

# Optické mřížky na motýlích křídlech

Příčinami zbarvení motýlích křídel s příklady mikroskopické stavby jejich šupinek (Živa 2011, 3: 125–127), otázkou kovového nebo perleťového lesku na křídlech hmyzu (2011, 1: 32–33) nebo např. problematikou vzorů odrážejících ultrafialové záření (2012, 1: 25–28) se některé příspěvky v Živě již zabývaly. V následujícím článku se zaměříme na náhlé změny barvy křídel palearktických motýlů z čeledi babočkovitých (*Nymphalidae*), a to na příkladu batolce červeného (*Apatura ilia*).

Výzkum změn barvy křídel hmyzu má dlouhou historii, touto tematikou se začal zabývat již v r. 1882 H. A. Hagen. Rozmanité fotonické nanostruktury motýlích křídel popsali např. P. Vukusic a R. Sambles v přehledovém článku, který vyšel v časopise Nature (2003, 424: 852). Příslušné optické jevy se obvykle vysvětlují pomocí interference světla na vícevrstvé kutikule. Kupř. náhlé změny barvy křídel motýlů rodu *Morpho* (Živa 2010, 4: 176–177) jsou způsobeny interferencí na submikronových klikatých žlábkách šupinek jejich křídel. V literatuře jsou ale popsány ještě jiné mechanismy změny barvy tohoto rodu motýlů. Ptakokřídlec *Troides magellanus* má jinou strukturu povrchu šupinek křídel, tvořenou dlouhými tenkými paralelními zářezy, které rovněž způsobují náhlou změnu jejich barvy.

V tomto článku bychom chtěli vysvětlit změny barvy křídel batolce červeného, jehož šupinky jsou pokryty speciální optickou mřížkou – ta má opět zcela odlišnou architekturu než u výše uvedených druhů.

## Submikronová struktura šupinek

Vrchní strana předního křídla samce batolce červeného je hnědá s malými bílými

nebo žlutými skvrnami. Pokud však křídla pozorujeme pod určitým úhlem, hnědá barva se může náhle změnit na modrofialovou (obr. 1). Špička předního křídla a lemy obou křídel pokrývají také hnědé šupinky, které ale barvu nemění. Spodní strana křídel rovněž nevykazuje žádné barevné změny. Hnědé zbarvení je způsobeno (jako u mnoha jiných druhů) zejména pigmentem melaninem, který je oxidačním produktem aminokyseliny tyrozinu. Centrální část křídel naproti tomu pokrývají speciální šupinky (v počtu asi 400 na mm<sup>2</sup>), které jsou příčinou náhlé přeměny na zářivě modrofialovou barvu. Tato změna je dobře patrná hlavně při plném slunečním osvětlení. Přitom u samice nevykazují žádné změny barvy.

Sousední šupinky v jedné řadě se částečně překrývají. To vede k mnohonásobným odrazům světelných paprsků, protože šupinky jsou částečně průsvitné. Na obr. 2 je barvoměnná šupinka z křídla batolce červeného. Vidíme, že se skládá z dlouhých rovnoběžných vláken oddělených žlábkami, jejichž vzdálenost je přibližně 2 μm. Při bližším pohledu však zjistíme, že vlákna jsou ještě napříč rozdělena jemnými drážkami.

Změny barvy křídel samců těchto motýlů podstatně závisí na úhlu pohledu, charakteru a intenzitě světla, způsobu osvětlení, ale zároveň na absorpci, difrakci (ohybu) a odrazu světla. Pozoruhodná modrofialová barva vzniká především interferencí světla na jemných drážkách šupinek.

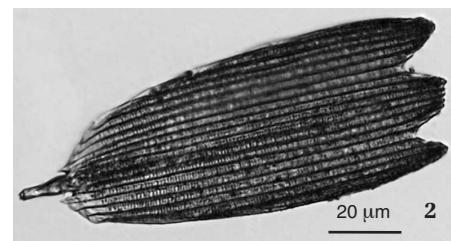
Obr. 3 a 4 ukazují šupinky z křídla jedinice stejného druhu při několikanásobném zvětšení s dobře pozorovatelnými příčnými drážkami. Jejich vzdálenost je okolo 800 nm a šířka každé drážky kolem 400 nm, což odpovídá modrofialové barvě. Existence těchto jemných žlábků s půlkulatým průřezem vede k interferenci světla a odpovídajícím zářivým barvám v poměrně širokém úhlu pozorování. Navíc jsou šupinky přirozeně fluorescentní (autofluorescentní, viz obr. 4), což také částečně přispívá k výsledné barvě.

## Náhlé změny barvy

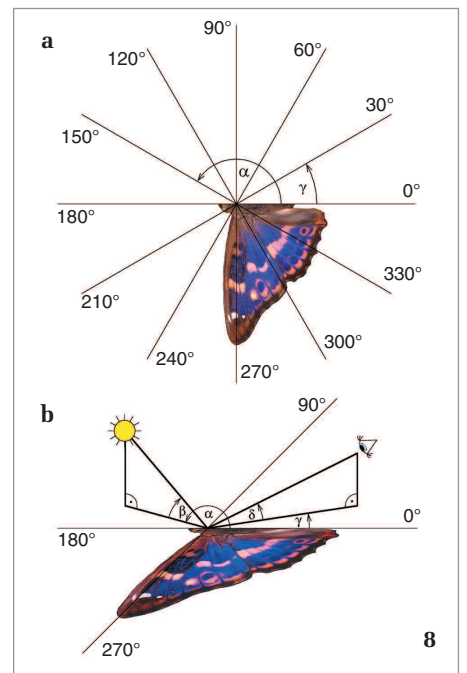
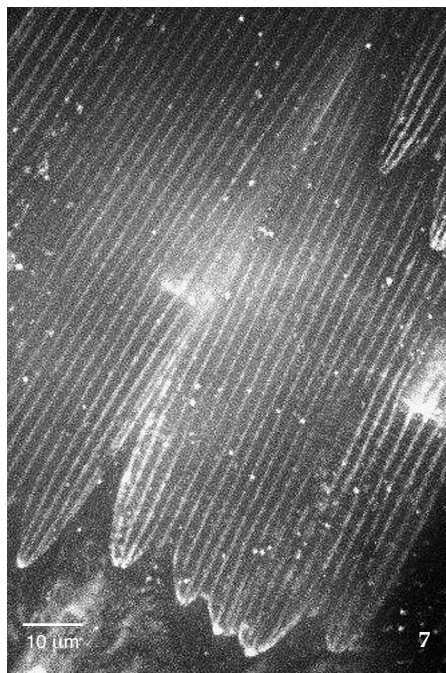
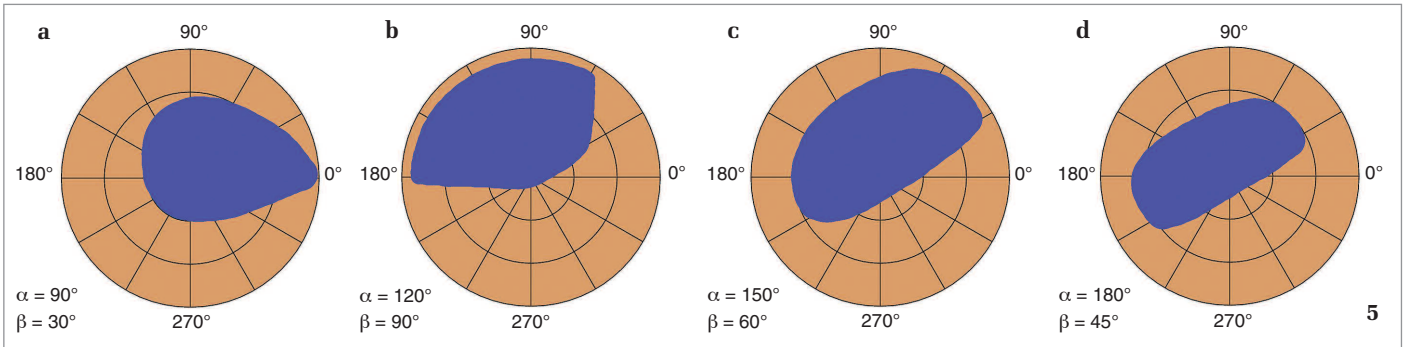
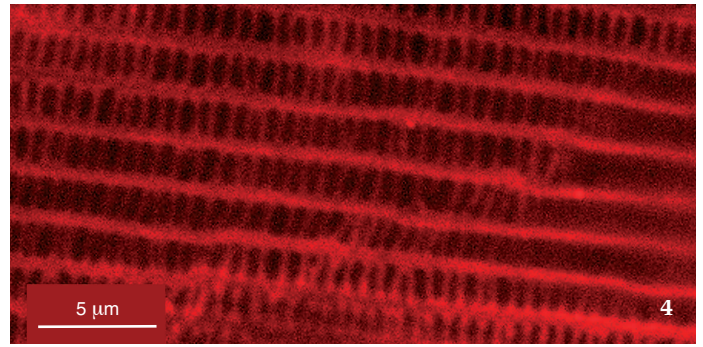
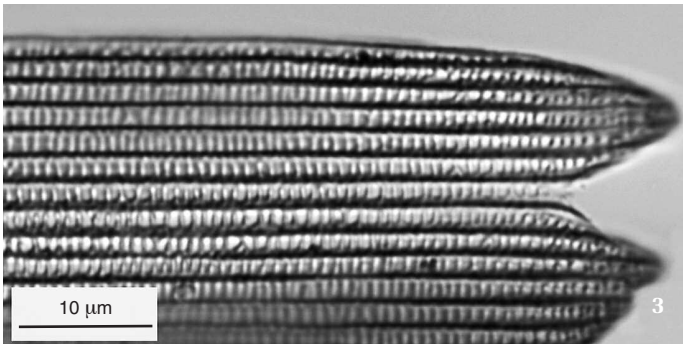
Pokud je křídlo batolce červeného osvětleno kolmo bodovým zdrojem světla (např. sluncem) a my je pozorujeme též z kolmého směru, vidíme modrofialovou barvu (obr. 1). Při malé změně polohy křídla se však polarizované modrofialové světlo náhle změní na nepolarizované světlo, které odpovídá hnědé pigmentaci (obr. 5).

Levé křídlo samce bylo umístěno do polárních souřadnic v horizontální rovině tak, jak je znázorněno na obr. 8. Polohy azimutálního úhlu α světelného zdroje a úhlu γ pozorovatele jsou vyznačeny na obr. 8a. Odpovídající elevační úhly β a δ zobrazuje obr. 8b. Úhly α a β tedy jednoznačně určují směr osvětlení a úhly γ, δ směr pohledu pozorovatele. Výsledky tohoto experimentu znázorňuje obr. 5. Vidíme, že závislost změn barvy na úhlech α, β, γ, δ je vysoce nelineární. Modrofialové oblasti na obr. 5 odpovídají zářivým barvám křídel. Žádné změny nebyly pozorovány při osvětlení křídla červeným, oranžovým, žlutým nebo zeleným světlem. Při průchodu světla modrým a fialovým filtrem se náhlé změny barvy opět objevily.

Uvedené údaje platí pro formu batolce červeného nazývanou *clytie*. Obrátíme nyní pozornost na jinou formu druhu, a to *ilia*. Vzdálenost mezi vlákny šupinek samce je asi 2 500 nm. Vzdálenost mezi příčnými drážkami přibližně 900 nm a šířka každé drážky dosahuje kolem 450 nm, což odpoví



- 1 Samec batolce červeného (*Apatura ilia*), forma *clytie*. Foto L. Havel
- 2 Šupinka z vrchní strany předního křídla samce batolce formy *clytie*
- 3 Část téže barvoměnné šupinky ve velkém zvětšení v bílém světle pomocí polarizované mikroskopie
- 4 Úsek barvoměnné šupinky z obr. 2 a 3 byl pomocí fluorescentní mikroskopie osvětlen monochromatickým zeleným světlem o vlnové délce přibližně



530 nm. Výsledná emisní červená barva dosahuje vlnové délky zhruba 600 nm.

**5** Závislost barevných změn na poloze zdroje světla a pozorovatele. Střed odpovídá elevačnímu úhlu pozorování  $\delta = 90^\circ$ , malá kružnice úhlu  $\delta = 60^\circ$ , střední kružnice  $\delta = 30^\circ$  a vnější kružnice úhlu  $\delta = 0^\circ$ . Úhel pozorování  $\gamma$  je v intervalu  $0^\circ$  až  $360^\circ$ . Náhlé změny barvy v polarizované modrofialové na nepolarizované smíšené světlo, kterému odpovídá hnědá barva, jsou znázorněny pro několik hodnot úhlů osvětlení  $\alpha$  a  $\beta$  (obr. 5a–d).

**6** Samec batolce červeného formy *ilia*. Foto L. Havel

**7** Samice batolce duhového (*A. iris*) nevykazují barvoměnu křídel – detail šupinek z prostřední části křídla. Snímky a orig.: G. M. Hagen a P. Křížek, pokud není uvedeno jinak

**8** Hodnoty úhlů osvětlení a pozorování. Nahore  $\alpha$  a  $\gamma$  (a). Polohy úhlů  $\alpha$ ,  $\beta$  a  $\gamma$ ,  $\delta$  dole (b). Popis viz obr. 5

vídá modrému světlu. To jsou větší hodnoty než u samce formy *clytie*. Proto se forma *ilia* jeví modřejší (obr. 6) než *clytie* (obr. 1).

Podobné rozměry drážek lze očekávat u samce druhu *A. metis* z jihovýchodní Evropy, který byl ještě poměrně nedávno považován za poddruh batolce červeného.

### Závěr

Příroda v průběhu evoluce vytvořila optické mřížky mnohem dříve, než je objevil člověk. Na běžné skleněné optické mřížce (viz např. Československý časopis pro fyziku 1954, 4: 72–91), která způsobuje interferenci světla, se typicky počet vrypů pohybuje kolem 500 až 1 000 na 1 mm. Tyto hodnoty jsou srovnatelné s počtem drážek na šupinkách křídel samců batolců rodu *Apatura*. Půlkulatý průřez drážek ale způsobuje, že se při interferenci světla příliš nemění výsledná modrá až modrofialová barva křídel, protože takový průřez má téměř konstantní průměr při různých

úhlech pohledu. Na běžných optických mřížkách s pilovitým průřezem se naopak výsledná barva při pohybu mění.

Silně třpytivá modrá nebo modrofialová barva křídel samců rodu *Apatura* je viditelná ze vzdálenosti přes 100 m a je vyzařována v širokém úhlu (viz obr. 5). Tato jejich pozoruhodná vlastnost naviguje samice mnohem přesněji než feromony. Zářivé zbarvení samců batolců tak můžeme považovat za výsledek dlouhodobého selekčního tlaku.

Článek vznikl za podpory grantů 304/09/1047 a P205/12/P392 Grantové agentury ČR, resp. projektů RVO 67985840, UNCE 204022, P302/12/G157, Prvok/1LF/1 a OP VK CZ.1.07/2.3.00/30.0030.

Kolektiv spoluautorů: Guy M. Hagen, Pavel Křížek, Markéta Havlová, Michal Křížek