HORVÁTH GÁBOR–BARTA ANDRÁS–SUHAI BENCE–VARJÚ DEZSŐ

A poláros fény rejtett dimenziói

Első rész

Sarkított fény a természetben, polarizációs mintázatok

Mivel az emberi szem fotoreceptorai érzéketlenek a fény polarizációjára, többnyire nem is tudjuk, mennyi különféle fénypolarizációs mintázat vesz bennünket körül. A biológiai evolúció legutoljára kifejlődött állatcsoportja, a polarizációvak emlősök legfejlettebb agygyal rendelkező fajaként mi, emberek – összetett gondolkozásunknak köszönhetően – pótoltuk szemünk egyik hiányosságát, a polarizációérzéketlenséget. Miután a kulturális és technikai evolúció eredményeként fölfedeztük a fény polarizációját, hamarosan megalkottuk a polariméterekat, és ezekkel a műszerekkel föltérképeztük a természet polarizációs mintázatait. Cikkünk első részében röviden megismertetjük az olvasót a fény polarizációjával, a méréséhez használatos polariméterekkel, majd a természet legjellemzőbb polarizációs mintázataival. A második részben az állatok polarizációlátását tárgyaljuk.

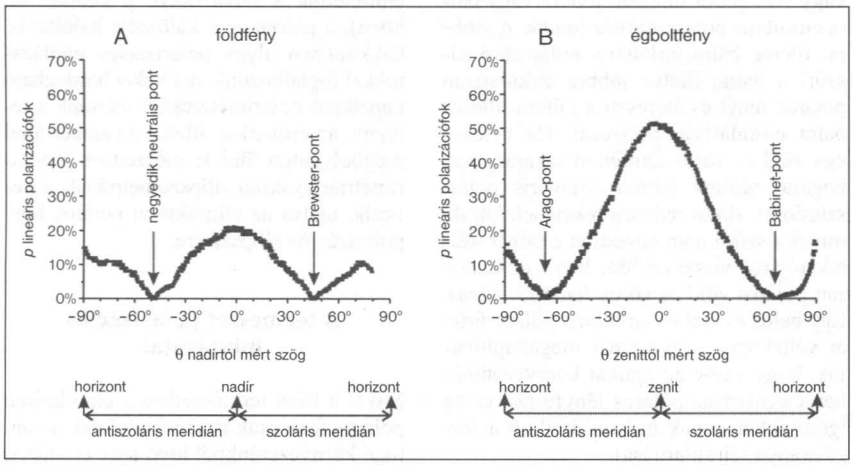
A fénypolarizációban rejlő többletinformáció

Írásunk főcímében a „rejtett" jelző arra utal, hogy – számos állattal ellentétben – az ember számára szabad szemmel nem hasznosítható a fény sarkítottsága, más néven polarizációja. Vajon a fény erősségén (intenzitásán) és színén (hullámhosszán) túl a polarizáció milyen információt szolgáltathat az optikai környezetről? Minőségileg annyival többet, mint amennyivel több információ rejlik a színekben a fényerősség hordozta információhoz képest. Míg például egy zöld levelű és piros virágú növény szürke tónusú (fekete-fehér) fényképén a fényintenzitás alapján általában nem különíthetők el a virágok a levelektől – ehhez az alak fölismerése is szükséges –, addig a színes fényképen a színük alapján rögtön fölismerjük a zöld levelek közt megbújó piros virágszirmokat. De a zöld árnyalatainak segítségével többnyire azt is megállapíthatjuk, mely levelek a fiatalabbak (a világos- vagy sárgászöldek), melyek az öregebbek (a sötétebb zöldek), melyeket világít meg napfény, melyeket kék égboltfény, melyek állnak úgy, hogy a napfényt a szemünkbe verik vissza, s melyek úgy, hogy az általuk áteresztett napfény jut el hozzánk.

A színek tehát a fényerősségen túl fontos információk hordozói, ezért is fejlődött ki az evolúció során rengeteg állatfajban a színlátás képessége. Például az őserdőben élő gyümölcsevő majmok a fákon függő gyümölcsök színe alapján becsülik meg a táplálékuk érettségét, s döntik el, hogy megéri-e kimászni értük a fák ágaira. A még éretlen gyümölcsök többnyire zöld színűek; az ilyeneket még nem érdemes leszakítani, mert még élvezhetetlen az ízük. A növények haszna, hogy így megmenekülnek éretlen gyümölcseik, melyek képtelenek lennének továbbterjeszteni a még éretlen magokat. Mikor a magok már megértek, a gyümölcs színváltozással jelez a majmoknak, amelyek megszerzik az érett gyümölcsöket.

A fény polarizációja további fontos információk forrása lehet. Például a növényekről visszaverődő fény lineáris polarizációfokából (lásd később) következtetni lehet a levél- és sziromfelületek simaságára.

1. ábra. Hőlégballonról a spektrum kék (450 nm) tartományában mért földfény (A) és égboltfény (B) p lineáris polarizációfokának változása a szoláris és antiszoláris meridián mentén mérve a nadírtól, illetve a zenittől számított θ szögtávolság függvényében, napkeltekor. Az Arago-, Babinet- és Brewster-pontokból, valamint a negyedik neutrális pontból polarizálatlan ($p = 0$) fény jön



Poláros fény

A fény elektromágneses hullám, melyben az $\underline{E}$ elektromos és $\underline{M}$ mágneses térerősségvektorok egymásra és a terjedési irányra is merőlegesen szinuszosan rezegnek azonos fázisban. A fény színe a λ hullámhosszal kapcsolatos (λ csökkenése az érzékelt színnek a vöröstől a kék felé való eltolódását eredményezi), míg az intenzitása az elektromos térerősség maximumának (amplitudójának) négyzetével arányos. Ha egy adott hullámhosszúságú fényben az elektromágneses rezgés egyetlen irányban játszódik le, akkor teljesen lineárisan poláros fényről beszélünk, a rezgéssík irányát pedig polarizációiránynak nevezzük. Ekkor a lineáris polarizációfok, $p = 100\%$. Ilyen teljesen lineárisan poláros

fény tükröződik például a vízfelületről az úgynevezett Brewster-szögben, mikor a visszavert és a vízben tovahaladó megtört fénysugár egymásra merőleges.

Ha például azonos amplitúdójú és hullámhosszúságú, de sok eltérő rezgéssíkú teljesen lineárisan poláros fényt keverünk össze, akkor polarizálatlan fényhez jutunk (p = 0%). Ilyen a Nap fénye, melyben a rezgéssík minden lehetséges iránya előfordul. Ugyancsak polarizálatlan fény jön az égbolt Arago-, Babinet- és Brewster-féle neutrális pontjaiból **(1. ábra),** valamint a vastag felhőkből. Egy világos és érdes (matt) felület, például a porhó vagy a fehér homok is gyakorlatilag polarizálatlan ($p \approx 0\%$) fényt ver vissza.

A polarizálatlan és a teljesen lineárisan poláros fény keveréke részlegesen lineárisan poláros fényt eredményez ($0\% < p < 100\%$), melyben minden irányú rezgéssík előfordul, de a teljesen poláros fény rezgéssíkja kitüntetett, mert ebben az irányban maximális az intenzitás. E kitüntetett irányt nevezzük polarizációiránynak, a p lineáris polarizációfok pedig azt adja meg, hogy az összintenzitás hányad részét képezi a teljesen poláros fényé. A földi természetben leggyakrabban részlegesen lineárisan poláros fény fordul elő a fényvisszaverődésnek vagy fényszóródásnak köszönhetően. Ilyen például a szórt égboltfény **(2. ábra, lásd a hátsó borítót),** és szinte minden (nemfémes) tárgy ilyen fényt ver vissza.

Amikor adott hullámhosszúságú fény elektromos amplitudóvektorának vége egy kör mentén az óramutató járásával egyezően (jobbra) vagy ellentétesen (balra) körbe-körbe forog, jobbra, illetve balra cirkulárisan poláros fényről beszélünk. A földi természetben a poláros fény ilyen fajtájú megjelenése meglehetősen ritka. Ilyen fényt bocsátanak ki bizonyos szentjánosbogarak, s egyes fémfényű szkarabeuszbogarak kitinpáncéljáról tükröződő fényben is van balra cirkulárisan poláros komponens **(3. ábra, lásd a hátsó borítót).**

Ha azonos hullámhosszúságú teljesen lineárisan poláros és cirkulárisan poláros fényt keverünk össze, akkor elliptikusan poláros fényhez jutunk, melyben az elektromos térerősség amplitudóvektorának vége jobbra vagy balra körbe-körbe forog egy ellipszis mentén. Ekkor a polarizációs ellipszis nagytengelyének irányát hívjuk polarizációiránynak, a lineáris, illetve cirkuláris polarizációfok pedig az intenzitás azon hányadát jellemzi, amely teljesen lineárisan, illetve cirkulárisan poláros.

Polárszűrők és polarimetria

Az emberi szem számára a lineárisan poláros fényt például a fényképészeti boltokban kapható lineáris polárszűrőkkel lehet észlelhetővé tenni. Az ilyen szűrők csak egyetlen rezgéssíkú poláros fényt engednek át, amit a szűrő áteresztési irányának nevezünk. Az erre merőleges rezgéssíkú fényt a szűrő szinte teljesen elnyeli. Ilyen szűrőket úgy szoktak előállítani, hogy egy speciálisan színezett műanyagot melegen vékony lappá hengerelnek, miközben a műanyag jelentősen megnyúlik: ennek hatására hosszú láncmolekulái közel párhuzamosan rendeződnek. Mivel egy láncmolekula annál több fényt nyel el, minél kisebb szöget zár be a hossztengelyével a poláros fény rezgéssíkja, a műanyag lap (fólia) gyakorlatilag csak egyetlen rezgéssíkú fényt enged át, azaz lineáris polárszűrőként működik. A vékony, hajlékony fóliát keretbe foglalt, kis vastagságú üveglapok közé szokás szorítani.

Ha egy forgó lineáris polárszűrőn át nézünk egy lineárisan poláros fényforrást, akkor szinuszosan változó fényintenzitást észlelünk. Ezzel az egyszerű módszerrel magunk is föltérképezhetjük környezetünkben a lineárisan poláros fény forrásait: a szemünk előtt kell csak ide-oda forgatnunk egy lineáris polárszűrőt és keresni látóterünk azon részeit, ahol szinuszos fényintenzitás-változást tapasztalunk. A szemüvegboltokban kapható olyan sötétszürke szemüvegfeltét, amely függőleges áteresztési irányú lineáris polárszűrőből áll. Ha ezt fölcsíptetjük a szemüvegünkre, akkor részben kiszűri az optikai környezetünkből jövő vízszintesen poláros fényt. Az ilyen polárszűrős szemüvegfeltét jó szolgálatot tesz napszemüvegként, mert jelentősen csökkenti a fényintenzitást, és például autóvezetéskor megszűri az aszfaltutakról a vezető szemébe verődő, zavaró poláros fény vízszintes rezgéssíkú összetevőjét.

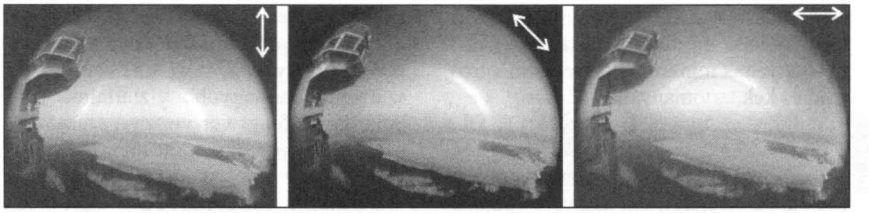
Ha egy lineáris polárszűrőre egy $d = \lambda/4n$ vastagságú, úgynevezett egytengelyű kristálylapkát úgy ragasztunk föl, hogy a polárszűrő áteresztési iránya $\pm 45^\circ$-os szöget zár be a kristálytengellyel, ahol n a kristály törésmutatója, λ pedig egy adott fényhullámhossz a vákuumban, akkor a + vagy – előjeltől függően jobbra vagy balra cirkuláris polárszűrőhöz jutunk. A jobbra, illetve balra cirkuláris polárszűrő kiszűri a balra, illetve jobbra cirkulárisan poláros fényt és áteresztí a jobbra, illetve balra cirkulárisan polárosat. Ha például egy zöld és vörös fémfényű szkarabeuszbogarat nézünk jobbra cirkuláris polárszűrőn át, akkor teljesen feketének látjuk, mivel a szűrő nem engedi át a bogár kültakarójáról visszaverődő, balra cirkulárisan poláros zöld és vörös fényt *(3. ábra).* Egy balos és jobbos cirkuláris polárszűrőn át váltakozva nézve tehát megállapíthatjuk, hogy van-e az optikai környezetünkben cirkulárisan poláros fényforrás, és ha igen, akkor annak milyen értelmű a forgásiránya (cirkularitása).

E polárszűrőkkel persze csak kvalitatív módon térképezhető föl a poláros fény környezetbeli eloszlása. A polarizáció pontos vizsgálatához, vagyis az $I(\lambda)$ intenzitás, az $\alpha(\lambda)$ polarizációirány, valamint a $p_L(\lambda)$ lineáris és $p_C(\lambda)$ cirkuláris polarizációfok adott λ hullámhosszon való méréséhez megfelelő eszközre, úgynevezett polariméterre van szükség. Az ilyen mérőeszközök egy adott hullámhossz mellett általános esetben minimum négy független mérést végeznek a poláros fényen a négy $I(\lambda)$, $\alpha(\lambda)$, $p_L(\lambda)$ és $p_C(\lambda)$ paraméter meghatározása céljából. Mérhető például a fény intenzitása három eltérő áteresztési irányú lineáris polárszűrőn és egy cirkuláris polárszűrőn keresztül, s a négy mért intenzitásértékből kiszámíthatók az I, α, p_L és p_C értékei. A pontforrású polariméterek csak egy adott szűk térszögből jövő fényt vizsgálnak egy adott pillanatban, míg a képalkotó polariméterekkel a tér rengeteg irányában mérhetjük egyszerre a fénypolarizációt a polariméter látóterének nagyságától függően.

A pontforrású polarimetria már régi, évszázados módszere a fizikai optikának, az első képalkotó polariméterek azonban csak az 1980-as években jelentek meg. Mivel a képalkotó polarimetriával egyetlen méréssel igen sok polarizációs adat nyerhető, e módszer alkalmazása forradalmasította a természetben előforduló polarizációs mintázatok *(2. ábra)* föltérképezését és vizsgálatát: segítségével olyan optikai jelenségek polarizációját is lehetett tanulmányozni, melyeket pontforrású polarimetriával lehetetlenség volt. Ilyenek például az időben viszonylag gyorsan változó vagy csak rövid ideig, megjósolhatatlan helyen és időben föllépő légköroptikai jelenségek, például az égbolt polarizációjának mérése napkelte vagy napnyugta környékén, mikor gyorsan változnak a fényviszonyok, vagy mikor felhők mozognak az égen, vagy ha napfogyatkozáskor a holdárnyék nagy sebességgel söpör végig a Föld felszínén, s emiatt gyorsan változnak a megvilágítási viszonyok, de említhetjük a szivárványt, a ködívet **(4. ábra),** a glóriát és a különféle halókat is. Cikkünkben olyan polarizációs mintázatokkal foglalkozunk, melyeket hordozható képalkotó polariméterekkel mértünk a terepen, az érintetlen, illetve az ember által megbolygatott földi természetben. A polarimetriát gyakran ellipszometriának is nevezik, utalva az elliptikusan poláros fény polarizációs ellipszisére.

A természet polarizációs mintázatai

Mivel a földi természetben a cirkulárisan poláros fény csak ritkán fordul elő, az optikai környezetünkből jövő fény cirkuláris



4. ábra. Egy arktiszi ködív (fehér szivárvány az anti-Nap körül) lineáris polárszűrőn át készített 180° látószögű halszemoptikás fényképei, ahol a kettős fejű fehér nyilak a polárszűrő áteresztési irányát mutatják. Mivel a ködív fehér fénye az ívvel párhuzamos rezgéssíkú és erősen lineárisan poláros, a képeken csak egyes ívdarabjai látszanak, a többit a polárszűrő kiszűri

polarizációfoka általában elenyésző. Így a továbbiakban csak a leggyakrabban föllépő lineáris polarizációs mintázatokkal foglalkozunk.

Az égbolt polarizációja

Az égboltfény polarizációját Dominique Francois Jean Arago (1786–1853) francia fizikus fedezte föl 1809-ben, s hamarosan egy egyszerű kézi polariszkóppal kvalitatíve föl is térképezte a polarizációfok eloszlását az égbolton. A jelenség fizikai okait 1871-ben John William Strutt (1842–1919), más néven Lord Rayleigh angol fizikus a napfénynek a levegő molekuláin és sűrűségingadozásain való szóródásában lelte meg. 1810-ben Arago fölfedezte az ég később róla elnevezett egyik kitüntetett pontját, ahonnan polarizálatlan fény jön *(1/B ábra)*. Ez az Arago-féle neutrális pont, ami a Nappal szemközti pont, az anti-Nap fölött van 20–35°-ra, a napállástól függően. 1840-ben Jacques Babinet (1794–1872) francia meteorológus és fizikus fedezte föl az ég második olyan pontját, ahonnan polarizálatlan fény származik *(1/B ábra)*. A Babinet-féle neutrális pont a Nap fölött helyezkedik el 20–35°-ra, a napmagasságtól függően. 1842-ben David Brewster (1781–1868) skót fizikus fedezte föl az égbolt harmadik neutrális pontját, mely a Nap alatt van 20–35°-ra, annak állásától függően *(1/A ábra)*. Elméleti megfontolásokból, majd a légkörben szóródó fény polarizációjának számítógépes szimulációjából később világossá vált, hogy léteznie kell egy negyedik neutrális pontnak is az anti-Nap alatt 20–35°-ra. Ez azonban nem látható a Föld felszínéről, csak megfelelő magasságból. E negyedik neutrális pont létét hőlégballonról végzett képalkotó polarimetriai vizsgálatokkal kutatócsoportunk (Horváth Gábor, Bernáth Balázs, Barta András, Suhai Bence és Bakos Attila) mutatta ki elsőként 2001. június 28-án *(1/A ábra)*.

A neutrális pontok tanulmányozásának – a légkörfizikai alapkutatásokon túl – az 1950-es évekig az volt a gyakorlati jelentősége, hogy a neutrális pontoknak a Naptól és anti-Naptól mért szögtávolságát a légköri aeroszolkoncentráció becslésére használták. Kiderült ugyanis, hogy minél szennyezettebb a légkör, azaz minél nagyobb az aeroszol sűrűsége, annál nagyobb szögtávolságra van az Arago-, Babinet- és Brewster-féle neutrális pont az anti-Naptól, illetve a Naptól. Ezért szorgalmas meteorológusok megmérték, hogy a Nap horizont fölötti magassága függvényében miként változik a neutrális pontok helye a tiszta égbolton, normál légköri viszonyok között, amikor alacsony az aeroszolkoncentráció. Ennek ismeretében a neutrális pontok helyének a normálistól való eltéréséből következtetni lehetett a légköri aeroszol mennyiségére. Az 1950-es évektől az aeroszolszint meghatározását a neutrális pontok helyének mérésén alapuló módszernél pontosabb légkör-diagnosztikai módszerek váltották föl.

A tiszta (felhőtlen) égbolt polarizációja adott hullámhosszon a polarizációfok és -irány mintázataival jellemezhető. A p lineáris polarizációfok a Napnál, anti-Napnál és a neutrális pontoknál nulla, az ég többi részén ennél nagyobb. p a Naptól távolodva fokozatosan nő, majd a Naptól 90°-ra eléri maximumát, ahonnan az anti-Nap felé haladva fokozatosan csökken *(2. ábra)*. Az égboltfény polarizációfoka erősen függ a levegő aeroszolkoncentrációjától: minél párásabb, ködösebb, füstösebb, porosabb vagy felhősebb az ég egy adott része, annál kisebb polarizációfokú az onnan származó égboltfény, mivel a többszörös fényszórás depolarizáló hatású *(2. ábra)*.

Az ég polarizációjának az állatok navigációja szempontjából fontos jellemzője, hogy az égboltfény polarizációirány-mintázata szinte minden meteorológiai körülmény között hasonló, és jellegzetes tükörszimmetriát mutat, melynek szimmetriatengelye a szoláris és antiszoláris meridián *(2. ábra)*. Ez teremt arra lehetőséget, hogy a polarizációérzékeny állatok még akkor is meghatározhassák a Nap irányát (ami nappal térbeli tájékozódásuk legfontosabb viszonyítási iránya, „szoláris iránytűje"), mikor azt felhő vagy köd takarja. Polarimetriai vizsgálataink szerint a tiszta, a részben felhős, a teljesen borult, a füstös és a ködös égbolt mind stabil, a Nappal együtt forgó polarizációs iránymintázattal rendelkezik, melyből meghatározható a Nap azimutszöge, ha az égboltfény polarizációfoka nem kisebb, mint a polarizációérzékenység küszöbe. Ha e küszöb megfelelően alacsony, akkor az állat akár teljesen felhős, borult, ködös vagy füstös ég alatt is képes lehet a nem látható Nap irányát az égbolt polarizációirány-mintázatából megbecsülni. Könnyen belátható mindennek az állatok túlélésében játszott fontos evolúciós előnye.

Amikor a Napot éjjel a telihold váltja föl, gyakorlatilag semmi sem változik az égbolt polarizációeloszlásában. Az éjjeli teliholdas tiszta ég képalkotó polarimetriai vizsgálatával bizonyítottuk, hogy a holdfényes éjszakai égbolt polarizációfokának és -irányának ugyanolyan a mintázata, mint azonos napállás mellett a nappali égnek *(2. ábra)*. Ebből az is következik, hogy a polarizációlátású állatok az égboltfény polarizációját holdvilágos éjjeleken is használhatják navigációra, amennyiben szemük érzékelni képes a légkörben szóródott nagyon kis intenzitású poláros holdfényt. Egy naplemente után aktivizálódó dél-afrikai galacsinhajtó bogárról éppen ez derült ki nemrég (lásd cikkünk második részét).

Jean Baptiste Biot (1774–1862) francia fizikus 1811-ben fölfedezte, hogy a szivárvány fénye is lineárisan poláros. Kiderült, hogy a szivárvány a földi természetben előforduló második legerősebben poláros fényű tünemény; az első a vízfelületről Brewster-szögben tükröződő fény, ami teljesen lineárisan poláros ($p = 100\%$) vízszintes rezgéssíkkal. A szivárvány fő-, illetve mellékívének fénye $p \approx 96\%$, illetve $p \approx 90\%$ polarizációfokú lenne, ha nem jönne a háttérből égboltfény. A szivárvány fényének polarizációiránya mindig a szivárványívvel párhuzamos *(4. ábra)*. A szivárvány polarizációs mintázatát először nekünk sikerült mérnünk, amit szintén a nagylátószögű képalkotó polarimetria tett lehetővé. A szivárvány nagy polarizációfoka és érintőleges rezgéssíkja arra vezethető vissza, hogy a napfény az esőcseppek belső faláról a Brewster-szöghöz közeli szögben verődik vissza. A szivárvány polarizációs sajátságainak leírásához szinte az egész klasszikus fizikai optika apparátusát föl kell vonultatni, ami jól mutatja, milyen bonyolult légköroptikai jelenségről van szó, aminek vizsgálata még napjainkban is ad kenyeret a fizikusoknak. (A szivárvány fizikai alapjairól lapunk idei májusi és júniusi számában írtunk; a szerk.)

Jelenleg is a Föld körül kering egy francia műhold (a PARASOL), aminek az egyik fő feladata, hogy a földfelszín felé fordulva nagylátószögű polarizációs mintázatokat mérjen a spektrum néhány tartományában. Ezekből aztán a földi űrközpontban meg lehet határozni például azt, hogy a képalkotó polariméter látóterében

lévő felhő vízcseppekből vagy jégkristályokból áll-e. Erre az ad módot, hogy ha egy felhő vízcseppekből áll, akkor a polarizációs mintázatán jól fölismerhetők a nagy polarizációfokú szivárványívek, ha viszont a felhő jégkristályokat tartalmaz, akkor nem alakul ki szivárvány. Miután a műhold többször megkerüli a Földet, amely folyamatosan elfordul alatta, a polariméter letapogatja a Föld felszínének nagy részét, így végül megkapható a Föld adott időszakra vonatkozó átlagos felhőborítottsága és becsülhető a felhők víz-, illetve jégtartalma. Mindez fontos szerepet játszik a földi meteorológia és éghajlat változásának kísérleti, távérzékelési tanulmányozásában.

A felhők polarizációját azonban nemcsak fölülről, mesterséges holdakról érdemes mérni, hanem alulról, a Föld felszínéről is. A meteorológiai állomásokon általában mérik az égbolt felhőfedettségét is, amit egyszerű vizuális becsléssel szokás regisztrálni. Ez egyrészt nagyon szubjektív, másrészt többéves tapasztalatot igényel. Ezért merült föl annak igénye, hogy az ég felhőfedettségét pontos mérésekre alapozva határozzák meg. Korábban csak az égboltról a spektrum különböző tartományaiban készített fényintenzitás-mintázatok számítógépes kiértékelésével próbálták meg fölismerni a felhőket. Kutatócsoportunk kifejlesztett egy hatékony eljárást a felhők polarimetrikus detekciójára. Ennek során 180° látószögű képalkotó polarimetriával mérjük a teljes égbolt fényintenzitásának, lineáris polarizációfokának és -irányának mintázatát a spektrum vörös, zöld és kék tartományában *(2. ábra)*, s egy számítógépes algoritmussal ismerjük föl e mintázatokon a felhőket. Kísérletileg igazoltuk, hogy az égboltfény lineáris polarizációjának ismeretében nagyobb pontossággal, megbízhatóbban lehet fölismerni az égen a felhőket, mint pusztán a fényintenzitás ismeretében. Módszerünk továbbfejlesztésén és automatizált műszaki megvalósításán jelenleg az Estrato Kutató és Fejlesztő Bt. (Barta A., Suhai B.) dolgozik.

Az égboltfény polarizációja jelentősen megváltozik, amikor a Nap korongját a Holdé takarja el napfogyatkozáskor. Az 1999. augusztus 11-i magyarországi teljes napfogyatkozáskor mértük az égbolt polarizációs mintázatát. Ezzel néhány korábbi elméleti jóslatot sikerült igazolnunk, valamint több olyan polarizációs jellemzőt is fölfedeztünk, aminek elméleti magyarázata még hátravan. Az égboltpolarizáció napfogyatkozáskori változása azon állatok (például a háziméhek) viselkedését is módosíthatja, melyek a poláros égboltfény segítségével tájékozódnak, amikor a Napot nem láthatják.

A talajfelszín polarizációja

Nemcsak fölfelé, az égboltra érdemes néznünk egy polariméterrel, hanem lefelé, a talajra is. Az úgynevezett Umow-szabály szerint a spektrum adott tartományában minél sötétebb egy tárgy, annál nagyobb polarizációfokú fényt ver vissza. Mivel a nedvesebb talaj sötétebb, mint a szárazabb, a nagyobb víztartalmú talaj polárosabb fényt ver vissza a szárazabbnál. Ha mérjük egy adott talajról visszavert fény *p* lineáris polarizációfokát a víztartalom függvényében, akkor azt kapjuk, hogy *p* monoton nő a nedvességgel. E jelenséget arra használják, hogy repülőgépről vagy műholdról távérzékeléssel mérjék a talajfelszín polarizációs jellemzőit, amiből a talajnedvesség mértékére következtethetnek. Ez azért fontos, mert a talaj nedvességtartalmának ismeretében lehet csak eldönteni, mikor kell öntözni a mezőgazdasági művelés alatt álló területeken.

Az Umow-szabály érvényesül a pernyemezők esetében is, melyek akkor keletkeznek, amikor ősszel vagy tavasszal fölégetik például a nádasokat, a mezők elszáradt füvét vagy az aratás után visszamaradt tarlót. Az ilyen égetések után a földet borító fekete hamuréteg erősen poláros fényt ver vissza a sötét és/vagy nedves talajokhoz hasonlóan.

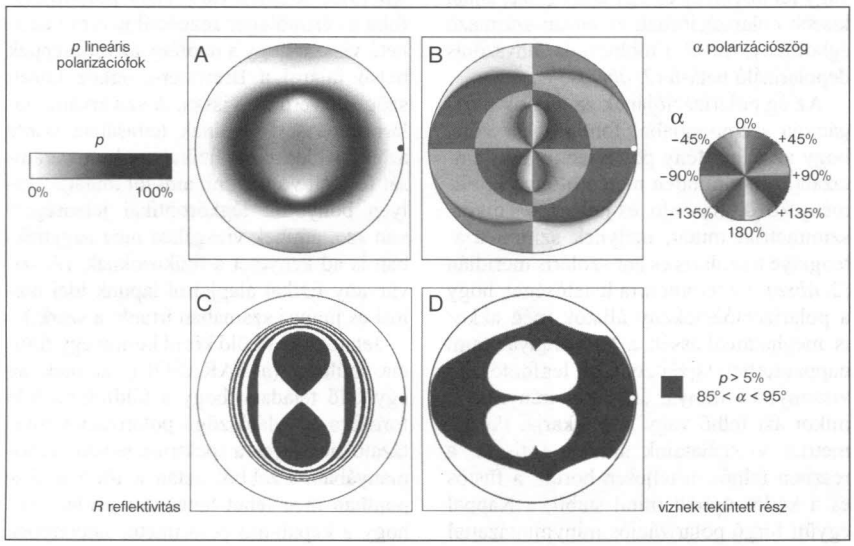
A vízfelszín polarizációja

Polarimetriával meghatározhatjuk a vízfelületek polarizációs mintázatát is **(5. ábra)**. Széles körben elterjedt téves vélekedés, hogy a természetben a sima vízfelszínről mindig vízszintesen poláros fény verődik vissza. Ez azonban csak akkor igaz, ha teljesen borult az ég, vagyis amikor a vizet megvilágító égboltfény polarizálatlan. Ha az égboltfény, mint általában, részlegesen lineárisan poláros, akkor nem biztos, hogy a vízfelszínről visszaverődve vízszintes lesz a rezgéssíkja.

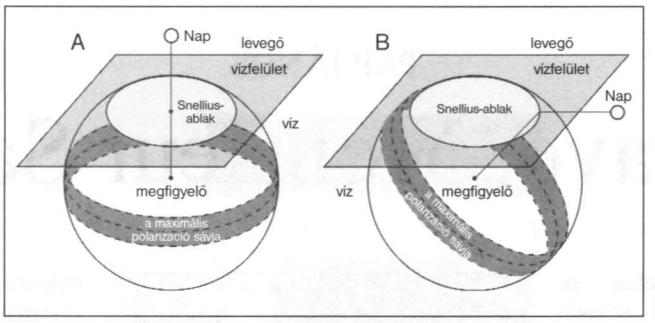
Egy víztest polarizációs jellemzőit ugyanis befolyásolja a víz alól visszaszóródó fény is, amely részlegesen lineárisan poláros függőleges domináns rezgéssíkkal. Minél több fény jön a vízből, annál kisebb a vízről származó fény eredő polarizációfoka, s annál kisebb a vízszintesen poláros vízfelszíni régió. A sötét vizek (melyekből csak kevés fény jön a víztestből) felületének nagy a vízszintesen és kicsi a függőlegesen polarizáló hányada, a világos vizeknél (melyekből sok fény jön a víztestből) fordított a helyzet. Ráadásul mindez függ a Nap állásától, ami meghatározza az égbolt polarizációs mintázatát is. A vizekre általában jellemző, hogy amint a Nap horizont fölötti magassága nő, egyre csökken a vízfelület vízszintesen poláros részaránya. Mint cikkünk második részében látni fogjuk, mindennek a vízirovarok polarotaktikus vízkeresési stratégiájában van nagy jelentősége.

A vizek felületéről tükröződő fény polarizációját repülőgépről történő távérzékeléssel azért is szokták mérni, hogy a vízfelszín tükröződési-polarizációs mintáza-

5. ábra. A spektrum kék (450 nm) tartományában egy sima vízfelületről tükröződő égboltfény *p* lineáris polarizációfokának (A), függőlegestől számított polarizációszögének (B) és a vízfelszín *R* reflektivitásának (C) 180° látószögű képalkotó polarimetriával mért mintázata, valamint a vízfelület azon részei, melyeket egy polarotaktikus vízirovar a polarizáció alapján ($p > 5\%$ és $85° < \alpha < 95°$) víznek tekint (D), mikor a fehér, illetve fekete ponttal jelzett Nap éppen a horizonton van. A C mintázat közepén lévő két tojásdad fekete területen $R \leq 2\%$, onnan kifelé haladva *R* – minden egyes fekete-fehér határon átlépve – $\Delta R = 1\%$ lépésközzel fokozatosan nő. A legkülső fehér gyűrűben $R > 10\%$. Az A mintázaton jól látszik a gyűrű alakú, erősen és vízszintesen poláros Brewster-zóna



tán fölismerhessék és behatárolhassák például a vízfelületen elterülő olajszennyeződést egy-egy olajszállító hajó elsüllyedését követően. Egy vízen úszó olajfolt sokszor nem vagy csak alig látható a vízről készült színes fényképeken a víz és az olajfolt közti csekély spektrális különbség miatt, ellenben gyakran jól fölismerhető a vízfelület polarizációfok-mintázatán, mert az olajfolt polarizációfoka jelentősen eltérhet a vízfelületétől.



7. ábra. A sima vízfelszín Snellius-ablakán át a vízbe hatoló napfény vízbeli szóródása miatt kialakuló erősen lineárisan poláros gyűrű (sötétszürke sáv) a vízbe merült megfigyelő körül, amikor a Nap a zeniten (A), illetve a horizonton (B) van. A maximálisan poláros gyűrűből származó fény rezgéssíkjának irányát szaggatott vonal mutatja

A növényzet polarizációja

Polariméterrel vizsgálhatjuk a növények fénypolarizáló-képességét is **(6. ábra, lásd a hátsó borítót)**. Ha a Föld felszínét borító növényzetről visszaverődő fénynek nemcsak az intenzitását, hanem a polarizációfokát is mérjük a spektrum különböző tartományaiban egy repülőgépről, akkor olyan hasznos optikai információkhoz juthatunk, amelyekből például a haszonnövények (pl. búza, kukorica) egészségi állapota vagy a termés érettségi foka nagyobb pontossággal állapítható meg, mintha csak a spektrális jellemzőket ismernénk. A növényi levelek által visszavert fény polarizációja ugyanis bonyolult módon függ a levelek felületi struktúráitól, korától, irányulásától, színétől és a megvilágítási viszonyoktól, azaz attól, hogy árnyékban vannak-e a levelek vagy közvetlen napfény éri őket, milyen magasan van a Nap a horizont fölött és milyen az égbolt felhőzöttsége *(6. ábra)*.

A földfelszínt fedő növényzet polarizációirány-mintázata is fontos információk hordozója lehet. Mivel a levelekről visszaverődő fény rezgéssíkja függ a levéllemezek irányulásától is, ha az utóbbi térbeli eloszlása például a szárazság miatt lecsökkent növényi turgornyomás miatt megváltozik, akkor a növényzet polarizációirány-mintázata is módosul. Ebből a mintázatból tehát a magasból következtetni lehet arra, hogy mely növények mennyire szenvednek a vízhiánytól, s el lehet rendelni az öntözést a megfelelő helyen és időben. Távérzékeléssel egyszerre hatalmas területek növényzetéről kaphatunk információkat, amelyek helyszíni mintavételezéssel nem vagy csak nagyon időigényesen és költségesen lennének beszerezhetők.

Amikor hőlégballonról 180° látószögű képalkotó polarimetriával fölülről mértük a közvetlen napfény által megvilágított földi növényzet polarizációját, azt tapasztaltuk, hogy a növénytakaró polarizációirány-mintázata gyakorlatilag ugyanolyan, mint a tiszta égbolté. Finnországi erdők képalkotó polarimetriai vizsgálatával azt is megmutattuk, hogy az erdőkben a napfény által megvilágított lombokon ugyanolyan polarizációirány-mintázat keletkezik, mint ami az égboltra jellemző *(2. ábra)*. Ez azért fontos, mert az erdőkben a Nap többnyire nem látható a lombok miatt, ugyanakkor a polarizációlátású erdei állatok a föléjük boruló lombsátor polarizációirány-mintázatából meg tudják állapítani a szoláris-antiszoláris meridián irányát, mint ahogy erdőn kívüli társaik az égboltéból. Az ég polarizációs mintázatát felhasználó orientáció, vagyis az „égi polarizációs iránytű" tehát nemcsak nyílt terepen, hanem az erdőben, a lombok alatt is működik.

A víz alatti világ polarizációja

Végül, ha a szárazföldről a vízbe merülünk egy vízálló polariméterrel, megérthetjük, mit látnak a polarizációérzékeny vízi állatok. Ha a vízből a levegőre nézünk, akkor az égbolt polarizációs mintázatát láthatjuk a Snellius-ablakon át **(7. ábra)**. E mintázat azonban kissé módosul, mivel az égboltfény polarizációja többékevésbé változik a vízfelszíni fénytörés miatt. Mindezt izraeli tengerbiológusokkal együttműködve kísérletileg igazolta kutatócsoportunk. E változás azonban nem olyan nagy, hogy egyes polarizációérzékeny vízi állatok ne tudnának a vízben a szárazföldi állatokhoz hasonlóan tájékozódni a vízből látható égbolt polarizációs mintázata alapján.

Amikor nem a vízfelület, hanem a fenék felé vagy a vízszinteshez közeli irányban nézünk, akkor a víz alatt egészen más polarizációs mintázatot tapasztalunk, ami azonban lényegében a légkörben keletkező polarizációs mintázathoz hasonlít. A vízben megfelelő mélységben lebegve egy polarizációérzékeny állat egy erősen poláros gyűrűt lát maga körül, melynek forgástengelye átmegy az állaton és párhuzamos a vízfelszínen megtört, vízben haladó napfény irányával *(7. ábra)*. Ezen maximálisan poláros gyűrű irányától távolodva fokozatosan csökken a polarizációfok, mígnem a nullára csökken a megtört napfény irányában, azzal ellentétesen, valamint a szoláris és antiszoláris meridián mentén elhelyezkedő neutrális pontokban. Egy polarizációérzékeny hal a vízben lényegében teljesen hasonló polarizációs mintázatot lát maga körül, mint egy levegőben magasan repülő polarizációérzékeny madár. Az egyik lényeges eltérés, hogy a víz alatti polarizációs mintázat szimmetriatengelye nem a Napot a megfigyelővel összekötő egyenes, hanem az az egyenes, amely a megfigyelőn megy át és párhuzamos a vízfelszínen megtört, vízben haladó napfénnyel. A másik fő eltérés, hogy míg a levegőben legalább néhány száz méter vastag légrétegen való áthaladás után szóródik csak a napfény kellő intenzitással a polarizációs mintázat kialakulásához, addig a vízben – annak tisztaságától függően – mindez néhány méteren vagy deciméteren belül megvalósul a víz levegőénél jóval nagyobb sűrűségének köszönhetően.

A vízben a tárgyak láthatósága sokkal rosszabb, mint levegőben, azaz a sűrű vízben sokkal kisebb távolságból lehet fölismerni egy tárgyat, mint a jóval hígabb levegőben. A látótávolságot tovább csökkentik a vízben lebegő részecskék (hidroszol). Mivel azonban a vízben haladó fény már rövid távolság megtétele után is erősen polárossá válik a vízbeli intenzív szórás miatt, a polarimetria lehetőséget ad a vízbeli látótávolság növelésére. Nem kell mást tenni, mint mérni a vízi optikai környezet polarizációs mintázatát, s annak ismeretében egy megfelelő számítógépes algoritmussal kiszűrni a vízben szórt poláros fényt. Ezáltal a vízbeli erős fényszórás miatt láthatatlan vízbeli tárgyak láthatóvá válnak, mert a róluk eredő, közelítőleg polarizálatlan fényt nem nyomja el a vízben szórt poláros fény. A víz alatti emberi munkálatok során manapság már ezzel a polárszűrési módszerrel növelhető meg a vízbeli látótávolság, aminek különösen a zavaros vizekben nagy a gyakorlati jelentősége. Egyes polarizációlátású lábasfejűek e módszerhez hasonlóan képesek fölismerni zsákmányukat a zavaros vízben.

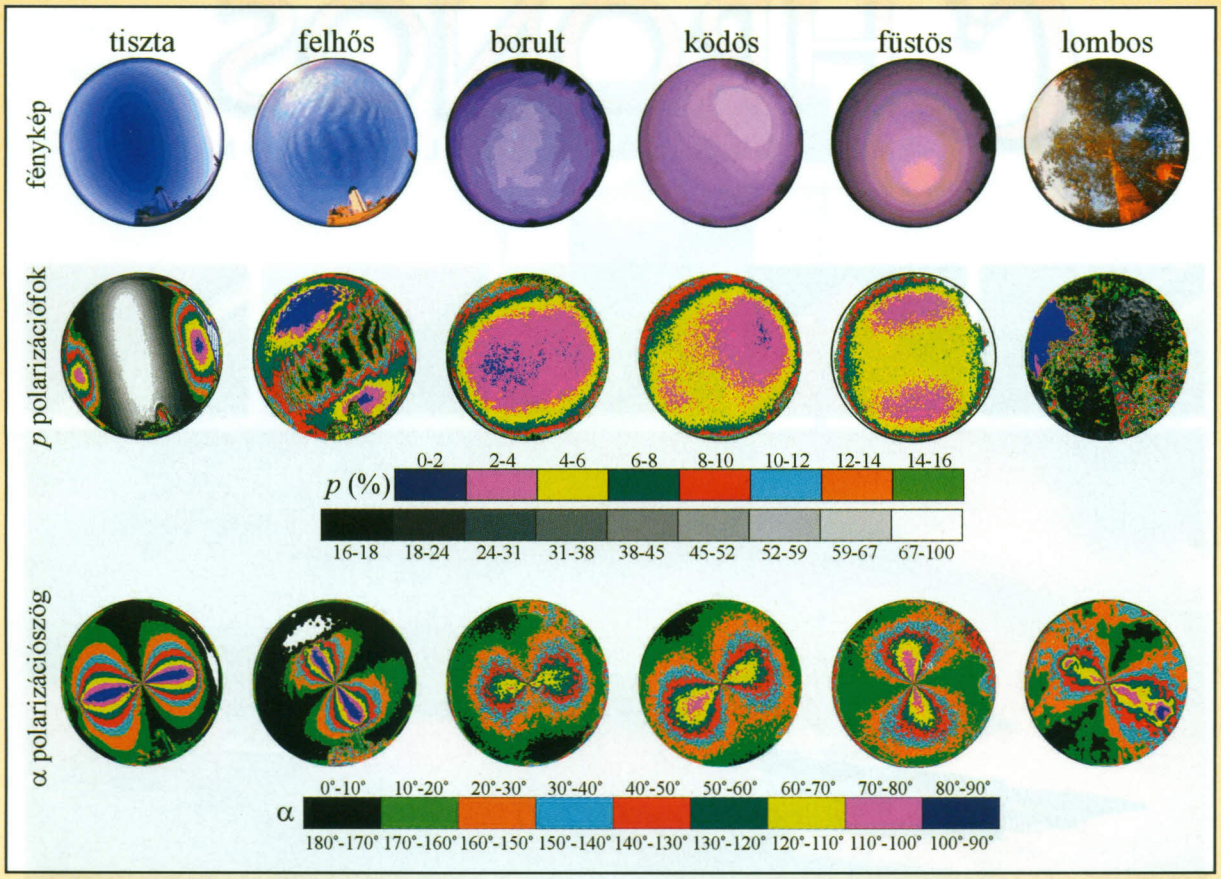
AJÁNLOTT IRODALOM

Horváth, G. & Varjú, D. (2003) *Polarized Light in Animal Vision Polarization Patterns in Nature.* Springer-Verlag, Heidelberg–Berlin–New York

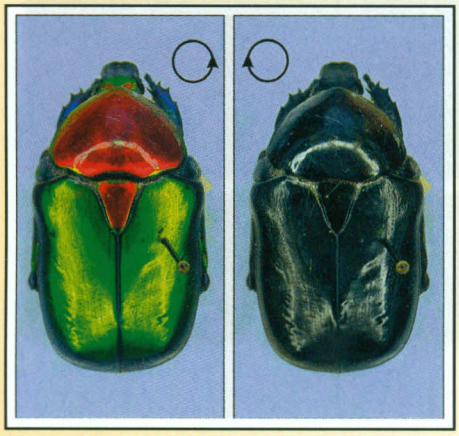
Az ELTE Biológiai Fizika Tanszék Biooptika Laboratóriumának honlapjáról számos magyar és angol nyelvű cikk tölthető le a természet polarizációs mintázatai és az állatok polarizációlátása témakörökben: http://arago.elte.hu

Sarkított fény a természetben

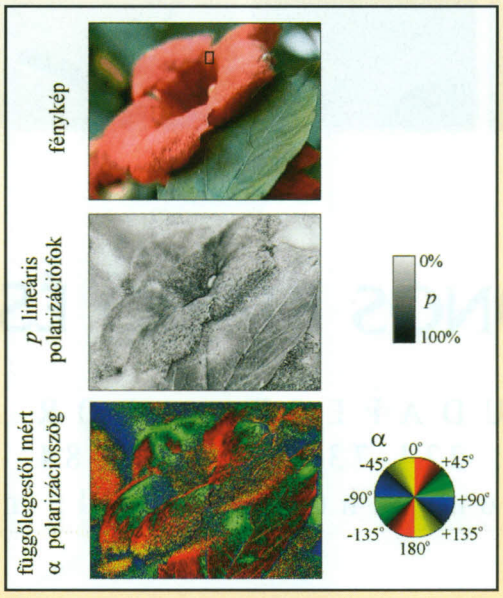
A poláros fény rejtett dimenziói című írásunk néhány ábrája



2. ábra. Tiszta, részben felhős, teljesen borult, ködös, erdőtűztől füstös és napfény által megvilágított lomboktól zömében takart égbolt 180° látószögű halszemoptikás fényképe, valamint a spektrum kék (450 nm) tartományában képalkotó polarimetriával mért *p* lineáris polarizációfokának és a helyi meridiántól számított α polarizációszögének a mintázata. A napkorong egyik égbolton sem látszik, mert vagy a horizont alatt van (tiszta ég), vagy pedig felhők, köd, füst vagy lombok takarják



3. ábra.
A *Potosia aeruginosa jousselini* fémfényű szkarabeuszbogár balra (az óramutató járásával ellentétesen), illetve jobbra (az óramutató járásával egyezően) cirkuláris polárszűrőn át készült fényképe. A képpáron jól látszik, hogy a bogár kültakarójáról visszaverődő fémes zöld és vörös fény balra cirkulárisan poláros, amit a jobbos cirkuláris polárszűrő nem enged át, ezért a jobb oldali képen a bogár teljesen fekete a fémfényért felelős réteg alatt húzódó feketén pigmentált kitinpáncél miatt



6. ábra.
Egy piros virágról és zöld leveléről visszaverődő fény *p* lineáris polarizációfokának és függőlegestől számított α polarizációszögének a spektrum zöld (550 nm) tartományában képalkotó polarimetriával mért mintázata