LÉGKÖR

XL. évfolyam

AZ ORSZÁGOS METEOROLÓGIAI SZOLGÁLAT ÉS A MAGYAR METEOROLÓGIAI TÁRSASÁG SZAKMAI TÁJÉKOZTATÓJA

1995. 3. szám

Víztükrök derült égbolt alatti polarizációs mintázata biológiai vonatkozásokkal

Horváth F. Ákos és
Horváth Gábor
ELTE Meteorológia Tanszék és
Atomfizika Tanszék

Víztükrök derült égbolt alatti polarizációs mintázata biológiai vonatkozásokkal

Bevezetés

Számos légköri optikai jelenségben fontos szerepet játszik a fény polarizációja*. A természetben döntően szóródáskor és visszaverődéskor történik polarizáció. A légköri fényszórás következtében a részlegesen lineárisan poláros fény egyik fő forrása a derült égbolt (Coulson, 1988). A víz alatti optikai környezet is erősen poláros a fény szóródásának köszönhetően (Jerlov, 1976). A harmadik fő forrás a sima, csillogó felületekről, pl. vizek felszínéről visszaverődő és polarizálódó fény.

Rengeteg állat képes érzékelni a fény rezgési síkját (Waterman, 1981). A legtöbb ilyen állat arra használja látórendszere e képességét, hogy az égbolt polarizációs mintázata alapján határozza meg a szoláris meridián irányát, s azt „iránytűként" alkalmazza térbeli tájékozódáshoz, mikor a Nap felhők, tereptárgyak vagy naplemente miatt nem látható. Ujabban a vízirovarokról derült ki, hogy szemük szintén érzékeny a fénypolarizációra, és hogy a vizet a felszínéről visszavert horizontálisan poláros fény segítségével ismerik fel, többnyire az ultraibolya spektrális tartományban (Schwind, 1991, 1995). Az ezzel a kérdéskörrel foglalkozó biológiai kutatások során merült fel azon légköri optikai probléma megoldásának igénye, hogy miként is néz ki a tiszta égboltozat alatti sima vízfelszínről visszaverődő égboltfény polarizációs mintázatának a finomszerkezete (Schwind & Horváth, 1993; Horváth, 1995).

Ez a lényegében légköri optikai probléma érdekes módon nem a meteorológiai optikai kutatások során vetődött fel, hanem egy biológiai jelenségkör fiziológiai optikai, vizuális ökológiai megközelítésekor. Talán ez a magyarázata annak, miért nem találtunk részletes méréseket vagy számításokat a vízfelszínek tükröződési-polarizációs mintázatáról sem a fizikai, sem pedig a meteorológiai optikai irodalomban. A meteorológiai modellekben a földfelszín fénytükrözését elég, ha a hullámhossztól és a beesési szögtől függő albedóval veszik figyelembe; a légkör energiamérlegét leíró egyenletekben nyugodt szívvel elhanyagolható a felszíni fénytükrözés polarizációfüggése és annak finomszerkezete, legyen szó akár sima vízfelszínekről.

A fent említett biológiai indíttatással arra vállalkoztunk, hogy számítógéppel meghatározzuk a tiszta égbolt alatti víztükör polarizációs mintázatának a finomszerkezetét. Reményeink szerint e szép légköri optikai probléma a Légkör olvasói számára is érdekesnek bizonyul.

Az alkalmazott számítógépes módszer

Az égbolt félgömbjének polarizációs mintázatait egy polárkoordináta-rendszerben ábrázoltuk, amelyben sugáriránybán mértük a zenittávolságot és érintőlegesen a szoláris meridiántól számított azimutot. Hasonló polárkoordináta-rendszerben jelenítettük meg az égboltfény vízfelszíni tükröződési-polarizációs mintázatait. A számítások során a következő két egyszerűsítéssel éltünk: (i) a vízfelületet teljesen simának, hullámfodroktól mentesnek tekintettük; (ii) a vízfelszíni tükrözésből eredő fénypolarizáció mellett elhanyagoltuk a víztest fenekéről visszavert valamint a vízben lebegő részecskékről szóródó és a felszínen megtört fény polarizációs járulékát. Mivel a vízfelszín tükröződési polarizálóképessége csak elhanyagolható mértékben függ a fény hullámhosszától, ezért minden polarizációs mintázatot a látható spektrum közepő tartományára határoztunk meg, mikor a víz törésmutatója 1.333.

A derült égbolt polarizációjának matematikai leírására a félempírikus Rayleigh-modellt használtuk, amely célunknak megfelelő, viszonylag jó közelítés (Coulson, 1988), főleg, ha figyelembe veszszük, hogy a vízfelületnek igen erős a saját fénypolarizáló hatása, ami a tükröződő égi polarizációs mintázat igen finom, árnyalatnyi részleteit amúgy is elnyomja. A levegő/víz határátmenet polarizációs sajátságait a Fresnel-formulák alkalmazásával számítottuk polarizálatlan ill. részlegesen lineárisan poláros beeső fényre. A polarizációs mintázatok számítógépes megjelenítésekor a polarizációfoknak, polarizációs iránynak valamint a vízfelszín fénytükrözőképességének különböző értékeit eltérő színárnyalatokkal ábrázoltuk; az eredményül kapott mintázatokat pedig a képernyőről fényképeztük le.

Eredmények és biológiai vonatkozások

A polarizációeloszlás finomszerkezet

Az *1. és 3. ábra* a tiszta égbolt polarizációfokának és polarizációs irányának az eloszlását mutatja a félempírikus Rayleigh-modell szerint számítva a Nap zenittávolságának függvényében, míg a *2. és 4. ábra* a sima vízfelszínről visszavert égboltfény hasonló mintázatait szemlélteti.

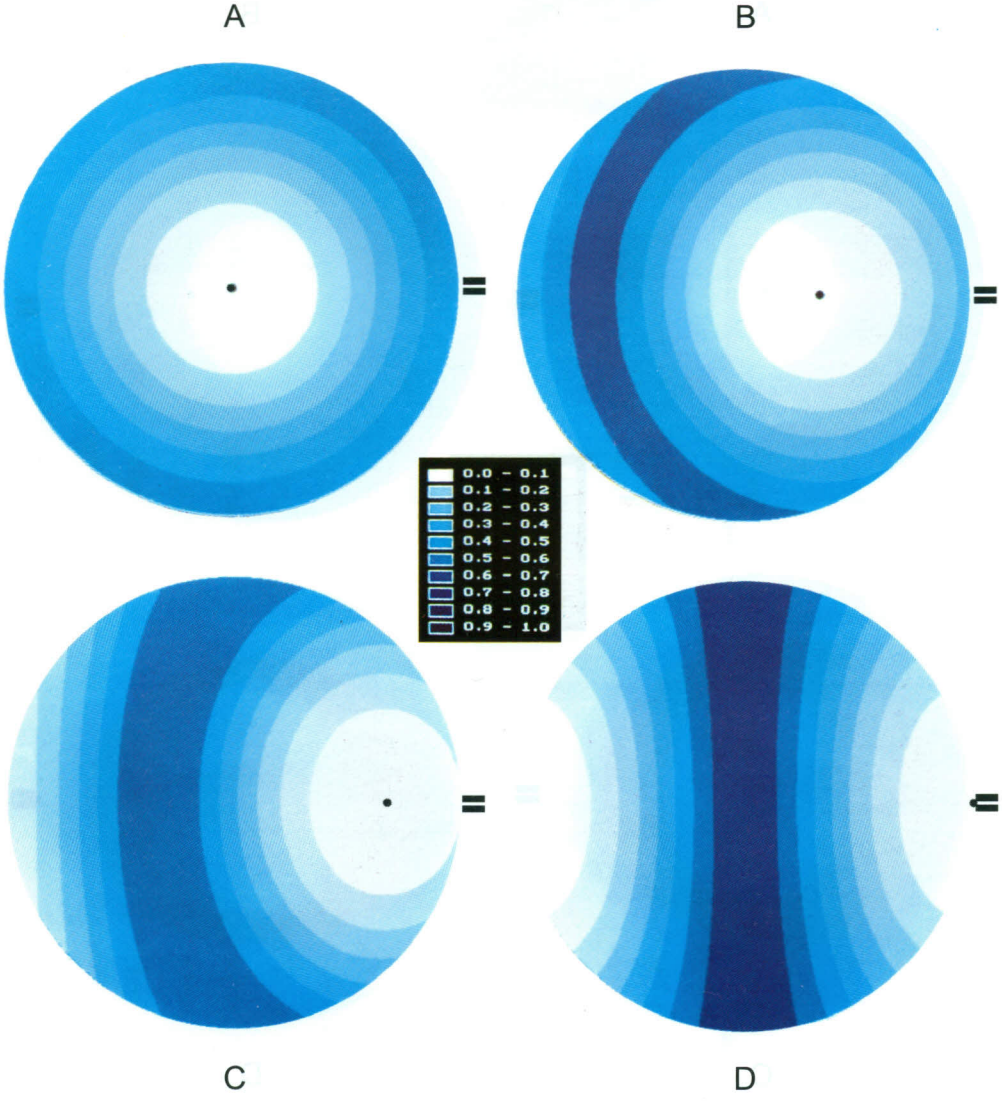
A tiszta égboltozat alatti sima vízfelszín tükröződési-polarizációs mintázata akkor a legegyszerűbb, mikor a Nap a zeniten van (*2A, 4A ábra*). Mivel ekkor a bármely irányból jövő égboltfény rezgéssíkja vízszintes (*3A ábra*), ezért a vízről visszaverődő égboltfény polarizáci-

ója is mindig horizontális (*4A ábra*). A tükröződő égboltfény polarizációfokának az ún. Brewster-gyűrűben van maximuma, amely a nadírtól (a zenit tükörképétől) körkörösen 53°-ra húzódik a vízfelszínen (*2A ábra*). A reflektivitás a nadírtól a horizont felé exponenciálisan nő.

A meteorológiai viszonyoktól és a Nap zenittávolságától függetlenül a víztükör egyik fő jellegzetessége a viszonylag széles, erősen és horizontálisan poláros Brewster-gyűrű (*2. ábra*), amelynek konkrét alakja tiszta égbolt alatt a Nap zenittávolságától függ. Mikor a Nap a horizonton van, a Brewster-gyűrű a Nap irányában és azzal szemben eléri maximális szélességét, míg a szoláris meridiánra merőlegesen ekkor a legkeskenyebb (*2D ábra*).

Mikor a Nap a zeniten van, a nadírban egy neutrális (polarizálatlan) folt keletkezik a vízfelszínen (*2A ábra*). A Nap zenittől való távolodásakor e folt a szoláris meridiánra merőlegesen megnyúlik (*2B ábra*), majd két neutrális folttá szakad (*2C ábra*), amelyek a Nap horizonthoz való közeledésekor egyre távolodnak egymástól, mígnem napnyugtakor a szoláris meridiánra merőlegesen, a nadírtól kb. 45°-ra állapodnak meg (*2D ábra*). Naplementekor további két neutrális folt is kialakul a Brewster-gyűrűn kívűl ugyancsak a szoláris meridiánra merőlegesen, valamint két ívalakú neutrális zóna a szoláris és anti-szoláris pontok irányában (*2D ábra*). E neutrális foltok a vízfelszín azon régiói, ahol a tükröződő égboltfény horizontális polarizációja vertikálissá változik (*4B,C,D ábra*).

A Nap kis zenittávolságai mel-

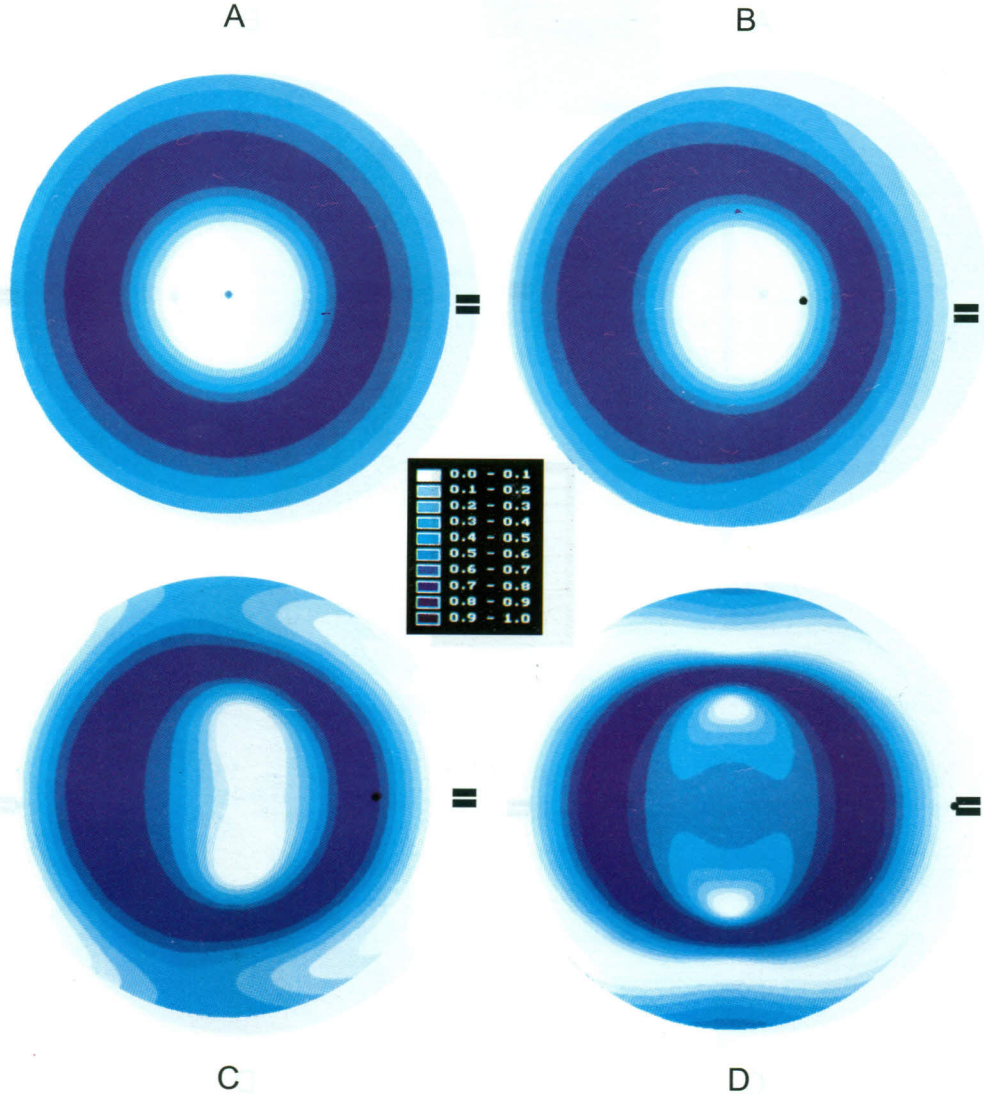


1. ábra:
Tiszta égbolt polarizációfokának eloszlása a félempírikus Rayleigh-modell alapján a Nap négy különböző zenittávolságára számítva: (A) , (B) , (C) , (D) . A Napot fekete pont jelöli, a szoláris meridián irányát pedig egy fekete sáv a horizonton. A polarizációfok 0-tól 0.1-es lépésközzel 1-ig terjedő intervallumait a színkódtáblázat mutatja középütt.

lett a vízről visszavert égboltfény túlnyomórészt horizontálisan poláros (*4A,B ábra*). Amint a Nap a horizonthoz közelít, változik a kép: a vízfelszín horizontális polarizációja változatlanul megmarad a szoláris és anti-szoláris pontok irányában, de a szoláris meridiánra merőlegesen megjelenik a nadír közelében két vertikálisan poláros folt (*4C ábra*), amelyek lényegében az égboltnak ekkor a zenit közelében húzódó sávjáról jövő erősen és közel függőlegesen poláros fényét (*1C, 3C ábra*) tükrözik. A vízfelület e függőlegesen poláros foltjai naplementekor fokozatosan kiterjednek a szoláris meridiánra merőlegesen, mígnem elérik a horizontot, ahol karéj alakot öltenek (*4D ábra*). A víztükör napnyugta körül fellépő függőlegesen poláros sávját a vízszintesen poláros Brewster-gyűrű szeli át.

Megmutatható, hogy amint a Nap közeledik a horizonthoz, a szoláris meridiánra merőlegesen két sötétebb folt alakul ki, ahol a vízfelület reflektivitása 2%-nál kisebb. E foltokban a felszín egészen átlátszó, könnyen a vízbe lehet nézni, mert nem zavar a csekély visszavert égboltfény.

Ezek után világos, hogy a derült égbolt alatti sima vízfelszín tükröződési-polarizációs mintázatai jellegzetes és erős gradiensekkel rendelkeznek, különösen napnyugta tájékán (*2C,D; 4C,D ábra*). A vízfelszín visszaverte égboltfény polarizációfokának, polarizációs irányának és a vízfelület reflektivitásának gyors térbeli változásai legtöbbször a víztükör ugyanazon régióira jellemzőek. Ez szembetűnően látszik pl. a *4C,D ábra* lepke alakú, függőlegesen poláros foltjában, amely egybeesik a *2C,D ábra* Brewster-gyűrűn belüli két neutrális foltjával



2. ábra:
Derült égboltozat alatti sima vízfelszínről tükröződő égboltfény polarizációfok-eloszlásának finomszerkezete az 1. ábrához hasonlóan. A Nap tükörképét fekete pont jelöli.

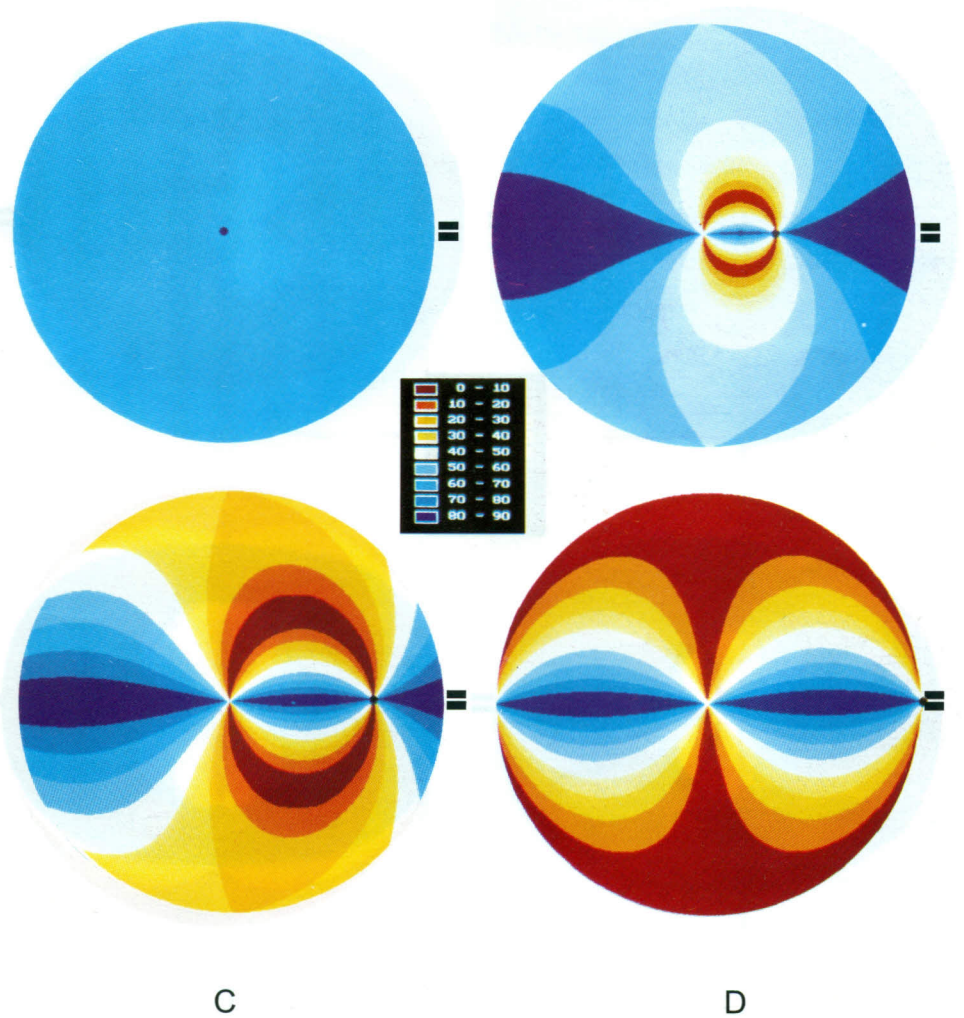
valamint az említett kis reflektivitású sötét foltpárral.

Víztükrök polarizációs mintázata és a vízirovarok vízdetektálása

A víztükör tükröződési-polarizációs mintázatának fent vázolt finomszerkezete a vízirovarok vízkeresésében és vízdetektálásában játszik fontos szerepet (Schwind, 1991, 1995; Schwind & Horváth, 1993; Horváth, 1995). Az emberi szem gyakorlatilag vak a fénypolarizációra, de számos rovar és más ízeltlábúak is – pl. méhek, lepkék, legyek, tücskök, sivatagi hangyák, pókok, rákok – képesek detektálni a lineárisan poláros fény rezgéssíkját (Waterman, 1981).

Az ízeltlábúak fotoreceptoraiban ugyanis a sejtmembránnak speciális, ujjszerű kitüremkedései, ún. mikrovillijei vannak, amelyek egymással párhuzamosan irányulnak, és a bennük lévő látópigmentmolekulák a hossztengelyükkel párhuzamosan rendeződnek (Waterman, 1981). Mivel a látópigment molekulái annál több fényt nyelnek el, minél párhuzamosabb a fény rezgéssíkja a dipóltengelyükkel, ezért a mikrovillis fotoreceptorok érzékenyek a fénypolarizáció fokára és irányára.

A polarizáció-érzékelés a tájékozódáson túl sok másra is jó még, pl. vízdetektálásra. Schwind (1991, 1995) fedezte fel, hogy a vízirovarok és a nedves anyagokon élő rovarok látórendszere is érzékeny a fénypolarizációra, és hogy e rovarok a vízfelületről tükröződő nap- és égboltfény horizontális polarizációja alapján találják meg vízi életterüket, többnyire az ultraibolya (UV) spektrális tartományban.

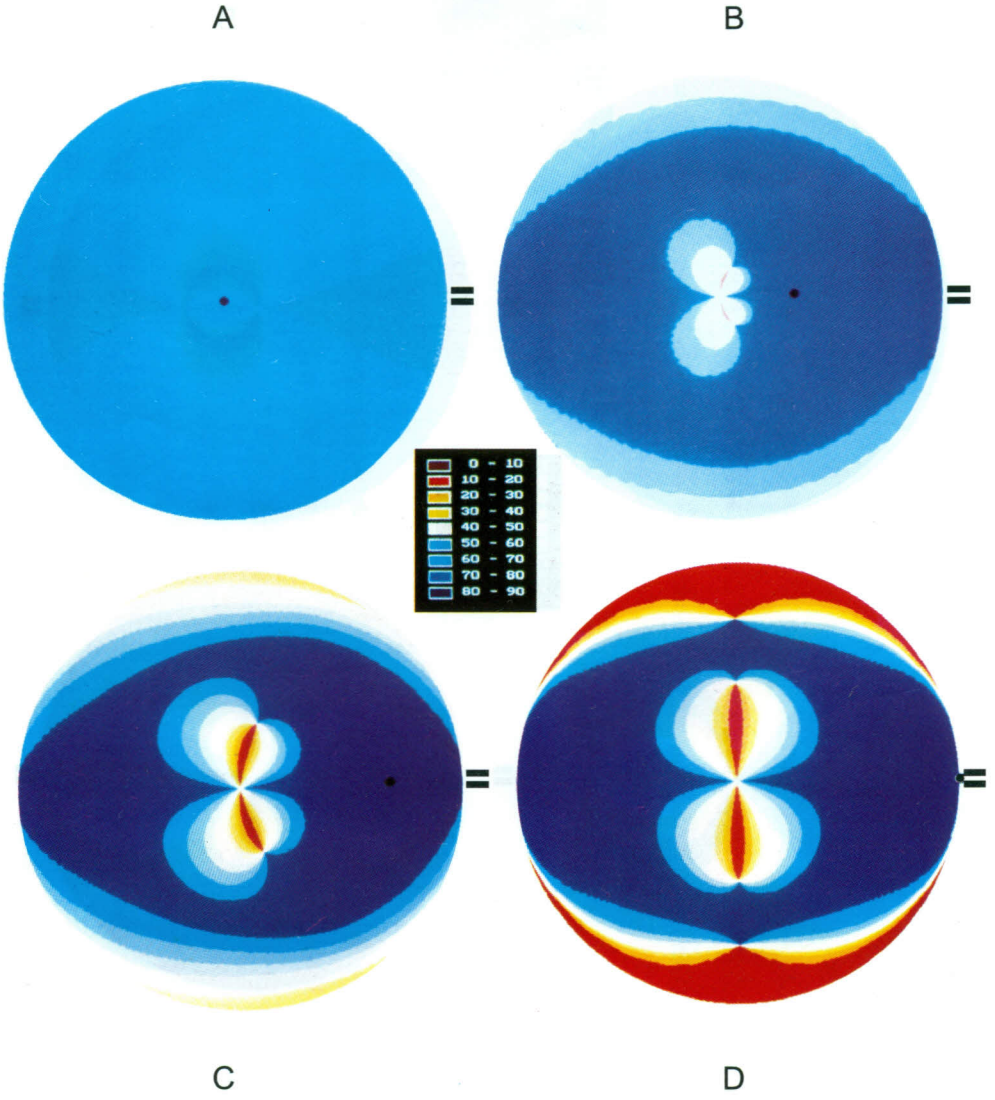


3. ábra:
Mint az 1. ábra az égboltfény polarizációs irányának eloszlására. Az égboltfény rezgéssíkjának meridiántól mért irányát -tól -ig -os lépésközű intervallumokra osztva eltérő színekkel ábrázoltuk.

Ha repülés közben vizet keresve egy vízirovar az optikai környezete bármely tartományából horizontálisan poláros UV fényt észlel, akkor egyenesen arra veszi repülési irányát, majd vizet remélve fejest ugrik, ill. landol a fényforráson. Számítása az esetek többségében be is válik, mivel a természetben szinte kizárólag csak a vízfelületekre jellemző az erősen ultraibolya, horizontálisan poláros visszavert fény. Példának okáért a zöld növényzet egyrészt viszonylag kevés fényt ver vissza az UV tartományban, másrészt pedig a reflektált fény polarizációs iránya nem vízszintes, hanem a nap irányára merőleges a levelek és ágak véletlenszerű elrendeződése következtében.

A rovarok összetett szeme a gerincesek egyszerű lencsés szemével összehasonlítva sokkal kisebb térbeli felbontású, és természetesen a rovarok „értelmi képessége" is messze elmarad a magasabbrendű állatokétól. Ezért ami nekünk embereknek látszólag magától értetődően vizet jelent – fényesen csillogó felület, sokszor tipikus vízinövényektől határoltan, olykor vitorláshajókkal –, az egy vízirovar számára nem jelent feltétlenül és holtbiztosan vizet. Az optikai környezet egy világosabb, pl. napsütéses foltja a rovarszemet könnyen megtéveszthetné a víz csalóka látványát keltve.

Egy vízirovarnak azonban kb. egy órai repülés alatt feltétlenül vizet kell találnia, különben kiszárad és elpusztul. Vízfelismerési képességének és módszerének genetikailag kell öröklődnie, mivel általában nincs lehetősége a vízzel való előzetes vizuális tapasztalatok megszerzésére. Az evolúció során szinte százszázalékosan biztosnak bizonyult a vizeknek a róluk visszavert



4. ábra:
Tiszta égboltozat alatti sima vízfelszínről tükröződő égboltfény polarizációs irányeloszlásának finomszerkezete a 3. ábrához hasonlóan.

horizontálisan poláros UV fény alapján történő felismerése. Éppen ezért téveszthetők meg könnyen a vízirovarok és ejthetők csapdába mesterséges fénytükröző és fénypolarizáló felületekkel (pl. az autók csillogó és erősen poláros karosszériájával, szélvédő üvegével vagy növényházak üvegtábláival).

Horváth F. Ákos és Horváth Gábor
ELTE Meteorológia Tanszék és Atomfizika Tanszék

Köszönetnyilvánítás: A cikkben foglalt eredmények a „Természetes polarizációs mintázatok és az állatok polarizáció-látása" című, F-014923 számú Fiatal OTKA pályázat támogatásával születtek.

Irodalmi hivatkozások

Coulson, K. L. (1988) Polarization and Intensity of Light in the Atmosphere. A. Deepak Publishing, Hampton, Virginia

Horváth, G. (1995) Reflection-polarization patterns at flat water surfaces and their relevance for insect polarization vision. Journal of Theoretical Biology, 175, 27-37

Jerlov, N. G. (1976) Optical Oceanography. Elsevier, Amsterdam

Schwind, R. (1991) Polarization vision in water insects and insects living on a moist substrate. Jornal of Comparative Physiology A, 169, 531-540

Schwind, R. (1995) Spectral regions in which aquatic insects see reflected polarized light. Journal of Comparative Physiology 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

Waterman, T. H. (1981) Polarization sensitivity. In: Handbook of Sensory Physiology VII/6B. Comparative Physiology and Evolution of Vision in Invertebrates B: Invertebrate Visual Centers and Behavior I (ed. H. Autrum), pp. 281-469, Springer Verlag, Berlin

LÉGKÖR

Megjelenik negyedévenként

XL. évfolyam
3. szám

Felelős szerkesztő:
Dr. Ambrózy Pál
a szerkesztő bizottság elnöke

Operatív szerkesztők:
Dr. Bartholy Judit
Dr. Csomor Mihály

Szerkesztő bizottság:
Bóna Márta
Dunay Sándor
Dr. Haszpra László
Ihász István
Mezősi Miklós
Dr. Pálvölgyi Tamás
Schirokné Kriston Ilona
Tóth Róbert
Zárbok Zsolt

Technikai szerkesztő:
Szinok István

Szövegszerkesztés:
Elekné Szibilla Ágnes

Grafika és tipográfia:
Bánáti Istvánné
Szekrényi Anikó

ISSN 0133–3666

A kiadásért felel.:
Dr. Mersich Iván, az OMSZ elnöke

Készült:
a MET-DRUCK Kft. Nyomdájában
800 példányban

Felelős vezető:
Szinok István

Évi előfizetési díja: 326 Ft

Megrendelhető:
Az OMSZ Pénzügyi Osztályán

Munkaszám: 95.72