

Polarotaxis a rovarvilágban

KRISKA GYÖRGY

ELTE Biológiai Szakmódszertani Csoport, Budapest, H–1117 Pázmány Péter sétány 1/C.

E-mail: kriska@ludens.elte.hu

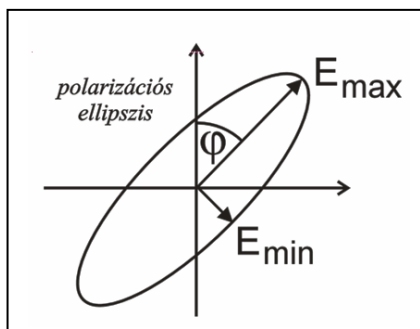
Összefoglalás. A fénypolarizáció érzékelésére képes állatcsoportok közül különösen a rovarok között találunk olyanokat, amelyek számára az egyéb optikai jegyeket kiegészítő fénypolarizáció létfontosságú információhordozó. A fénypolarizáció érzékelésével kapcsolatos rovartani kutatások eredményei kezdetben az egyes rovarfajok térbeli tájékozódásának vizsgálatához kapcsolódtak. Az utóbbi évek kutatásai eredményeként ma már ismeretes, hogy a vízben és nedves anyagokban élő rovarok szeme képes érzékelni a fénypolarizációt és ezek az állatok a vízfelszínről visszatükröződő vízszintesen polarizált fény segítségével találják meg életterüket. A polarotaxissal történő vízdetektálást megzavarhatják bizonyos hatások, amelyek főként antropogén eredetűek. A cikk a tudománytörténeti és fizikai alapok áttekintése után ezekkel a problémákkal foglalkozik.

Kulcsszavak: vízirovarok, polarotaxis, rovar csapdák, vízdetektálás, tükrözőes fénypolarizáció.

Fizikai alapok

A környezetünkben érkező fény transzverzális, tehát a terjedési irányára merőleges rezgésű elektromágneses hullám. Optikai jellemzői az intenzitás, vagy fényesség (I), a hullámhossz (λ), a polarizációs irány, vagy rezgési sík (α) és a polarizációs irány állásának gyakorisága a polarizáció fok (δ).

Amennyiben a részlegesen poláros fény E elektromos térerősség-vektorait (a továbbiakban röviden E -vektorait) a terjedési irányra merőleges koordináta-rendszerben vesszük fel, akkor a vektorok vége az úgynevezett polarizációs ellipszis mentén helyezkedik el, amit három paraméterrel ($E_{\max}$, $E_{\min}$, α) egyértelműen leírhatunk (1. ábra).



1. ábra. A fény polarizációs sajátságait szemlélteti a polarizációs ellipszis, mely három paraméterrel, a nagy- ($E_{\max}$) és kis- ($E_{\min}$) tengellyel, valamint a nagytengely ϕ irányával egyértelműen leírható. E geometriai paraméterek és a mérhető három fizikai paraméter (az I fényerősség, a δ polarizációfok és az α polarizációs irány) között egyértelmű a megfeleltetés: $I = (E_{\max}^2 + E_{\min}^2)/2$; $\delta = (E_{\max}^2 - E_{\min}^2)/(E_{\max}^2 + E_{\min}^2)$; $\alpha = \phi$. (HORVÁTH G. nyomán).

Figure 1. Polarization ellipse.

A polarizációs ellipszis geometriai paraméterei és a poláros fény három, mérhető fizikai paramétere között az alábbi megfeleltetés áll fenn: $I = (E_{\max}^2 + E_{\min}^2)/2$, $\delta = (E_{\max}^2 - E_{\min}^2)/(E_{\max}^2 + E_{\min}^2)$. Ha a fény polarizálatlan, akkor ($\delta = 0\%$) és a polarizációs ellipszis kör alakú, míg ha a fény teljesen poláros ($\delta = 100\%$), akkor az ellipszis egyenessé válik. Az egyre polárosabb fény tehát fokozatosan összelapuló polarizációs ellipszissel rendelkezik (HORVÁTH 1986a,b).

A fény optikai sajátságai fontos információkat hordoznak, amelyeket a fényérzékelésre képes állatok hasznosítanak. Ugyanakkor a fotoceptorokkal rendelkező állatcsoportok és gyakran az azonos rendszertani csoportba sorolt különböző fajok között is jelentős különbségek adódnak abban a tekintetben, hogy a fény előbbiekben felsorolt négy optikai sajátsága közül melyik információtartalmát használják ki.

Történeti áttekintés

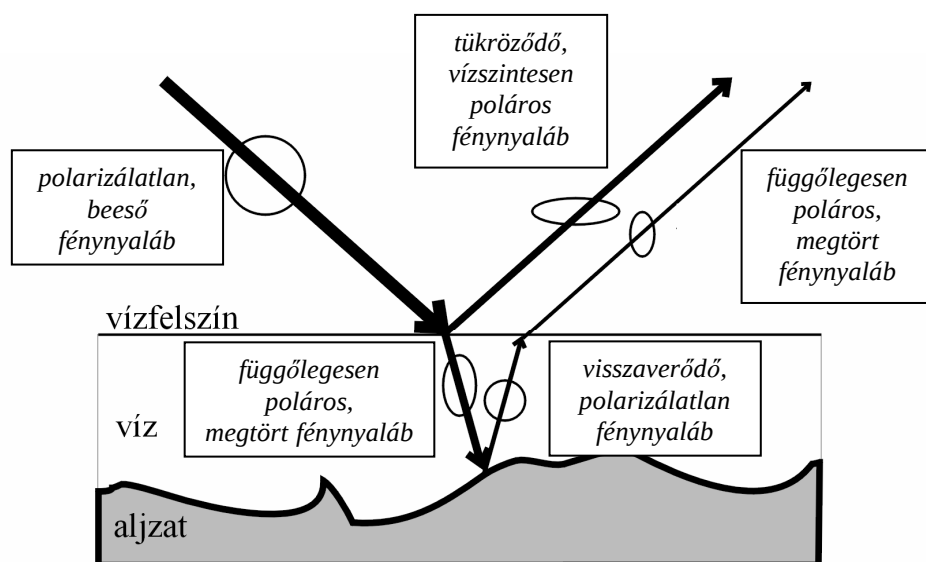
Annak ellenére, hogy az emberi szem nem alkalmas a fénypolarizáció érzékelésére, elődeink már i.sz. 1000 körül megfelelő segédeszközökkel képesek voltak érzékelni az égbolt polarizációját. A vikingek még nem ismerték az iránytűt, ezért a nyílt tengeren elsősorban a Nap állása alapján tájékozódtak. Borús vagy ködös időjárás esetén, amikor a Nap állását nem tudták megállapítani, ugyanakkor az égbolt jó része látható volt az úgynevezett „napkövek” segítségével tájékozódtak. A napkövek olyan természetes eredetű kristályok (pl. kordierit, turmalin), amelyek fényáteresztési képessége függ a fény beesési irányától, hullámhosszától, valamint attól, hogy mekkora szöveget zár be a fény rezgéssíkja a kristály optikai tengelyeivel. Ezeket az ásványokat a szemük előtt forgatva az égboltfény erősségének és színének változását tapasztalták. Ily módon a vikingek érzékelték az égbolt polarizációs mintázatát, amely az égboltnak a Napon és a zeniten áthaladó főkörére, a szoláris meridiánra tükröszimmetrikus eloszlású. A polarizációs mintázat alapján képesek voltak megállapítani a szoláris meridiánt, a Nap irányát akkor is, ha nem látták azt közvetlenül.

A fénypolarizáció kutatásának fontos eredménye volt 1669-ben a dán E. BARTOLIUS felfedezése, aki először írta le a kalcit kristály kettőtörését. A kalcittal folytatott kísérletek eredményeként mutatta ki 1690-ben C. HUYGENS a kalcitkristályon áthatoló kettősen megtört fény polárosságát. Ezt követően L. MALUS 1808-ban figyelte meg a visszavert fénynek a felülettel párhuzamos polarizáltságát.

A vikingek tapasztalatai a napkövekkel nem maradtak fenn a későbbi korok számára, ezért mintegy nyolcszáz évnek kellett eltelnie ahhoz, hogy 1809-ben D. F. J. ARAGO (1855) francia fizikus és csillagász újra felfedezte az égboltfény polarizációját. E tudományos felfedezés járult hozzá a fényhullám transzverzális jellegének igazolásához, amely alapján A. FRESNEL 1821-ben kidolgozta a fénypolarizáció elméletét.

Az égboltfény polarizációjának értelmezése Lord RAYLEIGH, más néven J. W. STRUTT (1871) nevéhez fűződik. Magyarázata azon a megfigyelésen alapult, hogy a fény egy átlátszó közegen áthaladva szóródik, és részlegesen síkban polarizálódik a közeg részecskéin. A szóródás hatására kialakuló polarizáció a fény beesési irányára merőlegesen a legnagyobb, ezért az égboltfény elektromos terének vektorai, az E-vektorok koncentrikus köröket alkot-

nak a Nap körül. A fényszóródás eredményeként a Naptól távolodva az égboltfény polarizációfoka nulláról fokozatosan növekszik, addig, amíg a Naptól 90° -ra eléri a maximumát. Ezt követően a polarizációfok ismét csökkenni kezd, majd a Nappal ellentétes pontban újra zérus lesz az értéke. Ez a magyarázat képes értelmezni a szoláris meridiánra tükrörszimmetrikus égboltpolarizáció kialakulását, hozzátevéve azonban azt, hogy a fotonok többszörös szóródása a légkörben negatív polarizációt eredményez, ami csökkentheti az eredő polarizációfokot és hatással van az égbolt polarizációs mintázatára is (HORVÁTH et al. 1999, GÁL et al. 2000). Lord RAYLEIGH elmélete alapján, a fényszóródás jelenségével magyarázhatjuk az égboltpolarizáció kialakulása mellett azt is, hogy miért kék színű az égbolt és vöröses a naplemente.



2. ábra. A vízfelszín felől érkező fénysugár eredő polarizációs sajátosságait a felszínről közvetlenül visszaverődő, vízszintesen poláros fénynyaláb és a vízfelszín alól visszaszóródó, a felszíni fénytörés következtében függőlegesen polárossá váló fénynyaláb intenzitásának aránya szabja meg. Mély, sötét vizeknél, illetve fekete kőolajnál, vagy pakuránál az utóbbi komponens elnyelődik, így mindig vízszintes lesz az észlelt polarizációs irány.

Figure 2. The polarization characteristics of water bodies are determined by the ratio of intensities of horizontally polarized light reflected from the water surface and of vertically polarized light from water.

A fénypolarizációs jelenségek jelentős részét a tükröződési polarizáció eredményezi (KÖNNEN 1985), amelynek a természetben előforduló legfontosabb forrásai a vízfelszínnek (SCHWIND & HORVÁTH 1993, HORVÁTH 1993, 1995a,b, HORVÁTH & HORVÁTH 1995, HORVÁTH & VARJÚ 1997, HORVÁTH et al. 1997). A vizek polarizációját egyrészt a felületről visszaturkórozódó vízszintesen polarizált fény, másrészt a víztestből származó, függőlegesen

polarizált fény határozza meg. A kétféle polarizáció lerontja egymás hatását, ezért a visszavert fény polarizációs jellegzetessége elsősorban attól függ, hogy az adott víztípusban a felszínről, vagy a víztestből visszavert fény jelenik-e meg dominánsan (2. ábra). Az ábrán az eltérő vastagságú nyilak különböző intenzitású fénynyalábokat jelentenek. A sekély, világos színű (pl. szikes pocsolyák), vagy átlátszó vizek esetében a fenékről és a vízben lebegő anyagokról visszaverődő és a felszínen átlépő függőlegesen polarizált fény dominál, a felszíni fényvisszaverődés vízszintes polarizációjával szemben. Ezért ezekről a pocsolyákról függőlegesen polarizált fény érkezik a szemünkbe. A sötét, mély, vagy sok huminsavat tartalmazó lápi vizek esetében a vízbe érkező fény túlnyomórésze elnyelődik, ezért a törési polarizációval szemben a tükröződési polarizáció érvényesül.

A fényvisszaverő objektum sötétsége, vagy világossága mellett a közeg törésmutatója is hatással van a fénypolarizációra. Ha nagyobb a fényvisszaverő közeg levegőre vonatkoztatott törésmutatója, akkor a Fresnel-formulákból következően (GUENTHER 1990) nagyobb lesz a reflektivitás, a polarizációfok és a vízszinteshez közelebb lesz a visszatükröződő fény rezgéssíkja. Ezért például a fekete kőolaj, vagy kátrány tócsa nemcsak a színe, hanem a víznél nagyobb törésmutatója miatt is jobban polarizálja a felszínéről visszaverődő fényt (HORVÁTH & ZEIL 1996a,b, POMOZI 1997, BERNÁTH 1999).

A fénypolarizáció entomológiai vonatkozásai

A fénypolarizáció érzékelésére képes állatcsoportok közül különösen a rovarok között találunk olyanokat, amelyek számára az egyéb optikai jegyeket kiegészítő fénypolarizáció létfontosságú információhordozó.

A fénypolarizáció érzékelésével kapcsolatos rovar-tani kutatások eredményei kezdetben az egyes rovarfajok térbeli tájékozódásának vizsgálatához kapcsolódtak. Ennek során elsőként K. VON FRISCH (1965) volt az, aki megállapította, hogy a háziméhek tájékozódása részben az égbolt polarizációs mintázata alapján történik, ha a Napot felhők takarják.

Ebben az esetben a méhek az ég polarizáció-eloszlásának tükröszimmetriája alapján határozzák meg a szoláris meridiánt, amely lehetővé teszi számukra a Nap helyzetének megállapítását. A háziméh szemének vizsgálata napjainkra már az anatómiai és funkcionális alapjait is feltérképezte a K. VON FRISCH által megfigyelt tájékozódási képességnek.

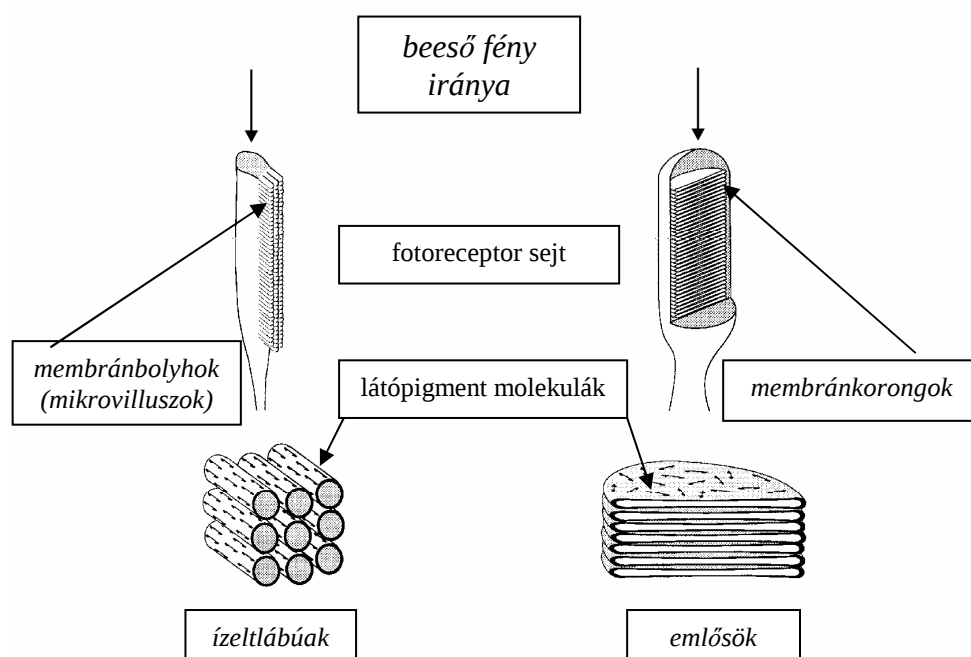
De vajon miért alkalmas a rovarszem a fénypolarizáció érzékelésére? A rovarok retináját megnyúlt, henger alakú receptorsejtek alkotják. Ezek sejtmembránja ujjszerű kitüremkedéseket, mikrovilluszokat képez, amelyekben rendezetten, egymással és a mikrovilluszokkal párhuzamosan helyezkednek el a megnyúlt látópigment molekulák (3. ábra).

A sejt ezen receptív részéhez érkező fénysugár annál nagyobb kimenő elektromos ingert eredményez, minél inkább párhuzamos a beérkező fény polarizációs síkja a mikrovilluszok hossz tengelyével mivel a látópigment molekulái ekkor nyelik el a fényt a legnagyobb mértékben.

Az emlősök retinájában a látósejtek receptív régióját korong alakú membránképződmények alakítják ki, amelyben a látópigment molekulák rendezetlenül helyezkednek el (3. ábra) (WATERMAN 1981). Ennek eredményeként az emlős receptorsejtben a fény hatására kiala-

kuló receptorpotenciál értéke független lesz a fény polarizációjától, ezért az ilyen receptorokkal rendelkező szem nem képes a fény polarizációjának érzékelésére.

A háziméh szemének polarizációérzékeny egyszerű szemei, ommatídiumai egy keskeny sávot képeznek az összetett szem háti részén. Az ezekben található fotoreceptorok csak ultraibolya (UV) tartományban működnek (MIZERA & HORVÁTH 1998), szemben a többi (lefelé és előre irányuló) ommatídiummal, amelyek három, az UV, a kék és a zöld színtartományban maximálisan érzékeny receptortípust tartalmaznak.



3. ábra. Balra fent: Az ízeltlábúak fotoreceptorsejtjeinek felépítése, vázlatosan. Balra lent: Néhány mikrovillusz kinagyított részlete. A nyíllal jelölt látópigment, rodopszin molekulák a receptorsejtek mikrovilluszainak hosszanti tengelyével közel párhuzamosan állnak. Ez a rendezett szerkezet felelős a fotoreceptorok polarizáció-érzékenységeért. Jobbra fent: Az emlősök pálcika sejtjének kültagja vázlatosan. A pálcikákban a rodopszin molekulák a membránkorongok felszínén rendezetlenül helyezkednek

el, ezért a receptorsejt nem érzékeny a polarizációra.

Figure 3. Schematic view of the visual cells of vertebrates (right) and invertebrates (left). Due to the microstructural organization of the vertebrate photoreceptor membrane the dipoles are randomly oriented, the consequence of which is that the receptors are blind to polarization of light. In invertebrates the dipoles are parallel to the microvilli, which results in the polarization sensitivity of the photoreceptors.

Az UV érzékeny fotoreceptorok a rovarok színérzékelésében is részt vehetnek (MOLNÁR et al. 1997). A méhek színlátását három, az UV, a kék és a zöld színtartományban maximálisan érzékeny receptor teszi lehetővé, szemben az ember színlátásával, amelynél a látósejtek a színek vörös, zöld és kék tartományára érzékenyek. Ma már bizonyított tény, hogy az UV receptorok bizonyos esetekben részét képezik a színlátó rendszernek, amelynek segítségével a rovarok egy része képes színeket is megkülönböztetni az UV tartományon belül.

A szembe jutó fény hullámhossz-eloszlásának megfelelően eltérő mértékben gerjeszti a különböző típusú receptorokat. Az egyes hullámhossz-tartományokra érzékeny receptorok fényintenzitásokat mérnek, amelyek aránya alakítja ki az idegi feldolgozás eredményeként a megfelelő szín érzékletét.

A polarizációérzékeny receptor gerjesztésének mértéke nemcsak a beeső, adott hullámhosszúságú fény intenzitásától, hanem polarizáltságának mértékétől is függ. Mindezt tovább bonyolítja, hogy a három különböző hullámhossz-tartományra érzékeny, polarizációt is detektáló fotoreceptor nem egyenlő mértékben gerjesztődik az azonos intenzitású, azonos polarizáltságú, eltérő hullámhosszú fénysugarakra. Ez azt jelenti, hogy abban az esetben, ha a színeket érzékelő szemrész polarizációérzékeny is lenne, akkor a színérzékelés kialakulása a megfigyelt objektum polarizációs mintázatától is függne.

Mivel a környezet polarizációs mintázata különböző nézőpontokból más és más, ezért a rovar mozgása során ilyen esetekben a környezet színe is állandóan változna. Ez lehetetlenné tenné a színek alapján történő tájékozódást, ezért a színérzékelésben fontos szemrészek receptorsejtjeiben olyan strukturális változások mentek végbe (a látópigmenteket tartalmazó mikrovilluszok a fotoreceptorok hossztengelye mentén csigalépcsőszerűen megtekerekednek), amelyek alkalmatlanná teszik ezeket a látósejteket polarizáció érzékelésére a látópigment molekulák rendezett elhelyezkedésének megszűnése miatt (POMOZI et al. 1998).

A méhekhez hasonló módon a *Cataglyphis* nemzetségbe tartozó sivatagi hangyák is képesek felhasználni az égbolt polarizációs mintázatát tájékozódásuk során (WEHNER 1997, HORVÁTH & WEHNER 1999). Ezek a rovarok a homokfelszínen vadásznak a hőség miatt elpusztult rovarokra. Véletlenszerű mozgásuk során a Nap helyzetéhez viszonyítva folyamatosan összegzik és megjegyzik elmozdulásaik vektorait, így vándorlásuk minden pillanatában ismerik a földalatti fészük bejáratának helyvektorát. Ez a képesség teszi őket alkalmassá arra, hogy a táplálék felfedezése után a legrövidebb, egyenes úton jussanak vissza fészükhöz.

Az égbolt polarizációs mintázata alapján történő tájékozódás (SCHWIND & HORVÁTH 1993, HORVÁTH & VARJÚ 1995, HORVÁTH & POMOZI 1997, HORVÁTH et al. 1998b, HORVÁTH & WEHNER 1999, GÁL et al. 1998, 2000) kettős előnnyel is jár. Egyrészt sikeresebb tájékozódási módszert nyújt a forrásban hamar eltűnő szagösvényekkel szemben, másrészt lehetővé teszi, hogy a zsákmány megtalálása után a hangya a legrövidebb idő alatt elhagyhassa a felforrósodott homokfelszínt és a fészkébe térhessen.

Annak ellenére, hogy a polarizált fény látásával kapcsolatos kutatások több évtizede folynak, csupán 1985 után vált csak ismertté, hogy a fénypolarizáció érzékelésére képes állatcsoportok közül különösen a rovarok között találunk olyanokat, amelyek számára az egyéb optikai jegeket kiegészítő fénypolarizáció létfontosságú információhordozó.

A fénypolarizáció érzékelésével kapcsolatos rovartani kutatások eredményei kezdetben az egyes rovarfajok térbeli tájékozódásának vizsgálatához kapcsolódtak (SCHWIND 1985, 1991, 1995, SCHWIND & HORVÁTH 1993, HORVÁTH 1993, 1995a,b, HORVÁTH & VARJÚ 1997, GÁL & HORVÁTH 1998). R. Schwind, a Regensburgi Egyetem Állattani Intézetének professzora fedezte fel, hogy a vízben és nedves anyagokban élő rovarok szeme képes érzékelni a fénypolarizációt és ezek a rovarok a vízfelszínről visszatükröződő vízszintes polarizált fény segítségével találják meg életterüket. Kísérletei során a talaj fölött néhány deciméterre 1 m²-es üveglapokat helyezett el, amelyeknek enyhén lejtő felszínét gyenge vízárammal mosta le folyamatosan. Ezzel a módszerrel vízi rovar csoportokhoz tartozó fajokat (*Heteroptera*, *Dytiscidae*, *Hydrophilidae*, *Halipidae*) fogott be. Az üveglapok alá helyezett különböző spektrális és reflexiós tulajdonságú lapok alkalmazásával a fajok egy részénél az UV spektrális tartományban működő polarotaxist is igazolta. A kísérletek eredményeként egyértelművé vált, hogy a vizet kereső repülő rovar ha optikai környezetében vízszintes polarizált fényt érzékel, akkor ebben az irányban folytatja a repülését, majd landol a felületen. A szitakötők élőhelyválasztását vizsgálva WILDERMUTH (1993, 1998), WILDERMUTH & SPINNER (1991) és HORVÁTH et al. (1998a) folytatott választásos terepkísérleteket különböző tesztfelületekkel. A tesztfelületek egy része felett a szitakötők a vizet mellett szokásos jellegzetes viselkedésmintáikat mutatták be.

A fénypolarizáción alapuló vízdetektálási stratégia sikeres voltát jól bizonyítják a mind több vízi rovar csoporttal elvégzett terepkísérletek. A stratégia evolúciós sikerét nemcsak az eredményezi, hogy a természetes környezetben a vízfelületeken kívül kevés objektum képes tükröződési polarizációt létrehozni, hanem az is, hogy a fény intenzitására és színére érzékeny, de a fénypolarizációra vak látórendszerrel (mint az ember szeme is) szemben a fénypolarizációra érzékeny szemet nem téveszti meg a vizet utánozó délibáb sem (HORVÁTH et al. 1997, GÁL et al. 1997).

A meleg napokon, az erősen felmelegedő felszínek fölött létrejövő délibáb légtükröződés, amely a levegőben kialakuló törésmutatógradiens miatt jön létre. A törésmutató-gradiensben az égboltnál folyamatosan törik, így az égboltnál látszólag a horizont alól érkezik a szemünkbe. Eközben a forró levegő turbulens áramlásai miatt törésmutató-ingadozások alakulnak ki, amelyek hatására a délibábkép kissé remeg, ami víz képzetét kelti a számunkra. Mivel a délibábkép sorozatos fénytöréssel és nem fénytükröződéssel jön létre, ezért a délibábban nem változik meg az égbolt polarizációs mintázata. Ezért a délibábból többnyire nem érkezik a szemünkbe vízszintes polarizált fény, attól a ritka esettől eltekintve, amikor vízszintes poláros égboltnál tükröz a szemünkbe a délibáb (HORVÁTH et al. 1997; GÁL et al. 1997).

A vízi élőhely detektálása mellett a polarotaxisnak fontos szerepe van a nedves, bomló anyagokban, például a friss trágyában, és növényi korhadékban élő rovarok élőhely felismerésében is (pl. *Megasternum boletophagum*, *Cryptopleurum minutum* (Coleoptera)). Ezek az állatok a környezetük polarizációs mintázata alapján már akkor felismerhetik a számukra fontos közeget, amikor még a jelentősebb távolság miatt kémiai érzékszerveik nem segítik tájékozódásukat. A trágyában élő rovarok egy része csak friss, nedves trágyába petézik, amely polarizációs sajátosságai alapján jól megkülönböztethető a már kiszáradt, a lárvák kinevelésére már alkalmatlan ürüléktől (GÁL 1997).

A polarotaxissal történő vízdetektálást zavaró hatások

A szakirodalomban számos, a vízi rovarokkal kapcsolatos megfigyelés szerepel, amelyek szerint ezek a rovarok gyakran fellelhetők üvegtáblákon, kocsitetőkön és nedves aszfaltutakon. (FERNANDO 1958, POPHAM 1964). Annak ellenére, hogy a fentiekben említett, kérészekkel kapcsolatos megfigyelések ismeretesek az entomológus szakemberek számára, ezt a jelenséget csak szórványosan írták le publikációikban, beszámolóikban, marginális jegyzetek formájában. Általában azt feltételezték, hogy az aszfaltutak olyan markert jelentenek a kérészeknek, amelyek jelzik a rajzás és szaporodás helyeit (pl. BRODSKIY 1973, SAVOLAINEN 1978). A kérészek aszfaltutakra történő petézését egyszerűen azzal magyarázták, hogy a fényes felületű, nedves aszfaltutak hasonlóak lehetnek a rovarok számára, mint a valódi vízfelszínnek. Újabb kutatási eredmények alapján ma már tudjuk, hogy az aszfaltutak megtévesztésig hasonlóak egy vízszintesen polarizált fényt visszaverő vízfelszínhez a vizet kereső rovarok számára. Mivel a kérészek vízdetektálása a vízfelszínről érkező vízszintesen polarizált fény segítségével történik, hasonlóan sok más vízi rovarhoz, az antropogén eredetű aszfaltút vizuális csapdaként hat rájuk (KRISKA et al. 1998).

A föld mélyén képződő kőolaj bizonyos esetekben a felszínre szivároghatva kátránytavak kialakulását eredményezi. Napjainkban a kőolaj- és pakuratavak kialakulását elsősorban az ember környezetátalakító tevékenysége okozza. Erre láthatunk példát az Öböl-válság nyomán kialakult kőolajtavak esetében is. Az olajfelszín ugyan homokkal fűjje be a sivatagi szél, de az évszakok váltakozása során a csillogó felület rendszeresen megújul. A felbugygyanó kőolaj az ősi aszfaltmocsarakhoz hasonlóan számos állatot megtéveszt és csapdába ejt (PILCHER & SEXTON 1993). Ezek az állatok túlnyomórészt vízi rovarok és vízi madarak (HORVÁTH & ZEIL 1996a,b).

A kőolaj és kátránytavak az aszfaltutakhoz hasonlóan (KRISKA et al. 1998) a felszínük-ről visszavert vízszintesen polarizált fénnel tévesztik meg a vizet kereső rovarokat. Az olajfelszínről tükröződő nap- és égboltfény polarizációs mintázata szupernormális ingerként hat (HORVÁTH et al. 1998a). Ennek két fő oka van. Az egyik az, hogy a kőolaj levegőre vonatkoztatott törésmutatója sokkal nagyobb, mint a vízé. A híg folyós kőolaj törésmutatója (1,39–1,49) de a kátrányé elérhet az 1,57-et is (LEVORSEN 1967), míg a vízé csak 1,33 a látható spektrum középső részén. A Fresnel-formulából következően (GUENTHER 1990) minél nagyobb a törésmutató, annál nagyobb a reflektivitás, a polarizációfok és annál vízszintesebb a tükröződő fény rezgéssíkja. A másik oka a szupernormális hatásnak a kőolaj erőteljes fényelnyelő sajátsága, amely jelentősen lecsökkenti a kőolaj belsejéből visszaszóródó fény vízszintes polarizációt csökkentő hatását.

Napjainkban a rovarok polarotaxisához és ezen belül is a vízdetektálásához kapcsolódó nemzetközi kutatások homlokterében azok a tereptani vizsgálatok és ezek értelmezései állnak, amelyek egyrészt az egyes élőhelyek jellegzetes rovarcsoportjainak vízdetektálását kutatják különböző tesztfelületek felhasználásával, másrészt bizonyos antropogén hatások környezeti tényezőként megjelenő hatásait vizsgálják (KRISKA et al. 1998, HORVÁTH & ZEIL 1996a,b, HORVÁTH et al. 1996, HORVÁTH et al. 1998a).

Köszönetnyilvánítás: Kutatómunkámat részben az OTKA T-020931 és F-025826 számú pályázatai tették lehetővé.

Irodalom

- ARAGO F. (1855): Meteorological Essays. (English translation) – Longman-Brown-Green- Longmans, London.
- BERNÁTH B. (1999): A polarizáció-látás szerepének vizsgálata rovarok és madarak vízkeresésében. – Diplomamunka, ELTE TTK Biológiai Fizika Tanszék, Budapest, p. 50.
- BRODSKIY A. K. (1973): The swarming behavior of mayflies (Ephemeroptera). – Entomol. Rev. 52: 33–39.
- FERNANDO C. H. (1958): The colonization of small freshwater habitats by aquatic insects. General discussion, methods and colonization in the aquatic Coleoptera. – Ceylon J. Sci. 1: 116–154.
- FRISCH K. von (1965): Tanzsprache und Orientierung der Bienen. – Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- GÁL J. (1997): Some biophysical applications of video polarimetry. – Diploma Thesis, Loránd Eötvös University, Department of Atomic Physics, Biophysics Group, Budapest, p. 96
- GÁL J., HORVÁTH G. & WEHNER R. (1997): Légtükrözések polarizációs mintázata: Miért nem tévesztheti meg a délibáb a vízirovarokat? – Fizikai Szemle 47: 37–42.
- GÁL J. & HORVÁTH G. (1998): A vízi rovarok vízkeresése. – Élet és Tudomány 53: 884–885.
- GÁL J., HORVÁTH G., POMOZI I. & WEHNER R. (1998): Az égbolt polarizálatlan pontjai, avagy amit már Arago, Babinet és Brewster is ismert, de eddig közvetlenül még senki sem látott. – Természet Világa 129: 151–154, 212–215.
- GÁL J., HORVÁTH G., HAIMAN O., MEYER-ROCHOW V. B. & WEHNER R. (2000): „Poláros” pillantás a teljes égboltra 180° látószögű képalkotó polariméterrel. – Élet és Tudomány 55: 1003–1006.
- GUENTHER R. D. (1990): Modern Optics. – John Willey & Sons, Inc., Duke University.
- HORVÁTH G. (1993): Computational Visual Optics. Theoretical Physiologic Optical Study of the Optical Environment and Visual System of Animals. – Kandidátusi Értekezés. Magyar Tudományos Akadémia Központi Fizikai Kutatóintézete, Biofizika Csoport (Budapest), pp. 1–256.
- HORVÁTH G. (1995a): Reflection-polarization patterns at flat water surfaces and their relevance for insect polarization vision. – J. Theor. Biol. 175: 27–37.
- HORVÁTH G. (1995b): How do water insects find their aquatic habitat? – World of Nature (Természet Világa special issue) 125: 44–49.
- HORVÁTH F. Á. & HORVÁTH G. (1995): Víztükrök derült égbolt alatti polarizációs mintázata biológiai vonatkozásokkal. – Légkör 40: 18–23.
- HORVÁTH G. & VARJÚ D. (1995): Underwater refraction-polarization patterns of skylight perceived by aquatic animals through Snell's window of the flat water surface. – Vision Research 35: 1651–1666.
- HORVÁTH G. & ZEIL J. (1996a): Kuwait oil lakes as insect traps. – Nature 379: 303–304.
- HORVÁTH G. & ZEIL J. (1996b): Állatcsapdák, avagy egy olajtócsa vizuális ökológiája. – Természet Világa 127: 114–119.
- HORVÁTH G., BERNÁTH B., MOLNÁR G., MEDGYESI D., BLAHA B. & POMOZI I. (1996): Kátránytő mint fénycsapda: a kuvaiti kőolajtavak állatokra gyakorolt vonzásának biofizikai okairól. – Fizikai Szemle 46: 221–229.
- HORVÁTH G., GÁL J. & WEHNER R. (1997): Why are water-seeking insects not attracted by mirages? The polarization pattern of mirages. – Naturwissenschaften 84: 300–303.
- HORVÁTH G. & POMOZI I. (1997): How celestial polarization changes due to reflection from the deflector panels used in deflector loft and mirror experiments studying avian navigation. – J. Theor. Biol. 184: 291–300.
- HORVÁTH G. & VARJÚ D. (1997): Polarization pattern of freshwater habitats recorded by video polarimetry in red, green and blue spectral ranges and its relevance for water detection by aquatic insects. – J. Exp. Biol. 200: 1155–1163.

- HORVÁTH G., BERNÁTH B. & MOLNÁR G. (1998a): Dragonflies find crude oil visually more attractive than water: multiple-choice experiments on dragonfly polarotaxis. – *Naturwissenschaften* 85: 292–297.
- HORVÁTH G., GÁL J., POMOZI I. & WEHNER R. (1998b): Polarization portrait of the Arago point: Videopolarimetric imaging of the neutral points of skylight polarization. – *Naturwissenschaften* 85: 333–339.
- HORVÁTH G. & WEHNER R. (1999): Skylight polarization as perceived by desert ants and measured by videopolarimetry. – *Journal of Comparative Physiology A* 184: 1–7.
- HORVÁTH G., WEHNER R., GÁL J. & POMOZI I. (1999): Az égboltpolarizáció és az állatok. – *Élet és Tudomány* 54: 235–237.
- KÖNNEN G. P. (1985): *Polarized Light in Nature*. – Cambridge University Press, Cambridge.
- KRISKA GY., HORVÁTH G. & ANDRIKOVICS S. (1998): Why do mayflies lay their eggs en masse on dry asphalt roads? Water-imitating polarized light reflected from asphalt attracts Ephemeroptera. – *J. Exp. Biol.* 200: 2273–2286.
- LEVORSEN A. I. (1967): *Geology of petroleum*. (2nd ed. F. A. F. BERRY) – Freeman, San Francisco.
- MIZERA F. & HORVÁTH G. (1998): On the ultraviolet paradox of polarization vision in Hymenoptera and Diptera: could the Permian/Triassic transition resolve the UV-POL paradox? (Lecture) – Annual Meeting of the International Geological Correlation Program 384, 28 September – 2 October 1998; Geological Institute of Hungary, Budapest; Conference Abstracts, pp. 81–83. (eds. C.H. DETRE & I. TÓTH).
- MOLNÁR G., BLAHA B. & HORVÁTH G. (1997): Látás az ibolyán túl: Az ultraviola fény érzékelésének elterjedése és szerepe az állatvilágban. – *Természet Világa* 128: 155–159.
- PILCHER C. W. T. & SEXTON D. B. (1993): Effects of the gulf war oil spills and well-head fires on the avifauna and environment of Kuwait. – *Sandgrouse* 15: 6–17.
- POMOZI I. (1997): Atlas of polarization patterns of some water-imitating shiny surfaces and their biological relevance. – Diploma Thesis, Loránd Eötvös University, Department of Atomic Physics, Biophysics Group, Budapest, p. 110.
- POMOZI I., HORVÁTH G. & WEHNER R. (1998): Hogyan látnák a méhek? Színlátás és fénypolarizáció. – *Élet és Tudomány* 53: 1072–1073.
- POPHAM E. J. (1964): The migration of aquatic bugs with special reference to the Corixidae (Hemiptera Heteroptera). – *Arch. Hydrobiol.* 60: 450–496.
- SAVOLAINEN E. (1978): Swarming in Ephemeroptera: the mechanism of swarming and the effects of illumination and weather. – *Ann. Zool. Fennici* 15: 17–52.
- SCHWIND R. (1985): Sehen unter und über Wasser, Sehen vom Wasser: Das Sehsystem eines Wasserinsektes. – *Naturwissenschaften* 72: 343–352.
- SCHWIND R. (1991): Polarization vision in water insects and insects living on a moist substrate. – *J. Comp. Physiol. A* 169: 531–540.
- SCHWIND R. (1995): Spectral regions in which aquatic insects see reflected polarized light. – *J. Comp. Physiol. A* 177: 439–448.
- SCHWIND R. & HORVÁTH G. (1993): Reflection-polarization pattern at water surfaces and correction of a common representation of the polarization pattern of the sky. – *Naturwissenschaften* 80: 82–83.
- STRUTT J. W. (Lord Rayleigh) (1871): On the light from the sky, its polarisation and colour. – *Philosophical Magazine* 41: 107–120, 274–279.
- WATERMAN H. (1981): Polarization sensitivity. In: AUTRUM H. (ed.). *Handbook of Sensory Physiology VII/aC*, Springer Verlag, Berlin, pp. 281–469.
- WEHNER R. (1997): The ant's celestial compass system: spectral and polarization channels. In: LEHRER M. (ed.). *Orientation and communication in Arthropods*; Birkhäuser Verlag, Basel, pp. 145–185.

- WILDERMUTH H. (1993): Habitat selection and oviposition site recognition by the dragonfly *Aeshna juncea* (L.): an experimental approach in natural habitats (Anisoptera, Aeshnidae). – *Odonatologica* 22: 27–44.
- WILDERMUTH H. (1998): Dragonflies recognize the water of rendezvous and oviposition sites by horizontally polarized light: A behavioural field test. – *Naturwissenschaften* 85: 297–302.
- WILDERMUTH H. & SPINNER W. (1991): Visual cues in oviposition site selection by the *Somatochlora arctica* (Zetterstedt) (Anisoptera: Corduliidae). – *Odonatologica* 20: 357–367.

Polarotaxis of insects

GYÖRGY KRISKA

Polarized light is an important factor of orientation and water seeking behaviour of insects. Aquatic insects detect water by means of polarotaxis; that is, on the basis of the partially and horizontally polarized reflected light. Water seeking behaviour can be disturbed by man-made products. Mayflies often swarm, mate above and oviposit on the shiny bodywork and windscreen of cars. The same reproductive behaviour can frequently be observed above and on shiny black plastic sheets used in agriculture. These artificial shiny surfaces also attract many other aquatic insects. There are numerous observations of water insects being deceived by glass panes, car roofs or wet asphalt streets. The waste-oil lakes deceive water-seeking insects by surface-mirrored horizontally polarized light, just as asphalt roads do. Thus, asphalt roads near ephemeropteran emergence sites (lakes, rivers and creeks) are a great danger for mayflies, because eggs laid on the asphalt inevitably perish. Asphalt roads can deceive and attract mayflies en masse like the ancient tar pits and asphalt seeps or the recent crude or waste oil lakes deceive, lure and trap polarization-sensitive water-seeking insects in large numbers.