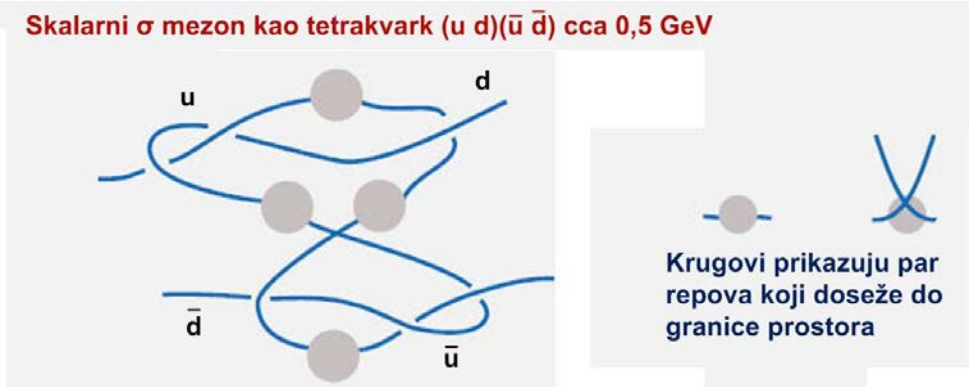
Slika 101 Jedan zaplet za svaki barion u najnižem $J = 3/2$ dekupletu bariona (krugovi povezuju par repova do granice prostora), zajedno sa izmerenim vrednostima mase

TETRAKVARKOVI I EGZOTIČNI MEZONI

Među egzotičnim mezonima tetrakvarkovi su naviše istraživani. (***Ref. 214***). Sada se naširoko veruje da su tetrakvarkovi skalarni mezoni male mase. (***Ref. 230***). U modelu niti tetrakvarkovi su mogući; jedan primer je prikazan na ***slici 102***. To je racionalni zaplet od šest niti. Čini se da su spin, pariteti i redosledi mase iz modela niti u saglasnosti sa opažanjima. Ako bi se pokazalo da je raspored sa ***slike 102*** tipičan, tetrakvark bi izgledao više kao vezani par dvaju mezona, a ne kao stanje u kojoj su sva četiri kvarka vezana međusobno na jednak način. S druge strane, tetraedarski raspored kvarkova možda je takođe moguć. Detalji ove teme ostavljeni su za budića istraživanja.

Model niti pravi dodatni iskaz: nisu moguće vezane (hadronske) niti u stanju kvark-antikvark. (***Ref. 217***). Takva stanja je predlagao Niemi (Antti Niemi). U modelu niti takva stanja nebi bila posebni mezoni, nego obični mezoni sa jednim ili više dodanih virtualnih vektorskih bozona. Stoga se predviđa da ovaj tip egzotičnih mezona ne postoji.

Situacija sa gluonskim loptama, koje su drugi tip egzotičnih mezona, već je bila razmatrana u predhodnom tekstu. (***Strana 243***). One verovatno ne postoje.(***Strana 255***).



Slika 102 Model niti pspecifičnog tetrakvarka (krugovi predstavljaju vezan par repova koji doseže do granice prostora)

OSTALI ZAPLETI NAČINJENI OD ČETIRI ILI VIŠE NITI

Nije potrebno da istražujemo ostale ***osnovne*** zaplete ili ***lokalno vezane*** zaplete načinjene od četiri ili više niti. Oni su verzije višeg reda racionalnih zapleta, kao što je već opisano u slučaju sa dve ili sa tri niti. Takođe nije potrebno da istražujemo ***razdvojive*** zaplete. Razdvojivi zapleti su složenosti zapleta sa manje niti.

Ostala je da se razmotri jedna klasa zapleta: ***upleteni*** zapleti od četiri ili više niti. Zatim, poremećaji višeg reda slabe interakcije mogu uvek da dovedu do topološkog izduženja nekih niti vakumma sa zapletima od malo niti. Upleteni zapleti od četiri ili više niti stoga su stanja prostiranja višeg reda leptona ili hadrona od tri niti.

To možemo da izrazimo takođe i na drugi način. Ne postoje zapleti od četiri ili više niti koji su više zapleteni no trivijalni zapleti, ali ni manje zapleteni no zapleti leptona. Prema tome, nisu moguće dodatne elementarne čestice. Ukratko, ***model zapleta ne dozvoljava elementarne čestice sa četiri ili više niti***.

ZAKLJUČAK O ZAPLETIMA NAČINJENIM OD ČETIRI ILI VIŠE NITI

Detaljnim istraživanjem svih mogućih klasa zapleta, pokazali smo da svaka lokalizovana struktura načinjena od niti ima prikaz u modelu niti. Model niti posebno daje prost iskaz o ***svakom*** zapletu načinjenom od četiri ili više niti: takvi zapleti su složenosti elementarnih zapleta načinjenih od jedne, dve ili tri niti. Drugim rečima, u prirodi ***ne postoje*** elementarne čestice načinjene od četiri ili više niti.

Model niti izražava da svaki moguć zaplet predstavlja sistem fizičke čestice: pregled je dat u ***Tabeli 13***. Mapiranje između zapleta i čestica jedino je moguće jer je (beskonačno) mnogo zapleta dodeljeno svakoj elementarnoj čestici sa masom.

Rezultat ovog istraživanja je da model niti ograničava broj elementarnih čestica na one koji su sadržane u standardnom modelu fizike čestica.

TABELA 13 Upoređenje između zapleta u modelu niti i čestica

Niti	Zaplet	Čestica	Vrsta
1	nevezan	elementarna	vakuum, (neprekinut) baždarni bozon, nije u modelu niti
1	vezan	-	nije u modelu niti
2	nevezan	složena	složena od prostijih zapleta
2	racionalan	elementarna	kvark ili graviton
2	prost, vezan	-	nije u modelu niti
3	nevezan	složena	složena od prostijih zapleta
3	upleten	elementarna	lepton
3	racionalan	elementarna ili složena	leptoni
3	prost, vezan	-	nije u modelu niti
4 i više	isto kao za 3 niti	sve složene	složena od prostijih zapleta

ZANIMLJIVOSTI I ZABAVNI IZAZOVI O ZAPLETIMA ČESTICA

U modelu niti masa se javlja usled uplitanja repova. Međutim masa nastaje takođe i usled obrtanja i kolebanja zapleta. Kako da se spoje ove dve odrednice? (***Izazov 194s***).

* * *

U modelu niti mogu da se opažaju samo promene ukrštanja. Kako tada može određena struktura zapleta čestice da ima bilo koji efekt opažanja? Posebno, kako mogu kvantni brojevi da se se povežu sa strukturom zapleta, ako su opažanja samo usled promena ukrštanja? (***Izazov 195e***).

* * *

Nisu opažene neutralne slabe struje koje menjaju čudnost (strangeness) ili druge ukuse. U modelu niti ovo opažanje je posledica oblika zapleta Z bozona.

* * *

Godine 2014. Marek Karliner predvido je postojanje stanja šest kvarkova. (***Ref. 231***). Može li model niti da ih prikaže? Može li da reši da li su oni molekuli ili tri mezona ili izvorna stanja šest kvarkova? (***Izazov 196r***).

* * *

Možete li da iskoristite model niti da biste pokazali da pentakvarkovi ne postoje? (***Izazov 197e***).

* * *

Kakva je veza modela koji je prikazan ovde sa idejom Viro i Viro o kosim linijama? (***Ref. 232***).

* * *

Najistaknutiji zagovornik ideje da bi čestice mogle da budu čvorovi, bio je 1868. godine Vilijam Tomson Kelvin (William Thomson Kelvin). (***Ref. 233***). On je predložio ideju da možda različiti atomi bili različito "vezanih vrtloga" u "eteru". Predlog je bio zanemaren – i to s pravom – pošto nije objašnjavao bilo šta: nije objašnjavao niti osobine niti interakcije atoma. Predlog jednostavno nije imao veze sa stvarnošću. Posmatrano unazad, glavni razlog za ovaj neuspeh bio je što su to vreme bile nepoznate elementarne čestice.

* * *

Čisto topološke modele elementarnih čestica predlagali su i istraživani u prošlosti razni naučnici. Međutim, samo je nekoliko istraživača ikada predlagalo posebne topološke strukture za svaku elementarnu česticu. Takve predloge je bilo lako kritikovati, tako da je lako od sebe napraviti osobenjaka; svaki takav predlog zato zahteva izvesnu količinu hrabrosti.

- Herbert Jele (Herbert Jehle) modelirao je elementarne čestice još 1970-ih godina. (***Ref. 234***). Međutim, njegov model nije prikazivao kvantnu teoriju niti je prikazivao bilo šta o česticama koje su poznate danas.
- Ng Že Kui (Ng Sze Kui) je modelirao mezone kao čvorove. (***Ref. 143***). Međutim, ne postoje modeli za kvarkove, leptone ili bozone, niti opis za interakcije merila.

- Tom Mongan je modelirao elementarne čestice kao da su načinjene od tri niti od kojih svaka nosi električni naboj. (***Ref. 235***). Međutim, ne postoji spoj sa kvantnom teorijom polja ili opštom teorijom relativnosti.
- Džek Avrin je modelirao hadrone i leptone kao Mebijusove trake, a interakcije kao proces iseci i zalepi. (***Ref. 139***). Model, međutim, ne objašnjava mase čestica ili konstante veza.
- Robert Finkelštajn modelirao je fernione kao čvorove, (***Ref. 141***). Međutim, ovaj pristup nije objašnjavao svojstva interakcija merila, niti većinu svojstava elementarnih čestica.
- Sandens Bison-Tompson (Sundance Bilson-Thompson), kasnije sa saradnicima, modelirao je elementarne fermione i bozone kao strukture od tri trake. (***Ref. 140***). Korišćen je trik pletenice od kože, kao i u modelu niti, da bi se objasnile tri generacije kvarkova i leptona. Ovo je daleko najpotpuniji model iz ove liste. Međutim, nije objašnjeno poreklo mase čestice, mešanja čestica i, pre svega, interakcija merila.

* * *

Niti ***nisu*** superstrune. Nasuprot superstrunama niti imaju osnovno načelo. (To je najveća pojmovna razlika.) Osim toga, osnovno načelo niti nije ispunjeno u superstrunama. Nasuprot superstrunama niti nemaju naprezanja, nemaju supersimetriju i nemaju sopstveni lagranžijan. (To je najveća fizička razlika.) Pošto niti nemaju naprezanje, one ne mogu da osciluju. Pošto niti nemaju supersimetriju, direktno sledi opšta teorija relativnosti. Pošto niti nemaju sopsveni lagranžijan, čestice su zapleti, nisu oscilujuće superstrune, a direktno sledi kvantna teorija. Ustvari, odrednice za čestice, talasne funkcije, polja, vakuum, masu i horizonte u potpunosti se razlikuju u ova dva pristupa.

Nasuprot superstrunama, niti opisuju brojne interakcije merila i generisanje čestica. Nasuprot superstrunama, niti opisuju kvarkove, hadrone, odraničenja, Ređijeva ponašanja, asimptotsku slobodu, mase čestica, mešavinu čestica i konstante spajanja. U modelu niti, nasuprot "otvorenim superstrunama" nijedna bitna konfiguracija nema kraj. Nasuprot otvorenim ili zatvorenim superstrunama, niti se kreću u tri prostorne dimenzije, ne u devet ili deset; niti rešavaju anomaliju pitanja bez viših dimenzija ili supersimetrije, pošto je konstrukcijom automatski održana jedinstvenost; strune nisu povezane sa membranama ili supermembranama. U modelu niti nema "bozonskih" ili "heterotičnih" struna, ne postoji E(8) ili SO(32) grupa merila, ne postoje opšti "dijagrami pantalona" za sve interakcije merila, ne postoji AdS/CFT (anti-de Sitter/Conformal Field Theory) dvojnost, nema "panorame" sa brojnim stanjima vakuuma i ne postoji "višeisvemir". Za razliku od superstruna niti se zasnivaju na Plankovim jedinicama. I nasuprot superstrunama, niti daju model niti elementarnih čestica bez ijedne alternative. Zapravo, nijedan iskaz o superstrunama ne može da se primeni na niti. (***Ref. 144***).

* * *

Niti ne zahtevaju više dimenzije. S druge strane, može da se raspravlja da niti proizvode dodatnu nekomunikativnu strukturu u svakoj tački u prostoru. U određenom smislu kada se uzme prosek niti u vremenu u svakoj tački prostora stvara se nekomunikativan unutrašnji prostor. Kao rezultat toga, kada se usredsredimo na određeni prostorni položaj u nešto dužoj vremenskoj razmeri nego što je Plankovo vreme, možemo tvrditi da se u toj tački prostora priroda opisuje proizvodom trodimenzionalnog prostora sa unutrašnjim, nekomutativnim prostorom. Alen Kon (Alain Cones) i njegovi saradnici već pre više godina ispitivali su detaljno tako proizveden prostor. (***Ref. 236***). Otkrili su da je moguće sa pogodno odabranim nekomutativnim unutrašnjim prostorom da se prikažu mnogi, ali ne i svi, aspekti standardnog modela fizike čestica. Između ostalog, izborom pogodnog nekomunikativnog prostora, oni su mogli da prikažu tri interakcije merila; s druge strane, oni nisu mogli da prikažu tri generacije čestica.

Konov pristup i model niti nisu u potpunosti saglasni. Jedan od načina da se opišu razlike je da se usmerimo na odnos unutrašnjeg prostora u različitim tačkama prostora. Konov pristup predpostavlja da svaka tačka ima sopstven unutrašnji prostor i da ti prostori nisu povezani. Model niti, umesto toga, podrazumeva da su susedni unutrašnji prostori povezani; oni su povezani posebnom topologijom i istezanjem umešanih niti. Iz tog razloga model niti dopušta da se shvati poreklo tri generacije čestica i detalji spektra čestice.

Postoje i druge razlike između ova dva pristupa. Konov pristup predpostavlja da su od početka dati kvantna teorija i opšta teorija relativnosti, posebno Hilbertov prostor i prostorne mnogostrukosti. Model niti zaista ove strukture izvodi iz osnovnog načela. I, kao što je već pomenuto, Konov pristup nije jedinstven i potpun, dok izgleda da model niti jeste. Od ova dva, samo model niti izgleda da je nepromenjiv, ili "težak za promene".

* * *

Model niti podrazumeva da na malim rastojanjima ne postoji ***ništa novo***. Na malim rastojanjima, ili na visokim energijama, priroda se sastoji samo od niti. Stoga tamo ne postoje nove pojave. Kvantna teorija izražava da se u malim razmerama ne pojavljuje ništa novo: u malim razmerama ne postoji ***nov*** stepen slobode. Na primer, kvantna teorija izražava da u prirodi ne postoji Kraljevina Liliput. Model niti stoga potvrđuje suštinu kvantne teorije. I zaista, model niti predviđa da između energetske razmere najteže elementarne čestice, gornjeg (top) kvarka, od 173 GeV i Plankove energije od 10^{19} GeV, ništa ne može da se nađe. Postoji u prirodi takozvana energetska pustinja – praznina zanimljivih svojstava, čestica ili pojava.

* * *

Većina užadi korišćenih u jedrenju, penjanju ili drugim područjima svakodnevnog života načinjena je uplitanjem. Traženje "mašine za uplitanje" ("braiding machine") na internetu daje veliku količinu video prikaza. Traženje "LEGO braiding machine" prikazuje najjednostavnije i divne primere i dopušta vam da vidite kako rade. (Jedan od videa je na www.youtube.com/watch?v=DXjdL2xdcpU)

* * *

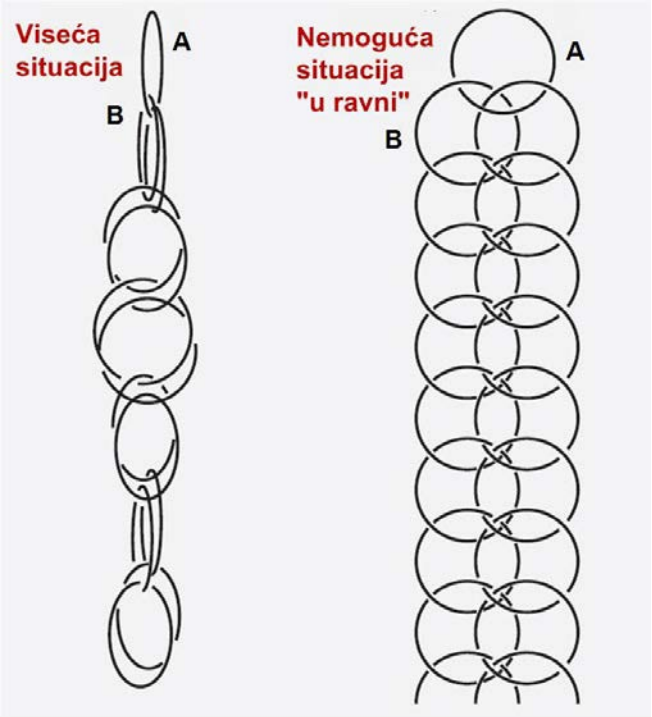
Kakav je efekt drhtanja pri uplitanju (***strana 119***), pa stoga mešanje slabih čestica, na porodicu zapleta i na broj generacija? (***Izazov 199ny***)

KRETANJE KROZ VAKUUM I BRZINA SVETLOSTI

Do sada ostao je nerešen jedan problem. Kako može čestica, budući da je zaplet sa beskrajnim proširenjima, da se kreće kroz tkanje niti koje sačinjava vakuum? Jedan stari trik, poznat u Francuskoj već u devetnaestom veku, može da pomogne za širenje ideje o kretanju čestice u prostoru. (***Ref. 237***). ***Slika 103*** prikazuje poseban lanac koji veoma lako može da se napravi id nekoliko desetaka alki za ključeve. Ako se uhvati prsten B, a pusti prsten A, ovaj poslednji prsten pada naniže duž celog lanca po spiralnoj putanji, kao što prikazuje film na ***slici 198***. Ukoliko niste videli trik, isprobajte ga sami: utisak je začuđujući. U stvarnosti, to je jedna optička iluzija. Nijedan prsten ustvari ne pada, ali redosled kretanja prstenova je na način koji stvara utisak kretanja prstena. A ovaj stari trik nam pomaže da rešimo brojna pitanja o kretanju čestice koje smo do sada držali počišćene pod tepihom. Glavna ideja je sledeća:

- Translatorno kretanje čestice nastaje usled zamene, ili "skakanja niti".

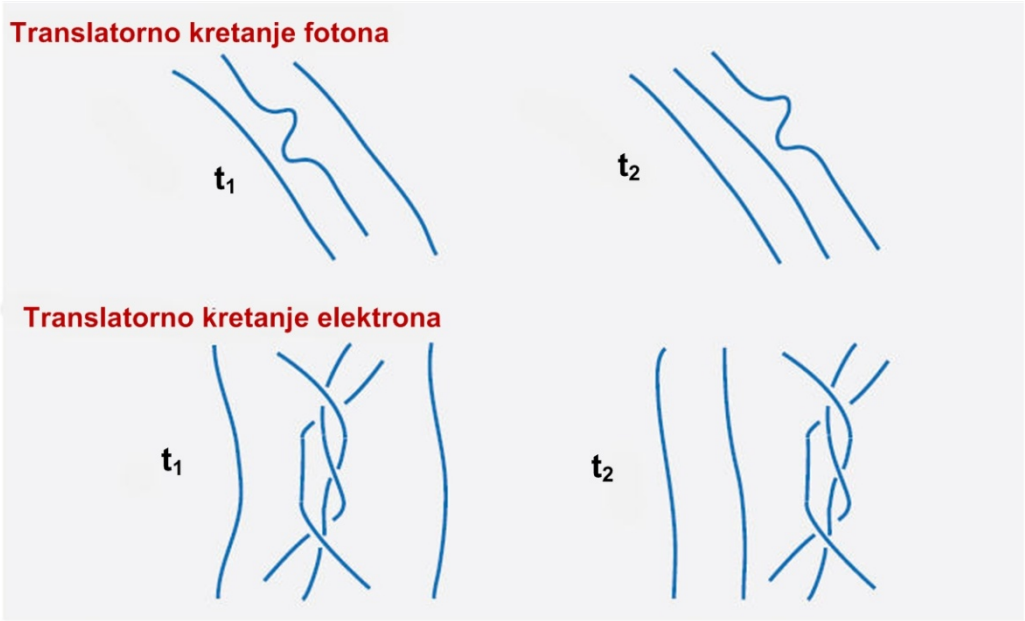
Šematska ilustracija translatornog kretanja prikazana je na ***slici 105***. U modelu niti, nasuprot do sada stečenom utisku, zaplet ne mora da se kreće u celosti. To se najlakše vidi u slučaju fotona. Lako je da se predstavi da struktura zapleta koja odgovara fotonu može da skače sa niti na nit. U svakoj fazi struktura je fotona, ali niti koje učestvuju nisu iste.



Slika 103 Lanac od prstenova daje utisak kretanja duž lanca, ako se drži prsten B dok prsten A pada

Slika 104 Trik sa lancem prstena stvara iluziju kretanja (mp4 film © Franz Aichinger). Da li je moguće da se doda još prstena u vodoravnom pravcu? (***Izazov 198e***)

Ideja o kretanju pomoću skakanja deluje takođe i za čestice sa masom. Kretanje čestice sa masom, kao što je elektron, šematski je prikazano na ***slici 105***. Slika prikazuje da kroz proces razmotavanja na granici prostora, struktura koja opisuje elektron može da se oslobodi jedne niti i da zgrabi novu. Naravno, ovaj proces ima malu verovatnoću. U modelu niti ovo je razlog zbog čega se čestice sa masom kreću sporije od svetlosti.



Slika 105 Kretanje fotona i elektrona pomoću skakanja niti

Primećujemo da je ovo objašnjenje kretanja bitno takođe zbog preslikavanja dijagrama iz modela niti u Fajmmanove dijagrame. Za većinu takvih dijagrama, na primer, za poništavanje (anihilaciju) čestica i antičestica u kvantnoj elektrodinamici, ulogu imaju skakanje niti i razmotavanje repova. Bez toga bi bilo nemoguće preslikavanje iz niti u u kvantnu teoriju polja.

Sažeto, zapleti čestica sa masom ***mogu*** da se kreću kroz vakuum korišćenjem skakanja, a to se prirodno događa mnogo sporije no kretanje fotona, kojima za skok nije potreban nikakav proces na granici prostora. Stoga je brzina fotona granična brzina za čestice sa masom; i zato je specijalna teorija relativnosti u potpunosti potvrđena.

ZAKLJUČAK O MILENIJUMSKIM PITANJIMA ČESTICA I VAKUUMA

Otkrili smo da model niti daje čvrst iskaz: elementarne čestice mogu samo da budu načinjene od jedne, dve ili tri niti. Svaka čestica je predstavljena beskonačnom ***porodicom*** zapleta sa utvrđenim brojem niti. Članovi porodice povezani su preko raznih stepena zaplitanja, kao što su uplitanje ili trik sa pletenicom od kože.

Za čestice od ***jedne niti***, model niti pokazuje da foton, W i Z bozon i gluoni obrazuju potpun popis bozona sa spinom 1, Za čestice od ***dve niti*** model niti pokazuje da postoje precizne tri generacije kvarkova. Za elementarne čestice od ***tri niti*** model niti pokazuje da postoje Higsov bozon i tri generacije leptona. Neutrini i antineutrini se razlikuju i oni su Dirakove čestice sa masom. Model niti zato predviđa da dvostruki beta raspad bez neutrna neće biti opažen. Gluonske lopta verovatno ne postoje.

Model niti objašnjava poreklo svih kvantnih brojeva opaženih elementarnih čestica. Isto tako svi predviđeni kvantni brojevi za složene čestice u saglasnosti su sa opažanjima. Prema tome, imamo takođe potpun dokaz da su sva opažanja u prirodi nastala usled promena ukrštanja. (***Strana 121***).

Model niti prikazuje model kvarka, uključujući sva dopuštena i sva zabranjena stanja hadrona. Za mezone i barione model niti predviđa tačne redoslede masa i kvantne brojeve. Predviđa se da tetrakvarkovi postoje. Predložen je način izračunavanja činilaca oblika hadrona.

U modelu niti su svi zapleti preslikani u poznate čestice. Model niti predviđa da ***ne postoje*** elementarne čestice izvan modela niti, pošto nije preostao nijedan zaplet. Na primer, u prirodi ne postoje aksioni, ni leptokvarkovi ni supersimetrične čestice. Model niti takođe predviđa nepostojanje drugih baždarnih bozona ni drugih interakcija. Model niti – ispravljen 2012. godine – posebno prikazuje postojanje Higsovog bozona. (***Strana 248***). Zapravo, svaka nova elementarna čestica otkrivena u budućnosti bila bi protivrečna i model niti bi se poništio.

Prostim rečima, model niti objašnjava zbog čega poznate elementarne čestice postoje, a druge ne postoje. Time smo rešili dve naredne stavke iz milenijumske liste otvorenih pitanja. (***Strana 128***). Ustvari, izveden spektar elementarnih čestica iznet ovde, trenutno je prvo i jedino izvođenje u istraživačkoj literaturi.

BROJ 3

Model niti pokazuje da broj 3, koji se redovno pojavljuje u standardnom modelu fizike čestica – 3 generacije, 3 interakcije, tri boje i SU(3) – u svakom slučaju je posledica prostora sa tri dimenzije. U stvari, model niti dodaje sledeći, ali relativan broj 3 na ovu listu, naime maksimalan broj niti od kojih su načinjene elementarne čestice.

Trodimenzionalnost prostora je, kao što smo videli u predhodnom tekstu (***strana 159***), rezultat postojanja niti: zapleti niti dopuštaju samo tri dimenzije. Ukratko, broj 3 koji se pojavljuje u osnovama fizike, objašnjen je nitima.

PREDVIĐANJA O TAMNOJ MATERIJI, LHC (LARGE HADRON COLLIDER) I SVEMIRU.

Astrifizočka opažanja pokazuju da su galaksije i jata galaksija okružena velikom količinom materije koja ne zrači. Ova nepoznata vrsta materije naziva se ***tamna materija***.

U modelu niti. jedino su moguće poznate elementarne čestice. Prema tome, galaktički oblaci sastavljeni od tamne materije mora da se satoje od čestica koje su pominjane do sada, ili od crnih rupa. Model niti zato predviđa da je tamna materija mešavina čestica standardnog modela i crnih rupa. Ovaj iskaz rešava još jednu stavku iz milenijumske liste otvorenih pitanja. (***Strana 128***).

Predviđanje odsustva novih elementarnih čestica u tamnoj materiji u suprotnosti je sa najpoželjnijim trenutnim izmerenim predstavljanjima, ali još ne mogu da se odbace. U stvari, predviđanje postavlja drugu strogu proveru modela: ako se nađe da je tamna materija načinjena od nepoznatih čestica, model niti je pogrešan.

Sve ove rezultate nađene do sada možemo da sažmemo u sledeći iskaz:

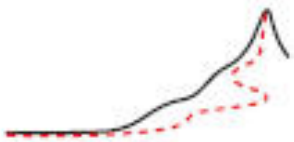
- Ne postoji ništa što bi se otkrilo o prirodi izvan opše teorije relativnosti i standardnog modela fizike čestica.

Niti predviđaju da nije preostao sakriven nijedan vid prirode. Model niti posebno predviđa takozvanu ***pustinju*** visoke energije; predviđa nepostojanje bilo koje dodatne elementarne čestice. Ekvivalentno tome, model niti predviđa da osim Plankove razmere nema druge energetske razmere u fizici čestica.

Drugim rećima, nema prostora za otkrića posle Higsovog bozona u LHC (Large Hadron Collider) u Ženevi, niti za različite tamne materije koje se traže širom sveta. Ako se otkrije bilo kakva nova elementarna čestica koja je protivrečna modelu niti, model niti je pogrešan. Da je neka nepoznata elementarna čestica propuštena u sadašnjem istrazivanju klasa zapleta i dalje je logična mogućnost.

Pošto model niti potvrđuje standardni model fizike čestica i opštu teoriju relativnosti, može da se načini sledeće predviđanje: vakuum je jedinstven i stabilan. Ne postoji prostor za druge mogučnosti. Na primer, ne postoje zidovi oblasti između različitih stanja vakuuma i svemir se neće raspasti ili promeniti na bilo koji drastičan način.

Sažeto, model niti predviđa nepostojanje bilo koje vrste naučne fantastike u savremenoj fizici.



Poglavlje 12

OSOBINE ČESTICA IZVEDENE IZ NITI

Tutto quel che vedete, lo devo agli spaghetti.[1]

Sofija Loren (Sophia Loren)

Plankove jedinice, izvedene preko niti i osnovnih načela, objašnjavaju skoro sve što je poznato o kretanju: niti objašnjavaju ***šta*** se kreće i ***kako*** se kreće. Međutim, model niti tačan je samo ako takođe objasni svaku osobinu koja može da se izmeri za svaku elementarnu česticu. Do sada smo izveli samo kvantne brojeve za sve elementarne čestice. Ostale su otvorene tri vrste svojstava čestica: ***mase***, ***uglovi mešanja*** i ***veze***. Ove velićine su bitne, pošto one određuju veličinu promene – ili rad – izazvan kretanjem svake elementarne čestice.

Sve dok ne shvatimo izmerene osobine elementarnih čestica, mi ne razumemo kretanje. A pošto model niti ne pravi predpostavke koje prevazilaze opštu teoriju relativnosti i standardni model, objašnjenja osobina elementarnih čestica jedini je način da se model niti potvrdi. Mogući su mnogi načini da se model niti opovrgne, ali jedino izračunavanje izmerenih osobina čestica može da ga potvrdi.

MASE ELEMENTARNIH ĆESTICA

Masa opisuje inercijske i gravitacijske efekte tela. Model niti mora da prikaže sve vrednosti mase opažene u prirodi; ako ne uspe, on je pogrešan. Da se prikažu mase ***svih*** tela, dovoljno je da model niti prikaže izmerene mase, uglove mešanja i jačine veza ***elementarnih*** čestica. Počenjemo njihovim masama.

Gravitacijska masa čestice u prirodi rezltat je zakrivljenosti prostora koju ona izaziva oko sebe. U modelu niti ova zakrivljenost nastaje usled kolebanja koje je rezultat prisustva jezgra zapleta, naročito zbog kolebanja repova čestice i kolebanja izmenjenih niti vakuuma oko položaja čestice. Kolebanja proizvode raspodele promena ukrštanja oko jezgra zapleta; raspodela promena ukrštanja dovodi do prostorne zakrivljenosti; na dovoljno velikom rastojanju ova raspodela zakrivljenosti otkriva se kao gravitacijska masa.

Inercijska masa, nasuprot tome, pojavljuje se u Dirakovoj jednakosti. Inercijsku masu u modelu niti određuju učestanost i talasna dužina obrtne faze vektora. Ova veličina, zauzvrat, pod uticajem je vrste zapletenosti, kolebanja izazvanih nabojima čestice, promenama topologije izazvane slabom interakcijom, a u slučaju fermiona, prosečne učestanosti i veličine opasača i trika sa pletenicom od kože. Takođe ovi procesi nastaju usled kolebanja niti.

Ukratko, i gravitacijska i inercijska masa čestice nastaju usled kolebanja niti, a još specifičnije, uglavnom usled kolebanja repova zapleta ćestice. Prema tome, ***model niti predpostavlja da su gravitacijska i inercijska masa automatski jednake***. Model niti posebno predpostavlja da je svaka masa okružena kolebajućim promenama ukrštanja čija se gustina smanjuje sa rastojanjem i srazmerna je samoj masi. Kao što je razmatrano u predhodnom tekstu, ova ideja dovodi do univerzalne gravitacije. (***Strana 211***).

OPŠTE OSOBINE VREDNOSTI MASE ČESTICE

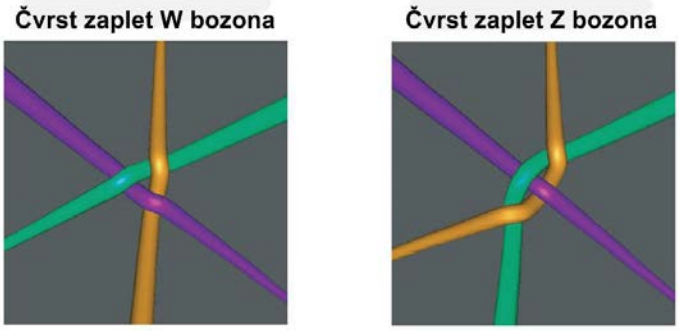
Naša pustolovina do sada dopuštala nam je da izvedemo nekoliko rezultata za mase elementarnih čestica:

- Model niti podrazumeva da mase elementarnih čestica nisu slobodni parametri, već su određene topologijom ili zapletenošću osnovnih zapleta i njihove porodice zapleta. mase čestica su zbog toga u modelu niti ***ustaljene*** i ***diskretne*** – kao što je i opaženo.
- Model niti podrazumeva da su mase uvek pozitivni brojevi.

[1] "Sve što vidite, dugijem špagetima", Sofija Vilani Šikolone (Sofia Villani Scicolone), poznata kao Sofija Loren – Ponti, italijanska je glumica i holivudska zvezda.

- Model niti podrazumeva da što je zaplet ***složeniji***, to je ***veća*** vrednost mase. Ovo sledi iz ponašanja kolebanja repova zapleta oko jezgra zapleta.
- Pošto mase čestica nastaju usled kolebanja niti, model niti takođe podrazumeva da su mase svih elementarnih čestica ***mnogo manje od Plankove mase***, kao što je i opaženo. Isto tako ovaj rezultat sledi iz ponašanja kolebanja repova zapleta oko jezgra zapleta
- Pošto mase čestica nastaju usled kolebanja niti, mase čestica i antičestica uvek su jednake, kao što je i opaženo.
- Pošto mase čestica nastaju usled kolebanja niti, mase čestica ne zavise od starosti svemira, niti od svog položaja u svemiru, niti od bilo koje druge promenljive stanja: model niti predviđa da su mase čestica nepromenljive i invarijantne, kao što je i opaženo. (***Strana 277***).
- Pošto mase čestica nastaju usled kolebanja niti, a kolebanja se razlikuju unekoliko za čvrste i labave zaplete istog oblika, model niti predviđa da se mase čestica menjaju sa energijom, kao što je i opaženo.

Opšte osobine masa čestica prikazane su modelom niti. Prema tome, nastavak našeg istraživanja ima smisla. Počinjemo traženjem načina da odredimo vrednost mase iz strukture zapleta. Razmatraćemo svaku klasu čestica posebno, određujući najpre odnose masa, a zatim apsolutnu vrednost mase.



slika 106 Kandidati za čvrste zaplete za najjednostavnije zaplete W i Z bozona (Preuzeto iz pdf izdanja Motion Mountain za 2018. godinu – u izdanju za 2016 ova slika nedostaje)

MASE BOZONA

Tri elementarne čestice sa celobrojnim spinom imaju masu koja ne iščezava: W bozon, Z bozon i Higsov bozon. Izračunavanje mase posebno je jednostavno za bozone, jer su oni u modelu niti ***čisti*** sistemi: svaki bozon opisan je relativno jednostavnom porodicom zapleta; osim toga, da bi se obrtali bozoni ne zahtevaju trik sa opasačem.

Očekujemo da je izazvana zakrivljenost, a time i gravitacijaska masa elementarnog bozona, nastala usled poremećaja koji su uvedeni u vakuum. ***Na Plankovoj energiji*** ovi poremećaji će biti, do velikih proširenja, funkcija ***dužine užeta*** uvedenog u odgovarajući čvrst zaplet. Objasnimo ovaj efekt.

Cvrsti ili ***idealni*** čvorovi i zapleti su oni čvorovi ili zapleti koji se javljaju ako zamislimo nit kao da je načinjena od užeta ***nepromenljivog*** prečnika koje je ***beskonačno savitljivo***, ***beskonačno klisko*** i zategnuto što je moguće čvršće. Dva primera čvrstih zapleta prikazana su na ***slici 106***. Čvrsti čvorovi ili zapleti ne postoje na svakidašnjem užetu; oni su matematička idealizacija. Međutim, čvrsti zapleti niti su zanimljivi: ako se podsetimo da svaka nit ima prečnik jedne Plankove dužine, čvrsti zapletii ostvaruju Plankovu granicu za model niti.

- ***Dužina užeta*** čvrstog ***zatvorenog ćvora*** je dužina savršeno savitljivog i kliskog užeta stalnog prečnika potrebnog da se zaveže čvrst čvor. Drugim rečima, dužina užeta je najmanja količina idealnog užeta potrebnog da se zaveže čvor.
- ***Dužina užeta*** cvrstog ***otvorenog čvora***, kakav je najjednostavniji zaplet svakog slabog bozona, je dužina kojom se skraćuje uže vezano u čvrst čvor.
- Uz malo pažnje, pojam dužine užeta može da se odredi za zaplete od nekoliko niti.

U ovome što sledi predpostavlja se da je dužina užeta izmerena u jedinicama prečnika užeta. Manje je uobičajeno merenje dužine užeta u jedinicama poluprečnika užeta .

Prema tome dužina užeta meri, u velikoj meri, količinu kojom čvrst čvor ili zaplet ometa vakuum oko sebe. Dužina užeta ispunjava sva svojstva mase čestice pomenute u predhodnom tekstu (***strana 267***): dužina užeta je diskretna, pozitivna, povećava se sa složenošću zapleta, jednaka je za čestice i antičestice, nepromenljiva je i invarijantna veličina. Dužina užeta će stoga imati važnu ulogu u svakoj proceni mase čestice.

Iz kvantne teorije polja poznato je da se mase W i Z bozona ne menjaju mnogo između Plankove energije i svakodnevne energije, bilo kada da se primeni šema renormalizacije. (***Ref. 239***). To nam omogućava, uz dobre približnosti, da procenimo mase slabih bozona na niskoj, svakodnevnoj energiji sa njihovom masom na Plankovoj energiji.

Gravitacijska masa bozona sa spinom 1 u modelu niti data je poluprečnikom ometanja koje je proizvedeno u vakuumu. Za bozon je ovaj poluprečnik, a time i masa, odmeren kao treći koren iz dužine užeta odgovarajućeg čvrstog zapleta.

ODNOS MASA W/Z BOZONA I UGAO MEŠANJA (U MODELU ČVORA IZ 2015. GODINE)

Najjednostavniji zapleti W bozona i Z bozona prikazani su na ***slici 106***. Odgovarajuće vrednosti dužine užeta čvrstih zapleta su L_W = … i L_Z = … prečnika užeta. Model niti procenjije odnos masa W/Z kao treći koren dužine užeta

$$\frac{m_W}{m_Z} = \left(\frac{L_W}{L_Z}\right)^{\frac{1}{3}} \qquad (200)$$

Ova vrednost mora da se uporedi sa eksperimentalnim odnosom oa 80,4 GeV/91,2 GeV = 0,88. (***Ref. 227***). Saglasnost između eksperimenata i modela niti prihvatljiva je iz dva razloga.

S jedne strane model niti posebno prikazuje višu vrednost mase neutralnog Z bozona. Takođe je jasno zbog čega se izračunati odnos masa ne slaže sa eksperimentalnim podacima. Pre svega, jednostavni zapleti predstavljaju W i Z bozone samo u najjednostavnijoj približnosti. (***Ref. 241***). Kao što je u predhodnom tekstu pomenuto (***Strana 190***), u modelu niti svaka je čestica sa masom predstavljena kao beskrajna porodica zapleta. Prosti otvoreni čvorovi samo su jednostavniji zapleti za svaki slab bozon. Model niti zato predviđa da saglasnost između izračunatog i izmerenog odnosa m_W/m_Z treba da se popravi kada se uzme u obzir Fajnmanov dijagram višeg reda, pa prema tome i komplikovanija topologija zapleta. Ispravak izračunavanja još uvek je predmet istraživanja. Drugo, približnost čvrstog čvora sa efektivnim poluprečnikom podrazumeva zanemarivanje njegovog stvarnog oblika i efektivno približno prikazuje njegov oblik kao loptu. Treće, kao što je već pominjano, ovo izračunavanje predpostavlja da je odnos masa na niskoj energiji jednak odnosu masa na Plankovoj energiji.

Upkos korišćenoj približnosti, procena odnosa masa iz čvrstog zapleta daje zadovoljavajuću usaglašenost sa eksperimentom. Glavno uporište je da očekujemo da kolebanja niti raznih članova porodice budu slične za čestice sa istim brojem niti. Za ovaj odnos masa isključen je proces uplitanja repova. Isto tako se očekuje da druge dve približnosti budu približno slične za oba slaba bozona. Ova sličnost objašnjava zašto je određivanje odnosa masa Z/W bozona moguće uz zadovoljavajuću tačnost.

Odnos masa W/Z određuje takođe slab ugao mešanja θ_W lagranžijana slabe interakcije, preko relacije $\cos\theta_W = m_W/m_Z$. Model niti stoga predviđa vrednost slabog ugla mešanja uz istu tačnost kao što je predviđa za odnos masa W/Z.

Ovaj dokaz dovodi do zagonetke: Možete li da zaključite iz modela niti kako se odnos masa W/Z menja sa energijom? (***Izazov 200ny***).

Inercijske mase W i Z bozona mogu takođe da se uporede. Inercijska masa u kvantnoj teoriji povezana je sa talasnom dužinom i učestanošću talasne funkcije. U modelu niti kvantna čestica koja se kreće kroz vakuum je jezgro zapleta koje se obrće kada napreduje. (***Strana 150***) i (***Strana 163***). Učestanost i talasna dužina spirale prema tome određuje inercijsku masu. Ovaj proces je analogan kretanju tela koje se kreće stalnom brzinom u viskoznoj tečnosti malog Rejnoldsovog broja. Uprkos trenju, analogija je moguća. Ako se malo telo opšteg oblika vuće kroz viskoznu tečnost stalnom silom, kao što je gravitacija, ono prati ***spiralnu*** putanju. (***Ref. 161***). Ova analogija podrazumeva za čestice sa spinom 1 da su učestanost i talasna dužina pre svega određeni efektivnim polupečnikom malog tela. Model niti stoga predpostavlja da inercijska masa – obrnuto srazmerna učestanosti putanje i kvadratu talasne dužine putanje – za W i Z

bozone približno srazmerna poluprečniku njihovog čvrstog čvora. To je isti rezultat kao što je za gravitacijsku mau.

S druge strane, inercijska masa nije tačno srazmerna prosečnom poluprečniku čvrstog čvora; ulogu ima i precizan oblik čvrstog čvora. Model niti zato predviđa da tačnije izračunavanje mase mora da uzme u obzir ovaj efekt.

Sažeto, model niti predviđa odnos W/Z masa i prema tome ugao slabog mešanja približno opaženom odnosu i objašnjava odstupanje približnosti od izmerene vrednosti.

ODNOS MASA HIGS/Z BOZONA

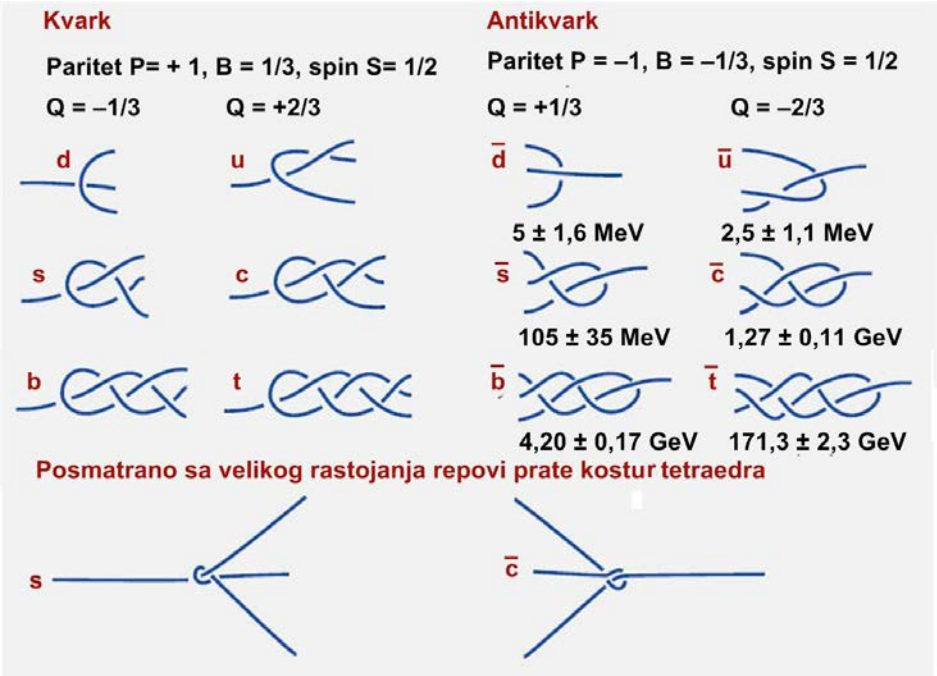
Opažena vrednost mase Higsovog bozona je 125(1) GeV. Slično kao za ostale bozone model niti predlaže korišćenje dužine užeta za određivanje mase zapleta Higsovog bozona. Zaplet je prikazan na ***slici 93***. (***Strana 249***).

Korišćenjem ovog zapleta Higsovog bozona (ispravljenog 2013. godine) dužina užeta može da se izračuna; pokazalo se da ova dužina iznosi 23,44. (***Ref. 240***). Ova vrednost daje naivnu procenjenu masu za Higsov bozon od

$$m_{\text{Higgs}} = \left(23,44/13,7\right)^{1/3} \cdot 91,2\ \text{GeV} = 109\ \text{GeV} \tag{201}$$

Procena je udaljenija od izmerene vrednosti, od 125(1) GeV, nego li vrednost izvedena iz zatvorenog zapleta. Zapravo, model niti predlaže za oblike koji se jako razlikuju od lopte– kakav je oblik zapleta Higsovog bozona – da je efektivna masa veća nego li vrednost određena samo iz dužine užeta. Izvođenje bolje procene mase iz Higsovog zapleta još uvek je predmet istraživanja.

Sažeto, model niti predviđa odnos masa Higs/Z u oblasti opažanja onosa; a model objašnjava odstupanje približnosti od opažene vrednosti.



Slika 107 Najjednostavniji zapleti pripisani kvarkovima i antikvarkovima. Date su takođe eksperimentalne mase

ODNOSI MASA KVARKOVA

Kvarkovi su fermioni. Procena masa za fermione u modelu niti mnogo je teža nego za bozone, jer njihovo napredovanje uključuje trik sa opasačem. Ipak, korišćenjem ***slike 107***, model niti omogućava nekoliko predviđanja za odnos masa kvarkova

- Pre svega, jasno je da je najjednostavniji zaplet kvarka manje zapleten no zapleti W i Z bozona. Model zato predviđa da su laki kvarkovi manje mase od W i Z bozona, kako je i opaženo.

- Takođe je predviđeno da su mase kvarkova jednake za bilo koji naboj boje, kao što je i opaženo.
- Osim toga, napredovanje u dužini užeta čvrstih osnovnih zapleta za šest kvarkova predpostavlja napredovanje njihovih masa. (***Strana. 241***). Ovo je i opaženo, uz izuzetak mase gornjeg (up) kvarka. Za ovaj izuzetan slučaj, očekuje se da imaju ulogu efekti nastali usled uplitanja repova i usled mešanja kvarkova, što se razmatra u daljem tekstu. (***Strana 277***).

Pokušajmo da izdvojimo brojčane vrednosti odnosa masa kvarkova. Počinjemo istrživanjem čvrstih zapleta kvarkova, stoga vrednostima mase Plankove razmere, i predpostavlja se i da kvarkovi imaju oblik lopte. Za svaki broj kvarka q masa kvarka biće ponderisan prosek iznad mase porodice zapleta sa q, q+6, q+12 ukrštanja itd. Svaki čvrst zaplet ima izvesnu dužinu užeta. masa svakog zapleta biće određena učestanošću trika sa opasačem. Tada je masa kvarka prosek svih zapleta porodice; biće određena učestanošću uplitanja repova.

Učestanost trika sa opasačem biće eksponencijalno mala funkcija dužine užeta L. Ne očekuje se da učestanost trika sa pletenicom od kože, ili šestostruko uplitanje repova, jako zavisi od jezgra zapleta. Ona meša zaplete višeg reda sa zapletima nižeg reda. Za izračunavanje odnosa masa u prvoj približnosti može uplitanje da se zanemari. Za kvarkove zato očekujemo sledeću opštu zavisnost mase

$$m \sim e^{aL} \tag{202}$$

gde je a nepoznat broj reda 1. Direktno primećujemo da takav odnos obećava opštu saglasnost sa opaženim odnosima među masama kvarkova.

Aktualna izračunavanja dužine užeta koja su sproveli Erik Raudon (Eric Rawdon) i Marija Fišer (Maria Fisher) pokazuju da dužina užeta zapleta kvarka raste približno linearno sa q, kao što se i očekivalo prema teorijskim dokazima čvora. (***Ref. 241***). Njihovi rezultati dati su u ***Tabeli 14***. Upoređujući razlike ovih izračunatih dužina užadi sa poznatim masama kvatka, potvrđuje da broj a ima efektivnu vrednost u opsegu između 0,4 i 0,9 te je stoga zaista reda veličine 1.

TABELA 14 Izračunate dužine užadi u jedinicama prečnika užeta za čvrste zaplete kvarka sa ***slike 83*** (***strana 240***) sa repovima usmerenim duž kostura tetraedra.

Zaplet	**Dužina**	**Dužina užeta**	**Razlika**
kostur (vakuum)	138,564065	osnovna vrednost	
najjednostavniji **d**	139,919533	1,355468	1,355468
najjednostavniji **u**	142,627837	4,063773	3,708305
najjednostavniji **s**	146,175507	7,611443	3,547670
najjednostavniji **c**	149,695643	11,131578	3,520136
najjednostavniji **b**	153,250364	14,686299	3,554751
najjednostavniji **t**	157,163826	18,599761	3,913462

Rezultati iz ***Tabele 14*** takođe predpostavljaju da se nešta posebno događa za d kvark, koji je izvan redoseda ostalih kvarkova. Više o tome u tekstu koji sledi. Rezultati iz ***Tabele 14*** osim toga predpostavljaju da je gornji (top) kvark posebno težak – kao što je i opaženo.

Eksperimentalne vrednosti masa kvarka date su u ***Tabeli 15***; tabela takođe sadrži vrednosti koje su ekstrapolirane do Plankove energije za čist standardni model. (***Ref. 242***). Izračunavanja u modelu niti nisu dobro usaglašena sa podacima. Procena modela niti pokazuje da sama dužina užeta ***nije dovoljna*** da se shvati odnos mase kvarkova. Jedina ohrabrujuća činjenica je da približnost dužine užeta može da obezbedi osnovni razlog za ranije predpostavke o približnim ***utvrđenim odnosima masa*** između gornjih (up) kvarkova i ***utvrđenim odnosima mase*** između donjih (down) kvarkova. (***Ref. 243***).

Ustvari, model niti predviđa da su mase svakodnevnih kvarkova rezultat kombinacije tri efekta: efekta dužine užeta i oblika jezgra zapleta u triku sa opasačem, efekta šestostrukog uplitanja repa i efekta zavisnosti mase od energije između Plankove energije i svakodnevne energije. Ostavljajući nastranu efekte zavisnosti od energije, bolja približnost za masu kvarka uključuje ostale članove porodice zapleta:

$$m_q \sim p_q e^{a_q L_q} + p_{q+6} e^{a_{q+6} L_{q+6}} + \cdots \tag{203}$$

gde je p_q verovatnoća zapleta sa q ukrštanja usled uplitanja repa, a a_q je broj reda jedan koji uključuje efekt oblika jezgra. Međutim, do sada nisu poznate vrednosti ove verovatnoće p_q i broja a_q. Uz približnost da je

prva verovatnoća 1, a sve ostale 0, i da su svi brojevi a_q jednaki, dobijamo predhodnu približnost. Videli smo da ova približnost ne odgovara dobro eksperimentalnim podacima. Očigledno je, da zanemarivanje ostalih članova porodice i ostalih efekata na masu nisu mogući za kvarkove. Ovo pitanje je predmet istraživanja.

TABELA 15 Izračunate mase kvarkova na Plankovoj energiji, pod predpostavkom da standardni model važi do ove vrednosti. (***Ref. 242***)

Ukus kvarka	**Masa na maloj energiji**	**Masa na Plankovoj energiji**
gornji (up) **u**	2,5(1,1) MeV	0,45(0,16) MeV
donji (down) **d**	5,0(1,6) MeV	0,97(0,10) MeV
čudan (strange) **s**	105(35) MeV	19,4(1,2) MeV
ljubak (charming) **c**	1270(110) MeV	213(8) MeV
dubinski (bottom) **b**	4200(170) MeV	883(10) MeV
vršni (top) **t**	171300(2300) MeV	6699(880) MeV

Zapazili smo da model niti predviđa vrlo malu masu za donji (down) kvark – to jest ogoljenu masu Plankove energije. Međutim, opaženo je da je masa donjeg (down) kvarka u prirodi veća od mase gornjeg (up) kvarka. (Primećujemo da uprkos ovom problemu, da je redosled masa mezona predviđen ispravno.) Zapravo, uplitanje repa i trik sa pletenicom od kože imaju potencijal da objasne izuzetno veliku masu donjeg (down) kvarka; dodana dužina užeta šest dodatnih ukrštanja je oko 42 polupreč nika ili 21 prečnik. (***Ref. 241***); Rezultat je činilac $e^{a_7 \cdot 21}$ koji je u opsegu između milion i nekoliko hiljada miliona. Ovaj veliki činilac mogao bi da kompenzira malu verovatnoću za zaplet sa 6 dodatnih ukrštanja, dovodeći stoga do mase donjeg (down) kvarka koja je veća od predpostavljene iz jednostavnosti najčeščeg osnovnog zapleta. Moglo bi da se dogodi da je simetrija u ogledalu najjednostavnijeg zapleta donjeg (down) kvarka razlog da je mešanje sa članovima porodice sa šest i više dodatnih ukrštanja ***veće*** od onog za gornji (up) kvark.

Premda izgleda teško analitičko izračunavanje za mase kvarkova, moguće su i bolje približnosti. Uz dovoljan kapacitet računara moguće je za mase kvarkova da se izračuna efekt oblika jezgra u triku sa opasaćem i zavisnost od energije. Najteža tačka ostaje izračunavanje verovatnoće uplitanja repa. Ova tačka zahteva još mnogo istraživanja.

ODNOS MASA LEPTONA

Izračunavanje mase leptona podjednako su uključena. Svali lepton, budući da je fermion, ima veliku porodicu pridruženih zapleta. Postoje jednostavniji zapleti i postoje zapleti koji se pojavljuju preko ponavljanih primena uplitanja repa. Uprkos ovoj velikoj porodici zapleta, neki rezultati mogu da se izvedu iz samih najjednostavnijih zapleta leptona, zanemarujući članove višeg reda u porodici.

Pre svega, najjednostavniji zapleti leptona znatno su manje vezani nego li zapleti "prekinutih" W i Z bozona. (Dužina užeta za zaplet leptona mora tek da se izračuna.) (***Izazov 201ny***). Model niti zato predviđa da su mase leptona mnogo manje od masa W i Z bozona. To odgovara opažanjima.

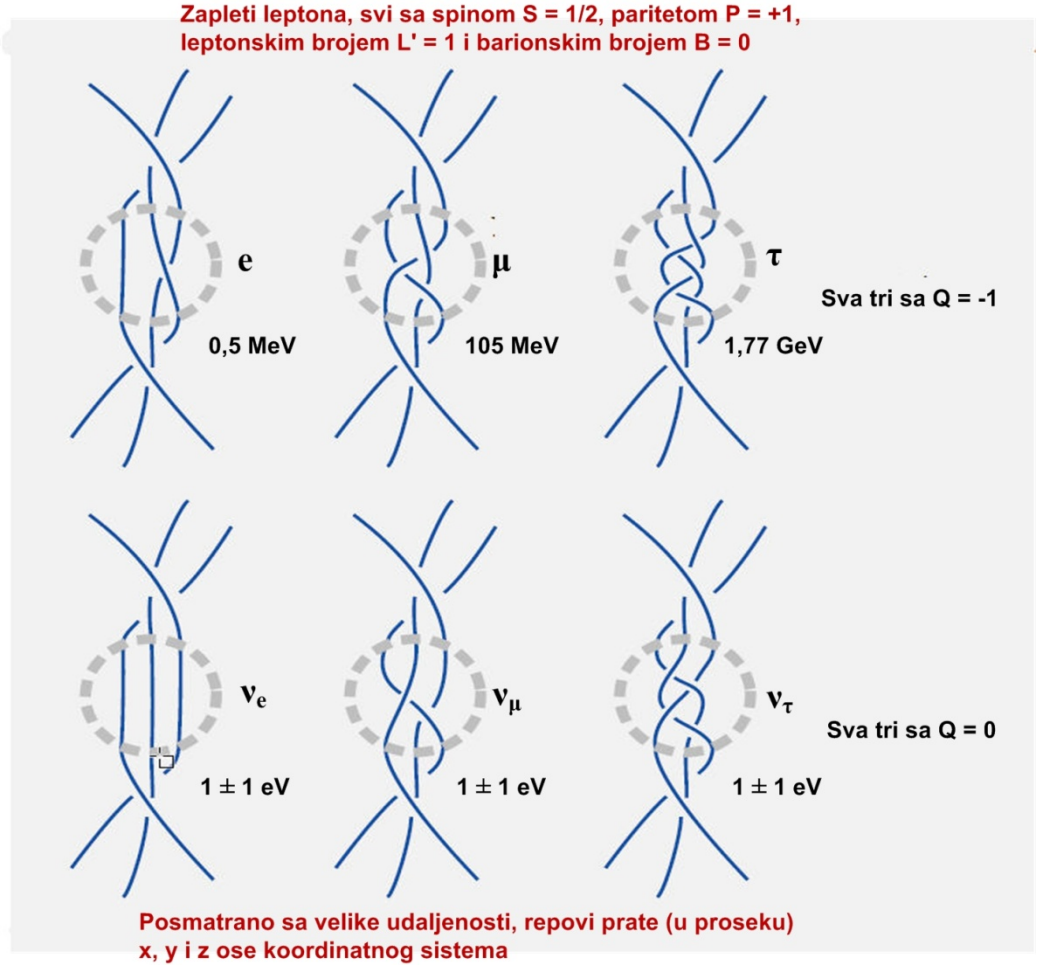
Međutim možemo da kažemo i više. Za elektronski neutrino, osnovni zaplet je skoro nevezan. Model niti stoga nagoveštava za elektronski neutrino masu koja skoro nestaje. Trik sa opasačem ima zanemarljivu ulogu; samo efekt uplitanja repa sprečava da masa neutrina bude tačno nula. S druge strane, predviđa se da elektron ima veću masu od neutrina, suštinski usled dodatne složenosti čvora – posebno kod članova višeg reda u porodici – to jest usled njegovog električnog naboja.

I za neutrine i za leptone sa nabojem, dobitak u dužini užeta u verziji čvtstog osnovnog zapleta predviđa dobitak u njihovim masama. To je zaista opaženo.

Za svaku generaciju leptona masa leptona će biti prosek u odnosu na zaplete sa brojevima ukrštanja l, $l + 6$, $l + 12$ itd. Za svaki zaplet leptona sa l ukrštanja teorija čvorova predlaže dužinu užeta L koja se približno srazmerno povećava sa l. Svaka vrednost mase leptona biće ponovo data učestanošću trika sa opasačem i uplitanja repa. Zato očekujemo opšti odnos tipa

$$m_l \sim p_l e^{bL_l} + p_{l+6} e^{bL_{l+6}} + \cdots \qquad (204)$$

gde je b broj reda 1 koji uzima u obzir oblik jezgra zapleta. Takav odnos je o opštoj saglasnosti sa opaženim odnosima između masa leptona. Ispitivanja ovog pitanja su u toku.



Slika 108 Najjednostavniji kandidati za zaplete leptona. Antileptoni su zapleti u ogledalu. Date su takođe i eksperimentalne vrednosti mase

Buduća izračunavanja dužine užadi i drugih geometrijskih svojstava zapleta omogućiče detaljnije analize. Najvažniji izazov je da se izvede tačan redosled masa između mionskog i elektronskog neutrina. Procenjivanjem efekta na masu usled električnog naboja, još uvek je predmet istraživanja.

Ponovo primećujemo da se mehanizam generisanja mase u modelu niti razlikuje od ostalih predloga u istraživačkoj literaturi. (***Strana 248***). To je u saglasnosti sa Higsovim mehanizmom, ali ide i izvan njega. Za neutrine je mehanizam protivrečan mehanizmu klackalice ali potvrđuje mehanizam Jukave (Yukawa). Sa udaljenosti, mehanizam mase modela niti podseća pomalo na prekid konformalne simetrije. (***Ref. 244***).

ODNOSI MASA ŠIROM PORODICE ČESTICA

Neutrini su laki, elektoni imaju veću masu, laki kvarkovi još veću, a W i Z bozoni još veću. Šta je poreklo ovih razlika masa? Drugim rećima, šta je poreklo ove takozvane ***hijerarhije masa***?

U modelu niti glavni uticaj na masu čine veličina i oblik jezgra zapleta. Veličina i oblik jezgra zapleta određuju poremećaj vakuuma preko učestanosti kolebanja koje dodaju oko sebe. Veličina jezgra zapleta može da se proceni preko dužine užeta čvrstog zapleta.

Opaženo je da su laki kvarkovi manje mase od W i Z bozona. I zaista, njihova dužina užeta znatno je manja od one za W i Z bozone. Dužina užeta kvarkova sa većom masom veća je od one za W i Z, i zaista, gornji (top) kvark ima veću masu od W i Z bozona. (Za dubinski (bottom) kvark ulogu imaju dodatni efekti.)

Opaženo je da su neutrini znatno manje mase nego čak kvarkovi najmanje mase. I zaista, njihova dužina užeta manja je od lakih kvarkova.

Zato model niti kvalitativno prizazuje opaženu hijerarhiju masa. Sledeći korak je je da se načini kvantitativan iskaz, ili najmanje, precizniji kvantitativni iskazi.

Nikakav uticaj na masu nema broj niti? Zapleti lakih bozona načinjeni su od jedne niti, zapleti kvarka od dve, zapleti Higsovog bozona i leptona od tri, a vakuum od više niti. Uopšteno govoreći, što je veći broj niti to je manje vezana najlakša elementarna čestica. Upleteni zapleti lakših kvarkova i lakših leptona – stoga zapleti koji su manje zapleteni – nekako proizvode manje promena ukrštanja oko jezgra no "čvrsto zapletini" zapleti W i Z bozona. Hijerarhija masa izgleda da nastaje usled lakoće razpetljavanja zapleta čestice. Ova predpostavka predmet je istraživanja.

PREDVIĐANJA O APSOLUTNOJ VREDNOSTI MASE I PUNOJ HIJERARHIJI MASE

Kao što smo videli, model niti predviđa redosled masa i odnose masa koji potkrepljuju ili bar nisu protivrečni opažanjima. Model niti takođe predviđa da su mase čestica ustaljene i diskretne, da ne zavise od starosti svemira i da se ne razlikuju od masa antičestica. Sva ova svojstva u saglasnosti su sa svim eksperimentima.

Sledeći korak je određivanje ***apsolutnih*** vrednosti masa. Za taj korak potrebno nam je da odredimo verivatnoću promena ukrštanja oko jezgra zapleta za svaku česticu. Ova verovatnoća zavisi od trika sa opasačem i od verovatnoće uplitanja repa na granici prostora. Jasno je da su ove verovatniće male, pošto su, grubo govoreći, retka odgovarajuća kolebanja. To podrazumeva da su sve mase elementarnih čestica predviđene da budu mnogo manje od Plankove mase, što je zaista i opaženo.

Model niti zato smanjuje izračunavanje apsolutnih masa čestica na izračunavanje pojedinačnog procesa: na ućestanost promene oblika niti koja dovodi do promena ukrštanja. Promena oblika niti dovodi do trika sa opasačem i do uplitanja repova niti na granici prostora. Primećujemo da su u prošlosti razni istraživaći dolazili do zaključka da sve mase elementarnih čestica treba da nastanu usled pojedinačnog procesa ili energetske razmere. Na primer, prekid konformne simetrije uvek je bio kandidat za pridruženi proces. ***Ref. 244***) i (***Ref. 245***). Nasuprot tome, Higsov mehanizam – potvrđen sada eksperimentom (***strana 248***) – ima zajednički ***uticaj*** na vrednosti masa, ali ***nije*** osnovno objašnjenje tih vrednosti; umesto toga, uplitanje repa jeste.

Apsolutna vrednost mase u modelu niti nije čisto geometrijska veličina koja može da se izvede iz oblika vezivanja zapleta. Mase čestica su u velikoj meri nastale usled ***dinamičkih*** procesa. Apsolutne vrednosti mase su usled kolebanja niti; kolebanja su usled dužine užeta, usled trika sa opasačem i usled uplitanja repa. Još preciznije, možemo reći da je masa određena uglavnom dužinom užeta i trikom sa opasačem, a pod uticajem relativne verovatnoće raznih zapleta u porodici zapleta koji predstavljaju česticu.

Da bi se odredila apsolutna vrednost mase, potrebno je da odredimo odnos između mase čestice i ***Plankove mase***. Jednim od pristupa mogao bi da se odredi odnos između verovatnoće promena ukrštanja za određenu česticu i verovatnoće promena ukrštanja za Plankovu masu. Međutim, šta je to Plankova masa?

U modelu niti Plankova masa odgovara strukturi koja proizvodi jednu promenu ukrštanja u svakom Plankovom vremenu, stalno, bez prekida. Ali model niti predviđa da se takve strukture ***ne pojavljuju*** kao lokalizovane čestice, pošto svaka lokalizovana čestica – to jest, svaki zaplet – prema konstrukciji ima mnogo manji broj izazvanih promena ukrštanja u vremenu. Prema modelu niti, elementarne čestice sa Plankovom masom ***ne postoje***. Ovaj zaključak je u skladu sa opažanjima. Međutim, model niti podrazumeva takođe da ***ne postoje*** ni crne rupe sa Plankovom masom. Zaista, takve crne rupe u Plankovoj razmeri, osim što su kratotrajne, nemaju jednostavnu strukturu niti. Obzirom na ove rezultate, ne možemo da koristimo model lokalizovane Plankove mase kao praktično merilo za određivanje masa čestica.

Napominjemo da je problem isti kakav se sreće u svakodnevnom životu. Premda Plankova masa određuje jedinicu mase u prirodi, nijedno merenje mase u bilo kojoj laboratoriji nije izvedeno neposrednim korišćenjem ove jedinice.

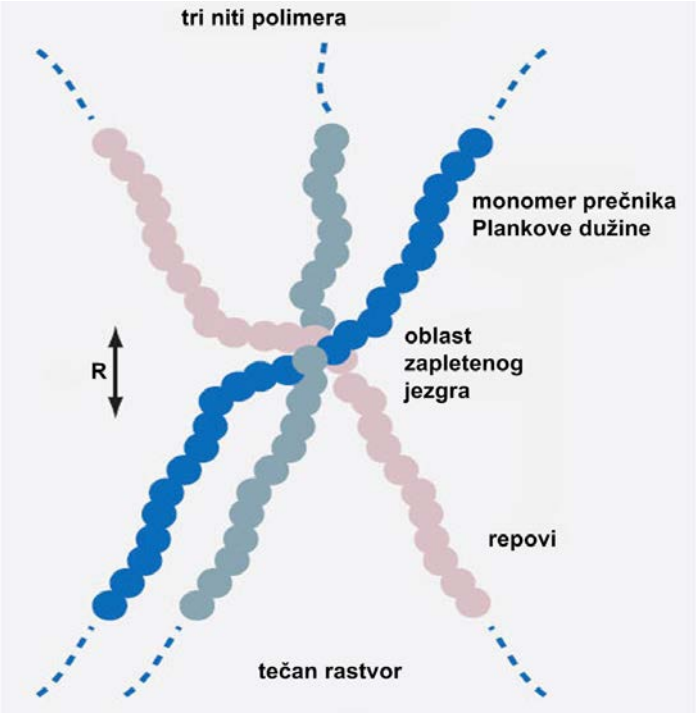
Nemogućnost da se modelira Plankova masa, znači da je potrebno da nastavimo drugačije. Stoga probamo drugačiji pristup. Znamo da je apsolutna masa čestice data prosečnim brojem promena ukrštanja koje izaziva u vremenu:

- Masa je brzina promene ukrštanja.

Preciznije, brzina promene ukrštanja čestice u mirovanju je njena gravitacijska masa, a brzina promene ukrštanja izazvana linearnim kretanjem je njena inercijska masa. Istražimo ovu ideju i njene posledice.

Obzirom da je masa određena brzinom promene ukrštanja, zaključujemo da su vrednosti mase čestica određene topologijom čestice, da su ustaljene, da su diskretne, da su pozitivne, da se povećavaju sa složenošću jezgra zapleta, da su jednake za čestice i antičestice i da su nepromenljive u vremenu. Pošto ova svojstva odgovaraju opažanjima, brzina promene ukrštanja zaista ostvaruje sve kvalifikacijske zahteve za apsolutnu vrednost mase čestice. (***Strana 267***). Zato možemo da nastavimo. Da bismo izračunali mase čestica potrebno je da odredimo broj promena ukrštanja u vremenu kojeg izaziva svaki zaplet čestice.

Prvi način da se izvede izračunavanje mase čestice je da se upotrebi veliki računar, da se unese model niti za vakuum plus model niti za čestice i broji broj promena ukrštanja u vremenu. Jedan primer takvog pristupa, koji koristi razvoj polimera u tečnom rastvoru, prikazan je na ***slici 109***. Određivanjem prosečne učestanosti sa kojim se pojavljuju promene ukrštanja za vezano jezgro date topologije jezgra, možemo da odredimo mase leptona.[1] U takvom izračunavanju razmera mase je postavljena posredno, preko vremenske razmere spektra kolebanja. Pristup masama čestica pomoću ***računara*** još uvek je tema istraživanja.



Slika 109 Određivanje vrednosti mase leptona pomoću analogije niti polimerom. Verovatnoća trika sa opasačem za jezgro zapleta daje procenu vrednosti mase elementarne čestice iste topologije

Drugi način da se odrede mase čestica je da se traži analitička približnost. To nije lak izazov. Ako predpostavimo da je inercijska masa čestice u pokretu određena uglavnom učestanošću trika sa opasačem (i samim tim zanemareno uplitanje repa), dobijamo neposredno rezultat da je trik sa opasačem vrlo neverovatan. Ako jezgro ima prečnik, recimo Plankove dužine, verovatnoća trika sa opasačem za česticu sa šest repova biće tako u opsegu od

$$e^{-30} \qquad (205)$$

ili manjem. To bi bila takođe procena Plankovih jedinica za česticu. Takva procena je vrlo gruba, a izložilac može da bude sasvim drugačiji. Prema tome dobijamo, kao što je bilo pomenuto u predhodnom tekstu (***strana 150***), jasno objašnjenje za veliku razliku između Plankove mase i tipične mase čestice. Preciznija analitička približnost – što nije nemoguć poduhvat – rešila bi prema tome takozvani ***problem hijerarhije masa***. Međutim, nije lako da se analitički odredi izložilac u vrednosti verovatnoće. Do sada je nekoliko stručnjaka za razvoj polimera promašilo u pokušajima da se dobije bar najgrublja procena verovatnoće trika sa opasačem u polimerno vezanoj lopti. Možete li vi to da učinite? (***Izazov 202r***).

Ukratko, nalaženje analitičke približnosti za apsolutne mase čestica, posebno onih koje u obzir uzimaju trik sa opasačem, još uvek je otvoren problem i predmet je istraživanja.

---

[1] To je teško, ali je izvodljivo. Prvo je potrebno da nađemo parametarski prostor i spektar kolebanja za koja zaplet polimera prati Šredingerovu jednakost. Izračunavanja sa različitim jezgrima tada daju razlličite vrednosti mase. Rezultat će biti u blizini izmerene vrednosti sve dok mogu da se zanemare trik sa pletenicom od kože i druge vrste uplitanja.

FINO PODEŠAVANJE I PRIRODNOST

Postalo je moderno od pre oko jedne decenije da se izražava kako je model niti "fino podešen". Pojam izražava da izuzetno niske vrednosti energije vakuuma nisu očigledne kada se uključe doprinosi svih polja sa nultim tačkama raznih elementarnih čestica iz standardnog modela. Niska energija vakuuma jedino izgleda moguća ako su mase i vrste čestica standardnog modela nekako međusobno povezane. Drugim rečima, pojam "fino podešavanje" pre svega izražava nedostatak razumevanja porekla masa, mešanja i konstante veza elementarnih čestica. Pojam naročito izražava da mase ***nisu*** parametri. U opštoj upotrebi "parametri" su različite konstante; međutim, niska vrednost energije vakuuma pokazuje da mase elementarnih čestica ne mogu da se menjaju bez razaranja valjanosti standardnog modela fizike čestica.

Neki predpostavljaju da "fino podešavanje" podrazumeva da je standardni model fizike čestica "neprirodan". Model niti pokzuje da je ova predpostavka pogrešna. Model niti ***prirodno*** ima nisku energiju vakuuma, pošto nevezane niti ravnog prostora ***prirodno*** imaju nultu gustinu energije.

U stvari, izraz "fino podešavanje" znači da konstante u standardnom modelu nisu nasumičan izbor, već da postoji objašnjenje za ove konstante koje čeka da bude otkriveno. I zaista, model niti ***prirodno*** objašnjava da vrednosti masa, mešanja i konstanti veza nisu promenljive, već ***ustaljene***.

Ukoliko standardni model nebi bio "fino podešen", on nebi opisivao prirodu. Svaki ispravan opis sveta je u nekom pogledu "fino podešen". Možemo da kažemo da pojam "fino podešen" naglašava potpuno odsustvo alternativa za svet kako ga opažamo; to je jedno od čuda prirode. I zaista, model niti čini da je ovo čudo očigledno u mikroskopskom domenu.

OTVORENA PITANJA O IZRAČUNAVANJIMA MASE

Izračunavanje apsolutne vrednosti nase iz kolebanja zapleta, bilo numerički, bilo uz analitičku približnost, omogućiće konačnu proveru iskaza u ovom odeljku. Model niti predviđa da će rezultati za vrednost odgovarati eksperimentima. (***Izazov 203ny***).

* * *

Pošto model niti predviđa nepostojanje nove fizike iza standardnog modela fizike čestica, izračunavanje masa neutrina i nihovog odnosa masa, jedno je od novih mogućih predviđanja koje je preostalo u modelu niti. Model niti iznosi predpostavku o masama neutrina: pod predpostavkom da su zapleti neutrina sa ***slike 108*** tačni, tada na masu elektronskog neutrina mnogo jače utiče uplitanje repa nego li trik sa opasačem.

* * *

Ako je masa data brzinom promene ukrštanja, kako se ova povezanost uklapa u gore iznetim procenama da se zasniva na dužini užeta? (***Izazov 204s***). Da li će novije otkriće, skoro linearnog odnosa između dužine užeta i broja ukrštanja, da pomogne u analitičkim približnostima masa? (***Ref. 246***).

* * *

Da li je masa zapleta povezana sa gustinom niti vakuuma? (***Izazov 205s***).

* * *

Da li mase čestica zavise od kosmološke konstante? (***Izazov 206s***).

* * *

Masa elementarnih čestica ne zavisi od smera spina. Posebno su jednake uzdužne i poprečne mase W i Z bozona. Model niti ne dopušta uticaj smera spina na masu.

* * *

Može li pojam ukupne zakrivljenosti da pomogne u izračunavanju masa čestica? (***Izazov 207s***).

* * *

Da li efekt uplitanja repa potvrđuje predpostavku da svaki eksperiment opisan malom energetskom razmerom određuje rezoluciju ili preciznost, a velika energetska razmera određuje tačnost, što je manje očigledno? (***Izazov 208d***).

ZAKLJUČAK O MASAMA ELEMENTARNIH ČESTICA I MILENIJUMSKIM PITANJIMA

Model niti podrazuneva da su mase dinamičke veličine uslovljene geometrijskim i topološkim svojstvima određene porodice zapleta. Kao rezultat toga, niti objašnjavaju zašto mase elementarnih čestica nisu slobodni parametri, već ustaljene konstante i zašto su one mogo manje od Plankove mase. Niti takođe prikazuju sva poznata kvalitativna svojstva masa čestica. Rezultati su ohrabrujući, pošto nijedan drugi model koji je usaglasnosti sa eksperimentima ne objašnjava ova kvalitativna svojstva.

Analitička procena mase (***strana 275***) obećava da objasni problem hijerarhije: prve procene verovatnoće trika sa opasačem su tako male da one obećavaju da objasne zbog čega su mase čestica tako mnogo manje od Plankove mase.

Niti daju procene za za brojne odnose masa elementarnih čestica, kao što su m_W/m_Z i m_{Higs}/m_w. Većina redosleda masa kvarka i leptona i prve grube procene odnosa masa u saglasnosi su sa eksperimentalnim podacima. Svi redosledi mase hadrona predviđeni su tačno. Model niti takođe predviđa da se apsolutne vrednosti masa i njihova promena ili "tok" izračunava sa energijom. Takva buduća izračunavanja omogućiće ili ispravku slaganja sa opažanjima ili odbacivanje modela niti.

U milenijumskoj listi otvorenih pitanja (***strana 128***) videli smo kako da se reši više budućih pitanja – mada ih još nismo rešili. Pošto nas očekuje nekoliko interesantnijih izazova, ipak nastavljamo. U narednoj etapi istražujemo mešanje stanja elementarnih čestica.

UGLOVI MEŠANJA

U prirodi se razlikuje sopstveno stanje ***mase*** za fermione od njihovog ***slabog*** sopstvenog stanja: kvarkovi se međusobno mešaju, a to čine i neutrini. Kvarkovi takođe pokazuju narušavanje CP. Ovi efekti su opisani sa dve takoznane ***matrice mešanja***. Dve matrice mešanja zato sadrže osnovne konstante prirode. Da bi model niti bio tačan, on mora da omogućava izračunavanje merenih vrednosti svih sastojaka u obe matrice mešanja.

MEŠANJE KVARKA – EKSPERIMENTALNI PODACI.

U prirodi se razlikuju sopstvena stanja mase kvarka i njihova slaba sopstvena stanja. Ovu razliku je otkrio 1963. godine Nikola Kabibo (Nicola Cabibbo) i nazvao je ***mešanje kvarka***. (***Ref. 227***). Vrednosti elemenata matrice mešanja kvarka izverene su u više eksperimenata, a u toku su mnogi eksperimenti da bi pomogli da se poveča preciznost merenja.

Matrica mešanja kvarka je određena sa (***Vol. V, strana 186***)

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \left(V_{ij}\right) \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix} \tag{206}$$

gde su, prema dogovoru, stanja +2/3 kvarkova u (gore), c (ljupkost) i t (vrh) nemešani. Nazivi kvarkova bez oznake "prim" predstavljaju jaka (i elektromagnetna) sopstvena stanja, a nazivi kvarka sa oznakom "prim" predstavljaju slaba sopstvena stanja. (***Ref. 227***). U njihovoj standardnoj parametrizaciji matrica mešanja je

$$V = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}s_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix} \tag{207}$$

gde je $c_{ij} = \cos\theta_{ij}$, $s_{ij} = \sin\theta_{ij}$, a i i j oznake generacije ($1 \leq i, j \leq 3$). Matrica mešanja prema tome sadrži tri ugla mešanja θ_{12}, θ_{23} i θ_{13} i jednu fazu δ_{13}. Na granici $\theta_{23} = \theta_{13} = 0$, to jest kada se mešaju dve generacije, jedini preostali parametar je ugao θ_{12} i naziva se ***Kabibov ugao***; ovaj ugao je Kabibovo orginalno otkriće. Poslednji parametar, takozvano ***CP narušavanje faze*** δ, nalazi se između 0 i 2π izmereno je da je različit od nule; on izražava opažanje da je CP invarijanta narušena u slučaju slabih interakcija. CP narušavanje faze pojavljuje se samo u trećoj koloni matrice; prema tome, CP narušavanje zahteva postojanje (najmanje) tri generacije. (***Izazov 209e***). Sadašnje vrednosti uz 90% pouzdanosti za izmerenu veličinu složenih elemenata matrice mešanja kvarka su (***Ref. 227***)

$$|V| = \begin{pmatrix} 0,97427(14) & 0,22536(61) & 0,00355(15) \\ 0,22522(61) & 0,97343(15) & 0,0414(12) \\ 0,00886(33) & 0,0405(12) & 0,99914(5) \end{pmatrix} \qquad (208)$$

Svi ovi brojevi neobjašnjene su konstante prirode, slično masama čestica. Matrica V je unitarna unitar grešaka eksperimenata.

Velika količina rada u eksperimentima nalazi se iza ovog kratkog sažimanja. Podatke su prikupljale hiljade ljudi tokom mnogo godina, u brojnom eksperimentima rasipanja i raspada, Bez obzira na to, ovo kratko sažimanje predstavlja sve podatke koje svaki objedinjeni opis mora da prikaže o mešanju kvarka.

MEŠANJE KVARKA – OBJAŠNJENJE

U standardnom modelu fizike čestica matrica mešanja kvarka obično se posmatra da je nastalo usled spoja između očekivane vrednosti vakuuma Higsovog polja i levih dvostrukosti kvarka ili desnih jednostrukosti kvarka. Međutim, ovaj opis nas ne dovodi do brojčanih predviđanja.

Pomalo drugačiji opis mešanja kvarka dat je u modelu niti. U modelu niti Higsovo polje (***strana 248***) i njegova uloga kao generatora mase i čuvara jedinstvenosti specijalan je slučaj procesa uplitanja repa. (***Strana 190***). A uplitanje je povezano sa slabom interakcijom. Pošto su razni kvarkovi različito zapleteni racionalni zapleti, uplitanje repa može da umanji ili da poveća ukrštanja u zapletu kvarka, i tako da promeni ukuse kvarka. Iz modela niti stoga zaključujemo da je mešanje kvarka automatski rezultat nodela niti i da je u vezi sa slabom interakcijom. Isto tako zaključujemo da je mešanje kvarka nastalo usled ***istog*** procesa koji proizvodi mase kvarka, kao što se i očekuje. Međutim, možemo da kažemo i više.

U modelu niti je ***sopstveno stanje mase*** – i sopstveno stanje boje – oblik zapleta u kojem je izražena simetrija boje i u kojem je položaj čestice određen. Sopstveno stanje mase kvarka odgovara zapletima čija su tri repa u boji usmereni u tri pravca koji su ravnomerno raspoređeni u prostoru. Oblik u kojem su repovi usmereni u tri pođednako razmaknuta pravca je oblik koji čine SU(3) pod izraženim uticajem I poteza Rajdemajstera na jezgra.

Nasuprot tome, slabo sopstveno stanje su oni oblici koji čine SU(2) ponašanje pri izraženim uticajem II poteza Rajdemajstera na jezgra. Za kvark se slabo sopstveno stanje javlja kod oniih oblika zapleta kod kojih svi repovi leže u ravni; za takvu konfiguraciju u ravni repovi i jezgro oponašaju opasač i njegovu kopču, strukturu koja generiše SU(2) ponašanje. Dve vrste sopstvenih stanja prikazani su na ***slici 110***.

Slika 110 Pomeranje repa dovodi do mešanja kvarka: razlikuju se sopstveno stanje mase i slabo sopstveno stanje

U modelu niti mase su dinamički efekti povezani sa oblikom zapleta. U slučaju kvarka, dve upravo pomenute konfiguracije ponašaće se stoga različito. Pretvaranje sopstvenog stanja mase u slabo sopstveno stanje nazivamo ***pomak repa***. Pomak repa je izobličenje: repovi kao celina se obrću i pomeraju. S druge strane, pomak repa može da dovede takođe do rasplitanja zapleta kvarka; drugim rečima, pomak repa može da dovede do uplitanja repa i stoga može da izmeni ukuse kvarka. Proces pomaka repa može stoga da objasni mešanje kvarka. (Pomak repa takođe objašnjava postojanje mešanja neutrina i nepostojanje mešanja za slabe bozone.)

Pomak repa može zato da se posmatra kao delimično uplitanje repa; kao takvo, ono nastaje usled slabe interakcije. Ove povezanosti daju sledeća predviđanja:

- Pomak repa kako sa uplitanjem tako i bez, na granici prostora je uopšteno izobličenje. Prema tome, ono je opisano jediničnim operatorom (***strana 161***). Prvi rezultat iz modela niti stoga je da je da je matrica mešanja kvarka jedinična matrica. (***Ref. 227***). To je zaista i opaženo.
- Uplitanje repa za kvark je proces male verovatnoće. Kao posledica toga, matrica mešanja kvarka ima najveće elemente u glavnoj dijagonali. To je zaista i opaženo.
- Pomak repa prirodno predviđa da će mešanje kvarka biti veće između susednih generacija, kao što su 1 i 2, nego li između udaljenih generacija, kao što su 1 i 3. To je takođe opaženo.
- Veza između mešanja i mase takođe podrazumeva da je mešanje između 1 i 2 jače od mešanja između 2 i 3, kao što je opaženo.
- Konačno, pomak repa predviđa da brojne vrednosti u matrici mešanja kvarka mogu da se izvedu iz razlika između oblika dve vrste zapleta prikazanih na ***slici 110***. Pomak repa takođe predviđa da se ugao mešanja kvarka menja, ili teče, sa energijom. Osim toga, predviđeno je da je efekt mali. S druge strane, do sada ne postoje puzdani eksperimentalni podaci o efektu.

Izvođenje preciznih izračunavanja o uglovima mešanja i njihovoj promeni sa energijom još uvek su predmet istraživanja.

IZAZOV

Možete li iz modela niti da izvedete približan izraz (***Ref. 247***)

$$\tan\theta_{\mathrm{u\,mix}} = \sqrt{\frac{m_{\mathrm{u}}}{m_{\mathrm{c}}}} \qquad (209)$$

za mešanje gornjeg (up) kvarka? (***Izazov 210r***).

NARUŠAVANJE CP U KVARKOVIMA

CP narušavanje faze δ za kvarkove obično se izražava preko ***invarijante Jarlskog***, koja je definisana kao $J = \sin\theta_{12}\sin\theta_{13}\sin\theta_{23}^2\cos\theta_{12}\cos\theta_{23}\sin\delta$. Ovi uvedeni izrazi nezavisni su od odrednice za fazne uglove, a otkrila ih je Sesilija Jarlskog (Cecilia Jarlskog), poznata švedska fizičarka čestica. (***Ref. 227***). Njena izmerena vrednost je $J = 3{,}06(21)\cdot 10^{-5}$.

Pošto model niti predviđa tri generacije kvarka, model kvarka podrazumeva verovatnoću CP narušavanja. U odeljku o mezonima (***strana 254***) videli smo da model stvarno predviđa postojanje CP narušavanja. (***Strana 255***). Na ***slici 96*** posebno je prikazano da se uz pomoć pomaka repa mešaju K^0 i $\bar{K}^0$ mezoni, a da se to isto dešava i sa izvesnim drugim neutralnim mezonima. ***Slika 97*** prikazuje i druge primere. Kao što je upravo pomenuto, mogučnost pomaka repova podrazumeva da je CP narušavanje malo, ali nije zanemarljivo, kako je i opaženo.

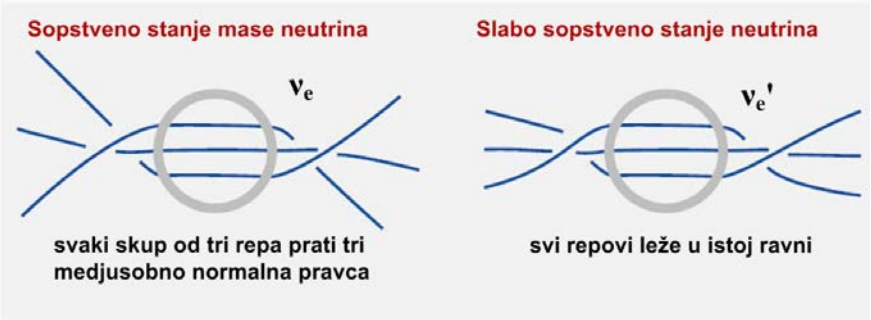
Model niti zato predviđa da matrica mešanja kvarka ima CP narušavanje faze koje ne nestaje. Predviđeno je da vrednost ove faze sledi iz geometrije zapleta kvarka, ako se kolebanja njihovih oblika pravilno uzmu u obzir. Ova tema je još uvek predmet istraživanja.

MEŠANJE NEUTRINA

Opažanja 1998. godine o mešanju neutrina relativno je novije u istoriji čestica, mada je uticajan fizičar Bruno Pontekorvo (Bruno Pontecorvo) predvideo taj efekt već 1957. godine. (***Ref. 248***). Opažanje mešanja neutrina podrazumeva da se takođe za neutrino razlikuju sopstveno stanje mase i slabo sopstveno stanje. Vrednosti elemenata matrice mešanja poznate su do sada uz ograničenu tačnost, pošto izuzetno mala masa neutrina čini da su eksperimenti vrlo teški. (***Ref. 227***). Za masu neutrina zna se da je pozitivna. Trenutno, merenja samo daju vrednost reda 1 ± 1 eV. U svakom slučaju, izričito je poznato da je mešanje između tri stanja neutrina jako, nasuprot situaciji za kvarkove.

Sopstvena stanja mase leptona u modelu niti odgovaraju zapletima čiji su repovi usmereni duž tri koordinatne ose. Nauprot tome, slaba sopstvena stanja ponovo odgovaraju zapletima čiji repovi leže u ravni. Dve vrste sopstvenih stanja prikatane su na ***slici 111***. Prelasci između dva stanja ponovo su nastali usled pomaka repa, posebne vrste izobličenja niti.

Zato zaključujemo da je mešanje neutrina, slično mešanju kvarka, automatski rezultat modela niti i da je povezan sa slabom interakcijom. Obzirom da su mase neutrina male i slične, i da neutrini ne obrazuju složenosti, model niti predviđa da su vrednosti mešanja velike. To je neposredna posledica trika sa kožom, koji za slučaj sličnih masa meša zaplete neutrina sa 0, 2, 4, 6, 8, 10 itd ukrštanja, a to vodi do velikog mešanja između ***svih*** generacija, a ne samo između susednih generacija. Visok stepen mešanja neutrina u modelu niti stoga se posmatra kao posledica njihovih malih i sličnih masa i kao njihovog postojanja kao slobodnih čestica. Model niti ponovo predviđa za neutrine jediničnu matricu mešanja. Model niti takođe predviđa da će nam geometrija zapleta neutrina i nihova kolebanja omogućiti da izračunamo uglove mešanja. Preciznija predviđanja još uvek su predmet istraživanja.



Slika 111 Pomak repa dovodi da se za mešanje neutrina razlikuju sopstveno stanje mase i slabo sopstveno stanje.

NARUŠAVANJE CP U NEUTRINIMA

Model niti predviđa da su tri neutrina Dirakove čestice sa masom, a ne čestice Majoranija[1]. Ovo još nije potvrđeno u eksperimentima. Stoga model niti predviđa da matrica mešanja neutrina ima samo jednu fazu CP narušavanja. (Imala bi tri takve faze kada bi neutrini bili čestice Majoranija.) Predviđa se da vrednost ove faze sledi iz zapleta neutrina i ispravnog uzimanja u obzir njihovog kolebanja. Ovo izračunavanje takođe je još uvek predmet istraživanja. S druge strane, nije jasno kada će vrednost faze CP narušavanja biti izmerena. Izgleda da je to najteži otvoren izazov eksperimentalne fizike čestica.

Mehanizam CP narušavanja ima važne posledice u kosmologiji, posebno u nesimetriji materija-antimaterija. Pošto model niti predviđa odsustvo mehanizma klackalice, model niti isključuje leptogenezu, ideju koje je uvedena da bi se objasnilo nepostojanje antimaterije u svemiru. (***Ref. 249***). Model niti je više na liniji elektroslabe bariogeneze. (***Ref. 250***).

OTVOREN IZAZOV: AB INITIO IZRAČUNAVANJE UGLOVA MEŠANJA I FAZA

Izračunavanje uglova mešanja i faza *ab initio*, koristeći statističku raspodelu kolebanja niti, moguće je na razne načine. Naročito je interesantno da se nađe odnos između verovatnoće za pomak repa i za uplitanje repa. To će omogućiti proveru iskaza u ovom odeljku. (***Izazov 211ny***).

Pošto model niti predviđa nepostojanje nove fizike izvan standardnog modela fizike čestica, izračunavanje uglova mešanja neutrina jedno je od malo mogućih predviđanja koja su preostala u osnovnoj fizici. Pošto su zapleti leptona još uvek privremeni, potrebna su pažljiva istraživanja.

ZAKLJUČAK O UGLOVIMA MEŠANJA I MILENIJUMSKOJ LISTI

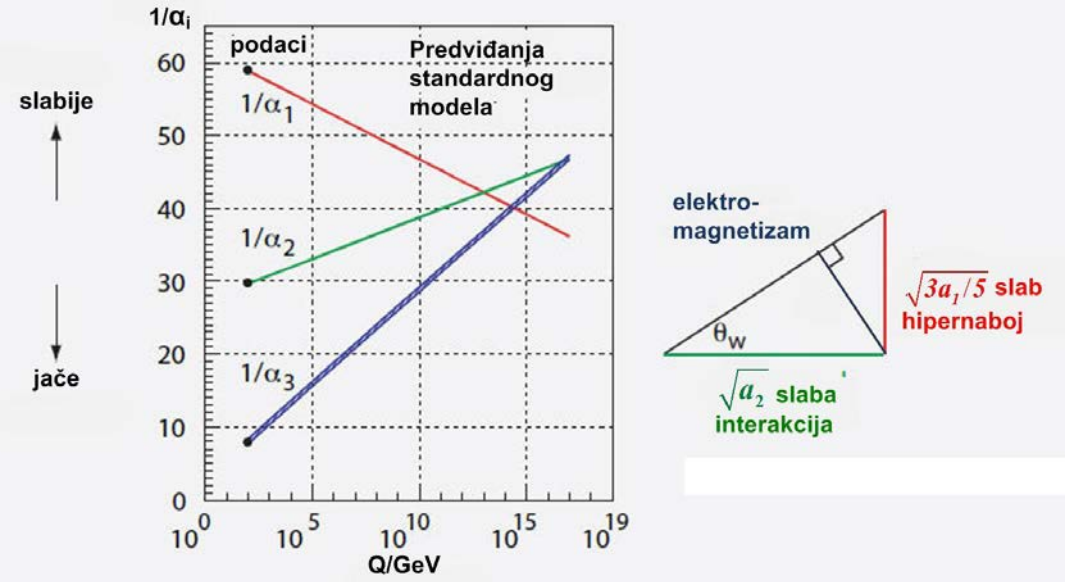
Model niti podrazumeva da su uglovi mešanja za kvarkove i neutrine svojstva njihovih porodica zapleta. Postojanje mešanja nastaje usled oblika zapleta i nihovog kolebanja. Kao rezultat toga, niti objašnjavaju

[1] Etore Majorana (Ettore Majorana) rođen 1906. – nestao sa broda Palermo – Napulj 27. marta 1938. godine. Bio je italijanski teoretski fizičar koji je radio na masama neutrina. Bio je na pragu blistave karijere kada je misteroizno nestao, ostavivši iza sebe dva pisma, jedno rodbini, drugo Antoniju Karaliju, direktoru odseka za fiziku Napuljskog univerziteta, gde je predavao fiziku. Međutim, jedna medicinska sestra tvrdila je da ga je videla u Napulju pri iskrcavanja s broda. Godine 1960. u restoranu u Buenos Airesu fizičar Karlos Rivera računao je na salveti matematičke zadatke, kada mu je konobar rekao da još jedna osoba, povremeno dolazi u restoran i takođe rešava matematičke zadatke na salveti. Zove se Etore Majorana. (prim. prev. izvor Wikipedia)

zašto uglovi mešanja nisu slobodni parametri, nego diskretne konstante prirode. Model niti takođe predviđa da su uglovi mešanja nepromenljivi tokom razvoja svemira.

Pokazali smo da zapleti niti predviđaju za kvarkove i neutrine uglove mešanja različite od nule, kao i za CO narušavanje u oba slučaja. Model niti takođe predviđa da uglovi mešanja kvarkova i neutrina mogu da se izračunaju iz kolebanja niti. Niti predviđaju da su matrice mešanja unitarne i da se menjaju sa energijom. Niti takođe predviđaju poseban redosled veličina među elementima matrice; malo predviđanja do sada je u saglasnosti sa podacima eksperimenta. Konačno, model niti odbacuje leptogenezu.

Stoga smo delimično rešili četiri sledeća pitanja iz milenijunske liste otvorenih pitanja. (***Strana 128***). Svi kvalitativni vidovi i neki redosledi su ispravno prikazani, ali nema čvrstih količina. Rezultat je unekoliko razočaravajući, ali takođe i ohrabrujući. Nijedno drugačije objašnjenje za mešanja kvarkova i neutrina trenutno nije poznat. Buduća izračunavaja omogućiće ili poboljšanje provere ili će opovrgnuti model niti. Ovu temu sada ostavljamo nedovršenom pošto možemo da nastavimo ostavljenu interesantniju temu: razumevanje konstanti veza.



slika 112 *Levo*: kako se tri konstante veze (kvadrati veličina) menjaju sa energijom, kao što predviđa standardni model fizike čestica; grafici prikazuju konstantu $\alpha_1 = (5/3)\alpha/\cos^2\theta_W$ za elektromagnetnu interakciju (preciznije slab hipernaboj – činijac 5/3 je korišćen u velikoj unifikaciji), konstantu $\alpha_2 = \alpha/\sin^2\theta_W$ za slabu interakciju i konstantu $\alpha_3 = \alpha_s$ za jaku konstantu veze. Tri tačke su tačke podataka za najvišu do sada izmerenu energiju; na nižim energijama podaci i izračunavanja odgovaraju eksperimentalnim greškama (ljubaznošću Wim de Boer). *Desno*: odnosi imeđu konstanti veza – α za elektromagnetnu $U(1)_{EM}$, α_2 za slabu SU(3), α_1 za slab hipernaboj $U(1)_Y$ grupu merila i slab ugao mešanja θ_W.

KONSTANTE VEZA I OBJEDINJAVANJE

Jačina merne interakcije u prirodi opisana je konstantom veze. Konstanta veze daje verovatnoću kojom virtualni merni bozom emituje naboj, ili, ekvivalentno tome, prosečna promena faze proizvedena apsorpcijom mernog bozona. Postoje tri konstante veze, jedna za elektromagnetnu, jedna za slabu i jedna za jaku interakciju. Tri konstante veze zavise od energije. Poznati podaci i promena sa energijom predviđeni su u standardnom modelu fizike čestica, kao što je prikazano ma ***slici 112***. Na najmanjoj mogućoj energiji od 0,511 MeV, ***konstanta fine strukture*** α, to jest konstanta elektromagnetne veze, ima dobro poznatu izmerenu vrednost od 1/137,035999074(44). (***Ref. 5***). Objašnjenje ovog broja, koji određuje sve boje i sva materijalna svojstva u prirodi, najpoznatije je milenijumsko pitanje. Ukoliko model niti ne može da prikaže sva opažanja u vezi sa konstantama veza, model je pogrešan.

U modelu niti tri merne interakcije nastaju usled promene oblika jezgra zapleta. Najpre ćemo razvrstati moguće promene oblika. Obzirom na jezgro zapleta mogu da se pojave sledeče promene oblika:

- ***Male*** promene oblika jezgra ne proizvode bilo koju promenu ukrštanja. Male promene oblika prema tome nemaju nikakav fizički značaj: za određenog posmatrača one ostavljaju neizmenjena sva opažanja.

- ***Rajdemajsterov I potez***, kao promena oblika segmenta niti u jezgru, proizvodi električno polje, ukoliko čestica ima naboj. Precznije, električno polje oko čestice razlika je između prosečnog broja p_{tr} desnog poteza i prosečnog broja p_{tl} obrnutog levog poteza koje zaplet čestice proizvodi u jedinici vremena.
- ***Rajdemajsterov II potez***, kao promena oblika segmenta niti u jezgru, proizvodi polje slabe interakcije. Preciznije, slaba interakcija je nesimetričnost između verovatnoća p_{px}, p_{py} i p_{pz} za tri osnovne vrste poteza i njihovih inverzija.
- ***Rajdemajsterov III potez***, kao promena oblika segmenta niti u jezgru proizvodi polje boje, ukoliko čestica ima boju. Preciznije, polje boje je nesimetričnost između verovarnoća p_{s1} do p_{s8} za osam osnovnih vrsti poteza i njihovih inverzija.

Može da se pojavi i kombinacija ova tri poteza. U modelu niti verovatnoća kolebanja za svaki od Rajdemajsterovih poteza – prvog, drugog ili trećeg – određuje konstantu veze. Zato je potrebno da odredimo vrednosti ovih verovatnoća. Broj zaključaka može da se odredi neposredno, bez ikakvih detaljnih izračunavanja.

- Konstante veza nisu slobodni parametri, već su određeni geometrijskim, trodimenzionalnim oblicima zapleta čestica.
- Povezivanjem konstanti veza sa verovatnoćom kolebanja oblika, model niti predviđa da su konstante veza ***pozitivni*** brojevi i ***manji od 1*** za sve nivoe energije. To je zaista i opaženo.
- Takođe može da se zaključi i još strožija veza konstanti veza. Zbir svih mogućih kolebanja za određeni zaplet ima verovatnoću jedinice. Zato imamo

$$1 = p_{\text{small}} + p_{\text{tr}} + p_{\text{tl}} + \sum_{w=x,y,z} \left(p_{\text{pw}} + p_{\text{p-w}} \right) + \sum_{g=1}^{8} \left(p_{\text{sg}} + p_{\text{s-g}} \right) p_{\text{comb}} \qquad (210)$$

  Model niti stoga predviđa da da ***zbir*** tri konstante veza mora da bude ***strogo manji od 1*** za svaku vrednost energije. To jednostavno može da se proveri, kako sa podacima tako i sa predviđanjima kvantne teorije polja. U kvantnoj teoriji polja (izmenjen) kvadrat tri konstante veze dat je, kao zavisnost od energije, u poznatom grafiku prikazanom na ***slici 112***. Ove vrednosti su kombinacija eksperimentalnih podataka – za niske vrednosti energije – i teorijski proširene – za veće vrednosti energije. U ovom popularnom grafiku elektromagnetna veza je uobičajeno pomnožena činiocem $5/(3\cos^2\theta_W)$. (To je urađeno da bi se proverila teorija velike unifikacije; zadržavamo ovaj uobičajeni činilac, premda velika unifikacija predviđena eksperimentima i modelom niti nije primenljiva u prirodi.) Grafik omogućava da potvrdimo da je zbir neizmenjenih veza zaista manji od 1 za sve vrednosti energije, kao što je i predviđeno u modelu niti.
- Model niti takođe predviđa da tri konstante veza su povezane malim brojevima, pošto se odgovarajuća kolebanja razlikuju samo po broju uključenih niti. To se zaista i opaža, kao što ***slika 112*** pokazuje – posebno ako pamtimo da su veze kvadratni koreni prikazanih vrednosti u grafiku, ispravljene uobičajenim činiocem.
- Model niti osim toga predviđa da su konstante veza nezavisne od vremena i prostora, a da posebno ne zavise od starosti svemira. To je takođe opaženo, uprkos tvrdnjama u suprotno. (***Ref. 251***)
- Najzad, model niti predviđa da su konstante veza jednake i za čestice i za antičestice, kao što je i opaženo.

Ukratko, model niti predviđa, kao i kvantna teorija polja, da su konstante veza verovatvoće. Očigledne posledice da konstante veza moraju biti manje od jedan i da sabrane daju broj manji od jedan važe i u kvantnoj teoriji polja i u modelu niti. Uprkos ohrabrujućim saglasnostima sa eksperimentom, još uvek nismo izveli bilo koji nov rezultat – osim jednog.

NITI PODRAZUMEVAJU OBJEDINJAVANJE.

Zapravo, jedna nova tačka načinjena je modelom niti. Svaka interakcija merila nastala je usled različitog Rajdemajsterovog poteza. Međutim, obzirom na posebna izobličenja jezgra zapleta, različiti posmatrači će ozobličenje razvrstati kao drugačiji potez Rajdemajstera. (***Strana 207***). Ustvari, ***svaki*** Rajdemajsterov potez može da se izvrši ***istim*** izobličenjem pojedinačne niti: dovoljno je da se doda zakrivljen deo pravolinijskom delu niti. Takvo izobličenje izgledaće jednom posmatraču kao I potez, drugom kao II potez, a trećem kao III potez Rajdemajstera.

Pošto sve interakcije slede iz iste vrste izobličenja niti, model niti stoga predviđa ***objedinjavanje*** interakcija. Ovaj rezultat je nov: zapravo, ova vrsta objedinjavanja interakcija preko niti u potpunosti se razlikuje od bilo kojeg ikad predloženog drugog prilaza. Posebno ovo objedinjavanje niti ne zahteva da tri konstante veze imaju istu vrednost na visokoj energiji.

Ovakva promena oblika stoga ima pet pridruženih verovatnoća: verovatnoće opisuju koliki procenti posnatrača vide ovo izobličenje kao I potez, kao II potez, kao III potez, kao kombinaciju tih poteza ili kao da potezi uopšte ne postoje, to jest, kao mala kretanja bez promene ukrštanja. S druge strane, na energijama koje se mogu izmeriti u laboratotiji, potezi Rajdemajstera ***obično mogu*** da se razlikuju, pošto za datu reakciju obično nestaju sve verovatnoće osim jedne, usled proseka u vremenu i uvedene razmere prostora.[1] Ukratko, na energijama koje se mogu izmeriti u laboratoriji tri interakcije uvek se jasno razlikuju.

OPŠTA OČEKIVANJA O KONSTANTAMA VEZA

Model niti predviđa da je izračunavanje tri konstante veze problem geometrije zapleta i statistike kolebanja. Stoga može da mu se pristupi na svim energetskim razmerama ili ***analitički*** ili uz ***računarska izračunavanja***. Za izračunavanja je potrebno da se odrede verovatnoće odgovarajućih Rajdemajsterovih poteza. Ako se rezultatati ne slažu sa eksperimentalnim vrednostima, model niti je pogrešan. Zapažamo da ne postoji sloboda da se izračunavanja podese prema poznatim rezultatima eksperimenata.

Da bi se opažanja uskladila, svi zapleti sa jediničnim električnim nabojem moraju da imaju istu vezu, i stoga istu verovatnoću za poželjna kolebanja uvijanja, to jest I poteza Rajdemajstera. Na primer, poželjna verovatnoća mora da bude identična za pozitron i proton. ***Verovatnoća poteza stoga mora da bude kvantifikovana i mora da razvrsta zaplete u ekvivalentne klase određene njihovim električnim nabojem***.

Do sada izgleda da ne postoji bilo koji analitički alat koji dopušta izračunavanje verovatnoće izobličenja zapleta. Prema tome, trenutno izgleda da su jedini moguć izbor računarska izračunavanja. Od svih postojećih softverskih programa, najpodesniji za izračunavanje verovatnoće kolebanja jesu programi koji simuliraju dinamike umreženih polimera, ali kandidati su takođe i programi koji simuliraju dinamiku kosmičkih struna ili dimamiku vrtloga helijuma. Glavni problem, osim dugog vremena izračunjavanja računara, ispravna je i samodosledna specifikacija raspodele kolebanja oblika u svakoj energetskoj razmeri. (***Izazov 212r***).

Ukratko, korišćenjem modela niti očekujemo da budemo sposobni da izračunamo elektromagnetnu konstantu veze i da razumemo njenu valjanost prema svim elementarnim česticama. Ista očekivanja takođe postoje i za dve nuklearne interakcije, slabu i jaku. Ukoliko se nađe da je bilo koje iščekivanje interakcija zapleta netačno, model niti je pogrešan. ***Model niti mora da daje kvantifikovane klase ekvivalentnosti zapleta za elektromagnetni i slab naboj i naboj boje***. Iako su problemi izračunavanja još uvek predmet istraživanja, postoji nekoliko nagoveštaja da će ova očekivanja da se potvrde.

PRVI NAGOVEŠTAJ: KVANTIFIKOVANJE NABOJA I TOPOLOŠKI PREVOJ

Električni, slab i jak naboj u prirodi su ***kvantifikovani***. Ni u jednom eksperimentu nikada nije nađeno čak ni najmanje odstupanje od kvantifikovanja. ***Svi naboji u prirodi celobroni su umnošci manjih jedinica naboja.*** Posebno je opaženo da je električni naboj svake slobodne čestice celobrojni umnožak električnog naboja pozitrona. Ceo broj nazivamo ***kvantni broj električnog naboja***. Elektromagnetna veza pozitrona najbolje je opisana brojem 1/11,7062376139 (19) na niskoj energiji, to jest na 0,511 MeV. Ova vrednost – ***jedinica električnog naboja*** na niskoj energiji –kvadratni je koren poznate ***konstante fine strukture*** čija je vrednost 1/137,035999074(44). (***Ref. 5***). Kvantna elektrodinamika predviđa takođe preciznu promenu ove jedinice električnog naboja sa energijom; eksperimenti koji su do sada izvedeni do iznad 100 GeV, u saglasnosti su sa ovim predviđanjem. Ekstrapoliranjem ove promene, kvantna elektrodinamika predviđa da kada se ekstrapolira do približno Plankove energije, jedinični naboj bi imao vrednost 1/10,2(1), kao što je prikazano na ***slici 112***. Ukoliko model niti ne prikaže ova opažanja, pogrešan je.

Koristeći model niti stoga je potrebno da razumemo, s jedne strane kvanifikovanje električnog naboja, a sa druge strane zagonetnu vrednost jedinice električnog naboja – bilo na niskoj energiji ili na Plankovoj energiji.

---

[1] Model niti stoga predviđa da na izuzetno visokoj energiji, naime bliskoj Plankovoj energiji, za svaku mernu interakciju mogu da budu u interakciji takođe i čestice sa nultim nabojem. Na Plankovoj energiji vremenski prosek nije savršen, a interakcije postaju moguće čak i za nulti naboj.

U modelu niti je električni naboj povezan sa hirijalnošću zapleta. Samo hirijalni zapleti mogu da imaju električni naboj. Model niti zato podrazumeva da topološka količina zapleta – određena za svaki zaplet u porodici zapleta koji odgovara posebnoj elementarnoj čestici – mora da predstavja električni naboj. Koja bi to bila veličina?

Uobičajena topološka veličina za određivanje hirijalnosti čvorova i zapleta je ***topološki prevoj***. Da bismo ga odredili, nacrtamo ***najmanju projekciju***, to jest, dvodimenzionalni dijagram čvora zapleta sa najmanjim mogućim brojem ukrštanja. Potom izbrojimo desnostrana ukrštanja i odužmemo broj levostranih ukrštanja. Ova razlika, koja je ceo broj, je topološki prevoj. Primećujemo da:

- Topološki prevoj W bozona je +3 ili -3, u zavisnosti koju sliku gledamo u ogledalu; topološki prevoj zapleta Z bozona nestaje. Topološki prevoj svake nevezane niti takođe nestaje Na taj način, ako odredimo kvantni broj električnog naboja kao ***jednu trećinu*** topološkog prevoja, dobijamo tačan kvantni broj električnog naboja slabih i svih drugih mernih bozona.
- Zapleti kvarkova pokazuju da ako odredimo kvantni broj električnog naboja kao jednu trećinu topološki prevoj, dobijamo tačan kvantni broj električnog naboja za sve kvarkove. (***Strana 241***). Zapažamo da trik sa pletenicom kože ne menja ovaj rezultat.
- Zapleti leptona (***strana 245***) pokazuju da ako odredimo kvantni broj električnog naboja kao topološki prevoj samo ***centralne oblasti***, dobijamo tačan kvantni broj električnog naboja za sve leptone. I ponovo, trik sa pletenicom kože ne menja ovaj rezultat.

Drugim rečima, kvantni broj električnog naboja može da se prikaže pomoću topološkog prevoja.

Saberimo sve ovo. Električni naboj u prirodi je kvantifikovan. Model niti opisuje naelektrisane čestice pomoću alternativnih kolebajućih zapleta, a kvantifikovanje naboja je topološki efekt koji nastaje pošto su sve čestice načinjene od niti. Osim toga,

- ***Kvantni broj električnog naboja*** ponaša se slično topološkom prevoju: on je kvantifikovan, ima dva moguća predznaka, nestaje u slučaju nehirijalnih zapleta, topološka je invarijanta – stoga je očuvan.

Ukratko, topološka količina, naime topološki prevoj, u modelu niti prikazuje kvantni broj električnog naboja. Preostaju tri pitanja. Prvo, obzirom da je svaka čestica opisana porodicom zapleta sa beskrajnim brojem članova, kako se električni naboj, to jest, kako se topološki prevoj ostalih članova porodice uzima u obzir? (***Izazov 213e***). Nije teško da se vidi da članovi porodice ne menjaju topološki prevoj. Drugo pitanje je trnovitije: zbog čega se odrednica naboja za leptone razlikuje? (***Izazov 214ny***). Ovaj problem privremeno ćemo da preskočimo, pa nastavljamo trećim pitanjem: Koje je poreklo čudne vrednosti jediničnog naboja, čiji kvadrat na niskoj energiji ima vrednost 1/137,035999074(44)? Počinjemo od ponove posete promeni naboja sa energijom.

DRUGI NAGOVEŠTAJ: ENERGETSKA ZAVISNOST FIZIČKIH VELIČINA

Svi efektivni naboji u prirodi, to jest, konstante veza menjaju se sa energijom. Kaže se takođe da one ***teku*** sa energijom. (***Strana 281***). ***Slika 112*** prikazuje detalje. Promene se takođe pojavljuju za mase i uglove mešanja. Za sva druga sopstvena svojstva čestice, kao što su spin, paritet i svi drugi kvantni brojevi, nalazi se da se ***ne menjaju*** sa energijom. Za konstante veza izmerene promene između svakodnevne energije i oko 100 GeV u saglasnosti su sa predviđanjima kvantne teorije polja.[1]

Model niti predviđa

- Konstante veza, slično masama i uglovima mešanja, menjaju se sa energijom, pošto su to veličine koje ***zavise*** od prosečnog ***geometrijskog oblika*** osnovnih zapleta čestice.

Preciznije, veličine koje se menjaju zavise od kolebanja geometrijskih oblika, a ova kolebanja zavise unekoliko od razmera energije koja se posmatra. Primećujemo da model niti predviđa promene ***samo*** za ove tri vrste opažanja; sva druga opažanja – spin, pariteti ili ostali kvantni brojevi – predviđeno je da zavise

[1] U standardnom modelu fizike čestica tok elektromagnetne i slabe konstante veze – nagib na ***slici 112*** – zavisi od broja postojećih Higsovih bozona. (***Ref. 223***). Model niti (ispravljen) predviđa da je taj broj jedinica. (***Strana 248***). Merenje promena konstante prema tome omogućava da se proveri broj Higsovih bozona. Na nesreću, razlika je mala; za elektomagnetnu vezu nagib se menja oko 2% ako se broj Higsovih bozona promeni za jedan. Međutim, u budućnosti takva tačnost merenja možda će biti moguća.

od ***topologije*** zapleta čestica, pa su stoga ***nezavisni*** od energije. To je u saglasnosti sa opažanjima. Prema tome, sada istražujemo detalje promene.

TREĆI NAGOVEŠTAJ: PROMENA KONSTANTE VEZA NA NISKOJ ENERGIJI

Model niti predlaže nov pogled na efekte skrininga i antiskrininga koji su deo kvantne teorije polja. Efekti skrininga posledica su statistike izobličenja oblika za labava jezgra zapleta koja su ugrađena u niti koja oblikuju vakuum. Pošto ovi statistički efekti mogu u načelu da se izračunaju, očekuje se da takva izračunavanja mogu da se uporede sa predviđanjima kvantne teorije polja prikazne na ***slici 112***. (***Strana 281***). Ova provera je u toku. Međutim, nekoliko rezultata može da se zaključi bez ikakvog računanja.

Elektromagnetna interakcija u modelu niti nastaje usled prvog poteza Rajdemajstera. Za česticu sa nabojem – stoga onu sa hirijalnim jezgrom zapleta – prosečna razlika u pojavi desnog i levog poteza određuje efektivan naboj. Očekuje se da se ova razlika smanjuje kada je jezgro zapleta labavo, pošto su labave niti sličnije onim iz okružujućeg vakuuma, tako da će izbledeti razlika usled hirijalnosti zapleta. U jeziku kvantne teorije polja, virtualni par čestica-antičestica – načinjen kolebanjem niti vakuuma – prikazuje centralni, goli naboj. Promene skrininga se smanjuju kada se povećava energija, a time se smanjuju dimenzije, uključujući i one od kolebanja. Drugim rečima, model niti predviđa da elektromagnetna veza raste sa energijom, kao štro je i opaženo.

Isto tako pojavljuje se efekt ispiranja za dve nuklearne interakcije, za labava jezgra zapleta usled vakuuma, kao što predviđa kvantna teorija polja. U slaboj interakciji antiskrining slabog naboja pojavljuje se na taj način. U jakoj interakciji i par virtualnih kvark-antikvark i par virtualnih gluona može da se pojavi iz niti koje sačinjavaju vakuum. Virtualni par kvark-antikvark dovodi do skrininga, kao što virtualni par elektron-antielektron dovodi do elektromagnetne interakcije. Međutim, osim toga videli smo da model niti mezona podrazumeva da virtualni par gluona dovodi do antiskrininga. (***Strana 250***). (suprotno tome, virtualni par footona ne dovodi do tog efekta.) Pošto model niti određuje broj kvarkova i gluona, model niti je dosledan sa rezultatima da skrining naboja boje parom kvarka previše je kompenziran anti-skriningom para virtualnih gluona.

Drugim rečima, model niti prikazuje opažen predznak za nagibe konstanti veza na ***slici 112***, iz istog razloga zbog kojeg prikazuje u kvantnoj teoriji polja opis tri interakcije merila. Predviđena promena može takođe da se proveri kvantitativno, uzimanjem statističkih proseka kolebanja niti različitih dimenzija. To je izazov za buduća istraživanja.

ČETVRTI NAGOVEŠTAJ: PREDVIĐANJA NA NISKOJ ENERGIJI, NEZAVISNO OD SADRŽAJA ČESTICE

Kao što smo videli, potpuno objašnjenje promena konstanti veza zavisi od izričitog sadržaja bozonskog i fermionskog sadržaja prirode i od činjenice da model niti prikazuje kvantnu teoriju polja. Zanimljivo je, ali model niti takođe predlaže jednostavnije objašnjenje promene, mada malo manje precizno.

Na energijama mnogo manjim od Plankove energije, kao što su svakodnevne energije, model niti podrazumeva da je prosečna veličina jezgra zapleta reda neizvesnosti položaja čestice. Drugim rečima, bilo koja debljina niti – stvarna ili efektivna – na niskim energijama može da se zanemari. Prema tome, na niskim energijama, prosečna dužina niti unutar jezgra zapleta čestice takođe je reda de Broljijeve talasne dužine. Niska, svakodnevna energija stoga podrazumeva ***velika***, ***labava*** i ***loptasto/elipsoidalna*** jezgra zapleta.

Na niskim energijama kolebanja niti mogu da dovedu do bilo kojeg od tri poteza Rajdemajstera. Verovatnoća takvih izobličenja oblika biće srazmerna nekom stepenu prosečne dužine niti unutar jezgra zapleta. Drugim rečima, konstante veza zavise od energije. Ali kako tačno?

Primetili smo neposredno da ***viši*** potezi Rajdemajstera, koji obuhvataju veći broj delova niti, biće u srazmeri sa ***većom*** vrednošću stepena. Osim toga, što je duža nit u jezgru – to jest, što je niža energija – biće veća relativna verovatnoća za više poteze Rajdemajstera.

Sažeto, model niti predviđa da ako je zaplet labav i dugačak, to jest, kada su energije niske, jaka nuklearna interakcija usled III poteza Rajdemajstera najjača je interakcija merila, pračena slabom nuklearnom interakcijom usled II poteza Rajdemajtera i praćena elektromagnetnom interakcijom. Predviđanje je u saglasnosti sa opažanjima. Nažalost, ovaj dokaz je nepouzdan. Ako bi broj niti bio jedini uzrok promene,

dokaz bi podrazumevao da tri nagiba promena konstanti veza treba da se ponašaju slično 3:2:1. Međutim, grafik na ***slici 112*** (***strana 281***) pokazuje drugačije, čak i kada se u obzir uzme razlika između elektromagnetne veze i slabe veze hipernaboja. Zaista, promena konstanti veza nije samo usled broja niti, već takođe zbog izričitog bozonskog i fermionskog sadržaja prirode, kao što smo upravo videli.

PROMENE KONSTANTI VEZA U BLIZINI PLANKOVE ENERGIJE

Na energijama u blizini Plankove energije, kvantna teorija polja se menja: počinju ulogu da imaju efekti prečnika niti. U blizini Plankove energije zapleti postaju sve zategnutiji i zategnutiji, a kolebanja postaju slabija, pošto za njih nema mesta. Drugim rečima, u blizini Plankove energije zapleti nastoje da se približe strukturi horizonta. Prema tome, u blizini Plankove energije, model niti predviđa odstupanje konstanti veza od energetske zavisnosti koja je predviđena kvantnom teorijom polja.

Procena odstupanja Plankove razmere između modela niti i kvantne teorije polja je moguća: potrebno je da izračunamo konstante veza na Plankovoj energiji. Takvo izračunavanje možda čak omogućava da se procene konstante veza na niskoj energiji iz njihovih vrednosti na Plankovoj energiji. Međutim, do sada, uprkos brojnim pokušajima, ovaj pristup nije doveo do uspeha. Ustvari, takav pristup izračunavanju konstanti veza na niskoj energiji mora da se smatra nezadovoljavajućim, usled približnosti i ekstrapolacija koje učestvuju.

O PROCENI KONSTANTE FINE STRUKTURE IZ OBLIKA ČVORA

Obzirom na nesigurnost Plankovog energetskog ponašanja, bolje je da se konstante odrede ili procene na niskoj energiji. Na primer, u modelu niti konstanta fine strukture (kvadratni koren iz) je verovatnoća za emitovanje uvijanja kolebajućeg hirijalnog zapleta.

- Model niti predviđa da konstanta fine strukture može da se izračuna određivanjem verovatnoće uvijanja u nasumičnom obliku zapleta određene čestice sa električnim nabojem različitim od nule.

Drugim rečima, model niti mora da pokaže da je ***kvantifikovana*** verovatnoća I poteza Rajdemajstera u hirijalnom zapletu čestice. Ova verovatnoća mora da bude celobrojni umnožak jedinice koja je uobičajena za sve zaplete; i ova jedinica koja povezuje mora da bude konstanta fine strukture.

Provera postojanja jedinice koja povezuje zahteva izračunavanje verovatnoće pojave I poteza Rajdenajstera za svaki hirijalni zaplet čestice. Model niti je tačan samo ako sve čestice sa jednakim električnim nabojem daju istu verovatnoću emisije uvijanja. Proste procene pokazuju da numeričke simulacije nasumičnih oblika zahtevaju veliku količinu vremena računara, zbog velikog broja konfiguracija koje moraju da se istraže. Može li verovatnoća emitovanja uvijanja da se proceni uz jednostavnije izračunavanje? Možemo li da proverimo da li je verovatnoća zaista kvantifikovana? Postoje brojne mogućnosti.

PETI NAGOVEŠTAJ: 3D PREVOJ

Prvo, prosto objašnjenje konstante fine strukture zasniva se na ***predpostvci*** da je verovatnoća emisije uvijanja ***približno*** proporcionalna 3d prevoju zapleta.

3d prevoj je trodimenzionalni prosek topološkog prevoja. (***Strana 311***). Da bi se odredio 3d prevoj, zamišljamo da opažamo čvor ili zaplet iz nasumičnog pravca i da crtamo projekciju, to jest dvodimenzionalni crtež zapleta. Tada izbrojimo desnostrana ukrštanja i oduzmemo broj levostranih ukrštanja. Kada napravimo prosek ove razlike prema svim mogućim pravcima opažanja, dobijamo 3d prevoj za taj čvor ili zaplet. Ukratko, 3d prevoj je trodimenzionalna mera hirijalnosti. Važna tačka je ta što 3d prevoj ***zavisi od oblika zapleta***, suprotno topološkom prevoju. Da bi se dobilo fizički iskoristivo opažanje iz modela niti, moramo takođe da napravimo prosek za datu talasnu funkciju nad svim mogućim oblicima zapleta.

3d prevoj je prirodan kandidat da se potpuno opiše električni naboj, to jest, proizvod konstante fine strukture i kvantnog broja električnog naboja. 3d prevoj je uopštavanje topološkog prevoja, a topološki prevoj se ponaša, kao što smo videli, kao kvantni broj električnog naboja. Međutim, postoje dodatni dokazi za predpostavku.

Nedavna istraživanja pravljenja proseka oblika čvora i zapleta dala su neke bitne rezultate u vezi 3d prevoja i odnosnih svojstava zapleta. (***Ref. 252***). Prvo, istraživači su otkrili da je nekoliko prosečnih svojstava ***nasumičnih*** čvorova i zapleta u uzajamnoj vezi sa svojstvima ***čvrstih*** čvorova i zapleta. Dva primera čvrstih čvorova prikazani su na ***slici 113***. Da bi se objasnila uzajamna veza, uzećemo skup koleba-

jućih ili nasumičnih zapleta, koji svi imaju istu topologiju; ovakvi zapleti pokazuju kolebanje ili slučajnu vrednost 3d prevoja. Ipak, za ***prosečan*** 3d prevoj svih oblika zapleta numerički je nađeno da je neraspoznatljiv od 3d prevoja ***čvrstog*** zapleta. (***Ref. 252***). Ovo je potvrđeno u raznim studijama do brojne preciznosti od nekoliko procenata. Na primer, nestaju i prosečni 3d prevoj bilo kojeg ***slučajnog*** nehirijalnog čvora i 3d prevoj odgovarajućeg ***čvrstog*** nehirijalnog čvora. Ova brojčana ekvivalentnost proverena je numerički za čvorove sa minimalnim brojem ukrštanja manjim od 10. Međutim, do sada ne postoji matematički dokaz da je jednakost tačna.

slika 113 Čvrst otvoren čvor načinjen rukom odozgo nadole i čvrst otvoren čvor oblika osmice (© Piotr Pieranski, iz ***Ref. 238***)

Drugi rezultat savrenog istraživanja čvora je još interesantije. U godinama između 1996. i 1998 otkriveno je da je 3d prevoj zatvorenog alternativnog ***čvrstog*** čvora ***kvazi-kvantifikovan***. (***Ref. 253***). Tačnije rečeno, mnogi različiti zatvoreni čvorovi imaju skoro iste vrednosti 3d prevoja, u okviru do 1%, 3d prevoji za sve (male) zatvorene alternativne čvorove je umnožak "kvanta prevoja", čija je vrednost 4/7. Još uvek nije poznat prost dokaz ovog čudnog rezultata.

Povežimo ova dva rezultata savremenih istraživanja. Ako bi potpun električni naboj, to jest verovatnoća emitovanja uvijanja hirijalnih, to jest čestica sa nabojem, bio određen vrednošću 3d prevoja, tada bi jedinica naboja bila povezana sa kvazi-kvantom 3d prevoja.[1]

- Ako bi bila tačna predpostavljena povezanost između naboja i 3d prevoja, sledilo bi (kvazi-) kvantifikovanje naboja.

Naravno, mogli bismo da proverimo prvo da svi pomenuti rezultati za čvorove važe i za zaplete, a ne samo za čvorove. To ne izgleda teško.

Ukratko, ako bi električni naboj i konstanta fine strukture bili opisani pomoću 3d prevoja zapleta čestice, naboj bi bio skoro kvantifikovan. Nažalost, poznata vrednost kvazi-kvanta prevoja od 4/7 ne pomaže nam da izvedemo vrednost konstante fine strukture, pošto u ovoj predpostavci o poreklu konstante fine strukture kvazi-kvant može da se pomnoži bilo kojim brojnim činiocem da bi dao vezu čestice. Ipak, ostaje nam zadivljujuća predpostavka koja predlaže prirodan način na koji može u prirodi da se kvantifikuje električni naboj. Pretpostavka da je neka količina bliska 3d prevoju kvantifikovana celobrojnim umnošcima neke najmanje vrednosti, objasnila bi zašto postoji konstanta fine strukture.

Zapažamo da bi ova predpostavka takođe predviđa da 3d prevoj zapleta kvarkova bila ili jedna trećina ili dve trećine prevoja zapleta W bozona. Takvo izračunavanje tek treba da se izvede.

ŠESTI NAGOVEŠTAJ: TORZIJA

Pomenuli smo da svaka konstanta veze daje prosečcnu verovatnoću emisije virtualnih bozona. U slučaju elektromagnetizma, moguće je da bi ***ukupna torzija*** čvrstog zapleta bila tačnija mera verovatnoće emisije uvijanja. Isto tako ova predpostavka ispunjava mnoga očekivanja za konstantu fine strukture.

Proučavanje torzije tema je istraživanja. U svakom slučaju, određivanje verovatnoće emisije uvijanja bez izračunavanja pomoću računara ne predstavlja problem, jer se lako rešava bez dubljeg uvida u oblike zapleta. Nažalost, nepoznat je tačan oblik svih čvrstih otvorenih ili zatvorenih čvorova – čak ni za čvor lista deteline. (Kao što je već pomenuto u ***Vol I, strana 60***, to je jedan od jednostavnijih, a istovremeno, težih otvorenih problema u geometriji.) Tačan čvrst oblik svih zapleta čestica takođe je nepoznat.

[1] Primećujemo da pitanje kvazi-kvantifikovanja – umesto za tačno kvantifikovanje – može da se zaobiđe na sledeći način, U modelu niti, na niskoj energiji, niti efektivno imaju zanemarljivu debljinu. Kao rezultat toga, prosečan prevoj nasumučno oblikovanog zapleta moglo bi unekoliko da odstupa od prevoja čvrstih čvorova. To bi moglo da podrazumeva da bi prosečan prevoj labavih nasumično oblikovanih zapleta možda bilo tačno kvantifikovano, dok prevoj čvrstih zapleta ostaje samo približno kvantifikovan.

SEDMI NAGOVEŠTAJ: BROJEVI POVEZIVANJA

Jedno od najboljih privremenih objašnjenja za kvantifikovanje naboja odnosi se na električni naboj i broj povezivanja traka. Predpostavka se sastoji od sledećeg lanca dokaza.

- U teoriji čvorova ***uokviravanje*** je traka pridružena zapletu ili čvoru kada se niti pomere na neki unapred određeni način. (***Strana 311***). Svaki zaplet čestice u prirodi ima efektivno uokviravanje, pošto niti mogu da se posmatraju, zbog vremenske nesigurnosti, kao da su efektivno trake. Uokviravanje se koleba.
- U zapletima čestica samo zakrivljene trake treba da dovedu do (čiste) emisije fotona. Električni naboj treba stoga da zavisi od zbira ***prevoja*** i ***uvijanja*** (prosečne) trake uokviravanja, pošto oba oba svojstva dovode do emisije virtualnih fotona.
- Zbir prevoja i uvijanja trake određen je teoremom Kalugareanu (Calugareanu), sačiniocem vezivanja koji je čista topološka celobrojna veličina. Detaljnije, ***broj povezivanja*** trake je broj koji pokazuje koliko puta su dve ivice trake savijene jedna oko druge.
- Povezivanje između emisije fotona i broja povezivanja, koji je ceo broj, predlaže kvantifikovanje naboja. Ovo izgleda kao privlačna predpostavka za objašnjenje tačnog kvantifikovanja električnog naboja.
- Prosek broja povezivanja nad svim mogućim trakama zapleta mogao bi čak da objasni vrednost konstante fine strukture.

Ukoliko je tačna predpostavljena veza između broja povezivanja i električnog naboja, moguće je da to vodi do delimičnog analitičkog izračunavanja konstannte fine strukture, ukoliko je oblik zapleta uključen na pravilan način. Ova predpostavka još uvek je tema istraživanja.

OSMI NAGOVEŠTAJ: ODREĐIVANJE KONSTANTI VEZA KORIŠĆENJEM NASUMIČNOG OBRTANJA (VERZIJA IZ 2013.)

Drugi pristup za izračunavanje konstanti veza je sledeći. Kao što je razmatrano u predhodnom tekstu, predpostavili smo da su čestice u proseku na niskoj energiji tačno opisane labavim zapletima koji imaju oblik ***povećanih uskih zapleta***. Zatim smo predpostavili da su najjednostavniji zapleti dobra približnost za celu porodicu zapleta koji odgovaraju određenoj elementarnoj čestici. Uz ove dve predpostavke možemo da uzmemo zaplete prikazane na ***slici 106*** (***strana 268***), premda sa nitima zanemarljivog prečnika, kao što su prosečna predstavljanja W bozona i Z bozona. Korišćenjem ovih predstavljanja bozona, možemo da pokušamo da procenimo U(1) i SU(2) veze na Plankovoj energiji izračunavanjem verovatnoće u kojoj ***nasumično obrtanje*** otvorenog čvrstog čvora lista deteline daje Rajdemajsterov I ili Rajdemajsterov II potez. (***Ref. 254***).

Ovo izračunavanje je prvi put izvedeno uz pogrešno pridruživanje dugačkog prostog čvora i dugačkog čvora oblika osmice za W i Z bozone. Ova pridruživanja zapleta nisu ispravna, ali rezultati još uvek su zanimljivi.

Nasumično usmerenje čvora dovodi do vrednosti za elektromagnetnu konstantu veze. Međutim predpostavka da je svako usmerenje čvora iste verovatnoće ne daje vrednosti za konstante veza koje su u saglasnosti sa podacima čvora (***Ref. 254***): neslaganje sa podacima je oko 50%.

Gde se ova približnost raspala? Mogli bismo da tvrdimo da nasumična obrtanja čvrstih otvorenih čvorova uopšte nisu moguća, ali da je dozvoljeno samo obrtanje oko ose određene repom. Uzimanjem u obzir ove tačke, popravlja se situacija za U(1) vezu, ali dovodi da SU(2) veza nestane.

Neznatno drugačiji pogled na konstante veza više obećava. Konstanta fine strukture može da se posmatra kao prosečna vrednost ugla kod kojeg se menja talasna funkcija kada se foton apsorbuje (ili emituje). Ovakav pristup verziji niti nudi zanimljiv pristup izračunavanjima. Znamo iz kvantne elektrodinamike da je ovakav pogled na konstantu fine strukture ispravan i da je plodonosan, pošto smo ga koristili u predhodnom tekstu da bismo izveli Švingerov (Schwinger) izraz za nenormalan magnetni moment u modelu niti. (***Strana 182***).

I ponovo, prva izračunavanja izvedena su uz netačne i vezane W i Z zaplete. Najjednostavniji slučaj da se istraži otvoren trolisni čvor (list deteline) koji opisuje suštinski vid slabog W bozona. Očekuje se da svako apsorbovanje fotona u W bozon na niskoj energiji dovodi do obrtanja trolisnog čvora lista. Tako možemo

da napravimo prosek nad svim usmerenjima otvorenog trolisnog čvora, ugao koji je potreban da se doda efektivna petlja (ili uvijanje), to jest da se promeni (2d) prevoj za +1, a istovremeno broj ukrštanja za +1. Pošto takav poseban proces opisuje apsorpciju fotona bez naknadne ponovljene emisije, prosečan ugao koji se dobije treba da bude približan kvadratnom korenu iz konstante fine strukture. Ovakav pristup neposredno daje vrlo grubu, ali prostu približnost. Zamislimo da je najjednostavniji efekt fotona samo da promeni usmerenje *W* zapleta u prostoru, tako da se njegov broj ukrštanja i njegov (2d) prevoj promene za 1. Ova verovatnoća *p*, kodirana je u 3d prevoju *w* otvorenog trolisnog čvora. Naravno, 3d prevoj sadrži takođe i ostale promene, ali njih zanemarujemo u ovoj gruboj približnosti. Stoga dobijamo približnost kao $p = w - 3$, gde je *w* 3d prevoj otvorenog trolisnog ćvora. Vrednost za *w* je odredio Džejson Kantarela (Jason Cantarella) i ona je 3,394. U daljnjoj, vrlo gruboj približnosti, procenjujemo prosečan ugao, to jest kvadratni koren iz konstante fine strukture, kao

$$\sqrt{\alpha} \approx \frac{p}{2\pi} = \frac{w-3}{2\pi} = 0,063 \qquad (211)$$

S druge strane, izmerena vrednost za $\sqrt{\alpha}$ je 0,085424(1). Kao što se i očekivalo, približnost nije zadovoljavajuća.

Bolja približnost efekta obrtanja pojavljuje se ako odaberemo nasumično početno usmerenje W zapleta i potom odredimo prosečan ugao potreban da se promene i njegov (2d) prevoj i njegov broj ukrštanja za +1. Tada ponovo napravimo prosek nad svim mogućim početnim usmerenjima. Za najjednostavniji Z zaplet, oblika čvora osmice, prosek nestaje unutar brojne preciznosti podatka oblika čvora. To se i očekivalo za neutralnu česticu. Za otvoren trolisni čvor, dakle za jednostavniji W zaplet, dobijamo

$$\sqrt{\alpha} \approx 0,072(2) \qquad (212)$$

rezultat je nekako bliži eksperimentalnoj vrednosti od 0,085424(1), ali tačnost još uvek ne zadovoljava: kvadrat obrnute srazmere od oko 192(10), razlikuje se za 40%.od konstante fine strukture 137,036(1),

Ove približnosti predpostavljaju: (1) da je W zaplet ispravan, (2) da apsorbovani fotoni samo ***obrću*** jezgro zapleta i (3) da su svi mogući uglovu obrtanja iste verovatniće. Međutim, znamo da prva predpostavka nije tačna, a čak i kada bi bila tačna, poslednje dve predpostavke ne mogu da daju tačan rezultat, pošto apsorpcija fotona sadrži i podrazumeva ***izobličenje*** jezgra zapleta.

Ukratko, potrebno je da se ponove procene i izračunavanja sa tačnim zapletima W i Z bozona.

DEVETI NAGOVEŠTAJ: PROCENA KONSTANTE FINE STRUKTURE IZ STATISTIKE IZOBLIČAVANJA

Kolebanja zapleta su nasumična. Precizna izračunavanja konstante fine strukture mora da obuhvati kolebanja oblika, kao i njihov stvarni spektar koji prekriva njihova nasumičnost.

Prost pristup je da se zapletu čestice doda nasumično uvijanje – to jest, nasumičan foton. Takvo nasumično uvijanje uticaće i na na fazu i na 3d prevoj zapleta.

Ako posmatramo 3d prevoj, možemo da posmatramo prosečno 3d prevoj za levostrana uvijanja i da ga uporedimo sa prosečnim desnostranim uvijanjima. Izračunavanja su u toku.

Ako istražujemo fazu, potrebno je da izračunamo sledeće: za nasumično uvijanje koje je dodato zapletu čestice, određujemo izazvanu promenu faze. Napravimo prosek ove faze nad svim nasumičnim zapletima. Prosečna promena faze je kvadratni koren konstante fine strukture, Izračunavanja su u toku.

Ova vrsta izračunavanja može da se popravi uključivanjem detaljnijeg spektra kolebanja, posebno uzimajući u obzir kako nasumični virtualni fotoni izobličavaju zaplete čestica. Ovo je još uvek tema koja se istražuje.

OTVOREN IZAZOV: IZRAČUNAJTE KONSTANTE VEZA AB INITIO

Izračunavanje ***sve tri*** konstante veze *ab initio*, određivanjem statistike kolebanja niti, omogućilo bi da se provere iskazi iz ovog odeljka na nezavisan način. (***Izazov 215r***). Izračunavanja bi trebalo da se izvrše na različitim energijama, da bi se potvrdila nezavisnost veza od energije.

Da bi se postigla visoka preciznost, moraju se uzeti u obzir efekti raznih članova porodice zapleta, pošto je u modelu niti svaka čestica opisana porodicom zapleta. (***Strana 264***). Izgleda, međutim, da članovi

porodice zapleta imaju slične efekte na električni naboj q i na efektivnu vezu $q\sqrt{\alpha}$, tako da se pitanje porodice može zanemariti u izračunavanjima prvog reda. Za nuklearnu konstantu veze mogu u izračunavanjima da pomognu Arnoldovi rezultati za krive u ravni. (***Ref. 255***).

U toku su izračunavanja opisana u predhodnom odeljcima. Željni smo da proverimo ishod izračunavanja sa izmerenim vrednostima.

MOMENT ELEKTRIČNOG DIPOLA

Pitanje električnog momenta dipola zaslužuje detaljniji pogled. Da li model niti dovodi do električnih momenata dipola za elementarne čestice? S jedne strane, kvantni broj naboja je topološka veličina. S druge strane, pojam momenta dipola zasniva se na raspodeli električnog naboja u prostoru.

Električni naboj u modelu niti, budući da je topološka veličina, prema odrednici je pomalo nelokalna veličina. On je nelokalan u razmeri reda Plankove dužine. Istovremeno, model niti ne dozvoljava da se odredi prostorna raspodela u dimenzijama Plankove razmere.

Ukratko, očekujemo da do oblasti bliske Plankovoj dužini, model niti ne daje momente dipola koji bi se razlikovali od onih koje predviđa standardni model fizike čestica.

ZAKLJUČAK O KONSTANTAMA VEZA I MILENIJUMSKIM PITANJIMA

Model niti podrazumeva da su konstante veza geometrijska svojstva posebne porodice zapleta. Kao rezultat, niti objašnjavaju zbog čega u prirodi konstante veza nisu slobodni parametri, već utvrđene konstante. Niti predviđaju da se konstante veza menjaju sa energijom i da su konstantne tokom makroskopskog razvoja svemira, kao što je i opaženo. Niti takođe predviđaju tačne redoslede konstanti veza na niskim energijama i tačan predznak pri njihovoj promeni sa energijom. Niti stoga prikazuju sva kvalitativna svojstva konstanti veza. Nijedan drugi objedinjeni model nije to postigao.

Niti predlažu nekoliko načina za izračunavanje konstanti veza korišćenjem oblika čvorova. Prva procena konstante fine srukture, zasnovana na vezanim nitima, odstupa od eksperimenta za 40%. Tačnost i modeli čestica nisu zadovoljavajući; međutim, približnost može da se poboljša. Ovo je bila prva procena konstante fine strukture iz prvog načela. Poboljšana izračunavanja su u toku i dozvoliće da se model niti potvrdi ili odbaci.

KONAČAN ZAKLJUČAK O MILENIJUMSKIM PITANJIMA

Tvrdili smo u našoj pustolovini da bi trebalo da se Plankove prirodne jedinice modeliraju preko osnovnog načela niti, koje je ponovo prikazano na ***slici 114***. Osnovno načelo objašnjava sledeća izmerena svojstva prirode.

- Niti objašnjavaju načelo najmanjeg rada i invarijantnost c, $\hbar$, G i k
- Niti objašnjavaju tri dimenzije prostora, postojanje gravitacije i zakrivljenosti, jednakosti opšte teorije relativnosti, vrednost entropije crne rupe i opažanja u savremenoj kosmolohiji.
- Niti objašnjavaju pojmove koji se koriste u lagranžijanu standardnog modela fizike čestica, uključujući talasne funkcije, Dirakovu jednakost i konačno, diskretnu i malu masu elementarnih čestica.
- Niti objašnjavaju postojanje elektromagnetizma i dve nuklearne interakcije, sa njihovim grupama merila i svim ostalim opaženim svojstvima.
- Niti opisuju opažene baždarne i Higsove bozone, njihove naboje, njihove kvantne brojeve i njihove opsege masa.
- Mase objašnjavaju tri generacije kvarkova i leptona, njihove naboje i kvantne brojeve, njihova mešanja, redoslede njihovih masa, kao i njihova svojstva ograničenja.
- Niti objašnjavaju model kvarka hadrona, uključujući CP narušavanje, redoslede masa, predznake momenta kvadripola, nepostojanje neopaženih hadrona, opšte Ređijeve nagibe i postojanje tetrakvarkova.
- Niti ***ne dozvoljavaju*** proizvoljne vrednosti za mase, konstante veza, uglove mešanja i faza CP narušavanja.

- Niti omogućavaju izračunavanja masa čestica, nihovih konstanti veza, njihovih uglova mešanja i faza CP narušavanja. Prve grube procene ovih veličina u saglasnosti su (mnogo preciznije) sa eksperimentalnim podacima. U bliskoj budućnosti izračunavanja na računarima omogućiće da se ove provere poboljšaju.
- Najzad, niti predviđaju da priroda ***ne krije*** bilo koju nepoznatu temeljnu interakciju, temeljnu simetriju, elementarnu česticu ili dodatnu dimenziju. Osim toga niti predviđaju da konačna teorija ne zahteva dodatne matematičke ili fizičke pojmove,

Slika 114 Osnovno načelo modela niti. ***Plankove jedinice određene su promenom ukrštanja u tri prostorne dimenzije***. Osnovno načelo podrazumeva opštu teoriju relativnosti i standardni model fizike čestica.

Svi ovi rezultati mogu da se prevedu u posebne iskaze o eksperimentalnim opažanjima. Do sada ne postoje protivrečnosti između modela niti i eksperimenata. Ovi rezultati omogućavaju da se naša postolovina rezimira u tri iskaza.

1. ***Niti rešavaju sva otvorena pitanja***. Pomoću jednog jednostavnog principa model niti rešava ili bar predlaže način rešavanja ***svih*** pitanja iz milenijumske liste otvorenih pitanja (***strana 22*** ili ***strana 128***) u osnovnoj fizici.
2. ***Niti su u saglasnosti sa svim opažanjima***. Model niti naročito podrazumeva da su opšta teorija relativnosti, kvantna teorija i standardni model elementarnih čestica ***precizan*** opis kretanja za sve praktične primene.
3. ***Ništa novo neće biti otkriveno u osnovnoj fizici***. Neočekivano, ali uverljivo, niti predviđaju da su opšta teorija relativnosti, kvantna teorija i standardni model elementarnih čestica potpuni opis kretanja za sve praktične svrhe.

Još nismo doslovno stigli do vrha Planine Kretanja – pošto još nisu dovoljno precizna izvesna brojčana predviđanja za osnovne konstante – međutim, ako nas nije obmanuo oblak, naziremo u blizini vrh. Posebno, konačno znamo poreklo boja.

Poslednja deonica, tačno izračunavanje konstanti standardnog modela fizike čestica, je u toku. težnja za jednostavnošću i razigrani duh, koje smo prizvali na početku (***strana 23***) bili su dobri vodiči.

EKSPERIMENTALNA PREDVIĐANJA MODELA NITI

Es gibt viele Theorien,
die sich jedem Test entziehen.
Diese aber kan man checken,
elend wird sie dann verrecken.[1]

Anonymous

Mnogi eksperimenti širom sveta traže efekte koji nisu objašnjeni standardnim modelom fizike čestica. Istovremeno u svim eksperimentima proverava se model niti ovde predstavljen. Zapravo, većina ljudi koji rade na tim eksperimentima nije ni čula za model niti, tako da čak i ne postoji opasnost od nesvesne pristrasnosti.

[1] Autor knjige navodi da za ovaj citat ne postoji dobar prepev. Pokušaj prevoda na srpski glasi:
"Postoje mnoge teorije koje izmiču svakoj proveri. Ali one koje ne mogu da se provere tada crkavaju bedno."

Najvažnija predviđanja modela niti koja smo izveli u našoj pustolovini navedena su u ***Tabeli 16***. Jedno predviđanje je jedinstveno i nepotvrđeno: mogućnost da se izračunaju konstante u standardnom modelu fizike čestica.

TABELA 16 Glavna predviđanja modela niti koja slede z osnovnog principa. Vrsta slova pravi razliku predviđanja koja nisu iznenađujuća, koja su u modelu niti *nepotvrđena* ili *jedinstvena* i koja su i **nepotvrđena i jedinstvena**.

Eksperiment	**strana**	**Predviđanja (iz 2008/2009)**	**Stanje (2015)**
Plankove jedinice (c, $\hbar$, k, $c^4/4G$)	***34***	granične su vrednosti	Nijedna nije prekoračena, ali moguće su dalje provere
Higsov bozon	***247***	2008/2009: ne postoji	Lažno
	248	2012: postoji	Provereno
Promena konstanti veza	***283***	*2008/9: podrazumeva da ne postoje Higsovi bozoni*	*Nema još uvek podataka*
	283	*2012: podrazumeva postojanje jednog Higsovog bozona.*	*Nema još uvek podataka*
Uzdužno rasipanje W i Z bozona	***247***	*2008/9 pokazani nelokalni efekti na Large Hadron Collider (LHC)*	*Nema još uvek podataka*
	248	*2008/9 pokazani nelokalni efekti na Large Hadron Collider (LHC)*	*Još uvek nije nađeno*
Uzdužno rasipanje W i Z bozona	***247***	*jedinstven je na LHC*	*Očigledno*
Nepoznati fermioni (supersimetrične čestice, magnetni monopolovi, dioni, teški neutrini itd)	***264***	*ne postoje*	*Još uvek nisu nađeni*
Nepoznati bozoni (ostali merni bozoni, supersimetrične čestice, aksioni itd.	***255***	*Još uvek nije nađeno*	*Još uvek nisu nađeni*
Nepoznate interakcije, razmere energije i simetrije (velika unifikacija, supersimetrija, kvantne grupe, tehnikolor itd)	***207, 238***	*ne postoje*	*Još uvek nisu nađene*
Mase čestica, uglovi mešanja i konstante veza	***235***	**izračunato izmenjenim postojećim softverskim paketima**	**Većina još nije izračunata; približnosti daju uglavnom tačne redoslede vrednosti i procene.**
Mase čestica, uglovi mešanja i konstante veza	***235***	nepromenljivi u vremenu	Opaženo je.
Matrica mešanja za kvarkove	***277***	jedinstvena je	Opaženo je
Matrica mešanja za neutrine	***279***	*jedinstvena je*	*Nema još uvek podataka*
Neutrini	***255***	*Dirakove su čestice*	*Nema još uvek podataka*
Dvostuki beta raspad bez neutrina	***247***	ne postoji	Još uvek nije nađen
Momenti električnog dipola elementarnih čedtica, moment magnetnog dipola neutrina	***207, 247***	imaju izuzetno male, vrednosti standardnog modela	U saglasnosti su sa eksperimentima
Tetrakvarkovi	***259***	postoje	Verovatno
Gluonske lopte	***243, 255***	*verovatno ne postoje, ako postoje, spektar može da se uporedi sa modelom niti*	*Još uvek nisu opažene*
Raspad protona i drugi retki raspadi, oscilacije neutron-antineutron	***207, 247***	pojavljuju se u izuzetno malim razmerama standardnog modela	Još uvek nije opažen
Raspad neutrona	***257***	prema standardnom modelu	Nisu nađena odstupanja
Naboj neutrona	***257***	nestaje	Nije opažen

Mase hadrona i činilac oblika	***253***	*može da se izračuna ab initio*	*Nije još izračunat; redosled vrednosti i predznaci su tačni*
Tamna materija	***264***	uobičajena je materija plus crne rupe	Podaci su neuverljivi
Standardni model fizike čestica	***235***	*2008/9 suštinski tačan, uz odstupanja za rasipanja uzdužnih vektorskih bozona na energiji LHC*	*Nije još uvek pogrešan, ali odstupanja nisu još uvek opažena*
		2012 je tačan za sve izmerene energije	*Nije još uvek pogrešan*
Dodatne dimenzije	***117***	ne postoje	Nisu opažene
Nekomutativno prostor-vreme	***117***	ne postoji	Nije opaženo
Opšta teorija relativnosti	***221***	tačna je na svim dostupnim energijama	Nisu nađena odstupanja
Odstupanja na malim rastojanjima od univerzalne gravitacije i izmenjene gravitacije	***221***	ne postoje	Nisu nađena odstupanja
Singulariteti prostor vremena, kosmičke strune, crvotočine, vremenske petlje, područja negativne energije, zidovi oblasti	***221***	ne postoje	Nijedno od toga nije opaženo
Efekti kvantne gravitacije	***223, 208***	neće biti nađeni	Nisu još uvek opaženi
Iza horizonta	***228***	ništa ne postoji	Ništa nije opaženo
Kosmološka konstanta (tamna energija)	***230***	mala je i pozitivna	Opažena je
Kosmološka konstanta (tamna energija)	***230***	*smanjuje se sa kvadratom vremena*	*Podaci su neuverljivi*
Gustina kosmičke materije	***231***	*smanjuje se sa kvadratom vremena*	*Podaci su neuverljivi*
Kosmička inflacija i leptogeneza	***230, 280***	ne pojavljuje se	Podaci su neuverljivi
Kosmička topologija	***226***	trivijalna je	Kao što je opaženo
Vakuum	***265***	je stabilan	Kao što je opaženo
zaključno: sva kretanja		**rezultati su niti**	**Nisu još uvek pogrešne**

Najzanimljivija predviđanja modela niti do sada su numerička predviđanja o raspadu kosmološke konstante, spektru mogućih elementarnih čestica – uključujući postojanje tri generacije – razni odnosi masa i redosledi masa – uključujući odnose masa Z/W i Higs/W – i relativna jačina tri interakcije. Pre svega, postoji mogućnost da se u predvidivoj budućnosti izračunaju osnovne konstante.

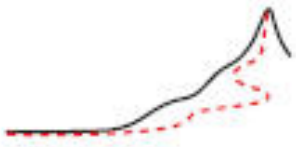
Model niti prikazuje model kvarka, teoriju merila, talasne funkcije i opštu teoriju relativnosti, a istovremeno predviđa nepostojanje merljivih odstupanja. Model niti rešava pojmovne probleme, kao što je problem tamne materije, ograničenja, jak CP problem i pitanje anomalije; čineći to, model nit predviđa odsustvo nepoznatih efekata u ovim oblastima.

Model niti izvodi sva svoja eksperimentalna predviđanja iz jedinog i jednostavnog osnovnog načela: ***događaji i Plankove jedinice nastaju zbog promena ukrštanja niti***. Pod uslovom da nema grešaka u rasuđivanju, ne postoji način da se promene predviđanja koja su ovde sažeta. Model niti je jednostavan i nepromenjiv.

Naravno, greške u rasuđivanju u predhodnim poglavljima vrlo su moguće. Nekoliko se pojavilo u prošlosti. Istraživanje je izvedeno velikom brzinom – možda i prevelikom.

Ako bilo koji eksperiment ikada protivreči predviđanu modela niti, model je osuđen na propast. Kada su gore navedena eksperimentalna predviđanja bila prvi put izvedena 2008. i 2009. godine, bila su dosta

nepopularna. Praktično svi drugi pokušaji objedinjavanja predviđaju postojanje još neotkrivenih čestica i efekata. Međutim, do sada, eksperimenti nisu potvrdili takve pokušaje; ustvari, nijedno predviđanje modela niti još uvek nije bilo pogrešno.



Poglavlje 13

VRH PLANINE KRETANJA

Sve stvari su pune bogova.

Tales (Thales)[1]

Ko sam ja? Odakle sam došao? Šta treba da radim? Odakle je došao svet? Da li će celokupan svet zaista doći do kraja? Šta će se dogoditi u budućnosti? Šta je lepota? Sva ova pitanja imaju nečeg zajedničkog: to su pitanja o kretanju. Međutim, šta je kretanje? Naše traženje odgovora dovodi nas da kretanje proučimo u svim njegovim detaljima. U ovom traganju svako povećanje preciznosti u našem opisu kretanja bio je korak više prema vrhu Planine Kretanja. Sada kada smo stigli tamo, možemo da se naslađujemo onim što smo postigli i da se sećamo osećanja koje smo iskusili.

U našem usponu naučili smo kako se mi krećemo, kako doživljavavamo naše okruženje, kako rastemo, od kakvih delova smo načinjeni, i kako mogu da se razumeju naša delovanja i naša ubeđenja o njima. Naučili smo mnogo o istoriji i nešta malo o budućnosti materije, o zračenji i o prostoru. Iskusili smo i razumeli mnogo načina na koji se lepota javlja u prirodi: kao boje, kao oblici, kao ritmovi i pre svega: kao jednostavnost.

Naslađivanje našim dostignućem znači pre svega da sada možemo da pogledamo unazad tamo odkuda smo došli. Potom da uživano u pogledu koji nam se nudi i zapazimo ono što nismo vieli ranije. Posle toga tražimo ono što je još uvek skriveno od našeg pogleda. I konačno, da odaberemo drugačiju putanju za silazak tamo gde živimo.

NAŠA PUTANJA DO VRHA

Rad koji uživamo u fizičkom bolu.

Viljem Šekspir (William Shakespeare), *Makbet*

Naše hodanje ima prost cilj: da govorimo tačno o svim kretanjima. Ovo pitanje staro 2500 godina dovelo nas je na vrh ove planine. Sada možemo da sumiramo našu putanju u tri deonice: svakodnevni život, opšta teorija relativnosti i kvantna teorija i objedinjavanje.

SVAKODNEVNI ŽIVOT: VLADAVINA BESKONAČNOSTI

Galilejeva fizika je opis svakodnevnog života. Galilejevu fiziku smo učili između našeg rođenja i polaska u srednju školu. Galilejeva fizika je istraživanje i opisivanje kretanja kamenja, vode, drveća, toplote, vremenskih uslova, elektriciteta i svetlosti. (***Ref. 1***) i (***Ref. 3***). Da dođemo do ovih opisa u našem okruženju, naš prvi i glavni cilj u životu je da podelimo doživljaj u doživljaj**e**. Drugim rečima, naše prvo intelektualno delovanje je izum ***delova***; izmislili smo ***množinu***.

Čin podele dopušta da odredimo redoslede između naših doživljaja, a time da odredimo pojam ***vreme***. Pojam ***prostor*** pojavljuje se slično uz našu mogućnost da razlikujemo opažanja koja se događuju istovremeno. Upoređivanjem delova sa drugim delovima odredili smo ***merenje***. Koristeći sve ovo, postali smo sposobni, između ostalog, da odredimo ***brzinu***, ***masu*** i ***električni naboj***. To nam je omogućilo da uvedemo ***rad***, veličinu koja određuje promenu.

Za prost opis opažanja predpostavljamo da je podela moguća bez kraja: stoga smo uveli pojam beskonačno malo. Isto tako predpostavljamo da je širenje našeg opsega opažanja moguće bez kraja. Stoga smo uveli beskonačno veliko. Određivanje delova stoga nas dovodi da uvedemo beskonačnost.

Korišćenjem delova i sa njima pojmova beskonačno malo i beskonačno veliko, našli smo u ***Volumenu I*** i ***Volumenu III*** ove knige da svakodnevno kretanje ima šest glavnih svojstava: ono je neprekidno, očuvano,

[1] Tales iz Mileta (cca 624. – cca 546. pne) bio je prvi poznat filozof, matematičar i naučnik

relativno, dvosmerno, invarijantno u ogledalu i lenjo. Kretanje je lenjo pošto proizvodi što je moguće manje promene.

Priroda minimizira promene. To je Galilejeva fizika, opis svakodnevnog kretanja, u jednoj rečenici. Ovo nam omogućava da opišemo naša svakodnevna iskustva sa kamenjem, tečnostima, zvezdama, električnom strujom, toplotom i svetlosti. Ideja o kretanju koje minimizira promene zasniva se na pojmu kretanja koje je neprekidno i predvidivo i na pojmu prirode koja sadrži beskonačno malo i beskonačno veliko.

RELATIVNOST I KVANTNA TEORIJA: ODSUSTVO BESKONAČNOSTI

Vorhin haben wir gesehen, daß in der Wirklichkeit das Unendliche nirgends zu finden ist, was fur Erfahrungen und Beobachtungen und welcherlei Wissenschaft wir auch heranziehen.[1]

David Hilbert

Ideja da priroda nudi beskonačnu oblast mogućnosti često se izražava uz duboko lično uverenje. Međutim, rezultati relativnosti i kvantne teorije pokazuju suprotno. (***Ref. 2***) i (***Ref. 4***). U prirodi su ograničeni brzine, sile, starost i rad. Nijedna veličina u prirodi nije beskonačno velika niti beskonačno mala. Nijedna veličina u prirodi nije određena uz beskonačnu preciznost. Nikada ne postoji beskonačno mnogo primera situacije; broj mogućnosti je uvek konačan. Svet oko nas nije beskonačan; niti njegova veličina, niti njegova starost, niti njegov sadržaj. ***Priroda nije beskonačna***. To je opšta teorija relativnosti i kvantna teorija u jednoj rečenici.

Relativnost i kvantna teorija pokazuju da se ideja od beskonačnosti pojavljuje samo u približnim opisima prirode; ona nestaje kada se govori precizno. Ništa u prirodi nije beskonačno. Na primer, u ***Volumenu II*** ove knjige nalazimo da je nebo crno tokom noći (takođe) pošto prostor nije beskonačan. U ***Volumenu IV*** i ***Volumenu V*** nalazimo da kvantna teorija sadrži verovatnoće pošto postoji najmanja vrednost rada u prirodi. Ustvari, iskaz da je veličina beskonačno velika ili beskonačno mala ne može da se potvrdi ili prikaže ni u jednom eksperimentu. Još gore, takav iskaz se opovrgava svakim merenjem. Ukratko, otkrili smo da je beskonačnost fantazija ljudskog uma. U prirodi se ne pojavljuje. ***Beskonačnost prirode uvek je laž***.

Broj čestica, njihovi mogući položaji, stanja koja mogu da imaju, maš mozak, naše stvaralaštvo, naše moguće misli: sve to nije beskonačno. Ipak, kvantna teorija i relativnost promenili su svet: oni su omogućili izradu snimanja ultrazvukom, snimanje magnetnom rezonansom, sisteme satelitske navigacije, muzičke uređaje i internet. (***Ref. 4***).

Uprkos ogromnom napretku usled savremene fizike i povezanih tehnologija, jedan rezultat ostaje: ništa u našem okruženju nije beskonačno – niti naš život, niti naši doživljaji, niti naše pamćenje, pa čak ni naši snovi ili fantazije. Nisu beskonačne informacije potrebne da se opiše svemir, niti papir da se zapišu obrasci, ni potrebno mastilo, ni vreme potrebno da se razuneju obrasci. Priroda nije beskonačna. S druge strane, znamo takođe da je iluzija o postojanju beskonačnosti u prirodi jedna od najupornijih predrasuda i mitova koji su ikada zamišljeni. Zašto smo je uopšte koristili?

Navika da se koristi beskonačnost za opisivanje sveta ima više emotivnih razloga. Za neke, to odražava duboko ukorenjeno iskustvo malenkosti koje nosimo u sebi kao ostatak naše lične istorije, kada nam je svet izgledao tako velik i moćan. Za druge, ideja naše malenkosti omogućava nam da negiramo odgovornost za svoje postupke ili postojanje smrti. Za druge opet, ideja o konačnom svemiru često, na prvi pogled, proizvodi obmanu, nevericu i obeshrabrenje. Odsustvo beskonačnosti znači da ne možemo da postignemo sve što želimo i da su naši snovi i naše mogućnosti ograničene. Istrajavanje na ideji o beskonačnosti način je da se izbegne suočavanje sa stvarnošću.

Međutim, jednom kada se suočimo i prihvatimo nepostojanje beskonačnosti, stvaramo snažno iskustvo. Dobijamo snagu. Oslobođeni smo moći onih koji koriste ovaj mit da postave sebe iznad drugih. (***Izazov 216e***). To je prosvetljujuće iskustvo da se ponovno pročitaju sve one rečenice o prirodi, o svetu i univerzumu koji sadrže izraz "beskonačan", a da se zna da su oni netačni, te onda jasno iskusiti

[1] "Nedavno smo videli da u stvarnosti beskonačnost nigde ne može da se nađe, bez obzira na iskustva i opažanja i bilo koju nauku koju koristimo." (***Ref. 256***).

manipulacije koje stoje iza njih. Želja da se drugi navedu na ono što se naziva beskonačnim čest je tip ljudskog nasilja.

U početku, negiranje beskonačnosti takođe može da dovede do paničnog straha, pošto to može da izgleda kao nestanak smernica. Međutim, ako se bliže sagleda, odsustvo beskonačnosti daje snagu. Ustvari, odbacivanje beskonačnosti otklanja od ljudi jedan od najdubljih strahova: strah sa se bude slab i beznačajan.

Štaviše, jednom kada se suočimo sa granicama prirode, delovaćemo slično kao u svim onim situacijama u kojima se srećemo sa ograničenjima: granica postaje izazov. Na primer, iskustvo da sva tela neizostavno padaju, čini padobranstvo toliko uzbudljivim. Prepoznavanje da je naš život konačan, proizvodi oganj da se on proživi u potpunosti. Saznanje o smrti daje smisao našim delovanjima. U beskonaćnom životu svako delovanje bi moglo da se odloži bez posledica. Nestanak beskonačnosti proizvodi stvaralaštvo. Svet bez granica je obeshrabrujući i depresivan. Beskonačnost je prazna; granice su izvor snage i ulivaju strast u naš život. Samo granice sveta osiguravaju da nas svaki dodatni korak u životu odvodi napred. Samo u ograničenom svemiru napredak je moguč i razuman. Ko je mudriji, onaj ko odbacuje granice ili onaj koji ih prihvata? I ko živi intenzivnije?

OBJEDINJAVANJE: ODSUSTVO KONAČNOSTI

Moli se uvijek u pokretu. Rano ujutro idi i vidi stvari; a u ostatku dana idi i vidi ljude. Ako ostaneš samo nedelju dana na nekom mestu, i to beznačajnom, vidi, međutim, sve što se tamo vidi; upoznaj što više ljudi i uđi u koliko god možeš više kuća

Filip Stenhoup[1] (Philip Stanhope), *Pisma sinu o lepoj umetnosti kako da postane čovek sveta i gospodin.*

Poslednji deo naše pustolovine, opisane u ovom delu knjige, proizvodi neočekivan rezultat. Ne samo da priroda nije beskonačna; priroda nije ni konačna. Nijedna veličina koja je navodno konačna, pokazalo se da nije. Pokazalo se da je konačnost približnost, ili bolje iluzija, premda prefinjena. ***Priroda nije konačna***. To je objedinjenje fizike u jednoj rečenici.

Precizna opažanja pokazuju da ništa u prirodi ne može da se prebroji. kada bi priroda bila konačna ona bi morala da bude (opisana) kao skup. (***Strana 104***). Međutim, istraživanje Plankovih razmera pokazuje da je takav opis u suštini nepotpun i netačan. Zaista, opis prirode pomoću skupa nikada ne može da objasni broj njenih elemenata, pa zato ne može da objasni samu konačnost. Drugim rečima, svaki pristup koji pokušava da opiše prirodu kao konačnu je uverenje, a ono nikada nije ispravno. ***Konačnost je laž***.

Tako smo izgubili po drugi put sigurnost u razmišljanju. Priroda nije ni beskonačna ni konačna. Istražili smo mogućnosti koje su preostale i našli da je preostala samo jedan izbor: ***priroda je nedeljiva***. Drugim rečima, svi delovi koje smo doživeli su približnosti. I beskonačnost i konačnost približnosti su prirode. Sve razlike su približnosti. Ovaj ključan zaključak rešava preostala otvorena pitanja o prirodi. ***Priroda nema delove***.

Nemogućnost da se prebroje i odsustvo delova podrazumeva da priroda nije računar, nije ni automatizacija, nije čak ni fizički sistem. ***Priroda nije diskretna***.

Prepoznavanje svih razlika kao približnosti ukida razliku između trajnih vidova prirode ("objekata", opisanih masom, nabojem, spinom, itd.) i promenjivih vidova ("stanja", opisanih položajem, količinom kretanja, energijom). Uzimanje svih razlika kao približnih, uvodi proširene sastojke: kolebajuće niti. Posmatrajući još bliže, ovi prošireni sastojci su svi isti. Prostor, koji se samo formalno koristi da bi se opisala stanja, dobija takođe promenljiv vid: on je načinjen od kolebajućih niti. Isto tako svojstva, kao što su masa ili naboj, koji su formalno bili posmatrani kao statični, postaju vid stalno promenljive interakcije između ova dva osnovna sastojka. Opis prirode kao jedne kolebajuće niti omogućava nam da izbegnemo konačnost i da odgovorimo na sva preostala otvorena pitanja kvantne teorije i opšte teorije relativnosti.

[1] Filip D. Stenhoup (Filip Dormer Stanhope, 1694. London – 1773. London) bio je državnik i pisac

U izvesnom smislu spajanje objekata i stanja je razlaganje suprotnih gledišta grčkog mislioca Parmenida – "ne postiji kretanje", to jest jezikom fizike "ne postoje stanja, postoji samo stalnost" – i Heraklita – "sve se kreće", to jest, jezikom fizike "ne postoji stalnost, postoje samo stanja". Pokazalo se da su obojica u pravu.

Prema tome, naš napredak tokom naše pustolovine kroz fiziku možemo da sažmemo u sledeću tabelu – ***Tabelu 17***.

TABELA 17 Napredak fizike

Korak 1	Galilejeva fizika	Priroda je kontinualna	Živimo u Galilejevom prostoru
Korak 2	Relativnost	Priroda nema beskonačno veliko	Živimo i Rimanovom prostoru
Korak 3	Kvantna teorija polja	Priroda nema beskonačno malo	Živimo u Hilbert/Fok prostoru
Korak 4	Objedinjavanje	Priroda nije konačna. Priroda nema delove.	Ne živimo ni u kakvom prostoru; mi smo prostor

Ukratko, mi smo načinjeni od prostora. Još preciznije, mi smo načinjeni od istih sastojaka kao i svemir. Zapravo, očaranost ovim rezultatom ide i dalje od toga.

NOVI POGLEDI

Nel suo profondo vidi che s'interna,
legato con amore in un volume,
cio che per l'universo si squaderna: *(87)*

sustanze e accidenti e lor costume
quasi conflati insieme, per tal modo
che cio ch'i' dico e un semplice lume. *(90)*

La forma universal di questo nodo
credo ch'i' vidi, perche piu di largo,
dicendo questo, mi sento ch'i' godo.[1] *(93)*

Dante, Božanstvena komedija, Raj, XXXIII, 85-93.

Modeliranje prirode kao složenog tkanja od kolebajućih niti omogućava nam da opišemo istovremeno prazan prostor, materiju, zračenje, horizont, kefir, zvezde, decu i sva naša ostala opažanja. Svi svakodnevni doživljaji posledice su svega u prirodi Ovakav rezultat doslovno proširuje naš horizont.

---

[1] Izvor prevoda: "Božanstvena komedija" izdanje "Dereta", 2016. na srpski jezik prepevao Dragan Mraović,

U njegovoj dubini* videh da je sjedinjeno,
sa ljubavlju i u jednoj jedinoj knjizi ispisano,
sve ono što je po vaseljeni razmešteno. (87)

Sve što biva po sebi, načini postojanja i kako je povezano,
izgleda skoro stopljeno zajedno, na takve načine
da se iz mojih reči tek naslućuje kako je izatkano. (90)

Sveopštu formu toga čvora, bar meni se stvari tako čine,
mislim da sam tako video, a dok zborim o tom
osećam da se topim od radosti i miline. (93)

Primedbe: * *u dubini božjeg uma*
** *Dante koristi aristotelovsku i skolastičku terminologiju*

Ovo je, u devet stihova, Danteov pesnički opis njegovog najdubljeg mističnog iskustva: vizije Boga. Za Dantea, Bog, u dubini svetla kojeg zrači, je čvor. Taj čvor se širi celim svemirom, a stvari i nesreće – fizičari bi rekli: čestice i stanja – vidovi su tog čvora.

Dante Algiejeri (Dante Alighieri, 1265. Firenca – 1321. Ravena) bio je jedan od osnivača i najznačajniji pesnik italijanskog jezika. Najveći deo Božanstvene komedije, njegov *magnum opus*, napisan je u izgnanstvu, posle 1302. godine, kada je u Firenci osuđen na smrt.

LEPOTA NITI

Jednog dana, svakako, videćemo da je načelo, koje je u osnovi samog postojanja, tako jednostavno, tako lepo, tako očigledno, da ćemo jedan drugom reći: "Oh, kako smo mogli svi biti tako slepi, tako dugo."

Džon Viler (JohnWheeler), *Put u gravitaciju i prostor-vreme – A Journey Into Gravity And Spacetime*.

Opisivanje svega kao spojenog nije u prirodi ljudi. Pre svega, u našem životu izvodimo samo jednu radnju: delimo. Mi smo odredili mnoštvo. Ne postoji način da izbegnemo da to činimo. Bez podela nije moguće da mislitmo, da govorimo, da odlučujemo, da se krećemo, da surfujemo, da volimo ili da uživamo u životu.

Naše hodanje nam pokazuje da postoje granice sposobnosti da se prave razlike. Svaka vrsta podele uvek je približnost. Zapravo, mnogi ljudi mogu da sažmu njihova lična iskustva govoreći da su naučili da prave sve finije i finije razlike. Međutim, goviriti uz veliku preciznost o delu sveta neizbežno dovodi do govora o celom svemiru. Situacija podseća na osobu koja ima u ruci deo konopca i prateći ga otkriva veliku mrežu. On nastavlja da vuče i konačno otkriva da je sve, uključujući i sebe samog kao dela mreže.

Za model niti pojam "teorija o svemu" prema tome nije prihvatljiva. Priroda ne može da se podeli na "stvari". U prirodi stvari nisu nikada razdvojive. Ne postoji način da se govori o "svakoj" stvari: u prirodi ne postoje skupovi, nema elemenata i nema delova. Teorija koja opisuje sve u prirodi ne može da bude jedna od "svega", pošto su "stvari" samo približni objekti: pravilno govoreći, oni ne postoje. Model niti nije teorija o svemu: on je ***konačna teorija***.

Model niti pokazuje da priroda nije načinjena od povezanih delova. Priroda je načinjena samo od povezanosti. Delovi postoje samo približno. Model niti takođe pokazuje: biti u kretanju je suštinski biti deo. Delovi, budući da su približnosti, uvek su u kretanju. Čim ih podelimo, opažamo kretanje. Čin podele, razdvajanja, određivanja delova, upravo je ono što proizvodi red iz haosa. Niti nas primoravaju da ponovo razmislimo o ovoj navici.

Uprkos tome što je teško da se shvate, niti daju precizan opis kretanja koje objedinjuje kvantnu teoriju polja i opštu teoriju relativnosti. Model niti je i jednostavan i snažan u objedinjavanju kretanja. ne postoje slobodni parametri. Nema neizvesnosti, nema tame, nema straha i nema nesigurnosti. Preostaje samo čudo.

MOŽE LI MODEL NITI DA SE UOPŠTI?

Die Natur kann besser Physik als der beste Physiker.[1]

Karl Ramzauer (Carl Ramsauer)

Kao što je pomenuto u predhodnom tekstu (***strana 129***), matematički fizičari vole da ***uopštavaju*** modele. Uprkos ovoj ljubavi, mi zahtevamo da svaki konačan, objedinjen opis mora da bude jedinstven: mora da bude nemoguće da se svaki konačan objedinjen opis skraćuje, menja ili uopštava. Naročito konačna teorija ne sme da bude uopštavanje fizike čestica niti opšte teorije relativnosti. Proverimo ovo.

Model niti nije uopštavanje opšte teorije relativnosti: odrednice za zakrivljenost, za gravitaciju i za horizonte bitno se razlikuju od pojmova kvantne teorije polja. Zapravo, pokazali smo da su kvantna teorija polja i opšta teorija relativnosti samo približnosti modelu niti; one nisu ni posebni slučaji niti smanjenje modela niti.

Međutim, šta je sa ostalim zahtevima za objedinjenu teoriju? Može li model niti da se menja ili uopštava? Videli smo da model niti ne radi u više prostornih dimenzija, da ne radi sa više porodica kvarkova, da ne radi sa više interakcija i da ne radi sa drugim jednakostima razvoja u opštoj teoriji relativnosti ili fizike čestica. Model niti ne radi sa drugim osnovnim sastojcima, kao što su bifurkacijski objekti, membrane, trake ili mreže. (Mada radi sa levkovima, kao što je ranije objašnjeno (***strana 132***), ali je taj opis ekvivalentan opisu niti.) Model niti ne radi ni sa jednim izmenjenim osnovnim načelom. Očigledno,

[1] "Priroda zna fiziku bolje od najboljeg fizičara". Karl Ramzauer (Carl Ramsauer, 1879. Oldenburg – 1955. Berlin), bio je značajan fizičar, otkrio je da se elektroni ponašaju kao talasi.

istraživanje svih mogućih promena i izmena ostaje izazov za godine koje dolaze. (***Izazov 217r***). Ako može da se nađe neka stvarna izmena modela niti, model niti bi tog trenutka izgubio svoju vrednost: u tom slučaju treba ga kao neuspeh odložiti na policu. Jedino može da bude tačan ***jedinstven*** objedinjen model.

Ukratko, jedno od lepih svojstava modela niti je njegovo korenito udaljavanje od fizike dvadesetog veka u njegovim osnovnim pojmovima, kombinovano sa skoro neverovatnom jedinstvenošću. Izgleda da nisu moguči ni uopštavanje, ni specijalizacija, ni izmene modela niti. (***Ref. 154***). Ukratko, model niti se kvalifikuje kao jedinstvena, konačna teorija. Ono što je za jednu osobu zahtev, za drugu osobu je kritika. Jedan broj istraživača duboko ne voli model niti uprvo zato pošto on ne uopštava predhodne teorije i zato što on ne može da se uopšti. Takav stav zaslužuje poštovnje, pošto je rođen iz divljenja prema nekoliko drevnih doajena fizike. Međutim, model niti ukazuje sa drugačiji pravac.

ŠTA JE PRIRODA?

Priroda je ono što je celina u svakom svom delu.

Hermes Trismegistos, Knjiga o 24 filozofa (***Ref. 257***)

Na kraju naše duge pustolovine otkrili smo da priroda nije skup: sve je povezano. Priroda je samo ***približno*** set. Svemir nema topologiju, pošto prostor-vreme nije mnogostrukost. Ipak, približna topologija svemira je ona u otvorenom Rimanovom prostoru. Svemir nema određeni broj čestica, pošto svemir nije posuda; Svemir je načinjen od iste građe od kojih su načinjene i čestice. Bez obzira na to, može da se odredi približna gustina čestica u svemiru.

U prirodi je sve povezano. Ovo opažanje se ogleda u predpostavci da je sve u prirodi opisano jednom niti.

Tako stižemo do (malo doteranog) zaključka datog oko 1200. godine od autora koji je pisao pod pseudonimum Hermes Trismegistos: ***Priroda je ono što je celina u svakom njenom delu***. Međutim, nasuprot ovom autoru, mi sada takođe znamo kako da izvedemo iz ovog iskaza zaključak koji može da se proveri.

KVANTNA TEORIJA I PRIRODA MATERIJE

U svemu postoji nešto od svega

Anaksagora iz Klazomenija (5100 – 428 pne Lampsaka)

Model niti pokazuje da čim razdvojimo svemir na prostor-vreme i ostalo, to jest, čim uvedemo koorditate x i t, automatski se pojavljuje kvantna mehanika. Još preciznije, ***kvantni efekti su efekti proširenja***. Kvantna teorija se pojavljuje kada shvatimo da su opažanja sastavljena od malih događaja usled promena ukrštanja, svaki sa promenom određenom kvantom rada. Svi događaji i opažanja pojavljuju se usled kolebanja niti koje sačinjavaju prirodu.

Otkrili smo da je ***materija načinjena od zapletenih niti***. U stvari, tačan način bi bio da se kaže: materija je načinjena od upletenih ***delova*** niti. Ove povezanosti dovode do jednakosti Šredingera i Diraka.

Pošto je materija iste građe kao i vakuum, s pravom možemo reći: ***materija je načinjena ni od čega***. Međutim, dobija se pogodniji odgovor kada shvatimo da materija nije načinjena od nečeg, već da je materija izvesan vid ***čitave*** prirode. Objedinjavanje pokazuje da svaka pojedinačna elementarna čestica proizilazi iz uređenja koji uključuje čitavu prirodu, ili, ako više želimo, ukupni svemir. Drugim rečima, možemo pođednako da kažemo: ***materija se sastoji od svega***.

KOSMOLOGIJA

Model niti takođe nam polazuje kako da izvedemo opštu teoriju relativnosti. Model niti pojašnjava tkivo horizonta i objašnjava tri dimenzije prostora. Najzačuđujuća je ideja o svemiru kao proizvodu pojedinačne niti. Pojedinačna nit podrazumeva da ničeg nije bilo pre velikog praska, a da ništa ne postoji izvan noćnog neba. Na primer, model niti podrazumeva da ne postoji "višesvemir" i da nema skrivenih svetova bilo koje vrste. A kolebajuće niti objašnjavaju sva opažanja u našem svemiru.

Kosmološka konstanta nije konstanta; ona samo meri trenutne godine i veličinu svemira. Prema tome, nije potrebno da se ova konstanta pojavi na ***slici 1***. (***Strana 9***). Drugim rečima, kosmološka konstanta prosto meri vreme od velikog praska do sadašnjosti.

"Veliki prasak" je ime za ono što opažamo ako pokušamo da pravimo opažanja približavajući se granicama prirode. "Veliki prasak" automatski se pojavljuje iz modela niti uvek kada opažamo prirodu iz jako udaljenih vremena, velikih rastojanja ili pri velikim energijama: "veliki prasak" je ime za fiziku Plankovih razmera.

Svemir se sastoji od jedne jedine niti. Postoji mnogo čestica u prirodi, pošto je nit zapletena na složene načine. Ono što nazivamo "horizont" svemira, to je mesto gde se pojavljuju novi zapleti.

Netačno je verovanje da su veliki prasak ili horizont primeri stvaranja. Ono što se dogodilo u velikom prasku događa se još i danas na horizontu. I crno nebo noću i veliki prasak prirodni su načini da nam kažu: "Galilejeva fizika je približnost! Kvantna teorija je približnost! Opšta teorija relativnosti je približnost!

MIŠLJENJA O OBJEDINJAVANJU I NITIMA

Neprekidno kretanje nadvladava hladnoću.
Neprekidno mirovanje nadvladava toplotu.
Kretanje se zasniva na mirovanju:
Merenje svega događa se za jedinstvenost.

Lao Ce, Tao Te Ching[1], XXXXV.

Sve je napravljeno od iste vrste stvari: sve je jedna supstanca. Ova ideja, monizam, zvuči pomalo na ono zbog čega je uticajni filozof Baruh Spinoza (Baruch Spinoza, 1632. Amsterdam – 1677. Den Haag) proglašen krivim. Monizam, iako pomešan s idejom Boga, takođe je osnova filozofskih ideja koje je Gotfrid Vilhelm Lajbnic (Gottfried Wilhelm Leibniz, 1646. Leipzig – 1716. Hannover) predstavio u svom tekstu ***La Monadologie***.

* * *

Svaka potpuna teorija o kretanju, pa tako i model niti, izgrađena je na jednom iskazu o prirodi: ***mnogo*** postoji samo približno. (***Ref. 258***), Priroda je samo približno višestruka. Etimološko značenje pojma "višestrukost" je "ima više strukova"; u veoma posebnom smislu, priroda ima mnogo strukova[2].

* * *

Svaki precizan opis prirode je oslobođen proizvoljnih izbora, pošto podele koje moramo da napravimo kako bismo mislili sve su zajedničke za svakog i logički neizbežne. Pošto je fizika posledica ove podele, ona je "bez teorije" i "bez tumačenja". Ova posledica konačne teorije dovešće većinu filozofa do zida.

* * *

Bilo koji model prirode obuhvata više ideja, problema i znanja. Zbog enormne količine materijala njihovo objavljivanje u časopisima biče teško.

* * *

Već vekovima studenti fizike su bili bombardovani rečenicom: "Simetrije su lepe." Svaki poznavalac lepote, bilo da je slikar, arhitekt, vajar, muzičar, fotograf ili dizajner u potpunosti i kompletno ne slažu se, i to s pravom. Lepota nema veze sa simetrijom. Bilo ko da kaže suprotno onemogućio je svoje doživljaje lepog pejzaža, predivne ljudske figure ili divnog umetničkog dela.

Ispravan iskaz je:"Simetrije uprošćavaju opise." Simetrije uprošćavaju teorije fizike. To je pozadina iskaza Vernera Hajzenberga (Werner Heisenberg): "U početku je postojala simetrija." (***Ref. 259***). S druge strane, model niti pokazuje da je čak i taj iskaz netačan. Ustvari, ni traženje lepote, ni traženje simetrije nebi bili pravi putevi da se napreduje ka objedinjavanju. Takvi iskazi bili su uvek prazne marketiške fraze. U stvarnosti, napredak u osnovnoj teorijskoj fizici bio je uvek pokretan traženjem ***jednostavnosti***.

* * *

Niti ujedinjuju fiziku. Osim toga, niti proširuju naše viđenje kvantne teorije i matematičke fizike, fizike čestica i teorije polja, aksiomske fizike i algebarske fizike, fizike polimera i teorije merila, opšte teorije relativnosti i kosmologije. Biće potrebno nekoliko godina pre no što sva ta proširenja budu istražena.

* * *

---

[1] Lao Ce (šesti vek pne) bio je uticajan filoof i mudrac

[2] Ovo je slobodan prevod. U orginalnom tekstu upotrebljena je reč "multiple", čije je etimološko poreklo "to ima mnogo nabora". (Prim.prev.)

Može li u dijagramu na ***slici 1***, ***strana 9***, možda da ***ne postoji*** neka crvena tačka, to jest da neka teorija fizike nedostaje? Zanimljiv dokaz pokazuje da to nije slučaj. Ako krenemo odozdo, to jest od svakodnevnog života, do sledećeg nivoa teorije dospeva se kada se uvrsti jedno od poznatih ograničenja kretanja: brzina, rad ili sila. Nasuprot tome, ako krenemo od objedinjene teorije, dospevamo do teorija ispod nje kada ***odbacujemo*** jedno od ograničenja kretanja. Za sada, druga ograničenja osim poznatih ne postoje ili nisu moguća.

Prema tome, nisu moguće druge teorije na nivou ispod objedinjene teorije. To se primenljuje na svakom od nivoa na slici. Prema tome, na slici ne nedostaje nijedna teorija. Da li ovaj interesantan dokaz drži vodu? (***Izazov 218e***)

* * *

Opis prirode pomoću niti iznenađujuće je jednostavan, uglavnom zbog toga što koristi toliko malo osnovnih pojmova. Da li je ovaj rezultat začuđujući? U našem svakodnevnom životu naše doživljaje opisujemo pomoću hiljada reči, to jest uzimajući ih iz otprilike 350.000 reči od kojih se sastoji engleski jezik, ili iz sličnog broja reči drugih jezika. Ovaj skup je dovoljan da se govori o svemu, od ljubavi do surfovanja, od lepote do sreće. A ovi pojmovi su konstruisani od ne više od oko 35 osnovnih pojmova, koje smo već videli u ***Vol. III, strana 202***. Ne treba da budemo isuviše iznenađeni da ustvari možemo da govorimo o celom svemiru koristeći samo malo osnovnih pojmova: delovanja i rezultata (približnih) razlika, ili preciznije, osnovnih događaja – promena ukrštanja - i njihovih opažanja.

* * *

Do skoro svih otkrića u fizici došlo se sa najmanje 30 godina zakašnjenja. Isto to je tačno za model niti. Ako uporedimo model niti sa onim u šta su fizičari verovali u dvadesetom veku (***strana 32***), možemo da vidimo zbog čega: istraživači su imali previše pogrešnih ideja o objedinjavanju. Sve te pogrešne ideje mogu da se saberu u sledeći iskaz:

- "Objedinjavanje zahteva uopštavanje postojećih teorija,"

Ovaj iskaz je prepreden: retko se izričito izražava ali se u njega naširoko veruje. S druge strane, razvoj modela niti takođe prati posebnu vodeću ideju, naime:

- "Objedinjavanje zazteva pojednostavljenje."

Nadamo se da ova vodeća ideja neće i sama postati dogma: u mnogim oblastima života pojednostavljenje znači ne obraćati pažnju na detalje. Ovakav stav nanosi mnogo štete.

* * *

Model niti pokazuje da postizanje objedinjavanja nije poduhvat koji zahteva teške apstrakcije. Objedinjavanje nije bilo sakriveno na nekom skoro nepristupačnom mestu do kojeg je moglo da dopre malo odabranih, dobro obučenih istraživačkih naučnika. Naprotiv, objedinjavanje je dostuno svakom ko ima osnovna znanja o prirodi i fizici. Nije potrebna titula Ph.D. teorijske fizike da se razume i da se u njemu uživa. Znanje izloženo u predhodnim delovima serije ove knjige je dovoljno.

Kada je Endrju Vils (Andrew Wiles) prvi dokazao poslednju Fermovu (Fermat) teoremu posle tri veka pokušavanja najvećih i najboljih matematičara, objasnio je da je njegovo traganje za dokazom bilo kao istraživanje u mračnom dvorcu. Sagledavajuči pojmovne poteškoće koje je morao da prevaziđe, analogija je bila prikladna. Podsećajuči se koliko mnogo ljudi je već tragalo bezuspešno za objedinjavanjem, prva reakcija je da se uporedi traženje objedinjavanja sa istraživanjem nečeg još većeg, kao što je složeni mračni sistem pećine. Mađutim, ova analogija nije od pomoći. Nasuprot dokazu Fermove teoreme cilj traganja za objedinjavanjem pokazao se da je jednostavan i izložen na otvorenom. Istraživači su ga prosto previđali, jer su bili ubeđeni da je cilj složen, skriven u tami i teško dostupan. Nije bio.

* * *

Pustolovina penjanja na Planinu Kretanja stoga nije uporediva sa penjanjem na Cerro Torre, što je možda najteži i najspektakularniji izazov koji priroda nudi planinarima. ***Slika 115*** daje utisak o vrhu. Planina kretanja ne podseća uopšte na taj vrh. Planina Kretanja ne podseća ni na vrh Langtang Lirung u Nepalskim Himalajima, koje je prikazan na koricama ove knjige. Penjanje na Planinu Kretanja više je nalik hodanju uz blago zeleno brdo, usamljeni, sa smirenim umom, po sunčanom danu, dok uživate u lepoti okolne prirode.

* * *

Model niti rešava sva pitanja o ***determinizmu***. (***Strana 69***). Kvantna teorija i opšta teorija relativnosti su determinističke. Ipak, kada su oba opisa kombinovana, pokazalo se da je vreme približan pojam niske

energije. Isto se događa sa determinizmom. Iako je priroda deterministička za sve praktične primene i ne ispoljava iznenađenja, determinizam deli sudbinu svih onih zamislivih suprotnosti, kao što je temeljna slučajnost, nedeterminizam svih vrsta, postojanje čuda, stvaranje iz ničega, ili božanska intervencija: determinizam je ***netačan*** opis prirode na Plankovim razmerama – kao i sve njegove alternative.

Slika 115 Planina Kretanja ne liči na Cerro Torre, već na blago brdo (© Davide Brighenti, Myriam70)

* * *

Model niti je toliko jednostavan da staje kao natpis na majicu – i na nadgrobni spomenik. (***Ref. 260***).

* * *

Istorijski, model niti je razvijen iz objašnjenja, započetog 1990-ih godina, maksimalne sile u prirodi, trika sa opasačem i entropije crne rupe. Posle kompletiranja prvih šest poglavlja ovog dela knjige 2002. godine, raznišljanje o njegovoj primeni dovelo je do modela niti i njegovom osnovnom načelu.

Pre svega, bio je to opis opšte teorije relativnosti pomoću maksimalne sile koji je pokrenuo traganje za objedinjenim opisom koji se zasnivao čisto na Plankovim jedinicama. Druga suštinska tačka bio je poriv da se traži konačna teorija neposredno, iz njenih zahteva ("odozgo – naniže" na ***slici 1***) (***strana 9***), a ne iz objedinjavanja kvantne teorije i opšte teorije relativnosti ("odozdo – naviše"). U godonama od 2002. do 2007. većina ideja modela niti dobilo je oblik, uglavnom u podzemnoj železnici Minhena, dok sam putovao između kuće i posla. U tim godinama činilo se da model niti može da objasni Dirakovu jednakost, entropiju crnih rupa, opštu teoriju relativnosti i spektar čestica sa tri generacije čestica. Tokom šetnji po šumama i poljima u okolini Minhena, tokom 2008. i 2009. godine, činilo se da model niti objašnjava tri interakcije merila, da predviđa (uz skoro potpunu sigurnost) odsustvo Higsovog bozona – što je velika greška zbog pogrešnog rasuđivanja, kako se pokazalo 2012. godine – i bilo kakvih novih fizičkih efekata izvan standarda modela, te da omogućava izračunavanje neobjašnjenih konstanti fizike čestica. (***Strana 248***). Model je stoga davao sva njegova glavna predviđanja pre pokretanja eksperimenata u ubrzivaču LHC (Large Hadron Collider) u Ženevi, u jesen 2010. godine. Veliki deo posla obavljen je u žurbi – budućnost će pokazati šta je trajna vrednost.

* * *

Mnogi istraživači verovali su tokom celog svog života da je konačna teorija nešta korisno, važno i vredno. Ovo zajedničko verovanje o važnosti i ozbiljnosti traganja dovelo je, tokom proteklih decenija, do rastuće agresivne atmosfere prema ovim istraživačima. Ovakva neprofesionalna atmosfera, kombinovana sa zavisnošću od finansiranja istraživača, usporila je otkrivanje konačne teorije za nekoliko decenija.

Ustvari, konačna teorija nije korisna: ona ne dodaje ništa od praktične važnosti kombinaciji standardnog modela i opšte teorije relativnosti. Konačna teorija nije ni važna: ona nema nikakvih primena u svakodnevnom životu ili u industriji i suštinski ne menja naše viđenje sveta. Ona samo utiče da se nešta nauči. Najzad, konačna teorija nema ni vrednost: ona ne pomaže ljudima u njihovom životu ili ih usrećuje. Ukratko, konačna teorija je ono što su i sva istraživanja teorijskih osnova: ideje za zabavu.

Čak i kada bi model niti bio zamenjen drugim modelom, zaključak ostaje: konačna teorija nije korisna, nije važna i nema vrednost. Međutim, ona je zabavna.

* * *

Modelu niti biće potrebno dugo vreme da bude prihvaćen. Razlog je očigledan: ***Model niti je protivrečan navikama razmišljanja*** u mnogim poljima istraživanja. Istraživači koji rade na utemeljenju kvantne teorije, opšte teorije relativnosti, kosmičkih struna, matematičke fizike, klasične ili kvantne teorije polja, fizike polimera, promene oblika, kvantne gravitacije, struna, vizuelizacije kvantne mehanike, teorije čvorova, viših dimenzija, supersimetrije, aksioma fizike, teorije grupa, osnova fizike, kvantne optike i fizike čestica, moraju da se odreknu mnogih dugogodišnjih navika u razmišljanju. Isto moraju da urade i svi ostali fizičari. ***Niti zamenjuju čestice i tačke.***

Postoji takođe i drugi razlog za sporo prihvatanje: ***Model niti u svojoj jednostavnosti samo je mali korak napred od trenutnih istraživanja***. Mnogi istraživači otkrivaju koliko su bili u blizini idejama modela niti i koliko su dugo previđali ili zanemarivali tako jednostavnu mogućnost. jednostavnost osnovnog načela u protivrečnostima je sa očekivanjima većine istraživača. naime da je konačna teorija komplikovana, teška i teška za otkrivanje. Ustvari, suprotno je tačno. ***Niti se zasnivaju na Plankovim jedinicama i omogućavaju jednostavan, bezmalo algebarski opis prirode***. (***Strana 70***).

Sažeto, kod mnogih istraživača i mnogih fizičara postoji mešavina zbunjenosti, straha i razočaranja. Biće potrebno vreme pre no što ova osećanja savladaju i zamene ga oduševljenjem koje daje model niti.

Samo je dosadnim ljudima dosadno.

Anonimus

ODBACIVANJE INDUKCIJE

Cum iam profeceris tantum, ut sit tibi etiam tui reverentia, licebit dimittas pedagogum.[1]

Seneka

Konačna teorija kretanja ima posledice koje je vredno pomenuti detaljno: njeno odsustvo beskonačnosti i njeno odsustvo konačnosti odstranjuju potrebu indukcije. Ovaj zaključak je bitan zbog opšteg razmatranja o čovekovom shvatanju prirode.

U fizici, kao i u drugim prirodnim naukama, postoji tradicija da se izrazi kako izvesni opisi prirode – nekada zbunjujuće nazivani "zakoni" – važe u ***svim*** slučajevima. U ovoj rečenici "svim" znači "za sve vrednosti veličina koje se pojavljuju". Kao konkretan primer, za "zakon" univerzalne gravitacije uvek se tvrdilo da je isti ovde i danas, kao i za ostala mesta i vremena, kao što su drugi kraj svemira i kroz nekoliko hiljada godina. Potpun popis takvih tvrdnji za sve je deo milenijumske liste (***strana 128***) otvorenih pitanja u fizici dvadesetog veka. Tokom više decenija, navika da se tvrdi opšta valjanost za ograničen i konačan broj iskustava, takođe poznat pod nazivom ***indukcija***, posmatrana je, i to sa pravom, kao logički sumnjiiv manevar, koji je dopušten samo zato što radi. Međutim, razvoji opisani u ovom tekstu pokazuju da je takva metoda zaista i opravdana.

Pre svega, tvrdnja o uopštenosti nije toliko ogromna kao što se čini, pošto broj događaja koji u prirodi mogu da se razlikuju nije beskonačan. U predhodnom odeljku je pokazano da je maksimalan broj događaja N koji se mogu razlikovati u svemiru reda $N = (T_0/t_{Pl})^4 = 10^{244\pm2}$, budući da je T_0 starost svemra, t_{Pl} je Plankovo vreme. Ovo je veliki, ali sigurno konačan broj.

Objedinjeni opis prirode mora zato prvi da smanji razne tvrdnje o svemu od prividno beskonačnog na konaćan broj slučajeva, premda sadrži astonomski velike brojeve. Ovo smanjenje je posledica prepoznavanja da se beskonačnosti ne pojavljuju u opisu prirode. Sada znamo da kada govorimo o prirodi "svi" slučajevi ne znače beskonačan broj.

Drugo, važan rezultat postignit je opisom prirode pomoću niti. U bilo kojoj tvrdnji za sve sličajeve o osnovnim kretanjima, provera svakog od velikikog broja mogućnosti nije više potrebna, pošto su svi događaji rezultat jednog jedinog subjekta, za koji mi uvodimo različitosti pomoću naših čula i u našem mozgu. A razlike koje uvodimo podrazumevaju automatski da simetrije prirode – "tvrdnji za sve" ili "indukcije" – koje koristimo za opis kretanja jesu tačne. Priroda ne sadrži razdvojene delove. Prema tome, ne postoji način da se razdvojeni delovi ponašaju različito. Indukcija je posledica jedinstvenosti prirode.

[1] "Sada, kada ste napredovali tako daleko da poštujete sebe, možete da otpustite pedagoga." Seneka (Lucius Annaeus Seneca, 4. pne, Cordoba – 65. pne, , uticajan Rimski pesnik i filozof, napisao je ovo u delu *Epistulae morales ad Lucilium, XXV, 6.*

Konačno, mogućnost da se ***potvrde*** iskazi o prirodi nastaje zbog činjenice da su svi vidovi u našim doživljajima ***povezani***. Potpuno razdvajanje u prirodi je nemoguće. Prihvatanje tvrdnji o svemu moguće je pošto je model niti postigao potpun opis o tome kako su svi "delovi" prirode povezani.

Model niti pokazuje da možemo da govorimo i mislimo o prirodi pošto smo i mi njen deo. Model niti takođe pokazuje da indukcija deluje pošto je sve u prirodi povezano sa svim ostalim: priroda je jedno.

ŠTA JE JOŠ SKRIVENO

Ono što izmiće radoznalosti može da se shvati u delovanju.

Narodna izreka.

Otkuda smo došli? Odakle je došao svet? Šta nam donsi budućnost? Šta je smrt? Sva ova pitanja su pitanja o kretanju – i njegovom značenju. I kao i svi koji se penju na planinu i mi moramo da pitamo: zbog čega se penjemo? Kao svi penjači na planinu i mi moramo da priznamo da je penjanje, kao i svaka druga strast, takođe simbolična aktivnost. Penjanje može da bude potraga za smislom, za našom majkom i ocem ili za samim sobom.

Na sva ova pitanja model niti ne daje odgovore. Mi smo zbirka zapletenih niti. Mi smo sve i ništa. Nit(i) od koje mo načinjeni nastaviće da se koleba. Rođenje, život i smrt su vidovi zapletenih niti. Svemir je presavijena nit čija složenost se povećava.

Očigledno, takav apstraktan iskaz ne pomaže u bilo kojem ljudskom traganju. Ustvari, da bismo došli do preciznog opisa kretanja, mi smo samo istražili detalje pokretnih čestica i savijenog prostora. Proučavanje njih bio je redosled zagonetki; međutim, rešavanje tih zagonetki ne daje smisao, čak ni na vrhu Planine Kretanja. Sa vrha ne možemo da vidimo razvoj složenog sistema; posebno ne možemo da vidimo ili opišemo razvoj života, biološki razvoj vrsta, ili rast ljudskih bića. Sa vrha ne možemo da vidimo detalje dole u dolinima ljudskih odnosa ili iskustava. (***Vol. I, strana 17***). Ukratko, niti ne daju savet ili značenje. Biti previše dugo na vrhu Planine Kretanja nije od koristi. Da bismo našli značenje, moramo da siđemo opet dole u stvaran život.

PUT POVRATKA: JE RĘVE, DONC JE SUIS[1]

Mrzim stvarnost. Međutim, to je jedino mesto gde može da se dobije dobra šnicla

Vudi Alen (Woody Allen)

Uživati u živou i davati mu smisao zahteva silazak sa vrha Planine Kretanja. Put povratka može da ima različite smerove. Najlepši i neposredan silazak sa planine je možda korišćenje paraglajdera. Posle naše pustolovine, idemo isto tako lepim putem: napuštamo stvarnost.

Uobičajen put da se proučava kretanje, takođe i u ovom tekstu, počinje od sposobnosti da se nekom drugom govori o prirodi. Iz ove sposobnosti izveli smo naš opis prirode, počevši od Galilejeve fizike i završavajući sa modelom niti. Do istog rezultata može da se dođe uz zahtev da budemo sposobni da govorimo sebi o prirodi. Govoriti sebi je primer razmišljanja. Prema tome treba da smo sposobni da izvedemo celu fiziku iz rečenice Rene Dekarta "*je pense, donc je suis*"[2], koja je prevedena latinski kao "*cogito, ergo sum*". (***Ref. 261***). Dekart je naglašavao da je to jedini iskaz u koji je potpuno siguran, nasuprot njegovim opažanjima u koje nije bio siguran. On je prikupio brojne primere u kojima čula daju nepouzdane informacije.

Međutim, kada govorimo sebi, možemo da napravimo mnogo grešaka kada tražimo provere od drugih. Pristupimo ovom pitanju na korenito različit način. Direktno nastavljamo do one situacije u kojoj je prisutna velika sloboda i moguć velik broj grešaka: svet snova. Ako bi priroda bila samo san, da li bismo mogli iz njega da izvedemo potpun skup znanja iz fizike? Objasnimo ovo pitanje.

- Snovi podrazumevaju upotrebu raznolikosti pamćenja i prizora. Snovi sadrže ***delove*** i ***kretanje***.

[1] "Je ręve, donc je suis" – sanjam, dakle postojim.
[2] "Je pense, donc je suis" – mislim, dakle postojim.

- Nezavisno od toga da li su snovi usled predhodnih opažanja ili fantazije, preko pamćenja možemo da odredimo redosled među njima. Odnos redosleda naziva se ***vreme***. (***Ref. 262***). Subjekti iz sna bivaju poređani i nazivaju s ***događaji***. Skup svih događaja (iz sna) oblikuje ***svet*** (iz sna).
- U snu možemo imati nekoliko nezavisnih doživljaja istovremeno, na primer, o žeđi i gladi. Redosledi stoga ne daju potpuno razvrstavanje doživljaja. Potrebno dodatno razlikovanje nazivamo prostor. Prostor u snovima ima tri dimenzije.[1] Snevanje prema tome znači korišćenje prostora i vremena.
- Možemo praviti razliku između sadržaja snova. Razlikovanje znaći da možemo da izbrojimo stavke u snovima. Prebrojavanje znači da imamo način da odredimo merenje. Snovi su stoga okarakterisani nečim što možemo da nazovemo "opažanjima". Doživljaji u snu u datom trenutku vremena okarakterisani su ***stanjem***.
- Pošto snove možemo da opišemo. sadržaj snova postoji nezavisno od vremena sanjanja. Zato možemo da zamislimo isti sadržaj snova na različitim mestima i različitim vremenima u prostoru snova. Postoji zato invarijantnost sadržaja snova od prostora i vremena. Postoje i simetrije u prostoru snova.
- Sadržaji snova mogu da budu u interakciji. Čini se da se snovi menjaju bez kraja. Izgleda kao da su snovi beskonačni.

Drugim rečima, veliki deo sveta snova opisan je izmenjenim oblikom ***Galilejeve fitzike***. Naglašavamo da je najveća razlika između snova i prirode nepostojanje očuvanosti. Opažanja u snovima mogu da se pojavljuju, nestaju, počinju i prekidaju se. Napominjemo da umesto snova isto tako možemo da istražujemo kinematografske ***filmove***. Filmovi, slično snovima, opisani su izmenjenom verzijom Galilejeve fizike. I filmovi, isto kao snovi ne prate zakone očuvanja. Međutim, snovi nas uče mnogo više.

- Snovi pokazuju da prostor može da se iskrivi.
- Kretanja u snu, kao što možete da proverite, ispoljavaju maksimalnu brzinu. (***Izazov 219s***).
- Snovi pokazuju čudnu granicu rastojanja. Postoji ograničenje u našem vidnom polju, iako to ne možemo da vidimo.

Razmišljanje o ovim pitanjima pokazuje da postoje granice i u snovima. Ukratko, svet snova ima maksimalnu veličinu, maksimalnu brzinu i tri dimenzije koje mogu da se krive. Svet snova i svet filma opisani su prostim oblikom ***opšte teorije relativnosti***.

- I broj stavki koje možemo da sanjamo istovremeno i pamćenje predhodnih snova su konačni.
- Snovi imaju boju.
- Postoje slikovne taćke (pikseli) u snovima, premda ih ne doživljavamo neposredno. Međutim, to možemo da učinimo posredno: postojanje najvećeg broja stvari koje možemo da sanjamo istovremeno, podrazumeva da prostor snova ima najmanju razmeru.

Sažeto, svet snova ima nečeg sličnog minimalnoj promeni. Svet snova, ili onog filmski, opisan je jednostavnim oblikom ***kvantne teorije***. Različitost od prirode u snovima i na filmu je ta što je prostor diskretan od poćetka. Međutim, postoji još mnogo da se kaže o snovima.

- Ne postoji način da se kaže kako su slike iz snova načinjene od matematčkih tačaka, jer nepostoji ništa manje od slikovne tačke (piksela).
- U snovima često ne možemo jasno da razlikujemo objekte ("materiju") i okolinu ("prostor"); oni su često pomešani.
- U snovima se kolebanja javljaju i za slike kao i za pozadinu.
- U snovima su nemoguće oštre razlike. Prostor-vreme snova ne može da bude skup.
- Kretanje snova se javlja kada opažamo približnu postojanost (u vremenu).
- U snovima nije jasan broj dimenzija na malim rastojanjima. Tu su pomešane dve ili tri dimenzije.

Sažeto, svet snova izgleda da se ponaša kao da je opisan proširenim sastojcima. Stoga zaključujemo ovo kratko istraživanje fizike snova začuđujućom predpostavkom: Čak i kada bi priroda bila san, iluzija ili

[1] Iako neki matematičari tvrde da mogu da ***razmišljaju*** u više od tri dimenzije, svi oni ***sanjaju*** u tri dimenzije

fantazija, mogli bismo da dobijemo većinu rezultata koje smo otkrilu u našem usponu na Planinu krtanja. (Koje razlike bi preostale od moderne fizike?) (***Izazov 220s***). Govoreći sa jezikom za zubima, strah od naših ličnih grešaka u prosuđivanju, koje Dekart i mnogi drugi posle njega naglašavaju s pravom, možda se ne odnosi na fundamentalnu fiziku.

KOJE JE POREKLO BOJA?

Sve boje oko nas određene su konstantom fine strukture α – konstantom veze za elektromagnetnu interakciju na niskoj energiji – uz njenu izmerenu vrednost od 1/137,035999074(44). (***Ref. 5***). Konstanta fine strukture takođe je suštinska da se objasni većina svakodnevnih uređaja i mašina, kao i sva ljudska razmišljanja i kretanja. Konstanta je subjekt svakog električnog naboja u prirodi.

Model niti je pokazao da je električni naboj svojstvo zapleta niti.

- Konstanta fine strukture opisuje verovatnoću da kolebanje dodaje I potez Rajdemajstera u hiralni zaplet električno nabijene čestice. (***Strana 287***).

Još uvek nismo izveli tačnu vrednost konstante fine strukture, ali izgleda da ćemo naći kako to da uradimo.

Ukratko, čini se da naziremo poreklo svih boja i sve lepote oko nas.

ZAKLJUČAK: ŠTA JE KRETANJE?

Duboko mirovanje je kretanje samo po sebi. Njegovo kretanje miruje u sebi

Lao Ce, *Tao Te Ching*, VI.

Sada možemo da odgovorimo na pitanje koje nas je pokretalo tokom naše pustolovine.

- Kretanje je opažanje promena ukrštanja jedne nevidljive, zapletene i kolebajuće niti koja opisuje prirodu.

Niti prirode oblikuju čestice, horizonte i prostor vreme: to su delovi prirode. Čestice su zapleti niti; horizonti i prostor-vreme su tkanja niti. Delovi – uključujući materiju, zračenje i zakrivljenost vakuuma – kreću se zbog kolebanja njihovih niti.

Kretanje se javlja odmah pošto podelimo svet na delove i potom ove delove pratimo. Deljenje prirode na delove nije svesan čin; naša ljudska priroda – naša čula i naš mozak – ***primoravaju*** nas da to učinimo. I uvek kada doživljavamo ili govorimo o delovima svemira, nalazimo kretanje. Svi delovi prirode se kreću.

Mi doživljavamo kretanje zbog toga što smo ograničeni: naša čula i naš mozak su napravljeni i treba ih razlikovati. Ne možemo to da uradimo drugačije. Potrebne su nam razlike da bismo opstali, da razmišljamo i da uživamo u životu. Na neki način možemo da kažemo da se kretanje pojavljuje kao logična posledica naših ograničenja; temeljno ograničenje je ono što nas ćini da uvodimo delove, uključujući tačke i skupove.

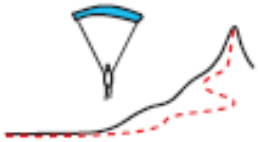
Kretanje se javlja pošto su svi delovi prirode približnosti. Detaljnije, opažanje promena ukrštanja i opis delova niti koje se kolebaju u prostoru pozadine rezultati su i mogući su pošto se približavamo od jedne niti do više delova. Jedna nit (približno) oblikuje više elementarnih čestica u sebi. Delovi niti i čestice (približno) nas dovode da uvedemo prostor pozadine, materiju i zračenje. Uvođenje prostora pozadine podrazumeva opažanje kretanja. Kretanje se stoga pojavljuje automatski kada približni delovi prirode, kao što su ljudi, životinje ili mašine, opisuju druge približne delove prirode, kao što su druga tela.

Opažanje kretanja nastaje usled našeg uvođenja množine. Kretanje je rezultat naše prinude da koristimo ***približne delove*** da bismo opisali ***jedinstvo*** prirode. Opažanje kretanja rezultat je približnosti. Sve ove približne razlike su nezaobilazne i nastaju usled ograničenja ljudske prirode.

Kretanje je "veštački proizvod" lokaliteta. Pošto je lokalitet približnost i nastao je usled naše ljudske prirode, možemo da kažemo, da je u nekom smislu kretanje iluzija. Izgleda da potvrđujemo ono što je Zenon iz Eleje izrazio pre 2500 godina. (***Vol. I, strana 17***). Međutim, nasuprot pesimističkom gledanju Zenona, mi sada imamo na raspolaganju začuđujući spektar rezultata i alata. Pre svega, ovi alati nam omogućavaju da menjamo sebe i naše okruženje nabolje.

Sve velike stvari koje su se dogodile na svetu prvo su se dogodile u mašti osobe, a kako će izgledati svet sutrašnjice, u velikoj meri zavisi od snage maštanja onih koji upravo sada uče da čitaju.

Astrid Lindgren[1] (***Ref. 263***)



[1] Astrid Lindgren (1907. Nas – 2002. Stockholm) bila je omiljena spisateljica dečjih kniga (*Pipi Diga Čarapa* i dr.).

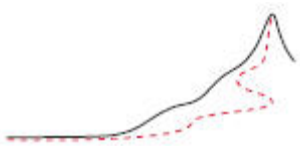
POGOVOR

Možda ćete jednom da pročitate Platonovo delo *Phaedrus (Dijalozi)*, jedno od lepih tekstova grčkih filozofa. U njemu je navedeno da je Sokrat rekao kako nikada nije izišao iz gradskih zidina, pošto njega, kao "zaljubljenika u učenje, drveće i otvoreni prostor ništa ne uče, dok u gradu ljudi to čine". Ovo je velom prikrivena kritika Demokrita, najznačajnijeg i najpoznatijeg filozofa u Grčkoj tokom Platonovog vremena Demokrit je bio prirodni filozof *par excellence*, i verovatno je naučio od prirode – sa njenim drvećem i otvorenim prostorom – više nego bilo ko drugi posle njega

Posle ovog uspona na planinu možete sami da se odlučite koji od ova dva pristupa je srodniji vama. Možda je korisno znati da je Aristotel odbio da bira i negovao je oba. Ne posroji alternativa u životu nego li da se prati sopstvena pamet i i da se u tome uživa. Ako ste uživali na ovom posebnom putu, pokažite ga vašim prijateljima. Vi lično, osetićete veliko zadovoljstvo posle hodanja, završetkom nečeg važnog. Mnogi pre vas nisu imali tu priliku. Uživajte u ponuđenoj lepoti pogleda. Uživajte u prostranstvima koje pruža horizont. Uživajte u doživljajima koji su se stvorili u vama. Prikupite ih na miru. Imaćete blago koje će biti korisno u više prilika. Zatim, kada osetite želju da krenete dalje, budite spremni za još neku pustolovinu koju život mora da vam ponudi.

Platonovo delo *Phaedrus (Dijalozi)*, napisano oko 380. godine pre nove ere, dostupno je u mnogo džepnih izdanja. Ne trošite vaše vreme da učite starogrčki jezik da biste ga pročitali, prevedene verzije su isto tako lepe kao i orginal. Polovina teksta je o ljubavi i daje ishodište izrazu "platonska ljubav", mada je njegovo izvorno značenje danas jako iskrivljeno, kao što ćete saznati.

Platonovo izbegavanje prirode tokom celog života imalo je dva razloga. Pre svega, on je bio ljubomoran na Demokrita. U svojim tekstovima Platon nikada nije citirao Demokrita. Demokrit je bio najplodniji, najhrabriji, najcenjeniji i najuspešniji filozof svog vremena (a možda i svih vremena). Demokrit je bio oduševljen proučavalac prirode. Njegovi pisani radovi nisu preživeli, jer njegovo učenje nije bilo srodno sledbenicima hrišćanstva, pa ih nisu prepisivali kaludjeri u Srednjem veku. Gubitak ovih tekstova povezan je sa drugim razlogom koji je Platona držao na odstojanju od prirodnih nauka: želeo je da sačuva svoj život. Platon je od ljudi u gradu naučio jednu stvar: govoriti o prirodi je opasno. Počevši od njegovog života, tokom više od 2000 godina ljudi koji su se bavili prirodnim naukama bili su redovno osudjivani na izgnanstvo ili na smrt zbog bezbožnosti. Na sreću, to je u današnje vreme samo retkost. Medjutim, takvo nasilje se i dalje dogadja, a mi možemo da poštujemo sve opasnosti koje su naši predhodnici savladali, kako bi nam omogućili da uživamo u ovoj pustolovini.



Dodatak A
GEOMETRIJA ČVOROVA

U narednoj tabeli dat je kratak sažetak matematike oblika čvorova

TABELA 18 Važna svojstva čvorova, veza i zapleta

Pojam	**Odrednica svojstva**	**Ostala svojstva**
Čvor / veza / zaplet	jednom zatvoren / više puta zatvoren, jedna ili više otvorenih krivih, sve u 3 dimenzije, bez preseka	dužina užeta je integral dužine lukova; dužina užeta zavisi od oblika
Idealan čvor, veza zaplet (oblici)	najčvršći moguč ćvor, veza ili zaplet (oblik) predpostavlja uže stalnog prečnika koje je beskonačno savitljivo i beskonačno klizavo	trenutno, poznati su samo približno svi ne-trivijalni idealni oblici; većina idealnih čvorova (gotovo sigurno) imaju kovrdže
Traka ili okvir	kratki normalan (ili netangentni) vektor koji je pričvršćen na svakoj tački krive	
Zakrivljenost krive	poluprečnik obrnute zakrivljenosti "dodirnog" kruga	meri odstupaje od prave, to jest lokalnu zakrivljenost krive
Normalan vektor ili vektor zakrivljenosti	lokalni vektor je normalan na krivu, u smeru centa “dodirnog” kruga, sa dužinom datom preko zakrivljenosti.	dat je prvim ili drugim izvodom krivine
Binormalan vektor	lokalni jedinični vektor normalan je na tangentu ili na vektor normale/zakriv-ljenosti	
Torzija	lokalna brzina obrtanja binormalnog vektora; pozitivna (negativna) za desnostranu (levostranu) spiralu.	meri odstupanje od ravnog, to jest lokalno uvijanje ili lokalnu desnostranost krive; suštinski je treći izvod krive.
Freneov okvir u tački zakrivljenosti	“prirodni” lokalni okvir sistema odredjen ***jediničnom*** tangentom, ***jediničnom*** normalom/zakrivljenosti i binormalnim vektorom,	Freneov okvir se razlikuje u svakoj tački krive, Freneov okvir nije jednoznačno određen ako je kriva lokalno prava.
“Prirodno” uokvirenje ili *Freneova* traka	odredjen lokalnom normalom, to jest lokalnim vektorom zakrivljenosti	za zatvorenu krivu je uvek zatvoren i dvostran, pa zato nikad nije Mobijusova traka.
“Prirodan” okvir ili *Freneova traka*	odredjen lokalnom normalom, to jest, lokalnim vektorom zakrivljenosti	za zatvorenu krivu uvek je zatvoren i dvostran i stoga nikada Mobiusova traka
Povezni broj izmedju dve zatvorene krive	nemarno rečeno, pokazuje koliko puta se dve krive okreću jedna oko druge, ili, ekvivalentno, polovina broja koliko puta krive “zamene” položaje	topološka invarijanta, to jest, ne zavisi od oblika $Lk(K1,K2)=\frac{1}{4\pi}\oint_{K2}\oint_{K1}\frac{r_{12}(dr_1\times r_{r2})}{r_{12}^3}$
Povezni broj za zatvorenu dvostranu traku	broj pokazuje koliko puta su ivice omotane jedna oko druge	topološka invarijanta, to jest, ne zavisi od oblika, uvek je ceo broj
Samopovezni broj ili “prirodni” povezni broj za čvor	broj pokazuje koliko puta su ivice prirodne/Freneove trake omotane jedna oko druge	nije topološka invarijanta, zbog postojanja prevojne tačke
Povezni integral za otvorenu krivu	uopštavanje poveznog broja od čvorova na otvorene krive	obično nije ceo broj
Uvijanje trake, otvorene ili zatvorene	ukupan ugao(u jedinicama 2π) za koji se traka obrne oko središnje ose trake; nemarno rečeno, merilo *lokalne* helio-idalnosti	nestaje za trake koje su posvuda ravne

Uvijanje krive ili čvora	ukupan ugao(u jedinicama 2π) za koji se Freneov okvir obrne oko pravca tangente ili ekvivalentno (ukupno) uvijanje Freneove trake, takodje i pod nazivom *ukupna torzija* krive.	nije ceo broj čak ni za slučaj čvorova; zavisi od oblika krive/čvora; različit je od nule za hiralne krive/čvorove; nula je za nehiralne krive/čvorove koji imaju krutu simetriju odraza; uvijanje i torzija jedino su jednaki ako je uvijanje odredjeno Freneovom trakom – sa ostalim okvirima koji se razlikuju; ovaj tip uvijanja nije u vezi sa prvim Rajdemajstero-vim potezom
Broj ukrštanja sa predznakom	zbur pozitivnih umanjeno za negativna ukrštanja u datoj usmerenoj 2d projekciji krive ili čvora (ponekad se naziva i "2d prevoj")	uvek je ceo broj; zavisi od oblika
2d-prevoj čvora ili *topološko uvrtanje*, ili *Tejtov broj*	broj ukrštanja sa predznakom za minima-lan broj ukrštanja dijagram/projekcija (ponekad se pojam "2d prevoj" koristi za broj ukrštanja sa predznakom bilo koje konfiguracije)	invarijanta je oblika; uvek je ceo broj; razli-kuje se od nule za sve hiralne čvorove; ima vrednost 3 za trolisni čvor, 0 za čvor oblika osmice, 5 za 5_1 i 5_2 čvorove, 2 za 6_1 čvor, 7 za 7_1 i 7_2čvorove, 4 za 8_1 čvor i 9 za 9_2 ćvor
Broj prevoja ili *3d prevoj čvora*	prosek nad smerom projekcije, za broj ukrštanja sa predznakom; površno rečeno, meri kako je umotan, namotan i hiralni čvor, to jest mjeri njegovu *ukupnu* helioidnost.	zavisi od oblika čvora; obično nije ceo broj; različit je od nule za hiralne čvorove; nula je za nehiralne čvorove koji imaju krutu simet-riju odraza $Wr(K)=\frac{1}{4\pi}\oint_{K2}\oint_{K1}\frac{r_{12}(dr_1\times r_{r2})}{r_{12}^3}$ ne koristi traku i zato je nezavisan od oblika trake pridružene čvoru
Prevoj idealnih, alternativnih čvorova i neparnih komponen-tnih povezivanja	vrednost je kvazikvantifikovana za alternativne čvorove sa malim brojem ukrštanja (< 11) u vrednostima koji se razlikuju od 2/7 + m4/7 samo za nekoliko procenata	aditivan je pri dodavanju čvora za čvorove sa malim brojem ukrštanja (< 11) unutar manje od 1%
Prevoj idealnih, alternativnih čvorova i parnih komponentnih povezivanja	vrednost je kvazikvantifikovana za alternativna povezivanja sa malim brojem ukrštanja (< 11) u vrednostima koji se razlikuju od 2/7 + m4/7 samo za nekoliko procenata	
Previjanje trake	površno rečeno, meri kako je umotana, namotana i hiralna traka, to jest meri njenu *ukupnu* helioidnost	
Previjanje ili otvorena kriva		nestaje za krive u ravni
Teorema Kalugareanu	za svaki čvor k i svaku traku G pridruženu čvoru $Lk(K,G)=Tw(K,G)+Wr(K)$	zahteva se za primenu teoreme na otvorene krive, (standardizovana) zatvaranja krivih

IZAZOVI, SAVETI I REŠENJA

Izazov 2s, ***strana 28***: Stavite $\Delta f\,\Delta t \geq 1$ i zamenite $\Delta l = c/\Delta f$ i $\Delta a = c/\Delta t$

Izazov 16s, ***strana 39***: Da. Međutim, možemo da se raspravljamo i o suprotnom, naime da li se materija pojavljuje kada se prostor dovoljno sabije. Obe tačke gledišta su ispravne.

Izazov 22r, ***strana 43***: Prema mojim saznanjima nijedne takve granice nisu objavljene. Učinite to sami!

Izazov 23 s, ***strana 43*** Granice sistema ne mogu da budu odabrane na drugi način; posle ispravki granica, granice koje su ovde date treba da se primenjuju

Izazov 26s, ***strana 44***: Samo unesite brojeve da biste to proverili.

Izazov 28s, ***strana 44***: Ne.

Izazov 29s, ***strana 45***: Ovo je trik pitanje koje je u vezi sa dva pitanja. Prvo, da li je kosmološka konstanta ista za sve posmatrače u svemiru koji su, kao što smo mi, manje ili više u stanju mirovanja u odnosu na zračenje iz pozadine? Mnogi istraživači bi se saglasili da je takav slučaj. Drugo, da li je kosmološka konstanta jednaka za izuzetno brze posmatrače, posmatrače koji se kreću na izuzetno visokoj energiji u odnosu na zračenje iz pozadine?

Izazov 33s, ***strana 55***: Površno govoreći, takav časovnik nije sposoban da pomera svoje kazaljke na način koji bi garantovao očitavanje tačnog vremena.

Izazov 37s, ***strana 68***: Krajnja energija E proizvedena ubrzivačem protona raste sa povećavanjem njegovog poluprečnika R približno kao $E \sim R^{1,2}$; kao pimer, SPS (Super Proton Synchrotron) u CERN-u postiže 450 GeV za poluprečnik od 740 m. Prema tome, morali bismo da imamo poluprečnik veći od 100.000 svetlosnih godina (veči od naše galaksije) za ubrzivač Plankove energije. Uzgradnja ubrzivača koji bi postigao Plankovu energiju je nemoguća.

Priroda nema ubrzivač takve snage, ali je blizu toga. Maksimalna izmerena vrednost kosmičkih zraka od 10^{22} eV je oko milionitog dela Plankove energije. Mehanizam ubrzavanja još uvek nije jasan. Izgleda da iz nekog još nejasnog razloga nisu izvori ni crne rupe ni kosmički horizont. Ovo pitanje još je uvek tema istraživanja.

Izazov 38s, ***strana 68***: Plankova energija je $E_{\mathrm{Pl}} = \sqrt{\hbar c^5/G} = 2{,}0\,\mathrm{GJ}$. Gorivo za automobile daje približno 43 MJ/kg. Prema tome, Plankova energija odgovara energiji od 47 kg goriva za automobile, ili oko jednog punjenja rezervoara.

Izazov 39s, ***strana 68***: Ne baš, pošto je greška mase jednaka masi samo u Plankovom slučaju

Izazov 40r, ***strana 68***: Malo je verovatno da se takva odstupanja mogu naći, jer su maskirana pojavom efekata kvantne gravitacije. (***Strana 211***). Međutim, ukoliko mislite da imate predpostavku za odstupanje, objavite je i pošaljite autoru e-poštu.

Izazov 41s, ***strana 69***: Najmanje rastojanje koje se može izmeriti isto je za pojedinačnu česticu kao za sistem čestica.

Izazov 42s, ***strana 69***: Na takvim energijama ne postoji gravitacija i ne postoje čestice. Ne postoji paradoks.

Izazov 43d, ***strana 69***: O pitanju se još uvek raspravlja; dobar kandidat za minimalnu količinu kretanja pojedinačne čestice dat je sa $\hbar/R$, pri čemu je R ppoluprečnik svemira. Da li je odgovor zadovoljavajući?

Izazov 44s, ***strana 70***: Sve pomenute mogućnosti važe istovremeno. Pitanje je još uvek otvoreno, a jasno razmišljanje o njemu nije lako.

Izazov 45s, ***strana 70***: Precizna razmera energije nije još jasna. Razmera je ili Plankova energija ili unutar nekoliko redova jačine njene najmanje moguće energije; najmanja moguća energija je prema tome oko hiljaditog dela Plankove energije.

Izazov 47r, ***strana 71***: Ukoliko možete da zamislite eksperiment, objavite ga sa predlogom i pošaljite autoru e-poštom.

Izazov 48s, ***strana 75***: Tabela agregata (***Tabela 33*** u ***Vol. I, strana 192***) jasno to pokazuje.

Izazov 49s, ***strana 76***: Zračenje iz pozadine svemira je časovnik u najširem smislu tog pojma.

Izazov 50s, ***strana 77***: Način na koji se izvode kosmološke granice prikazan je detaljno u odeljku koji počinje na ***strani 40***.

Izazov 61s, ***strana 83***: Greške merenja na Plankovim razmerama takođe onemogućavaju određivanje topologije u tim razmerama.

Izazov 63s, ***strana 84***: Greška merenja je velika koliko i rezultat merenja.

Izazov 67s, ***strana 85***: Nećete ga naći.

Izazov 69s, ***strana 86***: Ako ga nadete, objavite to i pošaljute autoru e-poštom.

Izazov 71s, ***strana 87***: Ovo je protivrečnost za opis prirode. Ipak, pojam "svemir", "skup svih skupova" i drugi matematički pojmovi, kao i mnogi religijski pojmovi ovog su tipa.

Izazov 72s, ***strana 88***: Ne, iz razloga koji su pomenuti ranije: ovo sprečavaju osnovne greške merenja pri merenju horizonta, kao i mnogi drugi efekti. Predpostavka je još jedan primer pogrešne fantazije o ekstremnom identitetu.

Izazov 73s, ***strana 88***: Fizički pojmovi koji su najviše u vezi sa "monad" su "niti" i "svemir", kao što je pokazano u drugoj polovini ovog teksta.

Izazov 74s, ***strana 88***: Makroskopski sadržaj svemira može da bude zavisan od posmatrača. Međutim, govoriti o više svemira (više "svačeg") ili "višesvemiru" (zašto samo jedan? šta je više od svega?), čista je besmislica. (***Vol. II, strana 200***)

Izazov 77s, ***strana 89***: Istina je samo ako bi bilo u mogućnosti da to učini. Pošto su čestice i prostor ne mogu razlikovati, uklanjanje čestica znači uklanjanje svega. (Model niti prikazuje ovu povezanost.)

Izazov 79s, ***strana 89***: Istina je. Postojanje je sposobnost interakcije. (***Vol. III, strana 234***). Ako ta sposobnost nestane, nestaje i postojanje. Drugim rečima, "postojanje" je pojam niske energije.

Izazov 80r, ***strana 90***: Ako nađete razuman iskaz o svemiru, objavite ga! I pošaljite ga takođe autoru. Sledeći izazov pokazaće jedan razlog zašto je to pitanje zanimljivo. Osim toga, takav iskaz bio bi protivrečnost zaključcima o kombinovanim efektima opšte teorije relativnosti i kvantne teorije.

Izazov 81s, ***strana 90***: Plotin u delu *Enneads* odredio je pojam "bog" na tačno takav način. Kasnije su Avgustin Hiponski u delu *De Trinitate* i mnogim drugim tekstovima, kao i mnogi teolozi posle njega, podržali ovo gledište. (Videti takođe kod Tome Akvinskog *Summa contra gentiles*, 1, 30). Ideja koju su oni predagali bila je jednostavna: moguće je reći šta "bog" nije, međutim, nemoguće je reći šta "bog" jeste. Ovaj iskaz je takođe deo *Roman Catholic Catechism, part one, section one, chapter one*, IV, 43. Ovo delo se može naći na veb strani www.vatican.va/archive/ENG0015/__PC.HTM. Slični iskazi nalaze se takođe u juduzmu, hinduizmi i budizmu.

Drugim rečima, teolozi priznaju da ne mogu da odrede pojam "bog", da pojam nema ni osobine ni sadržaj i da prema tome pojam ne može da se koristi u bilo kojoj potvrdnoj rečenici. Subjekti zajednički za "svemir" i za "bog" predpostavljaju zaključak da su oba pojma isto. U stvari, analogija između ova dva pojma može da se proširi kako bi se proverila: oba pojma imaju isti sadržaj iste granice i istu oblast primene. (To je prepredena i očaravajuća vežba.) (***Izazov 221e***). Ustvari, to je možda najzanimljiviji od svih dokaza o postojanju "boga", jer u njemu nedostaju svi problemi koje imaju uobičajeni "dokazi". Uprkos njegovoj zanimljivosti, ovaj dokaz ekvivalentnosti se kao tema još ne nalazi ni u jednoj knjizi. Razlog je dvojak. Prvo, rezultati savremene fizike – koji pokazuju da pojam svemira ima sva one

čudne osobine – još nisu opšte poznati. Drugo, rezultat dokaza identičnosti pojmova "bog" i "svemir" – poznat takođe kao ***panteizam*** – predstavlja jeres u mnogim religijama. Ironija je da katolička veronauka, zajedno sa savremenom fizikom, može da se koristi kako bi se dokazalo da je panteizam tačan, pošto svaki katolik koji brani panteizam (ili druge jeresi koje slede iz savremene fizike) navlači na sebe automatsko izopštenje (ekskomunikaciju – *latae sententinae*), bez bilo kakve potrebe za formalnom procedurom.

Ako je neko spreman da istraži identičnost svemira i "boga", nalazi rečenice kao što je "bog je stvorio svemir", koja se prevodi kao " svemir podrazumeva svemir". Početna rečenica stoga nije više laž, ali se pretvata u tautologiju. Slične promene se pojavljuju u mnogim drugim iskazima – ali ne i u svim – koji sadrže pojam "bog". (Ipak, ostaje problem sa izrazom " u početku beše…".) U stvari, može da se tvrdi da su iskazi o pojmu "bog" razumni i istiniti samo ako ostanu razumni i istiniti i posle zamene pojma "bog" pojmom "svemir". Uživajte u istraživanju takvih iskaza. (***Izazov 222e***).

Izazov 83r, ***strana 92***: Ako ih nađete, objavite ih i pošaljite mi. Predpostavka je da takvi efekti ne postoje

Izazov 85s, ***strana 92***: Zapravo nijedna dužina ispod Plankove dužine nema nikakvu ulogu u prirodi.

Izazov 87s, ***strana 93***: Vama je potreban kvantni temperament, pošto rezultat očigledno protivreči onom datom predhodno na ***strani 77***, koji uključuje opštu teoriju relativnosti.

Izazov 90s, ***strana 100***: Broj dimenzija prostora mora prvo da bude određen kako bi moglo da se govori o loptama.

Izazov 91d, ***strana 103***: Ovo je izazov za vas da saznate. On je zabavan, i možda daje rezultat u suprotnosti sa dokazima datim do sada (u ovom slučaju i objavljenih), on možda daje nezavisnu proveru rezultata u ovom odeljku.

Izazov 93s, ***strana 106***: Pitanje je otvoreno i još uvek je predmet istraživanja. Predpostavka autora je da je odgovor negativan. Ako pronađete alternativu, objavite to i pošaljite autoru e-poštom.

Izazov 95s, ***strana 110***: Poklopac kutije mora da se pridržava relacije neodređenosti. Ne može da bude u stanju potpunog mirovanja u odnosu na mirovanje kutije.

Izazov 97s, ***strana 110***: Ne, pošto pozadina svemira nije efekt Plankove razmere, već efekt mnogo niže energije.

Izazov 98s, ***strana 110***: Da, u Plankovim razmerama interakcije su izobličenja niti; prema tome, sudari i gravitacija ovde ne mogu da se razlikuju.

Izazov 99d, ***strana 110***: Ne. Vreme je kontinualno samo ako se predpostavljaju ***ili*** kvantna teorija i tačkaste čestice ***ili*** opšta teorija relativnosti i mase tačaka. Dokaz pokazuje da samo kombinacija obe teorije nije moguća sa neprekidnošću.

Izazov 100s, ***strana 110***: Trebalo bi, pošto u Plankovim razmerama prirodno nerazdvojive greške merenja ne mogu jasno da se razlikuju među različitim rezultatima merenja.

Izazov 101s, ***strana 110***: Još uvek imamo priliki da nađemo najbolji moguć približan pojam. To nije razlog za predaju.

Izazov 102d, ***strana 110***: Ovde postoji nekoliko mišljenja. Početak velikog praska ne postoji; nešta slično je dato onim delom kontinualnog subjekta koji smo sreli kada odemo unazad u vreme što je više moguće To ima nekoliko posledica.

- Odlazak u vreme unazad što je dalje moguće – prema "početku vremena" – isto je što i povećavanje do najmanjeg rastojanja: naći ćemo jednu nit amebe.
- Drugim rečima, predpostavljamo da je seo svet jedan jedini komad, koji se koleba i verovatno je vezan ili upleten.
- Odlazak daleko u prostor – do granice svemira – liči na kazivanje o snimanju sa kratkim vremenom okidača: niti su posvuda.
- Uvek kada površno kažemo da su prošireni subjekti "neograničene" veličine, mi samo zamišljamo da dopiru do horizonta svemira.

Sažeto, ne postoji početna tačka velikog praska, pošto tamo ne postoji vreme. Iz istog razloga ne postoje ni početni uslovi za čestice ili za prostor-vreme. Osim toga, to pokazuje da tu nije umešano nikakvo stvaranje, jer ako ne postoji vreme i bez mogučnosti izbora, pojam "stvaranje" nema smisla.

Izazov 103d, ***strana 110***: Ekvivalentnost sledi iz činjenice da svi takvi procesi zahtevaju Plankovu energiju, Plankovu preciznost merenja, Plankovu zakrivljenost i Plankovo vreme okidača.

Izazov 104s, ***strana 110***: Ne, kao što je objašnjeno kasnije u tekstu. (***Strana 274***)

Izazov 106s, ***strana 111***: Ako nije, prisilite sebe. Oluja ideja (breinstorming) je bitna u životu, kao u koraku koji sledi: proveravanje predpostavki.

Izazov 112r, ***strana 120***: Obavestite autora ako uspete. I objavite rezultate

Izazov 113s, ***strana 120***: Energija je rad u vremenu. Dakle, Plankova konstanta je jedinica rada i određena je promenom ukrštanja. Sistem koji neprekidno proizvodi promene ukrštanja u svakom Plankovom vremenu, ima prema tome Plankovu energiju. Primer bi bio zaplet koji se okreće izuzetno brzo, jedan obrt u Plankovom vremenu, stvarajući promenu ukrštanja pri svakom obrtu.

Količina kretanja je rad po dužini. Sistem koji neprekidno proizvodi promene ukrštanja uvek kada napreduje za Plankovu dužinu ima Plankovu količinu kretanja. Primer bi bio konfiguracija zapleta koja omogućava prebacivanje iz jedne niti u drugu pri tesnim pakovanjima niti.

Sila je rad po dužini i u vremenu. Sistem koji neprekidno proizvodi promene ukrštanja u svakom Plankovom vremenu i koji prolazi pored i za svaku Plankovu dužinu kroz koju napreduje, ispoljava Plankovu silu. Primjer bi mogao da bude zaplet sa strukturom zavrtnja koji se obrće i napreduje dovoljnom brzinom.

Izazov 118s, ***strana 126***: Da; pojava ukrštanja ne zavisi od rastojanja ili od broja niti koje se nalaze između.

Izazov 119s, ***strana 126***: Ne; broj veći od tri dimenzije ne dozvojava nam da odredimo promenu ukrštanja.

Izazov 120s, ***strana 126***: Ako je tako, obavestite autora. Ako je uopštavanje izvorno, model niti nije tačan.

Izazov 132s, ***strana 147***: Veličina u tački treba da bude povezana sa vektorskim zbirom svih obrnutih najkraćih rastojanja ukrštanja u toj tački.

Izazov 137s, ***strana 154***: Ova algebarska transformacija prikazana je u svim udžbenicima koji se bave Paulijevom jednakošću. Ona može da se takođe proveri ako se obe jednakosti napišu sastojak po sastojak.

Izazov 140s, ***strana 168***: Da, kao što može lako da se proveri ako se ponovo napiše odrednica imajući na umu spinorski opis zapleta.

Izazov 143s, ***strana 168***: Nije poznata nijedna protivrečnost.

Izazov 144s, ***strana 168***: U relativističkom slučaju, lokalna zakrivljenost prostora uzeta je takođe u obzir.

Izazov 146r, ***strana 168***: Saznajte, objavite rezultat i obavestite autora.

Izazov 147s, ***strana 167***: Ako je dozvoljeno ***uopšteno*** uzajamno prožimanje niti, nemoguće je da se izvede kvantna teorija, jer nebi bilo moguće spinorsko ponašanje. Ako je dozvoljeno uzajamno prožimanje (probojnost) niti samo pod određenim uslovima (kao što je samo za nit sa samom sobom, ali ne i za dve različite niti), kvantna teorija bi još uvek mogla biti moguća.

Izazov 149s, ***strana 169***: Trik sa opasačem podrazumevao bi da točak pređe preko sopstvenog snabdevanja krvlju pri svakom drugom obrtaju.

Izazov 157s, ***strana 184***: Ako možete da nađete, objavite.

Izazov 168s, ***strana 205***: Nije moguće klizanje, tako da se ne javljaju promene ukrštanja; zato situacija nema efekata koji se opažaju. Ako se izobliči jedno klizanje pre klizanja – što je moguće – vraća se u situaciju koja je već razmatrana u predhodnom tekstu.

Izazov 173d, ***strana 206***: Izgleda da je to slučaj za aksiom Vajtmana (Whiteman); međutim, na formalni dokaz se još uvek čeka. Isto se očekuje i od aksioma Hag-Kastler (Haag-Kastler)

Izazov 183s, ***strana 231***: Crna rupa ima najmanje jedno ukrštanje, stoga najmanje Plankovu masu.

Izazov 186s, ***strana 225***: Sadašnja optša saglasnost je: ne.

Izazov 191s, ***strana 244***: Ovi zapleti nisu racionalni. U obnovljenom modelu niti iz 2015. godine ne mogu da se oblikuju; oni nisu dopušteni i ne predstavljaju nijednu česticu.

Izazov 194s, ***strana 260***: Uplitanje repova dovodi do uvezivanja zapetljanosti, što se pokazalo da je osnova obrtanja jezgra.

Izazov 196r, ***strana 260***: Pitanje je tema za istraživanje; iz razloga simetrije izgleda da ne postoji stanje u kojem svaki od šest kvarkova ima istu granicu u odnosu na ostalih pet kvarkova.

Izazov 202r, ***strana 275***: Ako nađete takvu predpostavku, objavite je i pošaljite je autoru. Pitanje na koje svaka procena mase čestica mora da odgovori je sledeće: zašto masa čestica raste sa složenošću jezgra? Zaplet sa složenim jezgrom, to jest sa jezgrom velike dužine užeta, ima veliku vrednost mase. Svaka tačna predpostavka mase mora da daje ovu osobinu.

Izazov 204s, ***strana 276***: Uopšteno govoreći, postoji približno linearan onos između dužine užeta i broja ukrštanja; pa se stoga očekuje približno linearan odnos između dužine užeta i stepena promena ukrštanja.

Izazov 205s, ***strana 276***: Verovatno ne.

Izazov 206s, ***strana 276***: Verovatno ne.

Izazov 207d, ***strana 276***: Verovatno ne.

Izazov 208d, ***strana 276***: Saznajte i obavestite autora.

Izazov 210r, ***strana 279***: To bi bio zanimljiv rezultat vredan da se objavi.

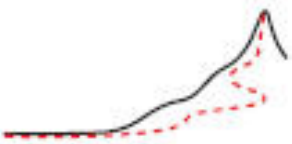
Izazov 212r, ***strana 283***: Ako planirate takvo izračunavanje, autor bi pomogao sa oduševljenjem.

Izazov 215r, ***strana 289***: Preuzmite izazov!

Izazov 217r, ***strana 300***: To je dobra prilika, ali takve alternative mogu da se odbace veoma brzo. Ako to ne možete da učinite, objavite dokaz i obavestite autora.

Izazov 219s, ***strana 306***: U snovima takođe mogu da se uporede brzine i isto tako u snovima važi uzročnost (mada ne trivijalna). Stoga postoji invarijanta, pa prema tome maksimalna brzina.

Izazov 220s, ***strana 307***: Verovatno nijedno. Odgovor zavisi od toga da li postojanje niti može da se izvede iz snova. Ako bi niti mogle da se izvedu iz snova, sledi celokupna fizika. Predpostavka je da je takvo izvođenje moguće. Ukoliko nađete dokaz protiv ili u korist ove predpostavke, obavestite autora.



BIBLIOGRAFIJA

Jedini završetak pisanja je omogućiti čitateljima da više uživaju u životu, ili da ga bolje podnesu.

Samjuel Džonson[1] (Samuel Johnson)

1. Videti Volumen I serije knjiga Planina Kretanja, *Pad, protok* i *toplota*, dostupan za slobodno učitavanje u formatu .pdf na veb strani www.motionmountain.net/. Citirano na ***stranama*** ***21*** i ***295***.

2. Videti Volumen II knjiga Planina Kretanja, *Relativnost*, dostupan za slobodno učitavanje u formatu .pdf na veb strani www.motionmountain.net. Citirano na ***stranama 21***, ***21***, ***296*** i ***320***.

3. Videti Volumen III serije knjiga Planina Kretanja, *Svetlost, naboji i mozak*, dostupan za slobodno učitavanje u formatu .pdf na veb strani www.motionmountain.net kao i pomenute četvrti i peti deo. Citirano na ***stranama 21*** i ***295***.

4. Videti Volumen IV, *Kvant promene i zadovoljstvo* i Volumen V *Tehnologija* i *Zvezde* serije knjiga Planina Kretanja dostupne za slobodno učitavanje u formatu .pdf na veb strani www.motionmountain.net/ Citirano na ***stranama 21***, ***296*** i ***320***.

5. Najpreciznija vrednost konstante fine strukture određena je ponderisanim svetskim prosekom merenja velike preciznosti od strane specijalnog međunarodnog komiteta zvanog CODATA. Njegova (ružna) veb strana je www.codata.org/, međutim, stvarna vrednost konstante fine strukture, zvana 2010 CODATA, je ona kojoja je objavljena rano 2012. godine na veb strani physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?alph. Skorašnje objavljivanje je P. J. Mohr, B. N. Taylor & D. B. Newell, CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2010, preprint na arxiv.org/abs/1203.5425. Videti takođe veb stranu physics.nist.gov/cuu/Constants/papers.html. Citirano na ***stranama 22***, ***281***, ***283*** i ***317***.

6. Videti na primer, knjigu od Robert Laughlin, *A Different Universe: Reinventing Physics from the Botton Down* Basic Books, 2005. Od brojnih knjiga koje razmatraju ideju o konačnoj teoriji, ovo je jedna koju vredi čitati, i jedina je koja je citirana u ovoj biblografiji. O mišljenje Laughlin-a vredi ramišljati. Citirano na ***strani 24***.

7. Mnogi fizičari, uključujući i Steven Weinberg-a, redovno su – i netačno – tvrdili u intervjuima da problem merenja još uvek nije rešen. Citirano na ***strani 24***.

8. Nedokumentovane rečenice o ovom efektu redovno su pripisivane Albert Einstein-u. Pošto je Einstein bio panteista, kao što je često objašnjavao, njegove izjave o "umu boga" nisu stvarno uzimane ozbiljno. One su sve načinjene – ako su uopšte izrećene – u duhovitom tonu. Citirano na ***strani 24***.

9. Kao primer za neopravdan strah od objedinjavanja, videti pozorišni komad *Die Physiker* od švajcarskog autora Friedrich Dürenmat-a. Nekoliko druih komada i romana bavi se oviom vrstom dezinformacije. Citirano na ***strani 24***.

10. Istraživanje duha igre predmet je proučavanja poznatog National Institute for Play, koji je osnovao Stuart Brown, a može se naći na veb strani www.nifplay.org/. Citirano na ***strani 24***.

11. Videti na primer, 1922 predavanja od Lorentz at Caltech, objavljeno kao H. A. Lorentz, *Problems of Modern Physics*, editovao H. Bateman, Ginn and Company, 1927, strana 99. Citirano na ***strani 27***.

12. Nils Bohr je objasnio nedeljivost kvanta rada u svom poznatom delu Como lecture, odšampano u N. Bohr, *Atomtheorie und Naturbeschreibung*, Springer, 1931. Ono je prevedeno na engleski jezik kao N. Bohr, *Atomic Theory and the Description of Nature*, Cambridge University Press, 1934. Vise iskaza o nedeljivosti kvanta rada može da se nađe u N. Bohr, *Atomic Physics and Human Knowledge*, Science Editions, New York, 1961. Za sažete ideje Bohr-a kod drugih videti Max Jammer, *The*

[1] Ovo je rečenica iz brilijantnog eseja uticajnog pisca Samjuela Džonsona (Samuel Johnson) *recenzija Soame Jenyns "A Free Enquiry Into the Nature and Origin of Evil"*, 1757. Videti na www.samueljohnson.com/.

Philosophy of Quantum Mechanics, Wiley, prvo izdanje, 1974, strane 90–91, i kod John Honner, *The Description of Nature – Niels Bohr and the Philosophy of Quantum Physics*, Clarendon Press, 1987, strana 104. Citirano na ***strani 28***.

13. Za pregled o kvantu rada kao osnove za kvantnu teoriju, videti Poglavlje 1, Volumen IV Planine Kretanja (***Vol. IV, strana 17***). (***Ref. 4***). Citirano na ***strani 29***.

14. Pregled EBK (Einstein, Brillouin, Keller), kvantizacije može da se nađe u delu o kvantnoj teoriji (***Vol. IV, strana 140***). Citirano na ***strani 29***.

15. Minimalna entropija je razmatrana kod by L. Szilard, *Über die Entropieverminderung in einem thermodynamischen System bei Eingriffen intelligenter Wesen*, Zeitschrift fur Physik **53**, strane 840–856, 1929. Ovo klasično delo može da se nađe i kao prevod na engleski jezik u njegovim sabranim selima. Citirano na ***strani 30***.

16. Videti na primer kod A. E. Shalyt-Margolin & A. Ya. Tregubovich, *Generalized uncertainty relation in thermodynamics*, preprint na veb strani arxiv.org/abs/gr-qc/0307018, ili kod J. Uffink & J. van Lith-van Dis, *Thermodynamic uncertainty relations*, Foundations of Physics **29**, strane 655–692, 1999. Citirano na ***strani 30***.

17. Videti takođe osnovni dokument od A. DiSessa, *Momentum flow as an alternative perspective in elementary mechanics*, **48**, strana 365, 1980, i kod A. DiSessa, *Erratum: "Momentum flow as an alternative perspective in elementarymechanics" [Am. J. Phys. 48, 365 (1980)]*, **48**, strana 784, 1980. Citirano na ***strani 30***.

18. Opažanja crnih rupa u centru galaksije i drugde, sažeo je R. Blandford & N. Gehrels, *Revisiting the black hole*, Physics Today **52**, June 1999. Njihovo postojanje je sada pouzdano utvrđeno. Citirano na ***strani 30***.

19. Izgleda da je prvi objavljen iskaz o maksimalnoj sili kao *osnovnom načelu* bio oko 2000. godine, u tom tekstu, u poglavlju o gravitaciji i relativnosti. Autor je otkrio načelo maksimalne sile, ne znajući za rad drugih, kada je tražio način da izvede rezultate poslednjeg dela ove pustolovine (***Strana 49***) koji bi bili toliko jednostavni da bi ubedili u učenike srednjih škola. Godine 2000. autor je ispričao svojim prijateljima u Berlinu o ovom didaktičkom pristupu.

Pojam maksimalne sile najverovatnije su prvi predložili, Venzo de Sabbata i C. Sivaram 1993. godine. Ovo otkriće u fizici načinjeno je takođe isuviše kasno. Godine 1995. Corrado Massa došao je do te ideje. Nezvisno su Ludwik Kostro 1999. godine, Christoph Schiller već pre 2000. godine i Gary Gibbons u godinama pre 2002. došli do istog pojma. Gary Gibbons je bio inspirisan knjigom Oliver Lodge; on je objasnio da vrednost maksimalne sile sledi iz opšte teorije relativnosti; on nije načinio iskaz o suprotnosti, a nisu ni ostali autori. Iskaz o maksimalnoj sili kao osnovnom načelu izgleda da potiće od Christoph Schiller-a.

Vremenski poredak prvih dokumenata o maksimalnoj sili izgleda da je V. de Sabbata & C. Sivaram, *On limiting field strengths in gravitation*, Foundations of Physics Letters **6**, strane 561–570, 1993, sledi mu C. Massa, *Does the gravitational constant increase?*, Astrophysics and Space Science **232**, strane 143–148, 1995, i L. Kostro & B. Lange, *Is c4/G the greatestpossible force in nature?*, Physics Essays **12**, strane 182–189, 1999. Sledeće reference su dokument od G.W. Gibbons, *The maximum tension principle in general relativity*, Foundations of Physics **32**, strane 1891–1901, 2002, preprint na veb strani arxiv.org/abs/hep-th/0210109 – premda je on razvio idelu pre tog datuma – i stara verzija ovog teksta od Christoph Schiller, *Motion Mountain – The Adventure of Physics*, besplatno dostupno u formatu .pdf na veb strani www.motionmountain.net/. Zatim dolazi C. Schiller, *Maximum force and minimum distance: physics in limit statements*, preprint na veb strani arxiv.org/abs/physics/0309118 i C. Schiller, *General relativity and cosmology derived from principle of maximum power or force*, International Journal of Theoretical Physics **44**, strane 1629–1647, 2005, preprint na veb strani arxiv.org/abs/physics/0607090. Videti takođe R. Beig, G. W. Gibbons & R. M. Schoen, *Gravitating opposites attract*, Classical and Quantum Gravity **26**, strana 225013, 2009. preprint na veb strani arxiv.org/abs/09071103.

Detaljno razmatranje o maksimalnoj sili i snazi dato je u poglavlju o opštoj teoriji relativnosti (***Vol. II, strana 87***). (***Ref. 2***). Citirano na ***stranama 31***, ***39***, i ***221***.

20. Maksimalna sjajnost često se pominje u vezi sa otkrivanjem gravitacijskih talasa; ipak, opšti maksimum snage nije pominjan ranije. Videti na primer L. Ju, D. G. Blair & C. Zhao, *Detection of*

gravitational waves, Reports on Progress in Physics **63**, strane 1317–1427, 2000. Videti takođe C.W. Misner, K. S. Thorne & J. A. Wheeler, *Gravitation*, Freeman, 1973, strana 980. Citirano na ***strani 31***.

21. Videti na primer Wolfgang Rindler, *Relativity – Special, General and Cosmological*, Oxford University Press, 2001, strana 70 ss, ili Ray d ' Inverno, *Introducing Einstein's Relativity*, Clarendon Press, 1992, strana 36 ss. Citirano na ***strani 32***.

22. T. Jacobson,*Thermodynamics of spacetime: the Einstein equation of state*, Physical Review Letters **75**, strane 1260–1263, 1995, preprint na veb strani arxiv.org/abs/gr-qc/9504004, ovaj dubokouman članak ostao je zadivljujući do danas. Čak se i autor uplašio da iznese sve moguće zaključke. Objašnjeni su opšti pojmovi, uglavnom bez obrazaca kod L. Smolin, *On the nature of quantum fluctuations and their relation to gravitation and the principle of inertia*, Classical and Quantum Gravity **3**, strane 347–359, 1986. Citirano na ***stranama 32*** i ***221***.

23. Relacija neraspoznavanja u opštoj teoriji relativnosti razmatrana je kod C. A. Mead, *Possible connection between gravitation and fundamental length*, Physical ReviewB **135**, strane 849–862, 1964. Uopštena relacija neraspoznavanja je obuhvaćena na strani 825, ali je pitanje objašnjeno prilično nejasno. Verovatno je autor smatrao da su rezultati toliko jasni da bi se izričito pomenuli. (Tom dokumentu je bilo potrebno 5 godina da bi bio objavljen; komentari na sadržaj, napisani 37 godina kasnije, nalaze se kod C. A. Mead, *Walking the Planck length through history*, Physics Today **54**, strana 15 i strana 81, 2001, sa odgovorom od FrankWilczek.) Videti takođe P. K. Townsend, *Smallscale structure of space-time as the origin of the gravitational constant*, Physical Review D**15**, strane 2795–2801, 1977, ili dokument od M. -T. Jaekel & S. Renaud, *Gravitational quantum limit for length measurement*, Physics Letters A **185**, strane 143–148, 1994. Citirano na ***stranama 33***, ***57***, ***58***, ***60*** i ***97***.

24. M. Kramer & al., *Tests of general relativity from timing the double pulsar*, preprint semože naći na veb strani arxiv.org/abs/astro-ph/060941. Citirano na ***strani 34***.

25. Intervali minimalne dužine i minimalnog vremena razmatrali su, na primer G. Amelino - Camelia, *Limits on the measurability of space-time distances in (the semiclassical approximation of) quantum gravity*, Modern Physics Letters A **9**, strane 3415–3422, 1994, preprint na arxiv.org/abs/gr-qc/9603014, i Y. J. Ng & H. van Dam, *Limit to space-time measurement*, Modern Physics Letters A**9**, strane 335–340, 1994. Više drugih autora istraživalo je ovu temu. Citirano na ***stranama 35*** i ***57***.

26. Maksimalna zakrivljenost kao i kvatifikovanje površine i zapremine razmatrano je kod A. Ashtekar, *Quantum geometry and gravity: recent advances*, preprint na arxiv.org/abs/gr-qc/0112038 i kod in A. Ashtekar, *Quantum geometry in action: big bang and black holes*, preprint na arxiv.org/abs/math-ph/0202008. Citirano na ***stranama 35*** i ***63***.

27. Maksimoni, elementarne čestice sa Plankovom masom, razmatrani su kod A. D. Sakharov, *Vacuum quantum fluctuations in curved space and the theory of gravitation*, Soviet Physics – Doklady **12**, strane 1040–1041, 1968. Citirano na ***stranama 37***, ***65***, i ***99***.

28. Wolfgang Rindler, *Relativity – Special, General and Cosmological*, Oxford University Press, 2001, strana 230. Citirano na ***strani 38***.

29. Ovaj odnos je naglasio Achim Kempf. Priča je ispričana kod A. D. Sakharov, *General Relativity and Gravitation* **32**, strane 365–367, 2000, reprint ovog dokumenta Doklady Akademii Nauk SSSR **177**, strane 70–71, 1967. Citirano na stranama ***33*** i ***39***.

30. Nekoliko pogrešnih protivzahteva za granicu entropije načinio je u dokumentu R. Bousso, *The holographic principle*, Review of Modern Physics **74**, strane 825–874, 2002, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/hep-th/0203101. Međutim, ovaj inače dobar časopis, ima neke greške u dokazima, kao što je objašnjeno u delu V, strana strana 144. Bousso je u međuvremenu promenio svoj stav; sada prihvata granicu entropije. Citirano na ***stranama 39***, ***42***, ***326***, i ***328***.

31. Eksplozije gama zraka razmatrali su G. Preparata, R. Ruffini & S. -S. Xue, *The dyadosphere of black holes and gamma-ray bursts*, Astronomy and Astrophysics **338**, strane L87– L90, 1998, kao i C. L. Bianco, R. Ruffini & S. -S. Xue, *The elementary spike produced by a pure e^+e^- pair-electromagnetic pulse from a black hole: the PEM pulse*, Astronomy and Astrophysics **368**, strane 377–390, 2001. Citirano na ***strani 40***.

32. Videti na primer pregled C.W.J. Beenakker & al., *Quantum transport in semiconductor nanostructures*, strane 1–228, kod H. Ehrenreich& D. Turnbull editors, *Solid State Physics*, volume 44, Academic Press, 1991. Citirano na ***strani 40***.

33. Razmatranja o relacijama različitih električnih neraspoznatljivosti, između struje i naboja, mogu da se nađu kod Y-Q. Li & B. Chen, *Quantumtheory for mesoscopic electronic circuits and its applications*, preprint na arxiv.org/abs/cond-mat/9907171. Citirano na ***strani 40***.

34. Hans C. Ohanian & Remo Ruffini, *Gravitation and Spacetime*, W.W. Norton & Co., 1994. Citirano na ***stranama 41*** i ***333***.

35. Granicu entropije za crne rupe razmatrao je J. D. Bekenstein, *Entropy bounds and black hole remnants*, Physical Review D **49**, strane 1912–1921, 1994. Videti akođe J. D. Bekenstein, *Universal upper bound on the entropy-to-energy ratio for bounded systems*, Physical Review D**23**, strane 287–298, 1981. Citirano na ***stranama 42*** i ***107***.

36. Iskaz je poznat takođe pod imenom *Kovtun-Son-Starinets conjecture*. It was published as P. Kovtun, D. T. Son & A. O. Starinets, *A viscosity bound conjecture*, preprint at arxiv.org/abs/hep-th/0405231. Videti takođe P. Kovtun, D. T. Son & A. O. Starinets, *Viscosity in strongly interacting quantum field theories from black hole physics*, Physical Review Letters **44**, strana 111601, 2005. Za eksperimentalnu potvrdu videti U. Hohm, *On the ratio of the shear viscosity to the density of entropy of the rare gases and H2, N2, CH4, and CF4*, Chemical Physics **444**, strane 39–42, 2014. Citirano na ***strani 43***.

37. Brian Greene, *The Elegant Universe – Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the UltimateTheory*, Jonathan Cape 1999. Citirano na ***strani 46***.

38. S. Weinberg, *The cosmological constant problem*, Reviews of Modern Physics **61**, strane 1– 23, 1989. Citirano na ***strani 49***.

39. Steven Weinberg, *The Quantum Theory of Fields*, Cambridge University Press, volumes I, 1995, i II, 1996. Citirano na ***strani 50***.

40. Videti izvanredno predstavljanje o kosmološkoj konstanti i opštoj teoriji relativnosti kod E. Bianchi & C. Rovelli, *Why all these prejudices against a constant?*, preprint na arxiv.org/abs/1002.3966. Citirano na ***strani 50***.

41. Teškoće su sažete kod B. S. DeWitt, *Quantum field theory in curved spacetime*, Physics Reports **19**, strane 295–357, 1975. Citirano na ***strani 50***.

42. C.W. Misner, K. S. Thorne & J. A. Wheeler, *Gravitation*, Freeman, 1973. Citirano na ***stranama 50***, ***51***, i ***57***.

43. J. A. Wheeler, u *Relativity, Groups and Topology*, editovao C. DeWitt & B. S. DeWitt, Gordon and Breach, 1994. Videti takođe J. A. Wheeler, *Physics at the Planck length*, International Journal of Modern Physics A **8**, strane 4013–4018, 1993. Međutim, njegova tvrdnja da spin 1/2 zahteva promenu topologije odbačena je modelom niti vakuuma. Citirano na ***strani 44***.

44. J. L. Friedman & R. D. Sorkin, *Spin 1/2 from gravity*, Physical Review Letters **44**, strane 1100–1103, 1980. Citirano na ***strani 51***.

45. A. P. Balachandran, G. Bimonte, G. Marmo & A. Simoni, *Topology change and quantum physics*, Nuclear Physics B **446**, strane 299–314, 1995, preprint na arxiv.org/abs/hep-th/9503046. Citirano na ***strani 51***.

46. J. Ehlers, *Introduction – Survey of Problems*, strane 1–10, u J. Ehlers, editor, *Sistemi gravitazionali isolati in relativitŕ generale*, Rendiconti della scuola internazionale di fisica "Enrico Fermi", LXVIIo corso, Societa Italiana di Fisica/North Holland, 1979. Citirano na ***strani 51***.

47. Videti C. Schiller, *Le vide différe-t-il de la matiére?* u E. Gunzig & S. Diner editors, *Le Vide – Univers du tout et du rien – Des physiciens et des philosophes s'interrogent*, Les Editions de l'Universite de Bruxelles, 1998. Starija verzija na engleskom jeziku je dostupna kao C. Schiller, *Does matter differ from vacuum?* preprint na arxiv.org/abs/gr-qc/9610066. Citirano na ***stranama 51***, ***97***, ***98***, ***99***, ***100***, i ***108***.

48. Videti na primer Richard P. Feynman, Robert B. Leighton & Matthew Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, Addison Wesley, 1977. Citirano na ***strani 51***.

49. Steven Weinberg, *Gravitation and Cosmology*, Wiley, 1972. Citirano na ***stranama 51***, ***56***, i ***57***.

50. Dokaz je dat, na primer, kod E.P. Wigner, *Relativistic invariance and quantum phenomena*, Reviews of Modern Physics **29**, strane 255–258, 1957. Citirano na ***strani 55***.

51. Polaznu tačku za dokaze koji slede uzeta je od M. Schon, *Operative time definition and principal indeterminacy*, preprint na veb strani arxiv.org/abs/gr-qc/9304024, i od T. Padmanabhan, *Limitations on the operational definition of space-time events and quantum gravity*, Classical and Quantum Gravity **4**, strane L107–L113, 1987; Videti takođe ranije dokumente Padmanabhan navedene ovde. Citirano na ***strani 55***.

52. W. Heisenberg, *Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik*, Zeitschrift fur Physik **43**, strane 172–198, 1927. Citirano na ***strani 55***.

53. E.H. Kennard, *Zur Quantenmechanik einfacher Bewegungstypen*, Zeitschrift fur Physik **44**, strane 326–352, 1927. Citirano na ***strani 55***.

54. M.G. Raymer, *Uncertainty principle for joint measurement of noncommuting variables*, American Journal of Physics **62**, strane 986–993, 1994. Citirano na ***strani 55***.

55. H. Salecker, & E. P. Wigner, *Quantum limitations of the measurement of space-time distances*, Physical Review **109**, strane 571–577, 1958. Citirano na ***stranama 56***, ***77***, i ***93***.

56. E.J. Zimmerman, *The macroscopic nature of space-time*, American Journal of Physics **30**, strane 97–105, 1962. Citirano na ***stranama 56***, ***77***, i ***93***.

57. J.D. Bekenstein, *Black holes and entropy*, Physical Review D **7**, strane 2333–2346, 1973. Citirano na ***stranama 56***, ***106*** i ***219***.

58. S.W. Hawking, *Particle creation by black holes*, Communications in Mathematical Physics **43**, strane 199–220, 1975; Videti takođe S.W. Hawking, *Black hole thermodynamics*, Physical Review D **13**, strane 191–197, 1976. Citirano na ***stranama 56***, ***106***, i ***219***.

59. P. Gibbs, *The small scale structure of space-time: a bibliographical review*, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/hep-th/9506171. Citirano na ***stranama 56*** i ***69***.

60. Nemogućnost određivanja vremenskog redosleda u kvantnoj teoriji razmatrali su J. Oppenheimer, B. Reznik & W. G. Unruh, *Temporal ordering in quantum mechanics*, Journal of Physics A **35**, strane 7641–7652, 2001, preprint na veb strani arxiv.org/abs/quant-ph/0003130. Citirano na ***strani 56***.

61. M. -T. Jaekel & S. Renaud, *Gravitational quantum limit for length measurement*, Physics Letters A **185**, strane 143–148, 1994. Citirano na ***strani 57***.

62. D.V. Ahluwalia, *Quantum measurement, gravitation and locality*, Physics Letters B **339**, strane 301–303, 1994, preprint na veb strani arxiv.org/abs/gr-qc/9308007. Citirano na ***strani 57***.

63. L. Garay, *Quantum gravity and minimum length*, International Journal of Modern Physics A **10**, strane 145–165, 1995, preprint at veb strani arxiv.org/abs/gr-qc/9403008. Ovaj dokument sadrži takođe i opširnu bibliografiju. Videti takođe kod R.J. Adler & D. I. Santiago, *On gravity and the uncertainty principle*, Modern Physics Letters A**14**, strane 1371–1381, 1999, preprint se nalazi na veb strani arxiv.org/abs/gr-qc/9904026. Citirano na ***strani 57***.

64. C. Rovelli & L. Smolin, *Discreteness of area and volume in quantum gravity*, Nuclear Physics B **442**, strane 593–619, 1995. R. Loll, *The volume operator in discretized quantum gravity*, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/gr-qc/9506014. Videti takođe C. Rovelli, *Notes for a brief history of quantum gravity*, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/gr-qc/0006061. Citirano na ***strani 58***.

65. D. Amati, M. Ciafaloni & G. Veneziano, *Superstring collisions at Planckian energies*, Physics Letters B **197**, strane 81–88, 1987. D.J. Gross & P.F. Mende, *The high energy behavior of string scattering amplitudes*, Physics Letters B **197**, strane 129–134, 1987. K. Konishi, G. Paffuti & P. Provero, *Minimum physical length and the generalized uncertainty principle*, Physics Letters B **234**, strane 276–284, 1990. P. Aspinwall, *Minimum distances in non-trivial string target spaces*, Nuclear Physics B **431**, strane 78–96, 1994, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/hep-th/9404060. Citirano na ***strani 58***.

66. M. Maggiore, *A generalised uncertainty principle in quantum mechanics*, Physics Letters B **304**, strane 65–69, 1993. Citirano na ***strani 58***.

67. Jednostavan pristup je kod S. Doplicher, K. Fredenhagen & J.E. Roberts, *Space-time quantization induced by classical gravity*, Physics Letters B **331**, strane 39–44, 1994. Citirano na ***stranama 58*** i ***69***.

68. A. Kempf, *Uncertainty relation in quantum mechanics with quantum group symmetry*, Journal of Mathematical Physics **35**, strane 4483–4496, 1994. A. Kempf, *Quantum groups and quantum field theory with nonzero minimal uncertainties in positions and momenta*, Czechoslovak Journal of Physics **44**, strane 1041–1048, 1994. Citirano na ***strani 58***.

69. E.J. Hellund & K. Tanaka, *Quantized space-time*, Physical Review **94**, strane 192–195, 1954. Citirano na ***strani 58***.

70. Ovaj zanimljiv izvod iz Ajnštajnovog pisma postao je veoma poznat kod John J. Stachel, u njegovom dokumentu *The other Einstein: Einstein contra field theory*, što je najbolje naći u njegovoj knizi *Einstein from 'B' to 'Z'*, Birkhauser, 2002. Nemački orginal pisma se nalazi kod Robert Schulmann, A.J. Knox, Michel Janssen & Jozsef Illy, *The Collected Papers of Albert Einstein, Volume 8A – The Berlin Years: Correspondence, 1914–1917*, pismo 299, Princeton University Press, 1998. Barbara Wolff je pomogla u razjašnjavanju nekoliko detalja u nemačkom orginalu. Pismo je sada dostupno na veb strani einsteinpapers.press.princeton.edu/vol8a-doc/463. Citirano na ***strani 59***.

71. A. Peres & N. Rosen, *Quantum limitations on the measurement of gravitational fields*, Physical Review **118**, strane 335–336, 1960. Citirano na ***strani 60***.

72. To je prva odrednica u Euklidovim *Elements*, *c.* 300 bce. Za prevod na engleski jezik videti kod T. Heath, *The Thirteen Books of the Elements*, Dover, 1969. Citirano na ***strani 61***.

73. Divan opis paradoksa Banach –Tarski je onaj kod Ian Stewart, *Paradox of the spheres*, New Scientist, 14 January 1995, strane 28–31. Citirano na ***strani 61***.

74. H.S. Snyder, *Quantized space-time*, Physical Review **71**, strane 38–41, 1947. H.S. Snyder, *The electromagnetic field in quantized space-time*, Physical Review **72**, strane 68–74, 1947. A. Schild, *Discrete space-time and integral Lorentz transformations*, Physical Review **73**, strane 414–415, 1948. E.L. Hill, *Relativistic theory of discrete momentum space and discrete space-time*, Physical Review **100**, strane 1780–1783, 1950. H.T. Flint, *The quantization of space-time*, Physical Review **74**, strane 209–210, 1948. A. Das, *Cellular space-time and quantum field theory*, Il Nuovo Cimento **18**, strane 482–504, 1960. Citirano na ***strani 62***.

75. D. Finkelstein, *'Superconducting' causal nets*, International Journal of Theoretical Physics **27**, strane 473–519, 1985. Citirano na ***strani 62***.

76. N.H. Christ, R. Friedberg & T.D. Lee, *Random lattice field theory: general formulation*, Nuclear Physics B **202**, strane 89–125, 1982. G. 't Hooft, *Quantum field theory for elementary particles – is quantum field theory a theory?*, Physics Reports **104**, strane 129–142, 1984. Citirano na ***strani 62***.

77. Radi razmatranja, videti R. Sorabji, *Time, Creation and the Continuum: Theories in Antiquity and the Early Middle Ages*, Duckworth, 1983. Citirano na ***strani 62***.

78. Vidti, na primer, L. Bombelli, J. Lee, D. Meyer & R.D. Sorkin, *Space-time as a causal set*, Physical Review Letters **59**, strane 521–524, 1987. G. Brightwell & R. Gregory, *Structure of random space-time*, Physical Review Letters **66**, strane 260– 263, 1991. Citirano na ***strani 62***.

79. Odumrlo je pogrešno verovanje da su čestice, kao što su kvarkovi i elektroni, složene čestice spore. Videti na primer: S. Fredriksson, *Preon prophecies by the standard model*, preprint na veb strani arxiv.org/abs/hep-ph/0309213. Modeli preona stekli su popularnost 1970-ih 1 1980- ih godina, posebno zbog dokumenta od J.C. Pati & A. Salam, *Lepton number as the fourth "color"*, Physical Review D **10**, strane 275–289, 1974, H. Harari, *A schematic model of quarks and leptons*, Physics Letters B **86**, strane 83–86, 1979, M.A. Shupe, *A composite model of leptons and quarks*, Physics Letters B **86**, strane 87–92, 1979, i H. Fritzsch & G. Mandelbaum, *Weak interactions as manifestations of the substructure of leptons and quarks*, Physics Letters B **102**, strane 319–322, 1981. Citirano na ***strani 63***.

80. N.F. Ramsey & A. Weis, *Suche nach permanenten elektrischen Dipolmomenten: ein Test der Zeitumkehrinvarianz*, Physikalische Blatter **52**, strane 859–863, 1996. Videti takođe W. Bernreuther

& M. Suzuki, *The electric dipole moment of the electron*, Reviews of Modern Physics **63**, strane 313–340, 1991, i razmišljanja Hans Dehmelt, *Is the electron a composite particle?*, Hyperfine Interactions **81**, strane 1–3, 1993. Citirano na ***strani 64***.

81. K. Akama, T. Hattori& K. Katsuura, *Naturalness bounds on dipole moments from new physics*, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/hep-ph/0111238. Citirano na ***strani 64***.

82. Dokument od J. Baron & al., *Order of magnitude smaller limit on the electric dipole moment of the electron*, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/1310.7534 i daje gornju eksperimentalnu granicu za moment dipola elektrona od $8.7\cdot10^{-31}$ *e* m. Citirano na ***strani 64***.

83. C. Wolf, *Upper limit for the mass of an elementary particle due to discrete time quantum mechanics*, Il Nuovo Cimento B **109**, strane 213–218, 1994. Citirano na ***strani 65***.

84. W.G. Unruh, *Notes on black hole evaporation*, Physical Review D **14**, strane 870–875, 1976. W.G. Unruh & R.M. Wald, *What happens when an accelerating observer detects a Rindler particle*, Physical Review D**29**, strane 1047–1056, 1984. Citirano na ***strani 67***.

85. Prvi primer je bio J. Magueijo & L. Smolin, *Lorentz invariance with an invariant energy scale*, Physical Review Letters **88**, strana 190403, 2002, preprint na arxiv.org/abs/hep-th/0112090. Oni predlažu izmenu odnosa masa energija ove vrste

$$E = \frac{c^2\gamma m}{1+\frac{c^2\gamma m}{E_{\mathrm{Pl}}}} \quad \text{i} \quad p = \frac{\gamma m \upsilon}{1+\frac{c^2\gamma m}{E_{\mathrm{Pl}}}} \tag{213}$$

Drugi, sličan pristup poslednjih godina, sa drugačijim predlogom, naziva se "dvostruka posebna teorija relativnosti". Nedavni sažetak je kod G. Amelino-Camelia, *Doubly-special relativity: first results and key open problems*, International Journal of Modern Physics **11**, strane 1643–1669, 2002, preprint na veb strani arxiv.org/abs/gr-qc/0210063. Dokument pokazuje kako pojmovni problemi otežavaju napredak na tom polju. Drugo takvo razmatranje je kod R. Aloisio, A. Galante, A.F. Grillo, E. Luzio & F. Mendez, *Approaching space-time through velocity in doubly special relativity*, preprint na veb stran arxiv.org/abs/gr-qc/0410020. Pouka iz ovih pokušaja je jednostavna: specijalna teorija relativnosti ne može da se menja tako da uključi graničnu energiju bez uključivanja opšte teorije relativnosti i kvantne teorije. Citirano na ***stranama 68*** i ***211***.

86. W. Jauch, *Heisenberg's uncertainty relation and thermal vibrations in crystals*, American Journal of Physics **61**, strane 929–932, 1993. Citirano na ***strani 69***.

87. H.D. Zeh, *On the interpretation of measurement in quantum theory*, Foundations of Physics 1, strane 69–76, 1970. Citirano na ***strani 69***.

88. Videti Y. J. Ng, W. A. Christiansen & H. van Dam, *Probing Planck-scale physics with extragalactic sources?*, Astrophysical Journal **591**, strane L87–L90, 2003, preprint na veb strani arxiv.org/abs/astro-ph/0302372; D.H. Coule, *Planck scale still safe from stellar images*, Classical and Quantum Gravity **20**, strane 3107–3112, 2003, preprint je na arxiv.org/abs/astro-ph/0302333. Negativni rezultati eksperimenta (i ne uvek tačna izračunavanja) nalaze se kod R. Lieu & L. Hillman, *The phase coherence of light from extragalactic sources – direct evidence against first order Planck scale fluctuations in time and space*, Astrophysical Journal **585**, strane L77–L80, 2003, i kod R. Ragazzoni, M. Turatto & W. Gaessler, *The lack of observational evidence for the quantum structure of spacetime at Planck scales*, Astrophysical Journal **587**, strane L1–L4, 2003. Citirano na ***strani 71***.

89. B.E. Schaefer, *Severe limits on variations of the speed of light with frequency*, Physical Review Letters **82**, strane 4964–4966, 21 June 1999. Citirano na ***strani 72***.

90. A.A. Abdo & al., (Fermi GBM/LAT collaborations) *Testing Einstein's special relativity with Fermi's short hard gamma-ray burst GRB090510*, preprint na veb strani at arxiv.org/abs/0908.1832. Citirano na ***strani 72***.

91. G. Amelino-Camelia, J. Ellis, N.E. Mavromatos, D.V. Nanopoulos & S. Sakar, *Potential sensitivity of gamma-ray-burster observations to wave dispersion in vacuo*, Nature **393**, strane 763–765, 1998, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/astro-ph/9712103. Citirano na ***strani 72***.

92. G. Amelino-Camelia, *Phenomenological description of space-time foam*, preprint na veb strani arxiv.org/abs/gr-qc/0104005. Dokument sadrži jasno napisan pregled trenutnih eksperimentalnih pristupa otkrivanju efekata kvantne gravitacije. Videti takođe njegovu aktuelizaciju G. Amelino-Camelia, *Quantum-gravity phenomenology: status and prospects*, preprint na veb strani arxiv.org/abs/gr-qc/0204051. Citirano na ***strani 72***.

93. G. Amelino-Camelia, *An interferometric gravitational wave detector as a quantum gravity apparatus*, Nature **398**, strane 216–218, 1999, preprint na veb strani arxiv.org/abs/gr-qc/9808029. Citirano na ***strani 72***.

94. F. Karolyhazy, *Gravitation and quantum mechanics ofmacroscopic objects*, Il Nuovo Cimento **A42**, strane 390–402, 1966. Y.J. Ng & H. van Dam, *Limit to space-timemeasurement*, Modern Physics Letters A **9**, strane 335–340, 1994. Y.J. Ng & H. van Dam, Modern Physics Letters A *Remarks on gravitational sources*, **10**, strane 2801–2808, 1995. Razmatranje je sažeto kod Y.J. Ng & H. van Dam, *Comment on "Uncertainty in measurements of distance"*, preprint na arxiv.org/abs/gr-qc/0209021. Videti takođe Y.J. Ng, *Spacetime foam*, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/gr-qc/0201022. Citirano na ***stranama 72*** i ***77***.

95. L.J. Garay, *Spacetime foam as a quantum thermal bath*, Physics Review Letters **80**, strane 2508–2511, 1998, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/gr-qc/9801024. Citirano na ***strani 72***.

96. G. Amelino-Camelia & T. Piran, *Planck-scale deformation of Lorentz symmetry as a solution to the UHECR and the TeV-γ paradoxes*, preprint je na veb strani arxiv.org/astro-ph/0008107, 2000. Citirano na ***strani 72***.

97. R.P. Woodard, *How far are we from the quantum theory of gravity?*, preprint na veb strani arxiv.org/abs/0907.4238. Za drugačiju tačku gledišta videti L. Smolin, *Generic predictions of quantum theories of gravity*, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/hep-th/0605052. Citirano na ***stranama 73*** i ***228***.

98. Sličnu tačku gledišta, često pod nazivom monizam, predlagao je Baruch Spinoza, *Ethics Demonstrated in Geometrical Order*, 1677, orginalno na latinskom jeziku; pristupačan prevod na francuski jezik je Baruch Spinoza, *L'Ethique*, Folio-Gallimard, 1954. Za razmatranje njegovih ideja, posebno njegovog monizma, videti Don Garret editor, *The Cambridge Companion to Spinoza*, Cambridge University Press, 1996, ili bilo koji opšti tekst iz istorije filozofije. Citirano na ***strani 73***.

99. Videti lucidno razmatranja kod G.F.R. Ellis & T. Rothman, *Lost horizons*, American Journal of Physics **61**, strane 883–893, 1993. Citirano na ***stranama 71***, ***74***, i ***81***.

100. Pogledajte, na primer, holivudski film *Contact*, zasnovan na knjizi C. Sagan, *Contact*, Simon & Schuster, 1985. Citirano na ***strani 81***.

101. Videti, na primer međunarodni bestseler od Stephen Hawking, *A Brief History of Time – From the Big Bang to Black Holes*, 1988. Postoji pevod na srpski jezik *Kratka istorija svemira* Citirano na ***strani 83***.

102. L. Rosenfeld, *Quantentheorie und Gravitation*, in H. -J. Treder, editor, *Entstehung, Entwicklung und Perspektiven der Einsteinschen Gravitationstheorie*, Springer Verlag, 1966. Citirano na ***strani 85***.

103. Holografija je u fizici visoke energije povezana sa radvima G 't Hooft i Susskind. Videti na primer kod G. 't Hooft, *Dimensional reduction in quantum gravity*, strane 284–296, kod A. Ali, J. Ellis & S. Randbar-Daemi, *Salaamfeest*, 1993, ili najcitiraniji dokument od L. Susskind, *The world as a hologram*, Journal of Mathematical Physics **36**, strane 6377– 6396, 1995, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/hep-th/9409089. Dobar savremen ptegled je ***Ref. 30***. Citirano na ***stranama 86*** i ***92***.

104. D. Bohm & B. J. Hiley, *On the intuitive understanding of nonlocality as implied by quantum theory*, Foundations of Physics **5**, strane 93–109, 1975. Citirano na ***strani 87***.

105. S. Lloyd, *Computational capacity of the universe*, Physical Review Letters **88**, strana 237901, 2002. Citirano na ***strani 88***.

106. Gottfried Wilhelm Leibniz, *La Monadologie*, 1714. Napisano je na francuskom, dostupno slobodno na www.uqac.uquebec.ca/zone30/Classiques_des_sciences_sociales i na mnogim drugim jezicima na drugim veb stranama. Citirano na ***strani 88***.

107. Videti, na primer, H.Wussing & P.S. Alexandrov editori, *Die Hilbertschen Probleme*, Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig, 1983, ili Ben H. Yandell, *Honours Class: Hilbert's Problems and their Solvers*, A.K. Peters, 2002. Citirano na ***strani 89***.

108. Veliki deo proučavanja dvojnosti kod struna i M teorije može da se smatra kao istraživanje detaljnih posledica spoljnih identiteta. Za pregled dvojnosti, videti P. C. Argyres, *Dualities in supersymmetric field theories*, Nuclear Physics Proceedings Supplement **61**, strane 149–157, 1998, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/hep-th/9705076. Klasičnu verziju dvojnosti razmatrali su M.C.B. Abdalla, A.L. Gadelka & I.V. Vancea, *Duality between coordinates and the Dirac field*, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/hep-th/0002217. Citirano na ***strani 92***.

109. Videti L. Susskind & J. Uglum, *Black holes, interactions, and strings*, preprint na veb strani arxiv.org/abs/hep-th/9410074, ili L. Susskind, *String theory and the principle of black hole complemen-tarity*, Physical Review Letters **71**, strane 2367–2368, 1993, i M. Karliner, I. Klebanov & L. Susskind, *Size and shape of strings*, International Journal of Modern Physics A **3**, strane 1981–1996, 1988, kao takođe L. Susskind, *Structure of hadrons implied by duality*, Physical Review D **1**, strane 1182–1186, 1970. Citirano na ***stranama 96*** i ***107***.

110. M. Planck, *Über irreversible Strahlungsvorgänge*, Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften zu Berlin strane 440–480, 1899. Danas je uobičajena upotreba Dirakovog $\hbar = h/2\pi$ umesto Plankovog h, što je Plank u početku označavao sa b. Citirano na ***strani 97***.

111. P. Facchi & S. Pascazio, *Quantum Zeno and inverse quantum Zeno effects*, strane 147–217, u E. Wolf editor, *Progress in Optics*, **42**, 2001. Citirano na ***strani 99***.

112. Aristotel, *Of Generation and Corruption*, book I, part 2. Videti Jean-Paul Dumont, *Les écoles présocratiques*, Folio Essais, Gallimard, strana 427, 1991. Citirano na ***strani 100***.

113. Videti na primer predloženi model vakuuma kao sastava od lopti Plankove veličine, koji je predložio F. Winterberg, Zeitschrift fur Naturforschung **52a**, strana 183, 1997. Citirano na ***strani 100***.

114. Dokazi starih Grka uz so i vodu i dokaz sa ribom dati su kod Lukrecija, tačnije Titus Lucretius Carus, *De natura rerum*, *c.* 60 bce. Citirano na ***stranama 101*** i ***112***.

115. J. H. Schwarz, *The second superstring revolution*, Predavanja na nivou kolokvijuma koja je održao na Sakharov Conference u Moskvi, May 1996, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/hep-th/9607067. Citirano na ***stranama 102*** i ***103***.

116. Simplicius, *Commentary on the Physics of Aristotle*, 140, 34. Ovaj tekst je citiran kod Jean- Paul Dumont, *Les écoles présocratiques*, Folio Essais, Gallimard, strana 379, 1991. Citirano na ***strani 102***.

117. D. Olive & C. Montonen, *Magnetic monopoles as gauge particles*, Physics Letters **72B**, strane 117–120, 1977. Citirano na ***strani 103***.

118. Poznati deo iz Diogenovog Laertius (IX 72) citira Demokrita na sledeći način: "Po konvenciji vruće, po konvenciji hladno, ali u stvarnosti, atomi i praznine; u stvari ne znamo ništa, jer je istina na dnu." Citirano na ***strani 104***.

119. Ovaj čuveni iskaz nalazi se na početku poglavlja XI, "The Physical Universe", od Arthur Eddington, *The Philosophy of Physical Science*, Cambridge, 1939. Citirano na strana ***104***.

120. Platon, *Parmenides*, *c.* 370 bce. Bio je preveden na mnogo jezika. Čitanje naglas, kao pesmu, divno je iskustvo. Bledi odraz ovih ideja je Bomov pojam "neprekidne celine". Citirano na ***strani 105***.

121. P. Gibbs, *Event-symmetric physics*, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/hep-th/9505089; Videti takođe njegovu veb stranu www.weburbia.com/pg/contents.htm. Citirano na ***strani 105***.

122. J.B. Hartle, & S.W. Hawking, *Path integral derivation of black hole radiance*, Physical Review D **13**, strane 2188–2203, 1976. Videti takođe A. Strominger & C. Vafa, *Microscopic origin of Bekenstein–Hawking entropy*, Physics Letters B **379**, strane 99–104, 1996, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/hep-th/9601029. Za drugo izvođenje entropije crne rupe videti kod G.T. Horowitz & J. Polchinski, *A correspondence principle for black holes and strings*, Physical Review D **55**, strane 6189–6197, 1997, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/hep-th/9612146. Citirano na ***stranama 107*** i ***113***.

123. J. Maddox, *When entropy does not seem extensive*, Nature **365**, strana 103, 1993. Ovo izdanje se sada koristi u svim udžbenicima koji razmatraju crne rupe. Džon Madoks (John Maddox, 1925. Penllergaer – 1999. Abergavenny) bio je poznat kao jedan od malog broja ljudi koji su bili poznavaoci više prirodnih nauka. Citirano na ***strani 107***.

124. L. Bombelli, R.K. Koul, J. Lee & R.D. Sorkin, *Quantum source of entropy of black holes*, Physical Review D**34**, strane 373–383, 1986. Citirano na ***strani 107***.

125. Analogija između polimera i crnih rupa nastala je zbog G. Weber, *Thermodynamics at boundaries*, Nature **365**, strana 792, 1993. Citirano na ***strani 107***.

126. Videti klasičan tekst od Pierre-Gilles de Gennes, *Scaling Concepts in Polymer Physics*, Cornell University Press, 1979. Citirano na ***strani 107***.

127. Videti na primer S. Majid, *Introduction to braided geometry and q-Minkowski space*, preprint na veb strani arxiv.org/abs/hep-th/9410241, ili S. Majid, *Duality principle and braided geometry*, preprint na veb strani arxiv.org/abs/hep-th/9409057. Citirano na ***strani 108***.

128. Odnos između spina i statistike proučavali su nedavno M.V. Berry & J.M. Robbins, *Quantum indistinguishability: spin–statistics without relativity or field theory?*, kod R.C. Hilborn & G.M. Tino editori, *Spin–Statistics Connection and Commutation Relations*, American Institute of Physics, 2000. Citirano na ***strani 109***.

129. A. Gregori, *Entropy, string theory, and our world*, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/hep-th/0207195. Citirano na ***stranama 110*** i ***111***.

130. Kosmologija struna za mnoge je prošlost. Primeri uključuju N.E. Mavromatos, *String cosmology*, preprint na veb strani arxiv.org/abs/hep-th/0111275, i N.G. Sanchez, *New developments in string gravity and string cosmology – a summary report*, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/hep-th/0209016. Citirano na ***strani 111***.

131. Za novije snimke videti wikipedia.org/wiki/Ultra-high-energy_cosmic_ray kao i wikipedia.org/wiki/Zetta-particule. Citirano na ***strani 111***.

132. P. F. Mende, *String theory at short distance and the principle of equivalence*, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/hep-th/9210001. Citirano na ***strani 111***.

133. Primer je dat kod A.A. Slavnov, *Fermi–Bose duality via extra dimension*, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/hep-th/9512101. Videti takođe standardni rad od Michael Stone editor, *Bosonization*, World Scientific, 1994. Citirano na ***strani 112***.

134. Model prostor-vremena kao talasa pojavljuje se u izvesnim pristupima kvantnoj gravitaciji, kao što je u ***Ref. 26***. Za malo drugačiju temu, videti takođe kod S.A. Major, *A spin network primer*, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/gr-qc/9905020. Citirano na ***strani 112***.

135. L. Smolin & Y. Wan, *Propagation and interaction of chiral states in quantum gravity*, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/0710.1548, i reference u njima. Citirano na ***strani 112***.

136. Dobar uvod u njegov rad je dokument od D. Kreimer, *Newmathematical structures in renormalisable quantum field theories*, Annals of Physics **303**, strane 179–202, 2003, erratum ibid. **305**, strana 79, 2003, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/hep-th/0211136. Citirano na ***strani 112***.

137. Uvodi u holografiju uključuju E. Alvarez, J. Conde & L. Hernandez, *Rudiments of holography*, preprint na veb strani arxiv.org/abs/hep-th/0205075, i ***Ref. 30***. Važnost holografije u teorijskoj fizici visoke energije naglašeno je otkrićem J. Maldacena, *The large N limit of superconformal field theories and supergravity*, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/hep-th/9711200. Citirano na ***strani 112***.

138. X. -G.Wen, *From new states of matter to a unification of light and electrons*, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/0508020. Citirano na ***strani 112***.

139. J.S. Avrin, *A visualizable representation of the elementary particles*, Journal of Knot Theory and Its Ramifications **14**, strane 131–176, 2005. Citirano na ***stranama 112*** i ***261***.

140. Dobro poznat model sa trakom predstavljen je kod S. Bilson-Thompson, *A topological model of composite preons*, preprint je na veb strani arxiv.org/hep-ph/0503213; S. Bilson-Thompson, F. Markopoulou & L. Smolin, *Quantum gravity and the standard model*, preprint je na veb strani

arxiv.org/hep-th/0603022; S. Bilson-Thompson, J. Hackett, L. Kauffman & L. Smolin, *Particle identifications from symmetries of braided ribbon network invariants*, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/0804.0037; S. Bilson-Thompson, J. Hackett & L. Kauffman, *Particle topology, braids, and braided belts*, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/0903.1376. Citirano na ***stranama 112***, ***130***, i ***261***.

141. R.J. Finkelstein, *A field theory of knotted solitons*, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/hep-th/0701124. Videti takođe R. J. Finkelstein, *Trefoil solitons, elementary fermions, and* SUq(2), preprint je na veb strani arxiv.org/abs/hep-th/0602098, R.J. Finkelstein & A.C. Cadavid, *Masses and interactions of q-fermionic knots*, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/hep-th/0507022, and R.J. Finkelstein, *A knot model suggested by the standard electroweak theory*, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/hep-th/0408218. Citirano na ***stranama 112*** i ***261***.

142. Louis H. Kauffman, *Knots and Physics*, World Scientific, 1991. Divna knjiga. Citirano na ***stranama 112*** i ***207***.

143. S.K. Ng, *On a knot model of the π+ meson*, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/hep-th/0210024 i S.K. Ng, *On a classification ofmesons*, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/hep-ph/0212334. Citirano na ***stranama 112*** i ***260***.

144. Za dobar uvod u superstrune, videti predavanja Zwiebach ,*String theory for pedestrians*, indico.cern.ch/fullAgenda.php?ida=a063319. Za stariji uvod u superstrune, videti poznat tekst od M.B. Green, J.H. Schwarz & E.Witten, *Superstring Theory*, Cambridge University Press, volumes 1 i 2, 1987. Kao i sve starije knjige o superstrunama, one ne sadrže iskaze koji su primenljivi u modelu niti ili su u saglasnosti sa njim. Citirano na ***stranama 112*** i ***261***.

145. Videti A. Sen, *An introduction to duality symmetries in string theory*, u *Les Houches Summer School: Unity from Duality: Gravity, Gauge Theory and Strings (Les Houches, France, 2001)*, Springer Verlag, **76**, strane 241–322, 2002. Citirano na ***strani 113***.

146. Brian Greene redovno koristi naziv *predpostavka strune*. Na primer, on je to učinio u podijum razmatranju na TED in 2009; video zapis o podijum razmatranju može da se učita sa veb strane www.ted.org/. Citirano na ***strani 113***.

147. L. Susskind, *Some speculations about black hole entropy in string theory*, preprint na veb strani arxiv.org/abs/hep-th/9309145. G.T. Horowitz & J. Polchinski, *A correspondence principle for black holes and strings*, Physical Review D**55**, strane 6189–6197, 1997, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/hep-th/9612146. Citirano na ***stranama 113*** i ***333***.

148. F. Wilczek, *Getting its from bits*, Nature **397**, strane 303–306, 1999. Citirano na ***strani 114***.

149. M. R. Douglas, *Understanding the landscape*, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/hep-th/0602266; njegovi raniji radovi takođe ukazuju. Citirano na ***strani 114***.

150. Teškoće sa predpostavkom struna razmatrane su u dobro poznatom blogu na internetu od Peter Woit, *Not even wrong* na veb strani www.math.columbia.edu/~woit/wordpress/. Nekoliko dobitnika Nobelove nagrade za fiziku čestica koji su odbacili predpostavku struna su: Martin Veltman, Sheldon Glashow, Burton Richter, Richard Feynman i od 2009. godine takođe Steven Weinberg je među onima koji su to učinili javno. Citirano na ***stranama 115*** i ***130***.

151. Potraga za pristupom bez pozadine. opisana je kod E. Witten, *Quantum background independence in string theory*, preprint je veb srani arxiv.org/abs/hep-th/9306122 i kod E. Witten, *On background-independent open string theory*, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/hep-th/9208027. Citirano na ***strani 115***.

152. Zapravo, nijedan drugi kandidat za model koji ispunjava sve zahteve za konačnu teoriju, nije dostupan do danas u literaturi. Premda će ovo da se izmeni u budućnosti. Citirano na ***strani 119***.

153. S. Carlip, *The small scale structure of spacetime*, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/1009.1136. Ovaj dokument izvodi postojanje kolebajućih linija u vakuumu iz brojnih dokaza koji su potpuno nezavisni od modela niti. Citirano na ***stranama 127*** i ***226***.

154. David Deutsch navodi da svako dobro objašnjenje mora da bude "teško za promenu". To mora takođe da se primeni na objedinjeni model, pošto se tvrdi da on objašnjava sve što opažamo. Videti

D. Deutsch, *A new way to explain explanation*, video zapis razgovora je na veb strani www.ted.org/. Citirano na ***stranama 129*** i ***300***.

155. L. Bombelli, J. Lee, D. Meyer & R. D. Sorkin, *Space-time as a causal set*, Physical Review Letters **59**, strane 521–524, 1987. Videti takođe prikaz od J. Henson, *The causal set approach to quantum gravity*, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/gr-qc/0601121. Citirano na ***stranama 130*** i ***225***.

156. D. Finkelstein, *Homotopy approach to quantum gravity*, International Journal of Theoretical Physics **47**, strane 534–552, 2008. Citirano na ***stranama 130*** i ***225***.

157. L. H. Kauffman & S. J. Lomonaco, *Quantum knots*, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/quant-ph/0403228. Videti takođe S.J. Lomonaco & L. H. Kauffman, *Quantum knots and mosaics*, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/quant-ph/0805.0339. Citirano na ***strani 130***.

158. Immanuel Kant, *Critik der reinen Vernunft*, 1781, je poznata, ali dugačka knjiga za koju se svaki filozof pretvara da je pročitao. U toj knjizi Kant uvodi "a priori" postojanje prostora i vremena. Citirano na ***strani 131***.

159. Literatura o kružnosti je retkost. Za dva interesantna izuzetka videti kod L.H. Kauffman, *Knot logic*, koja može da se učita sa www.math.uic.edu/people/profile?netid=kauffman i kod L.H. Kauffman, *Reflexivity and eigenform*, Constructivist Foundations **4**, strane 121–137, 2009. Citirano na ***strani 132***.

160. Informacije o triku sa opasačem rasejane su širom mnogih kniga i nekoliko dokumenata. Najbolji izvori informacija o informaciji o ovoj temi su veb strane. Za vizualizaciju trika sa opasačem videti na veb strani www.evl.uic.edu/hypercomplex/html/dirac.html, i na veb strane www.gregegan.net/APPLETS/21/21.html Za izvanrednan sažetak u literaturi i još više filmova, videti www.math.utah.edu/~palais/links.html. Nijedna od ovih veb strana ili citiranih referenci ne pominju da postoji mnogo načina da se izvede trik sa opasačem; čini se da je to znanje skriveno. U septembru 2009. godine, Greg Egan je prihvatio moj predlog i promenio svoj aplet kako bi prikazao drugu verziju opasača. Citirano na ***stranama 137*** i ***139***.

161. Postoji interesantno objašnjenje u vezi ove analogije. Prvi zahtev je da se otkrije zašto je uopšte moguća analogoja između nedisipativnog sistema – slobodne kvantne čestice koja se kreće u vakuumu – i disipativnog sistema – makroskopskog tela vučenog kroz visloznu tečnost, recimo med. (Potrebno je pažljivo razdvajanje ovih slučajeva sa spinom 0, spinom 1 i spinom 1/2). (***Izazov 223e***) Drugi zahtev je istraživanje kretanja tela opšteg oblika u viskoznoj tečnosti malog Rejnoldsovog broja i pri stalnoj sili. Za najbolji pregled ovih zahteva videti divan članak od O. Gonzalez, A.B.A. Graf & J.H. Maddocks, *Dynamics of a rigid body in a Stokes fluid*, Journal of Fluid Mechanics **519**, strane 133–160, 2004. Citirano na ***stranama 151*** i ***269***.

162. D. Bohm, R. Schiller & J. Tiomno, *A causal interpretation of the Pauli equation (A)*, Supplementi al Nuovo Cimento **1**, strane 48 – 66, 1955, i D. Bohm & R. Schiller, *A causal interpretation of the Pauli equation (B)*, Supplementi al Nuovo Cimento **1**, strane 67–91,1955. Autori istražuju uobičajeni način predstavljanja talasne funkcije, koji je od male važnosti ovde; međutim, čineći to, oni daju i istražuju opis Paulijevih spinora u terminima Ojlerovih uglova. Citirano na ***strani 153***.

163. Richard P. Feynman, *QED – The Strange Theory of Light and Matter*, Princeton University Press 1988. Ovo je jedan od najboljih sažetaka kvantne teorije koji je ikad napisan. Svaki fizičar bi trebalo to da pročita. Citirano na ***stranama 154***, ***158***, ***165***, ***172***, i ***330***.

164. A. Aspect, J. Dalibard & G. Roger, *Experimental tests of Bell's inequalities using time-varying analyzers*, Physical Review Letters **49**, strane 1804–1807, 1982, Citirano na ***strani 159***.

165. L. Kauffman, *New invariants of knot theory*, American Mathematical Monthly **95**, strane 195–242, 1987. Videti takođe sliku na početku Poglavlja 6 kod Louis H. Kauffman, *On Knots*, Princeton University Press, 1987. Citirano na ***strani 161***.

166. S. Kochen & E. P. Specker, *The problem of hidden variables in quantum mechanics*, **17**, strane 59–87, 1967. Citirano na ***strani 156***.

167. Detalji o brzini fotona objašnjeni su u svakom udžbeniku o kvantnoj elektrodinamici. Pitanje je takođe objasnio Feynman u ***Ref. 163*** na ***strani 70***. Citirano na ***strani 162***.

168. J. -M. Levy-Leblond, *Nonrelativitic particles and wave equations*, Communications in Mathematical Physics **6**, strane 286–311, 1967. Videti takođe A. Galindo & C. Sanchez del Rio, *Intrinsic magnetic moment as a nonrelativistic phenomenon*, American Journal of Physics **29**, strane 582–584, 1961, i V. I. Fushchich, A. G. Nikitin & V.A. Salogub, *On the non-relativistic motion equations in the Hamiltonian form*, Reports on Mathematical Physics **13**, strane 175–185, 1978. Citirano na ***strani 164***.

169. L. Lerner, *Derivation of the Dirac equation from a relativistic representation of spin*, European Journal of Phyics **17**, strane 172–175, 1996. Citirano na ***strani 164***.

170. E. P. Battey-Pratt & T. J. Racey, *Geometric model for fundamental particles*, International Journal of Theoretical Physics **19**, strane. 437–475, 1980. Neznajući za njegov rad, C. Schiller je došao do istih rezultata 2008. godine. Citirano na ***stranama 164*** i ***340***.

171. A. Abraham, *Prinzipien der Dynamik des Elektrons*, Annalen der Physik **10**, strane 105–179, 1903, J. Frenkel, *Die Elektrodynamik des rotierenden Elektrons*, Zeitschrift fur Physik **37**, strane 243–262, 1926, L. H. Thomas, *The motion of a spinning electron*, Nature April 10, 423 stranai 514, 1926, i L. H. Thomas, *The kinematics of an electron with an axis*, Philosophical Magazine **3**, strane 1–22, 1927. Videti takođe W. E. Baylis, *Surprising symmetries in relativistic charge dynamics*, preprint na veb strani arxiv.org/abs/physics/0410197. Videti takođe W. E. Baylis, *Quantum/classical interface: a geometric approach from the classical side*, strane 127–154 i W. E. Baylis, *Geometry of paravector space with applications to relativistic physics*, strane 363–387 in *Computational Noncommutative Algebra and Applications*, Zapisnik NATO Advanced Study Institute, NATO Science Series II, vol. 136, ed. J. Byrnes, Kluwer Academic 2004. W. E. Baylis, R. Cabrera & D. Keselica, *Quantum/classical interface: fermion spin*, preprint na veb strani arxiv.org/abs/0710.3144. D. Hestenes, *Zitterbewegung Modelling*, Foundations of Physics **23**, strane 365–386, 1993. D. Hestenes, *Zitterbewegung in quantum mechanics – a research program*, preprint na veb strani arxiv.org/abs/0802.2728. Videti takođe D. Hestenes, *Reading the electron clock*, preprint na veb strani arxiv.org/abs/0802.3227 i njegovu veb stranu geocalc.clas.asu.edu/. A. Loinger & A. Sparzani, *Dirac equation without Dirac matrices*, Il Nuovo Cimento **39**, strane 1140–1145, 1965.D. Bohm, P. Hillion,T. Takabayasi& J. –P. Vigier, *Relativistic rotators and bilocal theory*, Progress of Theoretical Physics **23**, strane 496–511, 1960. A. Challinor, A. Lasenby, S. Gill & C. Doran, *A relativistic, causal account of a spin measurement*, Physics Letters A **218**, strane 128–138, 1996. E. Santamato, *The role of Dirac equation in the classical mechanics of the relativistic top*, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/0808.3237. Citirano na ***strani 165***.

172. Pojam "podrhtavanje" (Zitterbewegung) formulisano je kod E. Schrödinger, *Über die kräftefreie Bewegung in der relativistischen Quantenmechanik*, Berliner Berichte strane 418–428, 1930, i *Zur Quantendynamik des Elektrons*, Berliner Berichte strane 63–72, 1931. Brojni naredni dokumenti razmatrali su ova objavljivanja. Citirano na ***strani 165***.

173. Videti na primer knjigu Martin Rivas, *Kinematic Theory of Spinning Particles*, Springer, 2001. Citirano na ***strani 166***.

174. Osnovni dokumenti u polju stohastičke kvantifikacije je od W. Weizel, *Ableitung der Quantentheorie aus einem klassischen, kausal determinierten Modell*, Zeitschrift fur Physik A **134**, strane 264–285, 1953,W. Weizel, *Ableitung der Quantentheorie aus einem klassischen Modell – II*, Zeitschrift fur Physik A **135**, strane 270–273, 1954, W. Weizel, *Ableitung der quantenmechanischen Wellen-gleichung des Mehrteilchensystems aus einem klassischenModell*, Zeitschrift fur Physik A**136**, strane 582–604, 1954. Ovo delo je preuzeto kod E. Nelson, *Derivation of the Schrödinger equation from Newtonian mechanics*, Physical Review **150**, strane 1079–1085, 1969, i kod Edward Nelson,*Quantum Fluctuations*, Princeton University Press 1985, može takođe da se učita slobodno sa veb strane web.math.princeton.edu/~nelson/books.html i knjiga Edward Nelson, *Stochastic Quantization*, Princeton University Press 1985. Videti takođe L. Fritsche & M. Haugk, *A new look at the derivation of the Schrödinger equation from Newtonian mechanics*, Annalen der Physik **12**, strane 371–402, 2003. Zaključak o pristupu Nelsona dat je takođe kod F. Markopoulou & L. Smolin, *Quantum theory from quantum gravity*, Physical Review D **70**, stranai 124029, 2004, preprint je na veb strani arxiv.org/ abs/gr-qc/0311059. Videti takođe važnu kritiku od T.C. Wallstrom, *Inequivalence between the Schrödinger equation and the Madelung hydrodynamic equation*, Physical Review A **49**, strane 1613–1617, 1994, and T. C. Wallstrom, *The stochastic mechanics of the Pauli equation*, Transactions of the American Mathematical Society **318**, strane 749–762, 1990.

Predloženi odgovor je od L. Smolin, *Could quantum mechanics be an approximation to another theory?*, preprint je na veb strani arxiv.org/quant-ph/abs/0609109. Videti takođe S. K. Srinivasan & E. C. G. Sudarshan, *A direct derivation of the Dirac equation via quaternion measures*, Journal of Physics A **29**, strane 5181–5186, 1996. Citirano na ***strani 166***.

175. Julian Schwinger, *Quantum Mechanics – Symbolism of Atomic Measurements*, 424 bibliography Springer, 2001. Citirano na ***strani 168***.

176. H. Nikolić, *How (not) to teach Lorentz covariance of the Dirac equation*, European Journal of Physics **35**, strana 035003, 2014, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/1309.7070. Citirano na ***strani 168***.

177. Za takav pokušaj videti predlog od M. Rainer, *Resolution of simple singularities yielding particle symmetries in space-time*, Journal of Mathematical Physics **35**, strane 646– 655, 1994. Citirano na ***strani 171***.

178. C. Schiller, *Deducing the three gauge interactions from the three Reidemeister moves*, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/0905.3905. Citirano na ***stranama 171*** i ***172***.

179. G. T. Horowitz & J. Polchinski, *Gauge/gravity duality*, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/gr-qc/0602037. Zapaziti takođe iskaz u uvodu da je gravitacija možda sastavljena od dva bozona sa spinom 1, što je donekle prikazano pomoću modela niti gravitona. Konkretniji pristup dvojnosti merilo-gravitacija načinio je M. van Raamsdonk, *Building up spacetime with quantum entanglement*, preprint na veb strani arxiv.org/1005.3035. Ovaj pristup dvojnosti merilo-gravitacija najpribližniji je onom iz modela niti. Citirano na ***strani 172***.

180. K. Reidemeister, *Elementare Begründung der Knotentheorie*, Abhandlungen aus dem Mathematischen Seminar der Universität Hamburg **5**, strane 24–32, 1926. Citirano na ***stranama 173*** i ***207***.

181. Sheldon Glashow, potvrdio je to autoru u jednom e-pismu; Richard Feynman, naglasio je to kod James Gleick, *Genius: The Life and Science of Richard Feynman*, Vintage Books, 1991, strana 288 i takođe kod Robert Crease & Charles Mann, *The Second Creation: Makers of the Revolution in Twentieth-Century Physics*, Macmillan Publishing, strana 418; Martin Veltman, je napisao ovo u govoru pri dodeli Nobelove nagrade, što je dostupno na veb strani www.nobel.org/. Citirano na ***strani 192***.

182. Za nešto o pozadini ove teme videti F. Wilczek & A. Zee *Appearance of gauge structures in simple dynamical systems*, Physical Review Letters **52**, strane 2111–2114, 1984, A. Shapere & F. Wilczek, *Self-propulsion at low Reynolds number*, Physical Review Letters **58**, strane 2051–2054, 1987, i kod A. Shapere & F.Wilczek, *Gauge kinematics of deformable bodies*, American Journal of Physics **57**, strane 514–518, 1989. Citirano na ***strani 205***.

183. R. Britto, F. Cachazo, B. Feng & E. Witten, *Direct proof of tree-level recursion relation in Yang–Mills theory*, preprint na veb strani arxiv.org/abs/hep-th/0501052. Citirano na ***strani 206***.

184. D.V. Ahluwalia-Khalilova, *Operational indistinguishability of double special relativity from special relativity*, Classical and Quantum Gravity **22**, strane 1433–1450, 2005, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/gr-qc/0212128; Videti takođe N. Jafari & A. Shariati, *Doubly special relativity: a new relativity or not?*, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/gr-qc/0602075. Citirano na ***strani 211***.

185. E. Verlinde, *On the origin of gravity and the laws of Newton*, preprint se može naći na veb strani arxiv.org/abs/1001.0785. Citirano na ***strani 212***.

186. G. -L. Lesage, *Lucrèce Newtonien*, Nouveaux memoires de l'Academie Royale des Sciences et Belles Lettres strane 404–431, 1747, ili na www3.bbaw.de/bibliothek/digital/struktur/03-nouv/1782/jpg-0600/00000495.htm. Videti takođe na wikipedia.org/wiki/Le_Sage's_theory_of_gravitation. Ustvari, prvi koji je predložio ideju o gravitaciji kao rezultat malih čestica koje guraju mase, bio je Nicolas Fatio de Duillier 1688. godine. Citirano na ***strani 213***.

187. G. 't Hooft, *Dimensional reduction in quantum gravity*, preprint na arxiv.org/abs/gr-qc/9310026. Mnoge ideje iz ovog dokumenta postale su lakše za razumevanje i za razmatranje kada se koristi model niti. Citirano na ***strani 217***.

188. S. Carlip, *Logarithmic corrections to black hole entropy from the Cardy formula*, Classical and Quantum Gravity **17**, strane 4175–4186, 2000, preprint je na veb ***strani*** arxiv.org/abs/gr-qc/0005017. Citirano na ***strani 218***.

189. O granici momenta količine kretanja crne rupe videti ***Ref. 34***. Citirano na ***strani 219***.

190. F. Tamburini, C. Cuofano, M. Della Valle & R. Gilmozzi, *quantum gravity signature from the farthest quasars*, preprint na veb strani arxiv.org/abs/1108.6005. Citirano na ***strani 223***.

191. B.P. Abbott & al., (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration) *Observation of gravitational waves from a binary black hole merger*, Physical Review Letters 1**16**, strana 061102, 2016, takođe je dostupno za slobodno učitavanje sa veb strane journals.aps.org/prl/pdf/10.1103/PhysRevLett.116.061102. Više o ovom otkriću rečeno je u Volumenu II serije Planina Kretanja. Citirano na ***strani 223***.

192. O torziji videti izvanredan prikaz od R. T. Hammond, *New fields in general relativity*, Contemporary Physics **36**, strane 103–114, 1995. Citirano na ***strani 225***.

193. H. Kleinert, & J. Zaanen, *World nematic crystal model of gravity explaining the absence of torsion*, Physics Letters A **324**, strane 361–365, 2004. Citirano na ***strani 225***.

194. Analogija između situacije oko linijske greške i opšte teorije relativnosti objašnjena je kod Ekkehart Kroner, *Kontinuumstheorie der Versetzungen und Eigenspannungen*, Springer, 1958, Ovu ideju su prihvatili i pratili J.D. Eshelby, B.A. Bilby i mnogi drugi posle njih. Citirano na ***strani 225***.

195. Kvantna petljasta gravitacija opširno je polje istraživanja. Kompletna literatura dostupna je na veb strani arxiv.org/archive/gr-qc. Citirano na ***strani 225***.

196. G. 't Hooft, *Crystalline Gravity*, International Journal of Modern Physics A **24**, strane 3243–3255, 2009, i takođe G. 't Hooft, *A locally finite model of gravity*, preprint se nalazi na veb strani arxiv.org/abs/0804.0328. Citirano na ***strani 225***.

197. L. Susskind, *concepts for old black holes*, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/1311.3335, a takođe i referenca ***Ref. 147***. Citirano na ***strani 225***.

198. M. Botta Cantcheff, *Spacetime geometry as statistic ensemble of strings*, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/1105.3658. Citirano na ***strani 226***.

199. N. Arkani-Hamed, L. Motl, A. Nicolis & C. Vafa, *The string landscape, black holes and gravity as the weakest force*, preprint je na veb strani arxiv.org/hep-th/060100. Citirano na ***strani 226***.

200. M. van Raamsdonk, *Comments on quantum gravity and entanglement*, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/0907.2939. Citirano na ***strani 226***.

201. W. H. Zurek & K. S. Thorne, *Statistical mechanical origin of the entropy of a rotating, charged black hole*, Physical Review Letters **54**, strane 2171–2175, 1985. Citirano na ***strani 226***.

202. M. Shaposhnikov & C. Wetterich, *Asymptotic safety of gravity and the Higgs boson mass*, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/0912.0208. Citirano na ***strani 227***.

203. M. M. Anber & J. F. Donoghue, *On the running of the gravitational constant*, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/1111.2875. Citirano na ***strani 227***.

204. C. H. Lineweaver & T.M. Davis, *Misconceptions about the big bang*, Scientific American strane 36–45, March 2005. Citirano na ***strani 229***.

205. Supernova Search Team Collaboration, A.G. Riess & al., *Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant*, Astronomical Journal **116**, strane 1009–1038, 1998, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/astro-ph/9805201. Citirano na ***strani 229***.

206. Stephen Hawking & Roger Penrose, *The Nature of Space and Time*, Princeton University Press, 1996. Citirano na ***strani 230***.

207. C. Balazs & I. Szapudi, *Naturalness of the vacuum energy in holographic theories*, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/hep-th/0603133. Videti takođe C. Bambi& F. R. Urban, *Natural extension of the generalised uncertainty principle*, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/0709.1965. Istu tačku je obradio D. A. Easson, P.H. Frampton & G. F. Smoot, *Entropic accelerating universe*, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/1002.4278. Citirano na ***strani 230***.

208. W. Fischler & L. Susskind, *Holography and Cosmology*, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/hep-th/9806039. Citirano na ***strani 230***.

209. Za pregled nedavnih kosmoloških podataka videti D.N. Spergel, R. Bean, O. Dore, M.R. Nolta, C.L. Bennett, G. Hinshaw, N. Jarosik, E. Komatsu, L. P. , H. V. Peiris, L. Verde, C. Barnes, M. Halpern, R. S. Hill, A. Kogut, M. Limon, S. S. Meyer, N. Odegard, G. S. Tucker, J. L. Weiland, E. Wollack & E. L. Wright, *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) three year results: implications for cosmology*, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/astro-ph/0603449. Citirano na ***strani 231***.

210. Postoji velika količina literature u kojoj se proučava promena kosmološke konstante sa vremenom, naročito u oblasti holografije. Primer sa mnogo referenci je L. Xu, J. Lu & W. Li, *Time variable cosmological constants from the age of the universe*, preprint se može naći na veb strani arxiv.org/abs/0905.4773. Citirano na ***strani 231***.

211. D. Wiltshire, *Gravitational energy and cosmic acceleration*, preprint se može naći na veb strani arxiv.org/abs/0712.3982 i D. Wiltshire, *Dark energy without dark energy*, preprint se može naći na veb strani arxiv.org/abs/0712.3984. Citirano na ***strani 231***.

212. Ne može da se potvrdi pripisivanje Volteru. Citirano na ***strani 235***.

213. V. Crede & C. A. Meyer, *The experimental status of glueballs*, Progress in Particle and Nuclear Physics **63**, strane 74–116, 2009. Citirano na ***strani 243***.

214. E. Klempt & A. Zaitsev, *Glueballs, hybrids, multiquarks. Experimental facts versus QCD inspired concepts*, Physics Reports **454**, 2007, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/0708.4016. Citirano na ***stranama 243*** i ***259***.

215. R. V. Buniy & T.W. Kephart, *A model of glueballs*, preprint je na veb strani arxiv.org/pdf/hep-ph/0209339; R. V. Buniy & T.W. Kephart, *Universal energy spectrum of tight knots and links in physics*, preprint je na veb strani arxiv.org/pdf/hep-ph/0408025; R.V. Buniy & T.W. Kephart, *Glueballs and the universal energy spectrum of tight knots and links*, preprint je na veb strani arxiv.org/pdf/hep-ph/0408027. Videti takođe J.P. Ralston, *The Bohr atom of glueballs*, preprint je na veb strani arxiv.org/pdf/hep-ph/0301089. Citirano na ***strani 243***.

216. Videti opis ponuđene nagrade od milion dolara na veb strani www.claymath.org/millennium/Yang-Mills_Theory. Citirano na ***strani 244***.

217. A. J. Niemi, *Are glueballs knotted closed strings?*, strane 127–129, u H. Suganuma, N. Ishii, M. Oka, H. Enyo, T. Hatsuda, T. Kunihiro & K. Yazaki editors, *Color confinement and hadrons in quantum chromodynamics*, World Scientific, 2003, preprint je na veb strani arxiv.org/pdf/hep-th/0312133. Videti takođe Y.M. Cho, B. S. Park & P.M. Zhang, *New interpretation of Skyrme theory*, preprint je na veb strani arxiv.org/pdf/hep-th/0404181; K. Kondo, A. Ono, A. Shibata, T. Shinohara & T. Murakami, *Glueballmass from quantized knot solitons and gauge-invariant gluonmass*, Jornal of Physics A**39**, strane 13767–13782, 2006, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/hep-th/0604006. Citirano na ***stranama 243*** i ***259***.

218. Za jasan pregled tema i planiranih eksperimenata videti E. Fiorini, *Measurement of neutrino mass in double beta decay*, Europhysics News **38**, strane 30–34, 2007, dokument se može učitati sa veb strane www.europhysicsnews.org/. Citirano na ***strani 246***.

219. Na primer, videti detaljno razmatranje o svostvima neutrina na veb strani pdg.web.cern.ch/pdg/, ili odštampano u ***Ref. 227***. Citirano na ***strani 246***.

220. Za moguć treći pristup, videti kod A.F. Nicholson & D.C. Kennedy, *Electroweak theory without Higgs bosons*, International Journal of Modern Physics A **15**, strane 1497–1519, 2000, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/hep-ph/9706471. Citirano na ***strani 247***.

221. M. Veltman, *The Higgs system*, dijapozitivi sa predavanja mogu se pogledati na veb strani www.nikhef.nl/pub/theory/academiclectures/Higgs.pdf. Videti takođe njegov CERN Yellow Report 97-05, *Reflections on the Higgs system*, 1997, i dokument H. Veltman & M. Veltman, *On the possibility of resonances in longitudinally polarized vector boson scattering*, Acta Physics Polonica B **22**, strane 669–695, 1991. Citirano na ***strani 247***.

222. J.W. Moffat & V.T. Thot, *A finite electroweakmodel without a Higgs particle*, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/0812.1991. Ideje su vraćene do D. Evens, J.W. Moffat, G. Kleppe & R.P.

Woodard, *Nonlocal regularizations of gauge theories*, Physical Review D **43**, strane 499–519, 1991. Za više detalja o tome kako da se uvede nelokalnost dok se održava očuvanje struje i objedinjenost, videti G. Kleppe & R.P. Woodard, *Non-local Yang- Mills*, Nuclear Physics B **388**, strane 81–112, 1992, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/hep-th/9203016. Za drugačiji pristup koji ne postulira posebno poreklo W i Z masa, videti J.W. Moffat, *Ultraviolet complete electroweak model without a Higgs particle*, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/1006.1859. Citirano na ***strani 248***.

223. H. B. Nielsen & P. Olesen, *A vortex line model for dual strings*, Nuclear Physics B, **61**, strane 45-61 (1973). Citirano na ***stranama 250*** i ***284***.

224. B. Andersson, G. Gustafson, G. Ingelman& T. Sjostrand, *Parton fragmentation and string dynamics*, Physics Reports **97**, strane 31–145, 1983. Citirano na ***strani 250***.

225. C. B. Thorn, *Subcritical string and large N QCD*, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/0809.1085. Citirano na ***strani 250***.

226. A.J. Buchmann & E.M. Henley, *Intrinsic quadrupole moment of the nucleon*, Physical Review C **63**, stranai 015202, 2000. Alfons Buchmann predviđa takođe da je pozitivan moment kvadripola drugog, čudnog $J = 1/2$ okteta bariona, a predviđa izduženu strukturu svih (lična komunikacija). Za dekuplet bariona, sa $J = 3/2$, moment kvadripola često može da se izmeri spektroskopski i uvek je negativan. Četiri Δ bariona su predviđeni da imaju negativan sopstveni moment kvadripola i prema tome spljošten oblik. To je objašnjeno kod A. J. Buchmann & E. M. Henley, *Quadrupole moments of baryons*, Physical Review D **65**, strana 073017, 2002. Za novija ažuriranja videti kod A.J. Buchmann, *Charge form factors and nucleon shape*, strane 110–125, kod C.N. Papanicolas & Aron Bernstein editors, *Shape of HadronsWorkshop Conference*, Athens, Greece, 27-29 April 2006, AIP Conference Proceedings 904. Citirano na ***stranama 253*** i ***257***.

227. K. Nakamura & al., *The Review of Particle Physics*, Journal of Physics G **37**, stranai 075021, 2010, ili na veb strani pdg.web.cern.ch/pdg/. Citirano na ***stranama 254***, ***255***, ***269***, ***277***, ***279***, ***334*** i ***336***

228. Pregled Ređijevih trajektorija i Chew-Frautschi crteža je kod W. Drechsler, *Das Regge- Pol-Modell*, Naturwissenschaften **59**, strane 325–336, 1972. Videti takođe kratko predavanje na veb strani courses.washington.edu/phys55x/Physics557_lec11.htm. Citirano na ***strani 254***.

229. Kurt Gottfried & Victor F. Weisskopf, *Concepts of Particle Physics*, Clarendon Press, Oxford, 1984. Citirano na ***strani 255***.

230. G. 't Hooft, G. Isidori, L. Maiani, A.D. Polosa & V. Riquer, *A theory of scalar mesons*, Physics Letters B **662**, strane 424–430, 2008, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/0801.2288. Kao u uvek, drugi istraživači, kao na veb strani arxiv.org/abs/1404.5673, protive se takvom prikazivanju tetrakvarka. Rasprava po ovom pitanju još uvek traje. Citirano na ***strani 259***.

231. M. Karliner, *Doubly heavy tetraquarks and baryons*, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/1401.4058. Citirano na ***strani 260***.

232. J. Viro & O. Viro, *Configurations of skew lines*, Leningrad Mathematical Journal **1**, strane 1027–1050, 1990, i ažurirani preprint na veb strani arxiv.org/abs/math.GT/0611374. Citirano na ***strani 260***.

233. W. Thomson, *On vortex motion*, Transactions of the Royal Society in Edinburgh strane 217–260, 1868. Ovaj poznati dokument pokrenuo je mnogo radova u teoriji čvorova. Citirano na ***strani 260***.

234. H. Jehle, *Flux quantization and particle physics*, Physical Review D **6**, strane 441–457, 1972, i H. Jehle, *Flux quantization and fractional charge of quarks*, Physical Review D **6**, strane 2147–2177, 1975. Citirano na ***strani 260***.

235. T.R. Mongan, *A holographic charged preon model*, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/0801.3670. Citirano na ***strani 261***.

236. Dokument se može naći kod A.H. Chamseddine, A. Connes & V. Mukhanov, *Geometry and the quantum: basics*, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/1411.0977 i kod A.H. Chamseddine & A. Connes, *Why the standard model*, Journal of Geometry and Physics **58**, strane 38–47, 2008, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/0706.3688. Citirano na ***strani 261***.

237. Jakobijevi prstenovi su prikazani, na primer, kao animacija koja se može videti na veb strani www.prestidigitascience.fr/index.php?page=anneaux-de-jacob. Oni su već bili objavljeni u knjizi od

Tom Tit, *La science amusante*, 1870, a slike su bile preštampane u popularne naučne knjige od Edi Lammers, i, skoro ceo vek kasnije, čak i u matematičkoj rubrici i u jednoj od knjiga od Martin Gardnera. Videti takođe veb stranu www.lhup.edu/~dsimanek/scenario/toytrick.htm. Citirano na ***strani 262***.

238. P. Pieranski, S. Przybyl & A. Stasiak, *Tight open knots*, European Physical Journal E **6**, strane 123–128, 2001, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/physics/0103016. Citirano na ***stranama 287*** i ***340***

239. R. Boughezal, J. B. Tausk & J. J. van der Bij, *Three-loop electroweak corrections to the W-boson mass and* $\sin^2\theta_{\text{eff}}$ *in the large Higgs mass limit*, Nuclear Physics B **725**, strane 3–14, 2005, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/hep-ph/0504092. Citirano na ***strani 269***.

240. Izračunavanja je izvršio Eric Rawdon uz pomoć Rob Sharein. Citirano na ***strani 270***.

241. Izračunavanja su izvršili Eric Rawdon i Maria Fisher. Citirano na ***stranama 269, 271*** i ***272***

242. Mase kvarkova na Plankovoj energiji su iz privatne komunikacije Xing Zhizhong and Zhou Shun. Oni su izračunali prema postupku prikazanom u *Quark mass hierarchy and flavor mixing puzzles*, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/1411.2713 i Zhizhong Xing, He Zhang & Shun Zhou, *Updated values of running quark and lepton masses*, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/0712.1419. Citirano na ***stranama 271*** i ***272***.

243. Videti kod H. Fritzsch, A.D. Ozer, *A scaling law for quark masses*, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/hep-ph/0407308. Citirano na ***strani 271***.

244. K.A. Meissner & H. Nicolai, *Neutrinos, axions and conformal symmetry*, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/0803.2814. Citirano na ***stranama 273*** i ***274***.

245. M. Shaposhnikov, *Is there a new physics between electroweak and Planck scale?*, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/0708.3550. Citirano na ***strani 274***.

246. Y. Diao, C. Ernst, A. Por & U. Ziegler, *The roplength of knots are almost linear in terms of their crossing numbers*, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/0912.3282. Citirano na ***strani 276***.

247. H. Fritzsch & Z. -Z. Xing, *Lepton mass hierarchy and neutrino mixing*, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/hep-ph/0601104. Citirano na ***strani 279***.

248. Efekti mešanja neutrina, to jest, oscilacije neutrina, bili su izmereni u brojnim eksperimentima od 1960-ih godina nadalje; navažniji eksperimenti izvršeni su u Super-Kamiokande u Japanu, kao i u Sudbury Neutrino Observatory u Kanadi. Videti ***Ref. 227***. Citirano na ***strani 279***.

249. M. Fukugita & T. Yanagida, *Baryogenesis without grand unification*, Physics Letters B **174**, strane 45–47, 1986. Citirano na ***strani 280***.

250. J.M. Cline, *Baryogenesis*, preprint je na veb strani axiv.org/abs/0609145. Citirano na ***strani 280***.

251. Pojavilo su se u literaturi nekoliko tvrdnji da se konstante veza menjaju sa starošću svemira**.** Prva je bila od J.K. Webb, V.V. Flambaum, C.W. Churchill, M.J. Drinkwater & J.D. Barrow, *A search for time variation of the fine structure constant*, Physical Review Letters **82**, strane 884–887, 1999, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/astro-ph/9803165. Nijedna od ovih tvrdnji nije bila potvrđena u merenjima koja su usledila. Citirano na ***strani 282***.

252. Da su čvrsti zapleti u uzajamnoj vezi sa nasumičnim zapletima prvi su pokazali V. Katritch, J. Bednar, D. Michoud, R.G. Sharein, J. Dubochet & A. Stasiak, *Geometry and physics of knots*, Nature **384**, strane 142–145, 1996. To je potvrđeno kod E. J. Janse van Rensburg, E. Orlandini, D.W. Sumners, M.C. Tesi & S.G. Whittington, *The writhe of knots in the cubic lattice*, Journal of Knot Theory and its Ramifications **6**, strane 31–44, 1997. Citirano na ***stranama 286*** i ***287***.

253. Kvazi-kvantifikovanje prevoja otkrio je V. Katritch, J. Bednar, D. Michoud, R.G. Sharein, J. Dubochet & A. Stasiak, *Geometry and physics of knots*, Nature **384**, strane 142–145, 1996. Videti takođe P. Pieranski, *In search of ideal knots*, strane 20–41, kao i A. Stasiak, J. Dubochet, V. Katritch & P. Pieranski, *Ideal knots and their relation to the physics of knots*, strane 1–19, oba se nalaze kod A. Stasiak, V. Katritch & L.H. Kauffman, editori, *Ideal Knots*, World Scientific, 1998. Najpedagoškija je P. Pieranski & S. Przybyl, *Quasi-quantization of writhe in ideal knots*, European Physical Journal E **6**, strane 117–121, 2001, preprint se nalazi na veb strani arxiv.org/abs/physics/0102067. Videti takođe C. Cerf & A. Stasiak, *Linear behavior of the writhe*

versus the number of crossings in rational knots and links, strane 111–126, kod M. I. Monastyrsky editor, *Topology in Molecular Biology*, 2007. Kvazi-kvantifikovanje i posebno odsustvo precizne kvantifikacije, otkrili su 2010. godine T. Ashton, J. Cantarella, M. Piatek & E. Rawdon, u ličnim komunikacijama. Citirano na ***strani 287***.

254. Verovatnoća nasumičnih usmerenja izračunata je uz pomoć Tyler Spaeth i Ronan Lamy, koriščenjem idealnih oblika čvorova koja je dao Jason Cantarella. Izračunavanja su dala sledeće relativne veličine oblasti sa različitim brojevima ukrštanja i uvijanja za otvoren trolisni čvor i za otvoren čvor oblika osmice.

Prevoj	**2**	**3**	**4**	**5**
Broj ukrštanja				
3	0	0,485	0	0
4	0,00046	0	0,392	0
5	0	0,045	0	0
6	0	0	0,076	0
7	0	0,00022	0	0
8	0	0	0,00011	0
9	0	0,000007	0	0
10	0	0	0,000002	0
11	0	0	0	0,000004
12	0	0	0	0
13	0	0	0	0,000002

Ovo su verovatnoće usmeranja čvorova sa zadatim prevojem i brojem ukrštanja za čvrst otvoren trolisni čvor 3_1. Očekuju se da su manji brojevi veštačke tvorevine izračunavanja.

Prevoj	**-1**	**0**	**1**
Broj ukrštanja			
4	0	0,561	0
5	0,001	0	0,00083
6	0	0,296	0
7	0,0004	0	0,00065
8	0	0,083	0
9	0,00038	0	0,00038
10	0	0,043	0,000002
11	0,000087	0	0
12	0	0,013	0,0001
13	0	0	0
14	0	0,00008	0,00004
15	0	0	0
16	0	0,000005	0

Ovo su verovatnoće usmerenja čvorova sa zadatim uvijanjem i brojem ukrštanja za uski otvoren čvor oblika osmice 4_1. Granica preciznosti izračunavanja jasno je primetna.

Nedostatak preciznosti je usled nedostatka preciznosti raspoloživog oblika zapleta čvora. Verovatnoća nasumičnih promena usmerenja čvora tada se uzima iz vrednosti datih u ovim tabelama. Pošto je čvor uzan, dobra je približna predpostavka da može da se napravi razlika između I poteza Rajdemajstera i II poteza Rajdemajstera bez dvoumljenja – nasuprot slučaju labavih čvorova, gde to nije moguće – pomoću prevoja i broja ukrštanja na početku i na kraju usmerenja. Citirano na ***strani 288***.

255. V. Arnold, *Topological Invariants of Plane Curves and Caustics*, American Mathematical Society, 1994. Citirano na ***strani 290***.

256. D. Hilbert, *Über das Unendliche*, Mathematische Annalen **95**, strane 161–190, 1925. Citirano na ***strani 296***.

257. Knjiga *Book of Twenty-four Philosophers*, cca. 1200, pripisuje se bogu Hermesu Trismegistosu, ali je ustvari napisana u srednjem veku. Tekst može da se nađe kod F. Hudry, ed., *Liber viginti quattuor philosophorum*, Turnholt, 1997, u seriji *Corpus Christianorum, Continuatio Mediaevalis*, CXLIII a, tome III, part 1, o projektu Hermes Latinus edition koji je vodio P. Lucentini. Postoji Spinozina prevara u citatu: umesto "priroda" u orginalu stoji "bog". Razlog zbog kojeg je ova zamena prihvatljiva, dat je u predhodnom tekstu. (***Izazov 81s*** na ***strani 314***). Citirano na ***strani 300***.

258. Kao razočaravajući primer, videti Gilles Deleuze, *Le Pli – Leibniz et le baroque*, Les Editions de Minuit, 1988. U ovoj nerazumljivoj, potpuno otkačenoj knjizi, autor se pretvara da istražuje upletenost ideje da je prevoj (na engleskom "fold", na francuskom "le pli ") osnovni entitet materije i "duše". Citirano na ***strani 301***.

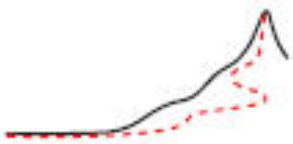
259. Werner Heisenberg, *Der Teil und das Ganze*, Piper, 1969. Teks dobro pokazuje koliko može da bude dosadna lična filozofija znamenitog fizičara. Citirano na ***strani 301***.

260. John Barrow je pisao autoru rekavši da je on možda prvi upotrijebio sliku majice, u Giffordovim predavanjima u Glazgovu 1988. koji su prethodili njegovoj knjizi John D. Barrow, *Theories of Everything: The Quest for Ultimate Explanation*, 1991. Dodao je da se nikada ne može biti siguran. Citirano na ***strani 303***.

261. Rene Descartes, *Discours de la méthode*, 1637. On je koristio i razmatrao ponovo rečenicu u njegovim *Méditations métaphysiques* 1641, i njegovim *Les principes de la philosophie* 1644. Ove knige su uticale na mnoge mislioce u narednim vekovima. Citirano na ***strani 305***.

262. D. D. Kelly, *Sleep and dreaming*, u *Principles of Neural Science*, Elsevier, New York, 1991. Dokument sažima sve eksperimente koje su izvele brojne osobe i pokazao da čak i u toku sna ljudi procenjuju trajanje vremena koje odgovara onom merenom pomoću časovnika. Citirano na ***strani 306***.

263. Astrid Lindgren je izgovorila ovo 1977. godine u svom govoru prilikom jubileja pedesetgodišnjice Oetinger Verlag, njenog izdavača u Nemačkoj. Orginal na nemačkom glasi: "*Alles was an Großem in der Welt geschah, vollzog sich zuerst in der Phantasie eines Menschen, und wie die Welt von morgen aussehen wird, hangt in großem Maß von der Einbildungskraft jener ab, die gerade jetzt lesen lernen*"[1]. Rečenica može da se nađe u Astrid Lindgren "*Deshalb brauchen Kinder Bücher*", Oetinger Almanach Nr. 15, strana 14, 1977. Citirano na ***strani 308***.



[1] "Sve velike stvari koje su se desile na svetu prvo su se dogodile u mašti jedne osobe, a kako će izgledati svet sutrašnjice u velikoj meri zavisi od snage maštanja onih koji upravo tek sada uče da čitaju".

ZASLUGE

PRIZNANJA

Ovaj deo knige bio je prvi objavljen 2009. godine. Sve do 2014. godine ni jedna osoba nije pomogla u razvoju ili istraživanju modela niti. Sergej Fadajev je 1914. godine predložio da se ponovo razmisli o modelu niti za W i Z bozone. Rezultati ovog poboljšanja prvi put su uključeni u izdanje 28, 2015. godine. Ovi predlozi su pokrenuli više poboljšanja, uključujući mnogo jasniju povezanost između tri Rajdemajsterova poteza i srednjih mernih bozona tri interakcije merila. Izračunavanje konstante fine strukture postalo je složenije, ali još uvek moguće.

Nekoliko drugih osoba pomoglo je da se postigne napredak u pojedinim pitanjima ili je ohrabrivalo. U prvoj polovini teksta, stimulišuće razmatranje sa Lukom Bombelijem (Luca Bombelli) 1990-ih godina, omoglo je da se osmisli poglavlje o protivrečnostima između opšte teorije relativnosti i kvantne teorije, kao i poglavlje o razlikama između vakuuma i materije. U godinama do 2005., pokretačka razmatranja sa Saverio Pascazio, Corrado Massa i posebno sa Steven Carlip pomomogla su da dobije oblik poglavlje o graničnim vrednostima.

Druga polovina teksta, o modelu niti, duguje mnogo Luis Kaufman (Louis Kauffman). Ideje koje se nalaze u njegovoj knjizi i u dokumentima podstakle su ideju za ovaj tekst mnogo pre no što smo se susreli i razmenili poštu. Njegovi radovi – koji su dostupni na homepages.math.uic.edu/~kauffman/ i njegove knjige vredni su da se pročitaju; među njima je zadivljujući dokument *Knot Logic* i divna knjiga *Knots and Physics*, World Scientific, 1991. Njegove ideje o čvorovima, o kvantnoj teoriji, o merenjima, o fizici čestica, o teoriji skupova i o temeljnim pitanjima uverila su me da su niti obećavajući smer u traženju konačne teorije. Širina Luisovog znanja i interesovanja, dubina njegovih strasti i njegova topla čovečnost su za primer.

Zahvaljujem se Eriku Raudonu (Eric Rawdon) i Mariji Fišer (Maria Fisher) za njihov izračunavanje dužine užeta. Takođe se zahvaljujem Klausu Ernstu (Claus Ernst), Andržeju Stasiaku (Andrzej Stasiak), Ralfu Mecleru (Ralf Metzler) i Jasonu Kantareli (Jason Cantarella) za njihov doprinos i plodonosno razmatranje koje smo imali.

Hans Aschauer, Roland Netz, Gerrit Bauer, Stephan Schiller, RichardHoffmann, Axel Schenzle, ReinhardWinterhoff, AldenMead, Franca Jones-Clerici, Damoon Saghian, Frank Sweetser, Franz Aichinger, Marcus Platzer, MilesMutka, i mnoge osobe koje su želele da ostanu anonimne, prižili su mi vrednu pomoć. Zahvaljujem se i mom nastavniku matematike i fizike u srednjoj školi, Helmutu Vinderlingu (Helmut Wunderling) za vatru koju je podhranjivao u meni.

Slog knjige i izgled je rezultat profesionalnih saveta Urlich Dirr. Štampa je mnogo poboljšana uz pomoć Johannes Kuster i njegovog fonta Minion Math. Izgled knjige i njene veb strane duguju takođe predlozima i podršci moje supruge Britta.

Takođe se zahvaljujem zakonodavcima i poreskim obveznicima u Nemačkoj, gde je, nasuprot drugim zemljama, dopušteno stanovnicima da koriste lokalne univerzitetske biblioteke. Od 2007. do 2011. godine elektronsko izdanje i distribuciju teksta Planina Kretanja velikodušno je podržavala Fondacija Klaus Čira (Klaus Tschira Foundation).

ZASLUGE ZA FILM

Animacije trika sa opasačem na ***slici 20*** i na ***slici*** i ***21*** su autorsko pravo i ljubaznost Greg Egan; one mogu da se nađu na njegovoj veb strani www.gregegan.net/APPLETS/21/21.html. Takođe se zahvaljujem Greg Eganu za proširenje njegovog apleta tako da pokazuje i drugu mogućnost od mnogih mogućih za trik sa opasačem.

Lepa animacija trika sa opasačem na ***slici 22*** i lepa i do sada jedinstvena animacija razmene fermiona na ***slici 28*** su autorsko pravo and ljubaznost Antonio Martos. On je nju napravio za ovaj tekst. Može da se nađe na vimeo.com/62228139 i na vimeo.com/62143283. Animacija obrtanja plave lopte privezane na list na ***slici 23*** bila je napravljena za ovu knjigu, a jedan deo softvera se nalazi na na veb strani www.ariwatch.com/VS/Algorithms/DiracStringTrick.htm.

Animacija trika sa opasačem, prepuna boja, na ***slici 25*** and ***slici 26*** su ***autorsko pravo*** i ***ljubaznost*** Jason Hise i nalaze se na veb strani www.entropygames.net, a bile su napravljene za ovaj tekst i za veb stranu Wikimedia Commons.

Film sa trikom lanca prstenova na ***slici 104*** je autorsko pravo i ljubaznostof Franz Aichinger. Animacije Greg Egana i film o padanju na lancu prstenova uključeni su u pdf datateku pomoću kopiranja softverom iShow U podržanog od Neil Clayton sa veb strane www.shinywhitebox.com/.

ZASLUGE ZA SLIKE

Fotografija istočne padine vrha Langtang Lirung u Nepalskim Himalajima, prikazana na prednjim koricama knige, je ljubaznost and autorsko pravo Kevin Hite i nalazi se na njegovom blogu thegettingthere. com. Fotografija projekta UltraDeep Field na ***strani 13*** is ljubaznost of NASA. Crtež Maurits Escher na ***slici 2*** je autorsko pravo M.C. Escher Heirs, c/o Cordon Art, Baarn, The Netherlands, koji su dali ljubazno odobrenje za njegovo korišćenje. Fotografija sa pasoša Andreja Saharova na ***slici 3*** je njegovo lično autorsko pravo. Fotografija uređaja za aferezu na ***slici 24*** je ljubaznost Wikimedia. Crtež Peter Battey-Pratt i Thomas Racey trika sa opasačem na ***slici 44***, Uzet iz ***Ref. 170***, je ljubaznost i autorsko pravo Springer Verlag. Prikazi uskih otvorenih čvorova na ***slici 113*** su ljubaznost i autorsko pravo Piotr Pieranski, i nalaze se u ***Ref. 238***. Grafik promene konstanti veza na ***slici 112*** je ljubaznost i autorsko pravo Wim de Boer i uzet je sa njegove veb strane www-ekp.physik.uni-karlsruhe.de/~deboer/. Na ***slici 115***, fotografija planine Cerro Torre je autorsko pravo i ljubaznost Davide Brighenti, i nalazi se na Wikimedia; fotografija zelenog brega na isoj slico je autorsko pravo i ljubaznost of Myriam70, a nalazi se na njenoj veb strani www.flickr.com/photos/myriam70. Fotografija na zadnjim koricama knjige, guštera basilisk koji trći po vodi, je ljubaznost i autorsko pravo belgijske grupe TERRA vzw i nalazi se na njihovoj veb strani www.terravzw.org. Svi crteži su autorsko pravo Christoph Schiller.

PLANINA KRETANJA

Pustolovine fizike – Vol. VI

Model niti – Predpostavka objedinjavanja

Koje je poreklo boja?
Koji problemi u fizici nsu rešeni do 2000. godine?
Šta bi moglo da bude njihovo rešenje?
Na kojem rastojanju dvaju tačaka postaje nemoguće da se nađe mesto za treću između njih?
Kakvo je najčudnovatije putovanje moguće?
Zašto postoje promene i kretanje?

Odgovarajući na ova i ostala pitanja o kretanju ova knjiga daje zabavan i mozgoloman uvod u potrazi za konačnom teorijom fizike: ona predstavlja ***model niti***. Zasnovani na jednostavnom načelu, niti prikazuju kvantnu teoriju, standardni model fizike čestica o opštu teoriju relativnosti. Niti ne ostavljaju prostor za alternativne teorije, u saglasnosti su sa podacima eksperimenata i omogućavaju izračunavanje konstante fine strukture.

Christoph Schiller, PhD Université Libre de Bruxelles, je fizičar i popularizator fizike. Napisao je ovu knjigu za studente, predavače i za svakog ko se interesuje za savremena istraživanja o osnovama fizike

Pdf datateka je dostupna besplatno na

www.motionmountain.net