

ZEBRACSIKOK FELTÉTELEZETT HŰTŐ HATÁSÁNAK KÍSÉRLETI CÁFOLATA – 1. rész

Horváth Gábor, Pereszlényi Ádám, Száz Dénes

ELTE Biológiai Fizika Tanszék

Barta András

Estrato Kutató és Fejlesztő Kft., Budapest

Jánosi Imre Miklós

ELTE Komplex Rendszerek Fizikája Tanszék

Gerics Balázs

Állatorvosi Egyetem, Tájanatómiai Intézet, Bécs, Ausztria

Susanne Ákesson

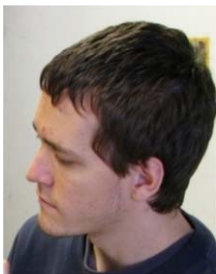
Lundi Egyetem, Biológia Tanszék, Svédország

A zebrák szembeötlő fekete-fehér csíkos mintázatának titokzatos szerepét *Wallace* [1] és *Darwin* [2] óta kutatók élénken vitatják. Mostanáig 18 különböző magyarázatot vetettek fel a zebracsíkok lehetséges funkcióira, amelyek négy fő csoportba sorolhatók [3]:

Hálásak vagyunk *Simon Istvánnak*, hogy a gödi Szálender lovastanyán megengedte a terepkísérleteink elvégzését. Köszönjük a Fővárosi Állat- és Növénykertnek, hogy hőkamerával vizsgálhattuk az ott élő zebrákat. Horváth Gábor kutatásait az NKFIH K-123930 (*Zebracsíkok termofiziológiai vizsgálata: új magyarázat a zebracsíkok szerepére*) pályázat, Száz Dénes kutatómunkáját pedig az Emberi Erőforrások Minisztériuma Új Nemzeti Kiválósági Programjának 17-3. számú pályázata támogatta.



Horváth Gábor fizikus, az MTA doktora, egyetemi tanár, az ELTE Biológiai Fizika Tanszék Környezetoptika Laboratóriumának vezetője. A vizuális környezet optikai sajátosságait és az állatok látását tanulmányozza, továbbá biomechanikai kutatásokat folytat. Számos szakmai díj és kitüntetés tulajdonosa. Évtizedek óta aktív tudományos ismeretterjesztői munkát is folytat előadások és cikkek formájában.



Pereszlényi Ádám az ELTE-n végzett biológus, jelenleg doktorandusz az ELTE Biológiai Fizika Tanszék Környezetoptika Laboratóriumában. Emellett a Magyar Természettudományi Múzeum Madárgyűjteményében segédmuzeológus. A biológiai és biofizikai kutatások mellett állatpreparálással is foglalkozik.



Száz Dénes 2013-ban végzett biofizika mesterszakon az ELTE-n. A Biológiai Fizika Tanszéken 2018-ban doktorált. Kutatásai felölelik a dunavirág kérdéses kivilágított hidaknál történő fénycsapdázódását, a vikingek égpolárizációs navigációját és a poláros fényszennyezést. 2017-től az ELTE szombathelyi Savaria Egyetemi Központjának fényszennyezés-kutatásaiban is részt vesz, az éjjeli fényszennyezés csillagászati és ökológiai vonatkozásaival foglalkozik. OFKD I. helyezést és Ernst Jenő biofizikai pályadíjat is nyert.

1. ragadozók elleni védelem, beleértve az álcázást és a vizuális összezavarás különböző vonatkozásait,
2. társas kölcsönhatások megkönnyítése,
3. vérszívó rovarok (cecelegyek és bögölyök) vizuális vonzásának csökkentése,
4. testhőmérséklet szabályozása.

A 3. funkció helyességét bögölyökre terepkísérletekben igazoltuk [4]. Jelen cikkünkben a 4. hipotézissel foglalkozunk. A 4. feltételezés szerint a zebracsíkok a test hűtését szolgálják, hiszen a felváltva sorakozó, napsütötte fekete és fehér csíkok fölött a hőmérséklet-különbségek által kiváltott örvénylő légáramok hűtő hatást biztosítanak. E hipotézis észszerűnek tűnik, mert a fekete zebracsíkok jobban elnyelik a napfényt és ezért melegebbek, mint a napsugárzást zömében visszaverő és ezért hűvösebb fehér csíkok. Infravörös felvételek szerint a napsütötte fekete csíkok melegebbek, mint a napsütötte fehérek, és e hőmérséklet-különbség fokozódik a léghőmérséklet emelkedésével. Éjjel azonban a hőmérséklet-különbségek fordítottak: a fekete csíkok hűvösebbek, mint a fehérek [3]. *Caro* [3] hőkamerával végzett mérései nem igazolták, hogy napfényben a



Barta András az ELTE-n végzett fizikusként, majd ugyanott szerzett PhD-fokozatot biofizikából a Biológiai Fizika Tanszék Környezetoptika Laboratóriumában. A bio- és környezetoptikával kapcsolatos alapkutatásokon kívül ipari műszerek, elsősorban minőségellenőrző eszközök fejlesztésével foglalkozik az Estrato Kutató és Fejlesztő Kft. vezetőjeként. Számos kutatásfejlesztési pályázat előkészítésében és megvalósításában vett és vesz részt.



Jánosi Imre Miklós fizikus, az MTA doktora, az ELTE Komplex Rendszerek Fizikája Tanszéken egyetemi tanár, a Kármán Környezeti Áramlások Laboratórium egyik alapítója. Érdeklődési területei a geofizikai hidrodinamikával kapcsolatos jelenségek modellezése és elemzése, nemlineáris idősor-analízis, légköri és óceáni adatbankok „bányászata”. Az ELTE Környezettudományi Doktori Iskola vezetője.

zebrák testfelületi hőmérséklete alacsonyabb volna, mint más patásoké (zsiráf, impala, bivaly). Másrészt, *Irondo* és *Rubenstein* lézeres infravörös digitális hőmérővel gyűjtött adatait röviden említik *Larison* és munkatársai [5]. Eszerint a zebrák testfelszíni hőmérséklete napfényben lényegesen alacsonyabb (29,2 °C), mint a hasonló méretű antilopoké (32,5 °C). E mérési adatokat viszont hivatalosan soha nem publikálták. Ne feledjük azonban, hogy a testfelületi hőmérséklet nem feltétlenül arányos a kiterjedt testek maghőmérsékletével [3], pedig a hőszabályozás tekintetében ez utóbbi a legfontosabb paraméter. A maghőmérséklet nem lehet magasabb egy kritikus értéknél, különben az állat túlhevül, ami halálos. *Caro* és munkatársai [6] 7 lófélé, valamint 20 zebraalfaj esetében vetették össze azok csíkozását (illetve annak hiányát) az évi hőmérséklettel, és nem találtak összefüggést köztük. *Larison* és munkatársai [5] Afrika számos részén a léghőmérséklet változékonyságát hasonlították össze *Burchell*-zebrák csíkozottságával. Ők pozitív korrelációt találtak az izotermia és a leghidegebb negyedév középhőmérséklete, valamint a csíkozás intenzitása között. Jelen tanulmányunkban ezt az ellentmondást kívánjuk feloldani.

A hőszabályozási hipotézis szerint felszálló légáramok alakulnak ki a melegebb fekete zebracsíkok fölött, amelyeket a szomszédos hidegebb fehér csíkok

periodikus fel- és leszálló légáramlatok a fekete és fehér zebracsíkok fölött



1. ábra. A napsütötte zebracsíkoknál feltételezett, hűtő hatású légörvények. A zebracsíkok hőszabályozási szerepéről szóló hipotézis szerint napsütésben a fekete csíkok melegebbek a fehéréknél, ezért szélcsendben az előbbieknél felszálló, míg az utóbbiak fölött leszálló légáramlatok lehetnek. Ilyen fel- és leszálló konvektív légáramokból álló periodikus légörvények azonban a zebratestnek csak a közel vízszintes felületrészei fölött keletkezhetnek. A ferde és függőleges felületrészeknél a légáramlatok inkább kaotikusak, turbulensek lehetnek.

fölötti hűvösebb levegő pótol (1. ábra). Ily módon a váltakozó fekete-fehér csíkok periodikus konvektív légörvények kialakulásához vezetnek. A napsütésben ezen örvények a zebra testét elvileg oly módon hűthetik, hogy meleg levegőt szállítanak el a fekete csíkok fölül és/vagy felgyorsítják a verejték elpárolgását.

E hipotézissel legalább három probléma van.

1. Mindaddig nem dokumentálták a napsütötte zebracsíkok fölött előrejelzett konvektív légörvényeket. Ilyen örvények leginkább a zebrák csíkos testfelületének csaknem vízszintes részein alakulhatnának ki. A zebra test erősen ferde vagy függőleges részei, például a horpaszok mentén a fölmelegedő turbulens légáramlás a testfelülettel párhuzamosan jöhet létre, ami megakadályozza a periodikus örvények kialakulását (1. ábra). Így napsütésben és forróságban csak a test majdnem vízszintes csíkos háti zónájának lehetne hűtő hatása. Erős fényelnyelésük miatt a fekete csíkok egyértelműen hátrányosak a ferde és függőleges testtájakon (például nyakon, lábakon). Amennyiben a zebrák csíkozottsága a hűtést szolgálná, akkor a csíkoknak csak a háton lenne értelmük. Márpedig a zebrák testfelszínének zöme csíkos.

2. A vízszintes csíkos felületek fölött feltételezett konvektív légörvények stabilitása sem ismert. Ezen örvényeket könnyedén elfújhatják a gyenge helyi szellők is, amelyek napsütésben gyakorlatilag folyamatosan tapasztalhatók. Továbbá, ezen örvényeket a zebrák mozgása is megszakíthatja [3].

3. Nem ismeretes az sem, hogy a zebrák csíkos vízszintes testfelületei fölött napsütésben esetleg kialakuló légörvények erősebben hűtenek-e, mint egy egyszínű testfelület izzadása és fölötte a nem-periodikus légáramlások.



Gerics Balázs állatorvosi diplomáját Berlinben, a Humboldt Egyetemen szerezte 1988-ban. 30 évig Budapesten, jelenleg Bécsben oktatja házi emlősök funkcionális és alkalmazott anatómiáját. Korábban az idegrendszer funkcionális morfológiai változásait kutatta. Az utóbbi években a lovak patkolásához kapcsolódó témákkal foglalkozik.



Susanne Åkesson a svéd Lundi Egyetem Biológia Tanszékének biológus-ökológus professzora és a Lundi Centre for Animal Movement Research igazgatója. Nemzetközi tudományos expedíciók szervezője-résztvevője, amelyeken főleg a madarak orientációját vizsgálja. Az állatok (különösen a rovarok és madarak) navigációjának, mozgásának és ökológiájának neves kutatója. Számos szakcikk és több szakkönyv szerzője. Rangos szakmai kitüntetések – többek között a fizikai Ig Nobel-díj – birtokosa.



2. ábra. A terepkísérletek során használt, állatbőrökkel bevont, vízzel töltött 6 fémhordó elrendezése, közöttük az automatikus meteorológiai állomással. A hordókat a füves talaj fölött 10 cm magasan fa raklapok tartották. A hordók palástján lévő lyukat egy kör alakú fém kupak fedte. A kupak függőleges fém rúdja végén volt egy automatikus hőmérő, ami a víz maghőmérsékletét mérte a hordó közepén.

E súlyos nyitott kérdések miatt a zebracsíkok hűtő hatásának hipotézise fizikailag és fiziológiailag is vitatható. A fekete és fehér zebracsíkok a napfényt nagyon eltérően verik vissza. Mindezülig kérdéses volt, hogy egyáltalán van-e ennek hűtő hatása, és ha igen, akkor annak mi a mechanizmusa, és végeredményben valóban csökkenti-e a testhőmérsékletet.

Cikkünk célja a zebracsíkok hűtő hatásának kísérleti vizsgálata. Négyhónapos terepkísérletben termográfias és termodinamikai méréseket végeztünk különböző modelleken (2. ábra). Ily módon meggyőzőbb érveket szolgáltatunk a zebracsíkok hűtő hatása ellen [7], mint a korábbi kutatások, amelyek egyszerű megfigyelések [3] vagy összehasonlítások [5, 6] voltak. Kísérletünk az állatmodellek maghőmérsékletének mérésén alapult, amit hőkamerás felvételekkel egészítettünk ki [7], és nem csak zebrák testfelületi hőmérsékletét regisztrálta, mint azt korábban tették [3].

Kísérleti módszerek

Terepkísérletek állatbőrökkel bevont hordókkal

Az 1. terepkísérletet 2017. június 10. és 30. között végeztük egy gödi lovastanyán (47° 43' N, 19° 09' E, Észak-Magyarország), majd július 6. és 27. között (2. kísérlet), augusztus 6. és 26. között (3. kísérlet), valamint augusztus 30. és szeptember 19. között (4. kísérlet) megismételtük. Hat fémhordót (átmérő = 30 cm, hosszúság = 60 cm, falvastagság = 1 mm) csapvízzel töltöttünk fel, és két párhuzamos sorban, egymástól 2 m távolságban a füves talajra helyeztük őket (2. ábra). Derült időben napkelte után napnyugtáig közvetlen napfény és égfény érte őket úgy, hogy sosem voltak árnyékban. A hordók vízszintes hossz tengelye a földrajzi kelet–nyugat iránnyal volt párhuzamos (2. ábra). Így derült napokon a hordók hengerpalástját túlnyomórészt közvetlen napfény világította meg, ami – a nyári időszámításnak megfelelően – délután 1 óra körül volt

a legerősebb. Ezen elrendezésnek köszönhetően, a hordók fala által elnyelt napfény a leghatékonyabban melegíthette a hordók víztartalmát.

A hordókat fa raklapokra helyeztük, amelyek 10 cm magasságban tartották őket a füves talaj fölött (2. ábra). A hordók hengerpalástja tetejének közepén egy kör alakú lyuk (átmérő = 5 cm) volt, amin keresztül – függőleges fémrúd alsó végéhez rögzítve – egy automata digitális hőmérőt (HOBO Pendant Temperature Data Logger, ONSET, Cape Cod, Massachusetts, USA) engedtünk le a hordó középpontjába, ahol 5 percenként folyamatosan mérte a

víz maghőmérsékletét. A fémrúd felső végét egy kör alapú fémsapka (átmérő = 7 cm) tartotta, ami eltakarta a hordó burkolatán lévő lyukat. A sapka vízbe merülő rúdját, végén a hőmérővel, egy 15 gramm súlyú anyacsavar tartotta függőlegesen. A sapkát a hordó külső mintázatának megfelelően festettük be.

A hordókat a következő állatbőrökkel borítottuk be: fehér marhabőr, fekete marhabőr, barnásszürke ló bőr, szürkemarhabőr, fekete-fehér csíkos marhabőr (műzebrabőr), valódi zebrabőr (*Equus burchelli boehmi*). A ló- és marhabőröket magyar ló- és marhatartóktól kaptuk, a zebrabőrt pedig egy magyar állatkerttől szereztük be. A nyers bőroket csáváztuk, majd nedves állapotban húztuk őket a hordókra, így a kiszáradásukat követően a lehető legjobban szorultak rá a hordókra, miáltal csak egy nagyon vékony légréteg maradt a bőr és a hordófal között.

A műzebrabőr 50-50%-a fekete és fehér csíkokból állt, amelyek vastagsága – a valódi zebrabőr mintázatának megfelelően – 2 és 7,5 cm között változott. A csíkokat egy szűcs varrta össze fekete és fehér marhabőr-csíkokból. E csíkok merőlegesek voltak a hordó hossz tengelyére, azaz függőlegesek, amikor a hordó a talajon feküdt. E mintázat jól modellezte a zebratest elülső felének csíkmintázatát. A hordók kör alakú véglapja a hordópalást mintázatának megfelelően volt befestve, vagy ugyanazzal a bőrral volt borítva, mint a hordópalást. Mivel e véglapokat csak rövid ideig – napkeltekor és napnyugtakor – érte gyenge napfény és máskor többnyire árnyékban voltak, ezért a hordópalásthoz viszonyított termikus hatásuk elhanyagolható volt.

A négy terepkísérletben a következő bőroket borították a hordókat: (1) fehér marha, fekete marha, szürke ló, műzebra; (2) fehér marha, fekete marha, szürke ló, műzebra, valódi zebra; (3, 4) fehér marha, fekete marha, szürke ló, műzebra, valódi zebra, szürkemarha.

A hordók mellett egy karám volt, ahol a homokos talajon lovakat tartottak (2. ábra), és ezért a hordók borítása néha poros lett. Így minden másnap a hor-

dók felületét egy kefével leporoltuk, és a hordók elhelyezkedését véletlenszerűen megváltoztattuk.

Meteorológiai változók rögzítése

Kísérleteink alatt a hordók közé telepített automata meteorológiai állomással (Conrad Electronic, equipment no: 672861) folyamatosan rögzítettük a $T_{\text{lég}}$ lég-hőmérsékletet és a w szélességet. Az érzékelők a talaj fölött 1 m magasságban voltak, hogy közvetlenül mérhessük a hordókat befolyásoló időjárási paramétereket. Az állomás adatgyűjtő egységét egy esőálló műanyag dobozban a talajra helyeztük.

Hőkamerás mérések

Napsütötte élő zebrák (*Equus burchelli boehmi*) testfelszínének hőmérséklet-mintázatát a Budapesti Állat-és Növénykertben mértük 2016 júliusában egy hőkamerával (VarioCAM[®], Jenoptik Laser Optik Systeme GmbH, Jena, Germany). A terepkísérleteinkben használt, állatbőrökkel bevont, napsütötte hordókról napközben óránként készítettünk hőképeket 2017. július 18-án, 30-án és augusztus 15-én 8:00/9:00 óra (= UTC + 2 óra = nyári időszámítás) és 19:00 óra között. A zebrák és hordók felszíni hőmérsékletének térbeli mintázatát egy egyenes vonal mentén mértük, amihez egy saját fejlesztésű szoftvert használtunk.

Spektroszkópiai mérések

Spektroszkópiai méréseket délben végeztünk teljes napsütésben, felhőtlen ég alatt. Az állatbőrökkel borított hordók $I(\lambda)$ visszaverődési spektrumát egy 350 nm $\geq \lambda \geq 825$ nm hullámhossztartományban érzékeny spektrométerrel (Ocean Optics STS-VIS, Largo, USA) mértük 15 perc alatt, miközben a megvilágítási körülmények gyakorlatilag nem változtak. Egy adott hordó felszínének 5 különböző pontján mértünk, majd ezen 5 spektrumot átlagoltuk. Kiszámoltuk az

$$INT = \int_{350 \text{ nm}}^{825 \text{ nm}} I(\lambda) d\lambda$$

integrált, valamint a

$$wb = \frac{INT}{INT_{\text{fehér marha}}}$$

($wb = 1$: fehér, $wb = 0$: fekete) fehérséget, ahol $INT_{\text{fehér marha}}$ a fehérmarhabőr-spektrum integrálja.

A hordók maghőmérsékleteinek összehasonlítása

A hordók maghőmérsékleteinek átlaga és szórása

Mind a négy kísérlet összes napjára 12:00 és 18:00 óra között (UTC + 2 óra, 1–3. kísérlet), valamint 12:00 és 17:00 óra között (4. kísérlet) meghatároztuk a hordók maghőmérsékleteinek átlagát (számtani közepét) és szórását. Külön kiszámoltuk a maghőmérsékletek

átlagait és szórásait a meleg napokra, amikor a napi átlagos léghőmérséklet 25 °C-nál magasabb volt (ekkor volt a legnagyobb esélye a zebracsíkok fölötti légörvények kialakulásának).

Statisztikai elemzés: Bonferroni post-hoc teszttel kiegészített ANOVA (Statistica 7.0) statisztikai vizsgálattal meghatároztuk, hogy van-e különbség a hordók napi átlagos maghőmérsékletei között. E statisztikai tesztet minden kísérletnél külön elvégeztük (i) az összes napra, és (ii) csak a meleg napokra (amikor a napi átlagos $T_{\text{lég}} > 25$ °C volt).

Adatok szűrése a léghőmérsékletre és szélességre vonatkozó küszöbértékekkel

Feltételezésünk szerint a zebracsíkok fölötti légörvények létrejöttek két fő meteorológiai előfeltétele, hogy (i) a léghőmérséklet egy adott T^* küszöbértéknél magasabb legyen, és (ii) a szélesség egy adott w^* küszöbértéknél alacsonyabb legyen. Mivel nem találtunk e küszöbértékekre vonatkozó szakirodalmi adatokat, ezért bizonyos tartományokon belül változtattuk őket. Egy állatbőrrel bevont hordó felszínén bekövetkező bármilyen hőmérséklet-változás bizonyos Δt idő-késéssel befolyásolja a hordó vízének maghőmérsékletét. Δt értékét úgy becsültük meg, hogy kiszámoltuk a

$$CC(\delta) = \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} T_{\text{lég}}(\tau) T_{\text{mag}}(\tau + \delta) d\tau$$

keresztkorrelációs integrált, ahol $T_{\text{lég}}(t)$ és $T_{\text{mag}}(t)$ a t időpontban mért léghőmérséklet és maghőmérséklet, δ pedig az időkésés. A CC keresztkorrelációs integrált δ függvényében egy adott hordóra mind a négy kísérletnél a legmelegebb napokon (ezek rendre 2017. június 28., július 20., augusztus 10. és szeptember 1. volt) $t_{\min} = 6:00$ óra és $t_{\max} = 20:00$ óra (UTC + 2 óra) között számoltuk. A $CC(\delta)$ függvény δ^* időkésésnél meghatározott maximuma becslést ad a $\Delta t = \delta^*$ terminus válaszidőre. A keresztkorrelációs számolásokhoz az R Statistics 3.2.3 szoftvert használtuk.

Teszteltük azon hipotézist, hogy a zebracsíkos hordók fölött konvektív légörvények csak akkor tudnak kialakulni, ha egyszerre teljesülnek a $T_{\text{lég}} > T^*$ és $w < w^*$ feltételek, és e légörvények Δt időkéséssel csökkentik a csíkos hordók T_{mag} maghőmérsékletét. Először azon $t_{\text{hűtés}}$ időpontokat határoztuk meg, amikor mindkét feltétel teljesül, majd kiszámoltuk a

$$\Delta T(t_{\text{hűtés}}; T^*, w^*) = T_{\text{hordó}}(t_{\text{hűtés}} + \Delta t) - T_{\text{műzebra}}(t_{\text{hűtés}} + \Delta t)$$

különbségeket egy adott típusú bőrrel bevont hordó maghőmérsékletei és a mű zebrabőrrel borított hordó maghőmérsékletei között a T^* és w^* küszöbértékek függvényében, melyeket a 25 °C $\geq T^* \geq 37$ °C és 1 km/h $\geq w^* \geq 10$ km/h tartományokban változtattunk. Mindig a mű zebrabőrrel burkolt hordó maghőmérsékletét tekintettük referenciaértéknek, mert e csíkos hordó mind a négy kísérletben szerepelt.

Statisztikai elemzés: a Python 2.7.12 programnyelv Scipy statisztikai függvénymodulját felhasználva, páros Wilcoxon-tesztet végeztünk a T^* és w^* küszöbértékekre, valamint a Δt időkézésre, hogy különbséget keressünk a mű zebrabőrrel bevont hordó és a szürke ló-, szürke marha-, valamint valódi zebrabőrrel bevont hordók maghőmérsékletei között, amikor az N esetszám (a pillanatnyi w és $T_{\text{lég}}$ értékekre teljesült a $w < w^*$ és $T_{\text{lég}} > T^*$ feltétel) nagyobb volt, mint 20.

Folytatás a következő számban.

Irodalom

1. A. R. Wallace: Mimicry and other protective resemblances among animals. *Westminster Foreign Quarterly Reviews* 32 (1867) 1–43.

2. C. R. Darwin: *The Descent of Man, and Selection in Relation to Sex*. John Murray, London (1871) Vol. 2, 302.
3. T. Caro: *Zebra Stripes*. University of Chicago Press, Chicago, London (2016)
4. Á. Egri, M. Blahó, G. Kriska, R. Farkas, M. Gyurkovszky, S. Ákesson, G. Horváth: Polarotactic tabanids find striped patterns with brightness and/or polarization modulation least attractive: an advantage of zebra stripes. *Journal of Experimental Biology* 215 (2012) 736–745.
5. B. Larison, R. J. Harrigan, H. A. Thomassen, D. I. Rubenstein, A. M. Chan-Golston, E. Li, T. B. Smith: How the zebra got its stripes: a problem with too many solutions. *Royal Society Open Science* 2 (2015) 140452.
6. T. Caro, A. Izzo, R. C. Jr. Reiner, H. Walker, T. Stankowich: The function of zebra stripes. *Nature Communications* 5 (2014) 3535.
7. G. Horváth, Á. Pereszlényi, D. Száz, A. Barta, I. M. Jánosi, B. Gerics, S. Ákesson: Experimental evidence that stripes do not cool zebras. *Scientific Reports* 8 (2018) 9351.

A FIZIKA TANÍTÁSA

A KIFORDÍTOTT KÖRHINTA, AMELYEN ÉLÜNK

Bokor Nándor
BME Fizika Tanszék

A sebesség illúzió, a gyorsulás nem

Képzelnünk el két űrhajót, amint kikapcsolt hajtóművel elsuhannak egymás mellett a világűrben. (Az űrhajók ablakai el vannak sötétítve, nem lehet kinézni rajtuk.) Mind a két űrhajó mozog? Vagy az egyik áll, és csak a másik mozog? Ezek a kérdések önmagukban értelmetlenek. Semmivel sem jogosabb például az elsőt állónak és a másodikat mozgónak tekinteni, mint fordítva. Ha a második űrhajót hirtelen eltávolítjuk, és csak a – változatlanul ugyanúgy suhanó – első űrhajóra összpontosítjuk figyelmünket, annak jogosága is megszűnik, hogy egyáltalán mozgásról beszéljünk. Értelmetlen például az a kérdés, hogy a magára maradt első űrhajó *milyen irányban* mozog a térben. Az űrhajósok – külső viszonyítási pont híján – egy ilyen kérdésre nem tudnának mit felelni: *semmilyen irányban* nem éreznek semmi különlegeset, hiszen szabadon lebegnek az űrhajó belsejében. (Ezt az állapotot nevezzük súlytalanságnak.)



Bokor Nándor egyetemi docens a BME-n szerzett villamosmérnök-diplomát 1993-ban, majd ugyanott fizikából PhD fokozatot 1999-ben. Munkájában – az optika számos területén végzett kutatásai mellett – legszívesebben a fizika, azon belül kiemelten a relativitáselmélet oktatásának pedagógiai kérdéseivel foglalkozik. Ez utóbbi témában számos publikációja jelent meg a *Fizikai Szemlében*, valamint a *Physics Education* és a *European Journal of Physics* folyóiratokban.

Más a helyzet, ha a magányos űrhajó hajtóműve be van kapcsolva, vagy ha az űrhajót előzőleg megforgatták. Ilyenkor az űrhajósok – feltéve, hogy az űrhajóhoz képest nyugalomban vannak, azaz például be vannak csatolva az ülésükbe, vagy kapaszkodnak egy korlátba – *éreznek* valamit. Az ülés vagy a korlát *nyomja vagy búzza* őket egy bizonyos irányba, és ezt az irányt meg tudják állapítani anélkül, hogy kinéznének az ablakon. Azt mondjuk ilyenkor, hogy eredő erő hat rájuk, ami az erő irányába *gyorsítja* őket. A gyorsulás tehát olyan fajta állapot, amit – a sebességgel ellentétben – az űrhajósok ténylegesen *átélnék*, nagyságát és irányát behunyttal szemmel is érzékelik. (Hasonló módon a beépített gyorsulásmérőjüket az okostelefonok „behunyttal szemmel is” tudják alkalmazni, míg sebességméréshez muszáj magukat külső tárgyakhoz pozicionálni, például a GPS-vevőjükkal.)

Összefoglalva a fentieket: a sebesség relatív fogalom (csak más testekhez viszonyítva van jelentése, „nem érezzük”), a gyorsulás pedig „abszolút fogalom” („érezzük magunkon”, kimutatásához nincs szükségünk arra, hogy más testhez viszonyítsuk a helyzetünket).

A gyorsulást *erő* okozza, ezt tekinthetjük akár az erő definíciójának is. A gyorsulást érezzük, tehát a ránk ható erőt is érezzük. Érezzük, amikor valaki megrúg minket, amikor nekiütközünk egy falnak, amikor megragadják a karunkat és hirtelen odébb rántanak bennünket stb. (Egy kiterjedés nélküli, ideális tömegpont természetesen nem érezhet semmit. Az emberi érzékelés részletei – még tisztán fizikai szempontból is – bonyolultak, hiszen idegrendszerünk