

HIDROTHERMALNI IZVORI NASPRAM „TOPLOG MALOG JEZERCA”: UPOREDNA PROCJENA ENERGETSKIH GRADIJENATA U PREBIOTIČKOJ SINTEZI I PORIJEKLU METABOLIZMA

Slaven Knežević 

Filozofski fakultet, Univerzitet u Banjoj Luci
Banja Luka, Bosna i Hercegovina
E-mail: slaven.knezevic@student.ff.unibl.org

Originalni naučni članak

Primljeno: 30.04.2026. Prihvaćeno: 21.05.2026.

DOI: <https://doi.org/10.65932/CAR-2026-1-2> UDK: 577.23:577.1

Sažetak: Pitanje o tome gdje je i kako nastao prvi živi sistem ostaje najspornija tačka savremene astrobiologije, a rasprava se već decenijama vodi između dvije škole: hipoteze o submarinskim alkalnim hidrotermalnim izvorima i hipoteze o površinskom „toplom malom jezeru”, odnosno vrelim izvorima na kopnu. Članak ne pokušava da izabere pobjednika. Umjesto toga, uvodi se nov analitički okvir — topologija slobodnoenergetskog gradijenta — koji preformuliše cijelu raspravu kao razliku između stajalećeg vektorskog gradijenta (hemiozmotski, protonski i redoks gradijent na membrani, karakterističan za izvore) i cikličnog vremenskog gradijenta (naizmjenično vlaženje i sušenje, karakteristično za jezera). Uz okvir se predlaže i mjerljivi Indeks slobodnoenergetske sprege (ISES), koji svako okruženje ocjenjuje duž pet dimenzija: perzistencija gradijenta, vektorska sprega, prostorna kompartmentalizacija, ciklična kondenzacija i fluks ugljenika i energije. Komparativnom sintezom termodinamičkih parametara iz recenzovane literature (2019–2026) pokazuje se da izvori postižu visoku vrijednost „metaboličkog pokretanja” (ISES-M $\approx 0,82$), dok jezera postižu visoku vrijednost „replikativnog pokretanja” (ISES-R $\approx 0,79$). Ključni nalaz jeste da ova dva okruženja nisu konkurentska nego termodinamički komplementarna duž prelaza metabolizam→replikacija: izvor obezbjeđuje kontinuirani vektorski gradijent nužan za pokretanje ugljeničkog i energetskog metabolizma, a jezero obezbjeđuje ciklični dehidratacioni režim nužan za polimerizaciju i inkapsulaciju. Rad zaključuje da porijeklo života nije vezano za jedno mjesto nego za sekvencu gradijentnih režima, i tu sekvencu tumači u okviru morfologije prauzroka.

Ključne riječi: *abiogeneza, alkalni hidrotermalni izvori, toplo malo jezero, hemiozmoza, slobodnoenergetski gradijent, protometabolizam, prauzrok.*

UVOD

Rijetko koje pitanje u prirodnim naukama drži takvu kombinaciju empirijske neizvjesnosti i konceptualne težine kao pitanje o načinu na koji je neživa hemija prešla u živi sistem. Procjenjuje se da se taj prelaz dogodio prije približno 3,5 do 4,0 milijarde godina, a rekonstrukcija posljednjeg univerzalnog zajedničkog pretka (LUCA) smješta njegovo postojanje na oko 4,2 milijarde godina unazad, dakle iznenađujuće blizu samom formiranju stabilne hidrosfere (Moody et al., 2024). Već ta brojka mijenja teren rasprave: ako je LUCA bio anaeroban, termofilan, zavisao od vodonika i ugljen-dioksida, te opremljen mehanizmima za iskorišćavanje jonskih gradijenata preko membrane, onda okruženje u kojem je život nastao mora biti kompatibilno upravo s takvom

fiziologijom (Weiss et al. u sintezi kod Schwander et al., 2023; Martin, 2020). Rekonstrukcije proteoma LUCA nezavisno potvrđuju sliku organizma oslonjenog na metale, gvožđe-sumporne klastere i redoks hemiju (Crapitto et al., 2022).

Pitanje ima i dužu istoriju nego što se obično priznaje, i ta istorija oblikuje sadašnju raspravu. Ideja o toplom malom jezercu potiče još iz jedne Darwinove privatne bilješke, dok je pretpostavka o dubokomorskom porijeklu novijeg datuma i vezana je za otkriće hidrotermalnih polja. Ono što je nekada bilo nagađanje danas je testabilna hemija: posljednjih pet do sedam godina donijelo je eksperimentalne rekonstrukcije koje su obje škole pomjerile s terena filozofske spekulacije na teren laboratorije (Preiner et al., 2020; Damer & Deamer, 2020). Uporedo s tim, polje se podijelilo i po drugoj osi — na pristup „prvo geni” (RNK svijet) i pristup „prvo metabolizam” — a ta podjela se samo djelimično poklapa s podjelom izvor–jezerce. Krishnamurthy i Hud (2020) upozoravaju da je stapanje tih dviju podjela izvor mnogih nesporazuma. Upravo zbog toga smatram da je potreban okvir koji razdvaja pitanje mjesta od pitanja mehanizma, umjesto da ih tretira kao jedno. Dvije velike istraživačke tradicije nude suprotstavljene odgovore na pitanje o mjestu tog prelaza. Prva, teorija submarinskih alkalnih hidrotermalnih izvora, tvrdi da su prirodni protonski i redoks gradijenti na granici alkalne hidrotermalne tečnosti i blago kisele praiskonske okeanske vode obezbijedili slobodnu energiju za fiksaciju ugljenika prije nego što su postojali geni, enzimi ili pigmenti (Cartwright & Russell, 2019; Russell, 2021). Druga, hipoteza vrelih izvora ili Darwinovog „toplog malog jezera”, tvrdi da tek naizmjenično vlaženje i sušenje u površinskim geotermalnim bazenima omogućava kondenzacione reakcije, polimerizaciju nukleotida i sklapanje membranskih vezikula, čega u trajno uronjenom okruženju nema (Damer & Deamer, 2020; Deamer et al., 2019). Rasprava između ove dvije škole traje decenijama i često poprima ton isključivosti u kojem svaka strana navodi „vodeni problem” ili „problem koncentracije” kao fatalni prigovor onoj drugoj (Russell, 2021; Deamer et al., 2022).

Centralno istraživačko pitanje ovog članka glasi: da li je razlika između izvora i jezera prije svega razlika u geografskoj lokaciji, ili je riječ o razlici u termodinamičkoj strukturi slobodnoenergetskog gradijenta koji svako od tih okruženja nudi ranim hemijskim sistemima? Iz tog pitanja izvodim tri hipoteze. Prva glasi da odlučujuća varijabla nije mjesto nego topologija gradijenta — da li je gradijent stajajući i vektorski ili cikličan i vremenski. Druga glasi da alkalni izvori sistemski nadmašuju jezera u dimenzijama koje pokreću metabolizam, a jezera sistemski nadmašuju izvore u dimenzijama koje pokreću replikaciju i inkapsulaciju. Treća glasi da su ta dva okruženja komplementarna, a ne međusobno isključiva, te da se najvjerovatniji scenario porijekla života sastoji u sekvenci gradijentnih režima, a ne u jednom jedinom lokalitetu.

Originalni doprinos ovog članka sastoji se u uvođenju analitičkog okvira topologije slobodnoenergetskog gradijenta i pratećeg Indeksa slobodnoenergetske sprege (ISES), koji prvi put omogućava da se rasprava izvor–jezerce kvantitativno preformuliše kao razlika između stajalećeg vektorskog i cikličnog vremenskog gradijenta, te da se pokaže termodinamička komplementarnost dvaju okruženja duž ose metabolizam→replikacija — teza koja u dosadašnjoj literaturi nije ni formalizovana ni mjerena. Time ovaj rad prelazi granicu pukog pregleda i nudi instrument koji je, u načelu, provjerljiv i osporiv. Priznajem odmah da je taj instrument heuristički, a ne laboratorijski; njegova svrha nije da zamijeni eksperiment nego da uredi raspravu koja je predugo bila vođena kvalitativnim analogijama. Postoji i širi okvir u koji smještam ovu analizu. U ranijem radu (Knežević, 2024) razvio sam pojam prauzroka kao morfološkog principa koji povezuje kosmološki, evolucion i teogonijski nivo objašnjenja, tražeći zajednički oblik u prelazima od nediferenciranog ka diferenciranom. Iz te perspektive, topologija gradijenta nije samo hemijski nego i morfološki pojam: ona opisuje oblik u kojem se slobodna energija „ulijeva” u materiju i time je organizuje. Filozofsku recepciju tog pristupa razmatra i Đukić (2025). Ne

tražim od čitaoca da prihvati taj širi okvir da bi prihvatio hemijski argument; navodim ga jer objašnjava zašto insistiram baš na topologiji, a ne na lokaciji.

Pitanje nije samo istorijsko. Trenutna generacija svemirskih instrumenata i misija čini raspravu o porijeklu neposredno relevantnom za tumačenje podataka. Spektroskopija atmosfera egzoplaneta traži molekularne biopotpise čije tumačenje zavisi od toga šta smatramo minimalnim uslovima za život (Gomez, 2024), a misije ka ledenim okeanskim svjetovima i Titanu planiraju se upravo oko hipoteza o hidrotermalnoj i organskoj hemiji (Robinson et al., 2023; Madan & Pearce, 2025). Ako je za nastanak života nužno jedno okruženje, kriterijumi pretrage su jedni; ako je nužna sekvenca okruženja, kriterijumi su bitno drugačiji. Rasprava izvor–jezerce, dakle, nije akademska u pogrdnom smislu — ona oblikuje to kako ćemo protumačiti eventualni signal života drugdje, i to kako ćemo procijeniti rizik lažno pozitivnog nalaza (Davis, 2025). Zbog toga smatram da uređenje te rasprave kroz jasan, mjerljiv okvir ima vrijednost koja prevazilazi samu geohemiju rane Zemlje.

PREGLED LITERATURE I METODOLOGIJA

Pregled literature

Teorija submarinskih alkalnih hidrotermalnih izvora doživjela je posljednjih 32 godine obilježavanje tridesetogodišnjice i, sa njom, kritičku rekapitulaciju. Cartwright i Russell (2019) tvrde da je ključna prednost alkalnih izvora tipa Izgubljenog grada (*Lost City*) u tome što oni spontano proizvode ono što stanica inače mora skupo da gradi: prostorno razdvojene odjeljke sa tankim neorganskim pregradama i trajni protonski gradijent između alkalne unutrašnjosti ($\text{pH} \approx 9\text{--}11$) i kiselijeg okeana ($\text{pH} \approx 5\text{--}7$ u hadejskim uslovima bogatim CO_2). Russell (2021) taj argument zaoštava odbacujući takozvani „vodeni problem” kao prividan i tvrdeći da hidroliza, koja jeste prijetnja polimerima, nije prepreka za metabolizam prvog reda koji radi na fiksaciji ugljenika. Preiner i saradnici (2020) su eksperimentalno pokazali da se, u prisustvu prirodnih minerala i vodonika, odvija geohemijski analog primordijalnog ugljeničnog i energetskog metabolizma, pri čemu se CO_2 reducira do formijata, 32reates i piruvata bez ijednog enzima. Schwander i saradnici (2023) dodatno pokazuju da serpentinizacija — reakcija 32reates i vode koja oslobađa vodonik i toplotu — istovremeno obezbjeđuje energiju, elektrone, organske 32reates, katalizatore, nutrijente i pH gradijent, i to upravo za sklop reakcija kakav pripisujemo LUCA.

Energetsku logiku izvora nekoliko istraživačkih grupa je operacionalizovalo. Sojo i saradnici (2019) su konstruisali mikrofluidne reaktore koji oponašaju uslove alkalnih izvora pri ambijentalnom pritisku i pokazali fiksaciju ugljenika duž veštačke pregrade. Ooka, McGlynn i Nakamura (2019) su elektrohemijski kvantifikovali termodinamičku pokretačku silu na granici hidrotermalne tečnosti i okeana, tumačeći je kao „baterije” koje pune autotrofni prelaz. Barge i saradnici (2019) su demonstrirali da redoks i pH gradijenti u sistemima gvožđe-oksihidroksida pokreću sintezu aminokiselina, čime su gradijent iz metafore pretvorili u mjerljiv 32reates. Duval i saradnici (2019) su predložili fugerit (zeleni rđa mineral) kao „ne tako jednostavnog pretka prvih ćelija”, povezujući mineralnu strukturu s redoks funkcijom. Rasmussen, Muhling i Fischer (2021) su u perjanicama alkalnih izvora identifikovali grenalitne nanočestice kao moguće šablone, a Goldman i saradnici (2023) su lanac prenosa elektrona iskoristili kao „prozor” u najranije faze evolucije. Boyd i saradnici (2020) su, sa druge strane, postavili bioenergetska ograničenja na porijeklo autotrofnog metabolizma, podsjećajući da nije svaki gradijent iskoristiv. Henriques Pereira i saradnici (2022) uveli su pojam geohemijskih protoenzima ili „geozima” — metala koji

specifično prenose hidrid na kofaktor tipa NAD⁺, čime se premošćuje jaz između geohemije i biohemije, o čemu sintetički pišu i Belthle i Tüysüz (2023) te Bonfio i Preiner (2024).

Nasuprot tome, hipoteza vrelih izvora i „toplog malog jezera” naglašava da metabolizam bez nasljeđa nije život i da se nasljeđe oslanja na polimere koji se u 33rea ne formiraju spontano. Damer i Deamer (2020) su razvili najpotpuniju verziju te hipoteze: naizmjenično vlaženje i sušenje u geotermalnim bazenima koncentriše organske 33reates33, a u suvoj fazi lipidne dvoslojne 33reates3333 posreduju u kondenzaciji nukleotida u polimere, formirajući takozvane protoćelije u „gelnoj fazi”. Deamer, Damer i Kompanichenko (2019) 33reat hemiju povezali s konkretnim geološkim analozima savremenih vrelih izvora, a Deamer, Cary i Damer (2022) su uveli pojam „urabilnosti” kao svojstva planetarnog tijela da uopšte može podržati porijeklo života. Eksperimentalna potpora nije izostala: Hassenkam i Deamer (2022) su vizualizovali RNK polimere nastale vrelim ciklusima vlaženja i sušenja, a Ross i Deamer (2023) su pokazali templatno vođenu replikaciju i hiralnu rezoluciju tokom takvih ciklusa. Novije studije analognih staništa, poput islandskih vrelih izvora, ispituju stabilnost nukleotida pod realnim terenskim uslovima (Šimonis et al., 2026).

Površinski scenario ima i geohemijsku prednost kod određenih „uskih grla”. Problem fosfata — činjenica da je fosfor u okeanu prerijedak i prebrzo istaložen da bi pokrenuo prebiotičku hemiju — Toner i Catling (2019/2020) rješavaju modelom karbonatno bogatih jezera u 33reate koncentracija fosfata može biti i do hiljadu puta 33rea nego u okeanu. Isti 33reate pokazuju da alkalna jezera koncentrišu i cijanid, ključni 33reates3333 prebiotičke sinteze (Toner & Catling, 2019). Haas, Sinclair i Catling (2024) su te modele empirijski provjerili na najfosfatnijem jezeru na svijetu. Rimmer i Shorttle (2019) su, zanimljivo, pokušali most između dvije škole predlažući površinske hidrotermalne izvore bogate ugljenikom i azotom kao mjesto sinteze gradivnih blokova.

Treća grupa literature bavi se prebiotičkom hemijom nezavisno od lokaliteta, i upravo ona pokazuje 33reate je pitanje okruženja isprepletano sa pitanjem mehanizma. Becker i saradnici (2019) su izveli jedinstvenu, prebiotički plauzibilnu sintezu i pirimidinskih i purinskih ribonukleotida, riješivši dugogodišnji prigovor da se dvije klase baza ne mogu dobiti pod istim uslovima. Muchowska, Varma i Moran (2019) su pokazali da gvožđe pokreće i sintezu i razgradnju univerzalnih metaboličkih prekursora, dok su isti 33reate (2020) dali sveobuhvatan pregled neenzimskih metaboličkih reakcija. Dherbassy i saradnici (2023) su demonstrirali neenzimsku transaminaciju uz saradnju metala i piridoksala. Frenkel-Pinter i saradnici (2020) su peptide opisali kao „molekularna čvorišta” porijekla života, a u kasnijem radu (2022) pokazali da tioestri nude plauzibilan put do proto-peptida — čime se povezuju s tioesterskom energetikom izvora. Krishnamurthy i Hud (2020) uređuju cjelinu polja hemijske evolucije, a niz radova o diamidofosfatu (Castañeda et al., 2019; Osumah & Krishnamurthy, 2021; Cruz et al., 2023) rješava problem prebiotičke fosforilacije. Pulletikurti i saradnici (2022) pokazuju sintezu α -aminokiselina i 33reates iz α -ketokiselina kao most ka postojećim metaboličkim putevima. Sandström i Rahm (2023) analiziraju diversifikaciju produkata cijanovodonika kao „raskršće” prebiotičke složenosti, dok Bizzarri i saradnici (2021) te Saladino, Bizzarri i Di Mauro (2024) razvijaju hemiju 33reates3333 kao alternativni izvor nukleobaza. Pitanje homoksiralnosti — zašto život bira samo jednu ruku molekula — Takahashi i Kobayashi (2019) smještaju u kosmički kontekst simetrijskog loma.

Napetost između hipoteze RNK svijeta i pristupa „prvo metabolizam” prožima cijelu ovu 33reates333333 i vrijedi je izložiti jer se dodiruje s pitanjem okruženja. Zagovornici RNK svijeta ističu da molekul koji istovremeno nosi informaciju i katalizuje reakcije rješava problem „kokoške i jajeta” između gena i enzima, dok zagovornici metabolizma prvog reda odgovaraju da RNK svijet pretpostavlja već postojeću zalihu aktiviranih nukleotida koju je neko morao proizvesti

(Krishnamurthy & Hud, 2020; Camprubí et al., 2019). Sistemsko-hemijski pristup, koji zastupaju Lopez i Fiore (2019), pokušava da prevaziđe tu dilemu tretirajući protoćeliju kao 34reate u kojem inkapsulacija, metabolizam i primitivno nasljeđe koevoluiraju umjesto da se javljaju redom. Za moj argument bitno je da RNK svijet, ma 34reate privlačan, i dalje zahtijeva okruženje koje pravi i održava polimere — dakle replikativnu osu jezerca — dok metabolizam prvog reda zahtijeva trajni redoks gradijent, dakle metaboličku osu izvora. Podjela „geni protiv metabolizma” tako se prelama kroz podjelu „jezerce protiv izvora”, ali se sa njom ne poklapa u potpunosti, i tek ih razdvajanje osa čini istovremeno razumljivim.

Poseban, često podcijenjen problem jeste homoksiralnost — činjenica da život koristi isključivo lijeve aminokiseline i desne šećere. Takahashi i Kobayashi (2019) taj lom simetrije smještaju u kosmički kontekst, dopuštajući da je pristrasnost mogla biti unesena zračenjem još prije nastanka Zemlje. Ross i Deamer (2023) pak pokazuju da ciklusi sušenja mogu pojačati postojeću hiralnu pristrasnost kroz selektivnu kristalizaciju i templatnu replikaciju. Nijedan scenario homoksiralnost ne rješava sam, ali je važno primijetiti da mehanizmi pojačanja hiralnosti pripadaju replikativnoj osi — još jedan pokazatelj da se pitanje nasljeđa i pitanje simetrije rješavaju u istom, cikličnom režimu.

Problem sklapanja prvih odjeljaka i mreža reakcija pokriva četvrta grupa. Jordan i saradnici (2019) su pokazali da mješavine amfifila (masne kiseline plus alkoholi i drugi lipidi) omogućavaju samosklapanje protoćelija čak i u uslovima u 34reate čiste masne kiseline zakažu, čime se ublažava klasični prigovor o nestabilnosti vezikula u slanoj 34rea. Lopez i Fiore (2019) daju sistemsko-hemijski pregled prebiotičkih protoćelija, a Bonfio (2021) analizira 34reates3434 koordinisane gvožđe-sumporne klastere kao most između prebiotičke i biomimetičke hemije. Xavier i saradnici (2020) matematički pokazuju da autokatalitičke hemijske mreže mogu nastati na porijeklu metabolizma, a Peng, Linderth i Baum (2022) analiziraju njihovu hijerarhijsku organizaciju. Camprubí i saradnici (2019) daju najcitiraniji noviji pregled cjeline problema pod naslovom „Pojava života”. Astrobiološku dimenziju otvaraju Robinson i saradnici (2023), koji predlažu odnose etena i etanola kao indikatore hidrotermalne aktivnosti na ledenim okeanskim svjetovima poput Enceladusa i Europe, te Madan i Pearce (2025), koji termodinamički modeluju sintezu aminokiselina na Titanu u kontekstu misije Dragonfly.

Ovaj članak se naslanja i na članke objavljene u ranijim brojevima časopisa u kojem izlazi. Subotić (2025) je analizirala horizontalni prenos gena kod ekstremofilnih arheja izloženih hemiji marsovskog regolita, sa implikacijama za panspermiju — što je relevantno za pitanje granica staništa u 34reate život opstaje. Singh (2024) je preispitao kvantnu koherenciju u fotosintetičkim antenskim kompleksima, tema koja se tiče same prirode biološke energetske sprege. Davis (2025) je dao pregled rasprave o biopotpisima u oblacima Venere, a Gomez (2024) je analizirala atmosferske biopotpise egzoplaneta u eri svemirskog teleskopa Džejms Veb — oba rada su metodološki relevantna za problem lažno pozitivnih signala, koji je blizak 34reates razlikovanja biotičkog od abiotičkog u samom porijeklu. Souza Mendes (2023) je razmatrao fino podešavanje fundamentalnih konstanti i antropički princip, čime se dotiče kosmološke pozadine pitanja o porijeklu.

Peta grupa literature, često zanemarena u raspravi izvor–jezerce, tiče se termodinamičkog okvira samog života. Prema toj perspektivi, živi 34reate je disipativna struktura — obrazac koji se održava trošeći slobodnu energiju i proizvodeći entropiju u okolini. Boyd i saradnici (2020) upravo iz tog ugla postavljaju bioenergetska ograničenja: nije dovoljno da gradijent postoji, on mora biti iskoristiv brzinom koja nadmašuje brzinu raspadanja struktura koje ga koriste. Goldman i saradnici (2023) lanac prenosa elektrona tretiraju kao najstariji „zapis” te disipacije, tvrdeći da se najranija evolucija može čitati unatrag kroz univerzalnu redoks hemiju. Xavier i saradnici (2020) formalizuju uslove pod 34reate autokatalitičke mreže mogu opstati daleko od ravnoteže, a Peng,

Linderoth i Baum (2022) pokazuju da takve mreže imaju hijerarhijsku strukturu koja podsjeća na metaboličke module. Takva perspektiva je važna za moj argument jer premješta težište s pitanja „koje 35reates35” na pitanje „koji tok energije” — a tok energije je upravo ono što topologija gradijenta opisuje.

Vrijedi izdvojiti i geohemijsku srž izvorišnog scenarija, jer se na njoj temelji većina procjena u ovom radu. Serpentinizacija — reakcija ultramafijskih minerala, prije svega 35reates, sa vodom — egzotermna je i oslobađa molekularni vodonik u znatnim količinama, stvarajući fluid visoke pH vrijednosti i izraženo redukujućeg karaktera (Schwander et al., 2023; Quéméneur et al., 2023). Taj vodonik je termodinamički donor koji, u dodiru s CO₂ iz okeana, čini reakciju redukcije ugljenika povoljnom, pod uslovom da postoji katalizator koji snizi barijeru (Preiner et al., 2020; Peng et al., 2021). Mineralni katalizatori — 35reates35, mackinawit, grenalit, fugerit i srodne faze bogate gvožđem i niklom — upravo su takvi (Duval et al., 2019; Rasmussen et al., 2021). Belthle i Tüysüz (2023) pokazuju da se biohemijska i geohemijska fiksacija CO₂ mogu razumjeti kao jedan katalitički 35reates3535, a Henriques Pereira i saradnici (2022) da metali mogu prenositi hidrid na kofaktor NAD⁺ specifično, kao „geozimi”. Cjelina tih nalaza čini izvorišni scenario hemijski konkretnim na način koji prije desetak 35reate nije postojao.

Ono što u ovoj 35reates353535 nedostaje jeste zajednička mjera. Svaka škola navodi svoje prednosti kvalitativno, a prigovore protivničke strane tretira kao diskvalifikujuće. Nedostaje instrument koji bi obje strane doveo na isti teren i pokazao da njihove prednosti nisu na istoj osi. Tu prazninu ovaj rad pokušava da popuni.

Metodologija istraživanja

Istraživanje primjenjuje komparativno-analički pristup dopunjen heurističkom kvantitativnom sintezom. Prvi metodološki sloj čini sistematska rekonstrukcija dviju hipoteza iz recenzovane literature objavljene u 35reate 2019–2026, s naglaskom na termodinamičke i bioenergetske 35reates3535 koji se u tim radovima navode: raspone pH gradijenta, redoks potencijale, slobodne energije reakcija serpentinizacije i fiksacije ugljenika, te stope polimerizacije i degradacije pod ciklusima vlaženja i sušenja. Drugi sloj čini konstrukcija Indeksa slobodnoenergetske sprege (ISES), instrumenta koji svako okruženje ocjenjuje duž pet dimenzija za koje 35reates353535 pokazuje da su presudne za prelaz od hemije ka životu.

Pet dimenzija definišem ovako. Prva je perzistencija gradijenta — da li slobodnoenergetski gradijent traje neprekidno ili se javlja u naletima; alkalni izvori tipa Izgubljenog grada aktivni su desetinama hiljada 35reate (Cartwright & Russell, 2019). Druga je vektorska sprema — u kojoj mjeri je gradijent usmjeren preko neke pregrade tako da se može spregnuti s vektorskom hemijom, kakva je hemiozmoza (Sojo et al., 2019; Ooka et al., 2019). Treća je prostorna kompartmentalizacija — postojanje prirodnih odjeljaka koji zadržavaju reaktante (Duval et al., 2019; Jordan et al., 2019). Četvrta je ciklična kondenzacija — sposobnost okruženja da kroz dehidraciju pokrene kondenzacione reakcije i polimerizaciju (Damer & Deamer, 2020; Hassenkam & Deamer, 2022). Peta je fluks ugljenika i energije — protok CO₂ i vodonika, odnosno drugih redoks parova, kroz 35reate (Preiner et al., 2020; Schwander et al., 2023).

Svakoj dimenziji dodjeljujem vrijednost u rasponu od 0 do 1, izvedenu iz raspona parametara koje 35reates353535 navodi, uz eksplicitno priznanje da je riječ o ekspertskoj procjeni a ne o mjerjenju. Iz pet dimenzija računam dva kompozitna skora. Skor metaboličkog pokretanja (ISES-M) ponderiše dimenzije perzistencije, vektorske sprege i fluksa (koeficijenti 0,30; 0,40; 0,30 primijenjeni na tri relevantne dimenzije, uz 35reat doprinos kompartmentalizacije), jer su to dimenzije koje pokreću fiksaciju ugljenika i energetske sprege. Skor replikativnog pokretanja (ISES-R) ponderiše dimenzije ciklične kondenzacije i kompartmentalizacije, uz 35reat doprinos

perzistencije, jer su to dimenzije koje pokreću polimerizaciju i inkapsulaciju. Odabrao sam ovaj okvir jer razdvaja dvije funkcije koje su u dosadašnjoj raspravi bile stopljene — a upravo to stapanje, po mom sudu, održava lažnu dilemu. Skoring svake dimenzije oslanjam na sljedeći rubrik. Vrijednost blizu 1 dodjeljujem kada 36creates363636 pruža direktnu eksperimentalnu potvrdu da okruženje posjeduje datu osobinu u mjeri relevantnoj za porijeklo; vrijednost oko 0,5 kada postoji indirektna ili djelimična potvrda, ili kada je osobina prisutna ali osporavana; vrijednost blizu 0 kada osobina strukturno izostaje. Tako, na primjer, vektorskoj sprezi izvora dodjeljujem 0,85, a ne 1,0, upravo zato što, iako mikrofluidni i elektrohemijski eksperimenti potvrđuju spregu (Sojo et al., 2019; Ooka et al., 2019), pitanje debljine i trajnosti prirodnih pregrada ostaje otvoreno. Cikličnoj kondenzaciji jezera dodjeljujem 0,90 jer postoji direktna vizualizacija polimera nastalih sušenjem (Hassenkam & Deamer, 2022) I demonstracija templatne replikacije (Ross & Deamer, 2023). Ovaj rubrik ne uklanja subjektivnost, ali je čini eksplicitnom i, time, osporivom.

Treći metodološki sloj čini provjera osjetljivosti: variram pondere i granične vrijednosti da bih 36reat da li se kvalitativni zaključak o komplementarnosti mijenja. Izvori podataka su isključivo primarni recenzovani radovi i institucionalni pregledi navedeni u bibliografiji; nisam koristio nerecenzovane izvore niti radove starije od 2019. Godine, osim vlastite monografije (Knežević, 2024) koja služi kao konceptualni okvir, ne kao empirijski izvor. Priznajem da svaki indeks nosi rizik prividne preciznosti; brojevi koje navodim treba čitati kao uređene procjene, ne kao izmjerene konstante. Njihova vrijednost je u tome što čine tvrdnje osporivim.

REZULTATI ISTRAŽIVANJA

Primjena Indeksa slobodnoenergetske sprege na dva okruženja daje nalaze koji se mogu organizovati u tri bloka, saglasno trima hipotezama. Prvi blok tiče se profila po dimenzijama, drugi kompozitnih skorova, treći analize osjetljivosti. Po pojedinačnim dimenzijama, alkalni hidrotermalni izvor postiže visoke vrijednosti u perzistenciji gradijenta (0,90), vektorskoj sprezi (0,85) i fluksu ugljenika i energije (0,80), te umjerenu vrijednost u prostornoj kompartmentalizaciji (0,80), ali nisku u cikličnoj kondenzaciji (0,20). Toplo malo jezerce, odnosno vrela izvor, pokazuje obrnut profil: visoku vrijednost u cikličnoj kondenzaciji (0,90), umjerenu u kompartmentalizaciji (0,55) i fluksu (0,45), a nisku u perzistenciji (0,35) i vektorskoj sprezi (0,20). Tabela 1 sažima ove vrijednosti i navodi glavne literaturne osnove za svaku procjenu. Vrijednosti se, dakle, ne poklapaju ni u jednoj dimenziji osim djelimično u kompartmentalizaciji, gdje izvori imaju prednost zahvaljujući neorganskim pregradama (Duval et al., 2019; Rasmussen et al., 2021), a jezera djelimičnu kompenzaciju kroz lipidne vezikule i gelnu fazu (Jordan et al., 2019; Damer & Deamer, 2020).

Dimenzija	Alkalni hidrotermalni izvor	Toplo malo jezerce	Glavna literaturna osnova
Perzistencija gradijenta	0,90	0,35	Cartwright & Russell (2019); Russell (2021)
Vektorska sprega (hemiozmoza)	0,85	0,20	Sojo et al. (2019); Ooka et al. (2019)
Prostorna kompartmentalizacija	0,80	0,55	Duval et al. (2019); Jordan et al. (2019)
Ciklična kondenzacija (dehidratacija)	0,20	0,90	Damer & Deamer (2020); Hassenkam & Deamer (2022)
Fluks ugljenika i energije	0,80	0,45	Preiner et al. (2020); Schwander et al. (2023)
ISES-M (metaboličko pokretanje)	0,82	0,38	—
ISES-R (replikativno pokretanje)	0,44	0,79	—

Tabela 1. Indeks slobodnoenergetske sprege (ISES): procjene po dimenzijama (skala 0–1) i kompozitni skorovi za dva okruženja.

Po kompozitnim skorovima, izvor postiže skor metaboličkog pokretanja ISES-M $\approx 0,82$, a jezerce svega ISES-M $\approx 0,38$. Obrnuto, jezerce postiže skor replikativnog pokretanja ISES-R $\approx 0,79$, a izvor ISES-R $\approx 0,44$. Drugim riječima, razlika između dva okruženja nije u ukupnoj „kvaliteti” nego u tome koju funkciju svako od njih optimizuje. Izvor je za oko 2,2 puta bolji pokretač metabolizma, a jezerce za oko 1,8 puta bolji pokretač replikacije. Ni jedno okruženje ne postiže visok skor na obje ose istovremeno; maksimalna kombinovana vrijednost bilo kojeg pojedinačnog okruženja ne prelazi 0,63 kada se obje ose ponderišu jednako. To je centralni empirijski obrazac koji izlazi iz analize.

Analiza osjetljivosti pokazuje da je ovaj obrazac robustan. Variranje pondera u rasponu od $\pm 0,15$ po dimenziji ne mijenja poredak: izvor ostaje dominantan na metaboličkoj osi u svim testiranim kombinacijama, a jezerce na replikativnoj. Da bi se poredak preokrenuo na metaboličkoj osi, vektorskoj sprezi bi trebalo dodijeliti ponder ispod 0,10, što bi bilo u suprotnosti s eksperimentalnim nalazima o hemiozmotskom pokretanju fiksacije ugljenika (Sojo et al., 2019; Preiner et al., 2020; Ooka et al., 2019). Slično, da bi izvor prestigao jezerce na replikativnoj osi, cikličnoj kondenzaciji bi trebalo dodijeliti ponder blizu nule, što bi zanemarilo čitav korpus dokaza o polimerizaciji vođenoj sušenjem (Hassenkam & Deamer, 2022; Ross & Deamer, 2023). Robusnost obrasca ne dokazuje da je model tačan, ali pokazuje da zaključak ne zavisi od fino podešenih pretpostavki.

Treći blok nalaza tiče se same distribucije skorova preko dimenzija, a ne samo njihovih zbirova. Kod izvora, četiri od pet dimenzija leže iznad 0,79, a jedina niska vrijednost (ciklična kondenzacija, 0,20) je oštro odvojena — profil je, dakle, izrazito „metabolički specijalizovan”. Kod jezera je slika manje polarizovana: najviša vrijednost (0,90) i najniža (0,20) razmaknute su jednako, ali su srednje dimenzije (kompartimentalizacija 0,55; fluks 0,45) bliže sredini skale, što daje „replikativno specijalizovan, ali energetski oslonjen na spolja” profil. Ova asimetrija u obliku profila, a ne samo u zbiru, dodatno potkrepljuje tezu da dva okruženja optimizuju različite funkcije: izvor je specijalista, jezerce je specijalista druge vrste, i ni jedno nije generalista. Kada bi neko od njih bilo generalista, očekivali bismo ravnomjerno visok profil preko svih pet dimenzija — a takav profil se ne javlja ni u jednom slučaju.

Dodatni nalaz tiče se numeričke asimetrije u „uskim grlima”. Na 37reate metabolizma, prirodni pH gradijent na izvorima iznosi tipično 3 do 5 pH jedinica, što odgovara protonskoj pokretačkoj sili reda veličine 0,15 do 0,30 volti — dovoljno da, u principu, pokrene redukciju CO₂ preko mineralnih katalizatora (Ooka et al., 2019; Schwander et al., 2023). Na 37reate replikacije, koncentracija fosfata u karbonatno bogatim jezerima može biti i do tri reda veličine 37rea nego u okeanu (Toner & Catling, 2019; Haas et al., 2024), a stope polimerizacije nukleotida u suvoj fazi rastu za više redova veličine u odnosu na uronjene uslove (Hassenkam & Deamer, 2022). Svaka strana, dakle, rješava jedno usko grlo koje druga ne rješava — obrazac koji direktno podupire hipotezu o komplementarnosti.

TOPOLOGIJA GRADIJENTA: STAJAĆI VEKTORSKI NASPRAM CIKLIČNOG VREMENSKOG REŽIMA

Rezultati navedeni u prethodnoj sekciji dobijaju smisao tek kada se pojedinačne dimenzije prepoznaju kao izrazi jedne dublje razlike. Ta razlika nije geografska. I izvor i jezerce nude slobodnoenergetski gradijent; ono što ih razdvaja jeste oblik tog gradijenta u prostoru i vremenu. Na alkalnom izvoru gradijent je stajaći i vektorski: on postoji trajno i usmjeren je preko pregrade, od alkalne unutrašnjosti ka kiselom okeanu (Cartwright & Russell, 2019; Russell, 2021). U jezercu gradijent je cikličan i vremenski: on ne postoji kao trajna prostorna orijentacija nego kao smjena stanja — mokro, pa suvo, pa opet mokro — koja se ponavlja u ritmu isparavanja i prilijeva

(Damer & Deamer, 2020). Ovu razliku nazivam topologijom gradijenta, i tvrdim da je ona, a ne lokacija, prava osa rasprave.

Značaj razlike leži u tome što se različite topologije spregu s različitim tipovima hemije. Vektorski gradijent može se, u principu, spregnuti sa vektorskim procesom — sa kretanjem protona ili elektrona preko pregrade koje pokreće nishodnu hemiju. To je logika hemiozmoze, i to je razlog zbog kojeg izvor postiže tako visok skor na metaboličkoj osi. Ciklični gradijent, nasuprot tome, spregu s procesima koji zahtijevaju izmjenu uslova — sa kondenzacijom koja se dešava u suvoj fazi i hidratacijom koja se dešava u mokroj. Polimerizacija nukleotida jeste upravo takav 38reates: u 38rea je termodinamički nepovoljna zbog hidrolize, a u suvoj fazi postaje moguća (Hassenkam & Deamer, 2022; Ross & Deamer, 2023). Time se objašnjava zašto jezerce postiže tako visok skor na replikativnoj osi, a izvor tako nizak.

Ovdje treba biti oprezan da se ne upadne u zamku da je jedna topologija „bolja”. Moja početna pretpostavka, priznajem, bila je da bi jedna od dvije morala biti fundamentalnija. Bliža analiza podataka tu pretpostavku nije potvrdila. Kada se dimenzije razdvoje, vidi se da svaka topologija dominira upravo u onim procesima za koje je strukturno prilagođena, i ni u jednom drugom. Stajajući vektorski gradijent ne može da pokrene dehidratacionu kondenzaciju jer u trajno uronjenom okruženju nema suve faze; ciklični vremenski gradijent ne može da održi kontinuiranu hemiozmotsku spregu jer se pri svakom sušenju membranski potencijal raspada. To nije nedostatak nijedne škole; to je posljedica fizike gradijenata.

Iz ugla nauke o porijeklu, ovakvo razdvajanje ima metodološku vrijednost koja nadilazi konkretan slučaj. Ono pokazuje da su mnogi „fatalni prigovori” u 38reates383838 zapravo prigovori upućeni pogrešnoj osi. Kada zagovornici jezera izvorima prigovaraju da u njima nema polimerizacije (Deamer et al., 2022), oni imaju 38reat — ali taj prigovor pogađa replikativnu osu, na kojoj izvori i ne pretenduju na dominaciju. Kada zagovornici izvora jezercima prigovaraju „vodeni problem” i nedostatak trajne energetske sprege (Russell, 2021), i oni imaju 38reat — ali taj prigovor pogađa metaboličku osu, na kojoj jezerca i ne pretenduju na dominaciju. Rasprava je, dakle, dijelom bila mimoilaženje: dvije strane su gađale različite mete uvjerene da gađaju istu.

Postoji i dublja, gotovo geometrijska strana ove razlike. Stajajući vektorski gradijent ima orijentaciju u prostoru: postoji „unutra” i „napolje”, pravac duž kojeg protoni teku, i pregrada koja tok kanališe. Ciklični vremenski gradijent nema prostornu orijentaciju nego vremensku periodičnost: njegov „pravac” je strelica vremena, smjena faza. Zbog toga se s njima spregu bitno različite klase reakcija. Vektorski procesi — kao što 38reates3838 elektrona i transport jona — traže prostorni pravac, i njih izvor može da nahrani (Ooka et al., 2019; Goldman et al., 2023). Kondenzacioni procesi — kao što je stvaranje fosfodiesterne veze uz otpuštanje vode — traže promjenu uslova kroz vrijeme, i njih jezerce može da nahrani (Damer & Deamer, 2020; Ross & Deamer, 2023). Nije riječ o tome da je jedan tip energije „jači”; riječ je o tome da su geometrijski nesamjerljivi, pa se ne mogu upoređivati na jednoj skali. Upravo to nesamjerljivost, mislim, objašnjava zašto je rasprava trajala tako dugo bez razrješenja: obje strane su bile u pravu jer su mjerile duž različitih osa.

Ovakvo tumačenje slaže se i sa širom morfološkom perspektivom koju sam ranije razvio (Knežević, 2024). Ako se prauzrok shvati kao oblik u kojem se slobodna energija ulijeva u materiju i organizuje je, onda su stajajući i ciklični gradijent dva različita morfološka rješenja istog problema — kako uvesti red tamo gdje ga nema. Filozofska analiza tog pristupa (Đukić, 2025) naglašava upravo tu tačku: da se porijeklo ne mora vezati za supstancu ili mjesto, nego za oblik prelaza. Ne insistiram da čitalac prihvati tu terminologiju; navodim je jer objašnjava zašto smatram da je razdvajanje dviju osa više od tehničkog trika.

HEMIOZMOZA KAO PRIMORDIJALNA SPREGA I ENERGETSKI PRAUZROK METABOLIZMA

Ako je metabolička osa domen izvora, onda je hemiozmoza mehanizam koji taj domen definiše. Univerzalnost hemiozmotske sprege — činjenica da sve tri domena života, bez izuzetka, energiju čuvaju u obliku jonskog gradijenta preko membrane — jedan je od najjačih argumenata da je ta sprega drevna, možda i starija od genetskog koda (Martin, 2020; Schwander et al., 2023). Rekonstrukcije LUCA to potkrepljuju: pretpostavljeni predak bio je zavisao od vodonika, fiksirao je CO₂ acetil-koenzim A putem i posjedovao je membranske komplekse za rad sa jonskim gradijentima (Moody et al., 2024; Crapitto et al., 2022). Teško je objasniti takvu univerzalnost ako hemiozmoza nije bila prisutna od samog početka, a prirodni protonski gradijent na alkalnom izvoru pruža jedini poznati abiotski način da ta sprega postoji prije nego što evolucija izgradi pumpe koje je danas održavaju.

Eksperimentalna potpora ovom argumentu ojačala je u posljednjih nekoliko 39reate. Preiner i saradnici (2020) su pokazali da native metali i minerali reduciju CO₂ vode do centralnih metaboličkih intermedijera, dakle da geohemija sama, bez enzima, može da kopira srž ugljeničnog metabolizma. Muchowska, Varma i Moran (2019) su pokazali da gvožđe pokreće reakcije obrnutog Krebsovog ciklusa, a u pregledu (2020) su mapirali 39reate daleko neenzimska hemija može da ide. Henriques Pereira i saradnici (2022) su uveli „geozime” — metale koji specifično prenose hidrid na NAD⁺, čime se rješava pitanje kako je redoks valuta mogla postojati prije proteina. Belthle i Tüysüz (2023) povezuju biohemijsku i geohemijsku fiksaciju CO₂ u jedan 39reates3939, a Bonfio i Preiner (2024) taj 39reates3939 sažimaju kao prelaz „od hemije pojave života ka hemiji života”. Ono što je ranije bila spekulacija — da metabolizam može prethoditi genima — sada ima laboratorijsku potporu, iako parcijalnu.

Vrijedi razmotriti i prigovore, jer bi bilo neodgovorno prikazati hemiozmotski scenario kao dovršen. Boyd i saradnici (2020) upozoravaju da nije svaki termodinamički povoljan gradijent i kinetički iskoristiv — da između „moguće” i „stvarno se dešava” stoji barijera aktivacije koju mineralni katalizatori ne moraju uvijek sniziti dovoljno. Postoji i rasprava o tome da li su prirodni pH gradijenti na izvorima dovoljno strmi i dovoljno spregnuti sa tankim pregradama da bi obavili koristan rad; dio literature to osporava, tvrdeći da su geološke pregrade predebele ili prekratkotrajne. Ne 39reates raspravu ovdje razriješiti, i namjerno je ostavljam otvorenom; napominjem samo da mikrofluidni eksperimenti (Sojo et al., 2019) i elektrohemijska mjerenja (Ooka et al., 2019) sugerišu da je koristan rad barem u principu dostižan. Moja procjena vektorske sprege od 0,85 odražava tu potporu, ali i njenu nedovršenost; da su dokazi potpuni, dodijelio bih vrijednost blizu jedinice.

Kvantitativno posmatrano, prednost vektorskog gradijenta leži u zrnastosti energije koju omogućava. Protonska pokretačka sila reda 0,15 do 0,30 volti, kakva se procjenjuje na granici alkalne tečnosti i kiselog okeana, odgovara slobodnoj energiji po prenesenom 39reate koja je uporediva s energijom pojedinačnih hemijskih koraka u fiksaciji ugljenika (Ooka et al., 2019; Schwander et al., 2023). To znači da gradijent ne isporučuje energiju u jednom velikom, teško iskoristivom naletu, nego u malim kvantima koji se mogu spregnuti s pojedinačnim reakcijama. Upravo je ta zrnastost, a ne sam iznos energije, ono što izvor čini pogodnim: serpentinizacija oslobađa mnogo energije, ali bez vektorske pregrade ta energija bi se rasula kao toplota. Pregrada je pretvara u niz iskoristivih koraka. Ni jezerce ni bilo koji ciklični režim ne nudi ovakvu zrnastost — dehidratacija isporučuje termodinamički poticaj odjednom, na nivou cijelog 39reates, a ne po pojedinačnoj vezi. To je dublji razlog zbog kojeg metabolička osa strukturno pripada izvoru, a ne stvar puke dostupnosti energije.

Postoji dublji razlog zbog kojeg hemiozmozmu nazivam energetske prouzrokom metabolizma. Ona nije samo jedan od načina čuvanja energije; ona je način koji omogućava da se slobodna energija razloži na kvante iskoristive za pojedinačne hemijske korake, umjesto da se troši odjednom. U morfološkim terminima koje sam ranije razvio (Knežević, 2024), vektorski gradijent je oblik koji „usmjerava” energiju, dajući joj pravac i time mogućnost da vrši rad. Bez tog usmjerenja, slobodna energija serpentinizacije — koja je znatna — rasula bi se kao toplota. Zato izvor nije samo bogat energijom; on je energiju već doveo u oblik pogodan za spregu. To je, po mom sudu, njegova prava prednost, i to je razlog zbog kojeg metabolička osa pripada njemu.

Treba dodati i da hemiozmoški scenario ima elegantno objašnjenje za jedan naizgled nepovezan podatak — univerzalnost acetil-koenzim A puta fiksacije ugljenika kod najdubljih grana života. Taj put je najkraći, energetski najjeftiniji i jedini koji je istovremeno put fiksacije ugljenika i put konzervacije energije (Martin, 2020). Njegova rasprostranjenost kod anaeroba koji žive od vodonika i CO₂ teško se objašnjava ako pretpostavimo da je metabolizam nastao u okruženju siromašnom trajnim redoks gradijentom. Ako, međutim, pretpostavimo alkalni izvor, taj put postaje gotovo očekivan: on je hemijski „otisak” okruženja u kojem su vodonik i CO₂ bili u izobilju a gradijent trajan (Preiner et al., 2020; Schwander et al., 2023). Muchowska, Varma i Moran (2020) pokazuju 40reates40 neenzimska verzija te hemije može da ide, a Dherbassy i saradnici (2023) da čak i transaminacija — prenos amino-grupe, srž povezivanja ugljeničnog i azotnog metabolizma — može teći bez enzima uz saradnju metala i kofaktora. Slika koja izlazi jeste da srž metabolizma nosi potpis izvorišnog okruženja, i to je, po mom sudu, jedan od najjačih posrednih argumenata u korist metaboličke ose izvora.

Ipak, sve i da je hemiozmoški scenario u potpunosti tačan za pokretanje metabolizma, on ostavlja neriješenim pitanje nasljeđa. Fiksacija ugljenika daje 40reates40; ona ne daje polimere koji te 40reates40 pamte i prenose. Autokatalitičke mreže mogu premostiti dio tog jaza (Xavier et al., 2020; Peng et al., 2022), ali autokataliza bez polimernog šablona ostaje krhka i podložna „razblaživanju”. Zbog toga se argument nužno vraća na drugu osu — na okruženje koje zna da pravi polimere. A to okruženje nije izvor.

SUŠENJE, KONDENZACIJA I REPLIKATOR: ŠTA JEZERCE RJEŠAVA A IZVOR NE

Nasljeđe zahtijeva polimere, a polimeri zahtijevaju kondenzaciju — uklanjanje molekula vode pri spajanju monomera. Upravo tu leži strukturna prednost jezera. U trajno uronjenom okruženju, ravnoteža kondenzacije i hidrolize pomjerena je ka razgradnji; polimer koji nastane biva razgrađen brže nego što se produžava. U ciklusu vlaženja i sušenja, suva faza pomjera ravnotežu ka sintezi, a lipidne 40reates4040 posreduju u organizaciji monomera (Damer & Deamer, 2020; Deamer et al., 2019). Hassenkam i Deamer (2022) su direktno vizualizovali RNK polimere nastale takvim ciklusima, a Ross i Deamer (2023) su pokazali čak i templatno vođenu replikaciju i hiralnu rezoluciju — dakle korake koji vode ka funkcionalnom nasljeđu, a ne samo ka nasumičnom nizanju.

Jezerce rješava i nekoliko geohemijskih uskih grla koja su izvoru nedostupna. Problem fosfata je najupečatljiviji. Fosfor je u okeanu pririjeđak da bi pokrenuo prebiotičku hemiju, ali u karbonatno bogatim, isparavajućim jezerima njegova koncentracija može porasti za tri reda veličine (Toner & Catling, 2019/2020; Haas et al., 2024). Slično, alkalna jezera koncentrišu cijanid, ključni 40reates4040 sinteze nukleobaza i aminokiselina (Toner & Catling, 2019). Prebiotička hemija koja daje 40reates404040 — poput jedinstvene sinteze Becker i saradnika (2019) ili puteva preko 40reates4040 (Bizzarri et al., 2021; Saladino et al., 2024) — često zahtijeva upravo naizmjenično sušenje i visoke koncentracije reaktanata, uslove koje jezerce nudi a izvor ne.

Fosforilacija diamidofosfatom (Castañeda et al., 2019; Osumah & Krishnamurthy, 2021; Cruz et al., 2023) takođe je efikasnija u koncentrisanim, djelimično dehidriranim sredinama.

Sklapanje membrana je treća oblast u kojoj jezerce ima prednost, mada ovdje slika nije jednoznačna. Klasični prigovor glasi da masne kiseline ne formiraju stabilne vezikule u prisustvu soli i dvovalentnih jona, kojih u okeanu ima u izobilju — što bi išlo u prilog slatkovodnom jezercu naspram slanog izvora. Jordan i saradnici (2019) su, međutim, pokazali da mješavine amfifila prevazilaze taj problem, čime su oslabili oštrinu prigovora. Lopez i Fiore (2019) sistemski pokazuju da inkapsulacija i primitivni metabolizam mogu koegzistirati u protoćeliji. Ipak, ostaje činjenica da suva faza jezera olakšava i koncentraciju lipida i njihovo sklapanje u multilamelarne 41reates4141 na način koji uronjeni izvor teško reprodukuje (Damer & Deamer, 2020). Zato kompartmentalizaciji jezera dodjeljujem umjerenu, a ne nisku vrijednost.

Postoji, naravno, i cijena. Jezerce plaća svoju replikativnu prednost energetskim siromaštvom. Ono nema trajan vektorski gradijent; svaki put kada se osuši, prekida se svaka kontinuirana energetska sprega. Redoks resursi jezera su povremeni i zavise od spoljašnjih izvora — sunčevog zračenja, atmosferskih donora, meteorskog materijala — a ne od stalne geohemijske reakcije kakva je serpentinizacija. Zbog toga jezerce postiže nizak skor na metaboličkoj osi. Ono zna da pravi polimere, ali ne zna da ih trajno hrani energijom. To je tačno ono što izvor zna, a jezerce ne — i obrnuto. Simetrija prednosti i nedostataka nije slučajna; ona je posljedica toga što su dvije topologije gradijenta strukturno komplementarne.

Sinteza samih nukleotida dodatno ilustruje zavisnost replikacije od uslova koje jezerce nudi. Jedinstvena sinteza pirimidinskih i purinskih ribonukleotida (Becker et al., 2019) prolazi kroz korake koji zahtijevaju umjerene koncentracije, kontrolisanu vlažnost i naizmjenične uslove — dakle upravo režim vlaženja i sušenja. Putevi preko 41reates4141 daju nukleobaze pod uslovima koji podrazumijevaju djelimičnu dehidrataciju i zagrijavanje (Bizzarri et al., 2021; Saladino et al., 2024). Prebiotička fosforilacija diamidofosfatom efikasnija je u koncentrisanim, aerosolnim ili djelimično suvim sredinama (Castañeda et al., 2019; Cruz et al., 2023). Sinteza α -aminokiselina i 41reates iz α -ketokiselina, koju su pokazali Pulletikurti i saradnici (2022), gradi most ka postojećim metaboličkim putevima i, značajno, koristi hemiju koja se lako smješta u koncentrisano površinsko okruženje. Sandström i Rahm (2023) pokazuju da čak i mreža reakcija cijanovodonika, temeljnog prekursora, diversifikuje produkte na način osjetljiv na koncentraciju i uslove — opet parametri koje jezerce reguliše bolje od izvora. Obrazac je dosljedan: hemija koja gradi nasljeđe voli koncentraciju i suhu fazu, a to je domen jezera.

Vrijedi napomenuti da ni scenario jezera nije bez otvorenih pitanja. Stabilnost polimera nastalih vlaženjem i sušenjem pod realnim terenskim uslovima tek se ispituje (Šimonis et al., 2026), a pitanje kako se iz nasumičnih polimera javlja funkcionalna sekvenca ostaje jednako teško kao i na 41reate izvora. Homoksiralnost — problem izbora jedne ruke molekula — takođe nije riješena nijednim scenarijem posebno (Takahashi & Kobayashi, 2019), mada Ross i Deamer (2023) sugerišu da ciklusi sušenja mogu doprinijeti hiralnoj rezoluciji. Ne tvrdim, dakle, da jezerce rješava replikaciju u potpunosti; tvrdim samo da je za replikaciju strukturno prikladnije nego izvor, jednako 41reate je izvor prikladniji za metabolizam.

KOMPLEMENTARNOST I SEKVENCA GRADIJENTNIH REŽIMA: SINTEZA

Ako izvor optimizuje metabolizam a jezerce replikaciju, i ako su te dvije funkcije obje nužne za život, onda se nameće zaključak koji nijedna škola u svom čistom obliku ne izvlači: da porijeklo života nije vezano za jedno mjesto nego za sekvencu gradijentnih režima. Ovo je treća i, po mom sudu, najvažnija implikacija okvira topologije gradijenta. Umjesto pitanja „izvor ili jezerce”, predlažem pitanje „kojim redom i kroz koje prelaze”. Kompozitni skorovi to potkrepljuju: pošto

nijedno pojedinačno okruženje ne postiže visoku vrijednost na obje ose (maksimum ispod 0,63 pri jednakom ponderisanju), 42reate koji bi objedinio obje funkcije mora ili kombinovati dva okruženja u prostoru ili proći kroz njih u vremenu.

Postoji nekoliko načina na koje se takva sekvenca može zamisliti, i namjerno ostavljam 42reates za više od jednog. Jedan scenario je prostorni: geotermalni 42reate u kojem 42reates₄₂, trajno uronjeni kanali obezbjeđuju hemiozmotski metabolizam, dok povezani površinski bazeni prolaze kroz cikluse sušenja i obezbjeđuju polimerizaciju, uz razmjenu materijala između to dvoje. Rimmer i Shorttle (2019) opisuju upravo hibridno okruženje površinskih hidrotermalnih izvora koje bi moglo približiti dvije funkcije. Drugi scenario je vremenski: 42reate koji migrira ili se mijenja, tako da isti hemijski 42reates₄₂ prvo prođe kroz metabolički režim izvora, a zatim, geološkim promjenama, dospije u režim jezera. Treći scenario je funkcionalni prije nego lokacijski: možda su rani sistemi 42reate „unutrašnji” ciklični režim (lokalne oscilacije koncentracije unutar mineralnih pora) uz „spoljašnji” vektorski gradijent, tako da su obje topologije postojale na istom mjestu u različitim razmjerama. Ne opredjeljujem se konačno; okvir ne zahtijeva jedan scenario, nego zahtijeva da bilo koji uspješan scenario mora obezbijediti obje topologije.

Ovakva sinteza mijenja i status „fatalnih prigovora” iz literature. Vodeni problem koji Russell (2021) proglašava prividnim, i problem energetske sprege koji zagovornici izvora ističu, prestaju da budu argumenti protiv jedne ili druge strane i postaju specifikacija onoga što svaka faza sekvence mora riješiti. Autokatalitičke mreže (Xavier et al., 2020; Peng et al., 2022) dobijaju prirodno mjesto kao most: one mogu održati hemijski kontinuitet tokom prelaza iz jednog režima u drugi, prije nego što polimerni šablon preuzme ulogu nasljeđa. Rekonstruisani LUCA, sa svojom mješavinom geohemijskih (metabolizam zavisen od vodonika, gvožđe-sumporni klasteri) i genetskih (polimerni kod) svojstava (Moody et al., 2024; Crapitto et al., 2022), tada izgleda manje kao paradoks a više kao očekivani proizvod 42reates koji je prošao kroz obje topologije.

Sekvencijalni scenario ima i jednu privlačnu posljedicu za tumačenje LUCA. Ako je LUCA proizvod 42reates koji je već prošao kroz obje topologije, onda njegova mješovita fiziologija — metabolizam zavisen od vodonika naslijeđen iz izvorišne faze, uz polimerni genetski kod izgrađen u replikativnoj fazi — nije anomalija koju treba objasniti, nego je očekivani ishod. Rekonstrukcije LUCA kao anaeroba koji fiksira CO₂, oslanja se na gvožđe-sumporne klastere i koristi jonske gradijente (Moody et al., 2024; Crapitto et al., 2022) upravo tako izgledaju: kao spoj dvije naslijeđene sposobnosti. Datum od približno 4,2 milijarde 42reate (Moody et al., 2024) dodatno sužava vremenski prozor u kojem su se obje faze morale odigrati, što ide u prilog scenariju u kojem su dva režima bila prostorno bliska ili brzo smjenjivana, a ne razdvojena stotinama miliona 42reate.

Astrobiološke implikacije su neposredne. Ako je za porijeklo života potrebna sekvenca dviju topologija a ne jedno okruženje, onda kriterijumi „nastanjivosti”, odnosno „urabilnosti” u smislu Deamera i saradnika (2022), moraju uključiti ne samo prisustvo tečne vode i energije nego i prisustvo oba tipa gradijenta, makar u različitim fazama planetarne istorije. Ledeni okeanski svjetovi poput Enceladusa i Europe, koji obiluju hidrotermalnom aktivnošću (Robinson et al., 2023), mogli bi biti bogati vektorskim gradijentima ali siromašni cikličnim dehidratacionim režimom, jer nemaju kopnene površine izložene isparavanju. Titan, sa svojom kompleksnom organskom hemijom (Madan & Pearce, 2025), mogao bi imati obrnut profil. Okvir topologije gradijenta tako daje konkretan, mada grub, kriterijum za rangiranje astrobioloških meta: tražiti tijela koja nude obje topologije, a ne samo jednu. Problem lažno pozitivnih biopotpisa, o kojem pišu Davis (2025) i Gomez (2024), dodatno naglašava da razlikovanje biotičkog od abiotičkog — bilo u atmosferi egzoplanete, bilo u samom porijeklu — zahtijeva upravo ovakve strukturne kriterijume, a ne pojedinačne molekularne signale.

Prigovor koji predviđam glasi da je teza o komplementarnosti 43reate pomirljiva — da spaja dvije hipoteze umjesto da bira, i time izbjegava odgovornost izbora. Tom prigovoru odgovaram da komplementarnost nije kompromis nego predviđanje. Okvir ne kaže „obje su donekle u pravu”; on kaže nešto tvrđe i osporivo: da nijedno pojedinačno okruženje ne može samo pokrenuti i metabolizam i replikaciju, i da svaki uspješan scenario porijekla mora, na ovaj ili onaj način, obezbijediti obje topologije. To je tvrdnja koja se može oboriti. Dovoljno bi bilo pokazati jedno okruženje koje istovremeno postiže visok skor na obje ose — recimo, 43reate koji održava trajan vektorski gradijent i istovremeno prolazi kroz cikluse sušenja bez gubitka energetske sprege. Da se takvo okruženje pokaže, teza o nužnosti sekvence bi pala. Dosad, 43reate mi je poznato, takvo okruženje nije opisano, i upravo zato komplementarnost smatram najekonomičnijim, a ne najpomirljivijim objašnjenjem.

Na kraju ove sinteze vraćam se morfološkom okviru. Ako je prauzrok oblik prelaza od nediferenciranog ka diferenciranom (Knežević, 2024; Đukić, 2025), onda sekvenca gradijentnih režima nije samo hemijska hipoteza nego i primjer opšteg obrasca: red nastaje tamo gdje se slobodna energija ulijeva kroz strukturisan oblik, a složeni red — kakav je život — nastaje tamo gdje se više takvih oblika nadovezuje. Metabolizam je red u energiji; nasljeđe je red u informaciji; život je njihova sprega. Da bi ta sprega nastala, bila je potrebna i vektorska i ciklična topologija. Time se, vjerujem, rasprava izvor–jezerce može ostaviti za sobom, ne tako što se jedna strana proglasi pobjednikom, nego tako što se prepozna da su obje opisivale nužne, ali različite faze istog prelaza.

ZAKLJUČAK

Članak je pošao od pitanja da li je razlika između alkalnih hidrotermalnih izvora i „toplog malog jezera” prije svega geografska ili termodinamička. Odgovor koji analiza podupire jeste da je razlika termodinamička i, preciznije, topološka. Prva hipoteza — da odlučujuća varijabla nije mjesto nego topologija gradijenta, odnosno razlika između stajalećeg vektorskog i cikličnog vremenskog režima — nalazi punu potvrdu. Profil po dimenzijama pokazuje da se dva okruženja ne razlikuju po ukupnoj energetskoj „kvaliteti” nego po obliku u kojem energiju nude, i da taj oblik određuje s kojom hemijom se energija može spregnuti.

Druga hipoteza — da izvori sistemski nadmašuju jezera u dimenzijama koje pokreću metabolizam, a jezera izvore u dimenzijama koje pokreću replikaciju — takođe je potvrđena, i to kvantitativno. Izvor postiže skor metaboličkog pokretanja od približno 0,82 naspram 0,38 kod jezera, dok jezerce postiže skor replikativnog pokretanja od približno 0,79 naspram 0,44 kod izvora. Analiza osjetljivosti pokazuje da ovaj poredak opstaje pri variranju pondera u rasponu od $\pm 0,15$, što znači da zaključak ne zavisi od fino podešenih pretpostavki. Treća hipoteza — da su dva okruženja komplementarna, a ne isključiva — slijedi iz prve dvije i podupre je nalazom da nijedno pojedinačno okruženje ne postiže visoku vrijednost na obje ose istovremeno. Iz toga izvodim da najvjerovatniji scenario porijekla života nije jedan lokalitet nego sekvenca gradijentnih režima.

Glavni originalni doprinos ovog članka jeste okvir topologije slobodnoenergetskog gradijenta zajedno sa Indeksom slobodnoenergetske sprege (ISES), koji rasparavu izvor–jezerce prvi put preformuliše kao razliku između dvije topologije i kvantifikuje termodinamičku komplementarnost duž ose metabolizam→replikacija. Za razliku od dosadašnje literature, koja je prednosti svake škole navodila kvalitativno i tretirala prigovore protivničke strane kao diskvalifikujuće, ovaj okvir pokazuje da se te prednosti nalaze na različitim osama i da mnogi „fatalni prigovori” zapravo gađaju pogrešnu metu. Instrument je heuristički, ali je — i to smatram

njegovom glavnom vrijednošću — osporiv: svako ko smatra da su moji ponderi ili procjene pogrešni može ih zamijeniti svojima i provjeriti da li se zaključak o komplementarnosti održava.

Ograničenja ovog istraživanja su četverostruka i navodim ih bez uljepšavanja. Prvo je priroda samog indeksa: vrijednosti dimenzija su ekspertske procjene izvedene iz raspona literaturnih parametara, a ne izmjerene konstante, pa nose rizik prividne preciznosti; brojeve treba čitati kao uređene procjene. Drugo je selekcija literature: ograničio sam se na radove iz perioda 2019–2026, čime sam možda izostavio starije nalaze koji bi promijenili pojedine procjene, iako sam tu odluku donio svjesno da bih zadržao aktuelnost. Treće je nedostatak nezavisne provjere pondera: cijeli okvir konstruisao je jedan autor, bez međurecenzentske provjere kodiranja, što je slabost koju bih u nastavku rada htio da otklonim uključivanjem više nezavisnih procjenitelja. Četvrto je konceptualna hrabrost okvira: povezivanje hemijskog argumenta s morfološkim pojmom prauzroka (Knežević, 2024) izlazi izvan uobičajenih granica astrobiologije i biće, očekujem, sporno; navodim ga jer smatram da objašnjava strukturu argumenta, ali priznajem da hemijski dio rada stoji i bez njega.

Za buduća istraživanja vidim tri pravca. Prvi je empirijska kalibracija indeksa: mjerenje stvarnih vrijednosti pet dimenzija u laboratorijskim analozima i na terenu, čime bi se procjene zamijenile podacima. Drugi je konstrukcija eksplicitnih modela sekvence — prostornih ili vremenskih — koji bi pokazali kako se hemijski 44reates44 prenosi iz metaboličkog u replikativni režim bez gubitka kontinuiteta, uz autokatalitičke mreže kao most (Xavier et al., 2020; Peng et al., 2022). Treći je astrobiološka primjena: sistematsko rangiranje planetarnih tijela po tome 44reate obje topologije nude, kao dopuna postojećim kriterijumima urabilnosti (Deamer et al., 2022; Robinson et al., 2023). Ostaje otvoreno pitanje, koje ne mogu ovdje riješiti, da li je sekvenca dviju topologija zaista nužna, ili je samo dovoljna — da li postoji, negdje, jedno okruženje koje objedinjuje obje. Dok se takvo okruženje ne pokaže, komplementarnost ostaje najekonomičnije objašnjenje.

BIBLIOGRAFIJA

- Barge, L. M., Flores, E., Baum, M. M., VanderVelde, D. G., & Russell, M. J. (2019). Redox and pH gradients drive amino acid synthesis in iron oxyhydroxide mineral systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(11), 4828–4833. <https://doi.org/10.1073/pnas.1812098116>
- Becker, S., Feldmann, J., Wiedemann, S., Okamura, H., Schneider, C., Iwan, K., Crisp, A., Rossa, M., Amatov, T., & Carell, T. (2019). Unified prebiotically plausible synthesis of pyrimidine and purine RNA ribonucleotides. *Science*, 366(6461), 76–82. <https://doi.org/10.1126/science.aax2747>
- Belthle, K. S., & Tüysüz, H. (2023). Linking catalysis in biochemical and geochemical CO₂ fixation at the emergence of life. *ChemCatChem*, 15(4), e202201462. <https://doi.org/10.1002/cctc.202201462>
- Bizzarri, B. M., Saladino, R., Delfino, I., García-Ruiz, J. M., & Di Mauro, E. (2021). Prebiotic organic chemistry of formamide and the origin of life in planetary conditions: What we know and what is the future. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(2), 917. <https://doi.org/10.3390/ijms22020917>
- Bonfio, C. (2021). The curious case of peptide-coordinated iron–sulfur clusters: Prebiotic and biomimetic insights. *Dalton Transactions*, 50(3), 801–807. <https://doi.org/10.1039/d0dt03947k>
- Bonfio, C., & Preiner, M. (2024). From the chemistry of life's emergence to the chemistry of life. *Accounts of Chemical Research*, 57(24), 3454. <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.4c00735>

- Boyd, E. S., Amenabar, M. J., Poudel, S., & Templeton, A. S. (2020). Bioenergetic constraints on the origin of autotrophic metabolism. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 378(2165), 20190151. <https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0151>
- Camprubí, E., de Leeuw, J. W., House, C. H., Raulin, F., Russell, M. J., Spang, A., Tirumalai, M. R., & Westall, F. (2019). The emergence of life. *Space Science Reviews*, 215(8), 56. <https://doi.org/10.1007/s11214-019-0624-8>
- Cartwright, J. H. E., & Russell, M. J. (2019). The origin of life: The submarine alkaline vent theory at 30. *Interface Focus*, 9(6), 20190104. <https://doi.org/10.1098/rsfs.2019.0104>
- Castañeda, A. D., Li, Z., Joo, T., Benham, K., Burcar, B. T., Krishnamurthy, R., Liotta, C. L., Ng, N. L., & Orlando, T. M. (2019). Prebiotic phosphorylation of uridine using diamidophosphate in aerosols. *Scientific Reports*, 9(1), 13527. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-49947-8>
- Crapitto, A. J., Campbell, A., Harris, A., & Goldman, A. D. (2022). A consensus view of the proteome of the last universal common ancestor. *Ecology and Evolution*, 12(6), e8930. <https://doi.org/10.1002/ece3.8930>
- Cruz, H. A., Jiménez, E. I., & Krishnamurthy, R. (2023). Enhancing prebiotic phosphorylation and modulating the regioselectivity of nucleosides with diamidophosphate. *Journal of the American Chemical Society*, 145(43), 23781–23793. <https://doi.org/10.1021/jacs.3c08539>
- Damer, B., & Deamer, D. (2020). The hot spring hypothesis for an origin of life. *Astrobiology*, 20(4), 429–452. <https://doi.org/10.1089/ast.2019.2045>
- Davis, C. (2025). Biosignatures in the clouds of Venus: Phosphine, ammonia, and methodological controversy — A review of the state of the debate before the DAVINCI and Rocket Lab missions. *Cosmological and Astrobiological Review*, 3(1), 63–77. <https://doi.org/10.65932/CAR-2025-1-4>
- Deamer, D., Cary, F., & Damer, B. (2022). Urability: A property of planetary bodies that can support an origin of life. *Astrobiology*, 22(7), 889–900. <https://doi.org/10.1089/ast.2021.0173>
- Deamer, D., Damer, B., & Kompanichenko, V. (2019). Hydrothermal chemistry and the origin of cellular life. *Astrobiology*, 19(12), 1523–1537. <https://doi.org/10.1089/ast.2018.1979>
- Dherbassy, Q., Mayer, R. J., Muchowska, K. B., & Moran, J. (2023). Metal-pyridoxal cooperativity in nonenzymatic transamination. *Journal of the American Chemical Society*, 145(24), 13357–13370. <https://doi.org/10.1021/jacs.3c03542>
- Đukić, O. (2025). Sic mundus 45reates est: Hermetička sinteza, ezoterijski monizam I morfologija prauzroka u filozofskom djelu Slavena Kneževića. *Critical Reflections: Journal of Philosophy and Social Sciences*, 3(1), 9–30. <https://doi.org/10.65932/CR-2025-1-1>
- Duval, S., Baymann, F., Schoepp-Cothenet, B., Trolard, F., Bourrié, G., Grauby, O., Branscomb, E., Russell, M. J., & Nitschke, W. (2019). Fougérite: The not so simple progenitor of the first cells. *Interface Focus*, 9(6), 20190063. <https://doi.org/10.1098/rsfs.2019.0063>
- Frenkel-Pinter, M., Bouza, M., Fernández, F. M., Leman, L. J., Williams, L. D., Hud, N. V., & Guzman-Martinez, A. (2022). Thioesters provide a plausible prebiotic path to proto-peptides. *Nature Communications*, 13(1), 2569. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-30191-0>
- Frenkel-Pinter, M., Samanta, M., Ashkenasy, G., & Leman, L. J. (2020). Prebiotic peptides: Molecular hubs in the origin of life. *Chemical Reviews*, 120(11), 4707–4765. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00664>
- Gomez, L. (2024). Atmospheric biosignatures of exoplanets in the JWST era: The K2-18b case, DMS detection methodology, and the EBDRI detection-reliability framework. *Cosmological and Astrobiological Review*, 2(1), 21–32. <https://doi.org/10.65932/CAR-2024-1-2>
- Goldman, A. D., Weber, J. M., LaRowe, D. E., & Barge, L. M. (2023). Electron transport chains as a window into the earliest stages of evolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 120(34), e2210924120. <https://doi.org/10.1073/pnas.2210924120>

- Haas, S., Sinclair, K. P., & Catling, D. C. (2024). Biogeochemical explanations for the world's most phosphate-rich lake, an origin-of-life analog. *Communications Earth & Environment*, 5(1), 28. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-01192-8>
- Hassenkam, T., & Deamer, D. (2022). Visualizing RNA polymers produced by hot wet-dry cycling. *Scientific Reports*, 12(1), 10098. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14238-2>
- Henriques Pereira, D. P., Leethaus, J., Beyazay, T., do Nascimento Vieira, A., Kleinermanns, K., Tüysüz, H., Martin, W. F., & Preiner, M. (2022). Role of geochemical protoenzymes (geozymes) in primordial metabolism: Specific abiotic hydride transfer by metals to the biological redox cofactor NAD⁺. *The FEBS Journal*, 289(11), 3148–3162. <https://doi.org/10.1111/febs.16329>
- Jordan, S. F., Ramm, H., Zheludev, I. N., Hartley, A. M., Maréchal, A., & Lane, N. (2019). Promotion of protocell self-assembly from mixed amphiphiles at the origin of life. *Nature Ecology & Evolution*, 3(12), 1705–1714. <https://doi.org/10.1038/s41559-019-1015-y>
- Knežević, S. (2024). *Prouzrok: Nacrt za uvod u morfologiju kosmologije, evolucije i teogonije*. Metaphysica.
- Krishnamurthy, R., & Hud, N. V. (2020). Introduction: Chemical evolution and the origins of life. *Chemical Reviews*, 120(11), 4613–4615. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.0c00409>
- Lopez, A., & Fiore, M. (2019). Investigating prebiotic protocells for a comprehensive understanding of the origins of life: A prebiotic systems chemistry perspective. *Life*, 9(2), 49. <https://doi.org/10.3390/life9020049>
- Madan, I., & Pearce, B. K. D. (2025). Prebiotic chemistry insights for Dragonfly: Thermodynamics of amino acid synthesis in Selk crater on Titan. *The Planetary Science Journal*, 6(12), 284. <https://doi.org/10.3847/psj/ae1c18>
- Martin, W. F. (2020). Older than genes: The acetyl CoA pathway and origins. *Frontiers in Microbiology*, 11, 817. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00817>
- Moody, E. R. R., Álvarez-Carretero, S., Mahendrarajah, T. A., Clark, J. W., Betts, H. C., Dombrowski, N., Szánthó, L. L., Boyle, R. A., Daines, S., Chen, X., Lane, N., Yang, Z., Shields, G. A., Szöllősi, G. J., Spang, A., Pisani, D., Williams, T. A., Lenton, T. M., & Donoghue, P. C. J. (2024). The nature of the last universal common ancestor and its impact on the early Earth system. *Nature Ecology & Evolution*, 8(9), 1654–1666. <https://doi.org/10.1038/s41559-024-02461-1>
- Muchowska, K. B., Varma, S. J., & Moran, J. (2019). Synthesis and breakdown of universal metabolic precursors promoted by iron. *Nature*, 569(7754), 104–107. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1151-1>
- Muchowska, K. B., Varma, S. J., & Moran, J. (2020). Nonenzymatic metabolic reactions and life's origins. *Chemical Reviews*, 120(15), 7708–7744. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.0c00191>
- Ooka, H., McGlynn, S. E., & Nakamura, R. (2019). Electrochemistry at deep-sea hydrothermal vents: Utilization of the thermodynamic driving force towards the autotrophic origin of life. *ChemElectroChem*, 6(5), 1316–1323. <https://doi.org/10.1002/celec.201801432>
- Osumah, A., & Krishnamurthy, R. (2021). Diamidophosphate (DAP): A plausible prebiotic phosphorylating reagent with a Chem to BioChem potential? *ChemBioChem*, 22(21), 3001–3009. <https://doi.org/10.1002/cbic.202100274>
- Peng, W., Zhang, L., Tumiat, S., Vitale Brovarone, A., Hu, H., Cai, Y., & Shen, T. (2021). Abiotic methane generation through reduction of serpentinite-hosted dolomite: Implications for carbon mobility in subduction zones. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 311, 119–140. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2021.07.033>
- Peng, Z., Linder, J., & Baum, D. A. (2022). The hierarchical organization of autocatalytic reaction networks and its relevance to the origin of life. *PLOS Computational Biology*, 18(9), e1010498. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1010498>

- Preiner, M., Asche, S., Becker, S., Betts, H. C., Boniface, A., Camprubí, E., Chandru, K., Erastova, V., Garg, S. G., Khawaja, N., Kostyrka, G., Machné, R., Moggioli, G., Muchowska, K. B., Neukirchen, S., Peter, B., Pichlhöfer, E., Radványi, Á., Rossetto, D., ... Xavier, J. C. (2020). The future of origin of life research: Bridging decades-old divisions. *Life*, 10(3), 20. <https://doi.org/10.3390/life10030020>
- Preiner, M., Igarashi, K., Muchowska, K. B., Yu, M., Varma, S. J., Kleinermanns, K., Nobu, M. K., Kamagata, Y., Tüysüz, H., Moran, J., & Martin, W. F. (2020). A hydrogen-dependent geochemical analogue of primordial carbon and energy metabolism. *Nature Ecology & Evolution*, 4(4), 534–542. <https://doi.org/10.1038/s41559-020-1125-6>
- Pullettikurti, S., Yadav, M., Springsteen, G., & Krishnamurthy, R. (2022). Prebiotic synthesis of α -amino acids and orotate from α -ketoacids potentiates transition to extant metabolic pathways. *Nature Chemistry*, 14(10), 1142–1150. <https://doi.org/10.1038/s41557-022-00999-w>
- Quéménéur, M., Mei, N., Monnin, C., Postec, A., Guasco, S., Jeanpert, J., Maurizot, P., Pelletier, B., & Erauso, G. (2023). Microbial taxa related to natural hydrogen and methane emissions in serpentinite-hosted hyperalkaline springs of New Caledonia. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1196516. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1196516>
- Rasmussen, B., Muhling, J. R., & Fischer, W. W. (2021). Greenalite nanoparticles in alkaline vent plumes as templates for the origin of life. *Astrobiology*, 21(2), 246–259. <https://doi.org/10.1089/ast.2020.2270>
- Rimmer, P. B., & Shorttle, O. (2019). Origin of life's building blocks in carbon- and nitrogen-rich surface hydrothermal vents. *Life*, 9(1), 12. <https://doi.org/10.3390/life9010012>
- Robinson, K. J., Hartnett, H. E., Gould, I. R., & Shock, E. L. (2023). Ethene-ethanol ratios as potential indicators of hydrothermal activity at Enceladus, Europa, and other icy ocean worlds. *Icarus*, 406, 115765. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2023.115765>
- Ross, D., & Deamer, D. (2023). Template-directed replication and chiral resolution during wet-dry cycling in hydrothermal pools. *Life*, 13(8), 1749. <https://doi.org/10.3390/life13081749>
- Russell, M. J. (2021). The “water problem” (sic), the illusory pond and life's submarine emergence — A review. *Life*, 11(5), 429. <https://doi.org/10.3390/life11050429>
- Saladino, R., Bizzarri, B. M., & Di Mauro, E. (2024). Determinism of formamide-based biogenic prebiotic reactions. *Physics of Life Reviews*, 51, 243–251. <https://doi.org/10.1016/j.plrev.2024.10.004>
- Sandström, H., & Rahm, M. (2023). Crossroads at the origin of prebiotic chemical complexity: Hydrogen cyanide product diversification. *The Journal of Physical Chemistry A*, 127(20), 4503–4510. <https://doi.org/10.1021/acs.jpca.3c01504>
- Schwander, L., Brabender, M., Mrnjavac, N., Wimmer, J. L. E., Preiner, M., & Martin, W. F. (2023). Serpentinization as the source of energy, electrons, organics, catalysts, nutrients and pH gradients for the origin of LUCA and life. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1257597. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1257597>
- Šimonis, P., Malikėnas, M., Deamer, D., & Masevičius, V. (2026). Icelandic hot springs as a prebiotic analog: Wet-dry cycling effects on the stability of nucleotides. *Astrobiology*. <https://doi.org/10.1177/15311074261427257>
- Singh, V. (2024). Quantum coherence in photosynthetic antenna complexes: A reassessment of “warm and wet” quantum biology and the PCFRI functional-relevance framework. *Cosmological and Astrobiological Review*, 2(1), 33–45. <https://doi.org/10.65932/CAR-2024-1-3>
- Sojo, V., Ohno, A., McGlynn, S. E., Yamada, Y. M. A., & Nakamura, R. (2019). Microfluidic reactors for carbon fixation under ambient-pressure alkaline-hydrothermal-vent conditions. *Life*, 9(1), 16. <https://doi.org/10.3390/life9010016>

- Souza Mendes, R. (2023). Fine-tuning of fundamental constants and the anthropic principle: Metaphysical implications and a critique of “causal explanation through selection”. *Cosmological and Astrobiological Review*, 1(1), 36–47. <https://doi.org/10.65932/CAR-2023-1-3>
- Subotić, T. (2025). Horizontal gene transfer in extremophilic archaea exposed to simulated martian regolith chemistry: Implications for panspermia hypotheses. *Cosmological and Astrobiological Review*, 3(1), 9–29. <https://doi.org/10.65932/CAR-2025-1-1>
- Takahashi, J., & Kobayashi, K. (2019). Origin of terrestrial bioorganic homochirality and symmetry breaking in the universe. *Symmetry*, 11(7), 919. <https://doi.org/10.3390/sym11070919>
- Toner, J. D., & Catling, D. C. (2019). Alkaline lake settings for concentrated prebiotic cyanide and the origin of life. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 260, 124–132. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2019.06.031>
- Toner, J. D., & Catling, D. C. (2020). A carbonate-rich lake solution to the phosphate problem of the origin of life. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(2), 883–888. <https://doi.org/10.1073/pnas.1916109117>
- Xavier, J. C., Hordijk, W., Kauffman, S., Steel, M., & Martin, W. F. (2020). Autocatalytic chemical networks at the origin of metabolism. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 287(1922), 20192377. <https://doi.org/10.1098/rspb.2019.2377>

HYDROTHERMAL VENTS VERSUS THE “WARM LITTLE POND”: A COMPARATIVE ASSESSMENT OF ENERGY GRADIENTS IN PREBIOTIC SYNTHESIS AND THE ORIGIN OF METABOLISM

Slaven Knežević

Faculty of Philosophy, University of Banja Luka
Banja Luka, Bosnia and Herzegovina
E-mail: slaven.knezevic@student.ff.unibl.org

Original Scientific Article

Received: 30.04.2026. Accepted: 21.05.2026.

DOI: <https://doi.org/10.65932/CAR-2026-1-2> UDC: 577.23:577.1

Abstract: The question of where and how the first living system arose remains the most contested issue in contemporary astrobiology, with the debate running for decades between two schools: the submarine alkaline hydrothermal vent hypothesis and the surface “warm little pond” (hot spring) hypothesis. This article does not attempt to declare a winner. Instead, it introduces a new analytical framework — the topology of the free-energy gradient — which reframes the entire debate as a distinction between a standing vectorial gradient (the chemiosmotic proton and redox gradient across a barrier, characteristic of vents) and a cyclic temporal gradient (alternating wetting and drying, characteristic of ponds). Alongside the framework, a measurable Free-Energy Coupling Index (FECI) is proposed, scoring each environment along five dimensions: gradient persistence, vectorial coupling, spatial compartmentalization, cyclic condensation, and carbon–energy flux. A comparative synthesis of thermodynamic parameters from peer-reviewed literature (2019–2026) shows that vents achieve a high “metabolic bootstrap” score (FECI-M $\approx$ 0.82), whereas ponds achieve a high “replicative bootstrap” score (FECI-R $\approx$ 0.79). The central finding is that these two environments are not competing but thermodynamically complementary along the metabolism→replication transition: the vent provides the continuous vectorial gradient required to bootstrap carbon and energy metabolism, while the pond provides the cyclic dehydration regime required for polymerization and encapsulation. The article concludes that the origin of life is tied not to a single location but to a sequence of gradient regimes, interpreted here within a morphology of the first cause (prauzrok).

Keywords: *abiogenesis, alkaline hydrothermal vents, warm little pond, chemiosmosis, free-energy gradient, protometabolism, first cause.*