



## Historie a elementární základy teorie barev III.

Václav Kohout<sup>1</sup>, Nakladatelství Fraus, s. r. o., Plzeň

Dostává se vám do rukou třetí díl série článků zabývajících se teorií barev. Problematika barev je na rozhraní fyziky, informatiky a výpočetní techniky, přírodopisu, výtvarné výchovy a případně i dalších vyučovacích předmětů. Poznatky, které jsou ve výuce běžně zmiňovány, jsou zde doplněny a rozšířeny odbornějšími informacemi z oboru kolorimetrie. Tento díl obsahuje i některá složitější matematická vyjádření. Ta již nejsou přirozeně určena žákům, ale hlavně učitelům, kteří mají o problematiku kolorimetrie hlubší zájem. Na kolorimetrický přehled dále naváže článek popisující mezipředmětové výukové téma „Barvy kolem nás“, které bylo na jeho základě vytvořeno, a článek popisující a hodnotící ověření tohoto tématu ve výuce.

### CIE – Commission Internationale de l’Eclairage

V předchozích kapitolách jsme viděli několik typů tristimulů, tj. definic barev založených na třech hodnotách. Jednalo se o RGB, CMY (s odvozenou formou CMYK) a HSB (s jeho variantami HVC, HSL a dalšími). Všechny tyto barvové prostory mohou být odvozeny z RGB a všechny proto také přebírají základní nedostatek RGB. Každé zařízení – lidské oko, skener, monitor, tiskárna atd. – má mírně odlišné tři primární barvy a tím také odlišnou definici celého barvového prostoru RGB. Existují stovky různých barvových prostorů, každý z nich je optimálně vhodný k danému účelu, je poměrně jednoduché převádět hodnoty barev z jednoho do druhého, ale žádný z nich není možné označit jako obecný standard pro všeobecné využití.

Skupina vědců zabývajících se barvami – tzv. skupina CIE – se pokusila tento problém vyřešit a vypracovala definici nového barvového prostoru, nového tristimulu, který vychází z RGB, ale v mnoha ohledech je lepší. Tento systém se nazývá XYZ. Běžný člověk, resp. uživatel počítače se s ním většinou vůbec neseťká, je primárně používán pouze pro kolorimetrické účely a případně pro interní zápis barvy v některých softwarových aplikacích. V dalším uvedeme, které problémy řeší.

Zkratka CIE označuje francouzský termín „Commission Internationale de l’Eclairage“ (Mezinárodní komise pro osvětlování). Od založení CIE v roce 1913 se každoročně schází vědeckí delegáti z mnoha zemí, aby projednali otázky týkající se výzkumu v různých oblastech vědeckého poznání lidského vnímání barev. Cílem CIE je vytvořit a průběžně aktualizovat systém, který umožňuje precizně popisovat barvy a jejich kvantitativní vlastnosti, případně přímo specifikovat barevnost různých produktů, jako jsou tiskařské barvy, fólie, inkousty, barevné monitory atd.

### Dva mezníky v práci CIE – 1931 a 1976

Jednou z klíčových schůzek v historii CIE bylo setkání v září 1931 v Cambridge v Anglii. Z tohoto roku pochází první komplexní pokus využít velké množství nejrůznějších dosud naměřených dat a vytvořit z nich systém, který systematicky popisuje světelné a pozorovací podmínky, za kterých má být do budoucna prováděno sledování a měření barev. Mimo jiné specifikuje 1931 CIE systém následující:

- **Standardní pozorovatel** – definice průměrného lidského pozorovatele,
- **Standardní osvětlení** – specifikace světelných zdrojů, které mají být používány pro porovnávání barev,
- **Primární systém XYZ** – systém imaginárních primárních barev souvisejících s RGB, ale vhodnějších jako standard pro výpočty, popisuje jak barvy světelných zdrojů, tak barvy objektů odrážejících či propouštějících světlo,
- **Barvový prostor xyY** – barvový prostor odvozený od XYZ, odděluje souřadnice  $x$  a  $y$  popisující barevný odstín od souřadnice  $Y$ , kterou je jas barvy,
- **Chromatický diagram** – graf přehledně znázorňující viditelné barvy a vztahy mezi nimi.

V následujících letech byl uvedený systém postupně zdokonalován a upřesňován, a to včetně úpravy definice standardního pozorovatele v roce 1964. Dalším klíčovým rokem je pro CIE a vědecký popis barev rok 1976. V tomto roce CIE zaměřila svoji pozornost zejména na následující:

<sup>1</sup> kohout@fraus.cz

- **Perceptuálně uniformní barvové prostory** – barvové prostory Lab a Luv bližší lidskému vnímání barev, vhodné pro posuzování „vzdáleností“ barev,
- **Barvná diference** – definice vztahu pro barevnou diferenci ( $\Delta E$ ), který umožňuje číselně popsat „vzdálenost“ nebo „rozdíl“ dvou barev.

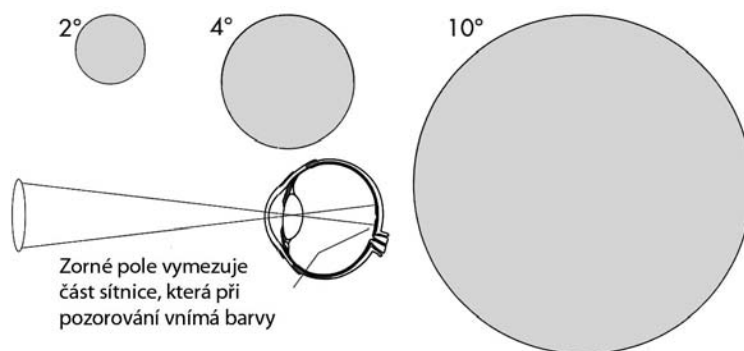
Dále rozebereme uvedené klíčové pojmy podrobněji.

### Standardní pozorovatel ( $2^\circ$ a $10^\circ$ )

Pro určení standardů měření je nutné definovat parametry pozorovatele. Během mnoha let bylo s dobrovolníky prováděno za účelem definice „normálního“ vidění velké množství experimentů týkajících se vnímání barev. Jedním z faktorů, které mohou mít vliv na barevnou citlivost lidského oka i u jednoho konkrétního pozorovatele, je mimo jiné velikost zorného pole.

V roce 1931 byl definován standardní pozorovatel s  $2^\circ$  zorným polem a tento standard se používá dodnes. Roku 1964 byla zkoumána a ověřována dříve prováděná měření a byly objeveny rozdíly, zejména v modrozelené oblasti spektra, pokud byly zorné úhly větší než  $2^\circ$ . Příčina těchto zjištěných rozdílů je zajímavá. V úplném středu sítnice uprostřed žluté skvrny je oblast nazývaná folvea. Je to jediná oblast na sítnici, kde množství barevných fotoreceptorů čípků výrazně převyšuje množství nebarevných fotoreceptorů pro noční vidění – tyčinek. Je-li zorné pole větší než  $4^\circ$ , zasahuje již barevné vidění i do oblasti s menší koncentrací čípků, což může způsobit mírnou odchylku při vnímání barev. Skutečný rozdíl je velice malý, zřídka pozorovatelný, nicméně je měřitelný. Ze zasedání CIE v roce 1964 vyplynula definice doplňkového standardního pozorovatele s  $10^\circ$  zorným polem, která by měla být použita při jakémkoli pozorování se zorným polem větším než  $4^\circ$ . Od tohoto roku by každé měření barev mělo obsahovat informaci, zda odpovídá použití definice  $2^\circ$  standardního pozorovatele z roku 1931 nebo definice  $10^\circ$  doplňkového standardního pozorovatele z roku 1964. Není-li tento údaj uveden, předpokládá se použití definice  $2^\circ$  standardního pozorovatele.

Pro představu o velikosti zorného pole  $2^\circ$  a  $10^\circ$  standardního pozorovatele slouží obrázek vpravo. Kruhy v něm vyznačené znázorňují zorná pole  $2^\circ$ ,  $4^\circ$  a  $10^\circ$  za předpokladu, že stránku pozorujete ze vzdálenosti 25 cm.



Obr. 21 – zorné pole standardního pozorovatele<sup>2</sup>

### Standardní osvětlení

Aby byly podmínky pozorování barvy kompletní, je vždy nutno specifikovat zdroj světla, který osvětluje pozorovanou barevnou plochu. Zasedání CIE v roce 1931 definovalo tři standardní osvětlení A, B a C, ke kterým byla později přidána sada osvětlení D, hypotetické osvětlení E a také sada neoficiálních zářivkových osvětlení F. Standardní osvětlení byla charakterizována jako žárovky reprodukující světlo určité barevné teploty.

Osvětlení A až F jsou popsána následovně:

- **A** – Žárovka s barevnou teplotou 2 856 K vyzařující žlutooranžové světlo. Standardní osvětlení A se obecně používá k simulaci osvětlení klasickými žárovkami.
- **B** – Žárovka s filtrem pro simulaci přímého slunečního světla odpovídajícího barevné teplotě 4 874 K. Dnes je standardní osvětlení B používáno jen velice zřídka.

<sup>2</sup> Převzato z: BUNTING, F. et al. *Colortron: User Manual. 1st Edition. Larkspur (California, USA): Light Source Computer Images, Inc., 1994. 752 p.*



- **C** – Žárovka s filtrem pro simulaci nepřímého slunečního světla odpovídajícího teplotě 6 774 K. Standardní osvětlení C je poměrně často používáno a je považováno za dobré přiblížení reálnému nepřímému slunečnímu světlu. Nejedná se však o dokonalou simulaci slunečního světla, protože neobsahuje dostatečné množství ultrafialového záření, které je zapotřebí při vyhodnocování fluorescenčních barev.
- **D** – Osvětlení nazývané denní světlo. Jde vlastně o celou skupinu jednotlivých definovaných osvětlení. Standardní osvětlení D65 odpovídá barevné teplotě 6 500 K a je téměř totožné se standardním osvětlením C. Je však ještě přesnějším přiblížením k reálnému nepřímému slunečnímu světlu, protože obsahuje ultrafialovou složku pro lepší vyhodnocování fluorescenčních barev. Všechna osvětlení D jsou pojmenována podle své barevné teploty. D50 a D75 odpovídají barevným teplotám 5 000 K a 7 500 K. Standardní osvětlení D65 a D50 jsou dnes při posuzování barev zdaleka nejrozšířenější.
- **E** – Osvětlení s rovnoměrným (equal) rozložením energie. Osvětlení E ve skutečnosti neexistuje. Jedná se o teoretický světelný zdroj, který ve viditelném spektru vyzařuje na každé vlnové délce stejné množství energie.
- **F** – Zářivkové osvětlení. Jde o sadu zářivkových světelných zdrojů, které nejsou oficiálními osvětlovacími standardy CIE. Zářivková svítidla mají ve svých spektrálních křivkách ostré špičky, a tak u nich není možné hovořit o barevné teplotě v přesném slova smyslu. Protože jsou ale zářivkové zdroje běžně používané, doporučuje CIE některé z nich alespoň jako neoficiální standardy pro porovnávání jejich barev. Zářivkové osvětlení jsou označována F1 až F12 a CIE z nich doporučuje F2 (studená bílá zářivka), F7 (zářivka v barvě denního světla) a F11 (úzkopásmová zářivka).

Kromě definice standardního pozorovatele jsou tedy specifikace barev podle CIE závislé také na konkrétním osvětlení použitým během měření.

## Barevná teplota

Jak je vidět z definic výše, pro popis zářících zdrojů světla se často používá pojem barevná teplota. Všechna zahřátá tělesa vyzařují světlo. I člověk s normální tělesnou teplotou 37 °C (310 K) vysílá záření, ale pouze na dlouhých vlnových délkách v infračerveném oboru.

Vědci definovali hypotetické tzv. absolutně černé těleso, které neodráží ani nepropouští žádné světlo. Absolutně černé těleso dokonale pohlcuje světlo všech vlnových délek, takže jakékoli světlo, které opouští jeho povrch, muselo být tímto tělesem vyzářeno. Rozložení vlnových délek vyzařovaných zahřátým absolutně černým tělesem při dané teplotě udává Planckův vyzařovací zákon. Při teplotě 2 000 K těleso září oranžově, při 4 800 K září jasně žlutě, při 6 500 K je vyzařovaná barva bílá (vlnové délky viditelného světla jsou zastoupeny podle Planckova zákona podobně jako u Slunce), při 9 300 K má světlo již výrazně modravý nádech. Při vyšších teplotách zůstává světlo namodralé, protože velká část záření je tak krátkých vlnových délek, že se dostává do ultrafialové oblasti a není viditelná.

Analogickým způsobem mohou být popsány všechny zdroje vyzařující světlo. Spektrální křivka zdroje může být změřena a označena např. jako 2 800 K (75W žárovka) nebo 6 500 K (denní světlo). Počítačové monitory a televizní obrazovky mají tzv. charakteristický bílý bod. Monitor s bílým bodem 9 300 K se bude jevit namodralý, monitor s bílým bodem 4 800 K bude mít žlutý nádech. Tento popis je však pouze přibližný, protože většina reálných zdrojů vyzařujících světlo se nechová zcela přesně jako absolutně černá tělesa.

Popis barvy pomocí barevné teploty je možný pouze u zdrojů, které vyzařují světlo. V žádném případě ho nelze použít u těles, která světlo odrážejí nebo propouštějí. Tento popis je striktně založen na modelu záření absolutně černého tělesa.

## XYZ – základní tristimulus CIE

Barvový prostor XYZ definuje všechny barvy pomocí tří imaginárních primárních barev X, Y a Z založených na lidském vidění. Tento barvový prostor se však v běžném životě téměř nepoužívá. Je využíván pro kolorimetrické zpracování barev a interně také v některých počítačových aplikacích pro transformace barev. Přesto je jednoznačně základem systému CIE.

Existuje mnoho popisů barev založených na třech primárních barvách, např. mnoho různých RGB prostorů, a všechny mají stejnou platnost. Je možné barvy mezi nimi libovolně transformovat, a proto je možné zvolit za základní libovolný soubor primárních barev. Komise CIE zvolila soubor primárních barev X, Y a Z, který je definovaný následujícími vlastnostmi:

1. Je založen na experimentálních údajích z pokusů s lidským vnímáním barev. Tím je zajištěno, že výsledky při teoretických operacích s barvami pomocí matematických výpočtů odpovídají přesně realitě.
2. Sada primárních barev X, Y a Z se chová aditivně, stejně jako primární barvy RGB. Každá barva může být vyjádřena jako směs složek X, Y a Z se stejně značenými hodnotami X, Y a Z.
3. Jedna z uvedených tří hodnot – Y – zároveň odpovídá jasů barvy. (Jas barvy závisí na vlnové délce příslušného světla. Barvy některých vlnových délek, zejména žluté a zelené části spektra, se jeví jasnější, než okraje spektra – hluboké fialové a červené odstíny.)
4. Všechny hodnoty všech tří složek jsou kladné. Experimenty s vnímáním barev nedávají pro XYZ výsledky, které by vyžadovaly zápornou hodnotu některé z primárních složek, jak bylo zmíněno dříve.

Definice primárních barev XYZ je přímou součástí specifikace standardního pozorovatele z roku 1931. CIE definuje pro standardního pozorovatele sadu barvových funkcí – soubor tří spektrálních křivek, které popisují, jakým způsobem je nutno kombinovat primární barvy XYZ pro reprodukci všech existujících barev spektra, resp. všech vlnových délek viditelného světla.

Hodnoty X, Y a Z jsou definovány následovně:

$$\begin{aligned} X &= k \int_{\lambda} S(\lambda) \bar{x}(\lambda) \beta(\lambda) d\lambda \\ Y &= k \int_{\lambda} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) \beta(\lambda) d\lambda \\ Z &= k \int_{\lambda} S(\lambda) \bar{z}(\lambda) \beta(\lambda) d\lambda \end{aligned} ,$$

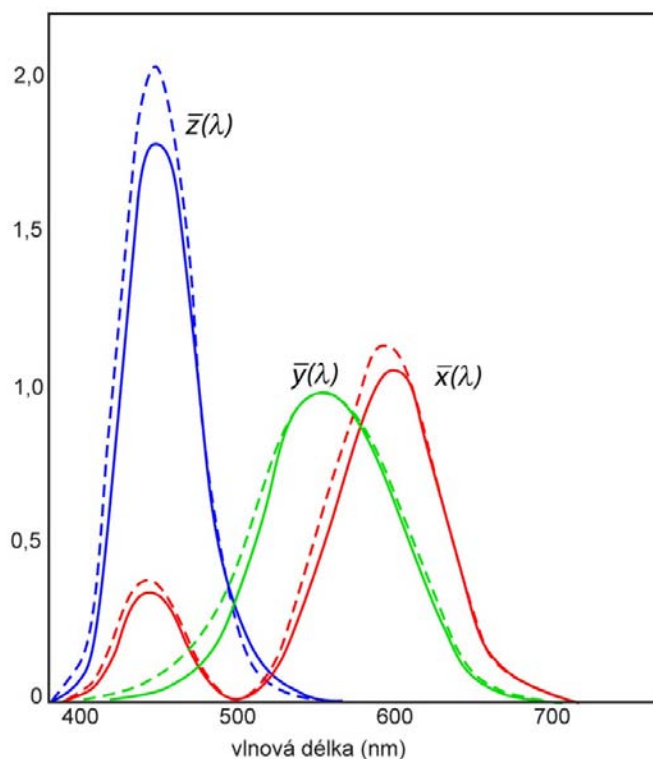
kde

$$k = \frac{100}{\int_{\lambda} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda} ,$$

$\beta(\lambda)$  = spektrální odrazivost vzorku při vlnové délce  $\lambda$ , pro průhledné nebo průsvitné vzorky se jedná o spektrální propustnost  $\tau(\lambda)$  ,

$S(\lambda)$  = spektrální rozložení energie osvětlení podle vlnové délky  $\lambda$ ,

$\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$  jsou barvové funkce pro 2° standardního pozorovatele z roku 1931.



Obr. 22 – barvové funkce (hodnoty tristimulu CIE) 2° standardního pozorovatele 1931 (plná čára) a 10° standardního pozorovatele 1964 (přerušovaná čára)<sup>3</sup>

<sup>3</sup> Podle: HUNT, R. W. G. *The reproduction of Colour. 6th Edition, Chichester (West Sussex, England, GB): John Wiley & Sons Ltd., 2004. 726 p. ISBN 0-470-02425-9.*



## xyY – chromatický diagram CIE

Barvový prostor xyY je odvozený přímo z XYZ a je určen především ke grafickému znázornění barev ve dvojrozměrném prostoru nezávisle na světlosti barvy. Hodnota Y je shodná s hodnotou Y, která je součástí tristimulu XYZ a představuje právě světlost nebo jas barvy. Hodnoty x a y se nazývají chromatické souřadnice barvy a jsou vypočtené přímo z hodnot X, Y a Z tristimulu XYZ následujícím způsobem:

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad z = \frac{Z}{X+Y+Z}$$

Z toho vyplývá, že  $x + y + z = 1$ , a proto je libovolná ze tří chromatických souřadnic x, y a z jednoduše odvoditelná ze zbývajících dvou, např.  $z = 1 - x - y$ .

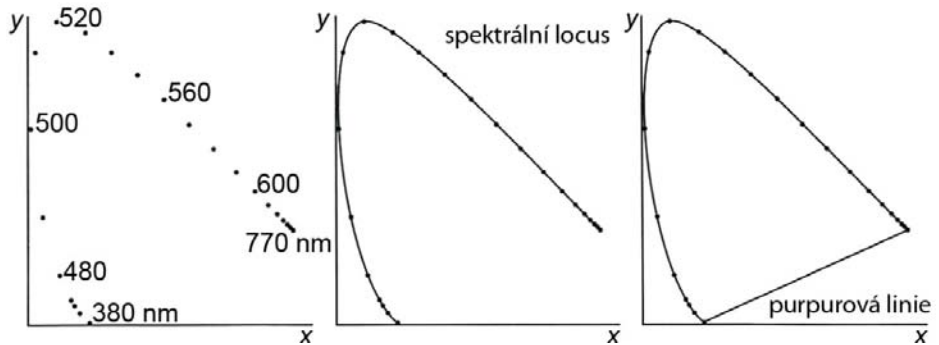
CIE se tímto částečně vrací k Munsellovu katalogizačnímu systému a odděluje jasový atribut barvy od hodnot popisujících pouze čistou barvu – chromatických složek. Dvě barvy, které se od sebe liší pouze jasnem, mají tentýž chromatický popis a tedy stejné chromatické souřadnice.

Hodnoty x, y, Y je možné zobrazit v užitečném grafu nazývaném chromatický diagram. Tento diagram významným způsobem zpřehledňuje poměrně komplikovaný systém barev zavedený CIE a činí ho srozumitelným i laikům. Poskytuje názorný náhled všech viditelných barev a zobrazuje vztahy mezi nimi.

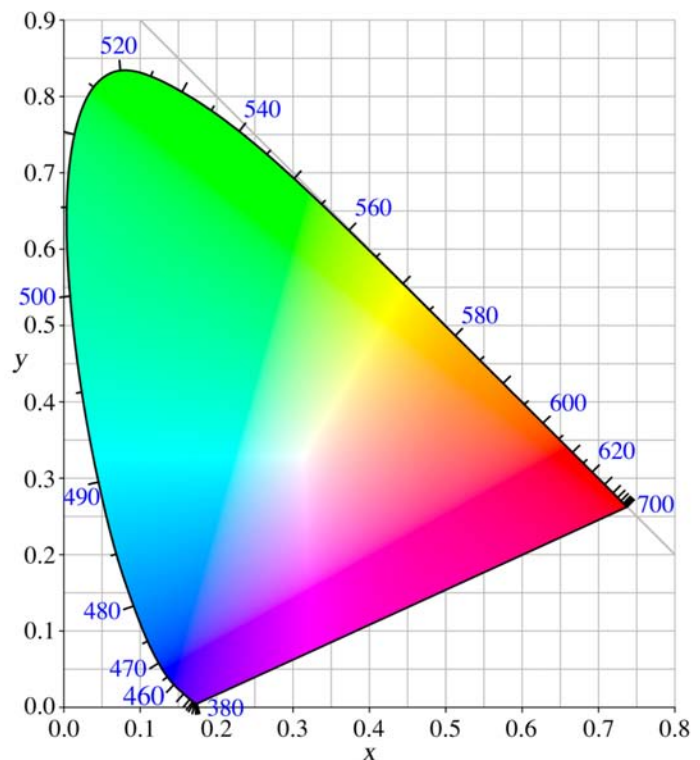
Pokud převedeme na chromatické souřadnice x, y čisté spektrální barvy, dostaneme v chromatickém diagramu tvar podkovy, známý jako spektrální locus. Protože všechny viditelné barvy jsou definované jako směs těchto čistých spektrálních barev, musí se nacházet uvnitř této křivky. Čára, která spojuje koncové body podkovy, se nazývá purpurová linie nebo purpurová hranice. Barvy na této čáře jsou složeny ze směsi čistého fialového světla o vlnové délce 380 nm a červeného světla o vlnové délce 770 nm.

Je třeba si uvědomit, že barvy, které jsou zobrazené v diagramu vytištěném zde na stránce, jsou pouze zástupné – jsou zkrácené technickými omezeními tiskového procesu použitého k vytištění tohoto diagramu, případně technickými omezeními monitoru počítače, dataprojektoru apod.

Chromatický diagram je do jisté míry podobný barevnému kruhu, tj. vodorovnému průřezu barvovým prostorem HSB. Ve středu podkovy se nacházejí neutrální barvy. Pokud se vzdalujeme



Obr. 23 – konstrukce chromatického diagramu CIE



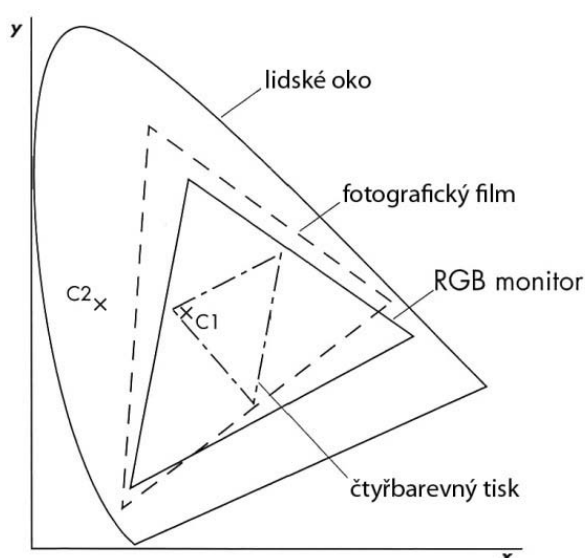
Obr. 24 – chromatický diagram CIE 1931<sup>4</sup>

4 CIE 1931 xy chromaticity diagram. [online]. c2005. [cit 2011 07 01]. Dostupné z URL <<http://en.wikipedia.org/wiki/File:CIExy1931.png>>.

od středu, jsou barvy sytější, a na okrajích se nacházejí nejsytější čisté spektrální barvy. Odstín barvy se mění při pohybu po obvodu podkovy.

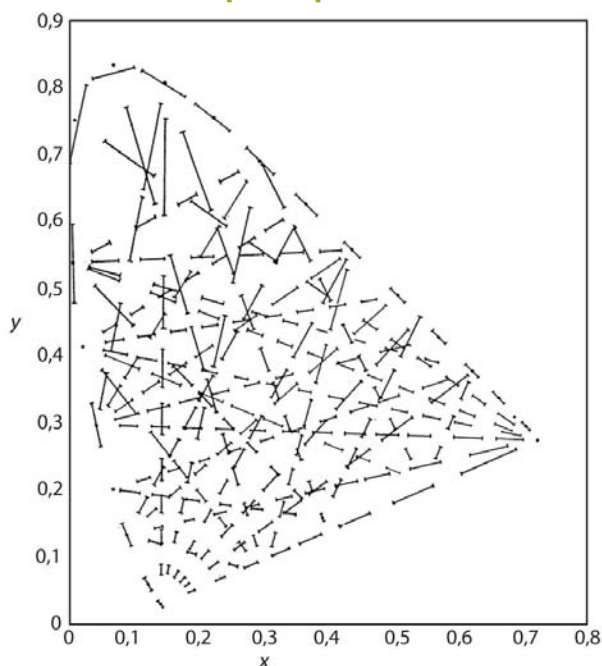
Podstatný rozdíl je ale v tom, že u chromatického diagramu je zcela jasná představa, kde se nacházejí viditelné barvy. Případné virtuální barvy ležící mimo oblast ohraničenou spektrálním locusem a purpurovou linií jsou lidským okem neviditelné, tj. mají nulový jas, případně jsou lidským okem neodlišitelné od barev, které leží na obvodu oblasti. Oblast viditelných barev se nazývá barevný gamut [gemit, dnes také gamut] (rozsah) lidského barevného vnímání. V praxi můžeme určit barevný gamut pro libovolné zařízení pracující s barvami na bázi nějakého tristimulu. Pro monitory, tiskárny i další zařízení je možné nakreslit jejich barevný gamut, který vymezuje barvy jimi reprodukovatelné.

Chromatický diagram na obr. 25 ukazuje barevný gamut typického počítačového monitoru a tiskárny. Barvy mimo daný gamut nedokáže zařízení nikdy reprodukovat a tento fakt vyplývá již přímo ze sady primárních barev, kterou používá. Uvedená tiskárna například dokáže vytisknout pouze azurovou barvu C1, při pokusu o tisk azurové barvy C2 mimo gamut bude výsledek téměř stejný jako při tisku C1.



Obr. 25 – barevný gamut různých zařízení<sup>5</sup>

### Lab a Luv – perceptuálně uniformní barvé prostory



Obr. 26 – „vzdálenosti barev“ v chromatickém diagramu xy<sup>6</sup>

CIE Lab a Luv jsou barvé prostory, které mají za cíl být perceptuálně uniformní. Perceptuálně uniformní systém (barvé prostor) je takový, ve kterém číselná vzdálenost mezi libovolnými dvěma barvami v barvému prostoru odpovídá pozorovatelem vnímané „blízkosti“ nebo „vzdálenosti“ těchto barev.

*Terminologická poznámka. Poměrně dlouhou dobou jsem se pokoušel o adekvátní překlad výrazu perceptuálně uniformní. Nalezl jsem jediný přijatelný překlad „jednotný z hlediska vnímání“<sup>6</sup>. Toto označení však dle mého o obsahu daného pojmu neříká vůbec nic, a proto se v textu přidržuji původního označení a jeho opisného vysvětlení.*

Nejprve se podíváme na tento problém v chromatickém diagramu xy. Pokud necháme lidského pozorovatele zkoumat dvojice barev a posuzovat jejich vzájemnou „vzdálenost“, dospějeme k nějaké intuitivní definici jednotky „barevné vzdálenosti“. Nyní můžeme do chromatického diagramu zakreslit všechny dvojice barev, které jsou podle pozorovatele stejně „vzdálené“ či „blízké“ – obr. 26. Člověk je daleko citlivější

5 Převzato z: BUNTING, F. et al. *Colortron: User Manual*. 1st Edition. Larkspur (California, USA): Light Source Computer Images, Inc., 1994. 752 p.

6 FRASER, B. – MURPHY, C. – BUNTING, F. *Správa barev: Průvodce profesionála v grafice a pre-pressu*. 1. vydání. Brno: Computer Press, 2003. 522 s. ISBN 80 722 6943 7.

7 Převzato z: HUNT, R. W. G. *The reproduction of Colour*. 6th Edition, Chichester (West Sussex, England, GB): John Wiley & Sons Ltd., 2004. 726 p. ISBN 0-470-02425-9.



na malé změny v odstínech fialové a červené než na změny v odstínech zelené a žluté. Tento efekt ztěžuje potřebné výpočty při porovnávání shody dvou barev. Řešením jsou právě barvové prostory Lab a Luv.

Již v roce 1931 byly podniknuty pokusy o vytvoření tzv. UCS (uniform color scale) diagramu, kterým byl do jisté míry zdeformovaný a natočený chromatický diagram. Roku 1960 byly z chromatických souřadnic  $x, y$  odvozeny nové souřadnice  $u, v$  a roku 1976 byl jejich výpočet upřesněn a byly označeny  $u'$  a  $v'$ . Dále byla definována nová souřadnice popisující jasovou složku barvy  $L^*$  odvozená od  $Y$  a upravené hodnoty  $u^*$  a  $v^*$ .  $L^*$  je podobná Munsellově hodnotě  $V$  v tom, že definuje světlost od černé do bílé v rovnoměrných stejně velkých krocích. Rozsah hodnot  $L^*$  je od 0 (černá) do 100 (bílá).

Barvový prostor definovaný CIE a používající souřadnice  $L^*, u' a v'$ , resp.  $u^* a v^*$  je označován jako  $L^*u^*v^*$ , často také CIELUV nebo pouze Luv. Jeho souřadnice jsou odvozeny ze souřadnic prostoru CIE XYZ a jsou definovány následujícími vztahy:

$$L^* = 116 \left( \frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} - 16$$

$$u^* = 13L^*(u' - u'_n)$$

$$v^* = 13L^*(v' - v'_n) \quad ,$$

kde:

$$u' = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} \quad v' = \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z}$$

$$u'_n = \frac{4X_n}{X_n + 15Y_n + 3Z_n} \quad v'_n = \frac{9Y_n}{X_n + 15Y_n + 3Z_n} \quad .$$

$X_n, Y_n, Z_n$  jsou hodnoty základního tristimulu CIE XYZ pro ideální těleso dokonale odrážející nebo propouštějící rozptýlené světlo.  $X_n = 96,422; Y_n = 100,00; Z_n = 82,521$ .

Barvový prostor CIE Luv je oproti prostoru  $xyY$  perceptuálně uniformní a jeho použití je dnes značně rozšířené, a to zejména v průmyslu vyrábějícím zařízení vyzařující světlo, jakými jsou televizní obrazovky, počítačové monitory nebo řízené světelné zdroje.

Druhou cestou, která směřuje k perceptuálně uniformnímu prostoru, jsou souřadnice  $a^*, b^*$ , také matematicky odvozené z primárních hodnot  $X, Y$  a  $Z$ . Souřadnice  $a^*$  víceméně odpovídá běžné červeno-zelené škále barev a nabývá hodnoty od  $-128$  (zelená) do  $128$  (červená). Souřadnice  $b^*$  odpovídá běžné žluto-modré škále a nabývá hodnot od  $-128$  (modrá) do  $128$  (žlutá). Matematicky jsou souřadnice  $L^*, a^*, b^*$  definovány takto:

$$L^* = 116 \left[ f \left( \frac{Y}{Y_n} \right) \right] - 16$$

$$a^* = 500 \left[ f \left( \frac{X}{X_n} \right) - f \left( \frac{Y}{Y_n} \right) \right]$$

$$b^* = 200 \left[ f \left( \frac{Y}{Y_n} \right) - f \left( \frac{Z}{Z_n} \right) \right] \quad ,$$

kde:

$$f \left( \frac{X}{X_n} \right) = \left( \frac{X}{X_n} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{pro } \frac{X}{X_n} > 0,00856,$$

$$f \left( \frac{X}{X_n} \right) = 7,7867 \left( \frac{X}{X_n} \right) + \frac{16}{116} \quad \text{pro } \frac{X}{X_n} \leq 0,00856,$$

(analogicky pro  $Y$  a  $Z$ ).  $X_n, Y_n, Z_n$  jsou hodnoty základního tristimulu CIE XYZ pro ideální těleso dokonale odrážející nebo propouštějící rozptýlené světlo.  $X_n = 96,422; Y_n = 100,00; Z_n = 82,521$ . Výsledný barvový prostor je  $L^*a^*b^*$  a často je označován jako CIELAB nebo jednoduše Lab.

Diagram barev (spektrální locus) prostoru Lab je obtížnější znázornit, a proto se příliš často nepoužívá. Pro tyto účely se používá chromatický diagram  $xy$  a Luv diagram. Protože je Lab perceptuálně uniformní a chromatické souřadnice kopírují názorné škály červená-zelená a modrá-žlutá, je Lab populárním barvovým prostorem v mnoha

odvětvích lidské činnosti zabývajících se barvami, mimo jiné i v grafickém průmyslu. Interní reprezentace barev ve známém profesionálním software na úpravu fotografií Adobe Photoshop je také v souřadnicích Lab.

### $\Delta E$ – rozdíl barev

Nejpodstatnější vlastností perceptuálně uniformních barvových prostorů, jako jsou CIE Lab a Luv, je, že umožňují vypočítat hodnotu, které vyjadřuje, jak „blízko“ jsou navzájem dvě dané barvy. Tato hodnota se označuje  $\Delta E$  a nazývá se rozdíl barev. V praxi se používá zejména  $\Delta E$  vypočtené v prostoru Lab.

Zde můžeme rozdíl dvou barev spočítat velice jednoduše. Najdeme souřadnice zadaných barev a spočítáme vzdálenost těchto dvou bodů:

$$\Delta E_{ab}^* = \left[ (\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 \right]^{\frac{1}{2}},$$

kde  $\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$ ,  $\Delta b^*$  jsou rozdíly souřadnic  $L^*$ ,  $a^*$  a  $b^*$  porovnávaných barev.

Vzhledem k tomu, jak jsou tyto perceptuálně uniformní barvové prostory definovány, bude vypočtené číslo odpovídat tomu, jak jsou barvy „podobné“. Hodnoty  $\Delta E$  jsou využívány všude tam, kde je zapotřebí přesně vyjádřit barevnou toleranci nějakého zařízení. Otázkou zůstává, jaká hodnota  $\Delta E$  odpovídá ještě stále přijatelné toleranci. Obecně platí, že rozdíl barev  $\Delta E \doteq 1$  je minimální hodnota, kterou je lidské oko schopné rozlišit. Byly zpracovány statistické studie, které naznačují, že rozdíl barev  $\Delta E$  6 nebo 7 je ještě považován za přijatelný u běžných tištěných materiálů. Je nutno zdůraznit, že se jedná o pokus kvantifikovat vlastnost, která je ze své podstaty poměrně subjektivní. Posouzení barevné tolerance vždy závisí na konkrétním pozorovateli, na specifických pozorovacích podmínkách a dalších faktorech. Nicméně hodnota  $\Delta E$  zůstane pro toto posouzení dobrým referenčním základem.

### Literatura

- [1] Bunting F. a kol.: *Colortron: User Manual*. Light Source Computer Images, Inc., Larkspur (California, USA) 1994.
- [2] Fraser B., Murphy C., Bunting F.: *Správa barev: Průvodce profesionála v grafice a pre-pressu*. Computer Press, Brno 2003.
- [3] Giorgianni E. J., Madden T. E.: *Digital Color Management: Encoding Solutions*. John Wiley & Sons Ltd., Chichester (West Sussex, England, GB) 2008.
- [4] Hunt R. W. G.: *The reproduction of Colour*. John Wiley & Sons Ltd., Chichester (West Sussex, England, GB) 2004.
- [5] Kang H. R.: *Computational Color Technology*. SPIE – The International Society for Optical Engineering, Bellingham (Washington, USA) 2006.

**Dalším pokračováním seriálu bude článek popisující mezipředmětové výukové téma „Barvy kolem nás“, které bylo na základě dosud předloženého kolorimetrického přehledu vytvořeno.**