

# Utemeljitev biološke inteligence kot elementarne kognitivne lastnosti vseh organizmov

Rok Krašovec, Igor Jerman

*Bion, Inštitut za bioelektromagnetiko in novo biologijo*

*Stegne 21 SI-1000 Ljubljana*

*e-mail: [rok.krasovec@bion.si](mailto:rok.krasovec@bion.si)*

## Povzetek

**Prevladujoča mehanicistična biološka paradigma vidi življenje kot vznik iz danes veljavnih zakonov fizike in zamrznjenih nesreč; potrebe po kakih dodatnih mehanizmih oz. danes še skritih vzrokih oziroma zakonih ni. Prispevek poskuša dokazati, da je takšen konstruktivizem oz. redukcionizem nezadosten za razlago biološke inteligence.**

Današnja paradigma vidi svobodno voljo kot iluzijo. Sprejemanje odločitev je torej makroskopska iluzija, ki je odgovor na naključne mikroskopske procese. To pomeni, da živi organizmi dolgujemo svoj obstoj ne samo elementarnim zakonom fizike in robnim pogojem zgodnjega univerzuma, pač pa tudi rezultatom nepredstavljivo dolgega zaporedja verjetnostnih dogodkov, ki bi se lahko končali tudi povsem drugače. Gibanje molekul zraka v steklenici bolj na levo kot na desno, v prihodnosti ne bo obveljalo kot nekaj zgodovinskega, se pa lahko pojavijo (ne)srečna naključja, ki imajo širše posledice za prihodnost organizma, a so omejena zgolj na določene regije prostora in časa.

Temelja danes veljavne paradigme sta vsaj dva. Prvi je zrasel v 40' letih prejšnjega stoletja, ko sta Luria in Delbruck (1943) nedvoumno dokazala obstoj naključnih mutacij, kar pomeni, da mutacije niso povezane s funkcijo gena in se pojavljajo s konstantno stopnjo, na katero selekcijske razmere v okolju ne vplivajo. Drug temelj pa je dojetje vedenja v nadzorovanih pogojih laboratorija, kjer rastline, bakterije in večina živali v povprečju dajejo podobne odgovore. To naj bi bila posledica tako imenovanega avtonomnega vedenja oz. od okolja neodvisnega vedenja, katerega razumevanje je danes ključno za razvoj predvsem robotike. Znanost tako obravnava večino živih organizmov kot nadvse kompleksne robote sposobne adaptacije, ki pa nimajo prav nobene svobodne volje in so zato nesposobni reševanja problemov, notranjega ocenjevanja, sprejemanja odločitev, predvidevanje prihodnosti, spomin pa je vezan zgolj na informacije zapisane v genomu.

## *Temelji biološke inteligence*

Če so organizmi zares programirani, da prepoznajo in odgovorijo na okolje okrog njih, potem bi rastlina in bakterijska celica morala kodirati odgovor na vsaj  $10^{11}$  različnih za rast dopustnih (ne-lethalnih) okolij. Vrednost smo dobili po oceni, da organizmi zaznavajo 10 abiotskih (svetloba, vlažnost, nivo  $\text{CO}_2$  in ostalih plinov, različni parametri prsti, nivo in kvaliteta hrane in vode itd.) in 6 biotskih signalov (npr. prisotnost, odsotnost in identiteta sosedov, nivo različnih hormonov itd.) ter 5 diskretnih jakostnih razredov znotraj enega signala. Pri čemer je število

signalov in jakostnih razredov podcenjeno, prav tako pa nismo upoštevali parametra kot sta smer signala in čas izpostavljanja signalu. Genetsko programiranje takšnega števila odzivov enostavno ni mogoča. Prepričani smo, da zgolj fleksibilnost organizmu lahko zagotovi usklajenost s pogoji v okolju.

Fleksibilnost pomeni, da zaznavanju okolja sledi procesiranje zaznane informacije in hkratno primerjanje informacij pridobljenih o okolju s svojim notranjim stanjem, ki ga definira tako trenutno stanje, kot tudi pretekle izkušnje. Ko je to opravljeno, organizem sprejme odločitev in izvede odgovor, ki je v tistem trenutku kar se da najbolj ekonomičen. Fleksibilnost je torej proces, ki ga razumemo kot biološko inteligenco in ga biologija pokriva s širokim pojmom reakcijske norme genoma.

Vendar ni vsako vedenje, pa naj bo še tako kompleksno in nam nerazumljeno, inteligentno. Tako na primer nastanek kristala, kjer atomi v kristalni mreži med seboj komunicirajo, ni prav nič inteligentno vedenje, saj kristal nima svobodne volje. Kristalizacija je posledica notranjih kemijskih in fizikalnih lastnosti atomov ter je izvedena povsem avtomatično. Prav tako so nukleinske kisline in proteini zunaj organizmov povsem brez svobodne volje in jih pojmujejo kot mrtev material. Še več, genom v celici je sam po sebi povsem inerten. Zapisi znotraj genoma se shranjujejo, berejo in spreminjajo le s funkcionalnim izražanjem ostalih celičnih sistemov, ki so v interakciji z DNA. V največji meri so to proteinski sistemi, dostopnost informacij znotraj genoma pa celice regulirajo tudi s spreminjanjem lokacije in topologije genoma.

Za to, kateri materiali izvajajo fleksibilno vedenje, so spoznanja molekulske biologije bistvena. Številne študije neizpodbitno kažejo, da npr. brezjedni organizmi (prokarioti) uporabljajo omejeno število različnih genetskih naprav (genskih kompleksov), kot so dvo-komponentni regulatorni sistemi, LuxI-LuxR sistemi za zaznavanje kvoruma, fosfodiesteraze, serinske in treoninske kinaze, regulatorje tipa OmpR in sigma signalne poti (Hellingwerf in sod. 2005). Celice z jedri (evkariotske) imajo nabor naprav še večji. Prav tako je pomembno, da vse celice uporabljajo modularne proteine z velikim številom vhodnih in izhodnih domen, ki pa imajo izjemno konzervativne prenašalne domene. Takšna ohranjenost za prevajanje signalov pomembnih domen, vodi v redundanco odgovorov na določen signal iz okolja, saj med njimi prihaja do neizogibnih navzkrižnih pogovorov. Če tem proteinskim komponentam dodamo še ponavljajoče se genetske elemente in mobilne genetske elemente (Shapiro 2002) ter 98% celokupne celične RNA, ki ne kodira proteinov (Mattick in Gagen 2001), potem

dobimo (še vedno) grobo sliko o kompleksnosti regulatornih procesov, ki določajo kateri protein bo sintetiziran, kdaj in kje. Prav tako se moramo zavedati, da je za učinkovito delovanje proteina, pomembna ne samo njegova sposobnost katalize, ampak tudi njegova premičnost in lokacija znotraj celice (Ryan in Shapiro 2003). Izjemen primer so proteini MinCDE, ki skrbijo za pravilno celično delitev bakterije *Escherichia coli*. Učinkovito delovanje presnovnih in regulatornih krogov je tako osnovano na kombinatoriki specifičnih vezalnih mest za množstvo zunanjih in notranjih signalov. Tako številne kombinacije vezalnih mest celici omogočajo zaznavanje okoljskih signalov in na koncu sprejemanje enostavnih odločitev, kot je prepisati določen nabor genov (operon), do izvedbe tistih precej bolj kompleksnih odgovorov. Poglejmo si to na zelo nazornem primeru.

Bakterijske celice se hranijo tako z laktozo kot tudi glukozo, vendar imajo slednjo raje. Če je v okolju le laktoza, ta deaktivira represorski gen znotraj operona Lac, CAP protein je aktiven in bakterija se lahko hrani z laktozo. Ko pa se poleg laktoze pojavi še glukozo, encimi ki razgrajujejo glukozo, zavrejo izražanje CAP proteina, to zavre razgradnjo laktoze in bakterija se hrani zgolj z glukozo. To je enostaven primer, kako bakterije na nek način 'zavohajo' hrano, procesirajo zaznane informacije in sprejmejo notranjo odločitev o tem, kateri set genov aktivirati, kar bo omogočilo hranjenje z bolj ljubim sladkorjem. Da ne bo pomote, razlog za izbiro glukoze je pač višja energijska korist (torej ekonomičnost), kot jo prinaša laktoza.

Kompleksna celična mreža, ki izkazuje občutljivost na množstvo okoljskih signalov, manipulira in kontrolira lasten tok informacij, kar je temelj biološke inteligence. Za biološko inteligenco tako potrebuješ delujočo mrežo komunikativnih celic, ki nabirajo latentne informacije iz okolja in od drugih organizmov, jih interpretirajo v eksistenčno pomembnem smislu, razvijejo splošno znanje in se učijo iz preteklih izkušenj.

### ***Izražanje biološke inteligence***

Vse kar lahko z današnjo tehnologijo opazujemo, je zgolj izražanje inteligence; gibanje in molekularno procesiranje nista inteligenca, sta le njen odraz. A vendar ima splošno nepriznavanje inteligence svoje povsem znanstvene razloge. Trewavas meni, da je problem predvsem statistika, ki povpreči fiziološke odgovore in s tem eliminira variacije posameznika, ki jih določi kot eksperimentalno napako (Trewavas 2005). Na ta način se ignorira vedenje posameznika, ki je temeljna enota biološke inteligence. Navedimo primer. Ob aplikaciji gravitacijskega signala koreninice mačjega repa (*Phleum pratense L.*) vedno znova začnejo rasti vertikalno. Vendar so trajektorije samega odziva značilno razlikujejo med posamezniki, čeprav je končni rezultat vedno enak. Izkazalo se je, da na trajektorijo in ne na končni rezultat vpliva rdeča svetloba, kalcij, dotik, vlažnost, kisik, temperatura ter hormona etilen in avksin. To pomeni, da so laboratorijsko nadzorovani pogoji, kjer spreminjaš le en parameter, ostale pa ohraniš konstantne, veljavni za določevanje vedenja populacije, ne pa posameznika. Na temelju takšnih raziskav populacije (te so v večini), obstoja inteligence ni mogoče izključiti. Izražanje inteligence je torej nujno opazovati na posamezniku in v ustreznem okolju.

Izražanje inteligence bomo nakazali predvsem s primeri iz sveta bakterij in rastlin, saj v splošnem oboji veljajo za bitja

brez kakršnekoli inteligence. Eden od pomembnih elementov inteligence je nedvomno *samoreferenca*, ki jo v evolucijskem smislu lahko obravnavamo kot primitivno stopnjo *samozavedanja*. Na primer, celica *E. coli* ve, kdaj je njena DNA poškodovana in s še neznanimi signali aktivira različne popravljalne sisteme. Prav tako zadrži delitev, dokler se popravilo ne zaključi in ko je popravilo zaključeno, celica to ve. Mnogi se sprašujemo, kako je lahko celoten genom ves čas na razpolago za prepoznavanje in popravilo poškodb in kateri faktorji prvi zaznajo poškodbo (Hanawalt 2001). Prav tako še vedno ne razumemo zakonitosti vstavljanja mobilnih genetskih elementov v tarčna zaporedja genoma, kar lepo demonstrira nerazumevanje adaptivnih mutacij, ki jasno izkazujejo višjo stopnjo regulacije kot naključne od rasti odvisne mutacije (Krašovec in Jerman 2002). Odličen primer so tudi bakterije *Paenibacillus vortex*, ki gradijo kompleksno strukturirano kolonijo z različno velikimi t.i. vrtinci. To so kondenzirane skupine bakterij, ki kolektivno rojijo okoli skupnega centra s hitrostjo okoli 10  $\mu\text{m/s}$ . Ko posamezna bakterija vstopi v vrtinec najprej spozna, da pripada nečemu večjemu in svoje gibanje prilagodi v odvisnosti od stopnje rotacije celotnega vrtinca. To naredi tako, da se odzove na atraktivno kemotaksijo, ki jo izvajajo celice znotraj vrtinca. Poskusi kažejo, da posamezne bakterije in vrtinec kot celoto vedno znova zanaša stran od središča. Vzrok je odbijajoče kemotaktično signaliziranje bakterij, ki niso v vrtincu (Ben Jacob in sod. 2006). Podobno zanimiv primer je bakterijska komunikacija pred sporulacijo (Stephen 1998). Ko rastni pogoji postanejo preveč stresni, grampozitivne bakterije preidejo v inertne spore. Preden pa to storijo, stradajoče celice oddajo kemične signale, ki sporočajo drugim bakterijam, da so v stresu. Ko vsi predstavniki kolonije zaznajo sporočila in oddajo svoje odločitve v obliki drugih signalov, se sporulacija zgodi le, če je večina kolonije za.

Še višjo stopnjo od pravkar prikazane sposobnosti samoreference nakazujejo tudi številni primeri iz sveta rastlin. Rastline kontinuirano sprejemajo odločitve o tem, kje bodo korenine, poganjki in listi (Trewavas 2005). Tako npr. posamezne rastline zrastejo bolj v večjem volumnu prsti kot v manjšem, pri enaki količini hranil, kar kaže, da so sposobne zaznati volumen prsti. Rastlina to najverjetneje zaznava z informiranostjo o razporejenosti lastnih korenin, kar je biološko smiselno, saj s tem minimalizira tekmovanje sama s seboj. Kako rastlina prepozna tujo rastlino še vedno ni povsem znano, ve pa se, da ima svetloba, ki se odbije od zelenih rastlin, povečano razmerje med IR/rdečo svetlobo ter vsebuje več modre svetlobe kot normalno sonce. Mnoge rastline zaznavajo ta del spektra in ustrezno regulirajo položaj in površino lastnih listov, ter s tem maksimirajo količino svetlobe. Pomenljiv je poskus, ko so s kirurško ločitvijo ene rastline naredili njen klon in ju po nekaj tedenski ločenosti dali v skupno zemljo. Oba klona sta naredila več korenin, ki so bile hkrati tudi daljše, kar je znak, da sta se prepoznala kot tujca. Pri tem je zanimivo, da je rastlina po presaditvi v novo zemljo ohranila spomin na svoje prejšnje sosede še nekaj mesecev do enega leta. Nadalje, če so veje preraščene, rastlina sprejme odločitve, ki temelji na količini povrnjenih energijsko bogatih ogljikovih hidratov. Če je ta premajhen, aktivno zamaši žilni sistem te veje in koreninske surovine usmeri k drugim delom rastline.

Značilen znak inteligence je zmožnost predvidevanja prihodnosti. Na primer, odločitve rastline, ki ima za posledico rast določenih vej in ne drugih, temeljijo na neke vrste špekulaciji o povratku z energijo bogatih ogljikovih

hidratov v prihodnosti in niso toliko odvisne od trenutnega stanja v okolju (Trewavas 2005). Npr. *Podophyllum peltatum* raste v podrasti gozda in sprejema odločitve o razvejitvi in cvetenju vnaprej in to z uporabo mnogih informacij iz okolja. Podobno številna drevesa zmerne pasu odločajo o številu cvetov leto vnaprej in če je pomlad hladna ali sušna, se cvetni popki enostavno izrežejo. S tem se število plodov prilagodi predvidevanju rastline o pogojih v poletnem času. Takšno vedenje rastlin je podobno kot ga poznajo živali, ki predvidijo količino porabljene energije za iskanje hrane in koliko bo s tem iskanjem energije pridobila. Takšen model napovedi naj bi imele tudi bakterije (Trewavas 2005).

Izjemen primer celičnega računanja predstavlja velik ameboidni organizem *Physarum polycephalum*. Ta ima očitno sposobnost izračunati minimalno dolžino med dvema točkama znotraj labirinta, v katerega so na začetek in konec postavili agarški blok s hrano (Nakagaki in sod. 2000). Poti do hrane so bile štiri, dolge 33, 41, 44 in 45 mm. Točen položaj in dolžina panožice sta bila v vsakem poskusu drugačna, a je organizem vedno znova izbral najkrajšo pot.

Če v znanosti in javnosti bakterije in rastline nimajo statusa inteligentnih bitij, je povsem drugače pri sprejemanju inteligence pri pticah, predvsem družini vranov (sem sodijo npr. vrane, šoje, krokarji in kavke) in papagajev (Emery in Clayton 2004). Njihova inteligenca je potrjena in je višja kot pri ostalih pticah ter se povsem primerja z nekaterimi velikimi opicami, saj vključuje vzročno sklepanje, fleksibilnost, domišljijo in predvidevanje prihodnosti. Študije tako kažejo, da vrani izdelujejo in s smislom uporabljajo orodje ter skrivajo hrano. Slednje vedenje zahteva poleg spomina tudi procesiranje informacij o lokaciji, tipu in kvarljivosti hrane. Npr. predstavnik vranov (*Nucifraga columbiana*), ki živi na visoki nadmorski višini, skriva do 30.000 borovih semen na širokem prostoru, odkrije pa jih tudi do 6 mesecev kasneje. Prav tako so vrani sposobni projekcije lastne izkušnje na drugo ptico oz. sposobni so simulacije notranjega pogleda te ptice, kar že kaže na obstoj uma oziroma zametka umske inteligence. Vrani nekatere probleme rešijo celo hitreje kot človek (Emery in Clayton 2004).

Z razlogom se nismo veliko posvečali inteligenci opic, kitov in slonov, pa tudi ne socialnim žuželkam, saj je obstoj inteligence pri njih bolj splošno sprejeta. Povejmo samo najnovejše zaključke, da inteligenca človeka ni rezultat nekih kvalitativnih razlik, ampak bolj posledica izboljšanja že obstoječih kvalitativnih, predvsem hitrosti procesiranja informacij. Razlike v možganskih strukturah med človekom ter primati, delfini in sloni so namreč zanemarljive (Roth in Dicke 2005).

### **Zaključek**

Vnimo se še zadnjič na protitežnostno (gravitropno) vedenje rastlin, katerega glavni namen je pridobiti čim več hrane. Končni kot, pod katerim bo veja ali korenina, je namreč zelo različen, kljub temu, da je optimalen le en sam. To pomeni, da se divje rastline in bakterije lahko učijo le s poskusom in napako, saj so signali v naravi izredno spremenljivi. Končni kot korenine je torej odvisen od pogojev v okolju in sprejetih notranjih odločitev, ki pa niso avtomatizirane (Trewavas 2005).

Prilagajanje okolju torej ni program zapisan v genomu, pač pa dinamičen proces, kjer celica sklopi interno shranjene informacije, z informacijami pridobljenimi iz okolja. Temu sledi procesiranje in odgovor. Seveda celice nujno

potrebujejo genom, saj le-ta kodira naprave, ki zaznavajo in prevajajo signale ter na koncu izvedejo odgovor. A biološka inteligenca ni materija, ampak sposobnost dajanja zunaj pridobljeni informaciji določen vsebinski pomen, ki se tiče preživetja in ekonomije življenja. Brez te lastnosti organizem pač ne more preživeti, saj so praktično vsi odgovori živih organizmov povezani s pridobivanjem hrane in zmanjševanjem stresa.

Biološka inteligenca je lastnost celotnega sistema, je torej emergentna in je decentralizirana. Ne gre jo vezati na neka centralna tkiva, saj kolonije socialnih žuželk, rastline in bakterije izkazujejo vse znake inteligence, in to navkljub dejstvu, da nimajo možganov. Ker se predvideva, da se je razvoj možganov v živalih zgodil zaradi razmerja med plenom in plenilci, je popolnoma jasno, da inteligenca izboljša preživetje in poveča verjetnost za razmnoževanje vseh organizmov.

Za konec, dokler se prevladujoča mehanicistična biološka paradigma ne nadgradi, bodo v javnosti vedno znova krožile razlage življenja tipa *inteligentni dizajn* ali *kreacionizem*, kjer je motiv iskanja vrzeli v znanstvenem dojemanju narave v celoti sporen in popolnoma nesprejemljiv.

### **Literatura:**

- Ben Jacob, E., Shapira, Y., Tauber, A.I. (2006). Seeking the foundations of cognition in bacteria: From Schrodinger's negative entropy to latent information. *PHYSICA A*, 359: 495-524.
- Emery, N.J., Clayton, N.S. (2004). The mentality of crows: Convergent evolution of intelligence in corvids and apes. *Science*, 306: 1903-1907.
- Hanawalt P.C. (2001). Controlling the efficiency of excision repair. *Mutation Research-DNA Repair*, 485: 3-13.
- Hellingwerf, K.J. (2005). Bacterial observations: a rudimentary form of intelligence? *Trends in Microbiology*, 13: 152-158.
- Krašovec, R., Jerman, I. (2002). Is a sort of intelligence at work in bacteria? Zbornik C5. mednarodne multi-konference Informacijska družba IS'2002, Kognitivne znanosti (ed.) Repovš G., Gams M. & Detela A., Ljubljana, 58-60.
- Luria, S.E., Delbrück, M. (1943). Mutations of bacteria from virus sensitivity to virus resistance. *Genetics*, 28: 491-511.
- Mattick, J.S., Gagen, M.J. (2001). The evolution of controlled multitasked gene networks: the role of introns and other noncoding RNAs in the development of complex organisms. *Molecular Biology & Evolution*, 18: 1611-1630.
- Nakagaki, T., Yamada H., Toth A.. (2000). Maze solving by an amoeboid organism. *Nature*, 407: 470.
- Roth, G., Dicke, U. (2005). Evolution of the brain and intelligence. *Trends in Cognitive Science*, 9: 250-257.
- Ryan, K.R., Shapiro, L. (2003). Temporal and spatial regulation in prokaryotic cell cycle progression and development. *Annual Review of Biochemistry*, 72: 367-394.
- Shapiro, J.A. (2002). Repetitive DNA, genome system architecture and genome reorganization. *Research in Microbiology*, 153: 447-453.
- Stephen, C. (1998). Bacterial sporulation: a question of commitment? *Curr. Biol.*, 8: 45-48.
- Trewavas, A. (2005). Green plants as intelligent organisms. *Trends in Plant Science*, 10: 413-419.