

# 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 Zalán**, 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 égbolttfény 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 égbolttfény 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  $180^\circ$  látószögű képalkotó polarimetriával, és tárgyaltam annak az emberi, illetve állati tájékozódással kapcsolatos néhány vonatkozását. Korábban az égbolttfény 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 egék 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  $180^\circ$  látószögű képalkotó polarimetriát alkalmaztam, melynek technikáját, kalibrációját és kiértékelési algoritmusát témavezetőm fejlesztette ki korábban. A  $180^\circ$ -os látószöget egy halszemoptika biztosította, melybe egy három, szélessáv-áteresztésű (275-750 nm) és három különböző áteresztési iránnyal rendelkező lineáris polárszűrőt tartalmazó forgatható tárcsa volt beépítve. Az égbolt-polarizáció mintázatai ugyanazon égboltnak a három különböző áteresztési irányú polárszűrőn keresztül való fényképezése által került 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  $\alpha$  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 ( $450 \text{ nm} \pm 40 \text{ nm}$ ) tartományaiban.

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

- $180^\circ$  látószögű képalkotó polarimetriával meghatároztam északi-sarki ködös és felhős égboltok polarizációs mintázatait a spektrum vörös (650 nm), zöld (550 nm) és kék (450 nm) tartományaiban.
- 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 polarizációs szöggel jellemzett égboltrészek egy nyolcas alakú területet képeznek, melyet a  $-45^\circ \leq \alpha \leq +45^\circ$  polarizációs szöggel 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 ködben.
- 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

- $180^\circ$  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) tartományaiban.
- Megmutattam, hogy a teljesen borult égboltról érkező fény  $p$  polarizációfoka jelentősen alacsonyabb a tiszta égboltra jellemző polarizációfok értékeknél.
- Megállapítottam, hogy a teljesen borult egek  $\alpha$  polarizáció-irány mintázatai minőségileg a tiszta égboltéival egyeznek: mindhárom spektrális tartományban (vörös, zöld, kék) az  $\alpha$ -izovonalak egy nyolcas alakot vesznek fel, melynek középpontja a zenit és tükörszimmetria-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  $\alpha$  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?

- $180^\circ$  látószögű képalkotó polarimetriával meghatároztam az alaszka Fairbanksben, 2005. augusztus 17-én, erdőtűztől füstös égboltok 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 égboltéihoz képest.
- Kimutattam, hogy a füstös ég fényének  $p$  polarizációfoka drasztikusan lecsökken a légkörben többszörös fényszórást előidéző füstreszecskek miatt.
- Megmutattam, hogy a Babinet-féle neutrális pont helyzete, az Arago- és Babinet-féle neutrális pontok zenitszöge, 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 polarizációfokának füst miatti drasztikus csökkenésével magyarázható.

### 3.4 Erdei lombzatok képalkotó polarimetriája

- $180^\circ$  látószögű képalkotó 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  $\alpha$  polarizáció-irány mintázata minőségileg megegyezik a neki megfelelő tiszta égboltéval: az  $\alpha$ -izovonalak egy nyolcas alakot vesznek fel, melynek középpontja a zenit és tükörszimmetria-tengelye a szoláris-antiszoláris meridián.
- Megállapítottam, hogy abban az esetben, mikor ez eget részben takaró lombzatot nem világítja meg közvetlen napfény, az égbolt  $\alpha$  polarizáció-irány mintázata annyira eltorzul, hogy már nem lehet a tükörszimmetria nyomait felfedezni benne.
- Képalkotó 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-egek” polarizációs sajátosságai: Miképp lehet a jégtakaró polinyjait távolból észlelni?

- $180^\circ$  látószögű képalkotó polarimetriával meghatároztam az északi-sarkvidéki nyílt vizek (polinyják) felett kialakuló „víz-egek” polarizációs mintázatait a spektrum vörös (650 nm), zöld (550 nm) és kék (450 nm) tartományában.
- Megállapítottam, hogy a „víz-égről” érkező fény  $\alpha$  polarizáció-iránya szignifikánsan különbözik az égbolt többi részéről (a „jég-égről”, illetve a „víz-ég” alatti fényes sávból) 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 függőlegetől 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 fénnel 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 "üvegpalták" 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)