

A VÍZFELSZÍN BREWSTER-FÉLE SÖTÉT FOLTJÁNAK POLARIZÁCIÓ-OPTIKÁJA

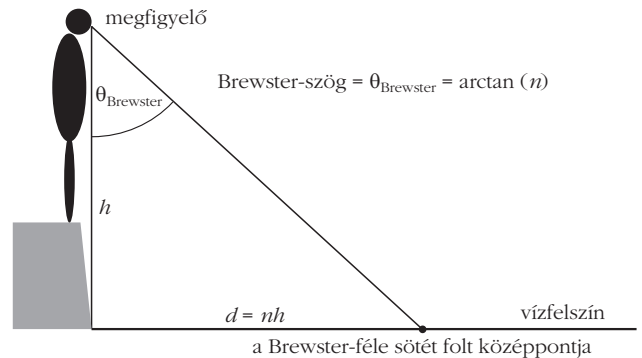
1. rész: elmélet, modellezés

Horváth Gábor, Takács Péter – ELTE, Biológiai Fizika Tanszék, Környezetoptika Laboratórium
Barta András – Estrato Kutató és Fejlesztő Kft.
David Pye – Londoni Egyetem, Nagy-Britannia

Felhőtlen ég alatt napkelte vagy napnyugta közelében arccal észak vagy dél felé fordulva a függőlegestől 53°-ra nézd a víztükröt és megláthatod. Már korábban is többször észlelhetted, csak nem voltál vele tisztában, mit látsz. E cikkből megismerheted a gyakori, de csak kevesek által ismert Brewster-féle sötét folt optikáját.

A vízfelszínen látható Brewster-féle sötét folt

Fizikai optikában tanítják a felületi normálistól mért $\theta_{\text{Brewster}} = \arctan(n)$ Brewster-féle szöget (1. ábra), amelynél egy n törésmutatójú közeg határfelületéről visszavert fénysugár merőleges a közegbe hatoló megtört sugárra. E beesési szögnél a felületre merőlegesen poláros fény nem verődik vissza, hanem behatol a közegbe, míg a felülettel párhuzamosan poláros fény egy része visszaverődik, a többi a közegbe hatol. E jelenséget a fényképezés jól ismerik és kihasználják, amikor például egy üvegvitrinben kiállított tárgyat fényképeznek és a kamera lencséje elé csavarható, forgatható lineáris polárszűrővel ki akarják iktatni az üvegről tükröződő fényt, ami zavarja a tárgyról érkező fényt. A kamera optikai tengelyét Brewster-szögben irányítják az üvegfelületre és a polárszűrő átérésztési irányát az üvegre merőlegesre forgatják,



1. ábra. A vízfelszín Brewster-féle sötét foltjának (BSF) közepe a h szemmagasságú megfigyelőtől vízszintesen $d = h \tan \theta_{\text{Brewster}} = nh$ távolságra van, mert $\theta_{\text{Brewster}} = \arctan(n=1,33) = 53^\circ$, ahol n a víz levegőre vonatkoztatott törésmutatója.

miáltal az üveglapról visszavert, vele párhuzamosan poláros zavaró fény teljesen kiszűrődik és tisztán láthatóvá válik az üveg mögötti céltárgy. A fotósok ugyanezen trükköt használják, amikor például a nap-sütötte növényzetet szeretnék minél zöldebbnek fényképezni. Ekkor is addig forgatják fényképezőgépük lineáris polárszűrőjét, amíg a levelekről visszavert, bizonyos polarizációirányú, a levelek saját zöld fényét elnyomó fehér napfényt ki nem szűrik. Ha valaki a levegőből fényképezi a víz alatti világot, akkor is zavaró a vízfelszínről tükröződő nap- és égfény, ami



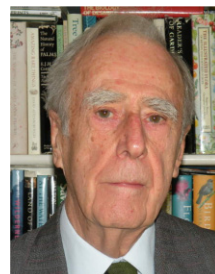
Horváth Gábor fizikus, az MTA doktora, az ELTE Biológiai Fizika Tanszék Környezetoptika Laboratóriumának vezetője. A vizuális környezet optikai sajátosságait és az állatok látását tanulmányozza, továbbá biomechanikai kutatásokat folytat. Számos szakmai díj és kitüntetés tulajdonosa.



Barta András az ELTE-n végzett fizikusként, majd ugyanott szerzett PhD-fokozatot biofizikából a Biológiai Fizika Tanszék Környezetoptika Laboratóriumában. A bio- és környezetoptikával kapcsolatos alap kutatásokon kívül ipari műszerek, elsősorban minőségellenőrző eszközök fejlesztésével foglalkozik az Estrato Kutató és Fejlesztő Kft. vezetőjeként. Számos kutatásfejlesztési pályázat előkészítésében és megvalósításában vett és vesz részt.



Takács Péter a középiskolát a Debreceni Egyetem Kossuth Lajos Gyakorló Gimnáziumában végezte. BSc szakdolgozatát az ELTE-n írta a vikingek égbolt-polarizációs navigációjáról. Az ELTE végzős mesterszakos fizikus hallgatójaként diplomamunkáját a Biológiai Fizika Tanszék Környezetoptika Laboratóriumában készíti, ahol több kutatásban is részt vesz.



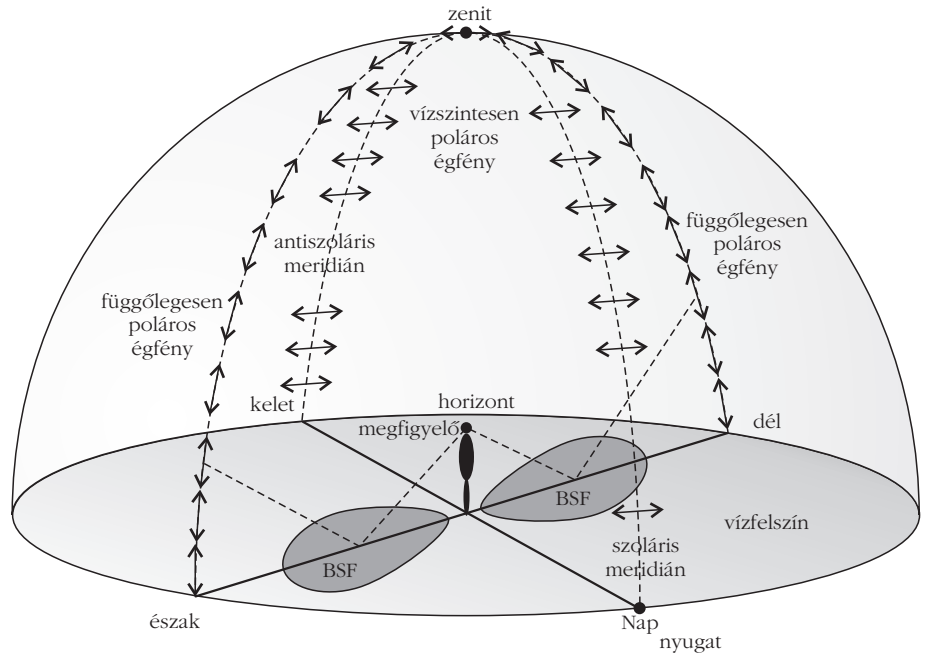
David Pye a Londoni Egyetem zoológus emeritus professzora. Fő érdeklődési területe az állatvilágban föllelhető fizikai elvek vizsgálata. Tanulmányozta az állatok ultrahangos kommunikációját, különös tekintettel a denevérek visszhangos tájékozódására és zsákmányszerzésére, majd az elektromágneses spektrum közeli ultraibolya-tartománya és a poláros fény állatvilágban játszott szerepét kutatta. A Zoological Society, Linnean Society, Institute of Physics és a Royal Institution tagja.

elnyomja a víz alól jövő fényt. Ekkor függőleges áteresztési irányú polárszűrőn át a függőlegestől Brewster-szögben nézve a vizet kiszűrhető a zavaró felszíni reflexió, miáltal a vízbe lehet nézni és tisztán látszanak a vízbeli tárgyak, növények és állatok.

A zavaró vízfelszíni tükröződések kiküszöböléséhez tehát általában lineáris polárszűrő kell. Kivételt egy esetben találunk, amikor maga a természet szolgáltat lineáris polárszűrőt a vízfelszín formájában és függőlegesen poláros beeső fényt az égből. A függőlegestől mért $\theta_{\text{Brewster}} = \arctan(n=1,33) = 53^\circ$ Brewster-szögben (ahol n a víz törésmutatója) a vízfelszínről csak a vízszintesen polarizált fény verődik vissza, emiatt, ha függőlegesen poláros égfény esik a vízre, akkor az nem tükröződik.

Mivel függőlegesen poláros fény reflektivitása csak lassan nő a Brewster-szögtől való szögeltéréssel, továbbá napnyugta és napkelte környékén a Naptól 90° -ra, a zeniten átmenő körkörös sávban közel függőlegesen polarizált az égfény, ezért tiszta ég alatt, horizontközeli (fölötti vagy alatti) Napnál egy kiterjedt, sötét folt látható a vízfelszínen, ha északra vagy délre nézünk a szoláris-antiszoláris meridiánra (a Napon és a zeniten átmenő függőleges égi főkörre) merőlegesen (2. ábra). Ekkor a függőlegesen poláros égfény nem vagy alig tükröződik a vízről a Brewster-szög közelében. Ez a *vízfelület Brewster-féle sötét foltja*. Amint a Brewster-szögtől egyre távolodunk, a tükröződő égfény fokozatosan fényesedik. A Brewster-féle sötét folt (a továbbiakban BSF) könnyen lefényképezhető és a szemfülesek néhány festményen is fölismerhetik.

Bár az égfény vízfelszínről történő visszaverődését már többen is részletesen tanulmányozták [1–8], a BSF polarizáció-optikájával korábban még nem foglalkoztak részletesen. Mint említettük, a fényképészek gyakran használnak polárszűrőt a kamerájuk előtt, hogy kiszűrjék a zavaró fénytükröződések, vagy esztétikailag javítsanak a fényképen (például sötétítsék a vízfelületet, zöldítsék a növényzetet). Azonban legtöbbször nem közlik, hogy egy adott kép elkészítésekor használtak-e polárszűrőt vagy sem. Így általában nem lehet tudni, hogy egy vízfelszínt megörökítő fotó sötét foltja valóban a BSF, vagy egy függőleges polárszűrő részlegesen/teljesen kiszűrte a vízfelszínről tükröződő vízszintesen polarizált fényt. E képeken többnyire a kamera látóiránya sem ismert a vízfelszínhez és a szoláris meridiánhoz képest, kivéve amikor a képen látható a Nap. A kamera szoláris meridiánhoz képesti látóirányára és a napmagasságra gyakran következtet-



2. ábra. A vízfelület Brewster-féle sötét foltja (BSF) kialakulásának geometriája, ha a megfigyelő északra vagy délre néz napnyugta vagy napkelte környékén, vagyis amikor a Nap közel van a horizonthoz. Kettősfejú nyilak szemléltetik az égfény polarizációirányát, ami vízszintes és függőleges a szoláris-antiszoláris meridián, illetve arra merőleges meridián mentén.

hetünk a fák és egyéb tereptárgyak árnyékából. Fák vagy épületek árnyékai bizony könnyen összekeverhetők a Brewster-féle sötét folttal. Ha egy képen az égbolt nem látszik, akkor annak jellemzői (tisztá vagy felhős) is ismeretlenek maradnak.

Tiszta ég alatt a BSF egy minden nap kétszer előforduló környezetoptikai jelenség, amit naplemente és napkelte környékén akkor észlelünk a vízfelszínen, ha északra vagy délre nézünk a szoláris meridiánra merőlegesen. Festőművészek is megörökíthetik e gyakori tünetényt tavakról vagy folyókról festett műveiken. Rengeteg festményt abból a szémszögből vizsgáltunk meg, hogy ábrázolják-e a Brewster-féle sötét foltot.

Cikkünknek három célja van: (i) Vizsgáljuk a BSF polarizáció-optikáját a napmagasság és felhőzöttség függvényében. (ii) Bemutatjuk a BSF polárszűrő nélkül készített néhány fényképét. (iii) Környezetoptikailag értelmezzük egy festményt, ami minden valószínűség szerint egy Brewster-féle sötét foltot is ábrázol. Mindezt tesszük a [9] cikkünk alapján.

Vizsgálati módszerek

A Brewster-féle sötét folt modellezése

A BSF elméleti alakjának (amikor nincsenek felhők és vízparti tereptárgyak) meghatározására a következő módszerrel éltünk: bemeneti adatként a tiszta ég $I_{\text{ég}}$ fényintenzitásának, $p_{\text{ég}}$ lineáris polarizációfokának és $\alpha_{\text{ég}}$ polarizációs szögének mintázatát vettük, amit a Berry és munkatársai [10] által kifejlesztett modelltől számítottunk a horizonttól mért θ_N napmagasság függvényében. E modell paraméterei a következők voltak: (i) az égfény $p_{\text{max}} = 50\%$ -os maximális polari-

zációfoka 90° -ra a Naptól. (ii) A Babinet- és Brewster-féle neutrális (polarizálatlan) pontok közti szögtávolság $\Delta(\theta_N = 0^\circ) = 20^\circ$, amikor a Nap a horizonton van, és $\Delta 20^\circ$ -ról lineárisan csökken $\Delta(\theta_N = 90^\circ) = 0^\circ$ -ra, amint a horizonttól mért θ_N napmagasság 0° -ról 90° -ra nő. 180° látószögű képalkotó polarimetriával [11] mértük tiszta, részben felhős és borult égboltok $I_{\text{ég}}$, $p_{\text{ég}}$ és $\alpha_{\text{ég}}$ -mintázatait a spektrum vörös (650 nm), zöld (550 nm) és kék (450 nm) tartományában (3. ábra az első belső borítón).

Az ég számított és mért $I_{\text{ég}}$, $p_{\text{ég}}$ és $\alpha_{\text{ég}}$ -mintázataiból kiszámítottuk a vízfelszínről tükröződő égfény $I_{\text{víz}}$, $p_{\text{víz}}$ és $\alpha_{\text{víz}}$ -mintázatait és a víz R reflektivitásmintázatát. A vízfelszínre beeső, lineárisan poláros, zérus körkörös polarizációjú égfény Stokes-vektora [2]:

$$\mathbf{S}^{\text{ég}} = I_{\text{ég}}[1, -p_{\text{ég}} \cos(2\alpha_{\text{ég}}), p_{\text{ég}} \cos(2\alpha_{\text{ég}}), 0]. \quad (1)$$

A vízfelület Mueller-mátrixa [4]:

$$\mathbf{M} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \frac{\tan \theta_-}{\sin \theta_+} \\ \frac{\tan \theta_-}{\sin \theta_+} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}^2 \cdot \begin{pmatrix} c_-^2 + c_+^2 & c_-^2 - c_+^2 & 0 & 0 \\ c_-^2 - c_+^2 & c_-^2 + c_+^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2c_- c_+ & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2c_- c_+ \end{pmatrix}, \quad (2)$$

ahol $\theta_- = \theta_b - \theta_v$ és $\theta_+ = \theta_b + \theta_v$, valamint c_- és c_+ rendre $\cos \theta_-$ és $\cos \theta_+$, továbbá θ_b és θ_v a függőlegestől mért beesési és visszaverődési szögek. A Snellius–Descartes-féle fénytörési törvény szerint:

$$\theta_v = \arcsin\left(\frac{\sin \theta_b}{n}\right), \quad (3)$$

ahol $n = 1,33$ a víz törésmutatója $\lambda = 550$ nm hullámhosszon. A vízről tükrözött fény Stokes-vektora:

$$\mathbf{S}^{\text{víz}} = \mathbf{M} \mathbf{S}^{\text{ég}}, \quad (4)$$

amiből a vízfelszínről visszavert fény polarizációs paraméterei:

$$I_{\text{víz}} = S_0^{\text{víz}}, \quad (5a)$$

továbbá

$$p_{\text{víz}} = \frac{\sqrt{(S_1^{\text{víz}})^2 + (S_2^{\text{víz}})^2 + (S_3^{\text{víz}})^2}}{(S_0^{\text{víz}})^2} \approx \frac{\sqrt{(S_1^{\text{víz}})^2 + (S_2^{\text{víz}})^2}}{(S_0^{\text{víz}})^2}, \quad (5b)$$

mivel $S_3^{\text{víz}} \approx 0$ és végül

$$\alpha_{\text{víz}} = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{S_2^{\text{víz}}}{-S_1^{\text{víz}}}\right), \quad (5c)$$

ahol $S_i^{\text{víz}}$ ($i = 0, 1, 2, 3$) a Stokes-vektor i -edik eleme. A vízfelszín $R = I_{\text{víz}}/I_{\text{ég}}$ reflektivitását képpontonként számítottuk az elméleti és mért égpolarizációs mintázatokra. Továbbá meghatároztuk a Brewster-pontot, mint a vízfelszínen lévő azon pontot, ahol az R minimális. Végül a Brewster-féle sötét foltot úgy definiáltuk, mint azon vízfelszíni pontok összességét, ahol $R \leq R^* = 2\%$.

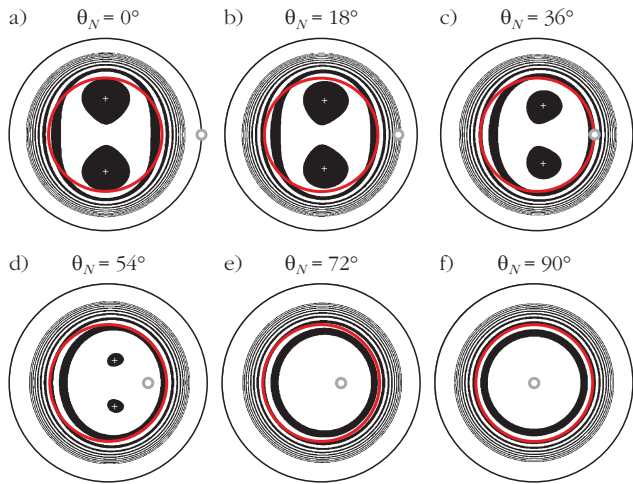
Az ég és vízfelszíni tükröződése szintetikus képeinek számítása

Az ég sima víztükrörben látható képét a következő módon állítottuk elő: 180° látószögű képalkotó polarimetriával [11] mértük az égfény $I_{\text{ég}}$, $p_{\text{ég}}$ és $\alpha_{\text{ég}}$ -mintázatát a spektrum vörös (650 nm), zöld (550 nm) és kék (450 nm) tartományában. Ezután Stokes–Mueller-formalizmussal [2, 4] kiszámítottuk az égbolt vízfelszíni tükörképének $I_{\text{víz}}$ intenzitását a vörös, zöld és kék spektrális tartományokban, majd ezekből egy színes képet komponáltunk. Mivel e tükörkép mindig nagyon sötét volt, ezért 50-szeres fényesítést alkalmaztunk, vagyis az $I_{\text{víz}}$ értéket mindhárom spektrális tartományban 50-nel szoroztuk. Ha az égfény túl gyöngye volt, akkor ábrázolásakor 5-szörös fényesítést végeztünk rajta, vagyis az $I_{\text{ég}}$ értékét mindhárom spektrális tartományban megszoroztuk 5-tel. 24 bites színkódolást használtunk, amikor I értéke 0 (fekete) és 255 (fehér) közé esett. Ha a fényesítést követően valamelyik I -érték nagyobb lett, mint 255, akkor I -t 255-ön rögzítettük. Ezáltal a kép egy része fehér lett, vagyis mindhárom spektrális tartományban túlexponált. A kivilágosított égbolton és vízfelszíni tükörképén a szoláris meridiánra merőlegesen két 90° nyílásszögű és a horizonttól mért 72° vastagságú kör-cikkgyűrűt vettünk, amelyeket téglalappá alakítottunk. Az ég és tükörképének téglalapját egymás alá helyeztük, amely képpár azt hivatott szemléltetni, amit egy megfigyelő lát, amikor a szoláris meridiánra merőlegesen nézi az eget és tükörképét.

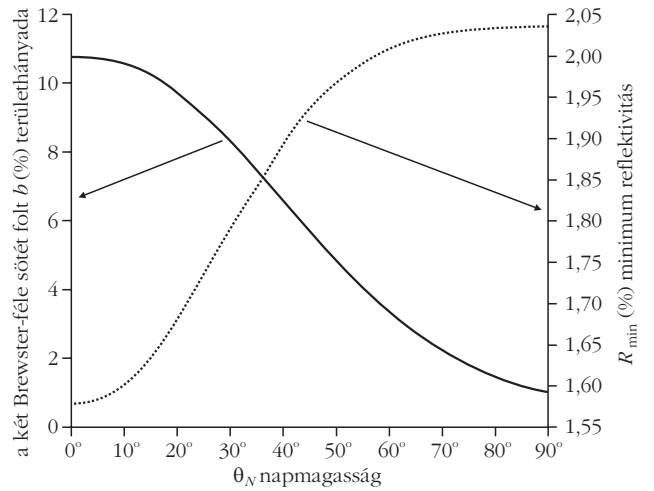
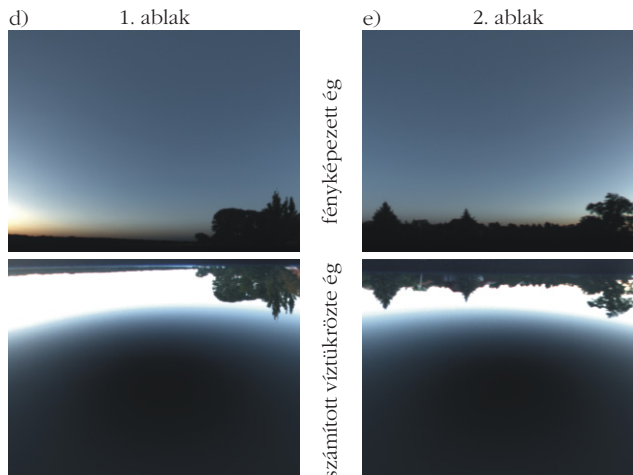
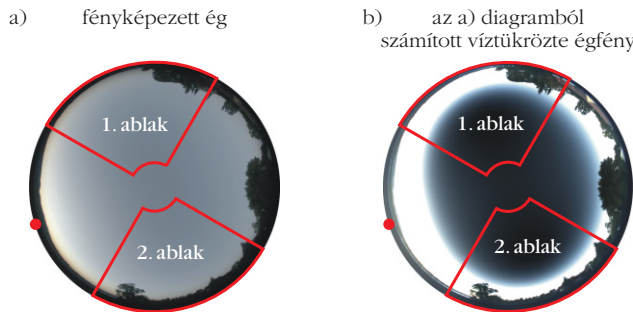
Eredmények

A Brewster-féle sötét folt alakja a napmagasság függvényében

Az 1. ábra annak geometriáját mutatja, amikor egy megfigyelő (fényképész vagy festő) h szemmagasságból és a függőlegeshez képest $\theta_{\text{Brewster}} = \arctan(n=1,33) = 53^\circ$ -ban nézi a vízfelszínt. Mivel $\tan \theta_{\text{Brewster}} = n$, ezért a BSF közepének a megfigyelőtől mért vízszintes távolsága $d = nh$. Például $h = 2\text{--}10$ m esetén $d = 2,66\text{--}13,3$ m. A 3. ábra egy tiszta, részben felhős és teljesen borult ég fényképét és polarizációs mintázatait szemlélteti.



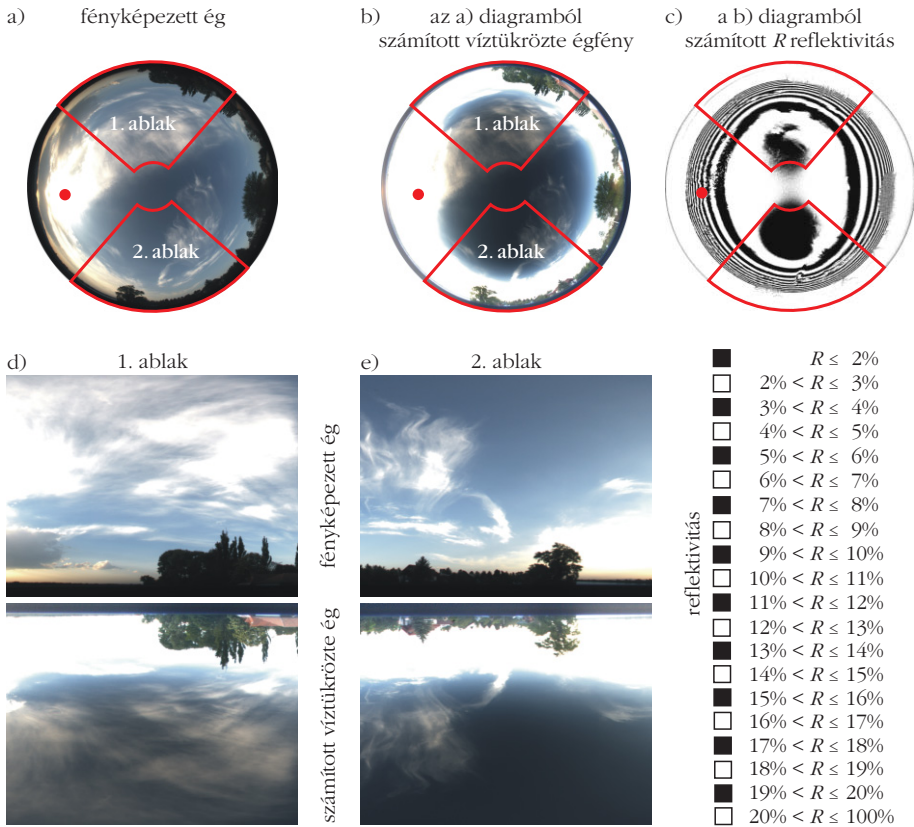
4. ábra. Tiszta ég alatti vízfelület számított R reflektivitásmintázata $\theta_N = 0^\circ$ (a), 18° (b), 36° (c), 54° (d), 72° (e) és 90° (f) horizont fölötti napmagasság mellett. A Nap tükörképét fehér közepű szürke kör jelöli, a nadírtól (zenit tükörképétől) mért $\theta_{\text{Brewster}} = 53^\circ$ sugarú Brewster-kört egy piros kör, a Brewster-pontot, vagyis az R_{min} legkisebb reflektivitású helyet pedig a Brewster-féle sötét folt közepén egy fehér + jel. Az a)–d) ábrákon a két középső, körte alakú fekete folt reflektivitása $R \leq 2\%$, a váltakozóan fehér-fekete régiókra $2\% < R \leq 3\%$, ..., $19\% < R \leq 20\%$, a legkülső fehér gyűrű esetén pedig $20\% < R \leq 100\%$.



5. ábra. Folytonos görbe (balra lévő függőleges skálával): a vízfelszín Berry és munkatársai [10] polarizációs égboltfénymodelljére számított két Brewster-féle sötét foltjának b (%) felülete a vízfelszínhez képest a horizont fölötti θ_N napmagasság függvényében tiszta égbolt alatt. Pontozott görbe (jobbra lévő skálával): tiszta ég alatti vízfelszín legkisebb, R_{min} reflektivitása θ_N függvényében.

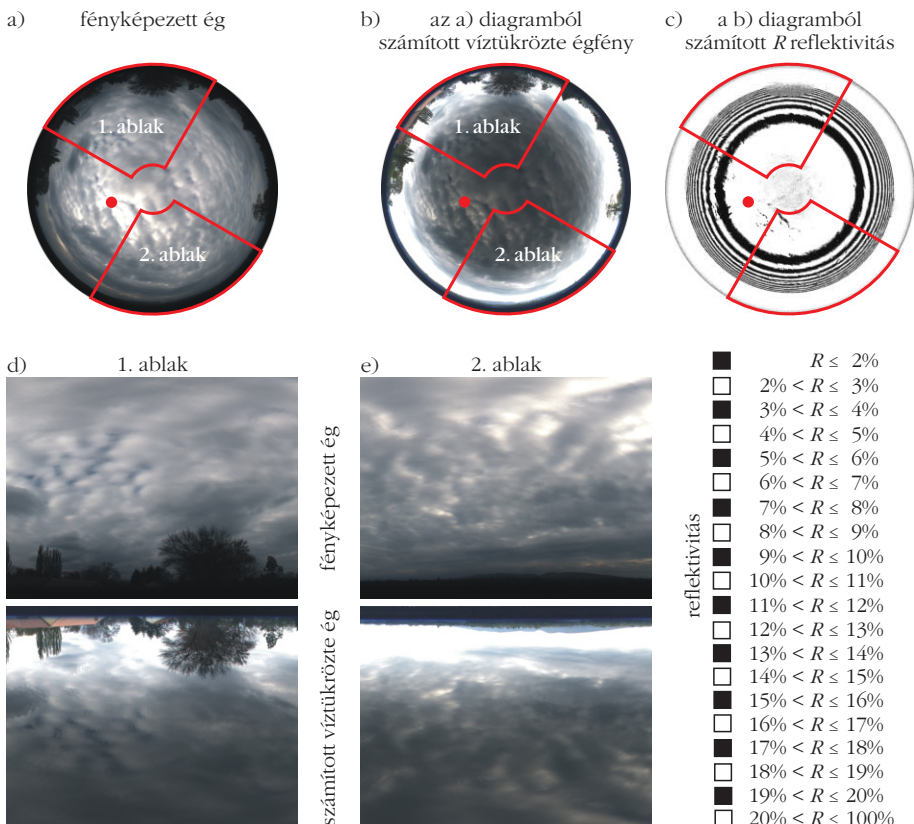
A 4. ábrán a vízfelszín R reflektivitásmintázata látható tiszta égbolt alatt $\theta_N = 0^\circ, 18^\circ, 36^\circ, 54^\circ, 72^\circ$ és 90° napmagasság mellett. A vízfelszín nadírtól (a zenit tükörképétől) mért $\theta_{\text{Brewster}} = 53^\circ$ sugarú Brewster-körének belsejében lévő két BSF egymáshoz közelít és kissé a Nap irányába tolódik, amint θ_N nő. Nagyobb θ_N esetén a BSF gyakorlatilag eltűnik (4.d-f ábra). A BSF területe akkor a legnagyobb, amikor a Nap a horizonton van, és a napmagasság növekedésével folyamatosan csökken, majd $\theta_N > 54^\circ$ esetén gyakorlatilag eltűnik (4. ábra). A 4. ábrán +-szal jelölt, a BSF közepének számított R_{min} minimális reflektivitású Brewster-pontok θ_N növekedésével

6. ábra. a) Tiszta ég 180° látószögű halszemoptikás kamerával készített fényképe $\theta_N = 0^\circ$ napmagasság esetén. b) Az a) ég tükörképe: az ég képalkotó polarimetriával mért polarizációs mintázatának felhasználásával és 50-szeres fényesítéssel számított szintetikus kép. c) A vízfelszín a) égbolt alatt számított R reflektivitásmintázata, ahol a középső, két tojásdad, fekete terület a Brewster-féle sötét folt. Az a)–c) képeken a Nap és tükörképének helyét piros pont jelöli. d)–e) Felül: az a) égbolt 1. és 2. ablakbeli részének téglalap alakú kinagyítása, ami egy megfigyelő (művész) által látottakat szemlélteti, amikor a szoláris meridiánra merőlegesen figyeli az eget. Alul: az ég b) tükörképe 1. és 2. ablakbeli részei téglalappá nagyítva. Az 1. és 2. ablak vízszintes és függőleges szögkiterjedése 90° és 72° . A fényképet Horváth Gábor készítette Gödön (Magyarország, $47^\circ 70' N, 19^\circ 15' E$) 2012. augusztus 7-én 20:15-kor (UT + 2 óra).



egymáshoz közelítenek és a Brewster-kör Nap felőli oldala irányába tolódnak el. A tojásdad alakú Brewster-féle sötét foltok $\theta_N = 0^\circ$ esetén tükörszimmetriku-

sak a szoláris meridiánra, és θ_N növekedtével egyre aszimmetrikusabbá válnak. A 5. ábra folytonos görbéje a két BSF vízfelülethez viszonyított összterületének b hányadát mutatja a θ_N napmagasság függvényében tiszta égbolt alatt, amikor az égfény polarizációját a Berry és munkatársai [10] modelljével számoltuk. Ha $\theta_N = 0^\circ$ (Nap a horizonton naplementekor vagy napkeltekor), akkor $b = 11,5\%$, majd θ_N növekedtével rohamosan csökken, végül $\theta_N > 58^\circ$ esetén 0-hoz közelít. Ebből kifolyólag megállapítható, hogy a BSF gyakorlatilag csak $\theta_N < 58^\circ$ esetén létezik. A 5. ábra pontozott görbéje a tiszta ég alatti vízfelszín R_{\min} minimális reflektivitását mutatja a θ_N napmagasság függvényében: $\theta_N = 0^\circ$ mellett $R_{\min} = 1,58\%$, majd a θ_N napmagassággal rohamosan nő és $\theta_N > 60^\circ$ esetén $2,04\%$ -hoz tart.



Poláros égbolt és tükörképe szintetikus képei

A 6.a ábrán egy tiszta égbolt 180° látószögű halveszemoptikával készült fényképe látható, amikor a θ_N napmagasság 0° . A 6.b ábra ezen ég számított vízfelszíni tükörképét mutatja 50-szeres fényesítést követően. A 6.c ábra a vízfelület számított R reflektivitásának mintázatát szemlélteti a szóban forgó tiszta ég alatt. A 6.d és 6.e ábra azt mutatja, hogy mit látna az ember a vízparton, ha a szoláris-antiszoláris meridiánra merőlegesen tekintve nézne az eget és tükörképét. A 6.d és 6.e téglalap alakú képek a 6.a ég és 6.b tükörképe 1. és 2. kör-cikkgyűrű alakú ablakainak

8. ábra. Mint a 6. ábra, de most teljesen borult égre $\theta_N = 58^\circ$ napmagasság mellett 2012. április 15-én 14:30-kor (= UT + 2 óra), mikor a Brewster-féle sötét foltok nem láthatók.

képi információiból származnak. A 6.c ábra szerint mindkét BSF beleesik az 1. és 2. körcikkgyűrűablakba, miáltal e sötét foltok a 6.d és 6.e ábra vízfelületén jól láthatók. Egy realiztikus festőnek a 6.d és 6.e ábrán láthatókhöz hasonló képet kell festenie, ha hűen kívánja megörökíteni a vízparton észlelteket, amikor arccal északra vagy délre fordulva, a szoláris-antiszoláris meridiánra merőlegesen tekint napnyugtakor vagy napkeltekor a vízre.

A 7. ábrán egy részben felhős eget és annak vízfelszíni tükörképét láthatjuk $\theta_N = 26^\circ$ napmagasságnál. A 7.c ábra alapján mindkét Brewster-féle sötét folt a körcikkgyűrűablakokba esik, azonban csak a 7.e ábra vízfelszíni ablakában tűnik fel egy sötét folt, mivel a 7.d ábra vízi ablakában a cirrusfelhők fénye nagyon alacsony $p < 8\%$ polarizációfokkal bír, miáltal a gyakorlatilag polarizálatlan felhőfény vízszintesen poláros összetevője a Brewster-szögben és környékén visszaverődik. A 7. ábra jól demonstrálja, hogy a BSF csak felhőtlen, tiszta ég alatti vízfelületen látszik, és csak egy gyengén poláros vagy polarizálatlan tárgy (jelen esetben cirrusfelhő) tükröződhet a Brewster-szög közeléből, aminek eredményeként nagy a fényesség- és szíkontrasztkülönbség a BSF és az alig poláros tárgy világos tükörképe között. Azonban fontos megjegyezni, hogy a felhőfény nem teljesen polarizálatlan, és a vízcseppeket tartalmazó felhők a szivárványszórás irányába viszonylag nagy polarizációfokú fényt szórnak. A képalkotó polarimetriát alkalmazó POLDER/PARASOL műhold e szivárványszórás magas polarizációfoka alapján különíti el a jégfelhőket a vízfelhőktől [12, 13]. A borult ég vastag felhőiből a földfelszínre (esetünkben a vízfelszínre) érkező fény a felhőbeli depolarizáció – ami a felhőrészecskék többszörös fényszóródásának eredménye – miatt csak igen gyengén poláros ($p < 6\%$).

A 8. ábrán egy teljesen borult ég és vízfelszíni tükörképe látható $\theta_N = 58^\circ$ napmagasság mellett. Ekkor a 8.d és 8.e ábrán nem látható a BSF, mivel a 8.c

ábra tanúsága szerint e folt – a felhőfény nagyon alacsony, $p < 6\%$ polarizációfoka miatt – gyakorlatilag nem létezik.

Irodalom

1. Können G. P.: *Polarized Light in Nature*. Cambridge University Press, Cambridge, UK (1985) 30. és 34.
2. Azzam R. M. A., Bashara N. M.: *Ellipsometry and Polarized Light*. North-Holland, Amsterdam, New York (1992)
3. Schwind R., Horváth G.: Reflection-polarization pattern at water surfaces and correction of a common representation of the polarization pattern of the sky. *Naturwissenschaften* 80 (1993) 82–83. + címkép
4. Collett E.: *Polarized Light. Fundamentals and Applications*. Marcel Dekker Inc., New York (1994)
5. Horváth G.: Reflection-polarization patterns at flat water surfaces and their relevance for insect polarization vision. *Journal of Theoretical Biology* 175 (1995) 27–37.
6. Horváth G., Varjú D.: 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. *Journal of Experimental Biology* 200 (1997) 1155–1163.
7. Gál J., Horváth G., Meyer-Rochow V. B.: Measurement of the reflection-polarization pattern of the flat water surface under a clear sky at sunset. *Remote Sensing of Environment* 76 (2001) 103–111.
8. Horváth G.: Chapter 16. Polarization patterns of freshwater bodies with biological implications. In: G. Horváth (editor): *Polarized Light and Polarization Vision in Animal Sciences*. Springer: Heidelberg, Berlin, New York (2014) 333–344.
9. Takács P., Barta A., Pye D., Horváth G.: Polarization optics of the Brewster's dark patch visible on water surfaces versus solar height and sky conditions: theory, computer modelling, photography and painting. *Applied Optics* 56 (2017) 8353–8361.
10. Berry M. V., Dennis M. R., Lee R. L.: Polarization singularities in the clear sky. *New Journal of Physics* 6 (2004) 1–14.
11. Gál J., Horváth G., Meyer-Rochow V. B., Wehner R.: Polarization patterns of the summer sky and its neutral points measured by full-sky imaging polarimetry in Finnish Lapland north of the Arctic Circle. *Proceedings of the Royal Society A* 457 (2001) 1385–1399.
12. Deschamps P. Y., Bréon F. M., Leroy M., Podaire A., Bricaud A., Buriez J. C., Seze G.: The POLDER mission: Instrument characteristics and scientific objectives. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 32 (1994) 598–615.
13. Fougnie B., Bracco G., Lafrance B., Ruffel C., Hagolle O., Tinel C.: PARASOL in-flight calibration and performance. *Applied Optics* 46 (2007) 5435–5451.

SZÁMÍTUNK RÁD, LÉGY A FIZIKA BARÁTJA!



**Támogasd jövedelemadód
EGY százalékkal
az Eötvös Loránd Fizikai Társulatot!
Adószámunk: 19815644-2-43**