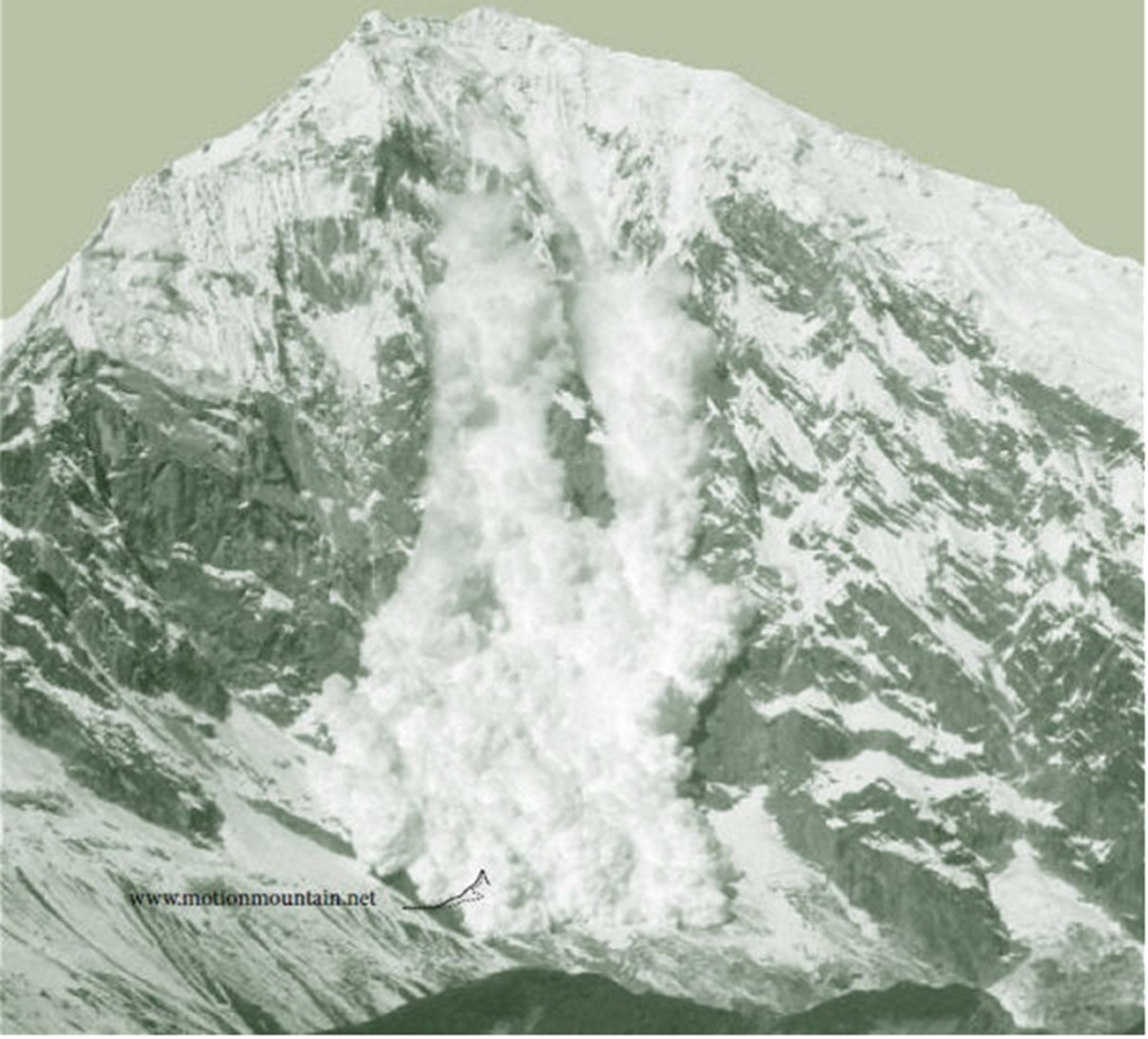
Christoph Schiller

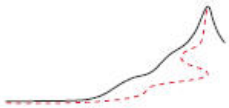
Preveo: Dragoš Vulović

PLANINA KRETANJA

PUSTOLOVINA FIZIKE – VOL. V

KRETANJE UNUTAR MATERIJE
ZADOVOLJSTVO, TEHNOLOGIJA I ZVEZDE





Naslov orginala:

Christoph Schiller

Motion Mountain

The Adventure of Physics

Volume V

Motion Inside Matter –
Pleasure, Technology and Stars

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 V

Kretanja unutar materije –
zadovoljstvo, tehnologija i zvezde

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 strani 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 serija knjiga je za svakog ko je radoznao u pogledu fizike. Zašto i kako se kreću stvari, ljudi, životinje, slike ili prazan prostor? Odgovor nas dovodi do više pustolovina, a ova knjiga prikazuje one pustolovine o unutrašnjim svakodnevnim kretanjima.

Kretanje unutar tela – živih i mrtvih – je malo: zbog toga je opisano kvantnom teorijom. Kvantna teorija opisuje sva kretanja sa kvantom rada Da bi bio ***jednostavan*** tekst je fokusiran na pojmove, pri čemu je matematika zadržana na neophodnom minimumu. Razumevanje principa fizike ima prednost nad korišćenjem formula u izračunavanjima. Ceo tekst je unutar oblasti dodiplomskih studija.

Da bi bio ***savremen*** tekst je obogaćen brojnim draguljima – kako teoretskim tako i praktičnim – koji su rasprostranjeni širom naučne literature

Da bi bio ***privlačan*** tekst nastoji da preplaši čitaoca što je više moguće. Čitanje knjige iz opšte fizike treba da bude slično odlasku na predstavu mađioničara. Gledamo, iznenadjeni smo, ne verujemo sopstvenim očima, razmišljamo i na kraju shvatamo trik. Kada posmatramo prirodu imaćemo često ista iskustva. Zaista, svaka stranica predstavlja za čitaoca najmanje jedno iznenadjenje ili provocira čitaoca da o tome razmisli. Predloženi su i brojni interesantni izazovi.

Moto teksta, *"Die Menschen stärken, die Sachen klären"*, poznata izreka Hartmuta von Hentinga o pedagodiji, prevodi se kao *"Osnažite ljude, razjasnite stvari"*. Razjasniti stvari – i oslanjati se samo na istinu – zahteva hrabrost, kao što promena navike razmišljanja izaziva strah, sakriven često besom. Ali savladavanjem naših strahova naša snaga se povećava. Takodje doživljavamo jače i lepše emocije. Sve velike avanture u životu omogućavaju to, a otkrivanje kretanja je jedna od njih. Uživajte u tome.

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.

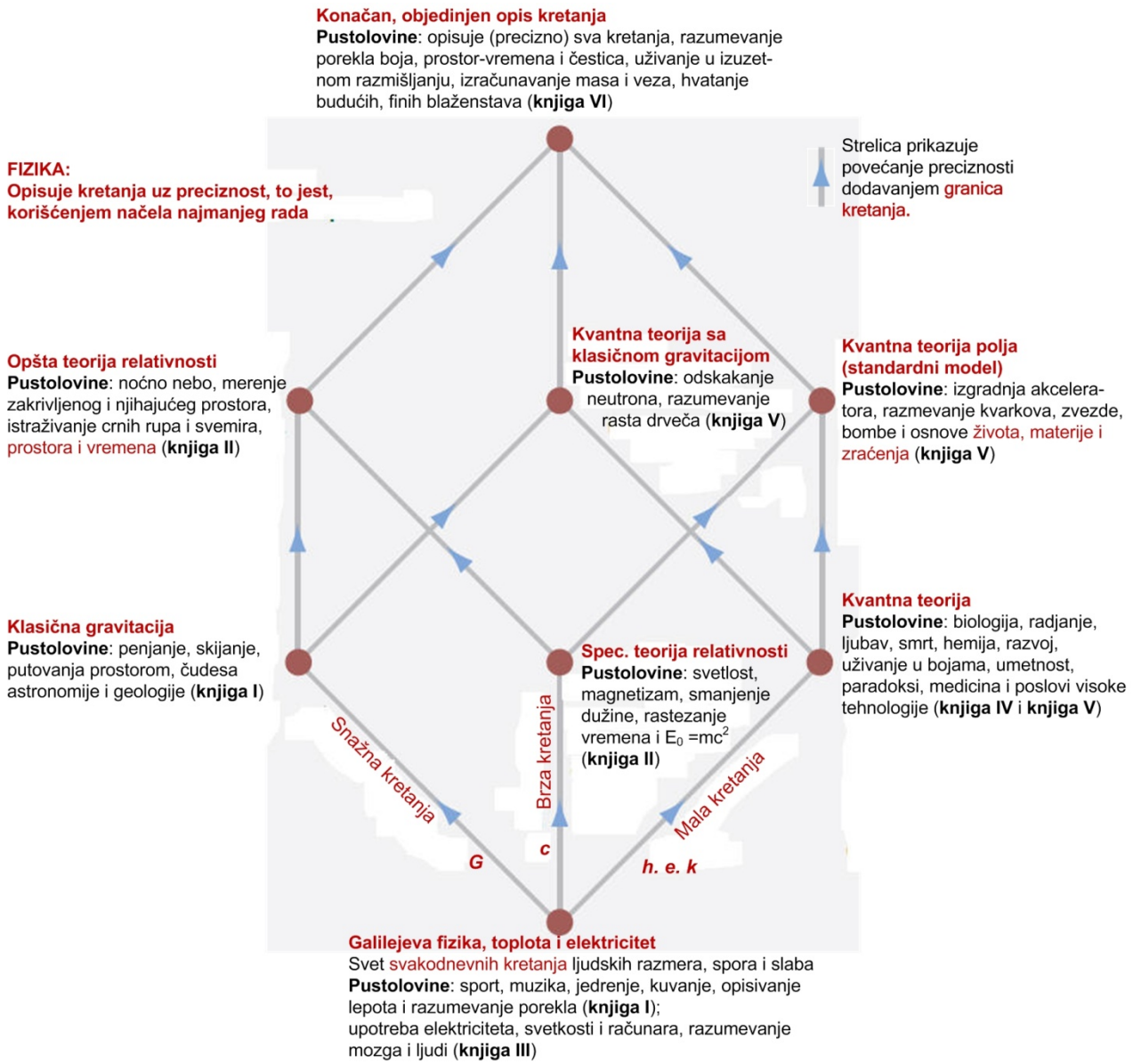
Unapred se zahvaljujem svim čitaocima koji me budu izvestili o svojim zapažanjima i svim mogućim poboljšanjima putem elektronske pošte dvulovic@sbb.rs. Time će doprineti da tekst prevoda postane još kvalitetniji.

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 Kompletma mapa fizike, nauke o kretanju. Počinje se od donjeg dela slike od svakodnevnih kretanja i pokazane su veze sa poljima savremene fizike: veze su određene za velika i snažna kretanja gravitacionom konstantom ***G***, za brza kretanja brzinom svetlosti ***c*** i za mala kretanja Plankovom konstantom ***ħ***, elementarnim naelektrisanjem ***e*** i Bolzmanovom konstantom ***k***.

KORIŠĆENJE 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 veza može ponovo da se nađe na veb strani preprinta www.archive.org, gde su sačuvane kopije starijih stranica interneta. U besplatnom izdanju, koje se može učitati sa www.motionmountain.net u formatu pdf, 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].

[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.)

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 dodati i označeni su sa (ny)

SAVETI ZA ONE KOJI UČE

Učenje povećava inteligenciju i omogućava osećaj postignića. Prema tome, učenje iz knjige, posebno one o prirodi treba da bude delotvorno i zabavno. Izbegavajte kao kugu metode lošeg učenja! Ne koristite marker ili olovku da biste podvlačili tekst ili stranicu. To je trošenje vremena, pruža lažni osečaj udobnosti, a sam tekst čini nečitljivim. I ne učite sa ekrana. Posebno nikad, ali nikad, ne učite sa interneta, sa video zapisa i svih igara koje su otrov i droga za mozak. Mobilni telefoni su rasturači droge koji čine ljude zavisnicima i sprečavaju učenje. Niko ne nauči efikasno markirani tekst ili gledanjem u ekran niti može da u tome uživa.

Iz ličnog iskustva, kako učenika tako i predavača, jedina metoda koja nikada nije omanula u pretvaranju neuspešnog učenika u uspešnog je: ako čitate tekst radi učenja, ponovite svaki pročitani odeljak ***naglas sopstvenim rečima i slkama.*** Ukoliko niste u stanju da to učinite, pročitajte odeljak ponovo. Ovo ponavljajte sve dok naglas jasno, sopstvenim rečima i slikama, ne razumete ono što ste pročitali. I ***uživajte*** dok izgovarate glasno. To možete da radite sami, ili sa prijateljem, u sobi, ili dok šetate. Ako ovo uradite sa bilo čim što čitate, znatno ćete smanjiti vreme učenja i čitanja, uživaćete još više učeći iz dobrih tekstova, a mnogo manje ćete omrznuti loše tekstove. Majstori ovu metodu mogu da koriste tihim glasom, čak i dok slušaju predavanja, čime izbegavaju pravljenje zabeleški.

SAVETI ZA PREDAVAČE

Predavač treba da voli učenike i da voli da ih vodi u istraživanje oblasti koju su odabrali. Njegov ili njen entuzijazam za posao ključ je uspešnog posla. Ako ste predavač, pre no što počnete lekciju, predstavite je slikom, osetite je i recite sebi koliko uživate u temi predavanja; zatim opišite osećaj i recite sebi kako ćete voditi svakog od učenika da uživa u toj temi isto koliko i vi. Izvršite ovu vežbu detaljno, svaki put. Tako ćete smanjiti poteškoće sa skupom slušalaca i povećati vaš uspeh kao predavača.

Ova knjiga nije napisana imajući na umu ispite; ona je napisana tako da je i predavači i učenici ***shvate*** i da ***uživaju*** u fizici, nauci o kretanju.

POVRATNE INFOMACIJE I PODRŠKA

Poslednje izdanje ovog teksta je besplatno, a tako će i ostati, za učitavanje na internetu.

Bilo bi mi drago da dobijem elektronsku poštu od vas na fb@motionmountain.net, posebno za stedeća pitanja:

- Šta je bilo nejasno i trebalo bi da se popravi? (***Izazov 1s***).
- Koja priča, tema, zagonetka ili filma su vam nedostajali?

Takođe i pomoć na neke od navedenih stavki navedenih na veb strani www.motionmountain.net/help.html dobro je došla. Sve povratne informacije biće iskorišćene da popravi sledeće izdanje. Dobodošle su sve vaše povratne informacije putem pošte ili slanjem pdf datateke sa dodanim žutim primedbama, da se obezbede slike ili fotorafije, ili doprinos wiki ispravkama na veb strani. Ako biste želeli da prevedete neko poglavlje iz knjige na vaš jezik, molim vas da me obavestite. U ime svih čitalaca, unapred se zahvaljujem na vašem doprinosu. 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 KRETANJE ZA UŽIVANJE U ŽIVOTU 17
Od kvantne fizike do bioloških mašina i minijaturizacije 17
Reprodukcija 19
Kvantne mašine 20
Kako se krećemo? –Molekulski motori 21
Linearni molekulski motori 22
Obrtni molekulski motor: ATP sinteza 24
Obrtni motori i prekid pariteta 25
Zanimljivosti i zabavni izazovi o biologiji 26
Fizika zadovoljstva 32
Nervi i mozak 35
Živi časovnici 36
Kada časovnici postoje 37
Preciznost časovnika 38
Zašto su predviđanja tako teška, posebno budućnosti? 39
Raspad i zlatno pravilo 40
Sadašnjost u kvantnoj teoriji 41
Zašto možemo da opažamo kretanje? 41
Mirovanje i kvantni Zenonov efekt 42
Svest – rezultat kvanta rada 42
Zašto možemo da opažamo kretanje? – Ponovo 43
Zanimljivosti i zabavni izazovi o doživljavanju kvanta 44
Zaključak o biologiji i zadovojstvu 47

2 PROMENA SVETA KVANTNIM EFEKTIMA 49
Hemija – od atoma do DNK 49
Atomske veze 50
Ribonukleinska kiselina i deoksinukleinska kiselina 52
Zanimljivosti i zabavni izazovi o hemiji 54
Nauka o materijalima 55
Zašto pod ne pada? 56
Stene i kamenje 56
Obrazovanje kristala 57
Neki interesantni kristali 60
Kako možemo da gledamo kroz materiju? 66
Šta je potrebno da bi materija postala nevidljiva? 68
Šta se kreće u materiji? 68
Zanimljivosti i zabavni izazovi iz nauke o materijalima 69
Kvantna tehnologija 78
Transistori 78
Kretanje bez trenja – superprovodnost i superprotočnost 79
Razlomljeni kvantni Halov efekt 82
Kako se matrija ponaša na najnižim temperaturama? 84
Laseri i drugi emiteri vektorskog bozona sa spinom 1 84
Od svetilke do lasera 87
Tri prevare sa sijalicama 88
Primena lasera 89
Izazovi, snovi i zanimljivosti iz kvantne tehnologije 90
Zaključak o promeni sveta kvantnim efektima 92

3 KVANTNA ELEKTRODINAMIKA – POREKLO VIRTUALNE STVARNOSTI 93
Brodovi ogledala i Kazimirov efekt 93
Lambov pomak 95
Lagranžijan kvantne elektrodinamike i njegove simetrije 96

Interakcije i virtualne čestice ... 97
Da li je energija vakuuma beskonačna ili nula? ... 97
Pokretna ogledala ... 97
Fotoni udaraju u fotone ... 98
Da li je vakuum kupatilo? ... 99
Renormalizacija – Zašto je elektron tako lak? ... 99
Zanimljivosti i zabavni izazovi iz kvantne elektrodinamike ... 100
Kako možemo da se krećemo po savršenom ledu? – Konačna provera fizike ... 102
Zaključak o kvantnoj elektrodinamici ... 102
Otvorena pitanja u kvantnoj elektrodinamici ... 104

4 KVANTNA MEHANIKA SA GRAVITACIJOM – PRVI KORACI ... 107
Atomi koji padaju ... 107
Igranje stonog tenia sa neutronima ... 107
Gravitacijska faza talasne funkcije ... 108
Gravitacijski Borov atom ... 109
Zanimljivosti o kvantnoj teoriji i gravitaciji ... 109
Gravitacija i granice nereda ... 110
Merenje ubrzanja pomoću termometra; zraćenje Fuling–Dejvis–Unru ... 111
Crne rupe nisu crne ... 112
Životni vek crnih rupa ... 114
Srne rupe su svuda ... 114
Očaravajuća eksplozija gama zraka ... 115
Materijalne osobine crnih rupa ... 116
Kako crne rupe isparavaju? ... 117
Paradoks informacije crnih rupa ... 117
Još paradoksa ... 118
Kvantna mehanika gravitacije ... 119
Da li gravitacija postoji? ... 119
Pena prostor-vremena ... 120
Dekoherencija prostor vremena ... 120
Kvantna teorija kao neprijatelj naučne fantastike ... 121
Nepostojanje vakuuma znači da nema čestica ... 122
Zaključak o kvantnoj teoriji i gravitaciji ... 122

5 STRUKTURA JEZGRA – NAJGUŠĆI OBLAK ... 123
Čudo fizike – snimanje magnetnom rezonansom ... 123
Veličina jezgra i otkriće radioktivnosti ... 124
Atomska jezgra su složena ... 128
Atomska jezgra mogu da se kreću sama – kosmički zraci ... 131
Nuklearni raspad – više od radioaktivnosti ... 135
Radiometrijsko datiranje ... 137
Zašto je u paklu vruće? ... 139
Atomska jezgra mogu da stvaraju kompozitne materijale ... 139
Atomska jezgra imaju boje i oblike ... 140
Četiri vrste kretanja u nuklerarnoj oblasti ... 141
Jezgra reaguju ... 141
Bombe i nuklearni reaktori ... 142
Zanimljivosti i izazovi o jezgrima i radioaktivnosti ... 142
Zaključak o atomskim jezgrima ... 149

6 SUNCE, ZVEZDE I RAĐANJE MATERIJE ... 151
Sunce ... 151
Kretanja u Suncu i na njemu ... 152
Zašto zvezde sjaje ... 155
Zašto reaktori sa fuzijom nisu još uobičajeni? ... 156
Odakle su došli naši atomi? ... 158
Zanimljivosti o Suncu i zvezdama ... 160
Zaključak o zvezdama i nukleosintezi ... 162

7 JAKA INTERAKCIJA – UNUTAR JEZGRA I NUKLEONA 163
Slaba strana jake interakcije 163
Vezano kretanje, zoološki vrt čestica i model kvarka 164
Suština kvantne hromodinamike 166
Lagranžijan kvantne hromodinamike 167
Eksperimentalne posledice modela kvarkal 169
Ograničavanje kvarkova – i slonovi 170
Asimptotska sloboda 172
Veličine i mase kvarkova 173
Masa, oblik i boja protona 174
Zanimljivosti o jakoj interakciji 175
Zaključak o kvantnoj hromodinamici i njena otvorena pitanja 177

8 SLABA NUKLEARNA INTERAKCIJA I SPRETNOST PRIRODE 179
Preobražaj elementarnih ćestica 179
Slabosti slabe nuklearne interakcije 180
Razlikovanje levog od desnog 183
Razlikovanje čestica i anti čestica, narušavanje CP pariteta 185
Slab naboj i mešanje 185
Prekid simetrije – i odsustvo elektroslabog objedinjavanja 187
Lagranžijan slabih i elektromagnetnih interakcija 188
Zanimljivosti o slaboj interalciji 190
Zaključak o slaboj interakciji 193

9 STANDARDNI MODEL FIZIKE ČESTICA – KAKAV SE VIDI NA TELEVIZIJI 195
Zaključak i otvorena pitanja 198

10 SNOVI O OBJEDINJAVANJU 201
Velika unifikacija 201
Upoređivanje predpostavki i podataka 201
Stanje velike unifikacije 202
Traženje viših simetrija 203
Supersimetrija 203
Ostali pokušaji 204
Dvojnost – najneverovatnije simetrije prirode 204
Kolektivni aspekti kvantne teorije polja 205
Zanimljivosti o objedinjavanju 207
Zaključak o matematici i višim simetrijama 207

11 BAKTERIJE, MUVE I ČVOROVI 209
Bumbari i ostali minijaturni leteći sistemi 209
Plivanje 213
Obrtanje, mačka koja pada i teorija promene oblika 216
Plivanje u zakrivljenom prostoru 218
Izvrtanje lopte iznutra napolje 219
Oblaci 220
Vrtlozi i Šredingerova jednakost 221
Prostor-vreme kao fluid 223
Razmeštanje i prostor-vreme kao čvrsto telo 224
Polimeri 225
Čvorovi i veze 227
Najteži otvoreni problemi koje možete da ispričate svojoj babi 229
Zanimljivosti i zabavni izazovi o čvorovima i kolebljivim objektima 229
Zaključak o kolebljivim objektima 232

12 KVANTNA FIZIKA U ORAHOVOJ LJUSCI – PONOVO 235
Kvantna teorija polja u nekoliko rečenica 235
Dostignuća u preciznosti 237
Šta nije objašnjeno u kvantnoj teoriji i opštoj teoriji relativnosti? 238
Kocka fizike 240

Jake emocije zbog kvantne teorije polja i opšte teorije relativnosti ... 241
Šta nas očekuje? ... 243

DODATAK A – JEDINICE, MERENJA I KONSTANTE ... 245
SI merne jedinice ... 245
Smisao merenja ... 247
Plankove prirodne jedinice ... 248
Drugi sistemi jedinica ... 249
Zanimljivosti i zabavni izazovi o mernim jedinicama ... 250
Preciznost i tačnost merenja ... 251
Granice preciznosti ... 252
Fizičke konstante ... 252
Korisni brojevi ... 256

DODATAK B – OSOBINE SLOŽENIH ČESTICA ... 259

DODATAK C – ALGEBRA, OBLICI I GRUPE ... 271

Algebra ... 271
Lijeva algebra ... 273
Razvrstavanje Lijeve algebre ... 274
Topologija – kakvi oblici postoje? ... 275
Topološki prostori ... 275
Mnogostrukost ... 276
Rupe, homotopija i homologija ... 278
Vrste i razvrstavanje grupa ... 279
Lijeve grupe ... 279
Povezanost ... 280
Kompaktnost ... 280
Matematičke zanimljivosti i zabavni izazovi ... 281

IZAZOVI, SAVETI I REŠENJA ... 285

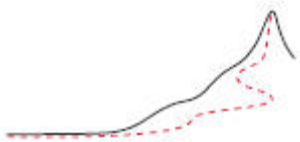
BIBLIOGRAFIJA ... 293

ZASLUGE ... 315

Priznanja ... 315
Zasluge za film ... 318
Zasluge za slike ... 318

KRETANJA UNUTAR MATERIJE - ZADOVOLJSTVO, TEHNOLOGIJA I ZVEZDE

U našem traganju da shvatimo kako se stvari kreću
kao rezultat najmanje vrednosti promene u prirodi, otkrili smo
kako se pojavljuje zadovoljstvo,
zašto pod ne propadne već nastavlja da nas drži,
da su interakcije razmene čestica zračenja,
da materija nije stalna,
kako kvantni efekti povećavaju ljudsko bogatstvo i zdravlje,
zbog čega prazan prostor približava ogledala međusobno
zašto zvezde sjaje,
odakle su došli atomi koji su u nama,
kako kvantne čestice sačinjavaju svet
i zašto plivanje i letenje nisu tako laki.



Poglavlje 1

KRETANJE ZA UŽIVANJE U ŽIVOTU

Ja sam čovek i ništa ljudsko nije mi strano.

Terencije[1]

Pošto smo u predhodnom poglavlju objasnili kvantne efekte, zabavimo se sada ozbiljno ***primenom*** kvantne fizike. Kvant rada $\hbar$ ima značajne posledice u medicini, biologiji, hemiji, nauci o materijalima, inženjerstvu i svetlosti koju emituju zvezde. Isto tako u umetnosti, boje i materijali koje koristi, pa i kreativan proces umetnika, temelje se na kvantu rada. Sa tačke gledišta fizike, sve ove oblasti proučava ***kretanje unutar materije***.

Pre svega, unutar materije zapažamo mala kretanja kvantnih čestica.[2] Stoga je za razumevanje i precizan opis materije neophodna kvantna fizika. U ovome što sledi mi ćemo samo istražiti presek ovih tema. ali će to biti vredno truda. Istraživanje kretanja unutar materije započećemo sa tri posebna oblika koji su za nas važni: život, razmnožavanje i smrt. Pomenuli smo na početku kvantne fizike da nijedan od ovih oblika kretanja ne može da se opiše klasičnom fizikom. (***Vol. IV, strana 17***). Zapravo, život, reprodukcija i smrt su kvantni efekti. Osim toda, svako osećanje, svako čulo, pa stoga i svaka vrsta zadovoljstva, kvantni su efekti. Isto to je tačno i za sve naše aktivnosti. Otkrijmo zašto.

OD KVANTNE FIZIKE DO BIOLOŠKIH MAŠINA I MINIATURIZACIJE

Znamo da se cela kvantna teorija može iskazati jednom rečenicom:

- U prirodi nije zapažen rad ili promena manja od $\hbar = 1{,}1 \cdot 10^{-34}$ Js.

U ovome što sledi, želimo da shvatimo kako ovo zapažanje objašnjava životna zadovoljstva i smrt. Važna posledica kvanta rada je dobro poznata.

- Ako se nešta kreće, načinjeno je od kvantona ili kvantnih čestica.

Korak po korak otkrivaćemo kako se ovaj iskaz odražava na ponašanje živih bića. Ali šta je to živo biće?

Živa bića su fizički sistemi koji ispoljavaju metabolizam, obradu informacija, razmenu informacija, reprodukciju i kretanje. Očigledno, sva ova svojstva slede iz samo jednog, za kojeg ostala obezbeđuju sredstva:

- Živo biće je predmet koji je sposoban da se samoreprodukuje.

Pod samoreprodukcijom podrazumevamo da predmet koristi sopstveni metabolizam za reprodukciju. Na časovima biologije u srednjoj školi možda se zapamtili glavno svojstvo reprodukcije.[3] Reprodukciju karakterišu nasumične promene, pod imenom ***mutacije***, koje ćine da se naredne generacija razlikuje. Statistika mutacije, na primer Mendelov "zakon" nasleđivanja i nepostojanje međustanja, neposredne su posledice kvantne teorije. Drugim rečima, reprodukcija i nasleđivanje su kvantni efekti.

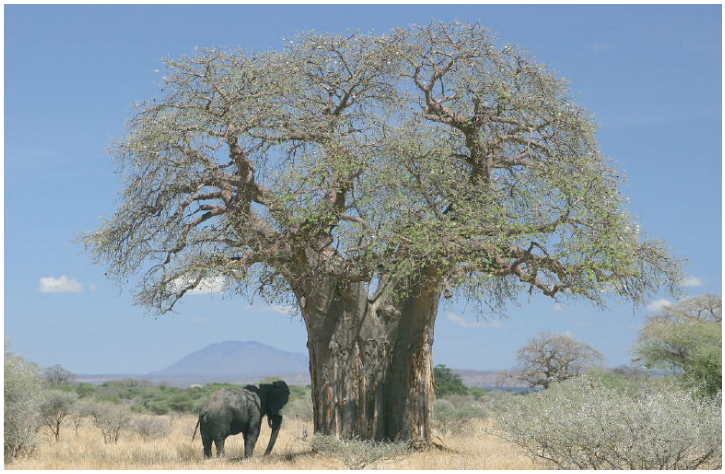
---

[1] Terencije je Publius Terentius Afer (190. pne Carthago – 159. pne Greece). Značajan rimski pesnik. Citat je iz njegovog komada *Heauton Timorumenos*, stih 77

[2] Fotografiju na ***strani 15***, koja prikazuje mehur sapunice, kretanje tečnosti u njemu i boje nastale usled interferencije, snimio je i vlasnik je Jason Tozer za Creative Review/Sony

[3] Postoje primeri predmeta koji se reprodukuju ali koje niko ne može da nazove živim. Možete li naći neki primer? (***Izazov 2s***). Da bi seizbegla nesuglasica, uvek kada se pomene "reprodukcija" u daljem tekstu, uvek će se misliti na "samoreprodukciju"."

Za reprodukciju je neophodan ***rast***, a za rast je neophodan ***metabolizam***. Metabolizam je hemijski proces, pa prema tome kvantni proces, da se iskoristi energija, da se iskoristi materija, ostvari rast, zaleče ozlede i ostvari reprodukcija. (***Strana 49***).



Slika 2 Metabolički rast vodi od jedne ćelije, u prečniku od oko 0,1 mm, do živih bića veličine od 25 m, kao što je baobab ili plavi kit (c Ferdinand Reus, NOAA).

Da bi se reprodukovala, živa bića moraju da imaju sposobnost sopstvenog kretanja. Predmet sposoban da ima sopstveno kretanje se mašina. Bića koja se samoreprodukuju su mašine. Ipak, gorivo je potrebno čak i mašinama koje ne rastu, te im je stoga potreban metabolizam. Sve mašine su zasnovane na kvantnim efektima.

Reprodukcija, rast i kretanje jednostavniji su što je odrastao sistem manji. Prema tome, većina živih bića su izuzetno male mašine za zadatke koje izvršavaju. To je posebno jasno kada se uporede sa mašinama ljudske izrade. Sičušnost živih bića je često začuđujuća, pošto projekt mašina ljudske izrade ima znatno manje zahteve: mašine ljudske izrade ne moraju biti sposobne da se reprodukuju; kao rezultat toga, one ne moraju da budu napravljene od jednog komada materijala, kao što to mora da bude kod svih živih bića. Ali uprkos svim jakim inženjerskim ograničenjima na kojima je život podvrgnut, živa bića drže mnoge svetske rekorde miniaturizacije mašina:

- Mozak ima najveću snagu obrade podataka u odnosu na zapreminu od svih do sada napravljenih računarskih uređaja. Pogledajte samo veličinu šahovskog šampiona Gari Kasparova i veličinu računara protiv kojeg je igrao i izgubio. Ili pogledajte veličinu bilo kojeg računara koji pokušava da govori.
- Mozak ima pamćenje najveće gustine i brzine od svakog dosadašnjeg uređaja. Skup kompakt diskova (CD) ili digitalnih obostranih diskova (DVD) koji bi se uporedili sa mozgom bio bi po zapremini hiljadu puta veći. (***Vol. III, strana 194***).

- Motori u živim bićima su za nekoliko redova veličine manji nego oni u mašinama ljudske izrade. Pomislite samo na mišiće u nogama mrava.
- Kretanje živih bića nadmašuje za red veličine ubrzanja svake mašine ljudske izrade. Nema mašine koja bi se kretala kao skakavac.
- Radne karakteristike čula živih bića, kao što su oči ili uši, mašine ljudske izraze vrlo retko nadmašuju. Za nos je ovaj cilj još u dalekoj budućnosti. Uprkos tome, veličina čula koje je razvila evolucija, još uvek nije nadmašena – pomislite na oči ili uši obične muve.
- Živa bića koja lete, plivaju ili pužu – kao što je voćna muva, plankton ili ameba – još uvek su na hiljade puta manja od bilo čega što je naptavio čovek. Posebno, već su sistemi za navigaciju koje je ugradila priroda, daleko manji os svega što je napravila ljudska tehnologija.
- Možete li da istaknete još primera? (***Izazov 3s***)

Nadmoćna minijaturizacija kod živih bića – u poređenju sa mašinama ljudske izrade – nastala je usled njihovog neprestanog nastojanja da konstrukcija bude efikasna. Ova efikasnost ima tri glavna vida. Pre svega, u strukturi živih bića ***sve je povezano sa svim***. Svaki deo utiče na mnogo drugih. U stvari, četiri glavna procesa u životu, naime metabolički, mehanički, hormonalni i električni, prepleteni su u prostoru i vremenu. Na primer, kod ljudi disanje pomaže varenju; pomeranje glave pumpa tečnost kroz kičmu; jedan hormon utiče na više hemijskih procesa. Drugo, ***svi delovi u živim sistemima imaji više od jedne funkcije***. (***Izazov 4e***). Na primer, kosti obezbeđuju strukturu, ali proizvode i krv; nokti na prstima su alat ali ispuštaju i hemijski otpad. Živi sistemi koriste mnogo takvih optimizacija. (***Izazov 5e***). Treće, žive mašine su dobro minijaturizovanne pošto one čine efikasnim korišćenje kvantnih efekata. Ustvari, svaka pojedinačna funkcija kod živih bića počiva na kvantu rada. A svaka takva funkcija je izuzetno dobro minijaturizovana. Mi ćemo istražiti nekolikoliko najvažnijih.

REPRODUKCIJA

Pronalaženje partnera je najveća životna nagrada.

Tačka gledišta biologa

Sva začuđujuća složenost života usmerena je ka reprodukciji. ***Reprodukcija*** je sposobnost nekog predmeta za izgradi predmet sličan sebi. Kvantna teorija nam govori da je moguće samo izgraditi ***sličan*** predmet, jer bi ***tačna*** kopija bila u suprotnosti sa kvantom rada. (***Vol. IV, strana 96***). Međutim ovo ograničenje nije bez prednosti: slična kopija, prema tome nesavršena kopija je ono što zahteva život; ustvari, slična, stoga nesavršena kopija predstavlja suštinu za biološku evoluciju, pa prema tome za promene i za specijalizaciju.

Pošto reprodukcija zahteva povećanje mase, kao što prikazuje ***slika 2***, svi reproduktivni predmeti ispoljavaju i metabolizam i rast. Da bi rast mogao da dovede do predmeta sličnom orginalu, neophodan je ***plan*** za konstrukciju. Ovaj plan mora da bude sličan planu kojeg je koristila predhodna generacija. Organizovanje rasta uz plan konstukcije jedino je moguće ako je priroda načinjena od malih delova koji mogu da se sastavljaju prema tom planu.

Zato zaključujemo da reprodukcija i rast podrazumevaju da je materija načinjena od malih suština, Ukoliko priroda nebi bila načinjena od malih delova, nebi postojao način da se ostvari reprodukcija. Posmatranje reprodukcije prema tome pordazumeva postojanje atoma i neophodnost kvantne teorije! Zapravo, bez kvanta rada nebi postojali molekuli DNK i ne bi bilo načina da predamo u nasleđe naše sopstvene osobine – našem planu izgradnje – deci.

Prelazeći na plan od generacije do generacije zahteva da živa bića imaju načine da sačuvaju informacije. Živa bića moraju imati neko ugrađeno skladište pamćenja. Mi već znamo da sistem sa pamćenjem mora da bude načinjen iz više delova; ne postoji drugi način da se sačuvaju informacije i da se osigura njihova stabulnost u vremenu. (***Vol. I, strana 288***). Veliki broj čestica je neophodan da se informacije zaštite od uticaja spoljašnjeg sveta.

Naš sopstveni plan konstrukcije uskladišten je u DNK molekulima u jezgrima i mitohondrijama svake od miliona ćelija unutar našeg tela. Detalje ćemo istražiti u tekstu koji sledi. (***Strana 52***). Plan je stoga zaista uskladišten i zaštićen pomoću velikog broja čestica. Prema tome, reprodukcija je pre svega prenošenje roditeljske DNK sledećoj generaciji. Prenošenje je primer kretanja. Pokazalo se da se ovaj i svi ostali primeri kretanja u našim telima odvijaju na isti način, naime uz pomoć molekulskih mašina.

Slika 3 Kvantna mašina (© Elmar Bartel).

KVANTNE MAŠINE

Živa bića se kreću. Živa bića su mašine, kao što je ono prikazano na ***slici 3***. Kako ove žive mašine rade? Sa osnovne tačke gledišta potrebno nam je samo nekoliko odeljaka u našem dosadašnjem hodanju da bismo ih opisali: potrebna nam je kvantna elektrodinamika i pomalo univerzalne gravitacije. Prosto rečeno, život je elektromagnetni proces koji se događa u slaboj gravitaciji.[1] Međutim, detalji ovog iskaza su složeni i zanimljivi.

Možemo reći da su ***živa bića sistemi koji se kreću u odnosu na svoju okolinu brže no što to čine molekuli***. (***Ref. 2***). Posmatranja pokazuju da se živa bića kreću utoliko brže ukoliko su veća. Posmatranja takođe pokazuju da živa bića postižu ovu brzinu tako što koriste ogroman broj mašina u zajedničkom radu. Ove mašine ostvaruju brojne procese koji su deo života.

Pregled procesa koji se događaju u živim bićima dat je u ***Tabeli 1***. Pre svega, tabela prikazuje da su svi procesi nastali usled ***molekulskih mašina***.

- Živa bića su ogromna zbirka specijalizovanih molekulskih mašina.

Molekulske mašine spadaju među najzanimljivije uređaje koji se nalaze u prirodi. ***Tabela 1*** isto tako prikazuje za je prirodi potrebno malo takvih mašina da bi ostvarila sve vrste kretanja koje koriste ljudi ili sva druga živa biča: ***pumpe*** i ***motori***. Obzirom na dugo vreme da su živa bića unaokolo, ovi uređaji su izuzetno efikasni. Oni se nalaze u svakoj ćeliji, uključujući i onu prikazanu na ***slici 5***. Specijalizovane molekulske mašine u živim bićima su jonske pumpe, hemijske pumpe, obrtni i linearni molekulski motori. Jonske i hemijske pumpe nalaze se u opnama i prenose materiju ***kroz*** opne. (***Ref. 3***). Obrtni i linearni motori pokreću stukture ***protivno*** opnama. Premda još uvek postoji mnogo toga da se nauči o molekulskim mašinama, a već je spektakularno i ovo malo što znamo.

---

[1] Ustvari, tu izvesnu ulogu imaju i nuklearne interakcije: kosmičko zračenje je izvor nasumičnih mutacija, koje su tako važne u evoluciji. Uzgajivači biljaka često koriste radioaktivne izvore da bi povećali stepen mutacije. (***Ref. 1***). Radioaktivnost može da okonča život, ali može i da se koristi u medicini.

Nuklearne interakcije su takođe neposredno umešane u život na nekoliko drugih načina. Nuklearne interakcije bile su neophodne da se stvore atomi – ugljenika, kiseonika itd. – neophodnih za život. Nuklearne interakcije su najzad glavni mehanizam za sagorevanje na Suncu, koje obezbeđuje energiju za biljke, za ljude i za sva druga živa bića (izuzimajući neke bakterije na nepristupačnim mestima).

Sumirajući, nuklearne reakcije imaju ulogu u pojavi i u uništavanju života; međutim, one obično nemaju nikakvu ulogu u aktivnostima ili funkcionisanju nekog posebnog živog bića

TABELA 1 Kretanja i molekularne mašine otkrivene kod živih bića.

Vrsta kretanja	Primer	Primenjen motor
Rast	zajednički proces pri rastu ćelija, promeni oblika ćelija , pokretljivosti ćelija	linearni molekulski motori, jonske pumpe.
	uključenje i isključenje gena	linearni molekulski motori
	starenje	linearni molekulski motori
Konstrukcija	prenos materijala (polisaharidi, lipidi, proteini, nukleinske kiseline i drugo)	mišići, linearni molekulski motori
	sile i interakcije između biomolekula i ćelija	pumpe u opnama ćelija
Funkcionisanje	metabolizam (disanje, varenje)	mišići ATP (adenosin-trifosfat) sinteza, jonske pumpe
	rad mišića	linearni molekulski motori, jonske pumpe
	termodinamika celog živog sistema i njegovih delova	mišići
	signali u nervima	kretanje jona, jonske pumpe
	rad mozga, razmišljanje	kretanje jona, jonske pumpe
	pamćenje: dugotrajna potencijacija	hemijske pumpe
	pamćenje: razvoj sinapsi	linearni molekulski motori
	proizvodnja hormona	hemijske pumpe
	oboljenja	kretanje ćelija, hemijske pumpe
	virusna infekcija ćelije	obrtni molekulski motori za prenos prenos RNK
Odbrana	imunološki sistem	kretanje ćelija, linearni molekulski motori
	zgrušavanje krvi	hemijske pumpe
	čišćenje bronhija	trepljasti motori
Čula	oči	hemijske pumpe, jonske pumpe
	uši	vlaknasti senzori kretanja, jonske punpe, obrtni molekulski motori
	miris	jonske punpe
	dodir	jonske punpe
Reprodukcija	skladištenje i pretraživanje informacija	linearni i obrtni molekulski motori u jezgrima
	deljenje ćelije	linearni molekulski motori
	kretanje spermatozoida	linearni molekulski motori
	udvaranje	linearni molekulski motori, jonske pumpe

KAKO SE KREĆEMO? – MOLEKULSKI MOTORI

Kako rade naši mišiči? Koji je osnovni motor? Jedan od prekrasnih rezultata moderne biologije je objašnjenje ovog pitanja.

- ***Mišići*** rade usled toga što oni sadrže molekule koji promene oblik kada su snabdeveni energijom.

Ova promena oblika je ***ponovljiva***. Mudrom kombinacijom i ponavljanjem ove promene oblika koristi se tada za izvođenje makroskopskog kretanja.

- Svaki molekul koji menja oblik je molekulski motor.

Postoje tri osnovne vrste molekulskih motora: linearni molekulski motori, obrtni molekulski motori i molekulske pumpe.

1. ***Linearni molekulski motori*** su osnova kretanja mišića; primer je dat na ***slici 4***. Drugi lineatni molekulski motori razdvajaju gene tokom deobe ćelije. Linearni molekulski motori takođe pokreću organele unutar ćelija i premeštaju ćelije po telu tokom rasta embriona, tokom zarastanja rana i u svim drugim slučajevima pokretljivosti ćelije. Tipičan molekulski motor troši oko 100 do 1000 molekula ATP (adenozin-trifosfat) svake sekunde, stoga oko 10 do 100 aW. Brojke su male; međutim, moramo da uzmemo u obzir da je snaga usled belog šuma vode u okruženju 10 nW. (***Izazov 6s***). Drugim rečima. u svakom molekulskom motoru snaga šuma iz okruženja je po veličini

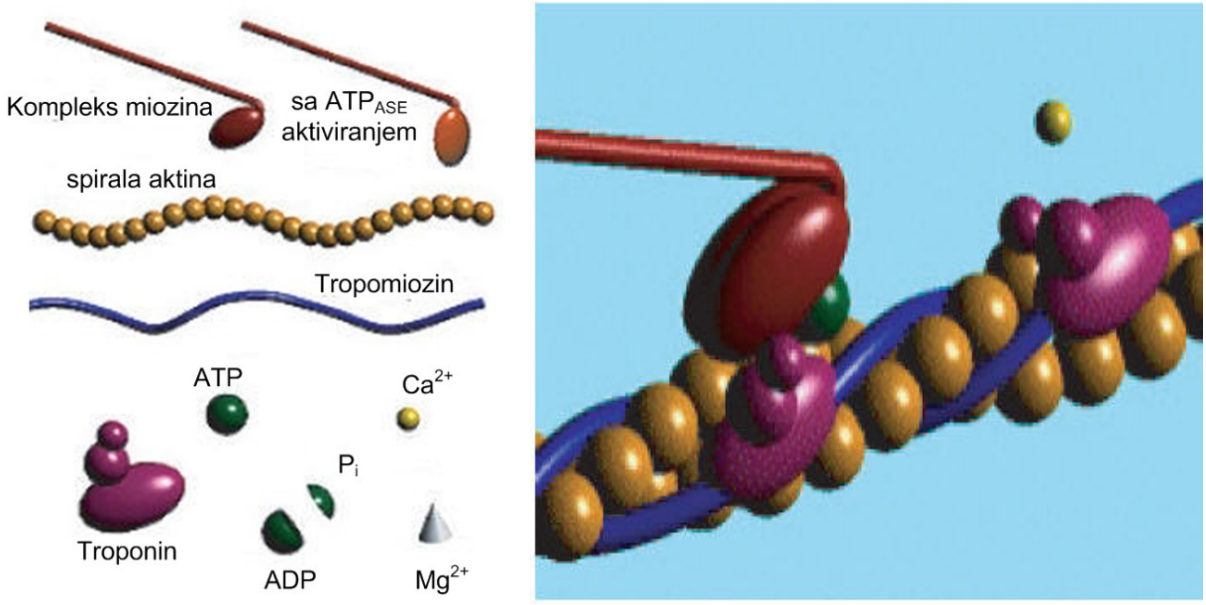
veća osam do devet puta od snage koju troši motor! Odnos pokazuje koliko je začuđujuća mašina molekulski motor. U našim razmerama to bi odgovaralo automobilu koji se kreće kroz neprestanu oluju i zemljotres.

2. Sa ***obrtnim molekulskim motorima*** sreli smo se već ranije (***Vol. I, strana 75***); priroda ih koristi za obrtanje cilija mnogih bakterija, kao i za rep spermatozoida. (***Ref. 4***). Istraživači su takođe otkrili da je evolucija proizvela molekulske motore koji okreću DNK spiralu kao što bi se motorizovan zavrtanj obtrao u navrtki. Takvi motori su dodani na kraj nekih virusa i unose DNK u tela virusa kada ih grade inficirane ćelije ili izdvajaju DNK iz virusa pošto su oni inficirali ćeliju. (***Ref. 5***). Najvažnili obrtni motor i najmanji do sada poznat – 10 nm popeko i 8 nm visine – je ATP sinteza, protein koji sintetizuje većinu ATP u ćelijama. (***Strana 24***).
3. ***Molekulske pumpe*** takođe su suštinske za život. One pumpaju hemikalije, kao što su joni ili specifični molekuli, u svaku ćeliju ili iz nje, koristeći energiju, čak iako gradijent koncentracije nastoji da čini suprotno. Molekulske pumpe su zato suštinske za obezbeđenje da život bude proces daleko od ravnoteže. Loše funkcionisanje molekulskih pumpi odgovorno je za mnoge zdravstvene probleme, na primer za dehidraciju pri infekciji kolerom.

U tekstu koji sledi istražićemo nekoliko posebnih molekulskih motora koji se nalaze u ćelijama. Kako molekuli proizvode pokretanje molekulskih motora otkriveno je tokom 1980-ih godina. (***Ref. 6***). Rezultat je pokrenuo talas istraživanja za sve ostale molekulske motore koji se nalaze u prirodi. Istraživanja su pokazala da se molekulski motori razlikuju od većine motora u svakodnevnom životu: Molekulski motori ne ispoljavaju porast temperature, kao što je kod automobilskih motora, ne koriste električnu struju, kao što to čine elektromotori, i da kao hemijski pokretani motori nisu povezani sa porastom koncentracije, kao što se to događa u narastanju testa za kolače.

LINEARNI MOLEKULSKI MOTORI

Glavni element u većini važnih linearnih molekulskih motora je kombinacija dva proteinska molekula, naime miozina i aktina. Miozin menja oblik na dva načina i doslovno ***šeta*** duž aktina. On se kreće pravilnim malim koracima, kao što je prikazano na ***slici 4***. Dužina koraka izmerena pomoću nekih prelepih eksperimenata iznosi uvek celobrojni umnožak 5,5 nm. (***Ref. 6***). Korak, obično napred, ali ponekad i unazad, izvodi se uvek kada se dogodi hidroliza molekula ATP (adenozin-trifosfat), standardnog biološkog goriva, u ADP (adenozin-difosfat) i oslobodi energiju koja je sadržana u hemijskoj vezi. Proizvedena sila iznosi oko 3 do 4 pN; koraci se mogu ponoviti nekoliko puta u sekundi. Pokretanje mišića je posledica hiljada miliona takvih elementarnih koraka koji se događaju usaglašeno.



Slika 4 Levo: miozin i aktin su dva proeinska molekula koji proizvode najvažniji molekulski motor u živim bićima, uključujući pokretanje mišića. Desno: nastao korak kretanja je dužine 5,5 nm; usporen je oko 10 puta (slika i QuickTime film © San Diego Statae University, Jeff Sale i Roger Sabbadini – može se videti na veb strani youtube.com/watch?v=4qMZot3zErY)

Zašto taj molekulski motor radi? Molekulski motor je toliko mali tako da je šum nastao od Braunovog kretanja molekula tečnosti oko njega izuzerno jak. Ustvari, pretvaranje neorganizovanog molekulskog kretanja u organizovano makroskopsko kretanje jedno je od velikih čuda prirode.

Evolucija je mudra: sa tri trika ona je stekla preimućstvo nad Braunovim kretanjem i pretvorila ga u makroskopsko kretanje. (Molekulski motori se stoga takođe nazivaju ***Braunovi motori***.) Prvi trik evolucije je da se koristi asimetričan, ali periodičan potencijal, takozvani ***zaporni točak – račet***.[1] Drugi trik evolucije je privremena promena potencijala račeta, zajedno sa ulazom energije da bi se do dogodilo. Dva najvažnija događanja prikazana su na ***slici 6***. (***Ref. 7***) Molekulski motor prema tome radi izvan toplotne ravnoteže. Treći trik je da se uzme ogroman broj ovakvih molekulskih motora i da se njihovo delovanje sabere.

Slika 5 Jajašce morskog ježa okruženo spermom, ili molekulski motor u radu: molekulski motori pokreću spermu, događa se oplodnja i događa se podela ćelija. (fotografija Kristina Yu, © c Exploratorium može se videti na veb strani www.exploratorium.edu/).

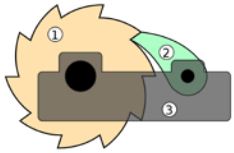
Periodična potencijalna varijacija u molekulskom motoru osigurava da u kratkim, ponavljajućim vremenskim intervalima na njegov položaj utiče slobodno Braunovo kretanje pokretnog molekula – obično oko 1μm/s. Posle toga molekul je pomovo ustaljen. U većem delu tog kratkog vremenskog intervala slobodmog Braunovog kretanja položaji se neće menjati. Ali ako se položaj promeni, unutrašnja asimertija oblika zapora obezbeđuje da će uz veliku verovatnoću molekuli napredovati u predpostavljenom smeru. (U animaciji na ***slici 4*** ova nepravilnost je izostavljena. Posle toga su molekuli ustaljeni ponovo, čekajući sledeću promenu potencijala. U proseku će stoga molekuli miozina da se kreću u jednom smeru. U današnje vreme kretanje pojedinačnih molekula može da se prati pomoću specijalnih eksperimentalnih postavki. Ovi eksperimenti su potvrdili da mišići koriste takav zaporni mehanizam. ATP molekuli dodaju energiju u sistem i pokrenu promenu potencijala preko promene oblika koju izazivaju u molekulu miozina.

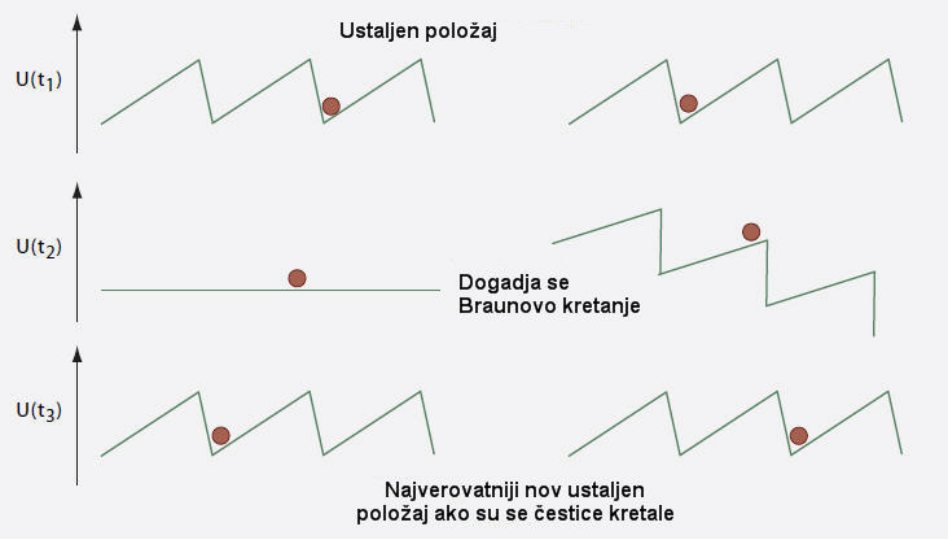
Inženjerstvo i evolucija uzeli su različite izbore, Moped ima samo jedan motor. Skupocen automobil ima oko 100 motora. (***Izazov 7e***). Ljudski organizam sadrži najmanje 10^{16} motora.

Druga vrsta dobro proučenog linearnog molekulskog motora je sistem kinezin-mikrotubula koji prenosi organele sa jednog mesta na drugo unutar ćelije. Kao i u predhodnom primeru, tako i u ovom slučaju pretvara se hemijska energija u kretanje u jednom smeru. Istraživači su imali mogućnost da na svaki molekul pričvrste silicijumsku perlicu i da prate njihovo kretanje. Korišćenjem laserskog zraka oni su mogli čak da primene sile na takve pojedinačne molekule. Otkriveno je da se kinezin kreće u koracima uzdužno brzinom od oko 800 nm/s, što je umnožak od 8 nm, koristeći istovremeno jedan ATP molekul i ispoljava silu od oko 6 pN.

---

[1] Uređaj je nazvan po Račetu Girlusu (Ratchet Gearloose) čuvenom pronalazaču iz Duckburga, junaku poznatog crtanog filma Gyro Gearloose crtača Karla Barksa (Carl Barks) iz Diznijeve kompanije. Pripada svetu Paje Patka. Račet je zapravo unuk Gyro Gearloose. U mehanici je to nazubljen točak (ili letva) čiji zupci dozvoljavaju obrtanje (kretanje) samo u jednom smeru. (prim.prev)





Slika 6 Dve vrste Braunovog motora: prebacivanjem potencijala (levo) i nagnuti potencijal (desno)

Kvantni račet motori ne postoje samo u živim bićima; oni postoje i u sistemima koje su napravili ljudi. Primeri su električni račeti koji pomeraju usamljene elektrone i optički račet koji pokreče male ćestice. Ove primene se koriste u raznim programima eksperimentalnih istraživanja.

Isto tako postoje i klasični račeti. Jedan primer se nalazi u svakom mehaničkom časovniku; takođe većina hemijskih pisaljki sadrži račet. Drugi primer račeta sa asimetrijom mehaničkih koraka koristi Lajdenfrost efekt (***Vol. I, page 269***) za brzo kretanje kapi tečnosti, kao što je prikazano na veb strani www.thisiscolossal.com/2014/03/water-maze/. Sledeći primer prikazan je na ***slici 7***; ustvari, mnogo piezoelektričnih pokretača radi kao račet i internet je prepun video snimaka koji prikazuju kako oni rade. Piezoelektrični račeti, takođe nazivani ultrazvučni motori, nalaze se u preciznim etapama za pokretanje sonde i unutar automatskih zum-objektiva na skupocenim fotografskim aparatima. Isto tako mikroskopi sa atomskom silom i elektronski mikroskopi za skeniranje koriste račet pokretače.

Slika 7 Klasični račet, ovde je piezoelektrične vrste, pokreće se kao linearni molekulski motor (© PiezoMotor)

Molekulski motori su suština za rast i rad nerava i mozga. (***Ref. 8***). Nervi sadrže veliki broj desetina molekulskih motora sve ti vrste: dineina, miozina i kinezina. Ovi motori koji prenose hemikalije, pod imenom "cargo" (tovar) duž aksona i svi oni imaju mehanizme ua uovar ili istovar na svojim krajevima. Oni su neophodni za rast nerva, na primer, od kičme du vrha nožnog palca. Drugi mototi upravljaju razvojem sinapsi i tako obezbeđuju da imamo dugoročno pamćenje. Smetnje u radu molekulskih motora odgovorne su za Alchajmerovu bolest, Hantingtonovu bolest, multiplu sklerozu, izvesne tumore i mnogo drugih bolesti usled genetskih poremećaja ili otrova iz okruženja.

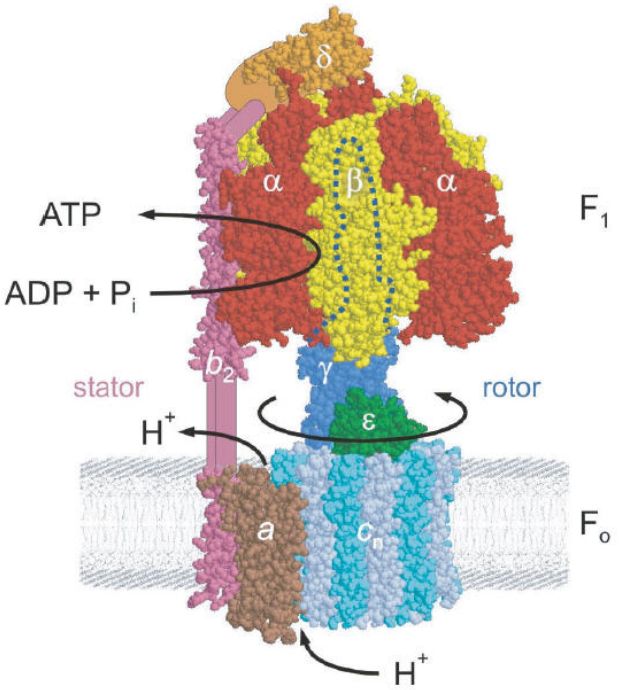
Ukratko, bez molekulskih motora ne bismo mogli ni da se krećemo ni da razmišljamo.

OBRTNI MOLEKULSKI MOTOR: ATP SINTEZA

Uobičajeno gorivo za većinu hemijskih reakcija u ćelijama je adenozin trifosfat (ATP). Kod biljaka se većina ATP proizvodi u opnama ćelijskih organela koje se nazivaju ***hloroplast***, a u životinjskim ćelijama u takozvanim ***mitohondrija***. Oni su energane u većini ćelija. ATP takođe pokreće većinu bakterija. Pokazalo se da se ATP sintetizuje od proteina koji se nalazi u opnama. Sam protein dobija snagu od protona H^+, koji čini osnovno gorivo u ljudskom telu, dok je ATP gorivo višeg nivoa. Na primer, većina drugih molekulskih motora pokretano je sa ATP. ATP svoju energiju ostvaruje preko promene u adenozin-difosfat, ili ADP.

Važnost ATP može jednostavno da se prikaže: sve sinteze u ljudskom organizmu, tokom tipičnog dana, su po količini ATP približno jednake njegovoj telesnoj masi.

Protein koji sintetizuje ATP naziva se prosto ATP sinteza. Ustvari, ATP sinteza razlikuje se neznatno od organizma do organizma; međutim, razlike su tako male da mogu da se zanemare u većini slučajeva. (Važna varijanta su one pumpe u kojima joni Na^+ zamenjuju protone.) Premda je ATP sinteza proces velike složenosti, opis njenog delovanja je jednostavan: ona radi slično točku sa lopaticama kojeg pokreće gradijent protona kroz opnu. (***Ref. 9***). ***Slika 8*** daje prikaz strukture i procesa. Istraživanje koje je dovelo do ovog otkrića nagrađeno je 1997. godine Nobelovom nagradom za hemiju.



Slika 8. Struktura sinteze ATP (© Joachim Weber).

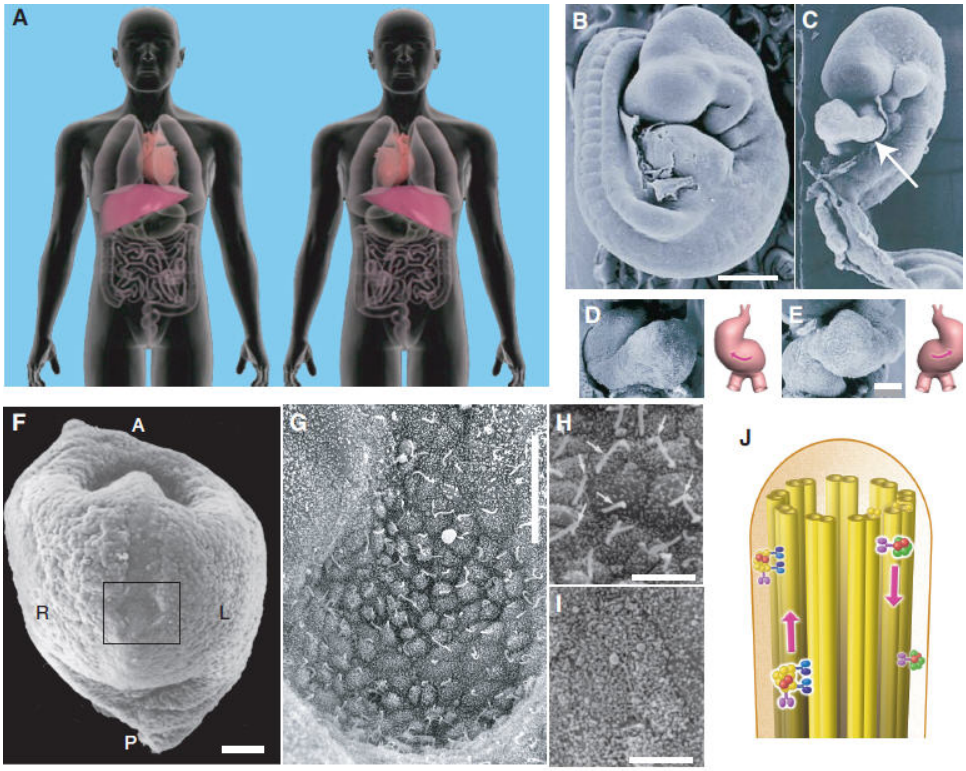
Ustvari, sinteza ATP takođe funkcioniše i u obrnutom smeru: ako postoji veliki ATP gradijent, on će pumpati protone iz ćelije. Ukratko, sinteza ATP je istovremeno i obrtni motor i molekulska pumpa. On zamenjuje električni pokretački motor napajan iz akumulatora koji se nalazi u svakom automobilu; u takvom automobilu, tokom vožnje, motor radi kao generator i puni akumulator. (Na internetu se nalaze animacije obrtanja ATP sinteze – što izgleda **ovako**.) Sinteza ATP istražena je detaljno. Na primer, poznato je da ona proizvede tri molekula ATP pri svakom obrtu, da pravi obrtni moment od oko $20kT/2\pi$. gde je kT kinetička energija molekula na temperaturi T. U ljudkom telu postoji najmanje 10^{16} ovakvih motora. Točak sa lopaticama sinteze ATP jedan je od osnovnih blokova života.

OBRTNI MOTORI I PREKID PARITETA

Zašto nam je srce na levoj strani, a jetra na desnoj strani tela? Odgovor na ovo staro pitanje je poznat tek od nekoliko poslednjih godina. Nesimetričnost levo-desno, ili hirijalnost, ljudskog tela mora da je povezana sa nesimetrijiom molekula koji sačinjavaju život. U svim živim bićima nesimetrični su molekuli šećera, proteina i DNK, i samo jedna vrsta molekula se zapravo nalazi u ljudskom telu. Ali kako je priroda prevela nesimetričnost molekula u nesimetričnost tela. Iznenađujuće je, ali odgovor koji je našao Hirokava Nobutaka i njegov tim, zavisi od obrtnih molekulskih motora. (***Ref. 10***).

Položaji unutrašnjih organa je određen tokom ranog razvoja embriona. U ranom stepenu je centralni deo embriona, takozvani ***čvor*** (***node***), prekriven obrtnim cilijama, to jest obrtnim malim vlaknima, kao što je prikazano na ***slici 9***. (Svi kičmenjaci imaju čvor u nekoj fazi razvoja embriona.) Cilije čvora su pokretane molekulskim motorom; one se sve pokreću u istom smeru (smer kazaljki časovnika) oko deset puta u sekundi. Smer obrtanja je posledica nesimetričnosti molekula koji se nalaze u motorima. Međutim, pošto su cilije nagnute u odnosu na površinu – prema kraju embriona – obrtanje cilija ustvari pomera tečnost preko čvora prema levoj strani embriona. Tečnost ovog novootkrivenog ***nodalnog protoka*** sadrži supstance – nodalne vezikularne čestice – koje se prikupljaju na levoj strani čvora i postepeno pokreću proces koji određuje položaj srca. Ako se cilije nebi obrtale, ili ako bi protok bio obrnut usled spoljašnih

uzroka, srce i ostali organi bili bi pogrešno raspoređeni. Ova povezanost takođe objašnjava ostale posledice takvih genetskih poremećaja.



Slika 9 A – asimetričan položaj unutrašnjih organa u ljudskom telu: normalan raspored (situs solitus) koji je uobičajen kod većine ljudi i raspored u ogledalu (*situs inversus*). Slike B do E su skenirani snimci embriona miša snimljeni elektronskim mikrografom; B – zrav embrion u toj fazi već pokazuje rep na desnoj strani; C – suprotno, mutirani embrion sa pokvarenim cijijalnim motorom ostaje neokrenut i srčana petlja je obrnuta, što pokazuje strelica; D – slika sa većim povećanjem i šematski prikaz srčane petlje; E – Slična slika pokazuje obrnutu petlju kod mutiranoh embriona. Slike F do I su skenirani elektronskim mikrografom čvora miša. F – slika sa malim povećanjem embriona miša starog 7,5 dana, posmatrano sa ventralne strane, sa crnim okvirom koji prikazuje čvor. Orijentacije su prikazane slovima: A za anterior, P za posterior, L za levo, R za desno; razmera je 100μm. G – slika sa velikim povećanjem čvora miša; razmera je 20 μm. H – još uvek slika sa velikim povećanjem zdravih cilija čvora, pokazanih strelicom i nodalne ćelije jame; razmera je 5 μm. I – nodalne ćelije jame mutantnog embriona bez cilija. J – prikaz molekularnoh prenosa unutar zdravog flageluma (© Hirokawa Nobutaka).

Drugim rečima, usled obtranja cilija i pomenutog mehanizma, nesimetrija molekula preslikava se na ceo organizam kičmenjaka. Možda se isti procesi dešavaju takođe bilo gde u prirodi, na primer u razvoju nesimetrije mozga. Ovo je još uvek polje intenzivnih istraživanja. Molekulski motori predstavljaju u stvari centar našeg blagostanja i života.

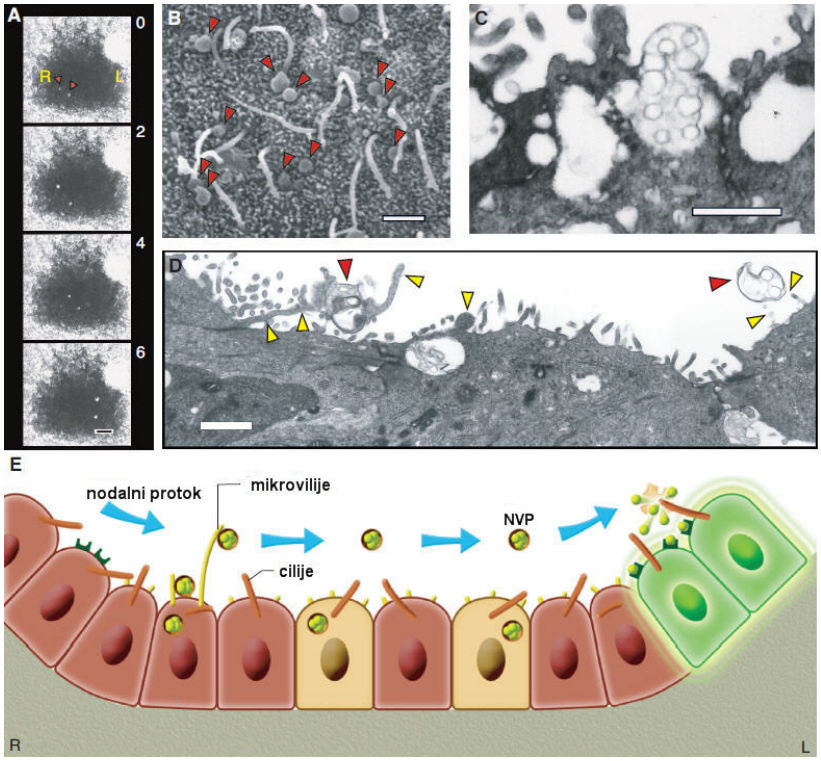
ZANIMLJIVOSTI I ZABAVNI IZAZOVI O BIOLOGIJI

Una pelliccia e una pelle che ha cambiato bestia.[1]

Girolamo Borgogelli Avveduti

Pomoću savremenih meroda mikroskopije moguće je napraviti film u sve tri dimenzije, razvoja oka voćne mušice još dok izlazi iz larve. Takav film omogućava da se prati svaka pojedina ćelija šta se događa u toku 20 sati: film pokazuje kako se ćelije kreću unaokolo tokom razvoja i prikazuje podelu svake ćelije. Posmatranje filma, snimljenog u EMBL Hajdelberg. moguće je na youtube.com/watch?v=rxECLgspbnI.

[1] "Krzno je koža koja je promenila zver."



Slika 10 A – Slike nodalnog protoka vezikularnih parcela (NVPs) pomoću optičkog mikroskopa. Oznake L i R prikazuju odijentaciju. NVPs je pokazan vrhovima strelica prenosi se sa leve strane nodalnim protokom. Razmera je 10μm. B – Skenirano elektronskim mikrografom ventralne površine nodalnih ćelija jame. Crveni vrhovi strelica prikazuju NVP predhodnika. Razmera je 2μm. C i D – Prenos nodalnih ćelija jame snimljeno pomoću elektronskog miktografa. Razmera je 1 μm. E – Šematski prikaz NVP protoka izazvanog cilijama. NVPs je ostvaren dinamičkim mikrovilijama, prenose sa sa leve strane nodalnim protokom usled cilija i konačno se podele uz pomoć cilija na levoj periferiji čvora. Zeleni odsjaj pokazuje visoku koncentraciju kalcijuma – znak aktivnosti ćelija koje naknadno pokreću formiranje organa (© Hirokawa Nobutaka)

* * *

Raspravljajte o sledećem dokazu: Ako bi priroda bila klasična umesto kvantna, tada nebi bilo samo dva pola – niti nijedan poseban njihov broj, kao što je kod nižih životinja – već bi postojao njihov ***neprekidni raspon***. U određenom smislu postojao bi beskrajan broj polova. Da li je to tačno? (***Izazov 8s***).

* * *

Biološka evolucija može da se sumira u tri načela:

1. Sva živa bića su različita – takođe i po vrstama
2. Sva živa bića imaju težak život – zbog nadmetanja
3. Živa bića koja imaju neku prednost preživljavaju i reprodukuju se.

Kao rezultat ova tri načela, uz svaku generaciju ***vrste i živa bića mogu da se promene***. Rezultat prikupljenih generacijskih promena naziva se ***biološka evolucija***. Poslednje načelo često se naziva "opstanak najsposobnijih".

Ova tri načela između ostalog objašnjavaju promenu od jednoćelijskog do višećelijskog života, od riba do kopnenih životinja i od životinja do ljudi.

Primećujemo da kvantna fizika zalazi u sva ti načela koja su dovela do evolucije. Na primer, različitosti, pomenute u prvom načelu, nastaju usled kvantne fizike: nemoguće su savršene kopije makroskopskih sistema. (***Vol IV, strana 96***). I naravno, život i metabolizam su kvantni efekti. Drugo načelo pominje nadmetanje; to su vrste merenja, koja kao što smo videli, jedino su moguća usled postojanja kvanta rada. (***Vol. IV, strana 19***). Treće načelo pominje reprodukciju: ona je opet kvantni efekt, zasnovan na kopiranju gena, koji su kvantna tvorevina. Ukratko, biološka evolucija je proces koji nastaje usled kvanta rada. (***Strana 19***).

* * *

Kako biste utvrdili koji je od dva identična blizanca otac deteta? (***Izazov 9d***).

* * *

Možete li dati najmanje pet dokaza koji pokazuju da je klon čoveka, ako bi ikada postojao, potpuno drugačija osoba nego li orginal? (***Izazov 10s***).

Dobro je poznato da je prva ikada klonirana mačka, copycat, doneta na svet 2002. godine izgledaja potpuno različito od "orginala" (ustvari njene majke). Boja krzna, njeni oblici šara bili su u potpunosti drugačiji no kod njene majke. Saglasno tome, identični blizanci kod ljudi imaju između ostalog različite otiske prstiju, skenirane zenice, mrežu krvnih sudova i unutrašnja doživljavanja.

Mnoga svojstva sisara nisu predodređena genima, već okolinom tokom trudnoće, posebno zbog materice i iskustva rađanja. Uticaji naterice obuhvataju šare krzna, oblike nabora kože ali i osobine karaktera. Uticaj iskustva rađanja na karakter je veoma poznat i njega proučava mnogo psihologa.

* * *

Poznato je pitanje bez odgovora o evoluciji: kako su nastale prva ***zrna kefira***? Zrna kefira proizvode napitak kefir ako se preliju mlekom za oko 8 do 12 časova. Zrna se satoje od uravnotežene mešavine od oko 40 vrsti bakterija i kvasaca. Sva zrna kefira u svetu su povezana. Ali kako su se pojavila prva zrna pre oko 1000 godina? (***Izazov 11r***).

* * *

Molekulski motori su prilično sposobni. Molekulski motori u sinjem galebu (*Puffinus griseus*), ptici dužine 45 cm, omogućavaju da preleti 74.000 km tokom godine, uz izmeren rekord od 1094 km u jednom danu.

* * *

Kada su preplavljeni cilijarni motori koji ćiste nos i ne mogu da nastave sa radom, oni šalju signal opasnosti. Kada je poslano dovoljno takvih signala, u ljudskom telu se pokrene reakcija kijanja. Kijanje je reakcija na zaustavljene molekulske motore.

* * *

Rast embriona čoveka jedno je od svetskih čuda. Veb strana embryo.soad.umich.edu daje o procesu rasta opširne podatke, fotografije animacije i snimke magnetnom rezonansom.

* * *

Da li ptice imaju pupak? (***Izazov 12s***).

* * *

Mnogi molekuli koji se nalaze u živim bićima, kao što su šećer, imaju molekule simetrične u ogledalu. Međutim, u svim živim bićima nalazi se samo jedna ili dve vrste. Život ima unutrašnju asimetriju. Kako je to moguće? (***Izazov 13s***).

* * *

Kako je to moguće da je genetska razlika između ljudi i šimpanze redovno navodi da je oko 1%, dok je razlika između muškarca i žene jedan hromozom od 46, drugim rečima oko 2,2%? (***Izazov 14s***).

* * *

Koje je najduže vreme koje je pojedinačna bakterija preživela? To je više od 5000 godina za bakteriju koja je nađena u egipatskim mumijama. Već dugi niz godina procenjivano je da vreme preživljavanja iznosi preko 25 miliona godina, što je vrednost utvrđena za spore bakterije izdvojene iz probavnog trakta insekta zarobljenog u ćilibru. (***Ref. 11***). Zatim se tvrdilo da iznosi preko 250 miliona godina, vreme koje je utvrđeno za neke bakterije, koje je 1960-ih godina našao Hajnc Dombrovski u naslagama soli (niske radioaktivnosti) u Fuldi, Nemačka, a koje su bile zamrznute u njima i oživljene ponovo u laboratoriji. Sličan rezultat je skoro potvrđen otkrićem drugih bakterija u severnoameričkim naslagama soli u formacijana Salado. (***Ref. 12***).

Međutim, ove vrednosti su sada odbačene, pošto je sekvenciranje DNK pokazalo da je poreklo ovih bakterija verovatno uzrokovalo zagađenje uzorka u laboratoriji, a da nisu deo orginalnog uzorka. (***Ref. 13***). Tako je pitanje najdužeg vremena preživljavanja bakterije još uvek otvoreno.

* * *

Godine 1967. postavljena je TV kamera na mesec. Nepoznato za svakog, ona je sadržala malu mrlju bakterije ***Streptococcus mitis***. Tri godine kasnije, kamera je vraćena na Zemlju. Bakterije su bile još uvek žive. One su preživele tri godine bez hrane, vode i vazduha. Život zaista može da bude otporan. Ova

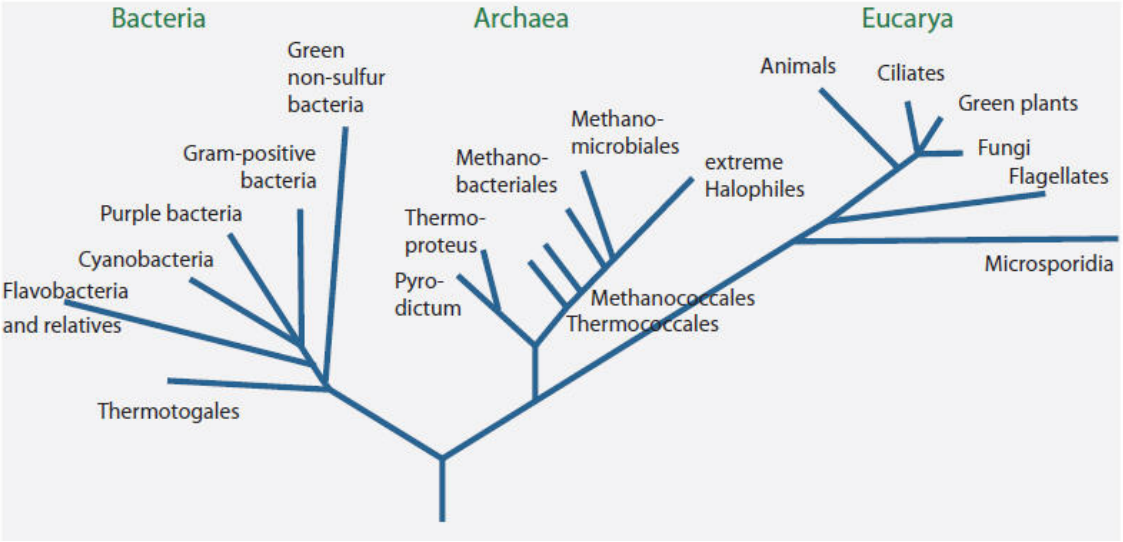
mnogo navođena priča je toliko neverovatna da je proverena 2011. godine. (***Ref. 15***) Zaključeno je: priča je neistinita; bakterije su greškom u laboratoriji stavljene na kameru posle njenog povratka na Zemlju.

* * *

Klasifikacija u biologiji je izuzetno korisna. (To je slično sa situacijom u astrofizici, ali u potpunoj suprotnosti sa fizikom.) ***Tabela 2*** prikazuje pregled veličina zadatka. (***Ref. 16***) Ovo bogatstvo materijala može da se sumira u jedan grafik, prikazan na ***slici 11***. Izgleda da novija istraživanja sugerišu male izmene na slici. Međutim, do sada postoji samo jedan koren stabla.

TABELA 2 Približni brojevi živih bića

Grupa života	**Opisane vrste**	**Procenjeno vrsti**	
		Min	**Max**
Virusi	$4\cdot10^3$	$50\cdot10^3$	$1\cdot10^6$
Prokariote (“bakterije”)	$4\cdot10^3$	$50\cdot10^3$	$3\cdot10^6$
Gljivice	$72\cdot10^3$	$200\cdot10^3$	$2{,}7\cdot10^6$
Praživotinje (Protozoa)	$40\cdot10^3$	$60\cdot10^3$	$200\cdot10^3$
Alge	$40\cdot10^3$	$150\cdot10^3$	$1\cdot10^6$
Biljke	$270\cdot10^3$	$300\cdot10^3$	$500\cdot10^3$
Valjkasti crvi (Nematode)	$25\cdot10^3$	$100\cdot10^3$	$1\cdot10^6$
Rakovi (C	$40\cdot10^3$	$75\cdot10^3$	$200\cdot10^3$
Pauci (Arahnidae)	$75\cdot10^3$	$300\cdot10^3$	$1\cdot10^6$
Insekti	$950\cdot10^3$	$2\cdot10^6$	$100\cdot10^6$
Mekušci (*Mollusca*)	$70\cdot10^3$	$100\cdot10^3$	$200\cdot10^3$
Kičmenjaci	$45\cdot10^3$	$50\cdot10^3$	$55\cdot10^3$
Ostalo	$115\cdot10^3$	$200\cdot10^3$	$800\cdot10^3$
UKUPNO	$\mathbf{1{,}75\cdot10^6}$	$\mathbf{3{,}6\cdot10^6}$	$\mathbf{112\cdot10^6}$



Slika 11 Savremena verzija stabla evolucije

* * *

Mišići proizvode kretanje preko električnog nadražaja. Mogu li tehnički sistemi da čine isto? Kandidat se pojavio: elektroaktivni polimeri promene oblik kada se aktivira električnom strujom ili hemikalijama. Oni su male težine, tihi i laki za proizvodnju. Međutim, u prvom takmičenju obaranja ruku između ljudi i veštačkih mišića, održanog 2005. godine bila je pobeda tinejdžerke. Utrkivanje da se to uradi bolje je u toku.

* * *

Život nije jasno definisan pojam. Definicija izneta u predhodnom tekstu, sposobnost za samoreprodukciju, ima svoju granicu. Može li da se primijeni na stare životinje, na pogrešno odsečenu ruku, na spermu, na ovulu ili na prve embrionalne faze sisara? Definicija života takođe stvara probleme kada se pokuša njena

primena na pojedinačne ćelije. Možete li da nađete bolju definiciju? Da li je korisnija definicija za živa bića "ono što je sastavljeno od ćelija"? (***Izazov 15e***)

* * *

Svaki primer rasta je vrsta kretanja. Pojedini primeri su izuzetno složeni. Uzmite rast akni. On iziskuje nedostatak cinka, slab imunološki sistem, nekoliko bakterija kao i pomoć ***Demodex brevis***, grinje (malog insekta) koji živi u porama kože. Uz veličinu od 0,3 mm, što je nešta manje od tačke na kraju ove rečenice, ova i druge životinje koje žive na ljudskom licu mogu da se zapaze uz pomoć jakog uveličavajućeg stakla.

* * *

Ljudi imaju mnogo živih bića ukrcanih na sebi. Na primer, da bi živeli ljudima su potrebne bakterije. Procenjuje se da 90% bakterija koje žive samo u ustima čoveka još nije poznato; do sada je izdvojeno samo oko 1000 vrsti.

Bakterije su od suštinske važnosti za naš život: one nam pomažu da svarimo hranu, brane nas od bolesti koje nastaju od opasnih bakterija. (***Ref. 17***). Ustvari, broj bakterija u ljudskom telu procenjen je na 10^{14}, pri čemu se procenjuje da je broj ćelija u ljudskom telu između 10^{13} i $5 \cdot 10^{13}$. Ukratko, ljudsko telo sadrži oko deset puta više bakterija no sopstvenih ćelija! Uprkos tome, ukupna masa bakterija u ljudskom telu procenjena je na samo 1 kg, pošto je bakterija u proseku mnogo manja od ljudske ćelije.

Od oko 100 grupa bakterija u prirodi, ljudsko telo uglavnom sadrži 4 vrste od njih: *aktinobakterije*, *bacteroidete*, *firmikute* i *proteobakterije*. One igraju ulogu u gojaznosti, neuhranjenosti, bolesti srca, dijabetisu, multiplnoj sklerozi, autizmu i još mnogo toga. Povezanosti su važan oblas istraživanja.

* * *

Koje vrste živih bića su najuspešnije, ako uspešnost merimo kao biomasu vrste? Ovo prosto pitanje nema poznat odgovot. Među životinjama, stoka (*Bos taurus*), ljudi (*Homo sapiens*) i antarktički kril (*Euphasia superba*) imaju slične vrednosti biomase, međutim nije jasno koji od njih ima najveću vrednost. Izgleda da za biljke nema dobrih podataka – osim za poljoprivredne kulture. Skoro je sasvim sigurno da nekoliko vrsta bakterija, kao što je morski rod *Prochlorococcus* ili neke druge vrste bakterija koje su pronađene u tlu i nekoliko vrsta gljiva imaju mnogo veće vrednosti biomase. Međutim, ne postoje pouzdani podaci.

* * *

Kako drveće raste? Kada drvo – biološki rečeno *monopodal phanerophyte* – raste i stvara lišće, između 40% i 60% mase od koje se sastoji, naime od vode i minerala, mora da se podigne naviše sa zemlje. (Ostatak mase dolazi d CO_2 u vazduhu.) Kako se to događa? Materijali su povučeni naviše usled vodenih stubova unutar drveća; povlačenje nastaje usled negativnog pritiska koji se stvara isparavanjem na vrhu stuba. To se naziva ***model transpiracija-kohezija-napon***. (Ovo je sažetak rezultata iz mnogih eksperimenata.) Drugim rečima, nije potrebna nikakva energija da bi drveće pumpalo materijale naviše.

Drveću nije potrebna energija da bi prenosilo vodu. Kao posledica toga, drveće raste samo dodavanjem materijala na svoju površinu. To podrazumeva da pri rastu drveća, grana koja izraste na nekoj visini nalaziće se na toj istoj visini tokom ostatka života drva. Proverite to posmatranjem drveća u vašem vrtu. (***Izazov 16e***)

* * *

Sisari imaju uzan opseg radne temperature. Nasuprot mašinama, ljudi funkcionišu samo ako im je unutrašnja temperatura u uskim granicama. Zašto? (***Izazov 17d***). A da li se ovaj zahtev može primeniti i na vanzemaljce – pod predpostavkom da postoje?

* * *

Kako se pojavila prva ćelija? (***Izazov 18r***). Ovo važno pitanje još uvek je otvoreno. Moguć korak u pravcu odgovora istraživaći su našli u nekoliko supstacija koje spontano u vodi stvaraju zatvorene opne. Takve supstance takođe stvaraju penu. Možda je u peni i nastao život. Druga raspravljana mogućnosti je da se život pojavio pod vodom, na mestima gde magma prodire u okean. Rasvetljavanje porekla ćelija jedna je od veličanstvenih otvorenih zagonetki biologije – premda odgovor neće biti od velike koristi.

* * *

Da li je život mogao da dođe na Zemlju iz spoljnog prostora? (***Izazov 19s***).

* * *

Postoji li život bilo gde u svemiru? Odgovor je jasan. Pre svega, možda postoji život bilo gde, premda je verovatnoća izuzetno mala, zbog dugih vremenskih intervala i zahtevima za stabilnim zvezdanim sistemom, stabilnim planetarnim sistemom i stabilnim geološkim sistemom. Osim toga, do sada su bile laž

sve izjave koje su tvrdile da su otkriveni primeri života. Ne greške, nego stvarne laži. Uobraženja o vanzemaljskom životu imaju interesantan izazov za svakog. Zbog čega bi jedan vanzemaljac bio za vas interesantan? (***Izazov 20e***). Ako umete da odgovorite, ostvarite vašu motivaciju na neki drugi način, odmah, bez odlaganja. Ako ne možete da odgovorite, radite nešta drugo.

* * *

Šta bi ***holistička medicina*** mogla da znači naučniku, tj. izbegavanju besmislica i lažnih uverenja? Holistička medicina znači lečenje bolesti uzimajući u obzir celokupnu osobu. To se prenosi na ćetiri područja:

- ***fizičku*** podršku, da pomogne mehaničkim ili toplotnim procesima zarastanja u telu;
- ***hemijsku*** podršku, sa ishranom ili vitaminima;
- ***signalnu*** podršku, sa električnim ii hemijskim sredstvima, koji bi održali signalni sistem tela;
- ***psihološku*** podršku, kako bi pomogla gore navedenim procesima.

Kada se se svi pomenuti vidovi lečenja pažljivo primene, ozdravljenje je što je moguće brže i potpunije. Ostaje, međutim, jedno glavno pravilo; *medicus curat, natura sanat*[1].

* * *

Pre svega, život je divan. Pogledajte na primer knjigu Kler Nuvian (Claire Nouvian) *The Deep:The Extraordinary Creatures of the Abyss*, koja je predstavljena na veb strani www.press.uchicago.edu/books/nouvian/index.html koja će vam omogućiti da se uživa u lepoti života u dubinama okeana.

* * *

Kakvi su efekti ***zagađenja okoline*** na život? Odgovor na ovo pitanje je polje intenzivnih savremenih istraživanja. Evo nekoliko poznatih priča.

- Mnogi herbicidi i genetski izmenjeni organizami ubijaju pčele. Iz tog razloga pčele izumiru u Sjedinjenim Američkim Državama (od 2007. godine); kao posledica toga, tamo su ugrožene mnoge poloprivredne kulture – kao što su bademi i pomorandže. U zemljama u kojima su zabranjeni najgori herbicidi i genetski modificirane poljoprivredne kulture, pčele nemaju probleme. Primer je Francuska, gde manjak pčela predstavlja opasnost za vinarsku industriju.
- Hemijsko zagađenje dovodi do deformiteta novorođenčadi. Iz ovog razloga, u kontinentalnoj Kini jedno od 16 novorođečadi rođeno je sa deformitetom (u 2007. godini). U Japanu su deformiteti jako smanjeni – premda ne i potpuno – pošto su usvojeni strogi zakoni protiv zagađivanja.
- Radioaktivno zagađenje ubija. Deo poznatog jezera Karačaj u Rusiji napunjen je betonom, pošto bi visoka radioaktivnost ubijala svakog ko bi se šetao pored jezera duže od jednog sata. (***Strana 146***).
- Pušenje ubija – premda postepeno. Zemlje u kojima je broj pušača manji ili u koje je pušenje ograničeno, smanjile su stepen pojave raka i nekih drugih oboljenja.
- Konzumiranje tunjevine je opasno za vaše zdravlje, zbog sadržaja teških metala.
- Hrast plutnjak nestaje. Vinarska industrija pokrenula je velike programe istraživanja kako bi se savladao ovaj problem.
- Čak i životinje na Arktiku i Antarktiku imaju jetre pune hemijskih otrova ljudske proizvodnje.
- Sagorevanje fosilnih goriva povećava nivo CO_2 u atmosferi. To dovodi do mnogih uticaja na klimu Zemlje, uključujući postepen porast prosečne temperature i podizanje nivoa mora. Ekološka istraživanja otkrila su mnoge druge povezanosti. Nadajmo se da će svest po ovim pitanjima da se povećava širom sveta.

* * *

Neki istraživači radije definišu živa bića kao sisteme sa ***samoreprodukcijom***, a drugi ih radije definišu kao sisteme sa ***metabolizmom***. Među ovim drugima Majk Rasel (Mike Russell) i Erik Smit (Eric Smith) predlažu sledeću definiciju života: "***Svrha života je hidrogenizovanje ugljen dioksida***." Drugim rečima, cilj života je je da se izvrši hemijska reakcija:

$$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O \qquad (1)$$

O ovom lepom i suvoparnom opisu vredi razmišljati – i brojni istraživači zaista istražuju posledice ovog gledišta.

[1] "Lekar leči, priroda ozdravljuje."

* * *

Ne samo da je smrt kvantni proces, već je to i starenje. Detaljna istraživanja ove široke oblasti su u toku. Divan primer je otpadanje lišća u jesen. Otpadanje je pokrenuto etenom, prostim gasom. Možete i sami da pokrenete otpadanje lišća, na primer, ako stavite u plastičnu kesu presečenu jabuku – jak izvor etena – zajedno sa grančicom ruže: ruža će odbaciti svoje lišće.

* * *

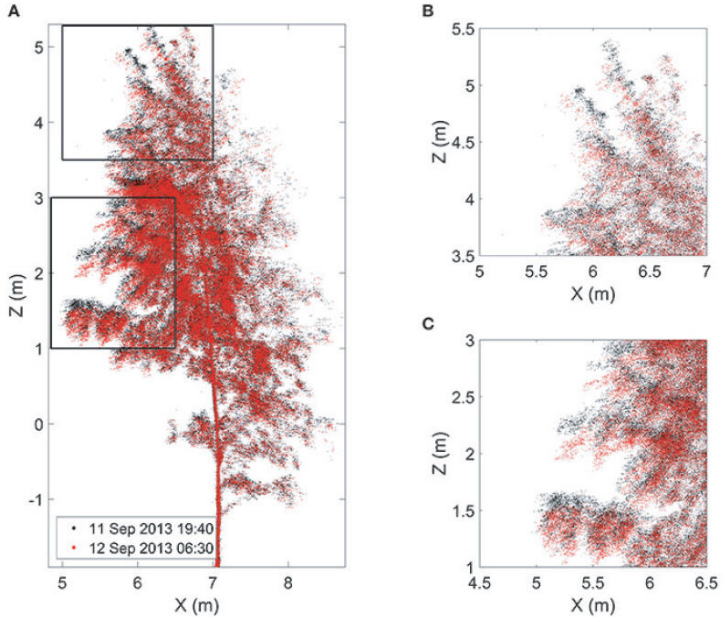
Reanimacija nekog kome je predstalo da radi srce i disanje, korisan je redosled pokreta, nazvan ***–kardio-pulmonalna reanimacija***. Naučite ih.

* * *

Da ostanete u dobroj formi i da se osigurate da se dobro osećate, uživate u životu i uživajte u knjigama Marka Ferštegena (Mark Verstegen).

* * *

Koja vrsta zivota je najuspešnija na Zemlji, ako se kao uspešnost meri ukupna masa njenih članova? (***Izazov 21r***).



Slika 12 Položaj grana i lišća breze na kraju dana (crno) i u rano jutro (crveno) sa povećanjem na desnoj strani (© Eetu Puttonen i drigi)

* * *

Drveće spava tokom noći i budi se ujutro. Ovo zapažanje je pozvato vekovima; divno merenje ovog efekta, uz upčtrebu laserskog skenera, izvršili su Eetu Puttonen i njegov tim. (***Ref. 18***). Njihov rezultat, prikazan na ***slici 12***, pokazuje da je visina tipičnih grana breze i njenih listova do 10 cm niža nego i tokom dana. Merenja takođe pokazuju da se drveće većinom kreće rano jutrom, kada se budi. Poreklo ovog efekta izgleda da je usled razlike dotoka vode u toku dana i noći.

FIZIKA ZADOVOLJSTVA

Šta je um nego kretanje u intelektualnoj sferi?

Oskar Vajld (Oscar Wilde), *The Critic as Artist*.

Zadovoljstva su kvantni efekt. Razlog je prost. Zadovoljstvo dolazi preko čula. Sva čula mere. A sva merenja su povezana sa kvantnom teorijom.

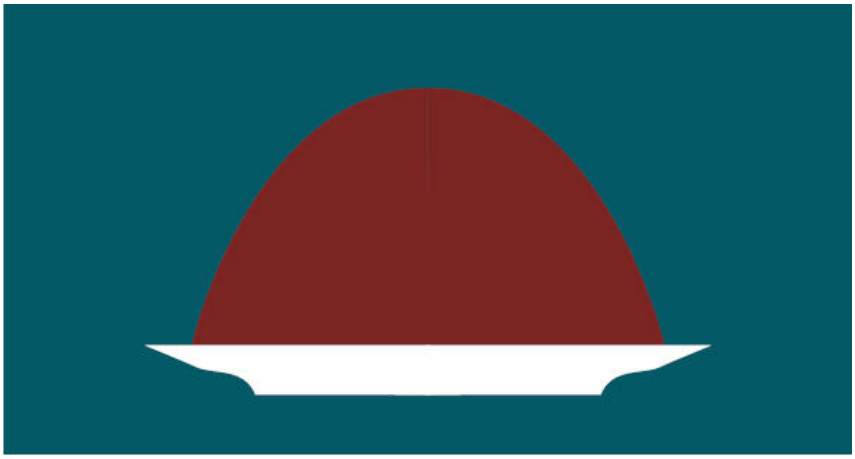
Ljudsko telo, isto kao skupocen automobil, pun je senzora. Evolucija je izgradila ove senzore na takav način da oni pokrenu osećanje zadovoljstava uvek kada našim telom uradimo nešto za šta smo načinjeni. Naravno, nijedan istraživač neće da prizna da on proučava zadovoljstva. Stoga će istraživači da kažu da on ili ona proučavaju osećaje, i da on ili ona rade na ***istraživanju percepcije***. Međutim, zadovoljstvo i ljudski senzori postoje da bi se produžavao život. Zadovoljstvo je najveće kada se nastavi život. U dalekoj prošlosti pojava novog senzora kod živih bića uvek je imala važan uticaj na evoluciju, na primer u toku kambrijske eksplozije.

Istraživanje zadovoljstava i bioloških senzora je začuđujuće polje koje se još uvek razvija; ovde ćemo samo imati kratko putovanje kroz postojeće znanje.

Uho je tako osetljivo a istovremeno tako grubo prema jakim signalima da stručnjaci još ispituju kako ono radi. Nijedan poznati senzor zvuka ne može da pokrije opseg energije od 10^{13}; ustvari čujna jačina zvuka od 1 pW/m^2 (neki kažu 50 pW/m^2) do 10 W/m^2 odgovara promeni pritiska vazduha od 20 µPa do 60Pa. Najmanja jačina zvuka koji se može čuti je ona od izvora zvuka od 20 W koja se čuje na rastojanju od 10.000 km. ako se zvuk između ne gubi. Talasne dužine zvuka koji se čuje protežu se od 17 m (za 20 Hz) do 17 mm (za 20 kHz). U ovom opsegu uho, sa svojih 16.000 do 20.000 vlaknastih ćelija i 30.000 kohlearnih neurona, sposobno je da razlikuje 1500 visina tonova. Međutim uho je sposobbno da razlikuje i bliske učestanosti, kao što su 400 Hz i 401 Hz, korišćenjem posebnog mehazizma za izoštravanje visine tona.

Oko je čulo zavisno od položaja fotona. Svako oko sadrži na mrežnjači 126 miliona posebnih senzora. Prostorna gustina je najveća moguća koja ima smisla, uzimajući u obzir prečnik sočiva oka. One daju oku snage razlaganja od 1' ili 0,29 mrad, a kapacitet da svesno otkriju manje od 60 ***slučajnih*** fotona za 0,15 s, ili 4 ***apsorbovana*** fotona u istom vremenskom razmaku.

Svako oko sadrži 120 miliona izuzetno osetljivih senzora jačine svetlosti, ***štapiće***. Oni su odgovorni za pomenutu osetljivost na jačinu svetlosti. Štapiči ne mogu da razlikuju boje. Pre kasnih godina dvadesetog veka, senzore svetlosti iste osetljivosti kao i štapići, a koje su pravili ljudi, morali su da budu hlađeni helijumom, pošto tehnologija nije bila sposobna da napravi senzore na sobnoj temperaturi koji bi bili osetljivi kao ljudsko oko.



Slika 13 Različita brzina reagovanja senzora za boju u oku, čepića, dovodi do čudnog efekta kada se ova slika (u verziji sa bojama) brzo pomera levo-desno pri slabom osvetljenju

Ljudsko oko sadži i oko 6 miliona ne toliko osetljivih senzora za boje, ***čepiće***, čiji raspored smo sreli ranije. (***Vol. III, strana 147***). Različite hemikalije u tri tipa čepića (crveno, zeleno, plavo) dovode do različitih brzina osetljivosti; to može da se proveri pomoću jednostavnog testa prikazanog na ***slici 13***. (***Ref. 19***). Razlika osetljivosti između ćepića i štapića slepih na boje razlog je da su noću sve mačke sive.

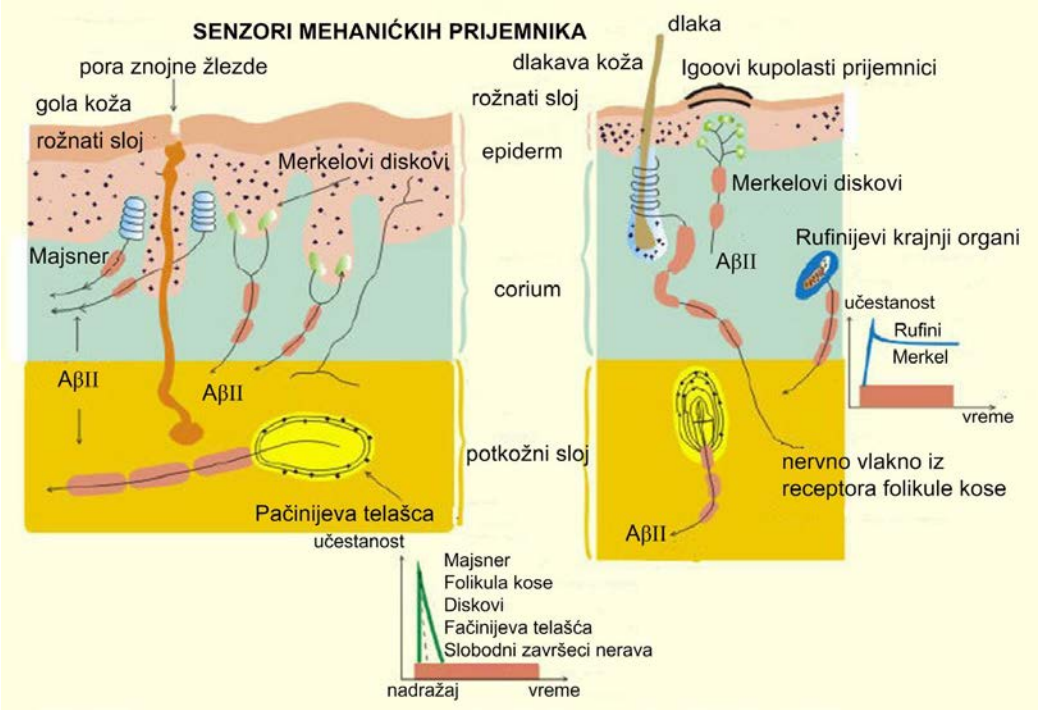
Slike koje stvara oko jedino su oštre ako se oko neprestano pomera u malim nasumičnim kretanjima. Ako se kretanje zaustavi, na primer pomoću hemikalija, slike koje stvara oko postaju neoštre.

Oko sadrži takođe oko 1 milion ganglijskih ćelija mrežnjače. Signali iz oka prenose se kroz 1 milion optičkih nervnih vlakana do dela u mozgu, virtualne moždane kore, koja sadrži preko 500 miliona ćelija.

Senzori ***čula dodira*** kod ljudi raspoređeni su na koži. uz površinsku osetljivost koja je promenljiva od jednog do drugog područja. Gustina je najmanja na leđima, a najveća na licu i na jeziku. Šaka ima oko 17.000 prijemnika na dodir, od kojih je većina na vrhovima prstiju. To su posebni senzori za lagani dodir – Majsnerova (Meissner) telašca, za pritisak – Merkelove (Merkel) ćelije, za izobličavanja – Rufinijeva (Ruffini) telašca, za vibracije – Pačinijeva (Pacini) telašca i za golicanje – nemielirana vlakna; postoje i drugi posebni senzori za toplotu, za hladnoću[1] i za bol. Neki od senzora, čiji je opšti izgled prikazan na

[1] Postoje ***četiri*** vrste senzora za toplotu: jedni se aktiviraju iznad 27ºC, drugi iznad 31ºC, treći iznad 42ºC i četvrti iznad 52ºC. Senzore za temperaturu iznad 42ºC, TRPV1, isto tako aktivira kapsiacin, hemikalija iz ljutih paprika.

slici 14 reaguju proporcionalno na jačinu stimulansa, neki diferencijalno, to jest daju signal samo kada se stimulans menja. Mnogi od ovih senzora nalaze se unutar tela – na primer na jeziku. Senzori se aktiviraju kada ih neki spoljašni pritisak deformiše: to dovodi do oslobađanja jona Na^+ i K^+ kroz jihove opne, što zatim izaziva električni signal koji se preko nerava šalje u mozak.



Slika 14 Pet vrsti senzora čula dodira kod ljudi, od najčešćih do najređih: Majsnerova telašca, Merkelove ćelije, Rufinijeva telašca, Pačinijeva telašca i prijemnici na kosi.

Ljudsko telo sadrži takođe ***senzore za orijentaciju***, koji se nalaze u uhu, ***senzore izduženja*** u svakom mišiću i ***senzore bola*** raspoređene različitom gustinom po koži i u unutrašnjosti tela.

Mehanizam čula ukusa, ***senzora za ukus***, samo je delimično poznat. Poznato je da jezik daje šest različitih signala ukusa[1]: – slatko, slano, gorko, kiselo, proteinsko i masno – a mehanizmi se neprestano otkrivaju. Osećaj proteina, takođe poznat pod imenom ***umami***, bio je otkriven 1907. godine od strane Ikede Kikunae; osećaj za "masno" otkriven je tek 2005. godine. (***Ref. 20***). Jezik, nepca i obrazi sadrže oko 10.000 pupoljaka ukusa, od kojih se 90% nalazi na jeziku. Svaki pupoljak ima između 50 i 150 prijemnika; njihov prečnik iznosi oko 10 μm.

Demokrit je u drevnoj Grčkoj predpostavljao da ukus zavisi od oblika atoma. Danas je poznato da je ukus slatkog povezan sa izvesnim oblikom molekula. Savremena istraživanja nisu još otkrila različite receptore na jeziku. Poznato je najmanje tri vrste različitih receptora za sladak ukus, desetine receptora za gorak i po jedan receptor za ukus proteina i masnoće. Nasuprot tome, poznato je da osećaj slanog i osećaj kiselog nastaju usled jonskih kanala. Uprkos ovim saznanjima ljudi nisu napravili nijedan senzor koji ima takvu sposobnost razlikovanja ukusa kakvu ima jezik. Dobar sezor ukusa bio bi veliku komercijalnu vrednost za industriju hrane. Takođe su u toku istraživanja da se nađe supstanca koja bi onesposobila neke receptore ukusa; cilj je da se umanji gorčina u lekovima i hrani.

Nos, čulo mirisa, ima oko 350 različitih receptora mirisa, a ukupno oko 40 miliona receprorskih ćelija. (Psi imaju 25 puta više.) Preko mogućih kombinacija procenjeno je da nos može da otkrije oko 10.000 različitih

---

Izgleda da postoji samo ***jedan*** senzor za hladnoću, jonski kanal TRPM8, koji se aktivira između 8ºC i 26ºC. Njega isto tako aktivira mentol, hemikalija koja se nalazi u mohitu (kubanski koktel) i nani. Neuroni hladnoće, to jest neuroni sa TRPM na svojim vrhovima, mogu da se vide pomoću posebne tehnike koja koristi fluorescenciju i poznato je da dolaze i u zube, pa pružaju osećaj kojeg dobijate kod zubara kada primenjuje test sa komprimiranim vazduhom.

[1] Osetljivost ukusa nije odvojena na jeziku u pojeđina područja; ovo je netačna tvrdnja koja je stotinama godina kopirana iz knjige u knjigu. Možete ovo falsifikovanje izvesti sami na sebi korišćenjem zrnaca šećera ili soli. (***Izazov 22s***).

mirisa.[1] Zajedno sa šest signala koje može da napravi čulo ukusa, nos takođe proizvodi širok opseg osećaja. On nas brani od hemijskih otrova, kao što je dim, i od bioloških otrova, kao šro su fekalne tvorevine. Nasuprot tome, veštački senzori gasa postoje samo za mali opseg gasova. Dobar veštački senzor za ukus i miris omogućio bi ispitivanja vina i sireva tokom njihove proizvodnje, pa bi stoga njegovog pronalazača obogatio. (***Izazov 23ny***). Ljudi u ovom trenutku, uz svu njihovu tehnologiju koja im je na raspolaganju, nisu u stanju da proizvedu senzore tako dobre kao kod bakterija; poznato je da ***Escherichia coli*** može da raspozna 30 supstanci u svojoj okolini.

Druge životinje imaju još neke vrste senzora. (***Vol III, strana 30***). Morski psi mogu da osete ***električna polja***. Mnoge zmije imaju ***senzore za infracrvenu svetlost***, kao što su jamski poskok ili vampirski slepi miš. Ove senzore koriste da odrede položaj žrtve ili izvora hrane. Neki insekti, kao što je *Melanophila acuminata* mogu takođe da detektuju infracrvenu svetlost; one koriste ovo čulo da bi odredile položaj požara koji im je potreban da se izlegu njihova jaja. Isto tako i drugi insekti imaju takve organe. Golubovi, pastrmke i morski psi mogu da osete ***magnetna polja***, te da ih koriste za navigaciju. Mnoge ptice i izvesni insekti mogu da vide ***ultraljubičastu svetlost***. Slepi miševi i delfini sposobni su da ***čuju ultrazvuk*** do 100 kHz i više. Kitovi i slonovi mogu da čuju i da odrede položaj ***ultrazvučnog signala.*** (***Vol. I, strana 235***).

Ukratko, senzori kojima nas je opremila priroda su umetničko delo; njihova osetljivost i jednostavno korišćenje je najviše moguće. Pošto svi senzori pokreću zadovoljastva ili pomažu da se izbegne bol, priroda očigledno želi da uživamo u životu uz najveće moguće zadovoljstvo. (***Ref. 21***). Proučavanje fizike jedan je od načina da se to postigne.

Postoje dve stvari koje čine život vrednim življenja: Mocart i kvantna mehanika.

Viktor Vajskopf (VictorWeisskopf[2])

NERVI I MOZAK

Ne postoji takva stvar kao stalno spokojstvo uma dok živimo ovde; jer sam život je samo kretanje i nikada ne može biti bez želja, bez strahova, ništa više nego bez smisla.

Tomas Hobs (Thomas Hobbes), *Leviathan*.

Glavna jedinica za obradu svih signala pristiglih od senzora, mozak, predstavlja suštinu za sva osečanja zadovoljstva. Ljudski mozak ima najveću složenost od svih poznatih mozgova.[3] Osim toga, snaga obrade signala i brzina izvršenja ljudskog mozga je još uvek mnogo veća od bilo kojeg uređaja ljudske izrade.

Već smo ranije videli kako se električni signali iz senzora prenose do mozga. (***Vol. I, strana 229***). U samom mozgu pristigli signali se ***razvrstavaju*** i ***skladište***, nekada krakoročno, a nekada dugoročno. Većina mehanizama skladištenja događa se u strukturi i snazi povezanosti između čelija u mozgu, ***sinapsama***, kao što smo već videli. (***Vol. III, strana 192***). Proces koji je ostao da se razume je razvrstavanje, proces koji se obično naziva ***razmišljanje***. Za izvesna razvrstavanja nižeg nivoa, kao što su geometrijski oblici za oči ili harmonije za uši, mehanizmi su poznati. Međutim, razvrstavanje višeg nivoa, kao što je ona koja se koristi kod pojmovnog razmišljanja, cilj je koji još nije postignut. Još uvek se ne zna kako bi se opisao proces čitanja ili razumevanja pomoću pojmova kretanja signala. Istraživanja su još uvek prepuna zaokreta i takva će verovatno ostati u velikom delu dvadesetprvog veka.

U tekstu koji sledi pregledaćemo sposobnosti našeg mozga, našeg tela i ostalih tela bitnih za sve vrste zadovoljstava koje ćemo sretati kada proučavamo kretanje

---

1 Linda Bak (Linda Buck) i Ričard Aksel (Richard Axel) dobitnici su Nobelove nagrade za medicinu i psihologiju u 2004. godini za njihovo otkriće kako radi čulo mirisa.

2 Viktor Fridrih Vajskopf (Victor Friedrich Weisskopf, 1908. Vienna – 2002. Cambridge) bio je priznat teoretski fizičar koji je radio sa Ajnštajnom, Bornom, Borom, Šredingerom i Paulijem. On je ubrzao razvoj kvantne elektrodinamike i nuklearne fizike. Radio je na projektu Manhattan, ali je kasnije vodio veliki pokret protiv nuklearnog naoružanja. U toku Hladnog rata prihvatio je kandidaturu Akademije nauka Sovjetskog Saveza. Bio je profesor na MTI i dugododišnji direktor CERN-a u Ženevi. Napisao je nekoliko uspešnih udžbenika fizike. Autor je od njega čuo navedenu rečenicu godine 1982. tokom jednog njegovog predavanja.

3 To nije u suprotnosti sa činjenicom da neke vrste kitova imaju mozak čija je masa veća. Velika masa je zbog toga da bi se mozak zaštitio od visokih pritisaka koji se javljaju kada kitovi zarone (neki zatone do dubine od 1 km). Broj neurona u mozgu kita znatno je manji nego li u mozgu ljudi.

ŽIVI ČASOVNICI

L'horologe fait de la reclame pour le temps.[1]
Žorž Pero (Georges Perros)

Na početku naše avanture već smo dali pregled živih časovnika. (***Vol. I, strana 41***). Oni su uobičajeni u bakterijama, biljkama i životinjama. A kako ***Tabela 3*** pokazuje, bez bioloških časovnika nebi postaojali ni život ni zadovovoljstva

TABELA 3 Primeri bioloških ritmova i časovnika

Živo biće	**Oscilirajući sistem**	**Period**
Sandučar (*Talitrus saltador*)	zna u kom smeru leti iz položaja Sunca ili Meseca	cirkadijalan
Čovek (*Homo sapiens*)	gama talasi u mozgu	0,023 do 0,03 s
	alfa talasi u mozgu	0,08 do 0,13 s
	otkucaji srca	0,3 do 1,5 s
	delta talasi u mozgu	0,3 do 10 s
	cirkulacija krvi	30 s
	čelijski cirkahoralni ritam	1 do 2 ks
	brzo kretanje očiju tokom sna	5,4 ks
	nazalni ciklus	4 do14 ks
	ciklus hormona rasta	11 ks
	suprahiasmatsko jezgro (SCN), cirkadijalna koncentracija hormona, temperatura itd; dovodi do efekta pri promeni više vremenskih zona	90 ks
	časovnik kože	cirkadijalan
	mesečni period	2,4(4) Ms
	ugrađeno starenje	3,2(3) Gs
Obična muva (*Musca domnestica*)	udaranje krila	30 ms
Voćna mušica (*Drosophila melanogaster*)	udarci krila pri udvaranju	34 ms
Više insekata (na primer, ose, voćne mušice)	osećaj približavanja zime (diapauza) preko merenja dužine dana; pokreće promenu metabolizma	godišnji
Alge (*Acetabularia*)	koncetracija adenozinotrifofata (ATP)	
Plesan (na pr. *Neurospora crassa*)	formiranje kondilija	cirkadijalan
Više biljaka cvetnica	otvaranje i zatvaranje cvetova	cirkadijalan
Biljka duvana	časovnik otvaranja cvetova (fotoperiodičnost) pokreće ga dužina dana, otkrili 1920. Garner i Alard	
Arabidopsis	cirkumnutacija	cirkadijalan
	rast	nekoliko časova
Biljka telegraf (*Desmodium gyrans*)	oketanje listova na drugu stranu	200 s
Fosythia europaea, *F. suspensa*, *F. viridissima*, F. *cpectabilis*	Obrtanje cvetnih latica, otkrio je 2002. godine Van Gooch	5,1 ks

Kada pevamo muzičku notu koju smo upravo čuli, možemo da ponovimo orginalnu učestanost uz veliku tačnost. Isto tako nam je poznato iz svakodnevnog života da su ljudi sposobni da održavaju ritam u granicama od nekoliko procenata tokom dužeg vremena. (***Ref. 22***). Kada se bavimo sportom ili igramo okretne igre sposobni smo da održavamo veoma uspešno vremensku preciznost. (Za kraće ili za duže vremenske intervale naš unutarnji časovnik nije toliko precizan.) Svi ovi časovnici se nalaze u mozgu.

Mozak obrađuje informacije. To isto radi i računar, te slično računaru, našem mozgu je potreban časovnik da bi ispravno radio. Svaki časovnik je sastavljen od istih sastavnih delova. Potreban mu je ***oscilator*** koji određuje ritam i mehanizam koji snabdeva oscilator energijom. Osim toga, svakom časovniku je potreban ***brojač*** oscilacija, to jest, mehanizam koji će očitavati signal časovnika i potreban je način raspodele signala u celom sistemu, da bi usklađivao procese koji su sa njim povezani. Konačno, časovniku je potreban ***mehanizam za resetovanje (ponovno postavljanje)***. Ukoliko časovnik mora da pokrije više vremenskih

[1] "Časovnici su reklame za vreme."

razmera, potrebno mu je nekoliko oscilatora sa različitim učestanostima oscilovanja i način da se resetuju njihove relativne faze.

Premda fizičari znaju kako da se napravi dobar časovnik, još uvek nam nisu poznate mnoge karakteristike bioloških časovnika. Većina bioloških oscilatora su hemijski sistemi, a neki su električni sistemi, kao što su srčani mišić ili štoperica u mozgu. (***Ref. 23***). Opšte objašnjenje za hemijske oscilatore dao je Ilja Prirogin; to mu je donelo Nobelovu nagradu za hemiju 1977. godine. Međutim, nisu još uvek poznati svi hemijski oscilatori u ljudskom telu, a da ne pominjemo mehanizam brojanja. Na primer, tek je 2003. godine bio otkriven ciklus od 24 minuta unutar svake ljudske ćelije, ali mehanizam osciliranja još uvek nije jasan u potpunosti. (Poznato je da ćelija otkucava ritmom od 27 minuta ako je snabdevamo teškom vodom, umesto ritmom od 24 minuta.) (***Ref. 24***). Možda se dnevni ritam, cirkadijalni časovnik, koji se sastoji od ili se resetuje za 60 od ovih 24-minutnih ciklusa, pokrenut od nekih glavnih ćelija u ljudskom telu. Poznato je takođe da se mehanizam resetovanja cirkadijalnog časovnika aktivira dnevnim svetlom; ćelije u oku koje izvršavaju ovo resetovanje tačno su određene tek 2002. godine. Signal svetlosti iz ovih ćelija obrađuje se u superhiasmatskom jezgru, dve posebne strukture u hipotalamusu mozga. Razne ćelije u ljudskom telu reaguju na različite načine u zavisnosti od faze ovog časovnika.

Časovnik koji ima najduži ciklus u ljudskom telu je ***starenje***. Jesan od poznatijih časovnika starenja ograničava broj podela kojima je ćelija podložna. U stvari, broj podela ćelija je konačan za sve ćelije u ljudskom telu, a iznosi tipično između 50 i 200. (Izuuzetak su ćelije za reprodukciju – ne bismo postojali ako one nebi bile sposobne da se dele beskonačno.) Brojač podela ćelije je poznat: on je upletan u telomere, posebne strukture u DNK, a proteini se nalaze na oba kraja svakog hromozoma. Ove strukture se smanjuju za mali iznos tokom podele svake ćelije. Kada su strukture prekratke, podela ćelija se zaustavlja. Čistu teoretsku predpostavku Alekseja Olovnikova iz 1971. godine kasnije su proverili brojni istraživači. (Za ovu potvrdu je samo poslednji primio Nobelovu nagradu za medicinu 2009. godine.) I toku su istraživanja mehanizama i izuzetaka iz ovog procesa, kao što su ćelije kancera i seksualne ćelije.

Nisu svi časovnici u ljudskom telu određeni, a nisu poznati ni svi mehanizm. Na primer, osnova za mesečni period kod žena je interesantan, složen i nejasan.

Ostali začuđujući časovnici su oni na osnovi ***svesnog*** stanja. od njih je najobimnije proučavana štoperica u mozgu, ili ***hronometar intervala***. Tek nedavno je ovaj mehanizam otkriven konbinovanjem podataka od bolesti ljudi, povreda ljudi, proučavanja magnetne rezonanse i efekata posebnih lekova. (***Ref. 25***). Osnovni mehanizam hronometra intervala događa se u striatijumu u baznoj gangliji mozga. Striatum sadrži hiljade hronometarskih ćelija različitih perioda. One se aktiviraju signalom "start". Zbog njihovog velikog broja, za male intervale vremena reda jedne sekunde, svaki interval vremena ima drugačiji uzorak kroz ove ćelije. Mozak može da čita ove uzorke i da ih nauči. Na taj način možemo da odradimo muziku ili specifične zadatke, na primer, delovanje u jednoj sekundi posle signala.

Iako nisu poznati svi mehanizmi časovnika u ljudima, biološki časovnici dele svojstva sa svim neživim časovnicima ljudske izrade; ona su ograničena kvantnom mehanikom. Ćak je i prosto klatno ograničeeno kvantnom teorijom. Istražimo ovu temu

KADA ČASOVNICI POSTOJE?

Die Zukunft war früher auch besser.[1]

Karl Valentin

Kada smo istraživali opštu teoriju relativnosti otkrili smo da ne postoje potpuno gravitacijski časovnici, pošto ne postoji jedinica vremena koja bi se načinila upotrebom konstanti c i G. (***Vol. II, strana 218***). Kao i svi standardi mernih jedinica, za rad časovnika je potrebna materija i negravitacijske interakcije. To je oblast kvantne teorije. Pogledajmo kakva je situacija u takvom slučaju.

Pre svega, u kvantnoj teoriji vreme nije opažanje. (***Ref. 26***). Ustvari, operator vremena nije ermitski. Drugim rečima, kvantna teorija izražava da ne postoji fizičko opažanje čija bi vrednost bila srazmerna sa vremenom. S druge strane, časovnici su sasvim uobičajeni, na primer, Sunce i Big Ben rade na zadovoljstvo većine ljudi. Posmatranja nas zato ohrabruju da potražimo operator koji bi opisao položaj kazaljki sata. Međutim, ako tražimo takav operator, dolazimo do čudnog rezultata. Svaki kvantni sistem koji ima hamiltonijan ograničen na donjoj strani – sa najmanjom energijom – nema ermitski operator za koji se

[1] "I budućnost je nekada bila bolja." Karl Valentin (1882. Munich – 1948 Planegg), dramski pisac, književnik i komičar.

očekuje da mu se vrednost monotono povećava sa vremenom. Ovaj rezultat može da se proveri rigorozno, kao matematička teorema. (***Izazov 24ny***).

Uzmimo mehanički časovnik sa klatnom. Kod svih časovnika takve vrste teg će da stane kada dostigne kraj lanca. Još opštije, svi časovnici moraju da stanu kada se isprazni baterija ili drugi izvor energije. Drugim rečima, kod svih stvarnih časovnika hamiltonijan je ograničen sa donje strane.A gornja teorema o kvantnoj teoriji izražava da takav časovnik ne može stvarno da radi.

Ukratko, kvantna teorija pokazuje da ***tačni časovnici ne postoje u prirodi***. Kvantna teorija kazuje da svaki časovnik može da bude samo ***približan***. Vreme ne može da bude izmereno tačno; vreme može da bude izmereno samo približno. Očigledno, ovaj rezultat ima značaj za časovnike velike tačnosti. Šta se događa ako pokušamo da što je moguće više povećamo tačnost časovnika?

Velika tačnost podrazumeva veliku osetljivost na poremećaje. Zatim, svaki časovnik ima u sebi oscilator, to jest, motor koji ga pokreće. Prema tome, za časovnik velike preciznosti potreban je precizi oscilator. Kod svih časovnika položaj ovog oscilatora očitava se i prikazuje na brojčaniku. Zatim, kvant rada podrazumeva da čak i kod najpreciznijeg časovnika oscilator ima neodređenost položaja. Preciznost svakog časovnika je ograničena.

Još gore, kao i svaki kvantni sistem, svaki oscilator u časovniku ima malu, ali konačnu verovatnoću da stane ili da se kreće ponekad unazad. Ovaj zaključak možete da proverite i sami. Pogledajte samo na časovnik kada mu je baterija skoro prazna, ili kada je teg koji pokreće klatno stigao skoro do donjeg položaja. Časovnik počinje da izvodi čudne stvari, kao da se kreće pomalo unazad ili da skakuće napred i nazad. Kada časovnik radi normalno, ovakvo ponašanje je jako potisnuto, medutim, još uvek je moguće, premda uz malu verovatnoću. Ovo važi i za sunčani sat. (***Izazov 25e***).

Ukratko, neophodno je da časovnici budu makroskopski da bi radili pravilno. Časovnik mora da bude što je moguće veći da bi kolebanja uprosečio. Astronomski sistemi su dobar primer. Dobar časovnik mora da bude takođe dobro izolovan od okoline, kao što je predmet koji slobodno leti i ćije se koordinate koriste kao promenljive vremena. Na primer, to se redovno radi sa atomskim optičkim časovnicima.

PRECIZNOST ČASOVNIKA

S obzirom na ograničenja usled kvantne teorije, koja je poslednja tačnost τ časovnika? Za početak, relacija neodređenosti daje ograničenje mase časovnika. Masa časovnika mora da zadovoljava (***Izazov 26ny***)

$$M > \frac{\hbar}{c^2 \tau} \tag{2}$$

što je očigledno uvek ispunjeno u svakodnevnom životu. (***Izazov 27e***). Ali možemo mi i bolje. Kao kod klatna, možemo povezati tačnost časovnika τ sa njegovim maksimalno očitanim vremenom T. Ideju su prvi objavili Zaleker (Salecker) i Vigner (Wigner). (***Ref. 27***). Oni tvrde da je

$$M > \frac{\hbar}{c^2 \tau} \frac{T}{\tau} \tag{3}$$

gde je T vreme koje treba da se izmeri. Mogli biste da proverite da ovaj uslov direktno zahteva da svaki časovnik mora da bude ***makroskopski***. (***Izazov 28e***).

Poigrajmo se sa obrascem Zalegera i Vignera. Ona može drugačije da iskaže na sledeći način. Za sat koji može da izmeri vreme t, veličina l je povezana sa masom m preko

$$l > \sqrt{\frac{\hbar t}{m}} \tag{4}$$

Koliko blizu može da se priđe ovoj granici? (***Ref. 28***). Pokazalo se da su najmanji poznati časovnci bakterije, časovnici koji su se najviše približili ovoj granici. Najmanja bakterija ***mikroplazma*** ima masu od $8 \cdot 10^{-18}$ kg, a reprodukuje se svalih 100 min, uz preciznost od 1 min. Veličina koja je predpostavljena izrazom (4) je između 0,09 i 0,009 μm. Opažena veličina najmanje mikroplazme je 0,3 μm. Činjenica da je bakterija mogla da se približi granici veličine časovnika pokazuje nam ponovo kakav dobar inženjer je bila priroda.

Primetimo da zahtevi Zalekera i Vignera nisu u suprotnosti sa mogućnošću izrade veoma malog oscilatora za časovnik; istraživači su napravili oscilatore koji se sastoje od jednog jedinog atoma. (***Ref. 29***). Zapravo,

takvi oscilatori obećavaju izradu najpreciznijih časovnika ljudske izrade. (***Strana 36***). Međutim, oscilator je samo jedan od delova svakog časovnika, kao što je objašnjeno u predhodnom tekstu. U stvarnom svetu granice časovnika su još više sužene. Ukupna masa M ne može da se koristi u gornjim granicama. Za časovnike izrađene od atoma može da se koristi samo energija veze između atoma. To dovodi do takozvane ***standardne kvantne granice za časovnike***; Ona ograničava tačnost njihove učestanosti *v na*

$$\frac{\delta\upsilon}{\upsilon} = \sqrt{\frac{\Delta E}{E_{tot}}} \qquad (5)$$

gde je $\Delta E = \hbar/T$ energija neodređenosti koja potiče od konačnog vremena merenja T, a $E_{tot} = NE_{bind}$ je ukupna energija veze atoma u metarskoj traci. Do sada nije dostignuta kvantna granica ni za jedan časovnik, mada se u eksperimentima prišlo vrlo blizu.

Ukratko, neizbežni su časovnici koji postoje samo u granici $\hbar$. U praksi, greške koje se načine korišćenjem časovnika i metarske trake mogu da se umanje prema zahtevu; to omogućava da se naprave dovoljno veliki časovnici. Časovnik ugrađen u ljudske mozgove saglasan je sa ovim zahtevima. Stoga možemo da nastavimo naše detaljno istraživanje materije bez mnogo briga, bar još neko vreme. Tek u poslednjem delu našeg uspona na planinu, kada će zahtevi za preciznošću biti još veći i gde će opšta teorija relativnosti da ogranići veličine fizičkih sistema, problemi će ponovo da se pojave: nemogućnost da se napravi precizan časovnik postaće glavno pitanje. (***Vol. VI, strana 55***).

ZAŠTO SU PREDVIĐANJA TAKO TEŠKA, POSEBNO BUDUĆNOSTI

Budućnost: to je period u kojem naši poslovi prosperiraju, naši prijatelji su istiniti, a naša sreća je osigurana

Ambroz Birs (Ambrose Bierce)

Priroda ograničava predviđanja na četiri načina:

1. Videli smo da veliki broj čestica otežava predviđanje budućnosti usled često statističke prirode njihovih početnih uslova. (***Vol. I, strana 175***).
2. Videli smo da kvantna teorija, preko relacije neodređenosti, ograničava preciznost merenja vremena. Stoga kvant rada otežava određivanje početnih stanja uz potpunu preciznost čak i pojedinačnih čestica.
3. U našoj pustolovini našli smo da predviđanja budućnosti otežavaju nelinearnosti i odstupanja od obližnjih početnih uslova.
4. Videli smo da nesvakidašnja topologija prostor-vremena ima ograničenu predvidivost. Na primer, otkrićemo da crne rupe i horizonti imaju ograničenu predvidivost usled njihovog jednosmernog uključivanja energije, mase i signala.

Merenja i praktične predvidivosti su zato ograničeni. Glavni razlog za ova ograničenja je kvant rada. Ali ako kvant rada čini da su savršeni časovnici nemgoući, da li je determinizam ispravan opis prirode? I da li vreme postoji posle svega? Odgovor je jasan: da i ne. Naučili smo da pomenuta ograničenja za časovnike mogu da se prevaziđu u ograničenim intervalima vremena; u praksi ovi intevali vremena mogu da se naprave tako veliki da ograničenja nemaju nikakvu ulogu u svakodnevnom životu. Kao rezultat toga, u kvantnim sistemima mogu da se primenjuju i determinizam i vreme, pa ostaje netaknuta naša sposobnost uživanja u zadovoljstvima na osnovu protoka vremena.

Međutim, kada mora da se uzmu u obzir izuzetno velike količine kretanja ili izuzetno velike dimenzije, ne može da se primeni samo kvantna teorija; u takvim slučajevima mora da se uzme u obzir i opšta teorija relativnosti. Začuđujući efekt koji se pojavljuje u takvim situacijama biće objašnjen u tekstu koji sledi. (***Vol. VI, strana 49***)

RASPAD I ZLATNO PRAVILO

Najviše volim da se sećam budućnosti
Salvador Dali

Sva zadovoljstva dobijaju smisao tek kada se suoče sa smrću. A smrt je oblik raspada. Raspad je spontana promena. Kao talasna osobina materije, raspad je proces koji nema odgovarajući pojam u klasičnoj fizici. Naravno, svaki raspad – uključujući i emisiju svetlosti iz svetiljke, aktiviranje senzora u kameri, radioaktivnost i starenje ljudi – može da se opaža u klasičnom smislu: međutim poreklo raspada je u potpunosti kvantni efekt.

U svakom raspadu nestabilnog sistema čestica,važnu ulogu ima dekoherencija superpozicije makroskopski različitih stanja. (***Vol. IV, strana 113***). Eksperimenti su zaista potvrdili da je predviđanje raspada posebnih sistema, kao što je rasipanje čestica, moguće jedino u proseku za veliki broj čestica ili sistema, a nikada samo za jedno. Ova posmatranja potvrđuju kvantno poreklo raspada. U svakom procesu raspada, superpozicija makroskopski različitih stanja – u ovom slučaju onih raspadnutih i onih neraspadnutih čestica – čini da je raspad ubrzan usled interakcije sa okolinom. Obično je "okolina" vakuum, uz njegovo kolebanje elektromagnetnih slabih i jakih polja, dovoljan je da se izazove dekoherencija. Kao i obično, detalji obuhvaćenih stanja okoline nisu poznati za jedan sistem i ne mogu se predvideti za bilo koji poseban sistem.

Koje je ***poreklo*** raspada? Raspad uvek nastaje od ***tunelskog*** efekta. Jezikom kvantne elektrodinamike, možemo reći da je raspad uzrokovan kolebanjima vakuuma. Kolebanja vakuuma su nasumična. Eksperiment između ploča potvrđuje važnost kolebanja okoline za proces raspada.

Kvantna teorija daje jednostavan opis raspada. Za sistem koji se sastoji od velikog broja N identičnih čestica i koji se raspada, svaki raspad je opisan sa

$$\dot{N} = -\frac{N}{\tau} \qquad \text{gde je} \qquad \frac{1}{\tau} = \frac{2\pi}{\hbar}\left|\left\langle \psi_{\text{initial}} \middle| H_{\text{int}} \middle| \psi_{\text{final}} \right\rangle\right|^2 \tag{6}$$

Ovaj rezultat $\dot{N} = \mathrm{d}N/\mathrm{d}t$ dobio je od Fermija naziv zlatno pravilo,[1] pošto ono funkcioniše tako dobro uprkos tome što je približnost čiji da domen primenljivosti nije lak da se odredi. Zlatno pravilo dovodi do (***Izazov 29e***)

$$N(t) = N_0\, e^{-\frac{t}{\tau}} \tag{7}$$

Prema tome, predviđa se da raspad sledi prema eksponencijalnom zakonu, nezavisno od fizičkih procesa. Osim toga, vreme raspada τ zavisi od interakcije i kvadrata modula elemenata prelazne matrice. Već skoro tokom vekova svi eksperimenti potvrđuju da je kvantni raspad eksponencijalan.

S druge strane, kada se kvantna teorija koristi za izvođenje zlatnog pravila, nalazi se da je raspad eksponencijalan samo za izvesne posebne sisteme. (***Ref. 30***). Proračun tada uzima u obzir članove višeg reda koji predviđaju dva odstupanja od eksponencijalnog raspada potpuno izolovanih sistema: za kratka vremena stepen raspada može da ***izostane***; za duga vremena stepen raspada može da se odvija ***algebarski*** – ne eksponencijalno – u zavisnosti od vremena; u nekim slučajevima čak može da bude podložan oscilacijama (***Ref. 31***). Posle obimnih eksperimentalnih istraživanja zapažena su odstupanja i pri kratkim vremenima. Posmatranje odstupanja pri dugim vremenima nemoguća su zbog neizbežnosti toplotnog šuma. Ukratko, pokazalo se da je raspad eksponencijalan samo kada je okolina puna šumova, kada je sistem sastavljen od više čestica sa slabom interakcijom ili iz oba razloga. Pošto je takav slučaj uobičajen, matematički izuzetak eksponencijalnog raspada postaje (zlatno) pravilo opisa raspada.

Možete li da objasnite zašto za ljudski život nije zapaženo da prati eksponencijalni raspad, uprkos tome što je kvantni efekt? (***Izazov 30s***).

[1] U orginalu zlatno pravilo je rečenica iz hrišćanske *Biblije* (Mateja 7,12), naime pouka: "Učinite drugima sve što biste želeli da oni učine vama."

SADAŠNJOST U KVANTNOJ TEORIJI

Utere temporibus.[1]
Ovidije (Ovidius)

Mnogi mudraci savetuju da uživamo u sadašnjosti. Kako pokazuju istraživanja percepcije, ono što ljudi nazivaju "sadašnjost" ima trajanje između 20 i 70 milisekundi. (***Ref. 32***). Ovaj rezultat o biološkoj sadašnjosti navodi nas da se zapitamo da li fizička sadašnjost možda ima takođe trajanje. U svakodnevnom životu navikli smo da zamišljamo kako u što većoj meri skraćivanje vremena potrebnog za merenje položaja tačke objekta, prilazi idealu čestice fiksirane u određenoj tački u prostoru. Kada je Zenon raspravljao o letu strele[2], on je mislio da je to moguće. Međutim, kvantna teorija menja situaciju.

Možemo li stvarno da kažemo da je sistem koji se kreće u datoj tački u određeno vreme? Da bi se dobio odgovor pomoću eksperimenta, mogli bismo da koristimo fotografsku kameru čije se vreme okidanja može smanjivati po volji, Šta bismo otkrili? Kada se vreme okidanja približi vremenu periode oscilacije svetlosti, povećava se oštrina slike; osim toga, boja svetlosti bi bila pod uticajem brzine okidanja. Možemo da povećavano energiju svetlosti koja se koristi, ali manje talasne dužine samo odlažu problem, one ga ne rešavaju. Još gore, pri izuzetno malim talasnim dužinama materija postaje providna, pa okidač više ne može da se koristi. Sva istraživanja ove vrste to su potvrdila: uvek kada smanjimo vreme okidanja što je više moguće, posmatranja postaju neoštra. nedostatak oštrine je usled kvanta rada. Kvantna teorija prema tome ne potvrđuje naivna očekivanja da smanjenje vremena okidanja dovodi do oštrijih slika. Nasuprot, kvantni aspekti prirode pokazuju nam da u principu ne postoji pristup granici o kojoj je raspravljao Zenon.

Ukratko, relacija neodređenosti i najmanja vrednost rada onemogućavaju da predmet koji se kreće bude na određenom položaju u dato vreme. Zenonovo razmatranje zasnovano je na primeni zakonitosti klasičnih pojmova u oblastima gde one više ne važe. Svako posmatranje, slično svakoj fotogtrafiji, podrazumeva ***prosečno vreme***: prosečnu interakciju posmatranja tokom određenog vremena.[3] Za fotografiju je trajanje određeno vremenom okidanja; za merenje prosek je određen detaljima postavke. Bez obzira na to kakva je postavka, prosečno vreme nikada nije nula. Ne postoji "tačkasti" vemenski razmak koji bi opisao sadašnjost. Opažena fizička ***sadašnjost*** uvek je prosek neiščezavajućeg vremenskog intervala. Da bismo dali grubu vrednost kako bismo mogli da razmišljamo, u većini slučajeva dužina sadašnjosti će biti manja od yoktosekunde, tako da se obično može zanemariti.

ZAŠTO MOŽEMO DA OPAŽAMO KRETANJE?

Zenon iz Eleje nije bio zato u pravu kada je predpostavio da je kretanje redosled posebnih položaja u prostoru. Kvantna teorija podrazumeva da je kretanje samo ***približna*** promena položaja u vremenu.

Zašto onda u kvantnoj teoriji možemo da posmatramo i opišemo kretanje? Kvantna teorija pokazuje da je kretanje približnost male energije kvantnog razvoja. Kvantni razvoj podrazumeva da mogu da se izvedu merenja u prostoru i vremenu uz dovoljnu preciznost. Znamo da za svako dato opažanje energije možemo da izgradimo časovnik i metarsku traku sa većom tačnošću od zahtevane, tako da je u praksi kvantni razvoj primenjiv u svim slučajevima. Sve dok energija i vreme nisu ograničeni, svi problemi su izbegnuti i kretanje je ***vremenski redosled kvantnih stanja***.

Ukratko, kretanje možemo da zapažamo jer za svako poznato posmatranje energije možemo da nađemo još veću energiju i još duže prosečno vreme koje možemo da koristimo u mernim uređajima kako bismo odredili prostor i vreme uz veću preciznost no za sistem koji se posmatra. U poslednjem delu našeg uspona na planinu (***Vol. VI, strana 40***), otkrićemo da postoji u prirodi maksimum energije, tako da ćemo morati da

---

[1] "Iskorisi priliku", Ovidije (Publius Ovidius Naso, 20. mart 43. pne Sulmona – 17. Tomis) bio je jedan od trojice najpoznatijih pesnika Avgustovskog doba, zlatnog veka rimske književnosti, pored Horacija i Vergilija.

[2] Aristotel je u svome delu *Fizika*, VI:9, 239b5 napisao: "Ako je nepomično sve što zauzima prostor, i ako sve što je u pokretu zauzima takav prostor u nekom vremenu, onda je "*leteća*" strela nepokretna.

Ovo se zasniva na poznatom ***Zenonovom paradoksu strele***: zamislite da strela leti neprestano napred, tokom nekog vremenskog intervala. Uzmite svaki momenat u tom vremenskom intervalu. Nemoguće je da se strela pomera u takvom momentu, jer trenutak ima trajanje 0, a strela ne može biti na dva mjesta u isto vreme. Prema tome, strela je nepokretna u svakom trenutku, pa je tako strela nepokretna i tokom čitavog intervala

[3] Takođe ni razmatranje kvantnog Zenonovog efekta, datog u daljem tekstu, neče da promeni zaključke iz ovog odeljka. (***Strana 42***)

promenimo naš opis u takvoj situaciji. Međutim, ova vrednost energije je toliko velika da nam uopšte ne smeta za naše sadašnje istraživanje.

MIROVANJE I KVANTNI ZENONOV EFEKT

Kvant rada podrazumeva da u prirodi ne postoji stanje mirovanja. Mirovanje je uvek ili približnost ili prosek vremena. Na primer, ako je jedan elektron vezan u atomu, neslobodno kretanje, oblak približnosti ili raspodela gustine nepokretni su u vremenu. Ali postoji i drugi očigledan slučaj mirovanja u kvantnoj teoriji, kvantni Zenonov efekt. Obično posmatranja menjaju stanje sistema. Međutim, za izvesne sisteme posmatranje može da ima suprotan efekt, pa da učvrsti sistem.

Kvantna mehanika predpostavlja da se raspad nestabilne čestice može sprečiti ako se ona neprestano posmatra. Razlog je da posmatranje, to jest, interakcija sa uređajem posmatranja daje verovatnoću različitu od nule da se sistem ne razvija. Ako se učestanost posmatranja povećava, verovatnoća da se sistem ne raspada približava se 1. Tri grupe istraživača – Alan Turing lično 1954. godine, grupa A. Degasperis, L. Fonda i G.C. Đirardi (Gianfranco Ghirardi) 1974. godine i Džordž Sudaršan (George Sudarshan) i Baiđanah Misra (Baidyanath Misra) 1977, godine – nezavisno jedni od drugih predvideli su ovaj efekt, koji se danas naziva ***kvantni Zenonov efekt***. Grubo rečeno, kvantni Zenonov efekt izražava: ako sve vreme posmatrate sistem, ništa se ne događa.

Kvantni Zenonov efekt prirodna je posledica kvantne teorije; bez obzira na to, njegove čudne okolnosti čine ga posebno zanimljivim. Prema predviđanjima, trka za prvim opažanjima je počela. Efekt su delimično posmatrali Dejvid Vinerland (David Winerland) i njegov tim 1990. godine, a konačno su ga osmotrili Mark Rejzen (Mark Raisen) i njegova grupa 2001. godine. (***Ref. 33***). U međuvremenu, druge su grupe potvrdile merenja. Prema tome, kvantna teorija je ptvrđena takođe i u njenim iznenađujućim efektima.

Kvantni Zenonov efekt povezan je takođe i sa odstupanjima od eksponencijalnog raspada – zbog zlatnog pravila – koga predpostavlja kvantna teorija. Ustvari, kvantna teorija predviđa da je svaki raspad eksponencijalan samo za srednja vremena, kvadratičan za kratka vremena i polinominalan za izuzetno duga vremena. Ova pitanja su teme istraživanja do današnjih dana.

U začuđujećem obrtu, 2002. godine, Saverio Paskačio (Saverio Pascacio) i njegom tim predvideli su da se kvantni Zenonov efekz može iskoristiti pri tomografiji objekata rendgenskim zracima uz najmanji zamislivi nivo ozračenosti. (***Ref. 34***).

Ukratko, kvantni Zenonov efekt nije u suprotnosti sa iskazom da u prirodi ne postoji mirovanje; u situacijama u kojima se pojavljuje ovaj efekt, postoji nezanemarljiva interakcija između sistema i njegove okoline. Detalji interakcije značajni su u izvesnim slučajevima, učestana posmatranja mogu stvarno da ubrzaju raspad ili razvoj. (***Ref. 35***). Kvantna fizika još uvek ostaje bogat izvor začuđujućih efekata.

SVEST – REZULTAT KVANTA RADA

U zadovoljstvima života svest ima suštinsku ulogu. Svest je naša sposobnost da opažamo šta se događa u mašem umu. (***Vol. III, strana 245***). Ova sposobnost, slična svakoj vrsti promena, može da se posmatra i da se proučava sama za sebe. Iako je teško i verovatno nemoguće to činiti samoposmatranjem, možemo da proučavamo svest kod drugih. Očigledno je da se svest dešava u mozgu. Ako to nebi bilo tako, nebi postojao način da se ona drži u vezi sa određenom osobom. Jednostavno rečeno, znamo da se svaki mozak na Zemlji kreće brzinom od preko milion kilometara na čas kroz kosmičko zračenje iz pozadine: takođe zapažamo da se svest kreće zajedno sa njim.

Mozak je kvantni sistem; on je zasnovan na molekulima i električnim strujama. Promene u svesti koje se dešvaju kada se materija ukloni iz mozga – u hirurškim zahvatima ili udesima – ili kada se struje uvedu u mozak – u nesretnim slučajevima, eksperimentima ili pogrešnim lečenjima – opisane su vrlo detaljno u medicinskoj profesiji. Isto tako posmatranje uticaja hemikalija na mozak – od alkohola do teških droga – dovode do iste tačke. Mozak je kvantni sistem.

Savremeni uređaji za snimanje mogu da odrede koji deo mozga radi kada osećamo, pamtimo ili razmišljamo. Ne samo da se vid, buka i razmišljanje obrađuju u mozgu; mi možemo ove procese i da pratimo pomoću mernih uređaja. Najbolji uređaji za snimanje zasnivaju se na magnetnoj rezonansi i opisani su u daljem tekstu. (***Strana 123***). Druga tehnika, koja je više pod znakom pitanja, pozitronska tomografija radi tako što ljudi moraju da pojedu radioaktivni šećer. Obe tehnike potvrđuju nalaze o mestu

razmišljanja i njegovu zavisnost od hemijskog goriva. Osim toga, mi već znamo da pamćenje zavisi od prirode čestica materije. Sva ova posmatranja zavise od kvanta rada.

Danas smo zato u istom položaju gde su pre nekoliko vekova bili naučnici koji proučavaju materiju; oni znaju da je materija sastavljena od naelektrisanih čestica, ači ne mogu da kažu kako je materija načinjena. Slično tome, danas znamo da je svest izvedena od prostiranja signala i da se signali obrađuju u mozgu; znamo da je svest elektrohemijski proces. Međutim, ne znamo još uvek detalje kako signali stvaraju svest. Cilj nauke o neurologiji je da objasni rad ovog začuđujućeg kvantnog sistema. To je jedan od velikih izazova za nauku dvadesetprvog veka.

Možete li da dodate nekoliko razloga, uz one koji su ovde navedeni, a koji pokazuju da je svest fizički proces? Možete li da pokažete naročito da je kvantni proces i vaša sopstvena svest, a ne samo svest drugih osoba? Možete li da pokažete, pored toga, da uprkos tome što je kvantni proces, koherencija ne igra bitnu ulogu u svesti? (***Izazov 31s***).

Ukratko, naša svest je posledica materije od koje smo sastavljeni. Svest i zadovoljstvo zavise od materije, njenih interakcija i kvanta rada.

ZAŠTO MOŽEMO DA OPAŽAMO KRETANJE - PONOVO

Proučavanje prirode može da bude jedno od najvećih zadovoljstava u prirodi. Sva zadovoljsta se zasnivaju za našoj sposobnosti za zapažamo ili otkrivamo kretanje. A naše ljudsko stanje centralni je deo ove sposobnosti. Osim toga, do sada u našoj pustolovini otkrili smo da mi doživljavamo kretanje:

- samo zato što smo konačne veličine, a posebno stoga što smo veliki u odnosu na talasnu dužinu kvantne mehanike (tako da u svakodnevnom životu ne doživljavamo efekte talasa),
- samo zato što smo veliki u poređenju sa crnom rupom mase iste kao što je naša (tako da imamo korisne interakcije sa našom okolinom),
- samo zato što smo načinjeni od velikog, ali konačnog, broja atoma (da bi stvorili pamćenje i omogućili posmatranja),
- samo zato što nam je pamćenje ograničeno (tako da možemo da ga očistimo),
- samo zato što imamo konačnu ali umerenu temperaturu (konačnu, tako da imamo život, a ne nula, tako da možemo da radimo kao mašine),
- samo zato što smo mešavina tečnosti i čvrste materije (omogućava nam da se krećemo i da eksperimentišemo),
- samo zato što smo približno neutralni u električnom pogledu (zato je izbegnuto da naši senzori budu preplavljeni),
- samo zato što nas mozak prisiljava da prostor i vreme približimo neprekidnim suštinama (inače ne bismo stvorili ove pojmove),
- samo zato što naš mozak ne može da izbegne da opisuje da je priroda sastavljena od različitih delova (inače ne bismo bili sposobni da govorimo i mislimo),
- samo zato što su se naši predhodnici reprodukovali,
- samo zato što smo životinje (pa prema tome imamo mozak),
- samo zazo što se život razvio ovde na Zemlji,
- samo zato što živimo u relativno mirnom delu naše galaksije (što je omogućilo razvoj) i
- samo zato što se ljudska vrsta razvila mnogo posle velikog praska (kada su uslovi za život bili mnogo povoljniji).

Ako nebi bio ispunjen bilo koji od ovih uslova – kao i mnogo drugih, ne bismo mogli da posmatramo kretanje; ne bismo imali zabavu u proučavanju fizike. Ustvari, mogli bismo da kažemo: ako nebi bio ispunjen bilo koji od ovih uslova, nebi postojalo kretanje. Na mnogo načina, prema tome, kretanje je iluzija, kao što je Zenon iz Eleje tvrdio pre mnogo vremena. (***Vol. I, strana 17***). Naravno, kretanje je neizbežna iluzija koju delimo sa mnogim drugim životinjama i mašinama. Najblaže rečeno, posmatranje i pojam kretanja rezultat je svojstava i ograničenja ljudskog stanja. Potpuni opis kretanja i prirode mora

uzeti u obzir ovu vezu. Pre nego što pokušamo da to učinimo u poslednjem delu ove avanture, istražićemo nekoliko dodatnih detalja.

ZANIMLJIVOSTI I ZABAVNI IZAZOVI O DOŽIVLJAVANJU KVANTA.

Većina časovnika koje koristimo u svakodnevnom životu, one ugrađene u ljudsko telo i one ljudske izrade, su elektromagnetni. Svaki časovnik na zidu, bilo da je mehanički, upravljan kvarcom, radiom ili zvezdama, zasniva se na elektromagnetnim efektima. Znate li neki izuzetak? (***Izazov 32s***).

* * *

Čulo mirisa je veoma složeno. Na primer, supstanca koja je najsmrdljivija za ljude je ***skatol***, takođe poznat i pod drugim imenom ***3-metilindol***. To je molekul na koga je ljudski nos najosetljiviji. Skatol čini da su fekalije lošeg mirisa; on nastaje kao rezultat prodora hemoglobina iz žuči u probavni trakt. Međutim, skatol nema neprijatan miris za sve životinje; nasuprot ljudima, muve ovaj mirus privlači. Iz tog razloga neke biljke proizvode skatol.

S druge strane, ***mali nivoi*** skatola nemaju za ljude neprijatan miris. Skatol se isto tako koristi u malim količinama u prehrambenoj industriji da bi se dobio miris i ukus sladoleda od vanile – mada pod drugim imenom.

* * *

Vredi napomenuti da ljudska čula otkrivaju energiju u sasvim različitim veličinama. Oči mogu da osete energiju svetlosti od oko 1 aJ, dok čulo dodira može da otkrije samo energiju koja je otprilike 10 μJ. Da li je jedan od ova dva sistema relativistički? (***Izazov 33s***).

* * *

Plan konstrukcije ljudi upamćen je u DNK. DNK je sastavljena od 20.000 gena, koji čine oko 2% DNK, a 98% DNK je nekodiran DNK, koji se nekada nazivao "otpadna DNK". Ljudi imaju isto toliko gena kao crvi; biljke ih imaju mnogo više. Tek oko 2010. godine postalo je konačno jasno, preko međunarodnog projekta "Encode" šta ustvari radi ovih 98% DNK; tu se uključuju ili isključuju geni. Oni sačinjavaju ***administraciju*** gena i rade uglavnom kroz vezivanje posebnih proteina.

Istraživači tvrde da većina genetskih poremećaja, pa prema tome genetskih bolesti, ne nastaje usled greške u genima, već zbog grešaka u prekidačima upravljanja. Sve ovo je još uvek oblast istraživanja u toku.

* * *

Čak i u potpunom mraku oko ne dostiže utisak crnog, već nešta svetlijeg, nazvanog sopstveno sivo. To je rezultat šuma koji se stvara u oku, verovatno pokrenutog spontanom raspadom rodopsina, ili alternativno, spontanim oslobađanjem neuroloških prenosnika.

* * *

Velika osetljivost čula sluha može da se iskoristi da se ***čuje*** svetlost. Da bi se ovo postiglo, uzmite praznu staklenu teglu džema od 750 gr. Držeći osu u horizontalnom položaju, nagaravite unutrašnju gornju polovinu pomoću sveće. Donja polovina treba da ostane providna. Kada ste to uradili zatvorite teglu njenim poklopcem i u njemu izbušite otvor od 2 do 3 mm. Sada kada prinesete zatvorenu teglu sa izbušenim otvorom do uha, držeći zacrnjenu stranu naviše i kada je osvetlite odozdo sijalicom od 50 W, dogodiće se nešta čudno: čućete zvuk učestanosti 100 Hz. Zašto? (***Izazov 34s***).

* * *

Većina čula radi već pre rođenja. Dobro je poznato već tokom više vekova da svakodnevno sviranje violine majci tokom trudnoće ima zanimljiv uticaj. Čak i kada se kasnije detetu ništa o tome ne kaže, ono će kasnije postati violinista. Zapravo, na ovakav način je "stvoreno" mnogo muzičara.

* * *

Postoji dovoljno dokaza da je štetna neupotreba čula. Ljudi su proučavali šta se dešava ako se u prvim godinama života ne koristi dovoljno čulo ravnoteže – ono koje se koristi za otkrivanje kretanja i uspostavljanje ravnoteže. Kasnije u životu izuzetno je teško nadoknaditi odsustvo ljuljanja, Podjednako je opasno ako se ne koristi čulo dodira. Bebe, isto kao i svi mali sisari, koji su potpuno i sistematski lišavani ovih iskustva imaju do kraja svog života sklonost nasilnom ponašanju. (***Ref. 37***).

* * *

Važnost jonskih kanala u ljudskom telu ne može da se prenaglasi. Zastoji u jonskim kanalima odgovorni su za mnoge infekcije, neke vrste šećerne bolesti i mnoge uticaje otrova. (***Ref. 38***). Ali pre svega, jonski kanali i elektricitet uopšte, predstavljaju suštinu života.

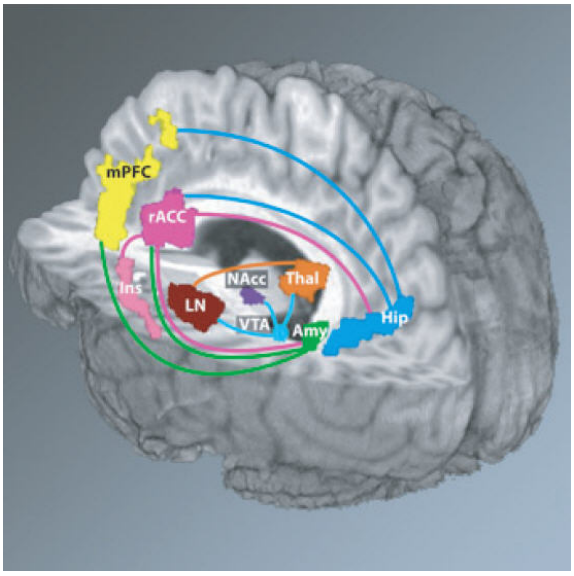
* * *

Naše telo sadrži mnogo sistema koji izbegavaju neželjeni ishod. Na primer, otkriveno je 2006. godine da se u pljuvački nalazi jako sredstvo protiv bolova. mnogo jače od morfina, koje se danas naziva ***opiorfin***. Ono sprečava da nam smetaju male ozlede u ustima. Opiorfin deluje takođe i kao antidepresant. Buduća istraživanja morala bi da pokažu da li zavisnost od hrane povezana sa tom hemikalijom

* * *

Još uvek je nepoznato zbog čega ljudi – i drugi sisari – ***zevaju***. To je još uvek tema istraživanja.

* * *



Slika 15 Lokacija *ventral tegmentalnog* područja (VTA) i *nucleus accumbens* (NAcc) u mozgu. Ostala područja koja učestvuju u zadovoljstvu i zavisnostima su Amy – *amigdala*, Hip – *hippocampus*, Thal – *thalamus*, rACC – *rostral anterior cingulate cortex*, mPFC – *medial prefrontal cortex*, Ins – *insula* i LN – *lentiform nucleus* (ljubaznošću NIH).

Priroda je uvela čula da bi se povećala zadovoljstva i izbegao bol. Međutim, neurolozi su našli da le priroda otišla i dalje, pa postoji namenski ***sistem zadovoljstva*** u mozgu, prikazan na ***slici 15***, čija je namena da odluči koji doživljaj pruža zadovoljstvo, a koji ne. Glavni deo ovog sistema zadovoljstva je ***ventralno tegmentalno područje*** u srednjem režnju i ***nucleus accumbens*** u prednjem režnju. Ova dva dela regulišu jedan drugog uglavnom kroz ***dopamin*** i ***GABA***, dva važna neurotransmitera. Istraživanja su pokazala da se dopamin proizvodi uvek kada zadovoljstvo prevazilazi očekivanja. Priroda je stoga razvila poseban signal za takvu situaciju.

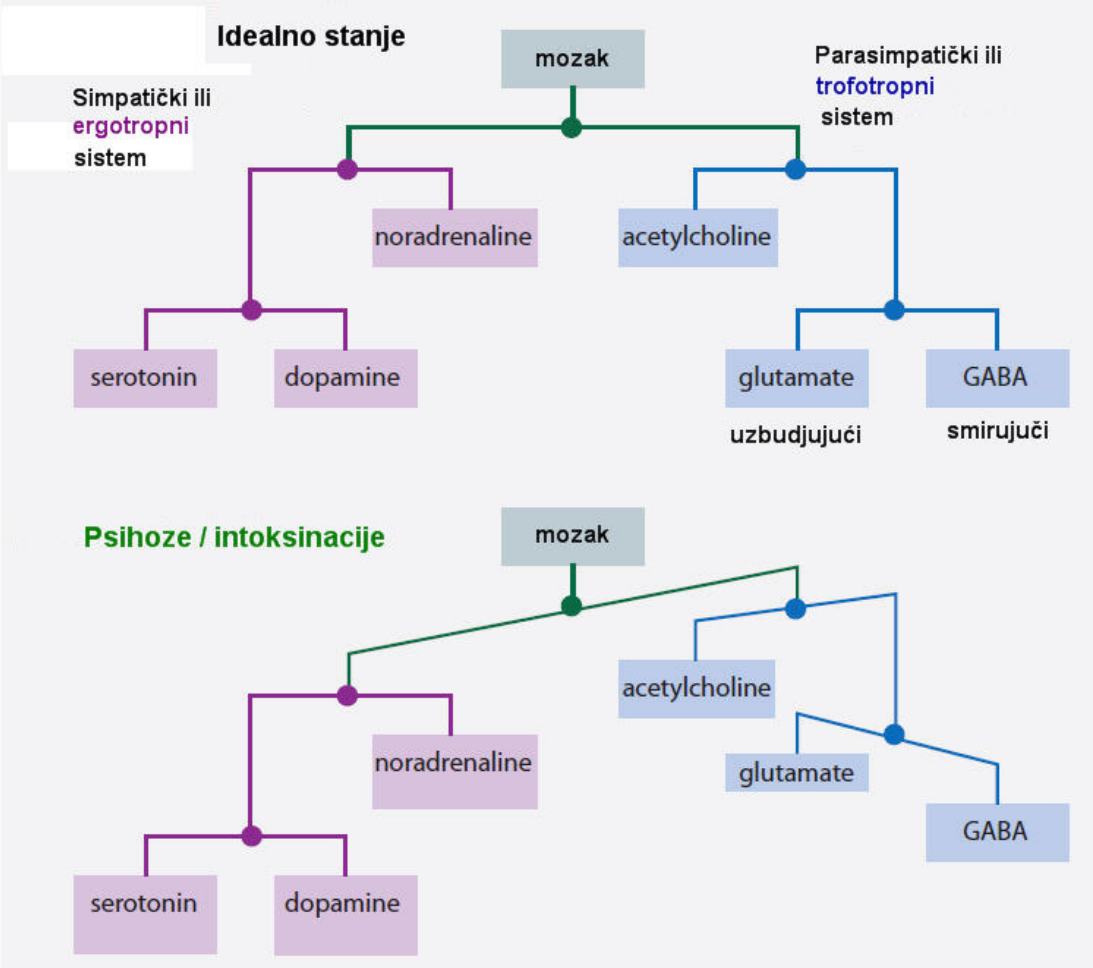
Ustvari, dobrim osećajem i zadovoljstvom upravlja veliki broj neurotransmitera i mnogo petlji regulacije, Istraživači pokušavaju da naprave model sistema zadovoljstva pomoću stotina povezanih diferencijalnih jednakosti, sa dalekim ciljem da se razumeju zavisnosti i depresije, na primer. S druge strane, mogući su takođe i jednostavni modeli sistema zadovoljstva. Jedan d njih, prikazan na ***slici 16***, je "neurohemijski mobilni" model mozga. (***Ref. 39***). U ovom modelu blagostanje je postignuto uvek kada je svih šest najvažnijih neurotransmitera[1] u relativnoj ravnoteži. Različita moguća odstupanja od ravnoteže, u svakom spoju mobilnog, mogu da se koriste da bi se opisali depresija, šizofrenija, psihoze, uticaji nikotina ili alkohola, zavisnost od alkohola, zavisnost od droga, detoksikacije, epilepsija i drugo.

* * *

Sistem zadovoljstva nije samo odgovoran za zavisnosti. On je takođe odgovoran, kako je pokazala Helen Fišer pomoću snimaka mozga magnetnom rezonansom, i za romantičnu ljubav. (***Ref. 40***). Romantična ljubav usmerena ka jednoj osobi, stanje je koje se stvara u *ventralno tegementalnom* i u *nucleus accumbens* području, Romantična ljubav je prema tome deo reptilskog mozga; zaista, romantična ljubav se može naći i

[1] Neurotransmiteri se pojavljuju u mnogo vrsta. Oni mogu da se grupišu u ***monoamine*** i ***diamine*** –kao što su dopamin, serotonin, histamin, adrenalin – ***acetilholin***, ***amino kiseline*** – kao što su glicin, GABA i glutamat – ***polipeptide*** – kao što su oksitocin, vasopresin, gastrin, opioide, neuropetide itd. – ***gasove*** – kao što su NO i CO – i brojne molekule koji se ne uklapaju u predhodne klase – kao što su anandamid ili NAAG.

kod mnogih životinjskih vrsta. Romantična ljubav je vrsta pozitivne zavisnosti i deluje kao kokain. Ukratko, u životu svi možemo da biramo između zavisnosti i ljubavi.



Slika 16 "Neruhemijski mobilni" model blagostanja sa jednim od načina na koji može da izađe iz ravnoteže

* * *

Važan događaj u životu je smrt. Kada umremo preraspodeljuju se sve naše očuvane veličine, kao što su energija, količina kretanja, moment količine kretanja i mnogi drugi kvantni brojevi. Oni se preraspodeljuju pošto očuvanost znači da se ništa ne gubi. Šta sve to znači za ono što se dešava posle smrti? (***Izazov 35s***).

* * *

Svima nama je poznat miris koji se pojavljuje na otvorenom polju kada počnu letnje kiše, ili miris sveže zemlje. To se događa zbog supstance koja se naziva ***geosmin***, biciklični alkohol kojeg proizvode bakterije u zemlji. Bakterije ga proizvode kada pada kiša. Iz razloga koji još uvek nije u potpunosti razumljiv, ljudski nos je posebno osetljiv na miris geosmina: možemo da ga namirišemo u koncentraciji ispod 10^{-10}.

* * *

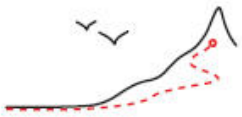
Mnoge biljke imaju ugrađen senzor i časovnik koji mere dužinu dana. Na primer, spanać ne raste u tropima, pošto da bi cvetao spanać mora da oseti tokom najmanje 14 dana zaredom da dan traje najmanje 14 sati, a to se u tropima ne događa. Ovo svojstvo biljaka, nazvano fotoperiodizam, otkrili su 1920. godine Vajtmen Garner (Wightman Garner) i Hari Alard (Harry Allard) dok su hodali kroz zasade duvana. Oni su otkrili – i eksperimentalno dokazali – da biljke duvana i soje cvetaju samo kada je dužina dana postala dovoljno kratka, prema tome oko septembra. Garner i Alard su otkrili da se biljke mogu podeliti na vrste koje cvetaju kada su dani kratki – kao što su hrizanteme i kafa – i na vrste koje cvetaju kada su dani dugi – kao što su karanfil ili detelina – i na ostale kojima dužina dana nije bitna – kao što su ruže i paradajz. Preciznost merenja dužine dana je oko 10 min. Senzor dužine dana otkriven je tek mnogo kasnije; on se nalazi u lišću biljaka, naziva se ***fitohromski sistem*** i zasniva se na posebnim proteinima. Ovi proteini sposobni su da mere odnos između svetlocrvene i tamnocrvene svetlosti i da upravljaju trenutkom kada će da se otvore cvetovi kod ovih biljaka

ZAKLJUČAK O BIOLOGIJI I ZADOVOLJSTVU

Da bi osigurala uspešnu reprodukciju živih bića, evolucija je sprovela minijaturizaciju koliko god je to moguće. Molekulski motori, uključujući molekulske pumpe, predstavljaju najmanje motore poznate do sada; oni se nalaze u velikom broju u svakoj živoj ćeliji. Molekulski motori rade kao kvantni račeti.

Da bi povećala zadovoljstva i izbegla bol, evolucija je snabdela ljudsko telo brojnim senzorima, senzorskim mehanizmima i sistemom zadovoljstva duboko unutar mozga.

Ukratko, priroda je osmislila zadovoljstva kao vodiče za ponašanja. Neurolozi su prema tome dokazali ono što je Epikur[1] rekao pre 25 vekova, a Zigmund Frojd (Sigmund Freud) ponovio pre jednog veka: zadovoljstva upravljaju ljudskim životom. Biološki senzori zadovoljstva i sistem zadovoljsva zasnivaju se na kvantnim kretanjima, posebno u oblasti hemije i nauke o materijalima. Zato ćemo u tekstu koji sledi istražiti obe ove oblasti.



[1] Iako se često zaboravlja da je Epikur rekao: "Nemoguće je živeti ugodan život bez mudrog i častnog i pravičnog života, i nemoguće je živeti mudro, častito i pravično bez ugodnog života."

Poglavlje 2

PROMENA SVETA KVANTNIM EFEKTIMA

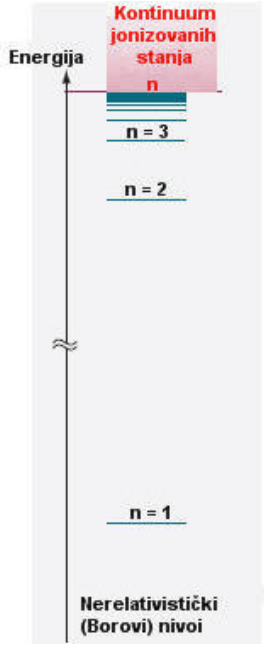
Otkriće efekata kvantne teorije promenilo je svakodnevni život. Ono je omogćilo prenošenje govora, muzike i filmova. Brojne mogućnosti telekomunikacija i interneta, napredak u hemiji, u nauci o materijalima, u elektronici i medicini nebi bili mogući bez kvantnih efekata. Mnoga druga poboljšanja u našem svakodnevnom životu nastala su usled kvantne fizike, a očekuje se još mnogo drugih. U tekstu koji sledi daćemo kratak pregled ove ogromne oblasti.

HEMIJA – OD ATOMA DO DNK

Bier macht dumm[1].
Albert Einstein

Stara je istina da Šredingerova jednakost sadrži sve iz hemije. Ljudi su prvi put imali mogućnost da pomoću kvantne teorije izračunaju jačinu hemijskih veza i, što je još važnije, uglove između njih. Kvantna teorija prema tome objašnjava ***oblik*** molekula, pa prema tome indirektno i oblik svake materije. Ustvari, tačan iskaz je: ***Dirakova*** jednakost sadrži sve iz hemije. Relativistički efekti koji prave razliku između ove dve jednakosti, potrebne su, na primer, da bi se razumelo zašto je zlato žuto i ne korodira ili zašto je živa tečnost. (***Ref. 41***).

Da bi se razumeli molekuli i svakodnevna materija, prvi korak je da se razumeju atomi. Prvi kvantni teoretičari, koje je predvodio Nils Bor (Niels Bohr) posvetili su svoje živote da bi razumeli atome i njihovu detaljnu strukturu. Glavni njihov rezultat je ono što ste naučili u srednjoj školi: u atomu sa više od jednog elektrona, posebni elektronski oblaci oblikuju loptaste nivoe oko jezgra. Nivoi elektrona mogu da se grupišu u grupe srodnih oblaka koji se nazivaju ***ljuske***. Za elektrone izvan poslednje potpuno zauzete ljuske, jezgro i unutrašnje ljuske, atomsko jezgro, mogu se često približno predstaviti kao jedinstveni naelekttisani subjekt.

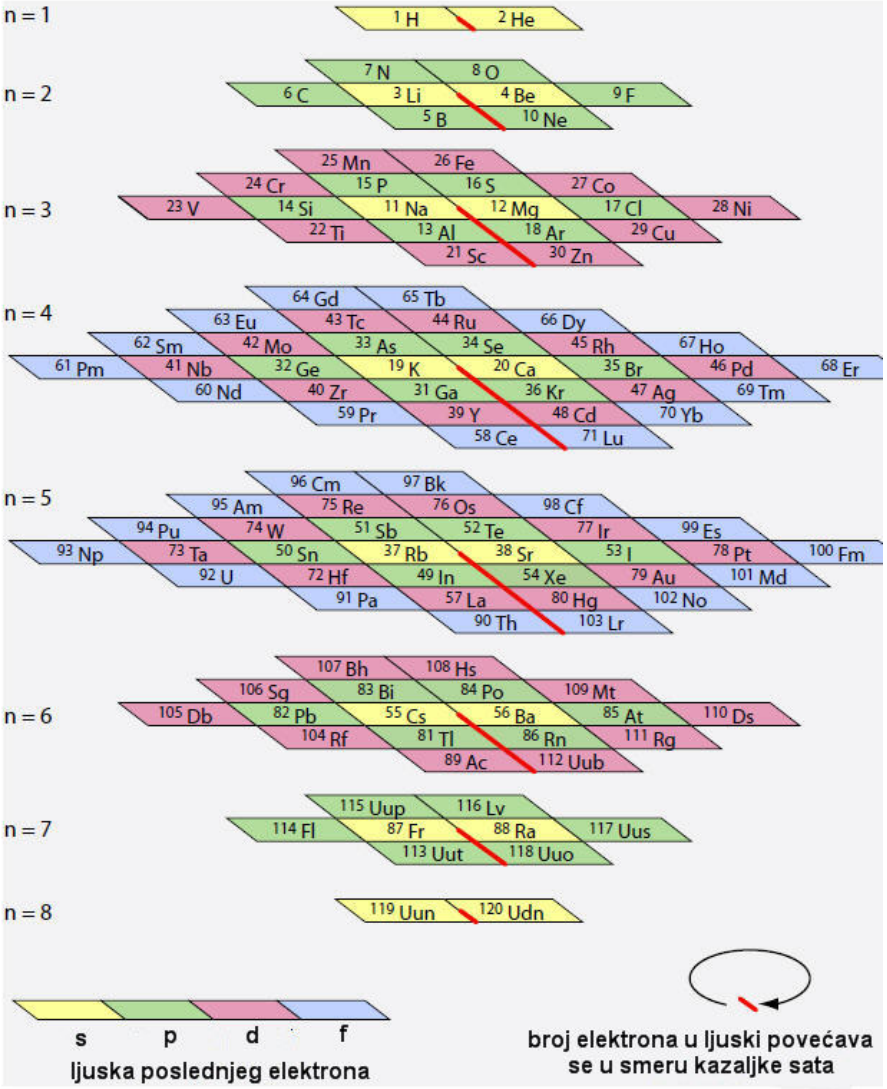


Slika 17 Glavni kvantni brojevi u atomu vodonika

Ljuske su numerisane od iznutra ka spolja. Ovaj ***glavni kvantni broj***, obično se obeležava sa n, izveden je i povezan sa kvantnim brojem koji određuje stanja u atomu vodonika. Odnosi su prikazani na ***slici 17***.

[1] "Pivo zaglupljuje", Albert Ajnštajn

Kvantna teorija pokazuje da u prvoj ljusci atoma ima mesta za dva elektrona, u drugoj za 8, u trećoj za 18 i u opštoj, n-toj ljusci, za $2n^2$ elektrona. Neutralni atom sa samo jednim elektronom je atom vodonika, atom sa dva elektrona nazvan je helijum. Svaki hemijski element ima poseban broj elektrona (i isti broj protona, kao što ćemo saznati). Način da se prikaže ova povezanost prikazana je na ***slici 18***. To se naziva periodni sistem elemenata. (***Ref. 42***). Standardni način da se sistem prikaže dat je na ***strani 261***, a još očiglednije na ***slici 19***. (Za periodični sistem elemenata sa video zapisom za svaki element, može se pogledati veb strana www.periodicvideos.com/.



Slika 18 Neuobičajen oblik periodičnog sistema elemenata

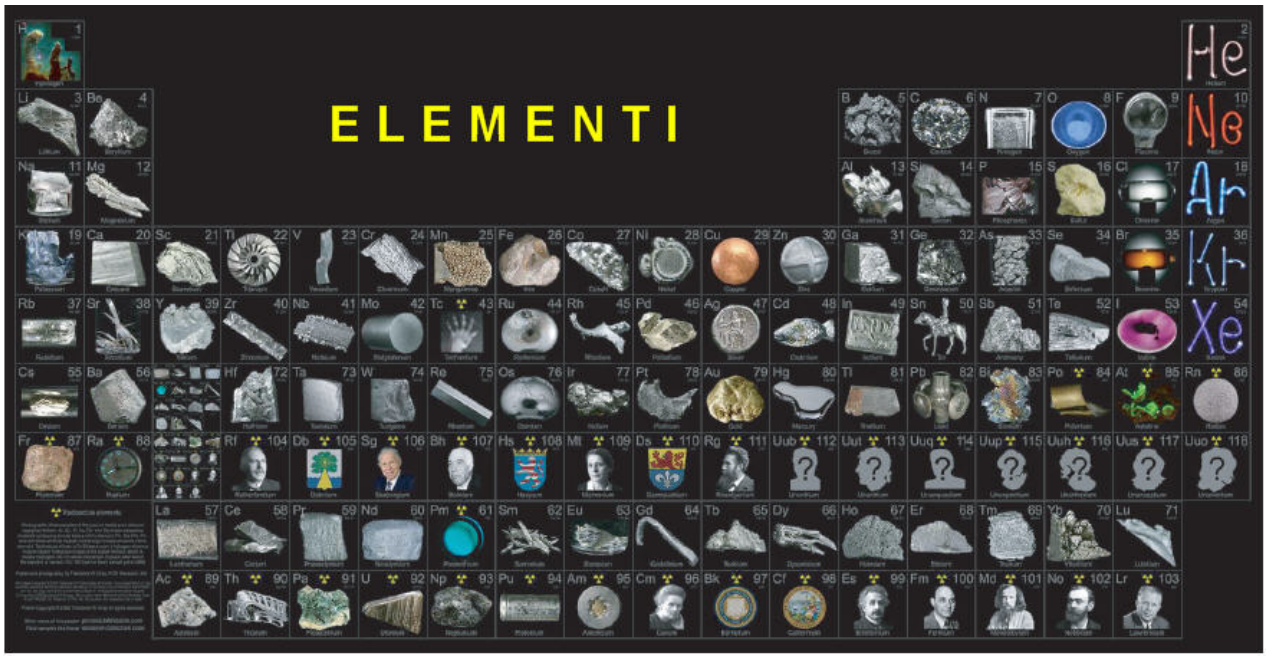
Eksperimenti pokazuju da različiti atomi koji dele isti broj elektrona u njihovim najudaljenijim ljuskama pokazuju slične hemijske osobine. Hemičari znaju da su hemijske osobine elementa određene sposobnostima atoma da obrazuju veze. Na primer, elementi sa jednim atomom u spoljnoj ljuski su ***alkalni metali***: litijum, natrijum, kalijum, rubudijum, cezijum i francijum; za vodonik, koji je izuzetak, predpostavlja se da se pod velikim pritiscima ponaša kao metal. Elementi kod kojih je spoljna ljuska popunjena, nazivaju se ***plemeniti gasovi*** (ili inertni gasovi); helijum, neon, argon, kripton, ksenon, radon i oganeson (ranije se zvao ununoktijum)

ATOMSKE VEZE

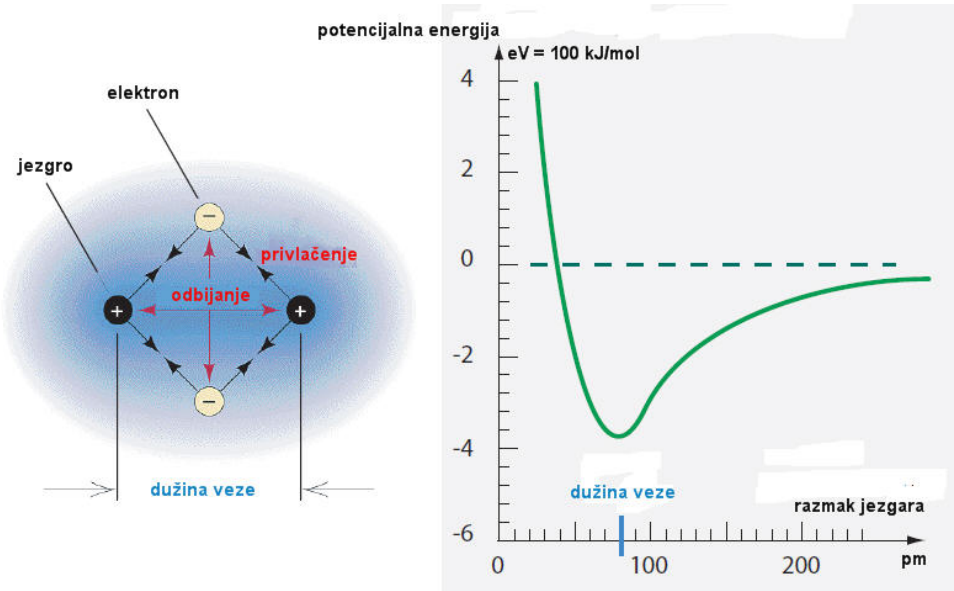
Kada se dva atome približe jedan drugom, njihovi oblaci elektrona se deformišu i pomešaju. Razlog za ove promene je kombunovani uticaj dva jezgra. Ova promena oblaka je najveća kod najudaljenijih elektrona; oni oblikuju ***hemijske veze***.

U najprostijoj približnosti veze mogu da se prikažu kao preklapanja koja popunjavaju najudaljenije ljuske oba atoma. Ova preklapanja dovode do dobitka energije. Dobitak energije je razlog zbog kojeg je vatra vruća. U plamenu drva hemijska reakcija između atoma ugljenika i kiseonika dovodi do velikog

oslobađanja energije. Posle oslobađanja energije, atomske veze naprave ustaljeno rastojanje između atoma, kao što je prikazano na ***slici 20***. Ovo rastojanje nastaje usled minimalne energije; manje rastojanje bi dovelo do elektrostatičkog odbijanja između atomskih jezgara, a veće rastojanje povećalo bi energiju elektronskog oblaka.



Slika 19 Savremen periodni sistem elemenata (© Theodor Gray, poster može da se kupi na veb strani home.theodoregray.com/).

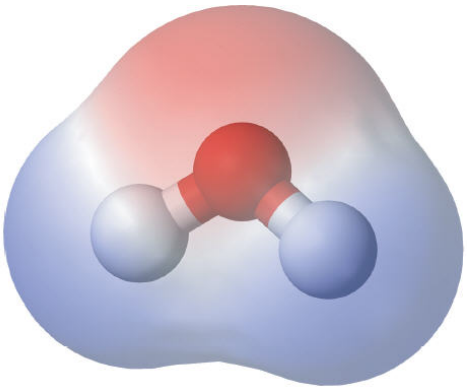


Slika 20 Nastajanje hemijske veze između dva atoma i minimum energije veze (Slika na levoj strani je sa veb strane © chemistry4gcms2011.wikispaces.com).

Mnogi atomi mogu da se povežu sa više od jednog suseda. U tom slučaju, minimalizacija energije dovodi do posebnih uglova veza, kao što je prikazano na ***slici 21***. Možda se sećate onih smešnih slika iz školske hemije o orbitama i visećim vezama. (***Ref. 43***). Takve viseće veze sada mogu da se izmere i da se posmatraju. Sada je omogućeno da se snimi više takvih grupa ako se koriste mikroskopi sa atomskim silama ili sa tunelskim skeniranjem, kao što je prikazano na ***slici 22***. (***Ref. 44***).

Sila odbijanja između oblaka svake veze objašnjava zbog čega su vrednosti uglova približni kosturu tetraedra ($2\arctan\sqrt{2} = 109{,}47°$) tako uobičajeni u molekulima. (***Izazov 36e***). Na primer, ugao u molekulu vode H-O-H iznosi 107º.

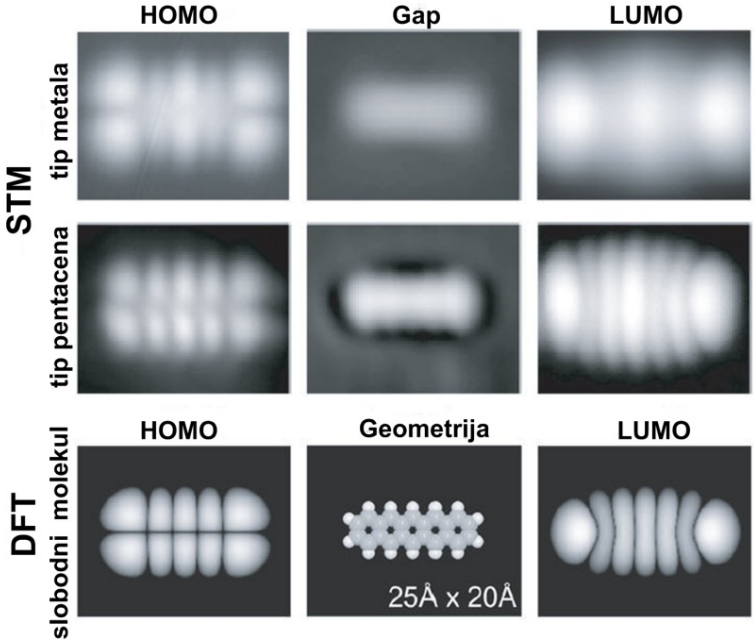
Atomi mogu da budu povezani i ***višestrukim*** vezama. Dvostruke veze se javljaju kod molekula ugljendioksida ili CO_2, koji se prema tome često piše kao O=C=O, trostruke veze se javljaju kod molekula ugljenmonoksida, CO, koji se često piše kao C≡O. I dvostruke i trostruke veze su uobičajene u organskim jedinjenjima. (Osim toga, dobro poznati šestougaoni molekul benzenov prsten C_6H_6, kao i mnoga druga jedinjenja, imaju jednuipostruku vezu.) Višestruke veze su retke, međutim postoje: četvorostruke veze se pojavljuju između prelazaka atoma metala kao što su renijum ili volfram. Istraživači su takođe potvrdili da molekul urana U_2 ima šestostruku vezu. (***Ref. 45***).



Slika 21 Umetnički prikaz ugla hemijske veze kada učestvuju dva atoma: u molekulu vode, sa njegovim rasporedom naelektrisanja usled njegove kovalentne vete, plava boja na oba kraja označava pozitivne naboje, a crvena boja u uglu na vrhu predstavlja negativan naboj. Slika u sredini prikazuje tipično prikazivanje strukture molekula vode (© Benjah-bmm27)

RIBONUKLEINSKA KISELINA I DEOKSIRIBONUKLEINSKA KISELINA

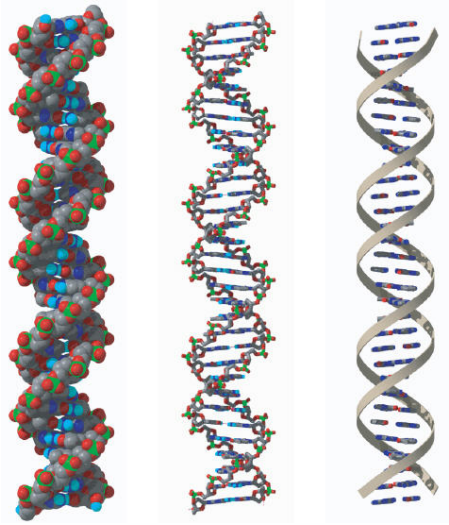
Verovatno najočaravajući od svih molekula je ljudska deoksiribonukleinska kiselina, bolje poznata po svojoj skraćenici DNK. Nukleinske kiseline je otkrio 1869. godine lekar Fridrih Mišer (Friedrich Miescher, 1844. Basel – 1895. Davos) u belim krvnim ćelijama. On ih je takođe našao i u jezgru (nucleus) ćelija, pa je zato supstancu nazvao "nuklein". Godine 1874. on je objavio značajnu studiju pokazujući sa se molekuli nalaze u spermatozoidima, te započeo raspravu o pitanju da li je ta supstanca u vezi sa nasleđivanjem. Svojim delom Mišer je otvorio put koji je doneo mnogim njegovim kolegama Nobelove nagrade (premda je on nije dobio, jer je umro pre no što je ona osnovana). Oni su promenili naziv u "nukleinska kiselina".



Slika 22 Gornja dva reda: izmerene hemijske veze u molekulu pentacena primenom različitih tehnologija; donji red: izračunavanja za udžbenik i prikaz istog eksperimenta (© IBM)

DNK je polimer, kao što je prikazano na ***slici 23***. Polimer je molekul sastavljen od više sličnih jedinica. Ustvari, DNK spada u najduže poznate molekule. Molekul DNK kod ljudi, na primer, može da ima dužinu

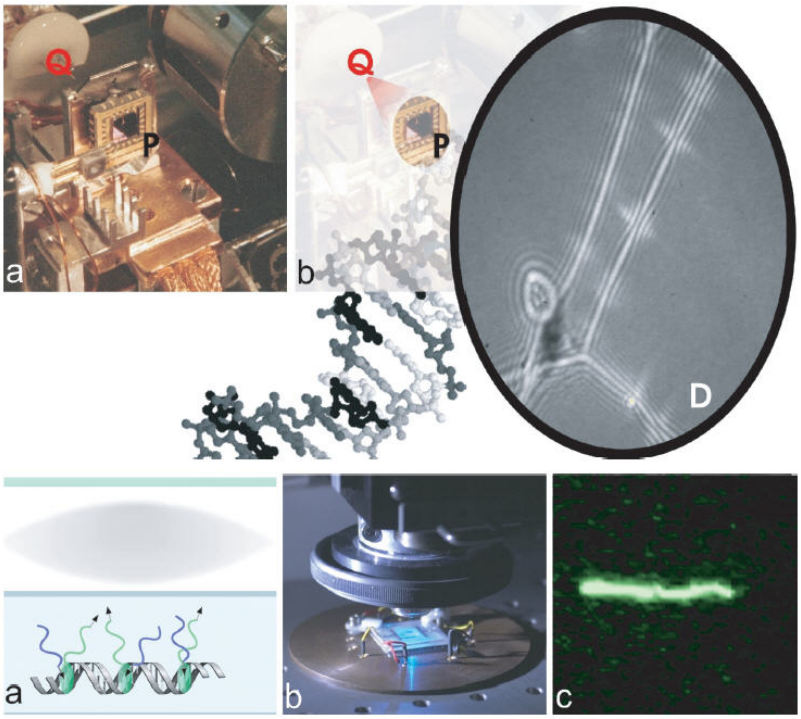
do 5 cm. Unutar svake ljudske ćelije postoji 46 hromozoma. Drugim rečima, unutar svake ljudske ćelije postoje molekuli ukupne dužine 2 m. Svi molekuli DNK sastoje se od dvostruke spirale derivata šećera, za koju su četiri nukleinske kiseline zakačeni u nepravilnom rasporedu. U današnje vreme moguće je da se naprave snimci pojedinačnog molekula DNK; jedan primer je prikazan na ***slici 24***. (***Ref. 46***).



Slika 23 Nekoliko načina da se prikaže B-DNK, sve su u lažnim bojama (© David Deerfield).

Na početku dvadesetog veka postalo je jasno da nemački naziv Desoxyribonukleinsaure (DNS) – preveden na engleski kao deoxyribonucleic acid (DNA) odnosno na srpski kao deoksiribonukleinska kiselina (DNK) – predstavlja tačno ono što je Ervin Šredinger (Erwim Schrödinger) bio predskazao u svojoj knjizi *What Is Life?* Kao centralni deo hromozoma koji se nalazi u jezgru ćelije, DNK je odgovorna za skladištenje i reprodukciju informacija o konstrukciji i funkcionisanja eukariota. Informacije su kodirane preko različitog rasporeda četiri nukleinske kiseline. DNK je nosilac informacija nasleđivanja. DNK određuje velikim delom kako će se pojedinačna ćelija, što smo nekada bili, razvijati u složenu ljudsku mašinu kakvi smo kada odrastemo. Na primer, DNK određuje boju kose, predispoziciju na razne bolesti, određuje maksimalnu visinu rasta i mnogo više. Od svih poznatih molekula, ljudska DNK je zato naintimnije povezana sa ljudskim postojanjem. Znatna veličina molekula je razlog što je shvatanje njegove pune strukture i njegove pune sadržine zadatak koji će zaposedatii naučnike u nekoliko generacija koje dolaze.

Radi doživljavanja čuda DNK, pogledajte animaciju kopiranja DNK i druge molekulske procese na jedinstvenoj veb strani www.wehi.edu.au/wehi-tv.



Slika 24 Dva načina da se snime molekuli DNK: holografijom pomoću elektrona emitovanih iz atomski izoštrenog šiljka (gore) i pomoću fluorescentnoh mikroskopa, pomoću komercijalnoh optičkog mikroskopa (dole) (© Hans-Werner Fink/Wiley VCH).

ZANIMLJIVOSTI I ZABAVNI IZAZOVI O HEMIJI

Među začuđujućim temama iz hemije nalaze se proučavanja supstanci koje utiču na ljude: toksikologija istražuje ***otrove***, farmakologija istražuje ***medicinu*** (farmakološki lekovi) i endokrinologija istražuje ***hormone***.

Poznato je oko 50.000 otrova, počev od vode (obično ubija kada se popije u velikim količinama, većim od 10 l), i kuhinjske soli (može da ubije ako se unese 100 g) do polonijuma 210 (ubija već u dozama manjim od 5 ng), mnogo manjeg od čestice prašine. Većina zemalja je objavila bazu podataka pristupačnih otrova; pogledajte na primer veb stranu www.gsbl.de/.

Možete li da zamislite zašto "toksikologija, nauka o otrovima, ustvari na grčkom znači "nauka o luku"? (***Izazov 37e***) Ustvari, nisu svi otrovi hemijskog porekla. Parafin i ulje za svetilke, na primer, redovno ubijaju decu koja ih probaju, pošto samo jedna kap naneta na jezik obrazuje tanak film oko alveola, što sprečava prenos kisonika. Ova takozvana ***lipoidna pneumonija*** može da bude smrtonosna za decu čak i kada se ***jedna kap*** ulja stavi u usta i udahne. Parafin nikada ne treba da da bude u kući gde ima dece.

Biolog Bini Van Lips (Binie Van Lipps) je tokom 1990-ih godina otkrio supstancu, jednostavan polipeptid, koja pomaže pri ujedu otrovnih zmija i drugih otrovnih životinja. Medicinske industrije širom sveta odbile su da prodaju ovu supstancu, jer je bila isuviše jeftina – a mogla je da spase mnoge živote.

* * *

Da li je supstanca otrov zavisi od životinje koja je proguta. Čokolada je otrovna za pse, ali nije za decu. Otrovne pečurke su jestive za puževe; zagrižene pečurke nisu prema tome označene kao jestive.

* * *

Hormoni su unutrašnje signalne supstance koje proizvodi ljudsko telo. Hemijski, oni mogu da budu peptidi, lipidi ili monoamini. Hormoni uzrokuju promenu raspoloženja, pokreću tuču, bežanje ili ukočenost, potpomažu rast, pokreću pubertet, upravljaju odumiranjem ćelija i starenje, aktiviraju ili zaustavljaju imunološki sistem, regulišu ciklus reprodukcije i aktiviraju osećaj žeđi, gladi i seksualnog uzbuđenja.

* * *

Kada se pomeša 50 ml vode i 50 ml etanola (alkohol), zapremina mešavine je manja od 100 ml. Zašto? (***Izazov 38s***).

* * *

Zašto ***organski*** materijali, to jest, materijali koji sadrže nekoliko atoma ugljenika, obično sagorevaju na mnogo nižoj temperaturi nego li ***neorganski*** materijali kao što su aluminijum ili magnezijum? ***(Izazov 39ny***).

* * *

Kocka šećera neće da gori. Međutim, ako na nju stavite malo pepela od cigarete ona će da gori. Zašto? (***Izazov 40ny***).

* * *

Šećeri su neophodni za život. Jedan od najjednostavnih šećera je ***glukoza***, poznata i pod nazivom ***dekstroza*** ili ***grožđani šećer***. Glukoza je takozvani monosaharid, za razliku od šećera od šećerne trske, koji je disaharid ili skroba, koji je polisaharid.

Varenje glukoze ili spaljivanje ili sagorevanje glukoze odvija se prema istoj hemijskoj reakciji

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O + 2808\,\text{kJ} \qquad (8)$$

Ovo je najjednostavnija i glavna reakcija koja snabdeva gorivom mišiće i rad mozga u našem telu. Ova reakcija je razlog što moramo da jedemo iako nam rast više ne povećava veličinu. Neophodan kiseonik O_2, razlog je što udišemo vazduh, a CO_2 koji nastaje, razlog je da ga izahnemo. Život, za razliku od vatre, sposoban je prema tome da "sagoreva" šećer na 37ºC. To je jedno od većih čuda prirode. Energija dobijena od varenja šećera pretvara se unutar ćelija u adenotrifosfate (ATP) i potom se pretvara u kretanje molekula.

* * *

Hemijske reakcije mogu da budu spore ali još uvek opasne. Sipanje žive na aluminijum stvara amalgam koji posle nekog vremena smanjuje čvrstoću aluminijuma. To je razlog što je unošenje živimih termometara u avion strogo zabranjeno.

* * *

Dva atoma mogu da stvore stanja veza uz brojne efekte koji su slabiji od elektronskih veza. Jedno od poznatijih je stanje veze stvoreno os dva atoma natrijuma na rastojanju od 60 Borovih poluprečnika, prema tome mnogo većem od uobičajenih rastojanja veza. (***Ref. 47***). Veza se ostvaruje usled neprestane razmene fotona između dva atoma.

* * *

Šta se događa kada se uzme beli prah kalijumjodida KJ i beli prah olovonitrata $Pb(NO_3)_2$ i izmešaju pomoću aparata za pasiranje? (***Izazov 41s***) (Potrebno je da se ovo uradi uz odgovarajuću zaštitu i uz nadzor.)

* * *

Pisanje po papiru perom napunjenim sokom od limuna umesto mastilom čini da je pisanje nevidljivo. Kasnije, tajno ispisan sadržaj može da se učini vidljivim pažljivim zagrevanjem papira iznad plamena sveće.

* * *

Kako se koncentracija ozona, sa hemijskim jedinjenjem O_3, održava visoko u atmosferi? Bilo je potrebno mnogo godina da se pokaže kako rashladno sredstvo koje se koristi u frižiderima, takozvani hlorofluorokarbonati ili FCHC, postepeno razaraju ovaj važan sloj. Smanjenje ozona povećalo je stepen pojave raka kože širom sveta. Zabranom upotrebe najopasnijeg rashladnog sredstva u svetu nadamo se da koncentracija ozona može da se povrati. Prvi rezultati su ohrabrujuči. Godine 1955. Paul Krutcen (Paul Crutzen), Mario Molina (Mario Molina) i Šervud Rouland (Sherwood Rowland) dobili su Nobelovu nagradu za hemiju zbog istraživanja koje je dovelo do ovih rezultata i promene politike.

* * *

Godine 2008. je pokazano da infuzija u kičmenu moždinu jedne jedine supstance, ***etanercept***, umanjuje simptome Alchajmera kod pacijenata u poodmakloj fazi Alchajmerove bolesti u roku od nekoliko minuta. Lečenje Alchajmerove bolesti jedan je od velikih otvorenih izazova savremene medicine. Godine 2013. Jens Pahnke je otkrio da ekstrakt ***kantariona*** (*hypericum perforatum*) ima pozitivno delovanje na spoznaju i pamćenje pacijenata sa Alchajmerovom bolesti. Ekstrakt je već dostupan kao besplatan lek za druge korisnike, pod imenom LAIF900.

* * *

Cijanoakrilat je očaravajuća supstanca. To je glavni satojak trenutnih lepkova, lepkova koji počinji da se očvršćuju posle nekoliko sekundi po izlaganju vlagi. Miris isparenja cijanoakrilatnog lepka je jak i poznat svima koji koriste ovaj način spajanja. (***Ref. 48***). Isparenje ima i drugu primenu: ono čini da otisci prsta postanu vidljivi. Ovo moćete da probate kod kuće! ((***Izazov 42e***)

* * *

Vatromet oduševljava mnoge. Veliki izazov u tehnologiji vatrometa je da se napravi šumska zelena i zelenkasto-plava boja. Proizvođači se još uvek trude da reše problem. Za više detalja o vatrometu, pogledajte veb stranu cc.oulu.fi/~kempmp

NAUKA O MATERIJALIMA

Da li znate da se kuvano jaje ne može koristiti kao čačkalica za zube?

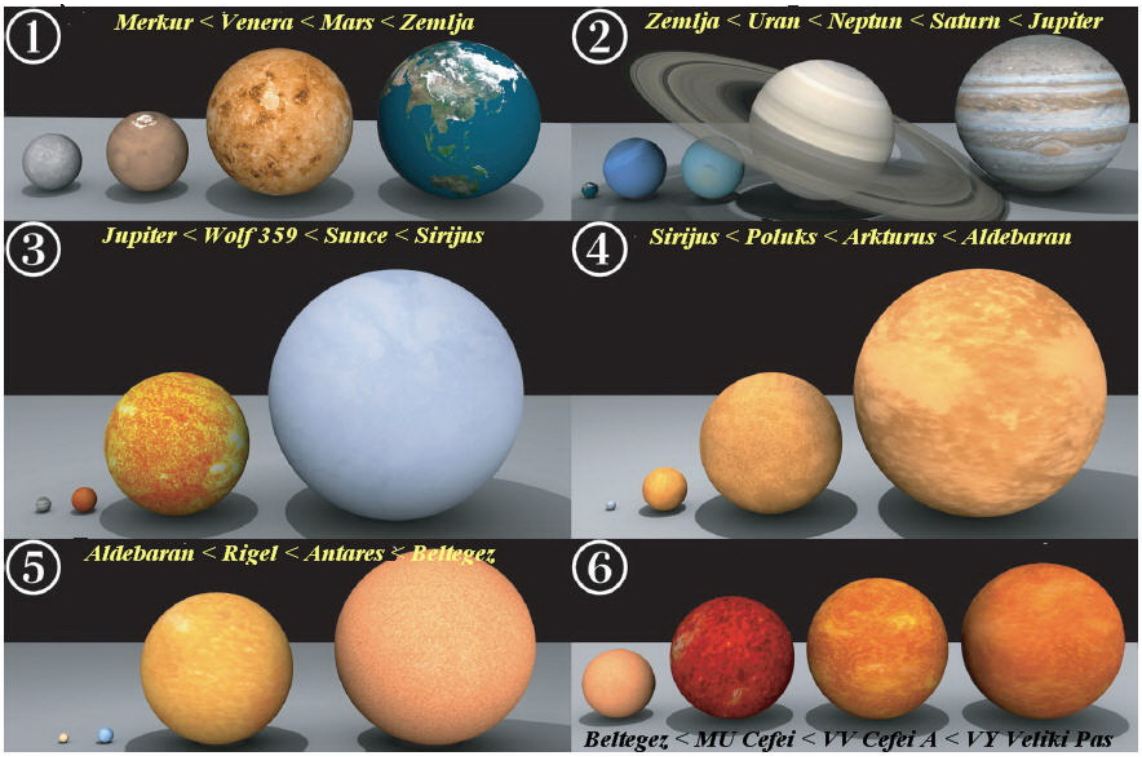
Karl Valentin

Više puta smo pomenuli da kvant rada objašnjava osobine materije. Mnogi istraživači u fizici, hemiji, metalurgiji, inženjerstvu, matematici i biologiji sarađivali su međusobno da bi dokazali ovu tvrdnju. U našem usponu na planinu jedva da ćemo imati malo vremena da objasnimo ovu opširnu ali zadivljujuću temu. Prođimo kroz ovaj odeljak

ZAŠTO POD NE PADA?

Mi ne propadamo kroz planinu po kojoj hodamo. Neka interakcija nas sprečava da ne propadnemo. Za uzvrat, kontinenti drže planine da ne propadnu kroz njih. Isto tako tečna magma u unutrašnjosti Zemlje drži kontinente da ne potonu. Svi ovi iskazi mogu da se sumiraju u dve misli. Prvu, atomi ne prodiru jedan kroz drugog: uprkos tome što su uglavnom prazni oblaci, atomi održavaju rastojanje. Drugu, veličina atoma ne može da se sabije. Oba svojstva nastaju usled Paulijevog načela isključivosti između elektrona. (***Vol. IV, strana 106***). Svojstvo elektrona da je fermion onemogućava da se atomi smanjuju ili da se prožimaju – bar na Zemlji.

Ustvari, ne drže se svi podovi usled fermionskog karaktera elektrona. Atomi ne mogu da se prožimaju na svim pritiscima. Na dovoljno velikim pritiscima atomi mogu da se uruše i da obrazuju novu vrstu poda. Takvi podovi ne postoje na Zemlji. Neki ljudi su utrošili ceo svoj život da bi razumeli zašto takvi drugi podovi, naime ***površine zvezda***, ne propadaju, ili ako to učine, kako se to događa.



Slika 25 Poređenje veličina zvezda (© Dave Jarvis).

Podovi i veličine svih astronomskih objekata nastaju usled kvantnih efekata. Na ***slici 25*** prikazan je raspon veličina nađenih kod astronomskih objekata. Kod svakog od ovih objekata kvantni efekt dovodi do unutrašnjeg pritiska koji učvršćuje pod, pa prema tome i veličinu objekta.

Kod planeta u tečnom ili čvrstom stanju, veličina je određena nestišljivošću kondenzovane materije, što se pokazalo da nastaje usled Paulijevog načela isključivosti. Stvarni unutrašnji pritisak kondenzovane materije često se naziva ***Paulijev pritisak***. Kod planeta u gasovitom stanju, kao što je Jupiter, i uobičajenim zvezdama, kao što je Sunce, pritisak gasa preuzima ulogu kao nestišljivost kod manjih planeta u tečnom ili čvrstom stanju. Pritisak gasa nastaje usled toplote koja se nalazi u njima; toplota se obično oslobađa unutrašnjim nuklearnim reakcijama.

Pritisak svetlosti igra ulogu pri određivanju veličine ***crvenih džinova***, kakav je Betelgez, ali je kod prosečnih zvezda pritisak svetlosti zanemarljiv.

Ostali kvantni efekti se pojavljuju kod ***gustine*** zvezda. Uvek kada pritisak svetlosti, pritisak gasa i elektronski Paulijev pritisak ne mogu da spreče atome od prožimanja, atomi se sabijaju sve dok se svi elektroni ne potisnu u protone. Protoni tada postaju neutroni, a cela zvezda ima istu gustinu mase kao atomsko jezgro, naime oko $2{,}3 \cdot 10^{17}$ kg/m^3. Jedna kap ima težinu od 200.000 tona. U takvim takozvanim neutronskim zvezdama, pod – ili bolje rečeno, veličina – takođe je određen Paulijevim pritiskom; međutim, to je Paulijev pritisak između neutrona, pokrenut nuklearnom interakcijom (***strana 139***). Takve neutronske zvezde imaju poluprečnik od oko 10 km.

Ako pritisak raste i dalje, zvezda postaje ***crna rupa*** i nikada ne prestaje da se urušava. (***Vol. II, strana 203***). Crne rupe uopšte nemaju pod; one ipak imaju nepromenljivu veličinu koja je određena zakrivljenošću horizonta.

Pitanje da li u prirodi postoje i druge vrste zvezda, sa drugačijim mehanizmom obrazovanja poda – kao što su predpostavljene ***kvarkne zvezde*** – još uvek je tema istraživanja.

STENE I KAMENJE

Ako geolog uzme kamen u ruku i samo da pogleda, on je obično sposoban da odredi starost kamena, uz grešku od nekoliko procenata. Potpuna priča koja prati ovu zaprepašćujuću sposobnost sastavni je deo geologije, ali osnovne crte trebalo bi da su poznate svakom fizičaru.

Uopšteno govoreći, gustina mase na Zemlji povećava se od jezgra prema površini. ***Gornji omotač***, ispod čvrste zemljine kore, uglavnom se sastoji od ***peridotita***, guste, očigledno eruptivne stene sa gustinom od oko 3,3 g/cm^3. ***Okeanska kora***, debljine između 5 i 10 km, uglavnom se sastoji od eruptivnih stena, kao što su bazalt, diabaz i gabro. Ove stene, nešto manje gustine, oko 3,0 gr/cm^3, stare su tipično 200 miliona godina. Kontinentalna kora, koja ima debljinu 30 do 50 km, sadrži lakše stene, gustine oko 2,7 kg/cm^3, kao što je granit. Starost kontinentalne kore jako se razlikuje; u proseku je starost 2000 miliona godina, uz raspon od izuzetno mladih stena do nekih koje su starije od 4300 miliona godina. Kontinentalna kora sastoji se uglavnom od nespojivih elemenata.

Svaki kamen dospe u naše ruke preko ciklusa stena. Glavni ciklus stena je proces u kojem se magma iz unutrašnjosti Zemlje pretvara kroz hlađenje i kristalizaciju u ***eruptivne*** (***ili magmatske***) stene. Eruptivne stene, kao što je bazalt, mogu da se menjaju preko erozije, prenošenja i taloženja u ***sedimentne stene***, kao što je peščar. (Sedimentne stene mogu takođe da se obrazuju putem biogenetskog osnovnog materijala.) I jedna i druga vrsta stena mogu da se pretvore usled visokih pritisaka ili temperatura u ***metamorfne stene***, kao što je mermer. Konačno, većina stena uglavnom se – ali ne i uvek – ponovo pretvori u magmu,

Glavni ciklus stena traje oko 110 do 170 miliona godina. Iz tog razloga, stene koje su starije od toga manje su uobičajene na Zemlji. Bilo koji kamen kojeg prikupimo tokom šetnje proizvod je erozije jedne od pomenutih vrsta stena. Geolog može obično da kaže, ako samo pogleda kamen, vrstu stene kojoj pripada; ako vidi ili zna početno okruženje, on može da kaže kolika je starost i često da ispriča priču o tvorevini bez ikakve laboratorije.

Tokom miliona godina minerali iz kore isplivavali su naviše ili su potiskivali koru naniže, pretvarali su se pod delovanjem toplote ili pritiska, rastvarali su se ili taložili, i postajaji bogatiji na izvesnim mestima. Ove prelepe priče o mineralima geolozi detaljno objašnjavaju. Geolozi mogu da kažu gde se nalaze plaže sa zelenim peskom (načinjenog od olivina); oni mogu da ispričaju kako dodir između sedimentnih krečnjaka i istopljenih eruptivnih stena, i pod kojim preciznim uslovima, dolazi do stvaranja mermera, rubina i ostalog dragog kamenja (***Ref. 49***); oni takođe mogu da ispričaju za malekristale kvarca koji obuhvataju koezit da je u ranijim vremenima stena bila pod izuzetno visokim pritiskom – ili da li je nekada bio na dubini reda od 70 km, ili usled udara asteroida ili posle eksplozije atomske bombe.

Sa stanovišta nauke o materijalima stene su mešavine minerala. Premda je poznato više od 5000 minerala, samo oko njih 200 obrazuju stene. Ovo obrazovanje stena od minerala može da se grupiše u nekoliko opštih tipova. Glavne grupe su stene obrazovane na osnovi silicijuma. One sadrže SiO_4 tetraedre i čine 92% svih stena. Ostalih 8% stena različitog su sastava, kao što su karbonati ili oksidi.

Sa stanovišta hemičara, stene su čak jedinstvenije. Od svih stena, njih oko 99% sastavljeno je od devet elemenata. ***Tabela 6*** prikazuje detalje.

Skoro svi minerali su kristali. ***Kristali*** su čvrsta tela sa pravilnim rasporedom atoma i oni su začuđujuća tema sama po sebi.

OBRAZOVANJE KRISTALA

Da li ste se ikada divili kristalu kvarca ili nekom drugom kristalnom materijalu? Divan oblik i raspored atoma oblikovali su se spontano, kao posledica kretanja atoma pod visokim temperaturama i velikim pritiscima, tokom vremena dok je materijal bio dubok ispod površine Zemlje. Detalji oblikovanja kristala su složeni i interesantni.

Da li su pravilne rešetke kristala ***energetski optimalne***? Ovo jednostavno pitanje dovodi do bogatstva problema. Mogli bismo da počnemo sa mnogo jednostavnijim pitanjem da li je pravilna gustina pakovanja lopti najveća moguća ***gustina*** pakovanja. Njihova gustina pakovanja je $\pi/\sqrt{18}$, to jest, malo iznad 74%. (***Izazov 43s***). Iako je već 1609. godine Johan Kepler (Johannes Kepler) ovo pretpostavio kao maksimalnu moguću vrednost, iskaz je proverio Tom Hales 1998. godine. (***Ref. 50***). Dokaz je težak, pošto je u malu zapreminu moguće zapakovati lopte do oko 78%. Kako bi se pokazalo da je i kod velikih zapremina niža vrednost tačna, predstavlja nezahvalan posao. Zatim, da li pravilni kristal čvrstih lopti, u kojima se lopte ***ne dodiruju***, zaista imaju ***najveću moguću entropiju***? Ovaj prost problem bio je predmet istraživanja još od 1990-ih godina nadalje. Interesantno, za niže temperature, rasporedi pravilne lopte zaista pokazuju najveću moguću entropiju. Na niskim temperaturama lopte u kristalima mogu da osciliraju oko svog prosečnog položaja, stoga da budu više poremećene nego li da su bile u tečnosti; u tečnosti bi stanje lopti sprečile međusobna kretanja i nebi mogle da postignu vrednost entropije čvrstog tela.

Slika 26 Eruptivne stene (gornja tri reda); gabro, adesit, permatit, bazalt, plovućac, porfir, opsidian, granit, sedra; sedimentne stene (u sredini): glina, krečnjak, peščar i (dole) dva primera metamorfozne stene: mermer (© Siim Sepp na veb strani www.sandatlas.org/. Wikimedia)

TABELA 4 Vrste stena i kamenja

Vrsta	**Svojstva**	**Podvrsta**	**Primer**
Eruptivne stene (magmatiti)	obrazovane od magme 95% svih stena	vulkanske ili istisnute	bazalt (okeansko dno, Prolaz Divova, Irska)
		plutonske ili nametnute	granit, gabro
Sedimentne stene (sedimentiti)	često sa fosilima, nekoliko procenata	klasične	škriljac, siltit, peščar
		biogenetske	krečnjak, kreda, dolomit
		nataložene	halit, gips
Metamorfne stene (metamorfiti)	pretvorene usled toplote i pritiska, nekoliko procenata	slojevite	
		neslojevite (grandoblastične ili hornfelične	mermer, skarn, kvarcit
Meteoriti	iz sunčevog sistema	kameni meteorit	
		gvozdeni meteoriti	

Mnogi slični rezultati izvedeni iz istraživanja ovih takozvanih sila entropije pokazuju da je prelazak iz čvrstog stanja u tečno – bar delimično – jednostavan geometrijski efekt. Iz istog razloga dobija se iznenađujući rezultat da čak i malo odbijanje lopti (ili atoma) može da oblikuje kristale i da ih istopi pri višim temperaturama. (***Ref. 51***). Ovo su lepi dokazi kako razmišljanje na klasičan način može da objasni izvesna svojstva materijala, koristeći iz kvantne teorije samo model materije sa česticama.

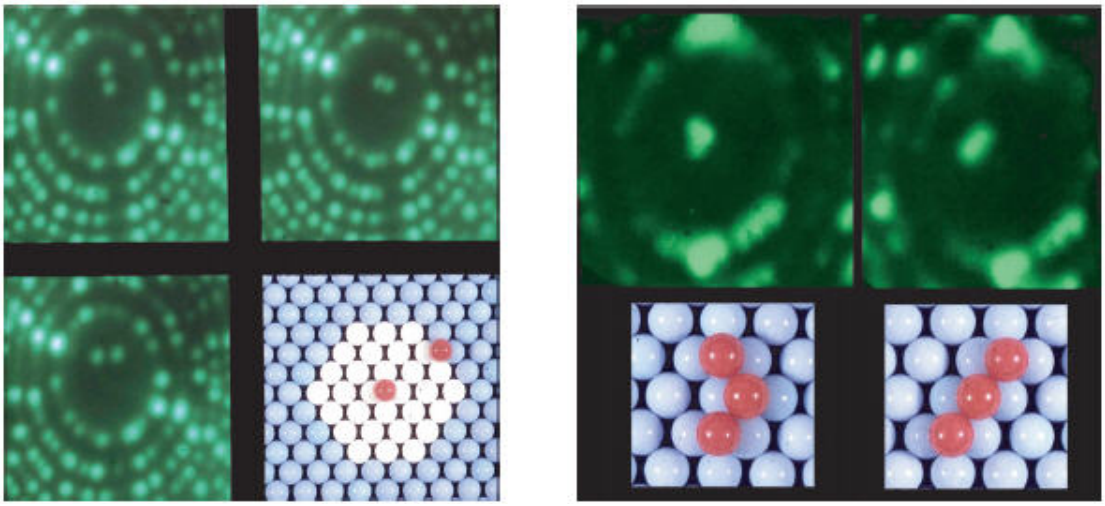
TABELA 5 Mineralni sastav stena i kamenja u Zemljinoj kori

Grupa	**Mineral**	**Zapreminski udeo**
Inosilikati	silikati *sa jednim lancem*: pirikseni, na primer, diopsidi	11(2) %
	silikati *sa dva lanca*: amfioboli/hornblende, na primer, tremoliti	5(1) %
Filosilikati	*listasti* silikati:	10(2) %
	gline, to jest. kalinit, talk	5(1) %
	silikati na bazi liskuna. to jest biotit, muskovit	5(1) %
Tektosilikati	*zapreminski* silikati	65(5) %
	kvarc, tridimit, kristobalit, koezit	1(1) %
	serija plagioklase feldspata, na primer, albit	43(4) %
	allkalni feldspati, na primer, ortoklase	14(2) %
Ostali silikati	sa izolovanom, dvostrukom ili cikličnom grupom silikata, na primer, olivin, beril i garneti ili amorfni silikati, na primer, opal	3(1) %
Stene na bazi oksida	na primer, magnetit, hematit, boksit	5(1) %
stene na bazi karbonata	na primer, kalcit, dolomit	
stene na bazi sulfata	na primer, gips, anhidrit	
stene na bazi halida	na primer, stene soli ili halit, fluorit	
ostale stene	fosfati, na primer, apatit	1(0,5) %
	sulfidi, na primer, pirit	
	samorodni metali, na primer, zlato	
	borati	
	i mnoge druge	

Ali energetska strana oblikovanja kristala daje druga interesantna pitanja. Kvantna teorija pokazuje da je moguće da ***dva*** atoma odbijaju jedan drugog, dok se ***tri*** atoma međusobno privlaće. Ovaj lep efekt otkrio je i objasnio Hans Verner Fink 1984. godine. (***Ref. 52***). On je proučavao atome renijuma da površini od volframa i pokazao, kao što je primećeno, da oni ne mogu da oblikuju dimere – dva atoma koji se kreču zajedno – već radije obrazuju trimere. To je primer koji se protivi klasičnoj fizici; efekt je nemoguč ako se atomi predstave kao nepromenljive lopte, ali postaje moguće kada se setimo da se oblaci elektrona oko atoma preuređuju u zavisnosti od njihovog okruženja.

Radi tačnog proučavanja energije kristala, moraju da se uzmu u obzir interakcije između svih atoma. Najprostije pitanje o energiji kristala je da se odredi da li je pravilno područje alternativno naelektrisanih lopti ima manju energiju od neke nepravilne kolekcije. Već je takvo jednostavno pitanje tema istraživanja; pitanje je još uvek otvoreno. Predhodne teme odnosile su se na velike kristale. Naredna tema je oblikovanje površine kristala. Možete li da potvrdite da su površine kristala one površine a najsporijom brzinom rasta, pošto su odstranjene sve površine sa bržim rastom? (***Izazov 44s***). Precizniji detalji o procesu obrazuju potpuno posebno polje istraživanja. (***Ref. 53***).

Međutim, tokom rasta kristala ne pobeđuju uvek ravni sa najsporijim porastom. ***Slika 28*** prikazuje neke dobro poznate izuzetke: pahulje snega. Danas je moguće da se objasne oblici snežnih pahulja. Furukava Jošinori (Furukawa Yoshinori) jedan od stručnjaka u ovoj oblasti predvodi tim istraživača posvećen ovoj temi. (***Ref. 54***). Ova objašnjenja rešavaju i pitanje simetrije: zbog čega su kristali često simetrični, umesto da su nesimetrični? To je tema samoorganizovanja, kao što je već pominjano u odeljku klasične fizike (***Vol. I, strana 297***). Pokazalo se da je simetrija automatska posledica načina na koji raste molekularni sistem pod uticajem difuzije i nelinearnih procesa rasta. Ali kao obično, detalji su još uvek tema istraživanja.



Slika 27 Atomi renijuma na šiljku volframa, vidljivi u centru slike, ne obrazuju dimere (levo) već obrazuju trimere (desno) (© Hans-Werner Fink/APS, iz ***Ref. 52***).

TABELA 6 Hemijski sastavi stena i kamenja u zemljinoj kori

Element	**Zapreminski udeo**
Kiseonik	47,6(1,0) %
Silicijum	37,6(0,6) %
Aluminijum	8,1(0,1) %
Gvožđe	5(1) %
Kalcijum	4,3(0,7) %
Natrijum	2,5(0,2) %
Kalijum	2,0(0,5)
Magnezijum	2,5(0,4) %
Titan	0,5(0,1) %
Ostali elementi	0,8(0,8) %

Slika 28 Oblici nekih snežnih pahulja (© Furukawa Yoshinori).

NEKI INTERESANTNI KRISTALI

Svaki kristal, kao i svaka struktura u prirodi, rezultat je rasta. Prema tome, svaki kristal je rezultat kretanja. Da se oblikuje kristal čija je pravilnost najveća moguća i čiji je oblik što je moguće simetričniji, neophodno kretanje je spor rast faceta od tečnih (ili gasovitih) osnovnih sastojaka. Rast iziskuje izvesan pritisak, temperaturu i gradijent temperature tokom izvesnog vremena. Za najimpresivnije kristale, ***drago kamenje***, uslovi su obično prilično ekstremni; to je razlog njihove trajnosti. Uslovi su ostvareni u posebnim stenama duboko u unutrašnjosti Zemlje, gde je proces rasta trajao i hiljadama godina. Kristali minerala mogu da se oblikuju u sva tri tipa stena: eruptivnim (magmatskim) metamorfičkim i sedimentnim. (***Strana 57***). Ostali kristali mogu da se naprave u laboratoriji za nekoliko minuta, časova ili dana i doveli su do posebne grane industrije. Samo malo kristala raste iz tečnosti pod normalnim uslovima; primeri su gips i neki drugi sulfati, koji mogu da kristališu u kućnim uslovima, kalijum bitartrat, koji se pojavljuje pri

pravljenju vina i kristali koji rastu unutar biljaka i životinja, kao što su zubi, kosti i magnetoosetljivi kristaliti.

Rast, rezanje obrada i glačanje kristala važna je industrija. Posebno rast kristala sama po sebi je nauka. Možete li pokazati pomoću pisaljke i papira da u kristalima mogu da se nađu samo površine sa najsporijim rastom? (***Izazov 45e***). U tekstu koji sledi biće predstavljeno nekoliko važnijih kristala.

Slika 29 Kvarc nađen na St. Gothardu, Švajcarska, veličina slike je 12 cm(© Rob Lavinsky).

Slika 30 Citrin nađen u Magalesbergu, Južna Afrika, visina kristala je 9 cm (© Rob Lavinsky).

Slika 31 Ametistin i narandžasti kvarc nađeni u Orange River, Namibija, veličina slike je 6 cm (© Rob Lavinsky).

* * *

Kvarc, ***ametist*** (čije boje nastaju usled zračenja i nečistoća sa Fe^{4+}), ***citrin*** (čije boje nastaju usled nečistoća sa Fe^{3+}), ***kvarc boje dima*** (sa centrima boje usled radioaktivnosti) ***ahat*** i ***oniks*** sve su to oblici kristalizacije silicijum dioksida ili SiO_2. Kvarc se obrazuje u eruptivnim i magmatskim stenama; kristali mogu da se nađu i u mnogim sedimentnim stenama. Kristali kvarca mogu ponekad da budu veći od ljudskog rasta. Uzgred, većina ametista gubi boju vremenom, pa ne trošite novac da biste ga kupili.

Kvarc je najčešći kristal u kori Zemlje, ali se takođe može uz veliku čistoću da bude sintetizovan od više sastojaka. Struktura je romboedar, a idealan oblik je šestostrana prizma sa šestostranom piramidom na vrhu. Kvarc se topi na 1986 K i ima piezoelektrična i piezo svojstva. Njegovo svojstvo piezoelektičnosti koristi se kao električni oscilator i filter. Film o časovniku sa kvarcnim oscilatorom nalazi se u prvom delu. (***Vol. I, strana 213***). Kvarc se isto tako koristi u proizvodnji stakla. komunikacionim (staklenim) vlaknima, za prevlake polimera, u gasnim upaljačima i kao izvor silicijuma za mnoge druge primene.

* * *

Slika 32 Korund nađen u Laacher See, Nemačka, veličina slike je 4mm (© Stephan Wolfsried).

Slika 33 Rubin nađen u Jagdalak, Afganistan, visina slike je 2 cm (© Rob Lavinsky)

Slika 34 Safir nađen u Ratnapura, Šri Lanka, veličina je 1,6 cm (©Rob Lavinsky).

Korund, ***rubin*** i ***safir*** su kristalne varijante glinice, ili Al_2O_3. Korund je čist i bezbojna kristalna glinica, rubin je legiran sa Cr, a plavi safir je legiran Ti ili Fe. Oni imaju trikliničku kristalnu strukturu i tope se na 2310 K. Prirodno drago kamenje obrazuje se u metamorfoznim stenama. Postoje takođe safiri u žutoj, zelenoj, purpurnoj, ružičastoj, smeđoj boji i boji lososa, u zavisnosti od legiranja sa drugim nečistoćama. Boja prirodnog safira, kao i kod mnogo drugog dragog kamenja, često se menja sa pečenjem i drugim obradama.

Korund, rubin i safir koriste se obično za nakit, kao hladnjak i podloga za rast, kao i za lasere. Korund je po čvrstoći drugi poznati materijal, odmah posle dijamanta, pa se zbog toga koristi za "stakla" otporna na ogrebotine na časovnicima i na mobilnim telefonima. Rubin je bio prvi dragi kamen kojeg je sintetički proizveo 1892. godine August Verneil (Auguste Verneuil, 1856. – 1913.) koji se na taj način obogatio. Savremeni sintetički pojedinačni kristali korunda mogu da teže 30 kg i više. Isto tako je keramika od glinice, koja može da bude bela ili providna, važna je u sistemima industrije i medicine.

* * *

Turmalin je mineral koji se često nalazi i može da bude crven, zelen, plav, narandžast, žut, ružičast ili crn, u zavisnosti od sastava. Hemijska formula je začuđujuće složena i menja se u zavisnosti od vrste. Turmalin ima trougaonu strukturu i obično obrazuje stubaste strukture trouglastog poprečnog preseka. Koristi se jedino za nakite. Turmalini iz Paraibe (Brazil), veoma retka vrsta zelenog ili plavog turmalina, spada među najlepše drago kamenje i može da bude skuplji od dijamanta ako je prirodan i neobrađen.

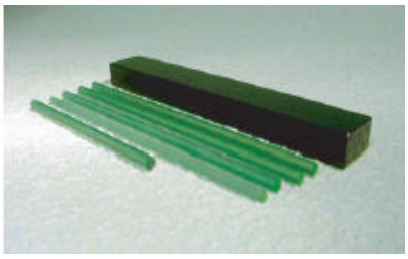
Slika 35 Levo: sirovi kristali, ili meci, od sintetičkog korunda, veličina slike 50 cm. Desno: jedinstven kristal korunda od 50 kg, veličina slike cca 50 cm (© Morion Company, GT Advanced)

Slika 36 Prirodni dvobojni turmalin nađen u Paproku, Afganistan, veličina slike 9 cm (© Rob Lavinsky)

Slika 37 Brušen turmalin iz Paribe, Brazil, veličina slike 3 cm (© Manfred Fuchs).

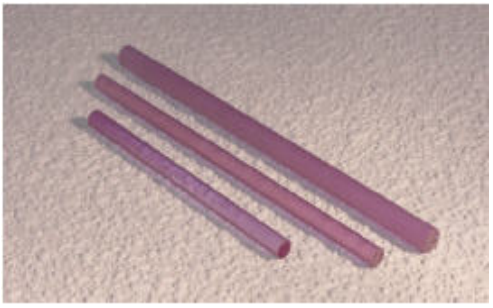
Slika 38 Crveni granat sa kvarcom boje dima nađen u Lečangu, Kina, veličina slike je 9 cm (© Rob Lavinsky

Slika 39 Zeleni dematonit granat svoju boju duguje legiranju hromom, nađen u Tubusisu, Namibija, veličina slike 5 sm (© Rob Lavinsky



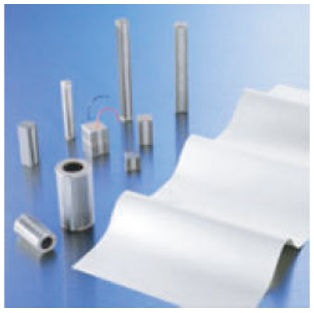
Slika 40 Sintetički Cr, Tm, Ho, YAG, granat legiran itrijum aluminatom, veličina slike 25 cm (© Northrop Grumman).

Slika 41 Aleksandrit nađen u reci Setubal, Brazil, veličina kristala je 1,4 cn osvetljen dnevnom (levo) i fluorescentnom svetlošču (desno) (© Trinity Mineral).



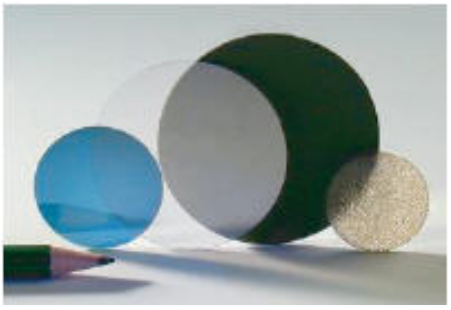
Slika 42 Sintetički aleksandrit, veličina sllike 20 cm (© Northrop Grumman).

Slika 43 Pervoksit nađen u Hilershajmu, Nemačka, širina slike je 3 mm (© Stephan Wolfsried).



Slika 44 Sintetički PZT ili olovni cirkonijum nitrat koji se koristi u mnogim proizvodima, širina slike je 20 cm (© Ceramtec).

Slika 45 Prirodni dijamant iz republike Saha, Rusija, veličina slike je 4 cm (© Rob Lavinsky).



Slika 46 Sintetički dijamant, veličina slike je 20 cm (© DIamondMaterials GmbH).

Slika 47 Dijamantski nož u hirurgiji oftalmologije, veličina slike je 1 cm (© Diamatrix Ltd.).

* * *

Garneti su porodica jedinjenja tipa X_2Y_3 $(SiO_4)_3$. Oni imaju kristalnu strukturu kocke. Mogu da budu bilo koje boje, u zavisnosti od sastojaka. Oni su podložni cepanju i njihov zajednički oblik je romboidni dodekaedar. Neki retki granati menjaju boju kada se posmatraju na dnevnoj svetlosti ili pod inkadescentim osvetljenjem. Prirodno, garneti se obrazuju u metamorfnim stenama i koriste se za nakit, kao abrazivna materija i za filtriranje vode. Sintetiči granati se koriste i kod mnogo važnih vrsta lasera.

* * *

Aleksandrit, vrsta ***hrizoberila*** legiranog hromom, koristi se za nakit i za lasere. Njegov sastav je $BeAl_2O_4$; ima ortoromboidnu kristalnu strukturu. Hrizoberil se topi na 2140 K. Aleksandrit je poznat po svojstvu da menja boju: on je zelen pri dnevnoj ili fluorescentnoj svetlosti, ali je ametistan pri inkadescennoj svetlosti, kao što je prikazano na ***slici 38***. Efekt nastaje zbog sadržaja hroma: ligandsko polje je upravo onog od hroma u crvenom rubinu i onog u zelenom emeraldu. Nekoliko ostalih dragih kamena takođe pokazuju ovaj efekt, posebno plavi garnet i neki turmalini iz Paribe.

Slika 48 Mašina za proizvodnju sintetičkih kristala silicijuma i dva proizvedena kristala dužine oko 2 m (© www.PVATePla.com)

* * *

Pervoksiti su velika klasa kristala sa strukturom kocke koja se koristi za nakit i za podesive lasere. Njihov opšti sastav je XYO_3, XYF_3 ili $XYCl_3$.

* * *

Dijamant je metastabilna vrsta grafita, prema tome čist ***ugljenik***. Teorija kaže da je grafit stabilan oblik; praksa kaže da je dijamant još skuplji. Za razliku od grafita, dijamant ima površinski centriranu strukturu kocke, poluprovodnik je širokog opsega i obično ima oktaedarski oblik. Dijamant sagoreva na 1070 K; u odsustvu kiseonika pretvara se u grafit na oko 1950 K. Dijamant može da se obrazuje u magmatskim i metamorfnim stenama. Može da se sintetizuje do razumnog kvaliteta, premda još uvek to nije moguće za veliko drago kamenje velikog kvaliteta. Dijamant može na razne načine da se oboji i može da bude legiran radi postizanja električne provodnosti. Dijamanti se koriste uglavnom za nakit, za merenje tvrdoće materijala i kao sredstvo za abraziju.

* * *

Silicijum, Si, ne nalazi se u prirodi u čistom obliku; svi kristali su sintetički. Struktura kristala je površinski centrirana struktura kocke, prema tome sličan dijamantu. Silicijum je umereno krt i može da se seče na tanke ploče koje se kanije tanje brušenjem ili hemijskim nagrizanjem, čak do debljine od 10 μm. Budući da je poluprovodnik, strukrura oblasti određuje njegovu crnu boju, njegov metalni slaj i njegovu krtost. Silicijum se široko koristi za silicijumske čipove i elektronske poluprovodnike. U današnje vreme mogu da se prave kristali silicijuma veličine čoveka oslobođeni od dislokacija i drugih linijskih grešaka. (Oni ipak imaju izvesne tačkaste greške.)

Slika 49 Hidroksilapatit nađen u Oksoikolenu, Snarum, Norveška, dužina 65 mm (© Aksel Osterlof).

Slika 50 Glavni i rezervni zubi u čeljusnoj kosti morskog psa, svi prekriveni hidroksilapatitom, veličina slike je 15 cm (© Peter Doe).

* * *

Zubi su struktura koja omogućava životinjama da budu tako uspešne u naseljavanju Zemlje. Oni su načinjeni od više elemenata; spoljna površina, ***enamel***, je 97 % hidroksilapatit, pomešan sa malim procentom dve proteinske grupe, amelogenini i enamelini. Rast zuba još uvek nije shvaćen u potpunosti; nisu razjašnjeni u potpunosti niti nivoi molekula niti mehanizmi stvaranja oblika. Hidroksilapatit je rastvorljiv u kiselinama; dodatak jona fluora menja hidroksilapatit u fluoroapatit i mnogo umanjuje rastvorljivost. To je razlog zašto se koristi fluor u pastama za zube.

Hidroksilapatit (ili hidroksiapatit) ima hemijsku formulu $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$, ima šestougaonu strukturu kristala, jako je tvrd (tvrđi je od čelika), ali je relativno krt. On se pojavljuje kao mineral u sedimentnim stenama (videti ***sliku 49***), u kostima, kao kamen u bubrezima, kamen u mokraćnoj bešiki, kamen u žuči, arterijskom plaku, artritisu hrskavice i zubima. Hidroksilapatit se vadi u rudnicima kao fosforna ruda za hemijsku industriju, koristi se u genetici za razdvajanje jednostruke i dvostruke DNK i koristi se za oblaganje implanata u kostima.

* * *

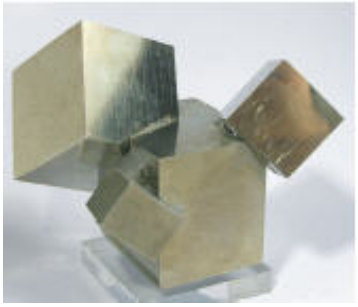
Čisti metali, kao što su ***zlato***, ***srebro***, pa čak i ***bakar***, nalaze se u prirodi obično u magmatskim stenama. Međutim, samo mali broj jedinjenja metala stvara kristale, kao što je ***pirit***. Monokristalni kristali čistih metala su svi sintetički. Monokristalni metali, kao na primer, gvožđe, aluminijum, zlato ili bakar, izuzetno su meki i rastegljivi. Oni se mogu načiniti jačim i tvrđim ili uzastopnim savijanjem – proces koji se naziva hladna obrada – ili dodavanjem nečistoća ili pravljenjem legura. Nerđajući čelik, legura gvožđa obogaćena ugljenikom, primer je upotrebe sva tri procesa.

* * *

Godine 2009., Luka Bindi (Luca Bindi) iu Prirodnjačkog Muzeja u Firenci, Italija, napunio je naslove časopisa širom sveta svojim otkrićem prvog prirodnog ***kvazikristala***. (***Ref. 55***). Kvazikristali su materijali koji isppoljavaju nekristalografske simetrije. Sve do 2009. godine bili su poznati samo kao sintetiččki materijali. Onda je 2009. godine, posle mnogo godina traganja, Bindi otkrio u svojoj zbirci primerak čija su zrna jasno pokazivala petostruku simetriju.

* * *

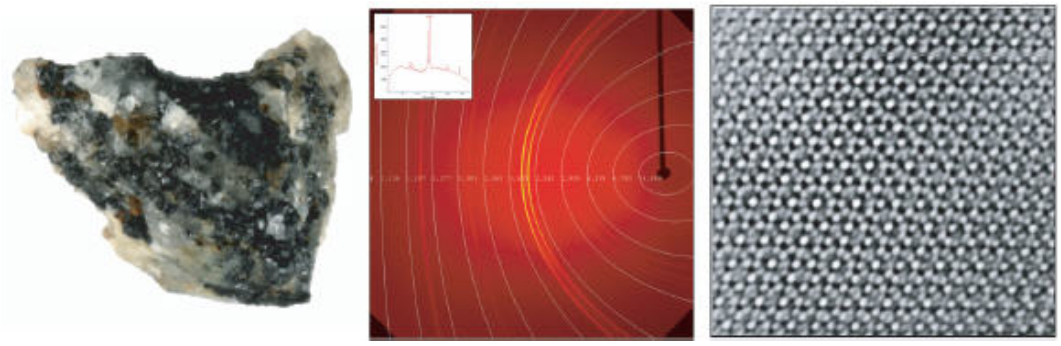
Postoji oko 4000 vrsti poznatih minerala. S druge strane, postoji deset puta više zastarelih naziva minerala, oko 40.000. Zvanične liste se mogu nači na više veb strana na internetu, uključujući www.mindat.org/ ili www.mineralienatlas.de. Da biste istražili svet oblika kristala pogledajte veb stranu www.smorf.nl. Oko 40 novih minerala otkrije se svake godine. Traganje za mineralima i njihovo sakupljanje predstavljaju očaravajući hobi.



Slika 51 Pirit nađen u Navahunu, Španija, širina slike 5,7 cm (© Rob Lavinsky).

Slika 52 Srebro iz Kolkvuehake, Bolivija, širina slike je 2,5 cm (© Rob Lavinsky).

Slika 53 Jedinstveni kristal sintetičkog bakra, širina slike je 30 cm (© Lachlan Cranswick).



Slika 54 Primerak nađen u planinama Korjak, Rusija, deo je triaznog minerala, starog oko 220 miliona godina; crni materijal je uglavnom katirkit ($CuAl_2$ i kupalita ($CuAl_2$) međutim sadrži takođe kvazikris-talna zrna sa legurom $Al_{63}Cu_{24}Fe_{13}$, koja imaju petostruku simetriju, što se vidi jasno na uzorku skretanja pri rendgenskim zracima i u prenosu slike elektrona. (© Luca Bindi).

KAKO MOŽEMO DA GLEDAMO KROZ MATERIJU

Kvant rada nam kazuje da sve prepreke imaju samo konačnu visinu potencijala. Kvant rada podrazumeva da je materija probojna (***Vol. IV, strana 26***). To nas dovodi do pitanja: Da li je moguće da se gleda kroz čvrstu materiju? Možemo li, na primer, da vidimo šta se krije unutar planine? Da bi se to postiglo, potreban nam je signal koji ispunjava dva uslova: signal mora da bude sposoban da ***prodre*** u planinu i mora da se rasipa na način koji ***zavisi od materijala***. Ustvari, takav signal postoji, a različite tehnike ga koriste. Tabela 7 daje pregled tih mogućnosti.

TABELA 7 Signali koji prodiru u planine i druge materijale

Signal	**Prodire u stenu**	**Postignuta rezolucija**	**Zavisnost od materijala**	**Upotreba**
tečni signali				
Prostiranje gasova kao što je helijum	oko 5 km	oko 100 m	srednja	ispitivanja sistema vakuuma i cevi
Prostiranje vode ili tečnih hemikalija	oko 5 km	oko 100 m	srednja	izrada mapa hidrosistema
zvučni signali				
Infrazvuk i zemljotres	100.000 km	100 km	velika	izrada mapa zemljine kore i omotača
Zvuk, eksplozija, kratki seizmički talasi	0,1 – 10 m	oko $\lambda/100$	velika	istraživanja nafte i ruda, izrada mape strukture stena, istraživanja blaga u potonulim brodovima sa profilerima ispod dna.
Ultrazvuk		1 mm	velika	snimanja u medicini, akustičnoj mikroskopiji, sonari, eho sistemi
Akustično-optičko i fotoakustično snimanje		1 mm	srednje	snimanje protoka krvi, snimanje podliva krvi (modrica)

elektromagnetni signali				
Promene statičkog magnetnog polja			srednje	traženje kablova, određivanje mesta kvara u kablu, traženje struktura i metala pod zemljom, u stenama i morskom dnu.
Električna struja				istraživanja tla i stena, traženje raspadanja zuba
Elektromagnetno sondiranje 0,2 – 5 Hz				istraživanja tla i stena u dubokoj vodi i na kopnu
Radio talasi	10 m	3 m do1 mm	mala	radar terena (do 10 MW) snimanje magnetnom rezonansom, istraživanja unutar sunčevog sistema
Ultra-široki radio opseg	10 cm	1mm	dovoljna	istraživanje provodnika i cevi, okrivanje raka dojke
THz i mm talasi	ispod 1 mm	1 mm		gledanje kroz odeću, kroz koverte i zuba (***Ref. 56***)
Infracrveni	oko 1 m	0,1 m	srednja	izrada mapa terena preko 100 m
Vidljiva svetlost	oko 1 cm	0,1 μm	srednja	više vrsti snimanja, uključujući snimanje tumora dojke
Rendgenski zraci	nekoliko metara	5 μm	velika	medicina, analiza materijala, aerodromi, provera proizvodnje hrane
γ-zraci	nekoliko metara	1 mm	velika	medicina
signali materijalnih čestica				
Neutroni iz reaktora	do oko 1 m	1 mm	srednja	tomografija metalnih struktura, na primer, arheoloških statua ili motora automobila
Mioni iz kosmičkog zračenja ili tehničkih izvora	do oko 300 m	0,1 m	mala	traženje šupljina u piramidama, snimanje unutrašnjosti teretnih kamiona
Pozitroni	do oko 1 m	2mm	velika	tomografija mozga
Elektroni	do oko 1μm	10 nm	mala	prenos u elektr.mikroskopima
Zrak neutrina	svetlosna godina	nema	veoma slaba	proučavanje Sunca
Radioaktivna izrada mapa	1 mm do 1 m			provera bezbednosti na aerodromima

Vidimo da mnogi signali mogu da prodru u planinu, a da čak još više signala je sposobno da prodre u druge kondenzovane materije. Da se napravo razlika između različitih materijala, ili da se napravi razlika između čvrstih i tečnih od vazduha, zvuk i radio talasi predstavljaju pravi izbor. Osim toga, svaka primenjena metoda zahteva veliki broj izvora signala i veliki broj prijemnika signala, pa prema tome i veliku količinu novca. Da li će ikada postojati jednostavna metoda koja omogućava gledanje u planinu upravo kao što rendgenski zraci omogućavaju istraživanje ljudskih tela? Na primer, da li je moguća izrada mapa unutrašnjosti piramida? Stručnjaci za kretanje trebalo bi da budu sposobni da daju konačan odgovor, (***Izazov 46s***).

Jedan od važnih ciljeva za fizičare u dvadesetom veku bio je razvoj najbolje dotadašnje metode da se gleda u materiju čije su dimenzije oko metar ili manje: magnetne rezonancije. (***Strana 123***). Nju ćemo razmatrati u tekstu koji sledi.

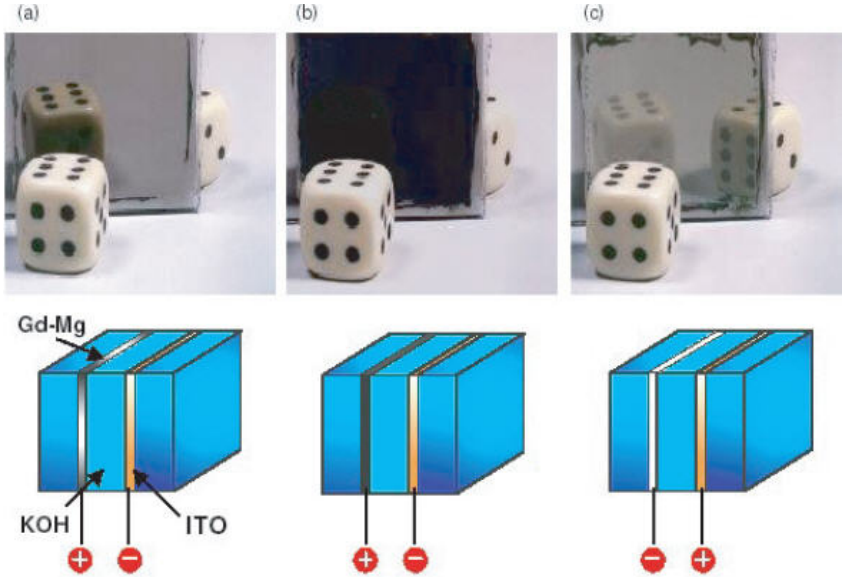
Različite savremene tehnike snimanja, kao što su rendgenski zraci, snimanje ultrazvukom i nekoliko budućih, koriste se u medicini. (***Vol. I, strana 227***). Kao što je pomenuto ranije, upotreba ultrazvuka za snimanje embriona pre rođenja nije preporučljiva. (***Vol. I, strana 228***). Proučavanja su utvrdila da ultrazvuk proizvodi jako veliki nivo čujnog zvuka za embrion, posebno kada se uzastopno isključuje i uključuje, kada bebe negativno reaguju na tu glasnu buku.

Gledanje u zemlju je važno iz drugog razloga. Ono može da pomogne za određivanje položaja ***nagaznih mina***. Otkrivanje nagaznih mina, posebno nemetalnih, zakopanih u teren, veliki je tehnološki problem koji još nije rešen. Isprobane su mnoge tehnologije: rendgenski zraci, uređaji sa povratnim rasipanjem koji rade

sa 350 do 450 keV, radar sa prodiranjem u tlo i ultraširokopojasni radar, infracrvena detekcija, toplotno bombardovanje ili bombardovanje brzim neutronima i analiza, zvučna i sonarna detekcija, tomografija električnim otporom, bombardovanje radio učestanostima, nukleatka kvadripolna rezonancija, milimetarski talasi, vizualna pretraga, spektrometri sa pokretnim jonima, upotreba pasa, upotreba pacova i otkrivanje eksplozivnih isparenja sa namenskim senzorima. (Naravno, za metalne mine su korišćeni magnetometri i detektori metala.) Međutim, do sada još uvek nema rešenja na vidiku. Možete li da ga nađete? Ukoliko uspete, stupite u vezu sa www.gichd.org/

ŠTA JE POTREBNO DA BI MATERIJA POSTALA NEVIDLJIVA?

Možda ste već zamišljali kakve avanture bi bile moguče ako biste neko vreme bili ***nevidljivi***. Tim holandskih istraživača rronašao je 1996. godine materijal, itrijum hidrid ili YH_3, koji može da se menja sa moda ogledala na providan mod upotrebom električnog signala. (***Ref. 57***). Primer efekta za slojeve Mg-Gd prikazan je na ***slici 55***.



Slika 55 Promenljivo ogledalo Mg-Gd (© Ronald Griessen).

Promenljivo oglealo možda izgleda kao prvi korak ostvarenja sna da se bude po želji nevidljiv ili vidljiv. Godine 2006. i mnogo puta ponavljano kasnije, istraživači su objavili naslove u populatnoj štampi tvrdeći da mogu da naprave ***ogrtač nevidljivosti***. To je očigledna laž. Ova laž se često koristi za dobijanje sredstava od lakovernih ljudi, kao što su kupci loših knjiga naučne fantastike ili vojska. Na primer, često se tvrdi da se predmeti mogu načiniti nevidljivim ako se prekriju metamaterijalima. Nemogućnost postizanja ovog cilja već je bilo objašnjeno u predhodnom tekstu. (***Vol. III, strana 126***). Međutim, ovog puta ćemo reći o malo više.

Priroda nam pokazuje kako da se ostvari nevidljivost. Objekt je nevidljiv ako nema površinu, ako nema apsorpciju i male je veličine. Ukratko, nevidljivi objekti su ili mali oblaci ili sastav od njih. Većina atoma i molekula primeri su toga. Homogeni gasovi bez apsorpcije takođe ispunjavaju ove uslove. To je razlog zbog kojeg je vazduh (obično) nevidljiv. Kada vazduh nije homogen, on je vidljiv, na primer, iznad toplih površina.

Nasuprot gasovima, čvrsti predmeti ili tečnosti imaju površine. Površine su uglavnom vidljive, čak i kada je telo providno, pošto sa na njima menja indeks prelamanja. Na primer, kvarc može da se načini toliko providnim da se kroz njega može gledati do 1000 km; čist kvarc je prema tome prozirniji od vazduha. Ipak, predmeti načinjeni od čistog kvarca vidljivi su za oko zbog njegovog indeksa prelamanja. Kvarc postaje nevidljiv samo kada se potopi u tečnost koja ima isti indeks prelamanja.

Ukratko, bilo šta što ima oblik ne može da bude nevidljivo. Ako bismo poželeli da budemo nevidljivi morali bismo da se pretvorimo u difuzni oblak gasa sastavljenog od atoma bez apsorpcije. U načinu da postanemo nevidljivi mi bismo izgubili celokupno pamćenje i gene, ukratko, izgubili bismo svoju ličnost, pošto ličnost ne može da se sastoji od gasa. Ličnost je određena svojim granicama. Ne postoji način da u isto vreme budemo i nevidljivi i živi; još je manje verovatan način da se vratimo u stanje vidljivosti. Ukratko, kvantna teorija ima umirujuću stranu: već smo utvrdili da kvantna teorija onemogućava postojanje duhova (***Vol. IV, strana 107***); sada smo urvrdili i da onemogućava bilo koje nevidljivo biće.

ŠTA SE KREĆE U MATERIJI

Sva svojstva materije nastaju usled kretanja sastojaka materije. Prema tome, možemo u potpunosti da se složimo da shvatanje kretanja elektrona i jezgara podrazumeva shvatanje svih svojstava materije. Međutim, ponekad je praktičnije da se istraži kretanje elektrona i jezgara u celini. Evo izbora takvuih kolektivnih pokreta. Kolektivni pokreti koji se ponašaju kao pojedinačne čestice nazivaju se ***kvazičestice***.

U kristalnim čvrstim telima zvučni talasi mogu da se opišu kao kretanje ***fonona***. Na primer, poprečni fononi i uzdužni fononi opisuju više procesa u poluprovodnicima, u laserima čvrstih tela i ultrazvučnim sistemima. Fononi se ponašaju približno kao bozoni.

U metalima kretanje kristalnih grešaka, takozvane ***dislokacije*** i ***disklinacije***, presudne su za razumevanje njihovog očvršćavanja i kidanja. (***Strana 224***).

Isto tako u metalima talasi naelektrisanja provodne elektronske plazme mogu da se posmatraju kao da su sastavljeni od takozvanih ***plazmona***. Plazmoni su takođe važni u ponašanju elektronike velikih brzina.

U magnetnim materijalima kretanje usmerenosti spina najlakše se objašnjava uz pomoć ***magnona***. Razumevanje kretanja magnona i područja magnetnih zidova korisno je za shvatanje svojstava magnetnih naterijala, na primer, u stalnim magnetima, uređajima magnetnog skladištenja ili električnim motorima. Magnoni se približno ponašaju kao bozoni.

U poluprovodnicima i izolatorima kretanje ***provodnih elektrona*** i ***elektronskih šupljina***, presudni su za opis i projektovanje većine elektronskih uređaja. Oni se ponašaju kao fermioni sa spinom 1/2, elementarnim električnim nabojem i masom koja zavisi od materijala od spesifičnog opseg provodnosti i od specifičnog smera kretanja. Vezani sistem od provodnih elektrona i šupljima naziva se ***eksiton***. On ima spin ili 0 ili 1.

Kod materijala koji se polarišu, kretanje svetlosti kroz materijal često se najbolje opisuje pojmovima ***polaritona***, to jest, povezanim kretanjem fotona i dipola koji su nosioci pobuđenosti materijala. Polaritoni su približno bozoni.

U dielektričnim kristalima, kakvi su većina neorganskih jonskih kristala, kretanje elektrona se često najbolje opisuje pojmom ***polarona***, vezanim kretanjem elektrona vezanim sa područjem polarizacije koje ga okružuje. Polaroni su fermioni.

U tečnostima, kretanje vrtloga je ključno za razumevnje turbulencija ili vazdušnih cevi. Posebno je u super tečnostima kretanje vrtloga kvantizovano pojmom ***rotona***, koji određuje svostva protoka. Isto tako u tečnostima kretanje mehurića je često korisno za opis mešanih procesa.

U superprovodnicima opisivanje temperaturnog ponašanja ne određuju samo ***Kuperovi parovi***, već isto tako i kretanje ***cevi magnetnog upliva***. Naročito u tankim i plosnatim superprovodnicima – takozvanim "dvodimenzionalnim" sistemima – takve cevi imaju svojstva slična čestici.

U svim sistemima kondenzovane materije kretanje ***površinskog stanja*** – kakvi su magnoni, površinski fononi, površinski plazmoni, površinski vtrlozi, moraju takođe da budu uzeti u obzir.

Mnogi druge, još egzotičnije ***kvazičestice*** postoje u materiji. Svaka kvazičestica po sebi je posebno polje istraživanja u kome se spajaju kvantna fizika i nauka o materijalima. Da bi se pojasnio pojam, napominjemo da ***soliton*** uglavnom nije kvazičestica. "Soliton" je matematički pojam; on se primenjuje na makroskopske talase sa samo jednom krestom koja ostaje neizmenjena i posle sudara. (***Vol. I, strana 230***). Mnogo zidova područja mogu da se posmatraju kao solitoni. Međutim, kvazičestice su pojmovi koji opisuju fizička zapažanja slično kvantim česticama.

Ukratko, svi pomenuti primeri kolektivnih kretanja u materiji, i makroskopska i kvantizovana, imaju veliku važnost u elektronici, fonetici, inženjerstvu i medicinskim primenama. Mnogi su kvantizovani i njihova kretanja mogu da se proučavaju kao kretanja stvarnih kvantnih čestica,

ZANIMLJIVOSTI I ZABAVNI IZAZOVI IZ NAUKE O MATERIJALIMA

Kolika je maksimalna visina planine? Ovo pitanje, normalno, interesuje sve planinare. (***Ref. 58***). Mnogi efekti ograničavaju visinu. Najvažniji od njih je što pod velikim pritiskom čvrsta tela postaju tečna. Na primer, na Zemlji bi se to dogodilo sa planinama visine od oko 27 km. (***Izazov 47ny***). To je dosta više od visina poznatih planina, kao što je vulkan Mauna Kea na Havajima, čija je visina oko 9,45 km računato od osnove (na dnu mora). Na Marsu je gravitacija manja, tako da planine mogu da budu i veće visine.

Zapravo, najviša planina na Marsu, Olimpus Mons, visoka je 80 km. Možete li da nađete nekoliko drugih efekata koji ograničavaju visinu planine? (***Izazov 48s***).

* * *

Da li želite da se obogatite? Samo izmislite nešto što može da se napravi u fabrici, da je jeftino i da može u potpunosti da zameni pačje perje u jorganima, vrećama za spavanje i perjanici za badminton. (***Izazov 49r***). Drugi industrijski izazov je da se pronađe veštačka zamena za lateks (sok kaučukovog drva) i treći je da se nađe zamena za materijal koji ubrzano nestaje usled zagađivanja: plutu.

* * *

Materijali se razlikuju po gustini, elastičnosti, jačini, tvrdoći, temperaturi topljenja, toplotnoj izolaciji, električnoj otpornosti i još mnogo drugih parametara. Da bi se dao pregled, najkorisnija je takozvana ***Ešbijeva*** (***Ashby***) ***mapa***, čiji je primer prikazan na ***slici 56***. Još uvek je u toku trka da se pronađe materijal koji je lakši i tvrđi od drveta, posebno drveta balze.

* * *

Koliko se promeni visina Ajfelovog tornja tokom godine usled toplotnog širenja i skupljanja? (***Izazov 50s***).

* * *

Kakva je razlika između proizvođača noža iz bronzanog doba i graditelja Ajfelovog tornja? Samo u njihovoj kontroli raspodele grešaka. Glavne greške u metalima su ***disklinacije*** i ***dislokacije***. Razmeštanja (dislokacije) su greške u kristalima u oblikovanju površina; to su mikroskopski vidovi granica zrna. Razmeštanja su greške kristala u obliku krivih linija; pre svega, njihov raspored i njihovo kretanje u metalu određuju njegovu tvrdoću. Za prikaz razmeštanja, videti tekst koji sledi. (***Strana 224***).

* * *

Koja razlika postoji između čvrstih tela, tečnosti i gasova? (***Izazov 51e***)

* * *

Jedan od predmeta nauke o materijalima je način na koji se čvrsi predmet kida. Glavna razlika je između ***krtog*** preloma i ***rastegljivog*** kidanja. U krtom kidanju, kao što je kidanje staklenog okna, ivice koje nastaju su oštre i nepravilne; u rastegljivom kidanju, koje sa pojavljuje kod vrućeg stakla, ivice su zaoblene i pravilne. Dva tipa kidanja razlikuju se i po njihovim mehanizmima, to jest, u kretanju kvarova i atoma koji učestvuju. Ova razlika je važna: kada se udes sa automobilom dogodi tokom noći, pogledom kroz mikroskop na površinu vlakna volframa u sijalici automobila lako može da se odluči da li je sijalica u vreme udesa bila uključena ili uključena..

* * *

Nauka o materijalima može takođe da pomogne da izbrisane informacije ponovo postanu vidljive. Mnogo laboratorija ima mogućnost da vrati izbrisane podatke sa magnetnih traka ili tvrdih diskova. Druge laboratorije mogu da učine da ponovo budi vidljivi serijski brojevi karoserija automobila, bilo zagrevanjem metalnih delova ili upotrebom magnetnih mikroskopa.

* * *

Kvantna teorija pokazuje da ne postoje čvrsti zidovi. Svaki materijal je probojan. Zašto? (***Izazov 52s***).

* * *

Kvantna teorija pokazuje da čak i kada bi postojali čvrsti zidovi kutije, poklopac kutije napravljene od takvih zidova nikada ne može da bude čvrsto zatvoren. Možete li da date dokaz? (***Izazov 53s***).

* * *

Godine 1936. Henri Ajring (Henry Eyring) predložio je da se viskozitet smicanja tečnosti pridržava

$$\eta \geq \rho\hbar \tag{9}$$

gde je ρ gustina tečnosti. Da li je donja granica valjana? (***Izazov 54ny***).

* * *

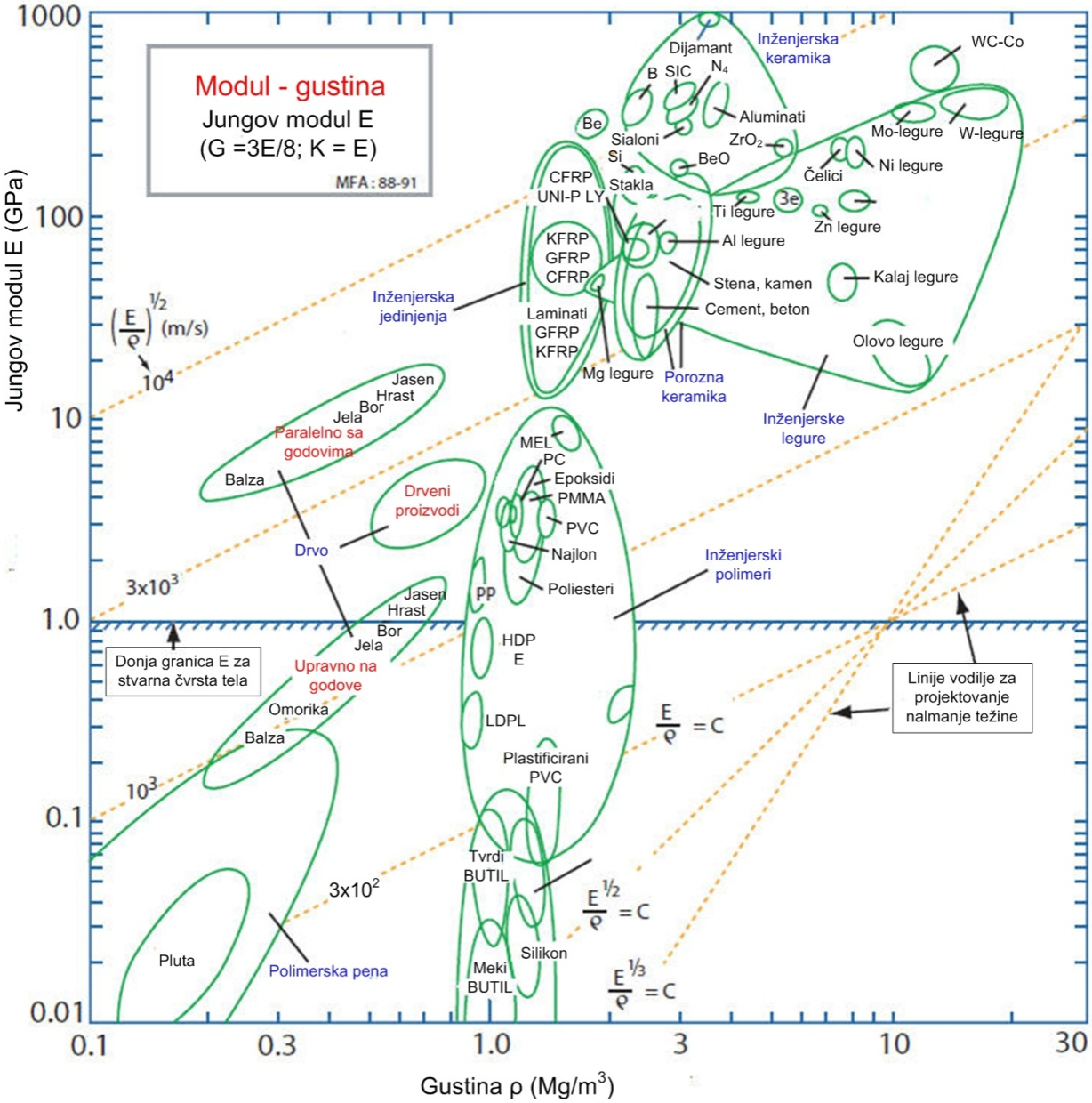
Toplota može da teče. Kao kod svih protoka, kvantna teorija predviđa da je prenos toplote kvantizovan. To podrazumeva i da je provođenje toplote kvantizovano. Zaista, 2000. godine eksperimenti su potvrdii ovo predviđanje. (***Ref. 59***). Možete li da pogodite namanju jedinicu provodnosti toplote? (***Izazov 55s***).

* * *

Robert Ful (Robert Full) je pokazao (***Ref. 60***) da Van der Valsove sile omogučavaju način na.koji gekon hoda po zidovima i tavanicama. (Prikaz se nalazi na ***slici 56*** – ***Vol. I, strana 75***) Gekon je mali reptil mase

od oko 100 g, a koristi posebnu strukturu na svojim stopalima da izvede ovaj trik. Svako stopalo ima 500.000 dlačica ili lopatica, od kojih je svaka podeljena na oko 1000 manjih lopatica i svaka lopatica koristi Van der Valsovu silu (ili drugačije rečeno, kapilarne sile) da bi prionule za površinu. Kao posledica ovih 500.000 tačaka prianjanja, gekon može da hoda po vertikalnom staklenom zidu, pa čak i po staklenoj tavanici; sila prianjanja može da iznosu i do 100 N za svako stopalo. Sile adhezije su toliko velike da oslobađanje noge zahteva posebnu tehniku. Na internetu se mogu naći usporeni filmovi koji prikazuju kako gekon izvodi podvig i svakom koraku koji načini.

Noge sa dlačicama kao metod za adheziju koriste takođe pauci skakači (*Saliticidae*). Na primer, *Evarcha archuata* ima dlačice na stopalima koja su prekrivena stotinama hiljada četkica. (***Ref. 61***). Opet Van der Valsova sila pomaže pauku da se prilepi za površinu. Isto tako mnogo insekata koriste dlačice za isti zadatak. ***Slika 57*** pokazuje poređenja. (***Ref. 62***). Istraživači su dokazali da su dlačice – ili sete – utoliko finije ukoliko je životinja veće mase. Eduard Arct (Eduard Arzt) je voleo da objašnjava da male muve i bubice imaju jednostavnije, loptasre sete prečnika nekoliko mikrometara, dok znatno veći i teži gekoni imaju razgranate nanodlačice prečnika 200 nm. Istraživači su prvi put 2003. godine kopirali mehanizam za adheziju dlačicama koristeći mikrolitografiju polimida i nadaju se da će u budućnosti napraviti izdržljivi materijal prianjanja bez upotrebe bilo kakvog lepka.



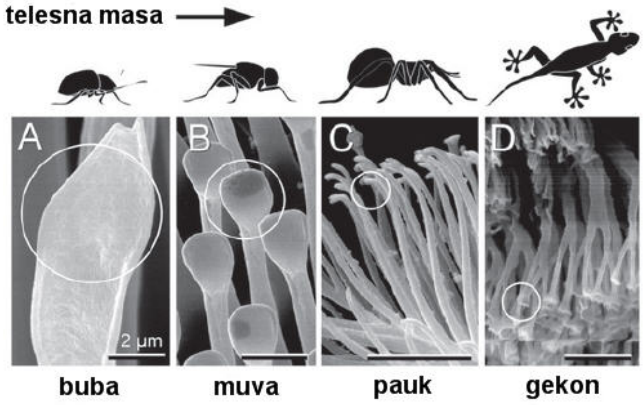
Slika 56 Pregled modula elastičnosti i gustina materijala. Za strukture koje treba da budu lake i čvrste, potrebna je velika vrednost odnosa E/ρ^3; slika prikazuje da je drvo najpovoljnije da ispuni ovaj zahtev (©Carol Livermore/Michael Ashby).

* * *

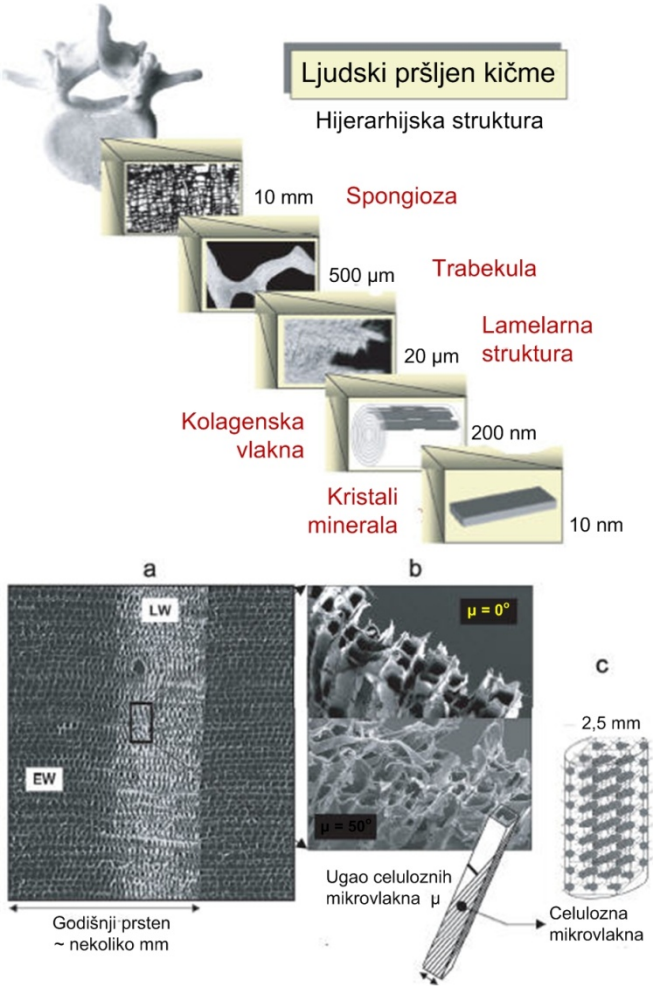
Jedan od najzačuđujućih materijala u prirodi su kosti. Kosti su lake, čvrste i mogu da se zaleče posle preloma. (***Ref. 63***). Ukoliko vas interesuje sastav materijala, pročitajte više o kostima, njihovoj strukturi, prikazanoj na ***slici 58***, i njihovim materijalnim svojstvima koja su začuđujuća i složena i o mehanizmima njhovog zaceljivanja i rasta. Svi ovi aspekti još uvek su predmet izučavanja.

* * *

Stabljika žitarice ima odnos visine prema debljini oko 300. Ovo nije postignuto kod nijednog tornja ili jarbola ljudske izrade. Zašto? (***Izazov 56s***).



Slika 57 Insekti i gekon lepe se na staklo i druge površine koristeći Van der Valsove sile na krajevima velikog broja lopatica (© Max Planck Geselschaft)



Slika 58 Struktura kostiju, prikazana za kičmeni pršljen ljudi (© Peter Fratzl i Physik Journal).

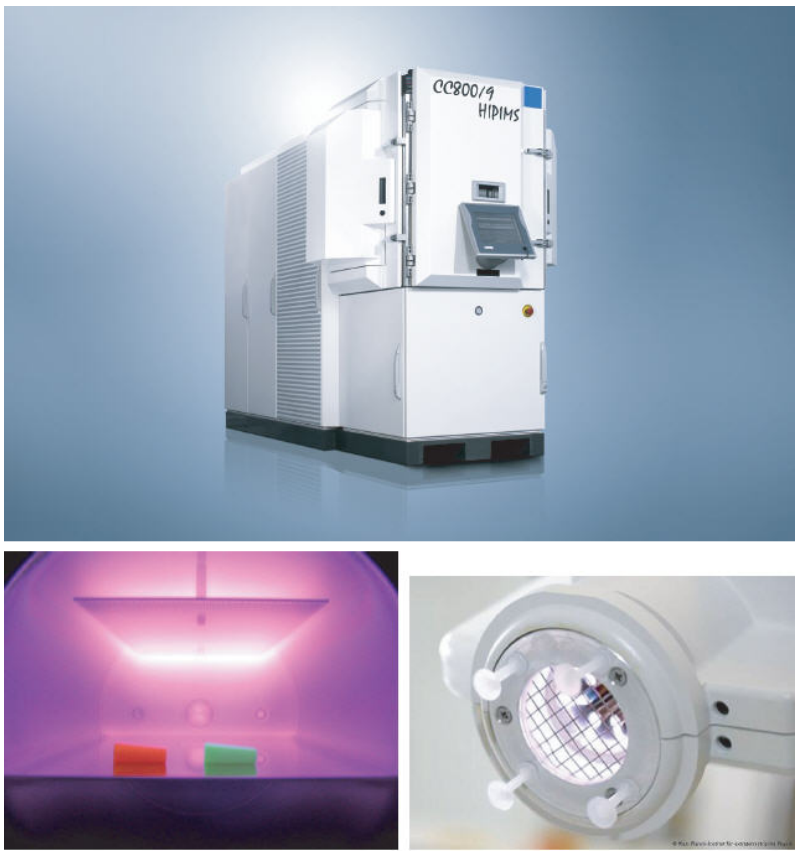
Milimetarske talase učestanosti reda teraherca emituju sva tela na sobnoj temperturi. Sisteni savremenih kamera omogičavaju da se pomoću njih napravi snimak. Na taj način je moguče posmatranje kroz odeću, kao što je prikazano na ***slici 59***. (Potreban je oprez; postoji sumnja velikih razmera da je slika lažan

proizvod da bi se dobilo više sredstava za razvoj. Ova mogučnost bi mogla a se koristi na aerodromima u budućnosti za otkrivanje skrivenog oružja. Međutim još je u toku razvoj praktičnog i dostupnog detektora kojim bi se rukovalo kao sa dvogledom. Talasi bi mogli takođe da se koriste za gledanje kroz papir, što bi učinilo da bude nepotrebno otvaranje pisama da bi se pročitao sadržaj. Tajne službe koriste ovu tehniku. Treća primena talasa učestanosti reda terahrca mogla mi da bide u medicinskoj dijagnostici, na primer za ispitivanje raspadanja zuba. Talasi učestanosti teraherca skoro su potpunosti bez uzgrednih pojava i prema tome su povoljniji od rentgenskih zraka. Nedostatak niskih cena kvalitetnih izvora još uvek predstavlja prepreku za njihovu primenu.

* * *

Da li tačka topljenja vode (leda) zavisi od magnetnog polja. Ovu iznenađujući tvrdnju izneo je 2004. godine Inaba Hideaki i njegove kolege. (***Ref. 64***). Oni su našli promenu od 0,9 mK/T. Poznato je da magnetno polje utiče na indeks prelamanja u blizini infracrvenog spektra. Ustvari, možda loš uvek ne znamo sve o vodi.

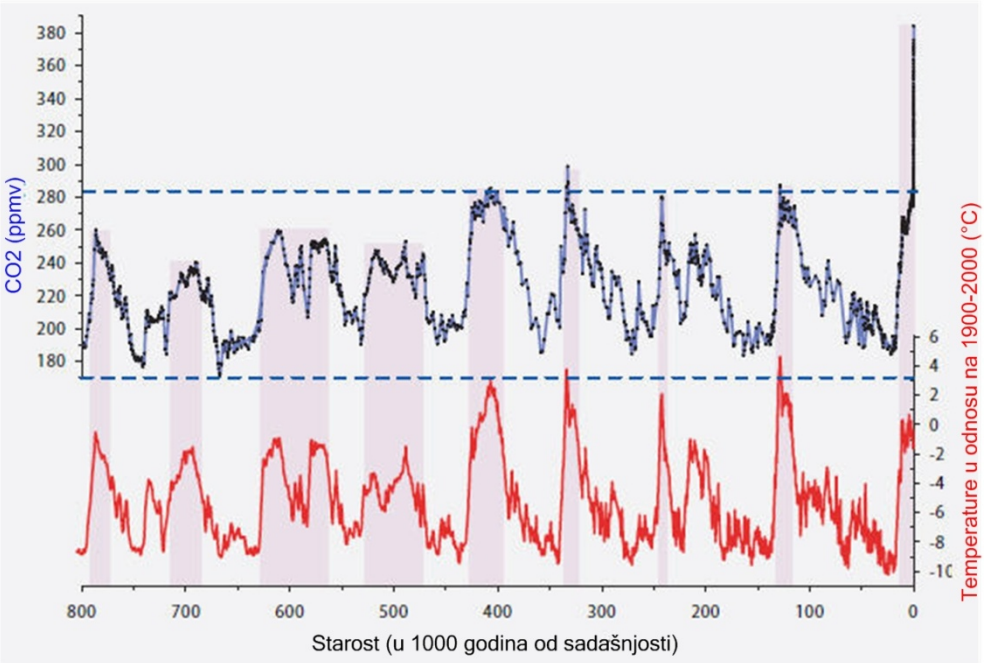
Slika 59 Slika koja je navodno načinjena pomoću talasa reda teraherca. Možete li da objasnite zbog čega je lažna? (© Jefferson Lab)



Slika 60 Neke mašine koje koriste plazmu: mašina za prevlačenje metalnih delova, mašina za čišćenje delova od polimera i uređaj za lečenje rana (© www.cemecon.de/, www.diener.de, Max Planck Gesellschaft).

* * *

Plazma, ili jonizovani gasovi, korisni su za različite primene. Nekoliko njih je prikazano na ***slici 60***. Ne samo da plazma može da se koristi za grejanje ili kuvanje i da se proizvede hemijskim sredstvima (takva plazma se naziva različito: požar i plamen) već može takođe da se proizvede pomoću elektriciteta i da se koristi za osvetljenje i nanošenje materijala. Plazme proizvedene električnim putem čak se proučavaju u svrhu dezinfekcija zubnih šupljina.



Slika 61 Koncentracija CO_2 i promena srednje temperature atmosfere u poslednjih 0,800.000 godina (© Dieter Luthi)

* * *

Poznato je da se koncentracija CO_2 u atmosferi povećala između 1800. i 2005. godine sa 280 na 380 delova na milion, kao što je prikazano na ***slici 61***. (***Ref. 65***) (Kako biste vi to izmerili?) (***Izazov 57s***). Poznato je bez sumnje da je ovo povećanje nastalo zato što ljudi sagorevaju fosilna goriva, a ne usled prirodnih izvora kao što su okeani ili vulkani. Postoje tri dokaza. Pre svega došlo je do paralelnog smanjenja odnosa $^{14}C/^{12}C$. Drugo, došlo je do paralelnog smanjenja odnosa $^{13}C/^{12}C$. Najzad, došlo je do paralelnog smanjenja koncentracije kiseonika. Sva merenja nezavisno podrazumevaju da je koncentracija CO_2 porasla zbog sagorevanja fosilnih goriva, koja su siromašna sa ^{14}C i ^{13}C, a istovremeno se smanjila koncentracija kiseonika. Prirodni izvori ne ispoljavaju ova tri efekta. Pošto je CO_2 glavni gas za staklenu baštu, podaci podrazumevaju da je čovečanstvo većim delom odgovorno za porast temperature tokom istog perioda. Globalno otopljavanje postoji i uglavnom je nastalo zbog ljudi. Međutim, veličina efekta još uvek je pitanje vrućih rasprava. U proseku, Zemlja se hladi tokom posljednjih 10 milijuna godina; međutim, od pre nekoliko hiljada godina temperatura se povećava na istom nivou kao pre 3 miliona godina. (***Ref. 66***). Kako da se slože desetogodišnji trend globalnog zagrevanja, hiljadugodišnji trend zagrevanja i trend hlađenja od milion godina? To je tema opširnih istraživanja i raspravljanja.

* * *

Pravljenjem kristala neki su se obogatili. Prvi čovek koji je uspeo u tome bio je Francuz Avgust Vernui (Auguste Veneuil, 1856. Dunkerque – 1913. Paris), prodavao je rubine koje je prozvodio u svojoj laboratoriji, a da nikome nije ništa ispričao. Mnoge kompanije u današnje vreme proizvode sintetičko drago kamenje pomoću mašina koje se drže u tajnosti. Jedan primer je dat na ***slici 62***.

Sintetički dijamanti sada su zamenili prirodne dijamante skoro u svim primenama. Poslednjih godina razvijeni su postupci za izradu velikih, belih dijamanata kvaliteta za nakit težine od 10 karata i više. (***Ref. 67***). Ovaj napredak će dovesti do velikih promena u svim oblastima koje zavise od ovog kamenja, kao što je proizvodnja specijalnig hirurških noževa koji se koriste u oftalmologiji pri operacijama sočiva u oku.

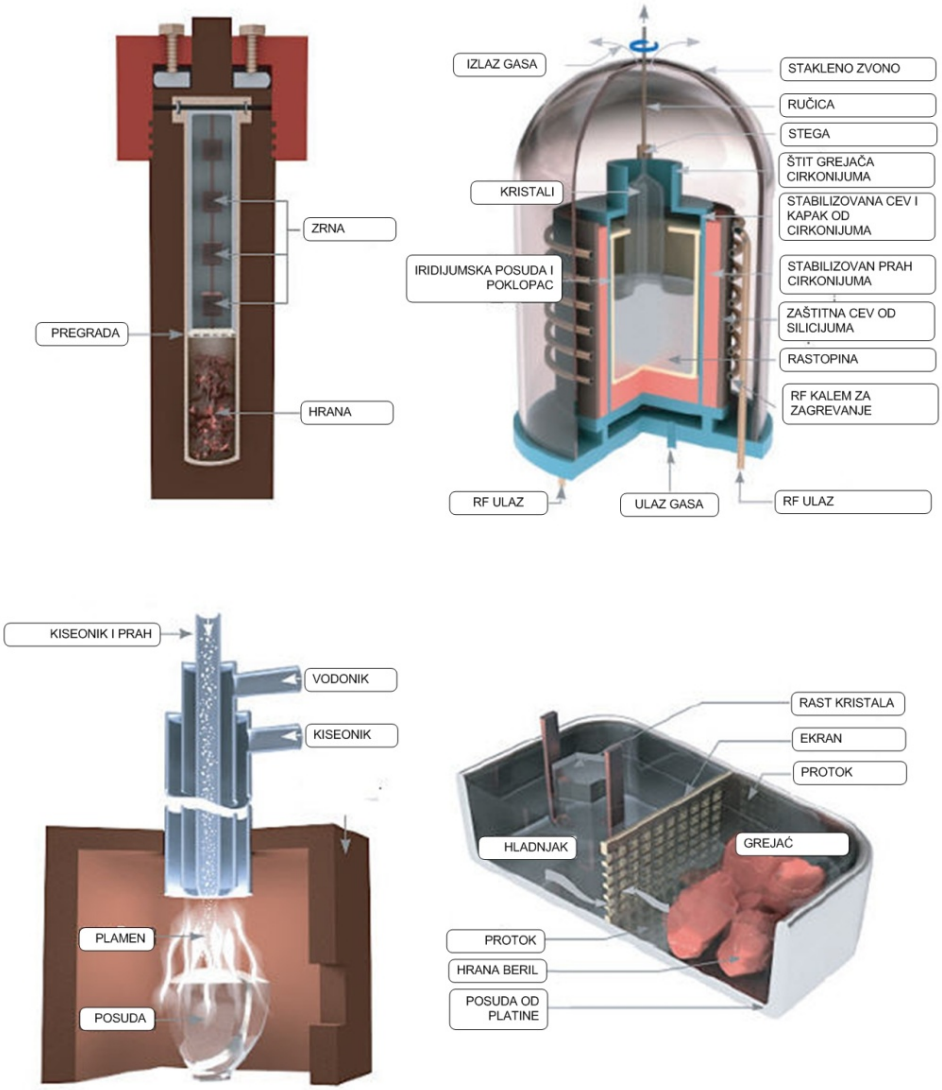
* * *

Tehnologije za proizvodnju savršenih kristala, bez zrnastih granica ili razmeštaja (dislokacija), važan su deo savremene industrije. Potpuno pravilni kristali predstavljaju osnovu integrisanih kola koja se koriste u

elektronskim primenama, od centralnog su značaja za mnoge lasere i sisteme telekomunikacija i koriste se za proizvodnju sintetičkog nakita.

* * *

Kako mala biljka može da se probije kroz asfalt? (***Izazov 58s***).



Slika 62 Četiri postupka za rast kristala i dragog kamenja. Gore: hidrotermalna tehnika koja se koristi za rast emeralda, kvarca, gorskog kristala i ametista i tehnika izvlačenja Čohralskog, koja se koristi za rast rubina, safira, spinela, itrijum-aluminijum granata, gadolinijum-galijum granata i aleksandrita. Dole: Vernuijeva tehnika fuzije plamena, koja se koristi za rast korunda, safira, rubina i spinela; posuda i proces protoka koji se koristi za kristoberil (© Ivan Golota).

* * *

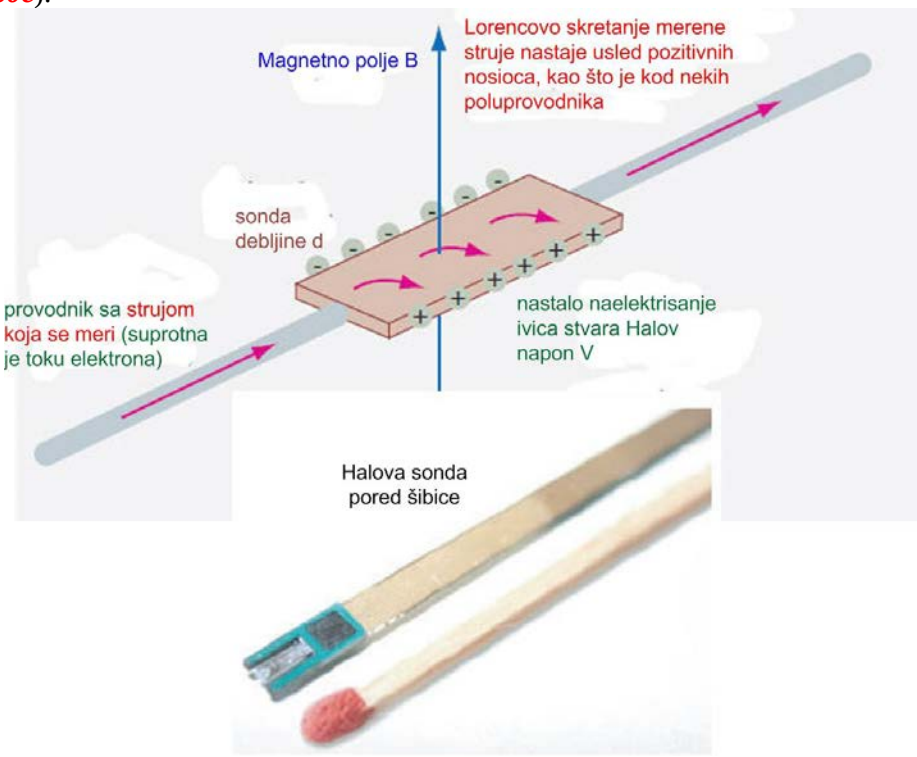
Ukoliko volite apstraktne slike u boji, nemojte propustiti da pogledate tečne kristale ispod mikroskopa. Otkrićete zadivljujući svet. Najbolji uvod predstavlja tekst od Ingo Dirking (Ingo Dierking). (***Ref. 68***).

* * *

Lorencova sila dovodi do interesantne pojave unutar materijala. Ako struja teće duž provodne trake koja se nalazi u magnetnom polju (neparalelnom), pojaviće se napon duž ivica provodnika, pošto su nosioci naelektrisanja skrenuti iz svog toka. Ova pojava se naziva (klasičan) Halov efekt prema američkom fizičaru Edvunu Halu (Edwin Hall, 1855. Great Falls – 1938. Cambridge), koji ga je otkrio u toku izrade doktorata. Efekt prikazan na ***slici 63*** redovno se koristi u takozvanoj Halovoj sondi pri merenju magnetnih polja; efekt se takođe koristi za čitanje podataka uskladištenih na magnetim medijima ili za merenje električnnih struja (reda 1 A i većih) u provodnicima bez potrebe da se preseku. Tipična Halova sonda je veličine od oko 1 cm pa maniže do 1 μm i manje. Pokazalo se da je Halov napon dat sa

$$V = \frac{IB}{ned} \qquad (10)$$

gde je *n* gustina broja elektrona, *e* maelektrisanje elektrona i *d* je debljina sonde, kao što je prikazano na ***slici 63***. Izvođenje obrasca vežba je za srednje škole. (***Izazov 59e***). Halov efekt je efekt materijala, a parametar materijala *n* određuje Halov napon. Predznak napona isto tako prikazuje da li materijal ima pozitivne ili negativne nosioce naelektrisanja; ustvari, u metalnoj traci je polaritet napona suprotan od prikazanog na slici. (***Izazov 60e***).



Slika 63 Gore: (klasičan) Halov efekt. Dole: savremena minijaturna Halova sonda koja koristi ovaj efekt za merenje magnetnih polja (© Metrolab)

Proučavane su mnoge varijante Halovog efekta. Na primer, kvantni Halov efekt i razlomljeni Halov efekt biće objašnjeni u tekstu koji sledi (***strana 82***).

Godine 1998. Geert Riken (Geert Rikken) i njegovi saradnici otkrili su da u nekom materijalima fotoni mogu da se skrenu magnetnim poljem; to je ***fotonski Halov efekt***. (***Ref. 69***).

Godine 2005. ponovo je Geert Riken sa svojim saradnicima pronašao materijal terbijum-galijum garnet u kojem protok fonona u magnetnom polju uzrokuje razliku temperature na dva kraja. (***Ref. 70***). Oni su ga nazvali ***fononski Halov efekt***.

* * *

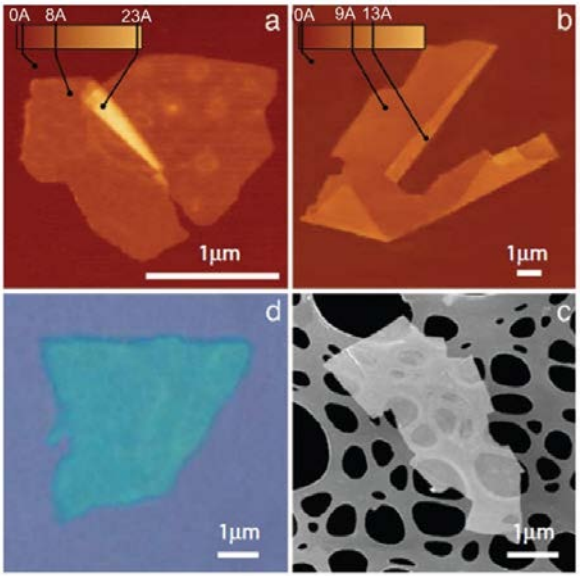
Da li magnetna polja utiču na kristalizaciju kalcijum karbonata u vodi? Ovo pitanje je tema opširnih rasprava. (***Ref. 71***). Možda da ili možda ne, ali magnetna polja menjaju zrna kristalizacije iz kalcita u aragonite, pa time utiču na to da li će vodovodne cevi na unutrašnjoj strani biti obložene karbonatima ili ne. Industrijske posledice smanjenja ***skaliranja***, kako se ovaj proces naziva, bile bi ogromne. Međutim, ovo pitanje još uvek je otvoreno kao i uverljivi skupovi podataka.

* * *

Odnedavno je postalo moguće da se naprave najtanji mogući listovi grafita i ostalih materijala (kao što su BN, MoS_2, $NbSe_2$, $Bi_2Sr_2CaCu_2O_x$): ovi listovi kristala imaju debljinu tačno jednog atoma! (***Ref. 72***). Proizvodnja grafena – što je naziv za jednoatomski grafitni sloj – izuzetno je složena; potrebno je da uzmete grafit iz olovke i namotaj lepljive trake. To je verovatno ono zbog čega je bilo potrebno da se čeka do 2004. godine na razvoj tehnike. (Zapravo, stabilnost jednoatomskih listova bila je ispitivana mnogo godina ranije. Neka pitanja iz fizike ne mogu da se odluče papirom i olovkom; ponekad je potrebna i lepljiva traka.) Grafeni i ostali takozvani ***dvodimenzionalni kristali*** (ovo je naravno preterivanje u stilu tabloida) proučavani su zbog njihovih elektronskih i mehaničkih svojstava; u budućnosti će možda čak naći primenu u baterijama visokih performansi.

* * *

Jednoslojni grafen ima začuđujuća optička svojstva. Njegova optička apsorpcija duž celog vidljivog dela spektra iznosi $\pi\alpha$, pri čemu je α konstanta fine strukture. (Tačan izraz za apsorpciju je $A = 1 - (1 + \pi\alpha/2)^{-2}$. Izraz za apsorpciju je posledica električne provodnost $G = e^2/4\hbar$ za svaki jednoslojni grafen. Brojčana vrednost apsorpcije je oko 2,3%. Ova vrednost je vidljiva golim okom, kao što je prikazano na ***slici 65***. (***Ref. 73***). Grafen prema tome omogućava da se "vidi" konstanta fine strukture.



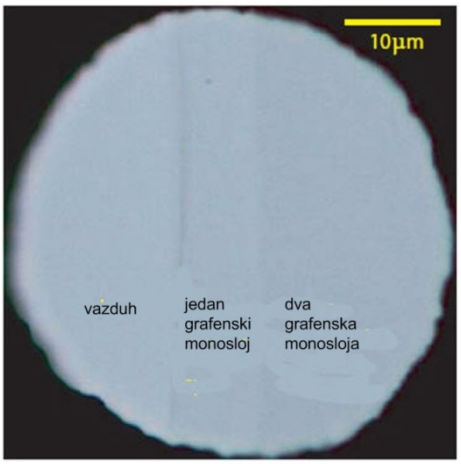
Slika 64 Listovi debljine jednog atoma, snimljeni pomoću mikroskopa sa atomskom silom, za a): $NbSe_2$; b): grafita ili grafena; d): jednoatomski sloj MoS_2 snimljen optičkim mikroskopom i c): jednoatomski sloj $Bi_2Sr_2CaCu_2O_x$ na praznom grafitnom filmu snimljeno elektronskim mikroskopom (iz ***Ref. 72***, © 2005. National Academy of Sciences)

* * *

Zlato apsorbuje svetlost. Zbog toga se koristi za bojenje ivica skupocenih knjiga. Osim što čuva knjige od prašine, ono sprečava da sunčeva svetlost prodire i da stranice požute po ivicama.

* * *

Kao i drveće kristali imaju ***prstenove rasta***. Kvarc boje dima je poznat po ovim takozvanim ***fantomima***, ali isto tako i fluorit i kalcit.

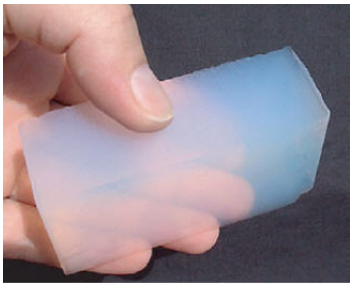


Slika 65 Mikroskopska fotografija prikazuje apsorpciju jednog i dva sloja grafena – ćime se pruža mogućnost da se vidi konstanta fine strukture (© Andre Geim)

* * *

Nauka i umetnost obrade površina u punom su zamahu, kao što pokazuje ***slika 66***. Izrada hidrofobnih površina važan je deo savremene nauke o materijalima, koji kopiraju ono što lotus, *Nelumbo Nucifera*, čini u prirodi. Hidrofobne površine omogućavaju da kapi vode na njima odskaču slično teniskim loptama po stolu. (***Vol. I, strana 38***). Površina lista lotusa koristi ovaj efekt da bi se očistio, otkuda i potiče naziv ***efekt lotusa***. Isto tako je to i razlog što je biljka lotusa postala simbol čistoće.

Slika 66 Lepota nauke o materijalima: na površini lista lotusa stvaraju se skoro loptaste kapi vode; plazmom obložen PTFE ili teflon na pamuku izaziva isti efekt za obojene kapi vode na njemu (© tapperboy, Diener Electronic)



Slika 67 Komad aerogela, čvrstog tela koje je toliko porozno da je prozirno (ljubaznošću NASA)

Ponekad istraživaći naprave neobične materijale. Primer su takozvani ***aerogeli***, jako porozna čvrsta tela, prikazana na ***slici 67***. Aerogeli imaju gustinu od samo nekoliko g/l, te su stoga hiljadu puta manje gustine od vode i samo nekliko puta veće od vazduha. Kao i svi porozni materijali, aerogeli su dobri izolatori; međutim, oni se lako razaraju pa prema tome još uvek nisu našli neku značajniju primenu.

* * *

Odakle dolaze minerali u Amazonske prašume? Reka Amazon ispira i nosi mnogo hranljivih minerala u Atlanski okean. Kako prašume nadoknađuju te minerale? Dugo su trajala istraživanja sve dok nije postalo jasno da je najveće snabdevanje vadušnim putem: iz Sahare. Vetrovi odnose preko Atlanskog okeana prašinu iz saharske pustinje do amazonskog bazena. Procenjuje se da da se svake godine premesti oko 40 miliona tona prašine iz Sahare do amaznskih prašuma.

* * *

Neki materijali su podložni neverovatnim transformacijama. Koje je krajnje stanje ***mahovine***? Velike količine mahovine postaju treset (tresetišta). Stara tresetišta postaju lignit ili mrki ugalj. Stari ligniti postaju antraciti (bitumenozni ugalj). Stari antraciti postaju ***dijamanti***. Ukratko, dijamanti bi mogli biti krajnje stanje mahovine.

KVANTNA TEHNOLOGIJA

Bolje bi mi bilo da me rđa pojede do smrti nego li da se trajnim kretanjem sperem do ničeg

Viljem Šekspir (William Shakespeare) i drame *King Henry IV*.

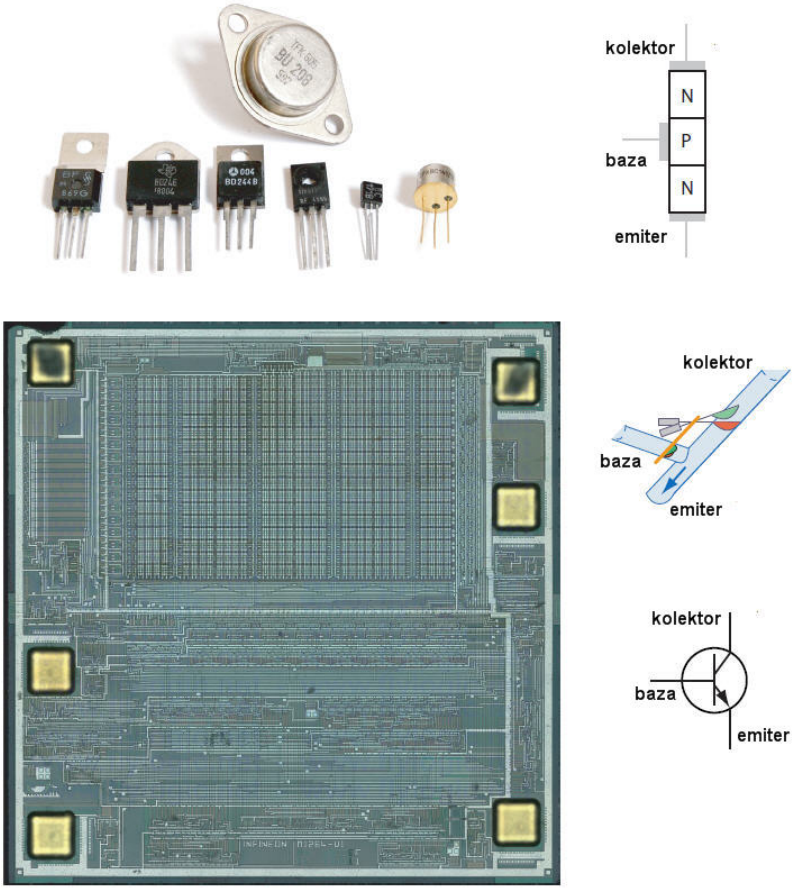
Ne pojavljuju se samo kvantni efekti u mikroskopskim sistemima ili svojstvima materijala. ***Primenjeni*** kvantni efekti imaju veliki značaj u savremenom životu: tehnologije kao šro su tranzistori, laseri, super-provodnici i druge pojave i sistemi snažno su uticali na civilizaciju.

TRANZISTORI

Tranzistori se nalaze u skoro svim uređajima koji popravljaju zdravlje, kao i skoro svim uređajima za telekomunikaciju. Tranzistor, prikazan na ***slici 68***, je uređaj kojim se pomoću slabe struje upravlja jakom električnom strujom; prema tome on se koristi kao prekidač sa elekrtičnim upravljanjem ili kao pojačavać. Tranzistori su napravljni od silicijuma i mogu da budu mali, kao 2 sa 2 μm i veliko kao 10 sa 10 cm. Tranzistori se koriste za upravljanje signalima u pejsmejkerima za srce i za struju električnih motora na

vozovima. Pojačavači sa tranzistorima glavni su deo primopredajnika u mobilnim telefonima a prekidački tranzistori su glavni deo u računarima i njihovim monitorima.

Tranzistori su (skoro isključivo) zasnovani na poluprovodnosti, to jest na materijalima gde su skoro potpuno ***slobodni*** elektroni odgovorni za električnu provodnost. Uređaji su napravljeni na takav način da električni signal menja provodnost. Svako objašnjenje rada tranzistora koristi potencijale i tunelshi efekt; tranzistori su primenjeni kvantni uređaji.



Slika 68 Gore:primeri izvedbe pojedinačnih tranzistora. Desno; osnovna poluprovodnička struktura, ekvivilent strukture vodenim modelom i tehnički simbol NPN tranzistora. Dole: tipično integrisano kolo za pametnu karticu koje sadrži veliki broj tranzistora (© Benedikt Seidl, sa veb strane blog.ioactive.com)

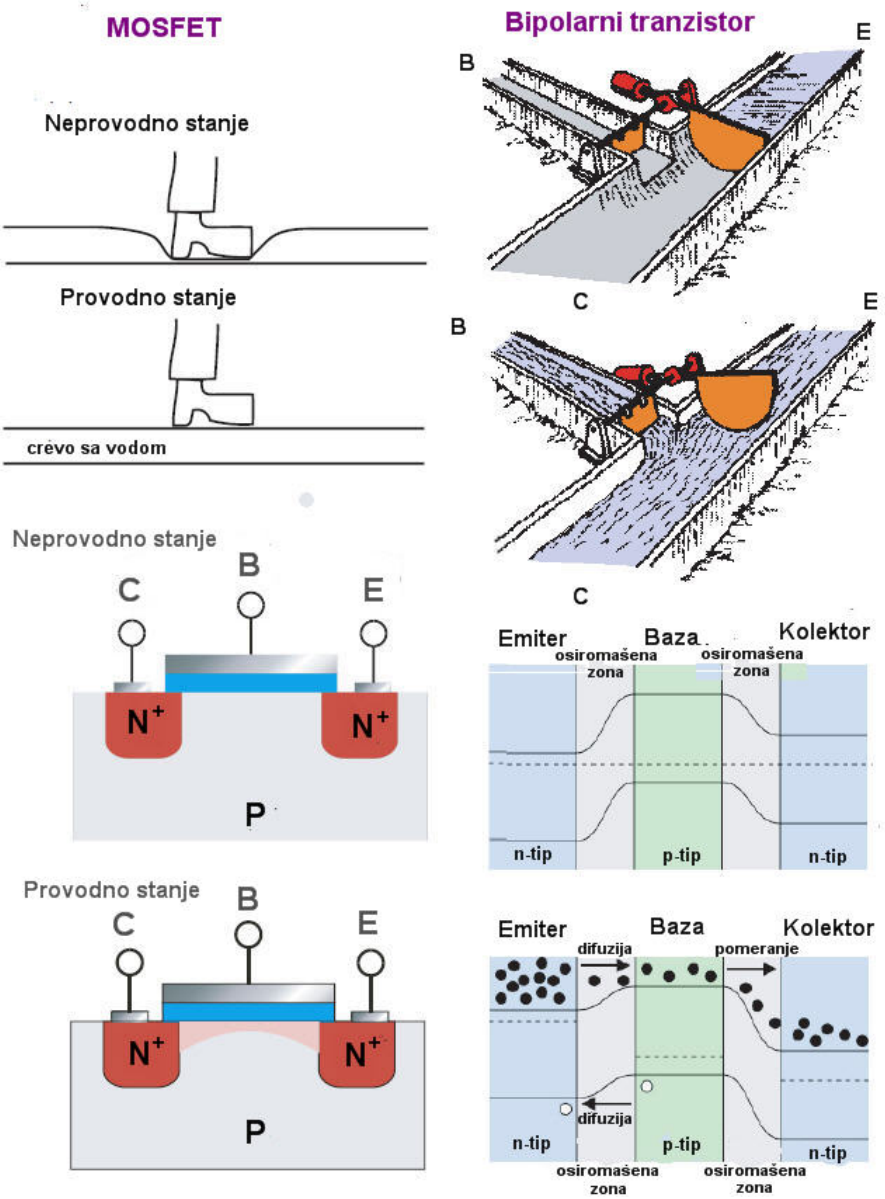
Tranzistor je samo jedan uređaj iz porodice poluprovodnika koja sadrži tranzistor sa efektom polja (FET – Field Effect Transistor), tranzistor sa efektom polja metal-oksid-silicijum (MOSFET – Metal Oxide Silicon Field Effect), tranzistor sa efektom polja spojenog ulaza (JFET – Junction Gate Field Effect Transiststor) bipolarni tranzistor sa izolovanim ulazom (IGBT - Insulated Gate Bipolar Transistor) i jednoprohodni tranzistor (UJT – Unijunction Transistor), nađutim, tu spadaju i memoristori, diode, PIN diode, Zenerove diode, lavinske diode, diode sa emitovanjem svetlosti (LED - Light-emitting Diode), foto diode, foto-naponske ćelije, diaci, triaci i konačno integrisana kola (IC). Oni si važni u industrijskim primenama: industrija poluprovodnika ima prodaju od 300 hiljada miliona eura svake godine (vrednost je iz 2010. godine) i zapošljava milione radnika širom sveta.

KRETANJE BEZ TRENJA – SUPERPROVODNOST I SUPERPROTOČNOST

Navikli smo da mislimo kako je trenje neizbežno. Čak smo i naučili da je trenje bilo neizbežan rezultat materije sastavljene od čestica. Treba da bude iznenađenje za svakog fizičara da je kretanje ***bez trenja*** ustvari moguće.

Godine 1911. si Žil Holst (Gilles Holst) i Heike Kamerling Ones (Heike Kamelingh Onnes) otkrili da na niskim temperaturama električna struja može da teće kroz olovo bez otpora, to jest, bez trenja, Ovo zapažanje je nazvano ***superprovodnost***. Posle toga, u istom veku, nađeno je da se mnogi metali, legure i keramike ponašaju na isti način.

Uslov za opažanje kretanja bez trenja je da kvanti efekti imaju ključnu ulogu. Da bi se to omogućilo, obično su neophodne niske temperature. Uprkos velikoj količini podataka, potrajalo je 40 godina da bi se došlo do potpunog razumevanja superprovodnosti. To se dogodili 1957. godine kada su Bardin (Bardeen), Kuper (Cooper) i Šrifer (Schrieffer) objavili svoje rezultate. (***Ref. 74***). Na niskim temperaturama u nekim materijalima na ponašanje elektrona utiče interakcija privlačenja tako da oni obrazuju parove. Ovi takozvani ***Kuperovi parovi*** ustvari su bozoni. A svi bozoni mogu da budu u istom stanju i da se zato kreću bez trenja.



Slika 69 Princip rada i konstrukcija silicijumskog metal-oksid tranzistora (levo) i bipolarnog tranzistora (desno). Prikazana su neprovodna i provodna stanja (© Leifi Physik, Wikimedia)

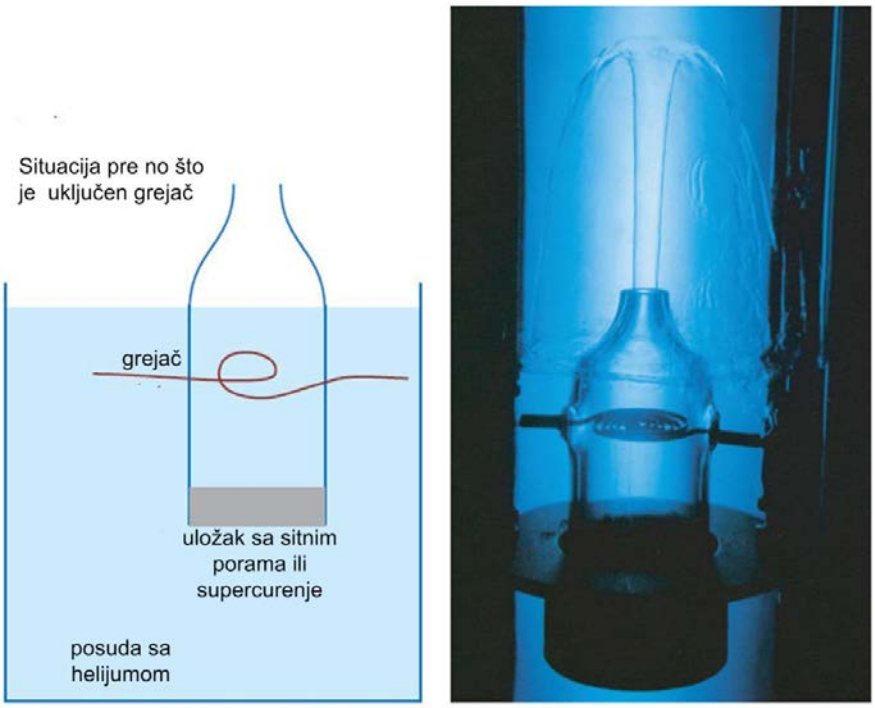
U superprovodnosti interakcija privlačenja između elektrona nastaje usled izobličenja rešetke. Na niskim temperaturama dva elektrona se uzajamno privlače na isti način kao što se dve mase uzajamno privlače usled izobličenja dušeka prostor-vreme. Međutim, u slučaju čvrstih tela ova izobličenja su kvantizovana. Uz takav pristup Bardin, Kuper i Šrifer su objasnili odsustvo električne otpornosti u superprovodnim materijalima, njihov potpuni dijamagnetizam ($\mu_r = 0$) postojanje energetskog procepa, prenos drugog reda u normalnu provodnost na određenoj temperaturi i zavisnost mase izotopa od ove temperature. Kao rezultat toga, oni su dobili Nobelovu nagradu za fiziku 1972. godine.[1]

[1] Za Džona Bardina (John Bardeen (b. 1908 Madison, d. 1991 Boston) to je bila druga Nobelova nagrada za fiziku, posle prve primljene 1956. godine koju je podelio sa Viljemom Šoklijem (William Shockley) i Volterom Bratenom (Walter Bratain) za otkriće tranzistora. Prva Nobelova nagrada predstavljala je problem za Bardina, pošto mu je bilo potrebno vreme za rad na superprovodnosti. Kao primer mnogima, on je smanjio tam-tam oko

Druga vrsta kretanja bez trenja je superprotočnost. Godine 1937. Pjotr Kapica je shvatio da običan tečan helijum, to jest ^{4}He, pri prelazu posmatranom na temperaturi 2,17 K predstavlja ***supertečnost***: tečnost koja se zapravo bez trenja kreće kroz uređaje, cevi i sl. Još preciznije, tečni helijum ostaje mešavina superprovodnog i normalnog sastojka; jedino se superprotočni sastojak kreće bez trenja. Supertečni helijum je čak sposoban, posle početnog udarca, da teče preko prepreka, kao što su stakleni zidovi ili da se izliva iz boce. Dobro poznati efekt superprotočnosti prikazan je na ***slici 70***. Superprotočnost je javlja pošto su atomi ^{4}He bozoni. Prema tome, nije potrebno nikakvo isparivanje da bi se on kretao bez trenja. Ovo istraživanje je donelo Kapici Nobelovu nagradu 1978. godine.

Godine 1972. Ričardson (Richardson), Li (Lee) i Ošerof (Osheroff) otkrili su da je čak i ^{3}He supertečnost, po uslovom da je temperatura niža od 2.7 mK. Helijum ^{3}He je fermion i zahteva ***sparivanje*** da bi postao supertečnost. Zapravo, ispod 2,2 mK ^{3}He je supertečnost na dva različita načina; radi se o fazi A i fazi B. Oni su 1996. godine dobil Nobelovu nagradu za ovo otkriće.

U slučaju ^{3}He teoretičari su bili brži od eksperimentatora. Teorija o superprovodnosti zbog sparivanja prilagodili su za supertečnost već 1958. godine Bor (Bohr), Motelson (Mottelson) i Pajns (Pines). – pre no što su bili dostupni bilo kakvi podaci. Ovu teoriju je kasnije prilagodio i objasnio Entoni Leget (Anthony Leggett).[1] Pokazalo se da je interakcija privlačenja između atoma ^{3}He, koja predstavlja osnovni mehanizam koji dovodi do superprotočnosti, interakcija spin-spin.



Slika 70 Superprotočnost helijuma 4 (^{4}He) može da se iskoristi za efekt vodoskoka iznad diska sa veoma malim porama, kroz koje može da prolazi supertečni helijum, ali ne i normalna tečnost. Supertečni helijum ima veliku toplotnu provodnost i teče ka toplijoj oblasti težeći da je ponovo ohladi, dok normalna tečnost ne može da se vrati kroz pore. Ovaj termomehanički efekt uzrokuje fontanu. (c Pacific Institute of Theoretical Physics).

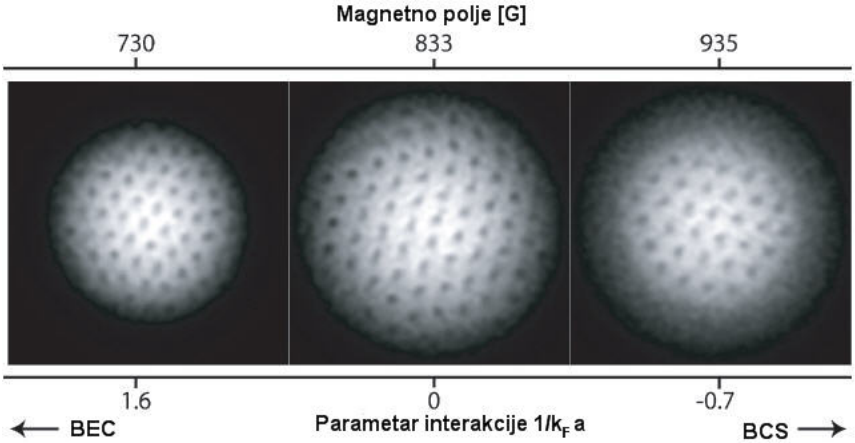
Superprotočnost je takođe zapažena i kod brojnih gasova, premda na mnogo nižim temperaturama. Proučavanje ponašanja gasova na niskim temperaturama postalo je jako popularno poslednjih godina. Kada je temperatura toliko niska da je de Broljijeva talasna dužina uporediva sa rastojanjem od atoma do atoma, bozonski gasovi obrazuju Boze-Ajnštajnov kondenzat. Prvo takvo stanje ostvarilo je 1995. godine nekoliko grupa; grupa okupljena oko Erika Kornela (Eric Cornell) i Karla Vimana (Carl Wieman) koristeći ^{87}RB, Rand Halet (Rand Hulet) i njegova grupa koristeći ^{7}Li i Volfgang Keterle (Wolfgang Ketterle) i njegova

sebe na minimum, tako da je mogao da radi što je više moguće o problemu superprevodljivosti. Uzgred, Bardin je nadmašio Frederika Sangera i Mariju Kiri. Sagner je prvu Nobelovu nagradu dobio sam 1958. godine za hemiju, a potom je drugu podelio sa Volterom Džilbertom 1980. godine. Marija Kiti je prvu Nobelovu nagradu dobila sa suprugom, a drugu sama, mada u dve različite oblasti.

[1] Oge Bor (Aage Bohr), sin Nilsa Bora i Ben Motelson dobili su Nobelove nagrade 1975. godine, a Entoni Leget 2003. godine.

grupa koristeći ^{23}Na. Za fermionske gasove, prvi degenerativni gas, ^{40}K, zapazila je 1999. godine grupa okupljena oko Debore Džin (Deborah Jin). Ista grupa je 2004. godine zapazila prvi gasoviti Fermijev kondenzat, posle sparivanja atoma kalijuma. Svi ovi kondenzati pokazuju superprotočnost.

Supertečnosti su začuđujuće supstance. U njima postoje i vrtlozi. Ali u supertečnostima, bilo u tečnostima ili gasovima, vrtlozi imaju svostva koja se ne pojavljuju u normalnim tečnostima. U supertečnosti ^{3}He-B fazi vrtlozi su ***kvantizovani***: vrtlozi mogu da postoje samo u celobrojnim umnošcima elementarne cirkulacije $\hbar/2m_{^3\mathrm{He}}$. (Takav je isti slučaj i kod superprovodnika.) Vrtlozi u supertečnostima imaju kvantizovan moment količine kretanja. Efekt kvantizovanja može da se vidi na ***slici 71***. U supertečnostima ovo kvantizovani vrtlozi traju zauvek! Isto kao kod običnih tečnosti, tako i kod supertečnosti mogu da se načine razlike između laminarnog i turbulentnog toka. Prelaz između ta dva režima posreduje ponašanje ***vrtloga*** u tečnosti. Tekuća istraživanja proićavaju kako se ponašaju ovi vrtlozi i kako uzrokuju prelaze. (***Ref. 75***).



Slika 71 Rešetke vrtloga hladnog gasa litijuma ispoljavaju kvantnu strukturu (© Andre Schirotzek).

RAZLOMLJENI KVANTNI HALOV EFEKT

Razlomački Halov efekt jedno je od najintrigantnijih otkrića u nauci o materijalima, a verovatno i u celoj fizici. Efekt se odnosi na tok elektrona u dvodimenzionalnoj površini. Godine 1982, Robert Laflin (Robert Laughlin) je pedpostavio da u takvom sistemu mogu da se zapaze objekti čije je naelektrisanje *e*/3. (***Ref. 76***). Ovo čudno i zanimljivo predviđanje zaista je i potvrđeno 1997. godine. (***Ref. 77***)

U predhodnom tekstu otkrili smo (klasični) Halov efekt. (***Strana 76***). Priču je nastavio Klaus fon Klicing (Klaus von Klitzing) ***kvantnim*** Halovim efektom. Klicing i njegovi saradnici su 1980. godine našli da je u dvodimenzionalnim sistemima na niskim temperaturama – od oko 1 K – električna provodnost *S*, poznata i kao Halova provodnost, kvantizovan umnožak kvanta provodnosti. ( )

$$S = n\frac{e^2}{h} \tag{11}$$

Objašnjenje je lako razumljivo: to je kvantna analogija klasičnog Halovog efekta, koja opisuje kako se provodnost menja sa primenjenim magnetnim poljem. Odgovatajuće otpornosti su

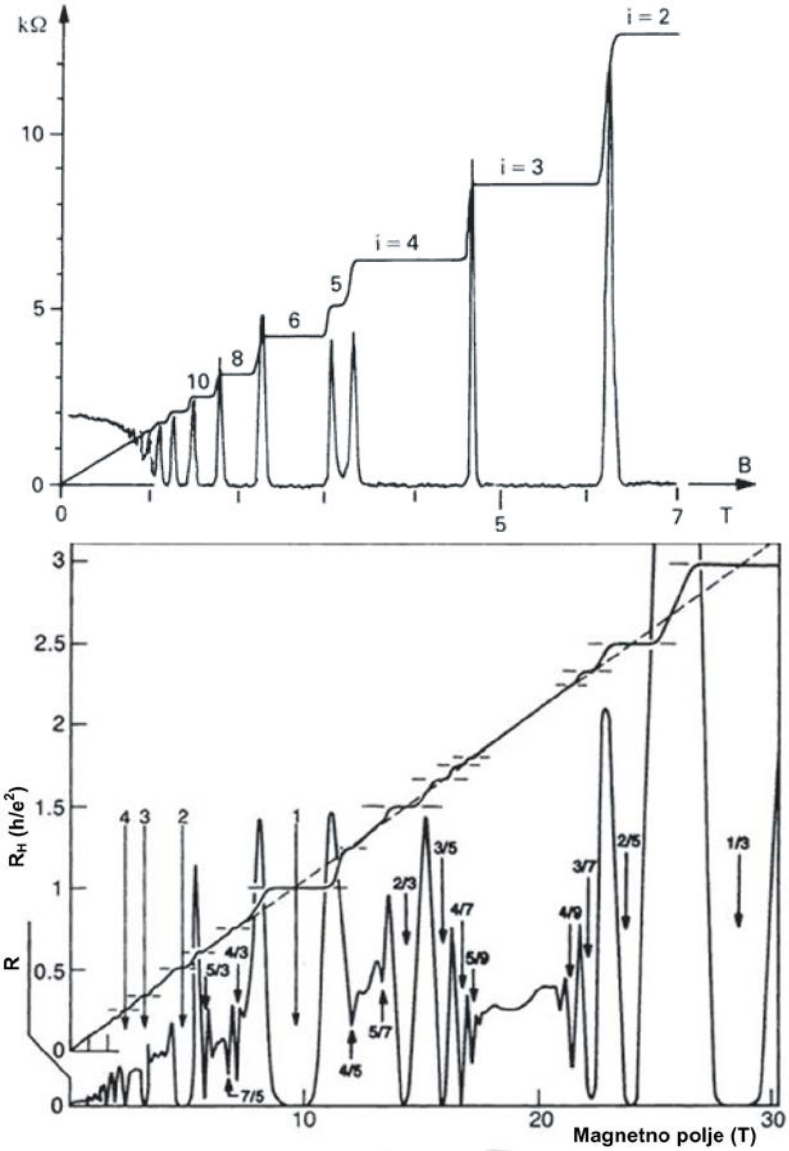
$$R = \frac{1}{n}\frac{h}{e^2} = \frac{1}{n}25{,}812\,807\,557(18)\ \mathrm{k\Omega} \tag{12}$$

Vrednosti su nezavisne od materijala, temperature ili magnetnog polja. One su konstante prirode. Za ovo otkriće je fom Klicing dobio Nobelovu nagradu za fiziku, pošto efekt nije bio očekivan, pošto je omogućio precizno merenje konstante fine strukture i pošto je omogućio da se izgrade detektori sa najmanjim kolebanjima napona izmerenim do sada. Njegovo otkriće je pokrenulo veliki talas kasnijih istraživanja.

Samo dve godine kasnije, 1982. otkriveno je da u veoma snažnim magnetnim poljima i pri izuzetno niskim temperaturama, provodnost može da se menja u koracima od ***jedne trećine*** ove vrednosti. (***Ref. 79***). Ubrzo potom, otkriveni su takođe još čudniji razlomci brojeva. Ustvari mogući su svi razlomci oblika m/(2*m* + 1) ili oblika (*m* + 1)/(2*m* +1) gde je *m* ceo broj. To je ***razlomački kvantni Halov efekt***. U dokumentu koji je predstavljao prekretnicu, Robert Laflin je objasnio sve ove rezultate uz predpostavku da bi gas elektrona mogao da obrazuje kolektivna stanja prikazujući pobuđenosti kvazičestice sa naelektrisanjem e/3. (***Ref. 76***). To je i potvrdio 15 godina kasnije, zbog čega je takođe dobio Nobelovu nagradu, Videli smo u

mnogim prilikama da je kvantizacija najbolje otkrivana preko merenja šuma; takođe i u ovom primeru najjasnija potvrda dolazi iz merenja šuma električne struje.

Kasnija merenja su potvrdila Laflinov zaključak. On je predvideo pojavljivanje novog oblika složene kvazičestice, sastavljene od elektrona i jednog ili više kvanta magnetnog upliva. Ako je elektron vezan sa ***parnim*** brojem kvantova, složeni sastav je fermion, i dovodi do Klicingovog ***integralnog*** kvantnog Halovog efekta. Ako je elektron vezan sa ***neparnim*** brojem kvantova, složeni sastav je bozon, pa se pojavljuje ***razlomački*** Halov efekt. Eksperimentalni i teoretski detalji o ovim kvazičesticama mogli bi da budu najsloženiji i najzanimljiviji vid fizike, ali bi nas njihovo istraživanje odvelo daleko od cilja naše avanture.



Slika 72 Kvantni Halov efekt (gore) i razlomački kvantni Halov efekt (dole): oba grafika donela su Nobelovu nagradu. Grafici pokazuju kako se menjaju Halova otpornost i omska otpornost sa primenjenim magnetnim poljem pri vrlo niskim temperaturama. Stepenasti porast je celobrojno kvantiziran ili prostim razlomkom h/e^2 = 25,812807577(18) kΩ). Kvantni Halovi eksperimenti omogućavaju do današnjeg vremena najpreciznije određivanje ove konstante prirode.

Godine 2007. novo poglavlje priče otvorili su Andrej Konstantinovič Gejm i njegov tim (***Ref. 80***) i drugi tim kada su otkrili nov tip kvantnog Halovog efekta na sobnoj temperaturi. (***Strana 77***). Oni su koristili grafen, to jest, jednoatomski sloj grafita, i otkrili relativističku analogiju kvantnog Halovog efekta, Ovaj efekt je bio još manje očekivan od predhodnih, podjednako je interesantan i može da se izvede na stolu. Grupa je dobar kandidat za put do Stokholma.[1]

[1] Ovo predviđanje iz decembarskog izdanja 2008. godine obistinilo se u decembru 2010. godine

Šta smo naučili iz ovih rezultata? Sistemi sa dve dimenzije imaju stanja koja prate drugačija pravila nego li sistemi sa tri dimenzije. Razlomačka naelektrisanja u superprovodnicima nemaju veze sa kvarkovima. Kvarkovi, sastavni delovi protona i neutrona imaju naelektrisanja $e/3$ i $2e/3$. Da li kvarkovi imaju neku vezu sa mehanizmom sličnim superprovodnosti? U ovom trenutku moramo da izdržimo neizvesnost, jer nije moguć odgovor; na ovo pitanje ćemo da se vratimo u poslednjem delu ove pustolovine.

KAKO SE MATERIJA PONAŠA NA NAJNIŽIM TEMPERATURAMA

Ponašanje materije na niskim temperaturama ima brojne eksperimentalne i teorijske oblike. Prvo je pitanje da li je na niskim temperaturama materija uvek u čvrstom stanju. Odgovor je: ne. na niskim temperaturana postoje sve tri faze, kao što je prikazano u ***Tabeli 8***.

TABELA 8 Materija na niskim temperaturama

Faza	**Tip**	**Ponašanje na niskoj temperaturi**	**Primer**
Čvrsto telo	provodnik	suprerprovdnost	olovo, MgB_2 (40 K)
		antiferomagnetni	hrom, MnO
		feromagnetni	gvožđe
	izolator	dijamagnetni	
tečnost	bozonski	Boze-Ajnštajnov kondenzat, to jest superprotočnost	^{4}He
	fermionski	uparenost, zatim BEC, to jest superprotočnost	^{3}He
gas	bozonski	Boze-Ajnštajn kondenzacija (BEC)	^{87}Rb, ^{7}Li, ^{23}Na, H, ^{4}He, ^{41}K
	fermionski	uparivanje, zatim BEC	^{40} K, ^{6}Li

Što se tiče električnih svojstava materije na najnižim temperaturama, prisutna stanja su da je materija ili izolator ili superprovodnik. Konačno, možemo se zapitati o magnetnim osobinama materije na niskim temperaturama. Već znamo da materija ne može na niskim temperaturama da bude paramagnetna. Izgleda da je materija na najnižim temperaturama ili feromagnetna, ili diamagnetna ili antiferomagnetna.

LASERI I DRUGI BACAČI VEKTORSKIH BOZONA SA SPINOM JEDAN

Fotoni su vektorski bozoni; svetiljke su prema tome bacači vektorskih bozona. Sve postojeće svetiljke mogu da se svrstaju u jednu od tri klase. (***Ref. 81***) ***Inkadescentne svetiljke*** koriste zračenja toplih čvrstih tela, ***svetiljke sa pražnjenjem u gasovima*** koriste pobuđivanje atoma, jona ili molekula usled sudara i ***svetiljke sa rekombinacijom*** koje stvaraju (hladnu) svetlost usled rekombinacije naelektrisanja u poluprovodnicima ili tečnostima. Ova poslednja vrsta svetiljki može da se nađe u živim sistemima. Sledeća velika grupa su ***laseri***. Svi izvori svetlosti zasnivaju se na kvantnim efektima, ali za lasere je ova povezanost posebno očigledna. U narednoj tabeli (***Tabela 9***) dat je pregled glavnih tipova izvora svetlosti i njihova primena.

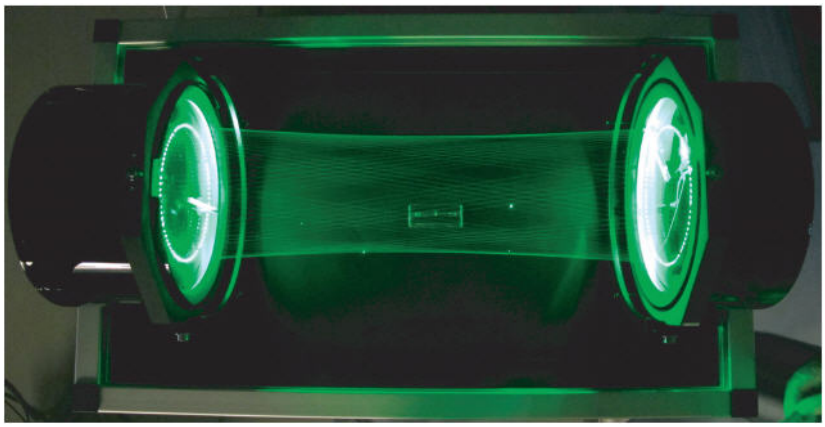
TABELA 9 Pregled svetiljki i lasera

Tip svetiljke, primena	**Tal. dužina**	**Sjajnost ili snaga**	**Cena**	**Trajanje**
Inkadescentne svetiljke				
Uljne svetiljke, sveće, za osvetljenje	bela	do 500 lm	1 c/lm	5 h
Sijalice sa vlaknom, halogene, za osvetljenje	300 do 800 nm	5do 25 lm/W	0,1 c/lm	
Zvezde, za proizvodnju teških metala	ceo spektar	do 10^{44} W	besplatno	do hiljadu miliona godina
Svetiljke sa pražnjenjem u gasovima				
Neonske sijalice, za reklamiranje	crvena			do 30.000 h
Živine sijalice, za osvetljenje	UV plus spektar	45 do 110 lm/W	0,05 c/lm	3.000 do 24.000 h
Metal halogenidne sijalice (ScI_3 ili ksenon-ska svetlst, NaI, DyI_3, HoI_3, TmI_5) za farove automobila i osvetljenjje	bela	110 lm/W	1 c/lm	do 20.000 h
Natrijumske sijalice niskog pritiska, za ulično osvetljenje	589 nm, žuta	200 lm/W	0,2 c/lm	do 18.000 h
Natrijumske sijalice visokog pritiska, za ulično osvetljenje	široko žuta	120 lm/W	0,2 c/lm	do 24.000 h

Ksenonske lučne svetiljke, za bioskope	bela	30 do 150 lm/W do 15 kW		100 do 2.500 h
Zvezde, za proizvodnju teških elemenata	više linija	do 10^{30} W	besplatno	do hiljadu miliona godina
Svetiljke sa rekombinacijom				
Fosforescencija u šumi, na primer zbog *Armillaria mellea*, *Neonothopanus gardneri* ili drugih gljiva	zelena	jedva vidljivo	besplatno	godinama
Svitac, da bi privukao partnera	zeleno-žuta		besplatno	oko 10 h
Dubinska lignja, *Taningia danae*, proizvodi bleskove svetlosti, da bi zbunila plen	crvena	oko 1 W	besplatno	godinama
Dubinska riba, kao što je ribolovac, da bi privukla plen i privukla partnera	bela	oko 1 μW	besplatno	godinama
Dubinska meduza, da bi privukla pažnju grabljivca	plava i sve ostale boje		besplatno	godinama
Diode emiteri svetlosti (LED), za merenja, osvetljenje i komunikaciju	crvena, zelena, plava, bela, UV	do 150 lm/W do 5 W	10 c/lm	15.000 h do 100.000 h
Sinhronisani izvori zračenja				
Sinhrotron izvor elektrona	rendgenski zraci do radio talasa	pulsirajući	više mili-ona eura	godinama
Verovatno neke zvezde	širok spektar		besplatno	hiljadama gdodina
Idealna svetiljka bele svetlosti ili laser	vidljiv spektar	oko 300 lm/W	0	beskonačno
Idealna svetiljka obojene svetlosti ili laser	zelena	683 lm/W	0	beskonačno
Gasni laseri				
He-Ne laser (zastareo) za eksperimentisanje u školama	632,8 nm	550 lm/W	20 E/lm	300 h
Argonski laser, za pumpanje drugih lasera i laserske predstave (sada zastareo)	više plavih i zelenih linija	do 100 W	10.000 E	
Kriptonski laser, za pumpanje drugih lasera i laserske predstave (sada zastareo)	više plavih, zelenih, crvenih linija	50 W		
Ksenonski laser	više linija u IR, vidljivom i bliskom UV	20 W		
Azotni (ili "vazdušni") laser, za pumpanje drugih lasera, za hobiste	337,1 nm	pulsiranje do 1 MW	manje od nekoliko hiljada E	ograničeno trajanjem metalne elektrode
Laser sa vodenom parom, za istraživanje, sada zastareo	više linija između 7 i 220 μm, često 118 μm	CW 0,5 W, pulsirajući mnogo više	nekoliko hiljada E	
CO_2 laser, za rezanje, zavarivanje, zavarivanje stakla i hirurgija	10, 6 μm	CW do 100 kW pulsirajući do 10TW	oko 100 E/W	1500 h
Ekscimerski laser, litografija u proizvodnji silicijumskih čipova, operacije oka, pumpanje drugih lasera, lećenje psorijaze, depozicija lasera	193 nm (ArF) 248 nm (KrF) 308 nm (XeCl) 353 nm (XeF)	100 W	10 do 500 hiljada E	godinama
Laseri sa parama metala (Cu, Cd, Se, Ca, Ag, Au, Mn, Ti, In, Hg)				
Laser sa parom bakra, za pumpanje drugih lasera, fotografiju, dermatologiju, rezanje, hobi konstrukcije i istraživanja	248 nm 511 nm i 578 nm	pulsirajući do 5 MW	10.000 E	1000 h
Laser sa parom kadmijuma, štampanje, slaganje i prepoznavanje lažnih dolarskih novčanica	325 nm i 442 nm	do 200 mW	12.000 E	10.000 h

Laser sa parom zlata, istraživanja, dermatologiju	637 nm	pulsirajući do 1 MW	od više hiljada E naviše	
Laseri sa hemijskim gasovima				
HE, DF i jodid-oksidni laser, naoružanje, pumpanje hemijskih reakcija, svi su zastareli	1,3 do 4,2 μm	do MW u CW modu rada	više od 10 miliona E	nepoznato
Laaseri sa tečnim bojilima				
Rodamin, stilben, kumarin itd, laseri za spekrtoskopiju i medicinsku upotrebu	podeesiv, opseg zavisi od bojila u opsegu od 300 do 1000 nm	do 10 W	10.000 E	zavisi od bojila
Pivo, vodka, viski, rastopljena marmelada i više drugih tečnosti korišćenih kao laserski materijal	infracrven i vidljiv spektar	obično mW	1000 E	nekoliko minuta
Laseri sa čvrstim materijama				
Rubinski laser (zastareo) holografija i uklanjanje tetovaže	694 nm		1000 E	
Nd: YAG (neodim: itrijum-aluminijum-garnet) laser, obrada materijala, hirurgija, merenje brzina, za dvostruku, trostruku i četvorostruku učestanost, koristi se i kao pločasti laser	1064 nm 532 nm (za f x2) 355 nm (za f x 3) 266 nm (za f x 4)	CW do 10 kW pulsirajući do 300 MW	50.000 do 500.000 E	1000 h
Er: YAG laser, za dermatologiju	2940 nm			
TI: safir laser za ultrakratke impulse u spekroskopiji, LIDAR i istraživanja	650 do 1200 nm	CW 1 W impulsi 300 TW	od 5.000 E naviše	
Aleksandritski laser, za laserske mašine, dermatologiju, LIDAR (Light Detection and Ranging)	700 do 840 nm	impulsi 10 TW ispod 30 fs		
Cr: LiSAF laser	1,35 do 1,6 μm	impulsi, ispod 100 fs		
Cr: YAG laser				
Laser sa staklenim vlaknima obogaćenih erbijumom, za optičke komunikacije (podmorski kablovi) i optički pojačavači	1,53 do 1,56 μn			godinama
Perovskitski laser, kao što je Co:$KZnF_3$ za istraživanja	NIR podesiva 1650 do 2070 nm	100 mW	2000 E	
Laser F-centra za spektroskopiju (NaCl:OH-, KI:Li, LiF)	podesiv u opsegu 1,2 i 6 μm	100 mW	20.000 E	
Poluprovodnički laseri				
GaN laserska dioda, za optička zapisivanja	335 do 500 nm u zavisnosti od dodataka	do 150 mW	od ekoliko do 5000 E	10.000 h
AlGaAs laserska dioda, za optička zapisivanja, pokazivače, razmenu podataka, laserske ograde, čitače bar kodova (normalnih i vertikalnih šupljina)	620 do 900 nm u zavisnosti od dodataka	do 1 W	ispod 1 E do 100 E	10.000 h
InGaAsP laserska dioda, komunikacije u optičkim vlaknima, pumpanje druguh lasera, obradu materijala, upotreba u sredinama (normalne i vertikalne šupljine ili VCSEL)	1 do 2,5 μm	do 100 W	ispod 1 E do više hiljada E	do 20.000 h
Laserska dioda sa solju olova (PbS/PbSe), za spektroskopiju i detekciju gasa	3 do 25 μm	0,1 W	nekoliko stotina E	
Laser kvantne kaskade, spekroskopija i istraživanje	2,7 do 350 μm	do 4 W	oko 10.000 E	oko 1000 h
Hibridni silicijumski laser, istraživanja	IR	nW	100.000 E	

Laseri sa slobodnim elektronima				
za korišćenje u nauci o materijalima	5 nm do 1 mm	CW 20 kW impulsi reda GW	10 mil. E	godinama
Laseri pumpani nuklearnim reakcijama				
Koriste se samo u naučnoj fantastici i za drpanje novca od lakoverne vojske				



Slika 73 Lepota laserskih uređaja: lepa mrežica, koju je napravila zelena laserska linija sa kašnjenjem (© Laser Zentrum Hannover).

OD SVETILJKE DO LASERA

Mnogo svetiljki u čvrstom stanju su diode sa emitovanjem svetlosti (LED). Veliki napredak u postizanju osvetljaja dioda sa emitovanjem svetlosti mogao bi da doprinese velikom smanjenju potrošnje energije, ako bi se njihova cena dovoljno smanjila. Mnogo inženjera radi na ovom zahtevu. Pošto je cena dobra za procenjivanje energije potrebne za proizvodnju, možete li da odredite koja je svetiljka najpovoljnija za okolinu? (***Izazov 61s***).

Niko nije mnogo razmišljao o svetiljkama sve dok se nisu pojavili Albert Ajnštajn i još nekoliko velikih fizičara, kao što su Teodor Majman (Theodore Maiman) i Herman Haken. Mnogo drugih istraživača je kasnije dobilo Nobelovu nagradu kao nadgradu na njihov rad. Albert Ajnštajn je 1916. gpdine pokazao da postoje dve vrste izvora svetlosti – ili uopšteno elektromagnetnog zračenja – od kojih svaki stvarno "stvara" svetlost. On je pokazao da će svaka svetiljka, ćiji se osvetljaj dovoljno poveća, da promeni svojstva kada se prekorači izvesan prag jačine. Glavni mehanizam emisije svetlosti promeni se tada od spontane emisije u ***stimulisanu emisiju***. U današnje vreme takva posebna svetiljka naziva se ***laser***. (Slova "se" u reči laser skraćenica su za "stimulisanu emisiju".) Posle strastvene trke istraživača širom sveta, 1960. godine Majman je bio prvi koji je napravio laser sa vidljivom svetlošću. (Takozvani ***maseri*** koji emituju mikrotalase bili su već poznati tokom nekoliko dekada. Ukratko, Ajnštajn i ostali fizičari su pokazali da uvek kada se jačina svetlosti neke svetiljke dovoljno pojača, da ona postaje laser. Laseri se sastoje od nekog izvora koji proizvodi svetlost i materijala za pojačavanje zajedno sa mehanizmom koji u njih upumpava energiju. Materijal može da bude gasovita, tečna ili čvrsta materija; proces pumpanja može da koristi električnu struju ili svetlost. Obično se materijal stavlja između dva ogledala, kako bi se poboljšala efikasnost stvaranja svetlosti. Uobičajeni laseri su poluprovodnički laseri (u suštini jako pumpane LED ili diode sa emitovanjem svetlosti), He-Ne laseri (jako pumpani neonskim svetiljkama), laseri sa tečnošću u suštini jako pumpani raspršenom vatrom) i rubinski laseri (jako pumpani luminiscentnim kristalima. Mnogo materijala može da se koristi za izradu lasera radi zabave, uključujući vodu, pivo i vodku.

Laseri proizvode zračenje u opsegu od mikrotalasa i krajnje ultraljubičastog. Oni imaju posebno svojstvo da emituju koherentnu svetlost, obično u kolimiranom zraku. Prema tome laseri postižu mnogo veću jačinu svetlosti od svetiljki, što omogućava da se koriste kao alati. Kod savremenih lasera, koherentna dužina, to jest, dužina duž koje može da se opaža interferencija, može da iznosi hiljade kilometara. Takva veoma kvalitetna svetlost koristi se, na primer, u detektorima gravitacijskih talasa.

Ljudi su postali veoma dobri u gradnji lasera. Laseri se koriste za rezanje metalnih limova debljine do 10 cm, drugi se koriste u hirurgiji umesto noževa, neki povećavalu tvrdoću površine metala ili čiste kamenje

od zagađenja izduvnim gasovima automobila. Drugi laseri buše rupe u zubima, mere rastojanja, snimaju biološka tkiva ili zahvataju žive ćelije.

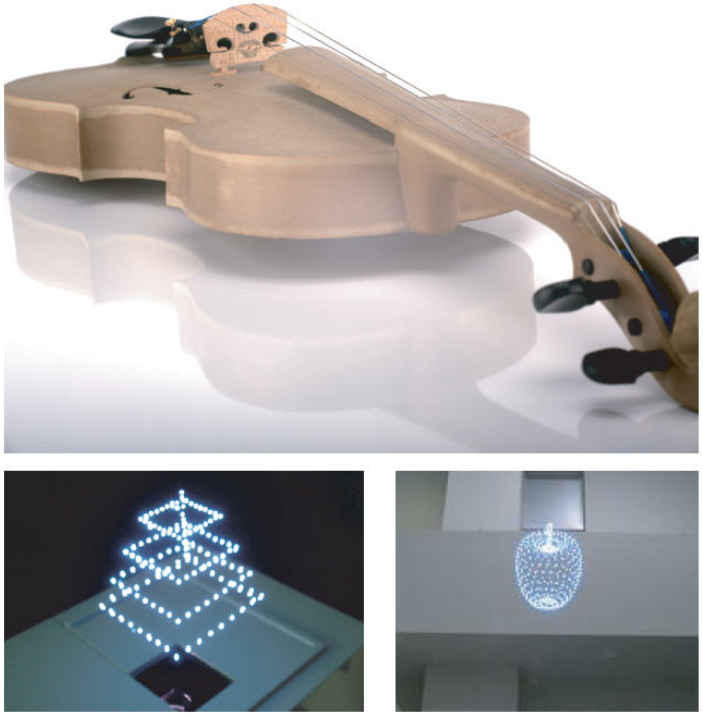
Neki materijali pojačavaju svetlost toliko da krajnja ogledala nisu potrebna. To je slučaj kod lasera sa azotom, kod kojih se azot, ili prosto vazduh, koristi za stvaranje ultraljubičastog zraka. Čak je napravljen laser od samo jednog atoma (i dva ogledala); u takvom slučaju u proseku samo jedanaest fotona se kreće između dva ogledala. (***Ref. 82***). Zaista je to mala svetiljka. Isto tako napravljeni su laaseri koji emituju svetlost u dve dimenzije. Oni stvaraju svetlosnu ravan umesto svetlosnog zraka.

TRI PREVARE SA SIJALICAMA

Tokom 1990-ih godina svi veliki proizvođači sijalica bili su kažnjeni velikim svotama, jer su se dogovorili da održavaju vek trajanja silalica konstantnim. Ne postoji tehnički problem da se napravi sijalica koja bi trajala 2000 časova; međutim, proizvođači su se dogovorili da povećaju vek trajanja samo iznad 700 časova, čime su zapravo postigli da je svaka sijalica tri puta skuplja no što bi trebalo da bude. To je bila prva svetska prevara sa sijalicama.

Uprkos kaznama lopovi iz industrije sijalica nisu se predali. Godine 2012. veliki nemački proizvođač sijalica objasnio je u svojoj reklami da njihov nov izvor svetlosti ina veći vek trajanja no obične sijalice, koja, kako su objasnili u njihovom oglasu, traje samo 500 časova. Drugim rečima, ne samo da kazna nije pomogla, već je industrija sijalica smanjila vek trajanja sijalica od 1990-ih godina do 2012. godine. To je bila druga prevara sa sijalicama.

Uporedo sa drugom prevarom, oko 2000. godine industrija sijalica je počela da lobira kod političara sa lažnim iskazom da su sijalice skupe i da su energetski rasipnici. Kao rezultat pogrešnih podataka proisteklih iz prve dve prevare, sijalice sa užarenim vlaknom su zabranjene u Evropi, uz rezultat da su potrošači bili primorani da kupuju druge, mnogo skuplje načine za osvetljenje. Pre svega, većina ovih mnogo skupljih izvora svetlosti imaju loš uticaj na oči. Zapravo, treperenje živinih ili treperenje LED sijalica, zajedno sa njihovim suženim spektrom boja, dovelo je do toga da je sistem vida kod ljudi preopterećen, što se nije događalo kod sijalica sa stalno užarenim vlaknom. Drugim rečima, ovom trećom prevarom industrija sijalica još više je povećala dobit, pri čemu su istovremeno narušili zgravlje potrošača. Možda će jednog dana parlamenti biti manje korumpirani i inati više osećanja. Situacija će tada ponovo da se popravi.



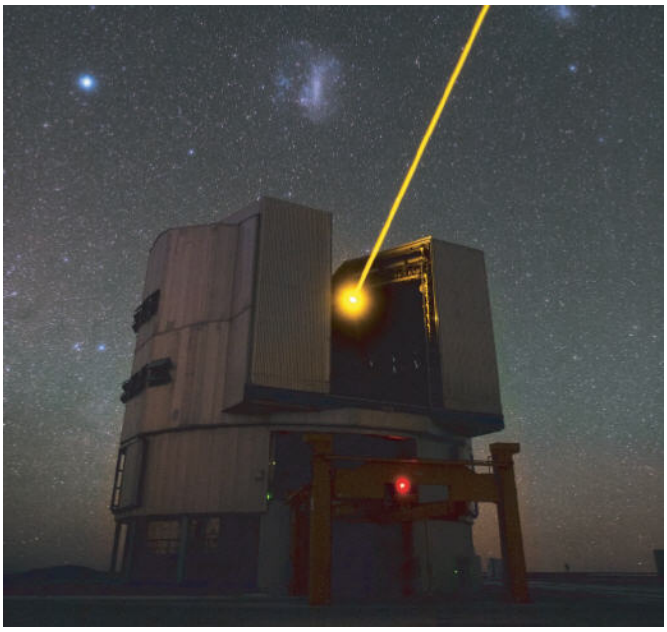
Slika 74 Neke od primena lasera. Gore: violina sa izvanrednim kvalitetom zvuka izrađena od jednog komada polimera (osim žica i crnih delova) pomoću laserskog sinterovanja PEEK od EOS iz Krajlinga, Nemačka. Dole: ekran koji lebdi u vazdušnom prostoru napravljen pomoću galvanometarskog skaniranja i brzog pomaka fokusa (© Franz Aicinger, Burton).

PRIMENA LASERA

Kao što je prikazano na ***slici 74***, laseri se mogu iskoristiti da se naprave divne stvari – uključujući dobre violine i da delove bicikla prilagode korisniku – sinterovanjem polimera ili metalnog praha. Laseri se koriste u mašinama za brzu izradu prototipa i da se prave arhitektonski modeli. Laseri mogu da režu papir, metal, plastiku i meso.

Laseri se koriste i za čitanje podataka sa kompakt diskova (CD) i digitalnih prilagodljivih (versatile) diskova (DVD), koriste se u proizvodnji silicijumskih integrisanih kola i za prenos telefonskih signala kroz optička vlakna. U našoj pustolovini već smo se sreli sa laserom koji radi kao zvučnik. (***Vol. I, strana 292***) Značajna prednost poslednjih godina nastaje od primene femtosekundnih laserskih impulsa. Femtosekundni impulsi stvaraju plazmu velike temperature u materijalima kroz koje prolaze; to se događa čak i u vazduhu, ako se imulsi fokusiraju. Efekt se koristi za stvaranje osvetljenih trodimenzionalnih ekrana koji lebde u okolnom vazduhu kao što je prikazano na ***slici 74*** ili u tečnosti. Takvi kratki impulsi mogu isto tako da se koriste za rezanje materijala bez njegovog zagrevanja, na primer za rezanje kosti pri operacijama lobanje. Odsustvo toplote je toliko potpuno da femtosekundni laseri mogu da se koriste za graviranje šibica pa čak i dinamita, a da ne pokrenu paljenje. Femtosekundni laseri se koriste za izradu holograma ljudske glave u visokoj rezoluciji u samo jednom blesku. Nedavno su takvi laseri korišćeni za vođenje atmosferskog prelažnjenja duž predhodno određene putanje; izgleda da su oni kandidati koji obećavaju laserske gromobrane. (***Ref. 83***). Neobična demonstracija primene femtosekundnih lasera je skladištenje informacija u noktima (do 5Mbit tokom nekoliko meseci), na način koji ni po čemu nije drugačiji od onog koji se koristi u kompaktnim diskovima za snimanje (CD-R). (***Ref. 84***).

Laseri se koriste u oftalmologiji, tehnikom koja se naziva ***tomografija optičke koherencije*** za postavljanje dijagnoze oka i srčanih oboljenja. Oko 2025. godine postojaće konačno uređaj za skaniranje na bazi svetlosti lasera za pretragu kancera bez bilo kakve opasnosti za pacijenta. U toku je trka još od 1990-ih godina da se proizvede takav prvi sistem koji radi. Ostale medicinske primene lasera pojaviće se u godinama koje dolaze.



Slika 75 Najskuplji laserski pokazivač: žuti laser snage 10 W, čija je učestanost stabilisana na talasnu dužinu natrijumove sijalice, omogućava astronomima da poboljšaju kvalitet zemaljskih teleskopa. Pobuđivanjem atoma natrijuma nađenih na visinama od 80 do 90 km, laser pravi veštačku zvezdu vodilju koja se koristi za kompenzaciju turbulencija u atmosferi, upotrebom podesive optike ugrađene u teleskop. (© ESO/Babak Tafreshi).

Laseri su bili korišćeni u različitim prikazivanjima, uporedo sa softverima za obradu slika, za ubijanje komaraca u letu. Drugi laseri su se koristili za spaljivanje korova dok se laser kretao iznad polja sa letinom. Takav kombinovan laser i vizualni sistem jednog dana će se upotrebiti za uništavanje pojedinačnih kišnih kapi; Čim jedan takav laaserski kišobran bude dostupan, on će biti prikazan ovde. (***Ref. 85***). Ovaj poduhvat će biti moguć pre 2022. godine.

IZAZOVI, SNOVI I ZANIMLJIVOSTI IZ KVANTNE TEHNOLOGIJE

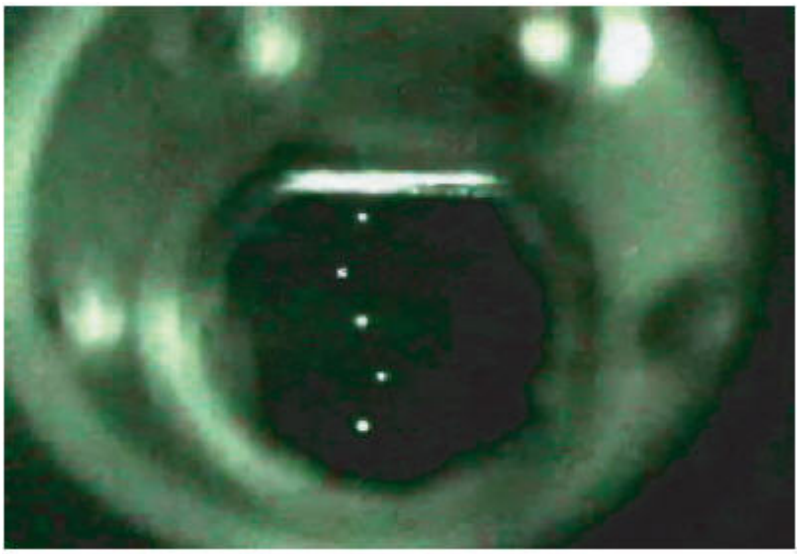
U današnje vreme nosimo mnogo elektronskih uređaja u našim kaputima i džepovima. Skoro svi koriste baterije. Postoje velike šanse da u budućnosti neki od ovih uređaja izdvajaju energiju iz ljudskog tela. Postoji nekoliko mogućnosti. Toplotna energija može da se izdaja preko termoelemenata, ili može da se dobija energija vibracija preko piezoelektriciteta, elektrostatičkih ili elektromahnetnih pojačavača. izazov predstavlja da se ovi elementi naprave mali i jeftini. Biće interesantno da se vidi koja od ovih tehnologija će stići prva na tržište.

* * *

Hamfri Maris (Humphrey Maris) i njegov student Vei Guo izveli su zadivljujući eksperiment: oni su snimili jedan elektron pomoću video kamere. (***Ref. 86***). Ustvari, istina je mnogo komplikovanija, ali nije laž ako se uprosti na ovaj način.

* * *

Maris je stručnjak za supertečni helijum. Već više godina je on znao da slobodni elektroni u supertečnom helijumu odbijaju atome helijuma i mogu da se kreću kroz tečnost oko 2 nm popreko, okruženi malim mehurima. On je takođe otkrio da pod negativnim pritiskom ovi mehuri mogu da rastu i da eksplodiraju na kraju. Kada oni eksplodiraju oni su u stanju da rasipaju svetlost. Sa svojim studentom Vei Guo on je u super-tečni helijum ubacio elektrone pomoću igle od volframa pod negativnim naponom, proizveo negativni pritisak usmeravanjem talasa iz dva piezoelektrična pretvarača u zapreminu helijuma i propustio svetlost kroz helijum. Kada je pritisak postao dovoljno negativan, on je zapazio eksplozije mehura. ***Slika 76*** prikazuje postupak i snimak iz dostupnog video snimka. Eksperiment je jedan od vrhunskih dostignuća eksperimentalne fizike poslednje decenije.



Slika 76 Kako snimiti jedan elektron pomoću video kamere: bele tačke su proizveli izdvojeni elektroni okruženi mehurima koji eksplodiraju u tečnom helijumu pod negativnim pritiskom. (mpg. film je dostupan na veb strani www.youtube.com/watch?v=pFezmUzzs_E © Humphrey Maris)

* * *

Da li je moguće napraviti savitljive ekrane u bojformata A4 i po pristupačnoj ceni i sa kvalitetom za štampanje? (***Izazov 62d***).

* * *

Da li će ikada postojati dopunjive baterije sa energijom u odnosu na masu koje su uporedive sa dizel gorivom? Koliko dugo će to trajati, od 2014. godine nadalje, dok poslednja kompanija koja proizvodi automobile na električni pogon ne prekine proizvodnju?

* * *

Koliko ćemo svake godine da vidimo nagoveštaje koji obećavaju besplatnu energiju, koliko inženjera koji obečavaju automobile koje pokreće voda, koliko političara koji obećavaju energiju iz fuzije ili varalica koji obećavaju dodatke jelima ili šećerne pilule koje leče kancer?

* * *

Da li će ikada da postoji superprovodnost na sobnoj temperaturi? (***Izazov 63r***).

* * *

Da li će ikada da postoji stoni laserski uređaj za graviranje po ceni od 1000 E? (***Izazov 64r***).

* * *

Da li će ikada da postoji teleportovanje svakodnevnih predmeta? (***Izazov 65s***).

* * *

Jedini proces koji kvantna fizika ne dopušta je telepatija. Neimenovana svemirska agencija otkrila je ovo tokom misije Apolo 14, kada je tokom leta do Meseca kosmonaut Edgar Mičel proveravao telepatiju kao sredstvo komuniciranja. Nije iznenađenje da je on shvatio da je telepatija beskorisna. (***Ref. 87***). Nejasno je samo zbog čega je svemirska agencija potrošila tako puno novca za beskorisan eksperiment – eksperiment koji je mogao da se izvede i ovde dole na zemlji po ceni jednog telefonskog poziva.

* * *

Da li će ikada da se primenjuje kvantna kriptologija? (***Izazov 66d***).

* * *

Da li će ikada postojati štampana polimerska elektronska kola umesto litografski oblikovane silicijumske elektronike, kao što je sada uobičajeno? (***Izazov 67d***).

* * *

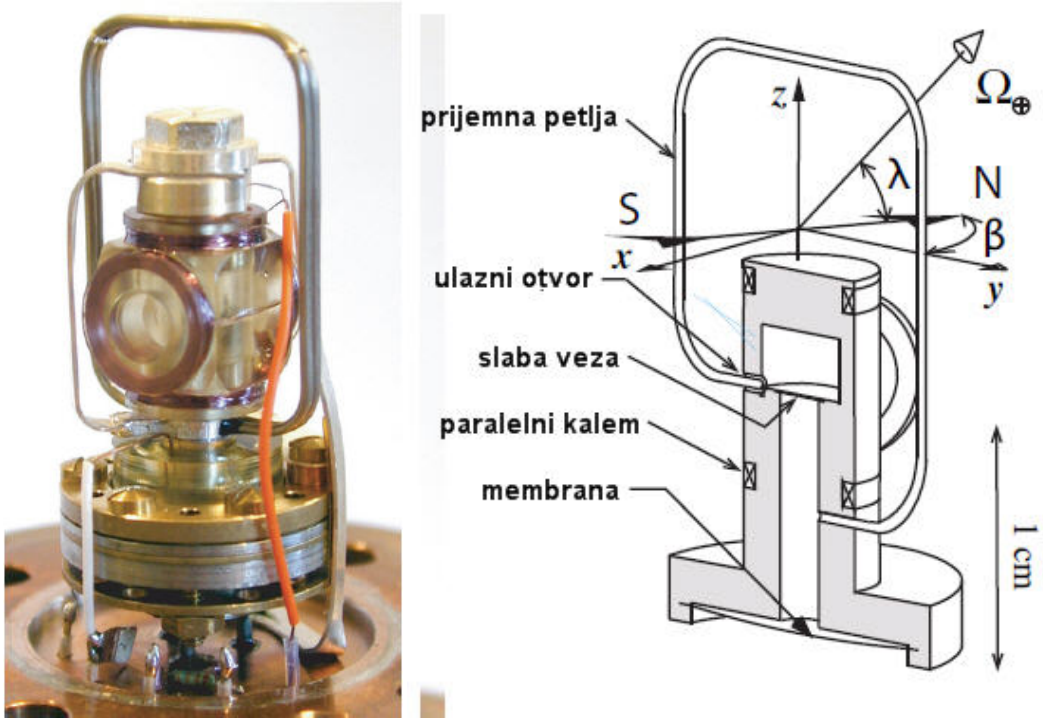
Da li će ikada postojati igračke veličine insekata upravljane radio talasima? (***Izazov 68r***).

* * *

Osvetljavanjem nevidljivog i bezopasnog zraka lasera u automobil koji prolazi, sada je moguće da se ustanovi da li su osobe u njemu pile alkohol. (***Ref. 106***). Da li će ovaj postupak ikada da ima širu upotrebu? (***Izazov 69s***).

* * *

Godine 1997. su Erik Varuko (EricVaroquaux) i njegova grupa napravili kvantnu verziju Fukoovog klatna koristeći superprotočnost helijuma. (***Ref. 107***). U ovom lepom delu istraživanja oni su rashladili mali prsten tečnog helijuma na temperaturu nižu od 0,28 K, ispod koje se helijum kreće bez trenja. U takvoj situaciji helijum može da se ponaša kao Fukoovo klatno. Uz mudru postavku, prikazanu na ***slici 77***, bilo im je omogućeno da izmere obrtanje helijuma u prstenu korišćenjem fononskih signala i da na kraju detektuju obrtanje Zemlje.

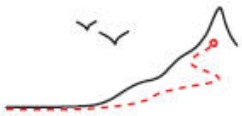


Slika 77 Unutrašnjost žiroskopa u kojem se koristi tečan helijum (© Eric Varoquaux).

ZAKLJUČAK O PROMENI SVETA KVANTNIM EFEKTIMA.

Atomi stvaraju veze. Kvantni efekti zbog toga stvaraju molekule, gasove, tečnosti i čvrsta tela, a takođe i sve efekte i svojstva svih materijala. U prošlosti su se kvantni efekti koristili za razvoj brojnih materijala sa željenim svojstvima, kao što su vrste novih čelika, novi spojevi ugljeničnih vlakana, nova sredstva bojenja, novi magnetni materijali i novi polimeri. Kvantni efekti su korišćeni za razvoj savremene elektronike, lasera, detektora svetlosti, uređaja za čuvanje podataka, superprovodničkih magneta, novih sistema za merenje i novih proizvodnih mašina. Snimanje magnetnom rezonansom, računari, polimeri, telekomunikacije i internet rezultirali su iz primene kvantnih efekata u tehnologiji.

Nastaviće se, između ostalog, korišćenje kvantnih efekata za razvoj novih materijala i sistema: novih nanočestica za unošenje lekova u telo, novih polimera, novih kristala, novih proizvodnih postupaka koji su u skladu sa okolinom i novih uređaja za medicinu.



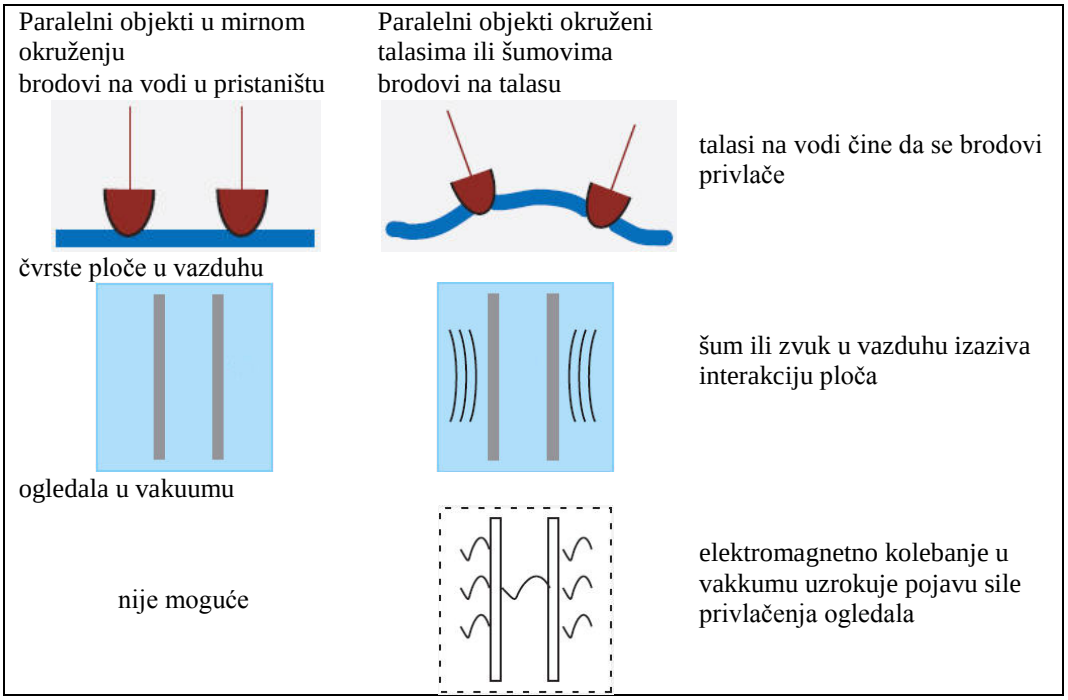
Poglavlje 3

KVANTNA ELEKTRODINAMIKA – POREKLO VIRTUALNE STVARNOSTI

Centralna ideja da kvantna teorija pomaže u opisu prirode je ideja o ***virtualnim česticama***. Virtualne čestice si čestice kratkog života; one duguju svoje postojanje kvantu rada. Usled kvanta rada one ne moraju da prate odnos energija-masa koji zahteva specijalna teorija relativnosti za obične, ***stvarne*** čestice. Virtualne čestice mogu da se kreću brže od svetlosti i mogu da se kreću unazad u vremenu. Uprkos ovim čudnim svojstvima, one imaju mnogo zapaženih efekata. Mi ćemo da istražimo one najspektakularnije.

BRODOVI, OGLEDALA I KAZIMIROV EFEKT

Kada se dva paralelna broda valjaju na velikom talasu, čak i bez najslabijeg vetra, oni se međusobno privlače. Ova situacija je prikazana na ***slici 78***. Možda je ova pojava bila poznata i pre devetnaestog veka, kada mnoga mesta nisu imala pristaništa.[1]



Slika 78 Analogije koje postoje između brodova u luci, metalnih ploča i metalnih ogledala u vakuumu

Talasi izazivaju oscilovanje brodova pošto brodovi apsorbuju energiju iz talasa. Kada brodovi osciluju oni takođe emituju talase. To se uglavnom događa na obe strane broda. Kao posledca toga, za usamljen brod emitovanje talasa nema uticaja na položaj broda. Sada zamislimo da dva paralelna broda osciluju na dugačkom talasu sa talasnom dužinom mnogo većom od rastojanja između dva broda. Zbog velike talasne dužine dva broda će da oscijuju u fazi. Usled toga brodovi neće imati mogućnost da apsorbuju energiju jedan iz drugog. Posledica toga je da će ih energija koji će oni da zrače na spoljnim stranama da pogura jednog ka drugom.

Nije teško da se izračuna efekt. Energija broda koji se valja je

$$E = mgh\cdot\alpha^2/2 \qquad (13)$$

[1] Sipko Boersma objavio je dokument u kojem je izneo svoj tekst priričnika za brodove, savetujući kaperane da dopuste da im brodovi budu rastavljeni pomoću čamaca sa više veslača. (***Ref. 88***). Međutim, kasnija istraživanja ovaj tekst stavljaju pod znak pitanja. (***Ref. 89***)

gde je α amplituda ugla valjanja, m masa broda i g = 9,81 m/s^2 ubrzanje usled gravitacije. ***Visina metacentra*** h je glavni parametar koji karakteriše brodove, posebno jedrenjake; on kazuje koliki je momenat koji vraća brod u normalan položaj kada se brod nagne za ugao α. Obično je h = 1,5 m.

Kada je brod bio nagnut on će se vratiti u normalan položaj uz prigušene oscilacije. Prigušene oscilacije su okarakterisane peridom T i faktorom dobrote Q. ***Faktor dobrote*** (Q-faktor) predstavlja broj oscilacija koji će sistem izvesti dok se njegova amplituda ne smanji za činilac e = 2,718. Ako su poznati faktor dobrote Q broda koji osciluje i njegov period oscilacija T, snaga W koja se zrači iznosi

$$W = 2\pi \frac{E}{QT} \tag{14}$$

Videli smo u predhodnom tekstu da sila zračenja (pritisak zračenja pomnožen površinom) iznosi W/c, gde je c brzina prostiranja talasa. (***Vol III, strana 93***). Za gravitacijske talase na vodi i dubokoj vodi, upoznati smo sa dobro poznatim odnosom (***Vol I, strana 211***)

$$c = \frac{gT}{2\pi} \tag{15}$$

Pod predpostavkom da svaki od dva bliska broda u potpunosti apsorbuje snagu koji emituje drugi brod, nalazimo da dva broda privlače jedan drugog prema

$$ma = m2\pi^2 \frac{h\alpha^2}{QT^2} \tag{16}$$

Ako ubacimo tipične vrednosti za Q = 2,5; T = 10 s; α = 0,14 rad i masu broda 700 t, dobijamo da je sila oko 1,9 kN. Dugački talasi će učiniti da se dva broda međusobno privuku. Snaga privlaćenja je relativno mala i može se savladati čamcem na vesla. S druge strane, čak i najslabiji vetar će prigušiti amplitudu oscilovanja i izazvati drugi efekt koji će pritajiti ili zaseniti ovo privlačenje.

Zvučni talasi ili šum ispoljavaju isti efekt. Dovoljno je da se postave u vazduh dve metalne ploće i da se okruže zvučnicima. (***Ref. 90***). Zvuk će da izazove privlačenje (ili odbijanje) ploča, što zavisi da li talasna dužina zvuka ne može (ili može) da se primi od druge ploče.

Holandski fizičar Hendrik Kazimir (Hendrik Casimir) je 1948 godine načinio najspektakularniju predpostavku u kvantnoj teoriji: on je predpostavio sličan efekt na metalne ploče u vakuumu. Kazimir je radio u holandskoj elektronskoj kompaniji Philips i želeo je da shvati zbog čega te tako teško da se naprave katodne TV cevi. Površina koja emituje svetlost u katodnim cevima televizora – ili u današnje vreme na plazma ekranima – fosfor, napravljen je polaganjem malih neutralnih, ali provodnih čestica na staklo. Kazimir je zapazio da se te čestice na neki način međusobno privlače. Kazimir se zainteresovao da shvati na koji način su neutralne čestice u interakciji. Tokom ovog teoretskog istraživanja otkrio je da su u interakciji dve metalne ploče čak i u potpunom vakuumu. To je poznat ***Kazimirov efekt***. Kazimir je takođe odredio snagu privlačenja između lopte i ploče, kao i između dve lopte. Zapravo, sva provodna neutralna tela privlače se međusobno u vakuumu, silom koja zavisi od njihove geometrije.(***Ref. 91***) i (***Ref. 92***).

U svim takvim situacijama ulogu mora preuzima kolebanje nulte tačke elektromagnetnog polja, a ulogu brodova preuzimaju provodna tela. Kazimir je shvatio da prostor između dva paralelna provodna ogledala, usled geometrijskih ograničenja, ima drugačije kolebanje nulte tačke nego slobodan vakuum. Isto kao i u slučaju dva broda, posledica bi bila privlačenje dva ogledala.

Kazimir je predvideo da je privlačenje dva ogledala mase m i površine A, na rastojanju d određeno sa

$$\frac{ma}{A} = \frac{\pi^3}{120}\frac{\hbar c}{d^4} \tag{17}$$

Efekt je čist kvanti efekt; u klasičnoj elektrodinamici dva neutralna tela se ne privlače. Efekt je mali; zahteva malo dovitljivosti da se otkrije. Prvi eksperimentalni dokaz dali su ruski naučnici Derjagin, Abrikosova i Lifšic 1956. godine (***Ref. 93***); drugi eksperimentalni dokaz dao je Markus Šparnaj (Marcus Sparnaay), Kazimirov kolega u Philipsu 1958. godine. (***Ref. 94***). Dva divna precizna merenja Kazimirovog efekta izvršili su 1997. godine Lamoro (Lamoreaux) i 1998, godine Mohidin (Mohideen) i Roj (Roy); oni su potvrdili Kazimirovo predviđanje uz preciznost od 5%, odnosno 1%, respektivno. (***Ref. 95***). (Treba primetiti da na vrlo malim rastojanjima zavisnost nije 1/d^4 već 1/d^3) (***Ref. 96***). Ukratko, neutralna tela se privlače usled kolebanja elektromagnetnog polja.

Kazimirov efekt stoga potvrđuje postojanje kolebanja nulte tačke elektromagnetnog polja. To potvrđuje da je kvantna teorija valjana i za elektromagnetizam.

Kazimirov efekt između dve lopte srazmeran je $1/r^7$ i prema tome je mnogo slabiji nego li između dve paralelne ploče. Uprkos ovoj čudnoj zavisnosti, općinjenost Kazimirovim edektom naterala je mnoge amatere naučnike da spekulišu kako bi mehanizam sličan Kazimirovom efektu mogao da objasni gravitacijsko privlačenje. Možete li navesti najmanje tri razloga zbog čega je ovo nemoguće, čak i kada bi efekt imao ispravnu zavisnost od razmaka? (***Izazov 70s***).

Kao i u slučaju zvuka, Kazimirov efekt može da izazove odbijanje umesto privlačenja. Dovoljno je da jedan od dva materijala bude savršeno permeabilan (magnetno propustljiv) a drugi savršen provodnik. Takva kombinacija odbija međusobno materijale, kao što je 1974. godine otkrio Timoti Bojer (Timithy Boyer). (***Ref. 97***).

Spontana emisija je ugušena u šupljini, ako je ona manja od talasne dužine emitovane svetlosti! Ovaj efekt je takođe bio opažen. On potvrđuje da je spontana emisija ona emisija koja je podstaknuta kolebanjem nulte tačke.

Kazimirov efekt je iznedrio drugo iznenađenje: između dve metalne ploče brzina svetlosti se menja i može da bude veća od *c*. (***Ref. 98***). Možete li da zamislite šta ovde tačno znači "brzina svetlosti"? (***Izazov 71s***).

U 2006. godini Kazimirov efekt obezbedio je još jedno iznenađenje. Upravo ispričana priča o brodovima je lepa, interesantna i pomaže da se shvati efekt; ali izgleda da se priča zasniva na nesporazumu. Nažalost, tumačenje starog mornaričkog teksta koji je dao Sipko Boersma izgleda da je puštanje mašti na volju. (***Ref. 89***). Možda i postoji takav efekt na brodove, ali on nikada nije niti opažen niti je zapisan od strane moreplovaca, kako je naglasio Fabricio Pinto (Fabrizio Pinto) posle pažljivog istraživanja mornaričkih izvora. Međutim, kao analogija ostaje da važi.

LAMBOV POMAK

U neka davna vremena bilo je uobičajeno da osoba dobije Nobelovu nagradu za fiziku zato što je zapazila boju svetlosti svetiljke – ukoliko je posmatranje bilo dovoljno pažljivo. Godine 1947. Vilis Lamb (Willis Lamb, 1913. Los Angeles – 2008 Tucson) izvršio je takvo pažljivo merenje vodonikovog spektra. On je našao da energetski nivo $2S_{1/2}$ u atomu vodonika leži neznatno iznad nivoa $2P_{1/2}$.To opažanje je u suprotnosti sa ranije izvršenim proračunima gde je predviđeno da dva nivoa imaju istu energiju. (***Vol IV, strana 145***). Nasuprot tome, izmerena razlika energije iznosi 1057,864 MHz ili 4,3 μeV. Ovo otkriće je imalo zvačajne posledice za opisivanje kvantne teorije i donelo je Lambu podelu Nobelove nagrade z fiziku u 1955. godini. Zašto?

Razlog za neslaganje između proračuna i opažanja je približnost izvedena u reletivističkim proračunima energetskih nivoa vodonikovog atoma koja je trajala više od dvadeset godina do razjašjenja. Postoje dva podjednaka objašnjenja. Jedno objašnjenje je da relativistički proračun zanemaruje članove spajanja između jednačine Diraka i jednačina Maksvela. Ovo objašnjenje vodi do prvog izračunavanja Lambovog pomaka, oko 1950. godine. Drugo, podjednako dobro objašnjenje je da izračunavanje ***zanemaruje virtualne čestice***. Izračunavanje naročito zanemaruje virtualne fotone koji se emituju i apsorbuju tokom kretanja elektrona oko jezgra. Ovo drugo objašnjenje je u saglasnosti sa savremenim rečnikom kvantne elektrodinamike. Kvantna elektrodinemika (ili skraćeno QED) je (perturbativni) pristup rešavanju povezanih Dirakovih i Maksvelovih jednakosti.

Ukratko, Lamb je zapazio prvi efekt koji nastaje usled virtualnih čestica. Zapravo, Lamb je koristio mikrotalase za ovaj eksperiment; tek je 1970. godine postalo moguće da se vidi Lambov pomak optičkim sredstvima. Za ovaj i slične poduhvate Artur Šavlov (Arthur Schawlow) je dobio Nobelovu nagradu za fiziku 1981. godine

LAGRANŽIJAN KVANTE ELEKTRODINAMIKE I NJEGOVE SIMETRIJE

Uprošćenim pojmovima kazano, ***kvantna elektrodinamika*** je opis kretanja elektrona. To podrazumeva da je opis utvrđen efektima mase i naelektrisanja i kvantom rada. Gustina lagranžijana kvantne elektrodinamike je data sa:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{QED} = \bar{\psi}\left(i\hbar c\bar{\phi} - c^2 m_k\right)\psi - & \quad \text{materijalni član} \\ -\frac{1}{4\mu_0}F_{\mu\upsilon}F^{\mu\upsilon} + & \quad \text{član elektromagnetnog polja} \\ + e\hbar c A_\mu \bar{\psi}\gamma^\mu\psi & \quad \text{član elektromagnetne interakcije} \end{aligned} \qquad (18)$$

Materijalni član znamo iz Dirakove jednakosti za slobodne čestice; on opisuje kinetičku energiju slobodnih elektrona. Znamo i član elektromagnetnog polja iz Maksvelovih jednakostu; on opisuje kinetičku energiju fotona. Član elektromagnetne interakcije je član koji kodira mernu simetriju elektromagnetizma, naziva se takođe "minimalna povezanost"; on opisuje potencijalnu energiju. Drugim rečima, lagranžijan opisuje kretanje elektrona i fotona.

Svi eksperimenti koji su ikada izvedeni u saglasnosti su sa ovim lagranžijanom. Drugim rečima, ovaj lagranžijan je konačan i tačan opis kretanja elektrona i fotona. Osim toga, lagranžijan opisuje veličinu, oblik i boju atoma, veličinu, oblik i boju molekula, kao i sve interakcije molekula. Ukratko, lagranžijan opisuje sve u nauci o materijalima, sve u hemiji i sve u biologiji. Ako se malo pretera, ovaj lagranžijan na neki način opisuje život. (Ustvari, mora da se doda opis atomskog jezgra; to ćemo da istražimo u tekstu koji sledi.) (***Strana 123***).

Svi elektromagnetni efekti, uključujući i rast obojenih tačaka na krilima leptira, rad tranzistora, sečenje papira makazama, potpuno su opisani lagranžijanom kvantne elektrodinamike (QED). Zapravo, lagranžijan takođe opisuje kretanje miona, tau leptona i svih drugih naelektrisanih čestica. Pošto je ovaj lagramžijan deo konačnog opisa kretanja, vredi da se razmisli o njemu detaljnije.

Kakav je eksperinent potreban da bi se izveo lagranžijan kvantne elektrodinamike? Ovo pitanje je bilo istraženo veoma detaljno. Odgovor je dat u popisu koji sledi:

- usaglašenost sa invarijantnim kvantom rada posmatrača za kretanje elektrona i fotona,
- simetričnost u permutacionoj grupi među mnogim elektronima, to jest fermionsko ponašanje elektrona,
- usaglašenost sa invarijantnom brzinom svetlosti, to jest simetrija u transformaciji specijalne teorije relativnosti,
- simetrija u U(1) merilu transformacija za kretanje fotona i naelektrisanih elektrona,
- simetrija u grupi renormalizacije,
- niska energetska jačina interakcije opisane konstantom fine strukture, elektromagnetna konstanta veze α = 1/137, 036

Poslednje dve tačke zahtevaju izvesna objašnjenja. Kao i u svim slučajevima kretanja, rad je volumenski integral po vremenu gustine lagranžijana. Sva polja, bilo da su materija ili zračenja, kreću se na takav načim da rad ostaje minimalan. Ustvari, ne postoji nikakva poznata razlika između predviđanja načela najmanjeg rada zasnovanog na gustini lagranžijana kvantne elektrodinamike i posmatranja. Premda je gustina lagranžijana poznata od 1926. godine, proteklo je dugih dvadeset godina da se nauči kako da se računa sa njom. Tek u godinama oko 1947. postalo je to jasno, kroz postupak ***renormalizacije*** da je gustina lagranžijana kvantne elektrodinamike konačni opis svih kretanja materije usled elektromagnetne interakcije u ravnom prostor-vremenu. Detalje su nezavisno otkrili Džulijan Švinger (Julian Schwinger), Frimen Dajson (Freeman Dyson), Ričard Fajnmen (Richard Feynman) i Tomonaga Šiničiro (Tomonaga Shin'ichiro), četvorica među najpametnijim fizičarima ikad.[1]

Gustina kvantnog lagranžijana kvantne elektrodinamike sadrži silu elektromagnerne interakcije u obliku konstante fine strukture $\alpha = e^2/(4\pi\varepsilon_0\hbar c)$ = 1/137, 036(1). Ovaj broj je deo lagranžijana; nije dato nikakvo

[1] Tomonaga Šiničiro (Tomonaga Shin'ichiro, 1906. Tokio – 1979. Tokio) radio je na razvoju kvantne elektrodinamike i dobio je Nobelovu nagradu za fiziku zajedno sa Fajnmenom i Švingerom. Kasnije je postao značajna figura u politici nauke, zajedno sa svojim kolegom iz srednje škole i prijateljem, Jukava Hidei (Yukawa Hidei), dobitnikom Nobelove nagrade, bio je primer većini fizičara u Japanu.

objašnjenje za njegovu vrednost i objašnjenje je ostalo nepoznato do 2016. godine. To je jedna od najtežih zagonetki fizike. Isto tako U(1) merna grupa je posebna za elektromagnetizam. Svi ostali zahtevi važe za svaki tip interakcije. Zaista, potraga za lagranžijanima dve nuklearne interakcije postala je stvarno obuhvaćena i konačno uspešna samo kada su neophodni zahtevi jasno određeni, što ćemo da otkrijemo u ostatku ovog dela pustolovine.

Gustina lagranžijana zadržava sve simetrije koje su nam poznate iz klasične fizike. (***Vol. I, strana 311***). (***Izazov 72e***) Kretanje je neprekidno, u njemu su očuvani energija-količina kretanja i moment količine kretanja, ono je relativno, simetrično u odnosu levo-desno, dvosmerno je, to jest, simetrično pri promeni predznaka brzine, lenjo je, to jest, minimizira rad. Ukratko, unutar granica koje nameće kvant rada ostaje predvidivo i kretanje usled kvantne elektrodinamike.

INTERAKCIJA I VIRTUALNE ČESTICE

Elektromagnetna interakcija je razmena virtualnih fotona. Dakle kako može interakcija da bude privlačna? Na prvi pogled, svaka razmena virtualnih fotona treba da pokrene elektrone jedne od drugih. Međutim, to nije tačno. Količina kretanja virtualnih fotona ne mora da bude u smeru protoka njihove energije; može da bude i u suprotnom smeru.[1] Očigledno, to je jedina mogućnost u granicama koje nameće relacija neodređenosti,

Međutim, virtualne čestice imaju i druga iznenađujuća svojstva: virtialni fotoni, na primer, ne mogu da se izbroje.

DA LI JE ENERGIJA VAKUUMA BESKONAČNA ILI NULA?

Najčudnija posledica kvantne teorije polja je gustina energije u vakuumu. S jedne strane, u najboljoj približnosti, vakuum nema masu niti sadrži energiju. Energija vakuuma je stoga izmerena i očekivano je da bude ***nula*** (ili bar izuzetno nala).[2]

S druge strane, gustina energije kolebanja nulte tačke elektromagnetnog polja data je sa

$$\frac{E}{V} = \frac{4\pi h}{c^3}\int_0^\infty \nu^3 \mathrm{d}\nu \qquad (19)$$

Rezultat ovog integriranja je beskonačan. Kvantna teorija polja predviđa beskonačnu energiju vakuuma.

Možemo da pokušamo da ublažimo problem na sledeći način. Kao što ćemo da otkrijemo u poslednjem delu naše pustolovine, (***Vol VI, strana 36***), postoje dobri dokazi da u prirodi postoji najmanja merljiva vrednost rastojanja; ova najmanja dužina se pojavljuje kada se u obzir uzme gravitacija. Najmanje rastojanje je reda ***Plankove dužine***:

$$l_{Pl} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \approx 1{,}6 \cdot 10^{-35}\ \mathrm{m} \qquad (20)$$

Minimalno rastojanje dovodi do maksimalne granične učestanosti. (***Vol. VI, strana 36***). Međutim, čak i u tom slučaju gustina energije u vakuumu koja sledi iz toga još uvek je veliki broj i mnogo veća od opažene vrednosti, za red veličine preko 100 puta. Drugim rečima, izgleda da kvantna elektrodinamika predviđa beskonačnu, ili kada se u obzir uzme i gravitacija, ogromnu energiju u vakuumu. Međutim, merenja pokazuju malu vrednost. Šta je ustvari pogrešno u ovom prostom proračunu? Odgovor ne može da se da na ovom mestu; on će postati jasan u poslednjem delu naše pustolovine.

POKRETNA OGLEDALA

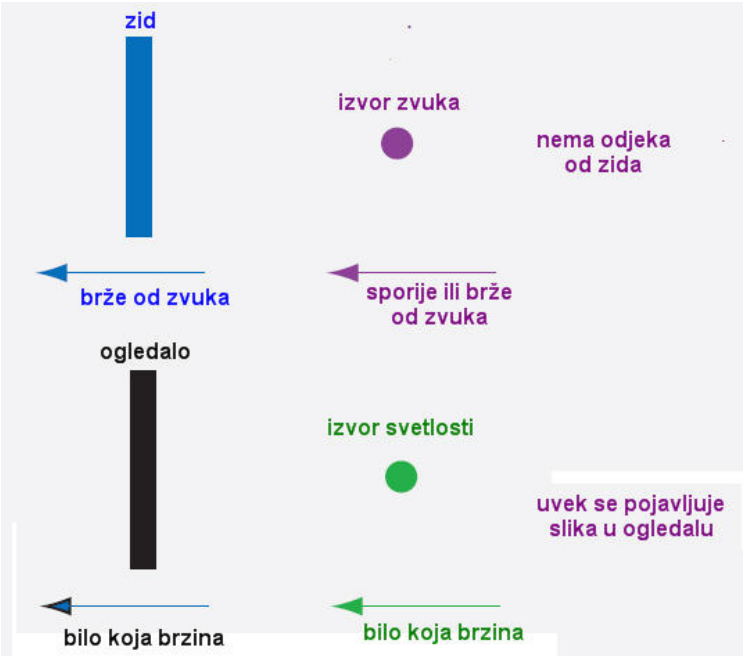
Ogledala rade kada su ili ona ili izvor svetlosti u pokretu. Nasuprot tome, zidovi, ili ogledala zvuka ***ne proizvode*** odjek za bilo kakav izvor zvuka ili za bilo koju brzinu zida. Na primer, eksperimenti pokazuju da zidovi ne proizvode odjek ako se zid ili izvor zvuka kreću brže od zvuka. Zidovi ne proizvode odjek ćak i kada se izvor zvuka kreće sa njim, ako se oba objekta kreću brže od zvuka. S druge strane, svetlosna

---

1 Jedna od najlepših brošura iz kvantne elektrodinamike koja obrađuje ovu temu ostaje tekst od Ričarda Fajnmena (Richard Feynman), *QED: Strange Theory of Light and Matter*, Penguin Books, 1990.

2 Ova strana pitanja još više je zapetljana 1998. godine. U astrofizičkim merenjima, koja su potvrđena u godinama koje su usledile, nađeno je da energija vakuuma ima malu vrednost, ali da ona nije nula, već je reda 0,5 nJ/m^3. Razlog za ovu vrednost nije još uvek razumljiv i to ostaje otvoreno pitanje savremene fizike.

ogledala ***uvek*** proizvode sliku, bilo kakva da je prisutna brzina izvora svetlosti ili ogledala. Ova posmatranja potvrđuju da je brzina svetlosti jednaka za sve posmatrače: ona je ivarijanta i granična brzina. (Možete li detaljno da razjasnite dokaz?) (***Izazov 73s***). Nasuprot tome, brzina zvuka u vazduhu zavisi od posmatrača; ona ***nije*** invarijanta.



Slika 79 Brzi zid ne proizvodi ođek, brzo ogledalo proizvodi sliku

Svetlosno ogledalo se razlikuje od teniskog reketa. Da bi se nastavila predhodna analogija teniski reket predstavlja ogledalo za tenisku loptu. (***Vol. II. strana 22***). Videli smo da ogledalo ne može da se upotrebi za promenu brzine svetlosti koja udara u njega, nasuprot teniskom reketu koji može to da učini sa loptom. Ovo posmatranje pokazuje da je brzina svetlosti granična brzina. Ukratko, samo postojanje ogledala i njegovih svojstava dovoljni su da se izvede specijalna teorija relativnosti.

Međutim, postoji mnogo interesntnih stvari da se nauče o ogledalima. Moramo samo da se zapitamo da li ogledala rade kada se podvrgnu ***ubrzanom*** kretanju. Ovo pitanje daje iznenađujuči rezultat.

Oko 1970-ih godina znatan broj istraživača našlo je da za ubrzavanog posmatrača ne postoji vakuum. Ovaj efekt se naziva ***Fuling-Dejvis-Unru efekt***. (Napušten je netačan i retko korišćen pojam ***dinamički Kazimirov efekt***.) Za ubrzavanog posmatrača vakuum je pun toplotnog zračenja. O tome ćemo raspravljati u tekstu koji sledi. Ova činjenica ima interesantnu posledicu za ogledalo koje ubrzava: ogledalo u ubrzanom kretanju odbija toplotno zračenje sa kojim se sreće. Ukratko, ***ubrzavano ogledalo emituje svetlost***! Nažalost, jačina ovog takozvanog ***Unru zračenja*** je toliko mala da ne može da se izmeri direktno, bar ne do sada. Mi ćemo detaljnije da istražimo ovo pitanje u tekstu koji sledi, (***strana 111***). (Možete li da objasnite zašto ubrzavano ogledalo emituje svetlost, ali ne i materiju?) (***Izazov 74s***).

FOTONI UDARAJU U FOTONE

Obično zrak svetlosti može neometano da prođe kroz drugi zrak svetlosti: interferencija je dokaz i osnovno svojstvo svetlosti. Međutim, tu postoje izuzeci. Kada se u obzir uzmu virtualne čestice, zraci svetlosti mogu da "tresnu" jedan u drugi – premda veoma slabo. Ovaj rezultat je u potpunoj suprotnosti sa klasičnom elektrodinamikom.

Ustvari kvantna elektrodinamika pokazuje da pojava virtualnih parova elektron-pozitron omogućava da fotoni udaraju jedni u druge. A takvi parovi nalaze se u svakom zraku svetlosti. Međutim, presek sudara fotona koji udaraju jedan u drugog je mali. Drugim rečima sudar je veoma slab. Kada se dva zraka svetlosti preseku, većina fotona će proći neometano. Površina poprečnog preseka približno iznosi

$$A \approx \frac{973}{10125\pi}\alpha^4\left(\frac{\hbar}{m_e c}\right)^2\left(\frac{\hbar\omega}{m_e c^2}\right)^6 \qquad (21)$$

za svakodnevni slučaj kada je energija $\hbar\omega$ fotona mnogo manja od ostatka energije $m_e c^2$ elektrona. Red vrednosti ove male energije je oko 18 puta manji od one izmerene 1999. godine; budučnost će pokazati da li će efekt ikada biti zapažen za vidljivu svetlost. Međutim, za fotone velikih energija ovaj efekt svakodnevno se viđa u ubrzivačima (akceleratorima) čestica. U takvim postavkama nisu zapažene samo interakcije parova elektron-antielektron, već takođe virtualnih parova mion-antimion, virtualnih parova kvark-antikvark i mnogo drugih.

Svako ko troši naučnu fantastiku zna da se materija i antimaterija poništavaju i pretvaraju se u čistu svetlost. Još preciznije, čestica materije i čestica antimaterije poništavaju se u dva ili više fotona. Interesantno je da kvantna teorija predviđa da je obrnuti proces takođe moguć, foton koji se sudari sa fotonom može sa stvori materiju. Ova predpostavka skoro da je bila eksperimentalno potvrđena tokom 1997. godine. (***Ref. 99***).

U ubrzivaču čestica u Stanfordu, fotoni iz pulsirajućeg lasera velike energije odbačeni su od veoma brzih elektrona. Na taj način su odbijeni fotoni dobili veliku energiju, kada se gleda u inercijalnom sistemu eksperimentatora. Impulsi zelenog lasera, talasne dužine od 527 nm ili energije fotona od 2,4 eV, imali su vršnu gustinu snage od 10^{22} W/m^2, skoro najveću do tada postignutu. To je gustina fotona od 10^{34} /m^3 i električno polje od 10^{12} V/m, obe vrednosti su bile rekordne u to vreme. Kada je elektronski zrak od 46,6 GeV odbio taj impuls zelenog lasera, povratni fotoni su imali energijuu od 29,2 GeV i prema tome postali gama zraci velike energije. (***Izazov 75e***). Ovi gama zraci su se sudarali sa drugim zelenim fotonima koji su stalno pristizali i stvarali su parove elektron-pozitron putem reakcije

$$\gamma_{29,2\,\mathrm{GeV}} + n\gamma_{\mathrm{green}} \rightarrow e^+ + e^- \qquad (22)$$

u kojoj su obe čestice otkrivane posebnim uređajima. Eksperiment je prema tome pokazao da u prirodi svetlost može da se sudari sa svetlošću, a da pre svega to čini na takav način da stvara materiju. To je najbliže što možemo da postignemo u fantaziji naučne fantastike sa svetlosnim mačevima ili sa laserskim zracima koji ***udaraju*** jedan u drugog.

DA LI JE VAKUUM KUPATILO?

Ako je vakuum more virtualnih fotona i parova čestica-antičestica, za vakuum bi moglo da se poosumnja da ima ulogu kupatila. U opštem slučaju odgovor je negativan. Kvantna teorija polja deluje na principu da vakuum ***nije*** kupatilo za pojedinačne čestice. Međutim, postoje uvek izuzeci. Na rasute sisteme sastavljene od mnogo čestica, kao što su električni provodnici, vakuum ***može*** da deluje kao viskozna tečnost. (***Ref. 100***). Tela koja su nepravilnog oblika, ali provodna, mogu da emituju fotone kada se ubrzavaju, prema tome da prugušuju takvu vrstu kretanja. To je zbog Fuling-Dejvis-Unru efekta, kao što je opisano u predhodnoma tekstu. Prigušenje zavisi od oblika pa prema tome i od smere kretanja tela.

Gour i Sriramkumar su 1998. godine čak predvideli da Braunovo kretanje treba čak da se pojavi i kod nesavršenog, to jest delimično apsorbujućeg ogledala postavljenog u vakuum. (***Vol. I, strana 280***). Kolebanja vakuuma treba da proizvedu srednji kvadratni pomak (***Ref. 101***)

$$\left\langle d^2 \right\rangle = \frac{\hbar}{m} t \qquad (23)$$

koji se povećava sa vremenom; međutim, izuzetno mala pomeranja proizvedena na taj način do sada su izvan eksperimentalnih domašaja. Međutim, rezultat nije iznenađenje. Jeste li sposobni da date drugačije manje složeno objašnjenje za ovo? (***Izazov 76ny***).

RENORMALIZACIJA – ZAŠTO JE ELEKTRON TAKO LAK?

Energija polja tačkaste naelektrisane čestice, pa prema tome njena masa, u klasičnoj fizici se predviđa da je beskonačna. (***Vol III, strana 175***). Kvantna elektrodinamika efektno odbacuje naelektrisanje elektrona preko njegove Komptonove talasne dužine; kao rezultat toga energija polja doprinosi samo maloj ispravci njegove ukupne mase. Možete li da ovo potvrdite? (***Izazov 77s***).

Kvantna elektrodinamika je opis teorije smetnje (perturbacije). To znači da se svaki predpostavljen rezultat R nalazi u Tejlorovom redu stepena malih parametara.

$$R = R_0 + R_1\alpha + R_2\alpha^2 + R_3\alpha^3 + R_4\alpha^4 + \cdots \qquad (24)$$

U kvantnoj elektrodinamici mali parametar je konstanta fine strukture α = 1/137,036(1). Uz pomoć reda poremećaja tačan rezultat R predpostavlja se sve preciznije. Zatim, u kvantnoj elektrodinamici mnogi medurezultati u razvijanju poremećaja su divergentni integrali, tj. integrali koji imaju beskonačnu vrednost. Divergencija nastaje usled predpostavke da su u prirodi moguća beskonačno mala rastojanja. Dakle, divergencije su tvorevine koje se mogu odstraniti. Postupak odstranjivanja se naziva ***renormalizacija***.

Ponekad se tvrdi da beskonačnost, koja se pojavljuje u kvantnoj elektrodinamici pri međukoracima izračunavanja, pokazuje da je teorija nesavršena ili pogrešna. Međutim, ovakva vrsta izjave podrazumevala bi da je i klasična fizika takođe nesavršena ili pogrešna, na osnovu odrednice brzine v pomoću prostora x i vremena t, naime

$$v = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \to 0} \Delta x \frac{1}{\Delta t} \qquad (25)$$

dobija se beskonačnost kao međukorak. Zapravo dt budući da je zanemarljivo mali može da se tvrdi ds je deljenik nula. Oba dokaza pokazuju teškoću da se prihvati da rezultat graničnih procesa koji može biti konaćna veličina iako su u proračunu prisutne beskonačne veličine. Paralela između mase elektrona i brzine veća je no što izgleda; oba međukoraka "beskonačnosti" proizilaze iz pretpostavke da je prostor-vreme neprekidno, tj. beskonačno deljivo. Beskonačnost neophodna u graničnim procesima za određivanje diferenciranja, integriranja ili renormalizacije pojavljuje se samo kada se prostor-vreme pojednostavi, kako kažu fizičari, kao "neprekinuti" skup ili kako kažu matematičari, kao "potpun" skup.

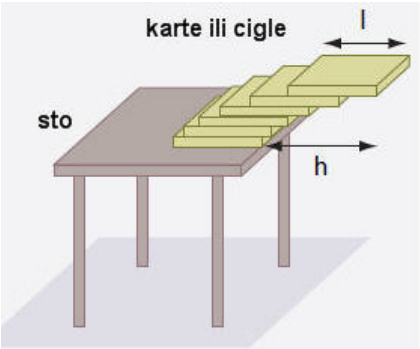
S druge strane, ubeđenje da pojava beskonačnosti može da bude znak nesavršenosti teorije bilo je zanimljiv razvoj u fizici. Ono pokazuje kako je beskonačnost u našem opisu prirode postala neudobna za mnoge fizičare. Zapravo to je bio slučaj sa samim Pol Dirakom, pošto je u mladosti uspešno položio osnove kvantne elektrodinamike, u ostatku svog života bezuspešno je tražio da promeni teoriju tako da se izbegnu beskonačni međurezultati. (***Ref. 102***).

Renormalizacija je procedura koja nastaje iz zahteva da neprekidno prostor-vreme i teorija merenja moraju da rade uporedno. Posebno, renormalizacija nastaje iz zahteva da je pojam čestice dosledan, to jest da su moguća širenja smetnji. Međurezultati koji su beskonačni nisu problem. U neobičnom preokretu, nekoliko dekada posle smrti Diraka, njegove želje su najzad bile ispunjene, premda na drugačiji način no što je predviđao. U zadnjem delu uspona na planinu biće pokazan način rešavanja ovog problema. (***Vol. VI, strana 34***).

ZANIMLJIVOSTI I ZABAVNI IZAZOVI IZ KVANTNE ELEKTRODINAMIKE

Kretanje je zanimljiva tema i kada radoznala osoba postavi pitanje o tome, za odgovor će zahtevati mnogo vremena kvantne elektrodinamike. Zajedno sa gravitacijom, kvantna elektrodinamika objašnjava skoro sve iz naših svakodnevnih doživljaja, uključujući i mnoga iznenanađenja. Pogledajmo neke od njih.

* * *



Slika 80 Kolika je najveća vrednost odnosa h/l?

Poznata zagonetka, prikazana na ***slici 80***, pita koliko poslednja karta (ili cigla) u slogu može da bude udaljena od ivice stola? Očigledno, jedino gravitacija, ne lepak niti bilo koje drugo sredstvo nije dopušteno da bi karte ostale na stolu. Pošto budete rešili zagonatku, možete li da date rešenje za slučaj da se u obzir uzme kvant rada? (***Izazov 78s***).

* * *

Kvantna elektrodinamika objašnjava zašto postoji samo konačan broj vrsta atoma. (***Ref. 103***). Ustvari, potrebno je samo dva reda za dokaz da par proizvodnje elektron-amtielektron parova onemogućava da jezgro ima više od 137 protona. Možete li to da pokažete? (***Izazov 79s***). Ukratko, konstanta fine strukture ograničava broj hemijskih elemenata u prirodi. Efekt na bazi ovog ograničenja, polarizacija vakuuma, isto tako ima značajnu ulogu u mnogo većim sistemima, kao što su crne rupe sa nabojem, kao što ćemo uskoro da vidimo. (***Strana 116***).

* * *

Skidanje 91 od 92 elektrona iz atoma uranijuma omogućava da se istraži uz veliku preciznost da li je elektron najbliži jezgru još uvek opisan kvantnom elektrodinamikom. Električno polje u bizini jezgra uranijuna od 1 EV/m je najveće koje je postignuto u laboratoriji; vrednost polja je u blizini praga spontanog stvaranja para. Polje je najjače stalno polje koje može da se proizvede u laboratoriji i idealna je osnova za precizne eksperimente kvantne elektrodinamike. Efekt virtualnih fotona je da stvaraju Lambov pomak; ali čak i za ovo polje izuzetne jačine, vrednost zadovoljava proračune. (***Ref. 104***).

* * *

Da li u prirodi postoji ***kritično magnetno polje***, kao što postoji kritično električno polje, ograničeno spontanim stvaranjem para? (***Izazov 80ny***).

* * *

Mikroskopski razvoj može da bude prilično spor. Svetlost, naročito ako je emitovana iz pojedinačnih atoma uvek je emitovana iz nekog metastabilnog stanja. Obično su vremena raspada, budući da su izazvana kolebanjima vakuuma, mnogo kraća od mikrosekunde. Međutim, postoje metastabilna stanja atoma koja traju desetak godina: na primer, jon iterbijuma u stanju $^2F_{7/2}$ dostiže ovo vreme, pošto emisija svetlosti zahteva oktopolni prelazak, u kojem se moment količine kretanja menja za $3\hbar$; što je izuzetno malo verovatan proces. (***Ref. 105***). U radioaktivnom raspadu rekord u sporosti drži ^{209}Bi, sa preko 10^{19} godina za vreme poluraspada. (***Strana 259***).

* * *

Mikroskopski razvoj može biti prilično brz. Možete li da zamislite kako se zaključuje ili meri brzina elektrona u atomu? A unutar metala? (***Izazov 81s***).

* * *

Ukoliko je električni provodnik dovoljno tanak, njegova električna provodnost je kvantizovana u koracima od $2e^2/\hbar$, Što je provodnik deblji, više takvih koraka je dodavano u njegovu provodnost? Možete li da objsnite efekt? (***Izazov 82s***). Uzgred, kvantifikovana provodnost takođe je bila zapažena za svetlost i za fotone. (***Ref. 108***).

* * *

Kazimirov efekt, kao i svi drugi eksperimenti, podrazumevaju da postoji posebna i konačna gustina energije koja može da se pripiše vakuumu. Da li to znači da možemo da primenimo efekt Banah-Tarski na delove vakuuma? (***Izazov 83d***).

* * *

Možete li da objasnite zašto blato nije providno? (***Izazov 84s***).

* * *

Nestabilnost vakuuma takođe daje (prostu) granicu konstante fine strukture. Vrednost konstante fine strukture od oko 1/137,036 ne može da se objasni kvantnom elektrodinamikom. (***Ref. 200***). Međutim, može se zaključiti da ona mora da bude manja od 1 da bi se dobila smislena teorija. Zapravo, kada bi njena vrednost bila veća od 1, vakuum bi postao nestabillan i spontano bi stvarao parove elektron-pozitron.

* * *

Može li svemir ikada da bude manji od njegove sopstvene Komptonove talasne dužine? (***Izazov 85s***).

* * *

Opis kretanja preko obrazaca u prošlosti je prihvatan prilično ozbiljno. Pre pojave računara proučavani su samo oni primeri kretanja koji su mogli da budu opisani jednostavnim obrascima. Međutim, pokazalo se da je ovakav uskogrudni pristup isuviše ograničavajuči. Zapravo matematičari su pokazali da Galilejeva mehanika ne može da reši probleme tri tela, da specijalna teorija relativnosti ne može da reši probleme dva tela, da opšta teorija relativnosti ne može da reši probleme jednog tela, a da kvantna teorija polja ne može da reši problem nultog tela. Bilo je potrebno da prođe neko vreme da zajednica fizičara shvati da razume-

vanje kretanja ne zavisi od opisa putem obrazaca, već od opisa jasnim jednakostima zasnovanih na prostoru i vremenu.

* * *

Ustvari kvantna elektrodinamika, ili QED, daje ogroman broj zanimljivosti i svake godine postoji bar jedno novo zanimljivo otkriće. Sada ćemo zaključiti temu jednim mnogo opštijim pristupom.

KAKO MOŽEMO DA SE KREĆEMO PO SAVRŠENOM LEDU? - KONAČNA PROVERA FIZIKE

U našim traganjima sreli smo se sa kretanjima svake vrste. Prema tome, provera koja sledi – a ne sme da se prihvati isuviše ozbiljno – konačna je provera fizike, koja vam omugućava da proverite svoje znanje i da ga uporedite sa tuđum.

Zamislite da ste na savršenoj površini bez trenja i da želite da se krećete prema njenoj ivici. Koliko postupaka možete da pronađete da biste to postigli? Dopišten je svaki postupak, ma koliko njegov efekt bio mali.

Klasična fizika pruža dosta veliki broj postupaka. Videli smo da je za obrtanje dovoljno da obrnemo naše ruke iznad glave. Za uzdužno kretanje najjednostavnije mogućnosti su da bacimo cipelu ili da udahnemo vertikalno, a izdahnemo horizontalno. Možete li da navedete najmanje još šest drugih postupaka, možda neke koji bi koristili položaj na površini Zemlje? (***Izazov 86s***). Šta biste učinili u svemiru?

Elektrodinamika i termodinamika nas uče da će zagrevanje jedne strane tela više od druge u vakuumu raditi kao motor; neravnoteža toplotnog zračenja poguraće vas, premda veoma sporo. Možete li da nađete ostala četiri postupka iz ove dve oblasti? (***Izazov 87s***)

Opšta teorija relativnosti kazuje da će okretanje jedne ruke nesimetrično da emitije gravitacijsko zračenje i da će takođe da izazove kretanje. Možete li da nađete najmanje dva bolja postupka? (***Izazov 88s***).

Kvantna teorija nudi celo bogatsto postupaka. Naravno, knantna mehanika pokazujeda smo mi ustvari neprestano u pokretu, pošto relacija neodređenosti čini da je ostalo nemoguće. Međutim, prosečno kretanje može da bude nula čak iako se širenje povećava vremenom. Možete li da nađete najmanje četiri postupka za kretanje po savršenom ledu usled kvantnih efekata? (***Izazov 89s***).

Nauka o materijalima, geofizika, fizika atmosfere i astrofizika daju takođe postupke za kretanje, kao što su kosmički zraci ili solarni neutroni. Možete li naći još četiri drugačija postupka? (***Izazov 90s***).

Samoorganizovanje, teorija haosa i biofizika takođe daju postupke za kretanje, ukoliko se unutrašnji radovi ljudskog tela uzmu u obzir. Možete li da nađete najmanje dva postupka? (***Izazov 91s***).

Predpostavljajući da ste već pročitali odeljak koji sledi ovom, o efektima poluklasične kvantne gravitacije; evo još jedne zagonetke: da li je moguće kretanje ubrzavanjem džepnog ogledala, koristeći emitovanje Unru zračenja? (***Izazov 92s***). Možete li da nađete najmanje dve drugačije metode da biste se kretali koristeći efekte kvantne gravitacije? Možete li da in nađete iz teorije struna?

Ukoliko želite bodove za test, označavanje je jednostavno. Za studente jedan poen donosi svaki postupak koji radi. Osam poena je u redu, dvanaest poena je dobro, šesnaest poena je vrlo dobro a dvadeset i više poena je izvanredno. Za diplomirane fizičare poen se dodeljuje samo ako je obezbeđena koverta za količinu kretanja ili ubrzanje koje sledi.

ZAKLJUČAK O ELEKTRODINAMICI

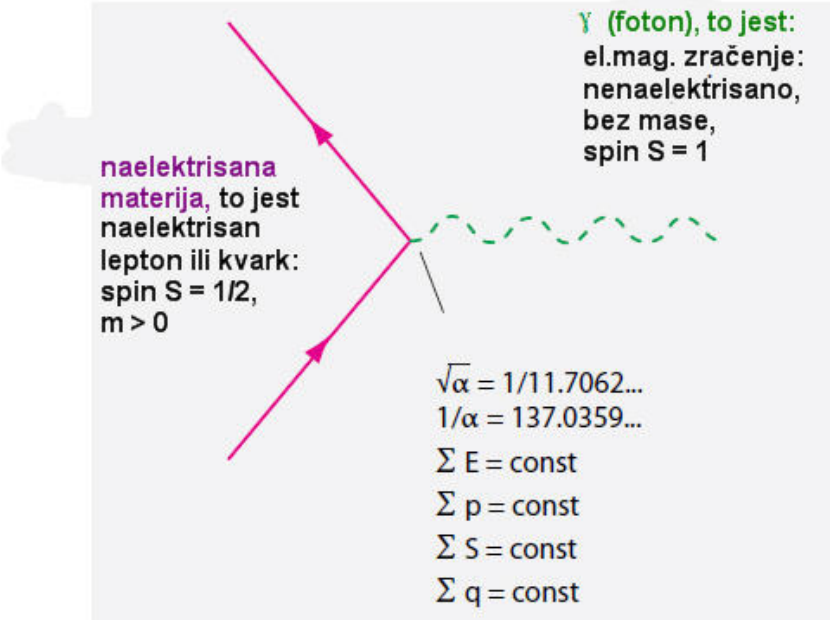
Najkraći moguć zaključak o kvantnoj elektrodinamici je sledeći

- Svakodnevna materija je sastavljena od naelektrisanih elementarnih čestica koje su interakciji preko fotona na način opisan na ***slici 81***.

Nije potrebna nikakva dopunska informacija. Malo detaljnije, kvantna elektrodinamika počinje sa ***elementarnim česticama*** – karakterisanim njihovom masom, spinom, naelektrisanjem i paritetom – i ***vakuumom***, suštinskim morem virtualnih parova čestica-antičestica. Interakcije između naelektrisanih čestica su opisane kao razmena virtualnih fotona, a elektromagnetni ***raspad*** je opisan kao interakcija sa virtualnim fotonina u vakuumu.

- Fajnmenov dijagram na ***slici 81*** daje tačan opis svih elektromagnetnih pojava i procesa.

Nisu poznate suprotnosti između zapažanja i proračuna. Osim toga, Fajnmenov dijagram je podudatan sa jednakošću (18) lagranžijana kvantne elektrodinamike. (***Strana 96***). Pošto je kvantna elektrodinamika teorija smetnji, Fajnmenov dijagram neposredno opisuje efekt prvog reda; njegov složeni dijagram opisuje efekte viših redova



Slika 81 Osnove kvantne elektrodinamike; još preciznije, osnovni dijagram kvantne elektrodinamike kao teorije poremećaja u prostor-vremenu

Kvantna elektrodinamika opisuje svakodnevna svojstva materije i zračenja. Ona opisuje ***deljivost*** do najmanjih sastavnih delova, ***izolovanost*** od okoline i ***neprobojnost*** materije. Ona takođe opisuje ***probojnost*** zračenja. Sve ove osobine nastaju usled elektromagnetne interakcije sastavnih delova i sledi prema ***slici 81***. Materija je deljiva zato što su interakcije konačne jaćine, materija je deljiva takođe zato što su interakcije konačnog opsega, a materija je neprobojna zato što se povećava snaga interakcije između sastavnih delova kada se oni međusobno približe, posebno zbog toga što su sastavni delovi materije fermioni. Zračenje je deljivo na fotone, a prodorno je pošto su fotoni bozoni i interakcija prvog reda foton-foton ne postoji.

I materija i zračenje sačinjeni su od ***elementarnih*** sastavnih delova. Ovi elementarni sastavni delovi, bilo bozoni ili fermioni, su nedeljivi, izolovani neraspoznatljivi i tačkasti.

Neophodno je da se koristi elektrodinamika u svim onim slučajevima da koje je karakteristična dimenzija d reda Komptonove talasne dužine.

$$d \approx \lambda_C = \frac{h}{mc} \tag{26}$$

U situacijama gde su dimenzije reda de Broljijeve talasne dužine, ili isto tako gde je veličina rada reda vrednosti Plankove vrednosti, dovoljna je prosta kvantna mehanika:

$$d \approx \lambda_{dB} = \frac{h}{mv} \tag{27}$$

Za još veće dimenzije to će da učini klasična fizika.

Zajedno sa gravitacijom, kvantna elektrodinamika objašnjava skoro sva zapažanja o kretanjima na Zemlji; kvantna elektrodinamika ujedinjuje opise materije i elektromagnetnog zračenja u svakodnevnom životu. Svi svakodnevni objekti i sve slike su opisani, uključujući njihove osobine, njihov oblik, njihov preobražaj i njihove druge promene. Ovo obuhvata samoorganizovanje i hemijske ili biološke procese. Drugim rečima, kvantna elektrodinamika pruža nam potpun uvid o efektima i različitostima kretanja usled elektromagnetizma.

OTVORENA PITANJA U KVANTNOJ ELEKTRODINAMICI

Iako kvantna elektrodinamika opisuje kretanja usled elektromagnetizma bez ikakvih neslaganja sa eksperimentima, to ne znači da razumemo svaki detalj svakog oblika takvih kretanja. Na primer, niko nikada nije opisao kretanje životinja preko kvantne elektrodinamike.[1] Ustvari, postoji lepo i zadivljujuće istraživanje koje se odvija u mnogo oblasti elektromagnetizma.

Fizika atmosfere još uvek postavlja mnogo zagonetki i redovno daje nove, predhodno nepoznate pojave. Na primer, detaljni mehanizmi nastanka polarne svetlosti (***Ref. 110***) još uvek su protivrečni; a nedavna neobjašnjiva otkrića pražnjenja ***iznad*** oblaka ne bi trebalo da predaju zaboravu da čak nisu u potpunosti objašnjeni ni precizni mehanizmi razdvajanja naelektrisanja ***unutar*** oblaka koja dovode do pojave munje. (***Ref. 111***). Zapravo, svi primeri elektriciteta, kao što je naelektrisanje ćilibara trljanjem, eksperiment koji je dao ime elektricitetu, još uvek je slabo razumljiv.

Slika 82 Duga može da se objasni u potpunosti ako bi mogla da se izračuna konstanta fine strukture (© ed g2s, Christophe Alfonso).

Nauka o materijalima u svoj svojoj širini, uključujući proučavanjem čvrstih tela, tečnosti i plazme, kao i biologija i medicina, još uvek daju mnogo tema za istraživanje. Posebno će dvadesetprvi vek biti bez sumnje vek nauke o životu.

Proučavanje interakcije atoma i jake svetlosti primer je tekućih istraživanja u oblasti atomske fizike. Jaki laseri mogu da liše atome većine njihovih elektrona; za takvu pojavu još ne postoje tačni opisi, pošto se to ne slaže sa približnošću slabog polja koje se obično predpostavlja u fizičkim eksperimentima. U jakom poljima dogodili su se novi efekti, kao što je takozvana Kulonova eksplozija. (***Ref. 112***).

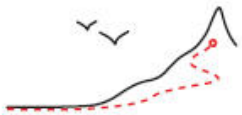
Međutim takođe i nebo ima svoje tajne. U temi kosmićkog zračenja još uvek nije jasno kako se izvan galaksije stvaraju zraci velike energije od 10^{22} eV. (***Ref. 113***). Istraživači se izuzetno trude da odrede mesto elektromagnetnog polja potrenbnog da njihovo ubrzanje i da shvate njihovo poreklo i mehanizam.

[1] S druge strane, izvan kvantne elektrodinamike, postoje divan rad o tome kako ljudi pomeraju svoje udove; izgleda da je svaki osnovni ljudski pokret konstruisan u mozgu kombinovanjem malog skupa osnovnih kretanja. (***Ref. 109***).

U teoriji kvantne elektrodinamike otkrića se očekuju od svih koji je proučavaju dovoljno detaljno. (***Ref. 114***). Na primer, Dirk Krajmer (Dirk Kreimer) je otkrio da gradenje dijagrama interakcija višeg reda, korišćenjem osnovnog dijagrama sa ***slike 81***, sadrži relacije iz teorije čvorova. Ova tema istraživanja daće u bliskoj budućnosti još interesntnije rezultate. Povezanost sa teorijom čvorova javlja se pošto je kvantna elektrodinamika opis ***poremećaja***, uz veliko bogatstvo još uvek skrivenih efekata bez smetnji. Proučavanje kvantne elektro-dinamike na većim energijama, gde smetnje nisu dobra približnost i gde broj čestica nije očuvan, obećava bogatstvo novih uvida.

Ako bismo želeli da budemo strogi, potrebno je da dodamo da mi nismo u potpinosti razumeli bilo koju boju, pošto nam je još uvek nepoznato poreklo konstante fine strukture. Konstanta fine strukture osim toga određuje indeks prelamanja vode, pa prema tome i obrazovanje duge, kao što je prikazano na ***slici 82***. (***Ref. 115***).

Mnoga druga otvorena pitanja više praktične prirode nisu bila pomenuta. Ustvari, daleko najveći broj fizičara dobija platu za neki oblik primenjene kvantne elektrodinamike. U našoj pustolovini, međutim, naša potraga je za opisom ***osnova*** kretanja. A sve do sada mi to nismo postigli. Posebno još uvek je potrebno da shvatimo kretanje u carstvu atomskih jezgara i efekt kvanta rada u oblasti gravitacije, Počećemo od ove zadnje teme.



Poglavlje 4

KVANTNA MEHANIKA SA GRAVITACIJOM – PRVI KORACI

Gravitacija je ima slabo dejstvo. Zaista, svaki pomorac zna da teške nesreće uzrukuju oluje, a ne gravitacija. Uprkos njenoj slabosti uvrštavanje gravitacije u kvantni teoriju pokreće brojna pitanja. Mi moramo sve ih da rešavamo radi dovršetka našeg uspona na planinu.

Gravitacija deluje na kvantne sisteme; u poglavlju o opštoj teoriji relativnosti već je bilo pomenuto da se učestanost svetlosti menja sa visinom. Prema tome, gravitacija ima prosto i merljivo dejstvo na fotone. Ali gravitacija deluje takođe i na ostale kvantne sisteme, kao što su atomi i neutroni, kao što ćemo videti. Takođe kvant rada ima značajnu ulogu u ponašanju crnih rupa, Sada ćemo istražiti ove teme.

ATOMI KOJI PADAJU

Godine 2004 konačno je postalo moguće da se ponovi Galilejev eksperiment sa kose kule ali sa jednim atomom umesto sa čeličnom kuglom. To nije bio lak ekperiment, pošto i najmanji efekti ometaju eksperiment. Rezultat je bio prema očekivanjima: pojedinačni atomi padaju isto kao kamenje. (***Ref. 116***). Osim toga, atomi različitih masa padaju uz isto ubrzanje, unutar preciznosti eksperimenta od jedan prema 6 miliona delova.

Eksperiment je bio težak za izvođenje, ali rezultat nije bio iznenađenje, pošto su svi objekti iz svakodnevnog života sastavljeni od atoma. Zapravo, sam Galilej je predpostavio da atomi padaju isto kao kamenje, pošto su delovi tela padali uz isto ubrzanje kao i celo telo. (***Vol. I, strana 152***). Ali kakvo je tačno delovanje gravitacije na talasnu funkciju? Najbolje je da se ovo pitanje objasni uz pomoć neutrona.

IGRANJE STONOG TENISA SA NEUTRONIMA

Gravitacijski potencijal ima takođe merljiv uticaj na kvantne čestice. Klasično, loptica za stoni tenis prati paraboličnu putanju kada odskače iznad stola za stoni tenis, sve dok trenje može da bude zanemarljivo. Opšta postavka eksperimenta prikazana je na ***slici 83***. Kako se kvantna čestica ponaša u istoj takvoj postavci?

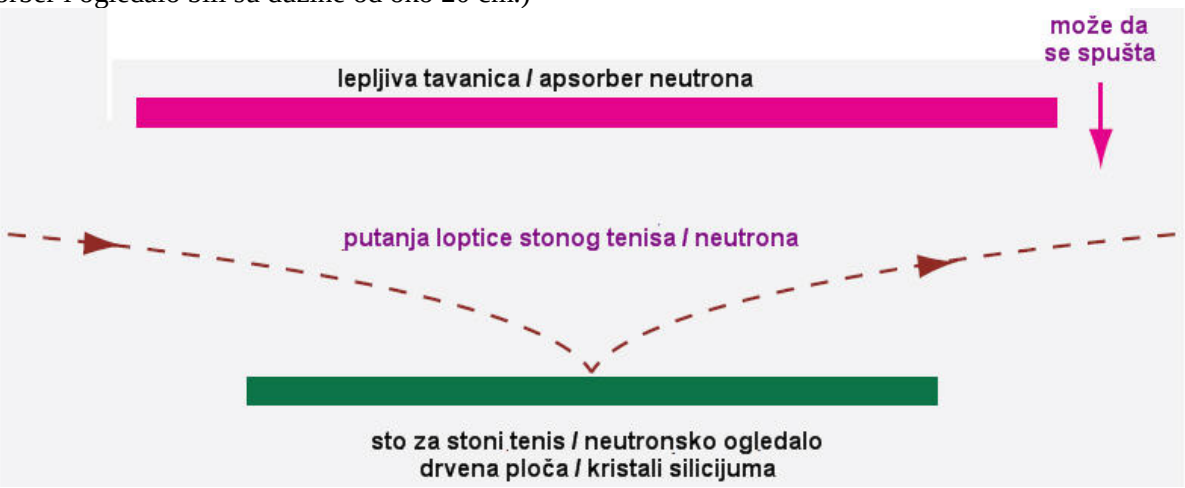
U polju gravitacije kvantna čestica koja odskače još uvek je opisana talasnom funkcijom. Međutim nasuprot klasičnom slučaju, moguća vrednost energije kvantne čestice koja pada je diskretna. U stvari, kvantizacija rada podrazumeva da je za odskok energije E_n i trajanje t_n (***Izazov 93e***)

$$n\hbar \sim E_n t_n \sim \frac{E_n^{3/2}}{gm^{1/2}} \qquad (28)$$

Drugim rečima, moguće su samo diskretne visine odskakanja u kvantnom slučaju, koje se razlikuju po broju n, Ova diskretnost dovodi do očekivane gustine verovatnoće koja se menja sa visinom u diskretnim koracima, kao što je prikazano na ***slici 83***.

Najbolji način da se izvede eksperiment sa kvantnim česticama je da se proizvede snažan zrak neutralnih čestica, pošto na neutralne čestice ne deluju lutajuća elektromagnetna polja koja su prisutna u svakoj laboratoriji. neutroni su idealni, pošto se u velikom broju proizvode u nuklearnim reaktorima. Eksperiment su prvi put izveli 2002. godine Hartmit Abele i njegova grupa posle višegodišnjih priprema. (***Ref. 117***). Koristeći dosta mudrih trikova, oni su uspeli da uspore neutrone iz nuklearnog reaktora do neverovatno male vrednosti od 8 m/s, što je uporedivo sa brzinom loptice za stoni tenis. (Jednaka vednost temperature ovih ultrahladnih neutrona je 1 mK, ili 100 neV.) Oni su potom usmerili neutrone u neutronska ogledala izrađena od uglačanog stakla – istovetnost stolu za stoni tenis – i posmatrali odskakanje neutrona. Da bi zapazili odskakanja, oni su spuštali apsorber – što je istovetno sa lepljivom tavanicom – prema stolu za

stoni tenis, odnosno prema ogledalu za neutrone, i merili koliko još neutrona stiže do drugog kraja stola. (I apsorber i ogledalo bili su dužine od oko 20 cm.)



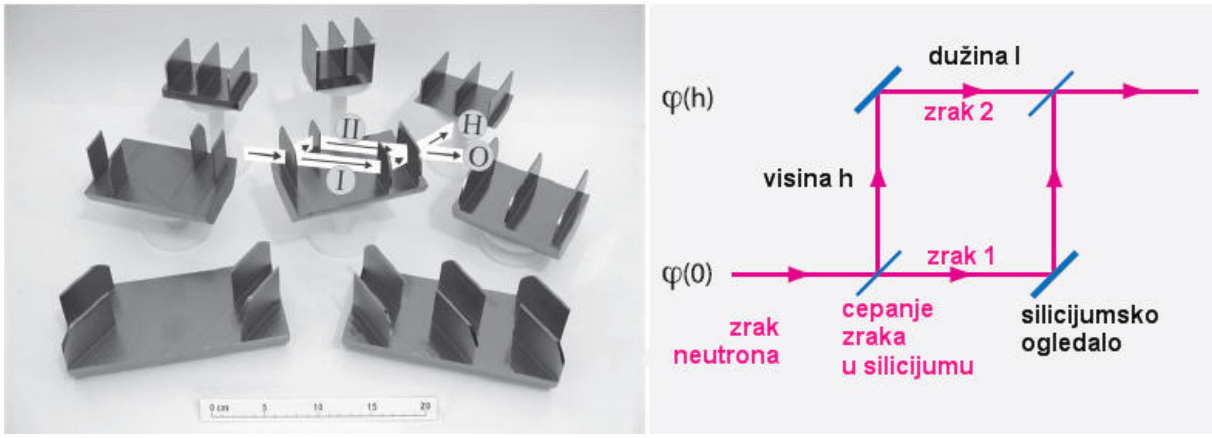
Slika 83 Stoni tenis i neutroni

Zbog čega je ekperiment zahtevao toliko godina rada? Najniži energetski nivoi neutrona usled gravitacije su $2{,}3\cdot10^{-31}$ J ili 1,4 peV, praćen sa 2,5 peV, 3,3 peV, 4,1 peV i tako dalje. Da bi se dobio osećaj koliko su ove vrednosti male, možemo da ih uporedimo sa vrednošću od $2{,}2\cdot10^{-18}$ J ili 13,6 eV za najniže stanje atoma vodonika. Uprkos ovim malim vrednostima energije, tim je uspeo da izmeri prvih nekoliko nivoa diskretnih energetskih nivoa. Rezultati su potvrdili predviđanje Šredingerove jednakosti, sa uračunatim gravitacijskim potencijalom, uz dostupnu preciznost merenja.

Ukratko, gravitacija utiče na talasnu funkciju. Gravitacija posebno menja fazu talasne funkcije i to čini u skladu sa predviđanjima.

GRAVITACIJSKA FAZA TALASNE FUNKCIJE

Ne samo da gravitacija menja oblik talasnih funkcija, ona takođe menja i njihove ***faze***. Možete li da zamislite zašto? (***Izazov 94s***). Ovo predviđanje prvi put su 1975. godine potvrdili Helmut Rauh (Helmut Rauch) i njegov tim. (***Ref. 118***). Rauh je osmislio interferometar neutrona zasnovan na kristali silicijuma, kako je prikazano na ***slici 84***, u kojem je zrak neutrona – opet iz nuklearnog reaktora – rascepljen na dva zraka, a potom su ta dva zraka rekombinovana i dovedena u interferenciju.



Slika 84 Slabost gravitacije. Interferometar neutrona načinjen od pojedinačnih kristala silicijuma (sa dva zraka neutrona 1 i 2) može da se koristi za otkrivanje uticaja gravitacije na fazu talasne funkcije (fotografija © Helmut Rauch i Erwin Seidl)

Obrtanjem interferometra uglavnom oko horizontalne ose, Semjuel Verner (Samuel Werner) i njegova grupa puslili su da dva zraka neutrona dođu u inerferenciju posle penjanja na malu visinu *h* u dva različita položaja. (***Ref. 119***). Šematski prikaz eksperimenta prikazan je na desnoj strani ***slike 84***. Zrak neutrona je rascepljen; dva dobijena zraka usmerena su naviše, jedan neposredno, drugu nekoliko centimetara dalje, pa potom rekombinovani.

Za takav eksperiment u gravitaciji kvantna teorija predviđa da je fazna razlika $\Delta\varphi$ između dva zraka data sa (***Izazov 95ny***)

$$\Delta\varphi = \frac{mghl}{\hbar v} \tag{29}$$

gde je l horizontalan razmak između dva uspona h, a v i m su brzina i masa neutrona. Svi eksperimenti – zajedno sa drugima slične elegancije jednostavnosti – potvrdili su predviđanja kvantne teorije unutar grešaka eksperimenta.

U godinama oko 1990., bili su izvedeni slični eksperimenti ali sa kompletnim atomima. (***Ref 120***). Ovi interferometri atoma toliko su osetljivi da je lokalno ubrzanje gravitacije g moglo da bude izmereno uz preciznost sa više od osam sigurnih decimala.

Ukratko, neutroni, atomi i fotoni ne ispoljavaju iznenađenja u polju gravitacije. Gravitacija može da se uvrsti u sve kvantne sisteme vakodnevnog života. Uključivanje gravitacije u potencijal, jednakosti Šredingera i Diraka mogu stoga da se koriste, na primer, za opisivanje rasta i procesa unutar drveča. Drveće uglavnom može da se opiše kvantnom elektrodinamikom u slaboj gravitaciji.

GRAVITACIJSKI BOROV ATOM

Može li gravitacija da dovede do ***vezanih*** kvantnih sistema? Kratak proračun pokazuje da će elektron koji kruži oko protona samo usled gravitacije, bez elektrostatičkog privlačenja, to da čini na gravitacijskom Borovom poluprečniku (***Izazov 96ny***)

$$r_{\text{gr.B}} = \frac{\hbar^2}{G m_e^2 m_p} = 1{,}1 \cdot 10^{29}\ \text{m} \tag{30}$$

što je oko hiljadu puta veće od rastojanja do kosmičkog horizonta. Gravitacijski Borov atom bio bi veći od svemira. Ova nesrazmerna veličina je razlog što u normalnom atomu vodonika ne postoji ***nijedan način*** da se izmeri gravitacijsko delovanje između njegovih sastavnih delova. (Možete li da potvrdite to?) (***Izazov 97e***).

Alo zašto je gravitacija tako slaba? Ili jednako tome, zašto su svemir i normalni atomi toliko mnogo manji od gravitacijskog Borovog atoma? Na ovom mestu našeg traganja nije moguće da se odgovori na ovo pitanje. Još gore, slaba gravitacija znači da uz veliku verovatnoću budući eksperimenti neće da daju nimalo dodatnih podataka koji bi pomogli da se odlučimo među konkurentnim odgovorima. Jedina pomoć je brižljivo razmišljanje.

Mogli bismo da zaključimo iz svega da gravitacija ne zahteva kvantni opis. Ustvari, naleteli smo u kvantna delovanja pošto klasična elektrodinamika podrazumeva da se atom raspada za 0,1 ns, što je u jakoj suprotnosti sa srvarnošću. Klasićno bi elektron koji se obrće emitovao zračenje pre no što se sruši na jezgro. Zato je kvantna teorija neophodna da bi se objasnilo postojanje materije.

Kada se isti proračun stabilnosti sprovede za emisije gravitacijskih zračenja elektrona koji se obrću, nalazi se da je vreme raspada oko 10^{37} s. (Da li je to tačno?) (***Izazov 98ny***). Ova izuzetno velika vrednost, trilion puta duža od starosti svemira, rezultat je slabe emisije gravitacijskog zračenja masa koje se obrću. (***Vol. II, strana 141***). Prema tome, za postojanje normalnih atoma nisu potrebne ni kvantna teorija ni gravitacija.

ZANIMLJIVOSTI O KVANTNOJ TEORIJI I GRAVITACIJI

Zbog uticaja gravitacije na fazu talasne funkcije neki ljudi koji ne veruju u dekoherenciju uzrokovanu kupatilom, proučavali su čak uticaj gravitacije na proces dekoherencije uobičajenih kvantnih sistema u ravnom prostor-vremenu. (***Ref. 144***). Kao što se i očekivalo, rezultati proračuna nisu ponovljeni eksperimentalno.

* * *

Uprkos svojoj slabosti, gravitacija je dala mnogo zagonetki. Najpoznatije su brojne čudne podudarnosti koje se mogu naći kada se kombinuju kvantna mehanika i gravitacija. One se obično nazivaju "hipoteze velikog broja", pošto one obično uključuju velike brojeve bez dimenzija. Lepa, ali manje poznata verzija povezuje Plankovu dužinu, kosmički horizont R_0 i broj bariona N_b: (***Ref. 145***).

$$(N_b)^3 \approx \left(\frac{R_0}{l_{\text{Pl}}}\right)^4 = \left(\frac{t_0}{t_{\text{Pl}}}\right)^4 \approx 10^{244} \tag{31}$$

gde je korišćeno $N_b = 10^{81}$ i $t_0 = 1{,}2 \cdot 10^{10}$. Ne postoji nijedan poznat razlog zbog kojeg bi se broj bariona i veličina horizonta R_0 povezali na ovakav način. Ova podudarnost je podjednaka onoj koju je prvobitno izrazio Dirak,[1] naime

$$m_p^3 \approx \frac{\hbar^2}{Gct_0} \tag{33}$$

gde je m_p masa protona. Ova približna jednakost izgleda da sugeriše kako su izvesna mikroskopska svojstva, naime masa protona, povezana sa nekim opštim svojstvima svemira u celosti. Ovo bi moglo da dovede do niza predpostavki, posebno što je zavisnost od vremena različita na obe strane jednakosti. Neki ljudi čak spekulišu da li relacije (31) i (33) izražavaju dugo tražen odnos između lokalnih i opštih topoloških svojstava prirode. (***Ref. 147***). Do današnjeg dana, izgleda da je jedini tačan iskaz da su to ***slučajnosti*** povezane sa vremenom na kojem živimo i da ih ne treba shvatiti previše ozbiljno.

* * *

Fotoni koji ne putuju paralelno jedan sa drugim privlače jedan drugog uz gravitaciju i stoga preusmeravaju jedan drugog. Mogu li dva takva fotona da oblikuju vezano stanje, neku vrstu atoma svetlosti, u kojoj bi kružili jedan oko drugog, pod uslovom da postoji dovoljno praznog prostora da se to dogodi? (***Izazov 99s***).

Ukratko, kvantna gravitacija je neophodna u svakoj pojedinoj oblasti svakodnevnog života. Međutim, mi ćemo da vidimo sada da je kvantna gravitacija neophodna i u oblastima koje su udaljenije, ali zbog toga je još interesantnija.

GRAVITACIJA I GRANICE NEREDA

Die Energie der Welt ist constant. Die Entropie der Welt strebt einem Maximum zu.[2]

Rudolf Klausijus (Rudolph Clausius)

Već smo se sreli sa čuvenom izrekom Klausijusa, oca pojma "entropija". (***Vol. I, strana 176***). Isto tako smo našli da je Bolcmanova konstanta k najmanja vrednost entropije koja se nalazi u prirodi.

Kakav je uticaj gravitacije na entropiju i na termodinamiku uopšte? Dugo vremena nikoga nije zanimalo ovo pitanje. Paralelno tome, tokom više decenija niko se nije zapitao da li takođe postoji ***maksimum*** entropije. Situacija se promenila dramatično 1973. godine kada je Jakob Bekenštajn (Jacob Bekenstein) otkrio da su ta dva pitanja povezana.

Bekenštajn je istraživao posledice koje gravitacija ima na kvantnu fiziku. (***Ref. 121***). On je našao da su entropija S nekog tela sa energijim E i veličine L povezane preko

$$S \le EL\frac{k\pi}{\hbar c} \tag{34}$$

za sve fizičke sisteme, pri čemu je k Bolcmanova konstanta. Posebno, on je zaključio da ***crne rupe*** (koje se ne obrću) zasićuju ovu vezu. Podsetimo se sa su crne rupe sistemi najveće gustine za određenu masu. (***Vol. II, strana 203***). One se pojavljuju kada se materija u potpunostu uruši. Na ***slici 85*** prikazano je umetničko viđenje crne rupe.

Bekenštajn je našao da crne rupe imaju entropiju datu sa (***Izazov 100s***)

$$S = A\frac{kc^3}{4G\hbar} = M^2\frac{4\pi kG}{\hbar c} \tag{35}$$

---

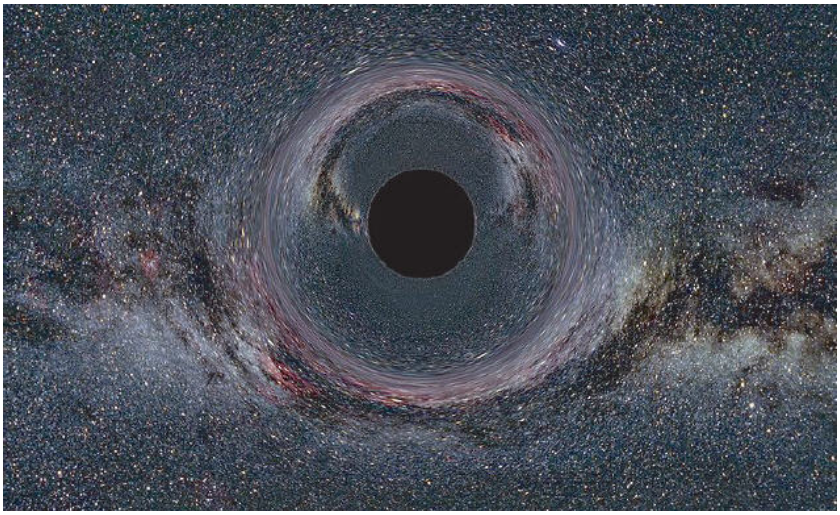
[1] Ekvivalentnost se može izvesti korišćenjem $Gn_b m_p = 1/t_0^2$, što zahtevaju brojni kosmološki modeli, kako je to objasnio Vajnberg (Weinberg) (***Vol. VI, strana 84***). Zaista to može da se napiše i kao (***Ref. 146***)

$$\frac{m_0^2}{R_0^2} \approx \frac{m_{Pl}^2}{R_{Pl}^2} = \frac{c^4}{G^2} \quad (32)$$

Zajedno sa definicijom gustine bariona $n_b = N_b/R_0^3$ dobija se Dirakova hipoteza velikog broja zamenom protona pionima. Primetimo da su Plankovo vreme i Plankova dužina definisani kao $\sqrt{\hbar G/c^5}$ i $\sqrt{\hbar G/c^3}$ i to su prirodne jedinice za dužinu i vreme. Njih ćemo detaljno da proučimo u poslednjem delu uspona na planinu.

[2] Energija sveta je konstantna. Entropija sveta stremi ka maksimumu.

gde je A sada površina horizonta crne rupe. Ona je određena sa $A = 4\pi R^2 = 4\pi(2GM/c^2)^2$. Ovaj rezultat osim toga podrazumeva da svaka crna rupa ima entropiju. Crne rupe su prema tome sistemi u neredu opisani termodinamikom. Ustvari, ***crne rupe su sistemi poznati po najvećem neredu***.[1]



Slika 85 Pojednostavljena simulirana slika – nije fotografija – crne rupe deset sunčevih masa, sa Švarc-šildovim poluprečnikom od 30 km, viđena sa rastojanja od 600 km, izobličava sliku Mlečnog puta u pozadini (slika © Ute Kraus na veb strani www.tempolimit-lichtgeschwindigkeit.de/)

Kao jedna interesantna primedba, maksimalna entropija takođe podrazumeva granicu gornjeg pamćenja za memorijske čipove. Možete li da nađete kako? (***Izazov 101s***).

Entropija crne rupe je nekako zagonetna. Kakva je razlika mikrostanja koja dovode do ove makroskopske entropije? Bilo je potrebno mnogo godina da se fizičari ubede da su mikrostanja nastala zbog raznih mogućih stanja samog horizonta crne rupe i da su ona nekako zbog invarijante difeomorfizma na tim granicama. (***Ref. 123***). Kako je objasnio Gerard 't Huft (Gerard t' Hooft), izraz za entropiju podrazumeva da je broj stepena slobode oko jedne (ali ne tačno) Plankove površine horizonta. (***Izazov 102s***)

Ako crne rupe imaju entropiju, one mora da imaju i temperaturu. Šta ta temperatura znači? Zapravo. niko nije verovao u taj zaključak sve dok dva nevezana događaja nisu to potvrdila u kratkom vremenu.

MERENJE UBRZANJA POMOĆU TERMOMETRA: ZRAČENJE FULING-DEJVIS-UNRU

Nezavisno jedan od drugog, Stefan Fuling (Stephen Fulling) 1973. godine, Pol Dejvis (Paul Davies) 1975. godine i Viljam Unru (William Unruh) 1976. godine došli su do istog teorijskog otkrića dok su proučavali kvantnu teoriju (***Ref. 124***): ako neki inercijski posmatrač opaža da je okružen vakuumom, drugi posmatrač koji je ***ubrzan*** u odnosu na prvog to ne opaža: on opaža zračenje crnog tela. Pojava zračenja za ubrzavanog posmatrača u vakuumu naziva se ***Fuling-Dejvis-Unru efekt***. Svi ovi rezultati o crnim rupama čekali su od 1930. godine; neverovatno je da niko nije o njima razmišljao narednih 40 godina.

Zračenje ima spektar koji odgovara temperaturi

$$T = \frac{\hbar}{2\pi kc} a \qquad (36)$$

[1] Precizno razmatranje da su crna rupe sistemi sa najvećem neredu u prirodi dosta je vispreno. Pitanje je ukratko izložio Rafael Buso (Raphael Bousso). (***Ref. 122***). Buso tvrdi da površina koja se pojavljuje u obrascu za maksimalnu entropiju ne može da se shvati bukvalno kao površina u datom vremenu i navodi četiri razloga zašto to nebi trebalo da bude dopušteno. Međutim, sva četiri dokaza su pogrešni na neki način, posebno pošto oni predpostavljaju da se može izmeriti dužina manja od Plankove dužine ili dužina veća od veličine svemira. Ironično je da je on neke od dokaza sam napustio kanije u dokumentima, pa potom izveo ispravljen obrazac koji je u potpunosti jednak sa onim kojeg je u početku kritikovao, samo sa drugačijim objašnjenjem površine A. Kasnije, tokom karijere, Buso je preradio svoje zaključke; sada podržava granicu maksimalne entropije. Ukratko, obrazac za entropiju crne rupe je zaista maksimalna entropija fizičkog sistema površine A.

gde je *a* veličina ubrzanja. Rezultat znači da ne postoji vakuum na Zemlji, pošto svaki posmatrač na njenoj površini može da ustanovi da je ubrzavan sa 9,8 m/s^2, što vodi do T = 40 zK! Prema tome možemo, barem u načelu, da izmerimo gravitaciju pomoću termometra. Međutim, čak i za najveća ubrzanja u praksi, vrednosti temperature su toliko male da je pitanje da li će uticaj ikad biti potvrđen eksperimentalno na ovaj precizan način. (***Ref. 125***). Međutim, ako se to ostvari, to bi bio izvanredan rezultat eksperimenta.

Kada je ovo dejstvo predskazano, ljudi su istražili sve moguće vidove dokaza. Na primer, takođe da i posmatrač u obrtnom kretanju oseća zračenje prema obrascu (36). Ali ni to nije sve. Otkriveno je da prosto ubrzavanje ***ogledala*** dovodi do ***emisije*** zračenja. Prema tome, ogledala je teže ubrzati nego li druga tela istih masa.

Kada je ubrzanje dovoljno veliko, takođe čestice ***materije*** mogu da budu emitovane i otkrivene. Ako se brojač čestica dovoljno snažno ubrza kroz vakuum, on će početi da prebrojava čestice! Vidimo da razlika između vakuuma i materije postaje nejasna pri velikim ubrzanjima. Ovaj rezultat će odigrati važnu ulogu pri traženju objedinjavanja, što ćemo kasnije da otkrijemo. (***Vol. VI, strana 55***).

Iznenađujuće je da je pri kraju dvadesetog veka postalo jasno da je Fuling-Dejvis-Unru efekt već bio opažen i ***pre*** no što je predpostavljen! Pokazalo se da je Fuling-Dejvis-Unru jednak dobro poznatom zapažanju: takozvanom ***Sokolov-Tenov efektu***. Ruski fizičar Igor Ternov, zajedno sa Arsenijem Sokolovim, iskoristili su 1963. godine Dirakovu jednakost i predvideli su da bi se elekroni automatski polarizovali pri velikim energijama u kružnom ubrzivaču (akceleratoru) i u akumulacionom prstenu koji se obrće. Prepostavka je prvi put potvrđena u ruskom Budker Institutu za Nuklearnu Fiziku 1971. godine, a zatim potvrđena eksperimentima u Orseju, Stanfordu i Hamburgu. U današnje vreme ovaj se efekt rutinski koristi u mnogim eksperimentima u ubrzivačima (akceleratorima). U godinama oko 1980. Bel i Lainas realizovali su da je Sokolov-Ternov efekt isti kao Fuling-Dejvis-Unru efekt, samo što je posmatran iz drugog referentnog sistema! Podjednakost je unekoliko iznenađujuća, ali je sada dobro prihvaćena. (***Ref. 126***). Kod naelektrisanja koja se kreću u prstenu za akumulaciju emitovano zračenje nije toplotno, tako da jednakost nije ni očigledna ni jednostavna. Međutim učinak koji polarizuje zrak – naime razlika u emisiji fotona za spinove koji su paralelni ili antiparalelni magnetnom polju – isti je kao Fuling-Dejvis-Unru efekt. Prema tome, imamo još jedan primer teorijskog otkrića koje je načinjen mnogo kasnije no što je to bilo neophodno.

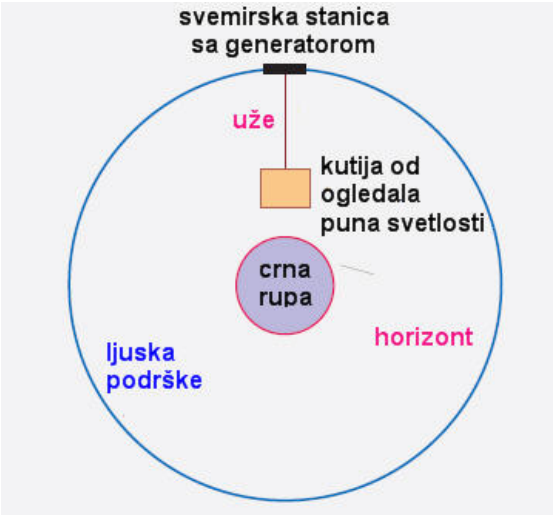
CRNE RUPE NISU CRNE

Godine 1973. i 1974. Jakob Bekenštjn i nezavisno Stiven Hoking (Stephen Hawking), poznat po snazi kojom se bori protiv bolesti koja ga je nasilno smestila u invalidska kolica, iznenadili su svet opšte teorije relativnosti temeljnim teorijskim otkrićem. Oni su našli da ukoliko se virtualan par čestica-antičestica pojavi u vakuumu u blizini horizonta, postoji konačna mogućnost da jedna čestica prebegne u realnu česticu, dok će crna rupa da zarobi virtualnu antičesticu. Virtualna antičestica ima prema tome negativnu energiju i smanjuje masu crne rupe. Mehanizam je primenjiv i za fermione i za bozone. Posmatran iz daljine ovaj efekt izgleda kao emisija čestica. Detaljna istraživanja su pokazala da je efekt izraženiji za emisiju fotona. Ukratko, Bekenštajn i Hoking su pokazali da ***crne rupe zrače kao crna tela***.

Zračenje crne rupe potvrđuje Bekenštajnov rezultat entropije crne rupe i efekt za posmatrača ubrzabog u vakuumu što su našli Fulihg, Dejvis i Unru. Kada je to svima postalo jasno, Unru i Robert Vald (Robert Wald) objavili su divan misaoni eksperiment, kojim je pokazano da je ceo reziltat mogao da bude zaključen još pre 50 godina! (***Ref. 127***).

Za zajednicu teorijskih fizičara sramotno je ovo kašnjenje otkrića, ali sama priča ostaje divna. Počela je ranih godina oko 1970., kada je Robert Geroh (Robert Geroch) proučavao problem prikazan na ***slici 86***. Zamislite kutiju od ogledala punu toplotnog zračenja, prema tome punu svetlosti. Prepostavlja se da je masa kutije zanemarljiva, kao da je kutija napravljena od tanke aluminijumske folije. Spustimo kutiju, zajedno sa svim zračenjem koje sadrži, iz svemirske stanice prema crnoj rupi. Na svemirskoj stanici, gubitak težine toplotnog zračenja proizvodi energiju. Očigledno, kada kutija stigne do horizonta crne rupe, toplotno zračenje je pomereno ka crvenom do beskonačne talasne dužine. U tom trenutku svemirskoj stanici je obezbeđen celokupan sadržaj energije koji je u početku sadržan u toplotnom zračenju. Sada možemo da uradimo sledeće: možemo da otvorimo kutiju na horizontu, da pustimo da ispadne sve što se još u njoj nalazi i da vratimo praznu kutiju bez mase nazad u svemirsku stanicu. Kao rezultat toga, mi smo u potpunosti pretvorili zračenje u mehaničku energiju. Ništa drugo se nije promenilo: crna rupa ima istu masu kao ranije.

Međutim, nepostojanje promene u suprotnosti je sa drugim načelom termodinamike! Geroh je zaključio da tu nešta mora da bude pogrešno. Mora biti da smo zaboravili neki efekt koji ovaj proces čini nemogućim.



Slika 86 Misaoni eksperiment koji nam omogućava da shvatimo postojanje zračenja crne rupe

Oko 1980. godine Viljem Unru i Robert Vald su pokazali da je zaboravljeni efekt zračenje crne rupe koji sve stavlja na svoje mesto. Zbog zračenja crne rupe kutija oseća potisak, tako da ne može u potpunosti da bude spuštena do horizonta. Kutija pluta unekoliko iznad horizonta, tako da toplotno zračenje unutar kutije još uvek nema nultu energiju kada pada iz otvorene kutije. Kao rezultat toga, crna rupa povećava masu, pa zato i entropiju kada se kutija otvori. Ukratko, kada se prazna kutija povuče ponovo naviše, krajnja situacija je sledeća: samo deo energije toplotnog zračenja bio je pretvoren u mehaničku energiju, deo energije je otišao na povećanje mase, a samim tim i na povećanje entropije crne rupe. Drugo načelo termodinamike ostaje očuvano.

Dobro, drugo načelo termodinamike je očuvano samo ako toplotno zračenje ima tačno gustinu energije na horizontu i iznad njega. Pogledajmo ovo. Centar kutije može da se spusti na rastojanje d na kojem lebdi iznad horizonta. Na površini ubrzanje usleg gravitacije iznosi $g_{\text{surf}} = c^4/4GM$. Energija koja se dobija spuštanjem kutije je

$$E = c^2 m - m g_{\text{surf}} \frac{d}{2} = c^2 m \left(1 - \frac{d c^2}{8GM} \right) \tag{37}$$

Efikasnost ovog procesa je $\eta = E/c^2 m$. Da bi se ostalo u skladu sa drugim zakonom termodinamike, ova efikasnost mora da se pokorava

$$\eta = \frac{E}{c^2 m} = 1 - \frac{T_{\text{BH}}}{T} \tag{38}$$

gde je T temperatura zračenja unutar kutije. Prema tome nalazimo da je temperatura crne rupe T_{BH} određena rastojanjem lebdenja d. Rastojanje lebdenja je grubo određeno veličinom kutije. Pokazalo se da veličina kutije mora da bude najmanje jednaka talasnoj dužini toplotnog zračenja; u prvoj približnosti Vinov (Wien) odnos daje $d = \hbar c/kT$. Preciznije izračunavanje uvodi sačinilac π, dajući rezultat

$$T_{\text{BH}} = \frac{\hbar c}{8\pi k G M} = \frac{\hbar c}{4\pi k} \frac{1}{R} = \frac{\hbar}{2\pi k c} g_{\text{surf}} \quad \text{sa} \quad g_{\text{surf}} = \frac{c^4}{4GM} \tag{39}$$

gde je R poluprečnik, a M masa crne rupe. Veličina T_{BH} naziva se ili ***temperatura crne rupe*** ili ***Bekenštajn-Hokingova*** temperatura. Kao primer, crna rupa sa masom jednakom masi Sunca imala bi dosta nisku temperaturu od 62 nK, dok bi manja crna rupa sa masom jednakom masi planine, od recimo 10^{12} kg, imala temperaturu od 123 GK. To bi bila sasvim dobra peć. Svi poznati kandidati crnih rupa imaju masu u opsegu od nekoliko do nekoliko miliona sunčevih masa. Zračenja su stoga izuzerno slaba.

Razlog za slabo zračenje crne rupe je u tome što je emitovana talasna dužina reda poluprečnika crne rupe, što možda želite da proverite. (***Izazov 103ny***). Zračenje koje emituje crna rupa često se naziva ***Bekenštajn-Hokihgovo zračenje***. (***Ref. 128***).

Naravno, sva načela termodinamike važe za crne rupe. Sažetak značenja svakog od principa termodinamike u slučaju crne rupe dat je u ***Tabeli 10***.

TABELA 10 Načela termodinamike i mehanike horizonta

Načelo	**Termodinamika**	**Horizonti**
Nulto načelo	temperatura T je ista duž tela u toplotnoj ravnoteži	površinska gravitacija a jednaka je na celom horizontu
Prvo načelo	energija je očuvana: $E = T\mathrm{d}S - p\mathrm{d}V + \mu\mathrm{d}N$	energija je očuvana: $\mathrm{d}\left(c^2 m\right) = \frac{ac^2}{8\pi G}\mathrm{d}A + \Omega\mathrm{d}J + \Phi\mathrm{d}q$
Drugo načelo	entropija nikada ne opada $\mathrm{d}S \geq 0$	površina se nikada ne smanjuje: $\mathrm{d}A \geq 0$ (osim za zračenje crne rupe)
Treće načelo	ne može da se postigne T = 0	me može da se postigne $a = 0$

Zračenje crne rupe toliko je malo da moramo da govorimo kao o akademskom efektu! Ono dovodi do sjajnosti koja raste sa porasrom mase ili veličine kao (***Izazov 104ny***)

$$L \sim \frac{1}{M^2} \sim \frac{1}{R^2} \quad \text{ili} \quad L = nA\sigma T^4 = n\frac{c^6\hbar}{G^2M^2}\frac{\pi^2}{15\cdot 2^7} \tag{40}$$

gde je σ Štefan-Bolcmanova konstanta ili ***konstanta zračenja crnog tela*** (***Vol. III, strana 173***), n je broj stepena slobode čestice koja može da bude izračena; sva dok su izračeni samo fotoni – što je jedini slučaj od važnosti – imamo da je $n = 2$. (***Ref. 129***)

Prema tome, crne rupe sjaje, utoliko jače što su manje. To je izvorni kvantni efekt, pošto prema klasičnoj fizici, kao što samo ime kaže, ne mogu da emituju svetlost. Iako je taj efekt akademski slab, on će biti važan kasnije. U stvarnim sistemima mnogo drugih efekata u vezi sa crnim rupama raste sa sjanošću mnogo iznad Bekenštajn-Hokingove vrednosti, crne rupe su obično sjajnije od normalnih zvezda, zbog emisije zračenja materije koja upada u njih. Ali to je neka druga priča. Ovde samo obrađujemo izolovane crne rupe koje su okružene vakuumom.

ŽIVOTNI VEK CRNIH RUPA

Zbog emitivanja zračenja crne rupe postepeno gube masu. Prema tome, njihovo teorijsko vreme trajanja je ***konačno***. Proračun pokazuje da je vreme trajanja dato sa (***Izazov 105ny***)

$$t = M^3\frac{20480\pi G^2}{\hbar c^4} \approx M^3 \cdot 3{,}4\cdot 10^{-16}\ \mathrm{s/kg^3} \tag{41}$$

koje zavisi od njihove početne mase M. Na primer, crna rupa sa masom od 1 g imala bi vreme trajanja od $3{,}4\cdot 10^{-26}$ s, dok bi crna rupa sa masom jednakom masi Sunca os $2{,}0\cdot 10^{30}$ kg imala vreme trajanja od oko 10^{68} godina. I ponovo, ove brojke su čisto akademske. Važno je da se naglasi da ***crne rupe isparavaju***. Međutim. ovaj izuzetno spor proces za obične crne rupe određuje njihovo vreme trajanja samo ako se ne pojavi neki drugi, brži proces. Ubrzo ćemo pomenuti nekoliko takvih procesa. Bekenštajn-Hokingovo zračenje je najslabiji od svih poznatih efekata. Nije maskiran jačim efektom samo ako se crna rupa ne obrće, nije električno neutralna i ako nikakva materija ne upada iz okoline u nju.

Nijedan od ovih efekata kvantne gravitacije nije potvrđen ekperimentalno, pošto su vrednosti isuviše male da bi se mogle zapaziti. Međutim, utvrđivanje Hokingove temperature bilo je lepo potvrđeno teorijskim otkrićem Vilijama Unrua (William Unruh), koji je otkrio da postoje takva uobličavanja fluida iz kojih ne mogu de izađu zvučni talasi, takozvane "***rupe tišine***". (***Ref. 130***). Posledično tome, ove rupe tišine zrače zvučne talase uz temperaturu koja zadovoljava isti obrazac kao stvarne crne rupe. Takođe je bio istraživan i drugi tip sistema koji ima podjednako dejstvo, naime ***optičke crne rupe***. (***Ref. 131***)

CRNE RUPE SU SVUDA

Oko godine 2000., astronomi su prikupili veliki broj dokaza koji su pokazivali nešta iznenađujuće: izgledalo je da postoji ***super velika*** crna rupa u centru skoro svih galaksija. Najpoznatija od svega naravno bila je crna rupa u centru naše galaksije. Takođe je izgledalo da su kvazari, aktivni izvori nukleida i gama zrakova nastali usled supermasivnih crnih rupa u centru galaksija. Mase ovih crnih rupa tipično su milion masa Sunca.

Astronomi su takođe mislili da mnogi drugi, manji astrofizički objekti sadrže crne rupe: ultrasjajni izvori X-zraka i dvojne zvezde sa X-zracima kandidati su za crne rupe ***srednjih*** masa.

Na kraju, jedini kandidat za objašnjenje tamne materije na periferiji galaksija jeste hipotetički oblak ***malih*** crnih rupa.

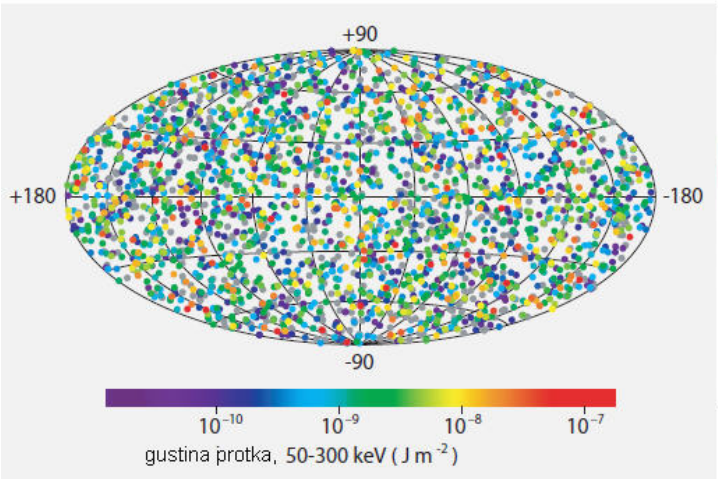
Ukratko, izgleda da su crne rupe prilično česta širom svemira. Uvek kada astronomi zapaze novu klasu objekata, dva pitanja iskrsavaju neposredno: kako se objekt oblikovao? I kako će on da nestane? Videli smo da kvantna mehanika postavlja gornju granicu trajanja života crne rupe. Gornja granica je akademska, ali to nije bitno. Bitno je da ona postoji. Zapravo, astronomi misle da je većina crnih rupa nestalo na drugi način, a mnogo pre granice Bekenštajn-Hoking, na primer putem spajanja. Sve ovo je još uvek predmet istraživanja. Detektori gravitacijskih talasa možda će da razjasne ovaj proces u budućnosti. (***Vol. II, strana 137***).

Kako su rođene crne rupe? Pokazalo se da rađnje crne rupe može zaista da se posmatra.

OČARAVAJUĆA EKSPLOZIJA GAMA ZRAKA

Nuklearne eksplozije stvaraju bleskove γ zraka, ili gama zraka. U godinama oko 1960. više zemalja je mislilo da su otkrile bleskove γ zraka, ili bolje, njihovo odsustvo pomoću satelita, što je bio najbolji način da se uvere da niko nije detonirao atomsku bombu iznad zemlje. Međutim, kada je vojska poslala satelite u nebo da bi proverila takve bleskove, otkriveno je nešta iznenađujuće. Opažali su oko dva bleska γ zraka svakog dana. Iz straha da će biti ismejani, vojska je dugo godina držala u tajnosti te rezultate.

Vojsci je trebalo šest godina da razume ono što sto je astronom mogao da im kaže u pet minuta: Bleskovi, danas se zovu eksplozije gama zraka, dolazili su iz spoljnog svemira (***Ref. 133***); to je verovatno jedino otkriće o prirodi koje je napravila vojska. Drugi satelit, *Compton Gamma Ray Observatoty*, ovaj put su ga napravili naučnici, potvrdio je da je poreklo eksplozija ***izvan galaksije***, što je dokazano mapom na ***slici 87***.



Slika 87 Mesta i energije opažene 2704 eksplozije na nebu između 1991. i 2000.godine u eksperimentu BATSE na *Compton Gamma Ray Observatory*, velikom satelitu koji je lansiran pomoću *space shuttle* posle 20 godina planiranja i izrade. Mlečni put je postavljen duž linije od +180 do -180. (NASA)

Merenje eksplozija gama zraka izvršeno je pomoću satelita, pošto većina gama zraka ne prodire kroz atmosferu. Italijansko-holandski satelit BeppoSAX započeo je 1996. godine sistematsko merenje i izradu mape eksplozija gama zraka. On je otkrio da one slede posle ***produženog svetljenja*** u oblasti rendgenovih zraka, koje traje više sati, ponekad čak i danima. Ovo produženo svetljenje je 1997. godine otkriveno takođe i u oblasti vidljive svetlosti. Satelit je isto tako omogućio istraživaćima da za svaku eksploiziju nađu odgovarajuće izvore rendgenovih, vidljivih ili radio zraćenja. Ova merenja su za uzvrat onogućila određivanje daljine izvora eksplozije; izmereno je pomeranje ka crvenom između 0,0085 i 4,5 (***Ref. 134***). Konačno je 1999. godine postalo moguće da se otkrije vidljiva eksplozija koja odgovara eksploziji gama zraka.[1]

[1] Za više detalja o ovoj zadivljujućoj temi pogledajte veb stranu www.mpe.mpg.de/~jcg/grbgen.html Johena Grajnera (Jochen Greiner)

Svi ovi podaci uzeti zajedno, pokazuju da eksplozije gama zraka imaju trajanje između milisekunde i oko jednog sata. Izgleda da eksplozije gama zraka pripadaju dvema klasama: ***kratke eksplozije***, trajanja obično od 3 s i emitovane iz bližih izvora i ***duge eksplozije***, emitovane iz udaljenijih galaksija, obično od 30 s i dužeg trajanja i sa mekšim energetskim spektrom. (***Ref. 136***). Duge eksplozije proizvode sjajnost procenjenu do 10^{45} W. To je oko stotinu puta sjajnije od svih zvezda uzetih zajedno u celokupnom vidljivom delu svemira! (***Izazov 106s***). Posmatrano drugačije, to je ista količina energije koja bi se oslobodila kada bi se pretvorilo nekoliko sunčevih masa u zračenje za nekoliko sekundi.

Ustvari, izmerena sjajnost dugih eksplozija je približna teorijskom maksimumu sjajnosti koju telo može da emituje. (***Vol. II, strana 88***). Ova granica je određena sa

$$L < L_{\mathrm{Pl}} = \frac{c^5}{4G} = 0{,}9 \cdot 10^{52}\ \mathrm{W} \qquad (42)$$

što možda želite da proverite. (***Izazov 107e***). Ukratko, izvori gama eksplozija predstavljaju najveće bombe nađene u svemiru. Postoje eksplozije skoro nezamislivuh razmera, Skorija ustraživanja izgledada suderišu da duge eksplozije gama zraka nisu izotropne, već da su usmerene, tako da upravo pomenutu veliku vrednost sjajnosti možda treba podeliti sa činiocem 1000.

Međutim, mehanizam koji dovodi do emitovanja gama zraka još uvek je nepoznat. Često se spekuliše da kratke eksplozije nastaju usled spajanja neutronskih zvezda, dok se duge eksplozije emituju kada se crna rupa obrazuje u eksploziji supernove ili hipernove. (***Ref. 134***). U tom slučaju duga eksplozija gama zraka bi bila "plač novorođene" crne rupe pri ***stvaranju***. Međutim, suprotno objašnjenje izražava da duge eksplozije gama zraka nastaju usled ***smrti*** crne rupe.

Ustvari, već 1975. godine mehanizam jake emisije zračenja zbog smrti crne rupe sa nabojem predvideli su Damur (Damour) i Rufini (Ruffini). (***Ref. 132***). Crne rupe sa nabojen imaju mnogo kraće vreme trajanja od neutralnih crnih rupa, jer se prilikom nihovog stvaranja odigrava drugi proces. U oblasti koja ih okružuje električno polje je jače od takozvane vrednosti polarizacije vakuuma, tako da se proizvodi veliki proj parova elektron-pozitron, koji se potom skoro svi poništavaju. Ovaj proces efektno smanjuje naboj crne rupe na vrednost za koju je polje svuda ispod kritične vrednosti, pri čemu se emituje velika količina svetlosti velike energije. Pokazalo se da masa smanjuje za do 30% u toku vremena reda jedne sekunde. To je veoma kraće od 10^{68} godina što predpostavlja Bekenštajn-Hokingova radijacija!

Ruffini je ponovo primenio svoj model iz 1975. godine i sa svojim saradnicima je pokazao da gama zraci izazivaju poništavanje parova elektron-pozitron stvorenih polarizacijom vakuuma, u regionu koje je nazvao ***dijadosfera***, imaju sjaj i trajanje tačno kao što je izmereno, ako se pretpostavi crna rupa od nekoliko do oko 30 sunčevih masa. Crne rupe sa nabojem prema tome smanjuju svoj naboj i masu putem polarizacije vakuuma i procesa stvaranja parova elektron-pozitron. (Proces smanjuje masu pošto je on jedan od retkih procesa koji je ***povratan***; nasuprot tome, mnogo drugih pokušaja da se smanji naboj crne rupe, na primer, ubacivanjem čestica suprotnog naelektrisanja, povećavaju masu crne rupe i prema tome su nepovratni.) Preostali ostatak tada može da izgubi energiju na različite načine i pokazalo se da je odgovoran za naknadni sjaj koji je otkrio satellit BeppoSAX. Između ostalog, Ruffinijev tim nagađa da su ostatci izvori energije visokih energija kosmičkih zraka, čije poreklo do sada nije lokalizovano.(***Ref. 135***). Sva ova uzbudljiva izučavanja još uvek su u toku.

Razimevanje dugih eksplozija gama zraka jedno je od najinteresantnijih otvorenih pitanja u astrofizuci. Povezanost sa crnim rupana u suštini je prihvaćena. Međutim, mogući su i mnogi procesi koji dovode do emisije zračenja iz crnih rupa. Primeri su materija koja je upala u crnu rupu i zagrejala se, ili materija koja je izbačena iz crne rupe koja se obrće usled Penrouzovog (Penrose) procesa (***Vol. II,, strana 210***), ili naelektrisane čestice koje su upale u crnu rupu. Ovi mehanizmi su poznati; oni su poreklo ***kvazara***, izuzetno sjajnih kvazi-zvezdanih izvora koji se nalaze svuda na nebu. Oni su predpostavili da je crna rupa okružena materijiom u razvojnoj fazi koja sledi po eksploziji gama zraka. Ali čak i detalji o tome šta se dešava u kvazarima, ogromni naponi (do 10^{20} V) i stvorena magnetna polja, kao i njihovi efekti na okolnu materiju i dalje su predmet intenzivnih istraživanja u astrofizici.

MATERJALNE OSOBINE CRNIH RUPA

Pošto je pojam entropije crne rupe prihvaćen, ljudi su počeli da razmišljaju o crnim rupama kao i o svim drugim materijalnim predmetima. Na primer, crna rupa ima gustinu materije koja se definiše kao odnos, njene mase prema zamišljenoj zapremini koja je određena sa $4\pi R^3/3$, gde je R njen poluprečnik. Ova gustina je određena sa

$$\rho = \frac{1}{M^2}\frac{3c^6}{32\pi G^3} \tag{43}$$

i može da bude veoma mala i za velike crne rupe. Za najveće poznate crne rupe, sa 1000 miliona sunčevih masa i veće, gustina je reda gustine vazduha. (***Izazov 108e***). Bez obzira na to, u tom slučaju ta je gustina najveća moguća u prirodi za takvu masu.

Uzgred, gravitacijsko ubrzanje na horizontu još uvek je prihvatljivo, pošto je određeno sa

$$g_{\text{surf}} = \frac{1}{M}\frac{c^4}{4G} = \frac{c^2}{2R} \tag{44}$$

što je još uvek 15 km/s^2 za crnu rupu sa gustinom vazduha. (***Izazov 109e***).

Očigledno je da se temperatura crne rupe odnosi prema entropiji S prema uobičajenoj definiciji

$$\frac{1}{T} = \left.\frac{\partial S}{\partial E}\right|_\rho = \left.\frac{\partial S}{\partial\left(c^2 M\right)}\right|_\rho \tag{45}$$

Sva ostala toplotna svojstva mogu da se izvedu u saglasnosti sa standardnim obrascima iz termostatike. Osim toga, crne rupe su sistemi u prirodi sa najvećom mogućom entropijom. Možete li da potvrdite ovaj iskaz? (***Izazov 110e***).

Isto tako se pokazalo da crne rupe imaju ***negativni*** toplotni kapacitet: kada im se dodaje toplota, one se hlade. Drugim rečima, crne rupe ne mogu da postignu ravnotežu sa koritom. Ovo stvarno nije iznenađenje, pošto ***svaki*** gravitacijski granični materijal ima negativnu specifičnu toplotu. Zaista, potrebno je samo malo razmišljanja da bi se videlo da svaki gas ili materijalni sistem koji se urušava pod dejstvom gravitacije prati $dE/dR > 0$ i $dS/dR > 0$. (***Izazov 111ny***). To znači da se pri urušavanju energija i entropija sistema smanjuju. (Možete li da odredite kuda odlaze?) (***Izazov 112s***). Pošto je temperatura određena sa $1/T = dS/dE$, temperatura je uvek pozitivna; iz porasta temperature $dT/dR < 0$ tokom urušavanja, može se zaključiti da je specifična toplota dE/dT negativna. (***Ref. 137***).

Crne rupe, isto kao svi ostali objekti, osciluju pri smetnjama. Ove vibracije su takođe bile proučavane; njihova učestanost je srazmerna sa masom crne rupe. (***Ref. 138***)

Crne rupe koje se ne obrću nemaju magnetno polje, što su još tokom 1960. godina ustanovili ruski fizičari. (***Ref. 129***). S druge strane, crne rupe imaju nešta slično električnoj provodnosti i konačnu viskoznost. Neke od ovih osobina mogu da se shvate ako se horizont opiše kao memmbrana, čak i kada ovakav model nije uvek primenjiv. (***Ref. 139***). U svakom slučaju, možemo crne rupe da proučavamo i da opisujemo izolovane makroskopske crne rupe kao i svako drugo makroskopsko telo. Ova tema još uvek nije zatvorena.

KAKO CRNE RUPE ISPARAVAJU?

Kada crna rupa koja se ne okreće i bez naboja je izgubi masu usled Hokingovog zračenja, konačno njena masa dostiže vrednost koja se približava Plankovoj masi, naime nekoliko mikrograma. Izraz (41) za vreme trajanja primenjena na crnu rupu koja ima Plankovu massu, dobija se vrednost od preko šezdeset hiljada Plankovih vremena. Iznenađujuće velika vrednost. Šta se događa u tim poslednjim trenucima isparavanja?

Crna rupa koja se približila Plankovoj masi u nekom trenutku postala je manja od njene sopstvene Komptonove talasne dužine; to znači da se ona ponaša slično elementarnoj čestici, a posebno da mora da bude uzet u obzir kvantni efekt. Još uvek je nepoznato kako se ovaj poslednji korak isparavanja dešava, da li se masa smanjuje kontinualno ili u koracima (na primer, sa vrednošću mase koja se smanjuje kao $\sqrt{n}$ kada se n približava nuli), kako se menja unutrašnja struktura, da li statička crna rupa počinje da se obrće (kao što predpostavlja autor), ili kako emitovano zračenje odstupa od zračenja crnog tela. Postoji još puno toga za proučavanje. Međutim, jedno važno pitanje je rešeno.

PARADOKS INFORMACIJE CRNIH RUPA

Kada je bilo otkriveno zračenje crnih rupa, jedno pitanje je tokom više godina bilo žučno raspravljano. Materija od koje je obrazovana crna rupa može da sadrži puno informacija, na primer, možemo da zamislimo da je crna rupa bila oblikovana od velikog broja knjiga koje su se urušile jedna u drugu. S druge

strane, crna rupa zraći toplotu sve dok ne ispari. Pošto toplotno zračenje ne nosi informaciju, izgleda kao da informacije nestaju na neki način, odnosno jednako tome, da se entropija povećava.

Neverovatan broj dokumenata bio je napisan o ovom problemu, neki su čak tvrdili da taj primer pokazuje da je fizika koju poznajemo netačna i da je potrebno da se menja. Kao i obično, da bismo rešili ovo pitanje, potrebno je da ga precizno razmotrimo, odstranjujući sva predubeđenja. Tri naknadna pitanja mogu da nam pomognu u traženju odgovora.

- Šta se događa sa knjigom koja se baci na Sunce? Kada i kako se informacije izrače?
- Koliko je precizna rečenica da crna rupa emituje toplotne zrake? Moglo bi da postoji odstupanje?
- Može li odstupanje da se izmeri? Na koji način bi crna rupa emitivala informaciju?

Možda želite da se pokrenete sopstveni um pre nego što pročitate (***Izazov 113e***). Prošetajmo se kroz kratki zaključak. Kada se knjiga ili bilo koji jako složen – ili male entropije – objekt baci na Sunce, informacije koje je sadržao bivaju izračene. Informacije se nalaze u nekim malim odstupanjima od zračenja crne rupe, naime u bliskoj korelaciji između emitovanog zračenja emitovanog tokom vremena sagorevanja Sunca. Kratak proračun, koji upoređuje entropiju knjige na sobnoj temperaturi i informacije koje se u njoj nalaze, pokazuje da je ovaj uticaj izuzetno mali i težak za izračunavanje.

Jasno obrazloženje ove teme dao je Don Pejdž (Don Page). (***Ref. 140***). On je proračunavao kako bi informacija mogla da se meri u zračenju ako bi sistem rne rupe i zračenje ***zajedno*** ili u ***čistom*** stanju, to jest u stanju koje sadrži posebnu informaciju. Rezultat j jednostavan. Čak i kada je sistem veliki – sastoji se od više stepena slobode – i u čistom je stanju, svi manji ***podsistemi*** izgledaju skoro savršeno toplotno. Još tačnije, ako ukupan sistem ima dimenziju Hilbertovog prostora od $N = n{\cdot}m$, pri čemu su n i $m \leq n$ dimenzije dva podsistema, i ukupan sistem je u čistom stanju, podsistem m bi imao entropiju S_m datu sa (***Izazov 114ny***)

$$S_m = \frac{1-m}{2n} + \sum_{k=n+1}^{mn} \frac{1}{k} \tag{46}$$

što je pojednostavljeno dato sa

$$S_m = \ln m - \frac{m}{2n} \quad \text{za} \quad m \gg 1 \tag{47}$$

Da bismo razmotrili rezultat, zamislimo da m i n predstavljaju stepene slobode umesto dimenzije Hilbertovog prostora. Prvi član u jednakosti (46) je uobičajena entropija mešovitog stanja. Drugi član je malo odstupanje i opisuje količinu određenih informacija koje se sadrže u početnom čistom stanju; uvrštavanjem brojeva nalazi se da je on izuzetno mali u poređenju sa prvim. Drugim rečima, podsistem m je skoro neraspoznatljiv od mešovitog stanja; izgleda kao da je toplotni sistem, mada nije.

Izračunavanja pokazuju da je drugi, mali član na desnoj strani jednakosti (47) zaista dovoljan za emitovanje zračenja bilo kojih informacija koje se sadrže u toku vremena trajanja crne rupe. Pejdž zatim nastavlja da bi pokazao da je drugi ćlan toliko mali da ne samo da se gubi pri merenjima; on je takođe izgubljen u uobičajenim, proračunima smetnji za fizičke sisteme. Na pitanje da li bi bilo koja izračena informacija mogla da bude izmerena, sada može da se se da direktan odgovor. Kao što je Don Pejdž pokazao, čak i merenjem polovine sistema daje samo oko polovine malo emitovanih informacija. (***Ref. 141***). Zato je neophodno da se meri skoro celokupno zračenje da bi se dobio značajniji deo emitovanih informacija. Drugim rećima, izuzetno je teško da se odrede informacije koje se sadrže u zračenju crne rupe.

Ukratko, u bilo kojem trenutku količina informacija emitovana iz crne rupe zanemarljiva je kada se uporedi sa zračenjem crne rupe; praktično je nemoguće da se dobije valjana informacija putem merenja ili čak i putem izračunavanja u kojima se obično koriste približnosti.

JOŠ PARADOKSA

Crna rupa je makroskopski objekt, sličan zvezdi. Kao i svaki objekt ona može da bude u interakciji sa svojom okolinom. Ona ima posebno svojstvo da proguta sve što u nju upadne. To nas odmah dovodi do toga da pitamo da li možemo ovo svojstvo da iskoristimo da prevarimo svakodnevne "zakone" prirode. Neki pokušaji su bili proučavani u odeljku o opštoj teoriji relativnosti i u predhodnom tekstu. Ovde ćemo istražiti nekoliko dodatnih. (***Vol. II, strana 212***).

* * *

Osim pitanja o entropiji, možemo potražiti načine za varanje u vezi očuvanja energije, momenta količine kretanja ili naelektrisanja. (***Izazov 115ny***). Nikakve prevare nisu moguće. Svako razmišljanje potvrđuje da je broj stepena slobode u oblasti srazmeran površini oblasti a ne njenoj zapremini. Na ovom začuđujućem rezultatu zadržaćemo se neko vreme.

* * *

Crna rupa pretvara materiju u antimateriju iz izvesnu efikasnost. Zaista, crna rupa koju stvara urušena materija zrači takođe antimateriju. To može da izgleda kao odstupanje od očuvanja broja čestica. Možete li da nađete primer? (***Izazov 116ny***).

* * *

Crne rupe skreću svetlost. Da li zavisi efekt polarizacije? Sama gravitacija ne pravi razliku polarizacije; međutim, ako se uključi efekt kvantne elektodinamike na virtualne čestice, priča bi mogla da se promeni. (***Ref. 142***). Prvi proračunu izgleda da pokazuju da takav efekt postoji, tako da bi gravitacija mogla da stvori dugu. Budite u toku.

* * *

Ako kutija male težine načinjena od ogledala može da lebdi u zračenju, moglo bi da se dođe do čudne posledice: takva kutija bi mogla u slobodnom prostoru da ubrzava sama sebe. U određenom smislu, ubrzana kutija bi mogla da lebdi na Fuling-Dejvis-Unru zračenju koje je stvorila sopstvenim ubrzanjem. Da li možete da pokažete da je ova situacija nemoguća zbog male ali značajne razlike između gravitacije i ubrzanja, odnosno odsustva efekata plime? (***Izazov 117ny***) (Drugi razlog koji uzrokuje da je ovaj efekt nemoguć je nepostojanje savršenih ogledala.)

* * *

Majkl Kučijev (Michael Kuchiev) je 2003. godine načinio spektakularnu predpostavku da će materija i zračenje koji imaju talasnu dužinu ***veću*** od prečnika crne rupe biti delimično odbijeni pri sudaru sa crnom rupom. (***Ref. 143***). Što je veća talasna dužina, utoliko bi bilo efikasnije odbijanje. Za zvezdane ili čak veće crne rupe on je predpostavio da bi bili odbijeni samo fotoni ili gravitoni. Crne rupe prema tome nebi bile u potpunosti kante za smeće. Da li je ovaj efekt stvaran? Razmatranja su još uvek u toku.

KVANTNA MEHANIKA GRAVITACIJE

Načinimo pojmovni korak na ovom mestu. Do sada smo posmatrali ***kvantnu teoriju sa gravitacijom***; sada ćemo se osvrnuti na ***kvantnu teoriju gravitacije***.

Ako se setimo sličnosti između elektromagnetnog polja i gravitacijskog "polja" naš sledeći korak trebalo bi da bude da nađemo kvantni opis gravitacijskog polja. Međutim, uprkos pokušajima mnogo brilijantnih umova tokom skoro celog veka, ova potraga je bila bezuspešna. Zaista, savremeni istraživači usmerili su se u drugom smeru, kao što će da bude objašnjeno u poslednjem deli naše pustolovine. Međutim, pogledajmo ono što je uspešno I zbog čega rezultati nisu dovoljni.

DA LI GRAVITACIJA POSTOJI

Kvantna teorija kaže da sve što se kreće sastavljeno je od čestica. Od kakve vrste čestica su sačinjeni gravitacijski talasi? Ako se gravitacijsko polje posmatra u smislu kvantne mehanike kao elektromagnetno polje, njegovi talasi bi trenalo da se kvantifikuju.

Mnoga svojstva ovog kvanta gravitacije mogu da se izvedu na neposredan način.

Zavisnost univerzalne gravitacije od $1/r^2$, slično kao kod elektriciteta, podrazumeva da kvant gravitacijskog polja ima masu koja ***iščezava*** I da se kreće brzinom svetlosti. Zavisnost gravitacije od elekromagnetnih efekata podrazumeva iščezavajući električni naboj.

Zapazili smo da gravitacija uvek privlači, a da nikada ne odbija. To znači da kvant polja ima ***celobrojan*** i ***paran*** spin. Spin koji iščezava je odbačen, pošto on podrzumeva da ne postoji povezanost sa energijom. (***Ref. 148***). U skladu sa svojstvom da "svaka energija ima gravitaciju" neophodan je spin $S = 2$. Ustvari, može da se dokaže da samo razmena čestice bez mase i sa spinom 2 dovodi do opšte teorije relativnosti, unutar klasičnih granica.

Povezanost jačine gravitacije, koja odgovara konstanti fine strukture elektromagnetizma, data je ili sa

$$\alpha_{G1} = \frac{G}{\hbar c} = 2,2 \cdot 10^{-15}\ \mathrm{kg}^{-2} \quad \text{ili sa} \quad \alpha_{G2} = \frac{Gmm}{\hbar c} = \left(\frac{m}{m_{Pl}}\right)^2 = \left(\frac{E}{E_{Pl}}\right)^2 \tag{48}$$

Međutim, prvi izraz nije neimenovan broj: drugi izraz jeste, ali zavisi od mase koju smo uvrstili. Ove poteškoće ukazuju na činjenicu da gravitacija u tačnom smislu nije interakcija, kao što je bilo već jasno u odeljku o opštoj teoriji relativnosti. Često se raspravlja da m treba da bude uzeto kao vrednost koja odgovara energiji sistema o kojem se radi. U svakodnevnom životu, tipične energije od 1 eV, dovode do vrednosti $\alpha_{G2} \approx 1/10^{56}$. Gravitacija je zaista slabašna u poređenju sa elektromagnetizmom, za koji je vrednost $\alpha_{em} = 1/137{,}036$

Ukoliko je sve ovo tačno morao bi da postoji kvant ***virtualnog*** polja, kako bi se objasnila statička gravitacijska polja. Međutim, sve do današnjih dana nije otkriven takozvani graviton, a postoji ustvari mala nada da će ikada da bude otkriven. Sa eksperimentalnog gledišta niko još ne zna kako da se načini detektor gravitona. Pokušajte! (***Izazov 118s***). Sa teorijskog gledišta, problemi sa konstantom veze verovatno čine da je nemoguće da se konstruiše renormalizovana teorija gravitacije; nedostatak renormalizacije znači nemogućnost definisanja širenja poremećaja, pa stoga i definisanja čestica, uključujući graviton. Možda odnosi kao što su $E = \hbar\omega$ ili $p = \hbar/2\pi\lambda$ nebi bili primenljivi na gravitacijske talase. Ukratko, možda bi morao da se promeni pojam čestice pre no što bi se na gravitaciju primenila kvantna teorija. Ovo pitanje je u ovom trenutku još uvek otvoreno.

PENA PROSTOR-VREMENA

Relacija neodređenosti za količinu kretanja i polložaj takođe je primenljiva na gravitacijsko polje. Kao posledica toga dolazi se do izraza za neodređenost tenzora metrike g u području veličine l, koji je dat sa

$$\Delta g \approx 2\frac{l_{Pl}^{\ 2}}{l^2} \tag{49}$$

gde je $l_{Pl} = \sqrt{\hbar G/c^3}$ Plankova dužina. Možete li da izvedete rezultat? (***Izazov 119ny***). Kvantna teorija prema tome pokazuje da je tenzor metrike g isto ***nejasno*** prepoznatljiv kao i količina kretanja i položaj.

Ali to nije sve. Kvantna teorija se zasniva na načelu da ne može da se zapazi vrednost rada manja od $\hbar$. To podrazumeva da su opažane vrednosti za metriku g u području L ograničene sa

$$g \geq \frac{2\hbar G}{c^3}\frac{1}{L^2} \tag{50}$$

Možete li da potvrdite ovo? Rezultat ima dalekosežne posledice. Najmanja vrednost za metriku koja je obrnuto srazmerna veličini područja podrazumeva da nije moguće da se kaže šta se događa sa oblikom prostor-vremena pri izuzetno malim dimenzijama. Drugim rečima, pri izuzetno velikim energijama, postaje nejasan i sam pojam prostor-vremena. Da bi opisao ovu situaciju Džon Viler (John Wheeler) je uveo pojam ***pena prostor-vremena***. Ovaj pojam razjašnjava da prostor-vreme nije ni neprekidno ni mnogostruko u ovim područjima. Međutim to je bila osnova na kojoj je izgrađen naš dosadašnji opis prirode! Prinuđeni smo da zaključimo da je naš opis prirode izgrađen na pesku. Pitanje će biti suštinsko u poslednjem delu našeg uspona na planinu. (***Vol. VI, strana 50***).

DEKOHERENCIJA PROSTOR VREMENA

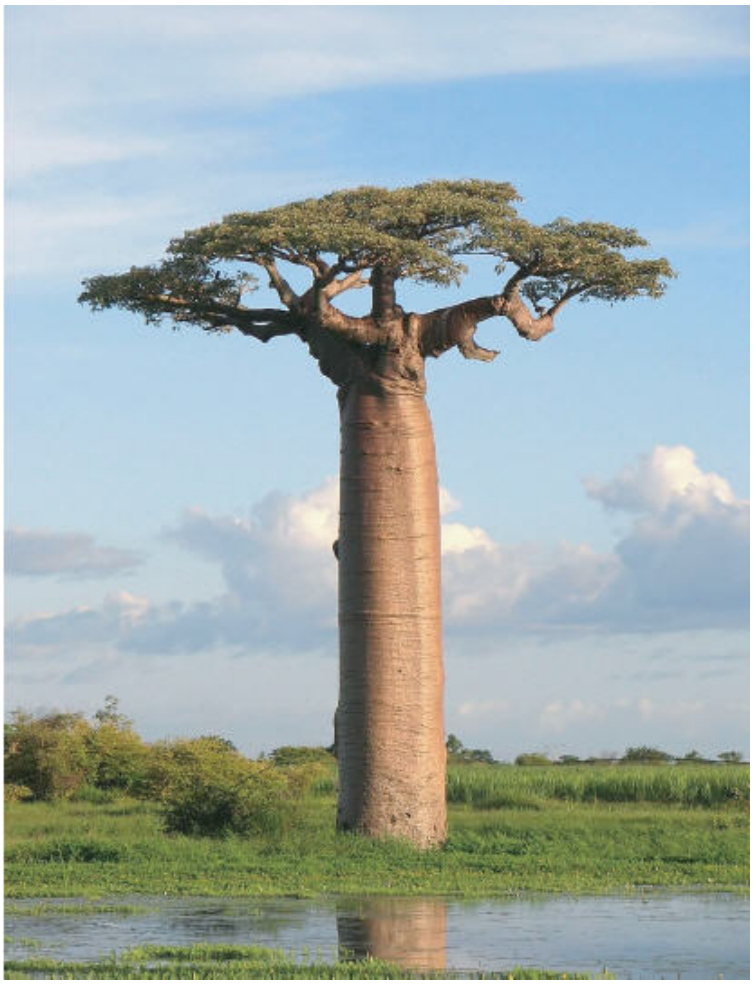
Opšta teorija relativnosti naučila nas je da su gravitacijsko polje i prostor-vreme jedno te isto. Ako se gravitacijsko polje razvija kao kvantni sistem, možemo da se upitamo zbog čega nisu zapažene superpozicije druguh makroskopskih prostor-vremena.

Razmatranje se pojednostavljuje na najjednostavniji način (***Ref. 149***), naime superpozicija u oblasti l vakuuma homogenog gravitacijskog polja sa vrednošću g i drugog sa vrednošću g'. Kao u slučaju superpozicije makroskopski različitih talasnih funkcija, takva superpozicija se raspada. (***Vol IV, strana 115***). Raspada se naročito kada čestica prođe kroz zapreminu. Kratko izračunavanje daje za vreme raspada t_d (***Izazov 120ny***)

$$t_d = \left(\frac{2kT}{\pi m}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{nl^4}{(g-g')^2} \tag{51}$$

Gde je *n* gustina broja čestica, *kT* njihova kinetička energija i *m* njihova masa. Uvrštavanjem tipičnih vrednosti nalazimo da su kolebanja jačine gravitacijskog polja izuzetno mala. (***Izazov 121e***). Ustvari, vrednosti su tako male da možemo da zaključimo da je gravitacijsko polje prva promenljiva koja se ponaša na klasičan način u istoriji svemira.

Otkrivanje efekta kvantne gravitacije za prostor-vreme biće stoga izuzetno teško. Ukratko, materija nam ne kazuje samo kako se zakrivljuje prostor-vreme, ona mu kazuje da se ponaša klasično.



Slika 88 Svako drvo, kao što je ovaj divan baobab (*Adansonia grandidieri*), pokazuje da je priroda sposobna da kombinuje kvantnu teoriju i gravitaciju (© Bernard Gagnon).

KVANTNA TEORIJA KAO NEPRIJATELJ NAUČNE FANTASTIKE

Kako je kvantna teorija promenila naše sagledavanje prostor-vremena? Kraj dvadesetog veka doneo je više neočekivanih ali značajnih rezultata u poluklasičnu kvantnu gravitaciju.

Godine 1995. Ford (L.H. Ford) i Roman (Thomas A. Roman) otkrili su da ***crvotočine*** (worm holes), koje mogu da se se zamisle u opštoj teoiji relativnoati, ne mogu da postoje ako se uzmu u obzir kvantni efekti. (***Ref. 150***). Oni su dokazali da makroskopske crvotočine iziskuju nerealno velike negativne energije. (Za mikroskopske crvotočine pitanje je još uvek nejasno.)

Godine 1996. Kej (Bernard S. Kay) Radzikovski (Marek J. Radzikowski) i Vald (Robert M. Wald) pokazali su da zatvoreno vreme u obliku krive ne postoji u poluklasičnoj kvantnoj gravitaciji; prema tome u prirodi ne postoji vremeplov (vremenska mašina). (***Ref. 151***).

Godine 1997. Fening (Frank Pfenning) i Ford (L.H. Ford) pokazali su da situacije sa varp pogonom (warp drive), koji su takođe zamislive u opštoj teoriji relativnosti ne mogu da postoje ako se uzmu u obzir kvantni efekti. Takve situacije bi zahtevale nerealno velike negativne energije. (***Ref. 152***).

Ukratko, uključivanje kvantnih efekata razara sva ona fantaziranja koja je pokrenula opšta teorija relativnosti.

NEPOSTOJANJE VAKUUMA ZNAČI DA NEMA ČESTICA

Gravitacija ima važnu posledicu na kvantnu teoriju. Da se izbroje i definišu čestice potrebno je da se u kvantnoj teoriji definiše vakuumsko stanje. (***Vol. IV, strana 91***). Međutim, vakuumsko stanje ne može da se definiše kada je poluprečnik krivine prostor-vremena postao uporediv sa Komptonovom talasnom dužinom umesto da bude veći od nje. U takvom jako zakrivljenom prostor-vremenu čestice ne mogu da se definišu. Razlog tome je nemogućnost da se u takvim situacijama načini razlika između okoline i čestice: kada je prisutna jaka zakrivljenost vakuum je pun spontano stvorene materije, kao što to pokazuju crne rupe. Sada smo upravo videli da pri malim dimenzijama nataju divlja kolebanja prostor-vremena; drugim rečima, strogo govoreći, čestice ne mogu da se definišu; pojam čestice je približnost samo pri maloj energiji! Ovaj čudan zaključak detaljno ćemo da istražimo u poslednjem delu našeg uspona na planinu.

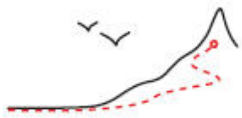
ZAKLJUČAK O KVANTNOJ TEORIJI I GRAVITACIJI

Svako drvo nam kazuje svakog dana: ***slabo*** gravitacijsko polje može da se uključi u kvantnu teoriju. ***Slaba*** gravitacijska polja imaju merljive i predvidive efekte na talasne funkcije: kvantne čestice padaju i njihova faza se menja u gravitacijskom polju. Nasuprot tome, uključivanje kvantnih efekata u opštu teoriju relativnosti dovodi do pene prostor-remena, superpozicija prostor-vremena i gravitona. Uključivanje kvantnih efekata u gravitaciju onemogućava postojanje crvotočina, vremenskih krivih i područja sa negativnim energijama.

Uvrštavanje ***jakih*** gravitacijskih polja u kvantnu teoriju funkcioniše u praktičnim situacijama, ali dovodi do problema sa pojmom čestice. Nasuprot tome, uvrštavanje kvantnih efekata u situacije sa jako zakrivljenim prostor-vremenom dovodi do problema sa određivanjem prostor-vremena.

Ukratko, kombinovanje kvantne teorije i gravitacije dovodi do problema kako sa pojmom čestice, tako i sa pojmom prostor-vremena. Kombinacija kvantne teorije i opšte teorije relativnosti dovodi u pitanje osnove opisa prirode koje smo do sada koristili. Kako je pokazano na ***slici 88***, priroda je pametnija od nas.

Ustvari, sve do sada mi smo skrivali prostu činjenicu: u osnovi kvantna teorija i opša teorija relativnosti međusobno su ***suprostavljene***. Ova suprotnost bila je jedan od razloga što smo načinili korak unazad ka specijalnoj teoriji relativnosti pre no što smo započeli da istražujemo kvantnu teoriju. Krakom unazad mi smo izbegli mnoge probleme, jer kvantna teorija nije u suprotnosti sa ***specijalnom*** teorijom relativnosti., već samo sa ***opštom*** teorijom relativnosti. Problemi su dramatični, menjajući sve, od osnova klasične fizike do rezultata kvantne teorije. Postojaće iznenađujjuće posledice na prirodu prostor-vremena, na prirodu čestica i na samo kretanje. Međutim, pre no što proučimo ova pitanja (***Vol. VI, strana 21***), završićemo temu o prisutnom kvantnom delu uspona na planinu, naime istraživanjem kretanja unutar materije, a naročito kretanje jezgra atoma i kretanja u njemu.



Poglavlje 5

STRUKTURA JEZGRA – NAJGUŠĆI OBLAK

Nuklearna fizika je rođena u Francuskoj 1896. godine, međutim ona je danas veoma malo aktivna. Na to temi sada ne radi mnogo istraživača. Ovo polje nauke nije stvorilo više od jedne ćerke, eksperimentalne fuzike velike energije, koja je rođena oko 1930. godine. Sve ove aktivnosti bile u u jakom opadanju širom sveta od 1985. godine, uz izuzetak poslednjeg eksperimenta CERN, *Large Hadron Collider*. S obzirom na kratko vreme postojanja nuklearne fizike, istorija ove oblasti je upečatljiva: otkrila je zašto zvezde sijaju, kako deluju snažne bombe, kako kosmička evolucija proizvodi atome od kojih smo načinjeni i kako lekari mogu drastično da poboljšaju stope ozdravljenja. (***Ref. 153***).

Nuklearna fizika je samo astrofizika male gustine
Anonimus

ČUDO FIZIKE – SNIMANJE MAGNETNOM REZONANSOM

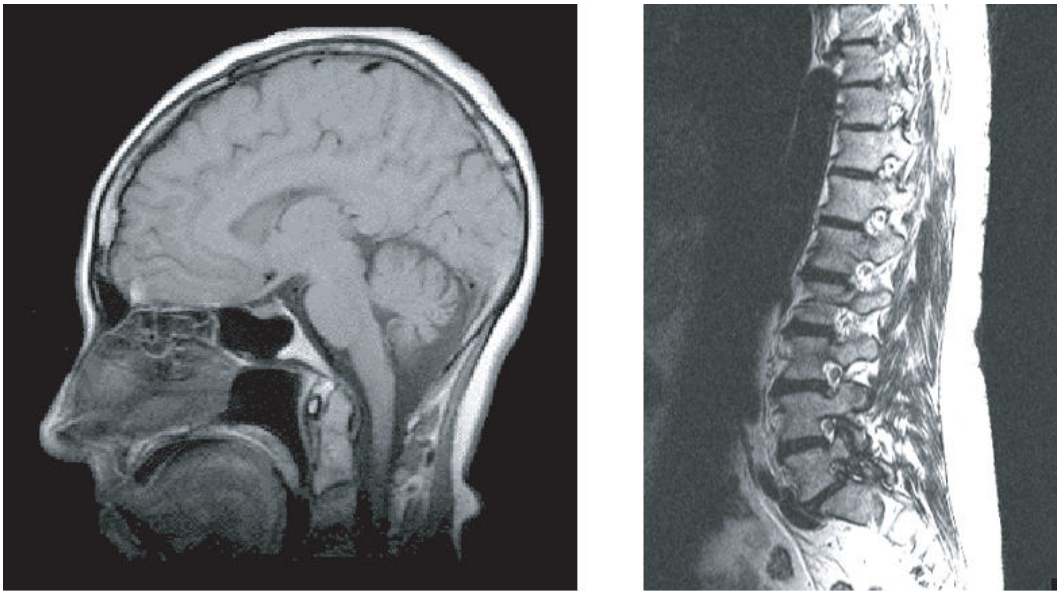
Nedvosmisleno, naspektakularniji alat koji je istraživanje u fizici ostvarilo u dvadesetom veku bilo je ***snimanje magnetnom rezonansom*** (skraćeno MRI – na engleskom Magnetic Resonance Imaging). Ova tehnika snimanja omogućava da se snimi unutrašnjost ljudskog tela u velikoj rezoluciji i bez ikakvih oštećenja i opasnosti po pacijenta, što je jako suprotno snimanju pomoću rendgenovih zraka. Tehnika se zasniva na kretanju atomskih jezgara. Premda su ovi uređaji još uvek skupi – koštaju do nekoliko miliona evra – postoji nada da će oni u budućnosti da postanu jeftiniji. Takav uređaj za snimanje magnetnom rezonansom, prikazan na ***slici 89***, u suštini se sastoji od velikog magnetnog kalema, radio predajnika i računara. Neki delovi tela osobe koja je stavljena u namotaj uređaja prikazani su na ***slici 90***. Snimci omogućavaju da se otkriju problemi u kostima, u kičmi, u srcu koje kuca i u ostalim tkivima. Mnogo ljudi duguje svoj život ovim uređajima; u više slučajeva ovi uređaji omogućavaju da se načini tačna dijagnoza i da se stoga odabere odgovarajući postupak lečenja pacijenta.

Slika 89 Komercijalni uređaj za snimanje magnetnom rezonansom (© Royal Philips Electronic)

U uređajima za snimanje magnetnom rezonansom radio predajnik emituje radio talase koji se apsorbuju jer su jezgra vodonika – protoni – mali obrtni magneti. Magneti mogu da budu paralelni ili antiparalelni u odnosu na magnetno polje koje pravi kalem. Energija prelaza E apsorbovana iz radio talasa čija je učestanost ω podešena je na magnetno polje B . Energija koju apsorbuje jedno jezgro data je kao

$$E = \hbar\omega = \hbar\gamma B \qquad (52)$$

Konstanta materijala $\gamma/2\pi$ ima vrednost od 42,6 MHz/T za jezgro vodonika; to je rezultat usled spina protona koji ne nestaje. Apsorpcija je čist kvantni efekt, kao što pokazuje prisutnost kvanta rada $\hbar$. Putem korišćenja pametno primenjenih magnetnih polja, jačije tipično 0,3 T i 7 T u komercijalnim uređajima i do 21 T u uređajima za eksperimente, može da se izmeri apsorpcija za svaki element zapremine. Zanimljivo je da nivo precizne apsorpcije zavisi od hemijskog jedinjenja koje je u jezgru. Stoga će vrednost apsorpcije da zavisi od hemijske supstance.



Slika 90 Sagitalne slike glave i kičme (korišćeno uz saglasnost Joseph P. Hornak,*The Basics of MRI*, takođe je dostupno na veb strani www.cis.rit.edu/htbooks/mri/. (Copyright 2003).

Kada se stepen apsoršcije prenese na crno-beli snimak, obrazuje se slika koja prikazuje različita hemijska jedinjenja. Na ***slici 90*** prikazana su dva primera. Primenom još jednog trika, savremeni uređaji mogu da prikažu protok krvi u srcu ili protok vazduha u plućima; oni tada rutinski načine film sa otkucajima srca. (***Ref. 154***). Druge tehnike prikazuju kako lokacija potrošnje šećera u mozgu zavisi od onoga o čemu razmišljate.[1]

Snimanje magnetnom rezonansom može da prikaže čak i velika čuda prirode. Prvi video snimak rađanja ljudskog bića, načinjen 2010. godine i objavljen 2012. godine prikazan je na ***slici 91***. (***Ref. 155***). Snimanje magnetnom rezonansom je bučno, ali ni na koji način nije štetno za nerođenu bebu. Prvo skeniranje para tokom seksualnog odnosa načinio je Vilibrord Vajmar Šulc (Willibrord Weimar Schulz) i njegov tim 1999. godine. (***Ref. 156***). To je prikazano na ***strani 304***.

Svaki snimak magnetnom rezonansom prema tome potvrđuje da

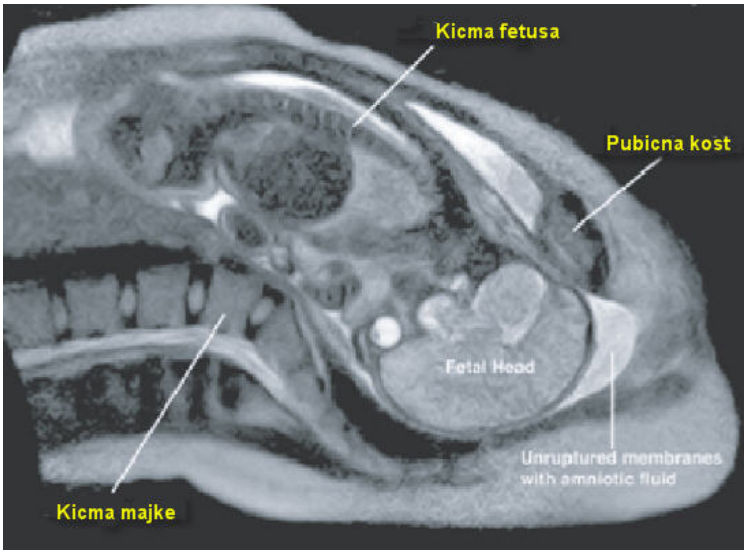
- Većina atoma – ali ne i svi – imaju jezgro koje se obrće.

Kao i svaki drugi predmet, jezgra atoma imaju veličinu, oblik, boju, sastav i interakcije. Ovde ćemo da ih istražimo.

VELIČINA JEZGRA I OTKRIĆE RADIOAKTIVNOSTI

Signal magnetne rezonanse pokazuje da su jezgra atoma vodonika osetljiva na magnetna polja. Za protone je g-faktor određen korišćenjem magnetnog momenta μ, njihove mase m naelektrisanja e, dat sa $g = \mu 4m/e\hbar$ i iznosi oko 5,6. (***Vol. IV, strana 86***). Korišćenjem izraza koji povezuje g-faktor i poluprečnik složenog predmeta, zaključujemo da je poluprešnik protona oko 0,9 fm; ova vrednost je potvrđena u mnogim eksperimentima i postupcima merenja. Prema tome protoni su oko 30.000 puta manji od atoma vodonika, čiji je poluprečnik oko 30 pm. Proton je najmanji od svih atomskih čestica; najveća poznata čestica ima poluprečnik koji je 7 puta veći od vrednosti za proton.

[1] Na veb strani www.cis.rit.edu/htbooks/mri/ Jozefa P. Hornaka dat je izvanredan uvod u tehnike snimanja magnetnom rezonansom, i na engleskom i na ruskom, uključujući fizičke osnove, rad uređaja i mnogobrojne lepe slike. Postupak proučavanja jezgara istovremenim izlaganjem radio talasima i magnetnom polju naziva se ponekad i ***nuklearna magnetna rezonansa***.



Slika 91 Slika iz prvog video snimka načinjenog magnetnom rezonansom – rađanje bebe (© C.Bamberg).

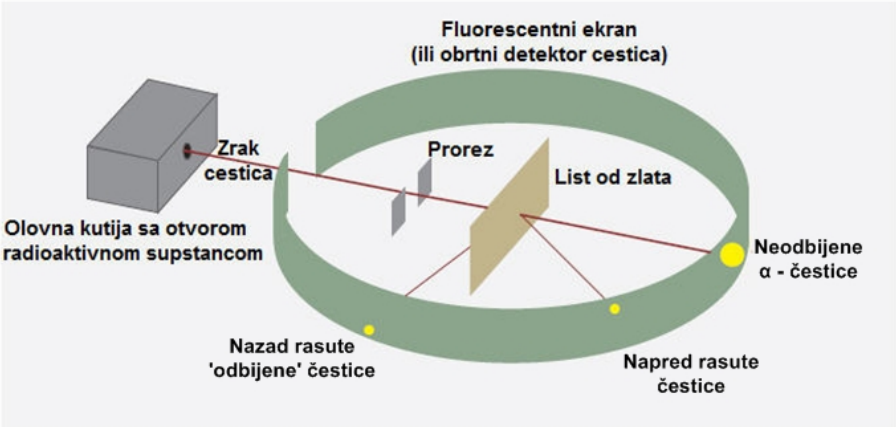
Mala veličina atomskog jezgra nije novost. Ona je pozata još od početka dvadesetog veka. Priča je započeta prvog marta 1896, godine kada je Anri Bekerel (Henri Becquerel)[1] otkrio zagonetnu pojavu: minerali uranijum natrijum sulfata zacrneli su fotografske ploče. Bekerel je čuo da je ovaj mineral jako fluorescentan; on je predpostavio da fluorescencija možda ima nešta zajedničkog sa rendgenovim zracima koje je Konrad Rentgen (Conrad Röntgen) otkrio godinu dana ranije. Njegova predpostavka je bila pogrešna; no bez obzira na to, dovela ga je do novog važnog otkrića. Istražujući razlog delovanja uranijuma na fotografske ploče, Bekerel je otkrio da ovaj mineral emituje nepoznatu vrstu zračenja; različitu od svih drugih poznatih u ono vreme; osim toga, zračenje emituje bilo koja supstanca koja sadrži uranijum. Godine 1898. Gistav Bemon (Gustave Bemont) dao je ime ***radioaktivnost*** svojstvu ovih minerala.

Slika 92 Anri Bekerel (1852–1908)

Slika 93 Marija Kiri (1867–1934)

Radioaktivno zračenje emituju osim urana takođe i mnogi drugi elementi. Ovo zračenje može da se "vidi": ono može da se otkrije preko malih bleskova svetlosti koji se javljaju kada zraci pogode scintilacioni ekran. Bleskovi svetlosti su mali čak i na rastojanju od nekoliko metara od izvora; prema tome, zraci mora da su emitovani iz tačkastog izvora. Ukratko, radioaktivnost mora da je emitovana iz pojedinačnih atoma. Stoga radioaktivnost nedvosmisleno potvrđuje postojanje atoma. Zapravo, radioaktivnost omogućava čak i da se atomi prebroje: u rastvoru radioaktivne supstance bleskovi mogu da se izbroje, bilo pomoću fotogafskog filma, bilo pomoću sistema za brojanje fotona. (***Vol. IV, strana 36***).

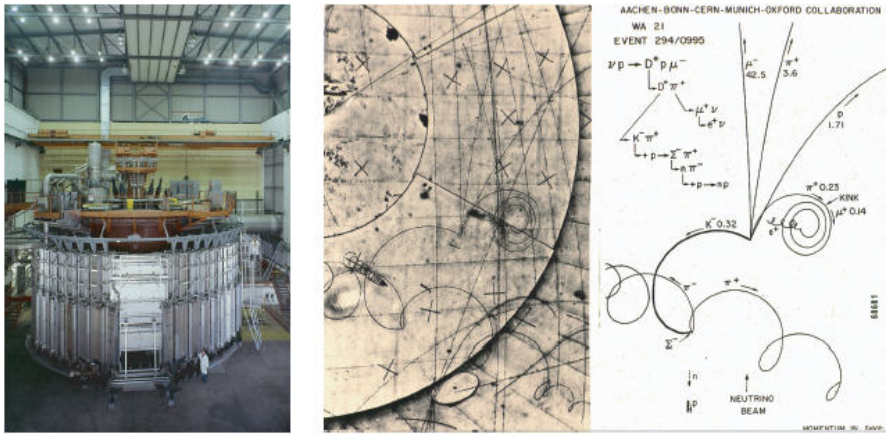
[1] Anri Bekerel (Henri Becquerel, 1852. Paris – 1908. Le Croisic), bio je značajan fizičar; njegova glavna tema bila je proučavanje radioaktivnosti. On je bio mentor teze Marije Kiri (Marie Curie), supruge Pjera Kirija (Piere Curie) i bio je centralna ličnost njene slave. SI jedinica za radioakrivnost nazvana je po Bekerelu. Za njegova otkrića dodeljena mu je 1903. godine Nobelova nagrada za fiziku koju je podelio sa bračnim parom Kiri, Pjerom i Marijom.



Slika 94 Šematski prikaz Raderford-Gajger eksperimenra rasipanja

Na jačinu radioaktivnosti ne može da se utiče magnetnim ili električnim poljem; ona ne zavisi od temperature ili izlaganja svetlosti. Ukratko, radioaktivnost ne zavisi od elektromagnetizma niti je sa njim povezana. Isto tako se velika energija emitovanog zračenja ne može objasniti elektromagnetnim efektima.

Radioalktivnost mora zato da bude usled neke druge sile, nove vrste. Ustvari, trajalo je 30 godina i tuce Nobelovih nagrada da bi se u potpunosti shvatili detalji. Pokazalo se da postoji nekoliko vrsta radioaktivnih zračenja; različite vrste emitovanih zračenja ponašaju se različito kada prolaze kroz magnetno polje ili kada se sretnu sa materijom. Vrste zračenja navedene su u ***Tabeli 11***. U međuvremenu svi ovi zraci su proučeni veoma detaljno, sa ciljem da se shvati priroda emitovanih subjekata i njihova interakcija sa materijom.



Slika 95 "Velika evropska komora sa mehurićima" – najveća koja je ikada izgrađena – i primer tragova relativističkih čestica koje je napravila, sa vrednostima količina kretanja izvededih sa fotografije. (© CERN)

Radioaktivnost je inspirisala 1909. godine Ernesta Raderforda (Ernest Rutherford)[1], starog 37 godina, koji je samo godinu dana ranije dobio Nobelovu za drugi od njegovih mudrih eksperimenata. On je zamolio svog saradnika Hansa Gajgera (Hans Geiger) da uzme izvor α zračenja – vrstu radioaktivnosti koju je Raderford otkrio i dao ime pre 10 godina – i da usmeri radijaciju na tanak metalni listić. Cilj je bio da se pronađe gde bi se α zraci završili. Eksperiment je prikazan na ***slici 94***. Grupa istraživača pratila je putanju čestica tako što je koristila svetlucavi ekran; kasnije su koristili izum Čarlsa Vilsona (Charles Wilson): maglenu komoru. Maglena komora, kao i njen naslednik, komora sa mehurićima, pravi bele tragove duž

[1] Ernest Raderford (Ernest Rutherford, 1871. Brightwater – 1937. Cambridge), bio je istaknuti fizičar. Emigrirao je u Englesku i postao profesor na Univerzitetu Mančester. Uveo je pojmove α čestice, β čestice, proton i neutron. Kao nadaren eksperimentator, otkrio je da radioaktivnost pretvara elemente, objasnio je prirodu α zraka, otkrio je atomsko jezgro, izmerio njegovu veličinu i izveo je prve nuklearne reakcije. Ironično, ali on je 1908. godine dobio Nobelovu nagradu za hemiju, uveseljavajući sebe i svetsku zajednicu fizičara; ovo je bilo neophodno jer je bilo nemoguće da se dodeli dovoljno nagrada za fiziku brojnim pronalazačima iz tog vremena. Osnovao je uspešnu školu istraživanja nuklearne fizikei mnogi čuveni fizičari su u toj instituciji proveli neko vreme. Premda je bio eksperimentator, Raderford je duboko prezirao kvantnu teoriju, čak i kada je ona bila jedino moguće objašnjenje za njegova otkrića.

putanja naelektrisanih čestica; mehanizam je isti kao onaj koji dovodi do stvaranja belih pruga na nebu iza aviona. Oba uređaja, i maglena komora i komora sa mehurićima prema tome omogućavaju da se posmatra radioaktivnost, kao što je prikazano na ***slici 95***.

TABELA 11

Tip	Čestica	Primer	Domet	Opasnost	Zaštita	Upotreba
α zraci 3 - 10 MeV	jezgra helijuma	^{235}U, ^{238}U, ^{238}Pu, ^{241}Am	nekoliko cm u vazduhu	unos jelom, udisanjem, dodirom	svaki materijal, na primer papir	merenje debljine
β zraci 0 – 5 MeV	elektroni i	^{14}C, ^{40}K, ^{3}H, ^{101}Tc	<1 mm u metalu	ozbiljna	metali	lečenje raka
	antineutrini		svetl. godine	nikakva	nikakva	istraživanja
β^+ zraci	pozitroni i	^{40}K, ^{11}C, ^{13}N, ^{15}O	manji od β	srednja	svaki materijal	tomografija
	neutrini		svetl. godine	nikakva	nikakva	istraživanje
γ zraci	fotoni velike energije	^{110}Ag	nekoliko m u vazduhu	velika	tanko olovo	zaštita biljaka dezinfekcija
n reakcije oko 1 MeV	neutrini	^{252}Cf, Po-Li (α,n), ^{38}Cl-Be (γ,n)	više m u vazduhu	velika	0,3 m parafina	nukl..elektrane, eksperimenti kvantne gravit.
n emisije tip. 40 MeV	neutroni	^{9}He, ^{24}N, ^{254}Cf	više m u vazduhu	velika	0,3 m parafina	istraživački eksperimenti
p emisije tip. 20 MeV	protoni	^{5}Be, ^{161}Re	kao α zraci	mala	čvrsta tela	
spont. fisija tip. 100 MeV	atomska jezgra	^{232}Cm, ^{236}Rf	kao α zraci	mala	čvrsta tela	detekcija novih elemenata

Detektor radijacije dao je dosledan, ali čudan rezultat: većina α čestica prošla je neometano kroz tanak metalni list, pri čemu je malo rasuto i malo odbijeno. Osim toga, ono malo odbijenih nije odbijeno od površine, već od unutrašnjosti listića. (Možete li da zamislite kako su oni to prikazali?) (***Izazov 122s***). Raderford i Gajger zaključili su iz njihovog eksperimenta rasipanja da su pre svega atomi u metalnom listiću uglavnom prozirni. Samo providnost atoma objašnjava zbog čega većina α čestica prolazi kroz metalni listić neometano, iako je njegova debljina preko 2000 atoma. Međutim, neke čestice se rasipaju pod velikim uglovima ili su čak odbijene. Prebrojavanjem čestica koje su bile odbijene (oko 1 na 20.000 za njegov 0,4 μm debeo listić), Raderford je imao mogućnost da zaključi ***veličinu*** odbijenih subjekata i da proceni njihovu ***masu***. (Ovo izračunavanje je sada uobičajena vežba u studijama fizike na univerzitetima.) On je našao da odbijeni subjekti praktično sadrže celokupnu masu atoma sa prečnikom od oko 1 fm. Raderford je zato ovu koncentrianu masu nazvao atomskim ***jezgrom***.

Koristeći saznanje da atomi sadrže elektrone, Raderford je zaključio iz ovog eksperimenta da se atomi satoje od oblaka elektrona kojim su određene veličine atoma – reda oko 0,1 nm – i od malog ali teškog jezgra u sredini. Ako bi atom bio veličine lopte za košarku, njegovo jezgro bi bilo veličine čestice prašine, premda bi sadržalo 99,9% mase lopte za košarku. Atomi podsećaju na šećernu penu oko teške čestice prašine. Iako je šećerna pena – oblak elektrona – oko jezgra izuzetno tanka i laka, on je dovolno jaka da spreči da dva atoma prodru jedan u drugog. U čvrstim telima, tečnostima i gasovima šećerna pena, to jest oblak elektrona, održava okolna jezgra na stalnom rastojanju. Međutim, za male α čestice koje imaju veliku masu, šećerna pena je u suštini prazan prostor, tako da one jednostavno prođu kroz oblak elektrona sve dok ne izađu kroz drugu stranu listića ili dok ne pogode jezgro. ***Slika 96*** prikazuje ispravan način oslikavanja atoma.

Gustina atomskih jezgara je impresivna: oko $5{,}5\cdot10^{17}$ kg/m^3. Sa takvom gustinom masa Zemlje bi mogla da stane u loptu poluprečnika 137 m, a zrno peska mi imalo masu veću od najvećeg postojećeg tankera za naftu. (Možete li ovo da potvrdite) (***Izazov 123e***).

Sada znam kako izgleda atom!
Ernest Raderford

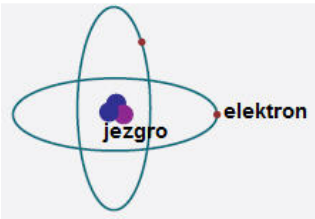
Prikaz slobodnog elektrona u osnovnom stanju

(1) U prihvatljivom obliku

Šta je tačno:
oblak elektrona ima zamućen oblik lopte

Šta nije tačno:
oblak elektrona i jezgro atoma nemaju vidljivu boju,
atomsko jezgro je isuviše veliko

(2) U neprihvatljivom obliku



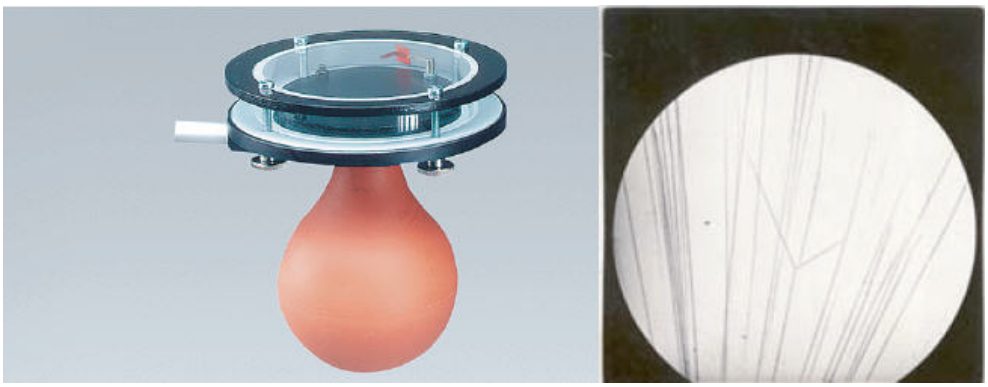
Šta je tačno:
skoro ništa!

Šta nije tačno:
Jezgra su 1o do 100.000 puta manja od atoma,
elektroni se ne kreću po putanjama,
elektroni nisu izraženi.
slobodan atom nije ravan već uvek loptast,
ni atom ni jezgro nemaju oštre granice,
nijedna čestica atoma nema vidljivu boju

Slika 96 Razumno realno (levo) i pogrešno (desno) prikazivanje atoma, kakvo se redovno sreće u školskim knjigama. Atomi u osnovnom stanju su loptasti oblaci elektrona sa sićušnim jezgrom unutar oblaka, u njihovom ce*ntru*. Atomi u interakciji, hemijski vezani atomi i neki – ali ne svi – pobuđeni atomi imaju oblake elektrona različitih oblika.

ATOMSKA JEZGRA SU SLOŽENA

Snimci magnetnom rezonansom pokazuju takođe da su atomska jezgra složena. Zaista, snimci bi mogli da se načine i korišćenjem težih jezgara od jezgra vodonika, kao što su izvesni fluorini ili jezgra kiseonika. Kod ovih jezgara *g*-faktor odstupa od vrednosti 2 koja je karakteristična za tačkaste čestice; što je veće atomsko jezgo, to je veće osdtupanje. Sva atomska jezgra imaju konačnu veličinu; (***Vol IV, strana 86***) posebno je moguće da se izmeri veličina jezgra, kao u eksperimentu Raderford-Gajger. Izmerene vrednosti potvrđuju vrednosti koje su predpostavljene preko *g*-faktora. Ukratko, i vrednost preko *g*-faktora i preko neiščezavajućih veličina pokazuju da je atomsko jezgro složeno.



slika 97 Vilsonova maglena komora, prečnika oko 99 mm i jedan od prvih snimaka α zraka snimljenih pomoću nje, od Patrik Blaketa, pokazuje takodje sudar sa atomom u komori. (© Royal Society)

Zanimljivo je da je ideja o složenosti atomskog jezgra starija od samog pojma atomskog jezgra. Već je 1815. godine, posle prvih merenja mase atoma koje su izveli Džon Dalton (John Dalton) i drugi, istraživači primetili da masa različitih hemijskih elemenata izgleda da je skoro u potpunosti savršen umnožak težine atoma vodonika. Vilijam Praut (William Prout) je potom formulisao predpostavku da su svi elementi sastavljeni od vodonika. Kada je otkriveno atomsko jezgro, znajući da ono sadrži skoro ukupnu masu atoma, mislilo se zbog toga da su sva jezgra sastavljena od jezgara vodonika. Budući da je bio prvi na listi sastojaka, jezgro vodonika je nazvano ***proton***, od grčkog pojma za "prvi", a podsećalo je istovremeno ina ime Prauta. Proton nosi pozitivnu jedinicu električnog naboja, tačno suprotrno od one u elektronu, ali je oko 1836 puta teži. Više detalja o protonu je navedeno u ***Tabeli 12***.

Prikaz atomskog jezgra

(1) U prihvatljivom obliku

Šta je tačno:
zamagljen i obično elispast oblik jezgra

Šta nije tačno:
atomsko jezgro nema vidljivu boju
neka jezgra imaju drugačiji oblik

(2) U neprihvatljivom obliku

Šta je tačno::
samo sastav

Šta nije tačno:
jezgra nisu na stalnom mestu jedna u odnosu na druge
jezgra nemaju oštre granice
jezgra nemaju vidljivu boju

Slika 98 Razumno realno (levo) i pogrešan prikaz atomskog jezgra (desno) kakvo se redovno sreće u školskim knjigama. *Atomska jezgra su loptasti oblak nukleona.*

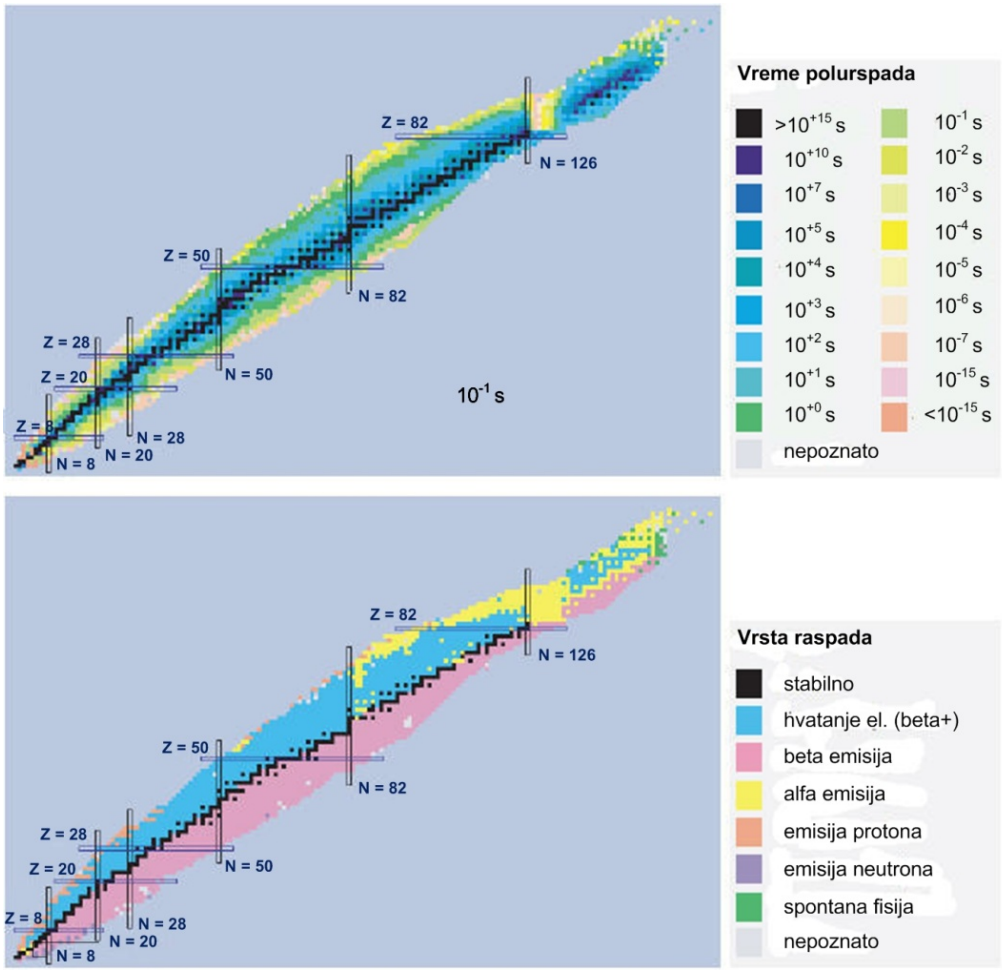
TABELA 12 Svojstva nukleida: protona i neutrona (izvor: pdg.web.cern.ch)

Osobina	**Proton**	**Neutron**
Masa	1,672 621 777(74)·10^{-27} kg	1,674 927 351(74)·10^{-27} kg
	0,150 327 7484(66) nJ	0,150 634 9631(66) nJ
	938,272 046(21) MeV	939,565 379(21) MeV
	1,007 276 466 812(90) u	1,008 664 916 00(43) u
	1836,152 6675(39)·m_e	1838,683 6605(11)· m_e
spin	1/2	1/2
P paritet	+1	+1
Antičestica	antiproton	antineutron
Sadržaj kvarka	uud	udd
Električni naboj	1 e	0
Poluprečnik naelektrisanja	0,88(1) fm	0,12(1) fm^2
Moment električnog dipola	< 5,4·10^{-26} e·m	< 2,9·10^{-28} e·m
Električna polarizacija	1,20(6)·10^{-3} fm^3	1,16(15)·10^{-3} fm^3
Magnetni moment	1,410 606 743(33)·10^{-36} J/T	-0,966 236 47(23)·10^{-26} J/T
g-faktor	5,585 694 713(46)	-3,826 085 45(9o)
	2,729 847 356(23)·μ_N	-1,913 042 72(45)·μ_N
Žiromagnetni stepen	0,267 522 2005(63) 1/nsT	
Magnetna polarizibilnost	1,9(5)·10^{-4} fm^3	3,7(2,0)·10^{-4} fm^3
Srednje vreme trajanja (slobodna čestica)	> 2,1:10^{29} god	880,1(1,) s
Oblik (kvadripolni moment)	ovalan	ovalan
Pobuđena stanja	više od 10	više od 10

Međutin, umnožak naelektrisanja i umnožak mase ostalih jezgara nisu se slagali. U proseku jezgro tada ima *n* puta veće naelektrisanje od protona, ali ima masu koja je oko 2, 6, n puta veća od mase protona. Dodatni eksperimenti su potvrdili ideju Vernera Hajzenberga (Werner Heisenberg): sva jezgra teža od jezgra vodonika sastavljena su od pozitivno naelektrisanih ***protona*** i neutralnih ***neutrona***. Neutroni su čestice sa malo većom masom od mase protona (razlika je manja od jednog dela na 700, kako je prikazano u ***Tabeli 12***), ali su bez električnog naboja. Pošto su mase skoro jednake, masa jezgra – pa prema tome i celog atoma – su još uvek (skoro potpuno) celobrojni umnožak mase protoma. Međutim, pošto su neutroni neutralni, brojne vrednosti mase i naelektrisanja jezgra se razlikuju. Budući da su neutralni, neutroni ne ostavljaji tragove u maglenoj komori i mnogo ih je teže otkriti no protone, naelektrisane hadrone ili naelektrisane leptone. Iz tog razloga neutroni su otkriveni mnogo kasnije od mnogih drugih, više egzotičnih subatomskih čestica.

Danas je moguće da se pojedinačni neutroni zadrže imeđu pogodno oblikovanih kalemova, uz pomoć teflonskih "prozora". Takve klopke je predložio 1951. godine Volfgang Pauli (Wolfgang Pauli). One rade zato što neutroni, iako nemaju naelektrisanje, ipak imaju mali magnetni moment. (Uzgred, to podrazumeva da su i sami neutoni sastavljeni od naelektrisanih čestica). Uz pogodno postavljena magnetna polja, neutroni se mogu držati na mestu, drugim rečima oni mogu da levitiraju. Očigledno, klopka ima smisla samo ako zarobljene čestice moguda se zapaze. U slučaju neutrona to se ostvaruje pomoću radio talasa koji se apsorbuju kada magnetni noment promeni smer u odnosu na primenjeno magnetno polje. Rezultat ovog eksperimenta je jednostavan: vek trajanja slobodnih neuttrona je 885,7(8) s. Bez obzira na to, svi sada znamo da unutar jezgara atoma od kojih smo načinjeni, neutroni se ne raspadnu tokom miliona godina, pošto proizvodi raspadanja ne dovode do stanja sa nižom energijom. (Zbog čega?) (***Izazov 124s***).

Snimci pomoću magnetne rezonanse isto tako pokazuju da većina elemenata ima različite vrste atoma. Takvi elementi imaju atome sa istim brojem protona, ali sa različitim brojevima neutrona. Kaže se za takvi elementi imaju više izotopa.[1] Ovi resultati pokazuju takođe zašto neki elementi zrače mešavinom različitih vremena raspada. Premda se izotopi (skoro) ne mogu razlikovati u hemijskom pogledu, oni su jako različiti po svojim nuklearnim svojstvima. Sveukupno, 118 poznatih elemenata ima preko 2000 izotopa. Oni su prikazani na ***slici 99***. (Izotopi bez elektrona, odnosno posebna atomska jezgra sa određenim brojem neutrona i protona nazivaju se ***nukleidi***.)



Slika 99 Svi poznati nukleidi sa njihovim vremenima trajanja (gore) i glavne vrste raspadanja (dole) Podaci su preuzeti sa veb strane www.nndc.bnl.gov/nudat2/

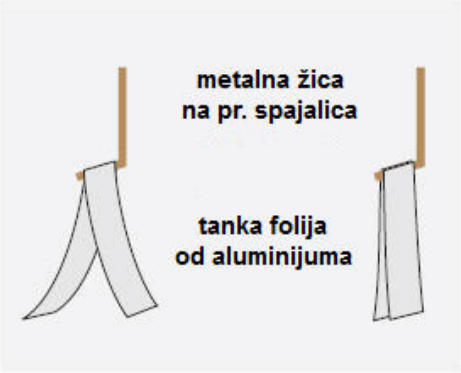
Pošto su atomska jezgra toliko izuzetne gustine uprkos tome što sadrže brojne pozitivno naelektrisane protone, mora da postoji sila koja ih drži zajedno nasuprot elektrostatičkom odbijanju. Videli smo da na tu silu ne utiču elektromagnetna ili gravitacijska polja; ona mora da je nešta posebno. Sila mora da bude kratkog dometa; inače jezgra nebi mogla da se raspadaju emitujući α zrake velike energije. Ta dodatna sila se naziva ***jaka nuklearna interakcija***. Uskoro će biti proučena detaljnije (***strana 163***).

[1] Ime proizilazi iz grčkih reči za "isto" i "mesto", pošto su atomi na istom mestu u periodičnoj tablici elemenata

Jaka nuklearna interakcija povezuje u jezgru protone i neutrone. Treba se u suštini podsetiti da unutar atomskog jezgra, protoni i neutroni – često imaju zajednički naziv nukleoni – pomeraju na sličan način kao što se elektroni pomeraju u atomima. To prikazuje ***slika 98***. Kretanje protona i neutrona unutar jezgra omogućava nam da razumemo oblik, spin i magnetni moment atomskog jezgra.

ATOMSKA JEZGRA MOGU DA SE KREĆU SAMA – KOSMIČKI ZRACI

U svakodnevnom životu atomska jezgra uglavnom su unutar atoma. Međutim, u nekim situacijama ona se kreću sama za sebe, bez elektronskog oblaka u okruženju. Prvi koji je otkrio takav primer bio je Radrford; on je oštroumnim eksperimentom pokazao da su α čestice koje emituje većina radioaktivnih supstanci ustvari atomska jezgra helijuma. Kao i sva atomska jezgra α čestice su male, tako da su prilično upotrebljive kao projektili.



slika 100 Elektroskop (ili elektrometar) i njegovo naelektrisano (sredina) i nenaelektrisano stanje (desno) (© Harald Chmela)

Slika 101 Viktor Hes (1883.-1964.)

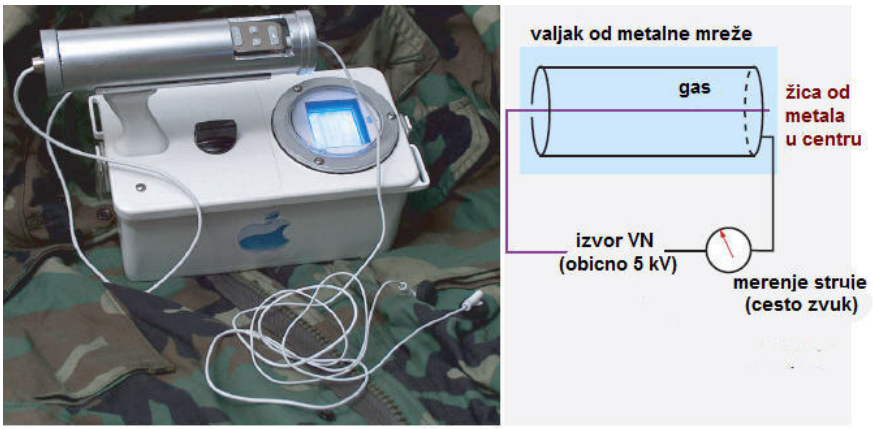
Tada je 1912. godine Viktor Hes (Viktor Heß)[1] načinio potpuno neočekivano otkriće. Njega su zainteresovali elektroskopi (poznati i kao elektrometri). To su najjednostavniji mogući detektori elektrčnog naboja. (***Vol. III, strana 24***). Uglavnom se sastoje od dve tanke metalne folije, kao što su trake aluminijumske folije iz pakovanja čokolade, koje vise obešene za metalnu žicu. Kada se elektroskop naelektriše, trake se međusobno odbijaju i rastave se, kao što je prikazano na ***slici 100***. (Možete i sami da napravite jedan ako prekrijete praznu čašu nekom providnom folijom kao što je celofan i obesite spajalicu za papir i trale aluminijumske folije. Možete elektroskop da naelektrišete pomoću gumenog balona i vunenog pulovera (***Izazov 125e***). Elektroskop meri prema tome električni naboj. Kao i mnogi pre njega, Hes je zapazio da naboj posle nekog vremena nestaje, čak i kada je elektroskop potpuno izolovan, Upitao se: zašto? Pažljivim proučavanjem otklanjao jedno po jedno objašnjenje. Hesu (i drugima) preostala je samo jedna mogućnost: naelektrisanje se možda gubi usled naelektrisanih zraka, kao što su oni pri nedavno otkrivenoj radioaktivnosti, emitovanih iz okruženja. Kako bi povećao rastojanje od okoline, Hes je izradio osetljiv elektrometar i sa njim je krenuo na let balonom.

Kao što je očekivao, let balonom je pokazao da se efekt pražnjenja smanjuje sa porastom visine, usled povećanog rastojanja od radioaktivnih supstanci na površini zemlje. Međutim, iznad oko 1000 m visine efekt pražnjenja se ponovo povećao i postajao je sve veći što je visina bila veća. Rizikujući zdravlje i život nastavio je da povećava visinu do više od 5000 m; tamo je pražnjenje bilo nekoliko puta brže nego li na površini Zemlje. Ovakav rezultat je tačno očekivan zbog zračenja koja dolazi iz spoljnog prostora i biva apsorbovana u atmosferi. U jednom od njegovih najvažnijih letova, izvedenog tokom (skoro potpunog) pomračenja Sunca, Hes je pokazao da većina ovih "visinskih zračenja" ne dolazi sa Sunca, već iz mnogo veće daljine. On je stoga ovo zračenje nazvao ***kosmički zraci***. Kaže se i ***kosmičko zračenje***. Tokom nekoliko poslednjih vekova puno ljudi je pilo iz čaše i jelo čokoladu zavijenu u aluminijumsku foliju;

[1] Viktor Franc Hes (Viktor Franz Heß, 1883.Waldstein – 1964. Mount Vernon), nuklearni fizičar, dobitnik je Nobelove nagrade za fiziku 1936. godine zbog otkrića kosmičkog zračenja. Bio je jedan od pionira istraživača radioaktivnosti. On je otkrio i takođe objasnio zbog čega je atmosfera uvek pomalo naelektrisana, rezultat koji je važan za stvaranje i ponašanje oblaka. Dvadeset godina posle otkrića kosmičkog zračenja, 1932. godine Karl Anderson (Crl Anderson) otkrio je u kosmičkom zračenju prvu antičesticu, pozitron; 1937. godine Set Nidernajer (Seth Needermeyer) i Karl Anderson otkrili su mion; 1947. godine tim pod vođstvom Sesila Pauela (Cecil Powel) otkrio je pion; 1951. godine otkriveni su Λ^0 i kaon K^0. U svim ovim otkrićima korišćeni su kosmički zraci i većina je dovela do Nobelove nagrade.

jedino je Hes ove dve aktivnosti kombinovao uz takvo pažljivo posmatranje i zaključivanje da je dobio zbog toga Nobelovu nagradu.[1]

Danas su uobičajeni detektori za otkrivanje kosmičkih zraka ***Gajger-Milerovi brojači*** i ***komore sa varničenjem***. Oba detektora dele isti princip; dovodi se visok napon između dva metalna dela (žica i cilindrična mrežica kod Gajger-Milerovog brojača, odnosno dve ploče u komori sa varničenjem) koja se nalaze u retkom i prigodno odabranom gasu. Kada jonizovane čestice velike energije prođu kroz brojač, proizvede se varnica, koja može ili da se opazi (kao što možete i sami da gledate u komori sa varničenjem u ulaznom hodniku u zgradu CERN) ili se otkrije iznenadnim protokom struje. Istorijski, struja je prvo pojačavana i prosleđena na zvučnik, tako da se čestica mogla čuti kao zvuk "klik". Ukratko, Gajgerovim brojačem čestice ili joni ne mogu da se vide, ali mogu da se čuju. Kasnije, uz razvoj elektronike, jonizovani atomi ili čestice mogle su i da se izbroje.



Slika 102 Gajger-Milerov brojač sa odvojenom cevi za detekciju, spojnim kablom sa elektonikom brojača i ugrađenim, samo kod ovog tipa, muzičkim uređajem (© Joseph Reinhardt)

Nalaženje prave mešavine gasova u Gajger-Milerovom brojaču je komplikovano; to je razlog što brojač ima dva imena u nazivu. Potreban je gas koji gasi varnicu posle izvesnog vremena kako bi detektor bio spreman za sledeću česticu. Miler je bio Gajgerov pomoćnik; on je usavršio brojač dodavanjem pravog procenta alkohola u gas koji je u komori. Zli jezici tvrde da je to otkriveno kada je drugi pomočnik bezuspešno pokušao da napravi brojač dok je Miler bio otsutan. Kada je Miler, za koga se predpostavljalo da je teška pijanica, vratio, sve je ponovo proradilo. Međutim, priča je izmišljotina. Danas se Gajger-Milerovi brojači koriste širom sveta radi otkrivanja radioaktivnosti; najmanja verzija može da stane u mobilni telefon i u unutrašnjost ručnog sata. Primer je prikazan na ***slici 102***.

Slika 103 Savremena komora sa varnicom pokazuje da kosmički zraci nepresrano stižu na Zemlju (Quick Time film © Wolfgang Rueckner, (film se može posmatrati preko sledeće veb strane: sciencedemonstrations.fas.harvard.edu/presentations/cosmic-ray-spark-chamber

[1] Ustvari, Hes je i svom elektrometru koristio foliju od zlata, a ne od aluminijuma.

Ako ikada možete da posmatrate komoru sa varniciom u radu, učinite to. Jedna je u CERN-u u ulaznom hodniku, veličine 0,5 m^3. nekoliko puta u toku jednog minuta nožete videti ružičastu varnicu koja pokazuje trag kosmičkih zraka. Zraci se pojavljuju u grupama, pod nazivom ***pljuskovi***. A oni nas pogađaju sve vreme.

Razni detektori čestica isto tako omogućavaju da se izmeri energija čestica. Energija čestice u kosmičkim zracima proteže se u opsegu od 10^3 eV pa sve do 10^{20} eV; poslednja vrednost jednaka je energiji teniske lopte posle serviranja, ali za samo jedan jon. To je ogroman opseg energije. Razumevanje porekla kosmičkog zračenja posebno je polje istraživanja. Neki kosmićki zraci imaju poreklo u galaksiji, a neki izvan galaksije. Za većinu energija ostaci supernove – pulsari i slično – izgleda da su najbolji kandidati. Međutim, izvor čestica sa najvećom energijom još uvek jenepoznat; crne rupe bi mogle da budu umešane u njihovo stvaranje.

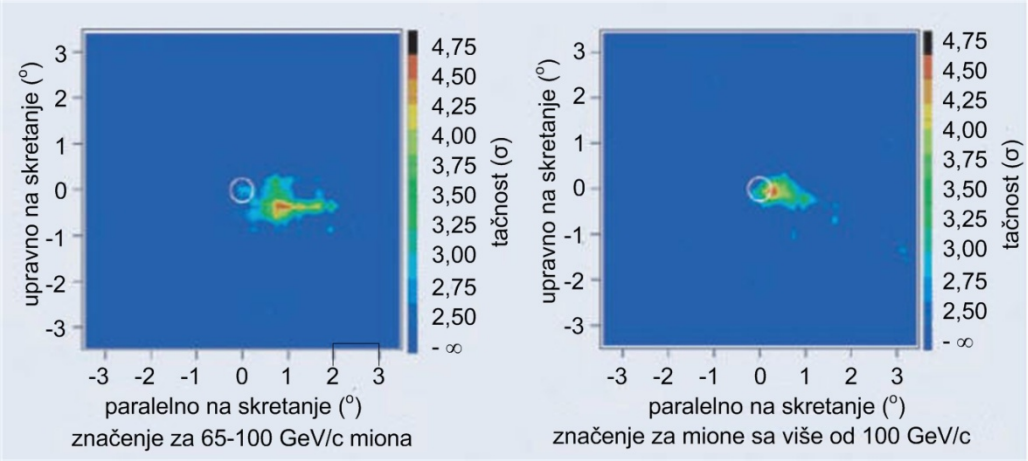
TABELA 13 Glavne vrste kosmičkog zračenja

Čestica	Energija	Poreklo	Detektor	Zaštita
Primarne čestice na velikoj visini				
Protoni 90%	10^9 do 10^{23} eV	zvezde, supernove, izvan galaktički, nepoznato	scintilator	u rudnicima
α zraci (9%)	tipično $5 \cdot 10^6$ eV	zvezde, galaksija	ZnS, brojači	1 mm svakog materijala
Ostali nukleoni kao što su: Le, Be, B, Fe (1%)	10^9 do 10^{19} eV	zvezde, nova	brojač, filmovi	1 mm svakog materijala
Neutrini	MeV, GeV	Sunce, zvezde	hlor, galijum, voda	nepotrebna
Elektroni (0,1%)	10^6 do $>10^{12}$ eV	ostaci supernove		
Gama zraci (10^{-6})	1 eV do 50 TeV	zvezde, pulsari, galaksija, van galaksije	poluprovodnički detektori	u rudnicima
Sekundarne čestice proizvedene u atmosferi, na površini mora				
Mioni	3 GeV, 150 /m^2s	protoni udaraju u atmosferu, stvaraju pione koji se raspadaju na mione	komora sa pomakom, komora sa mehurićima, scintilacija	15 m vode ili 2,5 m tla
Kiseonik, radioaktivni ugljenik i druga jezgra	različita	na primer, $n + {}^{16}O \rightarrow p + {}^{14}C$		tlo
Pozitroni	različita		brojači	tlo
Neutroni	različita	stvoreni reakcijom kada proton udari u jezgro ${}^{16}O$	brojači	tlo
Pioni	različita	stvoreni reakcijom kada proton udari u jezgro ${}^{16}O$	brojači	tlo
Osim ovih, postoje usporene primarne čestice zraka.				

Kosmički zraci su verovatno jedini tip zračenja otkriveni bez pomoći senki. Međutim, u međuvremenu pronađene su takve senke. U lepom eksperimentu izvedenom 1994. godine, izmerena je senka koju je bacio Mesec na kosmičke zrake velike energije (oko 10 TeV), što je prikazano na ***slici 104***. Kada je položaj senke upoređen sa stvarnim položajem Meseca, otkriven je pomak. I zaista, usled magnetnog polja Zemlje, očekivalo se da kosmički zraci senke Meseca budu pomereni ka zapadu za protone i istočno za antiprotone. Podaci su dosledni za odnos antiprotona u kosmičkim zracima između 0% i 30%. (***Ref. 157***). Proučavanjem položaja senke eksperiment je tako pokazao da su kosmički zraci velike energije uglavnom naelektrisani pozitivno, pa se stoga sastoje uglavnom od materije, a samo je mali deo, ako uopšte potoji, je antimaterija.

Detaljna posmatranja pokazuju da kosmički zraci stižu na površinu Zemlje kao mešavina više vrsti čestica kao što je prikazano u ***Tabeli 13***. Oni dolaze spolja u atmosferu kao mešavina više vrsti čestica u kojoj su protoni najveći deo, praćeni α česticama, jezgrima gvožđa i drugih. A kako je već ranije pomenuto, većina zraka ne potiče sa Sunca. Drugim rečima, jezgra mogu prema tome da putuju sama na velika rastojanja.

Ustvari, raspored upadnih smerova kosmičkih zraka pokazuje da je većina zraka poreklom izvan galaksije. Zapravo, tipična jezgra kosmičkog zračenja izbačena su sa zvezda i ubrzana eksplozijama supernove. Kada stignu do Zemlju ona stupaju u interakciju sa atmosferom pre no što dopru do površine Zemlje. Detaljan mehanizam ubrzavanja u nastanku kosmičkih zraka još uvek je tema istraživanja.



Slika 104 Senka Meseca na kosmičke zrake, opažen detektorom L3 u CERN. Senka je pomerena u odnosu na položaj Meseca, predstavljen belim krugom, pošto magnetno polje Zemlje odbija naelektrisane čestice od kojih su sastavljeni kosmički zraci (© CERN Courier)

Tok ***naelektrisanih*** kosmičkih zraka koji dopru do površine Zemlje zavisi od njihove energije. Pri malim energijama naelektrisani kosmički zraci pogađaju ljudsko telo mnogo puta u sekundi. Merenja isto tako pokazuju da zraci stižu u neredovnim grupama, zvanim ***pljuskovi***. Ustvari, tok ***neutrina*** je nekoliko redova veći od tokova naelektrisanih zraka, ali nema bilo kakav uticaj na ljudsko telo. (***Strana 190***).

Kosmički zraci imaju nekoliko efekata u svakodnevnom životu. (***Vol. III, strana 159***). Preko naelektrisanja koje proizvode u atmosferi, oni su verovatno odgovorni za početak i za razuđeno nepravolinijsko prostiranje svetlosti. (Svetlost napreduje u impulsima menjajući brzo prostiranje za oko 30 m sporim prostiranjem sve dok ne postigne povezanost. Pravci koje uzima na sporim mestima zavise od vetra i raspodele naelektrisanja u atmosferi.) Kosmički zraci su takođe važni pri stvaranju kišnih kapi i čestica leda unutar oblaka, pa stoga indirektno i naelektrisanje oblaka. Kosmički zraci, zajedno uz radioaktivnost sredine, pokreću takođe Kelvinov generator. (***Vol. III, strana 20***).

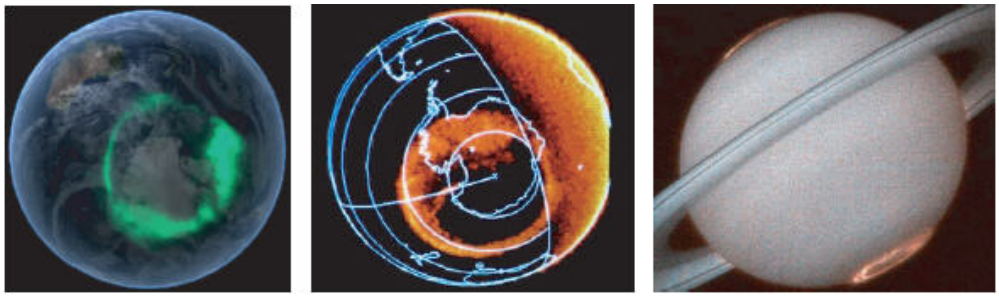
Slika 105 Polarna svetlost (Aurora borealis) na noćnom nebu usled naelektrisanih čestica (© Jan Curtis)

Kada nebi postojalo magnetno polje Zemlje, od kosmičkog zračenja moglo bismo da se razbolimo. Magnetno polje skreće većinu kosmičkih zraka u pravcu magnetnih polova. Isto tako gornji i donji slojevi atmosfere pomažu da se očuva život, tako što štiti od štetnih efekata kosmičkog zračenja. U stvari, piloti aviona i posada aviona izloženi su jakim zračenjima koje nije povoljno za njihovo zdravlje. Kosmički zraci su jedan od mnogih razloga što duga putovanja kroz svemir, kao štoje put do Marsa, nisu povoljni za ljude.

Kada su kosmonauti izloženi dugotrajnom zračenju, telo im oslabi i konačno umiru. Heroji svemira, uključujući one iz naučne fantastike, nebi mogli da opstanu mnogo duže od dve ili tri godine.

Isto tako kosmički zraci proizvode obojene bleskove u očima kosmonauta, koji redovno uživaju u ovim događanjima na svojim putovanjima. (A oni svi uzrokuju kataraktu kao posledicu.) Ali kosmički zraci nisu samo opasni i lepi. Oni su isto tako i korisni. Kada kosmički zraci nebi postojali isto tako ne bismo postojali ni mi. Kosmički zraci su odgovorni za mutaciju oblika života, pa su oni jedan od uzroka biološke evolucije. Premda se u današnje vreme ovaj efekt koristi na veštački način, stavljanjem ćelija u radioaktivno okruženje stvaraju se nove vrste. Na ovaj način rađanja redovno daju nove mutante.

Kosmički zraci ne mogu da se vide direktno, ali njihovi rođaci, "solarni" zraci mogu. Oni su najveličanstveniji kada dođu u velikom broju. U takvim slučajevima čestice su neopozivo savijene prema polovima usled magnetnog polja Zemlje i stvara se takozvana ***polarna svetlost*** – ***aurora borealis*** (na Severnom polu) ili ***aurora australis*** (na Južnom polu). Ona se polako pomera i zavese svetlosti različitih boja pripadaju najveličanstvenijim efektima koji se javljaju na noćnom nebu. (Videti ***sliku 105*** ili učitati film sa veb strane www.nasa.gov/mov/105423main_FUV_2005-01_v01.mov.) Vidljiva svetlost i rentgenovi zraci emituju se na visinama između 60 i 1000 km. Posmatrane iz svemira zavese polarne svetlosti obično obrazuju krugove prečnika nekoliko hiljada kilometara oko magnetnih polova. Polarne svetlosti mogu da se vide i u ostatku sunčevog sistema. Polarne svetlosti usled magnetnog polja jezgra bile su opažene na Jupiteru, Saturnu, Uranu, Neptunu, Zemlji Io i Ganimedu. Za primere pogledati ***sliku 106***. Polarne svetlosti usled drugih mehanizama viđene su na Veneri i Marsu.



Slika 106 Dve polarne svetlosti – aurora australis – na Zemlji, viđene iz svemira sa pojačanim UV intenzitetom i izgled u području rendgenovih zraka i dvostruka polarna svetlost na Saturnu (NASA)

Kosmički zraci su uglavnom slobodna jezgra. Tokom vremena, istraživaći su našli da se atomska jezgra bez oblaka elektrona pojavljuju i u drugim situacijama. Ustvari, ogromna većina atomskih jezgara u svemiru uopšte nema oblak elektrona: u unutrašnjosti zvezda atomska jezgra nisu okružena vezanim elektronima; slično tome, vekiki deo međugalaktičke materije načinjen je od protona. U današnje vrene je poznato da se većina materije u svemiru nalazi kao protoni ili α čestice unutar zvezda i kao retki gas između galaksija. Drugim rečima, nasuprot onome što su rekli stari Grci, materija nije obično sastavljena od atoma; većina je načinjena od golih atomskih jezgara. naše svakodnevno okruženje predstavlja izuzetak kada se posmatra u kosmičkim razmerama. U prirodi su elektroni retkost, uobičajena si gola jezgra atoma.

Uzgred, ne postoji način da se atomska jezgra primoraju da se kreću; jezgra mogu da se čuvaju skoro sasvim nepokretna. Postoje postupci – sada ih najčešće koriste grupe istraživača – da se preklope električno i magnetno polje na takav način da omogućavaju da usamljeno jezgro može da lebdi u vazduhu; ovu mogućnost smo razmatrali u predhodnom tekstu u odeljku o levitaciji. (***Vol. III, strana 164***).

NUKLEARNI RASPAD – VIŠE OD RADIOAKTIVNOSTI

Nisu sva atomska jetgra stabilna tokom vremena. Prvo merenje koje je dalo nagoveštaj bilo smanjenje radioaktivnosti sa vremenom. Opaženo je da broj N emitovanih zraka ***opada***. Još preciznije, radioaktivnost prati eksponencijalni raspad u vremnu t:

$$N(t) = N(0)e^{-\frac{t}{\tau}} \qquad (53)$$

Parametar τ, takozvano ***vreme trajanja*** ili ***vreme raspada***, zavisi od vrste atomskog jezgra koje emituje zrake. Vreme raspada može da se menja od manje od mikrosekunde do milion miliona godina. Izraz je bio proveren za više od 34 umnoška trajanja τ; njegova valjanost i preciznost utvrđeni su puten eksperimenata. Očigledno, obrazac (53) je približnost za veliki broj atoma, pošto predpostavlja da je $N(t)$ kontinualna promenljiva. Uprkos ovoj približnosti, izvođenje ovog obrasca iz kvantne teorije nije tako prost zadatak,

kao što smo videli u predhodnom tekstu. (***Strana 40***). Mada bi u načelu kvantni Zenonov efekt mogao da se pojavi za male vrednosti vremena *t*, za slučaj radioaktivnosti još uvek nije primećen. Umesto vremena raspada, često se koristi vreme poluraspada. ***Vreme poluraspada*** predstavlja vreme tokom kojeg radioaktivnost opadne na ***polovinu*** početne vrednosti. Možete li da zaključite u kakvoj su vezi ta dva vremena? (***Izazov 126s***).

Radioaktivnost je raspad nestabilnih atomskih jezgara. Pre svega, radioaktivnost nam omogućava da izbrojimo broj atoma u određenoj masi materijala. Zamislite da na početku eksperimenta imate izmerenu masu radioaktivnog materijala; odabrali ste element koji ima vreme trajanja oko jednog dana. Tada stavite materijal u scintilacionu kutiju. Posle nekoliko nedelja broj bleskova postaće toliko mali da možete da ih izbrojite; koristeći izraz (53) tada možete da odredite koliki je bio broj atoma u masi na početku. Prema tome, radioaktivnost nam dopušta da odredimo broj atoma, pa prema tome i njihov oblik, a osim toga i veličinu atomskog jezgra.

Eksponencijalni raspad (53) i oslobađanje energije svojstveno je metastabilnim sistemima. Raderford i Sodi (Soddy) su 1903. godine otkrili kakva su stanja male energije za α i β emitere. U takvim slučajevima radioaktivnost menja atom koji emituje; to je spontana transmutacija atoma. Atom koji emituje α i β zrake menja svoju hemijsku strukturu. Zato radioaktivnost podrazumeva, za slučaj atomskih jezgara, isti rezultat koji statistička mehanika gasova podrazumeva za slučaj atoma (***Vol. I, strana 290***): postoje kvantne čestice sa strukturom koja može vremenom da se menja.

- Pri ***α raspadu*** – ili ***alfa raspadu*** – radioaktivna jezgra emituju (dvostruko naelektrisana) jezgra atoma helijuma, koji se nazivaju ***α čestice***. Kinetička energija je tipično nekoliko MeV. Posle emisije je jezgro izmenjeno u jezgro elementa koji se nalazi u periodičnom sistemu elemenata dva meseca ispred; α raspad se događa uglavnom kod jezgara koja su bogata protonima. Primer α raspada je raspad ^{238}U izotopa uranijuma.
- Pri ***β raspadu*** – ili ***beta raspadu*** – neutron se pretvara u proton emitujući elektron – koji se naziva i ***β čestica*** – i antineutrino. Takođe i β raspad menja hemijsku prirodu elementa, ali mesto ostaje isto u periodičnom sistemu elemenata. Primeri β emitera su radioaktivni ugljenik ^{14}C, zatim ^{38}Cl i ^{137}Cs, izotopi koje izbacuju oštećeni atomski reaktori. Mi ćemo u daljem tekstu da istražimo β raspad detaljnije. (***Strana 179***). Posebna varijanta je β+ raspad, kod kojeg se proton pretvara u neutron i emituje neutrino i pozitron. To se događa kod atomskih jezgara bogatih protonima. Primer je ^{22}Na. Druga varijanta je vezivanje elektrona; atomsko jezgro ponekad zarobi elektron u orbiti, proton se pretvori u neutron i emituje se neutrino. To se događa kod ^{7}Be. Isto tako je vezan β raspad, koji se sreće kod ^{187}Re, varijanta β raspada.
- Pri ***γ raspadu*** – ili ***gama raspadu*** – atomsko jezgro se menja iz pobuđenog stanja u stanje manje energije tako što emituje proton velike energije, ili γ česticu. U takvom slučaju se ne menja hemijska priroda elementa. Tipične energije su u opsegu MeV. Usled velike energije γ zraci jonizuju materijal kojeg sretnu; pošto oni nisu naelektrisani, oni se ne apsorbuju dobro u materijalu i prodiru duboko u materijal. Zbog toga je γ zračenje daleko najopasniji oblik radioaktivnosti (iz okruženja). Primer γ raspaa je ^{99m}Tc. Varijanta γ raspada je ***izomerički prelazak***. Još jedna varijanta, ***unutrašnje pretvaranje***, zapaženo je, na primer, kod ^{137m}Ba.
- Pri emisiji neutrona atomsko jezgro emituje neutrone. Ovaj raspad se retko sreće na Zemlji, ali se javlja u zvezdanim eksplozijama. Većina emitovanih neutrona ima vreme poluraspada manje od nekoliko sekundi. Primeri emitera neutrona su ^{5}He i ^{17}N.
- Proces ***spontane fisije*** otkriven je 1940. godine. Proizvodi raspada su različiti, čak i kada je početno atomsko jezgro isto. Međutim ^{239}Pu i ^{235}U mogu da se raspadaju spontanom fisijom, premda uz malu verovatnoću.
- Pri ***emisiji protona*** atomska jezgra emituju protone. Ova vrsta raspada je srazmerno retka i javlja se samo za oko sto nukleida, na primer za ^{53m}Co i ^{4}Li. Prvi pomenut primer je bio otkriven tek 1970. godine. Oko godine 2000. bila je prvi put opažena simultana emisija dva protona.
- Godine 1984. otkrivena je ***grupna emisija*** ili ***emisija teških jona***. Mali deo atomskog jezgra Ra raspada se emitovanjem jezgara ^{14}C. Ovaj raspad se javlja za oko desetak nuklida. Takođe je opažena i emisija ^{18}O.

Poznato je takođe više kombinovanih i mešovitih raspada. (***Ref. 158***). Ove raspade proučavaju atomski fizičari. Radioaktivnost je uobičajen proces. Kao primer navedimo da se u ljudskom telu dešava svake

sekunde oko devet hiljada radioaktivnih raspada, pretežno 4,5 kBq (0,2 mSv/a) od ^{40}K i od ^{14}C 4 kBq (0,01 mSv/a). Zašto to nije opasno? (***Izazov 127s***).

Svaka rdioaktivnost je praćena emisijom energije. Energija koju jedan atom emituje putem radioaktivnog raspada ili nuklearne reakcije, po pravilu je milion puta veća od one koju emituje hemijskim procesima. Više od raspada, proces radioaktivnosti je prema tome mikroskopska eksplozija, Materijali koji su jako radioaktivni prema tome emituju ogromne količine energije, To je razlog opasnosti od nuklearnog oružja.

U čemu je razlika između atoma koji se raspadaju i onih koji se ne raspadaju? Zakon eksponencijalnog raspada podrazumeva da je verovatnoća raspada nezavisna od starosti atoma. (***Izazov 128e***). Starost ne ugra nikakvu ulogu. Isto tako znamo iz termodinamike da svi atomi imaju tačno ista svojstva. (***Vol. IV, strana 91***). Dakle kako se izdvaja atom koji se raspada? Trajalo je oko 30 godina da bi se otkrilo da su radioaktivni raspadi, kao i svi raspadi, kvantni efekti. Svi raspadi su pokrenuti statističkim kolebanjem vakuuma, ili još preciznije, kvantnim kolebanjem vakuuma. U stvari, radioaktivnost je bila jedno od jasnijih zapažanja za koje klasična fizika nijr dovoljna za opis prirode.

Radioaktivnost je, kao i svi raspadi, čist kvantni efekt. Samo krajnji kvant rada čini mogućim da sistem ostane neizmenjen sve dok se iznenada ne raspadne. U stvari, 1928. godine Georgij Gamov (Georgij Antonovič Gamov) objasnio je α raspad preko tunelskog efekta. On je našao da tunelski efekt objašnjava odnos između vremena trajanja i područja zraka, kao i izmerena kolebanja vremena trajanja – između 10 ns i 10^{17} godina – kao posledicu promenljivih potencijala koja treba savladati u različitim atomskim jezgrima.

RADIOMETRIJSKO DATIRANJE

Kao rezultat hemijskih efekata radioaktivnosti, odnos sastojaka izvesnog elementa u mineralima omogućava nam da odredimo ***starost*** minerala. Korišćenje radioaktivnog raspada za određivanje starosti uzorka naziva se radiometrijsko datiranje. Pomoću ove tehnike geolozi određuju starost planina, starost sedimenata i starost kontinenata. Oni određuju vreme kada su se kontinenti razdvojili, vreme kada su se stvorile planine pri sudaru kontinenata i vreme kada su obrazovane magmatske stene. Da li su to iznenađenja? Nisu. Vremena određena radiometrijskim datiranjem u saglasnosti su sa relativnom razmerom vremena koju su geolozi odredili nezavisno vekovima pre no što se pojavila ova tehnika. Radiometrijsko datiranje je potvrdilo ono što je bilo ranije zaključeno.

Slika 107 Savremeni spektometar mase akceleratorom za datiranje radioaktivnim ugljenikom u Akademiji nauka Mađarske (© HAS)

Radiometrijsko datiranje je posebna nauka. (***Ref. 160***) Pregled izotopa koji se koriste, zajedno sa njihovim posebnim primenama u određivanju datuma uzorka, naveden je u ***Tabeli 14***. (***Strana 138***). Tabela pokazuje kako tehnika radiometrijskog datiranja duboko zadire u astronomiju, geologiju, biologiju evolucije, arheologiju i istoriju. (I time se smanjuje broj zlonamernih uverenja.) (***Ref. 159***). Radioaktivno trajanje može obično da se izmeri do jedan ili dva procenta tačnosti, i poznato je eksperimentalno i teorijski da se ne menja u geološkim vremenskim razmerama. Kao rezultat toga, postupak radiometrijskog datiranja može

da bude iznenađujuće precizan. Možete li da zamislite kako izmeriti vremena poluraspada od miliona godina uz veliku preciznost? (***Izazov 129s***).

Radiometrijsko datiranje još više je uspešno na polju drevne istorije. Pomoću ***postupka datiranja radioaktivnim ugljenikom*** istoričari su odredili starost civilizacija i starost ljudskih umetničkih dela.[1] Mnogo pogrešnih uverenja bilo je razbijeno. U nekim takvim zajednicama uverenja šok još uvek nije prošao, iako je prošlo sto godina od kako su rezultati postali poznati. (***Ref. 159***).

Datiranje radioaktivnim ugljenikom koristi β raspad izotopa ugljenika ^{14}C, koji ima vreme raspada od 5730 godina. Ovaj izotop se neprestano stvara u atmosferi usled uticaja kosmičkog zračenja. To se događa preko reakcije $^{14}N+n \rightarrow p+^{14}C$. Kao rezultat toga, sadržaj radioaktivnog ugljenika relativno je nepromenljiv u vremenu. Unutar živih biljaka metabolizam stoga (nesvesno) održava istu koncentraciju. Kod mrtvih biljaka počinje raspad. Vrednost vremena trajanja od nekojiko hiljada godina posebno je korisna za datiranje istorijskih materijala. Prema tome, datiranje radioaktivnim ugljenikom koristilo se da bi se odredila starost mumija, starost preistorijskih alatki i starost religijskih relikvija. Izvorna verzija tehnike meriila je sadržaj radioaktivnoh ugljenika preko njegovog radioaktivnog raspada i scintilacija koje je stvarao. Kvalitetatan skok je postignut kada je spekrtoskopija mase u akceleratoru postala uobičajena. Nije više bilo potrebno da se čeka na raspad ako je bilo moguće da se sadržaj ^{14}C odredi neposredno. Kao rezultat, samo mala količina ugljenika, kao što je količina manja od 0,2 mg, potrebna je da bi se odredila starost precizno. Spektroskopija mase u ahceleratoru je pokazala da su brojni relikti religije falsifikati, kao što je slučaj sa Hristovim pokrovom u Torinu, a osim toga da su nekoliko njegovih čuvara lopovi.

TABELA 14 Glavni prirodno izotopi koji se koriste u radiometrijskom datiranju

Izotop	**Produkt raspada**	**Vreme poluraspada[1)]**	**Koristi se u postupku:**	**Primer**
^{147}Sm	^{143}Nd	106 Ga	samarijum – neodim	stene, mesečevo tlo, meteoriti
^{87}Rb	^{87}Sr	48,8 Ga	rubidijum – stroncijum	stene, mesečevo tlo, meteoriti
^{187}Re	^{187}Os	42 Ga	renijum – osmijum	stene, mesečevo tlo, meteoriti
^{176}Lu	^{176}Hf	37 Ga	lutecijum – hafnijum	stene, mesečevo tlo, meteoriti
^{40}K	^{40}Ar	1,25 Ga	kalijum – argon i argon – argon	stene, mesečevo tlo, meteoriti
^{40}K	^{40}Ca	1,25 Ga	kalijum – kalcijum	datiranje granita, neprecizno
^{232}Th	^{208}Pb	14 Ga	torijum – olovo i olovo – olovo	stene, mesečevo tlo, meteoriti
^{238}U	^{206}Pb	4,5 Ga	uranijum – olovo i olovo – olovo	stene, mesečevo tlo, meteoriti
^{235}U	^{207}Pb	0,7 Ga	uranijum – olovo i olovo – olovo	stene, mesečevo tlo, meteoriti
^{234}U	^{230}Th	248 ka	uranijum – torijum	korali, stalaktiti, kosti, zubi
^{230}Th	^{226}Ra	75,4 ka	torijum – radon	datiranje biljaka
^{26}Al	^{26}Mn	0,72 Ma	datiranje urušavanja supernove	provera da li se događa nukleosin-teza u galaksiji
^{10}Be	^{10}B	1,52 Ma	kosmogenička radiometrija	ledena jezgra
^{60}Fe	^{60}Ni	2,6 (ne 1,5) Ma	datiranje urušavanja supernove	kora u dubini mora
^{36}Cl	^{36}Ar	0,3 Ma	kosmogenička radiometrija	ledena jezgra
^{53}Mn	^{53}Cr	3,7 Ma	kosmogenička radiometrija	meteoriti, K/T veze
^{183}Hf	^{182}W	9 Ma	kosmogenička radiometrija	meteoriti, sedimenti
^{14}C	^{14}N	5730 a	kosmogenički radiougljenik	drvo, odeća, kosti, organski materi-jali,vino
^{137}Cs	^{137}Ba	30 a	brojanje γ – zraka	datiranje hrane i vina posle nuklear-nih incidenata
^{210}Ph		22 a	brojanje γ – zraka	datiranje vina
^{3}H	^{3}He	12,3 a	brojanje γ – zraka	datiranje vina

1) U koloni "vreme poluraspada" vreme je izraženo u godinama, tako da jedinica obeležena slovom *a* označava godine (od naziva za godinu na latinskom).

Istraživači su čak razvili poseban postupak koji koristi radioaktivnost za datiranje stenja. Uvek kada se emituju α zraci, atom koji ih je emitovao dobija trzaj. Ako je atom deo kristala, kristal se razori usled

1 Osnivač tehnike datiranja radioaktivnim ugljenikom, Vilard Libi (Willard Libby), dobio je 1960. godine Nobelovu nagradu za hemiju.

trzaja. U mnogim materijalima razaranje može da se vidi pod mikroskopom. Prebrojavanjem razorenih područja moguće je da se datira vreme u kojem se stena kristalizovala. Na taj način moguće je da se odredi kada je tečni materijal iz vulkanskih erupcija postao stena.

Nastajanjem radiometrijskog datiranja prvi put je postalo moguće da se pouzdano odredi starost stenja, da se uporedi sa starošću meteorita, a kada su svemirska putovanja ušla u modu, i sa starošću Meseca. Rezultat je bio iznad svih predhodnih procena i očekivanja: najstarije stene i najstariji meteoriti, nezavisno proučavani različitim postupcima datiranja, stari su 4570(50) miliona godina. (***Ref. 161***). Iz ovog podatka starost Zemje je procenjena da iznosi 454o(50) miliona godina. Zemlja je zaista ***stara***.

Ali ako je Zemlja toliko stara, zbog čega se u međuvremenu nije ohladilo njeno jezgro?

ZAŠTO JE U PAKLU VRUĆE?

Jezera lave koja se nalaze u vulkanima i njeni tokovi oko njih poreklo su slike koju su mnoge kulture pripisivale paklu: vatra i patnja. Zbog visoke temperature lave, pakao je nedvosmisleno opisivan kao vrelo mesto koje se nalazi u centru Zemlje. Upečatljivo mesto je vulkan Erta Ale, prikazan na ***slici 108***. Zašto je lava još uvek vrela i posle toiko miliona godina?

Slika 108 Jezero lave u vulkanu Erta Ale u Etiopiji (© Marco Fulle)

Jednostavni proračun pokazuje da ako je Zemlja u početku bila usijana lopta, ona je morala već odavno da se ohladi i da očvrsne. (***Izazov 130ny***). Zemlja bi trebalo da bude objekt u čvrstom stanju, kao što je Mesec: Zemlja nebi trebalo da sadrži bilo kakvu magmu niti da izbacuje lavu; pakao nebi bio vrelo mesto.

Rešenje ove zagonetke obezbeđuje radioaktivnost: centar Zemlje sadrži peć koja je napunjena sa procenjenih 8 do 10 TW radioaktivnog uranijuma ^{235}U i ^{238}U, sa 8 do 10 TW radioaktivnog torijuma ^{232}Th i sa oko 4 TW radioaktivnog kalijuma ^{40}K. (***Ref. 162***). Radioaktivnost ovih i u manjoj meri nekoliko ostalih elemenata održavaju usijano jezgro Zemlje. Još preciznija istraživanja koja su uzela u obzir vremena raspada i izmerene koncentracije naterijala (***strana 138***), pokazala su da taj mehanizam zaista objašnjava unutrašnju temperaturu Zemlje. (Osim toga, raspad radioaktivnog kalijuma poreklo je 1% argona koji se nalazi u atmosferi Zemlje.)

Ukratko, radioaktivnost održava temperaturu lave. Radioaktivnost je razlog što mi pakao opisujemo da je vreo. To nas dovodi do zagonetke: zašto radioaktivnost lave i Zemlje uglavnom nisu opasni po ljude? (***Izazov 131s***)

ATOMSKA JEZGRA MOGU DA STVARAJU KOMPOZITNE MATERIJALE

Atomska jezgra si veoma nestabilna ako sadrže više od oko 280 nukleona. Jezgra sa većim brojem nuleona neizostavno se raspadaju na manje delove. Ukratko, teška atomska jezgra su nestabilna. Međutim, kada je masa iznad 10^{57} nukleona, ona ponovo postaje stabilna: takvi sistemi se nazivaju ***neutronske zvezde***. To je najekstremniji primer čiste nuklearne materije u prirodi. Neutronske zvezde su ostatak eksplozija (tip II) supernova. U njima se ne događa nikada bilo kakva fuzija, kao u ostalim zvezdama; u najbjižem pojednostavljenju neutronske zvezde su prosto velika atomska jezgra.

Neutronske zvezde su načinjene od izobličene materije, Njihova gustina od 10^{18}kg/m^3 nekoliko puta veća od gustine atomskih jezgara, pošto gravitacija sabija zvezdu. Ovakva gustina znači da bi kafena kašičica takve zvezde imala masu od nekoliko stotina miliona tona. Neutronske zvezde imaju prečnik od oko 10

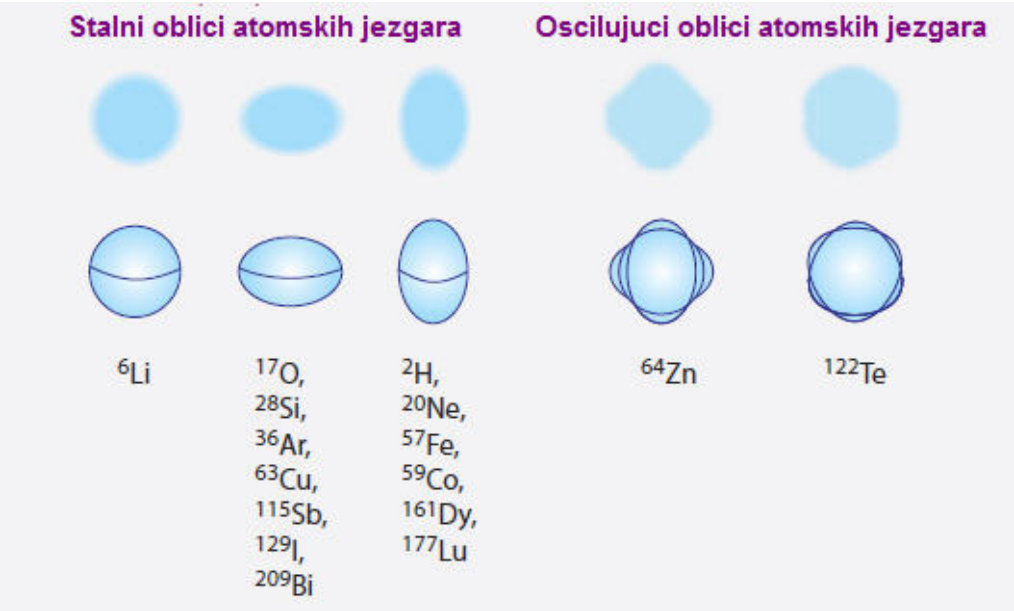
km. One nisu nikada mnogo manje, pošto bi takve manje zvezde bile nestabilne. One nisu nikada ni mnogo veće, pošto se veće neutronske zvezde pretvaraju u crne rupe.

ATOMSKA JEZGRA IMAJU BOJE I OBLIKE

U svakodnevmom životu boja predmeta određena je talasnom dužinom svetlosti koju taj predmet najmanje apsorbuje, ili ako svetli talasnom dužinom svetlosti koju emituje. Isto tako atomska jezgra mogu da apsorbuju fotone sa pogodno podešenom energijom i da pređu u pobuđeno stanje. U tom slučaju energija fotona pretvara se u veću energiju jednog ili više nukleona koji se vrtlože unutar jezgra atoma. Mnoga radioaktivna jezgra emituju takođe fotone velikih energija, koji se tada nazivaju γ zraci, u opsegu između 1 keV (ili 0,2 fJ) i više od 20 MeV (ili 3,3 pJ). Emisija γ zraka iz jezgra slična je emisiji svetlosti od elektrona u atomu. Iz energije, broja i vremena trajanja pobuđenog stanja – koje je u opsegu od 1 ps do 300 dana – istraživači mogu da odrede kako se nukleoni kreću unutar jezgra.

Ukratko, energije emitovanih i apsorbovanih fotona γ zraka određuju "boju" jezgra atoma. Spektar γ zraka može da se koristi, kao kod svih boja, da se načini razlka između jezgara i svega drugog da bi se proučavalo njihovo kretanje. Posebno, spektar γ zraka koji emituju pobuđena jezgra može da se koristiti za određivanje hemijskog sastava materije. Neke od ovih prelaznih linija su toliko uske da mogu da se koriste za proučavanje promena usled hemijskog okruženja jezgra, za merenje nuklearnih kretanja unutar čvrstih predmeta ili za otkrivanje gravitacijskog Doplerovog efekta.

Proučavanje γ zraka isto tako nam omogućava da odreimo ***oblik*** jezgra atoma. Većina jezgara je loptastog oblika, ali mnoga jezgra su produženi ili spljošteni elipsoidi. Elipsoidi imaju prednost ako je smanjenje prosečnog elektrostatičkog odbijanja veće od povečanja površinske energije. Sva jezgra – osim onih najlakših kao što su helijum, litijum i berilijum – imaju stalnu gustinu mase u svom centru, koja je data od oko 0,17 nukleona po fm^3 i debljinu omotača od oko 2,4 fm, u kojem se njihova gustina snanjuje. Atomska jezgra su prema tome mali oblaci, kao što je predstavljeno na ***slici 109***.



Slika 109 Različiti oblici atomskih jezgara – stalni, loptasti, spłošteni, produženi (levo) i oscilujući (desno), prikazani realistički kao oblaci (gore) i uprošćeno kao geometrijski oblaci (dole)

Znamo da molekuli mogu da budu izuzetno zapetljanih oblika. Nasuprot njima, atomska jezgra su uglavnom lopte, elipsoidi ili njihove male varijacije. Razlog je kratak domet, ili bolje, brz raspad nuklearnih interakcija u prostoru. Da bi se dobili zanimljivi oblici kao kod, molekula, potrebne su, osim najbližih susednih interakcija, takođe i sledeće susedne interakcije. Jaka nuklearna interakcija je isuviše kratkog dometa da bi to omogućila. Ili to čini? Možda će proučavanja u budućnosti da otkriju da neka jezgra imaju neobičan oblik, kao što su zarubljene piramide. Neka predviđanja su u tom, smeru načinjena; međutim, eksperimenti još uvek nisu bili izvedeni. (***Ref. 163***).

Oblik atomskih jezgara ne mora da bude nepromenljiv, jezgra mogu imati oblike koji ***osciluju***.Takve oscilacije su proučene veoma detaljno. Dva najjednostavnija slučaja, kvadripolna i oktopolna oscilacija, prikazana su na ***slici 109***. Osim toga, jezgra koja nisu oblika lopte takođe se obrću. Poznato je nekoiko

atomskih jezgara koja se obrću brzo, sa spinom do 60$\hbar$ i brže. Ona se obično usporavaju korak po korak, emitujući foton i smanjujući svoj moment količine kretanja. Nedavno je čak otkriveno da jezgra mogu da imaju i ispupčenja koja se obrću oko stalnog omotača, pomalo slično plimi koja se obrće oko Zemlje. (***Ref. 164***).

ČETIRI VRSTE KRETANJA U NUKLEARNOJ OBLASTI

Atomska jezgra su mala, jer su nuklearne interakcije kratkog dometa. Zbog ovog kratkog dometa, nuklearne interakcije igraju ulogu samo kod četiri vrste kretanja:

- ***rasipanje***,
- ***vezano kretanje***,
- ***raspad*** i
- ***nuklearna reakcija***, što je kombinacija sva tri kretanja.

Istorija nuklearne fizike je pokazala da ceo opseg opaženih fenomena može da se sažme u ova četiri osnovna procesa. Svaki od ovih procesa je vrsta kretanja. I u svakom procesu glavni interes je upoređivanje početne i krajnje situacije, situacije između od manjeg su značaja. U nuklearnim interakcijama stoga ne postoje složena kretanja koja karakterišu naš svakodnevni život. To je takođe i glavni razlog što je ovo poglavlje kratko.

Rasipanje se izvodi u svim eksperimentima sa ubrzivačima (akceleratorima). Takvi eksperimenti se ponavljaju za jezgra, što mi činimo kada posmatramo neki predmet. Posmatranje okom, ili gledanje nečeg, je eksperiment sa rasipanjem, pošto posmatranje okom predstavlja detekciju rasute svetlosti. Rasipanje rendgenovih zraka bilo je korišćeno da bi se videli atomi prvi put: rasipanje alfa čestica velike energije koristi se za otkrivanje i proučavanje atomskih jezgara u za proučavanje sastavnih delova protona.

Vezano kretanje je kretanje protona i neutrona unutar jezgra, ili kretanje kvarkova unutar mezona i bariona. Osim toga, vezano kretanje određuje oblik i promene oblika jedinjenja: hadrona i jezgara.

Raspad je očigledno osnova radioaktivnosti. Nuklearni raspad može da bude zbog elektromagnetne, jake ili slabe nuklearne interakcije.

Nuklearne reakcije su kombinacije rasipanja, raspada i verovatno vezanog kretanja. Nuklearne reakcije za jezgra su ono što se događa kada u svakodnevnom životu dodirnemo neki predmet. Dodirivanjem objekta možemo da ih razdvojimo, da ih polomimo, spojimo dva objekta lemljenjem, da ih bacimo i mnogo toga još. Isto to može da se učini i sa jezgrima atoma. Osim toga nuklearne reakcije su odgovorne za sagorevanje u Suncu i drugim zvezdama; one takođe pričaju istoriju atomskih jezgara u našim telima.

Kvantna teorija pokazuje da se sve četiri vrste nuklearnih kretanja mogu da se opišu na isti način. Svaka vrsta kretanja je ***razmena virtualnih čestica***. Na primer, rasipanje zbog odbijanja naelektrisanja je usled razmene virtualnih fotona, vezano kretanje unutar jezgra usled jake nuklearne interakcije je zbog razmene virtualnih gluona, β raspad je zbog razmene virtualnih W bozona, a reakcije neutrina su zbog razmene virtualnih Z bozona. U preostalom delu ovog poglavlja biće detaljnije objašnjeni ovi mehanizmi.

JEZGRA REAGUJU

Prvi čovek za kojeg se misli da je napravio transuranijumske elemente, genije fizike Enriko Fermi (Enrico Fermi), za svoje otkriće dobio je Nobelovu nagradu. (***Vol. IV, strana 93***). Nedugo zatim je Oto Han (Otto Hahn) i njegovi saradnici Liza Majtner (Lise Meitner) i Fric Štrasman (Fritz Strassmann) pokazali su da Fermi nije u pravu i da se njegova nagrada temelji na grešci. Fermiju je dozvoljeno da nagradu zadrži, a Nobelov komitet je takođe dodelio Nobelovu nagradu Hanu i Štrasmanu, a da bi stvar bila svima nejasna, posebno ženama fizičarkama, nagrada nije dodeljena Lizi Majtner. (Premda je posle njene smrti novi hemijski element nazvan po njoj.)

Kada se proton ili neutron upucaju u jezgra, oni obično ostanu zaglavljeni u njima i obično to dovodi do pretvaranja elementa u teži element. Pošto je to učinio sa svim elementima, Fermi je koristio uranijum; pošto ga je bombardovao neutronima našao je da se pojavio nov element i zaključio je da je stvorio transuranijumski element. Ali avaj, Han i njegovi saradnici našli su da je stvoren element bio dobro poznat; to je bio barijum, jezgro sa manje od polovine mase uranijumskog. Umesto da ostanu zaglavljeni kao kod

predhodnih 91 elementa, neutroni su pocepali jezgro uranijuma. Ukratko, Fermi, Han, Majtner i Štrasman su opazili reakciju kao što je;

$$^{235}\mathrm{U} + \mathrm{n} \rightarrow {}^{143}\mathrm{Ba} + {}^{90}\mathrm{Kr} + 3\mathrm{n} + 170\ \mathrm{MeV} \qquad (54)$$

Liza Majtner je ovaj proces cepanja nazvala ***nuklearna fisija***. Količina energije oslobođene u procesu fisije je neobično velika, milionima puta veća negi li u hemisjskoj interakciji atoma. Osim toga, emituje se nekoliko neutrona, koji mogu da dovedu do istog procesa; nuklearna fisija može prema tome da pokrene lančanu reakciju. Kasnije, a (normalno) protivno volji ovog tima, otkriće će biti upotrebljeno za stvaranje nuklearnih bombi.

Nuklearne reakcije se obično aktiviraju pomoću neutrona, protona, deuterona ili γ čestica. Osim aktiviranja fisije, neutroni se koriste za pretvaranje litijuma u tricijum koji se koristi kao (jedan tip) gorivo u reaktorima fuzije; a neutroni iz (sekundarnih) kosmičkih zraka proizvode radioaktivni ugljenik od azota u atmosferi. Deuteroni, koji oštećuju tricijum, proizvode helijum u reaktorima fuzije. Protoni mogu da aktiviraju pretvaranje litijuma u berilijum. Protoni mogu iz jezgra da izbace alfa čestice ili neurone.

Sve nuklearne reakcije i raspadi su pretvaranja (transformacije). Kod svakog pretvaranja, već su nas drevni Grci naučili da tražimo, pre svega, očuvanje energije. Pored već dobro poznatih slučajeva očuvanja veličina energije, količine kretanja, električnog naboja i momenta količine kreatanja, rezultati nuklearne fizike dodali su nekoliko novih. Ponašanje je prilično ograničeno. Kvantna teorija polja podrazumeva da se čestica i antičestica (obično označena gornjom crticom) moraju da se ponašaju na kompatibilne načine. I eksperimenti i kvantna teorija pokazuju da je svaka reakcija tipa

$$\mathrm{A} + \mathrm{B} \rightarrow \mathrm{C} + \mathrm{D} \qquad (55)$$

podrazumeva da reakcije

$$\mathrm{A} + \overline{\mathrm{C}} \rightarrow \overline{\mathrm{B}} + \mathrm{D} \qquad (56)$$

ili

$$\overline{\mathrm{C}} + \overline{\mathrm{D}} \rightarrow \overline{\mathrm{A}} + \overline{\mathrm{B}} \qquad (57)$$

ili, ako je energija dovoljna

$$\mathrm{A} \rightarrow \mathrm{C} + \mathrm{D} + \overline{\mathrm{B}} \qquad (58)$$

isto tako moguća. Čestice se prema tome ponašaju kao očuvani matematički subjekti.

Eksperimenti su pokazali da se antineutrini razlikuju od neutrina. Ustvari, sve reakcije potvrđuju da je takozvani ***leptonski broj*** očuvan u prirodi. Leptonski broj *L* je 0 za nukleone ili kvarkove, 1 za elektron i neutrino i -1 za pozitron i antineutrino.

Osim toga, u svim reakcijama očuvan je takozvani ***barionski broj***. Barionski broj B za protone i neutrine je 1 (i 1/3 za kvarkove), a -1 za antiprotone i antineutrine (pa stoga -1/3 za antikvarkove). Do sada nije opažen nijedan proces u kojem je prekršen barionski broj. Očuvanje barionskog broja jedan je od razloga zbog kojih su opasni radioaktivnost, fisija i fuzija. Pojam barionskog broja je uveo Ernst Štukelberg (Erns Stuckelberg, 1905, Basel – 1984 Geneva), značajan fizičar koji je uveo nekoliko drugih pojmova u fiziku čestica, uključujući Fajnmanov (Feynman) dijagram pre samog Fajnmana. Barionskom broju je promenjen naziv kada je Abraham Pajs (Abraham Pais, 1918. Amsterdam – 2000. Copenhagen) uveo pojmove “lepton” i “barion”.

BOMBE I NUKLEARNI REAKTORI

Fisiju urana aktivira neutron, oslobađajući energiju i stvarajući nekoliko dodatnih neutrona. Prema tome, fisija urana može da pokrene ***lančanu reakciju*** koja može da dovede ili do eksplozije ili do kontrolisanog stvaranja toplote. Nekada davno, sredinom dvadesetog veka, ove procese je proučavao priličan broj istraživača. Većinu njih je zanimala izrada oružja ili upotreba nuklearne energije uprkos velikoj ceni tih aktivnosti u odnosu na ekonomiju, zdravlje ljudi i zagađenje okoline.

Većina priča oko razvoja nuklearnog oružja skoro da je neverovatno besmislena. Prvo takvo oružje izrađeno je tokom Drugog svetskog rata, uz pomoć najpametnijih fizičara koji su mogli da se nađu. Sve je bilo spremno, uključujući najsloženije fizičke modele, nekoliko ogromnih fabrika i organizacije neverovatne veličine. Postojao je samo jedan mali problem: nije postojao uranijum zadovoljavajućeg kvaliteta.

Moćne Sjedinjene Američke Države obišle su ceo svet da bi kupile dobar uranijum. Njega su našli u (tadašnjoj) belgijskoj koloniji, Kongo, u centralnoj Africi. Ukratko, bez podrške Belgije, koja je Sjedinjenim Američkim Državamo prodala uranijum iz Konga, nebi postojala niklearna bomba, ni rani završetak rata, niti status supersile.

Kongo je platio visoku cenu ovog važnog statusa. Njime vlada dug lanac vojnih diktatora, sve do današnjih dana. Ali najveću cenu su platile države koje su zapravo izradile nuklearno naoružanje. Neke su bankrotirale, druge su ostale nerazvijene; čak i najbogatije zemlje nagomilale su ogromne dugove i veliko siromaštvo stanovništva. Ne postoje izuzeci. Cena nuklearnog oružja je da su neki delovi naše planete postali nenaseljivi, kao što su to brojna ostrva, pustinje, reke, jezera i morska okruženja. Međutim, moglo je da bude i gore. Kada je najzloglasniji fizičar ikad, Edvard Teler (Edward Teller) napravio prve proračune za hidrogensku bombu, predvideo je da bi bomba mogla da spali celu atmosferu. Dobitnik Nobelove nagrade Hans Bete (Hans Bethe)[1] ispravio je grešku i pokazao da se ništa te vrste neće dogoditi. Bez obzira na to, vojska je više volela da hidrogenska bomba eksplodira na ostrvu Bikini, najdaljem mestu od njihove domovine koje su mogli da nađu. (***Ref. 165***). Mesto je toliko radioaktivno još i danas, da je opasno čak da se prosto preleti iznad tog ostrva.

Slika 110 Razaranje nuklearnog reaktora 2011. godine u Fukušima, Japan, koje je načinilo nemogućim život na rastojanju 30 km od elektrane. (ljubaznošću Digital Globe)

Slika 111 Eksplozija nuklearne bombe: proveren način da se ubije puno dece u državi gde je eksplodirala i da uništi ekonomsku budućnost puno dece u državi gde je napravljena.

[1] Hans Bete (Hans Bethe, 1906. Strasbourg - 2005. Ithaca, New York) bio je jedan od velikih fizičara dvadesetog veka, iako je bio šef odeljenja za teoriju koja je dovela do izrade prve atomske bombe. On je radio na nuklearnoj fizici i astrofizici, pomogao je Ričardu Fajnmanu u razvoju kvantne elektrodinamike i radio na fizici čvrstih tela. Kada je ostario i postao mudriji, postao je veliki zagovornik kontrole naoružanja, takođe je bio nezaobilazan u uveravanju sveta da se prekinu nuklearne eksplozije u atmosferi, te je spasao mnoge ljude od karcinomskih oboljevanja.

Zapaženo je da probe nuklearnih eksplozija povećavaju radioaktivnost okoline u atmosferi širom celog sveta. Od proizvedenih radioaktivnih elemenata ^{3}H ljudi apsorbuju putem pijaće vode, ^{14}C i ^{90}Sr putem hrane, a ^{137}Cs na oba načina. Srećom, u međuvremenu, sve zemlje su se saglasile da svoje nuklearne probe izvode pod zemljom. Radioaktivnost je opasna po čovečanstvo, pošto ona ometa procese unutar živih ćelija. Detalje na koji način se radioaktivnost meri i kakve uticaje ima na zdravlje, dati su u tekstu koji sledi (***strana 146***).

Nisu samo opasne nuklearne bombe i mirnodopski nuklearni reaktori. Razlog su našli 1934. godine Frederik Žolio (Frederic Joliot) i njegova supruga Irena, čerka Pjera i Marije Kiri (Curie): to je ***veštačka radioaktivnost***. Supružnici Žolio-Kiri otkrili su da materijali koji su ozračeni α zracima postaju i sami radioaktivni. Oni su našli da α zraci pretvaraju aluminijum u radioaktivni fosfor.

$$ {}^{27}_{13}\mathrm{Al} + {}^{4}_{2}\alpha \rightarrow {}^{30}_{15}\mathrm{P} + {}^{30}_{15}\mathrm{n} \qquad (59) $$

Ustvari, skoro svi materijali postaju radioaktivni kada se ozrače alfa česticama, neutronima ili γ zracima. Kao rezultat, sama radioaktivnost može da bude čuvana samo uz teškoće. Zapravo posle nekog vremena, koje zavisi od materijala i zračenja, svaka posuda koja sadrži radioaktivni materijal i sama postaje radioaktivna. “Zaraza” prestaje samo za male količine radioaktivnog materijala.

Opasnosti od prirodne i veštačke radioaktivnosti razlozi su visokih troškova nuklearnih reaktora. Posle oko tridesetak godina rada, reaktori moraju da se demontiraju. Radioaktivni delovi moraju da se uskladište na posebno odabranim, nepristupačnim mestima, a istovremeno zdravlje radnika ne sme da se dovede u opsnost. Širom sveta mnogo reaktora sada mora da se demontira. Kompanije koje izvode radove prodaju usluge po visokim cenama. Sve posluju u oblasti bliskoj granici kriminalnih radnji, a pošto radioaktivnost ne može da bude otkrivena ljudskim čulima, mnoge kompanije tu granicu prelaze.

Ustvari samo jedan važan nuklearni reaktor (obično) nije opasan po čovečanstvo: Sunce. Uskoro ćemo da ga istražimo. (***Strana 151***)

ZANIMLJIVOSTI I IZAZOVI O JEZGRIMA I RADIOAKTIVNOSTI

U današnje vreme nuklearna magnetna rezonansa koristi se takođe za proveru kvaliteta hrane. Na primer, savremeni uređaji mogu da otkriju da li sok od pomorandže sadrži i sokove od drugog voća i da li je voće bilo zrelo kada je sok ceđen. Drugi uređaji mogu da provere da li je vino napravljeno od odgovarajućeg grožđa i kolika mu je starost.

Slika 112 Uređaj za proveru kvaliteta voća pomoću nuklearne magnetne rezonanse (© Bruker)

* * *

Uređaji za magnetnu rezonansu ne predstavljaju opasnost; međutim, imaju neke biološke efekte, kako objašnjava Peter Mensfild (Peter Mansfield), jedan od izumitelja ove tehnike. (***Ref. 170***). Prvi efekt nastaje

usled provodnosti krvi. Kada krv u aorti prođe kroz magnetno polje, indukuje de napon. Ovaj efekt je izmeren i on može da stupi u interferencu sa funkcionisanjem srca pri jačini od 7 T; uobičajeni uređaji rade sa 1,5 T, tako da ne predstavljaju rizik. Drugi efekt je usled promena magnetnog polja. Neke osobe osećaju promene u grudnom košu i u ramenima. Još nisu dovoljno poznati detalji takvih nadražaja nerava.

* * *

Količina radioaktivnog zračenja naziva se ***doza***. Jedinica za radioaktivnu dozu je ***grej (Gy)***: to je količina radioaktivnosti koja unosi energiju od 1 J u 1 kg materije: 1 Gy = 1 J/kg. ***Sivert***, ili 1 Sv je ekvivalent radioaktivne doze; prilagođen je ljudima ponderisanjem svake vrste ljudskih tkiva sa faktorom koji predstavlja uticaj unošenja zračenja na njega. Tri do pet siverta su smrtonosna doza za ljude. Za poređenje, prirodna radioaktivnost prisutna u ljudskom telu dovodi do doze os 0,2 mSv godišnje. Prosečan rentgenski snimak podrazumeva ozračivanje od 1 mSv; snimanje CAT (kompjuterska aksijalna tomografija) 8 mSv. (***Ref. 166***). Za ostale prinere merenja pogledati ***Tabelu 15***.

TABELA 15 Neke izmerene radioaktivnosti

Materijal	**Aktivnost** (Bq/kg)
Vazduh	oko 10^{-2}
Morska voda	10^{3}
Ljudsko telo	oko 10^{3}
Kravlje mleko	max. 10^{3}
Čist metal ^{238}U	oko 10^{7}
Najveći radiaktivni α emiteri	> 10^{7}
Radioaktivni ugljenik ^{14}C (β emiter)	10^{8}
Najveći radioaktivni β i γ emiteri	> 10^{9}
Glavni nuklearni otpadi: ^{137}Cs, ^{90}Sr (α emiter)	$2\cdot10^{9}$
Polonijum, najradioaktivniji materijal (α emiter)	10^{24}

Količina radioaktivnog materijala meri se brojem nuklearnih raspada u sekundi. Jedan raspad u sekundi naziva se jedan bekerel, ili 1 Bq. Telo odraslog čoveka tipično sadrži 9 Bq, evropsko ograničenje za hranu godine 2011. kreće se između 370 i 600 Bq/kg. Količina zračenja oslobođena bombom bačenom na Hirošimu procenjeno je da je bila između 4 PBq i 60 PBq, količina oslobođena razaranjem Černobilja bila je između 2 i 12 Ebq, prema tome između 200 i 500 puta veća. Brojke raznih radioaktivnih nesreća u Rusiji tokom 1960-ih i 1870-ih je slične veličine. Oslobađanje radioaktivnosti pri razaranju reaktora u Fukušimi, u martu 2011, procenjeno je da se kretalo između 370 do 639 PBq, što bi bilo kao da je palo negde između 10 i 90 bombi bačenih na Hirošimu.

SI jedinice za radioaktivnost sada su zajedničke širom sveta; u stara vremena 1 sivert se nazivao 100 rem (Röntgen equivalent man); SI jedinica za dozu, 1 grej (1 gray) zamenila je jedinicu koja se nekada nazivala 100 rd ili Rad. SI jedinica za izloženost 1C/kg zamenila je staru jedinicu "röntgen", preko odnosa 1 R = $2{,}58\cdot10^{-4}$ C/kg. Si jedinica bekerel (Bq) zamenila je jednicu kiri (Ci) da 1 Ci = 37 GBq.

* * *

Nisu svi γ zraci potekli od radioaktivnosti. Godine 2000. grupa italijanskih istraživača otkrila je da grmljavine takođe emituju γ zrake sa energijom do 10 MeV. (***Ref. 167***). Mehanizmi se još uvek istražuju; izgleda da su oni povezani sa procesom stvaranja munje.

* * *

Lančane reakcije su sasvim uobičajene u prirodi i nisu ograničene samo na nuklearnu oblast. ***Vatra*** je hemijska lančana reakcija, kao i eksplozije vatrometa. U oba slučaja materijalu je potrebna toplota da bi goreo; ova toplota se dobija iz susedne oblasti koja već gori.

* * *

Radioaktivnost može da bude izuzetno opasna po ljude. Najbolji primer za to je plutonijum. Dovoljan je samo 1 μg ovog α emitera u ljudskom telu da bi izazvao rak pluća. Drugi primer je polonijum. Polonijum 210 koji je prisutan u listovima duvana koji su rasli uz veštačko đubrivo. Osim toga, listovi duvana filtriraju druge radioaktivne supstance iz vazduha. Polonijum, olovo, kalijum i drugi radioaktivna jezgra koja se nalaze u duvanu, glavni su razlog što pušenje stvara rak. ***Tabela 16*** pokazuje da je doza znatna i da je to daleko najveća doza apsorbovana u svakodnevnom životu.

TABELA 16 Izloženost ljudi radioaktivnosti i odgovarajuće doze

Izloženost	**Doza**
Dnevna izloženost osobe	
na površini mora	0,3 mSv/a
na visini od 3 km	1,2 mSv/g
Srednja i maksimalna izloženost od tla, ne uzimajući u obzir efekte radona	0.4 mSv/a (2 mSv/a)
Srednje i maksimalno udisanje radona	1 mSv/a (100 mSv/a
Srednja i izloženost usled unutrašnjih radionukleida	0,3 mSv/a
prirodni sadržaj ^{40}K u mišićima ljudi	10^{-4} Gy i 1000 Bq
prirodni sadržaj Ra u kostima ljudi	$2 \cdot 10^{-5}$ Gy i 4000 Bq
prirodni sadržaj 14C u ljudima	
Uobičajene situacije	
Snimanje zuba rentgen aparatom	oko 10 mSv ekvivalentna zoza
Snimanje pluća rentgen aparatom	oko 0,5 mSv ekvivakentna doza
Kratak jednočasovni let (videti www.gsf.de/epcard)	oko 1μSv
Prekookeanski let	oko 0,04 mSv
Maksimalno dopuštena doza na poslu	30 mSv/a
Pušenje 60 kom. cigareta na dan	26 do 120 mSv/a
Smrtne izloženosti	
Jonizacija	0,05 C/kg može da bude snrtna doza
Doza	100 Gy = 100 J7kg je smrtno za 2 do 5 dana
Ekvivalentna doza	više od 3 Sv uzrokuje smrt kod 50% nelečenih pacijenata

* * *

Zbog čega je nuklearna elektrana opasan poduhvat? Najbolji dokaz je jezero Karačaj u blizini mesta Majak, na Uralu, Rusija. U kraćem vremenu od jedne decnije nuklearna elektrana u toj oblasti pretvorila se u mesto najveće radioaktivnosti na Zemlji. Tokom 1970-ih godina šetnja obalom jezera sigurno je dovodila do smrti. Radioaktivni materijal u jezeru rasprostranio se po velikom području u nekoliko katastrofalnih eksplozija tokom 1950-ih i 1960-ih godina, prouzrokujući rasprostranjene smrtne slučajeve i bolesti. Nekoliko ovih događaja bili su upoređeni sa događajem u Černobilju 1986. godine; oni su držani u tajnosti. Danas je, nasuprot ***slici 113***, jezero delimično napunjeno betonom – ali nije njime pokriveno – kako se često misli. (***Ref. 168***)

Slika 113 Datirana slika jezera Karačaj i nuklearna elektrana koja ga je napunila radioaktivnom supstancom (© Unknown)

* * *

Sve olovo je pomalo radioaktivno, pošto sadrži izotop ^{210}Pb, emiter β zračenja. Ovaj izotop olova je proizvod uranijuma i torijuma koji se nalazi u stenama iz kojih je izdvojeno olovo. Za osetljive eksperimente, kakvi su eksperimenti sa neutrinima, potrebni su štitovi od radioaktivnosti. Najboji materijal za štit je olovo, međutim očigledno ono mora da bude sa niskim nivooma radioaktivnosti. Pošto izotop ^{210}Pb ima vreme poluraspada 22 godine, jedini način da se to postigne je sa se korisri ***staro*** olovo. U preciznom eksperimentu sa neutrinima u Gran Saso, Italija, istraživaći su koristili olovo izvađeno iz rudnika tokom vremena Starog Rima, prema tome starog 2000 godina, kako bi smanjili lažne signale.

* * *

Nisu sve nuklearne reaktore napravili ljudi. Postojanje ***prirodnih*** nuklearnih reaktora predvideo je 1956. godine Pol Kuroda (Paul Kuroda). Prvi takav primer pronađen je 1972. godine. U mestu Oklo, u afričkoj državi Gabon, postoji poznati geološki sastav u kojem je uranijum toliko prisutan da je pre oko milion godina bio spontano obrazovan ***prirodni*** nuklearni reaktor – premda veoma mali, sa procenjenom proizvodnjom snage od 100 kW. On gori već preko 150.000 godina, tokom kojeg vremena procenat uranijuma 235 je bio 3% ili veći, što je potrebno za lančanu reakciju. (U dananje vreme koncentracija urana na Zemlji je 0,7%.) Voda u obližnjoj reci periodično se zagreje do isparavanja tokom procenjenih 30 minuta; potom se reaktor ponovo ohladi tokom procenjenih 2,5 časa, pošto je voda neophodna za usporavanje neutrona i održavanje lančane reakcije. Sistem je proučen veoma detaljno, od njegove geološke istorije pa do iskaza o stalnosti "zakona" prirode. Proučavanja su pokazala da je i pre 2000 godina mehanizam bio isti kakav se koristi danas.

* * *

Nuklearni reaktori postoje u više veličina. Oni najveći se korise u nuklearnim elektranama i mogu da daju električnu snagu od preko 1000 MW; najmanji se koriste na satelitima i obično proizvode oko 10 kW. Svi rade bez dopunjavanja gorivom od jedne do trideset godina.

* * *

Radiaoktivnost takođe koristi forenzika. Na mnogim površinama teško je da se otisci prstiju načine vidljivim. Jedan način da se objekt o kome se radi stavi u atmosferu radioaktivnog joda ili radioaktivnog sumpordioksida. Gasovi reaguju sa sastojcima u otisku prsta. Tako otisci prsta postaju radioaktivni, Posmatranjem scintilacionih signala otiska – postupak koji se naziva ***autoradiografija*** – moguće je snimanje otiska prsta jednostavnim stavljanjem fotografskog filma ili pogodnog detektora preko objekta koji se obrađuje.

* * *

Nasuprot česticama sa masom, čestice bez mase uopšte ne mogu da se raspadaju. Postoji prost razlog za to: čestice bez mase ne doživljavaju vreme, pošto je njihova putanja "nula". Čestice koje ne doživljavaju vreme ne mogu da imaju vreme poluraspada. (Možete li da nađete drugi dokaz?) (***Izazov 132s***).

* * *

Radijacija velike energije je opasna po ljude. U 1950-im godinama, kada je najveća vojska na svetu nuklearne probe još izvodila iznad zemlje, generali su zanemarili naređenja doktora medicine. Oni su postavili više vojnika u blizinu da bi posmatrali eksploziju, a što je gore, čak i naredili da oni odu do mesta eksplozije što je moguće pre posle eksplozije. Nije potrebno da se komentarišu naredbe ovih generala. Mnogi od ovih nesretnih vojnika zapazilo je nešta čudno: za vreme bleska eksplozije oni su mogli da vide kosti u sopstvenim šakama i rukama. Kako je to bilo moguće? (***Izazov 133s***).

* * *

Godine 1958. velika grupa kriminalaca napravila je šest nuklarnih bombi da bi eksplodirale u stratosferi. Suparnička grupa kriminalaca izvela je slične eksperimente 1961. godine, što je bilo praćeno još većim eksplozijama obe grupe 1962. godine. (Za izveštaj i filmove pogledati veb stranu en.wikipedia.org/wiki/High_altitude_nuclear_explosion.) Kao rezultat većine ovih eksplozija aktivirana je ***veštačka aurora*** tokom noći koja je sledila svaku od njih. Osim toga, elektromagnetni impulsi eksplozija uništili su satelite, razorile elektroniku na Zemlji, ometali radio komunikacije, povredili ljude na površini Zemlje, izazvali probleme kod elektrana i rasporedile velike količine radioaktivnog materijala iznad Zemlje – tokom najmanje 14 godina posle eksplozija. Van Alenov pojas radijacije koji okružuje Zemlju bio je pod velikim uticajem: očekivalo se da će se donji Van Alenov pojas povratiti od eksplozija tek za nekoliko stotina godina. Na sreču za ljudsku rasu, posle 1962. godine ove kriminalne aktivnosti su prekinute međunarodnim sporazumima.

* * *

Nuklearne bombe su užasno oružje. Da bi se iskusila njihova štetnost, ali takođe i kriminalna dela mnogih vojnih lica tokom proba, moramo da pogledamo slike eksplozija. (***Ref. 169***). U godinama posle 1950. i 1960. godine, nuklearne probe su vršili generali koji su odbijali sa čuju doktore i naučnike, Generali su naređivali da se eksplozije ovog oružja vrše u vazduhu, čineći da cela atmosfera na svetu bude radioaktivna, povređujći celokupno čovečanstvo čineći to; još gore, oni su čak obavezali vojnike da posete mesto radioaktivne eksplozije nekoliko minuta po eksploziji, čime su uradili najbolje da osiguraju smrt svojih vojnika od raka ii leukemije. Generali su ljudi koje treba izbegavati.

* * *

Nekoliko postupaka datiranja pomoću radioaktivnosti koriste za određivanje starosti vina, a još više ih je u razvoju. Nekoliko se nalazi u ***Tabeli 14***. (***Strana 138***).

* * *

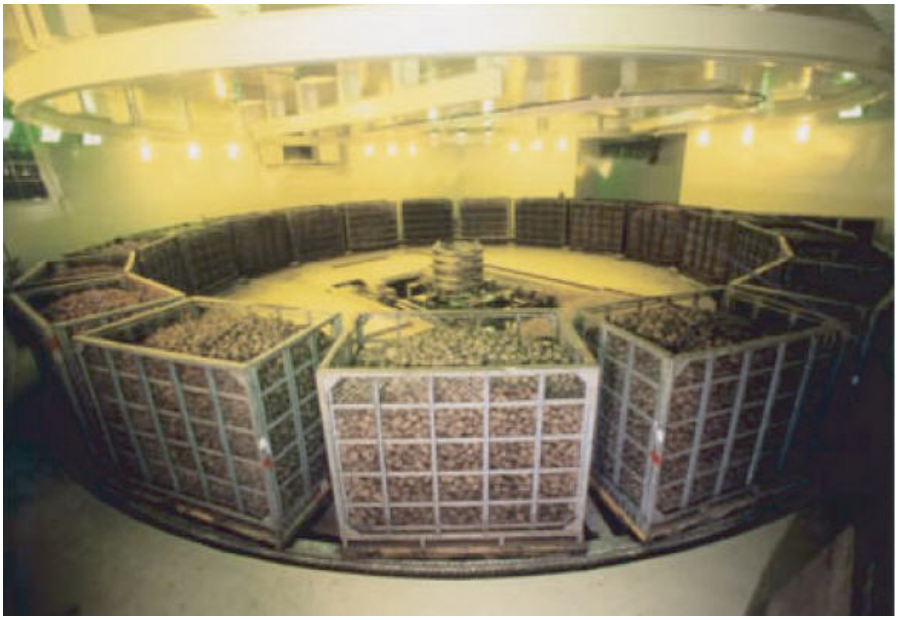
Nekoliko retkih radioaktivnih raspada može da se promeni spoljnim uticajem. Zarobljavanje elektrona, što je zapaženo kod berilijuma-7, jedan je od retkih primera u kojem vreme raspada može da se menja za do 1,5% u zavisnosti od hemijskog okruženja. Nađeno je da se vreme raspada istog izotopa menja za deo procenta pod pritiskom od 27 Gpa. S druge strane za ove efekte je predpostavljeno (i izmereno) da su zanemarljivi za jezgra veće mase. (***Ref. 158***). Još nekoliko nukleida pokazuju sličan, ali manji efekt. Najinteresntniji efekt na jezgra je laserom pokrenuta fisija ^{238}U, kojs se javlja pri velikim jačinama lasera. (***strana 192***).

* * *

I γ zračenje i zračenje neutrona mogu da se iskoriste za snimanje predmeta bez njihovog razaranja. Za snimanje unutrašnjosti Tutankamonove maske korišćeni su γ zraci. Zračenje neutrona, koje prodire dublje u metale istom lakoćom kao u druge materijalle, korišćeno je za snimanje, čak i pri filmskoj brzini, za snimanje procesa u automobilskom motoru.

* * *

U nekim zemljama Azije γ zraci se koriste za ozračivanje hrane. To je u ostalim državama, kao što je Nemačka, zabranjeno. Na primer, γ zraci se koriste za ozračivaje krompira, kako bi se sprečilo klijanje. Primer je prikazan na ***slici 114***. Bolje je da tamo niste zaposleni. Ustvari, u više od 30 zemalja dozvoljeno je u industriji hrane da se hrana ozračuje. Na primer, skoro svi začini na svetu obrađeni su γ zracima, da bi se produžilo njihovo trajanje na policama. Međutim, kupci su vrlo retko obavešteni o toj vrsti obrade.



Slika 114 Krompir će biti ozračen u Shihorocho Agricultural Cooperative Isotope Irradiation Center u Japanu. Prijatno!

* * *

U više velikih fabrika širom sveta β zraci sa 10 MeV i γ zraci koriste se za sterilizaciju medicinske opreme, medicinskih uređaja, igračaka, nameštaja i takođe da ubiju gljivice u knjigama i hrani za životinje. (Radi primera, pogledajte veb stranu www.bgs.eu.)

* * *

Neradiaktivni izotopi ^{2}H – često prosto napisan D – i ^{18}O mogu da se koriste za merenje energije koja se oslobađa u ljudima na jedan lak način. Dajte osobi da popije čašu dvostruko označene vode[1] i prikupljajte nekoliko sedmica uzorke urina. Korišćenjem masenog spektografa može da se odredi njihova potrošnja energije. Zašto? Dvostruko označena voda $^{2}H_2{}^{18}O$ proizvodi se u organizmu na tri glavna načina. Izotop kiseonika izdiše se u vidu $C^{18}O_2$ ili se izbacuje kao $H_2{}^{18}O$; izotop vodonika se izbacuje kao $^{2}H_2O$. Merenje u urinu omogućava da se odredi proizvodnja ugljendioksida,, pa prema tome i da se odredi koliko je hrane učestvovalo u metabolizmu, te tako da se odredi proizvodnja energije.

Potrošnja energije kod ljudi obično se daje u džulima po danu. Merenja su pokazala da su alpinisti sa 20.000 kJ/dan i biciklisti sa 30.000 kJ/dan najekstremniji sportisti. Prosečna proizvodnja energije ljudi iznosi 6000 kJ/dan

* * *

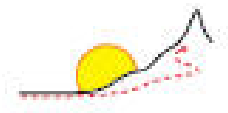
Procenat prisutnosti izotopa ^{18}O u vodama svetskih okeana može da se iskoristi da bi se zaključilo odakle je došla voda. O tome je bilo reči i prvom delu naše pustolovine. (***Vol. I, strana 265***).

* * *

Oblik mnogih atomskih jezgara oscilira. Proračunavanje oscilacija ovih oblika poseban je predmet proučavanja. Na primer, kada osciluje loptasto jezgro, ono može to da čini u tri uzajamno ortogonalne ose. Kada osciluje malim amplitudama loptasto atomsko jezgro se ponaša kao trodimenzionalni harmonijski oscilator. Zanimljivo je da je simetrija SU(3) trodimenzionalnog harmonijskog oscilatora ista simetrija koja karakteriše jaku nuklearnu interakciju. Međurim, te dve simetrije nisu u vezi – bar prema sadašnjim saznanjima. (***Vol. VI, strana 205***).

ZAKLJUČAK O ATOMSKIM JEZGRIMA

Atomska jezgra su sastavljena od protona i neutrona. Njihov prečnik je između jednog i nekoliko femtometara i oni imaju moment količine kretanja. Njihov moment količine kretanja, ako je veći od nule, omogućava nam da pravimo snimke magnetnom rezonansijom. Jezgra mogu da imaju oblik lopte ili elipsoida, mogu da se pobude u viša energetska stanja i njihov oblik može da osciluje. Atomska jezgra imaju boju koja ih opisuje preko njihovog spektra. Jezgra mogu da se raspadaju, mogu da se rasipaju, mogu da se cepaju i da stupaju u međusobne reakcije. Nuklearne reakcije mogu da se koriste za pravljenje bombi, elektrana, da stvaraju biološke mutacije i za istraživanja ljudskog tela. I, kao što ćemo otkriti u tekstu koji sledi. nuklearne reakcije su osnova rada Sunca i našeg postojanja.



[1] Dvostruko označena voda je voda u kojoj su i vodonik i kiseonik zamenjeni delimično ili potpuno zamenjeni (to jest označeni) neuobičajenim izotopima ovih elemenata u svrhu određivanja tragova.

Poglavlje 6

SUNCE, ZVEZDE I RAĐANJE MATERIJE

Lernen ist Vorfreude auf sich selbst.[1]

Peter Sloterdajk (Peter Sloterdijk)

Nuklearna fizika je najopasniji deo fizike. Ali uprkos svom ozlogašenom imenu, nuklearna fizika može da ponudi nešta zadivljujuće: proučavanjem atomskih jezgara naučićemo da razumemo Sunce, zvezde, rani svemir, rađanje materije i našu sopstvenu istoriju. (***Ref. 171***).

Atomska jezgra se sastoje od protona i neutrona. Pošto su protoni pozitivno naelektrisani, oni se međusobno odbijaju. Unutar jezgra protoni mora da su vezani silom dovoljno jakom da ih drži na okupu protivno njihovoj sili odbijanja. To je jaka nuklearna interakcija; ona je potrebna da bi se izbegla eksplozija jezgra. Jaka nuklearna interakcija je najjača od četiri interakcije u prirodi – ostale bi bile gravitacija, elektromagnetizam i slaba interakcija. Uprkos njenoj jačini, mi u svakodnevnom životu ne osećamo jaku interakciju, pošto je njen domet ograničen na rastojanja od nekoliko femtometara, odnosno na nekoliko prečnika protona. Uprkos ovoj ograničenosti, jaka interakcija priča lepu priču o sagorevanju Sunca i o mesu i krvi od kojih smo sazdani.

SUNCE

U sadašnjosti Sunce emituje 385 YW svetlosti. Količinu je prvi izmerio Klod Pule (Claude Poullet) na početku devetnaestog veka. Snaga je dovoljna da rastopi svake godine zapreminu leda koja je 500 puta veća od zapremine Zemlje.

Odkuda potiče ta ogromna energija koju emituje Sunce? Ako bi nastajala od uglja koji sagoreva, Sunce bi prestalo da goti posle nekoliko hiljada godina. Kada je otkrivena radioaktivnost, istraživači su proverili mogućnost da je taj proces srce sjaja Sunca. Međutim, čak iako radioaktivnost, - ili proces fisije koji je kasnije otkriven – može da proizvede više energije od hemijskog sagorevanja, sastav Sunca – uglavnom vodonik i helijum – to je činilo nemogućim.

Poreklo energije kojom Sunce zrači razjasnili su 1929. godine Fridrih Houtermans (Friedrich Houtermans), Karl Fridrih fon Vajscaker (Karl Friedrich von Weiszäcker) i Hans Bete (Hans Bethe). (***Ref. 172***). Sunce sagoreva ***fuzijom vodonika***. Fuzija je pravljenje velikog atomskog jezgra od manjih. U Suncu, osnovna reakcija fuzije

$$4\,{}^1\mathrm{H} \rightarrow {}^4\mathrm{He} + 2e^+ + 2\nu + 4{,}4\ \mathrm{pJ} \qquad (60)$$

pretvara jezgra vodonika u jezgra helijuma. Reakcija je nazvana ***ciklus vodonik – vodonik*** ili ***p – p ciklus***. Ciklus vodonika rezultat je neprekidnog procesa tri posebne nuklearne reakcije:

$$\mathrm{p} + \mathrm{p} \rightarrow \mathrm{d} + e^+ + \nu \qquad \text{(slaba nuklearna reakcija koja uključuje deuteron)}$$

$$\mathrm{d} + \mathrm{p} \rightarrow {}^3\mathrm{He} + \gamma \qquad \text{(jaka nuklearna reakcija)}$$

$${}^3\mathrm{He} + {}^3\mathrm{He} \rightarrow \alpha + 2\mathrm{p} + \gamma \qquad (61)$$

Isto tako možemo da napišemo p – p ciklus kao;

$${}^1\mathrm{H} + {}^1\mathrm{H} \rightarrow {}^2\mathrm{H} + e + \nu \qquad \text{(slaba nuklearna reakcija)}$$

$${}^2\mathrm{H} + {}^1\mathrm{H} \rightarrow {}^3\mathrm{He} + \gamma \qquad \text{(jaka nuklearna reakcija)}$$

$${}^3\mathrm{He} + {}^3\mathrm{He} \rightarrow {}^4\mathrm{He} + 2\,{}^1\mathrm{H} + \gamma \qquad (62)$$

---

[1] Učenje je predosećanje radosti o sebi. Peter Sloterdajk (Peter Sloterdijk)

Konačno, četiri protona se spajaju u jedno jezgro helijuma, ili α česticu; ukoliko uključimo i elektrone, može se reći da se četiri atoma vodonika spajaju u jedan atom helijuma. Proces fuzije emituje neutrine i svetlost ukupne energije od 4,4 pJ (26,7 MeV). Veći deo energije se emituje kao svetlost; oko 10% odnose neutrini. To je energija koja pravi sjajnost Sunca.

Prva od tri reakcije u jednakosti (61) nastaje usled slabe nuklearne interakcije. Ova transmutacija i normalan β raspad imaju isti Fajnmenov dijagram prvog reda. Slaba interakcija izbegava da se fuzija odigrava isuviše brzo i osigurava da će Sunce da sija još neko vreme. (***Izazov 134e***). Zaista, na Suncu, koje ima sjajnost od 385 YW, potoji samo 10^{38} fuzija u sekundi. (***Ref. 173***). To omogućava a se zaključi da će Sunce da traje još šačicu Ga (giga godina) pre no što ostane bez goriva.

Jednostavnost ciklusa vodonik-vodonik ne obezbeđuje u potpunosti fascinaciju procesa. Protoni u centru Sunca kreću se u proseku sa 600 km/s. Jedino kada se oni sudare tačno čeono pojavljuje se nuklearna reakcija; u ostalim slučajevima elektrostatičko odbijanje protona drži ih na odstojanju. Za prosečan proton čeoni sudar se dogodi jednom svakih 7 hiljada miliona godina. Bez obzira na to, postoji tako mnogo sudara u Suncu da se svake sekunde četiri miliona tona vodonika sagori u helijum. (Radi upoređivanja, druga reakcija ciklusa protona traje nekoliko sekundi. a treća oko milion godina.)

Reakcija fuzije (61) događa se u centru Sunca, u takozvanom ***jezgru***. Srećom po nas, γ protoni velike energije koji se stvaraju u centru Sunca, "usporavaju" se u spoljnom sloju Sunca, naime zoni zračenja, provodnoj zoni, uz njihova uključena unutrašnja kretanja i u takozvanoj ***fotosferi***, tankom sloju kojeg mi zapravo vidimo. (Poslednji sloj, atmosfera,[1] nije vidljiv tokom dana, već samo tokom pomračenja.) U tom procesu usporavanja γ protoni se postepeno pretvaraju u vidljive protone, većinom usled rasipanja. Za rasipanje je potrebno vreme. Zapravo, današnja svetlost Sunca bila je stvorena u vreme Neandertalaca: tipična procena je pre oko 170.000 godina. (***Ref. 174***). Drugim rečima, srednja efektivna brzina svetlosti u unutrašnjosti Sunca procenjena je na oko 300 km godišnje! Posle ovih stosedamdeset hiljada godina, fotonima je potrebno drugih 8,3 minuta da dođu do Zemje i da produžavaju život svih biljaka i životinja.

Slika 115 Fotografija Sunca sa talasnom dužinom vidljive svetlosti od oko 677 nm sa SOHO svemirske sonde, pokazuje nekoliko sunčevih pega (ESA i NASA)

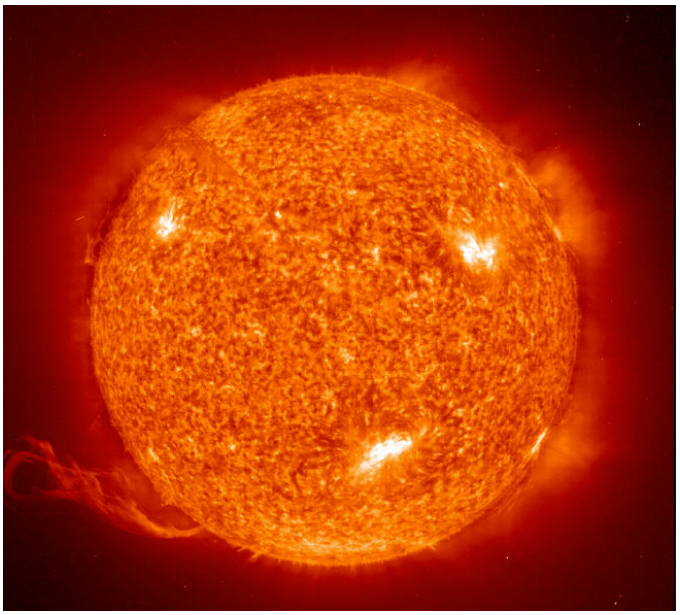
KRETANJA U SUNCU I NA NJEMU

U svom jezgru Sunce ima temperaturu od oko 15 MK. (***Vol. III, strana 113***). Na njegovoj površini temperatura je 5,8 kK. (Zbog čega je hladnija?) (***Izazov 135e***). Pošto je Sunce hladnije na površini no u centru, Sunce nije homogena lopta, već jedna nehomogena struktura. Temelji nehomogenosti su usled izazvanog procesa provodnosti. Provodnost, zajedno sa obrtanjem Sunca oko njegove ose, dovodi do fascinantnih struktura koje su prikazane na ***slici 116***: erupcija, uključujući baklje i izbacivanje koronarne

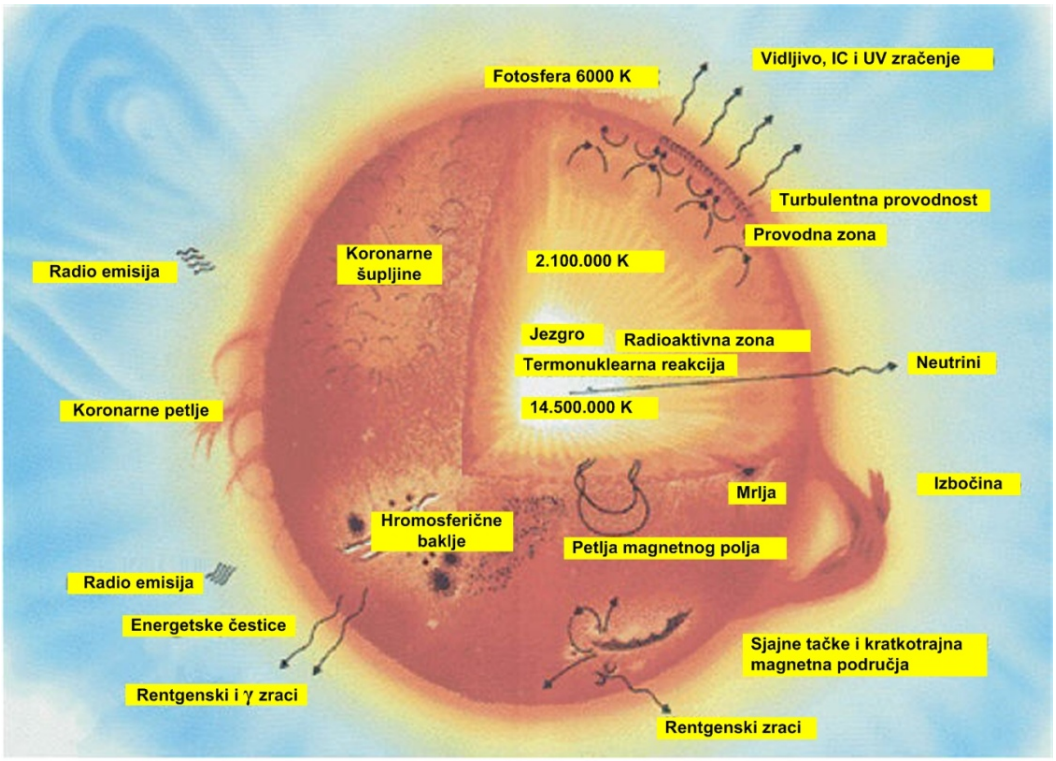
[1] Atmosfera Sunca sastoji se od ***temperaturnog minimuma***, ***hromosfere***, ***oblasti pretvaranja***, ***korone*** i ***heliosfere***

mase i sunčevih pega. Ako želite da doživite veličanstvenu lepotu Sunca, pogledajte video snimak na veb strani www.youtube.com/watch?v=ipvfwPqh3V4.

Ukratko, Sunce nije statičan objekt. Upečatljiv način da se dožive opaki procesi koji se na njemu događaju je da pogledate film prikazan na ***slici 118*** koja prikazuje razvoj takozvane sunčeve baklje.



Slika 116 Fotografija Sunca sa talasnom dužinom izuzetne ultraljubičaste svetosti od 30,4 nm takođe sa SOHO svemirske sonde, pokazuje sunčeve poremećaje (ESA i NASA)



Slika 117 Unutrašnjost Sunca (ljubaznošću NASA)

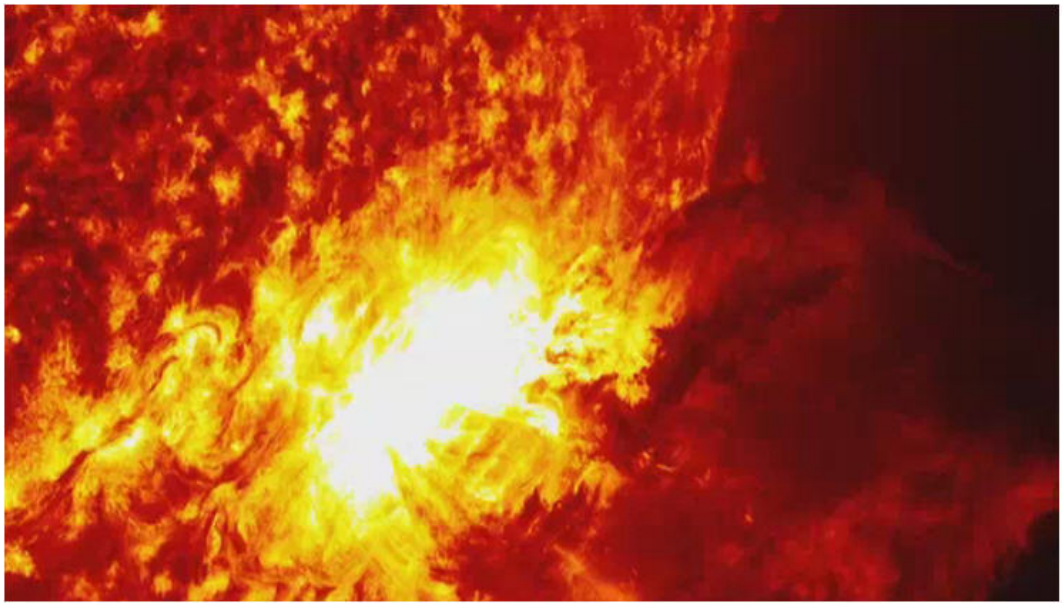
Kada se dogodi erupcija na suncu, kao što je prikazano i levom uglu ***slike 116*** ili na ***slici 119***, u svemir se izbacuje materija. Kada ta materija stigne do Zemlje,[1] pošto se ublaži tokom puta, ona utiče na naše svakodnevno okruženje. Takve ***sunčane oluje*** mogu da utiču na gornje slojeve atmosfere i mogu verovatno da aktiviraju uobičajene oluje na Zemlji. Ostali efekti sunčanih oluja su stvaranje polarne svetlosti i gubitak orijentacije ptica tokom seoba; ovo se događa tokom izuzetno jakih sunčevih oluja, pošto je u takvim situacijama poremećeno magnetno polje Zemlje. Poznat efekt sunčeve oluje bio je u martu 1989. godine,

[1] Možda čak i planete utiču na sunčev vetar, ova zagonetka još nije rešena i još se istražuje.

kada le veliki deo Kanade ostao bez električne energije, Tok naelektrisanih čestica sa Sunca izaziva velike indukovane struje u (petljama) dalekovodima, transformatori pregorevaju i razaraju se delovi prenosne mreže, isključujući energetski sistem. Milioni Kanađana ostalo je bez snabdevanja električnom energijom i u najudaljenijim delovima bilo je potrebno dve nedelje da se elektroenergetski sistem uspostavi. Zbog hladne zime i udesa u železničkom saobraćaju, kao posledice prestanka snabdevanja, umrlo je više od 80 ljudi. U međuvremenu elektroenergetski sistem je prepravljen tako da može da podnese ovakve događaje.

Kako može površina Sunca da ima temperaturu od 6 kK, dok ***korona*** Sunca – tanak gas koji potiče iz okruženja Sunca vidljiv tokom totalnog pomračenja Sunca – dostiže dva miliona Kelvina? U poslednjem delu dvadesetog veka, pokazano je uz korišćenje satelita, da je uzrok tome magnetno polje Sunca; Usled nasilnih tokova materije Sunca, magnetna energija se pretvara u koronu na onim mestima gde magnetne cevi obrazuju čvorove, iznad sjajnih tačaka prikazanih na levoj strani ***slike 116*** ili iznad crnih tačaka prikazanih na ***slici 115***. Kao rezultat toga, čestice u koroni se ubrzavaju i zagrevaju celu koronu do temperature koja je hiljadu puta veća od one na površini Sunca.

Slika 118 Razvoj sunčeve baklje opažen sa satelita TRACE (QuickTime film ljubaznošću NASA) (Film se može videti na veb strani: www.youtube.com/watch?v=JJzbgFp_NeE



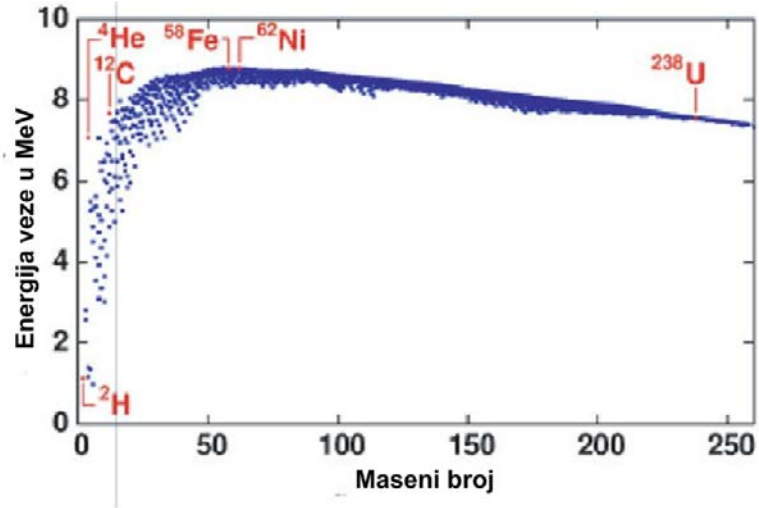
Slika 119 Spektakularno koronarno izbacivanje mase opaženo sa satelita Solar 7. juna 2011. godine Dynamic Observatory(QuickTime film ljubaznošću NASA) (Film se može posmatrati na veb strani svs.gsfc.nasa.gov/10801

ZAŠTO ZVEZDE SJAJE?

Zar ne sjaju zvezde divno? Ja sam jedina osoba na svetu koja zna zašto sjaju.

Friedrich (Fritz) Houtermans[1]

Sve zvezde sjaje zbog fuzije. Kada se dva laka jezgra spoje fuzijom u jedno teže, oslobađa se izvesna energija, pošto je prosečni nukleon mnogo jače vezan. Ova energetska korist je moguća sve dok se ne proizvede jezgro gvožđa ^{56}Fe. Za jezgra iza ovog, kao što je prikazano na ***slici 120***, energije veza po jezgru ponovo opadaju; prema tome fuzija nije energetski moguća. Pokazalo se da su teška jezgra koja se nalaze na Zemlji i širom svemira bila obrazovana putem ***hvatanja neutrona***. Ukratko, jezgra ispod gvožđa obrazovana su putem fuzije, jezgra iznad gvožđa obrazovana su hvatanjem neutrona. I iz istog razloga jezgra oslobađaju energiju u ***fuziji*** kada je rezultat jezgro lakše od jezgra gvožđa, a oslobađaju energiju u ***fisiji*** kada je polazna tačka iznad jezgra gvožđa.



Slika 120 Izmerene vrednosti energije veze po nukleonu u jezgru. Oblast levo od maksimlne vrednosti koja se nalazi na ^{56}Fe je oblast u kojoj je energetski moguća ***fuzija***; u desnoj oblasti je moguća ***fisija***. (© Max Planck Institute for Gravitational Physics).

Različite zvezde koje opažamo na nebu[2] možemo da razlikujemo prema tipu reakcije fuzije koja preovladava na njima. Na većini zvezda, posebno onim mlađim ili svetlijim zvezdama, odvija se fuzija vodonika. Ali to nije sve. Postoji nekoliko tipova fuzije vodonika; direktan ciklus vodonik-vodonik (p-p ciklus), kao što se nalazi na Suncu i mnogim drugim zvezdama i različit(i) CNO ciklus(i) ili Bete-Wajczaker ciklus(i).

Vodonični ciklus opisan je u predhodnom tekstu (***strana 151***) i može da se sumira kao

$$4\,^{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{4}\mathrm{He} + 2e^{+} + 4{,}4\ \mathrm{pJ} \qquad (63)$$

ili ekvivalentno tome

$$4\mathrm{p} \rightarrow \alpha + 2e^{+} + 2\nu + 26{,}7\ \mathrm{MeV} \qquad (64)$$

Međutim, to nije jedini način za sagorevanje zvezde. Ukoliko zvezda ima teže elemente u sebi vodonična fuzija koristi te elemente kao katalizatore. To se događa putem takozvanog Bete-Vajczakerovog ciklusa ili CNO ciklusa koji se odvija prema

$$^{12}\mathrm{C} + {}^{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{13}\mathrm{N} + \gamma$$
$$^{13}\mathrm{N} \rightarrow {}^{13}\mathrm{C} + e^{+} + \nu$$

---

1 Fridrih Georg "Fric" Houtermans (Friedrich Georg "Fritz" Houtermans, 1903. Sopot – 1966. Bern) bio je jedan od najslikovitijih fizičara svoga vremena Živeo je u Austriji, Engleskoj, Sovjetskom Savezu, Nemačkoj, Sjedinjenim Američkim Državama i Švajcarskoj. Njega je analizirao Sigmund Frojd, hapsio ga je i mučio NKVD u Rusiji, zatim ga je hapsio Gestapo u Nemačkoj i najzad je radio na nuklearnoj fisiji. Bio je saradnih Georgija Gamova i Roberta Atkinsona.

2 Da biste videli koje su zvezde prisutne na nebu iznad vas, vidite veb stranu www.surveyor.in-berlin.de/himmel.

$$
\begin{aligned}
{}^{13}\mathrm{C} + {}^{1}\mathrm{H} &\rightarrow {}^{14}N + \gamma \\
{}^{14}\mathrm{N} + {}^{1}\mathrm{H} &\rightarrow {}^{15}\mathrm{O} + \gamma \\
{}^{15}\mathrm{O} &\rightarrow {}^{15}\mathrm{N} + e^{+} + \nu \\
{}^{15}\mathrm{N} + {}^{1}\mathrm{H} &\rightarrow {}^{12}\mathrm{C} + {}^{4}\mathrm{He}
\end{aligned} \qquad (65)
$$

Krajnji rezultat je isti kao kod vodoničnog ciklusa, kako po broju jezgara tako i po energiji. Ciklus Bete-Vajczaker je brži od vodoničnog ciklusa, ali zahteva veće temperature, pošto protoni moraju da savladaju veće energetske prepreke pre no što stupe u reakcije sa ugljenikom ili azotom, koji potom stupaju u reakciju sa drugim protonima. (Zašto?) (***Izazov 136s***). U unutrašnjosti Sunca, usled srazmerno niske temperture od nekoliko desetaka miliona kelvina, ciklus Bete-Vajczaker nije toliko bitan koliko vodonični ciklus. Protonski ciklus Bete-Vajczaker nije jedina opcija za sagorevanje zvezda. Teže i starije zvezde no što je Sunce mogu da sjaje uz druge reakcije fuzije. Posebno, kada nema više vodonika na rapolaganju, zvezde pokrenu sagorevanje helijuma

$$3\,{}^{4}\mathrm{He} \rightarrow {}^{12}\mathrm{C} \qquad (66)$$

Ova reakcija fuzije, takođe pod imenom trostruki α proces, male je verovatnoće, pošto zavisi od toga da tri čestice budu na istom mestu u prostoru u isto vreme. Osim toga, mala količina ugljenika nestaje ubrzo preko reakcije $\alpha + {}^{12}\mathrm{C} \rightarrow {}^{16}\mathrm{O}$. Bez obzira na to, pošto je ${}^{8}\mathrm{Be}$ nestabilan, reakcija sa 3 α čestice jedini je način da se u svemiru proizvede ugljenik. Svi ovi negativni izgledi odbačeni su jednom odlikom: ugljenik ima stanje pobuđenosti na 7,65 MeV, što je za 0,3 MeV veće od zbira masa alfa čestica; pobuđeno stanje ***rezonantno povećava*** malu verovatnoću reakcije tri čestice. Samo na taj način svemir je sposoban da proizvede atome koji su neophodni za majmune, golubove i ljude. Predviđanje ove rezonanse Freda Hojla (Fred Hoyle) jedno je od nekoliko predviđanja u fizici načinjenih iz prostog eksperimentalnog posmatranja da čovečanstvo postoji. Priča je dovela do ogromnog izliva metafizičkih predpostavki, od kojih je većina nije dostojna ni da se pomene. (***Vol. III, strana 243***).

Proučavanje procesa sagorevanja zvezda takođe objašnjava zbog čega se Sunce i zvezde ne uruše. Ustvari Sunce i većina zvezda su lopte vrelih gasova, a ***pritisak gasa*** usled visokih temperatura njegovih sastojaka sprečava njihovu koncentraciju u male zapremine. Za ostale tipove zvezda – posebno onih velike mase kao što su crveni džinovi – ***pritisak zračenja*** emitovanih fotona sprečavaju urušavanje; za ostale zvezde, kao što su neutronske zvezde, ovu ulogu preuzima ***Paulijev pritisak***.

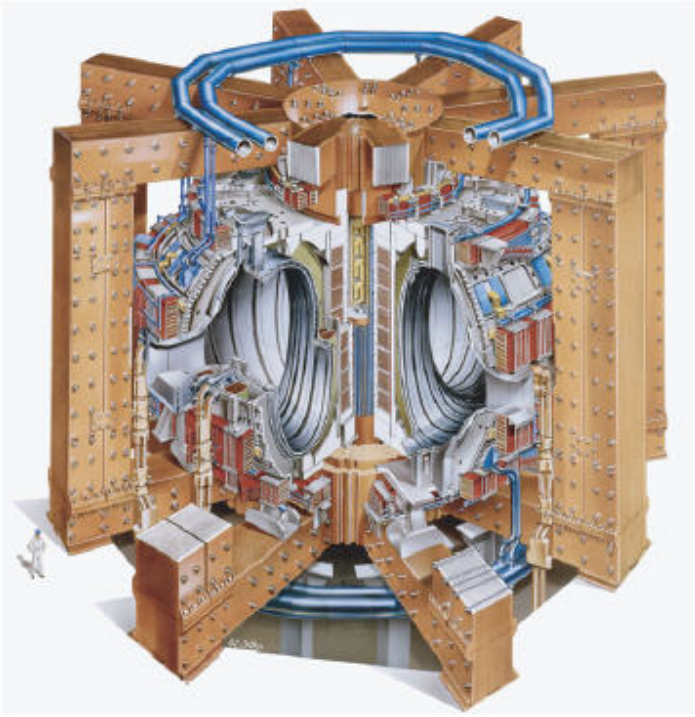
Stepeni nuklearnih reakcija u unutrašnjosti zvezda izuzetno su osetljivi prema njenoj temperaturi T. Stepen nuklearne reakcije ciklusa ugljenika srazmerna je između T^{13} za masivne O zvezde i T^{20} za zvezde slične Suncu. U crvenim džinovima i superdžinovima, stepen trostruke α reakcije srazmeran je T^{40}; ova jaka zavisnost podrazumeva da zvezde obično sjaje stalnim sjajem tokom dugog vremena, često hiljadama i milionima godina, pošto bi svaka promena temperature bila prigušena veoma delotvornim mehanizmom povratne sprege. Normalno, postoje i izuzeci; promenljive zvezde postaju sjajnije ili tamnije sa periodom od nekoliko dana; sjaj nekih zvezda menja se svakih nekoliko godina. Čak i Sunce ispoljava takve efekte. Tolom 1960-ih godina otkriveno je da Sunce pulsira sa učestanošću od minuta. Amplituda je mala, samo 3 kilometra od 1,4 miliona; bez obzira na to, ona može da se izmeri. U međuvremenu su helioseizmolozi otkrili ostala brojna oscilovanja Sunca, a 1993. godine čak i kod drugih zvezda. Takva oscilovanja omogućavaju da se prouči šta se događa unutar zvezda, čak i u svakom od slojeva od kojih su sastavljene.

Uzgred, još uvek nije jasno koliko se zračenje Sunca menjalo u dugom razdroblju vremena. Postoji jedan ciklus sa peiodom od 11 godina, poznati ***sunčev ciklus***, ali još nije poznat onaj dugoročan. Precizna merenja pokrivaju samo godine od 1978. nadalje, što je obuhvatilo samo oko tri ciklusa. Moguće promene jačine zračenja Sunca, takozvane ***solarne konstante***, možda imaju bitne posledice za istraživanje klime; međutim ovo pitanje još uvek je otvoreno.

ZAŠTO REAKTORI SA FUZIJOM NISU JOŠ UOBIČAJENI

Već duže od 50 godina, veliki broj fizićara i inženjera širom sveta pokušavao su da izgrade reaktor sa fuzijom. Reaktori sa fuzijom pokušavaju da kopiraju mehanizam oslobađanja energije koji se događa na Suncu. Prvi uređaj koji je proizveo makroskopsku energiju fuzijom 1991. godine bio je Joint European Torus[1] (skraćeno JET) koji se nalazi u mestu Culham u Ujedinjenom Kraljevstvu. Uprkos ovom uspehu, proizvedena snaga još uvek je dosta manja od snage potrebne za grejanje.

[1] Pogledati na veb strani www.euro-fusion.org/jet/



Slika 121 Uprošćen crtež fuzionog reaktora JET (Joint European Torus) u radu u Culhamu, prikazuje veliku torusnu komoru i magnete za zadržavanje plazme (© EDFA – JET)

Ideja za JET je da se proizvede izuzetno vrela plazma to jest što je moguće veće gustine. (***Ref. 175***). Na visokoj temperaturi i velikoj gustini dogodila bi se fuzija; energija se oslobođa kao tok čestica koja se pretvara (kao kod fisionih reaktora) u toplotu a potom u električnu energiju. Da bi postigao paljenje JET je koristio fuziju između deuterijuma i tricijuma, pošto ta reakcija ima najveći poprečni presek i dobitak energije:

$$\mathrm{D} + \mathrm{T} \rightarrow \mathrm{He}^4 + \mathrm{n} + 17{,}6\,\mathrm{MeV} \qquad (67)$$

Pošto je tricijum radioaktivan, većina eksperimenata izvedene sa daleko manje efikasnom reakcijom deuterijum-deuterijum, koja ima manji poprečni presek i manji dobitak energije

$$\mathrm{D} + \mathrm{D} \rightarrow \mathrm{T} + \mathrm{He} + 4\,\mathrm{MeV}$$

$$\mathrm{D} + \mathrm{D} \rightarrow \mathrm{He}^3 + \mathrm{n} + 3{,}3\,\mathrm{MeV} \qquad (68)$$

Fuzija se događa kada se sudare deuterijum i tricijum (ili deuterijum sa deuterijumom) pri velikoj energiji. Velika energija je neophodna da se savlada elektrostatičko odbijanje jezgara. Drugim rečima, materijal mora da bude vreo. Da bi se oslobodila energija iz deuterijuma i tricijuma, potrebna je prema tome najpre energija za njihovo zagrevanje. To je slično sa paljenjem drva: da bi se drvo koristilo kao gorivo prvo mora da se potpali pomoću šibice.

Sledeći takozvani ***Lousonov kruterijum*** kojeg je ponovo otkrio engleski inženjer Džon Louson (John D. Lawson), nakon što su ga otkili ruski istraživači, reakcija fuzije oslobađa energiju samo ako je proizvod tri činioca – gustine n, vremena reakcije (ili oporavka) τ i temperature T – premašuje izvesnu vrednost. U današnje vreme ovaj kriterijum se piše kao: (***Ref. 176***)

$$n \cdot \tau \cdot T > 3 \cdot 10^{28}\ \mathrm{sK/m^3} \qquad (69)$$

Da bi ostvario Lousonove kriterijume, JET koristi temperature od 100 do 200 MK, gustinu čestica $2{:}10^{20}$ do $3 \cdot 10^{20}\ \mathrm{m^{-3}}$ i vreme oporavka od 1 s. Temperatura u JET je prema tome mnogo veća od 15 MK, kolika je u centru Sunca, pošto su gustina i vreme opioravka mnogo manji.

Na ovoj temperaturi materija je u obliku plazme: jezgra i elektroni u potpunosti su razdvojeni. Očigledno je nemoguće stavljanje plazme od 100 MK u posudu: zidovi posude bi trenutno isparili. Jedina mogućnost je da plazma lebdi u vakuumu i da plazma ne dodiruje zidove posude. U prošlosti je glavni izazov za istraživače fizike bio da nađu način da drže mešavinu gasova deuterijuma i tricijuma zatvorenu u komori tako da gasovi nikada ne dodirnu zidove komore. Najbolji način da se gasovi zadrže je korišćenje magnetnog polja. To deluje pošto su u fuzionoj plazmi naelektrisanja razdvojena, tako da reaguju na

magnetna polja. Najuspešniji geometrijski raspored izmislili su poznati ruski fizičar Igor Tam i Andrej Saharov: ***tokamak***. Od brojnih tokamaka širom sveta, JET je najveći i najuspešniji. Njegova konkretna realizaija prikazana je na ***slici 121***. JET je uspeo da održava plazmu tako da dodiruje zidove tokom oko 1 sekunde; zatim sitiacija postaje nestabilna: plazma dodirne zid i tamo biva apsorbovana. Posle takvog ***poremećaja*** ciklus se nastavlja ubacivanjem gasa, zagrevanjem plazme i fuzija počinje ponovo. Međutim, do sada nije planirana ili moguća trajna komercijalna proizvodnja energije, pošto JET nije povezan sa generatorom električne energije.

Sledeći projekt, ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), međunarodni tokamak izgrađen uz pomoć evropskih, japanskih, američkih i ruskih finansiranja, ima cilj da nađe način komercijalne proizvodnje energije. Njegov linearni reaktor biće dva puta veći od JET, a što je još važnije, ITER planira da postigne vreme oporavka od 30 s. ITER će koristiti superprovodne magnete, tako da će imati izuzetno hladnu materiju od 4 K samo na nekoliko metara udaljenosti od izuzetno vrele materije na 100 NK: Drugim rečima, ITER će biti vrhunsko inženjerstvo. Objekt se gradi u mestu Cadarache u južnoj Francuskoj. Usled nepostojanja ekonomskog smisla, ITER ima dobre izglede da bude savremena verzija Vavilonske kule; međutim, možda će jednog dana on poćeti da radi.[1] Kao i svi veliki pojekti, fuzija je započeta snom: naučnici su raširili ideju ga je energija fuzije bezbedna, čista i neiscrpna. Ove tri tvrdnje još uvek se nalaze na svakoj veb strani o fuziji širom sveta. Osim toga, one izražavaju da fuzioni reaktori nisu opasni, proizvode mnogo manje radioaktivno zagađenje od fisionih reaktora, a kao osnovno gorivo koriste vodu. "Energija sunčeve fuzije bila bi čista, bezbedna i neograničena kao što je Sunce," U stvarnosti, jedini razlog zbog kojeg mi ne osečamo radiaktivnost Sunca je što smo daleko od njega. Fuzioni reaktori, isto kao i Sunce, jako su radioaktivni. Upravljanje projektima fuzionih reaktora mnogo je složenije od rukovođenja radioaktivnih fisionih reaktora.

Istina da je gorivo za fuziju skoro neiscrpno: deuterijum se izdvaja iz vode a tricijum – element kratkog trajanja radioaktivnosti koji se ne nalazi u prirodi – proizvodi se od ***litijuma***. Litijum mora da bude obogaćen, ali pošto taj materijal nije radioaktivan, to nije problematično. Međutim, proizvodnja tricijuma iz litijuma je prljav proces koji proizvodi veliku količinu radioaktivnosti. Energija fuzije je neiscrpna, ali nije ni bezbedna niti je čista.

Ukratko, od svih tehničih projekata koje je čovečanstvo započelo, fuzija je daleko najizazovniji i najambiciozniji. Da li će fuzija ikada biti uspešna – ili da li bi trebalo da bude uspešna – drugo je pitanja.

ODAKLE SU DOŠLI NAŠI ATOMI?

Elementi su stvoreni za mnogo kraće vreme no što biste skuvali jelo od patke i pečenog krompira.

Georgije Gamov

Ljudi se sastoje od elektrona i različitih jezgara. Gde se dogodija nukleosinteza? Mnogi istraživaći dali su doprinos da se na ovo pitanje odgovori. (***Ref. 177***).

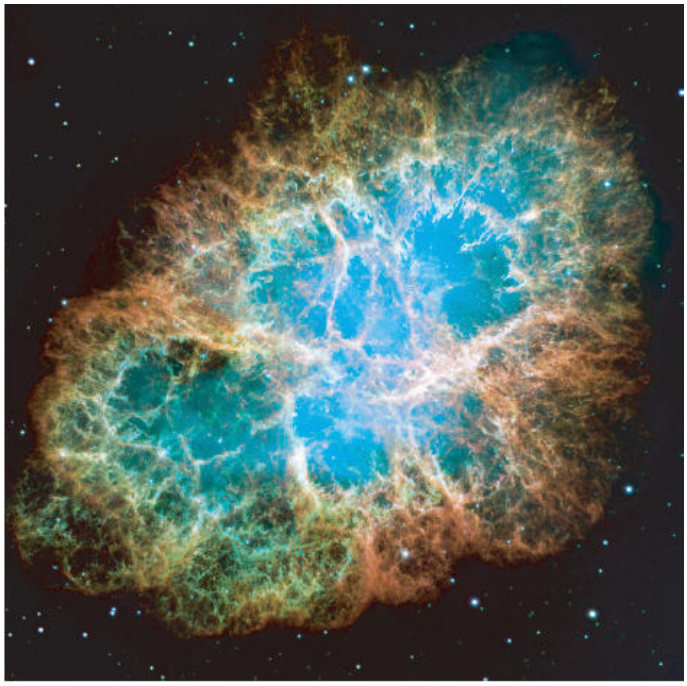
Oko tri minuta posle velikog praska, kada je temperatura bila oko 0,1 MeV, obrazovani su protoni i neutroni. Protona je stvoreno sedam puta više od neutrona, uglavnom zbog razlike njihovih masa. Zvog velike gustine, neutroni su bili zarobljeni u α čestice, kroz međukorak jezgra deuterijuma. Proces je zaustavljen oko 20 minuta od velikog praska, kada je temperatura postala isuviše niska da bi omogućavala fisiju. Posle ovih sedamnaest minuta masa svemira se podelila na 75% vodonika i 25% helijuma (oba procenta su rezultat činioca 7 između broja protona i neutrona) i tragova deuterijuma, litijuma i berilijuma. Ovaj proces je nazvan ***praiskonskom nukleosintezom***. Nije obrazovan nijedan teži element, pošto je pad temperature sprečio njihovu koncentraciju u merljivim količinama i pošto su postojala stabilna jezgra sa 5 ili 8 nukleona.

Simulacije praiskonske nukleosinteze dobro se slažu sa obiljem elemenata nađenih na izuzetno udaljenim, stoga izuzetno starim zvezdama. Obilnost je zaključena preko spektra ovih zvezda. Ukratko, ***jezgra vodonika, helijuma, litijuma i berilijuma obrazovana su kratko nakon ("tokom") velikog praska***. To su takozvani ***praiskonski elementi***. (***Vol. II, strana 190***).

Sva ostala jezgra su se obrazovala milionima godina posle velikog praska. Posebno ***u zvezdama su napravljena ostala laka jezgra***. U mladim zvezdama sagoreva vodonik u helijum; u starijim i težim

[1] Planiran početak rada je 2035. godina! (izvor Wikipedia). (Prim.prev).

zvezdama sagoreva neon ili čak silicijum. (***Ref. 178***). Ovi poslednji procesi zahtevaju veće temperature i pritiske, koji su prisutni samo u zvezdama čija je masa najmanje osam puta veća od mase Sunca. Svi ovi procesi su ograničeni foto odvajanjem i to dovodi samo do jezgara ^{56}Fe.

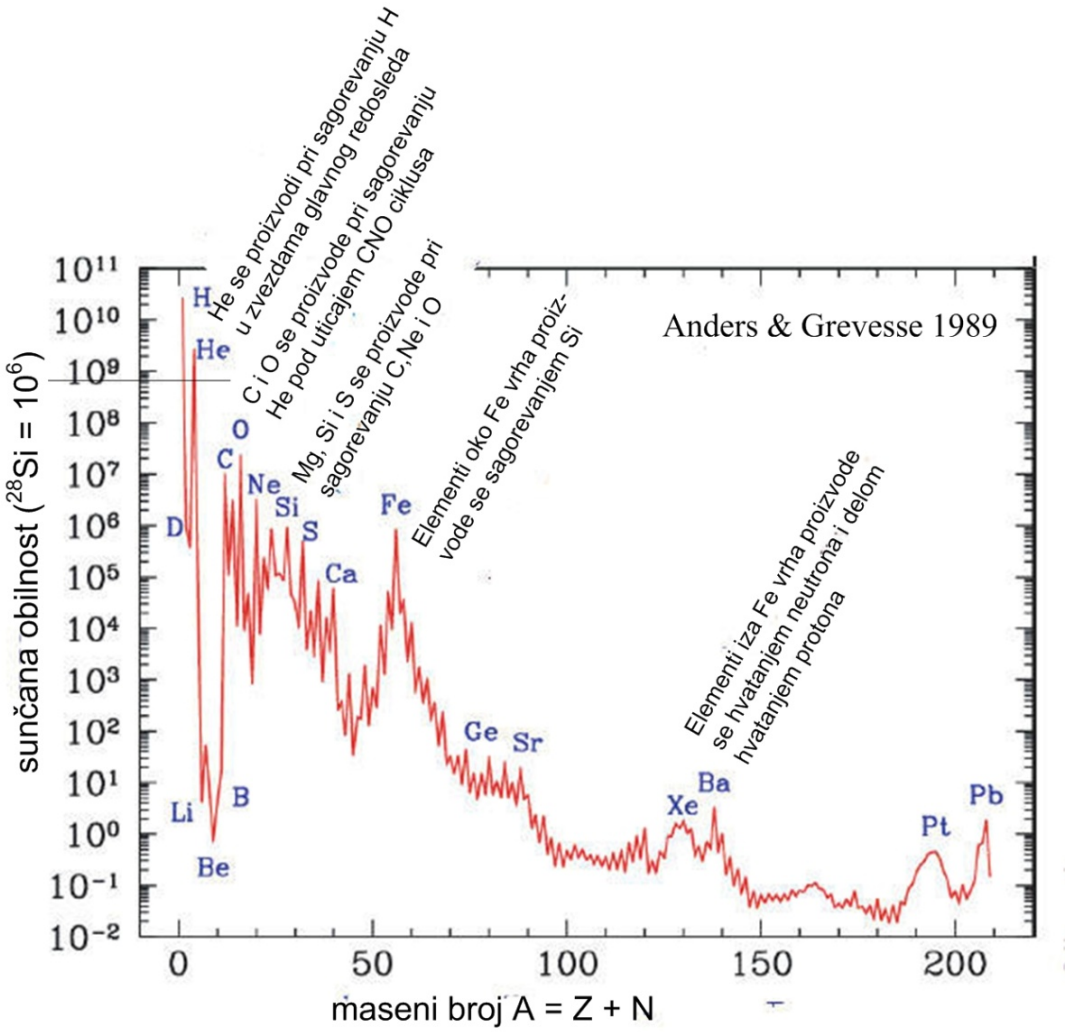


Slika 122 Dva primera kako zvezda koja eksplodira izbacuje materiju u međuzvezdani prostor: maglina M1 u sazvežđu Raka i maglina M27 u Tegovima (ljubaznošću NASA i ESA, © Bill Snyder)

Jezgra teža od jezgra gvožđa mogu da se naprave samo hvatanjem neutrona. Postoje ***dva*** glavna procesa hvatanja neutrona. Prvi proces je takosvani ***s-proces*** – za "slow" (spor). Proces se odvija unutar zvezda i postepeno se stvaraju teži elementi od neutrona koji lete unaokolo – uključujući najveće stabilno jezgro, olovo. Drugi proces hvatanja neutrona je brz ***r-proces*** (rapid). Dugo vremena bilo je nepoznato gde se događa; nekoliko desetaka godina mislilo se da se on događa i zvezdanim eksplozijama. (***Ref. 180***). Nedavna istraživanja ukazuju na ***spajanja neutronskih zvezda*** kao na verovatnije mesto r-procesa. Takvi sudari emituju materijal u svemir. Veliki protok neutrona stvara teške elemente. Na primer, izgleda da je većina jezgara zlata stvorena na taj način. Prisutnost teških elemenata u sunčevom sistemu može da se izmeri veoma precizno, kao što je prikazano na ***slici 123***. Ove tačke podataka odgovaraju dobro onome što se očekuje u sintetizovanju materijala putem spajanja zvezda. Trenutno najverovatniji kandidat za r-proces, prikazan je na ***slici 124***.

Brojni drugi procesi, kao što je ***hvatanje protona***, i takozvani ***ravnotežni proces***, doprineli su stvaranju elemenata,

Ukratko, elektroni i protoni u našem telu bili su stvoreni tokom velikog praska; u zvezdama lakša jezgra, kao što su ugljenik i kiseonik, a teža jezgra u eksploziji zvezde i pri mešanju neutronskih tvezdi. Ali kako su ova jezgra stigla na Zemlju?



Slika 123 Izmerena obilnost nukleidia u sunčevom sistemu i procesi njihovog stvaranja (iz ***Ref. 179***

U izvesnoj fazi svog života, mnoge zvezde eksplodiraju. Zvezda koja eksplodira naziva se ***supernova***. Takva supernova ima važan efekt: ona razbacuje u svemir većinu materije, kao što su ugljenik, azot i kiseonik. To se događa uglavnom u obliku neutralnih atoma. (Neki elementi su takođe sintetizovani tokom eksplozije.) Supernova koja eksplodira čini suštinu za raspodelu materijala u svemir.

Sunce je zvezda druge generacije – kao takozvana zvezda "populacija I", a sunčev sistem je obrazovan od ostataka supernove, kao i nešto kasnije život na Zemlji. Svi mi smo načinjeni od recikliranih atoma.

Mi smo reciklirana zvezdana prašina. To je kratak zaključak opširnih studija astrofizičara o svim vrstama zvezda koje se nalaze u svemiru, uključujući njihova rađanja, rast, spajanja i eksplozije. (***Vol. II, strana 165***). Objašnjenje kako se zvezde razvijaju i potom kreću u galaksijama začuđujuće je polje istraživanja, a mnogi aspekti još uvek su nepoznati.

ZANIMLJIVOSTI O SUNCU I ZVEZDAMA

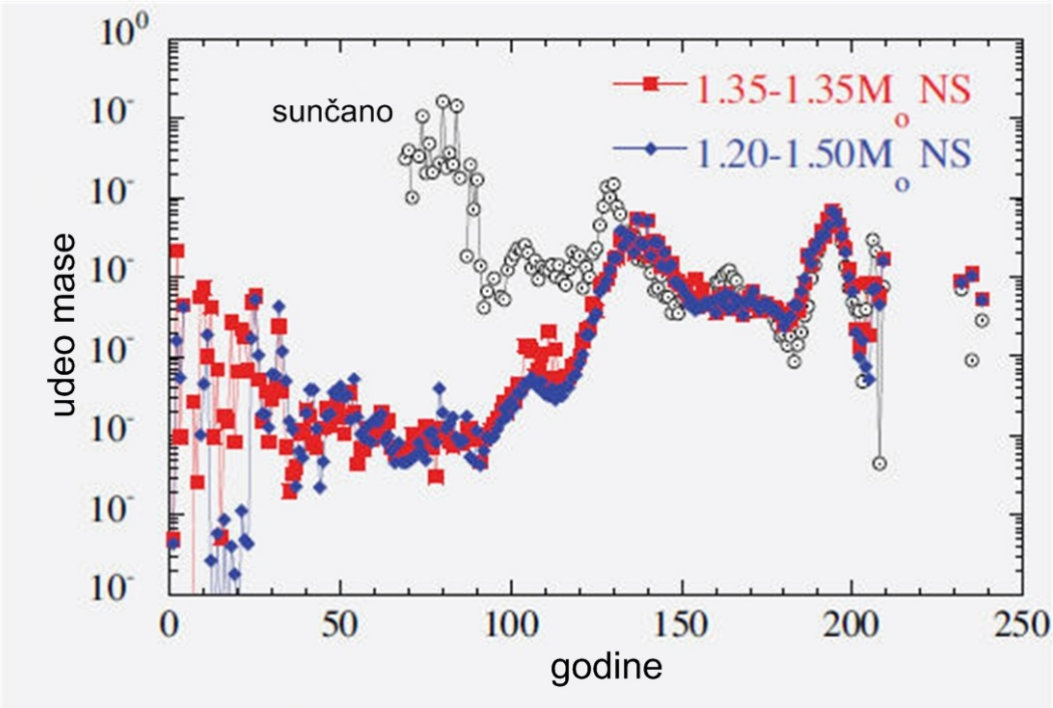
Šta bi se dogodilo kada bi Sunce odednom prestalo da sjaji? Očigledno, temperature bi pale za nekoliko desetina stepeni u roku od nekoliko časova. Padala bi kiša, a zatim bi se sva voda zamrzla. Posle četiri ili pet dana sav živi svet bi izumro. Posle nekoliko nedelja zamrzli bi se okeani; posle nekoliko meseci vazduh bi prešao u tečno stanje. Na sreću, to se nikada neće da se dogodi.

* * *

Sve o Suncu nije još uvek poznato. Na primer, tok neutrina sa Sunca osciluje sa periodom od 28,4 dana. To je ista perioda kojom osciluje magnetno polje Sunca. Ova povezanost još uvek se proučava.

* * *

Sunce je fuzioni reaktor. Ali njegova dejstva su brojna. Da je Sunce bilo manje sjajno no što jeste, evolucija bi imala drugačiji tok. Mi ne bismo imali očne kapke, imali bismo više kose i imali bismo svetliju kožu. Da li možete da nađete još neki primer? (***Izazov 137e***).



Slika 124 Poređenje između izmerene obilnosti nuklida (kružić sa tačkom) u sunčevom sistemu i izračunate vrednosti (crveni kvadrati i plavi rombovi) predviđeni spajanjem neutronskih zvezda (iz ***Ref. 180***)

* * *

Neke zvezde sjaje kao policijske sirene: njihov sjaj se pravilno povećava i smanjuje. Neke zvezde, pod nazivom Cepheides, značajne su pošto njihov period zavisi od njihove prosečne (apsolutne) sjajnosti. Prema tome, merenjem njihovog perioda i njihove sjajnosti na Zemlji stoga omogućava astronomima da odrede njihovu udaljenost.

* * *

Igrom slučaja, odnos sastava između ugljenika, azota i kiseonika unutar Sunca isti je kao u ljudskom telu.

* * *

Prva vodonična bomba koju su napravili ljudi eksplodirala je na atolu Bikini. Na sreću, nijedna nije nikada upotrebljena protiv ljudi.

Međutim, priroda je još bolja u gradnji bombi. Najjača nuklearna eksplozija dogodila se na površini neutronskih zvezdi u Rentgenovim binarima. Materija koja je pala na takvu neutronsku zvezdu sa zvezde koja je prati, uglavnom vodonik, bio je zagrejan sve dok temperatura nije omogućila fuziju. Posledična eksplozija mogla je da se posmatra teleskopima kao svetlost ili bleskovi Rentgenovih zraka u trajanju od oko 10 s; eksplozija je bila milion puta veća od snage one vodonične bombe koje su napravili ljudi.

* * *

Litijum, berilijum i bor su retki u zvezdama, pošto oni vole da hvataju protone, pa zato promene identitet. Iz istog razloga oni su retki i na Zemlji.

* * *

Nukleosinteza je uglavnom upravljana jakom interakcijom. Međutim, ako bi elektromagnetna interakcija bila mnogo jača ili mnogo slabija, zvezde bi proizvodile ili premalo kiseonika ili premalo ugljenika, pa mi ne bismo mogli da postojimo. Ovaj poznati dokaz je dao Fred Hojl (Fred Hoyle). Možete li ga dopuniti detaljima? (***Izazov 138d***).

ZAKLJUČAK O ZVEZDAMA I NUKLEOSINTEZI

Svi ljudi su braća. došli smo iz iste supernove.

Alan Sendidž (Allan Sandage)

Zvezde i Sunce sjaju zbog nuklearne fuzije. Energija koja se oslobađa u nuklearnoj fuziji je usled jake nuklearne interakcije koja deluje između nukleona. Kada zvezde utroše svoje nuklearno gorivo one obično eksplodiraju. U takvoj eksploziji supernove, ona izbacuje jezgra u prostor. Već u dalekoj prošlosti takva razbacna jezgra ponovo su se prikupljala usled gravitacije i načinila Sunce, Zemlju i ljude.

Nukleosinteza nastaje usled različitih nuklearnih procesa. Nukleosinteza u toku velikog praska obrazovala je vodonik i helijum, nukleosinteza u zvezdama obrazovala je laka jezgra, a nukleosinteza pri spajanju neutronskih zvezdi i eksplozijama supernove obrazovala je teška jezra.

Poglavlje 7

JAKA INTERAKCIJA – UNUTAR JEZGRA I NUKLEONA

I radioaktivnost i medicinsko snimanje pokazuju da su jezgra složeni sistemi. Međutim, kvantna teorija predviđa još i više: takođe i protoni i neutroni moraju da budu složeni. Postoje dva razloga: prvi, nikleoni imaju konačnu veličinu i drugi, njihovi magnetni momenti se ne podudaraju sa vrednošću predviđenu za tačkaste čestice.

Predviđanja za sastojke unutar protona bile su potvrđene kasnih 1960-ih godina, kada su Kendal (Kendall), Fridman (Friedman) i Tejlor (Taylor) upucali elektrone velike enegije u atome vodonika. (***Ref. 181***). Oni su našli da se proton sastoji od tri sastojka sa spinom 1/2. Eksperiment je bio kadar da "vidi" sastojke preko velikog ugla rasipanja elektrona, na isti način kao što mi vidimo predmete preko dubokog rasipanja fotona. Ovi sastojci odgovarali su po broju i (većini) osobina takozvanim kvarkovima koje su 1964. godine predvideli Džordž Cvajg (George Zweig) i Mari Gel-Man (Murray Gel-Mann).[1] (***Ref. 182***).

Zbog čega su ova tri kvarka u protonu? I u kakvoj su interakciji? Odgovori su duboki i iznenađujući.

SLABA STRANA JAKE INTERAKCIJE.

Pomenuti eksperimenti velikog neelastičnog rasipanja pokazuju da interakcija koja drži na okupu protone u jezgru, što je prvi opisao Jukava Hideki (Yukawa Hideki)[2], samo je slaba senka interakcije koja drži kvarkove na okupu u protonu. Obe interakcije nazvane su istim imenima. Oba slučaja donekle se slažu sa dva slučaja elektromagnetizma nađenim u atomskoj materiji. Najjasniji primer daju atomi neona: najjači i "najčistiji" vid elektromagnetizma odgovoran je za privlačenje elektrona ka jezgru neona; njegova slabija "senka", Van-der-Valsova interakcija, odgovorna je je za privlačenje atoma neona u tečnom neonu i za procese kao što su isparavanje i kondenzacija. Oba privlačenja su elektromagnetna, ali se jačine znatno razlikuju. Slično tome, najjači i "najčistiji" vid jake interakcije dovodi do oblikovanja protona i neutrona preko veza kvarkova; slab vid "senke" dovodi do obrazovanja jezgra i do α raspada. Očigledno, većina informacija može da se prikupi proučavanjem najjačeg i "najčistijeg" vida.

---

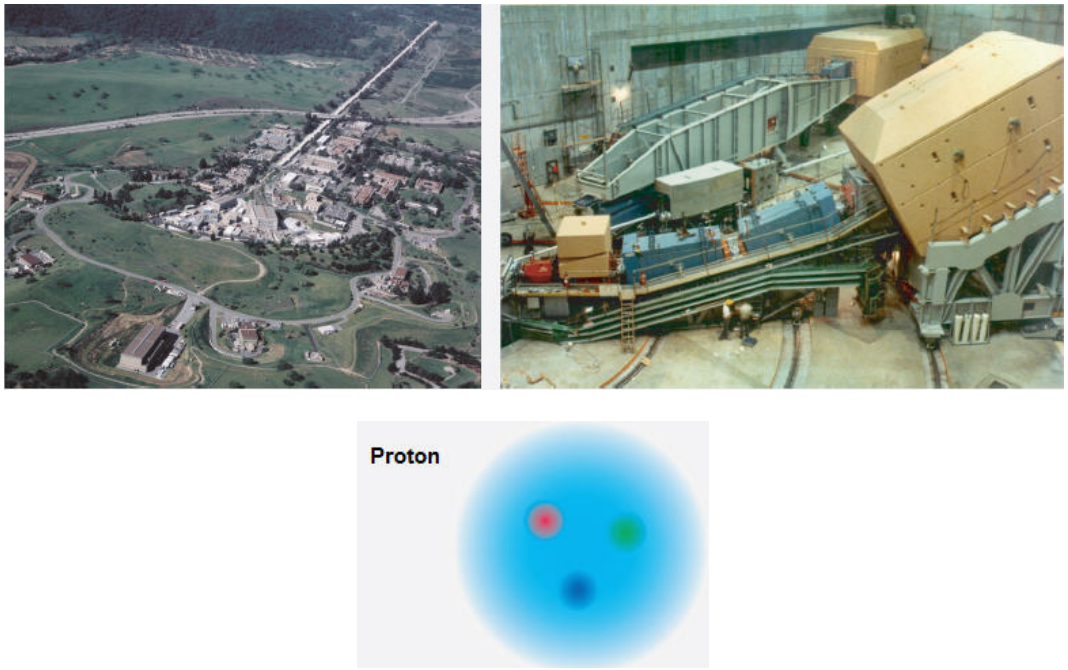
1 Fizičar Džordž Cvajg (George Zweig, 1937. Moscow) predložio je1963. godine ideju o kvarkovima – on ih je nazvao ***asovi*** – mnogo jasnije nego li Gel-Man. Cvajg je naglašavao stvarnost asova, dok Gel-Manu u početku nije verovao u postojanje kvarkova. Cvajg je kasnije prešao na mnogo teže polje: neurobiologiju.

Mari Gel-Man (Murray Gel-Mann, 1929. New York) dobitnik je Nobelove nagrade za fiziku 1969. godine. On je tvorac pojma "kvark". Pojam ima dvojako poreklo: zvanično govori se da je uzeto iz romana *Fineganovo bdenje* (Finnegans Wake) Džejmsa Džojsa (James Joyce), a ustvari Gel-Man je uzeo iz jezika jidiš i nemaćkog pojam koji znaći "posni meki sir", a figurativno korišćen u tim jezicima znači "glupa ideja". (***Ref.183***).

Mari Gel-Man je centralna figura u fizici čestica u 20. veku; on je uveo pojam neobičnost, grupa renormalizacije, simetriju ukusa SU(3) i sam pojam kvantne hromodinamike. Uznemiraćujuća priča da je on ideju ukrao, znanje pa čak i naziv V-A teorije od bistrog studenta fizike Džordža Sudaršana (George Sudarshan) pa ih je zajedno sa Ričardom Fajnmanom (Richard Feynman) objavio kao sopstvene. Pogrešno pripisivanje se može naći u mnogo udžbenika.

Mari Gel Man je poznat takođe i po neprestanoj borbi sa Fajnmanom oko toga ko je zaslužniji da se naziva najarogantniji fizičar na njihovom univerzitetu. Poznata anegdota je sledeća: Njutn je jednom u pismu Hooku koristio uobičajenu izreku tog vremena: "Ako sam ja video dalje od Vas i Dekarta, to je zato što stojim na ramenima divova". Gel-Man je poznat po izreci: "Ako ja vidim dalje od ostalih, to je zato što sam okružen patuljcima."

2 Jukava Hideki (Yukawa Hideki, 1907. Azabu – 1981. Kyoto), bio je značajan japanski fizičar specijalizovam za nuklearnu fiziku i fiziku čestica. Dobio je Nobelovu nagradu za fiziku 1949. godine za svoju teoriju o mezonima. Jukava je osnovao časopis *Progress of Theoretical Physics* i zajedno sa kolegom iz klase, Tomonaga Shin'ichiro, takođe dobitnikom Nobelove nagrade; bio je primer mnogim naučnicima u Japanu.



Slika 125 Gore: SLAC, linearni ubrzavač za sudare elektrona i detektori koji se koriste u eksperimentu za duboko neelastično rasipanje. Dole: umetničko viđenje krajnjeg rezultata, koje pokazuje tri centra rasipanja zapaženih u protonu.

Slika 126 Tipičan eksperiment koji se koristi za proučavanje modela kvarka; protonski sinhroton u CERN u Ženevi (© CERN)

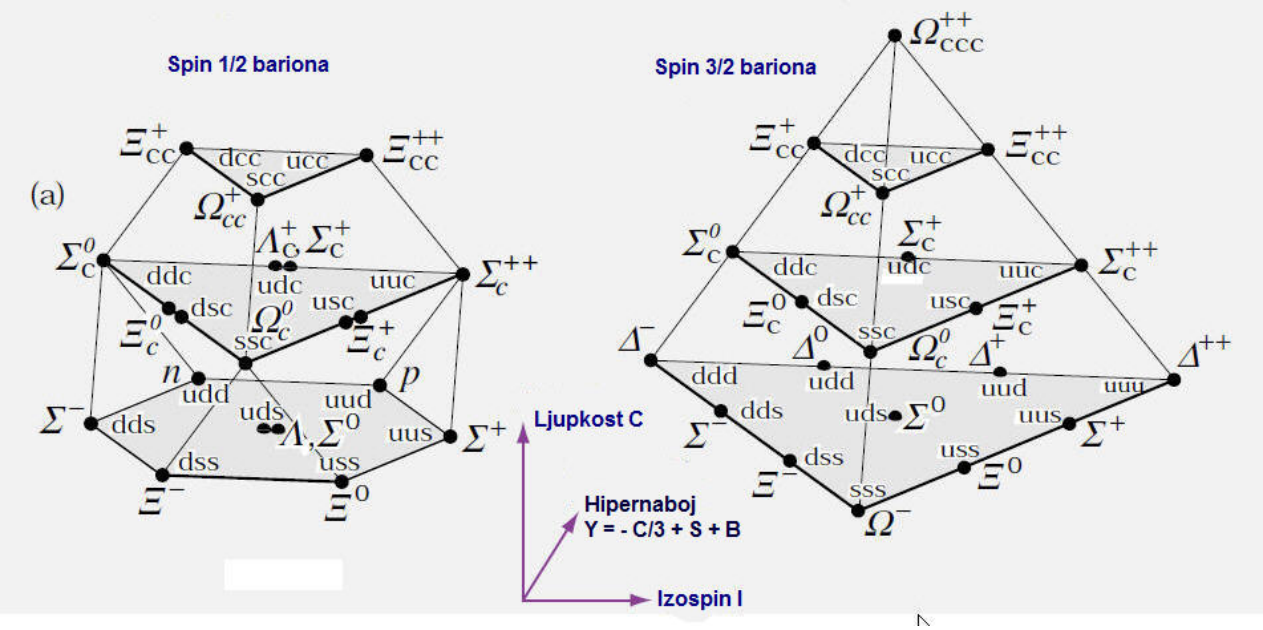
VEZANO KRETANJE, ZOOLOŠKI VRT ČESTICA I MODEL KVARKA

Duboko rasipanje elektrona pokazuje da su protoni sastavljeni od delova koji su u interakciji. Kako mogu da se prouče ovi sastojci.

Fizičari su jednostavni ljudi. Da bi se razumeli sastojci materije, a posebno protona, oni nisu imali bolju ideju no da uzmu sve čestice do kojih su mogli da dođu i da ih razbijaju jedne o druge. (***Ref. 184***). Mnogi istraživači igrali su ovu igru decenijama. Očigledno je da ovo šaljiv komentar; ustvari, kvantna teorija zabranjuje svaki drugačiji postupak. Možete li da objasnite zašto? (***Izazov 139s***).

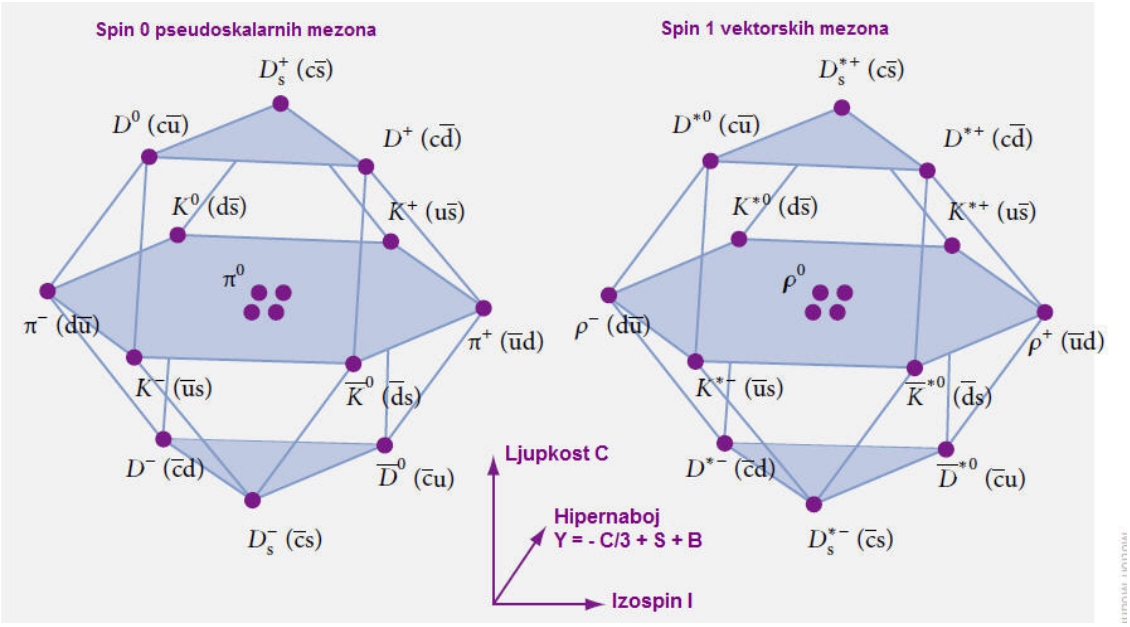
Razumevanje strukture čestica razbijanjem jednih o druge nije jednostavno. Zamislite da želite da poučavate kako su napravljeni automobili tako što čete ih razbijati međusobno. Pre no što dobijete popis svih njihovih sastavnih delova morate da proučite nezanemarljiv broj sudara. Mnogi će da daju iste rezultate, a ako tražite poseban par, možda biste morali dugo da čekate. Ako su delovi čvrsto vezani za druge, sudari bi morali da budu posebno energični. Osim toga, najvrovatnije je da će parovi da budu izobličeni. U poređenju sa sudarima automobila kvantna teorija dodaje mogućnosti da se ostaci pretvore, reaguju, povežu i da se pobude. Prema tome, potrebna marljivost i strpljenje čak su veći za sudare čestica no za sudare automobila. Uprkos ovim teškoćama, tokom više decenija, istraživači su prikupili sve veći broj ostataka protona, koji se takođe nazivaju ***hadroni***. Popis, čiji je mali deo dat u ***Dodatku B***, ***strana 259***,

prilično je dug. Zvaničan, pun popis, koji se može se naći na veb strani pdg.web.cern.ch sadrži nekoliko stotina strana fine štampe i sadrži nekoliko stotina hadrona. Hadroni nam dolaze u dva glavna tipa: hadroni sa celobrojnim spinom nazivaju se ***mezoni***, a hadroni sa spinom polovine celog broja nazivaju se ***barioni***. Proton i neutron sami po sebi prema tome su barioni.



Slika 127 Porodični dijagrami za barione najmanje mase koji se mogu izgraditi kao qqq sastavi prva četiri tipa kvarka (iz ***Ref. 185***)

Onda dolazi model kvarka. Korišćenjem genijalnosti mnogih eksperimentatora i teoretičara, model kvarka objasnio je celokupan katalog mezona i bariona kao posledicu samo 6 tipova vezanih kvarkova. Tipično, veliki deo kataloga može da bude strukturno prikazan kao što je dato na ***slici 127*** i ***slici 128***. Ovi grafovi su bili početak kraja fizike velikih energija. Model kvarka objašnjava sve kvantne brojeve ostataka i omogućava da se shvate odnosi njihovih masa, kao i njihovi raspadi.



Slika 128 Dijagram porodice za pseudoskalarne i vektorske mezone najmanje mase koji se mogu izgraditi kao $q\bar{q}$ sastavi prva četiri kvarkova karakteristika

Model kvarka objašnjava zašto ostaci dolaze u dva tipa: svi ***mezoni*** se sastoje od kvarka i antikvarka. pa prema tome imaju celobrojni spin; svi barioni se sastoje od tri kvarka, pa prema tome imaju spin polovine celog broja. Osim toga, proton i neutron mogu se posmatrati kao kombinacija dve vrste kvarka, nazvanih (u) (***up*** – ***gore***) i (d) (***down*** – ***dole***): proton je ***uud*** stanje, neutron je ***udd*** stanje. Otkriće ostalih hadrona dovelo je dodatnih četiri tipa kvarka. Nazivi kvarkova su unekoliko zbunjujući: oni se nazivaju: ***čudno*** -

strange (s), ***ljupko- charm*** (c), ***dno - bottom*** (b) (koji se ranije zvao i ***lepota – beauty)*** i ***vrh - top*** (t) (koji se ranije zvao i ***istinitost – thruth***). Tipovi kvarkova ukupno nazivaju se ***ukusi*** (***flavours***); prema tome postoji 6 vrsti kvarkova u prirodi.[1]

Svi kvarkovi imaju spin 1/2; oni su fermioni. Njihov električni naboji su umnošci 1/3 naelektrisanja elektrona. Osim toga kvarkovi nose jako naeektrisanje, nazvano, opet zbunjujuće, ***boja*** (***colour***). U suprotnosti sa elektromagnetizmom, koji ima samo pozitivno, negativno i neutralno naelektrisanje, jaka interakcija ima crven, plav i zelen kvark na jednoj strani i anti-crven, anti-plav i anti-zelen na drugoj strani. Neutralno stanje se naziva "belo". Svi barioni, uključujući proton i neutrone i svi mezoni su beli; na isti način kao što su svi atomi neutralni.

TABELA 17 Kvarkovi

Kvark	**Masa**	**Paritet *p* spina *J***	**Moguće boje; Moguće slabe osobine**	**Naelektrisanje *Q*, Izospin *I*, strange *S*, charm *C*, beauty *B'* topness *T***	**leptonski broj *L* barionski broj *B***
Donji Down (d)	4,5 do 5,5 MeV/c^2	$\frac{1}{2}^+$	crvena, zelena, plava; singlet, dublet	$-\frac{1}{3}, -\frac{1}{2}, 0, 0, 0, 0$	$0, \frac{1}{3}$
Gornji Up (u)	1,8 do 3,0 MeV/c^2	$\frac{1}{2}^+$	crvena, zelena, plava; singlet, dublet	$+\frac{2}{3}, +\frac{1}{2}, 0, 0, 0, 0$	$0, \frac{1}{3}$
Čudan Strange (s)	95(5) MeV/c^2	$\frac{1}{2}^+$	crvena, zelena, plava; singlet, dublet	$-\frac{1}{3}, 0, -1, 0, 0, 0$	$0, \frac{1}{3}$
Ljubak Charme (c)	1,275(25) GeV/c^2	$\frac{1}{2}^+$	crvena, zelena, plava; singlet, dublet	$+\frac{2}{3}, 0, 0, +1, 0, 0$	$0, \frac{1}{3}$
Dno Bottom (b)	4,18(3) GeV/c^2	$\frac{1}{2}^+$	crvena, zelena, plava; singlet, dublet	$-\frac{1}{3}, 0, 0, 0, -1, 0$	$0, \frac{1}{3}$
Vrh Top (t)	173,5 (1,4) GeV/c^2	$\frac{1}{2}^+$	crvena, zelena, plava; singlet, dublet	$+\frac{2}{3}, 0, 0, 0, 0, +1$	$0, \frac{1}{3}$

SUŠTINA KVANTNE HROMODINAMIKE

Teorija koja opisuje vezana stanja kvarkova naziva se ***kvantna hromodinamika***, ili skraćeno QCD. (***Ref. 186***). Nju su oblikovali u njenom konačnom obliku 1973. godine Frič (Fritzch), Gel-Man i Litvajler (Leutwyler). Na isti način kao što se kod atoma, elektrona i protona drže na okupu razmenom virtualnih fotona, u protonima se kvarkovi drže na okupu razmenom virtualnih gluona. ***Gluoni*** su kvantovi jake interakcije i odgovaraju fotonima, kvantovima elektromagnetne interakcije.

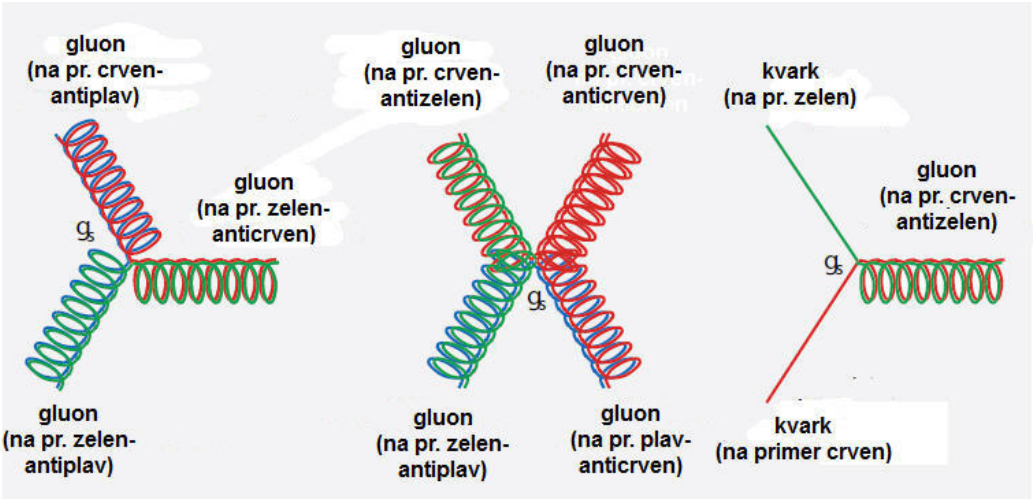
Kvantna hromodinamika opisuje sva kretanja usled jake interakcije pomoću tri osnovna procesa prikazana na ***slici 129***: dva gluona mogu da se rasipaju, gluon može da emitije ili da apsorbuje drugi gluon i kvark može da emituje ili da apsorbuje gluon. (***Ref. 187***). U elektrodinamici moguć je samo poslednji dijagram; u jakoj interakciji moguća je pojava i prva dva dijagrama. Između ostalog, prva dva dijagrama odgovorna su za ograničenje kvarka, pa stoga i za nepostojanje slobodnih kvarkova u prirodi,

Kvantna hromodinamika je teorija merila: polje jake interakcije ispoljava invarijantnost merila u Lijevoj grupi SU(3). Sećamo se da u slučaju elektrodinamike grupa merila je U(1) i abelijska ili komutativna. Nasuprot tome SU(3) je ne-abelijska; kvantna hromodinamika je ne-abelijska teorija merila. Ne-abelijskiu teoriju merila uveo je i popularizovao Volfgang Pauli (Wolfgang Pauli). Ona se često netačno naziva ***Jang-Milsova teorija***, prema dvojici fizičara koji su prvi zapisali Paulijevu ideju.

Usled simetrije merila SU(3), postoji 8 gluona: oni se nazivaju crven-antiplav, zelen-anticrven, zelen-antiplav i tako dalje. Pošto je simetrija SU(3) ne-abelijska, gluoni su u međusobnoj interakciji, kao što je

[1] U daljem tekstu prevoda koristiće se za ***ukuse*** kvarkova oznake iz engleskog jezika, to jesr: ***u***, ***d***, ***s***, ***c***, ***b*** i ***t***

prikazano u prva dva procesa na ***slici 129***. Od tri kombinacije crven-anticrven, plav-antiplav i zelen-antizelen, samo su dva gluona linearno nezavisna, pa stoga daju $3^2 - 1 = 8$ gluona.



Slika 129 Suština lagranžijana kvantne hromodinamike: Fajnmanovi dijagrami jake interakcije

Jačina spajanja jake interakcije, njenih tri osnovnih procesa na ***slici 129***, zajedno sa SU(3) simerijom merila i zapaženog broja od šest kvarkova, u potpunosti kompletiraju ponašanje jake interakcije. Posebno oni u potpunosti određuju njihovu gustinu lagranžijana.

LAGRANŽIJAN KVANTNE HROMODINAMIKE[1]

Gustina lagranžijana jake interakcije može da se posmatra kao komplikovana formulacija Fajnmanovih dijagrama sa ***slike 129***. Zapravo, gustimna lagranžijana kvantne hromodinsmike je

$$\mathcal{L}_{QCD} = -\frac{1}{4} F^{(a)}_{\mu\nu} F^{(a)\mu\nu} - c^2 \sum_q m_q \overline{\psi}^k_q \psi_{qk} + i\hbar c \sum_q \overline{\psi}^k_q \gamma^\mu \left(D_\mu\right)_{kl} \psi^l_q \tag{70}$$

gde su jačina polja gluona i kovarijantni izvod merila

$$F^{(a)}_{\mu\nu} = \partial_\mu A^a_\nu - \partial_\nu A^a_\mu + g_s f_{abc} A^b_\mu A^c_\nu$$

$$\left(D_\mu\right)_{kl} = \delta_{kl}\partial_\mu - i\frac{g_s}{2}\sum_a \lambda^a_{k,l} A^a_\mu$$

Sećamo se iz odeljka o načelu najmanjeg rada da su lagranžijani uvek zbir skalarnih proizvoda; (***Vol. I, strana 205***) što se jasno vidi u izrazu (70). Indeks $a = 1, 2, \ldots 8$ nabraja 8 tipova gluona, a indeks $k = 1, 2, 3$ nabraja tri boje, sve zbog SU(3). Indeks $q = 1,2,\ldots 6$ nabraja šest ukusa kvarkova. Polja $A^a_\mu(x)$ su osam polja gluona predstavljena zavojnicama na ***slici 129***. Polja $\psi^k_q(x)$ su polja kvarkova sa ukusom q i bojom k, predstavljena pravom linijom na ***slici 129***. Šest puta tri polja kvarkova, slično onima za bilo koji elementarni fermion, su četvoro-komponentni Dirakovi spinori sa masom m_q.[2]

Lagranžijan (70) je onaj iz teorije ***lokalnog*** polja: zapažanja su u funkciji položaja. Drugim rečima, kvantna hromodinamika slična je kvantnoj elektrodinamici i mogu da budu upoređivane u eksperimentima na isti način.

Prvi član u lagranžijanu (70) predstavlja kinetičku energiju zračenja (gluoni), drugi član sa masom je kinetička energija materijalnih čestica (kvarkovi) a treći član je interakcija između prva dva.

---

1 Ovaj odeljak može da se preskoči prilikom prvog čitanja

2 U svom najjednostavnijem obliku, matrica γ_μ može da se napiše kao:

$$\gamma_0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \quad \text{i} \quad \gamma_n = \begin{pmatrix} 0 & \sigma^i \\ -\sigma^i & 0 \end{pmatrix} \quad \text{za n = 1, 2, 3} \tag{71}$$

gde su σ^i Paulijeve matrice spina. (***Vol. IV, strana 179***)

Član sa masom u lagranžijanu je samo član koji kvari ili ***prekida simetriju ukusa***, to jest simetriju pri zameni tipova kvarka. (u fizici čestica ova se simetrija takođe naziva ***hiralna simetrija***, iz istorijskih razloga.) Očigledno, član sa masom takođe prekida konformalnu simetriju prostor-vremena.

Član interakcije u lagranžijanu prema tome odgovara trečem dijagramu na ***slici 129***. Snaga jake interakcije opisana je pomoću ***konstante jake veze g_s***. Konstanta ne zavisi od ukusa i boja, kao što je zapaženo u eksperimentima. Član interakcije ne meša različite kvarkove; kako je zapaženo u eksperimentima, ukus je očuvan u jakoj interakciji, kao broj bariona. U jakoj interakciji takođe su očuvani paritet prostora P i paritet spajanja naelektrisanja C. Jaka interakcija ne menja materiju.

U kvannoj hromodinamici osam gluona su bez mase; ovo svojstvo je dobijeno takođe u eksperimentima. Prema tome u lagranžijanu se ne pojavljuje član sa masom gluona. Lako je videti da bi gluoni sa masom kvarili invarijantnost merila. (***Izazov 140ny***). Kao što je pomenuto u predhodnom tekstu, nasuprot elektromagnetizmu, gde je grupa merila U(1) abelijska, grupa merila SU(3) jakih interakcija je ne-abelijska. Kao posledica toga, obojeno polje se menja, to jest nosi boju, pa se stoga indeks *a* pojavljuje u poljima *A* i *F*. Kao posledica, gluoni mogu da budu u međusobnoj interakciji, nasuprot fotonima koji prolaze jedan pored drugog neometano. Prema tome, prva dva dijagrama na ***slici 129*** odražavaju unekoliko složen opis polja $F_{\mu\nu}^{(a)}$. Nasuprot elektrodinamici opis ima poseban član koji je kvadratni i polju *A*; on je opisan takozvanom konstantom strukture f_{abc} i snagom interakcije g_s.Brojevi f_{abc} su konstante strukture SU(3). (***Strana 273***).

Ponašanje promene merila i polja gluona opisano je preko osam matrica $\lambda_{k,l}^{a}$. One su osnovno trodimenzionalno predstavljanje generatora algebre SU(3) i odgovaraju osam vrsti gluona. Matrice λ_a za $a = 1,\ldots 8$ i konstanta strukture f_{abc} pridržavaju se odnosa

$$\begin{aligned} [\lambda_a, \lambda_b] &= 2if_{abc}\lambda_c \\ \{\lambda_a, \lambda_b\} &= \frac{4}{3\delta_{ab}I} + 2d_{abc}\lambda_c \end{aligned} \qquad (72)$$

gde je *I* jedinična matrica. Konstanta strukture f_{abc} simetrije SU(3) koja je neparna pri zameni bilo kojeg para indeksa, i d_{abc} koja je parna, imaju vrednosti:

abc	f_{abc}	abc	d_{abc}	abc	d_{abc}
123	1	118	$1/\sqrt{3}$	355	$1/2$
147	$1/2$	146	$1/2$	366	$-1/2$
156	$-1/2$	157	$1/2$	377	$-1/2$
246	$1/2$	228	$1/\sqrt{3}$	448	$-1/(2\sqrt{3})$
257	$1/2$	247	$-1/2$	558	$-1/(2\sqrt{3})$
345	$1/2$	256	$1/2$	668	$-1/(2\sqrt{3})$
367	$-1/2$	338	$1/\sqrt{3}$	778	$-1/(2\sqrt{3})$
458	$\sqrt{3}/2$	344	$1/2$	888	$-1/\sqrt{3}$
678	$\sqrt{3}/2$				

Svi ostali elementi nestaju. Fizički, konstanta strukture SU(3) opisuje detalje interakcija između kvarkova i gluona i interakcija između samih gluona.

Osnovno trodimenzionalno predstavljanje osam generatora λ_a – koji odgovaraju osam tipova gluona – dato je, na primer skupom *Gel-Manovih matrica*:

$$\lambda_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \lambda_2 = \begin{pmatrix} 0 & -i & 0 \\ i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \lambda_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_4 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \lambda_5 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -i \\ 0 & 0 & 0 \\ i & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \lambda_6 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_7 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -i \\ 0 & i & 0 \end{pmatrix} \qquad \lambda_8 = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -2 \end{pmatrix} \tag{74}$$

Postoji osam matrica, po jedna za za svaki tip gluona, sa 3 × 3 elemenata, usled 3 boje jake interakcija. Ne postoji deveti gluon, pošto bi takav gluon bio bez boje, odnosno "beo".

Lagranžijan je kompletan kada je obuhvaćeno 6 masa kvarkova i konstanta veze g_s. Naravno, ove vrednosti, slično kao grupa simetrije SU(3), nisu objašnjene kvantnom hromodimanikom

U lagranžijanu kvantne hromodinamike pojavljuju se samo kvarkovi i gluoni, pošto su samo kvarkovi i gluouni u interakciji preko jake sile. To može takođe da se izrazi tako što se kaže da samo kvarkovi i gluoni nose boju; ***boja*** je izvor jake sile na isti način kao što je električni naboj izvor elektromagnetnog polja. Na isti način kao električni naboj, naboj bojom je očuvan u svim interakcijama. Električni naboj se javlja u dva tipa, pozitivan i negativan; nasuprot tome, boja se javlja u tri tipa, sa imenima ***crvena***, ***zelena*** i ***plava***. Neutralno stanje, koje nema naboj boje, naziva se ***belo***. Protoni i neutroni, ali takođe elektroni i neutrini, prema tome su "beli", stoga neutralni za jaku interakciju.

Ukratko, šest tipova kvarka u interakciji su razmene osam tipova gluona. Interakcija je opisana Fajnmanovim dijagramima na ***slici 129***, ili, ekvivalentno tome, lagranžijanom (70). Oba opisa slede iz zahteva da je grupa merila SU(3) i da su date mase i konstante veze. Bila je to velika količina posla da bi se potvrdilo da se svi eksperimenti zaista slažu sa lagranžijanom kvantne hromodinamike; odbačena su razna konkurentna objašnjenja.

EKSPERIMENTALNE POSLEDICE MODELA KVARKA

Kako možemo da se uverimo da kvarkovi i gluoni postoje, iako oni nikada nisu nađeni sami? Postoje za to brojni dokazi.

* * *

Model kvarka objašnjava magnetni moment neutrona koji ne nestaje i objašnjava magnetne momente μ bariona. Opisom protona kao stanje *uud*, a neutrona kao stanje *udd* bez orbitalnog momenta količine kretanja i korišćenjem precizne talasne funkcije, dobijamo (***Izazov 141e***)

$$\mu_u = \frac{1}{5}\left(4\mu_p + \mu_n\right) \quad \text{i} \quad \mu_d = \frac{1}{5}\left(4\mu_n + \mu_p\right) \tag{75}$$

Predpostavljajući da su mase $m_u = m_d$ i da je magnetni moment kvarka srazmeran njegovom naelektrisanju, model kvarka predviđa odnos magnetnih momenata protona i neutrona

$$\frac{\mu_p}{\mu_n} = -\frac{3}{2} \tag{76}$$

Predviđanje se razlikuje od izmerenog samo za 3%. Osim toga, korišćenjem istih vrednosti za magnetni moment kvarka, vrednosti magnetnih momenata mogu da se predvide za više od polovine od destetak ostalih bariona. Rezultati se tipično razlikuju od izmerenih samo za oko 10%. Posebno, uvek je tačno proračunat predznak rezultujućeg magnetnog momenta bariona.

* * *

Model kvarka opisuje sve kvantne brojeve mezona i bariona. Prikazani su P paritet, C paritet, i odsustvo izvesnih čestica mezona. Prikazano je opaženo očuvanje električnog naboja, broja bariona, izospina, neobičnosti itd. Porodični dijagrami hadrona, kao što su oni prikazani na ***slici 127*** i ***slici 128***, opisuju ***u potpunosti*** sva postojeća stanja hadrona (manje momente količine kretanja); stanja koja nisu nabrojana nisu ni opažena. Model kvarka prema tome pravi kompletnu i tačnu klasifikaciju hadrona kao graničnih stanja kvarkova.

* * *

Model kvarka takođe objašnjava ***spektar mase*** hadrona. Najbolje predviđanje je načinjeno proračunom rešetke kvantne hromodinamike. Uz mesece rada na računarima istraživači su bili u mogućnosti da reprodukuju mase protona i neutrona do unutar nekoliko procenata. (***Ref. 188***). Zanimljivo je da ako se *u* i *d* mase kvarka izjednače sa nulom, rezultujuće mase protona i neutrona razlikuju se samo za 10% vrednosti dobijenih u eksperimentima. (***Ref. 189***). Mase protona i neutrona su skoro u potpunosti posledica veza, a ne sastavnih delova. Više detalja biće dato u tekstu koji sledi. (***Strana 173***).

* * *

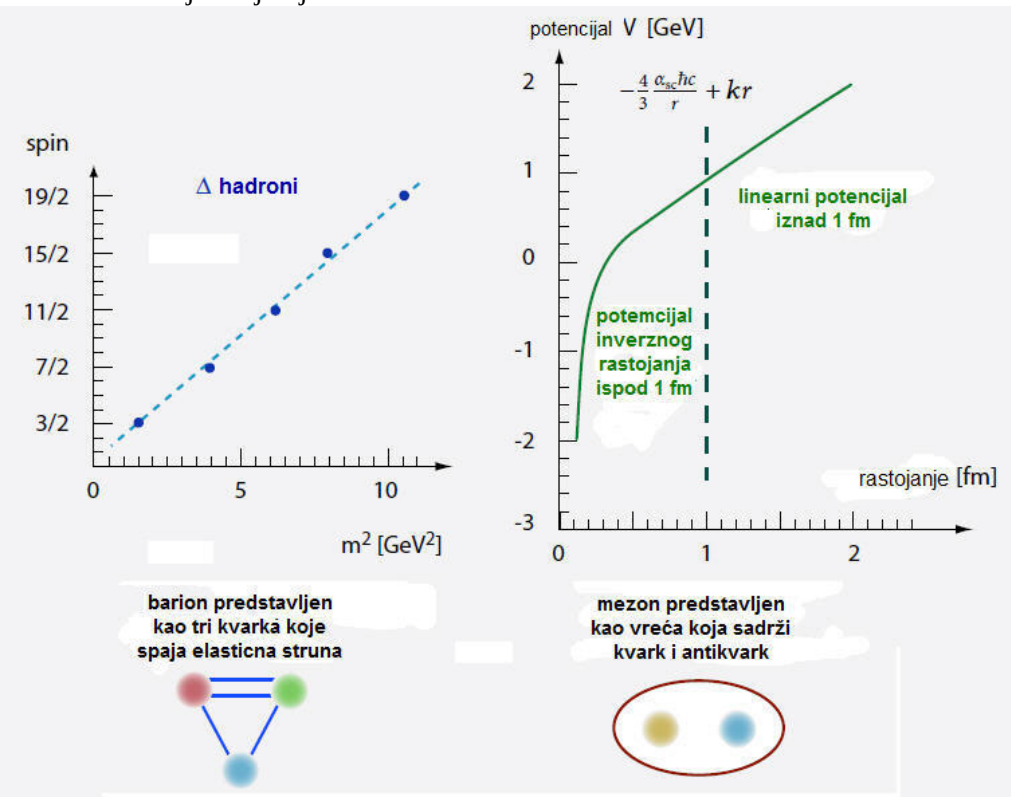
Broj boja kvarkova mora da se uzme u obzir da bi se postiglo slaganje teorije i proračuna. Na primer, izmereno vreme raspada neutralnog piona je 83 as. Izračunavanje bez boja daje rezultat od 750 as; ako se predpostavi da se svaki kvark pojavljuje u 3 boje, vrednost mora da se podeli sa 9, pa se posle toga slaže sa merenjem.

* * *

U sudaru čestica, sudari elektrona i pozitrona ponekad dovedu do stvaranja hadrona. Izračunat odnos stvaranja takođe odgovara eksperimentima samo ako kvarkovi imaju tri boje. Sa više detalja, ako se uporedi stvaranje mion-antimion i stvaranje hadrona, jednostavnije je proceniti njihov odnos prema njihovom naelektrisanju: (***Izazov 142s***)

$$R = \frac{\sum q_{\text{hadron}}}{\sum q_{\text{mion}}} \tag{77}$$

Između 2 i 4 GeV, kada mogu da se pojave tri kvarka, ovaj dokaz stoga predviđa $R = 2$ ukoliko postoje boje, ili $R = 2/3$ ako boje ne postoje. Eksperimenti su pokazali da je vrednost $R = 2{,}2$ i tako je broj boja potvrđen. Mnogi drugi takvi ***sporedni odnosi*** mogu da se proračunaju na takav način. Oni su u skladu sa eksperimentima samo ako je broj boja tri.

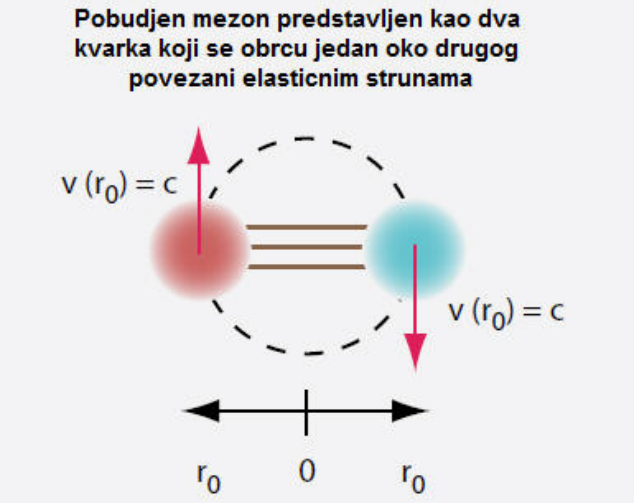


Slika 130 Gore levo: Ređijeva putanja ili grafik Ću-Frauči (Chew-Frautschi), usled ograničenja kvarkova. Gore desno: ograničenje potencijala kvarkova. Dole: dva načina za približan opis ograničenja kvarka – model hadrona sa strunama i model vreće hadrona.

OGRANIČAVANJE KVARKOVA – I SLONOVI

Mnogi od opaženih hadrona nisu deo dijagrama na ***slici 127*** i ***slici 128***; ovi posebni hadroni mogu da budu objašnjeni ***obrtnim pobuđivanjem*** osnovnih mezona sa tih dijagrama. Kako je pokazao Tulio Ređe (Tullio Regge) 1957. godine, ideja obrtnog pobuđivanja dovodi do kvantitativnih predviđanja. Ređe je predpostavio da su mezoni i barioni povezani strunama, kao gumenim trakama – što je predstavljeno na ***slici 130*** i ***slici 131*** – a da je sila ili naprezanje k između kvarkova stoga na rastojanju nepromenjena. Mi predpostavljamo da se strune, čiju čemo dužinu obeležiti sa $2r_0$, obrću oko svog težišta što je moguće brže, kao što je prikazano na ***slici 131***. Tada imamo:

$$v(r) = c\frac{r}{r_0} \tag{78}$$



Slika 131 Izračunavanje mase pobuđenih hadrona

Predpostavlja se da su mase kvarkova zamenarljive. Za ukupnu energiju podrazumevan je izraz:

$$E = c^2 m = 2\int_0^{r_0} \frac{k}{\sqrt{1 - v(r)/c^2}} \mathrm{d}r = k r_0 \pi \tag{79}$$

a za moment količine kretanja izraz

$$J = \frac{2}{\hbar c^2} \int_0^{r_0} \frac{k r v(r)}{\sqrt{1 - v(r)/c^2}} \mathrm{d}r = \frac{k r_0}{2\hbar c} \tag{80}$$

Ako se uključi spin kvarkova, dobija se

$$J = \alpha_0 + \alpha' m^2 \qquad \text{gde je} \qquad \alpha' = \frac{c^3}{2\pi k \hbar} \tag{81}$$

Ređe je prema tome izveo jednostavan izraz kojim su povezani masa m pobuđenog hadrona i njegov ukupaj spin J. Iz bizarnih istorijskih razloga ovaj izraz se naziva ***Ređijeva putanja***. Za vrednost konstante α' predpostavlja se da ne zavisi od uparivanja kvark-antikvark. Nekoliko godina kasnije takva linearnost je nađena i eksperimentalno, kao što je prikazano na ***slici 130***, ***Ču-Frauči*** (Chew-Frautschi) ***grafik***. Na primer, tri najniža stanja Δ su spin 3/2 Δ(1232) sa m^2 od 1,5 GeV^2, spin 7/2 Δ(1950) sa m^2 od 3,8 GeV^2 i spin 11/2 Δ(2420) sa m^2 od 5,9 GeV^2. Za vrednost konstante α' je nađeno eksperimentalno da iznosi oko 0,93 GeV^{-2} skoro za sve mezone i barione, dok se vrednost α_0 menja od čestice do čestice. (***Ref. 187***). Nađeno je da naprezanje strune kvarka iznosi

$$k = 0{,}87\ \mathrm{GeV/fm} = 0{,}14\ \mathrm{MN} \tag{82}$$

Drugim rećima, dva kvarka u hadronu privlače se silom koja je jednaka težini dva slona – oko 14 tona.

Eksperimenti su zato jasni: opažen Ču-Frauči grafik, kao i nekoliko drugih opažanja koja nisu ovde razmatrana, najbolje su opisana kvark-kvark potencijalom koji uznad 1 fm raste ***linearno*** sa potencijalom. Nagib linearnosti potencijala, sila, ima vrednost kojom Zemlja privlači dva slona. Kao rezultat toga, kvarkovi se ***nikada*** ne pojavljuju kao slobodne čestice: kvarkovi su uvek ***ograničeni*** u hadronima. Ova situacija je u suprotnosti sa kvantnom elektrodinamikom, gde se sila između naelektrisanja smanjuje do nule za velika rastojanja; električni naboji nisu zato ograničeni, već mogu da postoje kao slobodne čestice. Na velikim rastojanjima električni porencijal se ***smanjuje*** na dobro poznat način, obrnuto srazmerno rastojanju. Nasuprot tome, za jaku interakciju su eksperimenti pokazali (***Ref. 184***) da potencijal kvarka, koji je dat sa:

$$V = -\frac{4}{3}\frac{\alpha_{sc}\hbar c}{r} + kr \tag{83}$$

gde je, kao što je pomenuto k = 0,87 GeV/fm, α_{sc} = 0,2 i $\hbar \cdot c$ = 0,1975 GeV/fm. Potencijal kvarka je prikazan na ***slici 130***.

Premda su eksperimenti jasni, teoretičari su se suočili sa problemom. Do sada ni potencijal kvark-kvark ni vezana stanja kvarkova nisu nogli da se izvedu iz lagranžijana kvantne hromodinamike jednostavnim postupkom približnosti. Uprkos tome, složeni proračuni bez smetnji pokazuju da lagranžijan kvantne hromodinamike predviđa silu između dve čestice sa bojom koja se izravnava na stalnoj vrednosti (odgovarajućeg povećanog potencijala). Ova proračunavanja pokazuju da stare empirijske predpostavke hadrona kao kvarkova povezanih strunama ili kvarkovima u vreći, prikazanih na ***slici 130***, zaista mogu da se izvedu iz lagranžijana kvantne hromodinamike. Međutim, proračuni su isuviše komplikovani da bi mogli da se sumiraju u nekoliko redova. Nezavisno od toga, stalna vrednost sile može takođe da se da se ponovi proračunima na računaru, pri čemu se prostor-vreme uprošćava na rešetku, a potom se predpostavi kvantna hromodinamika takozvanom ***rešetkastom kvantnom hromodinamikom*** ili ***rešetkastom teorijom merila***. Proračuni sa rešetkom mogu osim toga da prikažu masu većine mezona i bariona uz prihvatljivu tačnost. Korišćenjem najsnažnijih dostupnih računara, ovi proračunu su dali predpostavku za masu protona i ostalih bariona unutar nekoliko procenata. (***Ref. 191***). Međutim, razmatranja ovih složenih i zanimljivih proračuna izvan je obima ovog teksta.

Ustvari, zagonetka objašnjavanja ograničavanja jednostavnim pojmovima toliko je teška da i najveći umovi nisu do sada bili u stanju da je reše. To i nije iznenađenje, pošto rešavanje verovatno zahteva objedinjavanje interakcija, a najverovatnije isto tako i objedinjavanje sa gravitacijom. Zato ćemo napustiti ovu temu sve do poslednjeg dela naše pustolovine.

ASIMPTOTSKA SLOBODA

Kvantna hromodinamika ima i drugo svojstvo koje je odvaja od kvantne elektrodinamike: ponašanje njenih veza sa energijom. Zapravo, postoje tri ekvivalentna načina da se opiše snaga jake veze. Prvi način je veličina g_s koja se pojavljuje u lagranžijanu kvantne hromodinamike. Drugi način se često koristi da bi se opisala ekvivalentna veličina $\alpha_s = g_s^2/4\pi$. I α_s i g_s zavise od energije Q u eksperimentu. Ako su poznati za jednu energiju, onda su poznati i za svaku drugu. Za sada najbolja eksperimentalna vrednost je $\alpha_s(M_Z)$ = 0,1185±0,0010.

Energetska zavisnost jake veze može da se izračuna uz standardni postupak renormalizacije (***Ref. 185***), (***Ref. 187***) i očekije se da je

$$\alpha_s\left(Q^2\right) = \frac{12\pi}{33-2n_f}\frac{1}{L}\left(1-\frac{\left(918-114n_f\right)\ln L}{\left(33-2n_f\right)^2 L}+\cdots\right) \quad \text{gde je} \quad L = \ln\frac{Q^2}{\Lambda^2\left(n_f\right)} \tag{84}$$

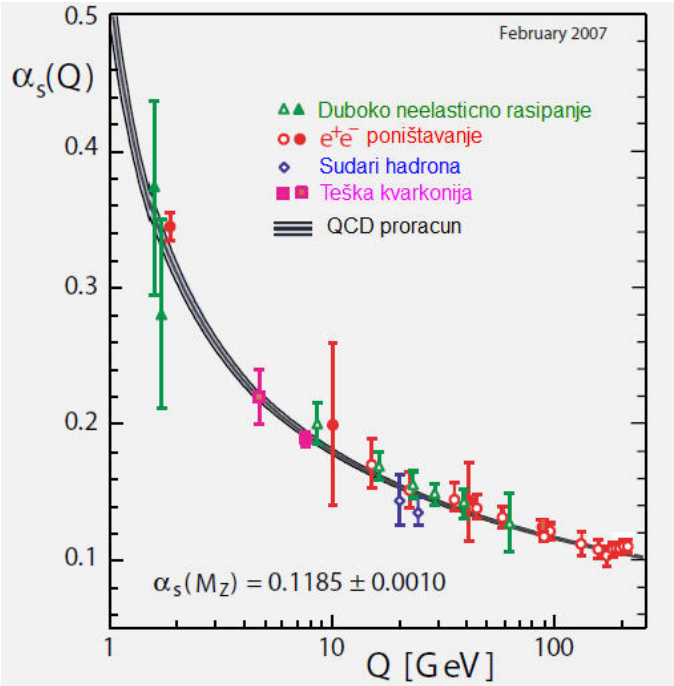
gde je n_f broj kvarkova sa masom ispod energetske razmere Q, prema tome broj između 3 i 6. (Izraz je proširen sa još mnogo dodatnih članova iz pomoć algebre računara.)

Treći naćin da se opiše jaka veza je dakle energetski parametar $\Lambda(n_f)$. Eksperimentima je dobijeno $\Lambda(3)$ = 230(60) GeV, $\Lambda(4)$ = 180(50) GeV i $\Lambda(5)$ = 120(30) GeV. Eksperimenti u akceleratoru koji mere jake veze izuzetno su primenjivani i storine ljudi širom sveta radilo je mnogo godina da bi prikupilo odgovarajuće podatke. Upoređivanje kvantne hromodinamike i eksperimenata, prikazano na ***slici 132***, nije pokazalo bilo kakvo neslaganje između njih.

Slika 132 i izraz (84) prikazuju ono što se naziva ***asimptotska sloboda***: α_s opada sa porastom energije. Grugim rečima, pri velikim energijama kvarkovi se oslobađaju jake interakcije i ponašaju se kao slobodne čestice.[1] Kao posledica asimptotske slobode, u kvantnoj hromodinamici može da se koristi proširenje smetnji samo za energije koje su veće od Λ. Istorijski, otkriće asimptotske slobode bilo je suština da se kvantana hromodinamika ustoliči kao teorija jake interakcije.

Asimptotska sloboda može da se razume u kvalitativnom smislu ako se situacija uporedi sa kvantnom elektrodinanmikom. Veza elektrona se povećava na malim rastojanjima, pošto ekranizacija zbog virtualnog para elektron-pozitron ima sve manji i manji uticaj. U kvantnoj hromodinamici efektivna veza boje takođe se smanjuje na malim rastojanjima, zbog manjeg broja virtualnih parova kvark-antikvark. Medutim osobina gluona koja dovodi do suptotnog efekta, ***antiekranizacija,*** čak je jača: ukupno, stvarna jaka veza raste pri malim rastojanjima.

[1] Asimptotsku slobodu otkruo je 1972. godine Gerardus ‘t Hooft, pošto je već bio dobio Nobelovu nagradu 1999. Godine, 2004. je nagrada dodeljena sledbenicima koji su je naglasili: Davidu Grosu, Davidu Policeru i Franku Vilčeku, koji su 1973. opširno proučavali asimptotsku slobodu.



Slika 132 Izmerene i izračunate varijante jake veze u zavisnosti od energije, pokazuju preciznost lagranžijana kvantne hromodinamike i asimptotsku slobodu jake interakcije (© Siegfrid Bethke, ažurirano iz ***Ref. 192***)

VELIČINE I MASE KVARKOVA

Prema kvantnoj hromodinamici veličina kvarkova, kao i ona kod svih elementarnih čestica, predviđa se da nestaje, kao i u svim kvantnim teorijama polja. Do sada, nijedan eksperiment nije našao bilo koi efekt usled konačne veličine kvarka. Merenja pokazuju da su kvarkovi sigurno manji od 10^{-19} m. (***Ref. 193***). Nijedna predpostavka veličine nije bila data bilo kojom hipotetičkom teorijom. U svim dosadašnjim opisima kvarkovi se predpostavljaju kao tačkasti, ili najmanje Plankove veličine.

Zapazili smo na više mesta da neutralno ili naelektrisana složena čestica ima manju masu nego li njeni sastavni delovi. Međutim, ako potražite vrednost za masu kvarkova u većini tabela, mase *u* i *d* kvarkova su samo reda nekoliko MeV/c^2, pri čemu je masa protona 938 MeV/c^2. Kakva je ovde priča?

Pokazalo se da je odrednica mase mnogo više zapetljana za kvarkove no za druge čestice. Kvarkovi se nikada ne nalaze kao slobodne čestice, već samo u vezanom stanju. Kao rezultat toga, pojam mase kvarka zavisi od sistema izračunavanja koji se koristi. Zbog ***asimptotske slobode*** kvarkovi se ponašaju slično slobodnim česticama jedino na velikim energijama. Masa takvog "slobodnog" kvarka naziva se ***trenutna masa kvarka***; za lake kvarkove ona je samo nekoliko MeV/c^2, kao što je pokazano u ***Tabeli 17***.

Na niskoj energiji, na primer u protonu, kvarkovi nisu slobodni, već moraju da nose veliku količinu energije zbog procesa povezivanja. Kao posledicu toga, vezani kvarkovi imaju mnogo veću efektivnu, takozvanu ***konstitucijsku masu*** kvarka, koja uzima u obzir energiju povezivanja. Da bi se dobila predstava o vrednosti, uzmite proton; relacija neodređenosti za česticu unutar lopte poluprenika 0,9 fm daje neodređenost količine kretanja od oko 190 MeV/c. U trodimenzionalnom prostoru to daje veću energiju za $\sqrt{3}$ puta, ili efektivnu, konstitucijsku masu kvarka od 330 MeV/c^2; zato još uvek možemo da kažemo da složeni proton ima manju masu od njegovih sastavnih delova.

Ukratko, masa protona i neutrona (skoro isključivo) je kinetička energija kvarkova u njima, dok je njihova preostala masa uglavnom zanemarljiva. (***Ref. 194***). Kako kaže Frenk Vilček (Frank Wilczek) neki ljudi dobijaju težinu čak iako nikada ne pojedu nešto teško. Ali takođe mala aktuelna vrednost mase "gornjih (up)", "donjih (down)", "čudnih (strange)" i "ljupkih (charmed)" kvarkova, koja se pojavljuje u lagranžijanu kvantne hromodinamike, zavisi od sistema proračuna koji se koristi. Vrednosti u ***Tabeli 17*** su one koji se koriste za razmeru renormalizacije od 2 GeV. Za polovinu te energije, vrednost mase se povećava za 35%. (***Ref. 185***). Teške mase kvarka su one koje se koriste u takozvanoj ***MS*** šemi, posebnom načinu da se izvedu proširenja smetnji.

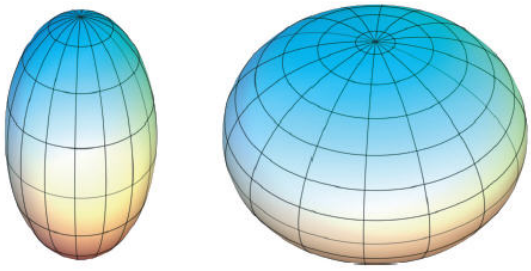
MASA, OBLIK I BOJA PROTONA

Frank Vilček (Frank Wilczek) je smatrao da je jedan od glavnih rezultata kvantne hromodinamike, teorija jake interakcije. taj što objašnjava odnose masa kao što je (***Ref. 194***).

$$m_{\text{proton}} \sim e^{-k/\alpha} m_{\text{Planck}} \quad \text{i} \quad k = 11/2\pi \ , \quad \alpha_{\text{unif}} = 1/25 \tag{85}$$

Ovde je vrednost konstante veze α_{unif} uzeta za veliku energiju unifikacije. sačinilac od 1000 ispod Plankove energije. (Pogledati odeljak o velioj unifikaciji u daljem tekstu.) (***Strana 201***). Drugim rečima glavno razumevanje masa vezanih stanja jake imterakcije, kao što je proton, zahteva skoro potpuno poznavanje energije unifikacije i konstante veze na toj energiji. Približna vrednost $\alpha_{\text{unif}} = 1/25$ predstavlja ekstrapolaciju od vrednosti manje energije, korišćenjem podataka iz eksperimenata. Sačinilac srazmere *k* u izrazu (85) nije lak za izračunavanje. On se obično odeđuje pomoću računara korišćenjem rešetke kvantne hromodinamike.

Međutim osobina protona nije samo masa. Budući da je on oblak kvarkova i gluona, on ima takođe i oblik. Zanimljivo je da je bilo potrebno mnogo vremena pre no što su se ljudi zainteresovali za taj aspekt. Proton, budući da se načinjen od dva "up (gornja)" kvarka i jednog "down (donjeg)" kvarka, nalikuje jonizovanom molekulu H_2^+, gde jedan elektron obrazuje oblak oko dva protona. Očigledno, molekul H_2^+ je ili ***izdužen*** ili ***spljošten***, kao što je prikazanp na ***slici 133***



Slika 133 Prikaz elipsoidnog oblika koji se izdužen (levo) ili spljošten (desno) (© Sam Derbyshire)

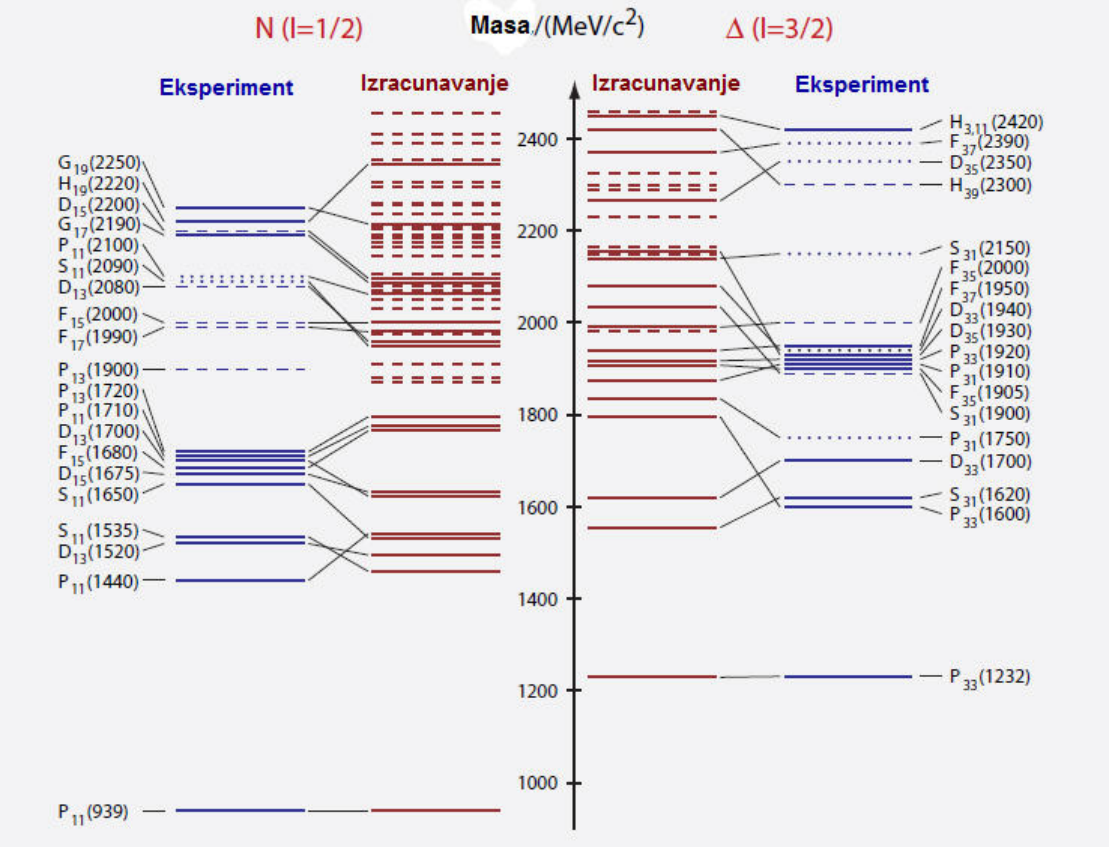
Da li je proton izdužen? Ne postoji spektroskopsko merljivo odstupanje od lopte – ili kvadripolnog momemta – protona. Međutim, proton ima ***sopstveni*** kvadripolni moment. Kvadripolni momenti protona i neutrona usvojeni kao pozitivni u svim poznatim postupcima izračunavanja, podrazumevaju ***izduženi*** oblik. (***Ref. 195***). Skorija merenja u Jefferson Laboratories potvrdila su ova predviđanja. Izdužen oblik je predpostavljen za sve barione sa $J = 1/2$, nasuprot spljoštenom obliku predviđenom za barione sa $J = 3/2$. Za pseudoskalarni mezon sa spinom 0 predpostavlja se da je izdužen, dok je za vektorski mezon sa spinom 1 predpostavljeno da je spljošten.

Oblik bilo kojeg molekula zavisiće od toga da li je okružen drugim molekulima. Poslednja ispitivanja su pokazala ovu simetričnost, i veličina i oblik protona u jezgru malo odstupaju; i jedno i drugo izgleda da zavise od nukleona od kojih je proton izgrađen. (***Ref. 196***).

Osim oblika molekuli imaju i boju, Boja molekula, kao i svakog drugog objekta, nastaje usled energije koja se apsorbuje kada je on ozračen. Na primer, molekul H_2^+ može da apsorbuje neke učestanosti svetlosti kada pređe u pobuđeno stanje. Molekuli menjaju masu kada apsorbuju svetlost; u stanju pobuđenosti oni su teži no u osnovnom stanju.

Na isti način mogu da se pobude protoni i neutroni. Ustvari, njihova pobuđena stanja proučavana su detaljno (***Ref. 185***); rezultati, koji takođe pokazuju i ograničenja u pristupu, prikazani su na ***slici 134***. Većina pobuđenih stanja moze da bude objašnjena kao pobuđena stanja kvarkova, međutim još više kao predviđena. Izračunate mase slažu se sa posmatranjima do u 10%. Model kvarka i kvantna hromodinamika prema tome struktuiraju i objašnjavaju veliki deo spektra bariona, ali slaganja još uvek nisu savršena.

Očigledno, u našem svakodnevnom okruženju ne pojavljuju se energije neophodne da bi se pobudili nukleoni – zapravo one se ne pojavljuju ni u unutrašnjosti Sunca – pa ova pobuđena stanja mogu da se zanemare. One se pojavljuju samo u ubrzivačima čestica (akceleratorima) i kod kosmičkih zraka. U rom smislu možemo da kažemo da u našem uglu svemira boja protona obično nije vidljiva.



Slika 134 Spektar masa pobuđenih stanja protona: vrednosti određene eksperimentalno i izračunate (iz ***Ref. 185***)

ZANIMLJIVOSTI O JAKOJ INTERAKCIJI

U dobro poznatoj analogiji, kvantna hromodinamika može da se uporedi sa superprovodnošću. ***Tabela 18*** daje pregled uporedivosti.

TABELA 18 Sličnosti između kvantne hromodinamika i superprovodnosti

Kvantna hromodinamika	**Superprovodnost**
Kvark	magnetni jednopol
Sila boje nelinearnosti	interakcija rešetke elektrona
Hromoelektrična cev upliva	magnetna cev upliva
Privlačenje gluon-gluon	privlačenje ečektron-elektron
Gluonske lopte	Kuperov par
Nestabilnost čistog vakuuma	nestabilnost gole Fermijeve površine
Diskretna centralna simetrija	kontunualna U(1) simetrija
Simetriju prekida visoka temperatura	simetriju prekida niska temperatura

* * *

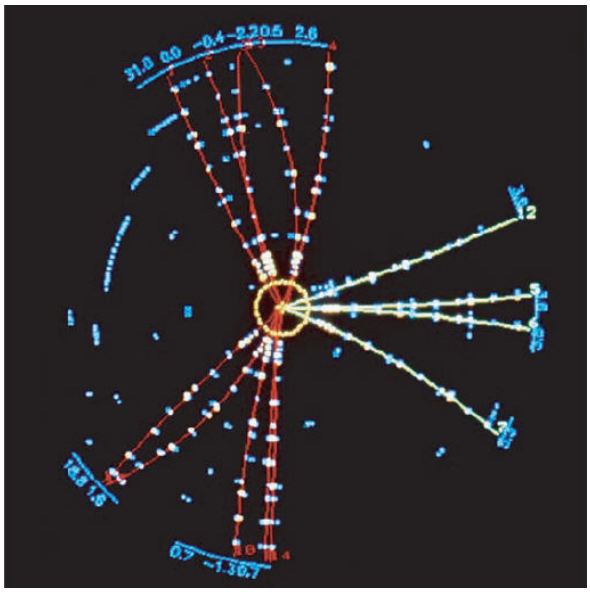
Izračunavanja na računaru potrebna da bi se izdvojili podaci za česticu iz lagranžijana kvantne hromodinamike spadaju među najsloženija izračunavanja koja su ikada vršena. Ona prema redu veličina nadmašuju prognozu vremena, simulacije protoka i slčno. Niko ne zna da li će to biti potrebno i u budućnosti: trka za nalaženje postupka jednostavne približnosti radi nalaženja rešenja još uvek je u toku.

* * *

Iako su gluoni bez mase, slično kao što su fotoni ili gravitoni, u prirodi ne postoji zračenje u boji. Gluoni nose boju i vezuju se međusobno; kao posledica toga za slobodne gluone predpostavljen je direktan raspad na kvark-antikvark.

Prvi jasan raspad gluona opažen je 1979. godine u sudaraču čestica PETRA u Hamburgu. (***Ref. 190***). Pojava izvednog događaja, nazvanog ***mlaz gluona*** nastala je zbog raspada gluona velike energije u uski

zrak čestica. Mlaz gluona se pojavljuje u koplanarnom događaju tri mlaza. Žapažen stepen i druga svojstva ovog događaja potvrđuju predviđanja kvantne hromodinamike. Eksperimenti u PETRA isto tako su odredili spin S = 1 gluona i tok konstante jake veze. Heroj iz tog vremena bio je vođa projekta Gustav-Adolf Vos (Voss), koji je dovršio ubrzivač sa predviđenim sredstvima i šest meseci pre roka



Slika 135 Tri mlaza opaženih u ubrzivaču PETRA u Hamburgu, Nemačka. Događaj koji je pokrenut sudarom elektron-pozitron, omogućio je otkriće raspada gluona i merenje njegovog spina (© DESY)

* * *

Nešta slično zračenju boje, ali još čudnije, možda je bilo otkriveno 1997.godine. Verovatno je da je skalarni mezon sa masom od 1,5 GeV/c^2 ***gluonska lopta***. To je hipotetički mezon sastavljen samo od gluona. Numerički rezultati iz teorije rešetkastog merila izgleda da potvrđuju mogućnost postojanja gluonske lopte u tom području mase. (***Ref. 197***). O postojanju gluonske lopte vodi se još uvek žestoka rasprava.

* * *

Postoji sve veća saglasnost da su ***tetrakvarkovi*** većina lakih skalarnih mezona mase ispod 1 GeV/c^2. (***Ref. 198***). Eksperimenti izvedeni 2003. godine dali su i kandidata za teže tetrakvarkove, naime X(3872), Ds(2317) i Ds(2460). U godinama koje dolaze pokazaće se da li je ovakvo predstavljanje ispravno.

* * *

Da li postoje čestice načinjene od pet kvarkova, takozvane ***pentakvarkovi***? Izgleda da do sada one postoje samo u nekoliko laboratorija u Japanu, dok u ostalim laboratorijama širom sveta nisu zapažene. (***Ref. 199***). Mnogi istraživači više ne veruju ovim rezultatima.

* * *

Uvek kada pogledamo periodičnu tabelu elemenata, vidimo prisutnost jake interakcije. Lagranžijan jake interakcije opisuje poreklo i svojstva do sada poznatih 115 elemenata.

Ipak jedan glavni aspekt jezgra određen je elektromagnetnom interakcijom. Zbog čega postoji oko 115 različitih elemenata? Zato što je elektromagnetna konstanta veze α oko 1/137,036. Uz više detalja odgovor je sledeći. Ukoliko bi naelektrisanje jezgra bilo mnogo veće od oko 137, električno polje oko jezgra dovelo bi do spontanog stvaranja parova elektron-pozitron; stvoreni elektroni bi pali u jezgro i pretvorili jedan proton u neutron, te stoga sprečili postojanje većeg broja protona. Konačan broj elemenata postoji zbog postojanja elektromagnetne interakcije.

* * *

Da bi se saznalo više o radioaktivnosti, njenim efektima, opasnosti od nje i šta vlade nogu da učine u tom pogledu, pogledajte veb stranu *Federal Office for Radiation Protection* koja je dostupma na engleskom i nemačkom jeziku www.bfs.de.

* * *

Od 1990-ih godina nadalje redovno se tvrdilo da izuzetno siromašne države grade nuklearno naoružanje. Zašto je ovo malo verovatno? (***Izazov 143e***).

* * *

Istorijski nuklearne reakcije su obezbedile prvu proveru izraza $E = c^2\gamma m$. To su postigli 1932. godine Kokroft (Cockcroft) i Valton (Walton). Oni su pokazali da ako se upucaju protoni u jezgro litijuma nastaje reakcija

$$ {}^{7}_{3}\mathrm{Li} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{8}_{4}\mathrm{Be} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} + 17\ \mathrm{MeV} \qquad (86) $$

Izmerena energija na desnoj strani ima tačno istu vrednost koja se dobija iz razlike ukupnih masa sa obe strane reakcije.

* * *

Veliki deo istraživača kaže da je kvantna hromodinamika određena preko ***dva*** parametra. Osim konstante veze oni uzimaju u obzir jak CP (charge+parity) parametar. Ustvari, može biti da jaka interakcija narušava CP invarijantu. Ovo narušavanje moglo bi da se opiše drugim članom u lagranžijanu; njegova jačina mogla bi da se opiše drugim parametrom, fazom, obično obeležavanom sa θ_{CP}. Međutim izvršeno je mnogo eksperimenata velike preciznosti da bi se našao taj efekt, međutim, u jakoj interakciji nije otkriveno CP narušavanje.

ZAKLJUČAK O KVANTNOJ HROMODINAMICI I NJENIM OTVORENIM TEMAMA

Kvantna hromodinamika, ne-abelijska teorija merila zasnovana na lagrnžijanu sa SU(3) simetrijom, opisuje svojstva gluona i kvarkova, svojstva protona, neutrona i svih ostalih hadrona, svojstva atomskog jezgra, rad zvezda i poreklo atoma u nama i oko nas. Bez jake interakcije mi ne bismo imali meso i krv. I svi ovi aspekti prirode usledili su iz prostog broja, konstante jake veze i SU(3) simetrije merila. Jaka interakcija deluje samo na kvarkove i gluone. U njoj su očuvani tip čestice, boja, električni naboj, slabi naboj, spin, kao i C, P i T paritet

Kvantna hromodinamika i eksperimenti slažu se uvek kada se načine upoređenja. Kvantna hromodinamika je savršen opis jake interakcije. Ograničenja kvantne hromodinamike samo su pojmovna. Kao i u celoj kvantnoj teoriji polja, tako i u slučaju kvantne hromodinamike matematički oblik lagranžijana je skoro jedinstveno određen potrebnom renormalizacijom, Lorencovom invarijantom i invarijantom merila – SU(3) u ovom slučaju. Kažemo "skoro", pošto lagranžijan, uprkos tome što je tačno opisan svim eksperimentima, sadrži nekoliko parametara koji su ostali neobjašnjeni:

- Broj 6 i mase kvarkova m_q nisu objašnjeni kvantnom hromodinamikom.
- Konstanta veze jake interakcije g_s ili ekvivalentno α_s ili Λ nisu objašnjeni. Kvantna hromodinamika predviđa njenu zavisnost od energije, ali ne i njenu apsolutnu vrednost.
- Eksperimentalno je nađeno da je jaka interakcija CP očuvanje. To nije očigledno; lagranžijan kvantne hromodinamike predpostavlja da nestaje član svakog CP narušavanja, mada u lagranžijanu postoje članovi CP narušavanja koji su Lorencova invarijanta, invarijantna merila i renormalizirani.
- Svojstva prostor-vremena, posebno negova Lorencova invarijanta, je kontinualna a broj njenih dimenzija se pretpostavlja od samog početka i očigledno je sve neobjašnjeno u kvantnoj hromodinamici.
- Isto tako nije poznato kako bi kvantna hromodinamika morala da se izmeni u jakoj gravitaciji, to jest u jako zakrivljenom prostor-vremenu.

U poslednjem delu naše pustolovine mi ćemo istražiti načine da se ova ograničenja prevaziđu. Pre no što to učinimo, moramo da pogledamo druge nuklearne interakcije koje su zapažene u prirodi.

Poglavlje 8

SLABA NUKLEARNA INTERAKCIJA I SPRETNOST PRIRODE

Najčudnija interakcija u prirodi je slaba interakcija. Slaba interakcija preobražava jedne elementarne čestice u druge, ima čestice zračenja koje imaju masu, narušava pariter i ponaša se različito prema levom i desnom. Srećom, mi se u svakodnevnom životu ne srećemo slabu interakciju, pošto bi njena svojstva narušila mnogo onog što doživljavamo kao normalno. Ova suprotnost čini da je slaba interakcija najinteresantnija od četiti interakcije u prirodi.

PREOBRAŽAJ ELEMENTARNIH ČESTICA

Radioaktivnost, posebno takozvani β raspad, neobična je pojava. Eksperimenti izvedeni tokom 1910-ih godina pokazali su da kada izvori β zračenja emituju elektrone, atomi se ***preobražavaju*** iz jednog hemijskog elementa u drugi. Na primer, eksperimenti kao što je onaj prikazan na ***slici 136***, pokazuju da se tricijum, izotop vodonika, raspada u helijum prema

$$ {}^{3}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{3}_{2}\mathrm{He} + e^{-} + \overline{\nu}_e \qquad (87) $$

Ustvari, novi elementi se pojavljuju u svim β raspadima. Tokom 1930-ih godina postalo je jasno da proces preobražavanja nastaje usled toga što se neutrom u jezgru pretvara u proton (i još u nešta):

$$ n \rightarrow p + e^{-} + \overline{\nu}_e \qquad (88) $$

Ova reakcija objašnjava sve β raspade. Tokom 1960-ih godina model kvarka je pokazao da je β raspad zapravo usled promene “down (donjeg)” kvarka u “up (gornji)” kvark:

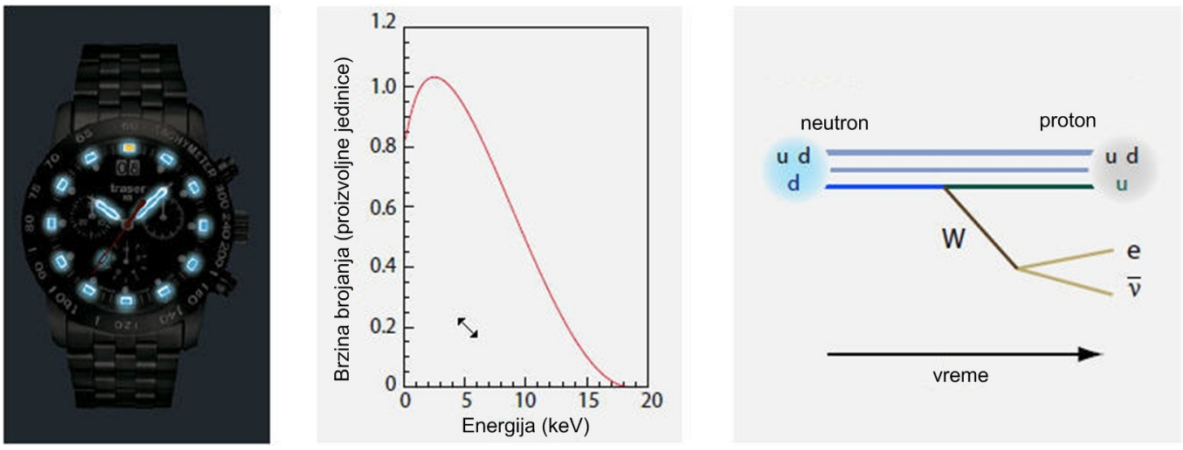
$$ d \rightarrow u + e^{-} + \overline{\nu}_e \qquad (89) $$

Ova reakcija objašnjava preobražaj neutrona – stanje ***udd*** – u proton – stanje ***uud***. Ukratko, materijalne čestice mogu da se preobražavaju jedne u druge. Zapažamo da se ovaj preobražaj razlikuje od onog što se događa u drugim nuklearnim procesima. U fuziji, fisiji ili α raspadu, iako se menjaju jezgra, svaki neutron i svaki proton zadržavaju svoje prirode. U β raspadu elementarne čestice nisu nepromenljive. Snovi Demokrita i Leukipa o nepromenljivim osnovnim građevnskim blokovima definitivno ***nisu*** ostvarena u prirodi.

Eksperimenti pokazuju da preobražaj kvarka ne može da se postigne pomoću elektromagnetnih polja, ni pomoću polja gluona, ni pomoću gravitacije. Mora da postoji drugi tip zračenja u prirodi, i time još jedna, četvrta interakcija. Hemijski preobražaji su dakle retki, u suprotnom ne bismo trčali okolo sa nepromenjivim hemijskim jedinjenjima. Četvrta inerakcija je prema tome ***slaba***. Pošto je proces preobražaja prvo zapažen u jezgrima (nukleusu) interakcija je dobila ime ***slaba nuklearna interakcija***.

U β raspadu slaba nuklearna interakcija preobražava kvarkove jedne u druge. Ustvari, slaba nuklearna interakcija isto tako može da preobražava leptone jedne u druge, kao na primer mione u elektrone. Ali kuda odalazi energija koja se oslobađa u β raspadu? Merenja izvršena 1911. godine pokazala su da je energetski spektar emitovanih elektrona kontinualan. To je prikazano na ***slici 136***. Kako je to moguće? Godine 1930. Volfgang Pauli (Wolfgang Pauli) imao je hrabrost i genijalnost da objasni ovo zapažanje smelom hipotezom: energija raspada se deli između elektrona i nove, zaista začuđujuće čestice, ***neutrina*** – preciznije antineutrino elektrona $\overline{\nu}_e$. Da bi se slagalo sa podacima, neutrino mora da je bez električnog naboja, ne može da bude u jakoj interakciji i mora da bude veoma male mase. Kao rezultat toga, neutrini su izuzetno retko u interakciji sa običnom materijom i obično prođu kroz Zemlju bez uticaja na nju. Ovakve osobine čine da je njihovo otkrivanje veoma teško, ali ne i nemoguće; prvi neutrino je komačno detektovan 1952. godine. Kasnije je otkriveno da postoje tri vrste neutrina, koji se sada nazivaju ***elektron neutrino***,

mion neutrino i ***tau neutrino***, svaki sa sopstvenom antičesticom. Za rezime ovih eksperimentalnih napora pogledajte ***Tabelu 19***.



slika 136 β raspad (beta raspad) u tricijumu: savremen časovnik pokretan tricijumom, izmeren kontinualni spektar energije emitovanh elektrona iz tricijuma i proces koji se događa u jezgru tricijuma (© saradnja Tracern Katrin)

TABELA 19 Leptoni: tri neutrina i tri naelekrtisana leptona (antičestice inaju suprotan naboj *Q* i paritet *P*)

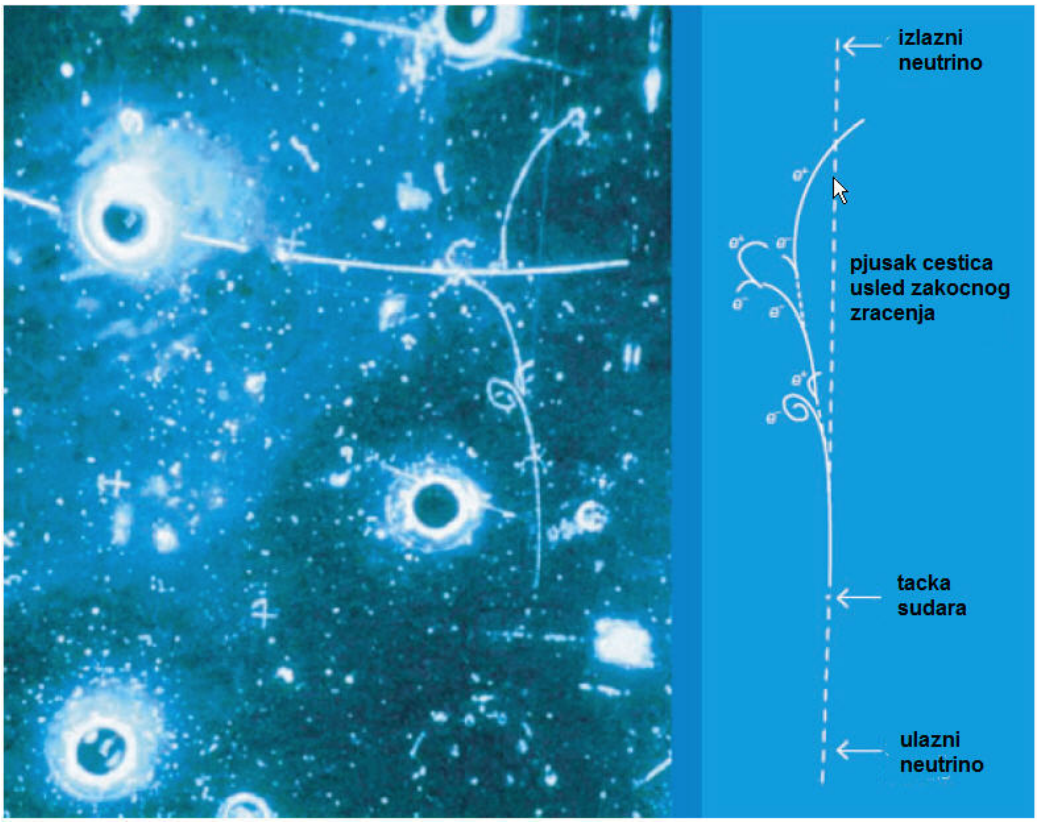
Neutrino	**Masa *m* i raspad (vidi tekst)**	**Spin *J* Paritet *P***	**Boja; moguće slabo ponašanje**	**Naboj *Q* Izospin *I* čudnost *S* ljupkost *C*, donji *B'* gornji *T***	**leptonski broj *L*, barionski broj *B***
Elektron neutrino	< 2 eV/c^2 oscilira	$\frac{1}{2}^+$	bela, singlet, dublet	0,0,0,0,0,0	1, 0
Mion neutrino	< 2 eV/c^2 oscilira	$\frac{1}{2}^+$	bela, singlet, dublet	0,0,0,0,0,0	1, 0
Tau neutrino	< 2 eV/c^2 oscilira	$\frac{1}{2}^+$	bela, singlet, dublet	0,0,0,0,0,0	1, 0
Elektron	0.510998928(11) MeV/c^2 stabilan	$\frac{1}{2}^+$	bela, singlet, dublet	-1,0,0,0,0,0	1, 0
Mion	105,6583715(35 MeV/c^2 cca 99% $e\bar{\nu}_e\nu_\mu$	$\frac{1}{2}^+$	bela, singlet, dublet	-1,0,0,0,0,0	1, 0
Tau	1,77682(16) GeV/c^2 cca 17% $\mu\bar{\nu}_\mu\nu_\tau$ cca 18% $e\bar{\nu}_e\nu_\tau$	$\frac{1}{2}^+$	bela, singlet, dublet	-1,0,0,0,0,0	1, 0

SLABOSTI SLABE NUKLEARNE INTERAKCIJE

Iz posmatranja β raspada i pomoću modela kvarka fizičari su brzo zaključili da mora da postoji neka međučestica koja je nosilac slabe nuklearne interakcije, slično fotonu koji nosi elektromagnetnu interakciju. Ovo "slabo zračenje" nasuprot svim ostalim vrstama zračenja sastoji se od čestica velike mase.

- Postoje dve vrste čestica slabog zračenja: neutralni Z bozon sa masom od 91,2 GeV – to jest mase skoro kao atom srebra – i naelektrisan W bozon sa masom od 80,4 GeV.

Zajednički naziv za W i Z bozone je ***slabi vektorski bozoni*** ili ***slabi srednji bozoni***.



Slika 137 Prvo opažanje virtualnog Z bozona: samo neutralna slaba struja omogućava da se neutrino sudari sa elektonom u komori sa mehurićima i da je zatim napusti (© CERN)

Mase slabog vektorskog bozona su tako velike jer slobodno slabo zračenje postoji samo u izuzetno kratkom vremenu, oko 0,1 ys; poste toga se bozoni raspadaju. Velika masa je razlog što je slaba interakcija izuzetno kratkog opsega i zato izuzetno slaba. U stvari, svaka razmena virtualnih nosećih čestica srazmerna je sa negativnim izložiocem mase međučestice. Nekoliko ostalih svojstava navedeno je u ***Tabeli 20***. Zapravo, slaba interakcija je toliko slaba, da neutrini, čestice koje su u interakciji ***jednom nedeljno***, imaju veliku verovatnoću da prođu kroz Sunce bez ikakve interakcije.

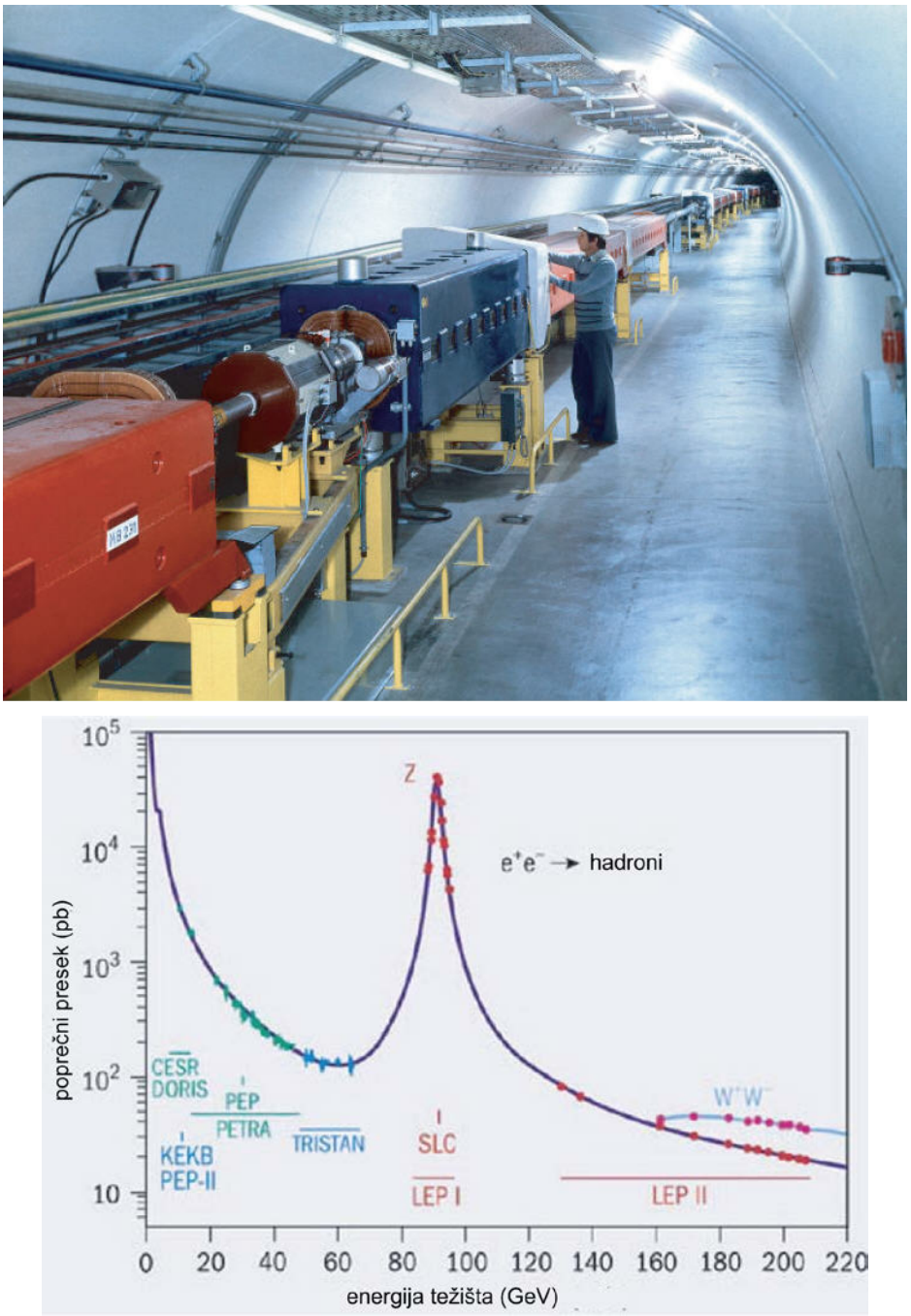
TABELA 20 Vektorski srednji bozon slabe interakcije (Z bozon je sopstvena antičestica) W bozon ima antičesticu suprotnog naelektrisanja)

Bozon	**Masa *m***	**Spin *J***	**Boja; moguće slabo ponašanje**	**Naboj *Q* Izospin *I* Strangeness *S* Charm *C*, Beauty *B'* Topness *T***	**Leptonski broj *L*, Barionski broj *B***
Z bozon	91.1876(21) GeV/c^2	1	bela, “triplet”	0,0,0,0,0,0	0, 0
W bozon	80.398(25) GeV/c^2	1	bela, “triplet”	1,0,0,0,0,0	0, 0

Postojanje naelektrisanih međučestica velike mase, vektorskog bozona, danas imenovanih kao W bozoni, bilo je izvedeno i predpostavljeno tokom 1940-ih godina; međutim teoretski fizičari nisu prihvatali ovu ideju sve dok holandski fizičari Martin Veltman i Gerard’t Hooft nisu dokazali da je bilo moguće da se ima tolika masa, a da ne postoje problemi u ostatku teorije. za ovaj dokaz njih dvojica su dobili Nobelovu nagradu za fiziku – posle eksperimentalne potvrde njihove predpostavke.

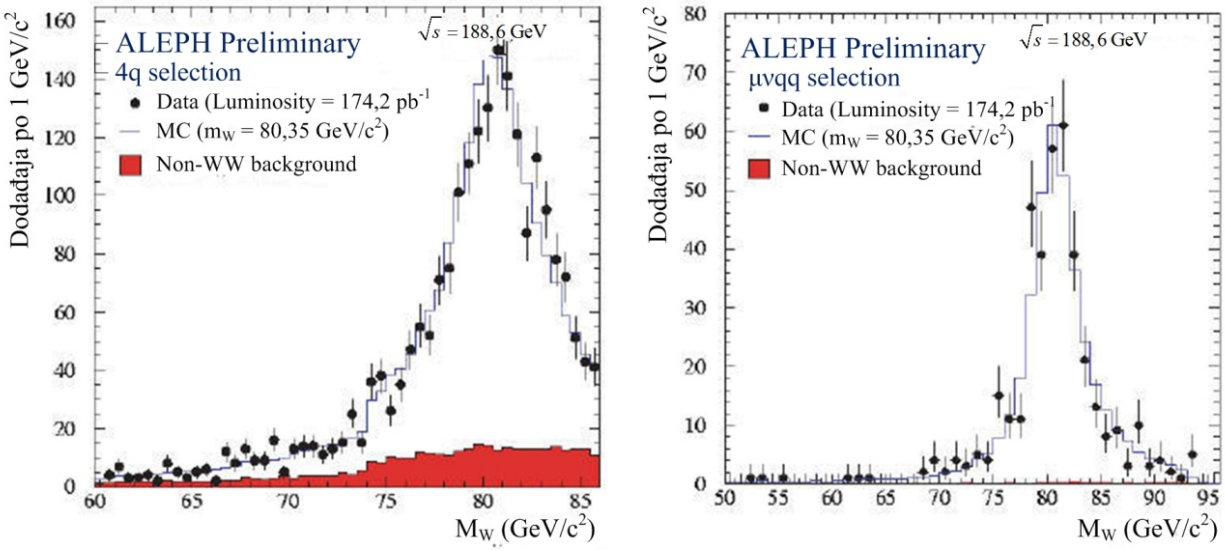
Postojanje drugog neutralnog vektorskog srednjeg bozona, Z bozona, bili su predpostavili samo malo posle W bozona fizičari Salem, Vajnberg (Weinberg) i Glešou (Glashow). Eksperimentalno je Z bozon prvi put opažen 1973. godine kao ***virtualna*** čestica u CERN-u, Ženeva. Otkriće je načinjeno posle pregleda, jedne po jedne, od 700.000 fotografija snimljenih u Gargamel komori sa mehurima. Nađeno je samo nekoliko zanimljivih fotografija; najpoznatija je ona prikazana na ***slici 137***.

Godine 1983. grupa iz CERN-a proizvela je i otkrila stvarne W i Z bozone. Ovaj eksperiment je bio petogodišnji zajednički trud hiljada ljudi. Rezultati su navedeni u ***Tabeli 20***. Vođa energetskog dela projekta, Karlo Rubia (Carlo Rubbia), čiji je gadan temperament učinio da ga sekretarice napuste u proseku posle tri sedmice, i šef tehnologa, Simon van der Meer, dobili su 1984. godine za ovo otkriće Nobelovu nagradu za fiziku. To je ponovo potvrdilo "zakon" prirode da su bozoni otkriveni u Evropi, a fermioni u Americi. Najjednostavniji podaci koji prikazuju Z i W bozone prikazani su na ***slici 138*** i ***slici 139***: oba rezultata su otkrivena iz poprečnoh preseka sudara elektron-pozitron u LEP, desetak godina posle početnog otkrića.



Slika 138 Gore: SPS uređaj za ubzavanje proton-antiprotona i sudaranje u CERN-u, sa obimom od 7 km, koji je korišćen za ostvarenje prvog opažanja stvarnih W i Z bozona. Dole: lepo jednostavno opažanje Z bozona pomoću LEP, naslednika uređaja (© CERN)

Na isti način na koji su fotoni emitovani zbog ubrzanih električnih naboja, W i Z bozone emituju ubrzani slabi naboji. Zbog velikh masa W i Z bozona neophodna ubrzanja su veoma velika, tako da se ona mogu naći samo u izvesnim nuklearnim raspadima i pri sudaru čestica. I pored toga W i Z bozoni su. osim što su im velike mase i slab naboj, slični fotonima u svakom drugom pogledu. Naročito što je opaženo je da su W i Z bozoni elementarne čestice. Na primer, W žiromagnetni odnos ima vrednost predpostavljenu za elementarne čestice. (***Ref. 185***).

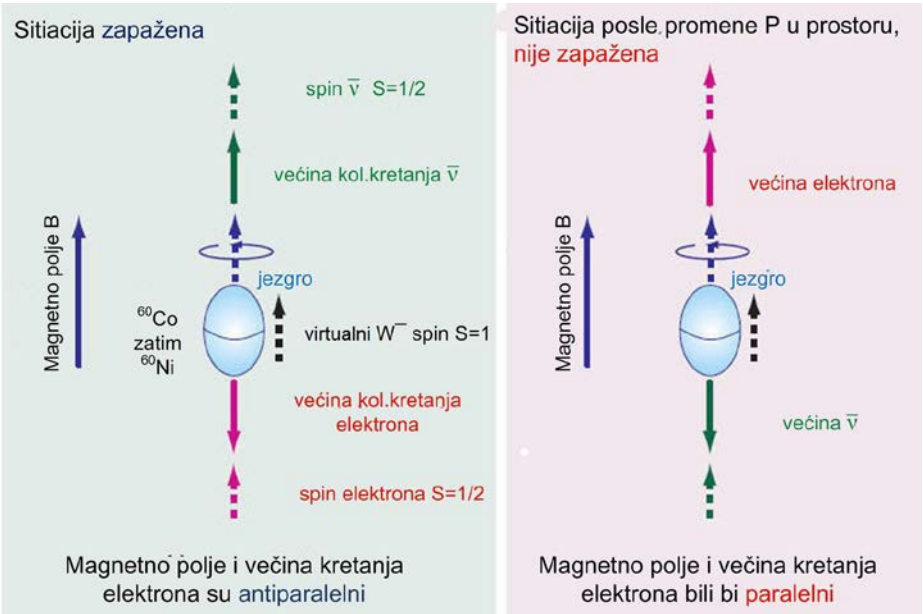


Slika 139 Merenje W bozona na LEP (© CERN)

RAZLIKOVANJE LEVOG OD DESNOG

Druga čudna osobina slabe interakcije je neočuvanje pariteta P pri inverziji prostora. Slaba interakcija pravi razliku između sistema ogledala; to je u suprotnosti sa svakodnevnim životom, sa gravitacijom, sa elektromagnetizmom i sa jakom interakcijom. Neočuvanje pariteta slabe interakcije predpostavili su 1956. godine Li Cung-Dao i Jang Čen Ning u cilju da objasne sposobnost K^0 mezona da se nekada raspada na 2 piona, koji imaju paran paritet, a ponekad na 3 piona koji imaju neparan paritet. (***Ref. 201***).

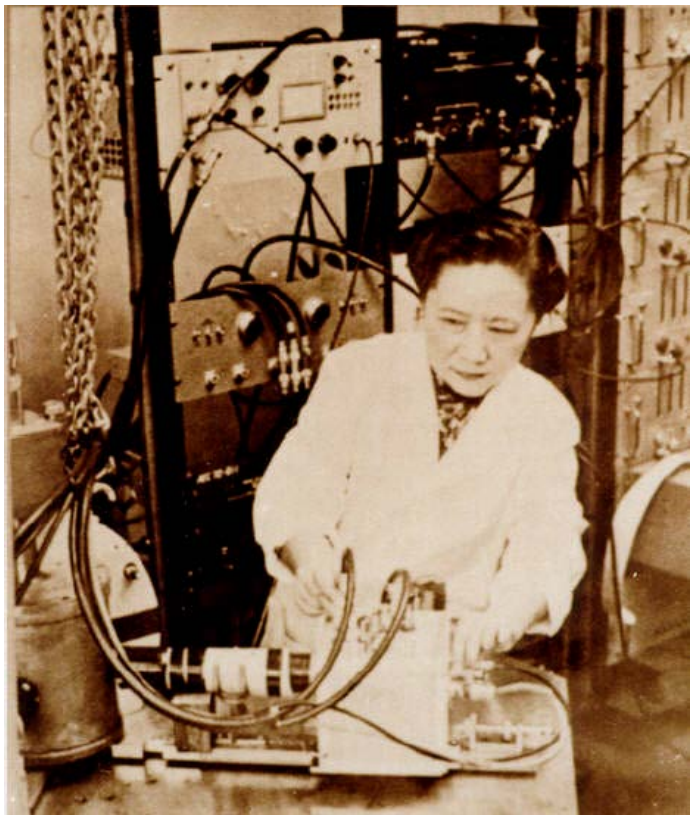
Li i Jang su predložili eksperiment Vu Čien Šiung.[1] Eksperiment koji je ona izvela sa svojim timom prikazan je šematski na ***slici 140***. Nekoliko meseci posle prvog susreta sa Li i Jangom, Vu i njen tim su otkrili da se u β raspadu kobalta jezgra poravnavaju duž magnetnog polja, a elektroni se emituju uglavnom ***nasuprot*** spinu jezgra. U eksperimentu sa obrnutim paritetom elektroni bi se emitovali ***duž*** smera spina; međutim, ovaj slučaj nije primećen. Paritet je narušen. Li i Jang su za ovo otkriće dobili 1957. godine Nobelovu nagradu.



Slika 140 Izmereno ponašanje β raspada i njegovo zamišljeno, ali nikad opaženo, ponašanje pri inverziji prostora P (odgovara odrazu u ogledalu plus dodatno obrtanje za π oko ose upravne na ravan ogledala

[1] Vu Čien-Šiung (1912. Shanghai – 1997. New York) njene koleginice su je zvale „madame Wu“. Bila je bistra i pokretačka fižičarka rođena u Kini. Radila je takođe na razvoju nuklearnog oružja; kasnije u životu ona je bila predsednica Američkog Društva Fizičara (American Physical Society).

Paritet je prema tome narušen usled slabe interakcije. Narušenost pariteta ne pojavljuje se samo pri β raspadu. Narušenost pariteta nađena je u raspadu miona i u svakom drugom procesu slabe interakcije koji su do sada proučavani. Posebno pri sudaru dva elektrona, takvi sudari koji su posredovani slabom interakcijom ponašaju se drugačije kada se eksperiment izvede obrnut u ogledalu. Broj eksperimenata pokazuje ovo povećanje iz godine u godinu. (***Ref. 202***). Godine 2004. dva polarizovana zraka elektrona – jedan levi i jedan desni – bili su upucani u materijalni cilj i prebrojeni su odbijeni elektroni. Razlika je bila 0,175 delova na milion – mala ali merljiva. Eksperiment je takođe potvrdio predpostavljen meki električni naboj elektrona od -0,046.



Slika 141 Vu Čien-Šiung (Wu Chien-Shiung, 1912–1997) pri njenom eksperimentu narušavanja pariteta

Lepa posledica narušavanja pariteta je njegov uticaj na ***boju*** kod nekih atoma. (***Ref. 203***). Ovu su predpostavku načinili 1974. godine Bušia i Bušia (Bouchiat & Boichiat). Slaba interakcija je izazvana slabim naelektrisanjen elektrona i jezgra; prema tome, elektroni u atomu ne razmenjuju virtualne fotone sa jezgrima, već isto tako i Z čestice. Verovatnoća za ovaj poslednji proces je izuzetno mala, oko 10^{-11} puta manja od razmene virtualnih fotona. Međutim, pošto u slaboj interakciji nije očuvan paritet, ovaj proces dopušta promenu elektrona, što je nemoguće u čistim elektromagnetnim efektima. Godine 1984. merenja su potvrdila da izvesna optička pretvaranja atoma cezijuma koja su nemoguća u elektromagnetnoj interakciji, postaju moguća ako se uzme u obzir slaba interakcija. (***Ref. 204***). Više grupa je ispravljalo ove rezultate i bile su u mogućnosti da potvrde izračunavanja zasnovana na osobinama slabe interakcije, uključujući i slab električni naboj jezgra, do unutar nekoliko procenata. (***Ref. 205***)

Slaba interakcija prema tome omogućava da se načini razlika između levog i desnog. Priroda ima procese koji se razlikuju od njihove verzije u ogledalu. Ukratko, fizika čestica pokazuje da je priroda (u manjoj meri) levoruka.

Osobina levorukosti prirode treba da se prihvati doslovno. Svi eksperimenti su potvrdili dva glavna iskaza o slaboj interakciji koji mogu da se pogode već sa ***slike 140***. (***Izazov 144e***).

- Slaba interakcija spaja se samo sa levorukim česticama i sa desnorukim antičesticama. U slaboj interakciji pariter je ***maksimalno narušen***.
- Svi dosad opaženi neutrini su levoruki, a svi antineutrini su desnoruki.

Ovi rezultati mogu da se održe ako masa neutrina nestaje ili je zanemarljivo mala. Ova dva reziltata eksperimenata popravljaju nekoliko aspekata lagranžijana slabe interakcije.

RAZLIKOVANJE ČESTICA I ANTIČESTICA, NARUŠAVANJE CP PARITETA

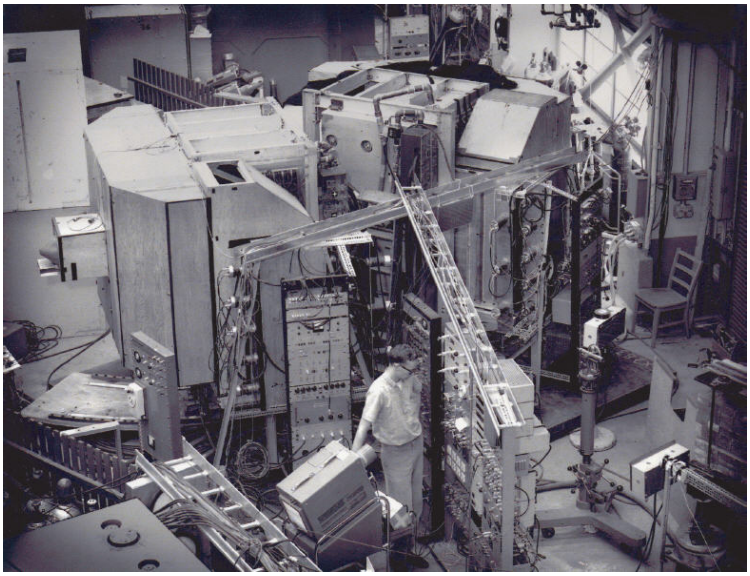
Zapažanje da slaba interakcija utiče samo na levoruke čestice i desnoruke antičestice ima važnu posledicu: to podrazumeva narušavanje pariteta C. (***Izazov 145e***). Posmatranja prelaska miona u elektron pokazuju ovo najjasnije: raspad antimiona razlikuje se od raspada miona. Slaba interakcija pravi razliku između čestica i antičestica.

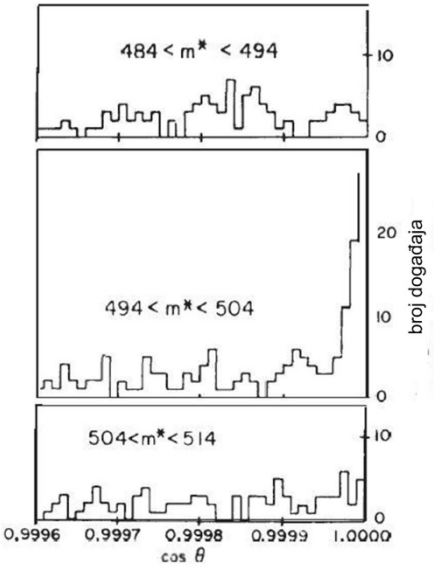
- Eksperimenti pokazuju da je ***maksimalno narušen*** C paritet isto kao P paritet.

Ovaj efekt je takođe potvrđen u svim narednim ikad izvršenim posmatranjima slabe interakcije.

Međutim, to nije sve. Val Fič (Val Fitch) i Džejms Kronin (James Cronin) 1964. godine načinili su sada čuveno zapažanje u raspadu neutralnih K mezona.

- Slaba interakcija takođe narušava kombinaciju inverzije pariteta sa simetrijom čestica-antičestica, takozvanu CP invarijantu. Nasuprot narušavanjima P pariteta i C pariteta, koji su maksimalni, narušavanje CP ima mali efekt.





Slika 142 Levo: Postavka za eksperiment merenja ponašanja raspada neutralnog K mezona. Desno: merenje zavisnosti od ugla; srednji grafik pokazuje vrh na desnoj strani koji se nebi pojavio ukoliko CP simetrija nebi bila narušena. (© Brookhaven National >Laboratory, Nobel Foundation).

Eksperiment prikazan na ***slici 142*** doneo im je Nobelovu nagradu 1980. godine. CP narušavanje bilo je zapaženo kod neutralnih B mezona, u nekoliko različitih procesa i reakcija. Istraživanja ostalih primera CP narušavanja, kao što je nenestajućeg momenta električnog dipola elementarnih čestica, predstavlja polje intenzivnog istraživanja. Istraživanje nije jednostavno, pošto CP narušavanje ima mali efekt u inače već slaboj interakciji; to samo čini da su eksperimenti obimni i skupi.

Pošto slaba interakcija narušava CP invarijantu, ona takođe narušava dvosmerno kretanje (ili vreme) T.

- Međutim, kao i svaka teorija merila, slaba interakcija ne narušava kombinovanu CPT simetriju: ona je CPT invarijanta.

Ukoliko bi CPT simetrija bila narušena, mase, vreme trajanja i magnetni momenti čestica i antičestica bi bili različiti. To nije opaženo.

SLAB NABOJ I MEŠANJE

Svi procesi slabe interakcije mogu da se opišu pomoću Fajnmanovih dijagrama sa ***slike 143***. Međutim, potrebno je nekoliko primedbi. Pre svega, W i Z deluju samo na levoruke fermione i na desnoruke antifermione. Drugo, u slaboj interakciji očuvano je takozvano ***slabo naelektrisanje T_3***, takođe poznato i kao ***slab izospin***. Tri kvarka *u*,*c* i *t* kao i tri neutrina imaju slab izospin T_3 = 1/2; druga tri kvarka i naelektrisani leptoni imaju slab izospin T_3 = -1/2. U nekom idealizovanom svetu sa simetrijom SU(2), tri vektorska bozona W^+, W^0 i W imala bi slab izospin vrednosti 1, 0 i -1 i nebi imali masu. Međutim, nekoliko aspekata komplikuje ovo pitanje.

Pre svega, pokazalo se da kvarkovi koji se pojavljuju na ***slici 143*** nisu oni sa jakom interakcijom: postoji mala razlika zbog ***mešavine kvarkova***. Drugo, takođe i zbog ***mešavine neutrina***. I treće, vektorski bozoni imaju veliku masu i prekidaju simertriju SU(2) zamišljenog idealizovanog sveta; Lijeva grupa SU(2) nije potpuno simetrična za slabu interakciju, a čuveni Higsov bozon ima masu.

Iznenađujuće je, ali sopstveno stanje slabe interakcije kvarkova nije isto kao sopstveno stanje mase. Ovo otkriće Nikole Kabiba (Nicola Cabibbo) opisano je u takozvanoj Kabibo-Kobajaši-Maskava (Cabibbo-Kobayashi-Maskawa) ili CKM matrici. Matrica je određena sa

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \left(V_{ij}\right) \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix} \tag{90}$$

gde su, prema dogovoru, stanja +2/3 kvarkova (u, c, t) nemešana. U svojoj standardnoj parametrizaciji CKM matrica ima izgled

$$V = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta_{13}} \\ -s_{21}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta_{13}} & s_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta_{13}} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta_{13}} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta_{13}} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix} \tag{91}$$

gde je $c_{ij} = \cos\theta_{ij}$, $s_{ij} = \sin\theta_{ij}$, a p i j označavaju generaciju ($1 \le i, j \le 3$). Na granici za $\theta_{23} = \theta_{13} = 0$, to jest kada su pomešane samo dve generacije, jedini preostali parametar je ugao θ_{12}, nazvan Kabibo ugao, koji je bio uveden kada su bile poznate samo prve dve generacije fermiona. Faza δ_{13}, koja se nalazi između 0 i 2π, u prirodi je različita od nule a izražava činjenicu da je CP invarijanta narušena u slučaju slabe interakcije. Ona se pojavljuje u trećoj koloni matrice i pokazuje da je CP narušavanje povezano sa postojanjem (najmanje) tri generacije.

Narušavanje CP faze δ_{13} obično se izražava preko ***invarijante Jarlskog***, koja je definisana izrazom $J = \sin\theta_{12}\sin\theta_{13}\sin\theta_{23}^2\cos\theta_{12}\cos\theta_{13}\cos\theta_{23}\sin\delta_{13}$. Ovaj izraz je nezavisan od definicije faznog ugla; njega je otkrila Cecilija Jarlskog, značajna švedska fizičarka čestica. (***Ref. 206***). Njegova izmerena vrednost iznosi $J = 2{,}96(20)\cdot 10^{-5}$.

Matrica mešavavine CKM predpostavlja se da je unitarna matrica. Unitarnost je potvrđena u svim eksperimentima koji su do sada izvedeni. (***Ref. 185***). Pouzdanost od 90% za gornju i donju granicu intenziteta kompleksne CKM matrice V data je sa

$$|V| = \begin{pmatrix} 0{,}97428(15) & 0{,}2253(7) & 0{,}00347(16) \\ 0{,}2252(7) & 0{,}97345(16) & 0{,}0410(11) \\ 0{,}00862(26) & 0{,}0403(11) & 0{,}999152(45) \end{pmatrix} \tag{92}$$

Vrednosti su određene tokom desetina eksperimenata hiljada fizičara.

Isto tako i mešavina neutrina, na isti način kao d, s i b kvarkovi. Određivanje elemenata matrice još uvek nije dovršeno za slučaj kvarkova. To je intenzivno polje istraživanja. Slično kao za kvarkove tako se i za neutrine razlikuju sopstveno stanje mase i sopstveno stanje ukusa. Postoji posebna matrica za mešavinu neutrina, pod nazivom Pontekorvo-Maki-Nakagava-Sakata mešovita matrica ili PMNS mešovita matrica, sa 4 ugla za neutrine sa masom (bilo bi 6 uglova kada bi neutrini bili bez mase). U 2012. godini izmereno je da je vrednost matrice bila

$$P = \begin{pmatrix} 0{,}82 & 0{,}55 & 0{,}15 + 0{,}038i \\ -036 + 0{,}020i & 0{,}70 + 0{,}013i & 0{,}61 \\ 0{,}44 + 0{,}026i & -0{,}45 + 0{,}017i & 0{,}77 \end{pmatrix} \tag{93}$$

U mnogim eksperimentima je pokušavano da se parametri ove matrice izmere uz veću preciznost.

Slika 143 Suština Lagranžijana elektroslabe interakcije

PREKID SIMETRIJE – I ODSUSTVO ELEKTROSLABOG OBJEDINJAVANJA

Srednji bozoni W i Z imaju velike mase i njihove se mase razlikuju. Prema tome, slaba interakcija ne ispoljava SU(2) simettriju. Osim toga, ***pomešani*** su elektromagnetni i slabi procesi.

Lepo istraživanje u 1960. godini pokazalo je da se mešavina elektromagnetne i slabe interakcije može opisati pomoću "***elektroslabe" konstante veze g*** i ***ugla θ_W slabog mešanja***. (***Ref. 185***). Ugao slabog mešanja opisuje jačinu prekida simetrije SU(2).

Potrebno je da se naglasi da nasuprot onome što se često govori ili piše, slaba i elektromagnetna interakcija ***nisu*** objedinjene. ***Nikada*** nisu ni bile objedinjene. Uprkos neprestanoj upotrebi pojma "***elektroslabo*** objedinjavanje" tokom nekoliko decenija, pojam je pogrešan. Elektromagnetna i slaba interakcija dve su nezavisne interakcije sa dve konstante veza, koje su pomešane. Međutim, nisu objedinjene. Iako je Komitet Nobelove nagrade koistio pojam "objedinjeno", dobitnik odgovarajuće Nobelove nagrade potvrdio je da pojam ***nije pravilan***.

- Elektromagnetnna i slaba interakcija ***nisu*** objedinjene. Nihova mešavina je razjašnjena.

Uobičajena elektromagnetna konstanta veze *e* povezana je sa "elektroslabom" konstantom veze *g* i uglom mešanja θ_W preko

$$e = g \sin\theta_W \tag{94}$$

što je pri 4-količini kretanja konstanta fine strukture sa vrednošću 1/137,036. Elektroslaba konstanta veze *g* takođe određuje istorijski određenu ***Fermijevu konstantu*** G_F preko

$$G_F = \frac{g^2\sqrt{2}}{8M_W^2} \tag{95}$$

Prekinuta SU(2) simetrija podrazumeva da su u ***stvarnom*** svetu, nasuprot ***idealnom*** SU(2) svetu, vektorski srednji bozoni:

- neutralni foton bez mase, dati je sa: $A = B\cos\theta_W + W^3 \sin\theta_W$
- neutralni Z bozon bez mase, dat je sa: $Z = -B\sin\theta_W + W^3\cos\theta_W$
- naelektriani W bozoni s masom, dati su sa: $W^{\pm} = \left(W^1 \mp iW^2\right)/\sqrt{2}$

Ukupno, mešavina elektromagnetne i slabe interakcije kao i prekid SU(2) simetrije podrazumevaju da su elektromagnetna konstanta veze *e*, konstanta veze slabe interakcije *g* i masa srednjih bozona dati u upečatljivom izrazu

$$\left(\frac{m_W}{m_Z}\right)^2+\left(\frac{e}{g}\right)^2=1 \qquad (96)$$

Ovaj izraz je takođe potvrđen u eksperimentima.

Mešavina elektromagnetne i slabe interakcije takođe nagoveštava postojanje skalarnog elementarnog ***Higsovog bozona***. Ovu predpostavku su 1963. godine načinili Peter Higs (Peter Higgs) i brojni drugi fizičari čestica, koji su pozajmili ideju koju su Joširo Nambu (Yoshiro Nambu), a pre svega Filip Anderson (Philip Anderson) uveli u fiziku čvrstih tela. (***Ref. 207***). Higsov bozon održava jedinstvenost uzdužnog bozona rasutog pri energijama od nekoliko TeV i utiče na masu ostalih elementarnih čestica. Godine 2012. Higsov bozon je konačno opažen u dva velika eksperimenta u CERN:

LAGRANŽIAN SLABIH I ELEKTROMAGNETNIH INTERAKCIJA

Ukoiko kombinujemo opažena svojstva slabe interakcije pomenutih u predhodnom tekstu, naime njihove opažene Fajnmanove dijagrame, njenu sposobnost pretvaranja čestica, narušavanje P i C pariteta, mešanje kvarka, mešanja neutrina i prekid simetrije, dolazimo do pune gustine lagranžijana. Ona je data sa:

$$\begin{aligned}
\mathcal{L}_{\text{E\&W}} = \quad & \sum_k \bar{\psi}_k\left(i\not{\partial}-m_k-\frac{gm_kH}{2m_W}\right)\psi_k - && \text{1. član mase fermiona}\\
& -e\sum_k q_k\bar{\psi}_k\gamma^\mu\psi_kA_\mu - && \text{2. elektromagnetna interakcija}\\
& -\frac{g}{2\sqrt{2}}\sum_k\bar{\psi}_k\gamma^\mu\left(1-\gamma^5\right)\left(T^+W_\mu^+ + T^-W_\mu^-\right)\psi_k - && \text{3. slaba naelektrisana struja}\\
& -\frac{g}{2\cos\theta_W}\sum_k\bar{\psi}_k\gamma^\mu\left(g_V^k-g_A^k\gamma^5\right)\psi_kZ_\mu - && \text{4. slaba neutralna struja}\\
& -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} - && \text{5. elektromagnetno polje}\\
& -\frac{1}{2}W_{\mu\nu}^+W^{-\mu\nu}-\frac{1}{4}Z_{\mu\nu}Z^{\mu\nu} + && \text{6. slaba W i Z polja}\\
& +m_W^2W^+W^- + \frac{1}{2}m_Z^2Z^2 - && \text{7. članovi W i Z mase}\\
& -gWWA - gWWZ - && \text{8. kubična interakcija}\\
& -\frac{g^2}{4}\left(W^4+Z^4+W^2F^2+Z^2F^2\right)+ && \text{9. kvartična interakcija}\\
& +\frac{1}{2}\left(\partial^\mu H\right)\left(\partial_\mu H\right)-\frac{1}{2}m_H^2H^2 - && \text{10. masa Higsovog bozona}\\
& -\frac{gm_H^2}{4m_W}H^3-\frac{gm_H^2}{32m_W^2}H^4 + && \text{11. Higsova sopstvena interakcija}\\
& +\left(gm_WH+\frac{g^2}{4}H^2\right)\left(W_\mu^+W^{-\mu}+\frac{1}{2\cos^2\theta_W}Z_\mu Z^\mu\right) && \text{12. Higsova W i Z interakcija}
\end{aligned} \qquad (97)$$

Članovi u lagranžijanu lako se pridružuju Fajnmanovom dijagramu na ***slici 143***:

1. ovaj član koji opisuje inerciju svakog predmeta u našem okruženju, daje kretanje fermiona i predstavlja kinetičku energiju kvarkova i leptona, pošto se on pojavljuje u uobičajenoj Dirakovoj jednakosti, prilagođen je takozvanom ***Jukava (Yukawa) vezom*** za Higsovo polje H i mogućim članom Majorana za neutrine (nije prikazan);
2. drugi član opisuje dobro poznatu interakciju materije i elektromagnetnog zračenja i praktično objašnjava sva svojstva materijala i boje koje opažamo u svakodnevnom životu;
3. član koji se naziva ***interakcija slabe naelektrisane struje***, usled razmene virtualnih W bozona, to jest odgovoran je za β raspad i za činjenicu da Sunce sija;
4. ovaj član je ***interakcija slabe neutralne struje***, "V-A teorije" Džordža Sudaršana (George Sudarshan), koji objašnjava elastično rasejavanje neutrina u materiji;

5. ovaj član predstavlja kinetičku energiju fotona i prikazuje razvoj elektromagnetnog polja u vakuumu, prema tome je osnova za Maksvelove jednakosti;
6. ovaj član predstavlja kinetičku energiju polja slabog zračenja i prikazuje razvoj W i Z međubozona slabe interakcije;
7. ovaj član je kinetička energija vektorskih bozona;
8. Ovaj član predstavlja trostruki vrh sopstvene interakcije vektorskih bozona;
9. ovaj član predstavlja četvorostruki vrh sopstvene interakcije vektorskih bozona;
10. ovaj član je kinetička energija Higsovog bozona;
11. ovaj član je sopstvena interakcija Higsovog bozona;
12. očekuje se da poslednji član predstavlja interakciju vektorskih bozona sa Higsovim bozonom koji obnavlja objedinjavanje na velikim energijama.

Pogledajmo formalne detalje. Veličine koje se pojavljuju u Lagranžijanu su:

- Talasna funkcija $\psi_k = \left(\nu'_k \; l^-_k\right)$ za leptone i $\left(u_k \; d'_k\right)$ za kvarkove i generaciju polja levorukih k-ih fermiona; svaki činilac je spinor. Indeks k = 1, 2, 3 su brojevi generacije: vrednost 1 odgovara $\left(u \; d \; \nu_e \; e^-\right)$, druga generacija je $\left(c \; s \; \nu_\mu \; \mu^-\right)$ i treća $\left(t \; b \; \nu_\tau \; \tau^-\right)$. Talasna funkcija ψ_k se pretvara kao dublet pri SU(2); desnoruka polja su SU(2) singleti.

  U dubletima se ima:

  $$d'_k = \sum_l V_{kl} \, d_l \tag{98}$$

  gde je V_{kl} Kabibo-Kobajaši-Maskava matrica mešavine, d'_k je sopstveno stanje ukusa kvarka i d_k je sopstveno stanje mase kvarka. Sličan izraz važi i za mešavinu neutrina

  $$\nu'_k = \sum_l P_{kl} \, \nu_l \tag{99}$$

  pri čemu je P_{kl} Pontekorvo-Maki-Nakagava-Sakata matrica mešavime, ν'_k sopstveno stanje ukusa neutrina i ν_l sopstveno stanje mase neutrina.

- Predzračenja A^μ i $F^{\mu\nu}$ su polje vektorskog bozona slabe interakcije; odgovarajuće čestice W^+ i W^- uzajamno su antičestice.

  Z_μ je polje slabe interakcije vektorskog bozona neutralnog merila i velike mase; sam neutralni vektorski bozon obično se obeležava sa Z^0.

- H je polje neutralnog skalarnog Higsovog bozona H^0, jedine skalarne elementarne čestice u standardnom modelu.

- Pojavljuju se dva električna naboja, po jedan za svaku interakciju. Veličina q_k je poznat ***električni naboj*** čestice ψ_k izražen u jedinicama naelektrisanja pozitrona. Veličina $t_{3L}(k)$ je slab izospin ili slabo naelektrisanje fermiona k, čija je vrednost +1/2 za u_k i ν_k, a -1/2 za d_k i l_k. Ova dva naelektrisanja zajedno definiše takozvana ***vektorska veza***

  $$g_V^k = t_{3L}\left(k\right) - 2q_k \sin^2 \theta_W \tag{100}$$

  i aksijalna veza

  $$g_A^k = t_{3L}\left(k\right) \tag{101}$$

  Kobinacija $g_V^k - g_A^k$ ili skraćeno V–A izražava maksimalno narušavanje C i P pariteta u slaboj interakciji.

- Operatori T^+ i T^- su slabi izospinovi koji rastu i opadaju. Njihov efekt u polju je dat, na primer, sa $T^+ \cdot l_k = \nu_k$ i $T^- \cdot u_k = d_k$.

Videli smo da lagranžijan zaista sadrži sve ideje koje su razvijene u predhodnom tekstu. Elektroslab lagranžijan je suštinski ***objedinjen***: on nebi mogao da ima drugačiji matematički oblik, pošto su i članovi elektromagnetne interakcije i članovi slabe interakcije određeni zahtevima Lorencove invarijante, U(1) i prekinute SU(2) invarijante merila, razmenom simetrije i renormalizacijom.

Lagranžijan slabe interakcije bio je proveravan i potvrđen u hiljadama eksperimenata. Mnogi eksperimenti bili su osmišljeni posebno da ga provere uz najveću moguću preciznost. U svim takvim slučajima nije bila pronađena nikakva suprotnost između opažanja i teorije. (***Ref. 185***). Iako poslednja tri člana lagranžijana nisu potvrđena u potpunosti, ovo je – najverovatnije – tačan lagranžijan slabe interakcije.

ZANIMLJIVOSTI O SLABOJ INTERAKCIJI

Slaba interakcija, sa njenim prekidima pariteta i njenim nedostižnim neutrinom, jako očarava sve koji su je proučavali. (***Ref. 208***). Istražimo ove očaranosti malo više.

* * *

Slaba interakcija zahteva da se ima višak materije u odnosu na antimateriju. Bez narušavanja pariteta slabe interakcije nebi u svemiru postojala materija uopšte, pošto bi se poništile sva materija i sva antimaterija koje su se pojavile u velikom prasku. Slaba interakcija sprečava simetriju između materije i antimaterije, što je neophodno da bi se imao višak jedne u odnosu na drugu u svemiru. Ukratko, narušavanje pariteta slabe interakcije neophodan je uslov za naše sopstveno postojanje.

* * *

Slaba interakcija takođe je odgovorna za toplotu koja se proizvodi u unutrašnjosti Zemlje. Ta toplota održava magmu u tečnom stanju. Kao rezultat toga, slaba interakcija, uprkos svoje slabosti, odgovorna je za mnoge zemljotrese, cunamije i erupcije vulkana.

* * *

Lagranžijan slabe interakcije razjasnili su Stiven Vajnberg (Steven Weinberg), Šeldon Glašov (Sheldon Glashow) i Abdus Salam (Abdus Salam). Za svoj rad onu su dobili Nobelovu nagradu 1979. godine. Abdus Salam (1926. Santokdas – 1996. Oxford) bio je primer mnogim naučnicima širom sveta i duboko produhovljen čovek. U svom govoru na Nobelovom banketu on je objasnio: "To je ustvari vera svih fizičara: što dublje zalazimo, to sve više raste naše uzbuđenje, sve veća je zaslepljenost pred našim pogledom." Salam je često povezivao svoje istraživanje sa duhovnim vidom Islama. Jednom su ga pitali na pakistanskoj televiziji zbog čega veruje u objedinjavanje fizike; on je odgovorio: "Zato što je Bog jedan!" Kada je pakistanski parlament, u jednoj od najvećih nepravdi dvadesetog veka, proglasio Ahmadi Muslimsa da nije musliman i stoga zapravo započelo religijsko proganjanje, Salam je otišao iz Pakistana i nikada se nije vratio. Religijsko proganjanje nastavljeno je do sadašnjih dana: na njegovom nadgrobnom spomeniku u Pakistanu reć "musliman" je obijena, a internet je prepun napadačkih komentara o njemu od strane drugih muslimana. Salam je bio takođe uspešan naučni rukovodilac. Uz pomoć UNESCO, Salam je osnovao International Centre for Theoretical Physics i World Academy of Sciences, obe u Trstu, Italija, te privukao tamo najbolje naučnike iz zemalja u razvoju.

* * *

Zbog slabe interakcije β raspad razdvaja elektrone i protone. Konačno su 2005. godine ljudi predložili da se ovaj efekt iskoristi pri izradi dugotrajnih baterija koje bi mogle da se koriste u satelitima. Budućnost će pokazati da li je ovaj predlog bio uspešan

* * *

Svake sekunde oko 10^{16} neutrina prođe kroz naše telo. (***Ref. 210***). Oni imaju pet izvora:

- ***Solarni neutrini*** dolaze sa Sunca na Zemlju sa $6\cdot10^{14}$ /m^{2}s, sa energijom od 0 do 0,42 MeV; oni nastaju usled p-p reakcije u Suncu; manje ih je usled ^{8}B reakcije i imaju energiju do 15 MeV.
- ***Atmosferski neutrini*** proizvod su kosmićkog zračenja koji pogađa atmosferu, sastoje se od 2/3 mionskih neutrina i jedne trećine elektronskih neutrina i imaju energije uglavnom između 100 MeV i 5 GeV.
- ***Zemaljski neutrini*** od radioaktivnosti koja održava toplotu Zemlje, obrazuju tok od $6\cdot10^{10}$ /m^{2}s. (***Strana 138***).
- ***Fosilni neutrini*** od velikog praska sa temperaturom od 1,95 K nađeni su u svemiru sa gustinom od 300 cm^{-3}, odgovaraju protoku od 10^{15} /m^{2}s.
- ***Neutrini koje je proizveo čovek*** proizvode se u u nuklearnim reaktorima (sa 4 MeV) kao i u ubrzivačima, korišćenjem raspada piona i kaona. Standardna nukleatna elektrana proizvodi u svakoj sekundi $5\cdot10^{20}$ neutrina. Zraci neutrina proizvode se, na primer, i u CERN u Ženevi. Oni se rutinski šalju 700 km preko Zemlje u Gran Saso laboratoriju u centralnoj Italiji, gde se detektuju.

(Godine 2011. poznata greška u merenju navela je neke ljude da netačmo poveruju a ovi neutrini putuju brže od svetlosti.)

Neutrii se uglavnom stvaraju u atmosferi usled kosmičkog zračenja ali takođe dolaze i direktno od zračenja iz pozadine i iz centra Sunca. Bez obzira na to, tokom našeg života – od oko tri hiljade miliona sekundi – imamo samo 10% izgleda da neki od ovih neutrina stupi u interakciju sa jednim od $3 \cdot 10^{27}$ atoma u našem telu. Razlog je, kao i obično, što se slaba interakcija oseća samo na rastojanjima koja su manja od 10^{-17} m, što je 1/100 deo prečnika protona. Slaba interakcija je zaista slaba.

* * *

Već je 1957. godine veliki fizičar Bruno Pontekorvo (Pontecorvo) predpostavio je da bi neutrini tokom puta mogli da se promene u sopstvene antičestice. Danas je to poznato iz eksperimenata da neutrini koji putuju mogu da promene generaciju, pa se govori o ***oscilaciji neutrina***. Takvi eksperimenti su izvedeni u velikim dubinama podzemnih pećina; jedan od takvih je prikazan na ***slici 144***. Ukratko, eksperimenti pokazuju da slaba interakcija meša tipove neutrina na isti način kao što meša tipove kvarkova.

* * *

Samo jedna vrsta čestica je u interakciji (skoro) jednom sedmično: neutrini. Neitrini ne nose električni naboj, ni naboj boje ni skoro nikakav gravitacijski naboj (masu). Da bi se dobio utisak o slabosti slabe interakcije, obično se kaže da je verovatnoća da se neutrino apsorbuje u olovni ekran debline jedne svetlosne godine manja od 50%. Svemir je u suštini prazan u pogledu neutrina. Ima li prostora za vezana stanja kružnih masa neutrina? Koliko bi bila velika takva vezana stanja? Možemo li da zamislimo vezana stanja, koja bi se nazivala neutrinijum, od neutrina i antineutrina koji kruže jedni oko drugih? Odgovor zavisi od mase neutrina. Ne postoje vezana stanja čestica bez mase. Ona bi mogla da se raspadnu i raspala bi se na dve čestice bez mase.[1]

Pošto neutrino ima masu, vezano stanje neutrino-antineutrino u principu je moguće. Koliko bi bilo veliko? Da li bi imalo pobuđeno stanje? Da li bi iikada noglo da se otkrije? Ovo pitanje još uvek je otvoreno. (***Izazov 146ny***).

Slaba interakcija je toliko slaba da poništavanje neutrino-antineutrino – koje je jedino moguće tako što se stvara srednji bozon Z koji ima masu – nikada nije zapaženo, bar ne do današnjih dana.

* * *

Mešavina slabe i elektromagnetne interakcije dovodi do predpostavke o ***Higsovom bozonu***. Opčinjenost Higsovim bozonom je naglašena činjenicom da je to jedina osnovna čestica koja je dobila ime po fizičaru. Uzgred, dokument Petera Higsa o bozonu koji je dobio ime po njemu. dužine je samo 79 redova i ima samo pet jednakosti. (***Ref. 209***).

* * *

U 1993. i 1994. godini brojni fizičari čestica vodili su opširnu marketinšku kampanju širom Sjedinjenih Američkih Država. Tražili su finansiranje "superprovodničkog supersudarača", ubrzavača čestica sa obimon od 80 km. To je trebalo da bude najveća ikada izgrađena mašina, sa planiranim troškovima gradnje većim od dvanaest hiljada miliona dolara, sa ciljem da se otkrije Higsov bozon, pre no što bi Evropljani to mogli da urade za deo ovih troškova. Glavni argument koji je iznet bio je sledeći: pošto je Higsov bozon osnova za mase čestica, to je centralna tema za nauku SAD da ga saznaju prvi. Osim pitanja umesnosti ovog zaključka, najgore je to što je predpostavka bila pogrešna.

Videli smo u predhodnom tekstu (***strana 173***) da je 99% mase protona, pa stoga i svemira, usled zadržavanja kvarka; ovaj deo mase se pojavljuje iako je predpostavljeno da je kvark bez mase. Higsov bozon sam po sebi ***nije*** odgovoran za poreklo mase; to bi možda moglo da malo osvetli problem. Osim toga, Higsov bozon ne dozvoljava izračunavanja ili shvatanja mase bilo koje čestice. (***Ref. 194***). Cela kampanja je bila klasičan slučaj neobaveštenosti, a mnogi ljudi koji su bili učesnici u njoj pokazali su odsustvo časti.[2] Na kraju je projekt zaustavljen, uglavnom iz finansijskih razloga.

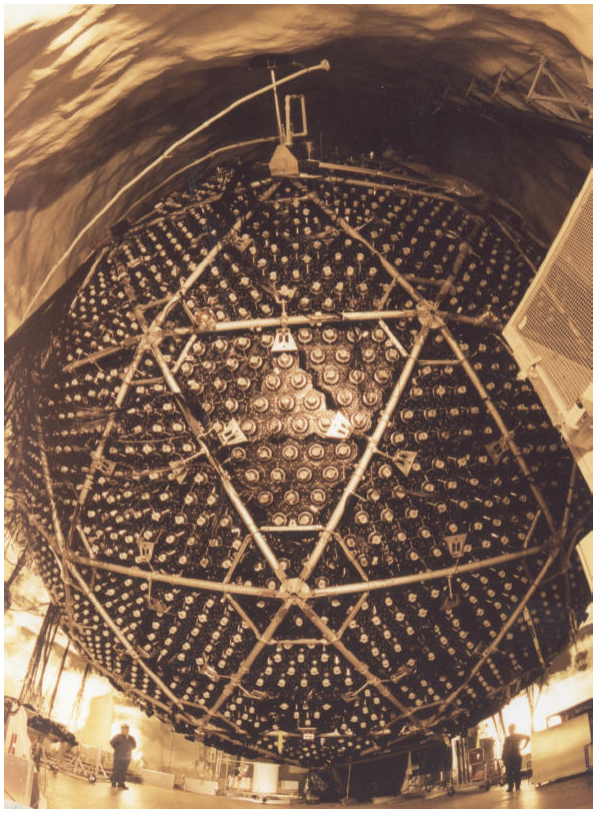
---

1 Ovo važi naročito za fotone vezane gravitacijom; ovakvo stanje nije moguće.

2 Ne treba da budemo hipokrite. Supersudarač je zanemarljiv kada se uporedi sa drugim lažima. Najveća laž na svetu je verovatno ona koja izražava da bi za osiguranje svog opstanaka, vlada SAD treba da utroši više na vojsku nego li sve ostale zemlje zajedno. Ova laž, svake godine, je oko 40 puta veća od nekadašnje laži za supersudarač. Mnoge druge zemlje posvetile su čak i veći procenat svojih bruto nacionalnih dohodaka u sopstvene verzije ove

Difficile est saturam non scribere.[1]

Juvenal, *Saturae* 1, 30.



Slika 144 Tipičan podzemni eksperiment za posmatranje oscilacija neutrina: Sudbury Neutrino Observattory u Kanadi (© Sudbury Neutrino Observatory)

* * *

Ne postoji opšte prihvaćeno ime za slabu interakciju kvantne teorije polja. Izraz ***kvantna astenodinamika*** (QAD – quantum asthenodynamics) – od grčke reči asteno – "slab" – nije bila šire prihvaćena

* * *

Da li krave kada preživaju hranu pomeraju svoje čeljusti pođednako često u smeru kazaljki sata ili u suprotnom smeru? Teoretski fizičari Paskval Jordan (Pascual Jordan) i Ralf de Lir Kronig (Ralph de Lear Kronig) objavili su 1927. godine studiju koja je pokazala da su u Danskoj pođednako zastupljena oba smera kretanja. (***Ref. 211***). Prema tome kretanje čeljusti preživara nije povezano sa slabom interakcijom.

* * *

Naravno, slaba interakcija je odgovorna za radioaktivni β raspad, pa prema tome i za deo zračenja iz pozadine koji je doveo do mutacija i stoga do biološke evolucije.

* * *

Zbog velikih troškova koji se nameću društvu, skoro da su istraživanja u oblasti nuklearne fizike nestala sa planete, kao što je slučaj sa poliomielitisom. Kao i kod poliomielitisa, nukearna istraživanja održavaju se u životu samo u nekoliko jako zaštićenih laboratorija širom sveta, uglavnom sumnjivih ličnosti, radi izrade opasnog naoružanja. Samo mali broj eksperimenata izvodi nekoliko istraživača sposobnih da izbegnu učešće u tome i tako unapređuju nauku.

* * *

Zanimljiva pojava u nuklearnoj fizicu dogodila se kada su korišćeni snažni laseri. Godine 1999., britanski tim sa vođom Kenom Ledinhamom, posmatrao je fisiju jezgra urana ^{238}U izazvanu laserom. U međuvremenu, to je moglo da se postigne i sa stonim laserom. Poslednji poduhvat, 2003. godine, bio je transmutacija ^{129}I u ^{128}I uz pomoć lasera. To je postignuto usmeravanjem impulsa lasera 360J na zlatan listič; postig-

laži. Kao rezultat toga, laž za troškove odbrane direktno je odgovorna za većinu siromaštva u državama koje je koriste.

[1] Teško je ne biti satiričan.

nuto ubrzanje plazme elektrona do relativističke brzine, koje je zagrejalo zlato i proizvelo γ zračeje velike energije moglo je da se iskoristi za transmutaciju. (***Ref. 212***).

ZAKLJUČAK O SLABOJ INTERAKCIJI

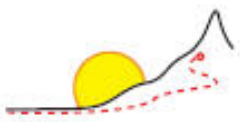
Slaba interakcija je opisana neabelijskom teorijom merila zasnovanoj na prekinutoj grupi merila SU(2) za slabe procese. Slaba interakcija meša se sa neprekinutom grupom merila U(1) elektromagnetne interakcije. Ovakav opis odgovara opaženim svojstvima β raspada, pretvaranju čestica, neutrinima i njihovoj mešavini srednjih bozona W i Z koji imaju masu, maksimalnom narušavanju pariteta, toploti koja se stvara unutar Zemlje, nekolicini važnih reakcija na Suncu i poreklu materije u svemiru.

Slaba interakcija opisana je lagranžijanom. Posle jednog veka obimnih istraživanja, lagranžijan je poznat u svim detaljima, a od 2012. godine obuhvaćen je i Higsov bozon. Teorija i eksperimenti se slažu ma gde da su upoređivanja bila vršena.

Sva preostala ograničenja teorije merila slabe interakcije samo su pojmovna. Kao i u celoj kvantnoj teoriji polja, tako i u slučaju slabe interakcije, matematički oblik lagranžijana skoro je jedinstveno određen renormalizacijom, Lorencovom invarijantom i (prekinutom) invarijantim merila – SU(2). Kažemo "skoro" ponovo, kao što smo to učinili i u slučaju jake interakcije, (***strana 177***) pošto lagranžijan slabe interakcije i elektromagnetne interakcije sadrži nekoliko parametara koji su ostali neobjašnjeni:

- Dve konstante veze g slabe interakcije i g' elektromagnetne interakcije ostale su neobjašnjene. (one određuju ugao slabog mešanja $\theta_W = \arctan(g'/g)$.
- Masa $M_Z = 91\ \mathrm{GeV/c^2}$ neutralnog Z bozona nije objašnjena.
- Broj $n = 3$ generacija nije objašnjen.
- Mase šest leptona i šest kvarkova su neobjašnjene.
- Četiri paramerta Kabibo-Kobajaši-Masakava matrice mešanja kvarkova i šest parametara matrice mešanja neutrina nisu objašnjene, uključujući odgovarajuću fazu narušavanja pariteta CP.
- Svojstva prostor-vremena, posebno njegova Lorencova invarijanta, njegova neprekidnost i broj dimenzija predpostavljeni su od početka i očigledno nisu objašnjeni.
- Isto tako nije poznato kako se slaba interakcija ponaša u jakoj gravitaciji, prema tome u jako zakrivljenom prostor vremenu.

Pre no što istražimo kako da se prevaziđu ova ograničenja, mi ćemo načiniti sažetak svih do sada nađenih rezultata u takozvani ***standardni model fizike čestica***.



Poglavlje 9

STANDARDNI MODEL FIZIKE ČESTICA – KAKAV SE VIDI NA TELEVIZIJI

Izraz standardni model fizike elementarnih čestica potekao je iz sažimanja sveg znanja o kretanju kvantnih čestica u prirodi. Standardni model može da se objasni pomoću četiri tabele: tabele elementarnih čestica, tabele njihovih svojtava, tabele mogućih Fajnmanovih dijagrama i tabele osnovnih konstanti.

U narednoj tabeli navedene su sve poznate elementarne čestice u prirodi

TABELA 21 Elementarne čestice

Zračenje	elektromagnetno	slabo	jako
	γ	W^+ W^-	g_1 .... g_8
		Z^0	
	foton	slabi bozoni	gluoni
	Čestice zračenja su srednji vektorski bozoni, prema tome imaju spin 1. Čestica W^- je antičestica W^+; fotoni i Z^0 njihove su sopstvene antičestice. Samo W^+, W^- i Z^0 imaju masu		
Materija	generacija 1	generacija 2	generacija 3
Leptoni	e	μ	τ
	ν_e	ν_μ	ν_τ
Kvarkovi (svaki u tri boje)	d	s	t
	u	c	b
	Materijalne čestice su fermioni sa spinom 1/2; sve gore navedene čestice imaju antičestice. Leptoni se međusobno mešaju; isto tako i kvarkovi. Svi fermioni imaju masu		
Vakuumsko stanje Higsov bozon	H	Ima spin 0 i masu od 126 GeV/c^2	

Osim za Higsov bozon, koji je pronađen 2012. godine, tabela nije mnogo menjana još od sredine 1970-ih godina. Predpostavljajući da je tabela kompletna, ona sadrži sve sastavne elemente od kojih su načinjeni u prirodi sve materije i sva zračenja. Prema tome, u tabeli su navedeni svi sastojci – stvarno "nedeljivi" ili "atomi", kako su ih nazivali drevni Grci – materijalnih predmeta i snopova zračenja. Elementarne čestce su osnova za nauku o materijalima, geologiju, astronomiju, inženjerstvo, hemiju, biologiju, medicinu, neurologiju i psihologiju. Iz tog razloga tabela se redovno pojavljuje u popularnim tabloidima, na televiziji i na internetu.

Potpun popis elementarnih čestica dopušta da se spoji sa potpunim pregledom svojstava čestica, prikazanim u ***Tabeli 22***. U njoj su navedena sva svojstva elementarnih čestica. Radi uštede prostora nisu posebno pomenuti boja i slab izospin. Isto tako nisu detaljno navedene ni sve vreste raspada nestabilnih čestica; one se nalaze u standardnoj literaturi. (***Ref. 185***).

Tabela 22 je zadivljujuća. Ona nam omogućava uvid u potpunu karakterizaciju sopstvenih osobina bilo kojeg objekta koji se kreće, bilo predmeta ili slike. Na početku našeg proučavanja kretanja (***Vol. I, strana 28***) mi smo tražili potpun pregled stalnih, sopstvenih osobina objekata koji se kreću. Sada ga imamo.

TABELA 22 Osobine elementarnih čestica

Čestica	**Masa m^a**	**Vreme trajanja τ, ili raspon energije^b, vrsta raspada**	**Izospin I, spin J,^{c} paritet P, paritet naboja C**	**Naboj, izospin, strange^c, charm, beauty^d, top (QISCBT)**	**Leptonski i barijonski broj L, B**
Elementarno zračenje (bozoni)					
foton γ	0 (<$2\cdot10^{-54}$ kg)	stabilan	$I(J^{PC}) = 0,1(1^{--})$	000000	0, 0
W^+, W^-	80,385(15) GeV/c^2	2,085(42) GeV 62,60(27) % hadrona, 332,40(27) % $l^+ \nu$		±100000	0, 0
Z	91,1876(21) GeV/c^2	0,265(1) ys = = 2,495(23) GeV/c^2 69,91(6) % hadrona 10,0974(69) % $l^+ l^-$	$J = 1$	000000	0, 0
gluon	0	stabilan	$I(J^P) = 0(1^-)$	000000	0, 0
Elementarna materija (fermioni): leptoni					
elektron e	9,10938291(40)$\cdot10^{-31}$ kg = 81,8710506(36) pJ/c^2 = 0,510998928(11) MeV/c^2 = 0,00054857990946(22) u žiromagnetni odnos μ_e/μ_B = -1,00115965218076(27) električni moment dipola d = < $0,87\cdot10^{-30}$ e m	$13\cdot10^{38}$ s	$J = \frac{1}{2}$	-100000	1, 0
mion μ	0,188353109(16) yg = = 105,6583715(35) MeV/c^2 = 0,1134289267(29) u žiromagnetni odnos $\mu_\mu/(e\hbar/2m_\mu)$ = -1,00115692009(6) električni moment dipola d = $(-0,1 \pm 0,9)\cdot10^{-21}$ e m	2,1969811(22) µs 99 % $e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$	$J = \frac{1}{2}$	-100000	1, 0
tau τ	1,77682(16) GeV/c^2	290,6(1,0) fs	$J = \frac{1}{2}$	-100000	1, 0
elektr.neutrino ν_e	< 2 eV/c^2		$J = \frac{1}{2}$		1, 0
mion neutrino ν_μ	< 2 eV/c^2		$J = \frac{1}{2}$		1, 0
tau neutrino ν_τ	< 2 eV/c^2		$J = \frac{1}{2}$		1, 0
Elementarna materija (fermioni); kvarkovi ^{f}					
up u	1,8 do 3,0 MeV/c^2	vidi proton	$I(J^P) = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{2}^+\right)$	$+\frac{2}{3}+\frac{1}{2}$0000	0, $\frac{1}{3}$
down d	4,5 do 5,5 MeV/c^2	vidi proton	$I(J^P) = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{2}^+\right)$	$-\frac{1}{3}-\frac{1}{2}$0000	0, $\frac{1}{3}$
strange s	95(5) MeV/c^2		$I(J^P) = 0\left(\frac{1}{2}^+\right)$	$-\frac{1}{3}$0-1000	0, $\frac{1}{3}$
charm c	1,275(25) GeV/c^2		$I(J^P) = 0\left(\frac{1}{2}^+\right)$	$+\frac{2}{3}$00+100	0, $\frac{1}{3}$
bottom b	4,18(17) GeV/c^2	τ = 1,33(11) ps	$I(J^P) = 0\left(\frac{1}{2}^+\right)$	$-\frac{1}{3}$000-10	0, $\frac{1}{3}$
top t	173,5(1,4) GeV/c^2		$I(J^P) = 0\left(\frac{1}{2}^+\right)$	$+\frac{2}{3}$0000+1	0, $\frac{1}{3}$
Elementarni bozon					
Higsov H	126(1) GeV/c^2	nije izmereno	$J = 0$		

Napomene:

a. Pogledati takođe prefikse SI jedinica na ***strani 246***. O jedinici mase eV/c^2 videti ***stranu 249***.

b. Raspon energije Γ čestice povezan je sa vremenom trajanja τ preko rekacije neodređenosti $\Gamma \cdot \tau = \hbar$. Postoji razlika između ***vremena poluraspada*** $t_{1/2}$ i ***vremena trajanja*** τ čestice. Oni su povezani preko odnosa $t_{1/2} = \tau \cdot \ln 2$, pri čemu je ln2 = 0,69314718, pa je stoga vreme poluraspada kraće od vremena trajanja. Unificirana jedinica atomske mase je definisana kao 1/12 mase atoma ugljenika 12 u mirovanju i osnovnom stanju. Ima se

$$1\,\mathrm{u} = \frac{1}{12} m\left({}^{12}\mathrm{C}\right) = 1{,}6605402(10)\ \mathrm{yg}$$

c. Da bi tabela bila kraća, u zaglavlju nije posebno pomenuta boja, ni naboj jake interakcije. To će biti dodato u popis osnovnih svojstava objekta. Kvantni brojevi koji sadrže reč "paritet" su multiplikativni, svi drugi su aditivni. Paritet vremena *T* (ne treba ga mešati sa *T – topness*), bolje ga je nazvati paritet dvosmernog kretanja, jednak je CP. Izospin *I* (ili I_Z) definisan je samo za "up" i "down" kvarkove i njihove sastave, kao što su proton ili neutron. U literaturi se može naći i navod za takozvani *G*-paritet, koji je sefinisan kao $G = (-1)^{IC}$. (***Strana 181***).

d. "Beauty" se sada obično naziva "*bottomness*"; slično tome se "truth" obično naziva "*topness*". Predznaci kvantnih brojeva *S, I, C, B, T* mogu d se odrede na razne načine. U standardnom označavanju, koje je ovde navedeno, predznak svakog kvantnog broja koji ne iščezava dat je preko predznaka električnog naboja odgovarajićeg kvarka. (***Ref. 213***) i (***Ref. 214***).

e. Zapaženi poluprečnik elektrona je manji od 10^{-22} m. Moguće je da se pojedinačni elektroni zadrže u klopci tokom više meseci.

f. Pogledati ***stranu 138*** za tačnu odrednicu i značenje masa kvarkova.

Drugi cilj kojeg smo odredili na početku naše pustolovine bio je da se odredi potpun popis svih svojtava stanja. Ovaj cilj je takođe postignut, naime preko talasne funkcije i vrednosti polja usled raznih bozona. Da nije bilo mogućnosti za zakrivljenje prostor-vremena, bili bismo na kraju našeg istraživanja.

Glavni sastojak standardnog modela su lagranžijani elektromagnetne, jake i slabe interakcije. Kombinacija lagranžijana, zasnovana na grupama merila U(1), SU(3) i prekinutom simetrijom SU(2), moguća je samo na poseban način. Lagranžijani mogu da se povežu pomoću Fajnmanovih dijagrama na ***slici 145***.

Da bi se dovršio standardni model, potrebne su nam konstante veza tri interakcije merila, mase svih čestica i vrednosti mešanja između kvarkova i leptona. Zajedno sa svim ovim konstantama prirode koje određuju SI sistem i brojem dimenzija prostor-vremena, naredna tablica konpletira standardni model.

TABELA 23 Osnovne konstante u fizici

Veličina	**Simbol**	**Vrednost u SI jedinicama**	**Nesigurnost**[a]
Konstante koje određuju SI merne jedinice			
Brzina svetlosti u vakuumu[c]	c	299792458 m/s	0
Propustljivost vakuuma[c]	μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m = 1,256637061435…μH/m	0
Dielektričnost vakuuma[c]	$\varepsilon_0 = 1/\mu_0 \cdot c^2$	8,854187817620…pF/m	0
Orginalna konstanta Planka	h	$6{,}62606957(52) \cdot 10^{-34}$ Js	$4{,}4 \cdot 10^{-8}$
Redukovana konstanta Planka	$\hbar$	$1{,}054571726(47) \cdot 10^{-34}$ Js	$4{,}4 \cdot 10^{-8}$
Kvant rada			
Naelektrisanje pozitrona	e	0,1602176565(35) aC	$2{,}2 \cdot 10^{-8}$
Bolcmanova konstanta	k	$1{,}3806488(13) \cdot 10^{-33}$ J/K	$9{,}1 \cdot 10^{-7}$
Gravitacijska konstanta	G	$6{,}67384(80) \cdot 10^{-11}$ Nm^2/kg^2	$1{,}2 \cdot 10^{-4}$
Gravitacijska konstanta veze	$k = 8\pi G/c^4$	$2{,}07650(25) \cdot 10^{-43}$ s^2/kg m	
Osnovne konstante (nepoznatog porekla)			
broj dimenz. prostor-vremena		3+1	0[b]
Konstanta fine strukture[d] ili	$\alpha = e^2/(4\pi\varepsilon_0\hbar c)$	1/137,035999074(44)	$3{,}2 \cdot 10^{-10}$
konstanta e.m. veze ili	$= g_{em}\left(m_e^2 c^2\right)$	= 0,0072973525698(24)	$3{,}2 \cdot 10^{-10}$

Fermijeva konstanta veze[d] ili	$G_F/(\hbar c)^3$	$1{,}166364(5)\cdot 10^{-5}$ GeV^{-2}	$4{,}3\cdot 10^{-6}$
konstanta slabe veze	$\alpha_W(M_Z) = g_W^2/4\pi$	1/30,1(3)	$1{,}0\cdot 10^{-2}$
Ugao slabog mešanja	$\sin^2\theta_W\left(\overline{MS}\right)$ $\sin^2\theta_W$ (na ljusci) = = $1-(m_W/m_Z)^2$	0,23124(24) 0,2224(19)	$1{,}0\cdot 10^{-3}$ $8{,}7\cdot 10^{-3}$
Konstanta jake veze[d]	$\alpha_S(M_Z) = g_S^2/4\pi$	0,118(3)	$25\cdot 10^{-3}$
CKM matrica mešanja kvarka	$\lvert V\rvert$	$\begin{pmatrix} 0{,}97428(15) & 0{,}2253(7) & 0{,}00347(16) \\ 0{,}2252(7) & 0{,}97345(16) & 0{,}0410(11) \\ 0{,}00862(26) & 0{,}0403(11) & 0{,}999152(45) \end{pmatrix}$	
Invarijanta Jarlskog	J	$2{,}96(20)\cdot 10^{-5}$	
PMNS matrica mešanja neutrina	p	$\begin{pmatrix} 0{,}82 & 0{,}55 & 0{,}15+0{,}038i \\ -0{,}36+0{,}020i & 0{,}70+0{,}013i & 0{,}61 \\ 0.44+0{,}026i & -0{,}45+0{,}017i & 0{,}77 \end{pmatrix}$	
Mase čestica: videti u predhodnoj tabeli			

a. Nepouzdanost: standardna devijacija greške merenja

b. Izmereno samo od 10^{-19} do 10^{26} m

c. Konstanta definicije.

d. Sve konstante veza zavise od prenosa 4-količine kretanja, kao sto je objašnjeno u odeljku renormalizacije (***strana 99***). ***Konstanta fine strukture*** je uobičajen naziv za konstantu elektromagnetne veze g_{em} u slulaju prenosa 4-količine kretanja od $Q^2 = m_e^2c^2$, što je najmanje moguće. Pri većem prenosu količine kretanja ona ima veću vrednost, to jest $g_{em}\left(Q^2 = M_W^2c^2\right) \approx 1/128$. Nasuprot tome konstanta jake interakcije ima manju vrednost pri većem prenosu količine kretanja, to jest α_S (34 GeV) = 0,14(2)

Ukratko, pomoću tri tabele i slike, standardni model opisuje svako zapažanje koje je ikad naćinjeno u ravnom prostor-vremenu. Posebno, standardni model obuhvata i najmanji rad, najveću brzinu, kvantifikovanje električnog naboja i načelo najmanjeg rada.

ZAKLJUČAK I OTVORENA PITANJA

Fizika standardnog modela čestice jasno pravi razliku između ***elementarnih*** i ***složenih*** čestica. Standardni model daje potpun popis svojstava koji karakterišu česticu – i prema tome bilo koji pokretni predmet ili sliku. Ova svojstva su: masa, spin, naelektrisanje, boja, slab izospin, paritet, paritet naboja, izospin, "strangeness - čudnost", "charm - ljupkost", "topness-vršnost", "beauty (bottom) - donjost", leptonski broj i barijonski broj.

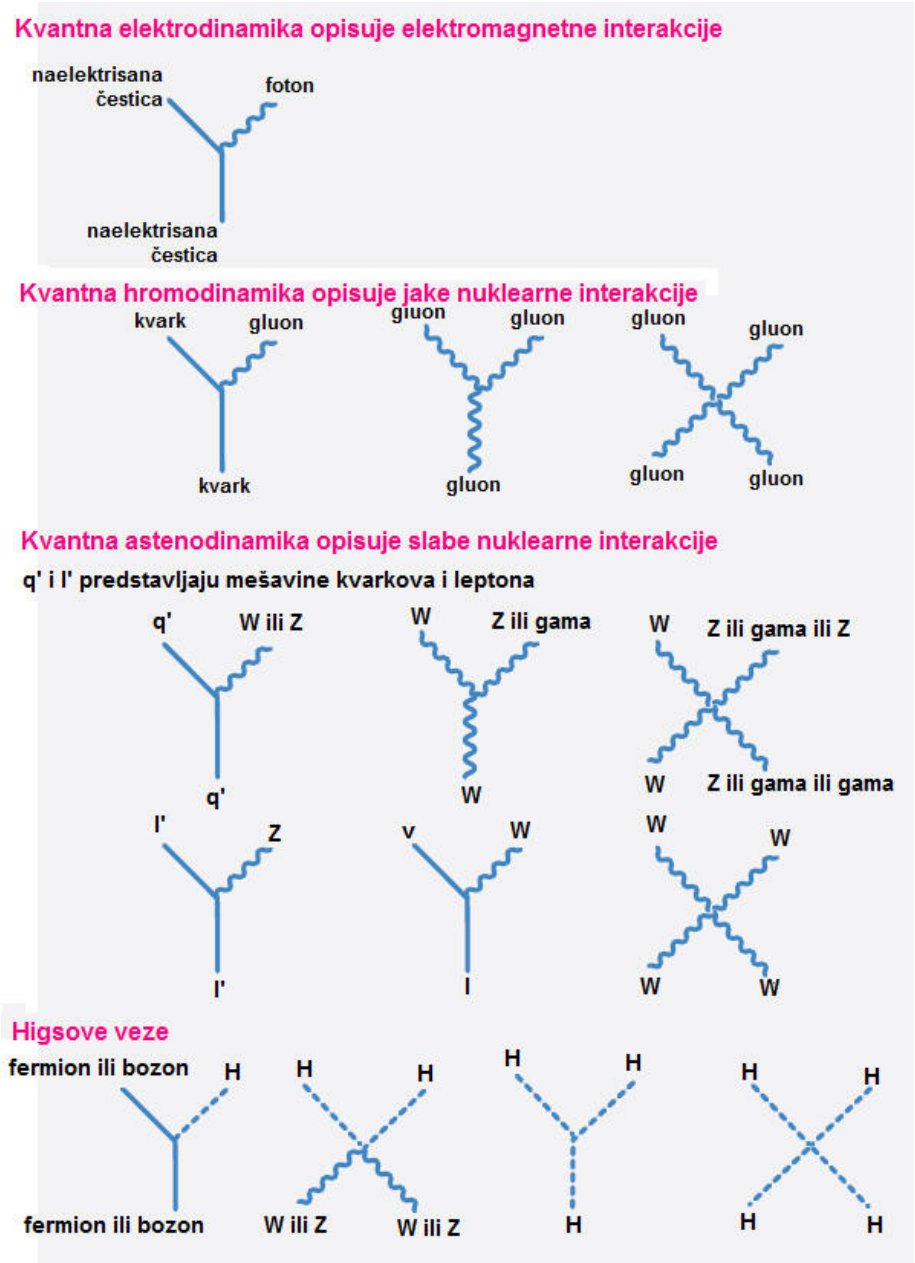
Standardni model opisuje elektromagnetne i nuklearne interakcije kao i razmene virtualnih čestica zračenja. Osim toga, standardni model opisuje veoma precizno tri vrste zračenja koja su opažena u prirodi. Standardni model se zasniva na kvantifikovanju i očuvanju električnog naboja, slabog naboja i boje kao i najmanjoj vrednosti rada $\hbar$ i maksimalnoj brzini energije c. Kao rezultat, standardni model opisuje strukturu atoma, njihovo oblikovanje kroz istoriju svemira, svojstva materije i mehanizme života. Uprkos izglednoj slavi i bogatstvu, nisu nađena nikakva odstupanja između eksperimenta i standardnog modela.

Ukratko, standardni model realizuje san Leukipa i Demokrita, ali i još više: znamo sve gradivne elemente od kojih se sastoje sve materije i zračenja, a osim toga sada znamo uz ***savršenu*** tačnost kako se kreću, stupaju u interakciju i pretvaraju u ravnom prostor-vremenu.

Uprkost ovoj savršenoj tačnosti, takođe znamo ono što još uvek ne znamo:

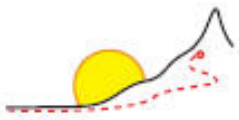
- Ne znamo preklo konstanta veza.
- Ne znamo zašto pozitroni i protoni imaju ista naelektrisanja.
- Ne znamo poreklo masa čestica.
- Ne znamo poreklo mešanja i CP narušavanja parametara.

- Ne znamo poreklo grupa merila.
- Ne znamo poreklo tri generacije čestica.
- Ne znamo da li pojam čestica opstaje na velikim energijama
- Ne znamo šta se događa u zakrivljenom prostor vremenu.



Slika 145 Fajnmanovi dijagrami standardnog modela

Da bi se proučila ova pitanja, najjednostavniji način je da se istraži priroda na energijama čestica koje su najveće moguće. Postoje dva postupka: da se izvedu veliki eksperimenti i da se istraže zamišljeni modeli. Ona su korisna.



Poglavlje 10

SNOVI O OBJEDINJAVANJU

Materie ist geronnenes Licht.[1]

Albertus Magnus

Postoji li zajedničko poreklo sve tri interakcije čestica? Videli smo u predhodnom poglavlju da je gustina lagranžijana tri merila interakcije određena skoro jedinstveno sa dve vrste zahteva: da poseduju izvesnu simetriju merila i da je u saglasnosti sa prostor-vremenom, preko Lorencove invarijante i renormalizacije. Traženje objedinjavanja interakcija prema tome slično je da se zahteva jedna, objedinjena simetrija prirode. (Da li ste saglasni?) (***Izazov 147s***). Između 1970. i 2010. godine nekoliko predpostavki je podstaklo nadu da se postigne objedinjavanje uz veću simettriju. Najpopularnije bile su velika unifikacija, supersimetrija, konformna teorija polja, dvojnost konstante veze i matematička kvantna teorija polja. Daćemo kratke zaključke o ovim nastojanjima; počećemo sa prvim kandidatom, koji je pojmovno najjednostavniji.

VELIKA UNIFIKACIJA[2]

U svim merenjima energije do 2012. godine, prema tome ispod oko 2 TeV, nije postojalo neslaganje između lagranžijana standardnog modela i opažanja. S druge strane, može da se predpostavi da je sam lagranžijan približnost objedinjenoj teoriji na malim energijama. Stoga bi trebalo da je moguće – pažnja ovo je verovanje – da se nađe objedinjena simetrija koja ***sadrži*** simetrije elektroslabe i jake interakcije kao podgrupe. Na taj način bi tri interakcije merila bile različiti vidovi jedne, "objedinjene" interakcije. Tada bismo mogli da ispitamo fizička svojstva koja slede iz ove objedinjene simertije i da ih uporedimo sa opažanjima. Ovaj pristup, nazvan ***velika unifikacija***, pokušava da objedini opise svih vrsta materije. Sve poznate elementarne čestice posmatrane su kao polja koja se pojavljuju u lagranžijanu određena jednom grupom simetrije merila.

Slično svakoj teoriji merila opisanoj do sada, tako i veliki objedinjen lagranžijan utvrđen je grupom simetrije, predstavljanjem atributa za svaku česticu i odgovarajućom konstantom veze. Opšte traganje za velikom simetrijom počinje onim (polujednostavnim) Lijevim grupama koje sadrže U(1)×SU(2)×SU(3). (***Ref. 215***). Najmanje grupe sa ovim svojstvom su SU(5), SO(10) i E(6); one su određene u ***Dodatku C***. Za svaku od ovih grupa kandidata, moraju da se prouče predpostavljene posledice na model i da se uporede sa eksperimentom. (***Ref. 216***).

UPOREĐIVANJE PREDPOSTAVKI I PODATAKA

Modeli velike unifikacije – takođe nazivani nekorektno GUTs ili ***grand unified theories*** – čine nekoliko predpostavki koje mogu da se usaglase sa eksperimentima. Pre svega, svaki model velike unifikacije predviđa odnose između kvantnog broja kvarkova i leptona. Velika unifikacija naročito objašnjava zbog čega je naelektrisanje elektrona tačno suprotno od naelektrisanja protona.

Model velike unifikacije predpostavlja vrednost za ugao slabog mešanja θ_W; ovaj ugao nije ustaljen u standardnom modelu. (***Ref. 215***). Najčešća predpostavljena vrednost

$$\sin^2 \theta_{W,th} = 0,2 \qquad (102)$$

je blizu izmerene vrednosti

$$\sin^2 \theta_{W,ex} = 0,231(1) \qquad (103)$$

što nije dobro slaganje, ali bi moglo da bude ispravljeno s obzirom na približnosti uzetih u predpostavci.

[1] Materija je zgrušana svetlost.

[2] Zadržan je pojam „***velika unifikacija***", u ostatku teksta korišćen je pojam ***objedinjavanj***e. (prim. prev)

Svi modeli velike unifikacije predviđaju postojanje magnetnih monopolova, kao što je pokazao Gerard't Hooft. (***Ref. 217***). Međutim, uprkos opširnim istraživanjima, takve ćestice još uvek nisu pronađene. Magnetni monopolovi su važni čak i kada bi postojao samo jedan u celom svemiru: postojanje jednog magnetnog monopola podrazumevalo bi da je električni naboj kvantifikovan. (***Ref. 218***). Kada bi magnetni monopol bio pronađen, velika unifikacija bi objasnila zbog čega se električni naboji pojavljuju kao umnošci malih jedinica.

Velika unifikacija predpostavlja postojanje teških srednjih vektorskih bozona, poznatih kao ***X bozoni***. U interakcijama u kojima učestvuju ovi bozoni nisu očuvani barionski i leptonski brojevi, već samo razlika između barionskog i leptonskog broja, B – L. Da bi bili dosledni sa podacima, X bozoni moraju da imaju masu reda 10^6 GeV. Međutim, ova masa bi bila uvek izvan opsega eksperimenata, tako da ova predpostavka ne može da bude proverena direktno.

Najspektakularnije je da X bozoni velike unifikacije podrazumevaju raspad protona. Ovu predpostavku prvi su izneli Pati i Abdus Salam 1974. godine. Ako se proton raspada, to znači da ni ugalj ni dijamat[1] – niti bilo koji drugi materijal – nebi bili večni. U zavisnosti od tačne grupe simetrije, velika unifikacija predpostavlja da se proton raspada u pione, elektrone, kaone ili druge čestice. Očigledno, mi znamo "u našim kostima" da je vreme trajanja protona dosta duže, inače bismo pomrli od leukemije; drugim rečima, nizak nivo oboljenja od kancera na svetu već podrazumeva da je vreme trajanja protona duže od oko 10^{16} godina.

Detaljna izračunavanja vremena trajanja protona τ_p koja su koristila grupu SU(5), dala su izraz (***Ref. 215***)

$$\tau_{\mathrm{p}} \approx \frac{1}{\alpha_G^2\left(M_{\mathrm{X}}\right)} \frac{M_{\mathrm{X}}^4}{M_{\mathrm{p}}^5} \approx 10^{31\pm1} \text{ god} \tag{104}$$

gde je nepreciznost nastala zbog nepredciznosti mase M_X merila bozona koji je uvršten u izraz i usled tačnog mehanizma raspada. U nekoliko velikih eksperimenata pokušavano je da se izmeri vreme trajanja i još uvek se pokušava. Do sada je rezultat jednostavan ali jasan. Niikada nije opažen nijedan raspad protona. (***Ref. 219***). Podaci mogu da se srede prema

$$\begin{aligned}
&\tau\left(p \to e^+\pi^0\right) > 5\cdot 10^{33} \text{ a}\\
&\tau\left(p \to K^+\bar{\nu}\right) > 1{,}6\cdot 10^{33} \text{ a}\\
&\tau\left(n \to e^+\pi^-\right) > 5\cdot 10^{33} \text{ a}\\
&\tau\left(n \to K^0\bar{\nu}\right) > 1{,}7\cdot 10^{33} \text{ a}
\end{aligned} \tag{105}$$

Ove vrednosti su veće od predviđanja modela SU(5). Za ostale grupe merila kandidati situacija još nisu određeni.

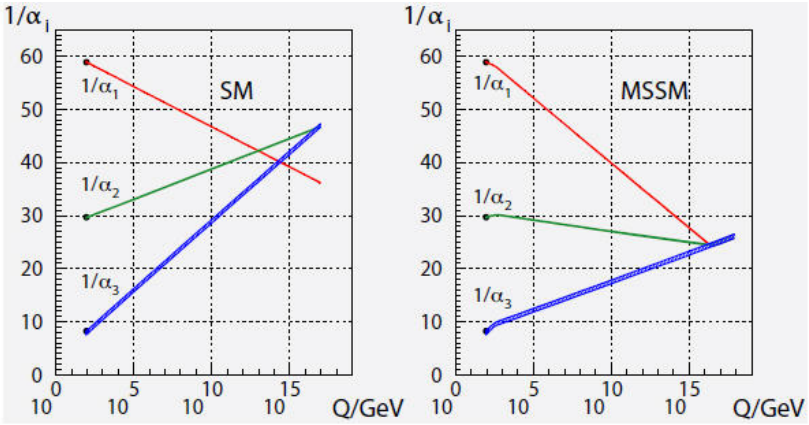
STANJE VELIKE UNIFIKACIJE

Da bi se definitivno rešila pitanja velike unifikacije, ostaje da se proveri poslednja predpostavka velike unifikacije: objedinjavanje konstanti veza. Većina procenjenih energija velike unifikacije su u blizini Plankove energije, energije pri kojoj gravitacija počinje da igra ulogu čak i između elementarnih čestica. Pošto velika unifikacija ne uzima gravitaciju u obzir, dugo je postojala sumnja da li je nešta ispušteno u pristupu. Ova sumnja se izmenila u izvesnost kada je 1991. godine postalo moguće da se izmere konstante veza i kada su stavljene u dijagram na ***slici 146***. (***Ref. 220***) Predpostavke teorije velike unifikacije o načinu da se konstante razvijaju sa energijom podrazumeva da se tri konstante ***ne sreću*** na jednoj energiji. Jednostavna velika unifikacija sa SU(5), SU(10) ili E6 prema tome je odbačena eksperimentom.

Ovo stanje se menja ako se u obzir uzme supersimetrija. Supersimetrija je predpostavka načina da se uzme u obzir gravitacijski uticaj male energije u svetu čestica. (***Strana 203***). Supersimetrija predpostavlja nove elementarne čestice koje menjaju krivime na srednjim energijama, tako da se sve one sreću sa energijom velike unifikacije od oko 10^{16} GeV. (Debljina na ***slici 146*** predstavlja eksperimentalnu grešku.) Primena supersimetrije vraća predpostavku vremena trajanja protona na vrednost veću (ali ne mnogo) nego li postojeće eksperimentalne veze i predviđa tačnu vrednost ugla mešanja. Uz supersimetriju može da se

[1] Kao što je dobro poznato, dijamant nije stabilan; prema tome dijamanti nisu večni, ali bi ugalj mogao da bude, sve dok se protoni ne raspadnu.

zadrže prednosti velike unifikacije (kvantifikovanje naelektrisanja, jedna konstanta veze), a da se bude u suprotnosti sa eksperimentima.



Slika 146 Ponašanje tri konstante veze sa energijom, za prostu veliku unifikaciju (levo) i za najmanji model supersimetrije (desno); grafik prikazuje konstante $\alpha_1 = (5/3)\alpha_{em}/\cos^2\theta_W$ za elektromagnetnu interakciju (činilac 5/3 se pojavljuje u teoriji velike unifikacije), $\alpha_2 = \alpha_{em}/\sin^2\theta_W$ za slabu interakciju i konstantu jake veze $\alpha_3 = \alpha_S$ (© W de Boer)

Čista velika unifikacija prema tome je u suprotnosti sa eksperimentima. To nije iznenađenje, pošto njen cilj, da objedini opise materije, ***ne može*** da se postigne na ovaj način. Zaista, grupa merila objedinjavanja mora da se uvede na samom početku, pošto velika unifikacija ne može da odredi grupu merila iz opštih načela. Ni velika unifikacija ne može da nam kaže u potpunosti koje elementarne čestice postoje u prirodi. Drugim rečima, velika unifikacija samo odlaže otvorena pitanja standardnog modela na sledeći nivo, dok većina otvorenih pitanja ostaje bez odgovora. Ime "velika unifikacija" pogrešno je od samog početka. Moramo neizostavno da nastavimo našu pustolovinu.

TRAŽENJE VIŠIH SIMETRIJA

Obzirom da želimo da dostignemo vrh Planine Kretanja, nastavljamo. Videli smo u predhodnom odeljku da glavni sadržaji lagranžijana koji opisuju kretanje imaju svojstva simetrije. Podsećamo se da je lagranžijan samo matematički naziv za pojam koji meri promenu. Otkriće ispravne simetrije, zajedno sa matematičkom doslednošću, obično smanjuju mogućnost izbora za lagranžijan na ograničen broj i na jedan u najboljem slučaju. Takav lagranžijan tada omogućava da se prave eksperimentalne predpostavke.

Istorija fizike čestica od 1920. do 1965. godine pokazala je da je napredak uvek povezan sa otkrićem veće simetrije, u smislu da novootkrivene simetrije uvek obuhvataju i one starije kao podgrupu. Zato su u dvadedetom veku istraživači tražili najveću moguću simetriju koja bi s jedne strane bila u skladu sa eksperimentima i s druge strane sa teorijom merila. Pošto je velika unifikacija promašaj, bolji pristup je direktno traženje simetrije koja uključuje gravitaciju.

SUPERSIMETRIJA

U traženju moguće simetrije lagranžijana koja bi opisala teoriju merila i gravitaciju, jedan način je da se nastavi sa traženjem opštih matematičkih teorema koje smanjuju simetrije koje lagranžijan možda ima. (***Ref. 221***).

Dobro poznata teorema Kolemana (Coleman) i Mandula (***Ref. 222***) izražava da ako transformacija simetrije transformiše fermione u fermione i bozone, neće biti očuvana nijedna druga veličina osim sledećih:

- tenzor energija količina kretanja $T^{\mu\nu}$, posledica Poenkareove ***spoljne*** simetrije prostor-vrmena i
- unutrašnji kvantni brojevi, svi skalari, pridruženi svakom generatoru grupe merila – kao što su električni naboj, boja itd – i posledice unutrašnje simetrije lagranžijana.

Međutim, tu se nalazi izlaz, ako se izmu u obzir transformacije koje mešaju fermione i bozone, postaju moguća nova očuvanja veličina. Ova porodica simetrija obuhvata gravitaciju i postaje poznata kao ***super-***

simetrija. Njene očuvane veličine nisu skalari, već ***spinori***. Prema tome, ***klasična*** supersimetrija ne postoji; to je čista simetrija kvantne mehanike. Moguće grupe super merila bile su u potpunosti razvrstane.

Supersimetrija može da se proširi tako što će da obuhvati i gravitaciju promenom u lokalnoj teoriji merila; u tom slučaju je reč o ***supergravitaciji***. Supergravitacija se zasniva na ideji da koordinate mogu biti fermionske, a isto tako i bozonske. Supergravitacija stoga pravi poseban iskaz o ponašanju prostor-vremena na malim rastojanjima. Supergravitacija predviđa N dodatnih očuvanja, spinorskih promena. Broj N se nalazi između 1 i 8; svaki broj vodi ka različitom kandidatu lagranžijana. Najprostiji slučaj supergravitacije je za $N = 1$.

Ukratko, supersimetrija je predpostavka da se objedine materija i zračenje na malim energijama. Mnogi istraživači su predpostavljali da je supersimetrija, a naročito supergravitacija $N = 1$, veriovatno približna stvarnosti.

Supersimetrični modeli prave brojne predpostavke koje se lako mogu proveriti u eksperimentima.

- Supersimetrija predpostavlja partnere uobičajenim elementarnim česticana, zvanim ***superpartneri*** (s-čestice). Za fermione je predpostavljeno da imaju bozonskog partnera i obrnuto. Na primer, supersimetrija predpostavlja ***fotine*** kao fermionske partnere fotonima, ***gluine*** kao partnere gluonima, ***selektrone*** kao partnere elektronima itd. Međutim, nijedna od ovih čestica još nije opažena.
- Supersimettrija omogućava objedinjavanje konstanti veza, na način koji je srazmeran podacima, kako je već rečeno u predhodnom tekstu. (***Strana 203***).
- Supersimetrija usporava stepen raspada protona koji predpostavljaju teorije velike unifikacije. Usporen stepen raspada srazmeran je sa posmatranjima.
- Supersimetrija predpostavlja momente električnog dipola za neutron i ostale elementarne čestice. Najveća predpostavljena vrednost za neutron od $10^{-30}e$ m u neskladu je sa posmatranjima, najmanja predpostavljena vrednost još uvek nije postignuta u eksperimentima. Radi upoređenja, vrednosti koje se očekuju iz standardnog modela su uglavnom $10^{-33}e$ m. Ovo je živahno polje istraživanja koje može da spase poreske obveznika od finansiranja još nekih ubrzavača čestica.

Do 2012. godine nije postojala evidencija eksperimenata u oblasti supersimetrije. Osim toga, LHC (Large Hadron Collider) u CERN u Ženevi nije našao bilo kakav nagoveštaj supersimetrije.

Da li je supersimetrija sastavni deo teorije objedinjavanja. Siguran odgovor je: to je nejasno. Optimistički odgovor je: postoji još uvek mala verovatnoćća da je supersimetrija otkrivena. Pesimistički odgovor je: supersimetrija je sistem verovanja koji je u suprotnosti sa opažanjima i napravljen da ispravi propuste teorije velike unifikacije. Poslednji deo ove pustolovine reći će nam koji odgovor je tačan.

OSTALI POKUŠAJI

Ako supersimetrija nije uspešna, možda je za objedinjavanje porebna još veća simetrija. Prema tome, istraživači su istraživali ***kvantne grupe, nekomutativno prostor-vreme, konformnu simetriju, topološku kvantnu teoriju polja*** i ostale apstraktne simetrije. Nijedan od ovih pristupa nije doveo do korisnih rezultata; niti su eksperimentalne predpostavke napredovale prema objedinjavanju. Međutim, dva drugačija pristupa zaslužuju posebnu pažnju: dvojna simetrija i proširenje renormalizacije.

DVOJNOST – NAJNEVEROVATNIJE SIMETRIJE PRIRODE

Važno otkriće matematičke fizike dogodlo se 1977. godina, kada su Klaus Montonen (Claus Montonen) i David Olive (David Olive) dokazali da bi se standardni pojam simetrije mogao da proširi dramatično na drugačiji i nov način.

Standardna klasa transformacija simetrije, za koju se pokazalo da je samo prva klasa, deluje u poljima. Ova klasa obuhvata simetrije merila, simetrije prostor-vremena, povratna kretanja, paritete, simetrije ukusa i supersimetriju.

Druga, nova klasa je sasvim drugačija. Ako uzmemo sve konstante veza u prirodi, možemo da zamislimo da su one članovi kontinualnog prostora od svih mogućih konstanti veza, nazvanog parametarski prostor.[1]

[1] Prostor rešenja za sve vrednosti parametara naziva se ***prostor modula***..

Montonen i Olive su pokazali da postoje transformacije u parametarskom prostoru u kojima priroda ostaje invarijantna. Ove transformacije prema tome obrazuju novu, drugu klasu simetrija prirode.

Zapravo, mi smo se već sreli jednog člana ove klase: renormalizaciju simetrije. Međutim, Olive i Montonen su znatno proširili ovu klasu otktićem ***elektromagnetne dvojnosti***. (***Vol. III, strana 72***). Elektromagnetna dvojnost je diskretna razmena simetrije

$$e \leftrightarrow \frac{4\pi\hbar c}{e} \tag{106}$$

u kojoj se pokazalo da je desna strana jedinica magnetnog naboja. Elektromagnetna dvojnost povezuje prema tome elektrini naboj e i magnetni naboj m

$$Q_{\text{el}} = me \quad \text{i} \quad Q_{\text{mag}} = ng = \frac{2\pi\hbar c}{e} \tag{107}$$

i stavlja ih na ravnopravnu osnovu. Drugim rečima, transformacija razmenjuje

$$\alpha \leftrightarrow \frac{1}{\alpha} \quad \text{i} \quad \frac{1}{137{,}04} \leftrightarrow 137{,}04 \tag{108}$$

i prema tome razmenjuje slabu i jaku vezu. Drugim rečima, elekttromagnetna dvojnost povezuje režime u kojima čestice imaju smisla (režimi slabih veza) sa onima u kojima čestice nemaju smisla (režimi jakiih veza). To je najzanimljivija simetrija ikada smišljena.

Dvojnosti spadaju među najdublje veze u fizici. One sadrže $\hbar$ pa su zato suštinski kvantne. One ne postoje u klasičnoj fizici i pokazuju da je kvantna fizika osnovnija od klasčne fizike. Još jasnije izraženo, dvojnosti su suštinski neklasične simetrije. Dvojnosti potvrđuju da kvantna teorija opstaje sama za sebe.

Ako se želi da se razumeju vrednosti neobjašnjenih parametara, kao što su konstante veza, da bi se to učinilo očigledna je stvar da se prouče sve moguće simetrije u prostoru parametara, prema tome sve moguče simetrije druge klase, mogućnosti koje ih kombinuju sa prvom klaasom simetrije. (Zaista, kombinacije dvojnosti sa supersimetrijom proučavaju se u teoriji struna.) (***Vol. VI, strana 112***).

Ova istraživanja su pokazala da postoji nekoliko tipova dvojnosti, koje su ***neperturbativne*** simetrije. (***Ref. 223***).

- S dvojnost, uopštavanje elektromagnetne dvojnosti na sve interakcije,
- T dvojnost, takođe nazivana dvojnost prostor-vremena, mapiranje između malih i velikih dužina i vremena prema $l \leftrightarrow l_{\text{Pl}}^2/l$;[1]
- infracrvena dvojnost

Uprkos oduševljenju idejom, istraživanja u dvojnostima nisu dovela do eksperimentalnih predpostavki. Međutim, rezultati su naglasili drugačiji način da se pristupi kvantnoj teoriji polja. Dvojnosti igraju važnu ulogu u teoriji struna, koju ćemo kasnije da istražimo. (***Vol. VI, strana 112***).

KOLEKTIVNI ASPEKTI KVANTNE TEORIJE POLJA

Tokom više decenija matematičari su pitali fizičare: Šta je suština kvantne teorije polja? Uprkos opširnim istraživanjima, na ovo pitanje još uvek nije precizno odgovoreno.

Polovina odgovora je data u uobičajenoj definiciji iz udžbenika fizike: kvantna teorija polja je najopštiji poznat način da se opišu kvantni mehanički kontinualni sistemi pomoću ***konačnog*** broja vrsta kvantova, ali uz ***beskonačan*** broj stepena sloboda. (Naravno, ova definicija podrazumeva da lagranžijan mora da bude relativistički invarijantan i mora da bude opisan teorijom merila.) Međutim, ova polovina odgovora je već više nego dovoljna da uzrokuje problem. U sledećem delu našeg penjanja (***Vol. VI, strana 36***) mi ćemo da pokažemo da nisu neprekidni ni prostor-vreme ni fizički sistemi; osim toga, mi ćemo da otkrijemo da

[1] Dvojnost prostor-vremena, transformacija između velikih i malih veličina, dovodi do pitanja da li postoji unutrašnjost i spoljašnjost čestica. Sa ovim pitanjem smo se već sreli u našem proučavanju rukavica. (***Vol. IV, strana 89***). Ovo pitanje ćemo sresti ponovo u daljem tekstu, kada budemo istraživali everziju i inverziju. (***Strana 219***).

priroda nema bekonačan broj stepena slobode. Drugim rečima, kvantna teorija polja je efikasna teorija; to je savremen način da se kaže da je ona približna, ili tačnije, da je pogrešna.

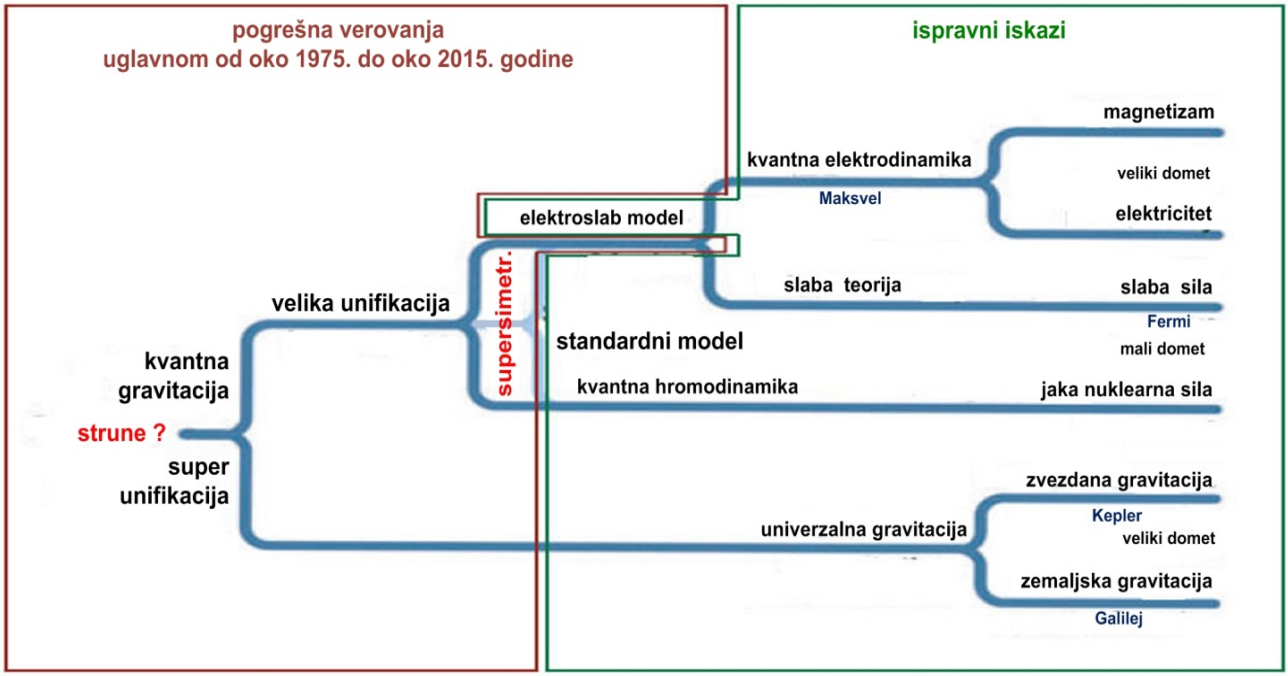
Druga polovina odgovora, još delimično nepoznata, određivala bi koji (matematički) uslovi fizičkih sistema, to jest lagranžijana, stvarno treba da budu ispunjeni, kako bi postali kvantna teorija polja. Uprkos radu mnogo matematićara, još uvek nije poznat kompletam popis uslova. Međutim, poznato je da popis sadrži najmanje dva uslova. Pre svega, kvantna teorija polja mora da bude ***renormalizativna***. Drugo, kvantna teorija polja mora da bude ***asimptototski slobodna***; drugim rečima, veza mora da se kreće ka nuli kada se energija kreće ka beskonačnosti. Ovaj uslov osigurava da su interakcije pravilno definisane. Samo podskup renormalizivanog lagranžijana ispunjava ove uslove.

U četiri dimenzije, jedina poznata kvantna teorija polja sa ova dva svojstva su ne-abelijske teorije merila. Ovi lagranžijani imaju nekoliko opštih aspekata koji nisu neposredno uočljivi kada se do njih stigne preko uobičajenih načina, to jest, preko uopštavanja naivne talasne kvantne mehanike. Ovaj standardni pristup, koji je istorijski, naglašava ***perturbativne*** aspekte: razmišljamo o elementarnim fermionima kao polju kvantova, a o interakcijama kao razmeni virtualnih bozona, na razlićite naloge smetnje.

S druge strane, svi Lagranžijani teorije polja pokazuju dve druge konfiguracije, osim čestica, koje igraju važnu ulogu. Ova matematička rešenja se pojavljuju kada se uzme neperturbativna tačka gledišta; to su kolektivne konfiguracije.

- Kvantna teorija polja pokazuje rešenja koja su statična i konačne energije, načinjena nelokalnim kombinacijama polja, pod nazivom ***solitoni***. U kvantnoj teoriji polja solitoni su uglavnom magnetni monopolovi i dioni; isto tako poznati ***skirmioni*** su solitoni. U takvom pristupu kvantnoj teoriji polja, predpostavljeno je da su stvarne jednakosti prirode nelinearne pri velikim energijama. Kao i u tečnostima, očekuju se stabilna i lokalizovana rešenja koja se šire, solitoni. (***Vol. I, strana 230***). Ovakvi solitoni mogli bi da budu u vezi sa opaženim česticama.
- Kvantna teorija polja pokazuje poludvojna i anti-poludvojna rešenja, nazvana instantoni. Instantoni imaju ulogu u kvantnoj hromodinamici, a imaju ulogu i u osnovnom lagranžijanu prirode.
- Kvantna teorija polja definiše čestice i interakcije koristeći perturbacijska širenja. Da li postoje neperturbativne čestice? Kada se perturbativno širenje prekida? Šta se događa u takvom slućaju? Uprkos ovim gorućim pitanjima još uvek nije pronađen nikakav odgovor.

Sve ove privlaćne teme bile su detaljno istraživane od strane matematičkih fizičara. (***Ref. 224***). Iako su ova istraživanja produbila razumevanje teorije merila, nijedan od dobijenih rezultata nije pomogao da se dođe do objedinjavanja.



Slika 147 Tipičan crtež objedinjavanja, kakav se može naći i većini objavljenih dokumenata na ovu temu, sa svojim tačnim i netačnim delom (© CERN)

ZANIMLJIVOSTI O OBJEDINJAVANJU

Od 1970-ih godina nadalje, postalo je popularno crtanje grafika kakav je onaj na ***slici 147***. Ovakav pristup konačnoj teoriji kretanja nastao je usled eksperimentalnih uspeha u elektroslabom objedinjavanja i zbog uspeha među teoretičarima velike unifikacije.

Nažalost, velika unifikacija je protivrečila elsperimentima. Zapravo, kao što je objašnjeno u predhodnom tekstu (***strana 184***) čak ni elektromagnetna i slaba interakcija nisu bile objedinjene. (Trajalo je decenijama ubeđivnje ljudi u suprotno, uvođenjem pojma "elektroslaba unifikacija" umesto pojma sličnog "elektroslaba usklađenost" ili "elektroslabo mešanje".) Drugim rećima, veliki deo na ***slici 147*** nije tačan. Grafik i priča iza njega odveli su većinu istraživača na pogrešan put tokom nekoliko decenija.

* * *

Za dobar i aktualan uvod u savremeno ustraživanje čestica, pogleajte letnja predavanja studentima u CERN, koja se mogu naći na veb strani cds.cern.ch/collection/Summer Student Lectures?ln=en.

ZAKLJUČAK O MATEMATIČKIM I VIŠIM SIMETRIJAMA

Četiri decenije teorijskih istraživanja su pokazala:

- Matematička fizika ***nije*** put kojim se traži objedinjavanje.

Sve potrage za objedinjavanjem koje su bile vođene ***matematičkim idejama*** – matematičkim teoremama ili matematičkim uopštavanjima – nisu bile uspešne. Matematika nije pomoć u ovom zahtevu.

Četiri decenije istraživanja takođe su pokazala i još konkretniji rezltat:

- Traženje viših simetrija u prirodi nije bilo uspešno.

Uprkos hiljadama izuzetno pametnih ljudi koji su istraživali moguće više simetrije u prirodi, njihov trud nije doveo do uspeha.

Izgleda da su istraživači upali u klopku teorije muzike. Svako ko je učio da svira neki instrument čuo je da se kaže da je "matematika osnova muzike". Naravno da je to besmislica; osećanja su osnova muzike. Međutim, netaćan iskaz o matematici krije se u glavi svakog muzičara. Osvrnemo li se na istraživanja u dvadesetom veku, izgleda da se to isto dogodilo i fizičarima. Iz ovih grešaka zaključujemo:

- Objedinjavanje zahteva tačno podvrgavanje ***fiziškim*** načelima.

S druge strane, u dvadestom veku istraživači su propustili da nađu takva načela. Ove greške nas dovode do dva pitanja: Postoji li drugi način da se traži viša simetrija? A možda su se istraživači oslanjali na primenjene pogrešne predpostavke o sastavu čestica ili prostor-vremena? Pre no što istražimo ova interesantna pitanja, načinićemo pauzu da bismo se inspirisali.

Poglavlje 11

BAKTERIJE, MUVE I ČVOROVI

La premiere et la plus belle qualite de la nature est le mouvement qui l'agite sans cesse; mais ce mouvement n'est qu'une suite perpetuelle de crimes; ce n'est que par des crimes qu'elle le conserve.[1]

Donatien de Sade (Donatien Alphonse Francois de Sade), *Justine, ou les malheurs de la vertu.*

Objekti promenljivog oblika, posebno meduze ili amebe, otvaraju novu viziju sveta kretanja, ukoliko dopustimo da nas vodi radoznalost da ih detaljno proučimo. Do sada smo propustili mnoge lepa uočavanja ostavljajuči ih na stranu. Ustvari, promenljivi objekti pružaju iznenađujuće veze između promene oblika i kretanja koje će biti od velike koristi u poslednjem delu našeg penjanja na planinu. Umesto da nastavimo da posmatramo sve manje i manje, sada ćemo napraviti drugačiji pogled na svakodnevna kretanja i njihov matematički opis.

Da bismo uživali u ovom poglavlju promenićemo dragu nam naviku. Do sada smo uvek opisivali svaki opšti primer kretanja kao složeno kretanje ***tačkastih čestica***. To je dobro funkcionisalo u klasičnoj fizici, opštoj teoriji relativnosti i u kvantnoj teoriji; pristup smo zasnivali na prećutnoj predpostavci da se tokom kretanja sve tačke složenog sistema prate posebno. Uskoro ćemo otkriti da se ova predpostavka ne ostvaruje u malim razmerama. Prema tome, najkorisniji opis kretanja ***proširenih*** tela koristi metode koje ne zahtevaju da se delovi tela prate deo po deo. Ove metode ćemo istražiti u ovom poglavlju; čineći to, naše je pravo da se mnogo zabavimo.

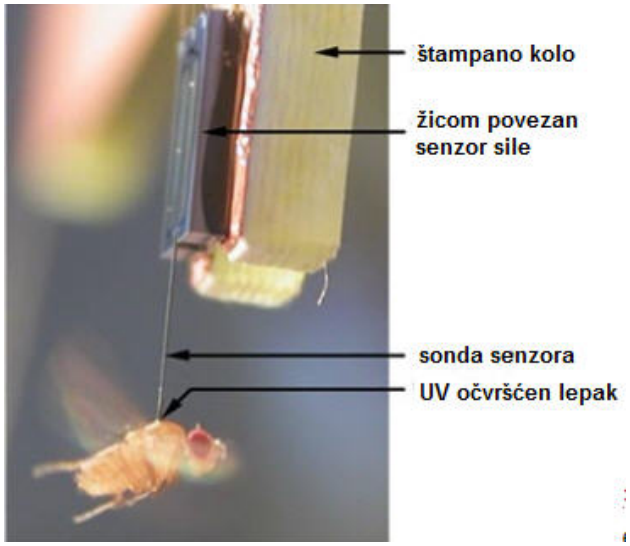
Ako elementarne čestice opišemo kao proširene objekte – kao što ćemo uskoro da učinimo (***Vol. VI, strana 95***) – kretanje čestice kroz prostor slično je delfinu koji pliva kroz vodu, ili pčeli koja leti kroz vazduh, ili vrtlogu koji napreduje u tečnosti. Zato istražujemo kako se to događa.

BUMBARI I OSTALI MINIJATURNI LETEĆI SISTEMI

Ako bumbar proleti tokom našeg uspona na planinu, možemo na trenutak da stanemo i da procenimo proste činjenice: leptir leti i prilično je mali. Ukoliko imamo u kuhinji neki komad presečenog voća koji počinje da truli, zapazićemo još manje voćne mušice (*Drosophila melanogaster*), veličine tek iznad dva milimetra. Na ***slici 148*** prikazana je voćna mušica u letu. Ako ste ikada pokušali da napravite mali model aviona, ili ako ste samo uporedili ove insekte sa papirnim modelom aviona – možda najmanja veštaćka leteća sprava koju ste možda videli – počećete da dobijate osećaj koliko dobro je evolucija optimizovala leteće insekte.

U poređenju sa papirnim avionom, insekti takođe imaju motore, krila sa preklapanjem, senzore, sisteme za navigaciju, žiroskopske stabilizatore, stajni trap kao i sva svojstva života, razmnožavanje i metabolizam, ugrađene u neverovatno malu zapreminu. Evolucija je zaista izuzetan inženjerski tim. Najnevetovatniji letači. kao što je obična kućna muva (*Musca domestica*), može da promeni pravac leta u samo 30 ms, koristeći stbilizatore koje joj je podarila priroda promenom početnog oblika drugog para krila. Ljudi inženjeri postaju sve više zainteresovani za tehnička rešenja koja je razvila evolucija; mnogo inženjera pokušava da postigne slične miniturizacije. (***Ref. 225***). Tema miniturizacije letećih sistema je izuzetno velika, tako da ćemo pogledati samo nekoliko primera.

[1] "Prvi i najlepši kvalitet prirode je kretanje, koji je neprestano uznemirava; ali ovo kretanje je prosto jedna neprekidna posledica zločina; ona ga čuva samo zločinima." Donaten Alfons Fransoa de Sad (Donatien Alphonse Francois de Sade, 1740. Paris – 1814. Charenton-Saint-Maurice) bio je plodan pisac prema kome je izveden pojam "sadizam".



Slika 148 Voćna mušica u letu, vezana za mikroelektromehanički sistem koji meri silu (© Bradley Nelson).

Kalo leti bumbar (*Bombus terrestis*)? Uzgon *mg* koji proizvode fiksna krila (kao što je ranije objašnjeno) (***Vol. I, strana 260***) sledi empirijski odnos

$$mg = f\, A\upsilon^2 \rho \qquad (109)$$

gde je A površina krila, υ je brzina krila u sredini specifične gustine ρ. Činilac f je čist broj, obično ima vrednost između 0,2 i 0,4 i zavisi od ugla krila i njihovog oblika; ovde ćemo da koristimo srednju vrednost 0,3. (***Ref. 226***). Za Boing 727 površina krila je 511 m^2, najveća brzina na nivou mora je 250 m/s; na visini od 12 km gustina vazduha je tek 1/4 gustine pri tlu, prema tome samo 0,31 kg/m^3. (***Vol. I, strana 36***). Zaključujemo (tačno) da Boing 747 ima masu od oko 300 t. (***Izazov 148e***). Za bumbara, koji ima brzinu od 3 m/s i površinu krila od 1 cm^2, dobijamo masu dizanja od oko 35 mg, daleko manju od težine bumbara, naime oko 1 g. Ova zbrka je još veća za voćnu mušicu. Drugim rečima, insekt nebi mogao da leti ako bi držao ***nepokretna*** svoja krila. Nebi mogao da leti sa nepokretnim krilima čak ni kada bi na njih bile pričvršćene male elise!

Zbog ograničenja usled nepokretnih krila malih dimenzija, nasuprot avionima, insekti i male ptice moraju da ***pokreču*** svoja krila. Oni moraju to da čine ne samo da bi poletele ili dostigle visinu, već prosto da ostanu u vazduhu u horizontalnom letu. Nasuprot njima, avioni proizvode dovoljan uzgon sa ***nepokretnim*** krilima. Ustvari, ako pogledate životinje koje lete, kao što su one prikazane na ***slici 150***, zapazićete da što imaju veće oči, utoliko je manje potrebno da pokreču svoja krila (pri brzini krstarenja).

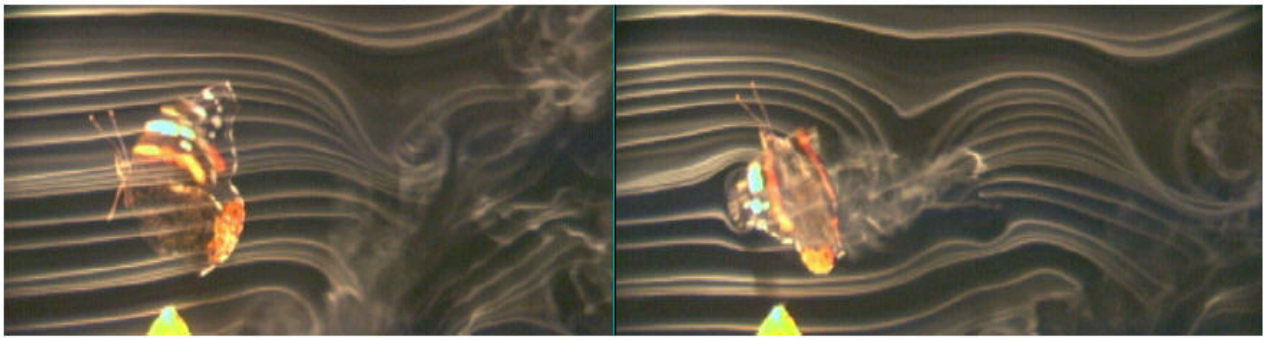
Možete li da zaključite iz jednakosti (109) da ptice i insekti mogu da lete, a ljudi ne? (***Izazov 149s***). I obratno, jednakost takođe (delimično) objašnjava zbog čega avioni sa ljudskim pogonom moraju da budu tako veliki.[1]

Ali kako insekti, male ptice, leteće ribe ili slepi miševi moraju da pokreću svoja krila da bi leteli? Ovo je zamršeno pitanje i odgovor je bio otkriven tek nedavno. Osnovna činjenica je da se krila insekata kreću na takav način da proizvode vrtloge vazduha na prednjoj ivici, koji za uzvrat potiskuju insekt napred. (***Ref. 227***) i (***Ref. 228***). Aerodinamička proučavanja letova leptira – prikazana na ***slici 149*** – i proučavanja sa povećanim modelima insekata koji se kreću u ulju umesto u vazduhu objasnila su precizno način na koji insekti koriste ove vrtloge. Istovremeno, širom sveta je napravljeno sve više "mehaničkih ptica" i "modela

[1] Drugi deo objašnjenja zahteva malo aerodinamike, koji nećemo ovde da proučavamo. Aerodinamika pokazuje da je potrošnja energije, pa prema tome otpor krila sa datom masom i datom brzinom krstarenja, obrnuto srazmeran kvadratu raspona krila. Veliki rasponi krila sa dugim vitkim krilima prednost su u (podzvučnim) letovima, posebno kada je energija oskudna.

Jedno pitanje je ovde pomenuto samo u prolazu: zašto avion leti? Tačan opšti odgovor je: ***zato što on skreće vazduh naniže***. Kako to postiže avion? On to čini uz pomoć nagnutih površina, rotora, mahanjem krila ili nepokretnih krila. A kako nepokretna krila skreću vazduh naniže? Pre svega, krila moraju da budu pod nagibom u odnosu na protok vazduha; osim toga, poseban poprečni presek krila može da poveća protok naniže. Odnosi između oblika krila i protoka naniže glavna su tema primenjene aerodinamike.

aviona" koji koriste mahanje krila za svoj pogon. Ovo polje je doslovno u punom zamahu.[1] Istraživači su posebno zainteresovani da shvate kako vrtlozi omogućavaju promenu smera leta pri malim dimenzijama, tipičnim za insekte. Naredni cilj je da se smanji veličina letećih mašina.



Slika 149 Vrtlozi vazduha oko krila leptira (© Robert Srygley / Adrian Thomas).

Izraz (109) za uzgon nepokretnih krila pokazuje takođe šta je neophodno za bezbedno uzletanje i sletanje. Uzgon kod svih krila ***smanjuje*** se pri malim brzinama. Zbog toga i životinje i avioni ***povećavaju*** površinu krila u takvim prilikama. Većina ptica takođe energično povećava mahanje krilima u takvim situacijama. Međutim, čak nu jako mahanje ni povećanje krila nisu često dovoljni za poletanje. Dosta letećih životinja, kao što su lastavice, zato u potpunosti izbegavaju sletanje. Za leteće životinje koje poleću sa zemlje priroda ih najčešće tera da zamahnu krilima iznad leđa, jednim naspram drugog, tako da kada se krila razdvoje, nizak pritisak između njih obezbeđuje početno podizanje. Ovakav postupak se koristi kod insekata i većini ptica, uključujući fazane. Kao što je poznato posmatraćima ptica, fazani naprave glasan "klap" kada poleću. Ovaj "klap" nastaje zbog stvorenog područja niskog pritiska.

Slika 150 Tri primera velikih krila u prirodi, sva optimizovana za brz let: zlatni kondor (*Cathartes aura*), crvenogrli kolibri (*Archilochus colubris*) i vilinski konjic (© S.L.Brown, Pennsylvania Game Commission/Joe Kosack and nobodythere).

I upotreba krila i konstrukcija krila zavise od veličine. Zapravo, u prirodi postoji četiri tipa krila.

1. Pre svega, svi veliki leteći objekti, kao što su avioni i velike ptice, lete tako što koriste ***nepokretna*** krila, osim u toku poletanja i sletanja. Ovakav tip krila prikazan je na levoj strani ***slike 150***.

2. Drugo, ptice uobičajene veličine koriste ***mahanje*** krila. (Kolibri može da napravi i više od 50 mahanja u sekundi.) Ova prva dva tipa krila imaju debljinu oko 10 do 15% dubine krila. Takav tip krila prikazan je u sredini na ***slici 150***

3. Kod malih dimenzija javlja se treći tip krila, ***membranska krila***. Ona se mogu naći kod vilinskih konjica i kod mnogih drugih svakodnevnih insekata. Na ovim razmerama i pri Rejnoldsovom (Reynolds) broju od oko 1000 i manje, tanka ***membranska krila*** su najefikasnija. Rejnoldsov broj meri odnos između inercijskog i viskoznog efekta u fluidu. On je određen kao

$$\mathrm{Re} = \frac{l\upsilon\rho}{\eta} \qquad (110)$$

gde je l tipična dužina sistema, υ je brzina, ρ je specifična gustina sistema, a η je dinamički viskozitet fluida.[1] Rejnoldsov broj veći od jedan je tipičan za brz protok vazduha i brz tok vode.

[1] Na veb strani www.aniprop.de predstavljen je tipičan istraživački pristup, a uvod u način kako ovakve siteme mogu da izgrade hobisti, dat je na veb stranama ovirc.free.fr i www.ornithopter.org/

Ustvari, veličina Rejnoldsovog broja razlikuje "brze" ili "turbulentne" protoke s jedne strane i "spore" ili "laminarne" protoke s druge strane. Primer membranskih krila prikazan je na desnoj strani ***slike 150***. Sve prve tri vrste krila namenjena su za ***turbulentne*** protoke.

4. Četvrti tip krila nalazi se kod najmanjih mogućih dimenzija, kod insekata manjih od 1 mm; njihova krila uopšte nisu membrane, ali su optimizovana za viskozni protok vazduha. Tipični slučaji su to tripsi i parazitske ose, koji mogu da budu manji od 0,3 mm. Svi ovi mali insekti imaju krila koja se sastoje od centralnog ***stabla*** okruženog dlakama. U stvari, ***slika 151*** prikazuje da neke vrste tripsova imaju krila koja liče na minijaturnu četku za toalet.

Slika 151 Krila kod nekoliko vrsti insekara manjih od 1 mm (*Trips, Encarsia, Anagrus, Dicomorpha*) (HortNET)

5. Kod još manjih dimenzija, kojima odgovara Rejnoldsov broj ispod 10, priroda više ne koristi krila, premda ih još uvek čuni sposobnim da koriste vazdušni saobraćaj. U principu, kod manjih Rejnoldsovh brojeva gravitacija više nema uticaja, pa se proces letenja meša sa onim kod plivanja. Međutim, vazdušne stuje su isuviše jake u poređenju sa brzinom koju bi ti mali sistemi mogli da postignu. Nikakva aktivna navigacija tada više nije moguća. Pri ovako malim dimenzijama, koje su bitne za prenos spora i polena kroz vazduh, priroda koristi vazdušne struje za pasivan prenos, koristeći posebne, ali određene oblike.

Da zaključimo: aktivan let je moguć samo preko promene oblika. Samo su dve vrste promene oblika moguće za aktivan let: one sa krilima i one sa propelerima (uključujući turbine). (***Ref. 229***). Inženjeri temeljno proučavaju kako da se iskoriste ove promene oblika u smislu da letenje bude što efikasnije. (***Ref. 230***). Interesantno je, ali slične izazove poseduje i plivanje.

---

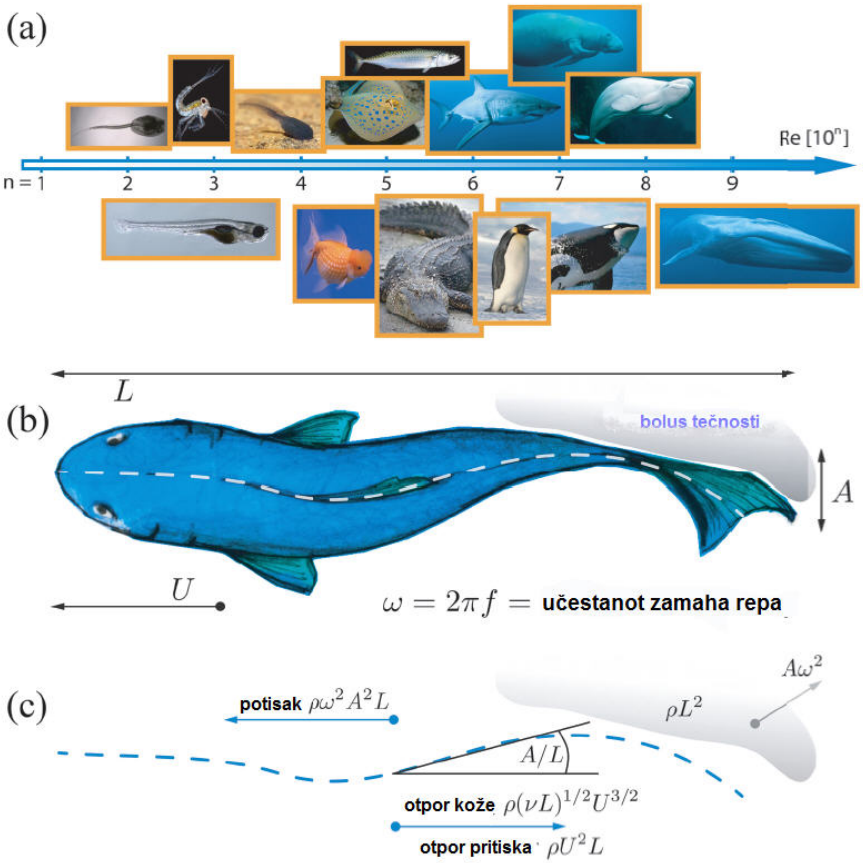
[1] Viskoznost je otpor protoku koji poseduje fluid. To je određeno kao sila F potrebna da se kreče ploča površine A u sekundi, paralelno sa drugom na rastojanju d; ukratko, (sačinilac) ***dinamička viskoznost*** je određena kao $\eta = dF/Av$. Jedinica je 1 kg/s·m ili 1 Pa·s ili 1 N·s/m^2, nekada nazivano 1 P ili 10 puaza. Drugim rečima, za datu horizomtlnu cev viskoznost određuje koliku je potrebna snaga pumpe da bi pumpala fluid kroz cev potrebnom brzinom. Viskoznost vazduha na 20°C iznosi 1,8·10^{-5} kg/s·m ili 18 µPa·s i povećava se sa temperaturom. Suprotno tome, viskozitet tečnosti se smanjuje sa temperaturom. (Zašto?) (***Izazov 150ny***). Viskoznost vode na 0°C je 1,8 mPa·s, na 20°C je 1,0 mPa·s (ili 1 cP), a na40°C je 0,66 mPa·s. Vodonik ima viskoznost manju od 10 µPa·s, dok med ima 25 Pa·s, a vršno 30 MPa·s.

Fizičari takođe koriste veličinu v, pod imenom ***kinematička viskoznost***. Ona je određena pomoću gustine mase fluida kao $v = \eta/\rho$, i meri se u jedinicama m^2/s, nekada se nazivalo 10^4 St (štoks). Kinematička viskoznost vode na 20°C iznosi 1 mm^2/s (ili 1 cSt) Jednu od najmanjih vrednosti ima aceton, sa 0,3 mm^2/s; Najveću vrednost ima glicerin sa 2000 mm^2/s. Gasovi su u opsegu između 3 mm^2/s i 100 mm^2/s.

PLIVANJE

Plivanje je začuđujuća pojava. Stari Grci su tvrdili da je sposobnost riba da plivaju dokaz da je voda sastavljena od atoma. Kada nebi postojali atomi, riba nebi mogla da napreduje kroz njih. Ustvari, plivanje je aktivnost koja pokazuje da materija ne može sa bude neprekidna. Proučavanje plivanja može prema tome da bude prilično prosvetljenje. Ali kako zapravo riba pliva?

Kada god delfini, meduze, podmornice ili ljudi plivaju, oni zahvataju vodu svojim perajima, telom, elisama, rukama ili nogama i potiskuju je unazad. Usled očuvanja količine kretanja oni se tada kreću napred.[1]



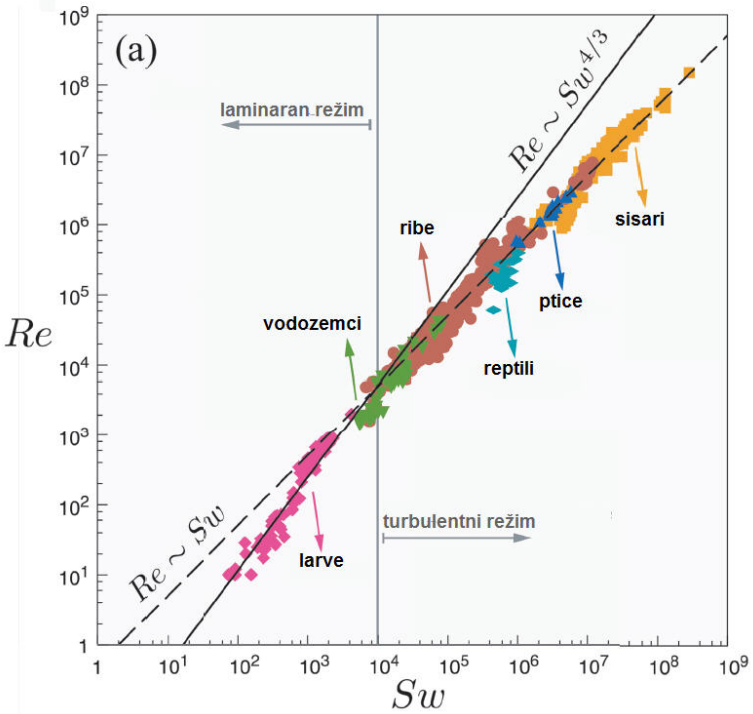
Slika 152 Izbor životinja koje za plivanje koriste talasasti hod i glavne promenljive koje ga opisuju (© L.Mahadevan/Macmillan iz ***Ref. 231***)

Većina riba i vodeni sisari privaju tako što savijaju svoja tela i menjaju dva krajnja izobličenja. Pregled životinja koje koriste ovu vrstu plivanja – stručnjaci ga nazivaju ***talasasti hod*** – prikazan je je na ***slici 152***. (***Ref. 231***). Za sva takva plivanja Rejnoldsov broj ispunjava Re = $\upsilon L/\nu \gg 1$; ovde je υ brzina plivanja, L je dužina tela i ν je kinematska viskoznost. Širok opseg vrednosti Rejnoldsovog broja zapažen kod plivanja živih bića, prikazan je na grafiku. Kretanje pri plivanju je najbolje opisano takozvanim brojem plivanja $Sw = \omega AL/\nu$, gde su ω i A kružna učestanost zamaha i amplituda. Sledeći grafik, ***na slici 153***, pokazuje da je za turbulentno plivanje brzina plivanja υ skoro isključivo zavisi od amplitude i učestanosti talasastog hoda; za manje organizme koje plivaju u laminarnom režimu, brzina plivanja zavisi takođe i od dužine organizma. (***Izazov 151e***).

Ukratko, ribe, delfini podmornice i ljudi plivaju na isti način na kakav rade vatromet ili rakete: pomoću potiska, potiskivanjem materije iza sebe. Pokretanje na osnovu potiska je glavni način makroskopskoh plivanja. (***Ref. 233***). Da li svi organizmi plivaju na ovaj način? Ne. Nekoliko organizama pliva tako što ispaljuje mlazeve vode, na primer glavonošci kakav je sipa. A pre svega mali organizmi napreduju kroz molekule vode tako što koriste potpuno drugačiji, ***mikroskopski*** način plivanja.

[1] Ribe bi mogle da koriste elise, jer se dokazi protiv točkova na početku našeg hodanja ne primenjuju na plivanje. (***Vol. I. strana 74***). Međutim, elise koje se snabdevaju krvlju bile bi slabo mesto u konstrukciji, pa bi stoga načinilo ribe ranjivim. Prema tome, priroda nije razvila ribe sa elisama.

Mali organizmi, kao što su bakterije, nemaju kapacitet da potiskuju ili ubrzavaju vodu nasuprot svom okruženju. Ustvari, voda ostaje vezana oko mikroorganizma bez ikakvog odvajanja od njega. U fizičkom smislu govoreći, u toj vrsti plivanja neizbežna je kinetička energija vode. Da bi plivala, jednoćelijskim bićima je zato potrebno da koriste drugačiji efekt. Zapravo, jedina njihova mogućnost je da menjaju oblik svog tela na kontrolisan način. Posmatrano iz daljine, plivanje mikroorganizama podseća na kretanje čestica kroz vakuum: kao i mikroorganizmi tako i čestice ništa ne potiskuju iza sebe.[1]



Slika 153 Talasasto plivanje prati prosta pravila razmere za organizme koji su u rasponu dužina od nekoliko mm do 30 m. Rejnoldsov broj *Re* opisuje odnos između inercijskog efekta (vode potisnute unazad) i efekta rasipanja (trenja sa vodom). Broj plivanja *Sw* opisuje kinematiku tela (© L. Mahadevan/Macmillan iz ***Ref. 231***)

Dobar način da se razdvoji makroskopsko od mikroskopskog plivanja prikazuje školjka morski češalj (*scallops*). ***Morski češalj*** je mekušac veličine nekoliko cm. Primer je prikazan na ***slici 154***. Morski češalj ima dvostruku školjku spojenu šarkom tako da može da je otvara i zatvara. Ako je ***brzo*** zatvori školjku, voda se izbaci iz nje, a mekušac se ubrza; na taj način morski češalj može neko vreme da kliza kroz vodu. Zatim mekušac ponovo otvori školjku, ovaj put ***polako***, pa ponovi poduhvat. Dok pliva, veliki morski češalj liči na veštačku vilicu sa satnim mehanizmom. Školjka morski češalj koristi prema tome makroskopski proces za plivanje.

Slika 154 Školjka morski češalj: (levo) izgled i (desno) pokret školjke kada pliva (ovde je prikazana iz roda *Chlamus* (© Dave Colwell)

[1] Postoji jedan izuzetak: klizne bakterije se kreću lučenjem sluzi, mada nije još uvek potpuno jasno kako to dovodi do kretanja.

Ako smanjimo veličinu morskog češlja hiljadu puta, do veličine jedne ćelije, dobićemo prost rezultat: takav mali morski češalj ***ne može*** da pliva. Gubitak prilagodljivosti metodi plivanja nastaje zbog promene odnosa između inercijskih efekata i efekata rasipanja po različitin razmerama. Ovaj odnos se meri Rejnoldsovim brojem Re. (***Vol. I, strana 307***). Za morski češalj Rejnoldsov broj je određen kao $Re = \upsilon L/\eta$, gde je υ relativna brzina plivača u odnosu na vodu, L je dužina plivača i η je kinematička viskoznost vode, koja iznosi oko 1 mm^2/s.

Za morski češalj Rejnoldsov broj je oko 100, što pokazuje da kada on pliva inercijalni efekti su daleko važniji od efekata rasipanja, efekata viskoznosti. Za bakterije je Rejnoldsov broj mnogo manji od 1, tako da inercijski efekti ne igraju nikakvu ulogu. Ne postoji način da se voda ubrza nastranu od morskog češlja svedenog na veličinu bakterije, pa tako nema načina da kliza. Bakterija ne može da pliva kao morski češalj ili ljudi; bakterije ne mogu da potiskuju vodu iza sebe. Međutim, to nije jedini problem sa kojim se sreću mikroorganizmi kada žele da plivaju.

Poznata matematička teorema izražava da nijedno biće veličine ćelije ne može da se kreće ako je promena oblika ista za obe polovine kretanja (otvaranje i zatvaranje). (***Ref. 232***). Takve promene oblika bi prosto učinile da se ono kreče napred nazad. Druga matematička teorema, takozvana ***skalop teorema***, kazije da nijedan mikroskopski sistem ne može da pliva ako koristi pokretne delove sa samo jednin stepenom slobode. Zato je kretanje nemoguće pri veličini ćelije, ako se koristi metoda morskog češlja pri centimetarskim razmerama.

Da bi plivali, mikroorganizmi moraju da koriste razvijeniju metodu, ***dvodimenzionalno kretanje*** njihovog oblika. Zaista, biolozi su našli da svi mikroorganizmi koriste jedan od sledećih četiri stila plivanja;

1. Mikroorganizmi nepromenljivog oblika prečnika između 20 μm i oko 20 mm koriste ***treplje*** (***cilije***). Treplje su male niti na površini organizma. Neki organizmi imaju treplje po celoj površini, drugi samo na jednom delu. Ovi organizmi pomeraju treplje u talasima koji se kreću duž njihove površine, a ovi površinski talasi čine da telo napreduje kroz tečnost. Sva deca gledaju sa čudom ***Paramecium***, jednoćelijsku životinju, koju pronalaze pod mikroskopom dok istražuju vodu u kojoj je tokom nekoliko sati bila ostavljena trava. Paramecium, veličine između 100 μm i 300 μm, kao i mnoge vrste planktona[1] koriste treplje za svoje kretanje. Treplje i njihovo kretanje jasno se vide pod mikroskopom. Sličnu metodu plivanja čak koriste i neke veće životinje; možda se videli slične talase na bokovima izvesnih lignji; čak i kretanje raža (delimično) spada u ovu klasu. Kretanje trepljama je efikasan način da se menja oblik tela koristeći dve dimenzije i time izbegava skalop teorema. (***Ref. 234***).

2. Spermatozoidi i mikroorganizmi eukariota, čije su veličine između 1 μm i 50 μm, privaju koristeći (eukariote) flagele[2] – bičeve. Bič (flagella – latinski naziv za "mali bič") deluje kao savitljivo veslo. Premda njegovo kretanje ponekad izgleda da je samo jedna oscilacija, bič ostvaruje udarac samo tokom jedne polovine svog kretanja, naime prilikom svakog zamaha ulevo. Ćelije zaista koriste bičeve kao minijaturna vesla. Neke ćelije čak koriste zamahe svojih bičeva na sličan način na koji ljudi okreću ruku. Neki mikroorganizmi, kao što su *Hlamidomonade* imaju čak dva biča koje pomeraju na isti način kao što ljudi pomeraju noge kada plivaju prsno. (***Ref. 236***). Mnoge ćelije mogu takođe da promene način na koji bićevi udaraju, što im omogućava da se kreću ili napred ili nazad. (***Ref.237***). Svojim obrnutim kretanjem vesla, bakterijski bičevi izbegavaju korišćenje istih puteva kada se kreću napred ili nazad. Kao rezultat toga, bakterije izbegavaju scalop teoremu i upravljaju plivanjem uprkos svojim malim dimenzijama. Savitljivo kretanje vesla koji one koriste predstavlja primer neadijabatskog mehanizma; bitan deo energije se rasipa.

3. Najmanji organizmi koji plivaju, bakterije veličine između 0,2 μm i 5 μm, plivaju tako što koriste ***bakterijske*** bičeve. (***Ref. 238***). Ovi bičevi, poznati pod nazivom i *prokariotski* bičevi, razlikuju se od onih koji su upravo pomenuti. Bakterijski bičevi se kreću kao vadičepovi koji se obrću. Njih koriste poznata bakterija *Esherichia coli* i sve bakterije iz roda *Salmonella*. Ova vrsta kretanja jedna je od istaknutih izuzetaka nepostojanja točkova; to smo već pomenuli na početku našeg hodanja. (***Vol. I, strana 74***). Kretanje na način vadičepa je primer adijabatskog mehanizma.

   Coli bakterije tipično imaju pregršt bičeva, svaki debljine oko 30 nm i oblika vadičepa, sa oko šest zavojaka, a zavojak ima "talasnu dužinu" od 2,3 μm. Svaki bič se obrće sofisticiranim obrtnim

---

[1] Radi pregleda pogledajte veb stranu www.liverpool.ac.uk/ciliate

[2] Najveći spermatozoid, dužine 6 cm, proizvodi mušica veličine 1,5 mm *Drosophila bifurca*, rođaka poznate *Drosophila melanogaster*. (***Ref. 235***).

motorom ugrađenim u ćeliju, kojim ćelija upravlja i smerom obrtanja i ugaonom brzinom. Za koli bakterije opseg je između 0 i 300 Hz. (***Ref. 239***)

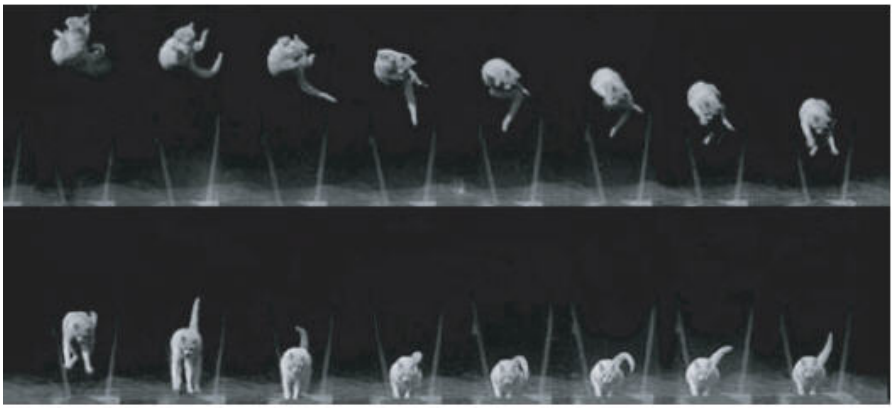
Obrtni bičevi ne pokreću bakterije kao elisa; kao što je pomenuto, brzine o kojima se radi su isuviše male, budući da je Rejnoldsov broj samo oko 10^{-4}. Pri takvim dimenzijama i brzinama, efekt je bolje opisan kao obrtanje vadičepa u medu ili u pluti: vadičep koji se obrće proizvodi kretanje nasuprot materijalu koji se nalazi oko njega, u smeru ose vadičepa. Bičevi pokreću bakteriju na isti način kao što vadičep pokreće obrtanje rukom u odnosu na čep.

4. Jedna grupa bakterija, *spirohete*, u potpunosti se kreću kroz tečnost kao vadičep. (***Ref. 240***). Primer je bakterija *Rodospirillum rubrum*, ćije se kretanje može pratiti na video zapisu sa veb strane www.youtube.com/watch?v=pUomEHMLHwU. Ove bakterije imaju unutrašnji motor okruglih aksijalnih finih vlakana, koji menjaju oblik ćelije na nesimetričan način i dovodi do kretanja kao vadičepa. Druga bakterija je *Spiroplazma*, helikoidalna bakterija – ali ne spiroheta – koja menja oblik ćelije ponovo na nesimetričan način širenjem parova kovrdža duž svoh tela

Da biste ispitali svoju intuiciju, možda da pokušate da rešite sledeću zagonetku: da li je mikroskopsko plivanje moguće u dve prostorne dimenzije? Ili u četiri? (***Izazov 152s***).

Primetite da još manje bakterije ne plivaju uopšte. Ustvari, svaka bakterija je suočena sa minimalnim zahtevima za plivanje: ona mora da nadvlada difuziju u tečnosti u kojoj živi. (***Ref. 241***). Sposobnost sporog plivanja nema smisla; brojni mikroorganizmi zbog toga ne upravljaju ili uopšte ne plivaju. Neki mikro-organizmi specijalizovali su se da se kreću duž spoja tečnost-vazduh. (zapravo, postoji više vrsta plivanja po graničnoj površini, uključujući makroskopsko plivanje, ali ovde nećemo da ih obrađujemo.) Drugi mikroorganizmi se vezuju za čvrsta tela koja se nalaze u tečnosti. Neki od njih su šposobni su da se kreću duž ovih čvrstih tela. Ameba je primer za mikroorganizam koji se kreće na takav način. Isto tako, na taj način rade najmanji aktivni mehanizmi kretanja, naime kretanje molekula u mišićima i opnama ćelija. (***Strana 17***).

Načinimo zaključak ovih zapažanja. Sva poznata aktivna kretanja, ili sopstveni pogoni, (u pljosnatom prostoru) događaju se u fluidima – bilo u vazduhu ili u tečnosti. Sva aktivna kretanja zahtevaju promenu oblika. Makroskopsko plivanje izvodi se preko smislene promene oblika koji čine da plivač napreduje kroz vodu. Da bi promena oblika dovela do plivanja, okruženje, to jest fluid, sam po sebi mora da se sastoji od sastojaka koji se kreču i uvek se pritiskaju uz objekt plivanja. Kretanje objekta koji pliva može tada da se zaključi preko delimične promene oblika koje izvodi. Matematika plivanja promenom oblika je čudesna; zaslužuje da bude istražena.



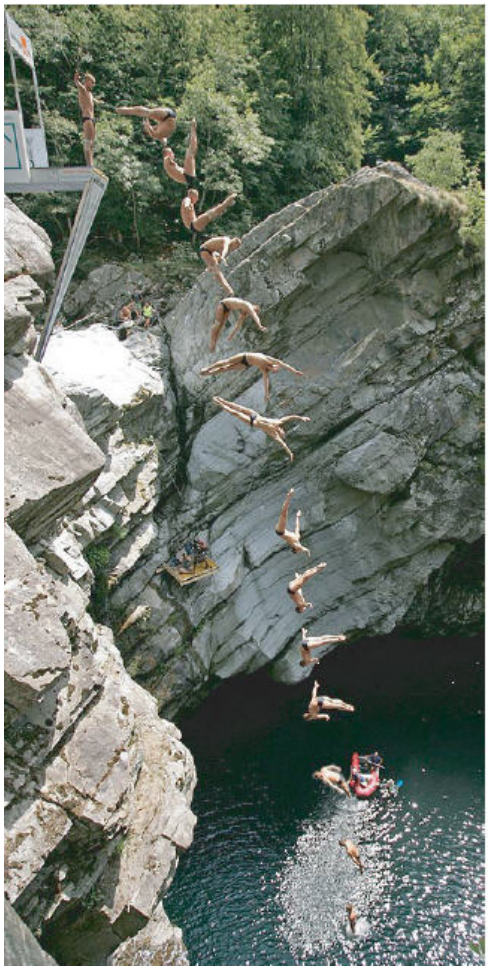
Slika 155 Mačka može da se obrne čak i bez početnog momenta kolčine kretanja (fotografije od Etienne-Jules Marey, 1894. godina)

OBRTANJE, MAČKA KOJA PADA I TEORIJA PROMENE OBLIKA

Kod malih dimemzija letenje i plivanje se događaju putem faznih promena. U poslednjim decenijama opisi pomena oblika promenili su se od pomodne vrste istraživanja do tema čiji su rezultati i primenjivi i korisni. Postoji mnogo istraživanja, kako eksperimentalnih, tako i teoretskih, o tačnim načinima na koje se mali sistemi kreću u vodi vazduhu, o ostvarivoj i postignutoj efikasnosti i mnogo više. U žiži pažnje je kretanje putem translacije.

Međutim, promena oblika može da dovede i do obrtanja tela. U tom slučaju ideje nisu ograničene na mikroskopske sisteme, već se primenjuju za sve razmere. Naročito je teorija promene oblika korisna za

objašnjenje kako mačka koja pada uspeva uvek da padne na sve četiri šape. Mačke se ne rađaju sa ovom sposobnošću; one moraju da je nauče. Međutim, taj podvig zadivljuje ljude vekovima, kao što je prikazano na redosledu fotografija na ***slici 155***. Ustvari, mačke potvrđuju u tri dimenzije ono što smo već znali u dve dimenzije: telo koje se deformiše može da promeni svoju orijentaciju u prostoru bez spoljne pomoći. (***Vol. I, strana 96***). Isto tako i ljudi mogu da izvedu ovaj poduhvat: posmatrajte prosto drugo, bočno obrtanje skakača u vodu na ***slici 156***. Kosmonauti u svemiru i putnici u praboličnom letu "nulte gravitacije" po pravilu izvode to isto, kao što to čini više veštačkih satelita poslatih u svemir.



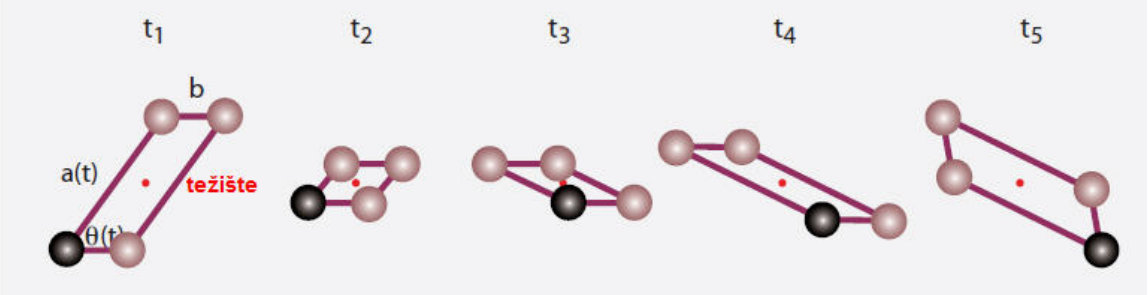
Slika 156 Ljudi se mogu obrtati u vazduhu slično mačkama; pogledajte drugo bočno obrtanje Artema Silčenka na svetskom prvenstvu skokova sa litice 2006. godine (© World High Divings Federation) Video se može pogledati na veb stani www.youtube.com/watch?v=ttetLjQ4du8

Godine 1980. u radovima Majkla Berija (Michael Berry), Vilčeka (Wilczek) i Zija (Zee), kao i Šapera (Shapere) i Vilčeka, dokazano je da su sva kretanja usled promene oblika opisana teorijom merila. (***Ref. 242***). Ekvivalencija je prikazana u ***Tabeli 24***. Prost i lep primer za ovu ideju dali su Puterman (Putterman) i Raz i on je prikazan na ***slici 157*** (***Ref. 243***). Zamislite četiri lopte na savršenom ledu, svaku iste mase i veličine, spojene pomoću četiri štapa tako da obrazuju paralelogram. Sada zamislite da taj paralelogram može da menja dužinu jedne stranice, nazvane a, kao i da može da menja ugao θ između stranica. Puterman i Raz su ovo nazvali ***kvadratna mačka***. Slika pokazuje da kvadratna mačka može da menja sopstvenu orijentaciju na ledu dok, očigledno, zadržava težište u mirovanju. Slika isto tako prikazuje da to čini samo zbog toga što nisu zamenjiva dva kretanja koja mačka može da izvede, rastezanje i promena ugla.

Obrtanje kvadratne mačke događa se u potezima; velika obrtanja se postižu ponavljanjem poteza, slično situaciji kod plivača. Ako bi kvadratna mačka mogla da pliva u tečnosti, ona bi mogla da se obrće – iako nebi mogla da napreduje.

Kada se mačka obrće, svaki potez ima kao rezultat ugao obrtanja koji je nezavisan od brzine poteza. (Isti doživljaj se može ostvariti kada se obrćete u kancelarijskoj stolici ruku dignutih iznad glave: ugao obrtanja stolice posle obrtanja ruku nezavisan je od brzine ruku.) To nas dovodi do zagonetke: koliko je najveći ugao za koji mačka može da se obrne u jednom potezu? (***Izazov 153d***).

Obrtanje u potezima ima brojne važne posledice. Pre svega, broj poteza je veličina sa kojom su saglasni svi posmatrači: ona je invarijanta posmatrača. Drugo, promena orijentacije posle ***završenih*** poteza takođe je invarijanta posmatrača. Treće, promena orijentacije posle nezavršenih poteza zavisi od posmatrača: ona zavisi od načina na koji je određena orijentacija. Na primer, ako je orijentacija određena smerom dijagonale tela kroz crnu masu (videti ***sliku 157***), ono se menja na izvesan način tokom poteza. Ako je orijentacija određena smerom štapa vezanog za crnu masu, ona se menja na različit način u toku poteza. Samo kada su završeni svi potezi ove dve vrednosti su podudarne. Matematičari kažu da izbor određivanja, pa prema tome i vrednost orijentacije, ***zavisi od merila***, ali da je vrednost promene orijentacije po završenim potezima ***invarijanta merila***.



Slika 157 Kvadratna mačka: u slobodnom prostoru ili na savršenom ledu, telo koje se deformiše, a sastavljeno je od četiri mase, može da se obrne promenom jednog ugla i jednog štapa.

Zaključno, kvadratna mačka ukazuje na dve interesantne tačke. Prvo, usmerenje tela koje se izobličava može da se menja ako izobličenja koje ono može da izvede ***nisu zamenljiva***. Drugo, takva tela koja se izobličavaju opisana su teorijom merila: izvesne osobine tela su nezavisne od merila, druge zavise. Ovaj zaključak dovodi nas do pitanja: mogu li se ove ideje iskoristiti da bi se povećalo naše razumevanje teorije merila u elektromagnetnoj, slaboj i jakoj interakciji? Šapere (Shapere) i Vilček (Wilczek) kažu – ne. To ćemo konačno da otkrijemo u sledećem delu pustolovine. Ustvari, promene oblika donose još više iznenađenja.

TABELA 24 Odnosi između pomene oblika i teorije merila

Pojam	**Promena oblika**	**Teorija merila**
Sistem	telo koje se izobličava	kombinacija materije-polje
Slobode merila	sloboda opisa usmerenja tela i položaja	sloboda određivanja vektorskog potencijala
Veličine zavisne od merila	ugaono usmerenje oblika i položaja	vektorski potencijal, faza
	usmerenje i promena položaja duž otvorene putanje	promena vektorskog potencijala i faze duž otvorene putanje
Promena merila	menja ugaono usmerenje i položaj	menja vektorski potencijal
Veličine nezavisne od merila	usmerenje i položaj posle potpunih poteza	razlika faza na zatvorenoj putanji, integral vektorskog potencijala duž zatvorene putanje
	izibličenja	jačina polja
Grupe merila	na primer, moguća obrtanja SO(3) ili kretanje E(3)	U(1), SU(2), SU(3)

PLIVANJE U ZAKRIVLJENOM PROSTORU

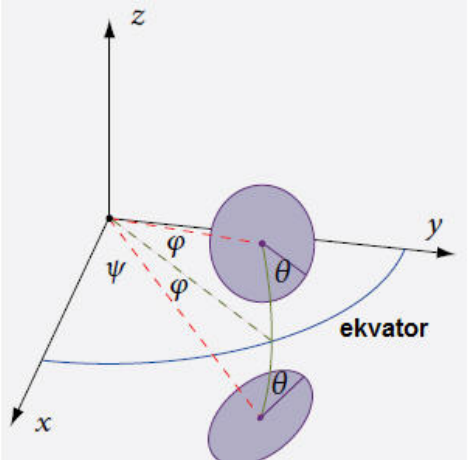
U ravnom prostoru nije moguće da se izvede kretanje putem promene oblika. Jedino je moguća promena usmerenja. Iznenađujuće je, ali ako je prostor zakrivljen, kretanje postaje moguće. Prost primer je objavio 2003. godine Džek Visdom (Jack Wisdom). (***Ref. 244***). On je našao da ciklične promene oblika tela mogu da dovedu do čistog kretanja, do obrtanja tela ili i jednog i drugog.

Zapravo, iz Galilejeve fizike znamo da se ne možemo kretati po površini koja nema trenje, ali da možemo da menjamo usmerenje. Ovo je tačno samo za ravnu površinu. Na zakrivljenoj površini možemo da koristimo sposobnost da ga promenimo i prevedemo u kretanje.

Uzmite dva diska sa masama koji leže na površini bez trenja na loptasoj planeti, kao što je prikazano na ***slici 158***. Uzmite u obzir sledeća četiri koraka; 1) rastojanje diskova φ povećava se za $\Delta\varphi$; 2). diskovi se obrću suprotno oko svojih centara za ugao $\Delta\theta$; 3). njihovo rastojanje se smanjuje za $-\Delta\varphi$; i 4). diskovi se obrću nazad za $-\Delta\theta$. Zbog očuvanja momenta količine kretanja sistem od dva diska je promenio svoju geografsku dužinu $\Delta\psi$ za (***Izazov 154ny***)

$$\Delta\psi = \frac{1}{2}\gamma^2 \Delta\theta \Delta\varphi \tag{111}$$

gde je γ ugaoni poluprečnik diskova. Ovaj ciklus koraka može da se ponavlja uvek od početka. Cikus omogućava da telo koje se nalazi na površini Zemlje pliva po njenoj površini. Na nesreću, za telo veličine jednog metra, kretanje za svaki ciklus plivanja je samo oko 10^{-27} m.



Slika 158 Plivanje po zakrivljenoj površini korišćenjem dva diska

Visdom je pokazao da isti postupak deluje u zakrivljenom prostoru, prema tome u prisustvu gravitacije. Mehanizam stoga dopušta telu koje pada da otpliva ustranu od putanje slobodnog pada. Nažalost, rastojanja koja mogu da se postignu zanemarljivo su mala. Bez obzira na to, ovaj efekt postoji.

Drugim rečima, postoji način da se pliva kroz zakrivljeni prostor slično plivanju pri malim Rejnoldsovim brojevima, gde je plivanje posledica proste promene oblika. Da li nam to govori nešta o osnovnim opisima kretanja? Poslednji deo naše pustolovine dače odgovor.

IZVRTANJE LOPTE IZNUTRA NAPOLJE.

Tekst bi trebalo da je nalik ženskoj haljini: dovoljno dug da pokriva predmet, ali i dovoljno kratak da ga zadrži interesantnim.

Anonymous

Istraživanje teme o kretanju subjekata promenljivih oblika, ne može da izbegne poznat primer. Matematičar Stiven Smale (Stephen Smale) dokazao je 1957. godine da se lopta može preokrenuti tako da joj unutrašnjost bude spolja. (***Ref. 245***). Otkriće mu je donelo 1966. godine Fildsovu (Fields) medalju, najveću nagradu za otkrića u oblasti matematike. Ovo otkriće matematićari nazivaju ***everzija*** lopte.

Da bi se rezultat shvatio, potrebno je da se jasnije objasne pravila matematičke everzije. Pre svega, predpostavlja se da je lopta načinjena od tanke opne koja ima sposobnost da se rasteže i savija bez ograničenja. Drugo, predpostavlja se da opna ima sposobnost da ***preseca*** samu sebe. Naravno, takav sablasan materijal ne postoji u svakodnevnom životu, ali u matematici može da se zamisli. Treće pravilo zahteva da materijal mora da se deformiše na takav način da se opna ne buši, ne cepa i ne gužva, ukratko, sve mora da se događa glatko (ili diferencijalno, kao što matenatičari vole da kažu).

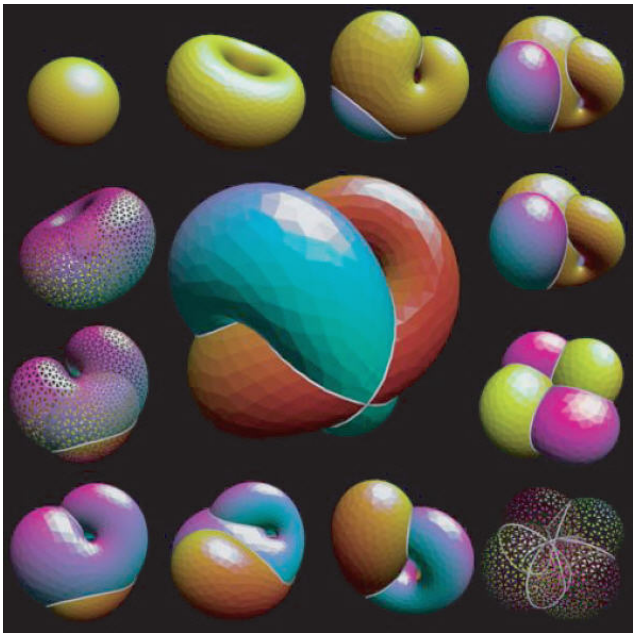
Iako je Smale dokazao da je everzija moguća, prvi način da se ona stvarno izvede otkrio je 1961. godine slepi topolog Bernard Morin, koji se zasnivao na ideji Arnolda Šapiroa (Arnold Shapiro). (***Ref. 246***) i (***Ref. 247***).

Dostupno je nekoliko računarskih video prikaza everzije lopte.[1] (***Ref. 248***). Najpoznatije su *Outside in* na kojoj je prikazana everzija Vilijema Turstona (William P. Thurston) i *Optiverse*, koja prikazuje najefikasniji postupak do sada, otkrio ga je tim Džona Salivana (John Sullivan), a prikazan je na ***slici 159***.

Zbog čega je everzija lopte interesantna za fizičare? Ako bi se elementarne čestice proširile, a istovremeno bi bile oblika lopte, everzija bi mogla da bude simertija čestice. Da bi se videlo zašto, sumiraćemo efekte everzije na celokupan prostor u okruženju, a ne samo na loptu, Krajnji efekt everzije je transformacija

$$(x, y, z) \rightarrow \frac{(x, y, -z)R^2}{r^2} \qquad (112)$$

gde je R poluprečnik lopte, a r dužina koordinatnog vektora (x, y, z), prema tome $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$. Zbog znaka minus za z-koordinatu everzija se razlikuje od inverzije. Kako ćemo otkriti uskoro, transformacije slične everziji, dvojnost prostor-vremena, osnovna je simetrija prirode. (***Vol. VI, strana 92***).



Slika 159 Način da se izvrne unutrrašnjost lopte napolje, sa međukoracima poređanim u smeru kazaljke sata (© John Sullivan)

OBLACI

Oblaci su još jedna važna vrsta objekata promenljivih oblika. Odsustvo određene ograničenosti čini ih još začuđujuće nego li amebe, bakterije i mačke u padu. Različitost oblika oblaka možemo da zapazimo iz svakog aviona.

Uobičajeni kumulusi ili kumulonimbusi na nebu, nalik svim drugim metereološkim oblacima, oblaci su vodene pare ili kapljica kiše. (***Vol. III, strana 159***). Galaksije su oblaci zvezda. Zvezde su oblaci plazme. atmosfera je oblak gasova. Atomi su oblaci elektrona. Jezgra atoma su oblaci neutrona i protona, koji su zauzvrat oblaci kvarkova. Upoređivanje različitih oblaka je i prosvećenje i zabava.

Sve vrste oblaka mogu da se opišu preko oblika i veličine, mada po teoriji oni nemaju ivice. ***Efektivni*** oblik i veličina mogu da se odrede preko one oblasti u kojoj je gustina oblaka samo, recimo, 1% maksimalne gustine; mogu da se koriste i slični drugačiji postupci. Svi oblaci su opisani ***verovatnoćom gustine*** sastojaka od kojih je oblak načinjen. Svi oblaci ispoljavaju ***očuvanje*** broja svojih sastojaka.

Uvek kada gledamo oblak možemo da se upitamo zašto se ne raspada. Svaki oblak je agregat; svaki agregat se održava od raspadanja na samo ***tri*** načina: putem obrtanja, putem pritiska ili putem Paulijevog načela, to jest kvanta rada. (***Vol. I, strana 190***). Na primer, galaksije sprečavaju raspad obrtanjem. Većina

[1] Pregled video snimaka može da se nađe na veb strani www.geom.umn.edu/docs/outreach/oi, na kojoj je dat i dobar pedagoški uvod. Sledeću jednostavnu everziju i njeno objašnjenje dao je Erik de Neve na svojoj veb strani www.usefuldreams.org/sphereev.htm. Čak je moguće da pustite film softvera kod kuće, pogledajte veb stranu www.youtube.com/watch?v=wO61D9x6lNY. ***Slika 159*** je sa veb strane new.math.uiuc.edu/optiverse.

zvezda, atmosfera i kišni oblaci sprečavaju raspad pritiskom gasa. Neutronske zvezde, Zemlja, atomska jezgra, protonski ili elektronski oblak u atomu drže se zajedno preko kvanta rada.

Kišni oblaci predstavljaju način da se hiljade tona vode održava u vazduhu. Možete li da objasnite šta ih drži u tečnom stanju i šta ih održava od postepenog razlaganja u sve tanje i tanje strukture? (***Izazov 155s***).

Dva kišna oblaka mogu da se spoje. Isto tako i dva atomska oblaka elektrona. To mogu i galaksije. Međutim, samo oblaci atoma imaju sposobnost da prolaze jedni kroz druge. Sećamo se da normalan atom može da bude unutar Ridbergovog (Rydberg) atoma i da ga napusti bez promene. (***Vol. IV, strana 143***). Nasuprot tome, kišni oblaci, galaksije ili drugi makroskopski oblaci ne mogu da prolaze jedni kroz druge. Kada se njihovi putevi ukrste, ono mogu samo da se spoje ili da se raspadnu na komade. Usled nepostojanja sposobnosti prolaženja, prebrojivi su samo mikroskopski oblaci. I makroskopskim slučajevima ne postoji realan način da se "pojedinačni" oblak pouzdano odredi. Ako nam je cilj potpuna preciznost, nismo u mogućnosti da tvrdimo da postoji više od jednog kišnog oblaka, pošto ne postoji jasna granica između njih. Elektronski oblaci su drugačiji. Istina, u komadu čvrste materije možemo da se složimo da postoji samo jedan elektronski oblak u celom predmetu; međutim, ako se predmet podeli, oblak je podeljen na način koji omogućava da se opet pojavi početni atomski oblak. Prema tome, možemo da govorimo o "pojedinačnom" oblaku elektrona.

Ako se želi da se bude precizan, galaksije, zvezde i kišni oblaci mogu da se posmatraju kao da su načinjeni od lokalizovanih čestica. Oblik oblaka je samo prividan. Može li isto da važi i za oblak elektrona? I šta je sa samim prostorom? Objasnimo neke aspekta ovih pitanja.

VRTLOZI I ŠREDINGEROVA JEDNAKOST

Dinamika fluida je područje mnogih interesantnih aspekata. Uzmimo vrtlog koji može da se zapazi u svakoj kadi koja se prazni: to je proširen jednodimenzionalni "predmet", on je promenljivog oblika i zapaža se da se obrće. Veći vrtlozi se pojavljuju kao tornada na Zemlji i drugim planetama, kao pijavice (***slika 160***) i na krajevima krila i elisa svih vrsta. Manji kvantifikovani vrtlozi pojavljuju se u superfluidima. (***Strana 81***). Primer je prikazan na ***slici 160***; isto tako vrtloge predstavljaju začuđujuće kovitlanje vatre i vatrena tornada zapaženi tu i tamo.

Slika 160 Vrtlog u prirodi: pijavica (© Ze Nogueira).

Vrtlozi, takođe zvani ***cevi vrtloga*** ili ***vrtložne niti***, prema tome su kolebljivi objekti. Zatim, predivan rezultat iz 1960-ih godina, navodi da se vrtložna nit u tečnosti koja se obrće opisuje jednodimenzionalnom Šredingerovom jednačinom. (***Ref. 249***). Pogledajmo kako je to moguće. Svaki linearni vrtlog koji može da se deformiše, kakav je prikazan na ***slici 161***, opisan je kontinualnim skupom vektora položaja $\boldsymbol{r}(t, s)$ koji zavisi od vremena t i jednog parametra s. Parametar s odeđuje relativne položaje duž vrtloga. U svakoj tački vrtloga postoji jedinični vektor tangente $\boldsymbol{e}(t, s)$, jedinični vektor normale zakrivljenosti $\boldsymbol{n}(t, s)$ i jedinični vektor uvijanja $\boldsymbol{w}(t, s)$. Ova tri vektora, prikazana na ***slici 161***, određeni su obično kao:

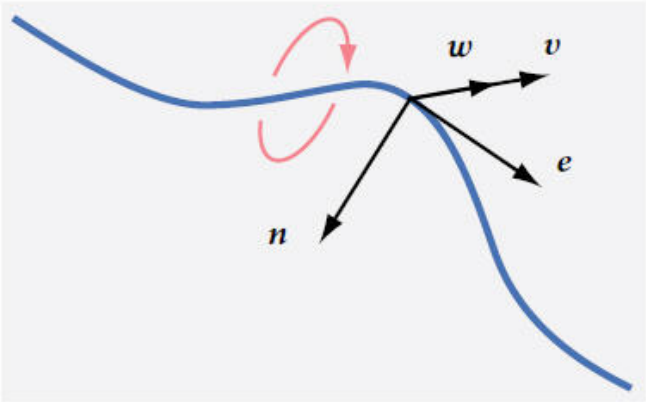
$$\boldsymbol{e} = \frac{\partial r}{\partial s}$$
$$k\boldsymbol{n} = \frac{\partial \boldsymbol{e}}{\partial s} \qquad (113)$$
$$|\tau \boldsymbol{w} = \frac{\partial(\boldsymbol{e} \times \boldsymbol{n})}{\partial s}$$

gde k određuje vrednost zakrivljenosti, a τ određuje vrednost uvijanja. U opštem slučaju, obe vrednosti zavise od vremena i od položaja duž linije.

U najjednostavnijem mogućem slučaju okruženje koje se obrće ispoljava lokalnu brzinu $\boldsymbol{v}$ vrtloga koja je srazmerna sa zakrivljenošću k, normalna na vektor tangente $\boldsymbol{e}$ i na vektor normale $\boldsymbol{n}$:

$$\boldsymbol{v} = \eta k(\boldsymbol{e} \times \boldsymbol{n}) \qquad (114)$$

gde je η takozvani sačinilac lokalne samoindukcije koji opisuje povezanost između tečnosti i kretanja vrtloga. (***Ref. 249***). Ovo je jednakost razvoja vrtloga.



Slika 161 Uzajamno normalni vektori tangente $\boldsymbol{e}$, normale $\boldsymbol{n}$, uvrtanja $\boldsymbol{w}$ i vrzine $\boldsymbol{v}$ u vrtlogu u fluidu koji se obrće.

Sada možemo da predpostavimo da je vrtlog ***neznatno*** izobličen od pravolinijskog usmerenja. Tehnički, mi smo prema tome u ***linearnom*** režimu. Za takav linearan vrtlog, usmeren duž x-ose, možemo da napišemo

$$\boldsymbol{r} = (x, y(x,t), z(x,t)) \qquad (115)$$

Zanemarljiva deformacija podrazumeva da je $\partial s \approx \partial x$, pa je prema tome

$$\boldsymbol{e} = \left(1, \frac{\partial y}{\partial x}, \frac{\partial z}{\partial x}\right)$$
$$k\boldsymbol{n} = \left(0, \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 z}{\partial x^2}\right) \quad \text{i} \qquad (116)$$
$$\boldsymbol{v} = \left(0, \frac{\partial y}{\partial t}, \frac{\partial z}{\partial t}\right)$$

Zato možemo ponovo da napišemo jednakost razvoja (114) kao

$$\left(0, \frac{\partial y}{\partial t}, \frac{\partial z}{\partial t}\right) = \eta\left(0, -\frac{\partial^2 z}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}\right) \qquad (117)$$

Ova jednakost nam je dobro poznata; ako ispustimo prvu koordinatu i uvedemo kompleksne brojeve, tako da stavimo da je $\Phi = y + iz$, možemo da je ponovo napišemo kao

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = i\eta \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \Phi^2} \qquad (118)$$

Ovo je jednodimenzionalna Šredingerova jednakost razvoja slobodne talasne funkcije! Kompleksna funkcija Φ određuje uzdužno izobličenje vrtloga. (***Ref. 250***). Drugim rečima, možemo da kažemo kako Šredingerova jednakost u jednoj dimenziji opisuje razvoj izobličenja za skoro linearan vrtlog u fluidu koji se obrće. Primetimo da ovde nema konstante $\hbar$ u jednakost, kao što smo otkrili u klasičnom sistemu.

Šredingerova jednakost je linearna po Φ. Prema tome je osnovno rešenje

$$\Phi(x,y,z,t) = ae^{i(\tau x-\omega t)} \quad \text{sa} \quad \omega = \eta\tau^2 \quad \text{i} \quad k = a\tau^2 \tag{119}$$

Amplituda a i talasna dužina ili nagib $b = 1/\tau$ mogu proizvoljno da se odaberu sve dok je ispunjena približnost malog odstupanja; ovaj uslov se prevodi kao $a \ll b$.[1] U ovom prikazu osnovno rešenje odgovara liniji vrtloga koja se izobličava u zavojnicu, kao što je prikazano na ***slici 162***. Ugaona brzina ω je brzina obrtanja oko ose zavojnice,

Zavojnica se kreće duž ose brzinom koja je data (***Izazov 156ny***)

$$v_{\text{zav.duž ose}} = 2\eta\tau \tag{120}$$

Drugim rečima, za proširene objekte prema jednakosti (114) povezano je obrtanje i kretanje.[2] Količina kretanja p može da se odredi korišćenjem $\partial\Phi/\partial x$ što dovodi do:

$$p = \tau = \frac{1}{b} \tag{121}$$

Prema tome, količina kretanja je obrnuto srazmerna talasnoj dužini zavojnice ili nagibu, kako se i očekivalo.

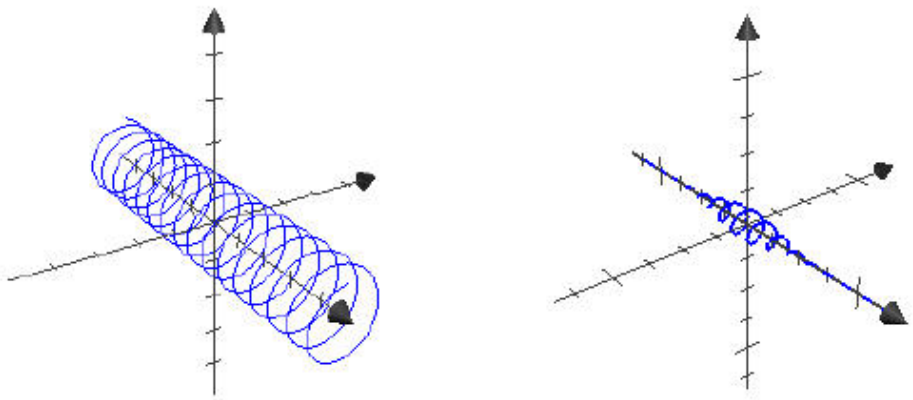
Energija E je određena koriščenjem $\partial\Phi/\partial t$, što dovodi do

$$E = \eta\tau^2 = \frac{\eta}{b^2} \tag{122}$$

Energija i količina kretanja su povezane preko

$$E = \eta\tau^2 = \frac{\eta}{b^2} \quad \text{gde je} \quad \mu = \frac{1}{2\eta} \tag{123}$$

Drugim rečima, vrtlog sa sačiniocem η – koji opisuje vezu između okruženja i vrtloga (***strana 221***) – opisan je prema tome brojem μ koji ima osobinu kao efektivna masa. Takođe možemo da odredimo (realnu) veličinu $|\Phi| = a$; ona opisuje ***amplitudu*** izobličenja.



Slika 162 Kretanje vrtloga: osnovno rešenje zavojnice i zavojno kretanje "paketa talasa"

U Šredingerovoj jednakosti (118) drugi izvod podrazumeva da izobličenje "paketa talasa" ima tendenciju da se širi u prostoru. Možete li da potvrdite da odnos između talasne dužine i učestanosti za grupu talasa vrtloga ovodi do nečeg što je nalik relaciji neodređenosti (međutim, bez pojavljivanja $\hbar$)? (***Izazov 158ny***).

Zaključno, kompleksna amplituda Φ linearnog vrtloga i tečnosti koja se obrće ponaša se kao jednodimenzionalna talasna funkcija nerelativističke slobodne čestice. Osim toga, nalazimo nagoveštaj razloga što se kompleksni brojevi pojavljuju u Šredingerovoj jednakosti kvantne teorije: to bi moglo da bude usled sopstvenog obrtanja osnovnog supstrata. Da li je ovaj nagoveštaj tačan? To ćemo otkriti u poslednjem delu naše pustolovine. (***Vol. VI, strana 135***).

---

1 Zakrivljenost je data sa $k = a/b^2$, a uvrtanje sa $\tau = 1/b$. Umesto $a \ll b$, zato može da se napiše takođe $k \ll \tau$

2 Paket talasa se pomera duž ose brzinom $v_{\text{paket}} = 2\eta\tau_0$, gde je τ_0 uvijanje zavojnice centralne talasne dužine. (***Izazov 157ny***).

PROSTOR-VREME KAO FLUID

Opšta teorija relativnosti pokazuje da prostor može da se pomera i da osciluje: prostor je kolebljiv objekt. Da li je prostor sličniji oblacima, fluidima ili čvrstim telima?

Zadivljujući pristup prostor-vremenu kao fluidu objavio je 1995. godine Ted Jakobson (Ted Jacobson). (***Ref. 251***). On je istraživao šta se događa ako se prostor-vreme, umesto predpostavljene neprekidnosti, predpostavi da je statistički prosek velikog broja sastavnih delova koja se kreću na nesređen način.

Standardni opis opšte teorije relativnosti opisuje pristor-vreme kao objekt sličan elastičnom dušeku. (***Vol. II, strana 114***). Jakobson je proučavao šta bi se dogodilo ako bi se predpostavilo da je dušek načinjen od fluida. Fluid je skup (neodređenih) sastojaka koji se kreću nasumice i opisan preko temperature koja se menja od jednog mesta do drugog.

Jakobson je pošao od Fuling-Dejvis-Unru (Fulling-Davies-Unruh) efekta (***strana 98***) i predpostavio da su lokalne temperature fluida date kao umnožak lokalnog gravitacijskog ubrzanja. On je takođe koristio srazmernost između područja i entropije – što je tačno na horizontu. Pošto energija koja protiče kroz horizont može da se nazove toplotom, izraz $\delta Q = T\delta S$ prelazi u izraz $\delta E = a\delta A\left(c^2/4G\right)$, kojim se opisuje ponašanje prostor-vremena na horizontu. (***Vol. VI, strana 31***). Kao što smo videli, ovaj izraz je u potpunosti ekvivalentan opštoj teoriji relativnosti.

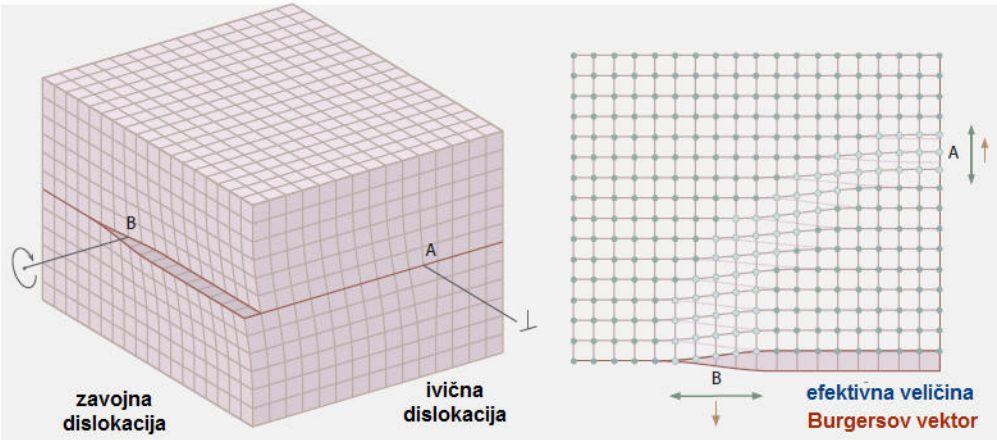
Drugim rečima, zamišljanje prostor-vremena kao fluida, dobra je analogija koja omogućava da se izvede opšta teorija relativnosti. Da li to znači da je prostor-vreme zaista slično fluidu? Do sada, analogija nije dovoljna da odgovori na pitanje i moraćemo da sačekamo do poslednjeg dela naše pustolovine za odgovor na njega. Ustvari, samo da nas zbuni malo više, postoji stari dokaz za suprotan iskaz.

RAZMEŠTANJE I PROSTOR-VREME KAO ČVRSTO TELO

Opšta teorija relativnosti kazuje nam da se prostor ponaša kao dušek koji se izobličava; prostor se prema tome pomnaša kao čvrsto telo. Postoji i drugi dokaz koji naglašava ovaj stav i koji izaziva neprekidnu začuđenost. Ovaj dokaz je u vezi sa poznatim svojstvom kretanja dislokacija.

Razmeštanja su jednodimezionalne greške u konstrukciji kristala, kao što je prikazano na ***slici 163***. Opšte razmeštanje je mešavina dva tipa čistih razmeštanja: ***ivičnih razmeštanja*** i ***zavojnih razmeštanja***. Obe vrste su prikazane na ***slici 163***.

Ako bi se istražilo kako atomi uključeni u razmeštanja mogu da se preurede, našlo bi se da ivična razmeštanja mogu samo da se kreću upravno na zadatu ravan. (***Izazov 159e***). Nasuprot njima, zavojna razmeštanja mogu da se kreću u svim smerovima.[1] Važni slučajevi opštih, mešovitih razmeštanja, to jest mešavina ivičnih i zavojnih razmeštanja, su zatvorena ***prstenasta razmeštanja***. Kod takvih prstenastih razmeštanja stepen mešovitosti menja se stalno od jednog do drugog mesta.



Slika 163 Dve vrste čistih razmeštanja (dislokacija), ivično i zavojno razmeštanje, viđeni izvan kubičnog kristala (levo) i mešovito razmštanje – četvrtina petlje razmeštanja – pridružena u horizontalni deo istog kristala (desno) (© Ulrich Kolberg)

[1] Kretanje razmeštanja videti na uet.edu.pk/dmems/edge_dislocation.htm, uet.edu.pk/dmems/screw_dislocation.htm i uet.edu.pk/dmems/mixed_dislocation.htm veb stranama.

Svako razmeštanje je opisano ***jačinom*** i njegovom stvarnom ***veličinom***; one su prikazane respektivno, crvenom i plavom bojom na ***slici 163***. Jačina razmeštanja meri se takozvanim ***Burgersovim vektorom***; on meri pogreške u kristalu u okolini razmeštanja. Još preciznije, Burgersov vektor određuje koliko delova savršenog kristala treba da bude premešteno posle njegovog presecanja da bi se proizvelo razmeštanje. Očigledno, jačina razmeštanja je kvantifikovana umnoškom minimalnog Burgersovog vektora. Ustvari. razmeštanja sa velikim Burgersovim vektorom mogu da se posmatraju kao složena razmeštanja minimalnog Burgersovog vektora, tako da se obično proučava samo ovaj poslednji.

Veličina ili ***širina*** razmeštanja meri se ***efektivnom širinom*** *w*. Isto tako širina je umnožak vektora rešetke. Širina meri veličinu izobličene oblasti u kristalu oko razmeštanja. Očigledno, veličina razmeštanja zavisi od svojstva elastičnosti kristala, može da ima kontinualnu vrednost i zavisna je od smera. Širina je stoga povezana sa sadržajem energije razmeštanja.

Opšte razmeštanje može da se kreće, istina samo u oba smera upravna na njegovo usmerenje i njegov Burgersov vektor. Zavojno razmeštanje je jednostavnije: ono može da se kreće u svim smerovima. Zatim, kretanje zavojnog razmeštanja ima jedinstveno svojstvo. Označimo sa *c* brzinu zvuka u čistom (recimo, kubičnom) kristalu. Kako su 1938. godine otkrili Frenkel (Frenkel) i Kontorova (Kontorowa) (***Ref. 252***), kada se zavojno razmeštanje kreće vrzinom *v*, njegova širina *w* menja se kao

$$w = \frac{w_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \qquad (124)$$

Osim toga, energija razmeštanja koje se kreće povinuje se

$$E = \frac{E_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \qquad (125)$$

Zbog toga zavojno razmeštanje ne može da se kreće brže od zvuka c u kristalu i njegova širina ispoljava skupljanje zavisno od brzine. (Ivično razmeštanje ima slično, međutim mnogo složenije ponašanje.) Kretanje zavojnog razmeštanja u čvrstim telima je zato opisano istim efektima i istim obrascima kojima se opisuju kretanja tela u specijalnoj teoriji relativnosti; brzina zvuka je granična brzina razmeštanja na isti način na koli je brzina svetlosti granična brzina predmeta.

Da li to znači da su elementarne čestice razmeštanje prostora, ili čak prostor-vremena, možda čak i prstenova razmeštanja? Razmišljanje je privlačno, iako se predpostavlja da je prostor vreme čvrst kristal, pa stoga protivreči modelu prostora ili vremena kao prostora fluida. (***Vol. VI, strana 63***). Još gore, uskoro ćemo da otkrijemo ostale razloge da se odbaci modeliranje prostor-vremena kao rešetke; možda ste već i sami našli nekoliko dokaza. (***Izazov 160s***). Pa ipak, izrazi (124) i (125) za razmeštanja nastavljaju da opčinjavaju.

U ovom trenutku zbunjeni smo. Prostor-veme izgleda da je istovremeno i čvrsto telo i fluid. Uprkos ovim suprotnostima, razmatranje pomalo daje utisak da ovde nešta čeka da bude otkriveno. Ali šta? To ćemo otkriti u poslednjem delu naše pustolovine.

POLIMERI

Proučavanje polimera je i važno sa ekonomske strane i teorijski je zanimljivo. (***Ref. 253***). Polimeri su materijali izgrđeni od dugčkih i savitljivih makromolekula koji čine redosled mnogo ("poli" na grčkom) jednostavnijih molekula. Ovi makromolekuli su zato promenljivi objekti. Polimeri obrazuju ***čvrsta tela***, kao što su guma ili pleksiglas, ***otopinu***, kao što je ona koja se koristi u protetici zuba, i mnogo vrsta ***rastvora***, kao što su lepkovi, boje, jaja ili ljudi. Gasovi polimera su od manje važnosti.

Sve materijalne osobine polimera, kao što je njihova elastičnost, njihov viskozitet, njihova električna provodnost ili njihova nejasna tačka topljenja, zavisi od broja monomera i topologije molekula koji su u sastavu. U većini slučajeva, ove zavisnosti mogu da se proračunaju. Istražimo primer.

Ako je *L* dužina konture slobodnog, idealnog nevezanog molekula polimera, prosečna udaljenost između krajeva *R* srazmerna je kvadratnom korenu iz dužine *L*:

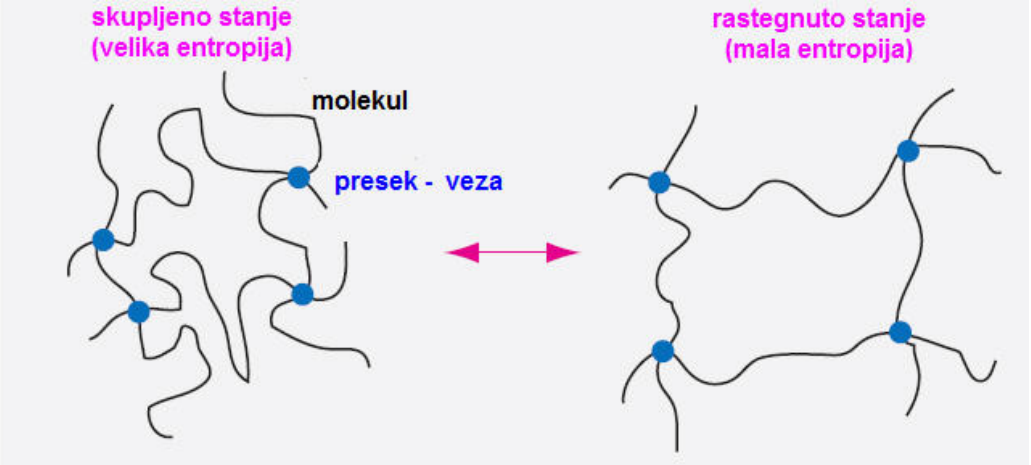
$$R = \sqrt{Ll} \sim \sqrt{L} \quad \text{ili} \quad R \sim \sqrt{N} \qquad (126)$$

gde je N broj monomera, a l je efektivna dužina monomera koja opisuje razmeru na kojoj su molekuli polimera efektivno kruti. R je obično mnogo manje od L, što znači da je slobodan, idealan molekul polimera obično u ***zavijenom*** stanju.

Očigledno, rastojanje od između krajeva R razlikuje se od molekula do molekula i prati Gausovu raspodelu verovatnoće P rastojanja R između krajeva:

$$P(R) \sim e^{\frac{-3R^2}{2Nl^2}} \tag{127}$$

Srednje rastojanje između krajeva, pomenuto gore, srednja je kvadratna vrednost (efektivna vrednost) ove raspodele. Neidealni polimeri su polimeri koji imaju, slično neidealnom gasovima, interakcije sa susednim molekulima ili sa rastvaračima. U praksi polimeri veoma retko prate idealno ponašanje: polimeri su idealni samu u izvesnim rastvaračima i rastopljeni.



slika 164 Prikaz povezanosti konfiguracije polimera i elastičnosti . Molekuli u rastegnutoj situaciji imaju imaju manje mogućih oblika konfiguracije, pa stoga i manju entropiju; prema tome, materijal nastoji da se vrati u skupljenu situaciju.

Ako se polimer ***rastegne***, molekuli moraju da se prerasporede. To menja njihovu entropiju i stvara silu elastičnosti f koja nastoji da spreči rastezanje. Za idealni polimer ova sila ne nastaje zbog interakcije molekula, već je entropija u prirodi. Prema tome, sila može da se izvede iz ***slobodne energije*** polimera:

$$F \sim T \ln P(R) \tag{128}$$

Sila je tada jednostavno data kao $f = \partial F(R)/\partial R$. Za idealan polimer, koristeći raspodelu verovatnoće, pokazalo se da je sila srazmerna dužini rastezanja. (***Izazov 161e***). Prema tome, može da se uvede konstanta opruge k, koja je data sa

$$k = \frac{f}{R} = \frac{3T}{Ll} \tag{129}$$

Tako uvodimo osobinu materijala, konstantu opruge k, iz proste ideje da su polimeri izgrađeni od dugačkih, savitljivih molekula. Srazmernost sa temperaturom T je posledica entropijske prirode sile; zavisnost od L pokazuje da se dugački molekuli lakše rastežu. Za stvarni, neidealni polimer, proračun je mnogo složeniji, ali postupak je isti. Ustvari, ovo je mehanizam koji čini osnovu elastičnosti gume.

Koristeći slobodnu energiju ustrojstva polimera, možemo da izračunamo svojstva materjala od makromolekula i u mnogim drugim situacijama, kao što je njegovo ponašanje na pritisak. promenu njegove zapremine pri topljenju, njegove interakcije u rastvaračima, efekt povezivanja molekula itd. Ovo je podućje izučavanja samo za sebe, koje ovde nećemo da pratimo. Savremena istraživanja obuhvataju proučavanje umreženih polimera i proučavanje mešavina polimera. Obimna izračunavanja na računarima i u eksperimetima redovno se upoređuju, Da li polimeri imaju neke veze sa strukturom fizičkog prostora? Ovo pitanje ostaje bez odgovora. Međuutim, sigurno je da su polimeri često umreženi i povezani.

ČVOROVI I VEZE

Ne diraj ovo, ili ću ti vezati prstiće u čvorove!

(Ružna, ali iznenađujuće efikasna tehnika obrazovanja dece)

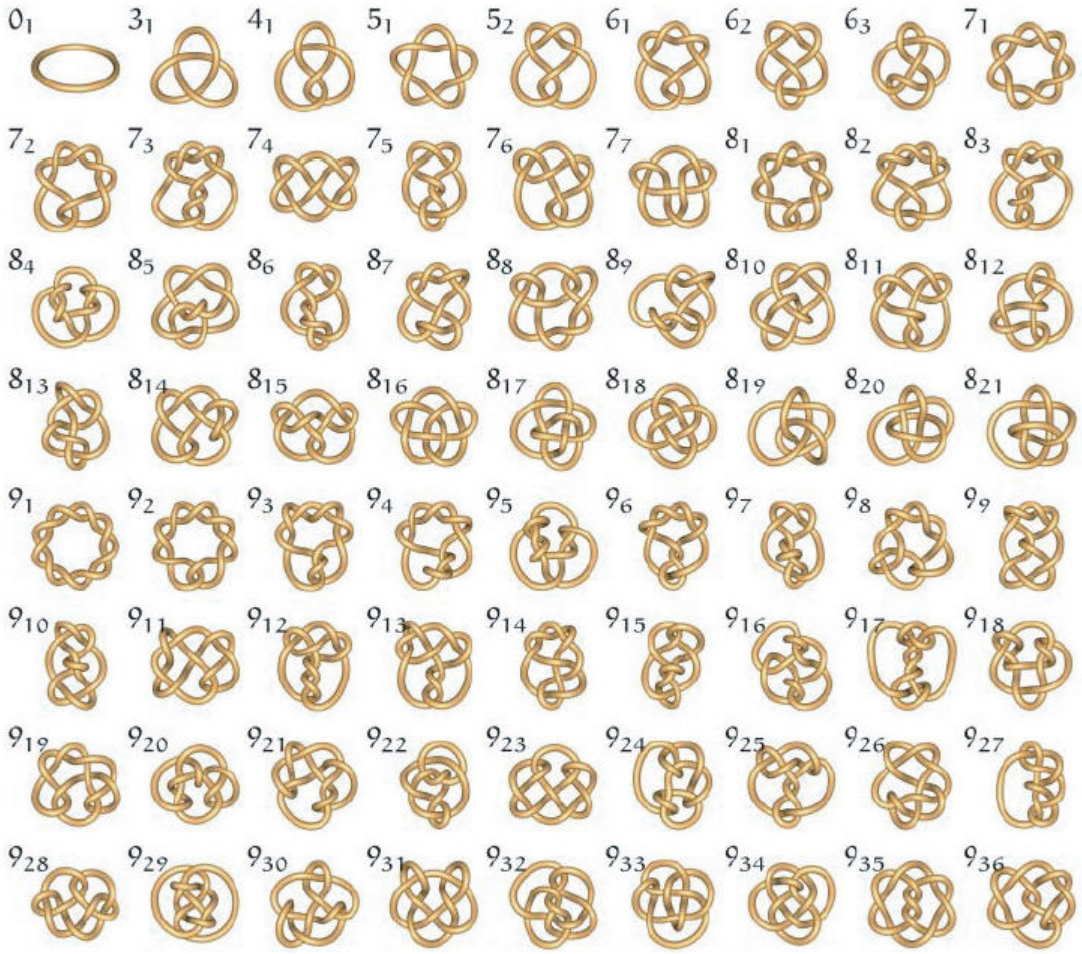
Čvorovi i njihovo uopštavanje predstavljaju centralni deo proučavanja kretanja kolebljivih predmeta. ***Matematički čvor*** je zatvoren deo gumene niti, to jest nit čiji su krajevi zalepljeni, koja ne može da se izobliči u kružnicu ili prostu petlju. Jednostavna petlja takođe se naziva ***prost*** čvor.

Čvorovi su važni u sastavu ovog poglavlja pošto oni ilustruju ograničenja kretanja kolebljivih objekata. Osim toga, otkrićemo kasnije i ostale razloge za proučavanje čvorova. (***Ref. 254***). U ovom odeljku samo ćemo da se malo zabavljamo.[1]

Godine 1949 Šubert (Schubert) je dokazao da svaki čvor može na jedinstven način da se razloži u zbir osnovnih čvorova. (***Ref. 255***). Čvorovi se prema tome ponašaju kao celi brojevi.

Ako se osnovni čvorovi poređaju prema broju ukrštanja, kao štoje prikazano na ***slici 165***, iza prostog čvora (0_1) sledi čvor lista deteline (3_1) i osmostruki ćvor (4_1). Na slici su prikazani samo osnovni čvorovi, to jest čvorovi koli ne mogu da se razlože na dva čvora koji su spojeni dvema paralelnim trakama. Osim toga, na slici su prikazani u ogledalu najčešći mogući slučajevi.

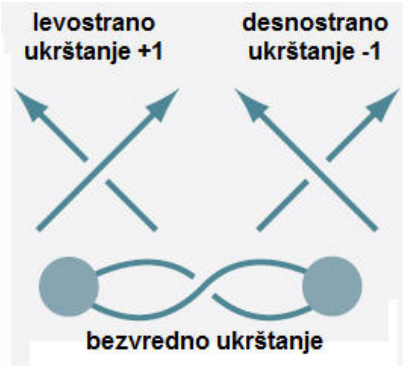
Zajedno sa traženjem invarijanti, tabelarni prikaz čvorova – rezultat njihovog razvrstavanja – predstavlja savremen matematički sport. Prikazi ravnih čvorova obično je poređan prema najmanjem broju ukrštanja, kao što je učinjeno na ***slici 165***. Postoji 1 čvor sa 0 ukrštanja, 1 sa tri i 1 sa četiri ukrštanja (ne računaju se čvorovi u ogledalu) (***Ref. 255***); postoji 21 čvor sa osam. 41 sa devet, 165 sa deset, 552 sa jedanaest, 2176 sa dvanaest, 998 sa trinaest, 46.972 sa četrnaest, 253.293 sa petnest i 1.388.705 sa šesnaest ukrštanja.



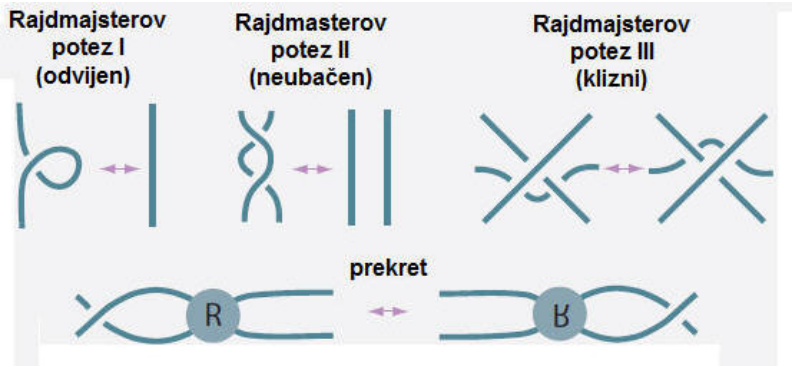
Slika 165 Slike čvorova za jednostavne osnovne čvorove (© Robert Scharen)

[1] Lepi prikazi i detaljne informacije o čvorovima mogu da se nađu na veb strani Knot Atlas katlas.math.toronto.edu i na veb strani www.knotplot.com.

Slika čvora u ogledalu obično je, ali ne i uvek, različita od orginalne. Ako želite izazov, pokušajte da pokažete da je čvor lista deteline, čvor sa tri ukrštanja, drugačiji od njegove slike u ogledalu. Prvi matematički dokaz dao je Maks Den (Nax Dehn) 1914. godine. Ne postoje antičvorovi. ***Antičvor*** bi bio čvor na konopcu koji bi poništio odgovarajući čvor kada bi se susrela na konopcu. Lako je dokazati da je to nemoguće. Uzmimo beskonačni niz čvorova i antičvorova na komopcu, K–K+K–K+K–K … S jedne strane mogli bismo da učinimo da nestaju na ovakav način· K–K+K–K+K–K…= (K–K) + (K–K) + (K–K) …= 0. S druge strane, mogli bismo da učinimo istu stvar koristeći K–K+K–K+K–K…= $K(-K+K)$ + $(-K+K)$ + $(-K+K)$... = K. Samo čvor K sa antičvorom je prema tome nečvor K = 0.[1] (***Ref. 256***).



Slika 166 Vrste ukrštanja u čvoru



Slika 167 Rajdmajsterovi potezi i prekret

Kako da opišemo takav čvor putem telefona? Matematičari su utrošili mnogo vremena da osmisle načine da se to postigne. Očigledan način je da se čvor izravna na ravan i da se napravi pregled i vrsta ukrštanja (iznad ili ispod). (Videti ***sliku 166***.) Međutim, koji je ***najednostavniji*** način da se čvor opiše preko telefona? Zadatak još nije izvršen u potpunosti, ali kraj je na vidiku. Matematičari ne govore o "telefonskoj poruci", oni govore o ***invarijantama čvora***, to jest o veličinama koje ne zavise od tačnog oblika čvora. Trenutno, najbolji opis čvorova koristi polinomne invarijante. Većina njih se zasniva na otkriću Vona Džonsa (Vaughan Jones) iz 1984. godine. Međutim, iako Džonsovi polinomi dopuštaju jedinstveno opisuju jednostavne čvorove, to im ne uspeva za one složenije. Ali Džonsovi polinomi su konačno omogućili matematičarima da dokažu da prikaz koji se menja i odstranjuju se bezvredna ukrštanja (to jest, ako se "smanji"), da je zaista čvor koji ima najmanji broj ukrštanja. Polinomi isto tako omogućavaju da se pokaže da su bilo koja dva smanjena alternativna dijagrama povezana redosledom prekreta.

Slika 168 Zategnut otvoren vršni čvor i zategnut otvoren čvor oblika osmice (© Piotr Pieranski)

Ukratko, najjednostavniji način da se čvor opiše preko telefona je da mu se daju Kaufmanovi (Kauffman) polinomi, zajedno sa nekoliko drugih polinoma.

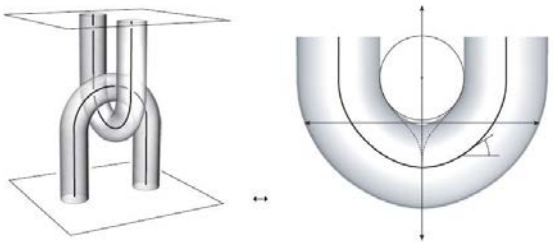
Pošto su čvorovi nepromenljivi u vremenu, zavezana linija u tri dimenzije ekvivalentna je zavezanoj površini u prostor-vremenu. Kada se razmišlja u većem broju dimenzija, potrebno je da se bude pažljiv. Svaki čvor (ili zavezana linija) može da se raspetlja u četiri ili više dimenzija. Međutim, ne postoji površina ugrađena u četiri dimenzije koja ima čvor za t = 0, a kružnicu za t = 1. Takvo ugrađivanje povtšine zahteva najmanje pet dimenzija. U većem broju dimenzija čvorovi su zato mogući samo u ako se umesto kružnice zaveže n-lopta; na primer, kako je upravo rečeno, 2-lopta može da se veže u čvor u četiri dimenzije, 3-lopta u pet dimenzija i tako dalje.

[1] Ovaj dokaz ne vredi ako se izvede sa brojevima; imali bismo mogućnost da pokažemo da je 1 = 0, ako se stavi da je K = 1. Zašto ovaj dokaz vredi za čvorove, a ne vredi za brojeve? (***Izazov 162s***).

NAJTEŽI NEREŠENI PROBLEMI KOJE MOŽETE DA ISPRIČATE SVOJOJ BABI

Iako su matematičari postigli lep napredak u klasificiranju čvorova, iznenađujuće je da oni skoro ništa ne znaju o obliku čvorova. Ovde je nekolio problema koji su danas još uvek otvoreni:

- Ovo je najjednostavniji nerešen problem sa čvorovima: Zamislite idealan gipki konopac, to jest konopac koji posvuda ima isti poluprečnik, ali čija se zakrivljenost može da menja prema želji. Zavežite čvor lista deteline na konopcu. Koliko se krajevi konopca približavaju? (***Izazov 163r***) Godine 2006. postojala je samo numerička procena odgovora: oko 10,1 prečnika. Ne postoji obrazac koji bi dao broj 10,1. Isto tako rešite sledeći problem: kolika je dužina konopca zavezanog čvora lista deteline? Isto tako, i tom slučaju poznata je samo numerička vrednost – oko 16,33 prečnika. Normalno, sve ovo važi i za druge čvorove.
- Za matematičke čvorove, to jest zatvorene čvorove, problem isto tako nije rešen. Na primer: poznato je da je dužina konopca čvrsto vezanog čvora lista deteline oko 16,33 prečnika, a da je za čvor oblika osmice oko 21,04 prečnika. (***Ref. 258***). Za lep vizualni prikaz procesa vezivanja, pogledajte animaciju na veb strani www.jasoncantarella.com/movs. Ali kako izgleda obrazac za date vrednosti dužine konopca? Niko ne zna, pošto se ne zna precizan oblik čvora deteline – ili bilo kojeg drugog čvora. Luis Kaufman (Louis Kauffman) ima prost komentar za tu situaciju: "To je skandal matematičara!"



Slika 169 Problem dužine konopca za jednostavnu kopču i moguća konfiguracija koja verovatno smanjuje dužinu kopče, ostavljanjem procepa između konopaca (© Jason Cantarella)

- Matematičari su takođe proučavali uopštenije strukture od čvorova. ***Karike*** su uopštavanje čvorova na više zatvorenih niti. ***Pletenice*** i dugačke veze predstavljaju generalizaciju veza na otvorene niti. Sada dolazi sledeće iznenađenje, prikazano na ***slici 169***. Čak i za dva konopca koja formiraju jednostavnu kopču, to jest dva povezana slova "U", problem dužine konopca nije rešen – a da u njemu čak nije ni uključen čvor! (***Ref. 259***). Ustvari, 2004. godine, Jason Kantarela (Jason Cantarella) sa svojim saradnicima predstavili su mogućnost oblika koji smanjuje dužinu konopca. Začuđujuće je, ali u predloženoj konfiguraciji ostavljen je mali procep između dva konopca, kako je predstavljeno na ***slici 169***.

Ukratko, oblik čvora je tema istraživanja koja teško da se završava. Zbog toga ćemo ostaviti ovo pitanje za buduće prilike.

ZANIMLJIVOSTI I ZABAVNI IZAZOVI O ČVOROVIMA I KOLEBLJIVIM OBJEKTIMA

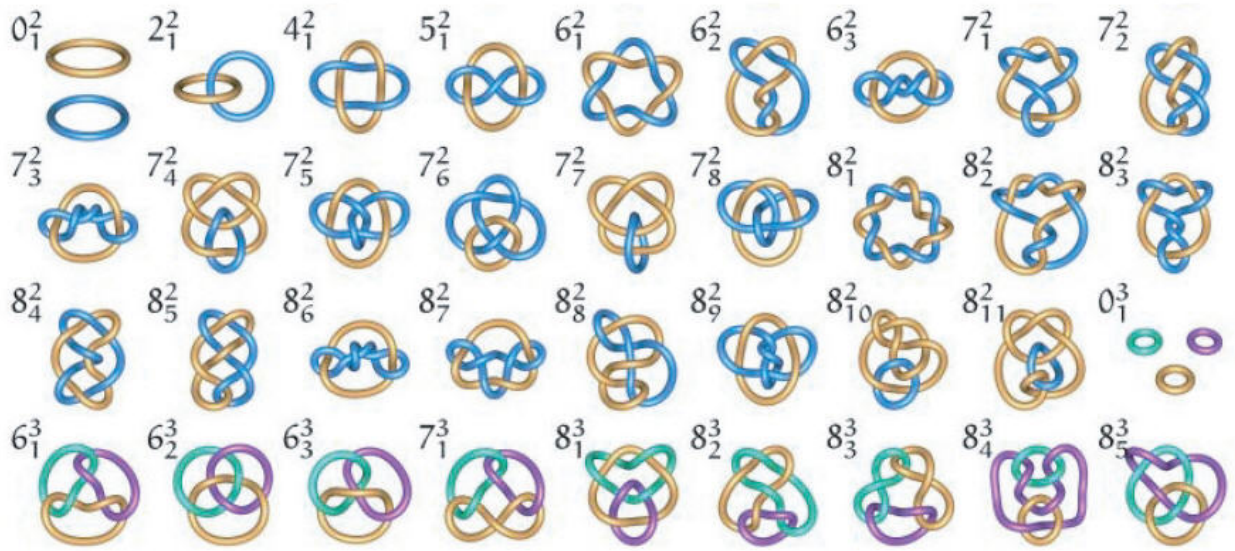
Čvorovi se retko pojavljuju u prirodi. Na primer, izgleda da ne rastu čvorovi na granama drveća ili korenju tokom doba života biljke. Na koji način biljka to izbegava? (***Izazov 164r***). Drugim rečima, zbog čega u prirodi ne postoje u čvor vezane banane ili vezane peteljke cveća?

* * *

Takođe i karike mogu da se klasificiraju. Najjednostavnija karika, to jest karika sa najjednostavnijom konfigurcijom ima najmanji broj ukrštanja, prikazane su na ***slici 170***.

* * *

Fizika plivanja ljudi je začuđujuća. Da bi se naučili detalji kako da se krećemo da bismo plivali najbrže što je moguće, pogledajte veb stranu coachsci.sdsu.edu/swim od Brenta Rašela (Brent Rushall) On nam pokazuje kako da pokrećemo ruke, trup i noge i prikazuje kako prvaci u plivanju izvode ove pokrete. Rašel takođe govori i o jednostavnim teorijama koje pomažu na polju plivanja, kao što je pogrešna ideja da potisak ima značaj pri plivanju ljudi.



Slika 170 Prikazi najjednostavnijih karika sa dve ili tri komponente (© Robert Scharein)

* * *

Poznata vrsta jegulje, riba-čvor *Myxine glutinosa*, poznata i kao riba veštica ili sluzava jegulja, sposobna je da napravi čvor na svom telu i da pomera taj čvor od glave do repa. (***Ref. 261***). Na ***slici 171*** prikazan je primer. Riba veštica koristi ovo kretanje da bi prekrila svoje telo sluzavom materijom koja sprečava grabljivce da je napadnu; ona isto tako koristi ovaj pokret da bi pobegla iz zahvata grabljivca, da bi se oslobodila sluzi pošto je opasnost prošla i da sluz potisne prema plenu da bi izdvojila komad mesa. Uzgred, sve proučavane ribe-čvorovi oblikuju samo levostrani čvor deteline; to je drugi primer hiralnosti u prirodi.

Slika 171 Riba-čvor *Myxine glutinosa*, ili sluzava jegulja, vezana u čvor (© Christine Ortlepp)

* * *

Proteini, molekuli koji sačinjavaju većinu struktura ćelije, lanci su aminokiselina. Izgleda da je vrlo malo proteina povezano, a da većina od njih oblikuje čvorove deteline. (***Ref. 260***). Međutim proteine vezane u čvor oblika osmice otkrio je 2000. dodine Vilijam Tejlor (William Taylor)

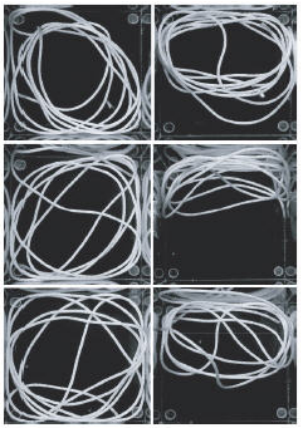
* * *

Jedno od najneverovatnijih otkrića u poslednjim godinama odnosi se na čvorove u molekulima DNK. Molekuli DNK u jezgru ćelija mogu da budu dužine stotinama i hiljadama miliona osnovnih parova; oni redovno treba da se pakuju i raspakuju. Kada se to izvrši, često se isto događa kao kada se komad dugačkog konopca ili dugačkog kabla izvadi iz ormana.

Dobro je poznato da možete namotatati konopac i staviti ga u orman na takav način da izgleda da je uredno stavljen, ali kada mu izvučete jedan kraj, pojave se odednom brojni čvorovi. (***Ref. 262***). Ovaj efekt je konačno detaljno istražen 2007. godine. Konopac dužine nekoliko metara stavljen je u četvrtastu kutiju i protresena je, kako bi se ubrzao efekt. Rezultat, koji je delimično prikazan na ***slici 172***, bio je iznenađujući: skoro svaki čvor koji može da se zamisli – do određene složenosti koja zavisi od dužine i savitljivosti kanapa – bio je na obrazovan ovaj način.

Da se skrati ova dugačka priča, ovo se takođe događa u prirodi kada se raspakuje DNK u jezgru ćelije. Život zahteva da se DNK molekuli kreću unutar jezgra ćelije bez prepreka. Kako priroda to postiže? Priroda preuzima prost pristup: kada postoje neželjena ukrštanja, ona preseca DNK, pomeri je i ponovo sastavi krajeve. U jezgru ćelije postoje posebni enzimi, takozvane *topoizomeraze*, koje izvršavaju ovaj proces. Detalji ovog začuđujućeg procesa još uvek su predmet savremenih istraživaja.

* * *



Slika 172 Kako se menja prividan raspored dugačkog kotura konopca (levo) i posle protresanja kutije (desno) (© 2007 PNAS)

Veliki matematičar Karl-Fridrih Gaus (Carl-Friedrich Gauβ – često se piše i kao Gauss) bio je prva osoba koja se zapitala šta se događa kada električna struja I teče kroz provodnik A koji je povezan sa provodnikom B. (***Ref. 263***). On je otkrio divan rezultat putem izračunavanja efekta magnetmog polja jednog provodnika na drugi:

$$\frac{1}{4\pi I}\int_A \mathrm{d}\boldsymbol{x}_A \cdot \boldsymbol{B}_B = \frac{1}{4\pi}\int_A \mathrm{d}\boldsymbol{x}_A \cdot \int_B \mathrm{d}\boldsymbol{x}_B \times \frac{(\boldsymbol{x}_A - \boldsymbol{x}_B)}{|\boldsymbol{x}_A - \boldsymbol{x}_B|^3} = n \qquad (130)$$

pri čemu je integriranje izvršeno duž provodnika. Gaus je našao da broj n ne zavisi od tačnog oblika konture provodnika, već samo od načina na koji su povezani. Izoblićenje konture provodnika ne menja rezultat broja n. Matematičari takav broj nazivaju topološka invarijanta. Ukratko, Gaus je otkrio fizičku metodu da se izračuna matematička invarijanta za vezu; trka u istraživanju da se to učini i za druge invarijante, posebno za čvorove i pletenice, u toku je i danas.

Edvard Viten (Edward Witten) je 1980. godine bio u mogućnosti da uopšti pristup da bi uvrstio nuklearne interakcije, i da odredi više razrađenih invarijanti čvorova, otkriće koje mu je donelo Fildsovu medalju.

* * *

Ako se krećemo duž čvora i brojimo ukrštanja na kojima ostajemo iznad i oduzimamo broj ukrštanja gde prolazimo ispod, dobijamo broj koji se naziva ***previjanje*** čvora. On nije invarijanta, već obično alat da se ona napravi. Ustvari, previjanje nije neophodno invarijanta pri jednom od tri Rajdermajsterovih (Reidermeister) poteza. Možete li da vidite koja, koristeći ***sliku 167***? (***Izazov 165e***). Međutim, previjanje je invarijanta pri prekretima.

* * *

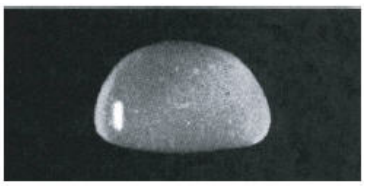
Savremeno istraživanje čvorova još uvek je tema sa mnogo otvorenih pitanja. Nedavno otkriće je ***kvazi-kvantifikacija trodimenzionalnog previjanja*** u zategnutim čvorovima. (***Ref. 264***). Očekuje se još mnogo otkrića u oblasti geometrije teorije čvorova.

* * *

Postoje dva načina da zavežete vaše cipele. Možete li da ih nađete? (***Izazov 166e***).

* * *

Kakav je oblik kišne kapi? (***Izazov 167s***). Pokušajte da ga nacrtate. Međutim, koristite vaš razum, ne predubeđenje! Uzgred, pokazao se da postoji maksimalna veličina kišne kapi, čija je vrednost oko 4 mm. (***Ref. 265***). Oblik takve velike kapi kiše prikazan je na ***slici 173***. Možete li da zamislite otkuda potiče ova granica?



Slika 173 Velika kap kiše koja pada naniže

Slika 174 Da li je ovo moguće?

Radi poređenja, kapi u oblaku ili magli su u opsegu od 1 do 100 μm, sa maksimumom pri 10 do 15 μm. (***Vol. III, strana 123***). U situacijama gde su sve kapi slične veličine, i gde svetlost rasipa samo jednom kroz kapi, može da se zapaze korona, oreol ili luk duge. (***Vol. III, strana 100***).

* * *

Šta je premet prikazan na ***slici 174*** – čvor, pletenica ili karika? (***Izazov 168s***)

* * *

Možete li da nađete način da razvrstate ćvorove? (***Izazov 169s***).

* * *

Da li ste sposobni da nađete načine na koje mogu da se zašniraju pertle cipela? (***Izazov 170s***).

* * *

Upečatljiv primeri kako tela koja menjaju oblik mogu da se ponašaju, prikazan je na ***slici 175***. Postoji zaista porodica zmija koje vole da skoče sa drveta i da jedre kroz vazduh do susednog drveta. I skok i tehnika jedrenja proučavane su nedavnih godina. Na veb strani www.flyingsnake.org Džek Soha (Jack Socha) nalazi se nekoliko filmova. Njegova začuđujuća objavljivanja govore više o ovim interesantnim reptilima. (***Ref. 266***),

Slika 175 Zmija koja leti, *Chrysopelea paradisii*, izvodi podvig po kojem je dobila ime. (QuickTime film © Jake Socha)

* * *

Kada se avion kreće nadzvućnom brzinom kroz vlažan vazduh, ponekad se obrazuje kupast oblak i kreće se sa avionom. (***Vol I, strana 238***). Kako se takav obblak razlikuje od onih proučavanih u predhodnom tekstu? (***Izazov 171e***)

* * *

Jedna od najtežih zagonetki o oblacima: da li je moguće izazvati kišu po zahtevu? (***Izazov 172ny***). Doskora skoro da nije bilo pozitivnih rezultata. Uvođenjem metode, koja se verovatno zasniva na ubacivanju higroskopne soli ili uz pomoć lasera, biće velika pomoć za čovečanstvo.

* * *

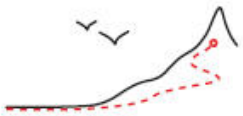
Da li čvorovi imaju veze sa elementarnim česticama? Ovo pitanje je staro skoro 150 godina. Prvo ga je istraživao Vilijam Tomson-Kelvin, a kasnije u devetnaestom veku i Peter Tajt. Do sada nije pronađena povezanost. Čvorovi su možda važni na Plankovim razmerama, najmanjim nogućimm dimenzijama u prirodi. Mi ćemo da isražujemo u kakvoj su vezi čvorovi i strukture elementarnih ćestica u poslednjem delu ove pustolovine.

ZAKLJUČAK O KOLEBLJIVIM OBJEKTIMA

Možemo da sumiramo mogića kretanja proširenih sistema u nekoliko ključnih tema. U predhodnom poglavljima proučavali smo talase, solitone i prodiranja. (***Vol. I, strana 230***). Ova zapažanja su opisana u jednakostima talasa. U ovom poglavlju istražili smo način kretanja pomoću promene oblika, objasnili everziju, proučili vrtloge, fluide, polimere, čvorove i njihovu preraspodelu, i istražili kretanje razmeštanja u čvrstim telima. Našli smo da je promena oblika opisana teorijom merila, da je everzija opisana dvojnošću prostora, da vrtlozi prate Šredingerovu jednakost, da fluidi i polimeri nalikuju opštoj teoriji relativnosti i crnim rupama, da su oblici čvorova teški za izračunavanja a da se razmeštanja ponašaju relativistički.

Kretanje kolebljivih objekata je često tema koja se zaobilazi u udžbenicima o kretanju. Istraživanja napreduju punom brzinom; očekuje se u bliskoj budućnosti otkrivanje mnogih lepih analogija sa tradicionalnom fizikom. Na primer, u ovom poglavlju nismo istraživali moguće analogije sa kretanjem svetlosti. Slično tome, uključivanje kvantne teorije u opise kretanja kolebljivih objekata ostaje zanimljivo pitanje za svakog ko ima cilj da to objavi u novoj oblasti. (***Izazov 173r***).

Kao zaključak, našli smo da kolebljivi objekti mogu da prikažu većinu polja savremene fizike. Postoje li objekti koji prikazuju sve iz savremene fizike? Ovo pitanje ćemo da istražimo u poslednjem delu.



Poglavlje 12

KVANTNA FIZIKA U ORAHOVOJ LJUSCI – PONOVO

U poređenju sa klasičnom fizikom, kvantna teorija je svakako složenija. Osnovna ideja je, međutim, jednostavna: postoji u prirodi najmanja promena, ili najmanji rad, koji ima vrednost $\hbar = 1{,}1\cdot10^{-34}$ Js. Najmanja vrednost rada dovodi do svih čudnih opažanja načinjenih u mikroskopskoj oblasti, kao što su talasno ponašanje materije, relacija neodređenosti, dekoherencija, nasumičnost u merenjima, neraspoznavanje, kvantifikovanja momenta količine kretanja, tunelski efekt, stvaranje parova, raspad, reakcija čestica i razmena virtualnih čestica.

KVANTNA TEORIJA POLJA U NEKOLIKO REČENICA

Deorum offensae diis curae[1].

Volter (Voltaire), *Traite sur la tolerance*.

Sve iz kvantne teorije može da se sabere u nekoliko rečenica.

- U prirodi nije zapažen manji rad od $\hbar = 1{,}1\cdot10^{-34}$ Js

Postojanje najmanjeg rada u prirodi neposredno vodi do glavne lekcije koju sno naučili o kretanju u kvantnom delu naše pustolovine.

- Ukoliko se nešta kreće, to je načinjeno od kvantona, ili kvantnih čestica.
- Postoje ***elementarne*** kvantne čestice.

Ovi iskazi se primenjuju na sve, stoga na sve predmete i na sve slike, to jest, na materiju i na zračenja. Pokretna stvar je načinjena od kvantona. Kamenje, talasi na vodi, svetlost, zvučni talasi, zemljotresi, zubna pasta i sve ostalo sa čime možemo da dođemo u dodir načinjeno je od pokretnih kvantnih čestica. Eksperimenti pokazuju:

- Sve bitne osobine objekata opažene u prirodi – kao što su električni naboj, slab naboj, naboj boje, spin, paritet, leptonski broj itd, uz jedini izuzetak, masu – pojavljuju se kao ***celi brojevi*** najmanjih jedinica; u složenim sistemima oni se ili sabiraju ili se množe.
- ***Elementarna kvantna čestica*** ili ***elementarni kvanton*** je nešta prebrojivo, manje od sopstvene Komptonove talasne dužine (***strana 195***), opisano energijom-količinom kretanja, masom, spinom, C, P i T paritetom, električnim nabojem, bojom, slabim izospinom, izospinom, čudnošću (strangeness), ljupkošću (charm), gornjost (topness), donjost (bottomness), leptonskim brojem i barionsim brojem.

Sve što se kreće načinjeno je od elementarnih kvantnih čestica. Da bi se videlo koliko je ovaj rezultat dubok, možete da ga primenite na sve ono što je pokretno a što se obično zaboravlja, kao što su aveti, duhovi, anđeli, nimfe, demoni, đavoli, bogovi, boginje i duše. Možete sami da proverite šta se događa kada se u obzir uzme njihova priroda čestica. (***Izazov 174e***).

Kvantne čestice nikada ne miruju, ne može im se odrediti položaj, kreću se nasumično, ponašaju se kao čestice ili kao talasi, stupaju u interferenciju, mogu da se polarišu, imaju tunelski efekt, ne mogu da se razlikuju, imaju antičestice, stupaju u lokalnu interakciju određuju razmeru dužine i vremena i ograničavaju preciznost merenja.

Kvantne čestice dolaze u dva oblika:

- Materija je sastavljena od ***fermiona***: kvarkova i leptona. Postoji 6 kvarkova koji sačinjavaju jezgro atoma, i 6 leptona – 3 naelektrisana leptona, uključujući elektron i 3 nenaelektrisana neutrina. Elementarni fermioni imaju spin 1/2 i poštuju načela Paulijeve isključivosti.

[1] "Briga bogove za ostale prekršaje". Volter, *Rasprava o toleranciji*.

- Zračenje nastaje usled tri interakcije merila i sastavljeno je od ***bozona***: fotona, bozona slabog vektora i 8 gluona. Svi ovi elementarni bozoni imaju spin 1.

U našoj pustolovini želeli smo da saznamo sta su materija i interakcija. Sada znamo: one nastaju usled elementarnih kvantnih čestica. Istraživanje kretanja unutar materije, uključujući reakcije čestica i razmenu virtialnih čestica, pokazuju da je materija sastavljena od ***konačnog broja*** elementarnih kvantnih čestica. Eksperimenti pokazuju:

- U ravnom prostoru elementarne čestice su u inerakciji na jedan od tri načina: postoje ***elektromagnetna interakcija***, ***jaka nuklearna interakcija*** i ***slaba nuklearna interakcija***.
- Tri interakcije su ***razmena virtualnih bozona***.
- Tri interakcije su opisane simetrijama merila U(1), SU(3) i narušenom, to jest približnom simetrijom SU(2).

Tri simetrije merila određuju lagranžijan svakog fizičkog sistema u ravnom prostor-vremenu. Najjednostavniji opis lagranžijana dobija se uz pomoć Fajnmanovih dijagrama i grupa merila.

- U svim interakcijama očuvani su energija. količina kretanja, moment količine kretanja, električni naboj, naboj boje, CPT paritet, leptonski broj i barionski broj.

Pregled očuvanih veličina podrazumeva:

- Kvantna ***teorija polja*** deo je kvantne fizike koja obuhvata opise ***pretvaranja čestica***.

Mogućnost pretvaranja čestica – uključujući reakcije čestica, emisiju čestica i apsorpciju čestica – posledica su postojanja najmanjeg rada i maksimalne brzine u prirodi. (***Vol. IV, strana 28***). Emisija svetlosti, radioaktivnost, sagorevanja na Suncu i istorija složenih materija koje smo napravili sve su usled pretvaranja čestica.

Zbog mogučnosti promene čestica, kvantna teorija polja uvodi ograničenje za lokalizaciju čestica. Zapravo svaki pedmet mase *m* nože da se lokalizuje samo u intervalima Komptonove talasne dužine:

$$\lambda_{\mathrm{C}} = \frac{h}{mc} = \frac{2\pi\hbar}{mc} \tag{131}$$

gde je *c* brzina svetlosti. Najkasnije na ovoj udaljenosti moramo da napustimo klasični opis i da koristimo kvantnu teoriju polja. Ako se približimo Komptonovoj talasnoj dužini, pretvaranje čestica postaje toliko važno da nisu dovoljne klasična fizika, pa čak ni prosta kvantna teorija.

Kvantna elektrodinamika je opis elektromagnetizma kvantnim poljem. Ona obuhvata i objašnjava sva pretvaranja čestica koja obuhvataju fotone. Lagranžijan kvantne elektrodinamike određen je grupom merila U(1), zahtevima (Poenkareove) simetrije prostor-vremena, simetrijom permutacije i renormalizacijom. Ovi poslednji zahtevi slede iz neprekidnosti pristor-vremena. Preko efekata virtuelnih čestica kvantna elektrodinamika opisuje elektromagnetni raspad, svetiljke, lasere, stvaranje parova, Unruovo zračenje za ubrzanog posmatrača, energiju vakuuma i Kazimirov efekt, to jest privlačenje neutralnih provodnih tela. Pretvaranje čestica usled elektrodinamike isto tako uvodi ispravke u klasičnu elektrodinamiku; između ostalog, pretvaranje čestica proizvodi malo odstupanje od načela superpozicije za elektromagnetna polja, uključujući mogućnost rasipanja foton-foton.

Teorija ***slabe nuklearne interakcije*** opisuje narušavanje pariteta, mešanja kvarkova, mešanja neutrina, vektorske bozone sa masom i Higsovo polje za prekid slabe simetrije SU(2). Slaba interakcija objašnjava veliki deo radioaktivnosti, uključujući proizvodnju toplote unutar Zemlje i opisuje proces koji omogućava da Sunce sija.

Kvantna hromodinamika, polje teorije jake nuklearne interakcije, opisuje sva pretvaranja čestica u koje su uključeni gluoni. Na osnovnoj razmeri, u jakoj interakciji posreduje osam elementarnih gluona. Na većoj, femtometarskoj razmeri, jaka interakcija, koja efektivno deluje preko razmene piona sa spinom 0, jako deluje privlačenjem i dovodi do oblikovanja atomskih jezgara. Jaka interakcija određuje nuklearnu fisiju i fuziju. Kvantna elektrodinamika objašnjava masu mezona i bariona preko njihovog opisa kao graničnih stanja kvarkova. (***Strana 151***).

Uključujući pretvaranje čestica kvantna teorija polja obezbeđuje zajedničku osnovu za pojmove i opise nauke o materijalima, nuklearnu fiziku, hemiji, biologiju, medicinu i veći deo astronomije. Na primer, isti pojmovi omogućavaju nam da odgovorimo na pitanja zbog čega je voda tečna na sobnoj temperaturi, zašto

je bakar crven, zbog čega je duga u bojama, zašto Sunce i zvezde nastavljaju da sijaju, zašto postoji oko 110 elemenata, gde drveče uzima materijal da napravi drvenu masu i zbog čega mi imamo sposobnost da pomeramo desnu ruku prema sopstvenoj želji. Kvantna teorija objašnjava poreklo svojstava materijala i poreklo svojstava života.

Kvantna teorija polja opisuje sva svojstva materijala, bilo da su mehanička, optička električna ili magnetna. Ona opisuje sve talase koji se pojavljuju u materijalima, kao što su zvuk i fotoni, magnetni talasi i magnoni, svetlost, plazmoni i sve lokalne pobuđenosti. Kvantna teorija polja takođe opisuje zajedničke efekte u materijalima, kao što su superprovodnost, efekte poluprovodnosti i superprotočnost. Konačno, kvantna teorija polja opisuje sve interakcije između materije i zračenja, od boje do stvaranja antimaterije.

Kvantna teorija polja takođe pojašnjava da opis prirode preko čestica, uključujući očuvanje broja čestica – koji je određen kao razlika između čestica i antičestica – sledi iz mogućnosti da se interakcije opišu perturbativno. Perturbativan opis prirode moguć je samo pri malim energijama. Pri izuzetno velikim energijama, većim od onih opaženih u eksperimentima, očekuje se da se situacija menja i ulogu preuzimaju nepertutbativni efekti. Ove situacije biće istražene u sledećem delu.

DOSTIGNUĆA U PRECIZNOSTI

Klasična fizika nije sposobna da predvidi bilo koju osobinu materije. Kvantna teorija polja predviđa sve osobine materije, i to u ukupnom broju decimala – ponekad i trinaest – koja mogu danas da se izmere. Preciznost obično nije ograničena netačnošću teorije, ona je ograničena tačnošću merenja. Drugim rečima, slaganje kvantne teorije polja i eksperimenta ograničeno je samo količinom novca koju želimo da potrošimo. ***Tabela 25*** pokazuje neka predviđanja klasične fizike i kvantne teorije polja. Predviđanja su izvedena iz svojstava prirode prikupljenih u milenijumskoj listi, koja je data u sledećem odeljku.

TABELA 25 Odabrana upoređenja između klasične fizike, kvantne teorije i eksperimenata

Posmatranje	**Klasično predviđanje**	**Predviđanje po kvantnoj teoriji[a]**	**Merenje**	**Procena troškova**
Prosto kretanje tela				
Neodređenost	0	$\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$	$\left(1 \pm 10^{-2}\right)\hbar/2$	10 k€
Talasna dužina materije	nema	$\lambda p = 2\pi\hbar$	$\left(1 \pm 10^{-2}\right)\hbar$	10 k€
Stepen tunela u α raspadu	0	1/τ je konačno	$\left(1 \pm 10^{-2}\right)\tau$	5 k€
Komptonova talasna dužina	nema	$\lambda_C = h/m_e c$	$\left(1 \pm 10^{-3}\right)\lambda$	20 k€
Stopa stvaranja parova	0	σE	slaže se	100 k€
Vreme radioakt. raspada u vodoniku	nema	$\tau \sim 1/n^3$	$\left(1 \pm 10^{-2}\right)$	5 k€
Najmanji moment količine kretanja	0	$\hbar/2$	$\left(1 \pm 10^{-6}\right)\hbar/2$	10 k€
Kazimirov efekt/pritisak	0	$p = \left(\pi^2 \hbar c\right)/\left(240 r^4\right)$	$\left(1 \pm 10^{-3}\right)$	30 k€
Boje predmeta				
Spektar toplog predmeta	razilazi se	$\lambda_{max} = hc/\left(4{,}956 kT\right)$	$\left(1 \pm 10^{-4}\right)\Delta\lambda$	10 k€
Lambov pomak	nema	$\Delta\lambda = 1057{,}86(1)$ MHz	$\left(1 \pm 10^{-6}\right)\Delta\lambda$	50 k€
Ridbergova konstanta	nema	$R_\infty = m_e c \alpha^2/2h$	$\left(1 \pm 10^{-9}\right)R_\infty$	50 k€
Štefan-Bolcmanova konstanta	nema	$\sigma = \pi^2 k^4/60\hbar^3 c^2$	$\left(1 \pm 3 \cdot 10^{-8}\right)\sigma$	20 k€
Vinova konstanta rasipanja	nema	$b = \lambda_{max} T$	$\left(1 \pm 10^{-5}\right)b$	20 k€
Indeks prelamanja vode	nema	1,34	nekoliko %	1 k€
Rasipanje foton- foton	0	konačno iz kvan.el.dinam.	slaže se	50 M€
Postojanje zračenja lasera	ne	da	slaže se	10 €
Čestice i svojstva interakcije				
Žiromagnetni odnos elektrona	1 ili 2	2,0023193043(1)	2,002319304 3737(82)	30 M€

Masa Z bozona	nema	$m_Z^2 = m_W^2\left(1+\sin\theta_W^2\right)$	$\left(1\pm10^{-3}\right)m_Z$	100 M€
Masa protona	nema	$(1\pm5\%)m_p$	$m_p = 1{,}67$ yg	1 M€
Vreme trajanja protona	≈ 1 μs	∞	> 10^{35} god	100 M€
Stopa hemijske reakcije	0	iz kvantne.el.dinamike	unutar ispravne greške	2 k€
Svojstva složenih materijala				
Vreme trajanja atoma	≈ 1 μs	∞	> 10^{20} god	1 €
Veličina molekula	nema	iz kvantne.el.dinamike	unutar 10^{-3}	20 k€
Fon Kicingova konstanta	∞	$h/e^2 = \mu_0 c/2\alpha$	$\left(1\pm10^{-7}\right)h/e^2$	1 M€
AC Jozefsonova konstanta	0	$2e/h$	$\left(1\pm10^{-6}\right)2e/h$	5 M€
Toplotni kapacitet metala na 0° K	25 J/K	0	< 10^{-3} J/K	10 k€
Toplotni kapacitet diatomskog gasa na 0° K	25 J/K	đ	< 10^{-3} J/K	10 k€
Gustina vode	nema	1000,00 kg/m^3 na 4°C	slaže se	10 k€
Minimun električne provodnosti	0	$G = 2e^2/\hbar$	$\left(1\pm10^{-3}\right)G$	3 k€
Feromagnetizam	nema	postoji	postoji	2 €
Superprotočnost	nema	postoji	postoji	200 k€
Boze-Ajnštajnov kondenzat	nema	postoji	postoji	2 M€
Superprovodnost (metali)	nema	postoji	postoji	100 k€
Superprovodnost (visoka T)	nema	još uvek ne	postoji	100 k€

a. Sva ova predviđanja su izračunata iz osnovnih veličina navedenih u milenijumskoj listi.

b. Ponekad je cena koštanja za izračunavanje predviđanja viša od one za eksperimentalno posmatranje. (Možete li da ukažete na primer?) (***Izazov 175s***). Dat je zbir ove dve cene.

Primećujemo da se ne razlikuju vrednosti predviđene kvantnom teorijom od izmerenih. Nasuprot tome, klasična fizika ne dopušta da se izračuna bilo koja opažena vrednost. To pokazuje napredak koji je kvantna fizika postigla u opisu prirode.

Ukratko, u mikroskopskoj oblasti kvantna fizika je u ***savršenoj*** saglasnosti sa prirodom; uprkos perspektivi slave i bogatstva, uprkos velikom broju istraživača, do sada nisu zapažena neslaganja sa opažanjima. Međutim, uprkos ovog impresivnog slaganja, postoje još uvek neobjašnjena opažanja; ona obrazuju takozvani milenijumsku listu.

ŠTA NIJE OBJAŠNJENO U KVANTNOJ TEORIJI I OPŠTOJ TEORIJI RELATIVNOSTI

Materijal sakupljen u ovom kvantnom delu našeg uspona na planinu, zajedno sa ranijim sumiranjem opšte teorije relativnosti (***Vol. II, strana 225***), omogućava nam da opišemo sve opažene pojave u vezi sa kretanjem. Po prvi put ne postoje poznate razlike između teorije i prakse.

Uprkos preciznosti u opisima prirode, neke stvari nedostaju. Uvek kada se upitamo "zašto?" pri nekom zapažanju i nastavimo da radimo tako posle svakog odgovora, doći ćemo do jednog od neobjašnjenih svojstava prirode, navedenih u ***Tabeli 26***. Tabela navodi sva pitanja o osnovnim kretanjima koja nisu objašnjena u 2000. godini, tako da možemo da je nazovemo ***milenijumska lista*** otvorenih problema.

Milenijumska lista ima nekoliko značajnih aspekata. Pre svega, ni kvantna mehanika, ni opšta teorija relativnosti ne objašnjavaju bilo koje svojstvo koje nije objašnjeno u drugim oblastima. Dve teorije ne ispomažu jedna drugu; delovi koji nisu objašnjeni u obe oblasti sabiraju se. Drugo, kako u kvantnoj teoriji, tako i u opštoj teoriji relativnosti kretanje ostaje još uvek promena položaja u vremenu. Ukratko, do sada nismo postigli naš cilj: još uvek ne razumemo kretanje! Sposobni smo da opišemo kretanje uz punu

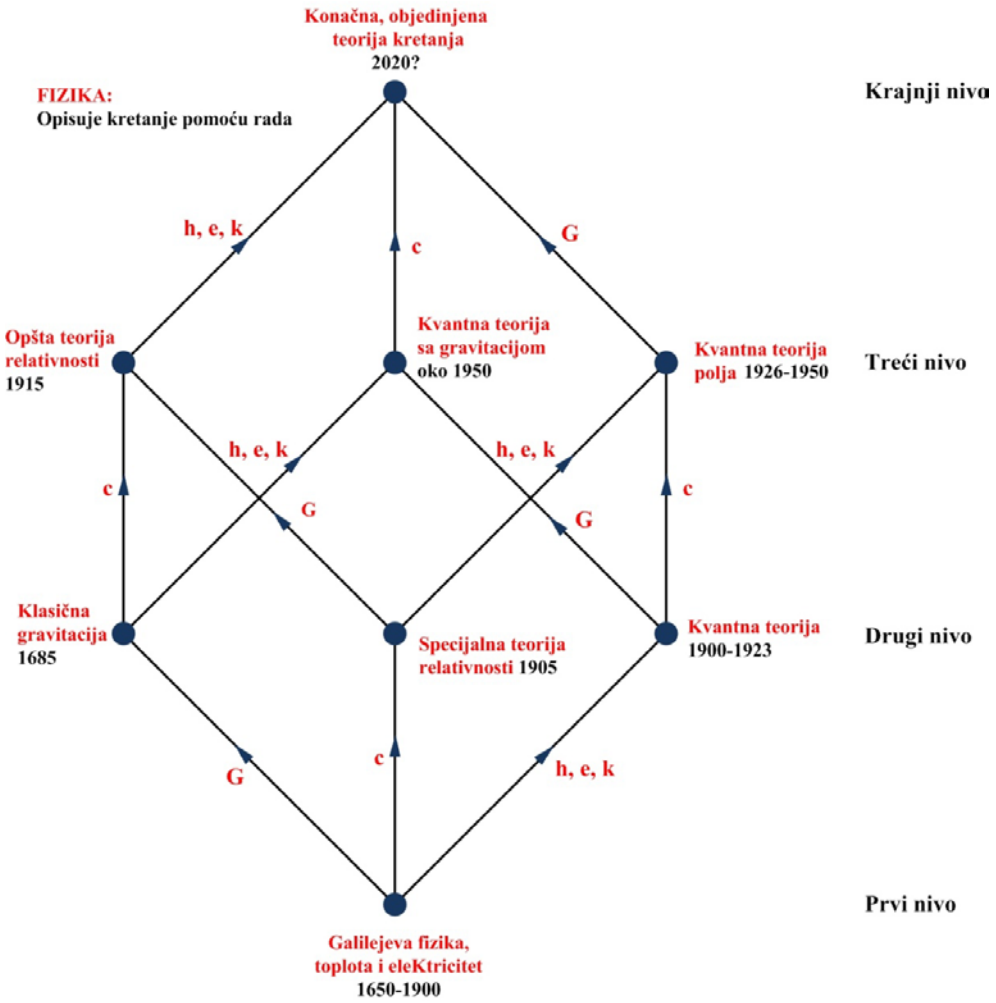
preciznost, ali mi još uvek ne znamo šta je ono. Ostaje naše osnovno pitanje: Šta su prostor i vreme? Šta je masa? Šta je naboj i šta su ostale osobine objekta? Šta su polja? Zbog čega su svi elektroni jednaki?

Isto tako primećujemo da milenijumska lista otvorenih pitanja, ***Tabela 26***, sadrži izuuzetno ***različite*** pojmove. Ovo znači da u ovom trenutku našeg rada postoji ***puno*** onoga što ne razumemo. Nalaženje odgovora zahtevaće napor.

TABELA 26 Milenijumska lista: sve što ne mogu da objasne standardni model i opšta teorija relativnosti; stoga takođe popis eksperimentalnih podataka, jedino dostupnih za proveru konačnog, objedinjenog opisa kretanja

Posmatranje	**Neobjašnjeno svojstvo u 2000. godini**
Lokalna veličina koju ne objašnjava standardni model: svojstva čestica	
$\alpha = 1/137{,}036(1)$	vrednost elektromagnetne konstante veze pri malim vrednostina energije
α_w ili θ_w	vrednost konstante slabe veze ili ugao slabog mešanja pri malim vrednostima energije
α_s	vrednost konstante jake veze na nekoj određenoj vrednosti energije
m_q	vrednost mase 6 kvarkova
m_l	vrednost mase 6 leptona
m_W	vrednost mase vektorskog W bozona
m_H	vrednost mase skalarnog Higsovog bozona.
θ_{12}, θ_{13}, θ_{23}	vrednost uglova mešanja tri kvarka
δ	vrednost CP narušavanja faze za kvarkove
$\theta_{12}^{v}, \theta_{13}^{v}, \theta_{23}^{v}$	vrednost uglova mešanja tri neutrina
δ^{v}, α_1, α_2	vrednost tri CP poremećaja faza za neutrine
3·4	broj generacija fermiona i čestica u svakoj generaciji
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 invarijanti Plankovih jedinica elektromagnetne teorije polja
3+1	broj dimenzija za fizički prostor i vreme
SO(3,1)	poreklo Poenkareove simetrije, to jest, spin, položaj, energija, količina kretanja
$S(n)$	poreklo identičnosti čestica, to jest, simetrije permutacije
simetrija merila	poreklo grupa merila, posebno
U(1)	poreklo elektromagnetne grupe merila, to jest, kvantifikovanja električnog naboja, kao i nepostojanje magnetnog naboja
SU(2)	poreklo grupe merila slabe interakcije, njenog prekida i P narušavanja
SU(3)	poreklo grupe merila jake interakcije i njeno očuvanje CP
Renormal. grupe	poreklo svojstava renormalizacije
$\delta W = 0$	poteklo talasne funkcije i principa najmanjeg rada u kvantnoj teoriji
$W = \int L_{SM}\,\mathrm{d}t$	poreklo lagranžijana standardnog modela fizike čestica
0	zapažena ravnost svemira, to jest nepostojanje zakrivljenosti,
$1{,}2(1)\cdot 10^{26}$ m	udaljenost horizonta, to jest "veličina" svemira (ukoliko to ima smisla)
$\rho_{de} = \Lambda c^4/(8nG) \approx 0{,}5\ \mathrm{nJ/m^3}$	vrednost i priroda zapažene gustine energije vakuuma, tamne energije ili kosmološke konstante
$(5 \pm 4)\cdot 10^{79}$	broj bariona u svemiru (ako to ima smisla), to jest prosečna vidljiva gustina materije svemira
$f_0(1, \ldots, c, 10^{90}$	početni uslovi za cca 10^{90} polja čestica u svemiru (ako i dokle to ima smisla), uključujući homogenost i izotropnost raspodele materije i gustina kolebanja u nastanku galaksija
ρ_{dm}	gustina i priroda tamne materije
Globalne matematičke strukture koje ne objašnjava opšta teorija relativnosti i kosmologija	
c, G	poreklo invarijanti Plankovih jedinica opšte teorije relativnosti
$\delta \int L_{GR}\,\mathrm{d}t = 0$	poreklo načela najmanjeg rada i Lagranžijana opšte teorije relativnosti
$R \times S^3$	opažena topologija svemira

S druge strane, milenijumska lista neobjašnjenih osobina prirode isto tako je ***kratka***. Opis prirode koju je do sada nastao iz naše pustolovine sažet je i precizan. Nije poznato nikakvo odstupanje od eksperimenata. Drugim rečima, ***u praksi*** imamo dobar opis kretanja. Ići dalje nije neophodno ako samo želimo da popravimo preciznost merenja. Uprošćavanje gornje liste uglavnom je važno sa ***pojmovne*** tačke gledišta. Iz tog razloga proučavanja fizike na univerzitetima često stanu na ovom mestu. Međutim, kako milenijumska lista pokazuje, iako nemamo poznatih neslaganja sa eksperimentima, mi još nismo na vrhu Planine Kretanja.



Slika 176 Uprošćena istorija opisa kretanja u fizici, davanjem ograničenja kretanja koje je uključeno u svakom opisu. Strelice pokazuju koja konstanta prirode treba da se doda i uzme u obzir da bi se došlo do sledećeg nivoa opisa. (Električni naboj *e* je uzet da predstavlja sve tri konstante veza merila

KOCKA FIZIKE

Drugi prikaz napretka i otvorenih pitanja u fizici koji je već dat u uvodu (***strana 9***), prikazan je na ***slici 176***: ***kocka fizike***. Od najnižeg ugla kocke koji predstavlja Galilejevu fiziku i teme koje se odnose na svakodnevni život, tri ivice – označene sa *c*, *G* i *ħ*, *e*, *k* – vode ka klasičnoj gravitaciji, posebnoj teoriji relativnosti i kvantnoj teoriji. Svaka konstanta podrazumeva ograničavanje kretanja; u odgovarajućoj teoriji ***jedno*** od ovih ograničenja je uzeto u obzir. Iz ovih teorija drugog nivoa, slične ivice vode naviše do opšte teorije relativnosti, kvantne teorije polja i kvantne teorije sa gravitacijom; svaka od ovih teorija trećeg nivoa uzima u obzir ***dva*** ova ograničenja.[1] Ovo poglavlje upotpunjuje treći nivo. Naglašavamo da je

[1] Naravno, ***slika 176*** daje uprošćen pogled na istoriju fizike. Precizniji prikaz bi koristio različite strelice za *ħ*, *e* i *k*, što bi dalo sliku kocke u pet dimenzija. Međutim, nebi svi njeni rogljevi imali date teorije (možete li to da potvrdite?) (***Izazov 176e***). Slika bi bila daleko manje privlačna. A pre svega, zaključci pominjani u tekstu nebi se menjali.

tačna svaka teorija i drugom i trećem nivou, mada samo u ***svojoj oblasti***. Nisu poznate nikakve razlike između eksperimenata i teorije u odgovarajućim oblastima.

Od teorija trećeg nivoa, ivice vode do poslednjeg nedostajućeg roglja: (objedinjene) teorije kretanja koja u obzir uzima ***sva ograničenja*** prirode. Samo ta teorija je potpun i objedinjen opis prirode. Pošto već znamo sva ograničenja kretanja da bismo stigli do poslednjeg nivoa nije potrebno da izvodimo nov eksperiment. Nije nam potrebno novo znanje. Moramo samo da napredujemo u ispravnom smeru uz pažljivo razmišljanje. A možemo poćeti iz tri različite tačke. Dolazak do konačne teorije kretanja tema je poslednjeg dela naše pustolovine.

JAKE EMOCIJE ZBOG KVANTNE TEORIJE POLJA I OPŠTE TEORIJE RELATIVNOSTI

Ponekad se smatra kako je moderno da se pretvaramo da je pustolovina završena na nivou do kojeg smo upravo stigli,[1] trećeg nivoa na ***slici 176***. Dato mišljenje je kako sledi. Ako promenimo vrednosti neobjašnjenih konstanti u milenijumskoj listi iz ***Tabele 26***, čak i samo malo, priroda bi izgledala potpuno drugačije no što jeste. (***Ref. 269***). U stvari, ove posledice su proučavane veoma detaljno; pregled posledica prikazan je u tabeli koja sledi.

Neki istraživači razmišljaju da cela ***Tabela 27*** može da se sažme u jednu rečenicu: ako se promeni bilo koji parametar u prirodi, svemir bi imao ili previše ili premalo crnih rupa. (***Ref. 270***). Međutim, dokaz za ovakav sažeti zaključak još uvek nije završen. Međutim, to je lepa hipoteza. (***Izazov 177r***).

Efekti promene prirode koji su navedeni u ***Tabeli 27*** dovode nas do izuzetnog iskustva: čak i najmanja promena u svojstvima prirode nespojiva je sa našim postojanjem. Šta ovakvo iskustvo znači? Opasno je da se isuviše brzo odgovori na ovo pitanje. Mnogi su upali u neku od više zamki:

- Prva zamka je da se zaključi, netačno, da neobjašnjene brojeve i druga svojstva iz milenijumske liste ne treba ni objašnjavati, to jest zaključiti ih iz opštijih načela.
- Druga zamka je da se zaključi, netačno, da je svemir bio ***stvoren*** ili ***konstruisan***.
- Treća zamka je da se zaključi, netačno, da je svemir ***stvoren zbog ljudi***.
- Četvrta zamka je da se zaključi, netačno, da je svemir ***jedan od mnogih***.

Sve ove zamke su iracionalna i netačna ubeđenja. Za sva ova ubeđenja zajedničko je da ona nemaju činjeničku osnovu, da su obeshrabrila naredna istraživanja i da su prodala mnogo knjiga.

Prva zamka je usled kombinacije pesimizma i zavisti; ona je vrsta željenog razmišljanja. Međutim, željeno razmišljanje ne sme da postoji u proučavanju kretanja. Druga vrsta zamke postoji pošto mnogi fizičari netačno govore o ***finoj podešenosti*** prirode. Mnogi naučnici su podlegli verovanju u "stvaranje" i nisu uspeli da izbegnu logičke pogreške koje se nalaze u njemu. Mi smo to već ranije razmatrali (***Vol. III, strana 238***). Treća zamka je često, opet netačno, nazvana ***antropsko načelo***. Naziv je greška, pošto smo videli da se antropski princip (***Vol. III, strana 243***) ne razlikuje od majmunskog principa i od prostog zahteva da se izjave zasnivaju na opažanjima. Oko 2000. godine treća zamka ie čak postala pomodna među frustriranim teoretičarima čestica. Četvrta zamka, verovanje u više kosmosa, predstavlja viđenje manjine, ali je prodala mnogo knjiga. Većina ljudi koja se drži ovog gledišta nalazi se u nekim institucijama, a to su zaista mesta gde oni pripadaju.

Da prekinemo naš uspon na planinu na ovom mestu uz netačno verovanje, isto je kao da smo to učinili na početku. Sa takvim izborom sretala su se razna društva koja su izgubila strast za racionalno istraživanje, i još uvek je u krugovima koji obeshrabruju upotrebu razuma među svojim članovima. Traženje verovanja umesto traženja odgovora znači predaju pred usponom na Planinu Kretanja, umesto nastojanja da se osvoji vrh. Svaki takav slučaj je tragedija, ponekad samo mala, ponekad velika.

---

[1] Zapravo ovaj stav nije nov. Izmenili su se samo dokazi. Možda najveći fizičar svih vremena, Džejms Klerk Maksvel (James Clerk Maxwell) borio se već protiv takvog stava pre više od sto godina. (***Ref. 268***) "Izgleda da su se mišljenja raširila da će, za nekoliko godina, sve velike fizičke konstante biiti približno određene i da će jedino zanimanje koje će da preostane ljudima od nauke, da izvedu ove eksperimente do drugog decimalnog mesta. […] Istorija nauke pokazuje, da je čak i u toku ove faze njenog napretka, u kojioj je sebe posvetila na poboljšanje tačnosti numeričkih merenja veličina sa kojima je bila dugo familijarna, ona pripremala materijale za pokoravanje novih oblasti, koje bi ostale nepoznate da je ona bila zadovoljna grubim metodama njenih ranih pionira.

Tabela 27 ustvari daje samo jednu poruku: svi dokazi podrazumevaju da smo mi samo ***mali deo*** svemira, ali da smo ***povezani*** sa svim njegovim ostalim aspektima. Zbog naše male veličine i zbog svih veza sa našim okruženjem, bilo koja zamišljena mala promena učinila bi da nestanemo, kao što bi kap vode bila zbrisana velikim talasom. Naše hodanje nas uzastopno podseća na ovu sićušnost i zavisnost, i to nadmoćno ponovo čini opet na ovom mestu.

TABELA 27 Izbor posledica promena osobina prirode

Posmatranje	**Promena**	**Rezultat**
Lokalne veličine, iz kvantne teorije		
α_{cm}	manje:	Samo zvezde kraćeg života, manje i toplije zvezde, nema Sunca
	više:	Tamnije Sunce, životinje ugibaju zbog elektromagnetnog zračenja, previše raspada protona, nema planeta, nema zvezdanih eksplozija, nema obrzovanja zvezda nema obrazovanja galaksija
	+60%	Kvakovi se raspadaju u leptone
	+200%	Odbijanje proton-proton čini nemogućim jezgra
α_w	-50%	Nestabilna jezgra ugljenika
	vrlo slaba:	Nema vodonika, nema p-p ciklusa u zvezdama, nema C-N-O ciklusa
	+2%	Nema protona iz kvarkova
	$G_F m_e^2 \neq \sqrt{G m_e^2}$	Ili ga nema ili je u svemiru samo helijum.
	mnogo veća:	Nema eksplozija zvezda, brže sagorevanje zvezda.
α_s	-9%	Nema deuterona, zvezde mnogo manje sjaje.
	-1%	Nema C rezonanse, nema života
	+3,4%	Diproton stabilan, brže sagorevanje zvezda
	mnogo veća	Nestabilan ugljenik, nestabilna teška jezgra, široko rasprostranjena leukemija
razlika masa n-p	veća::	U jezgrima raspad neutrona u proton, nema elemenata.
	manja	Slobodan elektron nije nestabilan, svi protoni prelaze u neutrone tokom velikog praska, nema elemenata
	manja od m_e:	Protoni bi zarobili elektrone, nema atoma vodonika, trajanje zvezda mnogo kraće.
promene m_i:		
odnos masa e-p	velika razlika	Nema molekula
	mnogo manja:	Nema čvrstih tela
3 generisanje	6-8:	U prirodi postoji samo helijum
	>8:	Nema asimptotske slobode i ograničavanja
Globalne veličine iz opšte teorije relativnosti		
veličina horizonta	mnogo manja:	Nema ljudi.
barionski broj	vrlo različit:	Nema ravnosti
	mnogo veći:	Nema sunčevog sistema.
masa Meseca	manja:	Sabo magnetno polje Zemlje, prejako kosmičko zračenje, široko rasprostranjen rak kože kod dece.
	veća:	Jako magnetno polje; preslabo kosmičko zračenje, nema evolucije u ljudska bića.
masa Sunca	manja:	Isuviše hladno za evoluciju života.
	veća:	Prekratko vreme trajanja za evoluciju na Zemlji.
masa Jupitera	manja:	Previše kometa udara u Zemlju; izumiranje života životinja
	veća:	Premalo kometa udara u Zemlju, nema Meseca, dinosaurusi nisu izumrli

broj objekata Ortovog oblaka	manji:	Nema kometa, nema nepravilnih asteroida, nema Meseca, još uvek postoje dinosaurusi
udaljenost centra galaksije	manja:	Nepravilno kretanje planeta, opasnost od supernove
početna kosmička brzina	+0,1%:	Svemir se širi 1000 puta brže
	-0,0001%:	Svemir se ponovo urušava posle 10000 godina
gustina energije vakuuma	promena za 10^{-55}:	Nema ravnosti
3 + 1 dimenzija	različito:	Nema atoma, nema planetarnih sistema.
Lokalne strukture iz kvantne teorije		
permutacija simetrije	ne postoji:	Nema materije
Lorencova simetrija	ne postoji:	Nije moguća komunikacija
U(1)	različita:	Nema Hajgensovog načela, nema načina da se vidi bilo šta
SU(2)	različita:	Nema radioaktivnosti, nema Sunca, nema života
SU(3)	različita:	Nema stabilnih kvarkova ni jezgara
Globalne strukture iz opšte teorije relativnosti		
topologija	drugačija	Nepoznato; verovatno povezano sa eksplozijom γ zraka ili slike zvetda u tački antipoda

U našoj pustolovini, prihvatanje snažnih poruka iz ***Tabele 27*** jedan je od trenutaka koji je najatraktivniji, najdirljiviji i najviše motiviše. To pokazuje jasno koliko je svemir ogroman. To takođe pokazuje koliko smo mnogo zavisni od mnogih različitih i udaljenih aspekata prirode. Sučeljavajući se sa ovim snažnim iskustvom, svako mora da izgradi sopstveno mišljenje da li da nastavi ovu pustolovinu ili ne. (***Izazov 178s***). Normalno, ne postoji obaveza da se to učini.

ŠTA NAS OČEKUJE?

Pod predpostavkom da ste odlučili da nastavite pustolovinu, prirodno je da se upitate šta vas očekuje. Kratkoća milenijumske liste neobjašnjenih aspekata prirode, data u ***Tabeli 26 strana 239***, znači da nema raspoloživih ***dodatnih eksperimentalnih podataka*** kao provere konačnog opisa prirode. Sve što nam je potrebno da dospemo do konačnog opisa kretanja biće izvedeno iz eksperimentalnih podataka navedenih u milenijumskoj listi i ni iz čega drugog. Drugim rečima, budući eksperimenti ***neće*** nam pomoći – osim ako oni nešta ne menjaju u milenijumskoj listi. Eksperimenti iz ubrzivača (akceleratora) možda će to učiniti sa popisom čestica ili astronomski eksperimenti u pitanjima topologije. Fantaziranje nema granica; na sreću, priroda ima.

Odsustvo novih eksperimentalnih podataka znači da je nastavak hodanja samo ***pojmovna*** pustolovina. Bez obzira na to, oluje besne u blizini vrha Planine Kretanja. Moramo da nastavimo hodanje držeći otvorene oči, bez ikakvih drugih putokaza osim našeg razuma. To nije pustolovina akcije, to je pustolovina uma. A ona je zadivljujuća, kao što ćemo uskoro da otkrijemo. Da bismo obezbedili utisak o onome šta nas očekuje, ponovićemo preostala pitanja u pet jednostavnih zagonetki.

1. Šta određuje boje? Druginm rečima, koji odnosi u prirodi određuju poznatu konstantu fine strukture? Kao heroj iz knjige Daglasa Adamsa (Douglas Adams) fizičari znaju odgovor na većinu pitanja; to je 137,036. Ali oni ne znaju pitanje.

2. Šta određuje sadržaj ***šolje za čaj***? On je dat trećim stepenom njene veličine. Ali zašto postoje samo tri dimenzije? Zbog čega je sadržaj čaja ograničen na taj način?

3. Da li je Demokrit bio u ***pravu***? Naša pustolovina je potvrdila njegovu izjavu do ove tačke: priroda je zaista dobro opisana pojmovima čestica i vakuuma. U velikim razmerama teorija relativnosti je dodala horizont, a u malim razmerama, kvantna teorija polja dodala je energiju vakuuma i stvaranje parova. Bez obzira na to, obe teorije ***predpostavljaju*** postojanje čestica i postojanje prostor-vremena, ali ih ne ***predviđaju***. Još gore, obe teorije u potpunosti ne predviđaju postojanje bilo koje osobine bilo prostora-vremena – kao što je njegova dimenzionalnost – bilo čestica – kao što su njihove mase i drugi kvantni brojevi. Mnogo nedostaje.

4. Da li je Demokrit ***grešio***? Često se kaže da standardni model ima samo oko dvadeset nepoznatih parametara; ova uobičajena greška odbacuje oko 10^{93} početnih stanja! Da mi se dobio smisao problema, prosto ćemo da zamislimo broj N mogućih stanja za sve čestice u svemiru preko

$$N = n \upsilon d\ p\ f \tag{132}$$

gde je n broj čestica, υ je broj promenljivih (položaj, količina kretanja, spin), d je broj različitih vrednosti koje svaka može da se uzme (ograničeno maksimumom od 61 decimalnog broja), p je broj vidljivih tačaka prostor-vremena (oko 10^{183}) i f je činilac koji izražava koliko je ovih od svih početnih stanja stvarno nezavisno jedno od drugog. Prema tome, dobijamo sledeći broj mogućih stanja svih čestica u svemiru:

$$N = 10^{92} \cdot 8 \cdot 10^{61} \cdot 10^{183} \cdot f = 10^{336} \cdot f \tag{133}$$

od kojih je objašnjeno 10^{93} početnih uslova. Međutim nije poznato objašnjenje. Loše je to, što postoji takođe i dodatni problem u kojem ne znamo ništa o činiocu f. Njegova vrednost bi mogla da bude 0, ako bi svi podaci bili nezavisni, ili 1, ako nijedan nebi bio nezavisan. Još gore, u predhodnom tekstu (***Vol. IV, strana 131***) primetili smo da početni uslovi svemira uopšte ne mogu da se odrede; prema tome, f treba da bude neodređen, a možda uopšte nebi bio broj! Bilo šta da je slučaj, potrebno je da shvatimo kako sve vidljive čestice postižu svojih 10^{93} sadašnjih stanja.

5. Da li su naši napori do sada bili ***uzaludni***? Skoro na poćetku našeg hodanja (***Vol. I, strana 313***) mi smo primetili da su prostor i vreme u klasičnoj fizici određeni korišćenjem materije, pri čemu je materija bila određena korišćenjem prostor-vremena. Stotinu godina opšte teorije relativnosti i kvantne teorije, uključujući desetine genija, još uvek nisu uopšte uspeli da reše ovaj najstariji paradoks. Ovo pitanje još uvek je otvoreno u ovom času našeg hodanja, kao što možda želite sami da proverite. (***Izazov 179e***).

Odgovori na ovih pet zagonetki određuju vrh Planine Kretanja. Odgovoriti na njih znači poznavati sve o kretanju. Kao zaključak, naša potraga za otkrivanjem suštine kretanja od ovog mesta nadalje postaje zaista zanimljiva.

*Zato Leukip i Demokrit, koji kažu da se atomi uvek kreću u praznini i neograničeno, moraju da kažu šta je kretanje i od čega se njihovo prirodno kretanje sastoji. (**Ref. 271**)*

Aristotel, *Treaty of the Heaven*

DODATAK A

JEDINICE, MERENJA I KONSTANTE

Merenje je upoređivanje sa standardom. Standardi se zasnivaju na ***jedinicama***. Širom sveta su se koristili različiti sistemi mernih jedinica. Većina ovih standarda davala je moć organizaciji koja je za njih bila nadležna. Kako ova moć može da bude zloupotrebljena, kao što je slučaj danas, vidi se u primeru industrije tačunara, a isto tako je postojala i u minulim vremenima. Rešenje je isto za oba slučaja: organizovati nezavisni globalni standard. Za merne jedinice to se dogodilo u 18. veku: kako bi se izbegla zloupotreba autoritarnih institucija, da bi se isključili problemi u razlikama, promene i neponovljivi standardi, kao i – ovo nije šala – uprostilo prikupljanje poreza i da bi ih načinili još pravednijim, grupa naučnika, političara i ekonomista saglasila se sa skupom mernih jedinica. On je nazvan ***Systeme International d'Unites***, ili skraćeno ***SI***, a bio je određen međunarodnom ugovorom, "*Convention du Metre*". Jedinice su čuvane u međunarodnoj organizaciji "*Conference Generale des Poids et Mesures*" i u njenim ćerka-organizacijama "*Commission Inter-nationale des Poids et Mesure"'* i "*Bureau International des Poids et Mesures*" (BIPM). Sve ovo je poteklo iz vremena neposredno pre Francuske revolucije. (***Ref. 272***)

SI MERNE JEDINICE

Sve SI merne jedinice izvedene su iz sedam osnovnih mernih jedinica, čije zvanične odrednice, prevedene sa francuskog na engleski (ovde i na srpski) su navedene niže, zajedno sa datumom njihovih formulacija:

- ***sekunda*** je trajanje od 9 192 631 770 periode radijacije koja odgovara prelasku između dva hiperfina nivoa osnovnog stanja atoma cezijuma 133 (1967.)[1]
- ***metar*** je dužina pređenog puta svetlost u vakuumu tokom vremenskog intervala od 1/299 792 458 dela sekunde (1983)[1]
- ***kilogram*** je jedinica mase koja je jednaka masi međunarodnog prototipa kilograma (1901)[1]
- ***amper*** je ona konstantna struja koja u dva paralelna prava provodnika beskonačne dužine, postavljenih u vakuumu na rastojanju od 1 m , proizvede između ta dva provodnika silu jednaku $2\cdot10^{-7}$ njutna po metru dužine. (1948)[1]
- ***kelvin***, jedinica za termodinamičku temperaturu, je razlomak 1/273,16 termodinamičke temperature trojne tačke vode (1967)[1]
- ***mol*** je količina supstance sistema koji sadrži isto onoliko elementarnih subjekata koliko postoji atoma u 0,012 kilograma ugljenika 12 (1971)[1]
- ***kandela*** je jačina osvetljenja u određenom pravcu iz izvora koji emituje monohromatsko zračenje učestanosti $540\cdot10^{12}$ herza i ima intenzitet zračenja u tom smeru od 1/683 vati po sterradijanu (1979)[1]

Primetili smo da su merne jedinice i za vreme i za dužinu određene preko izvesnih osobina standardnog primera za kretanje, naime svetlosti. Drugim rečima, i "*Conference Generale des Poids et Mesures*" naglasila je da je posmatranje kretanja preduslov za određivanje i konstrukciju vremena i prostora.

[1] Simboli ovih jedinica su, respektivno: **s**, **m**, **kg**, **A, K**, **mol** i **cd**. Međunarodni prototip kilograma je valjak od legure platina-iridijum, koji se čuva u BIPM u Sevru, u Francuskoj. (***Vol. 1, strana 83***) Za više detalja o nivoima atoma cezijuma, pogledati u knjigu o atomskoj fizici. (***Ref. 273***) Celzijusova skala temperature θ, određena je na ovakav način: θ (ºC) = T (K) – 273,15; treba zapaziti malu razliku od broja koji se pojavljuje u odrednici kelvina. SI takođe navodi: "Kada se koristi mol, elementarni subjekti moraju biti specificirani, a mogu biti atomi, molekuli, joni, elektroni, druge čestice ili određene grupe takvih čestica." U odrednici mola je razumljivo da atomi ugljenika 12 nisu vezani u mirovanju i u njegovom osnovnom stanju. U odrednici za kandelu, učestanost svetlosti odgovara 555,5 nm, to jest zelenoj svetlosti, oko talasne dužine na koju je ljudsko oko najosetljivije.

Kretanje je osnova svakog posmatranja i svih merenja. Uzgred, upotrebu svetlosti u odrednicama zagovarao je još 1827. godine Žak Babine (Jacques Babinet).[1]

Iz ovih osnovnih jedinica, izvedene su sve ostale merne jedinice množenjem ili deljenjem. Prema tome sve SI merne jedinice imaju sledeće osobine:

- SI merne jedinice obrazuju sistem koji ima ***najsavremeniju preciznost***: sve merne jedinice određene su uz preciznost koja je veća od preciznosti u uobičajenim merenjima. Štaviše, preciznost odrednica se redovno popravlja, Trenutna relativna nesigurnost za odrednicu sekunde je oko 10^{-14}, za metar oko 10^{-10}, za kilograma oko 10^{-9}, za amper 10^{-7}, za mol je manja od 10^{-6}, za kelvin 10^{-6} i za kandelu 10^{-3}

- SI merne jedinice obrazuju ***apsolutni*** sistem: sve jedinice su određene na takav način da se mogu reprodukovati u svakoj prigodno opremljenoj laboratoriji, nezavisno i uz veliku preciznost. Time je izbegnuta zloupotreba što je moguće više od strane organizacija koje postavljaju standarde. (Samo je još kilogram određen uz pomoć tvorevine, pa predstavlja izuzetak od ovih zahteva; vrše se intenzivna istraživanja da se nađe način da se ova tvorevina izbaci iz odrednica – to je međunarodna trka koja traje već više godina. Postoje dva pristupa: brojanje čestica ili utvrđivanje $\hbar$. Prvo se može postići u kristalima, to jest u kristalu načinjenom od čistog silicijuma, a drugo preko upotrebe obrasca u kojem se pojavljuje $\hbar$, kao što je obrazac za de Broljijevu (de Broglie) talasnu dužinu ili ona za Josefsonov (Josephson) efekt.

- SI merne jedinice obrazuju ***praktičan*** sistem: osnovne jedinice imaju veličine iz svakodnevnih opažanja. Često upotrebljavane merne jedinice imaju imena i skraćenice. Kompletan popis obuhvata sedam upravo pomenutih jedinica, dopunske merne jedinice, izvedene merne jedinice i dopuštene jedinice za upotrebu.

- ***Dopunske*** SI merne jedinice su dve: jedinica za ugao u ravni, određena je kao odnos dužine luka kružnice i poluprečnika, jedinica je ***radijan*** (rad). Za prostorni ugao, određena kao površina koja se vidi i kvadrata poluprečnika, jedinica je ***steradijan*** (sr).

- ***Izvedene*** merne jedinice sa posebnim nazivima napisane u zvaničnom engleskom pisanju[2], to jest bez velikih slova i akcenata su:

Naziv	Skraćenica
herc	Hz = 1/s
paskal	Pa = N/m^2 = kg/m s^2
vat	W = kg m^2/s^3
volt	V = kg m^2/A s^3
om	Ω = V/A = kg m^2 A^2 s^2
veber	Wb = V s = kg m^2/A s^2
henri	H = V s/A = kg m^2/A^2 s^2
lumen	lm = cd sr
bekerel	Bq = 1/s
sivert	Sv = 1/kg = m^2/s^2

Naziv	Skraćenica
njutn	N = kg m/s^2
džul	J = N m = kg m^2/s^2
kulon	C = A s
farad	F = A s/V = A^2 s^4/kg m^2
simens	S = 1/ Ω
tesla	T = Wb/m^2 = kg/A s^2 = kg/C s
stepen Cel.	ºC (videti odrednicu za kelvin)
luks	lx = lm/m^2 = cd sr/m^2
grej	Gy = J/kg = m^2/s^2
katal	kat = mol/s

Zapazili smo da se u svim odrednicama mernih jedinica pojavljuje kilogram samo sa stepenom 1, 0 i -1. Da li možete da odredite razlog? (***Izazov*** 159s)

Jedinice ***dozvoljene*** za upotrebu izvan SI sistema su: ***minut***, ***čas***, ***dan*** (za vreme), stepen $1^o = \pi/180$ rad, minut $1' = 1^o/60 = \pi/10800$ rad, sekunda $1'' = 1'/60 = 1^o/360 = \pi/648000$ rad (za uglove) ***litar*** i ***tona***. Sve ostale jedinice treba izbegavati

Još praktičnijim sve SI merne jedinice čini uvođenje standardih imena i skraćenica za stepene 10, takozvani ***prefiksi***.[3]

---

[1] Žak Babine (Jacques Babinet, 1794–1874), bio je francuski fizičar koji je objavio poznata dela radova u optici.

[2] U saglasnosti sa ostatkom teksta prevoda, nazivi će biti u obliku koji se koristi u srpskom jeziku.

[3] Neki od ovih naziva su izmišljeni (yocto zvuči kao latinski ***octo*** – osam, zepto zvuči kap latinsko ***septem***, yotta i zetta liče na njih, exa i peta zvuče kao grčke reči ***ἑξάκι*** – šest puta i ***πεντάκις*** – pet puta, a nezvanične zvuče ka grčke reči devet, deset jedanaest i dvanaest); neke su dansko/norveške (atto od ***atten*** – jedanaest, femto od ***femten*** – petnaest); neke su iz latinskog (od ***mille*** – hiljadu, od ***centum*** – sto, od ***decem*** – deset, od ***nanus*** – patuljak); neke su iz italijanskog (od ***piccolo*** – mali); neke iz grčkog (micro od ***μικρός*** – mali, deca/deka od ***δέκα*** – deset,

Stepen	Naziv	
10^{1}	deka	da
10^{2}	hekto	h
10^{3}	kilo	k
10^{6}	Mega	M
10^{9}	Giga	G
10^{12}	Tera	T
10^{15}	Peta	P

Stepen	Naziv	
10^{18}	Exa	E
10^{21}	Zetta	Z
10^{24}	Yotta	Y
nezvanično (***Ref. 364***)		
10^{27}	Xenta	X
10^{30}	Wekta	W
10^{33}	Vendekta	V
10^{36}	Undekta	U

Stepen	Naziv	
10^{-1}	deci	d
10^{-2}	centi	c
10^{-3}	mili	m
10^{-6}	mikro	µ
10^{-9}	nano	n
10^{-12}	piko	p
10^{-15}	femto	f

Stepen	Naziv	
10^{-18}	atto	a
10^{-21}	zepto	z
10^{-24}	yocto	y
nezvanično (***Ref. 364***)		
10^{-27}	xenno	x
10^{-30}	weko	w
10^{-33}	vendeko	v
10^{-36}	udeko	u

- SI merne jedinice obrazuju kompletan sistem: one na sistematski način pokrivaju ceo skup opažanja u fizici. Štaviše, one određuju jedinice za merenja takođe i za ostale oblasti u nauci.
- Si merne jedinice obrazuju univerzalni sistem: one se mogu koristiti u trgovini, u industriji u saobraćaju, u kući, u nauci i u istraživanjima. Mogi čak i da se koriste i u vanzemaljskim civilizacijama, ukoliko postoje.
- SI merne jedinice obrazuju ***samo-dosledan*** sistem: proizvod ili količnik dve SI jedinice daju takođe SI jedinicu. To u principu znači da se ista skraćenica, ti jest "SI" može koristiti za svaku jedinicu.

SI merne jedinice nisu jedini mogući skup koji može da ispuni sve ove zahteve, ali su one jedini sistem koji to čini.[1] U bliskoj budućnosti BIPM planira da ponovo odredi SI jedinice koristeći "kocku fizike", prikazane na ***slici 1*** (***strana 9***) To će biti ostvareno utvrđivanjem, pored vrednosti za c i K_{cd}, takođe i vrednosti za: $\hbar$, e , k i N_A. Predložene vrednosti iznose h = 6,62606957·10^{-34} Js, e = 1,602176565·10^{-19} C, k = 1,3806488·10^{-23} J/K i N_A = 6,02214129·10^{23} 1/mol. Odrednica za sekundu će se zadržati, da bi se izbegla mala preciznost u svim do sada poznatim merenjima G. Pojedinosti iz ove budućnosti, novi SI sistem, prikazan je na veb stranama: www.bipm.org/en/measurement-units/new-si/, www.bipm.org/utils/common/pdf/si-brochure-draft-2016.pdf i www.bipm.org/utils/common/pdf/SI-roadmap.pdf

SMISAO MERENJA

Svako merenje je upoređivanje sa standardom. Prema tome, svako merenje iziskuje ***materiju*** kako bi se realizovao standard (čak i za standard brzine), kao i ***zračenje*** da bi se postiglo upoređenje. (***Izazov 181e***). Pojam merenja prema tome podrazumeva da postoje materija i zračenje i da su jasno međusobno razdvojeni.

Svako merenje je upoređivanje. Merenje, prema tome, podrazumeva da postoje takođe prostor i vreme i da su jasno međusobno razdvojeni.

Svako merenje proizvodi rezultate merenja. Prema tome, svako merenje podrazumeva i ***čuvanje*** podataka. Proces merenja stoga podrazumeva da mogu da se izdvoje situacije pre i posle merenja. Drugim pojmom rečeno, svako merenje je ***nepovratan*** proces.

Svako merenje je proces, Stoga svako merenje uzima izvesnu količinu vremena i izvesnu količinu prostora.

Sve ove osobine marenja su jednostavne, ali važne. Klonite se svakog ko ih negira.

---

hekto od ***ἑκατόν*** – sto, kilo od ***χίλιοι*** – hiljadu, mega od ***μέγας*** – veliki, giga od ***γίγα*** – džin, tera od ***τέρας*** – monstrum).

Prevedite: Bio sam zarobljen u takvoj saobraćajnoj gužvi da mi je bilo potrebno mikrostoleće da pređem pikoparsek a potrošnja goriva je bila dve desetine kvadratnog milimetra. (***Izazov 180e***)

1 Osim internacionalnih mernih jedinica, postoje i takozvane ***provincijske*** jedinice. Većina ovih jedinica je u upotrebi još iz doba starog Rima.Milja je došla od "***milia passum***", što je bilo hiljadu (dvostrukih) koraka, svaki od po oko 1480 mm; današnja nautička milja, nekada određena je kao dužina luka ugla od 1 minura na površini Zemlje, određena je tačno kao 1852 m, Inč je došao od "***uncia/onzia***" (dvanaest – današnja stopa), Funta (pound) od "***pondere*** to weight" korišćena je kao prevod za ***libra*** – vaga – što je i poreklo njene skraćenice lb. Čak je i navika da se nešta razbraja na ***tuce*** (dvanaest) umesto deset rimskoh porekla. Ove i sve ostale slične smešne jedinice – kap što je sistem u kojem sve jedinice počinji na "f", a koje koriste furlong/fortnight za jedinicu brzine – sada su zvanično određene kao umnožak SI jedinica.

PLANKOVE PRIRODNE JEDINICE

Pošto tačan oblik mnogih jednakosti zavisi od sistema jedinica koji se koristi, teoretski fizičari često koriste sisteme jedinica koje su optimizirane da bi jednakosti bile jednostavnije. Izabrane jedinice i vrednosti konstanti iz prirode su relativni. U mikroskopskoj fizici često se koristi sistem Plankovih prirodnih jedinica. On je određen tako što se stavlja da je $c = 1$, $\hbar = 1$, $G = 1$, $k = 1$, $\varepsilon_0 = 1/4\pi$ i $\mu_0 = 4\pi$. Plankove jedinice su stoga određene preko kombinacija osnovnih konstanti; njihov odnos prema SI jedinicama prikazan je u ***Tabeli 29***.[1] Tabela je isto tako korisna za pretvaranje jednakosti napisanih u Plankovim prirodnom jedinicama ponovo u SI jedinice: potrebno je zameniti svaku veličinu X sa X/X_{Pl}. (***Izazov 182e***)

TABELA 29 Plankove (neispravljene) prirodne jedinice

Naziv	**Odrednica**	**Vrednost**
Osnovne jedinice		
Plankova dužina	$l_{Pl} = \sqrt{\hbar G/c^3}$	= 1,6160(12)·10^{-35} m
Plankovo vreme	$t_{Pl} = \sqrt{\hbar G/c^5}$	= 5,3906(40)·10^{-44} s
Plankova masa	$m_{Pl} = \sqrt{\hbar c/G}$	= 21,767(16) µg
Plankova struja	$I_{Pl} = \sqrt{4\pi\varepsilon_0 c^6/G}$	= 3,4793(22)·10^{25} A
Plankova temperatura	$T_{Pl} = \sqrt{\hbar c^5/Gk^2}$	·10^{25} A
Proste jedinice		
Plankova brzina	$v_{Pl} = c$	= 0,3·Gm/s
Plankov moment količine kretanja	$L_{Pl} = \hbar$	= 1,1·10^{-94} Js
Plankov rad	$S_{aPl} = \hbar$	= 1,1·10^{-94} Js
Plankova entropija	$S_{cPl} = k$	= 3,8 yJ/K
Složene jedinice		
Plankova gustina mase	$\rho_{Pl} = c^5/G^2\hbar$	= 5,2·10^{96} kg/m^3
Plankova energija	$E_{Pl} = \sqrt{\hbar c^5/G}$	= 2,0 GJ = 1,2·10^{28} eV
Plankova količina energije	$p_{Pl} = \sqrt{\hbar c^3/G}$	= 6,5 Ns
Plankova snaga	$P_{Pl} = c^5/G$	= 3,6·10^{52} W
Plankova sila	$F_{Pl} = c^4/G$	= 1,2·10^{44} N
Plankov pritisak	$p_{Pl} = c^7/G\hbar$	= 4,6·10^{113} Pa
Plankov o ubrzanje	$a_{Pl} = \sqrt{c^7/\hbar G}$	= 5,6·10^{51} m/s^2
Plankova učestanost	$f_{Pl} = \sqrt{c^5/\hbar G}$	= 1,9·10^{43} Hz
Plankov električni naboj	$q_{Pl} = \sqrt{4\pi\varepsilon_0 c\hbar}$	= ·1,9 aC = 11,7 e
Plankov napon	$U_{Pl} = \sqrt{c^4/4\pi\varepsilon_0 G}$	= 1,0·10^{27} V
Plankova otpornost	$R_{Pl} = 1/4\pi\varepsilon_0 c$	= 30 Ω
Plankov kapacitet	$C_{Pl} = 4\pi\varepsilon_0\sqrt{\hbar G/c^3}$	= 1,8·10^{-45} F
Plankova induktivnost	$L_{Pl} = (1/4\pi\varepsilon_0)\sqrt{\hbar G/c^7}$	= · 1,610^{-42} H
Plankovo električno polje	$E_{Pl} = \sqrt{c^7/4\pi\varepsilon_0\hbar G^2}$	= 6,5·10^{61} V/m
Plankova gustina magnetnog upliva	$B_{Pl} = \sqrt{c^5/4\pi\varepsilon_0\hbar G^2}$	= 2,2·10^{53} T

[1] Prirodne jedinice x_{Pl} navedene ovde su one koje se obično koriste danas, to jest one koje su određene korišćenjem konstante $\hbar$, a ne one koje je Plank izvorno koristio sa $h = 2\pi\hbar$. Elektromagnetne jedinice mogu isto tako da se odrede u jednakostima uz drugačiji činilac od $4\pi\varepsilon_0$: na primer, korišćenjem $4\pi\varepsilon_0\alpha$, uz ***konstantu fine strukture*** α, daje $q_{Pl} = e$. (***Vol. IV, strana 151***). Za objašnjenje brojeva koji stoje u zagradi, pogledati u tekstu koji sledi.

Prirodne jedinice su važne i iz drugog razloga: uvek kada je veličina površno nazvana "beskonačno mala (ili velika)". ispravan izraz bi bio "tako mala (ili tako velika) kao što odgovara ispravljenoj Plankovoj jedinici". Kao što je objašnjeno u celom tekstu, a posebno u poslednjem delu (***Vol. VI, strana 34***), zamena je moguća pošto sve Plankove jedinice predviđaju, unutar korekcionog činioca reda 1, krajnje vrednosti odgovarajuče posmatrane veličine – za neke gornju, a za neke donju granicu. Nažalost, ovi korekcioni činioci nisu još uvek široko poznati. Tačne krajnje vrednosti za svaku posmatranu veličinu u prirodi dobijaju se kada se G zameni sa $4G$ i $4\pi e_0$ sa $4\pi\varepsilon_0\alpha$ u svim Plankovim veličinama. Ove krajnje vrednosti, ili ***ispravljene Plankove jedinice*** su ***stvarne prirodne jedinice***. Prekoračenja ovih krajnjih vrednosi moguće su samo za neke proširene veličine. (Možete li da otkrijete koje su to? (***Izazov 183s***).

DRUGI SISTEMI JEDINICA

Glavni cij istraživanja u fizici velikih energija je izračunavanje jačine svih interakcija; prema tome nije praktično da se stavi da je gravitaciona konstanta G jednaka jedan, kao što je u Plankovom sistemu jedinica. Iz tog razloga, u fizici velikih energija često se samo stavlja $c = \hbar = k = 1$ i $\mu_0 = 1/\varepsilon_0 = 4\pi$[1] ostavljajući u jednakostima samo gravitacionu konstantu G.

U tom sistemu postoje samo osnovne jedinice, ali je njihov izbor slobodan. Često se kao osnovna jedinica odabere standardna dužina, budući da je dužina arhitip nerenih veličina. Najvažnija fizička posmatranja tada se odnose kao

$$
\begin{aligned}
&1/\left[l^2\right]=\left[E^2\right]=[F]=[B]=\left[E_{\text{electric}}\right],\\
&1/[l]=[E]=[m]=[p]=[a]=[f]=[I]=[U]=[T],\\
&\qquad 1=[v]=[q]=[e]=[R]=\left[S_{action}\right]=\left[S_{\text{entropy}}\right]=\hbar=c=k=[\alpha],\\
&[l]=1/[E]=[t]=[C]=[L] \quad \text{i}\\
&[l]^2=1/[E]^2=[G]=[P]
\end{aligned}
\tag{134}
$$

Gde je napisano $[x]$ za jedinicu veličine x. Međutim korišćenje iste jedinice za vreme, kapacitet i induktivitet nije baš po svačijem ukusu, pa zato električari ne koriste ovaj sistem.[2]

Da bi se dobilo saznanje o energijama potrebnim da se posmatra neki efekt tokom proučavanja, često se se kao osnovna jedinica izabere standardna energija. U fizici čestica najuobičajenija jedinica energije je ***elektronvolt*** eV, koja je određena kao kinetička energija dobijena od jednog elektrona kada je ubrzan razlikom električnog potencijala od 1 V ("proton volt" bi bilo bolje ime). Prema tome, ima se 1 eV = $1{,}6\cdot10^{-19}$ J, ili približno

$$1\,\text{eV} \approx \frac{1}{6}\,\text{aJ} \tag{135}$$

što je lakše za pamćenje. Pojednostavljenje $c = \hbar = 1$ daje $G = 6{,}9{:}10^{-57}$ eV^{-2} i omogućava da se koristi jedinica eV i za masu, količinu kretanja, temperaturu, učestanost, vreme i dužinu, uz sledeće povezanosti: 1 eV ≡ $1{,}8\cdot10^{-36}$ kg ≡ $5{,}4\cdot10^{-28}$ Ns ≡ 242 THz ≡ 11,6 kK i 1eV^{-1} = 4,1 fs ≡1,2 μm (***Izazov 184e***)

Da bi se dobio osećaj za jedinicu eV, korisni su sledeći odnosi. Sobna temperatura koja se obično uzima da je 20ºC ili 293 K odgovara kinetičkoj energiji po čestici od 0,025 eV ili 4,0 zJ. Najveća do sada izmerene energija čestice pripada kosmičkom zračenju sa energijom od $3\cdot10^{20}$ eV ili 48 J. (***Ref. 276***). Ovde dole na Zemlji izgrađen je akcelerator je sposoban da proizvede energiju od 105 GeV ili 17 nJ za elektrone i

---

1 Druge odrednice za konstante srazmernosti u elektrodinamici dovode do Gausovog sistema jedinica koji se često koristi u teorijskim izračunavanjima, do Hevisajd-Lorencovog sistema jedinica, elektostatičkog sistema jedinica i elektromagnetnog sistema jedinica, između ostalih. (***Ref. 275***).

2 U ovom popisu l je dužina, E energija, F sila, E_{electric} električno polje, B magnetno polje, m masa, p količina kretanja, a ubrzanje, f učestanost, I električna struja, U napon, T temperatura, v brzina, q naelektrisanje, R otpornost, P snaga, G gravitacijska konstanta.

Na veb strani www.chemie.fu-berlin.de/chemistry/general/units_en.html dat je alat za pretvaranje raznih jedinica jedne u druge.

Istraživači u opštoj teoriji relativnosti često koriste drugačiji sistem jedinica, u kojem se Švarcšildov poluprečnik $r_S = 2Gm/c^2$ koristi za merenje mase, tako što se stavi $c = G = 1$. U tom slučaju masa i dužina imaju istu dimenziju, a $\hbar$ ima dimenziju površine.

antielektrone, a drugi, koji će moći da proizvede energiju od 14 TeV ili 2,2 μJ za protone, biće uskoro završen. Oba su u vlasništvu CERN-a u Ženevi i imaju obim od 27 km

Najniža do sada izmerena temperatura je 280 pK, u sistemu jezgra rodijuma držanog u posebnom sistemu za hlađenje. (***Ref. 277***). Unutrašnjost takvog kriostata mogla biti čak najhladnija tačka u celom svemiru. Kinetička energija po čestici, koja odgovara ovoj temperaturi, takođe je najmanja koja je ikada izmerena: ona odgovara 24 feV, ili 3,8 vJ = $3{,}8 \cdot 10^{-33}$ J. Za izolovane čestice, rekord izgleda drže neutroni: postignute su kinetičke energije manje od 10^{-7} eV, koje odgovaraju de Broljijevoj talasnoj dužini od 60 nm.

ZANIMLJIVOSTI I ZABAVNI IZAZOVI O MERNIM JEDINICAMA

Plankova dužina je otprilike de Broljijeva talasna dužina $\lambda_B = h/mv$ ćoveka koji opušteno hoda (m = 80 kg, v = 0,5 m/s); takvo hodanje se stoga naziva "Plankova šetnja". (***Ref. 278***).

* * *

Plankova masa je jednaka masi od oko 10^{19} protona. To je otprilike masa ljudskog embriona starog oko deset dana.

* * *

Najpreciznije izmerene veličine su učestanosti nekih milisekundnih pulsara, učestanosti izvesnih uskih atomskih prelazaka i Ridbergove konstante atomskog vodonika, koje su mogle da budu izmerene onoliko precizno koliko je precizno određena sekunda. (***Ref. 279***). Prelazak cezijuma koji određuje sekundu ima konačnu širinu linije koja ograničava postignuće preciznosti: granica je oko 14 decimalnih mesta.

* * *

Najprecizniji časovnik koji je ikada izgrađen, korišćenjem mikro talasa, ima stabilnost od 10^{-16} u toku perioda rada od 500 s. (***Ref. 280***). Za duži period rada rekord je u 1997. godini bio 10^{-15}; međutim, vrednost 10^{-17} izgleda da je tehnološki dostižna. (***Ref. 281***). Preciznost satova je ograničena šumom pri merenju kratkih intervala vremena, a pomakom pri merenju dugih intervala vremena, to jest sistemskim efektima. Područje najveće stabilnosti zavisi od tipa časovnika; ono obično leži između 1 ms za optičke časovnike i 5000 s za masere. Pulsari su jedini tip časovnika za koje se još uvek ne zna ovo područje; ono je svakako veće od 20 godina, vreme koje je prošlo od njihovog otkrića do vremena ovog pisanja.

* * *

Najkraće izmereno vreme je je vreme trajanja izvesnih "elementarnih" čestica. Posebno, vreme trajanja izvesnih D mezona izmereno je da je krače od 10^{-23} s. (***Ref. 282***). Takva vremena se mere korišćenjem komore sa mehurićima, gde se fotografiše trag. Možete li da procenite koliko je dug trag? (***Izazov 185s***). (Ovo je trik pitanje – ako vaš trag ne može da se zapazi optičkim mikroskopom, napravili ste grešku u vašem proračunu.)

* * *

Najduže vreme koje se sreće u prirodi je vreme trajanja izvesnih radioizotopa, preko 10^{15} godina, a donja granica nekih raspada protona je preko 10^{32} godina. Ova vremena su prema tome mnogo veća od starosti svemira, koja je procenjena na 14 000 miliona godina. (***Ref. 283***).

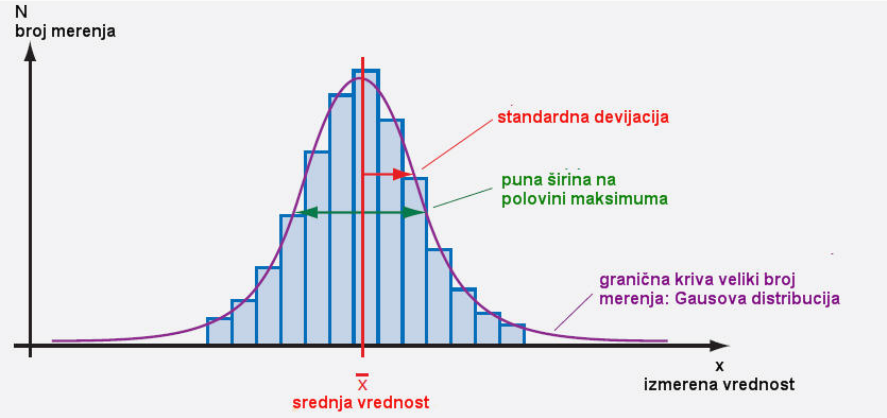
PRECIZNOST I TAČNOST MERENJA

Merenje je osnova fizike. Svako merenje ima ***grešku***. Greške nastaju usled nedostatka preciznosti ili usled nedostatka tačnosti. ***Preciznost*** znači koliko uspešno je rezultat ponovljen kada se merenje ponovi; ***tačnost*** je stepen u kojem merenje odgovara stvarnoj vrednosti.

Nedostatak preciznosti je usled ***slučajnih grešaka***; to se najbolje meri pomoću ***standardne devijacije***, obično prikazane skraćeno kao σ; ona je određena kao:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \overline{x}\right) \qquad (136)$$

gde je $\overline{x}$ srednja vrednost merenja x_i.. (Da li možete da predpostavite zašto je u obrascu korišćeno n – 1 umesto n?) (***Izazov 186s***).



Slika 177 Precizan eksperiment i distribucija merenja. Preciznost je veća ako je širina distribucije manja, tačnost je veća ako je centar distribucije slaže sa stvarnom vrednošću.

Za većinu eksperimenata, uvek kada je rastao broj merenja, distribucija izmerenih vrednosti teži prema normalnoj distribuciji, takođe nazvanom ***Gausova distribucija***. Ova distribucija je prikazana na ***slici 177***, a opisana je izrazom:

$$N(x) = e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} \qquad (126)$$

kvadrat σ^2 standardne devijacije naziva se takođe ***varijansa***. Za 2,35σ Gausove distribucije izmernih vrednosti ima se puna širina na polovini maksimuma. (***Izazov 187e***).

Nedostatak tačnosti je usled ***sistematskih grešaka***; obično se one mogu samo proceniti. Ove procene se često dodaju nasumičnim greškama da bi se dobila ukupna greška eksperimenta, ponekad nazvana i ***totalna nepouzdanost***. (***Ref. 284***). ***Relativna*** greška je odnos između greške i izmerne vrednosti.

Na primer, profesionalno merenje će dati rezultat kao što je 0,312(6) m. Broj u zagradi prikazuje standardnu devijaciju σ, u jedinicama poslednjeg decimala. Kao i gore, predpostavljena je Gausova distribucija za rezultate mernja. Prema rome, vrednost 0,312(6) m podrazumeva da se očekuje da stvarna vrednost leži: (***Izazov 188e***)

- unutar 1σ uz verovatnoću 68,3%, stoga u ovom primeru unutar 0,312 ± 0,006 m
- unutar 2σ uz verovatnoću 95,4%, stoga u ovom primeru unutar 0,312 ± 0,012 m
- unutar 3σ uz verovatnoću 99,73%, stoga u ovom primeru unutar 0,312 ± 0,018 m
- unutar 4σ uz verovatnoću 99,993 7%, stoga u ovom primeru unutar 0,312 ± 0,024 m
- unutar 5σ uz verovatnoću 99,9937, %, stoga u ovom primeru unutar 0,312 ± 0,030 m
- unutar 6σ uz verovatnoću 99,999 943%, stoga u ovom primeru unutar 0,312 ± 0,036 m
- unutar 7σ uz verovatnoću 99,999 999 999 74%, stoga u ovom primeru unutar 0,312 ± 0,041 m

(Imaju li naredni brojevi smisla? (***Izazov 189e***)

Treba zapaziti da standardna devijacija ima jednu cifru; morali bi da budete stručnjak svetskog ranga da biste koristili dve, a ludak ako želite da koristite i više. Ako nije navedena standardna devijacija, podrazumeva se (1). Kao rezultat, kod profesionalaca 1 km i 1000 m ***nisu*** iste dužine.

Šta se događa sa greškom kada se dve izmerene vrednosti *A* i *B* sabiraju ili oduzimaju? Ukoliko su sva merenja nezavisna – ili nepovezana – standardna devijacija za zbir i za razliku je data kao:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_A^2 + \sigma_B^2}$$

Za proizvod i za količnik dve izmerene i nepovezane vrednosti *C* i *D*, rezultat je:

$$\rho = \sqrt{\rho_C^2 + \rho_D^2}$$

gde je ρ pojam za ***relativnu*** standardnu devijaciju.

Predpostavimo da ste izmerili da se neki objekt kreće 1,0 m za 3,0 s: kolika je vrednost izmerene brzine? (***Izazov 190e***).

GRANICE PRECIZNOSTI

Kolike su granice preciznosti i tačnosti? Ne postoji način, čak ni u principu, da se dužina x izmeri uz preciznost veću od oko 61 decimale, pošto je u prirodi odnos između namanje i najveće dužine koja se može izmeriti: $\Delta x/x > l_{Pl}/d_{horiz} = 10^{-61}$. (Da li taj odnos važi i za silu ili zapreminu?) (***Izazov 191e***). U poslednjem volumenu našeg teksta, proučavanja časovnika i metarske trake još više sužavaju ovu teorijsku granicu. (***Vol. VI. strana 78***).

Ali nije teško zaključiti da postoje još uže praktične granice. Nikakva zamišljena mašina ne može izmeriti veličinu uz veću preciznost nego što je merenje prečnika Zemlje unutar najmanje ikada izmerene dužine, od oko 10^{-19} m; to je oko 26 decimala preciznosti. Korišćenje realističnijeg ograničenja sa mašinom od 1000 m podrazumeva granicu od 22 decimale. Ako je merenjem vremena, kako je previđeno gore, postignuta preciznost od 17 decimala, onda je ona u blizini praktičnih granica, pošto odvojeno od veličine, postoji još jedno praktično ograničenje: cena. Zapravo. svako decimalno mesto u preciznosti merenja često znači još jednu cifru u ceni uređaja.

FIZIČKE KONSTANTE

Opšta zapažanja u fizici izvedena su iz onih osnovnih. Kao posledica toga i većina merenja može da se izvede iz onih osnovnih. Najosnovnija merenja su merenja fizičkih konstanti.

U tablicama koje slede date su najtačnije svetske vrednosti najvažnijih konstanti u fizici i osobina čestica – u SI jedinicama i nekoliko drugih uobičajenih jedinica – koje su objavljene u referencama standarda. (***Ref. 285***). Date su srednje svetske vrednosti najboljih merenja izvršenih do sada. Kao i obično, eksperimentalne greške, uključujući kako slučajne tako i sistematske, izražene su navedenom standardnom devijacijom u poslednjoj cifri. Zapravo, iza svakog broja u tablicama koje slede postiji duga priča koja zaslužuje da bude ispričana, ali za koje ovde nema dovoljno mesta. (***Ref. 286***).

U principu, sve kvalitativne osobine materijala mogu da se izračunaju (***Ref. 285***) sa kvantom teorijom, kao i vrednosti izvesnih fizičkih konstanti. Na primer, boja, gustina i osobine elastičnosti mogu da budu predviđene korišćenjem jednakosti za standardni model fizike čestica i vrednosti osnovnih konstanti koje slede. (***Strana 195***)

TABELA 30 Osnovne fizičke konstante

Veličina	**Simbol**	**SI vrednost**	**Nepouz.**[a]
Konstante koje određuju SI jedinice merenja			
Brzina svetlosti u vakuumu [c]	c	299 792 458 m/s	0
Magntna provodnost vakuuma [c]	μ_0	$4\pi\cdot10^{-7}$ H/m = 1,256 637 061 435…μH/m	0
Dielektrična konstanta vakuuma [c]	$\varepsilon_0 = 1/\mu_0 c^2$	8,854 187 817 620…pF/m	0
Orginalna Plankova konstanta	h	$6{,}626\ 069\ 57(52)\cdot10^{-34}$ Js	$4{,}4\cdot10^{-8}$
Redukovana Plankova konstanta, kvant energije	$\hbar$	$1{,}054\ 571\ 726(47\cdot10^{-34}$ Js	$4{,}4\cdot10^{-8}$
Naelektrisanje pozitrona	e	0,160 217 656 5(35) aC	$2{,}2\cdot10^{-8}$
Bolcmanova konstanta	k	$1{,}380\ 6488(13)\cdot10^{-23}$ J/K	$9{,}1\cdot10^{-7}$
Gravitacijska konstanta	G	$6{,}673\ 84(80)\cdot10^{-11}$ Nm^2/kg^2	$1{,}2\cdot10^{-4}$
Gravitacijska konstanta veze	$k = 8\pi G/c^4$	$2{,}076\ 50(25)\cdot10^{-43}$ s^2/kg m	$1{,}2\cdot10^{-4}$
Osnovne konstante (ili nepoznatog porekla)			
Broj dimenzija prostor-vreme		3+1	0[b]
Konstanta fine strukture [d] ili	$\alpha = \dfrac{e^2}{4\pi\varepsilon_0\hbar c}$	1/137,035 999 074(44)	$3{,}2\cdot10^{-10}$
elektromagnetna konstanta veze	$= g_{em}\left(m_e^2c^2\right)$	= 0,007 297 352 5698(24)	$3{,}2\cdot10^{-10}$
Fermijeva konstanta veze [d] ili	$G_F/(\hbar c)^2$	$1,\ 166\ 364(5)\cdot10^{-5}$ GeV^{-2}	$4{,}3\cdot10^{6}$
konstanta slabe veze	$\alpha_w\left(M_Z\right) = g_w^2/4\pi$	1/30,1(3)	$1\cdot10^{-2}$
Ugao slabog mešanja	$\sin^2\theta_W\left(\overline{MS}\right)$	0,23124(24)	$1{,}0\cdot10^{-3}$
	$\sin^2\theta_W$ *na ljsci*	0,2224(19)	$8{,}7\cdot10^{-3}$

	$=1-\left(m_W/m_Z\right)^2$		
Konstanta jake veze [d]	$\alpha_s\left(M_Z\right)=g_s^2/4\pi$	0,118(3)	$25\cdot10^{-3}$
Matrica CKM mešanja kvarka	$\lvert V\rvert$	$\begin{pmatrix} 0{,}67428(15) & 0{,}2253(7) & 0{,}00347(16) \\ 0{,}2252(7) & 0{,}97345(16) & 0{,}0410(11) \\ 0{,}00862(26) & 0{,}0403(11) & 0{,}999152(45) \end{pmatrix}$	
Invarijanta Jarlskog	J	$2{,}96(20)\cdot10^{-5}$	
Matrica PMNS mešanja neutina	P	$\begin{pmatrix} 0{,}82 & 0{,}55 & 015+0{,}038i \\ -036+0{,}020i & 0{,}70+0{,}013i & 0{,}61 \\ 0{,}44+0{,}26i & -0{,}45+0{,}017i & 0{,}77 \end{pmatrix}$	
Mase elementarnih čestica (nepoznatog porekla)			
Masa elektrona	m_e	$9{,}109\ 382\ 91(40)\cdot10^{-31}$ kg	$4{,}4\cdot10^{-8}$
Masa miona	m_μ	$5{,}458\ 799\ 0946(22)\cdot10^{-24}$ u	$4{,}0\cdot10^{--10}$
		0,510 998 928(11) MeV	$2{,}2\cdot10^{-8}$
		$1{,}883\ 531\ 475(96)\cdot10^{-28}$ kg	$5{,}1\cdot10^{-8}$
		0,113 248 9267(29) u	$2{,}5\cdot10^{--8}$
		105,658 3715(35) MeV	$3{,}4\cdot10^{--8}$
Tau masa	m_τ	1,776 82(16) GeV/c^2	·
Masa el. neutrina	m_{Ve}	< 2 eV/c^2	·
Masa mion neutrina	m_{Ve}	< 2 eV/c^2	·
Masa tau neutrina	m_{Ve}	< 2 eV/c^2	
Masa gornjeg kvarka	u	1,8 do 3,0 MeV/c^2	
Masa donjeg kvarka	d	4,5 do 5,5 MeV/c^2	
Masa stranog kvarka	s	95(5) MeV/c^2	
Masa čarobnog kvarka	c	1,275(25) GeV/c^2	
Masa dubinskog kvarka	b	4,18(17) GeV/c^2	
Masa vršnog kvarka	t	173,5(1,4) GeV/c^2	
Masa fotona	γ	$<2\cdot10^{-54}$ kg	
Masa W bozona	$W^\pm$	80,385(15) GeV/c^2	
Masa Z bozona	Z^0	91,1876(21) GeV/c^2	
Higsova masa	H	126(1) GeV/c^2	
Masa gluona	$g_{1\ldots8}$	oko 0 MeV/c^2	
Mase složenih čestica			
Masa protona	m_p	$1{,}672\ 621\ 777(74)\cdot10^{-27}$ kg	$4{,}4\cdot10^{-8}$
		1,007 276 466 812(90) u	$8{,}9\cdot10^{-11}$
		938,272 046(21) MeV	$2{,}2\cdot10^{-8}$
Masa neutrona	m_n	$1{,}674{,}927{,}351(74)\cdot10^{-27}$ kg	$4{,}4\cdot10^{-8}$
		1,008 664 916 00(43) u	$4{,}2\cdot10^{-10}$
		939,565 379(21) MeV	$2{,}2\cdot10^{-8}$
Jedinica atomske mase	$m_u = m_{12C}/12 = 1\ u$	1,660 538 921(73) yg	$4{,}4\cdot10^{-8}$

a. Nepouzdanost: standardna devijacija greške merenja.
b. Mereno samo od 10^{-19} do 10^{28} m
c. Odrednica konstante
d. Sve konstante veza zavise od prenosa četverca količine kretanja, kao što je objašnjeno u odeljku za renormalizaciju (***strana 99***). Konstanta fine strukture je tradicionalni naziv za konstantu elektromagnetne veze g_{em} za slučaj prenosa četverca količine kretanja $Q^2 = c^2m_e^2$ koji je najmanji moguć. Kod većih prenosa količine kretanja ona ima veću vrenost, to jest g_{em} ($Q^2 = c^2M_W^2$) ≈1/128. Nasuprot tome, konstanta jake veze ima manju vrednost na višim prenosima količine kretanja, to jest, α_s(34 GeV = 0,14(2)

Zašto sve ove osnovne konstante imaju ovakve vrednosti? Za svaku osnovnu konstantu ***sa dimenzijom***, kao što je kvant energije $\hbar$, numerička vrednost ima samo istorijsko značenje. Ona je $1{,}054\cdot10^{-34}$ Js zato što je SI odredio džul i sekundu. Pitanje zašto vrednost konstante sa dimenzijom nije veća ili manja stoga uvek zahteva da se razume poreklo nekog neimenovanog broja koji određuje odnos između konstante i

odgovarajuće ***prirodne jedinice*** koja je određena pomoću c, G, $\hbar$ i α. Više detalja i vrednosti prirodnih jedinica bilo je navedeno ranije. (***Strana 247***). Shvatanje veličine atoma, ljudi, drveća i zvezda, trajanje procesa u molekulima i atomima, ili mase atomskoh jezgra i planina, podrazumeva shvatanje odnosa između ovih vrednosti i odgovarajuće jedinice u prirodi. Ključ za razumevanje prirode je prema tome razumevanje svih odnosa, pa prema tome i svih konstanti bez dimenzije. Traganje za razumevanjem svih odnosa, uključujući i samu konstantu fine strukture α, kompletno je samo u poslednjem delu naše pustolovine.

Osnovne konstante daju naredna korisna zapažanja uz veliku preciznost.

TABELA 31 Izvedene fizičke konstante

Veličina	**Simbol**	**Vrednost u SI jedinicama**	**Nepouz.**
Talasni otpor vakuuma	$Z_0 = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}$	376,730 313 461 77…Ω	0
Avogadrov broj	N_A	6,022 141 29(227)·10^{23}	4,4·10^{-8}
Lošmitov broj (273,16 K i 101325 Pa)	N_L	2,686 7805(24)·10^{23}	9,1·10^{-7}
Faradejeva konstanta	$F = N_A e$	96 485,3365(21) C/mol	2,2·10^{-8}
Univerzalna gasna konstanta	$R = N_A k$	8,314 4621(75) J/mol K	9,1·10^{-7}
Molarna zapr. ideal. gasa (273,15 K i 101325 Pa)	$V = RT/p$	22,413 968(20) l/mol	9,1·10^{-7}
Ridbergova konstanta	$R_\infty = m_e c\alpha^2/2h$	10 973 731,568 539 m^{-1}	5·10^{-12}
Kvant provodnosti	$G_0 = 2e^2/h$	77,480 917 346(25) μS	3,2·10^{-10}
Kvant magnetnog upliva	$\varphi_0 = h/2e$	2,067 833 758(46) pWb	2,2·10^{-8}
Odnos Jozefsonove učestanosti	$2e/h$	483,597 870(11) T Hz/V	2,2·10^{-8}
Fon Klicingova konstanta	$h/e^2 = \mu_0 c/2\alpha$	25 812,807 4434(84) Ω	3,2·10^{-10}
Borov magnetron	$\mu_B = e\hbar/2m_e$	9,274 009 68(20) yJ/T	2,2·10^{-8}
Klasičan poluprečnik elektrona	$r_e = e^2/4\pi\varepsilon_0 c^2 m_e$	2,817 940 3267(27) fm	9,7·10^{-10}
Komptonova tal. dužina	$\lambda_C = h/m_e c$	2,426 310 2389(16) pm	6,5·10^{-10}
… elektrona	$\lambda\!\!\!^{-}_c = \hbar/m_e c = r_e/\alpha$	0,386 159 268 00(25) pm	6,5·10^{-10}
Borov poluprečnik [a]	$a_\infty = r_e/\alpha$	52,917 721 092(17) pm	3,2·10^{-10}
Kvant cirkulacije	$h/2m_e$	3,636 947 5520(24)·10^{-4} m^2/s	6,5·10^{-10}
Spec. naelektisanje pozitrona	e/m_e	1,758 820 088(39)·10^{11} C/kg	2,2·10^{-8}
Učestanost elektrona u ciklotronu	$f_c/B = e/2\pi m_e$	27,992 491 10(62) GHz/T	2,2·10^{-8}
Magnetni moment elektrona	μ_e	-9,284 754 30(21)·10^{-24} J/T	2,2·10^{-8}
	μ_e/μ_B	-1,001 159 652 180 76(27)	2,6·10^{-13}
	μ_e/μ_N	-1,838 281 970 90(75)·10^3	4,1·10^{-10}
G-faktor elektrona	g_e	-2,002 319 304 361 53(53)	2,6·10^{-13}
Odnos masa mion-elektron	m_μ/m_e	206,768 2843(52)	2,5·10^{-8}
Magnetni moment miona	μ_μ	-4,490 448 07(15)·10^{-26} J/T	3,4·10^{-8}
G-faktor miona	g_μ	-2,002 331 8418(13)	6,3·10^{-10}
Odnos masa proton-elektron	m_p/m_e	1863,152 672 45(75)	4,1·10^{-10}
Specifično naelekrtisanje protona	e/m_p	9,578 833 58(21)·10^7 C/kg	2,2·10^{-8}
Komptonova talasna dužina proton	$\lambda_{C,p} = h/m_p c$	1,321 409 856 23(94) fm	7,1·10^{-10}
Magnetron jezgra	$\mu_N = e\hbar/2m_p$	5,050 783 53(11)·10^{-27} J/T	2,2·10^{-8}
Magnetni moment protona	μ_p	1,410 606 743(33)·10^{-26} J/T	2,4·10^{-8}
	μ_p/μ_B	1,521 032 210(12)·10^{-3}	8,1·10^{-9}
	μ_p/μ_N	2,792 847 356(23)	8,2·10^{-9}
Žiromagnetski odnos protona	$\gamma_p = 2\mu_p/\hbar$	2,675 222 005(63)·10^8 Hz/T	2,4·10^{-8}
G-faktor protona	g_p	5,587 694 713(46)	8,2·10^{-9}
Odnos masa neutron-elektron	m_m/m_e	1838,683 6605(11)	5,8·10^{-10}
Odnos masa neutron-proton	m_n/m_p	1,001 738 419 17(45)	4,5·10^{-10}
Komptonova talasna dužina neutrona	$\lambda_{C,n} = h/m_n c$	1,319 590 9068(11) fm	8,2·10^{-10}
Magnetni moment neutrona	μ_n	-0,966 236 47(23)·10^{-26} J/T	2,4·10^{-7}
	μ_n/μ_B	-1,041 875 63(25)·10^{-3}	2,4·10^{-7}

	μ_n/μ_N	-1,913 042 72(45)	$2{,}4\cdot10^{-7}$
Štefan-Bolcmanova konstanta	$\sigma = \pi^2k^4/60\hbar^3c^2$	56,703 73(21) nW/m^2K^4	$3{,}6\cdot10^{-6}$
Vinova konstanta	$b = \lambda_{max}T$	2,897 7721(26) mmK	$9{,}1\cdot10^{-7}$
		58,789 254(53) GHz/K	$9{,}1\cdot10^{-7}$
Elektron volt	eV	$1{,}602\ 176\ 565(35)\cdot10^{-19}$ J	$2{,}2\cdot10^{-8}$
Konstanta pretvaranja bitova u entropiju	$k\ ln2$	10^{23} bita = 0,956 994 5(9) J/K	$9{,}1\cdot10^{-7}$
Sadržaj energije TNT		3,7 do 4,0 MJ/kg	$4\cdot10^{-2}$

a. Za beskonačnu masu atomskog jezgra

U narednoj tablici su date neka korisna svojstva iz lokalnog okruženja.

TABELA 32 Astronomske konstante

Veličina	**Simbol**	**Vrednost**
Tropska 1900. godina [a]	a	31 556 925,974 7 s
Tropska 1994. godina	a	31 556 925,2 s
Srednji sideralni (zvezdani) dan	d	23 h 56 min 4,090 53 sec
Srednja udaljenost Zemlja – Sunce [b]		149 597 870 691(30) km
Astronomska jedinica [b]	AU	149 597 870 691 m
Svetlosna godina, bazirana na Julijanskoj godini [b]	al	9,460 730 472 5808 Pm
Parsek	pc	30,856 775 806 Pm = 3,261 634 al
Masa Zemlje	$M_{♁}$	$5{,}973(1)\cdot10^{24}$ kg
Geocentrična gravitacijska konstanta	GM	$3{,}986\ 004\ 418(8)\cdot10^{14}\ m^3/s^2$
Gravitacijska dužina Zemlje	$l_{♁} = 2GM/c^2$	8.870 056 078(16) mm
Poluprečnik Zemlje na ekvatoru [c]	$R_{♁\,eq}$	6378,1366(1) km
Poluprečnik Zemlje na polovima [c]	$R_{♁\,p}$	6356,752(1) km
Rastojanje ekvator – pol (prosečno) [c]		10 001,966 km
Sploštenje zemlje [c]	$e_{♁}$	1/298,25642(1)
Prosečna gustina Zemlje	$\rho_{♁}$	$5{,}5\ Mg/m^3$
Starost Zemlje	$T_{♁}$	4,50(4) Ga = 142(2) Ps
Normalna gravitacija Zemlje	g	$9{,}806\ 65\ m/s^2$
Standardni atmosferski pritisk na Zemlji	p_0	101 325 Pa
Poluprečnik Meseca iz pravca Zemlje	$R_{☾\,v}$	1738 km
Poluprečnik Meseca iz druga dva pravca	$R_{☾\,b}$	1737,4 km
Masa Meseca	$M_{☾}$	$7{,}35\cdot10^{22}$ kg
Srednja udaljenost Meseca [d]	$d_{☾}$	348 401 km
Udaljenost Meseca u perigeju		363 Mm (tipično)
		359 861 km (istorijski minimum)
Udaljenost Meseca i apogeju		404 Mm (tipično)
		406 720 km (istorijski maksimum
Ugaona veličina Meseca [e]		0,5181° = 31,08'
		0,49° (minimum)
		0,55° (maksimum)
Prosečna gustina Meseca	$\rho_{☾}$	$3{,}3\ Mg/m^3$
Gravitacija na površini Meseca	$g_{☾}$	$1{,}62\ m/s^2$
Atmosferski pritisak na Mesecu	$p_{☾}$	od 10^{-10} Pa (noću) do 10^{-7} Pa (danju)
Masa Jupitera	$M_{♃}$	$1{,}90\cdot10^{27}$ kg
Poluprečnik Jupitera na ekvatoru	$R_{♃}$	71,398 Mm
Poluprečnik Jupitera na polovima	$R_{♃}$	67,1(1) Mm

Prosečna udaljenost Jupitera od Sunca	$D_{♃}$	778 412 020 km
Gravitacija na površini Jupitera	$g_{♃}$	24,9 m/s^2
Atmosferski pritisak na Jupiteru	$p_{♃}$	od 20 kPa do 200 kPa
Masa Sunca	$M_\odot$	1,988 43(3)·10^{30} kg
Gravitacijska dužina Sunca	$2GM_\odot/c^2$	2,953 250 08(5) km
Heliocentrična gravitacijska konstanta	$GM_\odot$	132,712 440 018(8)·10^{18} m^3/s^2
Sjaj Sunca	$L_\odot$	384,6 384,6 W
Poluprečnik Sunca na ekvatoru	$R_\odot$	695,98(7) Mm
Ugaona veličina Sunca		0,53° prosečno, minimum 4.07.1888. (afel) maksimum 4.01.1952. (perihel)
Prosečna gustina Sunca	$\rho_\odot$	1,4 Mg/m^3
Prosečna ugaljenost Sunca	AU	149 597 870,691(30) km
Starost Sunca	$T_\odot$	4,6 Ga
Solarna brzina oko centra galaksije	$v_{\odot g}$	220(20) km/s
Solarna brzina prema pozadini svemira	$v_{\odot b}$	370,6(5) km/s
Gravitacija na površini Sunca	$g_{\odot b}$	274 m/s^2
Najmanji fotosferični pritisak Sunca	$p_{\odot b}$	15 kPa
Udaljenost od centra Mlečnog puta		8,0(5) kpc = 26.1(1,6) kal
Starost Mlečnog puta		13,6 Ga
Veličina Mlečnog puta		oko 10^{21} m ili 100 kal
Masa Mlečnog puta		10^{12} solarne mase, oko 2·10^{42} kg
Najdalje poznato jato galaksije	SXDF-XCLJ 0218-0510	9,6·10^9 al

a. Određuje konstantu od proletnje ravnodnevice do proletnje ravnovnevice; koristila se za odrednicu sekunde. (Upamtite: π sekundi je oko nanostoleća.) Vrednost za 1990 je manja za oko 0,7 s što odgovara usporenju od otprilike 0,2 ms/godišnje. (Pazite: zašto?) (***Izazov 192s***). Postoji empirijski obrazac za promenu dužine godine tokom vremena. (***Ref. 287***)

b. Zaista iznenađujuća preciznost za srednje rastojanje Zemlja-Sunce, od samo 30 m, posledica je prosečnog vremena signala kojeg šalje Viking u orbiti i spušten na Mars, a koji su primani u periodu većem os 20 godina. Zapazite da *International Astronomical Union* razlikuje srednje rastojanje Zemlja-Sunce od same ***astronomske jedinice***; koja je kasnije određena i tačne dužine. Isto tako svetlosnu godinu je odredio IAU kao tačan broj. Za više detalja, pogledati: www.iau.org/public/measuring .

c. Oblik Zemlje je preciznije opisan sa World Geodetic System. Poslednje izdanje datira iz 1984. godine. Za opširnije predstavljanje njene pozadine i detalja, pogledajte veb stranu www.wgs84.com. Godine 2000. International Geodesic Union prečistila je podatke. Poluprečnici i spljoštenost dati ovde su oni uzeti iz "mean tide system". Oni se razlikuju od onih u "zero tide system" i u ostalim sistemima za 0,7 m. Detalji su dovoljni za posebnu nauku.

d. Mereno od centra do centra. Da se nađe precizan položaj Meseca na nebu na određen datum, pogledajte veb stranu www.fourmilab.ch/earthview/moon_ap_per.html. Za položaje planeta pogledajte veb stranu www.fourmilab.ch/solar/solar.html i ostale strane na istom mestu

e. Uglovi su određeni na sledeći način: 1° = π/180 rad, 1' = 1°/60, 1"= 1'/60. Stare mere "third minute" i "fourth minute", svaki za 1/60 puta manji od predhodnog, nisu više u upotrebi. ("Minut" u orginalu znači "vrlo malo", kao što je zadržano u savremenom engleskom jeziku.)

Izvesne osobine prirode u celini nabrojane su u narednoj tabeli. (Ako želite izazov, možete li da odredite da li je navedena bilo koja osobina samog svemira?) (***Izazov 193s***)

TABELA 33 Kosmološke konstante

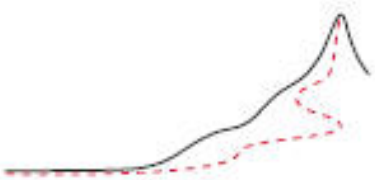
Veličina	**Simbol**	**Vrednost**
Kosmološka konstanta	Λ	oko $1\cdot10^{-52}$ m^{-2}
Starost svemira [a]	t_0	$4{,}333(53)\cdot10^{17}$ s = $13{,}8(0.1)\cdot10^{9}$ a
(određena iz prostor-vreme, preko proširenja opšte teorije relativnosti)		
Starost svemira [a]	t_0	preko $3{,}5(4)\cdot10^{17}$ s = $11{,}5(1{,}5)\cdot10^{9}$ a
(određena iz materije, preko galaksija i zvezda, korišćenjem kvantne teorije)		
Hablov parametar [a]	H_0	$2{,}3(2)\cdot10^{-18}$ s^{-1} = $0.73(4)\cdot10^{-10}$ a^{-1}
= $h_0\cdot100$ km/sMpc = $h_0\cdot1{,}0227\cdot10^{-10}$ a^{-1}		
Redukovan Hablov parametar [a]	h_0	0,71(4)
Parametar usporavanja [a]	$q_0 = -(\ddot{a}/a)_0/H_0^2$	-0,66(10)
Udaljenost horizonta svemira [a]	$d_0 = 3ct_0$	$40{,}0(6)\cdot10^{26}$m = 13,0(2) Gpc
Topologija svemira [a]		obično do 10^{26} m
Broj dimenzija svemira		3 (do udaljenosti do 10^{26} m)
Kritična gustina	$\rho_c = 3H_0^2/8\pi G$	$h02\cdot1{,}878\ 82(24)\cdot10^{-26}$ kg/m^3
… svemira		= $0{,}95(12)\cdot10^{-26}$ kg/m^3
Parametar (totalne) gustine [a]	$\Omega_0 = \rho_0/\rho_c$	1,02(2)
Parametar Bajronove gustine [a]	$\Omega_{B0} = \rho_{B0}/\rho_c$	0,044(4)
Parametar gustine hladne tamne materije [a]	$\Omega_{CDM0} = \rho_{CDM0}/\rho_c$	0,23(4)
Parametar gustine neutrina [a]	$\Omega_{\nu0} = \rho_{\nu0}/\rho_c$	0,001 do 0,05
Parametar gustine tamne energije	$\Omega_{X0} = \rho_{X0}/\rho_c$	0,73(4)
Parametar stanja tamne energije	$w = p_X/\rho_X$	-1,0)2)
Masa bariona	m_b	$1{,}67\cdot10^{-27}$kg
Gustina barionskog broja		0,25(1) / m^3
Gustina svetleće materije		$3{,}8(2)\cdot10^{-28}$ kg/m^3
Broj zvezda u svemiru	n_s	$10^{22\pm1}$
Broj bariona u svemiru	n_b	$10^{81\pm1}$
Mikrotalasna temperatura pozadine [b]	T_0	2,725(1) K
Broj fotona u svemiru	n_γ	10^{89}
Gustina energije fotona	$\rho_\gamma = \pi^2k^4/15T_0^4$	$4{,}6\cdot10^{-31}$ kg/m^3
Gustina broja fotona		410,89/cm^3 ili 400/cm^3 (T_0/2,7 K^3
Gustina amplitude perturbacija	$\sqrt{S}$	$5{,}6(1{,}5)\cdot10^{-6}$
Amplituda gravitacijskih talasa	$\sqrt{T}$	$< 0{,}71\sqrt{S}$
Fluktuacija mase u 8Mpc	σ_8	0,84(4)
Skalarni indeks	n	0,93(3)
Tekući skalarni indeks	$dn/d\ln k$	-0,03(2)
Plankova dužina	$l_{Pl} = \sqrt{\hbar G/c^3}$	$1{,}62\cdot10^{-35}$ m
Plankovo vreme	$t_{Pl} = \sqrt{\hbar G/c^5}$	$5{,}39\cdot10^{-44}$ s
Plankova masa	$m_{Pl} = \sqrt{\hbar c/G}$	21,8 µg
Trenutaka u istoriji [a]	t_0/t_{PI}	$8{,}7(2{,}8)\cdot10^{60}$
Tačke prostor-vreme	$N_0 = (R_0/l_{PI})^3$	$10^{244\pm1}$
unutar horizonta	(t_0/t_{PI})	
Masa unutar horizonta	M	$10^{54\pm1}$ kg

a. Indeks 0 odnosi se na vrednost na današnji dan.

b. Zračenje potiče kada je svemir bio star 380 000 godina i imao temperaturu od oko 3000 K; fluktuacija ΔT_0 koja je dovela do formiranja galaksija danas iznosi oko 16 ± 4 µK = $6(2)\cdot10^{-6}$ T_0. (***Vol. II, strana 179***).

KORISNI BROJEVI (***Ref. 288***)

π	3.14159 26535 89793 23846 26433 83279 50288 41971 69399 37510(5)
e	2.71828 18284 59045 23536 02874 71352 66249 77572 47093 69995(9)
γ	0.57721 56649 01532 86060 65120 90082 40243 10421 59335 93992(3)
$ln\,2$	0.69314 71805 59945 30941 72321 21458 17656 80755 00134 36025(5)
$ln 10$	2.30258 50929 94045 68401 79914 54684 36420 76011 01488 62877(2)
$\sqrt{10}$	3.16227 76601 68379 33199 88935 44432 71853 37195 55139 32521(6)



DODATAK B
SVOJSTVA SLOŽENIH ČESTICA

U tabeli koja sledi naveden je pregled najvažnijih složenih čestica. Tabela se u poslednje vreme nije puno promenila, uglavnom zbog velikog napretka koji je postignut još sredinom dvadesetog veka. U principu, korišćenjem standardnog modela fizike čestica (***strana 195***) mogu da se zaključe ***sva*** svojstva složenih materija i zračenja. Posebno, slede sva svojstva predmeta koje srećemo u svakodnevnom životu. (Možete li da objasnite kako sledi veličina jabuke iz standardnog modela?) (***Izazov 194s***). Najvažnija svojstva složenih materijala grupisana su u tabeli koja sledi.

TABELA 34 Svojstva odabranih složenih materijala

Složena materija	**Masa *m*, kvantni broj[a]**	**Vreme trajanja *τ*, glavni način raspada**	**Veličina (prečnik)**
Mezoni (hadroni, bozoni) (odabrani između više od 130 poznatih vrsta)			
Pion π^0 $(u\bar{u}-d\bar{d})/\sqrt{2}$	134,9764(6) MeV/c^2 $I^G(J^{PC})=1^-(0^{+-})$, $S=C=B=0$	84(6) as, 2γ 98,798(32)%	≈ 1 fm
Pion π^+ (ud)	139,56995(35) MeV/c^2 $I^G(J^P)=1^-(0^-)$, $S=C=B=0$	26,030(5) ns $\mu^+\nu_\mu$ 99,9877(4)%	≈ 1 fm
Kaon K_S^0	$m_{K_S^0}$	89,27(9) ps	≈ 1 fm
Kaon K_L^0	$m_{K_S^0}+3,491(9)$ μeV/c^2	51,7(4) ns	≈ 1 fm
Kaon $K^\pm(u\bar{s},\bar{u}s)$	493,677(16) MeV/c^2	12,386(24) ns $\mu^+\nu_\mu$ 63,51(18)% $\pi^+\pi^0$ 21,16(14)	≈ 1 fm
Kaon $K^0(ds)(50\%K_S,50\%K_L)$	497,672(31) MeV/c^2	n.a	≈ 1 fm
Svi kaoni $K^\pm,K^0,K_S^0,K_L^0$	$I(J^P)=½(0^-)$, $S=\pm1, B=C=0$		≈ 1 fm
Barioni (hadroni, fermioni) (odabrani između više od 100 poznatih vrsta)			
Proton *p* ili N^+ (uud)	1,67262158(13) yg = = 1,00727646688(13) u = = 938,271998(38) MeV/c^2 $I(J^P)=½(½^+)$, $S=0$ žiromagnetni odnos μ_p/μ_N = 2,792847337(29) moment elektr. dipola d = (-4±6)·10^{-26} *e*m	τ_{total} > 1,6·10^{25} a, $\tau(p\to e^+\pi^0)$ > 5,5·10^{32} a	0,89(1) fm (***Ref. 289***)
Neutron[b] ili N^0 (udd)	1,67492716(13)yg = = 1,00866491578(55) u = = 937,565330(38) MeV/c^2 $I(J^P)=½(½^+)$, $S=0$ žiromagnetni odnos μ_n/μ_N = -1,91304272(45) moment el.dipola d_n = (-3,3±4,3)·10^{-28} *e*m el. polarizativnost α = 0,98(23)·10^{-3} fm^3		≈ 1 fm

Omega Ω^- (sss)	1672,43(32) MeV/c^2 žiromagn. odnos μ_Ω/μ_N =-1,94(22)	82,2(1,2) ps ΛK^- 67,8(7)% $\Xi^0\pi^-$ 23,6(7)%	≈ 1 fm
Složeno zračenje: gluonske lopte			
kandidat gluonske lopte $f_0(1500)$ nejasan status	1503(11) MeV $I^G\left(J^{PC}\right)=0^+\left(0^{++}\right)$	puna širina 120(19) MeV	≈ 1 fm
Atomi (odabrani između 114 poznatih elemenata sa preko 2000 poznatih čestica jezgara) (Ref. 290)			
Vodonik (^{1}H) (najlakši)	1,007825032(1) u = 1,6735 yg		2 – 53 pm
Antivodonik[c]	1,007 u = 1,67 yg		2 – 53 pm
Helijum (^{4}He) (najmanji)	4,002603250(1) = 6,6465 yg		2 – 31 pm
Ugljenik (^{12}C)	12 u = 19,926482(12) yg		2 – 77 pm
Bizmut (^{209}Bi*) (najkraće vreme trajanja i najređi)	209 u	0,1 ps (***Ref. 291***)	
Tantalijum (^{180m}Ta) (drugi po dužini trajanja, radioaktivan)	180 u	> 10^{15} a (***Ref. 292***)	
Bizmut (^{209}Bi) (najduže vreme trajanja, radioaktivan)	209 u	1, 9(2):10^{19} a	
Francijum (^{223}Fr) (najveći)	223 u	22 min	2 – 0,28 nm
Element 118 (^{289}Uuo) (najteži)	294 u	0,9 ms	
Molekuli[d] (odabrani između viiše od 10^7 poznatih tipova)			
Vodonik (H_2)	≈ 2 u	> 10^{25} a	
Voda (H_2O)	≈ 18 u	> 10^{25} a	
ATP (adenozintrifosfat)	507 u	> 10^{10} a	cca 3 nm
Ljudski Y hromozom	70·10^6 osnovnih parova	> 10^6 a	cca 50 nm neuvijen
Ostale složenosti			
Nervna ćelija plavog kita	≈ 1 kg	≈ 50 a	20 m
Ćelija (crveno krvno zrnce)	0,1 ng	7 plus 120 dana	≈ 10 µm
Ćelija (sperma)	10 pg	≈ 5 dana neoplođen	dug 60 µm 3x5 µm glava
Ćelija (jajna ćelija)	1 µg	preko 4000 miliona godina, oplođena	≈ 120 µm
Ćelija (*Eshericia coli*)	1 pg	4000 miliona godina	2 µm telo
Jabuka	0,1 kg	4 sedmice	0,1 m
Odrastao čovek	35 m < m < 350 kg	τ ≈ 2,5·10^9 s (***Ref. 293***) ≈ 600 miliona udisaja ≈ 2500 miliona otkucaja srca < 122 a 60% H_2O + 40% prašina	≈ 1,7 m
Najteža živa stvar (kolonija drveća jasike)	6,6:10^6 kg	> 130 a	> 4 km
Velike složenosti	Videti ***Tabelu 33*** na ***strani 192, Vol, I***		

Primedbe (videti takođe primedbe uz ***Tabelu 22***) (***strana 198***)

a. Paritet C naboja je određen samo za neke neutralne čestice, naime za one koje se razlikuju od svojih antičestica. Za neutralne mezone paritet naboja je dat sa $C = (-1)^{L+S}$ gde je L orbitalni moment količine kretanja.

P je paritet pri inverziji prostora $r \to -r$. Za mezone se to odnosi na orbitalni moment količine kretanja L preko $P = (-1)^{L+1}$.

Električna polarizacija određena na ***strani 57 Vol. III*** predviđa se da nestaje kod svih elementarnih čestica.

G-paritet je određen samo za mezone i dat je sa $G = (-1)^{L+S+I} = (-1)^I C$.

b. Neutronske veze u jezgru imaju vreme trajanja najmanje 10^{20} godina.

c. Prvi ***antiatomi***, sastavljeni od antielektrona i anti protona, napravljen je januara 1966. godine u CERN, Ženeva. (***Ref. 295***). Sva svojstva antimaterije koja su do sada proverena u saglasnosti su teorijskim predviđanjima.

d. Broj postojećih molekula je nekoliko reda veličine veći od broja molekula koji su analizirani i dobili naziv.

Najvažnije složene materije su ***atomi***. Njihova veličina, struktura i interakcije odeđuju svojstva i boju svako-dnevnih objekata. Vrste atoma, u hemiji takođe pod nazivom ***elementi***, najčešće su navedeni u takozvanom ***periodnom sistemu***, gde su grupisani atomi sličnih svojstava u redovima i kolonama. To je dato u ***Tabeli 35*** i rezultat je različitih načina na koje mogu da se kombinuju protoni, neutroni i elektroni da bi obrazovali agregate.

TABELA 35 Periodni sistem elemenata sa njihovim atomskim brojevima. (Preuzeto iz Wikipedia)

grupa → / perioda ↓	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	**	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Fl	115 Uup	116 Lv	117 Uus	118 Uuo
* lantanoidi	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu			
** aktinoidi	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr			

Hemijske serije periodnog sistema elemenata

alkalni metali	zemno-alkalni metali	lantanoidi	aktinoidi	prelazni metali
slabi metali	metaloidi	nemetali	halogeni elementi	plemeniti gasovi

Uporedno sa tabelom periodnog sistema atoma postoji tabela za mezone (sastavljene od dva kvarka) i za barione (sastavljene od tri kvarka). Ovde nisu navedene tabele za mezone i za barione; obe se mogu naći u *Review of Particle Physics* i na veb strani pdg.web.cern.ch. Zapravo, tabela bariona još uvek ima brojna prazna mesta. Barioni koji nedostaju izuzetno su teški i kratkog vremena trajanja (što znači da je skupo da se naprave i otkriju), a ne očekuje se da će njihovo otkriće dati nove dublje uvide.

Bolje obrađena tabela periodnog sistema može da se nađe na veb strani chemlab.pc.maricopa.edu/periodic. Na ***strani 51*** dato je najlepše o svemu tome. ***Atomski broj*** daje broj protona (i elektrona) koji se nalaze u atomu datog elementa. Broj određuje hemijsko ponašanje elementa. Većina elemenata – ali ne svi – do 92 se nalaze na Zemlji; ostali su stvoreni u laboratorijama. Najviši otkriveni element je 118. U poznatom slučaju prevare istraživača, naučnik je 1990-ih obmanuo dve cele istraživačke grupe tvrdeći da je napravio i posmatrao elemente 116 i 118. Oba elementa su kasnije nezavisno napravljena i posmatrana.

U današnje vreme obimni fizički i hemijski podaci dostupni su za svaki element. (***Ref. 296***). Fotografije čistih elemenata prikazane su na ***slici 19***. (***Strana 51***). Elementi iz iste grupe ponašaju se u hemijskim reakcijama na sličan način. ***Periodičnost*** određuje ponavljanja ovih sličnosti.

Elementi iz grupe 1 su ***alkalni metali*** (mada je izuzetak vodonik kao gas), oni iz grupe 2 su alkalni zemni metali. Isto tako su metali ***aktinoidi*** i ***lantanoidi***, kao i elementi grupa 3 do 12 koji se nazivaju ***prelazni*** ili ***teški metali***. Elementi grupe 16 nazivaju se ***halkogeni***, to jest rudonosni; grupa 17 su ***halogeni***, to jest tvorci soli i grupa 18 su inertni ***plemeniti gasovi*** koji ne prave (skoro) hemijska jedinjenja. Grupe 13, 14 i 15 sadrže metale, polumetale, tečnost samo na sobnoj temperaturi – brom – i nekoliko gasova i nemetala; ove grupe nemaju posebna imena. Grupe 1 i 13 do 17 važne su za hemiju života; zapravo 96% žive materije načinjeno je od C, O, N, H;[1] skoro 4% od P, S, Ca, K. Na, Cl; elementi u tragovima, kao što su Mg, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb, Sn, Li, Mo, Se, Si, I, F, As, B, čine ostatak. Poznato je da je preko 30 elemenata suštinski za život životinja. Potpun popis još uvek nije poznat; elementi kandidati za proširenje liste su Al, Br, Ge i W.

Više elemenata postoji u verzijama sa različitim brojem neutrona u njihovim jezgrima, pa prema tome različitih masa; ovi različiti ***izotopi*** – nazvani tako pošto se nalaze na ***istom mestu*** u periodičnom sistemu – ponašaju se na isti način u hemijskim reakcijama. Postoji preko 2000 izotopa. (***Ref. 290***) i (***Ref. 297***).

TABELA 36 Elementi, njihovi atomski brojevi, prosečna masa poluprečnik atoma i glavna svojstva

Naziv	**Sim.**	**At. broj**	**Pros. masa[a] atom.jed. (greška), najduže trajanje**	**polupr. atoma[c] (pm)**	**Glavna svojstva, (naziv)[b], datum otkrića i upotreba**
Ajnštajnijum[b]	Es	99	(252,0830(1)), 472(2) d	n.a.	*Aktinoid* napravljen u laboratoriji, radioaktivan (po Albertu Ajnštajnu), 1952. , ne koristi se
Aktinijum[b]	Ac	89	(227,0277(1)), 21,77(2) a	(188)	*Aktinoid* jako radioaktivan (grčki *aktis* – zrak); 1899., koristi se kao izvor alfa emisije
Aluminijum	Al	13	26,981538(8), stabilan	118c, 143m	*Slabi metal* (latinski *alumen* stipsa) 1827, koristi se u konstrukciji mašina i u živim bićima
Americijum[b]	Am	95	(243,0614(1)), 7,37(2) ka	(184)	*Aktiniod* radioaktivan (italijanski *America* od Amerigo). 1945., koristi se u detektorima dima
Antimon	Sb	51	121, 760(1)[f], stabilan	137c, 159m, 205v	*Polumetal* otrovan (preko arapskog i latinskog *stibium*, isto iz grčkog,i egipatskog za jedan od njegovih minerala), antički, boji gumu koristi se u medicini, sastojak enzima.
Argon	Ar	18	39,948(1)[f], stabilan	(71n)	*Plemeniti gas* (grčki *argos* neaktivan, od *anergos* bez energije), 1894., treći sastojak vazduha, koristi se u zavarivanju i u laserima
Arsen	As	33	74,92160(2), stabilan	120c, 185v	*Polumetal* otrovan (grčki *arsenikon* ukrotiitelj muškaraca), antički, za trovanje golubova i dopiranje poluprovodnika
Astat[b]	At	85	(209,9871(1)), 8,1(4) h	(140)	*Halogen* radioaktivan (grčki *astatos* nestabilan), 1940., ne koristi se
Azot	N	7	14,0067(2)[f], stabilan	70c, 155v	*Nemetal* dvoatomski gas (grčki *nitre* šalitra), 1772., ima ga u vazduhu, u živim organizmima, viagra, đubriva, eksplozivi
Bakar	Cu	29	63,546(3)[f], stabilan	128m	*Prelazni metal* crven (Latinski *cuprum* od ostrva Kipar), antički, deo mnogih enzima, električni provodnici, bronza, mesing i druge legure, algicid
Barijum	Ba	56	137,327(7), stabilan	224m	*Zemno-alkalni metal* (grčki *bari* težak), 1808. koristi se u vakuumskim cevima, slikarstvu, industriji ulja, pirotehnici i dijagnozi pomoću rendgenovih zraka
Berilijum	Be	4	9,012182(3), stabilan	106c, 113m	*Zemno-alkalni metal*, otrovan (grčki *berilos* mineral), 1797., koristi se u lakim legurama i nuklearnoj industriji kao moderator.

[1] Prosečna formula života je približno $C_5H_{40}O_{18}N$.

Berkelijum[b]	Bk	97	(247,0703(1)), 1,4(3) ka	n.a.	*Aktinoid* napravljen u laboratoriji, verovatno metal. (prema Berkeley grad u SAD), 1949., ne koristi se jer je redak.
Bizmut	Bi	83	208,98040(1), stabilan	170m, 215v	*Slabi metal*, diamagnetni (latinski, preko nemačkog *weisse Masse* bela masa), 1753., koristi se u magnetima, legurama, protiv požara, kometici, kao katlizator, nuklearna industrija.
Bor	B	5	10,811(7)[f], stabilan	83c	*Metaloid*, poluprovodnik (latinski *borax* iz arapskog i persijskog za brilijant), 1808., koristi se u staklu, izbeljivačima, pirotehnici, raketnom gorivu, medicini
Borijum[b]	Bh	107	(264,12(1)), 0,44 s[g]	n.a.	*Transaktinid* napravljen u laboratoriji (prema Niels Bohr-u)1981., nalazi se u nuklearnim reaktorima, ne koristi se.
Brom	Br	35	79,904(1), stabilan	120c, 185v	*Halogen*, crveno-smeđa tećnost (grčki *bromos* jak miris), 1826., fungicid, fotografija, prečišćavanje vode, boje, medicina
Cerijum	Ce	58	140,116(1)[f], stabilan	183m	*Lantanoid*, metal (prema *Cereri*, rimskoj boginji), 1803., upaljači cigareta, omotač inkadescentih gasova, proizvodnja stakla, peći sa samočišće-njem, osvetljenje grafitnim lukom u filmskoj industriji, katalizatori, metalurgija
Cezijum	Cs	55	132,9054519(2), stabilan	273m	*Alkalni metal* (latinski *caesius* nebo plav), 1860., rešetka u elektronsim cevima, fotoelektrične ćelije, jonski pogoni, atomski časovnici
Cink	Zn	30	65,409(4), stabilan	139m	*Prelazni metal* (nemački *Zinke* ispupčenje), antički, zaštita gvožđa od rđe
Cirkonijum	Zr	40	91,224(2)[f], stabilan	160m	*Prelazni metal* (od minerala *cirkona*, prema arapskom *zargum* boja zlata), 1789., hemija i hirurški instrumenti, nuklearna industrija.
Darmštatijum[b]	Ds	110	(271) 1,6 min[g]	n.a.	*Transaktinid* napravljen u laboratoriji (prema *Darmstadt*, grad u Nemačkoj), 1994., ne koristi se
Disprozijum	Dy	66	162,500(1)[f] , stabilan	177m	*Lantanoid*, metal (grčki *disprositos* teško se dobija), 1886., laserski materijal, materijal za izvor infracrvenih zraka i nuklearna indusrtija
Dubnijum[B]	Db	105	(262,1141(1)), 34(5) s	n.a.	*Transaktinid* napravljen u laboratoriji u malim količinama, radioaktivan (prema *Dubna*, grad u Rusiji), 1967., ne koristi se. (bio jepoznat kao hanijum.)
Erbijum	Er	68	167,259(3)[f], stabilan	176m	*Lantanoid*, metal (prema Ytterby, švedski grad), 1843., koristi se u metalurgiji i opt. vlaknima
Europijum	Eu	63	151,964(1)[f],	204m	*Lantanoid*, metal (prema kontinentu Evropa), 1901, koristi se u TV ekranima kao crvena fosforescencija.
Fermijum[b]	Fm	100	(257,0901(1)), 100,5(2) d	n.a.	*Aktinoid* napravljen u laboratoriji (prema Enrico Fermiju), 1952., ne koristi se
Flerovijum[b]	Fl	114	(289), 2,7 s[b]	n.a.	*Transaktinid* napravljen u laboratoriji, supertežak hemijski element, jako radioaktivan (prema Georgiju Flerovu, ruskom fizičaru), 1999., ne koristi se,
Fluor	F	9	18,9984032(5), stabilan	62c, 147v	*Halogen*. (prema fluorinu, mineralu, od grčkog *fluo* teče), 1886., koristi se u polimerima i zubnim pastama.
Fosfor	P	15	30,973762(2), stabilan	109c, 180v	*Nemetal* smolasto čvrsto telo otrov (grčki *phosphoros* nosač svetlosti), 1669., đubriva, staklo, porcelan, čelici i legure, živi organizmi, kosti

Francijum	Fr	87	(223,0197(1)), 22,0(1) min	(278	*Alkalni metal* radioaktivan (prema francuskoj), 1939., ne koristi se.
Gadolinijum	Gd	64	157(25)[f], stabilan	10m	*Lantanoid*, metal.(prema Johan Gadolin), 1880., koristi se u laserima i fosforom
Galijum	Ga	31	69,723(1), stabikan	125c, 141m	*Slab metal* skoro tečan (prema latinskom imenu pronalazača i njegovoj naciji, *Francuska*), 1875. koristi se u optoelektronici
Germanijum	Ge	32	72,64(1), stabilan	122c, 195v	*Metaloid* poluprovodnik. (Prema *Germania* suprotno galijumu), 1886., koristi se u elektronici.
Gvožđe	Fe	26	55,845(2), stabilan	127m	*Prelazni metal* (indo-evropski *ajos*, latinski *ferrum*), antika, koristi se u metalurgiji
Hafnijum	Hf	72	178,49(2)[c], stabilan	158m	*Prelazni metal* (latinski naziv za *Kopenhagen*), 1923., koristi se za legure, inkadescente žice
Hasijum[b]	Hs	108	(277) 16,5 min[g]	n.a.	*Transaktinid*, radioaktivan (latinski od naziva za nemački grad *Hessen*), 1984., ne koristi se
Helijum	He	2	4,002602(2)[f], stabilan	(31n)	*Plemenit gas* (grčki *helios* Sunce) gde je otkriven 1895., koristi se u balonima, zvezde, pogonski gasovi, i kriogenika.
Hlor	Cl	17	35,453(2)[f], stabilan	102c, 175v	*Halogen* zelen (grčki *chloros* žuto-zelen), 1774., voda za piće, polimeri, papir, boje, tekstili, medicina, insekticidi, rastvarači, slikarstvo, guma
Holmijum	Ho	67	164,93032(2), stabilan	177m	*Lantanid*, metal (prema *Stockholm*, glavni grad Švedske), 1878., legure
Hrom	Cr	24	51,9961(6) stabilan	128m	*Prelazni metal* (grčki *chromos* boja), 1797., očvršćava čelik, čini da čelik ne rđa, legure, galvanizacija, boji staklo u zeleno, katalizator
Indijum	In	49	114,818(3) stabilan	141c, 166m	*Slab metal* (grčki *indikon* indigo), 1863., koristi se za lemljenje i fotoćelije
Iridijum	Ir	77	192,217(3) stabilan	136m	*Prelazni metal* dragocen (grčki *iris* duga), 1804., koristi se za prevlačenje električnih kontakata.
Iterbijum	Yb	70	173,04(3)[f], stabilan	174m	*Lantanoid* kovan teški metal (prema *Ytterby* grad u Švedskoj) , 1794., u superprovodnicima
Itrijum	Y	39	88,90585(2), stabilan	180m	*Prelazni metal*, kovan, lak (prema *Ytterby* grad u Švedskoj), 1794., koristi se u laserima
Jod	I	53	126,90447(3) stabilan	140c, 198v	*Halogen* plavo-crno čvrsto telo (grčki *iodes* ljubičasto),1811., koristi se u fotografijama
Kadmijum	Cd	48	112,411(8)[f], stabilan	157m	*Prelazni metal*, težak (grčki *kadmeia*, mineral cink karbonata gde je otkriven) 1817., galvanizacija, lemljenje, baterije, TV fosforizacija, boje
Kalaj	Sn	50	118,710(7)[f], stabilan	139c, 210v, 162m	*Slab metal*, siv koji kada se savija ispušta zvuk "kalajni plać" (latinski *stanium* stajanje), antika, koristi se u slikarstvu, bronzi, superprovodnicima i za lemljenje
Kalcijum	Ca	20	40,078(4)[f], stabilan	197m	*Zemno-alkalni* metal (latinski *calsis* kreda), antika, čist 1880, nalazi se u stenama i kostima, agens redukcije, legiranje
Kalifornijum[b]	Cf	98	(251,0796(1)), 0,90(5) ka	n.a.	*Aktinoid* napravljen u laboratoriji, verovatno metal, jak emiter neutrona (latinski *calor* toplota i *fornicare* seksati, *zemlja vrućeg seksa*), 1950., koristi se kao izvor neutrona,
Kalijum	K	19	39,0983(1) stabilan	238m	*Alkalni metal* reaktivni laki metal (nemački *Pottasche*, latinski *kalium* iz arapskog *quiliy*, biljka koja se koristi za pravljenje potaše), 1807., deo mnogih soli i stena, bitan za život i za hemijsku industriju, koristi se u đubrivima,

Kirijum[b]	Cm	96	(247,0704(1)), 15,6(5) Ma	n.a.	*Aktinoid*, jako radioaktivan srebrnast (prema Pier i Maria Curie), 1944., korusti se kao radioaktivni izvor zračenja, za dobro protokolisanje.
Kiseonik	O	8	15,9994(3)[f],	66c, 152v	*Nemetal* providan dvoatomski gas (iz grčkog sa značenjem "*onaj što pravi kiseline*"), 1774., koristi se za sagorevanje, regeneraciju krvi, ima ga u većini stena i kamenja, u bezbroj jedinjenja, boji polarnu svetlost u crveno
Kobalt	Co	27	58933195(5) stabilan	425m	*Prelazni metal* feromagnetan (nemački *Kobold* goblin, zao duh), 1694., deo vitamina B_{12}, magnetne legure, legure za velika opterećenja, plava boja emajla, mastilo, ishrana životinja
Kopernicijum[b]	Cn	112	(258) 34s[g]	n.a.	*Transaktinid* napravljen u laboratoriji, izuzetno radioaktivan (prema *Nicolaus Copernicus*), 1996., ne koristi se
Kripton	Kr	36	83,798(2)[f], stabilan	88n	*Plemenit gas* (grčki *kriptos* sakriven), 1898., koristi se u laserima
Ksenon	Xe	54	131,293(6)[f], stabilan	(103n), 200v	*Plemenit gas* (grčki *ksenos* stranac) 1989., koristi se u svetiljkama i laserima
Lantan	La	57	138,90547(7)[f], stabilan	188m	*Lantanoid* reaktivan (grčki *lanthanein* biti skriven), 1839., koristi se u svetiljkama i za specijalna stakla
Lorencijum[b]	Lr	103	(262,11097(1)) 3.6(3) h	n.a.	*Aktinoid*, javlja se u reaktorima (prema *Ernest Lawrence*, tvorac ciklotrona), 1961., ne koristi se
Litijum	Li	3	6,941(2)[f], stabilan	156m	*Alkalni metal*, lak, velike specifične toplote, (grčki *lithos* stena), 1817., koristi se u baterijama, antidepresni lek, legure, nuklearna fuzija i mnoge hemikalije
Livermorijum[b]	Lv	116	(293). 61 ms[g]	n.a.	*Transaktinid* napravljen u laboratoriji, jako radioaktivan (prema *Lawrence Livermore National Laboratory* u SAD), pogrešno u 1999., tačno u 2000., ne koristi se
Lutecijum	Lu	71	174,967(1)[f], stabilan	173m	*Lantanid* metal (prema latinskom *Lutetia* Pariz), 1907., koriti se kao katalizator
Magnezijum	Mg	12	24,3050(6), stabilan	160m	*Zemno alkalni metal* lak uobičajen (iz *Magnezije*, oblast Tesalije, Grčka), 1755., koristi se u legurama, pirotehnici, hemijskim sintezama i medicini, nalazi se u hlorofilu
Majtnerijum[b]	Mt	109	(266,1388(1)), 0,070 s[g]	n.a.	*Transaktinid* radioaktivan, javlja se u nuklearnim reakcijama (prema *Lise Meitner*), 1982., ne koristi se
Mangan	Mn	25	54,938045(5), stabilan	126m	*Prelazni metal*, krt (od italijanskog *manganese* mineral), 1774., koristi se u legurama, boji ametist i permanganate u ljubičasto
Mendeljevijum[b]	Md	101	(258,0984(1)), 51,5(3) d	n.a.	*Aktinoid*, javlja se u nuklearnim reakcijama (prema *D. I. Mendeljejevu*), 1955., ne koristi se
Molibden	Mo	42	95,94(2)[f],	140m	*Prelazni metal* (grčki *molibdos* olovo), 1788., koristi se u legurama, kao katalizator, u enzimima i kao mazivo,
Natrijum	Na	11	22,98976528(2), stabilan	191m	Alkalni metal, lak i reaktivan (arapski *souwad* soda, egipatski i arapski *natrium*), sastojak mnogih soli, sapuna, papira, sode, salpeter, boraks, bitan je za život
Neodijum	Nd	60	144,242(3)[c, f]	182m	*Lantanoid*, mekan srebrnast metal, tamni na vazduhu (grčki *neo* i *didimos* novi blizanac). 1885., koristi se u magnetima

Neon	Ne	10	20,1797(6)[f], stabilan	36n	*Plemenit gas* (grčki *neo* nov), 1898., koristi se u svetiljkama, laserima i kriogenici
Neptunijum[b]	Np	93	237,0482(1), 2,14(1) Ma	n.a.	*Aktinoid*, javlja se u nuklearnim reaktorima, radioaktivan metal (po planeti *Neptun*), 1940., koristi se u detektorima neutrona i u vojne svrhe
Nikl	Ni	28	58,6934(2) stabilan	125m	*Prelazni metal* (nemački *Nickel* zao duh), 1751., koristi se za novac, za nerđajući čelik, baterije i kao katalizator
Niobijum	Nb	41	93,90638(2) stabilan	147m	*Prelazni metal* rastegljiv (grčki *Niobe* mitska kći Tantalosa), 1801., koristi se za lučna zavarivanja, legure, nakit, superprovodnike
Nobelijum[b]	No	102	(259,1010(1)) 58(5) min	n.a.	*Aktinoid* napravljen u laboratoriji, jako radioaktivan (prema *Alfredu Nobelu*), 1958., ne koristi se
Olovo	Pb	82	207,2(1)[c, f], stabilan	175m	*Slab metal*, otrovan, kovan, težak (prema latinskom *plumbim*), antika, koristi se u akumulatorima i kao zaštita od radioaktivnog zračenja, slikarstvu
Osmijum	Os	76	190,23(3)[f], stabilan	135m	*Prelazni metal* (iz grčkog *osme* miris), 1804., koristi se za otkrivanje otiska prsta i za vrlo tvrde legure
Paladijum	Pd	46	106,42(1)[f], stabilan	138m	*Prelazni metal* (prema asteroidu *Palas*, jedna od grčkih boginja), 1802., koristi se u legurama, belom zlatu, katalizatorima, za skladištenje hibrida
Platina	Pt	78	195,084(9) stabilan	139m	*Prelazni metal* srebrnasto beli, težak, plemenit, rastegljiv, (španski *platina* malo srebro), pre Kolumba, ponovo 1735., koristi se za legure otporne na koroziju, magnete, topionice, katalizatore, gorivne čelije, katodna zaštita brodova i cevovoda, tanke žice tinjaju toplo crveno u pari metil alkohola, efekt se koristi u grejačima ruku,.
Plutonijum	Pu	94	(244,0642(1)), 80,0(9)	n.a.	*Aktinoid* napravljen 1940. u laboratoriji izuzetno radioaktivan i otrovan metal, alfa emiter (prema planeti *Pluton*), 1971 nađen u prirodi, koristi se kao nuklearni eksploziv, kao izvor napajanja u svemiru (kao što su sateliti) i u mernim uređajima, donet je na Mesec sa Apolo misijom.
Polonijum	Po	84	(208,9824(1)), 102(5) a	(140)	*Metaloid*, nestalan, alfa emiter, jako radioaktivan (prema *Poland*), 1898., koristi se za termoelektrično snabdevanje energijom u satelitima, kao izvor neutrona sa berilijumom, koristio se za odstranjenje statičkog elektriciteta i na četkicama za odstranjenje prašine sa fotografskih filmova.
Prazeodim	Pr	59	140,90765(2), stabilan	183m	*Lantanoid*, beo, kovan (grčki *praesos didimos* zeleni blizanac), 1885., koristi se u upaljačima cigareta, kao materijal za grafitni električni luk u filmskoj industriji, za staklo, boju emajla, zatamnjenje maski zavarivača.
Prometijum[b]	Pm	61	144,9127(1)), 17,7(4) a	181m	*Lantanoid*, radioaktivan metal (prema grčkom heroju *Prometeusu*), 1945., koristi se kao izvor beta zraka i za pobuđivanje fosfora.
Protaktinijum	Pa	91	(231,03588(2)), 32,5(1) ka	n.a.	*Aktinoid*, radioaktivan metal (grčki *protos* prvi, jer se raspada u aktinijum), 1917. nađen u prirodi, ne koristi se
Raderfordijum[b]	Rf	104	(261,1088(1)). 1,3 min[g]	n.a.	*Transaktinid* napravljen u laboratoriji, radioaktivan (prema *Ernest Rutherford*), 1964., ne koristi se

Radijum	Ra	88	(226,0254(1)), 1599(4) a	(223)	*Zemno-alkalni metal* jako radioaktivan (latinski *radius* zrak), 1898. više se ne koristi; ranije se koristio za snimanje zračenjem i radioaktivni izvor u medicini
Radon	Rn	86	(222,0176(1)), 3823(4) d	(130n)	*Plemeniti gas* radioaktivan (prema njegovom starom imenu "*radium emanation*"). 1900., više se ne koristi, nalazi se u zemljištu, uzaziva kancer pluća.
Renijum	Rn	75	186,207(1)[c], stabilan	138m	*Prelazni metal* (latinski *rhenus* za reku Rajnu), 1925., koristi se za nit u masenim spekrografima i meračima gasa, za superprovodnike, termoparove, bleskalice i kao katalizator
Rendgenijum[b]	Rg	111	(272,1535(1)), 1,5 ms[g]	n.a.	*Transaktinid* napravljen u laboratoriji, izuzetno radioaktivan (prema Conrad Röntgen-u), 1994., ne koristi se
Rodijum	Rh	45	102,90550(2), stabilan	135m	*Prelazni metal* beo (prema grčkom *rhodon* ruža), 1803., koristi se za čvrstinu legura platine i paladijuma za galvanizaciju i kao katalizator
Rubidijum	Rb	37	85,4678(3)[f], stabilan	255m	*Alkalni metal* srebrnasto beo reaktivni (latinski *rubidus* crven), 1861., koristi se u fotoćelijama, optičkom staklu, čvrste elektrolite
Rutenijum	Ru	44	101,107(2)[f],	134m	*Prelazni metal* beo (prema latinskom *Rhuthenia* Rusija),1844., koristi se u legurama platine i paladijuma, superprovodnicima, kao katalizator; njegov tetroksid je otrovan i eksplozivan
Samarijum	Sm	62	150,36(2)[c, f], stabilan	180m	*Lantanoid* srebrnasto beli (od minerala *samarskita* i Vasiliju Samarskom), 1879., koristi se u magnetima, optičkom staklu, dopiranje lasera, u fosforu i izvorima svetlosti velike snage
Selen	Se	34	78,96(3)[f], stabilan	120c, 190v	*Nemetal* crven, crn ili siv, poluprovodnik (grčki *selene* Mesec), 1818., koristi se u kserografiji, proizvodnji stakla, tonerima za fotografije, kao boja za emajl.
Siborgijum[b]	Sg	106	266,1219(1), 21 s[g]	n.a.	*Transaktinid* radioaktivan (prema istraživaču *Glenn Seaborg*), 1974., ne koristi se
Silicijum	Si	14	28,0855(3)[f], stabilan	105c, 210v	*Metaloid* siv sjajan poluprovodnik (latinski *silex* šljunak) 1823., nalazi se u zemljinoj kori, pesku koristi se za elektroniku, beton, opeku, staklo, polimeri, solarne ćelije, bitan je za život
Skandijum	Sc	21	44,955921(6), stabilan	164m	*Prelazni metal* srebrnasto beo (latinski *Scansia* Švedska) 1879, oksid se koristi u svetiljkama sa živinom parom velike jačine, radioaktini izotop se koristi kao tragač
Srebro	Ag	47	107,8682(2)[f], stabilan	145m	*Prelazni metal* beo najveće toplotne i električne provodnosti (latinski *argentum*, grčki *argiros*), antika, koristi se u fotografiji, legurama, za izazivanje kiše.
Stroncijum	Sr	38	87,62(1)[f], stabilan	215m	*Zemnoalkalni metal* srebrn lak sa samopaljenjem (prema *Strontian*, gradu u Škotskoj), 1790, koristi se u staklenim TV cevima, u magnetima, optičkom materijalu
Sumpor	S	16	32,065(5)[f],	105c, 180v	*Nemetal*, žuto čvrsto telo (iz latinskog *sulphur*), antika, koristi se za barut, za sumpornu kiselinu, vulkanizaciju gume, kao fungicid u vinarstvu, bitan je za život; neke bakterije koriste sumpor umesto kiseonika za svoj hemizam
Talijum	Tl	81	204,3833(2), stabilan	172m	*Slab metal*, mek, otrovan, težak (grčki *thalos* grana), 1861., koristi se kao otrov i za infracrvenu detekciju

Tantal	Ta	73	180,97488(2), stabilan	147m	*Prelazni metal* težak (prema *Tantalosu*, grčkom mitološkom biću), 1802., koristi se u legurama, za hirurške instrumente, vakuumske peći, za staklo
Tehnecijum[b]	Tc	43	(97,9072(1)), 6,6(10) Ma	136m	*Prelazni metal* radioaktivan (grčki *technetos* veštački), 1939., koristi se kao radioaktivni tragač i u nuklearnoj tehnologiji
Telur	Te	52	127,60(3)[f], stabilan	139c, 206v	*Metaloid*, krt poluprovodnik, mirisa belog luka (latinski *tellus* Zemlja), 1783., koristi se u legurama i kao sastojak stakla.
Terbijum	Tb	65	158,92535(2), stabilan	178m	*Lantanoid*, kovan (prema *Ytterby*, Švedski grad), 1843., koristi se kao dodatak u optičkim materijalima
Titanijum	Ti	22	47,867(1) stabilan	146m	*Prelazni metal* (prema grčkom mitskom heroju *Titanu*), 1791., koristi se u legurama i kao lažni dijamant
Torijum	Th	90	232,03806(2)[d, f], 14,0(1) Ga	180 m	*Aktinooid* radioaktivan (prema nordijskom bogu *Thor*), 1826., nalazi se u prirodi, zagreva Zemlju, koristi se kao oksid u gasnim ogrtačima kampera, u legurama, kao premaz i u nuklearnoj tehnologiji
Tulijum	Tm	69	168,94321(2), stabilan	175m	*Lantanoid* (prema *Thule*, mitskom imenu za Skandinaviju), 1879, nalazi se u monazitu (fosfatni mineral), koristi se lasere i kao detektor zračenja
Ugljenik	C	6	12,0107(8)[f], stabilan	77c	*Nemetal* gradi ugalj i dijamant, (latinski *carbo* ugalj) antika, koristi se za stvaranje većine živih oblika
Ununoktijum[b] (Oganeson)[i]	Uuo (Og)	118	(294), 0,9 ms[g]	n.a.	*Transaktinid* napravljen u laboratoriji Dubno, , izuzetno radioaktivan. Tvrdnja lažnog otkrića 1999., stvarno otkriven 2006., ne koristi se
Ununpentijum[b] (Moskovijum) *	Uup (Mc)	115	(288), 8 ms[g]	n.a.	*Transaktinid* napravljen u laboratoriji Dubno, , izuzetno radioaktivan, 2004., ne koristi se
Ununseptijum[b] (Tenesin) *	Uus (Ts)	117	(294), 78 ms[g]	n.a.	*Transaktinid* napravljen u laboratoriji Dubno, izuzetno radioaktivan, 2010., ne koristi se
Ununtrijum[b] (Nihonijum)[i]	Uut (Nh)	113	(284), 0,48 s[g]	n.a.	*Transaktinid* napravljen u laboratoriji Dubno, izuzetno radioaktivan, sada pod novim imenom (izvor Wikipedia),. 2003., ne korisri se
Uranijum	U	92	238,02891(3)[d,f], 4,468(3)·10^{9} a	156m	*Aktinid* radioaktivan i najveće gustine (prema *Uranu*, grčkom bogu neba), 1789., nalazi se u uranitu i ostalim mineralima, koristi se za nuklearnu energiju
Vanadijum	V	23	50,9415(1), stabilan	135	*Prelazni metal* (prema *Vanadis*, skandinavskoj boginji lepote), 1830., koristi se za legiranje čelika
Vodonik	H	1	1,00794(7)[f], stabilan	30c	*Nemetal*, reakcijski gas (grčki *ono što stvara vodu*), 1766., stvaranje zvezda u svemiru
Volfram	W	74	183,84(1), stabilan	141m	*Prelazni metal*, težak, najteže se topi (švedski *tung sten* teški kamen, nemačko ime *Wolfram*), 1783., koristi se kao užarena nit u sijalicama
Živa	Hg	80	200,59(2), stabilna	17m	*Prelazni metal*, tečan težak, (prema rimskom bogu *Merkuru*, grčki *hidroargirum* tečno srebro). antika, koristi se za prekidače, baterije, svetiljke, amalamske legure
Zlato	Au	79	196,966569(4), stabilan	144m	*Prelazni metal*, težak, plemenit (iz sanskrita *jval* sjaji, latinski *aurum*), antika, koristi se u elektronici i za nakit.

Primedbe:

a. Jedinica atomske mase je određena kao 1 u = (1/12)$m(^{12}C)$, što daje 1 u = 1,6605402(10 yg. Za elemente koji se nalaze na zemlji data je ***prosečna*** atomska masa za prirodne izotope koji se javljaju, uz grešku koja je data

u poslednjim ciframa u zagradi. (***Ref. 297***). Za elemente koji se ne nalaze na Zemlji, data je masa izotopa sa ***najdužim trajanjem***; kako to nije prosek, ona je navedena u zagradi, kao što je to u toj oblasti uobičajeno.

b. Element se ne nalazi na Zemlji zbog njegovog kratkog vremena trajanja.

c. Element ima najmanje jedan radioaktivan izotop,

d. Elenent nema nijedan stabilan izotop

e. Strogo govoreći, ***poluprečnik atoma*** ne postoji. Pošto su atomi oblaci, oni nemaju granice. Moguće je nekoliko približnih odrednica za "veličinu" atoma. Obično je poluprečnik određen na takav način da može da se koristi za procenu razmaka između atoma. Ovaj razmak je različit za različite vrste veza. (***Ref. 298***). U tabeli su poluprečnici atoma metala obeleženi sa m, poluprečnici jednostrukih veza (kovalentne) sa *c*, a Van der Valsovi poluprečnici sa *v*. (***Ref. 298***). Poluprečnici plemenitih gasova obeleženi su sa *n*. Obratite pažnju da vrednosti koje se nalaze u literaturi odstupaju za oko 10%; vrednosti u zagradama nemaju referentnu literaturu.

Kovalentni poluprečnik može biti manji do 0,1 mm od metalnog poluprečnika za elemente u (donjoj) levoj strani peroidnog sistema; na (celoj) desnoj strani on je uglavnom jednak sa metalnim poluprečnikom. Između, razlika između ova dva poluprečnika se smanjuje prema desnoj strani. Možete li da objasnite žašto? (***Izazov 195s***).

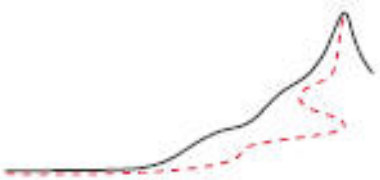
Sve ove vrednosti du date za atom u njegovom osnovnom stanju. Pobuđeni atomi mogu biti i do sto puta veći od atoma u osnovnom stanju. Neđutim, pobuđeni atomi ne stvaraju čvrsta tela ili hemijska jedinjenja.

f. Izotropski kompoziti, pa stoga i prosečne atomske mase elemenata odstupaju u zavisnosti od mesta gde je izvađena ruda i kasnije ljudske obrade, tako da mogu da leže izvan datih vrednosti. Na primer, atomska masa komercijalnog litijuma nalazi se između 6,939 i 6,996 u. (***Ref. 290***). Mase izotopa su poznate u atomskim masama do devet ili više sigurnih cifara, a obično sa jednom ili dve manje cifre u kilogramima. Greške u atomskim masama su zato uglavnom zbog odstupanja u izotropnim kompozitima. (***Ref. 297***).

g. Greške u dužini trajanja su nesimerične i nisu dobro poznate.

h. Opširniji detalji o nazivima elemenata mogu se naći na veb strani elements.vanderkrogt,net.

i. Novi nazivi, preuzeto iz Wikipedia



DODATAK C

ALGEBRA, OBLICI I GRUPE

Matematićari vole da uopštavaju pojmove. Jedan od najčešće uopštenih pojmova je pojam ***prostor***. Shvatiti matematičku odrednicu i uopštavanje znaći naučiti da se precizno razmišlja. Dodaci u predhodnom, četvrtom delu dali su jednostavan uvod u vrste ***prostora*** koji su važni u fizici; u ovom delu daćemo uvod u ***algebru*** koja je važna u fizici.

ALGEBRA

Pojam ***algebra*** koristi se u matematici u tri različita, ali labavo povezana, značenja. Prvo, ona označava deo matematike, kao u "*Mrzeo sam algebru u školi*". Drugo, ona označava skup opštih prvila kojih se pridržavaju apstraktni objekti, kao u izrazu "algebra tenzora". Konačno – a to je jedino značenje koje se ovde koristi – algebta označava *posebnu* vstu matematičke strukture.

Intuitivno, algebra je skup vektora sa vektorskim proizvodom kojeg ona određuje. Još preciznije, (unitalna, asocijativna) algebra je vektorski prostor (u polju K) koji je takođe unitalni prsten. Pojam je uveo Bendžamin Pirs (Benjamin Pierce, 1809. Salem – 1880. Cambridge), otac Čarsa Sandersa Pirsa (Charles Sanders Pierce). Prsten je skup u kojem su sabiranje i množenje određeni – slično celim brojevima. (***Vol. IV, strana 173***). Stoga u algebri postoje (najčešće) ***tri*** vrste množenja:

- (glavno) algebarsko množenje: proizvod dva vektora x i y je takođe vektor $z = xy$;
- skalarno množenje: c-struki proizvod vektora x je drugi vektor $y = cx$;
- Ako je vektorski prostor prostor skalarnog proizvoda (prehilbertov prostor): skalarni proizvod dva algebarska elementa (vektora) x i y je skalar $c = x{\cdot}y$;

Za preciznu odrednicu algebre prema tome potrebno je da se odrede svojstva (glavnog) množenja i da se odredi brojno polje K. Algebra je određena sledećim aksiomima:

$$x(y+z) = xy + xz \quad , \quad (x+y)z = xz + yz \quad \textbf{\textit{distributivnost množenja}}$$

$$c(xy) = (cx)y = x(cy) \quad \textbf{\textit{bilinearnost}} \qquad (138)$$

za sve vektore x, y, z i sve skalare $c \in K$. Da bi se naglasila njena svojstva, algebra se naziva i ***linearna*** algebra.

Na primer, skup linearnih transformacija nekog prostora sa n dimenzija (kao što je translacija na ravan, u prostor ili u vreme) linearna je algebra ako se izvršavanje vrši kao množenje. Dakle, to je skup zapažanja sistema kvantne mehanike.[1]

---

[1] Linearne transformacije su preslikavanja iz vektorskog prostora u samog sebe, sa svojstvom da se zbirovi i skalarni proizvodi vektora transformišu u odgovarajuće zbirove i skalarne proizvode transformisanih vektora. Možete li da odredite skup linearnih transformacija ravni? (***Izazov 196s***). A za trodimenzionalni prostor? Ili za prostor Minkovskog?

Sve linearne transformacije tranformišu neke posebne vektore, zvane ***sopstveni vektori*** (engl. *eigenvectors* – od nemačke reči *eigen* što znači *sopstven*) u proizvode njih samih, ako je T transformacija, e je vektor, a

$$T(e) = \lambda e \qquad (139)$$

gde je λ skalar, tada se vetor e naziva sopstveni vektor od T, a λ je sopstvena vrednost. Skup svih sopstvenih vrednosti transformacije T naziva se spektar od T. Fizičari nisu obraćali pažnju na ovaj matematički pojam sve dok nisu otkrili kvantni teoriju. (***Vol. IV, strana 72***). Kvantna teorija je pokazala da su posmatranja transformacije u Hilbertovom prostoru, pošto je svako merenje u interakciji sa sistemom i zbog toga ga transformiše. Kvantno-mehanički eksperimenti takođe su pokazali da rezultat merenja nekog posmatranja mora da bude sopstvena vrednost odgovarajuće transformacije. Stanje sistema posle merenja dato je sopstvenim vektorom koji odgovara merenoj sopstvenoj vrednosti. (***Vol. IV, strana 123***). Zato svaki stručnjak za kretanje mora da zna šta je sopstvena vrednost.

Asocijativna algebra je algebra u kojoj množenje ima dodatno svojstvo kao

$$x(yz) = (xy)z \quad \textbf{\textit{asocijativnost}} \tag{140}$$

Većina algebri koje se javljaju u fizici su asocijativne[1] i unitalne. Stoga se u matematičkoj fizici linearna unitalna asocijativna algebra često jednostavnije naziva samo algebra.

Skup proizvoda jedinice 1 algebre naziva se ***polje skalara*** scal(A) algebre A. Polje skalara takođe je podalgebra algebre A. Polje skalara i sami slakari ponašaju se na isti način.

Istražićemo nekoliko primera. Skup svih polinoma u jednoj promenljivoj (ili u više promenljivih) oblikuju albebru. Ona je konutativna i sa beskonačno dimenzija. (***Izazov 197e***). Konstante polinoma sačinjavaju polje skalara.

Skup n×n matrica, uz uobičajene operacije takođe oblikuju algebru. Ona ima n^2 dimenzija. Ove dijagonalne matrice (matrice sa svim elementima izvan dijagonale jednakim nuli) čiji svi elementi u dijagonali imaju istu vrednost daju polje skalara. Kako je određen skalarni proizvod dve matrice? (***Izazov 198ny***).

Skup svih funkcija realne vrednosti nad skupom takođe čini algebru. Možete li da odredite množenje? (***Izazov 199s***). Konstantna funkcija daje polje skalara.

Zvezda algebra, koja se označava i kao ****-algebra***, je algebra nad ***kompleksnim*** brojevima za koju postoji preslikavanje *: $A \to A$, $x \mapsto x^*$, naziva se involucija, sa sledećim osobinama

$$\begin{aligned}
&\left(x^*\right)^* = x \\
&\left(x+y\right)^* = x^* + y^* \\
&\left(cx\right)^* = \bar{c}x^* \qquad \text{za svako} \quad c \in \mathbb{C} \\
&\left(xy\right)^* = y^* x^*
\end{aligned} \tag{141}$$

koje važe za elemente x, y algebre A. Element x^* naziva se pridruženje (adjungacija) x. Zvezda algebra je glavna vrsta algebre koja se koristi u kvantnoj mehanici, pošto opažanja u kvantnoj mehanici obrazuju *-algebru.

C^*-algebra je Banahova algebra nad kompleksnim brojevima sa involucijom * (funkcija koja je inverzna samoj sebi) tako da norma $\|x\|$ elementa x zadovoljava

$$\|x\|^2 = x^* x \tag{142}$$

(Banahova algebra je potpuno normirana algebra; algebra je potpuna ako svi Košijevi redovi konvergiraju. Ukratko, C^*-algebra je algebra lepih svojstava čiji elementi obrazuju neprekidni skup i kompleksni vektorski prostor. C u nazivu dolazi iz "neprekidna funkcija" (continuous functions). Ustvari, ***vezane*** neprekidne funkcije oblikuju takvu algebru sa pravilno određenim normiranjem. Možete li da je nađete? (***Izazov 200s***).

Svaka C^*-algebra (izgovara se "Ce-zvezda") sadrži prostor ermitskih elemenata (koji imaju realan spektar). skup normalnih elemenata, umnožavajuću grupu jediničnih elemenata i skup pozitivnih elemenata (sa ne-negativnim spektrom). U kvantnoj teoriji je fizički sistem opisan pomoću C^*-algebre a njeni ermitski elementi su posmatranja.

Treba da pomenemo jednu važnu vrstu algebre koja se koristi u matematici. ***Algebra deljenja*** je algebra u kojoj jednakosti $ax = b$ i $ya = b$ imaju jedinstvena rešenja za x i y za svako b i za svako $a \neq 0$. Očigledno je da sve vrste kontinualnih brojeva moraju biti algebra deljenja. Stoga je algebra deljenja jedan od načina da se uopšti pojam broja. Jedan od važnih rezultata savremene matenaike izražava da algebra deljenja (konačnog broja dimenzija) može da ima dimenziju 1, kao za realne brjevi, dimenziju 2 kao za kompleksne brojeve, dimenziju 4, kao za kvaternione ili dimenziju 8 kao za oktonione. Ne postoji način da se uopšti pojan neprekidnog "broja" u druge dimenzije.

A sada malo zabave. Zamislite prsten A koji sadrži polje brojeva K kao podprsten (ili "polje skalara"). Ako je množenje prstena određeno na takav način da je element glavnog prstena pomnožen elementom iz K isti

[1] Treba primetiti da neasocijativna algebra ne poseduje matrično prikazivanje.

kao skalarno množenje, tada je *A* vektorski prostor, i zato algebra obezbeđuje da se svaki element iz *K* komutira sa svakim elementom iz *A*. (Drugim rečima, podprsten K mora da bude ***centralan***.)

Na primer, kvaternioni $\mathbb{H}$ su četvorodimenzionalna realna algebra deljenja, ali iako je $\mathbb{H}$ dvodimenzionalni kompleksni vektorski prostor, on nije kompleksna algebra, pošto *i* ne komutira sa *j* (ima se *ij* = -*ji* = *k*). Ustvari, ne postoji kompleksna algebra deljenja sa konačnim brojem dimenzija, a jedine realne asocijativne algebre deljenja sa konačnim brojem dimenzija su $\mathbb{R}$, $\mathbb{C}$ i $\mathbb{H}$.

Zatim, ako se ne bojite da dobijete glavobolju, razmislite o ovoj primedbi: svaka *K*-algebra je takođe algebra nad poljem skalara. Iz tog razloga. neki matematičari više vole da odrede (asocijativnu) *K*-algebru prosto kao prsten koji sadrži *K* kao centralno podpolje.

Postoje algebre koje se odnose na simetrije i koje imaju u fizici najvažniju ulogu. Njih ćemo da proučimo u sledećem.

LIJEVA ALGEBRA

Lijeva algebra je posebna vrsta algebre (pa stoga i vektorskog prostora). Lijeve algebre su najvažnije vrste neasocijativnih algebri. Vektorski prostor *L* nad poljem $\mathbb{R}$ (ili $\mathbb{C}$) uz dodatnu binarnu operaciju $[\,,]$ pod imenom ***Lijevo množenje*** ili ***komutator***, naziva se realna (ili kompleksna) ***Lijeva algebra*** ako ova operacija zadovoljava

$$\begin{aligned} [X,Y] &= -[Y,X] && \textbf{\textit{antisimetrija}} \\ [aX+bY,Z] &= a[X,Z]+b[Y,Z] && \textbf{\textit{(leva) linearnost}} \\ [X,[Y,Z]]+[Y,[Z,X]]+[Z,[X,Y]] &= 0 && \textbf{\textit{Jakobijev identitet}} \end{aligned} \tag{143}$$

za sve *X*, *Y*, *Z* ∈ *L* i za sveko *a*, *b* ∈ $\mathbb{R}$ (ili $\mathbb{C}$). Lijeva algebra je dobila ime po Sofusu Liju (Sophus Lie). Prva dva uslova uzeta zajedno podrazumevaju bilinearitet. (***Izazov 201e***). Lijeva algebra se naziva komutativnom ako je $[X,Y]=0$ za sve elemente *X* i *Y*. ***Dimenzija*** Lijeve algebre jednaka je dimenzijama vektorskog prostora. Podprostor *N* Lijeve algebre *L* naziva se ***idealom***[1] ako je $[L,N]\subset N$; svaki ideal je takođe ***podalgebra***. ***Maksimalan ideal*** *M* koji zadovoljava $[L,M]=0$ naziva se ***centrom*** *L*.

Lijeva algebra se naziva ***linearnom*** Lijevom algebrom ako su njeni elementi linearne transformacije drugog vektorskog prostora *V* (intuitivno, ako su oni "matrice"). Pokazalo se da svaka Lijeva algebra sa konačnim brojem dimenzija je izomorfna u odnosu na linearnu Lijevu algebru. Prema tome, ne postoji gubljenje opštosti u oslikavanju elemenata Lijeve algebre sa konačnim brojem dimenzija kao matrica.

Naziv "Lijeva algebra" bio je odabran pošto generatori, to jest, infinitezimalni elementi svake Lijeve grupe, obrazuju Lijevu algebru. (***Strana 281***). Pošto sve bitne simetrije u prirodi obrazuju Lijeve grupe, Lijeva algebra se često pojavljuje pošto od bilo koje asocijativne algebre sa konačnim brojem dimenzija (u kojima se simbol · koristi za njihovo množenje). Lijeva algebra se pojavljuje kada određujemo ***komutator*** sa

$$[X,Y]=X\cdot Y-Y\cdot X \tag{144}$$

(Ova činjenica je dala ime komutatoru.) Lijeva algebra je uopšteno neasocijativna, međutim, gornja odrednica komutatora pokazuje kako da se napravi iz asocijativne algebre.

Pošto su Lijeve algebre vektorski prostori, elementi T_i ***osnove*** Lijeve algebre uvek ispunjavaju relaciju oblika:

$$[T_i,T_j]=\sum_k c_{ij}^k T_k \tag{145}$$

Brojevi c_{ij}^k nazivaju se konstante strukture Lijeve algebre. Oni zavise od izbora osnove. Konstante strukture u potpunosti određuju Lijevu algebru.. Na primer, algebra Lijeve grupe SU(2), sa tri generatora

[1] Možete li da objasnite zapis [*L*,*N*]? Možete li da odredite šta je to ideal i da dokažete da postoji samo jedan? (***Izazov 202ny***).

određena sa $T_a = \sigma^a/2i$, gde su σ^a Paulijeve matrice spina (***Vol. IV, strana 179***), ima konstante strukture $C_{abc} = \varepsilon_{abc}$.[1]

RAZVRSTAVANJE LIJEVE ALGEBRE

Lijeve algebre sa ***konačnim*** brojem dimenzija razvrstane su kako sledi. Svaka Lijeva algebra sa konačnim brojem dimenzija je (poludirektan) zbir poluproste i rešive Lijeve algebre.

Lijeva algebra se naziva ***rešivom***, pa dobro, ako nije poluprosta. Rešive Lijeve algebre još uvek nisu razvrstane u potpunosti. One nisu značajne za fiziku.

Poluprosta Lijeva algebra je Lijeva algebra koja ima rešiv ideal različit od nule. Moguće su i druge jednako dobre odrednice, u zavisnosti od vašeg ukusa:

- poluprosta Lijeva algebra ne sadrži abelijske ideale različite od nule;
- njen Kilingov oblik je nesingularan, ti jest nije degenerativan;
- ona se razdvaja na direktan zbir ne-abelijskih prostih ideala (ovakva razgradnja je jedinstvena);
- svako linearno predstavljanje sa konačnim brojem dimenzija u potpunosti može da se redukuje;
- jednodimenzionalna homologija g sa vrednostima u proizvoljnom konačnom broju dimenzija g-modula je prosta.

Poluprosta Lijeva algebra sa konačnim brojem dimenzija u potpunosti je razvrstana. Ova se razlaže jedinstveno u direktan zbir ***prostih*** Lijevih algebri. Proste Lijeve algebre mogu da budu kompleksne ili realne.

Sve proste kompleksne Lijeve algebre sa konačnim brojem dimenzija spadaju u četiri beskonačne klase i pet posebnih klasa. Beskonačne klase takođe se nazivaju klasične, i one su: A_n za $n \geq 1$, što odgovara Lijevim grupama SL(n+1) i njihovim kompaktnim "rođacima" SU(n+1); B_n za $n \geq 1$, što odgovara Lijevim grupama SO(2n+1); C_n za $n \geq 1$, što odgovara Lijevim grupama Sp(2n) i D_n za $n \geq 4$, što odgovara Lijevim grupama SO(2n). Prema tome A_n je algebra svih kosih ermitskih matrica; B_n i D_n su algebre svih simetričnih matrica; C_n je algebra matrica bez traga.

Posebne Lijeve algebre su G_2, F_4, E_6, E_7, E_8. U svim slučajevima indeks prikazuje broj takozvanih ***korena*** algebre. Dimenzije koje imaju ove algebre su A_n: n·(n+2); B_n i C_n: n·(2n+1); D_n: n·(2n–1); G_2: 14, F_4: 32: E_6: 78; E_7: 133; E_8: 248.

Proste realne Lijeve algebre sa konačnim brojem dimenzija su još brojnije; njihova klasifikacija sledi iz kompleksnih Lijevih algebri. Štaviše, postoji uvek jedna kompaktna Lijeva grupa koja odgovara svakoj kompleksnoj Lijevoj grupi. (***Ref. 299***). Realna Lijeva algebra nije toliko važna u osnovama fizike.

Od velikog broja Lijevih algebri sa ***beskonačno*** mnogo dimenzija, samo jedna je važna u fizici, ***Poekareova algebra***. Nekoliko drugih algebri te vrste pojavilo se u propalim pokušajima objedinjavanja.

---

1 Kao i grupe, Lijeva algebra može da se predstavi matricama, to jest linearnim operatorima. Predstavljanje Lijevih algebri važno je u fizici pošto su mnoge kontinualne grupe simetrija Lijeve grupe.
Adjungovano predstavljanje Lijeve algebre sa osnovama $a_1 \ldots a_n$je skup matrica ad(a) koje su određene za svaki element a sa

$$\left[a, a_j\right] = \sum_c \mathrm{ad}\left(a\right)_{cj} a_c \qquad (146)$$

Odrednica podrazumeva da je $\left(a_i\right)_{jk} = c_{ij}^k$, gde je c_{ij}^k konstanta strukture Lijeve algebre. Za realnu Lijevu algebru svi elementi ad(a) su realni brojevi za svako $a \in L$.
Treba zapaziti da za svaku Lijevu algebru može skalarni proizvod da bude određen stavljanjem

$$X \cdot Y = \mathrm{Tr}\left(\mathrm{ad}X \cdot \mathrm{ad}Y\right) \qquad (147)$$

Ovaj skalarni proizvod je simetričan i i bilinearan. (Možete li da pokažete da je on nezavisan od prikazivanja?) Odgovarajući bilinearni oblik takođe se naziva ***Kilingov oblik***, prema matematičaru Viljemu Kilingu (Wilhelm Killing, 1847. Burbach – 1923. Münster), pronalazaču "neobičnih" Lijevih grupa. Kilingov oblik je invarijanta pri delovanju svakog automorfizma Lijeve algebre L. U datim osnovama se ima

$$X \cdot Y = Tr\left(\left(adX\right)\cdot\left(adY\right)\right) = c_{lk}^i c_{si}^k x^l y^s = g_{ls} x^l y^s \qquad (148)$$

gde je $g_{ls} = c_{lk}^i c_{si}^k$ i naziva se ***Kartanov*** (Elie Cartan) ***tenzor metrike*** L.

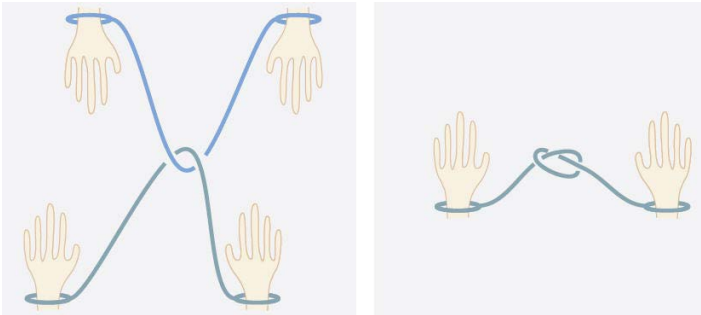
TOPOLOGIJA – KAKVI OBLICI POSTOJE?

Topologija je grupa teorija.

Erlangen program

U uprošćenom pogledu na topologiju koja je dovoljna fizičarima, samo jedna vrsta entiteta može da ima oblik: mnogostrukosti. Mnogostrukosti su uopšteni primeri pulovera: oni su na nekim mestima ravni, mogu da imaju otvore i ivice i često mogu da se izvrnu iznutra napolje. Puloveri su prepredeni predmeti. Na primer, možete li da izvrnete vaš pulover ako su vam ruke vezane zajedno? (***Izazov 203s***). (Može da vam pomogne prijatelj.) Uzgred, isti poduhvat je moguć i sa vašim pantalonama dok su vam noge vezane jedna uz drugu. Pojedini profesori vole ovo da prikazuju tokom predavanja topologije – normalno, uz pažljivo odabran par gaća.

Druga dobra topološka zagonetka, zagonetka sa lisicama, prikazana je na slici 178. (***Ref. 300***). Koja od dve situacije može da se razveže bez rasecanja kanapa? (***Izazov 204s***).



Slika 178 Koja od ove dve situacije može da se razveže bez rasecanja kanapa?

Za matematičare, puloveri i kanapi su svakodnevni primeri mnogostrukosti, a operacije koje se izvode sa njima primeri su za izobličenja. Da bismo odredii šta je mnogostrukost, najpre je potrebno da odredimo pojam topoloških prostora.

TOPOLOŠKI PROSTORI

En Australie, une mouche qui marche au plafond se trouve dans le meme sens qu'une vache chez nous.

Philippe Geluck[1], *La marque du chat*.

Proučavanje oblika zahteva dobru odrednicu skupa sastavljenog od "tačaka". (***Ref. 301***). Da bismo bili sposobni da govorimo o obliku, ovaj skup mora da bude sastavljen na takav način da omogućava upotrebljiv pojam za "susedstvo" ili "blizinu" između elemenata skupa. Postoje dva načina da se da se odredi topologija: može da se odredi pojam ***otvoren skup,*** pa zatim uz njegovu pomoć da se odredi pojam ***susedstvo***, ili obrnuto. Mi ćemo da koristimo drugu mogućnost koja je nekako intuitivnija.

Topološki prostor je konačan ili beskonačan skup X elemenata, nazvanih ***tačke***, zajedno sa susedstvom za svaku tačku. Susedstvo N neke tačke x je zbirka podskupova Y_x od X, sa svojstvima da je

- x u svakom Y_x;
- ako su N i M susedstvo x, tada je $N \cap M$;
- sve što sadrži susedstvo x je samo susedstvo x

Izbor podskupova Y_x je slobodan. Podskupovi Y_x za sve tačke x odabrane po posebnoj odrednici, sadrži susedstvo za svaku od svojih tačaka; oni se nazivaju otvoreni skupovi. (Susedstvo i otvoren skup su obično različiti, međutim, otvoreni skupovi su takođe susedstva. Susedstvo za x može takođe da se opiše kao podskup od X koji sadrži otvoren skup koji sadrži x.)

Topološki prostor se takođe naziva "skup sa topologijom". U suštini, *topologija* određuje sisteme "susedstva" svake tačke u skupu. Topologija je takođe i naziv grane matematike koja proučava topološke prostore.

[1] „U Australiji je muva na tavanici u istom smeru kao i krava u našoj kući." Filip Geluk (Philippe Geluck) *Znakovi mačke.*

Na primer, realni brojevi zajedno sa svim otvorenim intervalima obrazuju uobičajenu topologiju iz $\mathbb{R}$. Matematičari su ovaj postupak uopštili. Ako se uzmu svi podskupovi od $\mathbb{R}$ – ili bilo kojih osnovnih skupova - kao otvoreni skupovi, reč je o ***diskretnoj*** topologiji. Ako se uzme samo pun osnovni skup i prazan skup kao otvoreni skupovi, reč je o ***trivijalnoj*** ili ***indiskretnoj*** topoogiji.

Pojam topološkog prostora omogućava nam da odredimo neprekidnost. Preslikavanje iz jednog topološkog prostora *X* u drugi topolški prostor *Y* je neprekidno ako je inversna slika svakog otvorenog skupa u *Y* je otvoren skup u *X*. Možete dokazati da ovaj uslov nije zadovoljen za realne funkcije koje prave skok. (***Izazov 205e***). Isto tako možete da proverite da je u odrednici neophodan pojam "inverzan"; u suprotnom, bi funkcija sa skokom bila neprekidna, jer takva funkcija može još da preslikava otvorene skupove u otvorene skupove.[1]

Zbog toga nam je potreban pojam topološki prostor, ili susedstvo, ako želimo da izrazimo ideju da ne postoje skokovi u prirodi. Isto tako nam je potreban pojam topološki prostor da bismo imali mogućnost da odredimo limite.

Od mnogo posebnih vrsta topoloških prostora koje smo proučavali, jedna vrsta je posebno važna. ***Hausdorfov*** (Hausdorff) ***prostor*** je topološki prostor u kojem za svake dve tačke *x* i *y* postoje razdvojeni otvoreni skupovi *U* i *V* takvi da je *x* u skupu *U* i *y* u skupu *V*. Hausdorfov prostor je prema tome prostor u kojem, bez obzira koliko su "bliske" dve tačke, one uvek mogu da budu razdvojene otvorenim skupovima. Ovo izgleda kao željeno svojstvo; zaista prostori koji nisu Hausdorfovi prilično su neobični matematički objekti. (U Plankovoj energiji izgleda da se vakuum ponaša slično ne-Hausdorfovom prostoru; međutim, u Plankovoj energiji vakuum zaista uopšte nije prostor. Tako ne-Hausdorfovi prostoti ne igraju nikakvu ulogu u fizici.) Posebam slučaj Hausdorfovog prostora je dobro poznat: mnogostrukost.

MNOGOSTRUKOST

Najvažniji topološki prostori u fizici du diferencijalne mnogostrukosti.. Slobodno govoreći, ***diferencijalna mnogostrukost*** – fizičari prosto kažu ***jednostrukost*** – je skup tačaka koji liče pod mikroskopom na $\mathbb{R}^n$ sa malog rastojanja. Na primer, i lopta i torus su dvodimenzionalne diferencijalne mnogostrukosti, pošto lokalno izgledaju kao ravan. Nisu sve diferencijalne mnogostrukosti tako jednostavne, kako to prikazuju primeri na ***slici 179***.

Diferencijalna mnogostrukost se naziva ***spojenom*** ako bilo koje dve tačke mogu da se spoje putanjom koja leži na mnogostrukosti. (Pojam ima uopštenije značenje u topološkom prostoru. Međutim, pojmovi povezanosti i povezanosti putanjom poklapaju se za diferencijalne mnogostrukosti.) Kaže se da je mnogostrukost ***prosto spojena*** ako svaka petlja koja leži na mnogostrukosti može da se skupi u tačku, Na primer, lopta je prosto spojena. Spojena mnogostrukost koja nije prosto spojena naziva se ***višestruko spojena***. Torus je višestruko spojena mnogostrukost.

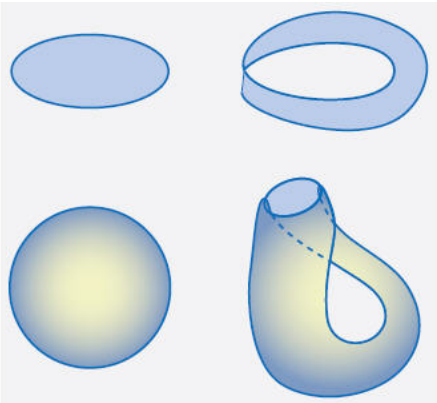
Mnogostrukosti mogu da budu ***neusmerene***, kako to pokazuje dobro pozmata Mobijusova traka. Neusmerene mnogostrukosti imaju samo jednu površinu: one ne dopuštaju da se napravi razlika između prednje i zadnje strane. (***Izazov 207e***). Ako želite da se zabavite, rasecite papirnu Mobijusovu traku na dva dela duž centralne linije. Možete takođe to da probate sa papirnim trakama koje imaju različite vrednosti uvrtanja i da istražite zakonitosti.

U dve dimenzije zatvorene mnogoestrukosti (ili površine), to jest površine koje su kompaktne i bez granica, uvek su jedna od tri vrste:

- Najprostija vrsta su lopte sa *n* pričvršćenih ručica; one se nazivaju ***n-torusi*** ili ***površine roda n***. One su usmerene površine sa ***Ojlerovom karakteristikom 2 – 2n***.
- ***Projektivne ravni*** sa pričvršćenih *n* ručica su neusmerene površine koje imaju Ojlerovu karakteristiku 1 – 2n.
- Klajnove boce sa *n* pričvršćenih ručica su neusmerene površine sa Ojlerovom karakteristikom -2.

---

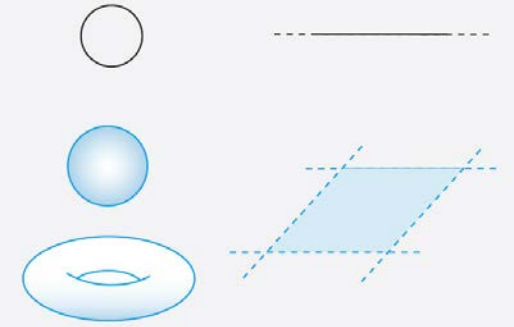
[1] Koši-Vajerštrasova (Cauchy–Weierstass) odrednica neprekidnosti glasi da je realna funkcija *f*(*x*) kontinualna u tački *a* ako je (1) *f*(*x*) određeno u otvorenom intervalu koji sadrži *a*, (2) *f*(*x*) teži ka limitu kada *x* teži ka *a* i (3) limit je *f*(*a*). U ovoj odrednici neprekidnost *f*(*x*) je određenaisana korišćenjem intuitivne ideje da realni brojevi obrazuju osnovni model skupa koji nema prekide. Možete li da sagledate vezu sa opštom odrednicom iznetom u gornjem tekstu? (***Izazov 206ny***).



Slika 179 Primeri usmerenih i neusmerenih mnogostrukosti u dve dimenzije: disk, Mobijusova traka, lopta i Klajnova boca.

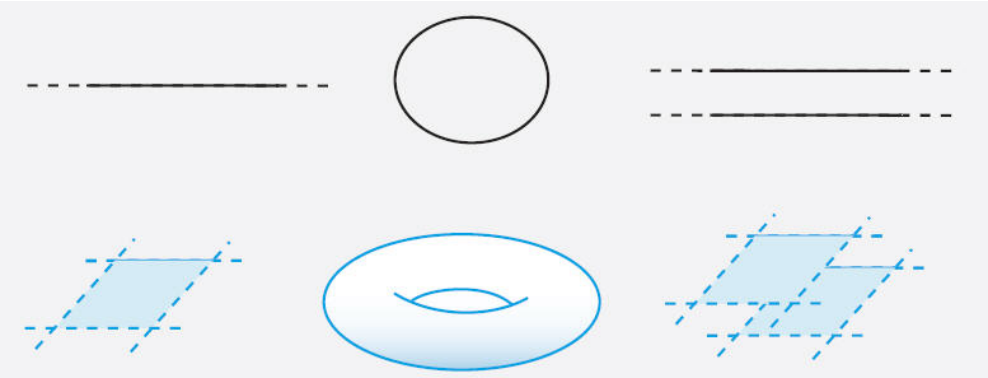
Ojlerova karakteristika i usmerenost opisuju kompaktne površine do homeomorfizma (a ako su površine glatke, onda do difeomorfizma). Homeomorfizmi su opisani u daljem tekstu. (***Strana 277***).

Dvodimenzionalne kompaktne mnogostrukosti ili površine sa granicama nalaze se tako što se odstrani jedan ili više diskova iz površine u ovom popisu. Kompaktna površina može da bude ugrađena u $\mathbb{R}^3$ ako je usmerujuća ili ako ima granicu koja nije prazna.



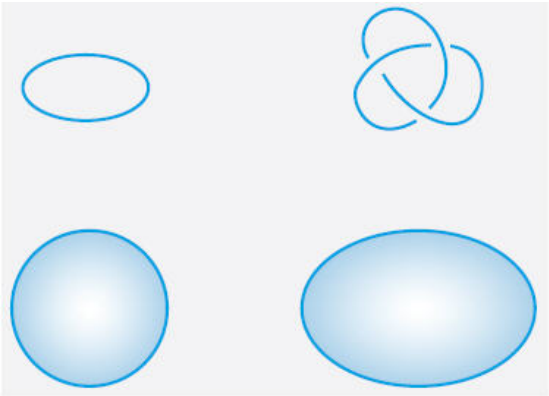
Slika 180 Kompaktna (levo) i nekompaktna (desno) mnogostrukost tazličitog broja dimenzija

Najvažnije mnogostrukosti u fizici su prostor-vreme i Lijeve grupe opažanja. Mi ćemo da proučimo Lijeve grupe u tekstu koji sledi. Čudno je, ali topologija prostor-vremena nije poznata. Na primer, nije jasno da li je on prosto povezan ili nije. Očigleno, razlog je taj da je teško zapažati šta se događa na velikim udaljenostima od Zemlje. Međutim, slična teškoća se pojavljuje i u blizini Plankvih razmera.



Slika 181 Jednostavno spojena (levo), višestruko spojena (sredina) i razdvojena (desno) mnogostrukost u jednoj (gore) i dve dimenzije (dole)

Ako se zamisli da se mnogostrukost sastoji od gume, spojenost i slična opšta svojstva se ne menjaju ako bi se mnogostrukost izobličila. Ova činjenica je formalizovana tako što se kaže da su dve mnogostrukosti homeomorfne (od grčkih reči za "isto" i "oblik") ako između njih postoji neprekinuto preslikavanje jedan na jedan sa neprekidnom inverzijim. Pojam homeomorfizma je ponekad uopšteniji nego onaj sa izobličenjem gume, a može da se vidi na ***slici 182***. Ako su preslikavanje i mnogostrukost diferencijabilne, kaže se da su dve mnogostrukosti ***difeomorfne***.



Slika 182 Primeri homeomorfnih parova mnogostrukosti

RUPE, HOMOTOPIJA I HOMOLOGIJA

U fizici ulogu igraju samo mnogostrukosti "dobrog ponašanja": naime samo one koje su usmerujuće i spojene. osim toga, mnogostukosti koje su spojene sa opažanjima uvek su kompaktne. Glavna netrivijalna karakteristika spojenih kompaktnih usmerujućih mnogostukosti je da one imaju "rupe" (videti ***sliku 183***). Pokazalo se da nam pravilan opis mnogostrukosti dozvolava da pravimo razliku između svih različitih, to jest nehomeomorfskih vrsta mnogostrukosti.

Slika 183 Prve četiri kompaktne spojene usmerujuće mnogostukosti: 0-, 1-, 2- i 3-torus

Postoje tri glavna alat da se opišu rupe u mnogostrukostima i odnosi između njih: homotopija, homologia i kohomologija. Ovi alati igraju važnu ulogu u proučavanju grupa merila, pošto svaka grupa merila odrđujr mnogostrukost.

Drugim rečima, pomoću teorije homotopije i homologije matematičari mogu da klasifikuju mnogosrukosti. Za uzete dve mnogostrukosti, svojstva rupa u njima prema tome određuju da li ono mogu da se izobliče jedna u drugu.

Fizičari su sada proširili ove rezultate standardne topologije. Izobličenja su klasična zamisao koja predpostavlja kontinualne prostor i vreme, kao i proizvoljno mali rad. U prirodi, međutim, kvantni efekt ne može da se odbaci. Spekuliše se da kvantni efekti mogu da transformišu fizičku mnogostrukost u jednu sa različitom topologijom. Na promer, torus u loptu. Možete li da pronađete kako se to postiže? (***Izazov 208d***).

Topološke promene fižičkih mnogostrukosti dešavaju se preko objekata koji su uopštavanje mnogostrukosti. ***Orbifold*** je prostor koji je lokalno modeliran sa R^n modulo konačne grupe. Primer je suza ili poluravan. Orbifold je uveo Satake Iširo (Satake Ishiro) 1956. godine; naziv je skovao Viljem Turston (William Thuston). Orbifoldi se teško proučavaju u teoriji struna.

VRSTE I RAZVRSTAVANJE GRUPA

Upoznali smo ranije matematičke grupe (***Vol. I, strana 201***), pošto grupe, naročito simetrične grupe, imaju važnu ulogu u mnogim delovima fizike, od opisa čvrstih tela, molekula, atoma, atomskih jezgara, elementarnih čestica i sila do proučavanja oblika, ciklusa i uzoraka u procesima rasta.

Teorija grupa je takođe jedna od najvažnijih grana savremene matematike i još uvek je oblast aktivnih istraživanja. Jedan od ciljeva teorije grupa je razvrstavanje svih grupa. To je dostignuto samo za nekoliko posebnih vrsta. Uopšteno, pravi se razlika između konačnih i beskonačnih grupa. Konačne grupe su lakše za shvatanje.

Svaka ***konačna*** grupa je izomorf podrupe simetične grupe S_N za neki broj N. Primeri konačnih grupa su grupe kristala, koje se koriste za klasifikaciju struktura kristala ili grupe koje se koriste za razvrstavanje uzoraka tapeta u pogledu njihove simetrije. Grupe simetrije Platonovih i mnogih drugih pravilnih čvrstih tela takođe su konačne grupe.

Konačne grupe su kompleksna porodica. Grubo govoreći, opšta (konačna) grupa može da se posmatra kao da je sastavljena od nekih osnovnih opeka, koje su same po sebi grupe. Ove osnovne opeke se nazivaju ***proste*** (konačne) grupe. Jedan od najvećih dometa matematike u dvadesetom veku bila je razvrstavanje konačnih prostih grupa. To je bio zajednički napor koji je trajao oko 30 godina, grubo rečeno, od 1950. do 1980. godine. Kompletan popis konačnih prostig grupa sastoji se od: (***Ref. 302***):

1) ***cikličkih grupa*** Z_p glavnog redoseda grupa;
2) ***alternativnih grupa*** A_n stepena n najmanje pet;
3) ***klasičnih linearnih grupa*** PSL(n; q), PSU(n; q), PSp(2n; q) i $P\Omega^{\varepsilon}(n; q)$;
4) ***izuzetnih*** ili ***obrnutih grupa*** Lijeve vrste $^3D_4(q)$, $E^6(q)$, $^2E_6(q)$, $E_7(q)$, $E_8(q)$, $E_4(q)$, $^2E_4(2n)$, $G_2(q)$, $^2G_2(3n)$ i $^2B_2(2n)$;
5) ***26 sporadičnih grupa***, naime M_{11}, M_{12}, M_{22}, M_{23}, M_{24} (Matijeove grupe), J_1, J_2, J_3, J_4 (Jankove grupe), Co_1, Co_2, Co_3 (Konvejeve grupe), HS, Mc, Suz ("bebe" grupe Co_1), Fi_{22}, Fi_{23}, Fi'_{24} (Fišerove grupe), F_1 = M (Monster = čudovište), F_2, F_3, F_6, He (= F_7) ("beba" Monstera), Ru, Ly i ON.

Klasifikacija je završena 1980. godine posle 10.000 stranica objavljenih dokumenata. Dokazi su toliko opširni da je pokrenuta posebna serija kniga kako bi se to rezimiralo i objasnilo. Prve tri porodice su beskonačne. Poslednja porodica, ona iz sporadičnih grupa, je najneobičnija; ona se sastoji od onih konačnih prostih grupa koje ne spadaju u ostale porodice. Neke od ovih sporadičnih grupa možda imaju ulogu u fizici čestica: verovatno čak i većina od njih, takozvana grupa Monster. To je još uvek tema istraživanja. Grupa Monster, ima oko $8{,}1\cdot 10^{53}$ elemenata; još preciznije, njen red je

808 017 424 794 512 875 886 459 904 961 710 757 005 754 368 000 000 000

ili

$$2^{46}\cdot 3^{20}\cdot 5^{9}\cdot 7^{6}\cdot 11^{2}\cdot 13^{3}\cdot 17\cdot 19\cdot 23\cdot 29\cdot 31\cdot 41\cdot 47\cdot 59\cdot 71)$$

Od ***beskonačnih*** grupa, proučene su samo one sa nekim konačnim uslovima. To su samo takve grupe koje su zanimljive u opisu prirode. Beskonačne grupe su podeljene na ***diskretne*** grupe i na ***neprekinute*** grupe. Diskretne grupe su aktivno područje matematičkih istraživanja, pošto imaju veze sa teorijom brojeva i topologijom. Neprekinute grupe se dele na ***konačno generirane*** i ***beskonačno generirane*** grupe. Konačno generirane grupe mogu biti sa konačnim brojem dimenzija i beskonačnim brojem dimenzija.

Najvažnija klasa konačno generisanih kontinualnih grupa su Lijeve grupe.

LIJEVE GRUPE

Lagranžijani osnovnih sila u prirodi invarijante su pri transformaciji merila i pri transformacijama neprekinutog prostor-vremena. Ove grupe simetrija primeri su Lijevih grupa, koje su posebne vrste beskonačnih neprekinutih grupa. Dobile su ime prema velikom norveškom matematičaru Sofusu Liju (Sophus Lie, 1842. Nordfjordfeld – 1899. Kristiania). Njegovo ime seizgovara kao "Li".

(Realna) ***Lijeva grupa*** je beskonačna grupa simetrije, to jest, grupa sa beskrajno mnogo elemenata, koja je isto tako analitička mnogostrukost. Grubo rečeno, to znači da elementi grupe mogu da budu posmatrani kao tačke na glatkoj (hiper-) površini čiji oblik može da bude opisan analitičkom funkcijom, to jest, funkcijom koja je toliko glatka da može da se opiše kao stepeni red u susedstvu za svaku tačku u kojoj je određena. Tačke Lijeve grupe mogu da se pomnože u saglasnosti sa množenjem grupe. Osim toga, koordinate proizvoda moraju da budu analitičke funkcije koordinata činioca, a koordinate invezija elementa moraju da budu analitičke funkcije koordinata elementa. Zapravo, ova odrednica je nepotrebno stroga: može da se proveri da je Lijeva grupa samo topološka grupa čiji je osnovni prostor konačnog broja dimenzija, lokalna euklidska mnogostrukost.

Kompleksna Lijeva grupa je grupa čija je mnogostrukost kompleksna i čije su operacije sa grupom holomorfne (umesto analitičke) funkcije u koordinarama.

Ukratko, Lijeva grupa je mnogostrukost dobrog ponašanja u kojima tačke mogu da se pomnože (i tehnički detalji). Na primer, krug $\boldsymbol{T} = \{z \in \mathbb{C} : |z| = 1\}$, uz obične kompleksne operacije je realna Lijeva grupa: Ona je abelijska. Ova grupa se takođe naziva S_1, pošto je ona jednodimenzionalna lopta ili U(1), što znači "jedinstvena grupa sa jednom dimenzijom". Druge Lijeve grupe sa jednom dimenzijom su multiplikativne

grupe sa realnim brojevima različitim od nule i njihove podgrupe, nultiplikativne grupe sa pozitivnim realnim brojevima.

Do sada u fizici ulogu imaju samo ***linearne*** Lijeve grupe – to jest, Lijeve grupe koje deluju kao linearne transformacije u nekom vektorskom prostoru. (Omotač $\mathrm{SL}(2,\mathbb{R})$ ili kompleksni kompaktni torus primeri su nelinearnih Lijevih grupa.) Važne linearne Lijeve grupe za fizčare su Lijeve podgrupe opšte linearne grupe GL(N,K), gde je K brojno polje. To je određeno kao skup nesingularnih, to jest, invertibilnih, N × N realnih, kompleksnih ili kvaternionskih matrica. Sve Lijeve grupe koje ćemo razmatrati u tekstu koji sledi su ove vrste. Svaka kompleksna invertibilna matrica *A* može da se napiše na jedinstven način sa članovima jedinične matrice *U* i ermitske matrice *H*: (***Izazov 209s***)

$$A = Ue^{H} \quad (H \text{ je dato sa } H = \frac{1}{2}A^{\dagger}A, \text{ a } U \text{ je dato sa } U = Ae^{-H}) \tag{149}$$

Proste Lijeve grupe U(1) i $\mathrm{SO}(2,\mathbb{R})$ i Lijeve grupe zasnovane na realnim i kompleksnim brojevima su abelijske (videti ***Tabelu 37***); sve druge nisu abelijske. Lijeve grupe su mnogostukosti. Prema tome, u Lijevoj grupi može da se odredi rastojanje između dve tačke, tangentna ravan (ili tangentni prostor) u tački i pojmovi integriranja i diferenciranja. Pošto su Lijeve grupe mnogostrukosti, Lijeve grupe imaju istu vrstu strukture kao predmeti na ***slici 179***, ***slici 180*** i ***slici 181***. Lijeve grupe mogu imati samo jedan broj dimenzija, Slično kao za svaku mnogostrukost, njihova globalna struktura sadrži važne informacije. Istražimo ih.

POVEZANOST

Nije teško da se vidi kako su Lijeve grupe SU(N) prosto povezane za sve N = 2, 3, ….: one imaju topologiju lopte sa 2N dimenzija. Lijeva grupa U(1), budući da ima topologiju lopte sa jednom dimenzijom, ili kruga, mnogostruko je povezana.

Lijeve grupe SO(N) ***nisu*** prosto povezane za svako N = 2, 3, … U opštem slučaju grupa SO(N,K) je povezana i GL(N,$\mathbb{C}$) je povezana. Sve Lijeve grupe SL(N,K) su povezane, a SL(N,$\mathbb{C}$) je prosto povezana. U opštem slučaju sve Lijeve polugrupe su povezane. Lijeve grupe O(N,K), SO(N,M,K) i GL(N,$\mathbb{R}$) nisu povezane; one sadrže dve povezane komponente.

Zapazite da Lorencova grupa nije povezana; ona se sastoji od četiri posebna dela. Slično Poenkareovoj grupi , ona nije kompaktna, niti je kompaktan bilo koji od njenih četiri dela. U širem smislu, nepovezanost grupa simetrije prostor-vremena posledica je nekompaktnosti prostor-vremena.

KOMPAKTNOST

Lijeva grupa je ***kompaktna*** ako je zatvorena o ograničena kada se posmatra kao mnogostrukost. Za datu parametrizaciju elemenata grupe, Lijeva grupa je kompaktna ako su svi opsezi parametara zatvoreni i konačnih intervala. U suprotnom, grupa se naziva ***nekompaktnom***. I kompaktne i nekompaktne grupe imaju uloge u fizici. Razlika između ova dva slučaja je važna, pošto predstavljanje kompaktnih grupa može da bude konstruisano na isti orost način kao za konačne grupe, dok se za nekompakne grupe moraju koristiti drugačiji postupci. Kao rezultat toga, opažanja u fizici, koja uvek spadaju u predstavljanje simetrične grupe, imaju različita svojstva u dva slučaja: ako je simetrična grupa kompaktna, opažanja imaju ***diskretan*** spektar; u drugom slučaju nemaju.

Grupe interne transformacije merila, kakve su U(1) i SU(*n*), obrazuju kompaktne grupe. Zapravo, teorija polja ***zahteva*** kompaktne Lijeve grupe za transformaciju merila. Jedine kompaktne Lijeve grupe su grupe torusa: T_n, O(*n*), U(*n*), SO(*n*) i SU(*n*), njihov dvostruki pokrivač Spin(n) i Sp(*n*). Nasuprot tome, grupe SL(*n*,$\mathbb{R}$), GL(*n*,$\mathbb{R}$), GL(*n*,$\mathbb{C}$) i ostale, nisu kompaktne.

Osim što su mnogostrukosti, Lijeve grupe su očigledno takođe i grupe. Pokazalo se da je većina njihovih svojstava grupe otkriveno preko ponašanja elemenata koji su vrlo blizu (kao tačke na mnogostrukosti) do identiteta.

Svaki element kompaktne i povezane Lijeve grupe ima oblik exp(*A*) za neko *A*. Elementi A koji se na taj način pojavljuju obrazuju algebru, koja se naziva ***odgovarajuća Lijeva algebra***. Za svaku linearnu Lijevu grupu, svaki element povezane podgrupe može da bude izražen kao konačan proizvod izložioca elemenata odgovarajuće Lijeve alebre. Matematički, vektorski prostor određen Lijevom algebrom je tangenta

mnogostrukosti određene Lijevom grupom, na položaju jediničnog elementa. Ukratko, Lijeva algebra izražava lokalna svostva Lijeve grupe u blizini identiteta. To je razlog njene važnosti u fizici. (***Strana 273***).

TABELA 37 Svojstva najvažnijih realnih i kompleksnih Lijevih grupa.

Lijeva grupa	**Opis**	**Osobine**	**Lijeva algeb.**	**Opis Lijeve algebre**	**Dimen-zija**
Realne grupe					
$\mathbb{R}^n$	Euklidov prostor sa dodacima	Abelijska, prosto pove-zana, nekonpaktna; $n_0 = \pi_1 = 0$	$\mathbb{R}^n$	Abelijska, stoga Lijeva zagrada je nula, nije prosta	n
$\mathbb{R}^\times$	realni brojevi različiti od nule sa množenjem	Abelijska, nepovezana nekompaktna; $\pi_0 = \mathbb{Z}_2$, nema π_1	$\mathbb{R}$	Abelijska, stoga Lijeva zagrada je nula	1
$\mathbb{R}^{>0}$	pozitivni realni brojevi sa množenjem	Abelijska, jednostavno povezana, nekompaktna, $\pi_0 = \pi_1 = 0$	$\mathbb{R}$	Abelijska, stoga Lijeva zagrada je nula	1
$S^1 = \mathbb{R}/\mathbb{Z} = U(1) = T = SO(2) = Spin(2)$	kompleksni brojevi apsolutne vrednsti 1, sa množnjem	Abelijska, povezana, nije prosto povezana, kompa-ktna, $\pi_0 = 0$, $\pi_1 = \mathbb{Z}$	$\mathbb{R}$	Abelijska, stoga Lijeva zagrada je nula	1
$\mathbb{H}^\times$	kvaternioni različiti od nule sa množenjem	prosto povezana, nekom-paktna $\pi_0 = \pi_1 = 0$	$\mathbb{H}$	kvaternioni sa Lijevom zagradom komutator	4
S^3	kvaternioni apsolutne vrednosti 1, sa množenjem, takođe poznata i kao Sp(1); topološki 3-lopta	prosto povezana, kompaktna; izomorfna sa SU(2), Spin(3) i dvostrukim pokrivačem SO(3); $\pi_0 = \pi_1 = 0$	Im($\mathbb{H}$)	kvaternioni sa nultim realnim delom, sa Lijevom zagradom komutator; prosta ili polu-prosta; izomorfna na realne 3-vektore, sa Lijevom zagradom unakrsni proizvod; takođe izomorfna sa SU(2) i sa SU(3)	3
$GL(n, \mathbb{R})$	opšta linearna grupa; invertibilna $n \times n$ realnom matricom	nepovezana, nekompaktna, $\pi_0 = \mathbb{Z}_2$, nema π_1	$M(n, \mathbb{R})$	$n \times n$ matrica, sa Lijevom zagradom komutator	n^2
$GL^+(n, \mathbb{R})$	n x n realna matrica sa pozitivnom determi-nantom	prosto povezana, nekom-paktna; $\pi_0 = 0$, za $n = 2$, $\pi_1 = \mathbb{Z}$, za $n \geq 2$; $\pi_1 = \mathbb{Z}_2$; $GL^+(1, \mathbb{R})$ izomorfna sa $\mathbb{R}^{>0}$	$M(n, \mathbb{R})$	$n \times n$ matrica, sa Lijevom zagradom komutator	n^2
$SL(n, \mathbb{R})$	specijalna linearna grupa; realna matrica sa determinantom 1.	prosto povezana,, nekom-paktna ako je n > 1, $\pi_0 = 0$, za n = 2; $\pi_1 = \mathbb{Z}$, za $n \geq 2$; $\pi_1 = \mathbb{Z}_2$; $SL(1, \mathbb{R})$ je jedna tačka, $SL(2, \mathbb{R})$ je izomorf-na sa SU(1,1) i $Sp(2, \mathbb{R})$	$sl(n,\mathbb{R}) = A_{n-1}$	$n \times n$ matrice sa tragom 0, sa Lijevom zagradom komutatorom	$n^2–1$
$O(n, \mathbb{R}) = O(n)$	ortogonalna grupa; realne ortogonalne matrice; simetrija hiper-sfere	nepovezana, kompaktna; $\pi_0 = \mathbb{Z}_2$, nema π_1	$so(n,\mathbb{R})$	$n \times n$ realna matrica kose simetrije sa Lijevom zagra-dom komutator; $so(3,\mathbb{R})$ je izomorfna na su(2) i na $\mathbb{R}^3$ sa unakrsnim proizvodom	n(n–1)/2
$SO(n, \mathbb{R}) = SO(n)$	specijalna ortogonalna grupa; realne ortogonalne matrice sa determimantom 1	povezana,kompaktna; za $n \geq 2$ nije prosto poveza-na; $\pi_0 = 0$, za $n = 2$: $\pi_1 = \mathbb{Z}$, za $n \geq 2$: $\pi_1 = \mathbb{Z}_2$	$so(n, \mathbb{R}) = B_{(n-1)/2}$ ili $D_{1/2}$	$n \times n$ realna matrica kose simetrije sa Lijevom zagra-dom komutator; za n = 3 i $n \geq 5$ prosta i poluprosta;	$n(n1)/2$

				SO(4) je poluprosta ali ne prosta	
Spin(n)	spin grupa; dvostruki pokrivač SO(n); Spin (1) je izomorfna na Q_2, Spin(2) na S^1	prosto povezana za $n \geq 3$ i $n \geq 5$ prosta i poluprosta; za $n > 1$: $\pi_0 = 0$, za $n > 2$: $\pi_1 = 0$	so(n, $\mathbb{R}$)	$n \times n$ realna matrica kose simetrije sa Lijevom zagradom komutator	$n(n–1)/2$
Sp($2n$, $\mathbb{R}$)	simplektična grupa; realne simplektičke matrice	nije kompaktna; $\pi_0 = 0$, $\pi_1 = \mathbb{Z}$	sp($2n$, $\mathbb{R}$) = $\mathbb{C}_n$	realne matrice A koje zadovoljavaju $JA + A^TJ = 0$, gde je J standardna matrica[b] kose simetrije, prosta i poluprosta	$n(2n+1)$
Spin(n) za $n \geq 3$	kompaktna simplektična grupa: kvaternionske jedinične matrice $n \times n$	kompaktna, prosto pove-; zana; $\pi_0 = \pi_1 = 0$	sp(n)	$n \times n$ kvaternionske matrice A koje zadovoljavaju $A = -A^*$ sa Lijevom zagradom komuta-tor; prosta i poluprosta	$n(2n+1)$
U(n)	jedinična grupa; kompleksne jedinične matrice $n \times n$	nije prosto povezna kompaktna; nekompleksna Lijeva grupa/algebra $\pi_0 = 0$, $\pi_1 = \mathbb{Z}$; izomorfna na S^1 za $n = 1$	u(n)	$n \times n$ kompleksne mat-rice A koje zadovoljavaju $A = -A^*$, sa Lijevom zagradom komutator	n^2
SU(n)	specijalna jedinična grupa kompleksne jedinične matrice $n \times n$ sa determinantom 1	prosto povezana, kompaktna; nekompleksna Lijeva grupa/algebra $\pi_0 = \pi_1 = 0$	su(n)	$n \times n$ kompleksne mat-rice A sa tragom 0 koje zadovoljavaju $A = -A^*$, sa Lijevom zagradom komutator; za $n \geq 2$ prosta i poluprosta	$n^2–1$
Kompleksne grupe					
$\mathbb{C}^n$	operacija grupe je sabiranje	Abelova, prosto povezana, nije kompaktna; $\pi_0 = \pi_1 = 0$	$\mathbb{C}^n$	Abelova, prema tome je Lijeva zagrada nula	n
$\mathbb{C}^\times$	kompleksni brojevi različiti od nule sa množe-njem	Abelova, nije prosto povezana, nekompaktna $\pi_0 = 0$, $\pi_1 = \mathbb{Z}$	$\mathbb{C}$	Abelova, prema tome je Lijeva zagrada nula	1
GL(n, $\mathbb{C}$)	opšta linearna grupa kompleksna invertirajuća matrica n × n	prosto povezana, nekompaktna $\pi_0 = 0$, $\pi_1 = \mathbb{Z}$ za $n = 1$ izomorfna na $\mathbb{C}^n$	M(n, $\mathbb{C}$)	$n \times n$ matrica sa Lije-vom zagradom komutator	n^2
SL(n, $\mathbb{C}$)	specijalna linearna grupa; kompleksne matrice sa determinantom 1	prosto povezana; za $n \geq 2$ nekompaktna $\pi_0 = \pi_1 = 0$ SL(2, $\mathbb{C}$) je izomorfnana na Spin(3, $\mathbb{C}$) i Spin (2, $\mathbb{C}$)	sl(n, $\mathbb{C}$)	$n \times n$ matrica sa tragom 0, sa Lijevom zagradom komutator; prosta, poluprosta; sl(2, $\mathbb{C}$) je izomorfna na su(2, $\mathbb{C}$) $\otimes$ $\mathbb{C}$ $\mathbb{C}$	$n^2–1$
PSL(2, $\mathbb{C}$)	projektivna specijalna linearna grupa; izomorfna na Möbijus grupu, na smanjenu Lorencovu grupu $SO^+(3,1, \mathbb{R})$ i na SO(3, $\mathbb{C}$)	nekompaktna; $\pi_0 = 0$, $\pi_1 = \mathbb{Z}_2$	sl(2, $\mathbb{C}$)	2 × 2 matrice sa tragom 0, sa Lijevom zagradom komutator; sl(2, $\mathbb{C}$) je izomorfna na su(2, $\mathbb{C}$) $\otimes$ $\mathbb{C}$	3
O(n, $\mathbb{C}$)	ortogonalna grupa; kompleksne ortogonalne matrice	nije povezana; za $n \geq 2$ nekompaktna; $\pi_0 = \mathbb{Z}_2$, nema π_1	so(n, $\mathbb{C}$)	kose simetrične $n \times n$ kompleksne matrice, sa Lijevom zagradom komutator	n(n–1)/2
SO(n, $\mathbb{C}$)	specijalna ortogonalna grupa; kompleksne ortogonalne matrice sa determinantom 1	za $n \geq 2$ nekompaktna nije prosto povezana; , $\pi_0 = 0$, za $n = 2$: $\pi_1 = \mathbb{Z}$, za $n \geq 2$: $\pi_1 = \mathbb{Z}_2$;	so(n, $\mathbb{C}$)	kose simetrične $n \times n$ kompleksne matrice, sa Lijevom zagradom komutator; za n = 3 i $n \geq 5$	n(n–1)/2

		neabelova za $n > 2$, SO(2, ℂ) je abelova i izomorfna na $\mathbb{C}^{\times}$		proste i poluproste	
Sp(2n, ℂ)	simplektična grupa; kompleksne simplek-tične matrice	nekompktna; $\pi_0 = \pi_1 = 0$	sp(2n, ℂ)	kompleksne matrice koje zadovoljavaju $JA + A^T J = 0$, gde je J standardna koso simetrična matrica;[b] prosta i poluprosta	n(2n+1)

a. Data je ***grupa komponenata*** π_0 Lijeve grupe; red π_0 je broj konponenata Lijeve grupe. Ako je grupa trivijalna (0), Lijeva grupa je povezana. Data je o***snovna grupa*** π_1 povezane Lijeve grupe. Ako je grupa π_1 trivijalna (0), Lijeva grupa je prosto povrzana. Tabela se napravljena prema podacima sa veb strane na Wikipedija en.wikipedia.org/wiki/Table_of_Lie_groups

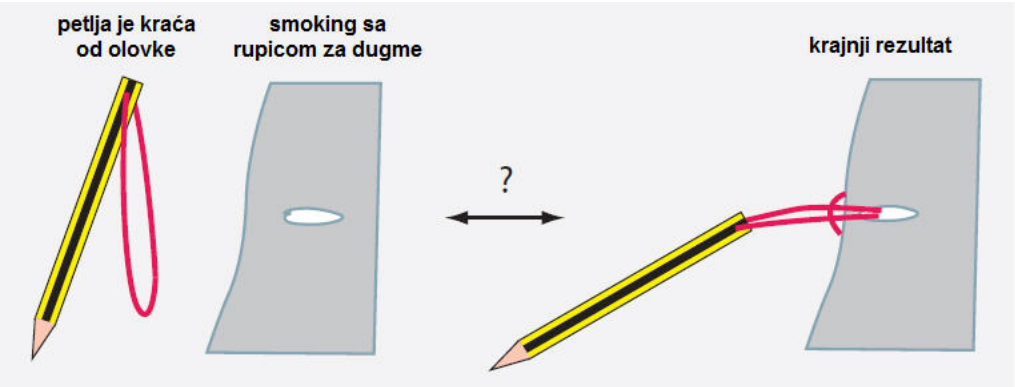
b. Standardna matrica koso simetrična J reda 2n je $J_{kl} = \delta_{k,n+l} - \delta_{k+n,l}$

c. Kompleksne Lijeve grupe i Lijeva algebra mogu da se posmatraju kao realne Lijeve grupe i Lijeva algebra dvostrukih dimenzija,

MATEMATIČKE ZANIMLJIVOSTI I ZABAVNI IZAZOVI

Teorema topologije kaže: ne možeš da češljaš kosmatu fudbalsku loptu. Možete li to da dokažete? (***Izazov 210ny***).

* * *



Slika 184 Poznati magični trik: naterajte svog prijatelja da poludi vezivanjem olovke za njegov večernji sako.

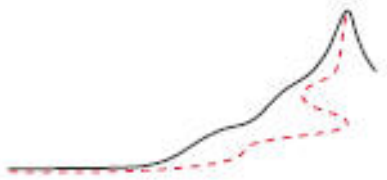
Topologija je zanimljiva. Ukoliko želite da se smejete pola sata, pričvrstite prilagođenu olovku, kako je pokazano na ***slici 184*** za rupicu dugmeta i pustite društvo da otkrije kako da je ponovo oslobode.

* * *

Postoji najmanje šest načina da se zaradi milion dolara preko istraživanja u matematici. Clay Mathematics Institute, veb strana www.claymath.org/ nudi takvu nagradu za veliki napredak u sedam tema:

- dokazati Birč (Bryan Birch) i Svinerton-Dijer (Peter Swinnerton–Dyer) predpostavku o algebar-skim jednakostima;
- dokazati Poenkereovu (Poincare) predpostavku o topološkim mnogostranostima.
- rešiti Navier-Štoksove jednakosti za tečnosti;
- naći kriterijume za razlikovanje P i NP numeričkih problema;
- dokazati Rimanovu (Riemann) hipotezu koja izražava da netrivijalne nule zeta funkcije leže na liniji;
- dokazati Hodžeovu (Hodge) pretpostavku;
- dokazati povezanost između Jang-Milsove (Yang-Mills) teorije i praznine mase u kvantnoj teoriji polja (***Vol. VI, strana 244***).

Poenkareovu predpostvku rešio je 2002. godine Grigorij Perelman (Grigorij Jakovlevič Perelman); za svaku od ostalih šest tema znatan napredak može da vam kupi kuću.



IZAZOVI, SAVETI I REŠENJA

Izazov 1s, ***strana 10***: Nemojte se ustručavati da budete zahtevni i strogi. Sledeće izdanje će imati od toga korist

Izazov 2s, ***strana 17***; Primer je virus. On nema sopstven metabolizam. Uzgred, sposobnost nekih virusa da obrazuju kristale nije dokaz da oni nisu živa bića, nasuprot onome što se često kaže.

Izazov 3s, ***strana 19***; Primer je sistem za navigaciju koji koriste muve.

Izazov 6s, ***strana 21***: Toplotna energija kT je oko 4 zJ i obično je vreme relaksacije 0,1ps

Izazov 8s, ***strana 27***: Tvrdnja je ispravna.

Izazov 9d, ***strana 27***; U sadašnje vreme to nije moguće. Ukoliko znate način, objavte ga. To bi pomoglo samohranim majkama koje moraju da žive bez finansijske pomoći očeva, uprkos tužbama, pošto je još uvek nemoguće da se utvrdi koji je od dva kandidata onaj pravi.

Izazov 10s, ***strana 28***: Takođe i identični blizanci se računaju kao posebne osobe i imaju različite sudbine. Obeležja u materici su različita, tako da će i njihovi temperamenti biti različiti. Doživljaj pri rađanju će biti različiti; to su najjaći utisci za sve ljude, koji prave razliku između njihovih strahova i stoga njihovih karaktera. Osoba čiji je otac stariji takođe se razlikuje od osobe čiji je otac mlađi. Ako materica nije ona njegove biološke majke, dobijaju se dalje razlike od predhodnih i najjačeg su iskustva.

Izazov 11r, ***strana 28***; Obavezno objavite svoje rezultate.

Izazov 12s, ***strana 28***: Da, ali samo jako mladog. Zašto?

Izazov 13s, ***strana 28***: Životne hemikalije se stvaraju unutar tela; asimetrija se nasleđuje tokom generacija. Zajednička nesimetrija stoga pokazuje da život ima zajedničko poreklo.

Izazov 14s, ***strana 28***: Dakle, muškarci su mnogo sličniji šimpanzama nego li žene. Ozbiljnije, gornji podaci, iako se često navode, pogrešni su. Novija merenja koja je izvršio Roj Briten (Roy Britten) 2002. godine, pokazala su da razlika u genima između ljudi i šimpanza iznosi oko 5%. (Videti R. J. Britten, *Divergence between samples of chimpanzee and human DNA sequences is 5%, counting indels*, Proceedings of the National Academy of Sciences **99**, pp. 13633–13635, 15th of October, 2002). Osim toga, iako su razlike između muškaraca i žena manje od jednog celog hromozoma, veličina X hromozoma u poređenju sa malim Y hromozomom, podrazumeva da muškarci imaju oko 3% manje genetskog materijala nego li žene. Međutim, svi muškarci imaju takođe i X hromozom. To objašnjava što sva druga merenja navode da svi ljudi dele bazu od 99,9% zajedničkih gena.

Izazov 17d, ***strana 30***: Hemijski procesi, uključujući rastvaranje i brzinu reakcija, jako zavise od temperature. Ona utiče na brzinu kretanja pojedinaca i time i na njegove šanse opstanka. Održavanje temperature u ispravnom opsegu važno je za razvoj oblika života.

Izazov 18r, ***strana 30***: Prvi korci nisu uopšte poznati. Procesi koji slede i dodaju složenost ćelija bolje su poznati.

Izazov 19s, ***strana 30***: Pošto svi atomi od kojih smo mi sačinjeni potiču iz spoljnog prostora, odgovor je da. Ali ako to znači da su biološke ćelije došle na zemlju iz svemira, odgovor je ne, pošto nijedna ćelija ne voli vakuum. Isto to važi i za DNK.

Ustvari, život i reprodukcija svojstva su složenih sistema. Drugim rečima, pitanje da li je život došao iz svemira, liči na pitanje "Može li osiguranje automobila da potiče iz svemira?"

Izazov 21r, ***strana 32***: Nije jasno da li postoje pouzdani podaci za odgovor na ovo pitanje – uprkos tome što je interesantno

Izazov 22s, ***strana 34***: Zar još niste probali? Fizika je eksperimentalna nauka.

Izazov 30s, ***strana 40***: Eksponencijalni raspad se dešava kada je verovatnoća raspada stalna u vremenu. Za ljude to nije slučaj. Zašto nije?

Izazov 31s, ***strana 43***: Ne postoje procesi koji nisu fizički: sve što može da se posmatra fizučki je proces. Svest je usled procesa u mozgu, stoga unutar materije; zato je to i kvantni proces. Na telesnoj temperaturi koherencija ima vreme trajanja mnogo manje od procesa razmišljanja.

Izazov 32s, ***strana 44***: Može se reći da se metoda radioaktivnog određivanja datuma zasniva na nuklearnim interakcijama, iako je otkrivanje opet elektromagnetno.

Izazov 33s, ***strana 44***: Svi detektori svetlosti mogu da se nazovu relativističkim, pošto se svetlost kreće maksimalnom brzinom. Senzori dodira nisu relativistički u uobičajenom smislu reči, pošto je prisutna brzina isuviše mala. Energije su male u poređenju sa ostalim energijama; to je slučaj čak i kada je energija signala pridružena samo elektronu.

Izazov 34s, ***strana 44***: Šum nastaje usled fotoakustičkog efekta; periodična svetlost zagreva periodično vazduh u tegli džema na zatamnjenoj površini i proizvodi zvuk. Videti M. Euler, *Kann man Licht horen?*, Physik in unserer Zeit 32, strane. 180–182, 2001.

Izazov 35s, ***strana 46***: To podrazumeva da nisu mogući ni vaskrsenje, ni reinkarnacija, ni večni život.

Izazov 38s, ***strana 54***: Etanol raskida veze vodonika u molekulima vode, tako da, u proseku, oni mogu da se međusobno približe. Na veb strani www.youtube.com/watch?v=Dyw1OvYUKL0 može da se vidi video zapis ovog eksperimenta.

Izazov 41s, ***strana 55***: Dobićete intenzivnu žutu boju usled stvaranja olovo-jodida (BbI_2)

Izazov 43s, ***strana 57***: Uobičajen način da se pomorandže pakuju na stolu je najgušći način pakovanja lopti.

Izazov 44s, ***strana 59***: Uzmite samo papir za crtanje. Nacrtajte poligon, pa ga kasnije nacrtajte ponovo, uzimajući u obzir kako su se stranice povećale sa vremenom. Sami ćete se uveriti kako stranice sa bržim povećanjem nestaju sa vremenom.

Izazov 46s, ***strana 64***: Kombinacijom postupaka iz ***Tabele 7*** to je zaista nemoguće. Zapravo, korišćenje kosmičkog zračenja radi traganja za nepoznatim komorama u piramidama već je bilo urađeno 1960. godine (***Ref. 303***). Rezultat je bio da ne postoje druge komore.

Izazov 48s, ***strana 70***: Na primer, teške planine će potiskivati naniže koru Zemlje u omotaču, čineći da se topi donja strana, pa tako smanjivati položaj vrha.

Izazov 49r, ***strana 70***: Ovaj razvoj je već započet; rezultat je još uvek daleko od orginalnog koji pokušava da se kopira, pošto oni moraju da ispune drugi uslov, pored toga što je "kopija" orginalnog pera ili od lateksa: kopija mora da bude jeftinija od orginala. To je često mnogo teži zahtev od prvog.

Izazov 50s, ***strana 70***: Oko 0,2 m.

Izazov 52s, ***strana 70***: Pošto je veličina potencijala uvek konačna, zidovi se uvek mogu savladati tunelskim efektom.

Izazov 53s, ***strana 70***: Poklopac kutije nikad ne može da bude u stanju mirovanja, što je potrebno za čvrsto zatvaranje, pošto je zbog kvantnog rada uvek u pokretu.

Izazov 55s, ***strana 70***: Jedinica provodnosti toplote je $T\pi^2k^2/3\hbar$, gde je T temperatura, a k je Bolcmanova konstanta.

Izazov 56s, ***strana 72***: Izuzetno vitke strukture nisu moguće iz dva razloga: prvi, jer strukture od homogenih materijala ne mogu da postignu takav odnos; drugi, svojstva savitljivosti biljaka nisu obično primenljiva u strukturama koje grade ljudi.

Izazov 57s, ***strana 74***: Koncentracije se mogu meriti i na polarnim kapama, merenjem kako se koncentracija izotopa menja sa dubinom. I u isparenjima i u kondenzatu vode odnos izotopa zavisi od temperature. Merenja na Antarktiku u na Grenlandu su podudatna, što je dobar znak njihove pouzdanosti.

Izazov 58s, ***strana 75***: Asfalt je mekan leti.

Izazov 61s, ***strana 87***: Neko drugi je bacio. Energija košta oko 10 centi/kWh. Od novih sijalica, fluorescentna sijalica je najbolja za životnu sredinu, iako je ona zbog treperenja najmanje prijatna za oko i mozak.

Izazov 62d, ***strana 90***: Ovaj stari san zavisi od preciznih uslova. Koliko savitljiv mora da bude displej? Koliko mora da ima vreme trajanja? Displej sličan novinama star je mnogo godina i možda više nije moguć.

Izazov 63r, ***strana 90***: Postoji samo nagoveštaj za odgovor; sklonost većine istraživača je da kažu ne.

Izazov 64r, ***strana 91***: Ovde je izazov da se nađe jeftin način skretanja zraka lasera na način da kojim može da se upravlja. Već su na raspolaganji jeftini laseri.

Izazov 65s, ***strana 91***: Ne, kao što je nemoguće zbog očuvanja količine kretanja i zbog teoreme neklo-niranja.

Izazov 66d, ***strana 91***: Postoje kompanije koje pokušavaju da prodaju sisteme koji se zasnivaju na kvantnoj kriptologiji, ali uprkos tehničkom interesu pod sumnjom je komercijalni uspeh.

Izazov 67d, ***strana 91***: Predviđao sam 2000. godine da masovna proizvodnja dobara korišćenjem ove tehnologije (prodatih najmanje 1 milion komada) neće biti dostupna do 2025. godine.

Izazov 68r, ***strana 91***: Možda, ali po izuzetno visokim cenama.

Izazov 69s, ***strana 91***: Postavka je pristupačna: koristi laser od 3,39 μm, detektor i neku optika na stativu. Osetljivost na apsorpciju alkohola je odlična. Samo će budućnost reći.

Izazov 70s, ***strana 95***: Na primer, gravitaciju možete izmeniti između dva ogledala.

Izazov 71s, ***strana 95***: Kao i obično u takvim iskazima ili je navedena grupa brzine faze, ali ne i odgovarajuća brzina energije koja je uvek manja od c.

Izazov 73s, ***strana 98***: Eho ne funkcioniše pošto se dostigne brzina zvuka i ne funkcioniše kada se približi brzini zvuka. I brzina svetlosti i brzina zvuka imaju konačne vrednosti. Pomeranja sa ogledalom još uvek daju sliku u ogledalu. To znači da brzina svetlosti ne može da se postigne. Ako ona ne može da se postigne, ona mora da bude ista za sve posmatrače.

Izazov 74s, ***strana 98***: Ogledala obično ne funkcionišu za materiju; osim toga ako ne funkcionišu, materija zbog njene energije mirovanja, zahtevala bi mnogo veće vrednosti ubrzanja.

Izazov 77s, ***strana 99***: Klasični poluprečnik elektrona, koji je veličine pri kojoj bi polje energije sačinjavalo celu masu elektrona, manji je oko 137 puta, mnogo manji od Komptonove talasne dužine elektrona.

Izazov 78s, ***strana 100***: Ispust može imati bilo koju vrednost. Ne postoji ograničenje. Uzimajući u obzir relaciju neodređenosti, uvodi se ograničenje da poslednja cigla ili karta ne smeju da dozvole da težište bude iznad ivice stola, zbog njihovih neodređenosti.

Izazov 79s, ***strana 101***: Veći naboj bi doveo do polja koje bi spontano stvaralo parove elektron pozitron, elektron bi pao u jezgro i smanjio nvegov naboj za jednu jedinicu.

Izazov 81s, ***strana 101***: Halov efekt je rezultat odstupanja elektrona u metalu usled primenjemog magnetnog polja. Prema tome on zavisi od njihove brzine. Dobijaju se vrednosti od oko 1 mm. Kao približnost u atomu se može koristiti Borov model atoma.

Izazov 82s, ***strana 101***: Koraci nastaju usled prirode elektriciteta čestice i svih ostalih predmeta koji se kreću.

Izazov 83d, ***strana 101***: Ako bismo mogli da primenimo paradoks Banah-Tarski na vakuum, izgledalo bi da možemo bez ikakvih problema da rascepimo jednu loptu vakuuma na ***dve*** lopte vakuuma, od kojih svaka ima istu zapreminu kao orgimal. (***Vol. I, strana 50***). Drugim rečima, jedna lopta sa energijom vakuuma E nebi mogla da se razlikuje od dve lopte sa energijom vakuuma $2E$.

Paradoks Banah-Tarski koristimo na takav način da se pokaže kako čokolada (ili bilo koja druga materija poseduju sopstvenu dužinu. (***Vol. I, strana 243***). Međutim, nije jasno da možemo da zaključimo da vakuum ima sopstvenu dužinu. Ustvari, paradoks se me može primeniti na vakuum iz dva razloga. Prvo, u prirodi zaista postoje maksimalna energija i

minimalna dužina. Drugo, ne postoji u prirodi mesto bez energije vakuuma, tako da ne postoji mesto u koje bismo stavili drugu loptu. Stoga ne znamo zašto paradoks Banah-Tarski za vakuum ne može da se primeni i ne možemo da ga primenimo da bismo zaključili postojanje minimalne dužine u vakuumu.

Bolje je da se o minimalnoj dužini u vakuumu raspravlja na sledeći način. Ako tamo nebi postojao prekid sopstvene dužine, energija vakuuma bi bila beskonačna. Eksperimenti, međutim, pokazuju da je ona konačna.

Izazov 84s, ***strana 101***. Mulj je smeša sa peskom, a pesak nije providan, mada je načinjen od providnog kvarca, pošto se svetlost nepravilno rasipa na nepravilnim površinama zrnaca peska. Rastvor ne može da bude providan ako su različiti indeksi prelamanja tečnosti i umešanih čestica. On nije nikada proziran ako čestice, kao kod svih vrsti peska, nisu ni sama prozirna.

Izazov 85s, ***strana 101***: Prvi odgovor je verovatno ne, pošto složeni sistemi ne mogu da budu manji od njihovih sopstvenih Komptonovih talasnig dužina, samo elementarni sistemi to mogu. Međutim, svemir nije sistem, pošto nema okolinu. Kao takav, njegova dužina nije precizno određen pojam, pošto je neophodna okolina da bi se izmerila i da bi se odredila. (Osim toga, u obzir mora da se uzme i gravitacija u toj oblasti.) Stoga je odgovor: u toj oblsti ovo pitanje je besmisleno.

Izazov 86s, ***strana 102***: Postupci za kretanje na savršenom ledu pomoću mehanike:

- ako je led potpuno ravan, mirovanje je moguće samo u jednoj tački – u suprotnom čete oscilovati oko te tačke, kao što je pokazano u ***Izazovu 25***;
- ne činite ništa, samo čekajte da će vas odvući veće centrifugalno ubrzanje na visini tela;
- da biste se obrtali samo obrćite ruke iznad glave;
- odbacite cipelu ili bilo koji drugi predmet;
- udahnite vertikalno, a izdahnite (ili govorite) horizontalno (ili obrnuto);
- sačekajte da vas pomeri centrifugalno ubrzanje usled obrtanja Zemlje (i njene spljoštenosti):
- skačite učestano u vis: Koriolisovo ubrzanje će dovesti do kretanja u horizontalnom pravcu.
- čekajte da vas pomere Sunce ili Mesec, kao što to čine sa plimom;
- "plivajte" u vazduhu koristeći ruke i stopala;
- čekajte da vas udari ptica, osa koja leti, kiša pod nagibom, vetar, lava, zemljotres. tektonska ploča ili bilo koji drugi makroskopski objekt (svi objekti koji guraju računaju se kao jedno rešenje);
- čekajte da se pomerite u promeni gravitacuje usled provodnosti u omotaču Zemlje;
- čekajte da vas pomeri gravitacija neke komete koja prolazi;
- računa se samo za decu: pljunite, kijajte, kašljite, prdite, urinirajte ili pomerajte uši i koristite ih kao krila.

Primetimo da lepljenje vašeg jezika nije moguće na savršenom ledu.

Izazov 87s, ***strana 102***: Postupci za kretanje na savršenom ledu koristeći termodinamiku ili elektrodinamiku:

- koristite radio ili TV stanicu u blizini da vas odgurne;
- koristite prenosni telefon i ogledalo;
- uključite džepnu svetiljku, dopuštajući da vas odgurne svetlost;
- čekajte da vas pomeri Braunovo kretanje u vazduhu;
- zagrejte jednu stranu tela, zračenje crnog tela će vas pomeriti;
- zagrejte jednu stranu tela, na primer radom mišića, promena protoka vazduha ili isparavanje će vas pomeriti
- čekajte da vam jedna strana tela bude hladnija od druge i da vas pomeri odgovarajuće zračenje crnog tela;

- čekajte na termodinamičko polje Zemlje odgurne neki feromagnetni ili paramagnetni metalni deo u vašoj odeći ili telu.
- čekajte da vas pomeri pritisak svetlosti, odnosno fotoni, sa Sunca ili sa zvezda; možda da koristite džepno ogledalo da povećate učinak:
- trljajte neki predmet od polimera da biste ga naelektrisali, a zatim ga krećite u krugovima, čime ćete obrazovati magnetno polje koje će biti u interakciji sa Zemljinim,

Primetimo da se savršena površina leda bez trenja ne topi.

Izazov 88s, ***strana 102***: Postupci za kretanje na savršenom ledu koristeći opštu teoriju relativnosti:

- pomerite ruku da biste emitovali gravitacijsko zračenje
- skrenite zračenje iz pozadine svemira pomoću džepnog ogledala;
- čekajte da vas pomeri gravitacijsko zračenje od urušavanja zvezda;
- čekajte sa se svemir skuplja.

Izazov 89s, ***strana 102***: Postupci za kretanje na savršenom ledu koristeći kvantne efekte:

- čekajte da se vaša talasna funkcija raširi i uruši ma kraju površine leda;
- čekajte da se komadi metala u odelu privuku od metala u okruženju usled Kazimirovog efekta;
- čekajte da vas potisne radioaktivni raspad u vašem telu.

Izazov 90s, ***strana 102***; Postupci za kretanje na savršenom ledu koristeći nauku o materijalima, geografiju i astrofiziku

- pomerićete se od radio talasa koje emituju atmosferska pražnjenja i apsorbuju se u bolnim zglobovima ljudi;
- čekajte da vas pomere kosmički zraci;
- čekajte da vas pomere neutrini sa Sunca;
- čekajte da vas pomeri pretvaranje Sunca u crvenog džina;
- čekajte da vas pogodi meteorit.

Izazov 91s, ***strana 102***; Postupci za kretanje na savršenom ledu koristeći samoorganizovanje, teoriju haosa i biofiziku:

- čekajte da struje u vašem mozgu budu u intrakciji sa magnetnim poljem Zemlje tako što ćete da upravljate mislima.

Izazov 92s, ***strana 102***: Postupci za kretanje na savršenom ledu koristeći kvantnu gravitaciju:

- ubrzajte rukom vaše džepno oledalo;
- skrenite pomoću džepnog ogledala Unruovo zračenje Zemlje;
- čekajte na raspad protona da vas gurne usled trzaja.

Izazov 94s, ***strana 108***: Ovo je trik pitanje: ako odgovorite zbog čega, možete pravo da odete u sledeći deo pustolovine i da proverite svoj odgovor. Gravitacijski potencijal menja fazu talasne funkcije, kao što to čine svi ostali potencijali; međutim, zašto je to tako, postaće jasno tek u zadnjem delu ove serije.

Izazov 99s, ***strana 110***: Ne. Granična stanja čestica bez mase uvek su nestabilna.

Izazov 100s, ***strana 110***: Ovo je lako samo ako je veličina crne rupe uneta u Bekenštajnove granice entropije. Prost zaključak o entropiji crne rupe koja uključuje činilac 1/4 nije još dostupan, više o tome u poslednjem delu.

Izazov 101s, ***strana 111***: Granica entropije podrazumeva i granicu informacije; samo određene informacije mogu da budu prisutne u određenoj oblasti prirode.

Izazov 102s, ***strana 111***: U prirodnim jedinicama tačno izražavanje entropije je $S = 0{,}25\ A$. Ako svaka Plankova površina nosi jedan bit (stepen slobode), entropija bi bila $S = \ln W = \ln(2^A) = A \cdot \ln 2 = 0{,}693A$. Ovo je bilizu tačne vrednosti.

Izazov 106s, ***strana 116***: Svemir sadrži oko 10^{22} zvezda; Sunce ima sjajnost od oko 10^{26} W; ukupna sjajnost vidljive materije u svemiru je stoga oko 10^{48} W. Eksplozija gama zraka emituje do $3\cdot10^{47}$ W.

Izazov 112s, ***strana 117***: Oni su odneseni gravitacijskim zračenjem.

Izazov 118s, ***strana 120***: Nije poznat nijedan sistem u prirodi koji emituje ili apsorbuje samo jedan graviton istovremeno. To je druga tačka u razgovoru protiv postojanja gravitona.

Izazov 122s, ***strana 127***: Dve složene folije ispoljavaju isti efekt kao jedna folija iste ukupne debljine. Prema tome, površina nema nikakvu ulogu.

Izazov 124s, ***strana 130***: Elektron je zadržan od pozitivnog naelektrisanja jezgra, ako je broj protona u jezgru dovoljan, kao što je u slučaju za ona jezgra od kojih smo napravljeni.

Izazov 126s, ***strana 136***: Vreme poluraspada $t_{1/2}$ odnosi se prema vremenu trajanja τ kao $t_{1/2} = \tau\cdot\ln 2$

Izazov 127s. ***strana 137***: Brojka je mala u odnosu n broj ćelija. Međutim, moguće je da je raspad u vezi sa starenjem ljudi.

Izazov 129s, ***strana 138***: Preko brojanja raspada i brojanja atoma uz dovoljnu preciznost.

Izazov 131s, ***strana 139***: Radioaktivnost koja je potrebna da održavala Zemlju toplom je mala; lava je samo neznatno radioaktivnija od običnog zemljišta.

Izazov 132s, ***strana 147***: Ne postoji način da se u takvom raspadu očuvaju i energija i količina kretanja.

Izazov 133s, ***strana 147***: Kombinacija rentgenovih zraka i ultraljubičastog zračenja velikih energija dovodi do tog efekta.

Izazov 136s, ***strana 156***: Jezgra azota i ugljenika imaju veliki električni naboj koji jako odbija protone.

Izazov 138d, ***strana 161***: Pogledajte dokument od C.J. Hogana koji je pomenut u ***Ref. 269***.

Izazov 139s, ***strana 164***: Dodirnuti nešta zahteva da se dođe u blizinu toga; približavanje znači neodređenost malog vremena i položaja; to podrazumeva malu talasnu dužinu sonde koja se koristi za dodir; ovo podrazumeva veliku energiju.

Izazov 142s, ***strana 170***: Procesi u prirodi su elektromagnetni, stoga električni naboji daju učestanost uz koju se pojavljuju.

Izazov 143s, ***strana 177***: Projektovanje nuklearnog oružja nije teško. Studenti na univerzitetima mogu to da urade i čak su to uradili nekoliko puta. Prvi studenti koji su to uradili bila su dva diplomca fizike 1964. godine, kako je rečeno na veb strani www.theguardian.com/world/2003/jun/24/usa. science. Nije teško osmisliti prijekt, čak ga i napraviti. Daleko veći je problem dobiti ili napraviti nuklearni materijal. To zahteva ili izuzetno kriminalne radnje ili ogroman tehnički napor, uz brojne velike fabrike, opširan razvoj i koordinaciju mnogih tehnoloških aktivnosti. Još je važnije da takav projekt zahteva velika novčana ulaganja, koja siromašne zemlje ne mogu da dopuste sebi bez velikog žrtvovanja celog stanovništva. Problem zato nije tehnički, već novčani.

Izazov 147s, ***strana 201***: Godine 2008. procena je da se saglasilo 98% svih fizičara. Vreme će pokazati da li su oni bili u pravu.

Izazov 149s, ***strana 210***: Masa od 100 kg i brzina od 8 m/s zahteva površinu krila od 42 m^2.

Izazov 152s, ***strana 216***: Pitanje je manevar odvlaćenja. Svet ima tri dimenzije.

Izazov 153d, ***strana 217***: Najveći ugao obrtanja $\Delta\varphi$ koji može da se postigne u jednom udarcu C nalazi se tako što se maksimizira integral

$$\Delta\varphi = -\int_C \frac{|a^2}{a^2+b^2}\mathrm{d}\theta \qquad (150)$$

Pošto je putanja C u prostoru zatvorenog oblika, možemo da koristimo Štoksovu teoremu za transformaciju linijskog integrala u površinski integral nad površinom S koju ograničava kontura C u prostoru oblika:

$$\Delta\varphi = \int_S \frac{2ab^2}{\left(a^2+b^2\right)^2} \mathrm{d}a\,\mathrm{d}\theta \qquad (151)$$

Maksimalan ugao se nalazi tako što θ može da se menja najviše između 0 i π i da a može da se menja najviše između 0 i ∞.To daje

$$\Delta\theta_{\max} = \int_{\theta=0}^{\pi}\int_{a=0}^{\infty} \frac{2ab^2}{\left(a^2+b^2\right)^2} \mathrm{d}a\,\mathrm{d}\theta = \pi \qquad (152)$$

Izazov 155s, ***strana 221***: Oblak ostaje da lebdi i kompaktan je zbog konvekcijskih strujanja. Oblaci bez konvekcije često mogu da se vide leti: oni su rasuti i nestaju. Detalji o unutrašnjim i spoljašnjim strujama vazduha zavise od vrste oblaka i tema su istraživanja same po sebi.

Izazov 160s, ***strana 225***: Rešetke nisu izotropne, rešetke nisu Lorencova invarijanta.

Izazov 162s, ***strana 228***: Beskonačan zbir nije definisan za brojeve, međutim on je određen za učvorenu strunu.

Izazov 163r, ***strana 229***: Trka istraživača za rešenjem je u toku, međutim, cilj je još uvek daleko.

Izazov 164r, ***strana 229***: Ovo je prosto, ali teško pitanje. Nađte ga!

Izazov 167s, ***strana 231***· Velike kapi kiše su kao palačinke sa masivnim zadebljanjem po obodu. Kada se veličina povećava, na primer, kada velika kap pada kroz paru, kap se razdvaja tako što se pocepa centralna membrana.

Izazov 168s, ***strana 232***: To je crtež; ako je prikazan kao slika objekta u tri dimenzije, on ili ne postoji ili nije zatvoren, ili je optička varka torusa.

Izazov 169d, ***strana 232***: Videti T. Fink & Y. Mao, *The 85 Ways to Tie a Tie*, Broadway Books, 2000.

Izazov 170s, ***strana 232***: Videti T. Clarke, *Laces high*, Nature Science Update 5th of December,2002, ili pogledajte veb stranu www.nature.com/nsu/021202/021202-4.html.

Izazov 173r, ***strana 233***: Ustvari, do sada niko nije pokušavao da to uradi. To može da bude takođe i zbog toga što problem nema smisla.

Izazov 175s, ***strana 238***: Većina svojstava makroskopskih materija spada u ovu klasu, kao što je promena gustine vode sa temperaturom.

Izazov 177r, ***strana 241***: Pre no što predpostavke mogu u potpunosti da se provere, mora najpre da se razjasni odnos čestica i crnih rupa.

Izazov 178s, ***strana 243***: Nikada ne očekujte tačno rešenje za lični izbor. Uvek uradite onako kako vi mislite da je ispravno.

Izazov 183s, ***strana 249***: Plankove granice mogu biti prekoračene za obimne osmatrane materijale za koje mnogi sistemi čestica mogu premašiti granice pojedinačnih čestica, kao što su masa, količina kretanja, energija ili električni otpor.

Izazov 185s, ***strana 250***: Ne zaboravite relativističko širenje vremena.

Izazov 186s, ***strana 251***: Obrazac sa n-1 bolje se uklapa.

Izazov 192s, ***strana 256***: Usporavanje se smanjuje sa ***kvadratom*** vremena, pošto se svako novo usporavanje dodaje starom!

Izazov 193s, ***strana 257***: Ne, nabrojana su samo svojstva delova svemira. Sam svemir nema svojstava, kao što će se videti u poslednjem delu. (***Vol. VI, strana 90***).

Izazov 194s, ***strana 259***: Konstante povezivanja merila, preko Plankove dužine, određuju veličine atoma, jačinu hemijskih veza i prema tome veličinu svih stvari.

Izazov 195s, ***strana 269***: Kovalentne veze teže da naprave pune ljuske; to je mala promena na desnoj strani periodične tablice.

Izazov 196s, ***strana 271***: Rešenje je skup svih matrica 2x2, pošto svaka matrica 2x2 određuje linearnu transformaciju, ako se definiše transformisana tačka kao proizvod tačke i ove matrice.

(Samo množenje sa fiksnom matricom može da daje linearnu transformaciju.) Možete li da prepoznate iz matrica da li je obrtanje, odbijanje, širenje, smicanje ili rastezanje duž dve ose? Koje su preostale mogućnosti?

Izazov 199s, ***strana 272***: (Najjednostavniji) proizvod dve funkcije dobija se množenjem tačke po tačke.

Izazov 200s, ***strana 272***: Norma $\|f\|$ realne funkcije f definisana je kao supremum njene apsolutne vrednosti.

$$\|f\| = \sup_{x \in R} |f(x)| \tag{153}$$

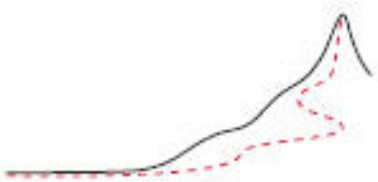
Jednostavnijim pojmovima: maksimalna vrednost uzeta od apsolutne vrednosti funkcije je njena norma. Ona se često naziva "sup"-norma. Pošto ona sadrži supremum, ova norma jedino je definisana u podprostoru ***vezanih*** kontinualnih funkcija u prostoru X, ili, ako je X kompaktno, u prostoru neprekidnih funkcija (pošto neprekidne funkcije u kompaktnom prostoru moraju da budu vezane).

Izazov 203s, ***strana 275***: Izvucite glavu, a zatim povucite jednu stranu vašeg pulovera nad odgovarajućom rukom, nastavite ga vući preko nadlaktice; onda povucite drugu stranu, ispod prve, i na drugu ruku. Vratite glavu nazad. Vaš pulover (ili pantalone) će biti izvrnuti.

Izazov 204s, ***strana 275***: Oba mogu da budu razvezana.

Izazov 208d, ***strana 278***: Transformacija iz jedne mnogostrukosti u drugu sa drugačijom topologijom može da se izvrši uz male izmene, u takozvanim ***singularnim tačkama***. Pošto priroda ispoljava najmanji rad, takve male promene ne mogu da se izbegnu.

Izazov 209s, ***strana 280***: Proizvod $M^{\dagger}M$ je ermitski i ima pozitivnu sopstvenu vrednost. Zato je H jedinstveno određeno i ermitsko. U je jedinstveno pošto je $U^{\dagger}U$ jedinična matrica.



BIBLIOGRAFIJA

Gedanken sind nicht stets parat. Man schreibt auch, wenn man keine hat.[1]

Wilhelm Busch, *Aphorismen und Reime.*

1. Upotreba radioaktivnosti za uzgoj novih vrsta pšenice, pirinča, pamuka, ruža, ananasa i mnogih drugih opisano je kod B.S. Ahloowalia & M. Maluszynski, *Inducedmutations – a new paradigm in plant breeding*, Euphytica 11, strane 167–173, 2004. Citirano na ***strani 20***.

2. Videti kod John T. Bonner, *Why Size Matters: From Bacteria to Blue Whales*, Princeton University Press, 2011. Citirano na ***strani 20***.

3. Videti knjigu od Peter Lauger, *Electrogenic Ion Pumps*, Sinauer, 1991. Citirano na ***strani 20***.

4. Motorizovan zavrtanj kojeg koriste virusi opisan je kod A.A. Simpson & al., *Structure of the bacteriophage phi29 DNA packaging motor*, Nature 408, strane 745–750, 2000. Citirano na ***strani 22***.

5. S. M. Block, *Real engines of creation*, Nature 386, strane 217–219, 1997. Citirano na ***strani 22***.

6. Rani rezultati i ideje za molekularne motore sabrani su kod B. Goss Levi, *Measured steps advance the understanding of molecular motors*, Physics Today strane 17–19, April 1995. Noviji rezultati su opisani kod R.D. Astumian, *Making molecules into motors*, Scientific American strane 57–64, July 2001. Citirano na ***strani 22***.

7. R. Bartussek & S. Hanggi, *Brownsche Motoren*, Physikalische Blatter **51**, strane 506–507,1995. Videti takođe R. Alt-Haddou & W. Herzog, *Force and motion generation of myosin motors: muscle contraction*, Journal of Electromyography and kinesiology **12**, strane 435–445, 2002. Citirano na ***strani 23***.

8. N. Hirokawa, S. Niwa & Y. Tanaka, *Molecular motors in neurons: transport mechanisms and roles in brain function, development, and disease*, Neuron **68**, strane 610–638, 2010. Citirano na ***strani 24***.

9. J. Weber & A.E. Senior, *ATP synthesis driven by proton transport in F1Fo-ATP synthase*, FEBS letters **545**, strane 61–70, 2003. Citirano na ***strani 25***.

10. Ovi zaista zaivljujući rezultati, vredni Nobelove nagrade sabrani su kod N. Hirokawa, Y. Tanaka & Y. Okada, *Left-right determination: involvement of molecular motor KIF3, cilia, and nodal flow*, Cold Spring Harbor Perspectives in Biology **1**, strana a000802, 2009, oni su dostupni takođe na veb strani cshperspectives.cshlp.org/. Veb strana beta.cshperspectives.cshlp.org takođe povezuje brojne snimljene filmove o mikroskopskim procesima. Citirano na ***strani 25***.

11. R.J. Cano & M.K. Borucki, *Revival and identification of bacterial spores in 25- to 40-million-year-old Dominican amber*, Science **26**, strane 1060–1064, 1995. Citirano na ***strani 28.***

12. Prvi dokumenti o bakterijama na naslagama soli su od V. R. Ott & H.J. Dombrwoski, *Mikrofossilien in den Mineralquellen zu Bad Nauheim*, Notizblatt des Hessischen Landesamtes fur Bodenforschung **87**, strane 415–416, 1959, H. J. Dombrowski, *Bacteria from Paleozoic salt deposits*, Annals of the New York Academy of Sciences **108**, strane 453–460, 1963. Najnovije potvrde su kod R. H. Vreeland, W.D. Rosenzweig & D.W. Powers, *Isolation of a 250 million-year-old halotolerant bacterium froma primary salt crystal*, Nature 407, strane 897–899, 2000. Citirano na ***strani 28***.

13. To je objašnjeno kod D. Graur & T. Pupko, *The permian bacterium that isn't*, Molecular Biology and Evolution 18, strane 1143–1146, 2001, a takođe kod M.B. Hebsgaard, M.J. Phillips & E. Willerslev, *Geologically ancient DNA: fact or artefact?*, Trends in Microbiology **13**, strane 212–220, 2005. Citirano na ***strani 28***.

[1] Misli nisu uvek spremne. Piše se i kada ih nemate.

14. Gabriele Walker, *Snowball Earth – The Story of the Great Global Catastrophe That Spawned Life as We Know It*, Crown Publishing, 2003. ***Nije citirano***.

15. J. D. Rummel, J.H. Allton & D. Morrison, *Amicrobe on themoon? Surveyor III and lessons learned for future sample return missions*, na veb strani www.lpi.usra.edu/meetings/sssr2011/pdf/5023.pdf. nalazi se preprint. Citirano na ***strani 29***.

16. Tabela i drvo evolucije preuzeti su iz J. O. McInerney, M. Mullarkey, M. E. Wernecke & R. Powell, *Bacteria and Archaea: Molecular techniques reveal astonishing diversity*, Biodiversity **3**, strane 3–10, 2002. Drvo bi moglo malo da se promeni u nastupajućim godinama. Citirano na ***strani 29***.

17. E. K. Costello, C. L. Lauber, M. Hamady, N. Fierer, J. I. Gordon & R. Knight, *Bacterial community variation in human body habitats across space and time*, Science Express 5 November 2009. Citirano na ***strani 30***.

18. E. Puttonen, C. Briese, G. Mandlburger, M. Wieser, M. Pfennigbauer, A. Zlinsky & N. Pfeifer, *Quantification of overnight movement of birch (Betula pendula) branches and foliage with short interval terrestrial laser scanning*, Frontiers in Plant Science **7**, 2016, može da se besplatno učita sa veb strane journal.frontiersin.org. Video zapis o kretanju drveća takođe je tu dostupan. Citirano na ***strani 32***.

19. Ovo je preuzeto iz divnog teksta za decu od Hans J. Press, *Spiel das Wissenschafft*, Ravensburger Buchverlag 1964, 2004. Citirano na ***strani 33***.

20. Otkriće specifičnog ukusa za masti objavio je F. Laugerette, STRANA Passilly-Degrace, B. Patris, I. Niot, M. Febbraio, J. STRANA Montmayeur & STRANA Besnard, *CD36 involvement in orosensory detection of dietary lipids, spontaneous fat preference, and digestive secretions*, Journal of Clinical Investigation **115**, strane 3177–3184, 2005. Citirano na ***strani 34***.

21. Ne postoji standardni postupak da se nauči kako maksimalno da se uživa u životu. Dobre osnove mogu da se nađu u ovim knjigama koje uče o toj sposobnosti one koji su ga izgubili.

Najbolji stručnjaci su oni koji pomažu drugima da prevaziđu traume. Peter A. Levine & Ann Frederick, *Waking the Tiger – Healing Trauma – The Innate Capacity to Transform Overwhelming Experiences*, North Atlantic Books, 1997. Geoff Graham, *How to Become the Parent You Never Had - a Treatment for Extremes of Fear, Anger and Guilt*, Real Options Press, 1986. Dobra dopuna ovih tekstova je pristup kojeg predstavlja Bert Hellinger, *Zweierlei Gluck*, Carl Auer Verlag, 1997. Neke od ovih knjiga dostupne su i na engleskom. Autor predstavlja prostu i delotvornu tehniku smanjujući preplitanje sa prošlošću u porodici. Sledeća dobra knjiga je od Phil Stutz & Barry Michels, *The Tools – Transform Your Problems into Courage, Confidence, and Creativity*, RandomHouse, 2012.

Sledeći korak, naime potpuno majstorstvo uživanja u životu, može da se nađe u bilo kojoj knjizi koju je napisao neko ko je majstorstvo postigao u nekoj od tema. Teme same po sebi nisu važne, važna je samo posvećenost. Evo nekoliko primera

A. de la Garanderie, *Le dialogue pedagogique avec l'eleve*, Centurion, 1984, A. de la Garanderie, *Pour une pedagogie de l'intelligence*, Centurion, 1990, A. de la Garanderie, *Reussir ca s'apprend*, Bayard, 1994. De la Garanderie objašnjava kako rezultati učenja i proučavanja zavise posebno od važnosti zainteresovanosti, mašte i motivacije.

Plato, *Phaedrus*, Athens, 380 bce.

Francoise Dolto, *La cause des enfants*, Laffont, 1985, i njene ostale knjige. Dolto (b. 1908 Paris, d. 1988 Paris), dečji psihijatar jedna je od svetskih stručnjaka za razvoj deteta, njena glavna tema je da je razvoj jedino moguć ako se svakom detetu daje najveća moguća odgovornost tokom razvoja.

U oblasti umetnosti, mnogi su imali strast da se postigne puno zadovoljstvo. Dobar deo muzike, divno slikarstvo, izražajne skulpture ili dobri filmovi mogu to da pokažu. U manjoj razmeri, o umetnosti slaganja lepih knjiga, tako različitih koliko to čine dobri programi računara, najbolji uvod je rad od Jan Tschichold (1902. Leipzig – 1974. Locarno), neospornog stručnjaka u ovoj oblasti. Među mnogo knjiga koje je napravio, divne su knige izdanja Penguin iz kasnih 1940-ih godina; on je bio takođe i stvaraoc fontova, na primer *Sabon* fonta. Lep pregled njegovih pogleda je kratak ali kondenzovan tekst Jan Tschichold, *Ausgewahlte Aufsatze uber Fragen der Gestalt des Buches und der Typographie*, Birkhauser Verlag, Basel, 1993. Opširan i divan udžbenik na ovu temu je od Hans Peter Willberg &

Friedrich Forssman, *Lesetypographie*, Verlag Hermann Schmidt, Mainz, 1997. Videti takođe kod Robert Bringhurst, *The Elements of Typographic Style*, Hartley & Marks, 2004.

Mnogi naučnici su strastveno uživali u svojim zanimanjima. Bilo koja biografija o Čarsu Darvinu (Charles Darwin) pokazaće njegovu opčinjenost za biologiju, o Fridrihu Beselu (Friedrich Bessel) za astronomiju, o Albertu Ajnštajnu (Albert Einstein) za fiziku i o Linusu Paulingu (Linus Pauling) za hemiju. Citirano na ***strani 35***.

22. Grupa Džona Virdena (John Wearden) u Manchesteru pokazala je eksperimentima sa ljudima da je moguća tačnost od nekoliko procenata za svaku radnju koja traje od desetine sekunde do minuta. Videti J. McCrone, *When a second lasts forever*, New Scientist strane 53–56, 1 November 1997. Citirano na ***strani 36***.

23. Hemijski časovnik u našem telu opisao je John D. Palmer, *The Living Clock*, Oxford University Press, 2002, ili A. Ahlgren & F. Halberg, *Cycles of Nature: An Introduction to Biological Rhythms*, National Science Teachers Association, 1990. Videti takođe veb stranu www.msi.umn.edu/~halberg/introd. Citirano na ***strani 37***.

24. D. J Morre & al., *Biochemical basis for the biological clock*, Biochemistry 41, strane 11941–11945, 2002. Citirano na ***strani 37***.

25. Uvod za osećaj vremena kao rezultat časovnika u mozgu, nalazi se kod R. B. Ivry & R. Spencer, *The neural representation of time*, Current Opinion in Neurobiology 14, strane 225–232, 2004. Tajmer za intervale objašnjen je jednostavnim rečima kod K. Wright, *Times in our lives*, Scientific American strane 40–47, September 2002. Korišćena istraživanja snimanjem pomoću magnetne rezonanse (MRI) su kod S. M. Rao, A. R. Mayer & D. L. Harrington, *The evolution of brain activation during temporal processing*, Nature Neuroscience 4, strane 317–323, 2001. Citirano na ***strani 37***.

26. Videti na primer kod Jan Hilgevoord, *Time in quantum mechanics*, American Journal of Physics 70, strane 301–306, 2002. Citirano na ***strani 37***.

27. E. J. Zimmerman, *The macroscopic nature of space-time*, American Journal of Physics 30, strane 97–105, 1962. Citirano na ***strani 38***.

28. Videti kod P.D. Pešić, *The smallest clock*, European Journal of Physics 14, strane 90–92, 1993. Citirano na ***strani 38***.

29. Mogućnost preciznog merenja vremena pomoću časovnika sa jednim jonom pokazana je kod W. H. Oskay & al., *Single-atom clock with high accuracy*, Physical Review Letters 97, strana 020801, 2006. Citirano na ***strani 38***.

30. Lep primer kvantnog mehaničkog sistema koji pokazuje eksponencijalna svojstva u svim vremenima dat je kod H. Nakazato, M. Namiki & S. Pascazio, *Exponential behaviour of a quantum system in a macroscopic medium*, Physical Review Letters 73, strane 1063–1066, 1994. Citirano na ***strani 40***.

31. Pogledajte očaravajuću knjigu o ovoj temi od Paolo Facchi & Saverio Pascazio, *La regola d'oro di Fermi*, Bibliopolis, 1999. Eksperimentalno posmatranje odstupanja kod kratkih vremena je kod S. R. Wilkinson, C. F. Bharucha, M. C. Fischer, K.W. Madison, P. R. Morrow, Q. Niu, B. Sundaram & M. G. Raizen, Nature 387, strana 575, 1997. Citirano na ***strani 40***.

32. Videti, na primer, kod R. Efron, *The duration of the present*, Annals of the New York Academy of Sciences 138, strane 713–729, 1967. Citirano na ***strani 41***.

33. W. M. Itano, D. J. Heinzen, J. J. Bollinger & D. J. Wineland, *Quantum Zeno effect*, Physical Review A 41, strane 2295–2300, 1990.; M. C. Fischer, B. Gutierrez-Medina & M. G. Raizen, *Observation of the Quantum Zeno and Anti-Zeno effects in an unstable system*, Physical Review Letters 87, strana 040402, 2001, takođe i na veb strani www-arxiv.org/abs/quant-ph/0104035. Citirano na ***strani 42***.

34. Videti kod P. Facchi, Z. Hradil, G. Krenn, S. Pascazio & J. Řehaček *Quantum Zeno tomography*, Physical Review A 66, strana 012110, 2002. Citirano na ***strani 42***.

35. Videti kod P. Facchi, H. Nakazato & S. Pascazio *From the quantum Zeno to the inverse quantum Zeno effect*, Physical Review Letters 86, strane 2699–2702, 2001. Citirano na ***strani 42***.

36. H. Kobayashi & S. Kohshima, *Unique morphology of the human eye*, Nature 387, strane 767–768, 1997. ***Nije citirano***.

37. James W. Prescott, *Body pleasure and the origins of violence*, The Futurist Bethseda, 1975, dostrupno takođe na veb strani www.violence.de/prescott/bullettin/article.html. Citirano na ***strani 44***.

38. Frances Ashcroft, *The Spark of Life: Electricity in the Human Body*, Allen Lane, 2012. Citirano na ***strani 44***.

39. Felix Tretter & Margot Albus, *Einfuhrung in die Psychopharmakotherapie –Grundlagen, Praxis, Anwendungen*, Thieme, 2004. Citirano na ***strani 45***.

40. Pogledajte razgovor o ovom eksperimentu kojeg je izvela Helen Fišer (Helen Fisher), a koji se nalazi na veb strani www.ted.com/ i informaciju na veb strani helenfisher.com. Citirano na ***strani 45***.

41. Videti primere kod P. Pyykko, *Relativity, gold, closed-shell interactions, and CsAu.NH3*, Angewandte Chemie, International Edition 41, strane 3573–3578, 2002, ili kod L. J. Norrby, *Why is mercury liquid? Or, why do relativistic effects not get into chemistry textbooks?*, Journal of Chemical Education 68, strane 110–113, 1991. Citirano na ***strani 49***.

42. Na internetu je "loptasta" tabela periodnog sistema pripisana Timoti Stove (Timothy Stowe); međutim, ne postoje osnove za ovu tvrdnju, osim nejasnog kalendara male hemijske kompanije. Orginalna tabela (koja nažalost sadrži brojne greške) sada može da se nađe na sledećoj veb strani chemlab.pc.maricopa.edu/periodic/stowetable.html; najbolje je da se traže slike pod nazivom "stowetable" pomoću bilo kojeg pretraživača na internetu Citirano na ***strani 50***.

43. Za dobra predstavljanja atomskih orbita uzmite bilo koji savremen tekst iz hemije. Ili možete da posetite veb stranu csi.chemie.tu-darmstadt.de/ak/immel/. Citirano na ***strani 51***.

44. Za eksperimentalno dobijene slike orbita visećih veza, videti primere kod F. Giessibl & al., *Subatomic features on the silicon (111)-(7x7) surface observed by atomic force microscopy*, Science 289, strane 422–425, 2000. Citirano na ***strani 51***.

45. L. Gagliardi & B.O. Roos, *Quantum chemical calculations show that the uranium molecule* U2 *has a quintuple bond*, Nature 433, strane 848–851, 2005. B.O. Roos, A.C. Borin & L. Gagliardi, *Reaching the maximum multiplicity of the covalent chemical bond*, Angewandte Chemie, International Edition 46, strane 1469–1472, 2007. Citirano na ***strani 52***.

46. H. -W. Fink & C. Escher, *Zupfen am Lebensfaden – Experimente mit einzelnen DNS Molekulen*, Physik in unserer Zeit 38, strane 190–196, 2007. Citirano na ***strani 53***.

47. Ova vrsta atomskih veza postala je dobro poznata preko uvoda kod D. Kleppner, *The most tenuous of molecules*, Physics Today 48, strane 11–12, 1995. Citirano na ***strani 55***.

48. Istraživanje uporebe fizike i hemije u forenzičkoj nauci je začuđujuće. Za lep uvod u ovo polje, uz puno priča i puno fizike, videti knjigu od Patrick Voss-de Haan, *Physik auf der Spur*, Wiley-VCH, 2005. Citirano na ***strani 55***.

49. Videti, na primer, opširna objašnjenja od Rafal Swiecki koja se nalaze na njegovoj informativnoj veb strani www.minelinks.com/. Citirano na ***strani 57***.

50. Videti veb stranu Toma Halesa (Tom Hales) www.math.lsa.umich.edu/~hales/countdown. Ranija knjiga po ovom pitanju je očaravajući tekst od Max Leppmaier, *Kugelpackungen von Kepler bis heute*, Vieweg Verlag, 1997. Citirano na ***strani 67***.

51. Za kratak pregled, a takođe i pretvaranje binarnih sistema, videti kod C. Bechinger, H. -H. von Grunberg & P. Leiderer, *Entropische Krafte - warum sich repulsiv wechselwirkende Teilchen anziehen konnen*, Physikalische Blatter 55, strane 53–56, 1999. Citirano na ***strani 59***.

52. H. -W. Fink & G. Ehrlich, *Direct observation of three-body interactions in adsorbed layers: Re on W(110)*, Physical Review Letters 52, strane 1532–1534, 1984, i H. -W. Fink & G. Ehrlich, *Pair and trio interactions between adatoms: Re on W(110)*, Journal of Chemical Physics 61, strane 4657–4665, 1984. Citirano na ***stranama 59*** i ***60***.

53. Videti za primere udžbenik od A. Pimpinelli & J. Villain, *Physics of Crystal Growth*, Cambridge University Press, 1998. Citirano na ***strani 59***.

54. Y. Furukawa, *Faszination der Schneekristalle - wie ihre bezaubernden Formen entstehen*, Chemie in unserer Zeit 31, strane 58–65, 1997. Njegova eb strana www.lowtem.hokudai.ac.jp/~frkw/index_e.html daje više infomacija na temu kristala pahuljica snega. Citirano na ***strani 59***.

55. L. Bindi, P. J. Steinhardt, N. Yai & P. J. Lu, *Natural Quasicrystal*, Science 324, strane 1306–1309, 2009. Citirano na ***strani 65***.

56. Sadašnje pokušaje da se napravi jeftin senzor talasa reda THz – koji bi omogućio gledanje kroz odeću – opisao je D. Clery, *Brainstorming their way to an imaging revolution*, Science 297, strane 761–763, 2002. Citirano na ***strani 67***.

57. Prekretni efekt ogledala otkrili su J. N. Huiberts, R. Griessen, J.H. Rector, R. J. Wijngarden, J. P. Dekker, D. G. de Groot & N. J. Koeman, *Yttrium and lanthanum hydride films with switchable optical properties*, Nature 380, strane 231–234, 1996. Dobar uvod je kod R. Griessen, *Schaltbare Spiegel aus Metallhydriden*, Physikalische Blatter **53**, strane 1207–1209, 1997. Citirano na ***strani 68***.

58. V. F. Weisskopf, *Of atoms, mountains and stars: a study in qualitative physics*, Science 187, strana 605, 1975. Citirano na ***strani 69***.

59. K. Schwab, E. A. Henriksen, J. M. Worlock & M. L. Roukes, *Measurement of the quantum of thermal conductance*, Nature 404, strane 974–977, 2000. Citirano na ***strani 70***.

60. K. Autumn, Y. Liang, T. Hsich, W. Zwaxh, W. P. Chan, T. Kenny, R. Fearing & R. J. Full, *Adhesive force of a single gecko foot-hair*, Nature 405, strane 681–685, 2000. Citirano na ***strani 70***.

61. A. B. Kesel, A. Martin & T. Seidl, *Getting a grip on spider attachment: an AFM approachto microstructure adhesion in arthropods*, Smart Materials and Structures 13, strane 512–518, 2004. Citirano na ***strani 71***.

62. Videti članak na veb strani www.bio-pro.de/magazin/wissenschaft/archiv_2005/index.html?lang=en&artikelid=/artikel/03049/index.html. Citirano na ***strani 71***.

63. Pogledati lep članak od R. Ritchie, M. J. Buehler & P. Hansma, *Plasticity and toughness in bones*, Physics Today 82, strane 41–47, 2009.Pogledati takođe čudesan naslov u magazinu od P. Fratzl, *Von Knochen, Holz und Zahnen*, Physik Journal 1, strane 49–55, 2002, i P. Fratzl & R. Weinkamer, *Nature's hierarchical materials*, Progress in Material Science 52, strane 1263–1334, 2007. Citirano na ***strani 72***.

64. H. Inaba, T. Saitou, K. -I. Tozaki & H. Hayashi, *Effect of the magnetic field on the melting transition of H_2O and D_2O measured by a high resolution and supersensitive differential scanning calorimeter*, Journal of Applied Physics 96, strane 6127–6132, 2004. Citirano na ***strani 73***.

65. Grafik za temperaturu preuzet je od J. Jouzel & al., *Orbital and millennial Antarctic climate variability over the past 800,000 years*, Science 317, strane 793–796, 2007. Grafik za CO_2 kombinovan je iz šest dokumenata: D. M. Etheridge & al., *Natural and anthropogenic changes in atmospheric CO_2 over the last 1000 years from air in Antarctic ice and firm*, Journal of Geophysical Research 101, strane 4115–4128, 1996, J.R. Petit & al., *Climate and atmospheric history of the past 420,000 years fromthe Vostok ice core, Antarctica*, Nature 399, strane 429–436, 1999, A. Indermuhle & al., *Atmospheric CO_2 concentration from 60 to 20 kyr BP from the Taylor Dome ic cores, Antarctica*, Geophysical Research Letters 27, strane 735–738, 2000, E. Monnin & al., *Atmospheric CO_2 concentration over the last glacial termination*, Science 291, strane 112–114, 2001, U. Siegenthaler & al., *Stable carbon cycle-climate relationship during the late pleistocene*, Science **310**, strane 1313–1317, 2005, D. Luthi & al., *High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000-800,000 years before present*, Nature 453, strane 379–382, 2008. Citirano na ***strani 74***.

66. H. Oerlemans, *De afkoeling van de aarde*, Nederlands tijdschrift voor natuurkunde, strane 230–234, 2004. Ovaj izvanredan dokument jednog od stručnjaka na tom polju takođe objašnjava da Zemlja ima dva stanja, naime današnje tropsko stanje i stanje ledene grudve, kada je prekrivena ledom. Takođe postoji histereza pri prelazu između ova dva stanja. Citirano na ***strani 74***.

67. R. Hemley & al., predstavio je ove rezultate na International Conference on New Diamond Science in Tsukuba (Japan) 2005. Videti slike na veb strani carnegiescience.edu/diamond-13may2005. Citirano na ***strani 74***.

68. Ingo Dierking, *Textures of Liquid Crystals*, Wiley-VCH, 2003. Citirano na ***strani 75***.

69. Halov efekt fotona otkrili su Geert Rikken, Bart van Tiggelen & Anja Sparenberg, *Lichtverstrooiing in een magneetveld*, Nederlands tijdschrift voor natuurkunde 63, strane 67–70, maart 1998. Citirano na ***strani 76***.

70. C. Strohm, G. L. J. A. Rikken & P. Wyder, *Phenomenological evidence for the phonon Hall effect*, Physical Review Letters 95, strana 155901, 2005. Citirano na ***strani 76***.

71. E. Chibowski, L. Hołysz, K. Terpiłowski, *Effect ofmagnetic field on deposition and adhesion of calcium carbonate particles on different substrates*, Journal of Adhesion Science and Technology 17, strane 2005–2021, 2003. i reference u njima. Citirano na ***strani 76***.

72. K. S. Novoselov, D. Jiang, F. Schedin, T. Booth, V. V. Khotkevich, S. V. Morozov & A. K. Geim, *Two Dimensional Atomic Crystals*, Proceedings of the National Academy of Sciences **102**, strane 10451–10453, 2005. Videti takođe razgovor od Andre Geim, *QED in a pencil trace*, može da se učita sa veb strane online.kitp.ucsb.edu/online/graphene_m07/geim/ ili A. C. Neto, F. Guinea & N.M. Peres, *Drawing conclusions from graphene*, PhysicsWorld November 2006. Citirano na ***stranama 76***, ***77*** i ***317***

73. R. R. Nair & al., *Fine structure constant defines visual transparency of graphene*, Science 320, strana 1308, 2008. Citirano na ***strani 77***.

74. Prvi dokument je bio od J. Bardeen, L. N. Cooper & J. R. Schrieffer, *Microscopic Theory of Superconductivity*, Physical Review 106, strane 162–164, 1957. Potpuna, takozvana BCS teorija data je u majstorskom dokumentu od J. Bardeen, L. N. Cooper & J. R. Schrieffer, *Theory of Superconductivity*, Physical Review 108, strane 1175–1204, 1957. Citirano na ***strani 80***.

75. A. P. Finne, T. Araki, R. Blaauwgeers, V. B. Eltsov, N. B. Kopnin, M. Krusius, L. Skrbek, M. Tsubota & G. E. Volovik, *An intrinsic velocityindependent criterion for superfluid turbulence*, Nature 424, strane 1022–1025, 2003. Citirano na ***strani 82***.

76. Početna predviđanja, koja su donela Laflinu Nobelovu nagradu su u R. B. Laughlin, *Anomalous quantum Hall effect: an incompressible quantum fluid with fractionally charged excitations*, Physical Review Letters 50, strane 1395–1398, 1983. Citirano na ***strani 82***.

77. Prvi eksperimentalni dokaz je od V. J. Goldman & B. Su, *Resonance tunnelling in the fractional quantum Hall regime: measurement of fractional charge*, Science 267, strane 1010–1012, 1995. Prva nedvosmislena merenja izveo je R. de Picciotto & al., *Direct observation of a fractional charge*, Nature 389, strane 162–164, 1997, i L. Saminadayar, D. C. Glattli, Y. Jin & B. Etienne, *Observation of the e*,3 fractionally charged Laughlin quasiparticle/ Physical Review Letters 79, strane 2526–2529, 1997. ili veb strana arxiv.org/abs/cond-mat/9706307. Citirano na ***strani 82***.

78. Otkriće orginalnog kvantnog Halovog efekta, koji je doneo fon Klicingu (von Klitzing) Nobelovu nagradu za fiziku, objavljeno je kao K. von Klitzing, G. Dorda & M. Pepper, *New method for high-accuracy determination of the fine-structure constant based on quantised Hall resistance*, Physical Review Letters 45, strane 494–497, 1980. Citirano na ***strani 82***.

79. Razlomački kvantni Halov efekt otkrili su D. C. Tsui, H. L. Stormer & A. C. Gossard, *Two-dimensional magnetotransport in the extreme quantum limit*, Physical Review Letters 48, strane 1559–1562, 1982. Tsui i Stormer dobili su ovim dokumentom Nobelovu nagradu za fiziku. Citirano na ***strani 82***.

80. K. S. Novoselov, Z. Jiang, Y. Zhang, S. V. Morozov, H. L. Stormer, U. Zeitler, J. C. Mann, G. S. Boebinger, P. Kim & A.K. Geim, *Roomtemperature quantum Hall effect in graphene*, Science 315, strana 1379, 2007. Citirano na ***strani 83***.

81. Pogledajte pregled primera kod M. Born & T. Justel, *Umweltfreundliche Lichtquellen*, Physik Journal 2, strane 43–49, 2003. Citirano na ***strani 84***.

82. K. An, J. J. Childs, R. R. Desari & M. S. Field, *Microlaser: a laser with one atom in an optical resonator*, Physical Review Letters 73, strane 3375–3378, 19 December 1994. Citirano na ***strani 88***.

83. J. Kasparian, *Les lasers femtosecondes: applications atmosph eriques*, La Recherche strane RE14 1–7, February 2004/ Videti takođe veb stranu www.teramobile.org/. Citirano na ***strani 89***.

84. A. Takita, H. Yamamoto, Y. Hayasaki, N. Nishida & H. Misawa, *Threedimensional optical memory using a human fingernail*, Optics Express 13, strane 4560–4567, 2005. To koriste Ti:safir oscilator i Ti:safir pojačavač. Citirano na ***strani 89***.

85. Autor predskazuje laserske kišobrane u 2011. godini. Citirano na ***strani 89***.

86. W. Guo & H. Maris, *Observations of the motion of single electrons in liquid helium*, Journal of Low Temperature Physics 148, strane 199–206, 2007. Citirano na ***strani 90***.

87. Priča može da se nađe na mnogom mestima na internetu. Citirano na ***strani 91***.

88. S. L. Boersma, *Aantrekkende kracht tussen schepen*, Nederlands tidschrift voor natuuurkunde 67, strane 244–246, Augustus 2001. Videti takođe njegov rad S. L. Boersma, *A maritime analogy of the Casimir effect*, American Journal of Physics 64, strane 539–541, 1996. Citirano na ***strani 93***.

89. P. Ball, *Popular physics myth is all at sea – does the ghostly Casimir effect really cause ships to attract each other?*, i na veb strani www.nature.com/news/2006/060501/full/news060501-7.html. Citirano na ***stranama 93*** i ***95***.

90. A. Larraza & B. Denardo, *An acoustic Casimir effect*, Physics Letters A 248, strane 151–155, 1998. Videti takođe A. Larraza, *A demonstration apparatus for an acoustic analog of the Casimir effect*, American Journal of Physics 67, strane 1028–1030, 1999. Citirano na ***strani 94***.

91. H. B. G. Casimir, *On the attraction between two perfectly conducting bodies*, Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen 51, strane 793–795, 1948. Citirano na ***strani 94***.

92. H. B. G. Casimir & D. Polder, *The influence of retardation on the London–Van der Waals forces*, Physical Review 73, strane 360–372, 1948. Citirano na ***strani 94***.

93. B.W. Derjaguin, I.I. Abrikosova & E.M. Lifshitz, *Direct measurement of molecular attraction between solids separated by a narrow gap*, Quaterly Review of the Chemical Society (London) 10, strane 295–329, 1956. Citirano na ***strani 94***.

94. M.J. Sparnaay, *Attractive forces between flat plates*, Nature 180, strane 334–335, 1957. M. J. Sparnaay, *Measurements of attractive forces between flat plates*, Physica (Utrecht) 24, strane 751–764, 1958. Citirano na ***strani 94***.

95. S.K. Lamoreaux, *Demonstration of the Casimir force in the 0.6 to 6 μm range*, Physical Review Letters ***78***, strane 5–8, 1997. U. Mohideen & A. Roy, *Precision measurement of the Casimir force from 0.1 to 0.9 μm*, Physical Review Letters 81, strane 4549–4552, 1998. Citirano na ***strani 94***.

96. A. Lambrecht, *Das Vakuum kommt zu Kraften*, Physik in unserer Zeit 36, strane 85–91, 2005. Citirano na ***strani 94***.

97. T.H. Boyer, *Van der Waals forces and zero-point energy for dielectric and permeable materials*, Physical Review **A9**, strane 2078–2084, 1974. To je uzeto ponovo u O. Kenneth, I. Klich, A. Mann & M. Revzen, *Repulsive Casimir forces*, Physical Review Letters 89, strana 033001, 2002. Međutim, nijedan od ovih efekata nije još uvek potvrđen. Citirano na ***strani 95***.

98. Efekt je otkrio K. Scharnhorst, *On propagation of light in the vacuum between plates*, Physics Letters B 236, strane 354–359, 1990. Videti takođe G. Barton, *Faster than-c light between parallel mirrors: the Scharnhorst effect rederived*, Physics Letters B 237, strane 559–562, 1990, i P. W. Milonni & K. Svozil, *Impossibility of measuring faster than-c signalling by the Scharnhorst effect*, Physics Letters B 248, strane 437–438, 1990. Kasnije su ispravljene greške u prvom dokumentu. Citirano na ***strani 95***.

99. D. L. Burke & al., *Positron production in multiphoton light-by-light scattering*, Physical Review Letters 79, strane 1626–1629, 1997. Jednostavan rezime je dao Bertram Schwarzschild, *Gamma rays create matter just by plowing into laser light*, Physics Today **51**, strane 17–18, February 1998. Citirano na ***strani 99***.

100. M. Kardar & R. Golestanian, *The 'friction' of the vacuum, and other fluctuation induced forces*, Reviews of Modern Physics 71, strane 1233–1245, 1999. Citirano na ***strani 99***.

101. G. Gour & L. Sriramkumar, *Will small particles exhibit Brownian motion in the quantum vacuum?*, i na veb strani arxiv.org/abs/quant/phys/9808032. Citirano na ***strani 99***.

102. P. A. M. Dirac, *The requirements of fundamental physical theory*, European Journal of Physics 5, strane 65–67, 1984. Ovaj članak je zapisan govor Pola Diraka (Paul Dirac) neposredno pre njegove smrti, on je odbacio kao pogrešnu teoriju koju je našao, iako ona tačno opisuje sve eksperimente. Smernost ovog velikog čoveka koji se tako odriče svojih glavnih i velikih dostignuća impresivni su kada ga slušamo, a još impresivniji kada čitamo njegov govor. Citirano na ***strani 100***.

103. H. Euler & B. Kockel, Naturwissenschaften 23, strana 246, 1935, H. Euler, Annalen der Physik **26**, strana 398, 1936, W. Heisenberg & H. Euler, *Folgerung aus der Diracschen Theorie des Electrons*, Zeitschrift fur Physik 98, strane 714–722, 1936. Citirano na ***strani 101***.

104. Th. Stoehlker & al., *The 1s Lamb shift in hydrogenlike uranium measured on cooled, decelerated ions beams*, Physical Review Letters 85, strana 3109, 2000. Citirano na ***strani 101***.

105. M. Roberts & al., *Observation of an electric octupole transition in a single ion*, Physical Review Letters 78, strane 1876–1879, 1997. Određeno je vreme trajanja od 3700 dana. Citirano na ***strani 101***.

106. Pogledajte upečatljiv dokument od J. Młyńczak, J. Kubicki & K. Kopczyński *Stand-off detection of alcohol in car cabins*, Journal of Applied Remote Sensing 8, strana 083627, 2014. Citirano na ***strani 91***.

107. Kvantni žiroskopi koji se zasnivaju na tečnom helijumu prvi put je upotrebila za merenje obrtanja Zemlje grupa francuskih istraživača O. Avenel & E. Varoquaux, *Detection of the Earth rotation with a superfluid double-hole resonator*, Czechoslovak Journal of Physics (Supplement S6) 48, strane 3319–3320, 1996. Opis postavke nalazi se kod Yu. Mukharsky, O. Avenel & E. Varoquaux, *Observation of half-quantum defects in superfluid* 3He − B, Physical Review Letters 92, strana 210402, 2004. Eksperiment sa žiroskopom kasnije je ponovila grupa Berkeley group, K. Schwab, N. Bruckner & R. E. Packard, *Detection of the Earth's rotation using superfluid phase coherence*, Nature 386, strane 585–587, 1997. Za pregled na ovu temu videti kod O. Avenel, Yu. Mukharsky & E. Varoquaux, *Superfluid gyrometers*, Journal of Low Temperature Physics 135,strana 745, 2004. Citirano na ***strani 91***.

108. K. Schwab, E. A. Henriksen, J. M. Worlock & M. L. Roukes, *Measurement of the quantum of thermal conductance*, Nature 404, strana 974, 2000. Za optičku analogiju ovog eksperimenta videti divan dokument od E. A. Montie, E. C. Cosman, G.W. 't Hooft, M. B. van der Mark & C.W. J. Beenakker, *Observation of the optical analogue of quantized conductance of a point contact*, Nature 350, strane 594–595, 18 April 1991, i dužu verziju kod E. A. Montie, E. C. Cosman, G.W. ' t Hooft, M. B. van der Mark & C.W. J. Beenakker, *Observation of the optical analogue of the quantised conductance of a point contact*, Physica B 175, strane 149–152, 1991. Za više detalja ovog eksperimenta videti deo ***Svetlost, naboji i mozak*** u ovoj seriji tekstova. Citirano na ***strani 101***.

109. Istraživanje kako se kreću ljudi objavljen je u časopisu Human Movement Science i takođe u Human Movement. Citirano na ***strani 104***.

110. Videti, na primer, dokument od D. A. Bryant, *Electron acceleration in the aurora*, Contemporary Physics 35, strane 165–179, 1994. Skorašnji razvoj je kod D. L. Chandler, *Mysterious electron acceleration explained*, nalazi se na veb strani web.mit.edu/newsoffice/2012/plasma-phenomenon-explained-0227.html; tu su objašnjeni rezultati iz dokumenta od J. Egedal, W. Daughton & A. Le, *Large-scale acceleration by parallel electric fields during magnetic reconnection*, Nature Physics 2012. Citirano na ***strani 104***.

111. Ovo je novije polje istraživanja; atmosferska pražnjenja iznad oblika opisana su, na primer, na veb strani www.spritesandjets.com/i na en.wikipedia.org/wiki/Sprite_(lightning). Takođe pogledajte veb stranu eurosprite.blogspot.com. Citirano na ***strani 104***.

112. O Kulonovim eksplozijama i njihovoj važnosti za obradu materijala laserima, pogledajte na primer kod D. Muller, *Picosecond lasers for high-quality industrial micromachining*, Photonics Spectra strane 46–47, November 2009. Citirano na ***strani 104***.

113. Pogledajte, na primer, kod L. O'C. Drury, *Acceleration of cosmic rays*, Contemporary Physics **35**, strane 231–242, 1994. Citirano na ***strani 104***.

114. Pogledajte kod Dirk Kreimer, *New mathematical structures in renormalizable quantum field theories*, i na veb strani arxiv.org/abs/hep-th/0211136 ili u Annals of Physics 303, strane 179–202, 2003, i štamparske greške u istom, 305, strana 79, 2003. Citirano na ***strani 105***.

115. Videti, na primer, dokument od M. Urban, *A particle mechanism for the index of refraction*, preprint na arxiv.org/abs/0709.1550. Citirano na ***strani 105***.

116. S. Fray, C. Alvarez Diez, T.W. Hansch & M. Weitz, *Atomic interferometer with amplitude gratings of light and its applications to atom based tests of the equivalence principle*, Physical Review

Letters 93, strana 240404, 2004, preprint na arxiv.org/abs/physics/0411052. Ideja za eksperiment je stara i može da se sledi unazad do predloga načinjenog 1950-ih godina da se napravi fontana sa atomima. Citirano na ***strani 107***.

117. Orginalni dokumenti o ponašanju neutrona u gravitacijskom polju vrede da budu pročitani. O orginalnom poduhvatu je izvestio V. V. Nesvizhevsky, H. G. Boerner, A. K. Petoukhov, H. Abele, S. Baessler, F. Ruess, Th. Stoeferle, A. Westphal, A.M. Gagarski, G. A. Petrov & A. V. Strelkov, *Quantum states of neutrons in the Earth's gravitational field*, Nature 415, strane 297–299, 17 January 2002. Duža objašnjenja se nalaze kod V.V. Nesvizhevsky, H.G. Boerner, A.M. Gagarsky, A.K. Petoukhov, G.A. Petrov, H. Abele, S. Baessler, G. Divkovic, F.J. Ruess, Th. Stoeferle, A. Westphal, A.V. Strelkov, K.V. Protasov & A.Yu. Voronin, *Measurement of quantum states of neutrons in the Earth's gravitational field*, Physical Review D67, strana 102002, 2003, preprint na arxiv.org/abs/hep-ph/0306198, i kod V.V. Nesvizhevsky, A.K. Petukhov, H.G. Boerner, T.A. Baranova, A.M. Gagarski, G. A. Petrov, K.V. Protasov, A. Yu. Voronin, S. Baessler, H. Abele, A. Westphal & L. Lucovac, *Study of the neutron quantum states in the gravity field*, European Physical Journal C 40, strane 479–491, 2005, preprint na arxiv.org/abs/hep-ph/0502081 i kod A. Yu. Voronin, H. Abele, S. Baessler, V. V. Nesvizhevsky, A. K. Petukhov, K. V. Protasov & A. Westphal, *Quantum motion of a neutron in a wave-guide in the gravitational field*, Physical Review D 73, strana 044029, 2006, preprint na arxiv.org/abs/quant-ph/0512129. Citirano na ***strani 107***.

118. H. Rauch, W. Treimer & U. Bonse, *Test of a single crystal neutron interferometer*, Physics Letters A 47, strane 369–371, 1974. Citirano na ***strani 108***.

119. R. Colella, A. W. Overhauser & S. A. Werner, *Observation of gravitationally induced quantum mechanics*, Physical Review Letters 34, strane 1472–1475, 1975. Ovaj eksperiment se obično naziva COW eksperiment. Citirano na ***strani 108***.

120. Ch. J. Borde & C. Lammerzahl, *Atominterferometrie und Gravitation*, Physikalische Blatter 52, strane 238–240, 1996. Videti takođe A. Peters, K. Y. Chung & S. Chu, *Observation of gravitational acceleration by dropping atoms*, Nature 400, strane 849–852, 26 August 1999. Citirano na ***strani 109***.

121. J. D. Bekenstein, *Black holes and entropy*, Physical Review D **7**, strane 2333–2346, 1973. Citirano na ***strani 110***.

122. R. Bousso, *The holographic principle*, Review of Modern Physics 74, strane 825–874, 2002, takođe dostupan i na arxiv.org/abs/hep-th/0203101. Dokument je izvaredan prikaz; međutim, on sadržii neke greške u dokazima, kao što je objašnjeno na strani 144. Citirano na ***strani 111***.

123. Ovo je jasno dokazao S. Carlip, *Black hole entropy from horizon conformal field theory*, Nuclear Physics B Proceedings Supplement 88, strane 10–16, 2000. Citirano na ***strani 111***.

124. S. A. Fulling, *Nonuniqueness of canonical field quantization in Riemannian space-time*, Physical Review D **7**, strane 2850–2862, 1973, P. Davies, *Scalar particle production in Schwarzchild and Rindler metrics*, Journal of Physics A: General Physics 8, strane 609–616, 1975, W. G. Unruh, *Notes on black hole evaporation*, Physical Review D 14, strane 870–892, 1976. Citirano na ***strani 111***.

125. O mogućnosti da se neposredno izmeri Fulling–Davies–Unruh zračenje, videti na primer dokument od H. Rosu, *On the estimates to measure Hawking effect und Unruh effect in the laboratory*, International Journal of Modern Physics D3 strana 545, 1994. ili na arxiv.org/abs/gr-qc/9605032 ili dokument od P. Chen & T. Tajima, *Testing Unruh radiation with ultra-intense lasers*, Physical Review Letters 83, strane 256–259, 1999. Citirano na ***strani 112***.

126. E. T. Akhmedov & D. Singleton, *On the relation between Unruh and Sokolov–Ternov effects*, preprint na arxiv.org/abs/hep-ph/0610394; videti takođe E. T. Akhmedov & D. Singleton, *On the physical meaning of the Unruh effect*, preprint na arxiv.org/abs/0705.2525. Nažalost, kao što napominju Bell i Leinaas, efekt Sokolov–Ternov ne može da se upotrebi da bi se izrazila entropija crne rupe, pošto zračenje nije toplotno, i tako je veoma teško da se odredi temperatura zračenja. Bez obzira na to C. Schiller predviđa (oktobar 2009.) da bi mogla da se koristi pažljiva analiza spektra (1) za proveru srazmernosti entropije i površine u crnoj rupi i (2) da se proveri transformacija temperature u specijalnoj teoriji relativnosti. Citirano na ***strani 112***.

127. W. G. Unruh & R.M. Wald, *Acceleration radiation and the generalised second law of thermodynamics*, Physical Review D25, strane 942–958 , 1982. Citirano na ***strani 112***.

128. R. M. Wald, *The thermodynamics of black holes*, Living Reviews of Relativity 2001, takođe i na veb strani www-livingreviews.org/lrr-2001-6. Citirano na ***strani 113***.

129. Na primer, ako su neutrini bez mase, njih bi crne rupe emitovale mnogo češće no protone. Za očaravajući popularni doprinos od stručnjaka za crne rupe, pogledajte kod Igor Novikov, *Black Holes and the Universe*, Cambridge University Press 1990. Citirano na ***stranama 114*** i ***117***.

130. Orginalan dokument je od W. G. Unruh, *Experimental black hole evaporation?*, Physical Review Letters 46, strane 1351–1353, 1981. Dobro objašnjenje sa dobrim pregledom literature je ono od Matt Visser, *Acoustical black holes: horizons, ergospheres and Hawking radiation*, takođe se nalazi na veb strani arxiv.org/abs/gr-qc/9712010. Citirano na ***strani 114***.

131. Optičke crne rupe objašnjene su kod W. G. Unruh & R. Schutzhold, *On Slow Light as a Black Hole Analogue*, Physical Review D 68, strana 024008, 2003, preprint na arxiv.org/abs/gr-qc/0303028. Citirano na ***strani 114***.

132. T. Damour & R. Ruffini, *Quantum electrodynamical effects in Kerr–Newman geometries*, Physical Review Letters **35**, strane 463–466, 1975. Citirano na ***strani 116***.

133. Ovo su bili Vela sateliti; njihovo postojanje i rezultati bili su objavljeni zvanično tek 1974. godine, iako su oni bili u funkciji već više godina. Citirano na ***strani 115***.

134. Izvanredan uopšteni uvod u temu o eksploziji gama zraka je od S. Klose, J. Greiner & D. Hartmann, *Kosmische Gammastrahlenausbruche – Beobachtungen und Modelle*, Teil I und II, Sterne und Weltraum March and April 2001. Citirano n ***stranama 115*** i ***116***.

135. Kada se eksplozija gama zraka susretne sa materijom oko crne rupe, ona se proširuje. Što je veća količina materije, to je šire pulsiranje. Videti kod G. Preparata, R. Ruffini & S. -S. Xue, *The dyadosphere of black holes and gamma-ray bursts*, Astronomy and Astrophysics 338, strane L87–L90, 1998, R. Ruffini, J. D. Salmonson, J. R. Wilson & S. -S. Xue, *On the pair electromagnetic pulse of a black hole with electromagnetic structure*, Astronomy and Astrophysics 350, strane 334–343, 1999, R. Ruffini, J. D. Salmonson, J. R. Wilson & S. -S. Xue, *On the pair electromagnetic pulse from an electromagnetic black hole surrounded by a baryonic remnant*, Astronomy and Astrophysics 359, strane 855–864, 2000, 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. Za veoma lični doprinos Rufinija u njegovom učešću u eksploziji gama zraka, videti njegov dokument *Black hole formation and gamma ray bursts*, nalazi se i na veb strani arxiv.org/abs/astro-ph/0001425. Citirano na ***strani 116***.

136. Videti izdanje od D.W. Fox & al., *Early optical emission from the γ-ray burst of 4 October 2002*, Nature 422, strane 284–286, 2003. Videti takođe veb strane arxiv.org/abs/astro-ph/0301377, arxiv.org/abs/astro-ph/0301262 i arxiv.org/abs/astro-ph/0303539. Citirano na ***strani 116***.

137. Negativan toplotni kapacitet otkriven je takođe u grupi atoma i u jezgrima. Videti, na primer, M. Schmidt & al., *Negative heat capacity for a cluster of 147 sodium atoms*, Physical Review Letters 86, strane 1191–1194, 2001. Citirano na ***strani 117***.

138. H. –P. Nollert, *Quasinormal modes: the characteristic 'sound' of black holes and neutron stars*, Classical and Quantum Gravity 16, strane R159–R216, 1999. Citirano na ***strani 118***.

139. O membranskom opisu crnih rupa, videti kod Kip S. Thorne, Richard H. Price & Douglas A. MacDonald, editors, *Black Holes: the Membrane Paradigm*, Yale University Press, 1986. Citirano na ***strani 117***.

140. Don Pejdž je napisao seriju dokumenata na ovu temu; lep kratak pregled je od Don N. Page, *How fastdoes a black hole radiate information?*, International Journal of Modern Physics 3, strane 93–106, 1994, koji se zasniva na njegovim ranijim dokumentima, kao što je *Information in black hole radiation*, Physical Review Letters 71, strane 3743–3746, 1993. SVideti takođe njegov preprint na veb ***strani*** arxiv.org/abs/hep-th/9305040. Citirano na strani ***118***.

141. Videti kod Don N. Page, *Average entropy of a subsystem*, Physical Review Letters 71, strane 1291–1294, 1993. Obrazac za entropiju iz ovog dokumenta dokazao je S. K. Foong & S. Kanno, *Proof of Page's conjecture on the average entropy of a subsystem*, Physical Review Letters 72, strane 1148–1151, 1994. Citirano na ***strani 118***.

142. R. Lafrance & R. C. Myers, *Gravity's rainbow: limits for the applicability of the equivalence principle*, Physical Review D51, strane 2584–2590, 1995, i veb stranu arxiv.org/abs/hep-th/9411018. Citirano na ***strani 119***.

143. M. Yu. Kuchiev & V. V. Flambaum, *Scattering of scalar particles by a black hole*, i na veb strani arxiv.org/abs/gr-qc/0312065. Videti takođe M. Yu. Kuchiev & V. V. Flambaum, *Reflection on event horizon and escape of particles from confinement inside black holes*, nalazi se i veb strani arxiv.org/abs/gr-qc/0407077. Citirano na ***strani 119***.

144. Videti naširoko citiran, ali pogrešan dokument od G. C. Ghirardi, A. Rimini & T. Weber, *Unified dynamics for microscopic and macroscopic systems*, Physical Review D34, strane 470–491, 1986. Citirano na ***strani 109***.

145. Ja predpostavljam da bi ova verzija podudarnosti mogla biti orginalna; nisam je našao u literaturi. Citirano na ***strani 109***.

146. Steven Weinberg, *Gravitation and Cosmology*,Wiley, 1972. Videti jednakost 16.4.3 na strani 619, a takođe i stranu 620. Citirano na ***strani 110***.

147. Moglo bi da bude da teorija čvorova daje odnose među lokalnim invarijantama čvorova, koje su povezane sa česticma i globalnim. Citirano na ***strani 110***.

148. Ovu tačku je više puta obrađivao Stiven Vajnberg (Steven Weinberg), naime u *Derivation of gauge invariance and the equivalence principle from Lorentz invariance of the S-matrix* , Physics Letters 9, strane 357–359, 1964, u *Photons and gravitons in S-matrix theory: derivation of charge conservation and equality of gravitational and inertial mass*, Physical Review B 135, strane 1049–1056, 1964. i u *Photons and gravitons in perturbation theory: derivation of Maxwell's and Einstein's equations*, Physical Review B 138, strane 988–1002, 1965. Citirano na ***strani 119***.

149. E. Joos, *Why do we observe a classical space-time?*, Physics Letters A 116, strane 6–8, 1986. Citirano na ***strani 120***.

150. L. H. Ford & T. A. Roman, *Quantum field theory constrains traversable wormhole geometries*, i na veb strani arxiv.org/abs/gr-qc/9510071 ili Physical Review D 53, strane 5496–5507, 1996. Citirano na ***strani 121***.

151. B. S. Kay, M. Radzikowski & R. M. Wald, *Quantum field theory on spacetimes with a compactly generated Cauchy horizon*, arxiv.org/abs/gr-qc/9603012 ili Communications in Mathematical Physics 183 strane 533–556, 1997. Citirano na ***strani 121***.

152. M. J. Pfenning & L.H. Ford, *The unphysical nature of 'warp drive'*, Classical and Quantum Gravity **14**, strane 1743–1751, 1997. Citirano na ***strani 121***.

153 Izvantedan tehnički uvod u nuklearnu fiziku je od Bogdan Povh, Klaus Rith, Christoph Scholz & Frank Zetsche, *Teilchen und Kerne*, Springer, 5th edition, 1999. Dostupan je takođe i prevod na engleski. Citirano na ***strani 123***.

154. Za film otkucaja srca snimljen magnetnom rezozansom potražite na internetu "cardiac MRI". Pogleajte na primer www.youtube.com/watch?v=cU6Z-YWA_4U. Citirano na ***strani 124***.

155. Vidite zaista jedinstven dokument od C. Bamberg, G. Rademacher, F. Guttler, U. Teichgraber, M. Cremer, C. Buhrer, C. Spies, L. Hinkson, W. Henrich, K.D. Kalache & J.W. Dudenhausen, *Human birth observed in real-time open magnetic resonance imaging*, American Journal of Obstetrics & Gynecology 206, strana 505e1-505e6, 2012. Citirano na ***strani 124***.

156. W.C.M. Weijmar Schultz & al., *Magnetic resonance imaging of male and female genitals during coitus and female sexual arousal*, British Medical Journal **319**, strane 1596–1600, December 18, 1999, dostupan je na www.bmj.com/cgi/content/full/319/7225/1596 veb strani. Citirano na ***strani 124***.

157. M. Chantell, T. C. Weekes, X. Sarazin & M. Urban, *Antimatter and the moon*, Nature **367**, strana 25, 1994. M. Amenomori & al., *Cosmic ray shadow by the moon observed with the Tibet air shower array*, Proceedings of the 23rd International Cosmic Ray Conference, Calgary 4, strane 351–354, 1993.M. Urban, P. Fleury, R. Lestienne & F. Plouin, *Can we detect antimatter from other galaxies by the use of the Earth's magnetic field and the Moon as an absorber?*, Nuclear Physics, Proceedings Supplement 14B, strane 223–236, 1990. Citirano na ***strani 133***.

Slika 185 Divno poreklo života ljudi (© W.C.M. Weijmar Schultz).

158. Joseph Magill & Jean Galy, *Radioactivity Radionuclides Radiation*, Springer, 2005. Ova suvoparna, ali zbijena knjiga sadrži najviše podataka o ovoj temi, uključujući i podatke o svim poznatim niuklidima. Citirano na ***stranama 136*** i ***148***.

159. Dobar kratak pregled radiometrijskog datiranja je od R. Wiens, *Radiometric dating – a christian perpective*, i na veb strani www.asa3.org/ASA/resources/Wiens.html. Besmislen naslov je usled navika u mnogim religioznim sredinama da stavljaju znak pitanja na radiometrijsko datiranje. Ako se odvoji nekoliko religijskih iskaza u prikazu, sadržaj dobro objašnjava.Citirano na ***stranama 137*** i ***138***.

160. Videti na primer izvanredne i besplatne beleške sa predavanja Heinz-Gunther Stosch, *Einfuhrung in die Isotopengeochemie*, 2004, dostupno je ina internetu. Citirano na ***strani 137***.

161. G. B. Dalrymple, *The age of the Earth in the twentieth century: a problem (mostly) solved*, Special Publications, Geological Society of London 190, strane 205–221, 2001. Citirano na ***strani 139***.

162. Dobar pregled je dat kod A. N. Halliday, *Radioactivity, the discovery of time and the earliest history of the Earth*, Contemporary Physics 38, strane 103–114, 1997. Citirano na ***strani 139***.

163. J. Dudek, A. God, N. Schunck & M. Mikiewicz, *Nuclear tetrahedral symmetry: possibly present throughout the periodic table*, Physical Review Letters 88, strana 252502, 24 June 2002. Citirano na ***strani 140***.

164. Dobar uvod je kod R. Clark & B. Wodsworth, *A new spin on nuclei*, Physics World strane 25–28, July 1998. Citirano na ***strani 141***.

165. John Horgan, *The End of Science – Facing the Limits of Knowledge in the Twilight of the Scientific Age*, Broadway Books, 1997, chapter 3, note 1. Citirano na ***strani 143***.

166. G. Charpak & R. L. Garwin, *The DARI*, Europhysics News 33, strane 14–17, January/ February 2002. Citirano na ***strani 143***.

167. M. Brunetti, S. Cecchini, M. Galli, G. Giovannini & A. Pagliarin, *Gamma-ray bursts of atmospheric origin in the MeV energy range*, Geophysical Research Letters 27, strana 1599, 2000. Citirano na ***strani 145***.

168. Za skorije snimke jezera Karachay, pogledati na internetu veb stranu www.google.com/maps/@55.6810205,60.796688,4800m/data=!3m1!1e3. Citirano na ***strani 146***.

169. Knjiga sa fotografijama nuklearnih eksplozija je od Michael Light, *100 Suns*, Jonathan Cape, 2003. Citirano na ***strani 148***.

170. *A conversation with PeterMansfield*, Europhysics Letters 37, strana 26, 2006. Citirano na ***strani 144***.

171. Stari ali još uvek očaravajući kratak pregled solarne fizike je od R. Kippenhahn, *Hundert Milliarden Sonnen*, Piper, 1980. To je bio poznat bestseler, a dostupan je i preveden na engleski. Citirano na ***strani 151***.

172. H. Bethe, *On the formation of deuterons by proton combination*, Physical Review 54, strane 862–862, 1938, and H. Bethe, *Energy production in stars*, Physical Review 55, strane 434–456, 1939. Citirano na ***strani 151***.

173. M. Nauenberg & V. F. Weisskopf, *Why does the sun shine?*, American Journal of Physics 46, strane 23–31, 1978. Citirano na ***strani 152***.

174. Sporost širenja svetlosti unutar Sunca je usled učestanog rasipanja fotona zbog materije Sunca. Najozbiljnija procena je od R. Mitalas & K. R. Sills, *On the photon diffusion time scale for the Sun*, The Astrophysical Journal 401, strane 759–760, 1992. On za pobeg fotona daje vreme od 0,17 Ma, za prosečan pređeni put slobodnog fotona 0,9 mm i za prosečnu brzinu 0,97 cm/s. Pogledajte takođe interesantan dokument od M. Stix, *On the time scale of energy transport in the sun*, Solar Physics 212, strane 3–6, 2003, u kome je došao do zaključka da je brzina prenosa energije 30 Ma, što je dva reda više od vremena difuzije protona. Citirano na ***strani 152***.

175. Pogledajte knjigu koja može besplatno da se učita od John Wesson,*The Science of JET -The Achievements of the Scientists and Engineers Who Worked on the Joint European Torus 1973-1999*, JETJoint Undertaking, 2000, kao i na veb strani www.jet.edfa.org/documents/wesson/wesson.html. Citirano na ***strani 157***.

176. J. D. Lawson, *Some criteria for a power producing thermonuclear reactor*, Proceedings of the Physical Society, London B **70**, strane 6–10, 1957. Dokument je držan u tajnosti dve godine. Međutim, rezultati su bili poznati svim ruskim nuklrearnim fizičarima nekoliko godina pre Lavsona. Citirano na ***strani 187***.

177. Klasičan dokument je od R. A. Alpher, H. Bethe & G. Gamow, *The Origin of Chemical Elements*, Physical Review 73, strane 803–804, 1948. Citirano na ***strani 158***.

178. Poznat pregled nukleosinteza, dug preko 100 strana, je takozvani B^2FH dokument od M. Burbidge, G. Burbidge, W. Fowler & F. Hoyle, *Synthesis of the elements in stars*, Reviews of Modern Physics 29, strane 547–650, 1957. Citirano na ***strani 158***.

179. Standardna referenca je od E. Anders & N. Grevesse, *Abundances of the elements – meteoritic and solar*, Geochimica et Cosmochimica Acta 53, strane 197–214, 1989. Citirano na ***strani 160***.

180. S. Goriely, A. Bauswein & H. T. Janka, *R-process nucleosynthesis in dynamically ejected matter of neutron star mergers*, Astrophysical Journal 738, strana L38, 2011, preprint na veb strani arxiv.org/abs/1107.0899. Citirano na ***stranama 159*** i ***161***.

181. Kendall, Friedman and Taylor dobili su Nobelovu nagradu za fiziku 1990. godine za niz eksperimenata koje su izveli između 1967. i 1973. godine. Priču su ispričali u tri predavanja na Nobelu R. E. Taylor, *Deep inelastic scattering: the early years*, Review of Modern Physics **63**, strane 573–596, 1991, H.W. Kendall, *Deep inelastic scattering: Experiments on the proton and the observation of scaling*, Review of Modern Physics 63, strane 597–614, 1991. i J. I. Friedman, *Deep inelastic scattering: Comparisons with the quark model*, Review of Modern Physics 63, strane 615–620, 1991. Citirano na ***strani 163***.

182. G. Zweig, *An SU3 model for strong interaction symmetry and its breaking II*, CERN Report No. 8419TH. 412, February 21, 1964. Citirano na ***strani 163***.

183. O čudnom geniju Gel-Manu (Gell-Mann), pogledajte divnu knigu od George Johnson, *Murray Gell-Mann and the Revolution in Twentieth-Century Physics*, Knopf, 1999. Citirano na ***strani 163***.

184. Najbolji uvod je možda izvanredno jasan tekst od Donald H. Perkins, *Introduction to High Energy Physics*, Cambridge University Press, fourth edition, 2008. Isto tako divnan, sa većim naglaskom na istoriju i detaljniji je od Kurt Gottfried & Victor F. Weisskopf, *Concepts of Particle Physics*, Clarendon Press, Oxford, 1984. Viktor Vajkopf (Victor Weisskopf) bio je jedan od heroja na tom polju, kako u teorijskim istraživanjima, tako i u upravljanju u CERN, evropskoj organizaciji za istraživanje čestica. Citirano na ***stranama 164***, ***171***, i ***306***.

185. Zvanična referenca za sve podatke čestica, knjiga vredna za sve fizičare, je velika zbirka informacija koje je sredila Particle Data Group, uz veb stranu pdg.web.cern.ch/pdg/ sadrži mnogo novijih podataka. Odštampan pregled se objavljuje približno svake druge godine u jednom od velikih pregleda za elementarnu fiziku. Vidite na primer C. Amsler & al., *The Review of Particle Physics*, Physics Letters B 667, strana 1, 2008. Za neka svojstva ovih čestica zvanična referenca je skup

takozvanih CODATA vrednosti navedenih u referenci ***Ref. 285***. Citirano na ***stranama 165***, ***172***, ***173***, ***174***, ***175***, ***182***, ***186***, ***187***, ***190*** i ***195***

186. H. Fritsch, M. Gell-Mann & H. Leutwyler, *Advantages of the color octet picture*, Physics Letters B 47, strane 365–368, 1973. Citirano na ***strani 166***.

187. Kvantna hromodinamika može da se istraži u knjigama na nekoliko nivoa. Za prvi, popularan nivo, pogledajte jedan jasan dugo prodavan jednog od osnivača Harald Fritzsch, *Quarks – Urstoff unserer Welt*, Piper Verlag, 2006, ili na engleskom jeziku *Quarks: the Stuff of Matter*, Penguin Books, 1983. Na drugom nivou oblast može da se istraži kroz tekstove o fizici velikih energija, u onima iz ***Ref. 184***. Treći nivo sadrži knjige kao što je od Kerson Huang, *Quarks, Leptons and Gauge Fields*, World Scientific, 1992, ili Felix J. Yndurain, *The Theory of Quark and Gluon Interactions*, Springer Verlag, 1992, ili Walter Greiner & Andreas Schafer, *Quantum Chromodynamics*, Springer Verlag, 1995, ili u savremenom i detaljnom tekstu od Stephan Narison, *QCD as a Theory of Hadrons*, Cambridge University Press, 2004. Kao i uvek, student ili studentkinja moraju sam ili sama da otkriju koji tekst im najviše odgovara.Citirano na ***stranama 166***, ***171***, i ***172***.

188. S. Durr & al., *Ab initio determination of the light hadron masses*, Science 322, strane 1224–1227, 2008. Citirano na ***strani 169***.

189. Pogledajte na primer kod C. Bernard & al., *Light hadron spectrum with Kogut–Susskind quarks*, Nuclear Physics, Proceedings Supplement 73, strana 198, 1999, i reference u njemu. Citirano na ***strani 169***.

190. R. Brandelik & al., *Evidence for planar events in e^+e^- annihilation at high energies*, Physics Letters B 86, strane 243–249, 1979. Citirano na ***strani 175***.

191. Za pedagoški uvod u mrežu izračunavanja kvantne hromodinamike, pogledajte kod R. Gupta, *Introduction to Lattice QCD*, preprint na veb ***strani*** arxiv.org/abs/hep-lat/9807028, ili jasan uvod od Michael Creutz, *Quarks, Gluons and Lattices*, Cambridge University Press, 1983. Citirano na ***strani 172***.

192. S. Bethke, *Experimental tests of asymptotic freedom*, Progress in Particle and Nuclear Physics 58, strane 351–368, 2007, preprint na veb ***strani*** arxiv.org/abs/hep-ex/0606035. Citirano na ***strani 173***.

193. F. Abe & al., *Measurement of dijet angular distributions by the collider detector at Fermilab*, Physical Review Letters **77**, strane 5336–5341, 1996. Citirano na ***strani 173***.

194. Približnost kvantne hromodinamike sa kvarkovima nulte mase opisana je kod F. Wilczek, *Getting its from bits*, Nature 397, strane 303–306, 1999. To je takođe objašnjeno kod F. Wilczek, *Asymptotic freedom*, Nobel lecture 2004. Masa protona je dobijena preko energetske razmere pri kojoj jaka veza, nastala iz njene vrednosti na Plankovoj energiji, postaje jediničnog reda. Citirano na ***stranama 173***, ***174*** i ***191***.

195. A. J. Buchmann & E.M. Henley, *Intrinsic quadrupolemoment of the nucleon*, Physical Review C 63, strana 015202, 2000. Alfons Bušman (Alfons Buchmann) takođe predviđa da je kvadripolna količina kretanja, čudnih J = 1/2 oktetnih bariona pozitivna i predviđa izduženi strukturu za sve (privatna komunikacija). Za razdvojene barione, sa J = 3/2, kvadripolna količina kretanja može često da se izmeri spektroskopski i ona je uvek negativna. Za četiri Δ bariona je zato predviđeno da imaju negativnu sopstvenu količinu kretanja i stoga ovalni oblik. To je objašnjeno kod A. J. Buchmann & E.M. Henley, *Quadrupole moments of baryons*, Physical Review D65, strana 073017, 2002. Za skorija ažuriranja videti kod A. J. Buchmann, *Charge form factors and nucleon shape*, strane 110–125, in the Shape of Hadrons Workshop Conference, Athens Greece, 27-29 April 2006, AIP Conference Proceedings 904, Eds. C.N. Papanicolas, Aron Bernstein. Za ažuriranja za ostale barione pogledati kod A. J. Buchmann, *Structure of strange baryons*, Hyp 2006, International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics, Oct.10-14, Mainz, Germany, biće objavljeno u European Physics Journal A 2007. Ova tema je aktivno polje istraživanja; na primer, očekuju se ubrzo rezultati magnetne oktopolne količine kretanja. Citirano na ***strani 174***.

196. S. Strauch & al., *Polarization transfer in the $^4He(e,e'p)\ ^3H$ reaction up to* $Q^2 = 2.6\ (GeV/c)^2$, Physical Review Letters 91, strana 052301, 2003. Citirano na ***strani 174***.

197. F. Close, *Glueballs and hybrids: new states of matter*, Contemporary Physics 38, strane 1–12, 1997. Pogledati takođe i sledeću referencu. Citirano na ***strani 176***.

198. Misli se da bi tetrakvark bio najbolje objašnjenje za $f_0(980)$ rezonansu na 980 MeV. Orginalan predlog za ovo objašnjenje je od R. L. Jaffe, *Multiquark hadrons I: phenomenology of* $Q^2\overline{Q}^2$ *mesons*, Physical Review D15, strane 267–280, 1977, R. L. Jaffe, *Multiquark hadrons II: methods*, Physical Review D 15, strane 281–289, 1977, i R. L. Jaffe, Physical Review D $Q^2\overline{Q}^2$ *resonances in the baryon-antibaryon system*, 17, strane 1444–1458, 1978. Za jasan i detaljan savremen zaključak, pogledajte izvanredan prikaz od E. Klempt & A. Zaitsev, *Glueballs, hybrids, multiquarks: experimental facts versus QCD inspired concepts*, Physics Reports 454, strane 1–202, 2007, preprint na veb strani arxiv.org/abs/0708.4016. Videti takođe F. Giacosa, *Light scalars as tetraquarks*, preprint na veb strani arxiv.org/abs/0711.3126, i V. Crede & C. A. Meyer, *The experimental status of gluebllls*, preprint na veb strani arxiv.org/abs/0812.0600. Međutim, drugi istraživači se protive ovoj mogućnosti; videti na primer veb stranu arxiv.org/abs/1404.5673v2. Pitanje nije još uvek zaključeno. Citirano na ***strani 176***.

199. Pentakvarkove prvi su predvideli Maxim Polyakov, Dmitri Diakonov, i Victor Petrov 1997. godine. Dve grupe eksperimentatora tvrdile su 2003. godine da su potvrdile njihovo postojanje, sa masom od 1540 MeV; videti K. Hicks, *An experimental review of the* Θ^+ *pentaquark*, preprint na veb strani arxiv.org/abs/hep-ex/0412048. Međutim, rezultati iz 2005. godine i kasniji, odbacili su da su čestice sa 1540 MeV pentakvarkovi. Citirano na ***strani 176***.

200. Videti, na primer, kod Ya. B. Zel'dovich & V. S. Popov, *Electronic structure of superheavy atoms*, Soviet Physics Uspekhi 17, strane 673–694, 2004 u prevodu na engleski. Citirano na ***strani 101***.

201. J. Tran Thanh Van, editor, *CP violation in Particle Physics and Astrophysics*, Proc.Conf. Chateau de Bois, France, May 1989, Editions Frontieres, 1990. Citirano na ***strani 183***.

202. P.L. Anthony & al., *Observation of parity nonconservation in Moller scattering*, Physical Review Letters 92, strana 181602, 2004. Citirano na ***strani 184***.

203. M. A. Bouchiat & C. C. Bouchiat, *Weak neutral currents in atomic physics*, Physics Letters B 48, strane 111–114, 1974., U. Amaldi, A. Bohm, L. S. Durkin, P. Langacker, A. K. Mann, W. J. Marciano, A. Sirlin & H.H. Williams, *Comprehensive analysis of data pertaining to the weak neutral current and the intermediate-vector-boson masses*, Physical Review D 36, strane 1385–1407, 1987. Citirano na ***strani 184***.

204. M. C. Noecker, B. P. Masterson & C. E. Wiemann, *Precision measurement of parity nonconservation in atomic cesium: a low-energy test of electroweak theory*, Physical Review Letters 61, strane 310–313, 1988. Videti takođe D. M. Meekhof & al., *High-precision measurement of parity nonconserving optical rotation in atomic lead*, Physical Review Letters 71, strane 3442–3445, 1993. Citirano na ***strani 184***.

205. S. C. Bennet & C. E. Wiemann, *Measurement of the 6S – 7S transition polarizability in atomic cesium and an improved test of the standard model*, Physical Review Letters 82, strane 2484–2487, 1999. Grupa je takođe izmerila prostornu raspodelu slabog naboja, takozvanu ***anapolnu*** količinu kretanja; videti kod C.S. Wood & al., *Measurement of parity nonconservation and an anapole moment in cesium*, Science 275, strane 1759–1763, 1997. Citirano na ***strani 184***.

206. C. Jarlskog, *Commutator of the quark mass matrices in the standard electroweak model and a measure of maximal CP nonconservation*, Physical Review Letters 55, strane 1039–1042, 1985. Citirano na ***strani 186***.

207. Tačan popis navoda tema je velikih rasprava. Ona svakako uključuje Y. Nambu & G. Jona–Lasinio, *Dynamical model of the elementary particles based on an analogy with superconductivity - I*, Physical Review 122, strana 345-358, 1961, P. W. Anderson, *Plasmons, gauge invariance, and mass*, Physical Review 130, strane 439–442, 1963, Popis se potom nastavlja sa referencom ***Ref. 209***. Citirano na ***stranama 188*** i ***308***.

208. K. Grotz & H. V. Klapdor, *Die schwache Wechselwirkung in Kern-, Teilchen- und Astrophysik*, Teubner Verlag, Stuttgart, 1989. Takođe je dostupna i a engleskom i na nekoliko drugih jezika. Citirano na ***strani 190***.

209. P. W. Higgs, *Broken symmetries, massless particles and gauge fields*, Physics Letters 12, strane 132–133, 1964, P. W. Higgs, *Broken symmetries and the masses of the gauge bosons*, Physics Letters 13, strane 508–509, 1964. On zatim objašnjava pruču u P. W. Higgs, *Spontaneous symmetry*

breakdown without massless bosons, Physical Review 145, strane 1156–1163, 1966. Higs odaje dosta priznanja Andersonu, umesto sebi; takođe pominje Brout i Englert, Guralnik, Hagen, Kibble and 't Hooft. Ovi dokumenti su od F. Englert & R. Brout, *Broken symmetry and the mass of the gauge vector mesons*, Physics Review Letters 13, strane 321–323, 1964, G. S. Guralnik, C. R. Hagen & T.W. B. Kibble, *Global conservations laws and massless particles*, Physical Review Letters 13, strane 585–587, 1964, T.W. B. Kibble, *Symmetry breaking in non-Abelian gauge theories*, Physical Review 155, strane 1554–1561, 1967. Za ideje koje su inspirisale sva ova izdanja, videti ***Ref. 207***. Citirano na ***stranama 191*** i ***307***

210. D. Treille, *Particle physics from the Earth and from the sky: Part II*, Europhysics News 35, no. 4, 2004. Citirano na ***strani 190***.

211. Preživari su proučavani kod P. Jordan & de Laer Kronig, in Nature 120, strana 807, 1927. Citirano na ***strani 192***.

212. K.W.D. Ledingham & al., *Photonuclear physics when a multiterawatt laser pulse interacts with solid targets*, Physical Review Letters 84, strane 899–902, 2000. K.W.D. Ledingham & al., *Laser-driven photo-transmutation of Iodine-129 – a long lived nuclear waste product*, Journal of Physics D: Applied Physics 36, strane L79–L82, 2003. R. P. Singhal, K.W.D. Ledingham & P. McKenna, *Nuclear physics with ultra-intense lasers – present status and future prospects*, Recent Research Developments in Nuclear Physics 1, strane 147–169, 2004. Citirano na ***strani 192***.

213. Ograničenje poluprečnika elektrona zaključeno je iz *g*–2 merenja, kao što je to objasnio Hans Demelt (Hans Dehmelt) u svom govori pri dodeli Nobelove nagrade, Hans Dehmelt, *Experiments with an isolated subatomic particle at rest*, Reviews of Modern Physics 62, strane 525–530, 1990, ili Hans Dehmelt, *Is the electron a composite particle?*, Hyperfine Interactions 81, strane 1–3, 1993. Citirano na ***strani 197***.

214. G. Gabrielse, H. Dehmelt & W. Kells, *Observation of a relativistic, bistable hysteresis in the cyclotron motion of a single electron*, Physical Review Letters 54, strane 537–540, 1985. Citirano na ***strani 197***.

215. Bibliografski detalji o poslednjoj štampanoj verziji *Review of Particle Physics*, nalaze se u Dodatku B. Verzija na internetu može da se nađe na veb strani pdg.web.cern.ch. Sadašnje stanje velikog objedinjavanja može takođe da se nađe o odgovarajućem odeljku pregleda. Citirano na ***stranama 201*** i ***202***.

216. Slajdovi veoma ličnog razgovora o pregledu H. Georgi, *The future of grand unification*, mogu da se nađu na veb strani www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~yt100sym/files/yt100sym_georgi.pdf. Savremen pristup istraživanju je kod S. Raby, *Grand unified theories*, i na arxiv.org/abs/hep-ph/0608183. Citirano na ***strani 201***.

217. H. Jeon & M. Longo, *Search for magnetic monopoles trapped in matter*, Physical Review Letters 75, strane 1443–1447, 1995. Citirano na ***strani 202***.

218. Kvantifikacija naboja kao posledica postojanja magnetnih monopolova je od P. Dirac, *Quantised singularities in the electromagnetic Field*, Proceedings of the Royal Society (London) A 133, strane 60–72, 1931. Citirano na ***strani 202***.

219. O stepenima raspada protona pogledajte poslednje podatke od Particle Data Group, na veb strani pdg.web.cern.ch. Citirano na ***strani 202***.

220. U. Amaldi, de Boer & H. Furstenau, *Comparison of grand unified theories with electroweak and strong coupling constants measured at LEP*, Physics Letters 260, strane 447–455, 1991. Ovaj naširoko citiran dokument je standardna referenca po ovom pitanju. Ažuriranje se nalazi kod Boer & C. Sander, *Global electroweak fits and gauge coupling unification*, Physics Letters B 585 strane 276–286, 2004, ili preprint na veb strani arxiv.org/abs/hep-ph/0307049. Slike su preuzete uz saglasnost sa kućne veb strane Wim de Boer www-ekp.physik.uni-karlsruhe.de/~deboer/html/Forschung/forschung.html. Citirano na ***strani 202***.

221. Peter G.O. Freund, *Introduction to Supersymmetry*,Cambridge 1988. Julius Wess & Jonathan Bagger, *Supersymmetry and Supergravity*, Princeton University Press, 1992. Ova naširoko citirana knjiga sadrži mnogo matematike ali malo fizike. Citirano na ***strani 203***.

222. S. Coleman & J. Mandula, *All possible symmetries of the S matrix*, Physical Review 159, strane 1251–1256, 1967. Citirano na ***strani 203***.

223. P. C. Argyres, *Dualities in supersymmetric field theories*, Nuclear Physics Proceedings Supplement **61A**, strane 149–157, 1998, preprint je datupan na veb strani arxiv.org/abs/hep-th/9705076. Citirano na ***strani 205***.

224. Michael Stone editor, *Bosonization*, World Scientific, 1994. R. Rajaraman, *Solitons and Instantons*, North Holland, 1987. Međuim, nada o objašnjenju postojanja fermiona kao posledice beskonačno velikog broja bozona u interakciji – ono što se naziva "bozonizacijom" – još nije uspešna. Citirano na ***strani 206***.

225. Godine 1997. najmanji leteći objekt kojeg je napravio čovek, bio je helikopter kojeg je izgradila grupa sa Institut fur Mikrotechnik u Majncu, Nemačka. Slike su dostupne na njihovoj veb strani i mogu da se nađu na www.imm.fraunhofer.de/English/billboard/f_hubi.html. Helikopter je dužine 24 mm, težak je 400 mg i leti (mada ne slobodno) koristeći dva elektromotora koji pokreću dva rotora brzinom od 40.000 do 100.000 obrtaja u minutu. Pogledajte takođe helikoprer sa Univerziteta Stanford na veb strani www-rpl.stanford.edu/RPL/htmls/mesoscopic/mesicopter/mesicopter.html, uz objašnjenje o problemu baterija. Citirano na ***strani 209***.

226. Henk Tennekes, *De wetten van de vliegkunst – over stijgen, dalen, vliegen en zweven*, Aramith Uitgevers, 1992. Ovaj jasan i zanimljiv tekst dostupan je i na engleskom. Citirano na ***strani 210***.

227. Najnoviji računarski model uzgona još uvek opisuje samo kretanje krila u dve dimenzije, kao na primer, kod Z. J. Wang, *Two dimensional mechanism for insect hovering*, Physical Review Letters 85 strane 2216–2219, 2000. Prvi primer mehaničke ptice konstruisao je Wolfgang Send; to može da se proučava na veb strani www.aniprop.de/. Videti takođe W. Send, *Physik des Fliegens*, Physikalische Blatter 57, strane 51–58, June 2001. Citirano na ***strani 210***.

228. R. B. Srygley & A. L. R. Thomas, *Unconventional lift-generating mechanisms in freeflying butterflies*, Nature 420, strane 660–664, 2002. Citirano na ***strani 210***.

229. Knjiga od John Brackenbury, *Insects in Flight*, 1992. je lep uvod u biomehaniku insekata, kombinujući zanimljivu nauku i divne fotografije. Citirano na ***strani 212***.

230. Simulacija leta insekata upotrebom povećanog modela sa krilima koja mašu u ulju, opisana je, na primer, na veb strani dickinsonlab.caltech.edu/. Veća viskoznost ulja omogućava da se postigne isti Rejnoldsov broj uz veću velićinu i manjom učestanošću nego li u vazduhu. Pogledajte isto tako video zapis iz 2013. u kojem se govori o letu insekata na veb strani www.ted.com/talks/ michael_ dickinson_how_a_fly_flies.html. Citirano na ***strani 212***.

231. Zaključak o talasastom plivanju koji sadrži dve lepe ilustracije ubačene u tekst, ***slika 152*** i ***slika 153***, su od M. Gazzola, M. Argentina & L. Mahadevan, *Scaling macroscopic aquatic locomotion*, Nature Physics 10, strane 758–761, 2014. Citirano na ***stranama 213*** i ***214***.

232. E. Purcell, *Life at low Reynolds number*, American Journal of Physics 45, strana 3, 1977. Videti takođe prikaz od E. Lauga &T. R. Powers, *The hydrodynamics of swimming microorganisms*, Reports on Progress in Physics 72, strana 096601, 2009, preprint na arxiv.org/abs/0812.2887. Citirano na ***strani 215***.

233. Kratak ali informativni pregled je od S. Vogel, *Modes and scaling in aquatic locomotion*, Integrative and Comparative Biology 48, strane 702–712, 2008, dostupan na internetu, na veb strani icb.oxfordjournals.org/content/48/6/702.full. Citirano na ***strani 213***.

234. Većina bakterija su ravne, elipsoidalne vreće koje održavaju oblik pomoću membrane koja okružuje citoplazmu. Međutim, postoje izuzeci; u slanoj vodi nađene su kvadratne i trouglaste bakterije. Više o tome se govori u odgovarajućem odeljku knjige od Bernard Dixon, *Power Unseen – How Microbes Rule the World*, W.H. Freeman, New York, 1994. Citirano na ***strani 215***.

235. S. Pitnick, G. Spicer & T. A. Markow, *How long is a giant sperm?*,Nature 375, strana 109, 1995. Citirano na ***strani 215***.

236. M. Kawamura, A. Sugamoto & S. Nojiri, *Swimming of microorganisms viewed from string and membrane theories*, Modern Journal of Physics Letters A 9, strane 1159–1174, 1994. Dostupno i na veb ***strani*** arxiv.org/abs/hep-th/9312200. Citirano na ***strani 215***.

237. W. Nutsch & U. Ruffer, *Die Orientierung freibeweglicher Organismen zum Licht, dargestellt am Beispiel des Flagellaten Chlamydomonas reinhardtii*, Naturwissenschaften 81, strane 164–174, 1994. Citirano na ***strani 215***.

238. Postoje takođe i takozvane *prokaryote flagella*. Pogledati na primer kod S.C. Schuster & S. Khan, *The bacterial flagellar motor*, Annual Review of Biophysics and Biomolecular Structure 23, strane 509–539, 1994, ili kod S. R. Caplan & M. Kara-Ivanov, *The bacterial flagellar motor*, International Review of Cytology 147, strane 97–164, 1993. Takođe pogledajte i informacije o temi koje se mogu naći na veb strani www.id.ucsb.edu:16080/fscf/library/origins/graphics-captions/flagellum.html. Citirano na ***strani 215***.

239. Za pregled o konstrukciji i kretanju koli bakterije, videti kod H. C. Berg, *Motile behavior of bacteria*, Physics Today 53, strane 24–29, January 2000. Citirano na ***strani 216***.

240. J.W. Shaevitz, J. Y. Lee & D. A. Fletcher, *Spiroplasma swim by a processive change in body helicity*, Cell 122, strane 941–945, 2005. Citirano na ***strani 216***.

241. To je iz knjige od David Dusenbery, *Life at a Small Scale*, Scientific American Library, 1996. Citirano na ***strani 216***.

242. 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 Reynold number*, Physical Review Letters 58, strane 2051–2054, 1987, A . Shapere & F.Wilczek, *Gauge kinematics of deformable bodies*, American Journal of Physics 57, strane 514–518, 1989, A. Shapere & F. Wilczek, *Geometry of self-propulsion at low Reynolds number*, Journal of Fluid Mechanics 198, strane 557–585, 1989, A. Shapere & F. Wilczek, *Efficiencies of self-propulsion at low Reynolds number*, Journal of Fluid Mechanics **198**, strane 587–599, 1989. Videti takođe kod R. Montgomery, *Gauge theory of the falling cat*, Field Institute Communications 1, strane 75–111, 1993. Citirano na ***strani 217***.

243. E. Putterman & O. Raz, *The square cat*, American Journal of Physics **76**, strane 1040–1045, 2008. Citirano na ***strani 217***.

244. J. Wisdom, *Swimming in spacetime: motion by cyclic changes in body shape*, Science 299, strane 1865–1869, 21st ofMarch, 2003. Sličan efekt su otkrili kasnije E. Gueron & R.A. Mosna, *The relativistic glider*, Physical Review D75, strana 081501(R), 2007, preprint je dostupan na veb strani arxiv.org/abs/gr-qc/0612131. Citirano na ***strani 218***.

245. S. Smale, *A classification of immersions of the two-sphere*, Transactions of the American Mathematical Society 90, strane 281–290, 1958. Citirano na ***strani 219***.

246. G. K. Francis & B. Morin, *Arnold Shapiro's Eversion of the Sphere*, Mathematical Intelligencer strane 200–203, 1979. Videti takođe i jedinstveno uputstvo za crtanje mnogostrukosti od George Francis, *The Topological Picturebook*, Springer Verlag, 1987. Ono sadrži takođe odeljak o everziji lopte. Citirano na ***strani 219***.

247. B. Morin & J. -P. Petit, *Le retournement de la sphere*, Pour la Science 15, strane 34–41, 1979. Videti takođe jasan članak od A. Phillips, *Turning a surface inside out*, Scientific American strane 112–120, May 1966. Citirano na ***strani 219***.

248. S. Levy, D. Maxwell & T. Munzner, *Making Waves – a Guide to the Ideas Behind Outside In*, Peters, 1995. Citirano na ***strani 220***.

249. George K. Batchelor, *An Introduction to Fluid Mechanics*, Cambridge University Press, 1967, i H. Hashimoto, *A soliton on a vortex filament*, Journal of Fluid Mechanics 51, strane 477–485, 1972. Zaključak se se nalazi kod H. Zhou, *On the motion of slender vortex filaments*, Physics of Fluids 9, strana 970-981, 1997. Citirano na ***stranama 221*** i ***222***.

250. V. P. Dmitriyev, *Helical waves on a vortex filament*, American Journal of Physics 73, strane 563–565, 2005, i V. P. Dmitriyev, *Mechanical analogy for the wave-particle: helix on a vortex filament*, ili na veb strani arxiv.org/abs/quant-ph/0012008. Citirano na ***strani 222***.

251. T. Jacobson, *Thermodynamics of spacetime: the Einstein equation of state*, Physical Review Letters 75, strane 1260–1263, 1995, ili na veb strani arxiv.org/abs/gr-qc/9504004. Citirano na ***strani 224***.

252. J. Frenkel & T. Kontorowa, *Uber dieTheorie der plastischen Verformung*, Physikalische Zeitschrift der Sowietunion 13, strane 1–10, 1938. F. C. Frank, *On the equations of motion of crystal dislocations*, Proceedings of the Physical Society A 62, strane 131–134, 1949, J. Eshelby, *Uniformly moving dislocations*, Proceedings of the Physical Society A 62, strane 307–314, 1949. Videti takođe kod G. Leibfried & H. Dietze, Zeitschrift fur Physik 126, strana 790, 1949. Opšti uvod može da se nađe kod A. Seeger & STRANA Schiller, *Kinks in dislocations lines and their effects in internal friction in crystals*, Physical Acoustics 3A,W. P. Mason, ed., Academic Press, 1966. Videti takođe udžbenik od Frank R. N. Nabarro, *Theory of Crystal Dislocations*, Oxford University Press, 1967, ili J. P. Hirth & J. Lothe, *Theory of Dislocations*, McGraw Hills Book Company, 1968. Citirano na ***strani 225***.

253. Očaravajući uvod u teoretsku stranu polimera su knjige od Alexander Yu. Grosberg & Alexei R. Khokhlov, *Statistical Physics of Macromolecules*, AIP, 1994, i Pierre-Gilles de Gennes, *Scaling Concepts in Polymer Physics*, Cornell University Press, 1979. Videti takođe pregled od P. -G. de Gennes, *Soft matter*, Reviews of Modern Physics 63, strana 645, 1992. Citirano na ***strani 225***.

254. Majstor za kombinovanje istraživanja i zabave u matematici je Luis Kaufman (Louis Kauffman). Primer njegove umešnosti je lep tekst Louis H. Kauffman, *Knots and Physics*, World Scientific, third edition, 2001. On daje jasan uvod u matematiku čvorova i njenu primenu. Citirano na ***strani 227***.

255. Dobar uvod u nabrajanje čvorova je dokument od J. Hoste, M. Thistlethwaite & J. Weeks, *The first 1,701,936 knots*,The Mathematical Intelligencer 20, strane 33–47, 1998. Citirano na ***stranama 227*** i 298.

256. I. Stewart, *Game, Set and Math*, Penguin Books, 1989, strane 58–67. Citirano na ***strani 228***.

257. P. Pieranski, S. Przybyl & A. Stasiak, *Tight open knots*, takođe i na arxiv.org/abs/physics/0103016 veb strani. ***Nije citirano***.

258. T. Ashton, J. Cantarella, M. Piatek & E. Rawdon, *Self-contact sets for 50 tightly knotted and linked tubes*, takođe na veb strani arxiv.org/abs/math/0508248. Citirano na ***strani 229***.

259. J. Cantarella, J. H. G. Fu, R. Kusner, J. M. Sullivan & N.C. Wrinkle, *Criticality for the Gehring link problem*, Geometry and Topology 10, strane 2055–2116, 2006, preprint se može da se nađe na veb strani arxiv.org/abs/math/0402212. Citirano na ***strani 229***.

260. W. R. Taylor, *A deeply knotted protein structure and how it might fold*, Nature 406, strane 916–919, 2000. Citirano na ***strani 230***.

261. Alexei Sossinsky, *Noeuds – histoire d'une theorie mathematique*, Editions du Seuil, 1999. D. Jensen, *Le poisson noue*, Pour la science, dossier hors serie, strane 14–15, April 1997. Citirano na ***strani 230***.

262. D.M. Raymer & D. E. Smith, *Spontaneous knotting of an agitated string*, Proceedings of the National Academy of Sciences (USA) 104, strane 16432–16437, 2007, ili videti na veb strani www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0611320104. Ovaj rad je dobio nagradu za humor Ig Nobel Prize za fiziku 2008. godine; pogledati veb stranu improbable.com/ig. Citirano na ***strani 230***.

263. A. C. Hirshfeld, *Knots and physics: Old wine in new bottles*, American Journal of Physics 66, strane 1060–1066, 1998. Citirano na ***strani 231***.

264. Za neka savremena istražinja ćvorova pogledajte kod P. Holdin, R. B. Kusner & A. Stasiak, *Quantization of energy and writhe in self-repelling knots*, NewJournal of Physics 4, strane 20.1–20.11, 2002. Citirano na ***strani 231***.

265. H. R. Pruppacher & J.D. Klett, *Microphysics of Clouds and Precipitation*, Reidel, 1978, strane 316–319. Kapi koje padaju su zaravnjene i slične su tableti usled uzajamnog delovanja površinskog napona i protoka vazduha. Videti takođe kod U. Thiele, *Weine nicht, wenn der Regen zerfallt*, Physik Journal 8, strane 16–17, 2009. Citirano na ***strani 231***.

266. J. J. Socha, *Becoming airborne without legs: the kinematics of take-off in a flying snake, Chrysopelea paradisi*, Journal of Experimental Biology 209, strane 3358–3369, 2006, J. J. Socha, T. O'Dempsey & M. LaBarbera, *A three-dimensional kinematic analysis of gliding in a flying snake, Chrysopelea paradisi*, Journal of Experimental Biology 208, strane 1817–1833, 2005, J. J. Socha

&M. LaBarbera, *Effects of size and behavior on aerial performance of two species of flying snakes (Chrysopelea)*, Journal of Experimental Biology 208, strane 1835–1847, 2005. Kompletna literatura o letećim zmijama može da se nađe na veb strani www.flyingsnake.org/. Citirano na ***strani 232***.

267. Informativni doprinos o svetu psihokineze i paranormalnog dao je poznati profesionalni mađioničar James Randi, *Flim-flam!*, Prometheus Books, Buffalo 1987, kao i u nekoliko njegovih drugih knjiga. Videti takođe veb stranu web.randi.org/. ***Nije citirano***.

268. James Clerk Maxwell, *Scientific Papers*, **2**, strana 244,October 1871. Citirano na ***strani 241***.

269. Dobar uvod je kod C. J. Hogan, *Why the universe is just so*, Reviews of Modern Physics **72**, strane 1149–1161, 2000. Većina materijala u Tabeli 27 je preuzeto iz velike knjige od John D. Barrow & Frank J. Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle*, Oxford University Press, 1986. Odbacivanje nerealnih opcija takođe je interesantna tema za vreme razonode. Vidite, na primer, razloge zašto život može da se zasniva samo na ugljeniku, kako je objašnjeno u eseju od I. Asimov, *The one and only*, u njegovoj knjizi *The Tragedy of the Moon*, Doubleday, Garden City, New York, 1973. Citirano na ***stranama 241*** i ***290***.

270. L. Smolin, *The fate of black hole singularities and the parameters of the standard models of particle physics and cosmology*, dostupno na veb strani arxiv.org/abs/gr-qc/9404011. Citirano na ***strani 241***.

271. Aristotel, *Treaty of the heaven*, III, II, 300 b 8. Videti kod Jean-Paul Dumont, *Les ecoles presocratiques*, Folio Essais, Gallimard, strana 392, 1991. Citirano na ***strani 244***.

272. *Le Systeme International d'Unites*, Bureau International des Poids et Mesures, Pavillon de Breteuil, Parc de Saint Cloud, 92310 Sevres, France. Svi noviji razvoji koji se tiču SI jedinica objavljuju se u časopisu *Metrologia*, kojeg uređuje isti telo. Pokazujući sporost stare institucije BIPM je pokrenuo veb stranu tek 1998.; Ona je sada dostupna na www.bipm.fr/. Videti takođe veb stranu www.utc.fr/~tthomass/Themes/Unites/index.html; na njoj su obuhvaćene biografije osoba po kojima su razne jedinice dobile nazive. Veb strana njenog britanskog ekvivalenta, www.npl.co.uk/npl/reference, mnogo je bolja; u njoj je dato mnogo detalja, kao i definicije SI jedinica na engleskom jeziku. Citirano na ***strani 245***.

273. Sveto pismo u oblasti merenja vremena je dvotomni rad J. Vanier & C. Audoin, *The Quantum Physics of Atomic Frequency Standards*, Adam Hilge, 1989. Popularan doprinos je dao Tony Jones, *Splitting the Second*, Institute of Physics Publishing, 2000.

Na veb strani opdaf1.obspm.fr/www/lexique.html dat je rečnik pojmova koji se koriste u ovoj oblasti. Za precizno merenje ***dužine*** izbor alata su posebni laseri, kao što je laser zatvorenog moda i frekventni češalj. Postoji opširna literatura za ovu oblast. Podjednako velika je literatura o preciznom merenju ***električne struje***; u toku je utrkivanje za nalaženje najboljeg načina da se to ostvari; prebrojavanjem naboja ili merenje magnetnih sila. Pitanje je još uvek otvoreno. Za merenja ***mase*** i ***atomske mase*** pogledajte ***Vol. II, strana 59***. Za precizno merenje ***temperature*** pogledajte ***Vol. I, strana 407***). Citirano na ***strani 245***.

274. Nezvanične SI prefikse prvi je predložio 1990. godine Jeff K. Aronson sa University of Oxford, i možda će ući u opštu upotrebu u budućnosti. Videti New Scientist 144, strana 81, 3 December 1994. Postoje i manje ozbiljni predlozi. Citirano na ***strani 247***.

275. Za više detalja o elektromagnetnom sistemu jedinica, videti standardni tekst od John David Jackson, *Classical Electrodynamics*, 3rd edition, Wiley, 1998. Citirano na ***strani 249***.

276. D.J. Bird & al., *Evidence for correlated changes in the spectrum and composition of cosmic rays at extremely high energies*, Physical Review Letters 71, strane 3401–3404, 1993. Citirano na ***strani 249***.

277. P. J. Hakonen, R. T. Vuorinen & J. E. Martikainen, *Nuclear antiferromagnetism in rhodium metal at positive and negative nanokelvin temperatures*, Physical Review Letters 70, strane 2818–2821, 1993. Videti takođe njegov članak u Scientific American, January 1994. Citirano na ***strani 250***.

278. A. Zeilinger, *The Planck stroll*, American Journal of Physics 58, strana 103, 1990. Možete li da nađete drugi sličan primer? Izazov 211. Citirano na ***strani 250***.

279. Pregled ovog zadivljujućeg rada je dat kod J. H. Taylor, *Pulsar timing and relativistic gravity*, Philosophical Transactions of the Royal Society, London A 341, strane 117–134, 1992. Citirano na ***strani 250***.

280. Najprecizniji časovnik napravljen 2004. godine, časovnik sa cezijumskom fontanom, ima tačnost jedan prema 1015. je Skoru mogućnost veće preciznosti redvideo je, između ostalih M. Takamoto, F. -L. Hong, R. Higashi & H. Katori, *An optical lattice clock*, Nature 435, strane 321–324, 2005. Citirano na ***strani 250***.

281. J. Bergquist, ed., *Proceedings of the Fifth Symposium on Frequency Standards and Metrology*, World Scientific, 1997. Citirano na ***strani 250***.

282. Videti informaciju o $D_s^{\pm}$ mezonima iz grupe podataka o česticama na pdg.web.cern.ch/pdg. Citirano na ***strani 250***.

283. O dugom trajanju tantala 180, videti D. Belic & al., *Photoactivation of* 180Tam *and its implications for the nucleosynthesis of nature's rarest naturally occurring isotope*, Physical Review Letters 83, strane 5242–5245, 20 December 1999. Citirano na ***strani 250***.

284. Različiti pojmovi čak su tema posebnog međunarodnog standarda, ISO 5725, pod naslovom *Accuracy and precision of measurement methods and results*. Dobar uvod je od John R. Taylor, *An Introduction to Error Analysis: the Study of Uncertainties in Physical Measurements*, 2nd edition, University Science Books, Sausalito, 1997. Citirano na ***strani 251***.

285. P. J. Mohr, B.N. Taylor & D. B. Newell, *CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2010*, preprint na veb strani arxiv.org/abs/1203.5425. Ovo je skup konstanti koje su posledica međunarodnog podešavanja i preporuka za međunarodnu upotrebu od srtrane Committee on Data for Science and Technology (CODATA), tela u International Council of Scientific Unions, koe su sakupili International Union of Pure and Applied Physics (IUPAP), the International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) i druge organizacije. Veb strana IUPAC je iupac.org/. Citirano na ***stranama 252*** i ***306***.

286. Neke od ovih priča mogu da se nađu u tekstu od N. W. Wise, *The Values of Precision*, Princeton University Press, 1994. Oblast merenja uz veliku preciznost, iz koje potiću rezultati na ovim stranicama, svet je sam za sebe. Lep uvod je od J. D. Fairbanks, B. S. Deaver, C. W. Everitt & P. F. Michaelson, eds., *Near Zero: Frontiers of Physics*, Freeman, 1988. Citirano na ***strani 252***.

287. Za detalje pogledati dobro poznatu astronomsku referencu od P. Kenneth Seidelmann, *Explanatory upplement to the Astronomical Almanac*, 1992. Citirano na ***strani 256***.

288. Pogledati odgovarajuću referencu u prvom delu. Citirano na ***strani 258***.

289. Naboj protona, uz veliku preciznost, odredio je merenjem učestanosti svetlosti koju emituju atomi vodonika T. Udem, A. Huber, B. Gross, J. Reichert, M. Prevedelli, M. Weitz & T.W. Hausch, *Phase-coherent measurement of the hydrogen 1S–2S transition frequency with an optical frequency interval divider chain*, Physical Review Letters 79, strane 2646–2649, 1997. Citirano na ***strani 259***.

290. Za potpun popis izotopa videti kod R. B. Firestone, *Table of Isotopes, Eighth Edition, 1999 Update*, with CD-ROM, JohnWiley& Sons, 1999. Za popis izotopa na internetu, videti koreansku veb stranu atom.kaeri.re.kr od J. Chang. Za popis precizno određenih masa izotopa pogledti veb stranu csnwww.in2p3.fr. Citirano na ***stranama 260***, i ***269***.

291. Za osnovno stanje bizmuta 209 mislilo se da je stabilno, sve do početka 2003. godine. Tada je otkriveno da je bilo radioaktivno, premda sa rekordnim vremenom trajanja, kako su izvestili P. de Marcillac, N. Coron, G. Dambier, J. Leblanc & J. –P. Moalic, *Experimental detection of α-particles from the radioactive decay of natural bismuth*, Nature 422, strane 876–878, 2003. Slučajno, pobuđeno stanje od 83 MeV iznad osnovnog stanja jezgra istog bizmuta 209 je najkraće poznato radioaktivno nuklearno stanje. Citirano na strani ***260***.

292. Za informaciju o dugom trajanju tantala 180 videti kod D. Belic & al., *Photoactivation of* 180Tam *and its implications for the nucleosynthesis of nature's rarest naturally occurring isotope*, Physical Review Letters 83, strane 5242–5245, 20 December 1999. Citirano na ***stranama 260*** i ***262***

293. Stephen J. Gould, *The Panda's Thumb*, W. W. Norton & Co., 1980. To je jedna od nekoliko interesantnih i informativnih knjiga o razvojnoj biologiji, od najboljeg pisca u ovoj oblasti. Citirano na ***strani 252***.

294. F. Marques & al., *Detection of neutron clusters*, Physical Review C 65, strana 044006, 2002. Suprotne rezultate su dobili B. M. Sherrill & C. A. Bertulani, *Proton-tetraneutron elastic scattering*, Physical Review C 69, strana 027601, 2004, i D. V. Aleksandrov & i dr., *Search for resonances in the three- and four-neutron systems in the7Li(7Li, 11C)3n and 7Li(7Li, 10C)4n reactions*, JETP Letters 81, strana 43, 2005. ***Nije citirano***.

295. Za dobar pregled, videti članak od P. T. Greenland, *Antimatter*, Contemporary Physics 38, strane 181–203, 1997. Citirano na ***strani 253***.

296. Skoro sve što je poznato o svakom elementu i njegovom hemizmu, može da se nađe u enciklopedijskim izdanjima Gmelin, *Handbuch der anorganischen Chemie*, objavljenih od 1817 nadalje. Postoji više od 5000 delova, sada su svi objavljeni na engleskom pod naslovom *Handbook of Inorganic and Organometallic Chemistry*, uz najmanje jedan deo posvećen svakom hemijskom elementu. Na istu temu, jedna izuzetno skupa knjiga sa isto tako lošim izgledom je od Per Enhag, *Encyclopedia of the Elements*, Wiley–VCH, 2004. Citirano na ***strani 261***.

297. Atomske mase, kao što ih daje IUPAC, mogu da se nađu u Pure and Applied Chemistry 73, strane 667–683, 2001, ili na internetu, veb strana iupac.org/. Za popis masa izotopa, videti veb stranu csnwww.in2p3.fr. Citirano na ***stranama 262,*** i ***269.***

298. Metalni, kovalentni i Van derValsovi popuprečnici su od Nathaniel W. Alcock, *Bonding and Structure*, Ellis Horwood, 1999. Ovi tekstovi takođe detaljno objašnjavaju kako su poluprečnici definisani i izmereni. Citirano na ***strani 269***.

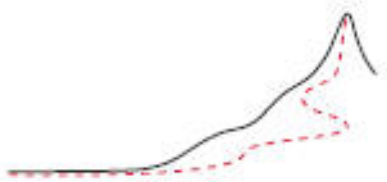
299. M. Flato, P. Sally & G. Zuckerman (editors), *Applications of GroupTheory in Physics and Mathematical Physics*, Lectures in applied mathematics, volume 21, American Mathematical Society, 1985. Ova interesantna knjiga je napisana pre revolucije superstruna, tako da ta tema nedostaje u inače izvanrednom prikazu.Citirano na ***strani 274***.

300. Za više zagonetki, pogledajte izvanrednu knjigu od James Tanton, *Solve This – Math Activities for Studends and Clubs*, Mathematical Association of America, 2001. Citirano na ***strani 275***.

301. Za uvod u topologiju. videti za primere kod Mikio Nakahara, *Geometry, Topology and Physics*, IOP Publishing, 1990. Citirano na ***strani 275***.

302. Uvod u teoremu razvrstavanja je kod R. Solomon, *On finite simple groups and their classification*, Notices of the AMS 42, strane 231–239, 1995, Takođe je tekst dostupan na internetu, na veb ***strani*** www.ams.org/notices/199502/solomon.ps. Citirano na ***strani 279***.

303. Pedagoška objašnjenja su navedena kod C. G. Wohl, *Scientist as detective: Luis Alvarez and the pyramid burial chambers, the JFK assassination, and the end of the dinosaurs*, American Journal of Physics 75, strane 968–977, 2007. Citirano na ***strani 286***.



ZASLUGE

PRIZNANJA

Mnogi ljudi koji su sačuvali svoj dar radoznalosti, pomogli su da se ovaj projekat ostvari. Pre svega, Saverio Pascazio bio je – prisutan ili ne – stalna referenca za ovaj projekat. Fernand Mayne, Anna Koolen, Ata Masafumi, Roberto Crespi, Serge Pahaut, Luca Bombelli, Herman Elswijk, Marcel Krijn, Marc de Jong, Martin van derMark, Kim Jalink, moji roditelji Peter i Isabella Schiller, Mike vanWijk, Renate Georgi, Paul Tegelaar, Barbara i Edgar Augel, M. Jamil, Ron Murdock, Carol Pritchard, Richard Hoffman, Stephan Schiller, Franz Aichinger i, pre svih, moja supruga Britta pružili su mi vredne savete i ohrabrenja.

Mnogi ljudi su pomogli u projektu i prikupljanju materijala. Najkorisnija je bila pomoć od Mikael Johansson, Bruno Barberi Gnecco, Lothar Beyer, brojna poboljšanja od Berta Sierre, detaljne predloge Claudia Farinatija, mnoga poboljšanja od Erica Sheldona, detaljne predloge Andrew Young-a, stalna pomoć i saveti Jonatana Kelu, ispravke Elmara Bartela, a posebno obimnu, strastvenu i savesnu pomoć Adrian Kubale.

Važan materijal su pružili Bert Peeters, AnnaWierzbicka, William Beaty, Jim Carr, John Merrit, John Baez, Frank DiFilippo, Jonathan Scott, Jon Thaler, Luca Bombelli, Douglas Singleton, George McQuarry, Tilman Hausherr, Brian Oberquell, Peer Zalm, Martin van der Mark, Vladimir Surdin, Julia Simon, Antonio Fermani, Don Page, Stephen Haley, Peter Mayr, Allan Hayes, Norbert Dragon, Igor Ivanov, Doug Renselle, Wimde Muynck, Steve Carlip, Tom Bruce, Ryan Budney, Gary Ruben, Chris Hillman, Olivier Glassey, Jochen Greiner, Squark, Martin Hardcastle, Mark Biggar, Pavel Kuzin, Douglas Brebner, Luciano Lombardi, Franco Bagnoli, Lukas FabianMoser, Dejan Ćorović, Paul Vannoni, John Haber, Saverio Pascazio, Klaus Finkenzeller, Leo Volin, Jeff Aronson Boone, Lawrence Tuppen, Quentin David Jones, Arnaldo Uguzzoni, Frans van Nieuwpoort, Alan Mahoney, Britta Schiller, Petr Daneček, IngoThies, Vitaliy Solomatin, Carl Offner, Nuno Proenca, Elena Colazingari, Paula Henderson, Daniel Darre, Wolfgang ang Rankl, John Heumann, Joseph Kiss, Martha Weiss, Antonio Gonzalez, Antonio Martos, Andre Slabber, Ferdinand Bautista, Zoltan Gacsi, Pat Furrie, Michael Reppisch, Enrico Pasi, Thomas Koppe, Martin Rivas, Herman Beeksma, Tom Helmond, John Brandes, Vlad Tarko, Nadia Murillo, Ciprian Dobra, Romano Perini, Harald van Lintel, Andrea Conti, Francois Belfort, Dirk Van de Moortel, Heinrich Neumaier, Jarosław Krolikowski, John Dahlman, Fathi Namouni, Paul Townsend, Sergei Emelin, Freeman Dyson, SR Madhu Rao, David Parks, Jurgen Janek, Daniel Huber, Alfons Buchmann, William Purves, Pietro Redondi, Damoon Saghian, Frank Sweetser, Markus Zecherle, Zach Joseph Espiritu, Marian Denes, Miles Mutka, kao i velik broj ljudi koji su želeli da ostanu nepomenuti.

Softverski alati su usavršavani uz obimnu pomoć za fontove i slaganje od strane Michaela Zedlera i Achima Blumensatha i uz ponavljanu i vrednu podršku Donalda Arseneaua; pomoć je došla i od Ulrike Fischer, Piet van Oostrum, Gerben Wierda, Klaus Bohncke, Craig Upright, Herbert Voss, Andrew Trevorrow, Danie Els, Heiko Oberdiek, Sebastian Rahtz, Don Story, Vincent Darley, Johan Linde, Joseph Hertzlinger, Rick Zaccone, John Warkentin, Ulrich Diez, Uwe Siart, Will Robertson, JosephWright, Enrico Gregorio, Rolf Niepraschk, Alexander Grahn , Werner Fabian i Karl Koller.

Slog i dizajniranje knjiga rezultat je profesionalnih saveta Ulricha Dirra. Slog je znatno poboljšan uz pomoć Johannesa Kustera i njegovog fonta Minion Math. Dizajn knjige i njena veb strana duguju mnogo sugestijama i podršci moje supruge Britte.

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).

PRIZNANJA ZA FILM

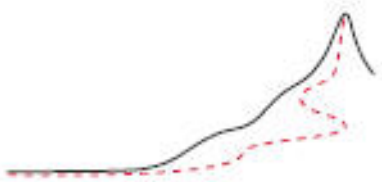
Animacija sistema aktin–miozin na ***slici 4*** je autorsko pravo i ljubaznost San Diego State University, Jeff Sale i Roger Sabbadini. Može da se nađe na veb strani www.sci.sdsu.edu/movies/actin_myosin.html. Film na ***slici 76***, koji pokazuje kako se pojedinačni elektron kreeće kroz tečni helijum, je autorsko pravo i ljubaznost Humphrey Maris; on može da se nađe na njegovoj veb strani www.brown.edu /academics/physics/. Film komore sa iskrom koji pokazuje kosmičko zračenje na ***slici 103*** je ljubaznost i autorsko pravo Wolfgang Rueckner i Allen Crockett i nalazi se na veb strani isites.harvard.edu/icb. Film sa aolarnim bakljama na ***slici 118*** uzet je sa satelita TRACE NASA, čija je veb strana www.lmsal. com/TRACE/. Film sa letećom zmijom na ***slici 175*** je autorsko pravo i ljubaznost Jake Socha. Može da se nađe na veb strani www.flyingsnake.org.

PRIZNANJA ZA SLIKE

Fotografija istočne padine vrha Langtang Lirung peak u Nepalskim Himalajima, prikazana na prednjim koricama, je ljubaznost i autorsko pravo Kevin Hite i nalazi se na njegovom blogu thegettingthere. com. Fotografija mehura sapunice na ***sttrani 9*** je ljubaznost i autorsko pravo Jason Tozer za Creative Review/Sony; njegovo pravljenje je opisano u blogu www.creativereview.co.uk/. Fotografija kita na ***slici*** 2 je ljubaznost NOAA u USA.Fotografija baobaba sa slonom je ljubaznost i autorsko pravo Ferdinand Reus. Slika orhideje na ***slici 3*** je ljubaznost i autorsko pravo Elmar Bartel. Prikaz jajašca morskog ježa na ***slici 5*** uzet je od Kristina Yu, i on je autorsko pravo i ljubaznost Exploratorium, nalazi se na veb strani www.exploratorium.edu. Fotografija piezoelektričnog motora na ***slici 7*** je ljubaznost i autorsko pravo Piezomotor AB i ona se nalazi na njihovoj veb strani www.piezomotor.se. Lep prikaz ATP sinteze na ***slici 8*** je ljubaznost i autorsko pravo Joachim Weber i on se nalazi na njegovoj veb strani www.depts.ttu.edu/ chemistry/Faculty/weber. Slike čvorova embriona na ***slici 9*** su ljubaznost i autorsko pravo Hirokawa Nobutaka i nalaze se u citiranom dokumentu. Šematski prikaz zadovoljstva u ljudskom mozgu, prikazan na ***slici 16*** je ljubaznost NIH i može da se nađe, na primer, na veb strani irp.drugabuse.gov/NRB/technical/ RFCMRI.php. Lepa tabela elemenata na ***slici 19*** je ljubaznost i autorsko pravo Theodore Gray i na prodaji je na www.theodoregray.com. Slika molekula vode na ***slici 21*** je autorsko pravo Benjah-bmm27 i nalazi se na Wikimedia. Prikaz DNK na ***slici 23*** je autorsko pravo i ljubaznost David Deerfield i posvećeno je uspomeni na njega. Uzet je sa njegove veb strane www.psc.edu/~deerfiel/Nucleic_Acid-SciVis.html. Prikazi molekula DNK na ***slici 24*** su autorsko pravo i ljubaznost Hans-Werner Fink i korišćeni su uz dozvolu Wiley VCH. Divan prikaz veličina zvezda na ***slici 25*** je ljubaznost i autorsko pravo Dave Jarvis i nalazi se na Wikimedia. Fotografije stena na ***slici 26*** su autorsko pravo i ljubaznost Siim Sepp; one mogu da se nađu na njegovoj divnoj veb strani www.sandatlas.org. Fotografija mermernog kipa je detalj kipa Silovanje Proserpine od Gian Lorenzo Bernini i ono je ljubaznost of Wikimedia; uz kip može da se uživa u Galleria Borghese u Rimu. Fotografije atoma renijuma na ***slici 27*** su ljubaznost Hans-Werner Fink i autorsko pravo i ljubaznost American Physical Society; one mogu da se nađu na veb strani journals.aps.org /prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.52.1532. Slike pahuljica snega na ***slici 28*** su ljubaznost i autorsko pravo Furukawa Yoshinori; njegova veb strana je www.lowtem.hokudai.ac.jp/ptdice/index_e.html. Fotografije minerala na ***slici 29*** nadalje su autorsko pravo i ljubaznost of Rob Lavinsky sa veb strane www.irocks.com/, a uzete su iz njegove velike i lepe zbirke na veb strani www.mindat.org/photo-49529.html. Fotografija prirodnog korunda na ***slici 32*** je autorsko pravo i ljubaznost Stephan Wolfsried i izeta iz njegove lepe zbirke mikrokristala sa veb strane www.mindat.org/user-1664.html. Fotografija veštačkog korunda na ***slici 35*** je autorsko pravo of Morion Company i ljubaznost je Uriah Prichard, uzeta sa veb strane www.motioncompany.com,. Fotografija Paraiba turmalina na ***slici 37*** je autorsko pravo i ljubaznost Manfred Fuchs i nalazi se na njegovoj veb strani www.tourmalinavitalis.de. Fotografija velikog pojedinaćnog kristala korunda, obično pogrešno smatranog "safir", ljubaznost je i autorsko pravo GT Advanced i nalazi se na veb strani www.gtat.com. Fotografije veštačkih kristala na ***slici 42*** i nadalje, su autorsko pravo Northrop Grumman i ljubaznost Scott Griffin. Fotografije aleksandrita na ***slici 41*** su autorsko pravo i ljubaznost John Veevaert i Trinity Mineral Co., sa veb strane www.trinityminerals. com/index.htm. Fotografija PZT – olovni cirkonijum titanat – prikazana na ***slici 44*** je autorsko pravo i ljubaznost Ceramtec. Fotografija veštačkog dijananta na ***slici 46*** je autorsko pravo i ljubaznost Diamond Materials GmbH. Fotografija dijamantskog noža na ***slici 47*** je autorsko pravo i ljubaznost Diamatrix. Fotografije mašine za rast kristala silicijuma i nastao kristal silicijuma na ***slici 48*** su autorsko pravo PVATePla sa veb strane www.PVATePla.com, i korišćene su uz ljubaznu dozvolu Gert Fisahn. Fotografija hidroksillapatita na ***slici 49*** je autorsko pravo i ljubaznost Aksel Osterlof. Fotografija zuba ajkule na ***slici 50*** je ljubaznost i autorsko pravo Peter Doe i nalazi se na veb strani www.flickr.com/ photos/peteredin. Fotografija pojedinačnog kristala bakra na ***slici 53*** je ljubaznost i autorsko pravo Lachlan

Cranswick. Fotografije prirodnog kvazikristala i njegovih osobina na ***slici 54*** su autorsko pravo i ljubaznost Luca Bindi i Paul Steinhardt. Fotografija i crtež promenljivog ogledala na ***slici 55*** su ljubaznost i autorsko pravo Ronald Griessen i nalaze se na njegovoj veb strani www.nat.vu.nl/~griessen. Crtež Ashby mape na ***slici 56*** je ljubaznost i autorsko pravo Carol Livermore; oma se nalazi u MIT OpenCourseWare course materijalima za 6.777J / 2.372J *Design and Fabrication*. Slike nogu insekata na ***slici 57*** su autorsko pravo i ljubaznost Max Planck Gesellschaft i nalaze se u citiranom članku. Fotografije sastava kosti na ***slici 58*** je ljubaznost Peter Fratzl i njegovo autorsko pravo i Physik Journal. Fotografija prolaznika uz svetlost i talase reda teraherca na ***slici 59*** su ljubaznost Jefferson Lab. Grafik klime na ***slici 61*** je autorsko pravo i ljubaznost Dieter Luthi. Prikazi tehnike rasta kristala na ***slici 62*** su autorsko pravo Ivan Golota i korišćene uz njegovu dozvolu i onu od Andrey Vesselovsky. Fotografija sonde Habl na ***slici 63*** je ljubaznost i autorsko pravo Metrolab, a nalazi se na njihovoj veb strani www.metrolab.com. Zbirka slika jednoatomskih listova na ***slici 64*** uzeta je iz ***Ref. 72***, autorsko je pravo National Academy of Sciences, i ljubaznost je autora i Tiffany Millerd. Fotografija grafena na ***slici 65*** je autorsko pravo i ljubaznost Andre Geim. Fotografije na ***slici 66*** su autorsko pravo i ljubaznost tapperboy i Diener Electronics. Fotografija komada aerogela na ***slici 66*** je ljubaznost NASA. Fotografija tranzistora na ***slici 68*** je autorsko pravo i ljubaznost Benedikt Seidl i nalazi se na Wikimedia; prikaz čipa je autorsko pravo i ljubaznost Ioactive blog na blog.ioactive.com. Fotografija efekta fontane na ***slici 70*** je ljubaznost i autorsko pravo Pacific Institute of Theoretical Physics. Fotografija rešetke vrtloga na ***slici 71*** je autorsko pravo Andre Schirotzek, ljubaznost Wolfgang Ketterle, na nalazi se na njihovoj istraživačkoj veb strani www.rle.mit.edu/cua_pub/ketterle_group/home.htm. Fotografija laserske linije sa kašnjenjem na ***slici 73*** je ljubaznost i autorsko pravo Laser Zentrum Hannover. Fotografija violine na ***slici 74*** je autorsko pravo Franz Aichinger i ljubaznost EOS. Slika ekrana koji lebdi je autorsko pravo i ljubaznost Burton Inc. i nalazi se na veb strani www.burton-jp.com. Fotografija lasera za navođenje na ***slici 75*** je ljubaznost i autorsko pravo ESO i Babak Tafreshi. Fotografija helijumskog žiroskopa na ***slici 77*** je ljubaznost i autorsko pravo Eric Varoquaux. Slike duga na ***slici 82*** su ljubaznost i autorsko pravo ed g2s, nalazi se na Wikimedia, a od Christophe Afonso, nalazi se na njegovoj lepoj veb strani www.flickr.com/photos/chrisafonso21. Prikaz neutronskog interferometra na ***slici 84*** je ljubaznost i autorsko pravo Helmut Rauch i Erwin Seidl, a nalaze se na veb strani Atominstitut u Beču na www.ati.ac.at. Simulirani izgled crne rupe na ***slici 85*** je autorsko pravo i ljubaznost Ute Kraus i može da se nađe na njenoj divnoj veb strani www.tempolimit-lichtgeschwindigkeit.de. Mapa sa izvorima eksplozija γ zraka na ***slici 87*** je ljubaznost NASA i uzeta sa veb strane BATSE, www.batse.msfc.nasa.gov/batse. Fotografija baobaba na ***slici 88*** je autorsko pravo i ljubaznost Bernard Gagnon i nalazi se na Wikimedia. Fotografija aparata za snimanje magnetnom rezonansom na ***slici 89*** je ljubaznost i autorsko pravo Royal Philips Electronics. Snimci glave i kičme magnetnom rezonansom na ***slici 90*** su ljubaznost i autorsko pravo Joseph Hornak i uzeti su sa njegove veb strane www.cis.rit.edu/htbooks/mri. Snimak porođaja na ***slici 91*** je ljubaznost i autorsko pravo C. Bamberg. Fotografija evropske velike komore sa mehurićima (Big European Bubble Chamber) na ***slici 95*** je ljubaznost i autorsko pravo CERN. Na ***slici 97***, fotografija Vilsonove maglene komore je ljubaznost i autorsko pravo Wiemann Lehrmittel; snimak α zraka kojeg je napravio Patrick Blackett je ljubaznost i autorsko pravo Royal Society. Fotografija elektroskopa na ***slici 100*** je ljubaznost i autorsko pravo Harald Chmela i uzeta je sa njegove veb strane www.hcrs.at. Fotografija Viktora Hesa na ***slici*** 101 nema poznato autorsko pravo. Fotografija Gajgerovog brojača na ***slici 102*** je ljubaznost i autorsko pravo Joseph Reinhardt, a nalazi se na njegovoj veb strani www.flickr.com/photos/javamoose. Fotofrafija senke Meseca na ***slici 104*** je ljubaznost i autorsko pravo CERN a nalazi se na veb strani cerncourier.com/cosmic-ray-apparatus-images-moons-shadow/. Fotografija aurore na ***slici 105*** je ljubaznost i autorsko pravo Jan Curtis i uzeta je sa njegove veb strane climate.gi.alaska.edu/Curtis/curtis.html. Fotografija spektrometra na ***slici 107*** je ljubaznost i autorsko pravo Hungarian Academy of Sciences i nalazi se na njihovoj veb strani www.atomki.hu/hekal/muszaki_hatter/ams_en.html. Slika vulkana Erta Ale na ***slici 108*** je ljubaznost i autorsko pravo Marco Fulle i deo je divne zbirke fotografija na veb strani www.stromboli.net. Fotografija aparata nuklearne magnetne rezonanse na ***slici 112*** je ljubaznost i autorsko pravo Bruker i nalazi se na njihovoj veb strani www.bruker.com. Crtež nuklearnih energija veza na ***slici 120*** je ljubaznost i autorsko pravo Max Planck Institute for Gravitational Physics. Crtež JET reaktora na ***slici 121*** je ljubaznost i autorsko pravo EFDA-JET. Na ***slici 122***, fotografija magline Rak je ljubaznost NASA ESA; Fotografija magline Dumbbell je ljubaznost i autorsko pravo Bill Snyder i prikazana je na veb strani apod.nasa.gov/apod/ap111227.html. Grafik obilja nukleida na ***slici 124*** je ljubaznost i autorsko pravo Thomas Janka. Fotografija Proton Synchroton na ***slici 126*** je autorsko pravo i ljubaznost CERN. Crtež konstante jake veze na ***slici 132*** je ljubaznost i autorsko pravo Siegfried Bethke. Fotografija mlaza kvarka na ***slici 135*** je ljubaznost i autorsko pravo DESY. Na ***slici 136***, fotografija časovnika je ljubaznost i autorsko pravo Traser i nalazi se na veb strani www.traser.com; Spektar je ljubaznost Katrin collaboration. Fotografije sudara

neutruna na ***slici 137*** i eksperimenta W i Z bozona ***slici 138*** i ***slici 139*** su ljubaznost i autorsko pravo CERN. Na ***slici 142***, fotografija postavke eksperimenta je autorsko pravo i ljubaznost Brookhaven National Laboratory; rezultati merenja su autorsko pravo i ljubaznost Nobel Foundation. Fotografija opservatorije Sudbury Neutrino Observatory na ***slici 144*** je ljubaznost i autorsko pravo SNO, a nalazi se na njihovoj veb strani www.sno.phy.queensu.ca/sno/images. Grafik objedinjavanja na ***slici 146*** je ljubaznost i autorsko pravo W. de Boer i uzeto sa njegove veb strane www-ekp.physik.uni-karlsruhe.de/~deboer/. Grafik objedinjavanja na ***slici 147*** je ljubaznost i autorsko pravo CERN. Slika leptira u vazdušnom tunelu na ***slici 149*** je ljubaznost i autorsko pravo Robert Srygley i Adrian Thomas. Na ***slici 150***, slika grabljivica je ljubaznost i autorsko pravo S.L. Brown sa veb strane slbrownphoto.com/. Slika kolibrija je ljubaznost i autorsko pravo Pennsylvania Game Commission i Joe Kosack i uzeta sa veb strane www.pgc.state.pa.us; slika vilinskog konjica je ljubaznost i autorsko pravo nobodythere i nalazi se na njegovoj veb strani xavier.favre2.free.fr/coppermine/. Slike perja insekata na ***slici 151*** su materijal korišćen uz dozvolu HortNET, proizvod The Horticulture and Food Research Institute of New Zealand. Prikazi na ***slici 152*** i na ***slici 153*** su autorsko pravo L. Mahadevan i ljubaznost Macmillan. Fotografija školjke morski češalj na ***slici 154*** je ljubaznost i autorsko pravo Dave Colwell. Istorijska fotografija pada mačke na ***slici 155*** je od Etienne-Jules Marey i ne postoji autorsko pravo. Fotogtafija skoka sa stene Artem Silchenko na ***slici 156*** je autorsko pravo World High Diving Federation, a nalazi se na njihovoj veb strani www.whdf.com i ljubaznost je Frederic Weill. Prikaz everzije lopte na ***slici 159*** je ljubaznost i autorsko pravo John Sullivan i nalazi se na njegovoj *Optiverse* veb strani new.math.uiuc.edu/optiverse/. Fotografija pijavice na ***slici 160*** je autorsko pravo i ljubaznost Ze Nogueira i nalazi se na njegovoj veb strani www.flickr.com/photos/zenog. Crtež mešovitog razmeštanja na ***slici 163*** napravljen je posebno za ovaj tekst i autorsko je pravo i ljubaznost Ulrich Kolberg. Dijagrami čvorova i veza na ***slici 165*** i na ***slici 170*** su ljubaznost i autorsko pravo Robert Scharein i uzeti sa njegove veb strane www.knotplot.com. Prikaz zategnutih čvorova na ***slici 168*** su autorsko pravo i ljubaznost Piotr Pieranski. Prikaz kopče na ***slici 169*** je ljubaznost i autorsko pravo Jason Cantarella. Fotografija sluzave jegulje na ***slici 171*** je ljubaznost i autorsko pravo Christine Ortlepp; ona može da se nađe i na veb strani www.lemonodor.com/scruz-2003-01-24/17m.shtml. Prikaz neuređenog čvora na ***slici 172*** je ljubaznost i autorsko pravo PNAS. Snimak seksualnog odnosa magnetnom rezonansom na ***slici 185*** je ljubaznost i autorsko pravo Willibrord Weijmar Schultz. Fotografija na zadnjim koricama, gušter basilisk koji trči po vodi, je ljubaznost i autorsko pravo belgijske grupe TERRA vzw i nalazi se na njihovoj veb strani terravzw.org/. Svi crteži su autorsko pravo Christoph Schiller. Ukoliko posumnjate da vaše autorsko pravo nije ispravno navedeno ili dobijeno, to nije učinjeno a namerom; molim vas da me obavestite u tom slućaju.



PLANINA KRETANJA

Pustolovina fizike – Vol. V

Kretanja unutar materije – Zadovoljstvo, tehnologija i zvezde

Koji kvantni efekti su temelji života?
Koliko motora imaju ljudi?
Kako rade naša čula?
Koji kristali se koriste u svakodnevnom životu?
Šta je energija vakuuma?
Kako radi magnetna rezonansa
Odkuda su došli atomi u naše telo?
Zašto zvezde sjaje?
Koji problemi u fizici nisu rešeni?

Odgovarajući na ova i ostala pitanja o kretanju, ova serija knjiga daje zanimljiv i mozgoloman uvod u savremenu fiziku – koji je iznenađujuć i izazovan na svakoj stranici. Polazeći od svakodnevnog života, pustolovina daje pregled savremenih rezultata u mehanici, toploti, elektromagnetizmu, relativnosti, kvantnoj fizici i objedinjavanju

Christoph Schiller, PhD Université Libre de Bruxelles, fizičar je i popularizator fizike. Napisao je ovu knjigu za svoju decu i za sve studente, predavače i čitaoce koji se interesuju za fiziku, nauku o kretanju.

Pdf datateka je dostupna besplatno na
www.motionmountain.net