

## Fyzikální a chemická podstata záznamu barevných obrazů

Oldřich Zmeškal, Michal Veselý a Barbora Komendová

Ústav fyzikální a spotřební chemie, Fakulta chemická, Vysoké učení technické v Brně,  
Purkyňova 118, 61200 Brno

email: zmeskal@fch.vutbr.cz

### 1. Úvod

Již od nepaměti se lidé snažili vytvořit obrazy objektů, které ve svém okolí pozorovali. Ve svých kresbách se pokoušeli zachytit jejich věrnou podobu, ale také vlastní pocity, které v nich předměty vyvolávaly. K uskutečňování svých představ využívali jednak znalosti matematiky (zpočátku intuitivně) a to především geometrie (aby zachytili proporce a perspektivu obrazů) a fyziky a chemie (k přípravě barev požadovaných vlastností). Jejich snahou bylo vyvolat v člověku stejný prostorový a barevný vjem jako při pozorování skutečných objektů.

Avšak teprve fotografie umožnila vytvořit obrazy, které dokumentovaly tvar, jas, později i barvu objektů světa. K rozvoji a hromadné výrobě obrazů pozorovaných v odraženém světle výrazně přispěl také knihtisk, obecně polygrafický průmysl.

Koncem 19. století se objevily aplikace, které umožnily pozorovat objekty vytvořené na jednobarevné reflexní ploše (zpravidla bílé) průchodem světla přes transparentní podložku, na které byl zaznamenán černobílý, později barevný obraz. Mezi tyto aplikace, ve 20. století velmi rozšířené, patří především film (kinematografie, technické i amatérské fotografie), ale také pozitivní fotografický film (diaprojekce) a transparentní fólie (zpětná projekce).

Počátkem 20. století vznikla také jiná aplikace, která umožnila vytvářet obrazy pomocí matice velkého počtu světlo generujících elementů různé světelné intenzity a barvy (na bázi fluorescence a fosforescence). Touto aplikací je televize, jejíž princip zobrazování byl převzat i monitory osobních (ale i jiných) počítačů. Tyto principy jsou v současné době využívány také ve spojení s aplikacemi umožňujícími vytvářet obrazy na reflexní podložce (tzv. dataprojektory).

Moderní technika založená na využití počítačů také zapříčinila změnu způsobu archivace obrazů. Klasické způsoby (např. kresby, film, fotografie) byly nahrazeny způsoby elektronickými, které jsou v současné době sice velmi náročné na objem digitálních dat (při srovnatelné kvalitě s klasickými způsoby), ale na druhé straně u nich nedochází ke zhoršování kvality obrazů vlivem stárnutí materiálů. K vytváření elektronických obrazů se v současné době využívají např. skenery, digitální fotoaparáty a digitální kamery.

Z uvedeného výčtu nových způsobů tvorby statických (dynamických) obrazů vyplývají i odlišné způsoby realizace podnětů v lidském mozku (prostřednictvím zraku) vedoucí ke stejnému (podobnému) vjemu jak při pozorování skutečných objektů, tak i jejich obrazů.

Z uvedeného rozboru vyplývá, že lidský mozek umožňuje zpracování tří základních typů obrazů

- obrazů vzniklých generací záření při fyzikálně chemických dějích (teplotní záření těles, světelná emise),

- obrazů vzniklých odrazem světla od látek absorbujících světlo pouze určitých vlnových délek (od tzv. spektrálních těles),
- obrazů vzniklých průchodem světla látkami, ve kterých dochází k absorpci světla určitých vlnových délek.

Mezi vlivy, které mohou vést k odlišnému vnímání reálného objektu a jeho obrazu patří např.

- optické vlastnosti a geometrické uspořádání světelných zdrojů použitých při osvětlení objektů a obrazů, resp. k jejich generaci,
- optické vlastnosti objektů (obrazů), které vnímáme (spektrální odrazivost, spektrální propustnost),
- optické vlastnosti detektorů světelného záření (světlocitlivé senzory, světlocitlivé záznamové materiály, zrak),
- chemické, resp. optoelektronické vlastnosti detektorů používaných k vytváření a archivaci obrazů.

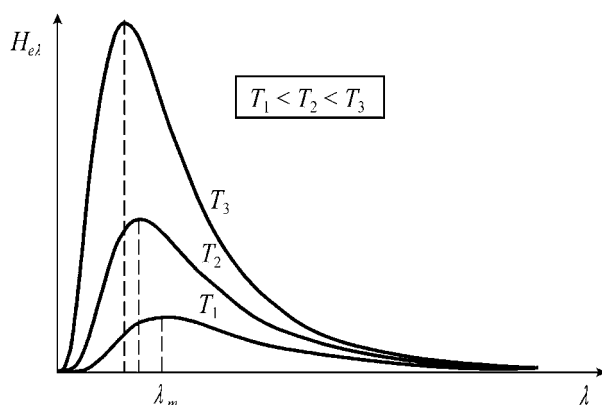
Ke sjednocení přístupu hodnocení optických vlastností objektů významnou měrou přispěla CIE (Commission Internationale de l'Éclairage - International Commission on Illumination), která definovala vlastnosti standardního kolorimetrického pozorovatele (v roce 1931 a 1964) a vlastností základních barevných prostorů používaných k hodnocení zařízení produkujících barevné obrazy a ke zjišťování odchylek mezi nimi.

Hodnocením schopnosti realizace barevného podání na konkrétních technických zařízeních a přenosem mezi nimi (např. skener - tiskárna) se zabývá systém správy barev (Color Management).

## 2. Podstata zobrazování

### a) Zdroje optického záření

Zdroje světla jsou objekty, které na základě různých fyzikálních principů generují optické záření. Podle typu se dělí na bodové, lineární (štěrbiny) a plošné. Podle průběhu vyzařovaného spektra na zdroje spojitého (např. žárovky) nebo diskrétního záření (např. světlocitlivé diody, některé výbojky).



Obr. 1 Spojité spektrum světelného záření

Spojité spektrum světelného záření může vzniknout např. teplotním zářením těles. Tvar spektra lze popsat Planckovým vyzařovacím zákonem (obr. 1). Množství energie  $E$  vyzařené jednotkovou plochou povrchu tělesa za jednotku času vyjadřuje *intenzita vyzařování*

$$H_e = \frac{d^2 E}{dS dt} = \frac{d\phi_e}{dt},$$

kde  $\phi_e$  je zářivý tok. Pro absolutně černé těleso, tj. těleso, které energii neodráží ani jím neprochází lze souvislost mezi intenzitou vyzařování

$H_e$  a absolutní teplotou tělesa  $T$  (v kelvinech) vyjádřit pomocí Stefan - Boltzmannova zákona

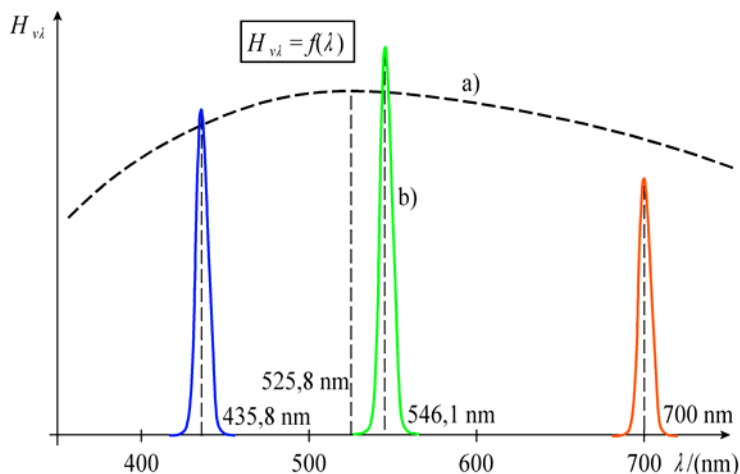
$$H_e = \int_0^{\infty} H_{e\lambda} d\lambda = \sigma T^4,$$

kde  $H_{e\lambda}$  je spektrální intenzita vyzařování,  $\lambda$  vlnová délka světla,  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$  je Stefan - Boltzmannova konstanta. Množství absorbované (vyzařené) energie je úměrné velikosti plochy pod odpovídající křivkou  $H_{e\lambda} = f(\lambda)$ .

Z polohy maxima lze pomocí Wienova posunovacího zákona určit teplotu tělesa

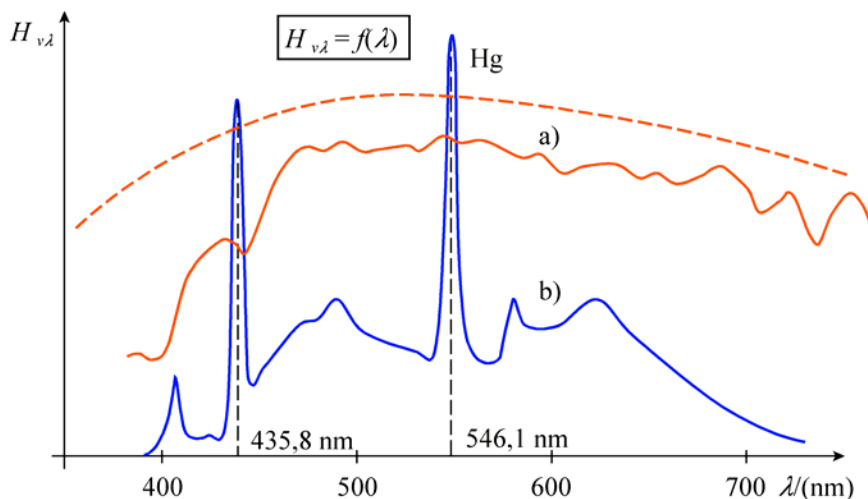
$$T = b/\lambda_m,$$

kde  $b = 2,89 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$ . Z obr. 1 je zřejmé, že poloha maxima se se zvyšující teplotou posouvá ke kratším vlnovým délkám.



Obr. 2 Ideální zdroj a) spojitého, b) diskrétního světelného záření ( $T = 5500 \text{ K}$ )

Na obr. 2 jsou společně se spektrální intenzitou vyzařování absolutně černého tělesa o teplotě  $T = 5500 \text{ K}$  ( $\lambda_m = 525,8 \text{ nm}$ ),  $H = 5,2 \cdot 10^7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  nakreslena spektra tří diskrétních světelných zdrojů ( $r$  - červené,  $g$  - zelené,  $b$  - modré), jejichž složením vznikne světlo stejné barvy (barevné teploty) a světlosti. Jejich vlnové délky byly zvoleny podle normy CIE ( $\lambda_r = 700,0 \text{ nm}$ ,  $\lambda_g = 546,1 \text{ nm}$ ,  $\lambda_b = 435,8 \text{ nm}$ ). Aby bylo dosaženo stejné barevné teploty byly zvoleny intenzity světelných zdrojů  $H_r \approx 4,8 \cdot 10^7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ,  $H_g \approx 5,2 \cdot 10^7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ,  $H_b \approx 4,9 \cdot 10^7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ .



Obr. 3 Reálný zdroj a) spojitého, b) diskrétního světelného záření ( $T = 5500 \text{ K}$ ), čárkovaně – ideální zdroj světla (záření absolutně černého tělesa), [1]

I když Slunce můžeme považovat za absolutně černé těleso, bude se spektrum záření dopadající na zemský povrch lišit od charakteristik uvedených na *obr. 1* (*obr. 2*). Je to způsobeno např. polohou Slunce vzhledem k Zemi, atmosférickými podmínkami, počasím apod. Typické spektrální charakteristiky světelného záření dopadajícího na zemský povrch (tzv. *ozáření*) jsou znázorněny na *obr. 3* pro  $T \approx 5500$  K společně se spektrem rtuťové výbojky, jejíž barevná teplota je také přibližně  $T \approx 5500$  K.

Podle CIE je doporučený zdroj světelného záření stimulující denní světlo D65 ( $T = 6500$  K,  $\lambda_m = 444,6$  nm), pro kalibrované osvětlení světelných boxů (např. skenery) zdroj D55 ( $T = 5500$  K,  $\lambda_m = 525,5$  nm). Někdy se používají i světelné zdroje D60 a D50 odpovídajících teplot a vlnových délek.

### b) Vlastnosti pozorovaných objektů

Objekty, které nevyzařují energii v oblasti viditelného světla (380 nm – 780 nm) nelze pozorovat přímo. Lze je vidět pouze tehdy, pokud na ně dopadne světlo ze zdroje optického záření (spojitého, diskrétního). Přitom je registrováno buď odražené ( $E_{ep}$ ) nebo prošlé světlo ( $E_{et}$ ), absorbované světlo způsobuje zvyšování vnitřní energie tělesa ( $E_{ea}$ ). Je zřejmé, že dopadající výkon energie na jednotku plochy (tzv. *ozáření*) je roven součtu výkonů absorbovaného, odraženého a prošlého světla

$$E_e = E_{ep} + E_{et} + E_{ea}.$$

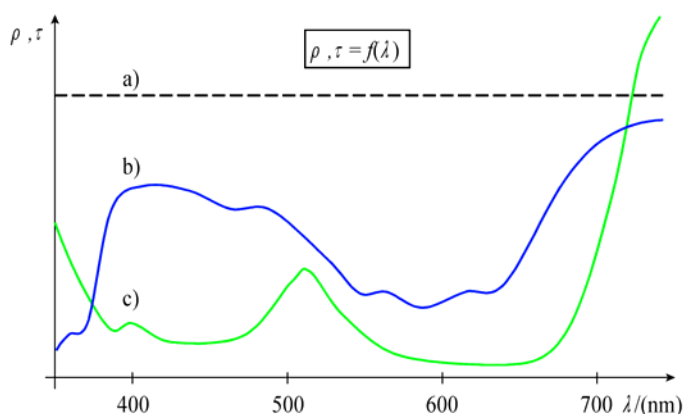
Z praktických důvodů se používají relativní veličiny: *odrazivost* (reflektance  $\rho = E_{ep}/E_e$ ), *propustnost* (transmittance  $\tau = E_{et}/E_e$ ) a *pohltivost* (absorptance  $\alpha = E_{ea}/E_e$ ), jejichž součet je roven

$$\rho + \tau + \alpha = 1.$$

Krajní meze odpovídají absolutně černému tělesu ( $\alpha = 1$ ), absolutně bílému tělesu ( $\rho = 1$ ) a absolutně průzračnému tělesu ( $\tau = 1$ ). Pokud závisí veličiny  $\alpha$ ,  $\rho$ ,  $\tau$  v oblasti viditelného spektra na vlnové délce hovoříme o barevných tělesech. Množství energie vyzážené (prošlé, odražené) bodovým zdrojem světla (bodem povrchu) do jednotkového prostorového úhlu určuje veličina *zář*

$$L_e = d H_e / d \Omega \quad \text{resp.} \quad L_e = d E_e / d \Omega.$$

Na *obr. 4* je znázorněn průběh odrazivosti (resp. propustnosti) na vlnové délce světla pro absolutně bílé (absolutně průzračné) a pro barevná tělesa.



*Obr. 4* Spektrální charakteristiky absolutně bílého (a) a barevného tělesa (b, c), modrého (b) a zeleného (c), [1]

Na obr. 4 jsou uvedena dvě spektra barevných těles, první z nich odráží (propouští) v oblasti krátkých vlnových délek (modrá barva), druhé v oblasti středních vlnových délek optického záření (zelená barva). Maxima ve spektrálních závislostech mimo oblast viditelného záření (i když reflektance, resp. transmitance je větší než v oblasti viditelného spektra) neovlivňuje barvu těles.

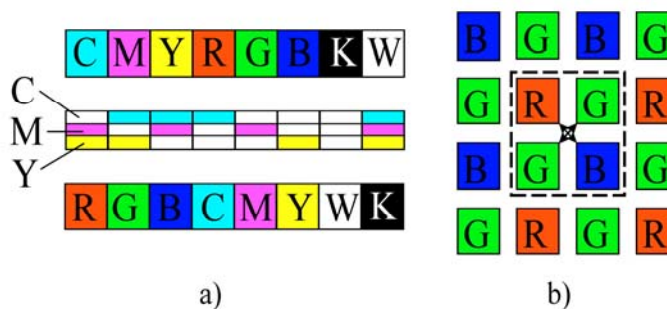
Projekční plátna (filmová, dataprojektorů a zpětných projektorů) jsou vyráběna tak, aby se jejich vlastnosti blížily vlastnostem bílého tělesa (nefluorescentní, izotropně difundující s reflektancí  $\rho \rightarrow 1$ ), optické prvky (čočky, optická vlákna) vlastnostem průzračného tělesa (nefluorescentní, nedifundující s transmitancí  $\tau \rightarrow 1$ ).

### c) Vlastnosti světlocitlivých senzorů

K záznamu obrazu se využívají světlocitlivé senzory, které nejčastěji zachycují barvu pomocí jejich tří základních barevných složek (červené, zelené a modré - RGB nebo azurové, purpurové a žluté - CMY). Na tomto principu, který je vlastní i lidskému oku (viz následující kapitola) pracují jak optoelektronické snímače (CCD a CMOS senzory), tak i optochemické měniče (např. fotografické filmy).

U fotografických filmů je světlo zachyceno v podobě latentního obrazu v tenké vrstvě halogenidů stříbra, které jsou citlivé na světlo. Chemické změny jsou potom detekovány a zesíleny (umocněny) během následujících chemických procesů. Princip barevných filmů spočívá v absorpci světla ve vrstvách citlivých na světlo různých vlnových délek (červené, zelené, modré), vytvoření tří latentních obrazů a během následujících chemických procesů vytvoření doplňkových barev (azurové, purpurové, žluté), viz obr. 5a.

U optoelektronických měničů vygeneruje světlo v tenké vrstvě polovodivého senzoru nosiče elektrického náboje, které nesou informaci o intenzitě dopadajícího světelného záření. Pokud světlo dopadá na světlocitlivý sensor přes barevné filtry (zpravidla červený, zelený a modrý) lze zachytit i informaci o barvě zdrojů světla a barevných těles, viz obr. 5b.



Obr. 5 Princip záznamu obrazu pomocí světlocitlivých senzorů  
a) fotografického filmu, b) optoelektronického měniče

Individuální odezvy, tzv. *expozice* mohou být vypočteny pomocí následujících vztahů

$$R_{\text{exp}} = k_{cr} \sum_{\lambda} S(\lambda) R(\lambda) r_c(\lambda),$$

$$G_{\text{exp}} = k_{cg} \sum_{\lambda} S(\lambda) R(\lambda) g_c(\lambda),$$

$$B_{\text{exp}} = k_{cb} \sum_{\lambda} S(\lambda) R(\lambda) b_c(\lambda),$$

kde  $R$ ,  $G$ ,  $B$  jsou expoziční hodnoty,  $S(\lambda)$  je spektrální výkonová charakteristika zdroje světla,  $R(\lambda)$  je spektrální odrazivost (propustnost) objektu,  $r_c(\lambda)$ ,  $g_c(\lambda)$  a  $b_c(\lambda)$  jsou spektrální odezvy světlocitlivého senzoru,  $k_{cr}$ ,  $k_{cg}$  a  $k_{cb}$  jsou normalizační koeficienty.

Tyto koeficienty jsou zvoleny tak, aby expoziční hodnot  $R_{\text{exp}}$ ,  $G_{\text{exp}}$ ,  $B_{\text{exp}} = 1$  pro absolutně bílé těleso. Tohoto normování se dosahuje u videokamer tzv. *vyvážením na bílou*, u denzitometrů *nulováním*.

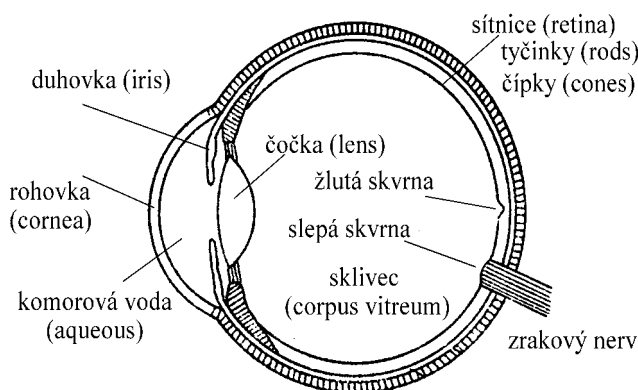
#### d) Optické vlastnosti oka

Optická soustava oka (*obr. 6*) je tvořena čtyřmi optickými prostředími (rohovkou, komorovou vodou, čočkou a sklívcem, které jsou odděleny třemi optickými plochami (rohovka, přední plocha čočky, zadní plocha čočky), *obr. 6*. Standardní parametry oka (index lomu a ohnisková vzdálenost) jsou uvedeny v *tab. 1*.

Tabulka 1 Optické parametry oka (Gullastrandův model)

optický prvek	latinský název	index lomu	$r$ (mm)
rohovka	cornea	1,376	7,8
komorová voda	aqueous	1,336	10,0
čočka	lens	1,413	-6,0
sklívec	corpus vitreum	1,336	

Množství světla vstupujícího do oka reguluje duhovka velikostí otvoru (zornice) ve svém středu. Vnitřní vrstvu oční stěny tvoří vlastní světlocitlivá vrstva (sítnice), která je tvořena tyčinkami (citlivost) a čípkami (barva). Ohniska standardního oka vzhledem k vrcholu rohovky jsou  $f = -15$  mm (předmětové),  $f = 23,9$  mm (obrazové), střední optická mohutnost oka je  $60 \div 70$  D (dioptrií).



Obr. 6 Optická soustava oka

**Barevné vidění člověka** (fotopické vidění) (*obr. 7*) je charakterizováno spektrální citlivostí barevných fotoreceptorů (čípků) na sítnici oka ( $\rho$  – červený,  $\gamma$  – zelený,  $\beta$  – modrý). Je zprostředkováno za vyšších intenzit osvětlení ( $E > 10$  lx) a umožňuje vidění barev. Nejcitlivější místo na sítnici z hlediska barevného vidění je žlutá skvrna.

**Nebarevné vidění člověka** (skotopické vidění) (*obr. 8*) je charakterizováno spektrální citlivostí nebarevných fotoreceptorů (tyčinek) na sítnici oka. Je zprostředkováno při nízkých intenzitách osvětlení ( $E < 10^{-3}$  lx) umožňuje vidění za šera. Pro intenzity osvětlení  $E$  od  $10^{-3}$ ,  $10$ , lx jsou v činnosti oba druhy fotoreceptorů sítnice. Takový způsob vidění se nazývá **mezopický**.

Vzhledem ke spektrální citlivosti lidského oka není vhodné používat k popisu účinků vjemů *radiometrické veličiny* definované v úvodu kapitoly (např. zářivý tok, intenzita vyzařování, ozáření, zář), ale jim odpovídající *fotometrické veličiny* (světelný tok, světlení, osvětlení a jas), které zohledňují vlastnosti lidského oka. *Světelný tok*

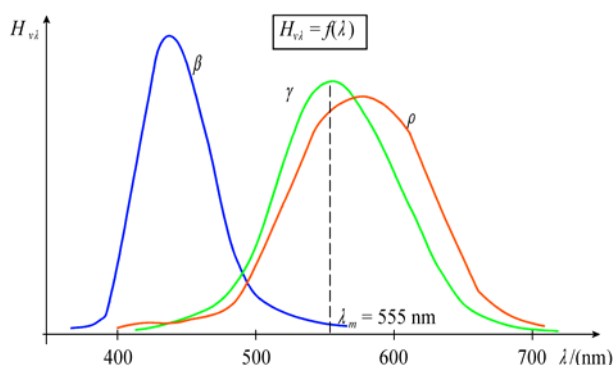
$\phi_v$  vyjadřuje množství energie vyzářené jednotkovou plochou, které je schopno způsobit zrakový vjem při fotopickém vidění

$$\phi_v = K \phi_e = \int_0^{\infty} k_\lambda \phi_{e\lambda} d\lambda,$$

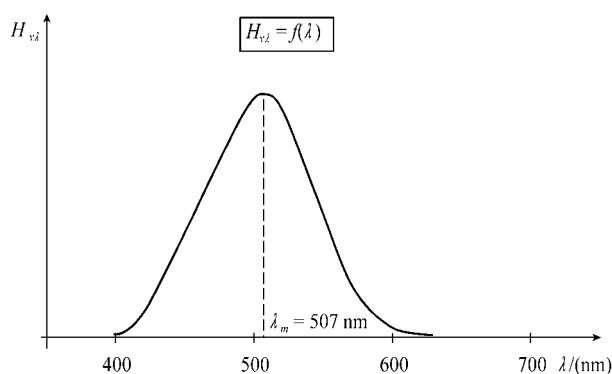
kde  $\phi_{e\lambda}$  je spektrální charakteristika světelného zdroje (obr. 1),  $K$  světelná účinnost a  $k_\lambda$  spektrální světelná účinnost záření (obr. 8). Světelný tok vyzářený (prošlý, odražený) bodovým zdrojem světla (bodem povrchu) do jednotkového prostorového úhlu určuje veličina *jas*

$$L_v = dH_v/d\Omega \quad \text{resp.} \quad L_v = dE_v/d\Omega,$$

kde  $H_v = d\phi_v/dt$  je *světlení* zdroje světla, resp.  $E_v = d\phi_v/dt$  *osvětlení* povrchu tělesa.



Obr. 7 Barevné (fotopické) vidění člověka (spektrální citlivost čípků)

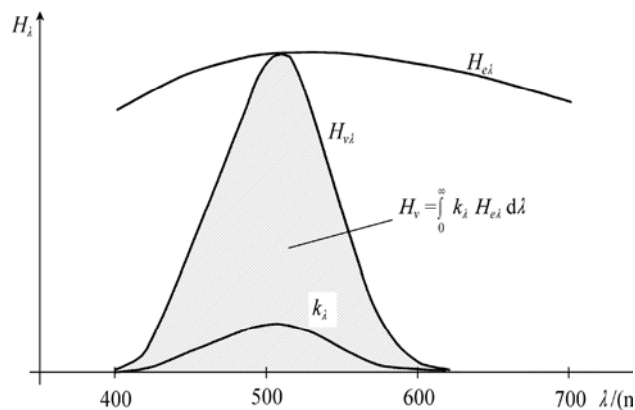


Obr. 8 Nebarevné (skotopické) vidění člověka (spektrální citlivost tyčinek)

Při zjišťování spektrálních charakteristik oka se provádí měření (srovnávání) citlivosti barev tak, aby světlo dopadalo na sítnici pod úhlem  $2^\circ$  (na žlutou skvrnu -  $2^\circ$  pozorovatel definovaný CIE v roce 1931), resp. pod úhlem  $10^\circ$  (na celou sítnici -  $10^\circ$  pozorovatel definovaný CIE v roce 1964), viz obr. 7.

Vzhledem ke spektrálním charakteristikám fotoreceptorů, mohou různé barevné podněty vést ke stejnému vjemu. Tato skutečnost se nazývá *metamerie* (obr. 10). I když je metamerie vlastnost oka je závislá také na vlastnostech zdrojů světla. Pro jeden zdroj světla mohou být barvy metamerické, pro jiný nikoliv.

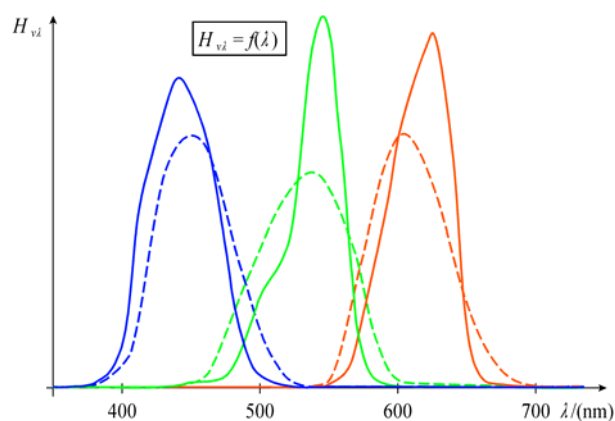
Optická soustava oka má na rozdíl od optické soustavy světlocitlivých senzorů některé odlišnosti. Vyvolaný vjem vyvolává v mozku tzv. *psychofyzikální* a *psychologické* procesy (preferance barev, ladění barev a různé poznávací jevy související s očekáváním a zkušeností).



Obr. 9 Spektrální hustota světelného toku pro nebarevné (skotopické) vidění

Psychofyzikální procesy zahrnují např. různé formy vizuální adaptace, tj. schopnosti oka přizpůsobit se množství dopadajícího světla (expozici)

- obecná jasová adaptace spočívá ve zvýšení citlivosti fotoreceptorů oka při dlouhodobé úrovni nízkého osvětlení,
- laterální jasová adaptace spočívá ve snížení nebo zvýšení citlivosti oka v závislosti na rozdílu expozicí sousedních receptorů (rozhraní černá bílá, pozorování předmětů na různém pozadí
- chromatická adaptace souvisí s citlivostí oka na světlo různých vlnových délek (na světlo kratších vlnových délek je oko citlivější), umožňuje interpretovat barvu i při slabém osvětlení.

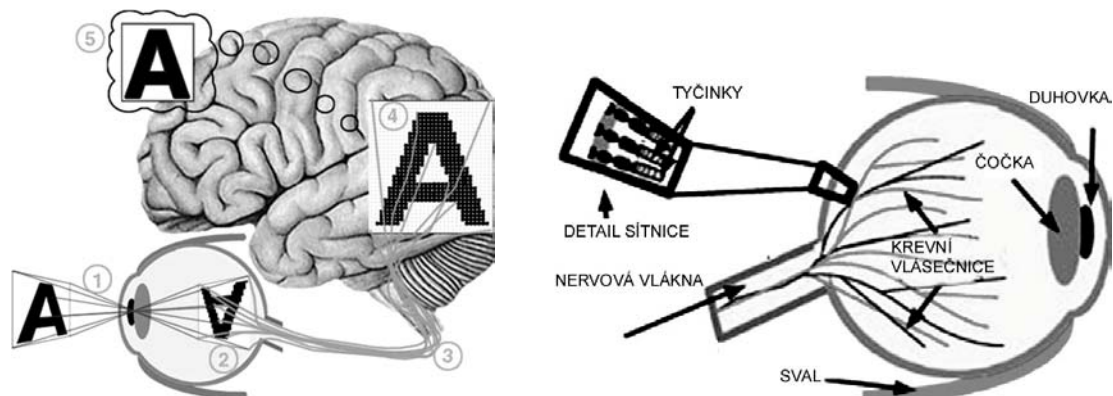


Obr. 10 Spektrální odezvy fotografického filmu (plně) a videokamery (čárkovaně), [1]



### 3. Zrak a světlem indukované molekulární změny

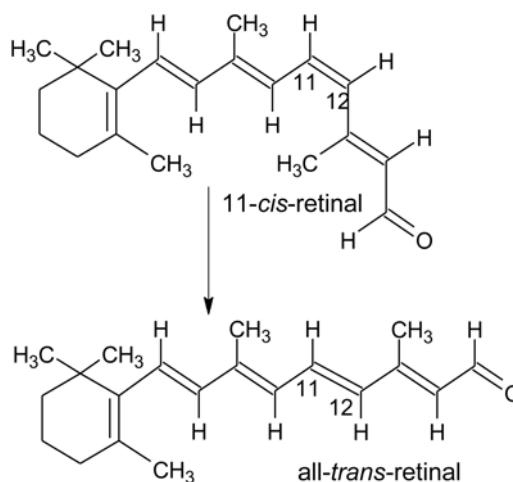
Zrak je fascinujícím příkladem účinku světla na molekulární změny s důležitými následky – tedy naší schopnosti vnímat obraz okolí. Oko obsahuje molekuly, které podléhají účinkem světla změnám, které teprve mozek umí zpracovat tak, aby vytvořil obraz. V některých ohledech se oko chová podobně jako kamera. Světlo vstupuje pupilou, je fokusováno čočkou a dopadá na světlocitlivé senzory v sítnici na zadní straně oka. Sítnice obsahuje světlocitlivé buňky nazývané tyčinky a čípky. Běžně je



Obr. 11 Vlevo: odražené paprsky (1) vstupují do oka a tvoří na sítnici obraz, který je převrácený (2); dopadajícím světlem jsou v sítnici aktivovány světlocitlivé buňky, vzniká pixelová mapa aktivovaných a neaktivovaných buněk v sítnici. Buňky, které byly aktivovány (bílé) posílají do mozku signál přes nervová vlákna (3). Mozek rozpozná místo, odkud pocházejí signály, tvoří pixelovou mapu (4), kterou interpretuje jako obraz (5). Vpravo: schematický náčrt lidského oka.

v sítnici 7 milionů čípků a 120 milionů tyčinek. Právě tyčinky jsou extrémně citlivé detektory světla a slouží především k nočnímu vidění. Tyto buňky přeměňují světlo na elektrické impulsy, přenášené do mozku pomocí nervových vláken. Aby byl obraz okolí rozpoznán, musí být mnoho světlocitlivých buněk aktivováno. Mozek potom detekuje, která nervová vlákna přenesla elektrický impuls a vytvoří obraz (obr. 11).

Vnější segmenty čípků a tyčinek obsahují oblasti vyplněné membránami s proteinem vázaným na chromofor 11-*cis*-retinal. Když světlo dopadne na tento chromofor, vyvolá konformační změny molekuly 11-*cis*-retinalu, která mění svoji konformaci (fotoizomerizuje) na all-*trans*-retinal (obr. 12). Nová konformační forma retinalu nevyhovuje konformacím proteinu, a tak vyvolá další změny v molekule proteinu. Konformačně měnící se protein vyvolá kaskádu biochemických reakcí, které mají za následek uzavření sodíkových kanálů v membráně. To vyvolá změnu náboje na membráně a následně elektrický impuls nervovým vláknům.



Obr. 12 Fotochemická izomerizace retinalu

### a) Vizuální vjem tyčinkami

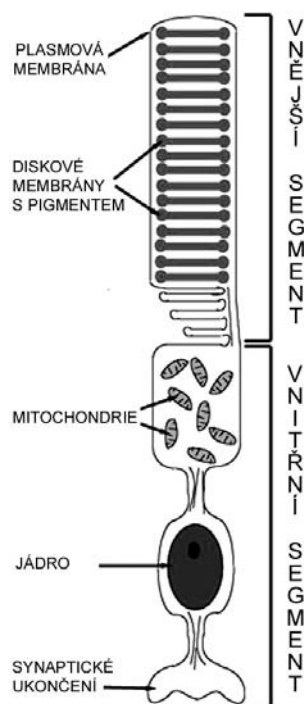
Sled procesů vedoucích ke generaci signálu do mozku pro monochromatický vizuální vněm (realizovaný tyčinkami sítnice, viz obr. 13) a pro barevný vizuální vněm (realizovaný čípkami sítnice) v podstatě podobný. Proces generující monochromatický vizuální signál sestává ze tří důležitých kroků:

1. izomerizace retinalu,
2. konformační změny proteinu,
3. tvorba signálu nervovým impulsem.

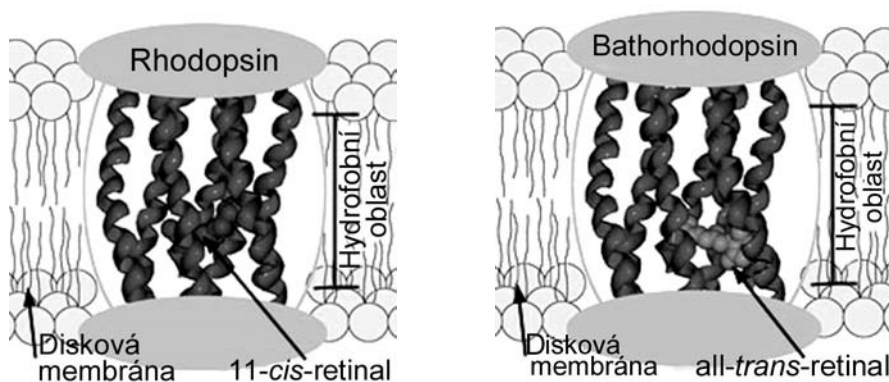
#### Izomerizace retinalu

Prvním krokem monochromatického vizuálního procesu po dopadu fotonů na buňky tyčinek je fotochemická izomerizace 11-*cis*-retinalu na all-*trans*-retinal. Absorbovaný foton excituje  $\pi$  elektron do vyšších energetických stavů ( $\pi-\pi^*$ ). Dochází k roztržení dvojité vazby a umožní se volně otáčení segmentů molekuly okolo jednoduché vazby mezi uhlíky C11 a C12 a k tvorbě konformace all-*trans*. Tato izomerizace proběhne během deseti až dvanácti pikosekund ( $10^{-11}$  s), někdy dokonce rychleji.

Izomerizace retinalu má důležitý účinek na speciální proteiny v buňkách tyčinek, které vlivem izomerizace retinalu mění svůj tvar. Tímto důležitým proteinem je opsin, známý také jako rhodopsin nebo oční purpur. Samotný 11-*cis*-retinal má maximum absorpce v ultrafialové oblasti, ale maximum absorpce rhodopsinu je 500 nm. Opsin sestává z 348 aminokyselin, kovalentně vázaných v řetězci. Řetězec má sedm hydrofobních oblastí, které prochází lipidickou membránou pigmentového disku (obr. 14).



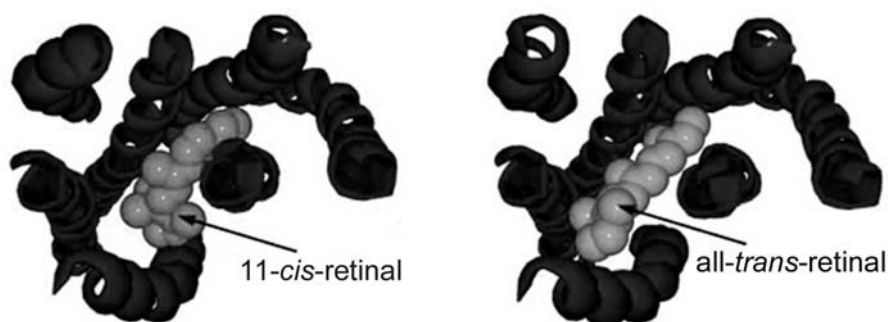
Obr. 13 Schéma tyčinek



Obr. 14 Schematický diagram rhodopsinu (11-*cis*-retinal vázaný na opsin) a bathorhodopsinu (all-*trans*-retinal vázaný na opsin) v pigmentové membráně tyčinek.

Chromofor je kovalentně vázaný na jednu amino kyselinu v peptidickém řetězci opsinu, na Lysin 296. Absorpce fotonu 11-*cis*-retinalem a jeho následná izomerizace není doprovázena změnou struktury proteinu. Rhodopsin obsahující all-*trans*-retinal je známý jako bathorhodopsin. Trans izomer se ale dobře nevejde do proteinu pro jeho rigidní, prodloužený tvar (obr. 15). Trans izomer se adaptuje do energeticky nevýhodné konformace, která zahájí sérii změn pro vypuzení chromoforu z proteinu. V této nestálé

konformaci nemůže molekula dlouho zůstat, a tak během nanosekund ( $10^{-9}$  s) vzniká volná molekula *trans*-retinalu a volná molekula opsinu. Bylo izolováno několik složitých komplexů, z nichž nejdůležitější pro vizuální proces je metharhodopsin II. Po tvorbě metharhodopsinu následuje několik reakčních kroků: aktivace enzymu transducinu a fosfodiesterázy, hydrolýza cyklického GMP (guaninmetafosfátu), uzavření kanálů pro  $\text{Na}^+$  ionty, tvorba elektrického signálu. K poslednímu kroku musí být uzavřeny kanály pro sodíkové ionty, čímž dojde k tvorbě velkého náboje na vnější membráně. Náboj je sveden k synaptickému konci, kde je přenášen na sousedící nervová vlákna.



Obr. 15 Spirály opsinu s vázaným retinalem

Izomer *all-trans*-retinal je důležitý pro obnovu *11-cis*-retinalu a jeho opětovnou inkorporaci v rhodopsinu. Po enzymatické redukci *trans*-retinalu na *trans*-retinol vzniká enzymatickou oxidací zpět *11-cis*-retinal a jeho reakcí s opsinem se regeneruje rhodopsin.

### b) Vizuální vjem čípků

Elektrické signály nervovým vláknům pro barevné vidění jsou generovány v buňkách čípků. V podstatě v nich probíhá stejný proces jako v tyčinkách pro monochromatické vidění. Ale zatímco je v oku jen jeden druh tyčinek, čípků jsou tři druhy. Rozdíly mezi těmito třemi druhy čípků jsou základním předpokladem pro rozeznávání barev. Naše barevné vidění je trichromatické, to znamená, že vnímáme barvy třemi základními receptory – čípků absorbující červené světlo, zelené světlo a modré světlo. Každá barva viditelného spektra může být složena třemi primárními barvami, na které jsou citlivé čípků. Každý druh čípků obsahuje různý protein vázaný na *11-cis*-retinal, který má svoje charakteristické absorpční spektrum s charakteristickým maximem absorpce. Absorpční pásy jednotlivých druhů čípků jsou velmi široké a navzájem se překrývají. To má za následek, že světlo určitých vlnových délek je absorbováno více než jedním druhem čípků. Například oranžové světlo je absorbováno zelenocitlivým i červenocitlivým pigmentem, ale červenocitlivý pigment absorbuje dané světlo efektivněji. Tři pigmentové proteiny jsou podobné rhodopsinu a obsahují stejné sekvence aminokyselin jako rhodopsin a liší se jen několika aminokyselinami umístěnými blízko vazby na retinal.

### c) Porovnání tyčinek a čípků: ostrost a citlivost

Je známé, že tyčinky jsou více citlivé než čípků a poskytují ostřejší obraz. Každá tyčinka je spojena nervovým vláknem, a tak mozek může velmi precizně určit umístění tyčinky, ve které proběhl výše popsaný fotochemický proces. Proto tyčinky tvoří velmi ostrý vizuální vjem.

Naopak čípky sdílí nervové vlákno přibližně s 10 000 jinými čípkami. Pokud tedy dostane mozek nervový impuls, nemůže rozlišit, které z 10 000 buněk čípků pochází impuls, a proto nemůže být obraz tvořený čípkami tak ostrý jako obraz tvořený tyčinkami. Na druhé straně, protože signál pocházející z buněk tyčinek se odvádí přímo a není sdílen jinými nervovými vlákny, vyznačují se tyčinky mnohem větší citlivostí než čípky.

#### 4. Literatura

- [1] E. J. Giorgianni, T. E. Madden: *Digital Color Management*, ed. Addison.Wesley, 1997, ISBN 0201634260
- [2] Kolektiv autorů: *Výkladový slovník fyziky*, ed. Prometheus, 1999, ISBN 8071961515
- [3] Kurt Nassau: *The Physics and Chemistry of Color*, ed. Wiley-Interscience, 1999, ISBN 0471391069
- [4] R. McDonald a kol.: *Colour Physics for Industry*, ed. Roderick McDonald, 1997, ISBN 0901956708
- [5] L. Lapčík, P. Pelikán, M. Čeppan: *Fotochemické procesy*, ed. Alfa, 1989, ISBN 8005000499