
Соответствие цветов. Цветовые пространства и модели

Алексей Игнатенко

Лекция 2

12 октября 2006

На прошлой лекции

- Курс: три части
 - восприятие, свет, материалы
 - геометрическое моделирование
 - алгоритмы экранизации
- Глаз – сложная оптическая система
- Восприятия цвета
 - Принцип одномерности
 - Адаптация, темпоральное сглаживание
 - Чувствительность к контрасту
 - Яркость и контраст
- Восприятие глубины: окуломоторное и визуальное
- Визуальное восприятие глубины: бинокулярное и монокулярное

На лекции

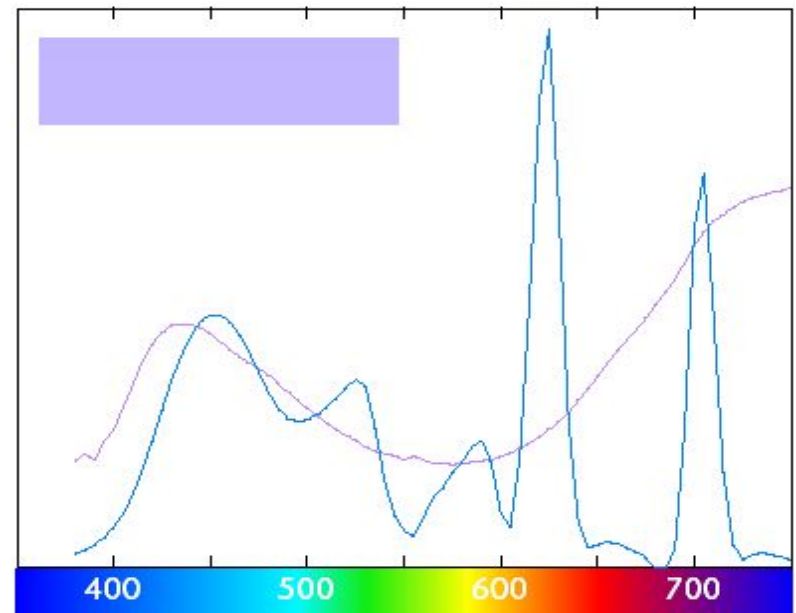
- Машинное представление цвета
- Соответствие цветов, эксперименты CIE
- Цветовое пространство CIE XYZ
- Однородное цветовые пространство L^*a^*b
- Мониторы. Цветовая модель и цветовое пространство RGB
- Точка белого, цветовая температура, гамма-коррекция.

Машинное представление цвета

- Как однозначно описать **цвет**?
 - Очень сложный механизм восприятия!
- Как соответствуют друг другу
 - Видимый глазом свет
 - Цвет на мониторе
 - Цвет на фотографии
 - Цвет в графическом редакторе
 - Цвет объектов в OpenGL?

Цвет как три числа

- Два основных следствия устройства человеческого зрения:
 - Трихроматия, трехцветность (*trichromacy*)
 - Весь спектр может быть сведен в точности к трем числам без потери информации для визуальной системы человека
 - Метамеризм (*metamerism*)
 - Все спектры, создающие одинаковые отклики, неразличимы человеком

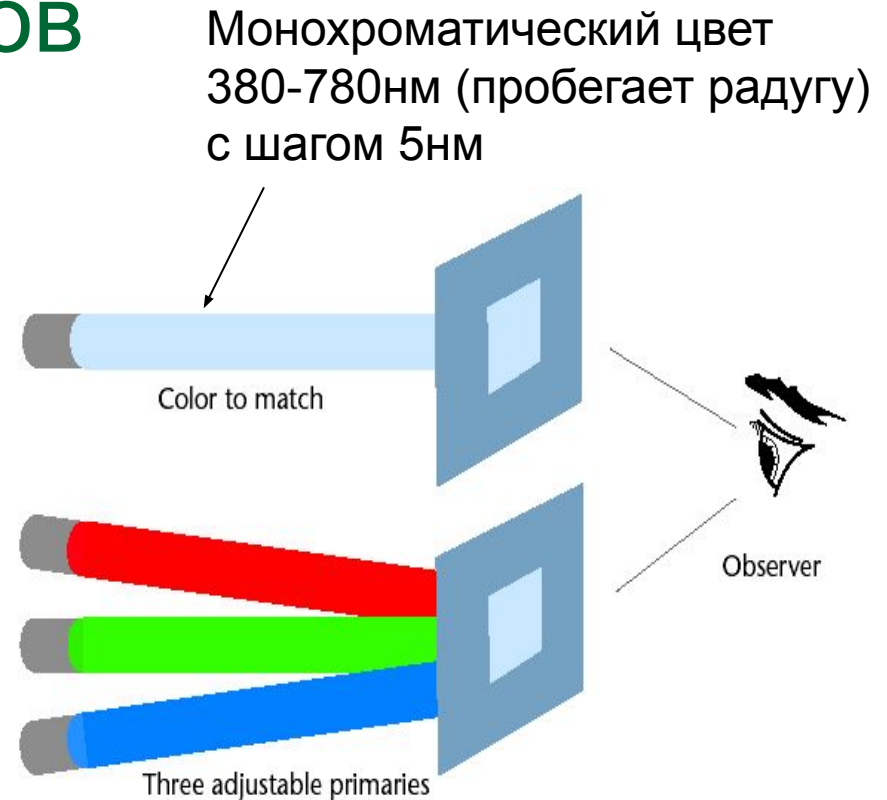


Соответствие цветов

- Чтобы научиться воспроизводить цвета, необходимо уметь количественно задавать тройки чисел для всех видимых цветов
 - Не нужно моделировать произвольный спектр, трех чисел достаточно только для тех цветов, которые различает человек
 - Перцепционное соответствие цветов (perceptual color matching)

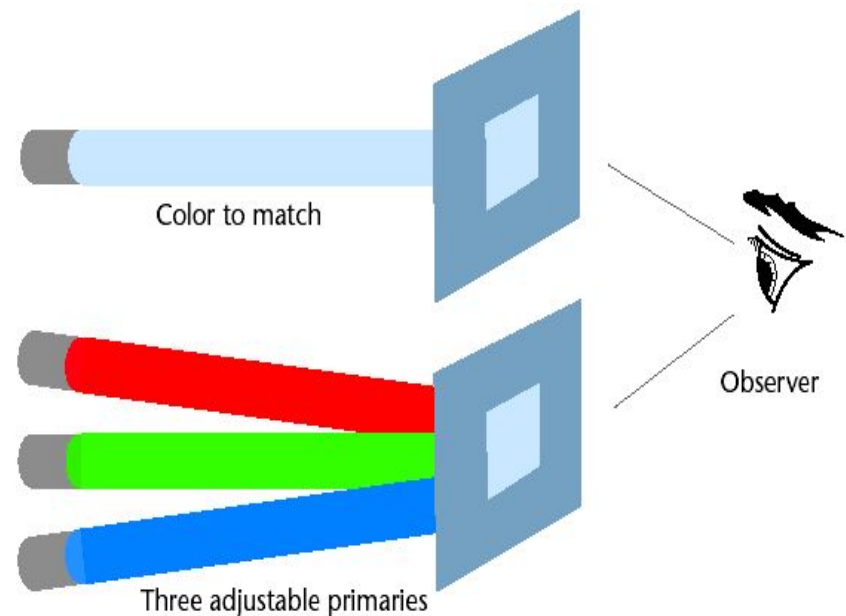
Эксперименты по перцепционному соответствию цветов

- 1920е-1930е
- Экран размером 2 градуса
- Три источника света – основные цвета R, G, B (монохроматические)
- Наблюдатель может менять интенсивность от -1 до 1
- Хотя можно найти соответствие любого цвета, исходный цвет был монохроматический
 - Чтобы ограничить число цветов

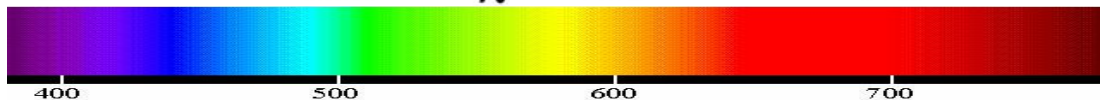
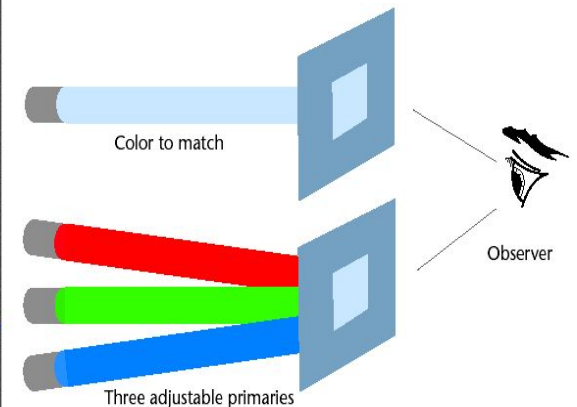
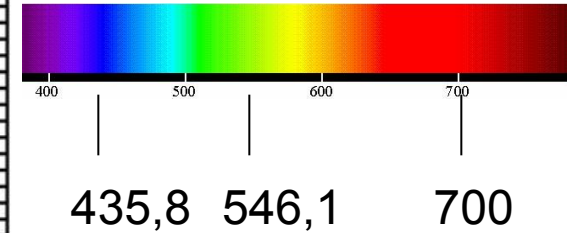
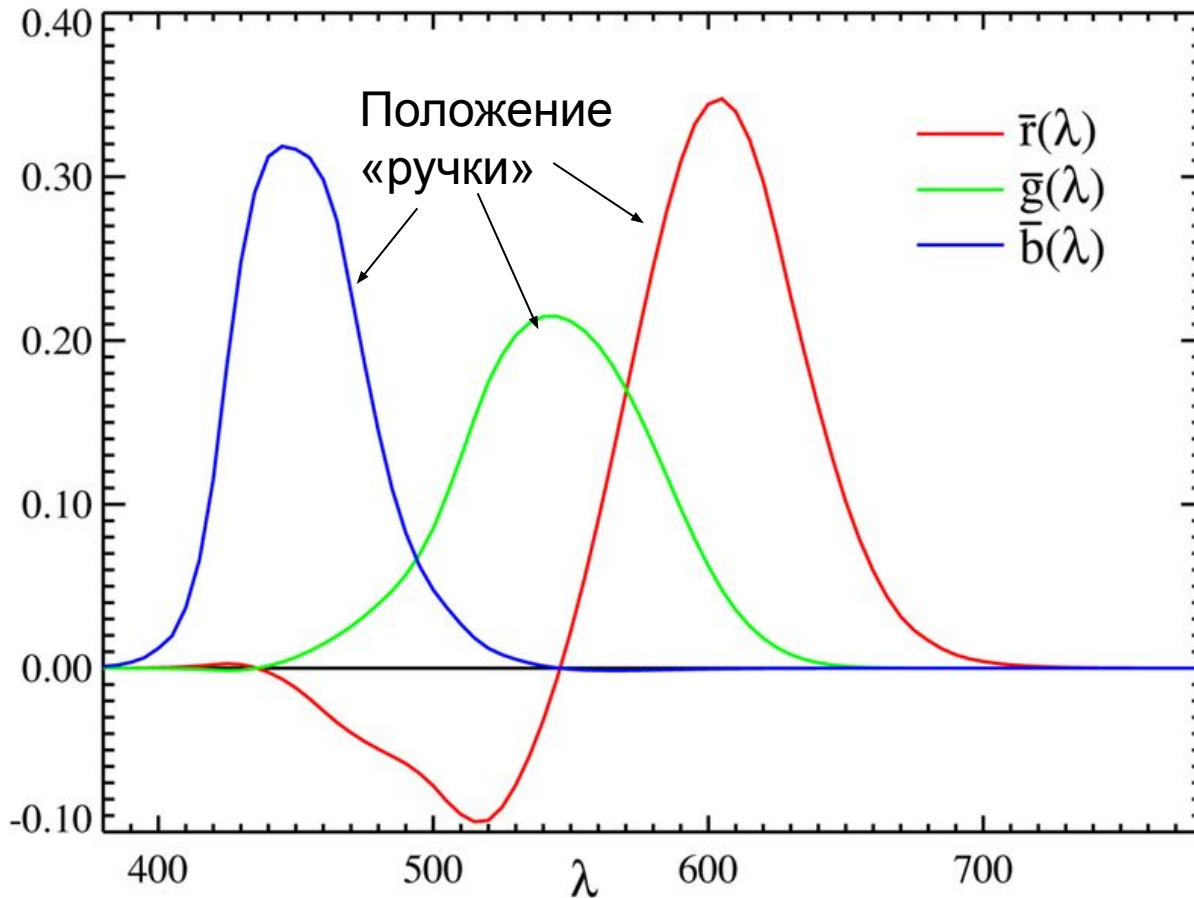


Эксперименты по перцепционному соответствию цветов (2)

- Большую часть цветов можно задать как сумму:
 $C = rR + gG + bB$ (аддитивное соответствие)
- Некоторые цвета нельзя задать таким способом, вместо этого:
 $C + rR = gG + bB$
(субтрактивное соответствие)
 - Создает проблемы для устройств вывода – нельзя создать лампу, которая забирает энергию
 - Позволяет использовать любые разные базовые цвета

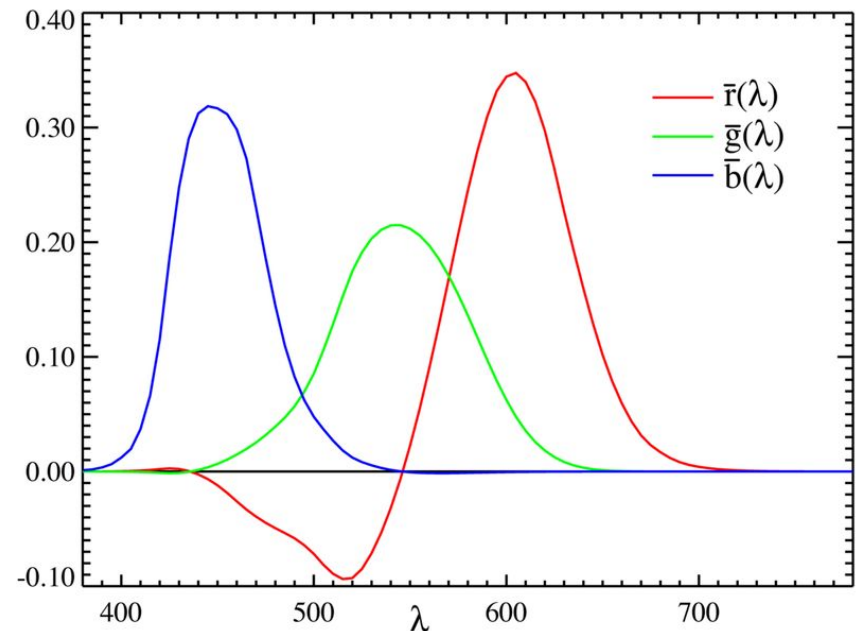


Эксперименты по перцепционному соответствию цветов: результаты



Эксперименты по перцепционному соответствию цветов: коррекция

- Кривые не соответствуют яркости источников света
- Нормированы, чтобы площадь под графиками была одинаковой
- Для получения яркости нужна коррекция:
- Мощность:
72.0962 / 1.3791 / 1
- Яркость:
1 / 4.5907 / 0.0601

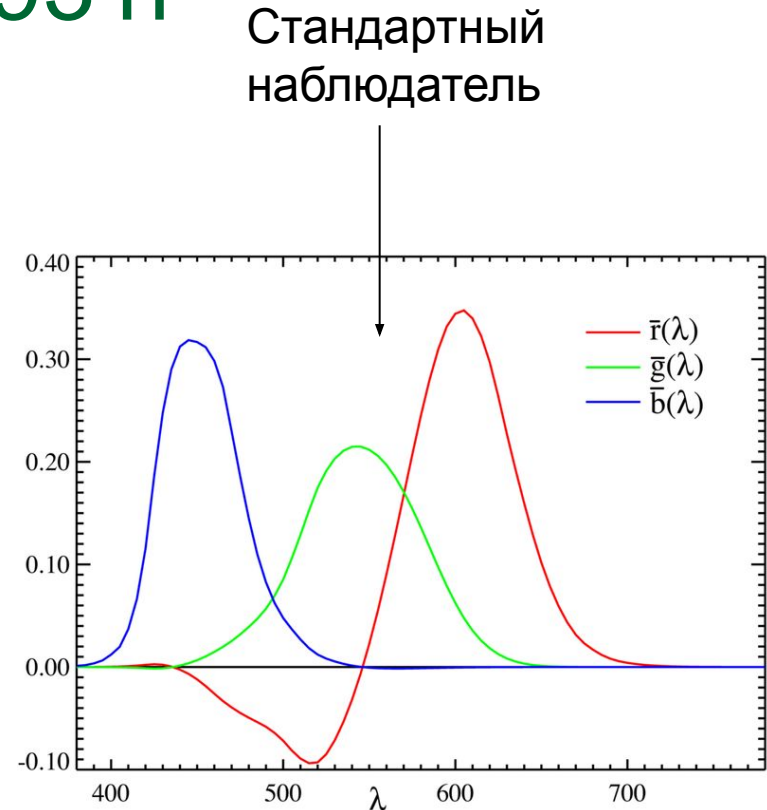


Эксперименты по перцепционному соответствию цветов: проблемы

- Результаты верны только для
 - конкретного наблюдателя
 - для данных основных цветов (ламп)
 - для монохроматических целевых цветов
- Для практического использования необходимо расширить их
 - На более широкий класс наблюдателей
 - На более широкий класс базовых цветов

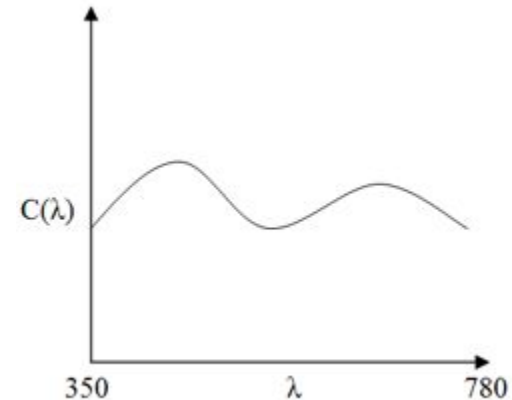
Эксперименты CIE 1931г

- Эксперименты по перцептуальному соответствию цветов были проведены на большом количестве людей
- Для людей с нормальным цветовосприятием результаты оказались достаточно близки
 - их можно усреднить
- В 1931 году на их основе CIE стандартизовала понятие *стандартного наблюдателя*
- **Вывод: результаты экспериментов по соответствию цветов для стандартного наблюдателя могут быть применены к любому человеку с нормальным зрением**



Закон аддитивности Грассмана

- Любой цвет – это сумма монохроматических цветов разной интенсивности (амплитуды волны)
- Мы знаем:
 - что любой цвет может быть описан тройкой чисел (трихроматия)
 - как представить монохроматические цвета с помощью тройки чисел (из экспериментов CIE) для данных базовых цветов
- Возможно ли на основе этой информации найти тройки чисел для любого цвета?
- **Да! Закон аддитивности Грассмана**



Закон аддитивности Грассмана

- Эмпирический закон о линейности человеческого зрения (Hermann Grassman)
- Аддитивность:
 - Если наблюдатель задаст цвет лучей 1 и 2 как $R_1B_1G_1$ и $R_2B_2G_2$ относительно заданных основных цветов
 - То цвет их комбинации цвет будет равен
$$R = R_1 + R_2$$
$$G = G_1 + G_2$$
$$B = B_1 + B_2$$

Закон аддитивности Грассмана (2)

- Позволяет использовать конечный набор соответствий цветов для моделирования бесконечного набора
- Любое спектральное распределение может быть задано как взвешенная сумма монохроматических цветов =>
- Если задать RGB-соответствия для этих цветов, то RGB для любого спектрального цвета будет взвешенной суммой RGB монохроматических цветов

Закон аддитивности Грассмана (3)

- В общем случае можно задать цвет для $C(\lambda)$ следующим образом

$$X = \int_{\lambda=380}^{780} C(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \quad C'(\lambda) = X\bar{x}(\lambda) + Y\bar{y}(\lambda) + Z\bar{z}(\lambda)$$

$$Y = \int_{\lambda=380}^{780} C(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda$$

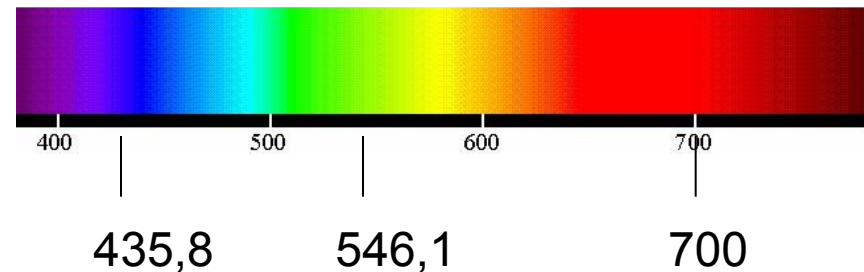
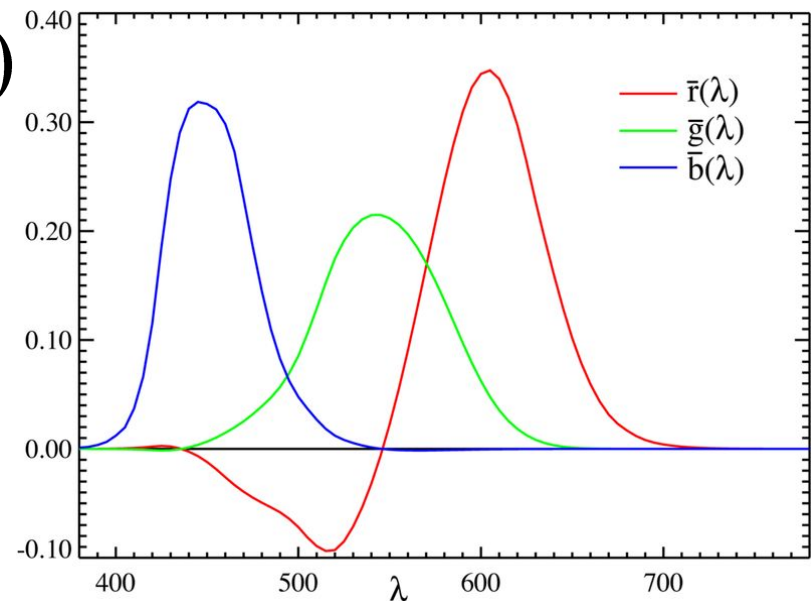
$$Z = \int_{\lambda=380}^{780} C(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda$$

$C'(\lambda) \neq C(\lambda)$, но **воспринимаемый цвет** будет одинаковый!

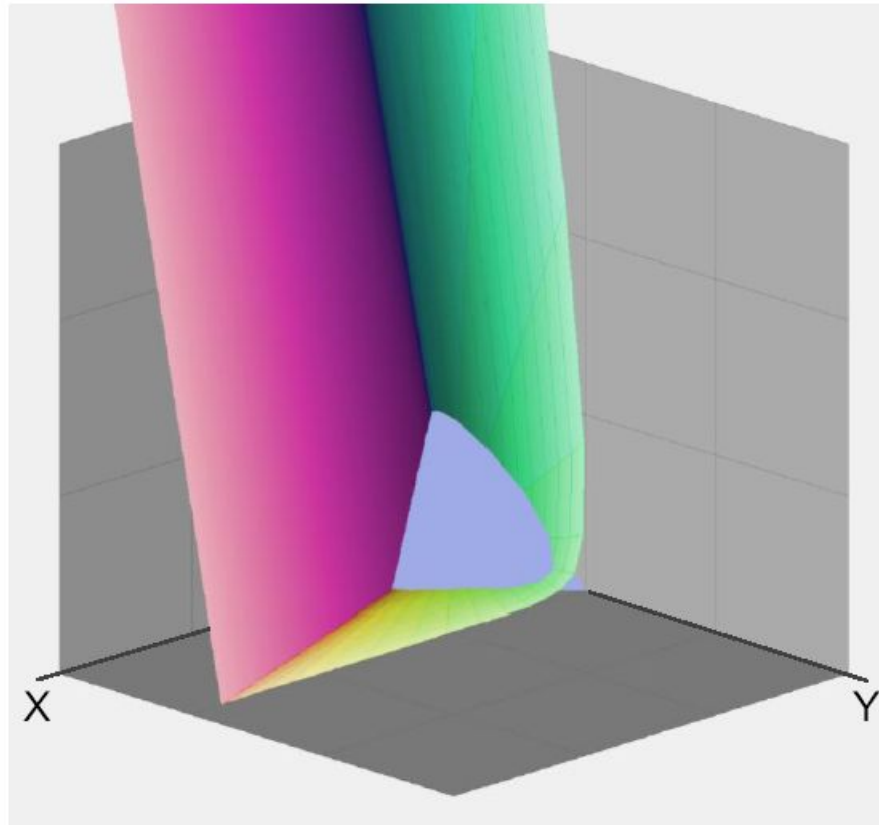
Это следует из определения стандартного наблюдателя и закона аддитивности Грассмана

Соответствие цветов: пространство CIE RGB 1931

- Кривые $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ и спецификация базовых источников света задают трехмерное цветовое пространство XYZ



Соответствие цветов: пространство CIE RGB 1931 (2)



Переход между цветовыми пространствами

- Хотим создать другое цветовое пространство с источниками $X(\lambda)$, $Y(\lambda)$, $Z(\lambda)$
- Нужно найти координаты (r_1, g_1, b_1) , (r_2, g_2, b_2) , (r_3, g_3, b_3) в RGB

$$\begin{aligned} C &= xX + yY + zZ = \\ &= x(r_1R + g_1G + b_1B) + y(r_2R + g_2G + b_2B) + z(r_3R + g_3G + b_3B) = \\ &= \underbrace{(xr_1 + yr_2 + zr_3)}_r R + \underbrace{(xg_1 + yg_2 + zg_3)}_g G + \underbrace{(xb_1 + yb_2 + zb_3)}_b B \end{aligned}$$

Переход между цветовыми пространствами (2)

$$\begin{pmatrix} r \\ g \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ g_1 & g_2 & g_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

- В предположении о верности закона Грассмана переход между цветовыми пространствами – линейное преобразование

Пространство CIE XYZ

- Задача: создать новое цветовое пространство XYZ, более удобное в работе, чем CIE RGB
 - Базовые цвета $x(\lambda)$, $y(\lambda)$, $z(\lambda)$ всюду неотрицательны
 - $y(\lambda)$ соответствует стандартной функции свечения CIE
 - Функция свечения отражает различную чувствительность глаза к силе излучения в различных частях спектра
 - Точка белого «равной энергии» должна соответствовать $x=y=z=1/3$
 - «плоское» спектральное распределение

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \frac{1}{0.17697} \begin{bmatrix} 0.49 & 0.31 & 0.20 \\ 0.17697 & 0.81240 & 0.01063 \\ 0.00 & 0.01 & 0.99 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

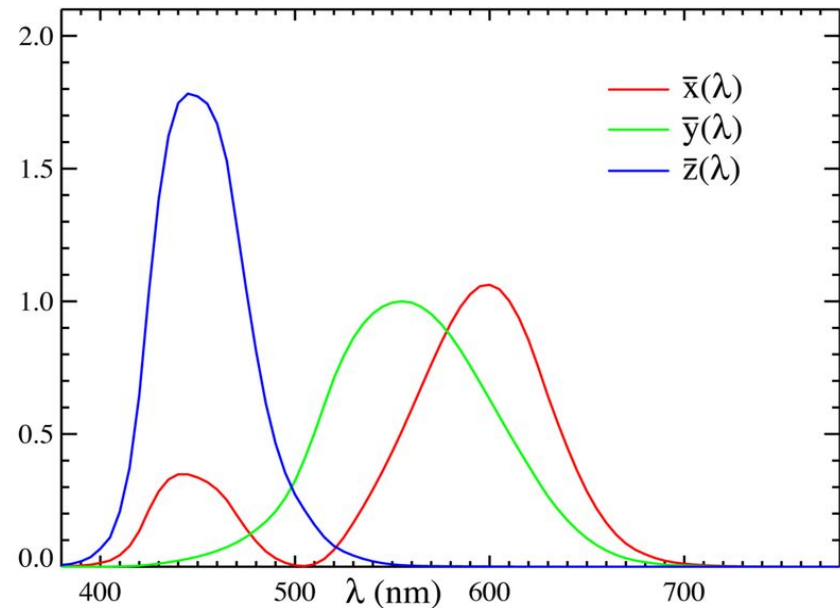
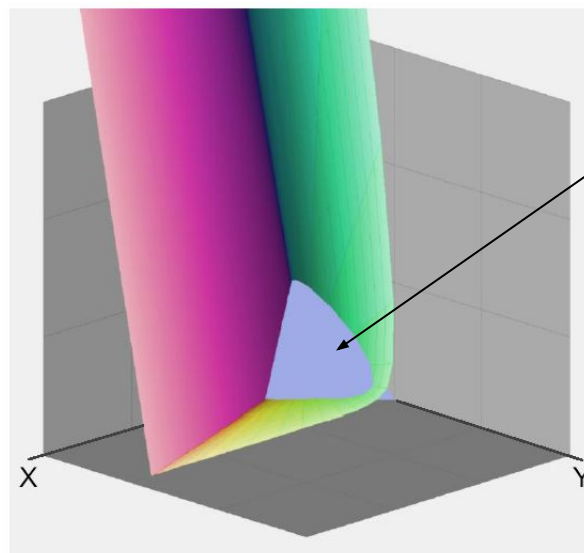


Диаграмма тональности

- Цвет – тональность и яркость
- В модели CIE XYZ Y задает яркость.
- Тональность принято задавать производными параметрами x и y:

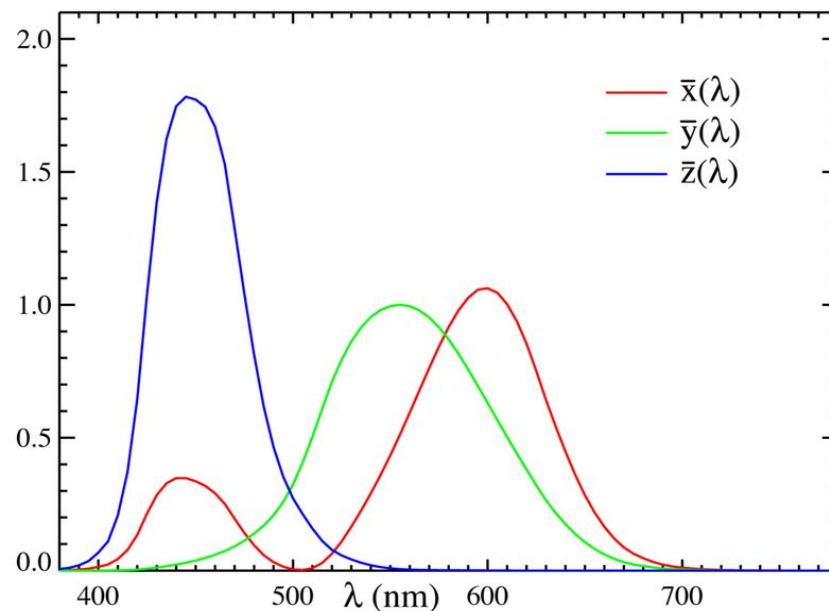
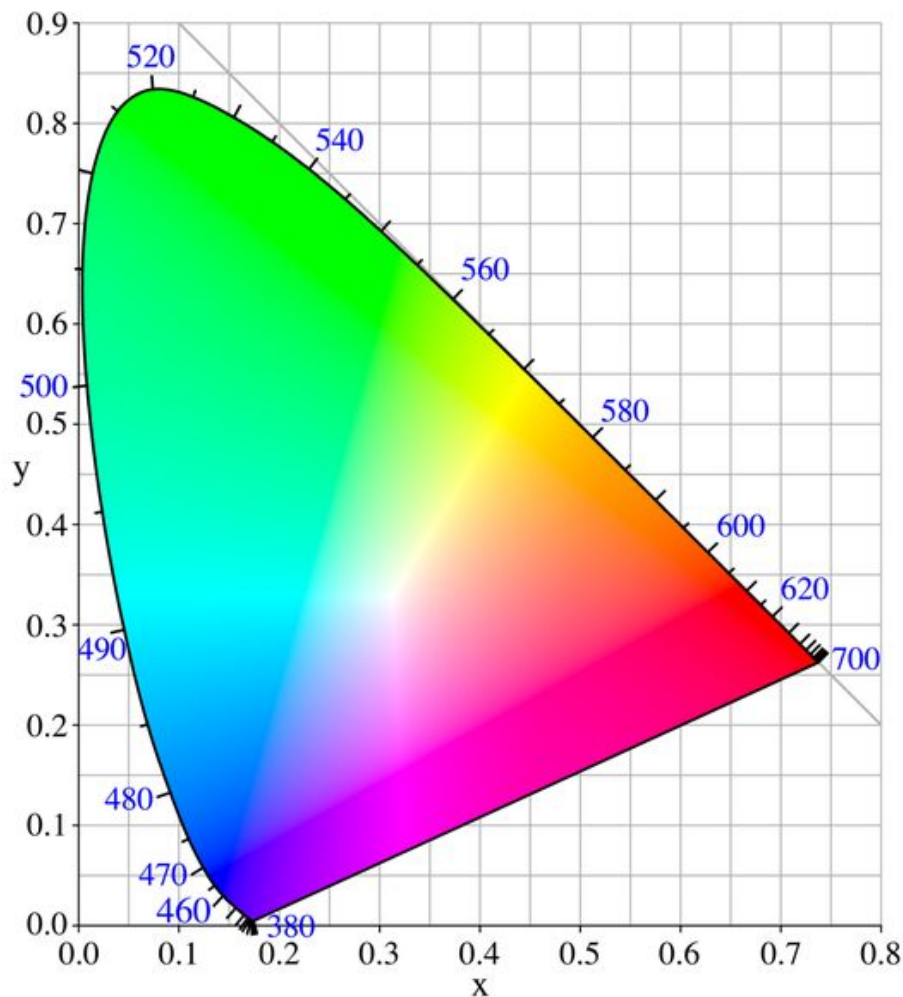
$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$



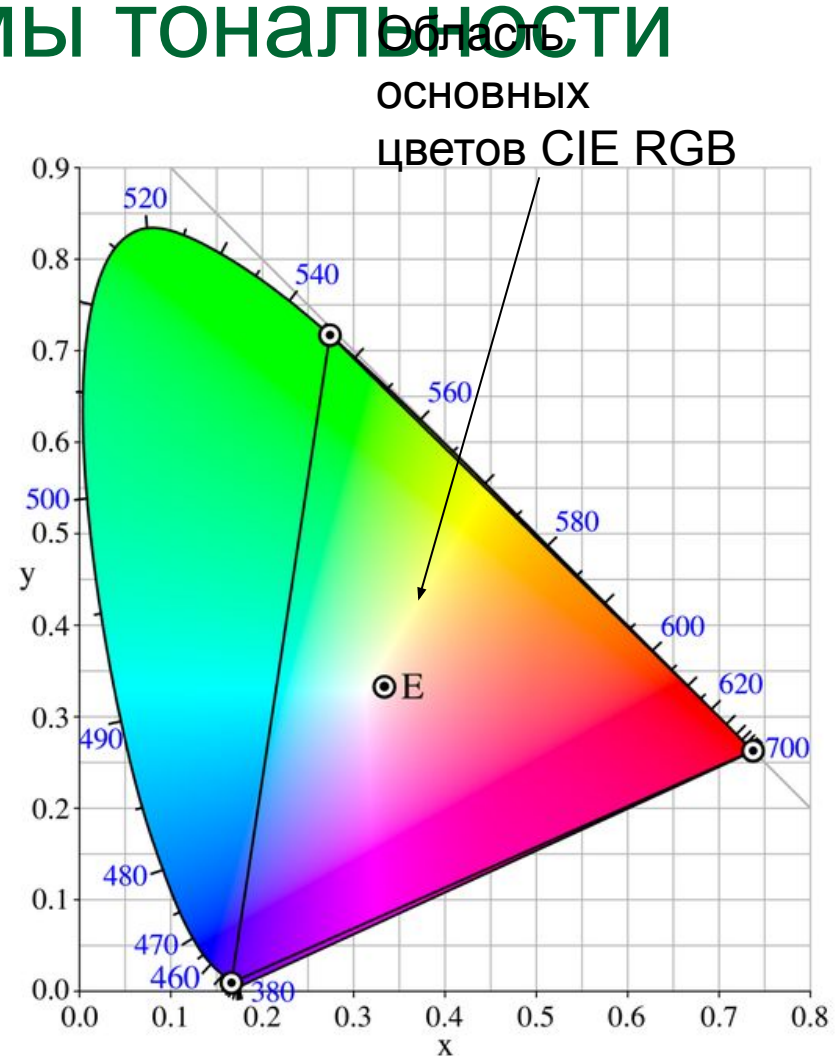
Проекция на
плоскость
 $X+Y+Z=1$

Диаграмма тональности для CIE XYZ



Свойства диаграммы тональности

- Свойства:
 - На диаграмме представлены все цвета, видимые среднестатистическому человеку
 - Все цвета, которые могут быть получены смешением любых двух, лежат на прямой между ними
 - Все цвета, которые могут быть получены смешением трех цветов, лежат внутри треугольника
 - Смешивая три данных реальных источника света, невозможно получить все цвета, видимые человеком

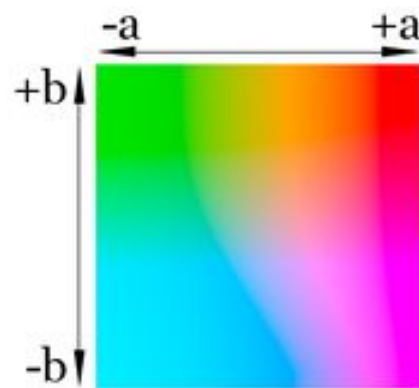
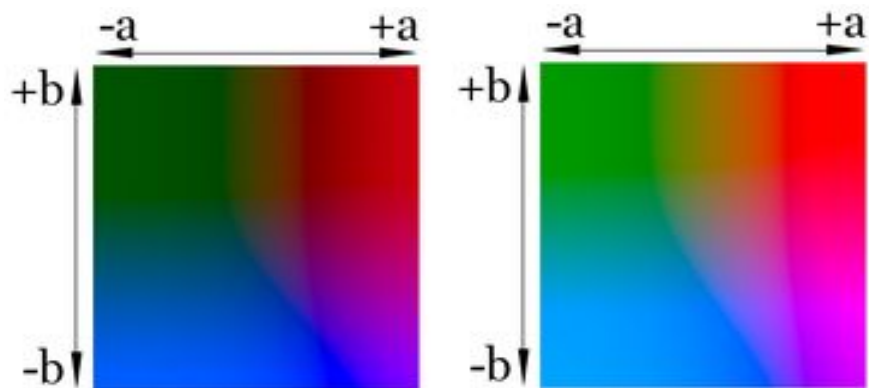


Интуитивные цветовые пространства

- Пространство XYZ недостаточно интуитивно
 - Нет осмысленных значений у компонент X,Z (Y означает яркость)
 - Перцептуально нелинейно
 - Изменение значений xuz не означает пропорциональное изменение цвета
- Было разработано несколько цветовых пространств, обладающих заданными свойствами

CIE 1976 L^*a^*b

- Трехмерное пространство
- L^* - яркость (lightness)
 - $L^* = 0$ черный
 - $L^* = 100$ белый
- a^* - положение между фиолетовым и зеленым
 - $a^* < 0$ фиолетовый
 - $a^* > 0$ зеленый
- b^* - положение между желтым и синим
 - $b^* < 0$ желтый
 - $b^* > 0$ синий



Преобразование XYZ->Lab

- Преобразование нелинейное!

$$L^* = 116 f(Y/Y_n) - 16$$

$$a^* = 500 [f(X/X_n) - f(Y/Y_n)]$$

$$b^* = 200 [f(Y/Y_n) - f(Z/Z_n)]$$

X_n, Y_n, Z_n – точка белого

$$f(t) = t^{1/3}$$

$$f(t) = 7.787 t + 16/116$$

Цветовые пространства и модели

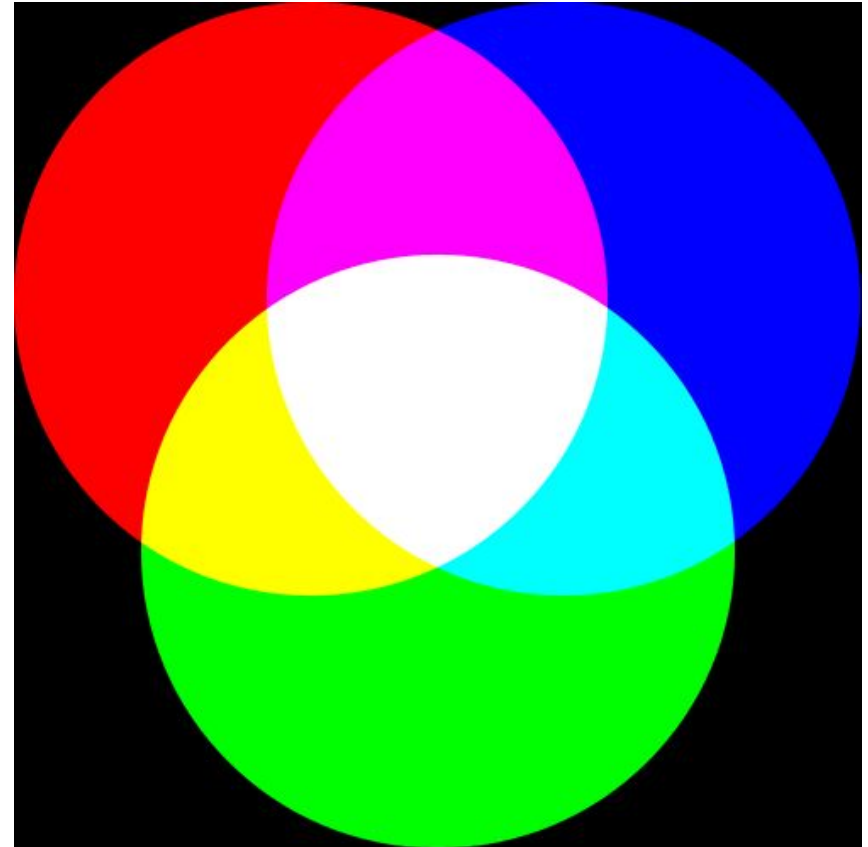
- Цветовая модель – абстрактная математическая модель описания цвета набором чисел (обычно тремя)
 - Не имеет функции отображения в абсолютное цветовое пространство
 - Нельзя использовать в прикладных задачах без привязки к абсолютному пространству
- Цветовое пространство = модель + отображение в некоторое исходное (reference) пространство
 - Цвета не зависят от внешних факторов

Цветовые пространства

- Исходные (reference) цветовые пространства:
 - CIE XYZ
 - CIE L*a*b
 - CIE RGB (не используется)
- Цветовые модели:
 - RGB
 - CMYK
 - YIQ
 - HSV
 - HSL
- Производные цветовые пространства:
 - sRGB (RGB)
 - Adobe RGB (RGB)
 - Apple RGB (RGB)

Модель RGB

- Основана на аддитивной комбинации трех основных цветов – красного (**R**ed), зеленого (**G**reen), синего (**B**lue)
- Описывает системы, основанные на испускании света для получения нужного цвета (телевизоры, мониторы)
- Сами по себе значения r, g, b не несут физического смысла
 - Нужна привязка к исходному цветовому пространству
- Наиболее часто применяется в компьютерной графике, т.к. компьютерная графика работает с изображениями на мониторе



Мониторы

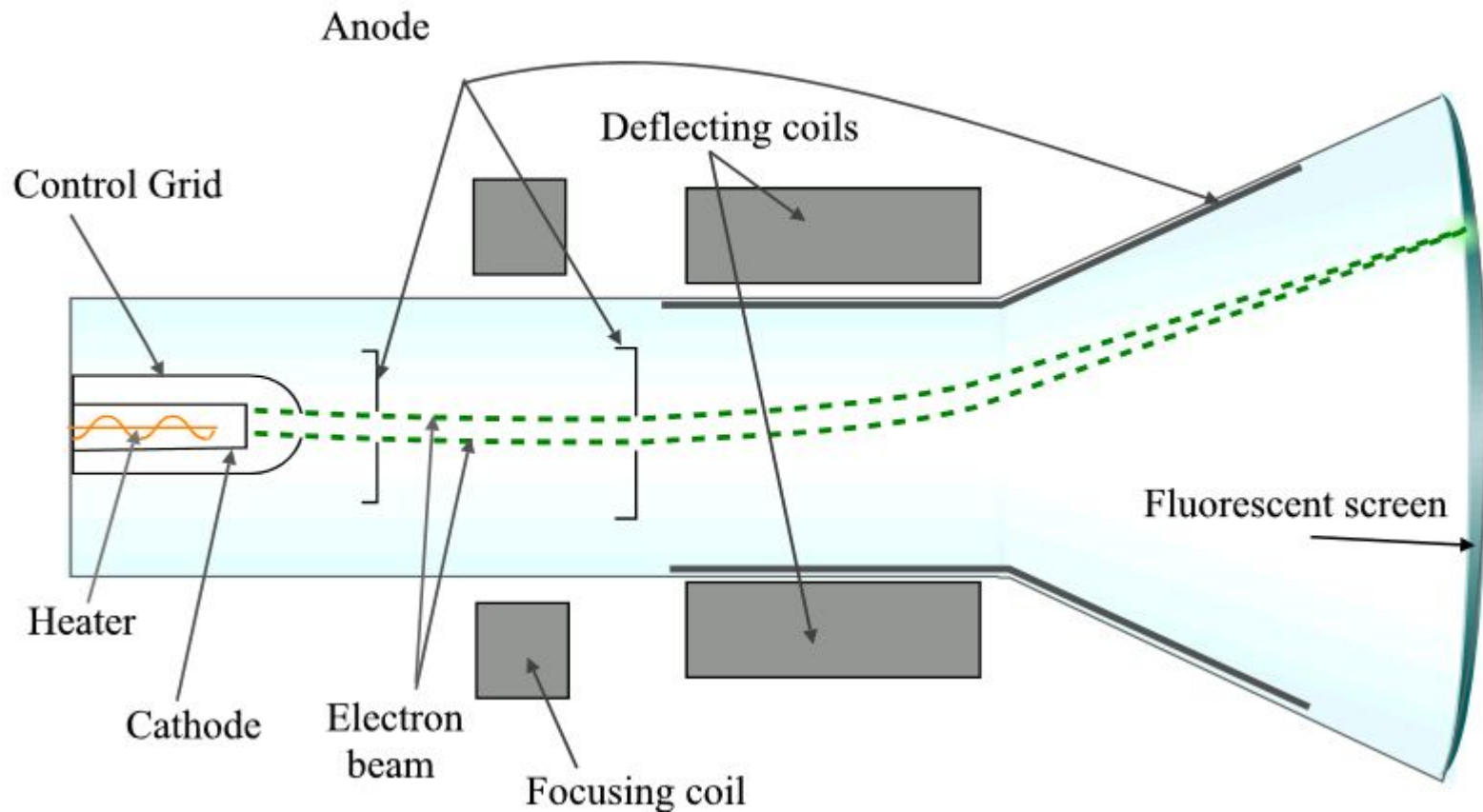
- Разновидности мониторов

- Светоиспускающие
 - CRT (Cathode ray tube)
- Светопропускающие
 - LCD (Liquid crystal display)



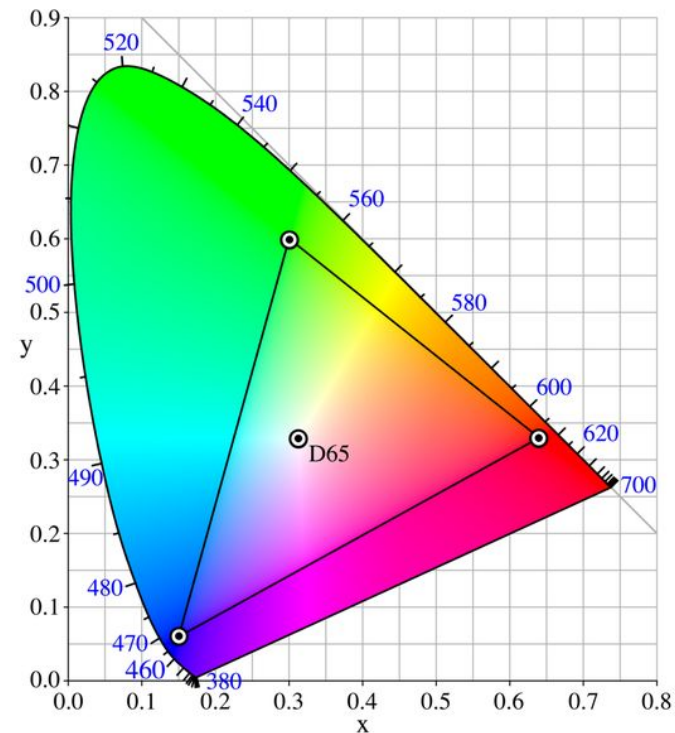
- Рассматриваем CRT, т.к. LCD появились позже и вынуждены подстраиваться под параметры CRT-мониторов

CRT



CRT: спецификация RGB элементов

- Три фосфора задают аддитивное цветовое пространство
- Для полной спецификации обычно задают
 - ху-координаты для r,g,b-фосфоров
 - точку белого (относительная яркость)
- Примеры пространств:
 - NTSC RGB (телевизоры)
 - HDTV RGB (телевизоры)
 - sRGB (мониторы)
- При передаче сигнала (например, телевизионного) цвет кодируется в предположении о соответствии фосфоров монитора (телевизора) стандарту
 - Если не соответствуют, но монитор должен включать в себя коррекцию (аппаратную или программную)



Пространство sRGB
(основные цвета и точка
белого)

Спецификация RGB элементов: точка белого

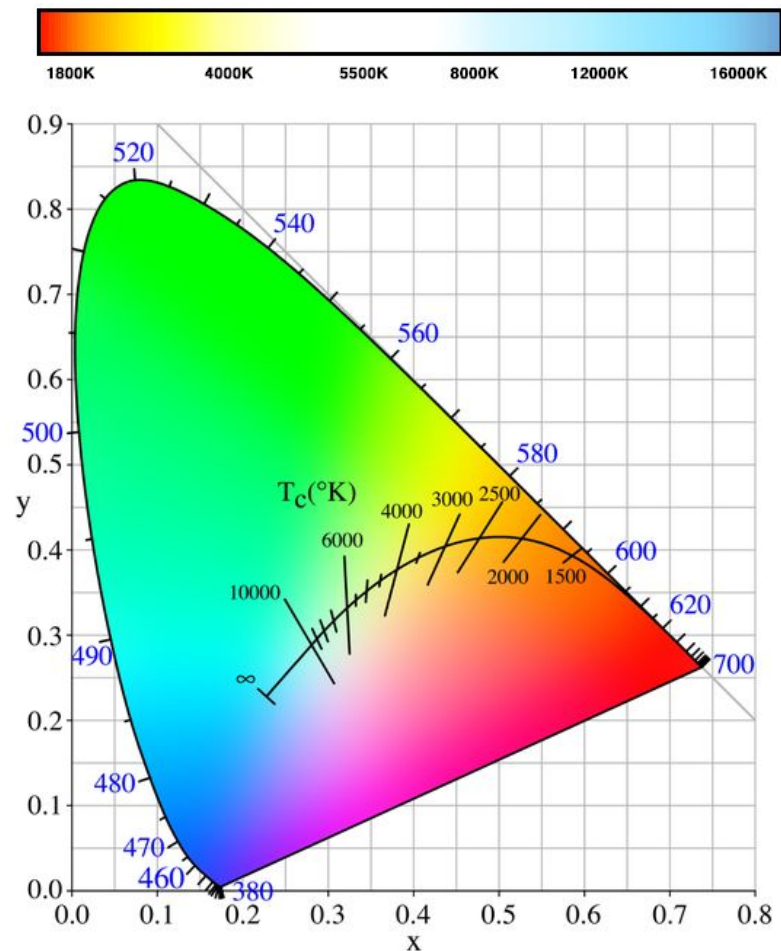
- Точка белого – цвет, который считается белым в данных условиях
- Для монитора – цвет, который испускают фосфоры с максимальной яркостью (1,1,1)
 - Фактически задает относительные яркости фосфоров
- Существуют стандартные точки белого
 - CIE common white points

Точка белого: некоторые стандартные точки белого

| Имя | CIE 1931 | | CCT | Прим |
|-----|----------|---------|------|----------------------|
| | x | y | | |
| E | 1/3 | 1/3 | 5400 | Точка равной энергии |
| D55 | 0.33242 | 0.34743 | 5500 | |
| D65 | 0.31271 | 0.32902 | 6500 | TV, sRGB |
| D75 | 0.29902 | 0.31485 | 7500 | |
| A | 0.44757 | 0.40745 | 2856 | Лампа накаливания |

Цветовая температура

- Цветовая температура – характеристика видимого света
- Сравнение цвета с цветом нагретого черного тела (black body radiator)
- Большинство источников света построены на излучении нагретого тела, поэтому их удобно описывать с помощью цветовой температуры
 - Можно сопоставить с реальным освещением

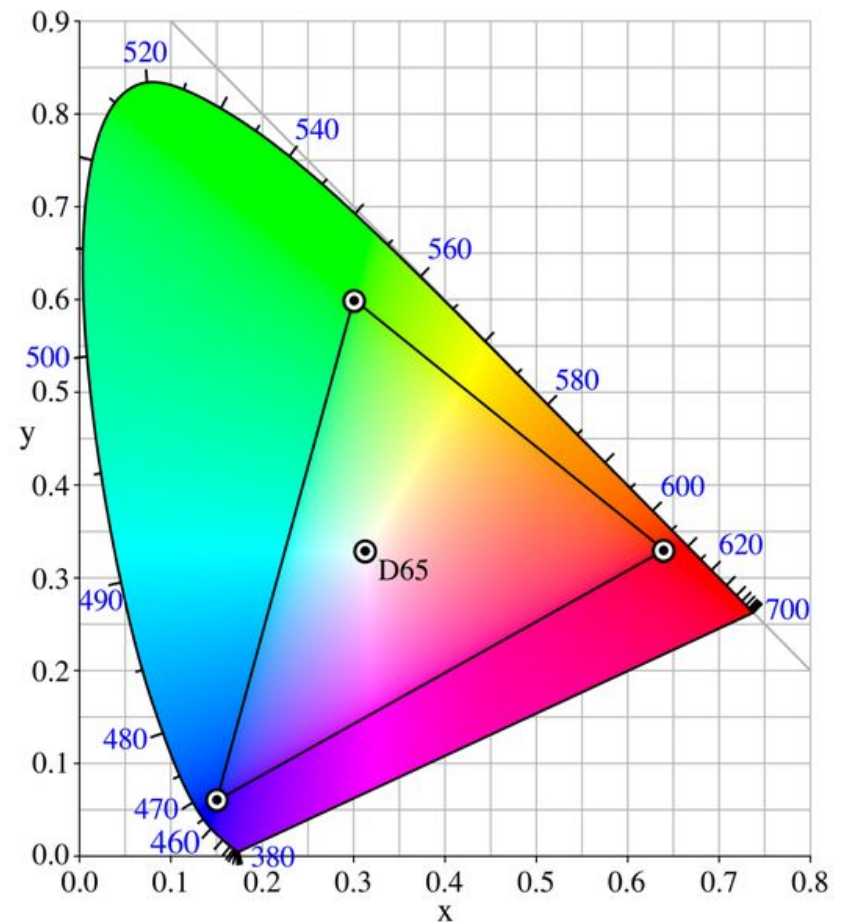


Цветовая температура: примеры

- 1600 К: восход и закат
- 1800 К: свеча
- 2800 К: лампа накаливания
- 3200 К: студийные лампы
- 5200 К: яркое полуденное солнце
- 5500 К: усредненный дневной свет
- 6000 К: облачное небо
- 20000 К: ярко-синее чистое небо
- 28000 - 30000 К: молния

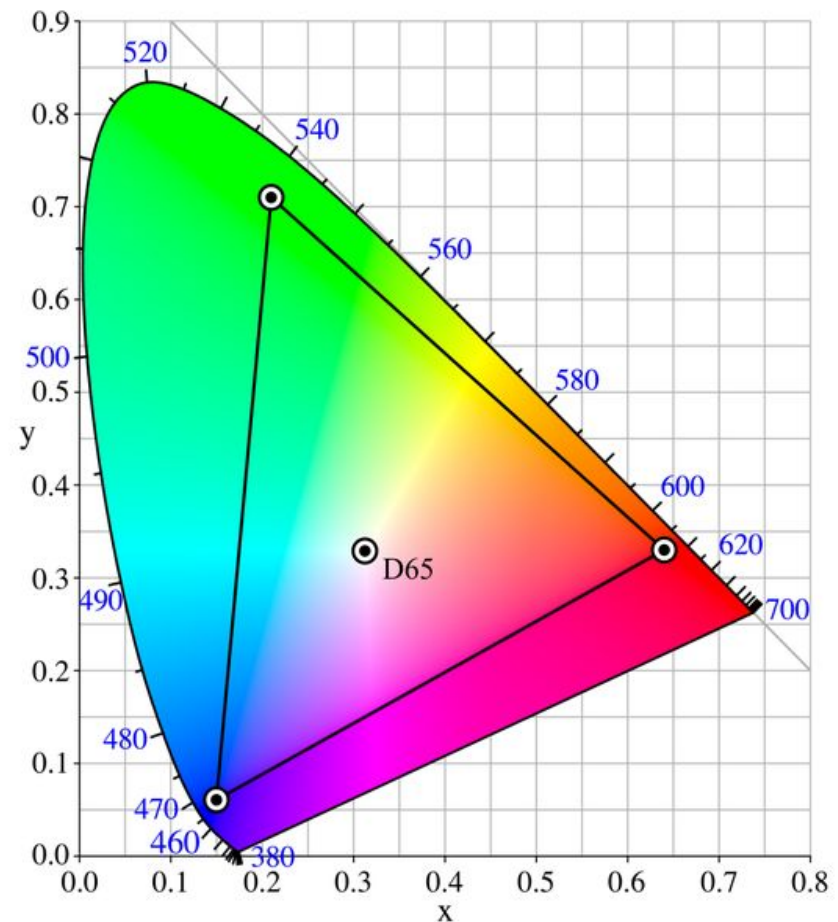
Пространство sRGB

- Создано Microsoft, Hewlett-Packard
- Стандартизировано в 1996г.
- На данный момент широко используется:
 - Мониторы
 - Фотоаппараты
- Если для изображения не указано цветовое пространство, можно считать, что это sRGB
- Недостатки: исходные цвета сильно внутри видимой человеком области



Пространство Adobe RGB

- Разработано Adobe в 1998
- Цель – иметь возможность работать на мониторе с большинством цветов, доступных в модели CMYK на принтерах
- Более широкий диапазон передаваемых цветов (gamut)
- Проблема: 8 бит на цвет может не хватать



Отображения передаваемых диапазонов цветowych пространств

- Цветовые пространства имеют разные диапазоны передаваемых цветов (gamut)
- Например, не все цвета изображения с профилем Adobe RGB могут быть показаны на мониторе с фосфорами sRGB
- Нужно преобразовать исходное изображение таким образом, чтобы все его цвета попадали в передаваемый диапазон устройства
- Процесс называется отображением передаваемого диапазона (gamut mapping)
- Два типа непередаваемых цветов
 - Невозможна коррекция тональности ($I < 0$)
 - Возможна коррекция тональности, но невозможна коррекция интенсивности ($I > 1$)

Отображения передаваемых диапазонов цветовых пространств:

ПОДХОДЫ

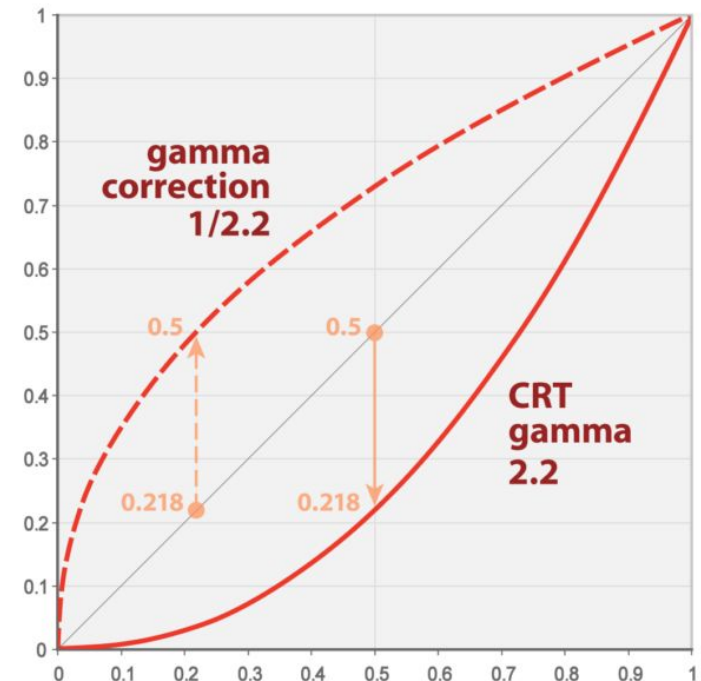
- Применяется после применения преобразования в целевое пространство
- Локальные и глобальные подходы
- Примеры локальных
 - Масштабирование цвета пикселя до попадания в диапазон
 - Отсечение по $[0, 1]$
 - ...
- Пример глобального подхода:
 - Поиск наименьших и наибольших компонент цвета и масштабирование цветов всего изображения для попадания в диапазон

CRT: Гамма-коррекция

- На CRT-мониторах яркость фосфора зависит от напряжения нелинейно

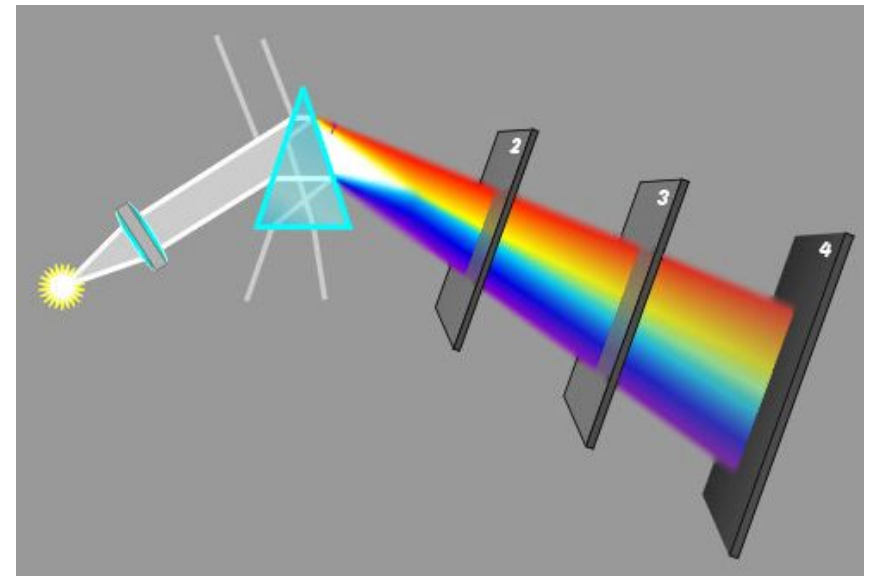
$$I = k(V - V_{co})^\gamma$$

- Перед передачей на монитор всегда применяется обратное преобразование
 - На LCD – приходится эмулировать!



Ограничения трехцветных пространств

- Нельзя использовать при физических вычислениях, включающих явление дифракции, интерференции
 - Радуга
- Аддитивные пространства имеют достаточно узкий диапазон передачи цвета



Итоги

- Все видимые цвета могут быть представлены в виде трех чисел
- Основное цветовое пространство CIE XYZ
 - Построено на основе экспериментов
- Инструмент – диаграмма тональности
 - Часто используется для анализа передаваемых диапазонов различных пространств
- Пространство L^*a^*b – однородность
- Мониторы. Цветовая модель и цветовые пространства RGB
- Точка белого, цветовая температура, гамма-коррекция.