

# Anyagtudósok kalandozása a biológiában: A lepkék szárnyainak szerkezeti színei

## Roaming of Materials Scientists in Biology: Structural Colours of Butterfly Wings

Biró László Péter,<sup>1</sup> Kertész Krisztián,<sup>1</sup> Piszter Gábor,<sup>1</sup> Horváth Zsolt Endre,<sup>1</sup> Bálint Zsolt<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet, Energiatudományi Kutatóközpont, Magyar Tudományos Akadémia, Budapest, Magyarország, [biro.laszlo@energia.mta.hu](mailto:biro.laszlo@energia.mta.hu)

<sup>2</sup>Magyar Természettudományi Múzeum, Budapest, Magyarország, [balint.zsolt@nhmus.hu](mailto:balint.zsolt@nhmus.hu)

### Abstract

The photonic nanoarchitectures occurring in the wing scales of lycaenid butterflies were investigated by scanning electron microscopy (SEM), transmission electron microscopy (TEM) and UV-VIS spectroscopy. We found that the males of all the nine investigated species possess photonic nanoarchitectures built according to the same general “plan”, but each species exhibits species-specific features which results in species-specific colours reproduced generation by generation with a high degree of accuracy.

**Keywords:** butterfly wing scales, photonic nanoarchitecture, electron microscopy, UV-VIS spectroscopy.

### Összefoglalás

Pásztázó elektronmikroszkóppal (SEM), transzmissziós elektronmikroszkóppal (TEM) és UV-VIS spektroszkópiával vizsgáltuk a boglárkalepkék szárnypikkelyeiben előforduló fotonikus nanoarchitektúrákat. Megállapítottuk, hogy mind a kilenc megvizsgált faj hímjeinek azonos szerkezeti rendszer szerint felépülő fotonikus nanoarchitektúrájuk a szárnypikkelyeik, de minden egyes faj elégséges mértékű faji sajátosságokat mutat a fajspecifikus színek létrejöttéhez. Ezek a színek nagy pontossággal reprodukálódnak generációról generációra.

**Kulcsszavak:** lepkék szárnypikkelyei, fotonikus nanoarchitektúra, elektronmikroszkópia, UV-VIS spektroszkópia.

## 1. Bevezető a fotonikus nanoarchitektúrákról

### 1.1. A fizika felől nézve

A fizika mintegy harminc évvel ezelőtt fedezte fel, hogy a fényhullámok esetében is előidézhető a félvezetők esetében jól ismert tiltott sáv megjelenése [1, 2]. Ehhez az szükséges, hogy olyan kompozitot állítsunk elő, amely két eléggé eltérő törésmutatójú, átlátszó közegből épül fel, és a törésmutató értékei periodikusan váltakoznak a térben olyan skálán, amely összemérhető a kompozitban terjedni nem képes fény hullámhosszá-

val. Ez utóbbi feltételből adódik, hogy a látható fény tartományában a fent említett kompozit tulajdonképpen egy nanokompozit, azaz a törésmutató váltakozása tipikusan 100 nm-es skálán történik. Ha szigorúan értelmezzük a fenti feltételeket, akkor az azoknak megfelelően létrejövő nanoarchitektúra egy fotonikus kristály lesz, amelyben az adott hullámhosszúságú fény semmilyen irányban sem tud terjedni, ezért visszaverődik a fotonikus kristály felszínéről. Ha lazítunk a tökéletes rendezettség feltételén, a fotonikus tiltott sáv megmarad és spektrális helyzetét is megőrzi, azonban szélessége csökken, és a teljes tiltott sáv részleges tiltott sávvá alakulhat át [3].

## 1.2. A biológia felől nézve

A biológiai evolúció mintegy ötvenmillió évvel ezelőtt fedezte fel a fotonikus nanoarchitektúrákban rejlő lehetőségeket [4]. Azóta is számos élőlény alkalmazza ezt a színeképzési mechanizmust változatos biológiai funkciók megvalósítására. A legközismertebb példák a lepkék és a különféle bogarak között adódnak [5]. A lepkék esetében a kék és zöld színek leggyakrabban szerkezeti eredetűek, azaz fotonikus nanoarchitektúrákra vezethetők vissza. A kék szín és ennek különféle árnyalatai különösen alkalmasak a figyelem felkeltésére például egy mező zöld háttére előtt [6]. Az ilyen jellegű élőhelyen élő boglárkalepkék hímjei a kék különböző árnyalataiban pompáznak, míg a nőstények szárnyfelszíne rendszerint festékanyag (melanin) által színezett barna. Ez azt eredményezi, hogy a nőstények szárnyai hatékonyabban nyelik el a napsugárzást [7], és ez elősegíti a felmelegedésüket, ami hasznos a peték érleléséhez.

## 1.3. Az anyagtudomány felől nézve

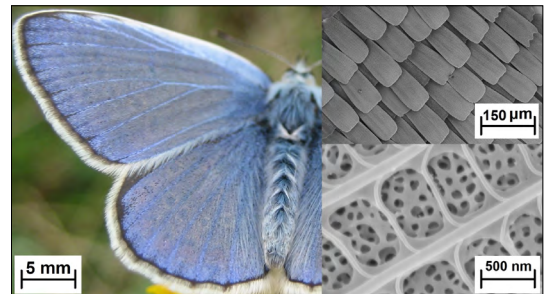
Ha az anyagtudomány felől tekintjük a szerkezeti (fizikai) színeket előállító nanoarchitektúrákat, akkor az első tényező, amit ki kell emelnünk, az a kompozitot felépítő két átlátszó anyag törésmutatójának elégséges különbsége. Minél nagyobb ez a különbség, annál könnyebben alakul ki fotonikus tiltott sáv, ha a két összetevő megfelelő periodicitással váltogatja egymást. A lepkék – a jelen írás fókuszában található rovarok – esetében a két összetevő a kitin, amelynek törésmutatója  $n_1 = 1,56$  és a levegő, amelynek törésmutatója  $n_2 = 1$ . A kitin egy biológiai polimer, egy polisaccharid, amelynek képlete és tulajdonságai közel állnak a cellulóz, a papír alapanyagát képező anyag tulajdonságaihoz.

Az eddigiekből következik, hogy a kitint és a levegőt 100 nm-es skálán kell „összekevernünk” egymással ahhoz, hogy a keletkező nanokompozit szerkezeti szint hozzon létre.

Természetesen ennek az összekeverésnek különféle módzatai lehetségesek: a) a 100 nm-es skálát jóval meghaladó méretben tökéletesen periodikus összekeverés, amit fotonikus egykristálynak nevezünk [8]; b) mikrométeres skálán tökéletesen periodikus szemcsékből felépülő úgynevezett fotonikus polikristály, amelynek a szemcséi véletlenszerűen el vannak forgatva egymáshoz viszonyítva [8]; c) csak közelrendezettséget mutató, úgynevezett fotonikus amorf, amelynek építőelemei között csak rövid távon fedezhető fel

valamilyen rend, például az első szomszédok átlagosan ugyanakkora távolságra vannak egymástól [9]. Ez utóbbi esetre mutat példát az 1. ábra.

Jól megfigyelhető az 1. ábrán, hogy a pikkelyek szabályos rendben helyezkednek el a lepkeszárnyon, azt az elrendezést idézve, ahogyan a cserépek borítják a háztetőt. Jellemző méreteik  $100 \times 50 \mu\text{m}^2$ , alakjuk pedig egy lapított zsákot idéz, amelynek vastagsága  $1 \mu\text{m}$ . Ez az a térfogat, amelyet kitölt a fotonikus nanoarchitektúra.



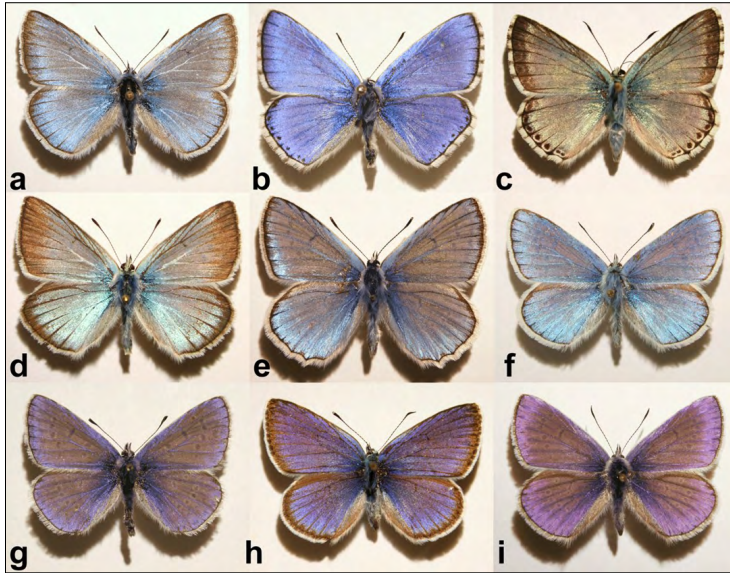
1. ábra. Hím Ikarusz boglárka (*Polyommatus icarus*) szárnyfelszínének fényképe balra, pikkelyeinek (jobbra fent) és a pikkelyekben található nanoarchitektúrának (jobbra lent) pásztázó elektronmikroszkópos felvétele

## 2. Szexuális jelzőszín

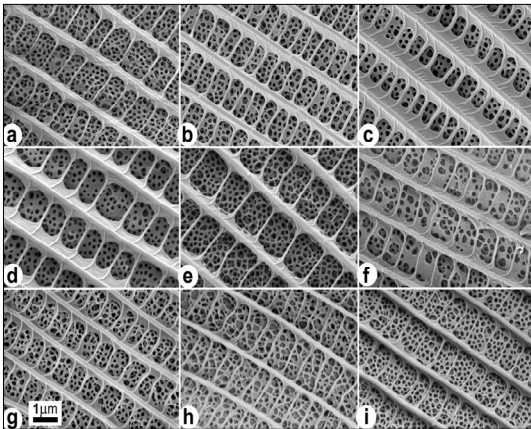
A boglárkalepke-félék körében igen gyakori az ivari kétalakúság, azaz a hímnek és a nősténynek teljesen más a megjelenési formája. A hímek szárnyfelszíne kékes árnyalatú, és ezt szerkezeti eredetű szín okozza (2. ábra [6]), míg a nőstények szárnyfelszíne pigment eredetű barna. Mindkét ivar szárny fonákján ugyanolyan, a fajra jellemző, de a fajok között sok hasonlóságot mutató bonyolult, ugyancsak pigment alapú pontmintázat található.

## 3. A színeket létrehozó nanoarchitektúrák

A fajra jellemző szexuális jelzőszíneket azonos elvek alapján felépülő, de mégis az egyes fajokra jellemző kialakítású nanoarchitektúrák hozták létre. Méretükből adódóan ezeknek a nanokompozitoknak a jellemzői csak elektronmikroszkópos módszerekkel tárhatók fel. Az egyes pikkelyek felszínéről pásztázó elektronmikroszkóppal (SEM) (3. ábra), míg a pikkelyek keresztmetszeti szerkezetéről transzmissziós elektronmikroszkóppal (TEM) nyerhetők adatok (4. ábra). Ez utóbbi módszer alkalmazásához az szükséges, hogy a speciális polimerbe ágyazott lepkeszárnyból 70 nm vastagságú szeleteket vágjunk gyémánt ultramikrotom késsel.



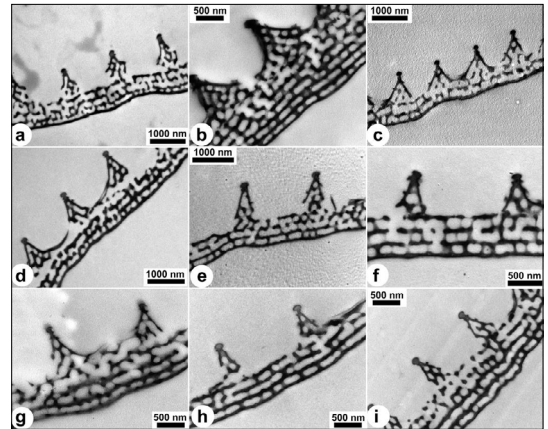
**2. ábra.** Kilenc, azonos élőhelyen előforduló közeli rokon boglárkafaj hímjeiről, azonos körülmények között, mesterséges fényben készült fényképek. a) *Polyommatus amandus*; b) *Polyommatus bellargus*; c) *Polyommatus coridon*; d) *Polyommatus damon*; e) *Polyommatus daphnis*; f) *Polyommatus dorylas*; g) *Polyommatus icarus*; h) *Polyommatus semiargus*; i) *Polyommatus thersites*



**3. ábra.** A 2. ábrán bemutatott kilenc lepkefaj hímjeinek jellemző pikkelyszerkezete SEM felvételeken. a) *Polyommatus amandus*; b) *Polyommatus bellargus*; c) *Polyommatus coridon*; d) *Polyommatus damon*; e) *Polyommatus daphnis*; f) *Polyommatus dorylas*; g) *Polyommatus icarus*; h) *Polyommatus semiargus*; i) *Polyommatus thersites*. Az alsó sor bal oldali képén megadott skála valamennyi felvételre érvényes

Jól látható a SEM-felvételeken (3. ábra), hogy valamennyi faj pikkelyei hasonló szerkezeti elemek szerint épülnek fel: a hosszanti gerinceket keresztbordák kötik össze, és az ezek alkotta háló alatt egy lyuggatott lemez helyezkedik el.

A TEM-felvételek (4. ábra) azt mutatják, hogy



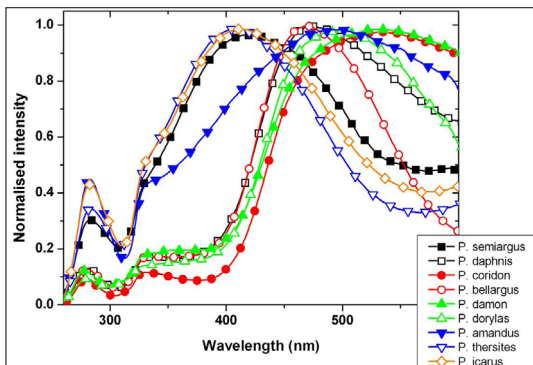
**4. ábra.** A 2. ábrán bemutatott kilenc lepkefaj hímjeinek jellemző pikkelyszerkezete TEM-ben. A nanostrukturáltakban a sötét részek a kitinnek felelnek meg, a világos részek a levegővel töltött üregeknek. a) *Polyommatus amandus*; b) *Polyommatus bellargus*; c) *Polyommatus coridon*; d) *Polyommatus damon*; e) *Polyommatus daphnis*; f) *Polyommatus dorylas*; g) *Polyommatus icarus*; h) *Polyommatus semiargus*; i) *Polyommatus thersites*

valamennyi szerkezet sötét (kitin) és világos (levegő) rétegek váltakozásával épül fel. Eltérések főleg a rétegek számában, illetve a rétegek rendezettségében mutatkoznak. A TEM-felvételek értelmezése során nem szabad eltekinteni attól, hogy a vizsgált minta csupán 70 nm vastagságú.

#### 4. A színek műszeres jellemzése

A lepkeszárnyak által visszavert fény színének jellemzésére száooptikás moduláris spektrométert alkalmaztunk. Az eredményeket az **5. ábrán** mutatjuk be.

Jól megfigyelhető az **5. ábrán**, hogy mindegyik spektrumnak jellegzetes, eltérő jegyei vannak. Ennek tulajdonítható, hogy egy, a mesterséges neurális háló elvén működő szoftver a betanító-lépések után 96%-os pontossággal azonosította a lepkék fajtát a szárnyfelszínük fényvisszaverése alapján [6].



**5. ábra.** A kilenc megvizsgált boglárkafaj hímjeinek szárnyfelszíni fényvisszaverése. A spektrális jellemzők jobb összehasonlíthatósága miatt valamennyi görbét egyre normáltuk

#### 5. Következtetések

A vizsgálataink megmutatták, hogy a boglárkalepkék kék és zöld színei szerkezeti eredetűek, olyan nanokompozitoktól erednek, amelyek két, eltérő törésmutatójú anyag: a kitin és levegő térben periodikus váltakozása útján fotonikus tiltott sávot hoznak létre. A fotonikus nanoarchitektúra a pikkelyek térfogatát tölti ki. A pikkelyek szabályos rendben borítják a szárnyak felszínét.

Az így létrehozott színek fajspecifikusak, és a szexuális kommunikációban játszanak fontos szerepet. Éppen ezért generációról generációra nagy pontossággal reprodukálódnak [10].

#### Köszönetnyilvánítás

A munka elvégzését a következő OTKA-támogatások tették lehetővé: 111741. és 115724.

#### Szakirodalmi hivatkozások

[1] Yablonoitch E.: *Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics*. Physical Re-

view Letters 58. (1987) 2059–2062.

<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.58.2059>

[2] John S.: *Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices*. Physical Review Letters 58. (1987) 2486–2489.

<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.58.2486>

[3] Edagawa K., Kanoko S., Notomi M.: *Photonic Amorphous Diamond Structure with a 3D Photonic Band Gap*. Physical Review Letters 100. (2008) 013901.

<http://doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.013901>

[4] McNamara M. E., Briggs D. E. G., Orr J. P., Wedmann S., Noh H., Cao H.: *Fossilized Biophotonic Nanostructures Reveal the Original Colors of 47-Million-Year-Old Moths*. PLoS Biology 9. (2011) e1001200.

<https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1001200>

[5] Bíró L. P., Vigneron J. P.: *Photonic nanoarchitectures in butterflies and beetles: valuable sources for bioinspiration*. Laser and Photonic Review 5. (2011) 27–51.

<https://doi.org/10.1002/lpor.200900018>

[6] Bálint Z., Kertész K., Piszter G., Vértesy Z., Bíró L. P.: *The well-tuned blues: the role of structural colours as optical signals in the species recognition of a local butterfly fauna (Lepidoptera: Lycaenidae: Polyommatae)*. Journal of the Royal Society. Interface 9. (2012) 1745–1756.

<https://doi.org/10.1098/rsif.2011.0854>

[7] Bíró L. P., Bálint Zs., Kertész K., Vértesy Z., Márk G. I., Horváth Z. E., Balázs J., Méhn D., Kiricsi I., Lousse V., Vigneron J.-P.: *Role of photonic-crystal-type structures in the thermal regulation of a Lycaenid butterfly sister species pair*. Physical Review E 67. (2003) 021907.

<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.67.021907>

[8] Kertész K., Bálint Z., Vértesy Z., Márk G. I., Lousse V., Vigneron J.-P., Rassart M., Bíró L. P.: *Gleaming and dull surface textures from photonic-crystal-type nanostructures in the butterfly Cyanophrys remus*. Physical Review E 74. (2006) 021922-1–021922-15.

<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.74.021922>

[9] Kertész K., Molnár G., Vértesy Z., Kóos A. A., Horváth Z. E., Márk G. I., Tapasztó L., Bálint Zs., Tamáska I., Deparis O., Vigneron J.-P., Bíró L. P.: *Photonic band gap materials in butterfly scales: A possible source of “blueprints”*. Materials Science and Engineering B 149 (2008) 259–265.

<https://doi.org/10.1016/j.mseb.2007.10.013>

[10] Kertész K., Piszter G., Bálint Z., Bíró L. P.: *Bio-geographical patterns in the structural blue of male Polyommatus icarus butterflies*. Scientific Reports 9. (2019) 2338.

<https://doi.org/10.1038/s41598-019-38827-w>