

A BIOLÓGIAI EREDETŰ FOTONIKUS KRISTÁLYOK CSODÁI

Márk Géza István,¹ Bálint Zsolt,² Kertész Krisztián,¹ Vértessy Zofia,¹ Biró László Péter¹

¹ MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet

² Magyar Természettudományi Múzeum

A lepkék szárnyain ámulatba ejtő színeket és mintázatokat láthatunk. Számos lepke annál ravaszabb trükköket is csinál a fényvel, minthogy egyszerűen „megszínezi”: a látható szín árnyalata és/vagy intenzitása – sőt, akár a visszavert fény polarizációja is – függhet a megvilágítás, illetve a megfigyelés irányától. Ezek a „fényjátékok” evolúciós előnyt biztosítanak a lepkéknek, ezért idestova 500 millió éve tökéletesíti őket a Természet. Három fő biológiai célra használják fel a pillangók szárnyszínüket: optikai jeladásra, rejtőzködésre és a hőmérsékletük szabályozására. A lepkeszárnyak színe kétféle eredetű lehet: egyrészt pigment által okozott szín, másrészt úgynevezett szerkezeti szín – ez utóbbi színeket a szárnyak mikroszerkezetén létrejövő fényinterferencia hozza létre.

Az MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet Nanotechnológia Főosztályán nagyfelbontású mikroszkópiai módszerekkel (pásztázó és transzmissziós elektronmikroszkópia), továbbá optikai spektroszkópiával tanulmányozzuk a szárnypikkelyek mikroszerkezetét és optikai tulajdonságait. A munkát az EU FP6 „BioPhot” programjának támogatásával végezzük, nemzetközi együttműködésben. Ebben a cikkben néhány szép példát mutatunk be a természet e gazdag tárházából. Megmutatjuk, hogy az optikai spektrum főbb jellegzetességei általában egyszerű, intuitív fenomenologikus modellek segítségével is megérthetőek. A természettől „elcseszett” trükkök lehetővé teszik hatékony és környezetbarát biomimetikus fotonikus eszközök és anyagok létrehozását, ilyenek lehetnek többek között színanyagok, kijelzők, antireflexiós rétegek.

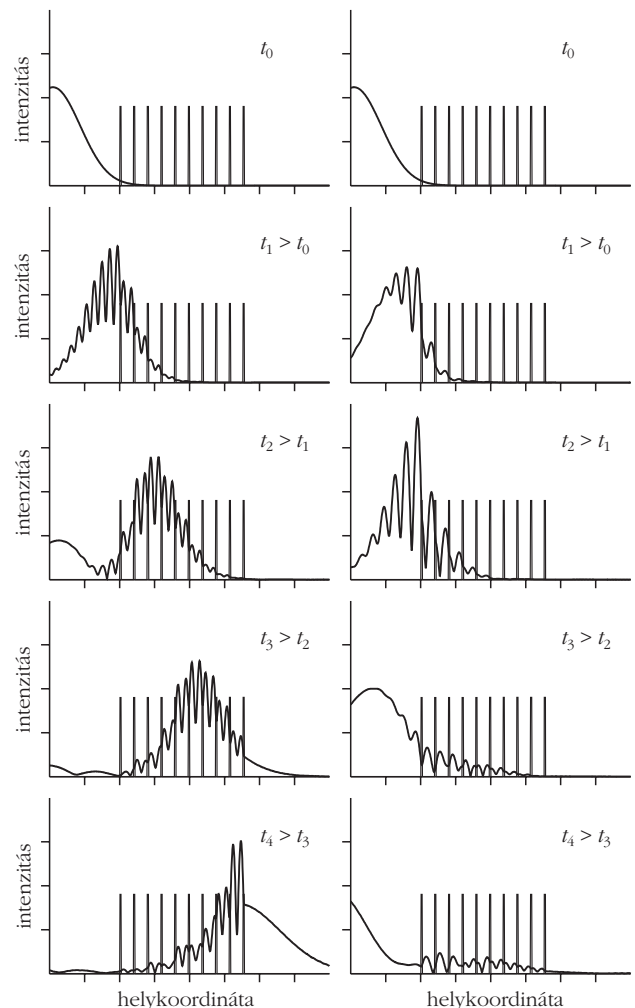
A fotonikus kristályok

Kristálynak az olyan fizikai rendszert nevezzük, amelynek jellemző tulajdonságai térben periodikusan változnak (azaz a tökéletes kristály térbeli eltolással önmagával fedésbe hozható). A *hullám* fogalom pedig valamilyen fizikai tulajdonság térben és időben periodikus változását jelenti. Ha valamely kristály-hullám kölcsönhatásnál a hullám hullámhossza a kristálybeli periódushossz nagyságrendjébe esik, akkor a kristály lényegesen befolyásolja a hullám szóródását: a szórás erőteljesen irány- és hullámhosszfüggő lesz. Bizonyos hullámhosszú sugárzás szabadon áthatol a kristályon, de lesznek olyan hullámhossztartományok is – ezeket a tartományokat nevezük *tiltott sávnak* – amelyekbe eső hullámok nem haladnak át a kristályon, hanem visszaverődnek. Ezt a jelenséget mutatjuk be az 1. ábrán, egydimenziós modell segítségével.

A fenti általános kijelentések függetlenek a méretskálától:

- Atomokból, molekulákból álló kristályok esetén a rácspériodicitás a 0,1–10 nm nagyságrendbe esik. Ha ilyen hullámhosszú röntgen- (vagy neutron-) hullámot bocsátunk a kristályra, fellép a röntgen- (neutron-) diffrakció jelensége: a kristály csak bizonyos, jól meghatározott irányokba szórja a hullámokat. Ezek a térbeli irányok a kristály, illetve a sugár tulajdonságaitól függenek – ezen alapul a röntgen-, illetve neutrodiffrakció jelensége. A röntgendiffrakciót már több mint 100 éve alkalmazzák az anyagszerkezet vizsgálatára. A kristályokat felépítő atomok elektronjai maguk is szóródnak a kristályrácsra, ez alakítja ki az adott anyag elektron

1. ábra. Hullámcsomag szóródása egydimenziós, 10 periódusból álló kristályon. A bal oldali ábrákon esetén a hullámcsomag energiája a megengedett sávba (a hullámcsomag áthalad a kristályon), a jobb oldali ábrákon esetén a tiltott sávba esik (a hullámcsomag visszaverődik). A vízszintes tengelyen az x pozíció, a függőleges tengelyen a hullám intenzitása látható, a t idő főnről lefelé nő.



sávszerkezetét. A vezetők és félvezetők sávszerkezetének célirányos kihasználása tette lehetővé az elmúlt 50 évben az elektronika és a számítástechnika látványos fejlődését.

- A hanghullámok hullámhossza 0,1–1 m körüli. Ilyen skálán periodikus szerkezeteket régóta alkalmaznak az építészetben hangszigetelésre és visszhangmentesítésre. A biológiai kutatások szerint a halrajok is gyakran „kristályos” formába szerveződnek és ez meghatározza az akusztikus hullámok szóródását a halrajon – ez minden bizonynyal növeli a halak túlélési esélyét.

- Ha a kristály periodicitása a 100 nm – 1 μm nagyságrendbe esik, ez a látható fény tartományában (továbbá a közeli ultraibolya- és infravörös-tartományban) okoz diffrakciós jelenségeket. A fénydiffrakciót okozó kristályok – az úgynevezett fotonikus kristályok – olyan fizikai rendszerek, amelyekben térben periodikusan változik a törésmutató. Húsz évvel ezelőtt *Eli Yablonovitch* [1] állított elő elsőként olyan szerkezetet, amelynek tiltott sávja volt az elektromágneses hullámok bizonyos hullámhossztartományában. 6 mm átmérőjű furatok háromdimenziós, periodikus rendszerét fúrta egy teflontömbbe, és mérésekkel igazolta az elméleti számításokat, miszerint ennek a rendszernek a 13–16 GHz frekvenciatartományban (mikrohullám) tiltott sávja van. A későbbiekben litográfias módszerek segítségével a látható fény tartományában működő fotonikus kristályokat is létre tudtak hozni. A mikroelektronikai iparban a csipek előállítására alkalmazott litográfias eljárások nagy pontossággal – már 10 nm pontossággal –, gyorsan és olcsón képesek létrehozni a több millió alkatrészből álló integrált áramköröket [2], de csak két-dimenziós (egy síkban elhelyezkedő) szerkezetek előállítására alkalmasak. Háromdimenziós fotonikus kristályokat jelenleg csak laboratóriumban, nehézkes eljárásokkal lehet készíteni.

A természet több százmillió éve hoz létre szubmikronos, illetve nanoméretű skálán rendezett háromdimenziós szerkezeteket – minden élőlény ilyen rendszer. Fotonikus kristályszerkezetek is létrejöttek az evolúció során, ezek adják a lepkeszárnyak strukturális színeit.

A lepkeszárnyak strukturális színei

Az élőlények színei [3] kétféle fő módon keletkeznek. A pigmentszíneket festékanyagok (pigmentek) hozzák létre, ezek olyan anyagok, amelyeknek a fényelnyelése, illetve visszaverése hullámhosszfüggő – kémiai, elektronszerkezeti okból. A szerkezeti (strukturális) színeket [4] olyan biológiai szerkezetek hozzák



2. ábra. Az iridescencia jelensége *Morpho* lepkén. Ahogyan változtatjuk a megvilágítás irányát, a szárny más-más részein látjuk a fémes kék színt (az ábrán világos szürke), a szárny többi része sötétbarna (az ábrán sötétszürke). A szárny és a lepketű árnyékának iránya mutatja a megvilágítás irányát.



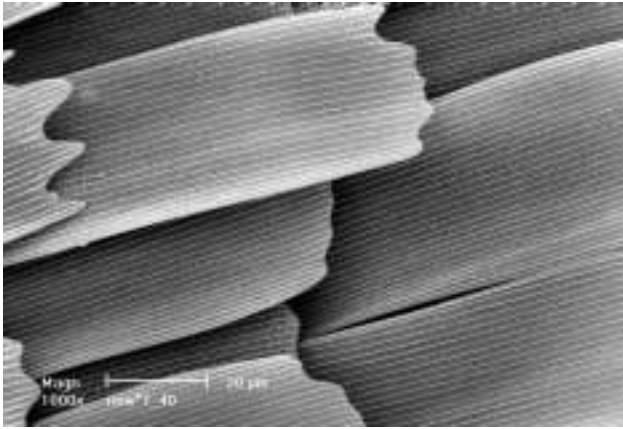
3. ábra. A közeg okozta színváltozás jelensége. Ha alkoholt cseppentünk a *Morpho* lepke szárnyára, az eredetileg kék szín (az ábrán világos szürke) zöldre (az ábrán sötétszürke) változik. (Az alkohol elpárolgása után majd visszaáll az eredeti szín.)

létre, amelyeknél a törésmutató szubmikronos skálán változik. Szerkezeti színeket növényeken és állatokon egyaránt megfigyelhetünk, de a szerkezeti színek legszebb és leggazdagabb tárházát az ízeltlábúak, elsősorban a bogarak és a lepkék adják.

Ha ránézünk egy lepkeszárnyra, hogyan állapíthatjuk meg, hogy pigmentszínt, vagy szerkezeti színt látunk? Két fontos alapjelenség segít ezt eldönteni: az iridescencia és a közegtől függő színváltozás jelensége – ezekre példákat a 2. és 3. ábrán mutatunk be.

Az iridescencia azt jelenti, hogy a szóban forgó test színének árnyalata vagy intenzitása erősen függ a megvilágítás, illetve a megfigyelés irányától – a felület gyakran fémes hatást kelt. A régebbi korok természetbúvárai valóban úgy vélték, hogy a lepkeszárny fémes színét fémréteg jelenléte okozza, és csak az 1920-as években jöttek rá arra – még fénymikroszkópos megfigyelések segítségével –, hogy ezt a jelenséget különleges interferencia hozza létre. Természetesen már egy egyszerű vékonyréteg – például olajfilm a víz tetején – színe is függ a megvilágítás és megfigyelés irányától, de azt a különleges jelenséget, hogy a szín árnyalata nem, de intenzitása függ az iránytól, csak háromdimenziós fotonikus kristályszerkezettel lehet létrehozni. A 2. ábrán egy *Morpho* lepkén mutatjuk be az iridescencia jelenségét. Miközben a pillangó repül, folyamatosan változik a szárny síkjának iránya a napsugárzás és a megfigyelő irányához képest, ezért a repülő *Morpho* lepke messziről egy villogó kék pontként látható – ahhoz hasonlóan, mint ahogy a rögzített helyen álló megfigyelő villogást érzékel, mikor a rendőrautó tetején forog a kék lámpa tükre.

A közegtől függő színváltozás jelenségét a 3. ábrán mutatjuk be. A lepkeszárny pikkelye egy kitinből felépülő háromdimenziós szerkezet, amelyet levegő tölt ki. A két anyag, a kitin és a levegő törésmutatójának eltérése (1,56 és 1) hozza létre a fotonikus kristályszerkezetet. Ha azonban a kitinszerkezetet kitöltő levegőt valamilyen más törésmutatójú anyaggal – a 3. ábrán alkohollal – helyettesítjük, akkor megváltozik



4. ábra. Az *Albulina metallica* lepke szárnyának pikkelyszerkezete SEM-képen. Jól megfigyelhetőek a hosszirányú gerincek a pikkelyeken.

a szárny színe. Ez a változás reverzibilis: ha a kitöltő anyag eltávozik a szerkezetből, ismét visszatér az eredeti szín.

Ha egyre növekvő nagyítással tanulmányozzuk a lepkeszárnyat, fokozatosan felfedezzük bonyolult szerkezetét. Az még fénymikroszkóppal is jól látható, hogy a szárnyembránt apró pikkelyek borítják, de a pikkelyek mikroszerkezete már csak elektronmikroszkóppal tanulmányozható. Intézetünkben kétféle elektronmikroszkópiát alkalmazunk: a pásztázó elektronmikroszkópiát (SEM) és a transzmissziós elektronmikroszkópiát (TEM): a SEM segítségével a minta felülete, a TEM segítségével a keresztmetszete vizsgálható. A 4. ábrán *Albulina metallica* lepke szárnypikkelyeit láthatjuk, SEM-képen. Megfigyelhetjük, hogy a pikkelyek szélessége körülbelül $50\ \mu\text{m}$, a hosszúsága pedig $100\text{--}150\ \mu\text{m}$. A pikkelyeken szabályos, hosszirányú gerinceket látunk, a gerincek között pedig valamilyen még kisebb skálájú szerkezet sejlik fel, de ez a szerkezet még nem ismerhető fel ebben a nagyításban. Növeljük hát tovább a nagyítást! Az 5., 6. és 7. ábrák SEM-képein már jól látható, hogy a gerinceket keresztbordák kötik össze. A gerincek és a keresztbordák ablakokat alkotnak, az ablakokon keresztül „belelátunk” a pikkely belsejébe, és ott egy szabálytalan lyukrendszer tűnik fel. Az 5., 6. és 7. ábrák keresztmetszeti TEM-képei megmutatják, hogy mikron nagyságrendbe eső vastagságú háromdimenziós szerkezetről van szó – megtaláltuk tehát a háromdimenziós fotonikus kristályt a lepkeszárnyon! Ezt a háromdimenziós, a pikkelyeket kitöltő szivacsos szerkezetet angolul gyakran *pepper-pot* (borsszóró) szerkezetnek nevezik, mert a borsszóró fedelén ehhez hasonlóan kinéző lyukrendszer van. Egy gyors pillantás az ábrák skálájára meggyőz minket, hogy a szerkezet periódushossza a néhány $100\ \text{nm}$ tartományba, tehát a látható fény hullámhosszának nagyságrendjébe esik!

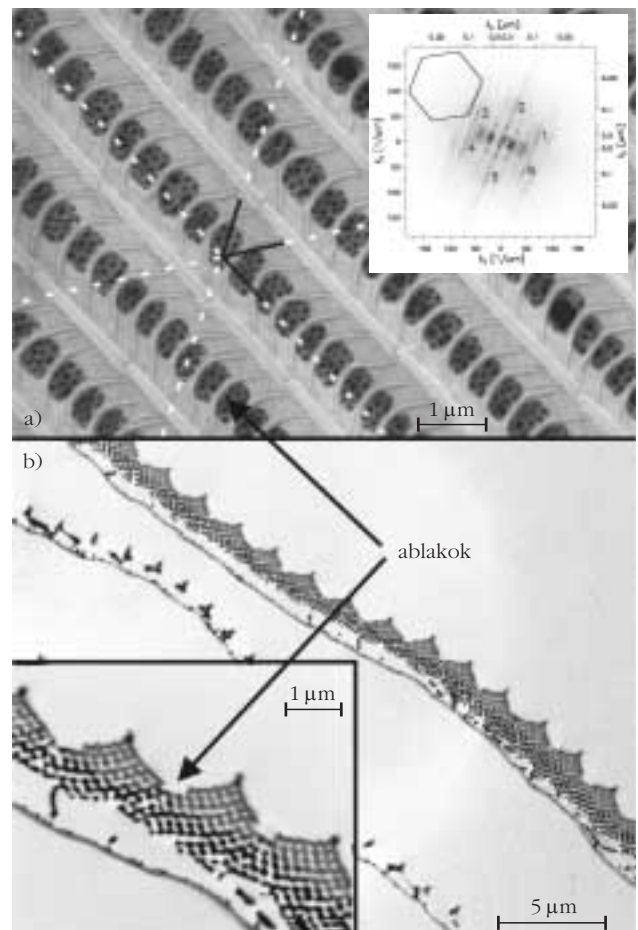
Mint korábban említettük, a szárnypikkely kitinből áll. A kitin egy összetett cukor (poliszacharid), amely az ízeltlábúak külső vázának (exoskeleton) legfontosabb építőanyaga. A kitin önmagában színtelen és a törésmutatója $n = 1,56$. A látható szín kialakulásához

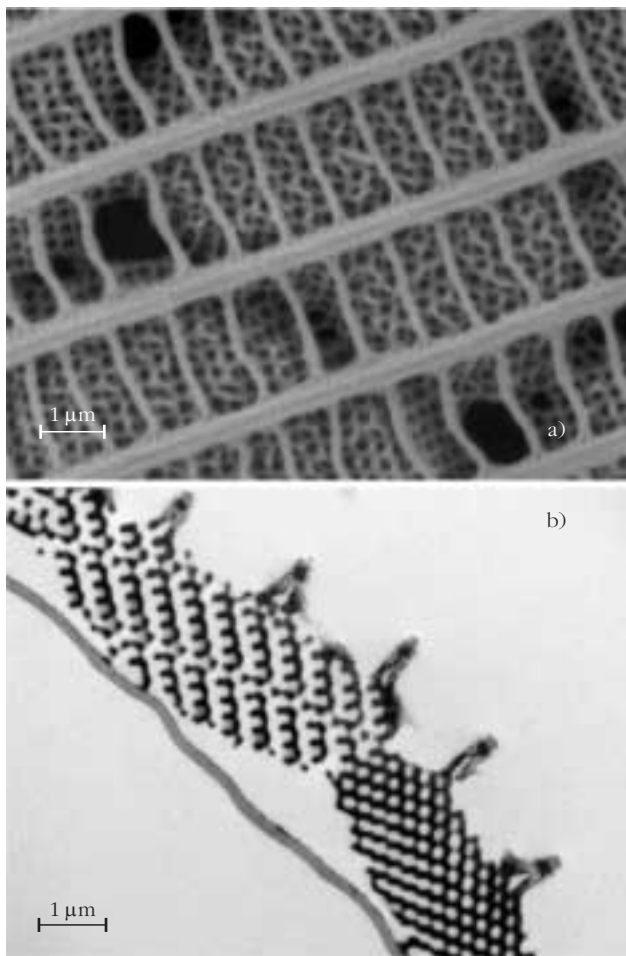
azonban általában pigment jelenlétére is szükség van a pikkelyben, a sötétbarna pigment (melanin) vagy a pikkely „alján” (a pikkelynek a szárny membrán felőli oldalán), vagy – granulák formájában – a pikkely térfogatában eloszlatva helyezkedik el. A színt a fotonikus kristályszerkezet és a melanin összjátéka alakítja ki: a beeső fehér fénynek a fotonikus kristály tiltott sávjába eső komponenseit a fotonikus kristály visszaveri (ld. 1. ábra), a többit átereszt. Az áteresztett fény azután a pigmentben elnyelődik. Ez a pontosabb magyarázata a 2. ábrán látható iridescenciajelenségnek: azoknak a megvilágítási irányoknak az esetén, amelyeknél a fotonikus kristály visszaveri a kék fényt, ezt a kék fényt látjuk, a többi megvilágítási irány esetén a fotonikus kristály átlátszó, ezért csak a melanin sötétbarna színét látjuk.

A lepkeszárnyak csodás trükkjei

Ebben a részben két lepkét vizsgálunk meg kicsit részletesebben. A címlapon bemutatjuk a két lepke – *Cyanophrys remus* és *Albulina metallica* – szárnyá-

5. ábra. A *Cyanophrys remus* lepke felső szárnyoldalának egy pikkelyén látható mikroszerkezet. a) SEM-kép – felülnézet, b) TEM-kép – keresztmetszet. Az a) ábra jobb felső sarkában a SEM-kép kétdimenziós Fourier-teljesítményspektruma látható. A b) ábra bal alsó sarkában kinagyítva látható a pikkelyt kitöltő szabályos szivacsos szerkezet.



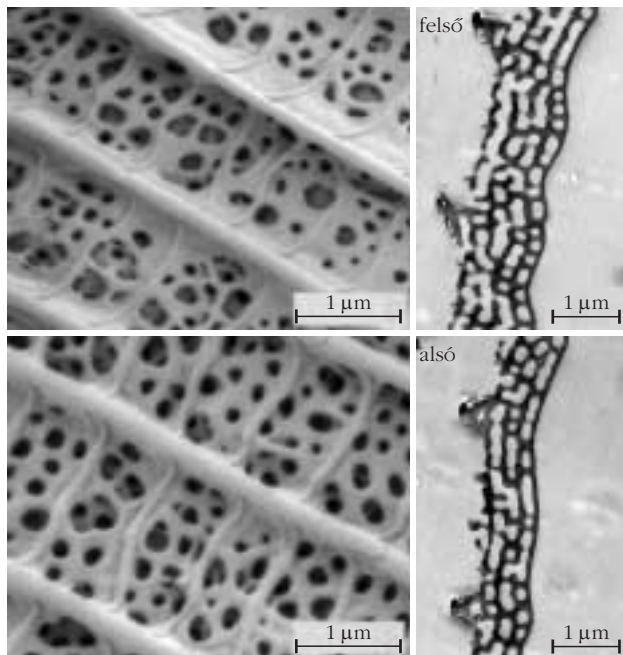


6. ábra. A *Cyanophrys remus* lepke alsó szárnyoldala egy pikkelyének mikroszerkezete. a) SEM-kép, b) TEM-kép.

nak felső és alsó oldalát. A pillangók pihenés közben általában összezárják a két szárnyukat, így ilyenkor a szárny alsó oldala válik láthatóvá. Ezért a szárny alsó oldala általában a rejtőzködést szolgálja: a pihenő lepke színével és mintázatával belesimul élőhelye környezetébe. Ez magyarázza a *Cyanophrys remus* alsó szárnyoldalának matt zöld színét – így válik észrevehetetlenné a zöld növényi háttérben. Az *Albulina metallica* viszont harmatos környezetben él – ezért ezüstös zöld a szárnyának alsó oldala. A szárny felső oldala többnyire jeladás céljára szolgál: mikor a pillangó kitarja a szárnyát, láthatóvá válnak a felső oldal fényes színei.

Fotonikus monokristály és polikristály – a *Cyanophrys remus* szárnyának két oldala

Az 5. ábrán a lepke szárnyának felső oldaláról vett pikkely felülnézeti (SEM) és keresztmetszeti (TEM) képét látjuk. A SEM-képen a gerincek és keresztbordák közötti ablakokban jól látható a pikkely testét kitöltő lyukacsos szerkezet legfelső rétege. Ahogyan a TEM-képen – és különösen a kinagyított kis képen – megfigyelhetjük, a pikkelyt háromdimenziós szivacszerű szerkezet tölti ki, mégpedig teljes egészében, tehát nemcsak az ablakokon keresztül látható részben, hanem a gerincek alatt is. Habár az



7. ábra. Az *Albulina metallica* lepke felső- és alsó szárnyoldala egy-egy pikkelyének mikroszerkezete. Bal oldalon SEM-képek, jobb oldalon TEM-képek.

ablakok közötti „fal”-réteg a pásztázó elektronmikroszkóp számára nem átlátható, a fény könnyedén áthatol ezen a körülbelül 100 nm vastag rétegen, úgyhogy a fényszórás kialakításában a teljes, a pikkelyt kitöltő háromdimenziós fotonikus kristályszerkezet részt vesz.

Közelebbről megnézve az 5.a ábrát láthatjuk, hogy a lyukak nem teljesen véletlenszerű módon helyezkednek el, de nem is teljesen rendezetten. Olyan a kép, mintha véletlenszerűen perturbált háromszögrácsot látnánk. Kiválasztottunk egy lyukat egy ablak közepe táján, és a legközelebbi szomszédok irányába egyeneseket rajzoltunk – ezek a fekete szakaszok az 5.a ábrán. Ha a fekete szakaszokat meghosszabbítjuk úgy, hogy a többi ablakon is keresztülhaladjanak – ezek a szaggatott fehér egyenesek – akkor észrevehetjük, hogy a többi ablakban is jó közelítéssel metszik ezek az egyenesek a lyukakat. Ez arra enged következtetni, hogy hosszútávú – azaz több ablakra kiterjedő – rend van jelen a szivacsos szerkezetben. Feltételezésünk ellenőrzésére kiszámítottuk a SEM-kép kétdimenziós Fourier-teljesítményspektrumát, ez látható az 5.a ábrán a jobb felső sarokban. A Fourier-képen a középpont közelében megfigyelhető alakzat – amely a gerincek és keresztbordák hálózatának felel meg – szabályszerűen (bár kissé elmosódottan) megismétlődik egy hatszög hat csúcspontjában. Ez igazolja, hogy a lyukak valóban az egész képre kiterjedő háromszögrácsot alkotnak. Ez a – valójában az egész pikkelyre kiterjedő – fotonikus monokristály hozza létre a felső szárnyfél fémes kék színét, mint azt számítógépes szimulációval is igazoltuk [5].

A lepke szárnyának alsó oldala matt zöld színű. Az iridescencia teljes hiánya miatt arra gondolnánk, hogy valamilyen festékanyag, pigment hozza létre

ezt a színt. A mikroszkópos képek (lásd 6. *ábra*) viszont azt mutatják, hogy az alsó oldal szárnypikkelyein is látható a szivacszerű mikroszerkezet! Megfigyelhetjük mind a SEM-, mind a TEM-képen, hogy ez a mikroszerkezet nem folytonos, hanem 5–10 μm átmérőjű granulákat alkot, és ezen szemcsék különböző, véletlenszerű irányítottságúak. Részletes vizsgálatok [5] segítségével kimutattuk, hogy a szemcsék FCC kristályszerkezetű háromdimenziós lyukrácsot tartalmaznak. Mindegyik szemcse más-más irányítottságú, ezért adott megvilágítási és megfigyelési iránynál más-más színű (kék, zöld, vagy sárga) – de a szemcsék együttes hatásaként homogén zöld színt lát az emberi szem. Valamilyen más megvilágítási, illetve megfigyelési iránynál az egyes szemcsék színe ugyan megváltozik, ám az összes szemcse együttesen megint csak homogén zöld színt ad. Tehát a *Cyanophrys remus* lepke alsó szárnyoldala végül is a megvilágítás és a megfigyelés irányától függetlenül matt zöldnek látszik.

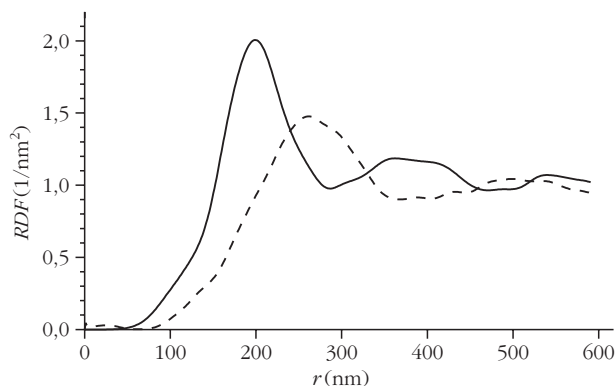
A mikroszkópos képekből származtatott modellszerkezetekre a Maxwell-egyenletekből kiindulva belga kollégáink (*Jean-Pol Vigneron*, Université Notre-Dame-de-la-Paix, Namur) segítségével kiszámoltuk az elméleti optikai spektrumokat a pillangószárny mindkét oldalára, ezek jól egyeznek a mért spektrumokkal.

A rövidtávú rend szerepe

– az *Albulina metallica* szárnyának két oldala

A 7. *ábra* ennek a Himalájában élő lepke szárnyának (hím példány) a felső, illetve alsó oldali SEM- és TEM-képeit mutatja. A SEM-képen a gerincek és a keresztbordák alkotta ablakokon keresztül látható a pikkelyek térfogatát kitöltő lyukrendszer felső rétege. A TEM-képek tanúsága szerint a pikkelyeket réteges szerkezet tölti ki, a rétegek között háromdimenziós szivacsos struktúrát látunk.

Ennek a pillangónak – mint a *címlapon* látjuk – a felső oldala kék, az alsó oldala pedig ezüstös zöld. Ám, ha szabad szemmel megnézzük a 6. *ábrán* a két oldal mikroszkópos képeit, nem fedezünk föl szembezők eltérést köztük. Mi okozza hát a színek eltérését? Ennek kiderítésére mindkét oldal SEM-képeiből kiszámítottuk az úgynevezett radiális eloszlásfüggvényt (*RDF*) – ezeket ábráztoltuk a 8. *ábrán*. A radiális eloszlásfüggvény azt adja meg, hogy ha a középpontban van egy lyuk, akkor milyen valószínűséggel találunk tőle r távolságban egy másik lyukat. Ezt a függvényt gyakran használják amorf anyagok és folyadékok elméleti és kísérleti vizsgálatánál, csak ott az atomokra vonatkozó radiális eloszlásfüggvényt tanulmányozzák. Az *RDF(r)* függvényben mindkét szárnyoldal esetén egy elsőszomszédcsúcsot látunk, a másod- és harmadszomszédcsúcsok lényegesen alacsonyabbak és laposabbak. Ez azt jelenti, hogy az első szomszédok még viszonylag rendezettek, de a második és harmadik szomszédok már sokkal kevésbé. Az *RDF*-függvények természetesen 1-hez konvergálnak, hiszen nagyobb távolságban már teljesen megszűnik a korreláció a lyukak helye között. Azaz a



8. *ábra*. Az *Albulina metallica* lepke szárnyán található szivacsos szerkezetből számolt radiális eloszlásfüggvények a felső oldalra (folytonos vonal) és az alsó oldalra (szaggatott vonal).

szerkezetben nincs hosszútávú rend – ellentétben az előző részben elemzett *Cyanophrys remus* lepke esetével –, de rövidtávú rend azért jelen van. Fordítsuk figyelmünket most az elsőszomszédcsúcsokra! A felső oldalon az elsőszomszédcsúcs $r_1 = 206$ nm sugárnál található, az alsó oldalon $r_1 = 260$ nm sugárnál, továbbá a felső oldali *RDF*-csúcs lényegesen magasabb és keskenyebb, mint az alsó oldal esetén. Egyszerű Bragg-reflexió közelítésben maradván azt mondhatjuk, hogy az első szomszédok helye határozza meg döntően a színt és $\lambda_d = 2 n_{eff} r_1$, ahol n_{eff} a szerkezet átlagos törésmutatója, r_1 az elsőszomszédhéj sugara, λ_d pedig a domináns hullámhossz. (Az átlagos törésmutatót a szerkezetnek a mikroszkópi képekből megállapítható kitöltöttségi tényezője ismeretében a kitin és a levegő törésmutatójából számolhatjuk ki, ebből $n_{eff} = 1,1$.) Ebből az egyszerű számolásból a felső oldalra $\lambda_d = 453$ nm, az alsó oldalra $\lambda_d = 572$ nm adódik, ami egy liláskék és egy sárgászöld szín – jó egyezésben a mért spektrummal. Minél magasabb és élesebb az elsőszomszédcsúcs az *RDF*-függvényben, annál tisztább a szín. Ez magyarázza, hogy a felső oldalon tiszta kék színt, az alsó oldalon viszont ezüstös zöld színt látunk.

Összefoglalás

A Természettől ellesett anyagok és szerkezetek lehetővé teszik biomimetikus, illetve bioinspirált anyagok és technológiák kifejlesztését. A természetben található megoldások általában multifunkciósak (a lepke szárnya például nemcsak egy optikai eszköz, hanem repülésre is szolgál!), energia- és anyaghatékonyak. Az evolúció 500 millió év alatt a fotonikus szerkezetek óriási gazdagságát hozta létre a pillangók szárnyán – csak két, kis törésmutató-különbségű anyag, a kitin és a levegő felhasználásával. Habár a mai technológiával a háromdimenziós fotonikus kristályok nehezen megvalósíthatóak, a lepkéktől megtanulhatjuk, hogy nem szükséges tökéletes hosszútávú rend a tiltott sáv létrejöttéhez. Láttuk azt is, hogy rendezetlen szerkezetekkel nemcsak fémes, hanem matt színek is létrehozhatók – ez lehetőséget teremt környezetbarát

(nehézfémeket nem tartalmazó) festékek, valamint napfényben is jól látható kijelzők létrehozására.

A biológiai eredetű fotonikus kristályokkal kapcsolatos kutatásaink részletes ismertetése, alkalmazási példák és hivatkozások a www.nanotechnology.hu honlapunkon találhatóak.

Irodalom

1. Eli Yablonovitch, Photonic Crystals: Semiconductors of Light. *Scientific American* (2001/12) 47

2. Gyulai József, Az emberiség útja a nanovilág felé. *Mindentudás Egyeteme* (2003), <http://www.nanotechnology.hu/magyarul/Mindentudas/Mindentudas%20Egyeteme.htm>
3. Rajkovits Zsuzsanna, Illy Judit, Az élő természet színei. *Fizikai Szemle* 51/3 (2001) 76
4. Biró László Péter, Nanovilág: a szén nanocsőtől a kék lepkeszárnyig. *Fizikai Szemle* 53/11 (2003) 385
5. K. Kertész et al, Gleaming and dull surface textures from photonic-crystal-type nanostructures in the butterfly *Cyanophrys remus*. *Physical Review E* 74 (2006) 021922
6. Bálint Zsolt, Biró László Péter, A lepkék színváltozása. *Természet Világa* 135/7 (2004) 310

SZERKEZETI SZÍNEK AZ ÉLŐVILÁGBAN

Rajkovits Zsuzsanna
ELTE Anyagfizikai Tanszék

„A természet egyszerre nagyszerű művész,
kreatív tudós és rendkívül jártas kézműves.”

Kurt Nassau

A színek kialakulása az élővilágban rendkívül összetett jelenség, megértéséhez kémiai, fizikai és biológiai ismeretekre egyaránt szükségünk van, amelyek összekapcsolása lehetővé teszi a természeti jelenségek mélyebb megértését.

Mint annyi más területen is, a színek keletkezésének fizikai alapjelenségein túl a biológiai rendszerek várnak bennünket szinte kimeríthetetlen sokféleségükkel és azzal a kihívással, hogy ezt a sokféleséget fizikai tudásunkkal összhangba hozzuk. Hogy ez az összhang a fizikai ismeretek milyen széles körét alkalmazva teremthető meg, azt a *Fizikai Szemle* ugyanebben a számában, az előző írásban *Márk Géza István* és szerzőtársai a lepkeszárnyak strukturális színeinek példáján mutatták be. Ez az írás, túl azon az esztétikai élvezeten, amelyet egy természeti jelenség megértése okoz, azt is bemutatja, hogy a megértést megfelelő technológiai feltételek megléte esetén – adott esetben korunk nagy újdonságának, a nanoméreték fizikájának köszönhetően – rögtön felmerül a gyakorlati alkalmazások gondolata is. Ez indította a jelen cikk szerzőjét arra, hogy – a Fő-szerkesztő ösztönzésének engedve – a szerkezeti színek élővilágbeli előfordulásának legcsodálatosabb példájáról ezt az összeállítást itt közzétegye annak ellenére, hogy igen sok részletét egy korábbi cikkben a *Fizikai Szemle*-ben már leírta [1]. Igaz, azt „csak” a megértés öröme, és a tanítás szempontjai motiválták.

A színek a biológiai rendszerekben, a madarak és rovarok világában gyakran festékszemcsékben, úgynevezett *pigmentek*ben keletkeznek, a „kémiai színezés”-nél megismert hullámhosszfüggő fényelnyelés útján. Bizonyos esetekben azonban a színek kialakulása a *fény* egy meghatározott *szerkezeten* történő szelektív *szóródásának*, *interferenciájának*, illetve *diffrakciójának* következménye. A szórással, interferenciával és diffrakcióval létrejövő színeket *szerkezeti* vagy *struktúraszínek*nek nevezzük [2]. Az interferenciával és diffrakcióval keletkező szerkezeti színek rendszerint visszavert fényben láthatók jól.

Fényszórás

Ha az anyag atomjai, molekulái a beeső sugárzás hatására másodlagos sugárzás forrásává válnak, a *fényszórás* jelenségéről beszélünk. A sugárzás természete függ a beeső sugárzás λ hullámhosszának és a részecske a méretének arányától. Ha a fényt szóró részecske mérete a fény hullámhosszánál sokkal kisebb, akkor a fényszórást *Rayleigh-szórás*nak nevezzük. A *szórt intenzitás* ekkor erősen függ a hullámhossztól, a *Rayleigh-törvény* szerint fordítottan arányos a hullámhossz negyedik hatványával. Például az úgynevezett Tyndall-kék szín Rayleigh-szórással jön létre. Erőteljes kék szórás figyelhető meg azokon a részecskéken, melyeknek átmérője 1 nm és 300 nm közé esik. Jó szórócentrum lehet akár néhány atom vagy molekula is. A szórt fény színének kék és lila közötti pontos árnyalata a szórócentrumok eloszlásától, méretétől, alakjától is függ.

Ha a szórt részecskék mérete eléri vagy felülmúlja a hullámhossz nagyságát, a Rayleigh-közelítés már nem alkalmazható. A nagyobb részecskéken bekövetkező szórást *Mie-szórás*nak nevezzük. Gömb alakú részecskék esetén, ha a méretük λ és 2λ közé esik, a szórás a beeső sugárzás haladásának irányában egyre intenzívebbé válik. A részecskeméret további növekedésekor már csak fehér szórás figyelhető meg, az intenzitás nem függ többé a hullámhossztól. Ez az a fehér szín, amelyet például a köd vagy az alacsony felhők vízcseppein átnézve láthatunk. Az intenzitás-eloszlás meghatározása Mie-szórás esetén nagyon bonyolult, különösen akkor, ha a szórt részecskék mérete különböző. A módszer nagyon jól használható kolloid oldatok, aeroszolok, köd, füst vizsgálatokkor a részecskék méretének meghatározására.

A Rayleigh-szórás látványos példája az élettelen természetben az ég kék, valamint a felkelő és lemenő Nap piros színe. Miközben a fény áthalad a vastag levegőrétegen, spektruma a rövidebb hullámhosszú