

PLANETE, FUDBAL I PALAČINKE

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

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

Fudbal i ringišpil

Kad posmatrate nešto složeno važno je da razlučite bitno od nebitnog. Zamislite da do sada niste nikad videli fudbalsku utakmicu, a da vas interesuje da naučite njena pravila. Zbog toga odlazite na stadion. Puno stvari se istovremeno dešava pred vašim očima. Dvadesetak ljudi sa krivim nogama trči po terenu, svako na svoju stranu. Desetine hiljada ljudi sedi oko vas. Velika većina gleda teren, ali jedan čovek pored vas već pola sata netremice bulji u zgodnu devojkicu sa svoje desne strane. Neki duvaju u trube. A da, tu je i neka lopta koja se kotrlja čas tamo, čas vamo.

Ako sve vreme budete pratili loptu onda ćete prilično brzo shvatiti osnovna fudbalska pravila. Naravno, trebaće vam kudi kamo više vremena da shvatite neke finese ove igre, na primer, zašto svi pevaju “Ole, ole”. Sa druge strane, ako i vi budete buljili u onu devojkicu, onda će fudbalska pravila za vas još dugo predstavljati misteriju.

Naravno, nije dovoljno samo da znate u šta treba da gledate. Važno je i da znate odakle da gledate. Zamislite da niste na stadionu, već da utakmicu posmatrate durbinom iz obljižnjeg luna parka gde se vozite na ringišpilu. E pa upravo iz takve perspektive su ljudi hiljadama godina pokušavali da dokuče pravila kretanja planeta, jer naša Zemlja nije ništa drugo nego ringišpil. Ona se vrti oko svoje ose i istovremeno kruži oko Sunca. Nije ni čudo što su se tolike misterije vezivale za kretanja planeta.

Sunce je gospodar našeg planetarnog sistema. Hiljadu puta je masivnije od džinovskog Jupitera, trista hiljada puta od naše Zemlje. Odavde treba posmatrati ovaj nebeski spektakl, ne sa Zemlje.

Naravno, Sunce je užarena lopta i, mada je reč o zvezdi osrednje veličine, nije baš zgodno da smo joj mnogo blizu – sa zvezdama se ne treba šaliti. Namestimo se zato na bezbednom udaljenju neposredno iznad sunčevog severnog pola. Pogled na dole nam govori da se Sunce polako okreće oko svoje ose. Ako pratimo one pege blizu sunčevog polutara, videćemo da im je potrebno oko 27 dana da bi napravile pun krug. Kretanje im je u smeru suprotnom od kazaljke na satu. Ništa čudno, to je prosto definicija severnog pola.

Okrenimo pogled od blještave površine Sunca. Oči nam se postepeno privikavaju na mrak. Odjednom opažamo svetlučave objekte koji kruže oko Sunca. Oni bliži Suncu izgledaju kao sićušne kuglice, dok ostale vidimo tek kao svetleće tačke. Za razliku od zvezda, ove tačke se primetno kreću – to su planete. Svetlost koja dolazi sa njih je samo odbлесак sunčeve svetlosti.

Planete se oko Sunca kreću po elipsama u čijoj zajedničkoj žiži se nalazi Sunce, to brže što su mu bliže. Ove elipse mogu biti više ili manje izdužene. Orbite većina planeta su toliko malo izdužene da ih golim okom ne možemo razlikovati od krugova. Izuzeci su Merkur i Pluton – najbliža, odnosno najudaljenija planeta.

Sve te elipse bi mogle biti nagnute pod ma kojim uglom u odnosu na ravan koja prolazi kroz sunčev polutar. Mogle bi, to nam kaže zakon gravitacije, no ispostavlja se da nisu. Ispostavlja se da je sunčev sistem zapravo mnogo jednostavniji – sva događanja se, u dosta dobroj aproksimaciji, mogu smestiti u tu jednu jedinu ravan. Dobro, nije baš tako – zemljina orbita odstupa nekih 7 stepeni od te ravni, ali to je zaista mali ugao. Najveće odsupanje, 17 stepeni, pokazuje orbita Plutona, no ni to nije puno. Nemojmo cepidlačiti, sunčev sistem je ravan ko palačinka. Zašto?

Planete i fizika 21. veka

Pre nego što počnemo da se bavimo palačinkama mislim da je red da vam objasnim zašto sam se uopšte odlučio da vam pričam o planetama. Na kraju krajeva, zar nije reč o problematici koja je bila interesantna fizičarima sedamnaestog i osamnaestog veka, ali koja je danas mnogo manje uzbudljiva? Ako ste ovo pomislili onda ste grdno pogrešili. Planetarni sistemi, njihov izgled i nastanak su upravo postali jedna od vrućih tema fizike na početku dvadesetprvog veka.

Planete ljude fasciniraju odvajkada, a sistematski ih posmatramo već nekoliko milenijuma. Kopernik i Kepler su napravili prve korake u našem razumevanju tajni kretanja planeta. Kopernik nam je pokazao kako da sidemo sa ringišpila zvanog Zemlja i da do tada misteriozni ples planeta po prvi put sagledamo u svoj njegovoj jednostavnosti. Kepler je prvi precizno opisao pravilnosti tog jednostavnog kretanja, a onda je došao Njutn i iz svojih zakona mehanike i gravitacije izveo sve te uočene pravilnosti. Planete su tako predstavljale važan deo teorijske fizike od samog njenog postanja.

Za razliku od kretanja planeta, razmišljanja o nastanku planetarnih sistema, međutim, su sve do nedavno pre pripadala filozofiji nego fizici. Najpoznatija među ovim razmatranjima je ideja do koje su (nezavisno) došli Kant i Laplas krajem osamnaestog veka. Ta ideja ne pripada filozofiji zato što je Kant bio filozof (Laplas je svakako bio fizičar), niti zato što je predstavljala grubu, rečima iskazan scenario događaja pre nego precizni fizički model (u tom trenutku se i nije moglo bolje). Razlog zašto su do pre par godina sve ove ideje bile na samom rubu fizike je izuzetno jednostavan. Fizika je, u svojoj biti, eksperimentalna nauka – to važi i za teorijsku fiziku. Teorijski model vam može biti jako lep, ali ako nemate eksperimentalne rezultate sa kojim ćete uporediti predviđanja tog modela to nije fizika (ako je model precizan to je matematika, ako je neprecizan to je filozofija¹). Do pre samo nekoliko godina smo imali eksperimentalne podatke o jednom jedinom planetarnom sistemu (o sunčevom

¹ Ako, sa izvesnom dozom ironije, pod filozofijom smatramo sva ona razmatranja koja su po svojoj prirodi takva da se ne mogu opovrgnuti, onda ideja Kanta i Laplase zaista nije prava filozofija. Naprotiv, njihova ideja se pokazala izuzetno plodnom i ona danas predstavlja osnovu većine modernih teorija koje opisuju formiranje planetarnih sistema.

sistemu), a kroz jednu eksperimentalnu tačku zaista nije teško provući ne jedan nego bezbroj lepih teorijskih modela.

Razmatranja o nastanku planetarnih sistema su pre šest godine naglo postala deo fizike kada smo otkrili prve planete koje kruže oko drugih zvezda. U ovom trenutku se broj ekstrasolarnih planeta popeo na 134, dok je broj planetarnih sistema u kojima vidimo više od jedne planete sada 14 (vidi katalog ekstrasolarnih planeta na sajtu <http://www.obspm.fr/encycl/catalog.html>). Krajnje je interesantno kako “vidimo” planete koje su više desetina svetlosnih godina udaljene od nas i čiju svetlost daleko nadjačava sjaj zvezde oko koje kruže. Za sada ih ne vidimo direktno već mereći izuzetno male periodične promene u kretanju njihove zvezde². Bilo bi lepo da se u nekom od budućih brojeva Mladog fizičara opiše ova posmatračka metoda, njene osobine i ograničenja, no u ovom trenutku će nas jedino interesovati činjenica da metoda veoma uspešno radi (dajući nam mase i udaljenja ovih planeta od svojih zvezda), kao i to da se predviđa da će primenom usavršenih verzija ovog metoda u sledećih deset godina biti otkriveno oko deset hiljada ekstrasolarnih planeta. Formiranje planetarnih sistema je tako postala vruća tema današnje fizike.

Priča o oblaku i palačinki

To što kruže po eliptičnim orbitama, to što se kreću brzinama kojim se kreću, sve to direktno sledi iz zakona gravitacije. Međutim, činjenica da se sve planete kreću u gotovo istoj ravni, u ravni sunčevog polutara, to nema nikakve veze sa gravitacijom. To svakako ne može biti ni slučajnost. Isto tako ne može biti slučajnost što se sve planete kreću u istom smeru oko sunca, u istom smeru kojim se sunce obrće oko svoje ose. Činjenica da je sunčev sistem ravan nam šapuće tajne o njegovom početnom izgledu – pre nego što su postojale planete, pre nego što se upalilo Sunce.

Pre pet milijardi godina nije bilo ni Sunca ni sunčevog sistema već se u bližoj okolini samo mogao primetiti oblak materije (uglavnom vodonik i helijum, ali u manjem procentu i drugih, težih, elemenata). Oblak se polako gzušnjavao pod dejstvom gravitacionog privlačenja, a kako se sabijao tako se polako i zagrevao³ i sve brže obrtao oko svoje ose⁴. Oblak je tako postajao sve rumeniji i, pod dejstvom centrifugalne sile, menjao oblik od sfere ka spljoštenom elipsoidu. U jednom trenutku je na obodu tog elipsoida centrifugalna sila nadjačala silu gravitacionog privlačenja i

² Planete i zvezda kruže oko zajedničkog centra mase, no taj centar mase je mnogo bliži zvezdi pošto je ona daleko masivnija od bilo koje planete. Lako možete pokazati da se centar mase sistema Jupiter - Sunce nalazi na oko 750 hiljada kilometara od centra Sunca, dakle unutar samog Sunca čiji je poluprečnik otprilike duplo veći. Sunce tera Jupiter da ide po svojoj orbiti ali, za uzvrat, i Jupiter gurka hiljadu puta masivnije Sunce da ide po krugu poluprečnika 750 hiljada kilometara. Spolja gledano samo se čini da se Sunce periodično drmsa (period je dvanaest godina – koliko treba i Jupiteru da jednom obiđe oko Sunca).

³ Iz svakodnevnog iskustva znate da sabijanjem dolazi do zagrevanja (zato vam se zagreva pumpa dok pumpate gumu na biciklu) odnosno da se širenjem telo hladi (zato vam je hladno kada stavljate dezodorans, a na istom principu radi i frižider).

⁴ Razlog za ovo vam je takođe sigurno poznat – reč je o očuvanju ugaonog momenta. Oblak je imao neki početni ugaoni momenat, ali je prekrivao veliki prostor (odnosno imao veliki moment inercije) te se skoro neprimetno okretao oko svoje ose. Sažimanjem oblaka se nije menjao ugaoni moment, ali se smanjivao moment inercije te je nužno došlo do porasta ugaone brzine. Istu stvar vidite kada klizačica na ledu izvodi piruetu – brzinu okretanja oko svoje ose povećava tako što skuplja ruke bliže telu smanjujući time svoj moment inercije.

počela je da se formira tanka palačinka odbeglog materijala. Palačinka je bila u ravni polutara rotirajućeg oblaka, bila je istovetnog sastava kao i ostatak oblaka, a materijal u palačinki se obrtao oko centralnog dela oblaka u istom smeru kao i sam taj centralni deo. Sad se desila jedna interesantna stvar – mada je oblak palačinci preneo tek manji deo svoje mase, u istom trenutku mu je preneo gotovo celokupni svoj ugaoni moment. Čim se to desilo centralni oblak je opet postao loptast i nastavio je da se ubrzano sažima, a time i zagreva.

Prisustvujemo izuzetno dramatičnom činu – rađanju jedne zvezde. Centralni oblak je sve manji, materijal je pod sve većim pritiskom i sve topliji. U jednom trenutku u središtu oblaka temperatura i pritisak prelaze kritičnu vrednost i uključuje se termonuklearna reakcija (vodonik postaje gorivo). Deo obodnog materijala oblaka se u eksploziji oduvava u svemir, a ostatak materijala postaje zvezda. Zvezda nije ništa drugo nego kompromis između gravitacije koja bi da sav materijal sabije u jednu tačku i termonuklearne eksplozije koja bi da taj isti materijal rasprši u svemir. Kompromis će trajati dok se ne potroši svo termonuklearno gorivo⁵. Izuzetno je interesantna priča o tome kako umiru zvezde, no o tome možemo pričati nekom drugom prilikom. U ovom trenutku nas interesuje rađanje planeta iz onoga što im je neposredno prethodilo – iz palačinke⁶.

Kao što smo videli, neposredno po rođenju zvezde je došlo do velike eksplozije koja oduvava veliku količinu materijala iz obližnje palačinke. Pre eksplozije, palačinka je imala isti sastav kao i materijal od koga je nastala zvezda, dakle tek oko 1/1000 deo materijala su činili teži elementi (svi sem vodonika i helijuma). Eksplozija je veliki deo materijala palačinke oduvala u svemir. Naravno, mnogo je lakše bilo oduvati lake elemente, pogotovo one koji su bili u delu palačinke koja je bliža zvezdi. Posle eksplozije oko zvezde je ostala jedna sasvim drugačija palačinka. U unutrašnjem delu palačinke (onom bližem zvezdi) je ostalo sasvim malo materijala (uglavnom teži elementi). Na spoljni deo palačinke eksplozija je imala mnogo manji efekat te je tu sastav ostao približno isti kao i u zvezdi (uglavnom laki elementi).

Dramatični događaji su prošli i materijal u palačinci je imao nekoliko stotina miliona godina da se zgušnjava pod dejstvom međusobnog gravitacionog privlačenja. U žitkom testu palačinke su se gomilale sve veće i veće grudvice. Ovaj izuzetno interesantan proces kondenzovanja manjeg broja masivnijih objekata iz materijala koji je činio palačinku se danas opisuje kompleksnim računarskim simulacijama. Proces je izuzetno složen, no krajnji rezultat ovog procesa ne mora nužno biti složen.

Pod određenim uslovima, po završetku procesa kondenzacije nam ostaje desetak masivnih objekata (planeta), više stotina objekata srednje mase (satelita, asteroida) i ogroman broj sasvim lakih objekata (manjih asteroida, kometa i drugog đubreta). Unutrašnje planete su manje i kamene, spoljne su masivnije i gasovite. Ostaje nam, dakle, nešto što veoma liči na sunčev sistem. Drugi početni uslovi dovode do još

⁵ Oko 10 milijardi godina za zvezdu veličine Sunca. Sunce je sada gotovo tačno na polovini svog životnog veka. Veće zvezde su mnogo toplije i žive daleko burnijim ali i kraćim životom. Sasvim suprotno važi za manje zvezde koje mnogo štedljivije troše svoje rezerve termonuklearnog goriva. Na prvi pogled kao da važi ona narodna izreka: “Žuti žutuju a crveni putuju”, no crvena boja odgovara hladnijim, a time manjim, odnosno dugovečnijim zvezdama, dok je boja rasipničkih zvezda pomerena ka plavom delu spektra. Za zvezde bi, dakle, pravilnije bilo reći: “Žuti žutuju a plavi putuju”

⁶ Stručni termin bi bio protoplanetarni prsten, no ja bih da nastavim da pričam o palačinkama.

jednostavnijeg krajnjeg stanja. Kondenzacija je u ovom slučaju mnogo efikasnija i sav materijal iz palačinke na kraju oformi jedno jedino masivno telo. Ako je dovoljno masivno i ono samo će postati zvezda čime se stvara sistem binarne zvezde⁷. Treći početni uslovi dovode do manje efikasnog procesa kondenzovanja posle koga oko zvezde nastavlja da kruži čitava menažerija manjih objekata koji oforme jedan ili više prstena.

Postaje sasvim jasno da većina zvezda u toku svog postanka oformi palačinke koje daljim kondenzovanjem mogu postati ili nove zvezde ili planetarni sistemi ili prstenovi sačinjeni od ogromnog broja manjih objekata. Zadatak grupa koji se bave ovom problematikom, kao što je naša u Laboratoriji za primenu računara u nauci na Institutu za fiziku, je da utvrde koje zvezde će pod kojim uslovima stvoriti planetarne sisteme i kakvi će oni izgledati. Na kraju krajeva, najviše nas interesuje koliko ima planetarnih sistema kao što je naš, a koliki deo njih sadrži planetu kao što je naša Zemlja – ni suviše veliku, ni suviše malu, ni suviše toplu, ni suviše hladnu... Raspoloživo vreme za naše teorijske modele je sasvim kratko – za deset godina će nam astronomi na osnovu direktnih posmatranja reći odogovor – na nama je da budemo brži od njih.

Ekscentrične planete

Kepler i Njutn su nas naučili da planete kruže po elipsama, no primer sunčevog sistema nam govori da su orbite jako dobro opisane i običnim krugovima. Elipsa nije ništa drugo nego spljošteni krug, a mera spljoštenosti se zove ekscentricitet. Na osnovu jednog jedinog primera planetarnog sistema kog smo do nedavno imali misili smo da planete generalno i nisu mnogo ekscentrične. Skoro da smo to mogli i da dokažemo – planete nastaju sudarima ogromnog broja manjih tela. Svako od tih tela se inicijalno kretalo po nekoj elipsi, ali efekat velikog broja sudara dovodi do usrednjavanja – do krajnje orbite koja malo odstupa od kruga.

Iz nekog čudnog razloga ljudi nisu razmatrali primere najekscentričnijih planeta u sunčevom sistemu. Najekscentričniji je svakako Pluton (najudalejnija planeta od Sunca), a posle njega Merkur (planeta najbliža Suncu). Čini mi se da je sasvim jasno zašto su one i najekscentričnije – obe su nastajale na krajevima palačinke. Nastajale su u sudarima manjih tela, no svi sudari su bili “sa iste strane” Sunca te je na taj način poremećen proces usrednjavanja mnoštva elipsi koje dovode do krajnje kružne orbite. Pluton i Merkur su takođe i najlakše planete (ima i smisla pošto su se “hranile samo sa jedne strane”). Koliko je meni poznato, niko se ovim nije do sada bavio a simulacije ovoga tipa nisu posebno teške. Indikacija da smo na pravom putu je Mars – planeta koja je treća po redu po ekscentrinosti u sunčevom sistemu. Mars je rastao u neposrednom okruženju Jupitera koji je (zato što je mnogo masivniji) Marsu oduzimao gotovo sav materijal sa te (od Sunca dalje) strane. Rezultat toga je da Mars ima deset puta manju masu od obližnje Zemlje i da ima mnogo veću ekscentričnost od nje.

⁷ Sekundarna zvezda sada ima mogućnost da u toku svog formiranja i sama oformi novu palačinku koja će potom i sama nastaviti da se gravitaciono kondenzuje.

Razlog zašto se do sada ovim niko nije bavio je verovatno u tome što, sa izuzetkom Plutona, planete u sunčevom sistemu nemaju velike ekscentričnosti (čak bi se i orbite Merkura i Marsa golim okom teško razlikovale od kruga). No sada je sasvim drugačija situacija – među prvim ekstrasolarnim planetama smo otkrili obilje izuzetno čudnih (planete kao Jupiter ili još masivnije koje su od svojih zvezda udaljenije tek koliko Merkur, planete koje su u velikom broju slučajeva izuzetno ekscentrične). U čemu je stvar – da li je moguće da je, suprotno od očekivanja, sunčev sistem izuzetak? Ako je tako onda je i broj planeta sličnih Zemlji daleko manji, pa je i drastično manji i broj mesta na kojima je mogao da se razvije život.

Meni se čini da ovo nije slučaj – da je razlog za to što među prvim ekstrasolarnim planetama vidimo toliko puno čudaka taj što su naše merne metode sada posebno osjetljive na upravo takve planete. Podsetimo se – mi detektujemo planete tako što posmatramo koliko one gurkaju svoje zvezde. Najbolji način da dobijemo jak signal je da imamo relativno tešku planetu koja je na malom odstojanju od relativno lake zvezde. Od pomoći je i da joj orbita bude ekscentrična (jer će tako još više prilaziti zvezdi). Čudnim li čudom – upravo takve planete i vidimo. Čini mi se da će sa profinjenjem mernih metoda doći do otkrivanja sve manjeg broja planetarnih sistema čudaka, a sve većeg broj “dosadnih” sistema sličnih našem. U svakom slučaju, bili oni retki ili ne, i samo postojanje ovih čudnih planetarnih sistema je stavilo veliki izazov pred fizičare koji se bave nastankom planeta. Upravo ovakvi izazovi i dovode do napretka u fizici.