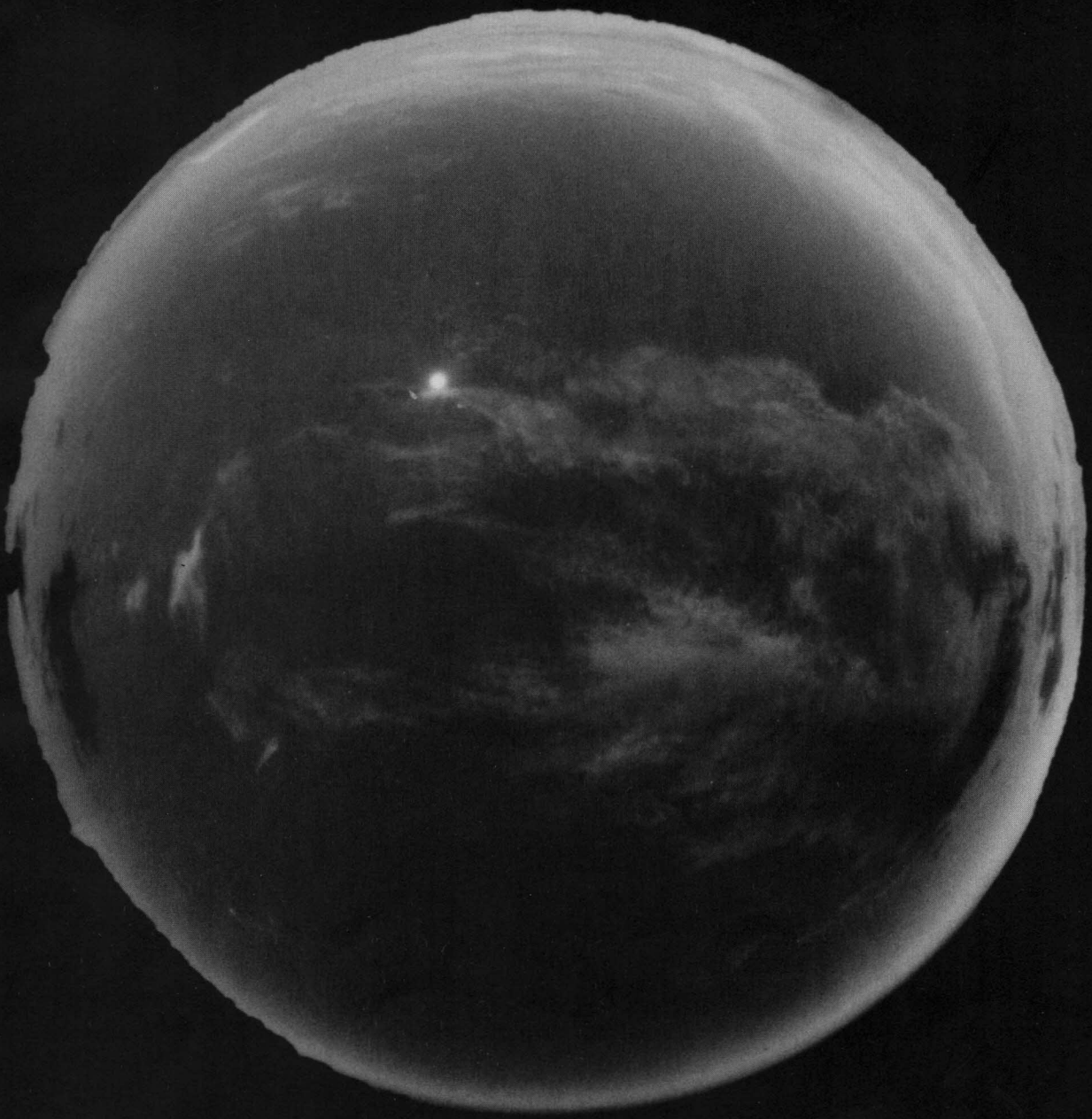
fizikai szemle



2001/8

A Magyar Tudományos Akadémia Fizikai Tudományok Osztálya, az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, a Magyar Biofizikai Társaság és az Oktatási Minisztérium folyóirata

Főszerkesztők:

Berényi Dénes
Marx György (vezető)
Pál Lénárd

Szerkesztő:

Turiné Frank Zsuzsa

Műszaki szerkesztő:

Kármán Tamás

A lap e-mail címe:

fizszem.elft@mtesz.hu

A címlapon:

Az égbolt 1999. augusztus 11-én a teljes napfogyatkozás alatt. A fénykép 180°-os látószögű halszemoptikával készült Kunfehértón. A legfényesebb fehér folt a Hold által eltakart Nap koronája.

TARTALOM

Horváth Gábor, Gál József, Pomozi István, Kriska György, Rüdiger Webner: Poláros pillantás az égre teljes napfogyatkozáskor 229
Király Péter: Szoláris, helioszférikus és kozmikus részecskesugárzás 238
Kasztovszky Zsolt: Természetes atomreaktorok Közép-Afrikában 245
Kerkápoly Anikó, Vajda Nóra, Zagyvai Péter: A csernobili atomerőmű-baleset következtében szennyezett környezeti minták 247
Jéki László: Fizika a színpadon II. 250
Szent-Györgyi Albert – falak nélkül... (Millenniumi mesék) 251
Náray Zsoltné Ziegler Mária, 1927–2001 *(Király Péter)* 254
Huszka Ernőné Fábián Ilona, 1907–2001 255
Fogarassy Bálint, 1932–2001 *(Tichy Géza)* 255
TÁVOLSÁGI BESZÉLGETÉS
Kvarkok és galaxisok – beszélgetés Kunszt Zoltánnal *(M. Gy.)* 256
A FIZIKA TANÍTÁSA
Sebestyén Dorottya: Miért fontos a fizika a 21. század mérnökei számára? 257
Szabó Tímea, Hadházy Tibor, Szabó Árpád: Még egyszer a fizikaoktatás helyzetéről 259
Lánczos Kornél megyei fizikaverseny *(Theisz György)* 260
Magyar középiskolai tanárok a CERN-ben *(Mester András, Ujvári Sándor)* 260
TÁRSULATI ÉLET
Az Eötvös Társulat évi rendes küldöttközgyűlése 261
VÉLEMÉNYEK
Zolnai László: Tudománymetria és intézeti kollaboráció 264
ESEMÉNYEK 264
KÖNYVESPOLC 264

G. Horváth, J. Gál, I. Pomozi, G. Kriska, R. Webner: Skylight polarization observation during a total solar eclipse
P. Király: Corpuscular radiations of solar, heliospherical and cosmical origin
Zs. Kasztovszky: Natural nuclear reactors in Central Africa
A. Kerkápoly, N. Vajda, P. Zagyvai: Environmental probes contaminated due to the Chernobyl accident
L. Jéki: Physics on the theater stage II.
Albert Szent-Györgyi – glimpses in a Hungarian TV memorial series
Mária Náray-Ziegler, 1927–2001 *(P. Király)*
Ilona Huszka-Fábián 1907–2001
Bálint Fogarassy 1932–2001 *(G. Tichy)*
LONG-DISTANCE CALLS
Quarks and galaxies – G. Marx' talk with Z. Kunszt
TEACHING PHYSICS
D. Sebestyén: Physics – an important requisite for XXI. century engineering work
T. Szabó, T. Hadházy, Á. Szabó: One more comment concerning the teaching of physics
The C. Lanczos physics competition *(G. Theisz)*
Hungarian secondary school teachers' visit to CERN *(A. Mester, S. Ujvári)*
NEWS OF THE PHYSICAL SOCIETY, OPINIONS, EVENTS, BOOKS

G. Horváth, J. Gál, I. Pomozi, G. Kriska, R. Webner: Polarisationsmessungen am Himmel während einer totalen Sonnenfinsternis
P. Király: Korpuskulare Strahlungen aus Sonne, Heliosphäre und dem Weltall
Zs. Kasztovszky: Natürliche Atomreaktoren in Zentralafrika
A. Kerkápoly, N. Vajda, P. Zagyvai: Umweltproben mit Verseuchung durch das Tschernobyl-Debakel
L. Jéki: Die Physik auf der Bühne II.
Albert Szent-Györgyi – Episoden im ungarischen TV-Programm
Mária Náray-Ziegler, 1927–2001 *(P. Király)*
Ilona Huszka-Fábián 1907–2001
Bálint Fogarassy 1932–2001 *(G. Tichy)*
FERNGESPRÄCHE
Quarks und Galaxien – G. Marx' Gespräch mit Z. Kunszt
PHYSIKUNTERRICHT
D. Sebestyén: Physik – unentbehrliche Grundlage der Ingenieur arbeit im XXI. Jahrhundert
T. Szabó, T. Hadházy, Á. Szabó: Nochmals zur Lage des Physikunterrichts
Der C. Lanczos-Physikwettbewerb *(G. Theisz)*
Besuch ungarischer Mittelschul-Physiklehrer im CERN *(A. Mester, S. Ujvári)*
AUS DEM GESELLSCHAFTSLEBEN, MEINUNGSÄUSSERUNGEN, EREIGNISSE, BÜCHER

Г. Хорват, Й. Галь, И. Помози, Г. Кришка, Р. Венер: Поляризационные наблюдения на небе во время полного солнечного затмения
П. Кирай: Корпускулярные излучения из солнца, из гелиосферы и из космоса
Ж. Кастовский: Естественные ядерные реакторы в центральной Африке
А. Кэркаполь, Н. Вайда, П. Зальваи: Пробы из окружающей среды, загрязненные вследствие чернобыльской аварии
Л. Ёки: Пьесы о физике II.
Алберт Сент-Дьердьи – из жизни крупного ученого
Мариа Нараи-Зиглер, 1927–2001 *(П. Кирай)*
Илона Гуска-Фабиян 1907–2001
Балинт Фогараши 1932–2001 *(Г. Тихи)*
ЗАГРАНИЧНЫЕ РАЗГОВОРЫ
Кварки и галактики – разговор Г. Маркса с З. Кунст
ОБУЧЕНИЕ ФИЗИКЕ
Д. Шебештьен: Важность физики для инженера XXI. века
Т. Сабо, Т. Халхази, А. Сабо: Ещё раз об обучении физике
Физический конкурс им. К. Ланцоша *(Г. Тейс)*
Визит венгерских учителей физики в институт CERN
ИЗ ЖИЗНИ ФИЗИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВО, ЛИЧНЫЕ МНЕНИЯ, ПРОИСХОДЯЩИЕ СОБЫТИЯ, КНИГИ

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

A Mathematikai és Természettudományi Értesítőt az Akadémia 1882-ben indította
A Mathematikai és Physikai Lapokat Eötvös Loránd 1891-ben alapította

LI. évfolyam 8. szám 2001. augusztus

POLÁROS PILLANTÁS AZ ÉGRE TELJES NAPFOGYATKOZÁSKOR

Az égbolt és a napkorona különös polarizációs mintázata 1999. augusztus 11-én

Horváth Gábor, Gál József, Pomozi István
Eötvös Egyetem, Biológiai Fizika Tanszék
Kriska György
Eötvös Egyetem, Embertani Tanszék
Rüdiger Wehner
Zoologisches Institut, Universität Zürich

A teljes napfogyatkozás okozta hirtelen elsötétedés a történelmi időkben mindig megrémisztette az embereket; pokoli démonokat, félelmes sárkányokat gyanúsítottak a Nap elrablásával. A teljes napfogyatkozás valóban furcsa jelenség a laikusoknak: a speciális megvilágításnak köszönhetően az égbolt megszokott kinézete hirtelen megváltozik annak polarizációjával együtt. Az utóbbit az emberi szem nem érzékeli, de a tudósok előtt majd két évszázada ismert. Az előzmények 1809-ig vezetnek vissza, amikor *Arago* felfedezte az égboltfény sarkítottságát (polárosságát), és nem sokkal később megfigyelt az égen egy polarizálatlan pontot, melyet ma Arago-féle neutrális pontnak hívunk. Egy neutrális pontban a p polarizációfok értéke nulla, s tőle távolodva p folyamatosan nő. Az 1840-es években *Babinet,* illetve *Brewster* fedezte föl az ég második, illetve harmadik neutrális pontját. Manapság már alapos elméleti ismeretekkel és bőséges mérési eredményekkel rendelkezünk a szórt égboltfény polarizációs sajátságairól.

A teljes napfogyatkozás az egyik leglátványosabb természeti jelenség. A totalitás néhány percében a Hold eltakarja a Napot. A teljesség kezdetén és végén hirtelen megváltozik az égbolt arculata. Ekkor az ég fényviszonyait csak elhanyagolható mértékben befolyásolja a gyérfényű napkorona. A legfőbb fényforrás az a többszörösen szórt fény, amely a légkör napsütötte részeiből szóródik a holdárnyékon belülre. A totalitás alatt az alkonyathoz vagy pirkadathoz hasonló megvilágítási viszonyok uralkodnak, a totalitás időtartamának közepén az ég a zeniten a legsötétebb, egyre jobban kifényesedik a horizonthoz közeledve, ahol a légkört a részben eltakart Nap világítja meg.

N. Piltschikoff 1906-os megfigyelése óta tudjuk, hogy a totalitás kezdetén az égbolt polarizációja nagymértékben lecsökken a Naptól 90°-ra. A teljes napfogyatkozáskor fellépő légköri optikai jelenségek az 1960-as évek elejétől képezik intenzívebb kutatások tárgyát. Sokszor leírták már és egyre pontosabban meg is mérték az égboltfény intenzitásának és színének hirtelen változásait. Az égboltfény polarizációjának változását először az 1961. február 15-i olaszországi teljes napfogyatkozáskor vizsgálták tüzetesebben *E. de Bary* és társai. Ezt követően e jelenséget csak ritkán tanulmányozták. Teljes napfogyatkozások alatt végzett égbolt-polarizációs megfigyelések igen hiányosak, mivel egészen mostanáig nem lehetett mérni az egész égbolt polarizációs mintázatát a totalitás alatt rendelkezésre álló néhány perc alatt.

Habár manapság már sokat tudunk az égbolt polarizációjáról, napjainkig lehetetlen volt méréssel meghatározni a teljes égbolt polarizációs mintázatát egy adott időpillanatban, egy adott meteorológiai helyzetben. Ezzel magyarázható például, hogy biológus körökben egészen a legutóbbi időkig közkézen forgott egy, az égbolt polarizáció-eloszlását hibásan bemutató ábra, amelyet még az égbolt-polarizáció alapján tájékozódó méhek viselkedését tanulmányozó Nobel-díjas *Karl von Frisch* osztrák biológus szerkesztett, s amit az égbolt-polarizáció alapján orientálódó állatok navigációjával foglalkozó biológusok kritika nélkül átvettek és rendszeresen hivatkoztak rá, s mely ábrát *Schwind* és *Horváth* korrigált 1993-ban [1].

Mindennek az az oka, hogy egészen a legutóbbi időkig olyan pontforrású polariméterek álltak rendelkezésre,

amelyekkel csupán a látótér néhány fokos szögtartományában lehetett fénypolarizációs méréseket végezni. Ilyen polariméterrel az egész égbolt letapogatása órákat venne igénybe, miközben maga a mérendő polarizációs mintázat a Nap látszólagos égi mozgása miatt jelentősen elfordulna és módosulna. Az sem kivitelezhető, hogy az ógörög mitológia százszemű, minden irányban egyszerre látó Árgus nevű óriásához hasonlóan több száz vagy több ezer ilyen polariméterrel egyidejűleg mérjük a fénypolarizációt az égbolt több száz vagy több ezer különböző irányában. Aki korábban meg akarta mérni a teljes égbolt polarizációs mintázatát, az hasonló, megoldhatatlannak tűnő problémával állt szemben, mint amit az ókori görög filozófus, *Hérakleitosz* (i.e. körülbelül 544–483) fogalmazott meg. Szerinte nem léphetünk kétszer ugyanabba a folyóba, mivel a folyóba lépőre másodszor már új víz ömlik a folytonos áramlás, a víz tovafolyása miatt („*pantha rhei*": minden folyóban van, változik). A hérakleitoszi gondolatmenetet egy százlábú persze könnyen kicselezheti, ha az összes lábát egyszerre dugja a folyó vizébe, hiszen ekkor tulajdonképpen százszor sikerült belelépnie ugyanabba a folyóba. Azonban ezerszer már a százlábú sem tud belelépni egyazon folyóba; erre csak egy ezerlábú lenne képes.

Az utóbbi években fényérzékelőként (fotodetektorként) fényképezőgépet vagy videokamerát alkalmazó képalkotó polariméterek [2, 3] megalkotásával lehetőség nyílt az égbolt-polarizáció mérésére viszonylag nagy szögtartományon belül. Egy ilyen foto- vagy videopolariméter a Hérakleitoszt kicselező száz- vagy ezerlábúnak felel meg, mivel vele egyidőben mérhető az égbolt-polarizáció a polariméter több tíz fokos látóterébe eső összes égi pontban. A teljes égbolt polarizációjának mérésére a 180° látószögű képalkotó polarimetria [4] a legalkalmasabb, amely a minden irányba egyszerre látó százszemű Árgushoz hasonlítható.

Legújabban három különböző állású lineáris polárszűrővel felszerelt, halszemoptikás fényképezőgépet használva kifejlesztettünk egy hordozható, 180° látószögű képalkotó polarimétert, amellyel a teljes égbolt polarizációs mintázata terepen is könnyen és gyorsan mérhető. E polariméterrel az égen összesen akár 500 000 különböző irányban is tudjuk egyidejűleg mérni az égboltfény polarizációs tulajdonságait a vörös, zöld és kék színtartományban [4]. E technikát használva, az 1999. augusztus 11-i teljes napfogyatkozás alatt, hála a szerencsés meteorológiai körülményeknek, lehetőségünk adódott az egész égbolt polarizációs mintázatának időbeli változását mérni Magyarországon. Valahol a Földön majdnem minden évben bekövetkezik teljes napfogyatkozás, de a korábbi polarizációs mérések csak az égbolt egyes pontjaira vagy a szoláris és antiszoláris meridiánra szorítkoztak. Ezért nagy tudományos kihívás volt számunkra kivitelezni a teljes égbolt polarimetriás vizsgálatát az 1999. augusztus 11-i teljes napfogyatkozás alkalmával Magyarországon [5–7].

Mérési eredményeink jelentőségét fokozza, hogy teljes napfogyatkozáskor annyira módosulnak, térben és időben olyan bonyolultan változnak a megvilágítási viszonyok, hogy eddig sem elméletileg, sem pedig számítógépes modellezéssel nem sikerült még senkinek pontosan megjósolnia az égbolt-polarizáció totalitáskor tapasztalható térbeli és időbeli változását. Habár a normál égbolt polarizációs sajátságai jól ismertek, ugyanez nem mondható el a totalitás alatti égbolt polarizációjának finomszerkezetéről. Méréseink célja éppen az volt, hogy részben pótoljuk e hiányt.

Mivel a napfogyatkozás egy csillagászati esemény, a totalitáskor kialakuló égbolt-polarizáció, illetve az akkor megfigyelhető napkorona polarizációja pedig egy légköri (meteorológiai) optikai, illetve napfizikai jelenség, csoportunk tagjai viszont biofizikusok és biológusok, ezért felvetődhet a kérdés, hogy miért éppen mi végeztük el e méréseket, s nem a csillagászok, napfizikusok vagy meteorológusok. Tudomásunk van róla, hogy 1999. augusztus 11-én debreceni napfizikusok is tervezték mérni a napkorona polarizációs mintázatát, de a borult ég megakadályozta mérésüket. Mi azért fejlesztettük ki az optikai környezetben fellépő polarizációs mintázatok mérését lehetővé tevő video- és fotopolarimetria, valamint a teljes égbolt polarizációs mintázatának mérésére alkalmas 180° látószögű képalkotó fotopolarimetria módszerét, mert évek óta vizsgáljuk az állatok polarizáció-látását, fénypolarizáció által irányított viselkedését és a vizuális környezetükben előforduló természetes vagy antropogén eredetű fénypolarizációs mintázatokat. 1999. augusztus 11-én már rendelkeztünk azokkal a módszerekkel és mérőeszközökkel, amelyekkel a teljes napfogyatkozás röpke 140 másodperce alatt is mérni tudtuk az egész égbolt és a napkorona polarizáció-eloszlását. Mielőtt rátérnénk a napfogyatkozáskor tapasztaltak ismertetésére, röviden szólunk az égbolt-polarizáció tudománytörténeti, légköri optikai és biológiai jelentőségéről, amiről korábban már részletesen írtunk a Fizikai Szemlében [8] és máshol is [2–4, 9–12].

Az égbolt polarizációjának légköri optikai és biológiai jelentősége

1669-ben a dán *Erasmus Bartolinus* (1625–1698) fedezte föl a kalcit (mészpát) kristály kettős törését, majd 1690-ben a holland *Christian Huygens* (1629–1695) a kalcit által kettősen megtört fény polárosságát, 1808-ban pedig *Étienne Louis Malus* (1775–1812) észrevette a visszaverődő fénynek a felülettel párhuzamos sarkítottságát. 1809-ben *Dominique François Jean Arago* (1786–1853) francia fizikus és csillagász fedezte fel az égboltfény polarizációját, miután meghatározta annak térbeli eloszlását. Eközben fedezte fel, hogy az égen a Nappal átellenes oldalon lévő anti-Nap fölött, az anti-szoláris meridián egy pontjában nulla a polarizáltság, vagyis az innen jövő fény polarizálatlan, azaz semleges (neutrális).

A fénypolarizáció jelenségének felfedezése tudománytörténetileg azért volt jelentős, mert ez vezetett el annak felismeréséhez, hogy a fény nem longitudinális (tehát nem a terjedési iránnyal párhuzamos rezgésű), hanem transzverzális (azaz a terjedési irányra merőleges rezgésű) hullámforma. *Thomas Young* (1773–1829) 1817-ben vetette fel először a fényhullám transzverzális voltát egy Aragónak írt levelében. *Augustin Fresnel* (1778–1827) 1821-ben dolgozta ki a fénypolarizáció elméletét (Fresnel-formulák), s látta be, hogy a kettős törés longitudinálisnak elgondolt fényhullámokkal nem magyarázható meg, mert csak transzverzális hullámokkal lehet megindokolni a különböző irányokban poláros komponensek közti interferencia hiányát. A polarizált fénnyel végzett interferencia-kísérletei elég alapot szolgáltattak ahhoz, hogy kimondhassa a fényrezgés transzverzális jellegét.

A fény hullámtermészetéért kardoskodó Huygens még longitudinális hullámnak képzelte a fényt. *Isaac Newton* (1642–1727) a fényt ré-

szecskék terjedéseként értelmezte, és a polarizáció miatt a fényrészecskéket új tulajdonsággal, pólusokkal ruházta fel. Innen ered a Malusteremtette „fénypolarizáció" (magyarul „fénysarkítás") szó. 1840-ben *Jacques Babinet* (1794–1872) francia fizikus és meteorológus megtalálta az égbolt második neutrális pontját. A Babinet-féle pont a szoláris meridiánon, a Nap fölött helyezkedik el körülbelül ugyanakkora szögtávolságra, mint az Arago-pont az anti-Naptól. *David Brewster* (1781–1868) skót fizikus szimmetriamegfontolások alapján arra a következtetésre jutott, hogy ha létezik egy neutrális pont a Nap fölött, akkor alatta is lennie kell egynek ugyanakkora szögtávolságra. 1842-ben fel is fedezte az égbolt harmadik, róla elnevezett neutrális pontját az elméletileg megjósolt helyen. 1871-ben *Lord Rayleigh* (1842–1919) Nobel-díjas angol fizikus adott helyes elméleti magyarázatot az égboltfény polarizációjára rámutatva, hogy e légköri optikai jelenségek a napfénynek a fényhullámhossznál sokkal kisebb, légkörbeli részecskéken történő szóródásával magyarázhatók. Az így szóródó fény intenzitása a hullámhossz negyedik hatványával fordítottan arányos, azaz minél rövidebb a hullámhossz (minél közelebb esik az ultraibolya tartományhoz), annál erősebben szóródik a fény. Később e szórási típus Rayleigh-ről kapta a nevét.

Az Arago-pont 20–30°-ra helyezkedik el a tiszta égbolton az anti-Nap fölött a szoláris meridiánon, a Babinet-pont a szoláris meridiánon 25–30°-ra található a Nap fölött, míg a Brewster-féle neutrális pont 25–30°-ra alakul ki a szoláris meridiánon a Nap alatt. Szokványos légköri viszonyok között a tiszta égbolton csak két neutrális pont látható egyszerre: vagy az Arago- és a Babinet-pont, vagy pedig a Babinet- és a Brewster-pont. A Nap égbolton történő vándorlásával szinkronban a neutrális pontok is mozognak az égen. Az Arago-pont az anti-Nap helyváltoztatását követi, ami ellentétes irányú a Napéval. Napkelte után a Nap egyre feljebb kúszik az égen, az Arago-pont egyre lejjebb vándorol, mígnem a horizont alá bukva teljesen eltűnik. Naplementekor értelemszerűen ellenkező értelmű a helyváltoztatása. A Babinet- és Brewster-pontok ellenben a Nap mozgását követik: például a Nap emelkedésekor egyre közelebb kerülnek hozzá, és mikor a Nap a zenitre ér (ami persze csak az egyenlítői zónában fordulhat elő), akkor e két pont egyetlen neutrális ponttá olvad össze, amelynek pozíciója egybeesik a Napéval.

Lord Rayleigh jött rá elsőnek arra, hogy ha a földi légkörben az eredendően polarizálatlan napfény sugarai (fotonjai) csak egyetlen egyszer szóródnának (e közelítést hívjuk Rayleigh-modellnek), akkor a földfelszínről nézve az égbolt fénypolarizációjának eloszlása viszonylag egyszerű képet mutatna: (i) A Nap irányától távolodva a polarizációfok nulláról fokozatosan növekedne, mígnem a Naptól 90°-ra elérné maximumát, a 100%-ot, majd ismét csökkenni kezdene, s a Nappal ellentétes pontban, az úgynevezett anti-Nap helyén ismét zérus lenne. (ii) Az égboltfény polarizációs iránya, azaz elektromos térerősség vektora (*E*-vektora) mindig merőleges lenne arra a síkra, amely átmegy a földi megfigyelőn, a Napon és az égbolt megfigyelt pontján. E síkot a fizikában szórási síknak nevezik. A légköri optikában pozitív polarizációról beszélnek, ha az *E*-vektor merőleges e síkra. A Rayleigh-modellben tehát az egész légkörben pozitív a levegőmolekulákon szóródó napfény polarizációja.

A valóságban azonban a fotonok nemcsak egyszer, hanem akár többször is szóródhatnak a légkörben, mire lejutnak a földfelszínre. Ha egy foton egynél többször szóródik, akkor a polarizációjára már nem érvényes, Rayleigh-féle szabály. A többszörösen szórt fény *E*-vektorának iránya már nem lesz merőleges a szórási síkra. Előfordulhat az is, hogy párhuzamos lesz azzal, mikor is negatív polarizációról beszélünk. Minél gyakoribb a légkörben a fotonok többszörös szóródása, annál jobban eltér az égbolt polarizációja a Rayleigh-modell jósolta helyzettől, azaz egyre nagyobbá válik a negatív polarizációs járulék. Ennek eredményeként az eredő polarizációfok egyre kisebb lesz. A később Nobel-díjas indiai származású fizikus, légkörfizikus és asztrofizikus, *S. Chandrasekhar* ismerte fel 1950-ben, hogy milyen nagy jelentőségű a többszörös szórás az égboltfény polarizációjának alakulásában.

Az égbolt azon helyei tökéletesen polarizálatlanok, ahonnan egyforma mennyiségű pozitívan és negatívan poláros szórt fény sugárzódik a földi megfigyelő felé. Itt jönnek létre a neutrális pontok. E pontok és a Nap, illetve anti-Nap között negatív a polarizáció, míg az égbolt más részein pozitív. A teljes égbolt polarizációfokának átlaga 40%. Az anti-Nap és az Arago-féle neutrális pont közötti negatív polarizációfokának maximuma 20–30%, míg a Nap és a Babinet-, valamint a Brewster-féle neutrális pontok között fellépő negatív polarizációé csak 6% körül van.

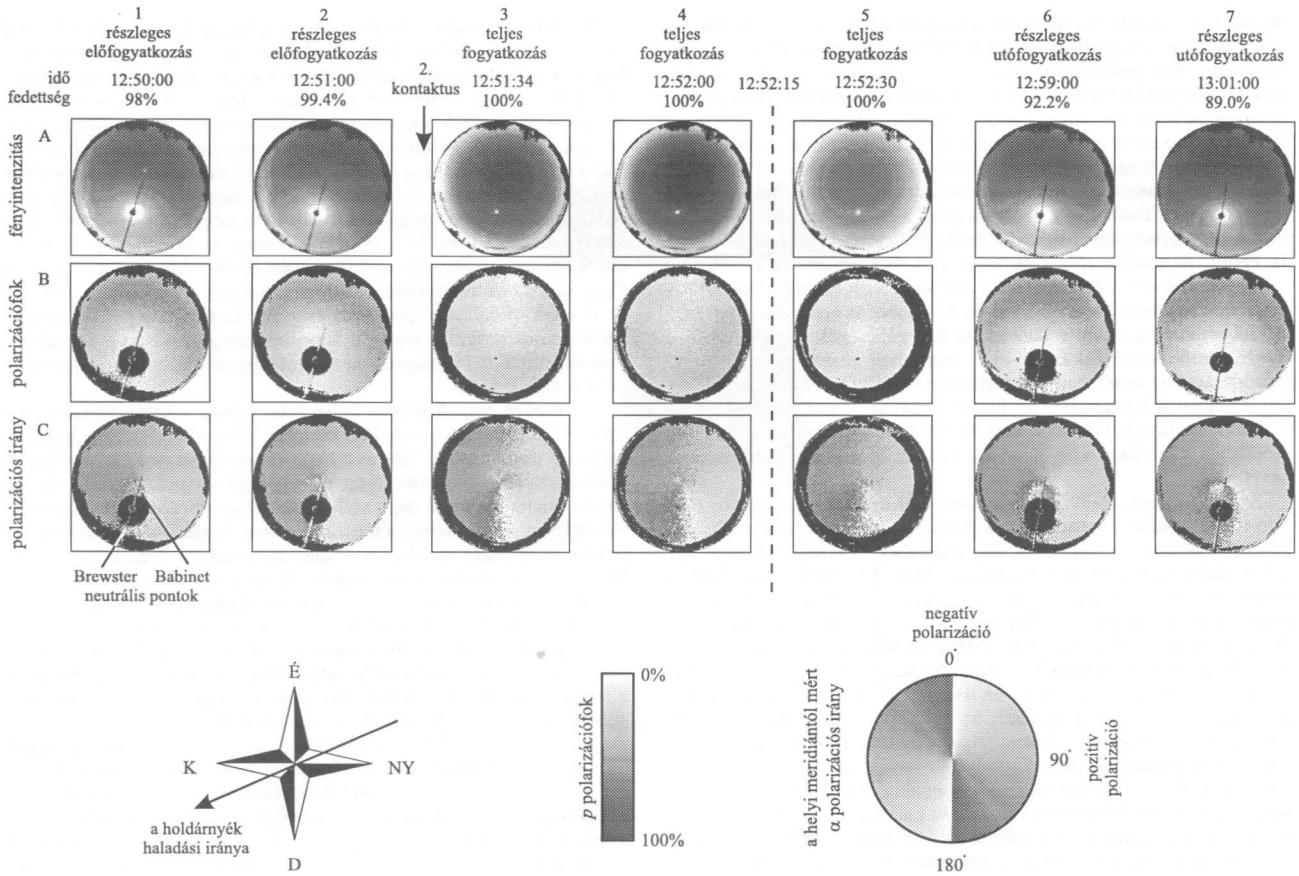
Konkrét példaként tekintsük az Arago-pont kialakulását a Nappal szemközt lévő anti-Nap fölött naplementekor (vagy napfelkeltekor). Ekkor az égbolt elsődleges fényszórásból eredő globális polarizációjára az jellemző, hogy a horizont közelében függőleges az *E*-vektor, azaz negatív a polarizáció, s távolodván a horizonttól, egyre inkább pozitívvá válik. Mivel a Nap a horizont alatt tartózkodik, az égboltnak az anti-Nap környéki része főleg a légkör alsóbb, horizonthoz közeli régióiból kapja a megvilágítást, ami mint említettük, negatívan poláros. Az anti-Nap közelében lévő levegőmolekulák ezt a negatív polarizációjú fényt szórják vissza, s ezért lesz az égbolt e része is negatívan poláros. Az égboltnak az anti-Naptól távolabbi részei egyre több, pozitívan poláros fényt kapnak az atmoszféra pozitív polarizációjú felsőbb részeiből, így itt az eredő polarizáció pozitívba csap át. Az átcsapás pontos helyén, ahonnan polarizálatlan fény jön, figyelhető meg az Arago-pont. Hasonlóan vezethető le és magyarázható kvalitatíven a Babinet- és Brewster-pontok kialakulása.

A neutrális pontok pontos helye erősen függ a megvilágítási viszonyoktól. Ebben a Nap égbolton elfoglalt helye döntő szerepet játszik, hiszen az elsődleges fényforrás a Nap. Másik fontos járuléknak számít a Föld felszínéről visszavert fény mennyisége és polarizációja. Ha az utóbbi pozitív (például nagy vízfelületekről az atmoszférába visszavert vízszintesen poláros fény esetén), akkor kissé megnő az égbolt pozitívan poláros része, azaz csökken a negatív polarizációjú régiók kiterjedése. Mivel e régiók mindig a neutrális pontok és a Nap, illetve anti-Nap között fordulnak elő, ezért ekkor a neutrális pontok közelebb húzódnak a Naphoz, illetve anti-Naphoz. Amennyiben viszont a földfelszínről visszavert fény negatívan poláros (magas albedójú, nagy kiterjedésű, érdes, például frissen behavazott felületeknél), akkor értelemszerűen kissé kiterjednek a negatív polarizációjú égbolttartományok, s ilyen esetben a neutrális pontok távolodnak a Naptól, illetve anti-Naptól.

A neutrális pontok kialakulásában fontos szerepet játszó harmadik tényező a fény hullámhossza. Szokványos, tiszta légköri viszonyok mellett általános szabály, hogy minél rövidebb a hullámhossz, annál kisebb az égboltfény polarizációfoka. E jelenséget nevezik diszperziónak, azaz a fény hullámhosszától való függésnek. Nagyobb hullámhosszak esetén (> 500 nm) a polarizáció csak kevésbé függ a fény színétől; de igen erős e függés a rövidebb hullámhosszaknál. Ennek oka is a fény többszörös szóródásában keresendő. A fény egyszeres (elsődleges) szóródásából származó pozitív polarizáltsága alapvetően független a fényhullámhossztól. A többszörös szórás azonban negatív polarizációt eredményez, ami lecsökkenti az eredő polarizációfokot. Minél intenzívebb a többszörös szórás, annál erősebb a negatív polarizáció hatása, azaz annál kisebb a polarizációfok. A szóródás Rayleigh-féle törvényéből következően a fény annál erősebben szóródik, minél kisebb a hullámhossza. Márpedig többszörösen csak akkor szóródhat egy foton, ha egyszer már szenvedett szóródást. Ily módon a rövidebb hullámhossztartományokban a Rayleigh-szórás eredményeként sokkal erőteljesebb a többszörös fényszórás, azaz drasztikusan kisebb a polarizációfok.

A fényszórás erősségének diszperziója tehát azt eredményezi, hogy a Napot és anti-Napot környező negatívan poláros régió a rövidebb hullámhosszak esetén kiterjedtebb, mint a hosszabbakra. Ennek az a végső következménye a neutrális pontok helyére, hogy azok az ultraibolya és kék színtartományban távolabb helyezkednek el a Naptól, illetve anti-Naptól, mint a spektrum zöld és vörös tartományaiban.

A neutrális pontok meteorológiai jelentősége abban áll, hogy az égbolton elfoglalt pontos helyük a légkörbeli aeroszol mennyiségének és fajtájának érzékeny indikátora. Minél több az aeroszol mennyisége, annál erőteljesebb a fény légkörbeli többszörös szóródása, annál kiterjedtebbek a negatívan poláros égbolttartományok, s annál nagyobb a neutrális pontoknak a Naptól, illetve az anti-Naptól mért szögtávolsága. Az égbolt-polarizáció biológiai jelentősége pedig az, hogy alapját képezi számos állat térbeli tájékozódásának. Itt csak a sivatagi hangyák navigációját említjük: A *Cataglyphis* nemzetséghez tartozó sivatagi hangyák szeme érzékeny a fénypolarizációra. Térbeli tájékozódásuk részben az égboltfény polarizációs mintázatán alapul, ha a Napot felhők miatt nem láthatják. E hangyák az ég polarizáció-eloszlásának tükörszimmetriája segítségével képesek meghatározni az orientációjukhoz szükséges viszonyítási irányt, a szoláris meridián irányát. A sivatagi hangyák homokos területeken élnek föld alatti fészkeikben, és a felszínen a nagy hőség miatt elhullott apró rovarokra vadásznak. A fészek nyílásának elhagyása után véletlenszerű bolyongással kutatnak e tetemek után. Mihelyt találnak valamit, nyílegyenesen rohannak vissza a fészekhez. Hogy ezt megtehessék, bolyongásuk során folytonosan összegezniük kell az elmozdulásuk vektorait, azaz minden pillanatban tudniuk kell, hogy éppen mekkora a helyvektoruk a fészek



1. ábra. Az égbolt fényintenzitásának (A), *p* polarizációfokának (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 horizontközeli tereptárgyakat és növényzetet feketével jelöltük a B és C sorokban. Az A sorban a fekete-fehér fényképfelvételek nem hűen adják vissza az égbolt abszolút fényintenzitását, mert különböző expozíciós időkkel és apertúrákkal készültek.

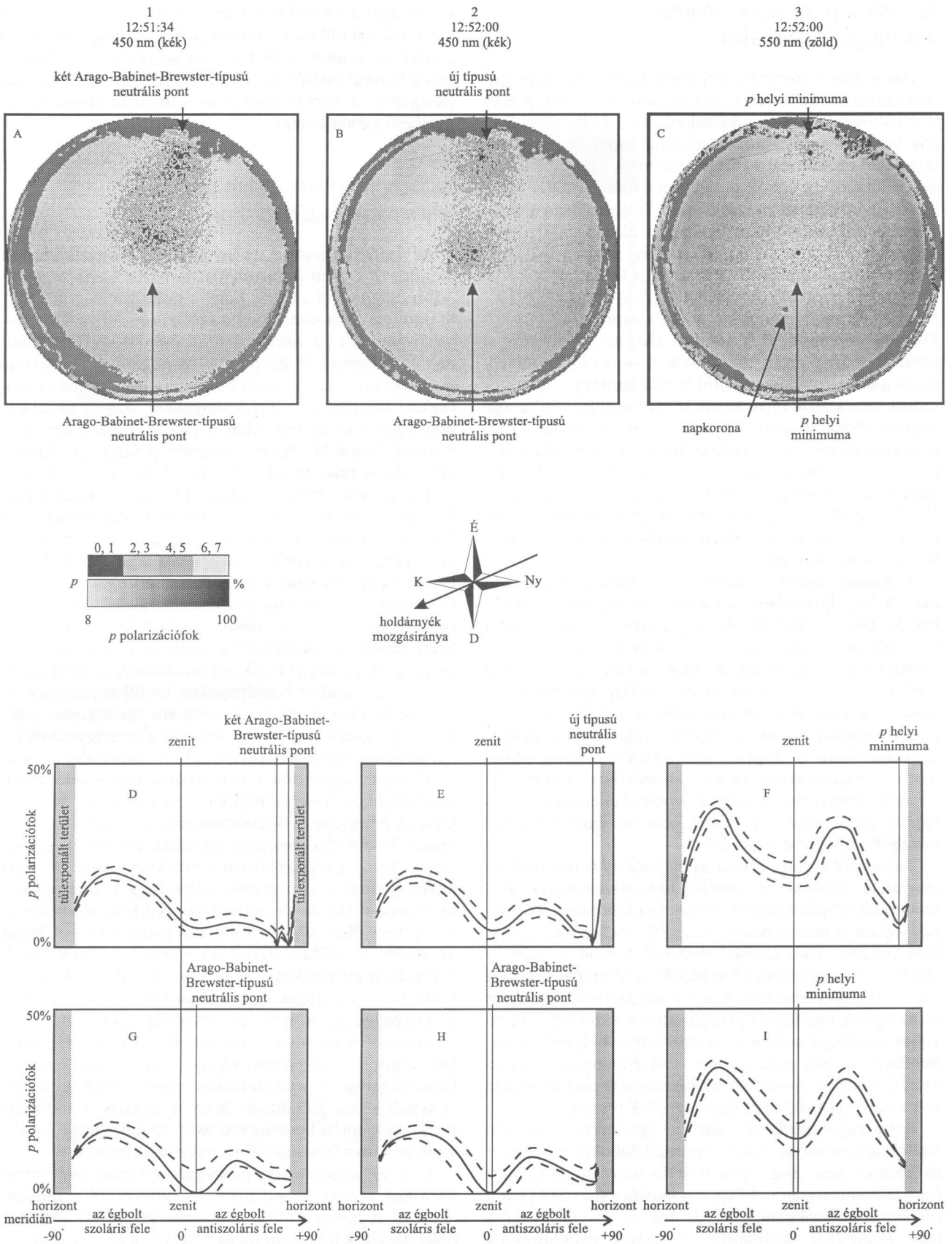
nyílásától mérve. Hogy ezt tényleg tudják, azt bizonyítja a zsákmány megtalálását követő, előbb említett viselkedésük. Ehhez a térbeli (kétdimenziós) vektorösszegzéshez van szükségük egy viszonyítási irányra, amely nem más, mint a Nap, illetve annak hiányában a szoláris meridiánnak az égbolt polarizációjából kikövetkeztetett iránya.

Egyes régészek és kultúrhistorikusok szerint időszámításunk szerint 1000 körül a vikingek is kihasználták az égboltfény polarizációját az Atlanti-óceánon való hajózásaik során. Navigációjuk nappal elsősorban a Nap irányának ismeretén alapult. Nagy bajban lettek volna azonban, ha nem lett volna valamilyen kiegészítő orientációs módszerük is. Még nem rendelkeztek ugyanis iránytűvel, így eltévedtek volna a nyílt vizeken, mikor a Nap a horizont alatt vagy felhők által takarva volt. Ez pedig gyakran előfordult lakóhelyüknek a sarkkörhöz való közelségéből kifolyólag. A vikingek már ismerték bizonyos, általuk „napköveknek" nevezett természetes kristályok (például cordierit vagy turmalin) azon (az optikában dikroizmusként ismert jelenségre visszavezethető sajátságát), hogy ha egy ilyen ásványon át nézték az égboltot, és megfelelő módon ide-oda forgatták azt a szemük előtt, akkor az égboltfény erőssége és színe a forgatás szerint váltakozott. Ennek az az oka, hogy az égboltfény részlegesen polarizált, egy dikroikus kristály pedig attól függő mértékben ereszti át az ilyen fényt, hogy milyen annak a beesési iránya, valamint hullámhossza, és mekkora szöget zár be a rezgéssíkja a kristály optikai tengelyeivel.

Egy ilyen kristállyal a vikingek megfigyelhették az égboltfény polarizációjának a szoláris meridiánra (vagyis az égboltnak a Napon és a zeniten átmenő főkörére) tükörszimmetrikus eloszlását, aminek segítségével még akkor is képesek lehettek meghatározni a szoláris meridián, azaz a Nap irányát, mikor a Nap köd vagy felhők miatt nem volt látható, de az égbolt egy jó része igen. Ez a fajta navigáció természetesen teljesen borult időben nem működött. Meg kell jegyeznünk, hogy a vikingek dikroikus napkövek használatán alapuló tengeri tájékozódására vonatkozó, régészeti és történelmi adatokkal kellően alá nem támasztott elméletet sokan kétségbe vonják.

Módszer

Égbolt-polarizációs méréseinket 1999. augusztus 11-én a magyar Nagy Alföld déli részén, Kecel közvetlen közelében (46°32' É, 19°16' K), a Föld felszínét végigsöprő holdárnyék középvonalában végeztük, ahol a részleges fogyatkozás kezdetének, a totalitás kezdetének, illetve végének és a részleges fogyatkozás végének ideje rendre 11:28:35, 12:51:34, 12:53:56, 14:15:35 volt a helyi nyári időszámítás szerint (UTC+2). Legnagyobb szerencsénkre az égbolt tiszta, felhőmentes volt a részleges fogyatkozás kezdetétől annak végéig egy hidegfronti zivatar első kontaktus előtti átvonulásának köszönhetően. Kalibrált polariméterünk „lelke" egy 2,8 fényerejű, 8 mm fókusztávolságú Nikon-Nikkor halszemoptika volt, amely egy Nikon F801-es fényképezőgéphez csatlakozott. A halszemoptika lencserendszerében egy szűrőtartó tárcsa található, amelyen három színszűrőt kicseréltünk lineáris (HNP'B típusú) polárszűrőkre, amelyek három különböző irányban engedik át a lineárisan poláros fényt. A kamerát egy háromlábra szereltük úgy, hogy keresőjének tengelye északra nézett, s a halszemoptika tengelye függőleges volt. Hogy a direkt napfénynek a halszemoptika felületein történő zavaró tükröződéseit kiküszöböljük, a részleges napfogyatkozás és a kontroll mérések alatt a Napot egy kis koronggal kitakartuk. Színes diafilm felhasználásával ezen optikával a mérendő égboltról három felvételt készítettünk a három eltérő áteresztési irányú polárszűrőn át, majd e három diakép szkennerrel történő laboratóriumi digitalizálása után a képalkotó polarimetria hagyományos eljárásával értékeltük ki őket számítógép segítségével. A fotóemulzió maximális érzékenységének vörös (650 nm), zöld (550 nm) és kék (450 nm) színtartományában az égbolt eredményül kapott fényintenzitás, polarizációfok és polarizációs irány mintázatait nagyfelbontású, kétdimenziós, színkódolt képekként ábrázoltuk. A teljes napfogyatkozás Kecel környéki 140 másodperce alatt mért égbolt-polarizációs mintázatokat összehasonlítottuk azokkal az égbolt-polarizációs mintázatokkal, amelyeket a napfogyatkozás másnapján 1999. augusztus 2-án, normál égbolt esetén mértünk ugyanazon a helyen és ugyanazokban az időpontokban, mint a napfogyatkozás alatt.



2. ábra. (A–C) Az égbolt *p* polarizációfokának mintázata az 1999. augusztus 11-én megfigyelt teljes napfogyatkozás totalitása alatt 180° látószögű képalkotó polarimetriával mérve Kecelen. (D–I) A neutrális pontokon, illetve a polarizációfok helyi minimumain átmenő különböző meridiánok mentén mért *p* értékek görbéi. A folytonos vonalak a mért *p* értékekre illesztett görbét mutatják, a szaggatott vonalak pedig *p* átlagos szórását. (A, D, G) 12:51:34, 450 nm (kék). (B, E, H) 12:52:00, 450 nm (kék). (C, F, I) 12:52:00, 550 nm (zöld).

Az égbolt polarizációs mintázata a napfogyatkozás alatt

Habár már a részleges napfogyatkozás vége felé szabad szemmel nézve feltűnően különböztek a megvilágítási viszonyok a megszokottaktól, az égbolt-polarizáció alig tért el a normálistól mindaddig, amíg a napkorong Hold által eltakart hányada el nem érte a 98%-ot. A totalitás beálltakor az égbolt polarizációs tulajdonságai hirtelen és drasztikusan megváltoztak. Folyamatosan módosultak a teljesség 140 másodperce alatt a holdárnyék megfigyelőhöz képest végzett mozgása miatt *(1. ábra)*. A részleges napfogyatkozás folyamán a totalitáshoz közeledve egyre gyorsuló ütemben alakult át az égbolt-polarizáció szokványos mintázata a teljes napfogyatkozás különleges mintázatává. A totalitás alatt az égbolt átlagos polarizációfoka jóval kisebb volt a normál égbolténál, mivel a holdárnyékba oldalról bejutó napfény csak többszörös szóródások útján juthatott el a megfigyelőhöz, ami depolarizációt okozott. A p polarizációfok égbolton való eloszlása közel forgásszimmetrikus volt a zenithez képest. A horizont közelében p = 0% volt, a horizonttól mért θ szögtávolság növekedtével p egy darabig nőtt, θ = 40–45°-nál elérte p_{max} = 15–20%-os maximumát, majd θ további növekedtével p egyre csökkent, a zenit közelében elérte minimumát.

A normál égbolt polarizációfok mintázata egészen más: A Nap közelében, a Babinet- és Brewster-pontokban p = 0%, a Naptól 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, az Arago-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 zenithez képest hengerszimmetrikus eloszlást, ha a Nap a zeniten van. A normál égbolttal ellentétben teljes napfogyatkozáskor a polarizációfok az égbolt Naphoz közelebbi felén volt nagyobb.

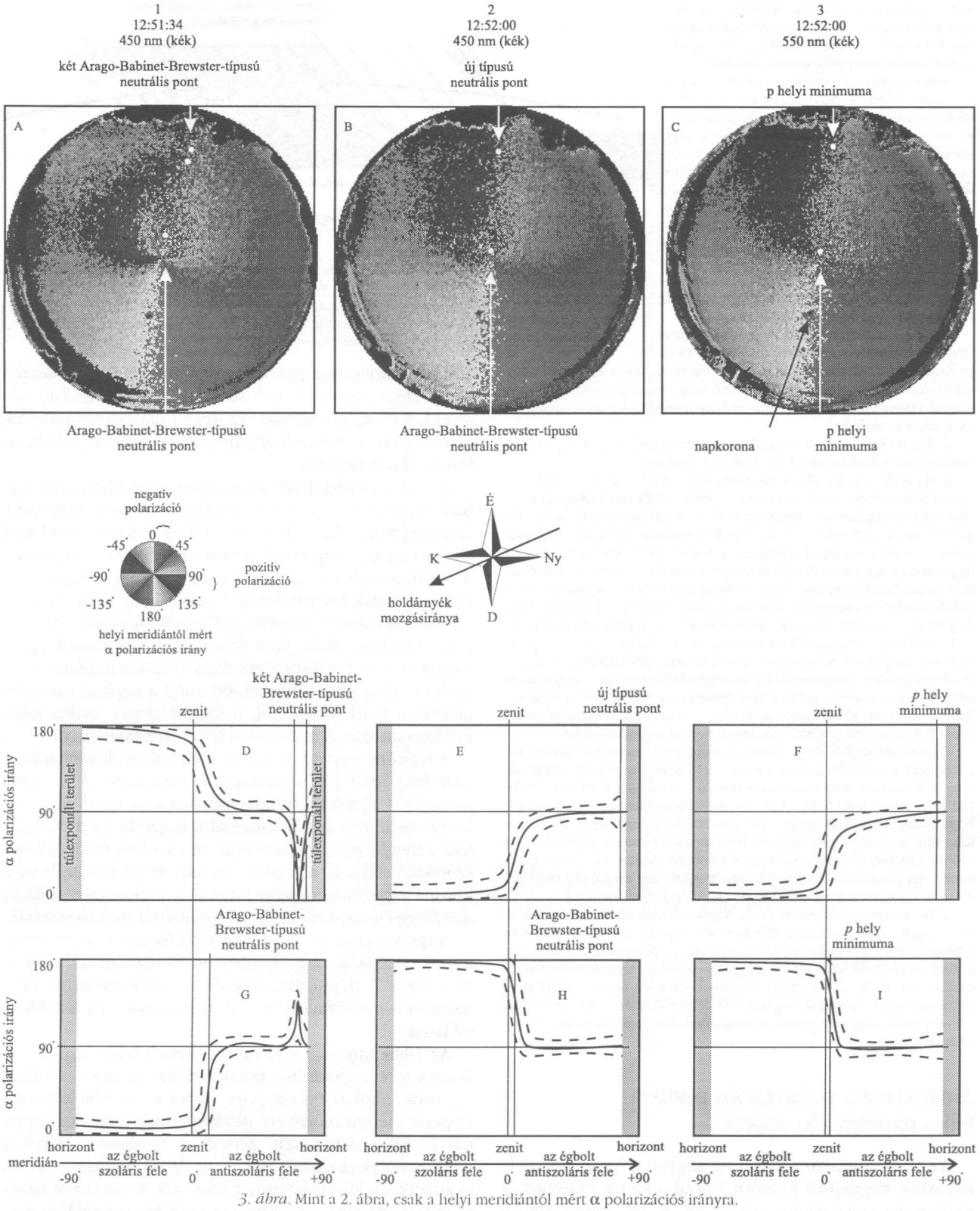
Teljes napfogyatkozáskor az égboltfény α polarizációs irányának eloszlása semmiféle hengerszimmetriát sem mutatott a zenithez képest, és teljesen különbözött a normál égbolt α-mintázatától. Az utóbbi esetben az égboltfény „pozitív polarizációja" dominál: a szórt égboltfény elektromos vektorának (E-vektorának) domináns rezgési síkja többé-kevésbé merőleges a megfigyelőn, a Napon és az égbolt megfigyelt pontján átmenő szóródási síkra. Teljes napfogyatkozáskor megfordult a helyzet, az égboltfény „negatív polarizációja" vált dominánssá, azaz a szórt égboltfény E-vektora többé-kevésbé párhuzamossá vált a szóródási síkkal az ég nagyobbik részén.

Teljes napfogyatkozás alatt az égboltfény spektrális sajátságai hasonlóak voltak a normál égboltfény spektrális jellemzőihez: míg a polarizációs irány alig függött a fény hullámhosszától, addig a polarizációfok csökkent a hullámhossz csökkenésével. Ennek az az oka, hogy a fény légkörbeli többszörös szóródása depolarizációt okoz, azaz p csökkenését, és mivel a Rayleigh-féle fényszóródási törvény értelmében a rövidebb hullámhosszak sokkal gyakrabban szóródnak, mint a hosszabbak, a depolarizáció a rövidebb hullámhosszaknál erősebb. Mivel a normál égbolthoz hasonlóan teljes napfogyatkozáskor a napfény szintén többszörösen szóródik a légkörben, nincs lényegi eltérés az égbolt-polarizáció spektrális sajátságaiban a normál égbolt és a totalitás idején megfigyelhető égbolt között.

Az égbolt polarizálatlan pontjai teljes napfogyatkozáskor

Az 1999. augusztus 11-én teljes napfogyatkozáskor megfigyelt égbolt-polarizációs mintázat egyik legfeltűnőbb sajátossága az volt, hogy a polarizációs irány 90°-ot ugrott a zenit közelében a szoláris és antiszoláris meridián mentén *(3. ábra)*. A szórt égboltfény E-vektorának ezen ugrása az ég pozitív és negatív polarizációjú tartományai határán lépett fel. A totalitás sajátos megvilágítási viszonyainak eredményeként alakult ki az égbolt Naptól távolabbi felén a pozitív polarizáció és a Naphoz közelebbi felén a negatív polarizáció. Ahol a két régió érintkezik, ott a pozitív és negatív polarizáció szükségképpen kioltja egymást. Itt a polarizációfok nulla – azaz egy neutrális pont alakul ki *(2. ábra)* –, az E-vektor iránya pedig hirtelen megváltozik amint átszeljük e polarizálatlan égi pontot, mivel a pozitív polarizációra jellemző E-vektor irány átcsap a negatív polarizációra jellemző E-vektor irányba. Ezt a neutrális pontot figyelhetjük meg a *2. ábrán* a zenit közelében, ahol azért alakul ki polarizálatlan pont, mert a holdárnyékbeli légkör megfigyelő fölötti tartománya a megfigyelő felé szórja a légkör holdárnyékon kívüli napsütéses részének minden irányából beszóródó részlegesen poláros fénysugarait, amelyek E-vektora a megfigyelőtől sugár irányban kifelé mutató függőleges szóródási síkokra merőleges. Végeredményben tehát a megfigyelő fölötti holdárnyékos légköri régióból érkező szórt fényben minden lehetséges polarizációs irány egyforma gyakorisággal fordul elő, amelyek lerontják egymás polarizációját, zérus polarizációfokot eredményezve. A zenit közeli neutrális pont pontos helye függ a fény hullámhosszától, valamint a holdárnyéknak a földfelszínhez és a megfigyelőhöz képesti bonyolult geometriájától. Mivel az utóbbi az időben állandóan változik, a zenit közeli neutrális pont pozíciója is az idő függvénye. A napfogyatkozáskor általunk észlelt zenit közeli neutrális pont és közvetlen égi környezetének polarizációs sajátságai megegyeznek az Arago-, Babinet- és Brewster-féle neutrális pontok és közvetlen környezetük polarizációs tulajdonságaival: a polarizációfok zérus voltán túl mindannyijuk közös jellemzője, hogy a szoláris, antiszoláris meridián mentén keresztezve őket, az égboltfény E-vektorának iránya hirtelen 90°-os változást szenved.

Az 1999. augusztus 11-én megfigyelt teljes napfogyatkozáskor a zenit közeli neutrális ponton túl a hullámhossztól függően további neutrális pontokat, illetve a polarizációfok helyi minimumát figyeltük meg az antiszoláris meridiánhoz és a horizonthoz közel *(2., 3. ábra)*. Az égbolt Naptól távolabbi felére pozitív polarizáció volt jellemző a totalitás alatt, ezért ott csak úgy alakulhatott ki



3. ábra. Mint a 2. ábra, csak a helyi meridiántól mért α polarizációs irányra.

neutrális pont, ha valamilyen fényszóródási mechanizmus negatív polarizációt keltett. Mi egyetlen ilyen mechanizmust tudtunk magyarázatul találni, a napfénynek a holdárnyékon kívüli földfelszínről a holdárnyékbeli légkörbe való visszaverődését és a földi megfigyelő felé történő szóródását *(4. ábra)*.

A természetes talajfelszínek részlegesen poláros fényt vernek vissza, amelynek polarizáltsága a felület érdességétől, fényvisszaverő-képességétől és spektrális jellemzőitől függ. A talajvisszaverte napfény polarizációja negatív, illetve pozitív, ha a beesés irányától mért visszaverődés szöge kisebb, illetve nagyobb mint egy γ küszöbérték *(4. ábra)*. Az utóbbi ugyancsak függ a visszaverő felület jellemzőitől, értéke tipikusan közel 20° az olyan világos, homokos, füves felület esetén, mint amilyen a talaj

volt méréseink helyszínén, Kecelen. Az ilyen felszín által visszavert fény negatív polarizációjának foka nulláról több százalékig nő, amint a visszaverődési szög γ-ról zérusra csökken.

Teljes napfogyatkozáskor az égbolt Naptól távolabbi felén a holdárnyékbeli légkörben többszörösen szóródó fény pozitív polarizációját többé-kevésbé lecsökkentette, illetve megnövelte a holdárnyékon kívülről a talajról visszavert negatívan, illetve pozitívan poláros fény, miután az is a megfigyelő felé szóródott a holdárnyékbeli légköri szórócentrumokról (n_- és n_+ a *4. ábrán*). A totalitás alatt egy adott irányba nézve az égboltra, a megfigyelő felé szórt pozitívan és negatívan poláros égboltfény intenzitásának viszonyától függően a következő három eltérő eset képzelhető el, amelyek mindegyikét meg is figyeltük Kecelen:

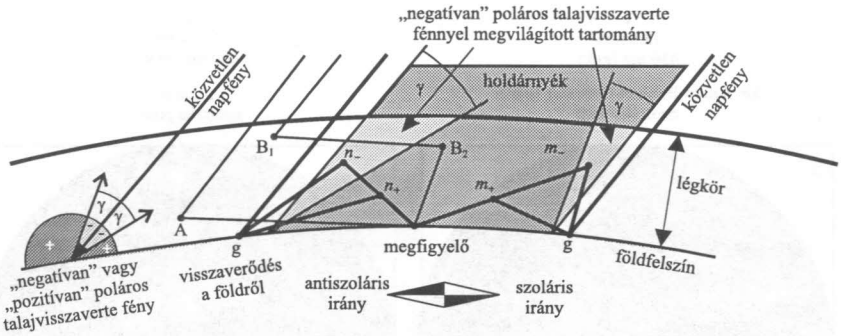
1. Ha λ hullámhosszon a negatívan poláros fény $a_-(\lambda)$ intenzitása kisebb, mint a pozitívan poláros fény $a_+(\lambda)$ intenzitása az égbolt egészén, akkor a pozitív polarizációfoknak helyi minimuma figyelhető meg azon irányban, amelyből a talajról visszavert negatívan poláros fény intenzitása a legnagyobb (*2.* és *3. ábra* 3. oszlopa).

2. Ha $a_-(\lambda) = a_+(\lambda)$ az égbolt egy adott irányában, akkor ott egy neutrális pont keletkezik (*2.* és *3. ábra* 2. oszlopa).

3. Ha $a_-(\lambda) > a_+(\lambda)$, akkor egy negatívan poláros „sziget" alakul ki az égbolt pozitívan poláros felén (*2.* és *3. ábra* 1. oszlopa). Ekkor két neutrális pont is megjelenik e negatívan poláros sziget peremén, ahol a negatív polarizáció *E*-vektora átcsap a pozitív polarizációra jellemző *E*-vektorba (*3. ábra* 1. oszlopa), a totalitás alatt megfigyelt zenit közeli neutrális ponthoz vagy a normál égbolt Arago-, Babinet- és Brewster-féle neutrális pontjaihoz hasonlóan. Teljes napfogyatkozáskor az antiszoláris meridián közelében megfigyelt neutrális pontok pozíciója a hullámhossztól függött és az időben változott, amint a holdárnyék geometriája is változott az idővel a megfigyelőhöz viszonyítva. A totalitás alatt az égbolton általunk megfigyelt mindhárom fenti esetben a polarizációfok legnagyobb mértékben megközelítőleg az antiszoláris meridián mentén csökkent le, mivel a mérés pillanatában ebben az irányban volt a legvastagabb a holdárnyékbeli légkör azon része, ahonnan a földfelszíni megfigyelő felé szóródott a talajról visszavert negatívan poláros fény.

Figyelemre méltó, hogy amint az antiszoláris meridián mentén keresztezzük a speciális 2. esetben kialakuló neutrális pontot, az égboltfény polarizációs iránya nem szenved 90°-os ugrást (*3. ábra* 2. oszlopa). E neutrális pont tehát azzal a különös tulajdonsággal rendelkezik, hogy habár e pontban nulla a polarizációfok, de egy olyan égi területen, ahol az *E*-vektorok megközelítőleg párhuzamosak egymással. Az utóbbi sajátság különbözteti meg e neutrális pontot az összes eddig ismert égi polarizálatlan ponttól, amelyeknek egy megfelelő meridián mentén való keresztezésekor 90°-ot ugrik a polarizációs irány.

Teljes napfogyatkozáskor az ég Naphoz közelebbi felén az égboltfény negatív polarizációját többé-kevésbé növelte, illetve csökkentette a talajról visszavert negatívan, illetve pozitívan poláros fény, miután az a földi megfigyelő felé szóródott a holdárnyékbeli légköri szórócentrumokról (m_- és m_+ a *4. ábrán*). A totalitás idején a negatív polarizáció került túlsúlyba az égbolt Naphoz közelebb eső felén, ezért figyeltünk ott meg kissé nagyobb polarizációfok értékeket, mint az égbolt Naptól távolabbi felén.



4. ábra. A teljes napfogyatkozáskor fellépő elsőrendű (A, B_1) és másodrendű (B_2) légköri fényszórás geometriájának sematikus ábrázolása, valamint kvalitatív magyarázat a totalitás alatt az antiszoláris meridián és a horizont közelében megfigyelt neutrális pontok, illetve a *p* polarizációfok helyi minimuma eredetére, ha figyelembe vesszük a földről visszavert negatívan (n_-, m_-) vagy pozitívan (n_+, m_+) poláros fény egyszeri szóródását a holdárnyékbeli légkörben.

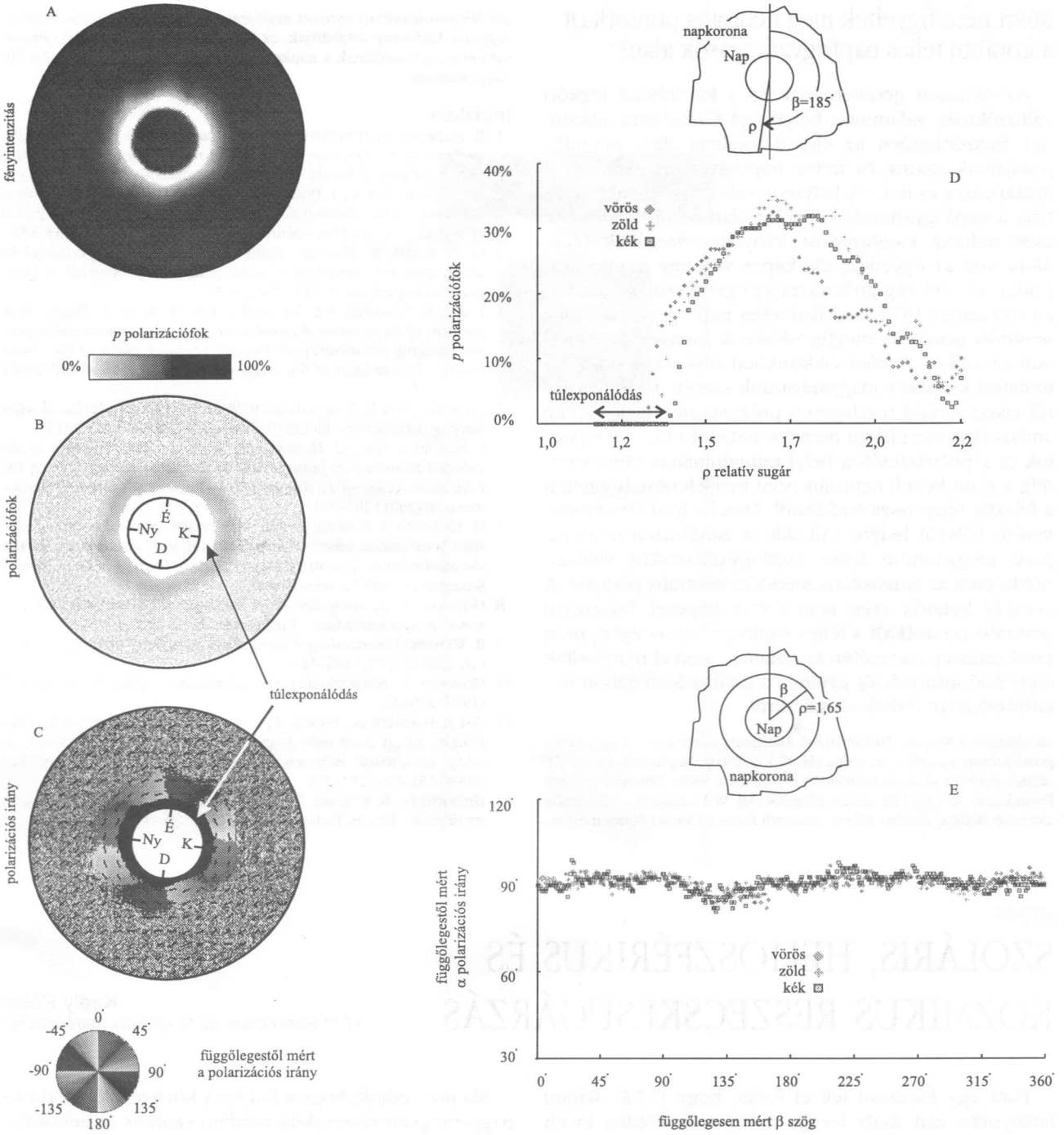
A napkorona polarizációs portréja teljes napfogyatkozáskor

Az 1999. augusztus 11-én megfigyelt teljes napfogyatkozáskor képalkotó polarimetriával sikerült mérnünk a napkorona polarizációs mintázatát is *(5. ábra)*. Habár korábbi teljes napfogyatkozások alkalmával külföldi csillagászok és napfizikusok már számos alkalommal mérték a napkorona polarizációs sajátságait a miénknél olykor nagyobb térbeli felbontással, Magyarországon elsőnek tudtunk hasonló képalkotó polarimetriás méréseket végezni. Mivel minden egyes napfogyatkozáskor különbözik, és a napkorona polarizációja a totalitás sávja mentén is változhat, ezért érdemes azt mérni és más hasonló mérésekkel összehasonlítani. Az ilyen polarizációs mérések eredményei a Napunk múltjával kapcsolatos adatbázis fontos részét képezik.

A Napot övező, nagy kiterjedésű térrészben lévő szabad elektronok szórják a napfényt (Thomson-szórás). Teljes napfogyatkozáskor e szórt fény látható a Hold által eltakart napkorong körül fényes napkorona formájában. A napfizikusok és csillagászok már régóta behatóan tanulmányozzák a napkorona tulajdonságait, mivel belőlük a Nap működésére következtethetnek, tesztelhetik a különféle elméleti jóslatok és számítógépes modellek egyes részleteit. Mivel a földi légkörben szóródó napfény, azaz az égboltfény sokkal fényesebb, mint a napkorona, ezért utóbbit a Föld felszínéről, a légkör aljáról csakis teljes napfogyatkozások alkalmával lehet tanulmányozni.

A napfény szabad elektronokkal való kölcsönhatása a szórt fény részleges polarizációját eredményezi. A Thomson-szórás elméletéből következően a szóródó fény polarizációs iránya a hullámhossztól függetlenül merőleges lesz a megfigyelő, a szórócentrum és a fényforrás alkotta szóródási síkra. Ez a napkorona esetén azt jelenti, hogy a korona egyszeresen szórt fényének elektromos vektora merőleges a napkorong középpontjából induló sugarakra, vagyis a polarizáció iránya érintőleges a napkoronghoz képest. A fény többszörös szóródása mindezt kissé módosítja. A napkorona képalkotó polariméterrel meghatározott polarizációs mintázatain mindez *(5.C,E ábra)* jól látható.

Az 1999. augusztus 11-én megfigyelt teljes napfogyatkozáskor a napkorona polarizációját Kecelen mértük, ugyanott, ahol az égbolt-polarizációt is. Kétféle képalkotó polarimetriai módszert alkalmaztunk: videopolarimetriát és fotopolarimetriát. Amint az *5. ábrán* látható, a napkorona polarizációs mintázata 1999. augusztus 11-én jó közelítéssel forgásszimmetrikus volt. A spektrum látható tartományában a polarizáció csak kis mértékben függött a fény hullámhosszától. A polarizációfok a napkorong peremétől kifelé haladva 0%-ról egy darabig nőtt, ρ = 1,70–1,75 relatív sugárnál elérte 30–35%-os maximumát, majd csökkenni kezdett, és a Naptól egészen távol 0%-ra csökkent *(5.B,D ábra)*, a polarizáció iránya pedig a napkorona minden pontjában többé-kevésbé merőle-



5. ábra. Az 1999. augusztus 11-én megfigyelt teljes napfogyatkozáskor a napkorona fényintenzitásának (A), polarizációfokának (B) és polarizációs irányának (C) mintázata a spektrum zöld (550 nm) tartományában képalkotó polarimetriával mérve. A C ábrán a pálcikák iránya a napkorona fényének helyi polarizációs irányát mutatja. A B és C ábrán a Hold által kitakart napkorongot egy fehér körrel helyettesítettük, amelyen bejelöltük a Nap északi és déli pólusát. (D, E) A napkorona polarizációfokának, illetve függőlegestől mért polarizációs irányának változása a vázlatos betétábrán jelölt sugár, illetve kör mentén mérve a spektrum vörös (650 nm), zöld (550 nm) és kék (450 nm) tartományában. $\rho = r/r_{Nap}$: relatív sugár, ahol r a napkorong középpontjától mért sugár, r_{Nap} pedig a napkorong sugara.

ges volt a helyi sugárra *(5.C,E ábra)*. A Naptól távolabb olyan kicsi volt már a napkorona fényessége, hogy a polarizációt lehetetlen volt mérni, ezért a kiértékelő programunk zajos, a térben véletlenszerűen változó polarizációs értékeket adott eredményül. Ez az oka a polarizációfok és polarizációs irány véletlenszerű eloszlásának a polarizációs mintázatok napkorongtól távolabb eső széli zónájában *(5.B,C ábra)*. A csillagászok és napfizikusok a napkorona mért polarizációs sajátságaiból számítások útján következtetni tudnak a Napot övező szabad elektronok sűrűségére, ami egy fontos napfizikai paraméter. Mivel a napkoronában minden polarizációs irány közel egyforma gyakorisággal fordul elő *(5. ábra)*, ezért a korona fényének eredő polarizációfoka közel zérus. A korona eredő polarizációfokának zérustól való eltérése ugyancsak egy fontos napfizikai jellemző.

Miért nem figyeltek meg neutrális ponto(ka)t a korábbi teljes napfogyatkozások alatt?

Az összetett geometriának és a különböző légköri változóknak, valamint a helyfüggő földfelszíni albedónak köszönhetően az égbolt totalitás alatti neutrális pontjainak száma és helye napfogyatkozásról napfogyatkozásra és helyről helyre is változhat. Mivel mostanáig a napfogyatkozás egének polarizációját többnyire csak néhány megfigyelési irányban vizsgálták (*G.E. Shaw* volt az egyetlen, aki képes volt egy pontforrású polariméterrel végigpásztázni az eget a szoláris meridián mentén az 1973-as afrikai teljes napfogyatkozáskor), neutrális pont(ok) megfigyelésének elenyészően kicsi volt az esélye. A jelen cikkünkben csak vázlatosan bemutatott kvalitatív magyarázatunk szerint a földfelszínről visszaverődő részlegesen poláros fény felelős az ég antiszoláris meridiánja mentén kialakuló neutrális pontok és a polarizációfok helyi minimumának eredetéért, míg a zenit közeli neutrális pont megjelenése független a felszíni fényvisszaverődéstől. Mivel a föld fényvisszaverése helyről helyre változik, a zenitközeli neutrális pont megjelenése teljes napfogyatkozáskor valószínűbb, mint az antiszoláris meridián neutrális pontjaié. A korábbi kutatók azért nem voltak képesek felismerni neutrális ponto(ka)t a teljes napfogyatkozás egén, mert pontforrású polarimétert használtak, amivel nem tudtak elegendő információt gyűjteni a totalitáskori égbolt polarizációjának térbeli eloszlásáról.

✧

Munkánkat a Magyar Tudományos Akadémia hároméves Bolyai János posztdoktori kutatói ösztöndíja (H. G.), a Soros Alapítvány 230/2/878 számú egyéves doktori ösztöndíja (G. J.) és a Swiss National Science Foundation 31-43317.95 számú pályázata (R. W.) támogatta. Köszönjük *Bernáth Balázs, Fischer Mária, Horváth János* és *Suhai Bence* méréseink lebonyolításában nyújtott segítségét és közreműködését. Hálásak vagyunk *Ludmány András*nak, az MTA Debreceni Napfizikai Obszervatóriuma igazgatójának a napkorona polarizációjával kapcsolatos felvilágosításaiért.

Irodalom

1. R. Schwind, G. Horváth: *Reflection-polarization pattern at water surfaces and correction of a common representation of the polarization pattern of the sky* – Naturwissenschaften *80* (1993) 82–83
2. G. Horváth, J. Gál, I. Pomozi, R. Wehner: *Polarization portrait of the Arago point: Video-polarimetric imaging of the neutral points of skylight polarization* – Naturwissenschaften *85* (1998) 333–339
3. G. Horváth, R. Wehner: *Skylight polarization as perceived by desert ants and measured by video polarimetry* – Journal of Comparative Physiology A *184* (1999) 1–7
4. J. Gál, G. Horváth, V.B. Meyer-Rochow, R. Wehner: *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* (2001) 1385–1399
5. Pomozi I., Gál J., Horváth G., R. Wehner: *Égbolt-polarizáció teljes napfogyatkozáskor* – Élet és Tudomány *55* (2000) 1003–1015
6. I. Pomozi, J. Gál, G. Horváth, R. Wehner: *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* (2001) 181–201
7. G. Horváth, I. Pomozi, J. Gál, R. Wehner: *Neutral points of skylight polarization observed by full-sky imaging polarimetry during the total solar eclipse on 11 August 1999* – Journal of Geophysical Research D (2001) (nyomdában)
8. Horváth G.: *Az Avogadro-szám meghatározása az égbolt kék színéből. A fény szóródása* – Fizikai Szemle *36* (1986) 214–227
9. R. Wehner: *Polarized-light navigation by insects* – Scientific American *235(1)* (1976) 106–114
10. Horváth G.: *Fényszóródás a természetben* – Természet Világa *117* (1986) 250–254
11. Gál J., Horváth G., Pomozi I., R. Wehner: *Az égbolt polarizálatlan pontjai, avagy amit már Arago, Babinet és Brewster is ismert, de eddig közvetlenül még senki sem látott* – Természet Világa *129* (1998) 151–154, 212–215
12. Horváth G., R. Wehner, Gál J., Pomozi I.: *Az égbolt-polarizáció és az állatok* – Élet és Tudomány *54* (1999) 235–237