

# A VÍZFELSZÍN BREWSTER-FÉLE SÖTÉT FOLTJÁNAK POLARIZÁCIÓ-OPTIKÁJA

## 2. rész: fényképezés és festmények

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 Brewster-féle sötét folt polárszűrő nélkül készült fényképei

A 9. ábrán látható a híres Tádzs Mahal („A paloták koronája”) központi épülete és az előtte terülő mesterséges tó, miközben a fényképész északra nézett naplementekor. A vízfelszín megfigyelőhöz közelebbi része nem veri vissza a függőlegesen poláros világoskék égfényt, míg a polarizálatlan épület nagy fényerővel tükröződik. Pont a polarizálatlan vagy csak gyengén poláros kupola és minaretek erős visszaverődése a függőlegesen poláros égfényhez képest bizonyítja, hogy e kép nem polárszűrővel készült, hiszen egy függőleges polár-



9. ábra. Az indiai Agrában lévő Tádzs Mahal mauzóleum és az előtte elterülő tó polárszűrő nélkül, naplementekor készült fényképe, amikor a vízszintes optikai tengelyű kamera északra néz. A vízfelszín megfigyelőhöz közelebbi része nem veri vissza a kék eget a Brewster-féle sötét foltban, míg az épület tükröképe tisztán látható, ami bizonyítja, hogy a kamera előtt nem volt polárszűrő. A fénykép az Abercrombie & Kent utazási ügynökség 1995-ös reklámkiadványából származik.

szűrő kiszűrte volna az összes, vízszintesen poláros vízfelszíni tükröződést.



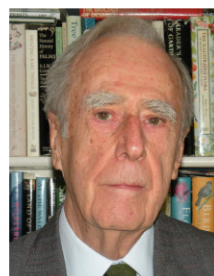
*Horváth Gábor* fizikus, az MTA doktora, az ELTE Biológiai Fizika Tanszék Környezetoptika Laboratóriumának vezetője. A vizuális környezet optikai sajátosságait és az állatok látását tanulmányozza, továbbá biomechanikai kutatásokat folytat. Számos szakmai díj és kitüntetés tulajdonosa. Évtizedek óta aktív tudományos-ismeretterjesztő munkát is folytat előadások és cikkek formájában.



*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.



10. *ábra*. A dél-svédországi Havnmantorp és Lessibo közelében lévő Hyllsjon-tóról polárszűrő nélkül készült fénykép. A vízszintes optikai tengelyű kamera északra nézett. A fényképet David Pye készítette 2011. június 4-én kora reggel.

A 10. *ábra* fényképe is polárszűrő nélkül készült: egy tavat mutat, amikor a kamera északra nézett napkeltekor, tiszta égbolt alatt. A Brewster-féle sötét folt (BSF) tisztán látszik a kép alján. A barna sziklák a víz

11. *ábra*. Az ég és öt különböző tőről vízszintes polárszűrővel a), c), e), g), i) és anélkül b), d), f), h), j) 180° látószögű halveszemoptikával Gödön (47° 70' É, 19° 15' K) 2017. július 15-én 20:30-kor (=UT + 2 óra) készített fényképek, amikor a kamera vízszintes optikai tengelye nyugat a)–d) és észak i)–j) felé nézett. A b) és d) fényképeken a Brewster-féle sötét folt nem látható, míg az f), h), j) fényképeken jól látszik a vízfelszínen.



alján jól kivehető, mivel a róluk eredő fényt nem nyomja el a vízfelszínről a Brewster-féle sötét foltban nem tükröződő függőlegesen poláros égboltfény.

A 11. *ábra* több, 180° látószögű fényképet mutat, amelyek egy részét vízszintes polárszűrővel exponáltuk, másik részét pedig polárszűrő nélkül. E képek napnyugtakor készültek, amikor a kamera vízszintes tengelye nyugat, dél és észak felé nézett. A 11.b és 11.d *ábrákon* nem látható a BSF, mivel a kamera nyugat felé nézett. A 11.f, 11.h és 11.j *ábrákon* a BSF jól kivehető a vízfelszínen. A 11.a és 11.c *képeken* az ég a szoláris meridián mentén fényes, mivel az égfény ott vízszintesen polarizált, ami akadály nélkül áthaladt a kamera előtti vízszintes polárszűrőn. A 11.e, 11.g és 11.i *ábrákon* azonban a szoláris meridiánra merőleges síkú meridián mentén sötét az ég, mert annak függőlegesen részlegesen poláros fényét jelentősen elnyelte a vízszintes polárszűrő. A 11.f *ábrán* a tóparti fa tükörképe – a gyenge polarizációjának köszönhetően – zöld maradt, míg az ég – erős függőleges polarizációja miatt – a fa mögött sötétkék. A 11.f *ábra* tóparti fájának körülményei hasonlóak a 9. *ábrán* látható Tádzs Mahaléihoz. A 11.e, 11.g és 11.i *ábrák* jól szemléltetik az ég függőleges polarizációját, amikor a megfigyelő dél vagy észak felé néz, aminek következményeként a vízfelszínen látható a BSF.

## Festmény Brewster-féle sötét folttal

A 12. *ábrán* Edouard Vuillard *A révész* című festményét láthatjuk (1897, D'Orsay Múzeum, Párizs) [14]. A festményen ábrázolt tájat a bal oldalt lenyugvó vagy felkelő nap sárgás fénye világítja meg,





így a festő (a kép szemléelője) északra vagy délre tekint és látja az eget meg annak vízfelszíni tükörképét. A világoskék ég majdnem teljesen tiszta, és a vízfelszínre függőlegesen poláros fény esik. Ezért alakul ki a Brewster-féle sötétkék folt a vízfelszínen, a festmény közepén és főleg a jobb alsó sarkában. A sárguló lombú fákról származó fény gyakorlatilag polarizálatlan, ezért a vízfelszínről még a Brewster-szög közelében is legalább a fele (a vízszintesen poláros összetevője) visszaverődik, ellentétben a függőlegesen poláros égfénnyel. E festmény minden részlete kielégíti a BSF kialakulásához szükséges feltételeket. Különösen fontos, hogy a sárga fák fényesen tükröződnek a vízfelszínről, míg a világoskék ég tükörképe sötétkék körülöttük.



12. ábra. Edouard Vuillard (1897): *A révész* (D'Orsay Múzeum, Párizs) [14]. A kép középső és jobb alsó részén látható sötétkék folt valószínűleg egy Brewster-féle sötét folt. Részletes magyarázatért lásd a szöveget.

## Elemzés

A  $180^\circ$  látószögű képkötő polarimetria lehetőséget nyújtott arra, hogy a vízfelszín tükrözéspolarizációs tulajdonságait különböző égboltszituációk mellett vizsgáljuk. E technikával *Gál* és munkatársai [7] mérték először egy sima fekete vízfelszín polarizációs mintázatait tiszta ég alatt, napnyugtakor. Ezen úttörő vizsgálatot kiterjesztve, Stokes–Mueller-formalizmust [2, 4] alkalmazva meghatároztuk a vízfelszínről tükröződő égfény polarizációs mintázatait abból a célból, hogy kiderítsük a Brewster-féle sötét folt jellemzőit és kialakulásának feltételeit.

A tiszta (felhőtlen és ködmentes) ég polarizációs mintázata a szoláris-antiszoláris meridiánra tükröszimmetrikus [15, 16]. Ennek köszönhetően a két BSF is tükröszimmetrikusan helyezkedik el a szoláris-antiszoláris meridián tükörképének két oldalán (4. ábra írásunk első részében). Ha a  $\theta_N$ -napmagasság  $58^\circ$ -nál nagyobb, akkor a BSF területe olyan kicsi, hogy szabad szemmel nem látható. Így a BSF gyakorlatilag csak  $\theta_N < 58^\circ$  esetén létezik tiszta ég alatt. A BSF akkor a legnagyobb s így a legkönnyebb megfigyelni, amikor a Nap a horizonton van, azaz naplementekor vagy napkeltekor (4. és 5. ábra írásunk első részében).

*Können* [1] szerint hullámozó vízfelszínen a BSF kerekded háromszög alakú. A számítógéppel modellezett BSF formája tényleg háromszög-tojásdad, főleg alacsony napmagasságoknál (4.a, 4.b és 6.c ábra írásunk első részében).

Bár azonos napállás mellett a teljesen borult vagy ködös égboltok polarizációirány-mintázata nagyon

hasonló a tiszta égbolttéhoz, az előbbi egek fényének polarizációfoka annyira alacsony, hogy nem keletkezik BSF még alacsony napállások esetén sem (8. ábra írásunk első részében).

*Berry* és munkatársai [10] modellje jobban leírja az ég polarizációs mintázatát, mint a klasszikus Rayleigh-modell, amiben nincsenek polarizálatlan (neutrális) pontok. Az előbbi modellt használva ezért valószínűbben modelleztük a BSF kialakulásának légkör-optikai körülményeit. Aeroszolokban gazdag atmoszféra esetén, például amikor sivatagi homok vagy erdőtüz füstje lebeg a levegőben, az égfény polarizációfoka a többszörös fényszórás okán jelentősen lecsökken. Emiatt az égfény majdnem polarizálatlan annak ellenére, hogy az ég nem felhős/ködös. Ilyenkor sem alakul ki a vízfelszín Brewster-féle sötét foltja, ugyanúgy, mint borult ég alatt (8. ábra írásunk első részében).

A vizekről készült fényképeken látható sötét folt általában azzal magyarázható, hogy a fényképész lineáris polárszűrőt alkalmazott kamerája lencséje előtt, feltehetően azért, hogy fokozza a fénykép vizuális élményét. Ilyenkor a polárszűrő áteresztési síkja függőleges, ami így a Brewster-szög környékén kiszűri a vízről visszaverődő vízszintesen poláros fényt. Ritka esetekben a fénykép bizonyos jellemzőiből meg lehet állapítani, hogy használtak-e vagy sem polárszűrőt a kép készítésekor. A 9., 10. és 11.b, d, f, b, j ábrákon közölt fényképek expozíciójakor nem használtunk polárszűrőt.

Festők alkalomadtán megörökíthetik a Brewster-féle sötét foltot, de néha helytelenül, mert többnyire a műtermükben, emlékezetből festik le a látottakat, miáltal elfelejtik, hogy pontosan mit és hogyan láttak. Festményeken a vízfelszín sötét foltjai sokszor tárgyak (például épületek, fák, bokrok, felhők, hegyek) tükröződésével magyarázhatók. Mi csak néhány

olyan festményt találtunk (belőlük itt csak egyet mutatunk be a *12. ábrán*), ahol a vízfelület sötét foltját nem lehet e triviális visszaverődésekkel magyarázni, hanem csakis a Brewster-féle sötét folttal tudjuk értelmezni.

Végül megemlítjük, hogy érdemes lenne tanulmányozni a halevő vagy más gázló madarak zsákmányszerzési viselkedését, például gémekek sekély vizekbeli vadászását alacsony napmagasságok mellett abból a szempontból, hogy északi/déli irányban gyakrabban próbálkoznak-e halat elkapni, mivel ekkor – a Brewster-féle sötét foltnak köszönhetően – könnyebben látnak a vízfelszín alá [17].

## Irodalom

14. Painting of Edouard Vuillard (1897) entitled 'The Ferryman' (Musée D'Orsay, Paris). [https://www.google.hu/search?q=Edouard+Vuillard+\(1897\):+The+Ferryman&client=firefox-b\&source=lnms\&tbn=isch\&sa=X\&ved=0ahUKEwj3Ma7xIJSAhXGiiwKHAdHD6MQ\AUICCgB\&biw=1024\&bih=644\#imgrc=VT3VBxnm8DRo6M](https://www.google.hu/search?q=Edouard+Vuillard+(1897):+The+Ferryman&client=firefox-b\&source=lnms\&tbn=isch\&sa=X\&ved=0ahUKEwj3Ma7xIJSAhXGiiwKHAdHD6MQ\AUICCgB\&biw=1024\&bih=644\#imgrc=VT3VBxnm8DRo6M)
15. Coulson K. L.: *Polarization and Intensity of Light in the Atmosphere*. Deepak Publishing (1988)
16. Horváth G., Barta A., Hegedüs R.: Chapter 18. Polarization of the sky. In: G. Horváth (editor): *Polarized Light and Polarization Vision in Animal Sciences*. Springer: Heidelberg, Berlin, New York (2014) 367–406.
17. Pye D.: *Polarised Light in Science and Nature*. Institute of Physics Publishing: Bristol, Philadelphia (2001)

## A FIZIKA TANÍTÁSA

# KEVÉSSÉ ISMERT DEMONSTRÁCIÓS KÍSÉRLETEK CSEPPFOLYÓS NITROGÉNNEL

Medvegy Tibor

Pannon Egyetem, Fizika és Mechatronika Intézet

Légkörünk 78 V/V%-át nitrogén teszi ki, ezért joggal nevezhetjük hétköznapi anyagnak. Azonban cseppfolyós halmazállapotában igen különlegessé és érdekessé válhat a fiatalok számára. A folyékony nitrogén ezért a tudománynépszerűsítő kísérleti előadások egyik, szinte elhagyhatatlan kelléke, amelynek felhasználásával számos látványos és tanulságos kísérlet végezhető el. Cikkemben olyan, kevésbé közismert, cseppfolyós nitrogént alkalmazó kísérleteket mutatok be, amelyek igen hasznosnak bizonyultak a fizika iránti érdeklődés felkeltésére és a tudománynépszerűsítésre egyaránt. Az interneten – természetesen – e témában számos kísérletleírás és videó lelhető fel, néhány ajánlott weblap az irodalomban megtalálható [1, 2].

## A biztonság

Cseppfolyós nitrogént alkalmazó kísérleteink során legfontosabb tényező a biztonság, ezért nagyon fontos fokozott óvatossággal kezelni ezt az anyagot. Az esetleges fröcsköléssel járó kísérletek során mindig viseljük védőszemüveget és megfelelő védőkesztyűt, valamint ügyeljünk arra, hogy pusztán kézzel ne érintsük meg a folyékony nitrogén hőmérsékletére hűtött kísérleti eszközeinket! A kísérleti bemutatókat csak jól szellőző helyen végezzük, és mindig tartsuk szem előtt a hallgatóság biztonságát!

## Cseppfolyós nitrogén viselkedése szobahőmérsékletű környezetben

Normál légköri nyomáson a cseppfolyós nitrogén forráspontja  $-195,8\text{ °C}$ , ezért szobahőmérsékletű környezetben állandó forrásban van. Ezt a tulajdonságát egy üvegedénybe töltve mutathatjuk meg nagyobb közönségnek, azonban az egyszerű főzőpohár elpattanhat a hirtelen hőhatástól, illetve, amennyiben egyszerű üvegedényben tároljuk a folyékony nitrogént, akkor annak külső – immár hideg – falára a levegő páratartalma hamar kicsapódik, átlátszatlanná téve azt. A legjobb megoldás a duplafalú – falai között vákuumot tartalmazó – üvegedény (ez a Dewar-edény) alkalmazása, amelynek külső falára még cseppfolyós nitrogén tárolása mellett sem azonnal fagy ki a levegő páratartalma. Ezen edényben jól megfigyelhetjük a nitrogén



Medvegy Tibor a Pannon Egyetem Fizika és Mechatronika Intézetének oktatója. A Szegedi Tudományegyetemen 2010-ben szerzett fizikatanári diplomát, jelenleg az ELTE Fizika Tanítása Doktori Program doktorjelöltje. Kutatási területei a különleges anyagok és a multimédiás eszközök fizikaoktatásban való felhasználási lehetőségeinek vizsgálata, valamint az elektro- és magnetoreológiai folyadékok szenzor- és aktuátorteknikában való alkalmazási lehetőségeinek fejlesztése.