

Matematikai pontossággal látnak a lepkék

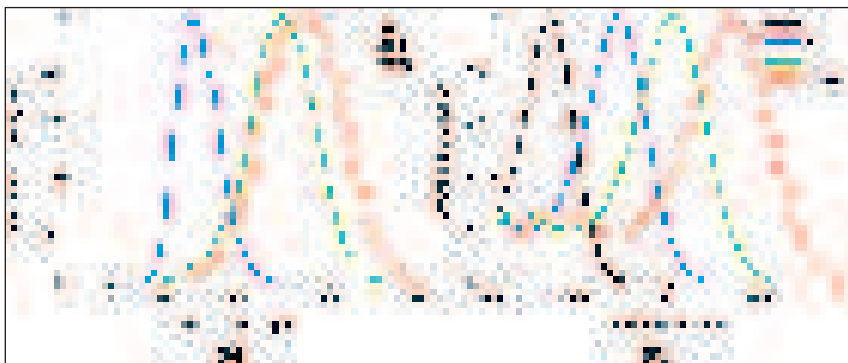
A látás, és nem ritkán a színes látás, igen fontos a nappali életmódot folytató állatoknál. A vizuális információ, vagy annak elrejtése (rejtőzködés) meghatározó szerepet játszhat számos területen a párválasztástól (például a kék, szexuális jelzőszín a boglárkalepkék esetében) az elriasztáson át a túlélésig. Ennél fogva a természetben rendkívül változatos színekkel találkozhatunk, amelyeket a szemünkben található fényérzékelő idegsejtek tesznek érzékelhetővé. Ezekből az ún. fotoreceptorokból az emberi szemben a hullámhossz szerinti érzékenyséjük alapján háromfélét különböztetünk meg: vannak a látható fény kék (~430 nm), zöld (~540 nm) és vörös (~580 nm) hul-

A szárnyak színe

A boglárkalepkék szárnyának szerkezeti eredetű kék színe miatt [4] már hosszabb ideje foglalkozunk kutatásunkkal. Az általunk tanulmányozott Boglárka-rokonúak lepketribusz [5] tagjai összetett szemének három, az emberi színérzékelőkhöz hasonló érzékenyséjű fotoreceptora van, azonban ezek kiegészülnek egy negyedikkel, amelynek segítségével a közeli ultraibolya – kék hullámhossz-tartományban (~350 nm) képesek többletinformációra szert tenni (**1b. ábra**) [1]. A vizsgált fajok mind-egyikére jellemző az ivari kétalakúság, azaz a hímek fémesen csillogó kék színűek (**2a. ábra**), míg a nőstények egyszerű ső-

vizgáltak kilenc kék boglárkalepke-faj hímjeinek színét, figyelembe véve szemük érzékenységi hullámhossz-tartományát. Az így megszerzett tudást sikeresen alkalmaztuk egy lepkeszárny alapú gőzérzékelő eszköz kifejlesztése során is. A gőzérzékeléssel kapcsolatos munka is érdekes újdonságokat tárt fel a boglárkalepkék színe és ennek a színnek az érzékelése között.

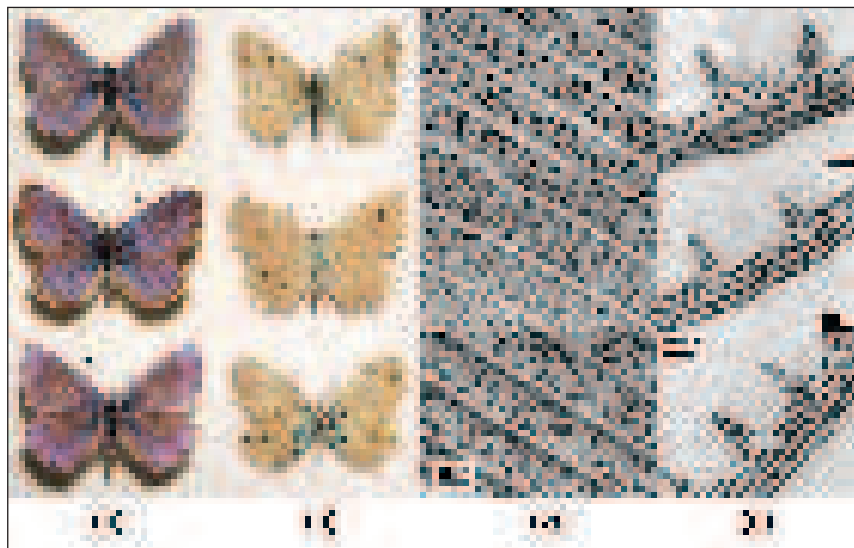
A természetben előforduló színeket [7] többnyire a festékanyagok okozzák. Ilyenkor bizonyos hullámhossz-tartományok elnyelődnek a festékanyag molekuláiban, és az érzékelt színt a többi, visszavert fény összessége adja. Környezetünkben leggyakrabban ezzel a színképzéssel találkozunk, például a hagyományos festékekben. Előfordulhat olyan eset, amikor a lezajló molekuláris kémiai folyamatok fénykibocsátással járnak, ekkor kemilumineszcenciáról, illetve ha ez élő rendszerekben történik, akkor biolumineszcenciáról beszélhetünk. Ilyen például a szentjánosbogár kibocsátott fénye. Szín keletkezhet fluoreszcenciával is, ilyenkor bizonyos anyagokat megfelelő hullámhosszú fényrel megvilágítva, eltérő (hosszabb) hullámhosszúságú fénykibocsátást tapasztalunk. Számos ásvány és vegyület képes fluoreszcens fény kibocsátására, melyeket például a sötétben világító vészjelzések esetében alkalmaznak. Azonban a bemutatott három, atomi vagy molekuláris szinten lejátszódó színképzési folyamaton túl létezik egy olyan, amely jóval nagyobb mérettartománnyal áll kapcsolatban. A fény hullámhosszának tartományába eső méretekkel rendelkező egy-, két- vagy háromdimenzióban rendezett szerkezetek, ha megfelelő törésmutatójú anyagokból épülnek fel, képesek lehetnek bizonyos hullámhosszakat visszaverni. Ezeket a nanoszerkezeteket fotonikus kristályoknak nevezzük, az így keletkezett színeket pedig szerkezeti színeknek [8, 9]. A szerkezeti szín hullámhossza függ a fotonikus kristály összetevőinek anyagi minőségétől (törésmutató), illetve a szerkezet jellemző méreteitől. Kimutatható, hogy ha valamelyik szerkezeti tulajdonságot megváltoztatjuk, akkor megváltozik a visszavert fény hullámhossza, vagyis a fotonikus kristály színe. Például, ha kicseréljük a levegőt valamilyen más anyag gőzére, vagy



1. ábra. (a) Az emberi szemben található háromféle fotoreceptor érzékenységi görbéi, amelyek a látható fény kék, zöld és vörös hullámhossz-tartományában érzékelnek. **(b)** A boglárkalepkék összetett szeme tartalmaz egy további, a közeli ultraibolya tartományban érzékeny fotoreceptort is [1]

lámhossz-tartományában érzékelő típusok (**1a. ábra**). Az így előálló egyedi színérzékelő detektorunk, a szemünk millió fölötti árnyalatot képes megkülönböztetni egymástól. A természetben azonban másféle fotoreceptorokat tartalmazó szemek is előfordulnak, amelyek a Napból érkező fénynek nem csak az általunk látható tartományát érzékelik. Bizonyos állatfajok az ultraibolya és az infravörös tartományba eső fényt is látják, mivel az emberétől eltérő életterük és életmódjuk miatt ez számukra evolúciós előnyt jelent. Számos madár- és rovarfajnak van négy, vagy esetenként még többféle fotoreceptora, rendkívüli esetben a számuk a tízet is meghaladhatja [1–3].

tétbarna szárnyfelszínűek. A fonák mindkét ivarnál szürkés-barna, igen bonyolult mintázattal (**2b. ábra**). A boglárkalepkékkel foglalkozó tudósok e fajspecifikus fonákmintázat alapján azonosítják az egyes lepkefajokat. Azonban meglehetősen valószínűtlennek tűnik, hogy erre a lepkék is képesek lennének repülésük közben. Sokkal valószínűbb, hogy a párkeresés során a szárnyak élénk kék színét használják egymás azonosítására [6]. Ám ahhoz, hogy ez a szexuális kommunikáció hiba nélkül megvalósulhasson, szükséges, hogy az egyes fajok egyedi kék színekkel rendelkezzenek, továbbá ezt a kék tartományt nagy felbontással érzékelni képes szemekre is szükség van. Kutatásunk során meg-



2. ábra. Három boglárka hím (Ikarusz boglárka, Aprószemes boglárka, Terzítész boglárka) (a) színének és (b) fonákjának fotója, valamint a szárnypikkelyeikben található fotonikus nanoarchitektúra felszínének (c) pásztázó elektronmikroszkópos, illetve keresztmetszetének (d) transzmissziós elektronmikroszkópos felvétele

a kék szerkezeti színek között ahhoz, hogy a boglárkalepkék hatékony szexuális kommunikációt valósítsanak meg a segítségükkel. Tehát képesek-e azonosítani egymást a szárnyfelszínük élénk színezete alapján? Ebből a célból több mint száz múzeumi példány optikai tulajdonságait vizsgáltuk meg az általunk kifejlesztett „spektrodeszka” [14] és egy spektrométer segítségével. Ez utóbbi eszköz alkalmas a lepkék szárnya által visszavert kék szín jellemzésére, mivel a visszavert fény hullámhossz szerinti intenzitás-eloszlását méri meg, azaz képes megállapítani, hogy bizonyos hullámhosszakat milyen arányban tartalmaz a szárnyakról reflektált fény.

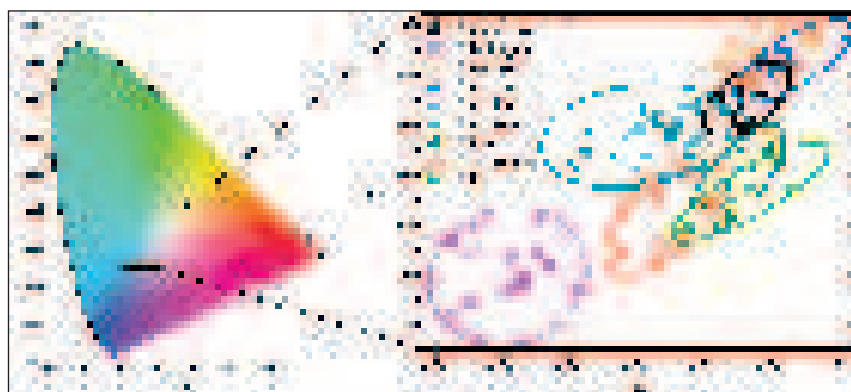
A visszavert színt megvizsgáltuk a kilenc bemutatott faj 110 egyede esetében, és összehasonlítottuk a kapott eredményeket. Megállapítottuk, hogy a szárnyak kék színe fajspecifikus, vagyis az azonos fajú példányok esetében meg egyezik, míg a különböző fajok esetében karakterisztikus eltérések tapasztalhatóak [13]. Ebből arra lehet következtetni, hogy emiatt a szerkezeti színt előállító fotonikus nanoarchitektúrának is fajspecifikusnak kell lennie. Ehhez mind a kilenc faj szárnypikkelyeiről pásztázó elektronmikroszkópos felvételeket készítettünk, és statisztikai elemzést végeztünk a bennük található nanoszerkezeteken. Az eredmények alapján kijelenthető, hogy a pikkelyek fotonikus nanoarchitektúrája is fajspecifikus, hasonlóan a szerkezeti színhez, valamint az is jól látható, hogy a kis színbeli eltérések a szivacszerű kitin

folyadékra (tehát megváltoztatjuk az egyik komponens törésmutatóját), akkor színváltozást tapasztalunk [10]. A szín megváltozásának mértéke függ a szerkezetbe jutott gőz koncentrációjától és anyagi minőségétől, illetve fontos tény, hogy a változás teljesen reverzibilis, azaz a kezdeti állapotok visszaállításával az eredeti színt kapjuk vissza [11, 12]. Megfordítva a kísérletet: a különböző gőzökre adott színváltozás vizsgálatával következtetni lehet az alkalmazott gőzök anyagi minőségére és koncentrációjára, létrehozva így egy fotonikus kristály alapú gőzérzékelő szenzort.

Az általunk vizsgált boglárkalepkék tribuszában a szárnyakat két réteg pikkely borítja: a nanoszerkezet nélküli alsó, barna színű, melanin pigmentet tartalmazó alappikkely-rétegen egy, a hímek esetében kék szerkezeti színt hordozó fedőpikkely-réteg található (2a. ábra). Látható, hogy a boglárkalepkék fémes kék szárnyainak színe két színképzési folyamat összjátékából származik: a fotonikus nanoszerkezet visszaveri a szárnyakra eső fény bizonyos hullámhossz-tartományait (esetünkben a kéket), míg a többi fényt a pikkelyek melanin pigmentje nyeli el [4]. Ezáltal a szárnyakra eső fehér fényből csak a visszavert kék komponens jut el a szemünkig.

Tehát a fotonikus kristályszerkezet a néhány mikron vastag kék fedőpikkelyek belsejében található, teljesen kitöltve a térfogatukat. Ugyanúgy kitinből épül fel, mint a pikkely többi része, azonban pár száz nanométer átmérőjű levegőüregeket tartalmaz, ami egy mikrométer alatti méretskálájú szivacsos teszi hasonlatossá (2c. ábra). Ezt a háromdimenziós ki-

tin–levegő nanokompozitot (keresztmetszeti felvételek a 2d. ábrán) fotonikus nanoarchitektúrának nevezzük. Az általunk vizsgált lepkék mindegyikében ilyen szivacszerű nanoarchitektúra hozza létre a szárnyak kékes színét, ennek megfelelően a fajok közti színbeli különbségeket is pusztán a nanokompozit szerkezeti tulajdonságainak eltérése okozza [6, 13].



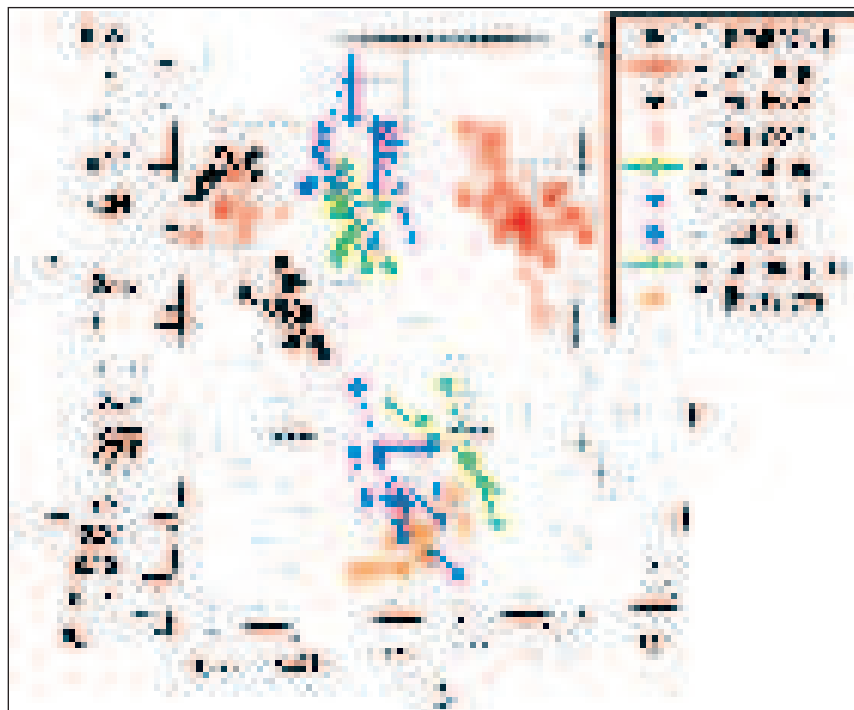
3. ábra. Az emberi színérzékelők alapján elkészített színinger-tér, vagy más néven papucsdiagram, amely az összes emberi szem által érzékelhető színárnyalatot tartalmazza. Ennek kinagyított részlete található a jobb oldalon, ahol feltüntetettük a kilenc vizsgált boglárkalepke-faj hímjeinek színinger-pontjait. Az ellipszisek az egyes fajok jellemző csoportosulásait mutatják

Párkeresés – szín szerint

Kutatásunk során megvizsgáltuk kilenc, Magyarországon is honos boglárkalepke-faj szerkezeti színét és az azt létrehozó nanoarchitektúráját. Arra kerestük a választ, hogy tapasztalható-e elegendő különbség

nanoszerkezet konformációs különbségein alapszanak [6].

Az emberi szem három fotoreceptorának érzékenységi maximumai (vörös, zöld, kék) felhasználásával elkészíthető egy olyan grafikus ábrázolás, amely az összes általunk érzékelhető színárnyalatot egy kétdimenziós



4. ábra. A lepkék színérzékelésén alapuló háromdimenziós színinger-tér, benne a kilenc vizsgált faj színinger-pontjaival. Jól látható, hogy ebben az esetben az egyes fajok csoportosulásai nem fednek át úgy, mint az emberi szemén alapuló papucsdiagramban (3. ábra), ami azt jelenti, hogy a lepkék látása kiválóan alkalmas a szárnyak kék színén alapuló megkülönböztetésére

diagramon jeleníti meg. Ez az ún. „CIE xyY színháromszög” vagy papucsdiagram, a háttérvonalán a monokromatikus hullámhosszakat tartalmazza, míg a papucs-alak belsejében a színkeveréssel előállított árnyalatok találhatóak [15]. A színinger-térhez tartozik egy előállítási szabály, ami lehetővé teszi a mért színképek színinger-pontokká történő átszámítását. A vizsgált 110 boglárkalepke-példány esetében kiszámítottuk a színinger-pontokat a mért visszaverési spektrumokból és ábráztuk az emberi színinger-térben (3. ábra). Látható, hogy a színinger-pontok fajok szerint csoportosulnak, de ezek között a csoportok között átfedések vannak [13]. Ez azt jelenti, hogy bár az emberi színinger-tér jól mutatja a szárnyak színének fajon belüli egyezését, azonban nem alkalmas azok szín szerinti biztonságos megkülönböztetésére, azaz emberi szemmel bizonyos fajok között nem tudunk különbséget tenni, ahogy ezt a 2. ábra kékes-lila hímjei esetében is megfigyelhetjük [13].

Éppen ezért érdemes „lepkeszemmel” tekintenünk a problémára. Az eredmények pontosítása érdekében a boglárkalepkék színérzékelését használtuk fel a fajok határozási problémájának megoldására. A bemutatott négy színérzékelő pigment érzékenységi függvényei felhasználásával elkészítettük a boglárkalepkék színinger-térét, ami az összes számukra érzékelhető színárnyalatot tartalmazza. Mivel látószere-

vük az emberi szemhez képest egy további fotoreceptort is tartalmaz, ezért a megalkotott színinger-tér is eggyel több, azaz háromdimenziós lesz. Ebben is ábráztuk a 110 vizsgált egyed visszaverési spektrumait és a 4. ábrán látható grafikont kaptuk eredményül. Jól látható, hogy az egyedek színét jelképező pontok fajokként csoportokat alkotnak, hasonlóan az előző esethez. Viszont az egyes csoportok között megszüntek az átfedések a harmadik (z-) tengely irányú szétválásnak köszönhetően, ami a negyedik fotoreceptor jelenlétének következménye [6, 16]. Ez azt jelenti, hogy a lepkék négy színérzékelővel rendelkező szeme képes megkülönböztetni egymástól a kék nagyon hasonló árnyalatával rendelkező lepkefajokat is. Így igazoltuk, hogy a lepkék szerkezeti színe valóban kommunikációs célokat valósít meg: a segítségével képesek az egyedek egymás szín szerinti azonosítására. Azonban az eredményeink a szín szerinti azonosítás problémájánál messzebbre is mutatnak. Kísérleteinkkel azt is sikeresen megmutattuk, hogy a lepkék szerkezeti színe és összetett szeme olyan összehangolt emitter (jelkibocsátó) – detektor- (jelérzékelő) rendszer, amely képes a kis, kék tartományba eső színbeli különbségek kimutatására. Ezért kiválóan alkalmas lehet a fotonikus kristályok színváltozásakor keletkező adatok elemzésére is, például, amelyeket a gőzérzékelési kísérletek során mérünk.

Gőzök érzékelése lepkeszárnyakkal

A gőzérzékelési kísérletek során különféle oldószerek gőzeivel teszteltük a kilenc boglárkalepke-faj kék szárnyainak színváltozását. Korábbi méréseink megmutatták, hogy az Ikarusz boglárka (*Polyommatus icarus*) hímek fotonikus kristályszerkezete rendelkezik a legnagyobb intenzitású válaszjellel a gőzexpozíció alatt, ezért kísérleteinkhez főleg ezt a fajt használtuk fel. A részletes vizsgálataink során hét gőz (aceton, ecetsav, etanol, izopropanol, kloroform, toluol, víz) lepkeszárnyak szerkezeti színére gyakorolt hatását vizsgáltuk a koncentráció és az idő függvényében. Ez azt jelenti, hogy a mérés kezdetén 100% referenciának választottuk az áramló mesterséges levegőben lévő lepkeszárnyról visszaverődő fényt, és mérés közben ennek időbeli változását rögzítettük különböző gőzkoncentrációk mellett. Így mind a hét gőz esetében tíz visszaverési spektrumot rögzítettünk (10-től 100%-os gőzkoncentrációig), ami tartalmazza a gőzök hatására létrejött optikai változásokat. Mivel a kicsiny színbeli eltérések a közeli ultraibolya – kék tartományban állnak elő, ezért a boglárkalepke-fajok szín szerinti azonosításához megalkotott háromdimenziós színinger-tér tökéletesen alkalmazható a mért gőzérzékelési spektrumok esetében is. Közös diagramban ábrázolva a hetven színinger-pontot (gőzök száma × koncentrációk száma) azt tapasztaljuk, hogy a szisztematikusan jelentkező spektrális változások miatt az adatok jó közelítéssel egy síkot jelölnek ki a színinger-térben, ezért érdemes elvégezni az adatsor két dimenzióba történő átalakítását. Így jutunk el az 5a. ábrán látható eredményhez, amely a hét gőz tíz koncentráció esetében mért színinger-pontjait tartalmazza. Jól látható, hogy minden anyag egyedi görbével rendelkezik, ami szemléletesen mutatja a lepkeszárny alapú gőzérzékelő szenzorunk kémiai szelektivitását, mivel az optikai válaszjelük egyértelműen megkülönböztethető egymástól. Továbbá az is leolvasható, hogy az egyes színinger-pontok koncentráció szerinti növekvő sorrendben (jobbról balra) követik egymást, tehát a szárnyak színbeli megváltozása arányos a gőzkoncentrációval. A fenti két tulajdonság minden jól működő kémiai érzékelő elengedhetetlen feltétele, mivel csak így juthatunk az anyagi minőséggel és az anyagmennyiséggel kapcsolatos pontos információhoz.

Pontosan látó lepkék

A lepkék biológiájával szoros kapcsolatban álló színinger-tér felhasználásával kiértékelte adatokat egy tisztán matematikai módszer, a főkomponens-analízis segítségével ellenőriztük. Az eljárás lehetővé teszi a gőzérzékelési adatsorban rejlő összefüggések meg-

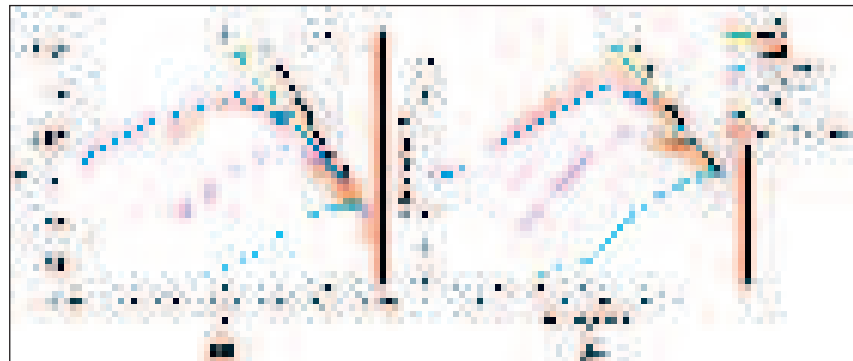
találását, azaz alkalmazásával elvégezhető a mért színbeli változások szétválogatása gőzfajta és koncentráció szerint. A főkomponens-analízis segítségével kapott eredmények a színíngertérhez hasonló diagramban ábrázolhatóak, amely az **5b. ábrán** látható. Összehasonlítva ezt a színíngertérben nyert eredményekkel, azt tapasztaltuk, hogy a két módszer szinte tökéletesen egyező eredményre vezet [17]. Más szavakkal: az összehasonlítás eredménye azt igazolja, hogy a számukra a szexuális jelzőszínek miatt fontos tartományban (kék színek) a lepkék matematikai tökéletességgel látnak. Ez azért érdekes megállapítás, mert két teljesen eltérő elven alapuló adatfeldolgozás, a lepkék vizuális pigmentjeire alapuló 3D színíngertér – ami több millió éves biológiai evolúció eredménye – és a tisztán matematikai algoritmusokon alapuló főkomponens-elemzés alapján gyakorlatilag ugyanaz az eredmény született.

Összefoglalás

A Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet Nanoszerkezetek osztályán több mint tíz éve foglalkozunk biológiai eredetű fotonikus

A lepkék látásán alapuló színíngertér segítségével azt is bizonyítottuk, hogy a lepkék kék színe és színérzékelése összehangolt, azaz a lepkék kiválóan látják a kék árnyalatai közötti kis különbségeket és emiatt képesek egymás szín szerinti azonosítására.

A kék boglárkalepkék szárnyai továbbá felhasználhatóak optikai elvű gőzérzékelő szenzor építésére, mivel a bennük található fotonikus nanoarchitektúra megváltoztatja a színét, ha kicseréljük az azt körülvevő levegő atmoszférát levegő és valamely más anyag gőzének keverékére. A kísérleteinkhez Ikarusz boglárka (*Polyommatus icarus*) hímek szárnyait és hét oldószert gőzét használtuk fel. A mért spektrális adatokat az említett faj színlátásán alapuló háromdimenziós színíngertér segítségével elemeztük, ami az adatfeldolgozási probléma biológiai megközelítésű megoldása. Az így kapott eredményeinket egy tisztán matematikai módszer, a főkomponens-analízis segítségével ellenőriztük. A két módszer szinte teljesen megegyező eredményei egyértelműen mutatják, hogy a lepkék látásán alapuló háromdimenziós színíngertér tökéletesen alkalmas a gőzérzékelés során létrejövő adatok elemzésére, mivel a lepkék szeme olyan apró, a kék szín árnyalatbeli



5. ábra. (a) A lepkék színérzékelése felhasználható a gőzérzékelési kísérlet során létrejövő adatok analizésére is. A 7 gőz 10 koncentrációnál mért visszaverési spektrumait színíngert pontokká alakítottuk és közös grafikonon ábrázoltuk. Látható, hogy minden egyes gőz jelét egyedi görbe írja le, amelyeken belül az egyes koncentrációkhoz tartozó értékek sorban követik egymást a tiszta mesterséges levegőtől egészen a telített gőzökig (jobbról balra). **(b)** A színíngert-teres eredmények ellenőrzésére a főkomponens-analízis módszert használtuk fel. Látható, hogy a két teljesen eltérő módszer szinte alapjaiban egyező eredményre vezet

nanoarchitektúrák vizsgálatával. Ez idő alatt számos növény- és állatfaj esetében tártuk fel a bennük található nanoszerkezetek működési mechanizmusát és funkcióját. Jelen munkánk során a kék boglárkalepkék szerkezeti színével és színlátásával kapcsolatos kutatási eredményeinket alkalmaztuk a gyakorlatban, a lepkészárnny alapú optikai gőzérzékelés vonatkozásában.

Megvizsgáltuk kilenc boglárkalepke-faj optikai és szerkezeti jellemzőit, és megmutattuk, hogy a hímek kék színe és az azt előállító fotonikus nanoarchitektúra fajszerkezetük.

különbségeinek érzékelésére fejlődött ki az evolúció évmilliói alatt, amilyenek a gőzérzékelés során is előfordulnak. Sőt, a lepkék színlátása olyan mértékben összehangolt a szerkezeti színükkel, hogy ez a detektor – emitter rendszer még a kifinomult matematikai algoritmus optimális eredményét is visszaadja, azaz a lepkék matematikai pontossággal látnak!

PISZTER GÁBOR – KERTÉSZ KRISZTIÁN – BÁLINT ZSOLT – BÍRÓ LÁSZLÓ PÉTER

Irodalom

- [1] Sison-Mangus, Marilou et al.: The lycaenid butterfly *Polyommatus icarus* uses a duplicated blue opsin to see green. *Journal of Experimental Biology* 211, 361-369 (2008)
- [2] Marshall, Justin – Oberwinkler, Johannes: Ultraviolet vision: The colourful world of the mantis shrimp, *Nature* 401, 873-874 (1999)
- [3] Bálint Zsolt: A madarak szerkezeti színei, *Természet Világa* 2004. nov., 517. o.
- [4] Bálint Zsolt – Bíró László Péter: A lepkészárnny kémiai és fizikai színei, *Természet Világa* 2009. nov., 486. o.
- [5] Rendszertani helye: Rend: Lepkék (Lepidoptera), Osztály: Pillangóalakúak (Papilioniformes), Családsorozat: Pillangó-formájúak (Papilionoidea), Család: Lángszínérfélék (Lycaenidae), alcsalád: Boglárkaformák (Polyommatinae), tribusz: Boglárka-rokonúak (Polyommatinii)
- [6] Bálint Zsolt et. al: The well-tuned blues: the role of structural colours as optical signals in the species recognition of a local butterfly fauna, *JRS Interface* 9, 1745-1756 (2012)
- [7] Rajkovits Zsuzsanna – Illy Judit: Az élő természet színei, *Fizikai Szemle* 51/3, 76-79 (2001)
- [8] Rajkovits Zsuzsanna: Szerkezeti színek az élővilágban, *Fizikai Szemle* 57/4, 121-126 (2007)
- [9] Bíró László Péter – Vigneron, Jean-Pol: Photonic nanoarchitectures in butterflies and beetles: valuable sources for bioinspiration, *Laser & Photonics Reviews* 5, 27-51 (2011)
- [10] Videó: <http://youtu.be/jMcConPGr2o>
- [11] Bíró László Péter et al.: Photonic nanoarchitectures occurring in butterfly scales as selective gas/vapor sensors, *Proc. SPIE* 7057, (2008)
- [12] Kertész Krisztián et al.: Selective optical gas sensors using butterfly wing scales nanostructures, *Key Engineering Materials* 543, 97-100 (2013)
- [13] Piszter Gábor et al.: Color based discrimination of chitin-air nanocomposites in butterfly scales and their role in conspecific recognition, *Analytical Methods* 3, 78-81 (2011)
- [14] Bálint Zsolt et al.: Spectroboard: an instrument for measuring spectral characteristics of butterfly wings – a new tool for taxonomists, *Genus* 21, 163-168 (2010)
- [15] Dr. Ábrahám György: *Optika*, Panem Könyvkiadó (1998)
- [16] További információ: <http://rsif.royalsocietypublishing.org/content/9/73/1745.figures-only>
- [17] Piszter Gábor et al.: Substance specific chemical sensing with pristine and modified photonic nanoarchitectures occurring in blue butterfly wing scales, *Optics Express* 22, 22649-22660 (2014)

Köszönetnyilvánítás

A bemutatott munka az OTKA K 111741 támogatásával jött létre.