

HŐLÉGBALLONOS FÉNYVADÁSZAT

Az utolsó polarizálatlan pont

Suhai Bence, Horváth Gábor, Bernáth Balázs, Barta András

Eötvös Loránd Tudományegyetem, Biológiai Fizika Tanszék, Biooptika Laboratórium, Budapest

Bakos Attila

MALÉV Hőlégballon Szakosztály, Aero Klub, Budapest

Rüdiger Wehner

Állattani Intézet, Zürichi Egyetem, Zürich

Elsőnek sikerült megfigyelnünk a légköri polarizáció utolsó, eddig még senki által sem észlelt, negyedik neutrális pontját. Hőlégballonról 180° látószögű képkötő polarimetriával vizsgálva a földfény spektrális és polarizációs tulajdonságait, kísérletileg igazoltuk a negyedik neutrális pont meglétét az elméletileg várt helyen. A légköri optikában hasonló jelentőségű esemény legutóbb 160 éve történt, amikor 1842-ben David Brewster skót fizikus először figyelte meg a poláros égbolt később róla elnevezett harmadik neutrális pontját az általa elméletileg megjósolt irányban.

A napfény légkörbeli szóródása miatt a tiszta égbolt kék fénye az iránytól függően részlegesen lineárisan poláros. Létezik azonban három olyan kitért irány, amerről polarizálatlan égboltfény érkezik a földi megfigyelőhöz. A poláros ég e helyeit neutrális pontoknak nevezik, utalva az innen eredő szórt fény polarizáció szempontjából semleges voltára. E neutrális pontokat az őket először megfigyelő tudósokról nevezték el. Az első neutrális pontot 1810-ben az antiszoláris meridiánon az anti-Nap fölött kb. 25°-ra figyelte meg Dominique Francois Jean Arago francia csillagász, aki 1809-ben az égboltfény polarizációját is fölfedezte. 1840-ben Jacques Babinet francia meteorológus észlelte először a második neutrális pontot a Nap fölött közel 25°-ra a szoláris meridián mentén. Ezt követően szimmetria megfontolás alapján David Brewster skót fizikus arra a következtetésre jutott, hogy a Nap alatt is kell léteznie egy harmadik neutrális pontnak közel akkora szögtávolságra a Naptól, mint a Babinet-féle neutrális pont. 1842-ben sikerült is megfigyelnie e neutrális pontot az elméletileg megjósolt helyen. Az 1A,B ábra az Arago-, Babinet- és Brewster-féle neutrális pontok égbolton elfoglalt helyét mutatja vázlatosan. Az ég polarizációjáról, annak méréséről és a szóban forgó három neutrális pontról részletesen olvashatunk az *Élet és Tudomány* [54, 235-237 (1999); 55, 1003-1006, 1015 (2000)], valamint a *Természet Világa* [129, 151-154, 212-215 (1998)] korábbi számaiban.

Az Arago-, Babinet- és Brewster-pontok felfedezésük óta számos földi polarimetriai mérés tárgyát képezték, mivel az égen elfoglalt helyükből a légköri aeroszol típusára és mennyiségére

lehetett következtetni, ami fontos információ a meteorológiában. Mára e módszert más mérési eljárások kiszorították, így a neutrális pontok elvesztették meteorológiai jelentőségüket. Talán részben ezzel magyarázható, hogy eddig még senki sem figyelte meg a napsütötte poláros légkör negyedik neutrális pontját, aminek a szükségszerű létezése hasonló szimmetria megfontolásból vezethető le, mint ami alapján Brewster is megjósolta a harmadik neutrális pontot. Eszerint az antiszoláris meridián mentén egy negyedik neutrális pontnak kell kialakulnia az anti-Nap alatt, attól hasonló szögtávolságra, mint az Arago-pont. Mivel e neutrális pontot még senki sem figyelte meg, ezért mindezideig névtelen maradt; mi a továbbiakban "4. neutrális pont"-nak hívjuk.

Ellentétben az Arago-, Babinet- és Brewster-pontokkal, a 4. neutrális pont a földről nem látható, mivel napközben az anti-Nappal együtt a horizont alatt tartózkodik, napnyugta után pedig a légkör anti-Nap alatti része a Föld árnyékába kerül, márpedig minden neutrális pont kialakulásának feltétele a közvetlen napfény légkörbeli többszörös szóródása. Ezért a negyedik neutrális pont csak napsütötte légkör esetén és olyan magasságból észlelhető, ahol megfelelően vastag légréteg helyezkedik el a földfelszín és a megfigyelő között ahhoz, hogy kellő intenzitású legyen a légkörből fölfelé szóródó részlegesen poláros napfény (1C,D ábra), s ne nyomja el ezt a földfelszínről visszavert fény. E két komponens eredőjét összefoglalóan földfénynek nevezzük utalva arra, hogy a föld irányából, alulról fölfelé halad, ellentétben a fölülről lefelé terjedő égboltfényvel.

Habár a negyedik neutrális pont léte már egyszerűen a szimmetriából is következik, továbbá a napfény légköri szóródását szimuláló számítógépes modellek is megjósolták e pont kialakulását, egészen napjainkig még senki sem volt képes kísérletileg kimutatni. Néhány, légköri polarizációval foglalkozó kutató korábban már többször is megpróbálta megfigyelni a 4. neutrális pontot repülőgépről, de alkalmasan kalibrált polariméter hiányában erre esélyük sem volt. Akik viszont kalibrált, megbízható polariméterekkel mérték a földfény polarizációját, azok a következő okok miatt nem észlelheték a 4. neutrális pontot: (i) Számos esetben a 4. neutrális pont egyszerűen nem került a polariméter látóterébe, mivel az nem a légkör anti-Nap alatti tartománya felé irányult. (ii) A cél sokszor a földről visszavert fény polarizációjának mérése volt, ezért a spektrum vörös vagy infravörös tartományában mérték a földfény polarizációját, kiszűrve annak a légköri fényszóródásból eredő, a spektrum rövidebb hullámhosszúságú (zöld és kék) tartományában domináló komponensét, éppen azt, amely a 4. neutrális pontot alakítja ki. Ezzel tehát a fürdővízzel (a zöld és kék szórt földfényvel) együtt öntötték ki a gyermeket (a 4. neutrális pontot). (iii) Mivel általában nem a 4. neutrális pont megtalálása volt a cél, hanem a földfény polarizációjának a mérése és hamisszínes polarizációs eloszlástérképek formájában történő ábrázolása bizonyos légkörfizikai és meteorológiai paraméterek meghatározása céljából, ezért a földfény polarizációjának fokát és irányát ábrázoló térképeken a neutrális pontok egyáltalán nem is tűntek föl. A neutrális pontok láthatóvá tételéhez ugyanis a mért polarizáció alkalmasan megválasztott színek szükegése.

Miután a szakirodalomból egyértelművé vált számunkra, hogy a 4. neutrális pontot korábban még senki sem figyelte meg, s tisztáztuk ennek valószínű okait is, továbbá kifejlesztettük a 180° látószögű képalkotó polarimetriát, amivel számos alkalommal meg tudtuk figyelni az égbolt Arago-, Babinet- és Brewster-féle neutrális pontjait, azt a célt tűztük magunk elé, hogy megpróbálkozzunk a 4. neutrális pont első megfigyelésével és létezésének kísérleti bizonyításával. E vállalkozást az teszi igazán jelentőssé, hogy mivel összesen csak négy neutrális pont alakul ki a napsütötte tiszta légkörben normál megvilágítási körülmények között, ezért az utolsó, kísérletileg még nem észlelt 4. neutrális pont megfigyelése megkoronázza, lezárja, kerek egészé teszi a légkörfizika neutrális pontokkal foglalkozó ágát. Számunkra igazi tudományos kihívást jelentett már csupán az a tény is, hogy a 4. neutrális pont immáron 160 éve bevehetetlen bátyának tűnt. Aki elsőnek figyelte meg a 4. neutrális pontot, az hasonló horderejű tettet hajt végre, mint Arago 1810-ben, Babinet 1840-ben és Brewster 1842-ben az első három neutrális pont észlelésével. Bármely tudományágban mindig szép feladat föltenni az i-re a pontot, azaz lezárni egy fejezetet.

Béreltünk hát egy hőlégballont a MALÉV Hőlégballon Szakosztályától, és Bakos Attila pilótával együtt 2001 június 28-án, majd augusztus 25-én pirkadatkor, teljesen tiszta égbolt alatt

Pákozd mellől (47°13' É, 18°33' K) felszálltunk, hogy egy 180° látószögű képképző polariméterrel mérjük a gondola alatti teljes térfélelől jövő földfény polarizációs tulajdonságait. A polarimetriai eljárásunkról korábban már részletesen írtunk az *Élet és Tudományban* [55, 1003-1006 (2000)]. A polariméter lelkét, egy drága, 180° látószögű, polárszűrőkkel ellátott, nagy fényerejű (2.8-as) Nikon-Nikkor halszemoptikát svájci kollégánk, Rüdiger Wehner kölcsönözte számunkra. Hajnalban szálltunk föl, mert ekkor a legkedvezőbb a 4. neutrális pont megfigyelhetősége, mivel egyrészt ekkor a legvastagabb a légkörnek az anti-Nap alatti, direkt napfény által megvilágított része, másrészt pedig ekkor a napfény csak sűrűsülve éri a földfelszínt, s ezért ilyenkor a legkisebb a földről visszavert napfény intenzitása, így az nem nyomja el a légkörben szóródó poláros napfényt.

Mivel korábban senki sem tudta, hogy a 4. neutrális pont milyen minimális magasságból figyelhető meg, ezért emelkedés közben folyamatosan mértük a földfény polarizációját, s cseréltük a polariméter fényképezőgépében a diafilmet, mikor az betelt. A méréshez három személyre volt szükség: Az első kihajolt a gondolából, és kezelte a polarimétert, amelyet egy függőleges állványon kellett lesüllyeszteni a gondola fenekének síkja alá, hogy a gondola ne lógjon bele a halszemoptika 180°-os látóterébe, s ne zavarja a mérést. Három fényképfelvételt kellett készíteni egy adott helyzetben három lineáris polárszűrőn keresztül, amelyek átérésztési síkja különböző irányokba mutatott. A három expozíciót a hőlégballon személyzetének második tagja végezte, miközben kezével kinyúlt a kosár egyik nyílásán, és háromszor lenyomta a kamera kioldószinórját és továbbtekerte a polariméter szűrőtárcsáját. Ezután az első személy felhúzta a polarimétert és változtatott az expozíciós időn és apertúrán, majd ismét leeresztette a mérőműszert további expozíciók céljából. Azt szintén nem tudhattuk, hogy melyek az expozíciós idő és rekesznyílás optimális beállításai. A harmadik személy a mérés időpontját, magasságát és a fényképezőgép beállításait jegyezte föl. A negyedik személy a hőlégballon pilótája, Bakos Attila volt.

Az első felszállásunk célja (mikor Bakos Attila, Bernáth Balázs, Horváth Gábor és Suhai Bence tartózkodott a gondolában) a polariméterünk és a mérési eljárásunk kipróbálása volt, továbbá minél több mérés elvégzése a lehető legnagyobb magasságban. Hőlégballonnal oxigénmaszk nélkül legfölbjebb 3500 m-es magasságba szabad felemelkedni. Sikert e magasságra felszálltunk és ott több sikeres mérést is végeztünk. Miután leereszkedtünk a földre és landoltunk egy búzatáblában, rohantunk vissza Budapestre, ahol előhívtuk a polarizációs fényképfelvételeinket, majd számítógéppel kiértékeltek és ábrázoltuk a földfény mért polarizációs mintázatait. Nagy élmény volt számunkra, mikor elsőnek pillanthattuk meg a földfény polarizációs mintázatait a régóta sokak által keresett 4. neutrális pontot. A 2. ábra mutat egy példát e mintázatokra, amelyeket 3500 m-es magasságban mértünk. Az ábrán jól látható a Brewster-pont és a 4. neutrális pont a vörös, zöld és kék színtartományban mind a polarizációfok, mind pedig a polarizációs irány mintázatokon. A neutrális pontok mindig a légkör pozitívan és negatívan poláros tartományainak határán, a szoláris vagy antiszoláris meridián mentén alakulnak ki, ahol a polarizációfok nullára csökken és a polarizációs irány hirtelen 90°-os ugrást szenved. A neutrális pontok helye függ a fény hullámhosszától: minél rövidebb a hullámhossz, annál közelebb vannak a nadírhoz, illetve a zenithez.

A második hőlégballonos fölszállásunknak (mikor Bakos Attila, Barta András, Bernáth Balázs és Horváth Gábor tartózkodott a gondolában) az volt a célja, hogy megbecsüljük azt a legkisebb magasságot, ahonnan a 4. neutrális pont közvetlenül napkelte után még megfigyelhető. Ezt korábban szintén senki sem ismerhette. Méréseink szerint tiszta légkörben 900 m a legkisebb magasság, ahonnan a 4. neutrális pont még észlelhető, mikor a Nap a horizont közelében tartózkodik. Ennél kisebb megfigyelési magasság esetén nem elég vastag a megfigyelő alatti légréteg ahhoz, hogy a benne szórt poláros napfény kellő intenzitású legyen, s ne nyomja el azt a földről visszavert fényt, amely más polarizációs tulajdonságokkal bír.

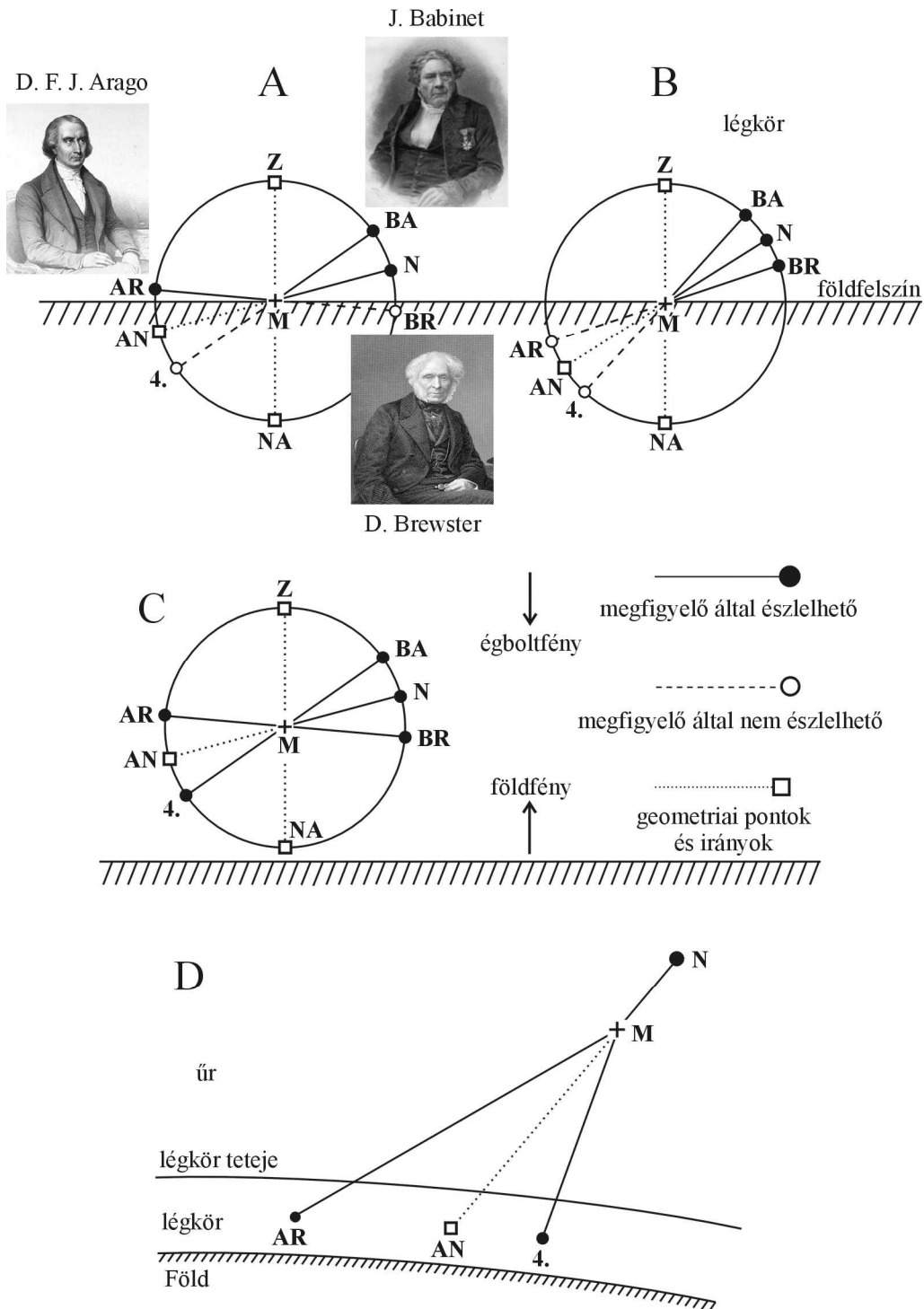
A földfény napkeltekor hőlégballonról mért polarizációs mintázatait és az azokon látható Brewster-pontot és a 4. neutrális pontot összehasonlítottuk az égboltfény napkeltekor földről mért polarizációs mintázataival és az azokon észlelhető Arago- és Babinet-pontokkal, amikre egy példát

a 3. ábra mutat. Az utóbbihoz célszerű olyan égboltpolarizációs mintázatokat választani, mikor a légkör igen száraz és tiszta, mert ekkor látszanak a legjobban a neutrális pontok. Ilyen körülmények leginkább a sivatagokban uralkodnak. Ezért választottuk összehasonlításként azokat a 3. ábrán látható égboltpolarizációs mintázatokat, amelyeket korábban a tunéziai sivatagban ugyancsak 180° látószögű képalkotó polarimetriával mértünk. A 4. ábra a földfény és az égboltfény polarizációfokát és polarizációs irányát mutatja a zenitől, illetve nadírtól mért szög függvényében a szoláris és antiszoláris meridián mentén a spektrum kék (450 nm) tartományában.

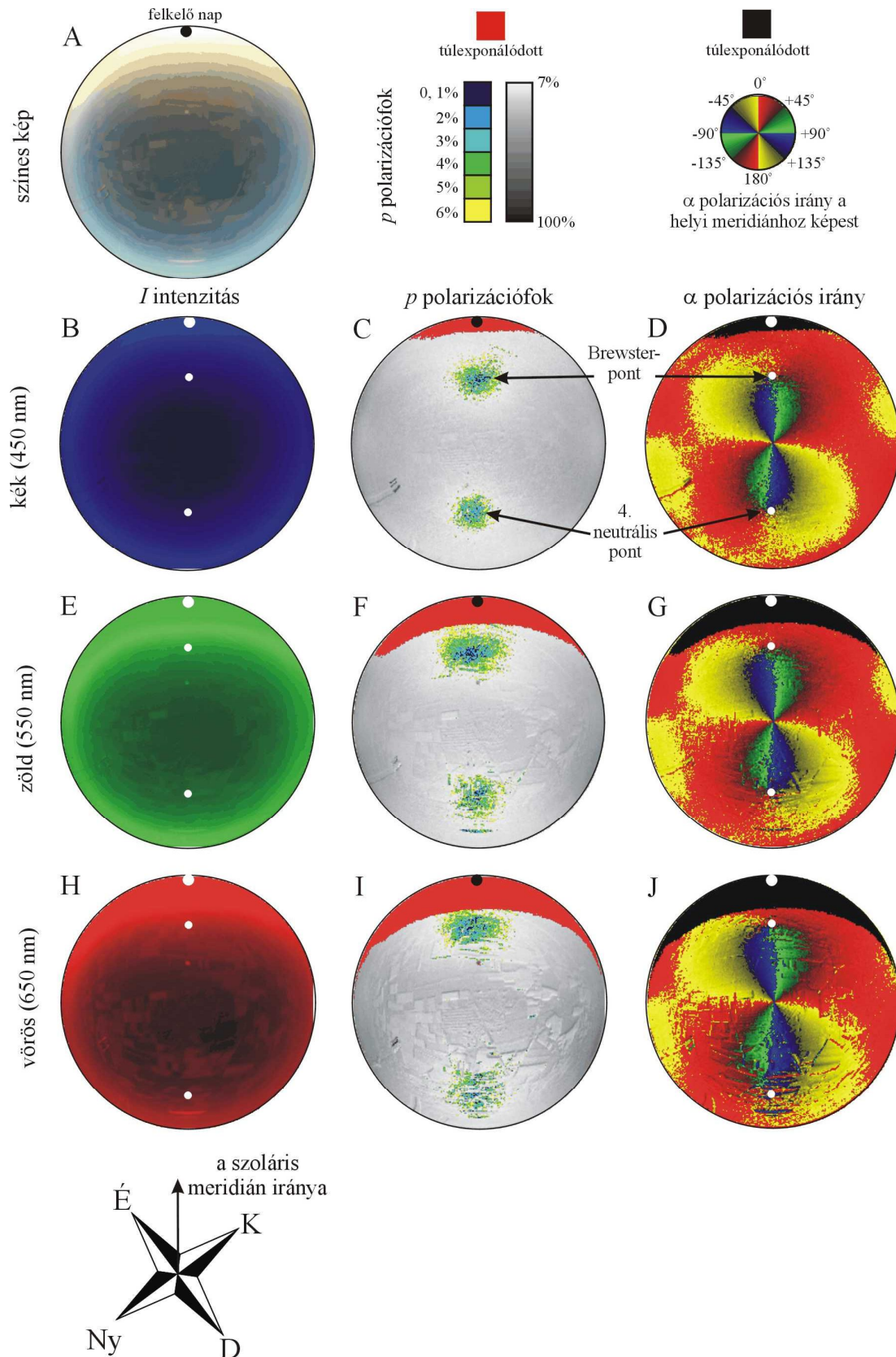
Összefoglalásul megállapíthatjuk, hogy hőlégballonos polarimetriai méréseinkkel a világon elsőnek sikerült kísérletileg bizonyítanunk a 4. neutrális pont létét. A 4. neutrális pontot napkeltekor 900 és 3500 m-es magasság között tudtuk megfigyelni a spektrum vörös, zöld és kék tartományában az antiszoláris meridián mentén, az elméletileg várt helyen, az anti-Nap alatt 22° - 40° -ra a Nap horizonttól mért szögtávolsága és a hullámhossztól függően. Megmutattuk, hogy a 4. neutrális pont hasonló spektrális és polarizációs sajátosságokkal rendelkezik, mint az Arago-, Babinet-és Brewster-pontok. Az egyedüli lényeges eltérés, hogy a 4. neutrális pont helyére, valamint spektrális és polarizációs jellemzőire döntő befolyással van a földfelszínről visszaverődő napfény, amelynek hatása nő a megfigyelési magasság csökkenésével és/vagy a hullámhossz növekedtével.

A múltban az Arago-, Babinet- és Brewster-pontok pozíciói mérésének több figyelmet szenteltek, mint az égboltpolarizáció összes többi sajátosságának együttvéve. A légkörfizika neutrális pontokkal foglalkozó fejezete lezártnak tekinthető az utolsó (negyedik) mindeddig meg nem figyelt neutrális pont első észlelésével és polarimetriai mérésével. Furcsa módon minderre 160 évet kellett várni a Brewster-pont első megfigyelését követően. Büszkék vagyunk arra, hogy a neutrális pontok kánonjában mi játszhattuk a negyedik szólamot olyan elődök mellett, mint Arago, Babinet és Brewster.

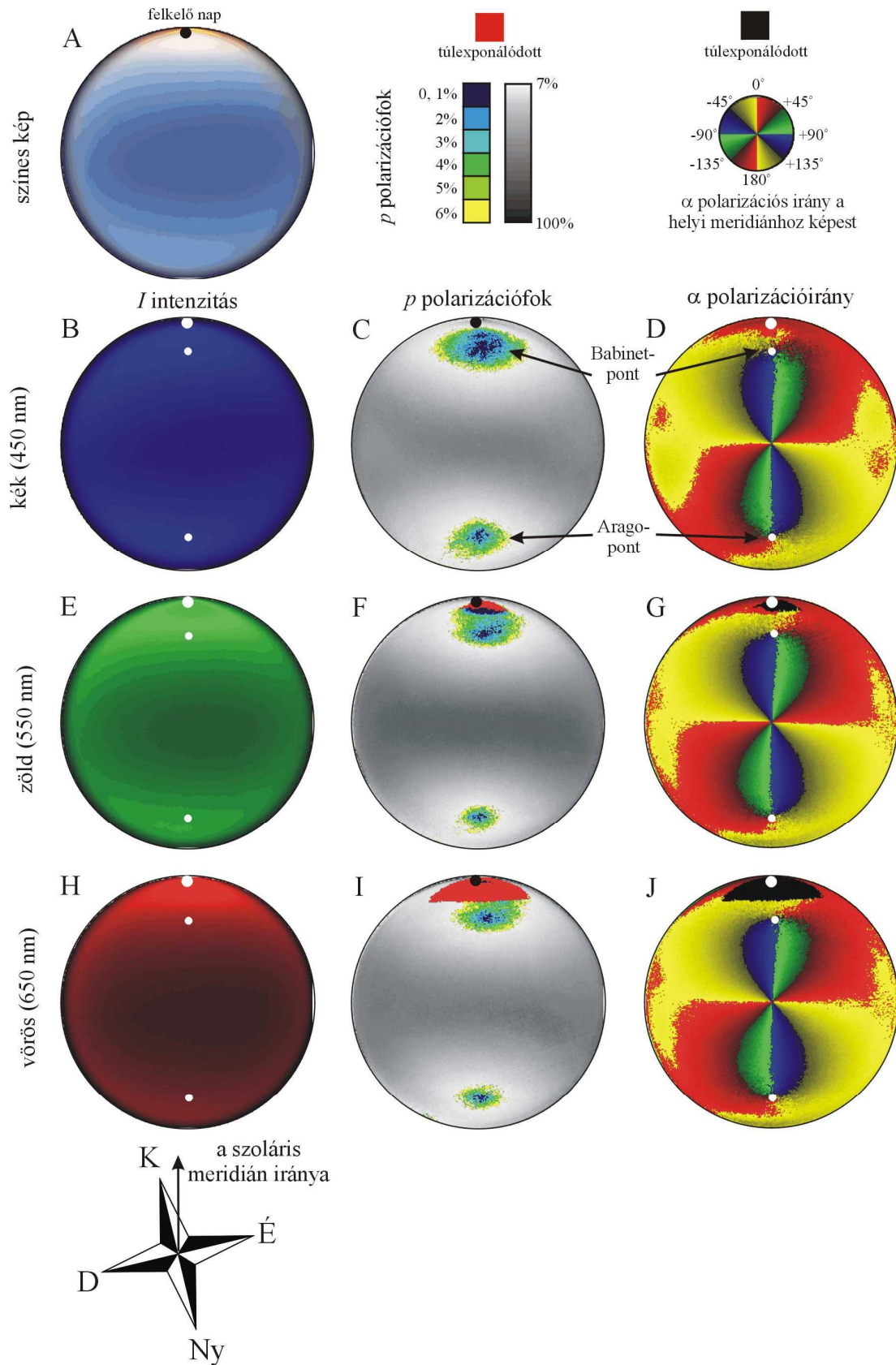
Köszönetnyilvánítás: Kutatásunkat a német Alexander von Humboldt Alapítvány 12 hónapos ösztöndíja (H. G.), a magyar Oktatási Minisztérium három éves Széchenyi István ösztöndíja (H. G.), az ELTE TTK Fizikus Doktori Iskolája (B. B.), valamint a Swiss National Science Foundation 31-43317.95 sz. pályázata (R. W.) támogatta. Hálásak vagyunk Cseraljai Istvánnak, Svájcer Ernőnek és Bogdányi Ottónak (Hőlégballon Szakosztály, MALÉV Aero Klub) a hőlégballonos repüléseink során nyújtott segítségükért, továbbá Hopp Sándornak és Berecz Endrének (ELTE TTK Mechanikai Műhely) a polariméter tartóállványának elkészítéséért. Köszönjük Horváth Ákos meteorológusnak (Viharjelző Observatórium, Siófok) a segítségét.



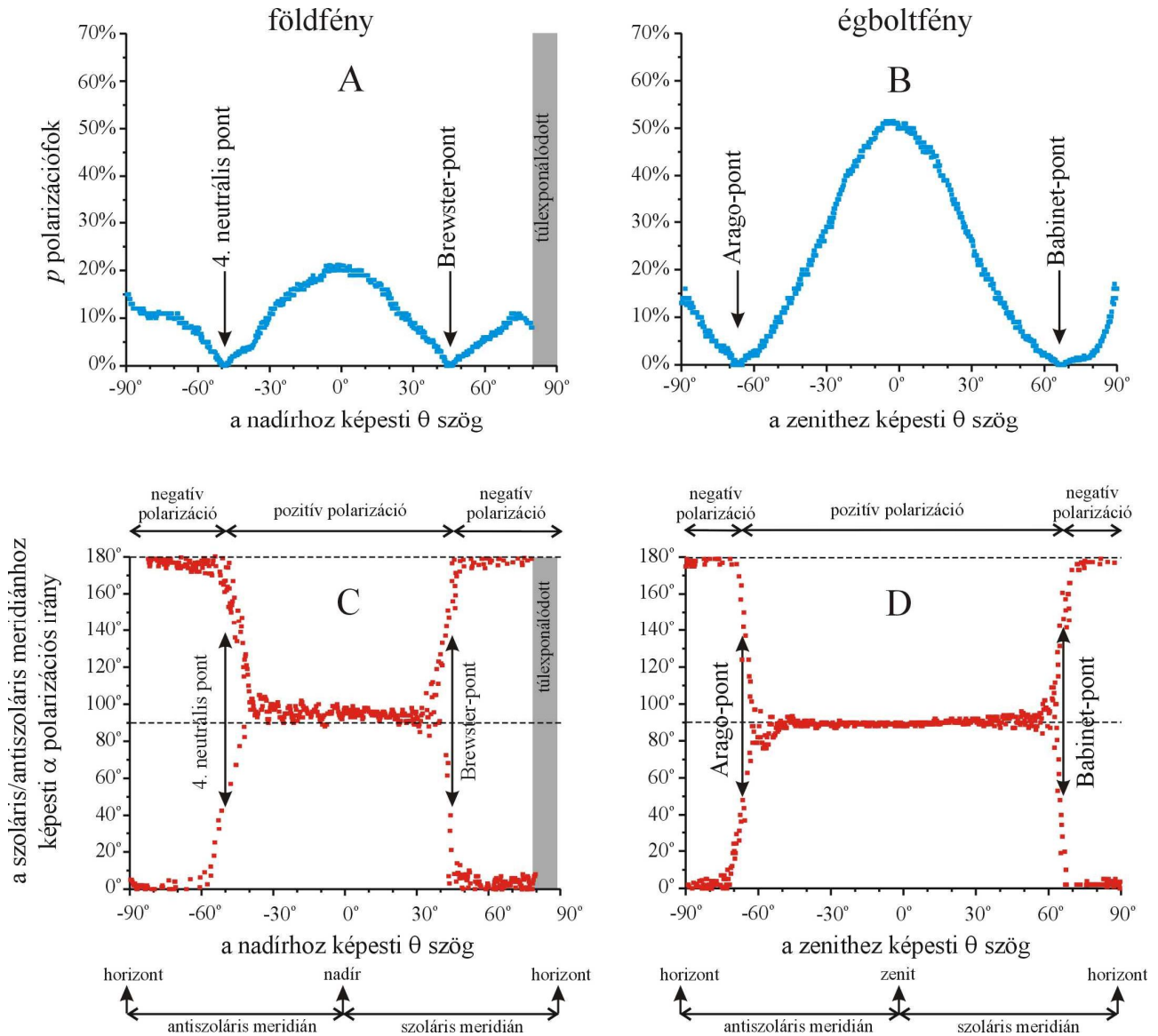
1. ábra. A, B: A poláros égbolt földről észlelhető Arago- (AR), Babinet- (BA) és Brewster-féle (BR) neutrális pontjainak elhelyezkedése a szoláris és antiszoláris meridián mentén a megfigyelőn (M), Napon (N), zeniten (Z), anti-Napon (AN) és nadíron (NA) átmenő függőleges síkban. A földről egyszerre csak két neutrális pont látható: vagy az Arago- és Babinet-pont (A, mikor a Nap a horizonthoz közel van) vagy a Babinet- és Brewster-pont (B, mikor a Nap a horizonttól távol van). A földről a 4. neutrális pont (4.) nem látható. A belső képek Dominique Francois Jean Arago (1786-1853) francia csillagász, Jacques Babinet (1794-1872) francia meteorológus és David Brewster (1781-1868) skót fizikus portréját mutatják, akik először figyelték meg az ég később róluk elnevezett neutrális pontjait. **C:** Megfelelően nagy magasságból a légköri polarizáció mind a négy neutrális pontja egyidejűleg megfigyelhető. Ekkor az Arago- és Babinet-pontok a fölülről jövő poláros égboltfény neutrális pontjai, míg a Brewster-pont és a 4. neutrális pont az alulról jövő poláros földfény polarizálatlan pontjai. **D:** Az Arago-pont és a 4. neutrális pont űrből is lehetséges megfigyelésének geometriája.



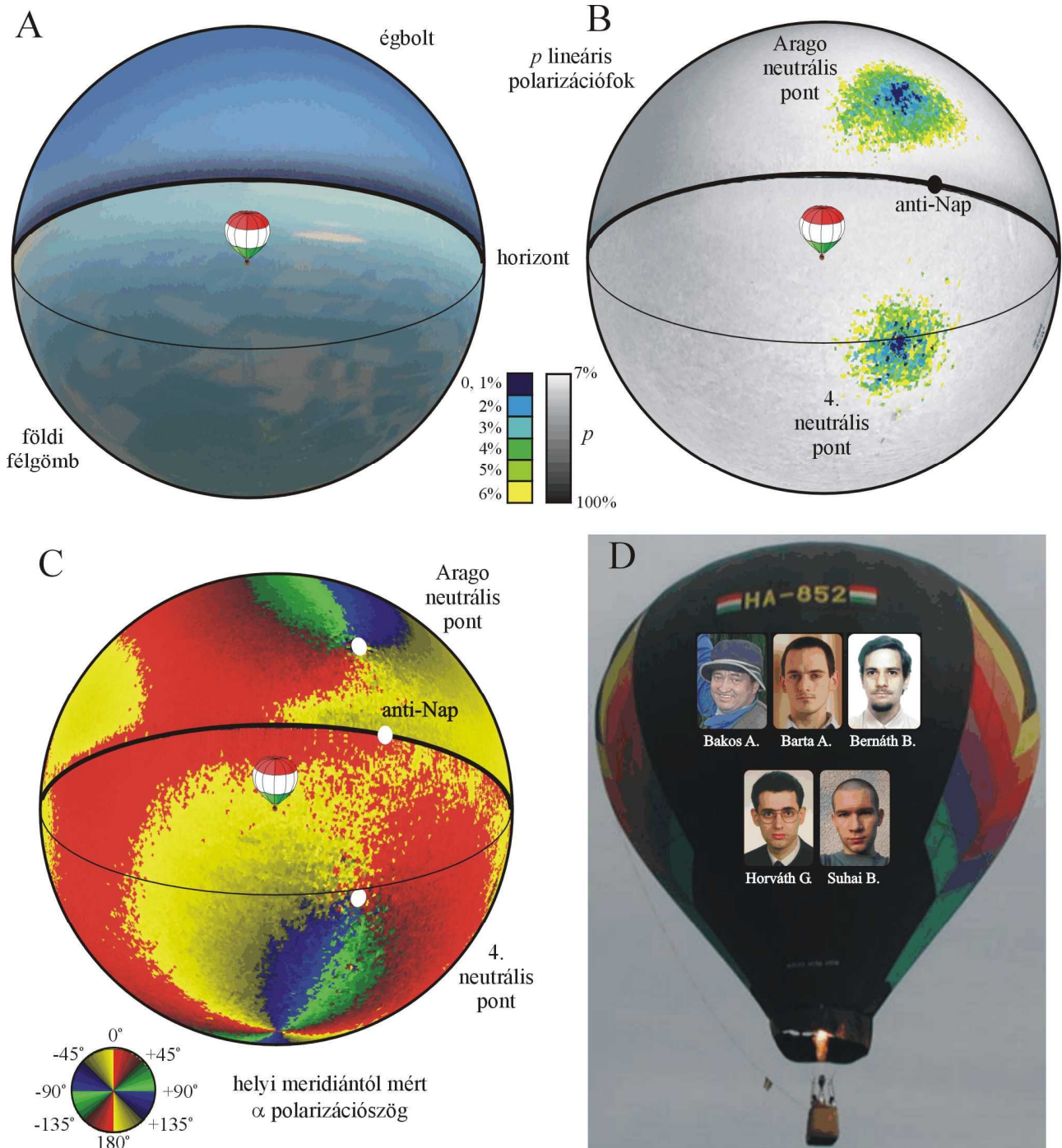
2. ábra. 180° látószögű színes fényképfelvétel a hőlégballon alatt elterülő tájról és légkörről (A), valamint a földfény I intenzitásának (B,E,H), p lineáris polarizációfokának (C,F,I) és α polarizációs irányának (D,G,J) eloszlása. A mérést a spektrum kék (450 nm), zöld (550 nm) és vörös (650 nm) tartományában 180° látószögű képalkotó polarimetriával végeztük Pákozdt közelében 3500 m magasságban 2001. június 28-án, közvetlenül napkelte után (5:12 = UTC+2), mikor a Nap 2° -ra volt a horizonttól. A Nap és a neutrális pontok helyét pontok jelölik.



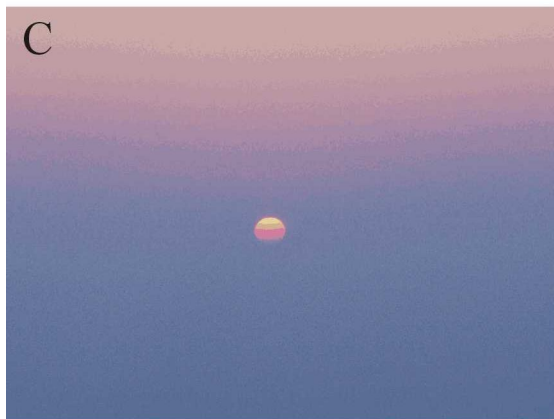
3. ábra. Mint a 2. ábra, de most a földről mért égboltfény esetén. A mérést napkeltekor (6:00 = UTC+1) végeztük 1999. augusztus 26-án a tunéziai sivatagban (Chott el Djerid, 33°52' É, 8°22' K) igen száraz légkörben és tiszta ég alatt. Az égtájakat jelző iránytűn Kelet és Nyugat azért van felcserélve, mert fölfelé nézünk az égre, s nem lefelé a földre.



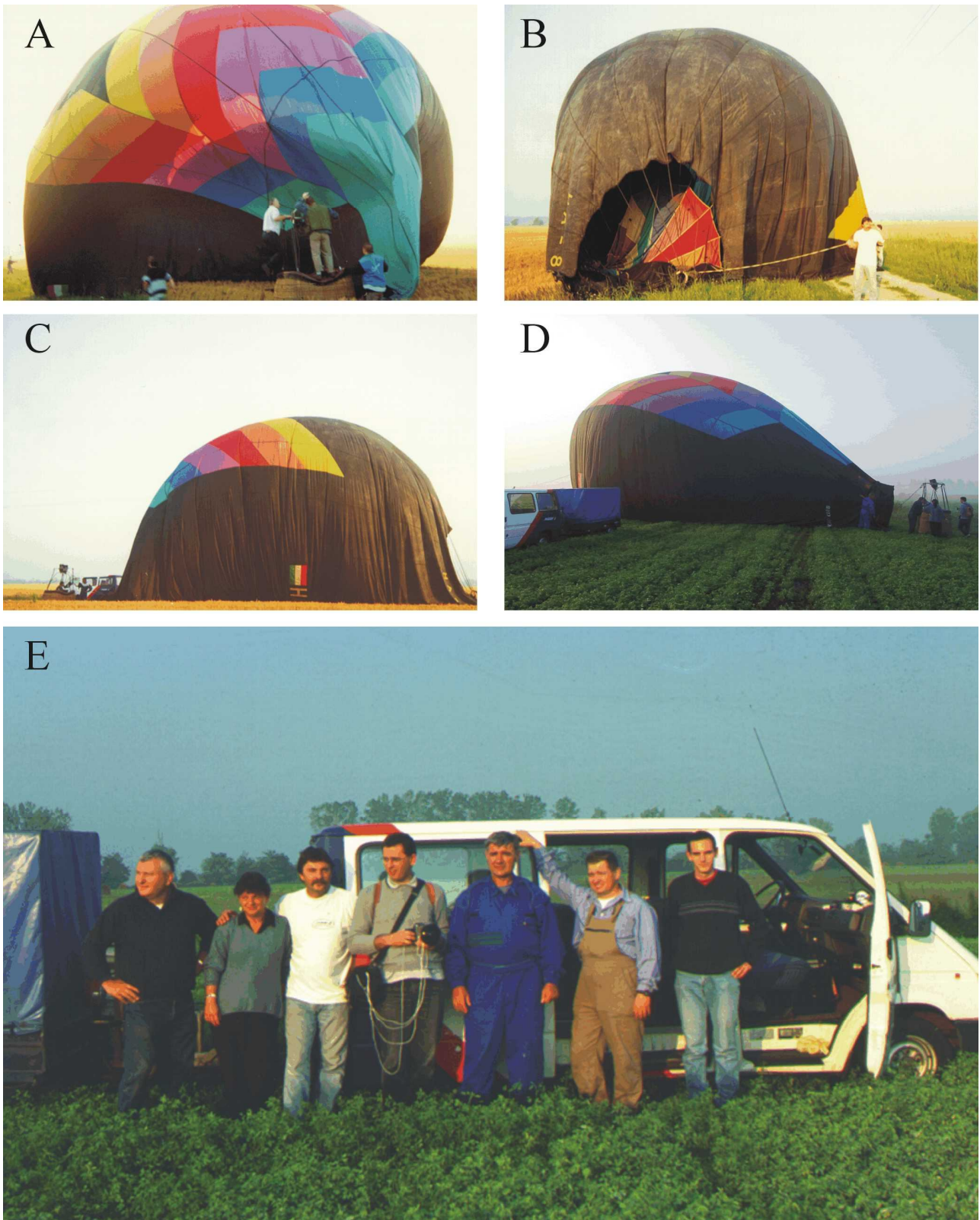
4. ábra. A földfény és az égboltfény p polarizációfoka és α polarizációs iránya a zenittől, illetve nadirtól mért θ szög függvényében a szoláris és antiszoláris meridián mentén a spektrum kék (450 nm) tartományában.



Az égboltfény és a földfény intenzitásának és színének (A), valamint lineáris polarizációfokának (B) és polarizációs szögének (C) eloszlása 3500 m-es magasságban a spektrum kék (450 nm) tartományában hőlégballonról mérve. A mért adatokat hamisszínes kódolással ábráztuk a hőlégballont körülvevő képzeletbeli gömbfelületen, amelyen bejelöltük az Arago-pontot és a keresett 4. neutrális pontot is. (D) A két hőlégballonos felszállás résztvevői, a 4. neutrális pont első megfigyelői: **Bakos Attila, Barta András, Bernáth Balázs, Horváth Gábor, Suhai Bence.**



(A,B) Hajnali felszállás Pákozdnál. (C,D) 4 km magason. (E,F) Leszállás Adonynál.



(A-D) A hőlégballon leeresztése az adonyi leszállás után. (E) A hőlégballonos mérőkampány résztvevői (a fényképet a mérőcsapat 4. tagja, Bernáth Balázs készítette).