

Цвет глазами человека и компьютера

Цвет фона: #FFA500



Андрей Гейн

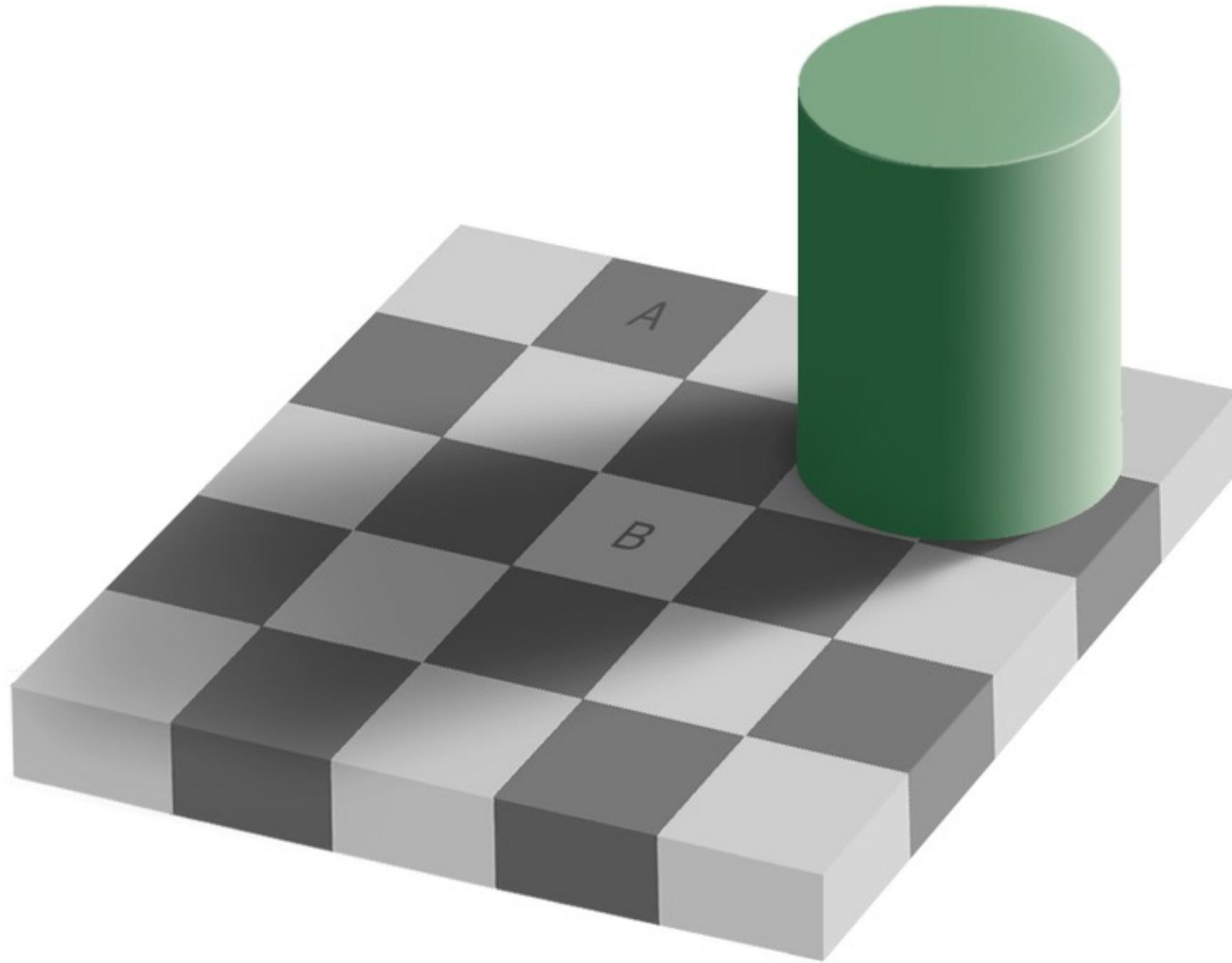
Дисклеймер

- <https://jamie-wong.com/post/color/>
- <https://medium.com/hipster-color-science/a-beginners-guide-to-colorimetry-401f1830b65a>
- <https://youtu.be/SUCVj3qBmNQ>
- <https://discovereye.org/way-eyes-work/>
- ...



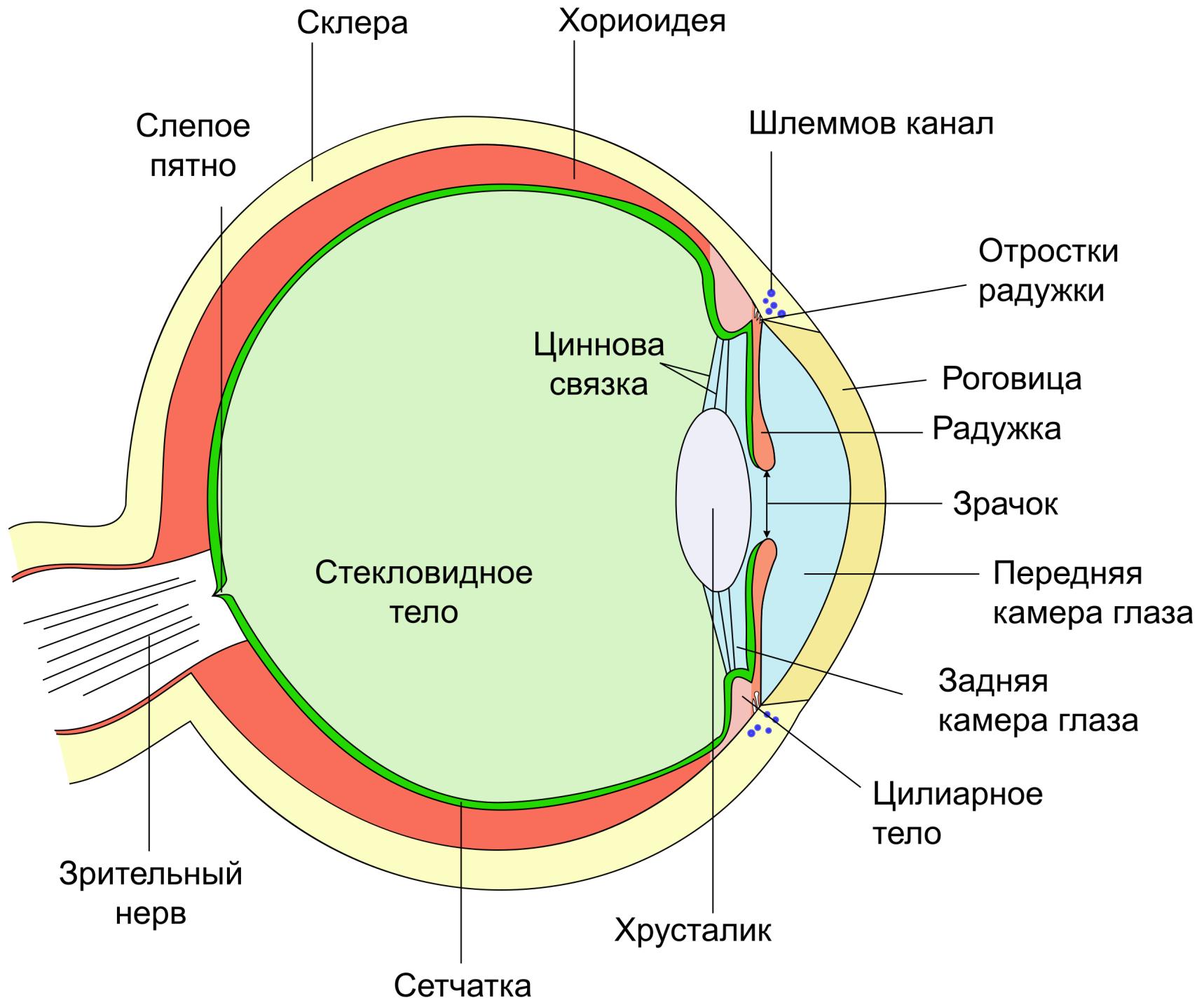






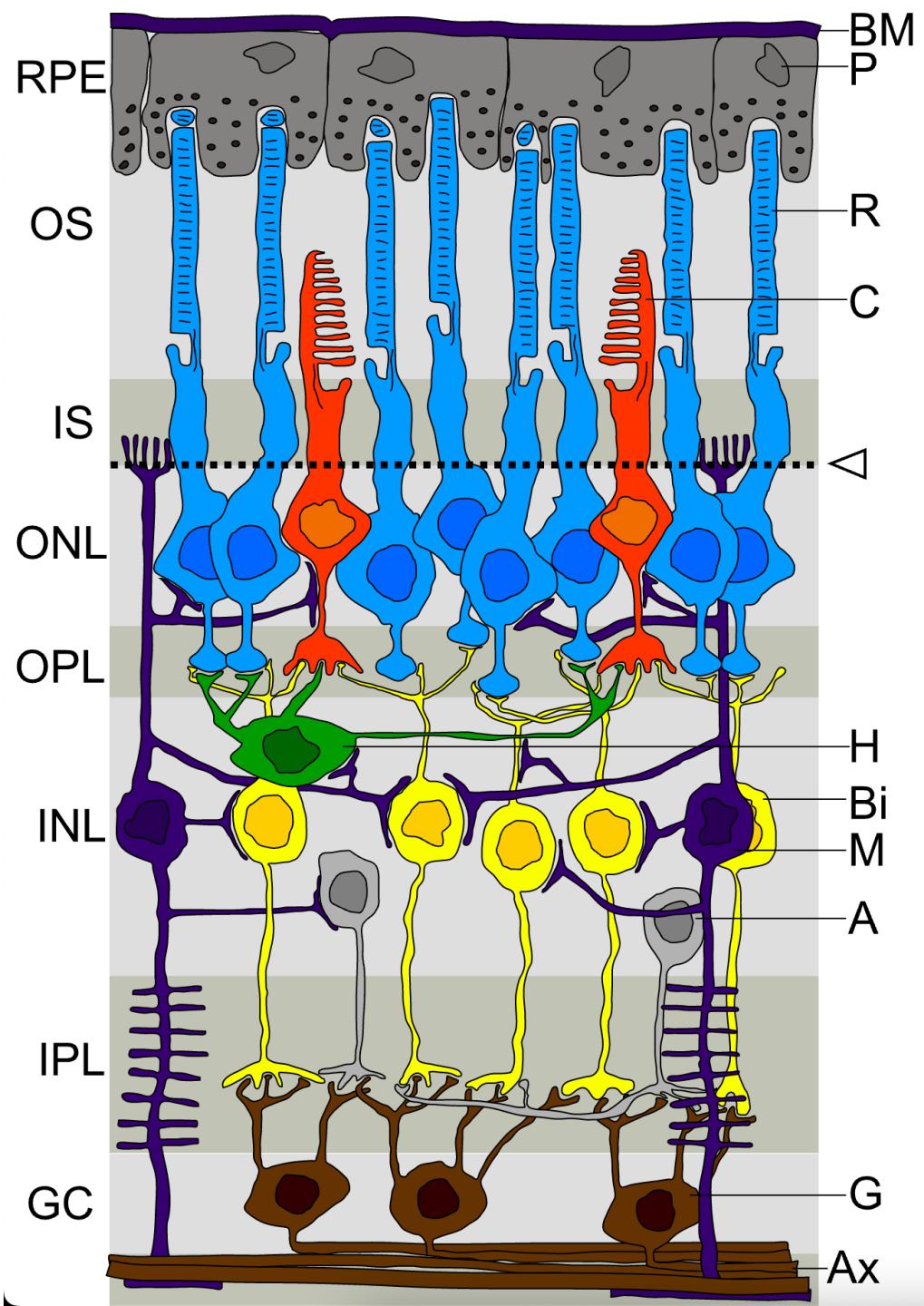
Ретина







Сетчатка



Сложнааа

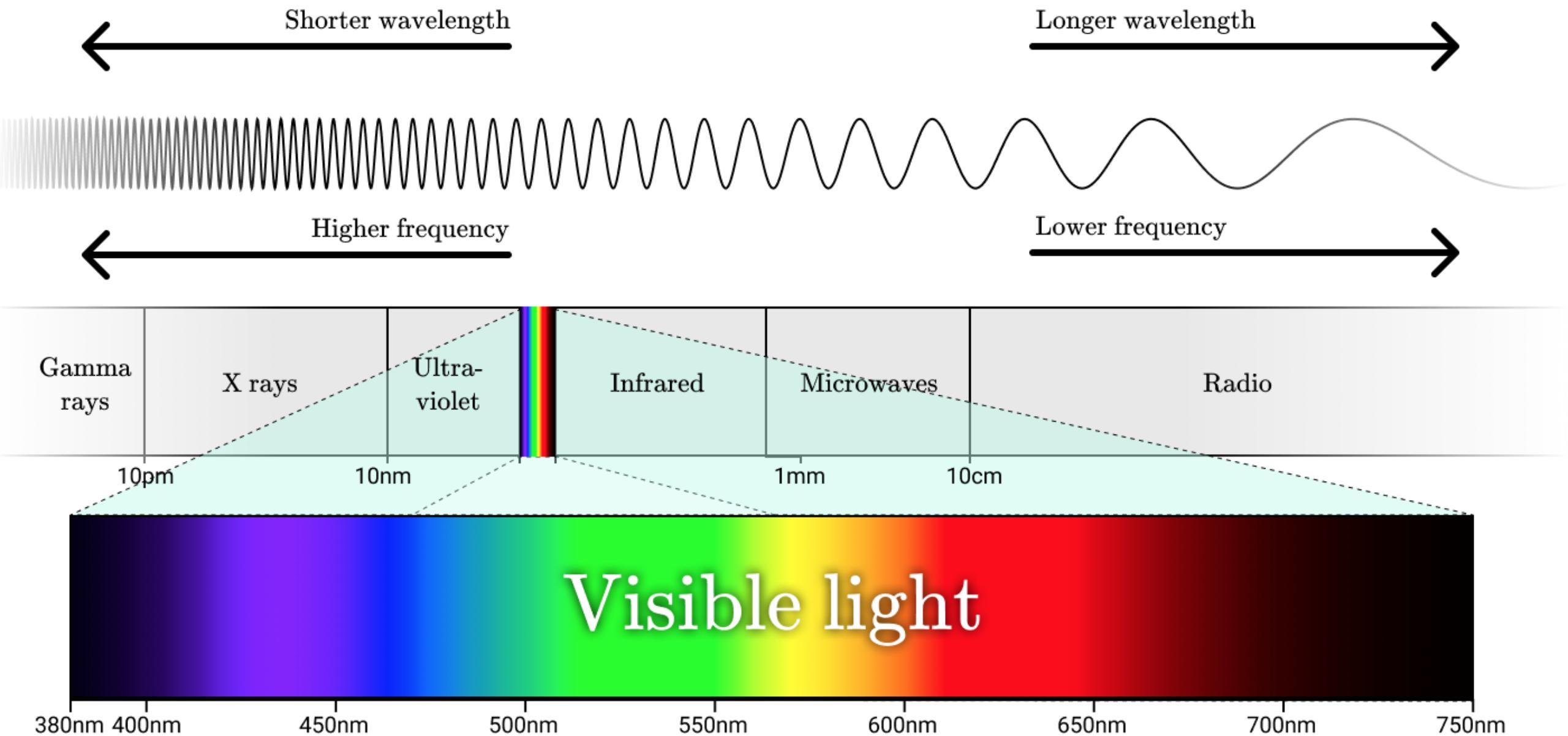
- Да, сложно!
- А ещё и по-разному у разных животных

Фоторецепторы – палочки и колбочки



Фоторецепторы — палочки и колбочки

- 110–125 млн палочек и 4–7 млн колбочек
- Нам больше интересны колбочки
- Размеры колбочек: длина около 50 мкм, диаметр — от 1 до 4 мкм.
- Фоторецепторы улавливают свет. Что это значит?



Фотоны

- «Фотоны — фундаментальные, безразмерные частицы, не имеющие заряда и двигающиеся со скоростью света. Переносят электромагнитное взаимодействие и являются электромагнитной волной»
- Фотонов оооооочень много — примерно в 20 000 000 000 раз больше, чем протонов и нейтронов.
- Энергия фотона пропорциональна частоте соответствующей ему волны



Какое КПД лампы накаливания?

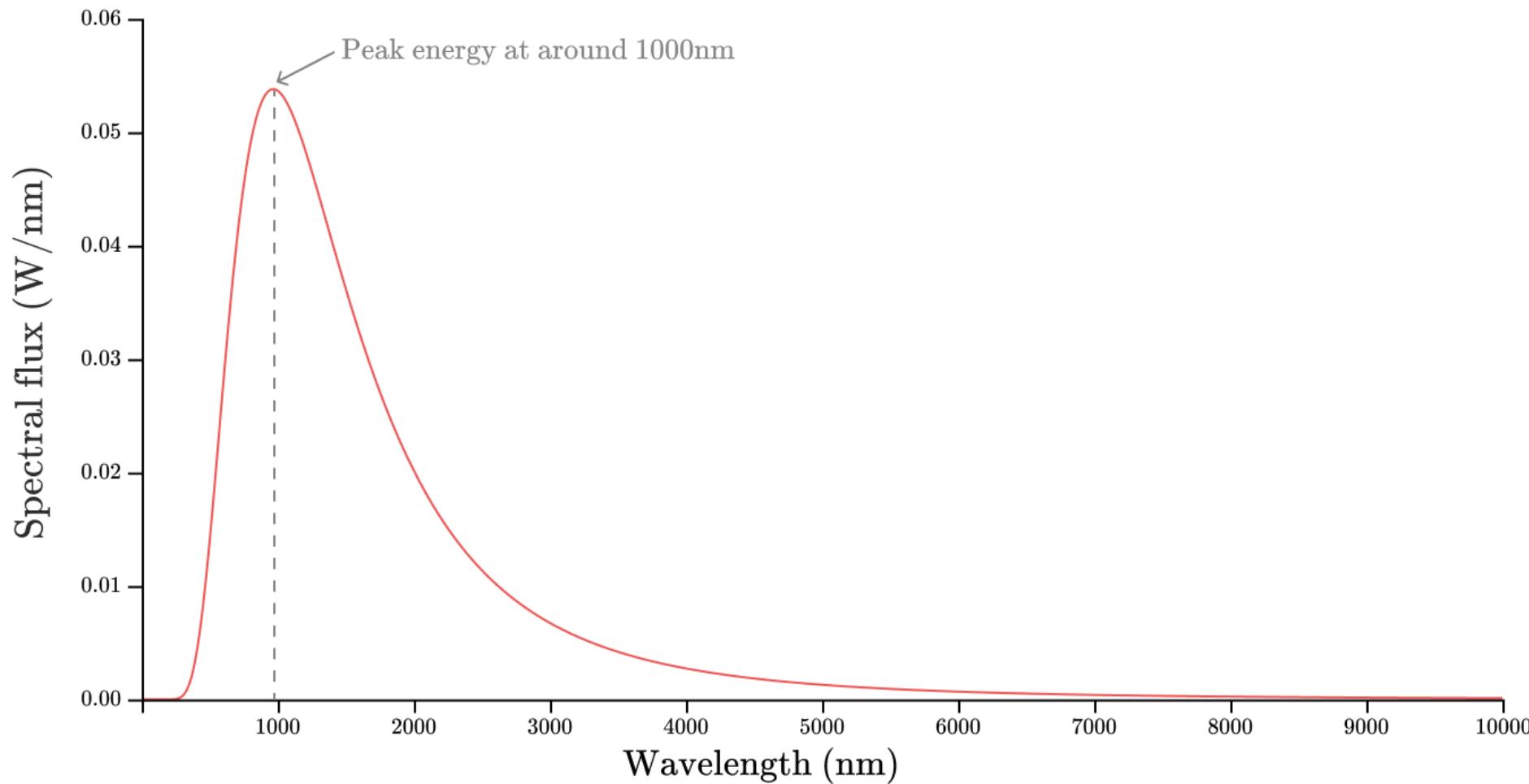


Мощность, энергия, ватты, ...

- Мощность подаваемого тока 100 Вт, примерно 80–100 излучается
- Излучаются волны разной длины!

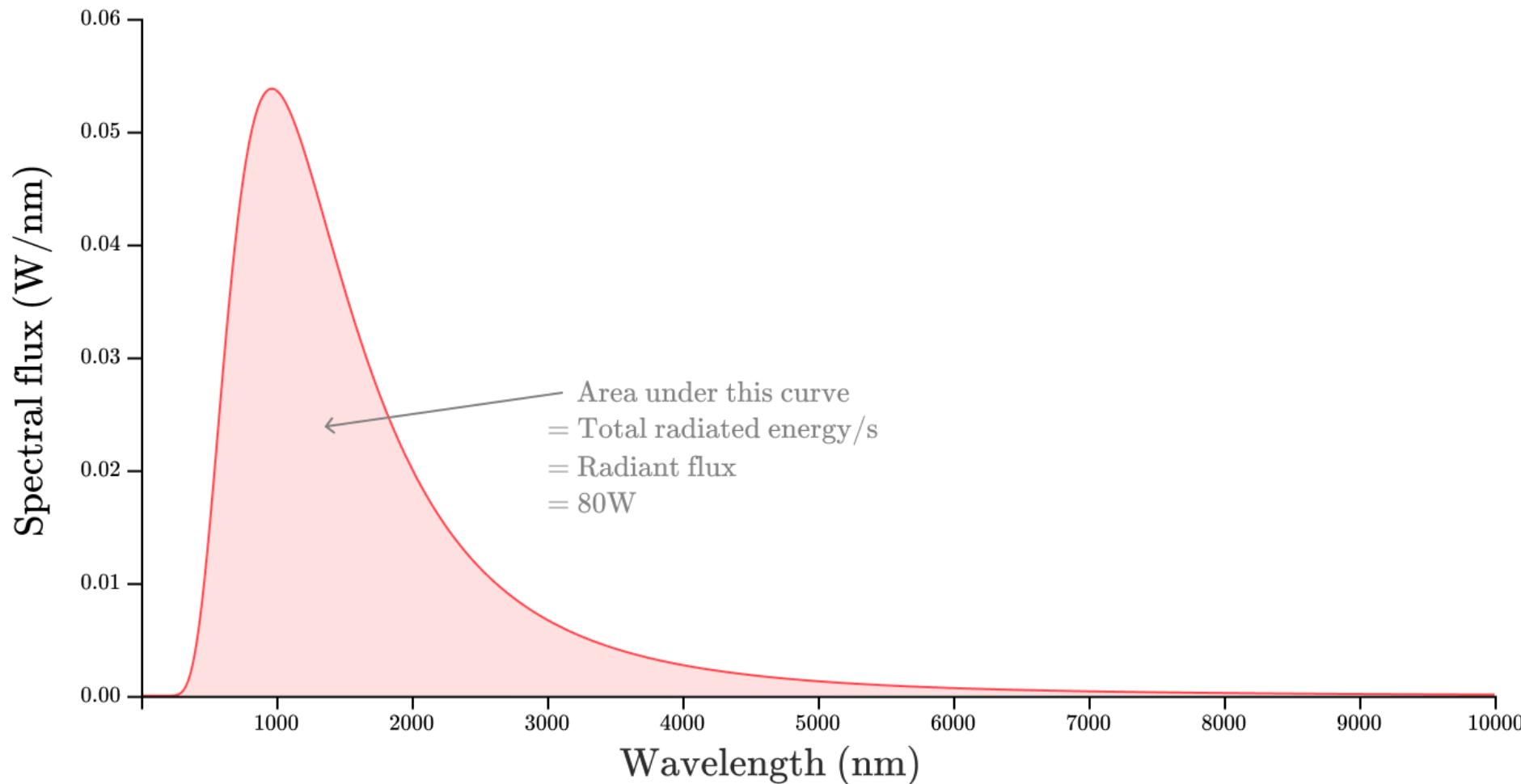
Спектральная плотность излучения

Radiated power by wavelength

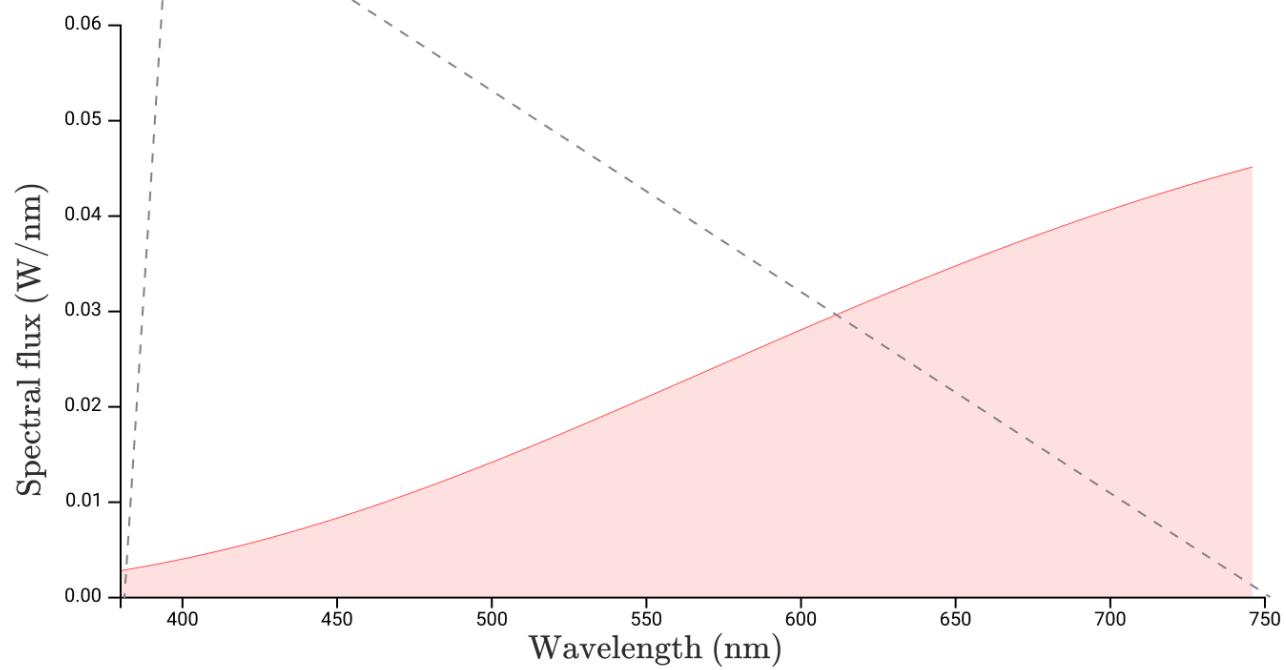
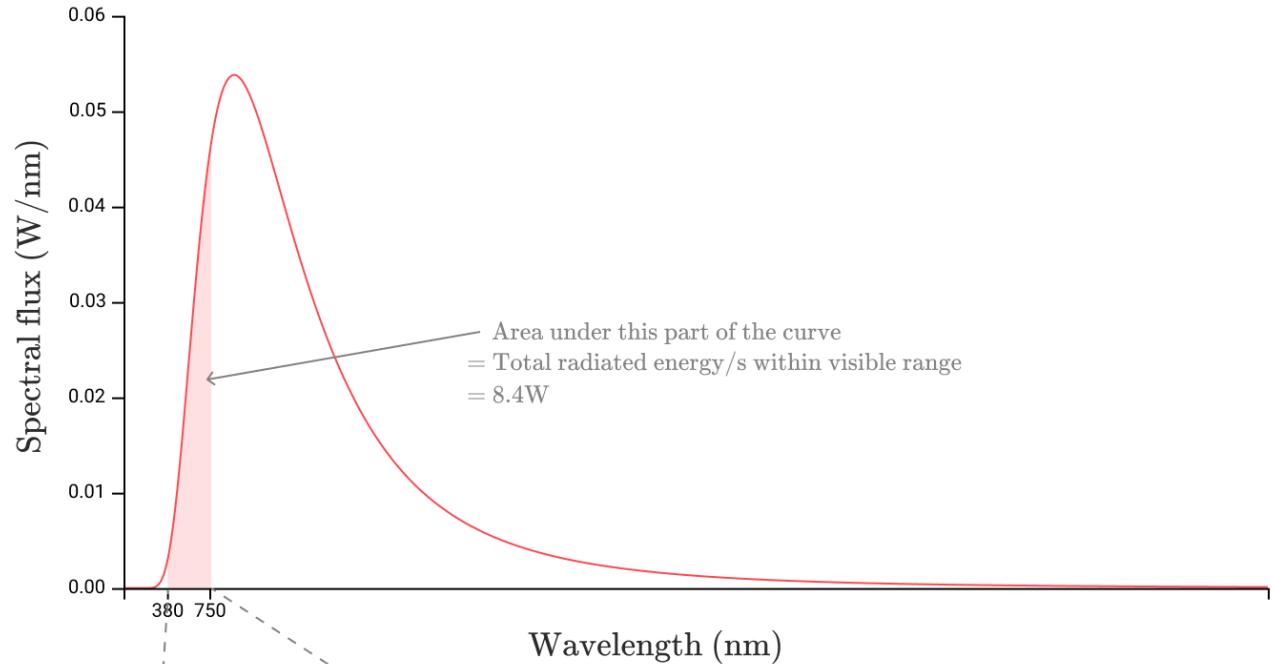


Спектральная плотность излучения

Radiated power by wavelength

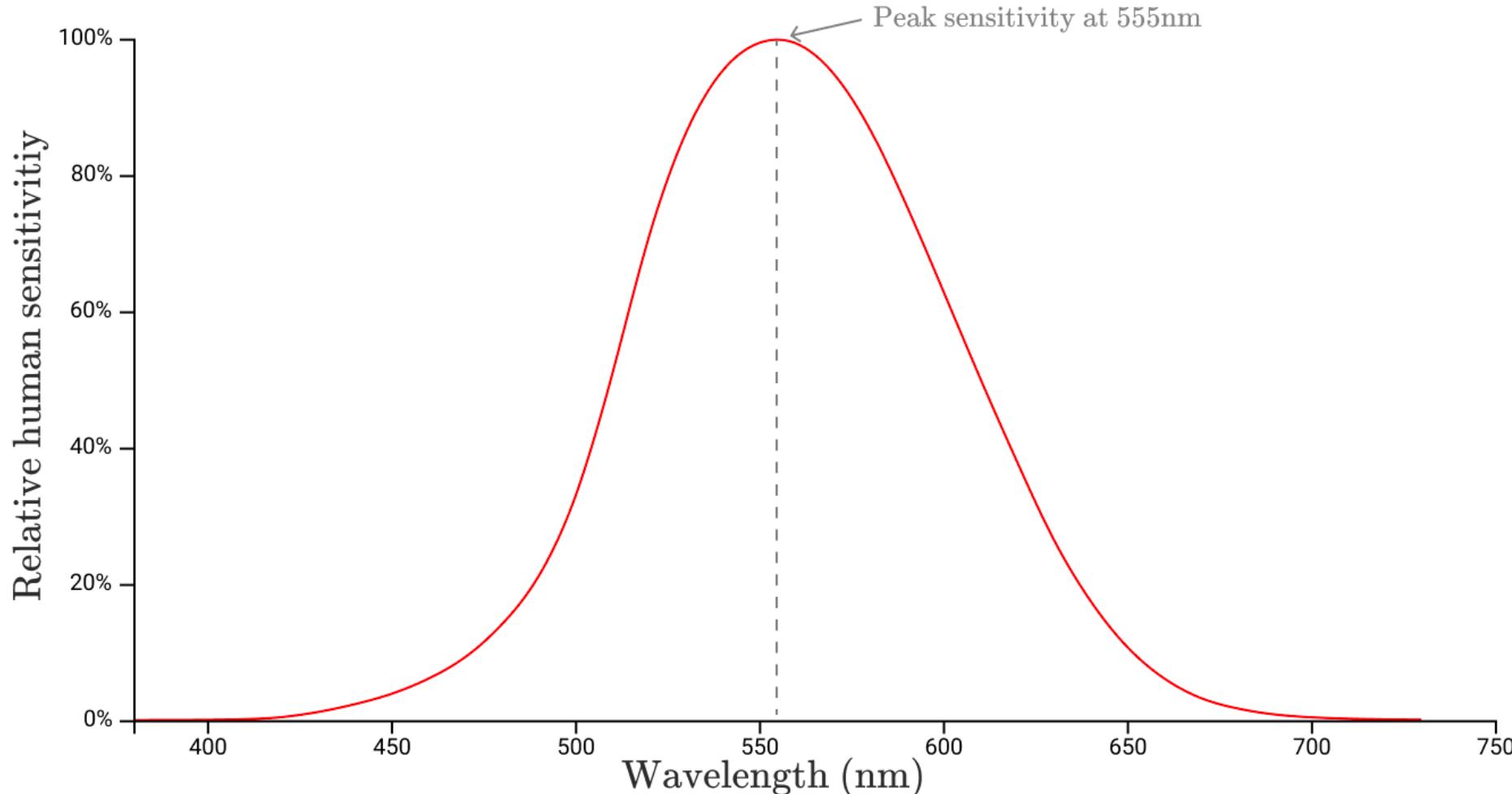


Radiated power by wavelength



Относительная спектральная световая эффективность монохроматического излучения

Relative human sensitivity by wavelength

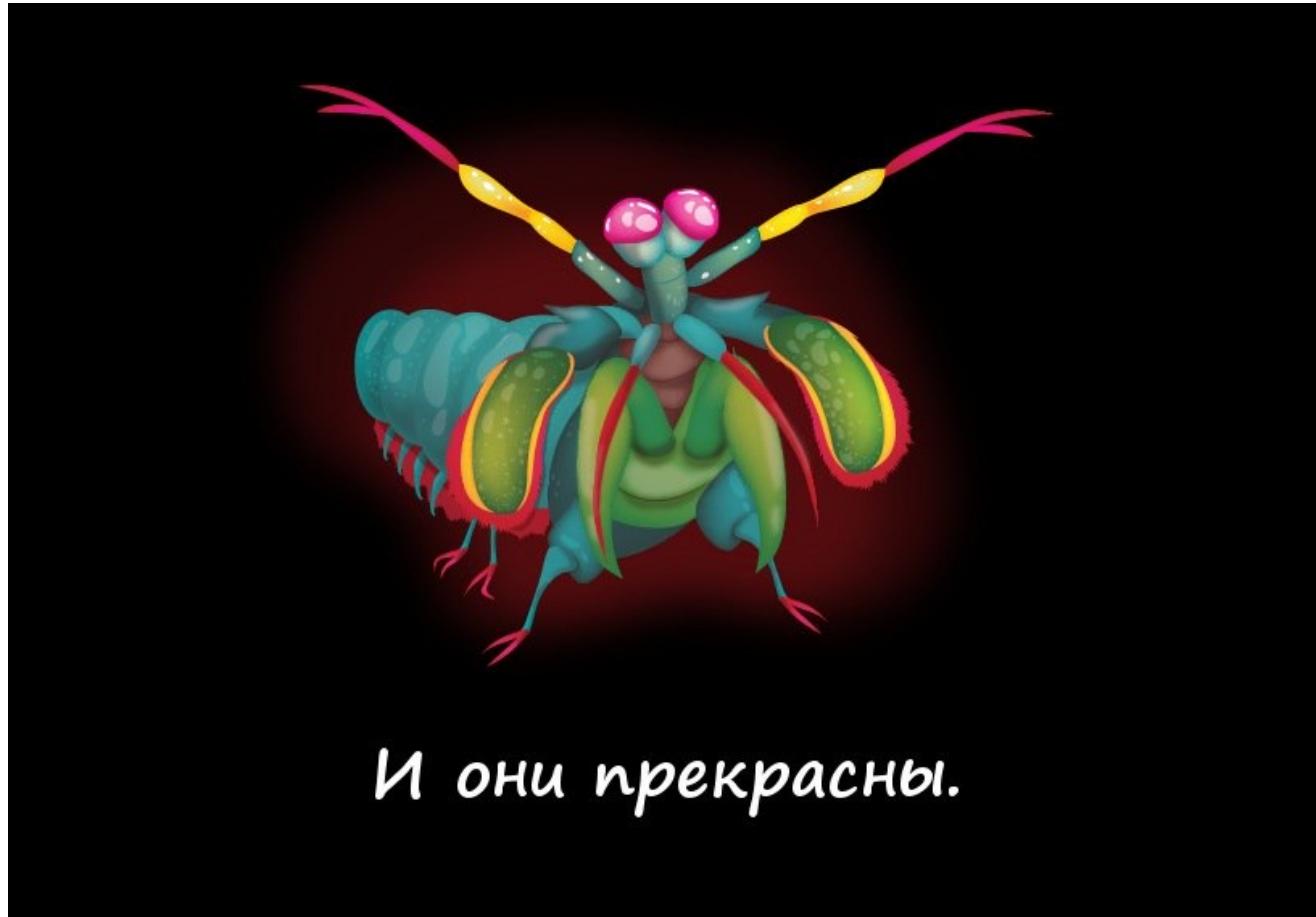


Видимые диапазоны

- Люди: 380–750 нм
- Пчёлы: 300–550 нм
- Некоторые птицы: 300–700 нм
- Опоссумы: нет цветного зрения



Рак-богомол



И они прекрасны.

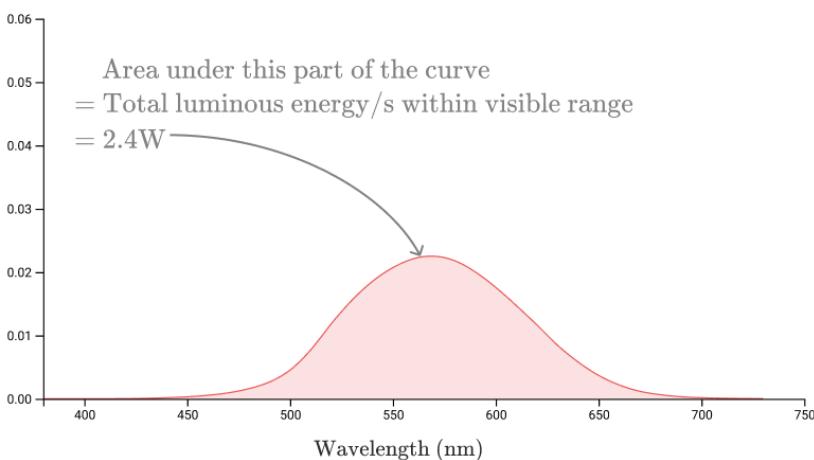
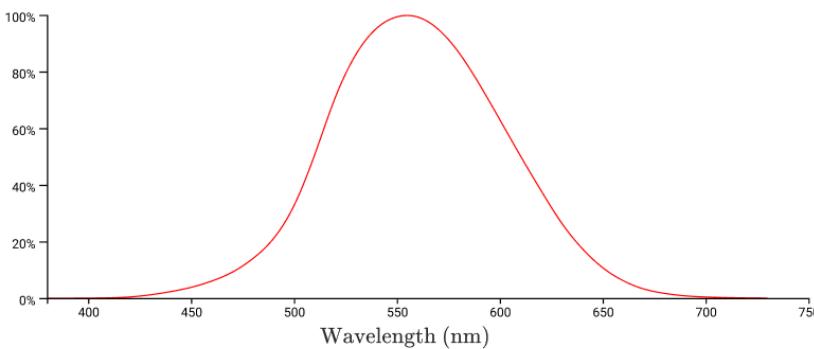
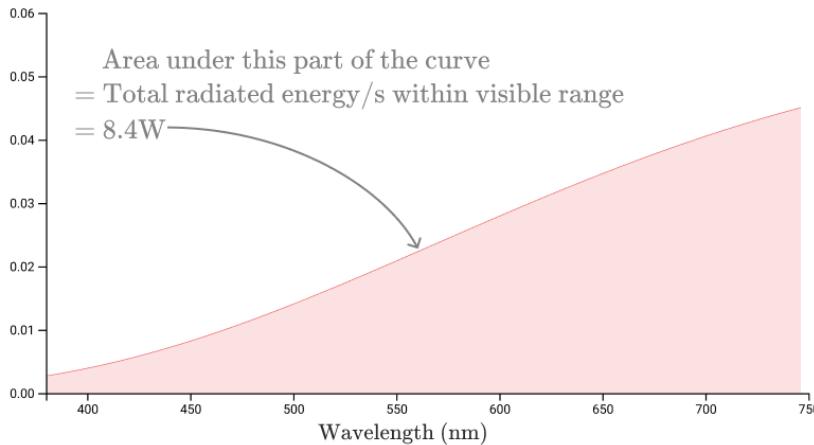
Spectral flux
(W/nm)

×

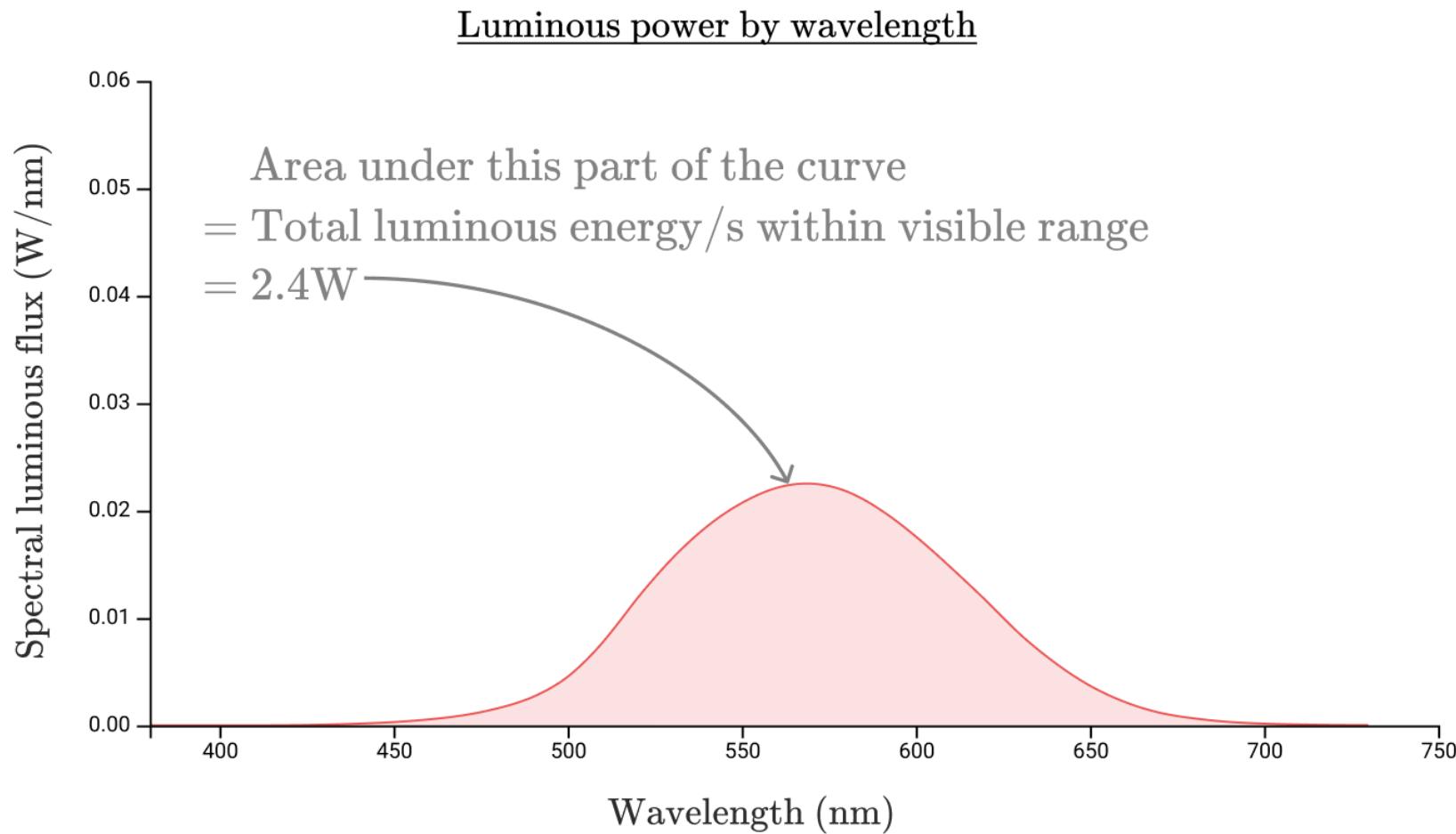
Relative human
sensitivity

—

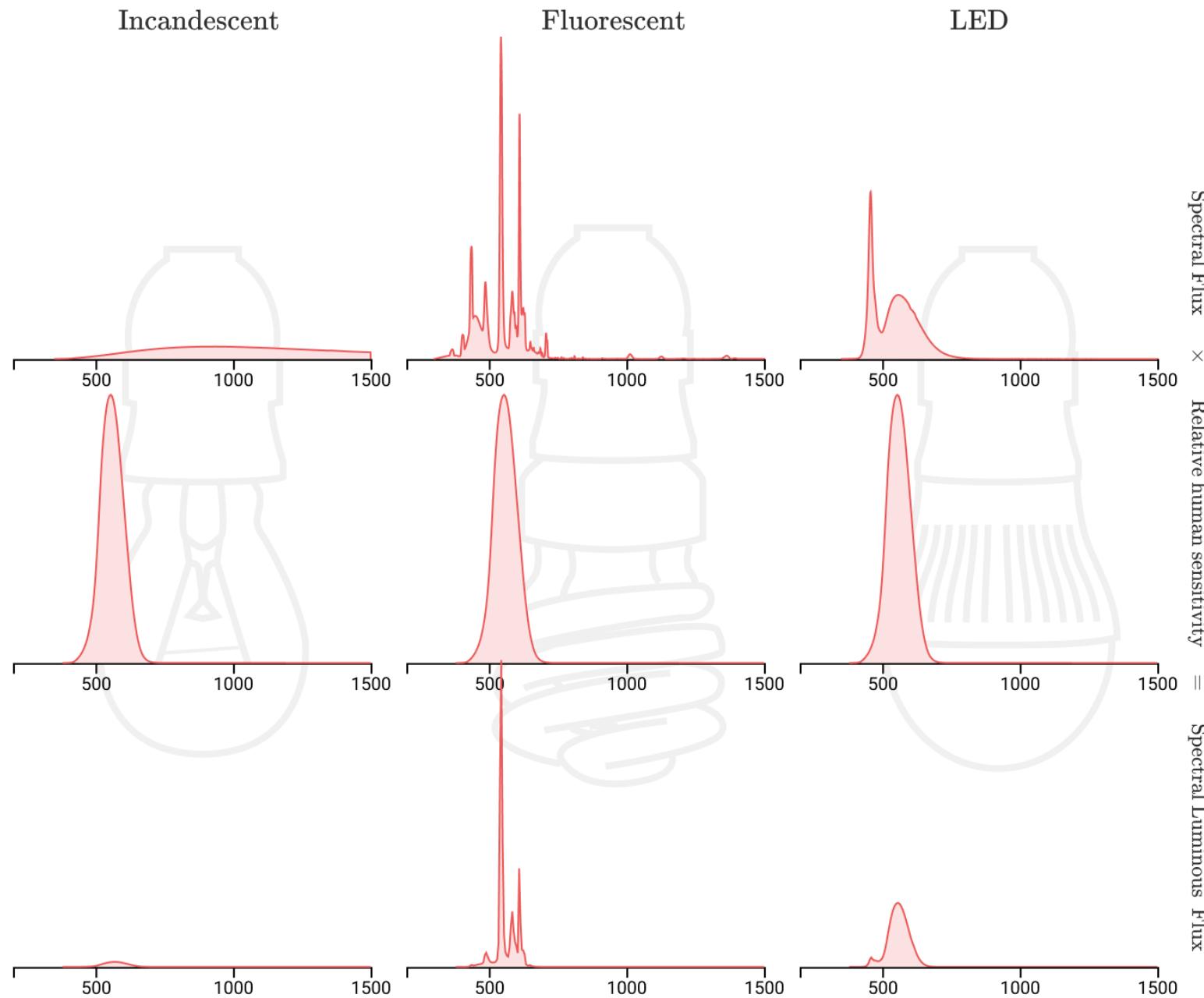
Spectral
luminous
flux
(W/nm)



Спектральная плотность светового потока



Emission spectra for light sources with equal radiant flux



Световой поток в



Световой поток в люменах



$$683 \cdot 2.4 \text{ Вт} \approx 1600 \text{ лм}$$

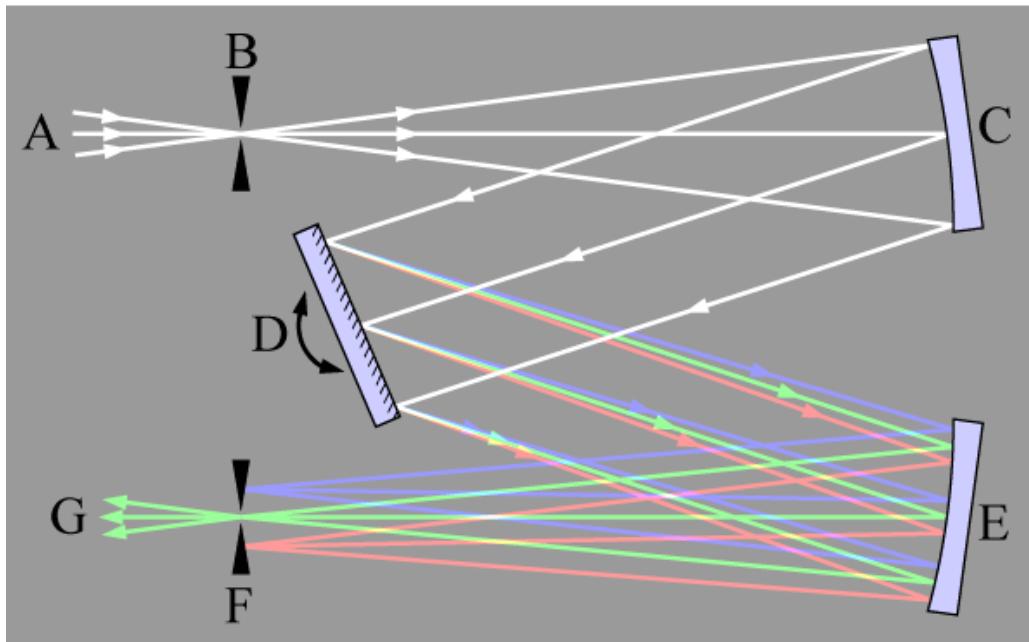
Цвет





Цвет

- Оказывается, не любой цвет есть на спектре
- Монохроматический цвет — в идеале волны одной частоты
- Для получения используется монохроматор

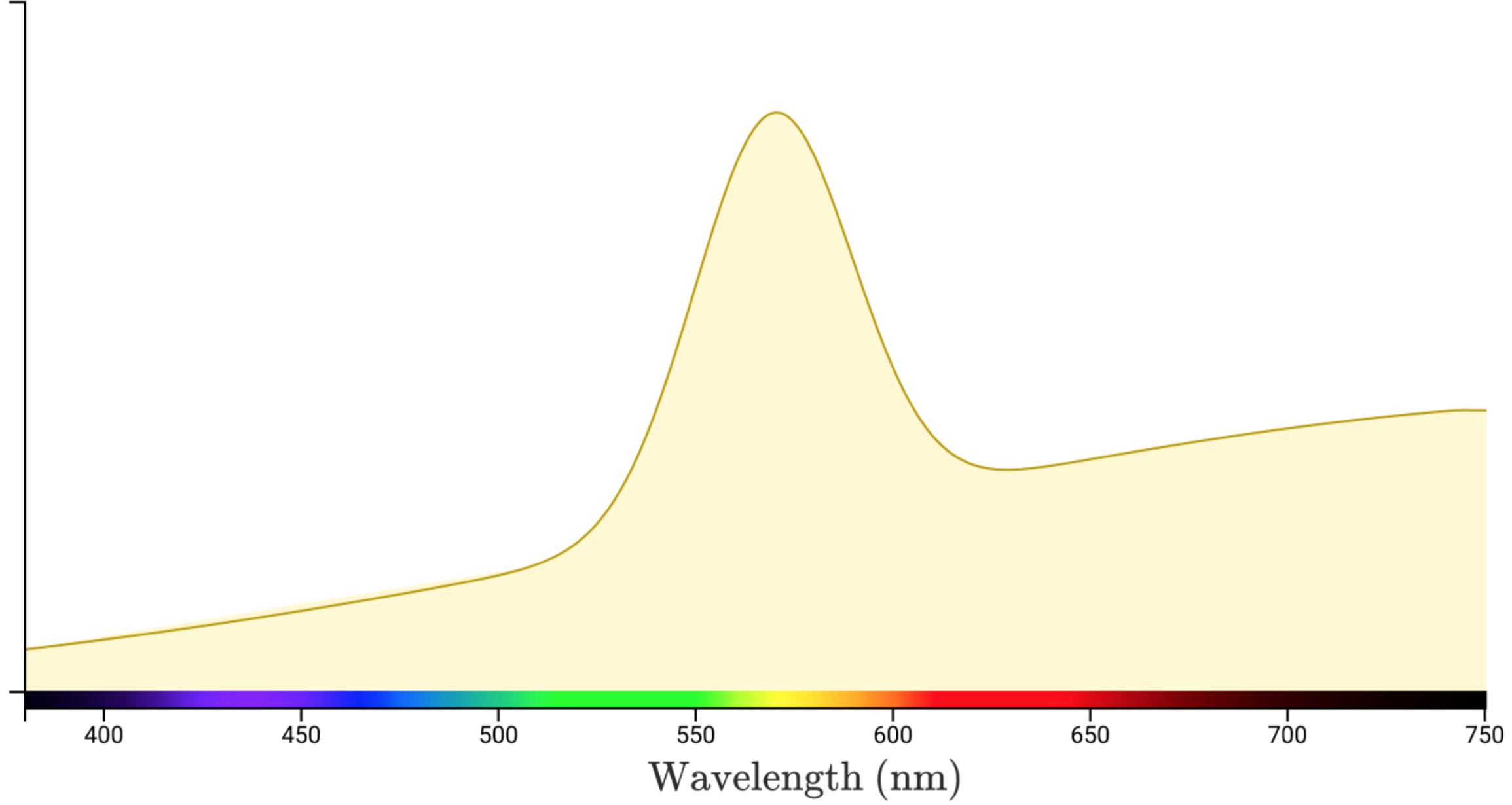


Цвет

- Оказывается, не любой цвет есть на спектре
- Монохроматический цвет — в идеале волны одной частоты
- Для получения используется монохроматор
- Для простоты давайте смотреть прямо на источник света

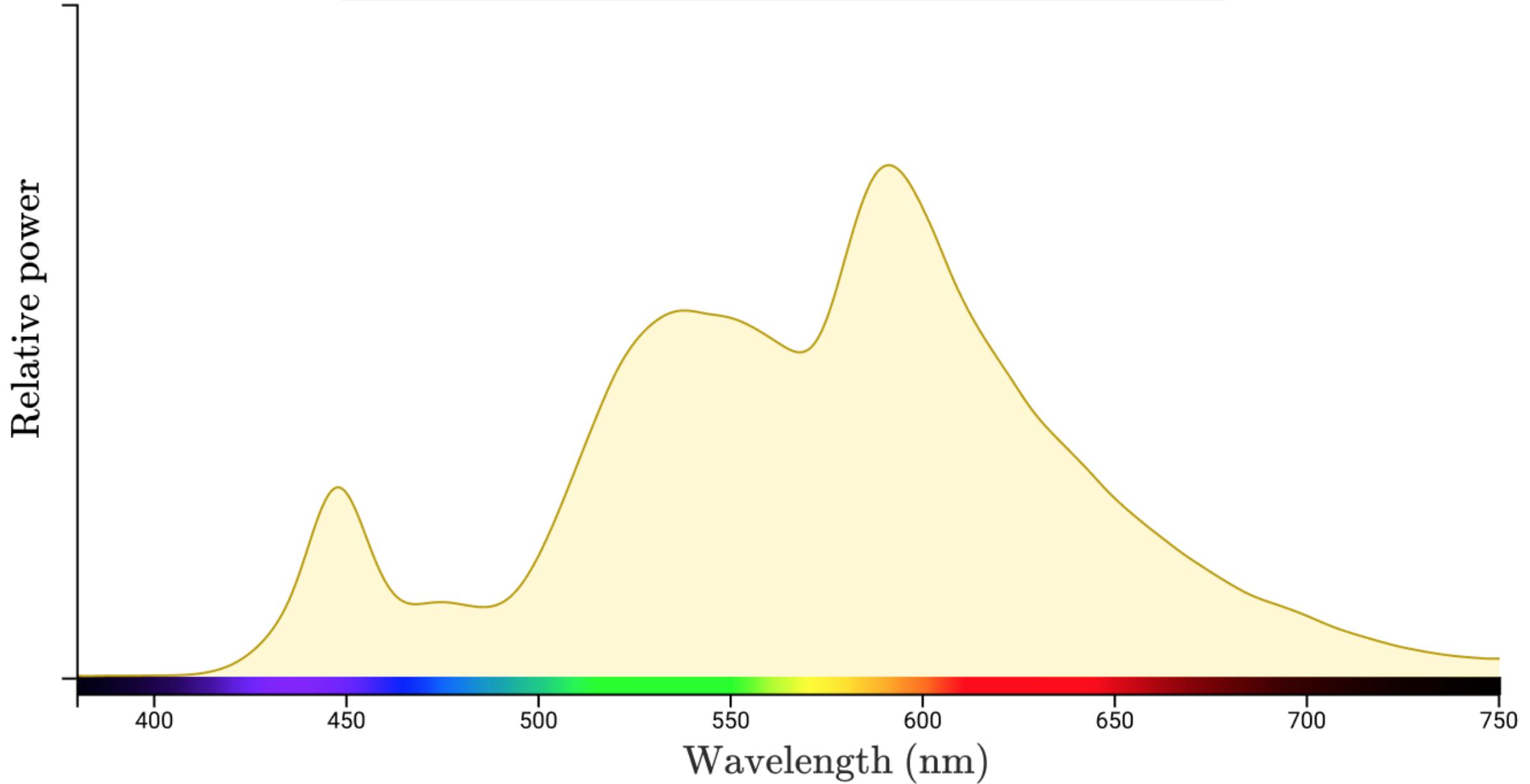


Relative power

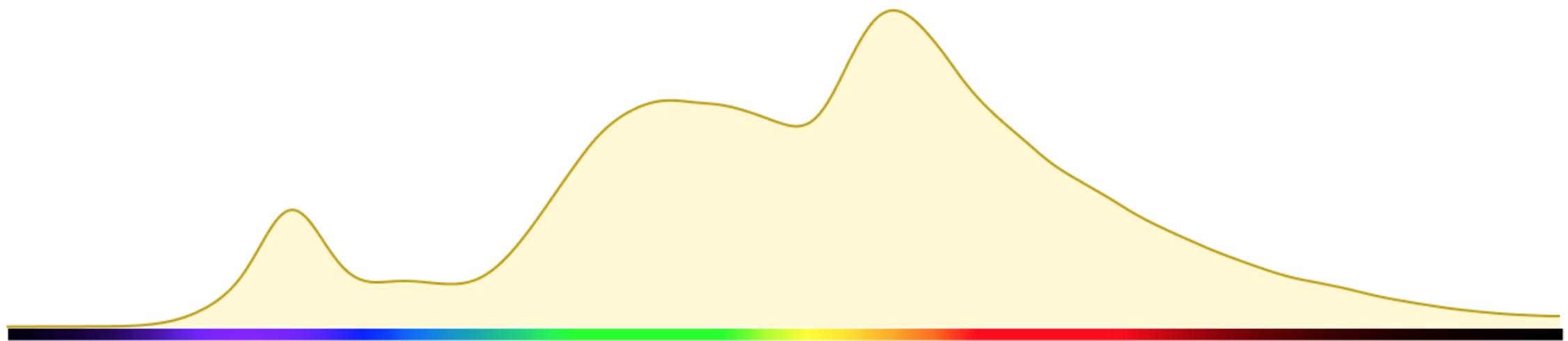
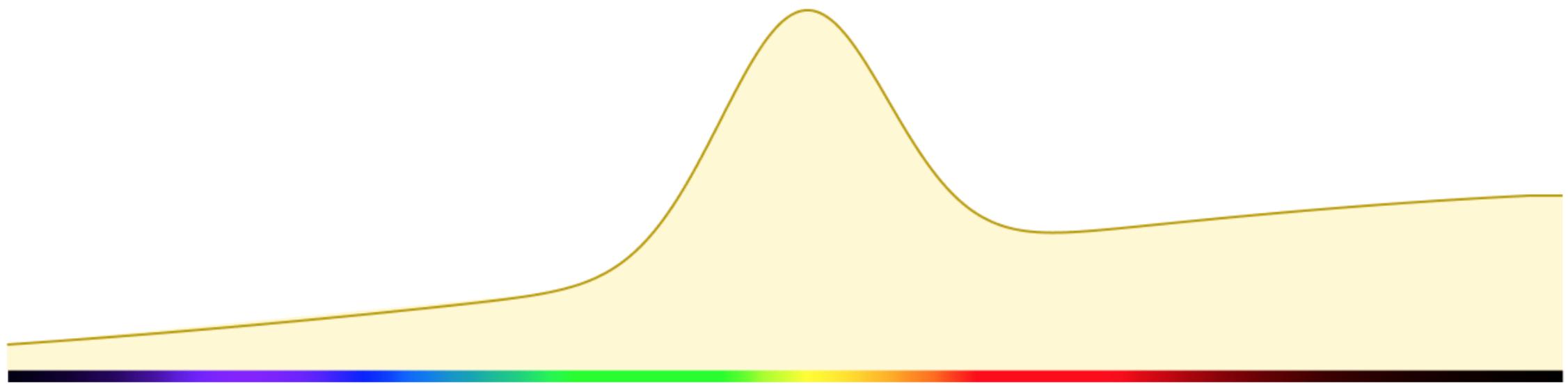




Emission spectrum of a pixel of a lemon on a screen



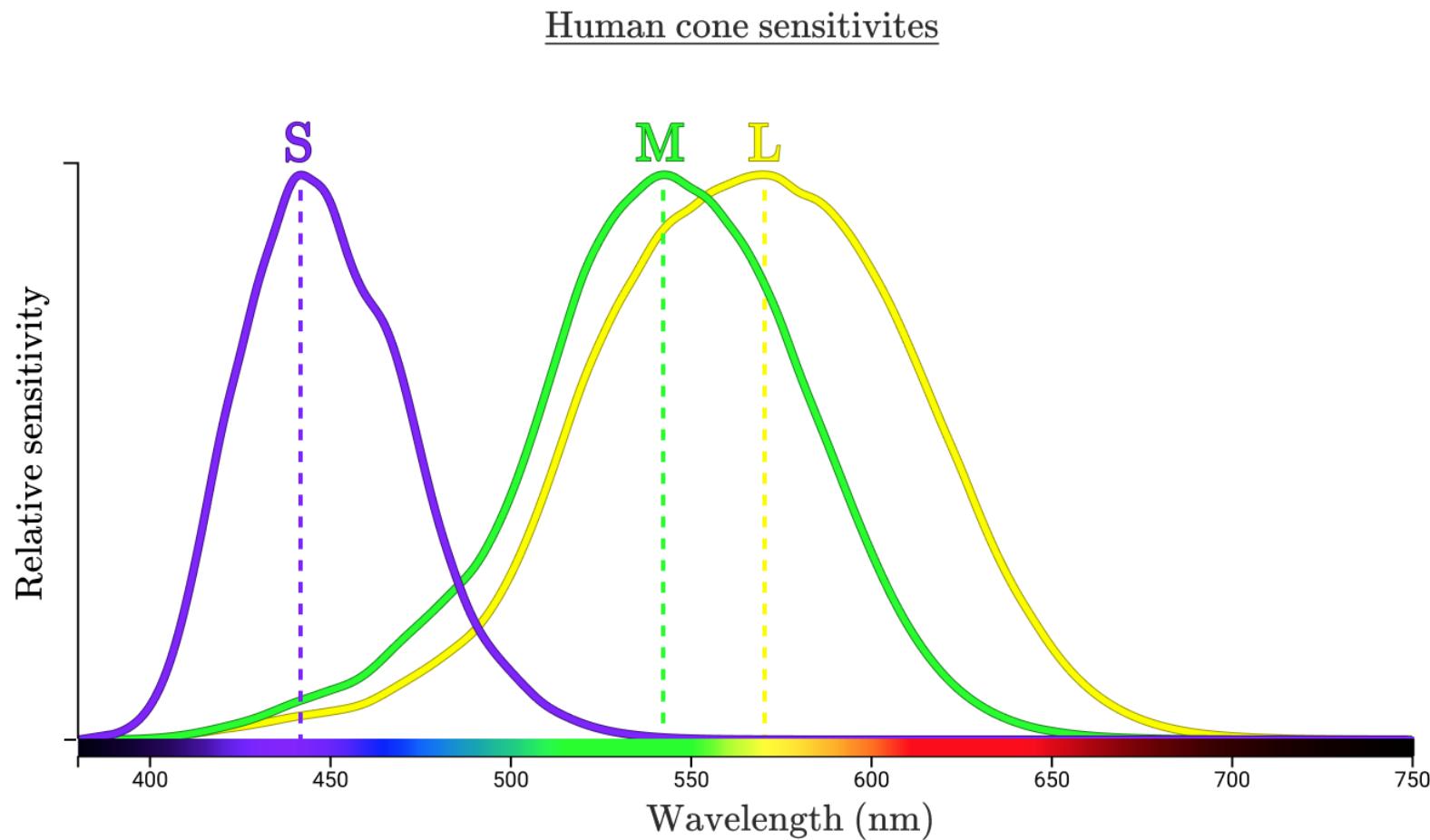
Two metamers of a specific yellow



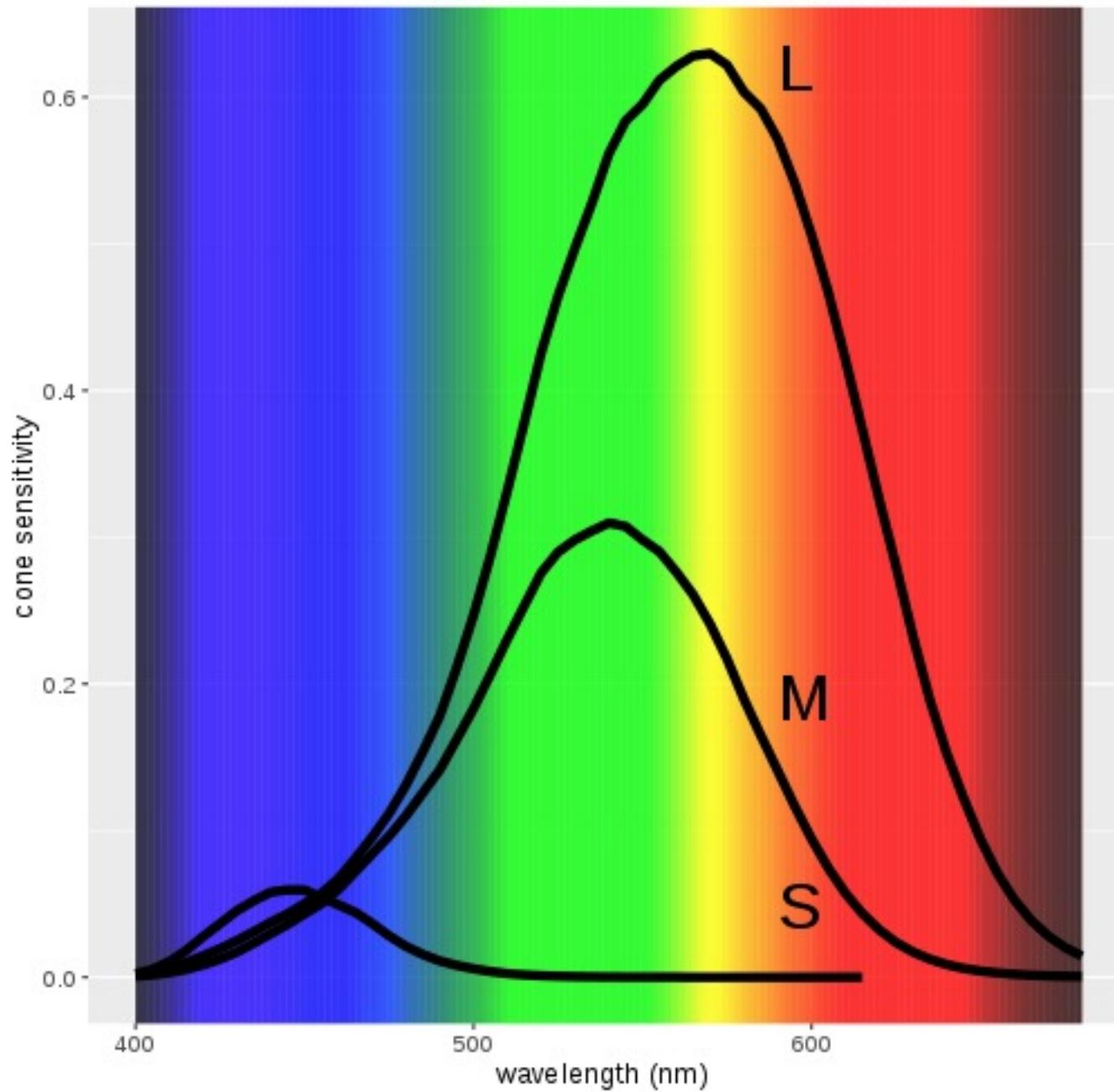
Вопросы

- Все ли люди увидят жёлтые метамеры одинаковыми?
- Все ли живые существа увидят их одинаковыми?

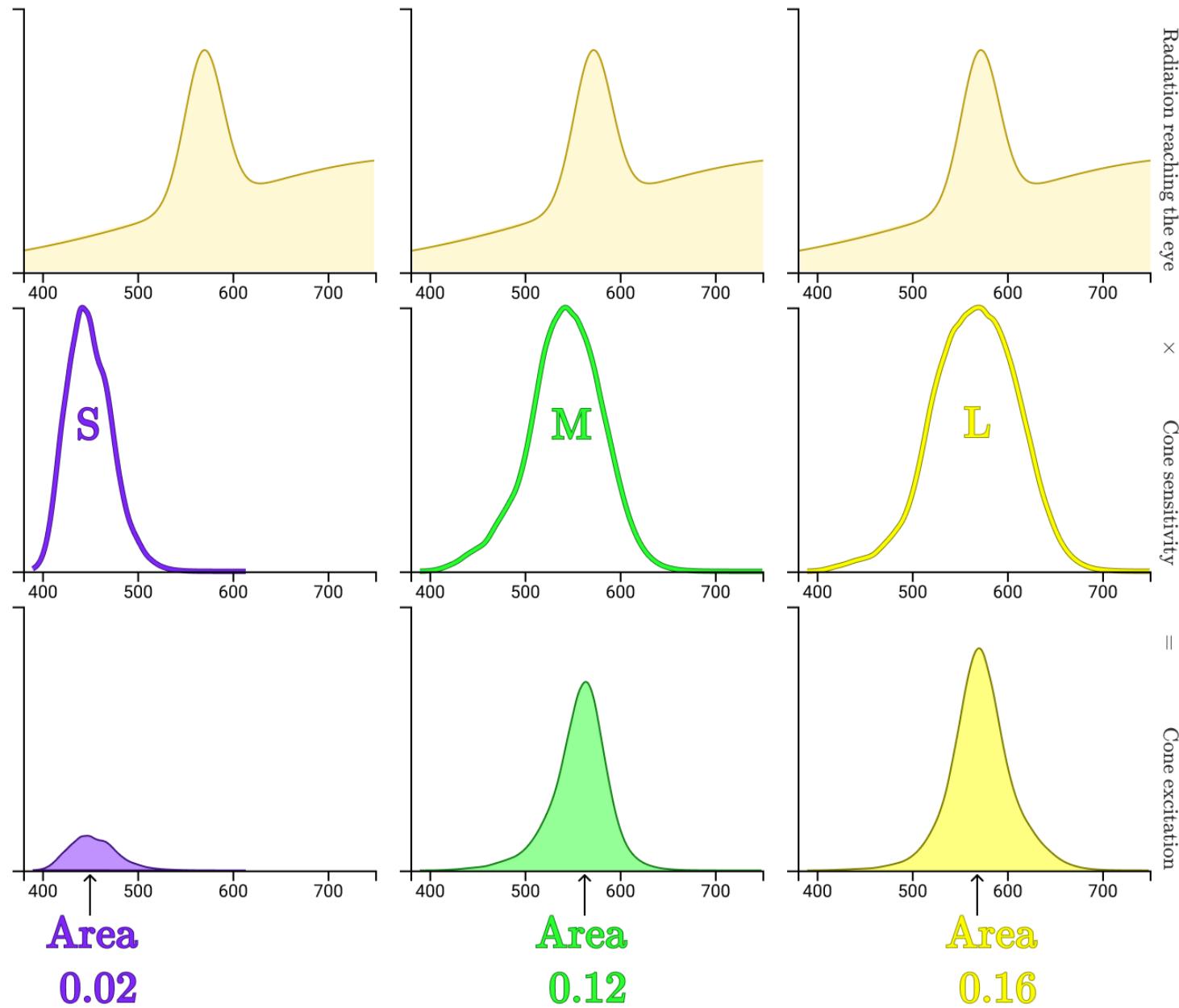
Вспоминаем про колбочки



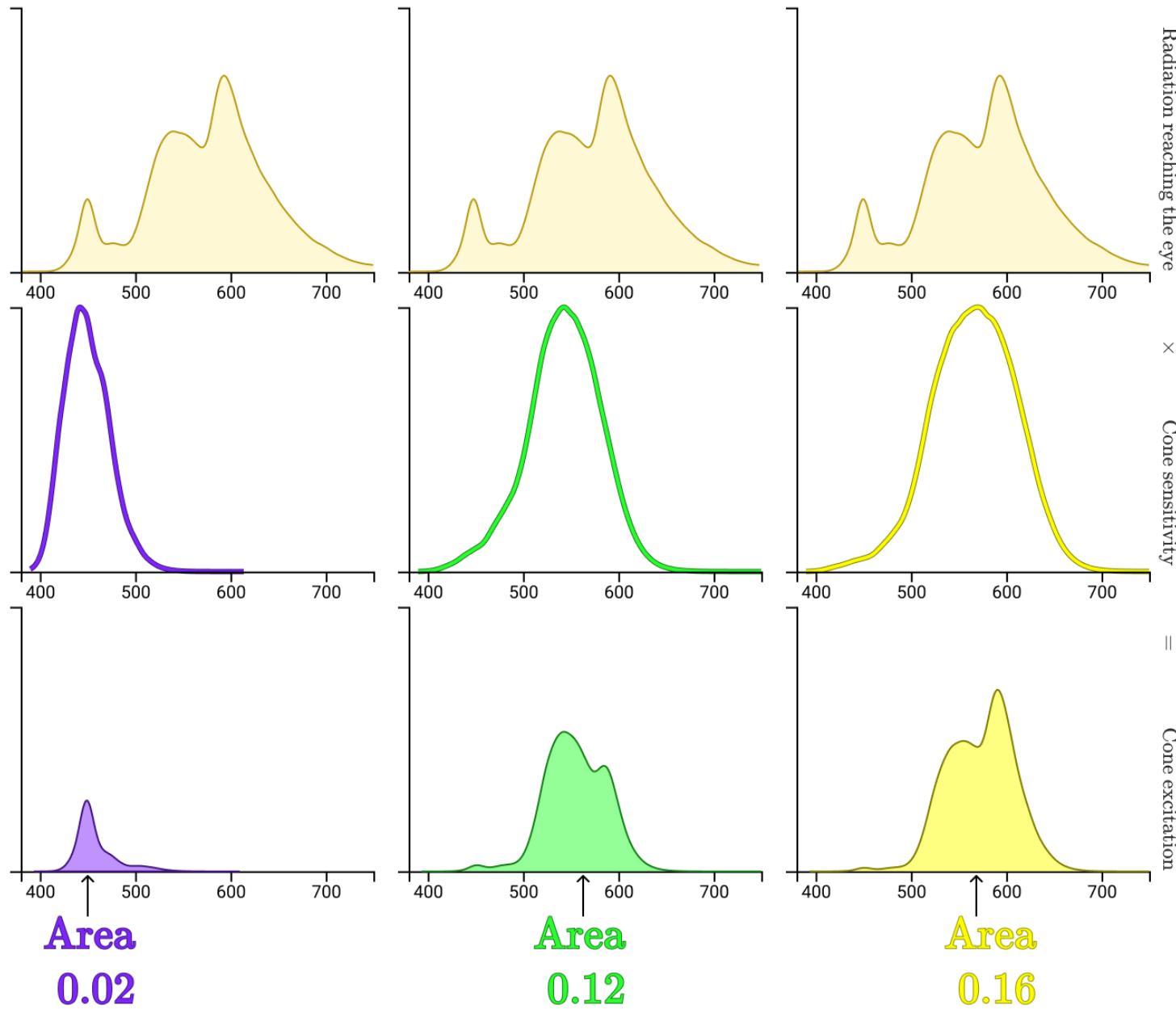
Population Weighted Cone Spectral Sensitivities



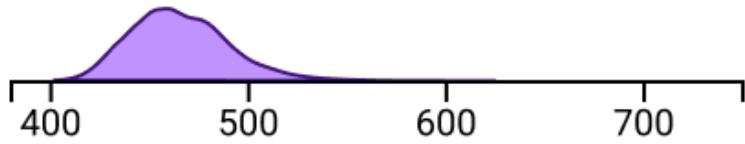
Cone excitation by a point on a lemon



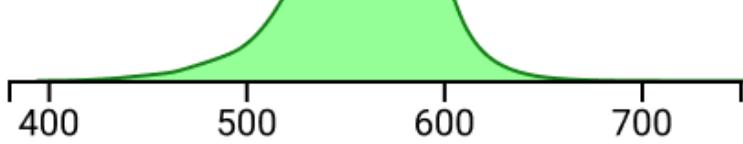
Cone excitation by a pixel of a lemon on a screen



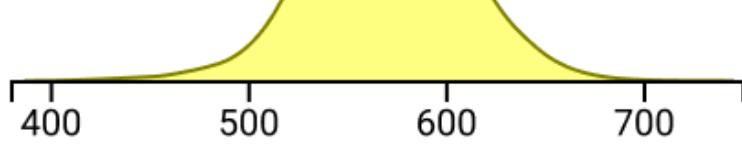
Cone stimulation of two metamers



S



M



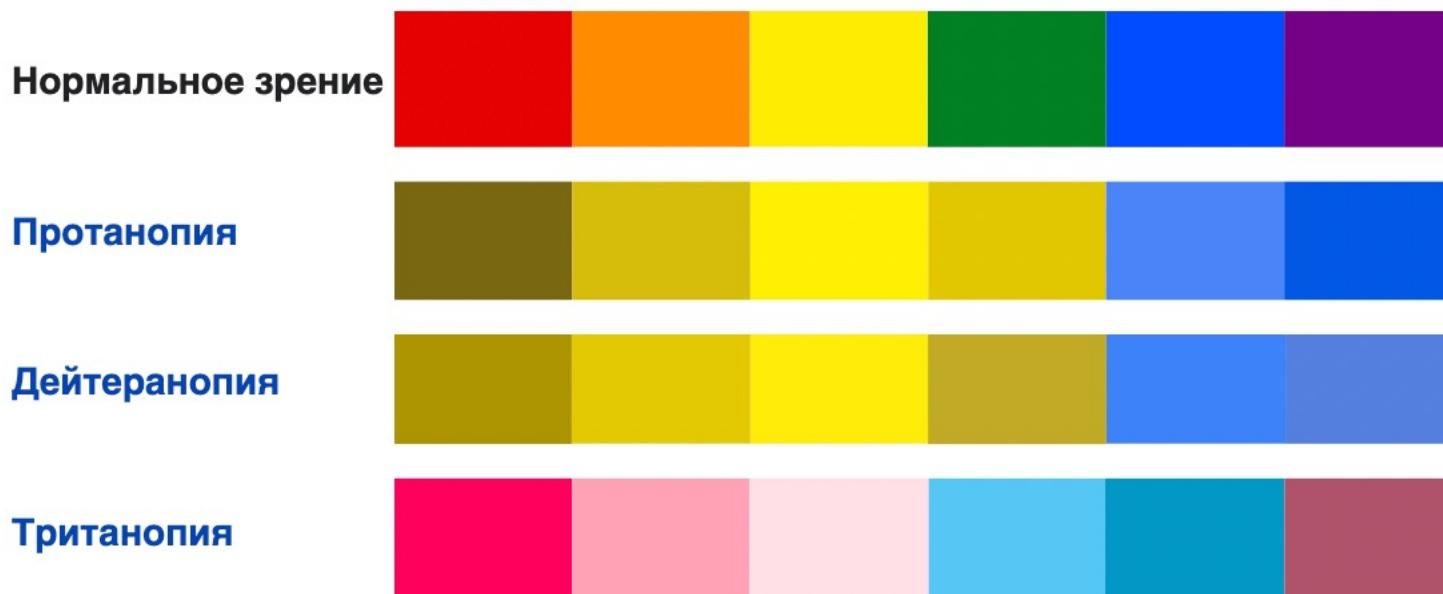
L

SML — наше первое пространство!

- Не все тройки возможны
- Откуда вообще человечеству известно, что колбочек всего три вида?

Лирическое отступление — тетрахроматия

- Приматы — трихроматы
- Два вида колбочек (L и M) кодируются X-хромосомой
- Дихромазия и дальтонизм



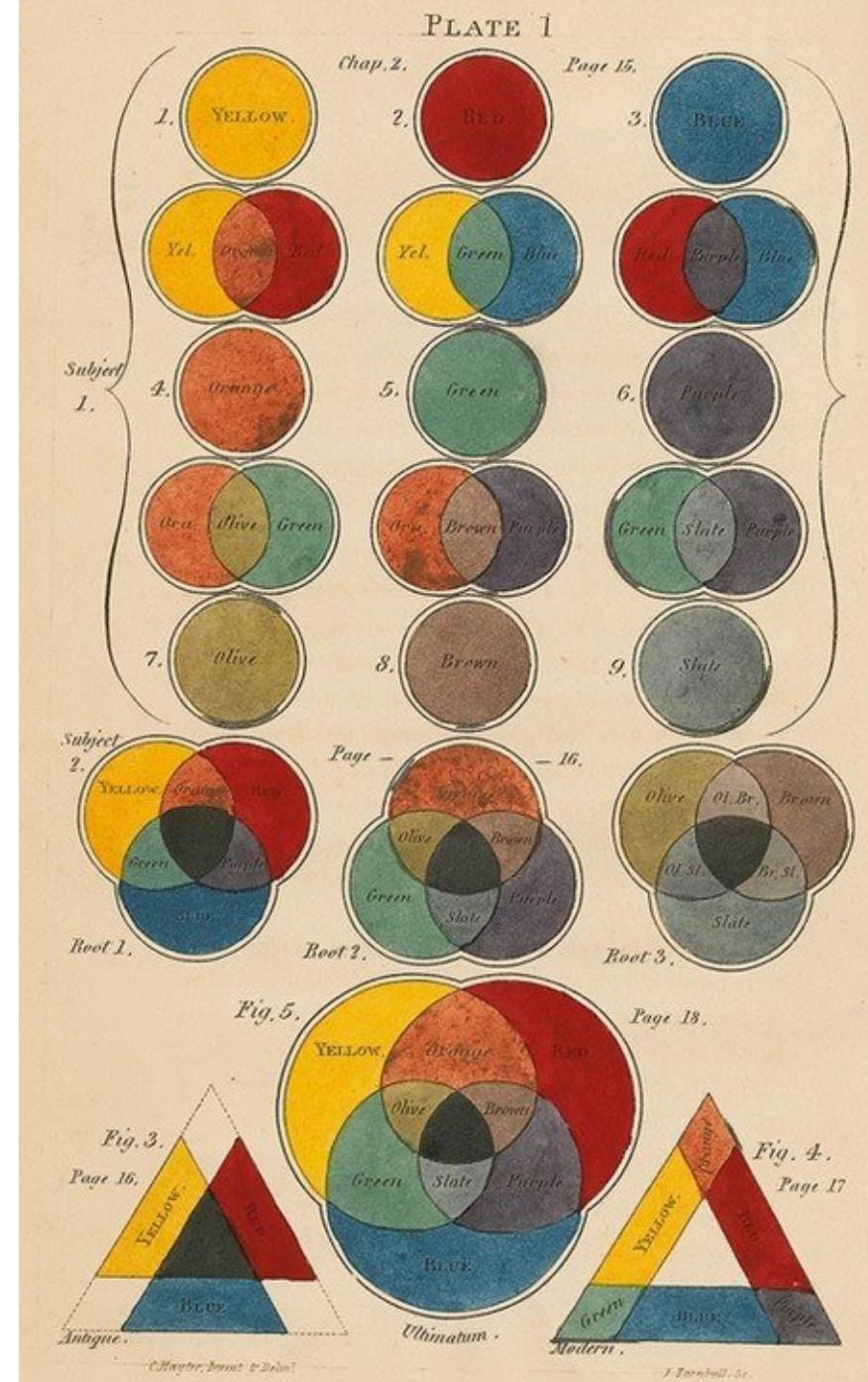
SML — наше первое пространство!

- Не все тройки возможны
- Откуда вообще человечеству известно, что колбочек всего три вида?

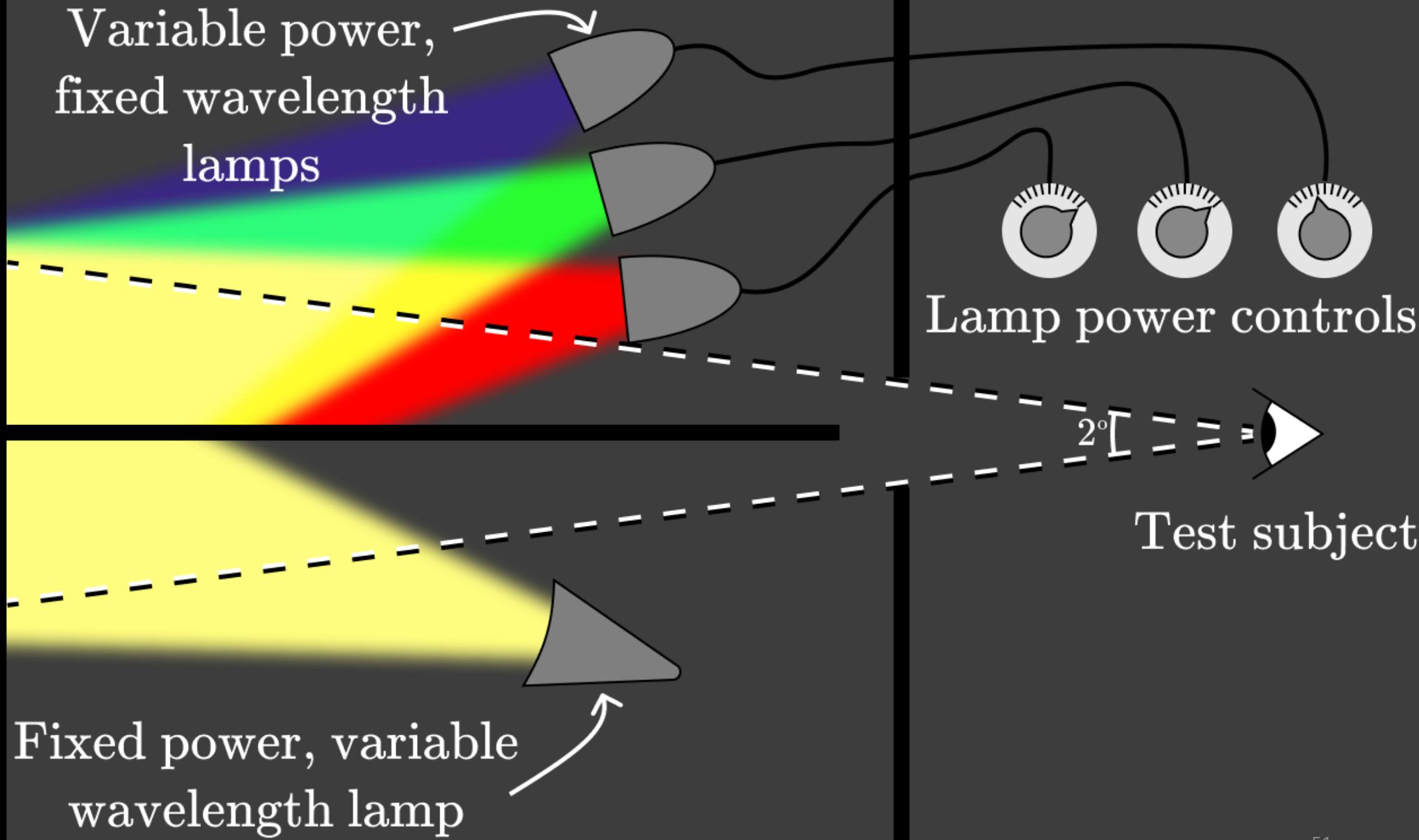
Эксперименты Райта и Гилда, 1920-е

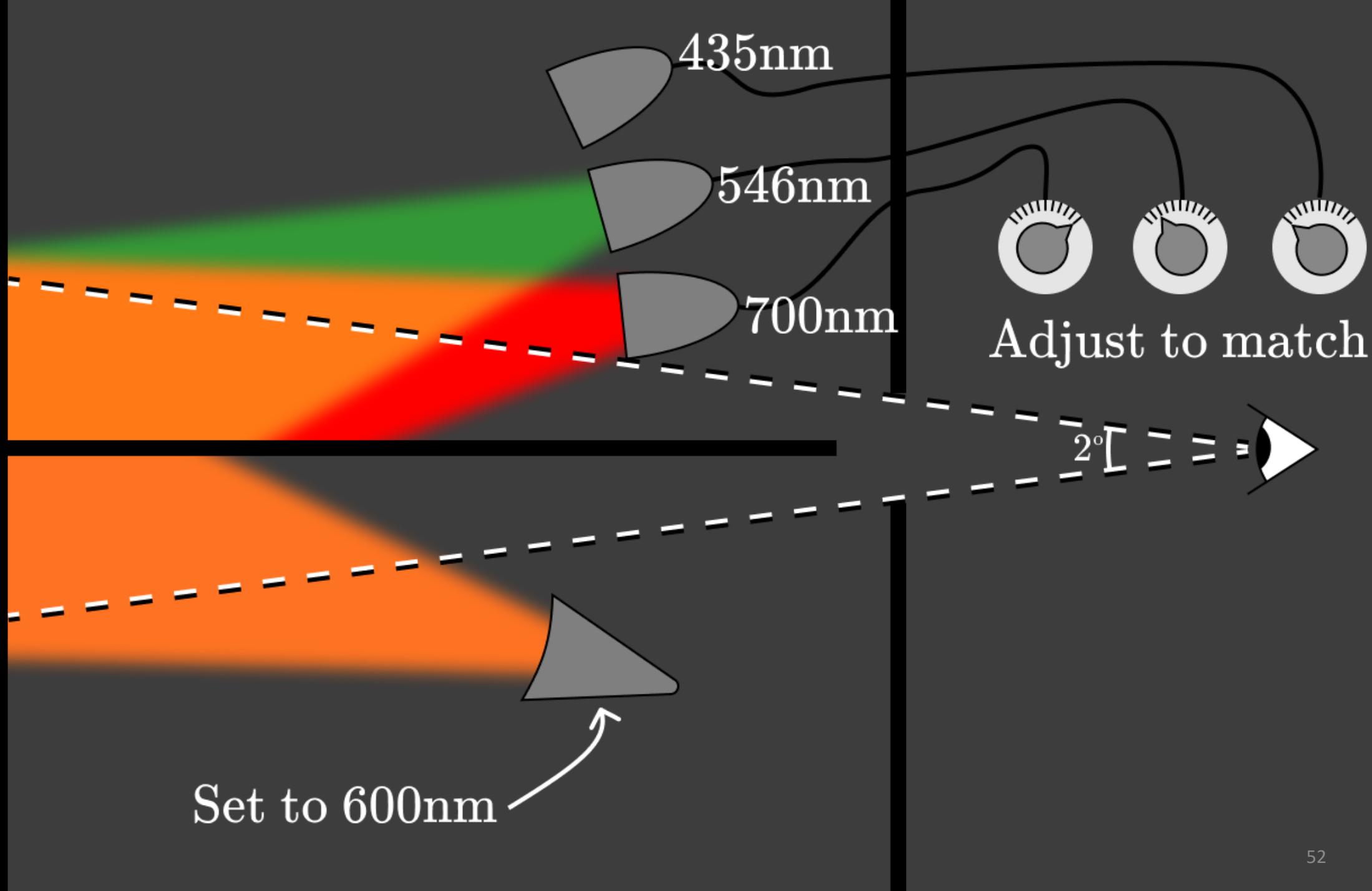
1826 г.

Трёхцветная теория цвета
Чарльза Хейтера

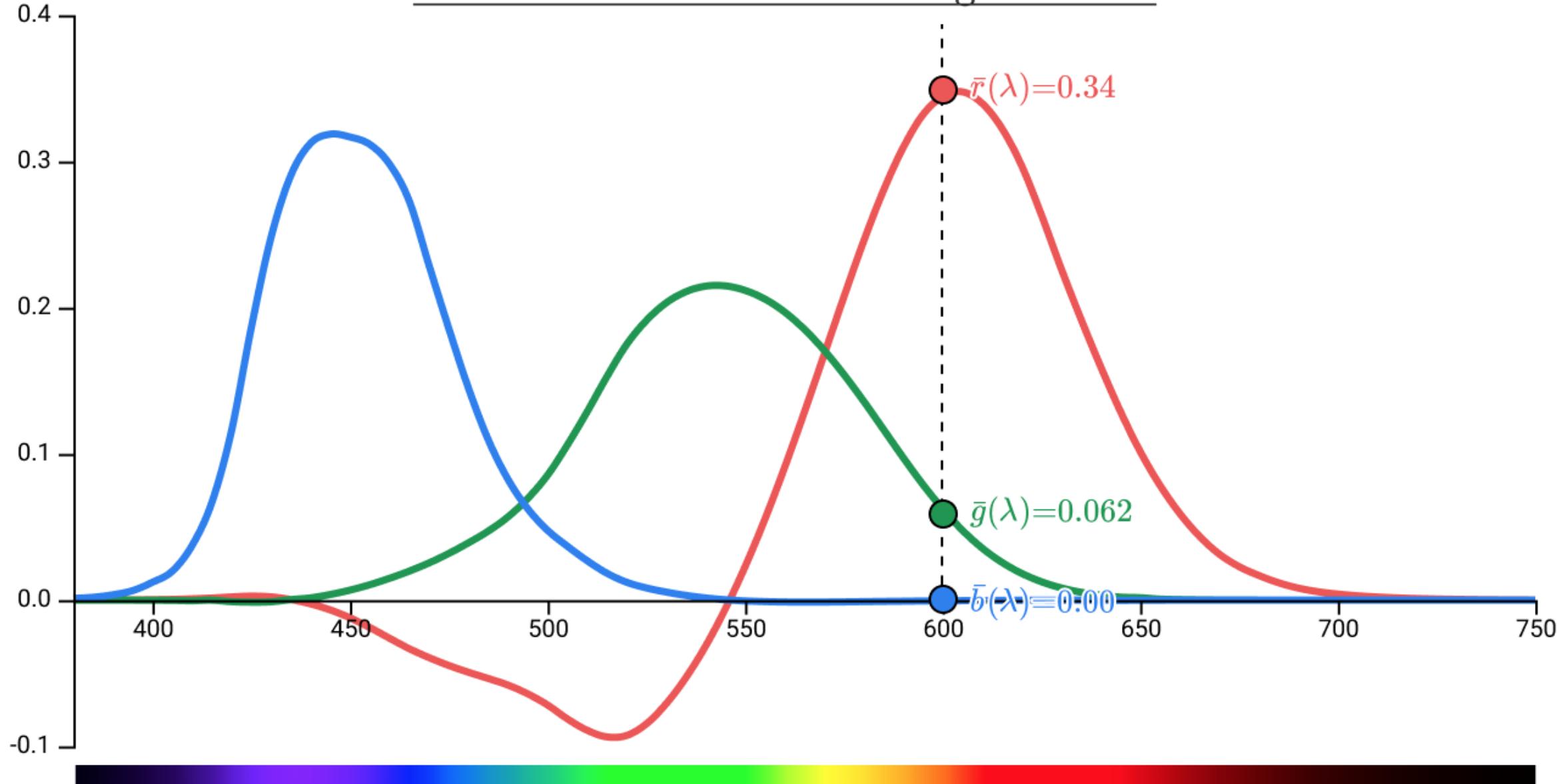


Variable power,
fixed wavelength
lamps



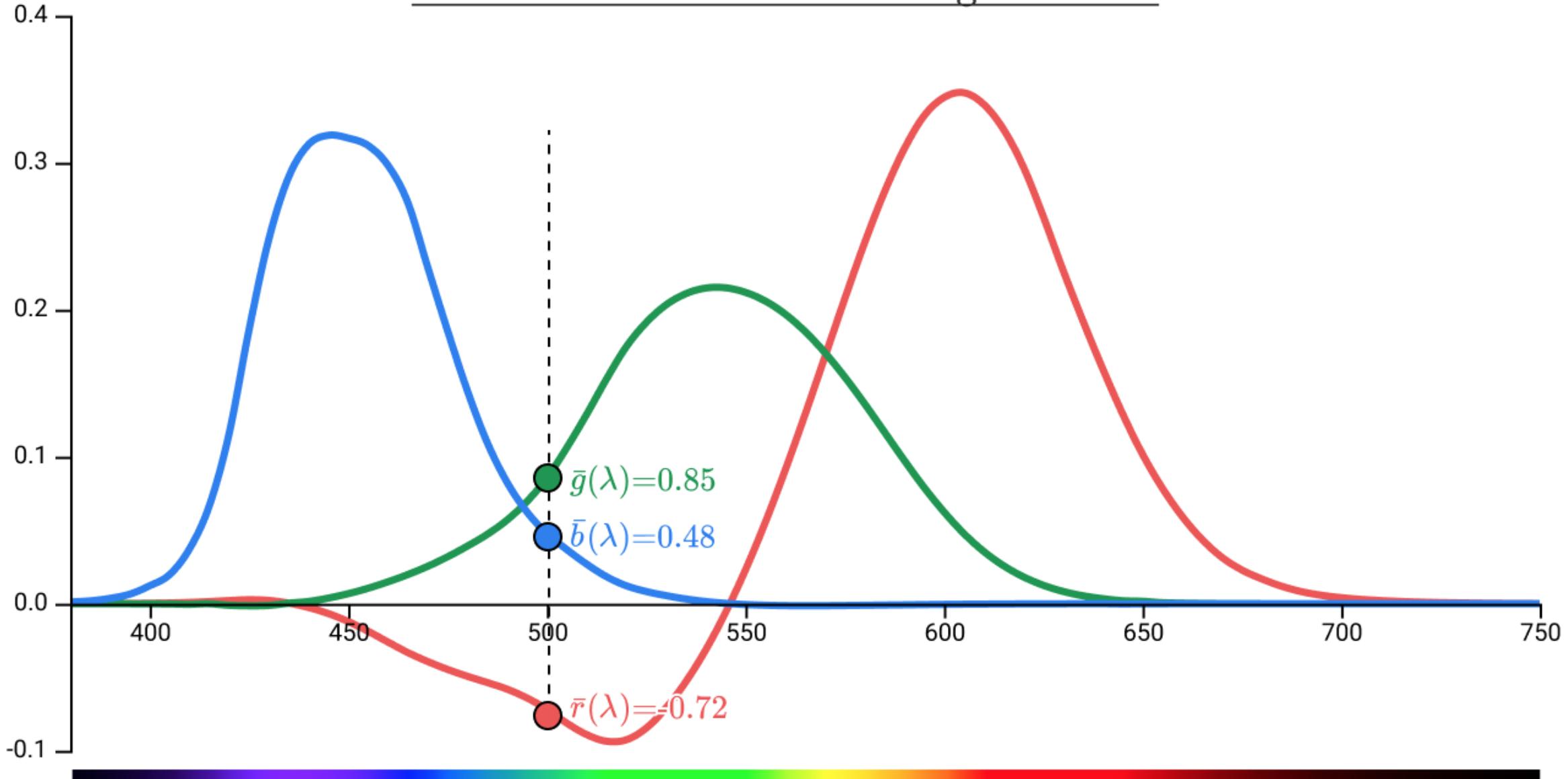


CIE 1931 RGB color matching functions



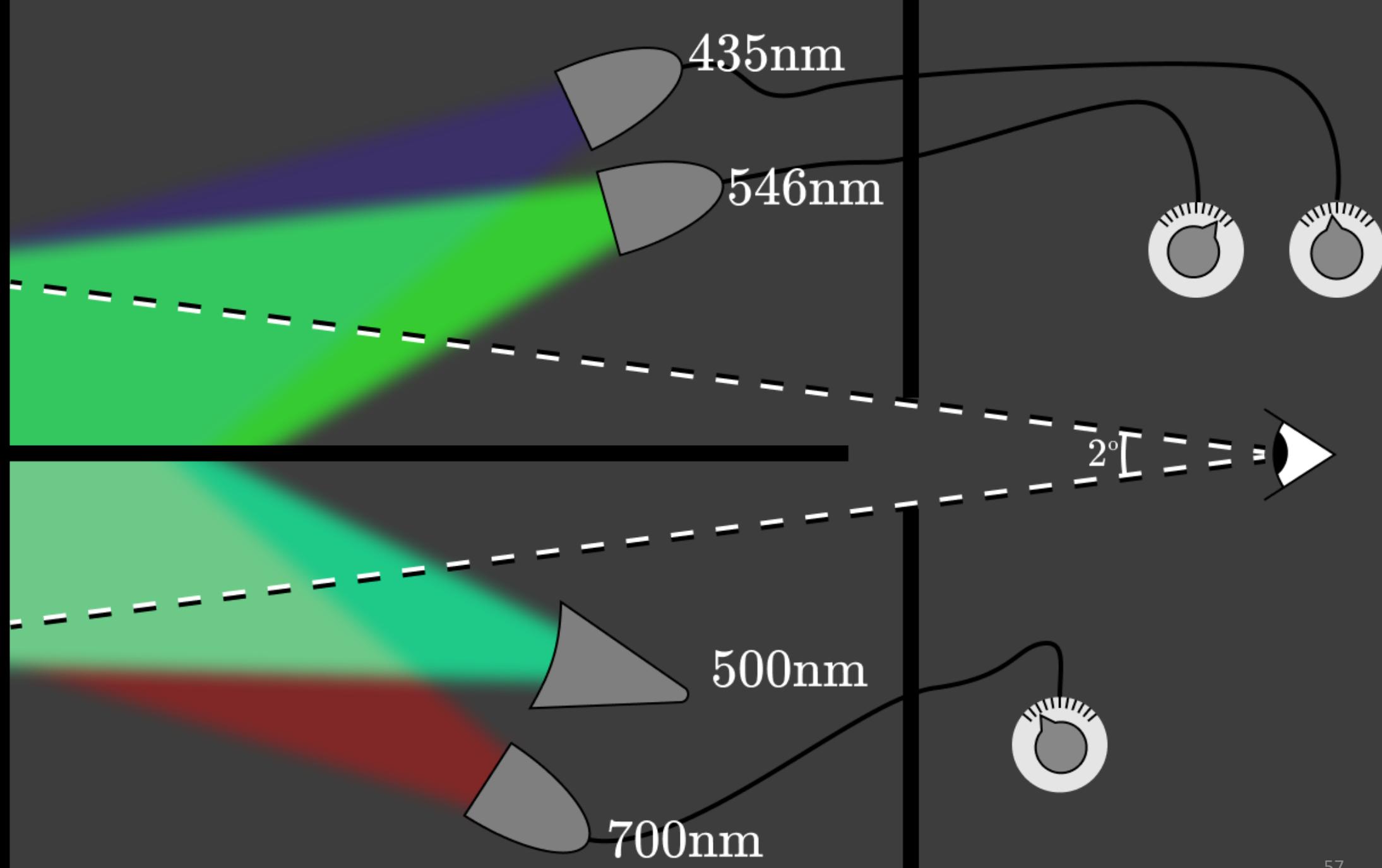
RGB — наше второе пространство!

CIE 1931 RGB color matching functions

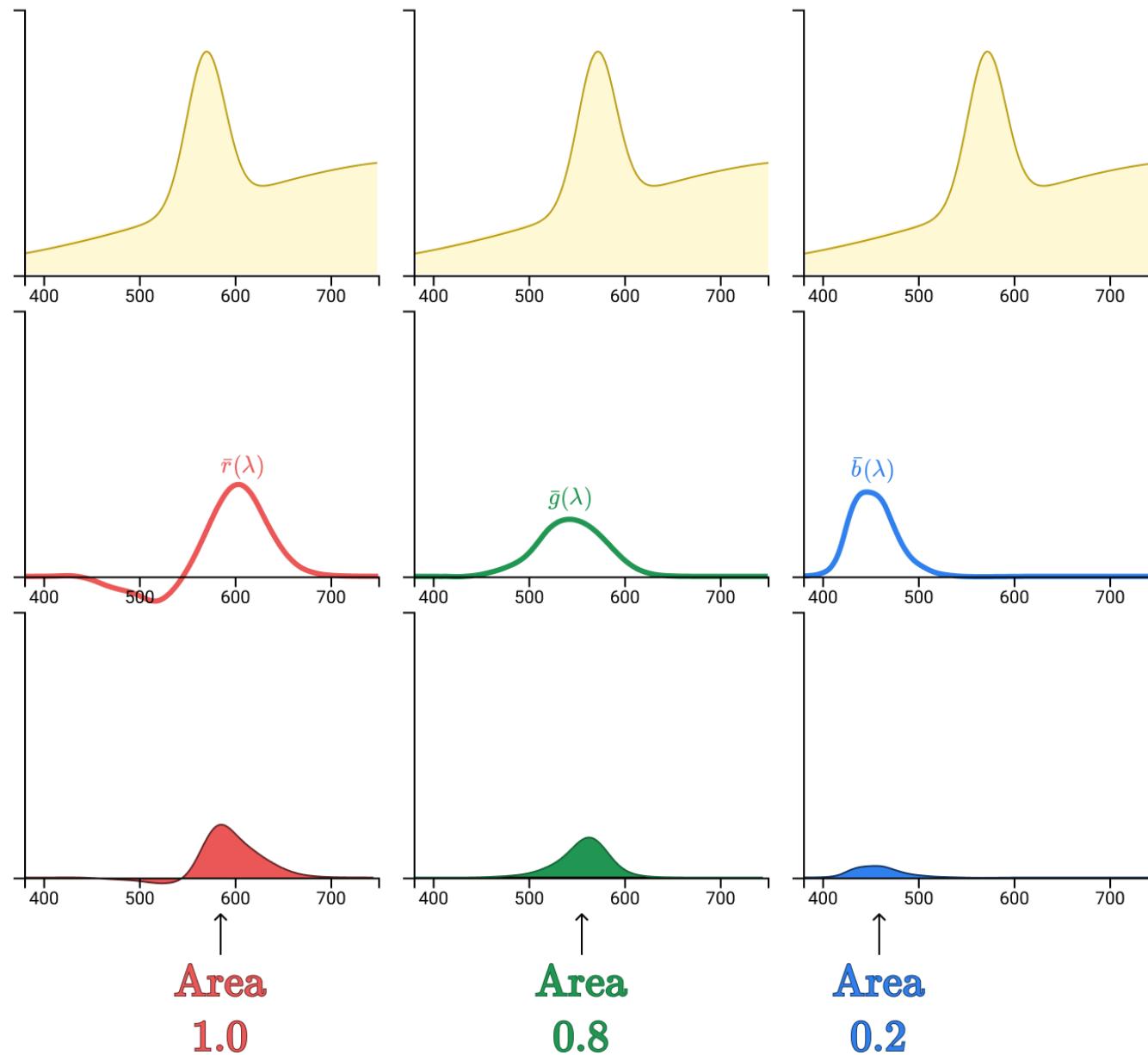


Отрицательные координаты?!





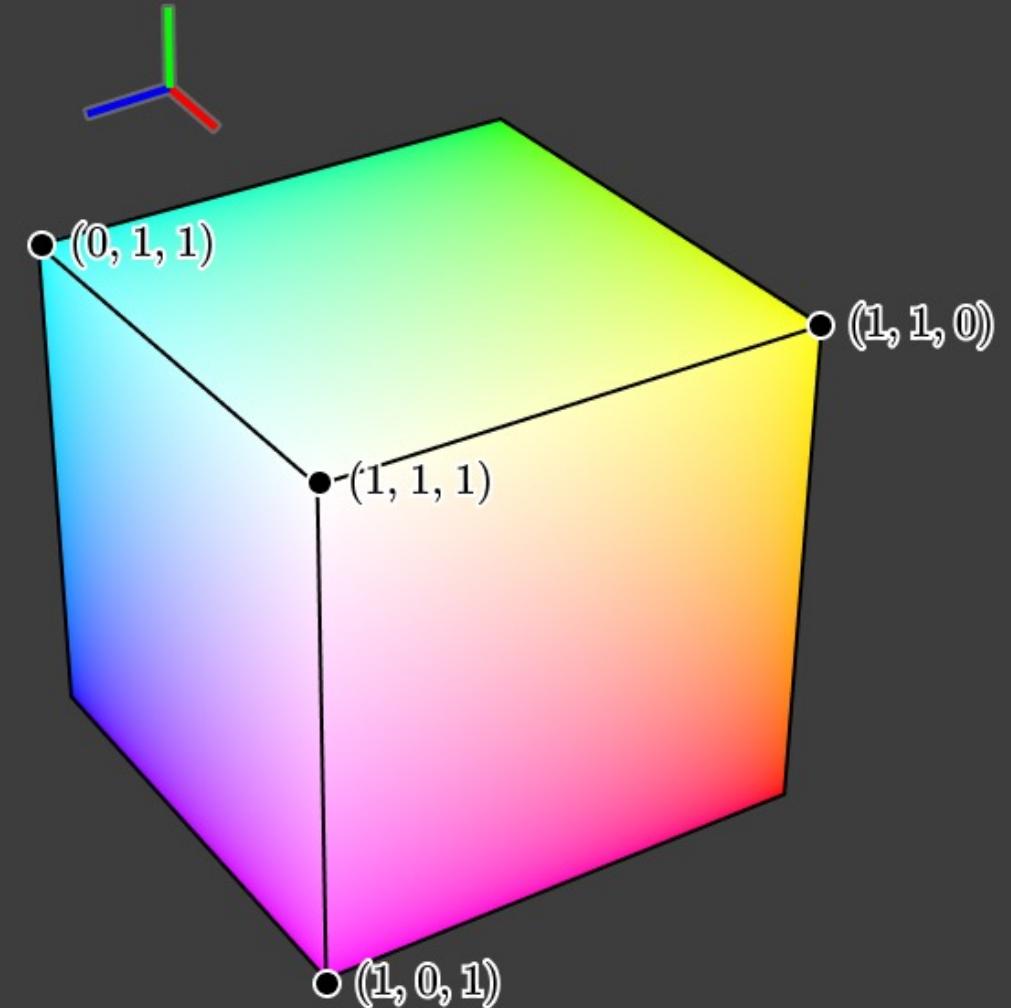
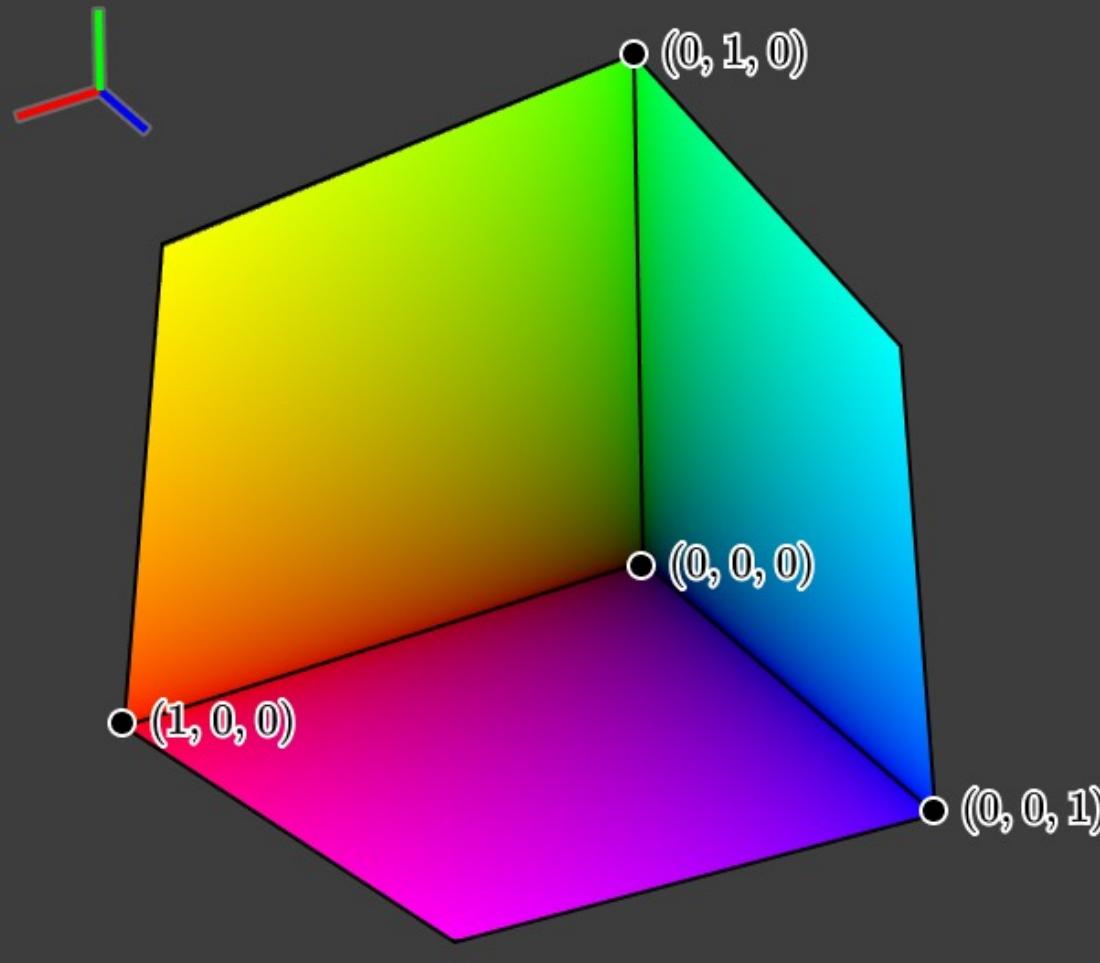
CIE 1931 RGB color matching of a point on a lemon



LMS vs RGB

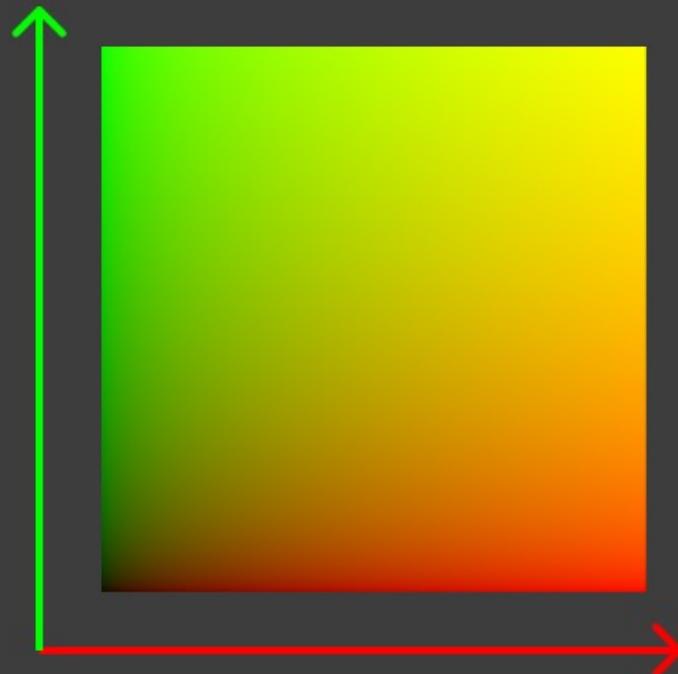
LMS позволяет точно **определить** (видимый человеком) цвет, а RGB — **воспроизвести** его (за исключением цветов с отрицательной координатой)

Перейдём в 3D!

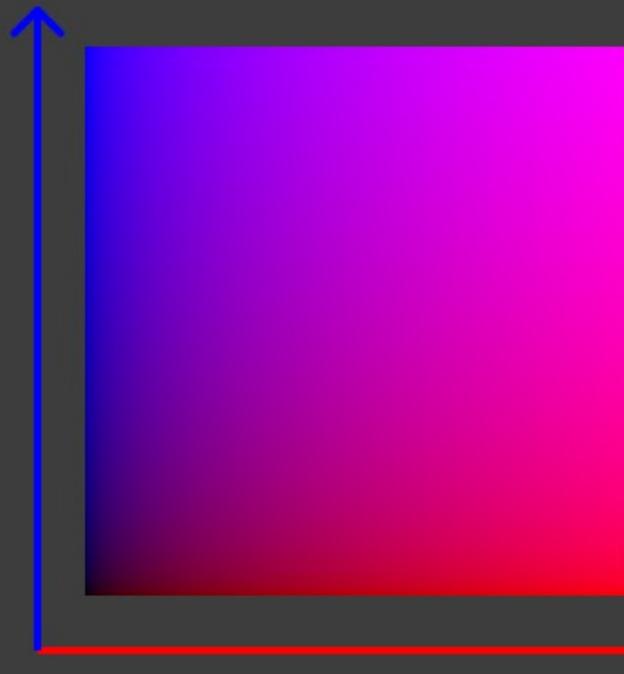


$$R \times G \times B = 0$$

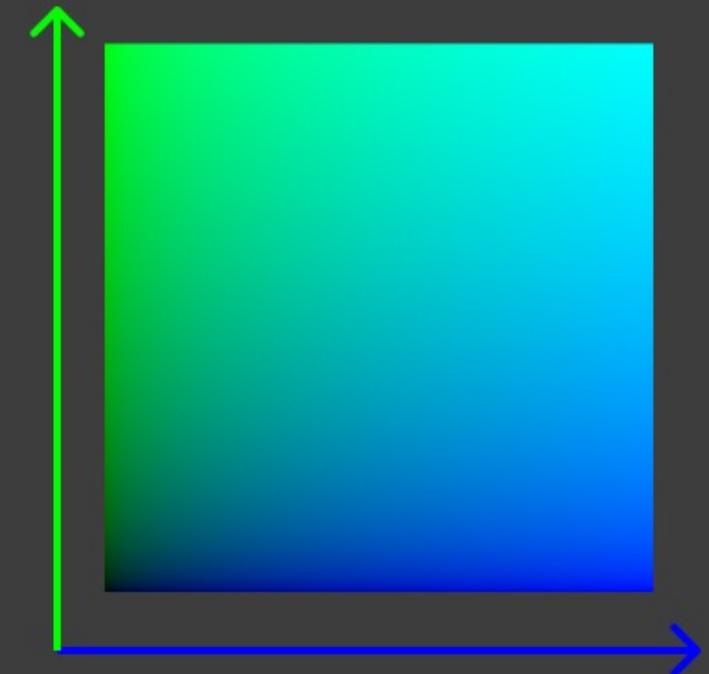
Constant Blue = 0



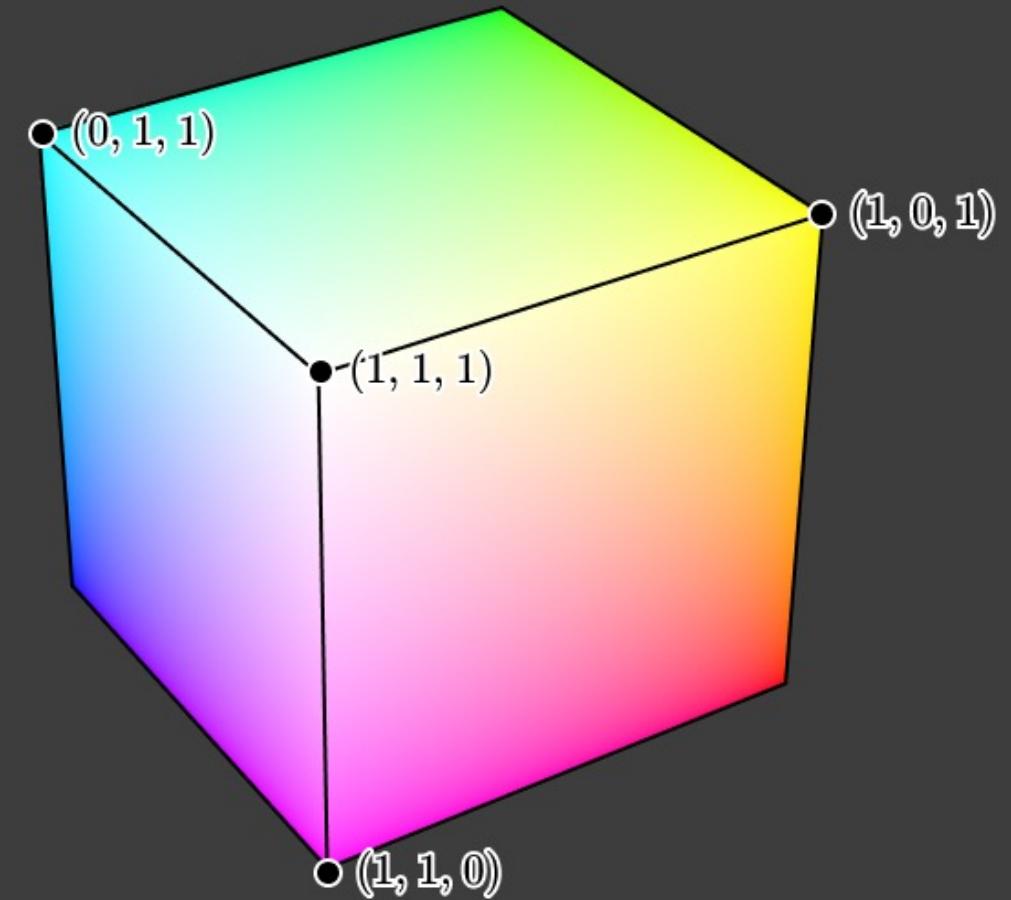
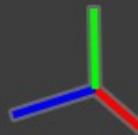
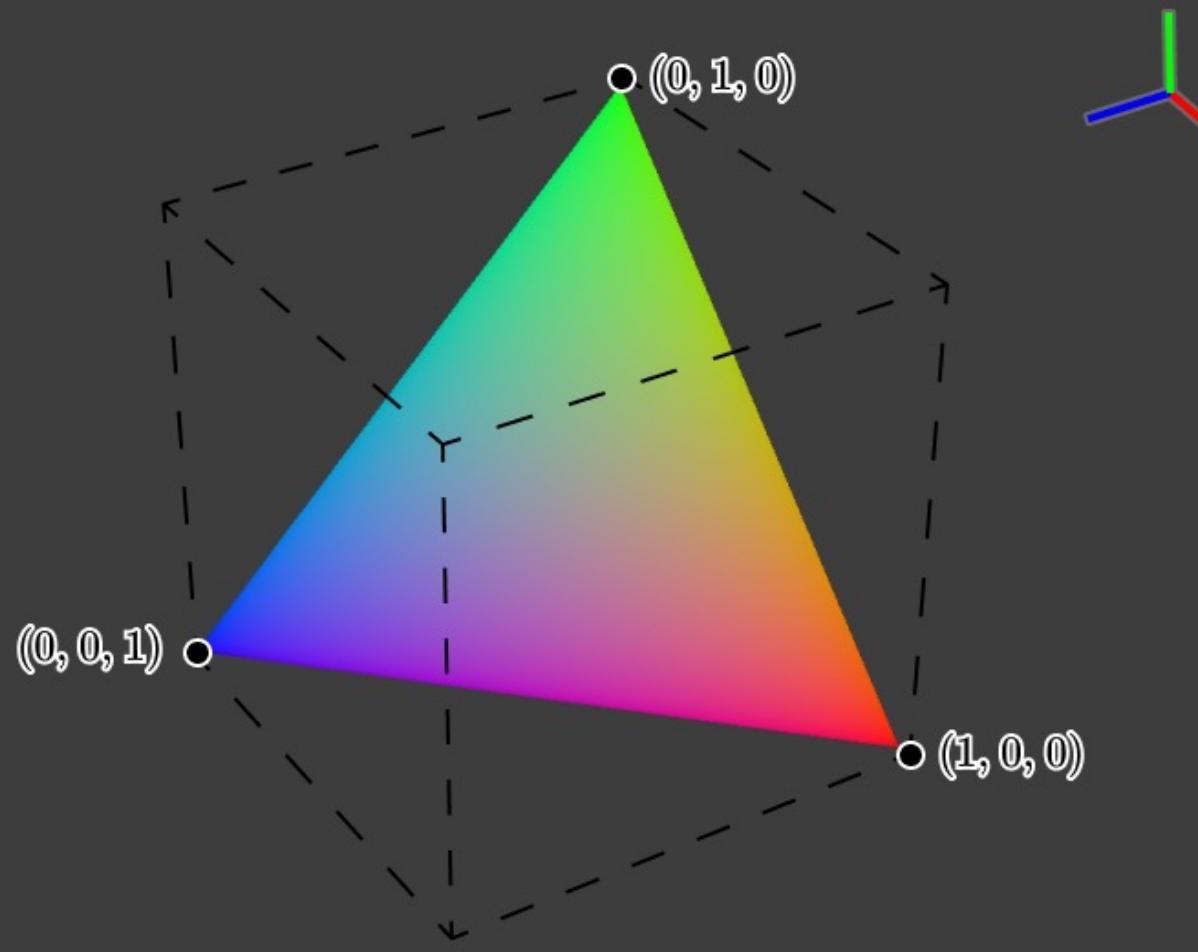
Constant Green = 0



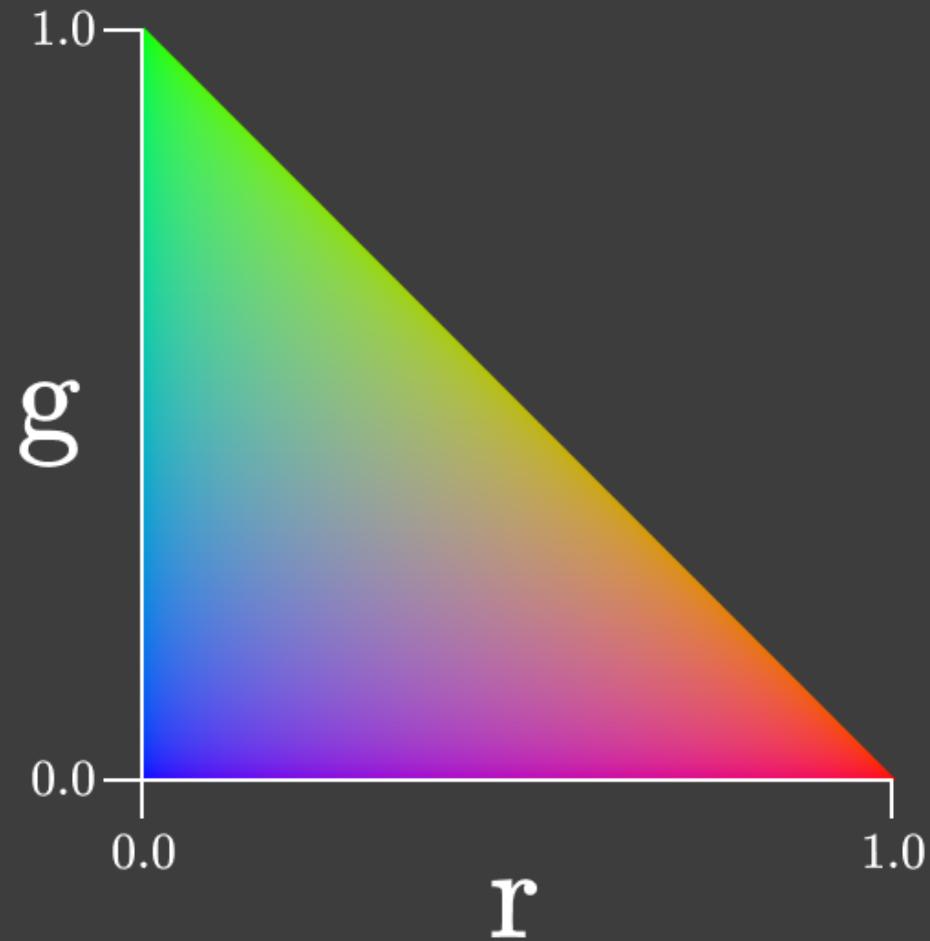
Constant Red = 0



$$R + G + B = 1$$



rg-хроматичность

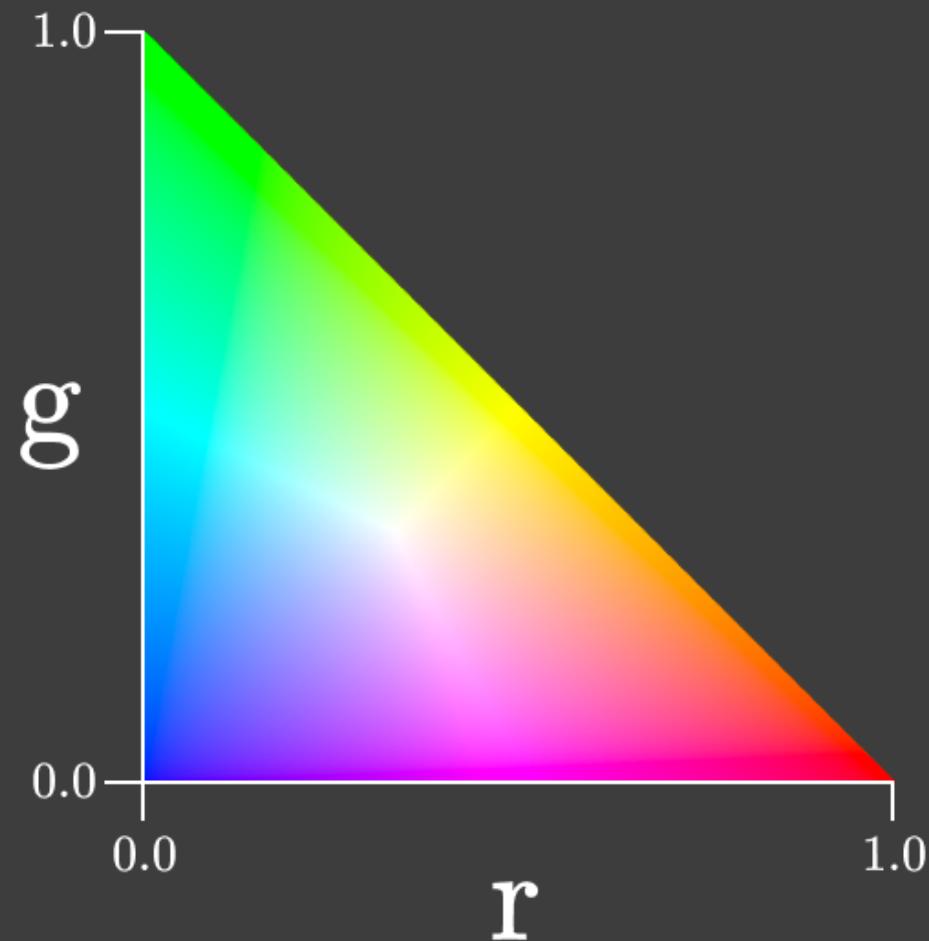


$$R = r$$

$$G = g$$

$$B = 1 - g - r$$

rg-хроматичность



$$k = \max(r, g, 1 - g - r)$$

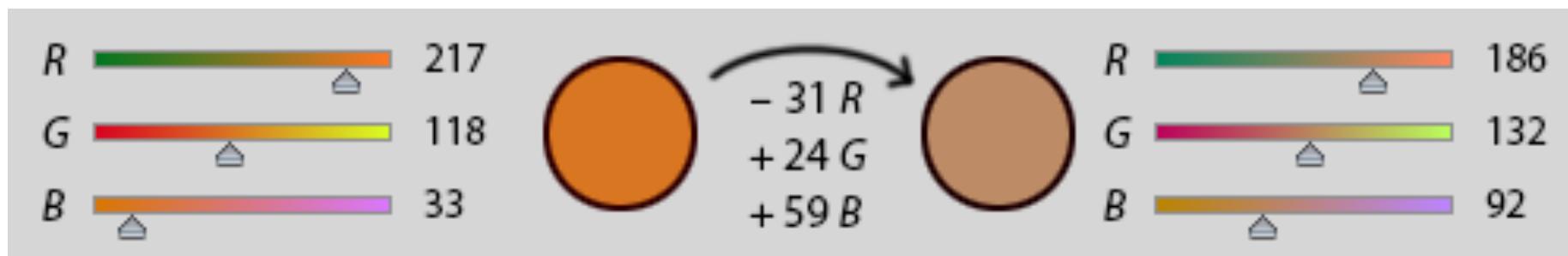
$$R = r/k$$

$$G = g/k$$

$$B = (1 - g - r)/k$$

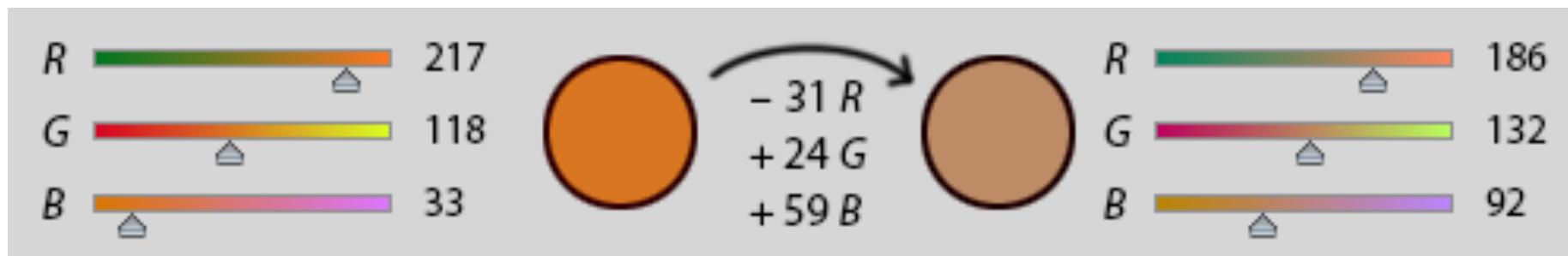
Возможно, вы слышали о HSL и HSV

- HSL — Hue, Saturation, Lightness
- HSV — Hue, Sutartion, Value, он же HSB — Hue, Saturation, Brightness



Возможно, вы слышали о HSL и HSV

- HSL — Hue, Saturation, Lightness
- HSV — Hue, Sutartion, Value, он же HSB — Hue, Saturation, Brightness



- Нелинейные преобразование RGB

Школа-то математическая...

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

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

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

, или, в общем случае, $S = \frac{MAX - MIN}{1 - |1 - (MAX + MIN)|}$,

RGB → HSV

не определено, если $MAX = MIN$

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

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

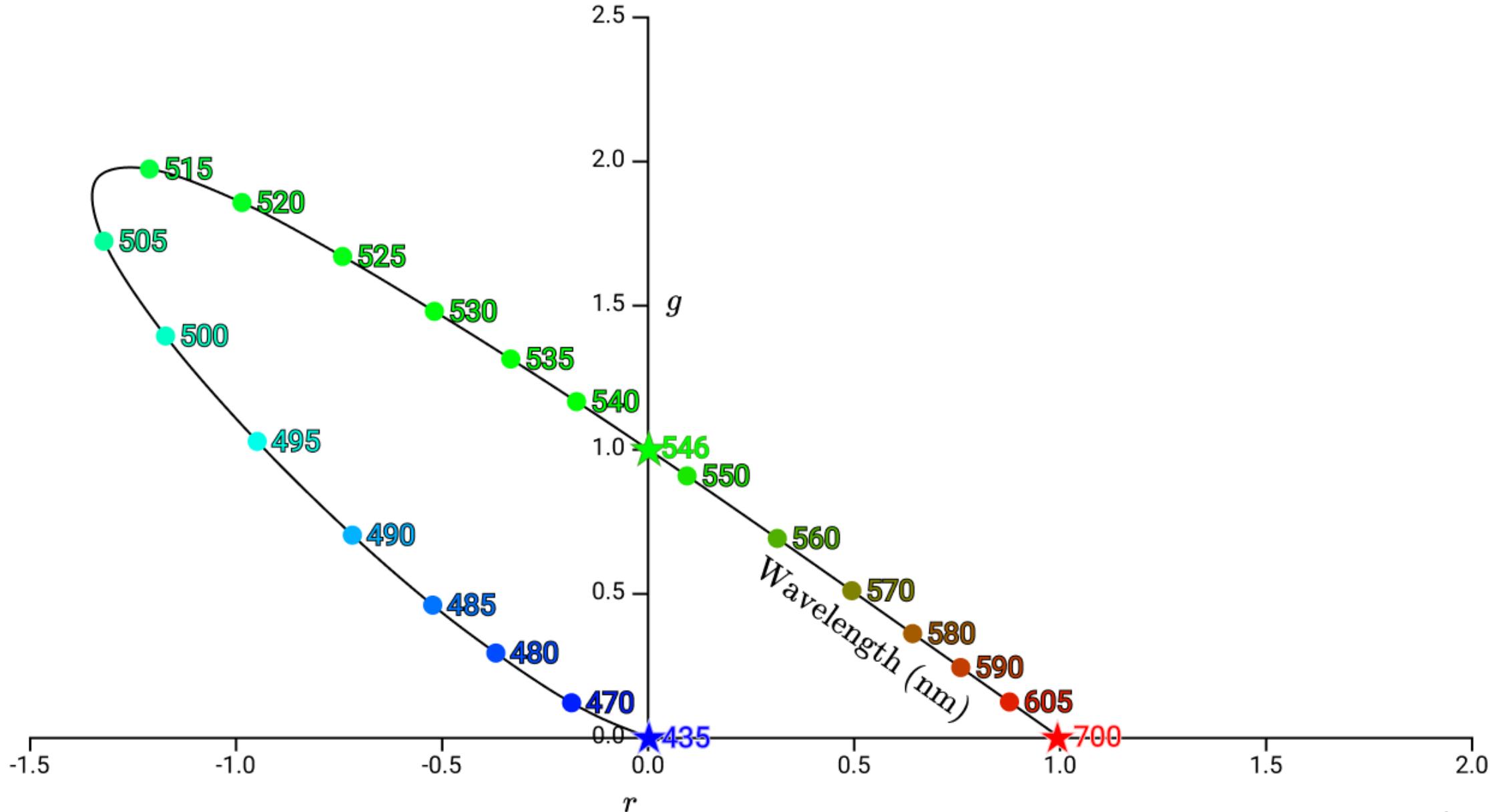
$$V = MAX$$

Что там про отрицательные R и G?

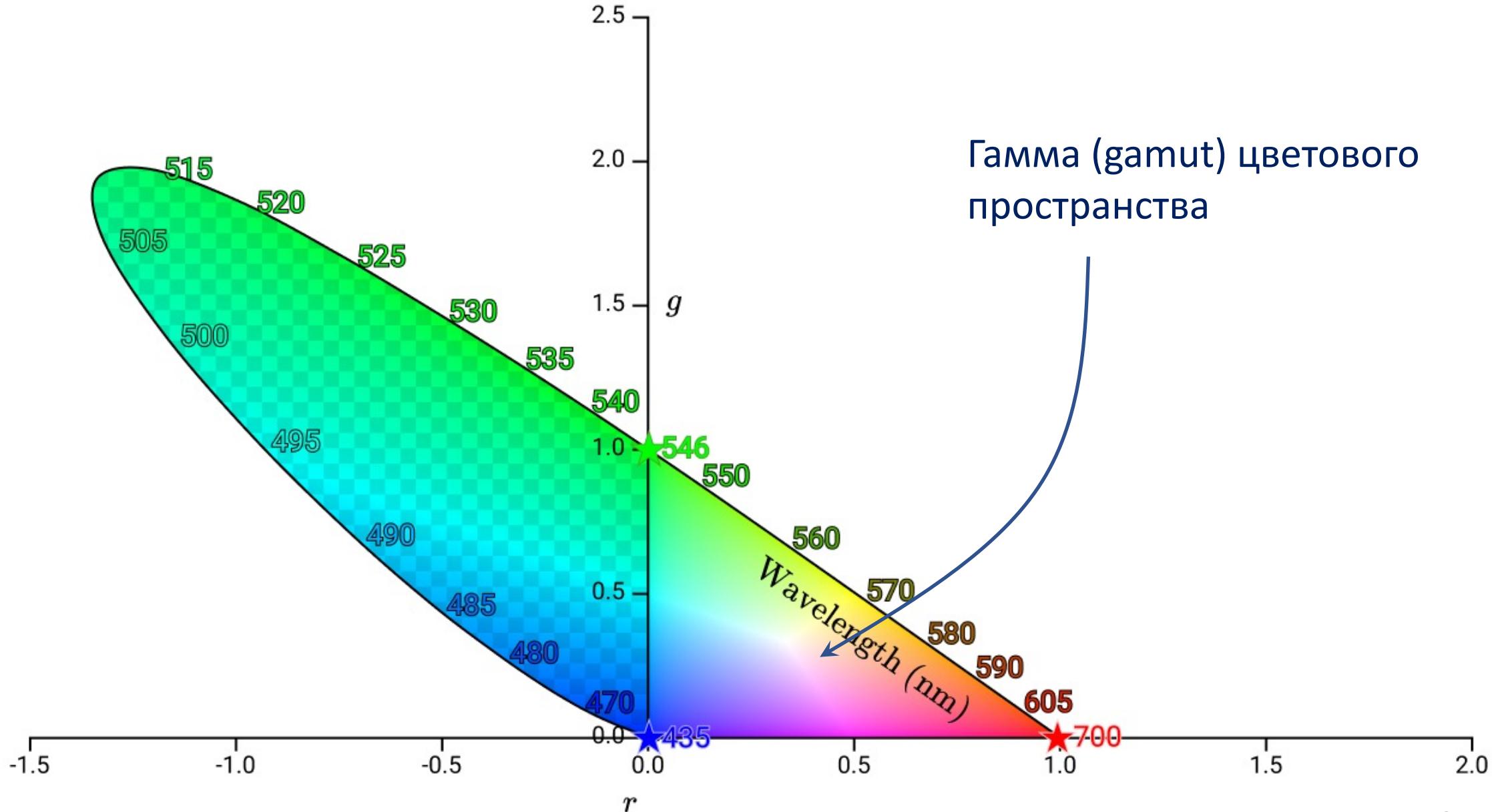
- Всё ещё можем воспроизвести не все цвета спектра!

Спектральный локус

rg chromaticities of the spectral locus



rg chromaticities of the spectral locus



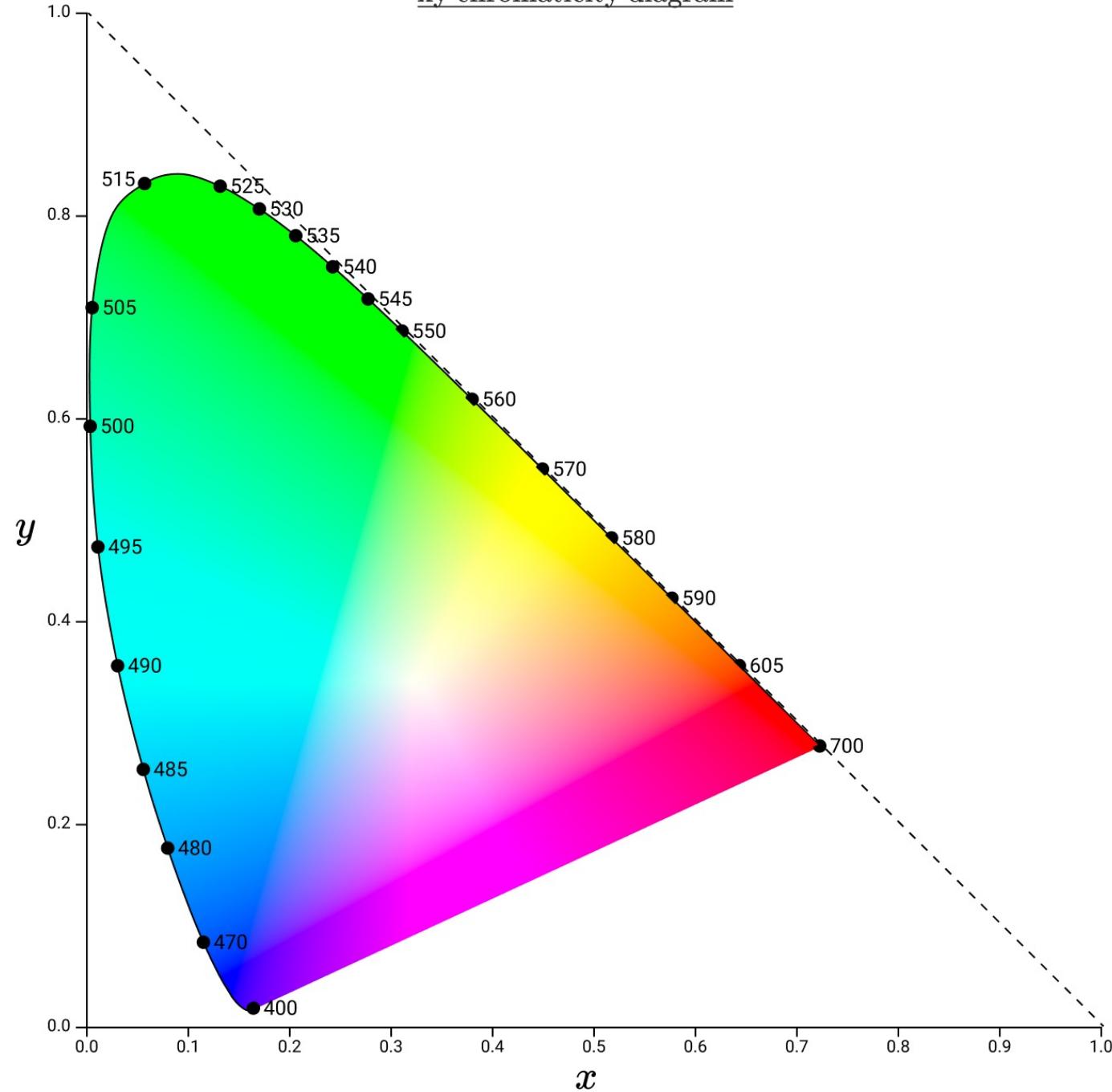
Международная комиссия по освещению, 1931

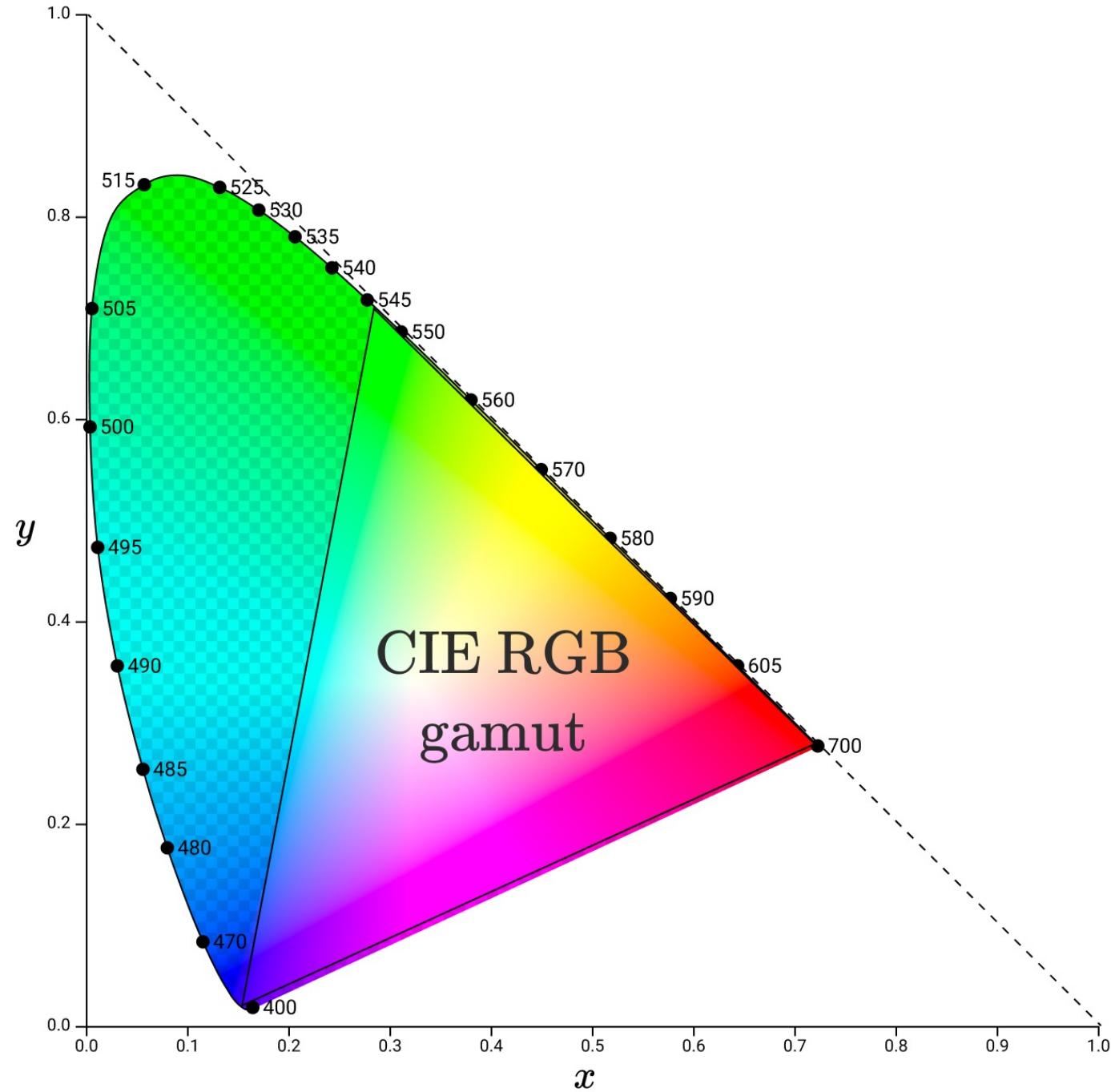
- RGB — как у Райта и Гилда
- XYZ — все компоненты (для спектральных цветов) должны быть положительными

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \frac{1}{b_{21}} \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \frac{1}{0.17697} \begin{bmatrix} 0.49000 & 0.31000 & 0.20000 \\ 0.17697 & 0.81240 & 0.010630 \\ 0.0000 & 0.010000 & 0.99000 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

- CIE (Commission internationale de l'éclairage) 1931 RGB и CIE 1931 XYZ

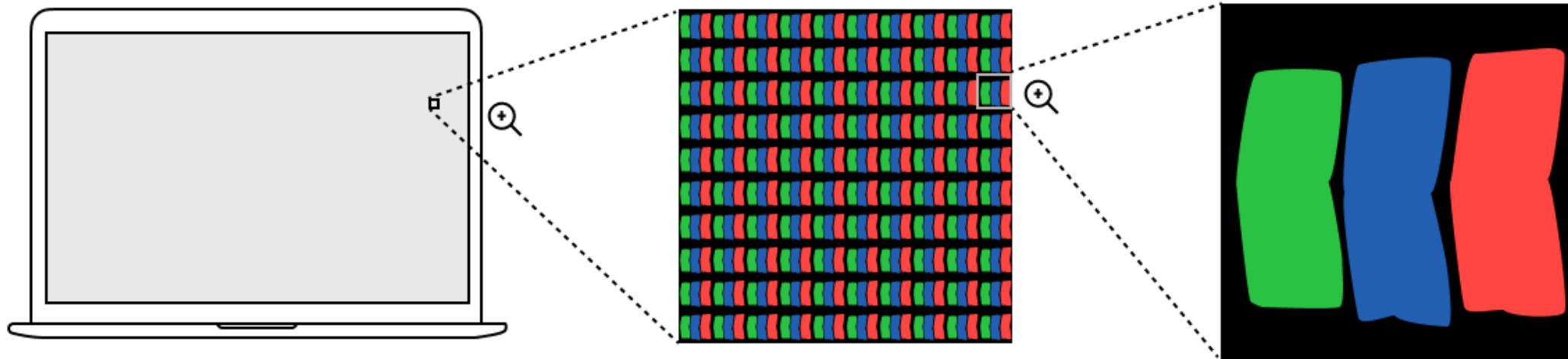
xy chromaticity diagram



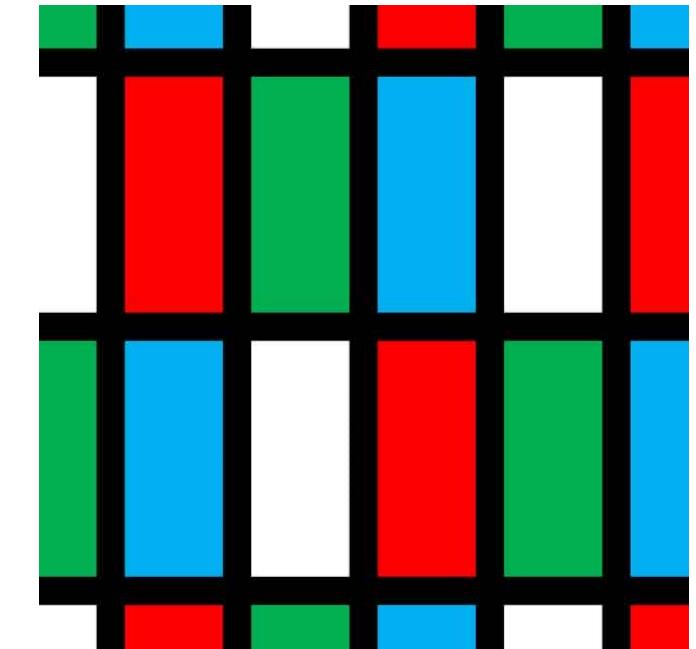
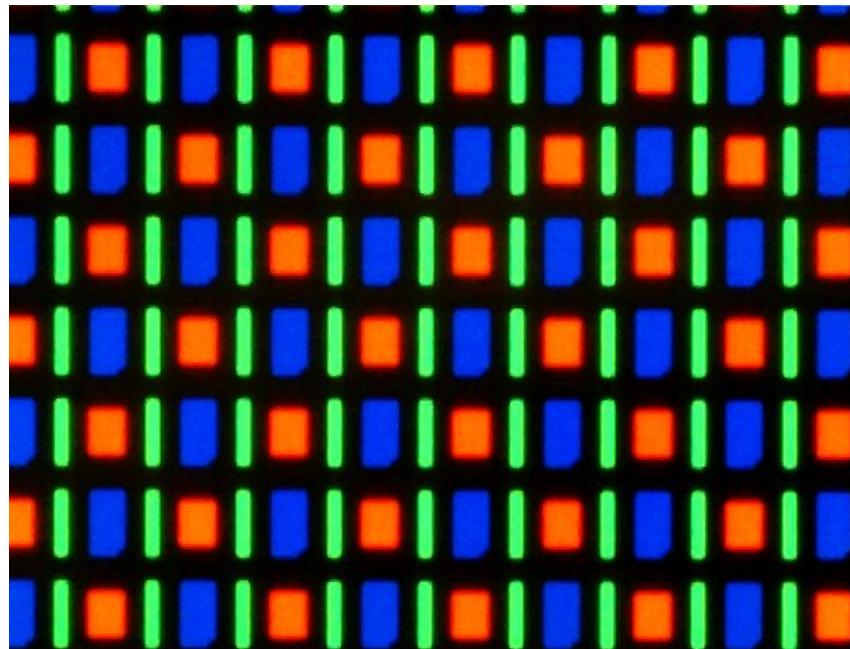
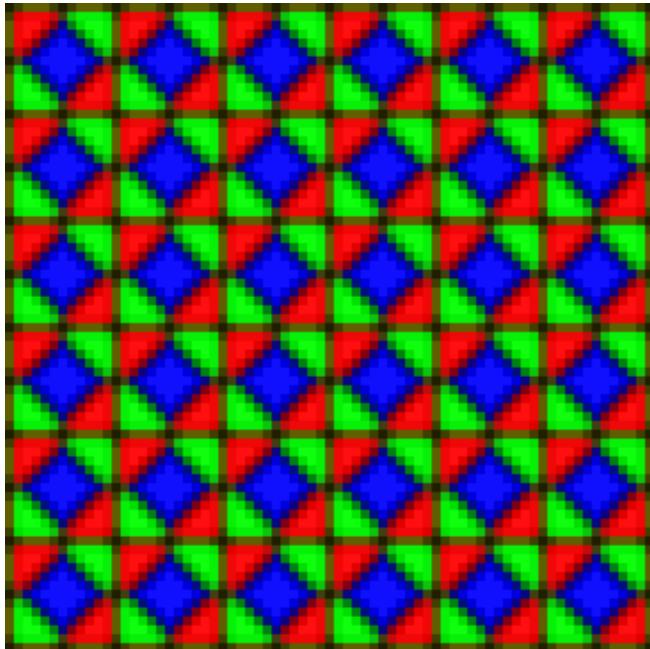


Как нарисовать цвет?

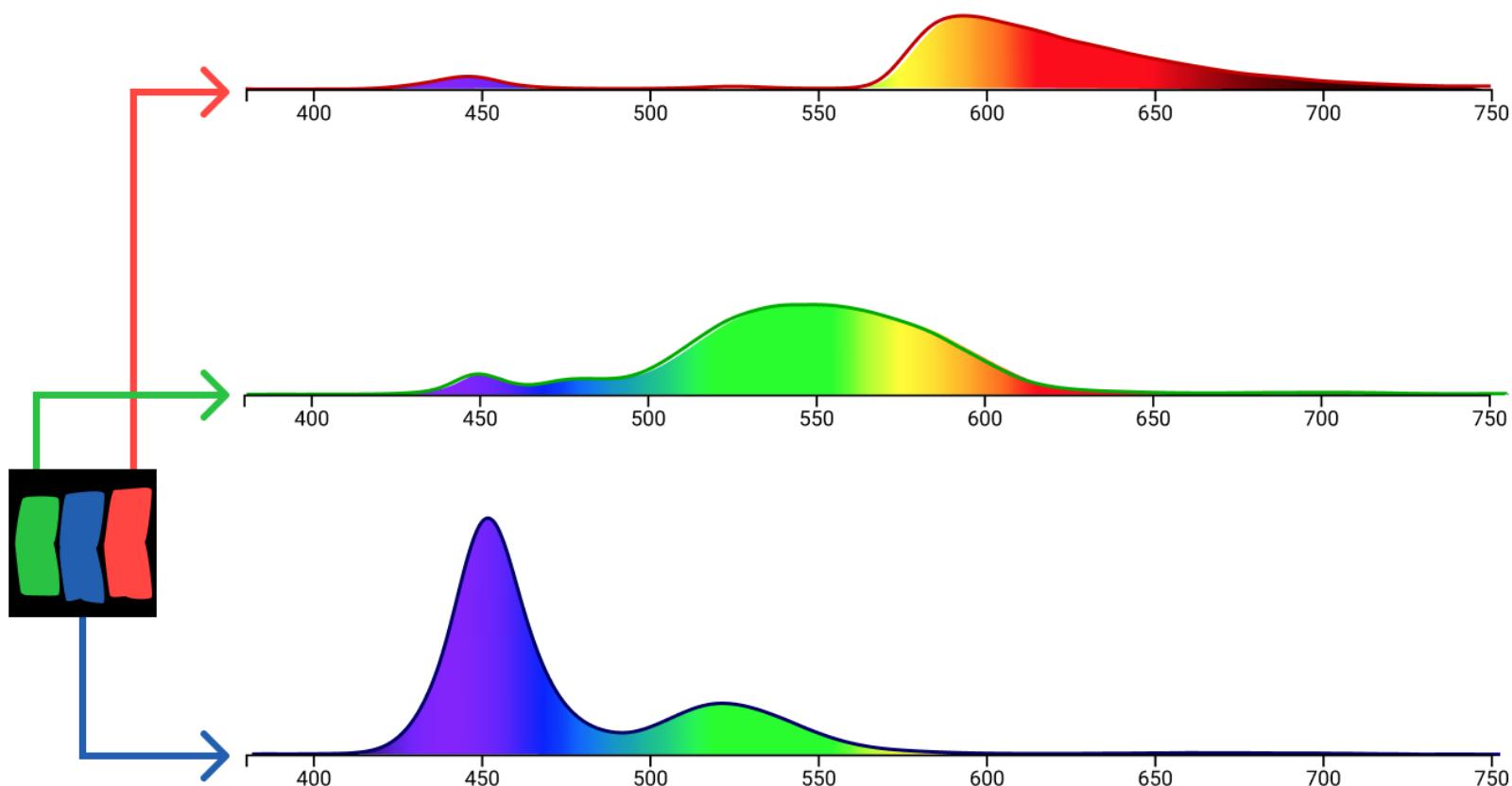
Пиксели и субпиксели

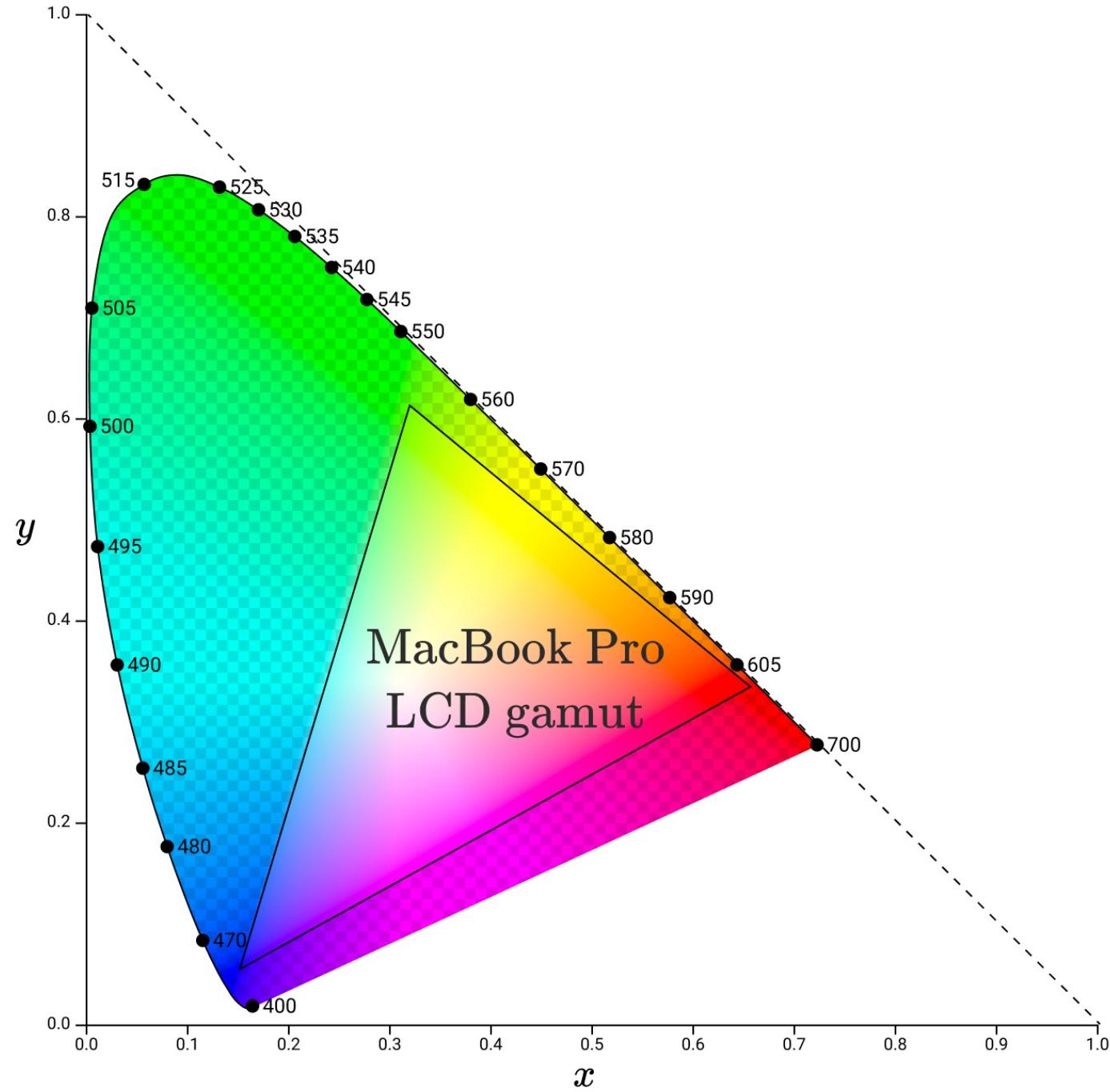


PenTile



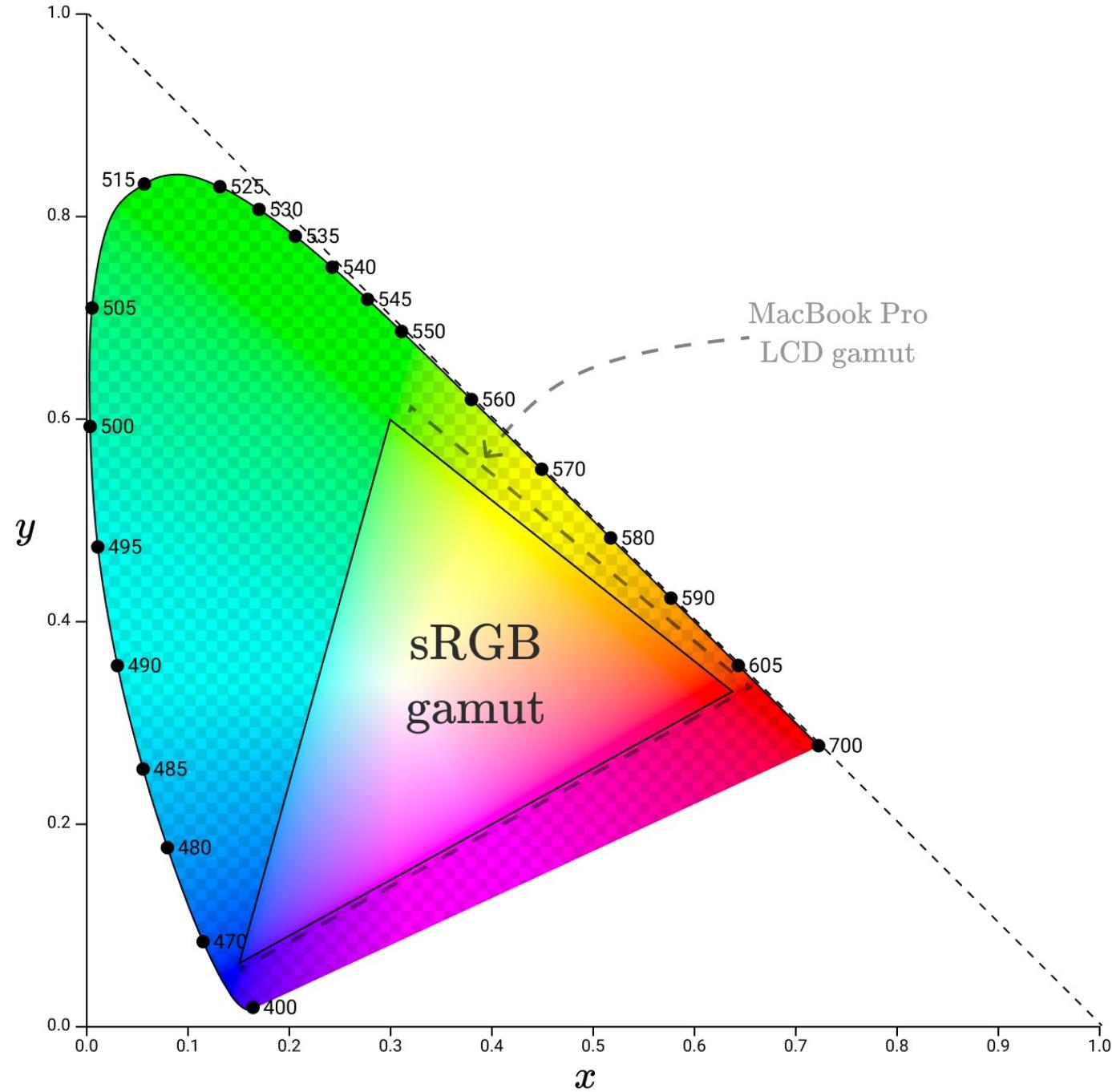
Субпиксели – не монохроматоры

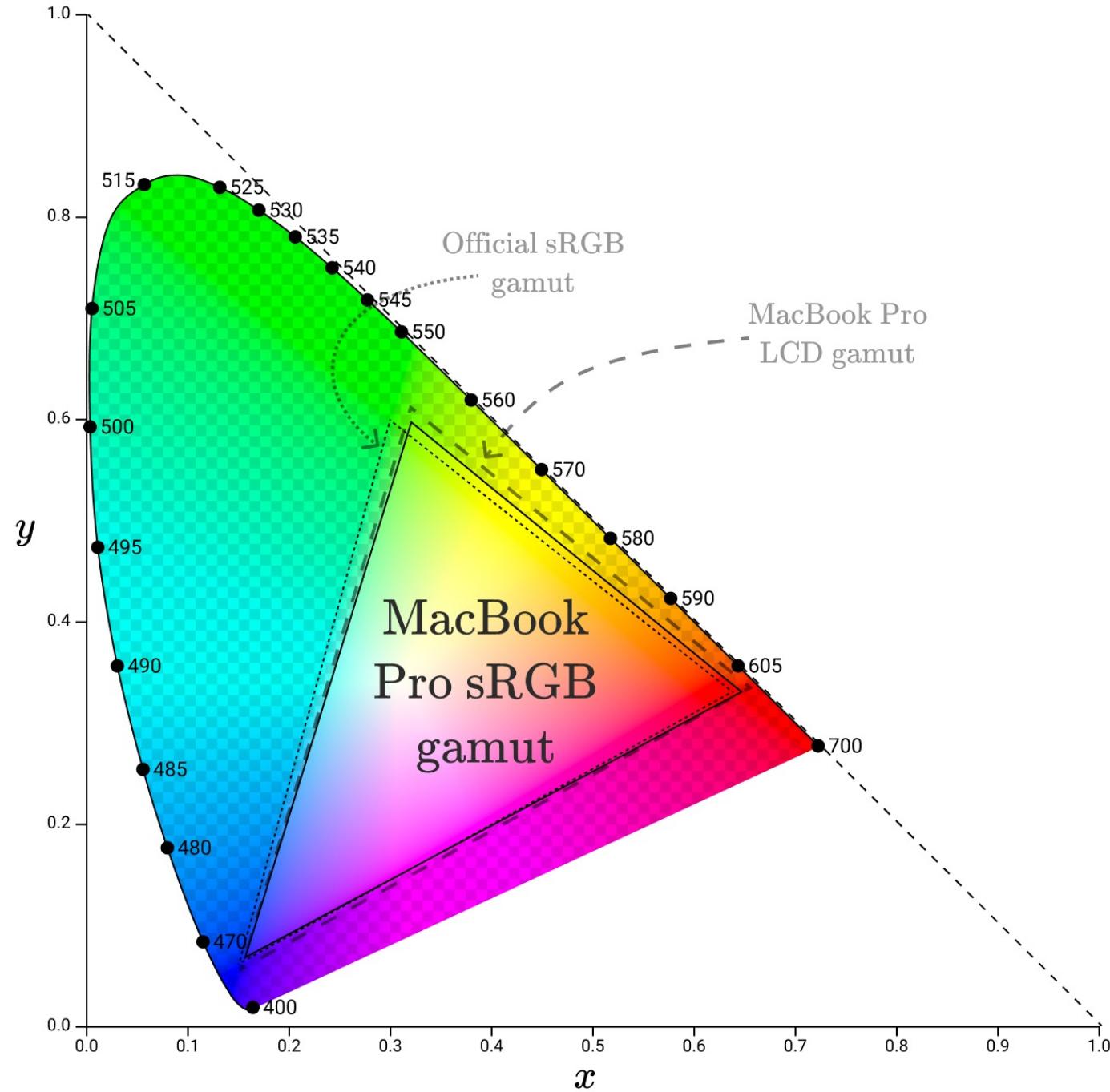


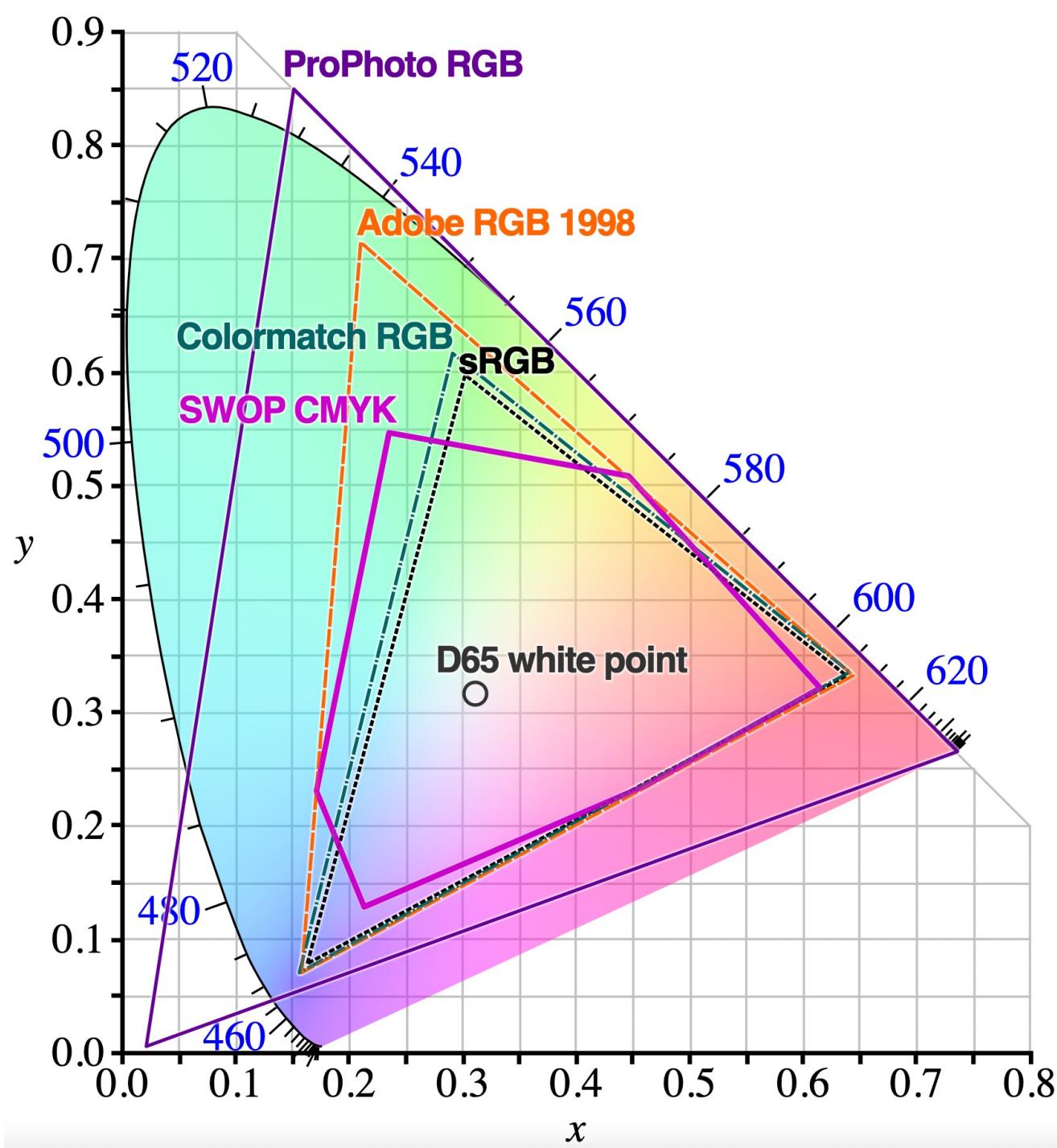


sRGB

- Разные мониторы имеют разную гамму
- Но все должны покрывать sRGB
- HP и Microsoft, 1996 год
- Используется в CSS (#FFA500)

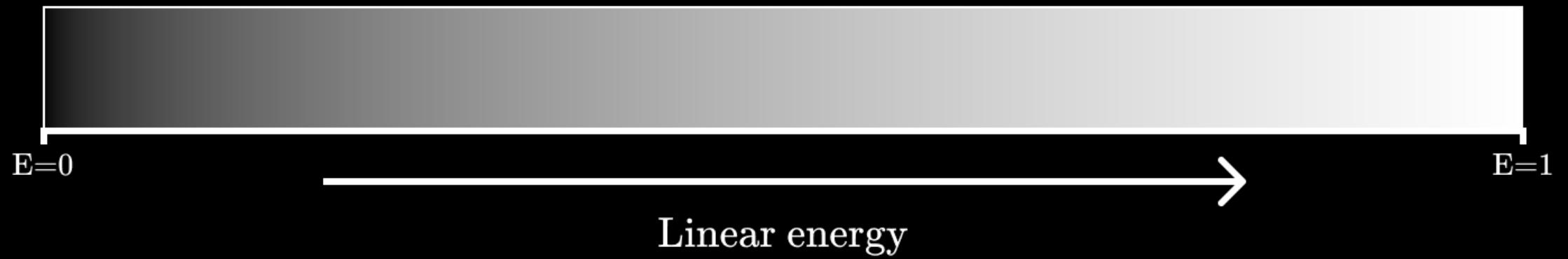




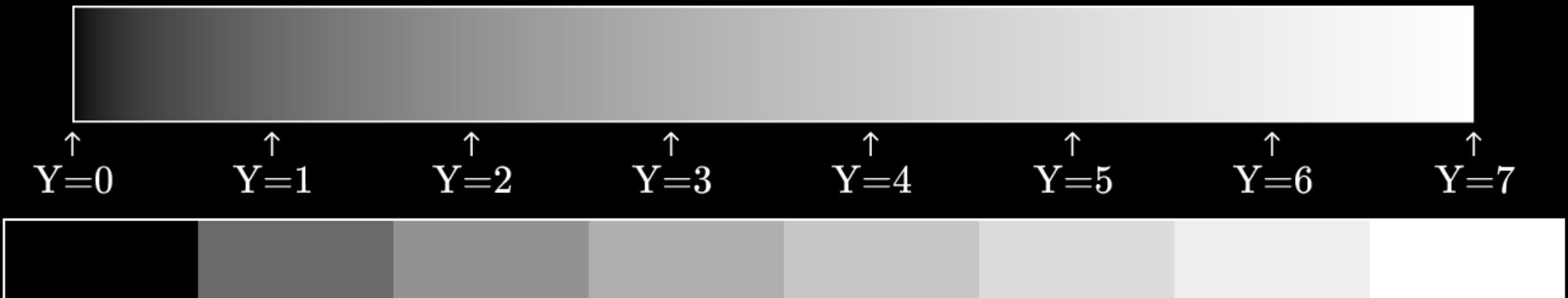


Гамма-коррекция

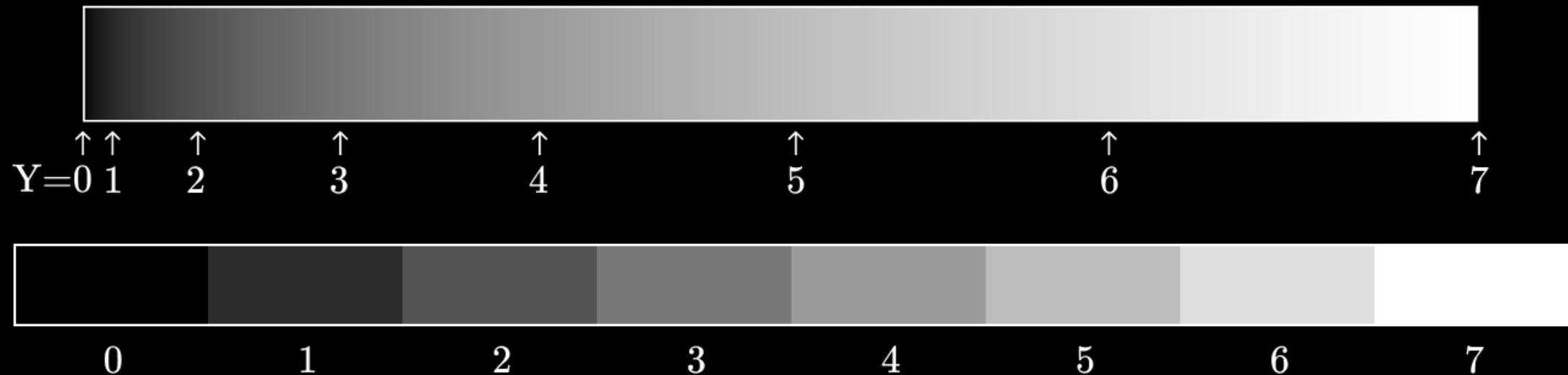
- #030000 и #040000 отличается так же, как #F40000 и #F50000?



Linear energy



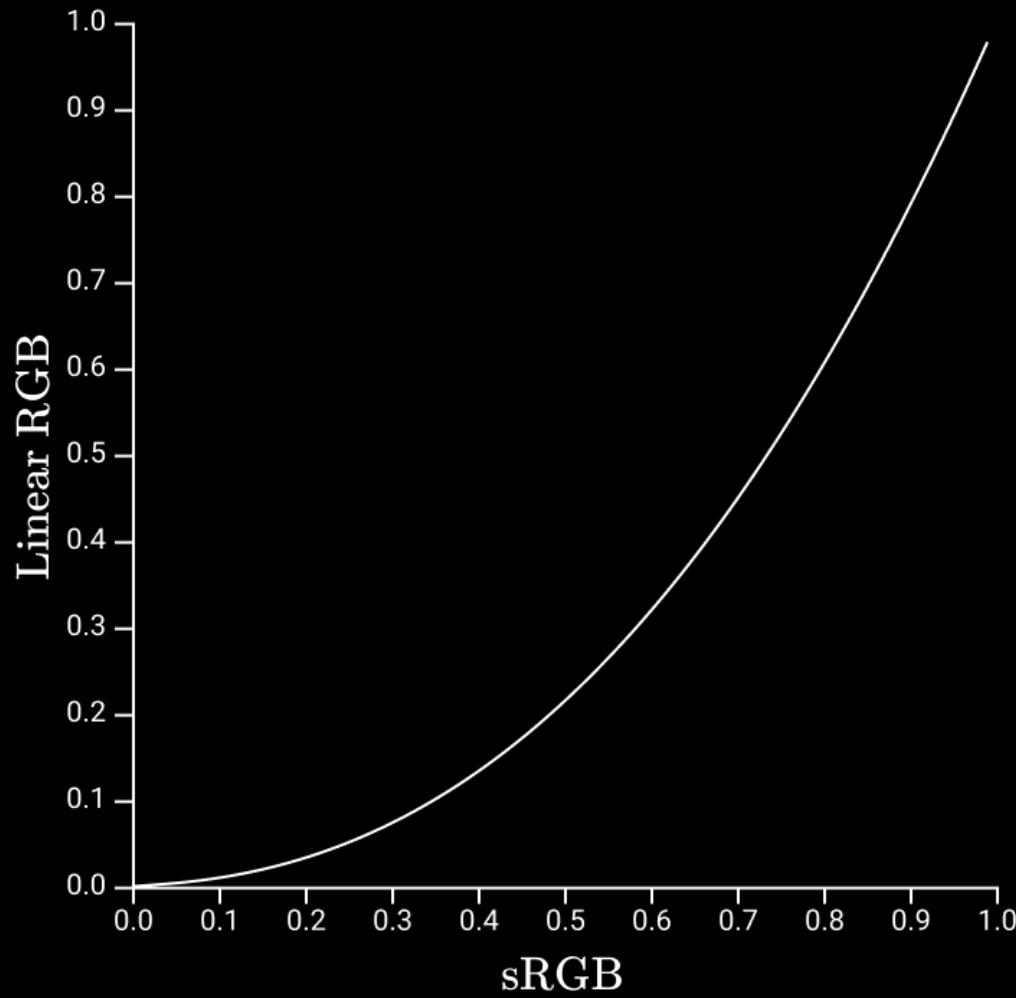
Linear energy



$$Y = \left(\frac{[8E]^2}{8} \right)$$

Гамма-коррекция в sRGB

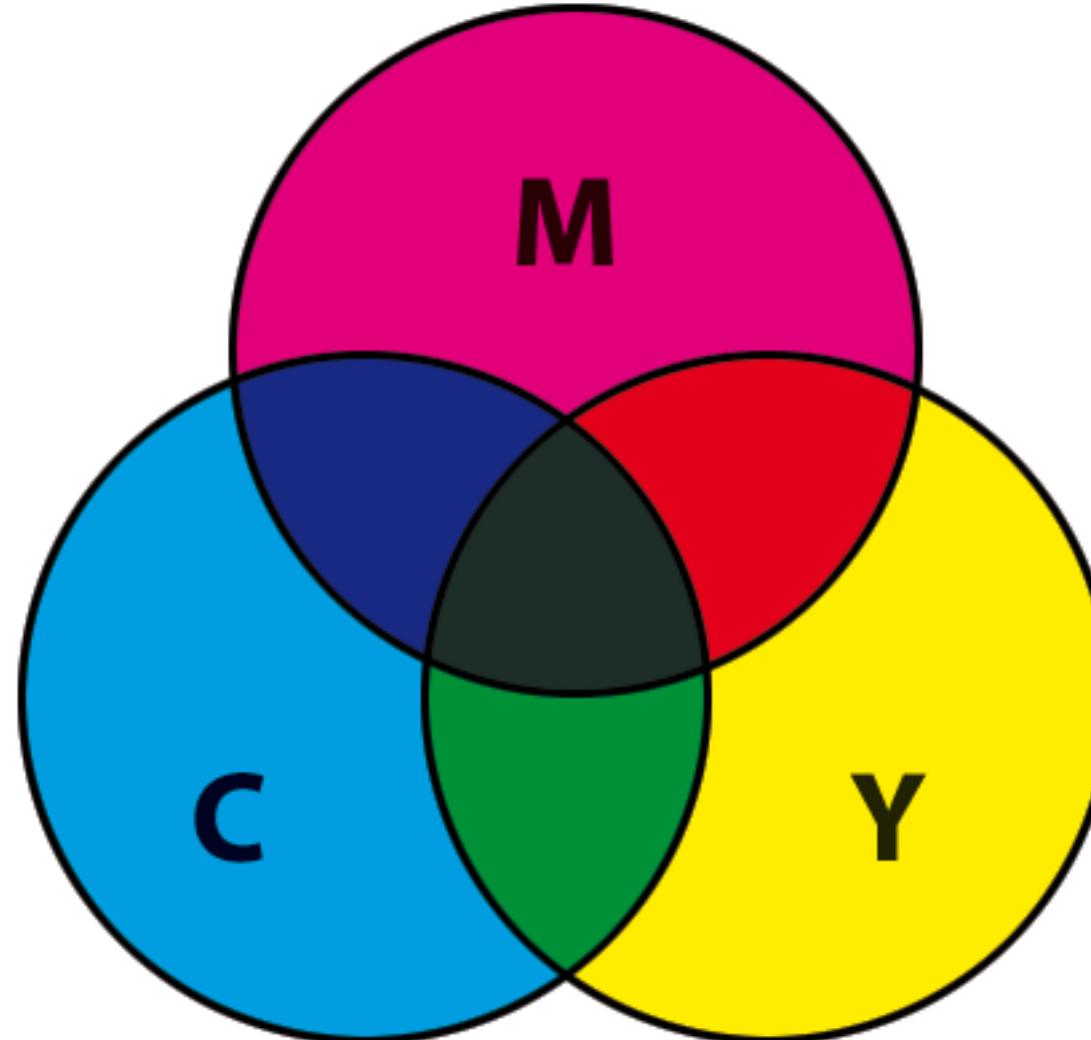
$$C_{\text{linear}} = \begin{cases} \frac{C_{\text{sRGB}}}{12.92}, & C_{\text{sRGB}} \leq 0.04045 \\ \left(\frac{C_{\text{sRGB}} + 0.055}{1.055} \right)^{2.4}, & C_{\text{sRGB}} > 0.04045 \end{cases}$$



Linear perceived brightness

CMYK

А ещё бывает
CMYKLcLm



Цветовые профили

- Описывают конкретное устройство печати или вывода
- Чаще всего можно встретить ICC-профили

#FFA500 → sRGB → гамма-коррекция → гамма
экрана → яркость экрана → субпиксели →
колбочки → мозг

