Ismerd meg!

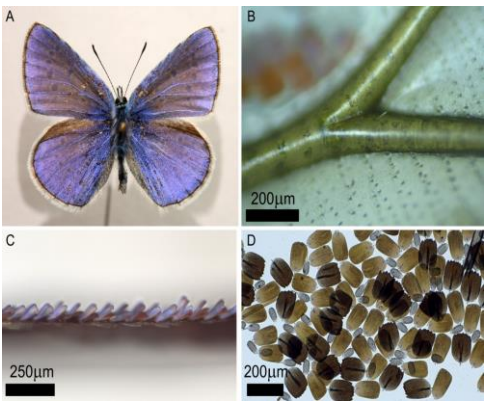
Boglárkalepkék szerkezeti eredetű színei

Az élővilág keletkezése és fennmaradása szempontjából az egyik meghatározó tényező a napfény, illetve annak spektrális összetétele, ami a különböző hullámhosszak erősségének eloszlását jelenti. Mind a természetes, mind a mesterséges fény fehérsége az összetettségében rejlik: ha egyidejűleg megfelelő arányban tartalmaznak különböző hullámhosszú összetevőket, azt az emberi agy fehérként értelmezi. Az ettől eltérő összetételű fényt viszont színként érzékeljük. Környezetünk színei általában az anyag atomi és molekuláris szerkezetével függenek össze: pigment alapú színek esetében a festékanyagban elnyelődnek bizonyos hullámhossz-tartományok, így a szemünkbe érkező többi, a felszínről visszaverődött fény okozza a színérzetet. Szerkezeti (fizikai) szín esetében két vagy több megfelelő törésmutatójú anyag egy-, két-, vagy háromdimenziós periodikus rendeződése szükséges, úgy, hogy a rendeződés periodicitása az adott fény vagy elektromágneses hullám hullámhossztartományába eső méretskálán legyen. Az ilyen módon rendezett anyagot fotonikus kristálynak nevezzük. Bár a továbbiakban a látható fényről lesz szó, fontos, hogy a rendezett szerkezetek és az elektromágneses hullámok kölcsönhatása a rádiófrekvenciás tartománytól egészen a röntgensugarakig fennáll, az emberi szem ennek csak egy keskeny (~400–700 nanométer közötti, épp a földre érkező napsugárzás maximuma) szakaszát érzékeli. A szerkezetről visszaverődött elektromágneses hullámok sokaságának összetevői megváltoznak a szerkezet méretei és a felépítő anyagok törésmutatóinak változásával. Így, egy fotonikus kristály esetében, ha a törésmutatókat vagy a nanoszerkezet jellemző méreteit megváltoztatjuk, másféle színt érzékelünk. A szerkezeti színnel rendelkező felületek egyik jellemzője, hogy irideszcens (színjátszó) tulajdonságúak, vagyis az érzékelt szín megváltozik a felület megvilágítási vagy a betekintési szögének változása szerint. Jól ismert példa erre a szappanbuborék jellegzetes visszaverése.

A természetben legtöbb esetben a szín szerkezeti eredete kiegészül festékanyagok szelektív elnyelésével, és ezek együttes hatására kialakuló színekkel találkozhatunk az ásványok, a növények és az állatok körében is. Látványossága miatt legismertebb példa a pávák élénk kék és zöld tollazata, de a sor hosszan folytatható. Idetartozik a nemesopál, egyes virágok szirmai, levelei vagy bogyós termései, a kagylóhéj, az egyes tengeri állatok kültakarója, a bogarak kitinpáncélja, a madarak csőre, bőre és tollai, valamint a lepkék szárnyai. Különösen a fémesen

csillogó zöld vagy kék szín utalhat szerkezeti eredetű összetevőre. Minden esetben érvényes, hogy a színt kialakító szerkezet mérettartománya a látható fény hullámhosszának nagyságrendjébe esik, tehát néhány 100 nm az ismétlődő egységek mérete. Általában az anyag egy nanokompozit, vagyis egy hordozó anyag nanométeres skálán egy másik anyagot tartalmaz, meghatározott rend szerinti eloszlásban. A következőkben kék lepkeszárnyakhoz kapcsolódó néhány kutatási eredményt mutatunk be, valamint egy alkalmazási lehetőséget is megemlítünk. A lepkék (tudományos nevükön Lepidoptera, vagyis pikkelyes szárnyúak) színét a szárnyakat borító pikkelyek adják.

Ezek nagyrészt kitinből épülnek fel, a szárny membránjához mindkét oldalán egy, két vagy három rétegben, vékony és mozgékony nyéllel kapcsolódnak. A csőszerű, elágazó ereknek köszönhetően a szárny membránja síkban kifeszített (1.B. ábra). Egyetlen pikkely szélessége 50–75, hosszúsága 150–200 mikrométer, viszont vastagsága alig haladja meg az egy mikront. A lepkék színét a főként a felső rétegben levő pikkelyek színe határozza meg, amely a bennük levő festékanyagok (pigmentek) és fotonikus nanoszerkezetek együtthatásából származik. A pikkelyek egyedi színe és a különböző típusú pikkelyek csoportosulásával kialakuló mintázat rendkívül változatos lehet, és a szárny két oldalán jelentősen eltérhet egymástól. Ez a változatosság biztosítja, hogy a színezet többféle funkciót betölthet a lepke életében, mint például a rejtőzködés, a figyelem elterelése, a figyelemfelhívás, a szexuális kommunikáció.



1. ábra.

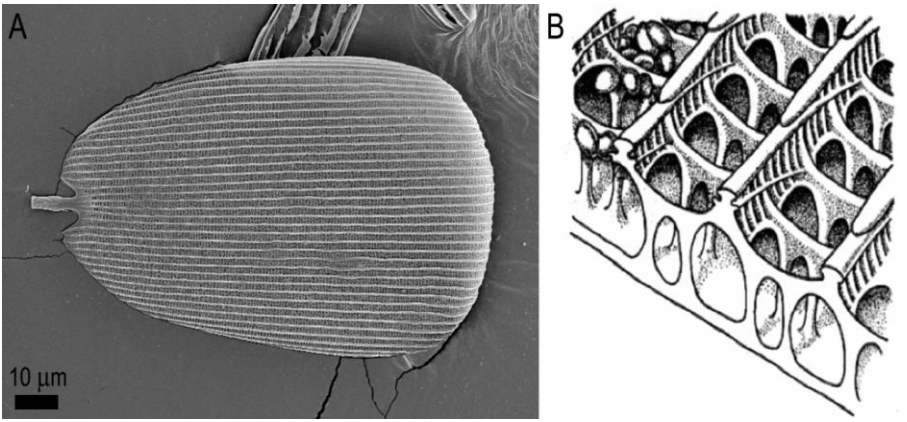
(A) Ikarusz boglárka (Polyommatus icarus) hím egyedének egész alakos képe, ahogyan a múzeumi gyűjteményben tárolják.

(B) A szárnymembrán pikkelyek nélkül. Egy elágazó ér látszik, amely a szárny merevségéért felel, illetve a fekete pontok a sorokba rendezett pikkelyek illeszkedési helyei.

(C) A szárny membránjának keresztmetszeti képe a pikkelyek dőlésszögének bemutatására.

(D) Az Ikarusz boglárka pikkelyei mikroszkóp tárgylemezre szórva, átvilágított fényben. Kerek végződéssel a fedőpikkelyek, cakkozott végűek a több festékanyagot tartalmazó alappikkelyek, míg a kis méretűek az illatpikkelyek.

A szárnyak színe jelezheti a közös fajhoz tartozást, ami egyben elkülöníti egymástól a fajokat, valamint szabályozhatja a hőháztartást. A szárnyak színe szabad szemmel meghatározható, valamilyen árnyalatot hozzájuk tudunk rendelni. Ez az emberi szem esetében a vörös, zöld és kék érzékelők (csapok) segítségével jön létre, a nagyjából 400–700 nm hullámhosszok közötti fény feldolgozásával. Ez az érzékelési intervallum akár jóval szélesebb lehet bizonyos állatoknál, és az érzékelők többfélék lehetnek, így az árnyalatok pontosabb megkülönböztetését teszik lehetővé. A lepkék esetében gyakori, hogy a szemükben található színérzékelő sejtek valóban szélesebb spektrumot fednek le az elektromágneses spektrumból: a kéknél rövidebb hullámhosszú, ultraibolya (UV) sugarak egy részét is érzékelik.



2. ábra

(A) Egyetlen Ikarusz boglárka fedőpikkely pásztázó elektronmikroszkópos felvétele. A hosszanti párhuzamos vonalakat nevezzük gerinceknek.

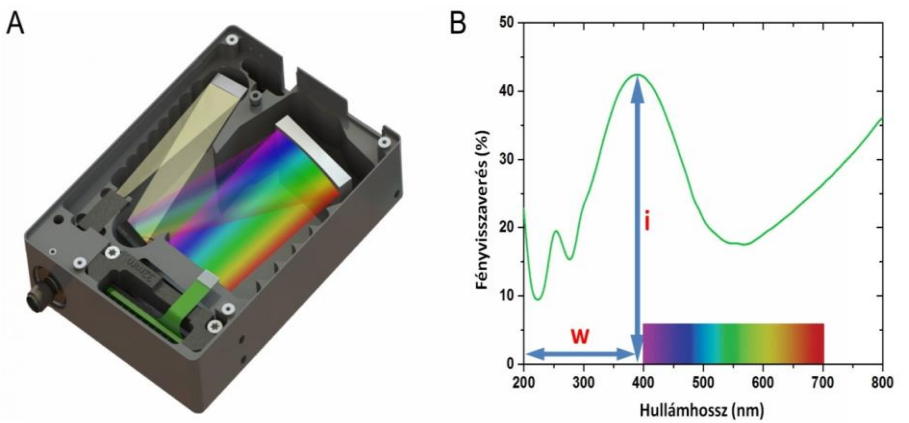
(B) A gerincekre merőleges metszet vázlata. Ez egy elvi felépítés, a valóságban az egyes lepkefajok különböző pikkelyei abban különböznek, hogy az egyes építőelemek változatosan módosulnak, rétegszámban és vastagságban is eltérhetnek.

Vizsgálati módszerek

A hagyományos optikai mikroszkóp segítségével a pikkelyek alakja és mérete vizsgálható (1.D. ábra), de felbontóképessége nem teszi lehetővé az alkalmazott fény hullámhosszánál kisebb részek, így a pikkelyek belső részeinek elkülönítését. Mivel az érzékelt szín jellegzetességeit részben fotonikus szerkezetek okozzák, ezek feltárása elengedhetetlen a jelenségek pontos megértéséhez. A pásztázó

elektronmikroszkóp esetében a számos, anyagi minőség vagy kristályszerkezet feltárására vonatkozó alkalmazási lehetőség közül a legegyszerűbbet, a minták felületi domborzatának leképezését használjuk. A szárny egy darabja, vagy akár egyetlen pikkely leképezésével is plasztikus képet kapunk a felszínéről. Viszont a minta térfogatában a legtöbb esetben nem tömör és homogén, ezért szükség van a mélységében elrejtett szerkezeti elemek ismeretére is. Transzmissziós elektronmikroszkóppal a pikkelyek hosszanti tengelyére merőleges síkban készült vékony metszetek átvilágíthatók, és a képen (4.C. ábra) látható sötétedés az anyag tömörségével lesz arányos, ezáltal a belső struktúrájuk részletesen feltérképezhető.

Színre vonatkozó információ optikai spektrométer segítségével nyerhető, amivel meghatározhatjuk a felületről visszaverődött fény hullámhossz szerinti intenzitás-eloszlását. A készülékbe vezetett fényt optikai rács bontja fel komponenseire, az intenzitás meghatározását pedig az összetevőire bontott fény útjába helyezett detektor végzi (3.A. ábra).



3. ábra

(A) Optikai spektrométer elvi felépítése. A fény tükrökön és optikai rácson keresztül jut a detektorra, ahol elektromos jelek keletkeznek.

(B) Ikarusz boglárka kék szárnyán mért fényvisszaverés. A jellemző csúcs helyzete és intenzitása jelölve. Alul szivárványos sáv mutatja azt a tartományt, ahol az emberi szem érzékeny, a kék tartományra eső maximum egy része ezen túl van.

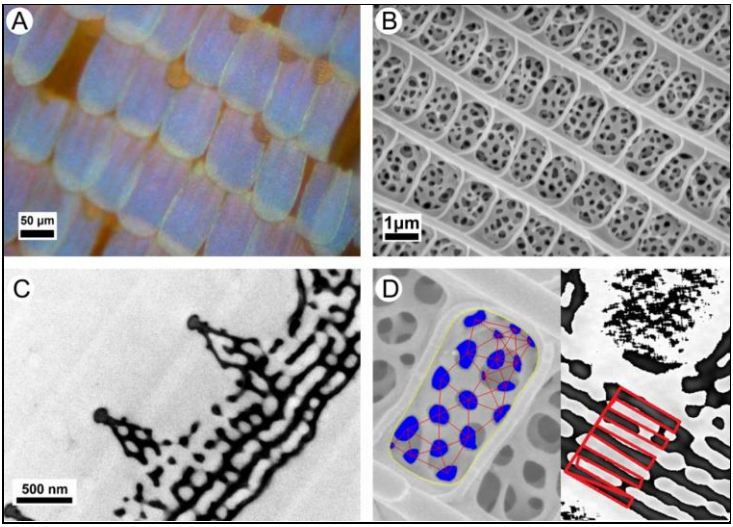
Általában az így megmért spektrális tartomány meghaladja az emberi szem érzékenységi tartományát. Hogy a lehető legtöbb információt szerezhessük meg

a vizsgált fotonikus szerkezetről, legegyszerűbb esetben a felületre merőlegesen beeső fény ugyanazon irányú visszaverődését mérjük. Lepkék szárnyára ez jó közelítés is lehetne, mivel a szárny felülete síknak tekinthető. Viszont, ha az 1.C. mikrofotón látható elrendeződést figyelembe vesszük, a merőlegesen beeső fény a pikkelyek szárnymembránhoz viszonyított szöge és a pikkelyekben található fotonikus szerkezet saját szögfüggő (irideszcens) viselkedése miatt egészen eltérő irányba szóródhat. Ezért a merőleges visszaveréstől eltérő mérési módra is szükség lehet, például integrálógömbös technikára, vagy szögszerinti detektálásra. Ha egyetlen lemért spektrumot elemzünk, jellemzően egy, vagy néhány maximum és minimumpontot találunk rajta (pl. 3.B. ábra).

A szerkezeti szín és alkalmazása

A létező közel 18000 lepkefaj tarka szárnyai szinte végtelen lehetőséget adnak a színekkel kapcsolatos vizsgálódásra; szerepeljen itt néhány eredmény a Boglárka-rokonúakra (Polyommatini) vonatkozóan. A szárnyfelszínek színét a fedőpikkelyekben lévő nanoszerkezet határozza meg, amely három-öt párhuzamos, lyukacsos kitinrétegből áll, levegőrétegekkel elválasztva. Ezt a borsszóróhoz hasonló felépítést „pepper-pot" típusú szerkezetnek nevezzük (4.B. ábra). Az elektronmikroszkópos felvételek alapján meg lehet határozni a szerkezeti elemek jellemző méreteit, illetve sok mérés után ezek szórását is. A rendezettség mértéke változatos, és szoros összefüggésben van a kialakult visszaverési spektrummal. A másik meghatározó jellemző a melanin nevű, barna színű festékanyag mennyisége. Ennek a spektruma összetevődik a pikkelyekben levő fotonikus kristály szerkezeti színével. Az Ikarusz boglárka (*Polyommatus icarus*) spektrumán (3.B. ábra) látható, hogy a kék tartományba eső csúcs a nanoszerkezetből származik, és a szárny felületét borító, egymáshoz nagyon hasonló fedőpikkelyek összessége adja, míg a sárgás-vöröses tartományú növekvő visszaverés a melaninnak ebben a hullámhossztartományban csökkenő elnyelésének a hatása.

A lepkék esetében egyetlen pikkelyt, ami egy élettelen kitin váz (2.A. ábra), egyetlen sejt választ ki magából az állat bábállapotában, így azok a sejtek magukban hordozzák a szín kialakulásához szükséges információt. Ez nagy pontossággal öröklődik nemzedékről nemzedékre, így megőrizve a fajra jellemző specifikus kék színt. A múzeumi gyűjtemény példányait elemezve azt találtuk, hogy ugyanarról az élőhelyről befogott lepkék esetében a kék szerkezeti szín jól megőrződött több mint 100 évre visszamenőleg (5.A. ábra). Mivel a Kaszpi-tengertől a Kárpát-medencéig évente két (megfelelő időjárás esetén három) generáció is lehet, ez összesen akár 300 generációt jelenthet, tehát a faj hosszú távon megőrzi a szerkezeti színét.



4. ábra

*(A) Ikarusz boglárka (*Polyommatus icarus*) szárnyának optikai mikroszkópos képe visszavert fényben. A fedőpikkely réteget látjuk, amely a szárny kék színét határozza meg. Az alaprétegből is látható néhány pikkely (sötét pikkelyek), amelyeknek nincs szerkezeti színük, csak melanin festékanyagot tartalmaznak.*

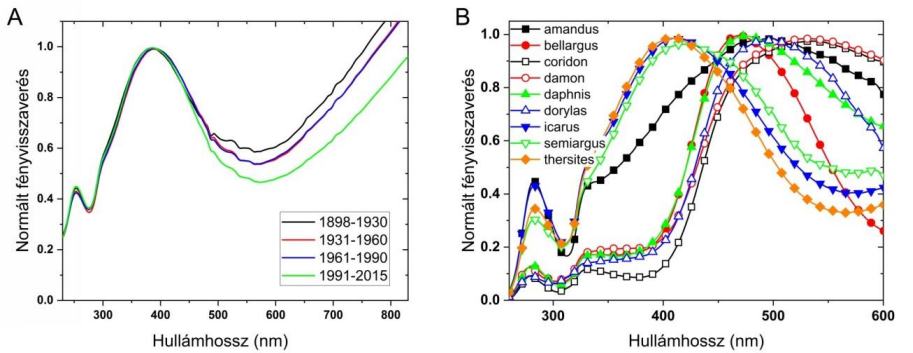
(B) Egyetlen kék pikkely pásztázó elektronmikroszkópos felvétele.

(C) Ugyanaz keresztmetszetben, transzmissziós elektronmikroszkóppal.

(D) Az elektronmikroszkópos képeken elvégezhető mérések vázlata. Nagyszámú mérés elvégzése után statisztikai elemzés végezhető.

Az Ikarusz boglárkát és nyolc közeli rokonát vizsgálva megállapítottuk, hogy az első látásra hasonló kéknek nevezhető szárnyak között karakterisztikus spektrális eltérések vannak. Ha a spektrumok jellemzőit számszerűsítjük, és ezt az adatsort mesterséges neurális hálózattal feldolgozzuk, a betanulási folyamat után a neurális hálózat 96%-os pontossággal képes felismerni egyes példányokat a spektrumuk alapján. Tehát az optikai spektrum bizonyíthatóan alkalmas a rokon fajok egyértelmű azonosítására. Mivel a visszavert szín különbségeinek forrása a nanoszerkezet eltérése, a pikkelyek elektronmikroszkópos képein méréseket végeztünk karakterisztikus jellemzők után kutatva. A fotonikus szerkezetre vonatkozó méretek legfontosabbja a kitin és levegő részek méreteinek eltérése (4.D. ábra). Így a pásztázó elektronmikroszkópos képeken a lyukak méretére és távolságára

vonatkozó adatok, míg a transzmissziós képeken az egyes rétegek vastagsága, illetve a közöttük levő távolság fontosak. A leolvasott és csoportosított mérőszámok segítségével szintén sikerült a neurális hálózatot tanítani, ami a mikroszkópos képeket (és ezeken keresztül a fajt) 91%-os pontossággal azonosította. Így sikerült kimutatnunk, hogy a szerkezeti színt hordozó lepkék változatos árnyalataihoz a pikkelyeket felépítő kitin struktúra nanométeres tartományú variációi társíthatók.



5. ábra

(A) Ikarusz boglárka összehasonlító spektrumai a múzeumi példányok alapján. Egy görbe 25 minta átlagát mutatja a megadott évek között.

(B) A kilenc rokon lepkefaj kék szárnyainak visszaverési spektrum-átlaga (fajonként 10 példányra).

Szintén változás keletkezik, ha a szerkezetben az üregek kitöltöttségét megváltoztatjuk. Ha az eredetileg levegővel töltött térfogatot valamilyen más optikai tulajdonságú anyagra cseréljük, a visszaverési spektrum azonnali változását tapasztaljuk. A törésmutató nagy változásának (levegőt folyadékra cserélünk) hatását szabad szemmel is jól érzékelhetjük, míg a kis változás (levegőt gőzkeverékre cserélünk) a spektrum csak kismértékű eltolódását okozza, ami spektrométerrel vizsgálható. Így akár a levegőhöz kevert szerves oldószerek gőzeinek koncentrációja is kimérhető. A vizsgált lepkefajok esetében az egységnyi törésmutatójú levegőhöz kevert gőz megemeli kissé a törésmutatót, és a spektrum néhány nanométerrel eltolódik a vörös felé. Hozzájárul a jelenséghez még a gőzök lecsapódása, amely során a szerkezet mikron alatti üregeiben folyadékréteg keletkezik, ami növeli a törésmutató megváltozását. A spektrum eltolódásának mértéke arányos a gőz koncentrációjával. Mivel a jelenség megismételhető, és a válaszjel reprodukálható, ezért a lepkeszárnyakat szerves gőzök detektálására is fel lehet

felhasználni. A visszaverési spektrumban létrejövő változás másodperces időskálán történik, ez a lehetséges alkalmazások szempontjából nagyon előnyös. A különféle oldószerek eltérő kémiai összetételük miatt eltérően lépnek kölcsönhatásba a kitin nanoszerkezettel, így a lecsapódás mértéke eltérő lesz, tehát a mérhető spektrális változás összefügg az érzékelendő gőz anyagi minőségével. Ez a hatás felhasználható többkomponensű keverékek esetében, így olyan szelektív optikai érzékelők készíthetők, amelyek költséges és nehezen hozzáférhető, valamint környezetszennyező mintakészítési eljárások megkerülésével lehetnek képesek a légtér összetételének analízisére. A jövő szempontjából ebben, és más alkalmazásokban is fontos a környezetbarát, lebomló anyagok használata, amelyek akár biológiai eredetű mintákon alapulhatnak.

Ajánlott irodalom

1. Rajkovits Zs., Illy J.: Az élő természet színei. Fizikai Szemle 51/3, 76, (2001)
2. Bálint Zs., Vértesy Z., Kertész K., Biró L.P: A lepkék színeváltozása. *Természet Világa* 135/7, 311, (2004)
3. Márk G.I., Bálint Zs., Kertész K., Vértesy Z., Biró L.P.: A biológiai eredetű fotonikus kristályok csodái. *Fizikai Szemle* 57/4, 116, (2007)
4. Rajkovits Zs.: Szerkezeti színek az élővilágban. *Fizikai Szemle* 57/4, 121, (2007)
5. Kertész K., Piszter G., Vértesy Z., Biró L.P., Bálint Zs.: Színek harmóniája: a boglárkalepkék szerkezeti kék színének fajfelismerési szerepe. I. rész, *Fizikai Szemle* 63/7-8, 231, (2013), II. rész, *Fizikai Szemle* 63/9, 293, (2013)
6. Kertész K., Piszter G.: Színes lepkeszárnyak: Nanoszerkezettől az alkalmazásig. *Élet és Tudomány* 68/16, 499, (2013)
7. Piszter G., Kertész K., Vértesy Z., Biró L.P., Bálint Zs., Jakab E.: Lepkeszárnyak fotonikus nanoarchitektúráinak gáz- és gőzérzékelési tulajdonságai. *Fizikai Szemle* 64/4, 120, (2014)
8. Piszter G., Kertész K., Bálint Zs., Biró L.P.: Matematikai pontossággal látnak a lepkék. *Természet Világa* 146/3, 112, (2015)
9. Piszter G., Kertész K., Horváth Zs.E., Biró L.P., Bálint Zs.: Ikarusz boglárka lepkék szerkezeti és pigment eredetű színeinek stresszállósága. *Fizikai Szemle* 68/7-8, 225, (2018)

Kertész Krisztián, Piszter Gábor, Bálint Zsolt, Biró László Péter
Energiatudományi Kutatóközpont,
Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet
www.mfa.kfki.hu, www. nanotechnology.hu