

ВЪПРОС:

Основните цветове са червен, зелен и син. Според изобразителното изкуство основните цветове са жълт, син и червен. Защо е заменен основният цвят зелен с жълт?

Силвия Попова – учител по химия и физика в СУ “Иван Вазов”,
Благоевград.

ОТГОВОР:

Въпросът е провокиран от явното разминаване в избора на “основните” цветове в учебниците по физика и астрономия, от една страна, и по изобразително изкуство, от друга. Объркването е пълно, тъй като в дефинициите на “основните” цветове – червен, зелен и син, или червен, жълт и син, съответно – се казва, че *с тях могат да се получават всички цветове*.

А съществува ли изобщо подобна тройка видими цветове?

Коректният отговор е **НЕ!**

Този неочакван отговор следва от феноменологичните закони на Грасман (чието име срещаме в математиката на квантовата физика), които лежат в основата на съвременната колориметрия. Грешката е в думичката “всички”, която трябва да се замени с “голяма част”, или нещо подобно. А какво да се каже за маджентата, която е обявена за основен цвят при субтрактивно смесване, но не присъства в спектъра на бялата светлина?

Светлинните лъчи са електромагнитни вълни и **нямат** цвят – няма естествена причина фотоните с дължина на вълната между 400 и 700 nm да се отличават от останалите¹. Още в “Оптиката” на Нютон (1702 г.) можем да прочетем:

“Лъчите, точно казано, не са цветни. Те не са нещо повече от някаква сила (power) и способност да пораждат усещане за този или онзи цвят.”. [1]

¹За мен бе голяма изненада, когато, споделяйки тази “библейска” истина с колеги, за много от тях това бе “откритие” – толкова дълбоко е запечатано в съзнанието ни, че цветът е обективна характеристика. Най-вероятно това “знание” се дължи именно на часа по физика за цветовете (този урок съгласно с програмите на МОН служи за основа на курсовете по биология, в разделите око и цветоусещане).

Използвам цитата, за да подчертая главната особеност на цветното зрение: **цветът е свойство, което наблюдателят приписва на обектите, а не е характеристика на самата светлина**. С други думи, когато се каже, че дадена светлина е “червена”, се разбира, че наблюдаваната светлина се възприема като червена от наблюдател с нормално зрение.

Цветоусещането не е чисто физична задача и преди да се обсъжда, би трябвало да се даде някаква, било то и доста опростена, представа за устройството на ретината. Добре би било да се спомене за пръчиците и трите вида фоторецептори – колбичките. Това би позволило да се разкаже накратко теорията на Юнг–Хелмхолц и да се обясни избора на RGB-системата (модел) за устройствата, които излъчват светлина – телевизионни и телефонни екрани. След това, като се използва дефиницията за допълнителен цвят, лесно може да се премине към случая с пигментите и да се изведе СМУ-моделът, използван при печатните устройства. Една от задължителните теми, които трябва да присъстват в урок по цветове е метамеризмът, т.е. усещането за един и същ цвят, въпреки че пораздащите го стимули могат да са различни – една монохроматична вълна или смес от вълни. Това е главната разлика между двете сетива – слух и зрение. Ухото, за разлика от окото, със своите няколко хиляди власинкови клетки, резониращи на различни честоти, отделя почти всеки звук в зависимост от честотата на пораздащия го източник.

Друг сериозен проблем, често водещ до объркване, е отсъствието на общоприета терминология. Никой не поема отговорност за съгласуването на понятията и в крайна сметка страдат и ориентираният към естествените науки, и онези, които търсят реализация в изкуството. Нещата стоят още по-зле, тъй като при цветоусещането се работи с два типа величини – физични, т.е. характеризиращи светлинния стимул; и психологични, които описват възприемания цвят. В допълнение, съставните цветове зависят от начина, по който е направено смесването, както и от осветеността на средата, в която се намира обектът, чийто цвят определяме.

Всичко това прави разказа за цветовете доста труден за коректно преподаване в 7. клас. Във всеки случай неговото място е след урока за звук, където се говори за вълни. **Цветоусещането няма нищо общо с геометричната оптика!** То е съвсем различна област, където се преплитат физика, физиология, психология.

В резюме

- Ако посочените бележки се включат в учебната програма, познанията на учениците ще съответстват на края на 19-ти век.
- Ако успеем да разширим програмата и покажем, че в рамките на

теорията на Юнг–Хелмхолц искането да опишем всички видими цветове води до отрицателни стойности в спектралните криви на цветните рецептори, ще достигнем до средата на 20-ти век. Тогава ще обясним защо, когато купуваме LED лампа с топло светене, на етикета ѝ пише 3000 градуса по Келвин, а когато искаме студено-светеща лампа — 8000 градуса.

- Е, ако сме максималисти и поискаме да запознаем учениците със съвременната теория на цветното зрение, ще трябва да се разгледа и опонентната теория на Херинг и нейното обединение с тривалентната теория на Юнг–Хелмхолц и, може би, ще погледнем по друг начин на модерното изобразително изкуство (Фиг. 1).



Фиг. 1. Съчетанията на цветовете в работата на Брайън Ино е илюстрация на психофизиологичните особености на цветното зрение, разглеждани в опонентната теория на Херинг.

Разбира се, някой ще се противопостави – та нали в училище изучаваме законите на Нютон от 17-ти и тези на Максвел от 19-ти век. Но аналогията не е коректна. И в двата случая не се преподават Нютон и Максвел, а зрелите “узаконени” теории от съответните области, където съмненията и неточностите са отстранени. В случая с цветовете това съответства на решенията на Международната комисия по осветление (CIE – Commission Internationale de l’Eclairage) от 1931 г.

НЕПЪЛЕН РАЗКАЗ ЗА ЦВЕТОВЕТЕ

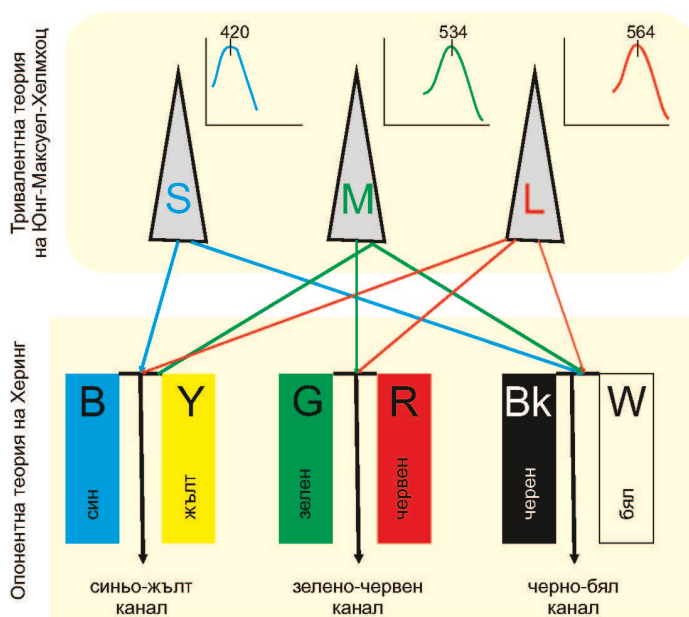
ЦВЕТОУСЕЩАНЕ – ФИЗИОЛОГИЯ

Усещането за цвят е резултат на сигнали, които специализирани клетки в окото предават на мозъка. Най-общо може да ги разделим на две групи:

- хроматични, зависещи от дължината на вълната на светлинния стимул; и
- ахроматични, свързани със светлинната енергия (поток) за съответната дължина на вълната.

В окото са разположени три вида фоторецептори, наречени колбички поради формата на клетките (вж. Фиг. 2). Може да ги разглеждаме като широколентови филтри с максимална чувствителност в късовълновата област (S-тип: 420–440 nm), средновълновата (M-тип: 530–540 nm) и дълговълновата (L-тип: 560–580 nm)). Те са активни на дневна светлина, което обяснява защо на тъмно трудно различаваме цветове.

Всеки тип колбички се възбужда в определена степен в зависимост от спектъра на падащата в окото светлина и предава (излъчва) съответен сигнал. Тази първа фаза е обект на теорията на Юнг-Хелмхолц, с която успешно се описва както метамеризмът, така и богатството от цветове, получаващи се при смесване на **три** цветни стимула.



Фиг. 2. Съвременно обяснение, как мозъкът възприема цвят.

Следващата стъпка е обработването на тези сигнали в т.нар. опонентни канали (долната половина на Фиг. 2). На биологично ниво това са неврони, чиято повишена спрямо нормалното състояние активност сигнализира например червено, а понижената – зелено, т.е. към мозъка се предава сигнал само за единия от двойката цветове. Нормалното състояние съответства на ахроматичен цвят. Тази фаза, използваща **четири** с думите на Херинг “уникални” цвята – син, жълт, зелен, червен, обяснява защо никога не наблюдаваме червенеещ се зелен цвят или жълтеещ се син, видимата разлика между цветовете, едновременния контраст (вж. Фиг. 4) и още много ефекти, които сме свикнали да наричаме илюзии.

СМЕСВАНЕ НА ЦВЕТОВЕ

Цветовите, които различаваме в спектъра на бялата светлина, се наричат *спектрални* или *физични*. Това са цветове, на които се съпоставя една (или много тясна лента от порядък на 1 nm) дължина на електромагнитната вълна, т.нар. *доминираща* дължина (съответно честота) на вълната. Освен тях различаваме още огромен (теоретично безкраен) брой цветове, които се получават чрез смесване. Съществуват два метода на смесване (вж. Фиг. 3):

- (i) **адитивно**, когато се смесват светлинни потоци. Правилата за адитивно смесване се прилагат за телевизионните и компютърните екрани, сценичните прожектори и осветлението на дискотеки.
- (ii) **субтрактивно**, когато се смесват мастила, багрила и бои. Правилата за субтрактивно смесване се прилагат при цветните принтери, цветната фотография и при последователно филтриране на светлинни снопове.



Фиг. 3. Ляво: адитивно смесване на отделни светлинни потоци. Дясно: субтрактивно смесване с отнемане на част от спектъра в резултат на разтваряне на единия пигмент в другия.

ЦВЯТ – ТЕРМИНОЛОГИЯ

Феноменологично, по аналогия със звука², цветовете се описват с три параметъра:

— **Цветен тон** или **отенък** (немски – Farbenton; английски – hue). Съответства на тембър³. Този термин често се заменя в ежедневието с думата “цвят”. Например електромагнитните вълни с дължина между 400 и 490 nm повечето хора възприемат като *синьо*, между 490 и 570 nm – *зелено*, между 570 и 600 nm – *жълто* и между 600 и 650 nm – *червено*. Всички езици имат думи, които съответстват на черно и бяло. Ако в езика има и трета дума за цвят, то това е червено, следват зелено, жълто и синьо. Има също така цветове – например *пурпурният* (маджента), които различаваме само когато наблюдаваме смес от вълни, но никога в случай на монохроматична светлина. Използваме още думата сиво, за да покажем, че имаме усещане за цвят, но не можем да го дефинираме. Научният термин е *ахроматичен* цвят.

— **Наситеност**. Съответства на височина на звука. Тази психологична характеристика показва колко даден цвят се отличава от ахроматичния. Добре-различимите цветове са наситени, а по-трудно различимите – ненаситени. Физичната характеристика, която в известна степен наподобява наситеността, се нарича **чистота**. Тя е свързана с броя монохроматични вълни, от които е съставен даден тон. Монохроматичните цветове са 100% чисти. Физичната чистота и психологичната наситеност не са еквивалентни – жълтото, предизвикано от светлинен стимул с дължина на вълната 570 nm, е по-ненаситен в сравнение със синьото, предизвикано от стимул с дължина на вълната 490 nm, въпреки че и двата цвята са еднакво чисти.



Фиг. 4. Квадратите са с еднаква яркост, но се възприемат различно.

²Идеята за описание на психологичното цветоусещане с три характеристики дължим на Херман Грасман и Херман фон Хелмхолц.

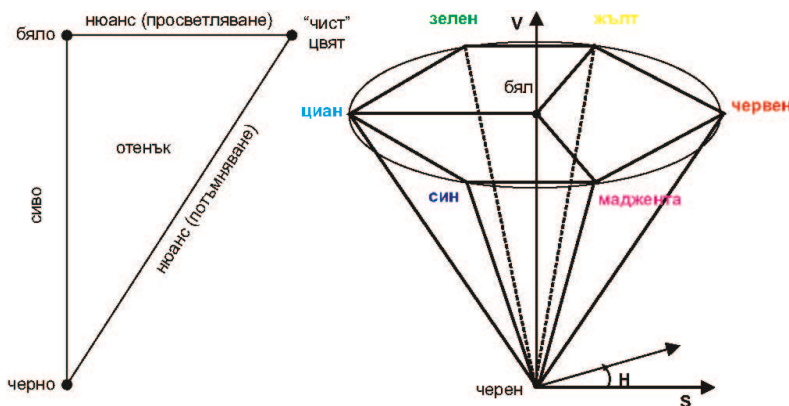
³Съвременните англоцивилизовани “специалисти”, забравяйки историята и ролята на великите представители на германската наука – Хелмхолц, Кьониг, Вебер, Херинг, както и езика на по-ранните поколения, използват директния превод на hue, т.е. *отенък*.

— **Яркост.** Съответства на сила на звука. Този параметър е пропорционален на **интензита** на физичния цвят съгласно със степенния закон на Стивън, но е различен за различните наблюдатели и се мени драстично в зависимост от осветеността на заобикалящата обекта среда (вж. Фиг. 4). Освен това се прави разлика между яркостта на цвят, получен от пряк източник на светлина, и колко светла изглежда дадена отразяваща повърхност.

Психологичните характеристики са широко разпространени сред артистичните среди. Художниците (вж. Фиг. 5 – ляво) различават спрямо един “чист” цвят: нюанси (резултат на смесване с бял пигмент, т.е. с по-малка наситеност или с по-малка светлота, когато е добавен черен пигмент) и отенък или тон (резултат на смесване с бял и черен пигмент). Съответстващият модел е познат като HSV (от hue, saturation, value; вж. Фиг. 5 – дясно) и присъства във всички графични програми.

Термини, които нямат точно съответствие в българския език

Tint	Цвят, получен чрез смесване с бяло. Когато се използва като характеристика на цветно пространство, показва с колко е просветлен оригиналният цвят.
Shade	Цвят, получен чрез смесване с черно. Когато се използва като характеристика на цветно пространство, показва с колко е потъменен оригиналният цвят.
Lightness	Обикновено се превежда като светлота. За дигиталните специалисти този параметър се мени от тъмно (0%) до блестящо (100%). Оригиналният цвят е най-често със светлота 50%.
Luminance	Възприеманата от окото яркост; в астрономията – собствена яркост на небесния обект.



Фиг. 5. Ляво: Описание на цвят в изобразителното изкуство. Дясно: HSV модел – по окръжността ($V = 1$) са разположени ярките “чисти” цветове ($H = 0^\circ$ – червен, $H = 120^\circ$ – зелен и т.н.). Допълнителните цветове са на 180° един спрямо друг.

ЦВЕТОУСЕЩАНЕ – РАННИ ТЕОРИЯ И МОДЕЛИ

Науката за цветовете води началото си от 50-те години на 19-ти век, когато Джеймс Кларк Максуел и Херман фон Хелмхолц създават експерименталната колориметрия и популяризират тривалентната (trichromatic) теория на Томас Юнг, основаваща се на гениалната му догадка:

Тъй като е почти невъзможно да си представим, че всяка светочувствителна точка от ретината съдържа безкраен брой елементи, всеки от които да трепти в перфектен унисон с всяка вълна (цвят), е задължително да предположим, че броят на основните цветове е краен, например три – червен, жълт и син... [2]

Това е “стартът” в търсене на **трите основни цвята**, от които се получават всички останали.



Фиг. 6. Хелмхолц е разглеждал цветовете в термини на силово поле а-ла Нютон с “център на тежестта”, съвпадащ с бялото. Ляво: Цветна диаграма, където “пурпурната” линия затваря кривата и позволява на всеки спектрален цвят да се съпостави допълнителен. Дясно: Върховете V (виолетов), R (червен), A (съответства на зелен) представят *невидимите* “основни” цветове, а V_1 и R_1 са спектралните виолетов и червен цвят.

За Хелмхолц, чийто “Наръчник по физиологична оптика” се е превърнал в нещо като “Библия” на цветоусещането, ключът е в допълнителните цветове⁴. Той въвежда т.нар. *пурпурна линия* за видимите, но неприсъстващи в дъгата цветове между червено и виолетово и подрежда спектралните цветове по крива, като осигурява по-голямо “рамо” за цвета с по-голям дял в сместа, възпроизвеждаща неутрално бяло (Фиг. 6 – ляво). Фигурата се обвива от триъгълник (Фиг. 6 – дясно), чийто върхове

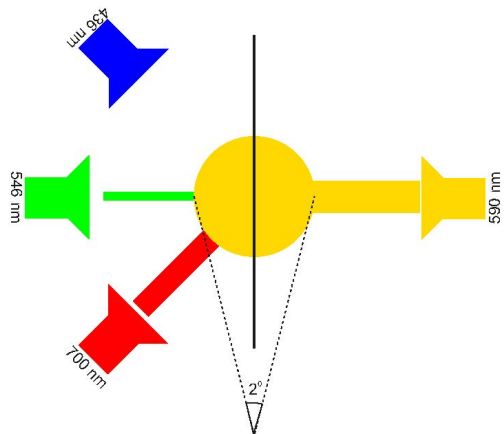
⁴ Два цвята се наричат допълнителни, ако при смесването им в определени пропорции се получава ахроматичен цвят – бяло, сиво или черно. Длъжен съм да дам дефиницията поради сложното определение, присъстващо в някои учебници

представят цветове, които са невидими за окото, но са независими и с тях могат да се получат **всички** видими цветове. С други думи, още през 19-и век е било ясно, че **не съществува** тройка видими цветове, от които да се получават всички останали. Този извод следва от законите на Грасман – разнообразието на цветовете може да се опише чрез линейна алгебра на векторно (афинно) пространство, т.е., (i) всеки цвят може да се представи като вектор чрез три независими стимула; (ii) всеки цвят има допълнителен; (iii) векторът на цвят, получен чрез смесване на два цвята, е сума на техните вектори. Именно линейността на цветното зрение и метамеризмът лежат в основата на експериментите по съвпадение, разработени от Максвел, в които наблюдател с нормално зрение (съпругата на Максвел) променя интензитета на три избрани монохроматични стимула така, че цветът, получен при адитивното им смесване да е ахроматичен.

ЕКСПЕРИМЕНТ НА РАЙТ И ГИЛД

В края на 20-те години на миналия век Райт и Гилд провеждат независимо един от друг експерименти, чиято цел не е просто да се покаже как се получава цветното богатство, като се смесват само три основни цвята – вече са съществували десетки схеми, диаграми, рецепти, а много по-фундаментална – *да създадат база данни, необходима за количествено, математически формализирано описание на цветовете, което днес наричаме CIE 1931 цветно пространство.*

Идеята е да се възпроизведе пълният спектър на еталонирана бяла светлина, като се използват само три цветни стимула – червен, зелен и син. От наблюдателите се иска да променят интензитета им така, че полученният цвят да е неразличим от пробния монохроматичен стимул, чиято дължина на вълната λ е известна (Фиг. 7).



Фиг. 7. Цветът, получен при адитивно смесване (лява страна), не се отличава от цвета, предизвикан от монохроматичен стимул (дясна страна).

Формално изравняването на пробния цвят с цвета, получен чрез смесване, може да се запише като

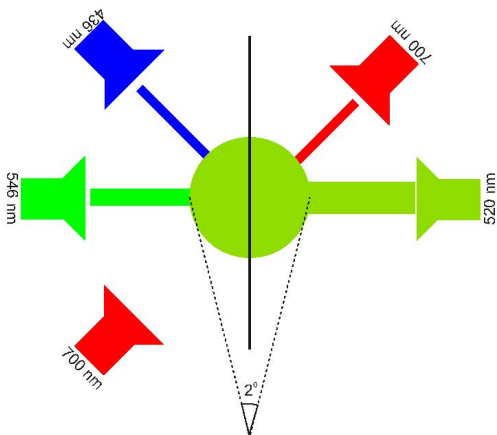
$$C \equiv rR + gG + bB, \quad (1)$$

където r , g и b са т.нар. *трихроматични коефициенти*, а R , G и B са избраните “основни” цветове. Ето как Райт обяснява с прост пример смисъла на трихроматичните коефициенти:

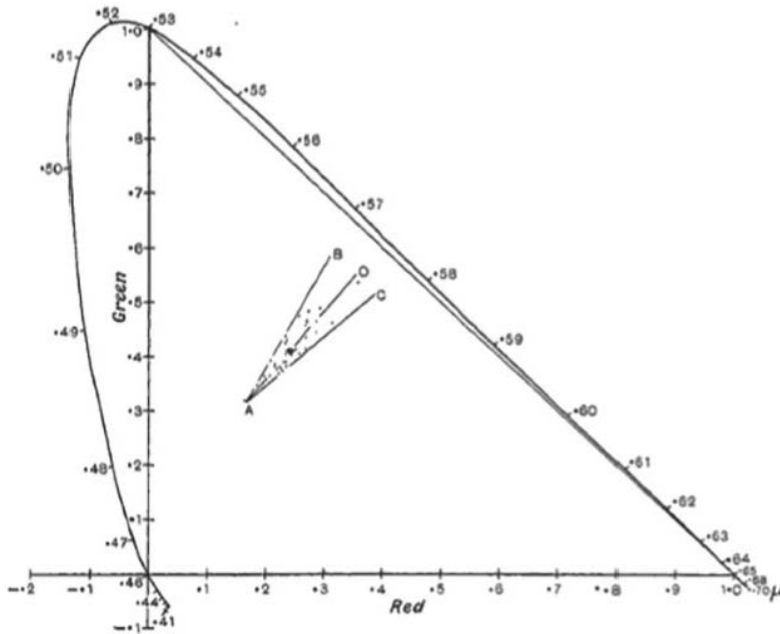
Да предположим, че “бяло” за даден наблюдател е смес от 30 части червено, 15 части зелено и 60 части синьо. Тъй като “бялото” трябва да съответства на смес от равни части на основните цветове, показанията на прибора (апертурата на колориметъра) трябва да се коригират. Съвсем произволно може да умножим по две стойността за червено и по четири за зелено, така че всички показания да са равни на 60. Тези множители се прилагат към всички последващи измервания. Например същият наблюдател достига съвпадение при показания на прибора 40 червено, 10 зелено и 20 синьо. Сега, умножавайки червеното с две и зеленото с четири, “коригираните” числа стават съответно 80, 40 и 20. Сумата им е 140, т.е. трихроматичните коефициенти са: 0.571, 0.286 и 0.143 ... [4]

Процедурата компенсира както разликите в интензитетите на основните цветове, така и индивидуалните особености на наблюдателите. Не-що повече, информацията за цвета се разделя на цветност (нормираните r , g , b) и яркост.

Важен резултат от тези и всички подобни експерименти е, че спектралните цветове **не могат** да бъдат възпроизведени чрез смесване на три основни цвята. Това става само ако се “добави” един от основните цветове към пробния (Фиг. 8), т.е. в колориметричното равенство присъства “негативен” цвят.



Фиг. 8. За да съвпадат двата цвята, е необходимо да се добави един от основните стимули към пробния. Всъщност това е друга проява на метамеризма – възприеманият цвят не зависи от спектъра на светлинния източник.

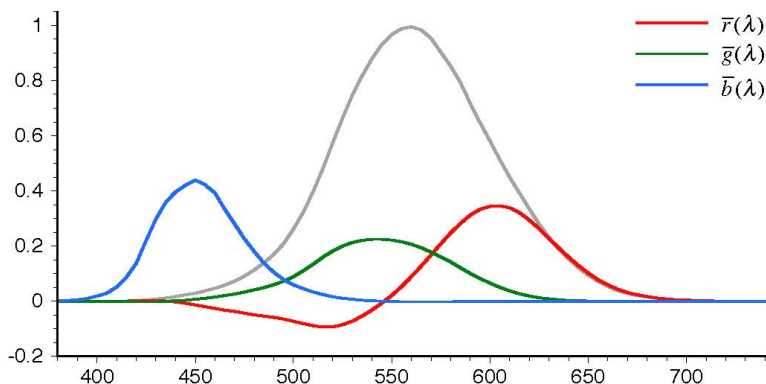


Фиг. 9. Цветен триъгълник, показващ осреднената за 10 наблюдателя крива, по която се разполагат спектралните цветове и точките за бял цвят, определени от 36 наблюдателя [4]. Осите, означени с “Red” и “Green”, представят r - g трихроматичните коефициенти.

След детайлно сканиране на всички спектрални цветове (дефинирани в интервал от 5 nm) данните са осреднени и представени графично.

Фигура 9 е копие от статията на Райт, където с думите на автора: “Абцисата представя червените (трихроматични) коефициенти, а по ординатата – зелените, докато стойностите за синьо се дават с разликата до единица на сумата от червените и зелените коефициенти. Следователно синият основен цвят се представя от началото на координатната система”. Причината за характерната, подобна на конско копито форма е очевидна. Издатината наляво от зелената ос се дължи на спектралните цветове, които изискват “отрицателно” червено, а малката гърбица по хипотенузата на триъгълника – “отрицателно” синьо. Накрая спектралните цветове, които попадат под абцисата, се възпроизвеждат с “отрицателно” зелено.

За да отчете относителната чувствителност на човешкото око, Гилд въвежда коригиращи т.нар. относителни коефициенти за яркост за основните стимули, по-точно тяхното отношение $L_R : L_G : L_B$. Последната стъпка е да се премащабира получената цветност за съответната дължина на вълната. Резултатът се съдържа във функциите $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$,

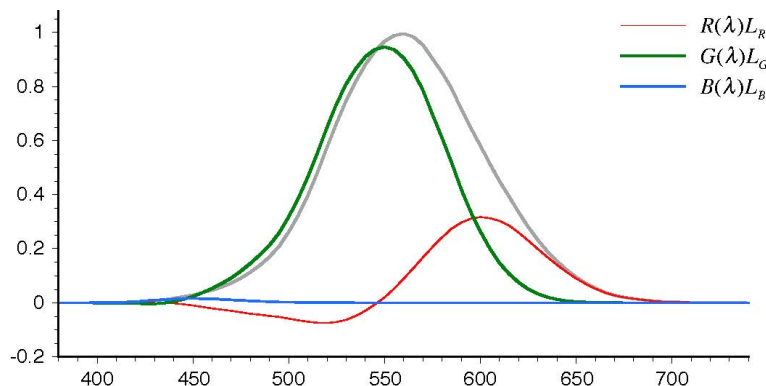


Фиг. 10. Функциите на Райт и Гилд, познати още като CMF_R , CMF_G , CMF_B . Сивата линия е възприеманата яркост на изследваната бяла светлина.

показани на Фиг. 10, където ясно се вижда “отрицателният” принос на червения цвят. Цялата процедура може да се представи със следната схема

$$\begin{pmatrix} r_u(\lambda) \\ g_u(\lambda) \\ b_u(\lambda) \end{pmatrix} \rightarrow \frac{1}{\rho} \begin{pmatrix} r_w r_u(\lambda) \\ g_w g_u(\lambda) \\ b_w b_u(\lambda) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_\lambda \\ g_\lambda \\ b_\lambda \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} \bar{r}(\lambda) \\ \bar{g}(\lambda) \\ \bar{b}(\lambda) \end{pmatrix} = \frac{V_\lambda}{L_\lambda} \begin{pmatrix} r_\lambda \\ g_\lambda \\ b_\lambda \end{pmatrix} \quad (2)$$

Тук r_w, g_w, b_w са коефициентите, калибриращи колориметъра за индивидуалния наблюдател, $\rho = r_w r_u + g_w g_u + b_w b_u$, $L_\lambda = r_\lambda L_R + g_\lambda L_G + b_\lambda L_B$ е нормиращият коефициент за яркост, а V_λ е чувствителността на окото за дадена дължина на вълната. Числата $R = \sum_\lambda \bar{r}(\lambda) E(\lambda)$, $G = \sum_\lambda \bar{g}(\lambda) E(\lambda)$ и $B = \sum_\lambda \bar{b}(\lambda) E(\lambda)$, които отчитат и енергетичния спектър на изследваната светлина, са известни още като *тристимулни параметри*. Те играят



Фиг. 11. Функции на относителната яркост по стимули, сравнени с възприеманата яркост на изследваната бяла светлина (сивата линия).

ролята на координати в 3-мерно векторно пространство с базис $\mathcal{R}, \mathcal{B}, \mathcal{G}$, тъй като два цвята са идентични само ако са неразличими за целия видим спектър.

От Фиг. 11 ясно се вижда, че яркостта на зеления стимул съвпада почти напълно с яркостта на изследваната бяла светлина – наблюдение, напълно в съгласие с факта, че $V(\lambda)$ има максимум при 555 nm. От друга страна, приносът на синия стимул е пренебрежимо малък – само 0.9%.

XYZ ЦВЕТНО ПРОСТРАНСТВО (CIE 1931)

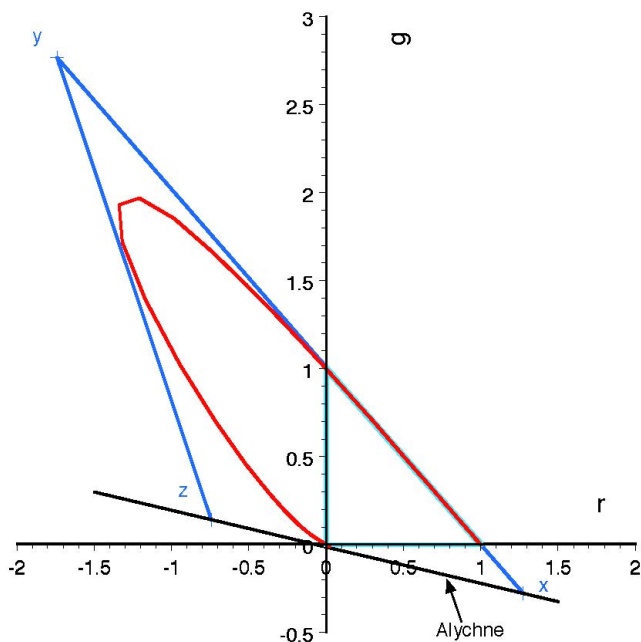
Разбира се, да се работи с отрицателни цветове, макар и математически да е разрешено, е твърде неестествено. Ето защо на съвещанието на Комитета по колориметрия на Международната комисия по осветление, състояло се на 18-ти септември 1931 г. в Тринити колидж, Кеймбридж с участието на 21 делегата от Франция, Германия, Великобритания, Япония, Нидерландия и САЩ, се взема решение, с което се преследват две цели: (i) да се конструира пространство, в което всички видими цветове да имат положителни координати; и (ii) цветността и яркостта да станат независими характеристики, като последната се припише изцяло на един тристимулен параметър.

Резултатът е цветното пространство CIE 1931 XYZ, чийто нови основни “цветове” (новият базис на математичен език) се получават с линейна трансформация (законите на Грасман запазват своята валидност) на базиса на RGB-пространството, а експерименталната му база са данните, получени от Райт и Гилд.

За основни стимули се избрани червен (700 nm), зелен (546 nm) и син (436 nm) с коефициенти за яркост в отношение 1:4.5907:0.0601, а спектрът на бялата светлина е $E(\lambda) = E = \text{const}$, т.е. тристимулните параметри са идентични с “площите” на функциите на Райт и Гилд. Изборът на основните цветове не е случаен: 700 nm е дължината на вълната на последния видим цвят, другите две дължини са първите линии в спектъра на живачния атом, а пропорцията на коефициентите за яркост осигурява най-доброто приближение на функцията $V(\lambda)$ с линейната комбинация $L_R\bar{r}(\lambda) + L_G\bar{g}(\lambda) + L_B\bar{b}(\lambda)$.

Трансформацията се основа на предложението на Шрьодингер [5] да се построи базис, в който два от основните стимули имат яркост нула, а тристимулният параметър на третия да е точно копие на $V(\lambda)$. Доколкото при този избор всеки цвят, дефиниран с координати r, g и b ($b = 1 - r - g$), има яркост, пропорционална на $0.17697r + 0.81240g + 0.01063b$, условието за нулева яркост води до уравнение на права в равнината rg

$$0.16634r + 0.80177g + 0.01063 = 0, \quad (3)$$



Фиг. 12. Цветна диаграма за CIE 1931 RGB цветно пространство с наложен CIE 1931 XYZ цветен триъгълник. Обърнете внимание на разликата с Фиг. 9, дължаща се на новия избор на бялата светлина и коефициентите за яркост.

наречена *alichne* (от старогръцки “без светлина”), на която лежат новите основни цветове $\mathcal{X}$ и $\mathcal{Z}$, а цялата яркост се приписва на третия основен цвят $\mathcal{Y}$ (вж. Фиг. 12). Отношението на новите коефициенти за яркост е 0:1:0.

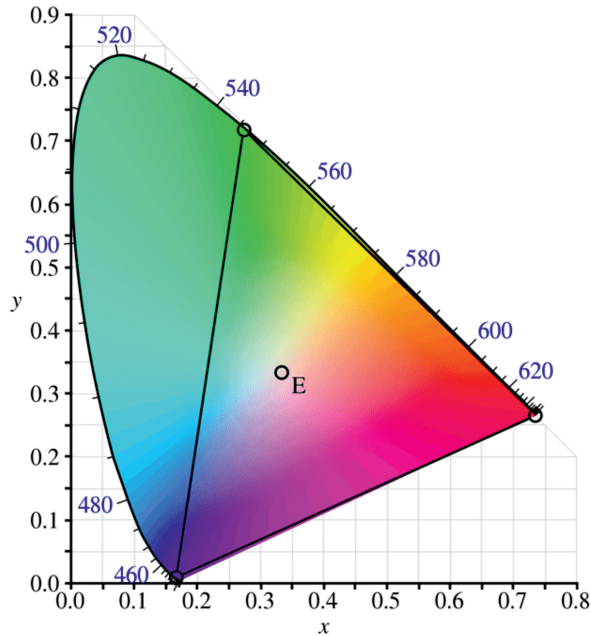
Условието за положителни координати изисква всички спектрални цветове да попадат в триъгълника XYZ в равнината rg . С достатъчна точност може да се приеме линията XY да минава през $\mathcal{R}$ с наклон, който се определя от факта, че в дълговълновата област $|b| < 0.01|g|$, т.е.

$$-0.01g = 1 - r - g \Rightarrow 0.99g = 1 - r. \quad (4)$$

Координатите на пресечната точка се определят от съвместното решение на (3) и (4), т.е. $r_X = 1.2749$, $g_X = -0.2777$ и $b_X = 0.0028$.

Третата линия, затваряща триъгълника XYZ , се определя от условието да минава оптимално близко до максималната отрицателна стойност на r при 505 nm, където $r = -1.3422$ и $g = 1.7195$. Следователно върховете имат координати: $r_Y = -1.7400$, $g_Y = 2.7677$, $b_Y = -0.0277$; $r_Z = -0.7430$, $g_Z = 0.1408$, $b_Z = 1.6022$.

Тези три точки (9 координати) определят трансформацията на координатите от RGB - в XYZ -пространство, но тъй като става дума за цве-



Фиг. 13. CIE 1931 XYZ диаграма на цветността (x -оста отговаря на аlyчне, началото на координатната система представя z , който се определя от $z = 1 - x - y$). Върховете на RGB-триъгълника са маркирани с кръгчета. Референтното бяло е означено с E.

тове остават още 3 неопределени коефициента съгласно със закона на Грасман, че усещането за цвят не се променя, ако умножим интензитета му с const. Решението на Комисията е неутралната точка $(R, G, B) = (1, 1, 1)$ да се проектира в $(X, Y, Z) = (1, 1, 1)$. Окончателно се получава⁵

$$\begin{aligned} X &= 0.4900R + 0.3100G + 0.2000B \\ Y &= 0.1769R + 0.8124G + 0.0107B \\ Z &= 0.0000R + 0.0099G + 0.9901B \end{aligned} \quad (5)$$

Ако се въведат нормирани цветни координати $x = X/\Sigma$, $y = Y/\Sigma$ и $z = Z/\Sigma$, където $\Sigma = X + Y + Z$, за описание на цветността на даден цвят ще са необходими само две координати (по договореност x и y), а тъй като цялата информация за яркост се съдържа в Y , всеки цвят в XYZ-пространството се дефинира с три числа x, y, Y . В новата x - y равнина на цветност (Фиг. 13) всички видими цветове са в първи квадрант, т.е. са с положителни координати. Цената е, че основните цветове са не само недостъпни за окото, но и яркостта на два от тях е нула.

⁵ Анализ и разширена дискусия върху извода на разположението на върховете и трансформацията са дадени в [6]

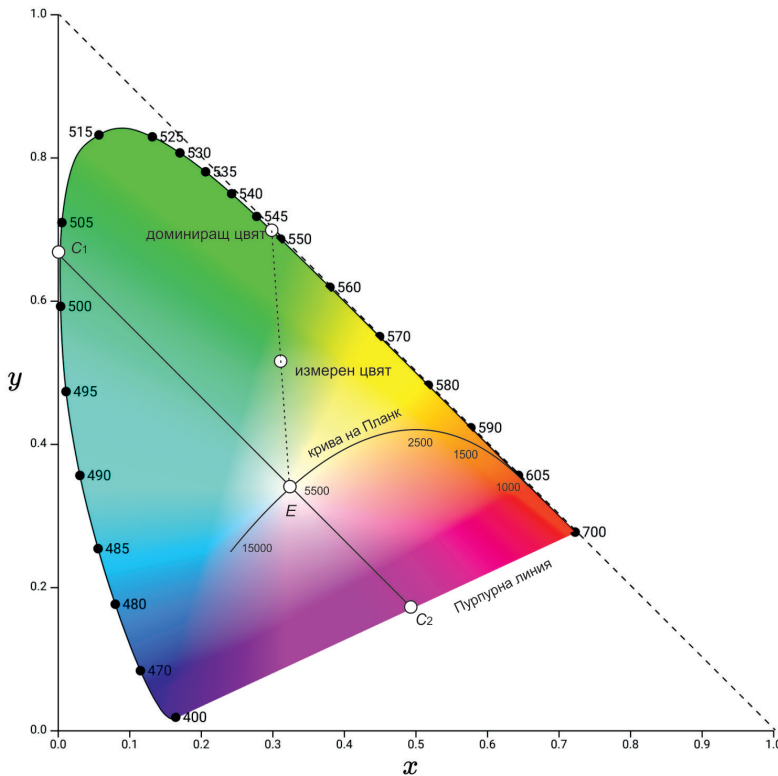
Красотата на тристимулната CIE 1931 система се състои в това, че всеки цвят, независимо дали е монохроматичен, или е получен при смесване на отразена от сложни повърхнини светлина, може да бъде описан, сравнен и разграничен от другите цветове с помощта само на **три числа**.

Главните ѝ предимства са:

- *Количествена дефиниция на цветния тон.* Всеки видим цвят се представя като линейна комбинация на тристимулите X, Y, Z ;
- *Възможност за адаптация.* Тъй като положението на точката Е от Фиг. 14, зависи от спектъра на източника на светлина, тристимулните параметри могат да се “адаптират” за различни ситуации и да се предскажат метамери, дължащи се на характеристиките на осветлението. Например може да се използва всяка точка от т.нар. линия на Планк (Фиг. 14), представляваща цветността на лъчението на абсолютно черно тяло в зависимост от неговата температура, и да се определи как се възприема даден цвят при съответното осветление;
- *Оценка за яркост.* Тъй като в xyY системата цялата яркост е приписана на Y координатата, то яркостта на даден цвят се явява отношението $Y_{\text{цвет}}/Y_0$, където Y_0 е координатата за бяла повърхност при същото осветление;
- *Определя доминиращия цвят.* Това е пресечната точка на лъча, прекаран от точката за бяло през дадения цвят, с кривата на спектралните цветове в равнината xy . (Фиг. 14);
- *Дефинира допълнителните спектрални цветове.* Това са пресечните точки на свързващата ги права, минаваща през точката за бяло в равнината xy . (Фиг. 14);
- *Линейно правило за смесване.* Различните цветове, получаващи се при смесване на два цвята, се разполагат по свързващата ги права в равнината xy . (**Внимание:** При смесване на пигменти, бои и мастила това не е вярно, тъй като получаваните цветове са резултат на различни видове отражения от повърхности или химически реакции),

но има и слабости, свързани с това, че x и y координатите са силно корелирани (XYZ пространството не е Евклидово):

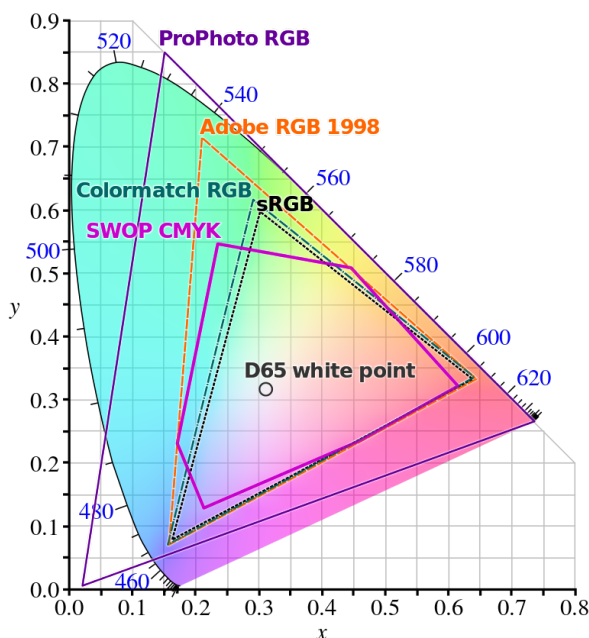
- *Наситеността*, която се дефинира като разстояние до бялата точка, се мени в зависимост от конкретния цвят;
- *Видимата разлика между цветовете*, която се апроксимира с разстоянието между тях на диаграмата за цветност, също е проблем.



Фиг. 14. CIE 1931 цветна диаграма. Цветовете C_1 и C_2 , лежащи на правата, която минава през точката за бяло, са допълнителни. Доминиращият цвят за даден цвят лежи на лъча с начало точката за бяло. Тристимулните параметри за кривата на Планк са получени, като се използва енергетичният спектър на абсолютно черно тяло. Груба оценка за възприемания цвят дава закона на Вин ($\lambda_{\max} = 2.8978T \text{ mm K}$).

Стандартът CIE 1931 няма пряко приложение за генерирането на цветове в съвременни дигитални устройства – не е удобно да се работи с отрицателни (CIE 1931 RGB) или с имагинерни основни цветове (CIE 1931 XYZ). По-скоро това е теория, която ни казва кои комбинации цветни стимули се възприемат от повечето хора като определен цвят, т.е. математическо обобщение на цветоусещането, подобно на Нютоновата механика. Пространството CIE 1931 е **теоретичната рамка**, от която се извеждат различните – в зависимост от целите и достъпните средства, **цветови модели**.

На Фиг. 15 са показани гамите на най-често използваните модели. Вижда се, че ADOBE RGB покрива почти 50% от всички видими цвето-



Фиг. 15. Сравнение на цветови гами с широко приложение в графичната индустрия. Най-разпространената в печатната индустрия система CMYK има доста сложна форма, с което се обяснява разликата в цветовете на екран и след печат. Точката D_{65} е стандартната бяла светлина за CIE 1931.

ве, но това не означава, че броят им е повече от този на sRGB. Броят на различните цветове и за двата модела е 16,8 милиона, ако се използва 8-битова кодировка. В този случай преходът от един цвят към друг е поплавен при sRGB.

Нехомогенността на цветното пространство е голямото предизвикателство за специалистите, работещи в областта на цветното зрение и свързаните с него индустрии. Търсеното на решение “възкреси” теорията на Херинг и в средата на миналия век Хурвиц и Джеймсон [7] конструираха аналози на функциите на Райт и Гилд, които отразяват ролята на второто ниво (опонентните канали) при формирането на усещането за цвят. Двадесет години по-късно (1976 г.) Международната комисия по осветление прие нова формула за определение на разстоянието между два цвята в т.нар. CIELAB цветно пространство. То отново е тримерно, като запазва особения статут на Y координатата, но се отчита степенният закон на Стивън за връзката между интензитета на стимула и неговата възприемана стойност. Другите два параметъра, описващи цветността, представят процесите в каналите на Херинг и приемат както положи-

телни, така и отрицателни стойности. Пространството CIELAB е локално хомогенно, което позволява да се дефинира разстояние (разлика) между близки цветове – ключова характеристика при всички устройства, използващи цветна кодировка. Но, както винаги, когато се успее в едно, се губи в друго. Простото правило за адитивно смесване не е в сила за CIELAB, а това означава, че книгата за цветното зрение не е завършена.

КАКВО БИ ТРЯБВАЛО ДА ЗНАЕ ЗА ЦВЕТОВЕТЕ УЧЕНИК В 7. КЛАС

Далеч съм от мисълта, че разказаното дотук трябва да присъства в учебниците по физика за 7. клас. То е по-скоро илюстрация, как желанието да се създаде несубективна, количествена оценка на онова, което наричаме цвят, води до въвеждане на имагинерни невидими основни цветове. За художник това вероятно звучи абсурдно, но едва ли за специалист по информатика или компютърен дизайн. В антагонизма на двете представи се крие дидактическият проблем, който трябва да решава съвременното образование – как да се създаде обща непротиворечива база знания.

Всичко трябва да започне с разбирането, че светлината е и частица (геометричната оптика) и **вълна**. Трудно ще обясним защо небето е синьо, защо поетът говори за “високи сини” планини, защо гребените на вълните са бели и още много защо и защо, ако не приемем, че става дума за вълнови процеси.

Следващата стъпка е да се демонстрира разлагането на бялата светлина, но може би по-важно е да се покаже обратното явление – **синтез** на бяла светлина от цветни снопове. Именно в това се състои революцията на Нютон – в продължение на хилядолетия хората са се забавлявали с цветните лъчи, получавани при преминаването на бяла светлина през призма, но за тях това са били вторични дефекти в идеалното бяло.

Важно знание е **разсейването** (дифузионно отражение) на светлината от повърхности, за да се разграничат двата главни метода за смесване: адитивно и субтрактивно.

Задължително е да се запознаят учениците с устройството на **окото**, но не само като оптичен прибор, а в смисъла на LMS рецепторите и каналите на Херинг. Не по-малко важно е откриването цветни **метамери**. Тогава въпросът с броя на основните цветове се трансформира в необходимия брой **параметри** за описание на цветовете. Може да се изучава най-естествената за човека HSV система, която също така ни позволява да преосмислим понятието яркост.

Отново задължително е да знае, както са знаели още Хелмхолц и Максвел, че **няма** три реални цвята, с които да се възпроизведат цветовете на дъгата.

Остават моделите: RGB за адитивно и СМУ за субтрактивно смесване на цветовете.

Описаната програма е мечта, но се надявам все някой, отговорен пред поколението и гилдията, да я реализира.

Литература

- [1] I. Newton (1730) *Opticks, or a Treatise of the Reflections, Refractions, Inflections & Colours of Light*. London: Wm. Innys.
- [2] T. Young (1802) The Bakerian Lecture. On the Theory of Light and Colours. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* **92** 12–48.
- [3] J. Clerk Maxwell (1857) XVIII.—Experiments on colour, as perceived by the eye, with remarks on colour-blindness. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh* **21**(2) 275–298; URL http://journals.cambridge.org/article_S0080456800032117.
- [4] W.D. Wright (1929) A re-determination of the trichromatic coefficients of the spectral colours. *Transactions of the Optical Society* **30** 141-164; URL (<http://iopscience.iop.org/1475-4878/30/4/301>
- [5] K.K. Niall (2017) “Erwin Schrödinger’s Color Theory. Translated with Modern Commentary”. Springer.
- [6] H.S. Fairman, M.H. Brill, H. Hemmendinger (1997) How the CIE 1931 Color-Matching Functions Were Derived from Wright–Guild Data. *Color Research and Application* **22** 11-23.
- [7] L.M. Hurvich, D. Jameson (1957) An Opponent-Process Theory of Color Vision. *Psychological Review* **6** 384-404.