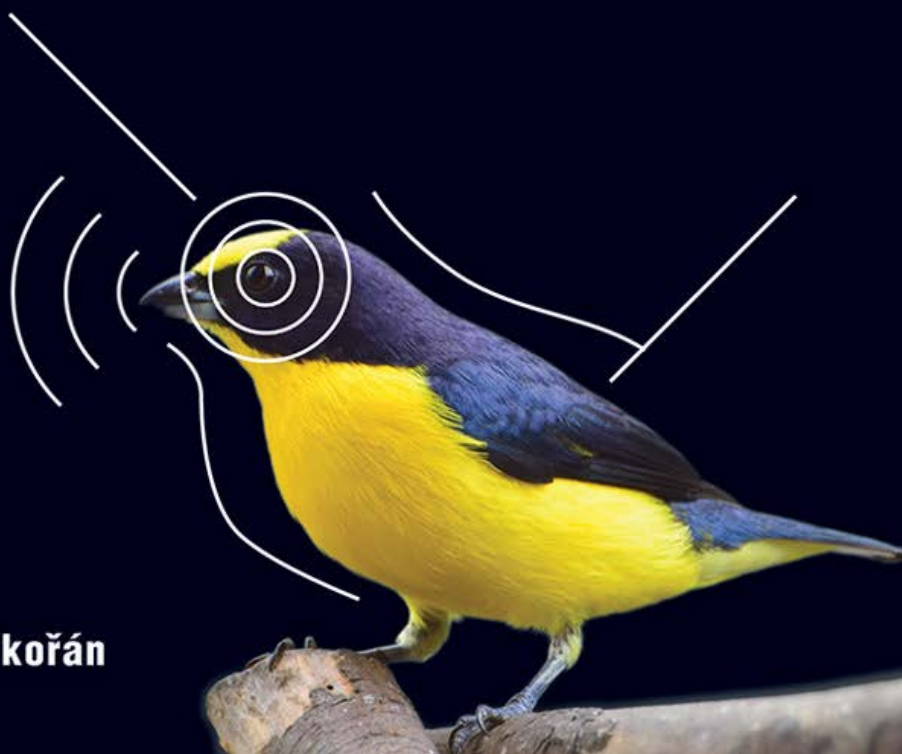


Jaroslav Petr

DESATERO SMYSLŮ

Jak lidé a zvířata vnímají okolní svět



argo / dokořán

Jaroslav Petr

DESATERO SMYSLŮ

Jak lidé a zvířata vnímají okolní svět

ARGO / DOKOŘÁN

Jaroslav Petr

DESATERO SMYSLŮ

Jak lidé a zvířata vnímají okolní svět

Copyright © Jaroslav Petr, 2021

Všechna práva vyhrazena. Žádná část této publikace nesmí být rozmnožována a rozšiřována jakýmkoli způsobem bez předchozího písemného svolení nakladatele.

Druhé vydání v českém jazyce (první elektronické).

Odpovědný redaktor Marek Pečenka.

Redakce Alžběta Knappová.

Obálka, sazba podle návrhu Pavla Růta

a konverze do elektronické verze Michal Puhač.

Vydalo v roce 2021 nakladatelství Dokořán, s. r. o.,

Holečkova 9, Praha 5,

dokoran@dokoran.cz, www.dokoran.cz,

jako svou 1107. publikaci (357. elektronická).

ISBN 978-80-7675-014-2

OBSAH

Úvod	9
Zrak	13
Sluch	51
Echolokace	91
Chuť	105
Čich	127
Feromony	157
Hmat a další opomíjené smysly	179
Orientace	219
Magnetorecepce	233
Smysl pro elektrické pole	249
Přehled použité literatury	261
Rejstřík	295

*Věnováno Toníkovi a Rostovi s přáním,
aby je nikdy nepřestalo bavit
odhalování tajů světa všemi smysly.*

ÚVOD

Za všechno, co víme a umíme, vděčíme svým smyslům. Vedle znalostí budících respekt, jako je výpočet diferenciální rovnice nebo transplantace srdce, nám přinášejí i bezpočet vjemů, které bereme jako samozřejmost, i když jsou ve své podstatě stejně úžasné jako vyšší matematika či kardiochirurgie. Pryskyřičná vůně linoucí se z borového lesa za prosluněného letního dne. Příjemná hořkost doušku čaje z hrnečku svíraného ve zkřehlých dlaních. Svěží zeleň lístků deroucích se z pupenu na větvičce břízy. Tlukot slavíka zaznívající z rákosin na břehu rybníka. Navlhlá měkkost mechu pokrývajícího kameny u potoka. To všechno nám předkládá „velká pětka“ smyslů tvořená zrakem, sluchem, čichem, chutí a hmatem.

Živočichové toho vnímají mnohem více než lidé. Soví uši nabízejí poslech v prostorovém provedení, před kterým blednou i ty nejmodernější zvukové aparatury. Hlubinné ryby si prohlízejí okolí v pestrých barvách, i když člověk si v temnotě oceánu bez umělého světla nevidí ani na špičku nosu. Madagaskarští lemuři si sdělují rodinné novinky tělesnými pachy a americký krtek se světem prohmatává pomocí dvaadvaceti prstíků, které si proti všem zvyklostem nenese na končetinách, ale na nose. Broukovi vrubounovi kutálejícímu kulíčku z trusu ukazuje správný kurz pás Mléčné dráhy protínající noční oblohu.

Svět však nevnímáme jen „velkou pětkou“ smyslů. Pokud bychom se opravdu snažili, napočítali bychom smyslů i několik desítek. Vnímáme bolest, chlad i horko. Smysl označovaný česky jako polohocit nám dává jistotu, že i když se probudíme uprostřed temné noci, okamžitě víme, jestli máme ruce u těla, nebo jsme se jimi roztáhli přes celou postel. Vjemy z těchto smyslů bereme s ještě větší samozřejmostí, než s jakou přijímáme dary „velké pětky“. O to hůře pak neseme, když nás některý z těchto podceňovaných smyslů nechá na holičkách.

Zvířatům jsou mnohé z našich smyslových vjemů cizí. Jeskynní ryby jsou slepé, delfínům zbyla z chutí pouze slaná a kyselá a včely registrují ve srovnání s člověkem jen třetinové spektrum pachů a vůní. Na druhé straně však živočichové disponují dovednostmi, které jim můžeme jen závidět. Paúhoři si zahrávali s elektrickými výboji dávno před italským fyzikem Voltou. Mořským želvám ukazuje cestu při transoceánských plavbách vnitřní kompas. Včely hravě zjistí, že někde blízko jejich družka tasila žihadlo, a je to pro ně

signál k mobilizaci před blížícím se nebezpečím. Mnohá zvířata využívají smysly s překvapivou rafinovaností. Americký sysel odpuzuje nepřátele tím, že se navoní pachem chřestýše.

Z překvapení nevycházíme ani nad výkony pětice základních smyslů. Jak je například možné, že sépie navzájem komunikují barevnými změnami kůže, když jsou barvoslepe? Jak zjistí ptáci lesňáčci blížící se živelní pohromu s předstihem, který jim umožní prchnout před katastrofou stovky kilometrů daleko? Cítí hroch něco přes svou pět centimetrů tlustou kůži? Jak najde motýl danaus stěhovavý cestu z rodiště v jižní Kanadě na mexická zimoviště, když tuto cestu naposled v celku absolvovali jeho pradědečkové a prababičky? A kdo by čekal, že čichat umí i srdce a že mícha má své vlastní chutě?

Homo sapiens čili člověk moudrý si smysly „prodloužil“ a zpřístupnil si místa, která zůstávala pro dlouhé generace našich předků *terra incognita*. Prostřednictvím Hubbleova vesmírného teleskopu jsme nahlédli do nejvzdálenějších hlubin vesmíru. Tajе subatomárního světa nám odhaluje obří urychlovač částic zbudovaný na pomezí Švýcarska a Francie. Lidským smyslům jsme moderními technikami zpřístupnili dokonce i dění v nekomplikovanější hmotě, jakou jsme zatím ve vesmíru našli, tedy v lidském mozku.

K vzestupu člověka a vzniku lidské civilizace významně přispěla „konzervace“ smyslových vjemů. Řeč, jako jeden z nejúžasnějších lidských vynálezů, zprostředkovává vjemy, které se odehrály bůhví kdy a kde. Zvířata žijí přítomností. Lidé si však zážitky vyprávěním předávali z pokolení na pokolení a také je hromadili. Objev písma „konzervaci“ vjemů pozvedl na novou úroveň. Dnes ukládáme obrovské objemy dat na servery počítačů a zažehli jsme informační explozi. Do roku 1900 potřebovalo lidstvo na zdvojnásobení objemu všech znalostí zhruba jedno století. Od roku 1950 jsme ke stejnému nárůstu znalostí docházeli každých 25 let. Počínaje rokem 2006 už nám k tomu stačí pouhých 13 měsíců. A daleko prý není doba, kdy se objem dat nashromážděných lidstvem zdvojnásobí každých 12 hodin.

Mnohem dál než v získávání informací „prodloužením“ smyslových orgánů a „konzervací“ smyslových vjemů jsme zašli v „krmení“ svých smyslů. Náš zrak, sluch, čich, chuť či hmat nejsou lepší, než byly smysly prvních lidí *Homo sapiens* žijících v Africe před 300 000 lety. Vládneme však podstatně účinnějšími prostředky pro zásobování smyslů vjemy. Po tisíciletí jsme je „přikrmovali“ uměním, Shakespearovými dramaty, fugami Johanna Sebastiana Bacha nebo plátny Vincenta van Gogha. Dnes dominuje menu pro lidské smysly produkce zábavního průmyslu a obsah sociálních sítí. Smyslovými vjemy jsme přehlcní. A nešetříme ani živočichy. Smyslové vnímání jim svými aktivitami komplikujeme. Tažným ptákům putujícím v noci jsme zamotali hlavy, když jsme hvězdy na obloze přesvítili září lidských sídel. Přízemní ozón znečišťující

ovzduší odbourává chemickými reakcemi molekuly tvořící vůni květů a znesnadňuje včelám a čmelákům pátrání po pylu a nektaru. Samice žab v rybníce u rušné silnice už v hluku projíždějících automobilů neslyší kvákání žabáků.

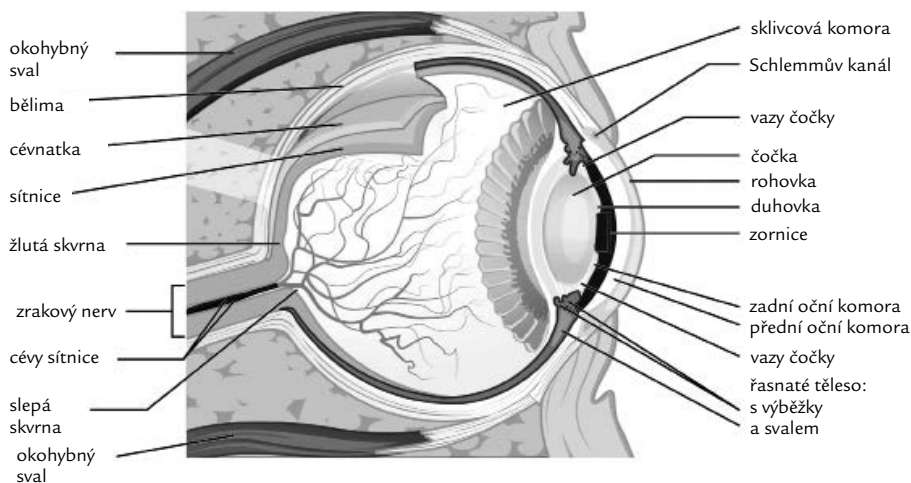
Není na čase se zastavit a zamyslet se nad tím, k čemu byly naše smysly miliony let dlouhou evolucí předurčeny, a porovnat to s tím, k čemu je užíváme nyní? Má zrak sloužit k tomu, abychom na sociálních sítích pásli po epizodách ze života pochybných celebrit? Máme sluch na to, abychom ho zahlcovali banálním žvaněním, fámami a dezinformacemi? Vybavila nás příroda chutěmi proto, abychom je zaměstnávali dalšími a dalšími porcemi pokrmů? Nehodí se hmatové receptory v kůži našich prstů víc k pohlázení někoho blízkého, než ke kochání se hebkostí kůže na sedačkách luxusního auta? Neměl by nás čich varovat před stavem znečištěného ovzduší místo toho, aby se oddával deliriu nejrozumnějších osvěžovačů vzduchu?

Svět smyslů a smyslových vjemů je úžasný i ve své prapůvodní prostotě. Neodehrávají se tu bulvární skandály, a přesto tu není nouze o neuvěřitelné příběhy plné lásky a sebeobětování, stejně jako úkladů, intrik a machiavelistických manipulací. Tyto příběhy nabízejí příležitost k zamyšlení se nad tím, k čemu všemu své smysly využijeme a čemu je už nepropůjčíme.

ZRAK

Oko má tak komplikovanou stavbu, že mu Charles Darwin ve svém přelomovém díle *O původu druhů* věnoval zvláštní pasáž. Slavný biolog se předem obával, že právě objasnění evoluce oka a zraku bude pro jeho teorii nepříjemně tvrdý oříšek. Na druhé straně byl Darwinův současník, německý fyzik a lékař Hermann von Helmholtz, trpce zklamán nevalnou kvalitou oka z hlediska optiky a došel k závěru, že tu příroda nijak skvělou práci neodvedla.

Ať už v oku vidíme evoluční brak, nebo naopak mistrovské dílo, nic to nemění na skutečnosti, že jeho prostřednictvím přijímáme informace o okolním



Oko člověka

V přední části kryje oko rohovka, za kterou se nacházejí oční komory vyplněné tekutinou, tzv. komorovou vodou. Mezi přední a zadní komorou se nachází duhovka, přes kterou otvorem zornice prochází světlo do nitra oka.

Zornice se stahuje nebo roztahuje jako clona a reguluje množství světla vstupující do oka. Za zornicí prochází světlo čočkou. Ta je upnutá na řasnaté těleso, které tahem svých svalů mění tvar čočky a dovoluje nám zaostření obrazu na sítnici. Zadní strana oka je na vnější straně kryta bělímou, na kterou se upínají okohybné svaly. Pod bělímou se nachází cévnatka prostoupená tepénkami a žilkami zajišťujícími prokrvení oka. Cévy prostupují až do řasnatého tělesa, kde se z krve tvoří komorová voda. Ta se dostává do očních komor Schlemmovým kanálem. Na cévnatku nasedá sítnice se světločivnými buňkami. Z těch putují nervové vzruchy zrakovým nervem do mozku.

Tam, kde zrakový nerv prostupuje sítnicí, chybí světločivné buňky a vzniká tzv. slepá skvrna. Nejvyšší nahromadění světločivných buněk se nachází v malé oblasti sítnice označované jako žlutá skvrna. Když dopadá světlo do žluté skvrny, vidíme nejostřeji.

Betts J. G. et al.: *Anatomy and physiology*. Houston: Rice University, 2017.

světě v neuvěřitelném množství i kvalitě. Zrak nám dovoluje rozlišit bezpočet tvarů a miliony barev a jejich odstínů. Vděčíme za to sítnici oka, která funguje jako jedinečný převodník, v němž se mění fotony světla na elektrický náboj. Elektrický stimul je následně zrakovým nervem odveden do mozku, kde na něj reagují podrážděním neurony zrakového centra.

Zrak nám nezprostředkovává jen přímo nabyté zkušenosti. Dovoluje nám čerpat ze zkušeností a myšlenek, které nasbíraly předchozí lidské generace a „zakonzervovaly“ je pro další pokolení. Díky tomu můžeme dnes číst Epos o Gilgamešovi vyrytý do hliněné tabulky babylónským písařem před bezmála čtyřmi tisíci lety. Můžeme si prohlížet z harddisku počítače vyvolané snímky povrchu Jupiterova měsíce Europa pořízené v roce 1996 kosmickou sondou Galileo. Zrak nám dovolí, abychom se potěšili Shakespearovým sonetem, filmovým westernem *Tenkrát na Západě* nebo malbami Šestatřicet pohledů na Fudži japonského mistra Kacušky Hokusaie. Za to všechno a mnohé další vděčíme zraku.

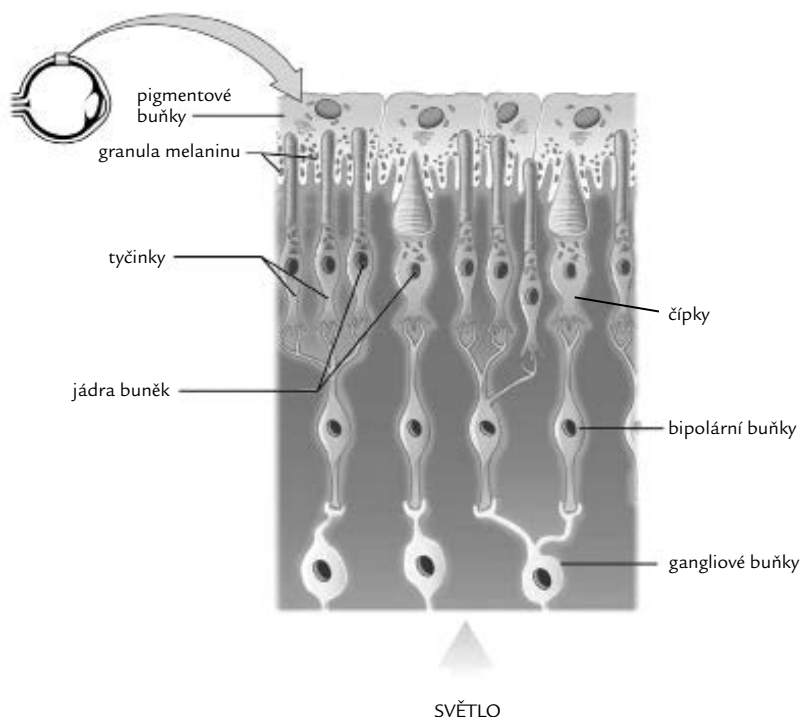
MISTŘI OSTRÉHO ZRAKU

Na vzdálenost tří kilometrů rozezná člověk s dobrým zrakem objekt velikosti lidské postavy. Ve tmě na stejnou vzdálenost rozliší, jestli auto svítí jedním, nebo dvěma reflektory. Orel skalní (*Aquila chrysaetos*) zahlédne na tři kilometry králíka přikrčeného k zemi. Proč máme oproti orlům tak chabý zrak?

Už zběžný pohled prozradí, že člověk má oči ve srovnání s orlem poměrně malé. Velké druhy orlů s hmotností kolem deseti kilogramů mají oko stejně velké jako urostlý muž, který měří bezmála dva metry. Největšíma očima se v poměru k rozměrům těla pyšní orel klínoocasý (*Aquila audax*). Tento australský dravec s třímetrovým rozpětím křídel váží až šest kilogramů. Jeho oko měří v průměru přes tři centimetry a v předozadním směru dokonce tři a půl centimetru. Větší oko má už jen africký pštros dvouprstý (*Struthio camelus*). Bez mála čtyřcentimetrové pštrosí oko předčí velikostí dokonce i mozek uložený v pštrosí lebce. V poměru k velikosti těla ale oko pštrosů nijak mimořádné není, protože tito ptáci často dorůstají výšky přes dva metry a hmotnosti přes sto kilogramů.

Zdatnost orlího zraku netkví jen ve velikosti oka. Zadní stěna oka dravců je znatelně zploštělá. Díky této inovaci se obraz vzdálených předmětů promítá orlovi na větší plochu sítnice, než když dopadá na kulovitou sítnici v oku člověka. Dravci mají navíc na sítnici nacpáno mnohem víc světločivných buněk. Zatímco sítnice lidského oka má na milimetru čtverečním asi 40 000 buněk reagujících na světlo, poštolce obecné (*Falco tinnunculus*) se jich na stejnou plochu vejde skoro dvakrát tolik. V místě, které zajišťuje nejostřejší obraz, se nám na jednom milimetru čtverečním tísní kolem 200 000 světločivných

MISTŘI OSTRÉHO ZRAKU



Sítnice oka

V sítnici oka probíhají reakce, které převádějí energii světelného záření na nervový vzruch. Ten pak putuje zrakovým nervem do zrakových center mozku. Na vnějším okraji sítnice se nacházejí pigmentové buňky s granuly barviva melaninu. Tato granula pohlcují světlo a brání jeho odražení zpět do oka. Na pigmentované buňky nasedají světločivné buňky, které jsou v sítnici zastoupeny tyčinkami a čípkami. Tyčinky reagují na slabé světlo, ale nerozlišují barvy. Pomáhají nám vidět za zhoršených světelných podmínek. Čípky reagují odlišně na světlo různých vlnových délek a dovolí člověku rozlišit tři základní barvy – modrou, zelenou a červenou. Pro svou práci potřebují čípky intenzivní světlo.

Vzruchy vzniklé ve světločivných buňkách převádějí bipolární buňky do gangliových buněk, které pak tento vzruch svými výběžky předají do zrakového nervu.

Betts J. G. et al.: *Anatomy and physiology*. Houston: Rice University, 2017.

buněk. Orel jich má v milimetru čtverečním této tzv. žluté skvrny kolem jednoho milionu. Rozdíl mezi lidskou a orlí sítnicí můžeme přirovnat k zrnitému obrazu na monitoru starého televizního přijímače a vysokému rozlišení obřích moderních obrazovek.

Ani teď ale nejsme ve výčtu evolučních zlepšováků oka dravců u konce. Lidské oko obdařila příroda jen jednou žlutou skvrnou o průměru asi pěti milimetrů. K ptákům byla mnohem štedřejší. Některým opeřencům dala do vínků protáhlou žlutou skvrnu, díky které pták vidí ostře celý obzor, a nikoli jen jeho malý výsek. Na sítnici dravců se nacházejí hned dvě žluté skvrny spojené pásem hustě nahloučených světločivných buněk.

Mezi ptáky jsou dravci výjimeční i tím, že mají podobně jako člověk trojrozměrné tzv. binokulární vidění. Oči mají otočené dopředu a jejich zorná

pole se velkou měrou překrývají. To dovoluje dravcům „obejmout“ předměty zrakem a vnímat je prostorově. Významný je tento efekt pro přesný odhad vzdálenosti. Pro sokola stěhovavého (*Falco peregrinus*) útočícího střemhlavým letem rychlostí 380 kilometrů v hodině na holuba letícího rychlostí kolem 140 kilometrů v hodině je to přímo nutnost. Velmi dobré binokulární vidění mají také sovy (*Strigiformes*). Mezi hady těží z této vymoženosti např. tropické bičovky (*Ahaetulla*).

Binokulárním viděním příroda rozhodně neplýtvá. Mezi bezobratlými se jím mohou pyšnit jen kudlanky (*Mantodea*). Ty však vnímají trojrozměrně pouze pohyblivé cíle. Pokud se cíl nepohybuje, kudlanka ho vidí „placatě“. Bohatě jí to stačí, protože ji ze všeho nejvíc zajímá kořist, a ta bývá pohyblivá. Statické objekty, jako jsou kamínky nebo větvičky, se obvykle k jídlu nehodí, a kudlanka proto na hodnocení jejich obrazu neplýtvá silně omezenou kapacitou svého nervového systému.

Za obrácení očí dopředu a překrývání jejich zorných polí platí živočichové zúžením celkového zorného pole. Proto si prostorové vidění nemohou dovolit obratlovci žijící v neustálém ohrožení. Atak vedený ze „slepého úhlu“ by je mohl stát život. Tito tvorové mají oči po stranách hlavy a každým okem si hlídají polovinu prostoru kolem sebe. Zatímco při prostorovém vidění musí obě oči svůj pohyb při sledování cíle vzájemně koordinovat, tvorové, kteří vystačí s plošným obrazem, pohybují každým okem nezávisle, a nejednou proto vypadají, jako kdyby silně šilhali.

Za skutečné mistry v šilhání platí chameleoni (*Chamaeleoninae*). Dokážou sledovat každým okem nezávisle něco jiného. Když je ale potřeba, umějí práci obou očí zkoordinovat. V tomto umění za nimi nezaostávají ani někteří ptáci. U opeřenců někdy vede šilhání do všech stran k tomu, že pro určité úlohy přednostně využívají jen jedno oko. Například samci brodivých ptáků pisil čáponohých (*Himantopus himantopus*) se s větší chutí dvoří samičkám, které vidí levým okem. Sokol stěhovavý se přibližuje k vyhládnuté kořisti tak, aby ji měl pod kontrolou pravého oka. Vrány kaledonské (*Corvus moneduloides*) patří k rozeným ptačím kutilům. Můžeme je zastihnout např. při výrobě jednoduchých nástrojů z větviček nebo když s nimi následně dobývají hmyz ze škvír. Používají k tomu své „oblíbené“ oko. Některé vrány preferují pravé oko, jiné zase upřednostňují levé. Poměr mezi očními „praváky“ a „leváky“ je v populaci vran novokaledonských zhruba vyrovnaný.

Protože je levé oko ovládáno pravou polovinou mozku a naopak, umožní preference jednoho oka odpovídající mozkové hemisféře, aby se specializovala na zvládání úkolů náročných na kontrolu zrakem. Ptáci pak dosahují v dané činnosti vyššího mistrovství, než kdyby zaměstnávali obě oči stejně.

Rozdíly v ostrosti zraku mezi jednotlivými příslušníky živočišné říše jsou

propastné. Pokud budeme kvalitu zraku měřit počtem „řádek“, které oko daného tvora rozliší pod zorným úhlem jednoho obloukového stupně, pak ostrozrací draví ptáci, jako je orel klínoocasý, rozliší kolem 150 řádků na obloukový stupeň. Člověk se zdravým zrakem jich odliší kolem šedesáti. Pokud se nám obraz rozmaže natolik, že odlišíme méně než deset řádků na obloukový stupeň, jsme prakticky slepí. Pro kočku (*Felis silvestris f. catus*) je ale taková ostrost zraku naprosto normální. Většina hmyzu vidí opravdu mizerně a rozliší nejvýše jeden řádek na stupeň. Korýši (*Crustacea*) vidí ještě hůř. Rozliší jeden řádek, jen když jim v zorném poli zabírá alespoň deset úhlových stupňů.

Velké rozdíly v ostrosti zraku různých živočichů dokázali využít někteří pavouci křížáci (*Araneoidea*). Vetrkávají do svých sítí tzv. stabilimentum z bílých vláken vytvářejících nápadný kříž. O účelu téhle „ozdoby“ se vědci dlouho přeli, protože se jim zdálo nelogické, aby pavouci výstražným znamením upozorňovali potenciální kořist na nastraženou síť. Modelování zraku různých tvorů však odhalilo, že letící moucha domácí (*Musca domestica*) stabilimentum nevidí, ani když se mu přiblíží na dvacet centimetrů a pavouk trůní přímo uprostřed kříže. Šídlo *Anax junius* ale zahlédne kontury stabilimenta na vzdálenost jednoho metru a z dvaceti centimetrů už ho vidí zcela zřetelně. Má tedy čas se sítí vyhnout. Pro pavouka je to důležité, protože šídlo pro něj představuje příliš velké sousto. Síť by takovou kořist nezadržela a náraz letícího hmyzu by ji těžce poškodil. Podobně vidí stabilimentum už na vzdálenost několika metrů ptáci. I oni mají dost času na to, aby se takové překážce za letu vyhnuli, a ušetří tak pavoukovi práci s rozsáhlou rekonstrukcí poničené sítě.

VÝHODY ROZMAZANÉHO VIDĚNÍ

Navzdory všem zjevným výhodám ostrého zraku můžeme v přírodě potkat živočichy, kteří vidí překvapivě rozmazaně, a přitom je pro ně zrak životně důležitý. Jedním z nich je skákavka skleníková (*Hasarius adansoni*). Jak jméno tohoto asi sedm milimetrů dlouhého pavouka napovídá, loví různý hmyz dlouhým skokem na nic netušící kořist. Zvládá výpady dlouhé i několik centimetrů a zjevně musí mít perfektní smysl pro odhad vzdálenosti.

Člověk odhadne správně vzdálenosti kromě jiného i díky tomu, že se mu překrývají zorná pole obou očí a vidí prostorově. Stejný optický trik prostorového vidění využívají i další savci a někteří ptáci. Vzdálenost se však dá poměrně spolehlivě odhadnout i v případě, že si lovec prohlíží kořist jen jedním okem. Umí to třeba chameleoni. Ti mění zaostření oka tak, aby se kořist dostávala střídavě do ohniska a pak zase mimo. Chvíli ji vidí ostře a chvíli zase rozmazaně. Chameleon tak bezpečně pozná vzdálenost, na jakou se musí přiblížit ke kořisti, aby na ni mohl vystřelit svůj dlouhý „teleskopický“ jazyk.

Skákavka skleníková na to jde jinak. Dopředu se dívá hned čtyřma očima. Prostřední pár očí má trubicovitý tvar a je zatažen hluboko do nitra pavoučího těla. Zorné pole je velmi úzké, což skákavka kompenzuje velkou pohyblivostí těchto zrakových orgánů. Speciálními svaly zamíří skákavka oko žádaným směrem. Hlavní pár očí tak nabízí skákavce podobný pohled, jako když si člověk ve tmě svítí baterkou. Vidí z okolí jen malou osvětlenou část, ale pohybem kuželu světla z baterky může libovolně pátrat na všechny strany. Postranní oči mají podstatně jednodušší stavbu a jsou vysoce citlivé na jakýkoli pohyb. Právě s pomocí těchto očí skákavka zjišťuje, kam má upřít zrak párem hlavních očí.

Zorná pole středového páru očí skákavek se nepřekrývají tak jako u prostorově vidících savců nebo ptáků. Jak tedy odhaduje vzdálenost pro skoky na kořist? Sítnice očí skákavky skleníkové má světločivné buňky uspořádané hned do čtyř vrstev. Druhá nejhlubší vrstva je citlivá jen na zelené světlo. Přitom ale zelená část světelného spektra není na této vrstvě zaostřená a obraz je proto rozmazaný. Jak se pavouk blíží ke kořisti, vidí ji v zelené části světla stále rozmazanější. A právě podle toho odhadne vzdálenost a při skoku se strefí.

Tento zcela unikátní systém pro odhad vzdálenosti mají všichni pavouci skákavky. My si ho můžeme přiblížit pohledem na fotografii s ostrým popředím a rozmazaným pozadím. Stačí nám na ni jen mrknout a je nám hned jasné, že ostrý objekt a rozmazané pozadí se nenacházejí od objektivu ve stejné vzdálenosti. Tím však naše dovednosti končí. Nikdo nedokáže přesně určit, jak daleko je ostrý předmět v popředí od rozmazaných předmětů v pozadí.

Měření vzdálenosti rozostřeným zrakem využívá při lovu také oliheň *Sepioteuthis lessoniana*. Ta upoutala vědce prapodivným chováním. Loví u srázů korálových útesů, kde si vybírá kořist mezi rybami, kraby a dalšími obyvateli tohoto neuvěřitelně pestrého světa. Potlouká se kolem skalisek, a jakmile narazí na potenciální kořist, začne se pohupovat na místě. Chvilku stoupá k hladině a vzápětí zamíří zpět do hlubin. Jako na gumě poskakuje v průzračné vodě a zcela jistě je díky tomu nápadnější, než kdyby se nehnutě vznášela na jednom místě. Je to zjevně poněkud neopatrné jednání. Oliheň se však bez něj neobejde, protože si „poskakováním“ vyměřuje finální ataku a odhaduje, jak je od oběti daleko. Její oko má na zadní stěně oční komory světločivnou sítnici podobně jako člověk. K oku olihně však zezadu těsně přiléhá nervová uzlina, která na sítnici silně tlačí a vytváří na ní jakousi bouli. V oku „poskakující“ olihně se promítá obraz cíle útoku na sítnici a přechází i přes bouli, kde se rozostří. Oliheň tak vidí obraz kořisti střídavě ostrý a rozmazaný. Podobně jako skákavky z toho dokáže přesně určit vzdálenost, jakou musí překonat při ataku.

OKO Z MINERÁLŮ

Měkkýš chroustnatka zrnitá (*Acanthopleura granulata*) žije v přílivové zóně při pobřeží Karibského moře. Měkké tělo jí chrání schránka složená z osmi velmi tvrdých a pevných štítků. Základ materiálu tohoto brnění tvoří organický chitin a nerost aragonit. Chroustnatka žije pod vypouklou schránkou jako pod pokličkou. Dokáže se přimknout k podkladu a pevně se k němu přisát.

Mohlo by se zdát, že se chroustnatka z bezpečí své pancéřované schránky o okolní dění příliš nezajímá. Ani po potravě se nemusí nijak zvlášť rozhlížet. Svalnatým jazykem opatřeným několika řadami extrémně tvrdých zubů se škrabává z povrchu kamenů vrstvičky mikroorganismů. K tomu, aby se nasýtila, jí stačí pomalíčku lézt z místa na místo a „olizovat“ kamení pod sebou. Přesto chroustnatka okolí vnímá. A kupodivu kvůli tomu nemusí vykuknout ze svého bezpečného úkrytu. Svět sleduje stovkami očí velmi nenápadné, ale o to důmyslnější konstrukce.

Těsně pod schránkou skrývá tento živočich na mnoha místech těla malá políčka tvořená světločivnými buňkami. Vypadá to, jako kdyby měla chroustnatka po těle rozesetou spoustu miniaturních očních sítnic překrytých pevnou schránkou. Může jimi vůbec vidět? Ano, může. A také se jejich prostřednictvím dívá. Ve štítcích schránky mají chroustnatky vsazena průhledná okénka o průměru necelé desetiný milimetru tvořená čirým minerálem. Mají dokonce vyklenutý tvar, takže fungují jako miniaturní čočky. „Okénka“ soustředí paprsky světla přímo na světločivné buňky.

Koordinují stovky miniaturních oček svou činnost a skládají své dílčí obrázky do jednoho obrazu? Kdepak. Každé očko pracuje zcela samostatně, nezávisle na druhých. Okénky ve schránce se nabízí chroustnatce série pohledů do okolí, podobně jako když ostraha banky sleduje nejružnější místa budovy na panelu obrazovek napojených na systém bezpečnostních kamer.

Čočky zasazené do schránky chroustnatky jsou z optického hlediska překvapivě kvalitní. Rozlišovací schopnost jednotlivých políček světločivných buněk je ale z hlediska lidských nároků na vidění naprosto nedostatečná. Každé políčko je tvořeno zhruba stovkou těchto buněk a jednotlivá oka nabízejí podobně hrubý obraz, jako kdybychom si my okolní svět zobrazili různými odstíny šedi na desetkrát deseti políčkách. Je jasné, že takovýma očima bychom se jen těžko kochali pohledem na tajemný úsměv da Vinciho Mony Lisy.

Chroustnatkám hrubý obraz generovaný „minerálním okem“ bohatě stačí. Jejich život běží loudavým tempem. Po vlhkém kamení příbojové zóny se přemisťují šnečí rychlostí. I kdyby měly ostříží zrak, nebyl by jim mnoho platný, protože v moři neexistuje mnoho tvorů tak pomalých, aby před nimi chroustnatka stačila včas prchnout. Její obranná strategie je založena na tom, že se pevně přichytí podkladu a přitiskne k němu okraje schránky. Pak je pro

každého nepřítele těžké chroustnatku od podkladu odtrhnout a zaútočit na měkkou spodní stranu jejího těla.

Stovky oček rozmístěných po povrchu schránky hlídají celý prostor nad chroustnatkou. Pokud se nad živočichem „setmí“, protože na něj dopadne stín jiného tvora, stačí, aby se přimkl ke kameni. Zrak chroustnatek je „nerozbitný“. Když se nějaké očko nenávratně poškodí, obranyschopnost to nijak zvlášť nepostihne. Okolní očka práci ztraceného zrakového orgánu převzou. Záhadou zůstává, jak chroustnatka informace získané prostřednictvím stovek očí nakonec zpracuje a vyhodnotí. Má totiž velmi primitivní nervový systém, který se zdá pro zvládnutí takového úkolu naprosto nedostatečný.

SVĚT BAREV

Sluneční záření dopadající na zemský povrch má různé kmity. Člověk a většina savců z něj vnímají jen poměrně úzký výsek. Naše oko zachytí záření s vlnovou délkou od 390 do 770 nanometrů (1 nanometr je miliardtina metru). Ultrafialové záření s ještě kratšími vlnami ani delší vlny infračerveného záření za normálních okolností nevidíme.

Sítnice oka člověka a spolu s ní i sítnice většiny obratlovců je uzpůsobena k vnímání světla prostřednictvím dvou typů buněk. Silné světlo aktivuje světločivné buňky označované jako čípky. Ty jsou u mnoha živočichů zodpovědné i za vnímání barev. Za zhoršených světelných podmínek přicházejí ke slovu tyčinky reagující na kontrast.

Funkce oka, sítnice a světločivných buněk závisí na souhře dvou základních molekul. První vzniká modifikací pigmentů karotenoidů, které se nacházejí ve velkém množství v rostlinách. Živočichové je obvykle přijímají s potravou. Býložravci konzumují karotenoidy přímo z jejich rostlinného zdroje. Masožravci je získávají zprostředkovaně z těla své kořisti. Druhou základní složkou nutnou pro vidění je bílkovina opsin. Modifikovaný karotenoid se váže na opsin a vytváří tak základní komponentu pro zachycení světla. Pokud na ni dopadne foton, mění se nejprve tvar modifikovaného karotenoidu a následně i prostorové uspořádání opsinu, který je pevně zabudován do membrán světločivných buněk. V reakci na změnu tvaru molekuly opsinu se aktivuje světločivná buňka. Opsinů je v oku hned několik typů a každý je připravený pro vnímání světla určité vlnové délky – tedy barvy.

Lidské oko je vybaveno pro zachycení modré, zelené a červené barvy. Kombinací těchto vjemů pak vnímáme další barvy a jejich odstíny. Když se například díváme na žlutou barvu květu pampelišky, dostává náš mozek silné podněty z buněk sítnice reagujících na červenou a zelenou složku světla.

VÝHODY BAREVNÉHO VIDĚNÍ

Naopak, buňky citlivé na modré světlo reagují jen velmi slabě. Náš mozek řeší „barevnou“ rovnici:

hodně červené + hodně zelené + málo modré = X.

A kalkulaci dospěje k výsledku:

X = žlutá.

Teprve nedávno se ukázalo, že na barvy reaguje jen malá část světločivných buněk, které jsou k tomu v sítnici předurčeny. Plně dvě třetiny buněk z výbavy pro barevné vidění posílají do mozku „černobílý“ signál. Nebarevné vidění je pro nás zjevně mnohem důležitější, protože jeho prostřednictvím získáváme informace o obrysech a tvarech. Dovoluje nám například při přecházení rušné silnice rozlišit přijíždějící automobil od nedaleko zaparkovaného vozidla. Fakt, zda je přijíždějící auto červené nebo zelené, je ve srovnání s rizikem, že nás přehlédnutý vůz přejede, zcela podružný. Odlišení zelené a červené samozřejmě nabývá na důležitosti, když sbíráme jahody a potřebujeme vybírat jen plně dozrálé plody. Tuto informaci nám však v sítnici oka spolehlivě zajistí i malý počet buněk, jež se rozlišení obou barev ujmou.

Barvy pro nás přesto mají velký význam. Jejich prostřednictvím vnímáme některé detaily prostorového upořádání okolí a lépe pak koordinujeme své pohyby a aktivity. Barvy nás také varují před riziky. Nejeden nebezpečný živočich má pestré výstražné zbarvení. Jako varování působí žluto-černé pruhy sršňů (*Vespa*), černo-bíle pruhovaná jedovatá ryba s případným názvem perutýn pruhovaný (*Dendrochirus zebra*), černo-červené skvrny amerického ještěra korovce jedovatého (*Heloderma suspectum*) nebo barevně kontrastní oranžovo-černé zbarvení křídel amerického motýla danaa stěhovavého (*Danaus plexipus*).

➤ Pro více informací viz obr. Vlnové délky světla v barevné příloze.

VÝHODY BAREVNÉHO VIDĚNÍ

Výhody barevného vidění jsou patrné u madagaskarských lemurů sifaků malých (*Propithecus verreauxi*). Ti mají světločivné buňky pro zelené a červené světlo kódované jediným genem. Jedna varianta genu zajistí vnímání červené a druhá varianta dovolí rozlišit zelenou barvu. Gen je vázán na pohlaví tak, že samci mají jen jeden výtisk genu, zatímco samice jím disponují ve dvou kopiích. Žádný ze samců proto zelenou od červené nerozezná. Všichni jsou barvoslepí a vidí buď jen zelenou, nebo jen červenou. U samic zaleží na tom, jaké varianty genu po rodičích zdědí. Pokud dostane dcera do vínku od matky

a otce odlišné varianty, vidí jak červenou, tak i zelenou. Pokud ale zdědí dvě stejné varianty genu, je barvoslepá jako samci.

V tlupách sifaků malých bývá v průměru necelá čtvrtina samic, které rozeznají červenou od zelené. V některých tlupách jich může být více, v jiných se nenajde ani jedna. Zajímavé je, že tlupy s výhradně barvoslepými zvířaty během období sucha výrazně strádají, zatímco tlupám, kde alespoň jedna samice rozezná zelenou od červené, se vede poměrně dobře.

Vysvětlení je celkem jednoduché. Sifakové se živí ovocem a při jeho hledání se řídí zrakem. Barvoslepi lemuři dokážou odlišit plody od listů. Nerozeznají však podle barvy zralé červené ovoce od nezralých zelených plodů. Nezralé ovoce přitom obsahuje méně živin a často se v něm nacházejí i látky, které mají odpudivou chuť, snižují celkovou stravitelnost potravy, nebo jsou dokonce jedovaté. Pokud se v tlupě vyskytuje samice s úplným barevným viděním, vodí ostatní lemury tam, kde se nabízí zralé ovoce s vysokým obsahem cukrů a dalších důležitých živin. Lemuři z barvoslepých tlup zhubnou během období sucha i o pětinu. Naopak jejich protějšky z tlup se samicemi schopnými odlišit zelenou a červenou ztratí za stejné období často jen 5 % tělesné hmotnosti.

Ve vzácných případech mohou podobným způsobem rozšířit své barevné vidění i lidé. Geny pro světločivné bílkoviny se mohou vyskytovat v různých formách. Někdy jsou tyto formy nefunkční a výsledkem je pak barvoslepost. Lidé postižení tzv. daltonismem neodliší červenou a zelenou barvu podobně jako sifakové. Jindy jsou ale varianty genů funkční a každá dává vzniknout světločivnému proteinu citlivému na světlo poněkud jiné barvy. Tyto geny jsou opět vázané na pohlaví a muži je dědí jen v jednom výtisku. Ženy však mohou zdědit od rodičů dvě různé varianty genu pro daný světločivný protein a vnímavost jejich očí k barvám citelně naroste. Byl popsán případ, kdy takto dědičně disponovaná žena rozeznávala barvy v zelené a červené části spektra s mnohem vyšší citlivostí než většina lidí.

BAREVNÍ PŘEBORNÍCI

Někteří obratlovci vidí jen černobíle. Například velryba grónská (*Balaena mysticetus*) či její příbuzná velryba biskajská (*Eubalaena glacialis glacialis*) sice mají v sítnici tyčinky i čípky, ale čípky postrádají molekuly opsinu klíčové pro zachycení světla. Čípky velryb jsou tedy slepé a zrak velryb stojí i padá s tyčinkami. Velryby proto vidí dobře v přítomí mořských hlubin. Problémy naopak mívají v silném slunečním jasu u hladiny. Oslnění sluncem možná vysvětluje, proč se tyto velryby tak často nevyhnou nastraženým rybářským sítím a uvíznou v nich. Používáním sítí nápadně pestrých barev

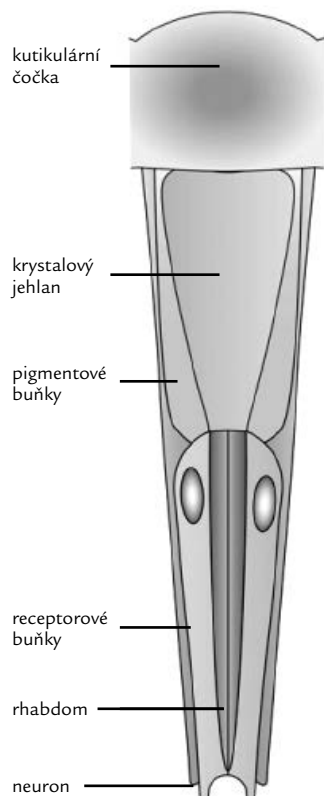
těmto nehodám nezabráníme, protože pro černobílý velrybí zrak nejsou „křiklavé“ barvy zřetelnější.

Mezi obratlovci vládneu nejdokonalejším barevným viděním ptáci. Oko mají uzpůsobené k vnímání hned čtyř základních barev. Oproti člověku jsou sítnice oka opeřenců navíc vybaveny světločivnými buňkami schopnými reagovat i na vlnové délky posunuté do fialové části spektra.

Barevné vidění významně přispívá k vysoké ostrosti zraku některých opeřenců. Obecně platí, že ptačí oko není přeborník v registrování barevných kontrastů. V tomto ohledu je průměrný ptačí zrak desetkrát horší než lidský. Existují ale výjimky. Jednou z nich je nevelký americký dravec káně Harrisova (*Parabuteo unicinctus*). Na rozdíl od „velkookých“ ptáků, jako je orel klínocasý, nemá tato káně oči příliš velké a nedostala tedy do vínku nijak zvláštní předpoklady pro ostré vidění. Tento handicap si však více než dostatečně kompenzuje viděním barevným. Pokud se kořist liší svým zbarvením od pozadí, rozezná ji káně Harrisova na dvakrát větší vzdálenost než člověk. To je u ptáka s hmotností kolem jednoho kilogramu a tomu odpovídající velikosti očí výkon skutečně úctyhodný. Káně využívá svůj barevně ostrý zrak k lovu v lesích, kde se střídají malé ostře osvětlené plochy s podobně velkými ploškami schovanými ve stínu. Orientace zrakem je v takovém prostředí velmi náročná.

V živočišné říši najdeme tvory s ještě důkladnější výbavou pro vnímání různých barev, než jakou disponují ptáci. Patří k nim i straškové (*Squilla*). Tato zvláštní skupina mořských koryšů se vyvíjela samostatně po dlouhých 400 milionů let. Výsledkem jejich evoluční odyseje jsou i velké oči složené z jednotlivých malých oček, tzv. omatidií. Straškově oko vypadá, jako kdyby mu přes něj přejela miniaturní motorka a otiskla tam pneumatiku. Středem oka se totiž táhne šest rovnoběžných řad tvořených zcela zvláštními omatidii. Očka ze středové „linky“ jsou vybavena světločivnými buňkami citlivými až na šestnáct různých barev. To je opravdu bohatá kolekce. Skoro by se chtělo říct – až příliš bohatá.

Už počátkem 19. století došel britský učenec Thomas Young k závěru, že barevné vidění je zprostředkováno čidly, která se nacházejí v sítnici oka a jsou citlivá k různým barvám. Neuniklo mu, že za příliš široké spektrum čidel k mnoha různým barvám platí oko daň v podobě omezené hloubky zorného pole. Young z toho vyvodil, že by živočichové měli vystačit s dvěma až čtyřmi čidly pro různé barvy. To je optimální kompromis. Dovoluje dostatečné rozlišení barev a přitom příliš neomezuje ostré vidění do hloubky zorného pole. Většina tvorů se Youngem zformulovaného pravidla drží. Strašek jím však během evoluce z nějakého důvodu pohrdl. Proč? K čemu potřebuje přehnaně dokonalé barevné vidění?



Oko hmyzu

Složené oko hmyzu se může skládat z několika mála jednoduchých očí, tzv. omatidií, ale může ho tvořit i několik tisíc těchto oček, tak jako u ováda *Tabanus lineola* (vlevo).

Omatidium má stejný základ jako oko hlavonožců nebo obratlovců a jeho stavbu řídí obdobné geny. Navrchu je kryto kutikulou, která je obdobou rohovky oka savců. Je vypoukle tvarovaná a slouží proto i jako čočka. Dalším optickým prvkem omatidia je krystalový jehlan, který rovněž přispívá k lomu paprsků světla dopadajícího do oka. Krystalový jehlan je od rušivého světla z vedlejších omatidií chráněn pigmentovými buňkami. Jako sítnice slouží v omatidiu receptorové buňky, které v místě vzájemného kontaktu vytvářejí tzv. rhabdom neboli zrakovou tyčku. Axony receptorových buněk odvádějí nervové vzruchy do nervových uzlin sloužících hmyzu jako mozek.

Foto: Thomas Shahan, Wikimedia.

Schéma: Nilsson D.-E., Almut Kelber A.: A functional analysis of compound eye evolution. *Arthropod Structure and Development* 36, 2007, 373–85.

Záhada zraku strašků se ještě prohloubila, když se ukázalo, že barvy vnímají neuvěřitelně mizerně. Mají třeba problém odlišit modrou od zeleně. Nehnou tedy s úkolem, jaký hravě zvládá člověk vybavený jen třemi typy světločivných buněk.

Každé z šestnácti typů barevných čidel v oku straška reaguje na svou barvu s mnohem nižší citlivostí, než s jakou rozeznává barvy člověk. Koryš se však obejde bez složitých „kalkulací“, jaké vyžaduje od mozku lidský zrak. Zatímco

my zaznamenáme žlutou barvu až poté, co náš vysoce výkonný mozek posoudí sílu podnětů zachycených barevnými čidly pro červenou, zelenou a modrou barvu, primitivní strašková nervová soustava dostává barvy z oka už „roztříděné“. Sice jen nahrubo, ale to straškovi nevadí. Hlavní je, že nervová soustava nemá se signály z oka mnoho práce a neztrácí jejich tříděním čas.

Pro straška je rychlá práce zraku nesmírně důležitá. Pokud by se ve zvířecí říši konal šampionát v boxu, byl by strašek ve své váhové kategorii horším favoritem. Jeden pár končetin na hrudi má zformovaný do podoby kyje a těmi dokáže udeřit rekordní rychlostí a neuvěřitelnou silou. Při dopadu na kořist se straškův kyj pohybuje rychlostí přes 800 km/h. Ani ta nejstřelhitější se pohybující kořist nebývá dost rychlá, aby stačila před jeho úderem uhnout. Úder končetiny straška je tak rychlý, že se za nohou vytváří ve vodě vakuová bublina, jež se vzápětí hrouť. Prudký kolaps bubliny dokonce vyvolá ve vodě slabý světelný záblesk tzv. sonoluminiscenci. Pokud má strašek kontrolovat takhle rychlý úder, pak se mu bleskově pracující oko určitě hodí.

Strašci nejsou jediní živočichové, u kterých to evoluce s výbavou pro barevné vidění poněkud přehnal. Australský otakárek *Graphium sarpedon* má hned patnáct různých zrakových „čidel“ pro barvy. Jedno reaguje na ultrafialové světlo a další na fialovou část spektra viditelnou i lidským okem. Pro různé odstíny modré si australský otakárek vyhradil tři různá čidla. Ve velkých očích tohoto motýla nalezneme i speciální čidlo pro modrozelenou a k tomu i čtveřici čidel zařízených na detekci zelených odstínů. Červenou část spektra registruje otakárek hned pětici čidel.

Motýli potřebují rozeznávat barvy při hledání květů rostlin a také ke zhodnocení hry barev na křídlech příslušníků vlastního druhu. Mnohé druhy však zvládají tyto úkoly s podstatně chudší výbavou světločivných buněk, než jakou dala příroda do vínku „patnáctibarevnému“ otakárkovi z Austrálie. Jeho asijský příbuzný otakárek *Papilio xuthus* například vystačí se šesti typy barevných čidel.

Graphium sarpedon je na tom ve skutečnosti velmi podobně, a dokonce naplňuje zásadu formulovanou Thomasem Youngem. K rozeznávání barev používá jen čtyři typy čidel, zbývajících jedenáct plní speciální úkoly. Motýlovi pomáhají například při identifikaci rychle se pohybujících objektů na pozadí sluncem ozářené oblohy nebo při vyhledávání barevných objektů ukrytých v zelené vegetaci. Všechny tyto dovednosti se otakárkovi náramně hodí. Rychle se pohybující objekt může být buď partner vhodný ke zplození potomstva, nebo hladový hmyzožravý pták. A spolehlivé vyhledávání květů jako zdroje kaloricky vydatného nektaru může být pro hladového motýla otázkou přežití.

CHAMELEONI MOŘÍ

Chameleoni se stali symbolem pro schopnost rychle a cíleně měnit barvy těla. Jsou v tom tak dobří, že za chameleonské označujeme i oportunistické změny názorů. Skutečnými přeborníky v barevném převlékání kabátů jsou však sépie (*Sepiida*). Dokážou se barvou kůže dokonale přizpůsobit okolí, takže jsou pro náhodného pozorovatele prakticky neviditelné. Umějí se však také barevně rozparádít, a pak se prostě nedají přehlédnout.

Příroda vybavila sépie a další hlavonožce k těmto barevným hrátkám zvláštními buňkami, tzv. chromatofory, uloženými těsně pod povrchem kůže. Každý chromatofor je vybaven pružným váčkem naplněným pigmentem. Sépie má „na skladě“ pigmenty černé, hnědé, oranžové, červené a žluté. Složitý systém nervů a svalů dokáže vyvolat smrštění nebo naopak roztažení váčků. Pokud je váček roztažený, je jeho obsah na pohled jasně patrný. Pokud se smrští, ztrácí pigment v kůži na intenzitě.

Další výbavu pro chameleonské proměny sépií tvoří iridiofory a leukofory. Iridiofory obsahují vrstvičky reflexního materiálu, na jehož povrchu se generují kovově lesklé modré, zelené, stříbrné i zlaté barvy podobným mechanismem, jakým vznikají duhové olejové skvrny na povrchu kaluží. Leukofory fungují jako mikroskopická zrcátka odrážející světlo do okolí.

K dokonalé kamufláži přispívá kromě jiného také výbava iridioforů a leukofořů speciální bílkovinou zvanou reflektin. V iridioforech je zformován do vrstviček, na kterých se odráží a láme světlo. V leukoforech se reflektin formuje do mikroskopických kuliček schopných rozehrát širokou škálu světelných efektů.

Žádný jiný živoch reflexin ve svém bohatém bílkovinném repertoáru nemá a ani hlavonožci nejsou původními majiteli tohoto pozoruhodného materiálu. Gen pro tvorbu reflektinu si dávní předkové sépií vypůjčili od bakterie *Vibrio fischeri*, která žije s hlavonožci jako symbiont.

Sépie mění barvu těla nejen kvůli maskování, ale také tímto způsobem komunikují. Například samečci olihně karibské (*Sepioteuthis sepioidea*) se zbarvují rudě, pokud chtějí nalákat samičku. Soky v námluvách zahánějí bílým zbarvením. Když se sameček ocitne mezi vyhlídnutou samičkou a konkurentem, nezaskočí ho to ani na moment. Každou polovinu těla zbarví jinak. Směrem k samičce zrudne, strana těla obrácená k sokovi mu zbělá. Kalmar peruánský (*Dosidicus gigas*) vytváří rychlou změnou barev krátké záblesky. Vědci se domnívají, že kalmaři těmito záblesky komunikují podobně, jako dříve námořníci „blikali“ světlem silných reflektorů z lodi na loď zprávy v morseovce. Jestli je to pravda a co si kalmaři případně sdělují, zůstává obestřeno tajemstvím.

Je k neuvěření, že sépie páchající hotové barevné orgie mají v sítnici oka jediný typ buněk schopných reagovat na světlo. Vidí tedy černobíle a jsou

dokonale barvoslepé. Proč si vůbec předávají „barevné vzkazy“? Nepodstupují zbytečné riziko, že je zahlédnou nepřátelé s očima uzpůsobenými k barevnému vidění? A jak se může sépie barevně maskovat, když barvy ve svém okolí nevidí? Odpověď na tyto znepokojivé otázky se nachází v prapodivně tvarované zornici oka hlavonožců.

Člověk má zornici kulatou. Světlo jí prochází do oční čočky, která paprsky láme a zaostřuje do jednoho bodu na sítnici. Díky tomu vidíme ostře a v jasných barvách. To platí při stažené zornici. Pokud máme zornice doširoka rozšířené, například po podání některých léků při vyšetření u očního lékaře, vidíme rozmazaně a obrysy každého objektu navíc hrají pestrými barvami. Odborně se tomuto efektu říká chromatická vada. Vzniká proto, že čočka v našem oku láme odlišně různé barevné složky bílého světla. Nejméně se ohýbá červené světlo, nejvíce naopak světlo fialové. Čím více máme roztaženou zornici, tím větší prostor pro lom světla na čočce a pro chromatickou vadu nabízíme.

Většina tvorů má oko s co nejužší zornicí a chromatickou vadu tím výrazně potlačí. Hlavonožci však mají zornici velkou a navíc tvarovanou do U nebo W. Příroda jako kdyby se v jejich oku snažila o co největší chromatickou vadu. Právě díky této „nesmyslné“ anatomii zornice mají hlavonožci zajištěné vnímání barev navzdory spartánské výbavě sítnice světločivnými buňkami.

Díky široce roztažené zornici vidí sépie a další hlavonožci rozmazaně. Tato rozmazanost obrazu však závisí na barvě pozorovaného objektu. Vědce šokovalo, jak se ostrost obrazu na sítnici sépií mění s barvou. Ačkoli skutečné barvy nevidí, z barevnosti okolního světa jim mnoho neuteče. Široce roztažitelná zornice jim ve srovnání s úzkou zornicí přináší i další výhody. Pouští do oka více světla a dovoluje sépiím vidět i ve tmě. Vyhodnocování informací o barvách přicházejících z oka do centrálního nervového systému je vysoce náročné. Možná právě tomuto „duševnímu tréninku“ vděčí hlavonožci za svou překvapivě vysokou inteligenci.

INFRAČERVENÁ PODÍVANÁ

Infračervenou část spektra slunečního záření za normálních podmínek nevidíme. Vědci pracující s infračerveným laserem ale jeho paprsek vidí, přestože září v „neviditelné“ části spektra. Jak je to možné? Laser zahustí fotony tak, že do světločivných molekul na sítnici našeho oka nenarazí fotony po jednom, ale někdy i po dvou. Zatímco jeden slabý foton infračerveného světla molekulu nenabudí, dvojice fotonů odvedou stejnou práci jako jediný, podstatně „silnější“ foton světla z viditelné části spektra. Infračervený laser tedy vidíme, ale infračervené záření „nezahuštěné“ laserem zůstává našemu zraku utajeno.

Živočichové celkem běžně zachytí infračervené záření specializovanými nervovými zakončeními v kůži a sliznicích a vnímají ho jako teplo. Některé tvory však vybavila příroda specializovanými orgány pro detekci infračerveného záření. Například u chřestýšů (*Crotalinae*) sídlí „oko“ pro infračervené záření v malých jamkách umístěných po stranách hlavy mezi tlamou a očima. Tvoří ho větší dutina vyplněná vzduchem, kterou odděluje bohatě prokrvená membrána od menší dutiny s nervovými zakončeními. Orgán chřestýšů dovoluje zachytit i velmi slabé tepelné podněty a je zároveň dobře chlazen, takže se had nepotýká s tepelným „šumem“ vlastního těla, který by mu komplikoval orientaci. Had ovládá otvor, kterým do orgánu přichází infračervené paprsky, a může si tak infračervený obraz promítnout na místo s největší citlivostí. Chřestýš svým orgánem zaostřuje podobně, jako my zaostřujeme zrakem.

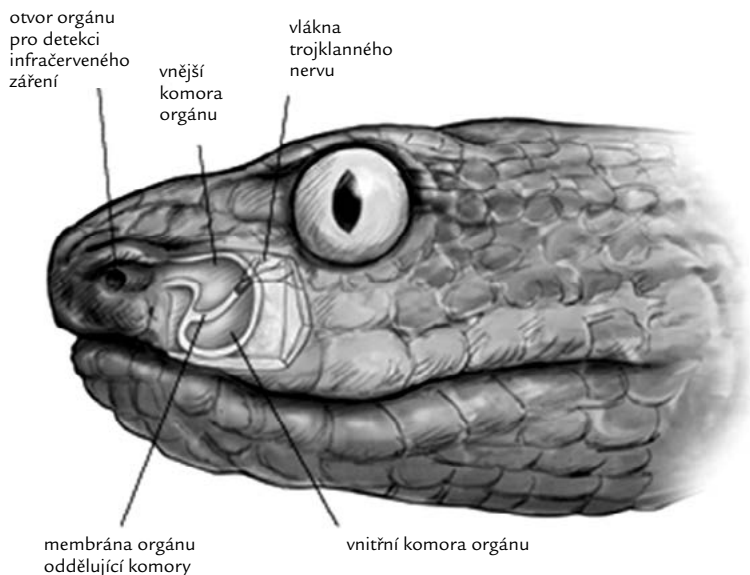
Hadi používají svůj smysl pro infračervené „vidění“ k vyhledávání teplokrevných živočichů. Najdou tak třeba sysla ukrytého v neproniknutelné tmě podzemní nory. Na chladnějším pozadí teplé tělíčko hlodavce silně září a chřestýšův orgán ho nemůže přehlédnout. Hadi ale využívají orgán i k měření teploty okolí a k vyhledávání míst, která jim s ohledem na teplotu nejlépe vyhovují. Podobně jako chřestýši jsou k vnímání infračerveného záření vybaveni i hroznýši a krajty (*Boidae*), kteří mají jamky s těmito orgány mezi nozdrami a tlamou na horní čelisti a někdy i na čelisti spodní.

I když hadi nevnímají infračervené záření okem, je u nich označení „infračervené vidění“ namístě. Nejen proto, že jamkovitý orgán chřestýše ostří podobně jako oko. Vsruchy z něj putují přes trojklanný nerv do té části mozku, která běžně zpracovává obraz přicházející z očí. Zatím ale není jasné, jestli si hadi promítají tepelné obrázky přes obraz zorného pole očí a skutečně infračerveně vidí.

Mezi savci jsou pro detekci infračerveného záření vybaveni jihoameričtí příbuzní našich netopýrů řazení mezi upíry (*Desmodontinae*), např. upír obecný (*Desmodus rotundus*), upír bělokřídlý (*Diaemus youngi*) nebo upír ptačí (*Phylla ecaudata*). Tito podivuhodní živočichové získali své hororové zoologické jméno proto, že se živí výhradně krví teplokrevných živočichů. Upír se uprostřed noci připlíží k nic netušící spící oběti a na jejím těle neomylně najde místo, kam se vyplatí zabořit ostré zoubky. Nehluboko pod kůží tam proudí žilou teplá krev. Žílu upíři najdou díky tomu, že vycítí i velmi malé rozdíly v intenzitě infračerveného záření. Poznaj, kde je kůže díky krvi proudící mělce uloženou žilou o něco málo teplejší.

Pozoruhodnou demonstraci zvířecích schopností vnímat infračervené záření nabídl v srpnu roku 1923 požár zásobníku s naftou v Kalifornii. Nádrž vzplála po zásahu bleskem a do večera se její hořící obsah ohřál natolik, že vzkypěl varem a vystříkl do okruhu přes sto metrů. Vzniklé naftové jezero

INFRAČERVENÁ PODÍVANÁ



Orgán pro detekci infračerveného záření

Někteří hadi, např. chřestýši, jsou vybaveni zvláštním orgánem pro detekci infračerveného záření. Ten je tvořen dutinou v přední části hlavy. Dutina je vyplněná vzduchem a membránou rozdělená na dvě části. V membráně se nacházejí receptory citlivé na infračervené světlo, které předávají vzruchy do trojklanného nervu. Ten odvádí vzruchy do mozku, kde je zpracovává zrakové centrum.

Lewis T.: Thermoreception. *The Scientist* 32941, 2016.

pak hořelo další dva dny. Ještě než uhasly poslední plameny, stalo se něco nevídaného. K požáru se začala slétat mračna uhlově černých brouků krasců druhu *Melanophila consputa*, kteří jsou na jihozápadě USA známí jako „lovci požárů“ nebo také jako „ohnoví brouci“. Jméno si vysloužili okázalou vášní pro ohnivý živel. Slétají se k lesním požárům, páří se na doutnajícímu dřevu spálených stromů a samičky pak nakladou oplozená vajíčka na zuhelnatělé kmeny. Larvy se do spáleného dřeva zavrtávají a živí se jím. Tahle zvláštní záliba „ohnových brouků“ ve spoušti zanechané požárem má své opodstatnění. Živé stromy se brání proti napadení škůdci velmi účinnými zbraněmi, k nimž patří například zaplavení chodbiček hmyzu pryskyřicí. Nic takového „uhelným“ krascům *Melanophila consputa* nehrozí. Jejich oběti jsou dokonale mrtvé.

K vyhledávání ohně jsou krasci vybaveni speciálními čidly, která se nacházejí na druhém ze tří párů nohou. Čidlo se skládá ze sedmi desítek tzv. sensil, v nichž je uzavřeno nepatrné množství vody. Pokud se sensila ohřeje, pak se voda začne roztahovat, tlačí na stěny sensily a brouk ví, že nablízku je vydatný zdroj tepla.

Na jakou vzdálenost brouci tepelný senzor funguje? Kalifornský požár dělilo od nejbližšího místa přirozeného výskytu krasců *Melanophila consputa* v pohoří

Sierra Nevada propastných 130 kilometrů. Z velikosti hořícího zásobníku se dalo spočítat, jak silnému infračervenému záření byli brouci v horských lesích Sierry Nevada vystaveni. Záření bylo šestsetkrát slabší než citlivost jedné sensily. Vzájemnou souhrou několika desítek sensil se ale krasec *Melanophila consputa* zjevně dopracuje citlivosti, jaká k detekci požáru vzdáleného přes sto kilometrů plně postačuje.

Zdaleka ne všichni broučí milovníci spáleného dřeva jsou vybaveni podobně jako americký ohňový brouk. Australští krasci *Merimna atrata* mají sice na stranách břicha orgány reagující na infračervené záření, ale ty jsou jen málo citlivé. Když brouk takové záření zachytí, neletí za jeho zdrojem, ale naopak od něj prchá. Orgán ho chrání před usednutím na dosud žhavé dřevo. Požářiště hledají australští brouci zřejmě jinak. Nejspíš se řídí pachem dýmu.

ULTRAFIALOVÝ SVĚT

Podobně jako na infračervené záření nereagují světločivné buňky naší sítnice ani na ultrafialovou část slunečního světla s vlnovou délkou pod 390 nanometrů. Neznamená to, že by nám mohlo být jedno, jak silnému ultrafialovému záření jsme vystaveni. O tom se přesvědčil doslova na vlastní kůži každý, kdo zůstal na slunkku déle, než je zdrávo, a ultrafialové záření mu spálilo pokožku. Záření z ultrafialové části spektra hrubě nesvědčí ani lidskému oku, protože spálí rohovku pokrývající přední stranu oka a spojivku na přechodu mezi víčkem a rohovkou. V živočišné říši však najdeme tvory, kteří jsou v ultrafialovém světě jako doma.

Ultrafialové záření často vidí svýma složenýmá očima hmyz. Třeba včely medonosné (*Apis mellifera*) spoléhají při hledání pylu a nektaru kromě jiných vodítek i na vzhled květů rostlin v ultrafialové části spektra. Orsej blatoucholistý (*Ranunculus ficaria*) kvete pro člověka žlutě, a to včetně středu květů vyplněného pestíky a tyčinkami. Pro složené oko včely není květ jednobarevný, ale tvoří ho dvě kontrastní barvy – sytější ve středu květu a bledší na lístcích okvětí, protože pestíky a tyčinky silněji odrážejí ultrafialové záření.

Se schopností včel, čmeláků a dalších hmyzích opylovačů vidět velmi dobře modrou, fialovou a ultrafialovou se pojí jedna velká záhada. Barva květů je dána přítomností pigmentů, které pohlcují záření o některých vlnových délkách a záření o jiných délkách naopak intenzivně odrážejí. Modré a fialové pigmenty vyrábějí rostliny se značnými obtížemi, a to je důvod, proč rostliny tak často kvetou žlutě nebo červeně. Hmyz rozlišuje žlutou a červenou s velkými problémy. Přesto hmyzí opylovače žluté, oranžové a červené květy neodolatelně lákají bez ohledu na to, jaký mají tvar nebo jak voní. Co k nim včely a čmeláky přitahuje?

Kromě pigmentů dodávají květům barvu velmi jemné povrchové nerovnosti nanometrových rozměrů. Dochází na nich k tzv. interferenci světla. To znamená, že dopadající a odrážené paprsky se na povrchových nerovnostech vzájemně skládají do duhové hry barev. Jde o podobný světelný efekt, jaký rozehrává duhové barvy na povrchu CD disku zbrzděného systémem velmi jemných rovnoběžných rýh.

Řada žlutých, červených a oranžových květů, na jejichž barvu není oko včel a čmeláků nijak zvlášť citlivé, má na povrchu okvětních lístků systém drážek z vosků. Interferencí světla na nich vzniká hra barev, kterou lidské oko spatří jen za příhodných světelných podmínek. Pro včely a čmeláky je duhový efekt nápadnější a láká je k celé řadě rostlin se žlutými, červenými či oranžovými květy, např. k liliím (*Lilium*), pryskyřníkům (*Ranunculus*), bobům (*Lupinus*), lomikamenům (*Saxifraga*) nebo hluchavkám (*Lamium*).

Nanometrové voskové rýhy se u květů jednotlivých rostlinných druhů výrazně liší tvarem i rozmístěním. Na všech se ale paprsky interferencí přednostně skládají do modré, fialové, a dokonce i do ultrafialového záření. Modré „halo“ pak působí na hmyzí opylovače jako barevná návnada.

NA ULTRAFIALOVÝCH KŘÍDLECH

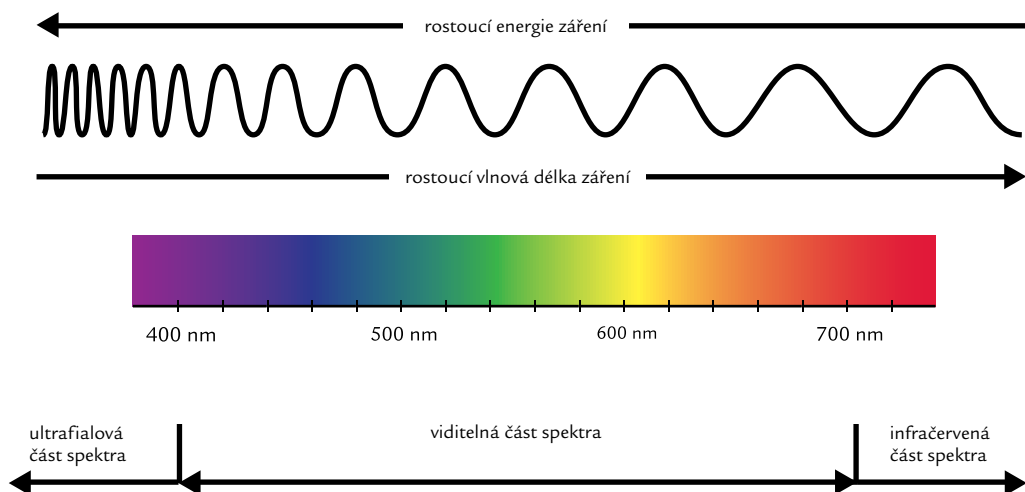
Motýli vnímají v ultrafialové části spektra barvy křídel příslušníků svého vlastního druhu. To není vždycky jednoduché, protože motýli poměrně často napodobují zbarvení křídel cizích jedovatých druhů, i když sami žádným jedem vybaveni nejsou. Předstíraná nebezpečnost je sice chrání před přirozenými nepřáteli, ale představuje problém při hledání partnerů. Čím lépe se podaří jedovatý druh imitovat, tím vyšší je pravděpodobnost, že si ho sami spletou s příslušníkem svého druhu a pokusí se mu nadbíhat. Babočky z rodu *Heliconius* z pralesů Střední a Jižní Ameriky se před podobnými omyly chrání „značkami“, jež jsou patrné jen v ultrafialové části světelného spektra. Gen, který ostatním motýlům dovoluje vidět ultrafialové záření, mají tyto tropické babočky zdvojený a díky tomu vidí ultrafialové odrazy od speciálního žlutého pigmentu. Jejich jedovaté „předlohy“ nesou na křídlech podobné žluté skvrny, ale ty v ultrafialovém světle nezáří. Pro predátora bez ultrafialového vidění vypadají oba druhy motýlů stejně. Babočka je však díky genu „navíc“ jasně odlišná.

K zajímavému účelu využívá ultrafialovou signalizaci ještěrka tilikva australská (*Tiliqua scincoides*). Na první pohled je velice nenápadná a s okolím dokonale splývá díky širokým hnědým pruhům táhnoucím se jí napříč tělem. Přesto se nevyhne střetům s početnou armádou přirozených nepřátel. Pasou po ní jak draví ptáci, tak i hadi nebo varani. Všichni tito tvorové vidí i v ultrafialové části slunečního spektra a tilikva pro ně má připravené překvapení.

Když se k tilikvě blíží nepřítel, zůstává ještěrka do poslední chvíle bez hnutí a spoléhá na ochranné zbarvení. Teprve na poslední chvíli prudce rozevře tlamu a odhalí modře zbarvený jazyk. Ten září překvapivě silně i v ultrafialovém světle. Kořen tilikvina jazyka je dokonce dvakrát více „ultrafialový“ než špička. Zároveň ze sebe ještěrka vyrazí varovné zasyčení a nafoukne tělo, aby vypadala větší. Tato obrana je poměrně účinná proti atakům dravců vedených ze vzduchu. Pták, který se lekne a zakolísá, snadno mine cíl. Pro tilikvu je klíčové správné načasování ultrafialové obrany. Pokud odhalí jazyk příliš brzy, může k sobě přilákat další predátory. Pokud naopak čeká s otevřením tlamy příliš dlouho, dravec stihne útok dokončit a ještěrka se nezachrání.

V řadě případů včasná detekce ultrafialového záření živočichovi dovoluje, aby se chránil před jeho škodlivými účinky. Dělá to například nereidka *Platynereis dumerilii*. Průsvitné larvy tohoto mořského červa jsou součástí mořského planktonu a volně se vznášejí ve vodě. Příroda je obdařila šesticí oček citlivých na modrozelenou barvu. V mozku mají navíc buňky citlivé na ultrafialové světlo. Pokud se larva ocitne v příliš velké hloubce, kam už proniká jen modrozelená složka slunečního záření, podrážděné buňky v očích ji na to upozorní a živočich zamíří k hladině. Jak stoupá vzhůru, nabírá ve vodě na intenzitě nebezpečné ultrafialové záření. Buňky mozku zjistí, kdy toto záření přesáhlo únosnou mez, a přinutí larvu opět klesat. Nereidka si tak neustále udržuje optimální hloubku ponoru.

Mezi savci je vnímání ultrafialového záření poměrně vzácné. Reaguje na něj sob (*Rangifer tarandus*), ačkoli nemá speciální gen pro vnímání ultrafialové barvy jako například ptáci. Vyvinula se u něj zvláštní varianta genu pro světločivný protein citlivý na modrou barvu, která má citlivost posunutou ke kratším vlnovým délkám, tedy k ultrafialové. K čemu ho sob využívá? Pomáhá mu přežít v drsných poměrech Arktidy. V zimních měsících za polárním kruhem slunce buď vůbec nevychází, nebo vystupuje jen velmi nízko nad obzor. Všude je jen led a sníh. Chabé zbytky slunečního svitu jsou rozptýleny natolik, že se z nich oku živočichů nabízí především ultrafialové záření. Sníh ho odráží až z 90 %. Některé povrchy však ultrafialové záření velmi intenzivně pohlcují a jeví se oku vnímavému k těmto vlnovým délkám jako tmavé či černé. Sob tak vidí černě například sníh potřísněný močí. To je pro něj životně důležitá informace, protože moč na sněhu prozrazuje přítomnost šelem nebo jiných sobů. Oběma je lepší se vyhnout. Jedni jsou nepřátelé, druhí konkurenti. Ultrafialové světlo pohlcují také lišejníky, na nichž se sobi popásají, takže zvířata tento důležitý zdroj potravy jen tak nepřehlédnou. Černá je v ultrafialovém světle i zvířecí srst, díky čemuž ostře kontrastuje s okolním sněhem. Polární vlci mívají velmi světlé kožichy a zdají se na sněhu dobře maskovaní. Sob je ale v ultrafialovém světle snadno odhalí.



Vlnové délky světla

Světlo je elektromagnetické záření. Lidské oko z něj vnímá jen malý výsek. Světločivné buňky naší oční sítnice dovedou převést na nervový vzruch jen záření s vlnami dlouhými od 390 do 770 nanometrů. Světlo s vlnovou délkou od 390 do 450 nanometrů vnímáme jako fialové. Vlnové délky od 450 do 490 nanometrů jsou pro člověka modré. Azurová nebo modrozelená mají vlnovou délku od 490 do 520 nanometrů. Jako zelené vidíme světlo s vlnovými délkami od 520 do 560 nanometrů. Vlnové délky od 560 do 590 nanometrů se nám jeví jako žluté. Oranžová barva je dána světlem o vlnových délkách od 590 do 635 nanometrů a červená zářením s vlnovou délkou 635 až 770 nanometrů. Záření s vlnovými délkami kratšími než 400 nanometrů označujeme jako ultrafialové. Jako infračervené označujeme záření s vlnovými délkami nad 700 nanometrů.



Pisila čáponohá (*Himantopus himantopus*)

Samci těchto brodivých ptáků se dvíří samicím, které přitom sledují přednostně levým okem.



Skákavka skleníková (*Hasarius adansoni*)
Oči nabízejí skákavce skleníkové rozmazaný pohled na svět. Přesto při skoku na kořist na vzdálenost několiknásobku délky vlastního těla jen málokdy mine cíl.



Chroustnatka zrnitá (*Acanthopleura granulata*)
Tento měkkýš má oči pod pevnou schránkou a na svět se dívá čočkami, které vytváří průhledné úseky jeho schránky.



Káně Harrisova (*Parabuteo unicinctus*)
Americký dravec vidí dvakrát ostřeji než člověk, i když má podstatně menší oči a tím také menší sítnici se světločivnými buňkami. Pomáhá mu v tom dokonalé barevné vidění.



Tetra mexická (*Astyanax mexicanus*)
Obývá podzemní řeky, kde panuje absolutní tma. Zrak nepotřebovala, a oči jí proto zakrněly.