



A márciusi szám ennek megfelelően a fényről szól. Nem feltétlenül a látható fényről, hanem a távoli infravörstől a röntgenfényig található elektromágneses hullámokról, fotonokról.

Több kézirat szól a fényről, mint amennyi a *Fizikai Szemle* egyetlen számába belefért. Ezért az egész 2015-ös évben feltűnő módon – a lap élőlábában a fény éve logójával – kiemeljük a fényről írt cikkeket. Azokat is, amelyek még meg sem születtek, de év végéig megjelennek.

Kérjük leendő szerzőinket, hogy minél több írással népszerűsítsék a fényt!

A HOLD ÉS NAP ÁLTAL MEGVILÁGÍTOTT ÉGBOLT POLARIZÁCIÓÁTMENETE BIOLÓGIAI VONATKOZÁSOKKAL: A SZÜRKÜLETI ÉG RENDELLENES POLARIZÁCIÓJA RÉSZLEGES HOLDFÁZIS IDEJÉN

Horváth Gábor, Száz Dénes

ELTE Biológiai Fizika Tanszék, Környezetoptika Laboratórium

Egri Ádám, Farkas Alexandra

ELTE BFT KOL + MTA Ökológiai Kutatóközpont, Duna-kutató Intézet, Budapest

Barta András, Barta Pál

Estrato Kutató és Fejlesztő Kft., Budapest

Kovács József, Csák Balázs, Jankovics István

ELTE Gothard Asztrofizikai Observatórium és Multidiszciplináris Kutatóközpont, Szombathely

Szabó Gyula

ELTE GAO MKK, Szombathely, MTA CSFK, Csillagászati Intézet, Budapest

Az égboltfény polarizációjának főbb tulajdonságai már jól ismertek [1]. Ezen ismeretek jelentős ütemben bővültek az elmúlt évtizedekben folytatott 180° látószögű képalkotó polarimetriai vizsgálatoknak köszönhetően [2]. Az égbolt polarizációs mintázatát vizsgálták már tiszta, részlegesen felhős, teljesen felhős, ködös és erdőtüzeztől füstös körülmények között, erdei lomboszat alatt, valamint olyan különleges viszonyok között is, mint a teljes napfogyatkozások és az arktiszi jég és tenger peremén [2]. Az égbolt-polarizációs mintázatokat hold nélküli alkonyatban [2] és telihold mellett [2] is mérték, továbbá a tiszta ég polarizálatlan (neutrális) pontjainak helyét is meghatározták [2] és elméletileg is leírták [3].

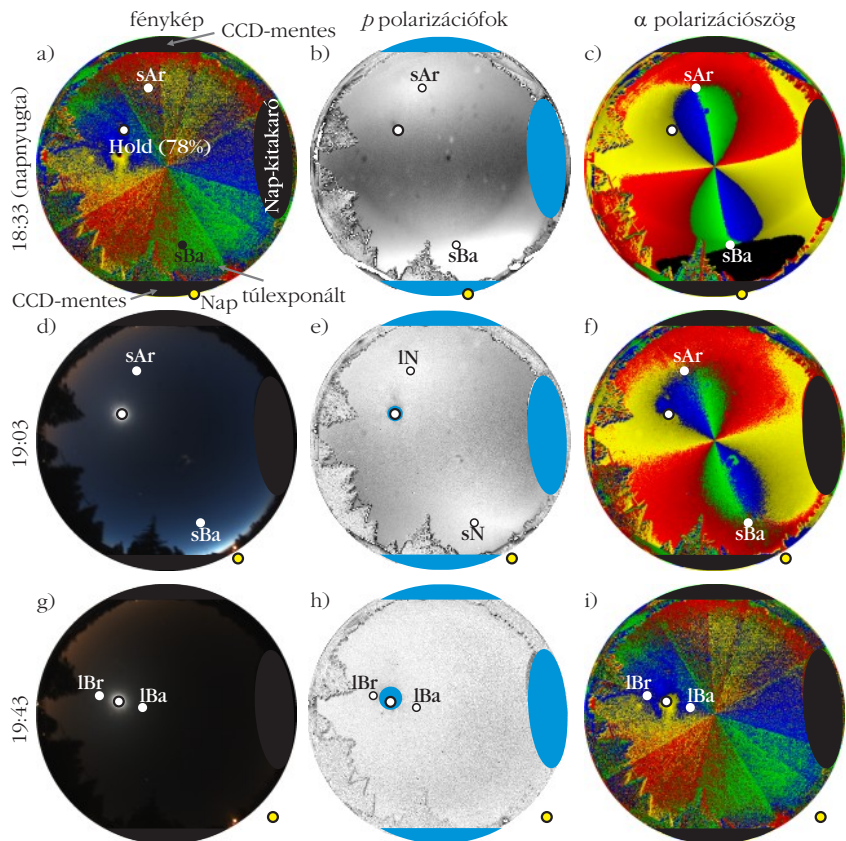
Az égbolt-polarizációról eddig megszerzett tudás jelentős biológiai vonatkozásokkal bír, mivel sok állat (például madarak, hullóok, kétélűek, halak, rovarok

és rákok) az égboltfény polarizációja segítségével tájékozódik, amikor a Napot felhő vagy köd takarja [2]. Ezen állatok tájékozódásának fő vonatkoztatási iránya a szoláris meridián, amely a zeniten és a Napon átmenő égi főkör és egyben az égboltfény polarizációirány-mintázatának tükörszimmetria-tengelye is. E tengely akkor is meghatározható, amikor a Nap nem látható. Olyankor, amikor az égbolt polarizációs mintázata például füst vagy teljes napfogyatkozás miatt rendellenes [2], az e mintázat segítségével tájékozódó rovarok el is tévedhetnek [4, 5].

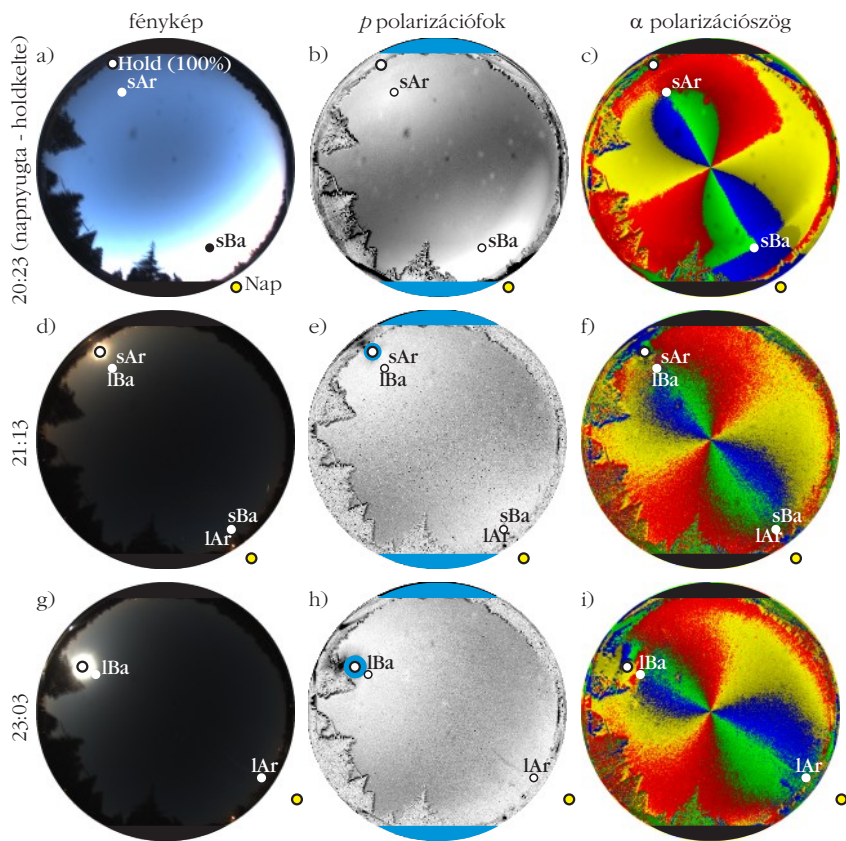
Bár a szürkületi (a napnyugta utáni alkonyati és a napkelte előtti pirkadati) égbolt polarizációját szórványosan már tanulmányozták [6], továbbá összehasonlították a telihold, illetve a Nap által megvilágított tiszta égbolt polarizációs mintázatait [2], a Nap és a Hold által megvilágított ég polarizációs jellemzőinek szürkületkori változását még nem vizsgálták. E hiány pótlására 180° látószögű képalkotó polarimetriával mértük az égboltfény polarizációs mintázatainak változását szürkületkor részleges holdfázis (78% és 72%) és telihold (100%) mellett. E változás oka, hogy például napnyugtakor a légkörben szórt napfény intenzitása folyamatosan csökken, amit fokozatosan elnyom az

Kutatásunkat az OTKA K-105054 (*Égbolt-polarimetria a felbök felismerésére és a polarimetrikus viking-navigációnak kedvező meteorológiai viszonyok vizsgálatára*) pályázata támogatja. Horváth Gábor köszöni a német Alexander von Humboldt Alapítvány műszeradományát és egy regensburgi ösztöndíjat (3.3-UNG/1073032 STP, 2013. június 1. – augusztus 31). Szabó Gyula köszöni az MTA Bolyai János kutatási ösztöndíját, az ELTE GAO MKK pedig Szombathely város S-11-1027 számú támogatását.

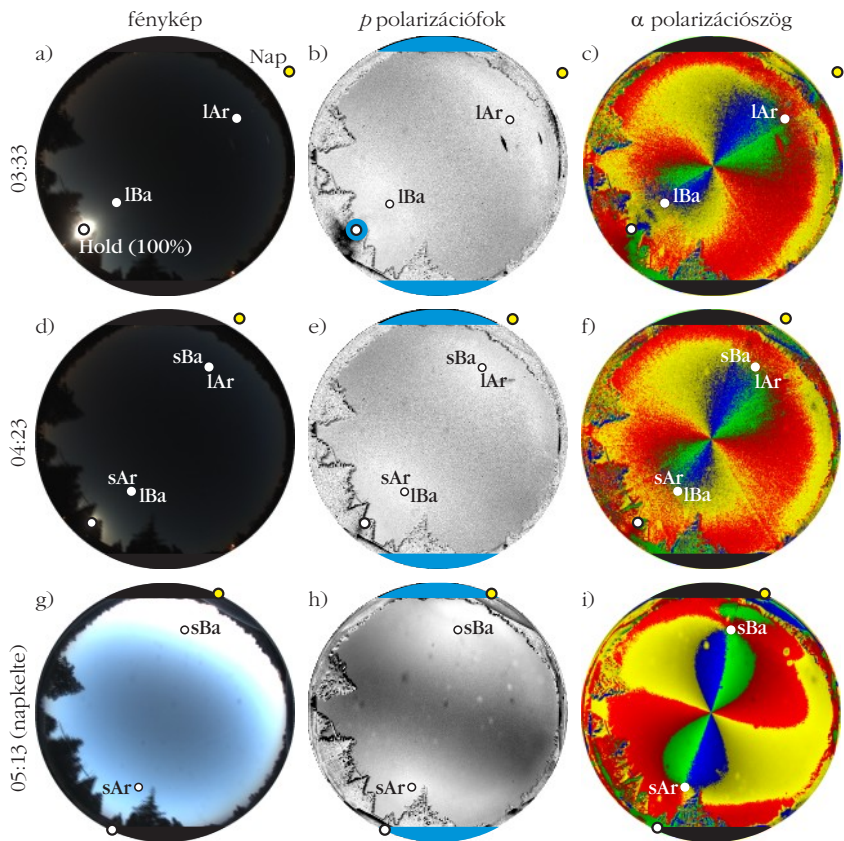




1. ábra. Tiszta égbolt 180° látószögű képképző polarimetriával készített fényképe, valamint az égboltfény p lineáris polarizációfokának és a helyi meridiántól az óramutató járásával megegyező irányban mért α polarizációs szögének mintázatai a spektrum kék (450 nm) tartományában 2013. március 22-én naplemente után Szombathelyen (47° 15,481' É, 16° 36,213' K), amikor a Hold 78%-os fázisban járt. (a, b, c) 18:33 (= greenwichi világidő + 1 óra, téli időszámítás). (d, e, f) 19:03. (g, h, i) 19:43. A fényképeken és a p -mintázatokon látható kis foltokat a polariméter műanyag védőburkára hullott esőcseppek okozták. A horizont alatti Nap, a horizont fölötti Hold és a neutrális pontok helyét fehér körök jelzik. sAr: szoláris Arago-pont. sN: szoláris neutrális pont. IN: lunáris neutrális pont. sBa: szoláris Babinet-pont. lBa: lunáris Babinet-pont. lBr: lunáris Brewster-pont.

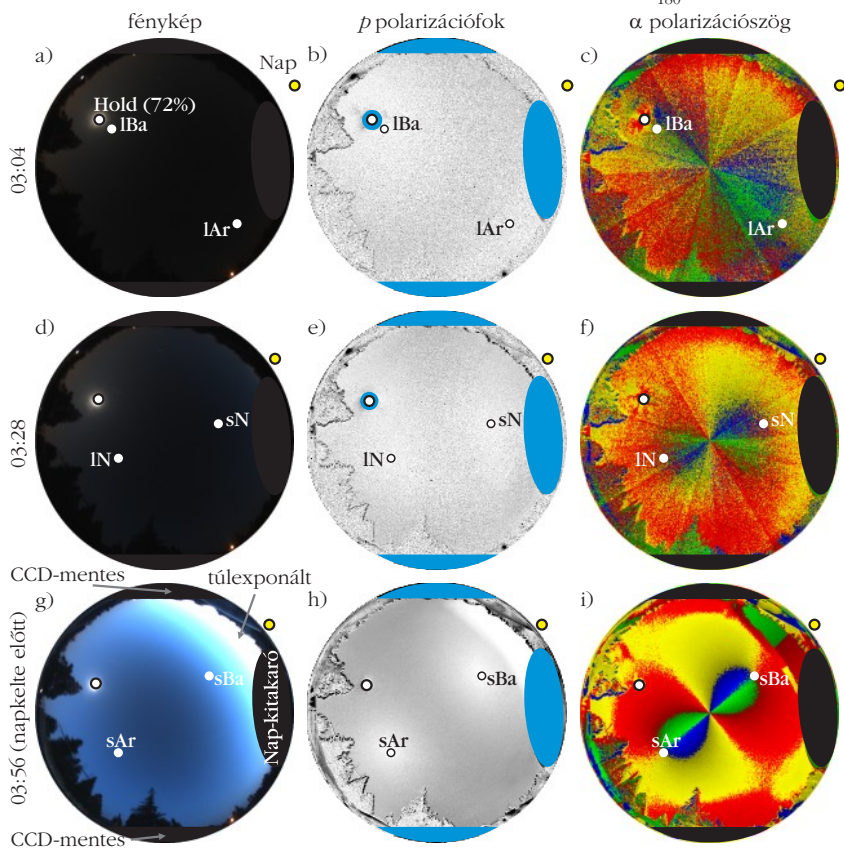


2. ábra. Mint az 1. ábra, 2013. április 25-én naplemente és holdkelte után a Hold 100%-os fázisa mellett, azaz teliholdkor. (a, b, c) 20:23. (d, e, f) 21:13. (g, h, i) 23:03 (= greenwichi világidő + 2 óra, nyári időszámítás). sAr: szoláris Arago-pont. sBa: szoláris Babinet-pont. lBa: lunáris Babinet-pont. lAr: lunáris Arago-pont.

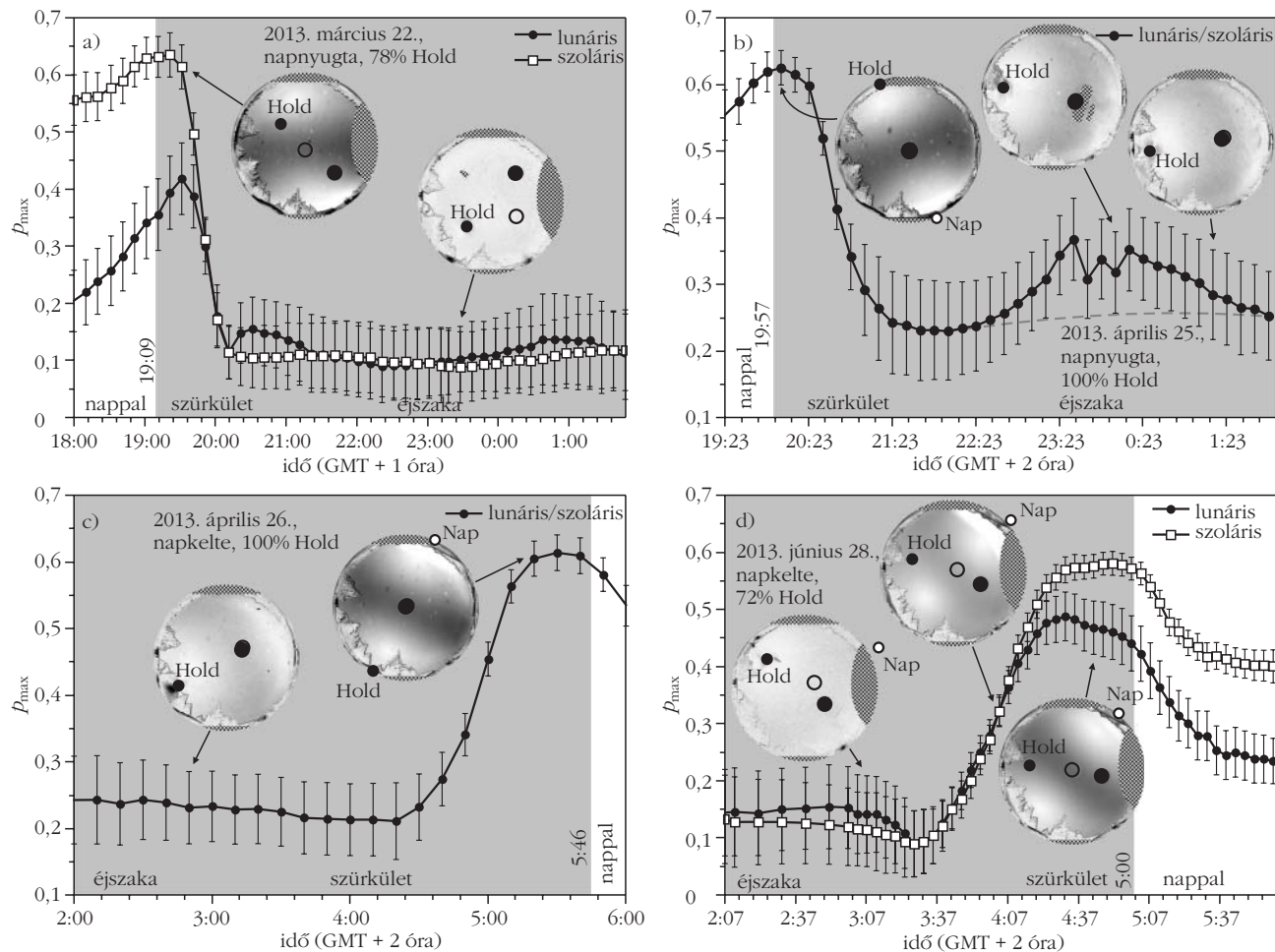


3. ábra. Mint az 1. ábra, 2013. április 26-án napkelte előtt, teliholdkor (100%-os holdfázis mellett). (a, b, c) 03:33. (d, e, f) 04:23. (g, h, i) 05:13. sAr: szoláris Arago-pont. sBa: szoláris Babinet-pont. IBa: lunáris Babinet-pont. IAr: lunáris Arago-pont.

■ kitakart, CCD-mentes, vagy túlexponált terület
 0% p lineáris polarizációfok 100%
 a helyi meridiántól mért α polarizációs szög



4. ábra. Mint az 1. ábra, 2013. június 28-án napkelte előtt, 72%-os holdfázis mellett. (a, b, c) 03:04. (d, e, f) 03:28. (g, h, i) 03:56. sAr: szoláris Arago-pont. sBa: szoláris Babinet-pont. IBa: lunáris Babinet-pont. IAr: lunáris Arago-pont. sN: szoláris neutrális pont. IN: lunáris neutrális pont.



5. ábra. Az égboltfény p lineáris polarizációfokának p_{\max} maximuma és szórása a spektrum zöld (550 nm) tartományában az idő függvényében az 1. (a), 2. (b), 3. (c) és 4. (d) ábra négy különböző situációjára. A p -értékeket kis, kör alakú égi területeken átlagoltuk a Naptól (üres körök) és a Holdtól (vastag fekete körök) 90° -ra. A beillesztett képek tipikus p -mintázatokat mutatnak, amelyek időpontját nyilak jelzik. A fehér és fekete pontok a Nap és a Hold helyzetét mutatják. A kitarart égrészeket kockás mintázat jelöli.

erősödő szórt holdfényé. Emiatt a napfény által megvilágított égbolt polarizációs mintázata fokozatosan alakul át a holdfény által megvilágított égbolt polarizációs mintázatává.

Cikkünkben megmutatjuk, hogy miben tér el a csak a Nap vagy csak a Hold által megvilágított ég polarizációs mintázata a holdfényes szürkületi égboltétól. Elemezzük továbbá a polarizációátalakulás lehetséges hatásait az éjjel vagy szürkületkor aktív, polarizációérzékeny állatok, valamint a feltételezetten polarizáló napköveket használó viking hajósok tájékozódására [7].

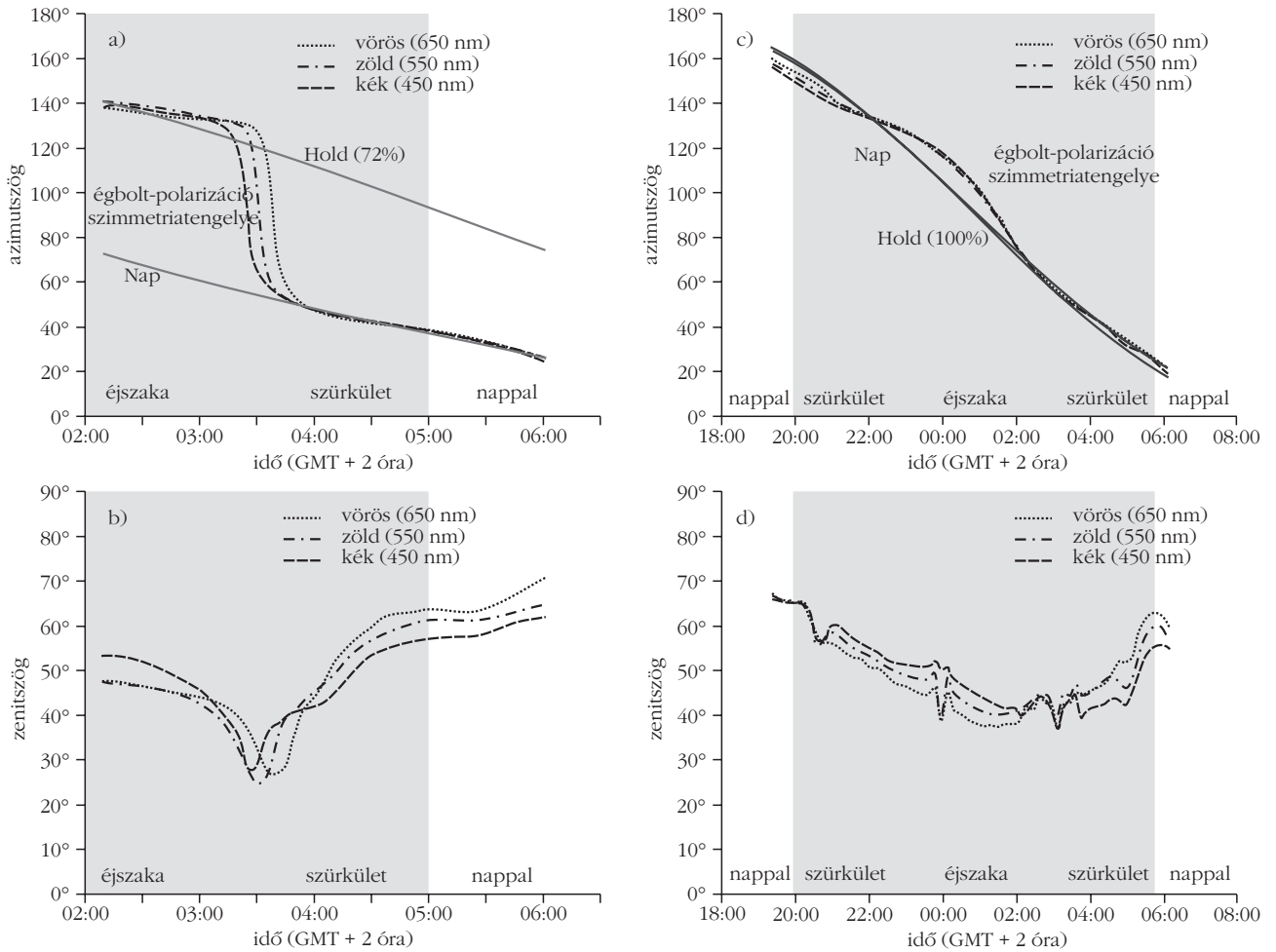
Mérési és számítási módszerek

A 180° látószögű égbolt-polarimetriai méréseinket az Estrato Kutató és Fejlesztő Kft. által épített képalkotó polariméterrel végeztük, amit a szombathelyi Gothard Observatórium egyik épületének tetejére telepítettünk ($47^\circ 15,481'$ É, $16^\circ 36,213'$ K). E műszernek 3 kamerája van (Imaging Source DFK41BU02, Németország), amelyek egy-egy halszemoptikával (FE185C046HA-1, Japán) és közvetlenül a kamerák CCD-lapjára elé helye-

zett lineáris polárszűrővel (Edmund Optics, 43-785, USA) rendelkeznek. A polárszűrők áteresztési iránya $100,27^\circ$, $45,39^\circ$ és $142,28^\circ$ szöget zár be a kamerák belső viszonyítási irányával az óramutató járásával megegyező irányban. A kamerák a lineáris polarimetriához szükséges polarizációs felvételeket azonos beállítások mellett készítették. Mivel a kamerák által látott égi objektumok a kamerák közti távolságokhoz képest igen távol helyezkednek el, ezért a parallaxishiba elhanyagolható mértékű. A kamerák kimenetén megjelenő nyers képeken a vörös, zöld és kék digitális intenzitásértékek a fényintenzitással egyenes arányban állnak. Mindhárom kamerában a halszemoptikák által alkotott, $4,6$ mm átmérőjű kör alakú kép vetül a $4,4$ mm \times 5 mm méretű CCD-érzékelőre, ezért e kép egy-egy vékony kórszelete alul és felül lemaradt.

A Nap és Hold azimut- és elevációs szögét csillagászati-földrajzi számításokkal határoztuk meg, számításba véve a légköri fénytörést is.

Az égbolt α polarizációs szög-mintázatának minden egyes képpontja a helyi meridiánhoz képesti rezgésirányát adja meg az ég adott pontjában. E mintázat antiszimmetrikus a szoláris-antiszoláris meridiánra



6. ábra. (a) A Nap és a Hold azimutszöge, valamint az égbolt $|\alpha - 90^\circ|$ -mintázatának szimmetriatengelye (ahol α az égboltfény polarizációszöge) az idő függvényében (nyári időszámítás, greenwichi világidő + 2 óra) képpalkotó polarimetriával mérve a spektrum vörös (650 nm), zöld (550 nm) és kék (450 nm) tartományában Szombathelyen ($47^\circ 15,481' \text{ É}$, $16^\circ 36,213' \text{ K}$) 2013. június 28-án, 72%-os holdfázis esetén. (b) Az lBa lunáris Babinet-pont (másnéven sAr szoláris Arago-pont) zenittől mért szögtávolsága az idő függvényében ugyanarra az észetes, mint (a). (c, d): Mint (a) és (b), 2013. április 25–26-án teliholdkor, a 2., 3. és 5.b-c ábrák szituációjával megegyezően.

nézve, azonban a szögértékből 90° -ot kivonva, majd abszolútértéket képezve kapjuk a már szimmetrizált α' -mintázatot minden képpontra:

$$\alpha' = |\alpha - 90^\circ|. \quad (1)$$

A szimmetrizált α' -mintázat szimmetriatengelyének irányát a képi momentumok segítségével határoztuk meg. Egy kép M_{jk} momentumait adott spektrális tartományban a következőképpen számítjuk:

$$M_{jk} = \iint f(x, y) x^j y^k dx dy, \quad (2)$$

ahol $f(x, y)$ az intenzitás értéke a kép (x, y) koordinátájú pontjában adott spektrális tartományban, M_{00} a kép össz-intenzitása, $M_{10}/M_{00} = x_c$ és $M_{01}/M_{00} = y_c$ pedig a kép középpontjának koordinátái. A kép centrális momentumainak definíciója:

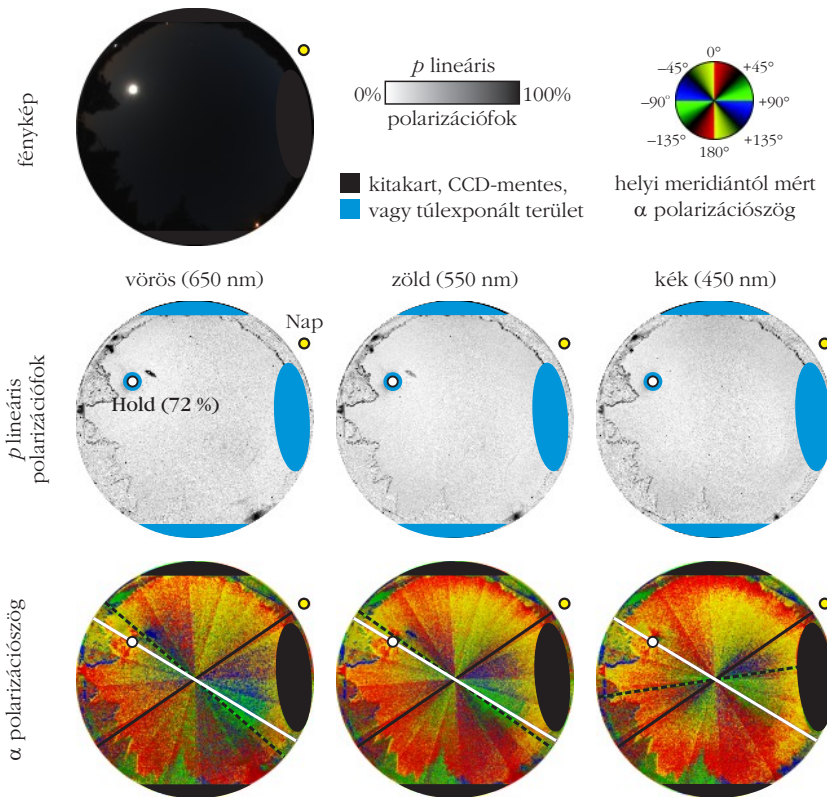
$$\mu_{jk} = \iint f(x, y) (x - x_c)^j (y - y_c)^k dx dy. \quad (3)$$

A szimmetrizált α' -mintázat szimmetriatengelyének irányát jellemző szög egy referenciáiránytól mérve:

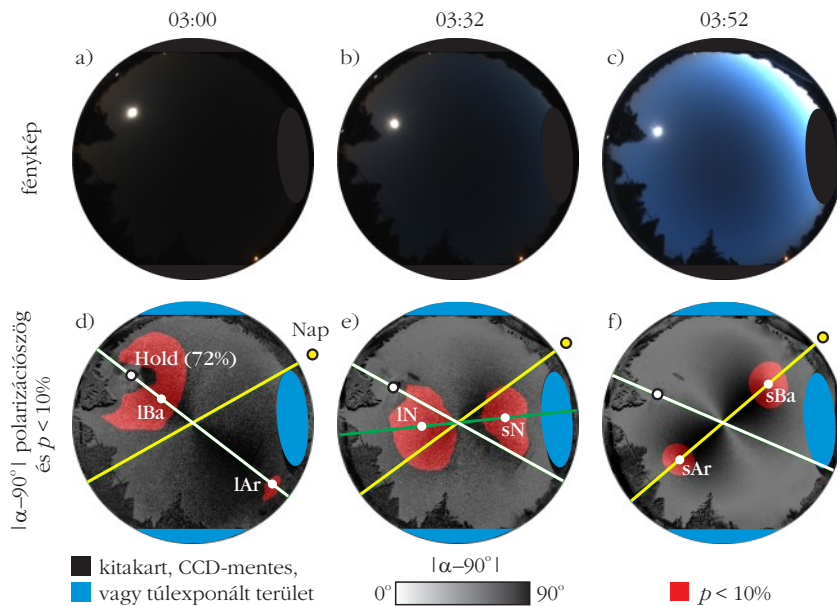
$$\theta = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{2\mu_{11}}{\mu_{20} - \mu_{02}} \right). \quad (4)$$

Az égbolt lineáris polarizációfok-mintázatán kiválasztottuk azon régiókat, amelyekben a p polarizációfok kisebb, mint a $p^* = 10\%$ küszöbérték. E küszöb alkalmas megválasztása esetén minden p -mintázaton csak két kis polarizációfokú tartomány adódott, amelyek középpontjaiban voltak a polarizálatlan ($p = 0\%$) neutrális pontok. E neutrális pontok helyét az azimut- és zenitszöggel jellemeztük.

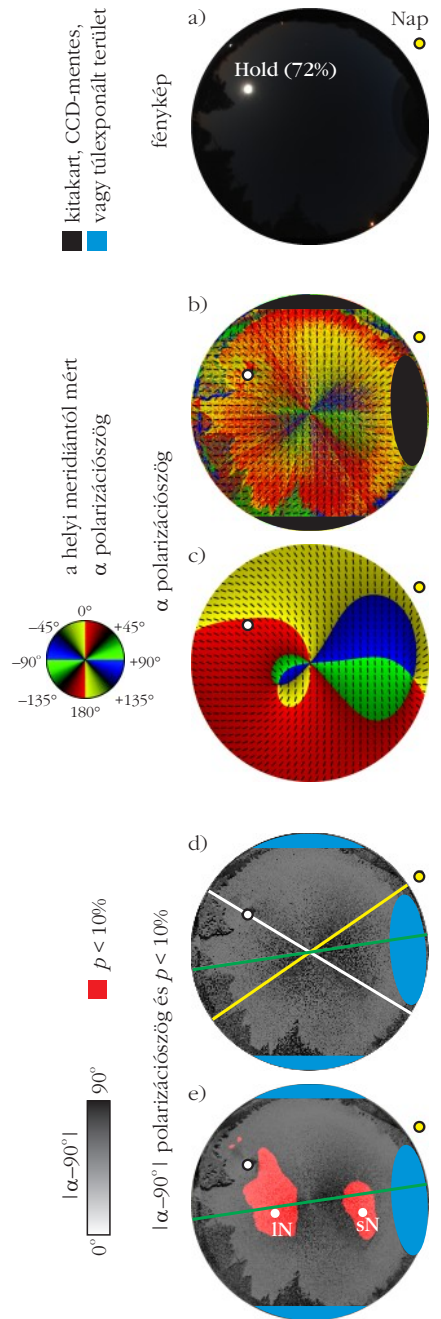
A Nap, illetve Hold által megvilágított égbolt közötti polarizációátmenet számítógépes modellezésének céljából kiszámítottuk e két égi fényforrás által létrehozott polarizációs mintázatok lineárkombinációját. A Nap és Hold adott állásai mellett a szórt égboltfény intenzitáseloszlását az egyszeres szóráson alapuló Rayleigh-modell alapján határoztuk meg [1], míg a polarizációfok és -szög mintázatait a Berry-modell [3] segítségével számítottuk. Adott Nap- és Hold-állás esetén az égbolt minden egyes pontjában meghatároztuk az $\mathbf{S} = (I, Q, U)$ Stokes-vektort az I in-



7. *ábra.* Tiszta égbolt 180° látószögű képalkotó képalkotó készített fényképe, valamint az égboltfény p lineáris polarizációfokának és a helyi meridiántól az óramutató járásával meg egyező irányban mért α polarizációs szögének mintázata a spektrum vörös (650 nm), zöld (550 nm) és kék (450 nm) tartományában 2013. június 28-án 03:25-kor, napkelte előtt Szombathelyen 72%-os holdfázis mellett. A horizont alatti Nap és a horizont fölötti Hold helyét sárga és fehér pontok jelzik. Az α -mintázaton fekete és fehér folytonos vonalak mutatják a szoláris-antiszoláris és lunáris-antilunáris meridiánokat, míg a szaggatott vonalak az $|\alpha-90^\circ|$ -mintázatok szimmetriatengelyét jelölik.



8. *ábra.* 2013. június 28-án napkelte előtt Szombathelyen 72%-os holdfázis mellett végzett mérések. (a, b, c) 03:00-kor, 03:32-kor és 03:52-kor készített fényképek. (d, e, f) Az ég $|\alpha-90^\circ|$ -mintázata a spektrum kék (450 nm) tartományában. A piros színű égboltterületeken az égboltfény p lineáris polarizációfoka $< 10\%$. A sárga és fehér vonalak a szoláris-antiszoláris és lunáris-antilunáris meridiánokat mutatják. A horizont alatti Nap és a horizont fölötti Hold helyét sárga és fehér pontok jelzik. sAr, sBa és sN, illetve lAr, lBa és lN: szoláris, illetve lunáris Arago-, Babinet- és neutrális pont. Zöld vonal: az $|\alpha-90^\circ|$ -mintázatok szimmetriatengelye.



9. *ábra.* (a) 2013. június 28-án 03:25-kor, 72%-os holdfázis mellett Szombathelyen készült égboltfénykép. (b) Az égboltfény α polarizációs szögének mintázata a spektrum kék (450 nm) tartományában. A fekete pálcikák az átlagos helyi polarizációirányt mutatják. (c) Szimulált α -mintázat $w = 1$ súlyozással, ami azt jelenti, hogy a szóró napfény és holdfény égboltpolarizációhoz való járuléka azonos. (d) Az ég $|\alpha-90^\circ|$ -mintázata a spektrum kék (450 nm) tartományában. A sárga és fehér vonalak a szoláris-antiszoláris és lunáris-antilunáris meridiánokat mutatják, a zöld vonal pedig az $|\alpha-90^\circ|$ -mintázatok szimmetriatengelyét jelöli. (e) Mint (d), ahol a piros szín azon égboltterületeket jelöli, ahol a p lineáris polarizációfok kisebb, mint 10%. sN, lN: szoláris és lunáris neutrális pont. A horizont alatti Nap és a horizont fölötti Hold helyét sárga és fehér pontok jelzik.

tenzitás, p lineáris polarizációfok és α polarizációszög mért értékeiből [2]. A Naphoz és Holdhoz tartozó Stokes-vektor-mintázatokat komponensenként összeadtuk egy w súlyfaktor figyelembevételével, ami azt jelenti, hogy a Hold járuléka a Napénak w -szerese (például $w = 1$ esetén a Nap és Hold szórt fénye azonos mértékben járul hozzá az égbolt-polarizációhoz). Végül az eredő Stokes-vektor-mintázatok I , p és α összetevőit határoztuk meg, és színekódolással ábrázoltuk.

Eredmények

Az 1–4. ábrák a tiszta égbolt fényképét mutatják a p lineáris polarizációfok és az α polarizációszög mintázataival együtt a spektrum kék (450 nm) tartományában napnyugta után (1., 2. ábra) és napkelte előtt (3., 4. ábra) különböző napokon, amikor a holdkorong 78%-a (1. ábra), 100%-a (2., 3. ábra) és 72%-a (4. ábra) napsütöttek látszott. Amíg az égen a szórt napfény dominált (1.a ábra), addig a szoláris Arago (sAr) és Babinet (sBa) polarizálatlan (neutrális) pontok jelentek meg az égbolt-polarizáció p -mintázataiban (1.b ábra). Amikor a szórt holdfény volt domináns (1.g ábra), akkor a lunáris Babinet (lBa) és Brewster (lBr) neutrális pontok voltak megfigyelhetők (1.b ábra). Az α -mintázatokban e neutrális pontok ott helyezkednek el, ahol az α polarizációszög hirtelen 90° -ot változik egy meridián mentén (1.c, 1.i ábra). E neutrális pontok mindig a szoláris-antiszoláris (1.b–c ábra), illetve a lunáris-antilunáris (1.b–i ábra) meridián mentén helyezkednek el, ha a szórt napfény (1.a ábra), illetve holdfény (1.g ábra) dominál. Ha azonban a szórt napfény és holdfény hasonló intenzitású (1.d ábra), akkor az sN szoláris (Naphoz közelebbi) és az lN lunáris (Holdhoz közelebbi) neutrális pontok a szoláris-antiszoláris és a lunáris-antilunáris meridiánon kívül helyezkednek el (1.e–f ábra).

A 2. ábrán jól látható, hogy teliholdkor a szoláris sAr és sBa, valamint a lunáris lAr és lBa neutrális pontok rendre a szoláris-antiszoláris és a lunáris-antilunáris meridián mentén helyezkednek el. Az átmeneti helyzetben, amikor a szórt napfény és holdfény közel egyforma erősségű (2.d ábra), a neutrális pontok elnevezése kettős: a Naphoz közelebbi neutrális pontot egyaránt hívhatjuk szoláris Babinet- vagy lunáris Arago-pontnak, míg a Holdhoz közelebbit nevezhetjük lunáris Babinet- vagy szoláris Arago-pontnak (2.e–f ábra) is.

A 3. ábrán látható, hogy teliholdas napkelte előtt a napfény és holdfény által megvilágított égbolt polarizációs mintázatai közti átmenet hasonló a teliholdas napnyugta után bekövetkező átmenethez (2. ábra), csupán a változások időrendje fordított. A 4. ábra szerinti részleges (72%) hold idején az égbolt-polarizáció hasonlóan megy át a napfény általi megvilágításból a holdfény általi megvilágításba, mint napnyugta után (1. ábra) részleges holdkor (78%), csupán a változások időrendje fordított.

Az 5. ábra az égboltfény p_{\max} maximális polarizációfokát mutatja a spektrum zöld (550 nm) tartományában az idő függvényében az 1–4. ábrákon látható négy különböző alkonyati szituációra. Az 5.a ábra szerint napnyugta előtt a szórt napfény által létrehozott p_{\max} jelentősen nagyobb, mint a szórt holdfény keltette maximális polarizációfok, de e két p_{\max} -érték fokozatosan csökken és összeolvad napnyugta után. Ugyanez a jelenség játszódik le napkeltekor is, csak fordított sorrendben (5.d ábra): napkelte előtt a szórt nap- és holdfény által keltett p_{\max} -értékek majdnem azonosak, és napkelte után szétválnak úgy, hogy a Nap nagyobb p_{\max} -ot hoz létre, mint a Hold.

Teliholdkor a szórt nap- és holdfény által keltett p_{\max} -értékek az égbolt ugyanazon területén helyezkednek el. Amint az 5.c ábrán látható, p_{\max} az idővel kissé csökken egészen napkelteig, azután napkelte után gyorsan növekszik a maximális 61%-ig. Az 5.b ábrán ugyanez látható fordított időbeli sorrendben: p_{\max} röviddel napnyugta előtt a legnagyobb (63%), azután gyorsan csökken. Az 5.b ábrán p_{\max} napnyugta után ér el egy újabb, kisebb csúcspontot. Ez utóbbi azonban egy kausztikának köszönhető műtermék, amit a képalakító polariméter műanyag védőkupolájáról történő fényvisszaverődés okozott. Az 5.b ábrán szaggatott vonal jelöli az elméleti várakozást. Mind részleges hold, mind telihold idején p_{\max} közvetlenül napkelte előtt vagy napnyugta után minimális (5. ábra).

A 6.a ábra a Nap, a Hold és az égbolt-polarizáció szimmetriatengelyének azimutszögét mutatja az idő függvényében a spektrum vörös (650 nm), zöld (550 nm) és kék (450 nm) tartományában, amikor a holdkorong 72%-a napsütötte a 4. és 5.d ábrák szituációira. A 6.a ábrán látható, amint a lunáris lAr és lBa, majd a szoláris sN és lunáris lN, később pedig a szoláris sAr és sBa neutrális pontokon átmenő meridiánnal egybeeső szimmetriatengely a lunáris meridiántól a szoláris meridiánig fordult. Amikor az égen a szórt holdfény dominált (4.a–c ábra), akkor az égbolt-polarizáció szimmetriatengelye egybeesett a lunáris-antilunáris meridiánnal. Ha a szórt napfény volt domináns (4.g–i ábra), akkor a polarizáció szimmetriatengelye a szoláris-antiszoláris meridiánnal egyezett meg. Mikor pedig a szórt holdfény és napfény hasonló intenzitású volt (4.d–f ábra), akkor a szimmetriatengely iránya napkelte előtt a lunáris-antilunáris meridiánból váltott át a szoláris-antiszoláris meridiánba (6.a ábra) és fordítva: napnyugta után a szoláris-antiszoláris meridiánból váltott át a lunáris-antilunáris meridiánba. E váltást megelőzően a szimmetriatengely kissé lemaradt a lunáris-antilunáris meridiántól: az előbbi azimutszöge kicsit nagyobb volt, mint az utóbbié az átmeneti időszakban (6.a ábra). A szimmetriatengely lunáris-antilunáris és szoláris-antiszoláris meridián közti átmenete egy enyhe diszperzióval rendelkezett: az átmenet először a kék, azután a zöld, végül a vörös spektrális tartományban történt meg (6.a ábra).

A 6.b ábra az lBa lunáris Babinet neutrális pont θ_{Ba} zenitszögét mutatja az idő függvényében ugyanazon szituációra, mint a 6.a ábrán. Az lBa lunáris Babinet-

pont mindhárom spektrális tartományban először közeledett a zenithez, majd fokozatosan távolodott attól. A neutrális pontok az α polarizációs szög mintázatában szereplő zöld-kék nyolcas alakzat csúcsában helyezkednek el. A *6.b ábra* szerint e nyolcas alakzat sugárirányú kiterjedése először csökkent, majd növekedett az idővel, amint a *4.c*, *4.f*, *4.i ábrákon* is látható. Alkonyatkor és napközben az lBa neutrális pont θ_{Ba} zenitszöge növekedett a hullámhosszal, továbbá θ_{Ba} először a kék, majd a zöld, végül a vörös spektrális tartományban érte el a minimumát (*6.b ábra*).

A *6.c-d ábra* ugyanazt mutatja, mint a *6.a-b*, csak teliholdkor (e szituációk ugyanazok, mint a *2.*, *3.* és *5.b-c ábrákéi*). A *6.c ábra* szerint teliholdkor az égbolt-polarizáció szimmetriatengelye gyakorlatilag megegyezik az egybeeső szoláris-antiszoláris és lunáris-antilunáris meridiánokkal. Éjszaka és késő alkonyatkor e szimmetriatengely kissé eltér az említett meridiánoktól, de ezen eltérés az égboltfény kis intenzitása által okozott zaj miatt is előfordulhat, és az alkonyat végéhez közeledve a szórt napfény erősödésével gyakorlatilag el is tűnik (*6.c ábra*). A *6.d ábra* szerint teliholdkor az lBa lunáris Babinet-pont θ_{Ba} zenitszögének diszperziója és időbeli változása hasonló ahhoz, amit részleges hold (72%) idején figyeltünk meg (*6.b ábra*).

A *7. ábrán* az égbolt-polarizáció szimmetriatengelyének diszperziója látható az α polarizációs szög-mintázaton napkelte előtt, részleges hold (72%) esetén: A vörös (650 nm) és zöld (550 nm) spektrális tartományokban e szimmetriatengely közel van a lunáris-antilunáris meridiánhoz, míg a kékben (450 nm) már a lunáris-antilunáris és a szoláris-antiszoláris meridiánok között helyezkedik el. E szituáció a *6.a ábrán* is előfordul.

A *8. ábrán* három különböző időpontban azon égboltterületek láthatók, ahol $p < 10\%$ a kék (450 nm) spektrális tartományban részleges hold (72%) esetén, amely szituáció azonos a *4.* és *5.d ábrákéival*. A *8.d ábrán* az lBa lunáris Babinet és az lAr lunáris Arago neutrális pontok a lunáris-antilunáris meridián mentén helyezkednek el, az égbolt-polarizáció szimmetriatengelye pedig egybeesik a lunáris-antilunáris meridiánnal. A *8.e ábrán* az sN szoláris neutrális pont és az lN lunáris neutrális pont az égbolt-polarizáció szimmetriatengelyén van. A *8.f ábrán* az sBa szoláris Babinet és az sAr szoláris Arago neutrális pont a szoláris-antiszoláris meridián mentén található, és az égbolt-polarizáció szimmetriatengelye megegyezik a szoláris-antiszoláris meridiánnal.

A *9.b* és *9.c ábrák* az égboltfény α polarizációs szögének a spektrum kék (450 nm) tartományában mért és szimulált mintázatait mutatják részleges hold (72%) esetén, amely szituációk a *4.* és *5.d ábrákéival* egyezők. A szimuláció $w = 1$ súlyozással történt, azaz amikor a szórt holdfény és napfény égbolt-polarizációhoz való járuléka azonos volt. Bár a mért α -mintázat zajos, kvalitatíve hasonló a szimulált α -mintázathoz. A *9.d ábra* azt a szituációt mutatja, mikor az égbolt-polarizáció szimmetriatengelye a szoláris-antiszo-

láris és a lunáris-antilunáris meridián közötti. A *9.e ábrán* a szoláris sN és lunáris lN neutrális pontok a $p < 10\%$ polarizációfokú égboltterületeken belül helyezkednek el az égbolt-polarizáció szimmetriatengelye mentén.

Az eredmények értelmezése és biológiai vonatkozásai

A földfelszínről nézve a tiszta égbolt egyetlen domináns égi fényforrás (a Nap vagy a Hold) esetén egyidejűleg két polarizálatlan (neutrális) ponttal rendelkezik [1, 2]. Alacsony napmagasság mellett (míg a Nap a horizonttól mérve 25° - 30° alatt jár) 25° - 30° -kal a Nap fölött a szoláris Babinet-pont és 25° - 30° -kal az anti-Nap fölött a szoláris Arago-pont jelenik meg. Mikor a Nap 25° - 30° fölött jár a horizonttól mérve, akkor a Nap fölötti szoláris Babinet-pont mellett a 20° - 25° -kal a Nap alatt található szoláris Brewster-pont van jelen az égen. 800 méternél nagyobb földfelszín fölötti magasságokból a légkör negyedik szoláris neutrális pontja is megfigyelhető 20° - 30° -kal az anti-Nap alatt [1]. A lunáris neutrális pontok éjszaka figyelhetők meg, ha a Hold a horizont fölött tartózkodik [2]. A neutrális pontok rendszeresen mindig a szoláris-antiszoláris, lunáris-antilunáris meridián mentén helyezkednek el, továbbá a Naptól, Holdtól, valamint az anti-Naptól, anti-Holdtól való szögtávolságuk a Nap, Hold magasságától, a légköri aeroszol-koncentrációtól és a földfelszíni reflexióktól függ [1, 2].

Részleges holdfázis idején a szürkületi ég szoláris sN és lunáris lN neutrális pontjai (*1.*, *4.*, *8.e*, *9.c* és *9.e ábrák*) nem a szoláris-antiszoláris vagy lunáris-antilunáris meridián mentén helyezkednek el, amikor a szórt holdfény és napfény versenyez egymással a hold- és napsütötte légkörben, a napkeltét megelőzően vagy közvetlenül napnyugta után. Az említett meridiánokon kívül eső sN és lN neutrális pontok szürkületi égen való előfordulása a részleges holdfázisok a légkörben lezajló összetett, többszörös fényszórásai események eredménye, amikor a szórt napfény és holdfény intenzitása közel azonos nagyságrendű.

Azon eredményünk, hogy a szürkületi égről érkező fény polarizációfokának p_{max} maximuma csökken az átmeneti periódusban (*5. ábra*), szintén a napfény és holdfény légkörbeli többszörös szóródásával magyarázható. Mikor a holdfény és napfény egymással verseng, a két különböző fényforrás (Hold és Nap) egyaránt hozzájárul a légköri fényszóródáshoz, ami növeli a többszörös szórás égbolt-polarizációra gyakorolt hatását. A többszörös szórás csökkenti az égboltfény polarizációfokát [1]. A többszörösen szórt fény polarizációiránya nem mindig merőleges a szórás síkjára, amit a domináns égi fényforrás (Nap vagy Hold), az észlelő helye és a megfigyelt égi pont határoz meg. Amikor a polarizációirány párhuzamos a szórás síkkal, akkor negatívan (vagy rendellenesen) polarizált fényről beszélünk, ha pedig a polarizációirány merőleges a szórás síkra, akkor pozitívan (vagy rendszeren)

polarizált fényről van szó [1]. A többszörös szórás negatívan poláros fényt kelt a túlnyomórészt pozitívan poláros légkörhöz. A rendes (Arago, Babinet, Brewster és a negyedik) neutrális pontok ott helyezkednek el, ahol a pozitívan és negatívan poláros fény intenzitása egyenlő, a polarizációs szög pedig 90° -ot ugrik, amikor áthaladunk egy neutrális ponton annak meridiánján keresztül. Így tehát a neutrális pontok léte a többszörös szórás egyik legfontosabb következménye. Szürkületkor, amikor két hozzávetőlegesen azonos intenzitású égi fényforrás, a Nap és a Hold is jelen van az égen, a polarizációs mintázatok e két forrás kölcsönhatásától függenek, és részleges hold esetén kialakul a szürkületi ég szoláris-antiszoláris és lunáris-antilunáris meridiánjain kívüli két közbülső sN és IN neutrális pontja (9.c, 9.e ábra).

Részleges hold mellett a szürkületi égen megjelenő, szoláris-antiszoláris és lunáris-antilunáris meridiánokon kívüli sN és IN neutrális pontokat korábban még senki sem figyelte meg. Ennek egyik oka, hogy egy ilyen megfigyeléshez a teljes égboltot vizsgálni képes képalakító polariméter szükséges. Ráadásul, ezen átmeneti neutrális pontok csak egy viszonylag rövid ideig (alacsony vagy közepes földrajzi szélességeken mindössze 10-20 percig) figyelhetők meg a részleges hold melletti szürkületkor (6.a ábra). Ezért sokkal kisebb valószínűséggel észlelhetők ezen átmeneti neutrális pontok a nappal és éjjel egyaránt akár 8-10 órán át is látható rendes neutrális pontokhoz képest.

Telihold idején az ég két neutrális pontja mindig a szoláris-antiszoláris és lunáris-antilunáris meridiánok mentén van a szürkületi polarizációátmenet idején. Ennek oka, hogy teliholdkor a Nap és a Hold szintén a szoláris/lunáris-antiszoláris/antilunáris meridián mentén helyezkedik el, és így a lunáris Arago-pont egybeesik a szoláris Babinet-ponttal, a lunáris Babinet-pont pedig egybeesik a szoláris Arago-ponttal.

A holdfényes szürkületi égbolt fönt említett polarizációátmenete hatással lehet a következő polarizáció-érzékeny, szürkületkor vagy éjjel aktív állatok térbeli tájékozódására, továbbá a viking hajósok hipotetikus égbolt-polarizációs navigációjára.

- A *Scarabaeus zambesianus* galacsinhajtó bogarak a galacsingolyójukat a központi trágyakupactól egy egyenes mentén görgetik sugár irányban kifelé, hogy minél hamarabb eltávolodhassanak a kupactól, ahol sok fajtársuk tolong a lárvák fejlődéséhez szükséges, értékes nyersanyagra vadászva, miközben gyakran egymástól lopják el a már kész galacsint. A galacsint egyenes mentén történő görgetése során a nappal aktív galacsinhajtók a Nap iránya alapján tartják a galacsint egyenes pályáját, amikor pedig a Napot felhők takarják, akkor a napsütötte égbolt polarizációs mintázatából következtetik ki a Nap irányát [2]. Naplemente után, amikor a Hold nem látható, az éjjel aktív galacsinhajtók tájékozódása kizárólag a szürkületi égbolt szórt napfény által keltett polarizációs mintázatára épül. Amikor a Hold fölkel, a galacsinhajtók navigációja a szórt holdfény által létrehozott polarizációs mintázat alapján folytatódik. E poláros szórt

holdfény intenzitása fokozatosan csökken, ahogy a holdkorong Nap által megvilágított hányada csökken. Még a holdsarló körüli rendkívül kis intenzitású égbolt-polarizációs mintázat is elegendő az éjszaka aktív galacsinhajtóknak ahhoz, hogy egyenes mentén görögessék a galacsint.

- A szürkületben és éjjel aktív *Megalopta genalis* trópusi méh a panamai erdőkből 60-45 perccel napkelte előtt repül ki a fészkekből és 15-30 percig kutat táplálék után, mielőtt visszatér oda [8]. Napnyugtakor ugyanezen viselkedés időben fordítottan jelentkezik. E méhfaj szemei szélsőségesen kis intenzitású fény mellett látásra specializálódtak és vélhetően képesek érzékelni az égbolt polarizációját is. Feltételezhető, hogy e méhek az égbolt polarizációja alapján is tudnak tájékozódni a szürkületi/éjjeli táplálékszerző útjaik során.

- Az éjjel aktív ausztrál *Myrmecia pyriformis* hangya is használja a poláros égboltfényt szürkületi iránytűként [9].

- Szürkületkor a költöző madaraknak is szüksége lehet az égbolt-polarizációra ahhoz, hogy a sötétben történő repülésükhöz beállítsák belső mágneses iránytűjüket, hiszen a velük végzett tájékozódási kísérletek során eltévedtek, amikor csak depolarizált égi optikai (intenzitás/szín) mintázatokat láthattak [2].

- Tájékozódásuk és navigálásuk során egyes szürkületkor és/vagy éjszaka aktív halak és vízi rákok is használják az égbolt polarizációs mintázatát a sima vízfelszín Snellius-ablakán keresztül érzékelve azt [2].

- Széles körben elfogadott és gyakran idézett hipotézis, hogy a viking hajósok a tengeri útjaik alatt képesek lehettek a felhők vagy a horizont által eltakart Nap helyét megállapítani egy napkőnek nevezett rejtélyes kristály (például kalcit, turmalin vagy kordierit) segítségével [2]. Napsütésben (mágneses iránytű hiányában) egy napiránytűvel tájékozódtak, ám amikor a Nap nem látszott, akkor annak égbolton elfoglalt helyét az égbolt-polarizáció elemzésével következtették ki egy polárszűrőként működő napkővel.

A fönti állati és emberi tájékozódási/navigálási típusok a szoláris-antiszoláris vagy a lunáris-antilunáris meridián ismeretén alapulnak, ami egybeesik a napsütötte vagy holdvilágos ég polarizációs mintázatának szimmetriatengelyével. Ám ahogyan cikkünkben megmutattuk, közepes (47°) földrajzi szélességek mentén részleges hold mellett szürkületkor van egy 10-20 perces átmeneti időszak, amikor (i) az égboltfény p_{\max} polarizációfoka csökken, (ii) a folytonosan változó helyű két neutrális pont nem a szoláris-antiszoláris vagy lunáris-antilunáris meridián mentén helyezkedik el, és (iii) az égbolt polarizációs mintázatából sem a szoláris-antiszoláris, sem a lunáris-antilunáris meridián nem határozható meg. Következésképpen az égbolt-polarizációra épülő, fönt említett állati tájékozódás és viking navigáció lehetetlenné válhat e szürkületi átmeneti időszakban, aminek időtartama jelentősen növekszik magasabb földrajzi szélességeken, amikor a Nap és Hold égi útvonala hosszú időn át a horizonthoz közel halad, és így a szürkületi periódus akár órákig, napokig is tarthat.

Habár a szóban forgó szürkületi átmeneti időszak mindössze 10-20 perc az alacsony és közepes földrajzi szélességek mentén, az égbolt-polarizáció ez alatti anomáliájából eredő tájékozódási zavart nem szabad alábecsülni. Mindezt jól szemlélteti például az a megfigyelés, hogy a táplálékszerző, viráglátogató háziméhek (*Apis mellifera*) jelentős hányada nem tért vissza a méhkasba egy teljes napfogyatkozás csupán 2 perces totalitása után [2, 4]. Nemcsak az égboltfény intenzitásának és színének, hanem p polarizációfokának és α polarizációszögének mintázata is drasztikus változáson esik át teljes napfogyatkozások totalitásakor a jelentősen megváltozott megvilágítási viszonyok miatt [2]. Napfogyatkozáskor az égboltfény p polarizációfoka általában jelentősen csökken, és ha e csökkenés azon p^* küszöbérték alá esik, ami egy adott faj égbolt-polarizáció alapján történő navigációjához szükséges polarizációérzékelés határa, akkor az állat megzavarodhat, eltévedhet. Továbbá, még ha $p > p^*$ a totalitás alatt, az ekkor megfigyelhető α -mintázat teljesen eltér a normál égboltétól [2]. Így a polarizációérzékelő állatok elkerülhetetlenül eltévednek, amikor a megváltozott α -mintázat alapján próbálnak tájékozódni. Egy javaslat szerint [2] a háziméhek teljes napfogyatkozás alatt megfigyelt tájékozódási zavarainak, valamint a kaptár 10-15%-át érintő eltévedésének [4] egyik oka az égbolt totalitáskor tapasztalható, természetellenes polarizációs mintázata lehet. A virágokhoz való kirepülés előtt a dolgozó háziméhek a kaptárban pontosan annyi táplálékot (mézet) vesznek magukhoz, mint amennyi a virághoz való elrepülésig és vissza elegendő energiaforrást jelent számukra. E távolságinformáció a hírvivő méh kaptárban lejtett megfelelő táncból következtethető ki. Ha a nektár- és virágporgyűjtő méh eltéved (például az égbolt teljes napfogyatkozás totalitása alatt kialakuló rendellenes polarizációs mintázata következtében, vagy az égbolt-polarizáció szimmetriatengelyének szürkületkori anomális irányulása miatt), akkor „üzemanyaga” azelőtt elfogyhat, mielőtt visszatalál a kaptárhoz. Ekkor az eltévedt méh menthetetlenül elpusztul, mivel „üzemanyag” hiányában nem tud visszarepülni vagy visszamászni a kaptárba.

Egy másik esetet, ahol rovarok tévedtek el a rendellenes égbolt-polarizációs mintázat miatt, kanadai kutatók írtak le [5]. Az erdőtüzből eredően füstös égbolt polarizációs mintázata is többé-kevésbé megvál-

tozik a normál égbolthoz képest [2]. Főként az égboltfény p polarizációfoka csökken drasztikusan a napfény füstszemcséken történő többszörös szóródásának depolarizáló hatása következtében. Égbolt-polarizációs méréseink [2] magyarázattal szolgáltak a 2003 augusztusi erdőtüzes időszakban a kanadai Brit Columbiában megfigyelt repülve vándorló rovarok füstös égbolt alatti eltévedésére [5], aminek fő oka az égboltfény polarizációfokának az erdőtüzek füstje miatti csökkenése volt.

A legnagyobb probléma, amivel a polarizáció-érzékeny állatok szembesülnek, hogy az égbolt-polarizáció nyújtotta információ, a polarizációs mintázat szimmetriatengelye részleges hold melletti szürkület idején folyamatosan és a Nap/Hold járásához képest gyorsan elfordul, miáltal kérdéses, hogy miként képesek céljukat elérni, ha közben égi polarizációs iránytűjük mindig másfelé mutat. E szürkületi polarizáció-átmenetes időszak könnyen okozhatja az érintett állatok eltévedését.

Irodalom

1. Coulson, K. L.: *Polarization and Intensity of Light in the Atmosphere*. A Deepak Publishing, Hampton, Virginia, USA, 1988.
2. Horváth G. (editor): *Polarized Light and Polarization Vision in Animal Sciences. Springer Series in Vision Research*, volume 2 (2014) (series editors: Shaun P. Collin, Justin N. Marshall) Springer, Heidelberg, Berlin, Dordrecht, London, New York
3. Berry M. V., Dennis M. R., Lee R. L.: Polarization singularities in the clear sky. *New Journal of Physics* 6 (2004) 162.
4. Baldavári L.: Méhek viselkedésének változása az 1999. augusztus 11-i teljes napfogyatkozás hatására egy méhészetben. *Állattani Közlemények* 86 (2001) 137–143.
5. Johnson D. L., Naylor D., Scudder G.: Red sky in day, bugs go astray. *Annual Meeting of the Canadian Association of Geographers*, Western Division, Lethbridge, Alberta, Canada, 12 March 2005, Abstracts, 145.
6. Cronin T. W., Warrant E. J., Greiner B.: Celestial polarization patterns during twilight. *Applied Optics* 45 (2006) 5582–5589.
7. Barta A., Farkas A., Száz D., Egri Á., Barta P., Kovács J., Csák B., Jankovics I., Szabó Gy., Horváth G.: Polarization transition between sunlit and moonlit skies with possible implications for animal orientation and Viking navigation: anomalous celestial twilight polarization at partial moon. *Applied Optics* 53 (2014) 5193–5204 + cover picture + 9 supplementary video clips.
8. Warrant E. J., Kelber A., Gislen A., Greiner B., Ribi W., Wcislo W.: Nocturnal vision and landmark orientation in a tropical halictid bee. *Current Biology* 14 (2004) 1309–1318.
9. Reid S. F., Narendra A., Hemmi J. M., Zeil J.: Polarized skylight and the landmark panorama provide night-active bull ants with compass information during route following. *Journal of Experimental Biology* 214 (2011) 363–370.

SZÁMÍTUNK RÁD, LÉGY



A FIZIKA BARÁTJA!

Támogasd adód 1%-ával az Eötvös Társulatot!

Adószámunk: 19815644-2-41

