

# A poláros fény rejtett dimenziói

## Második rész

### Polarizációlátás és polarizációs ökológiai csapdák

A rovarok, rákok, skorpiók, pókok, lábasfejűek, halak, kétélűek, hullók és madarak számos fajáról bizonyosodott már be, hogy érzékeli a fénypolarizációt, s a benne rejlő információkat például térbeli tájékozódásra vagy élőhelykeresésre használja. Cikkünk második részében röviden bevezetjük az olvasót a polarizációlátás biológiájába, s néhány jellemző példával szemléltetjük, mire jó az állatoknak a polarizáció érzékelése.

#### A fénypolarizáció érzékelése – polarizációlátás

A földi természetben a részlegesen lineárisan poláros fény uralkodik. Ezért érthető, hogy jelenlegi ismereteink szerint az állatok csak a lineárisan poláros fényt érzékelik. Ennek pontos receptorfiziológiai okait legjobban az izeltlábúak szemében sikerült kideríteni. Például a rovarok összetett szemének elemi szemecskéiben, az ommatídiumokban legfőljebb 9 fotoreceptor van, melyeknek a fény felé forduló külső részén, a sejtmembránon sok apró, egymással párhuzamos nanocsövecské türemkedik ki (1. ábra). E membráncövecskéikben a fényelnyelő látópigment-molekulák dipóltengelye közel párhuzamos a nanocsövecskék hossz tengelyével. Egyetlen dipólmolekula annál több lineárisan poláros fényt nyel el, minél kisebb szöveget zár be dipóltengelye a fény rezgéssíkjaival.

Mivel a rovarok fotoreceptoraiiban minden pigmentmolekula közel egyirányú, a receptorok polarizációérzékenyek: a rájuk eső lineárisan poláros fényt maximálisan, illetve minimálisan nyelik el, ha annak polarizációiránya párhuzamos, illetve merőleges a nanocsövecskék hossz tengelyére. A különböző irányú nanocsövecskéket tartalmazó polarizációérzékeny fotoreceptorok elektromos jeleit speciális neuronok hasonlítják össze, amiből az állat agyának látóközpontja meghatározza a fény intenzitását, polarizációfokát és -irányát.

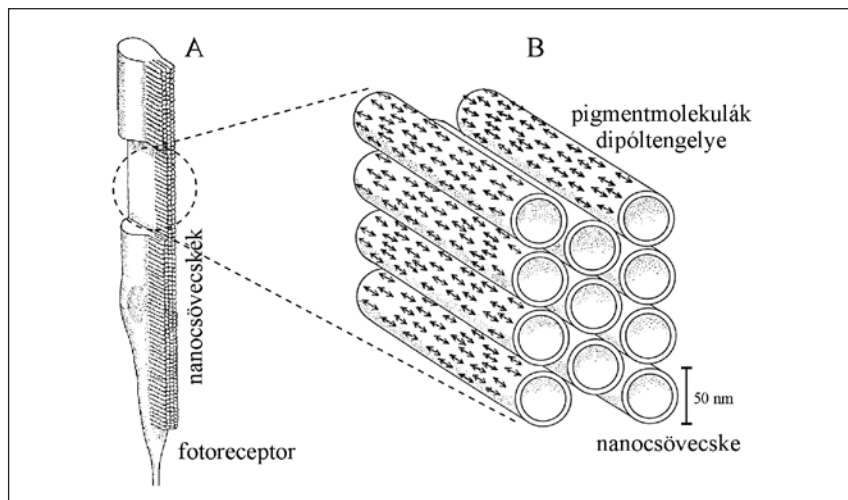
Mivel a rovaroknak általában ultraibolya-, kék- és zöldérzékeny fotoreceptorai vannak, nem meglepő, hogy a fénypolarizációt is a spektrum ugyanezen tartományainak egyikében érzékelik. Az viszont sokáig érthetetlen volt, hogy az égboltpolarizáció alapján tájékozódó állatok a spektrumnak miért nem ugyanazon tartományában érzékelik a poláros fényt. Például a

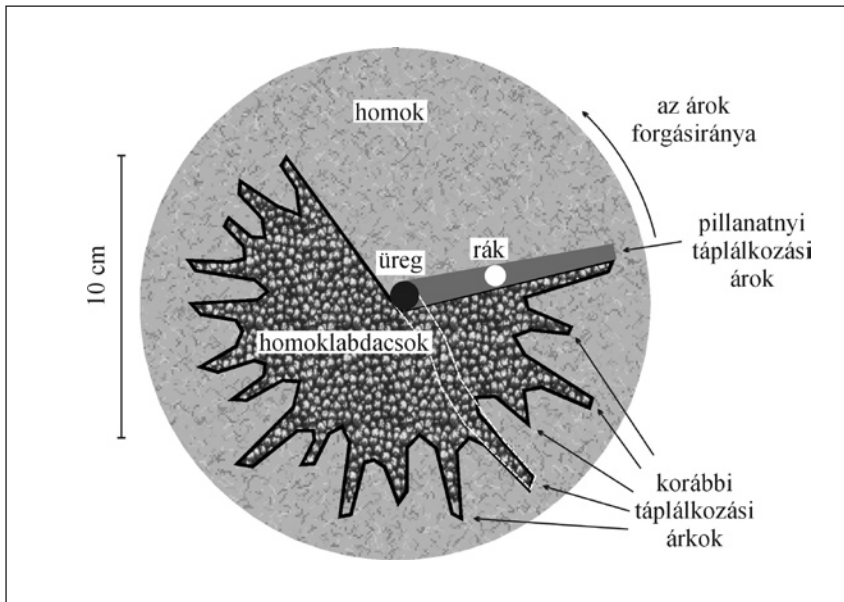
mézélő méhek (*Apis mellifera*) és a sivatagi hangyák (*Cataglyphis bicolor*) az ultraibolyában, a mezei tücskök (*Gryllus campestris*) a kékben, a májusi cserebogarak (*Melolontha melolontha*) pedig a zöldben érzékelik a felülről jövő poláros fényt.

Polarimetriai vizsgálatokkal és számítógépes modellezéssel kutatócsoportunknak sikerült megfejtenie a rejtélyt. Az állatok égboltpolarizáció-érzékelésének optimális hullámhossztartománya függ az állat életmódjától, valamint aktivitásának napszakától és az optikai környezettől. Megmutattuk, hogy tiszta égbolt alatt a spektrum bármely tartományában gyakorlatilag egyforma hatékonysággal lehet érzékelni a mindig megfelelően nagy polarizációfokú égboltpolarizációt. Tiszta légkör esetén tehát nincs kitüntetett spektrális tartománya a polarizációlátásnak. Napközben felhős ég alatt vagy napfényel megvilágított falombok alatt azonban az ultraibolyában érdemes érzékelni a felülről jövő poláros fényt, mert annak polarizációfoka az ultraibolyában a legnagyobb. Ennek oka, hogy úgy a felhőkről, mint a lombokról eredő fény intenzitása az ultraibolyában minimális, így a felhők és a lombok alatti légrétegben szóródó fény polarizációfokát az ultraibolyában csökkenti legkevésbé a felhőfény, illetve a lombfény.

A mezei tücskök viszont a spektrum kék részében érzékelik az égboltpolarizációt. Ez azzal magyarázható, hogy a tücskök főleg napnyugtá után aktivizálódnak. Márpedig a naplementét követően a kékben maximális intenzitású égboltpolarizáció erőssége az idővel rohamosan csökken. Ha napnyugtá után a tücskök az ultraibolyában érzékelnék az égboltpolarizációt, akkor az ultraibolya összetevőben szegényebb égboltpolarizáció intenzitása jóval hamarabb csökkenne az érzékelési küszöbük alá, vagyis jóval rövidebb ideig lennének képesek érzékelni az égboltpolarizációt és annak polarizációja alapján tájékozódni. Azzal, hogy a tücskök a kékben érzékelik a poláros ég-

1. ábra. A rovarok polarizációlátását lehetővé tevő, nanocsöves membránú fényérzékeny sejt (fotoreceptor) külső szegmense (A) és az egymással párhuzamos nanocsövecskék kötegének egy kinagyított részlete, ahol kettős fejtű nyilak szemléltetik a látópigment-molekulák dipóltengelyét (B)





2. ábra. A *Dotilla wichmanni* rák homokba fúrt ürege körül körbeforgó munkaárok, amelynek irányulását a Nap, illetve ha az nem látható, akkor az égbolt polarizációs mintázata szabályozza

boltfényt, napnyugta után és napkelte előtt közel egy-egy órával meghosszabbítják azt az időszakot, amikor az égbolt polarizáció segítségével tudnak navigálni a fűben, ahonnan az eget mindig láthatják.

A májusi cserebogarak polarizációlátásának zöldrészékenységét az előbb tárgyalt rovarokétól eltérő életmódra vezettük vissza. E bogarak kifejlett példányai életük zömét a falombok alatt töltik, és naplemente környékén rajzanak, többnyire az erdőszéli fák alatt. Megmutattuk, hogy a lemenő Nap fénye által megvilágított falombokról származó és a lombok alatti levegőben szóródó napfény eredő polarizált intenzitása (azaz a lineáris polarizációfok és a fényintenzitás szorzata) a spektrum vörös, majd zöld tartományában a legnagyobb. Mivel a cserebogaraknak sincsenek vörössérzékeny fotoreceptoraik, a második legkedvezőbb szinttartományban, a zöldben érzékelik a falombok alatt szóródó poláros fényt. A spektrum zöld tartományában ugyanis még elegendően nagy a lemenő Nap lombok alatt szóródó fényének intenzitása és polarizációfoka.

### Navigáció az égbolt polarizációja segítségével

A polarizációlátás egyik legfontosabb funkciója a térbeli tájékozódás segítése. Az állatok zöme a Nap azimutjához méri a mozgásirányát. Mikor a Nap felhők vagy lombok miatt nem látható, illetve a horizont alatt van, akkor az égboltfény polarizációirányának a meteorológiai viszonyoktól szinte független mintázatából következ-

tethető ki a Nap iránya, mivel e mintázat szimmetriasíkja a szoláris-antiszoláris meridián. Hogy az így adódó szoláris és antiszoláris irányok közül melyik mutat a Nap felé, az az égboltfény intenzitásának és színének mintázatából olvasható ki.

Az égbolt-polarizációra támaszkodó térbeli tájékozódás hosszskálájának egyik végén a több ezer kilométer megtételére képes polarizációérzékeny madarak vannak. E hosszskála másik végén a tengerparton élő *Dotilla wichmanni* nevű rákok foglalnak helyet, amelyek az égbolt polarizációs mintázatát használják föl ahhoz, hogy egy tenyérszerű területű, kör alakú homokfelületen tájékozódjanak (2. ábra). E néhány centiméteres rák a tengerpartok homokjába fúrt, légzárvánnyal teli apró üregében húzza meg magát, amíg dagály árasztja el a homokfövenyt. Amikor a tenger visszahúzódik, a rákocska a szárazra került homokfelszínre mászik, amelynek néhány milliméter vastag felső rétegét egy egyenes árokban haladva eszeveszett sebességgel kezdi mellső lábával a szájába lapátolni, hogy kiszűrje a homokszemcsék közül az apró élőlényeket és a szervesanyag-törmelékét. Az átszűrt homokból apró labdacskokat képez, melyeket mindig az árok azon oldalára dobál, ahol a homokot már átszűrte. Ily módon a rák az ürege körüli homokfelületen egy fokozatosan növekvő nyílászögű körcikkekben egyre több homoklabdacskot hagy, miközben a még át nem szűrt homokfelület körcikkszerűen egyre csökken. E két eltérő minőségű homokrészt az óramutató járásával egyező vagy azzal ellentétesen körbeforgó, a rák üregétől sugárszerűen induló homokárok választja el.

Miközben a rák – kihasználva az apály nyújtotta rövid táplálkozási időszakot – folyamatosan szűri a homokot és melléktermékként gyártja a homoklabdacskokat, munkaterepét néha egy-egy partra kicsapó víz hullám önti el. Ekkor a rák hirtelen visszahozan és elbújik az üregében. Miután a víz hullám visszahúzódott, a rák újra előbújik és ott folytatja a táplálkozást, ahol abbahagyta. De közben a víz teljesen elmosta a homoklabdacskokat az árokkal együtt, semmi nyomát sem hagyva a korábbi homoktúrás munkálatoknak. A rákocska azonban pontosan ott folytatja a homok átszűrését, ahol abbahagyta.

De honnan tudja a rák, hogy milyen irányú volt a vízelöntés előtti homokárka? Olasz biológusok kimutatták, hogy a rák a Nap azimutszögéhez méri a munkaárka irányát, vagy ha a Napot felhők takarják, akkor az égbolt polarizációs mintázatából következteti ki a szoláris meridián irányát.

A *Scarabaeus zambesianus* galacsinhajtó bogár napnyugta után kel szárnyra és keres egy friss trágyakupacot, hogy abból galacsint formázzon, amibe a petéit rakja. Azonban később érkező társai megpróbálják elorozni tőle e galacsint. Ezért a bogár a galacsinját a trágyakupactól tetszőleges sugárirányban, nyílegyenesen görgeti több száz méteren át, hogy kimentse társai karmaiból. Dél-afrikai és svéd biológusok fedezték föl, hogy ez a bogár az égbolt polarizációs mintázata segítségével képes tartani az egyenes irányt a napnyugtát követő közel egyórás szürkületi időszakban. Teliholdkor a holdfény légköri szóródása eredményeként az égen kialakuló polarizációs mintázatot is fölhasználja a térbeli orientációra, s emiatt több órával meghosszabbodik az az időszak, amíg a galacsinját meggyúrhatja és görgetheti.

### Polarizációlátás a vízben

A vízben két fő polarizációs mintázat fordul elő. Az egyik az égbolt polarizációja a vízből nézve, ami csak kismértékben tér el az égbolt eredeti polarizációjától. E mintázatot számos víziállat használja térbeli tájékozódásra ahhoz hasonlóan, ahogyan szárazföldi társai. Az egyik ilyen állat a *Palaemonetes vulgaris* tengeri rák, amely a parti vizekben él. A sekély tengervízben táplálkozik, de ha szárazföldi vagy vízi ellenséget vesz észre, akkor gyorsan és nyílegyenesen a mélyebb vízbe menekül. Mindig a partvonalra merőlegesen halad, mert ebben az irányban mélyül leggyorsabban a tenger. A zavaros és csak enyhén süllyedő fenékű vízben azonban nehéz megállapítani a partvonalra pontosan merőleges irányt. Amerikai biológusok fedezték föl, hogy e rák a Nap irányához méri a mindenkori partra merőleges me-

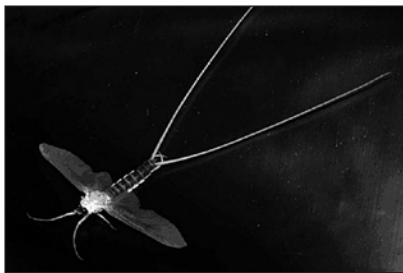
nekülési irányt, s mikor a Napot felhők takarják, akkor az égbolt polarizációs mintázatából határozza meg a szoláris meridián irányát. A rák figyelembe veszi a Nap és a vele együtt mozgó égboltpolarizációs mintázat Sarkcsillag körüli forgását, ezért minden pillanatban tudja, hogy a szoláris meridiántól mekkora szögben kell a mélyebb víz felé menekülnie, hogy a partvonalra pontosan merőlegesen hagyhassa ott a parti sekély vizet.

A víz alatti világ másik jellegzetes polarizációs mintázata a vízfelületen megtört, vízbe hatoló napfény vízbeli szóródásának az eredménye. Például egy polarizációérzékeny látórendszerű halat a vízben haladó napfény irányára merőlegesen, gyűrűszerűen övez a legnagyobb polarizációfokú tartomány, aminek szimmetriásíkja a szoláris-antiszoláris meridiánéval egyezik. A polarizációlátással bíró halak, például a szivárványos pisztrángok (*Oncorhynchus mykiss*) e polarizációs mintázat szimmetriatengelyének ismeretében még akkor is képesek megállapítani a szoláris meridián irányát, ha a Napot a felületi víz hullámzás vagy a zavaros víz miatt nem látják. E mintázat tehát úszási irányuk viszonyítási irányát jelöli ki, továbbá segít a rendes testtartás állandósításában is.

Végül megjegyezzük, hogy a lábasfejűek (például kalmárok vagy nyolckarú polipok) szintén látják a fény polarizációt, amit többek között arra használnak, hogy vízi zsákmányukat, például a halakat jobban fölismerehessék a zavaros vízben. A vízben kialakuló polarizációs mintázat ugyanis olyan háttér, aminek polarizációfoka és -iránya eltér a zsákmányról visszaverődő fénytől. A halak testét gyakran fémesen tükröző pikkelyek borítják, melyek funkciója, hogy elrejtse, láthatatlanná tegyék a halat a környező vízben szórt fény tükrözésével. Nos, a halakra vadászó lábasfejűek polarizációlátása lényegében ezt a rejtőzködést „töri föl”, mivel a lábasfejűek képesek észlelni a halakról és a környező vízből jövő fény polarizációja közti kis különbségeket is.

### Polarotaktikus vízkeresés

A sima vízfelületről többnyire vízszintesen poláros fény tükröződik. A víztestek a róluk visszaverődő fény vízszintes polarizációja alapján már távolról fölismerehetőek, amikor más érzékszervekkel, például a szagok, a hőmérséklet vagy a pára alapján a víz még nem észlelhető. Az evolúció során ki is fejlődött az állatok egy csoportjában a víz polarizáció alapján történő érzékelése: a vízirovarok (beleértve a továbbiakban a vízhez kötődő rovarokat is) pozitív polarotaxissal rendelkeznek, amennyiben vonzódnak a vízszintesen és erősen poláros fényhez.



3. ábra. Vízszintes fekete műanyag fólia által megtévesztett és odavonzott polarotaktikus hím tiszavirág (*Palingenia longicauda*)

Mivel egy röptében vizet kereső vízirovarnak testméretétől és kültakarója vastagságától függően mintegy fél-másfél órában belül vizet kell találnia, különben kiszáradás miatt elpusztul, biztosra kell mennie. Ha csupán a fény intenzitása alapján próbálna vizet találni, könnyen becsaphatná egy nagy fényvisszaverőképességű világos homokfelület vagy egy napsütötte földfelszín, ami hasonlóan fényesnek tűnik, mint egy vízfelszín. Ellenben ha a vízszintesen poláros fény forrásait keresi, akkor szinte teljes biztonsággal megleli a vizet, mert a természetben csak a vízfelszín ver vissza ilyen fényt. Rudolf Schwind német biológus az 1980-as évek elején fedezte föl a *Notonecta glauca* vízipoloska polarotaktikus vízdetekcióját, s azóta az ő és zömében a mi kutatócsoportunk munkássága eredményeként több mint 250 vízirovarfajról (vízibogarakról és vízipoloskákáról), valamint vízhez kötődő rovarfajról (szitakötőkről, kérészekről és bögölyökről) derült ki ugyanez. Manapság már paradigmának számít, hogy szinte minden vízirovar polarotaxissal találja meg vízi életterét.

A vízirovarok tehát a vízfelületnek csak azon részeit tekintik víznek, ahonnan a vízszinteshez közeli rezgésű fény verődik vissza, amelynek  $p$  lineáris polarizációfoka nem kisebb, mint polarizációérzékelésük  $p^*$  küszöbe.  $180^\circ$  látószögű képalkotó polarimetriával mértük a vízfelületek tükröződési polarizációs mintázatát a Nap állásának függvényében, és meghatároztuk a vízfelület azon  $Q$  hányadát, amit a polarotaktikus vízirovarok a polarizáció alapján víznek vélnek. Kiderült, hogy úgy a sötét, mint a világos vizeknél  $Q$  naplementekor és napkeltekor a legnagyobb, vagyis amikor a Nap a horizont közelében tartózkodik. A sötét vizeknél  $Q$ -nak délben ugyancsak maximuma van. Ebből kifolyólag a polarizáció alapján történő vízkeresés optimális időszaka az alacsony napállás ideje, míg a sötét vizeket a dél körüli magas napállások mellett is érdemes polarotaktikusan keresni. Nemrég azt is kimutattuk, hogy ezen fizi-

kai-optikai jósoltnak megfelelően a polarotaktikus vízirovarok tényleg többnyire reggel és/vagy délben és/vagy este kelnek szárnyra, hogy új vizeket keressenek. E jelenséget nevezzük a vízirovarok „polarizációs napórájának”.

A polarotaktikus vízkeresés kényszerre olyan erős, hogy még egy olyan vízirovarfaj is polarotaktikusnak bizonyult, aminek tulajdonképpen nincs is szüksége a víz ilyen detekciójára, mert röpké felnőtt életében soha sem kell vizet keresnie. A szinte hungarikumnak számító tiszavirágról (*Palingenia longicauda*) (3. ábra) van szó, melyről nemrég viselkedési terpkísérletekkel mutattuk ki, hogy szintén vonzódnak a vízszintesen poláros fényhez. Ez azért meglepő, mert e kérészfaj sohasem távolodik el az élőhelyétől szolgáló folyótól nagyobb távolságra. A tiszaviráglárvák vedlésével megjelenő első szárnyas alakok, a szubimágók közvetlenül a folyóparti növényeken vagy a víz fölé hajló ágakon, illetve a vízben álló növényeken és tárgyakon változnak kifejlett hímrovarrá. Ezt követően elkezdnek a folyó fölött közvetlenül ide-oda röpködni, farknyúlványukkal gyakran a vizet érintve, miközben nőstények után kutatnak. A nőstényeknek nincsen szubimágója; a folyó felületére úszó lárvákból párzóképes nőstények alakulnak ki, amelyek ugyan csak a vízfelszín közelében maradva szállodnak, míg a hímekkel nem párosodnak. A megtermékenyítés után a folyó sodrásirányával ellentétesen a víz fölött nagy magasságban röpülnek egy darabig, majd a vízbe rakják petéiket, végül a hímekkel együtt néhány óra múlva elpusztulnak.

A kifejlett tiszavirágak tehát igen szoros kapcsolatban maradnak a vízzel, más kérészeketől eltérően a peterakáshoz nem kell visszatérniük a vízhez, ezért nincs szükségük a vízről tükröződő fény polarizációjának érzékelésére. Mégis rendelkeznek ezzel a képességgel, ami jól mutatja, milyen erősen rögzült genetikailag ez az érzékelés. Mi is csak úgy tudtuk kimutatni a tiszavirágak polarotaxissát, hogy miután a Tisza fölött befogtuk a rovarokat, a part olyan részére vittük őket, ahonnan nem látták a folyót, s ott többszörös választásos kísérleteket végeztünk velük (3. ábra). Talán a polarotaxis szükségtelensége a tiszavirágnál újkeletű, s még nem telt el elég idő ahhoz, hogy e fölöslegesnek látszó képesség eltűnjön e kérészfaj genetikai állományából.

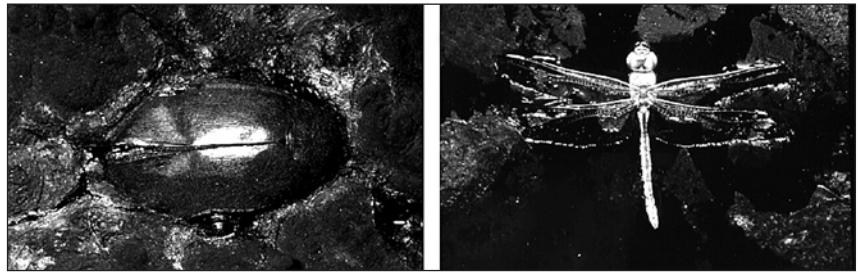
A polarotaktikus vízdetekció szabálya alól nemrég találtunk egy érdekes, nem várt kivételt is. Laboratóriumi viselkedési kísérletekben fölfedeztük, hogy a sárgaláz-szúnyog (*Aedes aegypti*) nősténye nem a vízszintes polarizáció alapján találja meg a peterakó helyét szolgáló apró víztesteket. Habár e szúnyog kifejlett egyedei a szárazföldön élnek, lárvaként a vízben fejlődnek,

tehát erősen a vízhez kötődő rovarfajról van szó. Éppen ezért logikus volt az a várakozás, hogy e faj is polarotaktikus vízdetekcióval rendelkezik. A vérszívó nőtény szúnyogok nedves peterakóhely-választását azonban egyáltalán nem befolyásolta a vízszintesen poláros fény jelenléte vagy hiánya. E meglepő eredmény magyarázatát abban véljük, hogy a sárgalázszúnyogok természetes vízi peterakó helyei olyan apró, eldugott, mesziről nehezen látható vízgülemlek (például faodvakban vagy sziklahasadékokban), melyek felületét nem éri közvetlen napfény vagy égboltfény, így a róluk visszaverődő fény polarizációja nem segíthet a távoli vizuális detekcióban. A sárgalázszúnyog az első olyan vízirovarfaj, mely kilóg az említett paradigma alól. Mindennek az a sajnálatos gyakorlati jelentősége, hogy e szúnyogfaj biztosan nem írható vízszintesen poláros fényt keltő csapdákkal.

#### Polarizációs ökológiai csapdák

Eddig arra mutattunk példákat, hogy a polarizációlátás a természetes környezetben hasznára válik az állatoknak. Ha azonban megváltozik a környezet, egy korábban előnyös tulajdonság vagy viselkedés hátrányossá is válhat. Így van ez például a vízirovarok vízszintesen poláros fényhez való vonzódásával is. Az ember megjelenése előtt a természetben a fényt vízszintesen és erősen gyakorlatilag csak a vizek felszíne polarizálta. Mióta azonban az ember aszfaltutakkal hálózza be a Föld felszínét, sivatagi háborúkban kőolajtavakkal szennyezi például a kuvaiti homoksvatagot, hatalmas felületű üvegházakat épít és fekete műanyag fóliákkal borítja be a szántóföldeket, akaratlanul is olyan mesterséges felületeket hoz létre, amelyek a fényt erősen és vízszintesen polarizálják. E mesterséges felületek a vízfelszínhez hasonlóan igen vonzóak a polarotaktikus vízirovaroknak, ezért megtévesztik őket, s a rovarokat vagy lerakott petecsomóikat elpusztítják.

A gondot csak tetézi, hogy ezek az erősen és vízszintesen polarizáló felületek gyakran még a vizeknél is sokkal vonzóbbak a vízirovarok számára, mert nagyobb polarizá-



4. ábra. A visszavert fényt erősen és vízszintesen polarizáló pakura által megtévesztett, odavonzott és elpusztított polarotaktikus vízibogár és szitakötő

ciófokú fényt vernek vissza és/vagy a visszaverődő fény rezgéssíkja kevésbé tér el a vízszintestől, mint a vízfelületekről tükröződő fényé. Ezáltal a szóban forgó, ember alkotta felületekről visszaverődő, igen erősen és szinte tökéletesen vízszintesen poláros fény szupernormális ingerként hat, azaz a vízirovarok csak ehhez a fényhez vonzódnak, figyelmen kívül hagyva a vízről tükröződő, kevésbé poláros fényt. Viselkedési terepkísérletekkel kimutattuk, hogy például a földre terített fekete műanyag fóliáról tükröződő fénynek olyan erős a vízszintes polarizációja, hogy szinte az összes odacsábított polarotaktikus vízirovar végleg ott tartja: a rovarok kiszáradnak és elpusztulnak. Ily módon e fóliák nemcsak a rájuk rakott petéket, hanem a kifejlett felnőtt vízirovarokat is megtizedelik.

Mindez tipikus ökológiai csapdamechanizmushoz vezet: a vízirovarok természetes körülmények között jól működő polarotaktikus vízkereső viselkedése az említett mesterséges felületekkel teli környezetben a saját vagy utódaik vesztére válik, amennyiben nem a gyengébb polarizációs jelű vizeket választják peterakó helyül, hanem az erősebb polarizációjú, de az utódok kifejlődésére teljességgel alkalmatlan aszfalt, olaj, üveg, műanyag, vagy autókrosszéria és márvány felületét. Nem nehéz belátni, hogy ez a környezeti csapdamechanizmus akár egy adott faj helyi kipusztulását is okozhatja. Az alábbiakban rámutatunk, hogy nemcsak egy ritka, helyi, speciális vizuálökológiai jelenségről van szó, hanem egy nagyon is globális, gyakran és a Földön szinte minden olyan

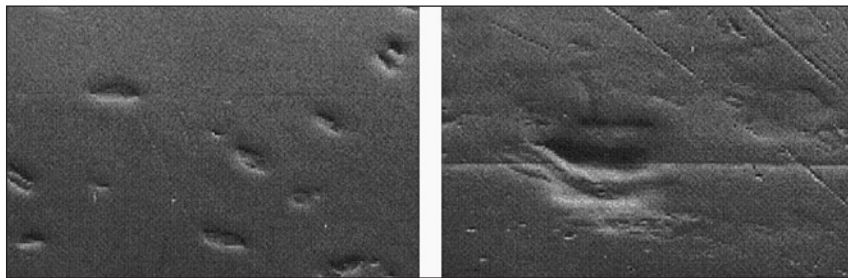
helyen fölbukkanó negatív hatásról, ahová a *Homo sapiens* betette a lábát.

E jelenséggel először akkor találkoztunk, mikor egyik német biológus kollégánkkal, Jochen Zeillel együtt megfejtettük annak rejtélyét, hogy a kuvaiti svatagban az első Öböl-háborúból visszamaradt több száz kőolajtóhoz miért vonzódnak a szitakötők és lelik ott halálukat. Itthon, Magyarországon folytattuk a kutatómunkát, amire az adott lehetőséget, hogy Budapest XVIII. kerületében több mint 50 évig létezett egy nyílt felszínű olajtároló, amiben pakurát tároltak. Polarimetriai vizsgálatokkal először kimutattuk, hogy az ilyen sötét olajfelületek mindig vízszintesen poláros fényt tükröznek, s adott visszaverődési szög mellett a tükrözőtt fénynek sokkal nagyobb a lineáris polarizációfoka, mint általában a vizekről visszaverődő fényé. Viselkedési terepkísérletekkel ezután azt is bizonyítottuk, hogy a szitakötők a vízfelületről tükröződő vízszintesen poláros fény alapján találják meg a peterakó helyül szolgáló vizeket, s ha választhatnak a sötét olaj és a világosabb víz között, akkor mindig az előbbi részesítik előnyben. Később számos más vízirovarfajról sikerült kimutatnunk ugyanezt, amivel érthetővé vált, hogy e rovarok miért vonzódnak a fekete olajhoz, ami csapdába is ejti őket (4. ábra).

Talán még ennél is meglepőbb volt, hogy nemcsak az erősen és vízszintesen polarizáló sötét olajszármazékok képesek megtévesztetni és elpusztítani a polarotaktikus vízirovarokat, hanem az olyan, elsőre veszélytelennek tűnő felületek is, mint

5. ábra. (A) Száraz aszfaltútra leszállt nőtény kérész (*Epeorus silvicola*). (B) Vízszintes fekete műanyag fóliára petéző dán kérész (*Ephemera danica*). (C) Dán kérészek fekete műanyag fóliára rakott fehér petecsomói





6. ábra. Forró autókarosszériára rakott szitakötőpetékből képződő kénsav marási nyomai az autó védő lakkrétegen

például a száraz aszfaltutak, elvégre ezek felülete általában nem ragadós. Biológusok figyelték meg, hogy a vízben fejlődő kérészek, ezek a tipikus vízirovarok a száraz aszfaltutak fölött rajzanak, párosodnak, majd az aszfaltra petéznek a víz helyett, ha egy aszfaltút vezet azon víztest (patak, folyó vagy tó) mellett, amiben lárvaként fejlődnek. Ugyancsak polarimetriai mérésekkel és viselkedési terepkísérletekkel bizonyítottuk, hogy a kérészek is polarotaxissal találják meg a vizet, s ha a közelben egy erősen és a kérészrajzáskor, napnyugta környékén vízszintesen poláros fényt viszaverő aszfaltút vezet, akkor annak szuper-normális jele a víz helyett a száraz aszfalthoz csábítja őket (5/a ábra). Ezzel megoldottuk azt a régi rejtélyt, hogy például az amerikai Mississippi folyó mellett húzódó aszfaltutak fölött miért rajzanak, szállnak le és petéznek le óriási tömegben a folyóból kikelő kérészek (emiatt a rajzás idejére rendszeresen le kell zárni ezeket az utakat az autóbalesetek elkerülése érdekében).

Ezek után már nem volt meglepő, hogy egyre szaporodott azon vízirovarfajok száma, melyekről kiderült, hogy pozitív polarotaxissal találják meg vízi élőhelyüket, és ugyancsak fokozatosan bővült azon ember alkotta tárgyak/felületek köre, melyek a róluk visszaverődő erős és vízszintes polarizáció okán odavonzzák e rovarokat. Ilyen felületek a mezőgazdaságban használatos sima felületű fekete műanyag fóliák és az üvegházak síküveg lapjai is (3. ábra, 5/b-c ábra). Ezzel szemben a fekete pernyemezők és a szántóföldek nem ökológiai csapdák, hiszen bár erősen poláros, de általában nem vízszintes rezgésű fényt vernek vissza.

Az autók fényes karosszériája is erősen polarizálja a visszavert fényt a spektrumnak abban a tartományában, amelyben az autó sötét. Kimutattuk, hogy a polarotaktikus vízirovarok a legjobban a fényes fekete és vörös autók vízszintes felületrészeihez vonzódnak, míg például a fehér vagy sárga autók nem fejtenek ki rájuk ilyen hatást. Mivel a vízirovarok nem érzékelik a vörös színt, mert nekik is csak ultraibolya-, kék- és zöld-érzékeny fotoreceptorai vannak, számukra a vörös és fekete autók egyformának tűnnek. Márpedig az Umow-szabály szerint (lásd

cikkünk első részét) a fekete autókarosszéria a spektrum minden részében, a vörös pedig csak a kékben és a zöldben igen nagy polarizációfokú fényt ver vissza, aminek rezgés-síkja vízszintes, ha a fény például a kocsi tetejéről tükröződik. Ez vonzza a fekete és vörös autókhoz a vízirovarokat. Ha egy autó piszkos, matt felületű, akkor diffúzan szórja a fényt, ami jelentősen csökkenti a fény polarizációfokát. Mindezek ismeretében azt mondhatjuk, hogy a „legzöldebb” autó fehér és piszkos.

E jelenség azonban nemcsak a vízirovaroknak káros, hanem az autók fényezését is károsíthatja. Brazil kémikusok ugyanis kimutatták, hogy ha napsütésben 70 °C fölé melegszik az autókarosszéria, akkor a rára-kott rovarpetékből olyan erős sav keletkezik, ami a savas esőkhöz hasonlóan kimarja az autó védő lakkréteget (6. ábra).

Érdekes módon ugyanezzel a jelenséggel találkozhatunk a temetőken is. Nemrég figyeltük meg, hogy bizonyos temetőken a fényes fekete márványból készített sírkövek erősen és vízszintesen polarizáló felületrészei szitakötőket tévesztenek meg, s vonzanak magukhoz. A szitakötők a fekete sírköveknél ugyanúgy viselkednek, mint a vízfelületeknél: a hímek territóriumot védenek, párosodnak az odavonzott nőstényekkel, amelyek a sírkövekre petéznek. Mivel e peték menthetetlenül elpusztulnak, itt megint egy ökológiai csapdával van dolgunk.

Legutóbb egyik terepkísérletünkben azt találtuk, hogy számos bögölyfaj is polarotaktikus, azaz a vízszintesen poláros fényhez vonzódik. Ez elsőségre azért volt meglepő, mert e rovarok nem a vízbe rakják petéiket. A vizsgált bögölyfajok a víz fölé hajló mocsári növényekre petéznek, hogy kikelő lárváik a vízbe pottyanhassanak. Ezek a bögölyök tehát azért polarotaktikusak, hogy a petézőhelyül szolgáló mocsári növények keresése közben a távolból először a fényt vízszintesen polarizáló vízfelületeket találják meg, s csak utána a vízparton lévő, peterakásra alkalmas leveleket. A polarotaxisnak a peterakóhely-keresésben játszott ilyen közvetett szerepe újnak számít a vizuálökológiában. További érdekesség, hogy a vizsgált bögölyfajok az első ismert olyan légyfajok, melyekben polarotaktikus vízdetekció vált ismertté. A nőstények vérszí-

vók, s az emlícsallatok, köztük az ember vérért szívva különféle súlyos állati és emberi fertőző betegségek hordozóit terjesztik. Vérszívásukkal állandóan zaklatják például a szarvasmarhákat is, így azok tejhozama több tíz százalékkal is visszaeshet. Ezen egészségügyi és gazdasági károk miatt már régóta próbálkoznak különböző típusú bögölycsapdák kifejlesztésével. A bögölyök általunk fölfedezett polarotaxisa új elven működő bögölycsapdák megalkotását teszi lehetővé. Néhány ilyen csapdánk jelenleg szabadalmazás alatt áll.

Végül megemlítjük, hogy a nagyvárosokban hőmpölygő folyók partján sorakozó modern üvegépületek is a vízirovarok ökológiai csapdájának új fajtáját képezik. Budapesten, a Duna partján figyeltük meg, hogy minden májusban, a *Hydropsyche pellucidula* dunai tegzesek szokásos, napnyugta környéki rajzásukkor kirepülve a Dunából, a parton lévő épületek függőleges üvegtáblái előtt röpdösnek hatalmas számban. E rajzó és párzó vízirovarok rászállnak az üvegfelületekre és gyakran ott is párzanak. Ha az ablakok a szellőzés miatt kissé meg vannak döntve, akkor a tegzesek bejutnak az épület helyiségeibe is, ahol aztán csapdába esnek és elpusztulnak. Laboratóriumi viselkedési kísérletekkel igazoltuk, hogy e tegzesek is a vízszintesen poláros fény segítségével találják meg a vizet mint természetes peterakó helyet.

Elsőre meglepőnek tűnhet, hogy a vízszintesen poláros fényhez vonzódnó tegzesek a függőleges ablakfelületekre szállnak. Polarimetriával azonban kimutattuk, hogy például az épületek árnyékban lévő függőleges ablaküvegeiről is közel vízszintes rezgésű poláros fény tükröződik, mivel ekkor alulról nézve a fölülről jövő égboltfény verődik vissza. A függőleges síküvegről visszavert vízszintesen poláros fény csábítja tehát oda a polarotaktikus tegzeseket. Ezek a vízszintesen polarizáló ablaküvegek a rovarvő barázdabillegetők terített asztalai lehetnek. E vízpárti madarak a természetben a vizek partján futkározva szedegetik össze az ott tartózkodó rovarokat. A Duna-parton azonban az épületek üvegfelületeihez csábított polarotaktikus tegzesekkel teszik ugyanezt.

A polarizációs ökológiai csapdák az evolúciós időskálán csak nemrég jelentek meg. Ezért még nem volt idő arra, hogy a vízirovarok evolúciós választ adjanak rájuk. A válasz lehet például egy adott vízirovarfaj kipusztulása vagy valamilyen alkalmazkodása az új, megváltozott körülményekhez.

HORVÁTH GÁBOR, HEGEDŰS RAMÓN  
MALIK PÉTER, BERNÁTH BALÁZS  
KRISKA GYÖRGY

AJÁNLOTT IRODALOM

Az ELTE Biológiai Fizika Tanszék Biooptika Laboratóriumának honlapjáról számos magyar és angol nyelvű cikk tölthető le e cikk témájában: arago.elte.hu