

MALI JE SVET ALI JE FIZIKA VELIKA
(a neki fizičari su debeli)

*dr Aleksandar Bogojević,
Laboratorija za primenu računara u nauci
Institut za fiziku*

<http://scl.phy.bg.ac.yu/>

Kao najfundamentalnija od nauka, fizika zaista pokriva širok opseg fenomena. To i ne treba da čudi – samo ime oblasti dolazi od grčke reči koja znači priroda. Iz “fizikocentričnog” rakursa – prirodne nauke i fizika to je jedno te isto. Naravno, kada su skale na kojima rade fundamentalni zakoni u jednoj oblasti jako daleko od naših svakodnevnih skala, fizika rađa efektivne zakone i nove discipline. Teško da ćete, polazeći od fundamentalnih zakona kojima se povinuju elementarne čestice, nešto moći da kažete o vodi koja ključa u čajniku – radije ćete stvoriti novu disciplinu primerenu toj skali – čajnikologiju (termodinamiku). Slično se iz fizike izvodi hemija (zanemaruju se objekti koji su bitno manji od jednog atoma), biologiju (izostavljaju se objekti koji nemaju sposobnost samorepliciranja), itd.

No danas se fizika po prvi put počinje ozbiljno prostirati i van opsega prirodnih nauka. Ispostavlja se da morate biti fizičar (ili, ako ne možete, onda bar matematičar) da bi razumeli moderne finansije, da bi razumeli kako izgleda internet, da bi pravilno predvideli kako se šire polne bolesti, da bi razumeli kako izgledaju mreže prijateljstava i druge socijalne mreže, itd. Upravo nam mreža svih glumaca može dati lep uvod u novonastali deo fizike – nauku o mrežama.

Pogledajte sajt <http://oracleofbacon.org/> na Univerzitetu u Virdžiniji i upoznaćete se sa svetom glumaca na način na koji to ranije niste mogli. Mreža glumaca je konstruisana po izuzetno jednostavnim pravilima – dva glumca su povezana ako su nekada glumili u istom filmu. Unesite ime i prezime bilo kog glumca i program će izmeriti koliko je njegovo minimalno “udaljenje” od Kevina Bejkona. Evo nekoliko primera:

1. Kevin Bejkon je udaljen 0 koraka (od samog sebe);
2. Tom Hanks je udaljen 1 korak (glumio u “Apollo 13” sa Bejkonom);
3. Elvis Presley je udaljen 2 koraka (glumio je zajedno sa Džon I. Vilerom u filmu “Live a Little, Love a Little”, dok je Viler igrao u “Apollo 13” sa Bejkonom);
4. Sergej Trifunović je takođe udaljen 2 koraka (sa Hose Ramon Rozariom je igrao u “Someone else’s America”, a ovaj je sa Bejkonom igrao u filmu “Mystic River”)

Kao što vidite, nije lako naći glumca koji je mnogo dalje od Bejkona. Probajmo sa glumcima sa početka ere filma. Rudolf Valentino je udaljen 3 koraka, isto toliko je i Čarli Čaplin. Toliko su udaljena i Seka Sablić i Miodrag Petrović Čkalja. Ako ne verujete program vam izbacuje odgovarajuću minimalnu trajektoriju u prostoru svih glumaca: Čkalja je glumio u filmu “Lepa Parada” sa Ljubom Tadićem, koji je sa Harvi Kajtelom

glumio u “Vlemma tou Odyssea” (sigurno ste gledali ovaj film), dok je Kajtel igrao sa Bejkonom u “Imagine New York”.

Možete li naći neke “udaljenije” glumce? Lola Novaković je 4 koraka udaljena od Kevina Bejkona. Evo i jedne petice – niko drugi nego Albert Ajnštajn! Neću da vam ispisujem trajektoriju – otidite na sajt i vidite. Sada stvar postaju zanimljivija – možete li naći nekog ko je 7 ili više koraka od Bejkona? Ako uspete pošaljite e-mail na gornji sajt. Verovali ili ne, neko je čak našao i jednog glumca udaljenog 9 koraka!

Naravno, ako vas više interesuju kompjuteri nego filmovi onda ste verovatno spremni da varate. Stojte – neko je to već uradio pre vas. Program oracleofbacon koristi bazu podataka svih glumaca koja se nalazi na sajtu <http://www.imdb.com/>. Znajući ovo neko je prosto napravio programčić (u žargonu “robot”) i pustio ga da pretraži celokupnu bazu i nađe glumca koji je najudaljeniji od Bejkona (čak 11 koraka).

Ako ste fizičar, ili bar ako razmišljate na taj način, sada ste verovatno pomalo zbunjeni. Ova mala šetnja kroz prostor svih glumaca vam šalje naizgled protivrečne signale. Sa jedne strane vidite da je reč o stvarno velikoj bazi podataka (jer u njoj možete naći i prilično opskurne glumce). Sa druge strane, vidite da su svi ti glumci na vrlo malom odstojanju od našeg koordinatnog početka (Bejkona). Kako je to moguće?

U ovom trenutku baza sadrži oko $N = 800000$ glumaca i 375000 filmova. Pokušajmo da steknemo neku intuiciju o tome kako izgleda ova mreža. Pretpostavimo da su glumci raspoređeni u čvorovima pravilne d dimenzionalne rešetke (tj. hiper kocke). Veza između broja čvorova N , dimenzije d i karakteristične dužine rešetke L je $N = L^d$, dok je broj najbližih suseda (tj. glumaca koji igraju u jednom filmu) $q = 2d$. Odavde dobijamo da bi karakteristično udaljenje glumaca trebalo da bude 15 (u slučaju da u jednom filmu igra 10 glumaca). Kao što smo videli, međutim, karakteristična udaljenja u gornjoj bazi su negde između 2 i 3 (moramo prilično da se potrudimo da nađemo glumce koji su 4 ili više koraka udaljeni)¹. Dakle, nešto škripi u našim pretpostavkama.

Sasvim je jasno da mrežu glumaca nije moguće modelirati pravilnom mrežom. Ovo je i razlog zašto nas je gornji problem malo zbunio – kao fizičari mi svakodnevno imamo posla sa ogromnim mrežama, no u većini slučajeva te mreže su izrazito pravilne, odnosno pokazuju veliku simetriju (kao atomi, odnosno joni u kristalnoj rešeci). Poznata je izreka: “Kada je jedini alat sa kojim raspolazete čekić, onda vam vremenom svi problemi počinju ličiti na eksere.” Tako i nama sve prvo liči na pravilnu mrežu. No nemojte misliti da fizičarska intuicija raspolaze samo jednim alatom. Od kako je računara, pored potpuno uređenih mreža, na spisku alata su nam se našle i potpuno neuređene, odnosno slučajno generisane mreže.

¹ Detaljnim prolazom kroz bazu se može odrediti da je prosečno udaljenje od Kevina Bejkona 2.939. Uma Turman bi bila jednako dobar koordinatni početak. Prosečno udaljenje do nje je 2.931. Sergej Trifunović, sa prosečnim udaljenjem od 3.03 je tek malo lošiji izbor za centar sveta glumaca. Albert Ajnštajn bi bio stvarno loš izbor za centar, pošto je prosečno udaljenje od njega 6.142. U svetu glumaca postoji i najgori izbor za centar. Prosečno udaljenje od ovog centra je čak 9.200.

Problem je u tome što je svet glumaca sa kojim smo se upravo upoznali jednako slabo opisan slučajnim mrežama kao i potpuno uređenim mrežama. Pre nekoliko godina Albert Laszlo Barabasi i saradnici su našli srednji put između ova dva ekstrema i dali nam u ruke treći alat za rad sa jednom velikom klasom kompleksnih mreža (scale-free networks, odnosno mreže bez karakteristične dužine). Mreža nema skalu ako je verovatnoća da iz jednog čvora izvire k veza proporcionalna sa $k^{-\gamma}$ (dakle ako je data stepenom zavisnošću), gde je γ zadati eksponent. Ove mreže se po svojoj topologiji (tj. po tome kako su povezani čvorovi) veoma razlikuju kako od potpuno uređenih mreža (kod kojih iz svih čvorova izvire isti broj veza), tako i od slučajnih mreža (kod kojih verovatnoća da čvor ima k veza eksponencijalno opada sa k). Kratko rečeno, nove mreže poseduju nezanemarljiv broj čvorova sa velikim brojem veza (tzv. habova).

Mreža svih glumaca je upravo primer jedne ovakve mreže – habovi su u ovom slučaju filmske zvezde. Da bi se filmovi prodavali oni moraju da imaju bar po jednu zvezdu, makar u epizodnoj ulozi. Na taj način zvezde igraju u ogromnom broju filmova, odnosno glume sa ogromnim brojem glumaca. Postojanje habova je razlog zašto je svet glumaca toliko mali (karakteristično udaljenje je oko 3) mada je broj glumaca prilično veliki (oko 800000).

Podimo sada od suprotnog kraja popularnosti, ne od zvezda već od glumca koji upravo započinje karijeru u svom prvom filmu. Sa kim će on igrati? Velika je verovatnoća da će upravo igrati sa nekom zvezdom. Verovatnoća da će se vezati za nekoga će upravo biti proporcionalna popularnosti onoga za koga se vezuje. Sad smo ujedno ugrubo skicirali i algoritam kako se u računarima mogu simulirati ovakve mreže. U svakom slučaju ove mreže se ne zadaju već se “gaje” – dodaju se novi čvorovi koji se preferencijalno vezuju za one čvorove koji već imaju puno veza koje iz njih izvire. U finansijama je ovakvo vezivanje odavno poznato i iskazano je sintagmom “bogati postaju još bogatiji”, ili “para se na paru lepi.”

Na sličan način debeli ljudi više jedu, čime postaju još deblji, a ovo je upravo sve što je potrebno da bi se stvorila još jedna interesantna kompleksna mreža. Tema ovog broja je fizika u kuhinji, a ja sam trebao da napišem nešto vezano za kuhinju i moderne trendove u fizici. Pa šta radimo u kuhinji nego što jedemo? Zato sam originalno i odlučio da pišem o ovakvim mrežama gojaznosti kao o lepoj ilustraciji mreža bez skale koje su postale tako vruća tema u modernoj fizici. Ideja je bila lepa, no predamnom su se odmah isprečila dva problema. Prvo, da bi se uključio ključni efekat “debeli postaju još deblji” hrana ne sme biti ograničena, što će reći na ovaj način ne možemo modelirati gojaznost u siromašnim društvima. Drugi problem je bitniji – pored navedenog efekta koji dovodi to stepene distribucije, ne smemo zanemariti i drugi koji unosi skalu (i time usložnjava problem). Ako ste jako debeli onda kraće živite te vas zbog toga sve manje ima u distribuciji. I ovo se prilično lako može simulirati, no i bez toga nam intuicija kaže kako bi krajnja distribucija trebala da izgleda – levi deo (manje težine) će izgledati stepeno, dok će desni deo (veće težine) biti glatko odsečen. Prave distribucije gojaznosti ovako i izgledaju. Primetimo, međutim, da je skala koja se unosi u ovu dinamiku zavisna od razvoja medicine. Što je medicina razvijenija u nekoj zemlji to je ona raznoraznim lekovima više u stanju da kompenzuje negativne efekte prekomerne težine. Evo dakle

predikcije – poredajmo distribucije gojaznosti u raznim zemljama po stepenu razvoja i opšte pristupačnosti njihovog zdravstva. Treba očekivati da će sa razvojem zdravstva distribucije gojaznih sve više nalikovati stepenoj distribuciji. Takođe, doći će do porasta maksimalne težine u populaciji. Eto prilike za jedno malo istraživanje.

E pa dobro, dotakao sam temu “kuhinja”, što se od mene i tražilo. Ajde sada da se vratimo pravim mrežama bez skale, one su ipak nešto jednostavnije od naše mreže debelih. Mogao bih da nastavim da vam pričam o mrežama glumaca, no možemo, raznolikosti radi, da pređemo i na neku drugu takvu mrežu – sve su one opisane gotovo identičnim matematičim formalizmom, čak im se i eksponenti γ ne razlikuju mnogo (najčešće se kreću između 2 i 3). Zapravo najinteresantnije je to koliki je broj raznolikih sistema koji su dobro opisani ovakvim mrežama. Broj je toliko veliki da mreže bez skale postaju nova paradigma u fizici, a fizika širi pipke tamo gde joj pre nije bilo mesto².

Gde se sve kriju mreže bez skala? Mreže rutera na internetu se ovako ponašaju, kao i mreže linkova na web stranicama. I web (bukvalno) ima svoje habove. Topologijom weba dominiraju Google i slični koji su povezani sa ogromnim brojem dokumenata duž cele mreže. Kao i mreža glumaca i web prostor je primer malog sveta – prosečno udaljenje između bilo koja dva dokumenta na webu je trenutno 13 (takozani prečnik weba) i raste izuzetno sporo sa porastom mreže (logaritaski). Pored računarskih mreža postoji još puno primera mreža bez skala: lanci ishrane u ekosistemima imaju ovakvu topologiju, isto važi za visokonaponske mreže, za mreže prijateljstava, isto ponašanje je karakteristično i za proces stvaranja planetarnih sistema³.

Postoji još puno sistema koji se mogu opisati ovim mrežama, a njihov broj raste iz dana u dan. Tako je ove godine i seks (kako heteroseksulani, tako i homoseksualni) postao deo fizike. Grupa lekara je nakon analiziranja mreže seksualnih partnera u Britaniji i Zimbabveu došla do zaključka da seks nema karakterističnu dužinsku skalu. Preciznije rečeno: verovatnoća da u fiksnom vremenskom periodu imate određeni broj različitih seksualnih partnera je stepena funkcija od tog broja. Razni segmenti populacije su opisani različitim eksponentom γ , za žene (kako homo tako i heteroseksualne) su dobili eksponent oko 3, za heteroseksualne muškarce je eksponent oko 2.5, dok homoseksualni muškarci imaju eksponent 1.6, što će reći imaju daleko najveći promiskuitet.

² Ovo samo pokazuje šta se sve dobija kada proširite skup alata. Do nedavno su socijalni ili finansijski sistemi, na primer, imali “drugačiji miris” od fizike. Verovalo se da uobičajeni matematički opis ovih fenomena nije baš koristan. Ako danas pogledate koliko lekari, ekonomisti, i razni društvenjaci počinju da citiraju fizičarske časopise videćete da se nešto sasvim uzbudljivo i novo desilo. Fizika je proširila skup svojih alata, a time i skup oblasti za koje je ona relevantna.

³ Inače, naša grupa u Laboratoriji za primenu računara u nauci na Institutu za fiziku se, između ostalog, bavi i ispitivanjem procesa stvaranja planetarnih sistema kroz proces gravitacione akrecije. Ovo je u suštini veoma sličan proces onome koji smo malopre razmatrali a koji se tiče distribucije gojaznosti. I u procesu stvaranja planeta važi da “debeli postaju još deblji” – što je veća masa jedne protoplanete to ona uspešnije otima raspoloživi okolni material od drugih protoplaneta, čime postaje još masivnija. Sličnost sa gojaznošću kod ljudi je očigledna. Razlika je u tome što su, za razliku od ljudi, planete praktično večne. Jupiter ne plaća nikakve zdravstvene penale zato što je debeo. Zato su planete ipak jednostavnije od ljudi.

Različite vrednosti za eksponent γ dovode do velikih razlika u izgledu ovih mreža i njihovim osobinama. Kod gravitacione kondenzacije protoplanetarnog materijala ovaj eksponent kontroliše šta će na kraju ostati da kruži oko zvezde – da li će to biti nešto nalik velikom prstenu asteroida ili će se oformiti pravi planetarni sistem sličan našem, ili u tom sistemu neće biti ničeg sem gasnih džinova ili će se celokupni raspoloživi protoplanetarni materijal kondenzovati u jedno jedino telo (dvojna zvezda). Jednako važne posledice imaju i razlike u eksponentu vezanom za seksualni promiskuitet, bar kad se posmatraju bolesti koje se prenose seksualnim putem kao što je AIDS. Ispostavlja se da u ovom kontekstu eksponent čija je vrednost u intervalu između 2 i 3 sprečava da se bolest nekontrolisano proširi baš na čitavu mrežu. Slučaj $\gamma < 2$, međutim, nema tu osobinu.

Na primeru mreže glumaca smo otkrili važnu osobinu svih mreže bez skale – da opisuju tzv. male svetove, tj. da je kod njih uvek mali broj skokova od jednog do drugog čvora mreže. Zamislite na šta se to svodi kada posmatrate mreže promiskuiteta. Kad se sledeći put prošetate ulicom možda ćete usputne prolaznike gledati na sasvim drugačiji način – znajući da jedni sa drugima delite mnogo više nego što ste mislili.