

10. ábra. A milliszekundumos neutroncsillagok frekvencia szerinti eloszlásának összehasonlítása Glendenning és Weber modelljével. A megfigyelések néhány évvel ezelőtt világos csúcsot mutattak a 300 Hz körüli tartományban, amelyet elég jól reprodukál a belső kvarkmag neutronanyagga történő átalakulásakor stagnáló frekvenciára alapozott modell (szimulációjából a csúcs 200 Hz körül adódik).

tum-vesztéssel együtt járó lepörgési folyamatára is. A csökkenő centrifugális hatás miatt fokozatosan növekvő kvarkfázis az anomálishan nagy tömegű neutroncsillagok lepörgésében is okozhat egy stagnáló szakaszt. Mindmáig azonban nem találtak erre mutató evidenciát.

A nagysűrűségű, erősen kölcsönható anyag állapotegyenletének vizsgálata a kvarkanyag számos termodinamikai fázisát tárta fel az elmúlt évtizedben, amelyek teszteléséhez a megfigyelt csillagászati kompakt objektumok növekvő számától és jellemzésük növekvő pontosságától várunk meggyőző információkat.

#### Irodalom

1. Horváth Dezső: Szimmetriák és sértésük a részecskék világában – a paritásértés 50 éve. *Fizikai Szemle* 57/2 (2007) 47.
2. Trócsányi Zoltán: A kvantum-szindinamika szerepe a nagyenergiájú részecskeütközések értelmezésében. *Fizikai Szemle* 57/3 (2007) 73.
3. Fodor Zoltán: Az erős kölcsönhatás fázisdiagramja. *Fizikai Szemle* 56/2 (2006) 42.
4. Fodor Zoltán, Katz Sándor: Volt-e (van-e) fázisátmenet a Big Bang (Little Bang) során. *Fizikai Szemle* 56/12 (2006) 393.

## SARKÍTOTT FÉNNYEL A VIKINGEK NYOMÁBAN AZ ÉSZAKI-SARKVIDÉKEN

A polarimetrikus viking navigáció légköroptikai feltételeinek kísérleti vizsgálata

Horváth Gábor, Barta András, Hegedüs Ramón, Pomozi István, Suhai Bence  
Eötvös Egyetem, Fizikai Intézet, Biológiai Fizika Tanszék, Biooptika Laboratórium

Susanne Åkesson  
Lundi Egyetem, Állatökológiai Tanszék, Lund, Svédország

Benno Meyer-Rochow  
Jacobs Egyetem, Biológiai Intézet, Bréma, Németország és  
Oului Egyetem, Állattani Intézet, Oulu, Finnország

Rüdiger Wehner  
Zürichi Egyetem, Állattani Intézet, Zürich, Svájc

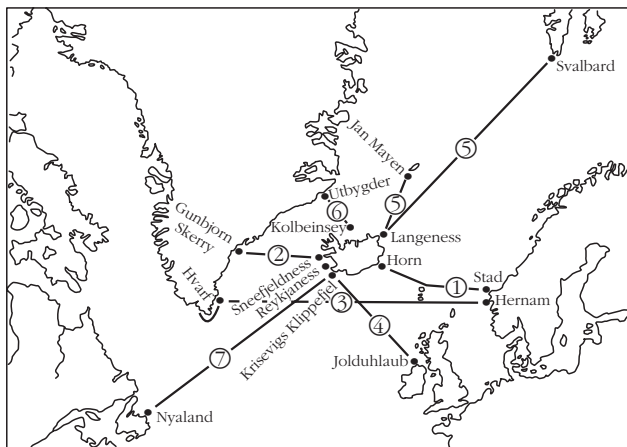
Az i.sz. 900 és 1200 közötti időszakban az Atlanti-óceán északi részeit a vikingek uralták, akik mágneses iránytű nélkül is kiválóan tájékozódtak a nyílt vizeken. Amikor sütött a Nap, egy speciális napórával határozták meg az égtájak irányát. Májig rejtélynek számított azonban, hogy felbős vagy ködös időben, amikor nem látható a napkorong, miként navigáltak. Egy 1967-ből származó, széles körben elterjedt és elfogadott hipotézis szerint ködös vagy felbős időben a vikingek az égbolt-polarizáció segítségével tájékozódhattak azon rovarokhoz hasonlóan, amelyek az égboltfény polarizációirányának mintázatából következtetik ki a felbők mögötti napkorong irányát. A feltételezések szerint a vikingek az égboltfény polarizációirányát lineáris polárszűrőként működő kristályokkal állapíthatták meg, amelyeket

„napkőként” emlegetnek a viking legendáriumban, de pontos mibenlétük ismeretlen. Habár a vikingek égbolt-polarimetrikus navigációjáról szóló hipotézis egy sokat idézett, híres elmélet, napjainkig teljesen nélkülözötte a kísérleti alapokat, aminek következtében nagyszámú hívője mellett számos szkeptikus tagadója is létezik. Cikkünkben azon égbolt-polarimetriai és laboratóriumi pszichofizikai méréseink eredményeit foglaljuk össze, amelyekben a polarimetrikus viking navigáció légköroptikai feltételeit vizsgáltuk Tunéziában, Finnországban, az Északi-sarkvidéken és Magyarországon.

### A viking napóra, mint iránytű

A vikingek egyik fő hajózási útvonala a 61. északi szélességi körön húzódott, amely mentén Norvégia és Grönland között hajóztak (1. ábra). Grönlandon a

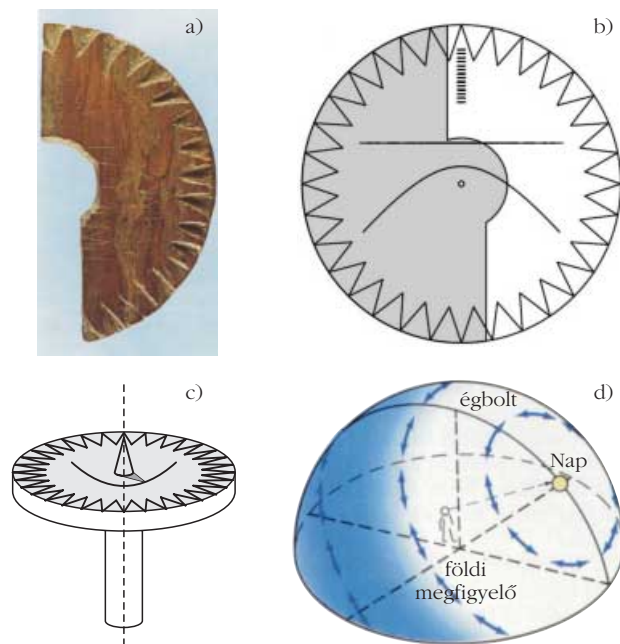
A cikk az ELTE Ortway Kollokviumán 2007. szeptember 27-én Horváth Gábor által tartott azonos című előadás írott változata.



1. ábra. A vikingek 7 legfőbb hajózási útvonalára, amelyek közül a 3-as számú Hernam (a mai norvégiai Bergen) városát kötötte össze a dél-grönlandi Hvarf településsel a 61. északi szélességi kör mentén [1].

régészek egy kőlapot és egy fatárcsátörédeket (2.a ábra) találtak, amelyeken egyenes és hiperbola alakú karcolások voltak (2.b ábra) [1]. Mindkét töredékről kiderült, hogy olyan napórák részei voltak, amelyeket a vikingek irányítúként használtak a 61. szélességi kör menti hajózásaik során. A fatárcsa közepéből, annak síkjára merőlegesen egy pálca, az úgynevezett gnomon állt ki, ami napsütésben árnyékot vetett a tárcsára (2.c ábra). Ha a tárcsát vízszintesen tartjuk és a 61. szélességen a vikingek fő hajózási szezójában (májustól augusztusig) rárajzoljuk azt a görbét, amit a

2. ábra. a) A Dél-Grönlandon talált fatárcsátörédékek, amire hiperbola alakú görbét karcoltak az egykori viking navigátorok [1]. b) A vikingek tengeri navigációra használt napirányítójának rekonstruált tárcsája, amelynek szürkével jelölt bal fele nem maradt fenn. c) A rekonstruált viking napirányítú háromdimenziós rajza a függőleges kúp alakú gnomonnal és annak a tárcsába vésett hiperbolát érintő árnyékával. d) A polarimetrikus viking navigáció akkor működik, ha az égboltfény rezgésirányának iránya (kettősfejtű nyilakkal szimbolizálva) merőleges a Napon, a földi megfigyelőn és az égboltfényt pontján átmenő szórásirányára, vagyis a Rayleigh-elméletnek felel meg.



gnomon csúcsának árnyéka követ napkeltétől napnyugtáig, akkor éppen a tárcsára karcolt hiperbolához jutunk. A tárcsán az egyenes karcolási nyom a napéj-egyenlőséghez, míg a másik, hiperbolikus nyom a nyári napfordulóhoz tartozott.

Miután a vikingek a napórájuk gnomonja árnyékának nyomait bekarcolták a tárcsába, egy olyan esz-közkhöz jutottak, amivel napsütésben a 61. szélességi körön, májustól augusztusig a nyílt vizeken is meg tudták határozni a földrajzi északi irányt. Nem kellett mást csinálniuk, mint napsütésben vízszintesen tartani a fatárcsát és a függőleges gnomon, mint tengely körül addig forgatni, míg a gnomon árnyékának csúcsa érintette a tárcsára karcolt megfelelő nyomot. Ekkor a tárcsába vésett egyik rovátka a földrajzi észak felé mutatott (2.b ábra).

Az Atlanti-óceánt a 61. szélességi kör mentén átsze-lő egyik vitorlánhajó-versenyen számos kapitány kö-zött kiosztottak több olyan napórát, amelyek a re-konstruált viking napóra hű másolatai voltak, s a ka-pitányokat megkérték, hogy időnként csak e napórát használják navigációra. Bebizonyosodott, hogy egye-dül a viking napórával is kiválóan, nagy pontossággal lehet navigálni a nyílt óceánon, ha süt a Nap [1]. E módszert nevezik „szoláris viking navigációnak”.

## A polarimetrikus viking navigáció hipotézise

Mivel a viking napóra csak napsütésben működik, fölvetődik a kérdés, hogy miként navigáltak a nyílt vizeken a vikingek, amikor a Napot felhő vagy köd takarta? E meteorológiai helyzet gyakran előfordul az Északi-sarkkör közelében, nem ritkán úgy, hogy napokig nem süt ki a Nap. Lehet-e a viking napórát használni felhős vagy ködös időben? Az 1960-as évek végén *Thorkild Ramskou* [2] dán régész feltételezte, hogy a vikingek a nyílt vizeken az égboltfény polarizációirányának segítségével a következőképpen tájékozódhattak, amikor a Nap felhő vagy köd mögött volt:

- A viking navigátor az ég legalább két helyén először meghatározta az égboltfény polarizációirányát egy „napkőnek” nevezett, lineáris polárszűrőként működő kristállyal (2.d ábra). A napkő mibenlétét teljes homály fedi; talán a skandináv régióban gyakori kordierit vagy turmalin lehetett. A szemünk előtt ide-oda forgatott ilyen kristálydarabkán át nézve az eget, az periodikusan kifényesedni és elsötétülni látszik, mert az égboltfény lineárisan poláros. Ha egy viking navigátor egy ilyen kristályt napsütésben úgy állított be, hogy azon át nézve az égbolt egy adott része a legfényesebb legyen, s ekkor a Nap felé mutató egyenes karcolást ejtett a kristályon, akkor ezzel kalibrálta a napkövet. Így a felhő által takart Nap iránya meghatározható: nem kell mást tenni, mint az ég egy felhőmentes, kék foltját nézni a napkövön át, s addig forgatni, amíg a legfényesebbnek látszik. Ekkor a napkövön lévő karcolás a Nap felé mutat, ha az égboltfény polarizációirány a Rayleigh-elmélet szerinti, vagyis

az ég bármely pontjáról jövő fény rezgésükje merőleges a megfigyelőn, a Napon és az ég megfigyelt pontján átmenő szórási síkra.

- Ezután a viking navigátor a két napkőbe vésett egy-egy karcoláson átmenő, s azzal párhuzamos két éggömbi főkör horizont fölötti metszéspontját becsülhette meg, ami megadja a nem látható Nap helyét, ha az égboltfény polarizációirány-mintázata azonos a Rayleigh-mintázattal. Végül a felhő vagy köd által takart Nap így meghatározott helyének ismeretében valahogyan imitálni kell azon egyenes irányát, ami a napsugaraknak felelne meg, ha a Nap sütne. Ez például úgy történhetett, hogy a navigátor társa egy égő fáklyát tartott úgy, hogy a navigátor pont abban az irányban látta azt, amerre a felhő/köd által takart Nap helyét becsülte az égen. Ekkor tehát a Napot a fáklya pótolta, s a fáklyafényben a viking napóra gnomonjának árnyéka tette lehetővé az északi irány meghatározását. Egy másik lehetőség, hogy a gnomon csúcsára egy, például nád-szárból készített, forgatható hossz tengelyű, vékony csövecske volt kötözve. A navigátor e csövecskével a felhő/köd által takart Nap fönt leírt módon megbecsült helyére célozhatott, majd a csövecskébe egy vékony, merev, egyenes pálcikát (például száraz fűszálat) dugott, modellezve ezzel a nem látható Napnak a gnomon csúcsát súroló sugarát.

A fönt leírtak szerint tehát felhős/ködös időben meg lehetett becsülni a viking napórával a földrajzi északi irányt. Mivel mindennek a kiindulási alapja az égboltfény polarizációirányának mérése, ezért e tájékozódási módszert „polarimetrikus viking navigációnak” hívjuk. A polarimetrikus viking navigáció hipotézisét a tudományos közösség jelentős része elfogadja és gyakran idézi is annak ellenére, hogy semmilyen konkrét bizonyíték sincs rá. Az egyik viking legendában (*sagában*) fölbukkan egy olyan történet, amit a polarimetrikus viking navigációra való utalásnak tartott Ramskou [2]: „Az idő nagyon borult volt, erősen havazott. Szent Olaf király elküldött valakit, hogy nézzen ki, de az égen nem volt egyetlen felhőtlen pont sem. Ekkor megkérte Sigurdot, hogy mondja meg, hol lehet a Nap. Amikor Sigurd ezt megtette, a király fogott egy napkövet, fölfelé tartotta és látta, hogy hol sugárzott fény a kőből, amiből kikövetkeztette a nem látható Nap helyét. Kiderült, hogy tényleg ott van, ahova Sigurd jósolta.” (Lásd a hátsó belső borító színes ábráit!)

E homályos értelmű Sigurd-ságán túli másik érv a polarimetrikus viking navigáció mellett az, hogy amikor a Skandináv Légitársaság pilótái DC-8 típusú gépekkel az Északi-sark környéke fölött repültek, sokáig egy olyan eszközt használtak, amellyel az égbolt polarizációja alapján tudtak navigálni. E műszer neve Kollsmán-féle égi iránytű (angolul *Kollsmán's sky compass*), amit 1948-ban fejlesztettek ki az amerikai hadiflotta számára a napnyugta utáni szürkületben történő tájékozódáshoz. Ez egy lencsékkel, beállítócsavarokkal és fokbeosztásos skálákkal ellátott eszköz, amelynek fő alkotórésze egy lineáris polárszűrőként működő kristály. A műszer mindig az ég zenit-

jére nézett. A navigátor a polárszűrő kristályt addig forgatta a függőleges tengelye körül, amíg a legfényesebbnek, illetve legsötétebbnek nem látta az eget. A kristály világos és sötét állásaiból a Nap irányára lehetett következtetni.

A harmadik érv a polarimetrikus viking navigáció lehetősége mellett az, hogy az osztrák biológus, *Karl von Frisch* [3] 1949-ben fölfedezte, hogy a háziméhek (*Apis mellifera*) az égbolt polarizációirány-mintázata segítségével tájékozódnak, amikor a Napot felhők takarják, de a tiszta, kék ég foltokban még látszik. Később sok más állatról bizonyosodott be ugyanez [4].

Mivel a polarimetrikus viking navigáció hipotézise igen vonzó és elegáns, gyakran minden kritika nélkül tényként kezelve idézik tudományos és népszerűsítő közleményekben, előadásokon. A széles körben elterjedt hit szerint a vikingek az égboltpolarizáció segítségével bármilyen meteorológiai viszony között (tisztá, részben felhős, teljesen borult, ködös ég alatt) is képesek voltak tájékozódni a nyílt vizeken. Mivel mindezen korábban semmi kísérleti alapja sem volt, elhatároztuk, hogy utánajárunk, vajon a polarimetrikus viking navigáció légköroptikai feltételei egyáltalán teljesülnek-e: célul tűztük ki, hogy tiszta, részben felhős, teljesen borult és ködös időben mérjük az égbolt lineáris polarizációs mintázatát, és meghatározzuk, hogy e mintázat mely részei lehetnek alkalmasak a polarimetrikus viking navigációra, s melyek nem. A továbbiakban e kísérleti vizsgálataink [5–9] főbb eredményeiről számolunk be.

## A Nap helyének vizuális becslése felhős és alkonyati/hajnali égen

*Roshund* és *Beckman* [10] szerint azért nem volt szükségük a vikingeknek a polarimetrikus navigációs módszerre, mert „A Nap helye a legtöbb navigációs módszerhez szinte mindig megfelelő pontossággal megállapítható a felhők fényességmintázata, a felhőtető fényes kontúrjai, illetve a Napból kiinduló fénysugarak alapján még olyankor is, amikor a Napot felhő takarja. Ha a Nap a horizont alatt van, akkor az égbolt hajnali és alkonyati fényességívei szabad szemmel is jól fölismerhetőek és egymástól elkülöníthetőek ahhoz, hogy ezek segítségével kitalálhassuk, hogy a Nap mely irányban tartózkodik.”

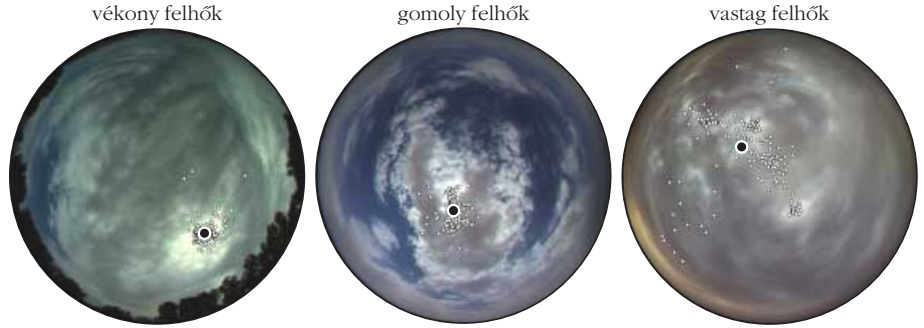
Ugyanakkor a polarimetrikus viking navigáció hipotézise nem cáfolható meg ilyen egyszerű kvalitatív ellenérvekkel. Ha igaz volna az a feltételezés, hogy a felhők mögötti vagy a horizont alatti Nap iránya szabad szemmel is nagy pontossággal megbecsülhető, akkor a vikingeknek nem lett volna szükségük az égbolt-polarimetrikus módszerre a Nap helyének, illetve azimutirányának felhős, illetve alkonyati körülmények között történő meghatározásához.

Kutatócsoportunk kvantitatívan vizsgálta [5] a Roslund–Beckman-féle kvalitatív ellenérv [10] igazságtartalmát: különböző felhős égboltokról színes fényképeket készítettünk a finnországi Hailuoto-sziget ten-

gerpartján és Oulu tengerparti városban egy 180° látószögű halszemoptikával, amivel a teljes égboltot le lehetett képezni egy kör alakú, színes képpé, amelyen a zenitnek a középpont, a horizontnak pedig a kör kerülete felel meg (3. ábra). Egy másik fényképsorozatot is készítettünk alkonyati/hajnali égboltokról, amikor a Nap a horizont alatt, de annak közelében volt (4. ábra).

Az első laboratóriumi pszichofizikai kísérletsorozatunkban felhő takarta Napot ábrázoló 25 különböző színes égboltképet (3. ábra) mutattunk 12 alkalommal egy sötét szobában lévő színes monitoron 18 tesztalanyok, akiknek egy számítógépes egérrel a nem látható Nap szabad szemmel megbecsült helyére kellett kattintaniuk a képernyőn. Számítógépes programunk tárolta a becsült nappozíciókat ( $\theta$ : zenitszög,  $\varphi$ : egy tetszőleges referencia azimutiránytól mért azimutiszög), és kiszámította az átlagukat ( $\langle\theta\rangle$ ,  $\langle\varphi\rangle$ ), valamint a szórásukat ( $\sigma_{\parallel}$ ,  $\sigma_{\perp}$ ,  $\sigma_{\varphi}$ ). A második pszichofizikai kísérletsorozatban a 18 tesztalanyok 6 alkalommal 15 eltérő alkonyati/hajnali égboltképet (4. ábra) mutattunk, amelyeken a Nap a horizont alatt volt. Az egérrel a nem látható Nap szabad szemmel megbecsült azimutirányára kellett kattintani a tengeri horizonton. A számítógépes programunk tárolta a nem látható Nap becsült  $\varphi$  azimutiszögét, és kiszámította annak  $\langle\varphi\rangle$  átlagát, illetve  $\sigma_{\varphi}$  szórását. A tesztalanyok 23 és 45 év közötti életkorú, brémai, budapesti és roskildei férfiak voltak. A kísérletek részletei [5]-ben olvashatók.

A felhővel való fedettség fokától függően a Nap felhős égen becsült helyének szórása a  $\sigma_{\parallel}^{\min} = 1,1^{\circ}$  és  $\sigma_{\perp}^{\min} = 1,4^{\circ}$  (ilyenkor a Nap egy vékony fátyolfelhőn át lényegében látható volt), illetve  $\sigma_{\parallel}^{\max} = 20,2^{\circ}$  és  $\sigma_{\perp}^{\max} = 25,2^{\circ}$  (ekkor a Napot vastag, összefüggő, nagy kiterjedésű felhő takarta) értékek között változott, míg az egyes becsült nappozíciók közötti  $\delta_{\max}$  maximális szögtávolságok  $8,1^{\circ}$ -tól  $162,9^{\circ}$ -ig terjedtek (1. táblázat). A  $\sigma_{\parallel}$ ,  $\sigma_{\perp}$  és  $\sigma_{\varphi}$  szórások és a  $\delta_{\max}$  maximális szögtávolság 25 képre átlagolt értékei  $\langle\sigma_{\parallel}\rangle = 7,4^{\circ}$ ,  $\langle\sigma_{\perp}\rangle = 11,9^{\circ}$ ,  $\langle\sigma_{\varphi}\rangle = 22,3^{\circ}$ ,  $\langle\delta_{\max}\rangle = 70,7^{\circ}$  voltak. Az égbolt felhőzöttségétől és a Nap horizont alatti szögétől függően az alkonyati/hajnali égen becsült azimutiszögek szórása  $\sigma_{\varphi}^{\min} = 0,6^{\circ}$ -tól (ekkor a Nap még látható volt a horizonton)  $\sigma_{\varphi}^{\max} = 2^{\circ}$ -ig terjedt, a becsült szoláris azimutiszögek  $\gamma_{\max}$  maximális szögtávolsága



3. ábra. Az első laboratóriumi pszichofizikai kísérletsorozatban a tesztalanyoknak a számítógép képernyőjén mutatott 25 felhős égboltkép közül 3, amelyeken a nem látható Nap helyét szabad szemmel kellett megbecsülni. A kör alakú képek közepe a zenit, kerülete pedig a horizont. Apró, fekete kerületű fehér pontok jelölik a tesztalanyok által becsült nappozíciókat, míg nagy, fehér szélű, fekete pontok mutatják a becsült nappozíciók helyének átlagát.



4. ábra. A második laboratóriumi pszichofizikai kísérletsorozatban a tesztalanyoknak a számítógép képernyőjén mutatott 15 alkonyati égboltkép közül 3, amelyeken a horizont alatti Nap helyét szabad szemmel kellett megbecsülni a tengeri horizonton. A kör alakú képek középpontja a horizontra néz, míg a zenitnek, illetve a nadírnak a kör legfelső, illetve legalsó pontja felel meg. A kép felső fele az égbolt, az alsó fele pedig a tengeri horizont alatti vízfelület. A tesztalanyok által becsült szoláris azimutirányokat a horizont alatti rövid, fekete-fehér vonalak mutatják. A horizont fölötti hosszú, függőleges vonal mutatja a becsült azimutirányok átlagát, míg a szórását a vízszintes vonal két végén lévő rövid, függőleges vonalak jelzik.

$2,1^{\circ}$  (a Nap a horizonton volt) és  $99^{\circ}$  (a Nap a horizont alatt volt) közé esett. A  $\sigma_{\varphi}$  és  $\gamma_{\max}$  mennyiségek 15 alkonyati képre átlagolt értékei  $\langle\sigma_{\varphi}\rangle = 11,4^{\circ}$ ,  $\langle\gamma_{\max}\rangle = 37,3^{\circ}$  voltak. A  $\langle\sigma_{\varphi}\rangle$  és  $\langle\gamma_{\max}\rangle$  mennyiségeknek a kísérletben részt vevő 18 személyre vett átlaga  $\langle\langle\sigma_{\varphi}\rangle\rangle = 5,9^{\circ}$ ,  $\langle\langle\gamma_{\max}\rangle\rangle = 14,5^{\circ}$  volt.

A felhős és alkonyati/hajnali égboltképeken a nappozíció, illetve napazimutirány vizuális meghatározásának pontosságát jellemző  $\sigma_{\parallel}$ ,  $\sigma_{\perp}$ ,  $\sigma_{\varphi}$  szórások és  $\delta_{\max}$ ,  $\gamma_{\max}$  szögtávolságok átlagai valamennyi felhős égboltra ( $\langle\sigma_{\parallel}\rangle = 7^{\circ}$ ,  $\langle\sigma_{\perp}\rangle = 12^{\circ}$ ,  $\langle\sigma_{\varphi}\rangle = 22^{\circ}$ ,  $\langle\delta_{\max}\rangle = 71^{\circ}$ ), minden alkonyati égboltra ( $\langle\sigma_{\varphi}\rangle = 11^{\circ}$ ,  $\langle\gamma_{\max}\rangle = 37^{\circ}$ ), továbbá az összes tesztalanyra (felhős képek:  $\langle\langle\sigma_{\parallel}\rangle\rangle = 3^{\circ}$ ,  $\langle\langle\sigma_{\perp}\rangle\rangle = 8^{\circ}$ ,  $\langle\langle\delta_{\max}\rangle\rangle = 25^{\circ}$ ; alkonyati képek:  $\langle\langle\sigma_{\varphi}\rangle\rangle = 6^{\circ}$ ,  $\langle\langle\gamma_{\max}\rangle\rangle = 15^{\circ}$ ) igen nagyok voltak. A legnagyobb mért szórásértékek  $\sigma_{\parallel}^{\max} = 20^{\circ}$ ,  $\sigma_{\perp}^{\max} = 25^{\circ}$ ,  $\sigma_{\varphi}^{\max} = 80^{\circ}$ ,  $\max(\delta_{\max}) = 163^{\circ}$ -nak adódtak a felhős égboltoknál, és  $\sigma_{\varphi}^{\max} = 42^{\circ}$ ,  $\max(\gamma_{\max}) = 99^{\circ}$ -nak az alkonyati egeknél. Ezek a nyilvánvalóan nagy hibák nem támasztják alá azt a vélekedést, hogy felhős vagy alkonyati/hajnali égboltocon a nem látható Nap helye az égbolt szín- és fényességmintázata alapján szabad szemmel is nagy pontossággal megbecsülhető.

Bár ezen eredményeink alulbecsülik egy tapasztalt viking navigátor vizuális nappozíció-meghatározásának pontosságát, a vizsgált ellenérv (miszerint a vi-

1. táblázat

Felhős égboltképeken 18 tesztalany mindegyike által 12-szer megbecsült nappozíciók  $\sigma_{||}$  és  $\sigma_{\perp}$  szögszórásai a Nap becsült átlagos helyén átmenő, két egymásra merőleges főkör mentén, egy adott képen becsült nappozíciók  $\delta_{\max}$  maximális szögtávolsága, és a becsült nappozíciók tetszőleges vonatkoztatási iránytól mért  $\varphi$  azimutszögének  $\sigma_{\varphi}$  szórása az első laboratóriumi pszichofizikai kísérletsorozatban [5].

sorszám	$\sigma_{  }$	$\sigma_{\perp}$	$\delta_{\max}$	$\sigma_{\varphi}$
1.	1,9°	3,5°	36,5°	5,0°
2.	1,1°	1,4°	8,1°	2,1°
3.	7,5°	10,5°	80,3°	14,3°
4.	7,9°	8,8°	76,8°	10,3°
5.	3,2°	4,9°	23,2°	6,9°
6.	4,5°	5,3°	41,2°	8,5°
7.	4,8°	8,7°	102,7°	15,3°
8.	5,6°	7,6°	67,1°	8,2°
9.	5,5°	10,8°	89,6°	13,0°
10.	6,3°	10,0°	79,4°	13,4°
11.	4,9°	6,1°	48,4°	6,4°
12.	4,3°	6,6°	30,5°	8,2°
13.	5,6°	11,4°	67,1°	11,0°
14.	4,1°	13,2°	116,8°	17,8°
15.	4,5°	6,9°	36,5°	13,6°
16.	2,8°	6,6°	33,3°	11,4°
17.	9,6°	12,8°	62,7°	20,4°
18.	20,2°	22,5°	106,6°	66,7°
19.	10,8°	14,3°	36,5°	19,0°
20.	5,3°	10,2°	105,1°	14,1°
21.	7,4°	23,8°	162,9°	36,5°
22.	17,0°	25,2°	81,3°	75,2°
23.	11,6°	17,6°	66,0°	21,6°
24.	11,3°	22,8°	90,3°	80,1°
25.	17,4°	24,7°	119,3°	58,4°
átlag	$\langle \sigma_{  } \rangle$	$\langle \sigma_{\perp} \rangle$	$\langle \delta_{\max} \rangle$	$\langle \sigma_{\varphi} \rangle$
	7,4°	11,9°	70,7°	22,3°

king navigátoroknak nem volt szükségük kettőtörő kristályokra a felhők által takart Nap helyének az égboltpolarizáció alapján történő meghatározásához, mivel a Nap helye a felhős égbolton szabad szemmel is egészen pontosan megbecsülhető (nem vehető komolyan a polarimetrikus viking navigáció hipotézisének bírálatként. Eredményeink csupán a polarimetrikus viking navigáció egyik ellenérvét kérdőjelezzik meg, s arra utalnak, hogy felhős vagy ködös időben szükség lehetett valamilyen „mankóra” a viking navigátoroknak a nyílt vizeken való tájékozódáshoz. Az egyik ilyen mankó éppen a polarimetrikus viking navigáció lehetett.

## Tiszta és részben felhős égboltok polarimetrikus viking navigációra alkalmas hányada

A polarimetrikus viking navigáció két légköroptikai feltétele:

1. Az égboltfény rezgésíkja merőleges a szórásí síkra, vagyis az égboltfény polarizációiránya megegyezik az egyszeres szórású Rayleigh-modell jóslatával. A polarimetrikus viking navigáció pontosságát az határozza meg, hogy az ég mely részéről jön

olyan fény, amelynek polarizációiránya megfelel a Rayleigh-elméletnek.

2. Az égboltfény  $p$  lineáris polarizációfokának megfelelően nagyoknak kell lennie, különben a szem előtt ide-oda forgatott, polárszűrőként működő napkövön át az eget nézve nem észlelhető annak periodikus kifényesedése és elsötétülése, s abból nem, vagy csak igen pontatlanul lehet meghatározni az égboltfény polarizációirányát.

Korábban e feltételek teljesülését még senki sem tudta vizsgálni nagylátószögű képalkotó polariméterek hiányában. E légköroptikai feltételek teljesülése utáni nyomozásunk egy tunéziai sivatagi expedíción kezdődött, amikor 1999-ben azt vizsgáltuk a Nap horizont fölötti  $\theta_N$  szögmagassága függvényében, hogy a részben felhős ég polarizációs mintázata mennyiben hasonlít a tiszta égéhez, amit fontos volt tudni a sivatagi hangyák (*Cataglyphis bicolor*) égbolt-polarizáció alapján történő navigációjának megértéséhez [6]. Habár korábban már számos alkalommal mérték, hogy az égboltfény polarizációja mennyire felel meg a Rayleigh-elméletnek, e vizsgálatok az ég viszonylag kevés pontjára/irányára korlátozódtak csak, mert pontforrású polarimétereket használtak.

Egy adott napállásnál és a spektrum egy adott tartományában az égboltfény  $180^\circ$  látószögű képalkotó polarimetriával mért  $\alpha$  polarizációs szög-mintázatának felhasználásával az ég minden általunk vizsgált pontjában képeztük az  $\alpha_{\text{mért}}$  mért és az  $\alpha_{\text{Rayleigh}}$  Rayleigh-elméletből számolt polarizációs szögek  $\Delta\alpha = |\alpha_{\text{mért}} - \alpha_{\text{Rayleigh}}|$  különbségét. Ezután az ég azon pontjainak  $N_{\text{Rayleigh}}$  számát számoltuk meg, amelyekre  $\Delta\alpha < \alpha_{\text{küszöb}} = 5^\circ$ . Ebből megkaptuk az égbolt összesen  $N = 150\,000$  vizsgált pontjának azon  $r = N_{\text{Rayleigh}}/N$  hányadát, amelynek polarizációiránya  $5^\circ$ -nál kisebb mértékben tér el a Rayleigh-jóslattól. Meghatároztuk az ég azon pontjainak  $N_{\text{nem-Rayleigh}}$  számát is, amelyekre  $\Delta\alpha > \alpha_{\text{küszöb}} = 5^\circ$ . Az égboltnak a Nap közelében volt  $N_{\text{túlexponált}}$  számú olyan pontja is, amelyben a polarizációs felvétel túlexponált volt; e pontokban ismeretlen volt az égboltfény polarizációiránya. Kiszámítottuk az  $n = N_{\text{nem-Rayleigh}}/N$  és a  $t = N_{\text{túlexponált}}/N$  relatív értékeket is. Az  $r$ ,  $n$  és  $t$  közti viszony nyilván  $r+n+t=1$ . E számításokat elvégeztük a tunéziai sivatagban mért tiszta és részben felhős égboltokra a napállás függvényében (5. ábra). A felhős égboltképeken a felhőket egy általunk kifejlesztett algoritmussal detektáltuk. Ily módon az ég tiszta, illetve felhős régióira külön-külön azt is megvizsgálhattuk, hogy az égbolt mely részeinek polarizációiránya követi  $\alpha_{\text{küszöb}} = 5^\circ$  pontossággal a Rayleigh-elméletet. Méréseinkből (például 5. ábra, 2. és 3. táblázat) a következőket állapítottuk meg [6, 7]:

1. A Nap egy adott állásánál és a spektrum egy adott tartományában az ég polarizációirány-mintázatának polarimetrikus viking navigációra alkalmas  $r$  hányada tiszta égnél mindig nagyobb, mint részben felhősnél. Tiszta égre  $r$  13% és 69% között változik, míg részben felhős égre 4% és 69% között. Ha a Nap a horizonton vagy annak közelében van és nem takarják felhők, akkor a részben felhős ég  $r$ -értékei megközelítik a tiszta égét.

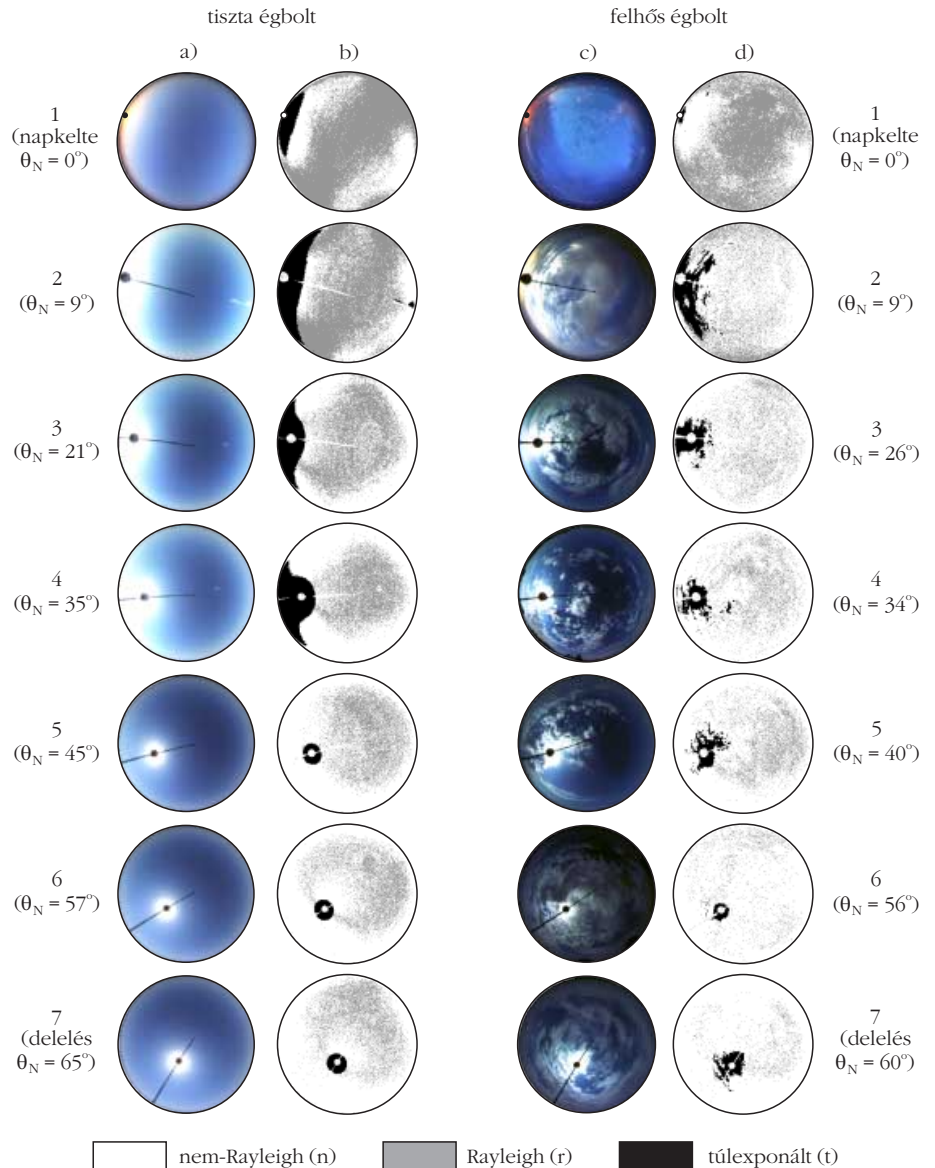
2. Minél kisebb a Nap horizonttól mért  $\theta_N$  szögtávolsága, annál nagyobb a tiszta vagy részben felhős ég polarimetrikus viking navigációra alkalmas  $r$  hányada a hullámhossztól függetlenül. Tiszta égen a spektrum vörös tartományában (ahol az ég túlexponált részének  $t$  hányada a legkisebb, vagyis ahol  $r$  mért értékeinek pontossága maximális),  $r$  19%-ról 65%-ig nő, amint  $\theta_N$  65°-ról (delelés) 0°-ra (napkelte vagy napnyugta) csökken. Részben felhős égen a spektrum vörös tartományában  $r$  4%-ról 56–65%-ra nő, amint  $\theta_N$  a legnagyobb szögértékről nulláig csökken.

3. Nagy napmagasságoknál tiszta és részben felhős egeknél egyaránt  $r$  legnagyobb a spektrum kék tartományában és legkisebb a vörösben. Alacsonyabb napmagasságoknál  $r_{\text{zöld}} > r_{\text{vörös}}$ , de  $r_{\text{kék}} < r_{\text{zöld}}$ .

4. Néha az ég felhős részein a polarizációirány mintázatának tekintélyes része (12–34%-a) felel meg a Rayleigh-elméletnek, ami a  $\theta_N$  napmagasság csökkenésével a hullámhossztól függetlenül fokozatosan nő.

Ha az égnek a Nap körüli túlexponált részein is ismert lenne a polarizációirány mintázata, akkor e régiók főleg az ég polarimetrikus viking navigációra alkalmatlan  $n$  hányadát növelnék, mert azok nagy mértékben átfednek a neutrális pontok környékének a Rayleigh-mintázattól jelentősen eltérő részeivel. Ezért a 2. és 3. táblázatban az  $r$  értékei csak kis mértékben térnek el a valóságtól  $t$  viszonylag nagy értékei ellenére.

A felhőkbeli többszörös fényszórás az oka annak, hogy a felhőfény polarizációiránya eltérhet az egyszerű szórás Rayleigh-elmélete által jósolt iránytól. Ha azonban a felhőket közvetlen napfény világítja meg, akkor nagy annak az esélye, hogy egy földi megfigyelt a felhő részecskéiről csak egyszerűen szóródott napfény éri. Ugyanakkor, minél alacsonyabban áll a Nap, annál nagyobb az esélye, hogy a felhőket direkt napfény világítja meg. Ezzel magyarázható tehát, hogy minél közelebb van a Nap a horizonthoz, annál



5. ábra. Tunéziai tiszta (a) és részben felhős (c) égboltok fényintenzitásának eloszlása a Nap horizonttól mért  $\theta_N$  szögmagassága függvényében. A kör alakú mintázatok közepe a zenit, kerülete a horizont, a zenittől mért  $\varphi$  szög pedig arányos a kör közepétől mért sugárral ( $\varphi_{\text{zenit}} = 0^\circ$ ,  $\varphi_{\text{horizont}} = 90^\circ$ ). (b, d) Szürke, illetve fehér jelöli az ég azon „Rayleigh”, illetve „nem-Rayleigh” részeit, amelyeknél az égboltfénynek a spektrum vörös (650 nm) tartományában mért  $\alpha_{\text{mért}}$  polarizációs szöge  $\Delta\alpha = |\alpha_{\text{mért}} - \alpha_{\text{Rayleigh}}| = 5^\circ$ -nél kisebb, illetve nagyobb mértékben tér el a Rayleigh-féle egyszeres szórási elméletből számolt  $\alpha_{\text{Rayleigh}}$  polarizációs szögtől. Fekete jelöli az égbolt túlexponált régióit. Tehát a szürke részek alkalmasak a polarimetrikus viking navigációra, a fehér részek nem, a feketékről pedig nem tudható. A Nap helyét pontok, illetve a Napot kitakaró korong jelöli. A sugárirányú fekete vonal a napkitakaró korong drótyja.  $r$ ,  $n$  és  $t$  tiszta, illetve részben felhős égboltokra mért értékeit a 2., illetve 3. táblázat első 7 sora tartalmazza.

nagyobb a részben felhős ég polarimetrikus viking navigációra alkalmas  $r$  hányada, ami megközelítheti, sőt el is érheti a tiszta égre jellemző értékeket, amikor a Nap a horizonton van.

A fentiekből az a következtetés vonható le, hogy tiszta égboltnál a Nap  $\theta_N$  szögmagasságától függően az égboltfény polarizációirány-mintázatának a Rayleigh-elméletet  $\alpha_{\text{küszöb}} = 5^\circ$  pontossággal követő  $r$  hányada nagyon magas, főleg  $\theta_N \leq 13^\circ$  alacsony napállások mellett, amikor  $40\% < r < 70\%$ . A felhőzottságtól és a felhők napfény általi megvilágításától függően  $r$  többé-kevésbé csökken felhős viszonyok között, de

2. táblázat

Tunéziai tiszta égboltok azon  $r$  (%), illetve  $n$  (%) hányada, amelynél az égboltfénynek a spektrum vörös (650 nm), zöld (550 nm) és kék (450 nm) tartományában mért  $\alpha_{\text{mért}}$  polarizációs szöge  $\Delta\alpha = |\alpha_{\text{mért}} - \alpha_{\text{Rayleigh}}| = 5^\circ$ -nál kisebb, illetve nagyobb mértékben tér el a Rayleigh-féle egyszerűes szórás elméletből számolt  $\alpha_{\text{Rayleigh}}$  polarizációs szögtől, és az ég  $t$  (%) hányada, amelyről az égboltról készített polarizációs képek túlexponáltsága miatt nem tudható semmi.  $N$ : az égbolt sorszáma napkeltétől (1), delelésen (7) át napnyugtáig (14).  $\theta_N$ : a Nap horizonttól mért szögmagassága.  $r + n + t = 100\%$ .

N	$\theta_N$	vörös (650 nm)			zöld (550 nm)			kék (450 nm)		
		r (%)	n (%)	t (%)	r (%)	n (%)	t (%)	r (%)	n (%)	t (%)
1.	0°	65,74	55,75	4,97	67,78	28,83	3,39	49,94	36,43	13,63
2.	9°	59,01	28,39	12,60	56,15	21,08	22,77	25,99	26,63	47,39
3.	21°	38,17	52,31	9,52	51,83	35,03	13,14	37,44	35,01	27,55
4.	35°	25,88	62,43	11,68	35,88	46,22	17,89	29,25	31,18	39,57
5.	45°	24,86	73,22	1,91	34,95	62,68	2,37	34,20	58,33	7,47
6.	57°	19,94	78,04	2,02	30,25	67,41	2,34	27,92	67,61	4,46
7.	65°	19,45	78,49	2,06	37,04	60,60	2,36	43,15	52,59	4,25
8.	64°	20,09	77,78	2,13	38,63	59,09	2,29	51,59	43,60	4,81
9.	58°	19,64	77,81	2,55	33,01	64,23	2,76	43,20	38,11	18,69
10.	44°	18,74	77,90	3,35	37,80	58,53	3,67	43,13	40,51	16,36
11.	34°	27,08	67,04	5,87	37,24	55,29	7,47	40,55	41,95	17,51
12.	25°	36,88	47,93	15,20	43,60	36,12	20,28	23,87	35,02	41,11
13.	13°	39,28	42,64	18,08	43,76	31,72	24,52	12,53	35,32	52,15
14.	0°	64,53	32,54	2,93	69,17	28,98	1,85	24,92	53,34	21,74

3. táblázat

Mint a 2. táblázat, de most részben felhős tunéziai égboltokra.

N	$\theta_N$	vörös (650 nm)			zöld (550 nm)			kék (450 nm)		
		r (%)	n (%)	t (%)	r (%)	n (%)	t (%)	r (%)	n (%)	t (%)
1.	0°	64,59	34,81	0,60	68,05	31,89	0,06	28,88	34,20	36,92
2.	9°	22,54	67,88	9,58	22,78	68,59	8,63	26,35	57,19	16,47
3.	26°	14,72	80,43	4,85	21,46	72,99	5,55	20,04	60,12	19,84
4.	34°	14,58	81,46	3,96	20,75	74,73	4,53	16,32	60,23	23,45
5.	40°	14,74	81,38	3,87	26,00	69,69	4,32	21,12	60,97	17,92
6.	56°	6,22	92,67	1,12	9,21	89,67	1,12	6,91	63,27	29,81
7.	60°	3,96	92,25	3,79	6,88	89,11	4,02	11,89	80,53	7,58
8.	61°	5,30	93,21	1,50	9,87	88,46	1,67	14,20	71,28	14,52
9.	59°	10,99	84,78	4,23	20,17	74,30	5,52	27,63	60,70	11,67
10.	46°	18,95	78,02	3,03	23,20	73,46	3,34	25,45	55,84	18,71
11.	37°	15,60	78,68	5,72	18,75	74,05	7,20	17,95	62,65	19,41
12.	23°	30,19	55,99	13,82	37,63	45,17	17,20	35,20	29,13	35,68
13.	11°	41,49	51,82	6,69	50,74	43,01	6,25	52,47	37,95	9,58
14.	0°	56,42	37,63	5,96	68,72	28,65	2,63	57,36	22,20	20,45

4. táblázat

Tiszta, részben felhős és napfény világitotta ködös ég polarizációs sajátosságai (átlag  $\pm$  szórás) a spektrum vörös (V, 650 nm), zöld (Z, 550 nm) és kék (K, 450 nm) tartományában 180° látószögű képalkotó polarimetriával mérve az Északi-sarkvidéken.  $p$ : lineáris polarizációfok,  $z$ : az  $\alpha$  polarizációs szög-mintázat zajossága,  $b$ : az  $\alpha$ -mintázat azon hányada, amely 5° pontosságon belül megegyezik a tiszta égboltéval,  $e$ : az  $\alpha$ -mintázat azon hányada, amely 5°-nál jobban eltér a tiszta égétől,  $t$ : az  $\alpha$ -mintázat túlexponált része. Az átlagolás 10 tiszta, 10 részben felhős és 10 ködös égre történt.

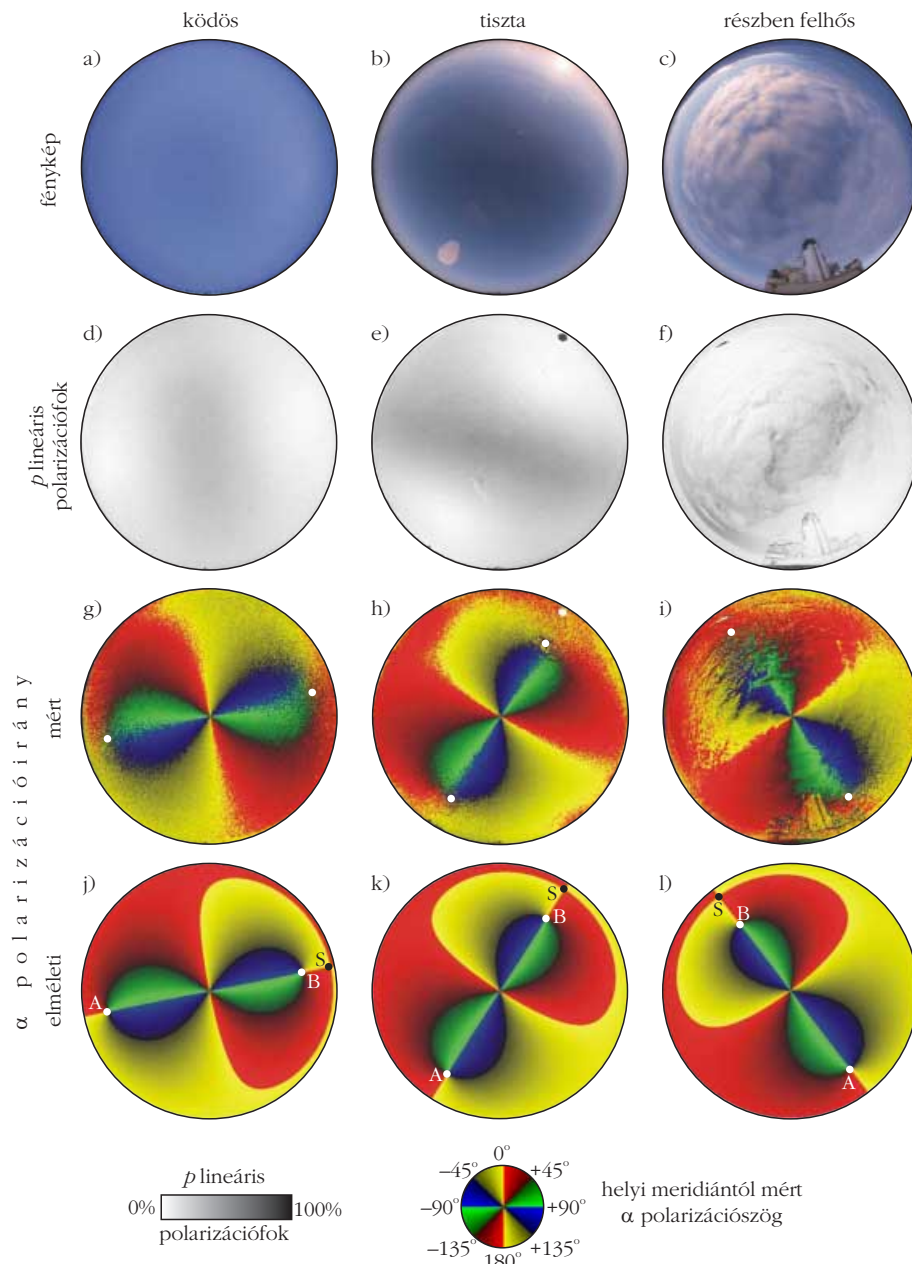
égbolt	$p$ (%) lineáris polarizációfok			az $\alpha$ -mintázat $z$ (%) zajossága			a tiszta ég $\alpha$ -mintázatának való megfelelés (%)								
							V			Z			K		
	V	Z	K	V	Z	K	$b$	$e$	$t$	$b$	$e$	$t$	$b$	$e$	$t$
tiszta	28,2 $\pm 17,5$	23,5 $\pm 14,3$	20,6 $\pm 12,1$	4,6 $\pm 0,7$	3,5 $\pm 0,8$	4,6 $\pm 1,4$	65,8 $\pm 10,0$	25,6 $\pm 8,0$	8,6 $\pm 4,9$	70,7 $\pm 8,2$	22,9 $\pm 6,4$	6,4 $\pm 3,4$	67,0 $\pm 11,6$	23,5 $\pm 7,3$	9,5 $\pm 6,0$
felhős	15,8 $\pm 10$	14,8 $\pm 8,7$	14,4 $\pm 8,4$	10,4 $\pm 2,7$	8,1 $\pm 2,2$	6,3 $\pm 1,3$	49,0 $\pm 7,5$	46,7 $\pm 9,6$	4,3 $\pm 4,2$	57,2 $\pm 7,4$	39,4 $\pm 8,7$	3,4 $\pm 3,7$	61,8 $\pm 7,7$	33,9 $\pm 8,5$	4,3 $\pm 4,1$
ködös	8,6 $\pm 4,7$	8 $\pm 4,1$	7,8 $\pm 3,6$	21,8 $\pm 6,8$	22,9 $\pm 12,5$	14,8 $\pm 8,4$	41,4 $\pm 14,5$	55,9 $\pm 14,3$	2,7 $\pm 4,0$	45,7 $\pm 16,6$	52,0 $\pm 16,6$	2,3 $\pm 3,3$	50,0 $\pm 14,2$	47,6 $\pm 15,2$	2,4 $\pm 3,4$

néha  $r$  értéke figyelemre méltóan magas lehet, ismét főleg alacsony napállásokra (például  $r_{\text{max}} = 69\%$  volt  $\theta_s = 0^\circ$  mellett). A tiszta és részben felhős ég polarizációirány-mintázatának nagy része tehát általában jó közelítéssel megfelel a Rayleigh-féle mintázatnak, ami a polarimetrikus viking navigáció alapja.

## A polarimetrikus viking navigáció lehetősége ködben

A vikingek fő hajózási útvonalain (1. ábra) gyakran van köd, ami sokszor olyan sűrű, hogy nem látható a napkorong sem, főleg amikor a Nap a horizont közelében van. Vajon a polarimetrikus viking navigáció működhet-e ködben is? A Svéd Sarkkutató Titkárság által szervezett *Beringia 2005* hat-hetes nemzetközi expedíció tagjaiként 2005 augusztusában–szeptemberében a svéd Oden jégtörőhajóval *Susanne Åkesson* és *Horváth Gábor* átszelték a Jeges-tengert, 2005. szeptember 12-én áthaladtak az Északi-sarkon, közben pedig mérték a ködös vagy teljesen borult arktiszi ég polarizációs mintázatát, amikor a napkorong nem volt látható [8] (6. ábra, 4. táblázat).

Az általunk vizsgált meteorológiai helyzetekben a ködré-



6. ábra. Ködös, tiszta és részben felhős eget 180° látószögű fényképei (a–c) és lineáris polarizációs mintázatai (d–i) a spektrum kék (450 nm) tartományában az Északi-sarkvidéken mérve. (j–l) a tiszta égboltnak a Rayleigh-modellnél a valóságot jobban közelítő elmélet alapján számított  $\alpha$  polarizációs szög-mintázatai a Nap a–i mintázatokéval megegyező helye mellett. Az  $\alpha$ -mintázatokon fehér pontok jelölik a Nap (S), valamint az Arago- (A) és Babinet-féle (B) neutrális pontokat.

teget direkt napfény érte, mivel a horizont fölötti Napot nem takarták felhők, de a köd olyan vastag volt, hogy a napkorong nem látszott. A felhőzöttségtől és a hullámhossztól függően, a részben felhős ég lineáris polarizációfokának és zajosságának  $p_{\text{felhős}} = 10\text{--}25\%$  és  $z_{\text{felhős}} = 4\text{--}15\%$  átlaga a tiszta ég  $p_{\text{tisztá}} = 16\text{--}34\%$ ,  $z_{\text{tisztá}} = 3\text{--}6\%$  és a ködös ég  $p_{\text{ködös}} = 4\text{--}15\%$ ,  $z_{\text{ködös}} = 5\text{--}45\%$  átlagai közé esik. A tiszta, részben felhős és ködös ég mért  $\alpha$ -mintázatainak az elméleti  $\alpha$ -mintázatokhoz való hasonlóságaira  $h_{\text{tisztá}} = 65,8\text{--}70,7\%$ ,  $h_{\text{felhős}} = 49,0\text{--}61,8\%$  és  $h_{\text{ködös}} = 41,4\text{--}50,0\%$  értékek adódtak,  $h$  minimumai és maximumai pedig  $45\% \leq h_{\text{tisztá}} \leq 81\%$ ,  $36\% \leq h_{\text{felhős}} \leq 72\%$  és  $19\% \leq h_{\text{ködös}} \leq 71\%$  voltak. Tehát, ha a köd nem

túl vastag, akkor a napvilágította ködös ég  $\alpha$ -mintázata nagyon hasonlíthat az elméleti  $\alpha$ -mintázathoz. Ugyanakkor az átlagok közti viszonyok a következők:  $p_{\text{ködös}} < p_{\text{felhős}} < p_{\text{tisztá}}$ ,  $z_{\text{tisztá}} < z_{\text{felhős}} < z_{\text{ködös}}$ ,  $h_{\text{ködös}} < h_{\text{felhős}} < h_{\text{tisztá}}$ .

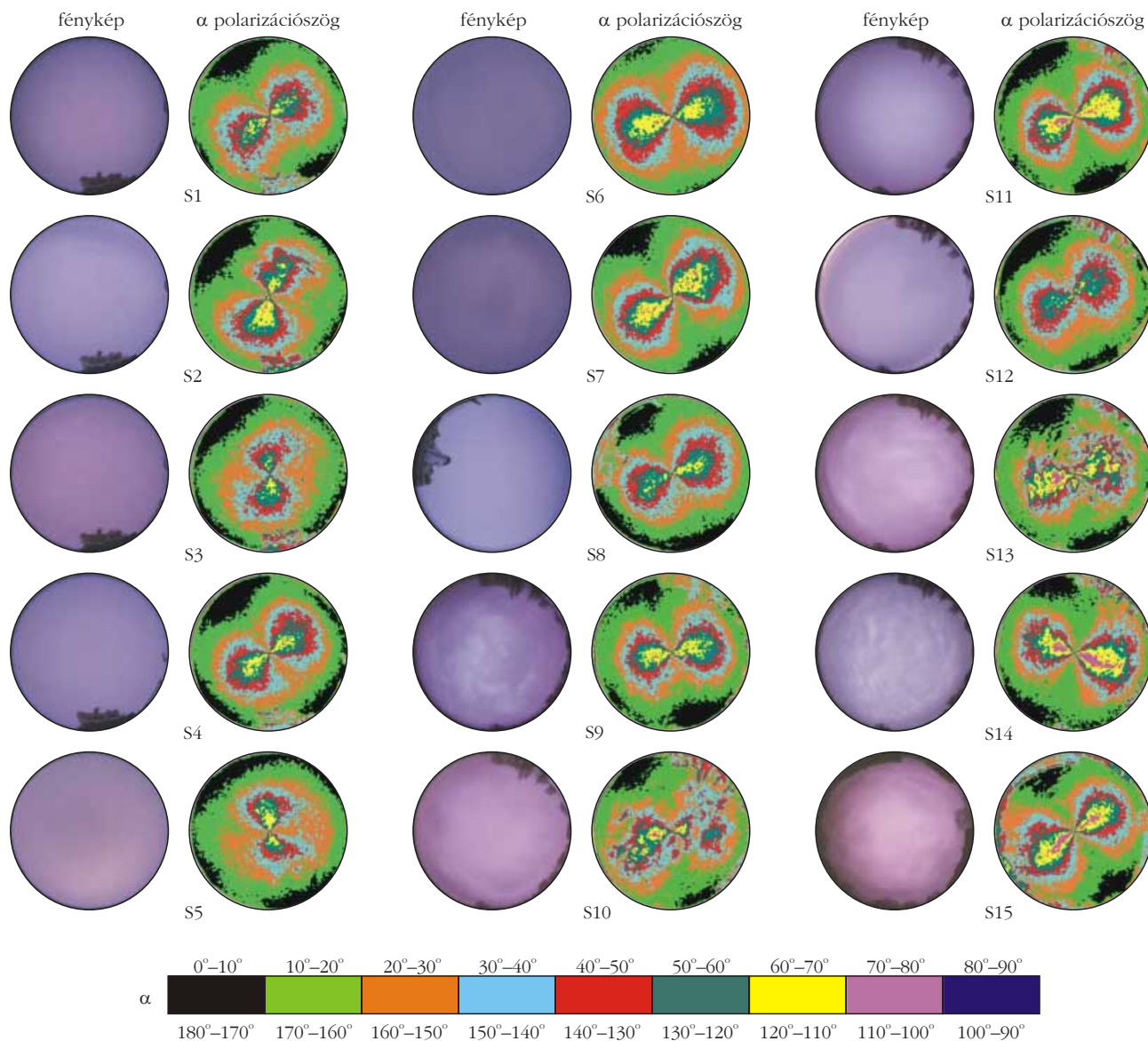
Méréseinkből ([8], 6. ábra, 4. táblázat) a következőkre jutottunk: Ha a ködöt közvetlen napfény éri, akkor a ködös ég  $\alpha$ -mintázata nagyon hasonló a megfelelő tiszta égéhez. Következésképpen, napvilágította ködben a polarimetrikus viking navigáció 1. légköroptikai feltétele közel annyira teljesül, mint tiszta ég esetén. Ugyanakkor a ködös égbolt fényének  $p$  lineáris polarizációfoka gyakran annyira alacsony, hogy a polarimetrikus viking navigáció 2. légköroptikai feltétele valószínűleg sokszor nem teljesül. A polarimetrikus viking navigáció korlátozó tényezője tehát nem az égboltfény polarizációiránya, hanem a polarizációfoka. Másrészt viszont, részben felhős időben a polarimetrikus viking navigáció mindkét feltétele általában teljesül.

## Polarimetrikus viking navigáció teljesen borult időben?

Mivel a vikingeknek gyakran kellett akár napokig is teljesen borult ég alatt hajózniuk a nyílt vizeken, ezért az Arktiszon és Magyarországon mértük teljesen felhős eget polarizációs sajátságait is [9] (7.

ábra, 5. táblázat), amikor a földfelszínt nagy albedójú fehér hó és jég fedte, néha pedig vagy hó vagy eső esett, amiből a felhők összetételére (jég vagy víz) lehetett következtetni. Nagy meglepetésünkre a teljesen borult eget polarizációirány-mintázatai nagyon hasonlónak bizonyultak a tiszta ég polarizációirány-mintázatához (5., 7. ábra). Ebből az a következtetés vonható le, hogy még teljesen borult időben is teljesül a polarimetrikus viking navigáció azon légköroptikai feltétele, hogy az ég polarizációirány-mintázatának jó része közelítőleg megegyezik a Rayleigh-mintázattal még akkor is, ha az  $\alpha$ -mintázat meglehetősen zajos (5. táblázat). Azonban a teljesen borult ég fényének  $p$





7. ábra. Teljesen borult égek 180° látószögű képalkotó polarimetriával a spektrum kék (450 nm) tartományában az Északi-sarkvidéken (S1–S8) és Magyarországon (S9–S15) mért fényintenzitásának és a helyi meridiántól mért  $\alpha$  polarizációs szögének mintázatai. Mind az arktiszi, mind pedig a magyar helyszíneken a földfelszín nagy albedójú fehér hó és jég fedte.

lineáris polarizációfoka olyan kicsi (5. táblázat), ami mégis valószínűtlenné teszi, hogy egy viking navigátor képes lett volna használni az ég polarizációját: ha  $p$  kicsi, akkor hiába forgatja az ember a szeme előtt a polarizátorként működő napkövet, a borult égbolt fényének szinuszos ingadozása nem vagy csak alig észlelhető, miáltal az égboltfény polarizációiránya nem vagy csak igen pontatlanul határozható meg.

## További kutatások

Eddigi vizsgálatainkkal tisztáztuk, hogy a polarimetrikus viking navigáció légköroptikai feltételei milyen meteorológiai körülmények között teljesülhetnek, s amikor nem. Hátra van még annak laboratóriumi pszichofizikai mérésekkel, számos tesztalanyon való tanulmányozása, hogy

- lineáris polárszűrőként működő különféle napkövekkel (például kordierit-, turmalin- és mészpátkristályokkal) mekkora pontossággal határozható meg a lineárisan poláros fény rezgésirányának iránya a polarizációfok függvényében (a polarimetrikus viking navigáció 1. lépése);

- az égbolt két tetszőleges pontjában mért polarizációirányból milyen pontossággal határozható meg a köd/felhő miatt nem látható Nap helye az égboltpontokon átmenő, s a polarizációiránnyal párhuzamos két főkör metszéspontjának becslésével (a polarimetrikus viking navigáció 2. lépése);

- a köd/felhő által takart Nap helyének ismeretében egy viking napórával mekkora pontossággal határozható meg a földrajzi északi irány (a polarimetrikus viking navigáció 3. lépése).

Miután e pszichofizikai mérésekkel meghatároztuk a polarimetrikus viking navigáció egyes lépéseinek

5. táblázat

Egy tiszta ég (S0) és 15 teljesen borult ég (S1–S15) polarizációs sajátosságai (átlag±szórás) a spektrum vörös (V, 650 nm), zöld (Z, 550 nm) és kék (K, 450 nm) tartományában 180° látószögű képalkotó polarimetriával mérve az Északi-sarkvidéken (Arktiszon) (S1–S8) és Magyarországon (S9–S15). A  $p$  lineáris polarizációfokot az egész égboltra átlagoltuk. Az  $\alpha$  polarizációs-zög-mintázat  $z$  zajosságát a teljes égre számoltuk. Mind az arktiszi, mind a magyar helyszíneken a földfelszint nagy albedójú fehér hó és jég fedte.

N	$p$ (%) lineáris polarizációfok			az $\alpha$ -mintázat $z$ (%) zajossága		
	V	Z	K	V	Z	K
arktiszi tiszta ég						
S0	34±25	25±16	21±15	5	3	6
arktiszi teljesen borult egek						
S1	6±4	5±3	4±3	32	43	30
S2	5±3	5±3	4±2	28	29	24
S3	5±4	5±3	4±3	33	41	30
S4	5±4	5±3	4±3	31	34	27
S5	5±3	5±3	4±2	28	38	29
S6	7±4	7±4	5±3	36	37	23
S7	8±5	8±5	6±3	30	40	22
S8	5±3	4±3	3±2	27	33	31
magyarországi teljesen borult egek						
S9	5±3	5±3	4±3	27	38	29
S10	5±3	5±3	5±3	29	42	31
S11	5±3	5±3	4±3	26	32	28
S12	4±3	4±3	3±2	27	32	32
S13	5±3	5±3	5±3	26	36	29
S14	3±3	4±3	3±2	28	30	23
S15	5±3	6±4	5±3	30	42	39

pontosságát leíró hibafüggvényeket, vállalkozhatunk arra, hogy egy adott ég polarizációfok- és polarizációirány-mintázatainak mérése után számítógépes modellezéssel megbecsüljük annak valószínűségét, hogy az adott meteorológiai helyzetben mekkora annak az esélye, hogy a polarimetrikus viking módszerrel adott pontossággal megkapjuk a földrajzi északi irányt. Végül válaszolni tudunk majd arra a kérdésre, hogy milyen meteorológiai szituációkban működhetett, s melyekben nem a polarimetrikus viking navigáció.

## MAGHASADÁS, FEKETE LYUKAK

### Emlékezés John Archibald Wheelerre

John Archibald Wheeler (1911–2008), a huszadik század egyik legkiemelkedőbb fizikusa távozott közülünk 96 éves korában, 2008. április 13-án. A *Fizika Története (The Story of Physics)* című könyv a huszadik század egyik legsokoldalúbb fizikusaként említi. Rövid megemlékezésemben megpróbálom érzékeltetni, mennyire reális ez az értékelés.

Mivel az egykori viking navigátorokkal már nem végezhető el a fönti kísérletek, ezért zömében magyar egyetemi hallgatókon mérjük a polarimetrikus viking navigáció különböző lépéseinek hibafüggvényeit. E kísérletek jelenleg is folynak az ELTE Biológiai Fizika Tanszékének Biooptika Laboratóriumában.

### Köszönetnyilvánítás

Kutatómunkánkat a német Alexander von Humboldt Alapítvány műszeradamánya támogatta. A tunéziai expedíciót a Svájci Tudományos Kutatási Alap finanszírozta. A finnországi mérőkampányt az Oului Egyetem Biológiai Intézete támogatta. Az északi-sarki expedíciót a Svéd Sarkkutató Titkárság és a Lundi Egyetem szervezte és támogatta. A laboratóriumi pszichofizikai kísérletek külföldi teszt-alanyainak toborzásában és a kísérletek elvégzésében Gál József (Brémai Egyetem) és Horváth Róbert (Roskildei Egyetem) segített, amiért hálásak vagyunk. Köszönjük továbbá Selmeczi Dávidnak (Dánia), hogy Ramskou dánul publikált cikkeit magyarra fordította.

### Irodalom

1. Thirslund, S.: *Viking Navigation: Sun-Compass Guided Norsemen first to America*. Humlebaek, Denmark, Print: Gullanders Bogtrykkeri a-s, Skjern, 2001.
2. Ramskou, T.: Solstenen. *Skalk* 2 (1967) 16–17.
3. Frisch K. von: Die Polarisation des Himmelslichtes als orientierender Faktor bei den Tänzern der Bienen. *Experientia* 5 (1949) 142–148.
4. Horváth, G., Varjú, D.: *Polarized Light in Animal Vision - Polarization Patterns in Nature*. Springer-Verlag, Heidelberg–Berlin–New York, 2004.
5. Barta, A., Horváth, G., Meyer-Rochow, V.B.: Psychophysical study of the visual sun location in pictures of cloudy and twilight skies inspired by Viking navigation. *Journal of the Optical Society of America A* 22 (2005) 1023–1034.
6. Pomozi, I., Horváth, G., Wehner, R.: How the clear-sky angle of polarization pattern continues underneath clouds: full-sky measurements and implications for animal orientation. *Journal of Experimental Biology* 204 (2001) 2933–2942.
7. Suhai, B., Horváth, G.: How well does the Rayleigh model describe the E-vector distribution of skylight in clear and cloudy conditions? A full-sky polarimetric study. *Journal of the Optical Society of America A* 21 (2004) 1669–1676.
8. Hegedüs, R., Åkesson, S., Wehner, R., Horváth, G.: 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 A* 463 (2007) 1081–1095.
9. Hegedüs, R., Åkesson, S., Horváth, G.: 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 (2007) 2347–2356.
10. Roslund, C., Beckman, C.: Disputing Viking navigation by polarized skylight. *Applied Optics* 33 (1994) 4754–4755.

Sok évvel ezelőtt, egy princetoni látogatásom előtt írtam neki, hogy szeretnék vele interjút készíteni a *Candid Science* című sorozatunk számára. Nagy örömmre azonnal válaszolt, hogy szívesen fogad. A látogatás annyira kellemes volt, hogy későbbi útjaim során minden alkalommal meglátogattam és mindig kedvesen fogadott és rendszerint a Faculty Clubba vitt