# fizikai szemle

TEMATIKUS SZÁM

25 éves az ELTE Biológiai Fizika Tanszéke

## MIÉRT CSÍKOS A ZEBRA?

## INTELLIGENS DRÓNRAJOK

## KÉMIAI NANOREAKTOR

## KÖSZÖNET A 31 ÉVÉRT!

2023/9

# Fizikai Szemle

**MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT**

A Mathematikai és Természettudományos Értesítőt az Akadémia 1882-ben indította
A Mathematikai és Physikai Lapokat Eötvös Loránd 1891-ben alapította

**Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat havonta megjelenő folyóirata.**
**Támogatók: a Magyar Tudományos Akadémia Fizikai Tudományok Osztálya, az Emberi Erőforrások Minisztériuma, a Magyar Biofizikai Társaság, a Magyar Nukleáris Társaság és a Magyar Fizikushallgatók Egyesülete**



*Főszerkesztő:*
**Iglói Ferenc**

*Szerkesztőbizottság:*
**Asbóth János, Bíró László Péter, Czitrovszky Aladár, Gyürky György, Horváth Dezső, Horváth Gábor, Kiss Ádám, Kopasz Katalin, Néda Zoltán, Ormos Pál, Pálfalvi László, Rábóczki Bence, Simon Ferenc, Simon Péter, Sükösd Csaba, Szabados László, Trócsányi Zoltán, Takács Gábor, Szabó Gábor, Ujvári Sándor**

*Tervezőszerkesztő:*
**Horváth Imre**



*A folyóirat e-mail címe:*
**szerkesztok@fizikaiszemle.hu**
A lapba szánt írásokat erre a címre kérjük

**A beküldött tudományos, ismeretterjesztő és fizikatanítási cikkek a Szerkesztőbizottság, illetve az általa felkért, a témában elismert szakértő jóváhagyó véleménye után jelenhetnek meg**

*A folyóirat honlapja:*
**http://www.fizikaiszemle.hu**

*A címlapon:*
**Zebracsikó az állatkertben**

**TARTALOM**


**25 ÉVES AZ ELTE BIOLÓGIAI FIZIKA TANSZÉKE**

*Vicsek Tamás, Kürti Jenő, Derényi Imre:*
Beköszöntő: 25 éves az ELTE Biológiai Fizika Tanszéke 297

*Horváth Gábor, Pereszlényi Ádám, Száz Dénes, Takács Péter, Egri Ádám, Jánosi Imre:*
Zebracsíkok termofiziológiai vizsgálata, avagy miért csíkos a zebra? 298
*A biológusokat régóta foglalkoztatja az a kérdés, hogy mi lehet a szerepe a zebrák feltűnő fekete-fehér csíkjainak?*

*Szabó Bálint, Ungai-Salánki Rita, Francz Barbara, Gerecsei Tamás, Horváth Róbert:*
Egyedi sejtek manipulációi robotizált mikropipettával 303
*Az egyedi sejtek DNS és RNS állományai bázissorrendjeinek meghatározása az utóbbi 10 évben vált lehetővé a második és harmadik generációs szekvenáló technikák kifejlesztését követően.*

*Nagy Máté, Zafeiris Anna, Horicsányi Attila, Kubinyi Enikő, Vásárhelyi Gábor Vicsek Tamás:*
Csoportos keresés labirintusban: a társaktól származó információ és a patkánycsoport változatos összetételének előnyei és hátrányai 305
*A patkányok döntéshozatali folyamatait vizsgálják, amint egyedül vagy csoportban próbálnak megtalálni valamilyen jutalmat egy labirintusban.*

*Asztalos Bogdán, Czégel Dániel, Pollner Péter, Palla Gergely:*
Szövegelemzések statisztikus fizikai aspektusai 311
*A feltett alapkérdés első hallásra nem kapcsolódik a fizikához: Milyen törvényszerűségek figyelhetők meg az emberek által beszélt nyelv változásával kapcsolatban?*

*Vásárhelyi Gábor, Virágh Csaba, Balázs Boldizsár, Somorjai Gergő, Nepusz Tamás, Vicsek Tamás:* Intelligens drónrajok csoportos viselkedése 315
*Általános összefoglalót adunk az elmúlt, mintegy másfél évtized kapcsolódó tudományos kutatásairól, bemutatva az intelligens drónrajok csoportos mozgásának, viselkedésének és döntéshozatalának mechanizmusait, buktatóit, szépségeit és alkalmazási lehetőségeit.*

*Somayeh Eskandari, Koltai János, László István, Kürti Jenő:*
Szén nanocsövek belső tere mint kémiai nanoreaktor 319
*Molekuladinamikai módszerrel azt vizsgálják, mennyiben módosulnak bizonyos kémiai reakciók, ha azok nem a háromdimenziós szabad térben játszódnak le, hanem egy szén nanocső belsejében.*

*Tárnoki-Zách Júlia, Méhes Előd, Bősze Szilvia, Czirók András:*
Biológiai gátrendszerek szövetmodelljének biofizikai jellemzése 324
*A cikk egy vesemodellt mutat be és ismertet néhány transzportfolyamatot jellemző kísérleti eredményt.*

A tematikus szám anyagát összeállította:
**Horváth Gábor**

**A FIZIKA TANÍTÁSA**

*Izsa Éva:* Hogyan szervezzünk tanulmányi kirándulást a CERN-be? 328

*Lendvai János:* Köszönet a 31 évért! 332
*A távozó műszaki szerkesztő, Kármán Tamás köszöntése.*

.....

*T. Vicsek, J. Kürti, I. Derényi :* Welcome: The Department of Biological Physics of ELTE is 25 years old

*G. Horváth, Á. Pereszlényi, D. Száz, P. Takács, Á. Egri, I. Jánosi:* Thermophysiological study of zebra stripes, or why is the zebra striped?

*B. Szabó, R. Ungai-Salánki, B. Francz, T. Gerecsei, R. Horváth:* Manipulation of individual cells with a robotic micropipette

*M. Nagy, A. Zafeiris, A. Horicsányi, E. Kubinyi, G. Vásárhelyi, T. Vicsek:* Group search in the maze: Information from peers and the advantages and disadvantages of the diverse composition of the rat group

*B. Asztalos, D. Czégel, P. Pollner, G. Palla:* Statistical physical aspects of text analyses

*G. Vásárhelyi, Cs. Virágh, B. Balázs, G. Somorjai, T. Nepusz, T. Vicsek:* Group behavior of intelligent drone swarms

*E. Somayeh, J. Koltai, I. László, J. Kürti:* The interior of carbon nanotubes as a chemical nanoreactor

*J. Tárnoki-Zách, E. Méhes, Sz. Bősze, A. Czirók:* Biophysical characterization of the tissue model of biological barrier systems

*É. Izsa:* How to organize a study trip to CERN?

*J. Lendvai:* Thanks for 31 years!



Fizikai Szemle
MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT
megjelenését támogatják:

Emberi Erőforrások Minisztériuma
Nemzeti Kulturális Alap
A Fizika Barátai

LXXIII. ÉVFOLYAM 9. (826.) SZÁM 2023. SZEPTEMBER

Tanszékünk sikeres működését az oktatásban és a kutatásban sok oktatás- és tudománymetriai mutató bizonyítja: eredményesen TDK-zó, szakdolgozó és diplomamunkás hallgatóink, doktoranduszaink nagy száma, illetve a tanszéki munkatársak által elnyert kutatási pályázatok, ösztöndíjak és a kiemelkedő teljesítményeket elismerő különböző díjak. Mindezekről tájékozódni lehet a tanszéki honlapunkon: https://physics.elte.hu/BIO_home.

Tanszékünk 2008-ban ünnepelte fennállásának 10. évfordulóját. Ezen alkalomból egyrészt ünnepi ülést szerveztünk, másrészt elkészítettünk egy angol nyelvű kiadványt, továbbá beszámoltunk a tanszéken folyó kutatómunkákról a Fizikai Szemle egyik tematikus számában (2008/11). Mindezekről részletes információk találhatók a már említett tanszéki honlapunkon. Furcsa érzés megtapasztalni az idő gyors múlását: immár negyedszázad telt el Tanszékünk alapításától. A Fizikai Szemlének ez a mostani tematikus száma az elmúlt időszak tanszéki eredményeiből szemezget. 2015-ben Derényi Imre vette át a tanszékvezetés feladatát, aki jelenleg is vezeti a Tanszéket.

***Derényi Imre:*** A Tanszék kutatásban elért eredményességét hűen tükrözik az MTMT adatbázisban megtekinthető publikációs mutatók: az alapítás óta eltelt 25 évben több, mint 100 könyv, illetve könyvfejezet, valamint több, mint 1000 tudományos folyóiratcikk jelent meg, melyekre 60 000 feletti független hivatkozás érkezett. A hivatkozások száma jelenleg évi 5000-et meghaladó mértékben gyarapszik. Ezzel összhangban a tanszéken évente 3–4 TDK dolgozat, 10 körüli alap- és mesterszakos diplomamunka, valamint 2–3 doktori értekezés születik.

Negyed évszázad hosszú idő. Az alapítás óta nagyot változott a tanszék személyi állománya és sokat változtak a kutatási területek is. A stabilitást (a 10 körüli állandó oktatói-kutatói létszám fenntartását) és a kiválóságot úgy sikerül folyamatosan biztosítani, hogy a nyugdíjba vonuló kollégák helyét a legrangosabb hazai (MTA/ELKH, illetve lendület kutatócsoporti) és nemzetközi (ERC) pályázatokon sikeresen szerepelő fiatalok veszik át, megújítva a Tanszék kutatási profilját.

A Tanszék főszervezésében 2023. augusztus végén került megrendezésre a Magyar Biofizikai Társaság 29. Kongresszusa, melyen egy külön ünnepi szekció emlékezett meg a Tanszék alapításának 25. évfordulójáról.

A Tanszéken folyó szerteágazó kutatási témák egy szeletét mutatja be a Fizikai Szemle jelen száma. A szerzők arcképeit a hátsó belső borítón mutatjuk be családi név szerinti ABC-sorrendben.

# ZEBRACSÍKOK TERMOFIZIOLÓGIAI VIZSGÁLATA, AVAGY MIÉRT CSÍKOS A ZEBRA?[1]

Horváth Gábor[1], Pereszlényi Ádám[1,2], Száz Dénes[1], Takács Péter[1], Egri Ádám[1,3], Jánosi Imre[4]

[1] ELTE Biológiai Fizika Tanszék, Budapest

[2] Deutsches Meeresmuseum, Stralsund, Németország

[3] Ökológiai Kutatóközpont, Budapest

[4] Nemzeti Közszolgálati Egyetem, Víz- és Környezetpolitikai Tanszék, Budapest

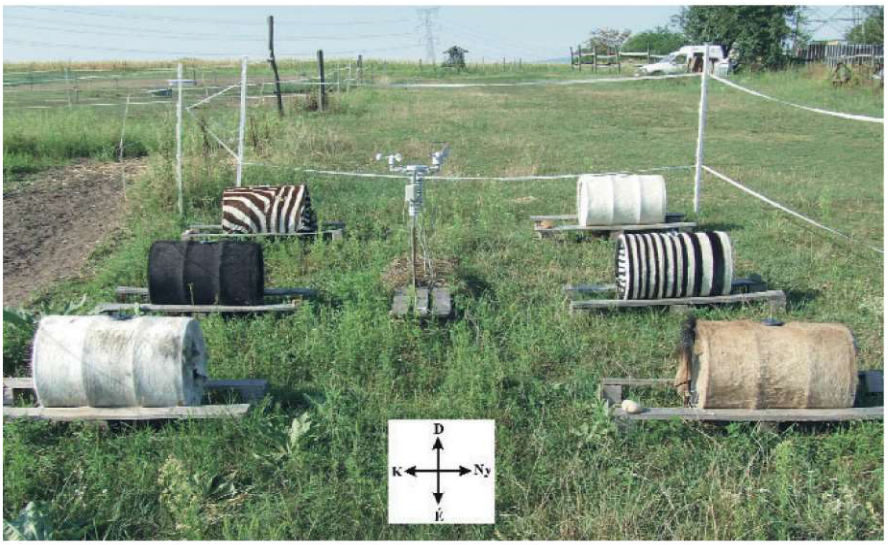
## Bevezetés

Charles Darwin és Alfred Wallace 1860–1870-es években folyt vitája óta foglalkoztatja a biológusokat az a kérdés, hogy mi lehet a szerepe a zebrák feltűnő fekete-fehér csíkjainak, milyen előnyt és/vagy hátrányt jelenthetnek a viselőiknek. Számos elmélet született minderre, amelyek zömét eddig még nem ellenőrizték. Az egyik hipotézis szerint a csíkok hűtő hatásúak lehetnek. A kísérletileg legjobban igazolt magyarázat, hogy a csíkos kültakaró nem vonzza a vérszívó cecelegyeket és bögölyöket, ami nagy előny a csíkos gazdaállat számára, mert e parazita legyek súlyos, gyakran halálos betegségek kórokozóit terjesztik vérszívásuk közben. Szakmai körökben az is rejtélynek számított, hogy a bögölyök miért a sötét színű gazdákat kedvelik, és azokat miért főleg csak napsütésben támadják meg. Az elmúlt bő évtizedben mi is bekapcsolódtunk e kérdések vizsgálatába, miközben teszteltünk egy korábbi hipotézist, továbbá a zebracsíkok szerepére találtunk egy optikai (fénypolarizációs) és egy termofiziológiai új magyarázatot. Mivel az előzőről részben már beszámoltunk a Fizikai Szemlében is [1, 2], ezért jelen cikkünkben csak az utóbbiról írunk.

## A csíkjai nem hűtik a zebrát

A zebrák fehér és fekete csíkjairól kimutattuk [3, 4, 5], hogy optikailag/vizuálisan nem vonzzák a vérszívó nőstény bögölyöket, amelyeket többek között azért célszerű elriasztani, mert vérszívásukkor súlyos betegségeket közvetítő kórokozókat juttatnak a gazdaállatok vérébe. Egy közkeletű hipotézis szerint a csíkjaik hűtik a zebrákat, amit azonban egy terepkísérlet-

[1] E cikkünkkel a 2023. augusztus 20-án tragikus hirtelenséggel, váratlanul elhunyt szerzőtársunkra, Jánosi Imre fizikus professzorra emlékezünk.

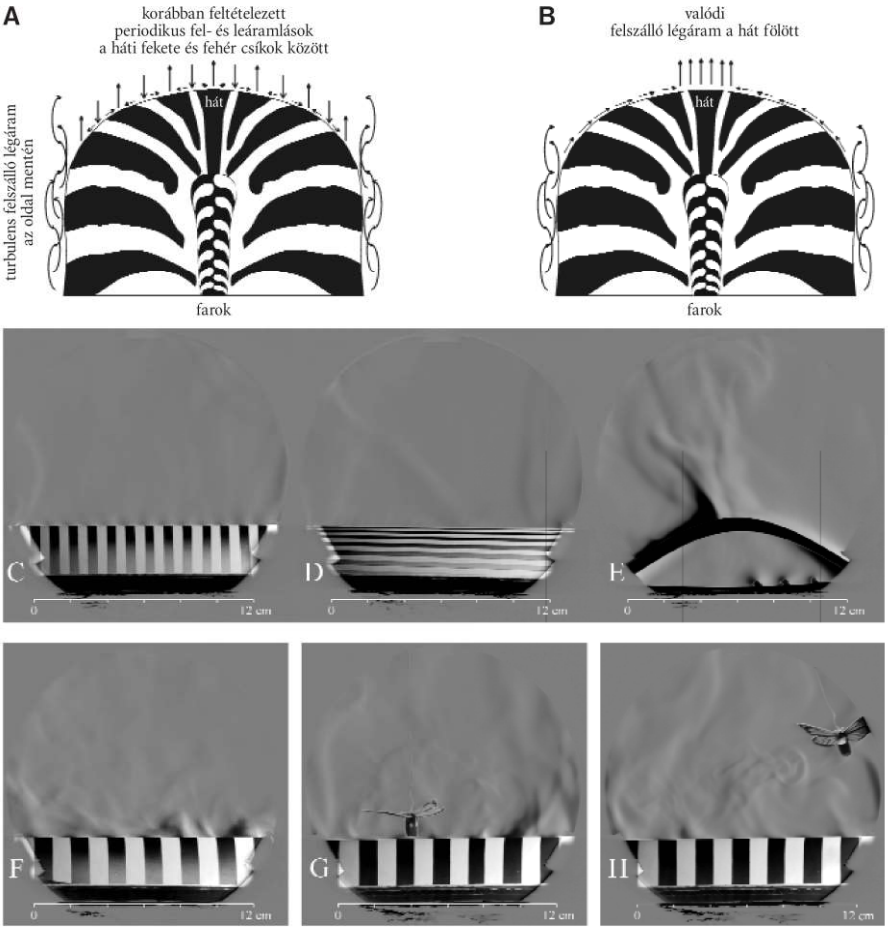



**1. ábra.** Egy terepkísérletben szarvasmarhák, lovak és egy zebra eltérő színű és mintázatú bőreivel borított, víztöltetű fémhordókat használtunk termodinamikai modellekként. A bal felső sarokbeli hordót valódi zebrabőrrel vontuk be, míg a jobb középsőt változó szélességű fehér-fekete marhabőrcsíkokból összevarrt kültakaróval [6, 7]

ben cáfoltunk [6, 7]. A gazdatestet vízzel töltött fémhordókkal modelleztük, amelyeket lovak, szarvasmarhák és egy zebra fekete, barna, szürke és fehér, homogén, illetve csíkos bőreivel borítottunk **(1. ábra)**. E hordókat nyáron nappal folyamatosan érte a nap- és égfény, mialatt vízálló automata hőmérőkkel 5 percenként mértük a maghőmérsékletüket. Azt találtuk [6, 7], hogy a csíkos hordók és az átlagszürkeségükhöz hasonló egyszínű hordók maghőmérsékletei között soha sem volt szignifikáns különbség. Ezért tehát a csíkos kültakaró nem tartja hidegebben a zebratestet, mint a csíkok átlagszürkeségének megfelelő homogén színű. Minderről a Fizikai Szemlében már részletesen írtunk [7].

## Napsütésben nincs hűtő légörvénysor a zebracsíkok fölött

Egy másik elterjedt hipotézis szerint, a napsütötte zebracsíkok fölött hűtő légörvénysor alakul ki: a fekete csíkok fölött fölszálló meleg légáramlatok keletkeznek, a fehérek fölött pedig leszálló hűvösebbek **(2A ábra)**. Ezt laboratóriumban ellenőriztük. Eltérő csíkosságú valódi/mesterséges, sima/szőrös szarvasmarha-, ló- és zebrabőrökkel borított, erős fehér fénynyel megvilágított, vízszintes, hengeres felületek fölötti légáramlásokat Schlieren-optikával vizsgáltunk [8]. Azt tapasztaltuk, hogy a fehér csíkok fölött nem alakultak ki leszálló légáramlatok **(2B–E ábra)**. A csíkoknak a föláramlások keletkezése elősegítésében és oldal irányú elsodródása gátlásában megnyilvánuló hatása a felület fölött 1–2 cm-nél magasabban már elhanyagolható volt. Noha szélcsendben föláramlások keletkeznek a közel vízszintes napsütötte zebracsíkok fölött, ezeket már a leggyöngébb szelek is elfújják **(2F–H ábra)**, továbbá a zebra saját mozgásakor föllépő relatív légmozgások is szétzilálják [8]. Mindez cáfolja a zebracsíkok fölött napsütésben formálódó periodikus légörvények hiedelmét.



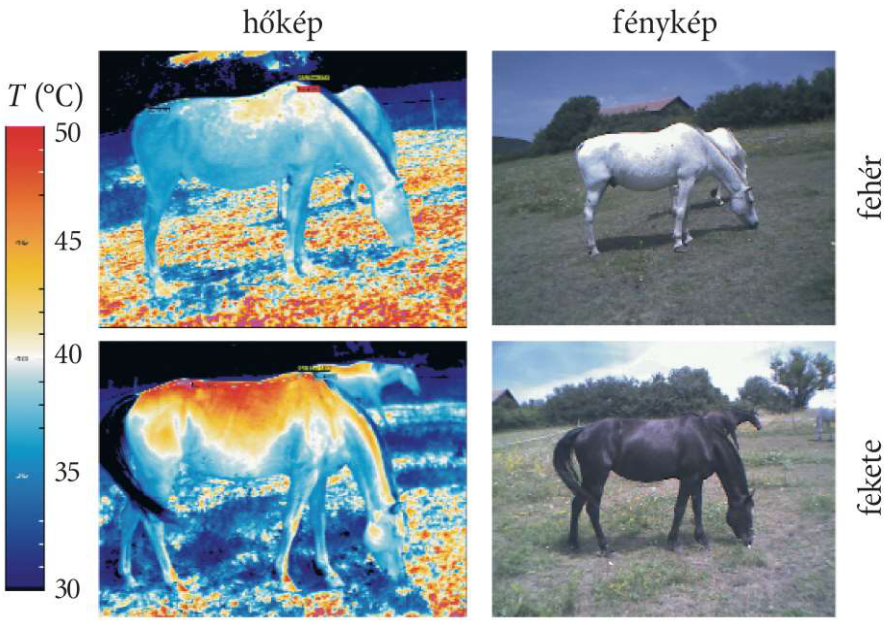

**2. ábra.** **(A)** A zebratestnél korábban föltételezett konvektív légörvények. **(B)** A Schlieren-optika szerinti valódi légáramlási viszonyok a zebratest körül. **(C–H)** Erős fehér fénnyel felülről megvilágított, csíkos, sima, hengeres tesztfelületekről fölszálló, Schlieren-optikával láthatóvá tett légáramlások, amikor a henger vízszintes hossztengelye merőleges **(C, D, F-H)**, illetve párhuzamos **(E)** a Schlieren-berendezés fénynyalábjával, és a görbült csíkok merőlegesek **(C, F–H)**, illetve párhuzamosak **(D, E)** a hossztengelyhez képest. Az **F** ábrán egy enyhe vízszintes szellő fújt a fény útjával párhuzamosan, a fényképezőgéptől a tesztfelület irányába, míg a **G** és **H** ábrán szélcsendben egy lepkemakett mozgott föl-le **(G)**, illetve jobbra-balra **(H)** [8]

## A vérszívó bögölyök napsütötte, sötét gazdállatokat kedvelnek

A haszonállatok (főleg lovak és szarvasmarhák) tartói által régóta közismert, hogy a vért szívni akaró nőstény bögölyök a sötét gazdákat kedvelik a világosakkal szemben, és jellemzően csak napsütésben támadnak, valamint zömében a napsütötte gazdákra szállnak az árnyékosakkal szemben. A bögölyök e melegpreferenciáját terepkísérletben mi is igazoltuk: Egy jeges vízzel teli hideg és egy légtöltetű meleg fekete műanyag hordó bögölyökre kifejtett vonzását hasonlítottuk össze [9]. Hőkamerával, képalkotó polariméterrel és Schlieren-optikával mértük e hordók és kicsinyített modelljeik termális és optikai sajátságait. A hideg és meleg hordó árnyékos és napos oldalain számoltuk a bögölylandolásokat, valamint mértük a rovarok e felületrészeken eltöltött idejeit. Kimutattuk, hogy a bögölynőstények a napsütötte, meleg, fényes, fekete céltárgyakat kedvelik az azonos optikai jellemzőjű árnyékos/napos hidegebbekkel szemben. E rovarok már a leszállásuk előtt is érzékelik a felület melletti/fölötti légrétegnek a $T$ felületi hőmérséklettel pozitívan korreláló hőmérsékletét, aminek alapján leszállnak (ha $T$ kedvező), vagy tovább röpülnek (ha $T$ túl alacsony/magas). Mindez alátámasztja azon hipotézisünket, hogy a vért szívni szándékozó nőstény bögölyök részben azért preferálják a melegebb testfelszínű gazdaállatokat, mivel melegebb (de még nem túl forró) mikroklímában a szárnyizmaik gyorsabb működésének köszönhetően hirtelen elröppenéssel kerülhetik el a gazdának a fájdalmas vérszívásuk által kiváltott veszélyes parazitaűző ellenreakcióit [9].

## Miért szeretnek vért szívni a bögölyök a melegebb testfelszínű állatokon?

Az előző fejezet végén említett hipotézisünket egy másik terepkísérletben is teszteltük. Olyan nőstény bögölyök menekülési sikerét mértük a felszíni hőmérséklet függvényében, amelyek egy napsütötte levegővel vagy jeges vízzel teli fekete hordóra szálltak le [10]. A leszállt bögölyöket megpróbáltuk mechanikusan elkapni, számoltuk a sikeres és sikertelen elkapásokat, majd mértük a leszállás helyének hőmérsékletét. Továbbá, különböző színű lovak testfelszíni hőmérsékleteloszlását mértük hőkamerával napos és felhős időben (**3. ábra**). Azt kaptuk [10], hogy a lovak testfelszínére jellemző hőmérséklettartományban a bögölyök menekülési sikere a csökkenő felszíni hőmérséklettel csökken. Ez magyarázza, hogy e rovarok miért szeretnek vért szívni melegebb gazdaállatokon. Mivel minél sötétebb egy napsütötte gazda, annál melegebb a felülete, ezen eredményünk egyben azt is megmagyarázza, hogy a nőstény bögölyök napsütésben miért részesítik előnyben a sötét gazdákat a világosakkal szemben, továbbá miért támadnak túlnyomórészt napsütésben. A nőstény bögölyök általában ezért nem követik az előlük menekülő gazdaállatokat az erdők és istállók árnyékába.

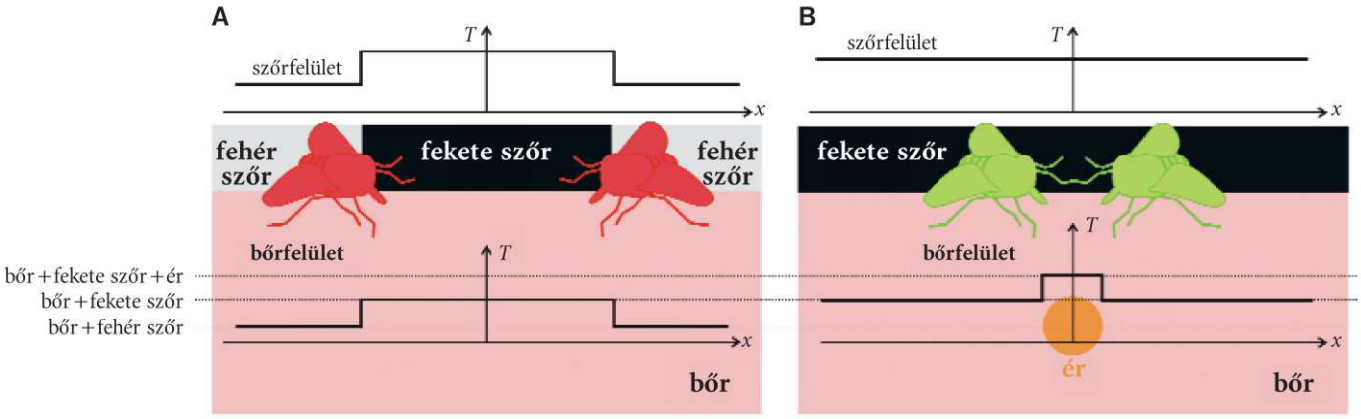



**3. ábra.** Napsütötte fehér és fekete lovak hőképei és fényképei [10]

## A zebracsíkok szerepének új termofiziológiai magyarázata

A zebracsíkok szerepének számos magyarázata közül kísérletileg az a legalaposabban igazolt, hogy a csíkos kültakaró a gazdaállatot védi a vérszívó cecelegyektől és bögölyöktől. Nemrég a zebracsíkok bögölytaszító hatásának új magyarázatával álltunk elő [11], amit terepkísérletekkel támasztottunk alá [11, 12].

A környezetüknél kissé melegebb vererek fölötti bőrfelszín hőmérséklet-grádeinseit nehéz megkülönböztetni a napsütötte zebrabőr melegebb fekete és hidegebb fehér csíkjainak határvonalainál fellépő hőmérséklet-grádiensektől. E sok csíkhatárnál kialakuló hőmérséklet-grádiensek – amelyek alatt nincsenek mindig erek – jelentősen lecsökkentik annak esélyét, hogy egy napsütötte zebrára szálló nőstény bögöly hőérzékeléssel vérszívásra alkalmas eret találjon. Márpedig a nőstény bögölyök zömében napsütésben támadják gazdaállataikat [9], aminek okát is tisztáztuk [10]. Ezért, ha egy bögöly hőérzékeléssel próbál megtalálni egy bőrfelület alatt húzódó eret, akkor a meleg-hideg csíkok határainál kialakuló hőmérséklet-grádienseket érzékelve ott is sikertelenül próbálkozik fájdalmas harapással vért szívni, ahol nincs is ér (**4A ábra**). Ez azonnal kiváltja a zebra bögölyre veszélyes parazitaűző ellenreakcióit, amelyek elűzik a bögölyt, aminek újra és újra próbálkoznia kell, amíg végre eret talál, de ekkor ismét elűzetik. Így többször kell próbálkoznia, hogy elegendő vért szívhasson a megtermékenyült petéi érleléséhez. Az egyszínű gazda-

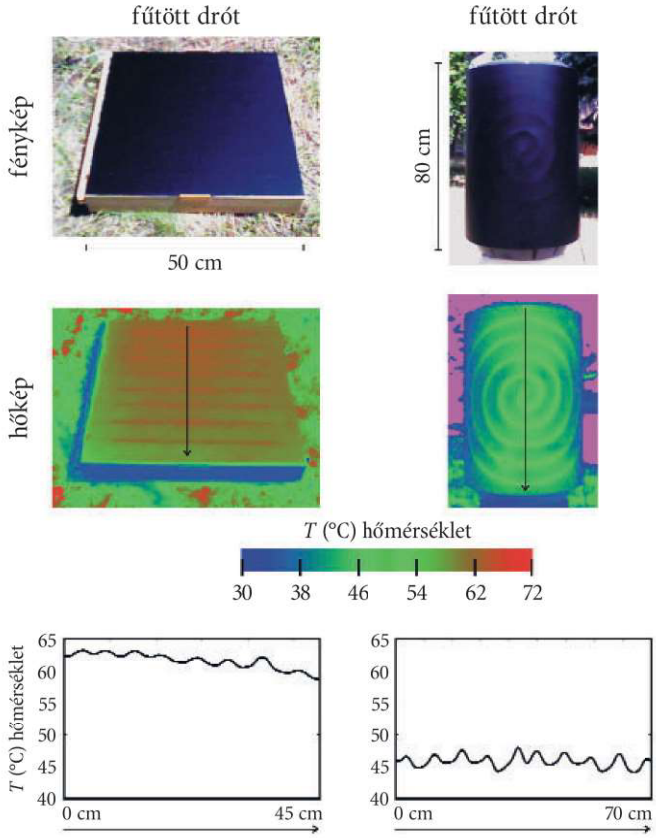



**4. ábra.** Egy gazdaállat napsütötte kültakaróján vérszívási céllal eret kereső nőstény bögölyök hőérzékelésen alapuló érdetekciójának két esete: **(A)** fehér-fekete csíkos kültakaró bőrfelület alatti ér nélkül, **(B)** homogén fekete kültakaró egy bőrfelület alatti érrel (narancssárga kör). A *T(x)* görbék kvalitatíve mutatják a szőr- és bőrfelület *T* hőmérsékletének változását az *x* tengely mentén, ami keresztezi a szomszédos fehér és fekete szőrcsíkok határvonalait az **A** alábrán. A vízszintes pontozott vonalak 3 jellemző hőmérséklet-értéket mutatnak emelkedő sorrendben: érmentes fehér szőrös bőr < érmentes fekete szőrös bőr < ér fölötti fekete szőrös bőr. A zöld bögölyök egy ér fölötti bőrfelület hőmérsékletnövekedései (pozitív hőmérséklet-grádiensei) által kiváltott sikeres vérszívási próbálkozás helyeit jelzik, míg a piros bögölyök szomszédos fehér és fekete szőrcsíkok határvonalai alatti bőrfelület hőmérsékletnövekedései előidézte sikertelen vérszívási próbálkozás helyeit mutatják. A bögölyök feje a pozitív hőmérséklet-grádiens felé fordul. Az erek, szőrrétegek és bögölyök méretei/vastagságai nem méretarányosak [11]

állatok testfelületén nincsenek a hőérzékelésen alapuló érdetekciót zavaró hőmérséklet-grádiensek, ezért rajtuk könnyebben és gyorsabban találják meg a rájuk szállt bögölyök a bőr alatti vérereket **(4B ábra)**. Így a bögölyöknek nem érdemes csíkos kültakarójú gazdaállatokon vérszívással próbálkozniuk, s emiatt kerülik a csíkos gazdaállatokat. E hipotézisünket négy terepkísérletben ellenőriztük [11, 12].

E kísérletekben a nőstény bögölyöket olyan sötét csalitárgyak (szürke hordó [11], fekete tesztfelületek [12]) vonzották, amelyek felületén vékony fekete csíkok vagy a felület alatt futó drótok utánozták a gazdaállat bőre alatti melegebb vérereket a hőérzékeléssel eret kereső bögölyök számára. A szürke hordó napsütötte felén a fekete csíkok kissé melegebbek voltak a szürke felületrészeknél, míg az árnyékos oldalán a csíkok és a szürke területek hőmérséklete gyakorlatilag egyforma volt. A drótok csak akkor voltak melegebbek a környezetüknél, amikor áram folyt bennük **(5. ábra)**, máskülönben mechanikailag és/vagy optikailag észrevétlenek maradtak, fűtetlen állapotukban pedig termálisan is fölismerhetetlenek voltak. Mértük a szürke hordó napos és árnyékos oldalán, illetve a fűtött és fűtetlen drótos fekete felületeken mászkáló nőstény bögölyöknek a szürke és fekete, illetve a drót fölötti és drótmentes felületrészeken eltöltött átlagos relatív idejeit, amelyeket összevetettünk e részek felületarányaival.

Azt találtuk [11], hogy a szürke hordó napos felén a bögölyök 2,8-szer (statisztikailag szignifikánsan) több átlagos relatív időt (19,6%) tartózkod-




**5. ábra.** A terepkísérletekben alkalmazott vízszintes, fekete, sík tesztfelület és függőleges tengelyű, fekete hengerfelület fényképe, hőképe és a *T* (°C) felületi hőmérséklet hőképen húzódó fekete nyíl menti változása, amikor a felület alatti drótok fűtöttek voltak [12]. A hőképeken és a *T* hőmérsékletgörbéken jól látszanak a fűtött meleg drótok, amelyek fűtetlen állapotukban nem voltak kivehetőek

tak a szürke felületeknél melegebb fekete csíkokon, mint a csíkok felületaránya (7%). Ellenben, a hordó árnyékos oldalán a szürke (93,6%) és fekete (6,4%) részeken töltött átlagos relatív idők nem tértek el statisztikailag szignifikánsan a szürke (93%) és fekete (7%) felületarányoktól. Ez arra utal, hogy a fekete csíkokat a vérereket kereső bögölyök nem a csíkok feketesége és/vagy sötétsége és/vagy nagyobb polarizációfoka miatt kedvelték, hanem a kissé nagyobb hőmérsékletük okán [11].

Amikor a földön nyugvó drótos fekete tesztfelület vízszintes volt [12], akkor a rajta mászkáló nőstény és hím bögölyök a drótos felületrészeket nem részesítették előnyben a drótmentes részekhez képest még akkor sem, amikor a drótok fűtve voltak. A drótos részek fölött eltöltött átlagos relatív idejük (fűtött drót: 6,84%, fűtetlen drót: 5,6%) nem tért el statisztikailag szignifikánsan a drótos részek felületarányától (6%). Ekkor a bögölyök nem ereket kerestek a vízszintes tesztfelület alatt (a hímek eleve nem szívnak vért, s így nem is kutatnak erek után), hanem vizet próbáltak találni, persze hiába. Emiatt csak a felületarányuknak megfelelő mértékben tartózkodtak a tesztfelület azon részein, amelyek alatt fűtött vagy fűtetlen drót húzódott [12]. A hím és nőstény bögölyök e jellegzetes vízkereső viselkedését korábbi terepkísérleteinkből jól ismerjük, amelyekben kimutattuk [13], hogy a földre helyezett, nagy polarizációfokú, vízszintesen poláros fényt visszaverő, sötét, sima felületekre a szomjas bögölyök rászállnak, előtte tipikus felületérintgető (vízpróbálgató) ide-oda, fölle röpködéssorozatot végezve, mert az így polarizáló felületeket optikailag víznek hiszik.

A ferde/függőleges fekete tesztfelületek fűtött drótos részein a nőstény bögölyök 3,4/4,2-szer (statisztikailag szignifikánsan) több átlagos relatív időt töltöttek, mint a drótos részek felületaránya (6%/4%) [12]. Fűtetlen drót esetén viszont a drótos részeken eltöltött átlagos relatív idők (6,79%/4,56%) nem tértek el statisztikailag szignifikánsan a drótos részek felületarányaitól (6%/4%). Az utóbbiak szerint a fűtött drótok fölötti felületrészeket a nagyobb hőmérsékletük miatt **(5. ábra)** kedvelték a vérereket kereső nőstény bögölyök, más érzékjelek híján. Mindezen eredmények alátámasztják a zebracsíkok bögölyök általi elkerülésére adott új termofiziológiai magyarázatunkat [11, 12].

## Összegzés

A fönti terepkísérletekkel tehát megcáfoltuk a zebracsíkok föltételezett hűtő hatását. Bizonyítottuk, hogy a zebrák csíkjai fölött napsütésben nem alakul ki olyan légörvénysor, ami egy elterjedt hipotézis szerint hűti a zebrákat. Kimutattuk, hogy a nőstény bögölyök vérszívásra a napsütötte sötét (meleg), csillogó (erősen fénypolarizáló) gazdaállatokat részesítik előnyben. Kiderítettük, hogy a bögölyök azért szeretik megtámadni a melegebb kültakarójú gazdaállatokat, mert a gazdák vérszívás okozta fájdalma által kiváltott ellenreakciói elől e parazita legyek könnyebben tudnak elmenekülni, mint a hűvösebb testfelszínű állatokról. Végül kísérletileg igazoltuk a zebracsíkok szerepéről fölállított azon magyarázatunkat, hogy a csíkos kültakarójú állatokra azért nem szállnak a vért szívni szándékozó bögölyök, mert napsütésben a sok fehér és fekete csík határvonalainál kialakuló hőmérséklet-grádiensek megzavarják azt, hogy a bögölyök hőérzékeléssel találják meg a testfelszín alatt húzódó vérereket. A zebracsíkok lehetséges biológiai szerepeinek témakörében nyitva maradt még jónéhány hipotézis, amelyek kísérleti tesztelése a jövő kutatóira vár.

**Köszönetnyilvánítás:** Kutatásunkat a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal „Zebracsíkok termofiziológiai vizsgálata: új magyarázat a zebracsíkok szerepére" című, NKFIH K-123930 számú, 60 hónap (2017–2022) futamidejű pályázata támogatta.

**IRODALOM**

[1] Blahó M, Horváth G, Hegedüs R, Kriska Gy, Gerics B, Farkas R, Åkesson S (2010) A lovak fehérségének egy nem várt előnye: A leginkább „bögölyálló" ló depolarizáló fehér szőrű, a fekete ló pedig szenvedi a polarizáló szőrét. *Fizikai Szemle* 60: 145–155 + címlap

[2] Szörényi T, Pereszlényi Á, Horváth G, Barta A, Gerics B, Hegedüs R, Åkesson S (2018) Miért kell polarizációérzékelés a gazdaállat-kereséshez? A bögölyök – vizuális környezetük sötét foltjai közül – polarizáció segítségével választják ki a napsütötte sötét gazdaállatokat. *Fizikai Szemle* 68: 164–171

[3] Egri Á, Blahó M, Kriska G, Farkas R, Gyurkovszky M, Åkesson S, Horváth G (2012) Polarotactic tabanids find striped patterns with brightness and/or polarization modulation least attractive: an advantage of zebra stripes. *Journal of Experimental Biology* 215: 736–745 (doi: 10.1242/jeb.065540)

[4] Blahó M, Egri Á, Száz D, Kriska G, Åkesson S, Horváth G (2013) Stripes disrupt odour attractiveness to biting horseflies: Battle between ammonia, $CO_2$, and colour pattern for dominance in the sensory systems of host-seeking tabanids. *Physiology and Behavior* 119 (2013): 168–174 (doi: 10.1016/j.physbeh.2013.06.013)

[5] Horváth G, Pereszlényi Á, Åkesson S, Kriska G (2019) Striped bodypainting protects against horseflies. *Royal Society Open Science* 6: 181325 (doi: 10.1098/rsos.181325)

[6] Horváth G, Pereszlényi Á, Száz D, Barta A, Jánosi I M, Gerics B, Åkesson S (2018) Experimental evidence that stripes do not cool zebras. *Scientific Reports* 8: 9351 (doi: 10.1038/s41598-018-27637-1)

[7] Horváth G, Pereszlényi Á, Száz D, Barta A, Jánosi I M, Gerics B, Åkesson S (2019) Zebracsíkok feltételezett hűtő hatásának kísérleti cáfolata. *Fizikai Szemle* 1.+2. rész 69: 117–121+147–154

[8] Pereszlényi Á, Száz D, Jánosi I M, Horváth G (2021) A new argument against cooling by convective air eddies formed above sunlit zebra stripes. *Scientific Reports* 11: 15797 (doi: 10.1038/s41598-021-95105-4)

[9] Horváth G, Pereszlényi Á, Tóth T, Polgár S, Jánosi I M (2019) Attractiveness of thermally different, uniformly black targets to horseflies: *Tabanus tergestinus* prefers sunlit warm shiny dark targets. *Royal Society Open Science* 6: 191119 (doi: 10.1098/rsos.191119)

[10] Horváth G, Pereszlényi Á, Egri Á, Tóth T, Jánosi I M (2020) Why do biting horseflies prefer warmer hosts? Tabanids can escape easier from warmer targets. *Public Library of Science One* 15: e0233038 (doi: 10.1371/journal.pone.0233038)

[11] Takács P, Száz D, Vincze M, Slíz-Balogh J, Horváth G (2022) Sunlit zebra stripes may confuse the thermal perception of blood vessels causing the visual unattractiveness of zebras to horseflies. *Scientific Reports* 12: 10871 (doi: 10.1038/s41598-022-14619-7)

[12] Száz D, Takács P, Egri Á, Horváth G (2023) Blood-seeking horseflies prefer vessel-imitating temperature gradients on host-mimicking targets: experimental corroboration of a new explanation of the visual unattractiveness of zebras to tabanids. *International Journal for Parasitology* 53: 1–11 (doi: 10.1016/j.ijpara.2022.10.001)

[13] Horváth G, Egri Á, Blahó M (2014) Linearly polarized light as a guiding cue for water detection and host finding in tabanid flies. pp. 525–559. In: Horváth G. (editor) (2014) *Polarized Light and Polarization Vision in Animal Sciences*. Springer: Heidelberg

# A Fizikai Szemle tematikus számának szerzői ABC-sorrendben

Asztalos Bogdán

Balázs Boldizsár

Bősze Szilvia

Czégel Dániel

Czirók András

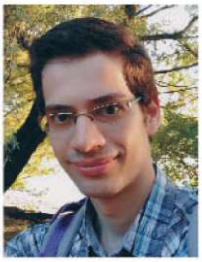
Derényi Imre

Egri Ádám

Eskandari Somayeh

Francz Barbara

Gerecsei Tamás


Horicsányi Attila

Horváth Gábor

Horváth Róbert

Jánosi Imre

Koltai János

Kubinyi Enikő

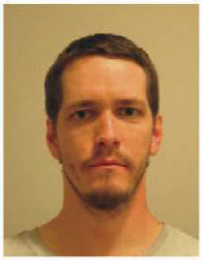
Kürti Jenő

László István

Méhes Előd

Nagy Máté

Palla Gergely


Pereszlényi Ádám

Pollner Péter

Somorjai Gergő

Szabó Bálint

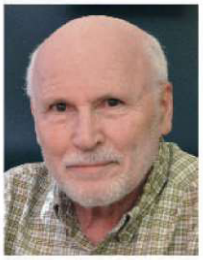
Száz Dénes

Takács Péter

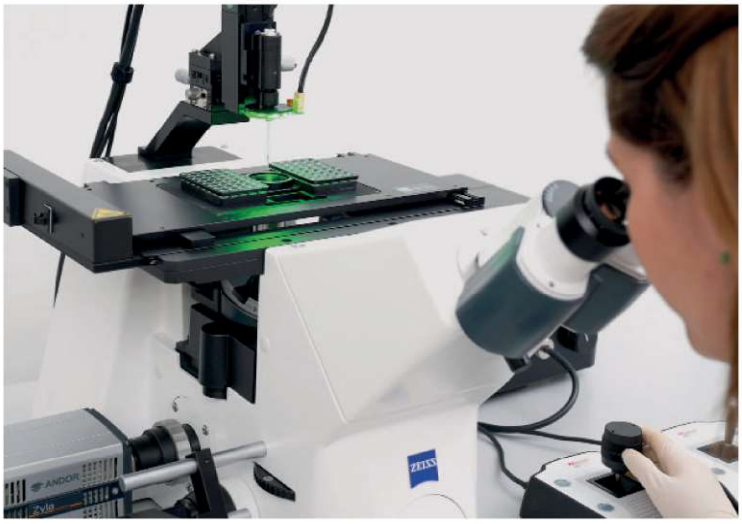
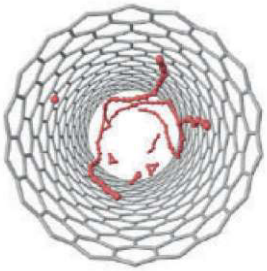
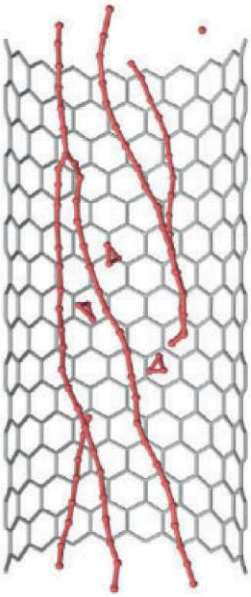
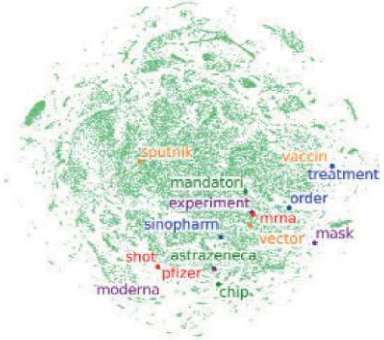
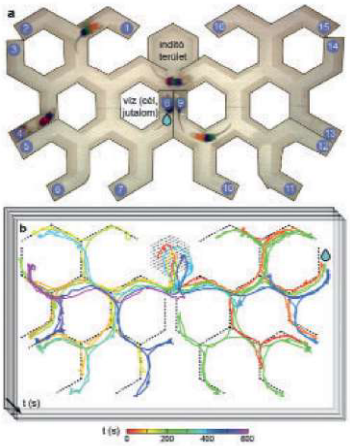
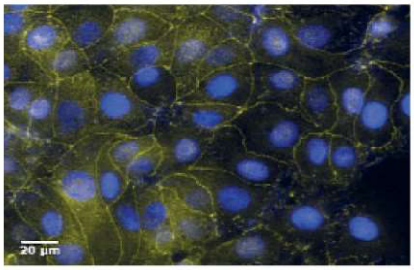
Tárnoki-Zách Júlia

Ungai-Salánki Rita

Vásárhelyi Gábor


Vicsek Tamás

Virágh Csaba

Zafeiris Anna

# Képek a tematikus szám cikkeiből