



UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET
DEPARTMAN ZA FIZIKU



Živi sistemi i produkcija entropije

- master rad -

Mentor: Prof. dr Zorica Svirčev

Kandidat: Branislav Nikolić

Novi Sad, 2012.

mojom mami

Izražavam veliku zahvalnost

Dr. Zorici Svirčev, profesorki na Departmanu za biologiju i ekologiju Prirodno-matematičkog fakulteta u Novom Sadu, mentoru ovog rada, bez koje ne bih imao prilike da upoznam čari teme ovog rada, koja je samo jedan mali deo jedne mnogo bogatije priče koja se još uvek razvija. Zahvaljujem joj se što mi je od 2008. godine pružila priliku da proširim vidike ne samo kroz proučavanje raznih aspekata astrobiologije i biologije i negovanje kombinacije intuitivnog i naučnog razmišljanja, već i kroz primenu istih na konkretnе probleme. Dugujem joj veliku zahvalnost i zbog toga što mi je omogućila da saradjujem sa njom i da se bavim istraživačkim radom već tokom osnovnih studija, kao i da se upoznam sa pisanjem naučnih radova, ali i da tokom ovih godina usavršim svoj način razmišljanja. Takođe sam joj zahvalan na podršci koju sam imao tokom proteklih meseci interdisciplinarnog istraživanja iz kojeg je proizišao ovaj rad i na savetima, podršci i strpljenju prilikom same izrade rada.

Dr. Milanu Pantiću, profesoru na Departmanu za fiziku Prirodno-matematičkog fakulteta u Novom Sadu, pre svega zbog izuzetnog razumevanja i podrške koje mi je pružao od kako sam odlučio da pišem ovaj rad. Zahvaljujem mu se i za pomoć i sugestije oko jasne i precizne formulacije problema entropije i produkcije entropije u neravnotežnim termodinamičkim sistemima na čemu ovaj rad počiva. Posebno sam mu zahvalan na tome što mi je omogućio da ne propustim predivne i korisne teme iz kvantne teorije polja i teorije grupa, zbog čega sam saznao puno o ovim temama iz prve ruke.

Dr. Miri Terzić, profesorki na Departmanu za fiziku Prirodno-matematičkog fakulteta u Novom Sadu pre svega na podršci tokom spremanja ovog rada i na spremnosti da izadje u susret po pitanju eventualnih problema vezanih za rad. Posebno sam joj zahvalan na podršci da bezbrižno privедем rad kraju, što je u velikoj meri doprinelo tome da se bolje fokusiram na njegovu izradu.

Dr. Tijani Prodanović, profesorki na Departmanu za fiziku Prirodno-matematičkog fakulteta u Novom Sadu, što mi je izašla u susret i omogućila da što pre počнем sa spremanjem odbrane ovog rada. Posebno joj zahvaljujem još i na izuzetnoj podršci tokom studiranja i mnogobrojnim savetima u vezi sa što preciznijim objašnjavanjem naučnih problema.

Tamari Važić, koleginici sa Departmana za biologiju i ekologiju Prirodno-matematičkog fakulteta u Novom Sadu na veoma korisnim savetima i sugestijama u vezi sa nekim aspektima ovog rada.

Svim svojim prijateljima i kolegama, koji su me tokom studiranja podržavali i podržavajući, što mi veoma mnogo znači i što nikada neću zaboraviti.

I posebno, svojoj mami, zbog toga što mi je omogućila da budem ono što jesam i da cenim to, bez obzira na sve.

Novi Sad, 6. jul 2012. godine

Branislav Nikolić

SADRŽAJ

1. Uvod.....	6
1.1. Motivacija i postavljeni problem	6
1.2. Važnost i prioritet multidisciplinarnosti za shvatanje funkcionisanja živih sistema.....	7
1.3. Cilj rada.....	8
2. Pojam entropije i produkcije entropije u živim sistemima.....	9
2.1. Entropija.....	9
2.2. Producija entropije	10
2.3. Princip maksimalne produkcije entropije.....	12
2.4. Statistička definicija entropije.....	14
3. Mehanizam funkcionisanja živih sistema	15
3.1. Regulacija entropije	16
3.2. Signaling	16
3.3. Uslovi sredine i quorum life.....	17
3.4. Informacioni i operativni blok živog sistema	18
3.5. Graf živog sistema	19
4. Graf živog sistema i produkcija entropije	21
4.1. Producija entropije	21
4.2. Specifična entropija kao mera uredjenosti i kompleksnosti živih sistema.....	25
4.3. Zahtevi za postojanjem dodatnih aktivnosti živih bića	28
4.4. Producija entropije, graf živog sistema i protok informacija	30
5. Pojam kritične minimalne entropije i razlog pojave rasta jedinke, bespolnog i polnog razmnožavanja	31
6. Implikacije na astrobiologiju	36
7. Zaključak.....	39
Literatura.....	41

1. Uvod

1.1. Motivacija i postavljeni problem

Nesumnjivo je da funkcionisanje i opstajanje živih bića intrigira ljudski um još od antičkog doba (Moya 2000). Prepoznati živo biće na Zemlji nije toliko teško, ali još uvek ne postoji dovoljno dobra definicija života (Oliver i Perry 2006; Sullivan i Baross 2007; Cleland i Chyba 2002), iako su postojali brojni pokušaji u istoriji da se do takve definicije dođe (Luisi sa sar. 1998; Palyi sa sar. 2002; Lineweaver 2006; Horowitz 1955; Grolier 1983; Koshland 2002). Čak se ni sami biolozi ne mogu složiti oko apsolutne definicije života (McKay 2004). Postoje pokušaji da se sami živi sistemi definišu kao klasa termodinamičkih disipativnih sistema (Prigogine 1980; Prigogine i Stengers 1984; Schrödinger 1944), kao skup hijerarhijskih sistema (von Bertalanfy, 1968), kao nelinearni i/ili kompjuterski sistemi (Emmeche 1992), ili pomoću definicije života kao transfera materije i informacije (Horowitz 1955; Benton 1968; Dyson, 2000). Bilo je pokušaja da se pronadje definicija života koja će biti primenljiva na eventualni vanzemaljski život (Sagan 1970; Lehninger 1970; Nealson and Conrad 1999; Cleland i Chyba 2002), ali te definicije su više bile opisne, nego objašnjavajuće, ali ukazivale su na to da je potrebna teoretska podloga za dobru definiciju života. Trenutno važeća definicija života, jeste NASA-ina definicija (Joyce 1994a,b): “Život je samo-održivi hemijski sistem sposoban za Darwinovu evoluciju” i njoj se trenutno pridaje veliki značaj od strane nekih naučnih krugova (Benner 2010), čak i kada je u pitanju potraga za vanzemaljskim životom.

Sve ove definicije i kategorizacija života ne pružaju zadovoljavajući opis samog *mehanizma funkcionisanja živih sistema*, a pritom i mešaju pojam života i živog sistema. Iskustvo nam govori da će sva živa bića nekako interagovati sa okolinom. Ovo je nužno, jer živi sistemi spadaju u neravnotežne termodinamičke sisteme koji održavaju svoje stacionarno stanje zahvaljujući protoku materije i energije (Prigogine 1980; Prigogine i Stengers 1984; Schrödinger 1992). Postoji ogroman broj različitih načina na koji živi sistemi funkcionišu i interaguju sa svojom okolinom i medjusobno i čak postoje pokušaji da se skup takvih interakcija akcentuje kao karakteristika koja definiše život, poput “Život je materijalni sistem koji podleže reprodukciji, mutaciji i priodnoj selekciji” (McKay 1991) – razni oblici kretanja, ishrane, razmnožavanja, reagovanja na spoljašnju sredinu, uticaja na druge žive sisteme...

Medjutim, uprkos raznovrsnoj aktivnosti živih sistema, pa i raznovrsnosti samih živih sistema, svi oni su bazirani na DNK molekulu. Stoga, ta raznovrsnost je samo prividna, u smislu da u njenoj osnovi zapravo стоји jedinstvena šema, pravilo po kojem se te razne aktivnosti ostvaruju. Ipak, kada se govori o DNK životu, mora se imati u vidu da je DNK život *karakterističan samo za Zemlju*. Na drugim svetovima na kojima možda ima mogućnosti za postojanje *nekakvog* života, vanzemaljski živi sistemi bi funkcionali na drugačijoj hemiji i izgledali sasvim drugačije od živih sistema na Zemlji (Asimov 1962; Rasmussen sa sar. 2003).

Stoga se postavlja pitanje kako prepoznati takav živi sistem i na osnovu kojih kriterijuma. Drugim rečima, potrebno je jednim univerzalnim opisom živih sistema precizno definisati *za kakvim sistemima tragamo i kakvi sistemi su živi sistemi koje poznajemo na Zemlji*. Trenutno važeća teorija živih sistema jeste po Mileru (Miller 1978) i ona koristi veći broj taksativnih objašnjenja karakteristika živih sistema. Međutim, takav pristup jeste nezadovoljavajuć, jer je Milerova teorija živih sistema konkretno vezana za život na Zemlji, tj. DNK život, stoga je ta činjenica čini ograničenom. Takodje, pokušaj da se ona uopšti na potencijalne žive sisteme koji nisu zasnovani na DNK molekulu bi bio bezuspešan, jer je potrebno skoro svaki aspekt modifikovati.

Umesto toga, ovde će biti predstavljen jedan „od nule“ izgradjen opis živih sistema i njihovih aktivnosti, koji se zasniva na razmatranju produkcije entropije u živim sistemima, a motivisan je Šredingerovom knjigom „*What is Life?*“ (Schroedinger 1944) u kome je ukazano na to da je jedna od osobina koja izdvaja žive sisteme od nežive materije veoma bitna osobina *održavanja unutrašnje entropije sistema*, tako da on „*izbegava dostizanje termodinamičke ravnoteže*“. Ova karakteristika živih sistema jeste jedna od ključnih karakteristika koja je potrebna da bi se razumelo funkcionisanje živih sistema, ali je na žalost potisnuta pokušajima definisanja života u pomenutim referencama.

1.2. Važnost i prioritet multidisciplinarnosti za shvatanje funkcionisanja živih sistema

Podela nauke na oblasti pruža praktične olakšice naučnicima, pogotovo kako se nauka razvija, jer je u 21. veku nemoguće da se jedan čovek bavi istovremeno ne samo problemima iz nekoliko različitih oblasti nauke, već i da se upusti u istovremeno rešavanje par problema iz jedne uske oblasti nauke. Međutim, to nije razlog da se savremen čovek, koji se bavi naukom, ne trudi da sa najrazličitijih mogućih aspekata, koji možda i nalaze u druge oblasti nauke, sagledava problem kojim se bavi. U nekim slučajevima prirodno je da to nije sasvim moguće, ali u slučaju bavljenja problemom funkcionisanja živih sistema ta interdisciplinarnost bi trebalo biti nužna. Naime, iz nekoliko različitih oblasti nauke (astrofizika, biologija, geologija, klimatologija...) izrodila se jedna posebna nauka, koja se i u ovom momentu razvija, a to je *astrobiologija* (Plaxco i Gross 2006) i ova nauka je na žalost propraćena predrasudama čak i u naučnim krugovima, iako postoje čitavi instituti i departmani za fiziku i astronomiju u kojima se ova nauka intenzivno proučava, kao i svaka druga prirodna nauka.

Konkretno, za razmatranje problema funkcionisanja živih sistema, potrebno je sagledati problem iz jednog drugačijeg ugla, koji je oslobođen nužde za pozivanjem na biohemiju, ali koji podjednako ima u vidu sve aktivnosti i raznovrsnost živih sistema koje biologija poznaje (Seckbach 2004), kao i zakone i principe koji omogućavaju njihovo funkcionisanje, a to su zakoni fizike i principi hemije. Sagledavanje ovog problema kroz pitanja koja nalaze u samu suštinu funkcionisanja živih sistema sa aspekta fizike uz prožimanje načina interakcija živih sistema sa okolinom koje proučava biologija i biohemija, predstavlja adekvatan prilaz problemu funkcionisanja živih sistema.

1.3. Cilj rada

Cilj ovog rada jeste da se pronadje i pruži najjednostavniji, najkompletniji, najlogičniji i po mogućству eksperimentalno proverljiv način za opis živih sistema, ali koji je pri tome *nezavisan od biohemije na Zemlji*. Ovaj rad pokazuje da takav način postoji u okviru jednog formulisanog *fundamentalnog logičkog principa po kome funkcionišu apsolutno svi živi sistemi* i to koristeći samo nekoliko jednostavnih i relativno dobro poznatih termina i fizičkih zakona. Rad takođe pokazuje da je biohemija koju pozajmimo na Zemlji nešto što *proizilazi* iz tog fundamentalnog principa i da kao takva predstavlja samo jednu mogućnost njegove realizacije u ono što nazivamo živim sistemima, a koju srećemo na Zemlji kao DNK život. Ovo se ispoljava kao *univerzalnost* pomenutog principa i ključna je za uspeh u potrazi za životom van Zemlje. Iz takve univerzalnosti prirodno proizilazi mogućnost da i najrazličitije forme živih bića budu otkrivene (Botta sa sar. 2008), ali pokazuje da bi sve te potencijalne forme imale zajednički upravo taj princip.

Takođe, ovaj princip je u radu doveden na nivo razmatranja sa aspekta produkcije entropije, sa idejom da se oformi jedna teorijska fizička osnova za primenu tog principa, čime bi se u nekoj budućnosti ona usavršila toliko da bude moguće primenjivati ovaj princip na konkretne probleme vezane za aktivnosti živih sistema.

2. Pojam entropije i produkcije entropije u živim sistemima

Jedna bitna karakteristika živih sistema, a koja bi se dobila iz odgovora na pitanje *zaštoživi sistemi traju i opstaju, uprkos tome što su izuzetno kompleksni i kao takvi daleko od stanja termodinamičke ravnoteže*, jeste mehanizam oslobadjanja viška unutrašnje entropije živog sistema, na šta je ukazao Šredinger 1944. godine u pomenutoj knjizi „*What is Life?*“¹. On takođe ukazuje na to da je metabolizam način na koji se živi sistem oslobadja „viška entropije“.

Medjutim, ideja o vezi živih sistema i entropije potiče još od tvoraca pojma entropije i njene primene – Klauzijus je 1864. godine medju prvima razmatrao vezu izmedju entropije i života (Clausius 1864), a kasnije je Boltzman prvi postavio pitanje veze termodinamike i evolucije (Boltzmann 1974), gde je takođe primetio: „Borba živih bića za opstanak nije borba za sirove materije – za organizme su to svedostupni vazduh, voda i zemljište – niti za energiju koja postoji na obilje u svakom telu u obliku toploće, već je to borba za *negativnu entropiju*, koja postaje dostupna kroz transfer energije od tolog Sunca ka hladnoj Zemlji.“ Termin *negativna entropija* se odnosi na entropiju koja se dobija iz iskoristive materije-energije.

Mi ćemo se bazirati na Šredingerovom naglašavanju, koje nije ništa drugačiji od Boltmanovog, pri čemu ističemo da je ključni termin „**oslobadjanje viška unutrašnje entropije**“, dok je „metabolizam“ samo pomoćni termin koji je biološki „prevod“ za tu pojavu (Hayne 2004).

2.1. Entropija

Jedna od definicija entropije (Atkins 1984), jeste da je to *mera neuredjenosti sistema* – što je sistem uredjeniji, to je njegova entropija manja i obrnuto, entropija manje uredjenog sistema je relativno veća. Takođe, entropija govori i o tome da li je neki proces povratan ili nepovratan. Pri povratnim procesima, promena entropije je ravna nuli, dok je pri nepovratnim procesima promena entropije uvek veća od nule i ovo je iskazano dobro poznatim drugim principom termodinamike (Ben-Naim 2007) (TD II):

U izolovanom sistemu ukupna promena entropije u vremenu je nenegativna

$$\Delta S \geq 0 \tag{1}$$

U slučaju jednakosti, koji se odnosi na povratne procese, radi se o procesima koji se odvijaju u termodinamičkoj ravnoteži (TDR). TDR jeste stanje u kome je energija sistema ravnomerno rasporedjena po celom sistemu i u TDR svaki deo sistema izgleda isto. To znači da u TDR postoji maksimalan broj načina na koji se delovi sistema mogu kombinovati, a da energija sistema ostane ista.

Posmatrajući žive sisteme, možemo videti da su oni na višem stepenu uredjenosti nego okolna, neživa priroda (Hayne 2004) – materija je u živim sistemima organizovana u organele, makromolekule, tkiva, organe – stoga za žive sisteme kažemo da poseduju *relativno nisku entropiju*. Međutim, na osnovu ovoga bi se naivno zaključilo da živi sistemi zapravo „prkose“ drugom principu termodinamike zbog toga što održavaju svoju unutrašnju entropiju (svoj red) i metabolizmom se oslobadjaju tog viška entropije (nereda). Ipak, TD II važi *isključivo za izolovane sisteme*, što živi sistemi svakako nisu. Živi sistemi su zapravo otvoreni neravnotežni termodinamički sistemi koji svoje stacionarno stanje održavaju stalnim protokom materije-energije, pa time i entropije (Prigogine 1977).

Ipak, TD II svakako ostaje na snazi kod živih sistema, ali samo ako se *živi sistem posmatra zajedno sa svojom sredinom koja ga okružuje* i koja mu obezbeđuje funkcionisanje tokom određenog vremena. Takav sistem se uslovno naziva *izolovan* sistem i za njega u potpunosti važi TD II. U odvojenim delovima ovog sistema čini se da entropija, nasuprot TD II, opada (na primer, u zelenom listu pri fotosintezi). Međutim, ovo smanjenje se dešava na račun porasta entropije u drugom delu takvog sistema (na primer, u izvoru svetlosti od koga dolazi energija do lista i u okolini prilikom oslobadjanja neiskoristive energije tokom procesa fotosinteze). Kao rezultat ukupna entropija takvog sistema, u skladu sa TD II, se ne smanjuje već ima tendenciju da se povećava. Stoga, proticanje procesa u njima ide u skladu sa TD II i entropija ovde ima važnu ulogu.

2.2. Producija entropije

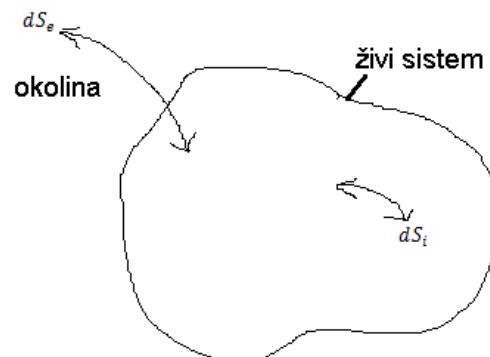
Energetsku karakteristiku otvorenog biološkog sistema u skladu sa TD II, moguće je dati na osnovu balansa (izmene) entropije sistema i njegove okoline. To je prvi uradio nobelovac I. Prigožin (Prigogine 1977).

Naime, promena entropije otvorenog sistema kakav je živi sistem se dešava ili na račun fluksa entropije sistema i spoljašnje sredine (dS_e), ili na račun entropije u samom sistemu usled unutrašnjih nepovratnih procesa (dS_i). Postulira se da je opšta promena unutrašnje entropije otvorenog sistema (dS_s) sastavljena iz ova dva nezavisna dela (Slika 1):

$$dS_s = dS_e + dS_i \quad (2)$$

Ova relacija predstavlja polaznu osnovu termodinamike nepovratnih procesa.

Ake se unutar sistema dešavaju povratni procesi, tada oni nisu praćeni pojmom entropije i $dS_i = 0$. U



$$dS = dS_e + dS_i$$

Slika 1: Šematski prikaz promena entropije otvorenog sistema na račun promene unutrašnje entropije sistema dS_i i spoljašnje entropije dS_e .

svim slučajevima nepovratne promene je $dS_i > 0$. Očigledno je da za izolovan sistem, gde je protok entropije kroz sistem $dS_e = 0$, izraz (2) se svodi na $dS_s = dS_i > 0$, što odgovara klasičnoj formulaciji TD II za izolovane sisteme.

Ako sada diferenciramo (2) po vremenu, sledi da (2) dobija formu jednačine kontinuiteta:

$$\frac{dS_s}{dt} = \frac{dS_e}{dt} + \frac{dS_i}{dt} \quad (3)$$

Veličina dS_s / dt – je brzina promene entropije otvorenog sistema i naziva se **produkacija unutrašnje entropije** sistema, a najčešće se obeležava sa $\sigma_s \equiv dS_s / dt$; dS_e / dt – brzina izmene (razmene) entropije sa spoljašnjom sredinom, a dS_i / dt – brzina nastanka entropije unutar sistema na račun unutrašnjih nepovratnih procesa (ili produkcija entropije *gradivne materije* sistema) i ovaj član je po prepostavci uvek pozitivan ($dS_i / dt > 0$), dok član dS_e / dt može biti kako pozitivan, tako i negativan. Jednačina (3) predstavlja suštinu energetskih procesa koji se dešavaju u živom sistemu.

Rečeno je već da su živi sistemi ne samo otvoreni sistemi, već i da održavaju *stacionarno stanje*. Pod stacionarnim stanjem se podrazumeva da nema promene entropije sistema u vremenu, tj. da je produkcija entropije u sistemu jednaka nuli $\sigma_s = 0$. Stoga, na osnovu (2) sledi:

$$dS = dS_e + dS_i = 0 \Rightarrow dS_i = -dS_e \quad (4)$$

a pošto je po prepostavci¹ $dS_i / dt > 0$, to iz gornje jednačine sledi da fluks entropije kroz živi sistem mora biti negativan:

$$dS_e < 0$$

Ovo je važan zaključak, jer ukazuje na to da se živi sistemi hrane tzv. "negativnom entropijom", koju je Boltzman spominjao, tj. kao da se *hrane redom* i to je vrlo tesno povezano sa kompleksnošću živih sistema, što je jedna od tema ovog rada i o čemu će biti reči kasnije.

Prepostavka da je $dS_i / dt > 0$ je vezana za činjenicu da živi sistemi stare. Starenje živog sistema povezano je sa nemogućnošću održavanja unutrašnje entropije na jednom istom nivou tokom vremena, tj. sa činjenicom da se u živom sistemu odvijaju nepovratni procesi. Zbog starenja, sistem vremenom sve manje proizvodi entropiju koju odaje u okolinu, jer sve više proizvodi entropiju u sebi, tj. stacionarno stanje (4) se sve teže održava. Krajnji ishod starenja jeste smrt, a fizički gledano, to je stanje sistema koje odgovara maksimalnoj entropiji, tj. termodinamičkoj ravnoteži. Stoga, kod starenja radi se o povećanju produkcije unutrašnje entropije – o povećanju neuredjenosti (ili

¹Što je opravdano niže.

smanjenju uredjenosti) sistema. Ovu veličinu je potrebno precizirati nešto bolje i to će biti uradjeno kasnije.

2.3. Princip maksimalne produkcije entropije

Karakteristika *trajanja* živih sistema je svakako povezana sa odlaganjem dostizanja termodinamičke ravnoteže (smrti) pomoću metaboličkih reakcija. Formalno, ovo znači da je trajanje sistema duže ako je promena entropije usled nepovrtanih procesa sistema manja. Ovo je sažeto u **principu minimalne produkcije entropije** koji je formulisao Prigožin (Prigogine 1977) i po kome se otvoreni sistem nalazi u stacionarnom stanju, koje predstavlja stanje u kome je produkcija entropije usled nepovratnih procesa minimalna:

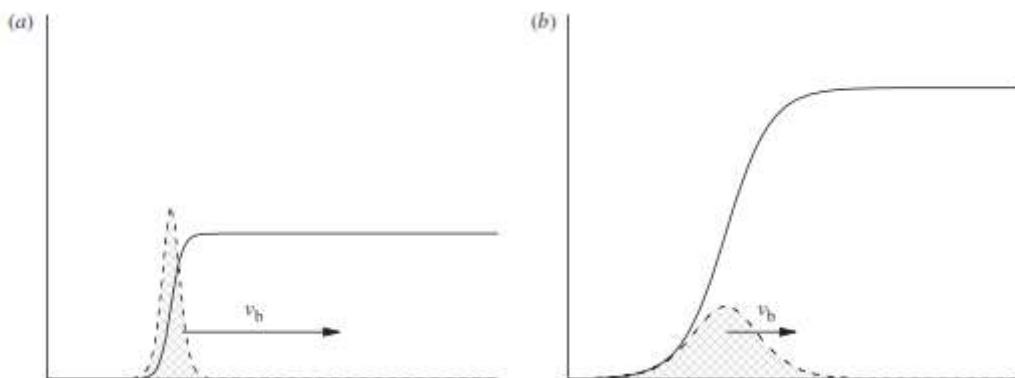
$$\frac{dS_i}{dt} > 0 \rightarrow \text{minimum}$$

Medjutim, ovaj princip se može primeniti samo na sisteme koji su veoma blizu TD ravnoteže i koji su infinitezimalno perturbовани od nje, pri čemu se pretpostavlja da su granični uslovi nepromenljivi. Granični uslovi u slučaju živih sistema nikako nisu nepromenljivi (Kleidon i Lorenz 2004) – okolina živih sistema se konstantno menja, pa je Prigožinov princip nemoguće primeniti na duže vremenske intervale u kojima se granični uslovi vidljivo menjaju. Štaviše, i uslovi u unutrašnjosti živih sistema se konstantno menjaju protokom materije-energije kroz njih. Na taj način, sistemu se nudi *spektar stacionarnih stanja*, a ne samo jedno, tako da princip minimalne produkcije entropije više ne može da se primeni.

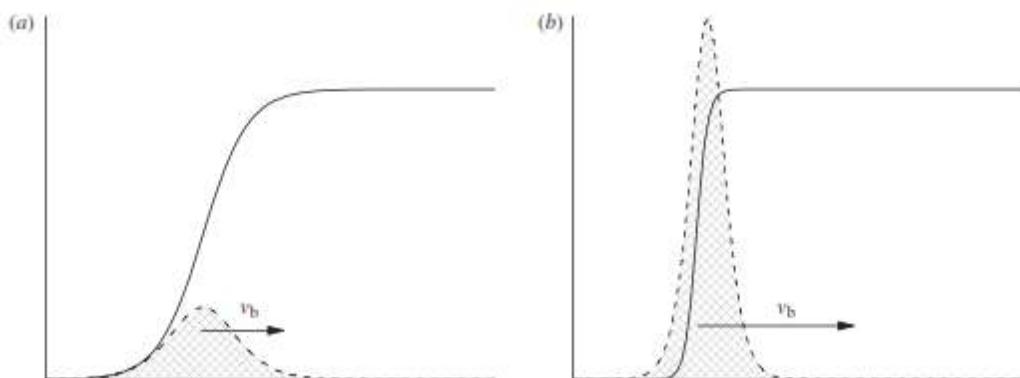
Ipak, proteklih nekoliko decenija se razvijao jedan drugi princip, koji za razliku od principa minimalne produkcije entropije, jeste primenljiv na neravnotežne sisteme sa stacionarnim stanjem u promenljivim uslovima, a to je princip **maksimalne produkcije entropije – MEP princip** (Lineweaver 2004; Kleidon i Lorenz 2004; Martyushev i Seleznov 2006; Dewar 2003; Niven 2010). Još jedna bitna razlika izmedju principa minimalne produkcije entropije i MEP principa, jeste da se MEP odnosi na produkciju entropije *u okolini*, a princip minimalne produkcije entropije se odnosi na produkciju entropije unutar organizma. Po MEP principu, sistem od svih raspoloživih stacionarnih stanja ulazi u ono koje proizvodi najveću entropiju (u okolini). Ovo možda zvuči paradoksalno, ali slikovito se to može objasniti time da prilikom promene graničnih uslova sistem nema vremena da udje u stacionarno stanje sa minimizovanom produkcijom entropije, jer ne može da stigne da odgovori na promene, već ulazi u stanje u kome se *sto pre* otarasi entropije; drugim rečima, ne znači da se proizvedena entropija povećava, već da se entropija (nered) izbacuje iz sistema za kratko vreme, odakle je produkcija entropije onda *maksimizovana* (Lineweaver 2004). Zanimljivo je istaći da postoji i matematički dokaz ovog principa (Dewar 2003; Dewar 2004) i da sledi da je stacionarno stanje koje je za date uslove odabранo, ono stacionarno stanje koje ima najveću verovatnoću za ostvarenje medju raspoloživim. Stoga bi trajanje bilo objašnjeno time da se živi sistemi velikom

brzinom oslobadaju entropije u toku funkcionisanja, težeći da funkcionišu u stacionarnom stanju sa najvećom verovatnoćom (Lineweaver 2004). Takodje je zanimljivo da je moguće izvesti TD II iz MEP principa, a i obrnuto (Martyushev i Seleznov 2006).

MEP princip je protekle decenije našao i mnoge eksperimentalne provere i primene (Kleidon i Lorenz 2004). Naime, pored primene u klimatologiji (Ito i Kleidon 2004; Pauliie 2004), geologiji (Miyamoto, Baker, Lorenz 2004) i planetologiji (Lorenz 2004), poseban napredak je ostvaren u eksperimentalnoj potvrди MEP principa u biološkim naukama. Županović i Juretić (2004) su modelovali fotosintetičke reakcije i pokazali da je produkcija entropije ovim procesom



Slika 2: Jedna od čvršćih eksperimentalna potvrda MEP principa. Na y-osi je stopa razmnožavanja bakterija, koja služi za meru aktivnosti bakterija, superponirana na koncentraciju supstrata, a na x-osi je prostorna koordinata: a.) manja koncentracija sa većim gradijentom uzrokuje veću brzinu migracije ka najvećim gradijentom koncentracije i veću aktivnost; b.) veća koncentracija sa manjim gradijentom usporava migraciju i umanjuje aktivnost kolonije. U oba slučaja je prikazana raspodela aktivnosti kolonije na kraju kretanja, a vidi se da se kolonija zaustavila tačno na mestu gde je najveći gradijent koncentracije. Ovakvo ponašanje predviđa MEP princip. (iz Županović sa sar. 2010)



Slika 3: Isti grafikoni kao i na Slici 2. Ovde je prikazano kako se menja aktivnost i brzina migracije kolonije kada je maksimalna koncentracija supstrata ista, a gradijent drugačiji. Vidi se da je aktivnost kolonije manja i brzina kretanja kolonije manja kada je gradijent manji a.) nego kad je gradijent veći b.). (iz Županović sa sar. 2010)

u skladu sa MEP principom. Takodje, Županović sa saradnicima (2010) je pokazao da migracija kolonije bakterija *E. coli* na supstratu koji poseduje gradijent koncentracije uzima pravac ka najvećem gradijentu koncentracije i u kome se nalazi stanje maksimalne produkcije entropije. Kolonija teži da nadje mesto u prostoru gde je produkcija entropije najveća i brže se kreće ako se radi o većim gradijentima.

Pored pomenutih, postoje i istraživanja na nivou biohemije koja idu u prilog MEP principu, kao što je istraživanje Djuara i saradnika (Dewar sa sar. 2006) koje je pokazalo da je funkcionalni dizajn jednog enzima koji učestvuje u proizvodnji energije u obliku ATP-a (adenozin-trifosfat) konzistentan sa MEP principom.

2.4. Statistička definicija entropije

Možemo na karakteristiku *trajanja* gledati i sa aspekta verovatnoće, ako se pozovemo na Bolcmanovu statističku definiciju entropije (Boltzmann 1974) koja važi za izolovane sisteme:

$$S = k \ln W \quad (4)$$

gde je k Bolcmanova konstanta. W predstavlja verovatnoću nalaženja datog sistema u nekom stanju za koji se entropija računa. Veličina W se takođe može interpretirati i kao broj raspoloživih stanja u kojima dati sistem u datim uslovima može da bude, pa kažemo da entropija nekog sistema zavisi od *broja stanja koje taj sistem može da zauzme sa datom energijom u datim uslovima*.

Pomoću statističke definicije entropije možemo takođe pogledati i na pomenutu karakteristiku trajanja živilih sistema, te se ono može interpretirati na sledeći način. Pošto živi sistemi imaju relativno *nisku entropiju* u odnosu na materiju od koje su sačinjeni, to bi značilo da živi sistemi, budući da opstaju neko vreme, *održavaju* stanje sa relativno *malom verovatnoćom*, pri čemu je stanje najveće verovatnoće upravo ravnotežno stanje². Pošto svaki sistem evoluira spontano ka stanjima sa većom verovatnoćom (ka ravnotežnom stanju), to će vremenski gledano stanja sa većom verovatnoćom trajati duže (stanje termodinamičke ravnoteže onda traje relativno najduže). Kako su živi sistemi ipak sistemi sa niskom entropijom, to će samo *konstantno održavanje njihovog stanja sa malom verovatnoćom odlagati evoluciju ka stanjima sa velikom verovatnoćom (visokom entropijom)* do stanja sa maksimalnom entropijom, tj. do smrti. Upravo to sprečavanje živilih sistema da evoluiranja ka stanjima veće verovatnoće omogućava trajanje.

² Drugim rečima, ako se zapitamo koja je verovatnoća da se u nekom proizvoljno odabranom delu prostora nadje izvesna količina materije (recimo 100 različitih biomolekula) u onakvom uredjenom stanju kakav je živi sistem (recimo neka ćelija ili neki njen deo), ta verovatnoća je izuzetno mala, tj. praktično ravna nuli, jer postoji samo malo stanja koja tih 100 molekula može da formira, a da se dobije funkcionalna ćelija. S druge strane, ako pitamo kolika je verovatnoća da se neka količina materije nadje u bilo kakvom stanju koju poseduje *proizvoljna* skupina u nekom delu prostora, pošto sada nema nikakvih ograničenja, verovatnoća je enormno veća, pa je time i entropija veća.

3. Mehanizam funkcionisanja živih sistema

Do sada se naivno tragalo za opisom i čak definicijom živih sistema koje su formulisane kao lista svih zajedničkih karakteristika koje intuitivno očekujemo kod živih sistema. One uključuju rast, razmnožavanje, trošenje materije-energije, reagovanje na nadražaje iz spoljašnje sredine, postojanje metabolizma itd., pa čak i postojanje DNK molekula i borbe za opstanak. Takodje, neki opisi i definicije koriste nabranje funkcionalnih podsistema sa uopštenim pojmovima. Međutim, ovakvim nabranjem se nikako ne ukazuje na, niti objašnjava, sam mehanizam funkcionisanja živih sistema. S druge strane, svi pokušaji da se zaista pokaže i objasni mehanizam funkcionisanja živih sistema skoro uvek je uključivao korišćenje biohemijskih procesa posebno u svakom pojedinačnom organizmu, pri čemu se gubi na opštosti.

Smisao ovog rada jeste, između ostalog, i da pokaže da je moguće formulisati mehanizam funkcionisanja živih sistema koji je *nezavisan od biohemije, ne vezuje se ni za jednu aktivnost živih sistema konkretno, ne uključuje zahtev za objašnjavanjem bilo koje aktivnosti preko DNK molekula i procesa vezanih za njega i to samim tim vodi ka univerzalnom opisu istog i to na potencijalno fundamentalnijem nivou.*

Ključna tačka u pokušaju da se shvati funkcionisanje živih sistema jeste pronalaženje onih elemenata koji su zajednički za sva živa bića, ali koji su u isto vreme oslobođeni zahteva za dodatnim preciziranjem specifičnim za individualni organizam.

Na neki način, ovo je vrlo slično fizičkom rezonovanju u teoriji fundamentalnih kalibracionih interakcija (Aitchison i Hey 2003; Aitchison i Hey 2003; Taylor 1976). Naime, kalibraciona invarijantnost Lagražijana koji opisuje elementarne čestice u odnosu na neku transformaciju veličina koje ulaze u Lagranžijan, ima za posledicu postojanje jedne fundamentalne interakcije koja proizilazi upravo iz simetrije Lagranžijana u odnosu na tu transformaciju. Rezultat su osnovni zakoni fizike koje opisuju fundamentalne interakcije Prirode. Sažetak ovakvog rezona se vidi u postavljanju pitanja: *Da li postoji i kako izgleda forma datog fizičkog zakona koja je nezavisna od veličina kojima taj zakon vlada?* Ovakav rezon „radi“ zbog toga što je Priroda stroga i zbog toga što je jedinstvena – zakoni Prirode (zakoni fizike i principi hemije) su nezavisni od posmatrača. Slično tome, i u traganju za “zakonom” koji opisuje žive sisteme, potrebno je sagledati problem sa ciljem da se nađe opis koji je zaista nezavistan kako od posmatrača, tako i od samih živih bića. Ovo je sasvim opravdano jer u sebi sadrži jednu važnu pretpostavku: *da je mehanizam funkcionisanja živih sistema u skladu sa poznatim zakonima fizike.*

U ovom poglavlju pronalazimo potrebne i dovoljne elemente za opis mehanizma funkcionisanja živih sistema.

3.1. Regulacija entropije

Sa ovim pojmom je već bilo susreta u prethodnom poglavlju – ovo je jedan od osnovnih elemenata za kojim tragamo i iz prethodnog poglavlja je jasno da svi živi organizmi poseduju mehanizam održavanja svoje unutrašnje entropije na nekom nivou ili u okviru nekih granica, što, kako smo videli, obezbeđuje trajanje. Ovaj mehanizam održavanja unutrašnje entropije jednostavno ćemo zvati **regulacija entropije (ER – entropy regulation)**.

Ukoliko želimo da formulšemo opis koji obuhvata sve žive sisteme na *svim* nivoima organizacije, što znači i organizme u najširem smislu (živa bića), i zatvorene kolonije, i ćelije unutar organizama (izuzimajući otvorene kolonije, organe, rojeve, jata, čopore, porodice i slično, jer su to samo skupovi živih sistema, o čemu će biti nešto reči kasnije), moramo primetiti da se regulacija entropije odvija na specifičan način na nivou organizama – organizmi su živi sistemi koji *sami u potpunosti* regulišu svoju unutrašnju entropiju kao celina i za njih kažemo da poseduju **autoregulaciju entropije (ARE – autoregulation of entropy)**. Za podsisteme organizama, tj. za ćelije organizama, jednostavno kažemo da poseduju regulaciju entropije. Na ovaj način se samo iz grupe živih sistema, koji regulišu svoju entropiju, izdvaja jedna podgrupa koja autoreguliše svoju entropiju, a to su organizmi (živa bića).

3.2. Signaling

Da bi živi sistem regulisao svoju entropiju, mora interagovati sa okolinom tako što će razmenjivati materiju-energiju sa njom. Bilo kakva reakcija živog sistema je posledica *primanja* informacija iz okoline, kao i *obrade i modifikacije* tih informacija, koje se potom *šalju* dalje kroz sistem i/ili u okolinu. Ovaj proces se naziva **signaling i na njemu počiva mehanizam regulacije entropije živog sistema**. Da bi sistem mogao da prepozna uslove sredine i reaguje na njih, potrebno je: 1. da postoji **signal³ (S)**, koji predstavlja informacioni sadržaj okoline i njenih promena (nosač signala može biti bilo koja čestica, atom, molekul, jedinjenje hemijske prirode, elektromagnetne prirode, mehaničke prirode, električne prirode); 2. sposobnost živog sistema (i njegovih delova ili podistema) da primi signal i 3. sposobnost živog sistema (i njegovih delova ili podistema) da pošalje signal u okolinu. Slično tome, način na koji živi sistem konstatuje promene u svojoj unutrašnjosti jeste upravo putem signala.

Bitno je napomenuti da ovaj pojam signala ne treba poistovećivati sa signalingom u telekomunikacijama ili cell signaling-om unutar ćelija. U oba slučaja, osnovni princip je isti, ali je gornjim preciziranjem pojma signaling izbegnuto bilo kakvo ograničenje na neku oblast nauke ili specifično mesto u prirodi.

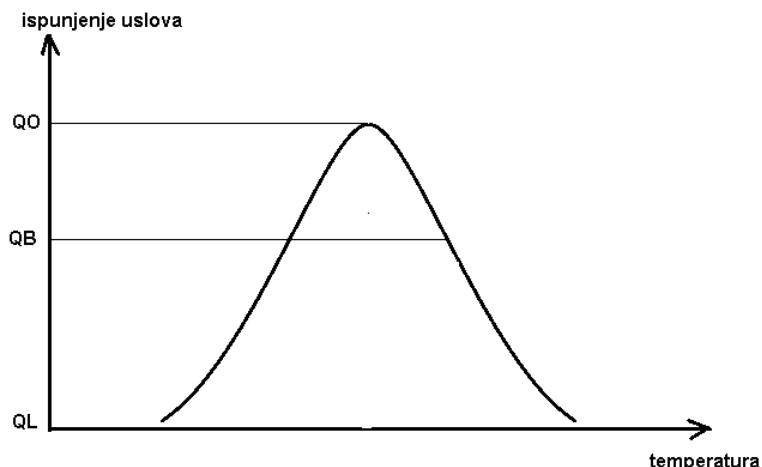
³ Ne treba mešati sa oznakom za entropiju.

3.3. Uslovi sredine i quorum life

Granični uslovi o kojima smo govorili u prethodnom poglavlju imaju važnu ulogu u formulaciji mehanizma funkcionisanja živih sistema. Za svaki živi sistem važi da ima **okruženje (sredinu)** u kojima vladaju određeni **uslovi (EC - environmental conditions)** i oni diktiraju pomenute granične uslove koji dalje određuju stacionarno stanje i regulaciju entropije. Potrebno je uočiti dve bitne karakteristike živih sistema vezane za uslove sredine:

a.) za sve žive sisteme važi da mogu da opstanu samo u određenim uslovima sredine, koje ćemo nazvati **zahtevi za postojanjem (BER – being requirements)**; ovo je na primer zahtev da postoji voda, kiseonik, određena jedinjenja (hrana), odgovarajući medijum za kretanje, određena temperatura (spoljašnji zahtevi), ali i zahtevi da su, na primer, svi vitalni organi u funkciji, ili da su ključne organe unutar ćelije prisutne i funkcionalne, ili da unutar organizma nema toksina (unutrašnji zahtevi);

b.) svi živi sistemi opstaju samo ako postoji zadovoljen *barem minimum* uslova u kojima oni mogu opstati; stoga, ako je ispunjen minimum zahteva za postojanjem BER, onda kažemo da je uspostavljen **quorum life⁴ (QL)**; na primer, čovek može opstati samo ako je temperatura iznad neke minimalne vrednosti i ispod neke maksimalne vrednosti, pa skup te minimalne i maksimalne vrednosti predstavlja QL za uslov temperature (Slika 4); slično definišemo i za svaki uslov iz EC;



Slika 4: Grafički prikaz odnosa QL, QO i QB sa vrednostima konkretnog uslova, u ovom slučaju na primeru temperature. Kriva ispunjenosti uslova ne mora biti istog oblika za svaki uslov, niti mora biti simetrična, ali svaka kriva ispunjenosti uslova ima svoje maksimalne i minimalne vrednosti. Vidi se da se QL odnosi na dve vrednosti temperature iznda i ispod kojih je funkcionisanje živog sistema omogućeno.

c.) ako je ispunjenje BER *maksimalno*, onda kažemo da je uspostavljen **quorum optimum (QO)**, a svaki nivo ispunjenja koji je između QL i QO nazivamo **quorum being (QB)**. Videćemo kasnije da je ova tačka povezana sa unutrašnjom entropijom živog sistema.

Potrebno je još malo pojasniti odnose QL, QO i QB. Naime, pod QB se podrazumeva ispunjenje uslova koji su potrebni za sve aktivnosti živog sistema. Pod ove uslove spada na primer i zahtev da ptica ima krila da bi mogla da leti, ali upravo zbog toga što krila ne spadaju u minimalne zahteve za

⁴ Uzeta je reč kvorum jer je upravo to u pitanju – kao što je potreban minimalan broj ljudi da bi se donela neka odluka, tako je princip prenet i na uslove sredine – potreban je minimum nekih uslova da bi sistem mogao da postoji i funkcioniše.

postojanjem (jer će i bez krila ptica moći da reguliše svoju entropiju), njihovo postojanje potпадa pod QB. Stoga, QB uključuje i QL, ali ne sadrži samo QL, već i sve ostale uslove koji omogućavaju bilo kakve dodatne aktivnosti sistema. Ukoliko QL nije uspostavljen, onda ni QB ne može biti uspostavljen, što se logički može zapisati kao $QB \Rightarrow QL$.

3.4. Informacioni i operativni blok živog sistema

Elementi koji su navedeni do sada su relativno poznati i dosta intuitivni i lako ih je uočiti kod živih sistema. Kroz prethodne odeljke se prožimala veza izmedju elemenata signalinga, ER, EC i QL (QB). Naime, rečeno je da živi sistem o ispunjenju BER saznaće putem interakcije sa okolinom, ali i putem raznih procesa unutar samog sistema, tj. putem interakcije medju njegovim delovima. Ove interakcije su moguće, kao što smo videli nešto ranije, zahvaljujući signalingu. U samoj suštini tih interakcija stoje zakoni fizike, pa dalje i principi hemije. Zahvaljujući njima, živi sistem može da prepozna odgovarajuće nadražaje kao signale koji nose informacije o trenutnim uslovima sredine i da dalje na osnovu njih ostvari razne procese signalinga koji omogućavaju regulaciju entropije. Očigledno je da mora postojati nekakav recept za obradu tih informacija – nekakav poseban skup zakona fizike i hemije koji je zajednički za sve žive sisteme. Suština tog recepta jeste da koji god to zakoni bili, svi oni služe da bi se formirao mehanizam regulacije entropije. Na taj način, može se govoriti o raznim skupovima fizičkih i hemijskih procesa, ali uvek u živim sistemima oni su okupljeni oko jednog motiva – regulacije entropije.

Na primer, zvuk koji čujemo je signal koji potiče od mehaničkog talasa koji je izazvao vibracije koščica u našem uhu. Recept za primanje tog signala iz spoljašnje sredine jeste upravo mehanika i dinamika koja vlada ušnim koščicama i koja pripada fizičkim zakonima. Svaki nadražaj iz okoline i svaki nadražaj iz unutrašnjosti organizma ima u svojoj osnovi neku fizičko-hemijsku reakciju sa organizmom. Takodje, svaki deo unutrašnjosti organizma povezan je sa nekim drugim delom istog organizma, tj. "komunicira" sa njim putem signalinga, što su fizičko-hemijske reakcije. U krajnjoj liniji, ceo živi sistem funkcioniše zahvaljujući zakonima fizike i principima hemije.

Ovaj recept za formiranje i ostvarenje mehanizma za regulaciju entropije unutar nekog živog sistema predstavlja apstraktni skup informacija o tome koji signali izazivaju koje reakcije i u okviru kojih uslova (što govori da ovaj recept onda definiše i QL, QB i QO), bilo da oni dolaze iznutra ili spolja, što zapravo predstavlja jedan skup pravila za formiranje raznih signalinga. Zbog toga bi ovaj recept bilo dobro nazvati **informacioni blok sistema (IB)** i u krajnjoj liniji on predstavlja skup pravila po kojima se reguliše entropija.

Bitno je napomenuti da je skup ovih pravila definisan isključivo zakonima fizike i principima hemije, a izgradjen na zahtevu za regulacijom entropije sistema. Ne postoji nikakva eksplicitna zavisnost IB od biohemije. Naprotiv, biohemija se *zasniva* na istim onim zakonima koje IB sadrži i stoga je ona nešto što *sledi* iz IB, a ne nešto što se nalazi unutar IB.

S druge strane, očiglednija je činjenica da je mehanizam ER nešto što predstavlja materijalan i dinamički aspekt živog sistema. Kao takav, on je deo samog sistema i to najveći njegov deo. Skup svih materijalnih delova sistema ćemo nazvati **operativni blok (OB)**, koji uključuje i mehanizam regulacije entropije.

IB i OB nisu nikakvi „delovi“ živog sistema, već su jednostavno naglašeni aspekti funkcionisanja živog sistema. Može se reći da su IB i OB jedan drugom „slika u ogledalu“ i da se živi sistem može podjednako posmatrati i sa aspekta OB i sa aspekta IB, ali se kompletno razumevanje funkcionisanja živih sistema dobija tek kada se uspostavi veza izmedju IB, OB i EC.

3.5. Graf živog sistema

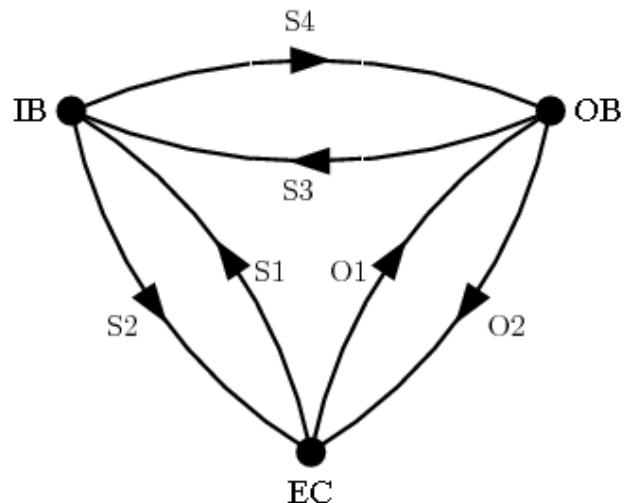
Ova dva bloka (a time i elementi ER, signaling, QL (QB) i EC) stoje u tesnoj vezi i upravo ova veza predstavlja princip po kome svi živi sistemi funkcionišu. Ovaj princip je predstavljen grafom na Slici 3.

Pre svega, ono što se uočava kod ovog grafa na osnovu teorije grafova (Harary 1969; Bollobas 1985; Chartrand i Lesniak 1996) jeste to da je on povezan, kompletan i usmeren graf.

Elementi ovog grafa su tri čvora (IB, OB, EC) i 6 grana (S1, S2, S3, S4, O1, O2). Čvorovi su: informacioni blok IB, operativni blok OB i spoljašnja sredina EC, što je poznato iz prethodnog odeljka. Grane grafa su *grane signala* S1 do S4, i fizičke (operativne) grane O1 i O2.

Grane signala S1 do S4 predstavljaju propagaciju signala izmedju spoljašnje sredine EC i informacionog bloka IB (S1, S2), i izmedju operativnog bloka OB i informacionog bloka IB (S3, S4). Fizičke (operativne) grane (O1, O2) predstavljaju protok materije-energije i entropije kroz sistem i imaju ulogu nosača signala. Grana signala S1 je signal koji nosi materija-energije koja utiče u sistem, a grana signala S2 je povezana sa odavanjem materije-energije van sistema.

Na grafu se jasno vidi interakcija živog sistema sa okolinom EC – to su grane O1 i O2. Informacioni sadržaj razmenjivane materije-energije predstavljaju grane S1 i S2. Bitno je napomenuti da S3 i S4 ne predstavljaju nikakvu fizičku razmenu materije-energije niti njihov analog.



Slika 5: Graf živog sistema kao osnovni princip po kome funkcionišu svi živi sistemi. S1, S2, S3, S4 su grane signala i predstavljaju informacioni aspekt funkcionisanja sistema, a O1 i O2 su "fizičke" grane i predstavljaju proticanje materije-energije i entropije.

Princip funkcionisanja živog sistema na osnovu grafa je sledeći: Kroz sistem prolazi materija-energija i entropija putem grana O1 i O2. Prvo, sistem interaguje sa okolinom putem grane O1, a informacije o spoljašnjem i unutrašnjem ispunjenju QB (o količini unete materije-energije i entropije i o trenutnom unutrašnjem stanju OB-a), dobija zahvaljujući prepoznavanju signala S1 i S3 u IB, redom, i to ako su iznad određenog praga, tj. ako je signal dovoljno jak. Ako su prisutni barem oni signali koji nose informaciju o ispunjenom minimumu BER, onda sistem konstatuje ispunjen QL. Na osnovu informacija o ispunjenju QB prepoznatih u IB putem signala S1 i S3, indukuje se odgovarajuća reakcija mehanizma regulacije entropije u OB, koja teži da dovede sistem do QO, jer je QO stanje minimalne entropije i maksimalne produkcije entropije. Ova reakcija je zasnovana na receptima iz IB u zavisnosti od toga kakvi su uslovi, i ona je indukovana signalima S4 koji nose instrukcije za odgovarajuću reakciju operativnog bloka OB čiji je krajnji cilj smanjenje povećane entropije i dostizanje QO. Stoga, može se reći da signali S4 diktiraju regulaciju entropije živih sistema. Grana O2 predstavlja na neki način obrnuto usmerenu granu O1 – tokom funkcionisanja, živi sistem se oslobadja viška materije-energije i entropije, a takodje i troši energiju da bi se kretao i vršio druge aktivnosti, tj. proizvodi entropiju u okolini, i sve ovo obuhvata granu O2. Stoga, grana O2 je produkcija entropije. Analogno vezi izmedju grane S1 i O1, i sa granom O2 povezana je grana S2, koja predstavlja informacioni sadržaj povezan sa materijom-energijom koja izlazi iz sistema, kao rezultat interakcija.

Ova specifična veza izmedju elemenata EC, IB i OB čini *fundamentalni logički princip koji je osnov funkcionisanja svih živih sistema*. Najznačajnija karakteristika ovog principa jeste što je univerzalan i to sa dve tačke gledišta.

Prvo, ovaj princip je objedinjujuć u smislu da se *bilo koja aktivnost* živog sistema može objasniti njime. Ovaj princip leži u korenu bukvalno *svake* aktivnosti svakog živog organizma, bez izuzetka. On pokazuje da ne postoji suštinska razlika izmedju ishrane i razmnožavanja, izmedju hodanja i varenja hrane, izmedju borbe za opstanak i slikanja. Na ovaj način, jednim potezom je dat odgovor na pitanje suštine svake aktivnosti živih organizama. Takodje, nikakva ograničenja ne postoje u vezi sa vrstom organizma na koji se graf sa Slike 5 primenjuje ili na nivo organizacije na koji se primenjuje. Sa aspekta ovog principa, ne postoji niakakva razlika izmedju bakterije, gljive, biljke i životinje – bakterija i čovek se u suštini ne razlikuju.

Drugo, ovaj princip govori da je biohemija zapravo rezultat izgradnje OB od materijala iz EC po pravilima IB i da je na Zemlji samo jedan vid realizacije ovakvog principa, što se i može jednostavno zapisati ovako:

$$IB + EC = OB(S) \quad (5)$$

gde je naznačeno da OB funkcioniše zahvaljujući signalingu.

Ovo znači da su živi sistemi bazirani na DNK molekulu samo jedan od velikog broja vidova realizacije ovog principa. Ovaj princip čak daje i razloge zašto je došlo do konkretnog vida realizacije mehanizma regulacije entropije na Zemlji u obliku DNK života.

4. Graf živog sistema i produkcija entropije

Graf živog sistema se može primeniti na bilo koji organizam koji nam je poznat i na bilo koji proces tog organizma. Ovde neće biti takve konkretnе primene, već će biti dato nekoliko zanimljivih aspekata koji se odnose na posmatranje živih sistema i produkcije entropije kroz princip grafa živog sistema. Biće dat nov pogled na kompleksnost živih sistema i njenu evoluciju, pojavu višečelijskih organizama, kao i na pojavu organizacija živih organizama u različite nivoje zajednica.

4.1. Producija entropije

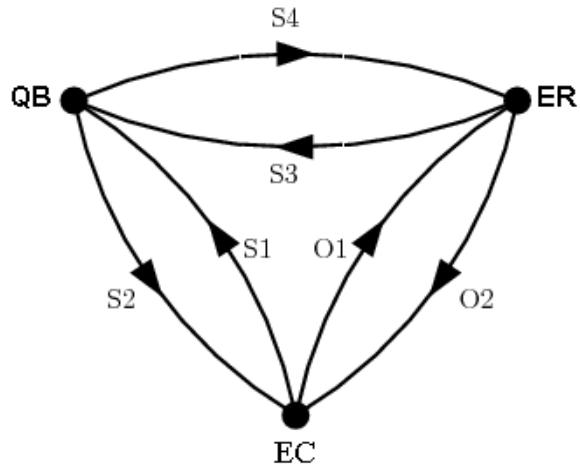
Razmatranja o entropiji i produkciji entropije iz drugog poglavlja se mogu razmotriti i sa aspekta grafa živog sistema. U tu svrhu, prepišimo ovde relaciju (2):

$$dS_s = dS_e + dS_i \quad (6)$$

koja govori da je promena entropije živog sistema jednaka zbiru promene spoljašnje sredine i promene entropije sistema zbog nepovratnih reakcija. Nas će ovde interesovati konkretno šta se dešava sa dS_i tokom vremena.

Nazovimo S_i^{min} *sopstvenom entropijom sistema*. Ova entropija predstavlja minimalnu entropiju gradivne materije i energije od koje je sistem izgradjen u formi i stanju u kome se nalazi trenutno i takodje postulirajmo da se sistem nalazi u *optimalnim unutrašnjim i spoljašnjim uslovima*, tj. da je u uspostavljen QO. Regulacija entropije ne može spustiti entropiju sistema ispod ove vrednosti. Stoga, QO predstavlja stanje najniže moguće sopstvene entropije. Potrošnjom energije, sistem izlazi iz QO i spušta se u QB i polako se kreće ka QL (Slika 2), pri čemu se entropija povećava na vrednost veću od S_i^{min} , te se javlja potreba za regulisanjem entropije i ponovnim uspostavljanjem QO. Ovo se može prikazati na grafu sa Slike 5, ali sa drugaćije označenim čvorovima. Naime, na Slici 6 je prikazan graf živog sistema koji je malo drugaćije označen.

Na ovom grafu je



Slika 6: Graf živog sistema sa drugaćije označenim čvorovima IB i OB. Ova notacija grafa se može nazvati i funkcionalni graf, jer ukazuje na samu funkciju i mehanizam regulacije entropije, za razliku od grafa na Slici 4 koji prikazuje princip na kome mehanizam regulacije entropije funkcioniše. Oba grafa su potpuno ekvivalentna.

eksplicitno prikazano funkcionisanje samog mehanizma regulacije entropije pomoću opisanih elemenata u prethodnom poglavlju ER i QB, s tim da je bitno naglasiti da je ovaj graf potpuno ekvivalentan grafu sa Slike 5. Veza izmedju elemenata sa grafa na Slici 6 i elemenata sa grafa na Slici 5 je takva da se može sažeti u rečenici:

IB je metod, QB je uslov; OB je sredstvo, ER je funkcija.

Naime, IB predstavlja metod po kome se izvršava funkcija ER, u okviru uslova predviđenih QB, a pomoću operativnog mehanizma koji je predstavljen sa OB. Sa ovog aspekta, EC bi bio “materijal”, a signaling “mehanizam”, pa bi kompletna veza izmedju principijelnog i funkcionalnog grafa na Slici 5 i 6 bila:

IB je metod, QB je uslov; EC je matrijal; S je mehanizam; OB je sredstvo, ER je funkcija.

Na ovaj način, ulazak materije i energije u sistem daje signal sistemu S1 i S3 koji se proverava u odnosu na zahtev za ispunjenošću uslova, dakle u odnosu na QB (uključujući i QL). Na osnovu ispunjenosti uslova, formira se signal S4 koji izaziva funkciju mehanizma ER da izazove promenu stanja sistema tako da QB bude ispunjeniji. Kada je proces gotov, S3 obaveštava sistem o ispunjenosti QB nakon regulacije entropije i postupak se ponavlja sve dok QB ne bude dostigao QO (što praktično nikad nije slučaj, već uvek postoje fluktuacije, što je i priroda neravnotežnih termodinamičkih sistema). Ovako opisan, graf na predivan način otkriva povratnu spregu koju čine čvorovi QB i ER sa granama S3 i S4 – ova povratna sprega je ništa drugo nego uopštavanje pojma povratne sprege koja je poznata iz biologije i čija je svrha održavanje homeostaze i alostaze (McEwen i Wingfield 2003). Štaviše, homeostaza je ništa drugo do stanja regulisane entropije živog sistema pomoću sprege S3 – S4.

Medutim, ne treba misliti o grani O1 i O2 samo kao o materiji-energiji u smislu hrane. Naprotiv, kao što je bilo reči, grana O1 mogu biti bilo kakvi fizičko-hemijski nadražaji iz okoline, pa i infracrveni (IC) fotoni recimo, koji će indukovati povećanje temperature u organizmu. Naime, kada IC fotoni stignu do živog sistema, putem fizičke reakcije ekscitacije oscilatornih nivoa molekula koji čine živi sistem, oni predaju energiju OB-u; živi sistem je to prepoznao i “pustio fotone da udju”, što predstavlja signal S1; na osnovu ovog signala, indukuje se proces signalinga koji predstavlja signal S3 zahvaljujući kome sistem “saznaje” o posledicama nadražaja O1; na osnovu ovoga, u IB postoji recept koji daje odgovarajuću reakciju na konstatovane nadražaje i konstatovano unutrašnje stanje i ta reakcija se formira zahvaljujući signalu S4; ta reakcija na konstatovano stanje u ovom slučaju bi bilo indukovane znojenje, da bi se organizam oslobođio viška energije; znojenjem, štetne materije i energija izlaze van sistema putem O2, S2 govori da je ta materija-energija upravo produkt regulacije entropije.

Prepostavimo sada da životni ciklus možemo posmatrati kao veliki broj *N* metaboličkih ciklusa. Pri tome neka svaki ciklus *n* traje od početka uzimanja materije-energije i entropije iz okoline, do

snižavanja entropije sistema na minimalnu moguću vrednost $S_i^{min}(n)$ i oslobođanja viška entropije i materije-energije.

Pri tome, neka se u svakom ciklusu n entropija sistema smanji za vrednost $\Delta S_i(n)$ putem mehanizma ER:

$$S_i^{min}(n) = S_i(n) - \Delta S_i(n) \quad (7)$$

gde je $S_i(n)$ početna entropija sistema. Ova minimalna entropija se odnosi na maksimalni mogući red za date unutrašnje uslove i određena je ispunjenošću unutrašnjeg QB. $\Delta S_i(n)$ je karakteristika mehanizma regulacije entropije i što je mehanizam ER efikasniji, to je vrednost $\Delta S_i(n)$ veća (i uvek je pozitivna). U sledećem ciklusu $n + 1$, neka se entropija poveća na vrednost $S_i(n + 1)$ i onda smanji procesom regulacije entropije:

$$S_i^{min}(n + 1) = S_i(n + 1) - \Delta S_i(n + 1) \quad (8)$$

Ako prepostavimo da je entropija sistema podignuta na približno isti nivo, tj. da je $S_i(n + 1) = S_i(n)$, tada oduzimanjem jednačine (7) od (8) dobijamo da je:

$$S_i^{min}(n + 1) - S_i^{min}(n) = -\Delta S_i(n + 1) + \Delta S_i(n)$$

Vrednost minimalne unutrašnje entropije se, na prvi pogled, ne menja, međutim, kako smo videli u drugom poglavlju, živi sistemi stare, a to znači da će važiti da je:

$$S_i^{min}(n + 1) - S_i^{min}(n) = -\Delta S_i(n + 1) + \Delta S_i(n) > 0$$

za svako n . Iz ovoga sledi da je $\Delta S_i(n) > \Delta S_i(n + 1)$, tj. da se tokom vremena efikasnost ER mehanizma smanjuje:

$$\frac{d\Delta S_i(t)}{dt} < 0 \quad (9)$$

Relacija (9) se može nazvati *nejednačina starenja*. Suština ove nejednakosti jeste u tome što se povećava neuredjenost samih putanja signalinga koji učestvuju u regulaciji entropije (praktično govorimo o celom OB). Posmatrajući graf na Slici 5, mesto gde dolazi do „kvarenja“ usled nepovratnih procesa jeste čvor OB, ali posledice ovoga su trajne i izazivaju lančanu reakciju i dalje kvarenje OB-a, tj. celog sistema, i to se vidi sa grafa: promena u signalingu u OB znači promenu u značenju signala S3, za koji sistem ima recept za prepoznavanje u IB, i upravo zbog toga se signal S4 formira na pogrešnim informacijama i dalje uzrokuje promene u OB i tako u krug. Kako se n povećava, tako $\Delta S_i(n)$ biva sve manji i na kraju biva toliko mali da ne može da smanji entropiju na prikladnu vrednost, vrednost koja odgovara barem ispunjenju QL, ispod kojed nastupa smrt. Tako da

bi za eliksir života bilo potrebno osmisliti mehanizam regulacije entropije za koji bi važilo da umesto znaka “ $<$ ” u (9) stoji znak “ \cong ” i to tako da (8) što manje utiče na promenu signala S3 i S4.

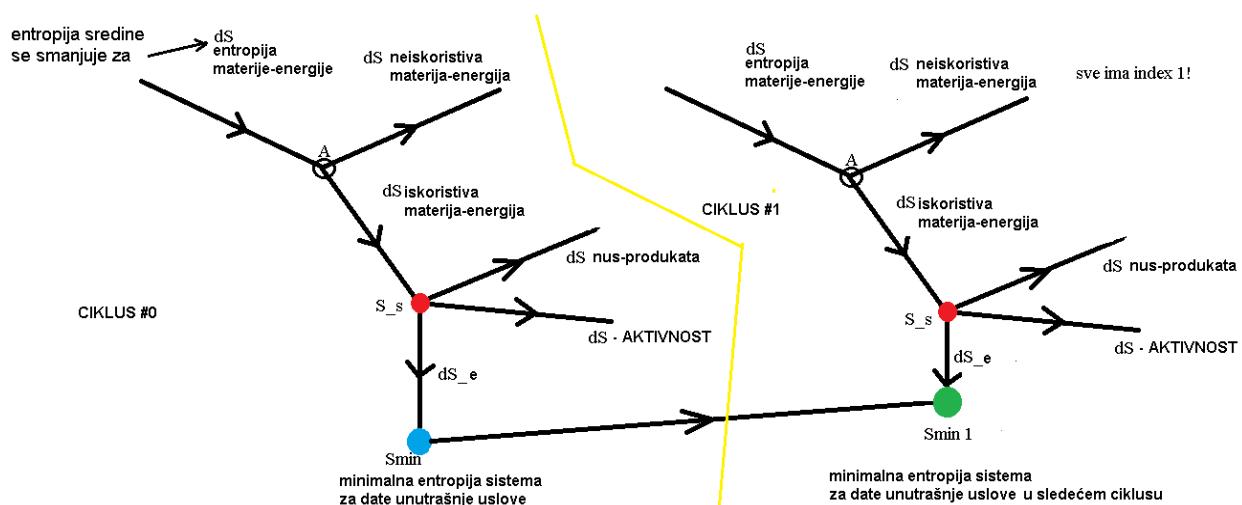
S druge strane, živi sistemi proizvode entropiju i izvan sebe ΔS_{ext} , zahvaljujući stanju relativno niske entropije, te raspoloživoj energiji (slobodnoj energiji). Najviše slobodne energije sistem ima u optimumu (QO) i blizu njega jer se tada najmanje energije troši na regulaciju entropije (ako je ΔS_i nisko, onda je i $\Delta Q = T\Delta S_i$ takodje nisko). Kako sistem stari, videli smo da je sistem sve dalji od QO, entropija mu je sve veća, sve više energije se troši na uredjivanje, pa će i efikasnost produkcije entropije biti manja:

$$\frac{d\Delta S_{ext}(t)}{dt} < 0 \quad (10)$$

što znači da će živi sistemi biti sve manje aktivni, što je zaista tako.

U neku ruku, relacije (9) i (10) su ekvivalentne i predstavljaju nemogućnosti izbegavanja termodinamičke ravnoteže, tj. smrti.

Može se šematski prikazati razlaganje entropije prilikom dva uzastopna ciklusa regulacije entropije, kao na Slici 7, a uz to se i pomoću grafa živog sistema veoma jasno vidi šta se dešava u samom sistemu sa aspekta regulacije i produkcije entropije.



Slika 7: Dva uzastopna metabolička ciklusa koja prikazuju relativno sniženje entropije sistema (plava i zelena tačka). Tačka A označava mesto ulaska materije-energije u sistem, gde se odvaja iskoristiva materija-energija od neiskoristive. Crvena tačka predstavlja trenutnu povišenu vrednost entropije (u oba ciklusa je ista vrednost, prateći tekst) koja treba da se snizi iskoristivom materijom-energijom.

Naime, materija-energija koja ulazi u sistem se deli na onu koja doprinosi smanjenju entropije za dS_e , na nusprodukte regulacije entropije koji se izbacuju iz sistema i rezultujuću aktivnost za koju je utrošena iskoristiva materija-energija. U oba ciklusa, ukupna promena entropije sredine je uvek dS_e , što odgovara Prigožinovoj relaciji (2). Takodje, u tački A i u crvenoj tački važi pravilo da je zbir entropija koje ulaze u tačku jednak zbiru entropija koje izlaze iz čvora. Kako ciklusi protiču, efikasnost mehanizma regulacije entropije opada i to se ispoljava kao „kvarenje“ mehanizma u tačkama A i u crvenoj tački. Rezultat tog kvarenja jeste prebacivanje entropije sa strelicu koje su ograničene sa oba kraja na strelice koje su ograničene samo sa izlaznog kraja. Zbog ovoga se tačka minimalne entropije sa mesta plave tačke (S_{min}) pomera na mesto zelene tačke (S_{min1}), tj. minimalna entropija vremenom raste. Sa stanovišta grafa živog sistema, tačno se mogu na ovoj šemi pronaći elementi koji odgovaraju grafu. Naime, strelica koja ulazi u tačku A jeste grana O1. Sama tačka A predstavlja prepoznavanje signala S1 i S3. Strelica od tačke A do crvene tačke predstavlja granu signala S4 koji u crvenoj tački daje instrukcije OB šta da uradi sa iskoristivom materijom-energijom. Strelica od crvene tačke do plave (zelene) tačke predstavlja delovanje OB – snižavanje entropije. Sve izlazne strelice bez jednog ograničenog kraja zajedno predstavljaju granu O2 i njoj odgovarajuću S2.

4.2. Specifična entropija kao mera uredjenosti i kompleksnosti živih sistema

Kompleksnost fizičkog sistema ili dinamičkog procesa predstavlja meru stepena povezanosti komponenata u organizovane struktuirane interakcije (Simon 1981; Gell-Mann 1995) i kao takav predstavlja relativan i širok pojam u odnosu na njegovo kvantifikovanje u raznim oblastima (Gregersen 2003; Lloyd i Pagel 1988; Chaitin 1977; Crutchfield i Young 1989; Bennett 1988; Grassberger 1986), te će se ovde precizirati uže, ali grubo, u svrhu dovodenja u vezu organizacije živih sistema sa suštinom grafa živog sistema. Živi sistemi postoje sa različitim nivoima kompleksnosti (složenosti) (Gregersen 2003; Adami 2002) i stoga se postavlja pitanje uzroka takvog diverziteta. Graf živog sistema daje način da se *principijelno* ovaj uzrok odredi.

Najniži oblici kompleksnosti živih sistema do sada poznati na Zemlji bi bili virusi i jednoćelijski organizmi. Nešto složeniji bi bile zatvorene kolonije, te višećelijski organizmi. Može se uočiti da višećelijski organizmi poseduju viši stepen uredjenosti od jednoćelijskih organizama na primer. To bi značilo da se sa uredjenošću živih sistema može povezati entropija. Međutim, višećelijski organizmi poseduju više stanja, tj. njihov fazni prostor je veći, pa je i njihova entropija veća od entropije jednoćelijskih organizama. Ipak, to ne znači da su oni manje uredjeni, naprotiv, višećelijski organizmi, koji su kompleksniji, poseduju veću uredjenost od jednoćelijskih organizama, koji su jednostavniji. Zbog toga se uredjenost, kompleksnost živog sistema ne može meriti samo njegovom entropijom, već je potrebno uvesti još jedan parametar koji se u kombinaciji sa entropijom sistema može dovesti u korelaciju sa kompleksnošću istog.

Stoga, dve bitne činjenice u vezi sa preciziranjem pojma kompleksnosti živih sistema je potrebno uočiti:

1. da je od dva sistema sa približno istom masom uredjeniji onaj koji ima relativno veću uredjenost (entropiju) te mase (gradivna masa koja čini sistem), tj. manju entropiju (zatvorena kolonija od 10 ćelija dve vrste i zatvorena kolonija od 10 ćelija 5 vrsti, ova druga je više uredjena, ima manju entropiju, veću diferencijaciju)

2. da je od dva živa sistema sa približno istom uredjenenošću (entropijom) mase, uredjeniji onaj koji ima veću (gradivnu) masu (dve kolonije sacinjene od istih vrsta organizama, ali jedna 100 ćelija druga 120 ćelija, kompleksnija je ova od 120 ćelija).

Na osnovu izloženog se može zaključiti da bi bolja mera uredjenosti živog sistema bila ne njegova entropija, već *specifična entropija* koju definišemo na sledeći način:

$$\epsilon = \frac{S}{m} \quad (11)$$

gde je m - uredjena masa sistema (gradivna masa), S - entropija sistema mase m .

Ova veličina se ponaša zadovoljavajuće, slično kao i entropija – što je masa živog sistema sa nekom entropijom S veća, to je specifična entropija tog sistema manja – pa je i uredjenost živog sistema veća. Takodje, živi sistem sa nekom masom m je uredjeniji ako je njegova entropija S manja.

Ako posmatramo evoluciju života na Zemlji, uočavamo da su vremenom nastajali sve kompleksniji sistemi. Na osnovu toga možemo reći da su obe veličine – i entropija po sistemu i masa sistema - rasle. Pitanje je na koji način ove dve veličine rastu, šta se dešava sa njihovim količnikom, te da li možemo nešto zaključiti o ponašanju specifične entropije ϵ tokom evolucije?

Uzmimo neki idealizovani sistem sa N jednakih podsistemske jedinica mase μ (to mogu biti molekuli, ćelije...). Ukupna masa tog sistema je $N\mu = m$, a entropija se može *proceniti* na taj način što se pobroje veze izmedju podistema, na osnovu (4):

$$S \sim \ln W \sim \ln \frac{N(N-1)}{2}$$

gde je W ukupan broj veza N podistema u tom sistemu. Za ovaj idealizovani sistem je uzeto da je svaki podistem povezan sa svakim drugim podistemom – to kod realnih živih sistema nije tako, već je broj tih veza uvek manji od ovog broja. Kako je N podistema povezano sa preostalih $N-1$ podistema, to je broj veza W jednak $N(N-1)$. Za veliki broj podistema, može se uzeti aproksimacija $N(N-1) \sim N^2$, pa je procena entropije:

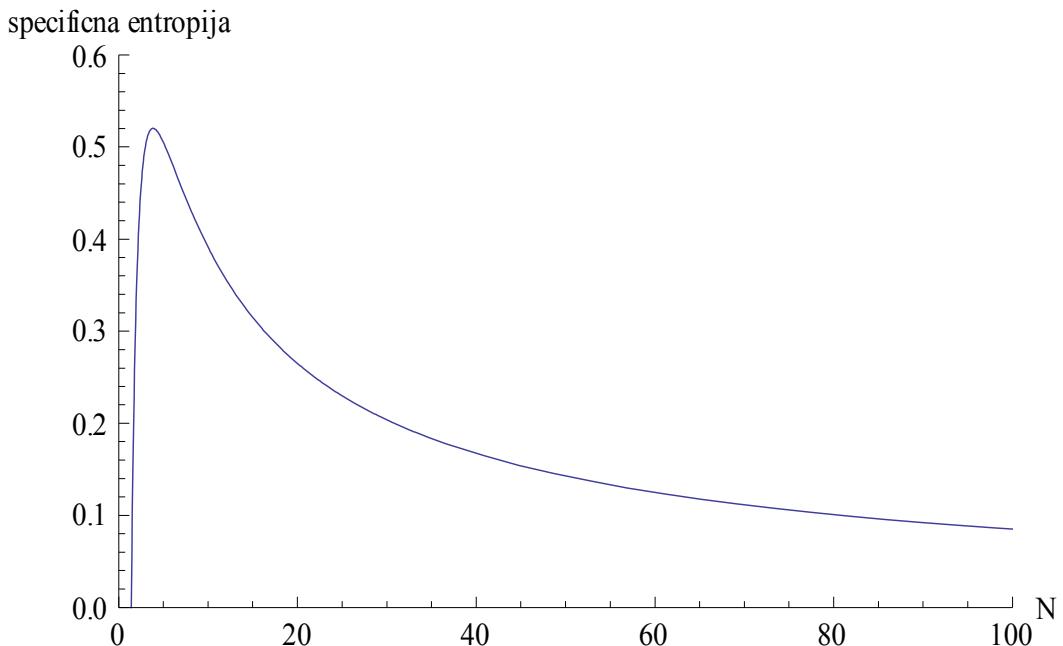
$$S \sim \ln \frac{N^2}{\sqrt{2}} = 2 \ln \frac{N}{\sqrt{2}}$$

Specifična entropija za ovaj idealizovani živi sistem je tada:

$$\epsilon = \frac{2 \ln \frac{N}{\sqrt{2}}}{N\mu}$$

Maksimum ove funkcije je za $N = e\sqrt{2}$, međutim, N je u ovom slučaju uvek ceo broj, te je maksimum specifične entropije na oko $N = 3$ i $N = 4$. Kako ima smisla razmatrati samo one žive sisteme koji su sastavljeni od većeg broja podsistema, to N ima smisla da bude upravo veći ili jednak od 3. Kako N raste, tj. kako posmatramo sistem sa sve većim brojem podsistema, tako specifična entropija opada (Slika 8).

Ova veličina se može tretirati kao vrlo gruba mera kompleksnosti, te se ostvaruje veza specifične entropije i kompleksnosti živog sistema na sledeći način: što je specifična entropija sistema manja, to je sistem kao celina uredjeniji i kompleksniji, i obrnuto, što je specifična entropija veća, to je sistem manje uredjen i manje kompleksan.



Slika 8: Modelovanje specifične entropije. Što je broj uredjenih molekula veći, to je specifična entropija manja i živi sistem je kompleksniji.

Pošto su kompleksniji sistemi uredjeniji, tj. imaju više mase koja je uredjena, njihova regulacija entropije zahteva veću energiju za održavanje stacionanog stanja. Takođe, pošto su kompleksniji, tj. uredjeniji sistemi relativno dalji od ravnotežnog stanja, rast njihove unutrašnje entropije će biti brži, jer je relativno veća verovatnoća za evoluciju u stanje sa manjom uredjenošću, i zbog toga ovakvi sistemi zahtevaju i veću brzinu pretvaranja energije za održavanje uredjenog stanja, tj. efikasniju regulaciju entropije. Ovo automatski povlači za sobom da je proizvodnja entropije od strane

kompleksnijih sistema – sistema sa manjom specifičnom entropijom – veća, i to proizilazi već samo iz efikasnije regulacije entropije. Međutim, kompleksniji sistemi imaju i više mogućnosti da „potpomognu“ regulaciju svoje entropije – da menjaju svoju okolinu – što je upravo zbog toga što zahtevaju više energije. Iskorišćavanje ovih mogućnosti ima za posledicu dodatnu proizvodnju entropije.

4.3. Zahtevi za postojanjem dodatnih aktivnosti živih bića

Ako se setimo definicije QB, videćemo da se ovaj termin odnosi na sve aktivnosti i uslove za njihovo ostvarenje koje su vezane za živi sistem, ne samo na one za koje je potrebno ispunjenje minimum uslova. Sve ove aktivnosti predstavljaju različite vidove produkcije entropije. Dakle, QB je skup $\{QL, QX_1, QX_2, \dots, QX_n\}$ koji pored QL sadrži i razne druge uslove za razne aktivnosti koje smo označili sa X_n .

To mogu biti uslovi koji omogućavaju detekciju svetlosti, na primer, pa će taj uslov $QX_1 = QF$ (quorum photoreception) sadržati uslov da postoji barem jedan fotoreceptor u nekom organizmu, a takođe i ceo signaling proces koji omogućava prepoznavanje i obradu datog signala. Ako organizam ima na primer dva oka, QF će biti da poseduje barem jedno oko sa signalingom koji uključuje povratnu reakciju putem signala S4. Činjenica da posedovanje *oba* oka nije uslov da bi sistem regulisao svoju entropiju i opstajao, ukazuje na to da QF zaista ne spada u QL nego da je deo skupa QB. Ukoliko oba oka nisu u funkciji, dati organizam neće moći da detektuje svetlost, tj. grana O1 na grafu na Slici 5 i 6 neće sadržati svetlost⁵. Zbog ovoga će neki signaling procesi biti neaktivni, tj. konstatovaće mrak, jer ne postoji signal S1 nošen fotonima da ih aktivira.

Još jedan primer, veoma bitan, jesu uslovi za razmnožavanje RER (reproduction requirements). Naime, neki pokušaji definisanja života poput McKay (1991), ukazuju na reprodukciju kao jednu od glavnih karakteristika života i živih bića. Reprodukcija je karakteristika koja nikako nije nužna za funkcionisanje živog sistema. Naime, postoje sterilni organizmi, poput mule, ili organizmi koji su sterilni zbog neke bolesti. Takođe, upravo iz istih razloga reprodukcija ne može da bude *unuverzalna karakteristika* živih sistema. Stoga, uslovi za reprodukciju RER, ukoliko su ispunjeni, samo obezbeđuju *budućim* generacijama opstanak, a ne datoj jedinki. Ispunjeno minimuma RER uspostavlja $QX_2 = QR$ (quorum reproduction) što obezbeđuje mogućnost reprodukcije. Pod ove uslove može spadati postojanje materice, postojanje odgovarajućih hormona u dovoljnim količinama, uopšte postojanje isprogramiranog DNK (samo na Zemlji!) za deobu ćelije, zatim postojanje polnih organa, itd., što zavisi od jedinke do jedinke. Pogledajmo sada kako pomoću grafa živog sistema možemo interpretirati reprodukciju. Naime, odmah možemo konstatovati da novostvorena jedinka (bilo prostom deobom ili polnim razmnožavanjem) predstavlja materiju koja je od jedne jedinke izašla kao grana O2 u spoljašnju sredinu. Pre toga, za prostu deobu i bespolno razmnožavanje je

⁵ Ovo i nije sasvim tačno, jer će svetlost izazivati neku promenu u temperaturi organizma, ali za trenutni kontekst to nije bitno.

princip malo drugačiji i biće razmotren u narednom poglavlju. Za polno razmnožavanje, potrebno je da se dve jedinke “pronadju”, tj. da nekakvim signalima obaveste jednu drugu o svom prisustvu. To mogu biti ili hormoni, ili nekakva druga jedinjenja, ili svetlost, ili neposredni pritisak od strane druge jedinke. Sve to predstavlja odredjeni signaling medju samim jedinkama koje se prepoznaju kao signali S1, ali su odati od strane druge jedinke kao signali S2. To ni ne mora biti namerno indukovani signal S2, već je dovoljno samo da u EC postoji sistem koji će taj S2 prepoznati kao svoj S1. Ako uzmemo primer polnog razmnožavanja kod jednoćelijskih organizama, vidimo da spajanje dve ćelije putem sjedinjavanja ćelijskih membrana predstavlja razmenjivanje materije-energije putem O1 i O2 grane tako da je O1 grana za jednu ćeliju celokupna druga ćelija. To je ujedno i signal za početak mejoze, koja se preko grafa može interpretirati kao niz S3 - S4 ciklusa, čiji je krajnji ishod nova jedinka i pri čemu se oslobođava višak energije kroz O2. Kod čoveka, princip je sličan, samo što posle oplodjenja imamo formiranje nove jedinke unutar majke. To je O1 i S1 muškarca kombinovan sa OB majke (što je ostvareno zahvaljujući postojanju materice i jajnika kao uslova za postizanje QR). Pri kraju trudnoće, kada beba dostigne odredjenu veličinu (što je veoma bitno naglasiti), pojavljuje se signal S3 koji je prepoznat kao znak za početak porodjaja. Na osnovu ovog signala se indukuje S4 koji nosi informaciju o tome šta OB majke treba da uradi i krajnji ishod porodjaja je izlazak bebe van majke kao majčin O2. Stoga, vidimo da O2 može da bude i novi živi sistem, a ne samo nus-prodукт regulacije entropije.

Ali ono što je bitno kod oba ova slučaja razmnožavanja jeste to što se u oba slučaja radi o *regulaciji entropije* sistema i da su nove jedinke upravo posledica regulacije entropije. Drugim rečima, nije regulacija entropije ishod razmnožavanja, već je razmnožavanje ishod regulacije entropije. I kao takvo ono predstavlja samo još jedan način *producije entropije* (u ovom slučaju je proizvedena entropija ustvari u formi nove jedinke).

Ako se vratimo na smisao oba primera QF i QR, vidimo da su to dodatni uslovi, a ne nužni, i upravo zato spadaju u skup QB, a ne čine skup QL.

Stoga je minimum uslova za X_n aktivnost označen sa QX_n . Broj ovih QX_n zavisi od organizma do organizma. Medutim, pošto smo gore videli da kompleksniji organizmi imaju i više mogućnosti da proizvedu entropiju, to direkto povezujemo sa njihovim aktivnostima. Odavde sledi da kompleksniji organizmi imaju veći skup QB, nego manje kompleksni organizmi, tj. imaju više potrebnih uslova za više aktivnosti i stoga poseduju veću produkciju entropije.

Ovo je moguće predstaviti na funkcionalnom grafu na Slici 6, tako što umesto čvora QB zamislimo krug na čijem obodu su poredjani svi X_n uslovi. Onda sa svakim tim dodatnim čvorom imamo vezu sa EC preko odgovarajućih S1 i S2 grana, jer su uslovi povezani sa spoljašnjom sredinom, a ukoliko su minimalni uslovi ispunjeni, uspostavlja se QX_n i pojavljuje se veza sa ER preko S3 i S4 odgovarajućih grana, jer svaki taj dodatni čvor jeste u suštini ili povezan sa novim načinom regulacije entropije ili je njegova posledica i predstavlja neku aktivnost sistema, ukoliko su za nju ispunjeni minimalni uslovi. To znači da za svaki čvor QX_n imamo po jedan par dodatnih grana signala S3 i S4. I sada dolazimo do sledećeg zaključka:

Porast specifične entropije sistema → raste kompleksnost;

Porast kompleksnosti → raste i broj uslova QX_n koji moraju biti ispunjeni;

Porast broja uslova QX_n → raste i broj signal S3 i S4 grana (koje, ne zaboravimo, diktiraju regulaciju entropije);

Porast broja signal S3 i S4 grana → raste i produkcija entropije sistema.

Ovaj zaključak proizvodi nekoliko vrlo interesantnih veza samo na osnovu grafa živog sistema i razmatranja pojma kompleksnosti. Na primer, poslednja relacija u zaključku povezuje broj parova grana S3 i S4 u grafu nekog sistema sa njegovom produkcijom entropije, što pruža podlogu za razmatranje delovanja živih sistema na okolinu iz sasvim jednog novog ugla. Dalje, povezivanje grafa živog sistema sa prvom relacijom u prethodnom zaključku pruža takodje sasvim jedan nov način posmatranja na evoluciju. Sledeća relacija ukazuje na mogućnost da se pomoću grafa živog sistema prati evolucija kompleksnosti i prikažu pojave novih vrsta. Ovo je pokazatelj da je graf živog sistema veoma moćan i da pruža sasvim drugačiji pogled na biologiju kakvu poznajemo.

4.4. Producija entropije, graf živog sistema i protok informacija

Napomenimo još jedan važan aspekt grafa živog sistema, a to je veza signalinga, grafa i teorije informacija sa produkcijom entropije. Naime, entropija se može definisati u teoriji informacija i kao mera nedostatka informacije o sistemu (Shannon i Weaver 1949) ili Šenonova entropija. Što je veća entropija, to je veći nedostatak informacija o sistemu, tj. to nam je više informacija potrebno da bismo ga definisali. Za uredjene sisteme ju suprotno, pošto je entropija relativno manja, treba nam manje informacija da bismo ga definisali. Producija entropije je onda gubitak informacija o sistemu. Protok entropije bi onda bio protok (nedostatka) informacije, a pošto je rečeno da se živi sistemi hrane negativnom entropijom, to će biti sa aspekta teorije informacija da se oni „hrane informacijom“.

Sada je samo dovoljno da se setimo kako je definisan signal – kao informacioni sadržaj nosača – i pogledamo graf (svejedno da li na Slici 5 ili 6). Vidimo da graf pokazuje da živi sistem funkcioniše na principu protoka signala, pa tako i na principu protoka informacija. Što je živi sistem kompleksniji, to će njegov graf imati više signalinga - S1, S2, S3 i S4 grana, a to znači i da će protok informacija biti veći. Kombinujući ovu činjenicu sa brojem i vrstom uslova koje sadrži QB, može se praktično mapirati *protok informacija* kroz graf u zavisnosti QX_n , na osnovu čega bi se dobila veza izmedju protoka informacija, produkcije entropije i kompleksnosti živih sistema. Takodje se mapiranje signalinga može proširiti i na višećelijske organizme, te crtati mreže grafova za pojedine sisteme ćelija u organizmu ili zatovrenoj koloniji. Ovo pokazuje da se funkcionisanje živih sistema zaista može objasniti preko signalinga.

5. Pojam kritične minimalne entropije i razlog pojave rasta jedinke, bespolnog i polnog razmnožavanja

U prethodnom poglavlju je bilo ukazano na važnost veličine S_i^{min} koja predstavlja minimalnu sopstvenu entropiju živog sistema u zadatim ispunjenim uslovima QB. Ovde će biti pokazano kako je moguće rezonovati pojavu rasta i deobe ćelije veoma prostim razmatranjem ove veličine, TD II i produkcije entropije.

Naime, postavlja se pitanje šta je uzrok rasta ćelije? Zbog čega uopšte živi organizmi rastu? Ne treba zaboraviti da je suština mehanizma funkcionisanja živih sistema regulacija unutrašnje entropije, pa bi bilo pogodno krenuti odatle.

Razmatrajmo jednoćelijski organizam. Nakon nastanka (ne interesuje nas da li je to bio prvi organizam ili je ćelija nastala deobom), ćelija počinje da reguliše svoju entropiju, propušta materiju-energiju putem O₁-O₂ grana. Rast ćelije je očigledno indukovani materijom-energijom koja protiče neko vreme kroz ćeliju i ugradjuje se u ćelijski zid. Ovo može biti iz dva razloga. Ili je jednom slučajna genetska mutacija proizvela promenu u genetskom materijalu tako da ćelija sada stvara molekule koje ugradjuje u membranu, povećavajući svoju zapreminu tako, ili je zaista postaojao neki razlog zbog čega je ćelija počela da raste te se funkcija zato izmenila. U prvom slučaju se postavlja pitanje zbog čega je povoljnije onda posedovati osobinu rasta u odnosu na osobinu konstantne zapremine, jer očigledno je da čak i ako je bilo takvih organizama, onih organizama koji ne rastu barem neko vreme od nastanka više nema. U drugom slučaju se dozvoljava da se zadje malo dublje u razlog za pojavu rasta ćelije i to prostim logičkim rezonovanjem.

Naime, pretpostavimo da je rast indukovani potrebom za pravljenjem više mesta za skladištenje materije koja ulazi u sistem. Pravljenje zaliha uopšte ne mora biti razlog zbog koga ćelija raste, iz prostog razloga što po TD II *nužno* dolazi do porasta entropije unutar ćelije tokom regulacije entropije (9), ili se ovo može rezonovati tako da je po TD II efikasnost mehanizma regulacije entropije ćelije manja od 100%, što za posledicu ima povećanje unutrašnje entropije ćelije. Entropija u unutrašnjosti ćelije (zaostala materija) će da poraste toliko da ćelija ima samo dve opcije: ili će da se raspade pod unutrašnjim pritiskom, ili će pronaći načina da smanji entropiju u sebi na neki nov način. Treća mogućnost jeste da je entropija u unutrašnjosti ćelije narasla taman toliko da mehanizam regulacije entropije može dovoljno brzo da reguliše entropiju, ali ovde nećemo razmatrati tu mogućnost.

Pošto prva opcija očigledno neće urodit plodom, onda ostaje da razmotrimo drugu opciju. Postoje dva logična načina da se entropija iz unutrašnjosti ćelije smanji. Jedna je da ćelija napravi propusni kanal u svojoj membrani tako da iz unutrašnjosti ćelije materija koja poseduje višak entropije izadje napolje nekim procesima putem grane O₂. Međutim, ovaj način nije baš zadovoljavajuć jer ne možemo da očekujemo da će izaći materija koja je potrebna da izadje, a da neće izaći citoplazma sa organelama, što je vrlo rizično. Drugi način jeste da jednostavno poveća svoju zapreminu i napravi mesta. Ovo je energetski povoljno iz dva razloga: ukoliko se radi o

korisnoj materiji ali koja sa sobom nosi višak entropije, onda je sasvim logično da ćelija ne izbacuje tu materiju pa je ponovo kada joj zatreba traži i vraća unutra; a ukoliko se radi o nepovoljnoj materiji sa viškom entropije, onda je dovoljno da primetimo da se povećanjem zapremine ćelije smanjuje koncentracija tih materija, tako da je, geldano u sve rastućoj zapremini, ima sve manje.

Dolazimo do zaključka, na ovaj intuitivan način, da će rast ćelije biti jedan od energetski najpovoljnijih, ako ne i najpovoljniji proces smanjenja unutrašnje entropije. Rastom se na prvi pogled entropija povećava, ali imajmo na umu da se radi o sve većoj *uredjenoj masi* (koja se ugradjuje u ćelijski zid na primer), te je entropija po ćeliji (specifična entropija (11)) sve manja.

Momenat u kome dolazi do rasta ćelije možemo nazvati kritična minimalna sopstvena entropija. To je minimalna sopstvena entropija S_i^{min} nakon koje dolazi do novog načina regulacije entropije. Ova veličina se može lako definisati na sledeći način:

$$\frac{S_i^{min}(n)}{S_i^{min}(n+1)} < 1 \Rightarrow S_i^{min}(n) \equiv S_{i,crit}^{min} \quad (12)$$

što znači, ukoliko je minimalna sopstvena entropija u $n+1$ -om metaboličkom ciklusu veća od minimalne sopstvene entropije u n -tom ciklusu, i ako je entropija smanjena pomoću signalinga same ćelije, onda $S_i^{min}(n)$ predstavlja *kritičnu minimalnu sopstvenu entropiju prvog reda* $S_{i,crit}^{min}$ (I), nakon koje je minimalna sopstvena entropija na nižem nivou. Sa aspekta regulacije entropije, uopšte nije bitno što su dimenzije ćelije uvećane, naime, regulacija entropije je mehanizam koji reaguje na signale koji se nude, i kao takav ima zadatku da odgovara na njih adekvatno, u skladu sa regulacijom entropije i energetski najpovoljnije.

Ova minimalna sopstvena kritična entropija prvog reda evolutivno bi predstavljala prvu kritičnu minimalnu sopstvenu entropiju nakon zatvaranja sadržaja primordijalne supe u pra-membranu (koja bi mogla biti nultog reda).

Ovim rezonom možemo nastaviti i dalje. Naime, sada se postavlja pitanje kada i zašto je ćelija prestala da raste? Šta se to značajno desilo da je prekinulo rast ćelije? Možemo razmišljati na sledeći način: pretpostavimo da je prva ćelija koja je počela da raste, rasla bez prestanka. Kad god prodje neki metabolički ciklus, ćelija malo po malo poraste, jer se u svakom metaboličkom ciklusu poveća sopstvena minimalna entropija. U principu, *poznajući život na Zemlji*, ekspresija gena koja inhibira i stimuliše rast ćelije funkcioniše putem signalinga koji ima svoj put od DNK do ćelijske membrane. Taj put je, grubo gledajući, srazmeran poluprečniku ćelije (ako jednostavno pretpostavimo da je ona kružnog oblika). Međutim, pošto je citoplazma sredina u kojoj ima puno različitih molekula i koji se haotično kreću, može se govoriti samo o srednjem slobodnom putu molekula unutar ćelije. Stoga, zahtev je da je zapravo srednji slobodni put molekula koji učestvuju u izgradnji ćelijske membrane (ako takvih molekula ima više) *u proseku* takav da sudari sa molekulima dozvole da molekul stigne posle izvenog vremena do membrane, da bi rast bio efikasan.

Ako je to tako, onda se postavlja pitanje tog vremena koje je potrebno da molekul predje taj put. To vreme zavisi od koncentracije citoplazme itd, ali prepostavljući da je citoplazma uniformne i konstantne koncentracije tokom rasta, lako se da zaključiti da je potrebno sve više vremena da molekul (ili skup signaling molekula) koji je zadužen za izgradnju membrane dodje do nje. U nekom momentu, to vreme će biti uporedivo i manje od vremena koje je potrebno da se višak entropije izbaci, tj. recimo od vremena izmedju dva metabolička ciklusa. Ako je to tako, onda je dalji rast ćelije osudjen na propast, jer ćelija neće stići da poraste, a već će entropija početi da se nagomilava i u jednom momentu će se ćelija raspasti. Dakle, ili se desila neka genetska mutacija koja je stopirala rast i usavršila izbacivanje štetnih materija ili regulaciju entropije, ili je došlo do nečeg zadivljujućeg. Ćelija se sada nalazi u poziciji u kojoj ne vredi više da napravi mesta starim načinom regulacije entropije i potreban je neki nov način – logički gledano, ako već postoji mehanizam koji koristi enzime koji ugradjuju dodatne molekule u membranu, možda bi energetski najpovoljnije bilo da se oni iskoriste za izgradnju zida nešto bliže DNK molekulu. Možda koristeći baš ovaj način, ćelija se podelila. Ovo je savršen način regulaciju entropije – koristeći se Boltzmanovom jednačinom (4), može se videti da je entropija ćelije od N molekula (sa recimo $N(N - 1)/2$ molekularnih veza) veća od entropije svake novonastale ćelije sa po $N/2$ molekula (sa recimo $N(N/2 - 1)/4$ molekularnih veza), tako što se jednačina (4) za $W = N(N - 1)/2$ podeli sa istom jednačinom za $W = N(N/2 - 1)/4$. Ova razlika nije velika, jer se dobija odnos 1.017 u korist majke ćelije⁶.

Stoga, deoba ćelije bi mogla da predstavlja nov način regulisanja entropije zbog nemogućnosti dalje regulacije entropije rastom ćelije. I za ovaj slučaj se može definisati kritična minimalna sopstvena entropija na potpuno isti način kao i (12), i obeležili bismo je sa $S_{i,crit}^{min}$ (II) - *kritična minimalna sopstvena entropija drugog reda*.

Ovime bi se moglo objasniti poreklo rasta i proste deobe ćelije, ali i višećelijskih organizama. Naime, može se primetiti da je kod skoro svih organizama faza rasta *pre* faze razmnožavanja (bilo ono polno ili bespolno). Ono što je karakteristično za sve organizme jeste *potreba* za razmnožavanjem. Ta potreba nikako ne dolazi od potrebe za umnožavanjem i smanjivanjem verovatnoće nestanka vrste ili slično, naprotiv, na osnovu gornjeg rezona, ta potreba je evolutivni ostatak deobe jednoćelijskih organizama kao načina za efikasnijom regulacijom entropije. Pre nego što dodjemo do kritične sopstvene minimalne entropije trećeg reda, napomenimo da izbor baš pomenutih rešenja rasta i proste doebe kao najefikasnijeg smanjenja entropije vrlo verovatno, gotovo zasigurno ima svoj osnov u MEP principu, kao stanje koje je najverovatnije da se dogodi i tokom kojeg je produkcija entropije maksimalna u odnosu na raspoloživa stanja i ovo je podložno eksperimentalnim proverama.

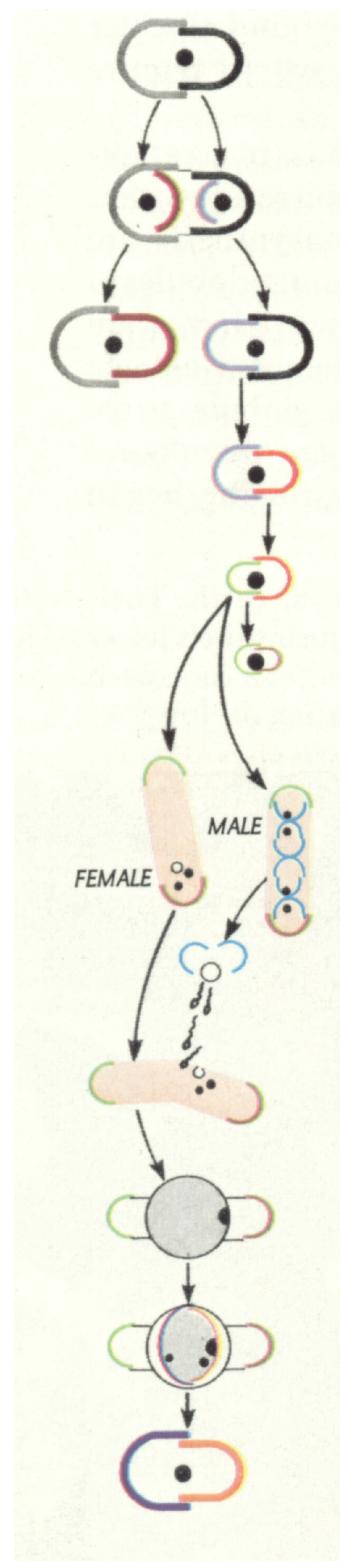
⁶ Ovo je veoma gruba aproksimacija, ali opravdana, jer pravi rezultat može samo biti bolji od ovog, budeći da će biti manje veza zbog postojanja nekog stepena kompleksnosti.

Dalje možemo postaviti pitanje otkud polno razmnožavanje? Za ovaj metod smanjenja entropije ćelije kao novonastalog načina nakon kritične minimalne sopstvene entropije trećeg reda postoje posmatranja koja idu u prilog ideji. Naime, radi se o jednoćelijskim algama koje se zovu dijatome (*Diatomae*) (Graham i Wilcox 2000). Jedna ovakva alga, *Navicula lanceolata*, je prikazana na Slici 9, kao predstavnik dijatome, sastoji se od dva dela koji naležu jedan na drugi poput Petri šolje, tako da kao da ima pokloac i dno, gde je dno manje od poklopca.



Slika 9: Dve dijatome *Navicula lanceolata*, leva je snimljena sa slike, a desna od gore.

Ono što je zanimljivo kod ovih algi jeste što se one razmnožavaju i prostom deobom i polnim putem (Hoover 1979). Naime, na Slici 10 je prikazan životni ciklus jedne dijatome. Kada se dijatoma deli prostom deobom (mitoza), DNK se replikuje i hromozomi se podele na dve identične polovine, od kojih jedna ode u poklopac, a druga u dno. Potom, svaka od dve polovine, izgradi sebi *dno* – bitno je da i mala i velika polovina grade manju polovinu. Zbog ovoga, uvek će ona manja polovina u svakoj mitotičkoj deobi stvarati manju polovinu i kao celina će biti sve manja i manja. Ta manja ćelija u jednom momentu neće više moći da se deli jer je suviše mala. To se dešava kada se dostigne veličina od oko 60 do 80% veličine ćelije roditelja (Hoover 1979). Ova ćelija nema načina više da deobom reguliše svoju entropiju (jer će se raspasti) i onda se dešava to da ta najmanja nalazi jednu veću dijatomu sa kojom stupa u polno razmnožavanje na taj način što ona proizvede semenu tečnost, a veća



Slika 10: Životni ciklus dijatome.

proizvede jajašca i onda veća dijatoma propusti semenu tečnost u sebe i dolazi do oplodnje. Oplodjena alga naraste do maksimalne veličine i onda ponovo kreće ciklus mitotičke deobe.

Ovo predstavlja očigledan primer evolucije na jednoj istoj jedinki i opravdanje za uvodjenje *kritične minimalne sopstvene entropije trećeg reda* - $S_{i,crit}^{min}$ (III). Očigledno je da iz fizičkih razloga najmanja ćelija nije mogla više da nastavi životni ciklus kao ranije. Stoga, ovaj organizam je pronašao povoljan metod za smanjenje entropije i to putem polnog razmnožavanja. Ono što je zanimljivo jeste da je preskočena kritična minimalna sopstvena entropija prvog reda, jer manja ćelija ne može više da raste. S druge strane, možda je evolutivno energetski bilo povoljnije stupiti u polno razmnožavanje (na neki način) nego stupiti u rast i to možda iz tog razloga što je ova alga nastala možda kao rezultat simbioze ćelije koja nije imala sposobnost rasta sa ćelijom koja jeste imala tu sposobnost, te da je zbog toga ostala funkcionalna “asimetrija” izmedju dva dela ćelije. U prilog ovoj hipotezi ide i činjenica da postoje dijatome koje imaju (koliko je poznato do sada) samo mitotičku fazu, kao *Phaeodactylum tricornutum* (Hoover 1979), i koje se prilikom deobe ne smanjuju i stoga nemaju ni potrebu za polnim razmnožavanjem.

Imajući u vidu gore rečeno, sada postaje jasnije da je veoma verovatno da je razmnožavanje samo posledica fundamentalne karakteristike živih sistema, a ne sama karakteristika živih sistema kako se trenutno razmatra. Za pojavu ovakve naizgled anomalije jeste zaslužna pomenuta sposobnost pronalaženja efikasnijeg načina regulacije entropije zbog dostizanja izvesne kritične minimalne sopstvene entropije sistema nakon koje je minimalna sopstvena entropija sistema snižena.

Graf živog sistema može pokušati da objasni na koji način je principijelno došlo do ovakvih anomalija. Na primer, za $S_{i,crit}^{min}$ (I): granom O1 dolazi, izmedju ostalog, i višak entropije, koji se gomila u OB; zbog kašnjenja signala S4, gomilanje je sve veće i veće; sistem bira stanje u kome je vreme kašnjenja signala S4 minimalno; da li je došlo do mutacije u samom OB ili je ona indukovana nekim O1, graf ne može pojasniti, ali suština je da se tako nešto verovatno desilo i verovatno je MEP princip odigrao ključnu ulogu.

6. Implikacije na astrobiologiju

Po Plaksku i Grossu (Plaxco i Gross 2006) danas je Astrobiologija postala nauka koja uz širok pogled teži da ne razlikuje život na Zemlji i život na drugim nebeskim telima. Ona se fokusira na fundamentalnija i osetljivija pitanja o vezi izmedju života i Univerzuma. Konkretno, krećući od života na Zemlji (jer to je jedini život koji poznajemo za sada), ona nastoji da odgovori na tri ključna pitanja koje Plaksko i Gros ističu:

1. Šta je trebalo da se desi da bi Univerzum mogao podržati život?
2. Kako se objašnjava poreklo i evolucija života na Zemlji, a koliko drugačije bi to bilo negde drugde?
3. Gde još je život mogao da nastane u našem Univerzumu, kakav bi on bio i kako bismo ga pronašli?

Na prvo pitanje bi se moglo odgovoriti valjano samo ako se uzmu u obzir svi poznati *fundamentalni* zakoni fizike koji vladaju u našem Univerzumu – da ti zakoni nisu ovakvi, onda bi Univerzum bio drugačiji, a tada razmatranje o životu u takvom drugačijem Univerzumu ne bi imalo smisla, jer bi se zakoni fizike razlikovali i morali bismo njih da poznajemo potpuno u istoj onoj meri kao i važeće zakone u ovom Univerzumu. Stoga, uzimajući u obzir *sve* fundamentalne zakone fizike i parametre koji definišu ono što se naziva Standardnim Modelom elementarnih čestica (Huebsch 2011), a to su masa elektrona, protona, vrednost elementarnog naielktrisanja, brzine svetlosti, jačine fundamentalnih interakcija, itd. (ima ih ukupno 18), sve što se može reći u cilju odgovora na prvo pitanje jeste da je u *ovom* Univerzumu postojanje živih sistema, pa time i života moguće zahvaljujući tome što su vrednosti tih fundamentalnih parametara baš onolike kolike ih merimo. Stoga je bilo potrebno da Univerzum nastane baš onako kako je nastao, jer da je drugačije nastao, sa drugačijim parametrima, mi ne bismo bili u mogućnosti da ga kao takvog posmatramo, jer ne bismo ni nastali (Hawking 2001). Ova vrlo čudna ideja je poznata kao *antropičko načelo* i jedan od njenih zagovornika je Stiven Hoking. Međutim, ona ne pruža nikakav fizički razlog ili objašnjenje zbog čega je moguće ili nije moguće da život nastane u nekakvom drugačijem Univerzumu, naprotiv, ovo načelo tvrdi da smo nemoćni u razumevanju onoga što ne možemo da neposredno osmotrimo eksperimentom (npr. pojavu drugačijih fundamentalnih interakcija na početku Univerzuma), što sa razvojem novih fundamentalnih teorija poput teorije stringova postaje sve manje tačno (Greene 2004).

Ali gledajući sa aspekta grafa živog sistema, stvari postaju mnogo jasnije. Naime, graf živog sistema je formulisan tako da, iako nismo u mogućnosti da tvrdimo *koji* fizički i hemijski procesi bi održavali neki hipotetički živi sistem u funkcionalnom stanju, on daje *princip po kome su ti fizički i hemijski procesi udruženi u mehanizam funkcionisanja živog sistema*. Zapravo, u IB su dozvoljeni svi oni procesi koji zajedno mogu da obezbede takav signaling da sistem može da autoreguliše svoju entropiju. A da bi bilo povoda za autoregulaciju entropije, takav sistem mora imati neki stepen

kompleksnosti (kao što smo videli u poglavlju 4), što znači da procesi koji su doveli do nastanka takvog sistema moraju obezbedjivati *porast kompleksnosti* potencijalnog operativnog bloka OB. To dalje znači da, ukoliko prepostavimo da su energija i (proizvoljno dimenzionalni) prostor nešto što je univerzalno i zajedničko za sve hipotetičke različite univerzume, jedini zahtev za evoluciju kompleksnosti jeste da istovremeno postoje zakoni koji energiju mogu da lokalizuju i zakoni koji je mogu delokalizovati u prostor-vremenu. Lokalizacija i delokalizacija energije u prostor-vremenu obezbedjuje *neravnomernu raspodelu verovatnoće nalaženja energetskih kvanata*. Imajući na umu statističku definiciju entropije (4), to automatski povlači za sobom postojanje entropije i produkcije entropije u takvom univerzumu. Ako je to tako, onda IB može biti definisan, jer je IB skup svih zakona koji omogućavaju regulaciju entropije. Kada je IB definisan, imamo na umu da je i signaling automatski definisan, jer IB uključuje ona pravila koja omogućavaju signaling kao deo mehanizma regulacije entropije. Možemo se pozvati na relaciju (5) i reći da je u takvom univerzumu život *principijelno* moguć.

Medjutim, ono što ne možemo reći jeste koliki je potreban stepen kompleksnosti za pojavu živih sistema. Naime, da se naš Univerzum ranije širio mnogo brže, materija bi se toliko razredila da ne bi bilo mogućnosti za formiranje zvezda, galaksija, planeta. To znači da bi materija u Univerzumu samo do nekog stepena dospila do kompleksnosti, koja možda ne bi bila dovoljna za stvaranje živih sistema.

Stoga, može se zaključiti da graf živog sistema daje odgovor na prvo pitanje:

Univerzum može da podrži život ukoliko postoje fizički zakoni koji omogućavaju lokalnu promenu entropije usled lokalizacije/delokalizacije energije,

uz ograničenje da stepen kompleksnosti potreban za stvaranje života ostaje nepoznat i to verovatno zbog toga što je to relativan pojam, jer bi se radilo o drugim fizičkim zakonima.

Odgovor na drugo pitanje graf živog sistema može dati samo delimično, jer nisu poznati uslovi koji su vladali Zemljom u vreme nastanka života. Medjutim, upravo zbog svoje univerzalnosti, i na osnovu poglavlja 5, može se *prepostaviti* šta se dogadjalo i šta bi se dogadjalo negde drugde.

Naime, najbitnija osobina evolucije života, a koju kao novu uvodi graf živog sistema jeste to da se diverzitet živih sistema pojavio zbog njihove primoranosti na odabir drugačijih načina regulacije entropije. Do ovoga dolazi delom zbog mutacija i prirodne selekcije, a delom zbog toga što sama regulacija entropije, kako smo videli u prethodnom poglavlju, indukuje potrebu za novim načinima regulacije entropije.

Stoga, s obzirom na to da po grafu živog sistema osnovni princip funkcionisanja ostaje isti, bez obzira na to gde je život nastao, može se zaključiti da će, *ukoliko život negde drugde nastane (ili ako je već nastao) evoluirati tako da se kompleksnost povećava sa „otkrivanjem“ novih načina regulacije entropije.*

Na treće pitanje graf živog sistema ukazuje na sledeći odgovor. S obzirom na to da se grafom živog sistema ne preciziraju fizičko-hemijski procesi koji održavaju žive sisteme, odgovor na treće

pitanje bi zavisio od toga gde su moguće fizičko-hemijske reakcije takve da obezbede IB koji može da diktira mehanizam regulacije entropije. U suštini, ukoliko želimo da pitamo da li je na takvom i takvom mestu, sa takvim i takvim uslovima, (recimo na Titanu) moguć život, onda je potrebno da primenimo graf živog sistema na to okruženje i razmatramo pojavu sistema koji mogu da regulišu svoju entropiju putem signalinga i u okviru ispunjenih zahteva za postojanjem, a koji su odredjeni datom sredinom i fizičko-hemijskim osobinama koje vladaju u njoj.

Nesumnjivo je da bi život drugde bio drugačiji, ali način na koji bismo ga nalazili bi podrazumevao raspoznavanje uredjenih formi i biomarkera, koji po grafu živog sistema predstavljaju signal O₂ granu⁷. Drugim rečima, u potrazi smo za širokim spektrom produkata protoka negativne entropije i potrebno je podrobno proučiti što više mogućih fizičko-hemijskih reakcija koje mogu obezbediti mehanizam signalinga za regulaciju entropije, da bismo bolje mogli uočiti na nekom drugom svetu šta znače pojedini biomarkeri. U svakom slučaju, čini se da graf živog sistema predstavlja najopštiji i najfundamentalniji opis mehanizma funkcionisanja živilih sistema do sada i buduća istraživanja u domenu njegovih primena bi značajno unapredila astrobiologiju kao nauku, a i nauku o živim sistemima na Zemlji uopšte.

⁷ Biomarker je signal koji govori o postojanju nekog živog sistema koji ne mora biti živ.

7. Zaključak

Ovaj rad pokazuje da je korišćenjem jednog širokog pogleda na žive sisteme i problem nijihovog funkcionisanja moguće praktično prodreti u suštinu mehanizma funkcionisanja živih sistema. Ključ za uspeh ovakvog pogleda jeste pronaći osnovne elemente (principle, zakone ili objekte) koji su zajednički za apsolutno sve žive sisteme i pokušati pronaći vezu izmedju tih elemenata koji zajedno daju unverzalnu i fundamentalnu sliku mehanizma funkcionisanja živih sistema. Ispostavlja se da su ti elementi regulacija unutrašnje entropije sistema (ER), (ispunjeni) zahtevi za postojanjem sistema (QB) i signlaing (S), kao proces prepoznavanja, transporta, i slanja signala. Pored toga, ovi elementi stoje u tesnoj vezi sa spoljašnjom sredinom (EC), jer živi sistemi jesu otvoreni ne-ravnotežni sistemi koji održavaju svoje stacionarno stanje stalnim protokom materije-energije i entropije, pa su stoga u stalnoj interakciji sa okolinom EC.

Kao rezultat, uočeno je da svaki živi sistem poseduje informacioni blok (IB) i operativni blok (OB) koji zajedno sa S i EC čine *fundamentalni logički princip mehanizma funkcionisanja svakog živog sistema koji se može predstaviti kompletним usmerenim grafom sa tri čvora*. OB predstavlja sam skup svih materijalnih delova živog sistema koji većinom čine mehanizam ER sistema, dok je IB skup univerzalnih fizičko-hemijskih zakona koji predstavljaju recept za obradu signala i funkcionisanje signalinga i kao takav je potpuno nezavisan od biohemije, te čini ovaj princip univerzalnim. Odnos svih ovih elemenata se može sažeti u sledećem: *IB je metod, QB je uslov; EC je matrijal; S je mehanizam; OB je sredstvo, ER je funkcija*. Bazirano na ovome, može se formirati i *funkcionalni graf* čiji su čvorovi ER umesto OB i QB umesto IB, dok je EC ostao nepromenjen. Pomoću ovog grafa se može primenjivati termodinamika ne-ravnotežnih sistema i razmatrati produkciju entropije živih sistema.

Razmatranjem evolucije kompleksnosti preko pojnova specifične entropije i kritične minimalne entropije, a pomoću ovog fundamentalnog logičkog principa, dolazi se do zaključka da su praktično sve aktivnosti živih sistema posledica pronalaženja novih načina regulacije entropije, a ne njihov uzrok, čime je ukazano na poreklo tih aktivnosti. Medju njima je posebno izdvoje rast i deoba celije i udruživanje organizama u zajednice.

Ukazano je i to da je, s obzirom da graf živog sistema pokazuje da oni funkcionišu na bazi signalinga, moguće formulisati informacionu teoriju živih sistema pomoću Šenonove entropije u kombinaciji sa grafom živog sistema i mrežama ovog grafa.

Ovaj rad takođe postavlja dva osnovna gledišta vezana za potragu za vanzemaljskim životom, a koja su u potpunosti kompatibilna za zahtevima Astrobiologije:

1. Tragajući za živim bićima na drugim svetovima, ukoliko ih pronadjemo, moramo imati na umu da ona uopšte ne moraju da budu bazirana na DNK molekulu, niti na hemiji na kojoj počivaju živim bićima na Zemlji. To jasno pokazuje razmatranje univerzalnog principa grafa živih sistema koji je predstavljen u ovom radu;

2. Postoji jedna absolutna zajednička karakteristika (pod absolutnom podrazumevamo onu koja ne zavisi ni od prostora ni od vremena, niti od fizičke podloge) svih živih sistema (uključujući i potencijalne vanzemaljske), a to je da na kakvim god fizičko-hemijskim reakcijama bili izgradjeni, svi živi sistemi regulišu svoju unutrašnju entropiju putem signalinga u okviru svojih ispunjenih zahteva za postojanjem. Sa ove dve tačke gledišta, graf živih sistema predstavlja univezalno sredstvo na kome bi se mogle graditi astrobiološke teorije o nastanku života ne samo na Zemlji, već i na drugim svetovima.

Uvodeći pojam kritične minimalne sopstvene entropije sistema, ukazano je na mogućnost da su praktično sve aktivnosti živih sistema, uključujući pogotovo i razmnožavanje, rezultati biranja najverovatnijeg i energetski najpovoljnijeg stacionarnog stanja regulacije entropije usled nemogućnosti dalje regulacije entropije.

Imajući u vidu sve napred izneto, bilo bi uputno pogledati na stvarnost iz jednog drugačijeg ugla i shvatiti da je ceo život opstao zahvaljujući toj od drugog zakona termodinamike iznudjenoj sposobnosti razmnožavanja.

To je misao vredna strahopostovanja.

Literatura

Aitchison, I. J. R., Hey, A. J. G. (2003): "Gauge Theories in Particle Physics – A Practical Introduction, Volume 1: From Relativistic Quantum Mechanics to QED". IOP Publishing, Bristol and Philadelphia.

Aitchison, I. J. R., Hey, A. J. G. (2004): "Gauge Theories in Particle Physics – A Practical Introduction, Volume 2: Non-Abelian Gauge Theories: QCD and the Electroweak Theory". IOP Publishing, Bristol and Philadelphia.

Asimov, I. (1962): "Not as We Know it - The Chemistry of Life". Mercury Press, Inc.

Atkins, P.W. (1984): „The Second Law”. Scientific American Books, W. H. Freemanand Co., New York

Ben-Naim, A. (2007): "Entropy demystified: The Second Law Reduced to Plain Common Sense". World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, Singapore.

Benner, S. A. (2010): "Defining Life". *Astrobiology*, 10,10:1021-1030.

Bennett, C.H. (1988): "Logical depth and physical complexity", objavljeno u "The Universal Turing Machine: A Half-Century Survey", R. Herken (rec.). Oxford University Press, Oxford, 227-257

Benton (1968): "Biology". *Encyclopaedia Britanica*, Chicago.

Bollobas, B. (1985): "Random Graphs". Academic Press.

Boltzmann L. (1974): "The second law of thermodynamics (Theoretical physics and philosophical problems)". Springer, New York.

Botta, O., Bada, J. L., Javaux, E., Gomez-Elvira, J., Selsis, F., Summons, R., rec. (2008): "Strategies of Life Detection". Springer, Berlin.

Chaitin, G.J. (1977): "Algorithmic information theory". *IBM Journal of Research and Development* 21:350-359.

Chartrand, G. and Lesniak, L. (1996): "Graphs and Digraphs". Chapman and Hall.

Clausius, R., (1864): "On the Concentration of Rays of Heat and Light, and on the Limits of its Action". U "The Mechanical Theory of Heat". Macmillan, London.

Cleland, C.E. and Chyba, C.F. (2002): "Defining Life". *Orig. Life Evol. Biosphere* 32:387-393.

- Crutchfield, J. P., Young, K. (1983): "Infering statistical complexity". *Physical Review Letters* 63:105-109.
- Dewar, R. C. (2003): „Information theory explanation of the fluctuation theorem, maximum entropy production and self-organized criticality in non-equilibrium stationary states“. *J. Phys. A.* 32:631–641.
- Dewar, R. C. (2004): „Maximum EntropyProduction and Non-equilibrium Statistical Mechanics“, objavljeno u „Non-equilibrium Thermodynamics and the Production of Entropy: Life, Earth, and Beyond“, (Kleidon A. i Lorenz, R. D., rec.), Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 41-55.
- Dewar, R., Juretic, D., Zupanovic, P. (2006): "The functional design of the rotary enzyme ATP synthase is consistent with maximum entropy production". *Chemical Physics Letters*, 430,1:177-182.
- Dyson, F. (1985) "Origins of Life". Cambridge University Press, Cambridge.
- Dyson, F. (2000): Govor dat u NASA Goddard svemirskom centru.
- Emmeche, C. (1992): "Life is an abstract phenomenon: is artificial life possible?", objavljeno u "Towards a Practice of Autonomous Systems". *Proc. 1st European Conf. on Artificial life* (Varen, F. J. i Bourgine, P., rec.), MIT Press, Cambridge, MA, 466-474.
- Gell-Mann, M. (1995): "What is complexity?", *Complexity* 1:16-19.
- Grassberger, P. (1986): "Toward a quantitative theory of self-generated complexity". *Int. J. Theor. Phys.* 25:907-928.
- Greene, B. (2004): "The Fabric of the Cosmos: Space, Time, and the Texture of Reality". Alfred A. Knopf (Random House Inc.), New York, 327-414.
- Graham, L., and Wilcox, L. W. (2000): "Algae". Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, New Jersey.
- Gregersen, N. H. (2003): "From Complexity to Life". Oxford University Press, New York, 3-43.
- Grolier (1983): "Life". *Encyclopedia Americana*. Danbury.
- Harary, F. (1969): "Graph Theory". Addison-Wesley, New York.
- Hawking, S. (2001): „Kosmos u Orahovoj Ljusci“. Zoran Živković i Informartika, Beograd.
- Hayne, D. (2004): „Biological Thermodynamics“. Cambridge University Press, Cambridge.

- Hübsch, T. (2011): "Fundamentalna Fizika Elementarnih Čestica". Prirodno-matematički Fakultet, Univerzitet u Novom Sadu.
- Hoover, R. B. (1979): "Those Marvelous, Myriad Diatoms". *National Geographic* 155,6:871-878.
- Horowitz, N. H. (1955): "On Defining Life", objavljeno u "The Origin of Life on Earth", (A. I. Oparin, rec.). Pergamon, New York.
- Ito, T. i Kleidon, A. (2004): „Entropy Production of Atmospheric Heat Transport”, objavljeno u „Non-equilibrium Thermodynamics and the Production of Entropy: Life, Earth, and Beyond“, (Kleidon A. i Lorenz, R. D., rec.). Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 93-106.
- Joyce, G. F. (1991): "The RNA World: Life before DNA and Protein". Recenzirani transkript javnog predavanja "The Dawn of Biology Current Views Concerning the Origin of Life", prezentovanom na Scripps Institution of Oceanography, La Jolla, California, 16. Maj 1991.
- Kleidon, A. i Lorenz, R. D., rec. (2004): „Non-equilibrium Thermodynamics and the Production of Entropy: Life, Earth, and Beyond“. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Koshland D. E. Jr., (2002): "The seven pillars of life". *Science* 295:2215–2216.
- Lehninger, A. L. (1970): "Biochemistry", Worth Publishers Inc., New York.
- Lineweaver, C. H. (2004): „Cosmological and Biological Reproducibility: Limits on the Maximum Entropy Production Principle“, objavljeno u „Non-equilibrium Thermodynamics and the Production of Entropy: Life, Earth, and Beyond“, (Kleidon A. i Lorenz, R. D., rec.). Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 67-77
- Lineweaver, C. H. (2006): "We have not detected extraterrestrial life, or have we?", objavljeno u "Life As We Know It" (J. Seckbach, rec.), Tom 10 serije na temu *Cellular Origin, Life in Extreme Habitats and Astrobiology*. Springer, Dordrecht, 445-457.
- Lloyd, S., Pagels, H. (1988): "Complexity as thermodynamic depth". *Annals of Physics* 188:186-213.
- Luisi, P.L., Lazzcano, A., Varela, F.J. (1998): "What is life? Defining life and the transition to life", objavljeno u "Defining Life: The Central Problem in Theoretical Biology", (Rizzoti, M., rec.). University of Padova, Italy, 149–165.
- Martyushev, L. M. i Seleznov, V. D. (2006): „Maximum entropy production principle in physics, chemistry and biology“. *Physics Reports* 426:1 – 45.

McEwen, B. S. i Wingfield, J. C. (2003): "The concept of allostasis in biology and biomedicine". *Horm Behav.* 43(1):2-15

McKay, C. P. (1991): Urey Prize lecture: "Planetary evolution and the origin of life." *Icarus* 91:92–100.

McKay, C.P. (2004): "What Is Life—and How Do We Search for It in Other Worlds?" *Plos Biology* 2(9):302.

Miller, J. G. (1978): "The Living Systems Theory". Dostupno na *The Living Systems Theory of James Grier Miller*, http://projects.issss.org/the_living_systems_theory_of_james_grier_miller, Primer project ISSS, 1996.

Miyamoto, H., Baker, V. R., Lorenz, R. D. (2004): „Entropy and the Shaping of the Landscape by Water”, objavljeno u „Non-equilibrium Thermodynamics and the Production of Entropy: Life, Earth, and Beyond“, (Kleidon A. i Lorenz, R. D., rec.). Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 135-146.

Moya, F. (2000): "Epistemology of Living Organisms in Aristotle's Philosophy". *Theory in Biosciences* 119:318-333.

Nealson, K.H. i Conrad, P.G. (1999): "Life: past, present and future". *Phil Trans. R. Soc. Lond B* 354:1923-1939.

Niven, R. K. (2010): „Minimization of a Free-energy-like Potential for Non-equilibrium Flow Systems at Steady State“, *Phil. Trans. R. Soc. B* 365:1323-1331

Oliver, J.D. i Perry, R.S., (2006): "Definitely life but not definitively", *Orig. Life Evol. Biosphere* 34:323–346.

Paului, O. M. (2004): „Water Vapor and Entropy Production in the Earth's Atmosphere”, objavljeno u „Non-equilibrium Thermodynamics and the Production of Entropy: Life, Earth, and Beyond“, (Kleidon A. i Lorenz, R. D., rec.). Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 107-119.

Pályi, G., Zucchi, C., Caglioti, L., rec. (2002): "Fundamentals of Life". Elsevier, Paris.

Plaxco, K.W., Gross, M. (2006): "Astrobiology: A Brief Introduction". The Johns Hopkins University Press, Baltimore, viii.

Prigogine, I. (1977): "Self-organization in non-equilibrium systems". John Wiley and Sons, Inc.

Prigogine, I. (1980): "From Being to Becoming". W. H. Freeman, San Francisco.

- Prigogine, I. i Stengers, I. (1984): "Order Out of Chaos". Heinemann, London.
- Rasmussen, S., Chen, L., Nilsson, M., Shigeaki, A. (2003): "Bridging nonliving and living matter". *Artif Life* 9:269–316.
- Sagan, C. (1970): "Life". U *Encyclopedia Britannica*, 15. izdanje, Tom. 10, New York, Macropaedia.
- Seckbach, J. (2004): "Origins: Genesis, Evolution and Biodiversity of Microbial Life in the Universe". Springer.
- Shannon, C.E. i Weaver, W. (1949): "The Mathematical Theory of Communication". University of Illinois Press, Urbana.
- Simon, H.A. (1981): "The Sciences of the Artificial". MIT Press, Cambridge.
- Schrödinger, E. (1944): "What is life?", Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge.
- Sullivan, W. T. i Baross, J. (2007): "Planets and Life: The Emerging Science of Astrobiology", Cambridge University Press, Cambridge.
- Taylor, J. C. (1976): "Gauge Theories of Weak Interactions (Cambridge Monographs on Mathematical Physics)". Cambridge University Press, Cambridge.
- Von Bertalanfy, L. (1968): "General Systems Theory". George Braziller, New York.
- Zupanovic, P. i Juretic, D. (2004): „The Free-Energy Transduction and Entropy Production in Initial Photosynthetic Reactions“, objavljeno u „Non-equilibrium Thermodynamics and the Production of Entropy: Life, Earth, and Beyond“, (Kleidon A. i Lorenz, R. D., rec.). Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 161-171.
- Zupanovic, P., Brumen, M., Jagodic, M., Juretic, D. (2010): „Bacterial chemotaxis and entropy production“. *Phil. Trans. R. Soc. B* 365:1397-1403.

Biografija autora



Rodjen sam 7. septembra 1988. godine u Požarevcu. Osnovnu školu “Jovan Jovanović-Zmaj” sam završio u Pančevu 2003. godine. Od 2003. godine sam pohadjao prirodno-matematički smer gimnazije “Isidora Sekulić” u Novom Sadu. Odbranom maturskog rada sa naslovom “Ajnštajnova gravitacija i geometrija svemira” završavam srednjoškolsko obrazovanje 2007. godine. Iste godine upisujem studije fizike, smer astronomija sa astrofizikom, na Prirodno-matematičkom fakultetu u Novom Sadu. Završio sam osnovne četvorogodišnje studije na istom fakultetu sa diplomskim radom “Kerova metrika sa primenama u astrofizici“.

UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj:

RBR

Identifikacioni broj:

IBR

Tip dokumentacije:

TD

Monografska dokumentacija

Tip zapisa:

TZ

Tekstualni štampani materijal

Vrsta rada:

VR

Završni rad

Autor:

AU

Branislav Nikolić

Mentor:

MN

Prof. dr Zorica Svirčev

Naslov rada:

NR

Živi sistemi i produkcija entropije

Jezik publikacije:

JP

srpski (latinica)

Jezik izvoda:

JI

srpski/engleski

Zemlja publikovanja:

ZP

Srbija

Uže geografsko područje:

UGP

Vojvodina

Godina:

GO

2012

Izdavač:

IZ

Autorski reprint

Mesto i adresa:

MA

Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

Fizički opis rada:

FO

broj poglavlja-7, broj strana-43, broj referenci-69, broj slika-10

Naučna oblast:

NO

Fizika

Naučna disciplina:

ND

Astrobiologija

Predmetna odrednica/ ključne reči:

PO

Živi sistemi, entropija, produkcija entropije

UDK

Čuva se:

ČU

Biblioteka departmana za fiziku, PMF-a u Novom Sadu

Važna napomena:

VN

nema

Izvod:

IZ

U radu je prikazan jedan nov opis mehanizma funkcionsanja živih sistema u formi jednog fundamentalnog logičkog principa. Ovaj opis je univerzalan i nezavisan od biohemije na Zemlji i temelji se samo na nekoliko fizičkih

zakona i logici. Takodje je ovaj princip predstavljen i kao graf, te je ukazano i na njegovu potencijalnu primenu u biološkim naukama. U radu je predstavljena teorijska osnova primene ovakvog novog opisa, kroz pojmove entropije i produkcije entropije koji su veoma bitni u slučaju živih sistema. Takodje su pomenuti novi aspekti koji sagledavaju poznate aktivnosti živih sistema iz jednog sasvim drugačijeg ugla i dat je značaj ovakvog novog opisa živih sistema za astrobiologiju.

Datum prihvatanja teme od NN veća:

DP

Datum odbrane:

DO

Članovi komisije:

KO

Predsednik:

Prof. dr Mira Terzić

član,mentor:

Prof. dr Zorica Svirčev

član:

Prof. dr Milan Pantić

UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF SCIENCE AND MATHEMATICS

KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number:

ANO

Identification number:

INO

Document type:

DT

Type of record:

TR

Content code:

CC

Author:

AU

Mentor/comentor:

MN

Title:

TI

Language of text:

LT

Language of abstract:

LA

Country of publication:

CP

Locality of publication:

LP

Publication year:

PY

Publisher:

PU

Publication place:

PP

Physical description:

PD

Scientific field:

SF

Scientific discipline:

SD

Subject/ Key words:

SKW

UC

Holding data:

HD

Note:

N

Abstract: A new description of living system's functioning mechanism is presented in the form of a fundamental logical principle. This description is universal and independent of biochemistry on Earth and it is based on just a few physical laws and logic. Also, this principle is presented as a mathematical graph and its potential application in biological sciences is emphasized. A theoretical basis of application of this new description is also presented, in terms of entropy and entropy production which are very important in the

AB

case of living systems. Also, new aspects which turn to known living systems' activity from a different perspective are also presented, as well as the importance of this new description of living systems for astrobiology.

Accepted by the Scientific Board:

ASB

Defended on:

DE

Thesis defend board:

DB

President:

Prof. dr Mira Terzić

Member, advisor:

Prof. dr Zorica Svirčev

Member:

Prof. dr Milan Pantić