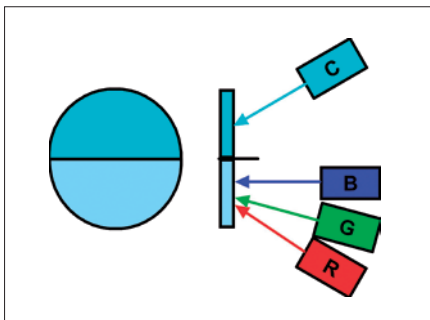


# Odchyly od platnosti Grassmanových zákonů - problém současné kolorimetrie?

doc. Ing. Michal Vík, Ph.D., Ing. Martina Víková –  
LCAM TŮ Liberec

## Úvod

V roce 2009 byla přijata publikace CIE 185:2009: Reappraisal of Colour Matching and Grassmann's Laws (Přehodnocení vyrovnání barvy a Grassmannovy zákony) [1]. Vzhledem k tomu, že se tato publikace týká jednoho ze stavebních kamenů současné CIE Kolorimetrie, je podle našeho názoru nutné blíže diskutovat o problematice uvedené v této publikaci. Pionýrské práce Williama A. Thorntona [2] až [7] ukázaly, že existují významné odchylky od platnosti Grassmannových zákonů, především zákona o aditivitě. Prá-



Obr. 1. Vyrovnání barvy při metodě maximálních čistot (podnět C je monochromatické světlo)

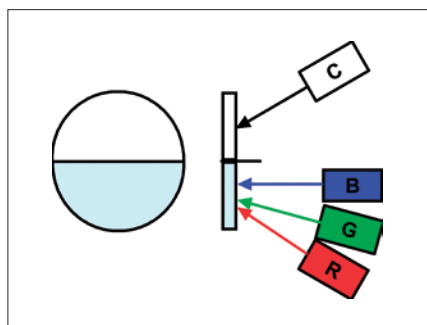
ce technického výboru Mezinárodní komise pro osvětlování CIE TC 1-56 potvrdily, že v blízkosti prahu mezopického vidění, tedy při hladinách jasu  $3 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ , jsou odchylky od platnosti Grassmannova zákona o aditivitě významné.

## Metamerie

Barva světla je závislá na jeho spektrálním složení. Barevná jakost světla je označována jako *chromatičnost* světla, barevná jakost povrchů jako *kolorita*. Kolorita je dána schopností odrazit určité spektrální složky světla, které na předmět dopadají. V praxi to znamená, že s výjimkou izoenergetického osvětlení je spektrum odraženého světla ovlivňováno jak spektrálním činitelem odrazu, tak poměrným spektrálním složením dopadajícího světla.

Je nutné mít na paměti, že chromatičnost světla je jednoznačně určena jeho spektrálním složením, ale naproti tomu,

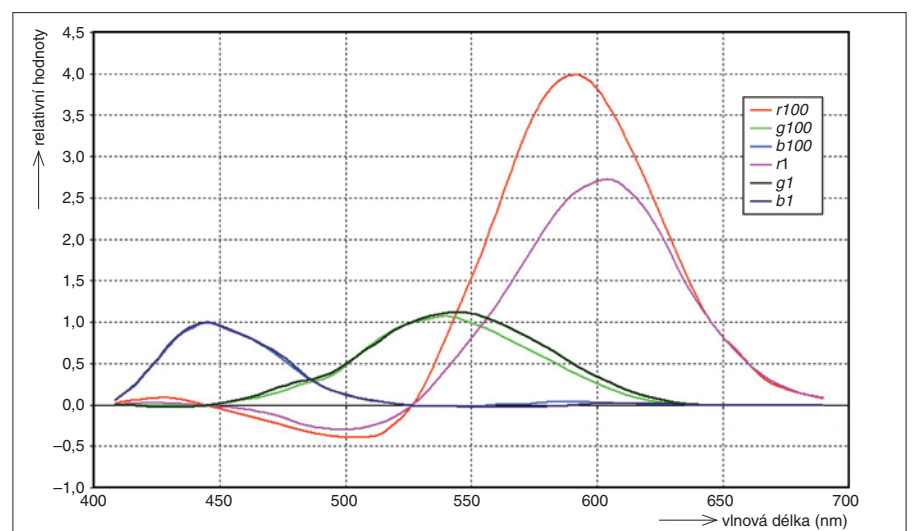
s výjimkou monochromatických světel, žádná chromatičnost neurčuje spektrální složení světla. Světlo o určité chromatičnosti může být různého spektrálního složení. Například stejnou chromatičnost jako má izoenergetické bílé světlo může



Obr. 2. Vyrovnání barvy při Maxwellově metodě (podnět C je bílé světlo)

mít i světlo, ve kterém jsou v určitém poměru smíšena pouze dvě, tři či čtyři monochromatická světla anebo vlnové délky jenom některých oblastí spektra (pásmová spektra). Spekter, která dávají stejnou chromatičnost, je nekonečně mnoho.

Barevná světla, která za určitých podmínek vyvolávají stejný barevný vjem, a mají tedy stejnou chromatičnost, přestože jsou různých spektrálních složení, jsou nazývána *metameri* a celý tento jev je nazýván *metamerie* [8].



Obr. 3. Funkce trichromatických členitelů zjištěné pro  $2^\circ$  dvoudílné zorné pole při sítnicovém osvětlení  $1\ 000 \text{ td}$  (1) a  $100\ 000 \text{ td}$  (100); pozorovatel GW, bílá normalizována na D65

## CIE Kolorimetrie

Obecně řečeno, kolorimetrie vychází ze spektrálních vlastností světla a fyziologických vlastností zraku, přičemž se kolorimetrické určení barvy světla nebo předmětu obvykle dělá v trichromatické kolorimetrické soustavě. Také kolorimetrie je založena na principu náhrady libovolného barevného světla metamerním světlem, které vznikne smíšením tří barevných světél. Pro kolorimetrické účely byla tato měrná barevná světla v roce 1931 normalizována Mezinárodní komisí pro osvětlování [9]. Pro jednoznačnost a reprodukovatelnost byla zvolena spektrální světla, a to z obou konců a ze středu viditelného světla. Červené měrné světlo (R) odpovídá monochromatickému světlu s vlnovou délkou 700 nm, zelené měrné světlo (G) odpovídá vlnové délce 546,1 nm a modré měrné světlo (B) vlnové délce 435,8 nm. Vlnové délky zeleného a modrého měrného světla odpovídají spektrálním čarám rtuťové výbojky. Wrightův-Guildův experiment, který byl použit pro určení CIE standardního pozorovatele, byl založen na metodě vyrovnání barvy nazvané Maximum Saturation, kdy podnět  $C = R + G + B$ , jestliže se obě poloviny zorného pole jeví jako barevně shodné, přičemž tento podnět je monochromatickým světlem o určité vlnové délce. Tuto metodu nejlépe popisuje schéma na obr. 1.

Zároveň by mělo být bráno v úvahu, že Guild testoval sedm osob při použití ne-spektrálních primárních světél, která adjustoval na NPL<sup>1)</sup> bílou, kdežto Wright použil monochromatická světla o vlnových délkách 650, 530 a 460 nm a svá měření vykonal u deseti pozorovatelů, když adjustoval hodnoty při 582,5 a 494,0 nm. Výsledky obou experimentů byly přepočteny na již uvedené CIE RGB vlnové délky.

Přepočet naměřených hodnot umožnily Grassmannovy zákony, které objevil Hermann Grassmann [10] před více než sto padesáti lety. Grassmannovy zákony byly pro potřeby moderní kolorimetrie upraveny Wyszeckim a Stilesem [11] do této formy:

Zákon symetrie:  
 Jestliže  $A = B$ , platí, že  $B = A$  (1)

Zákon tranzitivity:  
 Jestliže  $A = B$  a  $B = C$ , platí, že  $A = C$  (2)

Zákon proporcionality:  
 Jestliže  $A = B$ , platí, že  $kA = kB$  (3)

Zákon aktivity:  
 Jestliže  $A = B$  a  $C = D$ , platí, že  $A + C = B + D$  (4)

Jestliže  $A = B$  a  $A + C = B + D$ , platí, že  $C = D$  (5)

kde  $A, B, C$  a  $D$  jsou barevné podněty (tj. poměrná spektrální složení  $A(\lambda), B(\lambda), C(\lambda)$  a  $D(\lambda)$  jako funkce vlnové délky ve vizuální části elektromagnetického spektra),

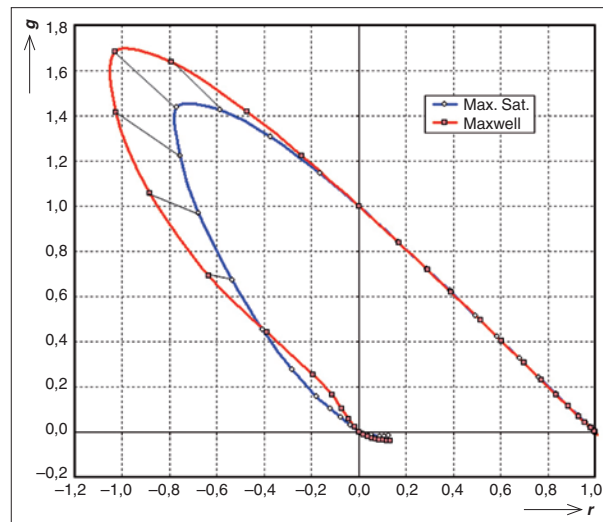
$k$  faktor ovlivňující intenzitu podnětu bez vlivu na spektrální složení, symbol „=“ v rovnicích znamená vyrovnání, resp. vnímanou barevnou shodu, symbol „+“ znamená aditivní míšení.

Jelikož lze barevné podněty  $A, B, C$  a  $D$  považovat za třídimenzionální vektory<sup>2)</sup> a  $k$  je možné chápat jako skalární veličinu, lze uvedené rovnice řešit pomocí standardních operací vektorového počtu. Tato vlastnost byla využita právě při přepočtu měření z Guildova a Wrightova experimentu na jednotná monochromatická světla CIE RGB, tedy světla o vlnových délkách 700, 546,1 a 435,8 nm.

### Thorntonova měření

Již v roce 1980 publikovali Wyszecki a Stiles [12] práci, ve které diskutovali o hy-

potéze vybělování čípkových pigmentů<sup>3)</sup>. K měření použili Maxwellovu metodu vyrovnání barvy (obr. 2) při sítnicové osvětlenosti 1 000 a 100 000 td<sup>4)</sup>. Jak je zřejmé



Obr. 4. Diagram chromatičnosti s pravouhlymi souřadnicemi  $r, g$  vypočtený z trichromatických členitelů zjištěných při 9° dvoudílném poli pomocí metody maximální čistoty (Max. Sat) a Maxwellovy metody (Maxwell); pozorovatel GW (1978),  $R = 645,16 \text{ nm}$ ,  $G = 526,32 \text{ nm}$  a  $B = 444,44 \text{ nm}$

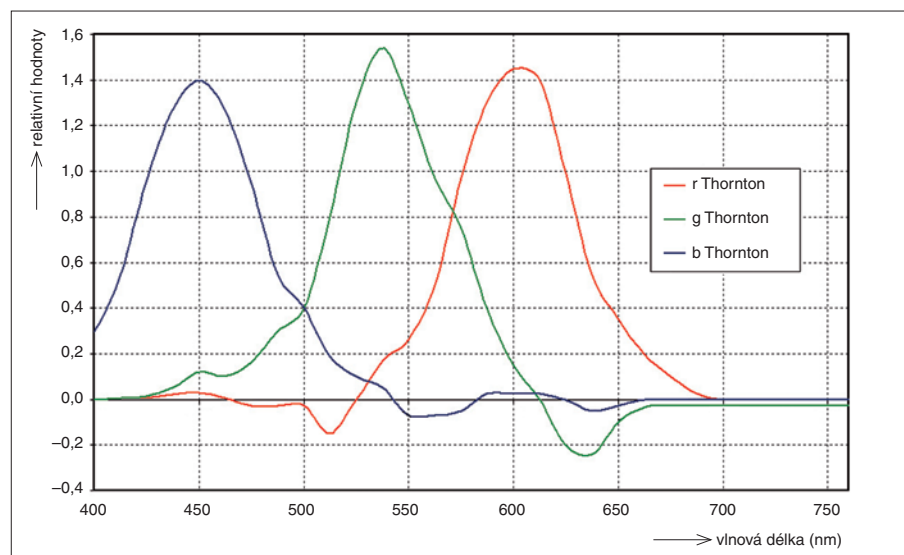
z obr. 3, byla zjištěna silná vybělovací charakteristika v případě  $R$  a  $G$  trichromatických členitelů, kdežto v případě složky  $B$  se toto chování nepotvrdilo. To autory vedlo k porovnání výsledků přepočtu hodnot trichromatických členitelů zjištěných metodou maximální čistoty podnětů (Maximum Saturation) a Maxwellovy metody.

Na obr. 4 jsou znázorněny diagramy chromatičnosti získané oběma metodami, ze kterých je patrný nárůst plochy diagramu v případě Maxwellovy metody. Wyszecki a Stiles se domnívali, že

příčinou tohoto výsledku by mohla být chyba v aditivitě Grassmannových zákonů. Tento výsledek potvrdil Zaidi [13], když testoval vyrovnání barvy metodou maximální čistoty podnětů s použitím superpozice desaturáčního monochromatického světla a bez něj. Rovněž zjistil chybu v aditivitě, když dokázal, že zdrojem odchylky od platnosti zákona o aditivitě nejsou chyby v experimentu.

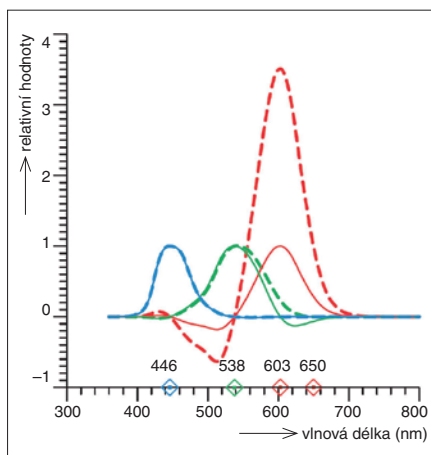
Thornton v roce 1992 publikoval práci o měření [2], kde použil tři sady přibližně monochromatických světél. Během měření zjistil podstatnou odchylku od aditivity v případech, kdy změnil libovolně přibližně

monochromatické světlo z první sady odpovídající kombinací přibližně monochromatických světél z druhé sady. To by znamenalo problém jak s aditivitou, tak tranzitivitou v Grassmannových zákonech. Brill a Worthey [14] ukázali, že vlivem změny dominantní vlnové délky jednoho z použitých monochromatických světél na-



Obr. 5. Funkce trichromatických členitelů zjištěné Thorntonem pomocí Maxwellovy metody

1) NPL – National Physical Laboratory neboli Národní fyzikální laboratoř ve Velké Británii  
 2) U barev se rozlišuje: **syťost** (čistota či stupeň naředění bílou), **světlost** (jas) a **tón** (určen vlnovou délkou).  
 3) Tento jev je znám u řady barviv a pigmentů, kde nastává fotonová excitace na vyšší singletní stavy molekul. Typicky u fluorochromních soustav používaných v mikroskopii, ale rovněž i u fotochromních systémů, kam je řazena i konverzní reakce retinalu.  
 4) td – Troland, jednotka přepočteného jasu na plochu vstupní pupily oka;  $T = Lp$ , kde  $L$  je jas v  $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$  a  $p$  je plocha vstupní pupily v  $\text{mm}^2$ .



Obr. 6. Změna průběhu funkcí trichromatických členitelů podle Brilla a Wortheyho pomocí metody maximální čistoty (Max. Sat), jestliže primární monochromatické červené světlo  $R = 603 \text{ nm}$  se změnilo na  $R = 650 \text{ nm}$  a zbývající monochromatická světla  $G = 538 \text{ nm}$  a  $B = 446 \text{ nm}$  jsou konstantní

stávají změny v amplitudě trichromatických členitelů, ale vlnová délka maxim jednotlivých průběhů se neposouvá (viz graf na obr. 6). Toto zjištění je v souladu s Thorntonovým předpokladem, že dominantní vlnová délka trichromatických členitelů se téměř neposouvá, naproti tomu jednoznačně nepotvrzuje jeho předpoklad o porušení aditivity a tranzitivity v Grassmannových zákonech.

### Závěr

Výsledky Thorntonových měření [2] až [7] byly podrobeny zkoumání v rámci technického výboru Mezinárodní komise pro osvětlování CIE TC 1-56 [15], který na základě numerického experimentu prokázal, že hlavní příčinou odchylek od tranzitivity

ty a aditivity u Grassmannových zákonů v případě Thorntonových experimentů (obr. 5) je skutečnost, že každý pozorovatel hodnotil specifická vyrovnání barvy pouze jednou. Ale doporučil pokračování výzkumu platnosti Grassmannových zákonů [1] s tím, že základní otázky týkající se funkcí vyrovnání barvy je nutné zkoumat i nadále, neboť výsledky výzkumů dalších autorů ohledně rozdílů mezi metodou maximální čistoty a Maxwellovou metodou tímto výbojem zpochybněny nebyly.

Jedním z možných vysvětlení je problém „přebuzení“ čípků monochromatickým, resp. přibližně monochromatickým světlem. Vystává tak otázka, zda při přísně trichromatickém modelu čípků lidské oko ve skutečnosti nemá podobný gamut jako jiné RGB systémy (kamery, skenery, monitory apod.).

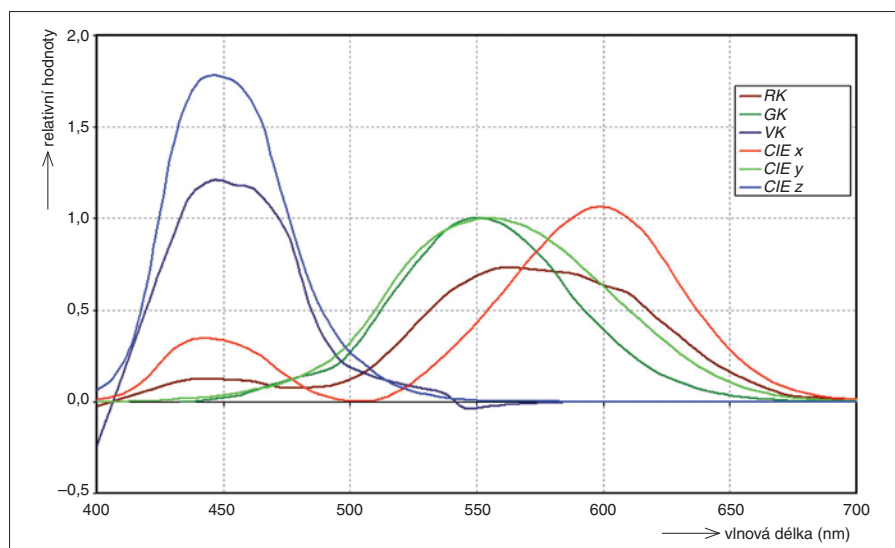
Další otázkou je, zda použití tří primárních světél vede k optimálním funkcím trichromatických členitelů při barevném vyrovnání. Jinými slovy, zda např. použití čtyř primárních monochromatických světél nevede ke stabilnějšímu vnímání barevného vyrovnání.

Zároveň je nutné mít na paměti, že funkce vyrovnání barev lze získat ještě třetí metodou, a sice pomocí pozorovatelů s dichromatickými vadami barvocitu. Již na konci devatenáctého století dokázali tímto postupem analyzovat funkce trichromatických členitelů Artur König a Conrad Dietrici [16]. Přesnost jejich měření by měla být inspirací pro další výzkum v této oblasti kolorimetrie. Graf na obr. 7 dokumentuje průběhy funkcí trichromatických členitelů pro 2° pozorovatele podle CIE a funkce trichromatických členitelů zjištěných z experimentu Königa a Dietriciho. Je zřejmé, že hlavní rozdíl je v hypsochromním posuvu dlouhovln-

ného maxima  $r_3$  členitele  $r$  o 30 nm. Při úpravě údajů Königa a Dietriciho pomocí vyhlazení funkcí typu spline se zjistí, že rozdíl mezi dominantní vlnovou délkou pro členitele  $g$  a  $r$  je rovněž 30 nm, což odpovídá současným znalostem o rozdílu dominantních vlnových délek odezvo- vých křivek  $M$  a  $L$  u lidského oka.

### Literatura:

- [1] CIE 185:2009: *Reappraisal of Colour Matching and Grassmann's Laws*.
- [2] THORNTON, W. A.: *Toward a more accurate and extensible colorimetry. Part I. Introduction. The visual colorimeter-spectroradiometer. Experimental results*. Color Res. Appl., 1992, 17, s. 79–122.
- [3] THORNTON, W. A.: *Toward a more accurate and extensible colorimetry. Part II. Discussion*. Color Res. Appl., 1992, 17, s. 162–186.
- [4] THORNTON, W. A.: *Toward a more accurate and extensible colorimetry. Part III. Discussion (continued)*. Color Res. Appl., 1992, 17, s. 240–262.
- [5] THORNTON, W. A.: *Toward a more accurate and extensible colorimetry. Part IV. Visual experiments with bright fields and both 100 and 1.30 field sizes*. Color Res. Appl., 1997, 22, s. 189–198.
- [6] THORNTON, W. A. – FAIRMAN, H. S.: *Toward a more accurate and extensible colorimetry. Part V. Testing visually matching pairs of lights for possible rod participation on the Aguilar–Stiles model*. Color Res Appl., 1998, 23, s. 92–103.
- [7] THORNTON, W. A.: *Toward a more accurate and extensible colorimetry. Part VI. Improved Weightings Functions. Preliminary Results*. Color Res Appl., 1998, 23, s. 226–233.
- [8] KRÍŽEK, F.: *Od černobílé k barevné televizi*. NADAS, Praha, 1977.
- [9] WRIGHT, W. D.: *The Historical and Theoretical Background to the 1931 CIE System of colorimetry*. In: Sborník ze symposia Golden Jubilee of Colour in the CIE, JSDC Bradford, 1981.
- [10] GRASSMANN, H. G.: *Zur Theorie der Farbenmischung*. Ann. Phys. Chem. (Poggen-dorf), 1853, 89, s. 69–84. English translation (anon.) in: Philosophic Magazine, 1854, 4(7), s. 254–264, reprinted in MacAdam, D. L. (Ed.) (1970), Sources of Color Science, MIT Press, Cambridge, MA, 1970.
- [11] WYSZECKI, G. – STILES, W. S.: *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae*. 2nd ed., Wiley, New York, 1982.
- [12] WYSZECKI, G. – STILES, W. S.: *High-level trichromatic color matching and pigment bleaching hypothesis*. Vision Res., 20, s. 23–37.
- [13] ZAIDI, Q.: *Adaptation and color matching*. Vision Res., 1986, 26, s. 1925–1938.
- [14] BRILL, M. H. – WORTHEY, J. A.: *Color Matching Functions When One Primary Wave-length Is Changed*. Color Res. Appl., 2007, 32, s. 22–24.
- [15] SCHANDA, J.: *Colorimetry*. Wiley and Sons, Hoboken, 1970, s. 245–259. [16] KÖNIG, A. – DIETERICI, C.: *Die Grundempfindungen und ihre Intensitäts-Vertheilung im Spectrum Sitzungsberichte*. Akademie der Wissenschaften, Berlin, 1886, 805.



Obr. 7. Funkce trichromatických členitelů zjištěné Königem a Dietricim roku 1886 po normalizaci na úroveň poměrné spektrální citlivosti lidského oka  $V_\lambda$  faktorem 0,088 ve srovnání s funkcemi trichromatických členitelů pro 2° pozorovatele podle CIE

Recenze: prof. Ing. Jiří Militký, CSc., TU Liberec