

# fizikai szemle



2007/1

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat  
havonta megjelenő folyóirata.  
Támogatók: A Magyar Tudományos  
Akadémia Fizikai Tudományok Osztálya,  
az Oktatási Minisztérium,  
a Magyar Biofizikai Társaság,  
a Magyar Nukleáris Társaság  
és a Magyar Fizikushallgatók Egyesülete

Főszerkesztő:

Németh Judit

Szerkesztőbizottság:

Beke Dezső, Bencze Gyula,  
Czitrovszky Aladár, Faigel Gyula,  
Gyulai József, Horváth Dezső,  
Iglói Ferenc, Kiss Ádám, Lendvai János,  
Ormos Pál, Papp Katalin, Simon Péter,  
Sükösd Csaba, Szabados László,  
Szabó Gábor, Tóth Kálmán,  
Trócsányi Zoltán, Turiné Frank Zsuzsa,  
Ujvári Sándor

Szerkesztő:

Tóth Kálmán

Műszaki szerkesztő:

Kármán Tamás

A folyóirat e-mailcíme:

szerkesztok@fizikaiszemle.hu

A lapba szánt írásokat erre a címre kérjük.

A folyóirat honlapja:

http://www.fizikaiszemle.hu

A címlapon:

**Egy arktiszi ködív (fehér szivárvány az anti-Nap körül) lineáris polárszűrőn át, 180° látószögű halszemoptikával készített két fényképe, a kettősféjű nyílak a polárszűrő áteresztési irányát mutatják. A ködív fehér fénye az ívvel párhuzamos rezgéssíkú és erősen lineárisan poláros, ezért a képeken csak egyes ívdarabjai látszanak. Horváth Gábor felvételei az Északi-sarkon a svéd Beringia 2005 sarkkutató expedíción.**

## TARTALOM

<i>Király Péter</i> : A 100 éves Eötvös–Pekár–Fekete kísérletek és máig tartó hatásuk	1
<i>Nemecz Ernő</i> : A Föld eredete	6
<i>Forgács P., C. Hoenselaers, P. Tod, Fodor Gy., Vasúth M., Gergely Á.L.</i> : In memoriam Perjés Zoltán (1943–2004)	14

### A FIZIKA TANÍTÁSA

<i>Papp Katalin, Nagy Anett</i> : Public relation és a fizikatanítás – avagy hogyan tegyük vonzóvá a fizika tantárgyat	18
A 2006. évi Eötvös-verseny ünnepélyes eredményhirdetése és díjkiosztója ( <i>Geffertb András</i> )	25

### VÉLEMÉNYEK

<i>Kamarás Katalin</i> : Ófalu és Újfalu	27
--	----

### HÍREK – ESEMÉNYEK

<b>MINDENTUDÁS AZ ISKOLÁBAN</b>	29
---------------------------------	----

Polariméter a szemben, polarizációs iránytű és napóra az égen, vízen és vízben ( <i>Hegedüs Ramón, Horváth Gábor</i> )	34
--	----

*P. Király*: After 100 years still of interest: the gravimetric experiments of Eötvös, Pekár and Fekete

*E. Nemecz*: The origin of the Earth

*P. Forgács, C. Hoenselaers, P. Tod, Gy. Fodor, M. Vasúth, Á.L. Gergely*:

In memoriam Z. Perjés (1943–2004)

### TEACHING PHYSICS

*K. Papp, A. Nagy*: Teaching physics and PR: how to make physics attractive  
The 2006 Eötvös physical contest (*A. Geffertb*)

### OPINIONS

*K. Kamarás*: Must we file applications for everything

### EVENTS

#### SCIENCE IN BITS FOR THE SCHOOL

Orientation based on polarimetry in the animal world (*R. Hegedüs, G. Horváth*)

*P. Király*: Nach 100 Jahren immer noch aktuell: Die Schwerekraft-Messungen von Eötvös, Pekár und Fekete

*E. Nemecz*: Der Ursprung unserer Erde

*P. Forgács, C. Hoenselaers, P. Tod, Gy. Fodor, M. Vasúth, Á.L. Gergely*:

In memoriam Z. Perjés (1943–2004)

### PHYSIKUNTERRICHT

*K. Papp, A. Nagy*: Physikunterricht: Wie macht man Physik attraktiv?

Der Eötvös-Wettbewerb in Physik 2006 (*A. Geffertb*)

### MEINUNGSAUSSERUNGEN

*K. Kamarás*: Ohne Bewerbungen geht es nicht

### EREIGNISSE

#### WISSENSWERTES FÜR DIE SCHULE

Polarimetrische Effekte als Orientierungsbehelfe im Tierreich (*R. Hegedüs, G. Horváth*)

*И. Кириль*: Столетняя актуальность результатов измерений Этвеша, Пекара и Фекете по гравитации

*Э. Не.меч*: Возникновение нашей Земли

*И. Фор.гач, К. Хунсе.ларс, И. Тод и др.*: Памяти З. Пэреша (1943–2004)

### ОБУЧЕНИЕ ФИЗИКЕ

*К. П.ап, А. На.дь*: Как обучать физике увлекательными методами

Физический конкурс им. Этвеша 2006. г. (*A. Geffertb*)

### ЛИЧНЫЕ МНЕНИЯ

*К. Ка.мар.аш*: Необходимо ли подавать прожекты на конкурс

### ПРОИСХОДЯЩИЕ СОБЫТИЯ

#### НАУЧНЫЕ ОБЗОРЫ ДЛЯ ШКОЛ

Поляриметрические явления как способы ориентации зверей

(*P. Хэ.гед.юш, Г. Хор.ват*)

Szerkesztőség: 1027 Budapest, II. Fő utca 68. Eötvös Loránd Fizikai Társulat. Telefon/fax: (1) 201-8682

A Társulat Internet honlapja <http://www.elft.hu>, e-postacíme: [mail.elft@mtesz.hu](mailto:mail.elft@mtesz.hu)

Kiadja az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, felelős: Németh Judit főszerkesztő.

Kéziratokat nem őrünk meg és nem küldünk vissza. A szerzőknek tiszteletpéldányt küldünk.

Nyomdai előkészítés: Kármán Tamás, nyomdai munkálatok: OOK-PRESS Kft., felelős vezető: Szathmáry Attila ügyvezető igazgató.

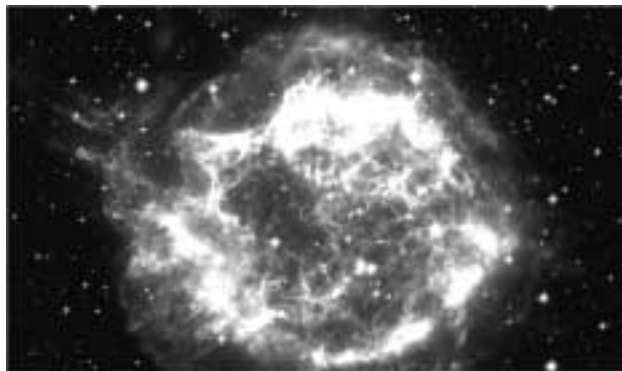
Terjeszti az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, előfizethető a Társulathoz vagy postautalványon a 10200830-32310274-00000000 számú egyzámlán.

Megjelenik havonta, egyes szám ára: 750.- Ft + postaköltség.

HU ISSN 0015-3257

## Kozmikus sugárzás szupernóva-maradványokból

Az MIT (Massachusetts Institute of Technology) csillagászainak sikerült egy felrobbant csillag maradványairól részletekben rendkívül gazdag képet nyerni, amely új adatokat szolgáltat a kozmikus sugárzás eredetével kapcsolatban. A NASA Chandra Röntgen Obszervatórium segítségével a kutatók leképezték egy felrobbant csillag, egy szupernóva maradványaiban a kozmikus sugárzás elektronjainak gyorsulását. Ez a maga nemében első kép azt bizonyítja, hogy a kozmikus sugárzás szupernóva-maradékokból keletkezik. A kép a *Cassiopeia A* objektumról, egy 325 éves szupernóva-maradványról készült. A képen található vékony kék ívek jelzik a kifelé terjedő lökeshullámot, amelyben az elektronok gyorsulása létrejön. A kép más színekkel jellemzett részei a robbanás egyéb termékeinek felelnek meg, amelyek több millió fokra melegedtek fel a robbanás



következtében. Az eredményekről az MIT Kavli Institute for Astrophysics and Space kutatói a *Nature Physics*-ben számoltak be. ([www.nature.com](http://www.nature.com))

## Naperőmű Kínában

A Xinhua kínai hírügynökség jelentése szerint Kína a világ legnagyobb naperőművének megépítését tervezi. A 100 MW teljesítményű létesítmény Kína északkeleti részén, Dunhuang városban működik majd. A ter-

vek szerint a felépítés öt évet vesz igénybe. Más országok is terveznek hasonló létesítményeket. Nemrég Ausztrália jelentette be, hogy egy 154 megawattos erőművet készül építeni. ([www.nature.com](http://www.nature.com))

### MINDENTUDÁS AZ ISKOLÁBAN

## POLARIMÉTER A SZEMBEN, POLARIZÁCIÓS IRÁNYTŰ ÉS NAPÓRA AZ ÉGEN, VÍZEN ÉS VÍZBEN

Mire jó az állatok polarizációlátása?

A fény emberi szem számára érzékelhetetlen egyik sajátosságát, a fénypolarizációt számos állatfaj képes látni. Az emlős állatokban, az emberben is, a biológiai evolúció során nem alakult ki a *polarizációlátás* képessége, mert erre a fejlett agy miatt nem volt szükség. Mivel a fény polarizációja sok hasznos információt hordoz arról a közegről, ahol keletkezik, a technikai evolúció folyamán az ember létrehozott olyan eszközöket is, melyekkel a polarizáció mérhető. Ezeket nevezzük *polarimétereknek*.

Adott hullámhosszúságú poláros fény általában négy paraméterrel jellemezhető: (i) Az *intenzitás* az egységnyi idő alatt, egységnyi hullámhossztartományban, egységnyi felületre eső fényenergia. (ii) A *polarizációirány* a poláros fény domináns rezgéssíkjának iránya egy viszonyítási irányhoz képest. (iii) A *lineáris polarizációfok* a lineárisan poláros, azaz egyetlen

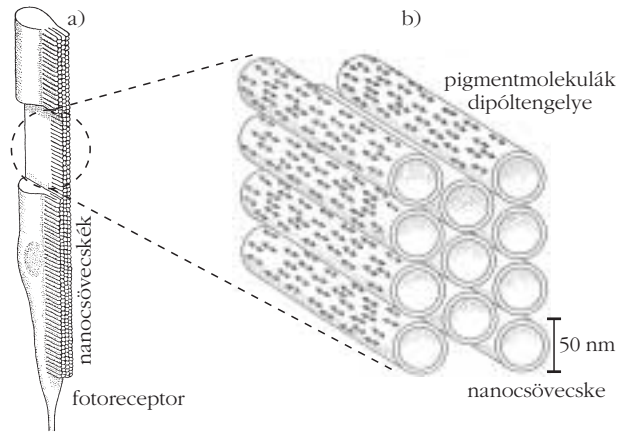
rezgéssíkú fény intenzitásának aránya a teljes intenzitáshoz képest. (iv) A *circuláris polarizációfok* a circulárisan poláros, vagyis körbe forgó elektromos amplitudóvektorú fény intenzitásának aránya a teljes intenzitáshoz viszonyítva. Ha tehát a fény polarizációját akarjuk megismerni, akkor legalább négy független mérést kell végeznünk a fényvel a szóban forgó négy optikai paraméter meghatározása végett. Egy polariméter lényegében ezt teszi: egy adott hullámhosszon például úgy méri a poláros fény intenzitását, hogy azt az első három méréskor egy-egy *lineáris polárszűrőn*<sup>1</sup> engedi át a szűrő három különböző áteresztési iránya mellett, majd a negyedik mérésben

<sup>1</sup> Egy lineáris polárszűrő csak egyetlen rezgéssíkú fényt ereszt át. Ez az irány a polárszűrő áteresztési iránya. Az erre merőleges rezgéssíkú fényt teljesen elnyeli.

egy *cirkuláris polárszűrő*.<sup>2</sup> A fényintenzitás így mért négy értékéből alkalmas számításokkal megkapjuk az említett négy optikai paraméter értékét. Ha csak a lineáris polarizációra vagyunk kíváncsiak, akkor elég három független mérést végeznünk, például a három eltérő áteresztési irányú lineáris polárszűrő segítségével. A polariméterekkel mérhetők és megjeleníthetők az optikai környezetben előforduló lineáris és cirkuláris polarizációs mintázatok, melyeket mi emberek az emlősökkel együtt nem látunk, de rengeteg más állat érzékel és különféleképpen föl is használ.

A polarizációlátású állatok szemében lényegében „élő polariméterek” működnek. Mivel azonban néhány ritka kivételtől eltekintve a földi természetben a részlegesen lineárisan poláros fény uralkodik, ezért jelen tudásunk szerint az állatok is csak a lineárisan poláros fényt érzékelik. A két legfontosabb kivétel biológiai eredetű: az egyik a szentjánosbogarak által kibocsátott cirkulárisan poláros biolumineszcens<sup>3</sup> fény, a másik pedig a Scarabaeidae családba tartozó fémfényű bogarak (például zöld cserebogarak vagy aranyos rózsabogarak) kيتينpáncéljáról visszaverődő cirkulárisan poláros fény. A harmadik kivétel abiotikus eredetű: ha a vízben haladó részlegesen lineárisan poláros fény teljesen visszaverődik a víz–levegő határfelületen, akkor a tükröződő fény részben cirkulárisan poláros lesz. Mostanáig nem ismert, hogy vannak-e a fény cirkuláris polarizációját érzékelni képes állatok.

Ismereteink szerint az állatok szemében a polariméterek egyszerűbb fajtája fordul elő, mellyel a fénynek csak a lineáris polarizációja érzékelhető. Ennek alegysége a polarizációérzékeny fotoreceptor, melyre az 1. ábra mutat egy példát. Például a rovarok összetett szemének *ommatidiumaiban*<sup>4</sup> több (maximum 9) fényérzékeny sejt (fotoreceptor) van, melyeknek a szemet érő fény felé forduló külső szegmensén, a sejtmembránon, rengeteg apró nanocsövecské türemkedik ki. E nanocsövecskék hossz tengelye egymással közel párhuzamos, miáltal a fotoreceptor olyan, mint egy apró fésű (1.a ábra). A nanocsövecskékben a fényelnyelő látópigment-molekulák úgy helyezkednek el, hogy a hossz tengelyük irányába mutató dipóltengelyük közelítőleg párhuzamos a nanocsövecskék hossz tengelyével (1.b ábra). Egy dipólmolekula annál több lineárisan poláros fényt nyel el, minél kisebb szöget zár be a dipóltengelye a fény **E** elektromos térerősségvektorával, röviden E-vektorával. Mivel a rovarok fotoreceptoraiban minden pigmentmolekula közel egyirányú, ezért a fotoreceptor polarizációérzékeny: a ráeső lineárisan poláros fényt maximálisan/minimálisan nyeli el, ha annak E-vektora

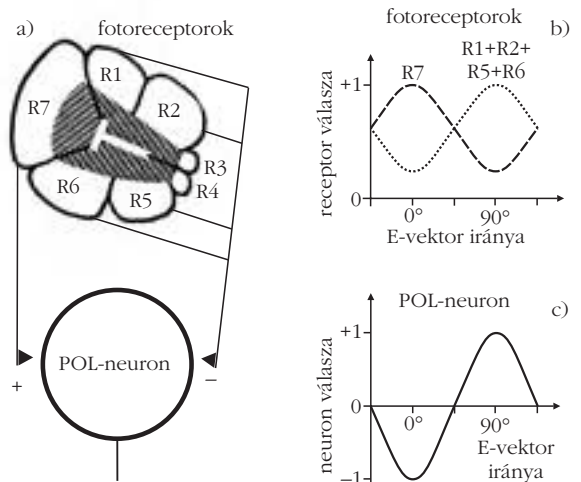


1. ábra. A rovarok polarizációlátását lehetővé tevő, nanocsöves membránú fényérzékeny sejt (fotoreceptor) külső szegmense (a) és az egymással párhuzamos nanocsövecskék kötegének egy kinagyított részlete, ahol kettősfejű nyilak szemléltetik a látópigment-molekulák dipóltengelyét (b).

párhuzamos/merőleges a membrán nanocsövecskéinek hossz tengelyével. Az ilyen fotoreceptor egy forgó E-vektorú lineárisan poláros fényt például úgy észlel, mintha annak szinuszosan változna az intenzitása (2.b ábra). Egy ilyen polarizációérzékeny fotoreceptor úgy viselkedik, mint egy lineáris polárszűrő.

Az ommatídiumokbeli polarizációérzékeny fotoreceptorok a lineárisan poláros fény elnyelésekor keletkező elektromos jelüket polarizációérzékeny POL-neuronokhoz küldik tovább. A mezei tücsök (*Gryllus campestris*) szemében például a kék fényre érzékeny R7 fotoreceptor jele serkentőleg hat a POL-neuronra, míg az R7 receptor nanocsövecskéire merőleges nanocsövecskéké csak gátlólag (2.a ábra). A POL-neuron összehasonlítja e

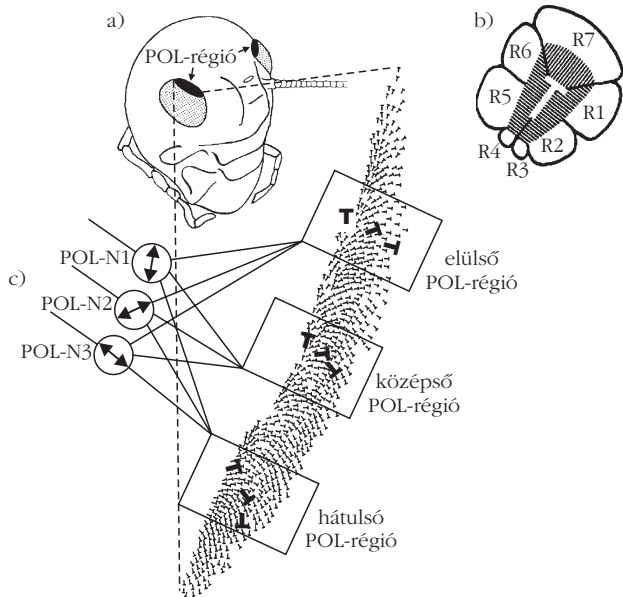
2. ábra. (a) A mezei tücsök (*Gryllus campestris*) szemének eget kémlelő háti részén lévő polarizációérzékeny R1, R2, ..., R7 ommatidialis fotoreceptoregység keresztmetszete és az alatta lévő POL-neuronhoz való kapcsolódások módja, ahol + serkentést, – pedig gátlást jelent. A receptorok nanocsövecskéinek irányát csíkos mintázat mutatja. (b) Az R7, illetve az R1 + R2 + R5 + R6 receptoroknak egy forgó E-vektorú lineárisan poláros fényre adott válasza (a kisülési frekvencia logaritmus 1-re normalva) az E-vektor iránya függvényében. (c) A POL-neuron válasza (az R7 és az R1 + R2 + R5 + R6 receptorok jelének különbsége) az E-vektor iránya függvényében.



<sup>2</sup> Egy jobbra, illetve balra cirkuláris polárszűrő elnyeli a balra, illetve jobbra cirkulárisan poláros fényt, míg átereszt a jobbra, illetve balra cirkulárisan polárosat.

<sup>3</sup> A biolumineszcens fény a gazdaállattal együttélő baktériumokban zajló speciális biokémiai reakciók mellékterméke, amit a gazda vizuális kommunikációra használ szabályozható módon.

<sup>4</sup> Az összetett szem számos elemi szemecskéből, latinul ommatidumból áll, melyben egy lencse és egy azt követő kúp alakú fénytörő test (kristálykúp) alatt húzódnak a nanocsövecskés membránú fotoreceptorok.



3. ábra. A mezei tücsök (*Gryllus campestris*) összetett szemének eget kémlelő polarizációérzékeny POL-régiója (a), az ommatídiuumokban lévő polarizációérzékeny R1, R2, ..., R7 fotoreceptoregység keresztmetszete, ahol rovátkák jelzik a nanocsövecskék irányát (b), és a POL-régió ommatidiális fotoreceptoregységeinek a három különböző típusú POL-neuronhoz (POL-N1, POL-N2, POL-N3) való kapcsolódása (c). A T betűk az R7 és R1+R2+R5+R6 ommatidiális receptoregységek egymásra merőleges nanocsövecskéinek irányulását mutatják a POL-régióon belül. A kettősfejű nyilak a POL-neuronok által preferált E-vektor irányokat szemléltetik, melyekre a neuronok maximális választ adnak. Minden POL-neuron a POL-régió elülső, középső és hátsó részében lévő olyan ommatidiális fotoreceptoregységekhez kapcsolódik, melyekben az R7 receptor nanocsövecskéi közel párhuzamosak a POL-neuron által preferált E-vektor iránnyal (vastag T-k).

két, egymásra merőleges nanocsövecskével bíró receptorcsoport jeleit (2.b ábra), képezi azok különbségét (2.c ábra), s e különbséget továbbítja a látóközpont-

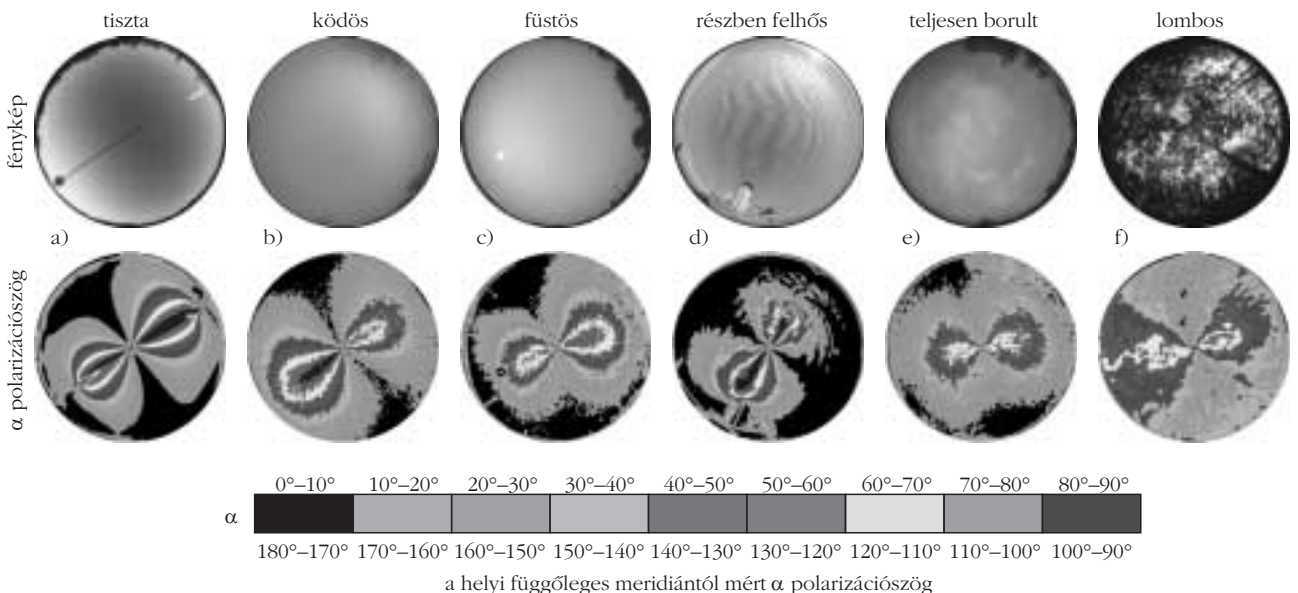
ba. A fotoreceptorok és a POL-neuron jele (tüzelési frekvenciájának logaritmus) szinuszosan változik, amikor a receptorokat érő lineárisan poláros fény E-vektora körbe-körbeforgó (2.b, c ábra). A POL-neuron jele akkor maximális/minimális, mikor a stimuláló fény E-vektora párhuzamos/merőleges a neuronhoz kapcsolódó egyik receptortípus (például R7) membránjának nanocsövecskéivel. Ezt a kitüntetett irányt nevezzük a POL-neuron által preferált E-vektor iránnyak. Ily módon a POL-neuron jelének időbeli változásából meghatározható egy forgó E-vektorú lineárisan poláros fény rezgéssíkjának pillanatnyi iránya. A POL-neuron ekkor egy elemi, dinamikus polariméterhez hasonló.

A természetben a legtöbb polarizációs mintázat időben csak lassan változik. Például a tücsökök szemét érő részlegesen lineárisan poláros égboltfény E-vektora nem forog körbe-körbe, ha a tücsökök nem forog. Ilyen statikus helyzetben legalább három eltérő preferált E-vektor irányú POL-neuronra van szükség ahhoz, hogy azok jeleiből a tücsökök agya meg tudja határozni az égboltfény statikus polarizációirányát. Elektrofiziológiai vizsgálatokkal tényleg fölfedezték, hogy a tücsökök szemének az eget kémlelő polarizációérzékeny régiójában (3.a, b ábra) három különböző E-vektor irányra maximálisan érzékeny POL-neuron van (3.c ábra). A tücsökök agya e három POL-neuron jeleiből határozza meg a szemet érő égboltfény intenzitását, lineáris polarizációfokát és polarizációirányát, hasonlóan, mint egy lineáris polariméter.

De vajon mire használják az állatok a polarizációlátásukat a spektrum ultraibolya vagy kék vagy zöld tartományában?

A polarizációlátás egyik legfontosabb szerepe a térbeli tájékozódásban van, amit az optikai környezet számos polarizációs mintázatának jellegzetes tükröszimmetriája (4. ábra) tesz lehetővé. Az állatok zöme

4. ábra. Tiszta (a), ködös (b), erdőtüztől füstös (c), részben felhős (d), teljesen borult (e) és napfény által megvilágított lomboktól takart (f) égbolt 180° látószögű halszemoptikával készített fényképe (felső sor) és képalkotó polarimetriával a spektrum kék (450 nm) tartományában mért polarizációirány mintázata (alsó sor), ahol a körök középpontja a zenit, a kerülete pedig a horizont. E mintázatok tükröszimmetriatengelye a szoláris-antiszoláris meridián, ami számos polarizációlátású állat térbeli tájékozódásának viszonyítási iránya.



a térbeli orientációja során viszonyítási alapul a *Nap azimutját*<sup>5</sup> választja: ahhoz méri például a járásának, repülésének vagy úszásának irányát, illetve annak megváltozását. Mikor a Nap nem látható, mert például felhők, lombok, hegyek takarják vagy a horizont alatt van, akkor jön jól a polarizációlátás. Az égboltfény E-vektorának térbeli eloszlása olyan tükörszimmetrikus mintázat, melynek szimmetriasíkja a *szoláris–antiszoláris meridián*<sup>6</sup> síkja. Magyarországi, tunéziai, svájci, finnországi, alaszakai és északi-sarki 180° látószögű képalkotó polarimetriai vizsgálatokkal magyar, német és svéd kutatókkal (*Gál József, Pomozi István, Haiman Ottó, Rüdiger Webner, Benno Meyer-Rochow, Susanne Akesson, Varjú Dezső*) együtt kimutattuk, hogy az égbolt E-vektor mintázata szinte minden meteorológiai körülmény között hasonló, gyakorlatilag ugyanaz a szoláris–antiszoláris meridiánra *tükörszimmetrikus polarizációirány mintázat* alakul ki tiszta (*4.a ábra*), ködös (*4.b ábra*), részben felhős (*4.d ábra*) és teljesen borult (*4.e ábra*) égbolton, sőt még akkor is, mikor az eget erdőtüzek sűrű füstje borítja (*4.c ábra*). Ha az ég nem tiszta, akkor az égboltfény  $p$  lineáris polarizációfoka jelentősen lecsökkenhet;  $p$  legkisebb, néhány százalékos értékei a teljesen borult időben mérhetőek, mikor az eget vastag, sűrű eső- vagy jégfelhők fedik. Ha egy állat *polarizációlátásának  $p^*$  küszöbe* a ködös, füstös vagy felhős ég fényének átlagos  $p$  lineáris polarizációfoka alá esik ( $p^* < p$ ), akkor látja az égbolt E-vektor mintázatát, aminek szimmetriatengelyéből megállapíthatja a szoláris–antiszoláris meridián irányát akkor is, amikor a Nap nem látható. Hogy az így adódó két ellentétes (szoláris és antiszoláris) irány közül melyik mutat a Nap felé, az az égboltfény intenzitásának és színének mintázatából következtethető ki. Számos polarizációlátású rovar, rák, pók, skorpió, hal, kétéltű, hulló és madár az égbolt E-vektor mintázatából határozza meg az orientációja alapjául szolgáló szoláris meridián irányát, ha a Napot nem látja.

*Bakos Attilával, Barta Andrással, Bernáth Balázssal és Subai Bencével* hőlégballonnal több kilométer magasra szálltunk, és megmértük, hogy az alattunk elterülő légóceánban milyen lineáris polarizációs mintázat alakul ki a napfény levegőbeli szóródása eredményeként. Kiderült, hogy lényegében ugyanolyan, mint a fölénk boruló égbolté: egy magasban repülő polarizációérzékeny madár például nemcsak a fölötté lévő égbolton (*4.a–e ábra*), hanem az alatta húzódó levegőben is a szoláris–antiszoláris meridiánra tükörszimmetrikus E-vektor mintázatot észlelhet. Nemrég azt is bizonyítottuk, hogy az erdőkben a napfény által megvilágított lombokon ugyanolyan E-vektor mintázat keletkezik, mint ami a tiszta/ködös/füstös/felhős égboltra jellemző (*4.f ábra*). Emiatt, bár az erdőkben

a Napot lombok takarják, a polarizációlátású erdei állatok a fölējük hajló lombok E-vektor mintázatából ugyanúgy képesek megállapítani a szoláris–antiszoláris meridián irányát, mint az erdőn kívüli társaik az égboltéból (*4.a–e ábra*). Az ég polarizációs mintázata alapján történő orientációt szokás *égi polarizációs iránytű*nek nevezni.

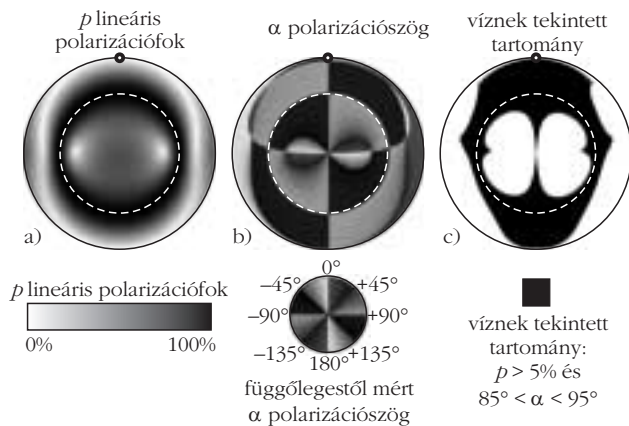
De nemcsak a levegőben vagy a szárazföldön tartózkodó állatok használhatják a fény lineáris polarizációját, hanem a levegő és a víz határán is jól jön bizonyos állatoknak a polarizációlátás. A vízirovarok (pl. vízibogarak, vízpoloskák) és vízhez kötődő rovarok (pl. szitakötők, kérészek és böglyök) a számukra, illetve lárváik számára életfontosságú víztesteket nem azok csillogása vagy színe alapján találják meg, hanem a vízfelületről visszavert vízszintes poláros fény érzékelése segítségével: e rovarok erősen vonzódnak a vízszintes poláros fényhez, (a jelenség neve: *pozitív polarotaxis*). Azt gondolhatnánk, hogy a vízfelszínről mindig vízszintes rezgésű fény verődik vissza. Ez azonban nincs így! A vízfelületről visszaverődő fény polarizációs sajátosságait a *Fresnel-féle képletek* írják le. Ezek szerint a vízszintes poláros fény nagyobb mértékben verődik vissza a vízfelületről, mint a függőlegesen poláros, egy kitüntetett beesési irányban, az úgynevezett *Brewster-szögben*<sup>8</sup> pedig kizárólag vízszintes poláros fény tükröződik. Ebből következően, ha a vízből nem jön fény (ez a helyzet a sötét víztesteknél), akkor a vízről Brewster-szögben tükröződő fény teljesen lineárisan poláros lesz vízszintes rezgésűvel, ami vonzza a vizet kereső vízirovarokat. Ha a víz felületére az ég azon részeiről esik fény, ahol az égboltfény polarizációiránya függőleges vagy ahhoz közeli, akkor a vízről visszavert fény rezgésűje is függőleges vagy ahhoz közeli irányú lesz. Az ilyen fényt visszaverő vízfelszínhez már egyáltalán nem vonzódnak a vízirovarok. A vízfelszín polarizációs mintázatát tehát az égboltfénynek a Nap helyzetétől és a hullámhossztól függő, térben és időben változó lineáris polarizációja, valamint a vízfelszín Fresnel-képletekkel leírt polarizálóképessége bonyolult módon határozza meg. Ennek eredményeként a Nap állásának függvényében meglehetősen összetett tükröződési-polarizációs mintázat jellemző a sima vízfelszínre, amire egy példát az *5.a, b ábra* mutat. A vízirovarok a vízfelületnek csak azon részeit tekintik víznek, ahonnan a vízszinteshez közeli rezgésű fény verődik vissza, amelynek  $p$  lineáris polarizációfoka nem kisebb, mint a polarizációérzékelés  $p^*$  küszöbe (*5.c ábra*).

<sup>7</sup> *Augustin Fresnel* (1788–1827) francia fizikus. A Fresnel-képletek egyik formája két elektromos szigetelő közeg határfelületére merőleges, illetve azzal párhuzamos polarizációjú beeső fény elektromos térerősségvektorának a visszaverődés utáni megváltozását írják le a beesési szög és a közegek egymásra vonatkoztatott törésmutatója függvényében.

<sup>8</sup> *David Brewster* (1781–1868) skót fizikus. Ha a fény Brewster-szögben esik a vízfelületre, akkor a visszavert és megtört fénysugarak egymásra merőlegesek. A levegő–víz határfelületre a Brewster-szög 36,5° a vízszinteshez képest.

<sup>5</sup> A Nap azimutja az a földfelszínnel párhuzamos, vízszintes irány, amely a földi megfigyelőtől a Nap felé mutat.

<sup>6</sup> A szoláris meridián a képzeletbeli éggömbön azon függőleges síkú főkör negyed íve, mely a földi megfigyelő fölötti zenittől a Napon át a horizontig húzódik. Az antiszoláris meridián a szoláris meridiánnak a zenitre vonatkozó tükörképe.



5. ábra. Sima vízfelületről tükröződő poláros égboltfény lineáris polarizációfokának (a) és polarizációrányának (b)  $180^\circ$  látószögű mintázata naplementekor, ahol a körök középpontja a nadír (a zenit tükröképe), a kerülete pedig a horizont. A Napot egy fekete szegélyű fehér pont mutatja, a szaggatott kör pedig a Brewsterszögnek felel meg. A vízfelszín ezen tükröződési–polarizációs mintázatai fontos szerepet játszanak a vízirovarok vízkeresésében. E rovarok a vízfelületnek csak a c) ábrán feketével jelölt tartományát tekintik víznek.

Ha  $180^\circ$  látószögű képalkotó polarimetriával mérjük a vízfelületek tükröződési polarizációs mintázatát (5.a, b ábra) a Nap állásának függvényében, és meghatározzuk a vízfelület azon  $Q$  hányadát, amelyet a vízirovarok a polarizáció alapján víznek vélnek (5.c ábra), akkor kiderül, hogy úgy a sötét, mint a világos vizek esetén  $Q$  naplementekor és napkeltekor maximális, vagyis amikor a Nap a horizont közelében tartózkodik. A sötét vizeknél  $Q$ -nak délben ugyancsak maximuma van, azaz amikor a Nap horizonttól mért szögtávolsága a legnagyobb. Ebből kifolyólag a polarizáció alapján történő vízkeresés optimális időszaka alacsony napállás mellett van, míg a sötét vizeket a dél körüli magas napállások mellett is érdemes polarotaktikusan keresni. *Kriszka György, Csabai Zoltán és Boda Pál* biológus kollégáinkkal együtt kimutattuk, hogy ezen fizikai-optikai jóslatnak megfelelően a vízirovarok tényleg reggel és/vagy délben és/vagy este kelnek szárnyra, hogy új vizeket keressenek a kiszáradófélben lévő vagy táplálék-, illetve oxigénhiányos vagy túlszűfolt régi vizek helyett. E jelenséget nevezzük a vízirovarok *polarizációs napórájának*. Az evolúció során kifejlődött a vízirovarok azon képessége, hogy a polarizáció alapján többnyire akkor keresnek vizet, mikor az optikailag a leghatékonyabb, és mindezt a Nap állása szabályozza. A vízben tartózkodó vízirovarok nem érzékelhetik a levegő hőmérsékletét és páratartalmát, sem a szél sebességét, így ezek alapján képtelenek lennének megválasztani a vízkereső repülésükhöz megfelelő időszakot, mikor a léghőmérséklet, páratartalom és szélesség optimális. Viszont a Nap állása a fényintenzitás alapján észlelhető a vízben is, és ennek segítségével jól érzékelhető az optikailag ideális vízkeresési napszak eljövételének ideje. A vízirovarok polarizációs napórájában közvetve megint az égbolt polarizációs mintázata játszik fontos szerepet, hiszen az égboltfénynek a polarizációt módosító vízfelszíni tükröződése eredményezi azt a vízfelszíni polarizációs mintázatot, amelynek saját-

ságai határozzák meg az erősen és közel vízszintesen polarizáló vízfelület arányának maximumát, végső soron pedig a vízkeresésnek a *pozitív polarotaxis* jelenségének megfelelő optimális napszakát.

Ha a víz alá merülünk, polarimetriával ott is sajátos lineáris polarizációs mintázatokra bukkanunk. Izraeli tengerbiológusokkal (*Shai Sabbah, Nadav Shashbar*) együttműködve víz alá meríthető polariméterekkel igazoltuk, hogy a levegőnél közel 700-szor sűrűbb tengervízben a vízbeli igen erős fényszórás miatt hasonló E-vektor mintázat keletkezik, mint a légkörben (fölöttünk az égbolton és alattunk a légoceánban, mikor például hőlégballonnal lebegünk a levegőben), s a víz alatti E-vektor mintázat tükörszimmetria-síkja szintén a szoláris–antiszoláris meridián. A vízi állatok térbeli tájékozódásának viszonyítási iránya ugyancsak a szoláris meridián. A vízből nézve a Nap pontos helye sokszor még akkor sem állapítható meg, amikor az ég tiszta. A mozgó víz hullámokon történő fénytörés miatt a Nap pontszerű korongjának helye ugyanis véletlenszerűen ingadozik a víz alatti megfigyelő látóterében. A vízbeli E-vektor mintázat szimmetriatengelyének iránya ellenben viszonylag állandó, ami alkalmas a szoláris–antiszoláris meridián irányának megállapítására szinte bármilyen meteorológiai viszonyok között. Bizonyos halak és rákok vándorlásuk és úszkálásuk során a víz alatti polarizációs mintázatból kikövetkeztetett szoláris meridián irányára támaszkodva tájékozódnak, a szárazföldi állatokhoz hasonlóan. A polarizációlátású vízi állatoknak is van tehát egy sajátos „vízi polarizációs iránytűjük”.

Úgy foglalhatjuk össze a fentieket, hogy sok állat szemében az evolúció során részben azért fejlődtek ki „élő polariméterek”, hogy az optikai környezetet uraló égi, vízfelszíni és víz alatti, a szoláris meridiánra tükörszimmetrikus lineáris polarizációs mintázatokban rejlő „polarizációs iránytűt”, illetve „polarizációs napórát” térbeli tájékozódásra, illetve vízkeresésre tudják kiaknázni olyan meteorológiai viszonyok között, mikor a Nap nem látható. A polarizációlátás az állatvilág egyik legfontosabb „evolúciós találmánya”, a túlélés egyik kulcsa kedvezőtlen meteorológiai viszonyok közt. A polarizációlátás további szerepeivel az olvasó az ajánlott irodalomban ismerkedhet meg.

Az ember, felismerve, hogy a fény polarizációja a tudományban és a technikában szinte kifogyhatatlan információforrás, az agyában kigondolt polariméterek megépítésével pótolta a polarizációlátás hiányát.

*Hegedüs Ramón, Horváth Gábor*  
 ELTE, Biológiai Fizika Tanszék,  
 Biooptika Laboratórium

## Irodalom

- G. Horváth, D. Varjú, *Polarized Light in Animal Vision – Polarization Patterns in Nature*. Springer-Verlag, Heidelberg – Berlin – New York (2003) p. 447
- A Biooptika Laboratórium <http://arago.elte.hu> honlapjáról számos magyar és angol nyelvű cikk tölthető le a polarizációlátás és a természet polarizációs mintázatai tárgykörökben.
- Härtlein K., A sarkított fénytől a Polaroid szemüvegig. *Fizikai Szemle* 56 (2006) 108