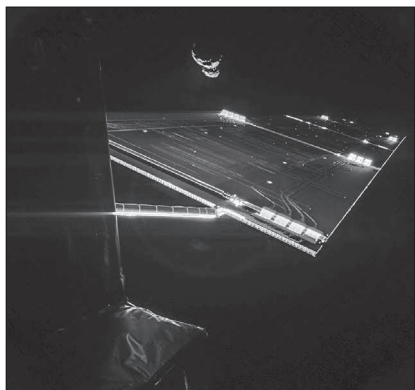


ományban is szokatlanul sötét, a felszínén egyelőre nem tudták vízjég nyomait kimutatni. A kísérletet végző kutatók mindkét eredményt meglepőnek minősítették. Az üstökös kómájában, azaz a magot körülvevő gázburkokban azonban már kimutatták a hidrogén és az oxigén jelenlétét. A Rosetta további tudományos eredményeiről szeptember második hetében az Európai Bolygókutatói 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 belelóg a Rosetta egyik, 14 méter hosszú napelemtáblája. Valójában a kép montázs, mert az üstökös és a szerkezeti részek lefényképezéséhez 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). Vanak 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 viselkedés-mintázatnak 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 tüzetezesebben megvizsgálni, s a jelenlegi tudásunk alapján igeekszünk válaszokat is adni rájuk.

A homoszexualitás genetikai háttere

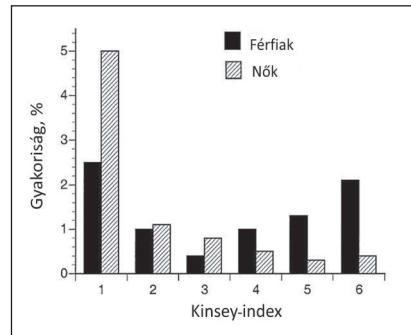
Nyilván a legizgalmasabb kérdés az, hogy van-e a homoszexualitásnak genetikai háttere, azaz vannak-e olyan öröklődő faktorok, melyek hordozói nagyobb eséllyel lesznek homoszexuálisok? Ennek eldöntésére az egy háztartásban felnevelkedett egyetétjű és az azonos nemű kétpetjű ikerpárok szexuális érdeklődését kell összehasonlítani. (Feltehető, hogy a vizsgált tulajdonság szempontjából hasonló a környezeti háttér az egyetétjű és a kétpetjű ikreknél.) Az egyetétjű ikrek genetikailag azonosak, míg a kétpetjű ikrek átlagosan 50%-ban hordoznak azonos géneket, így ha a homoszexualitásnak nincs genetikai háttere, akkor az egyetétjű és a kétpetjű ikerpárok homoszexuális érdeklődése hasonló arányokat mutat, míg ha ez elsősorban genetikailag meghatározott viselkedés, akkor a viselkedésbeli korreláció nagyon magas lesz az egyetétjűeknél (vagy mind a két testvér heteroszexuális vagy mind a kettő homoszexuális), és ennek az értéknek úgy a felében lesz a kétpetjű 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.

A homoszexuálisok a segítők?

A homoszexualitás előnyét firtatók kérdésére az evolúcióbíológusok klasszikus válasza: rokonszelektációs okok miatt nem szelektálódnak ki teljesen a homoszexualitást elősegítő gének, hanem egy meghatározott arányban jelen vannak a populációban. Tegyük fel, hogy egy homoszexuális egyed segítőtestvérét utódaik felnevelésében. Mivel a testvérek génjei 50%-os eséllyel azonosak, annak esélye is 50%, hogy a segítőtestvér a homoszexualitásra hajlamosító gént változatot hordozza. Tehát, ha a segítőttestvér szaporodási sikere kétszer annyival nő, mint amennyivel a segítőttestvér szaporodási sikere csökken, akkor az ilyen gének terjedni fognak a populációban. Ahogy nő az ilyen „segítőttestvér” gének aránya, úgy csökken azok előnye, hiszen az optimálisnál több lesz a segítőttestvér és kevesebb az aktívabban szaporodó egyed. Ezért végül egyensúlyi arány fog beállni a segítőttestvérben lévő homoszexuális és a segítőttestvér 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 élelmiszerforrások 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



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)

magyarázza, hogy a megfigyelt 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 szelektáció 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 hatása, ha egyszerre több, esetenként ellentétes hatást fejt ki az egyedre. Például egy gént változat (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 alapfogolata, hogy egy *A* gént változat 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 kiszélektálódni 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 gént változat 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 gént változatok, 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 férfiágú rokonaikra 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 azo-

kat a géneváltoztatokat, melyek a homosze-
xuális érdeklődést növelik, ráadásul ezen
hipotézisek alapján az egypetéjű ikreknél
magas arányban kéne előforduljon, hogy
az ikerpár mind a két tagja homosze-
xuális érdeklődésű (mivel azonos környezet-

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 lehet-
séges, hogy az egyedfejlődés
ezen része epigenetikus sza-
bályozás alatt áll.

Itt most rövid kitérőt kell
tegyünk, mert fontos, hogy
az epigenetikus szabályozás-
ról és annak öröklődéséről
pontosabb képet alakítsunk
ki. Amikor a megterméke-
nyített petesejt osztódni kezd,
kezdetben minden sejt tel-
jesen azonos, ám a sejtek
idővel egyre jobban kezde-
nek különbözni, fokozato-
san megjelennek a különbö-
ző szövetek és szervezede-
mények, szervek. Az emb-
rió formája is fokozatosan
változik, és úgy a 3. hónap
végére, az embrió már egy
emberi élőlény „kicsinyített
mása”. Ilyenkor már a ne-
mi szervek is elkülönülnek.
Az egyedfejlődés e hihet-
lenül összetett folyamatát a

konyan íródjon át, azaz genetikai szabá-
lyozóként működik. A legizgalmasabb az
egészben, hogy ezen metilációs mintáza-
tok egy része öröklődik, továbbá a környe-
zeti hatások, például a stressz vagy a táp-
lálkozás is befolyásolja a DNS-metilációt.
A metilációs mintázatokat és más fel nem
sorolt epigenetikai szabályozókat ezen túl
együttesen epi-jeleknek fogjuk nevezni, a
szabályozó pontos megnevezése nélkül.

Mivel, ahogy az imént megemlítettem,
a magzati tesztoszteronszint alig elkülö-
nítendő a két nemben, így sokkal valószí-
nőbb, hogy a tesztoszteron csak egy álta-
lános jel, amire a fiúmagzat máshogy re-
agál, mint a leánymagzat. (Számos, itt fel
nem sorolt tény megerősíti ezt az elképze-
lést). Egérkísérletekben kimutatták, hogy
a szexkromoszómán lévő öröklődő epi-
jelek több tucatnyi további gén működé-
sét befolyásolják a magzati korban. Ezek
alapján elég valószínűnek látszik, hogy a
szexkromoszómákon lévő epi-jelek kulcs-
fontosságúak abban, hogy a fiú- és a leány-
magzatok máshogy reagáljanak a tesztosz-
teronra. Tehát sokkal valószínűbb, hogy a
nemi jelek kialakulása epigenetikusan
is szabályozott, ahogy azt a 3. ábra vázla-
atosan érzékelteti.

Eddig a nemi jellegekről beszéltünk, ami
valójában három nagy csoportot foglal ma-
gába: a nemi szerveket, a szexuális érdeklő-
dés irányát, azaz, hogy az adott személy
az ellenkező neműekhez vonzódik kizáró-
lagosan (heteroszexuális) vagy sem (homo-
szexuális a definíció alapján), és a szexu-
ális identitást, azaz, hogy komfortosan é-
rzi-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 jelek. 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).

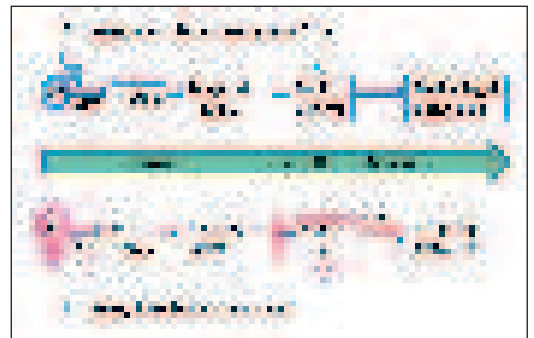
ben nőnek fel és genetikailag azonosak).
De, ahogy ezt korábban már említettem,
nem ezt tapasztaljuk. Az ikerkísérleteket
megismélték úgy is, hogy – teljes gén-
térképeket készítve a kísérleti alanyokról
– keresték a „homoszexualitás géneit”, de
eredménytelenül.

Epigenetikus öröklődés és szexuális egyedfejlődés

Jelen tudásunk alapján tehát elvethetjük a
genetikai alapú öröklődést. Ám valószí-
nűleg közelebb kerülünk a magyarázat-
hoz, ha megvizsgáljuk, hogy hogyan lesz
a megtermékenyített petesejtből egy fiú
vagy leány újszülött. Mikor fejlődnek ki
az elsődleges nemi szervek, mikor és ho-
gyan alakul ki a szexuális identitás, érdeklő-
dés? Milyen irányítás alatt állnak ezek a
folyamatok?

A klasszikus felfogás szerint a nemi
androgén hormonszint, a tesztoszteron irá-
nyítja ezt a komplex egyedfejlődési folya-
matot. A fiúmagzatban (valószínűleg) az
Y-kromoszómában lévő gének aktiváci-
ója miatt magasabb a tesztoszteronszint,
ami más pályára viszi a fejlődést, mint a
leánymagzatban, ahol nincs Y-kromoszó-
ma (2. ábra). Az utóbbi évek vizsgálatai
azonban egyértelművé tették, hogy a mag-
zati tesztoszteronszint alig különbözik a
fiú- és a leánymagzatban (kivéve a magza-

testi sejtek géneinek időbeli és térbeli ak-
tívításának 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 aktivi-
zálódnak. A gének ki- és bekapcsolásá-
nak szabályozása az epigenetika (azaz a
gének fölötti folyamatok). Ma
már számos epigenetikai szabá-
lyozó mechanizmust ismerünk,
azonban a részletek ismereté-
re most nincs szükségünk, csu-
pán a legismertebb és talán a
legfontosabb mechanizmusról,
a DNS-metilációról ejtek né-
hány szót. Ha a DNS-szálon
egy citozin (C) bázis mellett
egy guanin (G) bázis van, ak-
kor a citozinra könnyen tud egy
metilcsoport kötődni. Általában
ez semmi változást nem okoz,
a metilcitozin ugyanúgy visel-
kedik a kettős DNS-szálaban,
mint a citozin, kivéve, ha egy
CG bázisokban gazdag régió
metilációja magas fokú. Ekkor
a DNS-szál átíródása mRNS-sé
jelentősen gátlódik, tehát a ré-
gióban kódolt gének alig vagy egyáltalán
nem íródnak át fehérjékké. Igazolt,
hogy az élőlények jelentős hányadában éppen ez
a DNS-metilációs mintázat az, ami meg-
határozza, hogy melyik gén milyen haté-

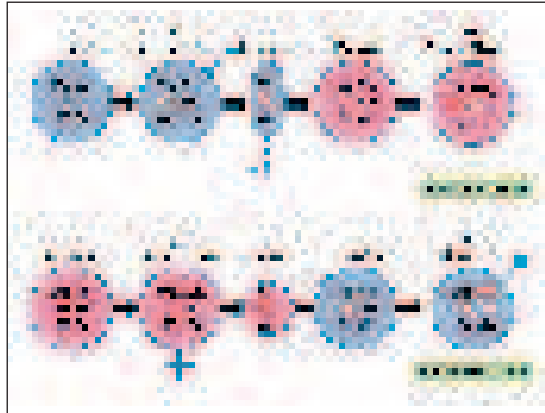


3. ábra. A férfi és női nemi jelek kialakulása az epi-jelek segítségével. A klasszikus elképzelés módosításaként a szexkromoszómákon lévő epi-jelek a magzat nemétől függően növelik vagy csökkentik a tesztoszteronérzékenységet (Rice és mtsai. 2013. nyomán)

vek megléte és működése a meghatározó,
a másik két csoportban sajátos agyi funk-
ciókról van szó. Ennek alapján valószínű-
leg a szexuális jellegekhez 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 cm³-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 (progeszteronszámrazékok) 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 következménye. Alapgondolatuk 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-jelelmintázatok 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 szülőktől hozott hasonló epi-jelei gyengék, akkor az utód nagy eséllyel homoszexuális érdeklődésű lesz (Rice és mtsai. 2013. nyomán)

átkerülnek 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 utódba 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 hímnemű 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-jelekkel van összefüggésben, akkor érthetővé válik. Állatkísérletekből tudjuk, hogy még az egypetéjű ikrek epi-jelei sem azonosak, és a magzati egyedfejlődés során fokozatosan egyre jobban különböznek, részben ez az oka annak, hogy az egypetéjű 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 felelősök 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 tesztelésére, 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 hűséges) himje, aki természetesen egy másik tojóval állt párba. A szigeten csak úgy 20 éve kezdtek el újra költeni 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 ellentétben, 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.

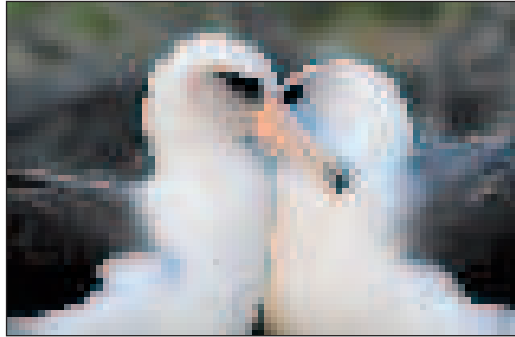
Sok társas emlős esetében felmerül, hogy a homoszexuális kapcsolatoknak közöset az összetartó, agressziócsökkentő szerepe is van. A törpecsimpánzoknál (*Pan paniscus*), elsősorban a nőstények között, az azonos neműek közötti szexuális jellegű kapcsolatok feszültségszökkentő, békítő szerepe egyértelműen 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 tapasztalatszerzés is jelent. Ha most ránézünk az 1. 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 egyetértő 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 alap tulajdonsága 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 ritmusérzékűek, 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 lévőkre kirekesztésével, megbélyegzésével, hanem ellenkezőleg, azok elfogadásával, támogatásával valószínűsítik meg. Bizom 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 male homosexuality. *Arch. Sex. Behav.* 31: 461–467
- Rice, W. R., Friberg, U. and Gavrillets, S. (2012) Homosexuality as a consequence of epigenetically canalized sexual development. *Q. Rev. Biol.* 87: 343–368
- Rice, W. R., Friberg, U. and Gavrillets, 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 VanderWert, E. A. (2013) Adaptive value of same-sex pairing in Laysan albatross. *Proc. Roy. Soc. B.* 281: 20132473