

A lepkeszárny kémiai és fizikai színei

Bálint Zsolt¹ – Biró László Péter²

¹Magyar Természettudományi Múzeum

²MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet

A lepkék szárnyainak szín- és rajzolatgazdagsága mindenki számára nyilvánvaló. Így természetesnek vesszük, hogy a boglárka lepkék hímjei rendszerint kékek, a nőstényei barnák, fonákjukat fekete pöttyöcskék, narancssárga foltocskák és fémes boglárrok rajzolata díszíti. Azon se lepődik meg senki, hogy a magasabb hegyvidékeken élő Boglárkák között egyes fajok a havasokban „elfeketednek”. Mi lehet ennek az oka? Az, hogy ilyenkor nem a pikkelyekben levő festékanyag mennyisége növekszik, hanem a szerkezeti kék színt előállító nanoszerkezet tűnik el, és teszi láthatóvá magát a színtestet. Tehát a nappal repülő fajoknál a szárnyak pikkelyzete által rendelt színeknek és a rajzolatnak összetett a szerepe, és ez az összetettség alapvető fontosságú a kifejlett lepke egyedi életének minden mozzanatában.

A lepkeimágó testét és az abból kinövő függeléket zsindeyszerűen elrendeződő pikkelyek fedik. Szörbundává módosult pikkelyek borítják a fejet, a tort, a potrohot. Pikkelyek borítják a csápokat, az ajaktapogatókat, a lábakat; és a hártyás szárnyakat. Minden egyes pikkely saját sejtkezdeményből, még az egyed báb állapotában alakul ki. A pikkelyek igen sokfélék lehetnek a testtájakon és testrészeken elfoglalt helyzetükből függően. A csápok végén szerepük a szaglás, az ajaktapogatók belső oldalán az ízlelés, a potroh végén a tapintás-érzékelés, míg a testen és a szárnyon illatot árasztó és érzékelő speciális pikkelyek is vannak. Ezek mikro- és nanotartománybeli alakja és szerkezete igen sajátos, a fajra vagy a genuszra rendkívül jellemző.

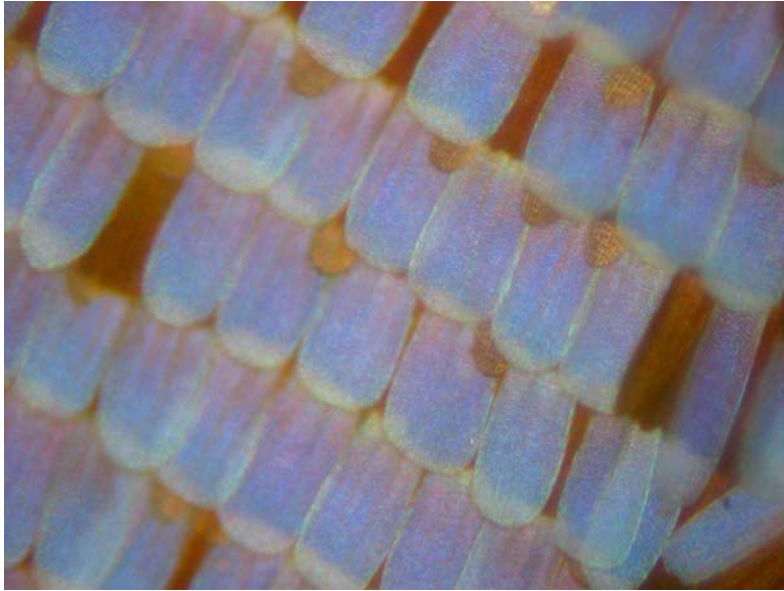
A lepke négy, vékony hártyás szárnyának mindegyikén megkülönböztetjük a színét és a fonákját. Ezeket két, zsindeyszerűen elhelyezkedő pikkelyréteg fedi. A hártyához közelebbi és az ahhoz simuló réteget nevezzük alappikkely-rétegnek, az erre fekvőt pedig fedőpikkely-rétegnek. Ezek a színpikkelyek. Közöttük a szárnyon elszórva vagy kisebb csoportokban illatpikkelyek is találhatóak, illetve hosszú szörré módosult pikkelyek. Szerepük az illatanyag minél hosszabb ideig való megőrzése, vagy ha ezek a test közelében vannak, akkor feltehetően az izomzat melegen tartása. (1. ábra).

Mivel célunk kizárólag a pikkelyek által fedett szárnyak rajzolatának és színeinek ismertetése és alkalmazásuk bemutatása, az alábbiakban csak a színeket hordozó vagy megjelenítő pikkelyekről lesz szó.

A színpikkelyek és színeképzés módszere

A színeket hordozó vagy megjelenítő pikkelyek alakja általában lapát alakú, hosszúságuk 150–250 µm, szélességük pedig 50 µm körüli. Keskeny és rövid nyéllal illeszkednek a szárny hártyájához, a kb. 1 µm vastag pikkelytesteknek pedig ugyanúgy van színe és fonákja, mint a szárny hártyájának. A színéről vizsgálva a pikkelyt, hosszanti gerincek és

keresztbordák tagolják, ablakos és rácsszerű szerkezetet formálva. Ez az ablakos rácsszerkezet függőleges oszlopokkal ízesül a fonák igen vékony, néhány μm vastagságú hártájához.



1. ábra. A hím csipkés boglárka (*Polyommatus daphnis*) szárnyainak felszínén megfigyelhető jellegzetes pikkelyzettség: a kék színű kerek végű fedőpikkelyek, alattuk az itt-ott kilátszó hullámos végű barna alappikkelyek, és köztük a boglárka-rokonúak (*Polyommatus*) tribuszára jellemző apró teniszütő alakú illatpikkelyek.

Az alappikkelyek rövidek és szélesek, végük többnyire lekerekített, míg a fedőpikkelyek hosszúkasabbak, végük hullámos vagy fogazott. Sokkal lényegesebb azonban az, hogy a pikkelytesteknek más-más a tartalma, amelyek már csak különféle elektronmikroszkópos technikákkal láthatók. Az alappikkelyek rendezettnek tűnő rácsozott szerkezetében, közel a hártájához vagy a hártájában nagy mennyiségű szintest foglal helyet. A fedőpikkelyek ablakos szerkezetű, és az ablakok alatt – sokszor csak keresztmetszetben láthatóan – egészen bonyolult többrétegű vagy szivacszerű szerkezet rejtőzik.

A színek képzés két teljesen eltérő úton történik: a pigmentek (festékanyagok) a rájuk eső fehér fényből szelektíven elnyelhetnek tartományokat. Például, ha a kék hullámtartomány nyelődik el, akkor az illető festékanyagot sárgának fogjuk látni (ezért találták ki nagyanyáink idejében a kékítőt, ami a mosott fehér ruhához adva, annak sárgás színét tompította, és a ruha „fehérebbnek” látszott). Az egyes hullámtartományokban jelentkező elnyelés azon alapul, hogy a különféle molekulák, szerkezetüknek megfelelően, más-más energián (hullámhosszon) képesek elnyelni a fényt. Ezt a színek képző mechanizmust szokás „kémiai” színnek is nevezni. Ugyanis az elnyelt hullámtartomány megváltoztatásához a festékmolekula szerkezetét kell átalakítani kémiai úton. Az így elnyelt energia rendszerint hő formájában jelentkezik. Ezért van az, hogy a napra kitett fehér papír (nincs elnyelés a látható tartományban) kevésbé melegszik fel, mint a fekete papír (nagy mértékű az

elnyelés a látható tartományban) és ezért viselünk szívesebben nyáron világos színű öltözéket.

A másik lehetőség az úgynevezett „fizikai” (szerkezeti) szín alkalmazása. Ez olyan méretű szerkezeteken alapul, amelyek képesek szelektív kölcsönhatásba lépni a látható fényvel. Mivel a látható fény hullámhossza a 400–750 nanométeres ($1\text{ m} = 1\,000\,000\,000\text{ nm}$) tartományba esik, nem meglepő, hogy azoknak a szerkezeteknek, amelyek képesek ezzel a fényvel szelektív kölcsönhatásba lépni, a jellemző méretei a 100 nanométeres tartományba esnek, azaz *nanoszerkezetek*. Megváltoztatva a jellemző nanoszerkezetek méreteit, megváltoztatható az a hullámtartomány, amellyel szelektíven kölcsönhatnak. Például két eltérő optikai tulajdonságú anyagból létrehozott multirétegben (*nanoarchitektúra*) megváltoztatva a rétegek vastagságát, a multiréteg által visszavert fény hullámhossza a pirostól a kékig változtatható. Bár előfordulnak az élővilágban ilyen, viszonylag egyszerű szerkezetű fizikai színt adó nanoarchitektúrák is, a lepkéknél gyakoribbak az ennél sokkal bonyolultabb háromdimenzióban (3D) strukturált nanoarchitektúrák.

A nanoarchitektúrák által adott szín kétségtelen előnye a pigment alapú színekkel szemben az, hogy a pigmentek bonyolult biokémiai szintézisláncok végén alakulnak ki. Ezért a pigmentmolekula színének megváltoztatása csak a teljes szintézisfolyamat jelentős átalakításával lehetséges. Ezzel szemben a szerkezeti színek esetében a 3D nanoarchitektúra geometriai jellemzőinek kisméretű megváltoztatása is érzékelhető színeltolódást okoz. Ennek a jelenségnek igen szép példái a kék színű lepkéfajok, amelyek eltérő kék színeit hasonló, bizonyos mértékig a sószóró lyukmintázatát idéző („pepper-pot”) elemekből felépülő 3D nanoarchitektúra adja. Az ilyen típusú nanoarchitektúrákat, amelyek képesek visszaverni a fény bizonyos hullámhossztartományait, fotonikus kristályoknak nevezik. A név a szilárdtestfizikából jól ismert kristályokra utal, amelyekben a 3D atomi rend következtében alakul ki a viselkedésüket meghatározó elektronszerkezet: a fémes, félvezető, vagy szigetelő tulajdonságok. A fotonikus kristályok jellemző méretei mintegy ezerszeresen nagyobbak, mint a szilárdtestek kristályszerkezetét leíró méretek.

Az alap- és a fedőpikkelyek együttes játéka adja a színt. Amikor magát a kémiai színt látjuk – az rendszerint fekete, barna, piros vagy sárga, vagy ezek valamilyen árnyalata. Ez azonban nem is olyan egyértelmű, hiszen a színeket sokszor valamilyen szerkezet „támogatja”, vagy éppen az hozza napvilágra. A fedőpikkely testében levő szerkezet pedig a fotonikus kristály elvén működő többdimenziós nanoarchitektúra, ami már magában is képes a fizikai szín megjelenítésére, de az alappikkelyben levő festékanyag ennek intenzitását képes növelni, vagy éppen csökkenteni, például azzal, hogy a fény véletlenszerűen szóródó részét elnyeli és ennek eredményeként, jobban kiemeli a szerkezeti színt.

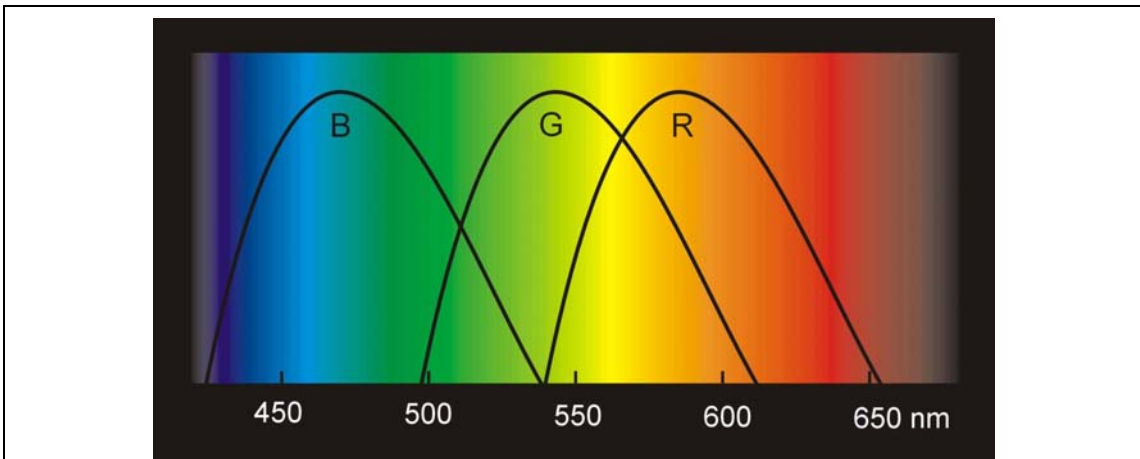
A színek

A színek szerepét és „előállításuk” módját a lepkék (*Lepidoptera*) rendjének általunk leginkább ismert és vizsgált családján szemléltetjük. Ez a család a kozmopolita lángszínérfélék (*Lycaenidae*), amely maga igen nagy fajszerű és életmódjában rendkívül változatos. Rendszertana sem kiforrott. A bemutatás során még ezen a családon belül is csak a boglárkarformák (*Polyommata*), a farkröpéformák (*Theclinae*) és a

lángszinérformák (*Lycaeninae*) alcsaládjára szorítkozunk (**2. ábra**). Ezek feltételezhetően közös őstől származnak, tehát monofiletikusak. Ez a szűkítés a monofília tagjaival (tribuszok, génuszok és fajok) kapcsolatos élő- és élettelen jelenségeket jobban érthetővé teszi, és a párhuzamos, illetve az egyedi folyamatok nagyobb biztonsággal felismerhetők. A kémiai és fizikai színek lepkék általi alkalmazását a kifejlett egyedben (imágó) keresztül próbáljuk érzékeltetni. Ezzel nem azt kívánjuk sugallni, hogy a többi fejlődési alak esetében (pete-hernyó-báb) a színek nem játszanak szerepet, de szerintünk az imágók mutatják ebben a legnagyobb változatosságot. A színek skáláját a hullámhosszuk szerint legmélyebbtől kezdve a legmagasabbik felé haladva járjuk be (**3. ábra**).



2. ábra. A bemutatott alcsaládok egy-egy jellegzetes képviselője, múzeumi példányok alapján: a = lángszinérformák (*Lycaeninae*): Aranyos lángszinér (*Lycaena virgaureae*); b = farkröpéformák (*Theclinae*): japán farkröpér (*Neozephyrus japonicus*) és c = boglárkaformák (*Polyommatae*): ikarusz boglárka (*Polyommatus icarus*) (a lepkék nem méretarányosak).



3. ábra. A látható fény spektruma és az emberi szem érzékenységi görbéi (B = kék; G = zöld; R = vörös).

A lángszinérfélék szárnyain a *fekete* szín három helyen figyelhető meg: (1) a szárnyak felszínén kormozottságot eredményez, (2) a szárnyakat keretbe foglalja és (3) a fonák pöttyös vagy hullámos rajzolatát adja. Az első eset a valódi melanizmus példája: a lepkeegyeden megszorodnak a fekete pikkelyek, ez sötétebb megjelenést eredményez. A második jelenség úgy tűnik a családban általános. A szárnyak felszínén levő alapszín keretezi, és vélhetőleg abban segít, hogy a sebesen repülő lepke határozott alakú optikai

jelzést adjon az irányfüggő fizikai szín segítségével. Feltételezhető, hogy a fekete szín a lángszinérféléken részben fizikai. A melanin természetes színe a barna. A családot még nem vizsgáltuk ebből a szempontból, de más nappali lepkecsaládok, például pillangófélék (*Papilionidae*) esetében kimutatták, hogy az egészen mélyfekete szín a fotonok szinte tökéletes elnyeléséből adódik, ami egyrészt a megemelkedett melanin-tartalomnak, másrészt a pikkelyek szerkezetének köszönhető. A fényelnyelő pikkelyszerkezetek egészen különlegesek, csapdába ejtik a visszaverődő fény fotonjait is. Tulajdonképpen a mélyfekete lepkeszárny fekete lyukként működik. Egyáltalában nincs kizárva, hogy ez a jelenség előfordul a lángszinérféléken is.

A barna többnyire alapszínként fordul elő, vagy a fonák rajzlati elemeiben. Ez a lángszinérfélék jellemző kémiai színe, és többnyire a nőstényekre jellemző, akiknek több energiára van szükségük petéik beérleléséhez. A fedőpikkelyekben nincs fotonikus kristályszerkezet, így a szárnyakat nagy energiamennyiség képes elérni. A barna szín esetében írjuk le a színvesztés (diszkoloráció) jelenségét, amikor egy kék színű faj barnává változik. A jelenség elterjedt mind a három általunk vizsgált alcsaládban. A színvesztés esetében úgy keletkezik a barna szárnyfelszín, hogy a kék vagy más szerkezeti színt adó fedőpikkelyréteg testében a nanoszerkezetek eltűnnek, és az alappikkelyekhez hasonlóan üressé válnak. A színvesztés jelensége nemcsak a lepkeegyedek hőháztartására, hanem az adott populáció szerkezetére is nagy hatással van. Az addig őrjáratkozó kék hímek területörzövé válnak, az állomány kis területre sűrűsödik. Ez a stratégia sokkal hatásosabb olyan körülmények között, amikor a viszonyok csak rövid repülési és szaporodási időre adnak lehetőséget.

A lepkék a sajátságos, az emberi szem számára még nem érzékelhető *ibolyántúli* színtartományban is látnak. Ennek megfelelően a szárnyak felszínén olyan foltok és rajzolatok jelennek meg, amelyek csak különleges technikai felszereltségű laboratóriumokban vizsgálhatók. Bár az ibolyántúli sugarak az élő szövetekre romboló hatással vannak, az utóbbi években a kutatók számára egyértelművé vált, hogy a lepkék ezt a tartományt is intenzíven használják. A már nem káros 250–300 nanométer körüli tartományban több olyan fajon is felfedezhetünk szabad szemmel nem látható foltmintázatokat. Ezek a rokon fajok esetében eltérőek, különösen a nőstényeken – ezért minden bizonnyal a hímek számára jelentenek fontos információt jövőbelijük biztosabb felismeréséhez.

A három alaposabban vizsgált alcsalád imágóinak szárnyfelszíne többé-kevésbé irányfüggő élénk *ibolya*, *kék* vagy *zöld*. Ezek olyan finoman „hangoltak”, hogy ugyanolyan színű közel rokon faj nem fordul elő ugyanakkor és ugyanazon a helyen. Ha két faj nagyon hasonló spektrumú, akkor repülési idejük nem fedik egymást. Így az előbb repülő faj hímjei már kopottak és „más színűek”, amikor a később rajzó rokonfaj friss hímjei megjelennek az élőhelyen. A hím lepkék az élőhelyen őrjáratoznak, a nőstény a neki megfelelő színű hím után repül, és ha az illat alapján is felismeri, akkor megkezdődik a nászrepülés. A lombkoronaszintben élő fajok hímjeinek egy része az elülső szárny fonákján olyan kék reflektort „visel”, ami csak a lepke röptében látható – és csak alulról. Ilyenek a farkröpérfarmák alcsaládját képviselő farkincás-rokonúak (*Eumaeini*). A hímek a leveleken üldögélnek és figyelik a környezetüket. Ha észrevesznek egy nőstényt, amely szárnyainak felszíne kék és már jó messziről látható, „megmutatják” magukat: sebes köröket tesznek a levegőben (**4a. ábra**). Ha a nőstény felismeri a hímeket kék reflektoráról, és ha közlőről még az illata alapján is felismeri – itt is

megkezdődhet a nász. A fonákon is előfordulnak az élénk vagy a csillogó, sőt egészen különlegesen matt zöld vagy kék színek. De ezek szerepe a rejtőzködés segítésében keresendő. A fémes zöld szín harmatos füvekben, a matt zöld meg a lomb között kiválóan képes elrejteni a lepkét.

Meg kell, hogy említsük a fonák csillogó pöttyökből vagy foltokból álló rajzolatát. Ezek erdei fajokon fordulnak elő, barna vagy valamilyen sötét alapon. Szerepük a lepke elrejtése lehet a sötét, árnyakkal és fényfoltokkal, csillogó esőcseppekkel tarkított környezetben. Viszont a hátulsó szárny fonákjának alsó sarkában csillogó kékszínű pikkelyek szinte biztosan a támadó elriasztására szolgálnak. Különösen látványos ez a jelenség a már említett farkincások esetében, ahol a hátulsó alsó csücske lebernyegszerűen eláll, farkocskák díszítik: és azt a hatást kelti, mintha egy nagy darázs, hangya vagy szitakötő nézne ránk. Ez az egyik legmeghökkenőbb alkalmazása az „élő” szerkezeti színeknek (**4b–c. ábra**).

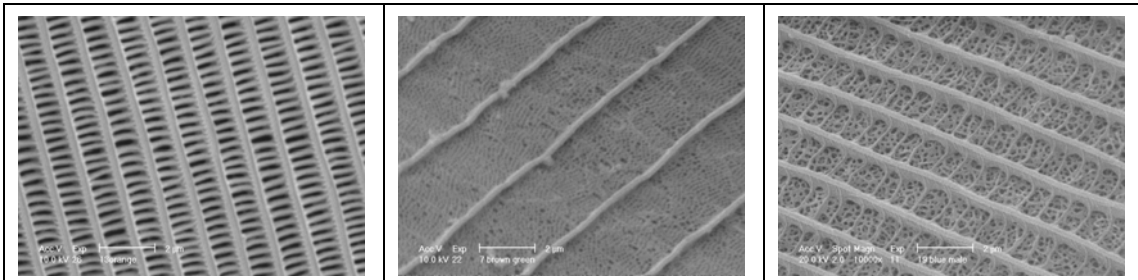


4. ábra. Az amerikai igazmondó kalárka (*Atlides halesus*, farkröpérfarmák) hímje különféle helyzetekben: a = a virágra érkező hím testéről és szárnyainak felszínéről ragyog a szerkezeti szín; b = táplálkozás közben kivillan az elülső szárny fonákjának kék reflektora, miközben a hátulsó szárnyait egymáshoz dörzsölgeti; c = ugyanaz a példány fölül nézetből, meghökkenítő szitakötő vagy hangyaszerű megjelenést kölcsönöz a hátulsó szárny belső szögletéből kiálló lebernyeg és a kis farkinca.

A sárga-arany-piros tartománya a vizsgált alcsaládokban mintha a lángszinérformákra korlátozódna. Felehetően azért, mert a lángszinérszárnyak festékanyaga nem elsősorban a barna melanin, hanem a narancssárga karotin vagy a melaninnek egy olyan válfaja, amit még nem kellőképpen ismerünk. Ezért lett a család neve is lángszinér (vagy tűzlepke, *3a. ábra*). A „lángolás” szinte kizárólag a hímekre korlátozódik, mert a nőtények többnyire egészen barnák vagy narancssárgák. A sárga szín is csak a lángszinérfélék fonákján jelenik meg, ami megint arra enged következtetni, hogy ez a festékanyag a sajátjuk.

A hímek szárnyainak felszíne pirosan-narancssárgán csillogó, aranyos-bronzos fényben ragyogó. Ezt a látványt a pikkelytestekben levő rácyszerű szerkezet okozza, amelyek elemei ritmikusan követik egymást. A lángszínű fajok pikkelytestei nincsenek kitöltve nanoméretű anyagokkal – a rács és a szintestek együttese adja a mindenki számára meghökkenően élénk színeket. A lángszinérek bizonyos ágazatai – elsősorban a hideg lápok vagy más hűvösebb területeken élők (sarkkör vagy havasok) lila színbe váltanak, vagy ők is eljártsszák a színvesztés jelenségét. Ez arra enged következtetni, hogy a pikkelyek benső szerkezetének változása nem igényel különösebb genetikai módosulást, és talán a meglévő alapszerkezetből igen könnyen előhívhatóak látszólag nagyon eltérő architektúrák. Érdekes módon a boglárkaformák képviselői szárnyaik felszínén inkább a kék, a farkröpérfarmák pedig a zöld színt részesítik előnyben. Ennek feltehetően oka az,

hogy míg az előbbieik pikkelyein a hosszanti gerincek magasak, az ablakocskák mélyen ülők és alattuk a nanoszerkezet szivacsos rétegű, addig lángszinérformák fedőpikkelyein a gerincek alacsonyak, ablakocskák gyakorlatilag nincsenek és a pikkelytest nanoszerkezetei inkább perforált rétegekből állnak. Természetesen nem lehet éles határt szabni a két jelenség között, de úgy tűnik, hogy az egymásra épülő rétegek száma és kitöltöttségük könnyben változtatható, mivel a lángszinérformák egyik ágazata, a napröpérrokonúak (*Heliophorini*) ezzel a technikával az általunk látható színtartomány minden színét képesek megjeleníteni (5. ábra).



5. ábra. A lángszinérfélék három fő fedőpikkely típusainak felszíne: a = aranyos lángszinér (*Lycaena virgaureae*) rácsos szerkezete; b = japán farkröpér (*Neozephyrus japonicus*) alacsony hosszanti gerinccel; c = ikarusz boglárka (*Polyommatus icarus*) magasabb hosszanti gerinccel, „sószóró” szerkezettel.

A fehér és az ezüstszín rendszerint a szárnyak fonákján jelenik meg. Szerepük így minden bizonnyal a nyugalomban levő példány minél eredményesebb elrejtése a környezetben. A klasszikus boglárka szárnyfonák fehér vagy nagyon világosszürke, amiben az elszórt fekete rajzlati elemek hatékonyan szolgálhatják azt a szerepet, hogy az optikailag igen bonyolult környezetben (különböző megvilágítású, és színű fűszálak, apró levelek stb.) ne a lepke jelenjen meg éles képként a környezetben. Ezt a szerepet játszhatja talán még hatásosabban az ezüst szín, amely inkább csak magasabb hegyvidéki boglárkafajokon figyelhető meg. Egészen különös a sivatagos-félsivatagos helyeken élők fonákján látható ezüstös foltok szalagokat alkotó rajzolat. Ebben az esetben is valamiféle optikai csalódást idézhetnek elő a fényes pikkelyek a puszta, napfénynek erősen kitett élőhelyeiken. A fehér szín a boglárkákon eddigi ismereteink szerint nem kémiai – az egymásra boruló színanyag nélküli kitinpikkelyek keltik a papírszerű hatást. Tehát a szín fizikai, és a kitin szerkezetéből adódik. Az ezüst szín pedig úgy keletkezik, hogy az átlátszó (színtelen) pikkelyeken minden egyes rétegben a látható fény teljes spektrumában fellépő visszaverődés eredményeként nyolc-tíz réteg összesített hatásaként 60%-ot meghaladó visszaverődés is elérhető.

Zárszó

Mint sejtettük, a lepkefajok életében komoly szerepe van annak, hogy az imágók milyen színűek és milyen rajzolatúak. A nappal repülő lepkék esetében a pigment segítségével előállított kék vagy zöld szín igen ritka – viszont a szerkezetek segítségével ezeket a színeket nagyon egyszerűen képesek megjeleníteni és alkalmazni az ivarok közti kommunikáció, a rejtőzködés, az utánzás és a riasztás céljából. A többi színre is megvan

Természet Világa, 2009. november, 486-489.

a jól kialakult módszer, amelyet természetesen meghatároz a lepkék környezete és életmódja, és ebből fakadóan az, hogy milyen forrásokhoz képesek hozzájutni, azokat feldolgozni, és megfelelő módon alkalmazni.

Minél inkább belelát a kutató biológus és fizikus a természet – most a lepkék – titkaiba, egyre inkább elcsodálkozik azon a végtelen szabadságon, de mégis szigorú rendben és fegyelmen, és azokon „környezetbarát” technikákon, amivel az élővilág az élethez szükséges ismereteket és alkalmazásokat tovább örökíti. Módszerei olyanok, hogy az élet nem fogyatkozik, hanem sokszorozódik. Minél inkább szembesülnek ezzel, annál inkább meggyőződésükké válik: ez a mi igazi hivatásuk, és minden, amit teszünk, az életet kell, hogy szolgálja.

Megjegyzés

A munka az OTKA T-04297 és az EU6 BioPhot/012915 programok során elért eredmények alapján készült. Köszönetünket fejezzük ki Vértesy Zófia és Kertész Krisztián kutatótársainknak, akik nagyban hozzájárultak a programok sikerességéhez.