



Historie a elementární základy teorie barev I.

Václav Kohout¹, Fakulta pedagogická Západočeské univerzity v Plzni

Dostává se vám do rukou první díl série článků zabývajících se teorií barev. Série si neklade za cíl být vědecky přesnou a zcela konzistentní teorií. Jedná se spíš o souhrn dílčích informací tvořících základní přehled, který může být ve většině případů předložen běžnému žákovi druhého stupně základní školy takovým způsobem, že jej bez problémů pochopí. 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. 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.

Úvod

S pojmem barva se setkávají žáci na základní i střední škole ve více vyučovacích předmětech – zejména ve fyzice a v informatice a výpočetní technice, ale také v přírodopisu a samozřejmě ve výtvarné výchově. Každý z těchto předmětů se dotýká barvy jiným způsobem a žákům (ale i vyučujícím) většinou chybí jednotící nadhled. Ve fyzice se v tematickém celku optika v běžné výuce dospěje k rozkladu bílého světla hranolem, k pojmu spektrální barvy, případně ke zmínce o trojbarevném vjemu barvy lidským okem, s nímž souvisí ještě popis barevného monitoru. Trojbarevné vidění se také rozebírá ve výuce přírodopisu v tematickém celku biologie člověka, a to v kapitole věnované lidským smyslům a zraku. V předmětu informatika a výpočetní technika se s pojmem barva pracuje zejména v tematickém celku věnovaném grafickým aplikacím, webové grafice apod. Vysvětluje se pojem RGB barvy a jejího zápisu. Ani ve fyzice, ani v informatice a výpočetní technice se však na úrovni základní školy nedává do jasné souvislosti barva ve spektru a barva popsána pomocí RGB.

Tato série článků si klade za cíl zmíněné souvislosti a vztahy doplnit a rozšířit o další zajímavé informace z oboru kolorimetrie. Po krátkém motivačním úvodu, který je možné předložit žákům na začátku jejich „výpravy do světa barev“, zahájíme přehled spektrálním popisem barvy pomocí vlnové délky světla a její souvislosti se vnímanou barvou. Poté se podíváme na pojem tristimulus ve smyslu popisu barvy pomocí trojice základních barevných stimulů, neboli základních barev, a definujeme pojmy RGB a CMYK. Následně se seznámíme s dalšími možnými tristimuly, jako jsou Munsellův systém, HSB a příbuzné popisy barev. Vše završíme nezávislou definicí barvy navržené komisí CIE – Commission Internationale de l'Eclairage a s ní úzce souvisejícím chromatickým diagramem a pojmem barevná diference.

Záměrně jsem se v naprosté většině případů nepouštěl do matematického vyjadřování a odvozování kolorimetrických vztahů a zaměřil jsem se pouze na kvalitativní popis pojmů a veličin. Pokud někde výjimečně používám matematické vztahy, nejsou určeny pro výklad žákům, ale pouze pro demonstraci některých vazeb mezi kolorimetrickými veličinami pro vyučujícího, který se problematikou barev cíleně zabývá.

K čemu jsou barvy a známe je vůbec?

Jedním z důležitých předpokladů přežití člověka jako živočišného druhu v průběhu jeho druhového a historického vývoje je fakt, že lidské oko je schopno vnímat barvy. Člověk v minulosti musel mít schopnost, pomocí které dokázal například rozeznat „špatné“ a „dobré“ ovoce, mimo jiné podle jeho barvy, a tato schopnost mohla znamenat až rozdíl mezi životem a smrtí. V současnosti však schopnosti lidského oka, a zejména intuitivní popis barvy předmětů, narážejí v mnoha oborech lidské činnosti na hranice možného. Ukazuje se, že již není vhodné a dostatečné popisovat barvy jen prostým slovním označením oranžová, meruňková, lososová apod. Do obrovského množství barev, které je schopen člověk vnímat, je nutno vnést nějaký řád a také nějakou kvantifikaci.

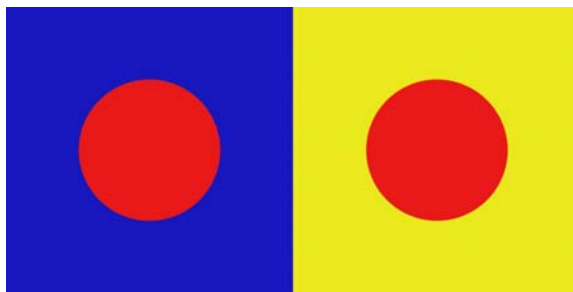
¹ vaclav68@kmt.zcu.cz



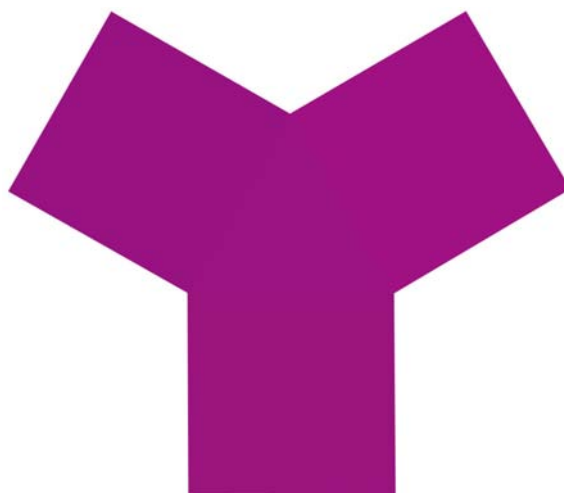
Je nutno si dále uvědomit, že lidské oko může být při vnímání barev oklamáno, není zcela dokonalé, i když uvážíme fyziologicky zcela zdravé a normální lidské oko. V případě osob postižených daltonismem (formou barvosleposti) není možné o korektním vnímání barev vůbec hovořit. Uvedu několik málo příkladů, které demonstrují běžné situace, kdy při vnímání barev narážíme na meze schopností lidského oka.

- **Metamerismus** – dvě různé barvy (různé rozumíme ve smyslu různé spektrální odrazivosti – viz dále) mohou být vnímány odlišně při jedné barvě osvětlení (klasickými žárovkami nebo zářivkami), jak lze předpokládat. Při jiném druhu osvětlení (denním světlem) se mohou překvapivě jevit zcela stejné. Tento jev bohužel není možno nasimulovat tiskem procesními barvami CMYK ani zobrazením na RGB monitoru.
- **Simultánní kontrast** – zcela identická barva může být lidským okem vnímána jednou tmavší a podruhé světlejší v závislosti na tom, zda je daný barevný objekt umístěn na světlejším nebo tmavším pozadí, viz obr. 1.
- **Rozdíl neboli difference barev** – obr. 2 obsahuje centrální trojúhelník, se kterým sousedí tři čtverce různých barev. Úkolem je rozhodnout, který čtverec má barvu nejpodobnější barvě trojúhelníku. Je pravděpodobné, že různí lidé na tuto otázku poskytnou různé odpovědi. V běžném životě je poměrně zvláštní zabývat se kvantifikací rozdílu dvou barev, ale ukazuje se, že lidé tento pojem intuitivně chápou a dokážou si pod ním něco představit. Pokud je zapotřebí o barvách hovořit nejen intuitivně, je nutné pojem rozdíl barev definovat a kvantifikovat.

Na faktu, že jsou schopnosti lidského oka při vnímání barev nejrůznějším způsobem omezené, staví velké množství optických klamů. Je možné je nalézt na mnoha webových stránkách. Jejich rozbořením by bylo možné jednotlivá omezení podrobněji popsat, to však není cílem článku. Věnujme se nyní historii poznatků o barvách a s tím souvisejícím a v průběhu doby stále se zpřesňujícím popisům barvy.



Obr. 1 – simultánní kontrast, subjektivní vnímání



Obr. 2 – rozdíl barev, subjektivní vnímání

Spektrum

Isaac Newton a jeho přínos k nauce o barvách

Anglický fyzik a matematik Isaac Newton (1642–1727) se mimo práci v mnoha jiných fyzikálních a matematických oblastech zabýval také světlem a jeho vlastnostmi. V Newtonově době byly znalosti o barvách velice kusé. Bylo známo, že barva souvisí s vlastnostmi povrchu objektu a zároveň se světlem odraženým od objektu. Byly využívány geometrické vlastnosti světla, jako jsou odraz a lom, ale vlastnosti související s barevností světla do té doby nebyly nijak systematizovány. Newton zjistil, že bílé světlo může být rozděleno na jednotlivé základní barvy. Pás těchto základních barev pojmenoval spektrum a popsal pořadí barev – oblast červenou, oranžovou, žlutou, zelenou, modrou, indigovou a fialovou. K popisu barev si vybral těchto sedm základních oblastí, i když bylo i jemu zřejmé, že existuje bezpočet dalších barev, které leží mezi nimi. Podstatné je zejména to, že Newton definuje barvu jako vlastnost světla. Bílé světlo v sobě obsahuje všechny barvy. Pokud se nám povrch jeví „žlutý“, pak to znamená, že tento povrch nějakým způsobem změnil původně bílé světlo, které se od něj odrazilo. Není-li světlo, nejsou ani barvy.



Newtonův pokus s hranolem

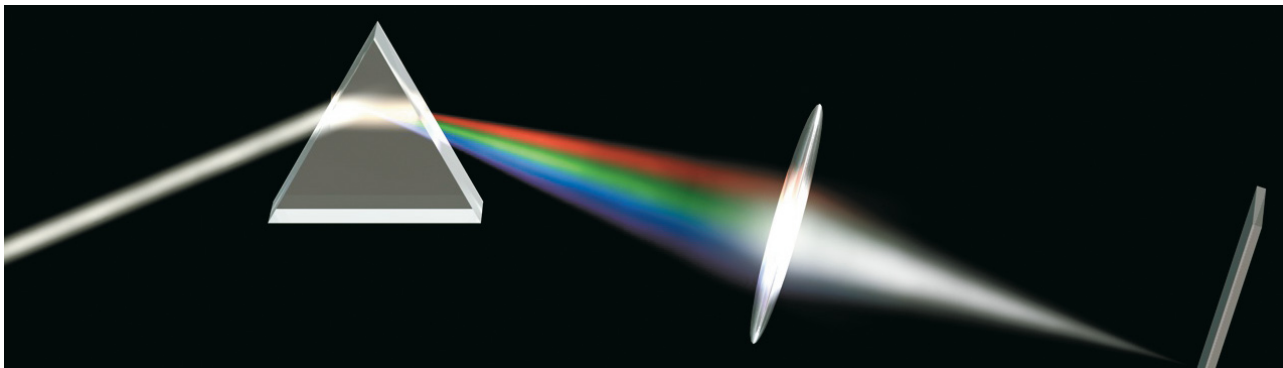
Oproti populárnímu tvrzení rozhodně nebyl Newton tím, kdo objevil optický hranol. Světelný barevný úkaz (spektrum) získaný hranolem byl v Newtonově době již dobře známý. Předpokládalo se však, že barvy spektra byly nějakým způsobem do světla přidány interakcí světla s látkou, ze které byl hranol vyroben (sklo nebo kapky vody způsobující duhu). Newton však ukázal, že všechny barvy spektra byly přítomné už v původním světle a hranol posloužil pouze k rozdělení původního bílého světla na jednotlivé barvy.



Obr. 3 – Newtonův pokus – rozklad světla hranolem²

Svůj slavný pokus Newton zrealizoval roku 1666 ve Woolsthorpe v hrabství Lincolnshire. Zatemnil pokoj a nechal do něj vstupovat malým kruhovým otvorem v okenici pouze úzký paprsek denního světla. Tento paprsek se jevil po dopadu jako malá bílá skvrna. Poté Newton umístil k otvoru trojboký hranol, který lámal paprsek světla, a tím zároveň způsobil, že se bílá skvrna změnila v pestrobarevný pruh. Jeden konec pruhu byl červený, druhý fialový a ostatní barvy se objevily mezi nimi (obr. 3).

Pomocí další clony s kruhovým otvorem pak Newton izoloval světelný paprsek pouze jediné barvy a zjistil, že tento paprsek již nelze hranolem dále rozložit, jeho barva zůstává stále stejná. Izoloval určitou úzkou část spektra a ověřil, že v ní již nejsou obsaženy další barvy. Newton provedl také opačný experiment. Paprsek rozložený prvním hranolem na spektrum nechal procházet spojnou čočkou a získal zpět původní bílé světlo (obr. 4).



Obr. 4 – Newtonův pokus – složení spektra v bílé světlo³

Z pokusů Newton vyvodil, že světelné paprsky procházející hranolem jsou lámány pod různým úhlem v závislosti na jisté vlastnosti světla, kterou nazýváme „barva“. Dnes víme, že touto vlastností je vlnová délka světla.

Jistě stojí za zmínku, že ještě před Isaacem Newtonem zkoumá stejnou problematiku v Čechách Jan Marcus (Marek) Marci (1595–1667), český lékař, fyzik a matematik, který se proslavil svými fyzikálními objevy o rázu pružných těles a o lomu světla. Za tyto výsledky byl jmenován členem Královské společnosti nauk v Londýně.

Souvislost mezi vlnovou délkou světla, barvou a spektrem

Newton také pozoroval a zkoumal jev zvaný dnes Newtonovy kroužky. Při studiu tohoto fenoménu byl již blízko odhalení vztahu mezi vlnovou délkou a barvou světla. Později se však jeho pozornost upírala spíše k jiným odvětvím matematiky a fyziky, jako jsou diferenciální počet, mechanika a pohybové zákony, vlastnosti gravitace, a tak si souvislost mezi vlnovou délkou a barvou světla musela na svůj objev ještě počkat.

² Převzato z: Rauner K. a kol.: Fyzika 7 pro základní školy a víceletá gymnázia. Nakladatelství Fraus, Plzeň 2005.

³ Převzato z: Rauner K. a kol.: Fyzika 7 pro základní školy a víceletá gymnázia. Nakladatelství Fraus, Plzeň 2005.



Základy pro vlnovou teorii světla vybudoval až James Clerk Maxwell (1831–1879), který se zabýval jiným odvětvím fyziky bezprostředně nesouvisející se světlem a s barvami. Snažil se najít základy jednotné teorie elektřiny a magnetismu (teorie elektromagnetického pole). Podařilo se mu však dokázat, že světlo je pouze jednou z forem elektromagnetické energie a může být popsáno pomocí standardních rovnic elektromagnetických vln. Je nutné podotknout, že Maxwell nebyl první, kdo se zabýval vlnovou teorií světla. Této myšlence se věnovali vědci již daleko dříve. Nedostatkem dřívějších vlnových teorií však byla nutnost postulovat fiktivní či virtuální prostředí (éter), ve kterém by se mohly světelné vlny šířit. Až Maxwell vytvořil ucelenou teorii elektromagnetického vlnění, která pro vysvětlení šíření vln v prostoru žádnou „berličku“ v podobě nehmotného éteru nepotřebovala.

Vlnová délka světla se pohybuje zhruba mezi 380 a 770 nm. Elektromagnetické vlnění o vlnových délkách pod 380 nm a nad 770 nm je pro lidské oči neviditelné. Uvedené hraniční vlnové délky mohou být pro různé lidi mírně odlišné. Newtonův pokus, při kterém vznikne barevné spektrum po průchodu bílého světla optickým hranolem, můžeme popsat také tak, že světelné vlny s kratší vlnovou délkou se lámou více než vlny s delší vlnovou délkou.

Nyní můžeme přiřadit jednotlivým barvám v barevném spektru konkrétní čísla (vlnové délky světla dané barvy), a tím můžeme popsat barvy daleko přesněji, než je popisoval Newton pomocí svých sedmi barevných oblastí (červená, oranžová, žlutá, zelená, modrá, indigová, fialová).

Existuje „světlo“ s vlnovou délkou menší než 380 nm a větší než 770 nm? Není žádný důvod pro to, aby elektromagnetické vlnění těchto vlnových délek neexistovalo, pouze ho lidské oči nejsou schopné zaregistrovat. Oblast vlnových délek sousedící bezprostředně s červeným světlem, tj. vlnových délek nad 770 nm, označujeme jako infračervený obor, oblast sousedící s fialovým světlem, tj. vlnové délky pod 380 nm, nazýváme ultrafialový obor. Není problém sestavit detektory, které budou schopny detekovat elektromagnetické vlnění i v dalších oblastech elektromagnetického spektra, např. rentgenové kamery, gama dalekohledy apod. nebo zařízení, která bude možné naladit na příjem konkrétních vlnových délek – radiopřijímače a televizní přijímače.

Vyzařování a odraz světla, průchod světla látkou

Zatím jsme dospěli k tomu, že barva světla souvisí s jeho vlnovou délkou a jednotlivé barvy můžeme pozorovat ve spektru. Je třeba si však uvědomit, že v přírodě se vyskytuje mnohem více barev, než se nachází ve spektru. Kde se berou tyto další barvy a jak souvisí s vlnovou délkou světla? Jsou dva způsoby, jak mohou objekty v přírodě ovlivňovat, z jakých vlnových délek je složeno dané světlo – tělesa mohou světlo vyzařovat (emitovat) nebo pohlcovat (absorbovat).

- **Vyzařování (emise) světla.** Při vyzařování světla je přeměňována nějaká jiná forma energie na energii světelnou. Vyzařování je vždy způsobeno konkrétními chemickými nebo fyzikálními procesy (například hoření). Pomocí fyzikálního či chemického procesu získáme vyzářené světlo různých vlnových délek. Žádný zdroj světla v přírodě není „ideálně bílý“, aby vyzařoval rovnoměrně na všech vlnových délkách.
- **Pohlcování (absorpce) světla.** Světelná energie je při absorpci přeměněna na jiné formy energie, je opakem emise. Libovolné světlo, které dopadne na těleso z dané látky, může být pohlceno jejími atomy či molekulami. Míra absorpce světla konkrétní vlnové délky je závislá na chemickém složení látky. Jakékoli změny barvy světla při odrazu nebo průchodu tělesem či látkou, jinými slovy změny v zastoupení jednotlivých vlnových délek ve světle odraženém od tělesa nebo ve světle tělesem prošlém, jsou způsobeny pohlcováním (absorpcí) nebo vyzařováním (emisí) světla.
- **Odras světla.** Kdykoli se světlo odráží od těles a jejich povrchů, interaguje s nimi. Na odraz je možné pohlížet jako na pohlcení světla a jeho okamžité následné vyzáření. Například u ideálního zrcadla je odražené světlo zcela totožné s dopadajícím světlem, změní se pouze jeho směr. Daleko častěji je ale dopadající světlo některých vlnových délek pohlcováno více než jiných vlnových délek. Odražené světlo má z hlediska zastoupených vlnových délek jiné složení.
- **Průchod světla.** Světlo prochází průhlednými nebo průsvitnými látkami, jako jsou voda, vzduch, filmová emulze, inkousty apod. Světlo při průchodu látkou interaguje s jejími molekulami nebo i většími částicemi a opět jsou některé



vlnové délky pohlcovány více než jiné. V každém případě je míra absorpce všech vlnových délek závislá na tloušťce vrstvy látky, kterou světlo prošlo. Například voda se běžně jeví jako průhledná, ale při potápění do větších hloubek tomu tak zdaleka není a projde jí pouze malé množství světla. Jediným dokonale průhledným prostředím je vakuum. Shrnutím předchozího lze všechny viditelné objekty rozdělit do tří kategorií: objekty vyzařující světlo (světelné zdroje – například počítačové monitory, žárovky, zářivky) a dva druhy objektů pohlcujících světlo – jedny světlo odrážejí, druhými světlo prochází.

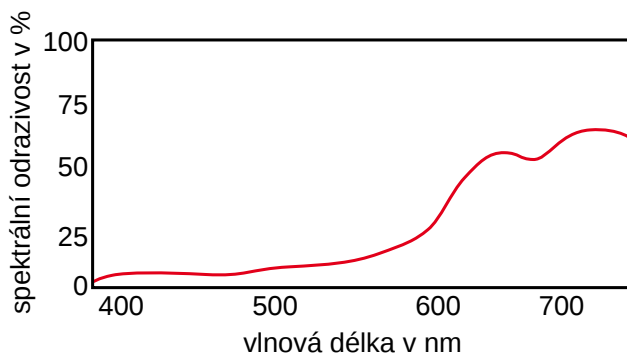
Spektrální data a spektrální křivky

Spektrální data každého objektu popisují, jakým způsobem tento objekt ovlivňuje světlo jednotlivých vlnových délek. Grafickým vyjádřením spektrálních dat jsou spektrální křivky. U objektu odrážejícího světlo můžeme popsat jeho spektrální odrazivost (reflektanci) – pro jednotlivé vlnové délky stanovíme intenzitu odraženého světla v procentech dopadajícího světla. Obr. 5 znázorňuje graf odrazivosti pro červený objekt – odráží velice málo světla krátkých vlnových délek (modré a zelené), částečně odráží žlutou část spektra a nejvíce odráží světlo delších vlnových délek (oranžové a červené).

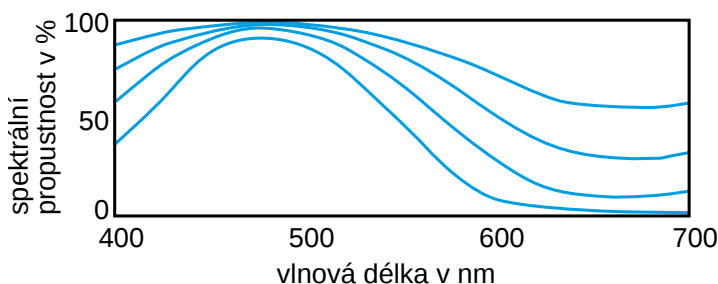
Přístroje, pomocí kterých můžeme zkoumat spektrální křivky pro libovolné objekty na základě měření spektrálních dat, tj. množství světla odraženého nebo propuštěného objektem pro jednotlivé vlnové délky, se nazývají spektrofotometry.

U objektů, které světlo propouštějí, můžeme zkoumat jejich spektrální propustnost – intenzitu prošlého světla pro jednotlivé vlnové délky udávanou opět v procentech dopadajícího světla. Obr. 6 znázorňuje graf spektrální propustnosti pro azurový inkoust – propouští zejména světlo kratších vlnových délek (modré), méně středních (zelené) a nejméně dlouhých vlnových délek (červené).

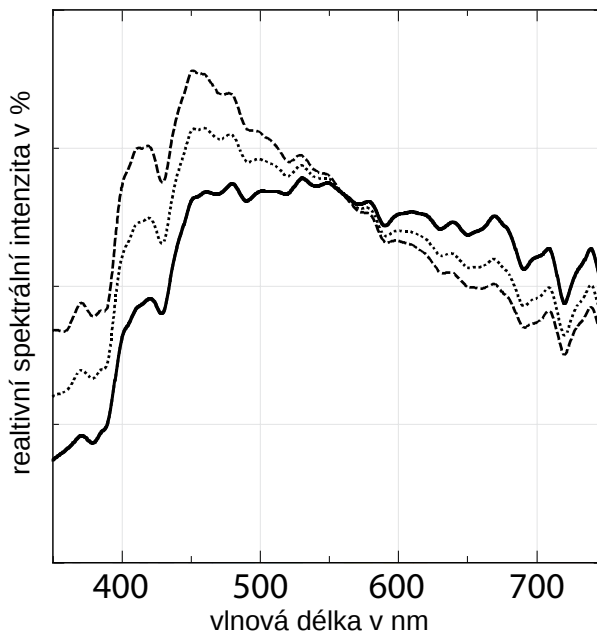
Poznámka – inkousty používané v tisku jsou transparentní a má smysl udávat jejich propustnost,



Obr. 5 – graf (spektrální křivka) odrazivosti červeného předmětu⁴



Obr. 6 – graf (spektrální křivka) propustnosti azurového inkoustu v různých koncentracích (dolní křivka odpovídá největší koncentraci)⁵



Obr. 7 – spektrální křivky denního světla v závislosti na různých atmosférických podmínkách⁶

4 Podle: Hunt R. W. G.: The reproduction of Colour. John Wiley & Sons Ltd., Chichester (West Sussex, England, GB) 2004.

5 Podle: Hunt R. W. G.: The reproduction of Colour. John Wiley & Sons Ltd., Chichester (West Sussex, England, GB) 2004.

6 Podle: Giorgianni E. J., Madden T. E.: Digital Color Management: Encoding Solutions. John Wiley & Sons Ltd., Chichester (West Sussex, England, GB) 2008.



nikoli odrazivost. Světlo projde inkoustem, odrazí se od bílého podkladového papíru a projde inkoustem podruhé cestou zpět. Při průchodu světla inkoust absorbuje světlo vlnových délek podle své barvy. Pokud však pohlédneme na papír a inkoust jako na jeden objekt, světlo odráží.

U objektů vyzařujících světlo můžeme měřit intenzitu vyzážené světelné energie pro jednotlivé vlnové délky udávanou v poměru k celkové vyzážené světelné energii. Na obr. 7 na předchozí straně je graf spektrální křivky denního světla po průchodu světla zemskou atmosférou, ve které se sluneční světlo částečně rozptyluje a pohlcuje.

Spektrální data – kompletní popis barvy

Nyní máme k dispozici první přijatelný model pro popis fyzikální vlastnosti, kterou v běžné řeči nazýváme „barva objektu“. Běžné světlo je tvořeno kombinací světél různých vlnových délek. Přesné zastoupení konkrétních vlnových délek je dáno vlastnostmi světelného zdroje. Pokud se světlo odráží od povrchu tělesa nebo prochází průhledným či průsvitným tělesem, zastoupení jednotlivých vlnových délek ve světle se změní. Světlo některých vlnových délek je absorbováno více než světlo jiných vlnových délek. Výsledná kombinace vlnových délek je informací, které v běžném jazyce říkáme barva. Spektrální data nebo jejich grafické vyjádření spektrální křivky jsou kompletním a jednoznačným popisem barevné informace. Povrch má danou barvu tím, že pohlcuje dopadající světlo některých vlnových délek, zatímco odráží (a/nebo propouští) světlo zbylé.

V principu by bylo možné popis barvy pomocí její spektrální křivky uzavřít, ale existují důvody, proč popisovat barvu ještě jiným způsobem:

1. Spektrální křivka popisuje, jak se chová světelný zdroj a jakým způsobem je dopadající světlo ovlivňováno při odrazu nebo průchodu barevným tělesem. Nezabývá se ale vůbec tím, jakým způsobem interpretuje barvu lidské oko.
2. Bylo by velice obtížné vyrobit zařízení jako barevné televizní obrazovky, tiskárny, počítačové monitory, skenery a další pouze na základě definice barvy světla pomocí jeho spektrální křivky. Je nutné přijít s jednodušším modelem barev, který umožní průmyslovou výrobu uvedených zařízení.
3. Spektrální data nejsou vhodná pro některé matematické operace s barvami a pro použití v situacích, kde je zapotřebí popsat a hlavně také vizualizovat vztahy mezi několika barvami. Je problémem znázornit do jednoho obrázku více než jednu nebo dvě barvy. Ze spektrálních dat není možné určit, jak jsou dvě barvy navzájem „vzdálené“ – v tom smyslu, že většina lidí bude některé dvě barvy považovat za vzájemně bližší než jiné dvě barvy.

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.

V příštím pokračování článku se podíváme na zcela odlišné způsoby popisu barev. Seznámíme se s pojmy, jako jsou tristimulus, RGB, CMYK, a s mnoha dalšími.