

# EGYSZERŰ SZIMMETRIA

Holló Gábor

PhD, Debreceni Egyetem Bölcsészettudományi Kar Pszichológiai Intézet  
hollogabor@gmail.com

## Összefoglalás

Az állati testszimmetria evolúciójának kérdése a biológia egyik alapvető, de csak részben tisztázott problémája. Az állati forma törzsfajlásában megfigyelhető változásokat elsősorban a génszabályozó hálózatokban bekövetkezett módosulások okozzák. E hálózatok általános tulajdonságaiból levezethető, hogy az állatvilágban megjelenő két fő szimmetriatípus – a sugaras és a kétoldali – egymással nincs szükségszerűen sem ősiségi, sem alá-fölérendeltségi viszonyban. Elméleti megfontolások alapján belátható, hogy a két uralkodó szimmetrián kívül másféle szimmetriafajta nem létezhet a Földön, és az állatra jellemző mozgásforma követelményei szelektív előnyhöz juttathatják egyik vagy másik szimmetriát. Mindezek alapján valószínűnek tűnik, hogy az állati szimmetria evolúciója erősen behatárolt úton halad, s a bolygónkon létező alapvető formák kötelező jellegű mintázatok.

## Bevezetés

A természetben megjelenő szimmetrikus mintázatok elbűvölnek az embert. Az egyik legszembetűnőbb ezek közül az élőlények testének szimmetriája. Jelen tanulmány az állatok szimmetriájával foglalkozik. Az állatfajok több mint 99%-a kétoldalian (idegen szóval *bilaterálisan*) részarányos; legismertebbek, leghétköznapiabbak közülük a gerincesek

és az ízeltlábúak. Az állatvilág más képviselői – mint például a medúzák, a virágállatok és egyéb csalánozók – sugarasan (*radiálisan*) szimmetrikus testűek, a szivacsok vagy a korongállatok pedig aszimmetrikus testet építenek. Miért jönnek létre ezek a szimmetriatípusok? Előnyben van-e egyikük a másikkal szemben bizonyos szempontból, vagy csak a vakvéletlennek köszönhető a létezésük és ilyen arányú eloszlásuk? Ezek a kérdések az evolúcióbiológia nagy problémái közé tartoznak. Ha magyarázatot szeretnénk találni rájuk, érdemes megvizsgálni, hogyan szabályozódik a forma kialakulása, mitől függ evolúciója, létezhetnének-e az aktuálisaktól eltérő szimmetriatípusok, és köthetők-e a létező típusok általános tulajdonságokhoz.

## Az állati forma evolúciója és a génszabályozó hálózatok

Az utóbbi egy-másfél évtizedben már általánosan ismertté vált az, hogy az állatok formájának evolúciója az úgynevezett *génszabályozó hálózatokban* (a továbbiakban: GSZH) bekövetkezett változásoktól függ (például: Davidson – Erwin, 2006; Davidson, 2010). Miből is áll a génszabályozó hálózat? A DNS-ben kódolt információ fehérjemolekulákká íródik át a fehérjeszintézis folyamán, s e fehérjéknek köszönhetően működnek anyagcsere-folyamataink, melyeken biológiai szempontból nézve az életünk alapul. Az

egy-egy fehérjét kódoló DNS-szakaszok – ezeket *kódoló* vagy *fehérjekódoló géneknek* nevezzük – működését azonban egyéb, úgynevezett *szabályozó gének* irányítják (e gének kódolják a transzkripció faktor elnevezésű molekulákat, amelyek a DNS megfelelő szakaszaihoz kötődve szabályozzák a kódoló gének működését). A szabályozó gének szabályozzák meg, hogy melyik szövetben mely fehérjék génjei íródjanak át, mikor és mennyi termelődjön belőlük. Mivel egy-egy gén többféle szabályozó molekulára (transzkripció faktorra) válaszolhat, és egy-egy szabályozó molekula is többféle gén számára szolgáltat bemeneti információt, a fehérjekódoló gének aktivitását szabályozó gének és kölcsönhatásaik bonyolult információs hálózatot alkotnak (GSZH). Nos, a forma törzsfajlására főképp ezen szabályozó hálózatokban bekövetkezett mutációknak köszönhető. Nemrégiben kiszámították például, hogy a fejgerincű húsos lándzsahal és az ember között 33%-os hasonlóság áll fenn a fehérjekódoló gének tekintetében, míg a konzervált nemkódoló DNS-szakaszokban (melyek gyakran bizonyulnak szabályozó régióknak) csupán kevesebb mint 1% az egyezés (Clarke et al., 2012).

Jóllehet a génszabályozó hálózatok bonyolult információs rendszerek, olyan általános és alapvető vonásaik vannak, amelyek tanulmányozása segítségünkre lehet az állati szimmetria problémájának megoldásában. A génszabályozó hálózatok hierarchikus felépítésűek. A hálózat magját képező, legbelső alrendszer információt határozzák meg a test alapvető koordinátáit, így a szimmetriáját, kijelölik a fejlődő szervkezdemények helyzetét, vagy például szabályozzák az immunrendszer fejlődését. Ezek az alrendszerek evolúcióban nagyon stabilak, vagyis nehezen változnak (Davidson – Erwin, 2006). A GSZH legkül-

ső köre olyan géncsoportokból áll, amelyek a finom részleteket alakítják ki a testen, ezek irányítják például a váz ásványainak felépítését, vagy meghatározzák a kültakaró pigmentációját. E génalrendszerek evolúciósan labilisak, és nagyrészt ezek változásai állnak a fajképződés hátterében (Davidson – Erwin, 2006). Fontos azonban azt meglátni, hogy a test felépítése alapvetően lineáris genetikai programot követ, vagyis a GSZH egyes alrendszereinek láncszerű, egymás utáni aktiválásának az eredménye. Ezért elmondható, hogy a GSZH egyes alrendszerei között nincsen valódi alá-fölérendeltségi viszony, tehát az említett hierarchikus kapcsolatuk nem a szokásos értelemben vett, társadalmi mintájú hierarchia, hanem pusztán annyit jelent, hogy *különműködő alhálózatok eltérő időzítéssel aktiválódnak az egyedfejlődés során* (Holló, 2014, 2015). Fontos továbbá azt is tudni, hogy a GSZH-alrendszerek közötti genetikai kapcsolatok evolúciós értelemben véve jóval változékonyabbak, mint az alrendszereken belüli kapcsolatok. Ennek egyik következménye az, hogy az egyes alegységek sorrendje könnyebben változik, mint magának az alrendszernek a szerkezete. Így a törzsfajlás folyamata megkeverheti az alegységeket, azaz alkalom nyílik, hogy az alrendszereket többféleképpen, több célra is „bevetessék”, s így szabadabban lehet „kísérletezni” új alaktani megoldásokkal (Holló, 2015). Ugyanannak az alrendszernek az újrahaználására az egyik legjobb példát talán a jelátviteli rendszerek (Wnt, TGF- $\beta$  stb.) szolgáltatják, melyeket az egyedfejlődés különböző fázisaiban és különféle célokra alkalmaz a genetikai program (Davidson – Erwin, 2006). Másik következménye pedig az, hogy pusztán az a tény, hogy egy alrendszer hamarabb aktiválódik az egyedfejlődés folyamán, még nem

feltétlenül jelenti azt, hogy a szóban forgó alrendszer ősi eredetű, mint a későbbiekben működésbe lépő GSZH-alegységek.

Mindez a *szimmetria szempontjából* annyit jelent, hogy a testszimmetriát meghatározó genetikai program és az alsóbb testszerveződési szinteken (például a szervekben, szervrendszerekben) megjelenő szimmetriát felépítő genetikai alhálózat között *szükségesszerű alá-fölrendeltségi viszony vagy ősiségi kapcsolat nem létezik* (Holló, 2014, 2015), mivel a génszabályozó hálózatok szerkezetileg, funkcionálisan és időbeliségükben is mozaikos rendszerek (Davidson, 2010). Ha pedig mindezt kiegészítjük azzal, hogy a „sugarasan szimmetrikus” csalánozók testében egy sor kétoldalian szimmetrikus képlet található (rhopaliumok, garat, a manubrium karjai), és hasonlóképpen, hogy a „kétoldalian szimmetrikus” állatok egy sor sugarasan szimmetrikus szervvel rendelkeznek (szemek, véredények, mirigyek kivetűcsövei, kiválasztórendszer csatornácskái stb.), akkor kimondhatjuk, hogy az állatok tulajdonképpen mindkét típusú szimmetria létrehozására képesek, azaz *egyszerre sugarasan és kétoldalian szimmetrikusak*. Ez a nézet a szimmetriaviszonyok új, rugalmas szemléletét indokolja. Ezt követően viszont felmerül a kérdés, hogy mi határozza meg azt, hogy melyik szimmetria fejeződjön ki az állatban.

#### Lehetséges szimmetriatípusok

Célszerűnek tűnik megvizsgálni ezután az elméletileg és gyakorlatilag lehetséges szimmetriatípusokat, és általános törvényszerűségeikkel való kapcsolatukat. Mint fentebb már szerepelt, a kétféle nagy szimmetriatípusnak (sugaras és kétoldali) az állatvilágban tapasztalható eloszlása erősen aránytalan a kétoldali szimmetria javára. A legszembeötlőbb tulajdonság, ami a kétoldali szimmetriával gyak-

ran párosul, az *irányított mozgás* képessége. Ez az egyetemi tankönyvekben régóta szereplő információ Vlagyimir Nyikolajevics Beklemishev összefoglaló munkájára (Beklemishev, 1969) vezethető vissza. Beklemishev szerint a kétoldali szimmetria haszna az, hogy a test két oldalára ható erők kiegyenlítik egymást, s így a test egyenesen mozoghat. Ez így önmagában természetesen igaz, viszont a szimmetrikus testek általában rendelkeznek ezzel a tulajdonsággal, azzal a kitételrel, hogy nem feltétlenül a test két, hanem akár több oldalára ható erők egyenlítik ki egymás hatását. Például egy háromoldali, sugarasan szimmetrikus testre az erők kiegyenlítődése éppolyan igaz, mint egy gömbre. Ez az indoklás tehát nem ad elégséges magyarázatot a kétoldali szimmetria feltételezett előnyére. Mivel azonban a pontos irányított mozgású<sup>1</sup> állatok kétoldalian szimmetrikusak, a sugaras állatok pedig – mint a medúzák – köztudottan lassan és pontatlanul mozognak, valószínűleg érdekes továbbra is az irányított mozgás mezején keresgélünk, de nem elégedhetünk meg a klasszikus magyarázattal.

Az élet – így az állati élet is – a vízben keletkezett, ezért további eszmefuttatásunk során vizes közegben zajló mozgást képzeljünk el. Ha egy test pontosan és egyenes vonalban próbál mozogni, szimmetrikusnak kell lennie. Ellenkező esetben, azaz ha a test aszimmetrikus, a rá ható ellenállási erők nem egyenlítik ki egymást, és így a test nem tarthatja meg egyenes pályáját. A testnek tehát szimmetrikusnak kell lennie. Az elvileg lehetséges

<sup>1</sup> Az irányított mozgás még nem feltétlenül jelent egyszerre pontos mozgást is: lehet viszonylag pontatlan is (mint a medúzák pumpáló vagy bizonyos lárvák spirális mozgása valamilyen ingerforrás felé vagy attól távolodva). Ezzel szembeállítható a pontos irányított mozgás (mint mondjuk a csuka precíz mozgása).

szimmetriák közül azonban csupán három felelhet meg a mozgás szabta feltételeknek: a végtelen – vagy sok, de véges – számú szimmetriatengellyel rendelkező *gömb*, az egy szimmetriatengellyel és számos szimmetriasíkkal rendelkező *sugaras*, és az egyetlen szimmetriasíkkal bíró *kétoldali* szimmetria (Holló – Novák, 2012).

A szimmetria kényszere mellett a vízben egy másik fontos hatás is fellép, mely korlátozza az állat formáját. Ez a *felületi súrlódás*, melynek köszönhetően mozgás közben jelentős fékezőerő lép fel, ha a felület növekszik. Ezért aztán a testfelületet célszerű az optimális legkisebb méretűre zsugorítani, ha hatékony mozgásra van szükség. Ebből kifolyólag a fenti szimmetriák közül a sugaras csak erős korlátok között jelenhet meg, mégpedig a *hengeres* formában, hiszen például egy csillag alakú keresztmetszettel bíró, hosszúságú test olyan nagy felületű, hogy az túlzottan és állandóan fékezni fogja mozgás közben. Ezért az irányított és gyors mozgáshoz a sugaras szimmetria csoportján belül az optimális forma a *hengeres*. A továbbiakban tehát e három (gömb, hengeres és bilaterális), elméletileg lehetséges típussal kell csak foglalkoznunk.

A fizika szempontjából a mozgás két fontos összetevőre bontható. Az egyik az *egyenes vonalú mozgás*, a másik az *irányváltás*. Egyenes vonalú mozgásra mindhárom szimmetriatípus képes, hiszen legalább egy irányból áramvonalasak lehetnek, és szimmetrikusak lévén, a körülöttük ható ellenállási erők kiegyenlítik egymást. Az egyenes iránytól való enyhe eltérés egy-egy szimmetriaelem elron-tásával, vagyis aszimmetria létrehozásával könnyen elérhető – erre is képes mindegyik szimmetriafajta. A *gyors* irányváltás esetében azonban már más a helyzet. Ekkor a testnek az új irányra ellentétes erőt kell gyakorolnia,

ehhez pedig egyfajta „lökőfelületet” kell létrehozni, ahonnan el tud rugaszkodni. Nos, képzeljünk csak el egy gömböt, amint hirtelen próbál irányt váltani: ezt nem tudja kivitelezni, hiszen olyannyira tökéletesen szimmetrikus, hogy minden irányban egyforma az ellenállása, vagyis egyformán áramvonalas, ezért nem képes a lökőfelületet létrehozni, amiről elindulhatna az új irányba. Legfeljebb úgy képes elfordulni, ha elkezdi pörögni, s – ahogy a focilabda csavarás közben – enyhén elhajlik a mozgási pályája; ez viszont nem eredményez hatékony és pontos fordulást. A megfelelő irányváltási képesség hiánya miatt tehát a gömb is kiesik mint gyakorlatilag lehetséges szimmetriatípus, ha az állat az irányított mozgás támasztotta követelményeknek próbál megfelelni (Holló – Novák, 2012).

A hengeres és a kétoldalian szimmetrikus testek egyaránt képesek előrehaladni – hiszen áramvonalasak – és elfordulni, mert képesek az új irányra ellentétes erőt kifejteni a vízben. Ha azonban közelebről is megvizsgáljuk a két szimmetria irányváltását, érdekes különbségre bukkanhatunk. Az elforduláshoz tehát ellenerőt kell kifejteni a vízre. Ehhez nagy *ellenállást* kell produkálni, hiszen minél nagyobb a tolóerő, annál gyorsabban és precízebben tud az állat az új irányba elindulni. Ennek pontosabb megértéséhez meg kell ismerkednünk a *közegellenállás* fogalmával. A közegellenállás egy olyan erő, mely a mozgás irányával ellentétesen hat a mozgó testre, és ami a makroszkopikus világban (ahol a viszkózus erők elhanyagolhatóak a tehetlenségi erőkhöz képest; például Vogel, 1994) az alábbi egyenlet szerint alakul:

$$F = -\frac{1}{2} \rho c A v^2$$

ahol  $F$  a közegellenállási erő,  $\rho$  a közeg sűrűsége,  $c$  egy dimenzió nélküli szám, a test alakjától függő úgynevezett *közegellenállási*

együttható,  $A$  az adott irányban a legnagyobb keresztmetszet területe,  $v$  pedig a test sebessége (Hoerner, 1965; Vogel, 1994). Könnyen belátható, hogy ebben az összefüggésben az egyetlen olyan tényező, amelynek a szimmetriához általánosan köze van, a *közegellenállási együttható* ( $c$ ). Ennek az együtthatónak az értéke a hengeres és a kétoldalian részarányos test esetében markánsan eltér. Mérnöki munkákból megtudható, hogy a lapos lemezek közegellenállási együtthatója – a magasság és hosszúság arányától függően, a tehetetlenségi/viszkózitási erők arányának egy bizonyos ( $10^\circ$ ) értékénél – 50–70%-kal nagyobb, mint a hengeres testeké (Hoerner, 1965). Ez pedig annyit tesz, hogy a létrehozott közegellenállási erők tekintetében is ekkora különbség lehet a két forma között. Mindez persze nem azt jelenti, hogy a kétoldalian részarányos testek lapos lemezek lennének, pusztán annyit, hogy az ilyen szimmetriájú test sokkal rosszabb áramvonalassági tényezőkkel jellemezhető, mint a hengeres szimmetriájú, és fennáll a lehetősége annak, hogy egy kétoldali szimmetriájú test a fentihez mérhető nagyságban megnövelje a forduláskor kifejtett tolóerejét egy hengeres testhez képest. Szemléletesen képzelhető el ennek mintájára, hogy

mi történné, ha nem evezőlapáttal próbálnánk csónakunkat hajtani, hanem mondjuk egy hengeres pezsgősüveggel. Szintén könnyen belátható, hogy a kétoldalian részarányos test ráadásul az egyetlen, mely a felületi súrlódás túlzott megnövelése nélkül képes olyan testfüggelékkel felszerelkedni, melyek lapos lemezekhez hasonlóan viselkednek – gondoljunk csak a halak úszóira. Kimondható tehát, hogy *az a szimmetria, amely egy irányban kis ellenállású (áramvonalas), a többi irányban viszont nagy ellenállást fejt ki, kedvező a fordulékony mozgáshoz, mert maximalizálja a fordulóerőket* (Holló – Novák, 2012). A mozgás során állandóan jelen lévő nagy fordulékonyaság óriási előnyhöz, kiváló manőverező-képességhez juttatja a kétoldalian részarányos makroszkopikus testet. Így válik tehát a szimmetriák „legtökéletesebbike” az irányított mozgáshoz optimális szimmetriává.

A kétoldali szimmetria a szárazföld és a levegő meghódítása után is sikeresnek bizonyult. A szárazföldön zajló felületi mozgás tulajdonképpen kétdimenziós, így a testnek az előre történő mozgás mellett balra vagy jobbra kell fordulnia, s erre kiválóan alkalmazkodik a jobb, illetve bal oldalon elhelyezkedő végtagok. A levegőben történő mozgás lenye-

gében a vízi mozgáshoz hasonlít azzal a különbséggel, hogy hiányzik a hidrosztatikus nyomás, ami a gravitációs erőt ellensúlyozná, így a mozgáshoz nagy felületű, lapos és könnyű szerkezeteknek kellett megjelenniük a testen – ahogy a szárnyak esetében ez meg is valósul (Holló – Novák, 2012). Természetesen egyéb tényezők is hozzájárulhattak a kétoldali szimmetriájú állatok sikerességéhez, azonban e tényezők még feltáratlanok.

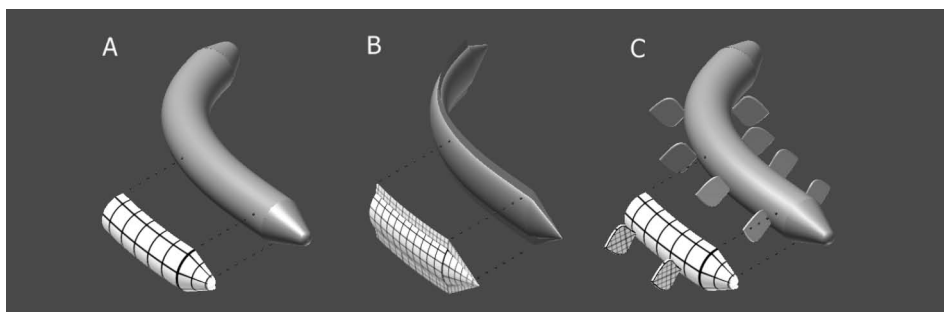
Ha azonban a bilaterális szimmetria előnyös az irányított mozgás során, akkor a sugaras szimmetria csak olyan élőlényekben fejlődhetett ki, amelyek életük során elsősorban nem a pontos és gyors mozgásra támaszkodnak. A medúzák, a hidraállatok (csalánozók), a tengeri csillagok vagy a tengeri liliumok (tüskésbőrűek) helyhez kötött, sodródó vagy lassú mozgással járó életmódot folytatnak: prédájuk náluk is lassúbb, vagy pedig az áramlatok által sodródik a tapogatóikba. Ezeknek az élőlényeknek viszont a gyors mozgás feláldozása árán a sugaras szimmetria másfajta előnyöket biztosít. A sugaras szimmetriájú állatok minden irányban nagyjából egyenlő eséllyel tudnak reagálni a környezeti hatásokra: így képesek statikus helyzetüket megtartani a vízáramlatokkal szemben, vagy éppen hatékonyan zsákmányt gyűjteni (Holló – Novák, 2012). A test külsején jelentkező hengeres szimmetria még két állatcsoportnál jellemző, ezek pedig a túró, ásó életmódúak (mint például a talajlakó férgek) és a mozgó belső élősködők (endoparaziták; mint az ember orsóférgé). Ezeknél az állatoknál a közeg, melyben mozognak, olyan sűrű, hogy a súrlódás lehetségesig történő csökkentésének érdekében a testalak a hengereshez közelít, mivel ez a forma biztosítja az egységnyi keresztmetszetre jutó legkisebb felületet (Holló – Novák, 2012).

### Következtetések

Az állati szervezetek szimmetriaviszonyainak evolúciója tehát úgy tűnik, nagyban meghatározott a *funkció* és a *fizikai környezet* által. Amennyiben a gyakorlatilag lehetséges kétféle szimmetriatípus eloszlási mintázatát bolygónkon ilyen egyszerű törvényszerűségek magyarázhatják, akkor feltételezhető, hogy az állati szimmetria evolúciója erősen becsatornázott pályán halad, ahol a testformák alapvető geometriai tulajdonságai szükségszerűek (Holló – Novák, 2012; Holló, 2015). Az állati szimmetria problémájának megoldásában tehát az egyszerű, mechanisztikus szemlélet sokat segít, jóllehet egy átfogó, a szimmetriák eredetét is pontosan megmagyarázó elmélet megalkotása még várat magára. A szimmetriák evolúciós eredete rejtélyének megoldásával remélhetőleg közelebb jutunk majd a földi törzsfajlás egy fontos, filozófiai következtetések levonására is módot adó kérdésének a megválaszolásához.

Köszönetemet fejezem ki Varga Zoltánnak, aki egyetemi oktatóként lelkesítő óráival elősegítette e gondolatok megfogását és kifejlődését, és aki előadás megtartására kért fel a *Többszemközt az evolúcióval* konferencián. Köszönet illeti továbbá azokat, akik szaktudásukkal, véleményükkel, bátorításukkal támogatták munkámat: Novák Mihály, Papp Balázs, Paolo Saiello, Andrew H. Knoll, Bert Hobmayer, Eric H. Davidson, Douglas H. Erwin, Csermely Péter, Barta Zoltán, Miskei Márton, Végh László, Bernard M. Degnan, és sokan mások. Az ábra Jász Ottó munkája.

Kulcsszavak: *állati szimmetria, sugaras szimmetria, kétoldali szimmetria, génszabályozó hálózatok*



1. ábra • Hengeres (A) és kétoldalian szimmetrikus (B, C) testek fordulás közben. A vetítési felületek mutatják a tolófelületet, melyet a vízben képeznek; rácsűrűségük pedig az ébredő erő nagyságát jelzi. Forrás: Holló – Novák, 2012.

## IRODALOM

- Beklemishev, V. N. (1969): *Principles of Comparative Anatomy of Invertebrates*, Vol. 1: *Promorphology*. Oliver and Boyd, Edinburgh
- Clarke, Shoa L. – VanderMeer, Julia E. – Wenger, Aaron M. et al. (2012): Human Developmental Enhancers Conserved between Deuterostomes and Protostomes. *PLOS Genetics*. 8(8), e1002852 DOI: 10.1371/journal.pgen.1002852 journals.plos.org/plosgenetics/article?id=10.1371/journal.pgen.1002852
- Davidson, Eric H. (2010): Emerging Properties of Animal Gene Regulatory Networks. *Nature*. 468, 911–920. DOI:10.1038/nature09645
- Davidson, Eric H. – Erwin, Douglas H. (2006): Gene Regulatory Networks and the Evolution of Animal Body Plans. *Science*. 311, 796–800. DOI:10.1126/science.1113832

- Hoerner, Sighard F. (1965): *Fluid-dynamic Drag*. Hoerner Fluid Dynamics, Brick Town, NJ <http://dl.kashti.ir/ENBOOKS/NEW/FDD.pdf>
- Holló Gábor (2014): Animals Are Both Radially and Bilaterally Symmetrical: Accommodating Seemingly Mutually Exclusive Paradigms. *BioEssays*. 36, 901–902. DOI:10.1002/bies.201400089
- Holló Gábor (2015): A New Paradigm for Animal Symmetry. *Interface Focus*. 5, 20150032 DOI: 10.1098/rsfs.2015.0032 • <http://rsfs.royalsocietypublishing.org/content/5/6/20150032>
- Holló Gábor – Novák Mihály (2012): The Manoeuvrability Hypothesis to Explain the Maintenance of Bilateral Symmetry in Animal Evolution. *Biology Direct*. 7, 22. • <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3438024/>
- Vogel, Steven (1994): *Life in Moving Fluids*. 2<sup>nd</sup> edition. Princeton University Press, Princeton, NJ



# FAJOK ÉS GÉNEK TÖRTÉNETÉNEK NYOMÁBAN

Gertheis Zsófia N. Szöllösi Gergely J.

doktorandusz, PhD, tudományos főmunkatárs,  
ELTE–MTA „Lendület” Evolúciós Genomika Kutatócsoport  
ELTE Biológiai Fizika Tanszék szzolo@gmail.com

## Bevezetés

A biológia történeti tudomány. A biológiai rendszerek szerkezete, a fehérjéktől egészen az ökoszisztémáig mind egy hosszú, több mint hárommilliárd évvel ezelőtt kezdődött evolúciós folyamat eredménye. Bár az evolúció folyamatainak és múltbeli lefolyásának tanulmányozását hagyományosan a többi biológiai diszciplínától különállóként kezelték, az a gondolat, hogy az élet története kulcsfontosságú az élő rendszerek megértésében, mára kezd széles körben elfogadottá válni.

A DNS-láncok nukleotidsorozatának megfejtésére kidolgozott technológiák rohamos fejlődése alapjaiban változtatta meg a biológia forrásait és kérdéseit. Különösen igaz ez az élővilág történetének kutatására. A DNS-szekvenciák hiányában néhány évtizede még a fajok származását, őseik testfelépítését és életmódját a ma élő egyedek közös és eltérő tulajdonságai, valamint fennmaradt fossziliák alapján próbáltuk meg felderíteni. Ma már a fajok teljes genetikai állománya és ezáltal az őseiktől örökölt gének közötti hasonlóságok és különbségek sokasága áll rendelkezésünkre. Ezek a DNS-szekvenciák a múlt dokumentumai (Zuckerlandl – Pau-

ling, 1965; Boussau et al., 2010), amelyek segítségével minden eddiginél részletesebben rekonstruálhatjuk az élet történetét és érthetjük meg ma fellelhető diverzitását.

## A szekvenálástól a géncsaládokig

Az örökítőanyag minden egyes szaporodási ciklusban megkettőződik, így adódik tovább (kisebb-nagyobb másolási hibákkal, mutációkkal) az utódoknak, akik azt saját utódaiknak örökítik, újabb módosulásokkal. Ily módon kerül a DNS-láncok nukleotid sorozatába, a DNS-szekvenciákba az élőlények leszármazási történetének lenyomata. A molekuláris filogenetika feladata, hogy csupán egyetlen jelenbeli pillanatképből, a laboratóriumban megfejtett szekvenciák közötti különbségekből kikövetkeztesse ennek a folyamatnak a lépéseit, rekonstruálja a hozzájuk vezető osztódások sorozatát.

Ezekből a pillanatképekből azonban nagyon sok áll rendelkezésünkre, mára több tízezer élőlény teljes genetikai állománya (genomja) ismert. Az evolúciós múlt DNS-szekvenciák alapján történő rekonstrukciójában az első feladatunk, hogy a genomszekvenciákat, amelyek önmagukban csak a négy nukleotidból (A, T, G, C) álló hosszú sorozatok, valamilyen módon értelmezzük. Ezt a