



A dél-amerikai lepke szárnya kékesen csillog – de csak ebből az irányból nézve.

színjátzó szárnyakon

LEPKÉKET ÖLTÖZTET A KRISTÁLYFIZIKA

ÍRTA JÉKI LÁSZLÓ FÉNYKÉPEZTE HARTYÁNYI NORBERT

A tenger habjaiból született Aphroditét Morphó, azaz „alakját változtató” néven tisztelték spártai templomában. A kéklő vízben úszó istennő szépsége inspirálhatta a biológust, aki a Morpho nevet adta a lepkék egyik nemének. Ebbe a csoportba mintegy harminc faj tartozik – legtöbbször szárnya gyöngyházfényű vagy fémesen csillogó kék, bár barna színű lepkék is előfordulnak közöttük. Több fajuk elnevezése: például a *Morpho achilles*, a *M. helena* vagy az élénk kékben pompázó *M. menelaus* szintén a görög mitológiát, a trójai háború szereplőit idézi.

A Dél- és Közép-Amerikában, Mexikóban honos, 8–20 centiméter szárnyméretű Morphók szépsége hosszú ideje lenyűgözi az embert. Egy braziliai indián törzs például kék lepkeszárnyakkal díszíti szertartási maszkjait, de a színjátzó szárnyak a modern ékszereken is feltűnnek – olyannyira, hogy ma már több divatipari vállalkozás belevágott a lepketenyésztésbe.

Nemcsak a divattervezők, hanem a tudósok érdeklődését is fölkelte az azúrlepkék egyedülállóan szép színei. Ezeket tudniillik nem az ismert módon: pigmentek, azaz festékszemcsék segítségével hozza létre a természet, hanem a lepkeszárnyról visszaverődő fény különös színjátékát látjuk. A kutatók úgy vélik, hogy a szárny „fotonikus kristályként” viselkedik: nanoléptékű szerkezetén fényinterferencia lép fel, és ez eredményezi a lepke kék színét (*a jelenség magyarázatát lásd a cikk végén*).

A kutatók eme feltevése két megfigyelésen alapul. Először is észrevették, hogy a szín intenzitása attól függ, hogy milyen irányból nézzük az illető felületet, és hogy a fény honnan érkezik – a szín *árnyalatát* azonban nem befolyásolja ez a két tényező. A fény irányának változásával csupán a szárny más-más részén csillan meg – „irizáló” hatást keltve – a fémes kék szín. Távrolról nézve ezért is látjuk villogó kék pontnak a repülő lepkét; szárny-síkja ugyanis állandóan változik a Nap és a megfigyelő irányához képest. Nos, effajta jelenséget csakis fotonikus kristályok hozhatnak létre. A másik bizonyíték: a fotonikus kristály tulajdonságai a környező közeg (a lepkék esetében a levegő) optikai



törésmutatójától is függenek. A levegőt más anyaggal, például alkohollal helyettesítve ezért a szín is megváltozik!

Jean-Pol Vigneron belga elméleti fizikus 2002-ben e témában számításokat kezdett a Namuri Egyetemen, majd nemsokára magyarok is bekapcsolódtak a kutatásokba. Az MTA csillebérci Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézetének (MFA) fizikusa, Biró László Péter 2002-ben szén nanocsöveket vizsgált Namurbán. Egyszer, amikor benyitott Vigneron szobájába, fémes kék színű lepkét pillantott meg kollégája asztalán.

„Csak nem lepkét gyűjtesz?” – kérdezte. „Dehogyan. Azt szeretném kideríteni, hogy tényleg a fotonikus kristályoktól kapják-e a színüket” – felelte a belga kutató. A téma nyomban felkeltette Biró érdeklődését, hiszen az effajta kristályok szerkezete szintén a nanovilág tárgyköréhez tartozik. (Ebben a mikrovilágban a jellemző méretek nanométerben adhatók meg. A „törpe” jelentésű görög *nano* előtag az ezermilliomod részt jelöli modern mértérendszerünkben.)

Kísérleti fizikus lévén Biró természetesen ellenőrizni akarta a fotonikus kristályokkal kapcsolatos feltevést. Hazatérve hozzálátott terve megvalósításához: „A vizsgálatokhoz először is megfelelő lepkékre volt szükségem. Utánanéztam az interneten, ki foglalkozik efféle lepkékkel Magyarországon. Így találtam meg Bálint Zsoltot, a Magyar Természettudományi Múzeum munkatársát, aki érdekes elméletet tett közzé egy szaklapban arról, hogy az egymással közeli rokonságban lévő boglárkalepkék színe miért más a magas hegyekben, mint egybűt.” Később e kérdés vizsgálata is bekerült Biró kutatási tervei közé.

Bálint Zsolt biológus azt vizsgálja optikai mikroszkópja alatt, hogy a boglárkalepke szárnyán hol található szerkezeti szint adó pikkelyek és illatpikkelyek, s hol vannak a sok festékanyagot tartalmazó „közönséges” pikkelyek.

Morfók helyett így végül a jóval népesebb, mintegy hatezer fajt számláló boglárkalepke család (*Lycaenidae*) példányait vizsgálták az MFA laboratóriumában. Egyikük, a *Cyanophrys remus* a nevében is viseli a görög „sötétkék” (küanosz) szót. Ennek a lepkének a szárnya fölül csillogó kék, alul fénytelen zöld színű.

„A pihenő lepke összezárja a szárnyait. Így jól el tud rejtőzni és zavartalanul pihenhet, mert matt zöld színe nagyszerűen beolvad a növények zöldjébe. Kitárt szárnyának élénk, fémes kékje viszont éppen az ellenkező célt szolgálja: a figyelemfelhívást, a szexuális kommunikációt” – avat be Bálint Zsolt a lepkék életének biológiai részleteibe.

Annak kiderítése, hogy a lepke mi módon hozza létre a kétféle színt, a fizikusokra várt. Ők modern vizsgálati eszközökkel tárták fel a lepkeszárny finom, nanoméretű részleteit. Bebizonyították, hogy a szárny felső felületének fotonikus kristályként működő szerkezete kék színt ad. A szárny alsó, matt felszínén viszont nyoma sincs fotonikus kristályoktól származó irizálásnak. Lehet, hogy itt másvalami okozza a zöld színhatást?

„A szárny alján is megfigyelhető a fotonikus kristályfelépítés, de nem az egész felületén, csak kisebb szemcsékben. A szemcsék mind másként állnak; a megvilágítástól és a megfigyelő irányától függően az egyik kék, a másik zöld, a harmadik sárga színt ad, s együtt létrehozzák a matt zöld összhatást” – foglalja össze Biró László a fizikai vizsgálatok eredményét.

Érdekes különbséget találtak a boglárkalepkék két testvérfaja: a *Polyommatus daphnis* és a *P. marcidus* esetében. „A nálunk is honos *P. daphnis* hímjeinek szárnya felül fémes kék színű, az iráni Elbursz hegységben, 2–3 ezer méter magasan élő *P. marcidus* hímjeié viszont barna, akárcsak a nőstényeké. Kutatótársammal úgy gondoltuk, hogy a nagy magasságban élő hím lepkék barna színének köze lehet a hőháztartáshoz: testük így jobban elnyelheti a napsugarakat” – meséli Bálint Zsolt.

A két lepkefaj eltérő színének titkát végül a laboratóriumi vizsgálatok tárták fel. A szárny finomszerkezetének feltérképezése mellett optikai és hőfizikai mérések egész sorát végezték el. Mint kiderült, a kék színt kétségtávol fotonikus kristályok kelteik, így a lepkeszárny maga csak keveset nyel el a ráeső fény kék tartományából. A magashegyi lepkék viszont nem engedhetnek meg maguknak ilyesfajta fényűzést. A napfény odafent különösen gazdag kék és ultraviolet sugárakban – a lepkéknek ezeket az összetevőket is hasznosítaniuk kell, különben kihűlné a testük. Azért nincs a szárnyukban fotonikus kristály, azért barna színű a hátoldaluk is, mert így el tudják nyelni a napfény kék összetevőit. A mérések szerint azonos megvilágítás mellett a hegyekben honos boglárkalepkék hímjeinek testhőmérséklete másfél-szer magasabb, mint kék rokonaiké. A szín ezek szerint döntő szerepet játszik a lepkék hőháztartásában, alkalmazkodásában.

Az első példányok tanulmányozása és a színek kialakulásának tisztázása során a fizikusok a lepkeszárny vizsgálati módszereit is

A természetben másutt is található fotonikus kristályok, például a nemesopálban vagy a pávatoll szerkezetében

K Ö Z E L K É P



Cyanophrys remus hátoldala



Cyanophrys remus hasoldala



Polyommatus daphnis hátoldala



Polyommatus daphnis hasoldala

kidolgozták. Ezután aprólékos, időigényes munkával sorra vették a különböző lepkéket. Biró László vezetésével megmérték több mint száz faj szárnyszerkezetét, színekpi tulajdonságait, és az eredményekből adatbankot állítottak össze. „Ez az adatbank a múltat őrző múzeum szerepét is betölti, mert sajnos sok lepkefajra kipusztulás vár” – jegyezte meg Bálint Zsolt.

A természet ma még ügyesebb nálunk, hiszen háromdimenziós fotonikus kristályokat egyelőre csak laboratóriumban tudunk előállítani. Remélhetőleg idővel sikerül majd bevetnünk ezeket a kristályokat az ipari gyakorlatban, s például a tűző nap-sütésben is kiválóan látható képernyőket készíthetünk belőlük. Mi több, a festékipart is gyökeresen átalakíthatjuk: cellulóz alapú fotonikus kristályokkal helyettesíthetjük a ma használatos, egészségre káros festékeket a nyomdákban, az autógyártásban vagy éppen a textiliparban. A katonai létesítmények, járművek álcázásában is közreműködhetnének a fotonikus kristályok, valamint fontos szerepet kaphatnak a jövő optikai számítógépeiben, amelyekben az elektronok helyett már fotonok továbbítják – nem lepkeszárnyon, hanem fénysebességgel – az információt.

➤ **A világhálón:** Többet is megtudhat a lepkeszárnyak szerkezetéről a <http://www.nanotechnology.hu/magyarul.html> weboldalon

MIT ÉR AZ ÉLMÉNY, HA NEM OSZTOD MEG SENKIVEL?



EGYÜTT SZEBB AZ ÉLET.

A VADONATÚJ VOLVO V70.

TÁGAS UTAS- ÉS CSOMAGTÉR, ÜTKÖZÉSELKERÜLŐ-, VALAMINT SÁVELHAGYÁSRA ÉS ELALVÁSRA FIGYELMEZTETŐ RENDSZER* A BIZTONSÁG FOKOZÁSÁRA. 5 ÉS 6 HENGERES DINAMIKUS MOTOROK. S MINDEZ AZÉRT, HOGY MINÉL TÖBB BOLDOG PERCET TÖLTHESS MINDAZOKKAL, AKIKKEL EGYÜTT SZEBB AZ ÉLET. **WWW.VOLVOCARS.HU**

*OPCIÓKÉNT RENDELHETŐ.

Volvo. for life



A KÉPEN LÁTHATÓ AUTÓ ILLUSZTRÁCIÓ.
A HÁTTERBEN LÁTHATÓ ÉPÜLET, A PALAU DE LES ARTS I HEMISFERIC, VALENCIÁBAN, SPANYOLORSZÁGBAN TALÁLHATÓ.
VEGYES FOGYASZTÁS: 5,9-11,3 l/100 km, CO₂ KIBOCSÁTÁS: 157-270 g/km.

A SZÁRNY – EGYRE KÖZELEBBRŐL

A lepkeszárny csodálatos kék színének felderítéséhez műszerekre, mikroszkópokra van szükség, szemünk ugyanis nem látja meg a finom részleteket. A mikroszkóp felbontását a megvilágítás hullámhossza szabja meg, így a legkisebb megfigyelhető méret a fény hullámhosszával összemérhető.

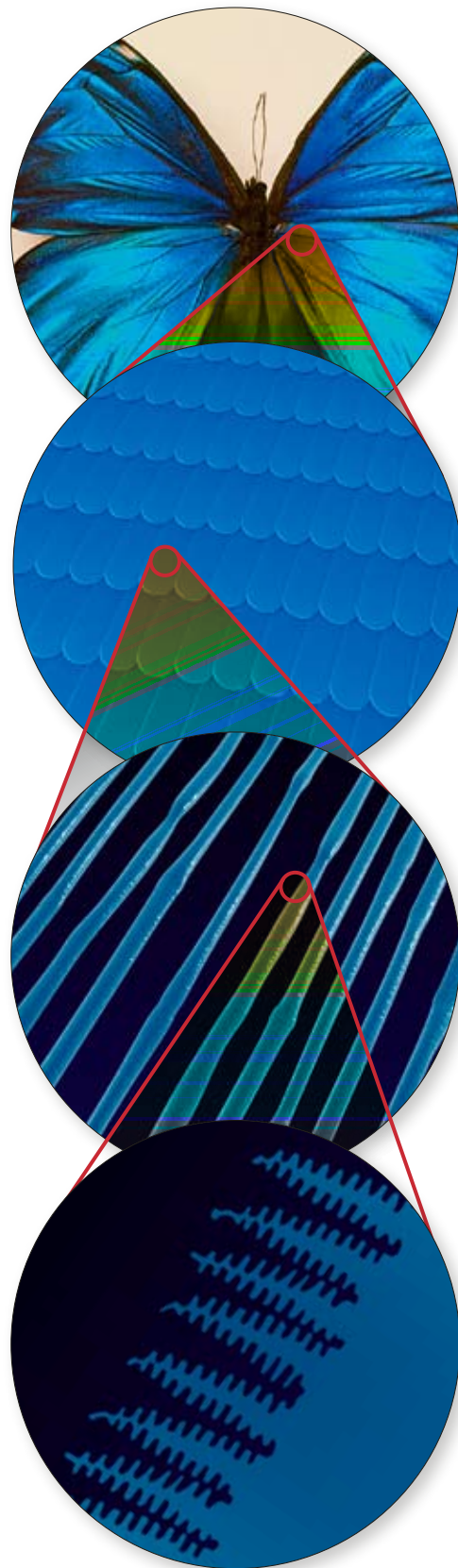
A fénymikroszkópban nem alkalmazható 200 nanométernél rövidebb hullámhosszú fény, ennél fogva a legkisebb megfigyelhető méretek is ebbe a nagyságrendbe esnek. A hagyományos mikroszkópok alatt látható pikkelyek olyképpen borítják be a lepkeszárnyat, akár a tetőcserepek. A pikkelyek szélessége 50, hosszúságuk 100-150 mikrométer körüli. Építőanyaguk kitin, ez a poliszacharid a rovarok vázszerkezetének alapanyaga.

A még apróbb részletek feltárására már elektronmikroszkópot vetnek be a kutatók: itt nem a fénycsugár, hanem nagy sebességre felgyorsított elektronok képezik le a tárgyat. Az elektronnyaláb hullámhossza jóval rövidebb, mint a látható fényé (akár a nanométer néhány ezredrésze is lehet), így segítségével valóban meglátható a nanovilág.

Az akár 200 ezerszeres nagyítású elektronmikroszkópokkal vírusokat, molekulákat, nanorészecskéket is tanulmányozhatunk. A pásztázó elektronmikroszkóp (angol rövidítése: SEM) elektronnyalábja pontonként tapogatja le a vizsgált tárgyat, míg az újabb átvilágító (TEM) elektronmikroszkópok a tárgyon áthaladó elektronsugarakat képezik le – hasonló módon, mint a hagyományos fénymikroszkóp. A pásztázás a felületről, az átvilágítás pedig a mélyebb rétegekről ad képet.

A SEM-felvételeken hosszirányú kis párhuzamos gerincek rajzolódnak ki a lepkeszárny pikkelyein. A nagyítást tovább növelve karácsonyfához hasonló keresztmetszetű parányi nanostruktúrák, fotonikus kristályok tűnnek elő (lásd jobbra lent és a szemközti oldalon). A beérkező fehér fény ezeken a kétféle törésmutatójú anyagból álló képződményeken szóródik, itt alakul ki tehát a lepkeszárny kék színe.

A barna színt ellenben nem a fotonikus kristály, hanem a pikkelyek sötétbarna festékszempái hozzák létre. Végül pedig a fotonikus kristály kékjének és a pigmentek barnájának irányfüggő váltakozása adja a színjátékos, irizáló összhatást.



A FOTONIKUS KRISTÁLY SZERKEZETE

A kristályok alkotóelemei: atomjai, ionjai, molekulái meghatározott rendben, periodikusan ismétlődnek. Ez a rend lehet lineáris, síkbeli vagy háromdimenziós is. Az eltérő törésmutatójú anyagokból álló fotonikus kristály rácsa bizonyos hullámhosszakon nem engedi át a fényt. Ebben a „tiltott” sávban a fénycsugár irányt változtatnak, visszaverődnek vagy szóródnak a kristályon. A fotonikus kristályok rácsának ismétlődési mérete összemérhető a fény hullámhosszával (300–750 nm),

és a jelenség is ebben a tartományban jelentkezik. A lepkeszárny fotonikus szerkezetét a szárnyat felépítő 1,56-os törésmutatójú kitin és a kitinvázat kitöltő levegő (törésmutatója: 1) hozza létre.



A PIKKELY BELSEJE

A pásztázó elektronmikroszkópos kép gerincek és keresztbordák alkotta ablakon át enged bepillantást a pikkely mélyebb rétegeibe. A lepkeszárny TEM-felvételén szabálytalan, szivacsos térszerkezet látható (lent, kis kép), amelynek ismétlődési rácsa hossza néhány száz nanométer, tehát a látható fénytartományba esik. Ez a háromdimenziós szerkezet pedig nem egyéb, mint maga a fotonikus kristály. A *Cyanophrys remus* szárnyának felső oldalán a rendezett fotonikus kristály adja a szárny kék színét. A szárny fonákján viszont szemmel láthatóan más a szerkezet jellege. A szabályos rendezettség nem terjed ki az egész szárnyra, csak kis méretekben, szemcsékben van jelen. A szem-

csék keltette eltérő színekből jön létre az együttes színhatás: a lepke rejtőzködését segítő matt zöld szín. A csekélyebb tengerszint feletti magasságban élő *Polyommatus daphnis* és több ezer méteres magasságban élő közeli rokona, a *P. marcidus* szárnypikkelyeinek szerkezete jelentős mértékben különbözik. A *P. daphnis* pikkelyei háromdimenziós fotonikus kristályt alkotnak, a *P. marcidus* pikkelyeiből viszont teljesen hiányzik ez a finomszerkezet. A *P. daphnis* ennek következtében élénk kék színben ragyog, míg a *P. marcidus* tompa barna színű szárnya a kék fényt is elnyeli. Ez magyarázza, hogy utóbbi faj egyedei jobban fölmelegednek a magashegyek hideg levegőjén.

