

UNIVERZITET U BEOGRADU  
FILOZOFSKI FAKULTET

Jovan Tadić

**FILOZOFSKI ASPEKTI BIOLOŠKE KOMPLEKSNOŠTI**

Doktorska disertacija

Beograd, 2024

UNIVERSITY OF BELGRADE  
FACULTY OF PHILOSOPHY

Jovan Tadić

**PHILOSOPHICAL ASPECTS OF BIOLOGICAL COMPLEXITY**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2024

## **Informacije o Mentoru i članovima Komisije**

### **Mentor:**

prof. dr Slobodan Perović, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu, Filozofski fakultet

### **Članovi Komisije:**

dr Miloš Adžić, vanredni profesor, Univerzitet u Beogradu, Filozofski fakultet

dr Eva Kamerer, docent, Univerzitet u Beogradu, Filozofski fakultet

dr Andrej Korenić, naučni saradnik, Univerzitet u Beogradu, Biološki fakultet

**Datum odbrane:** \_\_\_\_\_

## *Izjave zahvalnosti*

Materijalizacija doktorske teze, i pored činjenice da je pisac jedan, predstavlja kulminaciju složenog procesa idejnog uobličavanja, tehničkog upoznavanja sa literaturom, preispitivanje mogućih pravaca daljeg razvoja oblasti, ali i tehničko i stilsko prilagođavanje rada važećim akademskim standardima. U tom procesu, uživao sam podršku mentora, više profesora, prijatelja, i članova porodice. Ovom prilikom se zahvaljujem svom mentoru, prof. dr Slobodanu Peroviću koji mi je pomogao u svakoj od gore navedenih faza, uključujući i aktivno učestvovanje u pisanju filozofskog rada, koji je trenutno u pripremi. Želim da se zahvalim i članovima Komisije, dr Milošu Adžiću, dr Evi Kamerer, i dr Andreju Koreniću na saradnji i vremenu utrošenom da se disertacija stilski i tematski dovede u željeno stanje. Posebnu zahvalnost dugujem dr. Daršanu Ajeru za pomoć u instalaciji i formiranju kompjuterskog okruženja za izvođenje dela simulacija baziranih na AVIDA ED softveru. Konačno, zahvaljujem se svojoj porodici koja je našla načina i snage da neometano funkcioniše u uslovima mog smanjenog prisustva tokom izvođenja eksperimenata, proučavanja literature i pisanja disertacije.

# FILOZOFSKI ASPEKTI BIOLOŠKE KOMPLEKSNOSTI

## *Rezime*

Ova disertacija se fokusira na dva glavna cilja istraživanja. Prvi je ekstenzivno proučavanje relevantne literature na temu biološke kompleksnosti, sa akcentom ili na najnovija istraživanja, ili na još uvek kontroverzne teme. Biološka kompleksnost je višeslojan pojam koji se može analizirati i parcijalno, iz pravca pojedinačnih naučnih disciplina, i holistički. Razumevanje ovog fenomena direktno utiče na odgovore na fundamentalna pitanja o prirodi i poreklu života, i principima koji upravljaju živim sistemima. U filozofiji nauke analiza biološke kompleksnosti prepliće se sa redukcionizmom, odnosno pitanjem da li se kompleksni biološki fenomeni mogu objasniti razlaganjem na jednostavnije komponente. U teologiji, tema često igra centralnu ulogu u raspravama o svrsi i dizajnu. U etici i ekološkoj etici biološka kompleksnost igra centralno mesto u raspravama o vrednosnom statusu živih bića na različitim nivoima hijerarhije kompleksnosti, i konsekvantno, odnosu čovečanstva sa prirodnim svetom i etičkom postupanju prema drugim vrstama i posledicama narušavanja kompleksnih ekoloških sistema. Tema je povezana i sa raspravama o identitetu i individualnosti, jer se tiče postavljanja granice između organizma i sredine, odnosno teorijskog tretmana sistema organizam-sredina. Na kraju, ova tema je izrazito interdisciplinarna, na razmeđu biologije, fizike, hemije, filozofije, informatike i drugih disciplina. Ova interdisciplinarnost podstiče filozofska razmišljanja o integraciji različitih naučnih disciplina, prirodi naučne saradnje i epistemološkim izazovima povezanim sa premošćavanjem različitih polja saznanja i delatnosti.

Drugi deo teze je samostalno-istraživački i u njemu se analiziraju filozofske i teorijsko-biološke posledice usvajanja specifičnih narativa vezanih za poreklo i trend biološke kompleksnosti, odnosa kompleksnosti i simetrije, kao i biološke kompleksnosti kao alata u funkciji osvajanja novih ekoloških niša ili zadržavanja starih. Drugi deo se neposredno oslanja na seriju samostalnih kompjuterskih, digitalnih simulacija evolucije, korišćenjem tri simulatora samostalno i specifično razvijena za potrebe ove disertacije, dok je kao četvrta simulaciona platforma iskorišćena jedna od najpopularnijih simulacionih platformi ovog tipa – AVIDA ED, Univerziteta u Mičigenu. Sintezom informacija iz literature i sopstvenih eksperimentalnih zapažanja pokušali smo da dodatno osvetlimo problem biološke kompleksnosti i, ako ne da damo konačne odgovore, ukažemo na pravac u kom bi ih trebalo tražiti. U prvom delu su predstavljeni i glavni izazovi u konstituisanju pojma biološke kompleksnosti, i u odnosu na fizičku kompleksnost i u odnosu na njegov antipod —

nekompleksnost, kao i relevantni zakoni i teorije koji igraju ključnu ulogu u razvoju ili objašnjavanju geneze i osobina biološke kompleksnosti, poput Ešbijeveg zakona i Ajgenovih hiperciklusa.

Problem biološke kompleksnosti, pa i kompleksnosti uopšte, započinje već određivanjem semantičkog sadržaja pojma kompleksnosti. S obzirom da se radi o problemu koji se obrađuje u okviru različitih naučnih disciplina, ne čudi heterogenost i, ponekad, dispartnost specijalizovanih terminoloških okvira razvijenih za potrebe ova analize u okviru različitih naučnih disciplina. Kao početne ciljeve rada usvojili smo pretresanje pojmovnog okvira teorija kompleksnosti, prikaz najčešćih problema koji se susreću u pokušajima definisanja pojma kompleksnosti, ali i analizu specijalnih vidova kompleksnosti od kojih je jedan - biološka kompleksnost, i osnovna tema ovog rada. Pored bavljenja terminološkim okvirom, u početnim odeljcima prikazali smo različite definicije, ili možda preciznije, pokušaje definisanja, pojma kompleksnosti kao i tri specifična teorijska konstrukta koji će igrati važnu ulogu u odeljcima koji slede: Ešbijeve zakon koji pojmu kompleksnosti pristupa iz pravca kibernetičke teorije, zatim specifična svojstva odnosa simetrija-kompleksnost, i na kraju Ajgenove hipercikluse kao jedan od pokušaja objašnjenja predbiološke evolucije kompleksnosti.

U sledećim odeljcima, fokusirajući se na biološku kompleksnost, pokušali smo da prikazemo vladajuće neodarvinističko stanovište u objašnjenju evolucije biološke kompleksnosti bazirano na Modernoj sintezi, ali i novije, alternativno, neutralističko stanovište kroz dve neadaptacionističke teorije, konstruktivnu neutralnu evoluciju i Kimurinu neutralnu teoriju evolucije. S obzirom da se u ovom delu primarno bavimo poreklom biološke kompleksnosti, nakratko ćemo se osvrnuti i na dva kreacionistička argumenta, iz dva razloga. Prvo, u poslednje vreme kao da raste popularnost alternativnih interpretacija fizičke realnosti, a u okviru tog fenomena i oživljavanje kreacionističkih argumenata, usled čega raste njihov društveni uticaj bez obzira na unutrašnje slabosti. Drugi je što se kroz polemiku sa kreacionizmom može dati relativno brzi i lak uvod u neke aspekte fenomena biološke kompleksnosti, na primer informatičke.

Nakon porekla, fokus premeštamo na trend biološke kompleksnosti, temu na izvestan način kontroverznu i direktno u vezi sa odnosom prirodna selekcija – biološka kompleksnost, dakle indirektno i u vezi sa epistemološkim statusom neodarvinizma. Prikazaćemo osnove dva pogleda na biološku kompleksnost — kao numeričkog atributa evolutivnog procesa koji raste uzrokovan prirodnom selekcijom, i kao pasivne kolaterale procesa slučajne diversifikacije

života. Ova dva pogleda impliciraju različite osobine krive trenda biološke kompleksnosti, koje ćemo detaljno predstaviti.

U posljednjem delu, koji predstavlja kulminaciju rada i samostalni doprinos osvetljavanju nekih od gore pomenutih tema, predstavili smo rezultate simulacija razvoja biološke kompleksnosti, i u kontekstu distinkcije aktivan-pasivan, i iz ugla odnosa prema simetriji, i u smislu monotonije trenda biološke kompleksnosti. Preispitali smo eksperimentalne i teorijske osnove Guldovih zaključaka koji su promenili klimu u ovoj naučnoj oblasti i pokrenuli debate koje i danas traju. Zaključili smo, iz sopstvenih simulacija, da je pretpostavka minimalne biološke kompleksnosti neophodne za samo-održivi samoreprodukujući sistem, koji zovemo život, dovoljna da trend razvoja biološke kompleksnosti učini pseudo-aktivnim. Rad smo završili razmatranjem osnovnih pitanja o trendu biološke kompleksnosti, njenim uzrocima, osobinama krive rasta, i opštijim razmatranjima, u formi filozofskog dijaloga.

**Ključne reči:** Biološka kompleksnost; Teorija evolucije; Prirodna selekcija; Digitalni organizmi; Igra života; Stiven Guld.

**Naučna oblast:** Filozofija.

**Uža naučna oblast:** Filozofija biologije.

## PHILOSOPHICAL ASPECTS OF BIOLOGICAL COMPLEXITY

### *Summary*

This dissertation focuses on two main research objectives. The first is an extensive examination of relevant literature, with an emphasis on either the latest research or still controversial topics. Biological complexity is a multi-layered concept that can be analyzed both partially, from the perspective of individual scientific disciplines, and holistically. Understanding this phenomenon directly influences responses to fundamental questions about the nature and origin of life and the principles governing living systems. In the philosophy of science, the analysis of biological complexity intersects with reductionism, questioning whether complex biological phenomena can be explained by breaking them down into simpler components. In theology, the topic often plays a central role in discussions about purpose and

design. In ethics and environmental ethics, biological complexity occupies a central place in debates about the intrinsic value of living beings at different levels of complexity hierarchy and, consequently, humanity's relationship with the natural world and ethical treatment of other species, considering the consequences of disrupting complex ecological systems. The theme is also related to discussions about identity and individuality, addressing the delineation between organisms and their environment, as well as the theoretical treatment of the organism-environment system. Ultimately, this topic is highly interdisciplinary, at the intersection of biology, physics, chemistry, philosophy, computer science, and other disciplines. This interdisciplinary nature stimulates philosophical reflections on the integration of different scientific disciplines, the nature of scientific collaboration, and the epistemological challenges associated with bridging different fields of cognitive activity.

The second is an independent research part, representing a series of computer simulations of evolution, using three simulators developed specifically for this dissertation's needs. The fourth simulation platform used is one of the most popular simulation platforms of this type - AVIDA ED, from the University of Michigan. By synthesizing information from the literature, we aim to shed additional light on the problem of biological complexity and, if not provide definitive answers, at least indicate the direction in which to search for them. In the first part, we present the main challenges in constituting the concept of biological complexity, both in relation to physical complexity and its opposite - simplicity, as well as relevant laws and theories that play a crucial role in the development or explanation of the genesis and properties of biological complexity, such as Ashby's law and Eigen's hypercycles.

The problem of biological complexity, and complexity in general, begins with determining the semantic content of the concept of complexity. Since this is a problem addressed within different scientific disciplines, the heterogeneity and sometimes disparity of specialized terminological frameworks developed for the purposes of this analysis across different scientific disciplines are not surprising. As initial goals of the work, we adopted the examination of the conceptual framework of complexity theories, the presentation of the most common problems encountered in attempts to define the concept of complexity, as well as the analysis of special forms of complexity, one of which is biological complexity, the fundamental topic of this work. In addition to dealing with the terminological framework, in the initial sections, we showed different definitions, or more precisely, attempts to define, the concept of complexity, as well as three specific theoretical constructs that will play an important role in the following sections: Ashby's law, which approaches the concept of complexity from the

perspective of cybernetic theory, then the specific properties of the relationship between symmetry and complexity, and finally, Eigen's hypercycles as one attempt to explain the prebiotic evolution of complexity.

In the following sections, focusing on biological complexity, we attempted to present the prevailing neo-Darwinian standpoint in explaining the evolution of biological complexity based on the Modern Synthesis. We also explored newer, alternative, naturalistic viewpoints through two non-adaptationist theories: Constructive Neutral Evolution and Kimura's Neutral Theory of Evolution. Since in this part, we primarily deal with the origin of biological complexity, we will briefly touch on two creationist arguments for two reasons. First, there seems to be a growing popularity of alternative interpretations of physical reality, and within that phenomenon, a revival of creationist arguments, which increases their societal influence regardless of internal weaknesses. The second reason is that through the debate with creationism, a relatively quick and easy introduction to some aspects of the phenomenon of biological complexity can be provided, such as informatics.

After discussing the origin, we shift focus to the trend of biological complexity, a somewhat controversial topic directly related to the relationship between natural selection and biological complexity, and indirectly related to the epistemological status of neo-Darwinism. We will present the basics of two views on biological complexity – as a numerical attribute of the evolutionary process that grows due to natural selection, and as passive collateral of the process of random life diversification. These two views imply different properties of the curve of the trend of biological complexity, which we will present in detail.

In the last part, representing the culmination of the work and an independent contribution to illuminating some of the aforementioned topics, we presented the results of simulations of the development of biological complexity. We explored the distinction between an active and passive trend, the relationship with symmetry, and the monotony of the trend of biological complexity. We re-examined the experimental and theoretical foundations of Gould's conclusions that changed the climate in this scientific field and sparked debates that continue to this day. From our simulations, we concluded that the assumption of minimal biological complexity necessary for a self-sustaining self-replicating system, which we call life, is sufficient to make the trend of the development of biological complexity pseudo-active. We concluded the work by considering fundamental questions about the trend of biological complexity, its causes, the properties of the growth curve, and general considerations, in the form of an internal philosophical dialogue.

**Keywords:** Biological complexity; Evolutionary theory; Natural selection; Digital organisms; Game of Life; Stephen J. Gould.

**Scientific Field:** Philosophy.

**Narrow Scientific Field:** Philosophy of Biology.

## *Sadržaj*

Uvod.....	1
Sažetak poglavlja.....	2
1.    Problem kompleksnosti.....	5
1.1.    Šta je kompleksnost? .....	6
1.2.    Semantički okvir pojma biološke kompleksnosti .....	12
1.3.    Da li se kompleksnost generalno povećava sa vremenom? .....	18
1.4.    Ešbijejev zakon.....	26
1.5.    Odnos simetrije i kompleksnosti.....	33
1.6.    Ajgenovi hiperciklusi i predbiološka evolucija kompleksnosti .....	40
2.    Poreklo biološke kompleksnosti.....	44
2.1.    Moderna sinteza - adaptacionizam kao uzrok biološke kompleksnosti.....	45
2.2.    Neadaptacionističke teorije nastanka biološke kompleksnosti — Konstruktivna neutralna evolucija (KNE) i Kimurina neutralna evolucija.....	54
2.2.1.    Problemi neutralističkih pogleda na evolucionu istoriju.....	68
2.3.    Kratak osvrt na kreacionizam — argumenti Bihija i Dembskog .....	72
2.3.1.    Bihijejev argument .....	73
2.3.2.    Argument Dembskog.....	76
3.    Trend biološke kompleksnosti: Uloga prirodne selekcije .....	78
3.1.    Karakterizacija mogućih trendova biološke kompleksnosti.....	79
3.1.1.    Pasivan trend biološke kompleksnosti — Guldova hipoteza levog zida i sedam argumenata protiv evolucionog progresa .....	80
3.1.2.    Aktivan trend biološke kompleksnosti.....	94
3.2.    Prirodna selekcija kao “Maksvelov demon”: Digitalna evolucija u ulozi arbitra.....	99
4.    Razvoj simulatora trenda i drugih osobina biološke kompleksnosti.....	108
4.1.    Reprodukcija Guldovih ideja — simulacija pasivnog trenda u evoluciji kompleksnosti ....	109

4.1.1.	Rezultati simulacije statističkih osobina krive pasivnog i aktivnog temporalnog porasta kompleksnosti i analiza uzroka ramena .....	112
4.1.2.	Da li je Gulfov zid zapravo električna ograda, i da li izmena heurističke metafore menja zaključke? .....	115
4.2.	Poreklo simetrije i asimetrije u kontekstu biološke evolucije i ispitivanje efekata razaranja Markovljevih lanaca na njene ishode .....	118
4.2.1.	Uvod u ćelijske automate i osnovne pojmove Igre života .....	121
4.2.2.	Razvoj simulacione platforme — uvođenje stohastičnosti .....	124
4.2.3.	„Brute force“ pretraga obrazaca .....	125
4.2.4.	Diskretizacija evolucije po principu <i>svi-odjednom</i> i vezani problemi .....	127
4.2.5.	„Igra života“ i lanci Markova.....	127
4.2.6.	<i>Ex nihilo</i> generisanje simetrije.....	129
4.3.	Razvoj simulatora biološke evolucije na nivou individualnih organizama i preispitivanje odnosa aktivan–pasivan trend iz nove perspektive.....	132
4.3.1.	Simulacija neograničene populacije.....	134
4.3.2.	Simulacija ograničene populacije .....	137
4.4.	Simulacije korišćenjem AVIDA-ED simulacione platforme.....	138
4.4.1.	Šta je AVIDA-ED? .....	138
4.4.2.	Pojmovni okvir AVIDE .....	139
4.4.3.	Simulacije korišćenjem AVIDA-ED platforme .....	142
Zaključak .....		147
Bibliografija .....		155

## Uvod

Biološka kompleksnost predstavlja jedno od najintragantnijih i najdubljih pitanja u domenu biologije i evolucije. Kroz milijarde godina evolucionih procesa, živi svet je pokazao fascinantan razvoj u pogledu veličine tela, načina ishrane, složenosti mozga, nervnog sistema uopšteno govoreći i ponašanja, socijalne organizacije, i sposobnosti uticaja na svoju okolinu. Pa ipak, unutrašnji i spoljašnji pokretači ovog razvoja, kao i njihov međusobni odnos, i dalje su delimično kontroverzna tema i kao takvi predmet tekućih debata. Da problem bude još teži, konstituisanje kompleksnosti kao atributa i živog i neživog sveta samo po sebi predstavlja problem, jer se razvoj teorijskog okvira koji bi zaokružio problem kompleksnosti odvijao decentralizovano i neusklađeno, u više raznorodnih naučnih i filozofskih oblasti, sa disparatnim terminološkim okvirima specifičnim za svaku od njih. Još uvek čekamo objedinjujuću, sintetičku teoriju kompleksnosti.

U ovom radu smo izneli sopstvene stavove na temu više važnih pitanja: 1) Da li postoji uopšte trend biološke kompleksnosti? Ako postoji, kakav je?; 2) Šta se dešava sa kompleksnošću u stacionarnom okruženju?; 3) Da li je stalna smena okruženja konstanta koja pruža globalno-stacionarni okvir za razvoj trajnog trenda nekih osobina, možda i kompleksnosti?; 4) Da li postoji razlog za veru u nestohastičnu smenu okruženja?; i 5) Da li postoji evolutivna konvergencija i šta je pokreće? Ponudjeni odgovori na ova pitanja su bazirani na ekstenzivnom proučavanju literature, sa posebnim akcentom na novije radove, ali i rezultate sopstvenih simulacije, takođe predstavljenih u ovom radu.

U radu istražujemo suštinske aspekte biološke kompleksnosti i kompleksnosti uopšte, razbijajući je na ključne konstitutivne teme, kako bismo bolje razumeli njenu prirodu, poreklo i evolutivne trendove. Suočavamo se i sa samim pojmom kompleksnosti u pokušaju da definišemo njene različite dimenzije, poreklo, i trendove u biološkom svetu. Posebnu pažnju posvećujemo odnosu prirodna selekcija – biološka kompleksnost, jer se razumevanje ovog odnosa javlja kao ključan arbitražni element u sukobu (neo)darvinističkih i anti-darvinističkih teorija i hipoteza, kao i pitanju trenda biološke kompleksnosti, i u smislu samog postojanja, i u smislu njegovih osobina.

Ovaj rad predstavlja pokušaj i teorijskog i praktičnog istraživanja dubokih slojeva biološke kompleksnosti, kombinujući teorijsku analizu i kompjuterske simulacije. U radu predstavljamo odabrane teorije, zakone, hipoteze i heurističke modele važne za razumevanje

biološke kompleksnosti, kao što su npr. Guldova hipoteza levog zida ili Konstruktivna neutralna evolucija, kako bismo stvorili osnovu za uvod u, i shvatanje, kompleksnosti života i njegove evolutivne dinamike. Kroz multidisciplinarnu analizu predstavljamo odgovorena ključna pitanja koja prožimaju biološku evoluciju i status kompleksnosti u njoj.

Kao kolateralni, ali ne manje važan, doprinos ovog rada istakli bismo analizu nekoliko pomoćnih hipoteza i zakona, poput Ešbijeovog zakona koji reguliše pitanje interakcija agent–sredina i van okvira analize biološke kompleksnosti, ili biologije uopšte, kao i Ajgenovih hiperciklusa koji se tiču pre svega predbiološke, dakle hemijske, evolucije, sve do stepena kompleksnosti koji je rezultovao paljenjem iskre života kroz formiranje samo-održivih samoreprodukujućih sistema, koje uobičajeno nazivamo živim bićima.

Posebna pažnja u radu je posvećena eksperimentalnom preispitivanju važnih ideja i hipoteza, sa fokusom na Guldove (Gould, 1996) argumente protiv aktivnog trenda biološke kompleksnosti, kao i njegove kritike evolucionog progresu. U tom cilju razvijeni su originalni evolucionari simulatori, koji su integralni deo ovog rada. Kroz višestruke simulacije pokušali smo da proverimo validnost Guldovih zaključaka o osobinama krive rasta kompleksnosti u evolucionom procesu, kao i njegove teorijske implikacije. Analizirali smo i pitanje postojanja simetričnih atraktora, s obzirom da većina organizama danas pokazuje ili radijalnu ili bilateralnu simetriju. Analizirali smo mogućnost ostvarivanja disimetričnih stanja, koja su gotovo pravilo u biologiji, sa posebnim akcentom na ulogu stohastičnosti u ovom procesu. Na kraju, kroz simulacije smo delimično osvetlili i problem prirode ekoloških niša i problem neponovljivosti sveta kao efekta slučajnosti u evolucionom procesu.

## **Sažetak poglavlja**

Disertacija je organizovana u četiri, semantički, logički i epistemološki zasebna poglavlja, ali uz neizbežna preplitanja. U prvom poglavlju analiziran je sam pojam kompleksnosti iz nekoliko pravaca, s obzirom da je kompleksnost kao tema predmet proučavanja u više naučnih i van-naučnih disciplina, uključujući kibernetiku, informatičke teorije, fiziku, biologiju, društvene nauke, filozofiju, itd, pa i teologiju. U radu je takođe analizirano kontroverzno pitanje trenda kompleksnosti, i u biologiji („biološke kompleksnosti“) i u kosmologiji („fizičke kompleksnosti“). Posebna pažnja posvećena je demarkacionoj liniji između fizičke i biološke kompleksnosti. Pri kraju prvog poglavlja predstavljen je Ešbijeov zakon koji se odnosi na interakcije organizam–sredina iz perspektive

kompleksnosti, kao i opšti odnos pojma kompleksnosti prema pojmu simetrije. U poslednjem delu poglavlja predstavljeni su Ajgenovi hiperciklusi, kao jedna od teorija koja pretenduje da objasni predbiološku (hemijsku) genezu kompleksnosti do nivoa neophodnog za paljenje iskre samo-održivog života.

Drugo poglavlje disertacije se fokusira na pitanja porekla biološke kompleksnosti, kroz prizmu vladajuće neodarvinističke paradigme, ali i alternative koje pretenduju da je zamene, ili bar dopune, u vidu neutralističkih teorija — Konstruktivne neutralne evolucije i Kimurine teorije neutralne evolucije. U ovom delu predstavljene su hipoteze, ideje i slabosti vladajuće paradigme, kao sve brojnije eksperimentalne potvrde neutralizma, naročito u domenu mikrobiologije i biohemije. Kroz detaljnu elaboraciju ova dva pravca mišljenja implicitno je odslikan i njihov međusobni odnos. U ovom poglavlju je zaokružen i terminološki okvir evolucionih teorija koji će se javljati i u poglavljima koja slede. U njemu su prikazani i aksiološki aspekti u teorijama evolucionog procesa, uglavnom uzrokovani antropocentričnim projekcijama.

U trećem poglavlju disertacija se bavi kontroverznim pitanjem trenda biološke kompleksnosti, odnosno pitanjem da li je povećanje kompleksnosti pasivna posledica diversifikacije života — kako je to argumentovao Guld — ili je prirodna selekcija uzrok kompleksnosti, što bi impliciralo da je trend povećanja biološke kompleksnosti aktivan. U ovom poglavlju analizirano je sedam Guldovih argumenata protiv progresa u evoluciji, uključujući kompleksnost, kao i njihove slabosti. Dodatno, prikazani su i eksperimentalni argumenti s jedne strane bazirani na analizi fosilnih ostataka, a sa druge na sve popularnijim digitalnim simulacijama. Detaljno su obrađena očekivana statistička svojstva krive trenda biološke kompleksnosti i u slučaju aktivnog, i u slučaju pasivnog trenda, s obzirom da će se upravo ova statistička svojstva verovatno koristiti u konačnoj arbitraži vezano za prirodu trenda biološke kompleksnosti.

U poslednjem, četvrtom poglavlju predstavili smo sopstvene kompjuterske simulacije nekoliko važnih aspekata biološke evolucije, sa akcentom na kompleksnost. U prvoj seriji simulacija smo kompleksnost tretirali kao atribut organizma, a ne kao derivat drugih atributa, i modelovali njenu evoluciju uz pretpostavku aktivnog i pasivnog trenda. U simulacijama je otkriveno da je Guld verovatno napravio važnu interpretativnu grešku kada je postulirao stacionarnost vrednosti modusa u pasivnom scenariju porasta biološke kompleksnosti. U ovom delu je analizirana i Guldova heuristička metafora "hoda pijanca" u objašnjavanju načina evolucije kompleksnosti, i ukazano da ona nosi skriveni semantički sadržaj koji se reflektuje i

na njegove zaključke. U simulacijama je otkriveno da samo postojanje Guldivog levog zida predstavlja generator aktivnog trenda kompleksnosti, kao i bilo kog svojstva koje se "slučajnim hodom" menja u blizini granične vrednosti, što implicira da je istovremena tvrdnja i o postojanju zida i o pasivnom trendu evolucije kompleksnosti *contradictio in adjecto*.

U sledećoj seriji simulacija korišćenjem drugačijeg simulatora razvijenog za potrebe ove disertacije, bavili smo se pitanjem geneze simetrije u biološkoj evoluciji kroz poseban simulacioni okvir poznat kao "Igra života". Simulacije su pokazale da se simetrična biološka stanja, odnosno forme, javljaju kao trajni ireverzibilni atraktori u determinističkom okruženju, i da je stohastičnost neophodna za narušavanje striktno simetrije i genezu narušene simetrije, kao jedne od osnovnih osobina kompleksnosti. U trećoj seriji simulacija korišćenjem još jednog *ad hoc* simulatora razvijenog za potrebe ove studije, bavili smo se simulacijom trenda kompleksnosti, ali ovog puta na indirektan način — kroz simulaciju samog evolucionog procesa, odnosno ekosistema, na nivou pojedinačnih organizama. Simulacijama je otkriveno da postoji nešto posebno u tretmanu reproduktivne moći organizama u odnosu na sve druge njihove attribute, i da svaka osobina, pa i kompleksnost, koja je u funkciji reproduktivne moći, pokazuje aktivan trend. Interesantno je da se u arhitekturi procesa nastajanja novih organizama kroz proces razmnožavanja, koji uočavamo u biološkom svetu, gde postoje jasni parovi predak–potomak a nastajanje novih organizama rezultuje iz neprekinute sekvence razmnožavanja prethodnih generacija, favorizovanje reproduktivne moći zapravo svodi na gotovo trivijalan zaključak o selekciji samog života, jer se reproduktivna moć identifikuje sa životom upravo kroz postojeću arhitekturu procesa njegovog nastajanja. Na kraju, u četvrtom setu simulacija korišćenjem simulacione platforme AVIDA-ED, ispitivano je sticanje i gubljenje specifičnih osobina organizama u okruženjima koja se menjaju. Pokazano je da stečene osobine, pa i kompleksnost, mogu nastati i nestati u evolutivnom procesu, već prema uslovima sredine, samo ako je to u funkciji preživljavanja, i da kompleksnost *per se* ne predstavlja evolutivnu prednost u opštem slučaju. Na kraju disertacije smo izneli sopstvene stavove na ključna pitanja u vezi biološke kompleksnosti.

## 1. Problem kompleksnosti

*„Kompleksnost je bilo postojanja, koje kucajući kroz ritam reda i nereda oblikuje tkanje realnosti.“*

*- Alfred Vajthed*

Kompleksnost — kao pojam, misaoni konstrukt, objektivna osobina stvarnosti ili fikcija — predstavlja izazov u različitim disciplinama, iz više razloga. Ona obuhvata raznovrsne aspekte, uključujući organizaciju, unutrašnje interakcije, i ponašanje različitih i često vrlo raznovrsnih sistema. Prvi izazov u definisanju kompleksnosti leži u njenom višeslojnom karakteru. Fizika, biologija, informatika i društvene nauke, pristupaju problemu kompleksnosti na različite načine. Na primer, u biologiji, kompleksnost može odražavati raznolikost organizama i njihovih međusobnih interakcija, dok u informatičkoj teoriji kompleksnost može biti povezana sa stepenom teškoće u rešavanju problema ili obradi informacija. Nastojanja da se kompleksnost definiše u fizici često se susreću s izazovima zbog dinamičkih i nelinearnih sistema koji su inherentno teški za analizu. Teorija haosa, na primer, donosi jedan pristup razumevanju kompleksnosti u dinamičkim sistemima, ali se i dalje postavlja pitanje da li to obuhvata sve aspekte ove složene pojave. U informatičkoj teoriji, kompleksnost se ponekad meri brojem operacija koje je potrebno izvršiti da bi se rešio određeni problem. Ovaj pristup, iako kvantitativan, može zanemariti kvalitativne aspekte kompleksnosti, kao što su uzajamne veze između elemenata sistema. U društvenim naukama, kompleksnost može biti povezana sa društvenim sistemima, mrežama, i ponašanjem grupa. Pokušaji da se ona definiše često uključuju elemente kao što su adaptacija na promene, neizvesnost i sukobi interesa, vrlo daleko od terminologije koju fizika upotrebljava u pokušajima karakterizacije kompleksnosti.

Definisanje i karakterizacija kompleksnosti je izazov koji verovatno zahteva interdisciplinarni pristup. Različite discipline nude različite perspektive posmatranja ove pojave, te se stvaranje sveobuhvatne definicije suočava sa teškoćama. Možda je ključno razumeti kompleksnost kao fluidan i promenljiv pojam koji može zavisiti od konteksta i perspektive iz koje se posmatra. Ovo otvara vrata daljim istraživanjima i dijalogu između različitih disciplina u cilju stvaranja sveobuhvatnijeg razumevanje kompleksnosti u svetu oko nas. Ovaj rad je samo još jedan skroman doprinos u tom pravcu.

## 1.1. Šta je kompleksnost?

*„Kompleksnost je jezik prirode, zapisan u obrascima haosa i reda, otkrivajući lepotu univerzuma.“*

*- Stiven Hoking*

Nažalost, u naučnoj i filozofskoj zajednici ne postoji konsenzus po pitanju definicije pojma kompleksnosti. Odsustvo konsenzusa otežava komunikaciju i dovodi do semantičkih nesporazuma (Adami, 2002). Problem konstituisanja pojma kompleksnosti i nedostatka konsenzusa po pitanju njene prirode se direktno reflektuje na nepostojanje opšteprihvataene metrike, odnosno jedinice kompleksnosti, a što dalje onemogućava kvantitativna poređenja stepena kompleksnosti različitih entiteta<sup>1</sup>. Dodatan problem predstavlja transdisciplinarnost u upotrebi i pojma i metrike kompleksnosti, koja se često nekritički ekstrapolira iz fizičkih (gde obično nastaje) u biološke nauke, iako se srodni pojmovi fizičke i biološke kompleksnosti ne podudaraju u potpunosti.

Obično se kompleksnost smatra karakteristikom sistema ili modela čije komponente interaguju na različite načine rezultujući u nelinearnosti, stohastičnosti, kolektivnoj dinamici, hijerarhiji i emergenciji<sup>2</sup> (Johnson, 2002; Santa Fe Institute, 2019). Kompleksnost kao atribut se, dakle, odnosi na sisteme koji su složeni, odnosno sastoje se iz više delova, tako da se može reći da se kao atribut kompleksnost odnosi na unutrašnju strukturu, ali se ovim značenje atributa kompleksnosti ne iscrpljuje. Pored referiranja na unutrašnju strukturu, atribut kompleksnosti referira i na tip unutrašnjih interakcija između delova većeg sistema, koje rezultuju emergencijom, odnosno nesvodivošću složenog sistema na skup delova koji ga čine. Definicija kompleksnosti često se svodi na reiteraciju teze Herberta Simona da su „sistemi u kojima je celina više od zbira njegovih delova kompleksni sistemi“ (Simon, 1991). Zbog ovoga, pojam

---

<sup>1</sup> Na ovom mestu je upotrebljen relativno apstraktan pojam entiteta jer se kompleksnost kao atribut može odnositi na širok spektar objekata – skupova, procesa, relacija, fizičkih i bioloških objekata, itd.

<sup>2</sup> Emergencija se u gore navedenoj tvrdnji interpretira u skladu sa tzv. jakom tezom o emergenciji, koja kaže da emergentne osobine nisu, ni praktično, ni u principu, reducibilne na osobine njihovih sastavnih delova ili komponenti nižeg nivoa. Drugim rečima, emergentne osobine se ne mogu u potpunosti objasniti ili predvideti analizom samo pojedinačnih komponenti. Jaka emergencija implicira značajnu ontološku razliku između različitih nivoa stvarnosti, i često dovodi do gledišta da mogu postojati uzročne interakcije između emergentnih osobina i njihovih osnovnih komponenata koje se ne mogu objasniti samo nižim nivoima osobina. Slaba teza o emergenciji, s druge strane, priznaje da emergentne osobine zaista nastaju iz interakcija komponenata nižeg nivoa, ali tvrdi da se ove emergentne osobine konačno mogu objasniti ili razumeti u terminima interakcija i osobina osnovnih komponenata.

kompleksnosti ima poseban odnos prema pojmu emergencije. Trenutno u opticaju postoji više od 30 različitih matematičkih opisa kompleksnosti (Gell-Mann and Lloyd, 1996).

Adami (2002) posebno ističe problem nedostatka univerzalno prihvatljive metrike (jedinice) kompleksnosti bioloških sistema. On primećuje da se jasno izdvajaju dve dominantne naučne zajednice zainteresovane za jasno konstituisanje pojma kompleksnosti. Prvu čine fizičari koji se bave dinamičkim sistemima i koji žele da atribut kompleksnosti prevedu iz kvalitativnog u kvantitativan domen i koriste ga u svojim matematičkim modelima, dok drugu čine evolutivni biolozi koji imaju za cilj kvantitativnu i statističku analizu evolutivnog trenda kompleksnosti bioloških sistema. U prvom slučaju, kompleksnost dinamičkih fizičkih sistema se interpretira kao kompjutaciona kompleksnost. Naime, s obzirom da se prema dinamičkim sistemskim teorijama svaki dinamički proces može predstaviti kao kompjutacija, kompleksnost se mora odnositi na sam apstraktni automat (mašinu sa konačnim brojem unutrašnjih stanja) koji generiše sekvencu koja reprezentuje posmatrani dinamički sistem.<sup>3</sup>

Drugi autori su problemu karakterizacije pojma opšte kompleksnosti pristupali na sličan, ali ne identičan način. Gelman (Gell-Mann, 2002) smatra da se uobičajeno shvatanje kompleksnosti zapravo suštinski svodi na osobinu koju on naziva "efektivna kompleksnost". Efektivna kompleksnost se, po Gelmanu, svodi na dužinu potrebne koncizne deskripcije pravilnosti (engl. *regularities*) posmatranog objekta, da bi se one iscrpno opisale.<sup>4</sup> Jedna književna novela smatra se kompleksnom ako sadrži veliki broj scena, zapleta, radnji, karaktera, itd, a koje spadaju u pravilnosti koje konstituišu efektivnu kompleksnost te novele. Autor ističe da je hijerarhijska struktura u kojoj se podsistemi uklapaju u veće organizacione celine, takođe neophodan preduslov kompleksnosti i deo navedenih pravilnosti. Obzirom da je kompleksnost svedena na efektivnu kompleksnost, a ona na opis pravilnosti, postavlja se pitanje šta su zapravo pravilnosti objekta? Međuigra pravilnosti i slučajne komponente kompleksnosti je sveprisutna, na primer dok slušamo muziku na radio stanici šum koji se neizbežno javlja predstavlja slučajnu komponentu kompleksnosti, a isti princip se može primeniti gde god postoji signal i prateći šum. U proizvodnim procesima, odnos specifikovanih osobina objekta proizvodnje i njegovih varijacija u granicama tolerancije je zapravo odnos

---

<sup>3</sup> Adami (2002) eksplicitno navodi dve metrike kompleksnosti dinamičkih sistema razvijene unutar zajednice fizičara — kriterijum termodinamičke dubine (Lloyd and Pagels, 1986) i kriterijum statističke kompleksnosti (Crutchfield and Young, 1989), ali naglašava da obe pokazuju ozbiljne slabosti.

<sup>4</sup> Uvođenje razlike između deskripcije *pravilnosti* objekta i celine objekta na ovom mestu čini se važno, jer će se, kao što ćemo pokazati kasnije u delu koji se tiče Perakovog argumenta i anti-kreacionističkih argumenata, ova razlika pojaviti kao ključna u izbegavanju tvrdnje da je, na primer, slučajno nastala grudva blata kompleksnija od polirane, matematički savršene, mermerne kugle.

pravilne i slučajne komponente kompleksnosti. Kod bioloških objekata, čini se da razlika između genotipskih i fenotipskih osobina odgovara slučajnoj komponenti kompleksnosti.

Interesantno je da Gelman smatra da, na kraju krajeva, demarkaciona linija između pravilnog i slučajnog zavisi od toga *šta je važno*, iako arbitrar u ovom evaluiranju ne mora čak ni da bude čovek, ili uopšte živo biće. Kao primer, on navodi pesmu mužjaka neke ptice, u čijoj melodiji ženka prepoznaje pravilnosti koje su važne za ocenu privlačnosti istog u smislu budućeg sparivanja, a drugi mužjaci one elemente koji su važni za demarkaciju njegove teritorije u odnosu na njihove. Da bi dalje razvio pojam efektivne kompleksnosti i smislu njegove tehničke definicije, autor uvodi novi pojam, informacioni algoritamski sadržaj (IAS). Informacioni algoritamski sadržaj je, ukratko, minimalna dužina programa na zamišljenom kompjuteru koji je neophodan da se odštampa "string" (niz slovnih simbola) koji reprezentuje, odnosno kodira kompletan opis tog objekta. Informacioni algoritamski sadržaj sadrži dve komponente, jednu koja se odnosi na pravilnosti, i drugi koja se odnosi na slučajne komponente kompleksnosti. Na ovom mestu, Gelman koketira i sa platonizmom, jer smatra da su pravilnosti u objektu upravo one osobine objekta koje ga čine pripadnikom klase istorodnih objekata, što neodoljivo podseća na Platonove Ideje. Efektivna kompleksnost se, zaključuje Gelman, svodi na informacioni algoritamski sadržaj skupa istorodnih objekata, pri čemu se osobine ili aspekti po kojima su grupisani, odnosno koji se posmatraju, određuju arbitrarno.

Veber (Weber, 2005) takođe ističe probleme i u praktičnoj sferi, i u teoretskoj upotrebi pojma "kompleksnosti". Veber se osvrće na značenje originalne latinske reči "complexus", koja označava "upetljano" ili "isprepletano zajedno", preuzimajući početni pristup analizi kompleksnosti iz Hejlingena (Heylighen, 1999). Prema njoj, da bi se stvorio kompleksan objekat, potrebne su dve ili više komponenti koje su spojene na takav način da ih je teško razdvojiti. Slično tome, Oksfordski rečnik definiše nešto kao "kompleksno" ako je "napravljeno od (obično nekoliko) tesno povezanih delova". Ovde nalazimo osnovnu dualnost između delova koji su istovremeno različiti i povezani, pa se semantički sadržaj pojma kompleksnosti delimično podudara i sa sadržajem pojma totalitet. Kompleksnost se, dakle, povećava kada se povećava raznolikost i međuzavisnost delova ili aspekata objekta u barem jednoj dimenziji, iako je stanje ostalo nepromenjeno u svim ostalim dimenzijama. Veber, kao kasnije i Rozenhed i saradnici (Rosenhead *et al*, 2019) uočava da se bavljenje kompleksnošću, iako sve više konstituisano u jednu disciplinu poznatu kao Teorija kompleksnosti, ipak decentralizovano odvija u posebnim naučnim domenima koji pokrivaju širok spektar nauka poput astronomije, hemije, evolucione biologije, geologije, i meteorologije.

I ovde se problem metrike kompleksnosti stavlja u prvi plan, pa Veber prenosi definiciju kompleksnosti preuzetu od "Instituta za standarde i tehnologiju SAD" koja glasi da je kompleksnost „intrinzična minimalna količina resursa, kao što su memorija, vreme, poruke, itd, potrebnih za rešavanje problema ili izvršenje algoritma“. Ovakav konceptualni pristup definisanju kompleksnosti svoje uporište ima u radovima Kolmogorova (Kolmogorov, 1965), Šenona (Shannon, 1948) i Vivera (Weaver, 1953), i obično se i naziva Kolmogorovljeva kompleksnost.<sup>5</sup> Po ovoj definiciji, kompleksnost je povezana sa informacionim sadržajem, ali i stohastičkim karakterom objekta. Sa porastom unutrašnje stohastičnosti objekta, njegova kompleksnost raste, jer raste i potrebna količina informacija da bi se iscrpno opisalo njegovo ponašanje, u teoriji bezgranično, a što pojam kompleksnosti dovodi i u vezu sa termodinamičkim konceptom entropije.

Sledeće polje u kom Veber analizira razvoj koncepta kompleksnosti, istovremeno i najrelevantnije za ovaj rad, je polje biologije. Citirajući Hejlingena, on navodi da je opšte uvreženo mišljenje da se kompleksnost povećava sa evolucijom. Međutim, navodi da postoji serija pojedinačnih slučajeva u kojima je zapravo uočeno smanjenje kompleksnosti u evolutivnom procesu. Takođe, na izvestan način on i subjektivizuje pojam kompleksnosti tvrdnjom da je jedna te ista osobina za neke posmatračke kompleksna, a za druge ne.

U društvenim naukama, pojam kompleksnosti se razvija na donekle različit način, pre svega kroz radove Lumana (Luhman, 1984). Ovde se kompleksnost direktno dovodi u vezu sa brojem odluka koje je moguće doneti u jednom vremenskom trenutku. Po našem mišljenju, na ovaj način se pojam kompleksnosti indirektno dovodi u vezu sa objektivistički shvaćenim pojmom slobode, jer veći broj mogućih odluka implicira da takve odluke imaju smisla, odnosno da ih okruženje omogućava, a što je zapravo objektivistička definicija slobode. Iako bavljenje teorijama slobode tematski prevazilazi zamišljene okvire ovog rada, ukratko ćemo se osvrnuti na dva idejna pravca kojima se može pristupiti pojmu slobode. Za razliku od subjektivistički shvaćenog pojma slobode kao "shvatanja nužnosti" koje nalazimo kod Spinoze i Hegela, objektivističko shvatanje slobode moglo bi se interpretirati kao "odsustvo objektivnih smetnji" i teorijski je uobličeno u delima Tomasa Hobsa, iako u sasvim drugačijem kontekstu, kroz analizu pred-društvenog stanja i pojma društvenog ugovora (Šešić, 1963). Luman takođe tvrdi da je smanjenje kompleksnosti donošenjem odluka zapravo pretpostavka socijalne

---

<sup>5</sup> Ilustrativan primer Kolmogorovljeve kompleksnosti bi bio niz od  $n$  slova "ABABAB...", u kom se slova "A" i "B" ponavljaju naizmenično  $n/2$  puta. Ovaj niz se u informacionom smislu svodi na instrukciju "napiši "AB"  $n/2$  puta", dakle njegova kompleksnost je mala bez obzira na  $n$ .

funkcionalnosti, i ukazuje na socijalni paradoks da donošenje svake odluke sa ciljem smanjenja kompleksnosti automatski povećava kompleksnost.

Do sada predstavljeni pokušaji definisanja pojma kompleksnog upadljivo pripadaju specifičnim naučnim disciplinama, i pojam kompleksnosti pokušavaju da osvetle iz samo jednog pravca, fokusirajući se na informatički, kibernetički, matematički, semantički, socijalni, itd, ili neki drugi pojedinačan aspekt kompleksnosti. Sama heterogenost ovih pokušaja ukazuje na probleme u njihovoj harmonizaciji u jednu sveopštu teoriju kompleksnosti koji bismo mogli nazvati, po ugledu na Emeša (Emmeche, 1997) — Sintetička teorija kompleksnosti. Emešov skepticizam po pitanju mogućnosti jedne ovakve sintetičke teorije čini se razumljiv, iz čega on izvlači zaključak da: "*Studije kompleksnosti treba stoga posmatrati ne kao težnju ka novoj 'sintetičkoj teoriji' kompleksnosti bilo koje vrste, već kao interdisciplinarno polje istraživanja i mesto susreta za dijalog između specijalizovanih grupa ljudi kao što su biolozi, fizičari, filozofi, matematičari, informatičari i, na kraju krajeva, pisci naučnih članaka,...koji su doprineli popularizaciji ovog polja za širu javnost i možda olakšali susret stručnjaka iz specijalizovanih oblasti*" (Emmeche, 1997). Emeš (Ravn, 1995) takođe ističe neke do sada nepomenute, neklasične opise aspekata kompleksnosti, naročito kada se tiče pojma kompleksnosti u nauci:

- *Deskriptivna kompleksnost.* Deskriptivna kompleksnost javlja se kada je fenomenu potrebno pristupiti iz više pravaca da bi se dobio njegov relativno kompletan opis. Emeš je ponudio tri primera: organizam, foton, i individualna svest, svaki na svoj način, pokazuju svojstvo deskriptivne kompleksnosti. Organizam se može opisati na različitim nivoima, od kojih svaki sa specifičnim deskriptivnim aparatom (npr. iz pravca biohemije, ćelijske biologije, anatomije, ekologije, itd.). U kvantnoj mehanici, čak i jednostavni entiteti poput fotona zahtevaju upotrebu dva komplementarna opisa (talasni i čestični). Svest osobe može, s jedne strane, biti kvalitativno opisana iznutra kao sadržaj onoga što je subjektivno iskustvo o sebi, dakle introspekcijski, tj. iz "prvog lica", a sa druge strane kroz prizmu neurofizioloških procesa koji se javljaju kao korelati svesti, tj. spolja, iz "trećeg lica". Na ovom mestu moramo da primetimo da se na Emešovim primerima jasno vidi da se deskriptivna kompleksnost javlja kao epistemološki, a ne ontološki atribut posmatranih fenomena. Naime, iz koliko pravaca je moguće pružiti opis nekog fenomena zavisi ne od tog fenomena, već od strukture naučnih disciplina, tj. načina unutrašnje organizacije nauke. Na sličan način su se zagovornici identiteta hemije i njene nesvodivosti na kvantnu-fiziku pozivali na argument da su hemija i

kvantna fizika ontološki podudarne (bave se istom realnošću — mikrosvetom), ali epistemološki različite (daju opise iz različitih pravaca). Naše mišljenje je da deskriptivna kompleksnost, iz ovog razloga, ne može biti smatrana intrinzičnim svojstvom objekta, i mogla bi se opravdano nazvati i epistemološkom kompleksnošću.

- *Ontološka kompleksnost.* Nešto je kompleksno u ontološkom smislu (bez obzira na to da li ga možemo potpuno razumeti ili ne) kada je organizovano kao sistem sa mnogo neidentičnih komponenti koje same takođe imaju svojstva slična sistemima (dalje su razložive), i čije međusobne interakcije dovode do takve vrste kolektivnog ponašanja koje se razlikuje od ponašanja delova (drugim rečima, pojavljuju se emergentna svojstva). Fenomen je kompleksan ako poseduje određeni tip uređenosti koji se objektivno nalazi podjednako daleko od potpuno uređenog i predvidljivog sa jedne strane, i potpuno slučajnog i neuređenog sa druge strane. Po Emešu, primeri ontološki kompleksnih objekata su živa ćelija, mozak, rastuće telo kao morfogenietski sistem, društvo, i skupine galaksija. Po njemu reći da je  $X$  kompleksno samo po sebi ne govori mnogo o  $X$ . Kao i kod svih ontoloških svojstava, često moramo navesti kako i iz kojeg ugla znamo o ovom svojstvu, tako da smatrati nešto kompleksnim u ontološkom smislu često izaziva potrebu da se identifikuje i opiše i njegova deskriptivna kompleksnost.<sup>6</sup>

Pored pokušaja definisanja pojma kompleksnosti, Emeš uvodi još jedan pojam, iako semantički nerafiniran i zavistan od samog pojma kompleksnosti, koji se čini važnim za analizu u narednom delu ovog rada, pa ćemo ga predstaviti u kontekstu definisanja pojma kompleksnosti. To je pojam *kompleksifikacije*. Emeš aludira da su se tokom opšte evolucije fizičkog univerzuma pojavili biološki entiteti koji se možda ne bi mogli potpuno objasniti metodama fizike, astronomije i hemije, koji su u nekom intuitivnom smislu složenije od fizičkih stvari. Čak i unutar domena biologije, čini se da postoje različite skale kompleksnosti, otprilike povezane sa njihovim kasnijim pojavljivanjem tokom evolucionog procesa: eukariotske ćelije su složenije od prokariotskih; višćelijski organizmi čini se da pokazuju složeniji životni ciklus i ontogenetski razvoj od jednoćelijskih; životinje čini se da su složenije od biljaka zato što mogu da se kreću, jer imaju nervni sistem koji obrađuje senzorne i motorne informacije; dok

---

<sup>6</sup> Ne možemo da ne primetimo na ovom mestu da su i deskriptivna i ontološka kompleksnost, za razliku od svih do sada izloženih pokušaja definisanja ili opisivanja kompleksnosti, po svojoj prirodi predominantno filozofski pokušaji bavljenja temom, dok svi ostali svoje uporište nalaze u specifičnim naučnim disciplinama iz kojih su potekli.

su životinje sa društvenim ponašanjem složenije od životinja koje žive samotnjački.<sup>7</sup> Ovo temporalno povećavanje kompleksnosti sveta on naziva *kompleksifikacijom*, a brani i potrebu za formiranjem sintetičke teorije kompleksnosti (uključujući kompleksifikaciju) i kroz tezu da su prirodne nauke nedovoljan okvir za kompletiranje slike geneze i povećavanja kompleksnosti sveta, jer je teško zamisliti da se socijalno-kulturna evolucija može objasniti prirodnim naukama. Naime, pojava složenih oblika socijalne organizacije, institucija, tehnologije, prirodnih jezika i različitih oblika svesti teško se može svesti na, ili u potpunosti opisati, kao skup bioloških ili darvinističkih fenomena. Iako je kontinuitet između biološke i socio-kulturne evolucije zamisliv, neophodno je uključiti humanističke i društvene nauke poput psihologije, antropologije, istorije, sociologije, lingvistike, itd, kako bismo shvatili punu razmeru rasta kompleksnosti tokom kosmičke evolucije. Samo takav širok pogled može se smatrati deskriptivnim okvirom za razumevanje kompleksifikacije sveta (Emmeche, 1997).

## 1.2. Semantički okvir pojma biološke kompleksnosti

*„Organizovani proizvod prirode je onaj u kojem je svaki deo međusobno svrha (cilj) i sredstvo. U njemu ništa nije uzaludno, bez svrhe, ili se ne može pripisati slepom mehanizmu prirode.“ (...) "uzrok koji spaja zajedno potrebnu tvar, modifikuje je, oblikuje i stavlja je na odgovarajuće mesto, uvek se mora posmatrati teleološki...“*

*-Kant, Kritika moći suđenja (Kant, 1951)*

Istorijski gledano, kompleksnost je igrala važnu ulogu u konstituisanju biologije kao nauke. Godine 1802. Žan Baptist Lamarck je skovao pojam "biologija" kojim je želeo da označi sve što se odnosi na živa bića, njihovu organizaciju, procese razvoja i strukturalnu složenost (Emmeche, 1997).<sup>8</sup> U okviru nje, Lamarck je prvi sagledao "lanac bića" kroz temporalni okvir, kao vremenski tok, prvi put promovišući tada revolucionarnu ideju da složenije može poticati od manje složenog. Lamarck, ali i drugi prirodni istoričari krajem 16. i početkom 17. veka pre njega, imali su ideju da je organizacija tako važna odlika da razdvaja živi svet od nežive prirode,

---

<sup>7</sup> Emeš je svestan da je uvođenjem nedefinisanog pojma "složenije" problem delimično samo transformisao u problem definisanja pojma "složeno".

<sup>8</sup> Dve godine pre njega G. Treviranus i K.F. Burdah su takođe kreirali taj pojam, označivši njime novo polje istraživanja (Emmeche, 1997).

i da je ova razlika, na primer, daleko fundamentalnija od razlike između životinjskog i biljnog carstva.

U narednom veku, "stepen organizacije" postao je važan kriterijum u studijama klasifikacije živih bića. Očigledno je u ovim iskazima da su pomoćni pojmovi kao "složenost" ili "stepen organizacije" bar delimično podudarni sa pojmom biološke kompleksnosti, i da semantički predstavljaju njegove surrogate. Dva nezavisna i nova polja istraživanja doprinela su razumevanju biološke kompleksnosti u 20. veku — razvoj Moderne sinteze i fon Nojmanov rad na temu samoreprodukujućih automata (Emmeche, 1997; von Neumann, 1966). Prvo polje je teoriju biološke kompleksnosti dovelo u direktnu vezu sa informatičkom teorijom, jer se geni pojavljuju kao filogenetska i ontogenetska skladišta informacija, pri čemu se informaciona komponenta ćelijskog funkcionisanja (gde se informacije skladište, prenose i biraju kroz ćelijsku aktivnost, pri čemu njihov tok podražava fenomene koji spadaju u oblasti komunikologije i kodiranja) pojavljuje kao komplementarna fizičko-hemijskoj osnovi ćelijskog funkcionisanja. Drugo polje je donelo formalna istraživanja prirode kompleksnosti uopšte, počevši od osnovnih kompjuterskih nauka do interdisciplinarnih oblasti istraživanja "kompleksnih adaptabilnih sistema", ćelijskih automata, genetičkih algoritama, i veštačkog života. Fon Nojman je postulirao, iako je nije precizno odredio, i poznatu "granicu kompleksnosti" ispod koje entiteti mogu samo da se spontano termodinamički degenerišu (jer su živi sistemi daleko od termodinamičke ravnoteže i kao da prkose zakonima termodinamike), ali iznad koje postaje moguća komponenta samo-organizovanja i samoreprodukcije, ključna za funkcionisanje i održavanje živog sveta daleko od termodinamičke ravnoteže (von Neumann, 1966).

Baš ova granica kompleksnosti, kako tvrde Emeš i saradnici (Emmeche *et al*, 1997) predstavlja granicu između biološkog i fizičkog sveta, što definisanju pojma biološke kompleksnosti daje još veći značaj, s obzirom da se kroz njega konstituiše sam pojam "živog", i iscrtava granica između fizike i biologije, odnosno konstituiše biologija. Mnogi biolozi (poput J. Nidama, P. Vajsa, C.H. Vodingtona, J. Vudžera, E. Mejra, R. Luontina, R. Luensa ) su upravo kompleksnost i fizičku jedinstvenost organizama smatrali znakom autonomije biologije kao prirodne nauke. Bez obzira što različite paradigme unutar biologije mogu dati različite i polu-implicitne opšte definicije života (npr. život kao autokatalitički samoreprodukujući autonomni

sistemi; život kao samo-stvaralački ("autopoietic"<sup>9</sup>) sistemi; život kao evolucija prirodnom selekcijom replikatora ili život kao biosemiotički sistemi<sup>10</sup>) — sve ove posebne predstave impliciraju da je život emergentni fenomen (Emmeche *et al*, 1997). Biološka kompleksnost, život i pojava sve složenijih semiotičkih procesa čine se duboko povezanim.

Biološka kompleksnost, kao poseban vid kompleksnosti, nasuprot kompleksnosti nežive materije, pored načelnih svojstava poseduje i posebna svojstva. Prema Mičelovoj (2003), o biološkoj kompleksnosti može se govoriti u tri ravni, kao o: 1) konstitutivnoj ili kompozicionoj kompleksnosti (organizmi su sistemi koji se sastoje iz više delova spojenih na ne-slučajan način), 2) dinamičkoj kompleksnosti (organizmi su proizvod kompleksnih razvojnih i evolutivnih procesa, i 3) evolutivnoj (evoluiranoj) kompleksnosti (organizmi se javljaju u velikom obliku diverzifikovanih životnih formi iako su izloženi sličnim adaptivnim izazovima). Kao pozitivnu kolateralu svog gorenavedenog shvatanja strukture biološke kompleksnosti (koje su nazvali integrativni pluralizam), autori su istakli umanjeње tenzija na nekoliko frontova u filozofiji biologije, na primer na temu neselekcionističkih (razvojnih) objašnjenja evolucije nasuprot adaptacionizmu, pritom oživljavajući i debatu na temu šta je osnovna jedinica prirodne selekcije (gen, organizam, vrsta, itd.). Za razliku od opšte kompleksnosti, biološki sistemi (živa materija) poseduju ekskluzivna definišuća svojstva koja rezultuju u hijerarhijskoj kompleksnosti bez pandana izvan domena biologije (Forestiero, 2022). Prema ovom autoru, razlog ove izuzetnosti leži u činjenici da se evolucija živog sveta u suštini odvija kroz proces *variranja*, dok se evolucija, odnosno promena stanje nežive materije odvija kroz proces *transformisanja*, što dovodi do unikatnih osobina bioloških organizama i njihove kompleksnosti.

Forestiero (2022) je pokušao da preciznije opiše biološku kompleksnost na način nešto različit od Mičelove (Mitchell (2003), koristeći četiri fundamentalne osobine živog sveta: 1)

---

<sup>9</sup> "Poietic" se obično koristi u kontekstu semiotike i umetnosti kako bi se opisala kreativna ili stvaralačka komponenta. Ovaj se pojam ponekad koristi da označi proces stvaranja ili stvaralački akt. Na primer, u kontekstu semiotike, "poietic" se može koristiti da se opiše strana procesa koji se odnosi na stvaranje znakova ili simbola. Samo-stvaralački sistemi ("autopoietic") sistemi su u idejnom smislu razrađivani u poznatom delu Maturane i Varele (Maturana and Varela, 1991). Oni poseduju bitna svojstva koja ih razlikuju od drugih sistema, od kojih su neka: 1) samo-organizacija (mogu da se organizuju i reorganizuju autonomno, bez uticaja iz spoljašnje sredine), 2) zatvoreni su, odnosno postoji jasna granica između njih i spoljašnje sredine koja je suštinska za njihov identitet i autonomiju, 3) adaptibilni su uz održanje sopstvenog identiteta, 4) imaju kognitivne elemente (Maturana i Varela smatraju da deo procesa u koje su samo-stvaralački sistemi uključeni možemo interpretirati kao oblik kognicije, uključujući percepciju spoljašnjih stimulusa i generisanje odgovora.

<sup>10</sup> Pojam "semiotički" potiče od reči "semiotika", koja se odnosi na nauku koja proučava znakove, simbole, i znakovne sisteme te njihovo značenje i upotrebu u komunikaciji. "Semiotički" se odnosi na sve što je povezano sa semiotikom ili proučavanjem znakova i njihovog značenja.

organizaciju, 2) individualnost, 3) diverzitet i 4) relacionalnost. Organizacija (ili organizovanost), predstavlja fundamentalno svojstvo živog sveta (Mayr, 1982), koje određuje kako autonomiju tako i prostorni integritet živog sistema (u smislu da su njegove granice tamo dokle se prostire skup koherentnih procesa u međusobnom sadejstvu, koji čine živi sistem) (Forestiero, 2022; Varela, 1979).

Interesantno je da prisustvo organizacije odmah povlači za sobom i eshatološke i teleološke asocijacije, jer organizam kao da je “dizajniran” za postizanje neke vrste ciljnog (stabilnog) stanja koje je funkcija i osobina živog sistema i njegove životne okoline. S obzirom da intencionalnost biološkog dizajna ima kreacionističke implikacije, da bi se ostavio prostor ne-kreacionističkom tumačenju kompleksne organizacije živih bića neki autori su bili primorani da rafiniraju pojam teleologije i kreiraju/konstituišu poseban pojam — teleonomiju, koji je ništa drugo nego teleologija lišena intencionalnosti (François, 1970).

Sama kompleksnost može da se definiše i kroz kibernetički pojmovni okvir koji se direktno tiče pojma organizacije: “kompleksnost je broj različitih stanja u kojima se sistem *može* naći, odnosno koje *može* zauzeti” (Ashby, 1956). Reč “može” smo napisali kurzivom i istakli, jer po našem mišljenju, ovakva definicija kompleksnost gura iz ravni egzistencije u ravan mogućnosti - ona postaje dispozicionalno, a ne aktuelno svojstvo sistema. U svakom slučaju, iz Ešbijeovog zakona sledi da živi organizmi sa većim stepenom kompleksnosti pokazuju veći stepen adaptibilnosti na perturbacije u životnoj sredini od manje kompleksnih organizama, pa bi biološka kompleksnost mogla da se darvinistički tumači kao neka vrsta otpornosti na izazove životne sredine, odnosno kao alat preživljavanja.

Forestiero (2022) razlikuje dve vrste ove otpornosti: proaktivnu (engl. *robustness*) i čisto reaktivnu (engl. *resilience*). Prva se odnosi na unutrašnje mehanizme koji živi sistem čine otpornim na uklanjanje jedne ili više strukturnih komponenti u funkcionalnom smislu (postizanje funkcionalne invarijantnosti sistema bez obzira na nedostajući deo/delove), dok se druga odnosi na povratak sistema u prvobitno stanje, odnosno na anuliranje efekata perturbacije i vreme potrebno za takvo anuliranje.

Živi sistemi (živa bića) za razliku od fizičkih, hemijskih (ili matematičkih) objekata pokazuju još jednu karakterističnu osobinu – individualitet. Ovom osobinom, oni su i u strukturnom i u funkcionalnom smislu nedvosmisleno različiti od neživih sistema. Poreklo individualiteta živih bića je u samom izvoru varijabilnosti i njegovoj stohastičnosti, kodiranom u genima, i prevedenom u fenotip kroz seriju epigenetičkih razvojnih koraka. Fenotipska i epigenetička varijabilnost u direktnoj su vezi sa varijabilnošću gena jedne populacije, dakle sa

njenom genetičkom *kompleksnošću*, i određuje evolutivnu adaptibilnost populacije na stalne promene životne sredine. I ovde se kompleksnost u svojoj krajnjoj implikaciji ponovo javlja kao alat preživljavanja. Forestiero (2022) smatra da je individualitet živih bića vrlo složen fenomen, i da ne samo da je proizvod evolucije nego i njen aktivan činilac.

Diverzitet je, kao treća osobina živog sveta neophodna za karakterizaciju njegove kompleksnosti, nusproizvod individualiteta sa jedne strane, i pluraliteta živog sveta sa druge strane. Diverzitet bi mogao da se definiše kao totalitet razlika uočenih među živim bićima, u njihovom kvantitetu, ali i u odnosu na varijabilnost gena, organizama, vrsta i čitavih ekosistema (Heywood and Watson 1995). Genski diverzitet se reflektuje kroz skup razlika među individualnim organizmima u okviru jedne ili više populacija, i nasledan je. Genski diverzitet među živim bićima je, na primer, razlika u broju i strukturi hromozoma, kao i količini nukleinskog materijala u ćeliji. On može da se redukuje na skup razlika u sekvencama nukleotida nukleinskih kiselina. Kroz rekombinaciju gena organizama koji imaju seksualnu reproduktivnu strategiju, ova vrsta diverziteta može da raste praktično neograničeno. Sama seksualna reprodukcija favorizuje genske varijacije, i stavlja ih na raspolaganje fenotipu za adaptaciju na uslove životne sredine i povećanje šansi preživljavanja. Seksualnost kao svojstvo reprodukcije izgleda da ispoljava efekte na više nivoa hijerarhijske organizacije živih bića, od molekularno-genetičkog (rekombinacija) pa sve do nivoa populacije (npr. proto-politika kod šimpanzi, vođena seksualnim motivima). Diverzitet se ne ograničava samo na varijabilnost u prostoru, već i u vremenu. Interesantno je da je čovek do sada detaljno okarakterisao samo oko 15% od ukupno procenjenih 8,7 miliona vrsta koje nastanjuju planetu Zemlju (National geographics, 2023). Procesi genetičke divergencije u okviru vrste su ireverzibilni (Barton, 2020). Trenutni diverzitet na planeti rezultat je procesa koji traju između 3,4–3,9 miliona godina, odnosno od nastanka života (Forestiero, 2022).

Relacionalnost, kao četvrta osobina živog sveta neophodna za razumevanje njegove kompleksnosti, tiče se razumevanje interakcija između živog sistema i njegove okolne, i sledi iz termodinamičke otvorenosti živih bića kao sistema. Debata postoji u naučnoj i filozofskoj zajednici oko prirode kohezivnih sila koje drže jedan biološki sistem u funkcionalnom stanju. Naime, interakcije između delova čisto fizičkog sistema se svode na fizičke *sile*, dok se interakcije između delova bioloških sistema svode na biološke *signale*. Kontroverzna je interpretacija ustrojstva nekih fizičkih sistema (npr. hemijske oscilatorne reakcije Belousov–

Žabotinski)<sup>11</sup> koji su, iako neživi, u stanju da se samo-regulacijom dovedu u stanje više uređenosti iz početnog haotičnijeg stanja, što je izazvalo debate na temu da li su ti slučajevi zapravo i paradigmatični primeri ustrojstva živog sveta.<sup>12</sup> Ageno, na primer, smatra da su takve analogije veštačke (Ageno, 1986). Dakle, za razliku od fizičkih sistema u kojima je za postizanje uređenosti neophodno dejstvo spoljašnje fizičke sile, kod bioloških sistema se do uređenosti dolazi intrinzično, kroz koordinirano međudejstvo delova sistema ostvareno razmenom bioloških signala (Ageno 1986). Ovakvi komunikacioni signali ne samo da obezbeđuju koherentno unutrašnje funkcionisanje živog organizma, nego i njegove spoljašnje interakcije (komunikaciju) sa okruženjem (parovi signal–receptor su kroz evoluciju diversifikovani, često prostorno odvojeni ili grupisani, npr. receptori za miris u nosu, za svetlost u očima). Sledi da je kapacitet živih bića da formiraju i održavaju odnos sa životnom sredinom (adaptabilnost) deo šireg koncepta relacionalnosti (Forestiero, 2022). Forestiero stoga ističe da se za pravilno razumevanje biološke kompleksnosti kroz prizmu relacionalnosti moraju uzeti u obzir ne samo odnosi unutar biološkog objekta, već i odnosi biološki objekat – sredina, odnosno da se živa bića ne mogu posmatrati kao statični, neistorični objekti, već kao dinamički sistemi povezani sa nestabilnom i promenljivom sredinom. Pod sredinom se, u interpretaciji ovog autora podrazumeva objektivno, od organizma potpuno odvojeno životno okruženje, dakle okruženje shvaćeno darvinistički i u skladu sa Sintetičkom teorijom evolucije (koja spaja darvinizam i Mendelovu genetiku).

Pojednostavljeno, i metodološki i epistemološki sledi — neprihvatljivo je svako proučavanje kompleksnosti bioloških organizama izvan kontekstualnog okvira, jer je upravo interakcija sa sredinom uzrok i strukturalnih i funkcionalnih osobina organizma, dakle direktno korespondira sa njegovom kompleksnošću, i svaki takav pokušaj doveo bi do gubitka informacija. Zapravo, kompleksnost živih bića se, izgleda, javlja kao refleksija kompleksnosti životnog okruženja, koje je zapravo izvor najvećeg stepena kompleksnosti, i sa kojim živi organizam razmenjuje materiju, energiju i informacije (Jost, 2022; Forestiero, 2022). Odnos kompleksnosti sredine i organizma biće detaljnije analiziran nešto kasnije u Poglavlju 1.5, kroz prizmu Ešbijeovog zakona. Ovaj odnos, u kontekstu osobina samog organizma, predmet je

---

<sup>11</sup> Belousov–Žabotinski reakcije (BŽ reakcije) su hemijske reakcije koje pokazuju oscilacione i prostorne obrasce, prvobitno otkrivene od strane Borisa Belousova, a dalje istražene od strane Anatola Žabotinskog. One ispoljavaju ritmičke oscilacije koncentracije vizualno prećene promenama boje reakcione mase. Ove reakcije su značajne za razumevanje sistema van ravnoteže i imaju primene u hemijskoj kinetici i istraživanju kompleksnih sistema.

<sup>12</sup> Pionirske prodore u razumevanju problema samo-organizacije u sistemima daleko od termodinamičke ravnoteže, čiji je zapravo specijalan slučaj skup hemijskih reakcija Belousov–Žabotinski, intenzivno se bavio Prigožin u svojim radovima (npr. Prigogine and Van Rysselberghe, 1963; Prigogine, 1955)

višedecenijske debate jer se neki način odnosi i na epistemološki status Moderne sinteze. Proširena sinteza kao alternativa Modernoj, predložena od strane evolutivne teoretičarke Suzan Ojama, izazvala je tradicionalni genocentrični pogled na evoluciju i proširila sintezu evolutivne teorije izvan Moderne sinteze (Oyama, 2000). Moderna sinteza, koja se pojavila početkom 20. veka, naglašavala je ulogu gena kao osnovnih jedinica nasleđivanja i fokusirala se na prirodnu selekciju kao glavnu pokretačku silu evolucije. Ojamina proširena sinteza uključuje uvide iz razvojne biologije, epigenetike i drugih polja kako bi pružila sveobuhvatnije razumevanje kompleksnosti organizama. Proširena sinteza prepoznaje da je interakcija između gena i okoline ključna za razvoj i evoluciju organizma, ali umesto da posmatra gene kao izolovane entitete koji kontrolišu osobine, Ojama ističe dinamičku i interaktivnu prirodu razvojnog procesa. U kontekstu analize kompleksnosti organizama, Ojamina proširena sinteza, u svom holističkom i integrativnom stilu i u debati koja nije završena, naglašava važnost razmatranja kako genetičkih, tako i faktora sredine, kao i njihovog kompleksnog međusobnog delovanja, u razumevanju raznolikosti i kompleksnosti životnih oblika.

### **1.3. Da li se kompleksnost generalno povećava sa vremenom?**

Oko nas se nalazi vrlo kompleksan svet, od subatomske do galaktičke domena — na svim prostornim skalama uočavamo kompleksne strukture i procese. Jedan od osnovnih zadataka nauke je pokušaj simplifikacije sveta kroz matematičke generalizacije, uprošćavanja i usrednjavanja, kroz traženje objedinjujućih principa u obilju opservabilnih kontaminiranih stohastikom i šumom. Ovakav redukcionizam se, ponajviše u biologiji, suočava sa problemom nesvodivosti čitavih klasa fenomena (npr. biološke kompleksnosti) na njihove dublje i generalnije principe (Lineweaver *et al*, 2013).

U kontekstu analize evolucije iz perspektive neodarvinizma, jedna od osnovnih pretpostavki darvinizma — preživljavanje najprilagođenijih, i dalje ništa ne govori o problemu odnosa prilagođenost – kompleksnost, jer prilagodljivost ne mora da implicira kompleksnost. Pitanje trenda povećanja kompleksnosti odnosi se podjednako i na fizičku i na biološku kompleksnost jer se kosmolozi slažu da je jednu sekundu nakon Velikog praska Univerzum činila jednostavna "supa" subatomske čestice okupane u uniformnom zračenju, dok je trenutni Kosmos mnogo složeniji i hijerarhijski organizovan. Da li, dakle, postoji fenomen koji bi mogao da se nazove i vremenska strela kompleksnosti, po ugledu na termodinamičku?

Prvi problem određivanja opšteg trenda kompleksnosti je u implicitnoj pretpostavci da je kompleksnost *kvantitet*, jer da bi se nešto povećavalo ili smanjivalo u vremenu, da bi

pokazivalo trend, ono mora biti numerički izrazivo, odnosno imati utvrđenu metriku, a što je problem na koji smo već ukazali u slučaju kompleksnosti kojoj nedostaju i opšteprihvaćena definicija i njoj saobrazna metrika. Lajnviver i saradnici (Lineweaver *et al*, 2013) se pitaju da li je uopšte moguća takva univerzalna definicija, kao i da li je uopšte neophodna za razmatranja na temu trenda kompleksnosti, jer kompleksnost je ako ništa drugo — kompleksna! Oni dalje iznose podatak da je posle Darvina, koji je i sâm pokušao da pojasni i rafinira pojam kompleksnosti, tačno pet generacija evolucionih biologa bezuspešno pokušavalo da ovaj pojam jasno izgradi i samim tim omogući usvajanje opšteprihvaćene metrike kompleksnosti.

Jedan od najznačajnijih pokušaja je dovođenje kompleksnosti u vezu sa dužinom genoma. Ovaj pokušaj se odmah suočava sa problemom poznatim kao “enigma C-vrednosti” (Gregory, 2001). Naime, postoji uvreženo opšte mišljenje, koje je delio i Darwin, da ljudska vrsta predstavlja krunu evolucije, i kao takva pokazuje najviši stepen kompleksnosti. Međutim, genom nekih vrsta, npr. daždevnjaka, je mnogo duži od ljudskog (Lineweaver *et al*, 2013). Problem u redukcionističkom pokušaju svođenja biološke kompleksnosti na dužinu genoma je, dakle, u odsustvu korelacije između fenotipske kompleksnosti i dužine genoma, što je nazvano enigmom C-vrednosti.

Drugi značajan pokušaj u okviru biologije bio je redukcija kompleksnosti na broj vrsta ćelija u organizmu. Ovakav pokušaj vodi u problem nedefinisane, odnosno neuporedive, kompleksnosti ogromnog broja jednoćelijskih organizama. Sledeći pokušaj je bio da se kompleksnost kao atribut ne vezuje za pojedinačni organizam, nego za ekosistem; tako bi npr. broj vrsta u ekosistemu mogao biti ključ za određivanje njegove kompleksnosti (Lineweaver *et al*, 2013). Još jedan pokušaj bio je vezivanje biološke kompleksnosti za stepen specijalizacije organa, odnosno telesnih podistema, što je ništa drugo nego stepen neuniformnosti organizma na različitim prostornim skalama.<sup>13</sup> Ovde je problem u tome što postoji čitava serija primera u evoluciji gde je specijalizacija (kompleksifikacija) dovođila do izumiranja organizama, pa je teško braniti opštu tezu da se kompleksnost povećava sa evolucijom, kao i da je uopšte koristan

---

<sup>13</sup> Ne možemo na ovom mestu da ne istaknemo jedno zapažanje kroz pomalo bizaran primer. Svođenje kompleksnosti na strukturalna svojstva, bez uzimanja u obzir funkcionalnosti, konteksta, pa i istoričnosti je problematičan poduhvat. Naime, živ čovek i njegov leš pokazuju isti stepen strukturne kompleksnosti, ali se leš definitivno nalazi ispod fon Nojmanove granice kompleksnosti, dok se živ čovek ne nalazi. Tako bi se informatička definicija morala svesti i na neke druge (pored strukturnih), osobine organizma. Prisustvo *vis vitalis* u ovom primeru premošćava von Nojmanovu granicu kompleksnosti. *Vis vitalis*, ili životna sila, istorijski gledano deo je prevaziđenog filozofskog koncepta – vitalizma, u kom je smatrano da postoji fundamentalna razlika između žive i nežive materija koje se svodi na prisustvo ili odsustvo posebne "sile" u živom svetu. U našem komentaru, pojam *vis vitalis* je iskorišćen samo da bi se ukazalo na činjenicu da je čovek živ.

alat u evolutivnoj borbi u opštem slučaju, što i razloge postojanja bilo kakvog trenda kompleksnosti u evoluciji čini upitnim.

Stiven Guld (Gould, 1996), poznati evolucionari biolog, antropolog i istoričar nauke, inače profesor sa univerziteta Harvard, o čijem će delu nešto kasnije biti više reči, takođe je bio mišljenja da je teško evolucionom procesu pripisati bilo kakav pravac u domenu kompleksnosti. Njegova hipoteza je bila da je za održavanje života potrebna neka minimalna kompleksnost<sup>14</sup> ali da evolucija iznad te granice više podseća na "hod pijanca", poznat i kao "slučajan hod".<sup>15</sup> Umesto porasta kompleksnosti kao evolutivnog pokretača, Guld je pokretačem smatrao diversifikaciju, odnosno entropijski vođeno povećanje broja vrsta u cilju zauzimanja sve većeg broja ekoloških niša koje stvaraju neprekidne promene okruženja.

U poznatom delu "Prvi zakon biologije", MekŠej i Brendon (McShea and Brandon, 2010) tvrdili su da se povećanje kompleksnosti u evolutivnom procesu dešava jednostavnom akumulacijom slučajnosti (slučajnih promena). Oni su ponudili paradigmatičan primer nove bele ograde koja se vremenom sporadično i mestimično prlja, gubi farbu, itd. i stoga postaje kompleksnija. Njihov stav je naišao na kritike (npr. Lineweaver *et al*, 2013), jer njime kao da se briše granica između raznolikosti i kompleksnosti. I raznolikost se generiše akumulacijom slučajnosti, međutim za razliku od raznolikosti, u slučaju kompleksnosti ovakvo usložnjavanje nastaje kao posledica i slučajnosti i selekcije, dok u slučaju raznolikosti nastaje isključivo kao posledica slučajnosti, dakle gubi sve one ekološke informacije sadržane u nastaloj kompleksnosti, a koje implicira proces selekcije. Njihov stav bi se mogao kritikovati i sa termodinamičke tačke gledišta, naime, jer čista "akumulacija slučajnosti" je surogat-termin za drugi zakon termodinamike, u suštini proces prilaženja termodinamičkoj ravnoteži, dok je evolucionari proces upravo suprotan — udaljavanje od termodinamičke ravnoteže.

Naše mišljenje je da njihov stav pod kompleksnošću prećutno podrazumeva i slučajnu i pravilnu (regularnu) komponentu kompleksnosti, a što nije u skladu sa bar nekim definicijama kompleksnosti koje su samo usredsređene na njenu pravilnu komponentu. Tako, jedna te ista promena strukture ili funkcije dela organizma predstavlja slučajnu komponentu kompleksnosti ukoliko nije deo adaptivnog odgovora organizma na životno okruženje; ali u slučaju da jeste u funkciji lakšeg preživljavanja, ona je *pravilna* komponenta kompleksnosti koja je *slučajno nastala*. Po našem mišljenju, proces prirodne selekcije novog svojstva prebacuje ga iz carstva

---

<sup>14</sup> Što neodoljivo podseća na fon Nojmanovu granicu kompleksnosti.

<sup>15</sup> Hod pijanca je zapravo tvrdnja da ne postoji preferirani pravac trenda kompleksnosti, već da se pozitivne i negativne promene kompleksnosti dešavaju slučajno u svakom evolutivnom koraku.

slučajnog u carstvo pravilnog, konstituše ga kao deo istinske kompleksnosti, bez obzira na inicijalno poreklo/genezu. Drugim rečima, kompleksnost nije intrinzično svojstvo biološkog objekta, nego se ona mora posmatrati u sklopu osobina i kompleksnosti okruženja. Drugim rečima, Gulfov slučajan hod trpi selekzione pritiske. Kompleksnija okruženja traže kompleksnija adaptivna rešenja (što će biti detaljnije obrađeno u potpoglavlju 1.5 Ešbijeov zakon). U slučaju pada kompleksnosti okruženja, popušta selekcionim pritiskom, i entropijski vođena diversifikacija dovodi do simplifikacije do tada kompleksnih organizama, jer je nepotrebno održavanje kompleksnosti daleko od termodinamičke ravnoteže "skupo" i predstavlja evolutivni hendikep.

Problem u analizi odnosa organizama i njihovog okruženja je u tome što mi ne znamo: 1) koliko novih ekoloških niša se stvara promenama u ekosistemu, 2) koliko mogućih ekoloških niša već postoji u ekosistemu, odnosno koliko je mogućih pravaca evolutivnog razvoja otvoreno u svakom trenutku. Dakle, ne znamo šta će biti, a ni šta može biti, što otežava evaluaciju adekvatnosti pojedinih rešenja organizama u evolutivnoj borbi, a što dalje ima implikacije na evaluaciju takvih rešenja u smislu njihove kompleksnosti. Ukoliko su evolutivne promene, uključujući i promene kompleksnosti, rukovođene potrebom za osvajanjem novih ekoloških niša usvajanjem novih adaptivnih rešenja, onda je konačni uzrok povećanja kompleksnosti zapravo isti onaj uzrok koji otvara nove ekološke niše — promene u okruženju.

Dodatni problem je u tome što okruženje ne predstavlja samo pasivno fizičko okruženje (npr. tip zemljišta, temperaturni režim, i sl.) već i biološko okruženje koje se takođe menja u evolutivnom procesu, i koje uvodi mehanizam povratnih sprega u evolutivnu borbu kroz međusobne interakcije organizama. Linviver je zastupao mišljenje da je moguća potpuna redukcija okruženja na njegovu fizičku komponentu, jer organizmi reflektuju složenost fizičkog okruženja, tako da bi se uzrokom evolucije biološke kompleksnosti mogle smatrati promene u fizičkim osobinama kosmosa, organizacije nežive materije, itd. Naše mišljenje je da je ovo pojednostavljenje za sad neopravdano, i da je zasnovano na jednog jakoj pretpostavci — da će evolutivna rešenja u sličnim okruženjima uvek biti slična, odnosno da će sastav, broj i priroda živih bića uvek konvergirati ka nekom ravnotežnom stanju. Drugim rečima, to znači da bi u ponovljenim premotavanjima sveta rezultat biološke evolucije uvek bio više-manje isti.

Ova tema je već izazivala polemike u biološkoj naučnoj zajednici. Na primer, Kaufman (Kauffmann, 1993) je isticao nemogućnost sagledavanja svih načina alternativnih korišćenja već razvijenih evolutivnih alata (eksaptacija), očigledno ističući neodređenost (slučajnu komponentu) aktuelnog, faktički odabranog evolutivnog pravca u odnosu na totalitet svih

moćućih pravaca.<sup>16</sup> Za razliku od njega, Konvej Moris (Conway Morris, 1998) je isticao konvergentni karakter evolucionih procesa, oćigledno zastupajući ideju da slićne okolnosti dovode do slićnih evolutivnih rešenja, te da su mnoge osobine, ukljućujući kompleksnost, "zasićene", odnosno dostigle svoju biološku ravnotežu u odnosu na postojeći ekosistem (za ćoveka je tvrdio da to nije slućaj). Na ovom mestu istićemo naše neslaganje sa Morisom. Sasvim je moguće da je veliki broj vrsta dostigao ravnotežu u odnosu na fizićku komponentu globalnog (i lokalnih) ekosistema, ali zbog sadejstva vrsta i ogromnog uticaja ćoveka na planetu, redukcionizam u interpretaciji ekosistema na njegovu fizićku komponentu vodi do pogrešnih zakljućaka. Pod fizićkom komponentom ekosistema ovde podrazumevamo nebiološke osobine ekosistema, njegove nebiološke resurse — fizićki prostor, tok slobodne energije, vrstu i raspored neorganske materije, itd. Šesta ekstinkcija, kako mnogi danas zovu globalni gubitak diverziteta, pokazuje da organizmi nisu ni u kakvoj ravnoteži sa ekosistemom koji je ćovek promenio. Prema nekim izvorima (panda.org) do 2050. će globalni gubitak životinjskih vrsta dostići 50%, dok su slatkovodni ekosistemi već osiromašeni 81% broja vrsta. Deo površine planete koji se koristi za poljoprivredu je premašio 50%, u odnosu na samo 7% iz 1700. godine.

Morisov stav implicira da je evolutivni tok strogo determinisan okolnostima, tako da su njegove varijacije u odnosu na zamišljeni optimalan evolucionu pravac minimalne. Smatramo da je, ne zbog relativno statićne fizićke, već zbog dinamićke, biološke komponente ekosistema i efekta slućajnih odabira u evolutivnim pravcima pojedinih populacija (na primer zbog slućajnog genetićkog drifta) nemoguće reprodukovati *ista* evolutivna rešenja ćak i u istim fizićkim okolnostima. Naime, evolutivna rešenja nisu ništa drugo nego naćini vršenja odrećdenih, egzistencijalno vaŹnih funkcija, a funkcije koje treba vršiti direktno zavise od okruženja koje sadrŹi i komponentu neodrećdenosti zbog biološke komponente ekosistema. Kao primer naveli bismo evolutivnu promenu ptica na Novom Zelandu (ptica kivi) koje se gnezde na zemlji umesto na drveću ili liticama, jer tamo nema predatora, pa je ptica kivi razvila gigantizam i izgubila sposobnost letenja. Da se kojim slućajem, pre oko 25 miliona godina u oligocenu kada se Novi Zeland odvojio od Australije, neki od predaka tipićnih predatora našao na teritoriji Novog Zelanda, te nastavio da ko-evoluira sa pticom kivi, ona bi zbog egzistencijalne ugroženosti najverovatnije zadrŹala sposobnost letenja, kao i manje dimenzije.

---

<sup>16</sup> Eksaptacija je koncept u biologiji koji se odnosi na osobinu ili karakteristiku koja se razvila za obavljanje jedne funkcije, ali kasnije je prilagoćdena za drugu svrhu. Eksaptacije su vaŹne jer istiću ulogu istorijske slućajnosti i kompleksnost evolutivnih procesa.

Generalizacija ovog komentara čini nam se opravdana, jer ne samo ptica kivi, nego *bilo koja* ptičja vrsta na Novom Zelandu ne bi izgubila svojstvo letenja, dakle čitava jedna klasa evolutivnih rešenja (hodanje umesto letenja) ne bi postojala. Tako bi u identičnim fizičkim okolnostima evolutivni pravci međusobno interagujućih vrsta bili različiti<sup>17</sup>. S obzirom da je prisustvo i raspored vrsta u različitim ekosistemima bar delimično posledica slučajnosti, sledi da iste fizičke okolnosti mogu, ali *ne moraju*, dovesti do razvoja istog korpusa funkcionalnih evolutivnih rešenja. Pod fizičkim okolnostima ovde podrazumevamo sve interakcije organizam – ekosistem koje preostaju nakon uklanjanja bioloških interakcija, dakle interakcije sa materijalnim okruženjem – klimom, vlažnošću, sastavom zemljišta i sl. Darwin je ovu vrstu interakcija zvao abiotske, naspram biotskih interakcija koje su podrazumevale interakcije između živih bića. Ova podela, iako uz nedostatke i zamerke, često predstavlja heuristički pogodan alat za analizu interakcija u ekosistemu. Potreba za kontekstualnom analizom pri konstituisanju svojstva kompleksnosti otežava ne samo pronalaženje njene opšte definicije nego i metrike, jer jednostavnije metrike koje su fokusirane na samo intrinzična svojstva kompleksnog objekta ne reflektuju svojstva okruženja i istoričnost objekta.

Pored kontroverznih aspekata kompleksnosti, postoje i aspekti o kojima više-manje postoji konsenzus u naučnoj zajednici. Na primer, jasno je da je povećanje kompleksnosti, i fizičke i biološke, termodinamički nepovoljan proces, odnosno prividno nije u skladu sa termodinamičkim zakonima i zahteva univerzum koji nije u termodinamičkoj ravnoteži. Povećanje kompleksnosti (smanjenje entropije) na jednom mestu zahteva povećanje entropije na drugom mestu u univerzumu koji je daleko od stacionarnog, ravnotežnog stanja. Ovi fenomeni ne primećuju se samo u biološkim sistemima. Na primer, uređena struktura uragana sledi iz relativno nisko-entropijske, pred-uraganske meteorološke konstelacije gradijenata pritiska, temperature i vlažnosti, koja sopstvenim razaranjem kompenzuje termodinamički nepovoljno stvaranje uređene strukture uragana (Lineweaver *et al*, 2013). Stvaranje kompleksnih mineralnih struktura na sličan način zavisi od raspoloživosti slobodne energije (Hazen *et al*, 2008), a ona može da se pojavi samo u termodinamički neuravnoteženim okruženjima.

U vezi sa tim bi verovatno bilo umesno pomenuti Čejsonovu ideju svođenja kompleksnosti na specifičan tok slobodne energije kroz sistem (Chaisson & Chaisson, 2002).

---

<sup>17</sup> Iako smo iskoristili termin "vrsta", ovde se zapravo misli na različita evolutivna rešenja koja se, striktno govoreći, ne smeju poistovetiti sa vrstama.

Čejsonova koncepcija "specifičnog protoka slobodne energije" kao zamene za kompleksnost predstavlja jedan od načina kvantifikacije kompleksnosti sistema, posebno u kontekstu kosmičke evolucije. Specifični protok slobodne energije odnosi se na količinu energije koja prolazi kroz sistem, podeljenu masom ili sadržajem energije tog sistema. Drugim rečima, to je mera koliko se energije prerađuje ili koristi unutar određene količine materijala. Čejsonova ideja je da su kompleksnost i stopa protoka energije kroz sistem u korelaciji. Čejson predlaže da je složenost u različitim sistemima, bili to galaksije, zvezde, ekosistemi ili biološki organizmi, direktno proporcionalna količini energija koja protiče kroz njih. Složeniji sistemi imaju veći protok energije. Kvantifikacija složenosti, po njemu, praktično bi se izvela kvantifikacijom ove količine energije, a što bi rešilo i neke od već pomenutih problema i nedostatak metrike kompleksnosti. Čejson tvrdi da se evolucija — i galaksija i zvezda i života na Zemlji — može razumeti u terminima protoka energije i razvoja sve složenijih struktura sa njim povezanih.

Razmatranje termodinamičkih aspekata eventualnog povećanja kompleksnosti dovodi i do nekih pogrešnih zaključaka. Naime, mogli bismo zaključiti da je evolutivni pravac, bez obzira na trend kompleksnosti u njemu, povezan sa povećanjem entropije i smanjenjem slobodne energije sistema koji evoluiraju, s obzirom da se mora pokoriti zakonima termodinamike. Ovo je nesumnjivo tačno u univerzumu, ili bilo kom izolovanom sistemu, posmatranom kao celina. Međutim, mi posmatramo evoluiranje kompleksnosti u specifičnim prostorno-vremenskim domenima univerzuma koji se obično svode na određene objekte, a koji pritom nisu izolovani. Trendovi uređenosti, entropije i kompleksnosti u njima mogu prividno da protivreče zakonima termodinamike u privremenim i lokalizovanim domenima univerzuma, što se ispostavilo kao dovoljno za stvaranje lokalizovanih složenih fizičkih i bioloških struktura. Pitanje koje je delimično kontroverzno je — da li pojava samo-replikujućih samo-organizujućih prostorno-vremenskih struktura (npr. živih bića) utiče na dinamiku upadanja univerzuma u termičku smrt? Ako da, da li ova pojava ubrzava ili usporava termičku smrt univerzuma? Glajser (Gleiser, 2005) je predstavio model u kom se organizovana kompleksnost reprezentovana kroz specifičan oblik prostorno-vremenskih obrazaca spontano pojavila u nelinearnim sistemima, i zaključio da se pojavom samo-organizujućih sistema entropija smanjila na lokalnom nivou, a na globalnom usporilo njeno povećanje u smeru termičke smrti. Veći broj autora (Ulanowicz & Hannon, 1987; Meysman & Bruers, 2010; Kleidon, 2012) ipak smatra drugačije — da se pojavom živih bića na planeti Zemlji smanjila količina slobodne energije koju Sunce emituje u interstelarni prostor, odnosno da živa bića u lokalu konzumiraju

više slobodne energije (i povećavaju entropiju univerzuma kao celine) nego u slučaju da ih nema, čime ubrzavaju kretanje univerzuma ka termičkoj smrti.

Kao i u slučaju biološke kompleksnosti, analiza trenda (povećavanja ili smanjivanja) fizičke kompleksnosti tokom evolucije je težak problem. I u slučaju fizičke kompleksnosti je aktuelno pitanje da li je trend povećavanja kompleksnosti Univerzuma od momenta Velikog praska do danas aktivan ili pasivan, naime da li je u pitanju čisto piramidalna šema povećanja kompleksnosti? Naši istraživački napori u analizi kompleksnosti uglavnom se fokusiraju na najsloženije fizičke i kosmičke strukture, i s obzirom da je diversifikacija broja fizičkih objekata i njihovih struktura od nastanka Univerzuma do danas dovela do izrazite šarolikosti, jasno je da će najkompleksniji objekti bivati sve kompleksniji, ali na ovom mestu se treba vratiti izvornom pitanju koje se u osnovi ticalo *prosečne*, a ne *maksimalne* kompleksnosti struktura u Univerzumu. Ukoliko se prosečna kompleksnost nije menjala, ceo konstrukt bi neodoljivo podsećao na Guldovu hipotezu „Levog zida“ u analizi trenda biološke kompleksnosti, pri čemu bi ulogu levog zida imala inicijalna kosmička kompleksnost neposredno nakon Velikog praska. U odsustvu opšte definicije kompleksnosti, odgovor na pitanje o trendu prosečne kompleksnosti teško je dati. Ono što je nesumnjivo je da je entropijska udaljenost Univerzuma od ravnotežnog stanja pokretač kompleksifikacije, odnosno izvor slobodne energije za dalja usložnjavanja. Po Čejsonu, samo širenje Univerzuma je uzročnik kompleksifikacije i toka slobodne energije.<sup>18</sup> Ako je on u pravu, a znajući da se Univerzum ne samo širi, nego se širi ubrzano, pitanje kakve će biti sudbina Univerzuma, i samim tim procesa kompleksifikacije u njemu, zavisi od odgovora na pitanje o količini i karakteru tamne energije (engl. *dark energy*) u Univerzumu u odnosu na tamnu materiju (i materiju uopšte), jer širenje Univerzuma zahteva savlađivanje gravitacionih sila, uz utrošak energije. Odgovor na ovo pitanje još uvek nije dat, pa će futurističke i filozofske projekcije na ovu temu morati da sačekaju nove kosmološke naučne prodore. Ono što izgleda nesumnjivo je da, ukoliko je prostor-vremenski lokalizovano povećanje kompleksnosti inače relativno uniformnog Univerzuma zapravo anomalija, jer je većina Univerzuma i dalje relativno jednostavna, onda postoji međusobna kompeticija lokalnih procesa povećanja kompleksnosti u Univerzumu, jer svaki od njih mora da "pozajmi" entropiju od okruženja, čime se to okruženje osiromašuje i čini sve nepogodnijim izvorom entropijskih

---

<sup>18</sup> Naše mišljenje je da je Čejsonov zaključak pretenciozan, naime, i univerzum kao celina mora da se pokori sopstvenim fizičkim i termodinamičkim zakonima. Drugim rečima, njegovo širenje je *posedica*, a ne uzrok termodinamičkih dešavanja i pravaca kretanje. Kosmos se širi upravo zato što je to termodinamički (u smislu entropije i slobodne energije) najpovoljniji pravac njegovog evolutivnog razvoja. Drugim rečima, širenjem se, ako je ono spontano, slobodna energija *smanjuje*.

pozajmica za dalje i druge procese povećanja kompleksnosti. Drugim rečima, povećanje kompleksnosti je samo-usporavajući proces, osim ukoliko ne postoji mehanizam globalnog povećavanja slobodne energije na nivou Univerzuma kao celine.

#### 1.4. Ešbijev zakon

Ešbijev zakon o neophodnoj raznolikosti (engl. *requisite variety*) je zakon koji se tiče regulatornih procesa u kompleksnim sistemima koji su u homeostatičnoj ravnoteži, i direktno se odnosi na razumevanje odnosa kompleksnosti sredine i kompleksnosti organizma u kontekstu evolutivnih promena. Formulirao ga je kibernetičar Ros Ešbi tokom 50-tih godina 20. veka (Ashby, 1958). S obzirom da su živi organizmi intrinzično kompleksni, a pritom u kvazi-homeostatičnoj ravnoteži sa okolinom<sup>19</sup>, ovaj zakon se direktno odnosi na pitanja regulacije u živim sistemima, ali i šire. Zakon kaže da, ako postoji kibernetički sistem sa kontrolnim mehanizmima, koji može zauzeti različita stanja, tada za potpunu kontrolu stanja kontrolisanog sistema broj stanja u kojima se može naći kontrolni mehanizam mora biti veći ili jednak broju stanja kontrolisanog sistema. Pojednostavljeno, da bi organizam uspešno izašao na kraj sa brojnim i šarolikim izazovima koje predstavljaju promene u životnoj sredini, on mora da ima repertoar mogućih odgovora na te izazove koji je u najmanju ruku jednak (ili veći) od broja izazova. Dakle, sposoban za preživljavanje biće onaj sistem koji može da izađe na kraj sa varijabilnošću životne sredine. Ilustracija važenja ovog zakona ima mnogo, na primer jednostavne bakterije, poput mikoplazme, sa svega par stotina gena zahtevaju vrlo kontrolisane uslove životne sredine za preživljavanje, dok *Escherichia coli* koja ima 10 puta više gena, može preživeti u mnogo složenijim uslovima (jer ima veći arsenal mogućih odgovora na izazove životne sredine) (Carlson & Doyle 2002). Za razliku od fizičkih sistema koji *moгу* biti kompleksni, biološki sistemi *moraju* biti kompleksni (Forestiero, 2022).

U poglavlju 1.3 smo kao jednu od definicija života spomenuli život kao samo-stvaralački sistem (engl. *autopoietic*). Samo-stvaralaštvo se u ovoj definiciji odnosi na činjenicu da se tokom reprodukcije, u sledeće generacije organizama ne ugrađuju neposredno samo informacije iz spoljašnje sredine, dakle organizmi nisu puka refleksija aktuelne sredine, već određeni deo informacija koje se prenose na sledeće generacije prosleđuju, sami predstavljajući njihov izvor. Upravo se u ovoj informacionoj autonomiji krije izvor samo-stvaralaštva. Metrika

---

<sup>19</sup> Jer se i okolina menja, kontinualno traju procesi prilagođavanja biosfere fizičkom okruženju, uz uglavnom sporije promene i samog fizičkog okruženja.

samo-stvaralaštva je predložena nedavno (Fernández i sar., 2014), inspirisana delimično Ešbijevim zakonom (Gershenson, 2015). Prema Geršensonu, samo-stvaralaštvo se može definisati kao odnos između kompleksnosti sistema i kompleksnosti njegove okoline, pri čemu treba imati u vidu da okolina sistema nije ceo univerzum, već samo deo koji interaguje sa sistemom, odnosno utiče na njega (von Uexküll, 1985). Ukoliko je ovaj koeficijent (samo-stvaralaštvo) manji od jedan, to implicira da okolina ima veću kompleksnost od sistema i dominira njegovom dinamikom, dok ukoliko je koeficijent samo-stvaralaštva veći od jedan, to znači da sistem ima veću kompleksnost od svoje okoline, odnosno zadovoljava Ešbijeve zakon i poseduje veći stepen autonomije u odnosu na sredinu. Geršenson smatra da ovaj generalizovani pogled na samo-stvaralaštvo tretira sisteme kao samo-producirajuće ne samo u smislu njihovih fizičkih komponenti, već i u smislu njihove organizacije, koja se može meriti i u terminima informacija i kompleksnosti, što znači da kod samo-stvaralačkih sistema kroz generacije, više sopstvene kompleksnosti potiče od njih samih nego iz njihove okoline. Dakle, veće (informaciono) samo-stvaralaštvo implicira i veću autonomiju.<sup>20</sup>

Stjuart Kaufman (Kauffmann, 1993), priznati teoretičar biologije i istraživač kompleksnih sistema, dao je značajan doprinos našem razumevanju složenih veza između Ešbijeveg zakona o neophodnoj raznolikosti i biološke kompleksnosti u svom poznatom delu „*The Origins of Order: Self-Organization and Selection in Evolution*“ (1993). U njemu Kaufman istražuje nijanse kompleksnih sistema, naglašavajući neke inherentne osobine samo-organizacije bioloških sistema. On tvrdi da biološka složenost nastaje ne zbog kontrole odozgo ili van biološkog sistema, već zbog interakcija i veza među pojedinačnim komponentama unutar sistema. Jedan od ključnih koncepata u Kaufmanovom radu je ideja "reda bez ulaganja", koja sugerise da biološki sistemi, kako evoluiraju, prirodno teže stanju reda i složenosti bez potrebe za spoljnim mehanizmima kontrole. Ovaj koncept se podudara sa Ešbijevim zakonom, jer implicira da biološki sistemi inherentno poseduju neophodnu raznolikost za prilagođavanje svojim stalno promenljivom okruženjima. Kaufman dokazuje da međusobno delovanje između selekcije, mutacija i samo-organizacije dovodi do raznolikih, složenih i prilagodljivih bioloških mreža. Drugi važan koncept u Kaufmanovim istraživanjima odnosi se na princip "susednog mogućeg", odnosno ideju da evoluirajući biološki sistemi kontinuirano istražuju nove mogućnosti i inovacije, što dovodi do širenja njihovih potencijalnih konfiguracija. Ova stalna

---

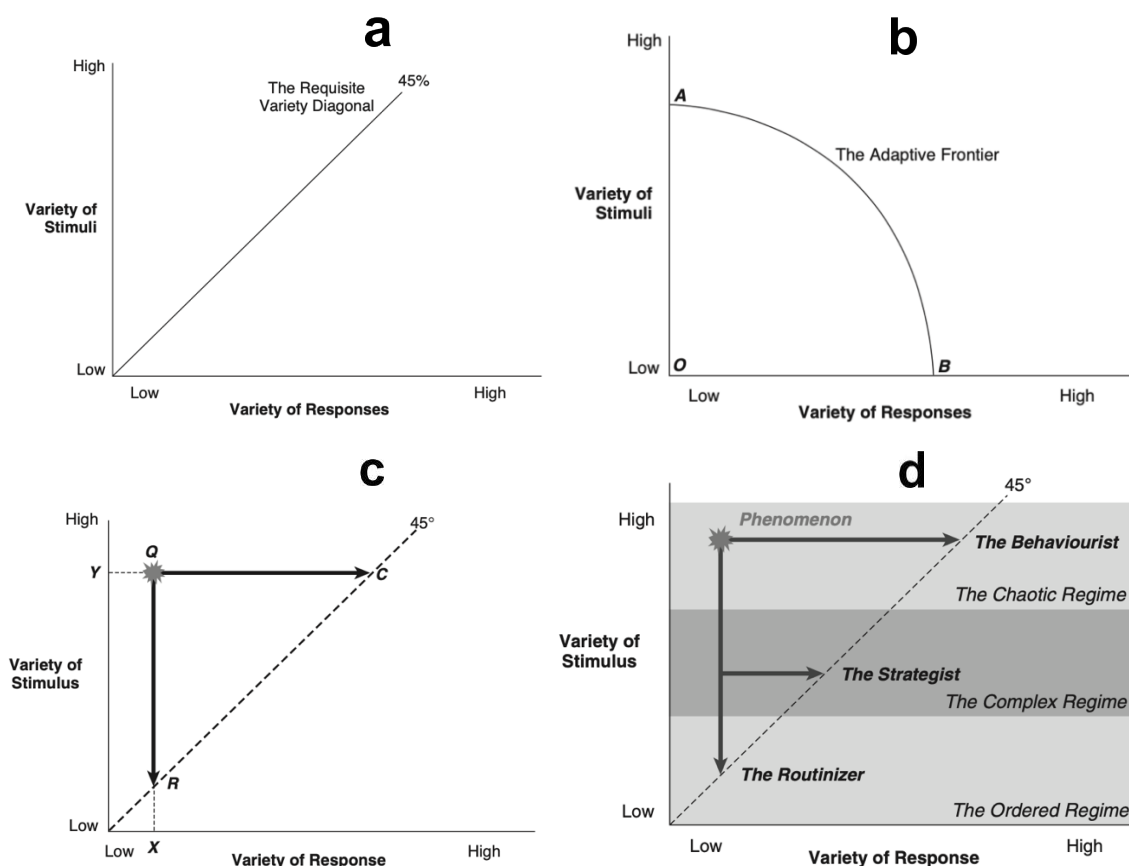
<sup>20</sup> Treba napomenuti da, ukoliko ideja samo-stvaralaštva daje iscrpan opis definicije "živog", sledi da prelaz iz neživog u živo nije diskretan, već postepen, te da postoje nijanse živog, jer koeficijent samo-stvaralaštva može zauzeti čitavu seriju kontinualnih vrednosti. Takođe, prema ovoj ideji, možemo konstruisati život na ne-biološkoj osnovi; jedini kriterijum života ostaje mogućnost samo-stvaralaštva, odnosno informacione autonomije.

dinamička istraživanja mogućih opcija u "susedstvu" postojećih rešenja održavaju neophodnu raznolikost potrebnu za snalaženje u složenim biološkim okruženjima, u skladu sa zahtevima Ešbijeovog zakona. Osim toga, Kaufmanova istraživanja predstavljaju izazov redukcionističkom, pa donekle i analitičkom, pristupu biologiji tako što ističu ograničenja izolovanog razmatranja složenih bioloških sistema. Kaufman tvrdi da se manifestne osobine bioloških sistema ne mogu potpuno razumeti izolovanim analiziranjem pojedinačnih gena, proteina ili organizama, već, umesto toga, ove manifestne osobine proizlaze iz kolektivnog ponašanja i interakcija mnogih komponenata unutar sistema, što je perspektiva koja rezonira sa holističkim implikacijama Ešbijeovog zakona.

Ešbijeov zakon o neophodnoj raznolikosti, pored kibernetike i uloge u razumevanju biološke kompleksnosti, našao je primenu i u drugim oblastima. Na primer, Nikolas Luman (Luhmann, 1984) ponudio je jedinstvenu perspektivu na Ešbijeov zakon neophodne raznolikosti i njegovu primenu na društvene sisteme kreirajući eksplicitne analogije sa biološkim sistemima kako bi razjasnio koncept neophodne raznolikosti i njegovu relevantnost u razumevanju dinamike društvene kompleksnosti. Lumanova istraživanja počinju prepoznavanjem društva kao kompleksnog, samo-organizujućeg sistema, sličnog biološkim ekosistemima. Luman je tvrdio da se društvo, kao i ekosistemi, suočava sa stalnim izazovima i promenama okruženja koje zahtevaju visok stepen raznolikosti i prilagodljivosti u cilju njegovog nesmetanog funkcionisanja. Baš kao što vrste unutar ekosistema moraju da se prilagode različitim ekološkim nišama kako bi opstale, društvene institucije i uloge moraju biti raznovrsne i prilagodljive kako bi se nosile sa šarolikim zahtevima međuljudskih interakcija. Jedna od centralnih bioloških analogija na koju se Luman oslanjao bila je ideja "konstrukcije niše". U biologiji, konstrukcija niše se odnosi na ideju da organizmi ne samo da se prilagođavaju svojoj okolini, već je i aktivno menjaju i oblikuju kako bi je prilagodili svojim potrebama. Luman je primenio ovu ideju na društvene sisteme, sugerišući da društvo, kroz svoje različite institucije, konstruiše i prilagođava sopstvene niše kako bi ispunilo specifične društvene funkcije. Ovaj dinamički proces konstrukcije niše u društvu odražava potrebu za neophodnom raznolikošću, kako bi se efikasno odgovaralo na različite unutrašnje izazove. Luman je istraživao i ranije pomenuti koncept samo-stvaralaštva u društvenom okruženju tvrdeći da društveni sistemi, slično živim organizmima, moraju neprestano da se reprodukuju i obnavljaju kako bi opstali, odnosno ispunili zahteve Ešbijeovog zakona. Naglašavajući paralele između društvenih i bioloških sistema, Luman produbljuje naše razumevanje delovanja neophodne raznolikosti u kompleksnim adaptivnim sistemima, i ističe njenu važnost u oblikovanju dinamike društva.

Lumanovo delo služi kao most između domena sociologije i biologije, otkrivajući univerzalnost Ešbijevog zakona i njegove implikacije za razumevanje složenosti u različitim oblastima.

Boiso i MekKelvi su dali šematski prikaz i odredili semantičke sadržaje pojmovima u direktnoj vezi sa Ešbijevim zakonom, uključujući "Ešbijev prostor", i tri ontološka režima odnosa raznolikosti okruženja (stimulus) prema raznolikosti odgovora na stimulse. Slika 1, preuzeta iz njihovog rada, pokazuje ključne derivate Ešbijevog zakona (Boisot and McKelvey, 2011).



Slika 1. Šematski prikaz: a) Ešbijevog prostora, b) adaptivnog horizonta, c) mogućih pravaca razvoja strategija odgovaranja na stimulse iz spoljašnje sredine, i d) tri tipa odgovora agenta na spoljašnje stimulse u tri režima okruženja [preuzeto iz Boisot and McKelvey, 2011]

Prema Ešbijevom zakonu, preživljavanje svakog sistema (npr. organizma, ili "agenta", prema terminologiji Boisoa i MekKelvija) u direktnoj je korelaciji sa šarolikošću mogućih odgovora na stimulse iz spoljašnje sredine koje sistem može da mobilise. Autori razlikuju dve vrste mogućih odgovora: 1) bihevioralne, i 2) kognitivne. Bihevioralni odgovori su odgovori van bilo kakve kognitivne kontrole, na primer refleksne radnje ili hormonalne reakcije u slučaju živih bića. Stvarni odgovori često predstavljaju kombinaciju bihevioralnih i kognitivnih komponenti, na primer u slučaju suočavanja organizma sa neposrednom pretnjom, recimo

predatorom, gde hormonalne reakcije (lučenje adrenalina) prati i kognitivna odluka o begu ili borbi (Boisot and McKelvey, 2011). Odgovori organizma su zapravo odgovori ne na stvarne procese u okruženju, nego na njihove reprezentacije — strukturirane opise objektivnog okruženja. Prednost operisanja nad reprezentacijama je u automatskom odvajanju signala od šuma, odnosno filtriranje smislenih, sistematskih i regularnih signala iz okruženja od stohastičkih, haotičnih i slučajnih signala. Drugim rečima, reprezentacije odvajaju efektivnu kompleksnost opisanu u potpoglavlju 1.1, od sveukupne, "sirove" kompleksnosti, prema Gelmanovoj terminologiji (Gell-Mann, 1994).

Naše mišljenje je da svođenje okruženja na reprezentacije, iz perspektive agenta, nije ništa drugo nego kombinacija simultane generalizacije i cenzure, sa ciljem ekonomisanja raspoloživim resursima i fokusiranja na one aspekte spoljašnjih stimulusa koju su važni za agent-specifične svrhe, potrebe i interese. Ideja da deklarisanje stimulusa kao smislenog signala ili šuma zavisi od motiva, namera i interesa agenta pojavljuje se u radovima više autora (npr. Gell-Man, 2002, Dennett, 1987), kao i ideja da je redukcija okruženja na reprezentacije zapravo hod linijom manjeg otpora, koja se u krajnjoj instanci svodi na ekonomisanje resursima (Ball, 2004; Vermeij, 2004).<sup>21</sup>

Odnos raznolikosti signala (stimulusa) prema raznolikosti mogućih odgovora na stimuluse konstituše tzv. Ešbijev prostor, prikazan na **Slici 1a**. Ovaj prostor određuju opseg stimulusa iz okruženja (koji prolazi filtere agenta, npr. perceptivni aparat), prikazan na Y-osi, i opseg odgovora koje agent (organizam) može da generiše, prikazan na X-osi. Dijagonala pokazuje optimalnu (i neophodnu) raznolikost odgovara koja korespondira sa kompleksnošću stimulusa. Svaka kompleksifikacija iznad te granice (prostor dole-desno od dijagonale) podrazumeva neoptimalno trošenje resursa, npr. vremenskih ili energetske. Boiso i MekKelvi ističu da postoji kompeticija između bihejvioralnih i kognitivnih odgovora (što je organizam složeniji više je kognitivnih), a kao primer navode pticu, majmuna i čoveka, gde su kod ptice odgovori predominantno bihejvioralni, kod majmuna mešoviti, a kod čoveka u većoj meri kognitivni. Na **Slici 1b** prikazan je Ešbijev adaptivni horizont, koji predstavlja prostor u kom je agent sposoban za adaptaciju, s obzirom na ograničenja u budžetu (spektru) mogućih

---

<sup>21</sup> Iz naše perspektive, ceo konstrukt je problematičan jer se i aparat cenzure mora smatrati delom kompleksnosti samog agenta, čak i ako je ugrađen i automatski, recimo u perceptualni aparat. Tada je redukcija kompleksnosti samog agenta koja mu omogućava da se izbori sa okruženjem, a koja je omogućena filtracijom spoljašnjih signala plaćena kompleksifikacijom perceptualnog aparata. Ako je perceptualni aparat i sam deo agenta, tada se i njegova kompleksnost mora uzeti u obzir u evaluaciji ukupne kompleksnosti agenta. Ešbijev zakon bi morao na izvestan način da važi i za odnos senzorni mehanizam – okruženje, jer filtracija složenih signala od šuma zahteva vrlo kompleksan senzorni aparat, pa je pitanje kolika je, i da li postoji, ušteda kompleksnosti cenzurom.

odgovora<sup>22</sup>. Ukoliko kompleksnost stimulusa izađe van okvira adaptivnog horizonta, agent (organizam) doživljava dezintegraciju, odnosno adaptivni neuspeh, jer ne uspeva da se prilagodi okruženju. Iako neuspeh agenta može biti kognitivni (ne primer neuspeh u obradi signala iz okruženja, ili pravilnog formulisanja odgovora) ili fizički (nesposobnost da se kognitivna odluka materijalizuje/sprovede), ove dve vrste neuspeha povlače, odnosno uzrokuju jedna drugu. U idealnom scenariju, organizam pokušava da optimizuje količinu resursa koje troši za generisanje adaptivnih odgovora tako da uvek ostane ne samo u okviru zone OAB na **Slici 1b**, već zapravo na samoj dijagonali u okviru te zone, prikazanoj na **Slici 1a**<sup>23</sup>. Interesantno je da sofisticiranost perceptivnog aparata utiče na to da se sistem može izboriti sa većom kompleksnošću stimulusa (jer *de facto* operiše sa njihovim reprezentacijama dobijenim transformisanjem sirovih stimulusa), čime se menja i oblik samog adaptivnog horizonta i nagib krive Ešbijeovog prostora, jer je manji broj mogućih odgovora, odnosno manji budžet resursa dovoljan da održi ravnotežu organizma sa okruženjem. Takođe, socijalne interakcije (međuljudska saradnja) i razvoj tehnologije kod čoveka su proširili adaptivni horizont, pa čovek kao vrsta može izaći na kraj sa varijabilnim okruženjem, odnosno njegov budžet resursa je značajno proširen<sup>24</sup>.

**Slika 1c** prikazuje dva moguća scenarija nakon suočenja organizma sa relativnim viškom kompleksnosti stimulusa. Inicijalno stanje, obeleženo sa X na x-osi, pokazuje raznolikost mogućih odgovora organizma u inicijalnom stanju. Ukoliko se ovakav organizam izloži stimulusima kojima ne može da parira, on ima nekoliko izbora. Može da reaguje čisto bihevioralno, generišući različite odgovore putem mehanizma pokušaja-i-pogreške, krećući se horizontalno ka tački C na **Slici 1c**, uz mogućnost da će se jedan od tih odgovora pokazati kao adaptivan. U ovom scenariju kognitivna simplifikacija odgovora nedostaje, kompleksnost stimulusa ostaje nataknuta uz rizik da potrošnja resursa prevaziđe adaptivni horizont. U ovakvoj situaciji, u odsustvu i predviđanja i anticipacije budućih stimulusa, a s obzirom na egzistencijalne rizike, Boiso i MekKelvi sugerišu da je najoptimalnija strategija zapravo — čekati, umesto generisanja različitih, a u suštini nasumičnih odgovora, uz potrošnju resursa. Drugi scenario je scenario u kom organizam uspeva da, uz kognitivni napor ili iz prethodnog

---

<sup>22</sup> Ograničenja su uglavnom vremenska, energetska ili prostorna.

<sup>23</sup> Iako u okviru budžeta raspoloživih resursa, organizam može i u OAB zoni da bude u suboptimalnom adaptivnom stanju; levo gore može biti nedovoljno varijabilan (fleksibilan) u odgovorima, a dole desno može generisati nepotrebnu kompleksnost trošeći resurse.

<sup>24</sup> Socijalne interakcije nisu specifično vezane za čoveka, i druge vrste na sličan način povećavaju budžet raspoloživih resursa, na primer mravi, pčele, itd.

iskustva, interpretira veliki deo stimulusa kao šum, da ih kognitivno ili iskustveno filtrira i simplifikuje, čime redukuje i kompleksnost odgovora neophodnih za postizanje ravnoteže — dijagonale Ešbijeovog prostora. Odgovori organizma su, u opštem slučaju, kombinacija kognitivnih i bihevioralnih elemenata, pri čemu organizam da bi preživeo, mora da postigne ravnotežu ostajući u okvirima svog adaptivnog horizonta, odnosno raspoloživog budžeta. Iz tog razloga, kognitivna i/ili perceptivna simplifikacija i interpretacija spoljašnjih signala implicira smanjenje egzistencijalnih rizika, jer se dijagonala Ešbijeovog prostora nalazi dublje u zoni adaptivnog horizonta u delu u kom je bliža početku koordinatnog sistema na **Slici 1a**, odnosno u delu u kom je (interpretirana) raznolikost stimulusa manja.

Na **Slici 1d** prikazana su tri ontološka režima Ešbijeovog prostora — haotični, kompleksni i uređeni<sup>25</sup>. Podela je u osnovu izvršena na osnovu raznolikosti stimulusa kojima je agent izložen, formirajući tri horizontalne zone na dijagramu Ešbijeovog prostora. U haotičnom režimu, visoka raznolikost prispelih stimulusa onemogućava ekstrakciju korisnih informacija i iz perspektive agenta deluje haotično. Organizam obično ostaje bez resursa pre isteka adaptivnog vremenskog okvira, a izbor strategije odgovora, kao što je pomenuto ranije, svodi se ili na čekanje do eventualnog prepoznavanja regularnosti u stimulusima, ili na nasumične pokušaje-i-pogreške, što će u krajnjoj liniji zavisiti i od raspoloživosti resursa organizma. U uređenom režimu, za razliku od haotičnog, stimulusi su po svojoj prirodi linearni, uobičajeni i jednostavni za interpretaciju i obradu od strane organizma (agenta). Između ovih ekstrema nalazi se kompleksan režim, u kom se regularnosti koje se pojavljuju svode na dva tipa regularnosti: redukcionističke i neskaliране<sup>26</sup>. U kompleksnom režimu, od inteligencije organizma zavisi koliki će broj regularnosti uspeti da interpretira, redukuje, i samim tim oslobodi resurse koje bi na njih nepotrebno trošio za one stimuluse koji izmiču interpretaciji. U slučaju čoveka, primer za ovu vrstu manevra bi bio razvoj mehanike, odnosno mehanicistička redukcija posmatranog kretanja u okruženju na ograničen broj jednostavnih mehaničkih zakona. Interesantno, prema Boisou i MekKelviju preterana redukcija koja nastaje kao posledica dotadašnje uspešnosti dovodi do Milerovog Paradoksa Ikara (Miller, 1990), odnosno gubitka sposobnosti dalje adaptacije, i konzerviranja u postojećem stanju („fossilizacije“), a što neminovno dalje vodi u situacije u kojima će izazovi spoljašnje sredine koja se stalno menja

---

<sup>25</sup> Prema terminologiji Boisou i MekKelvija.

<sup>26</sup> Podela je data prema Gelmanu (2002). Redukcionističke regularnosti su one koje se jednostavno reflektuju važećim formalizmima naučnih zakona, dok su neskaliране regularnosti one koje nastaju akumulacijom slučajnih događaja umreženih međusobnim nelinearnim interakcijama, koje izmiču lakom i jednostavnom naučnom objašnjenju (recimo prirodne nepogode, čija distribucija i intenzitet sledi engl. "power-law").

preći granicu adaptivnog horizonta, i ostaviti organizam bez adekvatnih odgovora. Koji će od tri ontološka režima odgovaranja/reakcije agent izabrati, zavisi upravo od percipirane kompleksnosti stimulusa, a koja opet zavisi od perceptivnih i interpretativnih moći agenta, odnosa kognitivnih i bihevioralnih komponenti odgovora, i na kraju samih raspoloživih resursa. **Slika 1d** prikazuje sve moguće pravce kretanja odgovora organizma u slučaju izlaganja stimulusima, od kojih se neki mogu pokazati kao uspešni (adaptivni).

Ešbijejev zakon, kao što je pokazano na **Slici 1**, nam pomaže da bolje razumemo kako organizmi i ekosistemi reaguju na različite promene u okolini, prilagođavajući se i održavajući ravnotežu, uključujući i analizu složenosti i adaptabilnosti bioloških sistema, a što je ključno za razumevanje njihove evolucije i funkcionisanja u dinamičnom okruženju.

### 1.5. Odnos simetrije i kompleksnosti

*„Narušena simetrija je najčistiji primer procesa  
emergencije...”<sup>27</sup>*

*- Filip Anderson, "More is Different" (Science,  
1972)*

Već iz uvodnog citata vidi se da pojam simetrije ima poseban odnos prema pojmu emergencije, a odnos kompleksnosti i emergencije se u više pokušaja konstituisanja pojma kompleksnosti predstavljenih ranije javlja kao ključan. Iz tog razloga, opravdano bi moglo da se pretpostavi da pojmovi simetrije i kompleksnosti stoje u posebnom odnosu, naročito u pogledu živog sveta u kom i kompleksnost i simetrija predstavljaju sveprisutna svojstva. U ovom poglavlju osvetljavamo tu temu.

Šta je simetrija? Iako odgovor na ovo pitanje na prvi pogled ne izgleda previše izazovno, zbog specifičnosti konteksta u ovom radu (evoluciona biologija) situacija je nešto složenija. Reč „simetrija“ vodi poreklo od grčke reči  $\sigma\upsilon\mu\mu\epsilon\tau\rho\rho\iota\alpha$ , što znači sklad u dimenzijama, proporciji i rasporedu. Matematička definicija simetrije je nešto preciznija, i znači invarijantnost objekta u odnosu na operacije translacije, refleksije, rotacije i promene veličine (skaliranja)<sup>28</sup>.

---

<sup>27</sup> Filip Voren Anderson bio je američki teoretski fizičar rođen 1923. godine. Dobitnik je Nobelove nagrade za fiziku 1977. godine, zajedno s Džonom H. Van Vlekom i Nevilom F. Motom, za njihova nezavisna teorijska istraživanja osnovnih svojstva magnetizma u antiferomagnetima, feromagnetima i nemagnetskim kristalima. Njegovo poznato delo "More is Different" ("Više je drugačije") iz 1972. godine postavilo je temelje za razumevanje fenomena emergencije i kompleksnosti u fizici i drugim oblastima. Njegov rad i doprinosi imaju dubok uticaj na različite oblasti fizike i nauke, a on se smatra jednim od najuticajnijih teoretskih fizičara 20. veka.

<sup>28</sup> Na prvi pogled izgleda da će svaki objekat biti invarijantan u odnosu na operaciju skaliranja, jer ona održava unutrašnje odnose nepromenjenim. Dok ovo važi za matematičke objekte, za fizičke objekte ne važi, jer skaliranje

Asimetrija, kao suprotan pojam, odnosi se na nedostatak bilo kakve vidljive simetrije ili ravnoteže u objektu ili sistemu. Disimetrija, na kraju, odnosi se na nedostatak potpune simetrije, odnosno na prisustvo blagih nepravilnosti koje razlikuju delove jedne od drugih. Ovo može uključivati razlike u obliku, veličini ili rasporedu elemenata. Kao što će biti kasnije pokazano, disimetrija ima naročit značaj i ulogu u biologiji. Treba primetiti da se do sada prikazani pojmovi simetrije i njenih suprotnosti ili devijacija odnose na oblik, prostornu ili vizuelnu strukturu. U biologiji, odnosno u živim sistemom u kojima su funkcije poput metabolizma, kretanja ili transporta nutrijenata usklađene jedna sa drugom, često se koristi i pojam *funkcionalne* simetrije. Međusobno harmonizovane funkcije koje ostaju invarijantne (konzervirane) u odnosu na proces samo-reprodukcije u biologiji se smatraju funkcionalno-simetričnim (Mainzer, 2005). Procesi adaptacije, očuvanja vrste, metabolizma, itd, zahtevaju (nelinearne) funkcionalne interakcije između delova organizama međusobno, kao i sa okruženjem, i mogu se posmatrati i iz perspektive simetričnosti. Majncercer piše: „*Pojava novih formi života sa sve većom kompleksnošću omogućena je nelinearnom dinamikom samo-organizovanja*“. Objašnjenje biološke evolucije, kompleksnosti i diverziteta, iz tog razloga mora da uzme u obzir i aspekte simetričnosti, a naročito narušavanja simetričnosti — pojavu disimetrije.<sup>29</sup>

Ako bi se definisala nekakva skala simetrije sa rasponom od savršene simetrije do potpunog haosa, pri čemu bi na čelu bili kristali koji bi reprezentovali savršenu simetriju<sup>30</sup>, pa preko parakristala, tečnih kristala, gelova, realnih i idealnih fluida i gasova na začelju, koji bi reprezentovali haotično stanje, živi organizmi, prema Majncerceru, bili bi negde na sredini. Njihova simetrija je *statistička*, jer se tokom samo-reprodukcije funkcionalni obrasci manje-više održavaju, ali dolazi i do odstupanja (npr. mutacija) koje omogućavaju diverzitet i individualitet živog sveta. Drugim rečima, (statistička) simetrija u živom svetu zapravo predstavlja veličinu raspršenu oko srednje vrednosti, sa nekom standardnom devijacijom. Tek procesom apstrakcije u našim heurističkim modelima, dolazimo do (fiktivne) ideje

---

fizičkih objekata uz konstantne dimenzije njihovih sastavnih delova, npr. atoma, znači da će se tokom skaliranja broj i raspored unutrašnjih elemenata menjati, što ukazuje na odsustvo simetrije u odnosu na skaliranje. Naše mišljenje je da je invarijantnost u odnosu na skaliranje čisto teorijski, imaginarni konstrukt rezervisan za domen matematike.

<sup>29</sup> Interesantan primer važnosti narušavanja simetrije nalazi se kod adeno-virusa (Mainzer, 2005). Naime, u svojoj inaktivnoj, koagulisanjoj formi, adeno-virus predstavlja jedan geometrijski savršeno simetričan nukleinsko-proteinski sklop. Da si se pokrenuli životni procesi, odnosno kada se oni pokrenu, ova simetričnost se narušava. Bioaktivni virus više nije simetričan, što ponovo podseća na važnost narušavanja simetrije u biološkim procesima.

<sup>30</sup> Naše mišljenje je da je simetrija kristala *savršena* samo na apsolutnoj nuli, koja nije dostižna zbog drugog principa termodinamike. Stoga, samo su *modeli* kristala savršeni, njihove idealizovane predstave. Realni kristali na temperaturama iznad apsolutne nule su u stalnom stanju narušene simetričnosti.

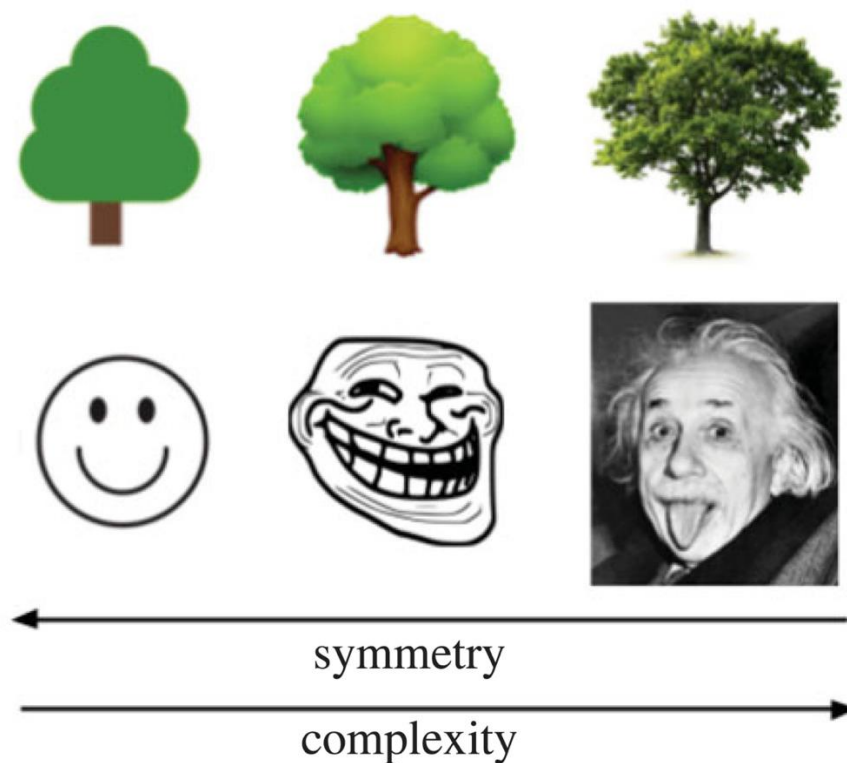
simetričnosti (Mainzer, 2005). Strukturna simetrija živog sveta javlja se kao posledica funkcionalnih zahteva, i ne može se svesti na molekularnu strukturu, te stoga predstavlja jedno od emergentnih svojstava koje ukazuju na kompleksnost. Najčešća simetrija u živom svetu je bilateralna simetrija u kojoj sagitalna ravan deli organizam na dve polovine koje se odnose jedna prema drugoj kao predmet i lik u ogledalu, i javlja se u 95% živog sveta. Majncer sugerise da je ovo posledica potrebe za kretanjem organizama unapred, pod pravim uglom u odnosu na linije gravitacione sile. U kombinaciji sa bilateralnom simetrijom, i određene proporcije tela (npr. koje sadrže zlatni presek) pokazuju se kao optimalne s obzirom na prirodu sredina kroz koje se kretanje vrši (voda, vazduh), odnosno predstavljaju oblike adaptacije. Majncer sugerise da je očigledno gravitacija uzrok bilateralne simetrije. Posle bilateralne, radijalna simetrija je najčešći oblik simetrije, i javlja se kod slobodno plutajućih (npr. meduze) ili sedentarnih organizama. Ređi oblici simetrije, sferna i spiralna simetrija se takođe javljaju u živom svetu, najčešće kod vodenih organizama. Uporedo sa simetrijom, kod živih organizama se uočava i sistematsko prisustvo asimetrije, odnosno disimetrije, kao deo njihove sveukupne nelinearne dinamike, o čemu će biti nešto reči kasnije u ovoj sekciji, sa fokusom na slučaj cerebralne disimetrije i specijalizacije delova dve hemisfere mozga čoveka i primata uopšte.

Odnos simetrije i kompleksnosti, naročito u domenu biologije, je kontroverzno pitanje. Priroda ove kontroverznosti se može pojednostavljeno objasniti kroz sledeći problem: u fizici je poznato da je narušavanje simetrije zapravo analogno uvođenju kompleksnosti u fizičke sisteme, što znači da su simetrije i kompleksnost obrnuto proporcionalni, dakle stoje u inverznom odnosu. Čak se i percepcija odnosa simetrije i kompleksnosti, bez fokusiranja na analizu prirode ovih pojmova i njihovog odnosa, dakle spontano, doživljava kao obrnuto proporcionalna (Videti **Sliku 2**). U biologiji, međutim, izgleda da se simetrija javlja u procesu evolucije kao adaptivna prednost, kao rezultat prirodne selekcije, a isto važi i za kompleksnost, bar u skladu sa shvatanjem većine neodarvinizmu naklonjenih evolucionih biologa. Dakle, simetrija i kompleksnost u biološkoj evoluciji rastu istovremeno i *zajedno*, iako bi trebalo da su u antagonizmu. Kako je to moguće? Koje je poreklo simetrije u biologiji? Kakva je njena uloga u razvoju kompleksnosti bioloških entiteta?

Biološke strukture često pokazuju modularnost i simetriju, ali poreklo takvih tendencija nije sasvim razumljivo. Prva asocijacija je verovatno da simetrija i modularnost proističu iz prirodne selekcije, odnosno da se poreklo simetrije može objasniti nekom vrstom adaptacionizma. Odmah se javlja i problem, ako je adaptacija na neki način refleksija trenutnog i lokalnog okruženja organizma ili populacije, zašto se onda simetrija javlja u tolikom obimu,

kod tolikog broja različitih bioloških sistema, i na tako mnogo nivoa organizacije, u veoma različitim lokalnim okruženjima?

Pored klasičnog adaptacionističkog objašnjenja u optičaju su i ne-adaptacionistička alternativna objašnjenja porekla simetrije. Na primer, u skorašnjoj studiji (Johnston *et al*, 2022) ponuđeno je neadaptacionističko objašnjenje porekla simetrije, bazirano na informatičkoj teoriji. Autori studije su predložili da se simetrične strukture stvaraju ne samo zbog prirodne selekcije, već i zato što zahtevaju manje specifičnih informacija za kodiranje i stoga je njihov nastanak mnogo verovatniji kao fenotipska varijacija dobijena putem slučajnih mutacija, što je samo poseban slučaj načelnije evolutivne preference ka fenotipovima niže opisne (deskriptivne) kompleksnosti.<sup>31</sup> Pri nasumičnim mutacijama, simetrični fenotipovi mnogo su verovatniji kao rezultat potencijalne varijacije genotipa, čak i ako se varijacija genotipa mutacijama odvija bez obzira na buduće fenotipske efekte, tako da može nastati snažna sklonost ka simetriji čak i bez prirodne selekcije u korist simetrije.



**Slika 2.** Mentalna reprezentacija kompleksnosti dva objekta korišćenjem različitih obima simetričnosti.

[preuzeto iz Ferraro *et al*, 2023]

<sup>31</sup> Zaključak sledi iz algoritamske teorije informacija i, interesantno, u direktnoj je suprotnosti sa verovanjem da se tokom evolucije kompleksnost aktivno povećava, odnosno da postoji preferencija ka *većoj* kompleksnosti. Treba naglasiti da su autori iskoristili izraz opisna kompleksnost sa posebnom svrhom, naglašavajući da se radi o kompleksnosti genotipa koji kodira fenotip, a ne direktno kompleksnosti fenotipa.

Džonston i saradnici su analizom ogromnog broja proteinskih kompleksa<sup>32</sup> potvrdili ovu hipotezu, uočavajući jasnu sklonost ka simetričnim rešenjima niže Kolmogorovljeve kompleksnosti. Pored toga, oni su sproveli i seriju kompjuterskih simulacija evolucije kvatenarnih proteinskih struktura, koje su potvrdile zaključke iz prethodnih opservacija. Gorenavedeni argumenti su dovoljno opšti da sugerišu da mnogi biološki sistemi, pored obrađenog primera, mogu favorizovati jednostavnost i visoku simetriju, pri tom ne zahtevajući selektivne prednosti ovih svojstava. Džonstonov argument je već doživeo i prve kritike (Ocklenburg and Mundorf, 2022). Naime, čak i ako postoji evolucionarna preferenca prema simetriji kod jednostavnijih bioloških struktura, kod složenijih bioloških struktura izgleda postoji evolucionarni pritisak prema razvijanju asimetrije, što ukazuje da se emergencija simetrije ne može posmatrati odvojeno od emergencije asimetrije. Kao primer koji podržava njihovu kritiku, autori su naveli ljudski mozak. Iako dva dela mozga na prvi pogled izgledaju otprilike simetrično, nedavno istraživanje je pokazalo da su za kortikalna područja mozga strukturalne asimetrije leve i desne strane pravilo, a ne izuzetak. U studiji koju kritičari navode, pokazano je da 91,1% kortikalnih regiona pokazuje značajne asimetrije u površinskim područjima, a 76,5% regiona pokazuje značajne asimetrije u debljini korteksa. Slični rezultati pronađeni su u istraživanju koje je bilo usmereno na asimetrije u subkortikalnim strukturama. Osim ovih strukturalnih asimetrija, ljudski mozak pokazuje funkcionalne asimetrije na mnogo različitih nivoa, na primer, levo-desno razlike u obradi jezika, lica ili emocija. Komparativna istraživanja su pokazala da su asimetrije mozga uobičajene kod svih glavnih grupa kičmenjaka i mogu se čak uočiti i u znatno jednostavnijim nervnim sistemima insekata i drugih beskičmenjaka. Kritičari nude i objašnjenje zašto nervni sistemi razvijaju ove asimetrije. Naime, u veoma složenom i energetske zahtevnom sistemu poput mozga, asimetrična organizacija daje nekoliko prednosti, uključujući poboljšane mogućnosti obavljanja više radnji istovremeno (engl. *multitasking*), energetske efikasniji dizajn izbegavanjem nepotrebnog ponavljanja (engl. *redundancy*) procesorskih jedinica i poboljšanu kontrolu akcija izbegavanjem bilateralne interferencije (Ocklenburg and Mundorf, 2022). Primer sugerise da simetrija možda nije uvek pozitivna za kompleksne biološke strukture poput mozga, i da je razbijanje simetrije ključan korak u razvoju svih nervnih sistema. Autori navode, pozivanjem na odgovarajuće reference, da je posebno zanimljivo da su mnogi neurološki i psihički poremećaji povezani sa smanjenim asimetrijama mozga. Džonston i saradnici su naravno, odgovorili na ovu kritiku, u debati koja

---

<sup>32</sup> Analizirali su 34.287 kvatenarne strukture proteinskih kompleksa, a za metriku kompleksnosti usvojili su Kolmogorovljevu kompleksnost.

još uvek traje. Oni su naglasili da je opšta tendencija ka jednostavnosti oličenoj u simetriji samo specijalan slučaj opšte tendencija ka jednostavnosti uopšte, i da je sasvim moguće i u suštini komplementarno, a ne protivrečno njihovim komentarima, postojanje drugih *jednostavnih* i asimetričnih manifestacija tendencije ka jednostavnosti. Kao primer su naveli algoritamski jednostavne fraktalne asimetrične strukture pluća i vaskularnog sistema, oblika biljaka i, potencijalno, strukture mozga (Johnston *et al*, 2022a). Pored ovih primera, i proteinski klasteri pokazuju mala odstupanja od savršene simetrije, delimično zbog toga što savršena simetrija stvara nesavršene hemijske veze i uglove na spojevima između jedinica. Pozitivni i negativni adaptivni pritisci koji udaljavaju od savršene simetrije mogu važiti i za mozak i nervne sisteme uopšte. Autori na neki način priznaju da postoji balans između dve grupe faktora — opšte težnje ka jednostavnosti, koja je u fokusu njihove prvobitne studije, i selekcijom odabranih svojstava bioloških sistema koja slede obrazac adaptacije. Prema prvoj grupi faktora, evolucija bi trebalo da pokazuje opštu težnju ka jednostavnosti, a ne trend povećanja kompleksnosti, dok sa druge strane potomci mogu da pokazuju složenija rešenja iz prostog razloga što je bilo više vremena na raspolaganju da genom variranjem omogući ispitivanje većeg broja potencijalnih rešenja. Autori priznaju da je određivanje balansa između ove dve grupe faktora jedan od najvećih izazova našeg vremena.

Kako se hipoteze u poreklu simetrije uklapaju u opštu sliku odnosa kompleksnost–simetrija, s obzirom da je, kao što je već spomenuto, simetrija suprotnost kompleksnosti? P. V. Anderson, dobitnik Nobelove nagrade za fiziku, zastupao je tezu da povećanje nivoa narušavanja simetrije u sistemima sa mnogo međusobno interagujućih komponenti korelira sa povećanjem kompleksnosti i funkcionalne specijalizacije (Anderson, 1972). Narušavanje simetrije, koja može nastati na više nivoa, čest je slučaj u biologiji. Narušavanje simetrije duž dobro definisanih osa blisko je povezano sa funkcionalnom diversifikacijom na svakom biološkom nivou, od molekularnih sklopova, preko subćelijskih struktura, do samih tipova ćelija, arhitekture tkiva i embrionalnih telesnih osa (Li and Boverman, 2010). Objavljene su serije studija koje pokazuju da je upravo narušavanje simetrije na subćelijskom nivou odgovorno za mnoštvo specifičnih funkcija, poput usmerenog kretanja, rasta, deobe, itd.<sup>33</sup> Poreklo makroskopske asimetrije u biologiji često leži u asimetrijama na mikro-nivou. Na primer, asimetrija anatomije leve i desne strane tela kod kičmenjaka, javlja se kao posledica asimetrije u molekularnom sastavu, pozicioniranju i orijentaciji subćelijskih struktura nazvanih

---

<sup>33</sup> Radi preglednosti, ne specificiramo reference ovde, mogu se pronaći u Li i Boverman, 2010.

nodalne cilije, koje mogu generisati tok vanćelijske tečnosti kroz tkivo što na kraju rezultira anatomskom asimetrijom tela u pravcu levo-desno (Hirokawa *et al*, 2009). U poslednjih par decenija, kroz kombinaciju savremenih metoda hemijske instrumentalne analize, tradicionalne genetike i biohemije, i teorijskih i kompjuterskih metoda, identifikovan je veliki broj, ako ne i većina, ključnih molekularnih učesnika u procesu narušavanja simetrije, uz značajno unapređenje objašnjenja i prediktivnih tehnika (Li and Bowerman, 2010). Vrlo generalizovani zaključak je da se simetrija najčešće, ali ne samo u tom slučaju, narušava zbog postojanja fizičkih i biohemijskih mehanizama pojačavanja "signala" koji su postojali i pre narušavanja simetrije, putem sistema povratnih sprega, a koji su pre narušavanja simetrije predstavljali prolazne signale, ili čak šum. Ovi signali su ili lokalizovani signali koji predstavljaju stimulse iz okoline, ili karakteristični signali nasleđeni iz sopstvene istorije samih bioloških sistema.<sup>34</sup> Savremeni pogled na ovu temu je da je narušavanje simetrije rezultat interakcije (nelinearne) dinamike sistema i internih ili eksternih signala koji usmeravaju tok interakcije ka konačnom ishodu.<sup>35</sup> Mi zapravo tek počinjemo da razumemo narušavanje simetrije kao dinamičnu posledicu sistema molekularnih interakcija koje deluju u fizičkom kontekstu živih ćelija i njihovog neposrednog okruženja. Matematički modeli i kompjuterske simulacije pokazuju se kao sve važniji delovi ovog procesa. Li i Boverman su zaključili da je "*asimetrija u biologiji jednako je bogata i raznovrsna kao i u neorganskom univerzumu; kao takvo, proučavanje narušavanja simetrije ostaće fundamentalno i uzbudljivo područje istraživanja još mnogo godina.*"

Na kraju, preostaje da se spomene i jedno tipično epistemološko odnosno filozofsko pitanje — da li su simetrija i kompleksnost samo osobine naših heurističkih modela i teorija, ili su objektivne osobine stvarnosti na koju se ti modeli odnose? Odgovor se u principu može naći negde u rasponu od empirijskog strukturalizma koji tvrdi da su simetrija i kompleksnost samo sintaktičke i semantičke osobine naših matematičkih struktura, odnosno proizvodi ljudskog uma, do strukturalnog realizma koji tvrdi da se matematičke strukture odnose na stvarne strukture sveta, nezavisno od sintaktičkih i semantičkih reprezentacija u ljudskom umu, što implicira da su simetrija i kompleksnost osobine stvarnosti. Problem empirijskog

---

<sup>34</sup> U okviru ovog rada, posvetili smo jedan deo digitalnih simulacija upravo ulozi istoričnosti i stohastičnosti u narušavanju simetrije, o čemu će biti više reči kasnije u delu o digitalnim simulacijama, a koji se tiče naših originalnih istraživanja.

<sup>35</sup> Detaljnija elaboracija biohemijskih mehanizama narušavanja simetrije na subćelijskom i ćelijskom nivou tematski prevazilazi zamišljene okvire ovog rada. Usmerena ugradnja citoskeletnih polimera, molekularni motori koji pokreću različite vrste pokreta, i regulatorno dejstvo GTP-aza, kinaza i proteaza, su ključni faktori koje kontrolišu narušavanje simetrije.

strukturalizma je u tome što ako su simetrija i kompleksnost samo sintaktičke i semantičke konstrukcije, zašto naše opservacije, eksperimentalna merenja i predviđanja pokazuju ove pravilnosti?<sup>36</sup> Možda bi, a u vezi s tim, trebalo pomenuti i tzv. "argument o ne-čudu" Ričarda Putnama (Mainzer, 2005a), koji ističe da je uspeh nauke čudo (neobičan) samo ako se pretpostavi da naučne teorije ne odražavaju stvarnost. Drugim rečima, Putnam tvrdi da je uspeh nauke manje iznenađujući ako pretpostavimo da naučne teorije, iako možda nisu potpuno tačne, ipak pružaju korisne i relevantne opise stvarnosti. Ako naučne teorije nekako odražavaju stvarni svet, onda uspeh nauke ne mora biti tumačen kao čudo. Ovaj argument podržava stajalište naučnog realizma, koje tvrdi da naučne teorije pružaju objektivne i tačne opise stvarnog sveta, umesto da su samo korisne alatke za predviđanje rezultata eksperimenata. Problem je što je, iako je nesumnjivo da su naučne teorije i heuristički modeli kreacije ljudskog uma, teško identifikovati one njihove delove koje imaju fizičke korelate, odnosno realistički ontološki sadržaj, jer to bi mogle biti reprezentacije strukturalnih veza, fundamentalni zakoni, ili samo neki entiteti koji učestvuju u konstituisanju teorija. Takođe, hipotetički karakter naučnih teorija i zakona što znači da dalje eksperimentalni rezultati mogu opovrgnuti ontološke implikacije postojećih teorija. Zbog ovih problema, Majncer (Mainzer, 2005a) je zauzeo kompromisni stav epistemološkog strukturalizma, negde između empirijskog strukturalizma i strukturalnog realizma koji, pojednostavljeno, tvrdi da simetrije teorija i njihovih modela otvaraju uvide u nepromenljive strukture sveta, dok narušavanje simetrije otvara uvide u raznolikost i kompleksnost sveta.

## **1.6. Ajgenovi hiperciklusi i predbiološka evolucija kompleksnosti**

O biološkoj kompleksnosti i njenim filozofskim aspektima nemoguće je formirati potpunu sliku bez osvrta na poreklo, na procese koji su u krajnjoj instanci doveli do paljenja iskre života, koji su direktno učestvovali u kompleksifikaciji nežive materije sve do fon Nojmanove granice kompleksnosti. Ovi procesi se uglavnom označavaju terminom predbiološka, ili hemijska evolucija. Hemijska evolucija se na prvi pogled suočava sa problemom termodinamike, jer je kompleksifikacija pre pojave samo-organizujućih svojstava živih bića termodinamički nepovoljan proces, i stoga je za razumevanje ovih procesa

---

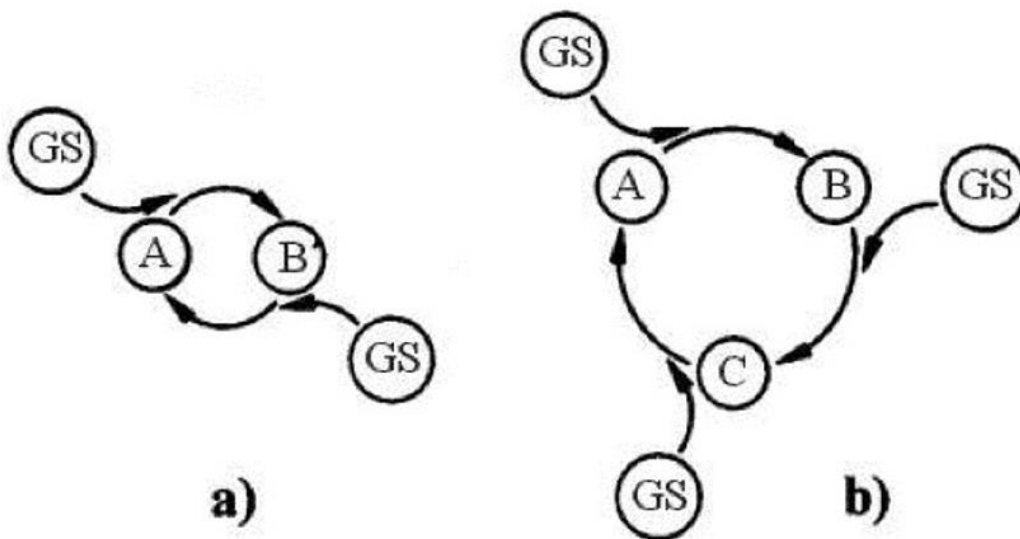
<sup>36</sup> Ova vrsta razmatranja se konceptualno ponavlja u različitim filozofskim raspravama. Na primer, u raspravi prirode lepote Dejvida Hjuma, postavljalo se pitanje da li je lepota objektivno svojstvo prirode ili predstave. Jedan od argumenata protiv lepote kao svojstva predstave sledio je iz opservacije da većina ljudi misli za neke stvari da su lepe, dakle oni uočavaju lepotu na sistematski način, što rezultuje u zaključku da ona ne može biti samo svojstvo predstave. Argument je zapravo isti kao i u ovom slučaju.

neophodno termodinamičko razmatranje sistema daleko od termodinamičke ravnoteže, teme koju smo ranije dotakli u vezi sa radovima Prigožina. U ovom delu predstavljamo jedno od predloženih i mogućih rešenja problema kompleksifikacije pre nastanka života.

U okviru analize neravnotežne dinamike kompleksnih sistema, više modela je predloženo u cilju simulacije porekla života na molekularnom nivou. Kompleksnost na ovom nivou se karakteriše velikim brojem potencijalnih stanja koja sistem može zauzeti s obzirom na aktuelna prostor-vremenska ograničenja kojima je izložen. Neka od njih mogu ispoljavati snažan uticaj na makroskopsko ponašanje sistema (Mainzer, 2005). Nelinearnost se u ovim sistemima javlja kao posledica mikroprocesa koji se odvijaju daleko od termodinamičke ravnoteže. Da bi se u ovakvim mikroprocesima pojavili začeci života, oni moraju da ispunjavaju određene kriterijume. Za nastanak život u osnovi je potrebno ispuniti svega nekoliko uslova, koje su ujedno i njegove osobine: (1) samo-reprodukciju, radi očuvanja vrsta nasuprot procesu kontinualne destrukcije individualnih organizama, (2) varijabilnost i selekciju, radi unapređenja sposobnosti preživljavanja, i (3) metabolizam radi kompenzacije za kontinualnu proizvodnju entropije. Majncer verovatnoću nastanka samoreprodukujuće sekvence aminokiselina (dakle peptidne sekvence) ili nukleinskih kiselina u okviru mogućih permutacija svih sekvenci karakteriše kao konačnu, i iako sam nastanak takve sekvence predstavlja slučajan događaj, njegova dalja evolucija pokorava se fizičkim i hemijskim zakonima. Kao i Guld nešto ranije (ali iz različitih razloga, videti sekciju 3.1.1), on smatra da se zahtevi postavljeni molekularnim sistemima da bi osvojili fazni prostor koji vodi u generisanje života, mogu ostvariti na mnogo načina, što znači da bi u ponavljanjima sveta, ili na drugim planetama, život mogao funkcionisati na bazi različitih konkretnih molekularnih rešenja. Tokom slučajne rekombinacije atoma mogli bi nastati molekuli različitih svojstava, uključujući i ne sposobne za autokatalizu. Majncer navodi primer dva molekula, A i B, koji se autokatalitički stvaraju iz "primordijalne supe"<sup>37</sup> i to tako što se pored autokatalitičkih osobina njihove sinteze i međusobno katalizuju, tako da sinteza jednog utiče na sintezu drugog, i obrnuto (Videti **Sliku 3a**).

---

<sup>37</sup> Pojam "primordijalne supe" odnosi se na hipotetičko stanje ili okruženje koje naučnici predstavljaju kao moguće mesto nastanka života na ranoj Zemlji. Hipoteza primordijalne supe sugeriše da su pre 3,5 do 4 milijarde godina okeani Zemlje sadržavali smešu organskih molekula, kao što su aminokiseline, nukleotidi i jednostavni šećeri, koji su nastali kroz različite hemijske procese. Smatra se da su ovi organski molekuli nastali kombinacijom jednostavnih neorganskih jedinjenja poput metana, amonijaka, vodene pare i vodonika, uz prisustvo izvora energije - munje ili ultravioletnog zračenja. Ideja je da su ovi organski molekuli tokom vremena prolazili kroz dalje hemijske reakcije, što je na kraju dovelo do formiranja složenijih molekula, uključujući gradivne blokove života.

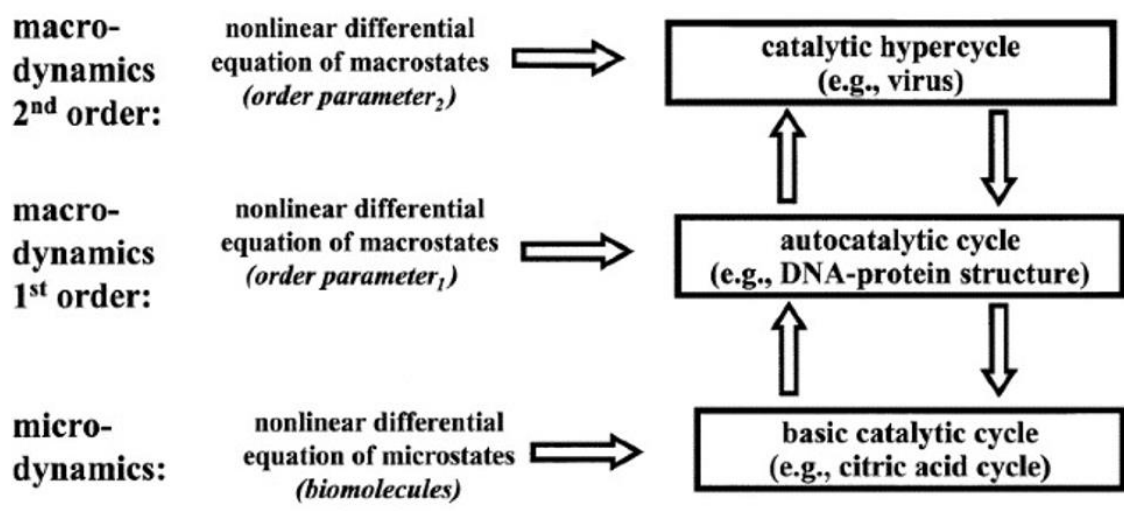


**Slika 3.** Ciklična kataliza [preuzeto iz Mainzer, 2005].

U još komplikovanijim slučajevima, u spregnutim katalitičkim ciklusima prikazanim na **Slici 3b**, koji se još zovu i Ajgenovi hiperciklusi<sup>38</sup>, učestvuje više molekularnih vrsta. Ajgenovi hiperciklusi su ciklusi ciklusa, i veruje se da, uz prisutne mutacije, vode u evolucionu proces (Mainzer, 2005). Kao primer bazičnog ciklusa koji se javlja kao konstituent ciklusa višeg nivoa, Majncner navodi ciklus limunske kiseline, u kom se molekul oksaloacetata koristi iznova i iznova radi ekstrakcije energije iz sirćetne kiseline, čime pokreće veći broj ciklusa višeg nivoa koji koriste tu energiju (**Slika 4**).

---

<sup>38</sup> Manfred Ajgen, nobelovac, zajedno sa Peterom Šusterom, predstavio je teoriju hiperciklusa u kontekstu molekularne evolucije. Tokom sedamdesetih, Ajgen i Šuster ovu ideju su uveli kao teorijski model koji objašnjava poreklo i evoluciju samoreplicirajućih molekula. Koncept se bazira na ideji da grupe samoreplicirajućih molekula, pri čemu svaka katalizuje replikaciju drugih na cikličan način, mogu obezbediti stabilniji i kooperativniji sistem u poređenju sa pojedinačnim replikatorima.



Slika 4. Emergencija prebiotičkog života kroz samo-organizovanje [preuzeto iz Mainzer, 2005].

Veći broj ovakvih osnovnih autokatalitičkih ciklusa mogao bi da konstituiše umreženi sistem reakcija koji je sposoban za samo-reprodukciju, i Manjcer kao primer hiperciklusa navodi viruse koji nalaze negde na granici između (mrtvih) kristala i živih organizama, i nastali su daljim umrežavanjem autokatalitičkih kompleksa DNK-proteini.

Ideja hijerarhijski organizovanih samo-reprodukujućih ciklusa može se generalizovati na hijerarhijsku organizaciju više nivoa bioloških aktivnosti nastalih u kosmičkoj i biološkoj evoluciji. Najniži nivo mogao bi biti fizičko-hemijski. Na Slici 5 prikazujemo nedavno objavljenu šemu hijerarhijske organizacije kompleksnosti fizičke i biološke stvarnosti (Ellis & Di Sia, 2023). Šema nije stacionarna u vremenu, neki nivoi mogu nastati ili nestati pod određenim okolnostima. Po Manjceru, ona se ne može interpretirati kao čisto heuristička i mora joj se pripisati objektivni sadržaj, s obzirom da je potvrđena obiljem eksperimenata. Pitanje je koji je najdublji nivo nelinearne mikrodinamike koji ima uticaj na biološke sisteme. Verovatno je to atomski nivo. Hijerarhijsko međudejstvo različitih nivoa sastoji se u tome da makrodinamika na dubljem nivou vodi do mikrodinamike novih entiteta, koja opet određuje makrodinamiku celog nivoa kompleksnosti kom oni pripadaju, i na sličan način određuju mikrodinamiku novih entiteta na višem nivou, itd. U primerima Ajgenovih hiperciklusa koje smo naveli, fokus analize je bio u tranziciji sa L4 na L5 na Slici 5 (na stvaranje samo-reprodukujućih proteinsko-nukleinskih kompleksa). Iznad ovog nivoa, govorimo o "pravoj" biološkoj dinamici, ispočetka ćelijskoj, pa zatim tkiva, organa, organizama, populacija, sve do čitave biosfere. Iako su nivoi "naslagani" jedan na drugi, interakcije među njima mogu i

preskočiti nivoe u neposrednom susedstvu (Majncer navodi primer raspoloživosti nutrijenata u životnoj sredini koji direktno utiču na ćelijski nivo).

L13		Biosphere	
L12	↑	Ecosystems	↓
L11	↑	Populations	↓
L10	↑	Organisms	↓
L9	↑	Physiological Systems	↓
L8	↑	Tissues	↓
L7	↑	Cells	↓
L6	↑	Cytoplasm, organelles	↓
L5	↑	Macromolecules	↓
L4	↑	Molecules	↓
L3	↑	Atoms	↓
L2	↑	Protons Neutrons Electrons	↓
L1	↑	Quarks Leptons Bosons Higgs	↓
L0		Unknown physics (if it exists)	

**Slika 5.** Hijerarhijska struktura fizičke i biološke stvarnosti. Nivoi L0 do L4 su striktno fizički, nezavisni od biologije. Nivo L5 je prvi nedvosmisleno biološki nivo, a nivo L6 prvi nivo gde se odvijaju svi životni procesi. Viši i neprikazani nivoi obuhvataju Zemlju (planetu u celini), Sunce (esencijalno za život), Sunčev sistem, Galaksiju, i tako dalje. Donji nivo L0 je nepoznat (možda su to strune, ali ta teorija nije do kraja razvijena). Strelice prema gore ukazuju na uspon iz određenog nivoa kompleksnosti [preuzeto iz Ellis & Di Sia, 2023].

## 2. Poreklo biološke kompleksnosti

Biološka kompleksnost kao svojstvo živog sveta izgleda da se, u proseku, povećavala kroz vreme od nastanka života do danas. Dakle, ona pokazuje svojstvo orijentisane temporalnosti. Slično tome, i evolutivni procesi pokazuju istu temporalnu orijentaciju pa je, uz gorepomenute opaske da se kompleksnost javlja kao instrument preživljavanja, gotovo očigledan zaključak da je sam evolutivni proces *uzrok* biološke kompleksnosti. Nažalost, iako najjednostavniji i najočigledniji model koji objašnjava poreklo, odnosno osvetljava kauzalitet između evolutivnog procesa i biološke kompleksnosti, ovaj model ima i ozbiljne manjkavosti, kao i alternative. Kroz eksperimentalni i teorijski rad, ali i digitalne simulacije omogućene razvojem kompjuterske tehnike, došlo se i do alternativnih interpretacija porekla biološke

kompleksnosti. U ovoj sekciji predstavimo dve interpretacije porekla biološke kompleksnosti, selekcionizam i neutralizam.

## 2.1. Moderna sinteza - adaptacionizam kao uzrok biološke kompleksnosti

*„Tokom prethodne milijarde godina, životinje su se razvijale u pogledu veličine tela, tehnika ishrane i odbrane, složenosti mozga i ponašanja, socijalne organizacije i preciznosti kontrole nad okolinom. (...) Ne pretvarajmo se da u svojoj filozofiji poričemo ono što znamo da je istina u svojim srcima.“*

*-E.O. Wilson (Wilson, 1990)*

Pod Modernom sintezom danas se smatra kombinacija Darwinove teorije prirodne selekcije i Mendelove genetike, obuhvaćene matematičkim formalizmom i harmonizovane u jednu teoriju evolucije (Huxley, 1948). Ovaj sintetički evolutivni koncept naziva se često i *neodarvinizam*. Neodarvinizam se u suštini može predstaviti kroz 4 osnovna pojma ili koncepta: (1) Darwinovu evoluciju (osnova moderne sinteze ostaje Darwinova teorija evolucije putem prirodne selekcije — prema Darwinovim konceptima, organizmi s naslednim varijacijama koje poboljšavaju njihovu sposobnost preživljavanja i reprodukcije imaju veće šanse za prenošenje tih varijacija na potomstvo), (2) genetika i nasleđivanje (ključna komponenta moderne sinteze je razumevanje genetike i nasleđivanja — Mendelova genetika pružila je osnovu za razumevanje kako se osobine prenose s generacije na generaciju putem gena), (3) mutacije i varijabilnost (mutacije u genima i genska varijabilnost igraju ključnu ulogu u evoluciji), (4) populaciona genetika (pojmovi populacione genetike, kao što su genetički drift, selekcija i migracija, omogućavaju razumevanje kako genetička struktura populacija evoluira tokom vremena).

Ideja da povećavanje genetičke kompleksnosti korespondira sa povećavanjem fenotipske kompleksnosti, u kombinaciji sa Ešbijevim zakonom vodi u gotovo trivijalan zaključak da je *uzrok* i genetičke i fenotipske kompleksnosti zapravo sam evolutivni proces. Pojednostavljeno, mutacije koje se superponiraju na već postojeći genom, a od kojih neke bivaju trajno prihvaćene jer vode do evolutivnih prednosti, nužno povećavaju kompleksnost genoma što direktno rezultuje u kompleksnosti njemu korespondentnog fenotipa.

Ovakav, verovatno najjednostavniji interpretativni okvir porekla genetičke kompleksnosti po svojoj prirodi je očigledno adaptacionistički i selekcionistički, jer je povećanje stepena adaptiranosti organizma kriterijum prihvatanja povećanja kompleksnosti. Međutim, ovakva interpretacija suočava se sa brojnim problemima, uz činjenicu da sama Moderna sinteza nije skup iskaza o kompleksnosti, niti implicira njeno poreklo ili temporalnost. Ona je u jednom svom delu skup iskaza o kriterijumima na osnovu kojih se neka novonastala osobina prihvata ili odbacuje u evolutivnom procesu<sup>39</sup>.

Pre izlaganja nekih ozbiljnijih kritika Moderne sinteze i selekcionizma, možda bi bilo korisno dodati i aksiološke aspekte evolucionog procesa, i sa njima vezan subjektivizam, a često i antropocentrizam, impliciran već u citatu E.O. Vilsona na samom početku ovog poglavlja. Do nedavno, tvrdnje da je život prošao kroz neku vrstu "napretka" tokom evolucione istorije smatrale su se gotovo samorazumljivim. Problem je što sam pojam napretka podrazumeva neku vrstu vrednosne vertikale, i zahteva vrednosni etalon u odnosu na koji bi se napredak merio<sup>40</sup>. Takođe, iz ovakve perspektive sledi da se organizmu u principu mogu klasifikovati kao "viši" i "niži", u zavisnosti od položaja na vertikali napretka, odnosno korespondentnoj vrednosnoj vertikali. Interesantno je da u samom edukativnom procesu u nastavi biologije postoji napor da se studenti već u početku oduče od prakse vrednovanja organizama kroz poziciju na skali naprednosti / vrednosti (Werth, 2012). Prirodna selekcija u okviru darvinizma i neodarvinizma, čini se, odigrala je ključnu ulogu u ovim naporima jer omogućava razlikovanje između "boljeg" i "lošijeg" na način koji ne zavisi od subjektivnog ljudskog vrednovanja, već je zasnovan na stepenu adaptiranosti organizma. Međutim, čak i ako bi se priznalo da pojmovi napretka mogu biti nezavisni od ljudskog vrednovanja, čini se napredak da nema teorijsku osnovu u teoriji prirodne selekcije. I G.C Vilijams i Stiven Gould prigovorili su na sličan način poistovećivanju napretka sa adaptiranošću:

*"Osnovna mehanika teorije prirodne selekcije ne pruža nikakvo opravdanje za napredak jer teorija govori samo o prilagođavanju lokalnom promenljivom okruženju"* (Gould, 2002, str. 467–468).

Suština ovog komentara je da, na osnovu same teorije prirodne selekcije, nema razloga nužno očekivati da će selekcija rezultovati u nečemu što predstavlja evolutivni napredak na univerzalnoj vrednosnoj skali, pri čemu subjektivni karakter vrednosne skale nije jedini

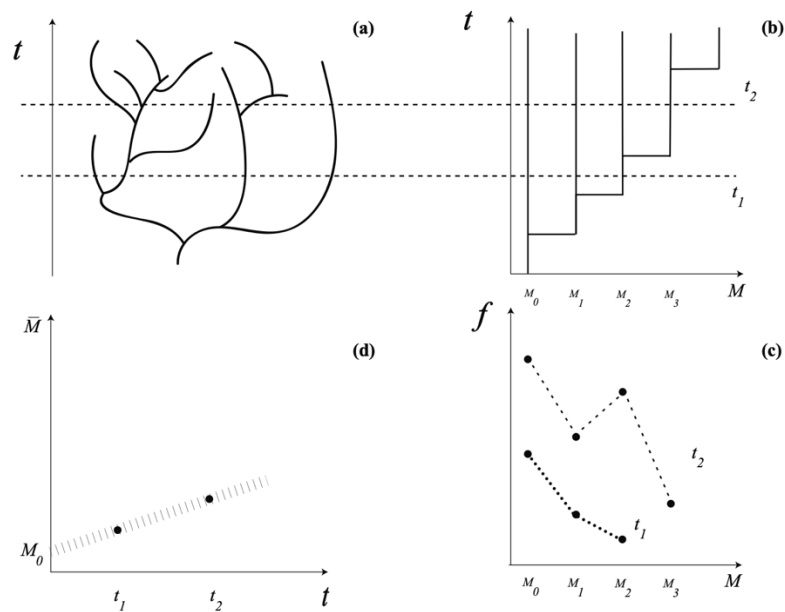
---

<sup>39</sup> Na primer, osobine koje smanjuju kompleksnost mogle bi takođe biti prihvaćene, ukoliko je to u funkciji uspešnijeg/prilagođenijeg organizma.

<sup>40</sup> Na ovom mestu ne insinuiramo bio kakvu vezu kompleksnosti kao kriterijuma ili etalona napretka.

problem, problem je i što bilo koja evolucijom stečena osobina predstavlja adaptivnu prednost u okruženjima ograničenim u prostoru i vremenu. Za bilo koju osobinu može se tvrditi da predstavlja adaptivnu prednost u jednom, a hendikep u drugom okruženju. Tako da, čak i ako bi vrednosna projekcija bila opravdana, ona bi imala problem što nije univerzalna, odnosno ne važi u svim okruženjima. Drugi problem na koji specifično ukazuje Guld (Gould, 1996) je problem *suvišnosti*. Prirodna selekcija se, čini jednostavno suvišnom za objašnjavanje evolutivnih trendova (videti **Sekciju 3.1.1** posvećenu Guldovim idejama). Upravo je biološka kompleksnost primer na kom se pokazuje suvišnost prirodne selekcije, prema Guldu. S obzirom na to da je život počeo sa minimalnom kompleksnošću, bilo je samo pitanje vremena kada će se kompleksnost povećavati — sa ili bez selekcije u odnosu na kompleksnost. Ova dva problema, kako ističe Dezmond (Desmond, 2021), u Guldovoj interpretaciji zajedno, u sinergiji, onemogućavaju potragu za vrednosno-neutralnom teorijom evolutivnog napretka, jer izgleda da niti prirodna selekcija nužno implicira napredak, niti je uopšte potrebna za objašnjavanje evolutivnih trendova. Dezmond iznosi svoju odbranu selekcionizma koja se odnosi na oba izneta argumenta protiv prirodne selekcije, tvrdeći da se prostorno-vremenska neuniformnost okruženja (heterogenost) ne svodi samo na generator konkretnih, realizovanih okruženja na koja se organizmi prilagođavaju (izvor kontingentnosti), već na višem nivou upravo favorizuje one organizme koji su prilagođeni ovoj heterogenosti, odnosno dovodi do selekcionih procesa koji kauzalno objašnjavaju trend ka vrstama koje su u stanju da bolje iskoriste heterogenost okoline. Pre nego što iznese svoju odbranu selekcionizma, pozivajući se na seriju autora, Dezmond se ukratko osvrće na karakter selekcionističkih opravdanja tvrdnji o napretku tokom evolucije, odnosno o samim evolutivnim zakonima. U delu koji sledi, iznećemo, pojednostavljeno, njegov osvrt na karakter ovih zakona.

Tvrdnje o napretku tokom evolucije su opšti zaključci o istoriji života i oblicima koji su se javljali tokom te istorije. Oni imaju za cilj da generalizuju zaključke o karakteru evolutivnih kretanja na velikim vremenskim skalama, i u velikom broju genetičkih linija. Genetičke linije karakterišemo jednom osobinom, kao što je kompleksnost, veličina tela, genetičke informacije itd. Ova osobina se obično kvantifikuje kroz meru  $M$  (npr. stepen kompleksnosti) koja omogućava da se svaka genetička linija u evolutivnoj istoriji apstraktno predstavi brojem ( $M_0$ ,  $M_1$ , itd.), kao i da se vremenski isečak evolutivne istorije predstavi kao funkcija raspodele te osobine po genetičkim linijama koja se menja tokom vremena.



**Slika 6.** Obrasci u evolutivnoj istoriji (u smeru kazaljke na satu počevši sa gornje leve strane): (a) evolutivna istorija; (b) zauzeće M-stanja tokom vremena; (c) apsolutne distribucije frekvencija različitih genetičkih linija preko M-stanja u vremenima  $t_1$  i  $t_2$ ; (d) povećanje prosečne vrednosti M kod svih postojećih genetičkih linija tokom vremena [preuzeto iz Desmond, 2021].

Na **Slici 6** predstavljeni su osnovni elementi ovog modela. Tvrdnje o evolucionom napretku obično se fokusiraju na određeno statističko svojstvo ove distribucije (maksimum, srednja vrednost, asimetrija, kurtosis, itd). Njen obrazac P opisuje kako se to svojstvo menja tokom vremena (**Slika 6d**). Na primer, može se opisati kako maksimum stepena kompleksnosti raste tokom vremena. Tvrdnje o napretku obično se odnose na određenu vrstu obrasca uočenog u ovim trendovima promene nekog statističkog svojstva. Trendovi stoga mogu da se razumeju kao rezultat uklanjanja šuma iz evolutivne istorije, ostavljajući samo jednostavnu kvantifikovanu reprezentaciju osnovnog pravca. Neka od ovih zapažanja su nesporna ili trivijalna, na primer, niko ne osporava da se veličina organizama zaista povećavala kroz evolutivnu istoriju. Pravo pitanje je, međutim, da li su takva povećanja na bilo koji način bila neophodna? Ako jesu, onda ona predstavljaju evolutivne *zakone*, i moraju se ponavljati u *svim* svetovima, odnosno pokazuju karakter nužnosti. U tom slučaju, bila bi opravdana ekstrapolacija uočenih evolutivnih zakonitosti čak i na eventualna evolutivna kretanja na drugim planetama, bez obzira koliko različita životna rešenja (metabolička, informatička) bi hipotetički tamo bila usvojena. Problem je što je stav da biološki evolutivni zakoni ne postoje vrlo raširen, i da u meri u kojoj su nužni oni nisu biološki:

"Sve generalizacije o živom svetu: (a) su samo matematičke, fizičke ili hemijske generalizacije (...) ili (b) su specifično biološke, u kom slučaju opisuju slučajne ishode evolucije" (Beatty 1995, str. 46-47)."

Beatijev stav očigledno odriče univerzalni karakter biološkim zakonima, i sve što je u njima nužno redukuje na druge nauke. Kao primer generalizacija koje nemaju snagu nužnosti Dezmund navodi Dolov zakon<sup>41</sup>. Ovakve generalizacije su bazirane na statistici dobijenom posmatranjem, a ne na dinamici bioloških procesa poput prirodne selekcije. U najboljem slučaju, ovakve generalizacije mogu imati status "pravila". Koupov (Cope) zakon, na primer, tvrdi da populacije u istoj genetičkoj liniji *obično* razvijaju sve veća tela tokom vremena (dakle, *ne uvek*). Takođe, Beatijev stav ne samo da tvrdi nepostojanje zakona evolucione istorije, već tvrdi da ne postoje ni razlozi za postojanje tih zakona (osim u kontingentnim, ograničenim prostorno-vremenskim domenima) i stoga takvi zakoni predstavljaju generalizovanu idealizaciju opaženog. Da bi dalje analizirao potragu za održivom selekcionističkom interpretacijom zakona evolucione istorije, Dezmund eksplicitno formuliše *Selekcionistički zakon evolucione istorije*:

*"U datom stohastičkom okruženju<sup>42</sup>, i bez dugoročnih ograničenja prirodne selekcije, sve evolucione istorije formiraju trend u metrici M, koji je uzrokovan selekcijom za povećanje M".*

I Beati u Guld smatraju da, s obzirom da je smena ekoloških okruženja stohastička u geološkoj istoriji (npr. kroz inundacije i povlačenje okeana, ili kroz Milankovićeve cikluse smenjivanja inter-glacijala i glacijala), tada bi i svi istorijski trendovi u metrici M kojom pokušavamo da pokažemo selekcijom izazvani trend bili stohastički, dakle ne bi postojali.

Kakav je odnos ideje postojanja evolutivnog "napretka" u odnosu na gore navedenu formulaciju selekcionističkog zakona evolucione istorije? Često se ideja napretka interpretira kao nenaučna, jer u semantičkom sadržaju pojma napretka figurišu i vrednosni elementi. Možda je se na ovaj pojam najdrastičnije obrušio Guld tvrdnjom da je napredak "štetna, kulturološki utemeljena, neproverljiva, neoperativna, nerešiva [engl. *intractable*] ideja" (Gould, 1988, str. 319). Sober je sarkastično konstruisao "formulu" napretka: napredak = usmerene promene + vrednosti (Sober, 1995). Dezmund odbacuje ovaj pogled na odnos napredak – prirodna selekcija tvrdeći da je upravo strastvenost Guldove kritike pokazatelj neočiglednosti njegovih

---

<sup>41</sup> Genetička linija koja je evoluirala nikada se neće vratiti u svoje početno stanje; Dollo 1893.

<sup>42</sup> Desmond nije sasvim precizan na ovom mestu, jer ne elaborira pojam "stohastičko". On misli na činjenicu da je aktuelno, dato okruženje stohastički izabrano kao aktuelno u sekvenci okruženja koje organizmi susreću u geološkoj istoriji zemlje, a ne da u njemu vladaju stohastička pravila.

argumenata. Veza između prirodne selekcije i napretka bila je prisutna u mnogim istorijskim opisima evolutivnog napretka, koji su se oslanjali na argument da neka svojstva, bilo da je reč o kompleksnosti, kogniciji ili nečemu trećem, omogućavaju opštu adaptivnu ili kompetitivnu superiornost u različitim okruženjima, koja je konstitutivni element pojmova kompetitivnog ili adaptivnog napretka (za kompletnu listu izvora videti Desmond, 2021).<sup>43</sup> Prema Dezmond, prevazilaženje gore navedenih problema odnosi na prirodna selekcija – napredak, omogućuje razvoj novog, vrednosno neutralnog pojma napretka i interpretaciju evolucionog razvoja kao suštinski progresivnog.

Dezmond se protiv prigovora neutralizma selekcionizmu u smislu stohastičnosti lokalnih okruženja na koja organizmi moraju da se adaptiraju (kao osnovnog faktora kontingentnosti selekcionistički dirigovane evolucije) bori na vrlo jednostavan način. On tvrdi da, ako su organizmi izloženi heterogenim okruženjima koja se smenjuju, od kojih svako može da svojstvo M tretira kao prednost ili hendikep, tada svojstvo prilagođavanja različitim biološkim okruženjima postaje upravo ono svojstvo M koje pokazuje pravi, selekcijom izazvani trend. Naše mišljenje je da je Dezmond i na ovom mestu napravio grešku. Naime, on je prećutno pretpostavio da je heterogenost okruženja homogena i stacionarna! Drugim rečima, načelo heterogenosti nije primenio na samu heterogenost. U praksi, ne postoji razlog zbog bismo verovali da smena heterogenih okruženja treba da sledi neki stacionarni obrazac, i baš zbog načela heterogene heterogenosti (dakle kvazi-homogenosti lokalnih okruženja u dužim intervalima vremena), odnosno relativnoj statičnosti okruženja po tipu i prirodi, prilagodljivost heterogenim okruženjima ne treba da ima drugačiji status od bilo kod drugog svojstva M.

Dezmond na više mesta pokušava da semantički prečisti i konstituiše pojam "lokalnog heterogenog okruženja", po našem mišljenju na delimično problematičan način. Prvo, on suprotno Guldu, insistira na tome da se lokalno okruženje ne sme izjednačavati sa neposrednim prostorno-vremenskim okruženjem organizma. Po njemu, fenotipska plastičnost<sup>44</sup> i polimorfizam<sup>45</sup> čine da se pojedina lokalna okruženja mogu posmatrati kao produžena na izvestan način. Takođe, obrasci unutrašnjih varijacija ekoloških parametara u individualnim

---

<sup>43</sup> Desmond je svestan da je pojam napretka upotrebljen na taj način specifično vezan za okruženje u odnosu na koje se adaptivnost razvila, ili kompetitivnost meri.

<sup>44</sup> Fenotipska plastičnost se odnosi na sposobnost organizma da promeni svoj fenotip, odnosno svoje fizičke karakteristike i osobine, u zavisnosti od promenljivih uslova okoline. Ovo se često dešava kao adaptivni odgovor na promene u okolini kako bi se povećala šansa za preživljavanje i reprodukciju. Fenotipska plastičnost može uključivati promene u morfologiji, ponašanju, fiziologiji ili drugim osobinama organizma.

<sup>45</sup> Polimorfizam u evolucionoj biologiji označava pojavu više različitih fenotipskih varijanti unutar populacije iste vrste. Ovi različiti fenotipski oblici mogu se manifestovati u fizičkim karakteristikama, bojama, veličinama ili drugim osobinama organizama iste vrste.

okruženjima mogu biti vrlo različiti. Na primer, temperatura može varirati između istih graničnih vrednosti, ali sasvim različitom dinamikom, na dnevnom, sezonskom ili nekom drugom vremenskom okviru, što zahteva različite odgovore organizma na „isto“ okruženje. Ostaju nejasni razlozi zbog kojih Dezhmond smatra da je opseg u kom neka ekološka varijabla varira, ali ne i sam obrazac variranja, konstitutivni faktor okruženja. Nama se čini da je prirodnije pretpostaviti da se okruženja konstituišu ne samo kroz opsege, nego i kroz obrasce variranja ekoloških parametara, čime bi problem nestao. Zapravo, opseg neke ekološke varijable samo je jedan statistički deskriptor njene sveukupne vremenske dinamike. Umesto opsega, to bi mogla biti i srednja vrednost, medijana, vremenska dekokorelaciona dužina, ili neko drugo statističko svojstvo krive vremenske evolucije odabrane varijable. Probleme u konstituisanju pojma lokalnog okruženja Dezhmond dalje komentariše kroz dilemu da li se lokalna okruženja svoda na obrasce već susretane u istoriji organizma, ili na one koje će se tek pojaviti. Na kraju, samo postojanje heterogenih okruženja, po njemu, uslovljava razvoj dve vrste adaptivnih odgovora na njih. U prvom slučaju, relativno statični organizmi takmiče se među sobom za resurse lokalnih okruženja, suočavajući se sa problemima njihovih fluktuacija. U drugom slučaju, koji je po Dezhmondu zapostavljen u filozofiji biologije, organizmi menjaju samo okruženje. Kao primer drugog slučaja on navodi migratorno ponašanje ptica, koje se, na primer u potrazi za hranom, sele u okruženja koja privremeno proizvode višak resursa. Ptice tako ostvaruju dvostruku funkciju, prvo izbegavaju evolutivnu borbu sa statičnim vrstama, i drugo, osvajaju novu, privremeno nastalu, ekološku nišu sa viškom resursa. Heterogenost okruženja je i iz fundamentalnih, termodinamičkih razloga, preduslov evolucionog procesa, jer bi odsustvo svih heterogenosti, odnosno gradijenata, zapravo predstavljalo termodinamičku smrt sistema. Metabolizam živih bića je u osnovi održavanje gradijenata molekularnih vrsta koje učestvuju u njemu. Interesantno je da život, nastao na gradijentima u fizičkom okruženju, stvara nove gradijente kreirajući ambijent za dodatna evolutivna rešenja koja su njima podstaknuta. Evolucionarna strategija predatorstva je upravo jedan od modusa eksploatacije gradijenata stvorenih životom kao takvim. Jedno od interpretacija nastanka eukariotske ćelije je upravo kroz predatorski napad jedne prokariotske ćelije na drugu (Pérez et al. 2016). Zašto je sve ovo važno? Zato što dinamika smene, priroda, metrike adaptibilnosti na heterogena okruženja, itd, predstavlja jednu od mogućih tačaka odbrane selekcionizma od neutralističkih prigovora. Po Dezhmondu, činjenica da se lokalna okruženja ne ponašaju kao eksterni nezavisni faktori koji utiču na proces selekcije, već su okruženja delimično *rezultat* aktivnosti organizama koja dele životno okruženje i utiču jedni na druge, kao i činjenica da je prostor mogućih modifikacija

biološkog okruženja vrlo veliki, predstavlja razlog tvrdnje postojanja selekcionog trenda u adaptaciji na heterogena biološka okruženja. Pojednostavljeno, činjenica da migracije ka drugim nišama, poput migracije ptica, uvek ostavljaju mogućnost adaptacije bez obzira kako stohastička smena okruženja bila, kao i da organizmi stvaraju nove niše bez prestanka, Dezmund zaključuje da mora postojati pozitivan trend u adaptaciji na heterogena okruženja, u načelu. Naše mišljenje je da je Dezmundova argumentacija, ponešto sarkastično interpretirana, zapravo tvrdnja da ako ne postoji trend u bilo kom svojstvu nižeg reda, M, onda sigurno postoji trend u načelnoj adaptabilnosti! Empirijsku evidenciju i proveru ovih tvrdnje on čak označava kao nepotrebnu, jer iako se hipotetički utvrdi da ne postoji trend u bilo kom svojstvu M uključujući adaptabilnost, i dalje ne znači da nije u pitanju samo privremeni zastoj trenda, ili ako se primeti smanjenje nekog svojstva M, i dalje ne znači da ono nije kompenzovano povećanjem istog svojstva negde druge u mreži interagujućih vrsta. Iako Dezmundova odbrana selekcionizma, po našem mišljenju, nije sasvim ubedljiva, ona rafinira i predstavlja neke važne pojmove i simplifikuje alternativna objašnjenja kroz kritiku istih, i kao takva predstavlja solidan uvod u probleme odnosa selekcionizma i neutralizma.

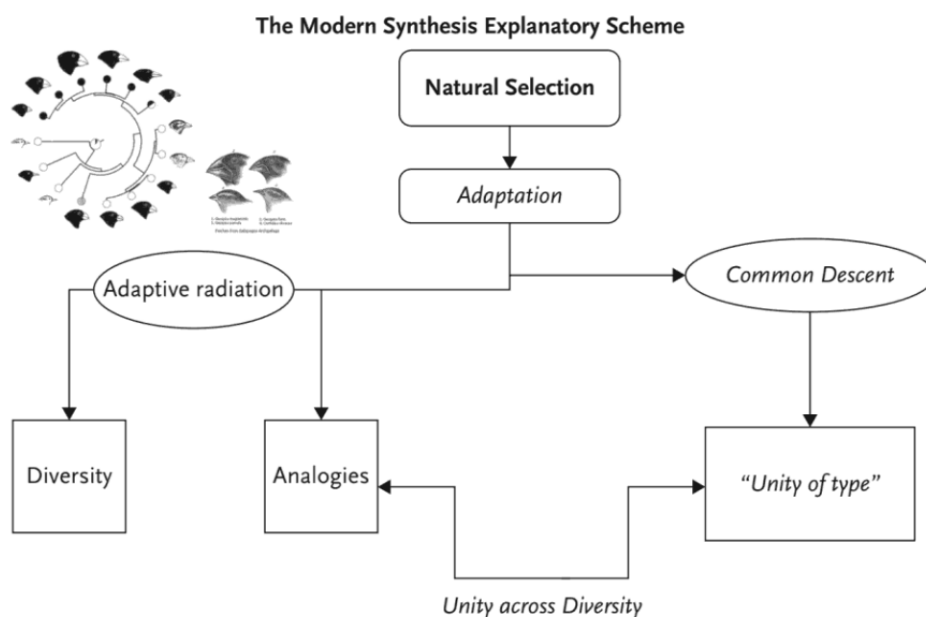
Pored problema koje je Dezmund obradio, i po njegovom mišljenju rešio, problem se javlja i u interpretaciji efekata genetičke kompleksnosti na fenotip, koji su nejasni (Newman, 2011). Naime, sva živa bića, od jednoćelijskih bakterija do višećelijskih organizama, imaju okvirno od nekoliko hiljada do nekoliko desetina hiljada gena, koji učestvuju u brojnim međusobnim interakcijama, što komplikuje razumevanje i karakterizaciju pravila koja regulišu korespondenciju genotipa i fenotipa. Pored korespondencije genotipa i fenotipa, problem je i u karakterizaciji same genetičke sličnosti među različitim vrstama<sup>46</sup>. Ideja da postoji neka vrsta paralelizma između genetičke i fenotipske kompleksnosti čini se sve problematičnijom (Schwartz & Maresca, 2006). Tako, dok izgleda neupitno da se genetička kompleksnost povećava sa evolucijom, bar prema nekim njenim definicijama, ona ne korespondira uvek sa povećanjem fenotipske kompleksnosti kvantifikovane na uobičajene načine (Newman, 2011). Njuman (2011) kao primer ovog problema navodi metazoe. Metazoe su taksonomska grupa koja sadrži tako raznolike životne forme kao što su crvi, insekti, morske zvezde, školjke i ljudi, kod kojih najkompleksnije forme imaju i do dva puta više gena nego najjednostavnije forme. Evolutivna diversifikacija metazoa traje oko pola milijarde godina, i uključuje promene i u regulatornim i u genima koji kodiraju proteine (Carroll, 2005; Davidson, 2010; Wray, 2007).

---

<sup>46</sup> Koja je kao koncept čak nazvana “nebuloznom” (Marks, 2003)

Međutim, većina ključnih regulatornih genetičkih mehanizama i regulatornih gena je nastala pre diversifikacije metazoa (Larroux *et al*, 2008), a mnogi od njih i pre nastanka višćelijskih organizama (King *et al*, 2008). Iz tih razloga, Newman (2006) zaključuje da brzina diversifikacije ne zavisi direktno od pojave novih genetičkih mehanizama, time podrivajući vezu između genetičke i fenotipske kompleksnosti. Naša primedba na ovakav zaključak se svodi na to da ova opservacija razara kauzalni lanac “novi *ključni* genetički mehanizmi” → “nova fenotipska svojstva” dok teza o korespondenciji genetičke i fenotipske kompleksnost nije svodiva isključivo na ovaj odnos, već se može zasnivati i na efektima evolucije “*ne-ključnih*” genetičkih mehanizama, kao i evoluciji regulatornih i gena koji kodiraju proteine, a što nije sporno (Carroll, 2005).

Fundamentalna premisa neodarvinizma je da evolutivne promene prate u stopu genetičke promene. Ova ideja ima uporište u posmatranju genoma kao neke vrste softverskog programa koji organizam prati u svom fenotipskom razvoju. Upravo ova, gotovo neosporavana, ideja često predstavlja mesto napada protivnika i samog realizma evolucije. Tako je, na primer, Dembski (2002) kompjuterskom simulacijom demonstrirao nemogućnost emergencije organizama iz procesa koji se svode na slučajnu pretragu, ali je tokom simulacije ulogu genoma igrao kompjuterski program. Simulacija je kontroverzna ne samo zbog matematičkih procedura koje su korišćene (Shallit & Elberry, 2004) već i zbog upotrebe kompjuterskog programa kao surogata genetičkog koda, aludirajući na nesvodivost svih osobina genetičkog koda na osobine kompjuterskog programa (Newman, 2011). Ovakvi eksperimentalni zaključci impliciraju inteligentni dizajn i koketiraju sa teologijom.



**Slika 7.** Eksplanatorna šema Moderne sinteze. [preuzeto iz Schluter (2000)]

Razvojna i fenotipska (biološka) plastičnost pružaju, po nekim autorima, interpretativni okvir u kom je moguće eliminirati teoretsku potrebu za striktnom korelativnom vezom genetičke i fenotipske kompleksnosti (West-Eberhard, 2003). Naime, serije studija pokazuju da epigenetički faktori, odnosno determinante funkcije i forme organizama koje nisu genetičke u osnovi, uzrokuju varijabilnost i evolutivne novotarije koje zavise od životnih uslova, i koje tek kasnije mogu biti asimilovane u genetički repertoar organizma (Callebaut *et al*, 2007; Jablonka & Lamb, 2014).

## **2.2. Neadaptacionističke teorije nastanka biološke kompleksnosti — konstruktivna neutralna evolucija (KNE) i Kimurina neutralna evolucija**

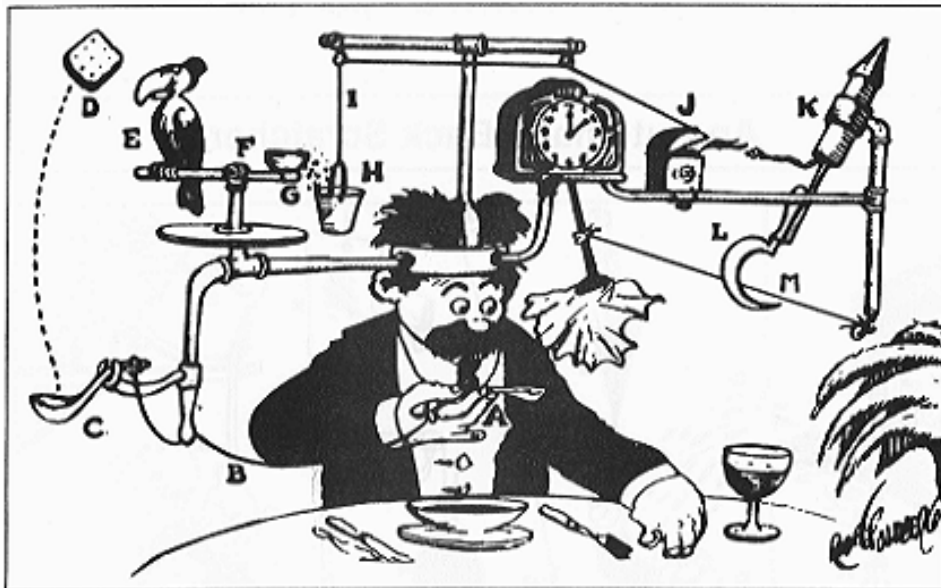
Kao treću teoriju koja pretenduje da objasni evoluciju i sa njom povezanu biološku kompleksnost, pored Moderne sinteze koja biološku kompleksnost objašnjava kao adaptaciju, i kreacionističkog učenja koje je smatra dizajnom tvorca, u ovoj sekciji prikazujemo tzv. Konstruktivnu neutralnu evoluciju (KNE), koja je u osnovi ne-adaptacionistička teorija. Teorijske postavke KNE dao je Stolcfus (1999), međutim njegov rad je samo generalizacija nešto ranijih ideja na temu adaptivno neutralne evolucije (Covello and Gray, 1993; Osawa and Jukes, 1989). KNE teorija zapravo daje novi smisao fenomenu ne-adaptivnih, “neutralnih” promena na molekulskom nivou koje nemaju neposredno kauzalno dejstvo na biološku strukturu, funkciju ili kompleksnost.

Teorija kaže da ove promene dovode do ireverzibilne kompleksnosti (Gray *et al*, 2010) i proizvode sisteme koji *nisu* fino podešeni (adaptirani) za obavljanje nekog zadatka, odnosno da poseduju nepotrebnii višak kompleksnosti, slično Rube Goldberg mašinama (Julius *et al*, 2011) (videti **Sliku 8**). Naročito kod eukariota, često se primećuje nepotreban višak kompleksnosti (Muñoz-Gómez *et al*, 2021). Nakon uobličavanja od strane Stolcfusa, KNE teorija je korišćena u cilju objašnjavanja čitavog spektra kompleksnih karakteristika živog sveta (npr. Brunet & Doolittle, 2018).

Iako su osnove konstruktivne neutralne evolucije postavljene pre više od 20. godine, Muñoz-Gomez i sar. (2021) tvrde da veliki broj evolucionih biologa i dalje nije upoznat sa ovim alternativnim eksplanatornim okvirom nastanka biološke kompleksnosti. Razlozi za to su višestruki. Kao prvo, većina aktuelnih primera KNE je zasnovana na analizi gena ili kompleksa proteina, pa je nejasna opšta primenljivost KNE na druge nivoe organizacije (npr. tkiva, populacije, ekološke zajednice i ekosisteme). Drugo, neki od najpoznatijih primera se odnose

na analizu relativno slabije proučavanih jednoćelijskih eukariota — protista. Na kraju, odjeci Darwinovih razmišljanja iz čuvenog dela *O poreklu vrsta* još su živi; Darwin je tvrdio, na primeru oka, da je razvoj makromolekularnih mašinerija postepen, nastao sukcesivnim finim podešavanjima i modifikacijama skoro do savršenstva, a što protivreči nalazima KNE studija.

Neadaptivna konstruktivna neutralna evolucija je inicijalno demonstrirana na primerima nekoliko kompleksnih molekulskih, genetički determinisanih procesa (Julius *et al*, 2011) da bi se taj broj kasnije povećao. Neki od primera uključuju višak peptidnih podjedinica koje nemaju nikakvu ulogu u proteinskim lancima, zakrivljene nervne puteve koji inervišu dušnik kod sauropodnih dinosaurusu i žirafa,<sup>47</sup> i verovatno najpoznatiji primer — subfunkcionalizaciju (obrađeno detaljnije kasnije u ovom radu) gena (Muñoz-Gómez *et al*, 2021). Dodatni primeri vezani su za nepotrebno složen način razvijanja somatskog genoma iz germinativnog genoma kod ciliata (protista)<sup>48</sup> koje zahteva masovno prepakivanje germinativnog genoma uz eliminaciju nekodirajućih sekvenci i razmršavanje genetičkih fragmenata, ili izuzetno komplikovan način kodiranja relativno jednostavnih mitohondrijalnih proteina kod kinetoplastida (parazitskih protista; Read *et al*, 2016). Sugerisano je da se aktuelna evolucija dešava kombinacijom adaptivnih (darwinistički) i ne-adaptivnih procesa (npr. putem KNE).



**Slika 8.** Autonomna salveta profesora Butsa. Paradigmatičan primer Rube-Goldbergove mašine koja pati od viška nepotrebne kompleksnosti [preuzeto iz *Wikipedia*].

<sup>47</sup> Nervi koji polaze od mozga, zatim se spuštaju kroz dugački vrat, i vraćaju nagore do grla, nepotrebno čineći celu strukturu kompleksnijom (Wedel, 2011).

<sup>48</sup> Protiste su jedna linija jednoćelijskih eukariota, a ciliate podgrupa te linije.

S obzirom da je eksperimentalno potvrđena, KNE bi mogla igrati ulogu “nulte hipoteze”, odnosno pre nego što se određena fenotipska osobina uslovljena genskom izmenom interpretira kao adaptivna po svojoj prirodi, moglo bi se pretpostaviti da je u pitanju promena uzrokovana KNE, čime bi se darvinizam eliminisao kao preferencijalno, ili bar jedino objašnjenje.

Ideje neodarvinističke evolucije provlače se kroz zajednicu evolucionih biologa duže vreme, ali nikad nisu imale status vladajuće paradigme. Munjoz-Gomez i sar. (2021) su izvršili detaljnu analizu teorijskih osnova KNE, i njenog uticaja na redosled događaja u narativima koji pretenduju da objasne poreklo biološke kompleksnosti. Već samo imenovanje ove teorije ukazuje na njene bitne osobine. Reč „konstruktivna“ u KNE se odnosi na povećanje složenosti, suprotno reduktivnom ili konzervativnom (Stoltzfus 1999). Reč „neutralna“ u KNE se ne odnosi nužno na uobičajeno značenje reči, gde karakteristika važi kao neutralna kada ne pruža prednost ili nedostatak u pogledu prilagodljivosti svojim nosiocima, već se odnosi na koncept „efektivne neutralnosti“ iz genetike populacija (npr. Ohta, 1973), koja efektivno neutralnim smatra svaku karakteristiku, bez obzira na to da li je korisna ili štetna, a koja se širi u populaciji putem slučajnog genetičkog drifta.<sup>49</sup> Munjoz-Gomez i sar. (2021) su, sledeći formulaciju KNE koju je dao Stolfus, identifikovali pet koncepata ili komponenti KNE: (1) višak kapaciteta, (2) epistazu, (3) slučajni genetički drift, (4) pristrasnu varijaciju i (5) pročišćavajući selekciju (engl. *purifying selection*).

1) Višak kapaciteta predstavljaju ona svojstva agenta (organizma) koja nisu rezultat prirodne selekcije, dakle nisu odabrana, i čije uklanjanje ne bi imalo negativne efekte na

---

<sup>49</sup> Slučajni genetički drift je proces slučajnih promena učestalosti alela gena u populaciji tokom sukcesije generacija. Slučajni genetički drift može dovesti do potpunog gubitka alela ili promena u učestalosti alela u populaciji tokom vremena. Specifični geni se uvek pojavljuju na istom mestu u DNK, na lokaciji koja se još naziva i genski lokus. Međutim, u populaciji organizama često postoji više verzija jednog te istog gena (sa nešto izmenjenom sekvencom) koje kodiraju protein sa nešto drugačijom strukturom, ali istom funkcijom. Ovaj proces se dešava zbog stohastičkih, nasumičnih događaja, kao što su slučajne mutacije ili slučajni izbor jedinki koje prenose svoje alele potomstvu. Kako se ovi slučajni događaji akumuliraju u vremenu, mogu dovesti do promena u genetičkom sastavu populacije bez obzira na prirodnu selekciju. Jasno je da, u principu, različiti geni mogu, ali ne moraju, ekspresijom ispoljavati fenotipske efekte koji utiču na samu sposobnost preživljavanja. Ukoliko ispoljavaju, tada se prirodnom selekcijom, putem selekcionog pritiska, povećava frekvencija onog alela u populaciji koji podiže sposobnost preživljavanja. Ukoliko specifičan alel ne podiže sposobnost preživljavanja, a ipak menja svoju frekvenciju u populaciji zbog *čiste slučajnosti*, tada se takva promena frekvencije naziva *slučajni genetički drift*. Uobičajen primer promene frekvencije selekciono indiferentnih alela je u slučaju drastičnog smanjenja broja jedinki populacije, na primer usled nekog katastrofalnog događaja, kada se mogu potpuno izgubiti aleli sa manjom frekvencijom zastupljenosti. Ovaj proces je posebno značajan u malim populacijama, gde je uticaj slučajnog genetičkog drifta veći, jer slučajni događaji imaju relativno veći značaj u manjim populacijama.

sposobnost preživljavanja. Na primer, novi duplikat gena odmah rezultuje u višku kapaciteta, a što kao posledicu ima umanjeње funkcionalnih ograničenja za svaku kopiju gena. Višak kapaciteta je preduslov za KNE, a njegova uloga je da omogući nastajanje ranije neraspoloživih mutacija, tj. omogući određeni oblik epistaze.

2) Epistaza se javlja kada su fenotipski efekti mutacije zavisni od konteksta, posebno kada zavise od drugih mutacija ili gena. U KNE, epistaza je posledica viška kapaciteta. Na primer, prisustvo dupliranih gena čini neutralnim mutacije gubitka funkcije u drugom duplikatu gena. Ove uslovno neutralne mutacije bile bi štetne u odsustvu duplikata gena (tj. viška kapaciteta). Epistaza maskira štetne efekte mutacija i oslobađa ih selekcionih ograničenja, odnosno pritiska. U odsustvu svih ili većine selekcionih ograničenja, neke promene se mogu akumulirati kao posledica slučajnog genetičkog drifta (Muñoz-Gómez *et al*, (2021)).

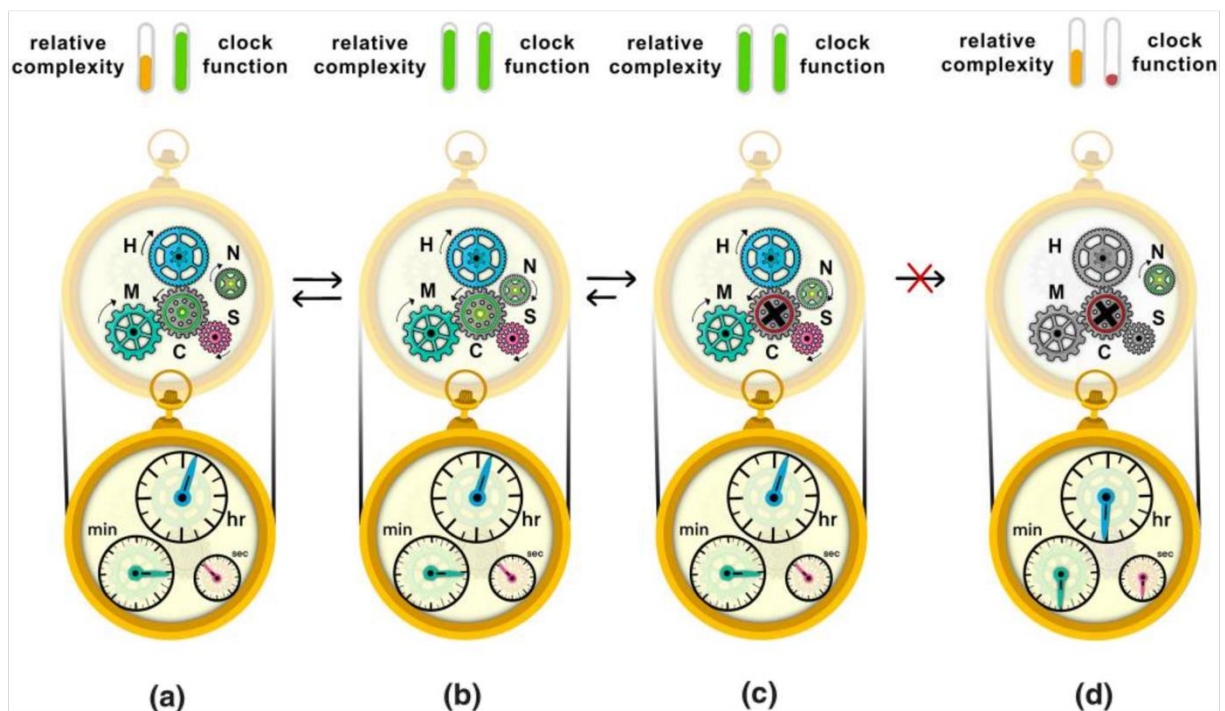
3) Slučajni genetički drift omogućava neutralnim, ili čak blago štetnim, mutacijama da povećaju svoju učestalost ili postanu fiksirane u populacijama. Kako je objašnjeno u fusnoti, ovo postaje mnogo verovatnije kod vrsta sa malim efektivnim veličinama populacije. Na primer, mutacije koje smanjuju funkciju u nedavno dupliranom genu mogu postati fiksirane zbog postojanja dodatne kopije gena koja i dalje obavlja funkciju. Uloga slučajnog genetičkog drifta u KNE je omogućavanje fiksiranja uslovno neutralnih mutacija čiji su potencijalno štetni efekti suzbijeni viškom kapaciteta.

4) Pristrasna varijacija se dešava kada su jedan tip mutacionih promena češći od drugih. Neke pristrasne varijacije imaju tendenciju da vode ka kompleksnijim stanjima i inherentne su za određeni sistem (organizam). Na primer, kada se roditelj gen duplira, mutacije koje smanjuju funkcije su češće od onih koje donose nove funkcije (Stoltzfus 1999). Drugim rečima, broj načina na koji gen može da mutira i pritom izgubi funkciju je veći od broja načina na koji može da mutira stičući nove funkcije.

5) Pročišćavajuća selekcija uklanja štetne mutacije iz populacija. Jedna od njenih ključnih uloga tokom KNE je sprečavanje razdvajanja neutralno evoluiranih međuzavisnosti. Slično tome, kada parovi gena paraloga postanu neophodni kao par, putem međusobnih mutacija gubitka funkcije, čista selekcija sprečava gubitak bilo kog od paraloga, uklanjajući organizme koji pokazuju gubitak funkcije kod jednog (ili oba) paraloga. Pročišćavajuća selekcija *de facto* sprečava gubitak složenosti koja je stvorena putem

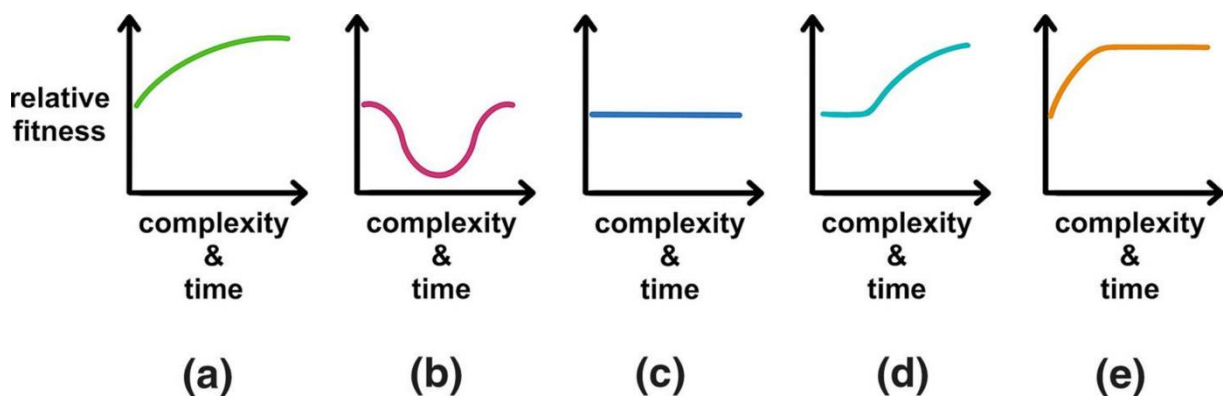
KNE, konzervirajući genetički sistem. Ona takođe rezultuje u relativno nepromenjenim fenotipskim efektima kompleksnih karakteristika i sprečava značajan pad prilagodljivosti organizma. Kao već navedeni primer, ona sprečava mutacije gubitka funkcije u genima paralozima koji su već postali neophodni putem međusobnih mutacija gubitka funkcije. Na ovaj način, pročišćavajuća selekcija deluje kao filter koji uklanja štetne mutacije, ali omogućava akumulaciju mutacija čiji su fenotipski efekti izbalansirani (Muñoz-Gómez *et al*, 2021).

Kako su to Muñoz-Gomez i saradnici rezimirali (2021), višak kapaciteta biološkog sistema prvo omogućava da se dese nepotrebne interakcije između dva ili više komponenti. Ove interakcije rezultirale su određenim tipom epistaze u kojoj se ranije štetna mutacija javlja kao efektivno neutralna. Kada je ranije štetna mutacija postala manje štetna ili neutralna, dolazi (može doći) do njenog fiksiranja. Ako se to dogodi, ova fiksirana mutacija „zaključava“ prethodno nepotrebnu interakciju, uzrokuje pojavu nove međuzavisnosti, i kao direktna posledica toga, složenost se povećava (tj. broj interagujućih delova je porastao), i sve to na neutralan način putem slučajnog genetičkog drifta bez pozitivne selekcije u bilo kom koraku kompleksifikacije. Zbog neophodnosti novonastale međuzavisnosti „pročišćavajuća selekcija“ sprečava razdvajanje inicijalnih funkcionalnosti komponenti ove nove, složenije, neutralno evoluirane karakteristike, jer bi razdvajanje narušilo funkciju i smanjilo prilagodljivost organizma.



**Slika 9.** Konceptualni prikaz funkcionisanja KNE. U hipotetičkom satu, tri zupčanika (zupčanici H, M i S) kontrolišu kazaljke (sate, minute i sekunde, tim redosledom). Oni se pokreću centralnim zupčanikom (zupčanik C), koji se napaja baterijom (označeno zelenim svetlom u centru zupčanika). Od panela (a) do (b) sat se usložnjava. Korak od (a) do (b) označava dodavanje prethodno neinteragujućeg zupčanika (zupčanik N) u mehanizam sata, ali koji ne utiče na funkciju sata. Korak od (b) do (c) donosi grešku u centralnom zupčaniku (zupčanik C), čime se novi zupčanik (zupčanik N), a koji ima sopstveni izvor napajanja, pokazuje neophodnim za funkcionisanje sata. Korak od (c) do (d) odvaja novi zupčanik (zupčanik N) od ostatka mehanizma. Ova promena čini sat nefunkcionalnim zbog nedostatka pristupa ikakvom napajanju. Ukratko, prisustvo novog zupčanika sa sopstvenim napajanjem (zupčanik N) uvodi višak kapaciteta, što pruža priliku da drugi zupčanik (zupčanik C) izgubi napajanje i rezultuje povećanjem složenosti koje je teško vratiti unazad, čime ceo proces podseća na način funkcionisanja gedora [prezeto iz Muñoz-Gómez *et al*, (2021)].

Interesantno je poređenje KNE procesa sa gedorama (engl. *ratchet*) (Gray *et al*, 2010).<sup>50</sup> Složenost nastala putem KNE se u ovoj interpretaciji označava kao nepopravljiva, odnosno ireverzibilna, upoređuje sa Rube Goldbergovim mašinama i kao takva smatra preteranom za obavljanje jednog jedinog zadatka. Grej i sar. (smatraju) da su inače zabranjene ili štetne mutacije omogućene prisustvom viška nepotrebne kompleksnosti u biološkim sistemima, odnosno da su njome potisnuti negativni efekti ovakvih mutacija, zbog čega se koncept prepotiskivanja (engl. *pre-supression*) pojavljuje kao ključan u njihovoj interpretaciji KNE.



**Slika 10.** (a) Tradicionalni pogled na evoluciju kompleksnosti kao posledice akumulacije progresivnih postepenih promena, (b) Scenario zasnovan na 'kompenzaciji', 'spašavanju', 'ispravci grešaka' ili 'post-supresiji' u evoluciji kompleksnih svojstava, (c) KNE dinamika promene kompleksnosti u vremenu, (d) Eksaptacija, gde neutralna evolucija prethodi adaptivnoj evoluciji, (e) Kombinacija adaptivne faze koja se zatim prati neutralnom evolucijom. Svi prikazani scenariji pretpostavljaju povećavanje složenosti [obratiti pažnju da se složenost zajedno sa vremenom nalazi na X-osi, a da se na Y-osi nalazi relativna

<sup>50</sup> Gedore su alat za odvrtanje ili zavrtanje šrafova kod kojih se rotacija može obavljati samo u jednom, predefinisanoj smeru, dakle nepovratno.

adaptiranost nastala kao posledica povećanja složenosti u vremenu, dakle, scenariji (b) i (c) bili bi ne-adaptacionistički] [prezeto iz Muñoz-Gómez *et al*, (2021)]

Akumulacija serije neutralnih promena može povećati njihovu međuzavisnost, i to tako da što je veća akumulacija neutralnih promena, to je ireverzibilnost sistema u prethodno stanje izraženija, zbog čega je KNE proces i upoređen sa gedorama (**Slika 9**).

Munjoz-Gomez i sar. (2021) daju sintetički i revijalni prikaz dinamike promene kompleksnosti impliciran različitim evolutivnim narativima (**Slika 10**). Tradicionalni narativ koji objašnjava evoluciju složenih karakteristika implicira da je složenost adaptivna, odnosno da složenija karakteristika mora doneti svom nosiocu kompetitivnu prednost. Ova tačka gledišta takođe sugerise da se složenost razvija postepeno, dakle pretpostavlja se da je darvinistička pozitivna selekcija pokretački faktor tokom celog procesa kompleksifikacije. U scenariju (b) na **Slici 10**, prikazan je nešto drugačiji adaptacionistički scenario. U početku, jedna ili više mutacija degradira sposobnost preživljavanja, što stvara pritisak za kompenzacionom mutacijom kako bi se povratila ta sposobnost. Autori navode dva načina realizacije ovog scenarija: (a) akumuliranje štetnih mutacija može da se dogodi zbog prolazne promene u okolini koja privremeno onemogućava njihove štetne efekte, (b) štetne mutacije se akumuliraju jer su povezane sa povoljnom mutacijom. U oba slučaja, štetna mutacija stvara pritisak koji vodi ka drugoj fazi scenarija (b) — evoluciji „mehanizma za ispravku grešaka“ koji je inherentno složeniji od jednostavnog poništavanja štetne mutacije. U scenariju (c), koji zapravo predstavljan KNE mehanizam, višak kapaciteta je unapred na raspolaganju, i unapred onemogućava potencijalno štetne posledice nekih mutacija, koje se stoga manifestuju kao neutralne i šire populacijom slučajnim genetičkim driftom. Stoga, one ne predstavljaju ni evolutivni hendikep ni evolutivnu prednost, ne izlažu organizam selekcionom pritisku, niti utiču na stepen adaptiranosti iako povećavaju kompleksnost. Sa obzirom da evolutivni narativi na **Slici 10a-c** nisu međusobno isključivi, oni se mogu kombinovati, pa je tako na **Slici 10d** prikazana kombinacija neutralne evolutivne faze za kojom sledi adaptivna. Suprotno tome, na **Slici 10e** prikazana je adaptivna evolutivna faza za kojom sledi neutralna evolucija.

U praktičnim studijama teško je evaluirati i složenost (posmatranu kroz temporalnu prizmu) i adaptivnu vrednost pojedinih karakteristika živih bića. Temporalna analiza često je onemogućena činjenicom da prethodne verzije nekih molekularnih mašinerija više nisu dostupne za ispitivanje, pa je ono što preostaje njihova filogenetska analiza i upoređivanje

(uglavnom strukturnih) složenosti aktuelnih verzija istog molekularnog mehanizma. Adaptivnu vrednost je još teže evaluirati, što se obično čini kroz posmatranje manifestovane funkcionalnosti u odnosu na uočenu složenost. Rekonstrukcija prethodnih ili prelaznih verzija neke molekularne mašinerije, prema Munjoz-Gomez i sar. (2021) predstavljala bi „zlatni standard“ za testiranje KNE narativa u svakom konkretnom slučaju.

Sledi prikaz dva mehanizma koji dovode do porasta genetičke kompleksnosti koja *nije* proizvod selekcionog pritiska:

*Mehanizam 1.* Pretpostavimo da postoje dva proteina, A i B, koji međusobno interaguju ali njihova interakcija ne utiče na obavljanje funkcije proteina A. Drugim rečima, njihova interakcija je nepotrebna (višak) iz funkcionalnog ugla. Zatim, slučajno se desi mutacija koja onemogućava protein A da svoju funkciju vrši bez proteina B. Ovakva mutacija zadržaće se, jer je protein B uvek prisutan, dakle neće biti eliminisana prirodnom selekcijom i populacijom se može širiti slučajnim genetičkim driftom. Kao ishod javlja se zavisnost funkcije A od prisustva B. Iako je u principu moguće zamisliti poništavajuće mutacije koje bi stvari vratile u prvobitno stanje, takav scenario je malo verovatan, dakle promena je praktično trajna, obavljena po KNE principima i dovela je do neadaptacionog povećanja genetičke kompleksnosti.

*Mehanizam 2.* Drugi mehanizam KNE naziva se i subfunkcionalizacija. Tok subfunkcionalizacije započinje genskom duplikacijom, pravljenjem duplikata gena od jednog te istog izvornog gena. Zatim se mutacijama, ova dva gena počnu degradirati, na taj način što proteini koje oni kodiraju mogu obavljati samo jedan deo prvobitne funkcije, ali zbog prisustva oba proteina, posmatrano u celini, negativan efekat na ceo organizam ne postoji, funkcija je očuvana, a genetička kompleksnost se povećala neadaptivno jer organizam sada poseduje dve blago degenerisane kopije jednog te istog izvornog gena (Stoltzfus 1999).

Na kraju, jedno ključno pitanje ostalo je otvoreno — kakav je tačno odnos KNE prema Modernoj sintezi, odnosno neodarvinizmu? Da li je KNE kao ne-adaptacionistička teorija zapravo anti-neodarvinistička, i ako jeste, sa kojim se hipotezama u okviru neodarvinizma sukobljava? Da podsetimo, pojednostavljeno, neodarvinizam tvrdi da se evolucija dešava slučajnim mutacijama i spontanom biranjem najsposobnijih jedinki za preživljavanje, dakle pozitivnom prirodnom selekcijom. KNE sama po sebi ne sadrži ništa što bi dovelo u pitanje deo neodarvinizma koji se tiče Mendelove genetike, zapravo, KNE uglavnom operiše baš na polju genetičkih ili makromolekularnih procesa. Dakle, ona komponenta neodarvinizma koja bi se mogla pokazati problematičnom je upravo darvinizam u okviru neodarvinizma — princip

selekcije najprilagođenijih koji ostavljaju svoje gene budućim generacijama. Sam pojam selekcije može se u načelu interpretirati na dva načina, kao pozitivna („biranje najboljih za nastavak vrste“) i negativna („biranje najgorih za odstranjivanje“) selekcija, i oba će podeliti inicijalnu populaciju na dva tabora — one koji jesu, i one koji nisu izabrani za preživljavanje, s tim što će u prvom slučaju oni biti birani eksplicitno, a u drugom implicitno. Klasična interpretacija neodarvinizma podrazumeva prvu interpretaciju. KNE nije lako pomirljiva sa ovom interpretacijom, jer, kao što je pokazano, osnovna ideja KNE je da promene organizma nastaju, bar delimično, slučajnim fiksiranjem mutacija koje u suštini ne predstavljaju adaptacije, odnosno evolutivne prednosti. Naprotiv, trošak viška kapaciteta koji je preduslov KNE možda bi se pre mogao interpretirati kao privremena slabost. Sam Stolcfus je 13 godina nakon postavljanja osnova KNE komentarisao: „*Veći deo savremene evolucione genetike odstupa od pojma evolucije koji leži u osnovi neodarvinizma, što rezultira širenjem jaza između onoga što formalni modeli dozvoljavaju i onoga što vladajuće mišljenje [neodarvinizam] o uzrocima evolucije sugerše.*“ (Stoltzfus, 2012). On, umesto shvatanja mutacija kao izvora sirovog materijala koji se pozitivnom selekcijom koja je u osnovi deterministički proces fiksiraju ili odbacuju, sugerše da bi se mutacije pre trebalo shvatiti kao izvor evolutivnih novotarija, dok bi se dejstvo selekcije moglo uporediti sa stohastičkim sitom koje neke od tih novotarija propušta. Naše mišljenje je da bi jedan deo tenzija između originalne interpretacije darvinizma kao komponente neodarvinizma, i KNE, mogao ukloniti ako bi se selekcija interpretirala kao negativna, umesto pozitivne, dakle kao uklanjanje neprilagođenih organizama i vrsta umesto favorizovanja prilagođenih. Naime, s obzirom da KNE generiše mutacije koje ne pružaju adaptivne prednosti, ali ipak bivaju fiksirane, u „negativističkoj interpretaciji“ prirodne selekcije za fiksiranje takvih mutacija bilo bi dovoljno da one ne predstavljaju značajnije evolutivne hendikepe da bi se „provukle“ kroz proces selekcije, dakle da su adaptivno neutralne, što, čini se, kao da je zaista i slučaj. Centralno mesto procesa prirodne selekcije ostalo bi netaknuto, uz umerenu reinterpretaciju njene strogo determinističke prirode s obzirom da je slučajni genetički drift nesporan. U takvoj konceptualnoj reinterpretaciji prirodne selekcije, KNE bi se teško mogla doživljavati kao anti-neodarvinistička teorija, već, u najgorem slučaju, kao a-neodarvinistička, nudeći rešenja dela evolutivnog procesa koji neodarvinizam nije dovoljno detaljno obradio.

Iako je KNE kao teorija prisutna u zajednici evolucionih biologa više od 20 godina, neka pitanja još uvek nisu potpuno rešena. Prema Munjoz-Gomez i sar. (2021), prvo od tih pitanja odnosi se na „trošak“ postojanja samog viška kapaciteta, koji je preduslov KNE. Drugo

pitanje je kako demarkirati granicu moći viška kapaciteta u suzbijanju negativnih mutacija. Na kraju, KNE je ostala na nivou kvalitativne teorije, a razvoj njenih kvantitativnih i matematičkih elemenata koji bi omogućavali i prediktivne, a ne samo analitičke poduhvate, ostaje budućim generacijama.

Na kraju, Kimurina hipoteza neutralne evolucije zaslužuje da bude spomenuta u analizi razvoja ne-darvinističkih interpretacija evolucionog procesa. Iako je hronološki prethodila KNE, ona nije u centar interesovanja postavila kompleksnost organizama, koja je centralna tema ovog rada, pa je stoga predstavljamo posle KNE. Ova teorija, predložena od strane japanskog biologa Motoa Kimure tokom 1960-ih (Kimura, 1968), sugerise da je većina genetičkih mutacija na molekularnom nivou (npr. sekvence DNK) selektivno neutralna, što znači da ne donose nikakvu prednost ili nedostatak organizmu. Preduslov razvoja ove teorije je svakako bilo otkriće strukture DNK i osnovnih biohemijskih mehanizama nasleđivanja, kao i obilje novih empirijskih podataka, naročito na molekularnom nivou. Kimura tvrdi da većina genetičkih promena nastaje usled genetičkog drifta, slučajnih fluktuacija frekvencija alela u populaciji. Prema ovoj teoriji, prirodna selekcija nije glavni pokretač molekularne evolucije, i većina genetičke varijabilnosti ostaje prisutna u populacijama zbog neutralnosti. Kimurina neutralna teorija se ne bavi specifično razvojem kompleksnih karakteristika ili struktura kod organizama. Povišene stope mutacija, neodrživi genetički tereti (ekstremne Rube Goldbergove mašine) i visok nivo varijacije u populacijama doveli su u pitanje Darwinovu evoluciju, centralnu tezu moderne sinteze, gde je adaptacija bila glavni pokretač evolucione promene. Nekoliko konkretnih eksperimentalnih zapažanja je dovelo do krize vladajuće darvinističke paradigme. Emile Zuckerkandl, pod nadzorom Lajnusa Polinga, otkrio je da broj razlika u aminokiselinama između hemoglobinskih proteina izolovanih iz bilo koje dve vrste korelira sa vremenom koje je prošlo otkako su se te vrste razdvojile od zajedničkog pretka (prema paleontološkim procenama). Ovaj koncept kasnije je nazvan „molekularni sat“ (Zuckerkandl i Pauling, 1962) i očigledno je protivrečio adaptacionističkim gledištima, jer je divergencija išla nekom svojom unutrašnjom dinamikom konstantnom u vremenu, i, na neki način, nezavisno od okruženja, dakle ne-adaptacionistički. U isto vreme, Džek Habi i Ričard Levontin koristili su gel elektroforezu kako bi pokazali da različiti pojedinci unutar iste vrste imaju iznenađujuće visok nivo varijabilnosti u bilo kom datom proteinu (Hubby i Lewontin, 1966). Ta varijabilnost bila je daleko veća nego što je većina modela populacione genetike predviđala. Drugi su primetili da mnoge od ovih promena dovode uglavnom do funkcionalno neutralnih promena u proteinima (npr. Freese, 1962). Iz ovako izražene varijabilnosti sledilo je da, ako bi sve ove

varijacije (aleli) nastale kao posledica selekcionog pritiska, dakle odstranjivanja neuspešnih pokušaja promene genetičkih informacija koje su kodirale ove proteina, frekvencija „genetičkih smrti“ u populaciji, odnosno broj organizama koji umiru zbog neprilagođenosti, bi bila neprihvatljivo visoka za opstanak vrste. Svi ovi nalazi doveli su do krize u evolucionoj biologiji interpretirane na darvinistički način. Zatim je usledila Kimurina teorija. Njegov zaključak, iz gore navedenih razloga, bio je da evolucija na molekularnom nivou mora biti neutralna, zapravo on je zaključio da se i mutacije koje nose blagu prednost ili hendikep često fiksiraju kao neutralne, pa je čak i dao kvantitativni kriterijum koji mutacija mora da zadovolji da bi bila praktično neutralna.<sup>51</sup> S obzirom da je prirodna selekcija do tada smatrana pokretačem evolucije, nova neutralna teorija izazvala je značajnu kontroverzu u okviru evolucione biologije, pokrećući ono što se obično naziva debatom između neutralista i selekcionista.

Sekvencioniranje proteina potvrdilo je predviđanja neutralnih teorija — da je frekvencije fiksacije mutacija mnogo veća u onim delovima genoma sa niskom funkcionalnom ograničenošću, kao što su npr. delovi genoma koji kodiraju deo enzima koji nije u njegovom aktivnom centru. Prirodna selekcija (odnosno neodarvinizam) teško je mogla da objasni preferencijalne mutacije u ovom delu genoma koji je funkcionalno ne tako bitan. Pritisak na neodarvinizam izvršen je i iz drugog pravca, u ispitivanju genetičke uloge u fenotipskim svojstvima organizama. Pokazano je da, osim prirodnom selekcijom regulisanih genetičkih promena, izmena fenotipskih osobina može biti posledica spektra drugih uzroka (pored neutralne evolucije), poput razvojnih ograničenja, plejotropije<sup>52</sup> i istorijske kontingencije (Gould and Lewontin, 1979). I danas postoji mišljenje da je pojedinačni uticaj neutralne evolucije na fenotipska svojstva organizama slabo shvaćen (Zhang, 2018; Palazzo and Nevraj, 2022). Iako mnogi detalji molekularne evolucije još uvek izazivaju debate, glavna teza neutralne teorije — da je većina mutacija sama po sebi gotovo neutralna, je potvrđena brojnim istraživanjima (Hochberg *et al*, 2020; Palazzo and Nevraj, 2022).

---

<sup>51</sup> Doveo je u vezu koeficijent selekcije  $|s|$  i efektivnu veličinu populacije  $N_e$ , i zaključio kad god je  $|s| < 1/N_e$ , mutacija je praktično neutralna. Koeficijent selekcije  $|s|$  je prosečan pad ili rast broja potomaka kod mutirane, u odnosu na izvornu jedinku vrste, dok je efektivna veličina populacije ( $N_e$ ) broj reproduktivnih jedinki koje se slučajno sparuju u vrsti, a koja je u praksi mnogo manja od same veličine populacije, npr. kod čoveka kao vrste iznosi oko 10000 (Palazzo and Nevraj, 2022).

<sup>52</sup> U radu Stivena Gulda i Ričarda Levontina, plejotropija se odnosi na pojavu u kojoj jedan gen utiče na više različitih osobina ili fenotipskih karakteristika koje se čine nespojivim. Plejotropija je korišćena kako bi se ilustrovala složena interakcija gena i osobina, dovodeći u pitanje ideju da su sve osobine rezultat direktnog dejstva prirodne selekcije i sugerirajući da su neke osobine mogle evoluirati bez direktnih prednosti, kao nusproizvod genetičkih promena.

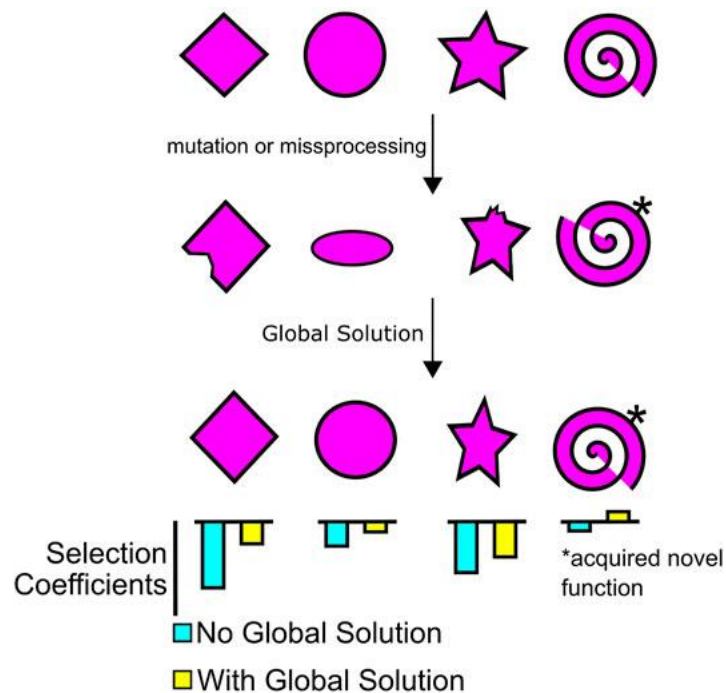
Teza o većini neutralnih mutacija izgleda da je najjače uporište dobila u otkrivanju ogromnog dela genoma (DNK) koji nema funkciju, a koji je nazvan „otpadom“ (engl. *junk DNA*). Ako je DNK mesto u kom se akumuliraju potpuno beskorisni delovi, onda je nepobitna činjenica da prirodna selekcija nije tako striktna kako nalaže darvinizam. Međutim, teza o "junk" DNK je takođe kontroverzna. Procene aktivnog dela DNK u genomu čoveka idu od 1% do 80% (Palazzo and Nevraj, 2022).<sup>53</sup> Raspon procena deluje gotovo neverovatno, a dobijen je u okviru skorašnjeg projekta mapiranja kompletnog genoma čoveka. Procena od 1% praktično čini nepobitnom činjenicu da je veliki deo DNK zapravo nepotrebnii višak, dok procene od 80% ukazuju da bi veliki delovi DNK zapravo mogli imati neku funkciju, iako ona ne mora da se neposredno odnosi na kodiranje proteina. Zapravo, poistovećivanje protein-kodirajuće uloge DNK, sa ulogom uopšte, čini se da je deo problema neslaganja različitih procena količine nepotrebne DNK u genomu. Regulatorni geni bi se teško mogli nazvati viškom, iako ne kodiraju proteine. Pa ipak, koliko god nategnuta bila odbrana selekcionizma i darvinizma, čak i najfleksibilnije interpretacije funkcionalnosti DNK teško da mogu da ospore tezu o nepotrebnom višku. Većina istraživača je istakla da su novi rezultati projekta mapiranja ljudskog genoma u potpunosti usklađeni sa tezom o višku, koji sledi iz modernog razumevanja molekularne evolucije (npr. Pointing, 2017). Prirodna selekcija se često netačno poistovećuje sa evolucijom, dok aktivna biološka funkcija implicira da je određena karakteristika ili element trenutno pod selekcionim pritiskom. Prema trenutnom stanju znanja, samo oko 10% DNK čoveka je pod selekcionim pritiskom (Gaur, 2017). Biohemija ćelije je daleko od savršenog, čak i optimalnog. Kao primeri ovih nesavršenosti često se navode nespecifičnosti enzima — recimo sklonosti enzima da isecaju ne samo peptidne delove koji su im osnovna namena, već i njima slične (Wei i sar, 2008)<sup>54</sup>, ili sklonost mesta za vezivanje RNK u ćeliji da u odsustvu ciljane RNK vežu bilo koju drugu RNK, dok se u njenom prisustvu pokazuju kao specifična (Ray *et al*, 2009). Enzimi koji gube specifičnost, često nisu dovoljno disfunkcionalni da bi bili pod selekcionim pritiskom, i stoga akumuliraju mutacije, što je u potpunom skladu sa neutralnom teorijom evolucije. Jedan od problema sa kojim se suočava neutralna teorija koja se bazira na relativno lakoj akumulaciji grešaka koje ne trpe selekcionii pritisak je sledeći: kako se genom kao celina ne degradira ovakvom akumulacijom do mere koja ugrožava egzistenciju

---

<sup>53</sup> Baziano na ENCODE projektu mapiranje kompletnog genoma čoveka (videti npr. ENCODE Project Consortium *et al.*, 2012),

<sup>54</sup> Ova osobina enzima, nazvana čak i enzimskim promiskuitetom (Palazzo and Nevraj, 2022), sledi iz Bolcmanove raspodele frekvencije različitih reakcionih puteva, jer će se u enzimskim reakcijama (kao i u svim drugim hemijskim reakcijama) alternativni, ali energetski nepovoljniji, reakcionii pravci, takođe realizovati zbog viška termičke energije u sistemu.

organizma, jer iako je hendikep prisustva jednog problema moguće tolerisati, kumulativni efekat velikog broja ovakvih pojedinačnih slučajeva sitnih nesavršenosti mogao bi biti poguban. Palaco i Nevraj, pozivajući se na seriju drugih autora, navode da se ćelija služi serijom mehanizama koja su nazvana „globalnim rešenjima“. Globalna rešenja, ukratko, su ćelijski mehanizmi koji održavaju homeostazu, sprečavajući i eliminišući greške ili suboptimalne molekularne proizvode (npr. proteine i RNK). Ovi mehanizmi rešavaju više problema odjednom, dakle deluju na izvestan način neselektivno. Kao jedan od primera Globalnih rešenja Palaco i Nevraj navode mehanizam za kontrolu kvaliteta RNK koji sprečava izlazak problematičnih RNK lanaca iz jedra u citoplazmu, onemogućavajući učestvovanje u sintezi proteina (translaciji). Krajnji efekat „globalnih rešenja“ je u blagom podizanju selekcionih koeficijenata onih mutacija koje dele zajednički problem. Na primer, nova mutacija može omogućiti enzimu da obavlja dodatnu korisnu funkciju, ali istovremeno ga destabilizuje. Na ovaj način, „globalna rešenja“ indirektno podstiču razvoj inovacija, povećavaju plastičnost i fenotipsku heterogenost organizama, i čini se da povećavaju i otpornost (Mo *et al*, 2021) (Videti Sliku 11).



**Slika 11.** Globalna rešenja umanjuju štetnost mutacija, i podstiču podložnost evoluciji (engl. *evolvability*) [Preuzeto iz Palazzo and Nevraj, 2022]

U vezi sa postojanjem spektra „globalnih rešenja“ je i uočena razlika u kompleksnosti između prokariota i eukariota. Naime, eukarioti koji su evolutivno kasnije nastali, prema većini definicija kompleksnosti poseduju veći stepen složenosti. Objašnjenje ovog zapažanja može se

relativno lako dati u pojmovnim okvirima neutralne teorije, i uzrokovano je načinom života prokariota i eukariota. Prokarioti su izloženi visokom nivou selekcionog pritiska, dok eukarioti nisu (Lynch, 2007). Kod organizama gde je selekциони pritisak ekstremno, višak kompleksnosti je hendikep i efikasno se eliminiše prirodnom selekcijom (Lynch, 2006). Kod organizama sa niskom efektivnom veličinom populacije, viškovi kompleksnosti se ne odstranjuju evolucijom, već opstaju tokom dužeg vremena i njihovi štetni efekti se umesto toga ublažavaju „globalnim rešenjima“. Zbog manjeg selekcionog pritiska, eukariotsko unutarćelijsko okruženje sadrži relativno viši nered i shodno tome višak kapaciteta (u terminima KNE), odnosno funkcionalno nepotrebnog sadržaja sa kojim se može eksperimentisati (videti potpoglavlje o eksaptaciji) kako bi se stvorile nove funkcionalne komponente<sup>55</sup>. Organizmi koji se suočavaju sa jakim selekcionim režimima obično efikasnije eliminišu višak nered, pa nemaju toliko sirovih supstrata za podsticanje neutralne evolucije. Organizmi koji doživljavaju slab selekциони pritisak ne eliminišu nered tako efikasno. Umesto toga, ovim novim ne-funkcionalnim entitetima omogućava se da istražuju neosvojeni funkcionalni prostor tokom dužeg vremena, povećavajući šansu da slučajno razviju novi višak kapaciteta jer povećanje složenosti nije posledica samo stvaranja novih delova, već i uspostavljanja novih interakcija između postojećih delova preuređivanjem mreža interakcija.

U okviru osvrta na neutralnu teoriju bilo bi korisno analizirati još jedan aspekt mutacija, koji po značaju i dometu prevazilazi neutralnu teoriju i može se ekstrapolirati i na neodarvinizam — pristrasnost mutacija. Naime, kroz eksperimentalna opažanja primećeno je da nisu sve moguće mutacije podjednako verovatne, već su neke verovatnije od drugih, odnosno favorizovane. Kao primer pristrasnih tačkastih mutacija često se navodi veća verovatnoća mutacije alanina u guanin, nego alanina u timin (Nei, 2013).<sup>56</sup> Takođe, s obzirom da je nukleotidni sadržaj u nukleinskim kiselinama u ravnoteži zbog principa sparivanja baza, stepen zamene jedne azotne baze drugom zavisiće od dinamike promene baza *u paru*, tako da promena jedne baze čini promenu druge baze favorizovanom. Zatim, zakrivljenost DNK lanaca utiče na lokalnu brzinu mutacija u njegovim različitim delovima (Duan *et al*, 2018). Ne samo mutacije, nego i mehanizmi reparacije mutacija, takođe su pristrasni. Na primer, brzina

---

<sup>55</sup> Distinkcija između unutarćelijskog nereda i viška kapaciteta je u tome što komponente nereda mogu da nemaju baš nikakvu funkciju, dok komponente viška kapaciteta imaju funkciju, ali je obavljaju na suboptimalan način, poput Rube-Goldbergovih mašina. Nered postaje višak kapaciteta onda kada postane deo suboptimalnih biohemijskih i metaboličkih ciklusa.

<sup>56</sup> Alanin, guanin, citozin i timin su azotne baze koje daju identitet nukleotidima — sastavnim delovima nukleinskih kiselina. Njihovim redosledom se zapravo kodiraju informacije.

reparacije mutacija DNK zavisi od modifikacija lokalnih histona (Huang and Li, 2018). Drugim rečima i generalizovano, genom kao da pokazuje dispozicionalna svojstva da mutira određenom putanjom, dakle da zauzima određeni evolutivni pravac razvoja, kao da njegovo trenutno stanje i osobine reflektuju i pravac budućeg razvoja, baš kao što telo genozom svojih anatomsko-morfoloških svojstava (npr. specifičnim pravcem pokretljivosti zglobova) biomehanički ograničava i usmerava način budućeg sopstvenog kretanja.

U debati između neutralista i selekcionista, neutralna teorija može se posmatrati i kao nulta hipoteza, i to se navodi i kao njena ključna prednost (Palazzo and Nevraj, 2022). Da bismo tvrdili da su adaptivne sile glavni uzrok neke molekularne osobine, moramo dokazati da ta osobina nije mogla nastati isključivo usled slučajnih promena i pristrasnih mutacija. Adaptivni modeli pretpostavljaju da je većina promena rezultat pozitivne selekcije, dok bi nulta hipoteza bila je da je većina promena posledica neutralnih ili blago štetnih mutacija. Neutralna teorija se ovde suočava sa jednim ozbiljnim argumentom dobijenim kroz eksperimentalni rad — primećeno je da je brzina mutacije određenog gena direktno u vezi sa nivoom njegove ekspresije (što je veći nivo ekspresije gena, to je manja brzina njegove mutacije). Palaco i Nevraj se pitaju, čini se sa pravom: „Ako pretpostavimo da je većina mutacija skoro neutralna (nulta hipoteza), zašto bi se one nakupljale u slabo ekspimiranim genima?“ Odgovor na ovo pitanje je bio, pojednostavljeno, da proteini visoko ekspimiranih gena doprinose većem broju intermolekularnih interakcija (u pogledu vrsta interakcija i ukupnog broja interakcija) i kao rezultat toga, male promene u ovim proteinima bi poremetile veći broj funkcionalnih interakcija, ili promovisale veći broj pogrešnih interakcija. Odgovor je, čini se, logičan, samo nije eksplicitno interpretiran kao selekcionistički ili neutralistički (Palazzo and Nevraj, 2022). Naše mišljenje je da je ovaj odgovor u suštini selekcionistički, uz rezervu da ovo možda i nije tačan, ili bar nije jedni mogući odgovor.

### **2.2.1. Problemi neutralističkih pogleda na evolucionu istoriju**

Iako smo u prethodnim sekcijama pomenuli i neke slabosti neutralizma, pored uvoda u dve verzije neutralizma, u ovom potpoglavlju ukratko izložemo slabosti neutralizma onako kako ih je video Desmond (Desmond, 2021). On je na relativno ubedljiv i sistematičan način izneo kritiku neutralne teorije. Već smo naveli da neki autori (Palaco i Nevraj) neutralizam posmatraju kao nultu hipotezu u karakterizaciji selekcionističkih pogleda na evolutivni tok. Prema Desmondovim pogledima na neutralizam, on teško da zaslužuje status nulte hipoteze jer pati od sličnih problema kao i selekcionizam. Prvo, neutralizam sadrži neke prećutne

pretpostavke, na primer da ako se evolucija dešava akumulacijom neutralnih mutacija, evolucionari „novčić“<sup>57</sup> nije pristrastan, odnosno da je pošten. Pod ovim on zapravo misli da je vremenski interval potreban da se porast bilo kog svojstva (metrike) M organizma desi sa verovatnoćom od 50% jednak vremenskom intervalu potrebnom da se pad istog tog svojstva M desi sa verovatnoćom od 50%. Drugim rečima, evolucionari put popločan slučajnim događajima nema tendenciju da ide u jednom određenom pravcu, predstavlja stvarni „slučajni hod“, ili „hod pijanca“ u Guldovoj terminologiji<sup>58</sup>. Druga prećutna pretpostavka je da je dužina ovih vremenskih intervala dovoljno mala da omogući akumulaciju neutralnih mutacija u vremenu usklađenim sa geološkim vremenom u kom planeta podržava i održava život (kada bi ovaj interval iznosio stotine milijardi godina tada promene ne bi bile uočljive na našoj planeti s obzirom da se evolucija dešava oko 4 milijarde godina). Desmond uvodi pojam bioloških mogućih stanja<sup>59</sup> i zaključuje kako bi organizmi, da bi neutralna teorija objasnila uočene trendove, prostor konstituisan mogućim biološkim stanjima oni morali da istražuju u vremenskim domenima koji su reda veličine jedne milijarde godina. Već tu se javljaju problemi, jer ne postoji konsenzus da li se prostor mogućih bioloških stanja svodi na sve moguće genotipove, morfologije, ili fenotipove organizama (uključujući i obrasce ponašanja). Čak i uz kontroverznu pretpostavku da demarkiramo prostor mogućih bioloških stanja totalitetom mogućih genotipova (jer se neutralna evolucija, čini se, predominantno dokazivala upravo na mikrobiološkim i biohemijskim procesima), suočavamo se sa hiper-astronomskim brojem takvih stanja. Broj permutacija genoma iole veće dužine je veći od broja protona u Univerzumu (Desmond, 2021). Drugim rečima, slučajnim izborom genoma (jedne njegove permutacije)

---

<sup>57</sup> Desmond aludira na bacanje novčića kao na metaforu evolucionog toka kroz akumulaciju neutralnih slučajnih mutacija.

<sup>58</sup> U svom čuvenom delu (Gould, 1996) Gould je objasnio detaljnije zašto je hod pijanca prihvatljiva metafora u njegovoj argumentaciji. Hod pijanca primer koji pokazuje da nasumično kretanje bez određenog smera može proizvesti određeni rezultat, ali koji nužno ne ukazuje na fiksni trend. Kretanje pijane osobe nije kontrolisano nikakvim predodređenim pravilom, niti pijanac pokazuje bilo kakvu sklonost ka kretanju ulevo ili udesno. U evolutivnom procesu vrste se mogu razvijati ka jednostavnosti ili složenosti. Međutim, u smeru jednostavnosti postoji nepremostiv zid, "levi zid", jer organizmi ne mogu biti jednostavniji od najjednostavnijih bakterija, dok na desnoj strani - strani složenosti, nema takvog zida. Stoga je porast prosečne vrednosti kompleksnosti u procesu biološke evolucije samo nusproizvod nasumičnog kretanja, poput hodanja pijane osobe, on kaže: "*Slično tome, neka prosečna ili ekstremna osobina života može se kretati u određenom smeru čak i ako nema evolutivne prednosti, i nema inherentnog trenda koji podržava taj put.*" Pijana osoba izlazi iz bara i hoda trotoarom ispred bara. S jedne strane je zid bara, a s druge strane je rov. Pijana osoba se tetura, ljuljajući se s jedne strane na drugu. Ako se tetura dovoljno dugo i potpuno nasumično, čovek će sigurno pasti u rov jer će svaki put kada udari u zid biti odbijen nazad i usmeren na drugu stranu. Međutim, kada se približi rovu, ništa ga ne zaustavlja. Dakle, uz pretpostavku dovoljno vremena, sigurno će pasti u rov i onesvestiti se. Iako padanje u rov nije ni cilj ni pokretač, moglo bi se tvrditi da je padanje cilj ovog misaonog ekvivalenta evolucionog kretanja.

<sup>59</sup> Pod biološki mogućim stanjima Desmond podrazumeva skup realizovanih i mogućih genotipskih i fenotipskih struktura organizma.

tokom geološke istorije zemlje bio bi pretražen zanemarljiv i beznačajan deo prostora mogućih bioloških stanja genoma. Ubedljiva demonstracija problema data je na paralelnom primeru formiranja tercijarnih struktura proteina trodimenzionalnim uvijanjem. Naime, ako bi prosečan protein pretraživao prostor mogućih konfiguracija, za pronalaženje prave konfiguracije bi mu trebalo  $10^{120}$  puta duže vremena od trajanja dosadašnje geološke istorije zemlje. Zaključak koji sledi je da proteini prostor mogućih konfiguracija ne pretražuju putem slučajnosti. Dezmund zaključuje, na sličan način, da je broj mogućih genotipova veći od  $10^{150}$ , za haploidne genotipove koji se sastoje od 1000 gena sa po dva moguća alela postoji  $\sim 10^{316}$  mogućih genotipova<sup>60</sup>. Čak i ova računica predstavlja pojednostavljenje, jer broj gena može biti značajno veći od 1000, mnogi organizmi su diploidni, mnogi geni imaju polimorfizme itd, dok se pritom kreiranje novih sekvenci genoma dešava mnogo sporije od brzine kojom protein ispituje totalitet svih mogućih prostornih konfiguracija. Kao i u slučaju proteina, zaključak da se ispitivanje genetičkih mogućih bioloških stanja ne dešava slučajno, se sam nameće. Ako se ne dešava slučajno, kako se dešava? U poglavlju o KNE već smo spomenuli pristrasnu varijaciju, a nešto kasnije u istom poglavlju i pristrasnu mutaciju. Mutacije uzduž koridora funkcionalne ekvivalencije (mutacionog prostora koji ne remeti genetičko–fenotipsko mapiranje) mogu biti sasvim slučajne, ali i preferirane u odnosu na mutacije van tog prostora. Prirodna selekcija, iako na molekularnom nivou vladaju neutralne sile, na fenotipskom nivou može igrati važnu ulogu. Dezmund navodi da, iako je cela ideja neutralizma usmerena na negiranje postojanja selekcijom pokretanih trendova u bilo kojoj metrici prilagođenosti organizma  $M$ , u mikroevolutivnim domenima selekcija može igrati ulogu. Neutralizam se, po njemu, svodi na krucijalnu tezu da je sukcesija različitih okruženja koja stimulišu ili potiskuju svojstvo organizma  $M$  u geološkom vremenu slučajna i česta, tako da je svojstvo  $M$  selektivno–neutralno posmatrano na duži rok (u čitavom geološkom vremenu). S obzirom na broj permutacija genoma koji smo pomenuli, broj različitih svojstava  $M$  daleko prevazilazi broj mogućih vrsta okruženja koja organizam (vrsta) može da sretne u svojoj istoriji. Većina svojstava, dakle, ne manifestuje se kao selektivno neutralna, što je bila jedna od osnovnih neutralističkih teza, već se javlja kao selektivno potiskivana. A ako je trend selektivno potiskivan, i dalje je proizvod selekcije, što samoukida neutralističku tezu o tome da trend nije vođen selekcionističkim principima. Naše mišljenje je da je Dezmund ovde napravio grešku u zaključivanju. Naime, disproporcija u odnosu broja

---

<sup>60</sup> Dezmund ovde misli na sledeće: ako dva proteina imaju sekvencu gena koji čine DNK molekul G1, G2, G3, itd., i svaki od njih ima dva moguća alela, npr. G1a i G1b, zatim G2a i G2b, itd., tada je broj mogućih jedinstvenih sekvenci dužine hiljadu gena  $\sim 10^{316}$ .

mogućih  $M$  stanja i bogatstva mogućih selekcionističkih okruženja pokorava se Ešbijeovom zakonu kao i svaki drugi sistem sredina–agent. Kao takav, ovaj odnos implicira da okruženja *nisu* u stanju da kontrolišu agenta, da njegovi odgovori po bogatstvu prevazilaze sposobnost okruženja da kreira haotičan režim na duži (geološki) rok. Ova situacija je donekle konceptualno suprotna uobičajenoj, koja je analizirana u sekciji Ešbijeov zakon, u kojoj se agent zapravo bori da kontroliše sredinu koja je bogatija stimulusima. Iako se slažemo sa Dezmundovim zaključkom da je većina mutacija zapravo štetna, pa je je moguće posmatrati sekvencu mutacija kao neutralnu, nije jasno kako je Dezmund ovaj zaključak izveo iz činjenice da je neproporcionalno veći broj permutacija genoma od broja mogućih okruženja. I premisa i zaključak su, po nama, tačni, samo zaključak ne sledi iz premise. Greška je logička, a ne faktička. Po nama, većina mutacija je zapravo štetna i neutralna hipoteza nije održiva u onom delu u kom posmatra vremenske intervale potrebne da se pad ili rast nekog svojstva desi sa verovatnoćom od 50% kao jednake, jednostavno, ako u datom okruženju svojstvo  $M$  predstavlja evolutivnu prednost, vreme potrebno da ono nestane sa verovatnoćom od 50% biće *kraće* od vremena potrebnog da se ono poboljša, ali ne zato jer organizam ima već broj mogućih bioloških stanja genoma u principu, već zbog toga što je karakter tih stanja takav da veći broj njih vodi u gubitak svojstva  $M$ . *Vice versa*, mogao bi se zamisliti scenario u kom je takođe mnogo veći broj stanja genoma od broja vrsta okruženja, ali većina tih stanja povećava svojstvo  $M$ , u kom slučaju bi evolucionarna preferenca bila povećanje  $M$ . Dezmund svoj zaključak brani tako što redukuje karakter svih mogućih bioloških okruženja na ona koja je realistično očekivati u aktuelnoj geološkoj istoriji, i onda se sarkastično pita da li bi evolucija, na primer, leptirovih krila veličine konja u bilo kom od njih predstavljala evolutivnu prednost. Naravno da ne bi, ali ne zato što je evolucija leptirovih krila veličine konja deo „viška“ genomskih bioloških stanja, odnosno predstavlja *per se* problem kao višak, već zbog prosečnog negativnog karaktera takve mutacije u odnosu na optimalnu veličinu krila u svakom pojedinačnom okruženju. Dalje, Dezmund analizira veličinu tela kao jedno od svojstava  $M$  oko kog vlada debata u smislu evolutivnog trenda. Neki autori smatraju da je verovatnoća biološki mogućih okruženja koja stimulišu povećanje veličine tela veća od 50%, a drugi da je manja. Dezmund agnostički zaključuje da je zauzimanje bilo kog stava, uključujući i onaj koji tvrdi da je ova verovatnoća tačno 50% nemoguće, jer svi eksperimentalni podaci i opservacija dolaze iz aktuelne biološke i geološke istorije. Na ovaj način uz gorenavedenu elaboraciju, on zapravo tvrdi da je zauzimanje neutralnog stanovišta na isti način problematično, kao i zauzimanje selekcionističkih stanovišta koja neutralizam pretenduje da zameni.

### 2.3. Kratak osvrt na kreacionizam — argumenti Bihija i Dembskog

U poslednje vreme, čini se kao da se kreacionističke ideje sve više prihvataju, naročito u pop-kulturi i u okvirima kvazi-naučnih krugova koje je sve teže razlikovati od naučnih, odnosno čije su strategije mimikrije sve sofisticiranije. Hipoteza inteligentnog dizajna je, u osnovi, tvrdnja da postoje dokazi da se glavne osobine života nisu javile kao posledica prirodne selekcije, već akata dizajnera (tvorca) (Felsenstein, 2007). Na **Slici 12** prikazani su glavni argumenti hipoteze inteligentnog dizajna. Oni mahom spadaju ili u grupu pozitivnih argumenata koji ističu eleganciju hipoteze inteligentnog dizajna, ili u grupu negativnih argumenata koji ističu nedovoljnost, neadekvatnost ili manjkavost darvinističkih objašnjenja. Iako ovaj rad nije zamišljen kao bavljenje kreacionističkim argumentima, zbog društvene i istorijske važnosti, čini se i sve veće popularnosti, ali i činjenice da se kroz neke od ovih argumenata mogu osvetliti informatički aspekti problema biološke kompleksnosti korisni u predstavljanju drugih ideja porekla biološke kompleksnosti, u delu koji sledi predstavimo dva odabrana kreacionistička argumenta u objašnjavanju biološke kompleksnosti — Bihijev argument i argument Dembskog. Upitno je i kontroverzno da li hipoteza inteligentnog dizajna uopšte može biti predmet naučne debate, ali nema sumnja da ova hipoteza, nazivana čak i bizarnom (Brockman, 2006), može biti legitiman predmet filozofske debate.



**Slika 12.** Karikaturalni prikaz sukoba (materijalističkog) darvinizma i pobornika hipoteze inteligentnog dizajna koji su metaforično predstavljeni kao Varvari (Vizigoti), sa simplifikovanim referiranjem na glavne argumente dva tabora [Preuzeto iz Brockman (2006)].

### 2.3.1. Bihijev argument

Majkl Bihi (1952), inače profesor biohemije na Lehigh univerzitetu u Pensilvaniji, je konstruisao argument u korist inteligentnog dizajna na osnovu sopstvenog istraživačkog rada koje se tiče molekularnih procesa („mašina“), kod kojih je uočio svojstvo nereducibilne kompleksnosti (Behe, 1996). Pod nereducibilno kompleksnim sistemom Bihi smatra jedinstven sistem sastavljen od nekoliko dobro uklopljenih, interagujućih delova koji svi doprinose osnovnoj funkciji sistema, gde uklanjanje bilo kog dela čini da sistem izgubi funkcionalnost. Nereducibilno kompleksan sistem ne može se kreirati kontinualnim unapređivanjem inicijalne funkcije koja sve vreme radi na isti način, dakle postepenim sukcesivnim modifikacijama prekursor–sistema, jer bi svaki prekursor–sistem koji ne bi imao ma koji deo bio po definiciji disfunkcionalan. Dakle, on mora nastati odjednom, a to je upravo ono što *nije* osnovna teza darvinizma. Sledi da je postojanje nereducibilno kompleksnih bioloških sistema dokaz protiv

validnosti neodarvinističke teorije evolucije. Istini za volju, Bihijev argument, iako nazvan po Bihiju, je samo preformulisan argument Vilijema Pejlija iz 1802. godine, koji je u svojoj čuvenoj knjizi „Prirodna teologija ili dokazi egzistencije i atributa božanskog“ formulisao tzv. argument časovničara, koji se svodi na to da inteligentan dizajn implicira inteligentnog dizajnera — časovnik kao složena mašina koja ima svoju funkciju tek nakon što su svi delovi razvijeni i sklopljeni mora kao proizvod biti delo inteligentnog dizajnera, a isto važi i za kompleksne sisteme u prirodi, uključujući biološke sisteme.<sup>61</sup> Zapravo, Pejlijev argument, iako objavljen u gorepomenutoj knjizi, bio je već neko vreme u opticaju, pa je pored zastupnika te ideje već imao i kritičare. Dejvid Hjum je u svom agnostičkom maniru napao argument časovničara u više ravni: (1) napadajući mogućnost indukcije iz nepostojećih primera stvaranja sveta koje nemamo jer nismo nikada učestvovali u stvaranju sveta i ne znamo ništa o tom procesu, (2) napadajući analogiju časovnika i univerzuma kroz tvrdnju da oni ne poseduju relevantne sličnosti (univerzum sadrži i organsku materiju, dok je časovnik sav od metala) (Hume, 1948) i (3) napadajući hrišćansku interpretaciju inteligentnog tvorca kao hrišćanskog Boga, jer univerzum je mogla da napravi i grupa dizajnera kroz mehanizam pokušaja-i-pogreške.

Za razliku od Pejlijevog argumenta koji je bio izveden čisto racionalistički, Bihijev argument nastao je posmatranjem (i ozbiljnim poznavanjem) subćelijskih, molekularnih procesa, i zbog toga je imao drugačiju prirodu i konotaciju, podgrevajući kreacionističke interpretacije nastanka živog sveta na način koji je imao izraženije atribute naučnosti. Bihijev argument je sistematična kritika originalnog darvinističkog objašnjenja funkcije oka, kao paradigmatičnog primera. Darwin se već u „Poreklu vrsta“ bavio problemom evolucije kompleksnih organa na primeru oka, ali je, po Bihiju, problem zapravo zataškao navodeći da u živom svetu postoji više modela oka kao organa (od fotosenzitivnih očnih mrlja, preko mozaičkog oka insekata, do oka sisara) i da je oko kao i svi organi tokom evolucije transformisano. Dakle, Darwin je oko posmatrao samo kroz prizmu anatomije, dok o molekularnim procesima nije mogao znati ništa zbog opšteg stanja (ne)znanja u oblasti molekularne biologije tog doba. Prvi sloj Bihijeve kritike tiče se redukcije oka na njegova čisto anatomska svojstva, i tretiranje ostalih aspekata oka kao „crne kutije“ (Behe, 1998). U drugom koraku Bihi detaljno analizira kompleksne molekularne mehanizme, danas poznate, koji su u

---

<sup>61</sup> Darwin je svoja evolutivna shvatanja izneo tek 50-ak godina kasnije, u delu “O poreklu vrsta”, tako da Pejlijev argument nije bio odgovor na darvinizam, već samo jedno formulisanje stava popularnog u to vreme koji su zastupali i Njutn i Dekart.

osnovi funkcije vida, i koji uključuju seriju različitih proteina (i ostalih biomolekula) u sadejstvu, od kojih svaki igra ključnu ulogu u funkciji vida, dakle nezamenjiv je. On čak anatomiju oka, kao i fosilne ostatke, eksplicitno naziva irelevantnim jer ne osvetljavaju molekularne osnove bioloških funkcija (Behe, 1998). Neuspeh objašnjenja molekularnih osnova *nastanka* života on u osnovi poistovećuje sa neuspehom u objašnjenju evolucije partikularnih funkcija pojedinih organa („kompleksnih biohemijskih sistema“). U „Poreklu vrsta“ sam Darwin je napisao: „Ako bi se pokazalo da je bilo koji kompleksan organ ikada postojao, a koji u principu ne bi mogao biti formiran brojnim, sukcesivnim, manjim modifikacijama, moja teorija bi se srušila.“ Po Bihiju, upravo to je slučaj sa nereducibilno kompleksnim molekulskim procesima. Pošto prirodna selekcija bira najbolje među već ponuđenim funkcionalnim rešenjima, kompleksni sistemi se moraju pojaviti *integralno*, dakle nastati odjednom (Behe, 1998). Ovakva pojava u koliziji je sa zahtevom *postepenosti* u promenama, koje implicira darvinizam. Bihi dokazuje da nereducibilno kompleksni mehanizmi postoje na primeru zamke za miševе, i na primeru cilija, proteinskih struktura odgovornih za transport sekreta u disajnim organima, ponavljajući da su cilije nereducibilne, da ne mogu imati funkcionalne prekursore koji ne bi imali jedan ili više delova, te da stoga ne mogu biti predmet prirodne selekcije. S obzirom da nisu proizvod prirodne selekcije onda su — dizajnirane. Bihi (1998) zaključuje da prirodna selekcija nije objašnjenje za brojne nereducibilno kompleksne biohemijske procese, da, iako njegovi zaključci ukazuju na natprirodno poreklo – dizajn, oni nisu konceptualno različiti od hipoteze o Velikom prasku (nakon što je na osnovu Doplerovog efekta utvrđeno da se univerzum širi, te da je izgleda nastao eksplozijom iz beskrajno guste materijalne tačke, jer i on implicitno ukazuje na tvorca), te da se potraga za pravim objašnjenjem evolucije nastavlja.

Kritika Bihijevog argumenta išla je u više pravaca. Za neke od Bihijevih paradigmatičnih nereducibilno–kompleksnih biohemijskih sistema, konkretno za niz biohemijskih reakcija koji dovode do zgrušavanja krvi, pokazano je da ne predstavljaju nereducibilno–kompleksan sistem u Bihijevom značenju, te do detalja razrađeno kako bi mogao nastati od sistema za zgrušavanje koji i dan-danas postoji kod nekih beskičmenjaka (Miller, 2002). Bihijev argument ima i drugih ozbiljnijih slabosti, naime, tvrdnja da se kompleksni molekularni sistemi moraju javiti integralno (jer su nereducibilni) inače ne bi mogli da vrše funkciju krije u sebi jednu pretpostavku — da je aktuelna funkcija *jedina* koju delovi sistema mogu vršiti, inače nemaju nikakav funkcionalan smisao. Ta pretpostavka ne izgleda korektno čak ni u slučaju Bihijevog prostog primera za zamkom za miševе, jer čak i delovi

zamke za miševе mogu imati druge upotrebne vrednosti, osim hvatanja miševa. Drugim rečima, nereducibilno–kompleksni molekularni sistemi mogu imati delove nastale *prenamenom*, a koji su ranije vršili *druge funkcije* u nekim drugim manje ili više kompleksnijim sistemima (ideja eksaptacije). Dodatno, u debati koja je usledila ispostavilo se da je Bihi, slučajno ili namerno, ignorisao obilje naučne literature vezane za darvinističke osnove evolucije na brojnim primerima subćelijskih ili molekularnih procesa. Zamereno mu je, kao i celom taboru pobornika hipoteze inteligentnog dizajna, da nisu konstituisali sam pojma *dizajna* na način koji ga jasno i nedvosmisleno sadržajno razdvaja od „proizvoda prirodne selekcije“, već ga svode na samo-očiglednost. Tabor zagovornika inteligentnog dizajna ima i problem što biološki dizajn često nije sasvim inteligentan, i da pojedina rešenja mogu biti mnogo bolja. Bihi je uzvraćao kontra optužbom da su ateizam i materijalizam kod darvinista premisa, a ne zaključak njihovog bavljenja naukom. Tekuća debata između kreacionističkog i neodarvinističkog tabora traje od formulisanja darvinizma, a, kako je već navedeno, kreacionistički argumenti postoje i mnogo duže, bez izgleda da će se uskoro završiti. Naše mišljenje je da, ako bi kreacionistička teza mogla biti predmet naučnog istraživanja, ona bi morala imati jasne proverljive implikacije, kao i rafiniran pojmovni okvir u kom je formulisana. Tada bi, kao i svaka druga hipoteza, mogla biti ravnopravna tema naučnih debata. Na sreću kreacionista, za filozofsku debatu kriterijumi su nešto blaži.

### **2.3.2. Argument Dembskog**

Kada bi bilo moguće uspostaviti jasne matematičke kriterijume koje neki složeni sistem mora da ispuni da bi se mogućnost njegovog slučajnog nastanka mogla smisleno prihvatiti ili odbaciti, tada bi cela rasprava na liniji prirodna selekcija – inteligentni dizajn izgubila smisao, jer bi se prostom primenom datog kriterijuma automatski prihvatila ili odbacila teza o prirodnoj selekciji datog sistema. Baš to je pokušao matematičar i zastupnik teze o inteligentnom dizajnu, Vilijem Dembski, uspostavljajući rigorozan kriterijum za razlikovanje slučajno stvorenih sistema od inteligentno dizajniranih na osnovama informatičke teorije (Dembski, 1998, 2006). Dembski je u svojim delima proširio karakter mogućih objašnjenja u prirodnim naukama, koji se do tada svodio ili na prirodne zakone, ili na slučajnost, uvodeći pojam *dizajna* kao trećeg mogućeg objašnjenja. Kompleksnost, kao pojam, je takođe redefinisao: kompleksnost, po njemu, znači da je objekat nedovoljno jednostavan da bi se mogao objasniti čistom slučajnošću. U biološkim kodovima, po Dembskom, jednostavnije sekvence (na primer, nukleotida u nukleinskim kiselinama, ili aminokiselina u proteinima) mogle bi nastati slučajno, ali duže

sekvence ne. Dembski je granicu nemogućnosti spontanog nastanka postavio na 500 bita informacija u sekvenci, što odgovara verovatnoći spontanog nastanka od oko  $10^{-150}$ . S obzirom da veliki broj gena, da ne govorimo o celim DNK lancima, sadrži više od 500 bita informacija, oni ne mogu biti predmet slučajnog nastanka, dakle oni su rezultat dizajna. Problem sa kojim se suočio argument Dembskog je što u argumentu nije dovoljno precizno definisan onaj deo biosekvence na koji se pravilo odnosi, da li je to gen, egzon, cela DNK, genom, itd. Ako pretpostavimo da kompleksne biosekvence ne mogu nastati slučajno, i da ne mogu nastati dejstvom prirodnih zakona, a uz to verujemo u „zakon održanja informacionog sadržaja“ u koji je Dembski verovao, preostaje samo zaključak da su informacije uvek bile prisutne negde, čak i pre nastanka života, u beživotnom univerzumu. Njegova kritika darvinizma kao teorije koja zapravo objašnjava tok, a ne nastanak informacija, može se sa pravom usmeriti i protiv njegovog argumenta — s obzirom da su informacije uvek bile sveprisutne ili deo dizajnerskog plana, i Dembski zapravo samo objašnjava njihov tok od dizajnera prema organizmima, a ne i njihov nastanak. Pored ovog problema, argument Dembskog je bio izložen mnogim kritikama iz različitih pravaca, čiji detaljan pregled daje Korthof (2000) (Wilkins and Elsberry 2001; Godfrey-Smith 2001; Rosenhouse, 2002; Schneider, 2001, 2002; Shallit 2002; Tellgren, 2002; Wein, 2002; Elsberry and Shallit, 2011; Edis, 2004; Shallit and Elberry, 2004; Perakh, 2004, 2009; Tellgren, 2005; Häggström. 2007). Jedan od karakterističnijih kontra-argumenata dao je fizičar Perak (Perakh, 2009). On je postavio sledeće pitanje (**Slika 13**): „Ako na plaži pronađemo nepravilni kamenčić, i savršenu belu kuglu, koja od ta dva je proizvod dizajna?“ Perak smatra da bi odgovor bio jednoznačan i univerzalan — bela kugla. Pa ipak, sadržaj informacija bele kugle je neuporedivo manji od sadržaja informacija kamenčića, jer se njen oblik i boja mogu opisati jednostavnom formulom koja sadrži veličinu prečnika, uz dodatak informacije o boji. Sledi da je algoritamski informacioni sadržaj bele kugle mali, za razliku od kamenčića koji zahteva mnogo više informacija za opis njegove nepravilne površine i šara. Primer zapravo pokazuje da kompleksnost pre ukazuje na spontane procese i slučajne događaje, dok jednostavnost verovatnije ukazuje na inteligentni dizajn, što je upravo suprotno od definicije kompleksnosti koju je dao Dembski i njegove namere da dokaže hipotezu inteligentnog dizajna. Naše mišljenje je da Perakov kontra argument i sam pati od više slabosti, jer iako je sirova kompleksnost slučajno nastalog kamenčića, prepunog neravnina i nepravilnosti, nesumnjivo veća, a što implicira veći broj informacija potrebnih da bi se on opisao, ako se setimo Gelmanove definicije kompleksnosti iz potpoglavlja 1.1 da se kompleksnost odnosi na opis *regularnosti* objekta, a ne na ceo objekat (sa svojim

neregularnostima), sledi da je Perak u komentaru objekat tretirao integralno, bez razdvajanja njegovih pravilnosti od njegovih slučajnih osobina. Drugim rečima, on je zaključak izveo upoređujući sirove, a ne efektivne kompleksnosti kamena i kugle, u Gelmanovoj terminologiji.



**Slika 13.** Perakov kontra-argument. *Levo:* gomila kamenčića, nastalih slučajno. *Desno:* pravilno oblikovana sfera. Koje je (više) proizvod inteligentnog dizajna?

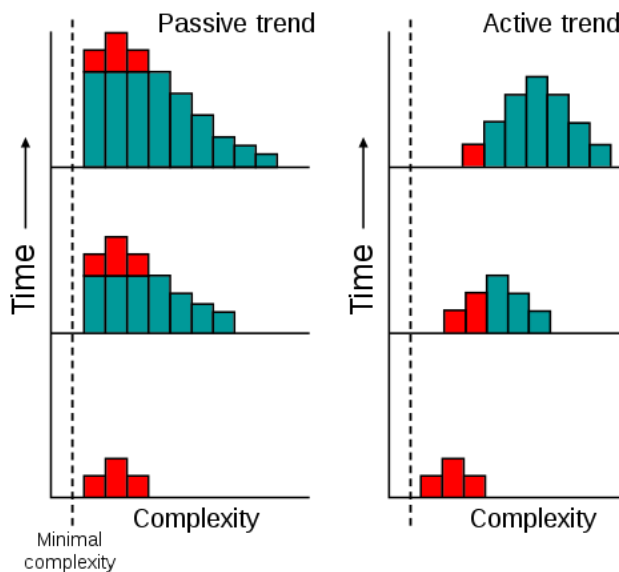
### 3. Trend biološke kompleksnosti: Uloga prirodne selekcije

*„Dok prirodna selekcija radi za i u prilog dobrobiti svakog bića, sva telesna i mentalna postignuća težiće unapređenju do savršenstva.“*  
- Darwin (Darwin, 1859, p. 489)

Iz gorenavedenog citata Čarlsa Darvina, slede dve (najmanje dve), ne nužno povezane, i ne nužno tačne, tvrdnje. Prva je da u evolucionoj biologiji postoje nedvosmisleni trendovi unapređivanja „postignuća“, a druga je da je to unapređivanje posledica prirodne selekcije. Svaka od ovih tvrdnji izazvala je, i i dalje izaziva debate, uz dodatne kontroverze koje slede iz nedovoljne pojmovne rafiniranosti samog postignuća. Verovatno je opšteprihvaćeno uverenje da je evolucija života kretanje od jednostavnog ka složenom, od pojedinačnog ka raznovrsnom, i od nižeg ka višem. Stoga se čini očiglednim da je evolucija progresivna. Veliki broj zvučnih imena u biologiji preuzeo je, i dalje razvijao, ove ideje poput Ernesta Hekela, Džulijana Hakslija, Dž. M. Todija, M. D. Salinasa, F. J. Ajale, E. O. Vilsona i Ričarda Dokinsa, itd. Međutim, u savremenim akademskim krugovima, neki biolozi i filozofi, kao što su J. Haldejn, Džordž C. Vilijams, Stiven Džej Guld, T. A. Goudž, Dejvid Hal i Majkl Rus, izneli su alternativne predloge, kritike originalnih Darvinovih stavova, i inspirisali debate koje i danas

traju. Neki od njih pozivali su se na to da je sam Darwin odbacio evolutivni napredak, jer se protivio upotrebi takvih deskriptora u kvalifikaciji živih bića kao što su „niža“ i „viša“, ili su tvrdili da je ideja o napretku antropocentrična i subjektivna, jer u prirodi ne postoji entitet koji bi se mogao nazvati napredak *per se* u biološkoj evoluciji. Među njima, Guld se često smatra najuticajnijim (Jianhui, 2019), i zato njegove ideje detaljnije izlažemo u potpoglavlju 3.1.1.

### 3.1. Karakterizacija mogućih trendova biološke kompleksnosti



**Slika 14.** Ilustracija dva moguća trenda povećavanja biološke kompleksnosti, aktivnog i pasivnog. [preuzeto iz Wikipedia]

Verovatno bi se na pitanje o kauzalnom odnosu evolucije i kompleksnosti moglo direktno odgovoriti posmatranjem trendova biološke kompleksnosti kroz istoriju života, kao što je pokušao MekŠej (MacShea, 1993, 1994). Naime, ukoliko evolucija uzrokuje kompleksnost, odnosno ako je kompleksnost favorizovana evolucijom, kao što je sugerisano na više mesta u ovom radu, uključujući Ešbijejev zakon, tada bi se trend povećavanja biološke kompleksnosti

morao javiti kao *aktivan trend* (Carroll, 2001). Suprotno, ako evolucija ne favorizuje biološku kompleksnost, i ona se samo povećava spontanom migracijom udesno od „levog zida“, onda bi i njen trend bio *pasivan trend*. **Slika 14** ilustruje raspodelu kompleksnosti po organizmima, datu kao frekvencija, u ova dva teorijska slučaja. Ukoliko bi trend povećavanja kompleksnosti bio aktivan trend, moglo bi se očekivati da će se inicijalna distribucija kompleksnosti manifestovana kroz morfologiju organizama pomerati udesno, i vremenom bi kompleksnije forme (*zeleni poligoni*) potpuno zamenile manje kompleksne forme (*crveni poligoni*). Kod pasivnog trenda, iako bi se vremenom povećavao broj kompleksnih formi, manje kompleksne forme bi ostajale. Matematički bi se razlika mogla izraziti kroz odnos modalne i srednje vrednosti ove raspodele. Kod pasivnog trenda, modalna vrednost se ne bi menjala, ali bi srednja vrednost (i varijansa) rasla. Kod aktivnog trenda bi se menjali i modalna i srednja vrednost. Kod pasivnog trenda bi, dakle, takođe postojala tendencija da se na repu distribucije pojavljuju

kompleksniji organizmi, ali bi njihov udeo opadao kroz vreme. Prema hipotezi pasivnog trenda, deluje da evolucija favorizuje kompleksnost samo zato što se istraživači fokusiraju na manji broj velikih, kompleksnijih organizama koji se nalaze na repu distribucije, ignorišući veliki broj jednostavnijih organizama. Iz modela pasivnog trenda sledi da će većina živog sveta biti zapravo sastavljena od vrlo jednostavnih organizama, što kao da potvrđuju opservacije koje pokazuju da je broj prokariota danas veći od broja eukariota. Čini se, prema ovoj hipotezi, da kompleksnost raste jer ne uzorkujemo živi svet na valjan način, drugima rečima patimo od eksperimentalnog problema koji se naziva pristrasnost pri uzorkovanju (engl. *sampling bias*). Problem sa pristupom koji bi identifikovao potencijalne analogije između aktuelne i modelovane biološke evolucije i samim tim presudio u korist jednog ili drugog trenda nije u tome što je on pogrešan, već što je problematično njegovo praktično izvođenje. Neke od problema koji se tiču semantičkog sadržaja samog pojma kompleksnosti, drugi su vezani za nedostatak očuvanih fosilnih nalaza u dovoljno dugim periodima geološke istorije, a zatim, čak i kad bi se pronašli takvi fosilni ostaci u nekoliko slučajeva, generalizacija indukcijom iz malog broja slučajeva bila bi metodološki problematična. Zbog eksperimentalnih ograničenja problemu se pristupa iz drugog ugla, kroz digitalne simulacije, o čemu će biti više reči kasnije.

### **3.1.1. Pasivan trend biološke kompleksnosti — Guldova hipoteza levog zida i sedam argumenata protiv evolucionog progressa**

*„Istorija života nije nužno progresivna; zasigurno nije predvidljiva. Bića na Zemlji razvijala su se kroz niz slučajnih i srećnih događaja.“*

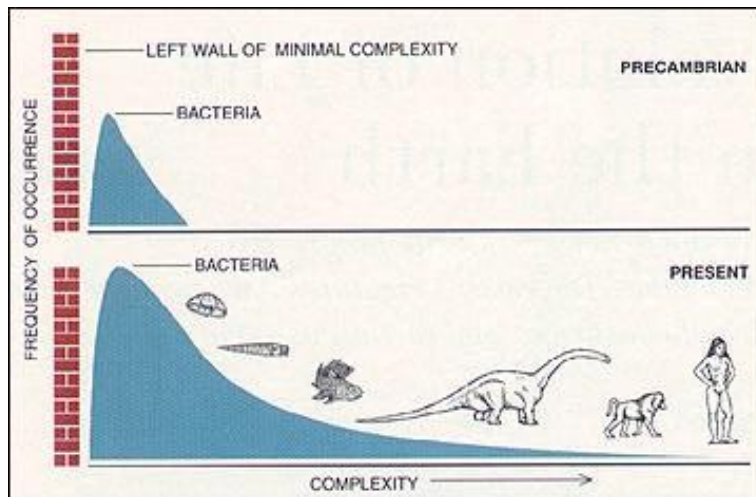
*- Stiven Džej Guld, 1994*

Guld je bio poznati američki evolucionisti biolog, paleontolog, istoričar nauke i pisac naučnih eseja na Univerzitetu Harvard. U nauci je postao poznat po teoriji isprekidane ravnoteže (engl. *punctuated equilibrium*), koju je razvio zajedno sa Nilsom Eldridžom 1972. godine. Za razliku od Darvinove teorije ili neodarvinizma, koji reflektuju verovanje da se evolucija dešava kroz proces sporih i kontinualnih promena, ova teorija tvrdi da je evolucija proces dugih perioda stabilnosti ili nepromenljivosti isprekidan brzim i nasilnim promenama<sup>62</sup>. Serija eseja koje je napisao je objavljena u sedam knjiga pod naslovom „Razmišljanja u

---

<sup>62</sup> Konceptualna sličnost sa Kunovom "Strukturom naučnih revolucija" objavljenoj desetak godina ranije je upadljiva. Da li je, i u kojoj meri, teorija isprekidane ravnoteže analogna, ili inspirisana Kunovim delom ostaje nejasno.

prirodnoj istoriji“. Popularnost Guldovih dela je nedvosmislena, na primer „Od Darvina naovamo“ (jednu od sedam knjiga) pročitao je više od milion ljudi samo u Sjedinjenim Američkim Državama (Jianhui, 2019). Ideja koja se provlači kroz sva ova dela je da evolucija nije usmerena i progresivna, što je i glavna tema čuvene Guldove knjige „Puna kuća: Širenje



**Slika 15.** Ilustracija „hipoteze levog zida“. [preuzeto iz Gould, 1994]

samo metaforična ekspresija činjenice da fizički i hemijski zakoni, kao i pretpostavljena minimalna kompleksnost neophodna za nastanak i održavanje života predstavlja neku vrstu barijere („zida“), te da se kompleksnost živih organizama može pomerati samo udesno od tog zida (**Slika 15**).

Bakterije zauzimaju prostor neposredno pored „levog zida“, one predstavljaju najbrojnije oblike života i praktično se nisu menjale od nastanka do danas. Neki organizmi tokom evolutivnih promena putuju udesno (povećavaju kompleksnost), istovremeno šireći „rep“ distribucije kompleksnosti, ali je u pitanju relativno mali broj organizama. HLZ ideja relativno jednostavno objašnjava povećanje kompleksnosti tokom evolucije — organizmi postaju kompleksniji jer su toliko jednostavni da svaka promena može samo da pomera stepen kompleksnosti naviše, pa je to jedini pravac kojim mogu da evoluiraju. Dalje, sama promena dešava se „hodom pijanca“. U kombinaciji „levog zida“ i „hoda pijanca“ kompleksnost se može povećavati i bez spoljašnjeg uzroka.

U svom drugom kapitalnom delu koje se, između ostalog, bavi i (ne)postojanjem trenda i progresa u evolucionim kretanjima (Gould, 1996), Gould svoje ideje generalizuje i ekstrapolira i na pitanja kulturne evolucije, ali u fokusu ostaju problemi evolucione biologije. U prvom delu knjige razmatra statističke alate obično korišćene za redukovani opis ponašanja varijabilnih

izvrsnosti od Platona do Darvina“ objavljene 1996. godine. „Hipotezu levog zida“ (HLZ) objavio je dve godine ranije u svom čuvenom radu „Evolucija života na Zemlji“, objavljenom u časopisu *Scientific American* (Gould, 1994). Njegova osnovna hipoteza je da se biološka kompleksnost povećava spontano, odnosno pasivno, bez kauzalnog dejstva prirodne selekcije. HLZ je

sistema, konkretno srednju vrednost, standardnu devijaciju, medijanu i najverovatniju vrednost (modus). Osnovna Guldova teza je da je primena ovih redukovanih opisa krivulja razvoja problematična u situacijama kada se oni primenjuju na asimetrične distribucije, a evolucionari trendovi koje pokušavamo da razumemo spadaju baš u tu kategoriju. Zapravo, najvažniji statistički koncept u ovoj knjizi je asimetrična verovatnoća koja je ograničena desnom ili levom krajnjom granicom ili „zidom“. Evoluciono, biološki fenomeni se upravo zasnivaju na jednoj takvoj distribuciji, gde je desni ili levi zid prisutan zbog fizičkih ili organizacionih ograničenja. Kod takvih distribucija, srednja vrednost ili prosek pomera se u pravcu asimetrije kako se asimetrija povećava, medijana se manje pomera, a najčešća vrednost (modus) se uopšte ne menja. Čak i bez eksplicitnog mehanizma za povećanje neke veličine, na primer kompleksnosti ili progresivnosti, u prisustvu donje granice ili „levog zida“ na njenoj distribuciji, slučajne promene će dovesti do povećanja te količine za pojedine uzorke, kao i u opštem proseku reprezentovanom kroz srednju vrednost, stvarajući time iluziju napretka.

Roča (Rocha, 1998) smatra da je najvažnije postignuće Guldovog dela upravo upozoravanje na probleme koji proističu iz svođenja sistema sa mnogobrojnim unutrašnjim varijacijama na srednju vrednost ili ekstremne slučajeve, uz naglašavanje da se samo holističkim proučavanjem varijacija unutar sistema mogu razlikovati slučajevi u kojima povećanje (ili smanjenje) određene varijable proizlazi iz eksplicitnog mehanizma usmerenog trenda, od slučajeva u kojima je to implicitan, neusmeren, slučajan mehanizam koji se prividno opaža samo zbog prisustva „zida“ na distribuciji.

Guldov argument se oslanja na eksperimentalne nalaze publikovane nekoliko godina ranije od strane MekŠeja (McShea, 1993, 1994). MekŠej je eksperimentalno utvrdio, proučavajući biološku evoluciju nekih kičmenjaka kroz njihove fosilne ostatke (sa posebnim naglaskom na kompleksnost telesne građe), da je evolucionari trend razvoja kompleksnosti pasivan, odnosno da nisu primetni eksplicitni mehanizmi za povećanje kompleksnosti.<sup>63</sup> Međutim, rezultati MekŠeja mogu se smatrati, u najboljem slučaju, anegdoticnim dokazima s obzirom na veoma ograničenu količinu fosilnih nalaza na osnovu kojih su izvršena uopštavanja (Rocha, 1998). U svakom slučaju, oni pokazuju da prosečno povećanje kompleksnosti *može* da

---

<sup>63</sup> Napomena: Zaključak je izveden na osnovu relativno ograničene količine fosilnih ostataka. MekŠej je zaključak izveo na osnovu tri uočene pravilnosti: (a) da se minimalna kompleksnost održava kroz celu seriju fosilnih nalaza, (b) da geološki mlađi fosili ne pokazuju tendenciju povećanja kompleksnosti u odnosu na pretke, i (c) da se fosilni ostaci srodnih linija koji su (slučajno) dosegli veće vrednosti kompleksnosti, dalje ne usložnjavaju. Takođe, MekŠej je predložio četiri različite kategorije kompleksnosti: (1) broj različitih fizičkih delova (na primer, gena, ćelija, organa ili organizama) u sistemu; (2) broj različitih interakcija među ovim delovima; (3) broj nivoa u kauzalnoj hijerarhiji; i (4) broj delova ili interakcija na određenoj prostornoj ili vremenskoj skali.

se dogodi bez eksplicitnog mehanizma koji bi pokretao to povećanje, jednostavno putem pasivnog, difuzionog procesa gonjenog slučajnim promenama. S obzirom na naše poznavanje neodarvinističke prirodne selekcije, raspolaganje ograničenim fosilnim zapisima i uočavanje preovlađujućeg prisustva jednostavnijih bakterija na Zemlji, Guld zaključuje još uvek nije identifikovan mehanizam u biološkoj evoluciji koji bi podržao ideju aktivnog progresivnog trenda ka većoj kompleksnosti.

U sledećem delu knjige (Gould, 1996), Guld se bavi kulturnom evolucijom ljudskog društva, i utvrđuje ključne razlike između biološke i kulturne evolucije na osnovi kojih dopušta postojanje aktivnog trenda u kulturnoj evoluciji. Sažeto, te razlike su topologija<sup>64</sup> i mehanizmi nasleđivanja. U evoluciji ljudske kulture, razmena (amalgamacija) ideja između različitih kulturnih grupa i pojedinaca je sveprisutna. Takođe, mehanizmi nasleđivanja u kulturi su, po Guldu, u osnovi lamarkistički<sup>65</sup> — stečeno kolektivno znanje, kao deo kulture, prenosi se edukacijom. Zbog te dve ključne razlike, biološka evolucija ispoljava pasivan trend, dok kulturna evolucija ispoljava aktivni, progresivni trend ka većoj kompleksnosti. Jedan od nedostataka u Guldovoj argumentaciji je zanemarivanje nekih dokaza da čak i biološki evolucionni proces odstupa od Guldove karakterizacije (Rocha, 1998). Prvo, Guldovi argument se zasnivaju na veoma tradicionalnom viđenju evolucije kao neodarvinističkog procesa nasumične genetičke izolovane varijacije. Međutim, u biologiji postoje primeri simbioze („amalgamacija“), kao što je, na primer, simbiotsko poreklo mitohondrija (Rocha, 1998). Seksualna reprodukcija kao strategija razmnožavanja, takođe, omogućava vrstu razmene genetičke informacije koja ide dalje od nasumične slučajne varijacije i omogućava rekombinaciju, a ne samo mutaciju, uspešnih gena. Seksualna rekombinacija nije lamarkistička pojava, ali pruža brži i usmeren izvor varijacija i zadržavanje evolutivno uspešnih rešenja (rekombinacija uspešnih jedinki u jednoj generaciji potencijalno stvara više uspešnih jedinki), što više podseća na razmenu kulturnih proizvoda u Guldovoj analizi evolucije kulture, nego na slučajnu izolovanu mutaciju. Nakon objavljivanja Guldovih dela, postalo je jasno da su digitalne simulacije evolucije veštačkih organizama jedan od mogućih pravaca u razrešavanju bar nekih od pomenutih dilema (Paulos, 1996), a čemu će biti posvećen drugi deo i ovog rada.

---

<sup>64</sup> Pod topologijom Guld smatra osobinu da se biološka vrsta, jednom stvorena, trajno konstituiše kao takva — nema stapanja (amalgamacije), sjedinjavanja sa drugim vrstama i slično.

<sup>65</sup> Pod lamarkizmom se podrazumeva tradicionalno tumačenje ovog fenomena — da se osobine stečene tokom života mogu preneti na potomstvo.

Iako je od objavljivanja Guldovih ideja prošlo više od 20 godina, ona ne prestaju da budu predmet debata i analiza. U relativno skorašnjem radu, Dianhui (Jianhui, 2019) je analizirao, sistematizovao i klasifikovao sedam Guldovih ideja protiv evolucionog progresa:

*1. Argument na bazi ljudske arogancije.* Kao i Sigmund Frojd 70 godina ranije<sup>66</sup>, i Guld veruje da je ideja evolucionog napretka u osnovi jedna od manifestacija ljudske arogancije, poput geocentrizma oborenog u tzv. kopernikanskom obrtu. Darwinova teorija evolucije oborila je kreacionizam i pokazala da ljudi nisu plemenita bića stvorena od strane Boga prema sopstvenoj slici, već su se postepeno razvijala iz nižih životinja predstavljajući samo jednu kariku u evolucionom procesu, ni po čemu posebnu u evolucionoj ravni. Frojdovo istraživanje nesvesnog, na sličan način, uvelo je koncept iracionalnosti, odsustva svesne kontrole i bacilo senku na ideju potpune slobode ili neuslovljenosti uma. Interpretacija ideje evolucionih promena, kao ideje evolucionog napretka, po Guld samo je još jedna od ideja koje su u osnovi arogantne, te da nam je potrebna četvrta revolucija da obori ove pogrešne ideje o trendovima u evoluciji. Guld piše:

*"Ovaj pozitivni spin počiva na zabludi da evolucija pokazuje fundamentalni trend koji vodi ka primarnom i jednoznačnom cilju, jednoj karakteristici koja se ističe iznad svih ostalih kao vrhunac istorije života. Ta ključna karakteristika, naravno, je napredak — operativno definisan na mnogo različitih načina kao tendencija života da se povećava u anatomske složenosti, neurološkoj elaboraciji, veličini i fleksibilnosti repertoara ponašanja, ili kroz bilo koji drugi kriterijum očigledno smišljen (ako bismo samo bili dovoljno iskreni i introspektivni u vezi naših motiva) da postavi Homo sapiens-a na vrh preostale gomile." (Jianhui, 2019; Gould, 1996)*

Ideja da je evolucija proces koje ima kretanje *ka nečemu*, ostvaruje više ciljeva. Prvo, ona na neki način marginalizuje značaj činjenice da je čovek na planeti zemlji u samo jednom kratkom vremenskom periodu, zanemarljivom u odnosu na milijarde godina evolucije pre toga. Ako je evolucija kretanje *ka nečemu*, tada je ishod na izvestan implicitan način bio njen deo i dok nije postignut. Čovek se, drugim rečima, ovom idejom ovekovečuje čineći svoje kratko prisustvo na planeti — sveprisustvom, dakle od početka (evolucionog) vremena kao cilj. Ako se odbaci inherentna progresivnost evolucionog procesa, i uz zapažanje da smo mi na planeti takoreći u samo jednom bljesku geološkog vremena, Guld se pita da li mi nismo zapravo samo jedna

---

<sup>66</sup> Frojd je verovao da su se ideje koje su rušile temelje arogancije čoveka pokazale kao prekretnice u istoriji. Pod ovim se misli na tzv. kopernikanski obrt, odnosno obaranje geocentrizma, koji je samo ekstenzija ideja da čovek živi u centru svemira.

kosmička (srećna) slučajnost koja bi mogla i da se ne ponovi u naknadnim premotavanjima sveta. Gould zaključuje:

*"Napredak, ipak, predstavlja zabludu zasnovanu na društvenim predrasudama i (psihološkoj) nadi izazvanoj našom nespremnošću da prihvatimo jasno (i tačno) značenje četvrte Frojdove revolucije"*<sup>67</sup> (Gould, 1996).

Drugim rečima, ove specifične teleološke interpretacije evolucije teže da dokažu da je pojava ljudske rase nužan rezultat evolucije, da je cela istorija evolucije priprema pozornice za pojavu ljudske rase i da je ljudska rasa jedini cilj evolucije, da stoji na samom vrhu evolucije, podvlačeći važnost ljudske rase u kosmičkim razmerama. Interesantno, ako se ista misaona konstrukcija, isti princip zaključivanja (koji se naziva socijalni darvinizam), primeni na posmatranje društvenih grupa ili kulturnih zajednica, on neminovno vodi u rasističke zaključke, jer se različite društvene grupe po kriterijumu razvijenosti<sup>68</sup> neminovno nalaze na različitim pozicijama na skali razvijenosti, odnosno implicitno — vrednosti. Umesto ideja o dominaciji, Gould se zalagao za ideju *"bratstva sa, preko milion drugih vrsta koje nastanjuju našu planetu"*.

Problem Guldovog argumenta je, kako ističe Đianhui, što je on aksiološki, baš kao i predmet njegove kritike. Naime, jednakost vrsta, rasa i kultura ovde se javlja kao premisa, a ne kao zaključak argumenta. Gould nastupa sa pozicija modernog pogleda na moral, ideje jednakosti, itd, po kojima su nejednakost, nadmenost, rasizam i supremacija neprihvatljivi, i u suštini zaključuje da je ideja napretka pogrešna zato što nije u skladu sa današnjom *kulturom*. Kao takav, Guldov argument je neprihvatljiv, jer se polemika između zagovornika i protivnika ovog argumenta zapravo dešava između pripadnika dva vrednosna tabora, dva etička stanovišta, i nemoguće je utvrditi objektivno merilo ispravnosti bilo kog od njih. Drugo, Gould je podmetnuo zagovornicima ideja napretka tezu da, ako je evolucija u suštini napredak, tada ona nužno rezultuje u pojavi čoveka kao najvišeg bića. Ideja napretka to ne implicira, ona se odnosi na opšti trend evolucije prema kojem sva bića postaju sve složenija i prilagođenija okolini, a koja će vrsta proisteći iz te borbe zavisi specifičnih uslova okruženja. Kako ističe Đianhui, da se nestanak dinosaurusu nije dogodio na sasvim slučajan način, danas ljudska vrsta ne bi postojala, kao ni, generalno, današnja raznolikost sisara, a i dalje bi važili evolucionarni zakoni. Zbog svega ovoga, Guldova tvrdnja da napredak u evoluciji nužno dovodi do ljudske

---

<sup>67</sup> Kada Gould spominje "četvrtu Frojdovu revoluciju", on sugerise da treba da dođe do nove promene paradigme ili promene u našem razmišljanju o evoluciji čoveka. "Četvrta Frojdova revolucija" predstavlja potrebu za ponovnim procenjivanjem ovih ideja u svetlu savremenog naučnog razumevanja.

<sup>68</sup> Kriterijum razvijenosti implicira vrednosne elemente, kako god bio formulisan.

vrednosne supremacije ostaje sporna. I sama Guldova teza o neprihvatljivosti ideje o supremaciji ljudske rase je na izvestan način rezultat upravo napretka u evoluciji (i biološkoj i kulturnoj) kojoj se ta ideja u suštini protivi.

2. *Antropocentrični argument.* Antropocentrični argument protiv progresa u suštini se svodi na tezu da čovek nameće svoje standarde prirodi, odnosno evolucionom procesu. Ideja napretka se uglavnom svodi na tvrdnju da u evoluciji postoje trendovi, npr. kompleksifikacija nervnog sistema, koji čine da organizmi postaju sve kompleksniji i fleksibilniji, da se kreću od nižeg ka višem. Reflektujući neka razmišljanja koja postoje još kod Darvina, Guld piše: „*Jer ako je ameba jednako dobro prilagođena svom okruženju kao i mi svom, ko će reći da smo mi viša bića?*“ (Gould, 2007). Antropocentrizam se ovde javlja kao posledica klasifikacije na „više“ i „niže“ primenom ljudskih vrednosnih standarda. Interesantno je Guldovo zapažanje da ni sam Darwin, u početku, nije proces menjanja organizama kroz geološku istoriju nazivao evolucijom, upravo da bi izbegao vrednosnu konotaciju, jer sam pojam „evolucije“ u engleskom jeziku nosi vrednosni teret. Guldovo istoriografsko istraživanje Darwinovog dela je veoma važno, na primer Guld je našao zabeležku na margini jedne od Darwinovih knjiga koja kaže: „*Nikada ne kaži viši ili niži*“, vezano za kvalifikacije organizama i ideju o evolutivnom napretku. Još interesantnije, u pismu paleontologu Alfeusu Hijatu od 4. decembra 1872. godine, Darwin je napisao: „*Nakon dugog razmišljanja, ne mogu se oteti ubedenju da ne postoji unapred utvrđena tendencija ka progresivnom razvoju*“ (Gould, 1996; Jianhui, 2019). Odustajanje od otpora korišćenju vrednosno konotiranih pojmova — pre svega pojma evolucije — kod Darvina, Guld pripisuje okolnostima u kojima je Darwin živeo i stvarao. Kao pripadnik plemićke porodice, liberalnih političkih shvatanja i konzervativnog životnog stila u viktorskoj Britaniji u zenitu industrijskog i kolonijalnog širenja, Darwin je uživao i porodične i društvene privilegije, upravo zbog utemeljenja progresa kao osnovne doktrine značaja i postojanja britanskog društva. Drugim rečima, Guld sugerise da je Darwinov pristanak na pojmovnu reviziju jedna vrsta konformističke pristrasnosti, refleksija ličnih, porodičnih i društvenih okolnosti vremena i epohe.

Da li je dozvoljena upotreba vrednosnih pojmova u nauci? Od Dejvida Hjumana, pa do modernih logičkih pozitivista, dihotomija činjenica/vrednost je metodološka zagonetka za nauku i humanističke nauke. Mnogi filozofi veruju da vrednosni sudovi ne bi trebalo da igraju ulogu u nauci jer nauka mora biti objektivna (Jianhui, 2019). Ovaj fundamentalni metodološki problem u debati o evolucionom progresu izazvao je dve vrste reakcija na osnovu kojih su konstituisane dve odvojene škole mišljenja — jedna koja veruje da možemo izbeći vrednosne

i koristiti čisto objektivne termine za definisanje progressa u evolucionoj teoriji, i druga koja smatra radikalnu dihotomiju činjenica–vrednost pogrešnom.

Primarni zadatak prve grupe bi prirodno morao biti definisanje objektivnog kriterijuma napretka. Dianhui pominje više pokušaja da se ovo postigne, na primer pokušaj uticajnog biologa Džulijana Hakslija<sup>69</sup>: „Sve karakteristike dominantnih grupa koje ih razlikuju od nedominantnih spadaju u jednu od dve vrste: one koje doprinose većem kontrolisanju okoline i one koje doprinose većoj nezavisnosti od okoline. Stoga napredak u ovom smislu može privremeno biti prihvaćen kao kriterijum biološkog napretka.“ Drugi zagovornik objektivizacije termina napretka je bio Džon Todej, profesor na Univerzitetu u Kembridžu, koji je pokušao da svede ovaj kriterijum na kvantitativno povećanje ili genetičke stabilnosti, ili genetičke varijabilnosti. Poznati antropolog, Salins, je pokušao da isto ostvari kroz kriterijum „termodinamičkog postignuća“, zapravo uočavajući da viši organizmi uspešnije koriste energetske resurse od nižih, odnosno imaju različitu sposobnost koncentracije energije u svojim telima i upotrebu energije za izgradnju i održavanje struktura organizma.<sup>70</sup> Na kraju, Dokins je '90 godina napisao da se objektivni kriterijum napretka svodi na „tendenciju za genetičke linije da kumulativno poboljšavaju svoje prilagođene osobine svom određenom načinu života, povećavanjem broja karakteristika koje se kombinuju u prilagođene komplekse“ iz čega sledi da adaptivna evolucija nije samo slučajno progresivna, već je duboko ukorenjena i nužno progresivna.

U drugu grupu spadaju biolozi i filozofi biologije koji su pokušali da, umesto objektivizacije napretka, „legalizuju“ vrednosne termine u biologiji, poput C. J. Herika, G. G. Simpsona i F. J. Ajale. Herik direktno tvrdi da je neka vrsta evaluacije nužno implicitna u ideji napretka: „Pitanje šta je napredak se zatim svodi na pitanje definicije, a sve definicije prave ljudi, a ne paraziti koje proučavamo. Svi drugi naučni sudovi su slično subjektivni. Samo posmatrane činjenice su objektivne. Naučna vrednost svakog mišljenja prirodnjaka o tome šta se može pravilno nazvati napretkom može se proceniti samo na osnovu njene operativne koristi u interpretaciji poznatih činjenica.“ (Jianhui, 2019). Njegova definicija napretka kao „Promene

---

<sup>69</sup> Džulijan Haksli je bio istaknuti biolog, rođen 1887. godine. Bio je pionir u oblasti evolucionne biologije i jedan od ključnih figura u razvoju moderne sintetičke teorije evolucije. Haksli je bio važan član britanskog biološkog društva i osnivač UNESCO-a.

<sup>70</sup> Kao antropolog, Salins je prirodno bio zainteresovan da ovaj kriterijum primeni i na kulturne i društvene zajednice: "...termodinamičko postignuće ima svoj organizacioni pandan, više nivoe integracije. Kulture koje transformišu više energije imaju više delova i podsistema, više specifikacija delova i efikasnije načine integracije celine. Organizacioni simptomi opšteg napretka uključuju proliferaciju materijalnih elemenata, geometrijsko povećanje podele rada, umnožavanje društvenih grupa i podgrupa i pojavu posebnih sredstava za integraciju. (Sahlins and Service, 1960)

u pravcu povećanja obima, raznovrsnosti i efikasnosti prilagođavanja organizma njegovoj okolini i okoline upotrebi organizma“ nije drastično različita od definicija koje su dali pripadnici prve grupe, tako da evaluativni momenat on uvodi na drugom mestu: „Mi prepoznajemo hijerarhiju bioloških vrednosti koje su u organskoj vezi sa povećanjem i diversifikacijom telesne strukture, društvene organizacije i sposobnosti učenja na osnovu ličnog iskustva. Postoji slično postizanje napretka u rastu svakog deteta. U nižim grupama životinja i u ranom detinjstvu čoveka, većina ovih vrednosti ugrađena je u nasleđenu strukturu i definisana je biološki u biheviorističkim terminima. Kod viših životinja i kod dece koja rastu sve je veći procenat naučenih veština i svesno prepoznatih zadovoljstava koja se mogu vrednovati i biološki i psihološki“. Pored pokušaja ispravne karakterizacije pojma napretka u vrednosnom smislu, neki naučnici i filozofi su pokušali da pojam napretka rafiniraju razlažući ga na grupu srodnih ili manje srodnih pojmova, kojima su onda dozvoljavali posedovanje promenljivog vrednosnog značenja. Tako Simpson kaže: „Među mnogim mogućim definicijama napretka i mnogim odgovarajućim vrstama napretka u evoluciji, ona promena ka određenom tipu organizma je podjednako validna kao i bilo koja druga, pod uslovom da se jasno razume da se odnosi na odabranu svrhu i subjektivna je u tom smislu. Za čoveka, evolutivna promena u pravcu čoveka je napredak, ove posebne vrste.“ Ajala<sup>71</sup>, kao poslednji primer druge škole mišljenja, ističe da napredak kao pojam sadrži dva elementa, jedan deskriptivni koji se odnosi na usmerenost promene, i drugi aksiološki, koji se odnosi na poboljšanje postignuto tom promenom.

Ideja vrednosno očišćene nauke izgleda kao da je potisnuta u savremenoj filozofiji nauke. Na primer, iz radova Kuna, Tulmina ili Lakatosa sledi da naučnici u svojoj svakodnevnoj praksi moraju donositi sudove, da su naučne paradigme obojene vrednosnim sudovima, da su naučne činjenice natovarene elementima vladajućih teorija, i sl. (Jianhui, 2019).

Pored pokušaja razrešenja problema dihotomije činjenica – vrednost, jedna grupa filozofa (na primer, Djui<sup>72</sup> i Peper<sup>73</sup>) pokušali su da ukinu ovu dihotomiju, ukazujući na njenu

---

<sup>71</sup> Francisko H. Ajala je priznati biolog i evolucionistički genetičar, rođen je 1934. godine u Peruu, posebno poznat po svom radu na evoluciji genetičke varijabilnosti i adaptaciji organizama. Bio je značajan i kao teolog i filozof, naročito zainteresovan za odnos između nauke i religije.

<sup>72</sup> Džon Djui bio je američki filozof i jedan od uticajnijih figura u filozofiji i obrazovanju u 20. veku. Rođen je 1859. godine. Bio je jedan od ključnih teoretičara pragmatizma, filozofskog pravca koji naglašava praktičnost i iskustvo kao osnovu za razumevanje filozofskih pitanja. Njegovo delo je obuhvatalo mnoge oblasti, uključujući etiku, estetiku, politiku i obrazovanje.

<sup>73</sup> Stiven Peper bio je američki filozof i profesor na Univerzitetu u Masačusetsu. Rođen je 1891. godine i bio je poznat po svom doprinosu oblasti pragmatizma i filozofiji edukacije. Peper je razvio filozofsku teoriju koja se naziva "World Hypotheses" (Svetske hipoteze), u kojoj je istraživao različite načine na koje ljudi interpretiraju svet oko sebe i formiraju svoje svetonazore.

besmislenost. Djui je tvrdio da se evaluacije moraju uvek oslanjati na faktičko razmatranje i da diskriminacija činjenica uvek zavisi o evaluaciji. Prema Peperovim shvatanjima, vrednost proizilazi iz činjenica, a „preživljavanje najprilagodljivijih“ može biti shvaćeno kao vrednosna izjava. Svi selektivni sistemi u osnovi prate dva dinamička faktora — instinktivni (afektivni) nagoni i sile evolucione selekcije. Prvi operišu na nivou pojedinačnih organizama, a drugi na nivou populacije, vrste ili neke druge jedinice grupe organizama koji se ukrštaju. U evoluciji, kroz borbu i prilagođavanje, *preživljavanje per se* se javlja kao aksiološki normativ. Život je vrednost. Zato je, naročito u biologiji, nemoguće razdvojiti potpuno vrednosno neutralne deskripcije (činjenice) od vrednosti. Svaki izbor je istovremeno i vrednosni sud.

Gore navedeni argumenti, i debate čiji su sastavni deo bili, pokazuju da Guldova kritika vrednosti možda i nije sasvim utemeljena. Guld se poziva na imaginarnog, a ne stvarnog Darvina, na Darvina kakvim Guld veruje da bi on bio da nije bio žrtva konformizma. Dianhui sa pravom smatra da je ovo samo Guldova sumnjiva pretpostavka, jer moglo bi se desiti i da je Darwin oklevao samo zato što nije imao inicijalnu veru u samu ideju, pa je postajao eksplicitniji kako je ideja dobijala na podršci, a on konsekventno na samopouzdanju. U svojim poznim delima, Darwin je bez sumnje evolutivni napredak evaluirao kao progresivan.

3. *Argument odsustva unutrašnjeg pokretača.* Guld veruje da, ako se evolutivni proces može interpretirati kao napredak, onda sam napredak mora egzistirati kao deo pokretačkog mehanizma evolucije, kao neka vrsta unutrašnjeg pokretača. S obzirom da (sveprisutnog i predvidljivog) napretka nema u svojstvu unutrašnjeg pokretača, onda se ni ceo evolutivni proces ne može interpretirati kao napredak, niti se on u tom pravcu kreće.

Na ovaj Guldov argument odgovoreno je da savremeni darvinizam ne smatra da je napredak ključni pokretač evolucije, da je to sastavni deo drugih teorija, lamarkizma i ortogeneze<sup>74</sup>. Prema darvinizmu i neodarvinizmu, prirodna selekcija, a ne napredak, je glavni pokretač evolucije (Jianhui, 2019).<sup>75</sup> Napredak je osobina, a ne pokretač, procesa u kom se novi organizmi razvijaju putem prirodne selekcije. Lamarkistički i darvinistički koncepti napretka

---

<sup>74</sup> Ortogeneza, u kontekstu biologije, predstavlja uglavnom odbačenu hipotezu ili koncept koji sugeriše da postoji unutrašnji, unapred određen pravac ili cilj u evoluciji organizama. Prema ovoj ideji, vrste se razvijaju linearno, kontinualno i usmereno, pokretane unutrašnjom silom ili vitalističkim principom, umesto da budu podložne spoljnim faktorima poput prirodne selekcije. Ortogeneza implicira da bi vrste evoluirale na određen način, vodeći do fiksiranih, neizbežnih ishoda.

<sup>75</sup> Na ovom mestu bi moglo da se postavi pitanje i kako interpretirati prirodnu selekciju u kontekstu okolnosti u kojima čovek sprovodi veštačku selekciju, kao i pitanje da li je prirodna selekcija "sila", ili samo epifenomen preživljavanja.

se razlikuju, i zbog toga argumenti protiv lamarkističkog pojma napretka nisu validni u slučaju darvinizma.

4. *Argument nedostatka biološkog mehanizma za kretanje ka napretku.* Gulfov argument je vrlo jednostavan — on smatra da teorija prirodne selekcije *per se* ne pruža nikakav dokaz postojanja bilo kog biološkog mehanizma koji bi vodio ka napretku, i zato napredak nije nužna posledica prirodne selekcije. Na primeru sibirskog mamuta, koji je nastao prilagođavanjem populacije slonova sa retkom dlakom na uslove niskih sibirskih temperatura, Guld pokazuje da je posledica prirodne selekcije prilagođavanje na lokalne, a ne univerzalne uslove životnog okruženja. Njegov argument je da se prilagođavanje na lokalne uslove teško može smatrati napretkom, u načelu. Da bi se lakše razumela priroda Guldovih argumenata trebalo bi se podsetiti nekih Darwinovih razmišljanja koja Guld zapravo kritikuje. Darwin posmatra konkurenciju tokom procesa prirodne selekcije kao dvojaku — biotsku (između samih organizama u takmičenju za resurse) i abiotsku (borbu organizama sa fizičkom životnom sredinom). Po Darwinu, sama borba organizama sa životnom sredinom ne vodi do napretka, jer je sredina statična, pa organizmi konvergiraju ka optimalnim rešenjima — ne vide se opšti trendovi.<sup>76</sup> Međutim, biotska konkurencija izaziva napredak jer se organizmi trajno takmiče među sobom u neprekidnoj borbi, što rađa opšte trendove. Ovo se odnosi na vrlo šarolik skup osobina, brzinu, izdržljivost, snagu, kognitivne sposobnosti, itd. (na primer brzina geparda i Tompsonove gazele koja je njegov plen, paralelno raste). Po Guldu, argument je nedovoljno objašnjen i u suprotnosti sa fosilnim nalazima. Prvo, ekstinkcije koje su pogađale planetu više puta u geološkoj istoriji svaki put su dovodile do masovnog gubitka akumulacije svih proizvoda prirodne selekcije u međuvremenu, dakle postoje diskontinuiteti koji ugrožavaju ideju opšteg trenda. Nakon ekstinkcija, diversifikacijom živog sveta stvaran je svet različit od prethodnog, dakle gubitak je bio trajan. Guld iznosi čitave serije *ad hominem* zapažanja, sa ciljem objašnjavanja Darwinove pristrasnosti iz konformističkih razloga, o čemu je već bilo reči ranije u ovom radu (Gould, 1996). Đianhui kritikuje Gulfov argument na vrlo jednostavan način. Prvo, i sam Guld priznaje da između dve ekstinkcije postoji akumulacija osobina dobijenih prirodnom selekcijom, zatim, čak i u slučaju masovnih ekstinkcija, uništenje nije potpuno. Preživela živa bića sa akumuliranim „napretkom“ nastavljaju dalje da se razvijaju. Drugim rečima, diskontinuiteti nastali ekstinkcijama u geološkoj istoriji zemlje nisu bili apsolutni. Dalje, Đianhui iznosi interesantno zapažanje da je Darwinova podela konkurencije na abiotsku

---

<sup>76</sup> Iz našeg ugla nije jasno zašto Darwin konvergenciju ne smatra napretkom, čak i bez opšteg trenda.

i biotsku u suštini nekompletna. On tvrdi da pored prilagođavanja na uslove lokalne okoline, napredak koji uzrokuje prirodna selekcija može biti posledica i osobina fizioloških i biohemijskih procesa, veličine tela, inteligencije i sposobnosti evolucije, koje nemaju veze sa lokalnim okolinama, koje su univerzalne, i kao takve dovode do opšteg napretka.

5. *Argument ekstremne kontingentnosti.* Argument ekstremne kontingentnosti tvrdi da je evolucija ispresecana slučajnim događajima u tolikoj meri, da je svaka ideja kontinuiteta u napretku tokom evolucije neopravdana. Zbog previše slučajnosti u istoriji života, biološka evolucija je nepredvidiva. Guld piše: „*Hvaljeni napredak života zapravo predstavlja slučajno udaljavanje od jednostavnih početaka, a ne usmereno kretanja prema kompleksnosti koja pruža inherentnu prednost*“ (Gould, 1996). Ceo argument je poduprt misaonim eksperimentom — premotavanjem i ponavljanjem evolutivne istorije života na Zemlji. Da li bi se ponovo pojavili isti organizmi, ljudi, mravi, vrane i magnolije? On zaključuje da bi se na repu distribucije organizama na skali kompleksnosti zaista ponovo pojavili vrlo složeni organizmi, ali nepredvidivi po svojim evolucionim rešenjima, kao rezultat efekata potpune ili delimične slučajnosti tokom evolucionog procesa, uz malu verovatnoću stvaranja samosvesnih bića poput čoveka, čija pojava je samo jedna malo verovatna, srećna okolnost.<sup>77</sup> Drugim rečima, sve one osobine koje su nastale tokom evolucije *nisu* rezultat nikakvih inherentnih trendova već sasvim slučajnih događaja, npr. određeni broj vrsta organizama je razvio velike dimenzije tela samo zato jer su organizmi nastali relativno mali, pa je jedan broj sasvim slučajno „hodom pijanca“ odšetao u tom pravcu. Isti argument važi i za opštu kompleksnost organizama, koja ne pruža nikakvu adaptivnu prednost, zbog čega evolucije nije napredak. Đianhuijev kontra argument na ovu tezu je da, čak i ako evolucija nije predodređena da povećava kompleksnost, čak i ako se dešava po principu „hoda pijanca“, i dalje ostvaruje sve ciljeve, kompleksnost raste — zašto bismo kriterijum postojanja predodređenosti interpretirali kao odlučujući u oceni da li postoji progres ili ne? I nepredodređeni progres je progres. Činjenica da evolucija nije usmerena, ako nije, i dalje ne znači da nije progresivna. Kao što je ranije pomenuto, Guld na neki način implicitno kritikuje ideju da je progres pokretač evolucije, dakle ortogenetsku tezu, a ne osnovne darvinističke postavke teorije prirodne selekcije, zastupajući radikalno anti-

---

<sup>77</sup> Guld očigledno ne uživa u gledanju naučno-fantastičnih filmova o vanzemaljcima, u kojima oni, upravo zbog antropocentričnih projekcija i ortogenetskih prećutnih pretpostavki, gotovo uvek imaju čovekoliki oblik.

adaptacionističko stanovište, suprotno većini evolucionih biologa danas koji zagovaraju tzv. slab adaptacionizam<sup>78</sup>.

6. *Argument (statističke) greške u uzorkovanju.* U suštini, ovaj argument kaže da se zbog propusta u odabiru (uzorkovanju) tipičnih predstavnika svih klasa organizama poređanih prema vremenskom redosledu kojim su se pojavljivali u geološkoj istoriji, čini kao da postoji progres u evoluciji, koji se odnosi i na kompleksnost. Organizmi se, na primer, mogu poređati prema sledećem redosledu: bakterije, gljive, biljke, beskičmenjaci, kičmenjaci i ljudi, što sugerise trend u kom život evoluira od jednostavnih oblika ka složenijim, pri čemu je progres ili napredak najuočljivija karakteristika istorije života. Guld tvrdi da su naučnici posmatrali isključivo istoriju najkompleksnijih organizama kroz vreme, uzimajući ekstremne pripadnike svake klase kao njene reprezentate, i koristili povećanje kompleksnosti najkompleksnijeg uzorka kao obmanjujuću demonstraciju progressa celokupnog života. On primenjuje svoje zaključke na tzv. Koupov zakon. Tradicionalna interpretacija Koupovog pravila je da veće telo nudi više prednosti organizmima, te da se veličina tela stoga povećava u evoluciji. Primeri tih prednosti uključuju poboljšanu sposobnost hvatanja plena ili odvrćanja predatora, veći reproduktivni uspeh, povećanu regulaciju unutrašnjeg okruženja i poboljšanu regulaciju termičke ravnoteže zbog povoljnijeg odnosa površina i zapremine tela kod većih organizama.<sup>79</sup> Međutim, Guld smatra da je takvo tumačenje potpuno pogrešno. S jedne strane, takozvane prednosti su spekulativne prirode, a sa druge strane, primećujemo porast veličine samo najvećih vrsta. Primarno nastale vrste su imale male telesne dimenzija, pa se opseg veličine može proširiti samo u jednom smeru, „hodom pijanca“. Veličina najčešće vrste (modalna vrednost veličine svih organizama) nikada se ne menja, a potomci *ne pokazuju* tendenciju da se rađaju veći od predaka. Tokom svakog koraka prosečna veličina organizama se pomera naviše zbog povećanja ukupnog broja vrsta, od kojih se, slučajno, kod nekih povećava, dok nijedna ne može proći kroz levi zid i postati manja od neophodne za održanje života. Ne postoji nikakav evolutivni smer u smislu povećanja dimenzija tela tokom evolucije — Koupov zakon je pogrešan. Iz analize sledi i potreba za redefinisanjem osnovnog pitanja kojim bi trebalo da se bavimo — sa pitanja kakve prednosti pruža veće telo, na pitanja o pravim uzrocima preživljavanja najmanjih organizama tokom svake ekstinkcije, čime oni postavljaju „levi zid“ baš tu gde jeste, i na neki način

---

<sup>78</sup> Pod slabim adaptacionizmom podrazumeva se stanovište da većina novostečenih osobina ipak pruža neke evolucione prednosti. Adaptacionizam je oslabio pod pritiskom jakih argumenata neutralizma

<sup>79</sup> Kerol (Carrol, 2001) pominje, iako Guld ne, i mogućnost evolucije većih moždanih struktura kod većih organizama, kao jednu od prednosti.

određuju pravac budućeg razvoja samo u smeru povećanja dimenzija tela. Greška je naučnika, prema Guldu, koji podržavaju ideju evolutivnog progressa to što naoko očigledni trendovi mogu biti generisani kao sporedne posledice ili nusproizvodi povećanja i kontrakcija varijabilnosti unutar sistema, a ne nečim što se usmereno kreće u nekom pravcu (Jianhui, 2019). Modalna vrednost veličine bakterija ostala je konstantna od nastanka do danas, a utisak o povećanju dimenzija tela je stvoren fokusiranjem na nekoliko odabranih ekstremnih slučajeva na repu distribucije veličina tela živog sveta.

7. *Argument dominacije bakterija u živom svetu.* Argument dominacije bakterija u živom svetu svodi se na opažanje da su u početku života, prema svim fosilnim nalazima, bakterije (prokariote) bile jedini oblik života, da su i dalje tu, da je cela geološka istorija zapravo istorija bakterija, i da nema izgleda da će se to u budućnosti promeniti. Zapravo, polovina života na zemlji su — bakterije (Jianhui, 2019). Celo trajanje života na zemlji je zapravo „doba bakterija“, bez obzira na kriterijum koji odaberemo za iznošenje takve ocene (Gould, 1996). One su šampioni izdržljivosti i istinski vladari Planete, i čovek, čak i kada bi hteo, ne bi mogao da promeni ovakvo stanje stvari. Njihov broj, raznolikost, diverzitet metaboličkih rešenja i životnih staništa koje su naselile, činjenica da su tu već 3,4 milijarde godina, garantuju njihov kontinuitet i dominaciju. Zbog svega toga, bakterije su *najvažniji* organizmi na Planeti, i nema nikakvog napretka u evolucionom kretanju od bakterija prema čoveku — bakterije dominiraju. Na ovaj Guldov argument odgovoreno je da prosta činjenice da su bakterije duže na Planeti, da su brojnije, itd. ne znači da su one viši organizmi od čoveka. S obzirom da su one nesumnjivo manje kompleksne od čoveka, u smislu organskih struktura i sposobnosti, a da je čovek nastao mnogo kasnije u hronologiji evolucionih dešavanja, znači da se tokom evolucije desio napredak. Guld simplifikuje stvari do apsurdna, tvrdeći da je nedostatak predodređene usmerenosti dokaz nedostatka smera, što je i logička i faktička greška. Naše mišljenje je da je ceo korpus rasprava koje su u suštini prožete aksiološkim refleksijama i kontaminirane ličnim etikama pomalo i nenaučan. Naime, i Guld i kritičari Gulda raspravama pokušavaju da dokažu unapred postuliranu tezu, koja postaje premisa, a ne zaključak rasprave. Guldove retoričke sposobnosti su od nesumnjive prednosti u ostvarivanju intelektualne rezonance sa publikom, ali to ne menja činjenicu da su njegovi argumenti obojeni ličnom etikom. Odbrana čoveka kao višeg bića pati od istih slabosti. Bez obzira na to koji deskriptor ili kriterijum usvojili u karakterizaciji *višeg* ili *nižeg*, neki organizmi će biti na višem, a neki na nižem položaju, ali na kraju će naša konvencionalna odluka da usvojimo jedan ili drugi kriterijum na kraju odrediti pobjednika u ovoj besmislenoj i nenaučnoj trci bez istinskih proverljivih implikacija. U svakom

slučaju, činjenica da se kompleksnost povećava tokom evolucije i dalje na govori ništa o mogućoj kauzalnoj vezi evolucije i kompleksnosti. Naime, pitanje da li je povećanje kompleksnosti *posledica* evolucije, ili samo još jedna koegzistirajuća kolateralna, i dalje je otvoreno.

### 3.1.2. Aktivan trend biološke kompleksnosti

Ideja aktivnog trenda biološke evolucije je ideja da je naizgled sveprisutno (setimo se Gulldovog šestog argumenta) povećanje kompleksnosti tokom evolutivnog procesa posledica prirodne selekcije, da postoji kauzalni odnos prirodna selekcija — genetička kompleksnost. Ideja se, naravno, javlja kao antipod ideji slučajnog porasta kompleksnosti „hodom pijanca“. Hronološki gledano, ona je ranije nastala od ideje pasivnog trenda. Postoji duga istorija podrške ovoj opštoj ideji evolutivnih trendova ka povećanju veličine, kompleksnosti i raznovrsnosti organizama. Kerol (Carrol, 2001) nas još jednom podseća da je traženje pravila i regularnosti u evoluciji posmatranjem pojedinačnih, izolovanih genetičkih linija opasno (aludirajući očigledno na slabosti anegdoticnog dokaza, u principu), te da srećom postoje delovi evolutivnih istorija više različitih genetičkih linija koji su se ponavljali, te stoga omogućavaju uopštavanje zaključaka. U istom radu, Kerol pokušava da ograniči ispitivanje prirode trenda biološke kompleksnosti na domen morfološke građe, da ga detaljno ispita, i na kraju generalizuje zaključke na biološku kompleksnost uopšte. Izvori informacija o evolutivnom toku su dvojaki: (1) pojedinačni fosilni nalazi i (2) filogenetsko drvo života koji omogućavaju određivanje vremena, redosleda i broja ponavljanja određenih događaja u evolutivnoj istoriji različitih genetičkih linija i grupa. Kerol ističe da su pojedini prelomni događaji u geološkoj istoriji biosfere bili ključni u utiranju puta sledećim prelomnim događajima<sup>80</sup>. Nakon ovih prelomnih događaja u kojima su osvajane nove funkcionalnosti, sledili su, ponekad sa kašnjenjem, periodi brze diverzifikacije živog sveta, kao na primer kambrijumska eksplozija<sup>81</sup>, uspon insekata u

---

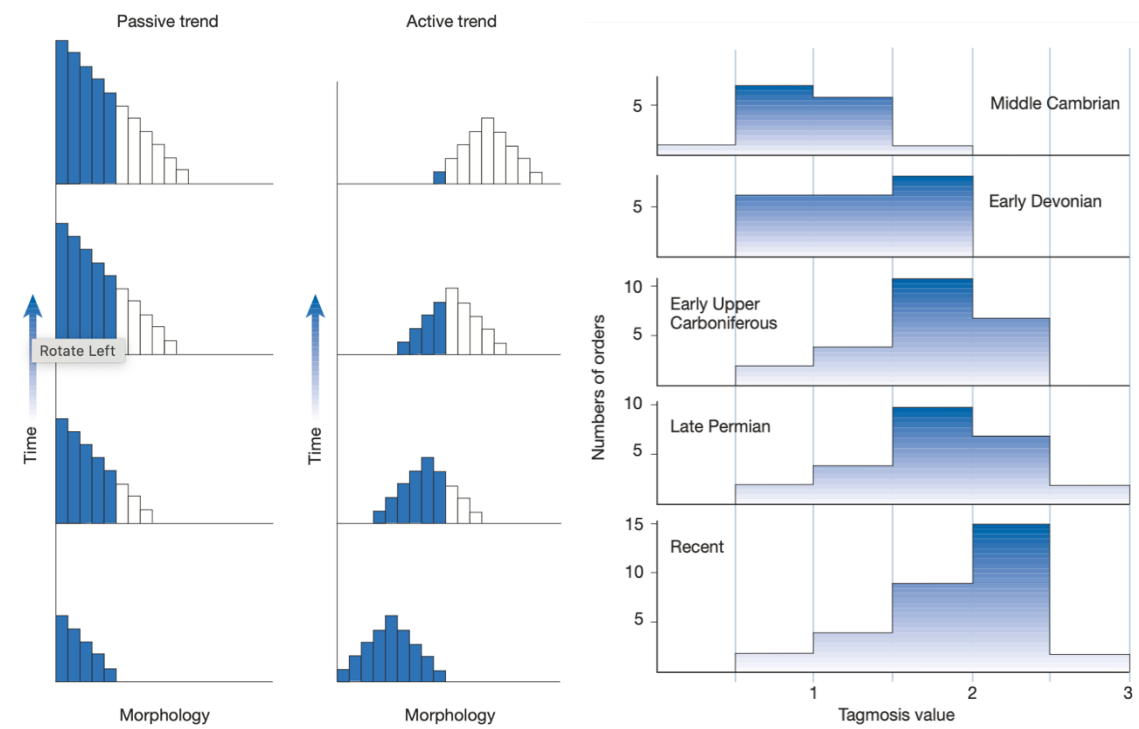
<sup>80</sup> Na primer, razvoj višecelijskih organizama je utro put diversifikaciji tipova ćelija, a koja je opet omogućila diversifikaciju tkiva, razvoj organa, itd.

<sup>81</sup> Kambrijumska eksplozija je period u geološkoj istoriji zemlje koji se desio pre 543 miliona godina, i trajao svega 20 miliona godina, tokom koga su se (prema fosilnim ostacima) pojavila morfološka rešenja za veći broj životinja. Kambrijumska eksplozija je često korišćen kreacionistički argument, pa će mu se posvetiti malo više pažnje. Dvadeset miliona godina predstavlja veoma kratak period iz perspektive evolucije, pa se zagovornici hipoteze inteligentnog dizajna često pozivaju na ovaj događaj (zapravo period) koji kao da svojom rapidnošću protivreći tezi o postepenim evolutivnim promenama Moderne sinteze (Biologos, 2022), čime se osporava Modernoj sintezi objašnjavalacki potencijal. Problem sa argumentom kambrijumske eksplozije je što se, iako su se tokom tog perioda zaista prvi put pojavila mnoga morfološko-anatomska rešenja životinjskog sveta, veliki broj formi tela nije pojavio tad, već mnogo kasnije (npr. forme morske zvezde, kraba, insekata, riba, guštera, ptica i sisara) (Falk, 2004). Postoji problem i sa tvrdnjom „eksplozivnosti“ kambrijumske eksplozije. Naime, fosilni nalazi su relativno

devonu i karbonu, širenje cvetnica u kasnoj kredi, i širenje sisara u ranom tercijaru (Carroll, 2001). Ako postoji intuitivna veza između veličine organizama i njihove kompleksnosti, vredno je napomenuti da je prvih 2,5 milijarde godina nakon nastanka živi svet bio sveden na dimenzije tela manje od 1 milimetra, često i mnogo manje. Tek sa razvojem višćelijskih organizama, verovatno tako što su nakon deoba jednoćelijski organizmi ostajali zajedno tvoreći neku vrstu filamenata, organizmi su postali veći, dostižući 50 cm veličine tela u kambrijumu. Kerol tvrdi da, ako se evolucija kompleksnosti posmatra iz ugla MekŠejevih kriterijuma (videti fusnotu 63 u potpoglavlju 3.1.1.), život je nedvosmisleno napredovao ka povećanom stepenu kompleksnosti, na primer u broju tipova ćelija, ali uz opasku da se i dalje najveći broj tipova ćelija nalazi kod bakterija (npr. bacili, koke, spiralne, vibrio, itd.). Međutim, povećanje broja tipova *udruženih* ćelija (kod višćelijskih organizama) povećalo je potencijalnu fiziološku i anatomsku složenost organizama kroz podelu rada između ćelija i formiranje specijalizovanih tkiva i organa.

---

nekompletni, naročito on koji potiču od životinja mekog tela (bez skeleta), i pronađeni su na svega dve lokacije, u Kanadi (*Burgess Shale*) i Kini (*Chengjiang*) (Biologos, 2022). Zatim, postoji hipoteza da se brzina fosilizacije životinja sa skeletom razlikuje od onih bez skeleta, što prividno ubrzava fosilizaciju i veštački smanjuje procenjeni period trajanja kambrijumske eksplozije, koji bi mogao biti i artefakt (Falk, 2004). Noviji fosilni nalazi iz prekambrijuma pokazuju da se neke životne forme nisu javile prvi put u kambrijumskoj eksploziji, već da su njihove proto-forme egzistirale i ranije (Campbell and Miller, 2003). Fosilne genetičke studije u skladu su sa geološkim fosilnim nalazima, obe pokazuju da je došlo do pojave beskičmenjaka bilateralne simetrije u prekambrijumu, a zatim eksplozije diverziteta u kambrijumu (Peterson et al., 2008). Bez obzira da li se trajanje od oko 20 miliona godina interpretiralo kao relativno kratko ili ne iz perspektive evolucije, činjenica je da je tokom mnogo dužeg perioda pre toga živi svet imao relativno stacionaran „dizajn“, pa se logično postavilo pitanje šta je uzrokovalo ubranu diversifikaciju tokom kambrijuma. Hipoteze uglavnom uključuju dramatične i rapidne promene u životnoj sredini koje su stvorile nove ekološke niše. Tako na primer, teorija rapidne glacijacije kaže da su u jednom kratkom period lednici prekrili veći deo površine planete, što je rezultovalo gubitkom životnog staništa, pa je u preostalim džepovima evolucija bila ubrzana (Hoffman and D.P. Schrag, 2002). Druga hipoteza insinuira da je ubrzana evolucija bila posledica promena u sadržaju kiseonika u atmosferi (Fike et al., 2006). Treća hipoteza pripisuje rapidnu evoluciju naglim promenama u osobinama morskog dna (Bottjer et al., 2000), itd.



**Slika 16.** a) Pasivan trend i b) aktivan promene morfologije organizama tokom evolucije, c) Broj redova je prikazan u odnosu na tagmozu, vrednost koja se izračunava uzimajući u obzir kako ukupan broj tako i različite vrste ekstremiteta kod artropoda. Minimalna, srednja i maksimalna vrednost tagmoze povećavale su se od kambrijuma do kasnog perma, što ukazuje na prisustvo aktivnog trenda [preuzeto iz Carrol, 2001].

Kod životinja sa bilateralnom simetrijom tela kičmenjaci imaju najveći broj tipova ćelija (Carrol, 2001). Tokom evolucije došlo je i do povećanja broja gena, mada odnos broja gena u odnosu na broj tipova ćelija nije jasan. Povećanje diverziteta na dužim vremenskim intervalima, kao jedne od komponenti kompleksnosti, pod znakom je pitanja zbog masovnih izumiranja i nedostatka fosilnih ostataka, naročito životinja sa mekim tkivima, ali je generalni stav da se diverzitet povećao u odnosu na skromne početke. Kako se ova zapažanja o povećaju kompleksnosti odnose na dilemu između aktivnog i pasivnog trenda ovog povećanja? Na **Slici 16**, Kerol je prikazao moguće grafikone promene morfologije organizama (kao paradigmu kompleksnosti), ali na nešto izmenjen način u odnosu na **Slike 15 i 14**. Na ranijom grafičkim prikazima pasivnog trenda sam vrh distribucije kompleksnosti se nije nalazio baš na samom levom zidu koji bi odgovarao minimalnoj kompleksnosti potrebnoj za održanje života, već malo pomeren udesno (ovaj detalj ćemo kasnije posebno analizirati u sopstvenim simulacijama). On zaključuje, slično kao Guld, da s obzirom da su organizmi nastali na minimumu kompleksnosti, objašnjenje rasta prosečne kompleksnosti mora bar delimično da

bude posledica povećanja ukupne varijanse kompleksnosti organizama. Međutim, evolucija novih osobina (kao što su pojava višćelijskih organizama, diferencijacija ćelija, unutrašnja složenost i modularnost) može da otvori nove nivoe kompleksnosti i omogući kasnije eksplozije diversifikacije (putem daljeg povećanja varijanse). Drugim rečima, iako globalni trendovi mogu biti pasivni, unutar celokupnog toka evolutivne istorije mogu da postoje periodi aktivnih, pravolinijskih trendova koji se superponiraju na pasivne trendove uzrokovane ukupnim povećanjem varijanse, što je u skladu i sa mišljenjem Knola i saradnika (Knoll *et al*, 2000). Drugo pitanje (pored distinkcije aktivan–pasivan), koje Kerol postavlja je o prirodi pokretača trenda, naime pokretač bi mogao da bude spoljašnji, poput prirodne selekcije i ekologije ili unutrašnji, poput genetičke, razvoje, ili biomehaničke kontrole. On na ova pitanja pokušava da odgovori posmatranjem trendova u okviru odvojenih grana drveta života, korišćenjem tri testa: (1) test ponašanja minimuma distribucije, koji bi trebalo da se pomeri udesno ako je sistem aktivan; (2) test parova predak–potomak, koji bi trebalo da otkrije povećanja u slučajnim uzorcima parova predak–potomak koji su odabrani iznad minimalne granice; i (3) test manjih grana uzetih iz primarne grane, koji bi trebalo da pokaže nesrazmeru u srednjoj vrednosti manjih grana uzorkovanih iz repa distribucije. Kerol je ovim testovima otkrio neke *aktivne trendove* u evoluciji veličine i složenosti životinja. Kao prvo, već spomenuti Koupov zakon, koji je izložen kritici od strane Gulda i okarakterisan kao pogrešan, ponovo se analizira. Koupov zakon je nastao posmatranjem evolucije veličine tela sisara u kenozoiku, posle najpoznatije masovne ekstinkcije pre 65 miliona godina u kojoj su nestali dinosaurusi. Kerol pokazuje, da kod sisara u kenozoiku, za razliku od nekih drugih epoha i grupa organizama<sup>82</sup>, postoji jasan aktivan trend povećanja telesne veličine organizama koji se superponira na nesporan pasivan trend nastao povećanjem varijanse. Dakle, iako aktivan trend u smislu Koupovog zakona ne može da se smatra univerzalnim, u ovom konkretnom slučaju on izgleda da važi, što ostavlja mogućnost daljih istraživanja o odnosu aktivan–pasivan u evoluciji trenda kompleksnosti. Fokus daljeg razmatranja prirode trendova Kerol pomera sa Koupovog zakona na morfologiju metazoa (videti potpoglavlje 2.1 za detalje o metazoama). Metazoe su odabrane jer kod njih, u evolutivnim počecima, postoji intenzivna diversifikacija broja tipova ćelija, koja kasnije kao da dostiže plato, pa su zaključci o odnosu aktivan–pasivan nekonkluzivni. Kerol navodi čitave serije istraživanja koja pokazuju da kod većeg broja proučavanih taksonomskih grupa životinja (kod kojih postoje dovoljno bogati fosilni nalazi),

---

<sup>82</sup> Kerol specifično pominje mekušce i planktone u Kredi.

poput brahiopoda (školjki), amonoida (amonita), vodenih zglavkara (trilobita), i kičmenjaka postoji *aktivan trend* u povećanju kompleksnosti, bar u nekim njenim aspektima (npr. geometrije školjki ili strukture nogu trilobita). Kerol naglašava da su uporedne analize detalja najlakše izvodljive u odnosu na repetitivne strukture u više instanci taksonomskih grupa i podgrupa, poput kičme kod kičmenjaka, zuba, udova, itd. Kod kičmenjaka i zglavkara postoji jasno povećanje maksimalnog broja repetitivnih struktura koje se mogu razlikovati tokom geološke istorije (Carrol, 2001). Na **Slici 16c**, Kerol je prikazao evolutivno kretanje tagmoze<sup>83</sup> kod vodenih zglavkara, koje pokazuje moguće elemente aktivnog trenda (pomeranje minimuma). Za razliku od tagmoze kod zglavkara, iako se kod kičmenjaka maksimalan i srednji broj diferenciranih pršljenova povećao u tranziciji od riba do sisara, ovaj trend je izgleda čisto pasivan (minimum se nije promenio i nema jasnog trenda povećanja kod parova predak–potomak). I kod Kerola se javlja sličan zaključak kao i na nekoliko drugih mesta — da je na dužim vremenskim skalama prisutno difuziono, pasivno kretanje povećanja kompleksnosti, ali da na kraćim vremenskim skalama, naročito neposredno posle osvajanja novih morfoloških prostora (npr. izlaska životinja na kopno, razvoja sposobnosti letenja kod kičmenjaka, itd.) dolazilo do eksplozivnog razvoja kompleksnosti koja ima elemente aktivnog trenda. Međutim, Kerol ide dalje i identifikuje, po njegovom mišljenju, jednu osobinu život sveta koja je u osnovi dubljih mehanizama evolucije i u slučaju pasivnog, i u slučaju aktivnog trenda — modularnost. Modularnost građe omogućava lakše postizanje veće veličine i efikasnosti, i evoluciju veće složenosti i prilagođavanja putem funkcionalne diferencijacije. Kod biljaka omogućava veću veličinu i diferencijaciju funkcionalnih uloga između listova i reproduktivnih struktura. Ona se može posmatrati kao analogija sa podelom rada između tipova ćelija kod jednostavnijih organizama, s tim što su delovi celog tela osnovni blokovi umesto ćelija. Ključnu ulogu u razvoju modularnosti igra razvoj sistema za regulaciju specijalizacije različitih modula organizma tokom embriogeneze. Divergencija evolutivnih pravaca repetitivnih modula kroz regulaciju ekspresije gena na nivou modula, pokazuje se, dakle, kao ključni preduslov kompleksifikacije. Modularizacija bioloških organizama, a koju smo površno dotakli kao temu i u potpoglavlju 1.6, omogućava organizmima izbegavanje ograničenja sopstvene unutrašnje morfologije (npr. biomehaničke, jer specijalizacija jednog repetitivnog modula ostavlja drugim

---

<sup>83</sup> Tagmoza se odnosi na grupisanje ili spajanje segmenata tela kod određenih člankonožaca (lat. *Arthropoda*), posebno insekata i stonoga (lat. *Myriapoda*), u specijalizovane funkcionalne jedinice koje se nazivaju tagmate. Kod ovih organizama, telo je podeljeno na različite regione ili segmente, od kojih svaki može imati specifične funkcije. Tagmoza podrazumeva evolutivnu modifikaciju i spajanje ovih segmenata u veće strukture sa specifičnim ulogama, kao što su glava, grudni deo i abdomen kod insekata. Na primer, kod insekata, glava, grudni deo i abdomen čine tri tagmate.

prostore za dalje specijalizacije u drugim pravcima, povećavajući opseg mogućih funkcija svih modula kao totaliteta), kao i genetička i razvojna ograničenja koja limitiraju opseg varijacija koje su dostupne unutar vrsta. Iz ovih razloga, organizmi sa modularnom građom poseduju selektivne prednosti (Carroll, 2001). Kerol zaključuje da je kompleksnost živog sveta pre uzrokovana varijacijama u malom broju regulatornih gena (odnosno proteina koje oni kodiraju), a manje ukupnim brojem gena. U potpoglavlju 1.2 dotaknut je slučaj bogatijeg genoma kod daždevnjaka u odnosu na čoveka koji ne prati i sličan odnos fenotipskih kompleksnosti, poznat kao ranije pomenuti paradoks C-vrednosti. Kerolova zapažanja rešavaju taj problem, jer kompleksifikacija po njemu nije posledica povećanja broja osnovnih gena, već specijalizacije modula nastale kroz evoluciju regulatornih genskih mehanizama. Evolucija regulatornih mehanizama omogućava nove načine eksprimiranja već postojećih osnovnih gena, čime genomu daje i novi informacioni sadržaj bez daljeg povećavanja broja gena.

Iz svega gore navedenog proističe da je generativni kapacitet genoma daleko veći od aktuelnog, realizovanog. Na primer, 100.000 gena koji mogu zauzeti dva binarna stanja, mogu da realizuju  $2^{100.000}$  različitih unikatnih kombinacija, što je broj neuporedivo veći od, na primer, broja različitih tipova ćelija koji je reda veličine 300-400 ili nešto više (Carroll, 2001). Kerol ovoliko diskrepanciju između latentnog informacionog sadržaja genoma i realizovane varijanse naziva iznenađujućom, naročito s obzirom da se manipulacijom relativno malog broja regulatornih gena ovaj potencijal može osloboditi.

### **3.2. Prirodna selekcija kao “Maksvelov demon”: Digitalna evolucija u ulozi arbitra**

Empirijski dokazi dobijeni analizom fosilnih ostataka i toka evolucije u kontrolisanim uslovima teško mogu da odigraju ulogu konačnog arbitra u sporu oko prirode trenda biološke kompleksnosti, jer postoje argument i za i protiv obe teze, o pasivnom i aktivnom trendu povećavanja biološke kompleksnosti, u raspravi koja traje decenijama. Na to treba dodati i problem konstituisanja samog pojma biološke kompleksnosti koji bi bio kvantitativno merljiv za potrebe ove arbitraže. Zbog manjkavosti fosilnih ostataka kao izvora podataka o čemu je bilo reči ranije, problemu se pristupilo iz drugog ugla — kompjuterskim simulacijama evolucije digitalnih organizama, zapravo softverskim simulacijama digitalnih modela živih organizama kojima su imputirane njihove relevantne osobine. U kontrolisanim uslovima ovakvih simulacija lakše je kvantitativno pratiti promene kompleksnosti, kao i uočiti i karakterizovati eventualni kauzalni odnos prirodne selekcije i biološke kompleksnosti.

U jednoj takvoj studiji (Adami *et al*, 2000), ispitivana je evolucija genomske kompleksnosti u populaciji digitalnih organizama i izolovani detalji genetičkih promena koje povećavaju kompleksnost. Literatura nastala pre ove studije nije bila konkluzivna, na primer studija MekŠeja (McShea, 1996) je utvrdila da bi mogla da postoji komponenta aktivnog trenda u evoluciji, ali dokazi nisu bili jednoznačni, ni univerzalni.<sup>84</sup> MekŠej je istakao problem sa tim kako zapravo opisati *ono* što se povećava tokom evolucije<sup>85</sup> ostavljajući pitanje da li je *to* nešto zapravo kompleksnost otvorenim. U svetlu MekŠejevih posmatranja i Guldove kritike iznete svega nekoliko godina ranije, postalo je jasno da je dalji doprinos rešavanju problema trenda biološke kompleksnosti zapravo goruće pitanje.

Adami i sar. (2000) započinju studiju rigoroznim definisanjem kompleksnosti u duhu informatičke teorije kao „količine informacija o okruženju koje (genska) sekvenca može da uskladišti“. Ovakva definicija olakšava kvantifikaciju kompleksnosti i njeno praćenje tokom simulacije evolucije, izbegavajući probleme u vezi strukturalne i funkcionalne kompleksnosti.<sup>86</sup> Autori ističu da ne postoji potpuna korelacija između genetičke kompleksnosti i fenotipske kompleksnosti, jer je značajan deo DNK pasivan, odnosno njegovi delovi nemaju funkcije (jer se ti geni ne eksprimiraju), iako *moгу*, u principu, da skladište informacije (što delimično objašnjava tzv. „paradoks C-vrednosti“, odnosno zapažanje da kod eukariota postoji mnogo veća razlika u genetičkoj kompleksnosti nego u morfološkoj i funkcionalnoj kompleksnosti samih organizama, tj. fenotipskoj). Tokom dve godine koje su prethodile ovoj studiji, Adami je već objavio dve uticajne studije evolucije digitalnih organizama kojima je uspostavio novu paradigmu — sprovođenje evoluciono–bioloških studija u veštačkim okruženjima koje su delile relevantne sličnosti sa prirodnim okruženjima. Digitalni organizmi u simulaciji su reprezentovani kroz nizove simbola (karaktera), koji predstavljaju kompjuterske programe koji se repliciraju autokatalitički, a sadrže informacije u sekvencama koje mogu da se menjaju (evoluiraju). Informacije koje sadrže su istovremeno i instrukcije za sopstveno samo-repliciranje. Ovakvo rešenje na neki način korelira sa načinom funkcionisanja

---

<sup>84</sup> Za razliku od ostalih radova MekŠeja koji zagovaraju ideje pasivnog trenda, u ovom je on utvrdio postojanje aktivnog trenda u samo jednoj vrsti kompleksnosti kod metazoa, i samo u ranom fanerozoiku (paleozoik mezozoik i kenozoik zajedno).

<sup>85</sup> MekŠej je zapravo pronašao nekonkluzivne indicije postojanja nekih evolucionih trendova, i zapitao se da li je to nešto što raste zapravo kompleksnost. Iz istog razloga je Benet (1995) promenio samu definiciju kompleksnosti, pretvarajući je u cirkularnu, tako što je kompleksnost definisao kao „ono što se povećava kada se samo–organizujući sistem organizuje“.

<sup>86</sup> Postoje i bitne slabosti ovakve definicije, na primer da se ona odnosi na izolovanu vrstu organizama u jednoj, statičnoj ekološkoj niši, te da ne reflektuje aspekte biodiverziteta, varijabilnosti sredine ili šire ekologije. Jeger i sar. (2011) smatraju da je to pre mera genetičke konzistencije, ili specijalizacije.

RNK. Digitalni organizmi u svom genomu, pored instrukcija o samo-replikaciji, reflektuju i bogatstvo informacija iz okruženja kojima su izloženi u vidu stimulusa. U simulaciji je pronađeno da se genomska kompleksnost organizama koji evoluiraju u okruženju bogatom informacijama povećava, dok se kod onih koji evoluiraju u okruženju siromašnom informacijama smanjuje, u drugom slučaju praktično svodeći selekcionni pritisak samo na osobine koje se tiču razmnožavanja — samo-replikacije.<sup>87</sup> Slični rezultati dobijeni su i u studiji Milisa i sar. (Mills *et al.*, 1967). Redukcijom pojmovnog sadržaja kompleksnosti na kompleksnost genoma, odnosno broja funkcionalnih parova azotnih baza u biološkim sistemima, Adami i sar. su omogućili jednostavno i direktno praćenje genetičke kompleksnosti praćenjem kompleksnosti (dužina) sekvenci samih digitalnih organizama, uz sve rizike koje ovakva redukcija povlači. Autori spekuliraju da je u ranim fazama biološke evolucije verovatno najveći porast kompleksnosti zabeležen *de novo* razvojem gena sa novim funkcionalnostima, dok je kasnije, akumulacijom neutralnog genetičkog materijala rast kompleksnosti sve više uzrokovan preinačavanjem namena i sticanjima novih funkcionalnosti od strane genskih duplikata nastalih mutacijama; odnosno, nastankom repetitivne DNK i diversifikacijom funkcionalnosti njenih delova, kao i promenama u mehanizmima genetičke regulacije.

Interpretirajući genetiku u duhu informatičke teorije, autori ističu da je informacija uvek informacija *o nečemu*, dakle da je referirajuća, da nužno ima korelat, te da ne postoji u vakuumu (Adami *et al.*, 2000).<sup>88</sup> Takođe ističu da su ranije studije kompleksnosti kroz pokušaj redukcije analize kompleksnosti na informacioni aspekt patile od problema definicije i samog pojma informacije.

O čemu su genetičke informacije? Genetičke informacije u ovoj studiji autori poistovećuju sa informacijama o tome kako napraviti organizam sa najvećim šansama za preživljavanje u njegovom životnom okruženju, dakle ovo su informacije i o organizmu, i o okruženju, uključujući i fizičku i ekološku (biološku) komponentu okruženja. Geni sadrže, osim informacija o strukturi organizma, i informacije o sopstvenim mikro-ekološkim nišama (ribozomima, unutarćelijskom okruženju, biohemijskim mehanizmima). Deo DNK koji se ne

---

<sup>87</sup> Na ovom mestu ne možemo da ne primetimo da je ova opservacija direktno na liniji Guldovih razmišljanja i, uopšte, neutralnog pogleda na evoluciju, te stohastičku smenu okruženja kroz geološku istoriju zemlje koja su vodila do veće ili manje kompleksnosti. Adami i sar. nisu ovaj nalaz interpretirali u tom duhu, iako je Guldova kritika adaptacionizma bila već 4 godine u opticaju. Opservacija takođe protivreči i jednoj od osnovnih poruka ovog rada, o kojoj će biti malo više reči kasnije, da trend porasta kompleksnosti ne može biti čisto pasivan.

<sup>88</sup> Kao primer korelata Adami i sar. navode mastilo na papiru, bitove u računarskoj memoriji ili neurone u mozgu, ali insistiraju na postojanju fizičkih instanci informacija. Niz simbola ispisan na komadu papira ne predstavlja informaciju sve dok se ne otkrije njegov semantički sadržaj — objekat ili objekti na koje referira, do tada on je samo potencijalna informacija koja se u informatičkoj teoriji interpretira i kao entropija.

ekspirimira, poznat i kao „junk“ DNK autori u duhu informatičke teorije smatraju entropijom (iako ne spore njegovu moguću važnu evolutivnu, ili druge uloge<sup>89</sup>). Interesantno je da isti deo DNK može biti interpretiran i kao informacija, i kao entropija, u zavisnosti od okruženja, jer ako se organizam nalazi u sredini koja predstavlja korelat njegovih gena, odnosno oni nose informaciju o njoj, tada oni predstavljaju informaciju, a ako ne nose informaciju o njoj, tada predstavljaju entropiju. Naša opaska je da se, ako je to tako, neutralne frakcije DNK mogu interpretirati kao latentne informacije o ne-aktuelnim, mogućim ili budućim sredinama. Tada bi se mutacije u ovim delovima DNK, a koje su pod neuporedivo manjim selekcionim pritiskom, dakle slobodnije, mogle interpretirati kao priprema organizma za moguće izazove. Neutralna frakcija DNK, dakle, ima ulogu nasumičnog simulatora, eksperimentalnog prostora ili „razvojnog okruženja“ (engl. *sandbox*), i igra veoma važnu ulogu u evoluciji. Ovakav zaključak o važnosti neutralnih frakcija DNK nije nov (npr. Maynard, 1970).

Digitalne simulacije evolucije su postale metod od izbora pre svega zbog eksperimentalnih ograničenja u posmatranju evolucije realnih živih organizama. Sporost reproduktivnih ciklusa, i mala verovatnoća mutacija, predstavljaju najveće izazove. Pored njih, problemi postoje i u latenciji uočavanja adaptacije, odnosno njenih makroskopskih manifestacija u odnosu na vreme njihovog nastanka na molekularnom nivou, tako da čak i bakterije, kao model organizmi sa vrlo kratkim reproduktivnim ciklusima, ne predstavljaju optimalno rešenje jer uočavanje adaptivno stečenih osobina traje nekoliko nedelja (Adami et al, 2000).

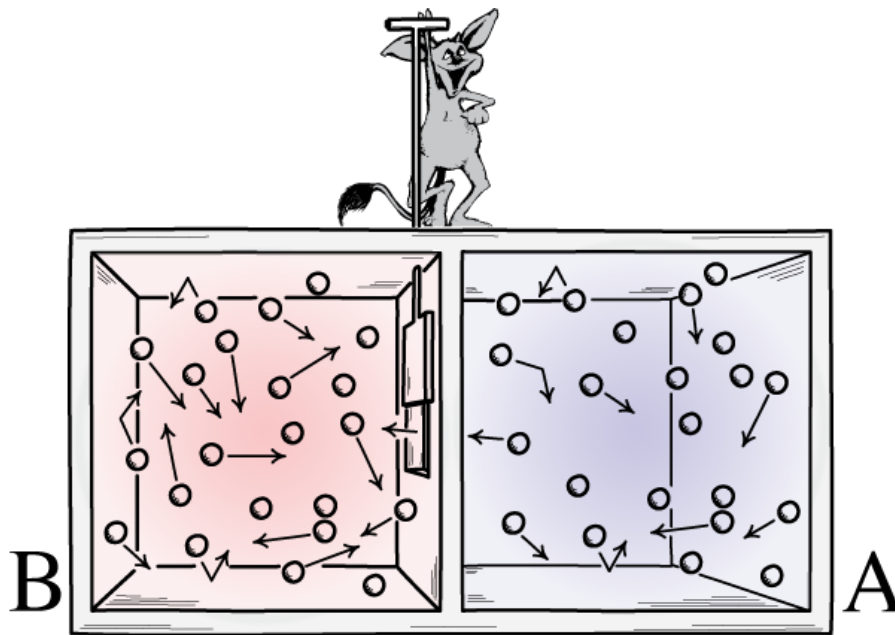
Da bi izveli eksperimente digitalne simulacije, autori su razvili simulacionu platformu AVIDA, koja prati osobine nekoliko hiljada digitalnih organizama u relativno malim okruženjima, uz trajanje simulacije od svega par sekundi. Evolucionarna dinamika, prema autorima, pokazuje relevantne sličnosti sa evolucionim dinamikom *Escherichia coli* na medijumima dugog trajanja (Adami et al, 2000). Kompleksnost dve generacije digitalnih organizama, razdvojenih sa  $N$  među-generacija, kvantifikovana je upoređivanjem entropije njihovih genoma<sup>90</sup>. Simulacija je pokazala da u većim populacijama, u evolutivnim tranzicijama kompleksnost može samo da raste, dok entropija samo da opada, što naizgled protivreči drugom principu termodinamike. Autori objašnjavaju da se u evoluciji radi o sistemima u neravnoteži, dok se drugi princip termodinamike odnosi na ravnotežne sisteme.

---

<sup>89</sup> Već je bilo reči o debati o procentu ne-ekspimirane, „junk“ DNK ranije, u potpoglavlju 2.2.

<sup>90</sup> Matematika računanja entropije je relativno jednostavna, i data je u Adami i sar. (2000). Ovde je nećemo detaljnije obrazlagati jer prevazilazi zamišljene okvire ovog rada.

Darvinov mehanizam prirodne selekcije ovde se pojavljuje u ulozi tzv. Maksvelovog demona (Knott, 1911) koji „propušta“ samo one mutacije koje povećavaju šanse za preživljavanje, uprkos entropijskim i efektima na kompleksnost. Šta je Maksvelov demon? Originalni Maksvelov demon je zamišljen kao biće koje u komori podeljenoj vertikalnom pregradom sa malim vratima na levu stranu propušta samo spore molekule gasa, a na desnu samo brze, **Slika 17**. S obzirom da je temperatura statistički fenomen koji korelira sa srednjom kinetičkom energijom čestica sredine, na taj način Maksvelov demon odvaja toplu desnu stranu komore, od hladne leve, praktično poništavajući drugi princip termodinamike.



**Slika 17.** Ilustracija Maksvelovog demona [preuzeto sa web stranice Univerziteta u Pitsburgu]

Kako se rezultati ove studije reflektuju na raspravu o pasivnom i aktivnom trendu biološke kompleksnosti? U zaključku studije su izložene tri ključne opservacije: 1) jednostavno okruženje daje samo jednostavne genome, 2) pojednostavljeno okruženje može da dovede do pojednostavljenija genoma, jer se geni koji nisu više potrebni gube, i 3) zbog seksualne reprodukcije (nasleđivanje para gena, od svakog roditelja po jednog na homolognim hromozomima), „loši“ geni mogu se zadržati u populaciji, čime se onemogućava kauzalno dejstvo Maksvelovog demona. Studija je potvrdila da trend biološke kompleksnosti *u fiksnim okruženjima* ne može biti čisto pasivan, već da on raste kroz adaptacionistički mehanizam. Kompleksnost organizma je refleksija kompleksnosti okruženja, kroz mehanizam prirodne selekcije analogan Maksvelovom demonu. Naravno, ako su posmatranja evolucije digitalnih organizama reprezentativna za realnu evoluciju, tada se pitanje prirode trenda zapravo svodi na

pitanje promene (smene i evolucije) samih okruženja, njihove stohastičnosti, njihovih karakteristika, itd, o čemu je već bilo reči ranije.

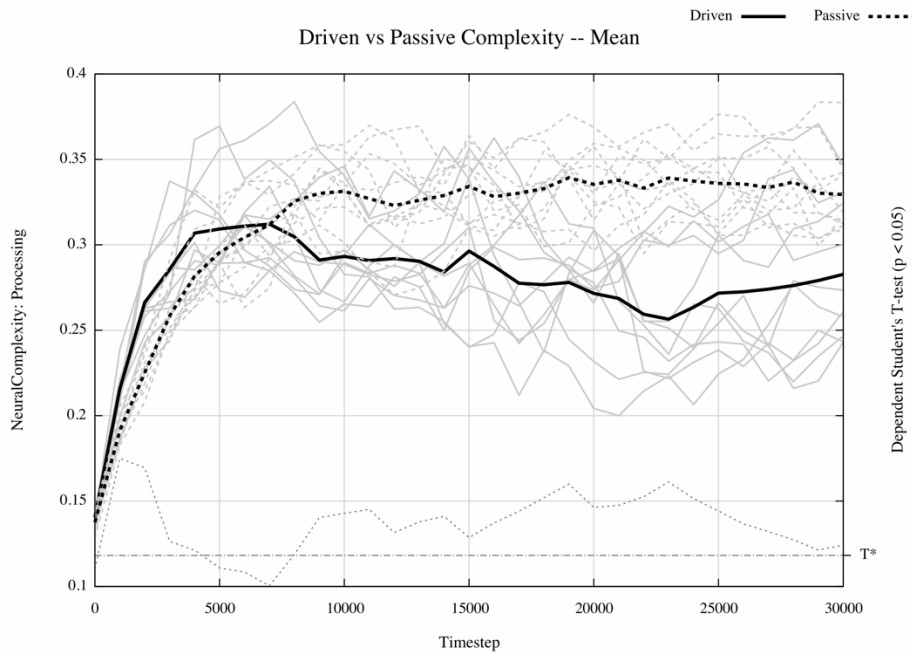
Iz prethodne studije sledi da mora postojati adaptacionistička komponenta u evolutivnom trendu, u stabilnim fizičkim okolnostima. U ponovljenoj studiji tri godine kasnije, Adamijeva grupa (Lenski *et al*, 2003) ponovila je eksperimente ali sa drugim ciljem — da prouči nastanak specifičnih kompleksnih osobina koje zahtevaju evoluciju jednostavnijih funkcionalnosti i njihove koordinacije pre sopstvene emergencije. Studija je objavljena u časopisu *Nature*, i ustanovila je da je za razvoj kompleksnih funkcija kod neke generacije organizama dovoljno da se ona od ne-funkcionalnih predaka razlikuje u samo 1-2 mutacije, ali da je razlika u odnosu na dalje pretke mnogo veća. Emergencija kompleksnih funkcionalnosti se javlja, dakle, brzo, u par koraka, ali je (neutralna) priprema emergencije, odnosno akumulacija jednostavnih funkcionalnosti koje su latentno korisne kao delovi složenijih funkcionalnosti, duži proces. Eksperiment izgleda da direktno potvrđuje mnoge neutralističke pretpostavke iznete u potpoglavlju 2.2. Autori, interesantno, upadaju u kontradikciju već u apstraktu rada iznoseći tvrdnju da su „jednostavnije funkcionalnosti koje se javljaju kao gradivni blokovi složenijih funkcionalnosti“ rezultat pozitivne prirodne selekcije, a par rečenica kasnije pišu da „je u nekim eksperimentima primećeno da čak i smrtonosne mutacije mogu popločati put ka kompleksnijim funkcionalnostima“<sup>91</sup>. Uzgred, AVIDA evoluciono-simulaciona platforma je i danas u širokoj upotrebi i predstavlja najčešće korišćenu platformu za digitalne simulacije evolucije (Ortega *et al*, 2023).

U sličnoj simulaciji deceniju kasnije, korišćenjem drugačije simulacione platforme, Jeger i sar. (Yaeger *et al*, 2011) delimično potvrđuju nalaze Adamijeve grupe. Za razliku od Adamijeve grupe, pritom svesni slabosti Adamijeve metrike kompleksnosti, oni definišu drugačiju metriku kompleksnosti na bazi Šenonove informatičke teorije, koja je matematički komplikovana i čije detaljno prikazivanje prevazilazi zamišljene okvire ovog rada. Oni demonstriraju da je trend *menjanja* biološke kompleksnosti aktivan<sup>92</sup>, da prirodna selekcija kauzalno menja biološku kompleksnost, te demonstriraju slučajeve u kojima kompleksnost, kroz mehanizam prirodne selekcije, raste, kao i slučajeve u kojima je ona stabilna upravo zbog prirodne selekcije.

---

<sup>91</sup> Naš komentar je: ako se zadrže dovoljno dugo, što je potpuno u skladu sa neutralističkim pogledom na evoluciju. Konfuzija se, kao i na mnogim drugim mestima, javlja zbog proizvoljne *ad hoc* interpretacije prirodne selekcije kao pozitivne (preživljavanje najposobnijih) ili negativne (kao eliminaciju neoptimalnih). Neutralizam se pre svega oslanja na drugu, a klasičan neodarvinizam na prvu definiciju selekcije.

<sup>92</sup> Ali ne uvek u istom smeru.



**Slika 18.** Aktivno i pasivno generisana kompleksnost tokom vremena. Svetlo-sive pune linije predstavljaju individualne eksperimente uz omogućenu prirodnu selekciju, a isprekidane uz ukinutu. Pune linije istog tipa pokazuju proseke 10 individualnih simulacija u oba slučaja. Svetlo-siva tačkasta linija na dnu grafika pokazuje zavisni studentov t-test u odnosu na horizontalnu kritičnu liniju (označenu kao T\*) za  $p > 0,05$  [preuzeto iz Yaeger *et al*, 2011].

Na nivou vrsta, prema ovoj studiji, trend kompleksnosti je čisto aktivan, ali je ostavljeno otvoreno pitanje da li takva situacija i na drugim nivoima. Studija započinje iznošenjem argumentacije da je nesumnjivo da postoji trend povećanja biološke kompleksnosti tokom geološke istorije, nezavisno od toga da li se ona merila veličinom organizama, raznovršnošću tipova ćelija, morfologijom ili mrežom ekoloških interakcija, uz pozivanje na više referenci, ali i glavnih primedbi na ovakav stav, pre svega od strane Mejnarda Smira, Roupa i Gulda (videti potpoglavlje 3.1.1). Simulaciona platforma koju su razvili i koristili (Polyworld) omogućavala im je da, po potrebi, uključuju i isključuju efekte prirodne selekcije. Interesan je inovativni način na koji su to ostvarili — naime, *Polyworld* omogućava premotavanje iste istorije digitalnog sveta proizvoljan broj puta. Autori su u simulacijama u kojima je postojala prirodna selekcija beležili događaje razmnožavanja i umiranja pojedinih organizama. Zatim su, u istim trenucima u novom premotavanju simulacije, ali bez efekta prirodne selekcije, stipulirali razmnožavanje i smrt organizama, ali ovog puta nasumično odabiranih iz opšte populacije

organizama, a ne odabranih prirodnom selekcijom, čineći populacionu statistiku veštački identičnom u ponovljenim premotavanjima.

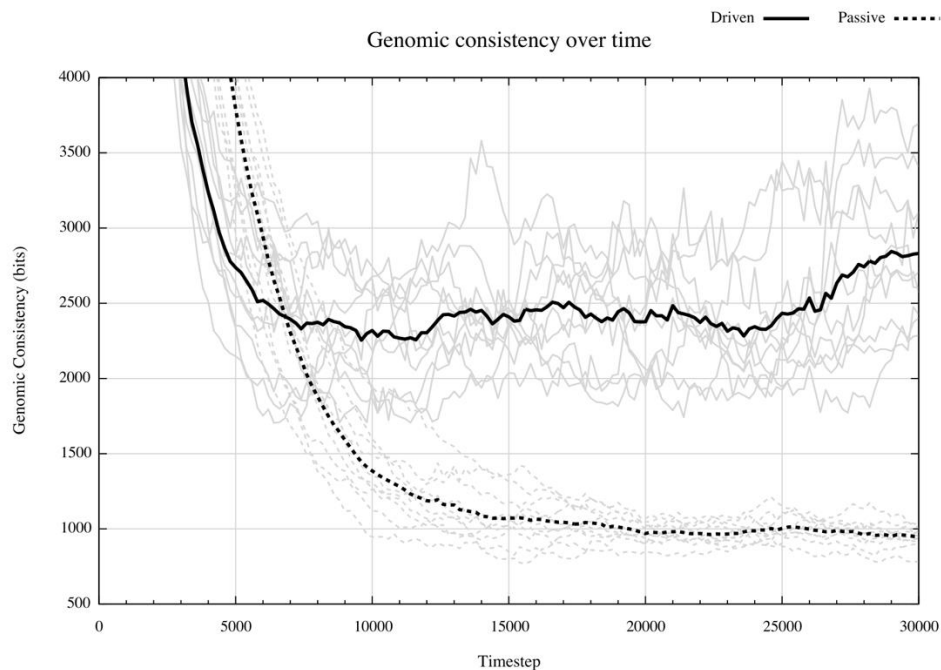
Na **Slici 18**, koja prikazuje porast kompleksnosti tokom simulacija sa i bez prirodne selekcije uočava se statistički značajan brži porast kompleksnosti u slučajevima kada je prisutna prirodna selekcija, u prvih 4000 koraka simulacije, što je interpretirano kao evolutivna težnja ka većoj kompleksnosti tokom prvog dela simulacija. Na intuitivnom planu, s obzirom da je početna populacija (engl. *seed population*) digitalnih organizama kreirana kao neprilagođena, ona mora ubrzano evoluirati da bi izbegla smrt, tako da se aktivno i selekcijom favorizovano povećanje njene kompleksnosti može shvatiti kao nužna adaptacija. U sledećoj fazi simulacije, između koraka 4000 i 7000, kompleksnost u eksperimentima sa uključenom prirodnom selekcijom dostiže plato, i u ovoj fazi kompleksnost nastala slučajnim lutanjem (driftom) u eksperimentima bez prirodne selekcije čak prevazilazi kompleksnost aktivno selektovanu prirodnom selekcijom. Objašnjenje je da je evolucija pronašla optimalna rešenja za dato okruženje, i ne postoji aktivan trend promene kompleksnosti. Zapravo, u ovoj fazi autori interpretiraju eksperimentalne opservacije kao selekciju ka stabilnosti, odnosno ne-menjanju optimalnih rešenja. Drugim rečima, prirodna selekcija suzbija slučajni genetički drift. Sve do kraja simulacija, eksperimenti bez prirodne selekcije zadržavaju u proseku veću kompleksnost od eksperimenata sa prirodnom selekcijom. Primetan je i plato u izvođenjima bez prirodne selekcije od 7000-og koraka do kraja simulacije, iako postavljen na nešto viši nivo, koji autori interpretiraju kao eksperimentalni artefakt koji sledi iz ograničenja arhitekture modela celog eksperimenta. Naime, s obzirom da se mutacije dešavaju promenom binarnih vrednosti bitova na svim lokacijama koje reprezentuju genetički kod, kada bitovi dostignu 50-50% raspodelu vrednost između 0 i 1, tada se kroz čistu slučajnost u svakom evolutivnom koraku poništavaju efekti njihovih daljih promena na ukupnu kompleksnost. Jasno je da višak kompleksnosti u izvođenjima bez prirodne selekcije ne predstavlja evolutivnu prednost.<sup>93</sup> Na kraju, autori se posebno fokusiraju na jedan deo izvođenja eksperimenata uz prisutnu prirodnu selekciju u kom kompleksnost u kasnijim fazama, iako ne i u proseku, dostiže nivo viđen u eksperimentima bez

---

<sup>93</sup> Nama je još interesantnije pitanje da li mogućnost mutacija koje ne predstavljaju evolutivnu prednost predstavlja evolutivnu prednost, odnosno da li je evolutivno poreklo ne-adaptacionizma zapravo adaptacionističko. Lako je zamisliti da u dve grupe organizama, prve kod kojih se prihvataju *samo* mutacije koje imaju neposredan efekat na preživljavanje, a sve ostale *odmah* eliminišu, i druge kod kojih je relaksiran kriterijum prihvatanja, kod kojih se provlače i mutacije koje nose latentnu, iako ne neposrednu korist. Ovi drugi na duži rok uspešnije rešavaju egzistencijalne izazove. Ideja bi implicirala i to da zapravo adaptacionizam uzrokuje ne-adaptacionizam, kroz mehanizam odloženog dejstva i strateške koristi.

prirodne selekcije. Oni smatraju da je u tim slučajevima došlo do osvajanja potpuno novih bihevioralnih obrazaca od strane organizama, odnosno konceptualno novih rešenja.

Pored analize kompleksnosti, Jeger i sar., (2011) sprovode i seriju eksperimenata primenjujući Adamijevu metriku kompleksnosti, samo što je interpretiraju kao genetičku konzistenciju. **Slika 19** prikazuje rezultate, kao i ranije, dobijene u dve grupe eksperimenata, sa i bez prirodne selekcije.



**Slika 19.** Genetička konzistencija kroz vreme. Svetlosne pune linije predstavljaju pojedinačne eksperimenta sa prirodnom selekcijom. Svetlo-sive tačkaste linije predstavljaju pojedinačne eksperimente uz ukinutu prirodnu selekciju. Pune linije pokazuju srednje vrednosti svih deset eksperimenata [preuzeto iz Yaeger *et al*, 2011].

Na **Slici 19** prikazan je trend genetičke konzistencije (kompleksnosti) u funkciji vremena, sa i bez prirodne selekcije, uz korišćenje Adamijeve metrike. Konzistencija (kompleksnost) na početku je visoka jer simulacija započinje uniformnom populacijom identičnih organizama. Ovde je razlika između eksperimenata sa i bez prirodne selekcije još upadljivija, jer eksperimenti bez prirodne selekcije dovode do pojave i akumulacije slučajnih mutacija, koje intenzivno umanjuju opštu genetičku konzistenciju. Slično kao i na **Slici 18**, u eksperimentima sa prirodnom selekcijom uočava se stabilizacija genetičke konzistencije, jer organizmi postižu i održavaju optimalna rešenja za zadato okruženje. Drugim rečima, postoje slučajevi u kojima je stabilizacija, a ne povećanje genetičke kompleksnosti, favorizovano prirodnom selekcijom.

Autori ne spore i postojanje slučajeva u kojima bi nepotrební višak kompleksnosti bio penalizovan, iako ga eksperimentalno ne demonstriraju (navode kao primer gubitak organa vida kod nekih pećinskih životinja). Ono što je poseban doprinos ove studije je isticanje važnosti skale na kojoj se analiza obavlja. Sukob između dva tabora, pristalica hipoteze pasivnog (npr. Gould (1996)) i aktivnog (npr. Dawkins (1997)) trenda rasta biološke kompleksnosti, po autorima ove studije je posledica odabira skale posmatranja. Dokins je izgleda nesumnjivo u pravu za slućajeve u kratkim intervalima posmatranja, i malog broja interagujućih vrsta. Za Gulda veruju da bi *mogao* biti u pravu za evoluciju posmatranu na dužim vremenskim intervalima, i na nivou celokupnog drveta života. Kratkotrajni aktivni trendovi na maloj skali, mogu biti suprotstavljeni, haotićno distribuirani i neusmereni na većoj skali. Na maloj skali kompleksnost se javlja kao alat preživljavanja, i spontano prihvata ili odbacuje u skladu sa ekonomskim pravilima – ono što je daje više evolutivnih benefita (u smislu povećavanja verovatnoće preživljavanja) od troškova koje pravi (u smislu energetske i materijalne troškova da se izgradi i održi kao svojstvo), biće zadržano pravilima prirodne selekcije.

#### **4. Razvoj simulatora trenda i drugih osobina biološke kompleksnosti**

U prethodnom delu rada, kroz opsežno ispitivanje postojeće literature i uz akcenat na novija, ili ključna dela u svakoj obrađivanoj temi, pokušali smo da doćaramo probleme analize kompleksnosti, njenog znaćenja, kontroverzi, aspekata i distinkcije fizićko – biološko u konstituisanju pojma kompleksnosti, kao i pogled na kompleksnost iz nekoliko naućnih i filozofskih pravaca. Takođe, detaljnije smo prikazali osobine i probleme vezane specifićno za pojam biološke kompleksnosti, pre svega kontroverzan problem postojanja i, uslovno, karaktera njenog trenda, uzroke i osobine biološke kompleksnosti, odnos prema pojmu simetrije i modularnosti morfološke građe živih bića. Detaljno smo prikazali neodarvinistićki pogled na kompleksnost, i alternativan, neutralistićki pogled. Revijalni deo rada završili smo prikazivanjem relativno nove grupe istraživaćkih napora koja se u suštini svode na digitalne simulacije evolucije i osobina biološke kompleksnosti. Ovim smo kreirali kontekst za deo koji sledi. U njemu ćemo prikazati rezultate *ab initio* razvijenih, sopstvenih simulatora pojedinih aspekata biološke kompleksnosti, sa ciljem da se bar neka od pitanja i kontroverzi vezanih za ovu temu dodatno osvetli. Prvi razvijeni simulator je u suštini reprodukcija Guldove krive pasivnog trenda kompleksnosti kroz „hod pijanca“. Drugi razvijeni simulator je korišćen za

ispitivanje efekata istoričnosti i stohastičnosti na pojavu, zadržavanje i narušavanje simetrije živih organizama korišćenjem simulacionog koncepta zvanog „Game of Life“ (GoL). Treći simulator je razvijen za više namena na nivou individualnih organizama — od alata koji bi trebalo da osvetli pitanje kauzaliteta prirodna selekcije – biološka kompleksnost, do ispitivanja zasnovanosti pojma evolutivnog atraktora i potencijalne kompatibilnosti ortogeneze i neodarvinizma. Četvrti simulator, AVIDA ED, je korišćen sa ciljem ispitivanja kriterijuma sticanja i gubitka svojstava u evolucionom procesu, u odnosu na veličinu nagrade i troška. Implicitno, zaključci iz AVIDA simulacije odnose se i na pitanja konvergencije, kao i okupiranja ekoloških niša na isti način u hipotetičkim ponavljanjima sveta, iz čega su izvučeni zaključci o odgovorima na neka Guldova pitanja. Svi softverski alati korišćeni u dole prikazanim simulacijama, osim AVIDA ED, razvijeni su u programskom jeziku Matlab (MATLAB and Statistics Toolbox Release 2019a, The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, United States) i javno su dostupni na adresi: <https://github.com/jtadic/evolution>.

#### **4.1. Reprodukcija Guldovih ideja — simulacija pasivnog trenda u evoluciji kompleksnosti**

U razvoju prvog i najjednostavnijeg simulatora, ideja nam je bila da reprodukujemo Guldove zaključke o karakteru pasivnog trenda, ali i da omogućimo simulaciju aktivnog trenda povećanja kompleksnosti, implementirajući logiku „hoda pijanca“ u prvom slučaju, i modifikujući tu logiku tako da sklonost „pijanca“ da hoda u pravcu udesno od zida postane nešto izraženija od hoda ulevo. Kompleksnost se, u principu, u simulacijama može tretirati: 1) direktno, kao jedna varijabla čija je numerička vrednost predmet direktne simulacije, ili 2) indirektno, simulacijom veštačkog ekosistema, pri čemu se kompleksnost računa u proizvoljnom trenutku uzimanjem u obzir nekih odabranih parametara ekosistema (u zavisnosti od usvojene metrike i definicije kompleksnosti, dakle kao neko izvedeno svojstvo sistema, najčešće statističko). U reprodukciji Guldovih ideja pasivnog porasta kompleksnosti odlučili smo se za prvi pristup. Ekosistem je zamišljen kao funkcionalni digitalni prostor u kom evoluiraju određeni broj genetičkih linija,  $N$ , paralelno, krećući se od početne pozicije kojoj smo imputirali vrednost 1. U  $M$  evolutivnih koraka, kompleksnost se menja tako što se u svakom koraku korišćenjem generatora pseudo-slučajnih brojeva uzorkuje jedan broj sa funkcije normalne raspodele verovatnoće čija je srednja vrednost postavljena na 0, i standardna devijacija na 0.05, i sabira sa vrednošću kompleksnosti iz prethodnog koraka. Odabir ovih konkretnih vrednosti je rezultat traženja optimalnog odnosa između imputirane početne

minimalne kompleksnosti i potrebe da se vidljive evolutivne promene dešavaju u relativno malom broju koraka simulacije. Centriranje funkcije raspodele verovatnoće na 0 je refleksija neutralističkog pogleda na evoluciju kompleksnosti u jednom izolovanom evolucionom koraku, a pomeranje centra raspodele udesno lako uvodi komponentu aktivnog trenda u ovako zamišljene simulacije. Pre simulacija, izolovali smo tri pitanja na koja bi simulacija mogla da odgovori, ili bar da ih dodatno osvetli:

1. Da li su statističke osobine krive pasivnog porasta kompleksnosti ispravno utvrđene u postojećoj literaturi? Naime, iako su ove ideje verovatno nastale racionalnim promišljanjem, Guld i ostali zagovornici pasivnog trenda su svoje ideje morali da testiraju kroz neku vrstu simulacije, bar u formi misaonog eksperimenta. **Slike 15 i 16a,b** prikazuju krive distribucije kompleksnosti po živim organizmima kroz vreme, uz pretpostavku aktivnog i pasivnog trenda kompleksnosti. Neka od svojstava ovih krivih, kao npr. konstantnost modalne vrednosti, pojavljuju se u interpretacijama i Gulda i Kerola, i još nekih analitičara (npr. Wagner, 1996). Guld je eksplicitan, i kaže da se modalna vrednost kompleksnosti ne povećava kroz vreme. Kerol (**Slika 16a,b**), adaptirajući sliku preuzetu od Vagnera, tvrdi isto to. Za razliku od nje, srednja vrednost kompleksnosti i varijansa bi rasle. U sopstvenim simulacijama smo preispitali ove zaključke, uz donekle iznenađujuća saznanja. Ono što je ostalo nedorečeno i kod Gulda i kod Kerola, a moglo bi da ima uticaj na izvedene zaključke, je pitanje kako su Guld i Kerol tretirali samu kompleksnost. Nesumnjivo je da je kompleksnost tretirana kao kvantitet, a ne kvalitet, jer je bila predmet numeričke simulacije i prikazana je grafički, međutim, od izbora da li je to diskretna ili kontinualna numerička varijabla zavise zaključci analize. Naime, kod diskretnih varijabli modalna vrednost se računa kao najčešće pojavljivana vrednost, a kod kontinualnih varijabli računa se traženjem pozicije maksimuma (vrha, engl. *peak*) na empirijskoj funkciji raspodele verovatnoće kompleksnosti po organizmima, što je nešto komplikovaniji zadatak.

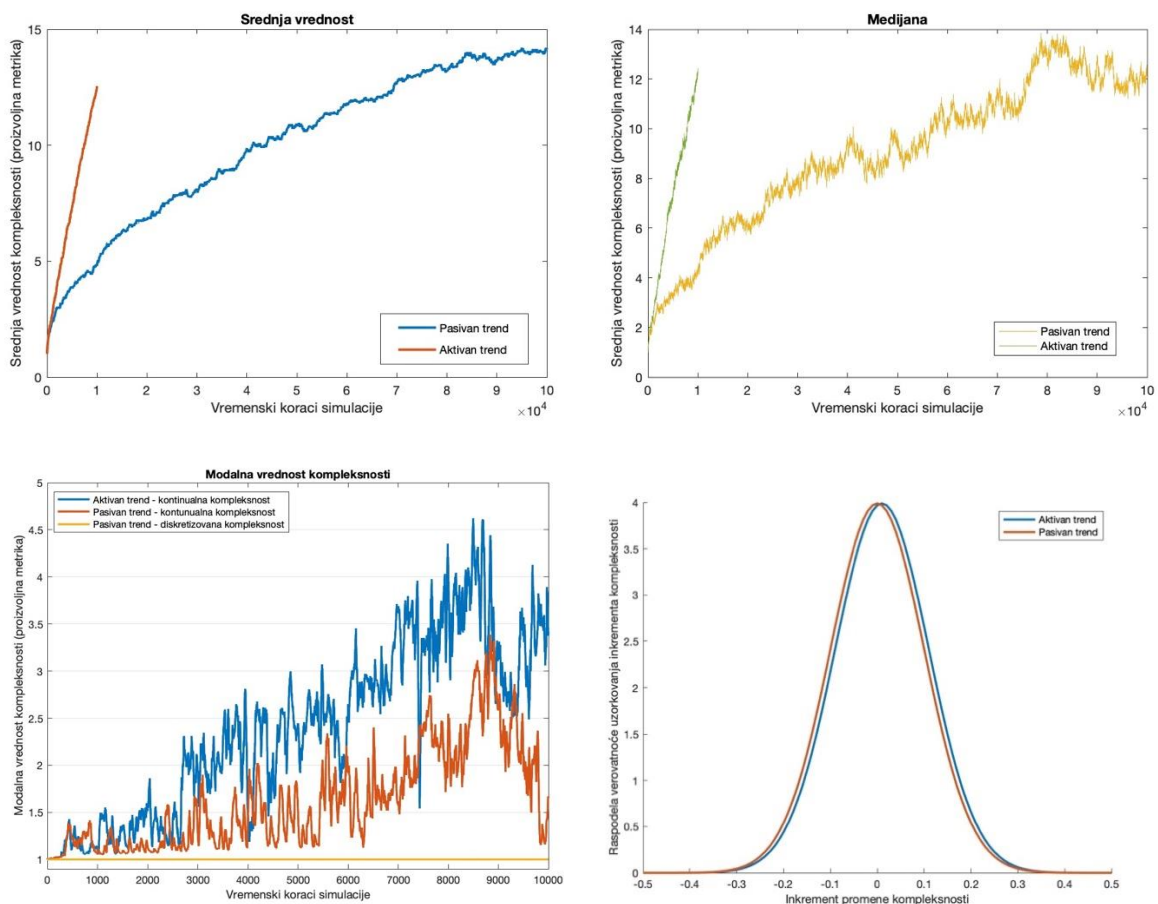
2. Da li se „pijanac“ odbija od „zida“, ili tamo umire? Da li je taj „zid“ zapravo metaforično preciznije predstaviti kao „električnu ogradu“ koja izaziva smrtni ishod? Kako to utiče na teorijsku krivu rasta kompleksnosti kod pasivnog trenda? „Hod pijanca“ predstavlja zgodnu metaforu, koju je Guld iskoristio da opiše način promene kompleksnosti tokom evolucije (Gould, 1996). On podrazumeva da se kompleksnost, poput pijanca iz pomenute metafore, kreće duž zida koji predstavlja minimalnu kompleksnost neophodnu za održavanje života. Sa desne strane, suprotno od zida, nalazi se rov, koji podrazumeva povećanje kompleksnosti.

Hodajući nasumice levo-desno, pijanac se od zida odbija, a u rov upada pre ili kasnije gonjen čistom slučajnošću. Metafora „hoda pijanca“ sadrži dovoljno informacija da bi mogla da se matematički reprodukuje, odnosno modelira. Već i na osnovu kvalitativnih opisa iz Guldove metafore, moglo bi se postaviti pitanje da li je deo metafore u kom se pijanac odbija od zid koji predstavlja minimalnu kompleksnost zapravo konceptualno pogrešan, odnosno ne predstavlja realističnu metaforu stvarnih evolutivnih dešavanja. Naime, u realnom scenariju, najjednostavniji organizmi koji su blizu zida, svakom mutacijom koja ih dalje pojednostavljuje umiru, padajući u termodinamičku smrt. Dodir sa zidom znači momentalan prekid „hoda“ (dalje evolucije) za sve genetičke linije koje se mutacijama simplifikuju do te mere da ne mogu više da se samo-održe kao živa bića. Zato bi umesto „levog zida“ metafora možda trebalo da se oslanja na „levu smrtonosnu električnu ogradu“. Kao jedan deo ciljeva simulacije postavili smo utvrđivanje eventualnih razlika između statističkih osobina krive pasivnog trenda u ta dva scenarija, prvog u kom je Guldov zid zapravo zid, i drugog u kom je Guldov zid električna ogradna koja zaustavlja dalju evoluciju kompleksnosti te genetičke linije.

3. Da li je „rame“ na krivoj kompleksnosti pri samom početku evolucije veštački stvoreno izborom parametara vizualizacije, i deo marginalne i slučajne razlike u interpretativnim naporima Gulda i Kerola, ili ima fundamentalnije poreklo? Odakle potiče razlika između Gulda i Kerola? Kako se to odnosi na argument Dembskog? U Guldovom originalnom prikazu, **Slika 15**, distribucija kompleksnosti po organizmima pokazuje maksimum blizu zida minimalne neophodne kompleksnosti, dok u Kerolovom prikazu ovog pika nema — kompleksnost opada monotono, **Slika 16a**. Guld je naravno, pretpostavio da su organizmi nastali ne baš na samom minimumu, nego *blizu* minimuma kompleksnosti, i ta razlika predstavlja rastojanje od maksimuma do zida, i održava se tokom pasivne evolucije kompleksnosti kroz pravilo nepromenjive modalne vrednosti. Problem male verovatnoće slučajnog nastanka života je već sam po sebi suština kritika teze o spontanoj genezi života (setimo se argumenta Dembskog, potpoglavlje 2.3.2), i svako udaljavanje početnog stanja od zida u pravcu povećane inicijalne kompleksnosti čini ga još težim, odnosno nastanak života manje verovatnim. Zatim, s obzirom da kriva raspodele verovatnoće kompleksnosti po organizmima zapravo predstavlja normalizovan histogram, postavlja se pitanje nije li ovaj pik artefakt nastao drugačijim grupisanjem kompleksnosti u različitim simulacijama radi kreiranja histograma, dakle nije intrinzično svojstvo samih podataka, već naknadne obrade. Ova i slična pitanja smo takođe obradili u simulaciji.

#### 4.1.1. Rezultati simulacije statističkih osobina krive pasivnog i aktivnog temporalnog porasta kompleksnosti i analiza uzroka ramena

Fokusirajući se na tri pitanja specificirana u sekciji iznad, izveli smo dva seta simulacionih eksperimenata, jedan simulirajući neposredno pasivnu evoluciju kompleksnosti u 1000 evolucionih koraka ( $M$ ), paralelno na 1000 genetičkih linija ( $N$ ), i drugi gde smo centar krive raspodele verovatnoće sa koje vršimo uzorkovanje promena kompleksnosti između dva vremenska koraka pomerili udesno za 0.005, imputirajući nešto veću verovatnoću rastu kompleksnosti. U oba seta simulacionih eksperimenata pratili smo promenu medijane, i srednje i modalne vrednosti u svakom koraku simulacije, za svih  $N$  genetičkih linija. Eksperimenti sa različitim brojem evolutivnih koraka su ponavljani više puta. **Slika 20a** prikazuje temporalne promene srednje vrednosti kompleksnosti u slučaju aktivnog i pasivnog trenda za sve genetičke linije, **Slika 20b** pokazuje ekvivalentnu promenu medijane, a **Slika 20c** promene vrednosti modusa iz jedne od serija eksperimenata.

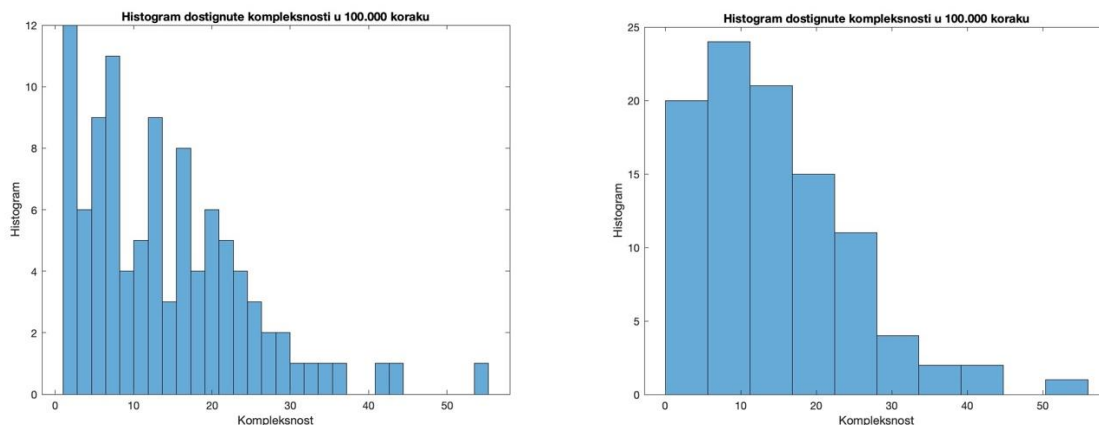


kompleksnosti, prikazana za srednju vrednost u u pokretnom prozoru širine 50 koraka, d) raspodela verovatnoće vrednosti inkrementa promene kompleksnosti tokom simulacije, u scenarijima aktivnog i pasivnog trenda. Na slikama a) i b) aktivan trend je prikazan samo za prvih 10.000 koraka u simulacijama koje su trajale 100.000 koraka, jer bi prikazivanje rezultata cele simulacije nepovoljno uticalo na skaliranje Y ose, zbog velikih vrednosti.

Oblik ovih krivih ne iznenađuje, oblici porasta medijane i srednje vrednosti kompleksnosti slični su, očekivani, i slede iz originalnih Guldovih i Kerolovih interpretacija pasivnog (i aktivnog) trenda razvoja biološke kompleksnosti. Aktivan trend, naravno, pokazuje veću brzinu prirasta kompleksnosti<sup>94</sup>, a ubrzanje prirasta u praktičnom smislu zavisi od toga koliko je kriva raspodele verovatnoće inkrementa promene kompleksnosti između dva evolucionarna koraka pomešana udesno — koliko je jak trend. Na **Slici 20d** prikazana je raspodela verovatnoće inkrementa promene kompleksnosti uzorkovanog tokom simulacije u svakom simulacionom koraku. Simulacija je počela da donosi iznenađenja prilikom analize vrednosti modusa, i otvorila pitanja adekvatnosti Guldove metafore „hoda pijanca“ tokom pasivnog evolucionog razvoja kompleksnosti, kao i pitanje ispravne interpretacije prirode kompleksnosti i odabira hiperparametara tokom procesa vizualizacije rezultata impliciranih pasivnim trendom razvoja kompleksnosti. Naime, kompleksnost (kao numerička varijabla) može biti tretirana ili kao diskretna ili kao kontinualna varijabla. Problem nastaje kod računanja vrednosti modusa, jer kod diskretnih varijabli vrednost modusa odgovara najčešće pojavljivanoj vrednosti, koja kao što pokazuje **Slika 20c**, i u našim simulacijama ostaje nepromenjena tokom simulacije pasivnog trenda, zadržavajući se na početnom nivou (koje je imputiran kao 1). Međutim, ne postoji, po našem mišljenju, nijedan validan razlog da kompleksnost tretiramo kao diskretnu numeričku varijablu, jer bez obzira koju metriku ili definiciju koristili kompleksnost bi trebalo da bude tretirana kao kontinualna varijabla, a u tom slučaju menja se i usložnjava tehnika računanja vrednosti modusa, a što dovodi i do značajno različitih rezultata i zaključaka.

---

<sup>94</sup> Uz odabir parametara simulacije kao u našim eksperimentima, srednja vrednost i medijana u aktivnom trendu dostižu slične vrednosti kao u pasivnom trendu za deset puta manje evolucionih koraka.



**Slika 21.** Histogrami dostignute kompleksnosti u simulacijama pasivnog trenda a) sa 30 stubaca, i b) sa 10 stubaca.

Kod kontinualnih varijabli, vrednost modusa se uobičajeno računa kao pozicija najviše tačke na funkciji raspodele verovatnoće vrednosti posmatrane varijable. U praktičnom izvođenju, traži se maksimum na normalizovanom histogramu. Da bi se ilustrovali problemi vezani za ovaj pristup, na **Slici 21**. prikazali smo histograme potpuno istih podataka (dostignutu vrednost kompleksnosti tokom simulacije pasivnog trenda, uz samo jednu razliku — odabir broja stubaca u histogramu, u prvom slučaju 30, a u drugom 10.

**Slika 21b** neodoljivo podseća na Guldovu krivu distribucije kompleksnosti po organizmima, sa vrednošću modusa nešto pomerenom udesno od „levog zida“, sa tim što za to pomeranje ne postoje fundamentalni razlozi — do njega smo došli odabirom pogodnog broja grupa prilikom tretmana kompleksnosti kao kontinualne varijable i računanja pozicije maksimuma distribucije vrednosti njene verovatnoće. Iz istog seta eksperimentalnih podataka, moguće je izvesti i sasvim drugi zaključak prostom promenom broja stubaca na histogramu, što je prikazano na **Slici 21a**.

Iz rezultata slede dva zaključka, prvo, i Guld i Kerol su prećutno usvojili pretpostavku diskretne numeričke prirode kompleksnosti, i izveli zaključak da se vrednost modusa raspodele kompleksnosti *ne menja* tokom evolucije ukoliko je trend pasivan.<sup>95</sup> Po našem mišljenju, ova pretpostavka ne stoji, iz čega direktno sledi zaključak *da se nestacionarnost vrednost modusa ne može uzimati kao indikator aktivnog trenda u evoluciji kompleksnosti*. Zaključak direktno protivreči Guldovim i Kerolovim nalazima. Vrednost modusa kompleksnosti i u slučaju

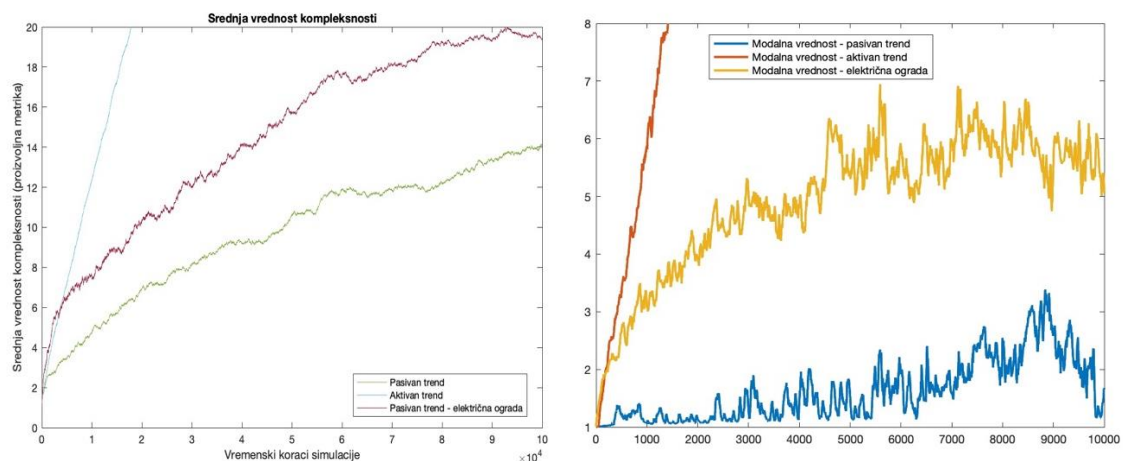
<sup>95</sup> Zaključak o pretpostavci diskretne prirode je zapravo naš pokušaj odbrane ugleda Gulda i Kerola, jer, alternativno, njihov zaključak je jednostavno pogrešan.

pasivnog, i u slučaju aktivnog trenda, *raste* ukoliko se kompleksnost ispravno tretira kao kontinualna varijabla. Drugi zaključak je da je mogući uzrok postojanja blago pomećenog maksimuma kompleksnosti u odnosu na „levi zid“ kod Gulda, naročito pre 30 godina kada su korišćeni slabiji računari, u slučajnom izboru odgovarajućeg broja stubaca na histogramu.

#### **4.1.2. Da li je Guldov zid zapravo električna ograda, i da li izmena heurističke metafore menja zaključke?**

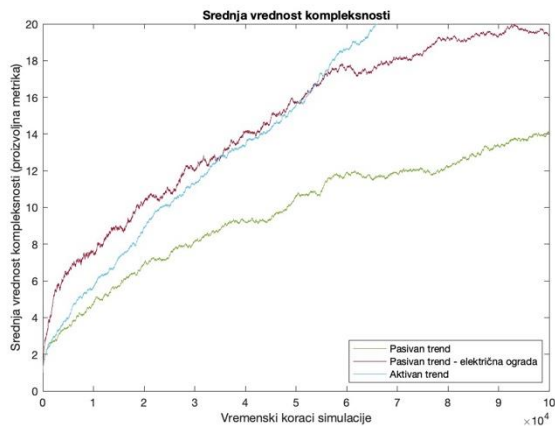
Druga tema koju obrađujemo u ovom odeljku ima direktnu epistemološku dimenziju. Naime, Guld je iskoristio i detaljno opisao „hod pijanca“ između rova i zida kao model pasivne evolucije kompleksnosti (Gould, 1996). Problem je u tome što ova metafora, pored činjenice da predstavlja vrlo neuobičajen i upečatljiv heuristički model, nosi sa sobom i dodatan sadržaj koji se nehotice, poput slepog putnika, uvukao u zaključke analize. Naime, pijanac se od zida odbija, i nastavlja dalje kretanje, dok ne upadne u rov. Da li je ova metafora uopšte realističan prikaz ishoda preterane simplifikacije tokom evolucionog procesa? Pijanac se u stvarnom životu obično ne dezintegriše, odnosno ne umire pri dodiru sa zidom. Naše mišljenje je da je „preživljavanje pijanca“ — koje je posledice izbora metafore — Guld prošvercovao u zaključke analize, zapravo nepotrebni i neopravdani semantički višak, i potencijalno degradira rezultate simulacije. U realnom scenariju, mutacija koja organizme gura ispod granice neophodnog minimuma za samo-održanje života, zapravo ima smrtni ishod. To znači da se sve one genetičke linije koje se slučajnim hodom dovedu u kontakt sa zidom tamo ne resetuju, nastavljajući put dalje — ovog puta iz polazne tačke minimalne kompleksnosti koja odgovara zidu — one zapravo ne nastavljaju put uopšte, što bi u teoriji moglo da ima uticaj na statistički ishod višestrukog ponavljanja simulacija, i karakterizaciju temporalnosti evolutivnog procesa. Ako želimo da i dalje insistiramo na metafori pijanca, možda bismo zid mogli da tretiramo kao električnu ogradu sa visokim naponom. Treba napomenuti da se „hod pijanca“ još zove i „slučajni hod“ (engl. *random walk*) i naše mišljenje je da je Guld trebalo da se drži drugog termina jer, čini se, on ima manji kolateralno štetni sadržaj od „hoda pijanca“. Da bismo proverili tezu da bi realističnije tretiranje zida kao električne ograde moglo imati posledice po zaključke simulacije sprovedi smo seriju dodatnih simulacija, u kojima smo sve one genetičke linije koje dodirnu zid momentalno uklanjali iz dalje simulacije, kao i iz obrade rezultata na kraju. Prvi problem uočen tokom ovog pokušaja simulacije je da doslovce svaka genetička linija, bez obzira na inicijalni broj linija čiji smo porast kompleksnosti simulirali, pre ili kasnije završi na zidu, tako da u ovoj simulaciji izvedenoj na izvorni način nema preživelih u opsegu

od 100–100.000 genetičkih linija, i od 100–1000 evolucionih koraka u više ponavljanja eksperimenta. Opservacija je u skladu sa intuitivnim zapažanjem da će, ukoliko je vreme neograničeno, pre ili kasnije slučajnim hodom svaka genetička linija doći do zida i nestati. Zapažanje se u načelu odnosi i na živa bića ukoliko je trend kompleksnosti pasivan, i ukoliko modifikovana arhitektura eksperimenta predstavlja realističniji prikaz stvarnog stanja stvari. Druga pretpostavka je po našem mišljenju upitna, jer se genetičke linije koje ne umru ne samo prenesu u sledeći evolucionu korak, već se i razmnože, dakle mogla bi da postoji tendencija da je veća verovatnoća i preživljavanja i razmnožavanja, što je organizam udaljeniji od zida, što unosi novu dinamičku komponentu u simulirani evolucionu proces. Radi postizanja novog cilja simulacije, izmenili smo dva detalja: 1) nakon svakog koraka simulacije uklanjane su genetičke linije koje su pokazivale kompleksnost manju od neophodnog minimuma, i 2) utvrđeni broj uklonjenih genetičkih linija iskorišćen je za dupliranje preživelih linija, slučajnim uzorkovanjem sa ponavljanjem, pri čemu su novonastale linije nastavljale dalje svoju evoluciju nezavisno od matičnih linija. Ceo koncept na neki način predstavlja refleksiju logike razmnožavanja kod živih organizama, a održanje broja linija reflektuje koncept saturacije (zasićenja) ekosistema. **Slika 22.** prikazuje rezultate ovakvog pristupa uz istovremeno prikazivanje prethodnih rezultata dobijenih simulacijama „hoda pijanca“ dosledno sprovedenih prema Guldovom modelu. U ovom setu eksperimenata vrednost modusa je računata uz tretman kompleksnosti kao kontinualne varijable. Interesantno je da ove izmene nisu promenile vremenski profil vrednosti modusa, ali jesu profil srednje vrednosti.



**Slika 22.** a) Kriva trenda razvoja srednje vrednosti simulirane kompleksnosti u pasivnom i aktivnom scenariju, i uz pretpostavku električne ograde umesto zida, b) vrednost modusa kompleksnosti tokom simulacije u pasivnom i aktivnom scenariju, i uz pretpostavku električne ograde umesto zida.

Rezultati simulacije pokazuju da efekat električne ograde ispoljava neke razlike u odnosu na čisto pasivan trend, što se vidi na primeru i srednje vrednosti i vrednosti modusa kompleksnosti koja se nalazi između aktivnog i pasivnog trenda. S obzirom da je intenzitet aktivnog trenda određen proizvoljno, lako je zamisliti scenario u kom je on oslabljen tačno toliko da se kriva temporalnog razvoja srednje vrednosti kompleksnosti uz aktivan trend približi, do nerazlučivosti, krivoj dobijenoj uz efekat električne ograde. Drugim rečima, postojanje zida – električne ograde je u izvesnoj meri ekvivalentno aktivnom trendu, iako je u



**Slika 23.** Kriva trenda razvoja srednje vrednosti simulirane kompleksnosti u pasivnom i aktivnom scenariju, i uz pretpostavku električne ograde umesto zida (izmenjeni parametri)

simulacijama pasivan mehanizam zadržan u potpunosti, odnosno inkrementi kompleksnosti različitog predznaka se uzorkuju sa podjednakom verovatnoćom. Sam zid, bilo da je zaista „zid“ ili „električna ograda“ onemogućava pasivan trend kompleksnosti u pravom smislu. Ukoliko su naša zapažanja tačna, Guldova pretpostavka pasivnog trenda u prisustvu zida – električne ograde je zapravo *condradictio in adjecto*, jer postojanje ograde automatski povlači nemogućnost postojanja pasivnog trenda na način na koji se on obično interpretira (kao nepromenljiva vrednost modusa). Da bismo proverili ovaj zaključak, manipulirali smo stepen pomenosti udesno krive raspodele verovatnoće sa koje se inkrementi kompleksnosti uzorkuju tokom evolucije, odnosno intenzitet aktivnosti trenda, dok nismo dobili relativno dobro poklapanje krive aktivnog trenda i pasivnog trenda uz pretpostavku električne ograde umesto zida (**Slika 23**). Na rezultatima simulacija se vidi da ni srednja vrednost ni vrednost modusa nisu ono što suštinski razlikuje aktivan od pasivnog trenda, već njen opšti oblik. U slučaju efekta električne ograde, na početku simulacije porast kompleksnosti je izrazit, podsećajući na veoma intenzivan aktivni trend, dok u kasnijim fazama simulacije oblik više podseća na pasivan trend. Na neki način ova opservacija i nije iznenađujuća, s obzirom da je efekat električne ograde utoliko veći ukoliko je genetička linija bliža ogradi<sup>96</sup>, tako da se tokom simulacije prosečnim udaljavanjem genetičkih linija od ograde

<sup>96</sup> U smislu da će se ispoljiti u fiksnom vremenskom intervalu koji sledi, za svaku genetičku liniju, kroz anihilaciju na ogradi.

njen efekat smanjuje. Brzina ovog smanjivanja zavisi od izbora inkrementa kompleksnosti, odnosno standardne devijacije na krivoj raspodele verovatnoće vrednosti ovog inkrementa koji se uzorkuju, ali generalizovani zaključci ostaju. U praktičnom smislu, ukoliko bismo posmatranjem fosilnih ostataka ili na neki drugi način i uspeli da rekonstruišemo oblik krive temporalnog razvoja kompleksnosti tokom evolucije živog sveta, oblik ove krive teško bi se mogao smatrati konkluzivnim indikatorom prirode trenda kompleksnosti, jer bi pitanje da li je u pitanju istinski aktivan, ili samo prividno aktivan trend koji je u suštini efekat zida – ograde, ostalo otvoreno. Na samom početku, kriva uz efekat ograde pokazuje osobine jakog trenda, u srednjim fazama su razlike između aktivnog i pasivnog trenda uz efekat ograde minimalne, a tek u kasnijim fazama oblik podseća na pasivan trend. Šta bi u realnim okolnostima predstavljale „rane“, „srednje“ i „kasne“ faze je vrlo komplikovano pitanje. Treba naglasiti da još uopšte nije ni razmotreno pitanje šta je zapravo pokretač kompleksnosti, prirodna selekcija ili nešto drugo, i da iz zaključaka sledi da je ono pomalo i bespredmetno, jer mi u praktičnom smislu ne možemo biti sigurni šta je efekat zida, a šta efekat aktivnog pokretača razvoja kompleksnosti naročito s obzirom na manjkavosti fosilnih ostataka i time uzrokovanu neodređenost koja se superponira na probleme iznete u ovoj sekciji.

#### **4.2. Poreklo simetrije i asimetrije u kontekstu biološke evolucije i ispitivanje efekata razaranja Markovljevih lanaca na njene ishode**

U potpoglavlju 1.6 pokušali smo da istaknemo važnost analize simetrije kao teme u kontekstu biološke evolucije, naročito njenog narušavanja kao primera emergencije i samim tim jednog od uzroka kompleksnosti. Narušenost simetrije nije prisutna samo u biologiji, već i u hemiji i nuklearnoj fizici, uključujući i hemiju koja je sastavni deo metaboličkih reaktivnih puteva u biološkim organizmima. Verovatno je najpoznatiji primer asimetrija u zastupljenosti *L*- i *D*-aminokiselina u živim bićima, dakle samo jednog od dva člana hiralnog para ovih molekula.<sup>97</sup> Ukoliko bi u prirodi vladao čist determinizam na svim nivoima, nemoguće bi bilo generisati asimetriju iz simetričnog početnog stanja. Međutim, pitanje da li je moguće generisati

---

<sup>97</sup> Asimetrija između *L* i *D*-aminokiselina u biologiji odnosi se na hiralnu prirodu ovih molekula. Hiralnost je svojstvo molekula koji su slike jedan drugog, slično kao što su leva i desna ruka predmet i lik u ogledalu, ali se ne mogu preklopiti, odnosno nisu podudarne.

U živim organizmima, u proteinima koji su sačinjeni od aminokiselina, velika većina aminokiselina ima *L*-konfiguraciju. To znači da je aminogrupa (-NH<sub>2</sub>) s leve strane atoma ugljenika u Fišerovim projekcionim formulama, koji je takođe vezan za vodonik (gore) i karboksilnu grupu (-COOH, desno).

*D*-aminokiseline, sa aminogrupom s desne strane ugljenikovog atoma u Fišerovim projekcionim formulama, manje su uobičajene u biološkim sistemima. I dok se neke *D*-aminokiseline nalaze u određenim peptidima i ćelijskim zidovima bakterija, one se obično ne koriste na isti način kao *L*-aminokiseline u izgradnji proteina. Asimetrija između *L*- i *D*-aminokiselina je osnovni aspekt molekulske arhitekture živih organizama.

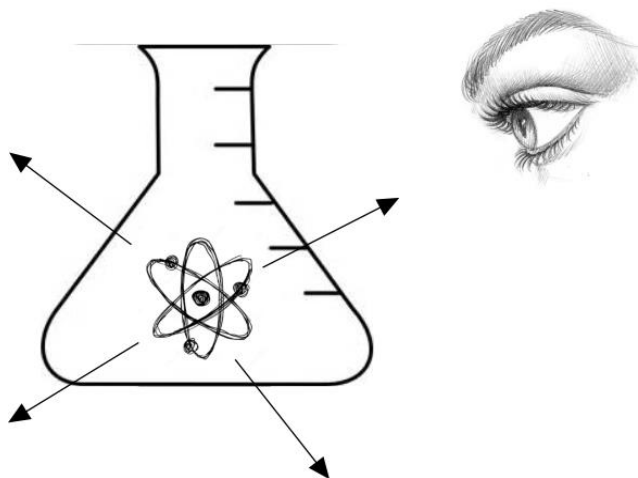
simetriju iz asimetričnog početnog stanja sistema čini se podjednako važnim u biologiji, jer joj je prethodila predbiološka (hemijska) evolucija u kojoj se već pojavili neki asimetrični elementi, prvi živi organizmi možda i nisu bili simetrični, ali je svejedno većina živog sveta danas simetrična. Kako? Iako je analiza kvantnih osnova asimetrije izvan konteksta ovog rada, podsećamo na Hajzenbergov princip neodređenosti koji na kvantnom nivou uvodi čistu slučajnost, nasuprot determinizmu na makro nivou. Po našem mišljenju, upravo ova slučajnost je otvorila put asimetriji iz simetričnih početnih stanja. Možda bi trivijalna metaforična predstava kako bi generisanje asimetrije moglo da funkcioniše bio primer dva kockara koji bacaju kocke, a pobeđuje onaj koji nakon određenog fiksnog broja bacanja ima veći zbir ishoda. Iako oba kockara imaju savršene kocke, jedan će najverovatnije pobediti. U čistom makroskopskom determinizmu, uz eliminisanje efekata njihovih situacionih i kontekstualnih razlika, kockari bi uvek bacili isti broj, odnosno nijedan ne bi pobedio. U realnom svetu, zbog sitnih varijacija u materijalima kocke, neravnina površina na koju se bacaju, početnih stanja i drugih razlika vezanih za kontekstualne i istorijske elemente dva kockara, jedan kockar bi pobedio, iako ne zbog indeterminizma, već zbog determinizma izvan opsega naše kontrole, koji nam se javlja kao haotičan i tretiramo ga probabilistički, nesposobni da obuhvatimo svu šarolikost faktora koji utiču na ishod pojedinačnih bacanja (setimo se Ešbijeovog zakona iz potpoglavlja 1.5; ponašamo se kao agent u haotičnom okruženju koji pokušava da generiše odgovore i sistematizuje stimulse, i za sada smo usvojili probabilistički model obrade stimulusa).<sup>98</sup> Možda bi na ovom mestu trebalo podsetiti i na čuvenu Gorgijinu izjavu da je „*verovatnoća pojam koji je čovek izmislilo da bi ulepšao svoju bespomoćnost*“ (Šešić, 1963). U mikro-svetu na kvantnom nivou, jedan kockar bi pobedio iz fundamentalnih, čisto indeterminističkih razlika. Na mikro-nivou, Ajnštajnova izjava da se dragi „Bog ne kocka“ izgleda ne samo da ne važi, već se dragi Bog kocka sa sve elementima zavisnosti.<sup>99</sup> Naše mišljenje je da je moguća direktna, neposredna propagacija indeterminizma na mikro-nivou u makro-svet, i da je ona verovatno odigrala ključnu ulogu u razvoju asimetričnih makroskopskih pojava, a kao što ćemo kasnije videti u simulacijama, i razaranju prethodno stvorenih

---

<sup>98</sup> Ukoliko tokom procesa bacanja kvantni efekti negde neposredno ne probijaju u makrosvet, što bi zahtevalo dublju analizu i izašlo iz tematskih okvira ovog rada.

<sup>99</sup> Naravno, postoje i hipoteze da je kvantni indeterminizam posledica determinizma na još dubljem nivou, da na kvantnom nivou i dalje „ulepšavamo svoju bespomoćnost“ ne razumevajući determinističke uzroke pojave stohastičnosti na kvantnom nivou, na primer prema pretpostavkama Dejvida Boma. Za sada, ove hipoteze nemaju status vladajućih paradigmi i više se javljaju kao polu-ezoterične ekskurzije u spekulativni svet mogućnosti.

simetričnih formi. Indeterminizam se ovde javlja kao sredstvo tranzicije simetrično–asimetrično u oba smera.



**Slika 24.** Misaoni eksperiment u kom se neposredno posmatra događanje na mikro nivou, i čiji su rezultati posledica kvantnih, a ne mehaničkih zakona.

Da bismo demonstrirali jedan od načina ove propagacije, kreirali smo misaoni eksperiment, razvijen po ugledu na jedan deo čuvenog Šredingerovog misaonog eksperimenta sa mačkom, ali upotrebljenog za druge svrhe, koji pokazuje da neodređenost na mikro nivou može da ima direktne kauzalne efekte na makronivou, čak da može i da se neposredno posmatra (**Slika 24**).

U ovom misaonom eksperimentu foto-ekscitovani atom nalazi se u providnoj posudi. Prema kvantnim zakonima, verovatnoća da atom emituje višak energije kao svetlosni kvant u određenom pravcu je ista u svim pravcima, dakle ona je posledica *čiste slučajnosti* i ne zavisi od stanja sveta u prethodnom, ili bilo kom drugom trenutku vremena. Ljudsko oko sposobno je da detektuje prijem jednog jedinog fotona. Verovatnoća da emitovani foton upadne u oko posmatrača jednaka je odnosu površina zenica i sfere poluprečnika jednakog udaljenosti oka od atoma. Zamislimo sada da posmatrač ima zadatak da izvrši neku radnju, da uzvikne ili pritisne taster ukoliko uoči foton. Tako proizlazi da je jedna potencijalno kauzalno efektna radnja na makro-nivou, kakav je uzvik ili pritisak tastera, neposredno vezana za čisto slučajni događaj na mikro nivou. U takvoj situaciji *nemoguće je predvideti ishod na makro-nivou iz prethodnih stanja sveta ni na mikro, ni na makro-nivou*. Propagacija indeterminizma je direktna i neposredna.

U simulacijama koje slede, ispitaćemo efekte istoričnosti i slučajnosti na pojavu i razaranje simetrije živih bića, korišćenjem „Igre života“ (engl. *Game of Life*) kao simulacionog okvira.

#### 4.2.1. Uvod u ćelijske automate i osnovne pojmove Igre života

Ćelijski automati, poput „Igre života“ (IG), su deterministički dinamički sistemi koji mogu da reflektuju vrlo složene nelinearne fenomene. „Igra života“ je sistem baziran na poljima (ćelijama), slično šahovskoj tabli, u kome su vreme i prostor diskretizovani, i svako polje istovremeno sa ostalim poljima prolazi kroz sekvencijalnu evolutivnu tranziciju korak-po-korak koja zavisi od njenog trenutnog stanja i skupa determinističkih pravila koja uzimaju u obzir stanje na 8 susednih polja (koja se još nazivaju i Murovo okruženje). Ćelijski automati u načelu obezbeđuju veštačke univerzume u kojima možemo kreirati i proučavati različite fenomene, od simulacije reproduktivnog ponašanja teoretskih organizama i evolucije njihovih društava, do „molekularne logike žive materije“ (Langton, 1986). Džon Konvej, matematičar, konstruisao je evolutivna pravila „Igre života“ po ugledu na neke ekološke principe, na primer efekte preteranog proređivanja ili prenaseljenosti populacija. Čak i zdravorazumski se može izvesti zaključak da pojedine žive jedinice, a koje zavise od međusobne kooperacije ili mnogobrojnosti populacije (engl. *strength in numbers*) mogu imati bitno umanjenu verovatnoću preživljavanja u slučaju generalnog proređivanja ili izolacije od seksualnih partnera. Sa druge strane prenaseljenost dovodi do prevelikog pritiska na resurse ekološke niše kojoj organizam pripada, što vodi u zagađenje, opadanje kvaliteta života, siromaštvo, itd. Između ova dva ekstrema, život najčešće buja, što je reprezentovano u „Igru života“ kao ćelija ili polje sa tri živa suseda, kao što ćemo videti kasnije. Primenom ovih lokalnih pravila evolucije polja (ćelija) u „Igru života“ generišu se globalni distributivni (vizuelni) obrasci na čitavom polju „Igre života“.

Postoji više varijacija „Igre života“, npr. sa asinhronom vremenskom osom, sa kontinualnim vremenskim prelazima umesto diskretnih, i sa proširenim okruženjem (Peper *et al*, 2010) ili auto-reproduktivne petlje, kao čuvene Langtonove petlje (engl. „*evoloop*“), koje demonstriraju međusobni odnos genotipa i fenotipa (Sayama, 1998). Razvijen je čak i model koji oponaša ponašanje virusa u smislu da pojedine ćelije „Igre života“ mogu hibernirati u neaktivnom stanju čekajući na određene uslove spoljašnje sredine, i tek onda se aktivirati. U svakom slučaju, bez obzira na specifičnosti bilo kod pojedinačnog skupa pravila, svaka logika koju smo u stanju da izrazimo jezički može se implementirati u simulaciji kroz skup korespondentnih pravila.

Klasična „Igra života“ pokazuje svojstvo ireverzibilnosti, što znači da poznavanje stanja na polju „Igre života“ u bilo kom trenutku vremena (kao i pravila evolucije) nije dovoljno da se jednoznačno odredi istorija sistema, odnosno njegova prethodna stanja (Abbot *et al*, 2008, Bleh *et al*, 2010). „Igra života“ pokazuje još jednu interesantnu osobinu, naime nakon perturbacije bilo koje proizvoljno odabrane ćelije odnosno polja, sistem evoluira u statistički stacionarno stanje koje ne zavisi od inicijalne konfiguracije. Drugim rečima, statistički stacionarna stanja pokazuju samo-organizujuća svojstva, odnosno generisanje reda iz haosa (Abott *et al*, 2008). Kritičnost (engl. *criticality*) takvih sistema manifestuje se kroz pojavu efekata lavine na svim prostornim skalama, čija se frekvencija pokorava tzv. stepenom zakonu (engl. *power law*). Kao i u slučaju drugih kritičnih fenomena, kritična svojstva ne zavise od specifičnih osobina samih pravila, već su univerzalna i determinišu pojavu obrazaca bez lokalnih zakona održanja, dakle na svim skalama (Bak *et al*, 1989). Drugim rečima, ni za jedno pravilo ćelijskog automata ne važi da samo na osnovu njega možemo prevideti kojoj klasi stacionarnih stanja će sistem pripadati, odnosno ka kojoj konvergirati (Reia and Kinouchi, 2014).

Posebno interesantan aspekt „Igre života“ je njena evolucija koja bi trebalo da reflektuje evolucionni proces — proces u kom replikatori pokazuju međusobne varijacije, i u kom najprilagođenije jedinice imaju veću verovatnoću širenja zastupljenosti u koloniji. (Sayama, 1998). Glavni problem sa svim replikatorima u „Igru života“ (npr. Langtonovom petljom) je u tome što su oni i morfološki i funkcionalno dizajnirani od strane čoveka. Zbog toga se kroz njihov proces samo-replikacije ne povećava kompleksnost, i ne pokazuju otpor prema perturbacijama i neočekivanim interakcijama sa spoljašnjom sredinom (Cisneros *et al*, 2019).

U stohastičkoj dvodimenzionoj „Igru života“, sudbina svakog polja (ćelije) zavisi od 8 najbližih suseda, kao i u determinističkoj verziji. Stohastička komponenta je uvedena kroz dva parametra: verovatnoće preživljavanja i rađanja (Monetti and Albano, 1997b). Umiranje je i dalje posledica ispunjenosti samo determinističkih kriterijuma (malobrojnosti i prenaseljenosti) u smislu postojanja više od 3 ili manje od 2 živa suseda. Međutim, stopa preživljavanja je promenjena, jer će ćelija koja ima 2 ili 3 živa suseda preživeti sa određenom verovatnoćom,  $p_s$ . Radi podsećanja, u klasičnoj izvedbi svaka mrtva ćelija, na primer, postajala je živa ako u susedstvu ima 3 živa suseda. Dodatno pravilo uvodi verovatnoću u ovaj scenario: ako su tačno 2 živa suseda ne znači nužno da će se „roditi“ nova ćelija — to će zavisiti i od novog uslova, verovatnoće  $p_b$ . Parametri verovatnoće su tako dizajnirani da za  $p_b = 0$  i  $p_s = 1$ , stohastička

verzija „Igre života“ konvergira ka klasičnoj Konvejevoj determinističkoj verziji (Monetti and Albano, 1997b).

U drugoj značajnoj modifikaciji „Igre života“ (Yaroslavsky, 2013a) je uveo drugačija stohastička pravila, različita od gore pomenutog modela, s obzirom da u novoj izvedbi individualne ćelije umiru sa verovatnoćom  $p_d \leq 1$ . Dodatno, uvedene su  $3 \times 3$  težinske matrice (u funkciji maski) koje obezbeđuju neuniformnost prostornog uticaja ćelija i njihovog neposrednog osmočlanog okruženja. Na primer, izotropne maske koriguju uticaj ćelija u okruženju prema euklidskim distancama od centralne ćelije (ugaone ćelije okruženja su  $\sqrt{2}$  puta udaljenije od ćelija na sredinama strana kvadrata Murovog okruženja, pa se njihov uticaj normalizuje prostornom udaljenošću). U ovoj studiji više novih fenomena je otkriveno, imenovano i proučavano: formiranje obrazaca koji liče na lavirint kao fiksnih tačaka u modelu, „samokontrolisani rast“, „večni život u ograničenom prostoru“, i „koherentno sažimanje“ (Yaroslavsky, 2013a).

Vredno pomena i relevantno za našu studiju je zapažanje da su svi gorepomenuti rezultati ostvareni modifikacijom jednog jedinog pravila, uvođenjem verovatnoće umiranja, ( $p_d$ ), kao i primenom gore opisanih kvadratnih  $3 \times 3$  maski koje normalizuju uticaj okruženja euklidskom prostornom distancom. Nijedan od prikazanih stohastičkih modela „Igre života“ ne predstavlja realističnu reprezentaciju bilo kog živog sistema, međutim oni pokazuju vrlo izraženo aperiodično i ireverzibilno kritično ponašanje, prisutno i u biološkim sistemima (Yaroslavsky, 2013a; Yaroslavsky, 2013b) u ovom slučaju generisano jednostavnim lokalnim pravilima. Radi ilustracije divergencije dve inicijalno bliske evolutivne trajektorije moglo bi se reći da se podešavanjem ovih verovatnoća može, na dugi rok, dinamičko ponašanje u simulaciji promeniti iz onog u kom su sve ćelije mrtve do onog u kom sve bujaju (Vieira *et al*, 2021).

Drugi način implementacije stohastičkog modela u „Igru života“ je da stanja individualnih ćelija evoluiraju sa određenom verovatnoćom, umesto da se pravila primene simultano na sve ćelije, na taj način uvodeći asinhronu evoluciju u model, sa diskretnim koracima (bilo slučajno birajući ćelije koje će evoluirati, ili osvežavati stanje ćelija na osnovu internog ćelijskog sata) (Fatès, 2010; Lee *et al*, 2004). Sugerisano je da se većina modela ćelijskih automata raspadaju pod ovakvim evolutivnim uslovima, i da „Igra života“ nije izuzetak (Peper *et al*, (2010) komentarišući (Blok and Bergersen (1999)).

Prvi predloženi model (Blok & Bergersen, 1999) je koristio  $0 < p \leq 1$  šemu ažuriranja i opisao je zapažanje da za  $p \rightarrow 0$  model aproksimira metodu dirigovanu vremenom (Poissonov slučajni proces). Otkrili su da „ćelijski automat pokazuje fazni prelaz drugog reda koji pripada

klasi univerzalnosti [procesu] usmerene perkolacije<sup>100</sup>.“ (Blok & Bergersen, 1999; Fatès , 2010)

Unapređenjem evolutivnih pravila i praćenjem intermedijarnih stanja, model koji je usledio (Lee *et al*, 2004; Peper *et al*, 2010) ispoljio je interesantan fenomen — egzistenciju *sinhronizacionih talasa*, ukazujući na to koja ćelija je u korelaciji sa kojom tokom sudara dva glajdera. Zbog postojanja parametra evolutivne verovatnoće koja utiče na brzinu same evolucije, a koja je u vezi i sa reproducibilnošću određenih stanja u „Igri života“, sledi da što je verovatnoća  $p$  manja, potrebno je više koraka da se postigne ista konfiguracija kao u klasičnoj „Igri života“ sa istom inicijalnom konfiguracijom, ukoliko se to uopšte i dogodi (Peper *et al*, 2010). Autori su takođe uočili konfiguracije obrazaca koje evoluiraju u alternirajuće trake živih i mrtvih ćelija, slično kao u prethodnim studijama (Blok & Bergersen, 1999; Yaroslavsky, 2013a). Variranjem parametara evolutivnog modela i inicijalnih obrazaca, sistem je u određenim situacijama evoluirao u kvalitativno različita stabilna stanja, koja su identifikovana kao izumrla, zamrznuta (male gustine i stabilizovana) i lavirint-faza (Fatès, 2010).

U simulacionoj platformi čiji je razvoj bio parcijalni cilj ove disertacije, implementirana su, pored originalnih, i stohastička pravila po ugledu na Fatès (2010), čime su omogućene dalje simulacije i analize „Igre života“, uključujući njene filozofske, evolutivno-biološke i informatičke aspekte. Pored ova dva seta pravila uveden je i treći set pravila, sekvencijalna evolucija, svi opisani u sledećim odeljcima.

#### **4.2.2. Razvoj simulacione platforme — uvođenje stohastičnosti**

U trenutnoj izvedbi, platforma sadrži tri vrste pravila evolucije koja se mogu odabrati: 1) originalna pravila, 2) originalna pravila sa sekvencijalnom implementacijom, i 3) originalna pravila uz uvođenje stohastičnosti. Originalna pravila (1) su relativno jednostavna (Bak, 1989) — ažuriranje svake ćelije se vrši tako što se u obzir uzima stanje njenih 8 susednih polja (ćelija). Ukoliko se među osam susednih ćelija nalaze manje od dve ili više od 3 žive ćelije, ona će umreti, u suprotnom će ostati živa. Na praznim poljima, nove ćelije će nastati u sledećoj iteraciji samo ako imaju tačno 3 živa suseda. Da bismo odstupili od jednovremene promene svih ćelija za koju smatramo da nije realistična reprezentacija načina funkcionisanja bioloških sistema, u sledećoj implementaciji pravila uveli smo sekvencijalnost, i to na takav način da se ćelije

---

<sup>100</sup> „Perkolacija“ se odnosi na proces kroz koji se supstanca ili informacija postepeno širi kroz porozan materijal ili mrežu. Ovaj termin se često koristi u fizici, matematici i drugim naučnim disciplinama kako bi opisao fenomene u kojima se povezanost ili prenos odvijaju na postepen način.

ažuriraju jedna po jedna, sekvencijalno. Praktična posledica ovakvog pristupa je da svaka sledeća ćelija u sekvenci ažuriranja (osvežavanja, engl. *update*) „vidi“ ažurirano stanje prethodnih ćelija, ali i neažurirano stanje ćelija koje tek slede u vremenskoj sekvenci ažuriranja. Ovim se narušava lanac Markova<sup>101</sup>, i uvodi vid ažuriranja reprezentativniji za biološke sisteme, međutim, problem postaje arbitrarnost redosleda ažuriranja ćelija u samoj simulaciji. Kao treći skup pravila evolucije, na originalna pravila smo dodali stohastički prekidač. Modifikacija podrazumeva da se originalna pravila ažuriranja usložnjavaju na taj način što se pravila primenjuju uz određenu verovatnoću, u suprotnom ćelija ostaje neažurirana iako su ispunjeni kriterijumi za promenu njenog stanja. Posledice ove izmene su višestruke. Okruženje dobija delimičnu memoriju — i reflektuje dublju sopstvenu istoriju, a ne samo stanje u prethodnom evolutivnom koraku. Manipulacijom parametra verovatnoće ažuriranja može se podešavati dubina koju zahvata istorija okruženja kao dela pravila ažuriranja. Ovo uvođenje istoričnosti u evolutivno okruženje prekida lanac Markova tokom simulacije, i reflektuje neistovremenost primene evolucionih pravila u evoluciji bioloških sistema.

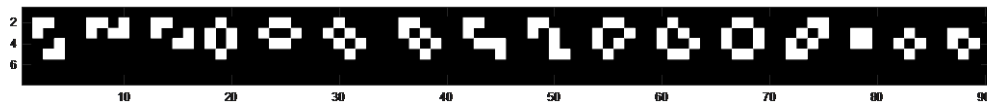
#### 4.2.3. „*Brute force*“ pretraga obrazaca

Kao deo simulacione platforme, pored simulacije same „Igre života“ korišćenjem predefinisanih ili naknadno prirodnih pravila evolucije, razvili smo i pretraživač karakterističnih obrazaca. Naime, evolucionih tok obrasca u ovoj igri zavisi od početnog stanja i pravila evolucije, odnosno ažuriranja. S obzirom na računarsku zahtevnost, kao i veliki broj obrazaca i pravila (teorijski bezbrojan) koji se mogu konstruisati, pronalaženje obrazaca sa karakterističnim osobinama je zahtevan i dugotrajan proces. Automatizacija ovog procesa ubrzala bi značajno pretrage i izolaciju karakterističnih obrazaca. Primeri karakterističnih obrazaca su stacionarni obrasci (koji se uopšte ne menjaju), oscilatori (koji se periodično vraćaju u početno stanje nakon  $n$  koraka) ili mobilni obrasci koje se pomeraju po simulacionom polju, a mogu imati i oscilatornu komponentu tokom pomeranja. Karakterističnost se može definisati na proizvoljan način, na primer tako da uključuje i svojstva simetrije. Pretraživač karakterističnih obrazaca koji je razvijen koristi „sirovu snagu“ (engl. *brute force*) kao pristup u pretraživanju obrazaca. Naime, razvijen u obliku Matlab funkcije, on kao argument funkcije dobija veličinu simulacionog polja u kom će vršiti pretragu, kao i veličinu obrasca čije će

---

<sup>101</sup> Markovljev lanac (engl. *Markov chain*) je stohastički model koji opisuje sekvencu događaja u kojoj verovatnoća svakog događaja zavisi samo od prethodnog stanja, a ne od celokupne, dublje istorije događaja. Ova osobina se često naziva Markovljevom svojstvom i čini osnovu Markovljevih lanaca.

promene tokom evolucije pratiti. Veličina obrasca ne može prelaziti veličinu simulacionog polja umanjenu za jedan, jer se evolucija ne odvija na ivicama polja, u poslednjem redu ćelija uz ivicu sa bilo koje strane. Za zadatu veličinu polja  $m \times m$ , pretraživač generiše sve moguće varijacije bez ponavljanja od tri do  $m^2$  živih ćelija u zadatom polju koje raspoređuju na svaki mogući unikatan način, a zatim simulira „Igru života“ i prati njene ishode. Kao početna veličina je odabran broj 3 jer su obrasci sa jedan i dva obrasca jednostavni i kompletno istraženi. Zbog problema u menadžmentu kompjuterske memorije za veće obrasce, gde je nemoguće smestiti u memoriju sve moguće varijacije bez ponavljanja, razvijen je generator obrazaca koji uvek prosleđuje pretraživaču obrasce jedan-po-jedan, dok ne iscrpi ceo spektar mogućih obrazaca. Tokom simulacije, obrasci se snimaju u posebnu Matlab strukturu podataka koju pretraživač vraća nakon simulacije.



**Slika 25.** Rezultati „brute force“ pretrage stacionarnih 4×4 obrazaca na polju 5×5.

Na **Slici 25** prikazan je rezultat pretrage stacionarnih 4×4 obrazaca na simulacionom polju 5×5. Veličina polja je odabrana tako da rastereti kompjutacione zahteve simulacije, jer pretraga obrazaca na neoptimalno velikim poljima vrši nepotreban pritisak na kompjutacione resurse tokom simulacije i produžava njeno trajanje. Za demonstraciju smo odabrali jednostavan slučaj – pretragu stacionarnih obrazaca na relativno malom polju. Za razliku od ostalih karakterističnih obrazaca, npr. oscilatora ili mobilnih struktura, stacionarne strukture su potpuno neosetljive na uvođenje stohastičnosti, u opisanoj izvedbi, u pravila evolucije. Drugim rečima, sva tri tipa pravila imaju zajedničke stacionarne obrasce. Kao deo budućih istraživanja, bilo bi interesantno proveriti da li postoje i oscilatorni ili mobilni obrasci neosetljivi na stohastičnost, ili čak oni koji se pojavljuju upravo zbog stohastičnosti u pravilima evolucije, a ne javljaju se u originalnoj simulaciji.

Kao poseban problem pri simulacijama na većem broju polja javila su se ograničenja kompjuterske memorije, obično takva da onemogućavaju skladištenje svih varijacija koje se moraju simulacijom proveriti na prisustvo karakterističnih obrazaca – predmeta pretrage.

#### 4.2.4. Diskretizacija evolucije po principu *svi-odjednom* i vezani problemi

Jedno od upečatljivih svojstava originalno zamišljene „Igre života“ je činjenica da se ažuriranje, odnosno diskretna evoluciona transformacija svih ćelija dešava po principu sve-ćelije-odjednom, odnosno jednovremeno. Iako se heuristička pravila ažuriranja primenjuju individualno i nezavisno na svaku ćeliju da bi se odredila njena pojedinačna sudbina, faktička promena svih ćelija se dešava skokovito, u diskretnim kolektivnim evolucionim koracima. Sistem se po vremenskoj evolutivnoj dinamički ponaša analogno vektoru koga transformiše jedan linearno-algebarski evolucioni operator (odnosno jedna matrica koja pomera vektor sistema kroz evolutivni prostor). Na intuitivnom nivou, sa jedne strane primena evolucionih pravila nezavisno i pojedinačno za svaku ćeliju, a sa druge sama transformacija svih ćelija odjednom izaziva izvesnu nelagodu, jer kao da postoji diskrepanca između temporalnosti samog procesa određivanja sudbine ćelije i faktičke realizacije takve odluke, odnosno njene materijalizacije u formi samog ažuriranja u „Igri života“. U kombinaciji sa narušavanjem lanca Markova, ova osobina predstavlja izazov reprezentativnosti „Igre života“ kao paradigmatičnog analogona evolutivnih principa koje slede brojni biološki sistemi.

#### 4.2.5. „Igra života“ i lanci Markova

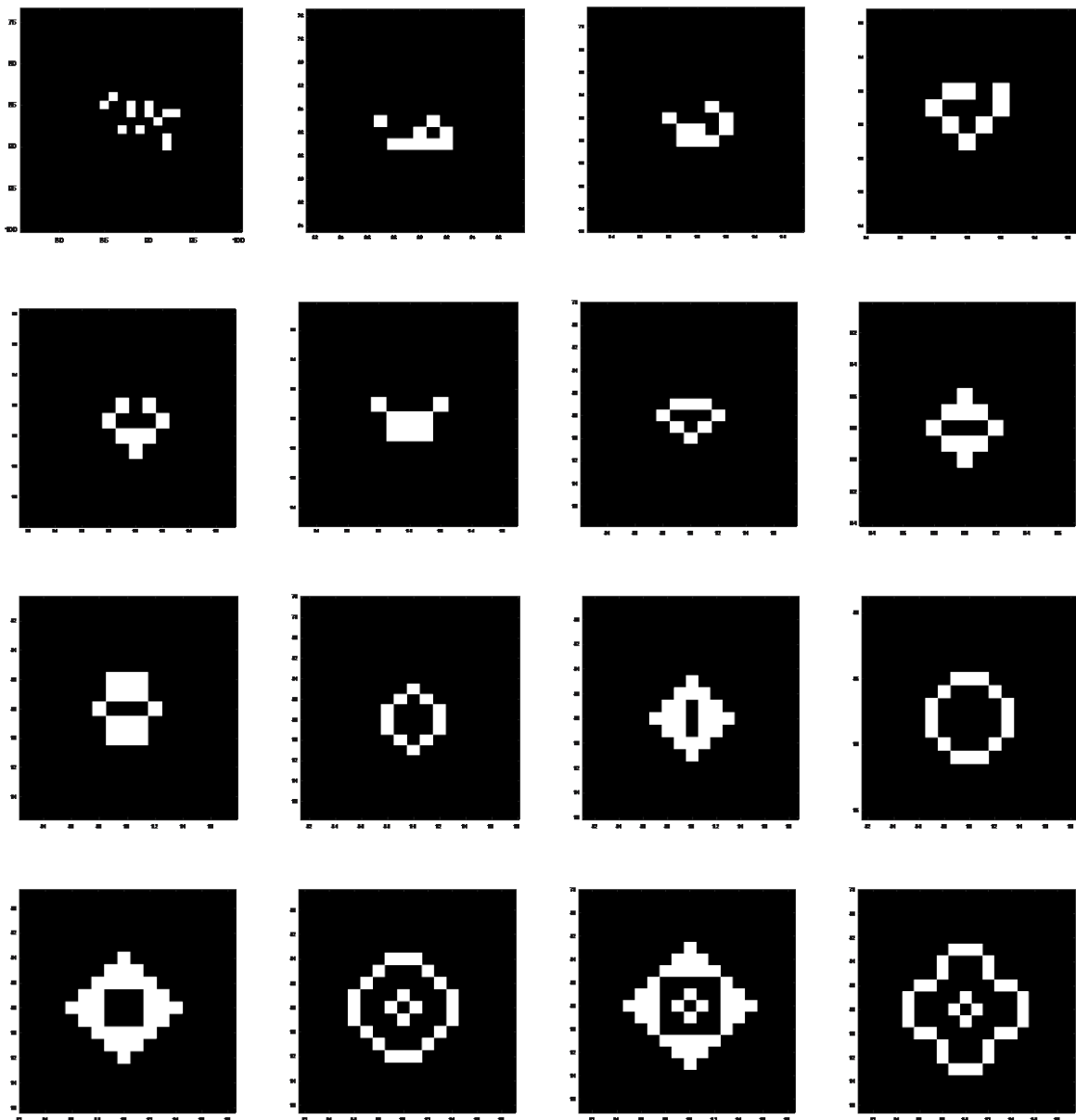
U svom originalnom izdanju, evolucija u „Igri života“ zavisi od dve okolnosti: a) pravila evolucije, i b) početnog (odnosno trenutnog) stanja. Treba uočiti da evolutivni put svake ćelije u originalnoj izvedbi ne zavisi od dublje istorije njenog okruženja, već samo od trenutnog stanja okruženja. Drugim rečima, put dolaska do tog stanja, njegova istoričnost, ne igraju nikakvu ulogu u determinisanju budućeg evolutivnog puta svake pojedinačne ćelije. Ovakvo stanje stvari ukazuje da klasično definisana pravila „Igre života“ uzrokuju da evolucija sistema kroz stanja  $s_0, \dots, s_n$  predstavlja jedan lanac Markova (Doob, 1953). Iako ovo svojstvo koje krase i druge igre u kojima sistem prati pravac temporalnog razvoja (recimo šah) ne predstavlja *per se* ni prednost ni slabost, postavlja se pitanje da li su analogni biološki sistemi koje pretendujemo da simuliramo kroz „Igru života“ u osnovi lanci Markova? Kao prvi primer, u formi misaonog eksperimenta možemo da posmatramo koloniju bakterija. Kolonija bakterija na prvi pogled predstavlja analog „Igri života“, jer bakterije mogu imati jednu od dve sudbine, ili se deobom podeliti ili uginuti. Takođe, komunikacija svake bakterije hemijskim putem najintenzivnije se obavlja sa njenim neposrednim okruženjem, što podseća na pravila ažuriranja u „Igri života“ koja se primenjuju samo na neposredno okruženje, jer sudbinu ćelije određuje samo prostorno

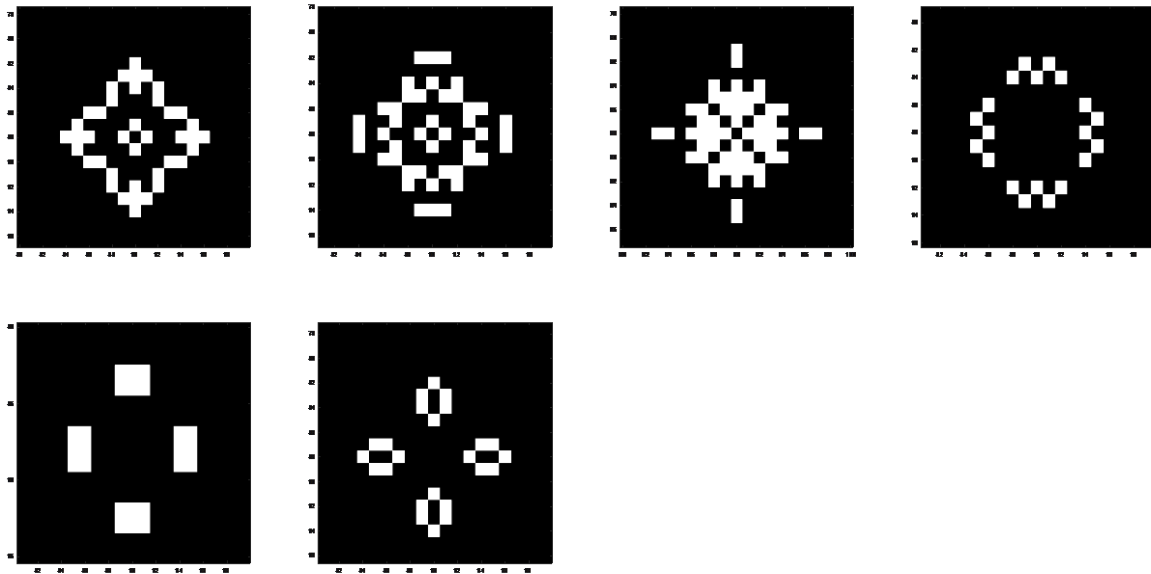
najbliži neposredni red ćelija do nje. Međutim, u koloniji bakterija postoje i bitna odstupanja od pravila „Igre života“. Naime, sudbine individualnih bakterija određuju se vremenski nezavisno jedna od druge, dakle njihove promene nisu vremenski sinhronizovane. Implikacije su višeslojne. U okruženju u kom se ažuriranje ne odvija jednovremeno, svaka bakterija „vidi“ ne samo stanje svog okruženja iz neposredno prethodnog trenutka, već vidi i dublju istoriju bar dela svog okruženja — onog dela koji se u prethodnom trenutku nije ažurirao. Što je ažuriranje u svakom trenutku manje verovatno, a jednovremenost narušenija, to bakterija „vidi“ dublju istoriju svog okruženja prilikom sopstvenog ažuriranja. Okruženje se ponaša kao da zadržava neku vrstu rezidualne memorije o svojim prošlim stanjima, čime se narušava lanac Markova. Sličan efekat u „Igri života“ se može postići uvođenjem verovatnoće ažuriranja u skup pravila. Naime, ako bi se uz originalna pravila „Igre života“ koja odlučuju o sudbini svake ćelije uveo još jedan parametar koji bi sadržao verovatnoću ažuriranja, tada bi u zavisnosti od vrednosti tog parametra okruženje svake ćelije ostajalo manje ili više neažurirano, dakle delimično zadržavalo rezidualnu memoriju o svojim prethodnim stanjima, što deluje kao realističniji analog pomenutoj koloniji bakterija.

Kao drugi primer prirodnog procesa koji pokazuje bitne sličnosti sa „Igrom života“, ali u kom striktna jednovremenost nije održana navešćemo apoptozu. Apoptoza, ili programirana ćelijska smrt, igra važnu ulogu u procesu organogeneze, zapaljenskim i drugim procesima, a nastupa kao posledica jednog od tri faktora: 1) dejstva supstanci koje je aktiviraju, 2) odsustva faktora rasta neophodnih za preživljavanje ćelije, ili 3) dejstva štetnih supstanci na ćeliju. Pravila inicijacije apoptoze su generalno ekvivalentna specifično dizajniranim odnosno prilagođenim pravilima „Igre života“, tako da bi, u principu, modifikacijom istih mogla da se simulira i apoptoza. Međutim, zbog odsustva apsolutne sinhronizacije metaboličkih procesa u ćelijama, te kašnjenja u prenošenju apoptotskih signala na različite prostorne daljine u tkivu, ograničene difuzijom ili drugim oblicima hemijskog transporta, grupa ćelija koja je izložena apoptotskim signalima neće reagovati istovremeno (sve-odjednom). Organogeneza kao takva, da bi uspešno dovela do razvoja simetričnih telesnih formi, ili konstrukcije funkcionalnih organa, morala bi da predstavlja analog „Igre života“ u kom je jednovremenost ažuriranja narušena, a skup pravila takav da i pored te narušenosti on u finalnom ishodu dovodi do generisanja željene forme, oblika, ili metaboličkog ishoda. Drugim rečima, biološki sistem mora da pokazuje neku vrstu otpornosti prema stohastičkim elementima u „Igri života“ koju sam igra, a koji se ne mogu izbeći zbog ograničenja nametnutih fizičkim i hemijskim zakonima.

#### 4.2.6. *Ex nihilo* generisanje simetrije

U originalnoj verziji, pravila „Igre života“ su zamišljena kao uniformna, simetrična, bez preferencijalnog tretmana bilo kog pravca u prostoru (izotropna). Ona se primenjuju na isti način na sve ćelije bez obzira na njihovu lokaciju ili orijentaciju u prostoru. Zbog tog svojstva pravila ažuriranja, na intuitivnom nivou za očekivati je da simetrični inicijalni obrasci daju simetrične ishode, odnosno da imaju simetrične evolucione atraktore. Situacija je nešto komplikovanija sa nesimetričnim obrascima, jer je u principu moguće zamisliti asimetrične obrasce kod kojih kroz seriju ažuriranja dolazi do eliminacije nesimetričnih elemenata, da bi se generisala potpuno simetrična forma. Na **Slici 26** prikazan je jedan takav obrazac, kao i njegov evolutivni put od asimetričnog ka simetričnom.





**Slika 26.** Paradigmatičan evolucioni put od 21-og koraka u kom inicijalni obrazac prolazi kroz 2 promene grupe simetrije tačke kojima pripada.

Inicijalni obrazac nema simetrična svojstva. U četvrtom koraku „Igre života“ prema originalnim pravilima, asimetrija se gubi i obrazac dobija formu koja ga svrstava u bilateralnu grupu simetrije tačke. Bilateralna grupa simetrije tačke je ona u kojoj se organizam (oblik) može jednom ravni podeliti na dve suštinski identične polovine. Ovoj grupi pripadaju brojni živi organizmi, većina zglavkara i svi kičmenjaci (University of California Museum of Paleontology, 2022). Bilateralna simetrija održava se kroz 7 evolutivnih koraka, da bi nakon toga obrazac prešao u drugu grupu simetrije tačke, radijalnu simetriju. Radijalna simetrija definiše se kao ona u kojoj je moguće organizam (oblik) podeliti na dve identične polovine sa dve ili više ravni koje prolaze kroz centar. Pored bilateralne, ovaj oblik simetrije je najzastupljeniji u živom svetu, kod dela bodljokožaca (npr. morskih zvezda), morskih sasa, meduza, itd. Nakon postizanja radijalne simetrije, obrazac dalje evoluira ne menjajući grupu simetrije tačke kojoj pripada, da bi nakon ukupno 21 koraka poprimio stacionarnu formu. Interesantno je da u simulaciji sa **Slike 26**, grupe simetrije tačke koje obrazac poprima dobijaju baš dva najdominantnija oblika simetrije u živom svetu, kao i da kada se jednom realizuju, simetrične forme ne mogu da se vrata u asimetrično stanje. Drugim rečima, simetričnost se ovde javlja kao jedan oblik evolutivnog atraktora koji spontano sledi iz same konstrukcije pravila „Igre života“. Uz dosta pretencioznosti, moglo bi se tvrditi da je upravo ovo mehanizam nastajanja i uzrok analognih simetričnih formi života, s obzirom da su originalna pravila „Igre života“ na neki i osmišljena tako da reflektuju principe prirodne evolucije, odnosno preživljavanja populacije organizama u zavisnosti od njihove brojnosti i raspoloživih resursa.

Zbog stohastičnosti, obrasci koji evoluiraju u prirodnom okruženju pre ili kasnije, zbog čiste slučajnosti, poprime formu koja ima simetrični atraktor, odnosno koje su prekursori simetričnih formi, u kojima obrazac ostaje trajno zarobljen. Pojednostavljeno, mogli bismo tvrditi da, *uz pretpostavku determinističkog i stacionarnog karaktera pravila „Igre života“, i asimetrični i simetrični obrasci mogu imati simetrične atraktore, dok simetrični obrasci mogu imati samo simetrične atraktore. U krajnjem ishodu ovo dovodi do trajne simetričnosti oblika života, jer jednom postignuti uz asistenciju stohastičnosti u konstruisanju inicijalnih obrazaca, oni predstavljaju nepovratna stanja.* Iznetu tvrdnju smatramo i glavnim rezultatom simulacije. Sve ovo, naravno, uz pretpostavku potpune rigidnosti samih evolucionih pravila.

Iako se bilateralna i radijalna simetrija javljaju kao dominantni oblici formi živog sveta (uz asimetrične izuzetke poput sunđera, ili složenijih oblika simetrije kod nekih vrsta planktona) upadljivo je da postoje sveprisutna odstupanja od striktno simetrije. Na **Slici 27** prikazana je tasmanijska džinovska kraba. Bilateralna simetrija narušena je disproportionalno razvijenijim klještima sa leve strane. Iako većina kraba ima jasnu bilateralnu formu tela, kod određenog broja javlja se slično odstupanje.



**Slika 27.** Tasmanijska džinovska kraba. Leva razvijenija klješta narušavaju bilateralnu simetriju tela krabe.

Pitanje koje se ovde postavlja je: kako se narušila jednom postignuta striktna bilateralna forma tela krabe, ako deterministička, simetrična i stacionarna pravila vode u trajno zarobljavanje prostornih obrazaca u simetričnim formama? U ovom radu spekuliramo da je za ovakva odstupanja od ključne važnosti prisustvo stohastičnosti (slučajnosti), i to ne samo u smislu generisanja obrazaca koji se podvrgavaju evoluciji, već i u samim pravilima evolucije. Drugim rečima, pored ažuriranja koje se deterministički javlja kao posledica ispunjenih kriterijuma iz uslova evolucije, uvođenje parametra slučajnosti kao jednog od uslova ažuriranja

narušava striktno deterministički karakter evolucionih pravila i omogućava da se ažuriranje ne desi i pored ispunjenih uslova. U simulacionoj platformi koju smo razvijali kao jedan od ciljeva ove teze, uveli smo i evolucionna pravila koja uključuju stohastičnost i ispitivali efekte stohastičnosti na mnoštvo karakterističnih obrazaca. Spekulišemo da je stohastičnost u pravilima ažuriranja permanentni izvor mogućnosti odstupanja od rigidno simetričnih formi, što potencijalno pruža evolutivne prednosti. Stohastičnost ovog tipa moguće je i eksperimentalno identifikovati, na primer tokom procesa prenosa neuronskih signala (sinaptičke transmisije), jer izgleda da kada neuronski signal dođe do presinaptičkog terminala, oslobađanje neurotransmitera se dešava sa verovatnoćom od oko 0.25 (Beck and Eccles, 1992), što je ništa drugo nego primer nedeterminističkog karaktera pravila tokom prenosa neuronskih signala, kao još jednog mogućeg analoga „Igre života“.

#### **4.3. Razvoj simulatora biološke evolucije na nivou individualnih organizama i preispitivanje odnosa aktivan–pasivan trend iz nove perspektive**

U potpoglavlju 4.1, odnos aktivnog i pasivnog trenda biološke kompleksnosti smo preispitivali korišćenjem direktnog simulatora trenda biološke kompleksnosti, uz akcenat na Guldovim formulacijama, terminologiji i interpretativnom okviru. U principu, pored direktne simulacije kompleksnosti kao jedne varijable — kvantitativnog svojstva genetičke linije, kompleksnost bi bilo moguće simulirati i indirektno, kroz simulaciju biološke evolucije na nivou organizama ili populacija, i određivanja karaktera trenda kompleksnosti kao jednog specifičnog atributa u evolutivnom procesu koji rezultuje iz simulacije kroz *post hoc* analizu, i zavisi od načina konstituisanja samog pojma kompleksnosti. U ekstremnom slučaju, simulacija bi se odvijala na nivou individualnih organizama, ali ovakva simulacija implicira značajne kompjutacione zahteve. U cilju izvođenja ovakve simulacije, kreirali smo prototip–organizam, koji je opisan vektorom dužine 104 polja, i koji sadrži attribute organizma. Opis organizma dat kroz vrednosti polja ovog vektora je kompletan, odnosno organizam je potpuno svodljiv na informacije sadržane u ovom vektoru. Prva četiri polja reflektuju svojstva organizma sa posebnim statusom, konkretno njegov identifikacioni broj (jedinствен identifikator, analogno jedinственom matičnom broju građana), zatim verovatnoće razmnožavanja, smrti i mutacije u svakom evolutivnom koraku. Vrednosti ovih verovatnoća predstavljaju hiperparametre simulacije, koje korisnik podešava prema sopstvenoj potrebi da zadrži broj organizama ograničenim u željenom broju evolutivnih koraka, a da pritom omogući posmatranje efekata mutacija (čije generisanje neposredno kontroliše kroz parametar verovatnoće mutacije).

Preostalih 100 polja sadrže nezavisne informacije, analogne svojstvima živih bića, kojima nismo pripisali specifične uloge ili značenja.<sup>102</sup> Sam ekosistem u kom se evolucija dešava nije fizički ograničen, kao u slučaju „Igre života“. Ograničenost raspoloživosti resursa u ekosistemu smo implementirali kao opciju, i to tako što verovatnoća smrti organizma raste u svakom evolutivnom koraku, asimptotski se približavajući verovatnoći od 100% za zadata gustinu naseljenosti ekosistema, reflektujući trivijalno zapažanje da u ograničenom prostoru (i resursima) može da se spakuje ograničen broj organizama. Po prirodi stvari, verovatnoće preživljavanja, smrti i mutacije imaju ograničene opsege vrednosti 0-100% (0-1) i predstavljaju kontinualne varijable. Početne, ali ne i konačne, vrednosti ostalih svojstava organizama su takođe, radi jednostavnosti, ograničene na opseg kontinualnih vrednosti 0-1. Pored ovih parametara, koje predstavljaju individualna svojstva organizama, simulator zahteva tri univerzalna hiperparametra. S obzirom da se mutacija dešava kroz dvostepen proces, prvo stohastičkim utvrđivanjem *da li će se desiti*, a zatim i *kolika će biti*, uveli smo, kao hiperparametar, normalnu distribuciju sa centrom 0, i standardnom devijacijom 0.05, sa koje se uzorkuju inkrementi izmene svojstava koja je potrebno mutirati u sledećoj generaciji organizama. Inkrementi se uzorkuju posebno za svako svojstvo organizma u svakom evolutivnom koraku u kom je mutacija stohastički „izvučena“ (kao u igrama na sreću). Pored ovih, uveden je i opcioni hiperparametar — maksimalni dozvoljeni broj organizama u ekosistemu, ka kom bi gustina naseljenosti mogla asimptotski da teži. Preživeli i novonastali organizmi na kraju svakog evolutivnog koraka predstavljaju početno stanje u sledećem koraku. Treba primetiti da su tri prva atributa, pored identifikatora, zapravo tipične varijable sa „zidom“ u Guldovom smislu, jer verovatnoće ne mogu biti veće od 100% niti manje od 0%, iako i same predstavljaju svojstva organizama. Zbog toga, ukoliko tokom simulacije dođe do probijanja izvan zadanog opsega, one se vraćaju u dozvoljeni opseg vrednosti na specifičan način. Naime, primetili smo nakon prvih simulacija da neki parametri, npr. verovatnoća preživljavanja, mogu slučajno da zauzmu vrednost 1, čime organizam postaje večan i dominira u populaciji. Slično tome, slučajnim hodom organizam može da dođe do nulte mutabilnosti, dakle postane

---

<sup>102</sup> Ideja zadržavanja ovih polja iako nemaju uticaja na ishode konkretnih simulacija predstavljenih u ovom radu je u tome da se omogući njihovo iskorišćavanje u naknadnim serijama simulacija, gde se bi kroz njih omogućilo kvantifikovanje sinergije i antagonizama određenih svojstava u okviru jednog organizma, ili pripadnika različitih vrsta (npr. razvoj brzine Tomsonove gazele negativno utiče na sposobnost preživljavanja geparda koji se njom hrani, ili težine i snage lava na njegovu brzinu). Zamišljeno je da se sve ove relacije kvantifikuju velikim matricama po principu svaki-sa-svakim, a ulazni podaci za tu matricu sinergija i antagonizama bile b upravo vrednosti osobina u pomenutih 100 polja. U ovom radu, nismo dalje razvijali ovaj koncept.

nepromenljiv. Zbog nerealističnosti ovih scenarija, odredili smo prag-vrednosti koje opseg ograničenost verovatnoća umiranja i mutacija ograničavaju na minimalnih 10%.

*Tok simulacije:* U svakom evolutivnom koraku, simulator iterativno prolazi kroz sve žive organizme, i za svakog od njih, sukcesivno, nezavisnim „bacanjem kocke“ (korišćenjem generatora pseudo-slučajnih brojeva u opsegu 0-1 sa uniformnom distribucijom) utvrđuje: 1) da li umire, 2) da li se razmnožava *ako* ne umire, i 3) da li mutira *ako* se razmnožava?<sup>103</sup> Ukoliko umire, organizam se indeksira (upisuje) u poseban registar organizama koji će biti uklonjeni na kraju evolutivnog koraka. Ukoliko se razmnožava, njegov vektor se duplira i upisuje u poseban registar novonastalih organizama u tom evolutivnom koraku, a ponekad i menja u zavisnosti od rezultata „bacanja kocke“ mutacija. Takođe, ukoliko mutira, ponovnim korišćenjem istog parametra verovatnoće utvrđuje se *na kojim* lokacijama u vektoru koji ga predstavlja mutira, a zatim na tim lokacijama izvlači inkrement koji se sabira sa starom vrednošću, perturbirajući je. Na kraju iteracije kroz sve organizme, iz registra organizama se uklanjaju svi organizmi sa spiska obeleženi za umiranje/brisanje, a u populaciju dodaju svi novorođeni sa spiska novorođenih, od kojih neki predstavljaju mutante. Ovako postavljen simulacioni okvir očigledno je pasivan, jer ne postoji preferencijalni status bilo koje vrednosti ili opsega vrednosti bilo kog svojstva, jer ne postoji ni „nagrada“ ni „kazna“ za posedovanje ili neposedovanje bilo kog svojstva.

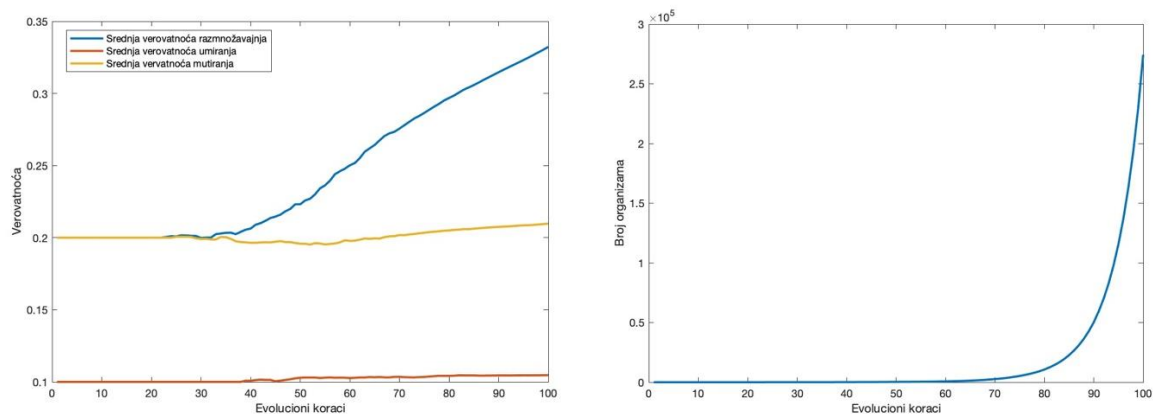
#### **4.3.1. Simulacija neograničene populacije**

Pod simulacijom neograničene populacije podrazumevamo simulaciju u kojoj ne postoji nikakav pokretač trenda, niti postoje interakcije među organizmima, dakle slično pasivnom trendu opisanom u prethodnom paragrafu i bez kontrole broja organizama. Drugim rečima, svojstva organizama na pozicijama vektora 5-100 diverzifikuju se na potpuno slučajan način, bez eksterno nametnutih trendova. Tri verovatnoće koje igraju neposrednu i ključnu ulogu u prilagođenosti organizma, verovatnoća preživljavanja, razmnožavanja i mutiranja, tretiraju se kao i ostala svojstva organizama i perturbiraju u paketu sa njima. Na ovom mestu bismo skrenuli pažnju na jedan detalj koji se tiče verovatnoće preživljavanja — njegovu višeslojnost. Preživljavanje u svakom evolutivnom koraku zavisi od dva faktora: 1) dugovečnosti organizma,

---

<sup>103</sup> Naravno, postoje pojednostavljenja uvedena ovim pretpostavkama. Živi organizmi bi u principu mogli da mutiraju i ako se ne razmnožavaju (npr. da razviju kancer), ili da se razmnože pa umru u istom koraku. S obzirom da smo prevashodno zainteresovani za mutacije sa filogenetskim, a ne ontogenetskim efektima, mutacije bez efekata na potomstvo smo ignorisali, iako bi se daljim uslozňjavanjem simulatora mogle uvesti kao faktor koji utiču na svojstva organizma, recimo njegov životni vek.

koja bi se mogla interpretirati i kao brzina kucanja metaboličkog sata, odnosno očekivani životni vek čak i u idealnim uslovima, i 2) sposobnosti snalaženja u uslovima životne sredine, uključujući i abiotičke i biotičke faktore, prema Darwinovoj terminologiji. Kao što je napomenuto, interakcije u prvom scenariju simulacije ne postoje, bilo sa ostalim organizmima, bilo sa fizičkom životnom sredinom, i zbog toga verovatnoća umiranja organizama reflektuje očekivani životni vek s obzirom na biološke i genetičke predispozicije organizma, a ne njihovu prilagođenost.



**Slika 28.** a) Srednje vrednosti verovatnoća preživljavanja, razmnožavanja i mutiranja simuliranih organizama u populaciji u 100 evolucionih koraka, b) rast broja organizama u ekosistemu tokom iste simulacije.

Na **Slici 28a** prikazane su vrednosti srednje verovatnoće preživljavanja, razmnožavanja i mutiranja, tokom simulacije u 100 koraka. Na **Slici 28b** prikazan je istovremeni, gotovo eksponencijalni rast broja organizama tokom simulacije. Iz **Slike 28** sledi da verovatnoća razmnožavanja ima bitno različita svojstva u odnosu na verovatnoće smrti i mutiranja. Naime, iako verovatnoće preživljavanja i mutiranja ne pokazuju značajan trend tokom prvih 100 koraka simulacije, verovatnoća razmnožavanja pokazuje. Njen trend, iako je način izvođenja simulacije takav da reflektuje logiku pasivnog trenda, je *aktivan*. U potpoglavlju 4.1.2, već smo, kao jedno od rezultata upotrebe prvog simulatora razvijenog za potrebe ove disertacije, predstavili zapažanje da se samo postojanje levog zida javlja kao pokretač trenda, naročito u početnim stadijumima simulacije, bliže zidu. Efekat zida bi mogao da objasni blago pomeranje srednjih vrednosti naviše kod verovatnoća umiranja i mutiranja, analogno direktno simuliranoj kompleksnosti iz potpoglavlja 4.1, ali ovaj efekat sam po sebi ne može da objasni ovako brz rast verovatnoće razmnožavanja, očigledno različit od verovatnoće mutiranja na **Slici 28a**.

Šta je uzrok ove razlike? Po našem mišljenju, filozofske i naučne implikacije ovog zapažanja bi mogle biti dalekosežne. Ako pokretač ili uzrok ovog trenda nije sam zid, a

simulacija je dizajnirana tako da obezbedi okruženje u kom svojstva organizama mogu da rastu samo pasivno, ostaje samo jedan mogući uzrok aktivnog trenda u porastu ovog svojstva, a to je sama arhitektura evolucionog procesa, činjenica da deca nastaju od roditelja, da u evolucionom procesu postoje generacije koje se smenjuju, da broj potomaka zavisi od nekog svojstva roditelja, itd. Unutrašnja struktura, način organizovanja procesa evolucije, postojanje genetičkih linija, priroda razmnožavanja, celokupna velika šema evolutivnog kretanja, predstavlja *uzrok* aktivnog trenda u porastu verovatnoće razmnožavanja, bar u okvirima ovog eksperimenta. U nekom alternativnom imaginarnom svetu, u kom bi organizmi nastajali bacanjem kocke, bez obzira na broj ili postojanje roditelja, verovatnoća razmnožavanja ne samo da ne bi rasla aktivno, ona ne bi postojala jer je koncept razmnožavanja osobina ovog sveta. U takvom svetu pojam roditelja bi bio bespredmetan — u svetu u kom „decu donose rode“, roditelji se redukuju na „poklono-primače“. U svom skorašnjem radu, Dianhui (Jianhui, 2019) kao da je intuitivno naslućivao ove rezultate, kada je napisao da „napredak koji uzrokuje prirodna selekcija može biti posledica i osobina fizioloških i biohemijskih procesa, veličine tela, struktura inteligencije i sposobnosti evolucije, koje nemaju veze sa lokalnim okolinama, koje su univerzalne“, samo ih nije formulisao na gore navedeni način.

Ako se osvrnemo na značenje pojma verovatnoće razmnožavanja, uviđamo da je ona složen pojam, da je njegova vrednost rezultat sadejstva više faktora, od metaboličkih predispozicija, stepena prilagođenosti okruženju, eksternog faktora stabilnosti samog okruženja, postojanja kompeticije ili sinergije sa drugim organizmima, itd. Svi ovi faktori, koji pozitivno utiču na verovatnoću razmnožavanja, takođe bi pokazivali aktivni trend. Jedan od ovih faktora mogao bi biti i sama kompleksnost organizama, ali ispitivanje odnosa kompleksnosti prema samoj verovatnoći razmnožavanja ostaje kao tema za budući istraživački rad. Interesantno, prema neodarvinističkom tumačenju i prirodna selekcija zapravo povećava verovatnoću razmnožavanja, kroz „preživljavanje najprilagođenijih“ koji samim tim imaju više šansi za ostavljanje potomstva.

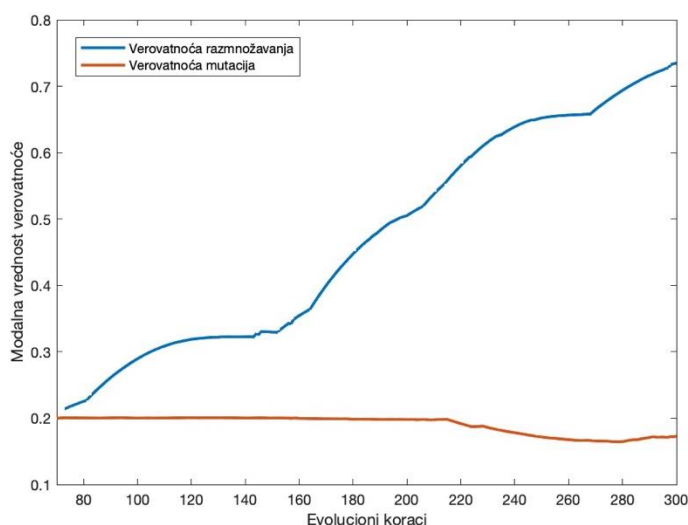
Naš treći simulator izgleda da pokazuje da je evolutivno kretanje ka organizmima sa većom verovatnoćom ostavljanja potomstva garantovano i prisutno i *bez* prirodne selekcije, pa ako prirodnu selekciju kao fenomen potvrđujemo preko njenih efekata povezanih sa verovatnoćom razmnožavanja koja raste kroz generacije, trebalo bi da imamo u vidu da se ovo povećanje, i to uz aktivan trend, može objasniti i na drugi način. Pojednostavljeno, organizmi bi mogli da pretražuju prostor mogućih vrednosti svih osobina, pri čemu bi se aktivan trend

uočavao kod onih osobina koje su u direktnoj vezi sa verovatnoćom razmnožavanja, kao posledica opštih osobina evolucije *per se*.

### 4.3.2. Simulacija ograničene populacije

Iznenadujuće zapažanje iz potpoglavlja 4.1 da vrednost modusa *raste* kod krive pasivnog trenda, nasuprot uobičajenim interpretacijama ove krive kao krive u kojoj je vrednost modusa konstantna (npr. Carrol, 2001), ostalo je da se još jednom preispita. Zaključak je ranije izvučen posmatranjem ponašanja krive trenda kompleksnosti koja je simulirana direktno, korišćenjem druge simulacione platforme, takođe razvijene za potrebe ovog rada. Ukoliko bi nalazi iz prethodnih simulacija bili tačni, vrednosti modusa sve tri verovatnoće koje se pojavljuju u svojstvu atributa organizama morale bi da se povećavaju već samo zbog prisustva levog zida, kako je ranije pokazano, ali bi modalna vrednost verovatnoće razmnožavanja morala da pokazuje najveći prirast, jer na nju pored zida utiče i prisustvo aktivnog trenda.

U cilju izvođenja ovih eksperimenata preinačen je način izvođenja eksperimenta, iz



**Slika 29.** Promene vrednosti modusa verovatnoća razmnožavanja i mutacije, od 70–300-og evolutivnog koraka. Verovatnoća preživljavanja nije prikazana, jer se njenim dinamičkim podešavanjem kontroliše veličina populacije.

vrednost modusa jer je broj organizama nedovoljno veliki za konstruisanje histograma sa kog bi se očitala vrednost modusa željene preciznosti). Rezultati su u skladu sa očekivanim u slučaju krive vrednosti modusa verovatnoće razmnožavanja. Što se tiče verovatnoće mutacije, ona ne pokazuje uočljiv trend, što bi se moglo očekivati zbog efekta zida. Naše mišljenje je da bi isti

jednostavnog razloga što, u originalnim postavkama eksperimenta, zbog geometrijske progresije broja organizama nije moguće pratiti evolutivni proces u dužem broju koraka, pa je stoga uvedena progresivna stopa smrtnosti (verovatnoća umiranja) koja zavisi od broja organizama u populaciji, tako podešena da se ovaj broj uvek kreće oko 1.000. **Slika 29** prikazuje promene vrednosti modusa verovatnoća razmnožavanja i mutacije, tokom 70–300-og evolutivnog koraka (za prve faze evolucije nemoguće je oceniti

faktori koji stimulišu rast verovatnoće razmnožavanja mogli igrati blago negativnu ulogu u slučaju verovatnoće mutacije, čime bi *de facto* mogli eliminisati efekat zida. Simulacija pasivnog trenda na nivou individualnih organizama u slučaju verovatnoće razmnožavanja praktično je potvrdila nalaze iz direktne simulacije atributa organizama u prisustvu zida, i generisala dodatne uvide u evolucionu proces.

#### **4.4. Simulacije korišćenjem AVIDA-ED simulacione platforme**

Kao što je ranije rečeno, zbog problema u izvođenju evolutivnih eksperimenata sa jedne strane, zbog sporosti evolutivnog procesa, i zbog ograničenja u fosilnim ostacima, pre svega zbog nekompletnosti, ali i drugih, u poslednje vreme se digitalne simulacije evolutivnog procesa pojavljuju kao alternativa. AVIDA, platforma letimice predstavljena u potpoglavlju 3.2, i dalje je jedna od najčešće korišćenih platformi za evolutivne simulacije. Iz tog razloga, kao četvrti i finalni set eksperimenata evolutivnih simulacija predstavljen u ovoj disertaciji, pored upotrebe simulatora samostalno razvijenih za potrebe ove disertacije, predstavljamo i simulacije izvedene simulacionom platformom AVIDA-ED, javno dostupne na veb stranici Univerziteta u Mičigenu, SAD.

##### **4.4.1. Šta je AVIDA-ED?**

AVIDA je platforma dizajnirana sa specifičnom svrhom da simulira evolucionu proces (Ofria and Wilke, 2004). Digitalne simulacione platforme, pa i AVIDA, ne samo da omogućavaju pasivnu analizu evolutivnog procesa iz ugla posmatrača, već i njegovo re-kreiranje. AVIDA omogućava asinhronu replikaciju digitalnih organizama, i modelira njihove međusobne interakcije, kao i interakcije sa životnom sredinom. Organizmi se takmiče za prostor u virtuelnom okruženju i evoluiraju kroz generacije putem slučajnih mutacija koje se javljaju u procesu replikacije. Opstanak gen-ekvivalenta određenog organizma u budućim generacijama zavisi od sposobnosti tog organizma da se razmnožava brže i da živi duže od drugih organizama, što je pokušaj refleksije evolutivnih principa realne evolucije. Do sada je korišćena za istraživanje nekoliko osnovnih aspekata evolutivnog procesa, uključujući evoluciju kompleksnosti (Lenski et al, 2003), odabir srodnika (engl. *kin selection*) (Goings et al, 2004), specijalizaciju i fenotipsku plastičnost (Chow et al, 2004; Ostrowski et al, 2007) i genetičku organizaciju (Misevic et al, 2005). Ono što je posebno interesantno, je da AVIDA kao platforma omogućava analizu efekata mutacija ne samo u smislu njihovog prisustva, nego i sleda kojom su nastajale, da bi omogućile nove funkcionalnosti organizma. Ova vrsta analize važna je u

odgovorima na pitanja i kritike koji su na liniji Bihijeovog argumenta, jer bi mogla pomoći u razumevanju nastajanja „nereducibilno kompleksnih“ organskih sistema, poput recimo oka.

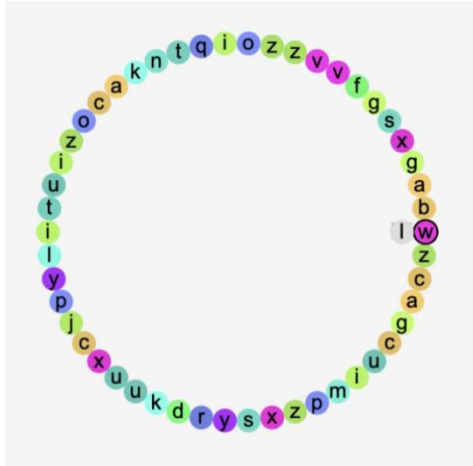
#### 4.4.2. Pojmovni okvir AVIDE

Kao evolutivna simulaciona platforma koje je u upotrebi već više od 20 godina, AVIDA je izgradila sopstveni rečnik, čije predstavljanje otvara uvid i u mehaniku i logiku simulacionog procesa. „*Avidian*“ je ekvivalent biološkog organizma, u osnovi samoreplikujući računarski kod. Organizam ima svoj genom–analog, koji je napravljen od niza instrukcija na osnovu kojih organizam izvršava operacije na nekom binarnom zapisu.<sup>104</sup> Ove instrukcije se vizuelno predstavljaju kao kružna sekvenca, čineći neku vrstu cirkularnog gena. Na osnovu svake instrukcije, organizam može izvesti jednu operaciju, od kojih su neke na binarnim zapisima koji služe, ukoliko postignu određene funkcije, kao ekvivalent većih evolutivnih prodora, osvajanja novih ekoloških niša (na primer razvoj moći letenja), dok su druge bazičnije prirode, i tiču se operacija u vezi sa kompjutacionim okruženjem, manipulaciju računarskom memorijom, regulaciju samoreplikacije i slično. *Avidian* je sposoban za samoreplikaciju – deobom, slično bakterijama, izgrađuje genom svojih potomaka, koji se nakon kompletiranja ugrađuje u novostvoreni organizam smešten ili u neposredno okruženje roditelja i negde u ekosistem, po slučajnom ključu, u zavisnosti od konfiguracije koju određuje korisnik. AVIDA ekosistem je sličan šahovskoj tabli i okruženju koje postoji u „Igri života“, sa tim što se u AVIDA-i životni prostor naziva petrijeva šolja, po analogiji sa mikrobiološkim eksperimentima. Svaki organizam zauzima jedno polje u petrijevoj šolji. Čelije su numerisane od 0 do konfigurisane maksimalne veličine populacije, obično od 3.600 do 10.000. Ako su sva četiri susedna mesta roditeljskog organizma već zauzeta drugim organizmima, tada će jedan od njih biti odabran i uništen/zamenjen novonastalim organizmom. Ukoliko se menja po principu čiste slučajnosti, što jeste jedna od mogućnosti, treba primetiti da u tom scenariju nema prirodne selekcije, nema nikakvog upoređivanja prilagođenosti ili bilo koje interne osobine starog organizma na polju i novonastalog, zamena se vrši po principu čiste slučajnosti. Alternativno, eksperimentator može izabrati da zameni najstariji organizam u okruženju. Kompetitivnost organizama, odnosno njihova evolutivna prilagođenost, se uzima u obzir na implicitniji način — s obzirom da je evolucija asinhrona, organizmi izvršavanju operacije u svojim acikličnim genomima različitim

---

<sup>104</sup> Da bismo približili čitaocu ovaj apstraktan opis, prilažemo primer. Ako je binarni zapis 100101110 operacija na njemu bi mogla biti „promeniti na drugoj poziciji zapisa vrednost bita“, pri čemu bi zapis postao 110101110. Operacije u AVIDA-i mogu biti i binarne, izvedene na paru binarnih zapisa.

brzinama, već prema tome koliki kompjuterski resursi im stoje na raspolaganju, a oni se dodeljuju kao nagrada za razvoj određenih funkcija, tako da „uspešniji“ organizmi brže izvršavaju svoje operacije, samim tim se brže samoreplikuju, pa je veća verovatnoća da će potomak uspešnijeg roditelja zameniti neuspešniji organizam nego obratno, čime se povećava



Slika 30. Primer genoma *Avidian*-a.

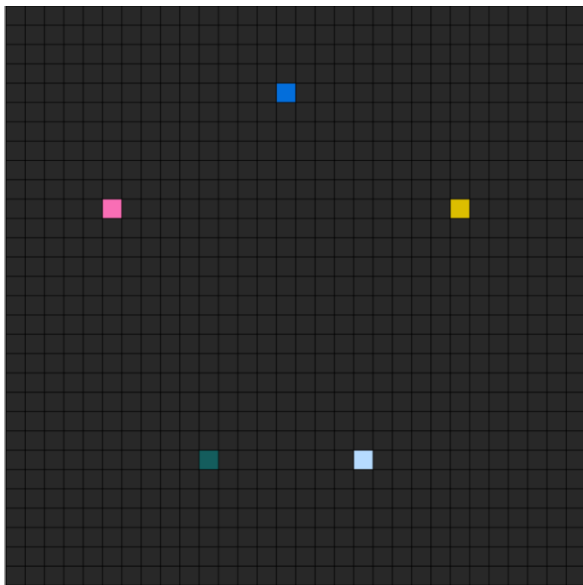
udeo uspešnijih organizama u populaciji. Iskorišćena je asinhronost evolucionog procesa, činjenica da je evolutivni interni sat različit za svaki organizam, da bi se istakla kompetitivna različitost organizama kroz brzinu reprodukcije uzrokovanu dostupnošću kompjutacionih resursa. Kako se određuje koji je organizam prilagođeniji, odnosno uspešniji? Već je spomenuto da genom organizama sadrži setove instrukcija koje se odnose na izvršavanje serije operacija. S vremena na vreme, ove se operacije, slučajno, tako „slože“ u vremenskom sledu i prema svojoj prirodi, da predstavljaju analoge Bulovih funkcija.<sup>105</sup> Bulove funkcije se među sobom razlikuju po složenosti, odnosno broju operacija koje organizam mora da izvrši da bi postigao punu funkcionalnost date Bulove funkcije, i shodno tome, organizmi se različito nagrađuju za ostvarivanje Bulovih funkcija različite težine. Na primer, Bulova funkcija „jednako“ (engl. *isEqual*) je izuzetno teška za podražavanje, dok je Bulova funkcija „ne“ (engl. *NOT*) relativno laka. Iz tog razloga se za ostvarivanje težih funkcija dodeljuju veće nagrade u smislu raspoloživosti kompjutacionih resursa.

Fenotip *Avidian*-a obuhvata sve njegove ispoljene karakteristike i ima istu definiciju kao u biologiji. Organizam stiče određene fenotipske osobine interagovanjem sa okolinom. One obuhvataju ulazno-izlazne operacije koje predstavljaju interakcije sa okruženjem, prilagodljivost, vreme gestacije (broj instrukcija koje treba izvršiti da bi se stvorio potomak), starost, interakcije sa okolnim organizmima i verovatnoću mutacije. Kao i u biologiji, mapiranje geotipa u fenotip nije linearno — fenotipska svojstva reflektuju samo deo genetičkih informacija. Sam genotip, Slika 30, sadrži setove instrukcija koje se izvršavaju u svakom

<sup>105</sup> Bez ulaženja u detalje, Bulove funkcije predstavljaju logičke operacije: *ne*, *i*, *ili*, *jednako*, itd. Na primer, ako je organizam tako evoluirao da može da preinači binarni zapis 101 u 010, smatra se da je on evoluirao Bulovu funkciju *ne* i po analogiji, slično tome za sve ostale Bulove funkcije (pri čemu su neke binarne). Bulove funkcije otvaraju ekološke niše organizmima koje omogućavaju posebne vrste nagrada.

ciklusu, ali i one koje se ne izvršavaju jer se preskaču, ali *bi mogle* da se izvrše. Kao i u biologiji, latentni informacioni sadržaj genotipa je veći od informacija ispoljenih u fenotipu.

Pored genotipa i fenotipa, možda najvažniji značaj u arhitekturi ove simulacione platforme imaju pojmovi *brzina metabolizma* i *vreme gestacije*. Kao što je već rečeno, *Avidian*-i imaju pristup kompjutacionim resursima računara na kom se simulacija izvršava. S obzirom da je simulacija asinhrona, svaki organizam se deli različitom brzinom, već prema raspoloživosti procesorskih taktova koje je stavio pod kontrolu. Organizmi koji su osvojili funkcionalnost neke od Bulovih funkcija, dobijaju posebne nagrade u vidu povećane količine kompjutacionih resursa na raspolaganju, pa stoga setove instrukcija u svom genomu (koji rezultuju deobom), izvršavaju relativno brže od drugih organizama. Individualna brzina izvršavanja setova instrukcija u genomu naziva se *brzina metabolizma*, po analogiji sa biološkim organizmima. S druge strane, *vreme gestacije* predstavlja ukupan broj operacija koje se izvršavaju u svakom ciklusu. Ovaj broj može biti i značajno veći, ili značajno manji od 50, kolika je formalna dužina genoma, jer se neke operacije preskaču, a neke izvršavaju više puta, već u zavisnosti od regulacije, vrlo slično efektima regulatornih gena kod bioloških organizama. Ova dva pojma

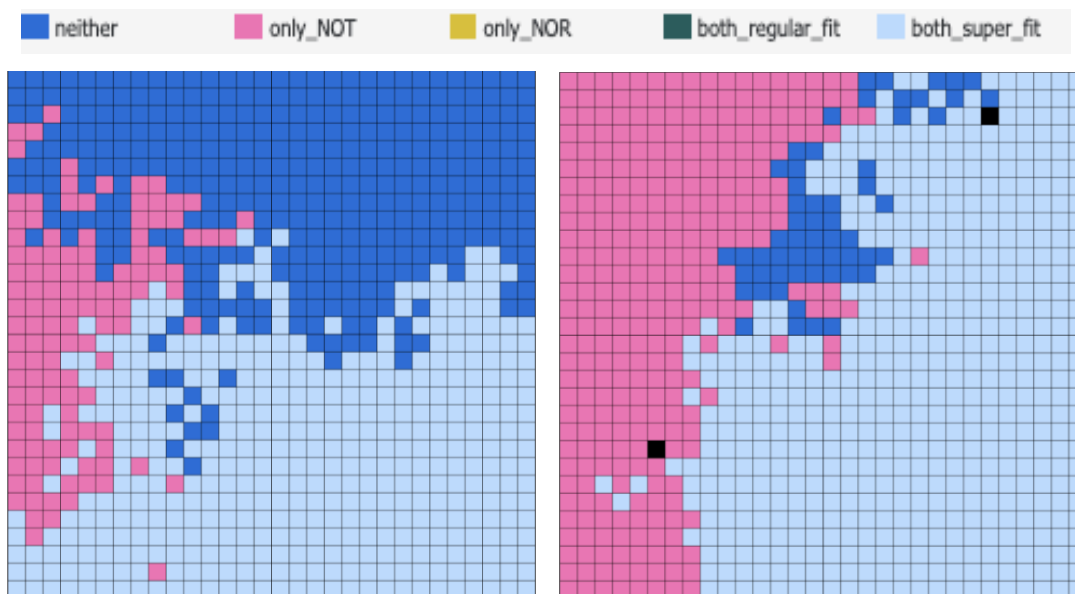


**Slika 31.** Početni raspored *Avidian*-a u simulacijama (legenda prikazana uz **Sliku 32**).

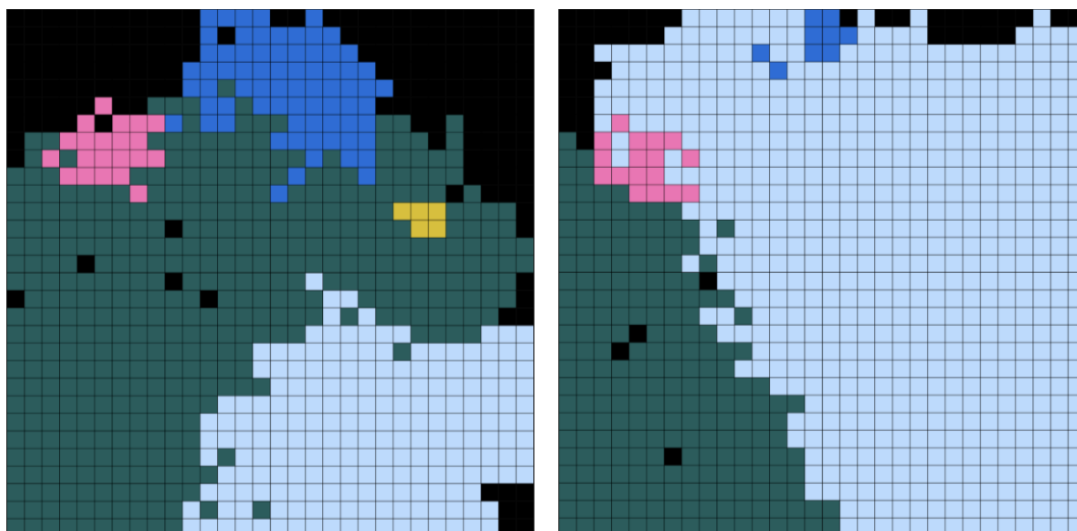
otvaraju put konstituisanju najvažnijeg pojma u *AVIDA*-i — *stepena prilagođenosti* — koji je količnik *brzine metabolizma* i *vremena gestacije*. Ceo konstrukt je relativno intuitivan i implicira da će organizmi koji imaju veći pristup kompjutacionim resursima, dakle brži metabolizam, ostavljati relativno veći broj potomaka i vremenom početi da dominiraju u populaciji. Međutim, ako iste efekte postižu na manje efikasan način od drugih organizama, reflektovan u većem broju operacija (*vreme gestacije*) koje je neophodno izvršiti za postizanje istih efekata, biće evolutivno inferiorni, odnosno manje prilagođeni, i shodno tome sporije će se deliti što će rezultovati umanjnim udelom njihovih potomaka u populaciji.

#### 4.4.3. Simulacije korišćenjem AVIDA-ED platforme

Četvrti, i poslednji, set eksperimenata sa ciljem proučavanja odabranih aspekata biološke evolucije izveli smo korišćenjem AVIDA-ED platforme.<sup>106</sup> Primarni cilj simulacija bio je preispitivanje Guldovih ideja o odnosu organizam–životna sredina u smislu nepostojanja globalnog trenda, odnosno vizija evolucionog procesa kao procesa u kom se organizam prilagođava trenutnom okruženju. Adamijeva grupa je već saopštila da se određene stečene osobine mogu izgubiti u jednostavnijim okruženjima, i ako bi ovaj nalaz bio usvojen kao konačan, to bi impliciralo da ne postoje globalni trendovi u evoluciji — ona bi bila samo privremena trka ka lokalnom optimumu u trenutnom okruženju generisanom na, bar delimično, slučajan način. S druge strane postoje ideje o sistematskom kretanju određenih svojstava u jednom pravcu, poput Đianhuijeve teze spomenute u potpoglavlju 4.3, kao i rezultata naših simulacija korišćenjem trećeg simulatora opisanog u istom poglavlju, koji pokazuju da zbog inherentne arhitekture i unutrašnje strukture evolucionog procesa, sve osobine koje utiču na verovatnoću razmnožavanja organizama bivaju aktivno selektovane, dok se ostale osobine mogu i dobijati i gubiti. Simulacija je zamišljena na sledeći način: kreirano je 5 *Avidian*-a, sa različitim osobinama.



<sup>106</sup> Dostupne na adresi <https://avida-ed.msu.edu/app4/>.



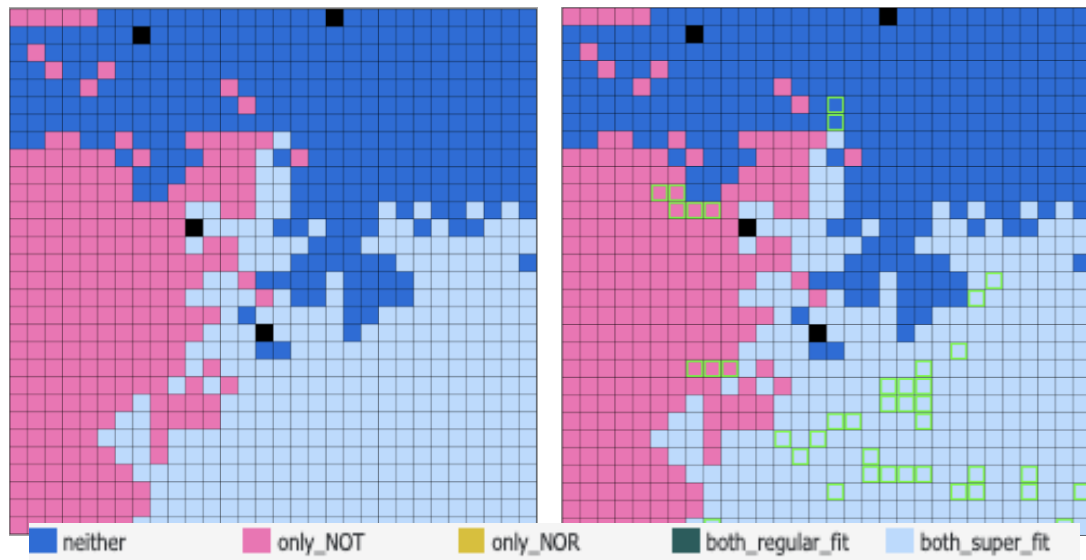
**Slika 32.** Zastupljenost potomaka pet *Avidian*-a koji mogu da vrše različite Bulove funkcije, u 4 različita okruženja (crnom bojom su predstavljena nezauzeta polja).

*Avidian 1* je najjednostavniji organizam koji ne može da izvrši nijednu Bulovu funkciju. *Avidian 2* je organizam koji može da izvrši Bulovu funkciju *NOT*. *Avidian 3* je organizam koji može da izvrši Bulovu funkciju *NOR*. *Avidian 4* je organizam koji može da izvrši obe Bulove funkcije, ali nije optimizovan – ima relativno dugačko *vreme gestacije*, dok je *Avidian 5* organizam koji može da izvrši obe funkcija, a pritom je optimizovan, tako da može da ih izvrši u relativno kratkom *vremenu gestacije*, odnosno u malom broju koraka/operacija. Na ovaj način mogao je da se prati i proces sticanja, i proces gubljenja novih funkcija u zavisnosti od okruženja, kao i odnos evolutivnih kompetetivnost organizama sa bitno drugačijim svojstvima u različitim okruženjima. Dužina trajanja evolucije ograničena je na 300 koraka (*napomena*: 300 koraka ne znači da će svaki organizam imati 300 ciklusa, jer organizmi imaju različite *brzine metabolizma*).

Na kompozitnoj **Slici 32** prikazani su ishodi evolucije u smislu zastupljenosti potomaka svih 5 *Avidian*-a u 4 različite sredine: 1) sredine u kojoj se vršenje Bulovih funkcija ne nagrađuje, 2) sredine u kojoj se nagrađuje samo Bulova funkcija *NOT*, 3) sredine u kojoj se nagrađuje samo Bulova funkcija *NOR*, i 4) sredine u kojoj se nagrađuju obe Bulove funkcije. Iako eksperiment predstavlja pojednostavljenje realnog evolutivnog toka, on ipak reflektuje generalne osobine i principe evolutivnog razvoja. U najjednostavnijem okruženju, **Slika 32a**, u kom nema ekoloških niša koje bi mogle obezbediti posebne nagrade, odnos udela potomaka dva previše kompleksna tipa organizama (tamno-zelena i svetlo-plava) pokazuje da je opšta efikasnost presudna u stepenu preživljavanja, jer je organizam koje je generalno optimizovaniji uspeo da preživi u okruženju u kom se njegove specijalne veštine ne nagrađuju. U realnom

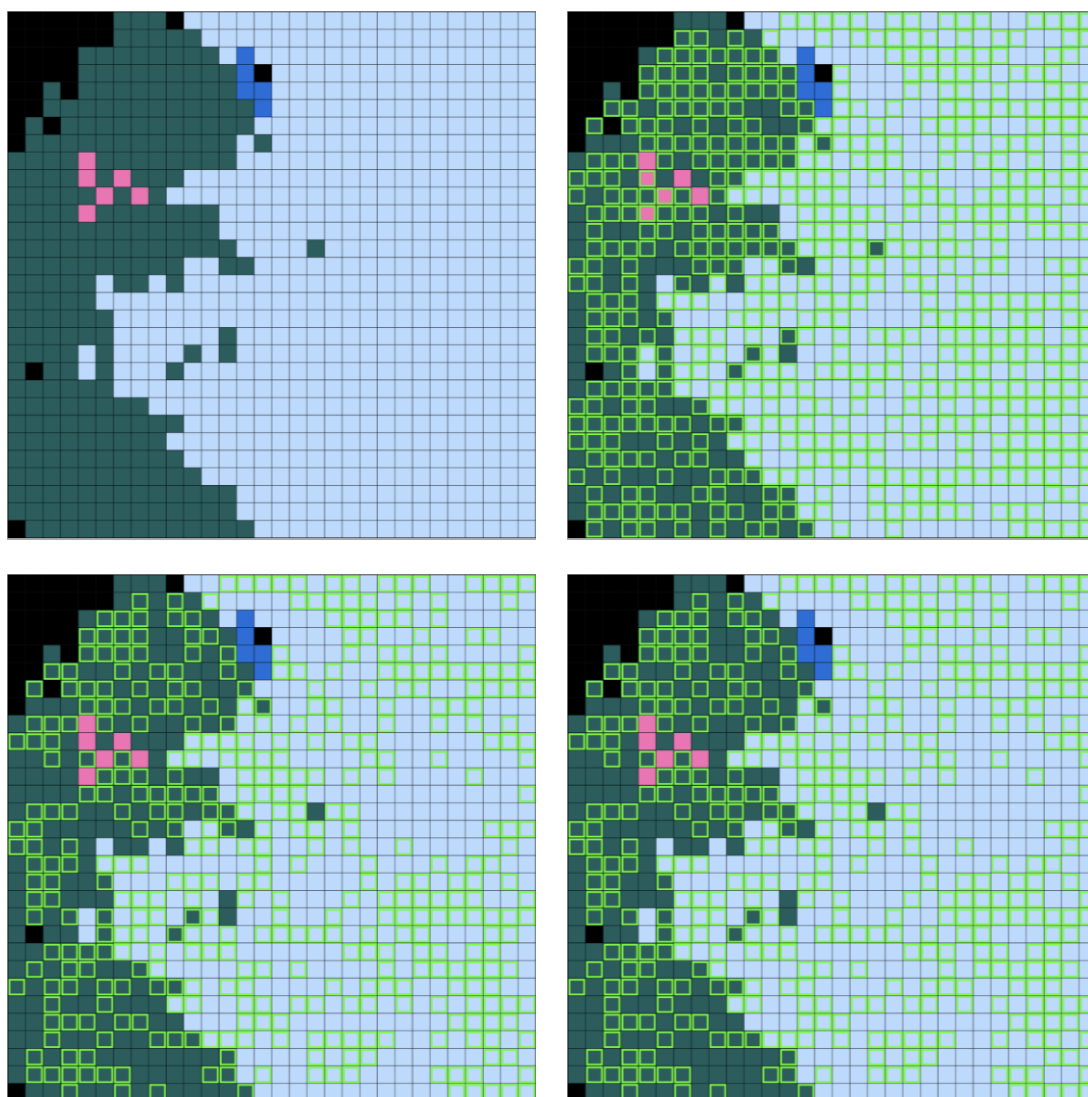
biološkom okruženju, zaključak bi se mogao odnositi na cenu specijalizacije, odnosno dodatnu kompleksnost koja je neophodna za ostvarivanje određene specijalne funkcije, ili osvajanje nove niše, npr. sposobnosti letenja.

Cena viška kompleksnosti se vidi i na primeru dva organizma koji su bili specijalizovani za dve različite Bulove funkcije, *NOT* i *NOR*, pri čemu je funkcija *NOT* znatno „jeftinija“ u smislu cene koja je plaćena kompleksifikacijom genoma da bi se ostvarila. Jednostavniji, ili je možda prigodnije reći *optimalniji*, *NOT* organizam uspeo je da ostavi potomke i preživi, dok je kompleksniji organizam *NOR* nestao. Najjednostavnije okruženje, **Slika 32a**, pokazuje da je i višak kompleksnosti u smislu broja funkcionalnosti, i višak kompleksnosti u ostvarivanju tih funkcionalnosti, zapravo evolutivni hendikep. Treba imati u vidu da **Slika 32** predstavlja potomke 4 organizma bez obzira da li su oni zadržali početne funkcionalnosti i specijalizacije ili su ih mutacijama u međuvremenu izgubili. Na **Slici 33** prikazana je prostorna distribucija funkcionalnosti početnih organizama, superponirana na distribuciju populacija, tako da se iz ove slike može videti i gubitak i sticanje novih funkcija. Odgovor na pitanje sticanja i gubitka funkcija je direktno u vezi sa kontroverznim pitanjem opšteg trenda biološke kompleksnosti, i odnosi se na Guldovu opasku da se organizmi zapravo samo prilagođavaju neposrednom, lokalnom okruženju. **Slika 33** prikazuje samo krajnju mapu distribucije populacija potomaka i mapu *NOT* funkcionalnosti, iz prostog razloga što nijedan organizam nije zadržao *NOR* funkcionalnost, iako je simulacija započeta sa tri organizma koji su je imali. Simulacija nedvosmisleno pokazuje da gubitak nepotrebne kompleksnosti obezbeđuje evolutivnu prednost, i javlja se kao rezultat prirodne selekcije u datom okruženju. Biološke analogije bi se mogle naći u primerima gubitka vida kod pećinskih životinja, ili udova kod morskih sisara, kitova i delfina, kao i zmija nastalih od reptila sa udovima, ili sposobnosti letenja kod ptica koje nisu izložene kopnenim predatorima, kao npr. ptice kivi sa Novog Zelanda, ili izumrle ptice dodo na Mauricijusu. Zaključak je u osnovi neodarvinistički, jer je uzrok promene kompleksnosti (iako ne njenog porasta) upravo prirodna selekcija.



**Slika 33.** a) Raspored populacija potomaka 5 različitih *Avidian*-a u drugom setu eksperimenata u okruženju koje ne pruža nagradu za razvoj bilo koje Bulove funkcije, i b) superponirana mapa *NOT* funkcionalnosti na mapu distribucije populacija potomaka.

Međutim, možda je interesantniji slučaj *NOT* Bulove funkcije. Kao što se vidi na **Slici 33b**, raspored *NOT* Bulove funkcija po populacijama potomaka pokazuje da se ona uglavnom izgubila u populacijama potomaka organizama koji su je imali jer nije obezbeđivala evolutivne kompetitivne prednosti, što ne iznenađuje. Ono što je iz ugla ortodoksnog neodarvinizma možda iznenađujuće je što se pojavila u tragovima i u populaciji potomaka organizma koji nije imao nijednu specijalizaciju. Zapažanje je u potpunosti na liniji neutralističkih nalaza, jer iako ne predstavlja evolutivnu prednost, s obzirom da je njena kompleksnost relativno mala (što korespondira sa malom „cenom“ koja se plaća za njeno privremeno prisustvo), *NOT* funkcionalnost se pojavila sasvim slučajno. U slučaju promene okruženja, ova neutralna mutacija bi bila fiksirana upravo prirodnom selekcijom, ili postala deo kompleksnije sekvence operacija koje bi izvršavale možda i neku drugu, još kompleksniju funkciju — koja bi pronašla način da iz okruženja izvuče nagradu.



**Slika 34.** Raspored populacija potomaka 5 *Avidian*-a u okruženju u kom se nagrađuju obe Bulove funkcije, i *NOT* i *NOR*. a) Krajnji raspored potomaka nakon 300 iteracija, b) raspored potomaka koji mogu da vrše *NOT* funkciju, bez obzira na poreklo, c) raspored potomaka koji mogu da vrše *NOR* funkciju, bez obzira na poreklo, i d) raspored potomaka koji mogu da vrše obe funkcije, bez obzira na poreklo.

Njeno poreklo je u potpunosti neadaptacionističko. Naravno, na višem nivou apstrakcije možda bi se moglo argumentovati da je i ne-adaptacionizam zapravo adaptacionizam, odnosno da su organizmi razvili sposobnost generisanja neutralnih, ili čak blago negativnih, mutacija jer u krajnjem ishodu, u široj i strateškoj slici evolutivnih prednosti i mana, one obezbeđuju veći stepen prilagođenosti, odnosno predstavljaju adaptaciju. Pojednostavljeno, sposobnost neadaptacionističkog generisanja novih osobina mogla bi biti — adaptacija (videti fusnotu 93).

U poslednjem setu eksperimenata, ispitivali smo sticanje i gubljenje naslednih osobina u vrlo izdašnom okruženju, koje nagrađuje obavljanje bilo koje od dve odabrane Bulove

funkcije, nezavisno. Na **Slici 34a**, prikazan je raspored populacija potomaka u ovom okruženju. Iz rasporeda se vidi dominacija potomaka organizama koji su na početku mogli da obavljaju obe funkcije, pri čemu je optimalniji organizam bio uspješniji u ostavljanju potomstva, što je očekivano. Uspele su da prežive i populacije *Avidian*-a koji nije imao specijalizaciju, i onog koji je imao samo „jeftiniju“ *NOR* specijalizaciju. Kompleksnija *NOR* specijalizacija se izgubila. Ono što je iznenađenje je da je jedan broj potomaka organizma sa *NOR* specijalizacijom istu izgubio, **Slika 34b**, još jednom pokazujući da je cena specijalizacije u odnosu na opštu jednostavnost ponekad prevelika. Isti zaključak može se izvesti i posmatranjem broja potomaka koji mogu da izvedu „skuplju“ *NOR* funkciju, jer se ona izgubila i kod dela potomaka organizama koji su mogli da je izvrše na početku eksperimenta. Cena koju specijalizacija zahtevaju u smislu adaptiranosti, naročito kroz efekte na produženo *vreme gestacije*, je ograničavajući faktor u prevalenciji potomaka različitih digitalnih organizama. Takođe, opšta efikasnost organizama se pokazuje se kao izglednija predispozicija za razvoj neke specijalizacije, nego već specijalizovano stanje, drugim rečima razvoj prve specijalizacije negativno utiče na razvoj druge jer se korist dvostruke specijalizacije kompenzuje značajnim povećanjem kompleksnosti u slučaju akumulacije specijalizacija.

### Zaključak

Ova rad predstavlja sintetički i eksperimentalni napor objedinjavanja, usklađivanja, pa i provere, teorijskih i eksperimentalnih saznanja vezanih za temu opšte i, naročito, biološke kompleksnosti. U revijalnom delu predstavili smo pogled na semantički sadržaj pojma kompleksnosti iz ugla više mislilaca: Džonsona, Adamija, Gelmana, Vebera i Emeša (Johnson, 2002; Adami 2002; Gell-Mann, 2002; Weber, 2005; Emmeche, 1997). Posebno smo istakli značaj razlikovanja sirove kompleksnosti i efektivne kompleksnosti (ili algoritamske kompleksnosti, u informatičkoj terminologiji), koja igra važnu ulogu u interpretaciji genetičke kompleksnosti u odnosu na fenotipsku, i koja već samom definicijom sprečava prividne paradokse i probleme poput Perakovog argumenta (videti potpoglavlje 2.3.2).

Zatim smo čitaoca proveli kroz izazove identifikacije i interpretacije trendova fizičke i biološke kompleksnosti, kroz pitanje evolutivne konvergencije, kao i termodinamičke aspekte kompleksnosti uz ugla odnosa entropija sistema i sredine. Predstavili smo najvažnije izazove ustanovljavanju „vremenske strele kompleksnosti“ po ugledu na strele vremena, entropije, i slobodne energije i u fizičkoj i u biološkoj realnosti, kao i pokušaje kvantifikacije

kompleksnosti kroz direktno dovođenje u vezu sa termodinamičkim pojmovima, npr. Čejsonov (Chaisson and Chaisson, 2002) pokušaj svođenja kompleksnosti na attribute protoka slobodne energije kroz sistem, kao i na otvorena, još uvek nerešena pitanja o budućnosti Univerzuma i slobodne energije u njemu, sa kojim je proces kompleksifikacije direktno povezan.

U sledećem delu, predstavili smo pokušaje demarkacije denotacije pojma biološke kompleksnosti u odnosu na fizičku, pa i interesantan pokušaj konstituisanja biologije kao nauke upravo kroz specifičnosti fenomena biološke kompleksnosti. Dovedi smo u vezu pojam kompleksnosti i njegove aspekte i attribute sa opštim odrednicama života kao takvog, kroz radove Mičela (Mitchell, 2003) i noviji rad Forestiera (Forestiero, 2022). Interesantan je pokušaj da se demarkacija pojma biološke kompleksnosti u odnosu na fizičku izvrši kroz tvrdnju repetitivnosti transformacija i reakcija u ponavljanim okruženjima kod kompleksnih fizičkih objekata, za razliku od bioloških kod kojih su, zbog mutacija u filogenetskoj ravni, ili individualnih stohastičkih fenomena u ontogenetskoj, ishodi neizvesni. Izneli smo i sopstvenu kritiku ovako postavljene demarkacione linije pozivanjem na Hajzenbergov princip neodređenosti, zaključujući i da apsolutna repetitivnost odgovora kompleksnih fizičkih sistema nije zagarantovana, osim u radikalnom mehanicizmu. Na kraju smo istakli postojanje biološke plastičnosti kao jedno od mogućih intrinzičnih svojstava bioloških kompleksnih sistema, za razliku od fizičkih.<sup>107</sup>

Zatim smo predstavili Ešbijeve zakon, po našem mišljenju nepravedno zapostavljen zakon koji se direktno odnosi na kompleksnosti sistema, a primenjiv je na sve nauke, od socijalnih i humanističkih do fundamentalnih.<sup>108</sup> Zakon, pojednostavljeno, kaže da agent mora raspolagati spektrom odgovora na stimulse iz okruženja koji je po broju, u najmanju ruku, jednak broju vrsta stimulusa, da bi tim okruženjem vladao. Drugim rečima, prejednostavni agenti ne mogu biti uspešni u kompleksnim okruženjima. Kompleksnost okruženja povlači i zahtev za kompleksnošću agenta. Ako se zakon ograniči na biološke fenomene, zamenom

---

<sup>107</sup> Na ovom mestu moramo da napomenemo da se ne slažemo u potpunosti i uvek sa idejama, hipotezama i opservacijama iznetim u revijalnom delu rada. Na ovom mestu, ideji da je biološka plastičnost kriterijum razlikovanja biološke i fizičke kompleksnosti mogli bismo da prigovorimo da je u, sasvim drugačijem kontekstu, odbrana dinamičkih sistemskih teorija (DST) u odnosu na kompjutacionizam u Filozofiji kognicije počivala upravo na identifikovanju "plastičnih" fizičkih sistema. Mogli bismo da iznesemo i neke sopstvene primere, npr. Sunčev sistem bi se prilagodio izbacivanju jedne planete iz sistema rekonfiguracijom orbita i promenom brzina kretanja ostalih planeta, itd. Dakle, plastičnost nije svojstvo samo bioloških sistema.

<sup>108</sup> Kao primere upotrebe, ili možda je preciznije reći zloupotrebe, Ešbijeveog zakona možemo pomenuti spamovanje kompjuterskih servera ogromnom količinom email-ova u cilju njihove blokade (Kompjuterske nauke), ili možda čak i interesantniji primer planiranim uništenjem političkih protivnika kroz tabloidno generisanje takve količine izmišljenih afera i optužbi, na koje žrtva tabloidnog linča ne može da odgovori demantima u realnom vremenu i uz realne resurse i ograničenja (real-Politika).

pojmovu „agent“ pojmom „organizam“, i pojma „okruženje“ pojmom „ekosistem“, dobijamo osovину interakcija na koju je Ešbijeve zakon direktno primenljiv.

Zatim smo analizirali odnos kompleksnosti i simetrije, ukazujući i na neke prividne paradokse, s obzirom da je u fizici narušavanje simetrije povezano sa rastom kompleksnosti, dakle obrnuto proporcionalno, dok u biologiji izgleda da i simetrija i kompleksnost rastu zajedno u evolucionom procesu. Formirali smo terminološki okvir simetrija-disimetrija-asimetrija da bismo analizirali aspekte simetričnosti bioloških objekata – organizama, i kao uvod u predstavljanje rezultata sopstvenih istraživanja na ovu temu u istraživačkom delu rada.

Poreklo biološke kompleksnosti je analizirano i sledećim poglavlјima, uključujući i predbiološku i biološku evoluciju kompleksnosti. Predbiološka evolucija je prikazana na primeru teorije Ajgenovih hiperciklusa, hijerarhijskoj nadgradnji autokatalitičkih lančanih reakcija, do paljenja iskre života. Biološka evolucija kompleksnosti može se interpretirati neodarvinistički, kao fenomen uzrokovan prirodnom selekcijom, ili neutralistički, kao akumulacija slučajnosti (npr. MacShea and Brandon, 2010). Oba stanovišta imaju i jake argumente i slabosti, kao i eksperimentalne potvrde i opovrgavanja, i debata pristalica jedne i druge škole mišljenja i dalje traje. Sa ovom debatom je u vezi i priroda trenda biološke kompleksnosti, tumačena ili kao aktivna ili kao pasivna. Pretpostavka prirodne selekcije kao uzroka trenda kompleksnosti nužno vodi do zaključka da je priroda ovog trenda aktivna, dok bi čista akumulacija slučajnosti dovela do pasivnog trenda. Istaknuta je konstantnost vrednosti modusa kao ključni kriterijum razlikovanja ova dva moguća trenda kompleksnosti.

U drugom, samostalno istraživačkom delu rada, predstavili smo 4 različite serije eksperimenata simulirane, digitalne evolucije kompleksnosti. U svakom smo ispitivali odabrani aspekt ili aspekte biološke kompleksnosti sa cilјem otkrivanja do sada nepoznatih osobina ili zakonitosti, ili provere nekih opšte prihvaćenih, a po nama nezaokruženih stavova na temu nastanka, evolucije ili prirode trenda biološke kompleksnosti. Prvi set eksperimenata obavljen je simulatorom koji smo razvili za ove potrebe u Matlab programskom jeziku, u kom je kompleksnost tretirana formalno, kao numerički atribut sistema. Reprodukovan je Guldo (Gould, 1996) „hod pijanca“ kompleksnosti u prisustvu „levog zida“. Eksperimenti su pokazali da je Guldova hipoteza „levog zida“, **odnosno postojanje minimalne kompleksnosti neophodne da podrži život, dovoljan uslov za aktivan trend kompleksnosti udesno, čak i u odsustvu prirodne selekcije**, koji se reflektuje kroz promene svih mera centralne tendencije, uključujući vrednost modusa. Drugim rečima, postojanje aktivnog trenda *nije* dokaz postojanja eksternog uzroka trenda kompleksnosti, bio on prirodna selekcija ili nešto drugo. Efekat zida u

našoj terminologiji dobio je dodatnu dimenziju u odnosu na Guldovu, jer je kod njega efekat zida sveden na rast srednje vrednosti i medijane u evolutivnom procesu, ali *bez* promena vrednosti modusa. **Naše simulacije su pokazale da je pasivan trend nemoguć uz postojanje zida i da je ideja pasivnog trenda u prisustvu zida u suštini oksimoronska.** U drugom setu eksperimenata, takođe simulatorom koji smo za ove potrebe razvili u Matlabu, ispitivali smo poreklo simetrije, i naročito disimetrije, korišćenjem simulacionog okruženja poznatog kao „Igra života“ (engl. *Game of Life*). Ustanovili smo da je **za pojavu disimetrije neophodno prisustvo neke vrste stohastičnosti u pravilima evolucije**, jer bi se u protivnom, stanja radijalne i bilateralne simetrije javljala kao trajni atraktori koji bi „zarobljavali“ organizme u evolutivnom toku. U trećem setu eksperimenata smo simulirali trend kompleksnosti, ali na nivou individualnih organizama, u pasivnom okruženju, odnosno bez „nagrade“ sredine za kretanje u bilo kom smeru. I ovim samostalno razvijenim simulatorom u istom programskom jeziku smo potvrdili efekte levog zida, ali otkrili da verovatnoća razmnožavanja, za razliku od drugih atributa organizma, ima poseban i funkcionalni i biološki status, i da se verovatnoća razmnožavanja kreće aktivno u pravcu povećavanja i bez zida, ali i bez drugih uzroka. Implikacije ovog zaključka su dalekosežne, prvo **kompleksnost koja je u funkciji verovatnoće razmnožavanja se aktivno povećava i bez zida, i bez drugih uzroka.** Ako je verovatnoća razmnožavanja sinonim za prilagođenost, onda se naš zaključak poklapa sa neodarvnističkim stavom da prirodna selekcija bira najprilagođenije, koji onda ostavljaju potomstvo. Međutim, mi taj efekat vidimo i *bez* prirodne selekcije, u okruženju u kom se ne dodeljuje nijedna nagrada za posedovanje bilo koje osobine. **Uzrok ovog fenomena, po nama, nije prirodna selekcija već sama arhitektura evolucionog procesa u kom se generacije smenjuju, postoje preci i potomci, vrši se nasleđivanje**, itd. Mogli bismo taj fenomen nazvati sistemskom selekcijom. Tamo gde se razmnožava smenom generacija, tamo brža smena i više potomaka osigurava dominantnu prevalenciju potomaka u odnosu na konkurenciju. Prilagođenost je samo u funkciji brže smene i više potomaka. **Verovatnoća razmnožavanja nije posledica prilagođenosti, već je prilagođenost sredstvo povećanja verovatnoće razmnožavanja.** Na neki način, poznata sintagma „preživljavanje najprilagođenijih“ bi trebalo da bude zamenjena sintagmom „dominiranje najplodnijih“. Organizmi su najprilagođeniji jer su ostvarili dominantnu prevalenciju potomaka, a ne ostvaruju dominaciju potomaka jer su najprilagođeniji. Kada bi se, kojim slučajem, evolutivna trka odigravala između organizama koji je poseduju nijedno drugo svojstvo, osim svojstva razmnožavanja, sistemaska selekcija bi odabrala one koji su u tom svojstvu najobdareniji. Sve ostale osobine, uključujući

kompleksnost, po našem mišljenju, bivaju selektovane sistemskom selekcijom samo ako su u funkciji ove verovatnoće, i to uz *aktivan trend* svake od njih. Neodarvinizam otprilike sledi diskurs *najprilagođeniji → najveća šansa preživljavanja → najveća šansa ostavljanja potomstva*, dok mi smatramo da bi ekvivalentan diskurs trebalo da bude *najviše potomaka → organizam je bio najprilagođeniji*. Razlika je delikatna. U neodarvinističkom diskursu prilagođenost može imati, odnosno biti reducibilna na neograničen broj svojstava, dok u našem diskursu, samo jedno, doduše kompozitno, svojstvo — verovatnoću (uspešnog) razmnožavanja. U epistemološki centar se stavlja razmnožavanje, a ne prilagođenost. Drugim rečima, ako se o stepenu prilagođenosti sudi samo kroz efikasnost razmnožavanja, onda je predmet naše analize i u raspravama o prilagođenosti zapravo razmnožavanje, uz nepotrebnu masku i komplikaciju. Da bismo pokazali razliku kreirali smo i misaoni eksperiment — planetu *X* na kojoj se organizmi stvaraju žrebom iz *Ništa*, na posebnoj lokaciji, a sve ostalo funkcioniše kao na Zemlji, osim što su organizmi lišeni nagona reprodukcije, uz zadržavanje nagona samoodržanja. Na toj planeti, iako bi se organizmi mogli rangirati prema stepenu prilagođenosti, on ne bi igrao nikakvu ulogu u prevalenciji određenog genoma u populaciji, bio bi potpuno nebitan osim za individualne sudbine organizama. Pojam „predak“ i „potomak“ izgubili bi značenje. Kontrolu genoma imao bi slučajan proces samo zato što on kontroliše razmnožavanje. Dakle, u generalnom slučaju razmnožavanje, a ne prilagođenost, kontroliše prevalenciju organizama, odnosno prilagođenost je važna *samo* u funkciji razmnožavanja, i to u specifičnoj arhitekturi razmnožavanja koju imamo za Zemlji, kroz linije predak–potomak, i opšta svojstva nasleđivanja, dakle vrlo kontingentne razloge. Iz tog razloga, po nama, istinitost neodarvinizma zavisi od kontingentnih faktora, i važi samo uslovno, zbog čega mu osporavamo epistemološki status zakona. Kompleksnost je tu samo sredstvo uticaja na verovatnoću razmnožavanja, a da li će se povećavati ili smanjivati zavisi od lokalnog, prolaznog i slučajnog, okruženja.

U četvrtom i poslednjem setu simulacija, koristili smo platformu AVIDA-ED, koja je javno dostupna na stranici Univerziteta u Mičigenu. Ideja je bila se odnos neutralizma i neodarvinizma ispita još jednom, u svetlu Adamijevih ranijih nalaza. U simulacijama smo potvrdili Adamijeve nalaze, **sticanje osobina koje ne omogućuju evolutivne prednosti, zadržavanje tih osobina izvesno vreme čak i ako impliciraju blag evolutivni trošak, uz mogućnost fiksiranja**. Praktično potvrdili smo neutralističke eksperimentalne nalaze.

Nakon pisanja ove disertacije, koje se pretvorilo u avanturu upoznavanja i sintetičkog objedinjavanja informacija iz više izvora, a koje je kulminaciju doživelo u interpretaciji sopstvenih simulacija, nismo mogli a da ne zauzmemo lični stav po pitanju više kontroverznih

tema vezanih za poreklo i trend biološke kompleksnosti. Svesni rizika koji to nosi, u drugom delu zaključka, u formi unutrašnjeg dijaloga i kroz koncizan format pitanje–odgovor, izložićemo neke od ključnih, i verovatno najrizičnijih stavova, za koje nam se čini da predstavljaju i deo originalnog filozofskog i naučnog doprinosa ovog rada. Ono što sledi predstavlja *naše* mišljenje o temi u ovom trenutku.

*Pitanje 1:* Da li postoji uopšte trend biološke kompleksnosti? Ako postoji, kakav je?

*Odgovor 1:* Iz naših simulacija direktno proizlazi da postoji pseudo-aktivan trend kompleksnosti kao rezultat samog postojanja zida, naročito u njegovoj blizini, i to ne samo kompleksnosti nego svakog svojstva koje ima „levi zid“, u načelu. Ovaj efekat slabi sa udaljavanjem od zida, i najizraženiji je kod onih svojstava koja imaju početno stanje blizu zida. Blizina se u ovom slučaju određuje u relativnim jedinicama veličine inkrementa kojim se to svojstvo menja pri smeni generacija. Nakon udaljavanja od zida, aktivan trend postoji samo u onim svojstvima koja podižu verovatnoću razmnožavanja, i to u uslovima organizacije živog sveta kakav imamo na Zemlji, njegovog specifičnog načina nasleđivanja i principa razmnožavanja. Ako je kompleksnost to svojstvo u funkciji razmnožavanja, u nekom specifičnom okruženju, onda se kompleksnost povećava, ali ako je to jednostavnost, onda se kompleksnost aktivno gubi. Ukoliko se nalazimo daleko od zida, a pritom kompleksnost ne igra nikakvu ulogu u verovatnoći razmnožavanja, ne postoji, po našem mišljenju, nijedan faktor koji bi učinio trend promene kompleksnosti aktivnim. Kompleksifikacija bi pasivno pratila diversifikaciju. Dakle, trend biološke kompleksnosti postoji, ali on nije nužno rastući, i nije nužno aktivan. U blizini zida, i u okruženjima koja nagrađuju kompleksnost trend je aktivan, a u drugim slučajevima pasivan.

*Pitanje 2:* Šta se dešava u stacionarnom okruženju?

*Odgovor 2:* Odgovor na ovo pitanje je — zavisi od početnog stanja organizama, od njihove inicijalne kompleksnosti. Nakon naglih promena okruženja, na primer nakon 5. ekstinkcije, nastupio je relativno statičan period sa stanovišta klime. Oslobođene ekološke niše nudile su nagrade preživelim organizmima koji su počeli da se takmiče u osvajanju istih kompleksifikacijom, naročito u klasi sisara. Kompleksifikacija je ovde pokazivala aktivan trend jer je bila u funkciji razmnožavanja. U načelu, kompleksifikacija ne mora da bude u funkciji

razmnožavanja, čak i u stacionarnom okruženju. Ukoliko su organizmi postigli ravnotežno stanje, i „zasitili“ ekosistem (setimo se hipoteze Konveja Morisa (Conway Morris, 1998) o konvergenciji evolutivnih tokova i postizanju biološke ravnoteže), dalja kompleksifikacija se neće dešavati. Tek smenom okruženja otvoriće se nove ekološke niše koje mogu da podstaknu aktivan trend u razvoju osobina u funkciji razmnožavanja, uključujući tu i kompleksnost.

*Pitanje 3:* Da li je stalna smena okruženja konstanta koja pruža globalno–stacionarni okvir za razvoj trajnog trenda nekih osobina, možda i kompleksnosti?

*Odgovor 3:* Odgovor na ovo pitanje zavisi od toga da li se smena stohastičkih okruženja odvija na istinski stohastičan način u svakom smislu, dakle u situaciji potpune haotičnosti, ili na način koji pokazuje i neke elemente reda u svojoj statistici. Na primer, ako bi se okruženja smenjivala po slučajnom obrascu, ali imala relativno konstantno, slično trajanje, ideja postojanja konstante u okruženju bi možda bila odbranjiva. Tada bi Dezmundova ideja da je podložnost evoluciji (engl. *evolvability*) ta osobina koja kontinualno raste, uzrokovana stohastičkom smenom okruženja možda i bila odbranjiva, međutim mi ne vidimo kako bi se teza odbranila ukoliko pretpostavimo istinsku stohastičnost, i u prirodi, i u trajanju okruženja. Naime, iz 4. seta eksperimenata koje smo izveli jasno proizlazi da se nepotrebne osobine gube ukoliko predstavljaju trošak bez nagrade. Tako bi u slučaju da se neko od okruženja zadrži dovoljno dugo, što bi se nužno desilo ukoliko se okruženja smenjuju na stohastičan način u punom smislu, i podložnost evoluciji izgubila kao svojstvo čim bi naišao dovoljno dug period, a podložnost evoluciji kao svojstvo imalo ikakav trošak.

*Pitanje 4:* Da li postoji razlog za veru u nestohastičnu smenu okruženja?

*Odgovor 4:* Po našem mišljenju, ne. Iako klimatologija na Zemlji pokazuje neke ciklične osobine, npr. Milankovićeve cikluse<sup>109</sup>, katastrofalni događaji koji su prošlosti izazivali ekstinkcije ne pokazuju cikličan obrazac pojavljivanja. Udari asteroida, ili upadanja u stanja globalne hipoksije usled pozitivne povratne sprege i autokatalitičkih efekata teško da

---

<sup>109</sup> Milankovićeve ciklusi odnose se na periodične promene u Zemljinom orbitalnom kretanju i nagibu ose, i svode se na tri vrste uzroka cikličnosti: a) ekscentricitet orbite koji opisuje promene u obliku Zemljine orbite od eliptične do skoro kružne, sa periodom od oko 100.000 godina, b) nagib ose koji se odnosi na promene u nagibu Zemljine ose u odnosu na ravan orbite i varira u periodima od oko 41.000 godina, i c) precesija koja opisuje promene u orijentaciji Zemljine ose u odnosu na zvezdane tačke tokom vremena, sa periodom oko 26.000 godina.

imaju ikakvu predvidivu dinamiku pojavljivanja, i kao takvi u terminologiji Ešbijeovog zakona predstavljaju paradigme nepopravljivog haosa za čitav živi svet. Nositi podložnost evoluciji kao svojstvo u relativno stacionarnim uslovima u dugim geološkim epohama, osim u slučaju da je takva osobina „besplatna“, iz naše perspektive ne deluje izvodljivo. Drugo je pitanje da je podložnost evoluciji moguće nositi besplatno kao latentno svojstvo, pa ga *in situ* generisati u potrebnom momentu preoptiranjem drugih svojstava ili pasivnog dela genoma. To bi možda i moglo biti moguće, uz opasku da latentna svojstva nisu svojstva u punom smislu te reči.

*Pitanje 5:* Da li postoji evolutivna konvergencija i šta je pokreće?

*Odgovor 5:* Odgovor na ovo pitanje je teško dati. Nema sumnje da eksperimentalna i neposredna opažanja potvrđuju konvergenciju evolutivnih rešenja, na primer evoluciju krila kao sredstva letenja kod insekata, ptica i sisara (slepih miševa), što ukazuje da fizička struktura planete Zemlje kao globalnog biotopa često nagrađuje osvajanje atmosferske niše, pa ipak imamo slučajeve da se jedna tako dragocena osobina poput letenja izgubi, na primer u već spomenutom slučaju ptice kivi (potpoglavlje 1.2), ili pingvina. Ako bismo odgovorili da postoji evolutivna konvergencija, na neki način bismo opovrgavali Guldov argument da se u alternativnim premotavanjima sveta ne bi pojavili ljudi, mravi, vrane i magnolije jer su ovi organizmi posledica srećnih okolnosti. Striktno govoreći, zaista se *ne bi* pojavili ovi organizmi kao postojeće taksonomske kategorije, kao što se ponovo ne pojavljuju ni iščezle vrste, ali bi se pojavila slična funkcionalna rešenja zbog fizičkih osobina životnih staništa na Zemlji, poput krila, peraja, udova, zuba, i slično. Moguće je da bi, zbog čiste slučajnosti, atmosfersku nišu u jednom od premotavanja predominantno zauzeli mekušci i bodljokošci. U tom smislu se ne slažemo sa Guldom (Gould, 1996) da bi se na repu distribucije organizama na skali kompleksnosti zaista ponovo pojavili vrlo složeni organizmi, ali nepredvidivi po svojim evolucionim rešenjima; naše mišljenje je da bi ovi organizmi bili predvidivi po svojim *pojedinačnim* evolucionim rešenjima koja bi se pojavila u različitim kombinacijama od postojećih organizama, ali identičnih specifičnih funkcionalnosti ili svrha. Fizički univerzum kao da raspoređuje nagrade po ekološkim nišama, a kako će ih, kojim redosledom i u kojoj kombinaciji nagrada, živi svet osvojiti je stvar slučajnosti. Po našem mišljenju optimalna evolucionarna rešenja primarno su određena fizičkim osobinama našeg makro-kosmosa i životnih staništa na Zemlji, fizičkim zakonima i konstantama, načinom razmnožavanja, itd, dok je fino podešavanje evolucionih rešenja u broju i specifičnoj kombinaciji, posledica ekološke

komponente okruženja, sadejstva organizama, kompeticije i sinergije. Guld bi mogao biti u pravu ako bismo premotali svet dovoljno daleko da život stvaramo ispočetka, jer bi se on možda mogao bazirati na silicijumu, i potpuno drugačijim molekularnim osnovama, ali sve dok premotavanje očuva način nasleđivanja koji danas imamo, stojimo na stanovištu da bi se slična ili ista pojedinačna funkcionalna rešenja ponavljala u naknadnim premotavanjima.

### Bibliografija

1. Abbott, Derek, Paul CW Davies, and Arun K. Pati. *Quantum aspects of life*. World Scientific, 2008.
2. Adami, Christoph, Charles Ofria, and Travis C. Collier. "Evolution of biological complexity." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 97.9 (2000): 4463-4468.
3. Adami, Christoph. "What is complexity?." *BioEssays* 24.12 (2002): 1085-1094.
4. Ageno, Mario. *Le radici della biologia*. Vol. 62. Feltrinelli Editore, 1986.
5. Ashby, W. Ross. "An introduction to cybernetics." (1957).
6. Ashby, W. Ross. "Requisite variety and its implications for the control of complex systems." *Cybernetica* 1 (2): 83-99." (1958).
7. Bak, Per, Kan Chen, and Michael Creutz. "Self-organized criticality in the 'Game of Life.'" *Nature* 342.6251 (1989): 780-782.
8. Ball, P. (2004) *Critical Mass*. London: Arrow Books.
9. Barton, Nicholas H. "On the completion of speciation." *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 375.1806 (2020): 20190530.
10. Beatty, J. (1995). The Evolutionary Contingency Thesis. In G. Wolters & J. G. Lennox (Eds.), *Concepts, Theories, and Rationality in the Biological Sciences*. Konstanz: Universitätsverlag Konstanz - University of Pittsburgh Press.
11. Behe, Michael J. *Darwin's black box: The biochemical challenge to evolution*. Simon and Schuster, 1996.
12. Behe, Michael J. "Molecular machines: experimental support for the design inference." *Cosmic Pursuit* 1.2 (1998): 27-35.
13. Bennett, Charles H. "Universal computation and physical dynamics." *Physica D: Nonlinear Phenomena* 86.1-2 (1995): 268-273.

14. Biologos, 2022. Does the Cambrian Explosion Pose a Challenge to Evolution? <https://biologos.org/common-questions/does-the-cambrian-explosion-pose-a-challenge-to-evolution>. [last accessed 09/04/2022]
15. Bleh, D., T. Calarco, and S. Montangero. "Quantum game of life." *Europhysics Letters* 97.2 (2012): 20012.
16. Blok, Hendrik J., and Birger Bergersen. "Synchronous versus asynchronous updating in the "game of life"." *Physical Review E* 59.4 (1999): 3876.
17. Boisot, Max, and Bill McKelvey. "Complexity and organization-environment relations: Revisiting Ashby's law of requisite variety." *The Sage handbook of complexity and management* (2011): 279-298.
18. Bottjer, David J., James W. Hagadorn, and Stephen Q. Dornbos. "The Cambrian substrate revolution." *GSA today* 10.9 (2000): 1-7.
19. Brockman, John, ed. *Intelligent thought: Science versus the intelligent design movement*. Vintage, 2006..
20. Brunet, T. D. P., and W. Ford Doolittle. "The generality of constructive neutral evolution." *Biology & Philosophy* 33 (2018): 1-25.
21. Callebaut, Werner, G. B. Müller, and S. A. Newman. "The organismic systems approach. Streamlining the naturalistic agenda. Integrating evolution and development. From theory to practice." *Sansom R& Brandon RN* (2007): 25-92.
22. Campbell, David and Keith Miller, "The 'Cambrian Explosion': A Challenge to Evolutionary theory?", in Miller, Keith B., ed. *Perspectives on an evolving creation*. Wm. B. Eerdmans Publishing, 2003.
23. Carlson, Jean M., and John Doyle. "Complexity and robustness." *Proceedings of the national academy of sciences* 99.suppl\_1 (2002): 2538-2545.
24. Carroll, Sean B. "Chance and necessity: the evolution of morphological complexity and diversity." *Nature* 409.6823 (2001): 1102-1109.
25. Carroll, Sean B. "Evolution at two levels: on genes and form." *PLoS biology* 3.7 (2005): e245.
26. Chaisson, Eric J., and Eric Chaisson. *Cosmic evolution: The rise of complexity in nature*. Harvard University Press, 2002.
27. Chow, Stephanie S., et al. "Adaptive radiation from resource competition in digital organisms." *Science* 305.5680 (2004): 84-86.

28. Cisneros, Hugo, Josef Sivic, and Tomas Mikolov. "Evolving structures in complex systems." *2019 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI)*. IEEE, 2019.
29. Conway Morris, Simon. *The Crucible of Creation: The Burgess Shale and the Rise of Animals*. Oxford University Press, 1998.
30. Covello, Patrick S, and Michael W Gray. "On the evolution of RNA editing." *Trends in Genetics* 9.8 (1993): 265-268.
31. Crutchfield, James P., and Karl Young. "Inferring statistical complexity." *Physical review letters* 63.2 (1989): 105.
32. Davidson, Eric H. *The regulatory genome: gene regulatory networks in development and evolution*. Elsevier, 2010.
33. Dawkins, Richard. "Full House." *Evolution* 51.3 (1997): 1015-1021.
34. Dembski, William A. *The design inference: Eliminating chance through small probabilities*. Cambridge University Press, 1998.
35. Dembski, William A. *Intelligent Design: The Bridge Between Science Theology*. InterVarsity Press, 2002.
36. Dembski, William. *No free lunch: Why specified complexity cannot be purchased without intelligence*. Rowman & Littlefield, 2006.
37. Dennett, D.C. (1987) *The Intentional Stance*. Cambridge, Mass: The MIT Press.
38. Desmond, Hugh. "The selectionist rationale for evolutionary progress." *Biology & Philosophy* 36.3 (2021): 32.
39. Dollo, L. (1893). *The Laws of Evolution*. *Bulletin de la Société belge de géologie, de paléontologie et d'hydrologie.*, 7, 164–166.
40. Doob, J. L. (1953) *Stochastic Processes*. New York: John Wiley and Sons ISBN 0-471-52369-0.
41. Duan, Chaorui, et al. "Reduced intrinsic DNA curvature leads to increased mutation rate." *Genome biology* 19.1 (2018): 1-12.
42. Eccles, John C., Friedrich Beck, and J. C. Eccles. "Quantum aspects of brain activity and the role of consciousness." *How the SELF Controls Its BRAIN* (1994): 145-165.
43. Edis, Taner. "Chance and necessity—and intelligent design." *Why intelligent design fails: A scientific critique of the new creationism* (2004): 139-152.
44. Elsberry, Wesley, and Jeffrey Shallit. "Information theory, evolutionary computation, and Dembski's "complex specified information"." *Synthese* 178 (2011): 237-270.

45. Emmeche, Claus. "Aspects of complexity in life and science." *Philosophica* 59.1 (1997).
46. Emmeche, Claus, Simo Køppe, and Frederik Stjernfelt. "Explaining emergence: towards an ontology of levels." *Journal for general philosophy of science* 28 (1997): 83-117.
47. ENCODE Project Consortium Bernstein, B. E., Birney, E., Dunham, I., Green, E. D., Gunter, C., and Snyder, M. (2012). An Integrated Encyclopedia of DNA Elements in the Human Genome. *Nature* 489, 57–74. doi:10.1038/nature11247.
48. Estes, Lyndon, et al. "The spatial and temporal domains of modern ecology." *Nature ecology & evolution* 2.5 (2018): 819-826.
49. Falk, Darrel R. *Coming to peace with science: Bridging the worlds between faith and biology*. InterVarsity Press, 2004.
50. Fates, Nazim. "Does Life resist asynchrony?" *Game of Life Cellular Automata*. London: Springer London, 2010. 257-274.
51. Felsenstein, Joe. "Has natural selection been refuted? The arguments of William Dembski." *Rep Na Center Sci Educ (RNCSE)* 27 (2007): 20-26.
52. Fernández, N., Maldonado, C., and Gershenson, C. (2014). Information measures of complexity, emergence, self-organization, homeostasis, and autopoiesis. In *Guided Self-Organization: Inception*, M. Prokopenko, (Ed.). *Emergence, Complexity and Computation*, vol. 9. Springer, Berlin Heidelberg, 19–51. URL <http://arxiv.org/abs/1304.1842>.
53. Ferraro, Stefano, et al. "Symmetry and complexity in object-centric deep active inference models." *Interface Focus* 13.3 (2023): 20220077.
54. Fike, D. A., et al. "Oxidation of the Ediacaran ocean." *Nature* 444.7120 (2006): 744-747.
55. Forestiero, Saverio. "The historical nature of biological complexity and the ineffectiveness of the mathematical approach to it." *Theory in Biosciences* 141.2 (2022): 213-231.
56. Freese, E. (1962). On the Evolution of the Base Composition of DNA. *J. Theor. Biol.* 3, 82–101. doi:10.1016/S0022-5193(62)80005-8.
57. Gell-Mann, M. (1994) *The Quark and the Jaguar*. New York: Freeman.
58. Gell-Mann, Murray. "What is complexity?." *Complexity and industrial clusters: Dynamics and models in theory and practice*. Heidelberg: Physica-Verlag HD, 2002. 13-24.
59. Gell-Mann, Murray, and Seth Lloyd. "Information measures, effective complexity, and total information." *Complexity* 2.1 (1996): 44-52.
60. Gershenson, Carlos. "Requisite variety, autopoiesis, and self-organization." *Kybernetes* 44.6/7 (2015): 866-873.
61. Gleiser, Marcelo. *The dancing universe: From creation myths to the big bang*. UPNE, 2005.

62. Godfrey-Smith, P. (2001). Information and the argument from design. In: Pennock RT, editor. *Intelligent Design Creationism and its Critics: Philosophical, Theological, and Scientific Perspectives*. Cambridge (MA): MIT Press. p 575–596.
63. Goings, Sherri, et al. "Kin selection: The rise and fall of kin-cheaters." *Proceedings of the Ninth International Conference on Artificial Life*. 2004.
64. Gould, S. J., and Lewontin, R. C. (1979). The Spandrels of San Marco and the Panglossian Paradigm: a Critique of the Adaptationist Programme. *Proc. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.* 205, 581–598. doi:10.1098/rspb.1979.0086.
65. Gould, S. J. (1988). On replacing the idea of progress with an operational notion of directionality. In M. H. Nitecki (Ed.), *Evolutionary Progress* (pp. 319–338). Chicago: University of Chicago Press.
66. Gould, Stephen Jay. "The evolution of life on the earth." *Scientific American* 271.4 (1994): 84-91.
67. Gould, Stephen Jay. *Full house: The spread of excellence from Plato to Darwin*. Harvard University Press, 1996.
68. Gould, S. J. (2002). *The structure of evolutionary theory*. Cambridge, MA: Belknap Press of Harvard University Press.
69. Gould, S. J. (2007). *Ever since Darwin*. NY: W. W. Norton & Company.
70. Graur, D. (2017). An Upper Limit on the Functional Fraction of the Human Genome. *Genome Biol. Evol.* 9, 1880–1885. doi:10.1093/gbe/evx121.
71. Gray, Michael W., et al. "Irremediable complexity?." *Science*, 330.6006 (2010): 920-921.
72. Gregory, T. Ryan. "Coincidence, coevolution, or causation? DNA content, cell size, and the C-value enigma." *Biological reviews* 76.1 (2001): 65-101.
73. Griffiths, P.E., and Gray, R.D. (2002). The developmental systems perspective: organism-environment systems as units of development and evolution. In: Pigliucci M, Preston K (eds) *Phenotypic integration: studying the ecology and evolution of complex phenotypes*. Oxford University Press, Oxford, pp 409–431.
74. Häggström, Olle. "Intelligent design and the NFL theorems." *Biology & Philosophy* 22 (2007): 217-230.
75. Hazen, R. M., Papineau, D., Bleeker, W. *et al.* (2008). Mineral Evolution. *Amer. Mineralogist*, **93**, 1693–1720
76. Heylighen, Francis. "The growth of structural and functional complexity during evolution." *The evolution of complexity* 8 (1999): 17-44.

77. Heywood, Vernon Hilton, and Robert Tony Watson. Global biodiversity assessment. Vol. 1140. Cambridge: *Cambridge university press*, 1995.
78. Hirokawa, Nobutaka, Yosuke Tanaka, and Yasushi Okada. "Left–right determination: involvement of molecular motor KIF3, cilia, and nodal flow." *Cold Spring Harbor perspectives in biology* 1.1 (2009): a000802.
79. Hochberg, G. K. A., Liu, Y., Marklund, E. G., Metzger, B. P. H., Laganowsky, A., and Thornton, J. W. (2020). A Hydrophobic Ratchet Entrenches Molecular Complexes. *Nature* 588, 503–508. doi:10.1038/s41586-020-3021-2.
80. Hoffman, Paul F., and Daniel P. Schrag. "The snowball Earth hypothesis: testing the limits of global change." *Terra nova* 14.3 (2002): 129-155.
81. Huang, Y., and Li, G.-M. (2018). DNA Mismatch Repair Preferentially Safeguards Actively Transcribed Genes. *DNA Repair* 71, 82–86. doi:10.1016/j.dnarep.2018.08.010.
82. Hubby, J. L., and Lewontin, R. C. (1966). A Molecular Approach to the Study of Genic Heterozygosity in Natural Populations. I. The Number of Alleles at Different Loci in *DROSOPHILA PSEUDOOSCURA*. *Genetics* 54, 577–594.
83. Hume, David (1948). "Part II". *Dialogues Concerning Natural Religion* (with introduction by Norman Kemp Smith ed.). Social Sciences Publishers.
84. Huxley, Julian. "Evolution. The modern synthesis." *Evolution. The Modern Synthesis*. (1942).
85. Jablonka, Eva, and Marion J. Lamb. *Evolution in four dimensions, revised edition: Genetic, epigenetic, behavioral, and symbolic variation in the history of life*. MIT press, 2014.
86. François Jacob, *La Logique du vivant : Une histoire de l'hérédité* (Paris : Gallimard, 1970).
87. Jianhui, L. I. "Evolutionary progress: Stephen Jay Gould's rejection and its critique." *Philosophy* 9.6 (2019): 293-309.
88. Johnson, Steven. *Emergence: The connected lives of ants, brains, cities, and software*. Simon and Schuster, 2002.
89. Johnston, Iain G., et al. "Symmetry and simplicity spontaneously emerge from the algorithmic nature of evolution." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 119.11 (2022): e2113883119.
90. Johnston, Iain G., et al. "Reply to Ocklenburg and Mundorf: The interplay of developmental bias and natural selection." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 119.28 (2022a): e2205299119.

91. Jost, Jürgen. "Biology, geometry and information." *Theory in Biosciences* 141.2 (2022): 65-71.
92. Kant, I. "Kritik der Urteilskraft (Critique of Judgement, translated by JH Bernard, New York." (1951).
93. Kauffman, Stuart A. *The origins of order: Self-organization and selection in evolution*. Oxford University Press, USA, 1993.
94. Kimura, M. (1968). Evolutionary Rate at the Molecular Level. *Nature* 217, 624–626. doi:10.1038/217624a0.
95. King, Nicole, et al. "The genome of the choanoflagellate *Monosiga brevicollis* and the origin of metazoans." *Nature* 451.7180 (2008): 783-788.
96. Kleidon, Axel. "How does the Earth system generate and maintain thermodynamic disequilibrium and what does it imply for the future of the planet?" *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 370.1962 (2012): 1012-1040.
97. Knoll, A. H. & Bambach, R. K. Directionality in the history of life: diffusion from the left wall or repeated scaling of the right? *Paleobiology* 26(Suppl.) 1–14 (2000).
98. Knott, C. Gilston (1911). "Quote from undated letter from Maxwell to Tait". *Life and Scientific Work of Peter Guthrie Tait*. Cambridge University Press. pp. 213–215.
99. Kolmogorov, Andrei N. "Three approaches to the quantitative definition of information'." *Problems of information transmission* 1.1 (1965): 1-7.
100. Korthof, Gert. On the origin of information by means of intelligent design?, a review of William Dembski's "Intelligent Design", <https://wasdarwinwrong.com/kortho44.htm> [last accessed 09/05/2022].
101. Langton, Christopher G. "Studying artificial life with cellular automata." *Physica D: Nonlinear Phenomena* 22.1-3 (1986): 120-149.
102. Larroux, Claire, et al. "Genesis and expansion of metazoan transcription factor gene classes." *Molecular biology and evolution* 25.5 (2008): 980-996.
103. Lee, Jia, et al. "Asynchronous game of life." *Physica D: Nonlinear Phenomena* 194.3-4 (2004): 369-384.
104. Lenski, Richard E., et al. "The evolutionary origin of complex features." *Nature* 423.6936 (2003): 139-144.
105. Lineweaver, Charles H., Paul CW Davies, and Michael Ruse. "What is complexity? Is it increasing." *Complexity and the arrow of time* (2013): 3-16.

106. Lloyd, S., Pagels, H. *Complexity as thermodynamic depth*. Ann. Phys. 1986; 188:186 – 213.
107. Luhmann, Niklas. *Soziale systeme: grundriss einer allgemeinen theorie*. Suhrkamp, 1984.
108. Lynch, Michael. "The frailty of adaptive hypotheses for the origins of organismal complexity." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104.suppl\_1 (2007): 8597-8604.
109. Lynch, M. (2006). Streamlining and Simplification of Microbial Genome Architecture. *Annu. Rev. Microbiol.* 60, 327–349.
110. Mainzer, Klaus. *Symmetry and complexity: The spirit and beauty of nonlinear science*. Vol. 51. World Scientific, 2005.
111. Marks, Jonathan. *What it means to be 98% chimpanzee: Apes, people, and their genes*. Univ of California Press, 2003.
112. Maturana, Humberto R., and Francisco J. Varela. *Autopoiesis and cognition: The realization of the living*. Vol. 42. Springer Science & Business Media, 1991.
113. Maynard Smith, J. (1970) *Nature* (London) 225, 563.
114. Mayr, Ernst. *The growth of biological thought: Diversity, evolution, and inheritance*. Harvard University Press, 1982.
115. McShea, Daniel W., and Robert N. Brandon. *Biology's first law: the tendency for diversity and complexity to increase in evolutionary systems*. University of Chicago Press, 2010.
116. McShea, D.W. [1993]. "Evolutionary change in the morphological complexity of the mammalian vertebral column." *Evolution*. Vol. 47, pp. 730-40.
117. McShea, D.W. [1994]. "Mechanisms of large-scale evolutionary trends." *Evolution*. Vol. 48, pp. 1747-63.
118. McShea, Daniel W. "Perspective metazoan complexity and evolution: is there a trend?" *Evolution* 50.2 (1996): 477-492.
119. Meysman, Filip J.R., and Stijn Bruers. "Ecosystem functioning and maximum entropy production: a quantitative test of hypotheses." *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 365.1545 (2010): 1405-1416.
120. Miller, D. (1990) *The Icarus Paradox*. New York: HarperBusiness.
121. Miller, Kenneth R. "Finding Darwin's God: a scientist's search for common ground between God and evolution." (2002).

122. Mills, Donald R., R. L. Peterson, and Sol Spiegelman. "An extracellular Darwinian experiment with a self-duplicating nucleic acid molecule." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 58.1 (1967): 217-224.
123. Mitchell, Sandra D. *Biological complexity and integrative pluralism*. Cambridge University Press, 2003.
124. Mo, N., Zhang, X., Shi, W., Yu, G., Chen, X., and Yang, J.-R. (2021). Bidirectional Genetic Control of Phenotypic Heterogeneity and its Implication for Cancer Drug Resistance. *Mol. Biol. Evol.* 38, 1874–1887. doi:10.1093/molbev/msaa332.
125. Monetti, Roberto A., and Ezequiel V. Albano. "On the emergence of large-scale complex behavior in the dynamics of a society of living individuals: the stochastic game of life." *Journal of theoretical biology* 187.2 (1997b): 183-194.
126. Muñoz-Gómez, Sergio A., et al. "Constructive neutral evolution 20 years later." *Journal of molecular evolution* 89 (2021): 172-182.
127. Nei, M. (2013). *Mutation-Driven Evolution*. Oxford: Oxford University Press.
128. von Neumann J. (1966), *Theory of Self-Reproducing Automata*, edited and completed by A. W. Burks. Urbana: University of Illinois Press.
129. Newman, Stuart A. "The developmental-genetic toolkit and the molecular homology-analogy paradox." *Biological Theory* 1.1 (2006): 12.
130. Newman, Stuart A. "Complexity in organismal evolution." *Philosophy of complex systems*. North-Holland, 2011. 335-354.
131. Ocklenburg, Sebastian, and Annakarina Mundorf. "Symmetry and asymmetry in biological structures." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 119.28 (2022): e2204881119.
132. Ofria, Charles, and Claus O. Wilke. "Avida: A software platform for research in computational evolutionary biology." *Artificial life* 10.2 (2004): 191-229.
133. Ohta, Tomoko. "Slightly deleterious mutant substitutions in evolution." *Nature* 246.5428 (1973): 96-98.
134. Omodeo, P. (2003) Vita. In: Fasolo A (ed) Dizionario di biologia. UTET, Torino, pp 947–949.
135. Omodeo, P. (2008) Characteristics of living beings. In: Contrafatto G, Minelli A (eds) Biological science fundamentals and systematics. UNESCO Publications/EOLSS Publications, Paris, pp 84–106.

136. Ortega, Raúl, Enrique Wulff, and Miguel A. Fortuna. "Ontology for the Avida digital evolution platform." *Scientific Data* 10.1 (2023): 608.
137. Osawa, Syozo, and Thomas H. Jukes. "Codon reassignment (codon capture) in evolution." *Journal of molecular evolution* 28 (1989): 271-278.
138. Ostrowski, Elizabeth A., Charles Ofria, and Richard E. Lenski. "Ecological specialization and adaptive decay in digital organisms." *The American Naturalist* 169.1 (2007): E1-E20.
139. Oyama, Susan. *The ontogeny of information: Developmental systems and evolution*. Duke university press, 2000.
140. Palazzo, Alexander F., and Nevraj S. Kejiou. "Non-Darwinian Molecular Biology." *Frontiers in Genetics* 13 (2022): 831068.
141. Paulos, J.A. Review of Stephen Jay Gould's 'Full House: The Spread of Excellence from Plato to Darwin' (1996). Washington Post.
142. Peper, Ferdinand, Susumu Adachi, and Jia Lee. "Variations on the game of life." *Game of Life Cellular Automata*. London: Springer London, 2010. 235-255.
143. Pérez, J., Moraleda-Muñoz, A., Marcos-Torres, F. J., & Muñoz-Dorado, J. (2016). Bacterial predation: 75 years and counting! *Environmental Microbiology*, 18(3), 766–779. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.13171>.
144. Perakh, Mark. "There is a free lunch after all: William Dembski's wrong answers to irrelevant questions." *Why intelligent design fails* (2004).
145. Perakh, Mark. *Unintelligent design*. Prometheus books, 2009.
146. Peterson, Kevin J., et al. "The Ediacaran emergence of bilaterians: congruence between the genetic and the geological fossil records." *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 363.1496 (2008): 1435-1443.
147. Ponting, Chris P. "Biological function in the twilight zone of sequence conservation." *BMC biology* 15.1 (2017): 71.
148. Prigogine, Ilya, and Pierre Van Rysselberghe. "Introduction to thermodynamics of irreversible processes." *Journal of The Electrochemical Society* 110.4 (1963): 97C.
149. Prigogine, Ilya. *Thermodynamics of irreversible processes*. Thomas, 1955.
150. Ray, D., Kazan, H., Chan, E. T., Castillo, L. P., Chaudhry, S., Talukder, S., et al. (2009). Rapid and Systematic Analysis of the RNA Recognition Specificities of RNA-Binding Proteins. *Nat. Biotechnol.* 27, 667–670. doi:10.1038/nbt.1550.

151. Ravn I. (ed.), C. Emmeche, S. K0ppe, F. Stjernfelt & J. Teuber (1995): *Chaos, Quarks und schwarze Locher. Das ABC der neuen Wissenschaften*. Verlag Antje Kunstmann, Munchen.
152. Read, Laurie K., Julius Lukeš, and Hassan Hashimi. "Trypanosome RNA editing: the complexity of getting U in and taking U out." *Wiley Interdisciplinary Reviews: RNA* 7.1 (2016): 33-51.
153. Reia, Sandro M., and Osame Kinouchi. "Conway's game of life is a near-critical metastable state in the multiverse of cellular automata." *Physical Review E* 89.5 (2014): 052123.
154. Rocha, Luis M. "Where is the progress?." *Cybernetics and Human Knowing* 5 (1998): 86-90.
155. Rosenhead, Jonathan, et al. "Complexity theory and leadership practice: A review, a critique, and some recommendations." *The Leadership Quarterly* 30.5 (2019): 101304.
156. Rosenhouse, Jason. "Probability, Optimization theory, and evolution". *Evolution* 56.8 (2002): 1721-1722.
157. Santa Fe Institute, "What is complex systems science". Retrieved 2022-08-31 (<https://www.santafe.edu/what-is-complex-systems-science>).
158. Sahlins, M. D., & Service, E. R. (1960). *Evolution and culture*. Ann Arbor: University of Michigan Press.
159. Sayama, Hiroki. "Constructing evolutionary systems on a simple deterministic cellular automata space." *Phd, University of Tokyo, Department of Information Science* (1998).
160. Schluter, Dolph. *The ecology of adaptive radiation*. OUP Oxford, 2000.
161. Schneider, T.D. (2001). Rebuttal to William A. Dembski's posting and to his book "No Free Lunch". Available on-line at <<http://www.lecb.ncifcrf.gov/~toms/paper/ev/dembski/>>.
162. Schneider, T.D. (2002). Dissecting Dembski's "complex specified information". Available on-line at <<http://www.lecb.ncifcrf.gov/~toms/paper/ev/dembski/specified.complexity.html>>.
163. Schwartz, Jeffrey H., and Bruno Maresca. "Do molecular clocks run at all? A critique of molecular systematics." *Biological Theory* 1 (2006): 357-371.
164. Shallit, Jeffrey. "No Free Lunch: Why Specified Complexity Cannot be Purchased Without Intelligence, William Dembski, Rowman and Littlefield, 2002." *Biosystems* 1.66 (2002): 93-99.

165. Shallit, Jeffrey, and Wesley Elsberry. "Playing games with probability: Dembski's complex specified information." *Why intelligent design fails: A scientific critique of the new creationism* (2004): 121-138.
166. Shannon, Claude Elwood. "A mathematical theory of communication." *The Bell system technical journal* 27.3 (1948): 379-423.
167. Simon, Herbert A. "The architecture of complexity. Facets of systems science." *Boston, MA: Springer US* 10 (1991): 978-1.
168. Stoltzfus, Arlin. "Constructive neutral evolution: exploring evolutionary theory's curious disconnect." *Biology direct* 7 (2012): 1-13.
169. Stoltzfus, Arlin. "On the possibility of constructive neutral evolution." *Journal of molecular evolution* 49 (1999): 169-181.
170. Šešić, Bodgan Nužnost i sloboda. Kultura, Beograd, 1963.
171. Tellgren, E. (2002). "On Dembski's Law of Conservation of Information." Available on-line at [http://www.talkreason.org/articles/dembski\\_LCI.pdf](http://www.talkreason.org/articles/dembski_LCI.pdf).
172. Tellgren E. (2005). "Free noodle soup". Available on-line at [http://www.talkreason.org/articles/nfl\\_gavrilets6.pdf](http://www.talkreason.org/articles/nfl_gavrilets6.pdf).
173. Von Uexküll, Jakob. "Environment [Umwelt] and inner world of animals." *Foundations of comparative ethology* (1985): 222-245.
174. Ulanowicz, Robert E., and Bruce M. Hannon. "Life and the production of entropy." *Proceedings of the Royal society of London. Series B. Biological sciences* 232.1267 (1987): 181-192.
175. University of California Museum of Paleontology. Bilateral (left/right) Symmetry. Understanding Evolution. Accessed July 22, 2022 (<https://evolution.berkeley.edu/the-arthropod-story/what-is-an-arthropod/bilateral-left-right-symmetry/>).
176. Varela, Francisco J. "Principles of biological autonomy." (1979).
177. Vermeij, G. (2004) *Nature: An Economic History*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
178. Vieira, André P., Eric Goles, and Hans J. Herrmann. "Phase transitions in a conservative game of life." *Physical Review E* 103.1 (2021): 012132.
179. Wagensberg, Jorge. "Complexity versus uncertainty: The question of staying alive." *Biology and philosophy* 15 (2000): 493-508.
180. Wagner, P. J. Contrasting the underlying patterns of active trends in morphological evolution. *Evolution* 50, 990–1007 (1996).

181. Weaver, Warren. "Recent contributions to the mathematical theory of communication." *ETC: a review of general semantics*(1953): 261-281.
182. Weaver, Warren. "Science and Complexity. In: Facets of Systems Science." (1991): 449-456.
183. Weber, Christian. "What is “complexity”?." *DS 35: Proceedings ICED 05, the 15th International Conference on Engineering Design, Melbourne, Australia, 15.-18.08.* 2005.
184. Wedel, Mathew J. "A monument of inefficiency: The presumed course of the recurrent laryngeal nerve in sauropod dinosaurs." *Acta Palaeontologica Polonica* 57.2 (2011): 251-256.
185. Wei, Hua, et al. "The Fidelity Index provides a systematic quantitation of star activity of DNA restriction endonucleases." *Nucleic acids research* 36.9 (2008): e50-e50.
186. Wein, Richard. "Not a Free Lunch But a Box of Chocolates: A critique of William Dembski’s book “No Free Lunch”." *Talk Reason* (2002).
187. West-Eberhard, Mary Jane. *Developmental plasticity and evolution.* Oxford University Press, 2003.
188. Werth, A. (2012). Avoiding the Pitfall of Progress and Associated Perils of Evolutionary Education. *Evolution: Education and Outreach*, 5(2), 249–265. <https://doi.org/10.1007/s12052-012-0417-y>.
189. Wheatley, Matthew, and Chris Johnson. "Factors limiting our understanding of ecological scale." *Ecological complexity* 6.2 (2009): 150-159.
190. Wilkins, John S., and Wesley R. Elsberry. "The advantages of theft over toil: the design inference and arguing from ignorance." *Biology and Philosophy* 16 (2001): 709-722.
191. Wilson, Edward O. "Success and dominance in ecosystems: the case of the social insects." *Success and dominance in ecosystems: the case of the social insects.* (1990).
192. Wray, Gregory A. "The evolutionary significance of cis-regulatory mutations." *Nature Reviews Genetics* 8.3 (2007): 206-216.
193. Yaeger, Larry, Virgil Griffith, and Olaf Sporns. "Passive and driven trends in the evolution of complexity." *arXiv preprint arXiv:1112.4906* (2011).
194. Yaroslavsky, Leonid. "The amazing dynamics of stochastic pattern formation and growth models inspired by the Conway's Game of Life." *arXiv preprint arXiv:1304.8104* (2013a).
195. Yaroslavsky, Leonid. "Self-controlled growth, coherent shrinkage, eternal life in a self-bounded space and other amazing evolutionary dynamics of stochastic pattern formation

and growth models inspired by Conways Game of Life." *arXiv preprint arXiv:1310.7604* (2013b).

196. Zhang, J. (2018). Neutral Theory and Phenotypic Evolution. *Mol. Biol. Evol.* 35, 1327–1331. doi:10.1093/molbev/msy065.

197. Zuckerkandl, Emile. "Molecular disease, evolution, and genic heterogeneity." *Horizons in biochemistry* (1962): 189-225.

## **Biografija**

Jovan Tadić rođen je 1974. godine u Beogradu. Osnovne studije hemije upisao je 1993. godine na Univerzitetu u Beogradu, Hemijskom fakultetu, gde je 1998. godine diplomirao sa prosečnom ocenom 9,17. Nakon dvogodišnjeg boravka na Institut Maks Plank za proučavanje hemije atmosfere u Majnzu, Nemačka, gde je radio kao istraživač u grupi prof. dr. Pola Kruzena (Nobelova nagrada za Hemiju, 1995), magistarske studije hemije je upisao 1998. godine na Hemijskom fakultetu u Beogradu, a završio 2001. godine sa prosečnom ocenom 10, odbranivši magistarski rad na temu „Fotofizika *n*-butanala i *n*-pentanala u veštačkoj atmosferi“ pod mentorstvom prof. dr Ivana Juranića. Iste godine upisuje doktorske studije na Univerzitetu u Beogradu, Hemijskom fakultetu, gde je, u julu 2003, odbranio doktorsku disertaciju pod naslovom "Fotohemijski i fotofizički procesi odabranih aldehida na različitim parcijalnim pritiscima kiseonika".

U oktobru 2010. godine odlazi u Američku svemirsku agenciju (NASA), u istraživački centar Ejms, SAD, na postdoktorske studije koje završava 2012. godine, istovremeno prihvatajući poziv da ih nastavi na Karnegi Institutu za proučavanje globalne ekologije pri Stanford univerzitetu, SAD. U Julu 2016. prihvata status naučnog saradnika u Lorens Berkli nacionalnoj laboratoriji (Lawrence Berkeley National Lab) gde ostaje stalno zaposlen do 2018. godine, kada preuzima poziciju višeg savetnika za implementaciju i razvoj veštačke inteligencije u kompaniji Epl (engl. *Apple*).

U oktobru 2014. polaže diferencijalni ispit iz filozofije na Filozofskom fakultetu u Beogradu, pred komisijom u sastavu prof. dr Slobodan Perović i doc. dr Mašan Bogdanovski. Godine 2021. upisuje doktorske studije filozofije na Filozofskom fakultetu Beogradu, gde u periodu 2021–2023. polaže neophodne ispite sa prosečnom ocenom 10. U septembru 2023. uspešno odbranjuje predlog teme doktorske disertacije pod nazivom „Filozofski aspekti biološke kompleksnosti“ pod mentorstvom prof. dr Slobodana Perovića. Osnovne filozofske

oblasti interesovanja i istraživanja Jovana Tadića su filozofija nauke, pre svega filozofija hemije, matematike, i biologije. Pored maternjeg jezika, tečno govori engleski jezik.

Tokom i nakon studija, Jovan Tadić je bio dobitnik različitih stipendija i nagrada, uključujući Stipendiju ambasade Norveške 1998., Specijalno priznanje Srpskog hemijskog društva 2000., Specijalno priznanje istraživačkog centra Ejms Američke svemirske agencija (NASA) 2011., i Specijalno priznanje Američke svemirske agencija (NASA) 2012. godine.

Jovan Tadić je autor preko 50 naučnih radova iz oblasti hemije, biologije, ekološkog inženjerstva, primenjene matematike, mašinskog učenja i filozofije, do sada citiranih preko 800 puta, i učesnik više (preko 20) naučnih konferencija u zemlji i inostranstvu. Kao saradnik ili nosilac projekta učestvovao je u brojnim istraživačkim projektima u Evropi i SAD, uključujući projekte finansirane od strane EU (RADICAL), Američkog ministarstva energetike, Američkog ministarstva odbrane, Kalifornijskog ministarstva za vodne resurse, itd.

Iz opusa radova, izdvajamo tri pretežno filozofskom tematikom (kompletna bibliografija je dostupna na <https://www.researchgate.net/profile/Jovan-Tadic/research>):

1. Tadić, Jovan M. "On Mathematical and Logical Realism and Contingency." *Mathematics* 11.7 (2023): 1747. (M21a)
2. Tadić, Jovan M. "On (non) universality of color experience." *Theoria, Beograd* 59.3 (2016): 34-48. (M24)
3. Tadić, Jovan M. "The refutation of counterfactual and conditional approaches to causation." *Theoria, Beograd* 58.1 (2015): 39-50.(M24)

## Изјава о ауторству

Име и презиме аутора: Јован Тадић

Број индекса: ОФ 210009

### *Изјављујем*

да је докторска дисертација под насловом

Филозофски аспекти биолошке комплексности

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

**Потпис аутора**



У Београду, 30.12.2023.

## Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора: Јован Тадић

Број индекса: ОФ 210009

Студијски програм: Докторске студије филозофије (2021)

Наслов рада: Филозофски аспекти биолошке комплексности

Ментор: проф. др Слободан Перовић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањивања у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

**Потпис аутора**



У Београду, 30.12.2023.

## Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

### Филозофски аспекти биолошке комплексности

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

**Потпис аутора**



У Београду, 30.12.2023.

1. **Ауторство.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.