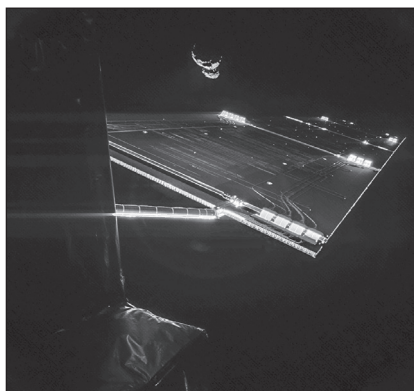


tományban is szokatlanul sötét, a felszínen egyelőre nem tudták vízjég nyomait kimutatni. A kísérletet végző kutatók mindkét eredményt meglepőnek minősítették. Az üstökös kómájában, azaz a magot körülvevő gázburkokban azonban már kimutatták a hidrogén és az oxigén jelenlétét. A Rosetta további tudományos eredményeiről szeptember második hetében az Európai Bolygókutató Konferencián számoltak be a szakemberek.

A keringő egység fő feladata az üstökösrandevú utáni első négy hónapban a pontos térképezés és a navigációhoz szükséges információk megszerzése volt. A leszállás után kezdődik meg a keringő egység 13 hónaposra tervezett küldetése. Ekkor már az üstökös fokozódó aktivitását vizsgálják, a mérések erre összpontosítanak.



**A még az anyaszondához erősített leszállóegység CIVA kamerája szeptember 7-én fényképezte le mintegy 50 km távolságból az üstököst. A leszállóegység elhelyezkedése miatt a képbe beléleg a Rosetta egyik, 14 méter hosszú napelemtáblája. Valójában a kép montázs, mert az üstökös és a szerkezeti részek fényképezéséhez különböző expozíciós időt használtak. A felvétel további érdekessége, hogy a képet a Philae és a Rosetta között az előbbi magyar gyártmányú (MTA Wigner Kutatóközpont és SGF Kft.) központi adatgyűjtő számítógépe továbbította (Valamennyi kép forrása: ESA)**

A leszállás helyszínét kiválasztó bizottság várhatóan október 12-én hozza meg a végleges döntését. Ez jelenti majd a leszállás dátumának, helyének és a szükséges manővereknek a véglegesítését (a tervezett időpont november 12.). Cikkünk megjelenésekor ez a döntés már ismert lesz. A küldetés eddig hibátlanul, pontosan a tervek szerint zajlott. Reménykedhetünk, hogy mire cikkünk az olvasó kezébe kerül, már csak napok választanak el a legizgalmasabb és egyben a legkockázatosabb eseménytől, amikor a Philae leszállóegység leereszkedik az égitest felszínére. ✱

SCHEURING ISTVÁN

## A homoszexualitás evolúciógenetikai háttere

Vajon mit gondol a kedves olvasó: a homoszexualitás kizárólag emberi tulajdonság, esetleg az ember mellett néhány emberszabású majomnál is megfigyelhető, avagy egy, az állatvilágban széles körben elterjedt viselkedés? Gyanítom, hogy a legtöbben a második válasszal értenek egyet, míg a legkevesebb szavazatot a harmadik lehetőség kapja. Így valószínűleg sokaknak meglepetést okoz, hogy a jó válasz az utolsó. Az utóbbi 10–15 év célzott megfigyelései alapján ma már több mint 1500 fajnál jegyeztek fel homoszexuális viselkedést (egy egyed egy másik azonos nemű egyeddel szexuális jellegű kapcsolatot létesít). Vannak köztük rovarok, halak, kétlélűek, hüllők, madarak és természetesen emlősök is szép számmal. Példaként megemlítek néhány madárfajt: Kaliforniában a nyugati sirály (*Larus occidentalis*) fészekpárok 14%-a nőstény-nőstény pár, míg ez a szám 31% a Laysan albatrosz (*Phoebastria immutabilis*) Oahu szigetén fészkelő populációja esetében. A nyári lúd (*Anser anser*) hímek 15%-a egész élete során más hímekkel áll párba, és a sort még folytathatnánk. Szinte az összes háziastott emlős között, az ó- és újvilági majmok és további több mint 200 emlős fajnál mutattak ki valamilyen gyakoriságú homoszexualitást.

Az emberi homoszexualitás gyakoriságára – a mérési eljárásoktól függően – többféle adat ismert. Először tisztáznunk kell, hogyan definiáljuk a homoszexualitást az ember esetében. Alfred Kinsey a múlt század negyvenes éveiben dolgozott ki egy, a kérdezett személy szexuális irányultságát vizsgáló kérdőívet. Ennek alapján meg lehet különböztetni kizárólagosan heteroszexuális érdeklődésű embereket (a Kinsey-indexük 0), olyanokat, akik a fantázia szintjén homoerotikus vonzalmat is mutatnak (Kinsey-index 1-es), ezen túl olyanokat, akiknek volt alkalmi homoszexuális élménye is, és így tovább, egészen azokig a tesztalanyokig, akiknek kizárólag homoszexuális érdeklődésük és tapasztalatuk van (Kinsey-index 6-os). Így természetesen kapunk egy eloszlást az emberek szexuális érdeklődéséről, ami önmagában is érdekes. A kutatók különböző Kinsey-indexnél húzzák meg a homoszexualitás határát, de a legtöbben a legegyszerűbb megoldást javasolják: *akiknek a Kinsey-indexe nagyobb,*

*mint 0, azok a homoszexuálisok csoportjába tartoznak.* Ennek alapján azt mondhatjuk, hogy mind a férfiak, mind a nők 3–10%-a tekinthető homoszexuálisnak (vagy pontosabban mondva: ilyen százalékban nem kizárólagosan heteroszexuálisok). Érdekes, hogy bár ez az arány a férfiakra és a nőkre közel azonos, a Kinsey-index szerinti eloszlás alapvetően különböző a két nemnél: míg a férfiaknál az alacsonyabb fokú homoszexuális érdeklődés ritkább (pl. volt az életében mindkét nemű szexuális partnere), a kizárólagos homoszexuális érdeklődés ennél gyakoribb. A nőknél a Kinsey-index növekedésével folyamatosan csökken a gyakoriság (1. ábra).

Az imént elmondottakból következik egyrészt az, hogy ha az állatvilágban ennyire elterjedt a homoszexualitás, akkor e viselkedés biológiai hátterében is sok hasonlóság kell, hogy legyen. Legalábbis az emlősök körében várható, hogy számos közös vonás fedezhető fel. Így az emlősökön végzett ilyen irányú kísérletek sok hasznos információval szolgálhatnak az emberi homoszexualitás biológiai hátterének megértésében is. Másrészt, ha az állatvilágban a homoszexualitás általánosan jelen van, akkor nyilvánvalóan az ember esetében sem lehet kizárólag „kulturális” háttere ennek a viselkedésnek.

Miközben természetesen a homoszexualitásnak igen fontos társadalmi és lélektani vetülete is van, minket e kérdéskör elsősorban evolúcióbiológiai szempontból érdekel. Hiszen a homoszexuális embereknek kevesebb utódja születik (ez a szám nem nulla, átlagos utódszámuk durván 85%-a heteroszexuálisok átlagos utódszámának), így, ha e viselkedésmintázatnak van öröklődő genetikai háttere, akkor ezek a gének igen gyorsan ki kell, hogy szelektálódjanak. De nem ezt tapasztaljuk, tehát egy érdekes evolúciós kérdéssel állunk szemben. Vannak-e gének, melyek a szexuális érdeklődéssel hozhatók kapcsolatba? Milyen mechanizmusok miatt nem tűnik el a homoszexuális viselkedés a populációból? Lehet, hogy a homoszexualitásnak valamilyen közvetett előnye van, s ezért viszonylag gyakori is a legtöbb fajnál? Az elkövetkezendőkben ezeket a kérdéseket fogjuk tüzetesebben megvizsgálni, s a jelenlegi tudásunk alapján igyekeznünk válaszokat is adni rájuk.

### A homoszexualitás genetikai háttere

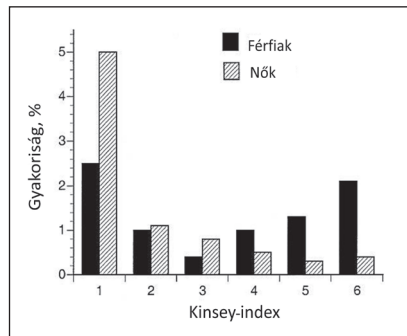
Nyilván a legizgalmasabb kérdés az, hogy van-e a homoszexualitásnak genetikai háttere, azaz vannak-e olyan öröklődő faktorok, melyek hordozói nagyobb eséllyel lesznek homoszexuálisok? Ennek eldöntésére az egy háztartásban felnevelkedett egypetéjű és azonos nemű kétpetéjű ikerpárok szexuális érdeklődését kell összehasonlítani. (Feltehető, hogy a vizsgált tulajdonság szempontjából hasonló a környezeti háttér az egypetéjű és a kétpetéjű ikreknél.) Az egypetéjű ikrek genetikailag azonosak, míg a kétpetéjű ikrek átlagosan 50%-ban hordoznak azonos géneket, így ha a homoszexualitásnak nincs genetikai háttere, akkor az egypetéjű és a kétpetéjű ikerpárok homoszexuális érdeklődése hasonló arányokat mutat, míg ha ez elsősorban genetikailag meghatározott viselkedés, akkor a viselkedésbeli korreláció nagyon magas lesz az egypetéjűeknél (vagy mind a két testvér heteroszexuális vagy mind a kettő homoszexuális), és ennek az értéknek úgy a felében lesz a kétpetéjű ikreknél azonos a szexuális érdeklődés. (A helyzet valójában ennél összetettebb, most csak a lényegét érzékeltettük). Az adatok elemzése alapján az általános tapasztalat az, hogy a homoszexualitásnak van genetikai (öröklődő) háttere, de ez nem erős, továbbá a genetikai meghatározottság a férfiak esetében valamivel erősebb, mint a nőknél.

A következőkben azokkal a kísérleti eredményekkel és elméleti megfontolásokkal foglalkozunk, melyek segítségével közelebb kerülhetünk a homoszexualitás evolúciós hátterének megértéséhez.

### Homoszexuálisok a segítők?

A homoszexualitás előnyét firtatók kérdésére az evolúcióbíológusok klasszikus válasza: rokonszelekciós okok miatt nem szelektálnak ki teljesen a homoszexualitást elősegítő gének, hanem egy meghatározott arányban jelen vannak a populációban. Az érvelés szerint, ha egy homoszexuális egyed segíti a testvéreit utódaik felnevelésében, akkor így annak az esélye, hogy a segített testvér a homoszexuális irányultságra hajlamosító géneváltozatokat hordozza: 0,5. Tehát, ha a segített szaporodási sikere kétszer annyi, mint amennyivel a segítő szaporodási sikere csökken, akkor az ilyen gének terjedni fognak a populációban. Ahogy nő az ilyen „segítő” gének aránya, úgy csökken azok előnye, hiszen az optimálisnál több lesz a segítő és kevesebb az aktívabban szaporodó egyed. Ezért végül egyensúlyi arány fog beállni a segítő szerepben lévő homoszexuális és a segített heteroszexuálisok között. Ray Blanchard amerikai kutató a 90-es években

megmutatta, hogy minél több bátyja van egy fiúgyermeknek, annál nagyobb eséllyel lesz homoszexuális felnőtt korában. Első hallásra ez az eredmény az imént vázolt elméletet támasztja alá. Ha az ételiszterforrások végesek, és a vadászó-gyűjtögető csoportokban, ahol az emberi evolúció zajlott, a készletek nem lehetnek bőségesek, akkor azok a gének terjedni fognak, melyek csökkentik az utódok számát, de növelik azok túlélési esélyét. Ráadásul a legtöbb ősi társadalomban a férfiak maradnak a csoportban párválasztás után, ami magyarázza, hogy a megfigyelt



1. ábra. A férfiak és a nők szexuális érdeklődésének eloszlása a Kinsey-index alapján. A 0-ás index a népesség úgy 90%-át kitevő kizárólagosan heteroszexuálisokat jelenti, ami az ábrán nincs feltüntetve (Baley és mtsai. 2000. nyomán)

hatás csak a fiúgyermekre érvényes. Ez az érvelés azonban mégsem olyan meggyőző, hiszen így a női homoszexualitásra nincs magyarázatunk, ráadásul a későbbi célzott kísérletek nem tudták kimutatni, hogy a homoszexuálisok nagyobb érzelmi és/vagy anyagi segítséget nyújtanának rokonaiknak, mint a heteroszexuálisok. Továbbá, feltételezve, hogy az emlősök körében megfigyelt homoszexuális viselkedés és az emberi homoszexualitás biológiai gyökere sok szempontból közös, a rokon szelekció nem tűnik általános magyarázó elvnek. Blanchard úgy vélte, hogy az anya a fiúmagzat bizonyos, a magzati fejlődéssel kapcsolatos antigénjeire (speciális molekuláira) a szülések számával egyre növekvő immunválaszt ad, ami a magzati fejlődésben egyre fokozódó zavart okoz, s ez vezet a növekvő arányú homoszexualitáshoz.

### Genetikai kényszerek, ellentétes hatások

Mások a pleiotrópiával, a heterozigóta előnnyel vagy a különböző nemű egyedekben ellentétes hatást kiváltó allélek jelenlétével magyarázzák a homoszexuális viselkedést.

Egy gén pleiotróp hatású, ha egyszerre több, esetenként ellentétes hatást fejt ki az egyedre. Például egy géneváltozat (allél), mely megnöveli a hordozó férfi adrenalin szintjét, fokozza annak férfias viselkedését, de ezzel együtt növeli a hirtelen szívleállás okozta halál valószínűségét. Nyilván az első hatás növeli a hordozója rátermettségét, és így ennek az allélnak a terjedését, míg a második hatás csökkenti azt. Tehát a pleiotrópián alapuló érvelés szerint vannak olyan allélok, melyek elsődleges hatása előnyös, de ezzel együtt növelik a hajlamot a homoszexualitásra is. Ha az előny nagyobb, mint a hátrány, akkor az allél terjedni fog.

A heterozigóta előny hipotézis alapjondolata, hogy egy *A* géneváltozat akkor okozza a legnagyobb növekedést a rátermettségben, ha az elterjedt *a* változattal együtt van jelen az egyedben (diploid, heterozigóta egyed *aA* allélpárral). Mind az *aa*, mind az *AA* allélpárok kisebb rátermettséggel rendelkeznek, mint az *aA* allélpár. Érezhető, és könnyű megmutatni, hogy ilyenkor sem az *a*, sem az *A* allél nem fog kiszekeláldni a populációból, hanem stabil egyensúlyban lesznek. (Az iskolapélda a sarlósejtes vérszegénységet okozó allél, mely heterozigóta formában (*aA* allélek) a malária ellen viszonylagos védeltséget nyújt, de homozigóta formában (*AA* allélek) súlyos betegséget okoz. A maláriával fertőzött területeken ezért viszonylag magas arányban található meg ez a géneváltozat a heterozigóta előny miatt. Mivel ezen túl nemigen vannak egyértelmű példák a heterozigóta előnyre, ezért valószínű, hogy nincs komoly szerepe a homoszexualitás magyarázatában sem.)

A különböző egyedekben ellenkező hatást kiváltó gének a pleiotrópia egy speciális esetének tekinthetők. E feltevés szerint az olyan géneváltozatok, melyek növelik az ilyen változatot hordozó nő (férfi) rátermettségét, például úgy, hogy a férfiak (nők) számára vonzó jellegeket alakítanak ki, egy fiú (lány) utódba kerülve ott éppen az ellentétes hatást váltják ki. Talán ez utóbbi javaslat tűnik a leginkább valószínű magyarázatnak, és vannak is olyan kísérleti eredmények, melyek némileg alátámasztják ezt a hipotézist. Kimutatták, hogy a homoszexuális férfiak anyai ágú női rokonainak átlagos utódszáma nagyobb, mint az adott mintára jellemző átlagos utódszám. (Azaz olyan gének lehetnek a háttérben, melyek a női vonalon növelik a rátermettséget, míg a férfi vonalon csökkentik azt.) Ismereteim szerint hasonló elemzést homoszexuális nőkre és férfigú rokonokra nem végeztek, de ez némileg érthető, hiszen a férfiak valódi utódszámát nem lehet pontosan tudni (hiszen csak az anya a biztos).

Tehát, az imént vázolt hipotézisek más és a más mechanizmusokon alapulnak, azonban bármelyik hipotézis is a helytálló, minden esetben meg kellene találni azokat

a géneváltásokat, melyek a homoszexuális érdeklődést növelik, ráadásul ezen hipotézisek alapján az egyetű ikreknél magas arányban kéne előforduljon, hogy az ikerpár mind a két tagja homoszexuális érdeklődésű (hiszen azonos környezetben nőnek

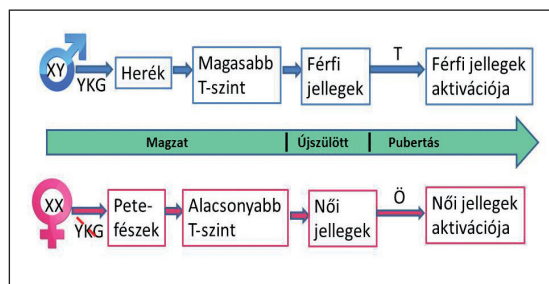
ti fejlődés 15-től 19-ig tartó heteit), ezért a különböző fejlődési utak valószínűleg úgy jönnek létre, hogy a hímnemű (XY-szexkromoszóma pár) és a nőnemű (XX) magzatban más és más folyamatokat indít el ugyanaz a hormon. Ez pedig úgy lehetséges, hogy az egyedfejlődés ezen része epigenetikus szabályozás alatt áll.

Itt most rövid kitérőt kell tegyünk, mert fontos, hogy az epigenetikus szabályozásról és annak öröklődéséről pontosabb képet alakítsunk ki. Amikor a megtermékenyített petesejt osztódni kezd, kezdetben minden sejt teljesen azonos, ám a sejtek idővel egyre jobban kezdenek különbözni, fokozatosan megjelennek a különböző szövetek és szervek. Az embrió formája is fokozatosan változik, és úgy a 3. hónap végére, az embrió már egy emberi élőlény „kicsinyített mása”. Ilyenkor már a nemi szervek is elkülönülnek. Az egyedfejlődés e hihetetlenül összetett folyamatát a testi sejtek géneinek időbeli és térbeli aktivitásának szabályozása irányítja. Hiszen (némi egyszerűsítéssel élve) az összes testi sejtünk azonos géneket hordoz, ezek csupán abban különböznek, hogy ebből a készletből mely gének és mikor aktiválódnak. A gének ki- és bekapcsolásának szabályozása az epigenetika (azaz a gének fölötti folyamatok). Ma már számos epigenetikus szabályozó mechanizmust ismerünk, azonban a részletek ismeretére most nincs szükségünk, csupán a legismertebb és talán a legfontosabb mechanizmusról, a DNS-metilációról ejtek néhány szót. Ha a DNS-szálon egy citozin (C) bázis mellett egy guanin (G) bázis van, akkor a citozinra könnyen tud egy metilcsoport kötődni. Általában ez semmi változást nem okoz, a metilcsoport ugyanúgy viselkedik a kettős DNS-szálon, mint a citozin, kivéve, ha egy CG bázisokban gazdag régió metilációja magas fokú. Ekkor a DNS-szál átíródása mRNS-sé jelentősen gátlódik, tehát a régióban kódolt gének alig vagy egyáltalán nem íródnak át fehérjékké. Igazolt, hogy az élőlények jelentős hányadában éppen ez a DNS-metilációs mintázat az, ami meghatározza, hogy melyik gén milyen haté-

konyan íródjon át, azaz genetikai szabályozóként működik. A legizgalmasabb az egészben, hogy ezen metilációs mintázatok egy része öröklődik, továbbá a környezeti hatások, például a stressz vagy a táplálkozás is befolyásolja a DNS-metilációt. A metilációs mintázatok és más fel nem sorolt epigenetikus szabályozókat ezen túl együttesen epi-jeleknek fogjuk nevezni, a szabályozó pontos megnevezése nélkül.

Mivel, ahogy az imént megemlítettem, a magzati tesztoszteronszint alig elkülöníthető a két nemből, így sokkal valószínűbb, hogy a tesztoszteron csak egy általános jel, amire a fiúmagzat máshogy reagál, mint a leánymagzat. (Számos, itt fel nem sorolt tény megerősíti ezt az elképzelést). Egérkísérletekben kimutatták, hogy a szexkromoszómán lévő öröklődő epi-jelek több tucatnyi további gén működését befolyásolják a magzati korban. Ezek alapján elég valószínűnek látszik, hogy a szexkromoszómán lévő epi-jelek kulcsfontosságúak abban, hogy a fiú- és a leánymagzatok máshogy reagáljanak a tesztoszteronra. Tehát sokkal valószínűbb, hogy a nemi jelek kialakulása epigenetikusan is szabályozott, ahogy azt a 3. ábra vázlatosan érzékelteti.

Eddig a nemi jelekről beszéltünk, ami valójában három nagy csoportot foglal magába: a nemi szerveket, a szexuális érdeklődés irányát, azaz, hogy az adott személy az ellenkező neműekhez vonzódik kizárólagosan (heteroszexuális) vagy sem (homoszexuális a definíciónk alapján), és a szexuális identitást, azaz, hogy komfortosan éri-e magát a saját biológiai nemében vagy sem. Míg az első csoportban a nemi szer-



**2. ábra. A férfi és női nemi jelek kialakulása a klasszikus szemlélet szerint. Ennek alapján az Y-kromoszómához kötődő gének (YKG) hatására alakulnak ki a herék, illetve azok hiányában a petefészek. A herék jelenlétében a magzati tesztoszteronszint (T) magasabb lesz, mint a petefészek esetén, így fejlődnek ki az újszülöttnél az elsődleges nemi szervek. A pubertás ideje alatt az egyed nemétől függően a tesztoszteron- vagy az ösztrogén- (Ö) szint hirtelen növekedni kezd, és ezek aktiválják a férfi, illetve a női jeleket (Rice és mtsai. 2013. nyomán).**

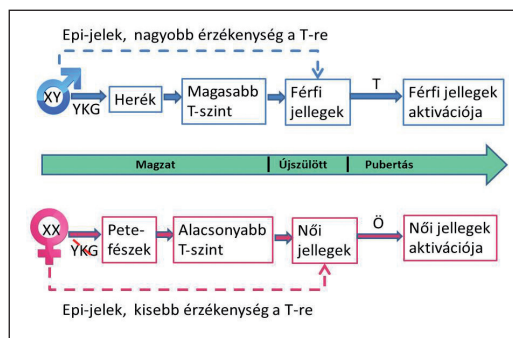
fel és genetikailag azonosak). De, ahogy ezt korábban már említettem, nem ezt tapasztaljuk. Az ikerkísérleteket megismételték úgy is, hogy – teljes géntérképeket készítve a kísérleti alanyokról – keresték a „homoszexualitás géneit”, de eredménytelenül.

**Epigenetikus öröklődés és szexuális egyedfejlődés**

Jelen tudásunk alapján tehát elvethetjük a genetikai alapú öröklődést. Ám valószínűleg közelebb kerülünk a magyarázathoz, ha megvizsgáljuk, hogy hogyan lesz a megtermékenyített petesejtből egy fiú vagy leány újszülött. Mikor fejlődnek ki az elsődleges nemi szervek, mikor és hogyan alakul ki a szexuális identitás, érdeklődés? Milyen irányítás alatt állnak ezek a folyamatok?

A klasszikus felfogás szerint a nemi androgén hormonszint, a tesztoszteron irányítja ezt a komplex egyedfejlődési folyamatot. A fiúmagzatban (valószínűleg) az Y-kromoszómában lévő gének aktivációja miatt magasabb a tesztoszteronszint, ami más pályára viszi a fejlődést, mint a leánymagzatban, ahol nincs Y-kromoszóma (2. ábra). Az utóbbi évek vizsgálataiban azonban egyértelművé tették, hogy a magzati tesztoszteronszint alig különbözik a fiú- és a leánymagzatban (kivéve a magza-

testi sejtek géneinek időbeli és térbeli aktivitásának szabályozása irányítja. Hiszen (némi egyszerűsítéssel élve) az összes testi sejtünk azonos géneket hordoz, ezek csupán abban különböznek, hogy ebből a készletből mely gének és mikor aktiválódnak. A gének ki- és bekapcsolásának szabályozása az epigenetika (azaz a gének fölötti folyamatok). Ma már számos epigenetikus szabályozó mechanizmust ismerünk, azonban a részletek ismeretére most nincs szükségünk, csupán a legismertebb és talán a legfontosabb mechanizmusról, a DNS-metilációról ejtek néhány szót. Ha a DNS-szálon egy citozin (C) bázis mellett egy guanin (G) bázis van, akkor a citozinra könnyen tud egy metilcsoport kötődni. Általában ez semmi változást nem okoz, a metilcsoport ugyanúgy viselkedik a kettős DNS-szálon, mint a citozin, kivéve, ha egy CG bázisokban gazdag régió metilációja magas fokú. Ekkor a DNS-szál átíródása mRNS-sé jelentősen gátlódik, tehát a régióban kódolt gének alig vagy egyáltalán nem íródnak át fehérjékké. Igazolt, hogy az élőlények jelentős hányadában éppen ez a DNS-metilációs mintázat az, ami meghatározza, hogy melyik gén milyen haté-



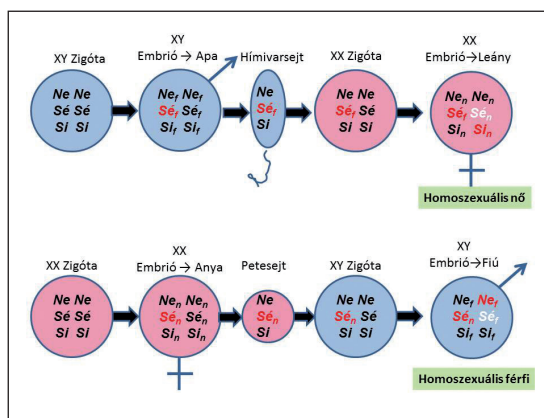
**3. ábra. A férfi és női nemi jelek kialakulása az epi-jelek segítségével. A klasszikus elképzelés módosításaként a szexkromoszómán lévő epi-jelek a magzat nemétől függően növelik vagy csökkentik a tesztoszteronérzékenységet (Rice és mtsai. 2013. nyomán)**

vek megléte és működése a meghatározó, a másik két csoportban sajátos agyi funkciókról van szó. Ennek alapján valószínűleg a szexuális jelekhez kapcsolható epi-jelek is három csoportra oszthatók. Vannak



olyanok, melyek a nemi szervek kifejlődését szabályozzák (Ne), olyanok, melyek a szexuális érdeklődés kialakításában játszanak szerepet (Sé), és olyanok, melyek a szexuális identitáshoz járulnak hozzá (Si). Köztudott, hogy a férfi és a női agy anatómiailag és működésében is különbözik. Hasonló anatómiai és működésbeli különbséget lehet kimutatni a hetero- és a homoszexuális emberek agya között is. A homoszexuális férfiak agya nagyon hasonlít a heteroszexuális nők agyára és fordítva. A hipotalamusz a köztiagy olyan néhány cm<sup>3</sup>-es régiója, melynek számos agyi érzelmi funkcióhoz, ezen belül a szexuális viselkedéshez is köze van. Néhány éve *Ivanka Savic* és munkatársai (stockholmi Karolinska Intézet) kimutatták, hogy a heteroszexuális nők és a homoszexuális férfiak hipotalamuszában hasonló aktivitási mintázatok keletkeznek férfi feromonok (progeszteronszármazék) szaglása közben, míg a heteroszexuális férfiak és a homoszexuális nők hipotalamusza alig reagál ezekre az ingerekre. Ugyanez a kutatócsoport később kimutatta azt is, hogy a jobb és bal agyfélteke aszimmetriájának jellegzetességei, illetve az amigdala kapcsolati mintázata a homoszexuális férfiakban és nőkben az ellenkező nemből tipikus mintázatra hasonlítanak. Fontos megjegyezni, hogy a nemekre jellemző agyi különbségek nem kizárólag a születés vagy a serdülőkort után alakulnak ki, hanem már a korai magzati korban is megfigyelhetők, s fokozatosan lesznek egyre határozottabbak. *Kizárt tehát, hogy csupán a születés utáni környezeti, nevelési hatások alakítják ki a jellegzetes férfi és női agyat!*

Az imént elmondott fejlődés- és neurobiológiai ismeretekre támaszkodva *William R. Rice* és munkatársai (2012) nemrég felvetették, hogy a homoszexualitás elsősorban a szexuális egyedfejlődés epigenetikai szabályozásának a következménye. Alap gondolatuk az, hogy elsősorban azok az öröklődő epigenetikai jelek (transzgenerációs epi-jelek) felelősek a homoszexuális érdeklődés kialakulásáért, melyek az egyik nemből fokozzák az ellenkező nemű egyedekre irányuló szexuális érdeklődés egy irányba terelését, a másikban pedig éppen gátolják azt. Elméletük alapján, ha például egy fiú (lány) utódban az átlagosnál erősebben ható Sé epi-jelek



**4. ábra. A homoszexualitás epigenetikai modellje. A megtermékenyített petesejt (zigóta) mind az apától, mind az anyától hoz öröklött epi-jeleket, melyek a nemi szervek kifejlődéséért (Ne), a szexuális érdeklődés (Sé) és a szexuális identitás (Si) kialakításáért felelősek. Az embrionális szakaszban az embrió nemétől függően férfira (f) vagy nőre (n) jellemző epi-jelmintázatok alakulnak ki. Vannak ezek között az átlagosnál erősebb nemi meghatározottságot jelentő epi-jelek (piros) és átlagosnál gyengébbek (fehér). Az erősebb hatású nemre jellemző Sé-jelek esetenként az ivarsejtekbe jutnak, s ha onnan egy olyan ellenkező nemű utódba kerülnek, melynek a másik szülőltől hozott hasonló epi-jelei gyengék, akkor az utód nagy eséllyel homoszexuális érdeklődésű lesz (Rice és mtsai 2013. nyomán)**

átterülnek az ivarsejtekbe és ott lány (fiú) utódba kerülnek, és ebben a lány (fiú) utódban az anyai (apai) oldalról érkező Sé epi-jelek az átlagosnál gyengébbek, akkor nem tudják ellensúlyozni a hím- (nő-) nemű utódra jellemző szabályozást. Ezen leány- (fiú-) utódok lesznek nagy eséllyel homoszexuális érdeklődésű felnőttek. A 4. ábra ezt a mechanizmust mutatja be részletesebben.

Kulcskérdés azonban, hogy ilyen öröklődő epi-jelek el tudnak-e terjedni a populációban, azaz evolúciójuk elképzelhető-e? Tegyük fel tehát, hogy újonnan megjelenik egy epi-jelel, mely növeli a rátermettséget a nőnemű utódban például azzal, hogy segítségével a szexuális fejlődésének egy irányba terelése (kanalizációja) pontosabb lesz. Tegyük fel, hogy ez az epi-jelel bizonyos valószínűséggel a következő generációba is átjut (azaz nem törlődik az ivarsejtekben). Ekkor, feltevésünk szerint, az ilyen epi-jelel hordozó nő ellenkező nemű utódainak szexuális kanalizációja gyengébb lesz, ami esetenként a szexuális vonzódásban olyan változást okozhat, mely homoszexuális orientációhoz vezet. Könnyű megmutatni, hogy ez az új epi-jelel sikeresen elterjed a populációban, ha a nőnemű utódban okozott átlagos rátermetség növekedés (b) és ezen nők hím nemű utódaiban okozott rátermetség csökkenés (c) aránya nagyobb, mint annak a valószínűsége, hogy ez a mu-

táns epi-jelel átjut a következő generációba (q) (pontosabban  $b/c > kq$ , ahol  $k=1/2$  vagy  $1/4$ , az öröklés menet részleteitől függően, tehát a feltétel még könnyebben megvalósul). Azaz, ha ez az epi-jelel nem terjed nagy eséllyel a következő generációba (az ivarsejtekbe jutva általában törlődik), és a káros hatása nem sokkal nagyobb, mint az előnyös, akkor az evolúció támogatja a terjedését a populációban. (Természetesen ugyanez az érvelés igaz az ellenkező nem esetén is.) *Tehát nem valamilyen genetikai mutáció miatti hibás működés okozza a homoszexuális orientációt, hanem – az adott génszabályozási módszer mellett – ez egy összességében előnyös megoldás következménye.*

Nézzük meg ezek után, hogy ez a hipotézis összeegyeztethető-e a tapasztalatokkal! Ahogy korábban említettem, az ikerkísérletek viszonylag alacsonynak találták a homoszexualitás genetikai meghatározottságát. A tisztán genetikai alapon nyugvó hipotéziseknek ellentmond ez az eredmény, azonban ha a homoszexualitás elsősorban az epi-jelek által szabályozott, akkor érthetővé válik. Állatkísérletekből tudjuk, hogy még az egypetűjű ikrek epi-jelei sem azonosak, és a magzati egyedfejlődés során fokozatosan egyre jobban különböznek, részben ez az oka annak, hogy az egypetűjű ikrek sem külsőre, sem viselkedésben nem teljesen azonosak. A hipotézis alapján az is érthető, hogy nem találtak géneket, melyek hozzárendelhetők a homoszexuális érdeklődéshez, hiszen nem a gének, hanem a sokkal gyengébben öröklődő szabályozó mintázatok a felelősek ezért. Az elképzelés összhangban van azzal a megfigyeléssel is, hogy a homoszexualitás egyes családokban gyakrabban jelenik meg, másokban ritkább. A nagyobb gyakoriság bizonyos extra erős szexuális érdeklődést meghatározó epi-jelek jelenlétével hozható összefüggésbe. Rice és munkatársai (2013) célzott őssejt-kísérleteket is javasoltak gondolatuk tesztelésre, s várhatóan a közeljövőben ezek eredményeket is hozhatnak.

#### A homoszexualitás okai az állatvilágban, a Laysan albatrosz és más esetek

Ahogy a bevezetésben is szóba került már, az Oahu szigeten élő Laysan albatrosz-populációban (5. ábra) a nőtények 31%-a azonos nemű társal alkot párt, és együtt nevelik föl valamelyik tojó fiókáját. Az apa nyilván a kolónia egyik (nem egészen hűségese) hímje, aki természetesen egy másik tojóval állt párba. A szigeten csak úgy 20 éve kezdtek el újra költetni ezek a madarak, és – valószínűleg a tojók nagyobb

vándorlási hajlama és képessége miatt – a betelepülők 2/3-a tojó. Ilyen esetben nyilván nem jut minden tojónak hím pár, miközben egy fióka felneveléséhez mind a két szülőre szükség van. Tehát a hímek nélkül maradt tojók egyetlen lehetősége, hogy párban próbálják meg felnevelni egyikük fiókját. *Young és VanderWert (2013)* nemrég közölt elemzése alapján, habár az azonos nemű párok szaporodási sikere kisebb, mint a hím-nőstény pároké, a sikeresen felnevelt utód hozzásegíti ezen nőstényeket, hogy a következő évben valamelyik hím párnak válassza őket. Ezzel elmentében, a sikertelen tojópárok tagjai nem tudnak „hímet fogni” maguknak. Azaz, ebben a különleges helyzetben a hímek választhatnak a tojók közül, és a sikeres tojó-tojó párok jelzik a hímeknek, hogy közülük érdemes választani. Azok a tojók, akik meg sem próbálnak együtt felnevelni egy fiókat, eleve esélytelenül indulnak a hímekért folytatott versengésben.

Sok társas emlős esetében felmerül, hogy a homoszexuális kapcsolatoknak közösséget összetartó, agressziócsökkentő szerepe is van. A törpecsimpánzoknál (*Pan paniscus*), elsősorban a nőstények között, az azonos neműek közötti szexuális jellegű kapcsolatok feszültségcsökkentő, békítő szerepe egyértelműen kimutatható. A palackorrú delfin (*Tursiops truncatus*) hímek között nagyon gyakori homoszexuális kapcsolatoknak is elsősorban a kisebb csoportok közötti szövetségek fenntartásában lehet fontos szerepe, de egyes megfigyelések szerint ez a fiatalabb hímek számára egyben szexuális tapasztalatszerzést is jelent. Ha most ránézünk az *I. ábrára*, nem tűnik erőltetettnek az a gondolat, hogy az embernél a nők viszonylag nagyobb arányú gyenge homoerotikus vonzalma valami hasonló társas csillapító szerepet jelez.

S végül álljon itt egy példa a rovarvilágból. A kukorica lisztbogár (*Tribolium castaneum*) hímjei gyakran párosodnak egymással. Sokan valószínűsítik, hogy ennek hatására a másik hímre juttatott spermium átjut a hordozó által később megtermékenyített nőstényre is, tehát részt vesz a megtermékenyítésben. A homoszexuális kapcsolatban a másik felet, mint spermahordozót használja fel a domináns fél.

Tanulságos, hogy a felsorolt esetekben egymástól alapvetően különböző okok miatt alakulnak ki homoszexuális kapcsolatok. A közös vonás bennük csupán annyi, hogy ez a viselkedésmintázat közvetve növeli a szaporodási sikert.

## Összefoglalás

Az evolúció barkácsol, és a lehetőségek közül kell a legjobbat megtalálnia. Ha egy úton elindul, akkor annak mentén haladva keresi a legjobb megoldásokat, újratervezésre nincs lehetőség. Láttuk, hogy az állatvilágban a homoszexualitás igen elterjedt jelenség, s azt is érzékeltettük,



5. ábra. Két Laysan albatrosz tojó párkapcsolatban (*Ruff Gábor felvétele*)

hogy ennek nagyon sokféle oka lehet. Az emberi homoszexualitás evolúciós hátterét vizsgálva megemlítettük a legfontosabb, adatelemzésekből adódó eredményeket, valamint vázoltunk néhány jelentősebb magyarázó hipotézist. Ezek közül a legígéretesebbnek Rice és munkatársai epigenetikus modellje tűnik, mely magyarázatot ad arra, hogy miért olyan alacsony az egyetjű ikrek ilyen jellegű azonossága, miért nem találták a homoszexuális viselkedés génjeit, s közben miért gyakoribb egyes családokban, mint másokban. A hipotézis nagyon meggyőző, ennek ellenére az állatvilágból hozott példák mögött lévő szelekciós okok és mechanizmusok sokszínűsége alapján nem zárható ki, hogy más hatásoknak, például a rokonszelekciónak vagy a társas feszültségek oldásának is van szerepe az emberi homoszexualitás fenntartásában.

## Utószó

Az élővilág egyik alaptulajdonsága a sokféleség. Több millió, formában, élőhelyi igényekben, életmódban, a működés metabolikus részleteiben is különböző faj van a Földön. Az élőlények egy fajon belül is sokfélék, ráadásul e sokféleség háttere is gyakran sokféle okokra vezethető vissza. Ahogy vannak nagyon magas vagy nagyon alacsony emberek, különleges zenei érzékel rendelkezők és gyenge ritmusérzők, úgy vannak olyanok is, akiknek a szexuális orientációjuk különbözik a többségtől. Kissé kilépve a természettudós szerepből, számomra egyértelműen látszik, hogy

a modern nyugati társadalmak vonzereje és embersége éppen abban rejlik, hogy a többséghez tartozók igyekeznek megérteni és elfogadni az emberi sokféleséget, s az ilyen társadalmak a csoport összetartozását nem a biológiai és szociológiai okok miatt kisebbségben lévők kirekesztésével, megbélyegzésével, hanem ellenkezőleg, azok elfogadásával, támogatásával valósítják meg. Bízom benne, hogy írásom nem csupán a jelenség megértését, hanem ennek hatására az elfogadást is segíti.

A cikkhez kapcsolódó kutatásokat az OTKA 100299-es pályázata támogatta.

## Irodalom

- Baley, J. M., Dunne, M. P., Martin, N. G. (2000) Genetic and environmental influences on sexual orientation and its correlates in an Australian twin sample. *J. Person. Soc. Psych.* 78: 524–536
- Baley, N. W and Zuk, M. (2009) Same-sex sexual behavior and evolution. *Trends in Evol. and Ecol.* 24: 439–446
- Blanchard R (1997). Birth order and sibling sex ratio in homosexual versus heterosexual males and females. *Annu. Rev. Sex. Res.* 8: 27–67.
- Ngun, T. C., Ghahramani N., Sánchez F. J., Bocklandt S., Vilain, E. (2011) The genetics of sex differences in brain and behavior. *Frontiers in Neuroendocrinology* 32: 227–246
- Rahman, Q. and Hull, M. S. (2005) An empirical test of the kin selection hypothesis for the maly homosexuality. *Arch. Sex. Behav.* 31: 461–467
- Rice, W. R., Friberg, U. and Gavrilets, S. (2012) Homosexuality as a consequence of epigenetically canalized sexual development. *Q. Rev. Biol.* 87: 343–368
- Rice, W. R., Friberg, U. and Gavrilets, S. (2013) Homosexuality via canalized sexual development: A testing protocol for a new epigenetic model. *Bioessays* 35: 764–770
- Swaab, D. F. (2008) Sexual orientation and its basis in brain structure and function. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 105: 9403–9408
- Savic, I. Lindström, P. (2008) PET and MRI show differences in cerebral asymmetry and functional connectivity in homo- and heterosexual subjects. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 105: 9403–9408
- Wijchers, P. J. and Festenstein, R. (2011) Epigenetic regulation of autosomal gene expression by sex chromosomes. *Trend in Genetics* 27: 132–140
- Young, L. C. and VanderWerf, E. A. (2013) Adaptive value of same-sex pairing in Laysan albatross. *Proc. Roy. Soc. B.* 281: 20132473