

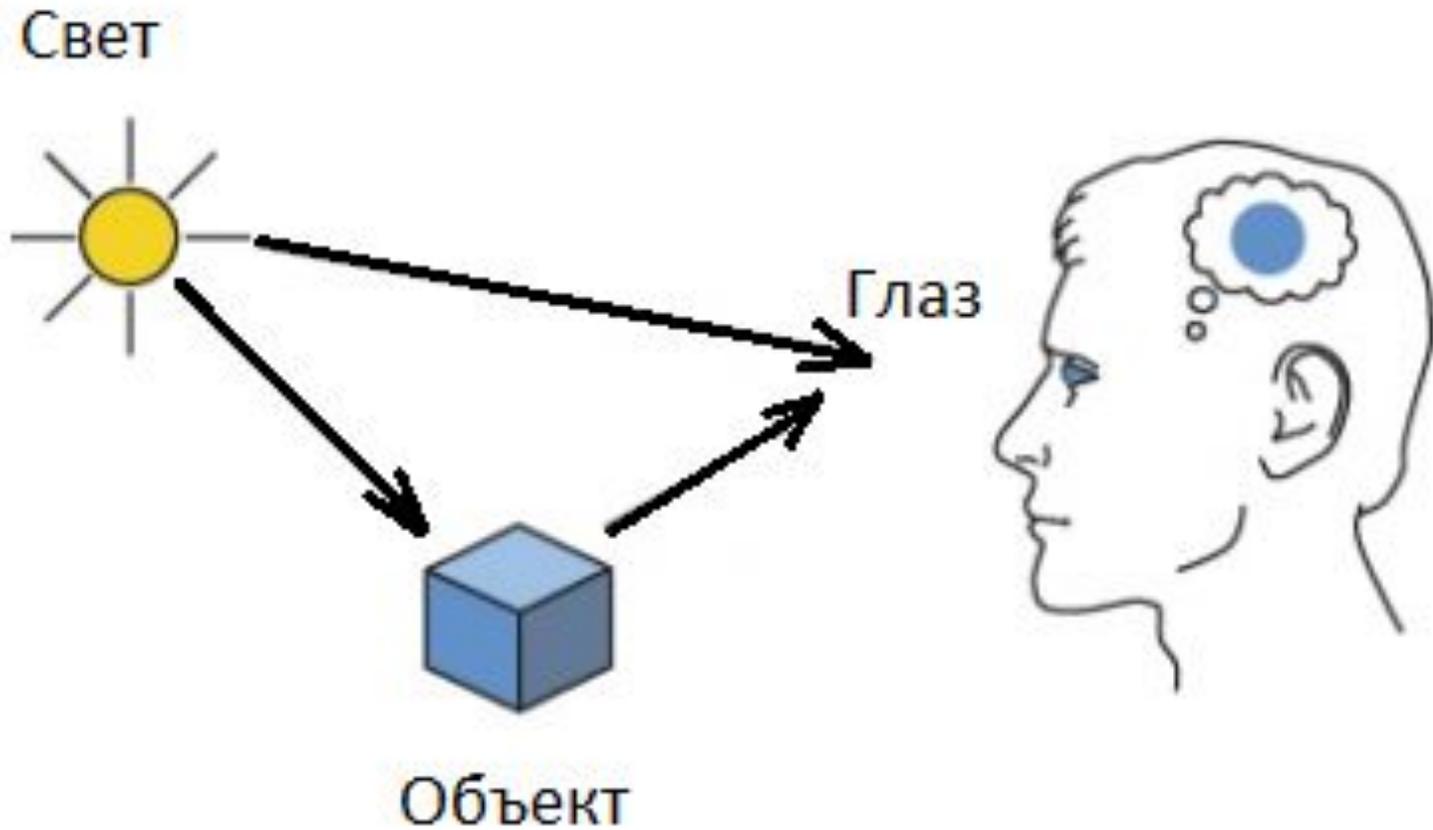


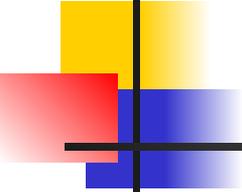
Компьютерная графика

Представление цвета в компьютерной
графике

3.1. Основные понятия теории цвета

Для того, что бы «увидеть» цвет необходимы три составляющих:





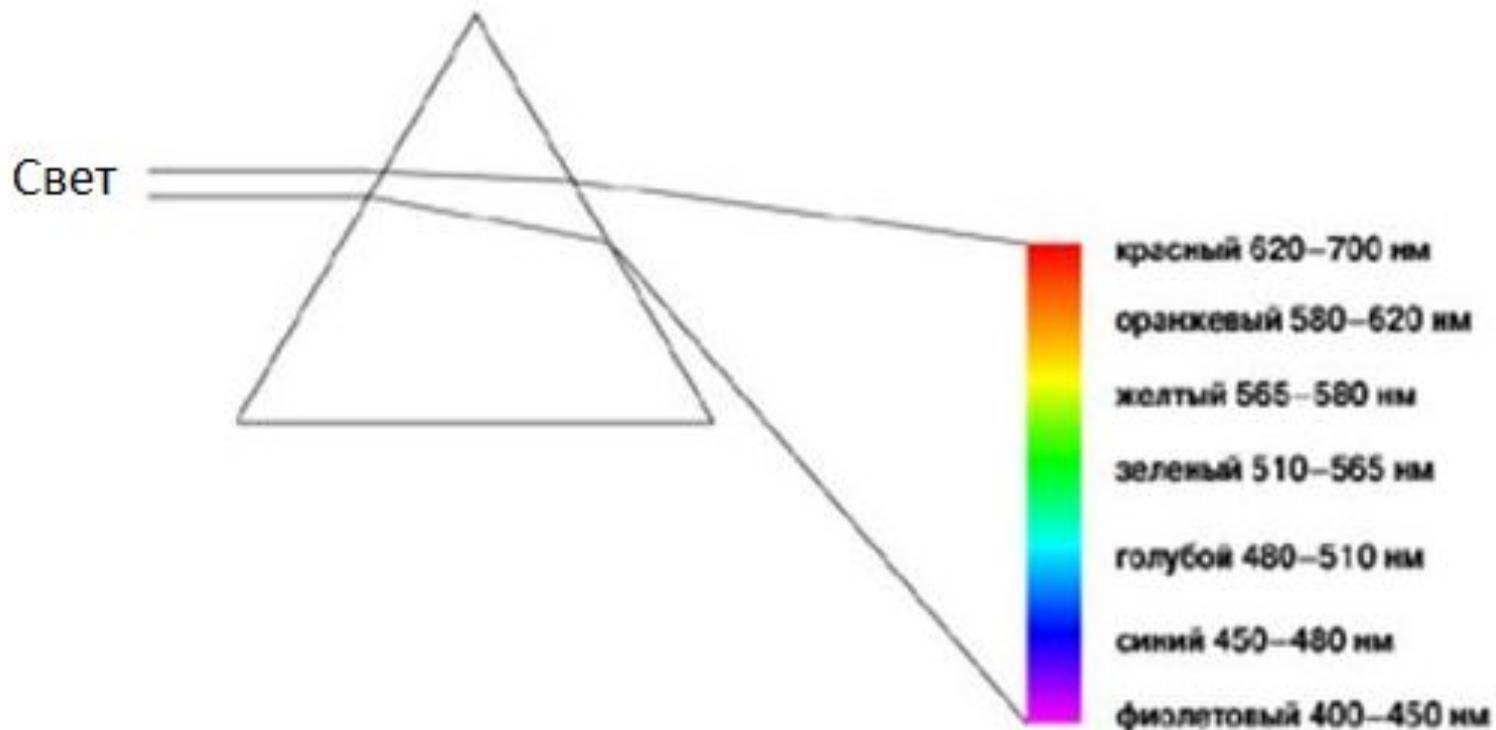
Теперь можно перейти к оценке роли физических, физиологических, психологических и биологических аспектов процесса восприятия цвета. Упрощенно этот процесс можно представить в следующем виде.

- ❑ *Первый аспект — физика.* Свет попадает на квадрат и отражается.
- ❑ *Второй аспект — физиология.* Отраженный свет попадает в глаз человека и воздействует на светочувствительные клетки глаза, которые содержат два типа рецепторов: *палочки* (cones) и *колбочки* (staves). Палочки активны только в темноте или в сумерках. При нормальном освещении мы воспринимаем цвет исключительно с помощью трех разновидностей колбочек, каждая из которых чувствительна к определенному диапазону видимого спектра. В данном случае отраженный от объекта свет воздействует на колбочки, чувствительные к зеленому цвету.
- ❑ *Третий аспект — психология.* Колбочки передают соответствующие импульсы в мозг, который после их обработки и последующей интерпретации выдает сообщение: квадратный, зеленый.

Свет и цвет

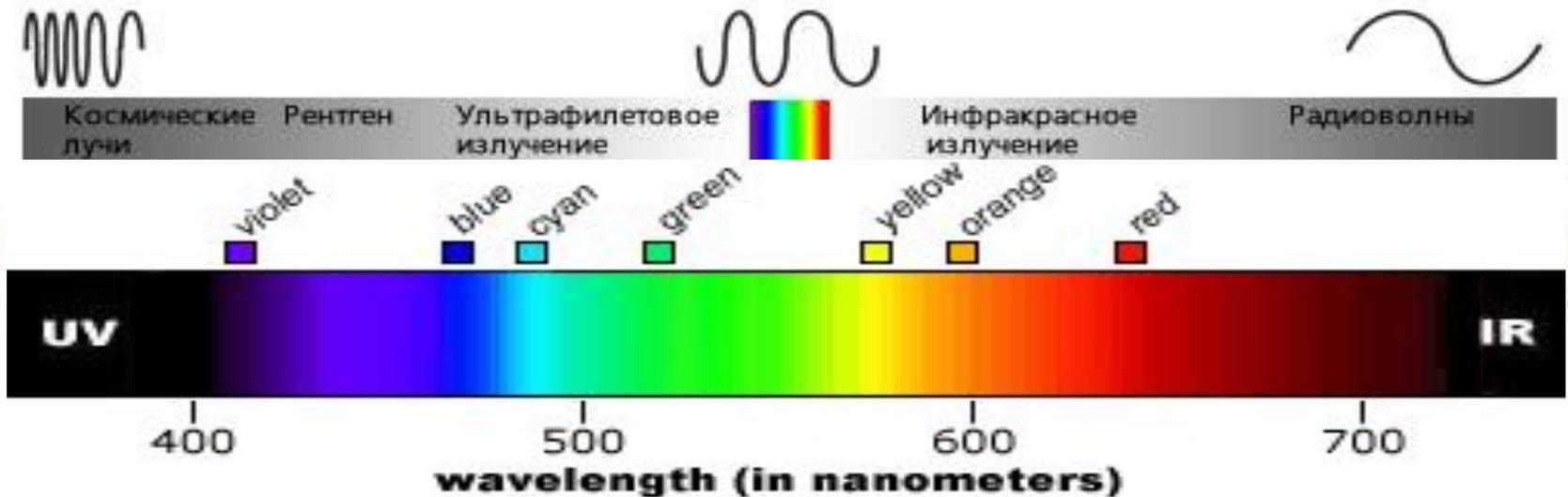
Если пропустить луч белого света через простую призму, он разложится на цветной спектр.

Цвета этого спектра, называемого **видимым спектром света**, условно классифицируют как:



Физическая природа света и цвета

Для нашего глаза каждый кусочек этого видимого спектра обладает своими уникальными характеристиками, которые называют **цветом**.



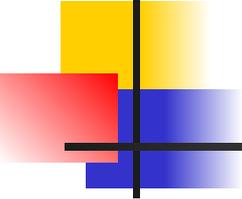
Область электромагнитного спектра, видимая человеческим глазом, занимает диапазон примерно от 400 до 700 нанометров (10^{-9} м).

Для правильной интерпретации восприятия цвета необходимо различать понятия цвета и окраски предмета.

Окраска это способность предмета отражать излучение в том или ином диапазоне длин волн.

Цвет включает окраску и условия освещенности.





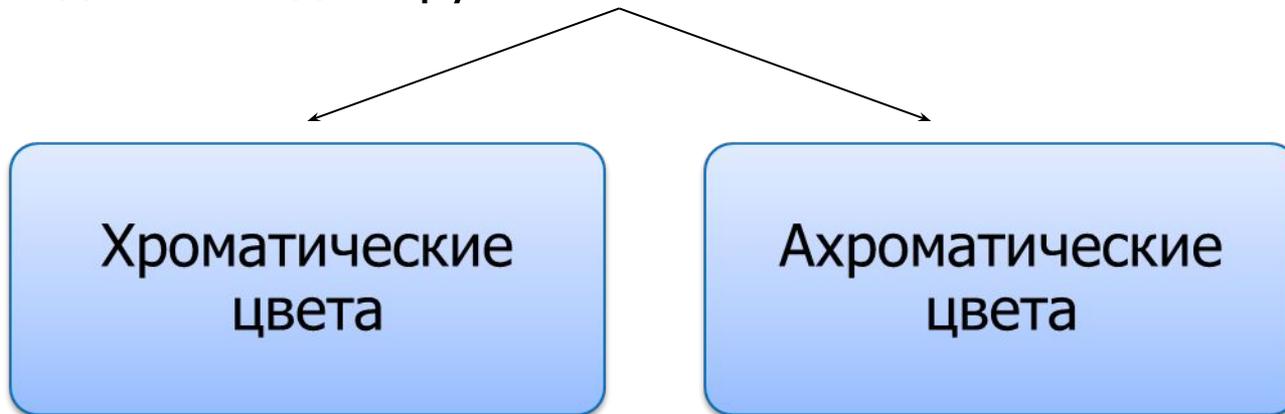
Цвет есть совокупность психофизиологических реакций человека на световое излучение, исходящее от различных самосветящихся предметов (источников света) либо отраженное от поверхности несамосветящихся предметов, а также (в случае прозрачных сред) прошедшее через них.

Излученный и отраженный цвет

Все, что мы видим в окружающем нас пространстве, либо излучает свет, либо его отражает.

Излученный цвет – это свет, испускаемый активным источником.

Отраженный свет возникает при отображении некоторым предметом световых волн, падающих на него от источника света. Механизм отражения цвета зависит от цветового типа поверхности, которые делят на две группы:

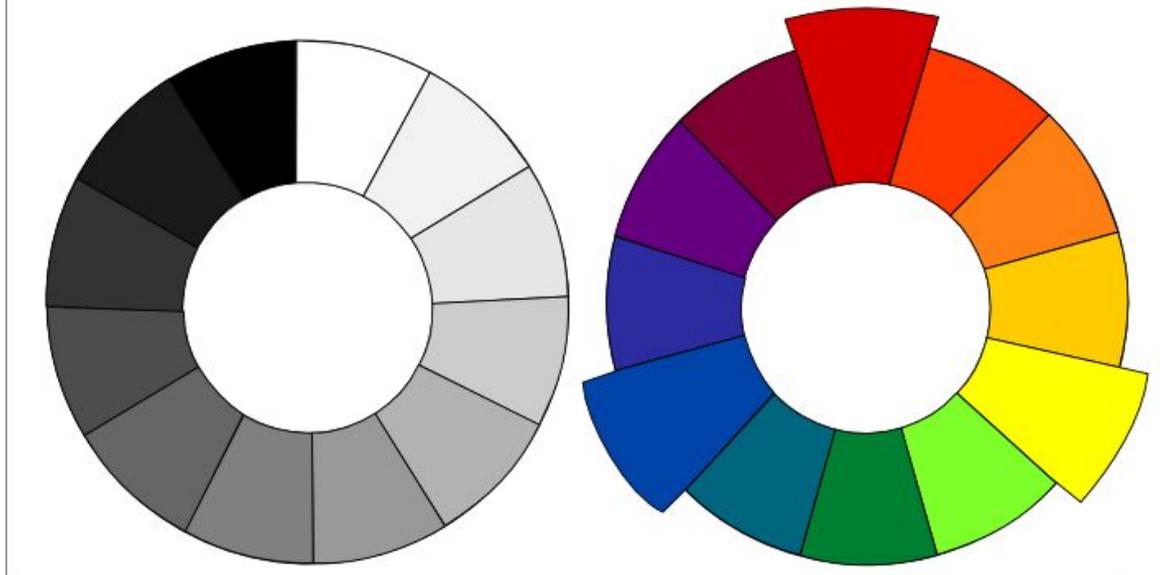


Хроматические и ахроматические цвета

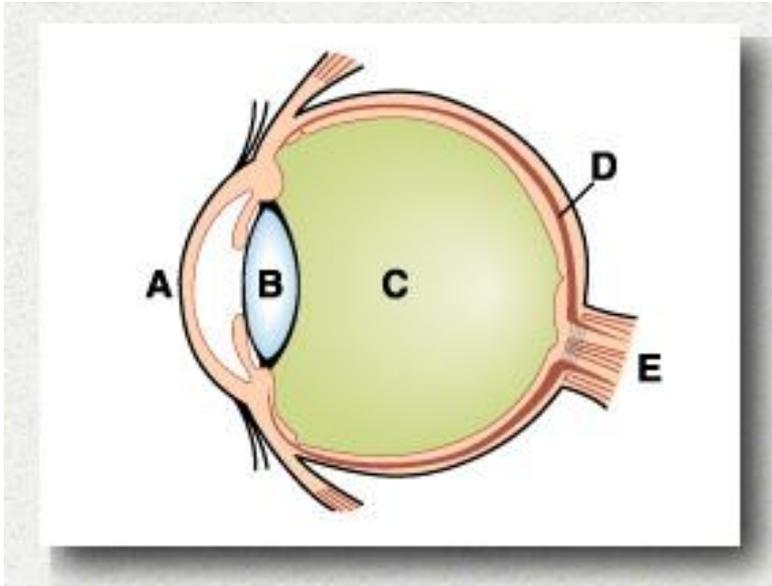
Ахроматические (бесцветные) — это серые цвета различной светлоты, белый и черный цвета. Ахроматические цвета характеризуются светлотой.

Все остальные цвета – **хроматические (цветные)**: синий, зеленый, красный, желтый и т.д. Хроматические цвета характеризуются цветовым тоном, светлотой и насыщенностью.

Хроматические и ахроматические цвета



Восприятие цвета человеком



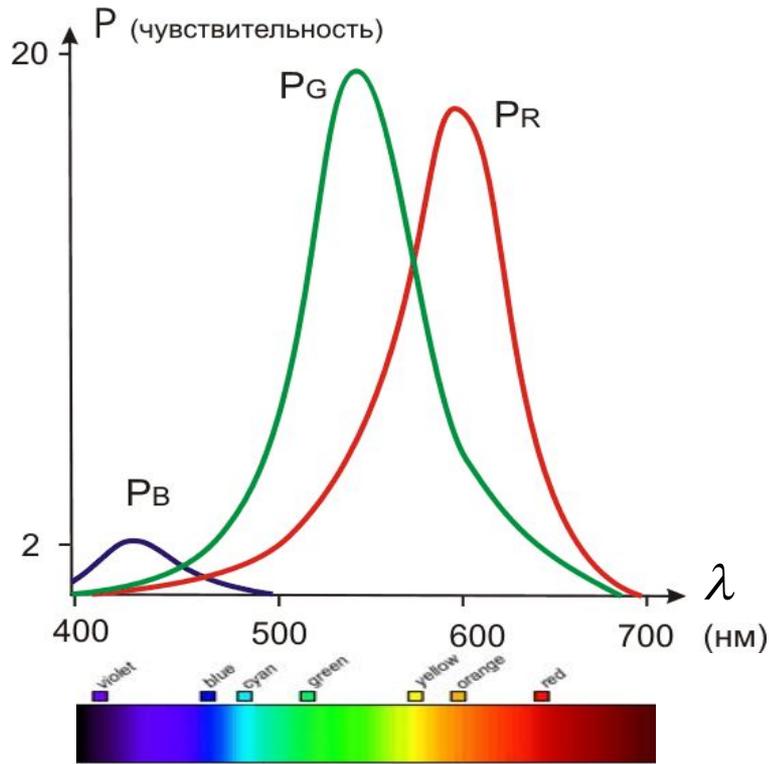
- A: роговая оболочка глаза
- B: хрусталик
- C: стекловидное тело
- D: сетчатка
- E: оптический нерв

Палочки (rods): 75-150 млн

Колбочки (cones): 6-7 млн, в ямке (fovea), - воспринимают цвет. К каждой - свой нерв.

Восприятие цвета человеком

Чувствительность трех типов колбочек к разным участкам спектра:



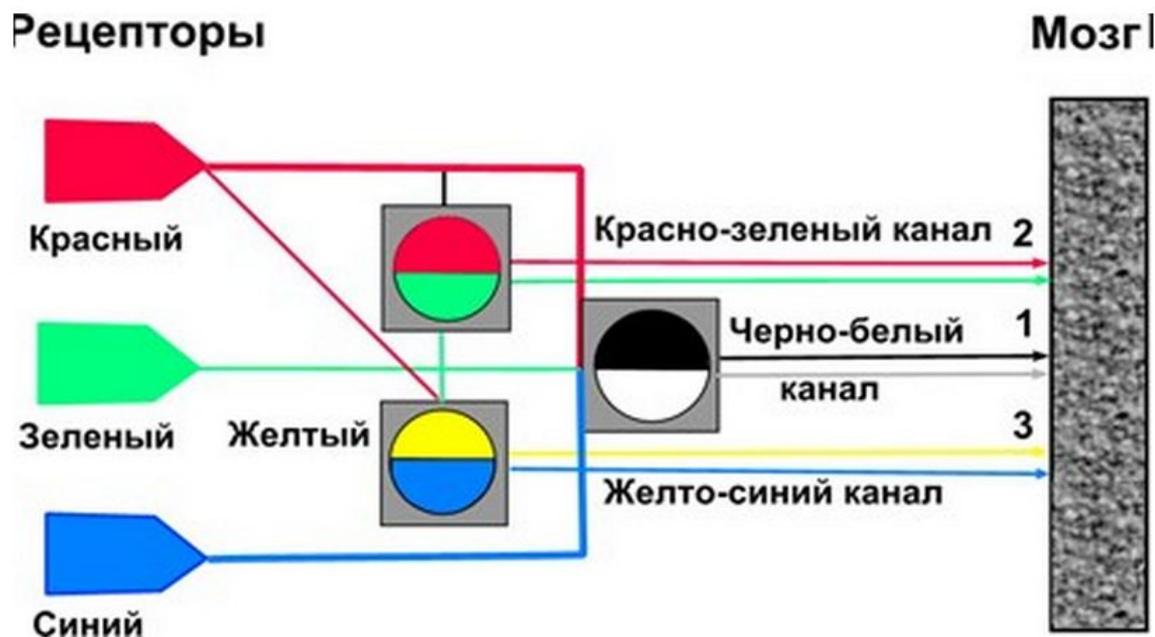
Интегральная чувствительность глаза к свету:



$$\begin{aligned} R &= \int I(\lambda) \cdot P_R(\lambda) d\lambda \\ G &= \int I(\lambda) \cdot P_G(\lambda) d\lambda \\ B &= \int I(\lambda) \cdot P_B(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (1)$$

$I(\lambda)$ ЗАВИСИМОСТЬ ИНТЕНСИВНОСТИ
 СВЕТА ОТ ДЛИНЫ ВОЛНЫ

Оппонентная теория цвета (Хьюбл и Вайзел)

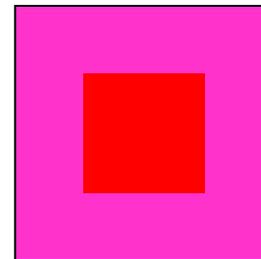
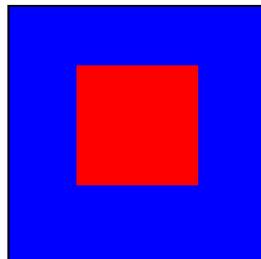
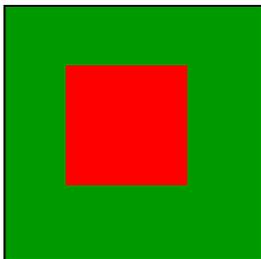
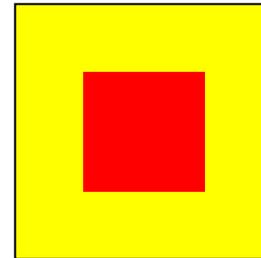
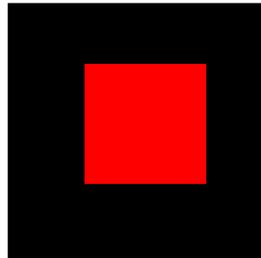
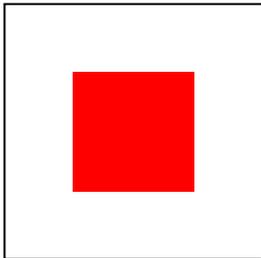


Мозг получает информацию о разнице яркости — о разнице яркости белого (Y_{\max}) и черного (Y_{\min}), о разнице ($G-R$), о разнице (B -yellow), а жёлтый цвет — ($\text{yellow} = R+G$).

Субъективность ощущения цвета

Цвета воспринимаются различными людьми по-разному. Основные факторы, влияющие на восприятие цвета:

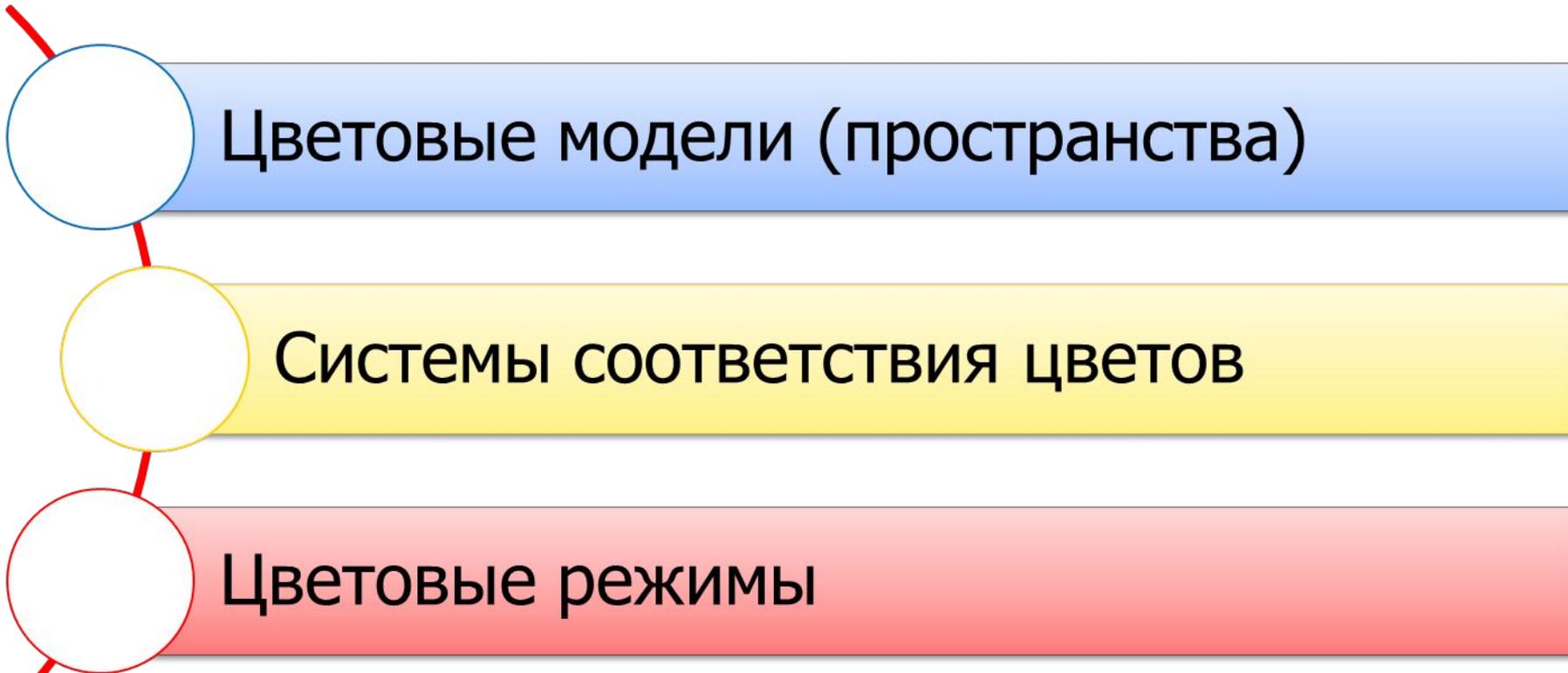
- спектральная чувствительность глаза каждого человека;
- возраст, острота зрения, расовая принадлежность;
- настроение (утомленному человек серые стены кажутся темнее);
- внешние факторы (контекст)



3.2. Цветовые модели (пространства)

Для обеспечения одинакового воспроизведения одного и того же цвета мониторами, принтерами и сканерами разных фирм-изготовителей необходимо наличие объективных измерительных систем, позволяющих установить однозначное определение цветовых координат.

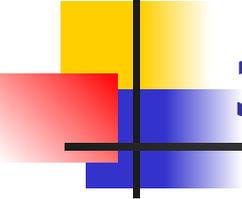
Для этих целей разработаны специальные средства:



Цветовые модели (пространства)

Системы соответствия цветов

Цветовые режимы



3.2. Цветовые модели (пространства)

Цветовые модели представляют средства для концептуального и количественного описания цвета.

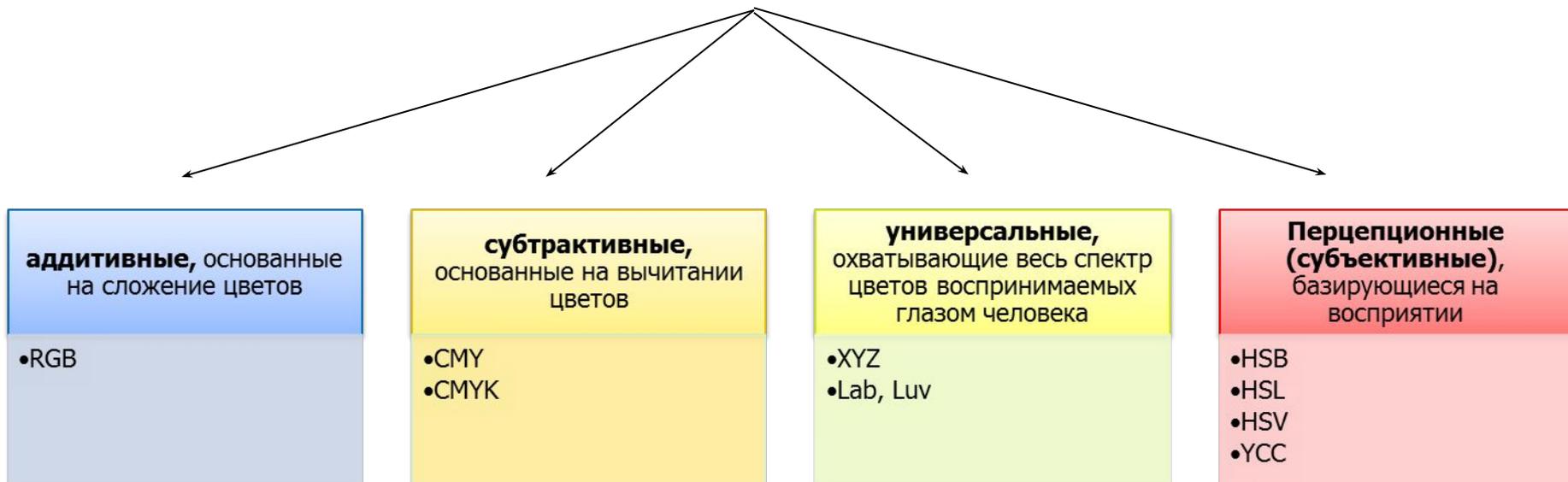
Цветовые модели используются для математического описания определенных цветовых областей спектра.

Независимо от того, что лежит в основе модели, она должна удовлетворять трем требованиям:

- Реализовывать определения цвета некоторым стандартным способом, не зависящим от какого-либо конкретного устройства.
- Точно задавать диапазон воспроизводимых цветов, поскольку ни одно множество не является бесконечным
- Учитывать механизм восприятия цвета - излучение или отражение

Классификация цветковых моделей

По принципу действия цветковые модели можно условно разбить на 4 класса:



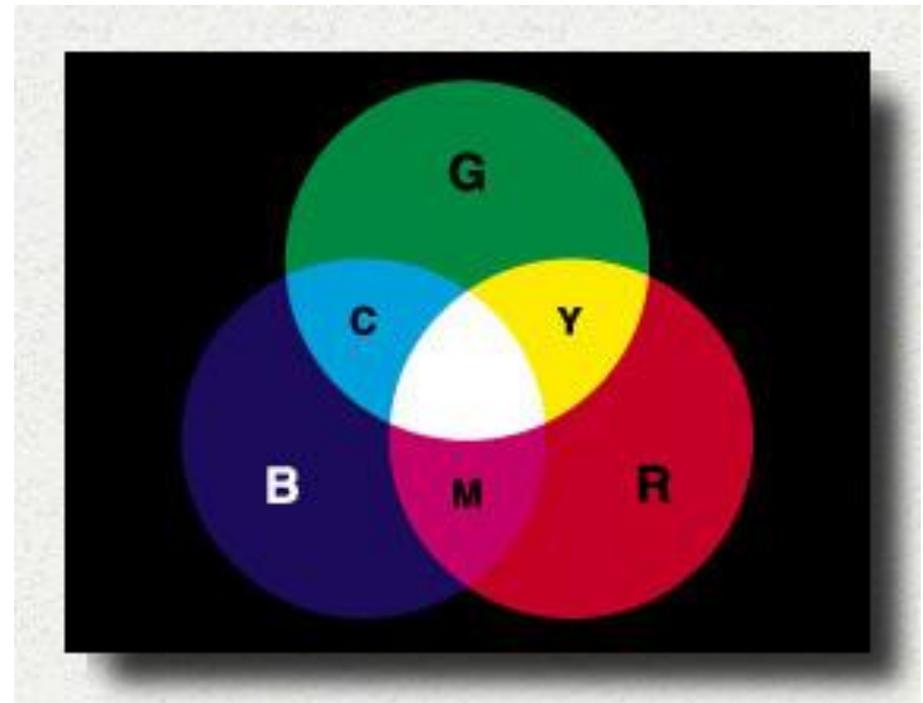
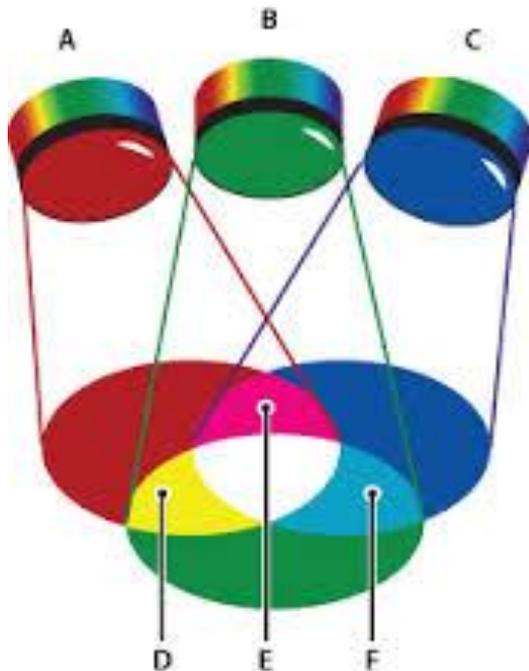
Существуют и другие классификации, например:

- аппаратно-зависимые (RGB, CMYK);
- аппаратно-независимые (XYZ, Lab);
- Психологические (HSB, HSV, HSL).

Опыт Томаса Юнга (1773-1829)

Томас Юнг (1773—1829) взял три фонаря и приспособил к ним красный, зеленый и синий светофильтры. Так были получены источники света соответствующих цветов. Направив на белый экран свет этих трех источников, ученый получил такое изображение. На экране свет от источников давал цветные круги.

В местах пересечения кругов наблюдалось смешивание цветов. Желтый цвет получался смешиванием красного и зеленого, голубой — смесь зеленого и синего, пурпурный — синего и красного, а белый цвет образовывался смешением всех трех основных цветов.



3.2.1. Аддитивная модель

Законы Германа Грассмана (аддитивного синтеза света):

1. Закон трехмерности: Любой цвет однозначно выражается тремя, если они линейно независимы. Линейная независимость заключается в том, что ни один из этих трех цветов нельзя получить сложением двух остальных.

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: Цвет смеси излучений зависит только от компонентов их цвета, а не от спектрального состава.

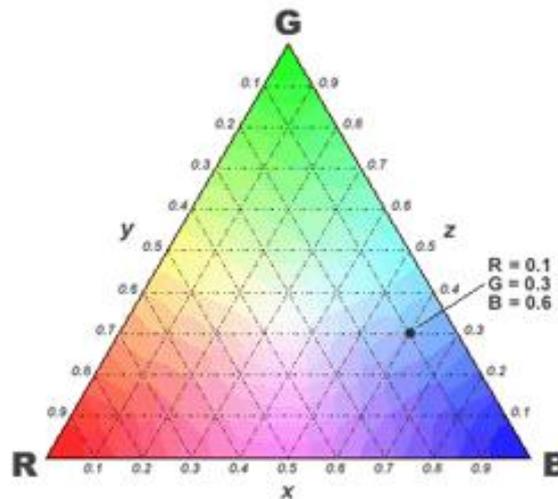
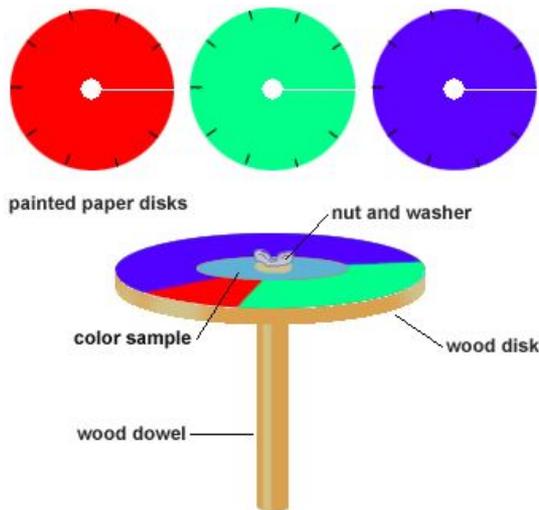
Как следствие - аддитивность цветковых уравнений: для смеси двух цветов C_1 и C_2 имеет место равенство:

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

Треугольник Д. Максвелла

Шотландский физик Джеймс Максвелл математически упорядочил цветовую модель. В 1872 году он предложил схему в виде равностороннего треугольника, предположив, что все видимые цвета находятся внутри него. В треугольнике Максвелла три основных цвета, красный, зеленый и синий, расположены по углам.

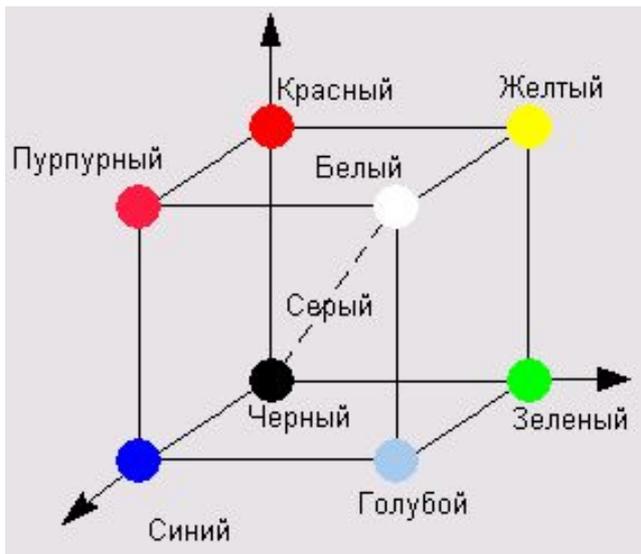
В центре треугольника расположен белый цвет, получаемый комбинацией всех цветов спектра. Внутри треугольника можно расположить все цвета.



Аддитивная модель RGB

Аддитивный синтез цвета: процесс получения различных цветов за счет смешивания (сложения) излучений трех основных зон спектра — синего, зеленого и красного.

Математически цветовую модель RGB удобнее всего представлять в виде куба. В этом случае каждая его пространственная точка однозначно определяется значениями координат X , Y , Z . Если по оси X откладывать красную составляющую, по оси Y – зеленую, Z - синюю, то каждому цвету можно поставить в соответствие точку внутри куба.

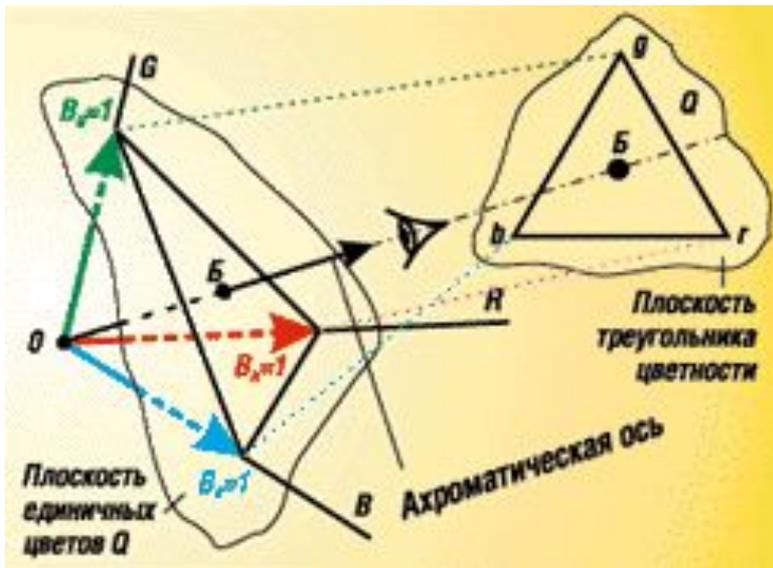


При использовании этой модели любой цвет может быть представлен в цветовом пространстве с помощью вектора:

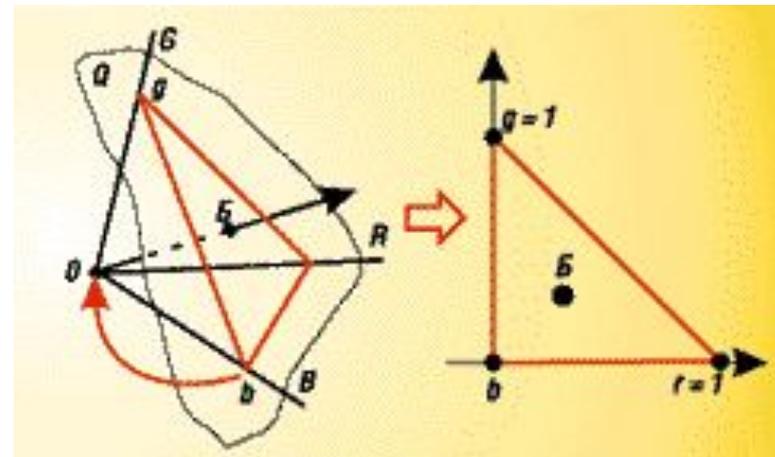
$$cC = rR + gG + bB$$

Аддитивная модель RGB

Плоскость нормированного цвета и треугольник Максвелла:



Проецирование треугольника цветности на плоскость RG:



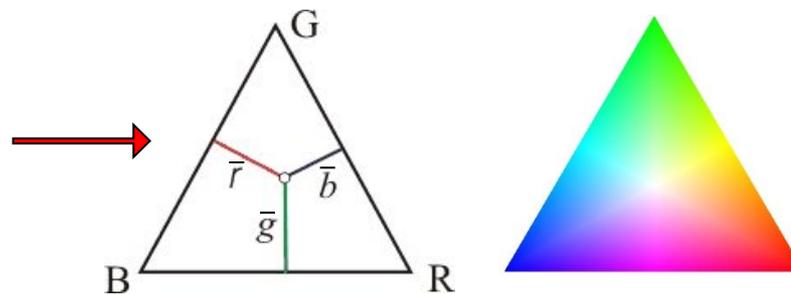
$$\bar{r} = \frac{r}{r+g+b}$$

$$\bar{g} = \frac{g}{r+g+b}$$

$$\bar{b} = \frac{b}{r+g+b}$$

$$\bar{r} + \bar{g} + \bar{b} = 1$$

Треугольник Максвелла

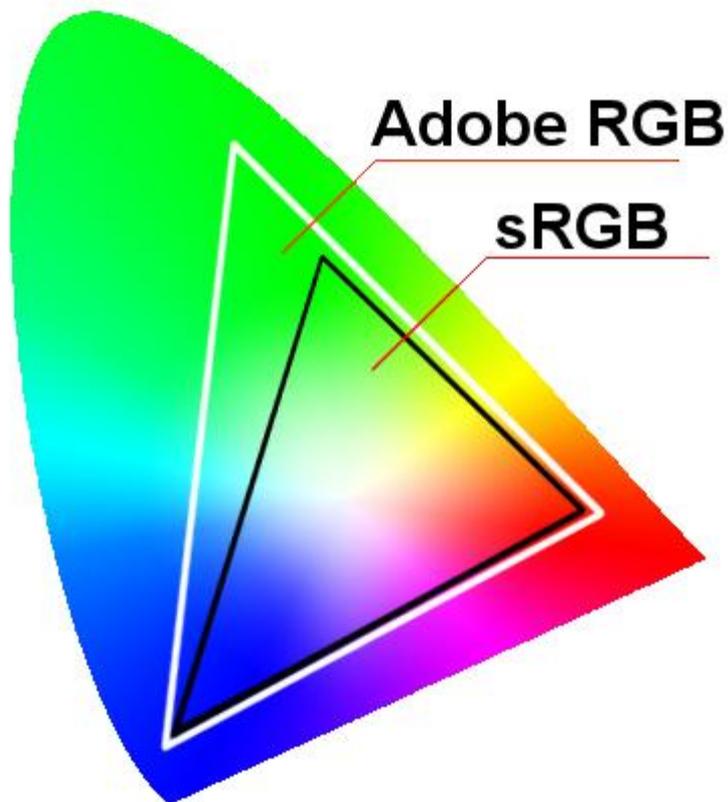


$$\lambda_R = 630\text{нм}, \lambda_G = 528\text{нм}, \lambda_B = 457\text{нм}$$

Стандарт sRGB

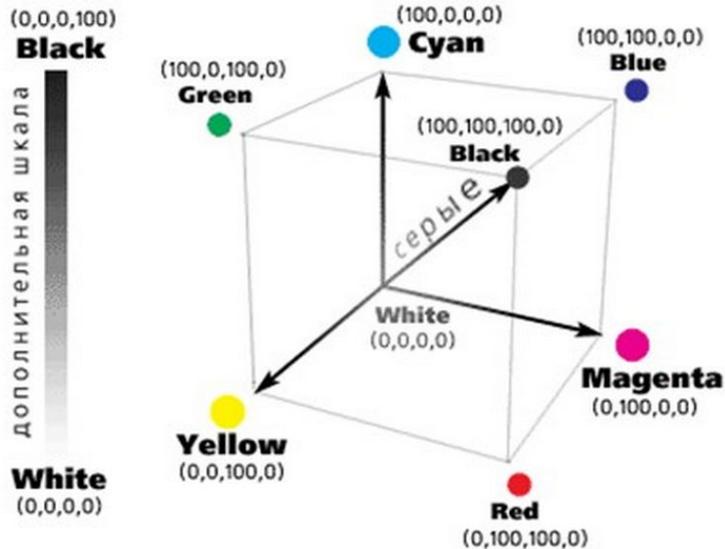
sRGB является стандартом представления цветового спектра с использованием модели RGB.

sRGB создан совместно компаниями HP и Microsoft в 1996 году для унификации использования модели RGB в мониторах, принтерах и Интернет-сайтах.



3.2.2. Субтрактивная модель СМУ

Субтрактивный синтез цвета: процесс получения цветов за счет поглощения (вычитания) излучений из белого цвета.



Цветовая модель СМУ

- является «перевернутой» моделью RGB:

$$C = 1 - R$$

$$M = 1 - G$$

$$Y = 1 - B$$

- основана на смешивании следующих цветов:

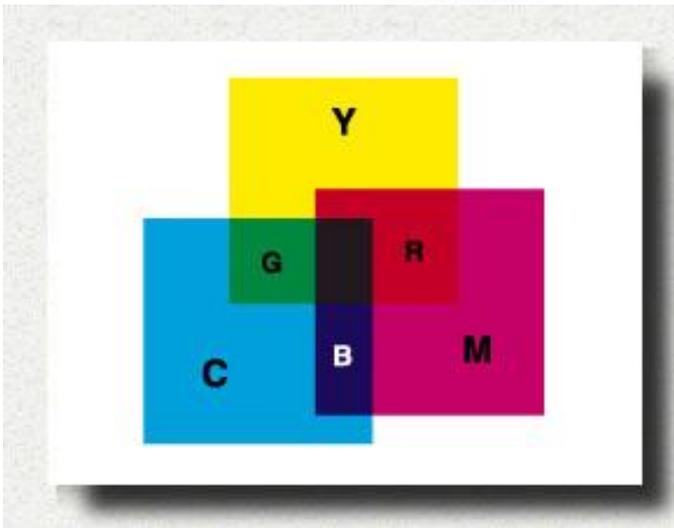
C – **С**уан (голубой)

M – **M**agenta (пурпурный)

Y – **Y**ellow (желтый)

K – **Key, black** (черный) (для СМУК)

- используется в цветной полиграфии (т. к. печать на бумаге создается поглощением цветов)

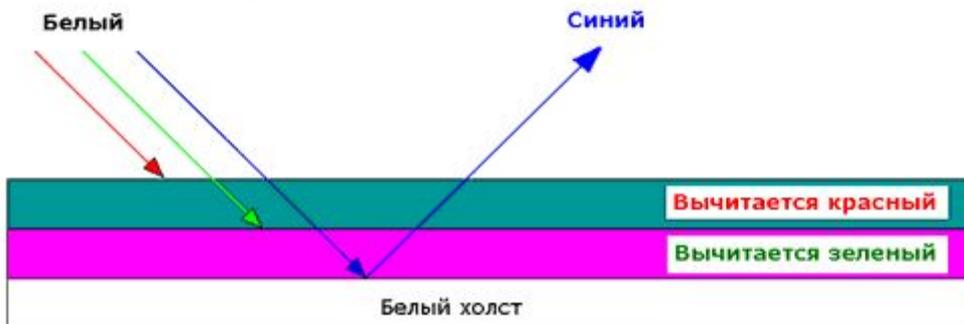


3.2.2. Субтрактивная модель СМУК

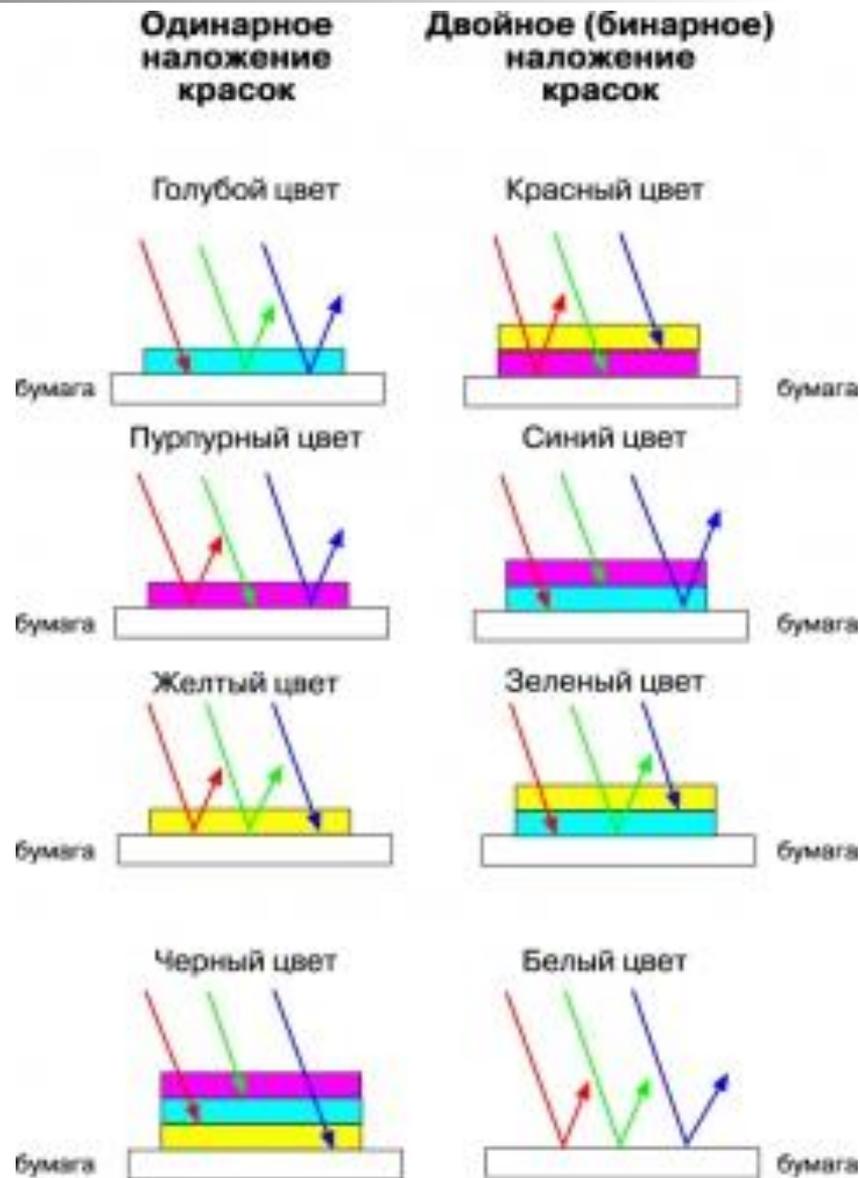
Для получения полиграфических цветных изображений используют так называемые триадные печатные краски: голубую, пурпурную и желтую. Эти краски прозрачны и каждая из них, как уже было указано, вычитает излучение одной из зон спектра.

Однако используют четвертую дополнительную черную краску поскольку:

- не получается число черный;
- на создание черного цвета с помощью СМУ тратиться в трираза больше краски;
- любые цветные краски дороже обычных.



Субтрактивное формирование оттенков



3.2.2. Субтрактивная модель СМҮК

В принтере присутствуют краски СМҮ и черная, которая, существенно дешевле, чем сумма трех красок СМҮ.

Поэтому стараются в первую очередь максимально использовать ее. Отсюда возникает следующий алгоритм вычисления количества красок (по СМҮК):

$K = \min(C, M, Y)$, при $\min(C, M, Y) > 0.33$;

$C = C - K$;

$M = M - K$;

$Y = Y - K$;

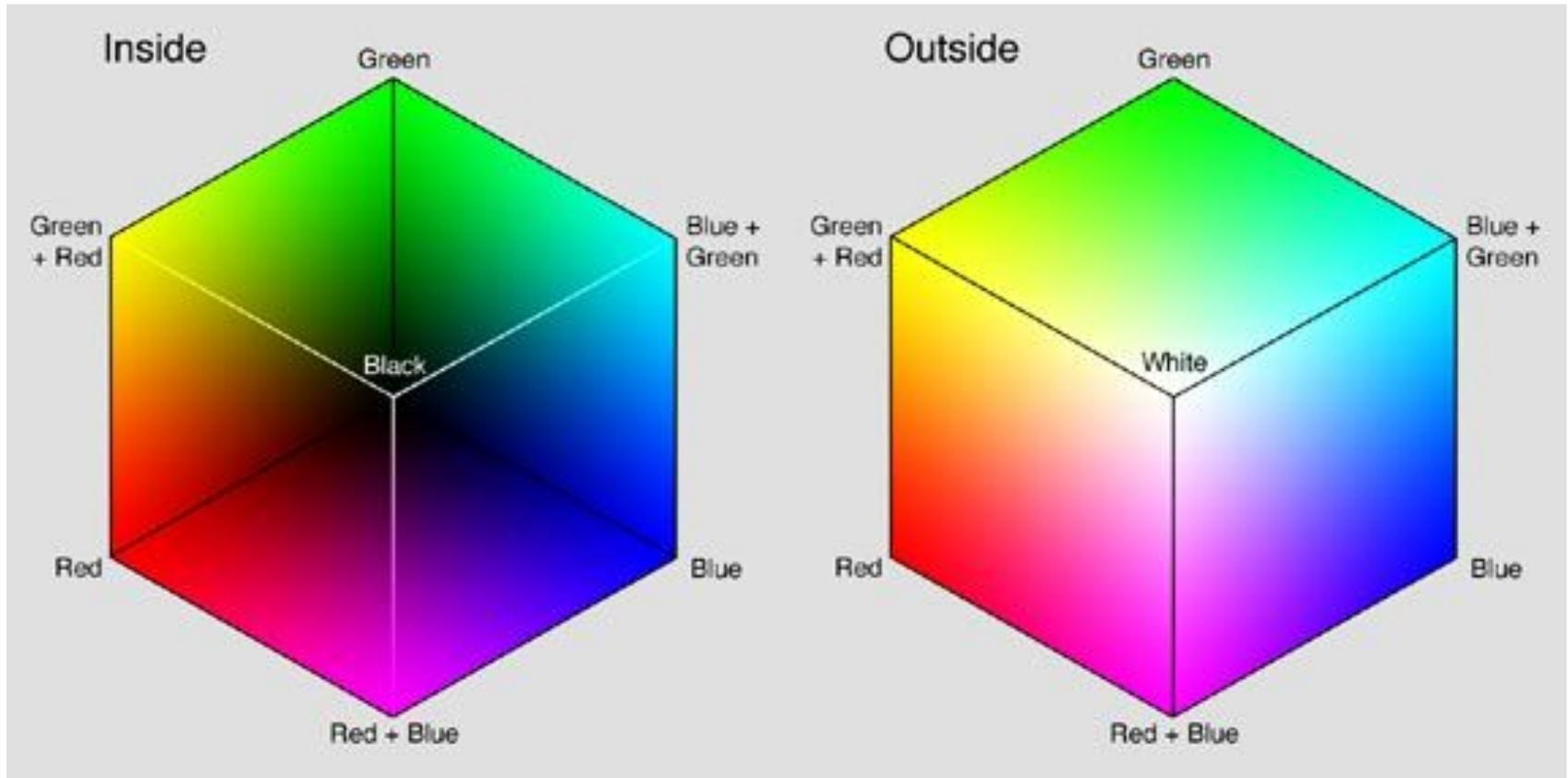


Схема смешения цветов для моделей RGB и CMY

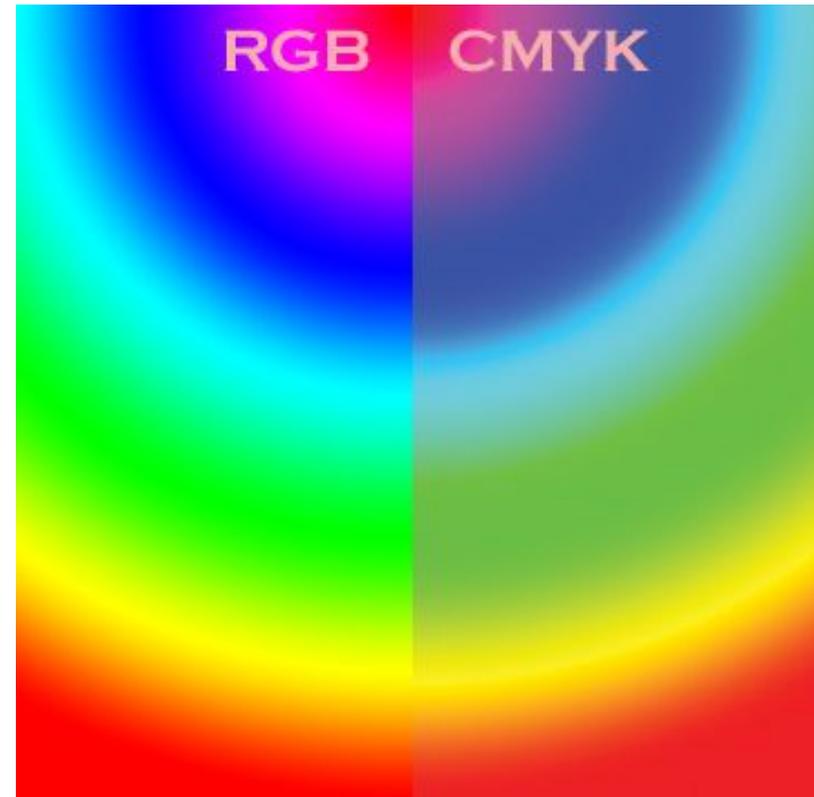
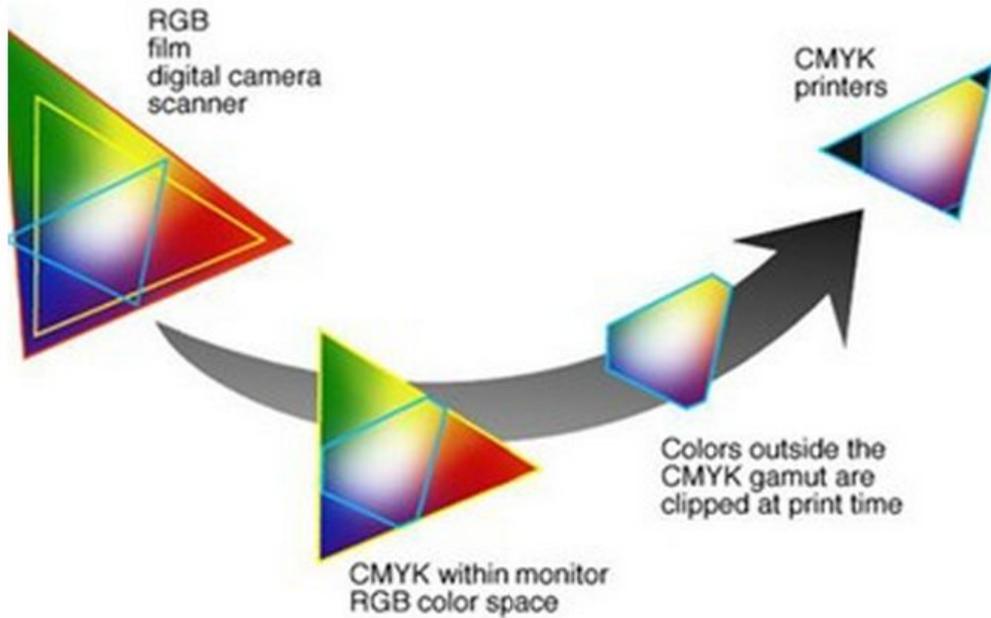


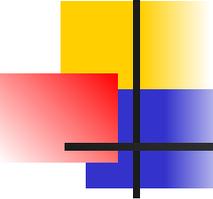
$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} C \\ M \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Цветовой куб для моделей RGB и CMY



Потери при преобразовании цветовых моделей





Почему используются аббревиатуры RGB и CMYK?

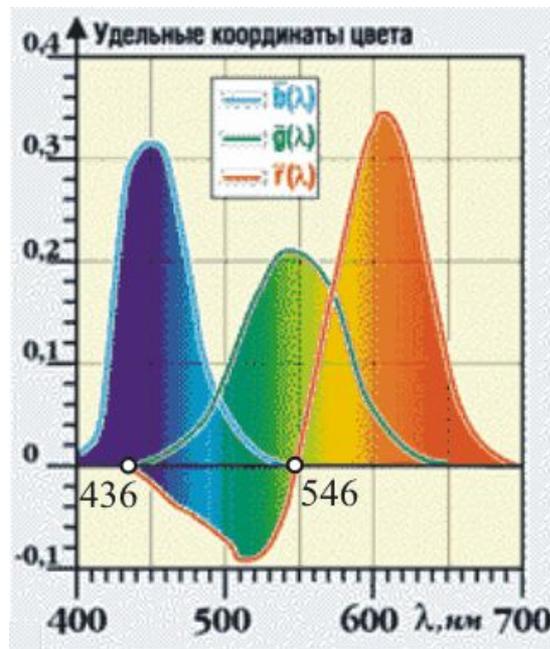
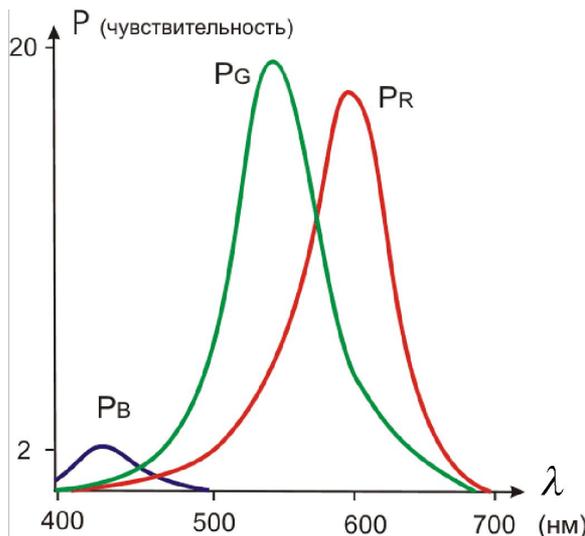
Почему RGB, а не GRB или BRG?

Почему CMYK, а не MCYK или YMCK

Проблемы RGB

В конце 1920-х годов В.Д. Райтом и Дж.Гилдом были проведены эксперименты, в которых наблюдателю предлагалось каждому монохроматическому цвету фиксированной яркости в видимом диапазоне сопоставить цвет, составленный из смеси основных цветов R, G и B с некоторыми весами, регулируемые наблюдателем.

Оказалось, что для некоторых монохроматических цветов необходимо было добавить к яркости испытуемого света один из базисных цветов (R), с тем, чтобы получить одинаковое восприятие. Это соответствует отрицательному весу R-компоненты:



Так как некоторые монохромные цвета раскладываются по RGB с отрицательными коэффициентами, то **не все возможные цвета представимы в рамках модели RGB.**

3.2.3. Модели CIE. Модель XYZ

$$X = k \cdot \int I(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) d\lambda$$

$$Y = k \cdot \int I(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) d\lambda$$

$$Z = k \cdot \int I(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) d\lambda$$

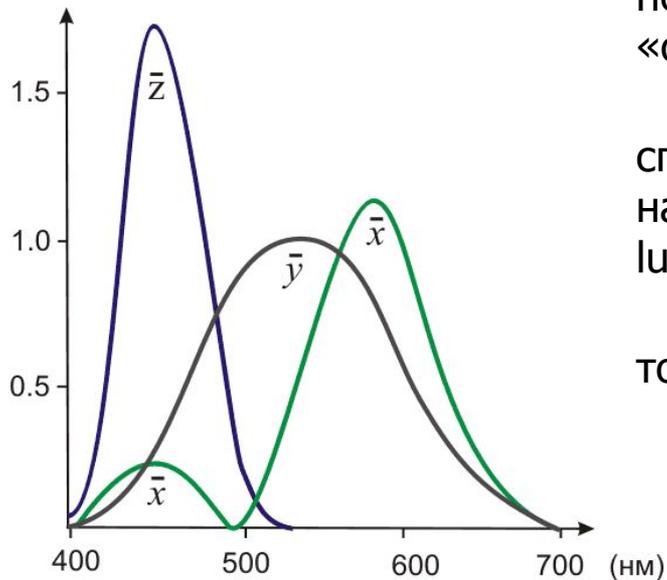


Рис. Стандартные кривые для идеального наблюдателя CIE

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, не соответствующих никаким реальным**, но все реальные могут быть представлены их комбинациями с положительными коэффициентами. Введено понятие «стандартного наблюдателя».

Y — выражает интенсивность света [$\text{Вт}/\text{м}^2$] с учетом спектральной чувствительности глаза стандартного наблюдателя и называется **люминантностью** (CIE luminance).

k — масштабный коэффициент, выбираемый исходя из того, какой цвет принимается белым.

Введены также нормированные координаты x, y, z :

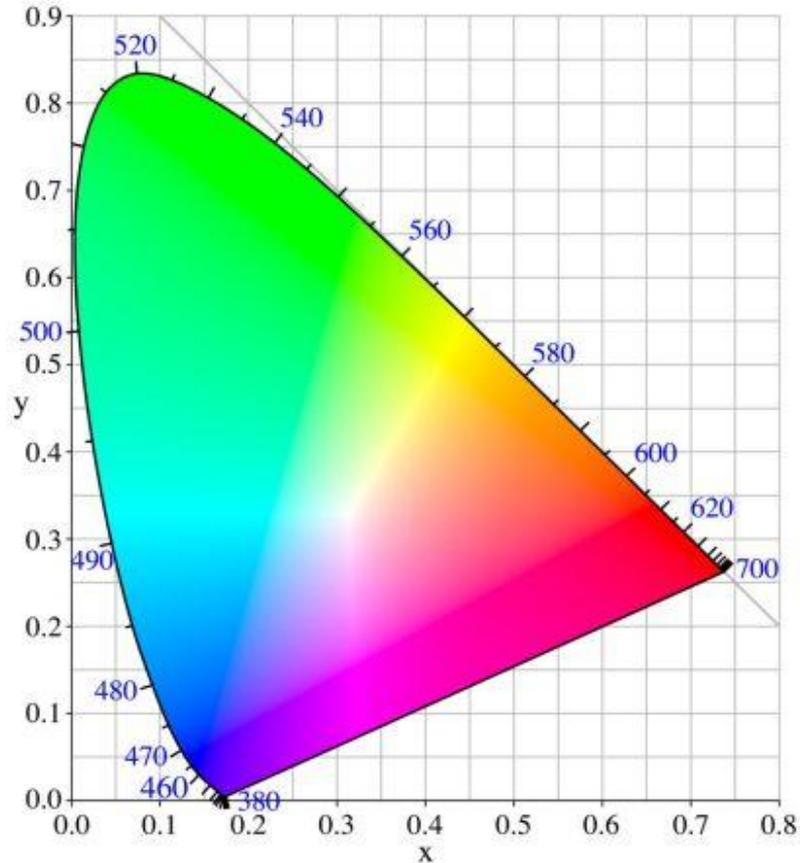
$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad z = \frac{Z}{X+Y+Z} \quad x+y+z=1$$

Обратное

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

На основе двух координат x и y введена **плоская хроматическая CIE-диаграмма**, которая вместе с Y позволяет полностью восстановить перенасыщенные цвета XYZ.

Цветовая CIE-диаграмма



Комиссия ориентировала треугольник xy таким образом, что равные количества перенасыщенных основных цветов XYZ давали в сумме белый.

Диаграмма представляет собой видимое множество цветов.

В центре области находится опорный белый цвет - точка равных энергий, с координатами $x=y=0.33(3)$.

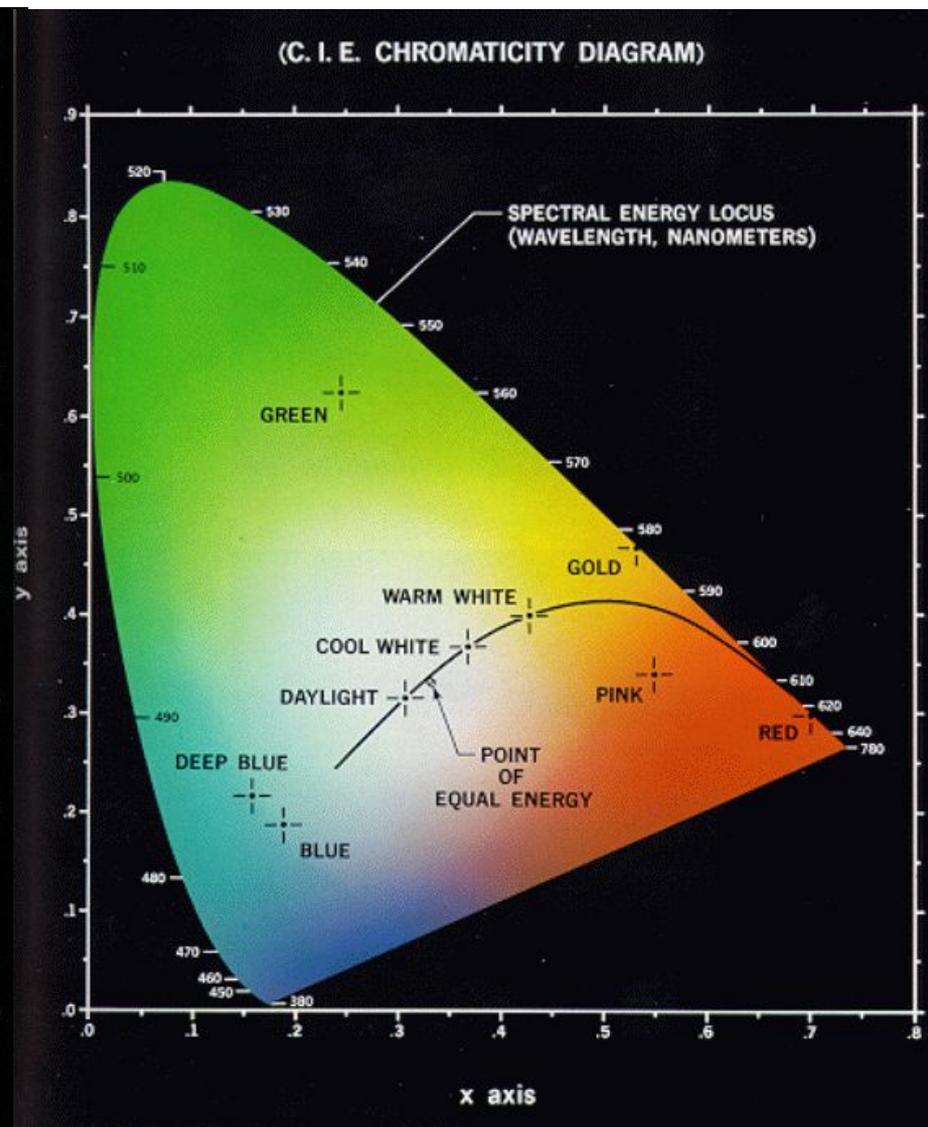
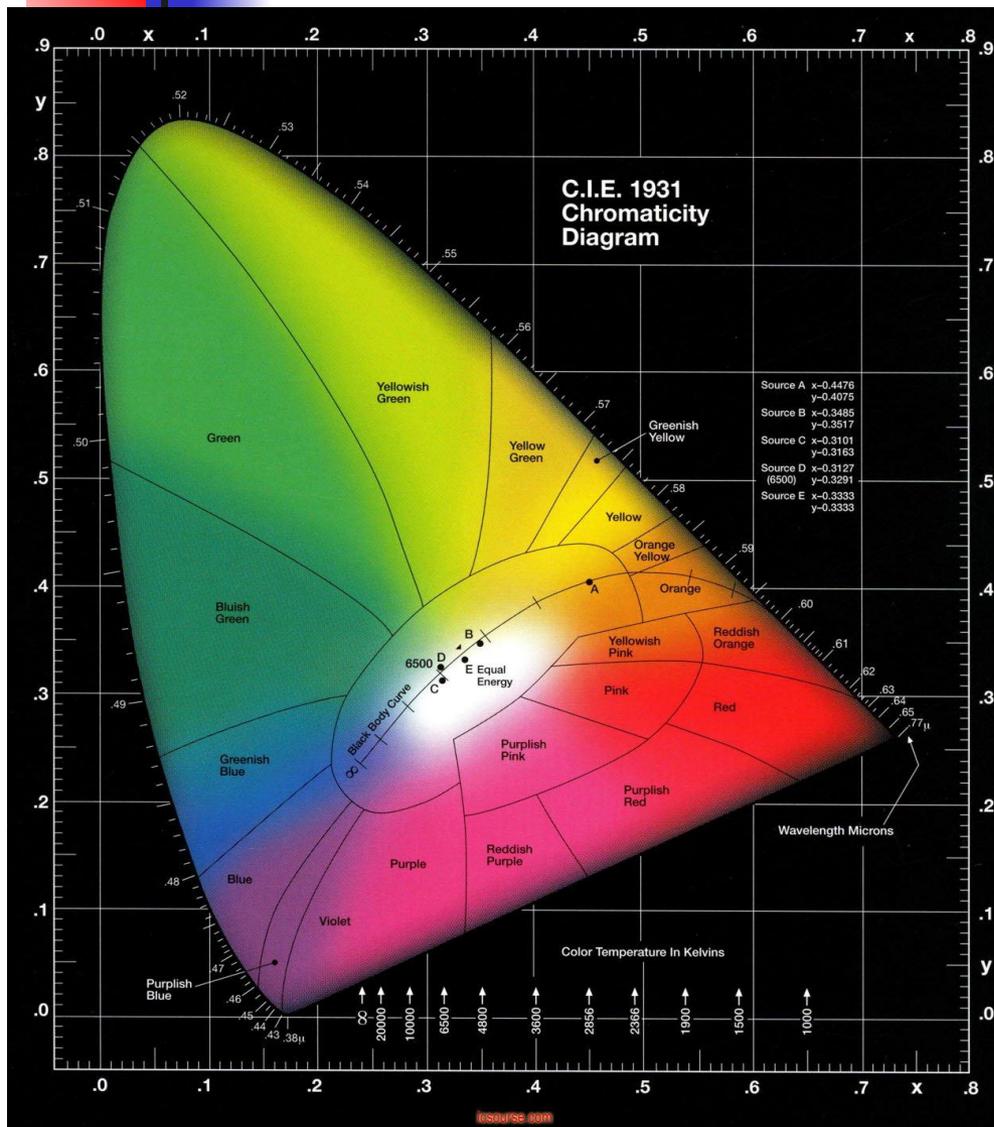
Система (x, y, Y) подчиняется законам Грассмана. Наибольшую площадь занимают цвета с преобладанием зеленого.

Длины волн, соответствующие R,G и B, определены стандартом CIE

$$\lambda_R = 700\text{нм}$$

$$\lambda_G = 546.1\text{нм}$$

$$\lambda_B = 435.8\text{нм}$$



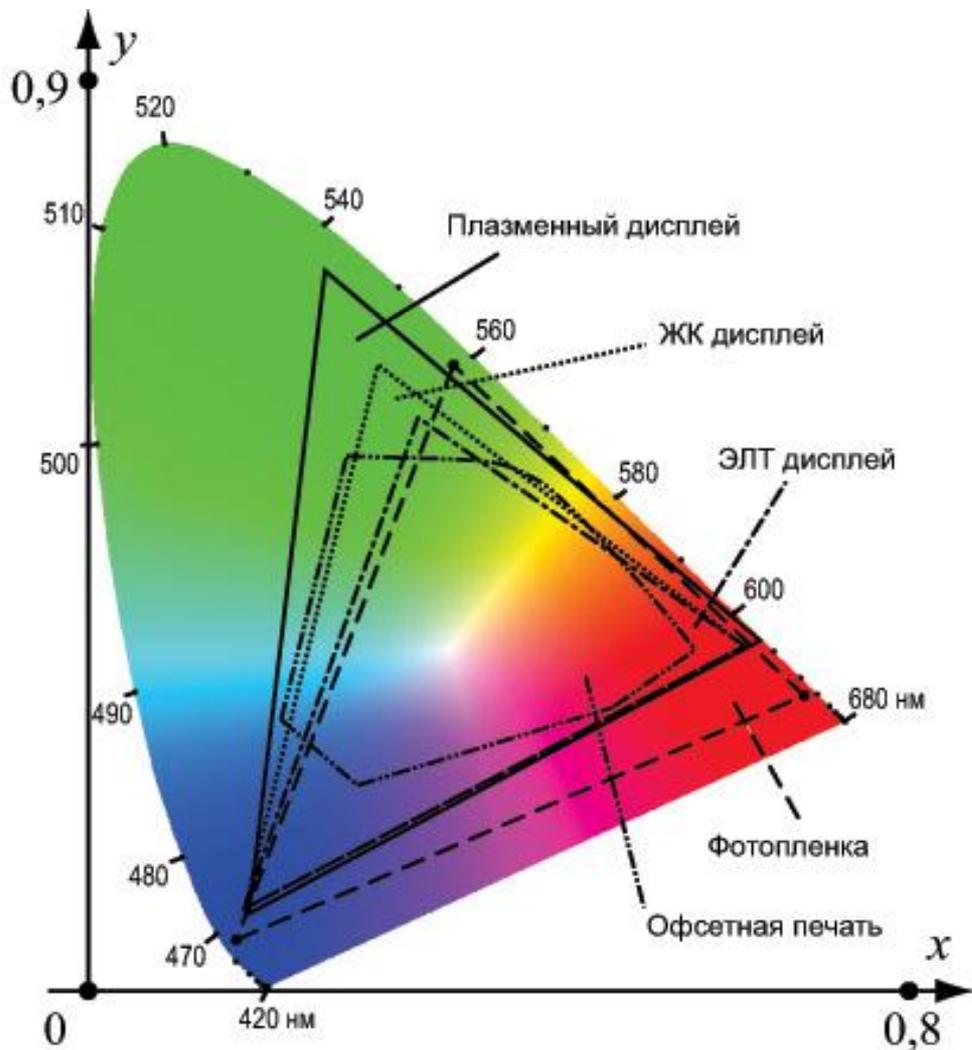
Длины волн, соответствующие R,G и B, определены стандартом CIE

$$\lambda_R = 700\text{nm}$$

$$\lambda_G = 546.1\text{nm}$$

$$\lambda_B = 435.8\text{nm}$$

Цветовая CIE-диаграмма и цветовой охват



На цветовом графике CIE удобно демонстрировать цветовой охват различных систем и оборудования: телевидения, типографской печати, фотопленок и т.п.

Цветовой охват для аддитивных систем - треугольник с вершинами, соответствующими основным цветам RGB. Цвет, который можно получить в данной цветовой модели лежит внутри треугольника; цвета, лежащие вне - получить невозможно.

Для цветной пленки, охват есть криволинейный треугольник. Причина этого заключается в нелинейном (в данном случае логарифмическом) законе создания цветного изображения с помощью цветной пленки.

XYZ как основа аппаратнонезависимого преобразования моделей

Координаты цветности CIE представляют точный стандарт определения цвета.

Их необходимо знать для преобразования координат CIE в другие цветовые модели и обратно.

Например, **преобразование RGB - CIE XYZ** задается следующей формулой:

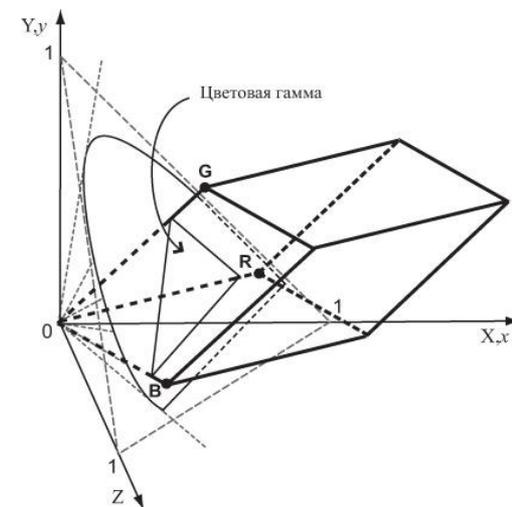
$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_r & X_g & X_b \\ Y_r & Y_g & Y_b \\ Z_r & Z_g & Z_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix},$$

где X_r, Y_r, Z_r - цвета для получения координат единичного основного цвета R, аналогично и для G и B.

Если известны координаты цветности CIE x и y **для основных цветов RGB**, то:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_r C_r & x_g C_g & x_b C_b \\ y_r C_r & y_g C_g & y_b C_b \\ (1-x_r-y_r)C_r & (1-x_g-y_g)C_g & (1-x_b-y_b)C_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix},$$

где $C_g = X_g + Y_g + Z_g, C_b = X_b + Y_b + Z_b, C_r = X_r + Y_r + Z_r$



Преобразования XYZ - RGB

Матрица преобразования зависит, таким образом, от стандарта, определяющего хроматические координаты x , y для цветов r , g , b . Ниже даны матрицы преобразования для рекомендации CIE 709:

	Red	Green	Blue	White
x	0.640	0.300	0.150	0.3127
y	0.330	0.600	0.060	0.3290

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.240479 & -1.537156 & -0.498536 \\ -0.969256 & 1.875992 & 0.041556 \\ 0.055648 & -0.204043 & 1.057311 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad \text{XYZ в RGB}$$

Если какой-либо цвет не может быть представлен в RGB, то у него хотя бы одна из координат будет меньше 0 или больше 1.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.412453 & 0.357580 & 0.180423 \\ 0.212671 & 0.715160 & 0.072169 \\ 0.019334 & 0.119193 & 0.950227 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad \text{RGB в XYZ}$$

$\rightarrow Y_{CIE} = 0.213R + 0.715G + 0.072B$

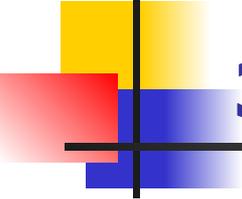
3.2.4. Цветовые пространства Luv и Lab

Недостатком пространства CIE была его неравноконтрастность. т.е. оно не является перцептивно (визуально) равномерным и не может использоваться для вычисления цветовых расстояний. Понимая это, ученые проводили дальнейшие исследования, и в 1960 г. Мак-Адам внес некоторые дополнения и изменения в существовавшее цветное пространство, назвав его UVW (или CIE-60). Затем в 1964 г. по предложению Г. Вышецкого было введено пространство U*V*W* (CIE-64).

Вопреки ожиданию специалистов предложенная система оказалась недостаточно совершенной. В одних случаях используемые при расчете цветовых координат формулы давали удовлетворительные результаты (в основном при аддитивном синтезе), в других (при субтрактивном синтезе) погрешности оказывались чрезмерными.

Это заставило CIE принять новую равноконтрастную систему. В 1976 г. были устранены все разногласия и на свет появились пространства Luv и Lab, базирующиеся на том же XYZ.

Эти цветовые пространства принимают за основу самостоятельных колориметрических систем CIELuv и CIELab. Считается, что первая система в большей мере отвечает условиям аддитивного синтеза, а вторая — субтрактивного.



3.2.4. Цветовое пространство Luv

Цветовое пространство CIE Luv позволяет определить различие цветов для человека с "усредненным" зрением, (т. е. различные люди неодинаково воспринимают разницу между цветами).

Свое название пространство получило благодаря его компонентам L , u и v .

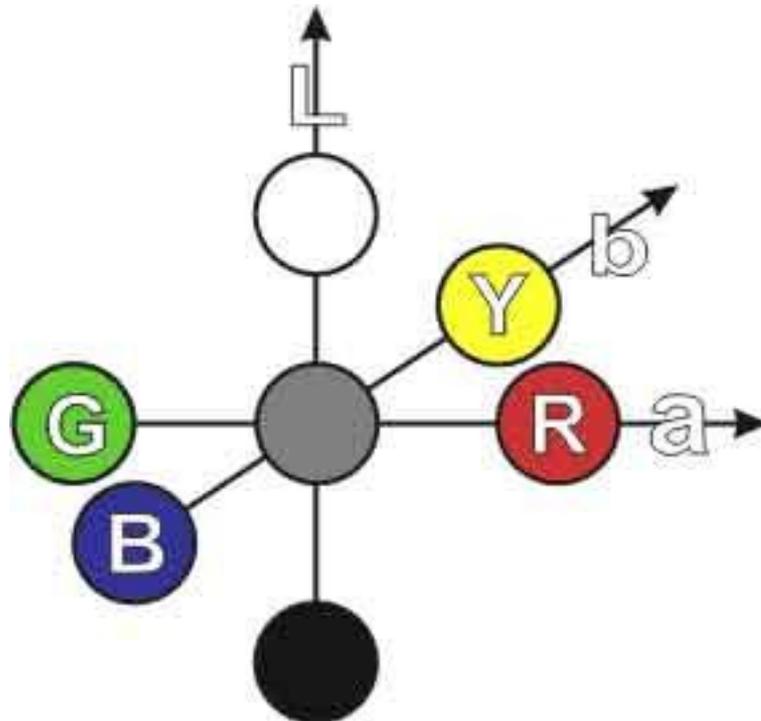
Параметр L соответствует **яркости** цвета, u отвечает за **переход от зеленого к красному** (при увеличении), а при увеличении параметра v происходит **переход от синего к фиолетовому**.

Если u и v равны 0, то, меняя L , получаем цвета, являющиеся градациями серого.

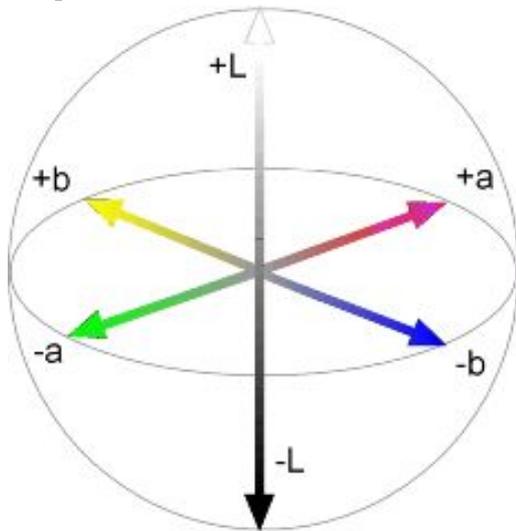
3.2.4. Цветовое пространство Lab

Одновременно с разработкой *CIE Luv* было также разработано перцептивно равномерное цветовое пространство *CIE Lab*. Из этих двух моделей более широко применяется модель *CIE Lab*. Структура цветового пространства *Lab* основана на той теории, что цвет не может быть одновременно зеленым и красным или желтым и синим.

Следовательно, для описания атрибутов "красный/зеленый" и "желтый/синий" можно воспользоваться одними и теми же значениями.



3.2.4. Модель L*a*b* (CIE Lab)



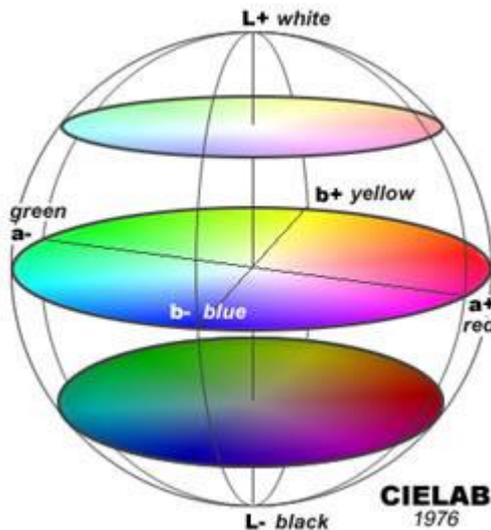
В модели L*a*b* отделено значение **светлоты** (яркости) от значения **хроматической составляющей** (тон, насыщенность):

- Яркость (светлота) задана координатой L (0-100)
- Хроматическая составляющая задана двумя полярными координатами:
 - ось **a** от зеленого (-a) до красного (+a)
 - ось **b** - от синего (-b) до желтого (+b).

В модели CIE L*a*b* яркость (L), цветовой тон и насыщенность (a, b) могут рассматриваться **раздельно**.

В результате цвет изображения можно изменять без изменения самого изображения или его яркости.

Поскольку CIE L*a*b* не зависит от устройства, то, при переходе от RGB к CMYK или от CMYK к RGB, полезно во избежание потерь использовать модель CIE L*a*b* в качестве промежуточной.



3.2.5. Перцепционные модели

Для адекватного нашему восприятию подбора оттенков были введены модели на основе параметров психофизиологического восприятия света:

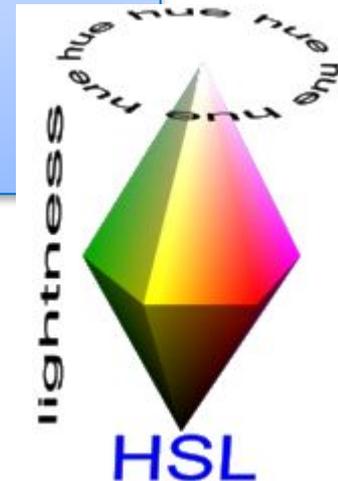
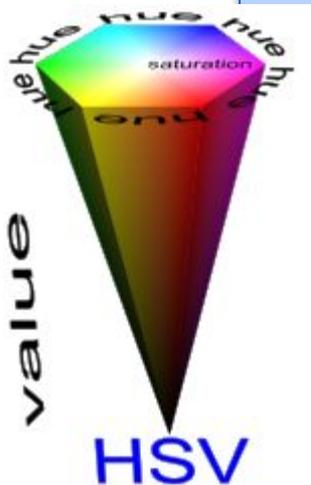
- **цветовой тон** позволяет различать цвета,
- **насыщенность** задает степень "разбавления" чистого тона белым цветом,
- **светлота (яркость)** - это интенсивность света в целом.

Перцепционные (субъективные) модели

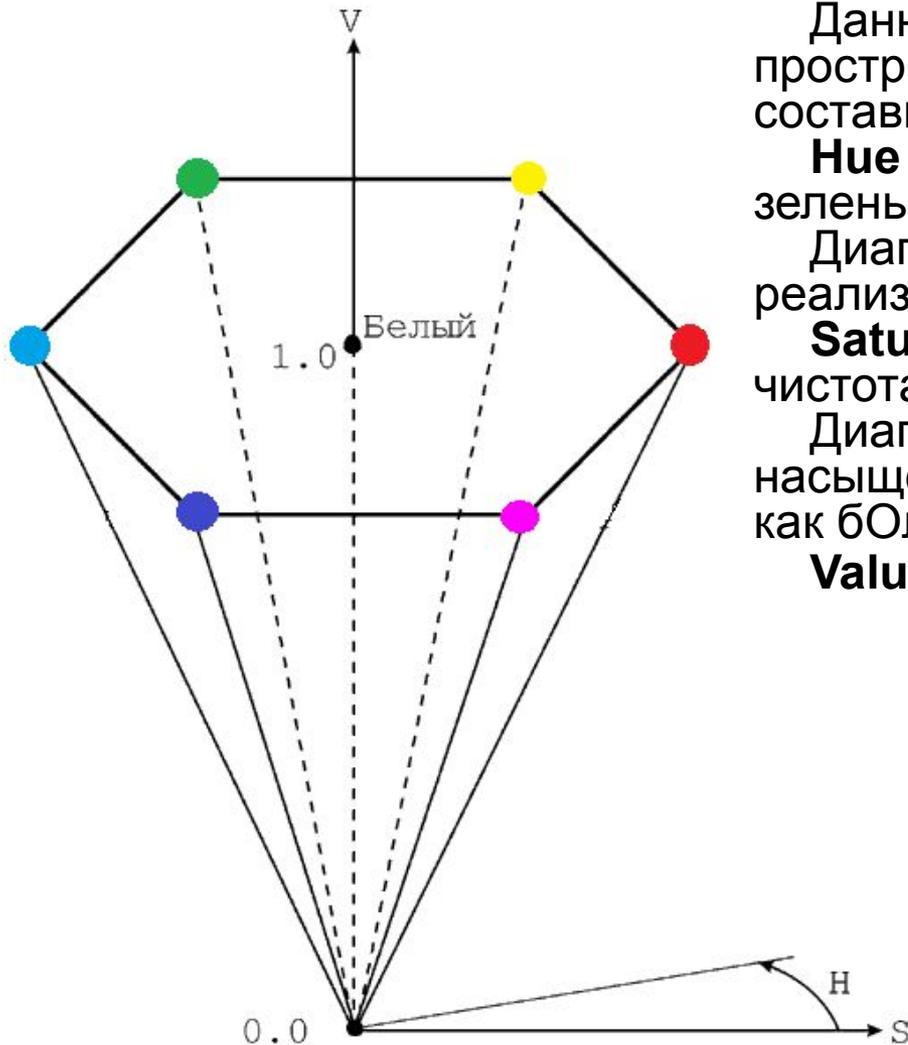
Hue (тон)
Saturation (насыщенность)
Value (значение)

Hue (тон)
Saturation (насыщенность)
Brithness (яркость)

Hue
Saturation
Lightness (светлота)



3.2.5. Цветовая модель HSV



Данная цветовая модель задает цветовое пространство в терминах следующих составных компонент:

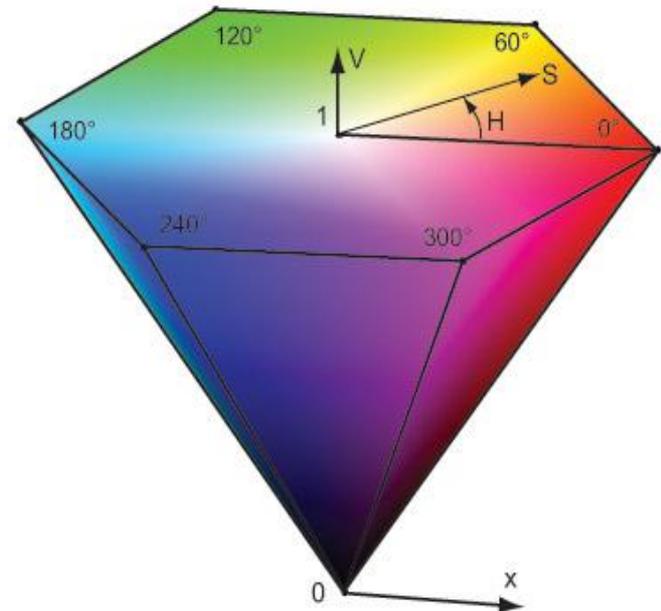
Hue – оттенок цвета (красный, синий, зеленый)

Диапазон $0-360^\circ$ ($0-100\%$ в некоторых реализациях)

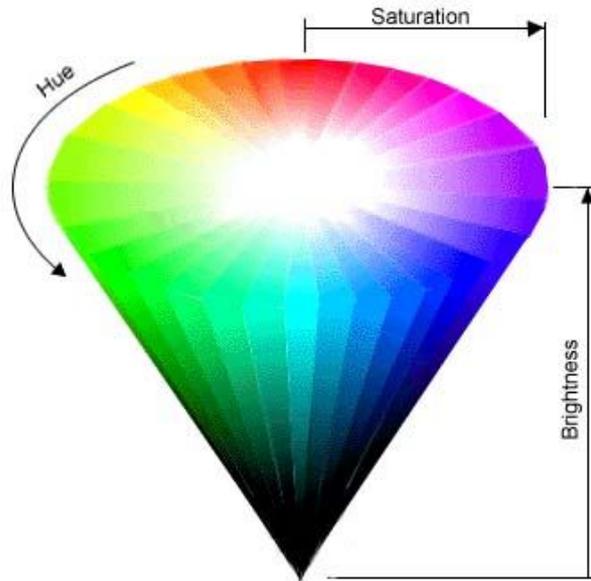
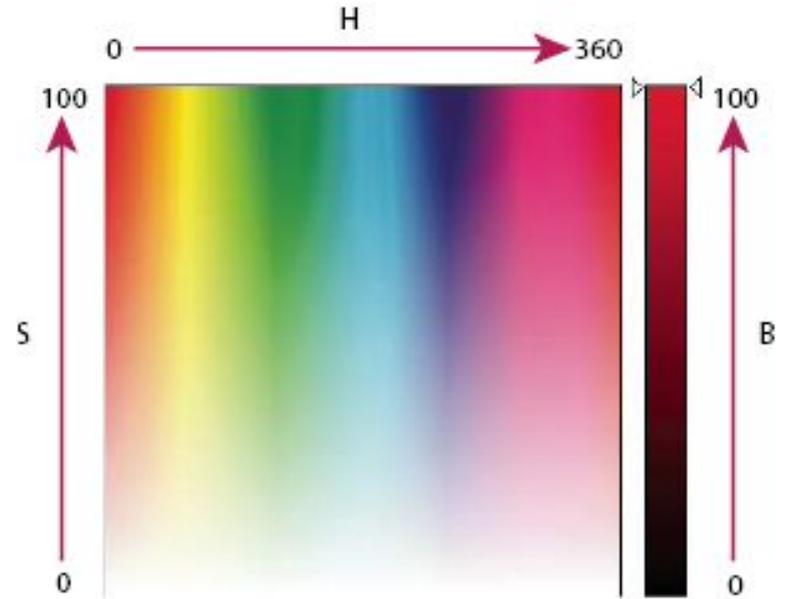
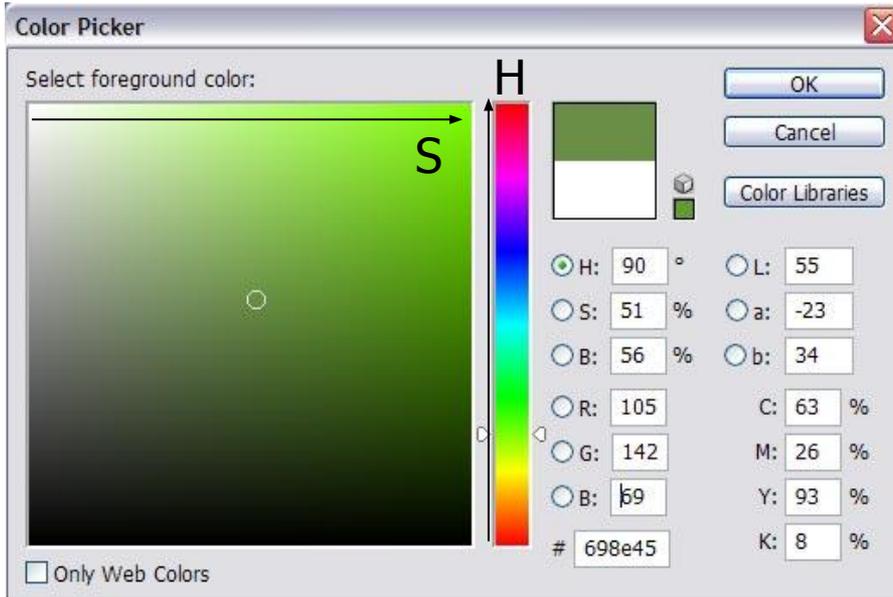
Saturation – насыщенность цвета (цветовая чистота)

Диапазон от 0 до 100%. Меньшие значения насыщенности делают цвет серым, в то время как большие значения – более «цветным»

Value (Brightness) – яркость цвета



3.2.5. Цветовая модель HSV



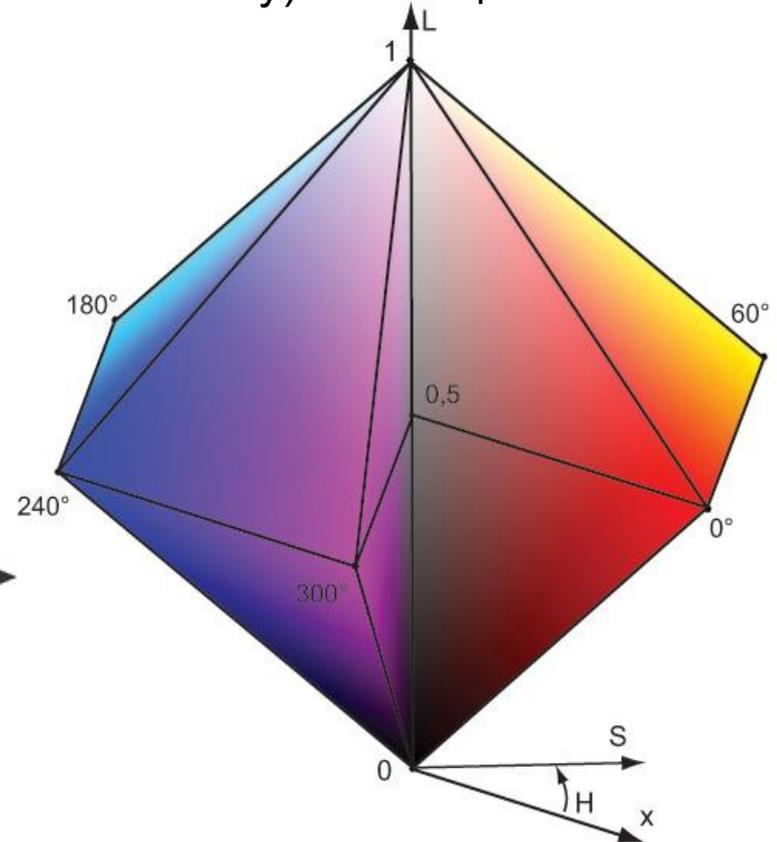
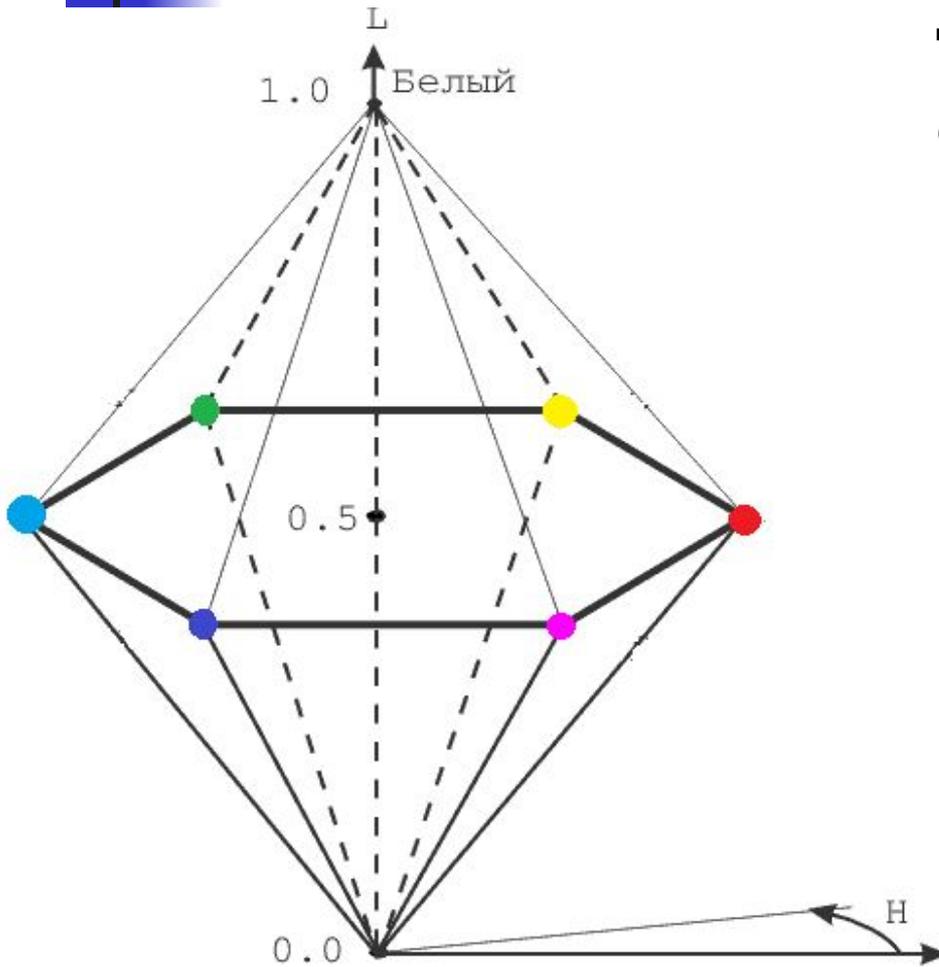
3.2.5. Цветовая модель HSL

Данная цветовая модель задает цветовое пространство с терминах следующих компонент:

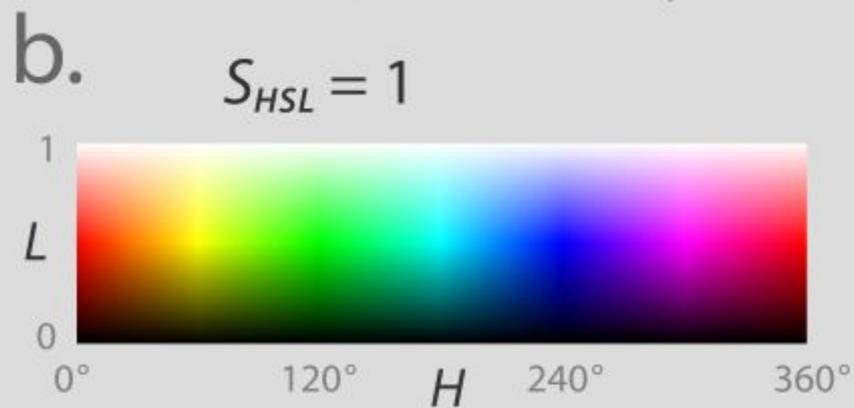
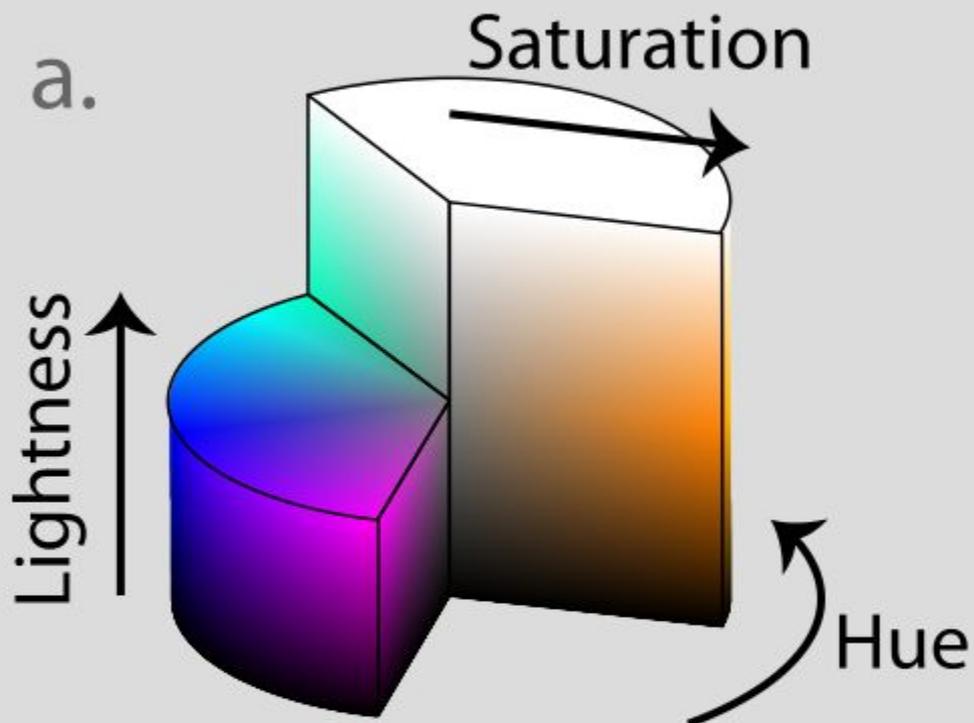
Hue – цветность

Saturation – насыщенность

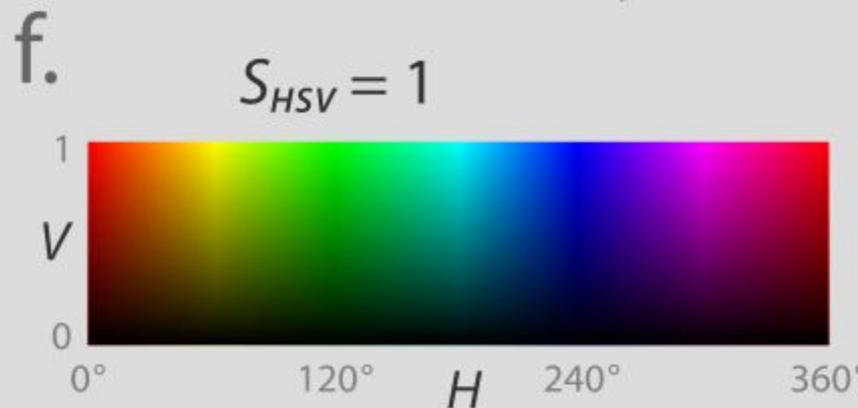
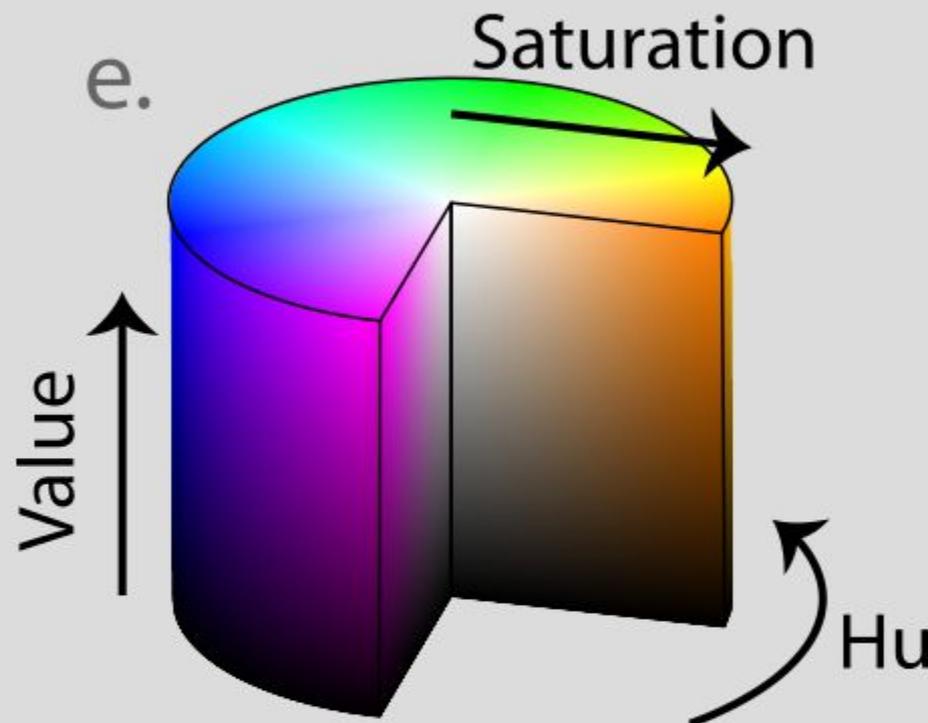
Lightness (Luminosity, Luminance, Intensity) - освещенность

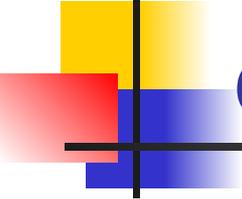


HSL



HSV





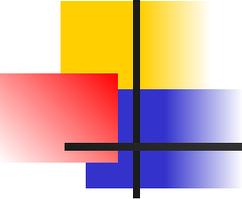
Сравнение моделей HSL и HSV

Модель HSL более интуитивно отражает понятие насыщенности и освещенности

- Насыщенность в модели HSL всегда изменяется от полностью насыщенного цвета к эквивалентному серому цвету, в то время как в модели HSV при $V=1$ полностью насыщенный цвет переходит к белому
- Освещенность в модели HSL изменяется от черного через выбранное значение цветности – к белому, а в модели HSV – проходит лишь половину пути – от черного к выбранному цветному.

Другие цветовые модели

- При передаче телевизионных аналоговых сигналов используются следующие цветовые модели:
 - YUV (используется в телевизионном сигнале PAL)
 - YDbDr (используется при передаче SECAM-сигнала)
 - YIQ (NTSC-сигнал)
- В этих моделях Y-составляющая несет яркостную составляющую изображения, а остальные – информацию о цвете
 - Этот подход позволил перейти на передачу цветного телевизионного сигнала, сохранив совместимость с черно-белым телевидением



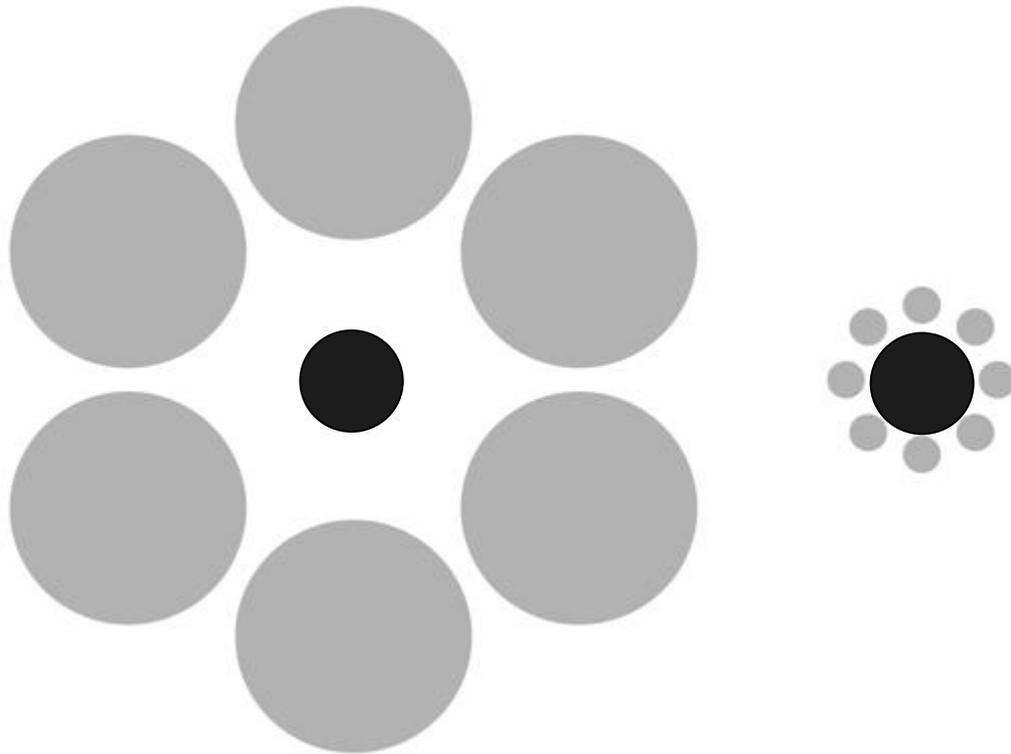
Цветовые модели описывают способы передачи цветовой информации в числовом виде

Идеальных цветковых моделей не существует. В различных ситуациях наиболее удобной может оказаться та или иная модель

Иллюзия Эббингаузена (Ebbinghaus)

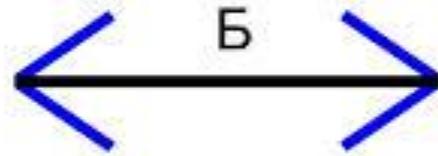
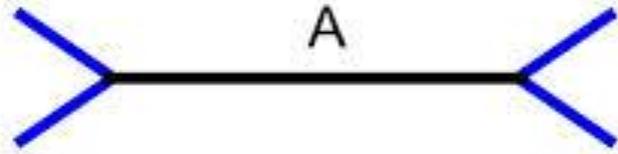
Здесь сразу две иллюзии:

- классическая иллюзия искажения размера (оба черных кружка имеют одинаковый размер)
- цветовая иллюзия - серые кружки справа выглядят светлее левых, хотя на самом деле они одного цвета.



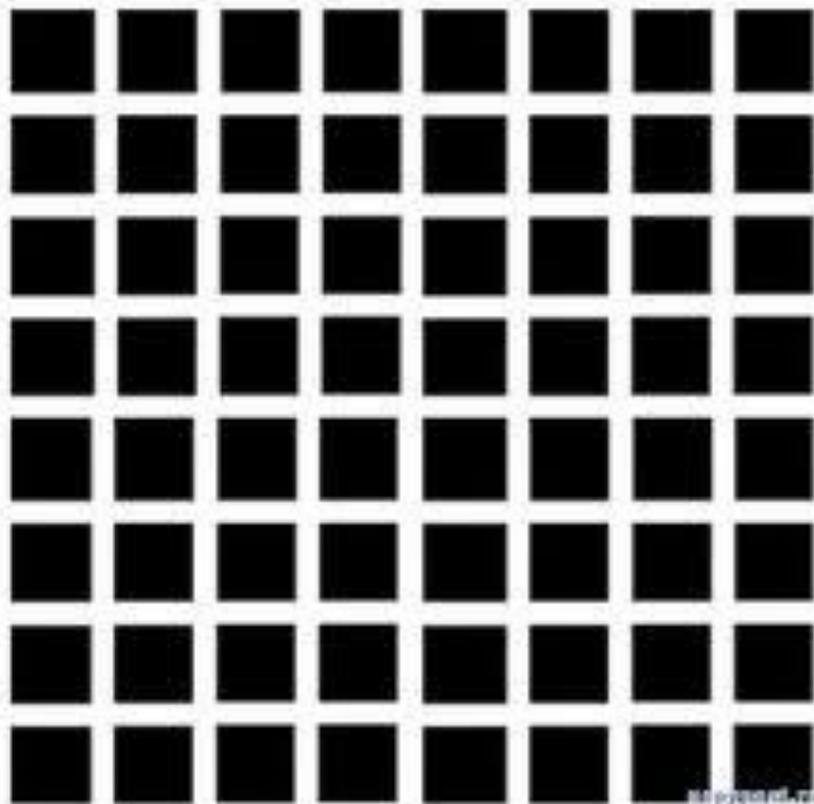
Иллюзия размера





Иллюзия цвета и контраста

Решетка Геринга



Иллюзия цвета и контраста

Решетка Вертгеймера-Коффи

