

(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 *strukturálszínek*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



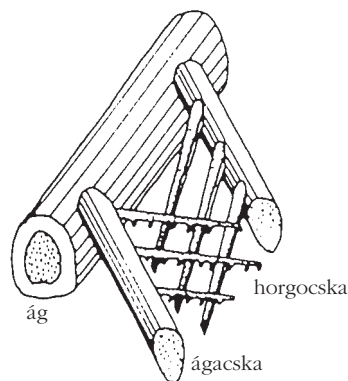
1. ábra. Kékszajkó

(kék) sávban a szóródás következtében jobban gyengül, emiatt a nagyobb hullámhosszúságú sáv intenzitása relatíve megnő. Szemünk a Napot ilyenkor piros színűnek érzékeli. A fényszóródás erősödik, ha nagy mennyiségű finom részecske kerül a felső lég rétegekbe. Példaként említhetünk két megtörtént eseményt is: 1883-ban a Krakatau vulkán kitörésekor a levegőbe került sok apró porszemcse különösen mélyvörös naplementét eredményezett, és ez a látványos jelenség több mint három évig fennmaradt.

Erdőtűzekkor a felhevült fákból szerves anyag párolog a levegőbe, zömmel apró gyanta- vagy olajcseppek formájában, ami szintén csodálatos naplementét okozhat. Ha az olajcseppek mérete 500 nm körül van, a Nap vagy a Hold zöld vagy kék színűnek látszik. A jelenséget észlelték 1950-ben, amikor egy nagy kanadai erdőtűz után hatalmas felhő húzódott át az Atlanti-óceánon Európába.

Az élő természetben a növények között a Tyndall-kék szerkezeti szín elég ritka, gyakori azonban az állatvilágban. Az alapvető biológiai szórócentrumok a szövetekben található levegővel telt üregek vagy zsírcseppek, protein, keratin vagy guanin kristályok, amelyek általában sötét melaninréteg felett helyezkednek el.

3. ábra. Sziámi macska



2. ábra. Madártoll vázának szerkezete

A legtöbb nem irizáló kék szín, például a kékszajkó (1. ábra) színe, tiszta szórás eredménye. A zöld és a bíbor szín kialakulásában is szerepe lehet fényszórási folyamatnak, ha a szóródás sárga, illetve piros színt eredményező abszorpcióval kombinálódik. Ilyenkor a szórócentrumokat tartalmazó réteg mögött pigment is jelen van. A közkedvelt barátpapagáj zöld színe hasonlóan alakul ki. Tiszta kék színt akkor látunk, ha a melaninréteg fekete, amely a kéknél kevésbé szóródott összes fényt elnyeli. A madártollak esetében a színezés az úgynevezett ágacska felületén történik.

A 2. ábrán egy madártoll vázának szerkezetét mutatjuk be. A kampókkal ellátott ágacska egymást átfedve az ágak között helyezkednek el. Az ágacska három különböző anyagréteg fedé: felül egy körülbelül 10 µm vastag, átlátszó szaruréteg van. Ez alatt helyezkednek el a szórásért felelős cellák, legalul pedig egy sötét melaninréteg található. A cellák szabálytalan alakú, 30–300 nm átlagos méretű, levegőt tartalmazó üregekből állnak. Az üregek az aktuális szórócentrumok. Három egyszerűen elvégezhető kísérlettel könnyen meggyőződhetünk a fenti szerkezeti felépítésről:

a) Ha a kék tollat alkoholba mártjuk, a légbuborékok folyadékkal telnek meg, törésmutatójuk megváltozik. Ennek következményeként a kék szín eltűnik, a fekete melanin válik láthatóvá. Az alkohol elpárolgásával a toll visszanyeri eredeti kék színét.

b) A toll elveszíti kék színét akkor is, ha kalapáccsal szétroncsoljuk a cellaszerkezetet.

c) Ha a melaninréteget hidrogén-peroxiddal kifehérítjük, a kék szín akkor is eltűnik. Ismét megjelenik azonban, ha az ágacska hátoldalát feketére festjük. Ez azt jelenti, hogy a hidrogén-peroxid a szórócentrumokban nem tett kárt.

Szilva, kökény, kék szem

A vizes közegben jelenlévő protein-, zsíradék részecskék, illetve rostos szövet finom keverékén történő fényszóródás következménye a szem kék színe. Nemcsak embereknél gyakori, hanem néhány állatnál, például a 3. ábrán látható sziámi macskánál is megfigyelhető. A szivárványhártyáról való szóródással létrejövő szép kék szín kialakulását háttérként segíti a sötét melanint tartalmazó *uvea* réteg. Magunk is előállíthatunk hasonló módon kék színt, ha kevés tejet



4. ábra. Kőkény

öntünk fekete asztalra. A tejben lévő zsírcseppek mérete éppen akkora, hogy a kék fény szóródik rajtuk, a fehér fény többi alkotóját pedig a fekete asztal elnyeli.

A kék szem korrall járó fakulása a szóró részecskék méretnövekedésének eredménye. A nagyobb szórócentrumok jelenlétében ugyanis a kék Rayleigh-szórás helyett egyre inkább a fehér Mie-szórás válik uralkodóvá [3].

5. ábra. Szitakötő



6. ábra. Házi légy



A szilva és a kőkény (4. ábra) szép kék színüket annak köszönhetik, hogy a fény a felületüket borító vékony viaszrétegen szóródik. Ezt a réteget akár a kezünkkel is letörölhetjük, ekkor a hamvaskék színük eltűnik, s megfigyelhető a fehér fény többi összetevőjét elnyelő sötétbarna háttér.

Fényinterferencia

A jelenség: két vagy több hullám szuperpozíciójával létrejövő hullámjelenség. Az eredő hullám intenzitását a szuperponálódott hullámok fázisa és polarizációja határozza meg.

A biológiai rendszereknél megfigyelhető *irizáló színek* többsége *többrétegű szerkezeten* kialakuló *vékonyréteg-interferencia* eredménye. Az irizáló színezés szivárványszínű jelenség, különböző színeket látunk attól függően, hogy milyen szögből nézzük a felületet. Ugyanezt tapasztalhatjuk vékony szappanhártyák esetén is. A szappanhártyára eső fehér fény a hártya első és hátsó felületéről visszaverődve úgynevezett vékonyréteg-interferencia eredményeként színeire bomlik.

A növényvilágban az interferenciaszínek ritkák, csupán néhány moha, illetve nedves tengeri alga esetén figyelhetők meg. Az algák kiszáradás után elveszítik irizáló tulajdonságukat [2]. Az állatvilágban azonban gyakrabban előfordulnak irizáló színek, rovarok, bogarak, madarak, sőt emlősök között is találkozhatunk velük.

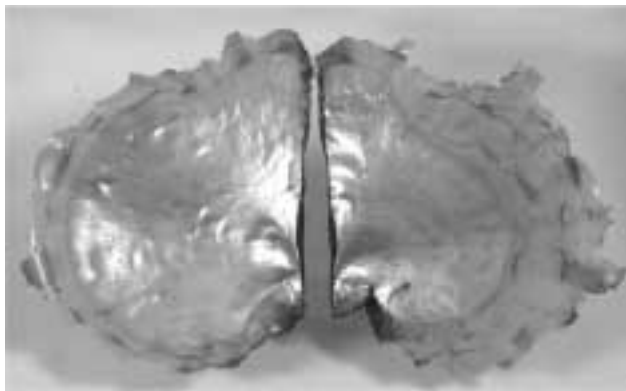
Szitakötők, legyek

A szappanhártyák, illetve vízben úszó olajfolt felületén is megfigyelhető egyrétegű interferencia eredménye néhány rovar, bogár átlátszó szárnyának fémes fénye. Szép példa erre a szitakötő és a házi légy. Ha a szárny vékonyabb, mint 50 nm, akkor már nem látszik színesnek. A szárny belső rétegében ugyanis szinte nem lép fel útkülönbség a találkozó hullámok között, s az optikailag sűrűbb közegről történő visszaverődéskor fellépő π fázisugrás minden színre gyengítő (kioltó) interferenciát eredményez.

Érdekes, hogy az 5. ábrán látható szitakötő esetében nemcsak a szárny, hanem testének egyes részei is biológiai festés miatt színesek. A testen tapasztalható kék színt fényszórás okozza. A rovar a fejlődése egyik fázisában ugyanis kámfort választ ki magából, ami vékony rétegben befedi testét, s a benne lévő részecskéken a kék fény szóródik. A vastagabb szárnyak irizáló interferenciaszíneket mutatnak. A 6. ábrán látható házi légy szárnya 500 nm vastag.

Kagylók, csigák

Vékonyréteg-interferencia okozza a kalcium-karbonát tartalmú kagylók csillogását, az igazgyöngyök színét, a tengeri kagylók és csigaházak gyöngyházfényét is. Egy kagyló irizáló belső felületét mutatja a 7. ábra.

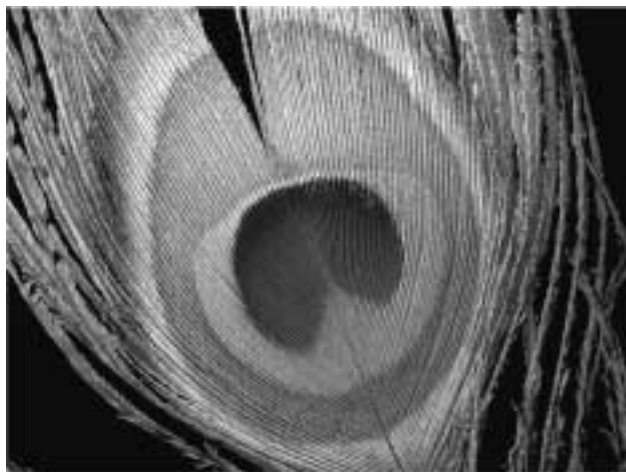


7. ábra. Kagyló belseje

Páva

A pávatoll (8. ábra) színei irizáló színek, változnak, ha a tollat forgatjuk. A színek kialakulásának mechanizmusa már évszázadokkal ezelőtt sok tudóst foglalkoztatott (*R. Hooke, I. Newton, Rayleigh*), de keletkezésükre elfogadható magyarázat csak a 20. században született. A szerkezetvizsgálati módszerek fejlődésével manapság egyre finomabb felbontásban ismerhetjük meg a biológiai szerkezeteket, s ennek megfelelően egészíthetjük ki korábban megfogalmazott megállapításainkat a színek keletkezését illetően. Az utóbbi 10 évben derült fény a nanoskálán építkező élővilág lenyűgöző, változatos szerkezeteire, az úgynevezett fotonikus kristályokra, amelyek a látható fénnel kölcsönhatva eredményezik azt a színgazdagságot, amelyet különösen szembeűnően a páváknál és az irizáló lepkéknél tapasztalhatunk. A tollakon, a szárnyakon gyakran megfigyelhető olyan szerkezet, amely a fény hullámhosszával összemérhető vastagságú, periodikusan ismétlődő, változó törésmutatójú rétegekből áll. A felső rétegre eső fény az egyes rétegekben történő többszöri visszaverődés és fénytörés után szemünkben *egy adott hullámhosszra* erősítő interferenciát eredményez. A természet gyakran a kék szín előállításánál él ezzel a lehetőséggel.

8. ábra Pávászem



A nanovilágban alkalmazott terminológiával élve azt mondhatjuk, hogy az ilyen szerkezet, mint egydimenziós fotonikus kristály, erre a frekvenciára tiltott átmenettel rendelkezik. Megjegyezzük, hogy a színek keletkezésének pontos leírásakor a szilárdtestfizikából megismert sávmélethez hasonlóan kezelik a fotonikus kristályok és a fény (fotonok) kölcsönhatását. A fotonok mozgása a fotonikus kristályokban hasonló az elektronok kristályos anyagokban történő mozgásához. Ezért az egy adott szerkezetről történő nagy intenzitású szelektív fényvisszaverődést úgy értelmezhetjük, hogy az ilyen frekvenciájú fény nem terjed a fotonikus kristályban, erre a frekvenciára tiltott sáv jelenik meg. A továbbiakban itt inkább a középiskolában használatos fizikai optikai megfogalmazásokkal élünk, amelyekkel szintén értelmezhető a jelenségek.

Kolibri

A kolibrít (9. ábra) a „természet drágakövének” is szokták nevezni. Gyönyörű színeinek köszönhetően úgy tűnik, mintha mindig izzásban, ragyogásban lenne.

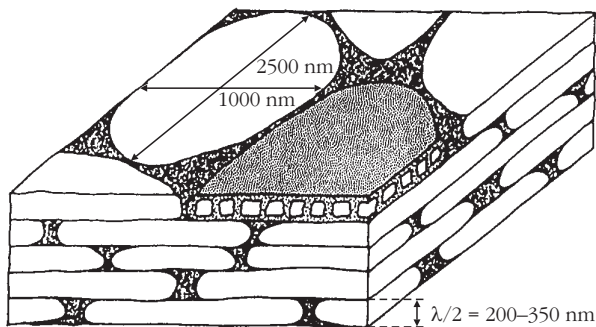
A madártollak esetén a színezés az ágacskák felületén jön létre. A kolibri szárnyán lévő $200 \times 100 \mu\text{m}$ méretű ágacskákat $1 \times 2,5 \mu\text{m}$ nagyságú, ovális lemezek százaiból álló mozaikréteg fedi, amint az a 10. ábrán látható. A lemezek vastagsága és törésmutatója akár ugyanazon madár tollának különböző helyein is nagyon változatos lehet. Ahol a törésmutató például $n = 1,85$, ott a tollak piros színűnek, ahol pedig $n = 1,5$

9. ábra. Kolibri



10. ábra. Mozaik mikroszerkezet a kolibri szárnyán





11. ábra. A kolibri tollának finomszerkezete

ott kéknek látszanak. Az összes lemez ugyanabból az $n = 2$ törésmutatójú anyagból áll, de a tényleges törésmutató az anyaghoz kevert levegő arányától függően ennél szinte mindig kisebb érték [2].

A 11. ábrán egy kolibri tollának felületi szerkezete látható. Ahogy a szín változik pirosból a zöldön át a kékig, a lemezek vastagsága egyre csökken. A lemezvastagság olyan, hogy az effektív optikai úthossz megközelítőleg a domináns szín hullámhosszának a fele.

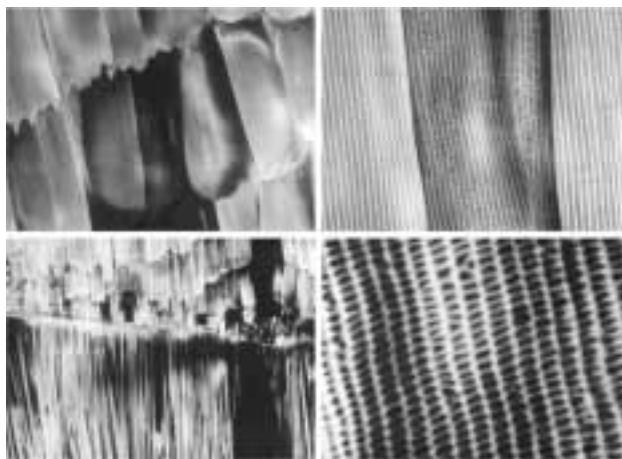
Emlősök

Az emlősállatok körme, haja, szeme szintén mutathat irizáló színeket. Sötét haj esetén a hajszalak felületén mikroszkóp alatt láthatunk csillogó interferenciaszíneket. Ha sötétben, például autóban utazva megvilágítjuk egyes gerinces állatok szemét, akkor az fémes fényűen csillog. Ezek a reflexiók a „choroid” rétegben kialakuló többrétegű interferencia eredményeként jönnek létre. A macska szeme 15 rétegű, és kedvező körülmények között gyönyörű fémes zöld reflexiót mutat. Kissé különböző szerkezet eredményezheti a kuttyák esetén tapasztalható sárga színt.

Lepkék

A legszebb, fémes fényű kék színeket (metáلكék) a lepkéknél figyelhetjük meg, amely eredete néhány *Morpho* családba tartozó trópusi lepkefajnál dominánsan vékonyréteg-interferencia eredménye [2].

Manapság nagy igyekezettel kutatják a lepkék színezési technikáját, a nanoszerkezetek megismerésével szinte naponta tesznek újabb és újabb felfedezéseket e téren. A *Fizikai Szemlének* e számában Márk Gézáék tollából is olvashattunk a legújabb felfedezésekről, ezért itt most csak a fotonikus kristályok megjelenéséig megszületett eredményekről számolunk be. A korábbi elméletek kissé egyszerűsítve, többrétegű vékonyréteg-interferenciával magyarázzák az irizáló kék keletkezését, amely az azóta megismert valóságnak csak egy része. A finomabb részletek felderítése újabb mechanizmusok működését is tisztázta, így az irizáló színek kialakításában más felderített struktúrákon (kétdimenziós fotonikus kristályok) történő diffrakciónak is szerepet tulajdonítanak [5].



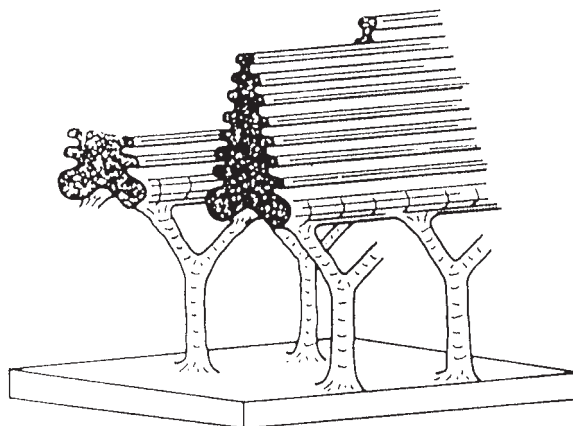
12. ábra. Pikkelyek szerkezete boglárkalepke szárnyán

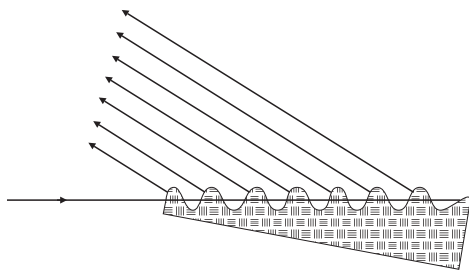


13. ábra. A Dél-Amerikában honos *Morpho* lepke

A pikkelyréteg (12. ábra) a lepkék szárnyán a szárnyfelületet lemezesen, a tetőcseréphez hasonlóan borítja. A Dél-Amerikában honos, 13 cm-es szárnyátávolságú *Morpho* (13. ábra) példányán a lemezek 0,1 mm méretűek, rajtuk körülbelül 200 nm széles bordázat látható. Ha a szerkezetet nagyobb felbontásban is szemügyre vesszük, akkor észrevehető a bordázat lábakon álló, háztetőszerű finomabb szerkezete (14. ábra). A bordák elrendezésének keresztmetszeti képén jelöltük a szárnyat érő és a felületről visszaverődő fény-

14. ábra. A *Morpho Retenor* szárnyának szerkezete





15. ábra. Többretegű interferencia a bordázaton

sugarakat (15. ábra). E példányon a bordák törésmutatója $n = 1,5$, a borda és a légrés vastagsága egyaránt 90 nm. Az effektív optikai útkülönbség (merőleges megfigyelés esetén) $90 \text{ nm} + 1,5 \times 90 \text{ nm} = 225 \text{ nm}$, amely éppen a 450 nm hullámhosszú kék fény hullámhosszának fele [2, 5].

Fényelhajlás (diffrakció)

Ha a hullámterjedés útjába a hullámhosszal összemérhető nagyságú akadály kerül, akkor az akadály mögött is észlelünk hullámjelenséget. A jelenség az elhajlás, vagy diffrakció. A fényelhajlás jelensége optikai réssel, ráccsal tanulmányozható. Ha a periodikus szerkezetről visszavert fény interferenciája eredményezi az elhajlási képet, akkor az elhajlás reflexiós diffrakciós rácsról történt. Periodikus szerkezeteken történő elhajlásra, diffrakcióra az élővilágban is találunk példát.

Indigókígyó

Az indigókígyó (16. ábra) levedlett bőre kétdimenziós, két különböző periodicitást tartalmazó diffrakciós rácsként működik (17. ábra). Az ismétlődő egységek egymástól való távolságát elektronmikroszkópos vizsgálatokkal meghatározták, és jó egyezést találtak a más módszerrel – a spektrometriás analízissel – kapott eredményekkel.

A levedlett bőr egy részletének külső felülete, a CD lemezhez hasonlóan, reflexiós diffrakciós rácsként

16. ábra. Az indigókígyó



működik. Jól látható a hullámos mintázat a 17.b ábrán, a hullámvonallal párhuzamos, illetve merőleges rácsparaméter $d = 1 \mu\text{m}$, illetve $d = 2,5 \mu\text{m}$ [4]. A viszonylag nagy rácsállandók ellenére, a kígyó erősen görbült bőrfelületéről a szinte mindig teljesülő sűrűdő beesés miatt, a bőr periodicitása kisebb látszólagos rácsállandóval jellemezhető. A szemünkbe jutó visszavert fény két különböző hullámhosszú összetevője együttesen eredményezi az indigó színhatást. A levedlett kígyóbőrrel szintelen anyagból készült replika (elektronmikroszkópos vizsgálathoz szükséges lenyomat), hasonló periodicitásának köszönhetően, szintén indigó színűnek látszott.

Összefoglalás

A teljesség igénye nélkül próbáltunk bepillantást nyújtani az élővilág színeit kialakító mechanizmusokba. Az érdeklődő olvasók az e témához kapcsolódó, napjainkban felfedezett kiegészítéseket a nanotechnológia eredményeiről szóló, internetes és nyomtatott folyóiratokban publikált cikkekből szerezhetik meg. A hazai kutatásokat is tartalmazó nemzetközi együttműködés legfrissebb eredményeiről a www.nanotechnology.hu című honlapról értesülhetnek.

Irodalom

1. Rajkovits Zsuzsanna, Illy Judit, *Fizikai Szemle* 51 (2001) 76–80
2. K. Nassau, *The Physics and Chemistry of Colors: The Fifteen Causes of Colors*. John Wiley & Sons, 1983.
3. Neugebauer Tibor, *Fizikai Szemle* 21 (1971) 33–48
4. E.A. Monroe, S.E. Monroe, *Science* 159 (1968) 97–98
5. Mohan Srinivasarao, *Chemical Reviews* 99 (1999) 1935–1961

17. ábra. Az indigókígyó bőrének szerkezete

