

Égboltpolarizáció az 1999. augusztus 11-i teljes napfogyatkozáskor és lehetséges biológiai vonatkozásai*

BERNÁTH BALÁZS¹, POMOZI ISTVÁN¹, GÁL JÓZSEF¹,
HORVÁTH GÁBOR¹ és RÜDIGER WEHNER²

¹ Eötvös Loránd Tudományegyetem, Biológiai Fizika Tanszék, H–1117 Budapest, Pázmány sétány 1/B.

E-mail: gh@arago.elte.hu

² Zoologisches Institut, Universität Zürich, CH–8057 Zürich, Winterthurerstrasse 190.

E-mail: rwehner@zool.unizh.ch

Összefoglalás. Az 1999. augusztus 11-i teljes napfogyatkozás alatt 180° látószögű képalkotó polarimetriával mértük az egész égbolt polarizációs mintázatát az idő függvényében a spektrum vörös (650 nm), zöld (550 nm) és kék (450 nm) tartományában. A mért mintázatokat összehasonlítottuk a napfogyatkozást követő napon ugyanazokban az időpontokban mért normál, részben felhős égbolt polarizációs mintázataival, valamint egy Tunéziában mért normál, tiszta égbolt polarizációs mintázatával, melynél a Nap zenittől mért szögtávolsága ugyanakkora volt (32°), mint a magyarországi napfogyatkozás totalitása idején. Cikkünkben azon főbb eredményeinket mutatjuk be, amelyek segítségével esetleg értelmezni lehet majd az égboltpolarizáció alapján tájékozódó egyes rovarok napfogyatkozás-kor tapasztalt olykor szokatlan viselkedését.

Kulcsszavak: légköri optika, égboltpolarizáció, teljes napfogyatkozás, 180° látószögű képalkotó polarimetria, polarizáció-látás, navigáció.

Bevezetés

Az ég szemünknek oly kedves kék színét légköri optikai folyamatok sora hozza létre. Ezek a fizikai jelenségek számos olyan optikai jelleggel is felruházzák az égboltot, melyeket csak bizonyos állatok szeme érzékel, de az emberi látórendszer elől rejtve maradnak. Az egyik leglátványosabb természeti jelenség, a teljes napfogyatkozás idején ezek az optikai jellemzők komoly változásokon mennek át. Az emberek és állatok a megszokott optikai környezetük helyett másodpercek alatt egy új, szokatlan világban találják magukat néhány percre. Mikor a Hold elfedi a Napot, az ég arculata azonnal gyökeresen megváltozik, egyfajta különleges alkonyat áll be. Az égbolton a teliholddal közel egyező fényességű napkorona világít, de jelentős mennyiségű a szórt égboltfény is, amely a teljes napfogyatkozás sávján kívülről ered, ahol a részlegesen takart Nap süt. Az 1999. augusztus 11-én Magyarországon megfigyelhető teljes napfogyatkozás idején az égbolt optikai sajátosságai közül az egyik legérdekesebbnek, a sok állat tájékozódásában is fontos szerepet játszó égboltpolarizációs mintázatnak a változását vizsgáltuk a Duna-Tisza közének déli részén, Kecel közvetlen közelében, a teljes napfogyatkozás sávjában.

* Előadták a szerzők az Állattani Szakosztály 904. ülésén (2000. május 3.).

Az égboltpolarizációját a napfény légkörbeli szóródása eredményezi (HORVÁTH, 1986a,b), az égbolt polarizációs mintázatát pedig a légkör tulajdonságain túl elsősorban a Nap horizonttól mért szögtávolsága határozza meg (KÖNNEN 1985, HORVÁTH & HORVÁTH 1995, HORVÁTH & POMOZI 1997, HORVÁTH et al. 1998, 1999, HORVÁTH & WEHNER 1999, GÁL et al. 1998, 2000, 2001a,b,c). Teljes napfogyatkozáskor oly mértékben módosulnak, térben és időben olyan bonyolultan változnak a megvilágítási viszonyok, hogy eddig sem elméletileg, sem pedig számítógépes modellezéssel nem sikerült még senkinek megjósolni az égboltpolarizáció tér-időbeli változását ezen ritka, de annál látványosabb égi tünemény idején. A teljes égbolt polarizációs mintázatát a napfogyatkozások igen rövid ideje alatt nagylátószögű képkötő polarimetriás módszerek hiányában korábban lehetetlen volt mérni, csak az égbolt egyes pontjaiban, illetve kitüntetett egyenesek mentén végeztek vizsgálatokat. Habár az égboltpolarizáció poláros voltát már 1809-ben felfedezte D. F. J. ARAGO francia fizikus, csak PILTSCHIKOFF (1906) megfigyelése óta tudjuk, hogy a teljes napfogyatkozás totalitása kezdetén az égbolt polarizációja a Naptól 90° -ra nagymértékben lecsökken. A teljes napfogyatkozáskor fellépő légköri optikai jelenségek az 1960-as évek elejétől képezik intenzívebb kutatások tárgyát. Sokszor leírták már, és meg is mérték az égboltpolarizáció intenzitásának és színének hirtelen változásait. Az égboltpolarizációjának változását először az 1961 február 15-én az olaszországi teljes napfogyatkozás alkalmával vizsgálták tüzetesebben DE BARY és munkatársai (1961). Ezt követően e jelenséget csak ritkán tanulmányozták (MOORE & RAO 1966, DANDEKAR & TURTLE 1971, RAO et al. 1972, MILLER & FASTIE 1972). Az azóta eltelt évtizedek során szinte alig gyarapodtak ezzel kapcsolatos ismereteink.

Az égbolt polarizációs mintázatának eredete

A XIX. század első felében az égboltpolarizációjának vizsgálata egyike volt a legizgalmasabb tudományos kérdéseknek. JOHN WILLIAM STRUTT, másnéven LORD RAYLEIGH (1842–1919), Nobel-díjas angol fizikus adott elsőként helyes elméleti magyarázatot e jelenségre. Egészen STRUTT (1871) cikkéig a légköri optika egyik legnagyobb rejtélyének számított az égboltpolarizáció intenzitásának, színének és polarizációjának magyarázata. Ez ugyanis nem sikerült az addig elfogadott feltételezések alapján, amelyek szerint az égbolt kék színe és polarizációja a napfénynek a légkörben lebegő apró vízcseppeken vagy egyéb részecskéken való törésére és az azokról történő visszaverődésére vezethető vissza. RAYLEIGH mutatott rá, hogy e légköri optikai jelenségek a napfénynek a fény hullámhosszánál sokkal kisebb légkörbeli részecskéken történő szóródásával magyarázhatók. Az így szóródó fény intenzitása a hullámhossz negyedik hatványával fordítottan arányos (Rayleigh-szórás), azaz minél rövidebb a hullámhossz (minél közelebb esik az ultraibolya tartományhoz), annál erősebben szóródik a fény. A fényszórás polarizációt is okoz. Az egyszerűen szórt fény polarizációs iránya mindig merőleges a fényforrásra, a szórócentrum és a megfigyelő által kijelölt síkra. Ennek oka a szóródás mechanizmusában keresendő. A szórócentrumként viselkedő részecskék a fényforrásból érkező elektromágneses hullámokat elnyelik, rezgő dipólussá alakulnak, majd, mint apró antennák az energiát kisugározzák. Az elnyelt fény energiáját annak elektromos vektora adja át, ezért a szórócentrumból kialakuló rezgő dipólus hossz-tengelyének iránya egybeesik a beeső elektromos térerősségvektor irányával. A rezgő dipó-

lus sugározni csak a hossz tengelyére merőleges irányban haladó, a hossz tengellyel azonos irányú elektromos térerősségvektorú hullámot képes. Látható tehát, hogy a szóródást létrehozó rezgő dipólus hossz tengelyének iránya jelöli ki a szórócentrum által elnyelt és kisugárzott fény polarizációs irányát. A polarizációs irány egyaránt merőleges a szórócentrumot a megfigyelővel, valamint a fényforrással összekötő egyenesre, ezért merőleges a két egyenes által meghatározott síkra is.

Az égboltnál tehát a napfény földi légkörben való szóródásának köszönhetően részlegesen és lineárisan poláros. A légkörben szóródó fény esetében a fényforrásnak a Nap felel meg, a szórócentrumok a légkör molekulái, illetve sűrűség-ingadozásai, a megfigyelő pedig a földfelszínen áll. A Rayleigh-modell szerint az égboltnál polarizációfoka fokozatosan nő zérusról a szoláris, illetve anti-szoláris pontoktól távolodva, és a Naptól, illetve anti-Naptól 90° -ra éri el a 100%-ot, a polarizációs irány pedig mindig merőleges az égbolt adott pontján, a Napon és a megfigyelőn átmenő síkra. Ezért például a szórt égboltnál polarizációs iránya mindig merőleges a szoláris és antiszoláris meridiánra. A tiszta égbolt polarizációs mintázata a szoláris-antiszoláris meridiánra minden esetben tükörszimmetrikus. Az égboltnál polarizációs mintázatát azonban a fentiekben vázolt Rayleigh-modell csak részben írja le helyesen. A légkörben a fény ugyanis nem csupán egyszeresen, hanem többszörösen szóródik, mielőtt eléri a földfelszínt. Ennek fontosságát CHANDRASEKHAR (1950) ismerte fel. Ha egy foton egynél többször szóródik, akkor polarizációs iránya nem mindig merőleges a szórási síkra. Továbbá minél többször szóródik a foton, annál kisebb lesz a polarizációfoka. Tiszta légköri viszonyok mellett ezért minél rövidebb a szórt fény hullámhossza, annál kisebb a polarizációfoka. A többszörös szóródás hatása legerősebben az égbolt horizont közeli tartományain jelentkezik, a zenithez közeli mintázatot azonban kevésbé befolyásolja. A többszörös szóródás hozza létre a szoláris, illetve antiszoláris meridiánon található neutrális pontokat, melyekből a megfigyelőhöz polarizálatlan fény érkezik (GÁL et al. 1998, HORVÁTH et al. 1998). E pontok a szoláris meridiánon a Nap alatt és fölött közel azonos szögtávolságra helyezkednek el, továbbá egyikőjük az antiszoláris meridiánon, az anti-Nap fölött alakul ki. A Naphoz, illetve anti-Naphoz viszonyított szögtávolságuk annál nagyobb, minél nagyobb a többszörös szóródást fokozó légköri aeroszol mennyisége. Elhelyezkedésük tehát jó mértéke a légkör szennyezettségének is (COULSON 1988).

Az égbolt polarizációs mintázatának szerepe az állatok életében

A fényszórás miatt az égbolton kialakuló, a szoláris és antiszoláris meridiánra tükörszimmetrikus polarizációs mintázat alapján még akkor is meghatározható a Nap helyzete, ha az éppen nem látható. Ennek nagy a jelentősége sok olyan állat életében, mely számára a Nap helyzete a tájékozódás alapja. Ma már száz felett van azon állatfajok száma, melyekről ismert, hogy képesek érzékelni a lineárisan poláros fény rezgéssíkjának irányát. Legtöbbjük polarizáció-látása az égbolt polarizációs mintázata alapján történő orientációt szolgálja. Elsőként KARL VON FRISCH (1949) fedezte fel, hogy a háziméh (*Apis mellifera*) nem csupán a Nap helyzete, hanem az égbolt polarizációs mintázata alapján is képes tájékozódni, mert összetett szeme érzékeli a fény polarizációját. Azóta számos ízeltlábú esetében igazolták, hogy képesek detektálni a lineárisan poláros fény rezgéssíkját. Ezen állatok többnyire az

égbolt polarizációs mintázatát a spektrum ultraibolya tartományában észlelik (WATERMAN 1981). Ezen alapul például az alkonyatkor mozgó mezei tücsök (*Gryllus campestris*) (WEHNER, 1989), vagy a tájékozódási pontok nélküli homokfelszínen táplálékot kereső sivatagi hangya (*Cataglyphis bicolor*) (WEHNER 1976) tájékozódása. Egy, a sekély vizekből ellenségei elől a mélyebb vizekbe menekülő garnélarák (*Palaemonetes vulgaris*) is a Nap helyzetét egyértelműen jelző égboltfény polarizációs mintázata alapján állapítja meg a part irányát (GODDARD & FORWARD 1991). Számos szitakötőfaj esetében leírtak olyan, az összetett szem dorzális részén elhelyezkedő, speciális ortogonális mikrovillus rendszert tartalmazó ommatidiumokat, melyek felépítése igen hasonló az elsőként a hártácsszárnyúaknál (*Hymenoptera*knál) leírt, polarizáción alapuló tájékozódáshoz használt receptorokhoz (MEYER & LABHART 1993). A legyek körében *Calliphora* és a *Musca* fajokban mutatták ki hasonló polarizáció-látásra alkalmas speciális ommatidiumok jelenlétét. A házilég (*Musca domestica*) esetében viselkedéstani kísérletek is bizonyítják, hogy a mezei tücsökhöz hasonlóan testével követi a felülről vetített forgó polarizált fény síkját (PHILIPSBORN & LABHART 1990). A pók-szabásúak körében is találtak égboltpolarizációt érzékelő fajokat (DACKE et al. 1999). Joggal feltételezhető, hogy a polarizáció-látás az ízeltlábúak körében igen elterjedt, korán kialakult képesség (WATERMAN 1981). A gerincesek között is ismertek polarizációra érzékeny látórendszerrel rendelkező, illetve az égboltfény polarizációs mintázatát orientációhoz használó fajok. Egyes békafajok lárvái a garnélarákhöz hasonlóan az égbolt fénye alapján határozzák meg a biztonságot jelentő mélyebb vizek irányát. A kísérletek érdekes, bár vitatható eredménye, hogy a polarizáció-érzékelés képessége nem a szemekhez, hanem a fejnek a tobozmirigy feletti régiójához köthető (AUBURN & TAYLOR 1979), bár nem tisztázott hogy a fejbőr vagy maga a tobozmirigy érzékeli-e a fényt. Hasonló képességet mutattak ki egy szalamandrafaj (*Ambystoma tigrinum*) és egy sivatagi gyík (*Uma notata*) esetében is (ADLER & PHILIPS 1984). A vándorló pisztrángok még alacsony polarizációfok mellett is meg tudják állapítani a szórt égboltfény polarizációs irányát, és az alapján választják meg útirányukat (HAWRYSHYN 1992). Számos éjszaka vonuló madárfajról is ismert, hogy térbeli orientációja erősen függ az égboltfény polarizációjától (ABLE 1993). Az égbolt polarizációs mintázata tehát sok állat számára nyújt alapvető információkat.

A teljes napfogyatkozás röpké 140 másodperce minden élőlény számára váratlan és különös időszak. Elképzelhető, hogy az égboltpolarizációt érzékelő állatok számára a változás nagyobb mértékű lehetett, mint azt az emberi szem érzékelhette. Cikkünkben azokat a főbb eredményeinket mutatjuk be, amelyek segítségével esetleg értelmezhetni lehet majd az égboltpolarizáció alapján tájékozódó egyes rovarok napfogyatkozáskor tapasztalt olykor különös viselkedését. További részletek más közleményeinkben olvashatók (POMOZI et al. 2000, 2001a,b).

Módszerek

Méréseinket 1999. augusztus 11-én 180° látószögű képalkotó fotopolarimetriával végeztük az Alföldön, a Duna-Tisza-közén, Kecel közvetlen közelében (46°32' É, 19°16' K) a teljes napfogyatkozás sávjának közepén teljesen tiszta égbolt alatt a részleges napfogyatkozás kezdetétől annak végéig. Óriási szerencsénkre egy hidegfronti zivatar első kontaktus előtti

átvonulásának köszönhetően az égbolt tiszta, felhőmentes volt a fogyatkozás teljes időtartama alatt (WEIDINGER et al. 2001). Méréseink helyszínén a részleges fogyatkozás kezdetének (első kontaktus), a teljes napfogyatkozás kezdetének (második kontaktus), a teljes napfogyatkozás végének (harmadik kontaktus) és a részleges fogyatkozás végének (negyedik kontaktus) időpontja rendre 11:28:35, 12:51:34, 12:53:56 és 14:15:35 (középeurópai idő, nyári időszámítás = UTC + 2 óra) volt. A részleges fogyatkozás alatt 400 ASA érzékenysé-
gű Fujichrome Sensia II színes diafilmet használtunk, míg a teljes napfogyatkozás idején 1600 ASA érzékenysé-
gű Kodak EPH színes diát. Az utóbbival 1/2, 1/4 és 1/8 másodperces expozíciós idővel sikerült az égboltról használható polarizációs felvételeket készítenünk a teljes fogyatkozás alatt. A felvételek egy Nikon-Nikkor halszemoptikával (f: 2.8, fókusztávolság: 8 mm, látószög: 180°) felszerelt Nikon F801 típusú fényképezőgéppel készültek. A halszemoptikába szerelt forgatható tárcsa segítségével a fényútba egy-egy, három különböző áteresztési irányú (0°, 45° és 90° a tárcsa sugarától mérve) szürke lineáris polárszűrőt lehet beforgatni. Hogy a direkt napfénynek a halszemoptika felületein fellépő zavaró tükröződését kivédjük, mind a részleges napfogyatkozás, mind pedig a kontroll mérések alatt a Napot egy kis koronggal kitakartuk. Az égboltról a három különböző irányú polárszűrőn át készített színes diafelvételeket Hewlett-Packard ScanJet 6100C szkennelrel történő digitalizálás után egy számítógépes program segítségével kiértékeljük. Meghatároztuk a fényintenzitás, polarizációfok és polarizációs irány égi mintázatait a fotóemulzió érzékenységi maximumainak vörös (650 nm), zöld (550 nm) és kék (450 nm) színtartományában, majd e mintázatokat nagyfelbontású, kétdimenziós, színekódolt térképekként ábráztuk. Polariméterünk kalibrációját és a kiértékelési folyamat részleteit máshol már publikáltuk (GÁL et al. 2001a,b).

A teljes napfogyatkozás Kecel környékén 140 másodpercig tartott. Az ezalatt az időszak alatt mért égboltpolarizációs mintázatokat összehasonlítottuk azokkal az égboltpolarizációs mintázatokkal, amelyeket a napfogyatkozás másnapján 1999. augusztus 12-én, normál égbolt esetén mértünk ugyanazon a helyen és ugyanazokban az időpontokban, mint a napfogyatkozás alatt. További összehasonlítási alapul szolgáltak azok a normál égboltpolarizációs mintázatok, amelyeket 1999. augusztus 26-án mértünk a tunéziai Chott el Djerid sivatagban a Nap ugyanakkora (zenittől mért 32°-os) szögtávolsága mellett, mint amekkora a teljes napfogyatkozás alatt volt Kecelen. A tunéziai összehasonlító mérési adatok felhasználására azért volt szükségünk, mert a Kecelen mért normál égbolt részben felhős, míg a tunéziai normál ég teljesen tiszta volt. Hogy a keceli felhős égen végzett ellenőrző polarizációs méréseket is felhasználhassuk az összehasonlításban, kifejlesztettünk egy számítógépes algoritmust, amely fotometriai úton felismeri a felhőket az égboltról készült színes fényképeken. Az ezen algoritmussal detektált felhőket kiszűrtük, és csak az égbolt tiszta részeit vetjük figyelembe a napfogyatkozáskor mért égboltpolarizációs mintázatokkal való összehasonlításakor.

Eredmények

Bár a teljes napfogyatkozás ideje alatt feltűnően különböztek a megvilágítási viszonyok a megszokottaktól, az égboltpolarizáció mintázata alig tért el a normálistól mindaddig, amíg a napkorong Hold által eltakart hányada el nem érte a 98%-ot. Ezután a teljes fogyatkozás-

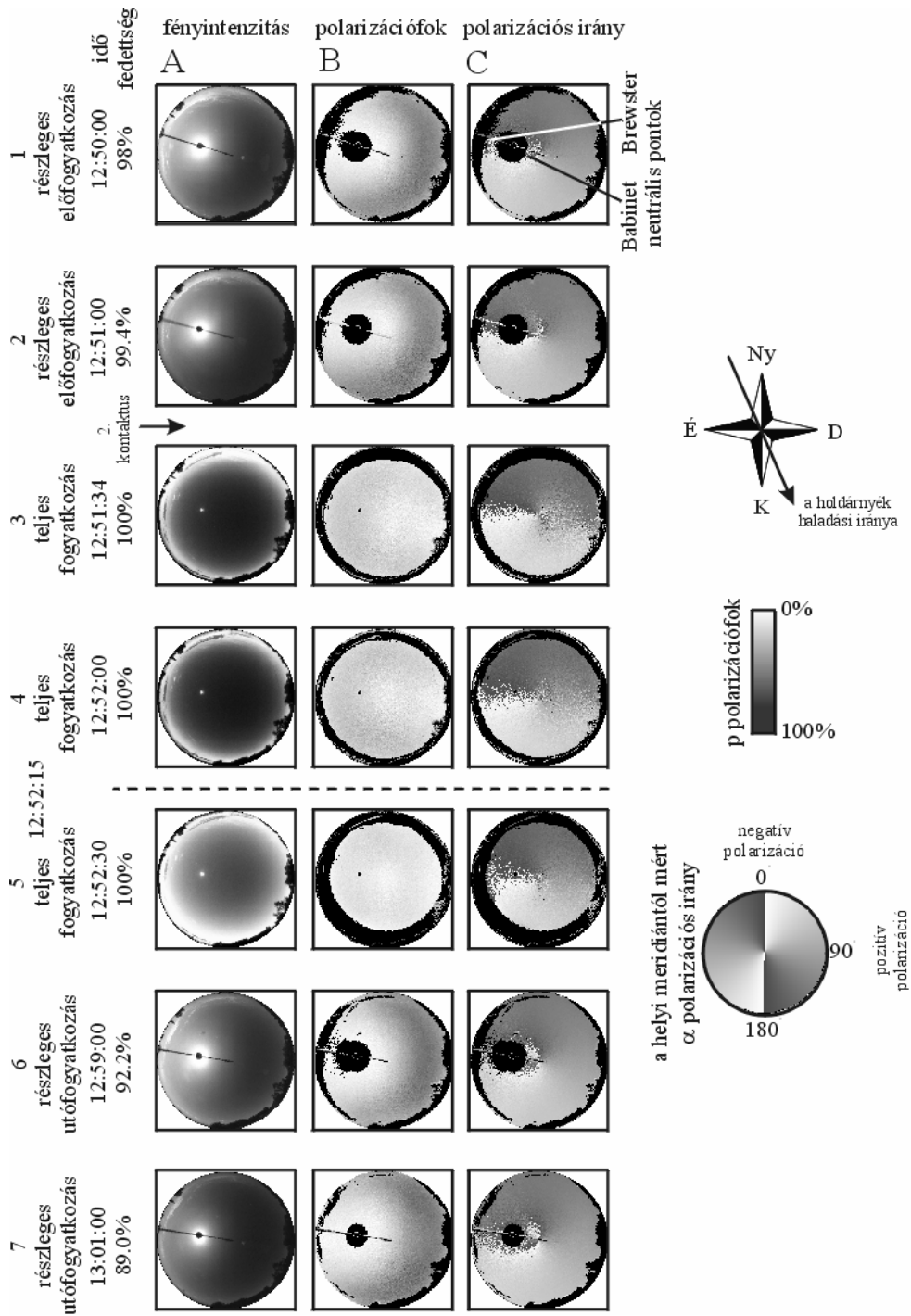
hoz közeledve egyre gyorsuló ütemben alakult át az égboltpolarizáció szokványos mintázata a teljes napfogyatkozás alatti különleges mintázattá. Az 1. ábra mutatja az égbolt fényintenzitásának, polarizációfokának és polarizációs irányának általunk mért térbeli eloszlását az idő függvényében a spektrum kék (450 nm) tartományában az 1999. augusztus 11-i teljes napfogyatkozás alatt. A teljes napfogyatkozás alatt az égbolt polarizációs mintázatát három különböző időpontban tudtuk mérni a teljes napfogyatkozás első felében. Az első felvétel 12:51:34-kor (a második kontaktus pillanatában) készült, a második 12:52:00-kor, a harmadik pedig 12:52:30-kor.

A normál égbolt esetében a p polarizációfok mintázata a szoláris-antiszoláris meridiánra tükrörszimmetrikus. A Nap közelében lévő Brewster- és Babinet-féle neutrális pontokban $p = 0\%$, tőlük távolodva p egyre nő, míg a Naptól mért 90° -os szögtávolságra eléri a meteorológiai viszonyoktól függő maximumát. Majd tovább távolodva a Naptól p csökkenni kezd, és az anti-Nap közelében lévő Arago-féle neutrális pontban ismét 0% -ot vesz fel. A normál égboltfény polarizációfoka az égbolt Naptól távolabbi felén mindig nagyobb, mint a Naphoz közelebbin, és csak akkor mutat a zeníthez képest hengerszimmetrikus eloszlást, ha a Nap a zeniten van. Napkeltekor és napnyugtakor a legkifejezettebb a normál égbolton a polarizációs mintázat tükrörszimmetrikus jellege. Ilyenkor a maximális polarizációfokú tartomány a szoláris-antiszoláris meridiánra merőlegesen a zeniten keresztül húzódó sávban helyezkedik el.

A napfogyatkozás idején a teljes napfogyatkozás beálltakor az égbolt polarizációs tulajdonságai hirtelen és drasztikusan megváltoztak (1. ábra), és folyamatosan módosultak a teljes napfogyatkozás 140 másodperce alatt a holdárnyék megfigyelőhöz képesti állandó mozgása miatt. A változás a 12:52:15 időpont körül közelítőleg szimmetrikusan folyt le. A részleges napfogyatkozás alatt, a teljes napfogyatkozás előtt és után a p polarizációfok égbolton való eloszlása nem volt forgásszimmetrikus, az antiszoláris félgömbön nagyobb p értékek fordultak elő, mint a szolárison. A teljes napfogyatkozás alatt az égbolt átlagos polarizációfoka jóval kisebb volt a normál égbolténál, mivel a holdárnyékba oldalról bejutó napfény csak többszöri szóródás útján juthatott el a megfigyelőhöz, ami depolarizációt okozott.

1. ábra: Az égbolt fényintenzitásának (A), p polarizáció fokának (B) és α polarizációs irányának (C) időbeli változása a spektrum kék (450 nm) színtartományában mérve Kecelen az 1999. augusztus 11-i teljes napfogyatkozás alatt. Az égbolt alul-, illetve fölülexponált területeit, valamint a horizont közeli tereptárgyakat és növényzetet feketével jelöltük a B oszlopban. Az 'A' oszlopban a fekete-fehér fényképfelvételek nem adják vissza hűen az égbolt valódi fényintenzitását, mert különböző expozíciós időkkel és apertúrákkal készültek.

Figure 1: Temporal change of the celestial pattern of the brightness (A), degree of polarization p (B) and E-vector alignment α with respect to the local meridian (C) measured in the blue spectral range (450 nm) in Kecel (Hungary) during the total solar eclipse on 11.08.1999. Overexposed areas of the sky and the landmarks/vegetation near the horizon are shaded by black in column 'B'. The black and white photographs of the sky in column 'A' do not represent correctly the real brightness of the skylight, because they were taken with different times of exposure and apertures.



A teljes napfogyatkozás idején a polarizációfok égbolton való eloszlása közel forgásszimmetrikus volt a zenithez képest. A horizont közelében $p = 0\%$ volt, a horizonttól mért θ szögtávolság növekedtével p nőtt, míg $\theta = 40\text{-}45^\circ$ -nál elérte $p_{\max} = 15\text{-}20\%$ -os maximumát, majd θ további növekedtével p egyre csökkent, míg a zenit közelében ismét 0% lett. A p változása a normál égbolthoz képest az égbolt egyetlen részén sem volt nagyobb $\pm 24\%$ -nál a teljes napfogyatkozás előtti, illetve utáni néhány percben, valamint a teljes napfogyatkozás alatti időszakban. Azonban a második és a harmadik kontaktus után az égbolt egy számottevő területén (a Naptól 55° -nál nagyobb szögtávolságra) $\Delta p > 24\%$ volt. A normál égbolttal ellentétben teljes napfogyatkozásakor a polarizációfok az égbolt Naphoz közelebbi felén volt nagyobb.

A teljes napfogyatkozás alatt az égboltnégy α polarizációs irányának eloszlása nem volt hengersizmetrikus a zenithez viszonyítva, mégis teljesen különbözött a normál égbolt α mintázatától. Az utóbbi esetében az égboltnégy „pozitív polarizációja” dominál, azaz a szórt égboltnégy elektromos vektorának (E-vektorának) domináns rezgési síkja többé-kevésbé merőleges a megfigyelőn, a Napon és az égbolt megfigyelt pontján átmenő szóródási síkra. Teljes napfogyatkozásakor megfordult a helyzet, és az égboltnégy „negatív polarizációja” vált dominánssá, azaz a szórt égboltnégy E-vektora többé-kevésbé párhuzamossá vált a szóródási síkkal. A polarizációs irány változása a zenittől mérve 20° -nál nagyobb szögtávolságok esetén 38° -nál kisebb volt. Ettől nagyobb változás csak a zenit körül alakult ki a második és a harmadik kontaktus idején.

A teljes napfogyatkozás alatt a zenit közelében az égbolton egy új neutrális pont alakult ki, ahol a p polarizációfok nulla, tőle távolodva p folyamatosan nő. A neutrális ponton a szoláris meridián mentén áthaladva az E-vektor iránya hirtelen 90° -os változást szenved a normál égbolt Arago-, Babinet- és Brewster-féle neutrális pontjaihoz hasonlóan.

A teljes napfogyatkozás idején az égboltnégy spektrális sajátosságai hasonlóak voltak a normál égboltnégy spektrális jellemzőihez. Egy horizont közeli keskeny vörös sávot leszámítva, az égbolt a kék tartományban volt a legfényesebb és a vörösben a legsötétebb. Míg a polarizációs irány alig függ a fény hullámhosszától, addig a p polarizációfok igen: minél kisebb a hullámhossz, annál kisebb a p értéke. Ennek oka, hogy a fény légköri többszörös szóródása depolarizációt okoz, azaz p csökkenését, és mivel a Rayleigh-féle törvény értelmében a rövidebb hullámhosszak sokkal gyakrabban szóródnak, mint a hosszabbak, ez a depolarizáció a rövidebb hullámhosszaknál erősebb. A normál égbolthoz hasonlóan teljes napfogyatkozásakor a napfény szintén többszörösen szóródik a légkörben. Ezért nincs lényegi eltérés az égboltpolarizáció spektrális sajátosságaiban a normál égbolt és a teljes napfogyatkozás idején megfigyelhető égbolt között.

Értékelés

Ahogy az a korábbi égboltpolarizációs vizsgálatok eredményei alapján is várható volt, a napfogyatkozás alatt az égbolt polarizációs mintázatának alakulása a napkorong 98% -os geometriai takarásáig magyarázható gyengített intenzitású, de máskülönben lényegében változatlan napfényrel számolva. A 98% -nál nagyobb takarásnál azonban a többszörösen szórt

fény relatív mennyisége jelentősen megnő, és hirtelen erőteljes változást okoz a teljes égbolt polarizációjának mintázatában (MILLER & FASTIE 1972, MOORE & RAO 1966). Ezt a mi méréseink is alátámasztják. Hasonlóan a korábban mások által megfigyelt napfogyatkozásokhoz, 1999. augusztus 11-én az égbolt polarizációs mintázata a napfogyatkozás előtt és után 3–5 perccel lényegében normális volt. Habár mi csak a spektrum látható tartományában tudtuk mérni az égbolt polarizációs mintázatát, semmilyen fizikai vagy légköri optikai érvet sem ismerünk az ellen, hogy következtetéseinket ne lehetne kiterjeszteni az ultraibolya tartományra. Meteorológusok vizsgálták a fényintenzitás időbeli változását a teljes napfogyatkozás alatt a spektrum ultraibolya tartományában is (TÓTH 2001).

Felvetődik a kérdés, hogy az ég polarizációs mintázatának a teljes napfogyatkozás bekövetkeztekor hirtelen megváltozó szerkezete milyen hatással lehetett az égboltpolarizáció alapján tájékozódó állatok viselkedésére. Tudnunk kell, hogy az állatok zömének térbeli tájékozódása a Napot használja viszonyítási alapul. Számos, polarizáció-érzékeny látószervvel rendelkező állat csak akkor használja az égbolt polarizációs mintázatát, ha a Nap valamilyen oknál fogva nem látszik, például felhők takarják, vagy a horizont alatt van. Ez utóbbi esetben a normál égbolt jellegzetes polarizációs irány mintázatából következteti ki az állat a szoláris meridián, vagy a Nap irányát. Teljes napfogyatkozáskor a teljes napfogyatkozás idején kívül az égbolt polarizációs mintázata gyakorlatilag a normál ég polarizáció-eloszlásával azonos, ezért az égboltpolarizáció alapján navigáló állatok ugyanúgy támaszkodhatnak rá, mint máskor, tehát nem tévednek el. A teljes napfogyatkozás alatt azonban annyira különbözik az ég polarizációs mintázata a normál mintázattól, hogy képtelenség lenne tájékozódni az alapján (HORVÁTH et al. 2003, POMOZI et al. 2000, 2001). Ha tehát egyáltalán észlelik egyes állatok a teljes napfogyatkozás gyér fényviszonyai között a megváltozott égboltpolarizációs mintázatot, s megpróbálnak az alapján tájékozódni, akkor is nagy valószínűséggel eltévednek. Lehetséges, hogy a méheknel megfigyelt különös viselkedés (SZENTKIRÁLYI & SZALAY 2001; BALDAVÁRI 2001), vagy más rovarok bizonyos viselkedési elemei részben ezzel a jelenséggel magyarázhatók. Mindennek akkor van jelentősége, ha maga a napkorona felhők miatt nem látszik. Ha a teliholdhoz hasonló fényerejű napkorona jól látható, akkor az állatok az alapján továbbra is tudnak tájékozódni, hiszen a napkorona a Nap helyét jelöli ki. Ekkor tehát nincs szükség az égboltpolarizációra a térbeli orientálódáshoz, és annak teljes napfogyatkozáskor megváltozott szerkezete sem vezetheti félre az állatokat.

Meg kell jegyeznünk, hogy a fenti bekezdésben foglaltak csupán spekulatív jellegűek olyan konkrét megfigyelés híján, amely egyértelműen bizonyítaná, hogy a teljes napfogyatkozáskor eltévedtek az állatok a hazafelé vezető útjukon. Nem tartjuk valószínűnek, hogy a teljes napfogyatkozáskor jelentősen módosuló égboltpolarizációs mintázat jelentős hatással lenne az állatok tájékozódására. Kérdéses, hogy a teljes napfogyatkozás kis fényintenzitásai mellett érzékelik-e az állatok az égboltpolarizációt, illetve képesek-e tájékozódni a gyér fényű napkorona helyzete alapján. Arra számítunk, hogy ha valamilyen oknál fogva (a jelentősen, váratlanul és hirtelen lecsökkenő fényintenzitásnak, illetve a jelentősen, váratlanul és hirtelen megváltozó égboltpolarizációs mintázatnak köszönhetően) el is téved a teljes napfogyatkozás alatt, a legtöbb állat számára mindez komoly kárt nem okozhat. A teljes napfogyatkozás legfeljebb csak néhány percig tart. Utána ismét visszaáll az eredeti égboltpolarizációs mintázat, és csak a fényerősség helyreállása vesz igénybe több időt. Bizonyos állatok esetében azonban, így a gyűjtőútjukra precízen kimért mennyiségű „üzemanyaggal” elindu-

ló méheknél a tájékozódási mechanizmus néhány perces megzavarodása is végzetes lehet (SZENTKIRÁLYI & SZALAY 2001, BALDAVÁRI 2001). Erről teljes bizonyossággal azonban csak a napfogyatkozások idején végzett viselkedéstani megfigyelések alapján lehetne kijelentéseket tenni. Ilyen adatok az irodalomban csak igen szórványosan lelhetők fel. Az 1999. augusztus 11-i napfogyatkozás alatt végzett, e kötetben ismertetett úttörő állattani megfigyelések erre a kevésbé kutatott érdekes jelenségre nyithatnak kaput.

Köszönetnyilvánítás: Munkánkat a Magyar Tudományos Akadémia hároméves BOLYAI JÁNOS poszt-doktori kutatói ösztöndíja (HORVÁTH G.), a SOROS Alapítvány 230/2/878 számú egyéves doktori ösztöndíja (GÁL J.) és a Swiss National Science Foundation 31–43317.95 számú pályázata (R. WEHNER) támogatta. Köszönjük FISCHER MÁRIA, HORVÁTH JÁNOS és SUHAI BENCE méréseink lebonyolításában nyújtott segítségét és közreműködését.

Irodalom

- ABLE P. K. (1993): Orientation cues by migratory birds: a review of cue-conflict experiments. – *Trends in Evolution and Ecology* 8: 367–371.
- ADLER K. & PHILLIPS J. B. (1984): Orientation in a desert lizard (*Uma notata*): Time-compensated compass movement and polarotaxis. – *Journal of Comparative Physiology A* 156: 547–552.
- AUBURN J. S. & TAYLOR D. H. (1979): Polarized light perception and orientation in larval bullfrogs *Rana catesbeiana*. – *Animal Behaviour* 27: 658–668.
- BALDAVÁRI L. (2001): Méhek viselkedésének változása az 1999. augusztus 11-i teljes napfogyatkozás hatására egy méhészetben. – *Állattani Közlemények* 86: 137–143.
- CHANDRASEKHAR S. (1950): *Radiative Transfer*. Clarendon Press, Oxford.
- COULSON K. L. (1988): *Polarization and Intensity of Light in the Atmosphere*. A. Deepak Publishing, Hampton, Virginia.
- DACKE M., NILSSON D.-E., WARRANT E. J., BLEST A. D., LAND M. F. & O'CARROLL D. C. O. (1999): Built-in polarisers form part of a compass organ in spiders. – *Nature* 401: 470–472.
- DANDEKAR B. S. & TURTLE J. P. (1971): Day sky brightness and polarization during the total eclipse of 7 March 1970. – *Applied Optics* 10: 1220–1224.
- DE BARY E., BULLRICH K. & LORENZ D. (1961): Messungen der Himmelsstrahlung und deren Polarisationsgrad während der Sonnenfinsternis am 15.2.1961 in Viareggio. – *Geofisica Pura et Applicata* 48: 193–198.
- FRISCH VON K. (1949): Die Polarization des Himmelslichtes als orientierender Faktor bei Tänzchen der Biene. – *Experientia* 5: 142–148.
- GÁL J., HORVÁTH G., POMOZI I. & WEHNER R. (1998): Az égbolt polarizálatlan pontjai, avagy amit már Arago, Babinet és Brewster ismert, de eddig közvetlenül még senki sem látott. – *Természet Világa* 129: 151–154, 212–215.
- GÁL J., HORVÁTH G., HAIMAN O., MEYER-ROCHOW V. B. & WEHNER R. (2000): „Poláros” pillantás a teljes égboltra 180° látószögű képalkotó polariméterrel. – *Élet és Tudomány* 55: 1003–1006.
- GÁL J., HORVÁTH G. & MEYER-ROCHOW V. B. (2001a): Measurement of the reflection-polarization pattern of the flat water surface under a clear sky at sunset. – *Remote Sensing of Environment* 76: 103–111.

- GÁL J., HORVÁTH G. & MEYER-ROCHOW V. B. & WEHNER R. (2001b): 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 of London A* 457: 1385–1399.
- GÁL J., HORVÁTH G., BARTA A. & WEHNER R. (2001c): Polarization of the moonlit clear night sky measured by full-sky imaging polarimetry at full moon: comparison of the polarization of moonlit and sunlit skies. – *Journal of Geophysical Research D* 106: 22,647–22,653.
- GODDARD S. M. & FORWARD R. B. (1991): The role of the underwater polarized light pattern in sun compass navigation of the grass shrimp, *Palaemonetes vulgaris*. – *Journal of Comparative Physiology A*, 169: 479–491.
- HAWRYSHYN W. C. (1992): Polarization vision in fish. – *American Scientist* 80: 164–175.
- HORVÁTH G. (1986a): Fényszóródás a természetben. – *Természet Világa* 117: 250–254.
- HORVÁTH G. (1986b): Az Avogadro-szám meghatározása az égbolt kék színéből. A fény szóródása. – *Fizikai Szemle* 36: 214–227.
- HORVÁTH F. Á. & HORVÁTH G. (1995): Víztükrök derült égbolt alatti polarizációs mintázata biológiai vonatkozásokkal. – *Léggör* 40(3): 18–23.
- HORVÁTH G. & POMOZI I. (1997): How celestial polarization changes due to reflection from the deflector panels used in deflector loft and mirror experiments studying avian navigation. – *Journal of Theoretical Biology* 184: 291–300.
- HORVÁTH G., GÁL J., POMOZI I. & WEHNER R. (1998): Polarization portrait of the Arago point: Video-polarimetric imaging of the neutral points of skylight polarization. – *Naturwissenschaften* 85: 333–339.
- HORVÁTH G. & WEHNER R. (1999): Skylight polarization as perceived by desert ants and measured by video polarimetry. – *Journal of Comparative Physiology A* 184: 1–7. [Erratum 184: 347–349 (1999)].
- HORVÁTH G., WEHNER R., GÁL J. & POMOZI I. (1999): Az égboltpolarizáció és az állatok. – *Élet és Tudomány* 54: 235–237.
- HORVÁTH G., POMOZI I. & GÁL J. (2003): Neutral points of skylight polarization observed during the total eclipse on 11 August 1999. – *Applied Optics* 42(3): 1–11.
- KÖNNEN G. P. (1985): *Polarized Light in Nature*. Cambridge University Press, Cambridge.
- MEYER E. P. & LABHART T. (1993): Morphological specializations of dorsal rim ommatidia in the compound eye of dragonflies and damselflies (Odonata). – *Cell and Tissue Research* 272: 17–22.
- MILLER R. E. & FASTIE W. G. (1972): Skylight intensity, polarization and airglow measurements during the total solar eclipse of 30 May 1965. – *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics* 34: 1541–1546.
- MOORE J. G. & RAO C. R. N. (1966): Polarization of the daytime sky during the total solar eclipse of 30 May 1965. – *Annales de géophysique*. 22, 147–150.
- PILTCHIKOFF N. (1906): Sur la polarisation du ciel pendant les éclipses du soleil. – *C.R. Académie des Sciences Paris* 142: 1449.
- PHILIPSBORN A. & LABHART T. (1990): A behavioural study of polarization vision in the fly, *Musca domestica*. – *Journal of Comparative Physiology A* 167: 737–743.
- POMOZI I., GÁL J., HORVÁTH G. & WEHNER R. (2000): Égbolt-polarizáció teljes napfogyatkozáskor. – *Élet és Tudomány* 55: 1003–1015.
- POMOZI I., GÁL J., HORVÁTH G. & WEHNER R. (2001): Fine structure of the celestial polarization pattern and its temporal change during the total solar eclipse of 11 August 1999. – *Remote Sensing of Environment* 76: 181–201.
- RAO C. R. N., TAKASHIMA T. & MOORE J. G. (1972): Polarimetry of the daytime sky during solar eclipses. – *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics* 34: 573–576.
- STRUTT J. W. ALIAS LORD RAYLEIGH (1871): On the light from the sky, its polarisation and colour. – *Philosophical Magazine* 41: 107–120, 274–279.
- SZENTKIRÁLYI F. & SZALAY L. (2001): Az 1999. augusztus 11-i teljes napfogyatkozás hatása a háziméhek viselkedésére és gyűjtési aktivitására. – *Állattani Közlemények* 86: 115–136.

- TÓTH Z. (2001): A földfelszínre érkező napsugárzás intenzitásának változása különböző spektrum tartományokon az 1999. augusztus 11-i napfogyatkozás alatt történt mérések alapján. – *Állattani Közlemények* 86: 75–80.
- WATERMAN T. H. (1981): Polarization sensitivity. – In: AUTRUM H.(ed.). *Handbook of Sensory Physiology VII/6C*, Springer Verlag, Berlin pp. 281–469.
- WEHNER R. (1976): Polarized-light navigation by insects. – *Scientific American* 235(1): 106–114.
- WEHNER R. (1989): Neurobiology of polarization vision. – *Trends in Neurosciences* 12: 353–359.
- WEIDINGER T., PINTÉR K., HIRSCH T. & MÉSZÁROS R. (2001): Az időjárási helyzet és a meteorológiai elemek változása az 1999. augusztus 11-i magyarországi teljes napfogyatkozás során. – *Állattani Közlemények* 86: 59–74.

Skylight polarization during the total solar eclipse of 11 August 1999 and its possible biological implications

BALÁZS BERNÁTH, ISTVÁN POMOZI, JÓZSEF GÁL, GÁBOR HORVÁTH & RÜDIGER WEHNER

Using 180° field of view (full-sky) imaging polarimetry, we measured the spatiotemporal change of the polarization pattern of the entire celestial hemisphere in the red (650 nm), green (550 nm) and blue (450 nm) spectral ranges during the total solar eclipse of 11 August 1999 in Kecel, Hungary. We compared these patterns with the corresponding polarization patterns measured under normal cloudy and clear sky conditions. Here those results of ours are presented, with the help of which the behaviour observed during the eclipse of certain insects navigating on the basis of sky polarization may be interpreted and explained.