

# **A fénypolarizáció szerepe egyes rovarfajok viselkedésében és a vikingek navigációjában**

DOKTORI ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

**Farkas Alexandra**

Témavezetők:

Dr. habil. Horváth Gábor, az MTA doktora, egyetemi docens

Dr. habil. Kriska György, tudományos főmunkatárs, egyetemi docens



Eötvös Loránd Tudományegyetem, Természettudományi Kar  
Környezettudományi Doktori Iskola (vezető: Dr. Jánosi Imre)  
Környezetbiológia Program (vezető: Dr. Ács Éva)

Eötvös Loránd Tudományegyetem, Biológiai Fizika Tanszék,  
Környezetoptika Laboratórium, Budapest

Magyar Tudományos Akadémia, Ökológiai Kutatóközpont  
Duna-kutató Intézet, Budapest

2018

# 1. Bevezetés és célkitűzések

A Földünket érő, eredendően polarizálatlan napfény tulajdonságai a különféle optikai közegekben való szóródás, illetve az eltérő közegek határain történő törés és visszaverődés következtében sokféleképpen módosulhatnak. Bár az így kialakuló optikai környezetből jövő fény polarizációs tulajdonságai az emberi szem számára gyakorlatilag érzékelhetetlenek, az azokban rejlő többletinformációt számos ízeltlábú látórendszere érzékeli és tájékozódásához fel is használhatja. E tények ihlették azt az 1967 óta világszerte elfogadott, ám kísérletileg máig nem bizonyított navigációs hipotézist is, mely szerint a fénypolarizáció érzékelését lehetővé tevő napköveket (azaz kalcit-, kordierit- vagy turmalinkristályokat) használva az északi vizek rettegett viking hajósai is kiválóan tájékozódhattak a nyílt vizeken.

Kutatási céljaink közt szerepelt a vizuális környezet néhány polarizációs tulajdonságának vizsgálata, majd az így kapott eredmények értelmezésével egyes állatsoportok bizonyos viselkedéseinek magyarázata. Mélni kívántuk továbbá az égboltnapfény polarizációján alapuló hipotetikus viking navigációs módszer 2. lépésének pontosságát, illetve egy feltételezett új viking navigációs műszer – az alkonyfény-iránytű – terepi használhatóságát is. Mindezek segítenek jobban megérteni egyes rovarfajok fénypolarizáció által vezérelt viselkedését, továbbá előmozdítják a vikingek nyílt tengeri navigációjával kapcsolatos, évtizedek óta bizonyítatlan kérdések megválaszolását is. Biológiai, földrajzi, meteorológiai és légköroptikai tudományterületeket egyaránt érintő doktori értekezésemben az e tárgykörökben szerzett kutatási eredményeket foglaltam össze.

## 2. Anyag és módszer

Doktori értekezésem első felében egyrészt olyan választásos terepkísérletek eredményeiről számoltam be, melyekben vízirovarok, különösképpen *Ephoron virgo* [OLIVIER 1791] és *Caenis robusta* [Eaton 1884] kérészek polarotaktikus viselkedését tanulmányoztuk. A terepkísérletekben használt, eltérő polarizációjú fényt kibocsátó kézilámpák és fénycsapdák polarizációs sajátosságait képalkotó polarimetriával igazoltuk. Az *E. virgo* kérészek rajzásakor végzett terepkísérlet során a vízszintesen poláros, függőlegesen poláros és polarizálatlan kézilámpák fényét a folyó közepe mentén repülő kérésztömegre irányítottuk, majd fényképeket készítettünk a lámpák fénycsóvjához vonzó kérészekről. Az elkészült fényképek kiértékelését az Estrato Kutató és Fejlesztő Kft. által e célra fejlesztett programmal végeztük, mely felismerte a kérészek egyedeit jelentő, egymástól elkülönülő fehér foltokat, majd megadta

azok számát. A *C. robusta* kérészek polarotaktikus viselkedését vízszintesen poláros, függőlegesen poláros és polarizálatlan fénycsapdák kihelyezésével vizsgáltuk, a csapdázott rovarok leszámolását pedig laboratóriumban végeztük el. A statisztikailag szignifikáns különbségek kimutatására elégségesnek bizonyult a  $\chi^2$ -teszt.

A szürkületi égbolt részleges holdfáziskor mutatott rendellenes polarizációjának vizsgálatát az Estrato Kutató és Fejlesztő Kft. által épített 180° látószögű polarizációs felhődetektor mérései alapján elemeztük, a napsütötte és holdvilágos ég erdőtűzfüst idején mutatott rendellenes polarizációját pedig képalkotó polariméterrel mértük. A rendellenes polarizációs sajátságok állati navigációban betöltött lehetséges szerepét szakirodalmi adatok alapján elemeztük.

Doktori értekezésem második felében azon világhírű hipotézissel foglalkoztam, mely szerint a viking hajósok napköveket használva képesek lehettek érzékelni az égbolt polarizációs sajátságait, mely alapján a felhő vagy köd által takart Nap égi helyére, majd a földrajzi északi irányra következtethettek. E feltételezett navigációs módszer 2. lépésének pontosságát 11 önkéntes tesztalany részvételével planetáriumi pszichofizikai kísérletsorozatban mértük, majd a mért hibák felhasználásával azt is kiszámítottuk, hogy a tesztalanyok által becsült nappozíciót a navigáció 3. lépésében felhasználva milyen pontosan lehet meghatározni a földrajzi északi irányt. A szignifikáns különbségek kimutatására cirkuláris statisztikai módszereket alkalmaztunk. Az így kapott eredmények fontos bemenő adatait képezték annak az átfogó vizsgálatnak, amely az égbolt-polarizációs viking navigációs módszer lépéseinek 1080 különböző meteorológiai helyzetben várható együttes pontosságát és korlátait vizsgálta.

A híres grönlandi fatárcsatöredék a legelfogadottabb elmélet szerint egy vikingek által egykor használt napiránytű részét képezte. Bernáth Balázs azonban részletes elemzésnek vetette alá a leletet, majd a rajta látható vésetek újraértelmezése után egy napkelte előtt és naplemente után is használható, kifinomultabb viking navigációs eszközrendszer – az alkonyfény-iránytűt – vélte felfedezni. Az elmélet ellenőrzésére rekonstruált középkori eszközzel (kúpárnyékvetős napiránytűvel, két kalcit napkövel és egy árnyékpálcával) hat önkéntes tesztalany részvételével terepi pszichofizikai kísérletsorozatban vizsgáltuk az alkonyfény-iránytű kezelhetőségét és navigációs pontosságát, tiszta égbolt alatt, hajnalban és alkonyatkor. A kísérlet során a tesztalanyok által a fenti eszközök segítségével mért földrajzi északi irányt egy számukra nem látható mágneses iránytűvel együtt lefényképeztük, a becsült északi irány és a valódi északi irány közti különbséget pedig utólag, ezen fotók kiértékelésével számítottuk ki. A szignifikáns különbségek kimutatására ez esetben is cirkuláris statisztikai módszereket alkalmaztunk.

### 3. Tézisek

#### 3.1. Kedvezőtlen élőhelyek elkerülése a kérészek polarotaktikus viselkedése révén

- Kimutattuk, hogy az *Ephoron virgo* folyólakó és a *Caenis robusta* állóvízi kérészek egyedei kevésbé vonzódnak a függőlegesen poláros, mint a vízszintesen poláros vagy a polarizálatlan fényforrásokhoz.
- Rámutattunk, hogy e viselkedés jelentősége abban áll, hogy a kérészek vízfelszíni repülésükkor a vízszintesen poláros fényt tükröző vízfelszín felett maradnak, a függőlegesen vagy nem vízszintesen poláros fényt tükröző, rajzásuk és petezésük szempontjából alkalmatlan, iszapos partrészek közelében azonban visszafordulnak. E viselkedés következménye az is, hogy a kompenzációs repülést végző nőstény kérészek visszafordulnak a hidaknál, ahol a híd vízfelszínre vetülő tükörképe szintén gyakran függőlegesen vagy ferdén poláros.
- Megállapítottuk, hogy a két vizsgált kérészfajnál eltérő az a kritikus fényintenzitás, melynél a polarotaxis felülírja a fototaxist.

#### 3.2. A szürkületi ég részleges holdfáziskor rendellenes polarizációja és annak tájékozódásban betöltött lehetséges szerepe

- Kimutattuk, hogy részleges holdfázis idején, napkeltét megelőzően vagy közvetlenül napnyugta után az égbolt polarizációs mintázata átmenetileg rendellenes, ilyenkor ugyanis a szórt napfény és szórt holdfény közel egyforma erősségű, a szoláris-antiszoláris és a lunáris-antilunáris meridián azonban nem esik egybe.
- Elsőként figyeltük meg, hogy a szürkületi égbolt neutrális (polarizálatlan) pontjai részleges hold mellett nem a szoláris-antiszoláris vagy lunáris-antilunáris meridián mentén helyezkednek el, hanem azoktól kissé távolabb.
- Megállapítottuk, hogy a rendellenes polarizációval jellemezhető átmeneti periódusban a szürkületi égről érkező fény polarizációfokának maximuma a napfény és holdfény légkörbeli többszörös szóródása miatt csökken.
- Feltártuk, hogy az égbolt napfény és holdfény által vezérelt polarizációs mintázatának szimmetriatengelye napkelte előtt fokozatosan vált át a lunáris-antilunáris meridiánból a szoláris-antiszoláris meridiánba, napnyugta után pedig a szoláris-antiszoláris

meridiánból a lunáris-antilunáris meridiánba. Az átmeneti időszak hossza ugyanakkor nagyban függ a földrajzi szélességi körtől.

- Rámutattunk, hogy a holdfényes szürkületi égbolt e rendellenes polarizációátmenete hatással lehet a polarizációérzékeny, szürkületkor aktív állatok térbeli tájékozódására. Különösen igaz lehet ez magasabb földrajzi szélességek mentén, ahol a Nap és a Hold égi útja hosszú időn át halad a horizont közelében, így a szürkületi periódus akár órákig, napokig is tarthat.

### **3.3. A napsütötte és holdvilágos ég erdőtűzfüst idején mutatott rendellenes polarizációja és annak tájékozódásban betöltött lehetséges szerepe**

- Képzalkotó polarimetriai módszerrel elsőként hasonlítottuk össze a tiszta és az erdőtűzfüsttel szennyezett holdvilágos égboltok polarizációs sajátosságait.
- Újabb adatokkal támasztottuk alá, hogy az égboltfény tiszta égboltnál megfigyelhető jellegzetes polarizációs mintázata napsütötte és holdvilágos égbolt esetén egyaránt jelentősen megváltozik, ha a légkörben erdőtűz okozta füst terjed szét. A füst légköri jelenléte miatt – napsütötte és holdvilágos égbolt esetén egyaránt – drasztikusan lecsökken az égboltfény polarizációfokának maximuma és az égbolt neutrális (polarizálatlan) pontjainak egymástól mért szögtávolsága is.

### **3.4. Az égbolt-polarizációs viking navigáció 2. lépésének planetáriumi vizsgálata**

- Planetáriumi pszichofizikai kísérletsorozatban mértük, hogy a feltételezett viking navigációs módszer 2. lépésében mekkora pontossággal határozható meg a nem látható Nap égi helye az 1. lépésben napkövekkel meghatározott mérőpontokon átmenő égi főkörök metszéspontjának becslésével. Azt is meghatároztuk, hogy a tesztalanyok által becsült nappozíciót a navigáció 3. lépésében felhasználva milyen pontosan lehet meghatározni a földrajzi északi irányt.
- Amikor a viking navigátor napköves méréséhez meteorológiai okok miatt nem tud a Naphoz és egymáshoz közeli égboltpontokat választani, akkor az égbolt polarizációs tulajdonságait egymástól távoli pontokban kénytelen meghatározni. Ehhez a mérőpontokon átmenő égi főköröket csak feje gyakori ide-odaforogatásával képes csak összekötni, mely a mozgásból eredő hibát eredményez. Mérési eredményeink alapján kijelenthető, hogy ilyen esetekben a 2. lépés hibája az egész navigáció pontosságát lerontja még akkor is, ha az 1. lépést hibátlanul végezte el a navigátor. Megállapítottuk,

hogy az égi főkörök horizont feletti metszéspontjának (azaz az Nap égi helyének) becslése könnyebben elvégezhető, ha a két kiválasztott égi mérőpont egymáshoz és a Naphoz is közelebb esik, és ha ez a három égi pont magasabb elevációval jellemezhető.

- Megállapítottuk, hogy magasabb napeleváció esetén pontosabb a földrajzi északi irány becslése, és az iránybecslés hibája nő, ha a kivetített fekete mérőpontok Naptól való szögtávolsága és az általuk meghatározott égi főkörök által bezárt szög nő. Mindez az emberi szem látószögének korlátaival magyarázható.

### 3.5. Az égbolt-polarizációs viking navigáció szürkületkor használható eszköze: az alkonyfény-iránytű

- Megállapítottuk, hogy a kúpárnyékvetős napiránytűvel, két kalcit napkövel és egy árnyékpálcával tiszta szürkületi időben használható alkonyfény-iránytű pontossága vetekszik egy mai zsebiránytű pontosságával, ami megerősíti az újonnan feltételezett viking navigációs eszköz létjogosultságát.
- Rámutattunk, hogy az alkonyfény-iránytű használatakor vétett tájékozódási hibák nagysága nagyban függ a navigátor személyétől, hiszen az egyénekre jellemző becslési módszerek különböző hibalehetőségeket vetnek fel, ugyanakkor kellő tengeri hajózási gyakorlattal egy navigátor északi iránybecslésének pontossága nagymértékben javulhat. A navigáció pontossága emellett nagymértékben függ az időjárás helyzettől, továbbá a Nap horizont feletti magasságának és azimutirányának becslésétől is.

## 4. Közlemények

### 4.1. A doktori értekezés alapját képező közlemények

- [1] **Farkas A.**, Száz D., Egri Á., Barta A., Mészáros Á., Hegedüs R., Horváth G., Kriska Gy. (2016): Mayflies are least attracted to vertical polarization: A polarotactic reaction helping to avoid unsuitable habitats. *Physiology and Behavior*, 163, 219–227. (D1, IF: 2,976)
- [2] Barta A., **Farkas A.**, Száz D., Egri Á., Barta P., Kovács J., Csák B., Jankovics I., Szabó Gy., Horváth G. (2014): Polarization transition between sunlit and moonlit skies with possible implications for animal orientation and Viking navigation: anomalous celestial twilight polarization at partial moon. *Applied Optics*, 53, 23, 5193–5204. (Q1, IF: 1,649)

- [3] **Farkas A.**, Száz D., Egri Á., Blahó M., Barta A., Nehéz D., Bernáth B., Horváth G. (2014): Accuracy of sun localization in the second step of sky-polarimetric Viking navigation for north determination: a planetarium experiment. *Journal of the Optical Society of America A*, 31, 1645–1656. (Q1, IF: 1,448)
- [4] Bernáth B., **Farkas A.**, Száz D., Blahó M., Egri Á., Barta A., S. Åkesson, Horváth G. (2014): How could the Viking Sun compass be used with sunstones before and after sunset? Twilight board as a new interpretation of the Unartog artefact fragment. *Proceedings of the Royal Society A*, 470, 2166, 20130787. (Q1, IF: 1,998)

#### 4.2. A doktori értekezéshez kapcsolódó további angol nyelvű közlemények

- [5] Horváth G., **Farkas A.**, Bernáth B. (2014): *Sky-polarimetric Viking Navigation*. In: *Polarized Light and Polarization Vision in Animal Sciences*. (Ed.: Horváth G.) Springer Series in Vision Research. Springer-Verlag: Heidelberg, Berlin, New York. p. 603–635.
- [6] Blahó M., Herczeg T., Kriska Gy., Egri Á., Száz D., **Farkas A.**, Tarjányi N., Czinke L., Barta A., Horváth G. (2014): Unexpected attraction of polarotactic aquatic insects to matt black car surfaces: mattness of paintwork cannot eliminate the polarized light pollution of black cars. *Public Library of Science ONE (PLOS ONE)*, 9, 7, article no. e103339.
- [7] Åkesson S., Odin C., Hegedüs R., Ilieva M., Sjöholm C., **Farkas A.**, Horváth G. (2015): Avian compass calibration: comparative experiments with diurnal and nocturnal passerine migrants in South Sweden. *Biology Open*, 4, 1, 35–47.
- [8] Száz D., Horváth G., Barta A., Robertson B., **Farkas A.**, Egri Á., Tarjányi N., Rácz G., Kriska Gy. (2015): Lamp-lit bridges as dual light-traps for the night-swarmer mayfly, *Ephoron virgo*: Interaction of polarized and unpolarized light. *Public Library of Science ONE (PLOS ONE)*, 10, 3, article no. e0121194.
- [9] Száz D., **Farkas A.**, Blahó M., Barta A., Egri Á., Kretzer B., Hegedüs T., Jäger Z., Horváth G. (2016): Adjustment errors of sunstones in the first step of sky-polarimetric Viking navigation: Studies with dichroic cordierite/tourmaline and birefringent calcite crystals. *Royal Society Open Science*, 3, article no. 150406.
- [10] Száz D., **Farkas A.**, Barta A., Kretzer B., Egri Á., Horváth G. (2016): North error estimation based on solar elevation errors in the third step of sky-polarimetric Viking navigation. *Proceedings of the Royal Society A*, 472, article no. 20160171.

- [11] Egri Á., **Farkas A.**, Kriska Gy., Horváth G. (2016): Polarization sensitivity in Collembola: An experimental study of polarotaxis in the water-surface-inhabiting springtail *Podura aquatica*. *Journal of Experimental Biology*, 219, 16, 2567–2576.
- [12] Száz D., Mihályi D., **Farkas A.**, Egri Á., Barta A., Kriska Gy., Robertson, B., Horváth G. (2016): Polarized light pollution of matte solar panels: Anti-reflective photovoltaics reduce polarized light pollution but benefit only some aquatic insects. *Journal of Insect Conservation*, 20, 4, 663–675.
- [13] Horváth G., Takács P., Kretzer B., Szilasi Sz., Száz D., **Farkas A.**, Barta A. (2017): Celestial polarization patterns sufficient for Viking navigation with the naked eye: Detectability of Haidinger's brushes on the sky versus meteorological conditions. *Royal Society Open Science*, 4, article no. 160688.
- [14] Egri Á., Pereszlényi Á., **Farkas A.**, Horváth G., Penksza K., Kriska Gy. (2017): How can asphalt roads extend the range of in situ polarized light pollution? A complex ecological trap of *Ephemera danica* and a possible remedy. *Journal of Insect Behavior*, 30, 4, 374–384.
- [15] Száz D., **Farkas A.**, Barta A., Kretzer B., Blahó M., Egri Á., Szabó Gy., Horváth G. (2017): Accuracy of the hypothetical sky-polarimetric Viking navigation versus sky conditions: revealing solar elevations and cloudinesses favourable for this navigation method. *Proceedings of the Royal Society A*, 473, article no. 20170358.

### 4.3. A doktori értekezéshez kapcsolódó magyar nyelvű közlemények

- [M-1] Horváth G., Blahó M., Herczeg T., Száz D., Czinke L., Barta A., Egri Á., **Farkas A.**, Tarjányi N., Kriska Gy. (2015): Matt fekete autók poláros fényszennyezése: a matt bevonat sem környezetbarát. I. rész. *Fizikai Szemle*, 65, 1, 7–9., II. rész. *Fizikai Szemle*, 65, 2, 38–41.
- [M-2] Horváth G., **Farkas A.**, Száz D., Egri Á., Barta A., Barta P., Kovács J., Csák B., Jankovics I., Szabó Gy. (2015): A Hold és Nap által megvilágított égbolt polarizációátmenete biológiai vonatkozásokkal: a szürkületi ég rendellenes polarizációja részleges holdfázis idején. *Fizikai Szemle*, 65, 3, 74–82.
- [M-3] Bernáth B., **Farkas A.**, Horváth G. (2015): Navigáció égre néző vikingekkel. 1. rész: Alkonyfény-iránytű. *Élet és Tudomány*, 70, 10, 307–309.



- [M-4] **Farkas A.**, Kriska Gy., Herczeg T., Horváth G. (2015): Navigáció égre néző vikingekkel 2. rész: Jég és föld között. *Élet és Tudomány*, 70, 15, 464–466.
- [M-5] Bernáth B., **Farkas A.**, Horváth G. (2015): Navigáció égre néző vikingekkel 3. rész: Hol vagyok? Merre tartok? *Élet és Tudomány*, 70, 20, 623–625.
- [M-6] Barta A., **Farkas A.**, Horváth G. (2015): Navigáció égre néző vikingekkel 4. rész: Útmutató fénytűnemények. *Élet és Tudomány*, 70, 25, 790–792.
- [M-7] Horváth G., Egri Á., Barta A., **Farkas A.** (2015): Navigáció égre néző vikingekkel 5. rész: Napkövel három lépésben. *Élet és Tudomány*, 70, 32, 1008–1010.
- [M-8] Hegedüs R., **Farkas A.**, Horváth G. (2015): Navigáció égre néző vikingekkel 6. rész: A napköhasználathoz légköroptikai feltételei. *Élet és Tudomány*, 70, 36, 1142–1144.
- [M-9] **Farkas A.**, Nehéz D., Horváth G. (2015): Navigáció égre néző vikingekkel 7. rész: Napkeresés a planetáriumban. *Élet és Tudomány*, 70, 44, 1385–1387.
- [M-10] Száz D., **Farkas A.**, Blahó M., Kretzer B., Horváth G. (2015): Navigáció égre néző vikingekkel 8. rész: Kristályrejtély. *Élet és Tudomány*, 70, 50, 1577–1579.
- [M-11] **Farkas A.**, Egri Á., Horváth G., Kriska Gy. (2015): Dunavirág-kutatás: Életmentő fénycsapdák. *Élet és Tudomány*, 71, 34, 1074–1076.
- [M-12] **Farkas A.** (2015): A dunavirág fénybörtöne. *A Földgömb*, 33, 296, 46–55.
- [M-13] **Farkas A.**, Trupka Z. (2015): Szennyező fény. A világítás csillagászati és ökológiai árnyoldalai. *A Földgömb*, 33, 299, 72–85.
- [M-14] Száz D., **Farkas A.**, Horváth G. (2016): Navigáció égre néző vikingekkel 9. rész: Napmagasságbecslés. *Élet és Tudomány*, 71, 39, 1235–1237.
- [M-15] Horváth G., **Farkas A.**, Kriska Gy. (2016): *A poláros fény környezetoptikai és biológiai vonatkozásai*. ELTE Eötvös Kiadó, Budapest, p. 485.
- [M-16] **Farkas A.**, Hegedüs R., Horváth G. (2017): Viking napkövek és napiránytűk rejtélyei. *Határtalan Régészet*, 2, 1, 74–77.
- [M-17] Takács P., **Farkas A.**, Kretzer B., Horváth G. (2017): Navigáció égre néző vikingekkel 10. rész: Iránytű a szemben. *Élet és Tudomány*, 72, 31, 980–982.
- [M-18] Száz D., **Farkas A.**, Horváth G. (2017) Navigáció égre néző vikingekkel 11. rész: A végső megoldás előszobája. *Élet és Tudomány*, 72, 46, 1459–1461.