ЦВЕТОВЫЕ МОДЕЛИ

Компьютерная графика

Лектор: Демяненко Я.М., 4-й курс ФИИТ, 2026

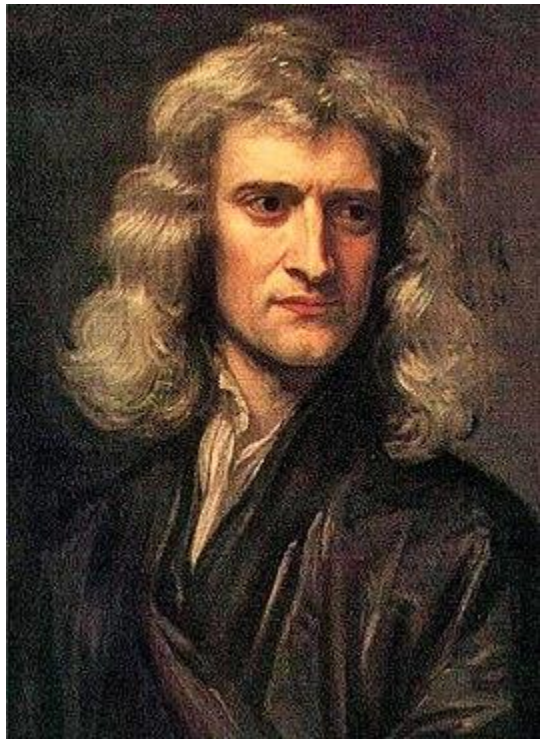
Цветовая модель

Математическая модель описания представления цветов в виде кортежей чисел, обычно из трёх значений, называемых *цветовыми компонентами* или *цветовыми координатами*

Цветовое пространство

Все возможные значения цветов, задаваемые моделью, определяют цветовое пространство

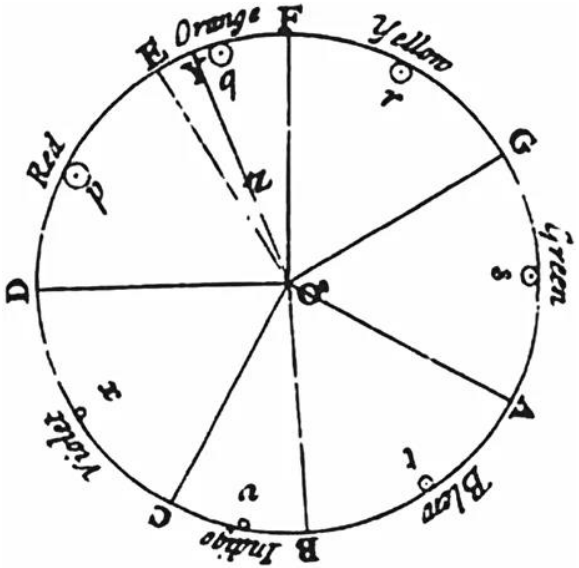
Исаак Ньютон



1643-1727

В 1676 году разложил белый солнечный свет на цветовой спектр с помощью трехгранной призмы.

Ньютон выделил семь секторов: красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий и фиолетовый.



Исаак Ньютон придерживался идеи о семи основных цветах

И остальные …



М.В.Ломоносов
(1711-1765)
идея трехцветности 1756



Томас Юнг (1773-1829)
один из создателей
волновой теории света
выдвинул идею трёх основных цветов



Герман фон Гельмгольц
(1821—1894)
способствует признанию теории
трёхцветового зрения Томаса Юнга

Джеймс Максвелл



(1831-1879)

- пионер количественной теории цветов
- автор принципа цветной фотографии

Максвелл во многом независимо повторял опыты Германа Гельмгольца

- Основными цветами являются **красный**, **зелёный** и **синий**

Первая в мире цветная фотография



«Тартановая лента»
Авторы
Джеймс Клерк Максвеллом и
Фотограф Томас Саттон

Представлена 17 мая 1861 года на лекции в Королевском институте на тему «О теории трёх основных цветов»

Сама идея возникла в 1855 году

Трёхкомпонентное цветовое пространство стимулов

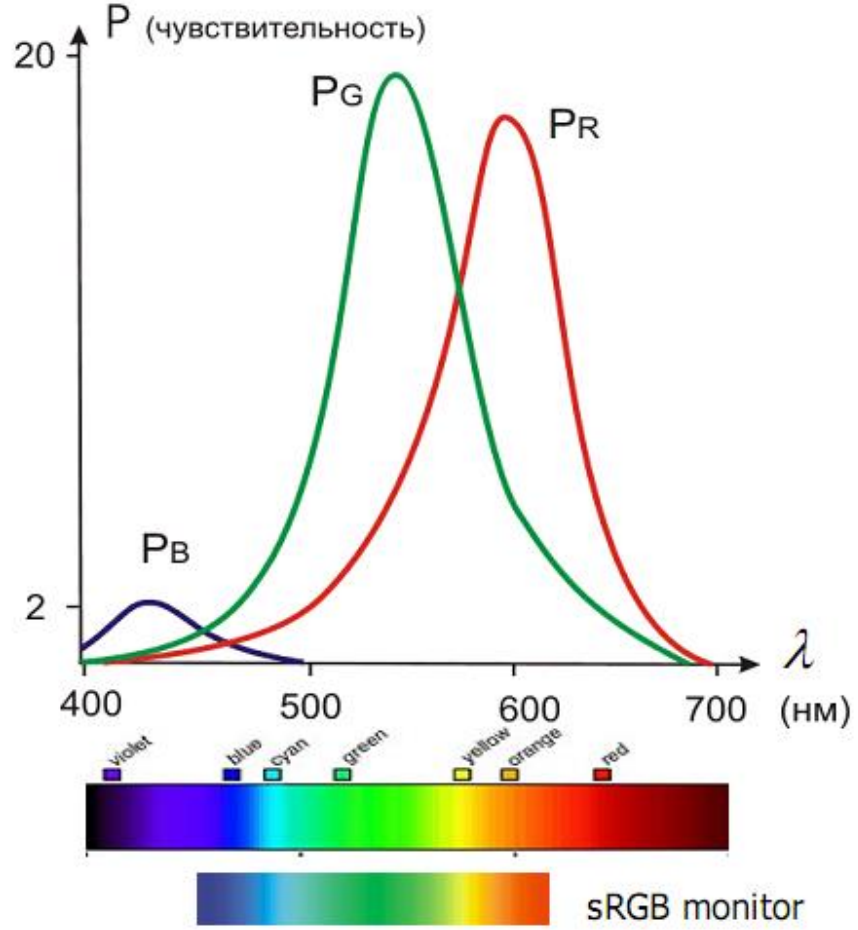
- Человек является трихроматом — сетчатка **глаза** имеет **3 вида рецепторов света** (**колбочки**), ответственных за цветное зрение

- Отклик, вызываемый в колбочках **светом определённого спектра**, называется ***цветовым стимулом***

- Метамериея: два **излучения** с разными спектрами, но **одинаковыми цветовыми стимулами**, **неразличимы для человека**



Чувствительность глаза к свету



Чувствительность трёх типов колбочек к разным участкам спектра



Интегральная чувствительность глаза к свету

Герман Гюнтер Грассман

- **Закон Грассмана** в оптике и колориметрии — эмпирическое наблюдение, что **восприятие** хроматической составляющей **цвета описывается** примерно **линейным законом**.
- Это правило было открыто Германом Грассманом в 1853 году



Законы Германа Грассмана (аддитивного синтеза света)

1. **Закон трёхмерности**. Любой цвет однозначно выражается тремя, если они линейно независимы

2. **Закон непрерывности**. При непрерывном изменении излучения цвет смеси также меняется непрерывно. Не существует такого цвета, к которому нельзя было бы подобрать бесконечно близкий.

3. **Закон аддитивности**. Для смеси двух цветов C1 и C2 имеет место равенство:

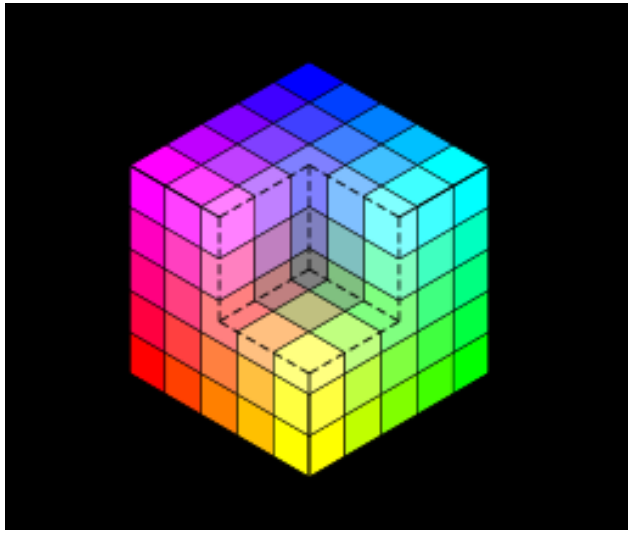
   $C=C_1+C_2=(r_1+r_2)R+(g_1+g_2)G+(b_1+b_2)B$

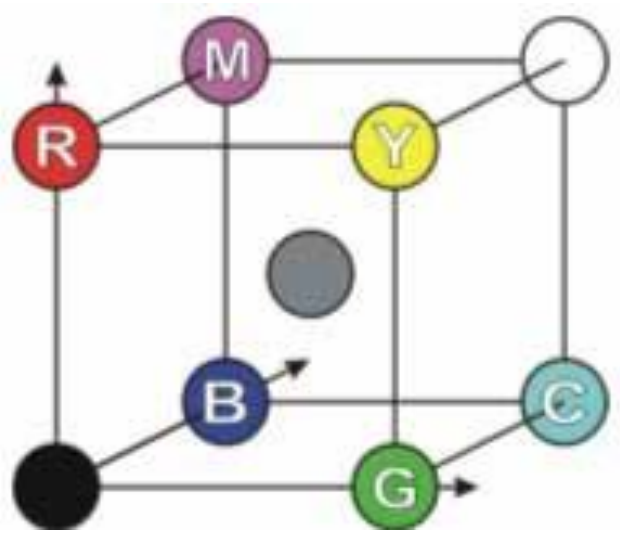
Цветовые модели

- RGB
- CMY(K)
- HSI (HSL, HSV)
- CIE XYZ (CIE Lab, CIE LUV)

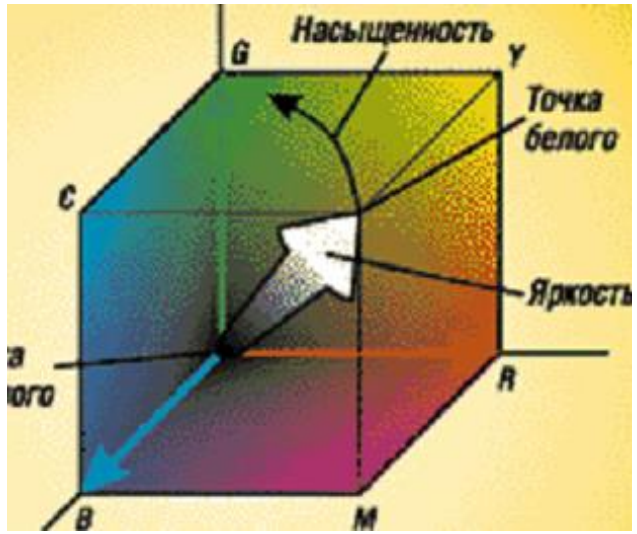
и др.

RGB – аддитивная модель



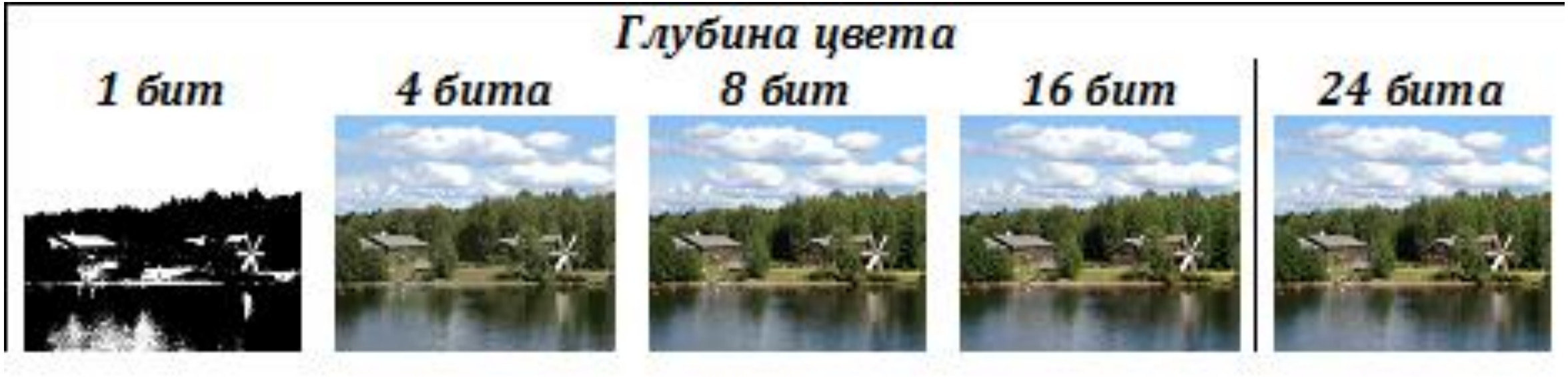






Изображение, разложенное на составляющие R, G и B



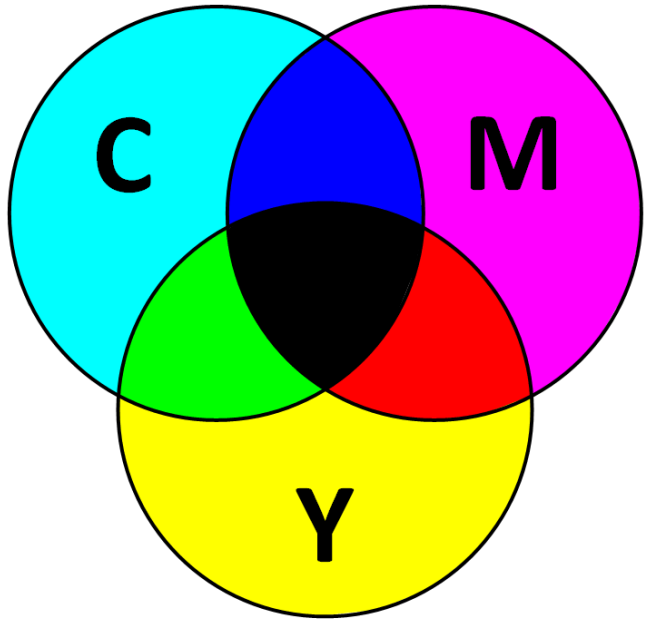


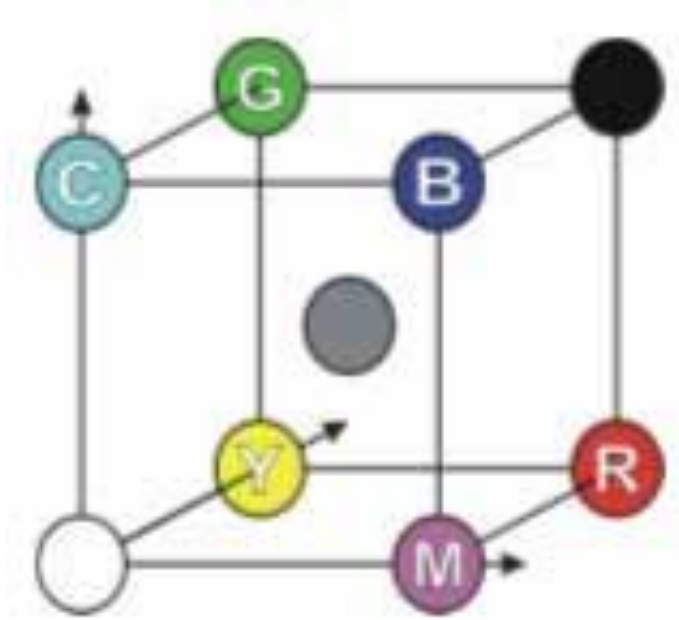
Глубина цвета

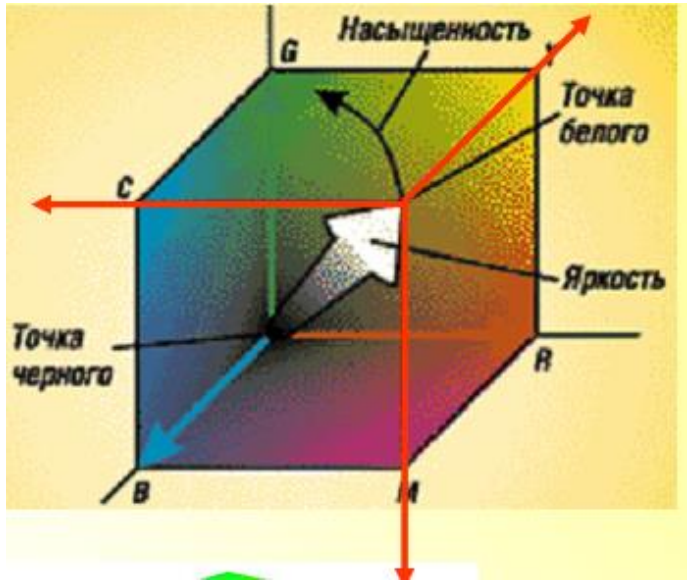
- 8-битный RGB дает 256 цветов
- 16-битный 65536 (схема 5-6-5)
- 24-битный 16777216 (8-8-8)

CMYK – субтрактивная модель

Используется прежде всего в полиграфии для стандартной триадной печати





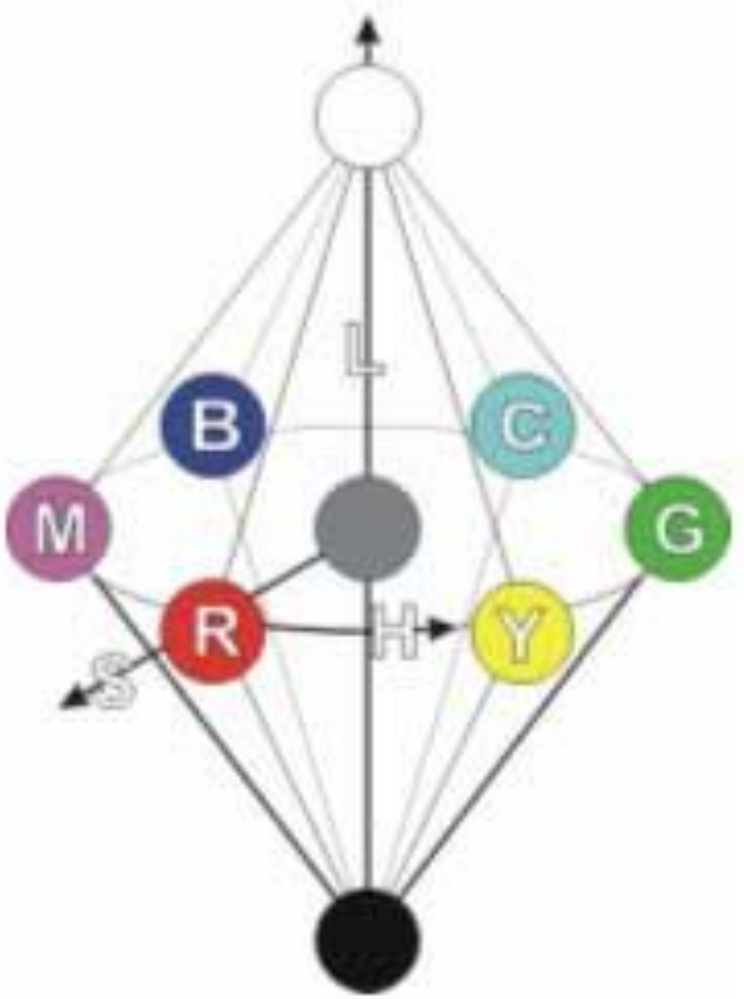


«Си-Эм-Уай-Кэй» или «си-мак»

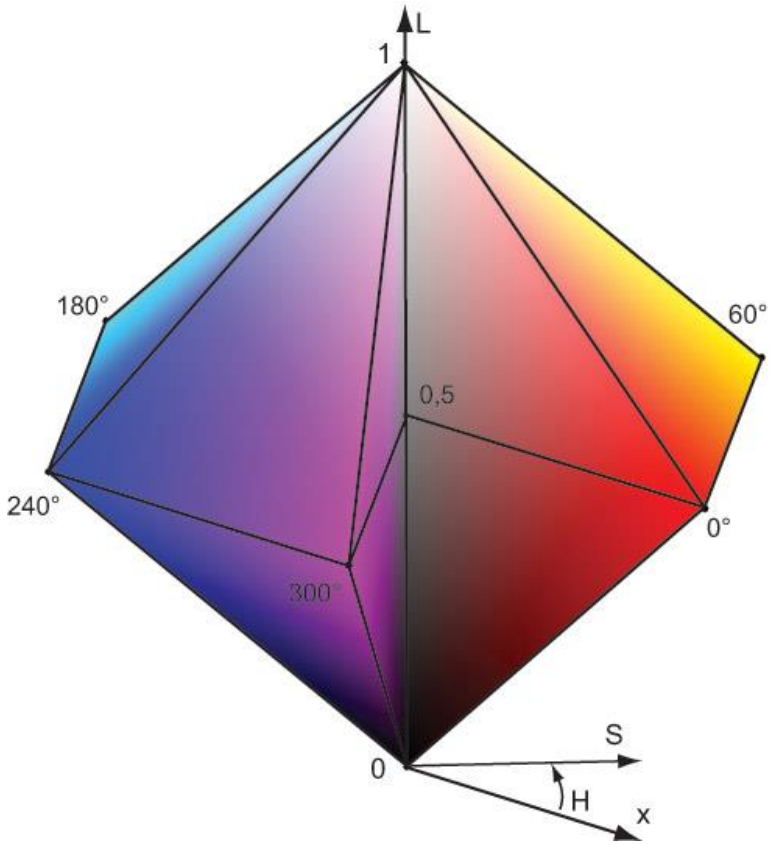
$$\begin{cases} C = 1 - R \\ M = 1 - G \\ Y = 1 - B \end{cases}$$

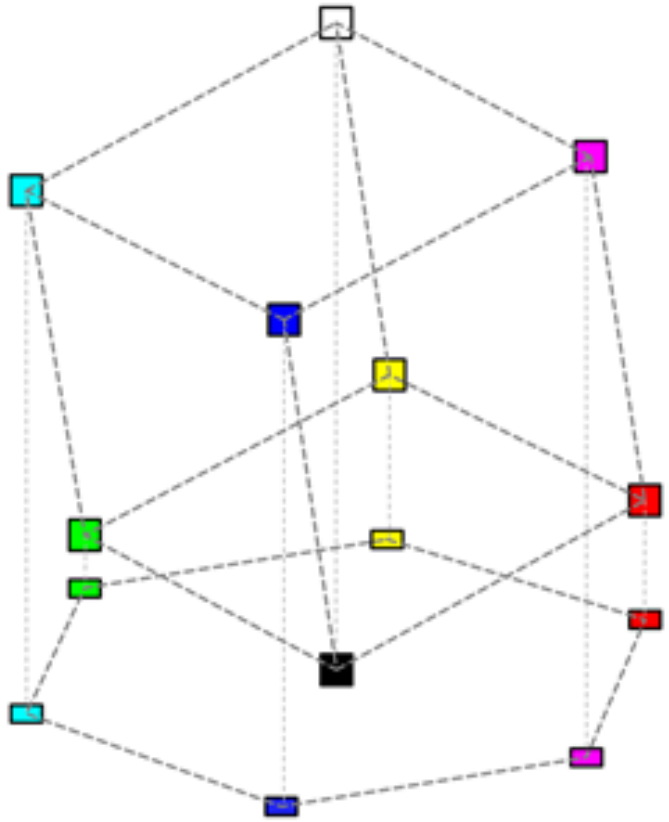
HSL, HLS или HSI

Hue	тон	длина волны
Saturation	насыщенность	интенсивность
Lightness	светлота	количество света



RGB и HSL: связи и зависимости





Преобразование RGB в HSL

$$H = \begin{cases} \text{undefined} & \text{if } MAX = MIN \\ 60° \times \frac{G-B}{MAX-MIN} + 0°, & \text{if } MAX = R \\ & \text{and } G \geq B \\ 60° \times \frac{G-B}{MAX-MIN} + 360°, & \text{if } MAX = R \\ & \text{and } G < B \\ 60° \times \frac{B-R}{MAX-MIN} + 120°, & \text{if } MAX = G \\ 60° \times \frac{R-G}{MAX-MIN} + 240°, & \text{if } MAX = B \end{cases}$$

$$S = \begin{cases} 0 & \text{if } L = 0 \text{ or } MAX = MIN \\ \frac{MAX-MIN}{MAX+MIN} = \frac{MAX-MIN}{2L}, & \text{if } 0 < L \leq \frac{1}{2} \\ \frac{MAX-MIN}{2-(MAX+MIN)} = \frac{MAX-MIN}{2-2L}, & \text{if } \frac{1}{2} < L < 1 \\ 1 & \text{if } L = 1 \end{cases}$$

$$L = \frac{1}{2}(MAX + MIN)$$

R, G, B — значения цвета в цветовой модели RGB в диапазоне [0; 1]

MAX — максимум из трёх значений (R, G, B)
MIN — минимум из трёх значений (R, G, B)

H — тон [0; 360]
S — насыщенность [0; 1]
L — светлота [0; 1]

Преобразование HSL в RGB

$$Q = \begin{cases} L \times (1.0 + S), & \text{if } L < 0.5 \\ L + S - (L \times S), & \text{if } L \geq 0.5 \end{cases}$$

$$P = 2.0 \times L - Q$$

$$H_k = \frac{H}{360}$$ приведение к интервалу [0,1]

$$T_R = H_k + \frac{1}{3} \qquad T_G = H_k \qquad T_B = H_k - \frac{1}{3}$$

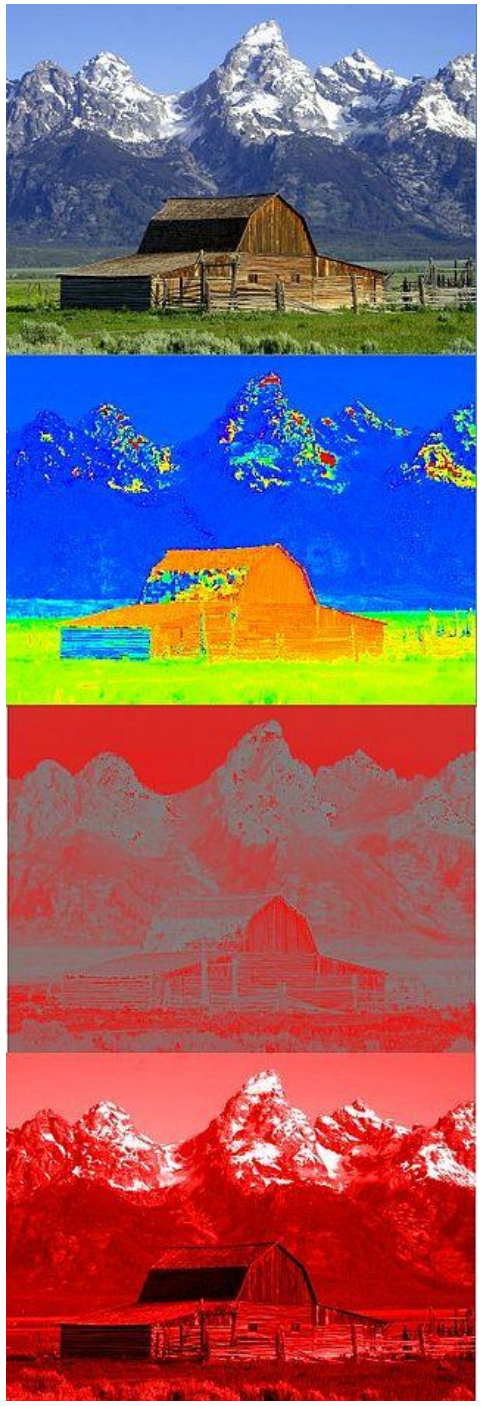
$$\text{if } T_c < 0 \rightarrow T_c = T_c + 1.0 \quad \text{for each } c = R, G, B$$

$$\text{if } T_c > 1 \rightarrow T_c = T_c - 1.0 \quad \text{for each } c = R, G, B$$

$$\text{color}_c = \begin{cases} P + ((Q - P) \times 6.0 \times T_c), & \text{if } T_c < \frac{1}{6} \\ Q, & \text{if } \frac{1}{6} \leq T_c < \frac{1}{2} \\ P + \left((Q - P) \times (\frac{2}{3} - T_c) \times 6.0\right), & \text{if } \frac{1}{2} \leq T_c < \frac{2}{3} \\ P, & \text{otherwise} \end{cases}$$

Для каждого цвета c = R,G,B:

Слева H, S и L



Изображение, разложенное на составляющие

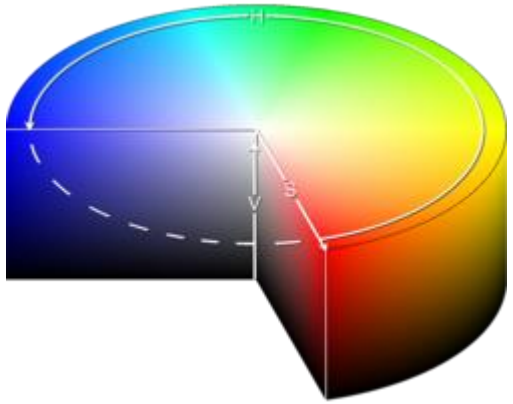


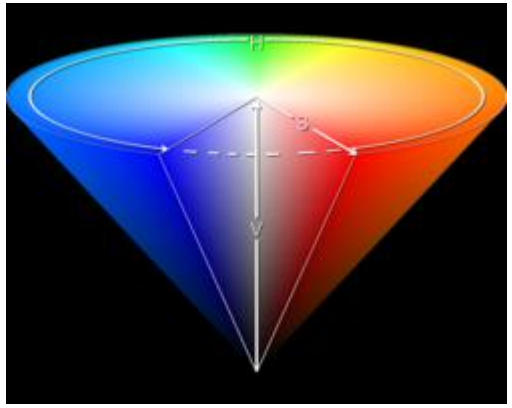
Справа R, G и B

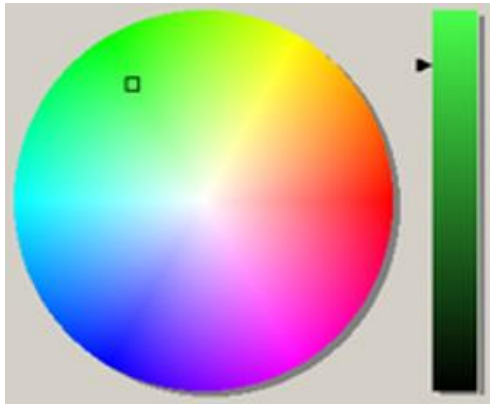
Интенсивность, тон, насыщенность

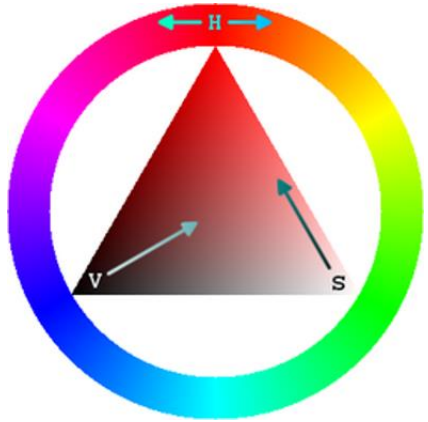
	Интенсивность	Тон	Насыщенность
Уменьшенное значение			
Исходное значение			
Увеличение значение			

Визуализация HSV и HSB











Шкала оттенков — Hue

Элви Рей Смит 1978

HSV

Hue, Saturation, Value — тон, насыщенность (чистота цвета), значение

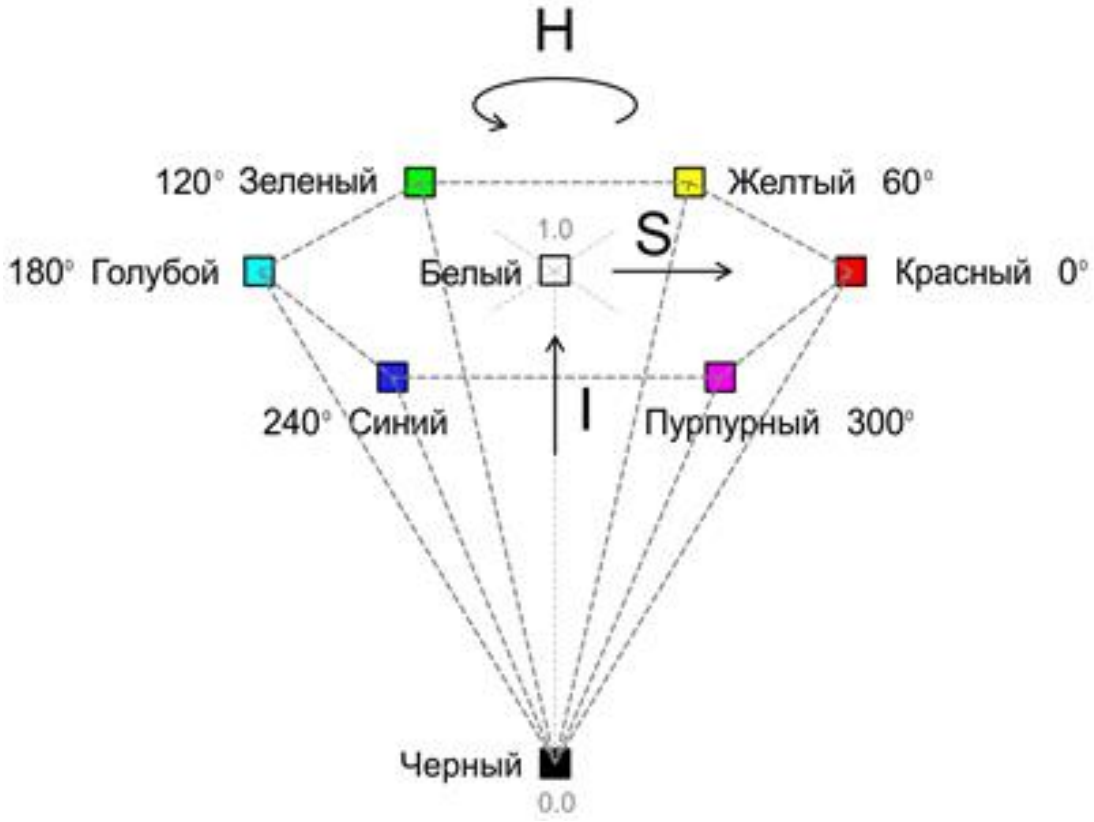
или

HSB

Hue, Saturation, Brightness — оттенок, насыщенность, яркость

Диапазоны значений

- **H**ue: 0-360, 0-100, 0-1
- **S**aturation: 0-100, 0-1
- **V**alue : 0-100, 0-1



Преобразование RGB в HSV

$$H = \begin{cases} 0, \text{ если } MAX = MIN \\ 60 \times \frac{G-B}{MAX-MIN} + 0, \text{ если } MAX = R \text{ и } G \geq B \\ 60 \times \frac{G-B}{MAX-MIN} + 360, \text{ если } MAX = R \text{ и } G < B \\ 60 \times \frac{B-R}{MAX-MIN} + 120, \text{ если } MAX = G \\ 60 \times \frac{R-G}{MAX-MIN} + 240, \text{ если } MAX = B \end{cases}$$

$$S = \begin{cases} 0, \text{ если } MAX = 0, \\ \text{иначе } 1 - \frac{MIN}{MAX} \end{cases}$$

$$V = MAX$$

MAX — максимальное значение из R, G и B
MIN — минимальное из них

$$H \in [0, 360)$$
$$S, V, R, G, B \in [0, 1]$$

Преобразование HSV в RGB

$$H_i = \left\lfloor \frac{H}{60} \right\rfloor \mod 6$$

$$f = \frac{H}{60} - \left\lfloor \frac{H}{60} \right\rfloor$$

$$p = V(1 - S)$$

$$q = V(1 - fS)$$

$$t = V(1 - (1 - f)S)$$

$H_i = 0 \rightarrow$ $R = V,\quad G = t,\quad B = p$

$H_i = 1 \rightarrow$ $R = q,\quad G = V,\quad B = p$

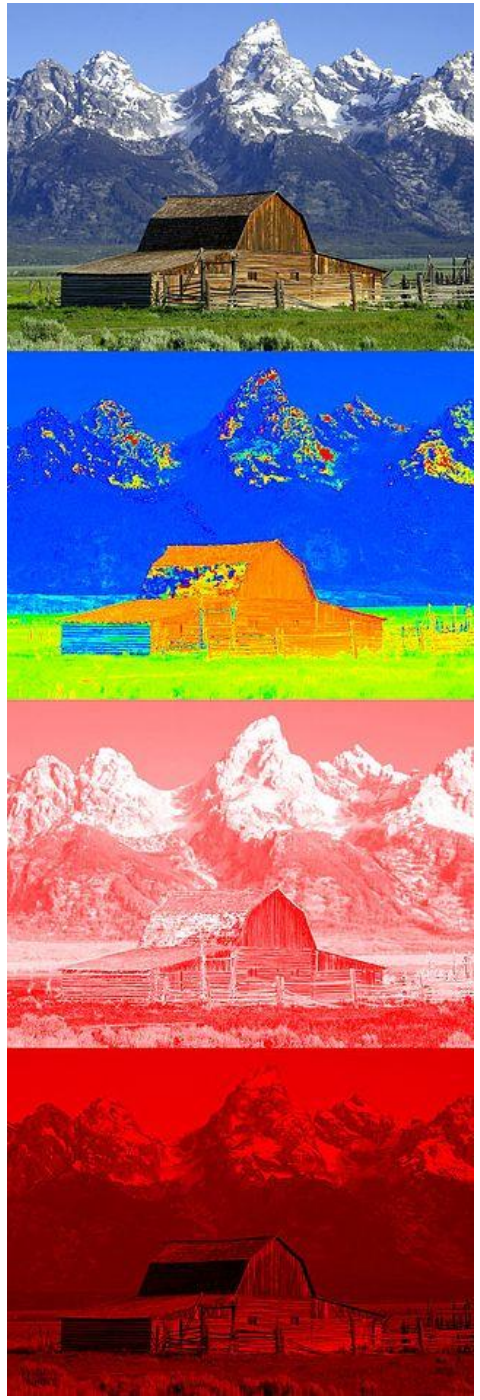
$H_i = 2 \rightarrow$ $R = p,\quad G = V,\quad B = t$

$H_i = 3 \rightarrow$ $R = p,\quad G = q,\quad B = V$

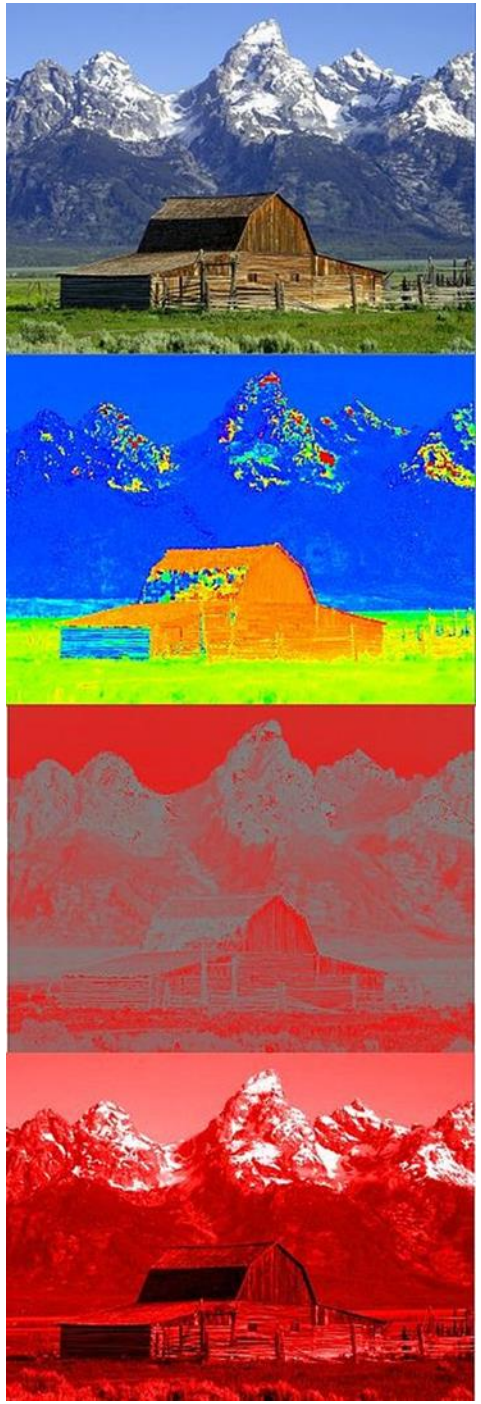
$H_i = 4 \rightarrow$ $R = t,\quad G = p,\quad B = V$

$H_i = 5 \rightarrow$ $R = V,\quad G = p,\quad B = q$

HSV



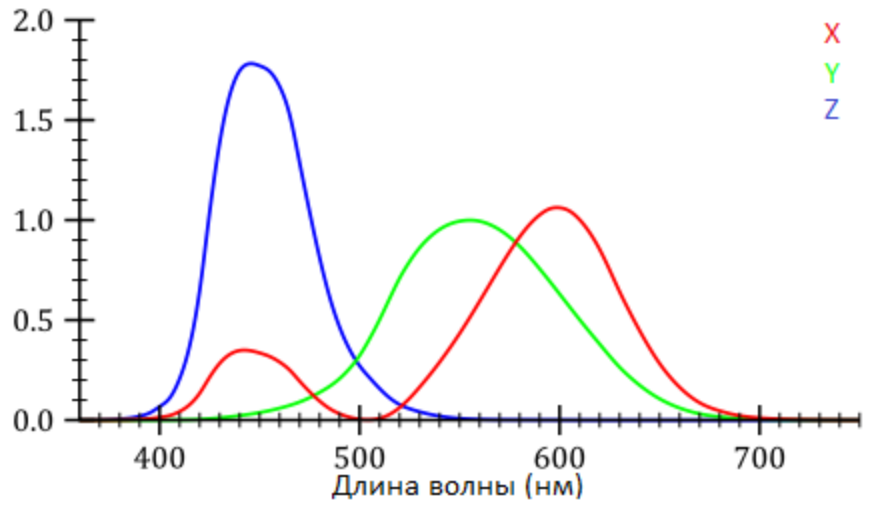
Изображение, разложенное на составляющие



HSL

Модель CIE XYZ

Линейная 3-компонентная цветовая модель, основанная на результатах измерения характеристик человеческого глаза



Кривые X(λ),Y(λ),Z(λ) описывают чувствительность среднестатистического наблюдателя к стандартным возбуждениям

В 1931 был принят стандарт CIE (Commission International de l’Eclairage – Международная комиссия по освещению)

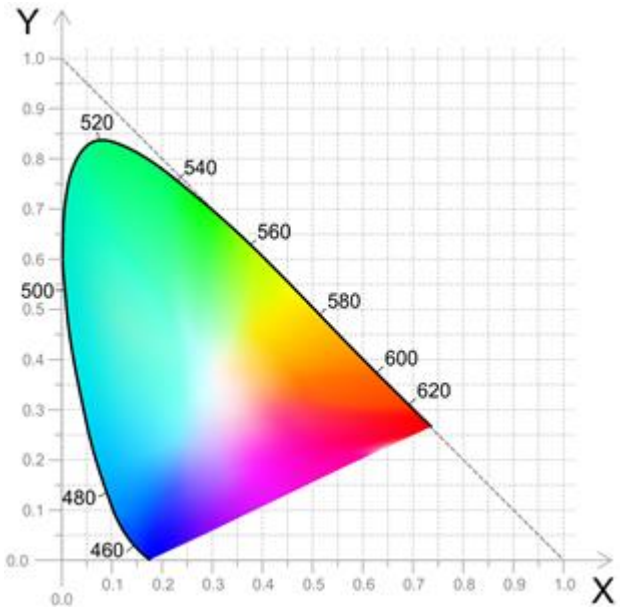
в качестве основы которого были выбраны три перенасыщенных цвета XYZ, несоответствующих никаким реальным

но все реальные могут быть представлены их комбинациями с положительными коэффициентами

Введено понятие «стандартного наблюдателя»

Цветовое пространство CIE XYZ

Относительные цветовые координаты



$$\begin{cases} x = \dfrac{X}{X+Y+Z} \\ y = \dfrac{Y}{X+Y+Z} \\ z = \dfrac{Z}{X+Y+Z} \end{cases}$$

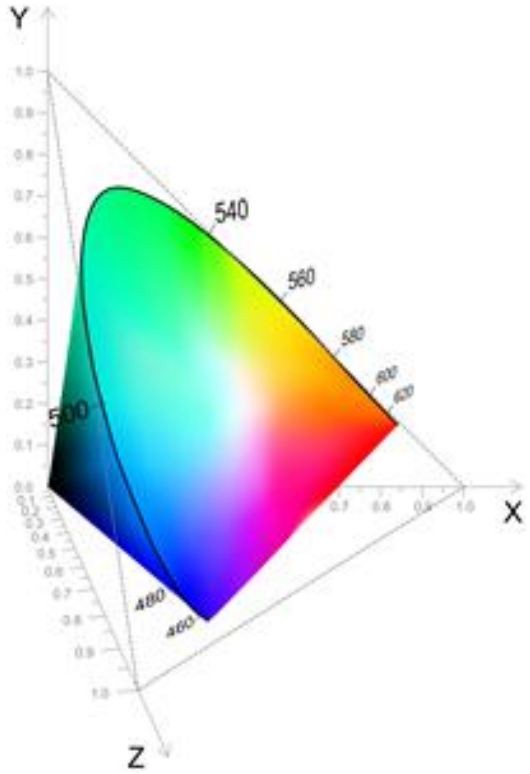
$$x+y+z=1$$

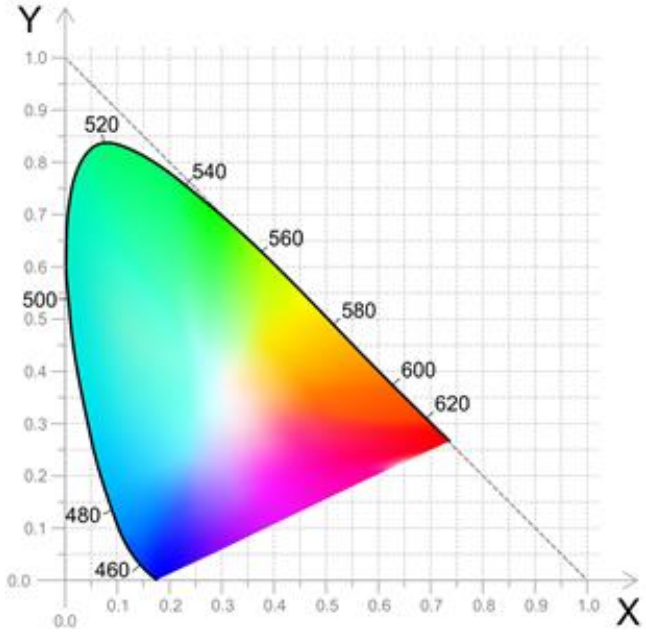
$$X = x\frac{Y}{y};\quad Y = Y;\quad Z = (1-x-y)\frac{Y}{y}.$$

Плоская хроматическая CIE-диаграмма вместе с Y (яркостью) позволяет полностью восстановить перенасыщенные цвета XYZ

На основе двух координат x и y введена плоская хроматическая CIE-диаграмма.
Или треугольник CIE

Все цвета, видимые среднестатистическим наблюдателем



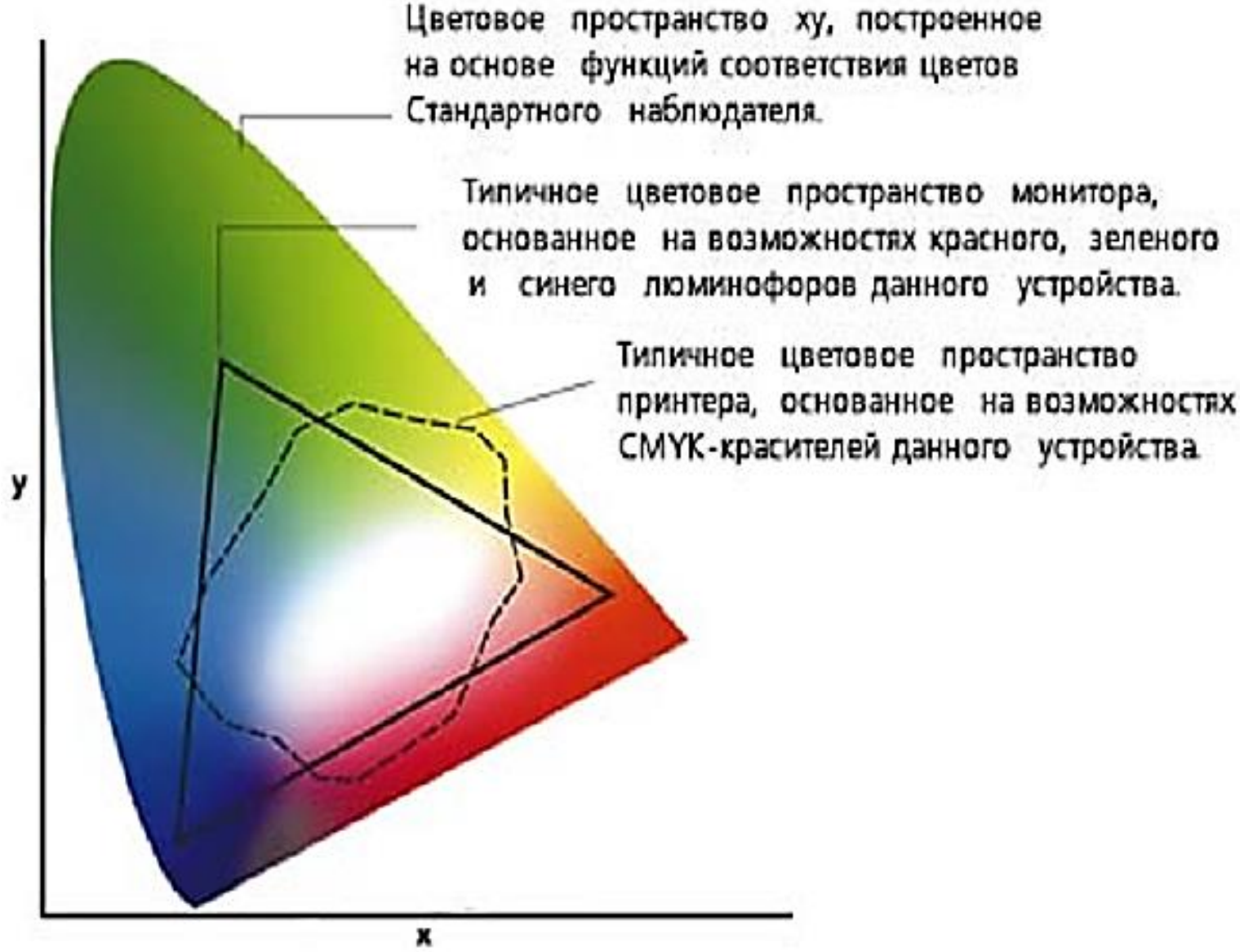


- Треугольник CIE описывает только цветовой тон, но никак не описывает яркость

- Для описания яркости вводят дополнительную ось, проходящую через точку с координатами (1/3;1/3) (т.н. точку белого)

- В результате получают цветовое тело CIE

Хроматическая CIE-диаграмма и цветовой охват



От CIE XYZ к CIE Lab и CIE Luv

CIE Lab и CIE Luv — цветовые пространства, разработанные Международной комиссией по освещению (CIE) в 1976 году

Их главная цель — сделать так, чтобы расстояние между цветами в пространстве примерно соответствовало тому, как человек воспринимает разницу между ними

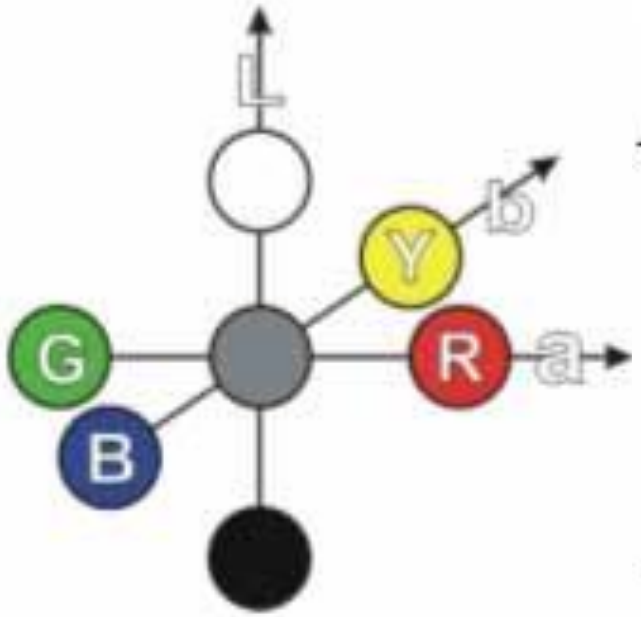
Главное **отличие**:

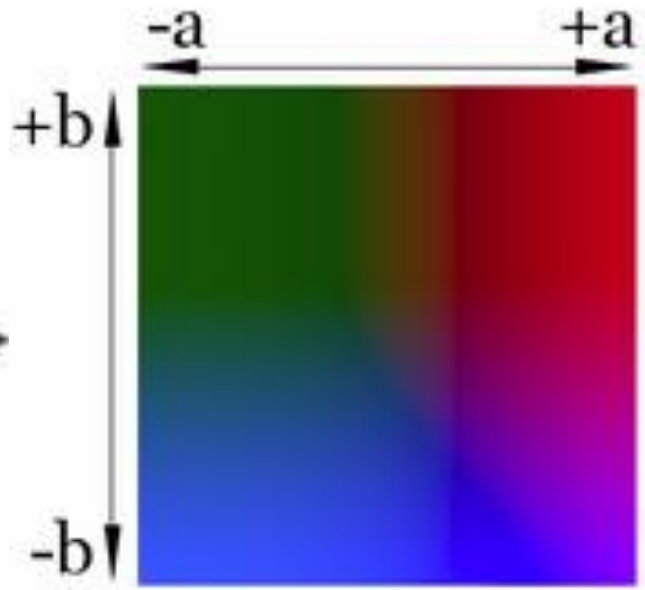
- Lab чаще используют для материалов и печати
- Luv — для экранов и источников света

Оба построены на базе пространства CIE XYZ и стремятся к равномерному восприятию цветовых различий

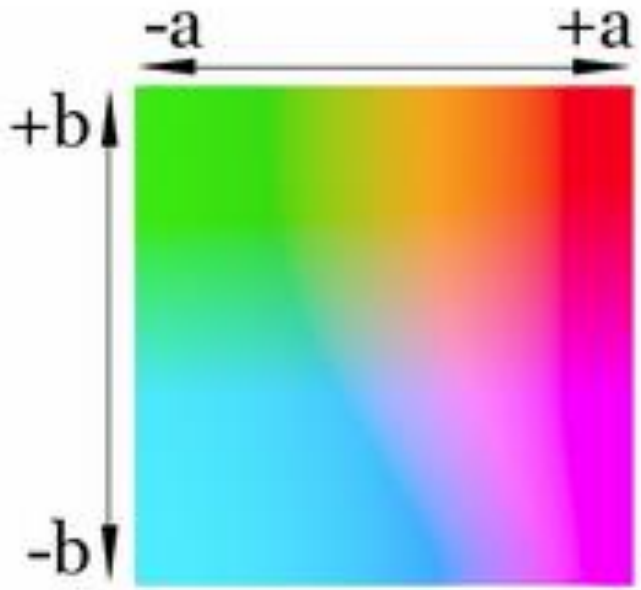
Визуальное представление CIE Lab и CIE Luv







Светлота 25%



Светлота 75%

L - яркость (luminosity), 0..100

a - величина красно-зеленой составляющей

b - величина желто-синей составляющей

Основное назначение

конвертирование данных между другими цветовыми пространствами (например, из RGB сканера в CMYK печатного процесса)

мощный инструмент цветокоррекции

Недостатки и критика LAB

Ввиду того что в преобразовании из XYZ в LAB используются формулы, содержащие кубические корни, LAB представляет собой сильно-нелинейную систему

LAB при разработке оптимизировался для применения в условиях известного (как правило, студийного) освещения

LAB также неприменим для редактирования фотографий с высоким динамическим диапазоном яркости

Области цветового охвата

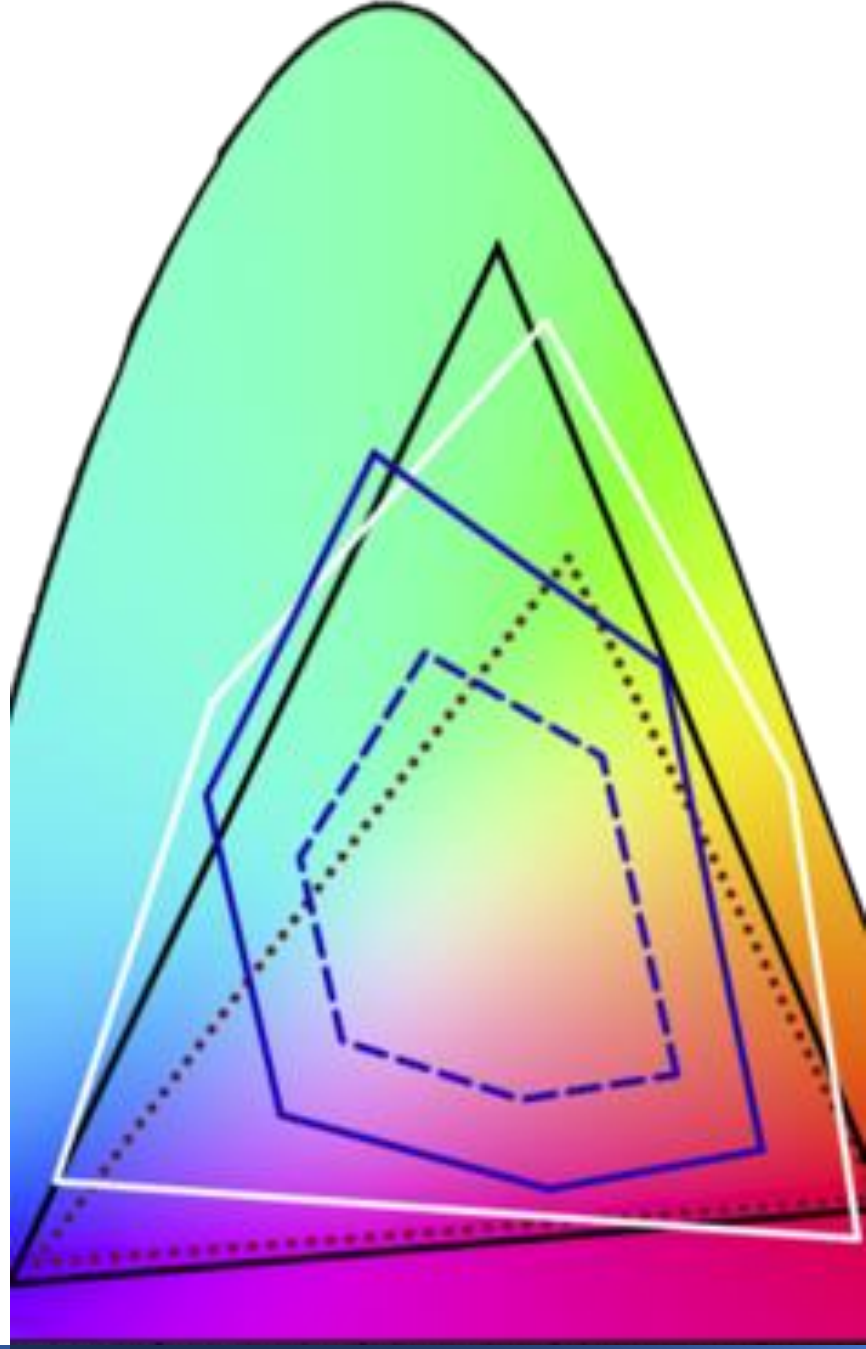
- белый контур отражает диапазон фотографической эмульсии различного назначения

- чёрный пунктирный контур — пространство sRGB, приблизительно соответствующее гамме большинства распространённых мониторов, являющиеся, по сути, стандартом представления графики в сети Интернет

- чёрный сплошной контур — пространство Adobe RGB, включающее цвета, воспроизводимые на печатных машинах, но с использованием первичных цветов;

- синий сплошной контур соответствует высококачественной офсетной печати;

- синий пунктирный контур отражает охват обычного бытового принтера.



Классификация цветовых моделей

Перцепционные (Восприятие человеком): XYZ — описание восприятия; Lab — то же пространство в других координатах.

Аддитивные модели — получение цвета на мониторе (например, RGB).

Субтрактивные (Полиграфические модели) — получение цвета при использовании разных систем красок и полиграфического оборудования (например, CMYK).

Более интуитивная для человека модель, основанная на восприятии, например HSV.

Модели, не связанные с физикой оборудования, являющиеся стандартом передачи информации.

Телевизионные/Видеомодели. Созданы для эффективного хранения и передачи видео, учитывая особенности человеческого зрения (глаз более чувствителен к яркости, чем к цвету).

Практическая задача: поиск по цвету

Критерии близости цветов

Цветовые метрики

Расстояние между цветами

- По сравнению с системой CIE XYZ Евклидово расстояние
- $\sqrt{\left((L1-L2)^2+(a1-a2)^2+(b1-b2)^2\right)}$
- в системе CIE L*a*b* значительно лучше соответствует цветовому различию, воспринимаемому человеком

- Стандартная формула цветового различия является чрезвычайно сложной CIEDE2000
- https://en.wikipedia.org/wiki/Color_difference

Примеры: поиск по цвету

Автор: Галайчук Виталий



Примеры: поиск по цвету

Автор: Галайчук Виталий



Поиск новых цветовых моделей и метрик

- ГЛУБОКОЕ ОБУЧЕНИЕ МЕТРИК ДЛЯ РАЗНИЦЫ ЦВЕТОВ
- (автор Фёдор Золотарёв)

Цветное → полутоновое → бинарное







Преобразование цветного изображения в оттенки серого

- В цветовых пространствах используемые в PAL и NTSC яркость Y' вычисляется следующим образом:

$$Y' = 0.299R + 0.587G + 0.114B$$

- Для учёта особенностей восприятия изображения человеческим глазом (чувствительность к зелёному и синему цвету) в модели HDTV используют другие коэффициенты:

$$Y' = 0.2126R + 0.7152G + 0.0722B$$

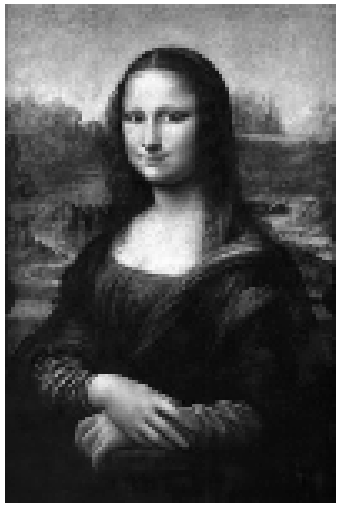
Различия в преобразовании





$$Y = 0.3R + 0.59G + 0.11B$$

NTSC RGB



Y = 0.21R + 0.72G + 0.07B

sRGB



разница

Наложение двух изображений



- Суммирование альфа-каналов

  $A_C + (1-A_C) \times A_K$

  Общая непрозрачность обоих стекол равна сумме непрозрачности ближнего к нам стекла и прозрачность ближнего, помноженная на непрозрачность дальнего.

- Доля цвета ближнего стекла равна непрозрачности ближнего стекла, деленной на общую непрозрачность

Зачем это в коде?

В шейдере вы будете работать с:

- RGB — основной формат вывода цвета
- HSV — для эффектов (изменение тона, насыщенности)
- CIE Lab — для цветокоррекции в пост-обработке

Формулы перевода — в библиотеках (glm, OpenCV)

Итог: что запомнить

1. RGB — аддитивная, для мониторов
2. CMYK — субтрактивная, для печати
3. HSV/HSL — интуитивная, для художников
4. CIE XYZ/Lab — научная, для цветокоррекции
5. Формулы — в библиотеках, не нужно запоминать

Проверочные вопросы

1. Какая модель аддитивная?
   - CMYK
   - RGB
   - HSL
   - Lab

2. Что такое метамерия?
   - Яркость цвета
   - Разные спектры → одинаковый цвет
   - Насыщенность
   - Тон

3. Где используется CMYK?
   - Мониторы
   - Печать
   - VR
   - Шейдеры

Для обсуждения:

4. Почему HSV удобнее для художника, чем RGB?
5. Зачем нужна CIE Lab, если есть RGB?