

Vznik a význam strukturálního zbarvení u brouků

Jednou z prvních věcí, která nás při zkoumání živé přírody zaujme, je obrovská barevná rozmanitost. Lidé si jí všimli pravděpodobně odedávna, ale teprve s příchodem Charlese Darwina a jeho náledovníků jsme si začali uvědomovat, co za touto pestrostí stojí. Zbarvení hraje důležitou roli při pohlavním výběru, v potravní biologii při interakcích mezi kořistí a predátorem (fenomény krycího nebo výstražného zbarvení), uplatňuje se také při koevoluci hmyzích opylovačů a kvetoucích rostlin. Zajímavou a neméně důležitou otázkou je, jak vlastně námi pozorovaná barva vzniká. Obecně rozlišujeme zbarvení pigmentová a strukturální (viz také Živa 2011, 1: 32–33 nebo 2012, 6: 300–301). Právě význam strukturálního zbarvení se v poslední době stále více zdůrazňuje, často v souvislosti s UV reflektancí (Živa 2012, 1: 25–28; 2013, 2: 79–81 a 2016, 2–4). Strukturální barvy bývají studovány ze dvou odlišných úhlů – z hlediska fyzikálního (optického) a z pohledu biologického významu. V následujícím textu bychom se chtěli pokusit o určité propojení obou přístupů a zároveň čtenáře seznámit s principy vzniku strukturálního zbarvení u brouků, kteří jsou v tomto ohledu dosud málo studovanou, přesto velice zajímavou skupinou.

Jedním ze základních typů strukturálního zbarvení je iridescence. Slovo bylo odvozeno ze starořeckého *iris* a následně z latinského *iris* – duha. Iridescentní znamená „mající nebo odražející duhové barvy“. Hlavní vlastností iridescentních povrchů je, že v závislosti na úhlu pohledu mění barevný odstín, zbarvení tedy funguje na principu interakce speciálních povrchových struktur s dopadajícími světelnými paprsky. Pokud elektromagnetická vlna dopadá na rozhraní dvou prostředí s rozdílnými optickými vlastnostmi, část vlny projde z jednoho prostředí do druhého a část se od rozhraní odrazí.

Existence a výsledná podoba zbarvení nezávisí pouze na jeho nositeli, ale hlavně na tom, kdo zbarvení interpretuje (vnímá). Toto téma bylo v Živě zmiňováno již několikrát (2014, 4: 180–183 a 2016, 2: 64–65), proto se omezíme jen na základní shrnutí. Světlo je elektromagnetické záření. Lidské oko vnímá pouze část elektromagnetického spektra o vlnových délkách ca 400–750 nm,

tj. oblast označovanou jako viditelné světlo (zkráceně VIS z anglického *visible*; podrobnosti lze najít ve slovníku pojmů na webovém stránce Živy). Paprsky o kratších vlnových délkách než z oblasti VIS se nazývají ultrafialové (UV) záření a světlo o delších vlnových délkách infračervené (IR) záření. Uvedené rozdělení však platí pro lidský zrak, kdežto mnoho organismů má hranice viditelného světla vymezené jinak. Někteří živočišové (např. mnozí ptáci) mohou vidět i pro nás neviditelné ultrafialové paprsky (především z oblasti tzv. blízkého UV záření, ca 320–400 nm), jiní zase nejsou schopni vnímat světlo o vlnových délkách, které my vidíme jako červené. Rozsah vlnových délek, jež živočich vnímá, tedy závisí v první řadě na citlivosti očních fotoreceptorů. Zjednodušeně můžeme říci, že každé vlnové délce odpovídá určitá barva spektra, ale výsledný barevný vjem konkrétního živočicha závisí především na zpracování zachyceného signálu nervovou soustavou. Foto-

receptory zodpovědné za barevné vidění nazýváme u komorového oka obratlovců čípky a jejich součástí jsou pigmenty, které se liší svými absorpčními vlastnostmi. V důsledku tak zodpovídají za to, jaké barvy oko vnímá. Bez ohledu na anatomickou stavbu oka je citlivost jednotlivých barevných fotoreceptorů napříč živočišnou říší velmi různorodá, což má za následek, že se skupiny organismů značně liší v rozsahu vnímaných barev.

Mechanismus vzniku strukturálního zbarvení

Základy studia strukturálního zbarvení a jeho vzniku pocházejí již z první poloviny 20. stol. (např. Michelson 1911 nebo Anderson a Richards 1942). V 60. a 70. letech 20. stol. byly zkoumány jednotlivé mechanismy vzniku strukturálních barev, nicméně jisté omezení v technických možnostech tehdejší vědy bránilo podrobnějšímu výzkumu (např. Hinton a Gibbs 1969). Na přelomu tisíciletí se s rozvojem a větší dostupností digitální fotografické techniky, elektronového mikroskopu a dalších moderních technologií výzkum strukturálního zbarvení vrátil do hledáčku biologů a fyziků (Parker a Martini 2006, Seago a kol. 2009 aj.). Brouci představují z hlediska studia strukturálního zbarvení jednu z nevhodnějších, ale paradoxně málo studovaných skupin živočichů. Paradoxně proto, že u nich nacházíme hned několik způsobů vzniku strukturálního zbarvení a zároveň je znám i výskyt strukturální UV reflektance. Nejprve si popíšeme fyzikální podstatu jednotlivých typů strukturálního zbarvení a charakteristické zástupce.

• Vícevrstevné odrazové plochy

Nejběžnějším a asi i nejznámějším způsobem vzniku zbarvení u brouků jsou vícevrstevné odrazové plochy (obr. 3 a 4). V kutikule brouků existuje mnoho tenkých vrstev, které tvoří odrazovou plochu. Pro vznik barev je důležité, aby se vzdálenosti

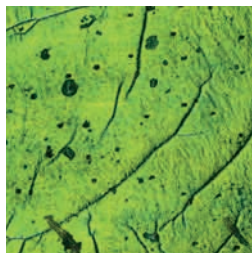
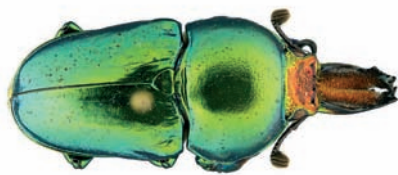
1 Krajník pižmový (*Calosoma sycophanta*), který se vyznačuje učebnicovým iridescentním zbarvením, patří mezi nejkrásnější zástupce našeho hmyzu.

2 Při detailním pohledu na jinak fádne hnědého svižníka *Calomera littoralis* zjistíme, že tělo má kovově lesklé. To způsobuje struktura kutikuly, obsahující mnohonásobné odrazové plochy. Drobné nerovnosti na povrchu však odrážejí světlo různým směrem, a proto se nám svižník z dálky jeví hnědý.



Vícevrstevné odrazové plochy

roháč rodu *Lamprima*



povrchová struktura kutikuly

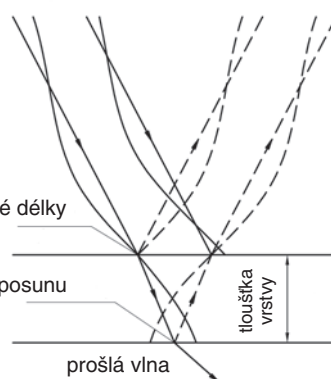
3

dopadající vlny (ve fázi)

odražené vlny (ve fázi)

změna fáze
o polovinu vlnové délky

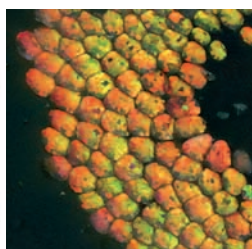
bez fázového posunu



4

Fotonické krystaly

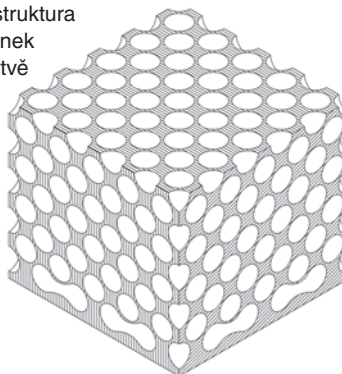
nosatec rodu *Pachyrrhynchus*



povrchová struktura kutikuly

5

trojrozměrná struktura
kulovitých dutinek
v chitínové vrstvě
kutikuly



6

Optická mřížka

chroustek *Serica sericea*

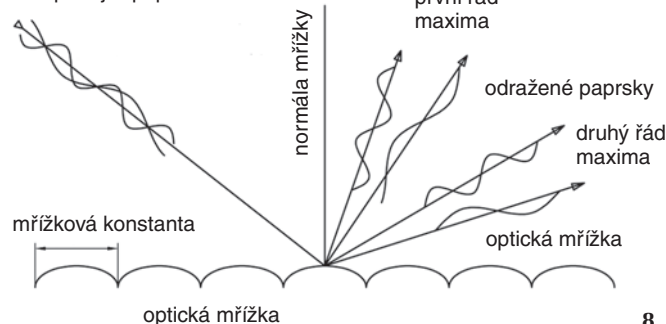


povrchová struktura kutikuly

7

dopadající paprsek

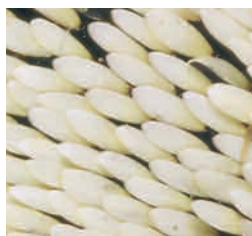
první řád maxima



8

UV reflektance

chroust rodu *Lepidiota*



zbarvení ve viditelném
světle (VIS)

povrchová struktura kutikuly

9

Zbarvení při UV záření (výsledná UV reflektance)



10

mezi vrstvami blížily jedné čtvrtině vlnové délky světelného paprsku a aby se pravidelně střídaly vrstvy s nižším a vyšším indexem lomu. Pokud tomu tak je, pomocí konstruktivní interference (vlnového skládání) vznikají iridescenční barvy. Jaká část spektra se odrazí, jak výrazné budou barvy (jejich sytost a jas), úhel odrazu jednotlivých barev i počet, záleží na hustotě a pravidelnosti těchto optických vrstev.

Zjednodušeně lze říci, že když se odrazová plocha skládá z velkého množství vrstev s malým rozptylem optických vzdáleností mezi nimi, odrazí se pouze paprsky z úzkého pásma vlnových délek. Díky tomu vnímá pozorovatel povrch jako jednobarevný, nicméně barevnost se výrazně mění s úhlem dopadu paprsků i s úhlem pozorování. Výsledné barvy jsou tak velmi syté a odrazová plocha se chová pro určité

vlnové délky jako zrcadlo. Naopak vícevrstevné plochy odrážející široké spektrum vlnových délek se oku jeví jako stříbrné nebo zlaté a podobají se zrcadlovému odrazu. Nejlepší příklady tohoto zbarvení můžeme najít u jihoamerických listokazů rodu *Chrysina*.

Vícevrstevné odrazové plochy ale nemusí vést jen k nápadně lesklému zbarvení. Pokud není povrch kutikuly hladký,



3 a 4 Mechanismus vzniku strukturálního zbarvení pomocí vícevrstevných odrazových ploch na kutikule roháče rodu *Lamprima* (obr. 3, foto J. Vlach) a schematické znázornění odrazu elektromagnetické vlny od tenké vrstvy (4). U každé vlny (dopadající plnou čarou, odražené přerušovanou) je nakreslen směr a profil. Je znázorněna konstruktivní interference – vlny se sčítají a vzniká barva o konkrétní vlnové délce. Blíže v textu. Orig. J. Vlach, upraveno podle: A. R. Parker (2000)

5 a 6 Strukturální zbarvení typu fotonických krystalů na kutikule nosatce *Pachyrhynchus congestus* (obr. 5, foto D. Vondráček). Na obr. 6 trojrozměrná struktura kulovitých dutinek v chitinové vrstvě kutikuly, zodpovědná za zbarvení tohoto nosatce. Orig. J. Vlach

7 a 8 Na vzniku strukturálního zbarvení se může podílet také optická mřížka – jako např. u chroustka druhu *Serica sericea* (obr. 7, foto J. Vlach), jehož starší název hedvábitec dokonale vystihuje optické vlastnosti kutikuly. Na obr. 8 schematické zobrazení rozkladu dopadajícího světelného paprsku na jednotlivé barvy pomocí optické mřížky. Orig. J. Vlach, upraveno podle: A. R. Parker (2000)

9 a 10 Význam UV reflektance pro zbarvení brouků není na rozdíl od motýlů tak známý. Jako příklad může sloužit asijský chroust rodu *Lepidiota*. Výřez (foto J. Vlach) zachycuje mikroskopické detaily povrchu kutikuly pokryté množstvím zploštělých chloupků, které jsou zodpovědné za odraz v UV spektru. Na obr. 10 je snímek stejného brouka pořízený fotoaparátém citlivým na UV záření. Foto P. Pecháček a J. Vlach

11 Díky svému zbarvení patří blízko-východní zlatohlávek *Protaetia (Cetonia) speciosa jousselini* mezi chovatelsky oblíbené brouky.

12 Krasec *Chrysochroa fulminans* zápasí s mravenci v parku uprostřed malajského hlavního města Kuala Lumpur. Kyselina mravenčí na povrchu kutikuly mění její optické vlastnosti i zbarvení. Po ošetření tekutinou jsou krovky brouka opět zářivě zeleně lesklé, kromě červené špičky krovek.

má na sobě různé nerovnosti (např. důlky), odrážejí tyto nerovnosti paprsky o různých vlnových délkách. Ačkoli se nám tedy objekt z dálky jeví matný, jeho barva se ve skutečnosti skládá z množství iridescentních



barev. Příkladem takového typu zbarvení jsou i naši hnědí svižníci (*Cicindela* nebo *Calomera*, obr. 2).

● Optická mřížka

Jde o soubor periodicky se opakujících povrchových struktur (vrypů, štěrbin, proužků, jemných rýh), jejichž vzdálenost je srovnatelná s vlnovou délkou dopadajících paprsků (také Živa 2012, 6: 300–301). Na každém elementu mřížky dochází k ohybu světla při dopadu a výsledný obrazec je dán konstruktivní interferencí. U živočichů se setkáváme výhradně s odraznou optickou mřížkou. Tento reflexní povrch nese pravidelné žlábky nebo drážky nanoskopických rozměrů, jež mohou být odvozené od mikrotrichií nebo přeměněných set (brv na kutikule). Optická mřížka funguje jako optický hranol a vytváří obrazy podobné duze. Každý její element způsobí rozptyl dopadajícího paprsku. Rozptýlené světlo se vlnově sečte nebo odečte s rozptýlenými paprsky z dalších elementů a tímto mechanismem se pak tvoří barvy (interferenční maxima). Vznikající iridescence má vždy formu jednoho nebo více uspořádaných spekter. Barvy následují ve stejném pořadí jako ve spektru viditelného světla – červená, oranžová, žlutá, zelená, modrá a fialová. Celý princip je lépe patrný z obr. 8. Zbarvení založené na principu optické mřížky mají např. někteří vrníci (Gyrinidae), střevlíkovití (Carabidae) nebo chroustek *Serica sericea* (obr. 7).

● Fotonické krystaly

Krystaly tvoří dvou- nebo trojrozměrné uspořádané mřížky o rozměrech menších než vlnová délka viditelného světla (viz obr. 5 a 6), např. u nosatců rodu *Pachyrhynchus*. Takové struktury jsou schopné řídit šíření světla stejným způsobem, jakým atomová mřížka řídí pohyb elektronů. Barvy se vytvářejí buď vysoce uspořádanou mřížkou nanoskopických kuliček, nebo její inverzní variantou – kulovými dutinkami v chitinové vrstvě. Oba způsoby přitom mají stejný optický efekt. Fotonické krystaly odrážejí syté barvy vzniklé na základě interference. Když pravidelně uspořádáme identické částice do formy mřížky nebo krystalu, světlo, které se o částice rozptýlí, interferuje a druhotně znovu vyzařuje do pravidelných směrů. V přírodě vznikají fotonické krystaly růstem, což znamená, že nejsou zcela dokonalé a tyto nedokonalosti pak ovlivňují jejich optické charakteristiky.

● Rozptyl

Další způsob vzniku barev na strukturálním principu se zakládá na rozptylu světla vzniklém interakcí světelných paprsků s látkami plynného nebo pevného skupenství. Pro zbarvení živočichů bývá důležitější lom světla na látkách s pevným skupenstvím, které jsou nejčastěji bezbarvé a hustě uspořádané do silných vrstev.

Jednotlivé částice fungují, zjednodušeně řečeno, jako různě orientovaná zrcadla. Podle principu vzniku rozlišujeme napůl uspořádané a neuspořádané soustavy. Příkladem první z nich je bílý rozptyl na povrchu motýlích křídel (např. u bělásků), kde se dopadající světlo rozptyluje všemi směry. To je zapříčiněno uspořádáním povrchu motýlího křídla, přičemž rozptyl v tomto případě často způsobují pigmentové granule, jež se nacházejí v jednotlivých šupinkách pokrývajících křídlo (pigmentové granule pohlcují pouze UV část spektra, pro ostatní vlnové délky fungují jako struktury způsobující jejich rozptyl).

Rozptyl světla je zodpovědný za vznik mnoha odstínů modré (případně červené) barvy v přírodě. Příkladem může být modrá barva oblohy, jež se připisuje rozptylu slunečního světla na molekulách plynů v atmosféře. Foton v tomto případě absorbuje molekula plynu, která je excitována na vyšší energetickou hladinu. Při návratu na původní hladinu molekula foton opět vyzařuje. Modré barvy se od částice šíří i mimo směr paprsku, kdežto červené většinou pouze ve směru šíření paprsku. To způsobuje, že v poledne vidíme oblohu modrou (pozorovatel stojí kolmo k šíření paprsku) a při západu Slunce se zbarvuje do červená (pozorovatel se nachází ve směru šíření paprsku).

Zbarvení způsobené rozptylem máme dobře zdokumentováno u ptáků, motýlů nebo váček. U brouků zatím nebyl tento způsob tvorby popsán, přesto ho uvádíme, aby byl náš přehled možností vzniku strukturálních zbarvení v přírodě úplný.

● Změna barvy

Některé druhy brouků dokážou ovlivňováním koncentrace vody v kutikule opakovaně měnit barvu krovek. Úpravou koncentrace vody se mění index lomu a optická tloušťka vrstvy, která lom způsobuje. Typickým příkladem takového zbarvení je nosorožník hercules antilský (*Dynastes hercules*), schopný během několika minut změnit barvu svých krovek z černé v nažloutlou. Svrchní vrstva kutikuly je u těchto brouků

téměř průsvitná, pod ní se nachází žlutá houbovitá vrstva a spodní vrstva kutikuly je černá. Pokud houbovitou vrstvu vyplňuje vzduch, stává se opticky různorodou a navenek se jeví nažloutlá. Když nasákne vodou, stane se opticky jednotnou a krovky se zdají černé.

Naprosto opačným způsobem probíhá změna ze zlaté na červenou u štítonošů, brouků z čeledi mandelinkovití (Chrysomelidae). Když se jedinec nachází v klidu, má kutikulu plně nasycenou vodou a krovky vykazují zlatou barvu. Pokud brouka vyrušíme, vytlačí vodu ven z kutikuly a barva se změní na červenou. Na rozdíl od předchozího druhu může tedy mandelinka měnit barvu svého těla aktivně a jde o formu obrany.

● UV reflektance

Mezi strukturální zbarvení patří také UV reflektance neboli schopnost odrážet paprsky z UV části světelného spektra. Z optického hlediska často jde o speciální případ bílého zbarvení a fyzikální princip jeho vzniku je obdobný jako u barev patrných ve viditelném světle.

Brouci představují z hlediska studia UV-reflektantních vzorů pozoruhodnou a v jistém smyslu jedinečnou skupinu (viz obr. 9 a 10). Tyto vzory u nich vznikají hned třemi odlišnými způsoby. První spočívá v odrazu UV paprsků od mikrotrichií, což mohou být miniaturní sety nahlučené blízko u sebe, které mají většinou bílou nebo výjimečně žlutou barvu. Při druhém způsobu hraje významnou roli bílá průsvitná látka (např. xylol), kterou brouci vylučují na povrch těla, kde následně tuhne. Třetím typem je odraz od kutikuly s průhlednou horní vrstvou kryjící spodní bílou nebo jemně nažloutlou UV-reflektantní vrstvu. U bezobratlých byla problematika UV reflektance dosud studována především na motýlech, co se týče brouků, existuje pouze několik publikovaných studií (např. Pope a Hinton 1977), příkladem jsou asijské chrousti rodu *Lepidiota*.

Funkční souvislosti

Vedle vizuální komunikace, jíž budou věnovány následující odstavce, má iridescentní a UV-reflektantní zbarvení i další funkce. Někdy jde pouze o vedlejší produkt morfologie povrchových struktur se zcela odlišnou funkcí – např. při termoregulaci, kdy brouci pomocí barvy povrchu těla dokážou regulovat tělesnou teplotu. Dalším příkladem mohou být kutikulární mikrostruktury určené ke snižování tření, adheze nebo ke zvyšování nesmáčivosti povrchu těla.

Iridescentní zbarvení se vyznačuje unikátními vlastnostmi, jež někteří živočichové mohou využívat při vnitrodruhové i mezidruhové vizuální komunikaci. Příkladem může být směrovost. Změna úhlu dopadajícího záření nebo úhlu postavení pozorovatele často způsobuje změnu barvy a intenzity záření. To má jednu velkou výhodu. Signály mohou být pro některé živočichy jasně viditelné a naopak neviditelné nebo nenápadné pro ostatní. Iridescentní zbarvení se jeví jasnější pod přímým než pod rozptýleným zářením. To umožňuje vyhledávat speciální světelné podmínky, při nichž zůstanou jedinci



13 Setkání s dlouhonožcem *Cheirotonus peracanus* (příbuzným chroustům) z hor pevninské Malajsie patří k zážitkům nejen kvůli jeho zbarvení, ale celkově neobvyklému vzhledu. Snímky P. Šípka, pokud není uvedeno jinak

kryptičtí pro predátory a zároveň nápadní pro jiné příjemce svých signálů.

Jako jiný příklad lze uvést jasnost a sytost iridescentních barev, které umožňují maximalizovat nápadnost vizuálních signálů tím, že brouk zvyšuje kontrast mezi zbarvením těla a okolím. Kontrast a nápadné zbarvení jsou využívány např. při mezidruhové komunikaci nebo varovném zbarvení. Další významnou vlastností iridescentního zbarvení je závislost odstínu, sytosti a jasu na optických vlastnostech nanostruktur vytvářejících barvy. I nepatrný rozdíl především v rozměrech a indexech lomu způsobí velké změny zbarvení mezi druhy i uvnitř jednotlivých druhů. Na vnitrodruhové úrovni může být rozdíl důsledkem změn abiotických faktorů (dostupnost světla, teplota, denní nebo roční období), nebo fyziologického stavu živočicha (množství tuku, stres).

Jak jsme již zmínili v úvodu, spektrální citlivost světločivných buněk se u jednotlivých druhů živočichů může lišit. Výsledně jsou určité barvy pro některé druhy prakticky neviditelné, ale pro jiné naopak výrazné. Tento jev v kombinaci s vlastnostmi iridescentního zbarvení umožňuje živočichům vytvářet spektrum vzájemných vizuálně komunikačních interakcí.

Zrak a vnitrodruhová komunikace

Jedním ze základních atributů vnitrodruhové komunikace je schopnost rozpoznat příslušníky svého druhu. Iridescentní a UV-reflektantní zbarvení může k takovému účelu napomáhat, dokonce na mezidruhové úrovni věst až ke vzniku účinných reprodukčně izolačních bariér. U řady druhů motýlů je UV zbarvení křídel druhově specifické, slouží tedy k identifikaci příslušníků stejného druhu a hraje velkou roli při výběru vhodného sexuálního partnera (viz Živa 2013, 2). U některých druhů motýlů, kteří se nám jeví jako pohlavně uniformní, sledujeme v UV spektru značný sexuální dimorfismus. UV-reflektantní zbarvení u nich slouží jako sekundární pohlavní znak a je velmi důležité při námluvách.

Motýlí představovali dlouho modelovou skupinu pro výzkum v této oblasti, nicméně i u mnoha dalších skupin, mimo

jiné u brouků, byl zjištěn nezanedbatelný význam strukturálních zbarvení ve vnitrodruhové komunikaci. U samců amerických vrubounů rodu *Phanaeus* slouží iridescentní zbarvení hřbetního štítu (pronota) ke zdůraznění velikosti a tvaru rohu, který je pro tyto brouky charakteristický. Černý roh ostře kontrastuje s lesklým zbarvením pronota. Velikost rohu hraje pak významnou roli při výběru partnera a v soupeření s ostatními samci. Podle stavu pronota samice pravděpodobně poznají, zdali jsou samci napadeni parazity, a podle toho si vybírají partnera. Podobný princip kontrastu byl popsán u amerického druhu *Coprophanaeus lancifer*. Výběr partnera založený na vizuálním vnímání zbarvení samice máme zdokumentován také u australského krasce *Julodimorpha bakewelli* (viz Živa 2013, 3: 128–130 nebo Vesmír 2017, 2: 72–73). Tento brouk byl v Austrálii pozorován, jak se pokouší kopulovat s láhvemí od piva, protože zbarvením a povrchem připomínaly krovky samiček. Rovněž u evropského rákosníčka *Plateumaris sericea* (mandelinkovití) má iridescentní zbarvení při výběru partnera velký význam.

Na základě zbarvení lze rozpoznat také věk jedince. Vzhledem k tomu, že strukturální zbarvení úzce souvisí s kvalitou mikroskopických struktur na povrchu těla, je velmi pravděpodobné, že starší jedinci budou mít tyto struktury opotřeбенé a poničené, a tudíž jejich barva nebude dokonalá. Podobný jev byl prokázán např. u motýlů, ptáků nebo pavouků.

Zrak a mezidruhová komunikace

Již bylo řečeno, že strukturální barvy se u brouků neuplatňují pouze při komunikaci s jedinci vlastního druhu, často jsou naopak určeny pro druhy jiné. Nejčastěji pak v této souvislosti plní funkci ochranného zbarvení. V následující části se proto zaměříme na krypsi, kamufláž, aposematické zbarvení a mimizei.

Strukturální zbarvení se uplatňuje rovněž při unikání predátorům pomocí kamufláže a krypse (maskování se v prostředí). Mnoho brouků, kteří se vyskytují na listech nebo zelených částech rostlin, vykazují zelené strukturální zbarvení. Může být vhodnou alternativou zeleného pigmentu, který se u brouků příliš často nevyskytuje, a když ano, tak nestabilně.

Iridescentní zbarvení je charakteristické proměnlivou odrazivostí dopadajícího světla, jež závisí jak na úhlu pozorování, tak na úhlu osvětlení. Při změně úhlů se proto může odrazivost zvýšit, nebo snížit. V prvním případě predátor oslní nečekaný záblesk světla, v druhém (např. při schování se kořisti do stínu) může predátor kořist vizuálně ztratit. Obě varianty zhoršují určení vzdálenosti od kořisti a její přesnou polohu. Pro tuto hypotézu svědčí i nápadně konvergentní zbarvení mnoha druhů denních florikolních brouků (vyhledávajících květy), jako jsou různé zelené a kovově zbarvené zlatohlávcí, listokazi, tesaříci nebo krasci (obr. 11 a 12).

Jako extrémní případy iridescentního zbarvení v přírodě jsme zmínili zástupce jihoamerických a australských listokazů z podčeledi Rutelinae. Ti mohou být zcela stříbrní nebo zlatí, přičemž jejich krovky odrážejí světlo podobně jako zrcadlo. Odraz

světla od povrchu může predátora oslepit, nebo podle některých teorií zprostředkovává kryptickou funkci – predátor pozoruje odraz okolí a brouka přehlédne. Brouci jsou tak stále krypticky zbarvení i v případě, že se prostředí v jejich okolí změní. Ve vzácných případech dokonce dochází ke kombinaci zeleného iridescentního zbarvení a stříbrných metalických ploch (pruhů na krovkách), jako pozorujeme u neobvyklé zbarveného listokaza *Chrysinia gloriosa*.

Jak jsme popsali, řada druhů svižníků používá iridescentní zbarvení v kombinaci s nerovnostmi kutikuly jako způsob kamufláže. V některých případech tak dokonale, že napodobuje i hrubost a barvu zrnku písku na místě, kde se svižník vyskytuje. Jelikož se na jeho těle střídají světlé a tmavé plochy, celkový tvar těla je rozdělen na několik částí. Kromě svižníků byl tento jev zaznamenán u některých nosatců (Curculionidae).

Varovné (aposematické) zbarvení bývá u živočichů často užívanou ochrannou strategií, upozorňuje predátora na nepoživatelnost, případně jedovatost. Charakteristické jsou většinou výrazné barvy – žlutá, červená a černá. Jaký význam hraje iridescence nebo UV reflektance v aposematismu, se však dosud mnoho neví. Existují nicméně druhy, u nichž iridescence pravděpodobně slouží jako aposematické zbarvení. Varo-

vání tohoto typu využívají někteří (nekryptičtí) svižníci – dávají najevo predátorům, že uvolňují ze svých žláz obranné látky. Výstražné zbarvení bylo zdokumentováno také u vodních brouků vírníků.

V úzkém propojení s aposematickým zbarvením lze zmínit mimezi. Pokud se jeden organismus podobá jinému a podobnost není zapříčiněná příbuzností nebo konvergentním vývojem, ale v typickém případě selekčním tlakem predátorů, nazýváme tento jev mimikry nebo mimeze (viz také Živa 1996, 3 a 4). Müllerovské mimikry, kdy nejedovatý druh napodobuje jedovatý vzor, bylo prokázáno opět u zástupců svižníků, např. u andského druhu *Pseudoxychila bipustulata*, jehož mimetický vzor představuje blanokřídlá kodulka rodu *Hoplomutilla* (Mutillidae). Podobně další (severoamerický) svižník *Cicindela scutellaris* pro změnu vypadá jako puchýřník druhu *Lytta nuttalli* (majkovití – Meloidae). Příklady by se dalo vypsát nespočet, mezi celosvětově často napodobované vzory patří zástupci jedovaté čeledi dlouhoústcovití (Lycidae).

Závěr

Za velkou část pestrého zbarvení u živočichů vděčíme strukturálnímu zbarvení, které společně s pigmentovým činí z přírody velkolepou podívanou. Za každým

typem tohoto zbarvení jsou však schované poměrně složité fyzikální zákonitosti. Je důležité si uvědomit, že mezi jednotlivými zde zmiňovanými způsoby vzniku strukturálního zbarvení neexistují ostré hranice. Mnohdy plynule přechází jeden způsob v jiný, nebo je pozorovaná barva výsledkem společného působení více fyzikálních mechanismů zároveň. Strukturální barvy se často vyskytují v kombinaci s pigmentovými (např. běžně u krascovitých – Buprestidae), proto je vhodné na zbarvení nahlížet vždy jako na komplexní fenomén.

Strukturální zbarvení u brouků (převážně UV reflektance) není tak detailně prozkoumané, jak by se mohlo zdát. Rozvoj a dostupnost moderní technologie ale otevírá nové možnosti výzkumu, především studium UV reflektance a jejího významu v komunikaci představuje velký příslib do budoucna.

Článek vznikl za podpory Grantové agentury Univerzity Karlovy (GA UK 580616).

Seznam použité a doporučené literatury, slovník pojmů a detailní schémata uvádíme na webové stránce Živy.

Karolína Sezemská

K výuce

O významu korýšů a jejich využití v praktických cvičeních ve školách

Korýši (Crustacea) jsou početnou skupinou členovců nejen s ekologickým významem. Mají hospodářský význam – řada druhů se loví nebo chová jako potrava pro člověka (např. garnáti, humři nebo krevety), jiné se využívají při chovu akvarijních ryb (jako krmivo se uplatňují především nauplie žábřonožky solné – *Artemia salina*). Jiní zástupci slouží jako modelové organismy především v toxikologických studiích (viz Živa 2015, 6: CXXXI–CXXXIII), za všechny lze zmínit hrotnatky (*Daphnia*), kaluženky (*Moina*) nebo žábřonožky solné. Mnoho druhů našlo cestu do zájmových chovů akvaristů (např. někteří raci, sladkovodní krevety, žábřonožky nebo listonozi). Opomenout ale nemůžeme ani negativní vliv nepůvodních druhů krabů a raků zavlečených nebo cíleně vysazených člověkem na nových kontinentech, kde se někdy chovají invazně (Živa 2009, 1: 36–37; 2015, 5: 268–270) a mohou se podílet např. na epidemickém šíření tzv. račího moru (Živa 2013, 1: 31–34). Zajímavá je i otázka fylogenetického postavení (a systému) korýšů a hmyzu (Insecta, resp. Hexapoda), kdy se hmyz jeví jako vnitřní skupina korýšů v rámci širěji pojaté skupiny Pancrustacea (Živa 2016, 3: LVI–LIX).

Rozvoj akvaristiky umožňuje snadno získat mnoho druhů korýšů, které lze využít v praktických cvičeních při výuce biologie na školách. Akvaristiky, prodejny chovatelských potřeb a akvaristické burzy často nabízejí zmrazené živočichy jako potravu

pro akvarijní ryby – z korýšů jde nejčastěji o hrotnatky (pod obchodním označením dafnie), kaluženky (prodávané jako moiny), buchanky (zakoupíte jako cyklop) a žábřonožky solné (artemie). Tímto způsobem levně získáme velké množství živo-

čichů pro praktika – rozmrazené korýše můžeme pozorovat pod binokulární lupou (k tomu se hodí např. dospělá žábřonožka solná, obr. 1), menší zástupci (hrotnatky, kaluženky, buchanky nebo mladé žábřonožky) jsou vhodné pro pozorování pod mikroskopem (obr. 3, 7 a 8).

Zajímavější variantou je pořízení živých jedinců a s tím spojená možnost založení školního chovu. Řada druhů, jako např. zmíněné rody perlooček (podřád Cladocera), se spokojí s malým akváriem nebo větší sklenicí a občasným příkrmováním. Takové chovy jsou nenáročné na údržbu a umožní mít celoročně k dispozici živý materiál (podrobnosti najdete v článku na str. L kulérové přílohy). Jiné druhy lze „vzkřísit“ k životu z diapauzních stadií, řádově za několik dní tak získáme nauplie nebo malé žábřonožky pro mikroskopická pozorování (např. žábřonožka *Streptocephalus siamensis*, obr. 3). Některé chovy, např. suchozemských stínek nebo svinek (řád stejnonožci – Isopoda, obr. 2 a 6), mohou být zároveň dlouhodobým experimentem, na němž ukážeme ekologický význam těchto stejnonožců v přírodě (viz Živa 2015, 5: 213–215).

Jiní zástupci, jako sladkovodní krevetky *Neocaridina denticulata* (obr. 4), již vyžadují větší péči. Pro tyto a další chovatelsky oblíbené druhy je třeba zařídit akvárium bohatě osázené rostlinami. Náročnější péče se však vyplatí – kromě korýšů máme také rostliny, tedy malý ekosystém. Do péče zároveň zapojíme i žáky nebo studenty. Seznámení s chovy ve škole tak u nich může vést k hlubšímu zájmu o přírodu.

V článku na str. L se dozvíte více o možnostech získání a chovu vybraných druhů korýšů a jejich využití při výuce.