

Az égbolt polarizációja normál és szélsőséges körülmények között és annak emberi/állati tájékozódással kapcsolatos vonatkozásai

Doktori értekezés tézisei

Írta:

Hegedüs Ramón

Fizika Doktori Iskola

Statisztikus fizika, biológiai fizika és kvantum rendszerek fizikája program

Fizika Intézet, Természettudományi Kar

Eötvös Loránd Tudományegyetem

Doktori iskola vezetője: Prof. **Horváth Zsolt**, akadémikus

Doktori program vezetője: Prof. **Kürti Jenő**, az MTA doktora

Témavezető: Dr.habil. **Horváth Gábor**, az MTA doktora



Budapest, 2008.

1 Bevezetés

A Föld légkörébe belépő polarizálatlan napsugárzás a légkör különböző gázmolekuláin, aeroszol részecskéin, a vízcseppeken és jégkristályokon szóródva részlegesen lineárisan polárossá válik. A túlnyomóan Rayleigh-szórással keletkező égboltfény egy jellegzetes polarizációs mintázattal rendelkezik, mely elsősorban a Nap helyzetétől, a légköri alkotórészek eloszlásától és a földfelszín fényvisszaverési tulajdonságaitól függ. Amióta 1809-ben Arago felfedezte, hogy az égboltfény poláros, az égbolt polarizációja számos elméleti és kísérleti vizsgálat tárgyát képezte. Léggöroptikai nézőpontból az égbolt polarizációs sajátosságai felhasználhatóak a légköri szennyezettség jellemzésére, de újabb tanulmányok rámutattak, hogy a korábbi módszerekhez képest az égboltot borító felhők megbízhatóbb detektálását is elősegíthetik. Másrészt az égbolt-polarizáció rendkívüli biológiai jelentőséggel bír, hiszen számos polarizáció-látással rendelkező állatfaj tájékozódásra használja. Néhány kutató azt a hipotézist is felvetette, miszerint a vikingek ugyancsak használhatták az égbolt-polarizációt felhős és ködös meteorológiai körülmények között a nyílt tengeren való tájékozódásukhoz.

Doktori értekezésemben az égbolt polarizációját vizsgáltam normál és szélsőséges körülmények között 180° látószögű képpalkotó polarimetriával, és tárgyaltam annak az emberi, illetve állati tájékozódással kapcsolatos néhány vonatkozását. Korábban az égboltfény polarizációját gyakorlatilag csak normál körülmények között vizsgálták, mikor döntően az egyszeres (Rayleigh-)szórás érvényesül a légkörben, azaz tiszta és részben felhős égboltok esetén. Ezzel szemben teljesen borult, ködös, füstös, valamint erdőlombok által takart egzek esetén eddig csak kevés vagy semmilyen információ nem állt rendelkezésre az égbolt-polarizáció térbeli eloszlásáról. Ezért azt a célt tűztem ki, hogy mérési adatokat gyűjtsék az égbolt polarizációjáról ilyen szélsőséges meteorológiai körülmények között, mikor a többszörös fényszórás fontos szerepet játszik. Doktori téziseimben a hároméves doktori ösztöndíjam alatt elért főbb eredményeimet ismertetem.

2 Módszerek

Az égbolt-polarizáció különböző meteorológiai körülmények között, illetve erdőlombok alatti méréséhez 180° látószögű képpalkotó polarimetriát alkalmaztam, melynek technikáját, kalibrációját és kiértékelési algoritmusát témavezetőm fejlesztette ki korábban. A 180° -os látószöget egy halszemoptika biztosította, melybe egy három, szélessáv-áteresztésű (275-750 nm) és három különböző áteresztési irányval rendelkező lineáris polárszűrőt tartalmazó forgatható tárcsa volt beépítve. Az égbolt-polarizáció mintázatai ugyanazon égboltnak a három különböző áteresztési irányú polárszűrőn keresztül való fényképezése által kerül rögzítésre. Egy ilyen fénykép-hármas kiértékelésével – amely egy eredetileg a témavezetőm által kifejlesztett, majd később doktoranduszai, köztük jómagam által továbbfejlesztett számítógépes program segítségével történt –, az adott égbolt p lineáris polarizációfokának és α polarizáció-irányának mintázatait kaptam meg a látható spektrum vörös ($650 \text{ nm} \pm 40 \text{ nm}$), zöld ($550 \text{ nm} \pm 40 \text{ nm}$) és kék ($450 \text{ nm} \pm 40 \text{ nm}$) tartományában.

Ahol a mért adatok értelmezéséhez erre szükség volt, a polarizációirány mintázatokat egy többszörös szórás figyelembe vevő elméleti modell alapján összehasonlítottam a tiszta égboltok elméleti mintázataival is, mely modell a tiszta égbolt mért polarizációs mintázatának nagyon jó kvantitatív közelítését teszi lehetővé, különös tekintettel a neutrális pontok létezésére és helyzetére.

3 Eredmények

3.1 Hajózhattak-e a vikingek az égbolt polarizációja segítségével ködös és felhős körülmények között? A polarimetrikus viking-navigáció légköroptikai feltételei

- 180° látószögű képalkotó polarimetriával meghatároztam északi-sarki ködös és felhős égboltok polarizációs mintázatait a spektrum vörös (650 nm), zöld (550 nm) és kék (450 nm) tartományjaiban.
- Megmutattam, hogy a részben felhős égboltok átlagos p polarizációfoka 10-25% közé, míg ködös égboltoké 4-15% közé esik.
- Megállapítottam, hogy a ködös és felhős egek polarizációs mintázatai minőségileg megegyeznek a tiszta égboltéival: a neutrális pontok a szoláris-antiszoláris meridián mentén, a Nap, illetve anti-Nap közelében helyezkednek el, illetve a $+45^\circ \leq \alpha \leq +135^\circ$ helyi meridiántól mért polarizációszőggel jellemzett égboltrészek egy nyolcas alakú területet képeznek, melyet a $-45^\circ \leq \alpha \leq +45^\circ$ polarizációszőggel jellemzett égboltrész vesz körül.
- A kapott eredményekből arra következtettem, hogy a ködös égboltokra jellemző meglehetősen alacsony p polarizációfok miatt kétséges, hogy vajon a feltételezett polarimetrikus viking navigáció minden légköroptikai feltétele teljesül-e napsütötte időben.
- Továbbá levontam azt a következtést is, miszerint részben felhős égbolt esetén a polarimetrikus viking navigáció minden légköroptikai feltétele teljesül az ég bizonyos (kisebb vagy nagyobb) részein.

3.2 Teljesen borult égboltok polarizációs mintázatai

- 180° látószögű képalkotó polarimetriával meghatároztam az Északi-sarkvidéken és Magyarországon mért teljesen borult égboltok polarizációs mintázatait a spektrum vörös (650 nm), zöld (550 nm) és kék (450 nm) tartományjaiban.
- Megmutattam, hogy a teljesen borult égboltról érkező fény p polarizációfoka jelentősen alacsonyabb a tiszta égboltra jellemző polarizációfok értékeknél.
- Megállapítottam, hogy a teljesen borult egek α polarizáció-irány mintázatai minőségileg a tiszta égboltéval egyeznek: mindhárom spektrális tartományban (vörös, zöld, kék) az α -izovonalak egy nyolcas alakot vesznek fel, melynek középpontja a zenit és tükrösszimmetria-tengelye a szoláris-antiszoláris meridián.
- Arra következtettem, hogy azon polarizáció-látással rendelkező állatok, melyek az égbolt-polarizációt használják tájékozódásukhoz, és megfelelően alacsony polarizációs küszöbérzékenységgel rendelkeznek (pl. a házi méhek és a mezei tücskök), képesek lehetnek az α polarizáció-irány mintázatot még teljesen borult időben is használni.

3.3 Erdőtűz füstje által előidézett anomális égbolt-polarizáció: Miért tévednek el bizonyos rovarok a füstös ég alatt?

- 180° látószögű képkalkító polarimetriával meghatároztam az alaskai Fairbanksben, 2005. augusztus 17-én, erdőtűztől füstös égbolt polarizációs mintázatait a spektrum vörös (650 nm), zöld (550 nm) és kék (450 nm) tartományában.
- Megállapítottam, hogy a füstös ég polarizációs mintázatai több vonatkozásban is rendellenesek a tiszta égboltéhoz képest.
- Kimutattam, hogy a füstös ég fényének p polarizációfoka drasztikusan lecsökken a légkörben többszörös fényszórást előidéző fűstrészecskék miatt.
- Megmutattam, hogy a Babinet-féle neutrális pont helyzete, az Arago- és Babinet-féle neutrális pontok zenitsszöge, valamint néhány esetben a Brewster-féle neutrális pont helyett az Arago-féle neutrális pont megjelenése anomális a tiszta égbolt neutrális pontjainak helyzetéhez képest.
- Arra következtettem, hogy bizonyos polarizáció-látással rendelkező rovaroknak az erdőtűzek idényében kanadai kutatók által megfigyelt eltérése részben az égboltfény polarizációfóka miatt drasztikus csökkenésével magyarázható.

3.4 Erdei lombzatok képkalkító polarimetriája

- 180° látószögű képkalkító polarimetriával meghatároztam a finnországi Ouluban erdei lombzat alatt mért polarizációs mintázatokat a spektrum vörös (650 nm), zöld (550 nm) és kék (450 nm) tartományában.
- Megmutattam, hogy amennyiben az eget részben takaró lombzatot a Nap közvetlenül megvilágítja, az égbolt α polarizáció-irány mintázata minőségileg megegyezik a neki megfelelő tiszta égboltéval: az α -izovonalak egy nyolcas alakot vesznek fel, melynek középpontja a zenit és a tükörszimmetria-tengelye a szoláris-antiszoláris meridián.
- Megállapítottam, hogy abban az esetben, mikor az eget részben takaró lombzatot nem világítja meg közvetlen napfény, az égbolt α polarizáció-irány mintázata annyira eltorzul, hogy már nem lehet a tükörszimmetria nyomait felfedezni benne.
- Képkalkító polarimetriával kapott eredményeken alapuló érveket szolgáltattam azon hipotézis mellett, hogy azok a polarizáció-látással rendelkező állatok, melyeknek a napsütötte erdei lombzat alatt kell tájékozódniuk (pl. a trópusi méhek), képesek lehetnek az orientációjukhoz szükséges égbolt-polarizáció nyújtotta információkat megszerezni ilyen körülmények között is.

3.5 Északi-sarkvidéki nyílt vizek felett kialakuló „víz-égek” polarizációs sajátosságai: Miképp lehet a jégtakaró polinjáit távolból észlelni?

- 180° látószögű képkalkító polarimetriával meghatároztam az északi-sarkvidéki nyílt vizek (polinják) felett kialakuló „víz-égek” polarizációs mintázatait a spektrum vörös (650 nm), zöld (550 nm) és kék (450 nm) tartományában.
- Megállapítottam, hogy a „víz-égről” érkező fény α polarizáció-iránya szignifikánsan különbözik az égbolt többi részéről (a „jég-égről”, illetve a „víz-ég” alatti fényes sávól) érkező fény polarizáció-irányától.
- Arra a következtetésre jutottam, hogy ha a „víz-ég” alatt kialakul egy fényes sáv, akkor a „jég-égről” és a „víz-égről” érkező fény polarizáció-iránya között a különbség maximális, ha az utóbbit közel függőleges polarizáció-irányú „jég-ég” veszi körül.

Minél inkább eltér a függőlegestől a „jég-égről” fényének polarizáció-iránya, annál kisebb ez a különbség, ami el is tűnik, amennyiben a „víz-ég” mögötti égboltrész polarizáció-iránya közel vízszintes.

4 Közlemények

4.1 A doktori értekezés alapjául szolgáló közlemények

- [1] Hegedüs, R., Åkesson, S. & Horváth, G. (2007) Anomalous celestial polarization caused by forest fire smoke: Why do some insects become visually disoriented under smoky skies? *Applied Optics* 46: 2717-2726
- [2] Hegedüs, R., Åkesson, S. & Horváth, G. (2007) Polarization patterns of thick clouds: Overcast skies have distribution of the angle of polarization similar to that of clear skies. *Journal of the Optical Society of America A* 24: 2347-2356
- [3] Hegedüs, R., Åkesson, S. & Horváth, G. (2007) Polarization of "water-skies" above arctic open waters: how polynyas in the ice-cover can be visually detected from a distance. *Journal of the Optical Society of America A* 24: 132-138
- [4] Hegedüs, R., Åkesson, S., Wehner, R. & Horváth, G. (2007) Could Vikings have navigated under foggy and cloudy conditions by skylight polarization? On the atmospheric optical prerequisites of polarimetric Viking navigation under foggy and cloudy skies. *Proceedings of the Royal Society of London A* 463: 1081-1095
- [5] Hegedüs, R., Barta, A., Bernáth, B., Meyer-Rochow, V. B. & Horváth, G. (2007) Imaging polarimetry of forest canopies: how the azimuth direction of the sun, occluded by vegetation, can be assessed from the polarization pattern of the sunlit foliage. *Applied Optics* 46: 6019-6032

4.2 A doktori értekezés témájához kapcsolódi további közlemények

- [6] Hegedüs, R.; Horváth, Á. & Horváth, G. (2006) Why do dusk-active cockchafers detect polarization in the green? The polarization vision in *Melolontha melolontha* is tuned to the high polarized intensity of downwelling light under canopies during sunset. *Journal of Theoretical Biology* 238: 230-244
- [7] Hegedüs, R. & Horváth, G. (2007) Mindentudás az iskolában – Polariméter a szemben, polarizációs iránytű és napóra az égen, vízen és vízben. *Fizikai Szemle* 57: 34-36, B3-B4
- [8] Horváth, G., Hegedüs, R., Malik, P., Bernáth, B. & Kriska, Gy. (2007) A poláros fény rejtett dimenziói II. Polarizációlátás és polarizációs ökológiai csapdák. *Természet Világa* 138: 512-516
- [9] Horváth, G., Barta, A., Hegedüs, R., Pomozi, I., Suhai, B., S. Åkesson, B. Meyer-Rochow & R. Wehner (2008) Sarkított fényvel a vikingek nyomában az Északi-sarkvidéken: A polarimetrikus viking navigáció légköroptikai feltételeinek kísérleti vizsgálata. *Fizikai Szemle* 58: 131-140
- [10] Sipőcz, B.; Hegedüs, R. & Horváth, G. (2008) Spatiotemporal change of sky polarization during the total solar eclipse on 29 March 2006 in Turkey: polarization singularities of the eclipse sky observed by full-sky imaging polarimetry. *Applied Optics* (nyomdában)

-
- [11] Malik P., Hegedüs R., Horváth G. & Kriska Gy. (2008) Folyóparti poláros "üvegpaloták" mint ökológiai csapdák II. Miért vonzódnak a tegzesek függőleges üvegfelületekhez? *Élet és Tudomány* (nyomdában)
- [12] Malik, P.; Hegedüs, R.; Kriska, G. & Horváth, G. (2008) Imaging polarimetry of glass buildings: Why do vertical glass surfaces attract polarotactic insects. *Applied Optics* (elbírálás alatt)