

HÁGEN ANDRÁS

AZ EVOLÚCIÓ KAOTIKUS ELEMEI

*Déli ASZC Bereczki Máté Élelmiszeripari és Mezőgazdasági Technikum,
Szakközépiskola
hagena@freemail.hu*

Absztrakt

A Föld történetében 545 millió évvel ezelőtt egy valóságos diverzitásrobbanás játszódott le. A kambriumi robbanás (545 millió éve) elnevezés a legtöbb ma ismert állatcsoport hirtelen megjelenésére utal.

Ez a 10 millió éven át tartó, nagy fajgazdagságot hozó időszak magyarázható a kaotikus evolúciós elmélettel, teljesülnek a káoszelmélet fő kritériumai, miszerint az új fajok váratlanul jelentek meg, és alapjában véve a folyamat sosem ismétlődött meg, ilyen robbanásszerű fajgazdagság-növekedés azóta sem volt. Előre nem jelezhető sejt differenciáció játszódott le, amely különösen érzékeny volt a kezdeti feltételekre (pl. kalcium jelenléte az óceánokban), ezzel a folyamat eleget tesz a második kritériumnak. A fajgazdagság változása aperiodikus volt, és fraktálszerkezetet formált. A kambriumi robbanás egy egyedülálló, azóta sem ismétlődő esemény volt a Föld történetében, hiszen semmi olyan előzménye nem volt, amely előre jelezte volna ennek a fajgazdagságnak a kialakulását.

Kulcsszavak: kambrium, evolúció, kaotikus dinamika, Ljapunov-exponens

ANDRÁS HÁGEN

THE CHAOTIC ELEMENTS OF EVOLUTION

*Déli ASZC Bereczki Máté Agricultural and Food Industry Technical School
hagena@freemail.hu*

Abstract

A veritable explosion of diversity occurred 545 million years ago in Earth's history. The name Cambrian explosion refers to the sudden appearance of most of the animal groups known today.

A period of species richness lasting 10 million years is consistent with chaotic evolution, as it meets the first major criterion of chaos theory, that it appeared unexpectedly and, fundamentally, never repeated itself.

According to the second criterion, unpredictable cell differentiation occurred, which was particularly sensitive to initial conditions (e.g., the presence of calcium in the oceans).

According to the third, species richness was aperiodic, meaning it formed a fractal structure.

Looking back we can say that the Cambrian explosion was novel in Earth's history, as nothing predicted the emergence of species richness.

Keywords: Cambrian, evolution, chaotic dynamics, Lyapunov exponent.

Bevezetés

A biológiában mára az evolúció ténye általánosan elfogadottá vált. Az élővilág fejlődését a legtöbben úgy tartják, hogy egy jövőbe mutató determinisztikus rendszer, pedig az élővilág változása nem egyértelműen leírható folyamat. A kezdő feltételek alapján egy nagyobb és fajgazdagabb rendszer kialakulására is lehetőség lett volna. DARWIN „A fajok eredete” (1859) című könyvében a szelekciót a fajok kialakulása szempontjából meghatározó, de nem kizárólagosan ható tényezőként említi. A későbbiekben Darwin elméletének több továbbfejlesztése is született először a neodarwinizmus (ROMANES, 1883), majd a szintetikus evolúciós elmélet (HUXLEY, 1942). Ezek az elméletek a rekombinációt, mutációt és arra épülő szelekciót tekintik a fajok kialakulásának egyedüli mozgatórugójának. Mai ismereteink alapján a pusztá véletlenszerű variációk és a szelekció mechanizmusa nem magyarázza meg teljes mértékben az evolúció összetettségét, nem ad magyarázatot se a fajkeletkezés változatos ütemére, se a környezeti hatások evolúciós következményeire, se egyes fajok gyors, mások lassú ütemű fejlődésére (NOBLE, 2010, BROWN & HULLENDER, 2022). Az evolúció kaotikus rendszerként történő értelmezése emiatt fontos, mert segítségével magyarázhatjuk ezeket a jelenségeket is. A kambriumban bekövetkezett hirtelen fajgazdagság-növekedés egy ilyen, csupán a természetes szelekcióval nem magyarázható földtörténeti esemény volt.

A Föld történetében 545 millió évvel ezelőtt egy valóságos diverzitásrobbanás játszódott le. A kambriumi robbanás elnevezés a legtöbb ma ismert állatcsoport hirtelen megjelenésére utal. Bár akkor még nem élt annyi állatfaj, mint a mai tengerekben, az előgerinchúrosok (*Urochordata*) képviselői jelen voltak a kambriumi óceánokban (SEPKOSKI, 1993; SHU, 2008; TRESTMAN 2013). A kriogén végén keletkezett fedő karbonátréteg a proterozoikum utolsó emeletét s egyben az ediacara korszak (635–542 millió év) kezdetét jelzi. Az Ediacara-dombság Ausztráliában van, itt található a korszakra jellemző több mint 30 lelőhely közül a névadó. A fossziliák **többsége 560 millió évesnél fiatalabb** (SEPKOSKI, 1993; TRESTMAN, 2013).

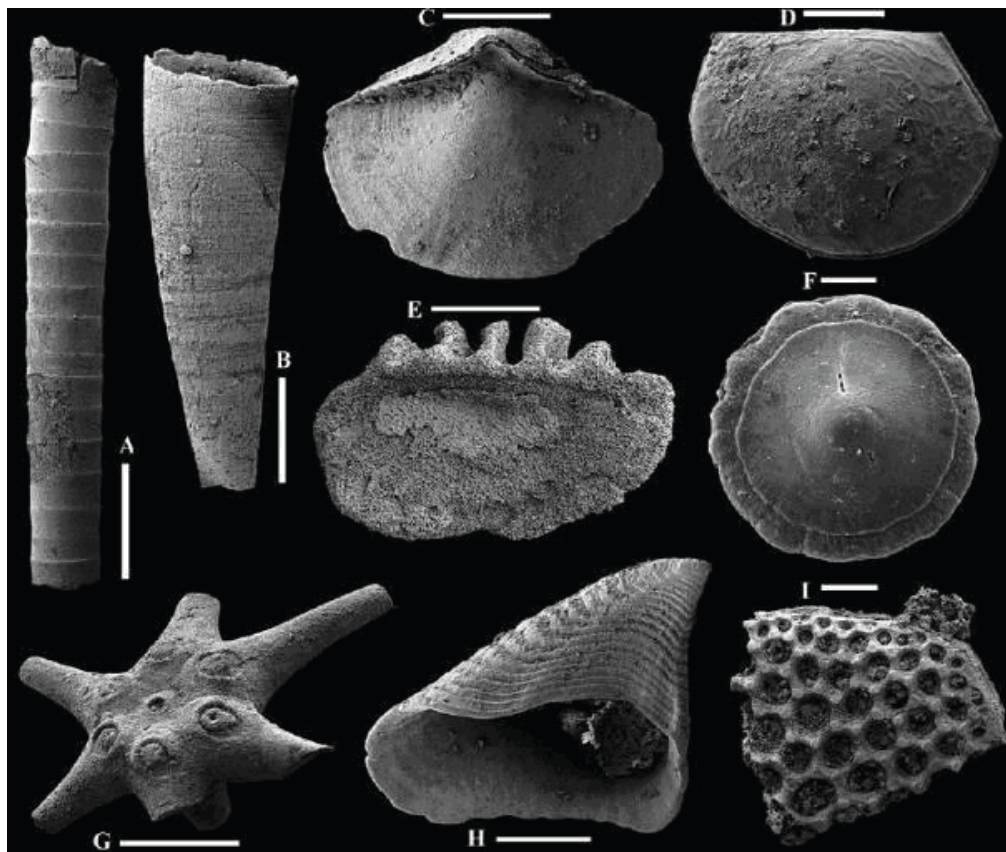
Hogy mi okozta és mi hajtotta a robbanásszerű diverzitásnövekedést, a merev csontvázak kialakulását, a merev testrészek megjelenését, az ízületek és a szemek kialakulását, azt nem tudjuk (SEPKOSKI, 1993; TRESTMAN, 2013). A Darwin-féle evolúciós elméletet követve azt láthatjuk, hogy az evolúció lassan és állandó sebességgel zajlik (ELDRIDGE & GOULD, 1972). Elképzelését felfordított kúpokkal ábrázolhatnánk, ami azt jelöli, hogy a morfológiai változatosság folyamatosan növekedik az idő előre haladásával.

A kambriumi robbanás szereplőit és a későbbi fosszilis maradványokat vizsgálva azonban kiderült, hogy a földtörténet során nem jelentek meg folyamatosan újabb és újabb morfológiai elemek. Ezt tehát nem egy kúpszerű, folyamatosan növekvő grafikkal

szemléltethetjük, hanem inkább egy téglalappal, amelynek már alapjánál megjelennek a morfológiai újítások, és azután nagyjából állandó marad az élővilág morfológiai kincseitára. Számos állatcsoport korai evolúciója jellemezhető erősen felgyorsult fejlődési szakaszokkal.

A következőkben megpróbáljuk matematikai formába önteni a kambriumi robbanást. Az ediacara bióta (~vendobióta) tagjai különböző méretű (1 cm–1,5 m), váz nélküli, lágyszárú élőlények voltak, melyek Ediacara Hillsben kvarcitban, kvarchomokkőben – Avalónia, Anglia ediacara fossziliái agyagpalában – őrződtek meg, és mind az öt kontinensen elterjedtek. A legidősebb, 600-580 millió éves leletek a kínai Doushantuo formációból kerültek elő: a Vernanimalcula *guizhouena* bilateria állatfosszília, embriófossziliák, óriás baktériumok, szivacsok. (A fossziliák egy része talán szervesetlen képződmény.)

Az Ediacara típusú megafossziliák után a korszak végén, 550 millió éve feltűnt egy eltérő fauna, mely az első leletegyüttesek alapján a kis kagylós fossziliák nevet (SSF: Small shelly fossils) kapta (1. ábra).



1. ábra. Kis kagylós fossziliák (Forrás: <https://tamop412a.ttk.pte.hu/files/biologia5/Evolucio/chunks/ch14s04.html>)

Egyik jelentőségét az adja, hogy felfedezhetők benne a kambriumi robbanásakor diverzifikálódott állatcsoportok ősi, kis méretű tagjainak vázmaradványai, amelyek legtöbbször mindössze milliméteres nagyságúak. Nagyon fontos momentum a biomineralizáció megjelenése a kalcium-karbonát szerkezetbe való beépítésével, s ennek következtében a szilárd váz kialakulása (LÖWENSTAM & MARGULIS, 1980). A szilárd váznak számos előnye van: védelem, támaszték, aljzathoz való tapadás, izomtapadási felületek, a táplálék tartása. Ugyan a szilárd váz már megjelent az Ediacara faunában is, *Namacalathus* néven fut a namíbiai együttesben, de csak a SSF-faunában válik elterjedté (ZHURAVLEV ÉS MTSAI., 2015)

A kemény állati testrészek, mint például a csigák és kagylók, valamint más puhatestűek kalcium-karbonát héja valószínűleg hulladékként keletkeztek először (MARGULIS, 2000). A tengervízben jelen lévő kalciumionok a sejten belül mérgezőek, így a sejteken belüli kalciumkoncentrációt a tengervíznél ezerszer alacsonyabb szinten kell tartani, különben a mitózisok mikrotubulusai szétesnek, és sejtpusztuláshoz vezető folyamatok indulnak be. A kalcium kipréselése mint salakanyag-eltávolítás kezdődött, majd ez a folyamat alakult át szilárd váz építésévé, majd később a fogak, páncéllemezek és a csontok kifejlődésévé (SEPKOSKI, 1993).

Összességében a kambriumban a törzsfejlődési diverzifikáció és komplexitásnövekedés gyors volt, amelyben nagyrészt felismerhető a filogenetikai rokonság a ma élő állatokkal (TRESTMAN, 2013).

A felsoroltakon kívül a kambriumi robbanás során további biológiai változások is történtek az élőlények között, többek között a testméret növekedése, a ma élő rokonokhoz hasonló testformák kialakulása.

A kambriumi robbanás magyarázata

Számos alternatív magyarázat létezik az élővilág nagyarányú megváltozására a kambriumban. A következőkben vizsgáljuk meg a hipotéziseket. Az első csoportba azok az elméletek tartoznak, amelyek a környezeti hatásokkal magyarázzák a kambriumi evolúciós eseményeket.

A prekambriumban a levegőben és a vízben rendelkezésre álló oxigén szintje jelentősen megnőtt (FIKE ÉS MTSAI., 2006). A magasabb oxigénszint az állatok testének növekedését, az anyagcsere-, a fejlődési, és a viselkedési folyamataik energetikailag hatékonyabbá válását tette lehetővé (TRESTMAN, 2013).

KIRSCHVINK (1992) szerint a kriogén során bekövetkezett „hóglyó-Föld” jégkorszak döntő szerepet játszott az élővilág fejlődésében.

Másokgenetikai alapon magyarázzák az eseményeket. Ezekben az elméletekben kulcsfontosságú szerepet kapnak a nem kódoló mikro-RNS-ek. Ezek a mikro-RNS-ek szabályozzák a hírvivő RNS translációját, amelyek valójában fehérjéket kódolnak. A hírvivő RNS-ek minden élőlényben megtalálhatóak, azonban ERWIN és munkatársai (2011) szerint a mikro-RNS komplexitásának növekedése és csökkenése korrelál a morfológiai komplexitás növekedésével és csökkenésével is.

Ebben a folyamatban a genetikai szabályozás a fontos, hiszen a morfológiai komplexitást ez hozta létre, valamint korlátozta a morfológiai fejlődés további változását. Így a fejlődés jellemzői rögzültek (WIMSATT, 1986). Az alapvető fejlődési módok, szervek kialakultak, és stabilan fejlődtek tovább.

A genetikai magyarázat mellett létrejöttek ökológiai magyarázatok is. A prekambrium végén a legtöbb állat bentosz életformát folytatott, és filtrációval táplálkozott (COLLINS & VALENTINE, 2001; ERWIN ÉS MTSAI., 2011). A kambrium elején azonban elhagyták az óceánfenéket, és plankton formában éltek tovább, ezzel gazdagabb táplálékforrást biztosítottak (BUTTERFIELD, 1997). A szárazföldről az óceánba kerülő törmelék a szűrővel rendelkező szivacsok számára elegendő táplálékot szolgáltatott, nem véletlenül szaporodtak el az edicianus korszak végén (ERWIN ÉS MTSAI., 2011). A „hógolyó-Föld” felolvadása szintén hozzájárult a több törmelék vízfolyásokba kerüléséhez.

Egy másik elképzelés szerint elszabadult fegyverkezési verseny indult el a ragadozók és a zsákmányuk között, így sokkal kifinomultabb fogó és pusztító eszközök fejlődtek ki, és persze jobb védekezési eszközök is (CONWAY MORRIS, 2000).

PARKER (2004) elméletében határozattan amellett érvel, hogy a kambriumi robbanás beindulásához kulcsfontosságú volt a képalkotó szemek kialakulása. A szemekkel olyan vizuális mechanizmusok is kialakultak, amely megkönnyítették a ragadozó észrevételét vagy a ragadozók elkerülését a zsákmányállatok számára. Emellett a szexuális szelekció folyamatában is fontosak lehetnek a szemek (PARKER, 2004). RITCHIE (2007) szerint a szexuális szelekció a fajképződés egyik erőteljes mozgatórugója lehetett.

A látás megjelenése mellett az asszociatív tanulás és a neurohormonális stresszválasz is hatással lehetett a fejlődésre. GINSBURG ÉS JABLONKA (2010) szerint az asszociatív tanulás fokozza az alkalmazkodóképességet, és lehetővé teszi új erőforrások kiaknázását. Egy-egy populációban az állatok következetesen megtanultak valamilyen új viselkedési formát, amivel növekedett az esélyük a túlélésre és a nagy szaporulat elérésére. A tanulás a környezethez történő gyorsabb alkalmazkodást teszi lehetővé, amely ha bevált viselkedési mintát alakít ki, akkor a későbbiekben „veleszületett” vagy „ösztönös” genetikailag kódolt tulajdonság lesz (BALDWIN, 1986; BATESON, 2005; WADDINGTON, 1957; WEST-EBERHARD, 2003).

GINSBURG ÉS JABLONKA (2010) azzal érvelnek, hogy az oxigénszint növekedésével nőtt az élőlények testmérete és aktivitási szintje, amely az idegrendszer centralizálásával járt együtt, így létrehozva az érzékszervi bemenetek integrációját és a motoros kimenetek koordinációját a test különböző régiói között. GINSBURG ÉS JABLONKA (2010) szintén hangsúlyozzák a neurohormonális stresszválaszt. A stresszes helyzetek elősegítik az asszociatív tanulást és a hosszú távú memória kialakulását.

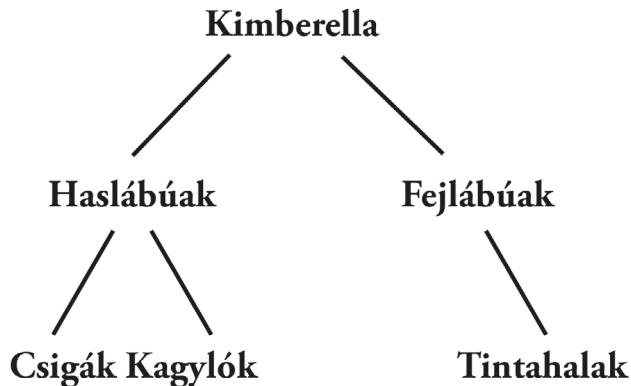
Fajgazdagság és a fagráf

A gráfelméletben azt nevezzük fagráfnak, amelynek bármelyik két csúcsát pontosan egy út köti össze, azaz a fák körmentes összefüggő gráfok. Az ediacarai faunában megjelent élőlényekből egy tökéletes fagráftól lehet alkotni, hiszen a távoli jövőben belőlük fejlődnek ki a napjainkban élő állatok – és az emberek (*Homo sapiens*) – ősei.

Az ediacara fauna az archaikum végéről, az ediacara időszakból származó, a világ több pontjáról előkerült fossziliák által ismert élőlénytársulások összessége. Ezek a legrégebbi életközösségek, melyekből többsejtű állatok ismertek. A legtöbb faj csalánozóyszerű forma, toll, diszkosz, fekvő toll, korong alakú lények és üregkitöltések ismertek. Valószínűleg a *Kimberella* egy ősi, váz nélküli puhatestű lehetett (SEPKOSI, 1993).

A kambriumból származó lerakódásokban megjelennek a puhatestűek valamennyi ismert osztályának képviselői: kagylók, csigák (haslábúak), tintahalak (fejlábúak vagy lábasfejűek). Utóbbiaknak külső héjuk volt.

Az ediacarai faunában megjelenő *Kimberella* fajból felépíthető a puhatestűek osztálya fagráf segítségével.



2. ábra. A *Kimberella* faj fagráfja

A Kimberellán kívül további fajokkal kapcsolatosan is megalkothatjuk a fagrafunkat, például a gerincesek elődjének számító parányi Pikaia *gracilis*ból (SEPKOSI, 1993).

A következőkben vizsgáljuk meg, hogy a kambriumi élővilág-robbanással kapcsolatosan azonosítani tudjuk-e a kaotikus evolúciós mechanikát.

A kaotikus dinamikájú mechanizmus

Edward Lorenz egyszerű meteorológiai modellen dolgozott. Három szabad változója volt, amelyek időbeli változását egy közös differenciálegyenlet határozta meg. A modellt számítógépes szimulációkkal tanulmányozta. A program elején kezdeti értékeket adott a változóknak. Többször is lefuttatta a programot, és meglepve tapasztalta, hogy minden esetben más és más eredményt kapott. Az eredmények láthatóan minden szabályszerűség nélkül változtak. Végül rájött, hogy csak négy tizedesjegy pontossággal adta meg az értékeket, így a gép maradék négy helyi értékre véletlenszerűen írta be a számokat. Az eltérés csekély volt (10^{-5}) az állapotok között, mégis egyre nagyobb és nagyobb különbségek keletkeztek. Ez az ún. pillangóeffektus: a kezdetben kicsi értékkülönbségek óriási eltéréseket okoztak rövid időn belül (SCHEURING, 1998; 2002). Lorenz kísérlete egy véletlenszerű kaotikus viselkedésű rendszert mutat.

A kaotikus viselkedés az egyszerű, kevés változóval leírható nemlineáris rendszerek mozgása és időbeli viselkedése. A három fő tulajdonsága közül az első, hogy időben szabálytalan, soha nem ismétli önmagát, és semmilyen időtávon nem periodikus. Másodsorban hosszú távon előrejelezhetetlen, és érzékeny a kezdeti feltételekre. A harmadik fő tulajdonsága pedig, hogy ábrázolásban rendezett, fraktálszerkezet társul hozzá (STOGATZ, 1994; WEISENFELD & MOSS, 1995; TÉL & GRIUZ, 2002; 2006; GRIUZ, 2013).

Az említett tulajdonságok általában egyszerre vannak jelen, vagyis ha egy egyszerű biológiai vagy fizikai rendszer hosszú távon aperiodikus, akkor időbeli fejlődése megjósolhatatlan és egyben fraktálszerű. A hagyományos szemlélet oldaláról nézve mindhárom tulajdonság újszerű és meglepő (GRIUZ, 2013).

Egy közös vonás van a három tulajdonságban, az, hogy a hosszú idejű viselkedés véletlenszerű, s ezért csak valószínűségi fogalmakkal írható le. Ez a viselkedés nemcsak fizikai és kémiai rendszerekben figyelhető meg, hanem a biológiai rendszerekben is, például a biokémiai folyamatokban (enzimreakció, idegrendszer, szív stb.) és a populációkban is (HASSEL ÉS MTSAL., 1976; GOLDBERGER ÉS MTSAL., 1990; SCHEURING & JÁNOSI, 1996; SCHEURING, 1998; 2002).

A szabályos biológiai rendszerektől az különbözteti meg, hogy véletlenszerűsége a kevés összetevő elem erős kölcsönhatásából, a belső dinamikából adódik. A kalcium-karbonát

hégjak kifejlődése és elterjedése a kambriumi robbanás során véges ideig tart, az ilyen típusú dinamikát tranziens káosznak nevezzük.

A kaotikus mozgások egyik legfontosabb tulajdonsága a közeli mozgáspályák idő függvényében való nagyon gyors (exponenciális) távolodása. Biológiába átültetve a kaotikus evolúciós dinamika, a rendszertanilag közeli fajok nagyon gyors szétválása, lehetőleg belső fejlődésük miatt.

Helyileg és átlagosan is mérhető a távolodás gyorsasága, a mérésből kapott függvény exponensét (λ) Ljapunov-exponensnek nevezzük:

$$d(t) = d_0 e^{\lambda t}, \quad (1)$$

ahol t az idő, d_0 és $d(t)$ az evolúciós dinamika kezdeti és pillanatnyi távolsága (TÉL, T. és MTSAI., 2002).

A kezdeti kis hibák is exponenciális gyorsasággal terebélyesednek ki, amelyek következménye a káoszra jellemző előrejelezhetőség. Minél nagyobb a λ , annál erősebb a káosz, amikor pedig egyenlő vagy kisebb, mint 0, akkor nincs távolodás, és a mozgás sem kaotikus. A kaotikus mozgás ún. előrejelzési ideje a Ljapunov-exponens reciprokjaként, vagyis $1/\lambda$ -ként becsülhető.

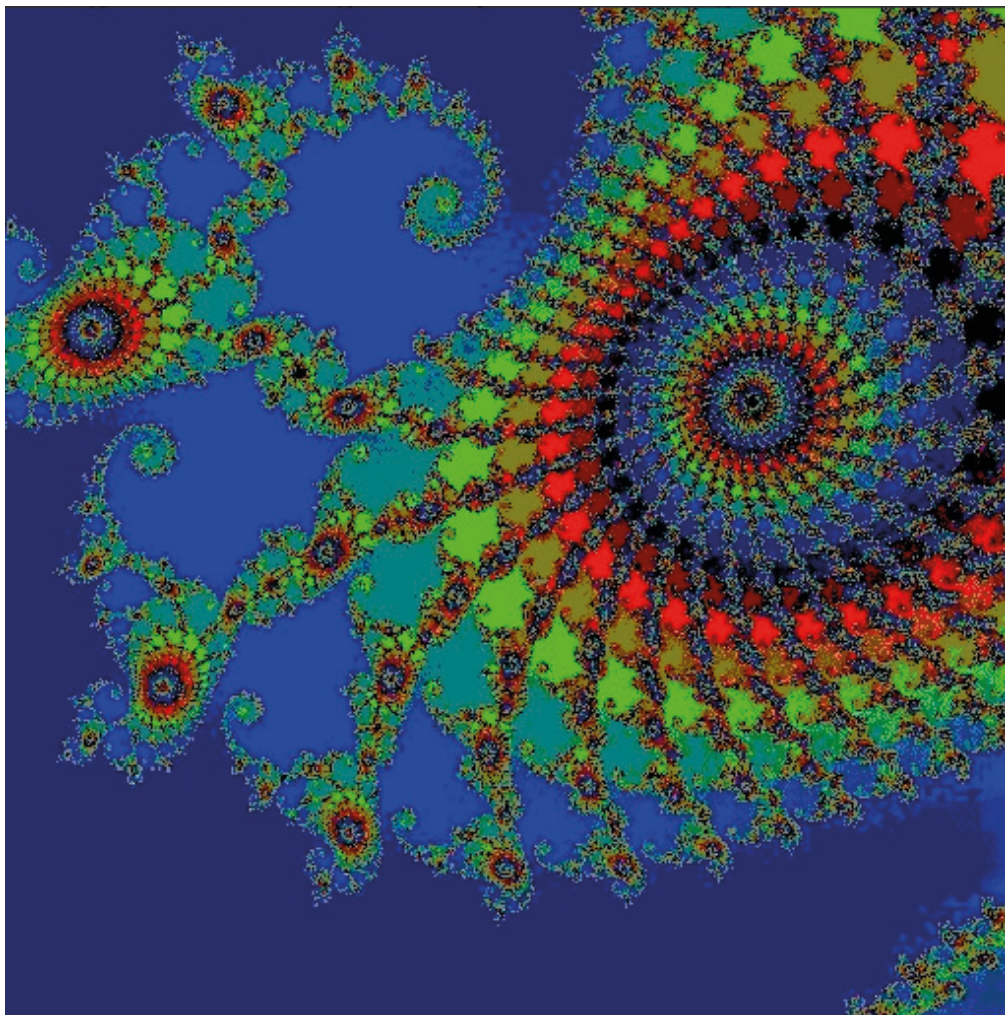
A másik fontos, immár kimondottan a tranziens káosznál mérhető mennyiség a szökési ráta. A sejtek véletlenszerűen hagyják el a halmaz környékét. Ha N_0 különböző pályát egyszerre indítottuk, s figyeljük a bent maradók $N(t)$ számát az idő függvényében, akkor az exponenciálisan fog csökkenni:

$$N(t) = N_0 e^{-\kappa t}, \quad (2)$$

Itt is mérhető tehát egy exponens, amely nevében is hordozza a jelenség lényegét: szökési rátának hívják, és κ -val jelöljük. A káosz átlagos élettartalma, amelyet τ -val szokás jelölni, a szökési ráta reciprokaként becsülhető: $\tau \sim 1/\kappa$ (TÉL, T. és MTSAI., 2006). A káosz átlagos élettartalma ($\tau \sim 1/\kappa$) 0,0000001 volt.

A biológiában a kaotikus viselkedésen kívül megfigyelhetőek további fizikai folyamatok is, különösen részecskék szintjén. Ilyen a Brown-féle mozgás is, amikor egy részecske minden egyes lépése véletlenszerű, nem tervszerű a mozgása. Ilyen a fehérjék diffúziója vagy a sejtekben zajló molekuláris transzportfolyamatok.

Az evolúciós fejlődést (természetesen a prekambriumban), ahol megáll (egy faj esetében, amelyik nem fejlődik tovább), attraktornak nevezzük. A 3. ábrán látható az evolúciós fejlődést bemutató fraktál, ahol kettő attraktor jól kivehető:



3. ábra. Az élővilág fejlődésének szerkezetét szimbolizáló fraktálszerkezet, a Mandelbrot-halmaz. A kezdeti élőlényekből további fajok alakulnak ki (Forrás: Pernecky 1992).

Az élővilág diverzitását két attraktorral mutatom meg. A 3. ábra központi részén elhelyezkedő attraktor jelzi az élővilág egyetlen közös őseit, amely évmilliárdok alatt tovább, komplexebb élőlényekké fejlődik. Matematikai nyelven mondva a két attraktorhoz egy-egy szintet rendelve szimulálással könnyen kiszínezhető az egész sík: egy adott pont színe jelzi, hogy az evolúciós dinamika melyik színű attraktorban fog megállni.

Az azonos színű területek az úgynevezett vonzási tartományok, amelyek mutatják az adott attraktorhoz vezető kezdeti helyek összességét. Az attraktorok vonzási határa első ránézésre fraktálszerkezetű.

A vonzási tartományok vizsgálatánál bármilyen kis területet is nagyítunk ki, a szinthatár közelében mindig a színek keveredését fogjuk látni.

Következtetés

Aki figyelemmel olvasta a cikket, annak feltűnt, hogy a 10 millió éven át tartó fajgazdagságot hozó időszak megfelel a kaotikus evolúció kritériumainak (az utóbbi évek kutatásai rávilágítottak, hogy több tíz millió évig tartott a kambriumi robbanás). A kaotikus mozgások első fő tulajdonságának amiatt felel meg, hogy időben váratlanul jelentek meg az új fajok, hiszen közel 3 milliárd éven keresztül alig változott az élővilág. A kambriumi robbanás sosem ismételte meg önmagát, hiszen ekkor hirtelenjében fajgazdag élővilág népesítette be a Föld vizeit (TRESTMAN, 2013).

Másodsorban hosszú távon előrejelezhetetlen volt (öslénytani adatok alapján nem előrejelezhető) az új sejtdifferenciálódás kialakulása. A kezdeti feltételekre érzékenyen reagált az élővilág, hiszen a tengerek magas kalciumtartalma miatt először a kiválasztó szerveknek köszönhetően hulladékként megszabadult a kalciumtól az élőlény, később azonban szilárd vázat épít magának a víz magas oldottkalcium-tartalmát felhasználva (SEPKOSKI, 1993). Összességében a genetikai változások előrejelezhetetlenek voltak. Ugyanakkor jegyezzük meg, hogy a Brown-féle mozgás is szerepet játszhatott ebben a fejlődésében, hiszen tudjuk, hogy az olyan transzportfolyamatokat irányít, amelyek esetleg a primitív kambrium kori organizmusokban is kialakultak már.

A harmadik kritériumnak abban felel meg, hogy a fajgazdagság kialakulása aperiodikus volt, fraktálszerkezetű dinamikát mutatott, mint ahogy azt a 2. ábra is mutatja.

Mindent összevetve elmondható, hogy a kambriumi robbanás újszerű volt az élővilág fejlődésében, és meglepő is volt egyben, hiszen semmi sem indokolta ennek a fajgazdagságnak a kialakulását.

A kaotikus mechanizmus definíció szerint nem tart sokáig, ebben az esetben is elmondhatjuk ugyanezt, annak ellenére, hogy 10 millió évig tartott (530-520 millió év), hiszen a 10 millió elhanyagolható a Föld történetében, hiszen előtte közel 2,5 milliárd éven át nem történt semmi lényeges dolog az élővilág fejlődésében. Az újabb kutatások szerint a fejlődés több tíz millió éven át történt (KNOLL & CARROLL 1999; ERWIN ÉS MTSAI, 2011).

Irodalomjegyzék

- Baldwin, J. M. (1896). A new factor in evolution. *The American Naturalist*, 30(355), 536–553. <https://doi.org/10.1086/276428>
- Bateson P. (2005). The return of the whole organism. *Journal of biosciences*, 30(1), 31–39. <https://doi.org/10.1007/BF02705148>
- Brown, O. R., & Hullender, D. A. (2022). Neo-Darwinism must Mutate to survive. *Progress in biophysics and molecular biology*, 172, 24–38. <https://doi.org/10.1016/j.pbiomolbio.2022.04.005>
- Butterfield, N. J. (1997). Plankton ecology and the Proterozoic-Phanerozoic transition. *Paleobiology*, 23(2), 247–262. <https://doi.org/10.1017/S009483730001681X>
- Collins, A. G., & Valentine, J. W. (2001). Defining phyla: evolutionary pathways to metazoan body plans. *Evolution & development*, 3(6), 432–442. <https://doi.org/10.1046/j.1525-142X.2001.01048.x>
- Conway Morris S. (2000). The Cambrian „explosion”: slow-fuse or megatonnage?. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 97(9), 4426–4429. <https://doi.org/10.1073/pnas.97.9.4426>
- Darwin C. *On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life*. London: John Murray; 1859. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.68064>
- Eldredge, N., & Gould, S. J. (1972). Punctuated equilibria: an alternative to phyletic gradualism. *Models in paleobiology*, 82, 115. <https://doi.org/10.5531/sd.paleo.7>
- Erwin, D. H., Laflamme, M., Tweedt, S. M., Sperling, E. A., Pisani, D., & Peterson, K. J. (2011). The Cambrian conundrum: early divergence and later ecological success in the early history of animals. *Science (New York, N.Y.)*, 334(6059), 1091–1097. <https://doi.org/10.1126/science.1206375>
- Fike, D. A., Grotzinger, J. P., Pratt, L. M., & Summons, R. E. (2006). Oxidation of the Ediacaran ocean. *Nature*, 444(7120), 744–747. <https://doi.org/10.1038/nature05345>
- Hassell, M. P., Lawton, J. H., & May, R. M. (1976). Patterns of dynamical behaviour in single-species populations. *The Journal of Animal Ecology*, 45(2), 471–486. <https://doi.org/10.2307/3886>
- Huxley, J. (1942). *Evolution, the modern synthesis*. George Allan and Unwin Ltd. London.
- Goldberger, A. L., Rigney, D. R. & West, B. C. (1990). Káosz és fraktálok az emberi szervezetben. *Tudomány*, 6, 28–36.
- Gruiz, M. (2013) Káosz mint komplexitás. *Természet Világa* 144. (II. különszám), 8–14.

- Kirschvink, J. L. (1992). Late Proterozoic low-latitude global glaciation: the snowball Earth. In: *Schopf J. W., Klein C. (eds.) The Proterozoic biosphere: a multidisciplinary study*. Cambridge University Press, Cambridge, 51–58.
- Knoll, A. H., & Carroll, S. B. (1999). Early animal evolution: emerging views from comparative biology and geology. *Science (New York, N.Y.)*, 284(5423), 2129–2137. <https://doi.org/10.1126/science.284.5423.2129>
- Lowenstam, H. A., & Margulis, L. (1980). Evolutionary prerequisites for early Phanerozoic calcareous skeletons. *Bio Systems*, 12(1-2), 27–41. [https://doi.org/10.1016/0303-2647\(80\)90036-2](https://doi.org/10.1016/0303-2647(80)90036-2)
- Marshall, C. R. (2006). Explaining the Cambrian “explosion” of animals. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 34(1), 355–384. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.33.031504.103001>
- Niklas, K. J. (1997). Effects of hypothetical developmental barriers and abrupt environmental changes on adaptive walks in a computer-generated domain for early vascular land plants. *Paleobiology*, 23(1), 63–76. <https://doi.org/10.1017/S009483730001664X>
- Noble D. (2011). Neo-Darwinism, the modern synthesis and selfish genes: are they of use in physiology?. *The Journal of physiology*, 589(Pt 5), 1007–1015. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2010.201384>
- Parker, A. (2004). In the blink of an eye: how vision sparked the big bang of evolution. Basic Books, New York.
- Pernecky, G. (1992). Mire jó a fraktálfilozófia? Avagy tallózás az „új lelkesültség” nemzetközi szakirodalmában. – *Penticulus Hungaricus*, 8(3), 1059. <https://www.penticulus.hu/rovatok/hidverok/pernecky-01.html#gsc.tab=0>
- Ritchie, M. G. (2007). Sexual selection and speciation. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, 38(1), 79–102. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.38.091206.095733>
- Romanes G. J. (1883). Letter to the Editor. *Nature*. 27, 528–529 <https://doi.org/10.1038/027528a0>
- Scheuring I. (1998). Kaotikus jelenségek a biológiában. *Természet Világa*, 129(8), 338–342.
- Scheuring I. (2002). Káosz az életközösségekben. Nemlineáris jelenségek kompetitív rendszerekben és táplálékhálózatokban. *Természet Világa*, 133, 8, <https://www.termvil.hu/archiv/tv2002/tv0208/scheuring.html>
- Scheuring, I. & Jánosi I. M. (1996) Az eltűnő káosz nyomában: Miért nem kaotikusak a valóságos ökológiai rendszerek? *Fizikai Szemle. Biológiai Fizika Különszám*. 2(7), 235–241.
- Sepkosi, J. J. (1993) Alapok: Élet az óceánokban. In: *Gould, S. J. (szerk.) Az élet könyve*. Officina Nova, Budapest. 37–64.
- Shu, D. (2008). Cambrian explosion: Birth of tree of animals. *Gondwana Research*, 14(1-2), 219–240. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2007.08.004>

- Tél, T. & Gruiz, M. (2002) Kaotikus dinamika. Bevezetés a kaotikus dinamika világába a klasszikus mechanika jelenségén keresztül. – Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest.
- Tél T. & Gruiz M. (2006) Chaotic dynamics, An introduction Based on Classical Mechanics. Cambridge University Press. UK. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511803277>
- Trestman, M. (2013). The Cambrian explosion and the origins of embodied cognition. *Biological Theory*, 8(1), 80–92. <https://doi.org/10.1007/s13752-013-0102-6>
- Waddington, C. H. (1957). The strategy of the genes. George Allen & Unwin, London.
- West-Eberhard, M. J. (2003) Developmental plasticity and evolution. Oxford University Press, Oxford. <https://doi.org/10.1093/oso/9780195122343.003.0008>
- Wiesenfeld, K., & Moss, F. (1995). Stochastic resonance and the benefits of noise: from ice ages to crayfish and SQUIDS. *Nature*, 373(6509), 33–36. <https://doi.org/10.1038/373033a0>
- Wimsatt, W. C. (1986) Developmental constraints, generative entrenchment, and the innately-acquired distinction. In: *Bechtel W (ed): Science and philosophy: integrating scientific disciplines*. Martinus Nijhoff, Dordrecht, 185–208. https://doi.org/10.1007/978-94-010-9435-1_11
- Zhuravlev, A. Y., Wood, R. A., & Penny, A. M. (2015). Ediacaran skeletal metazoan interpreted as a lophophorate. *Proceedings. Biological sciences*, 282(1818), 20151860. <https://tamop412a.ttk.pte.hu/files/biologia5/Evolucio/chunks/ch14s04.html>
<https://doi.org/10.1098/rspb.2015.1860>