

# Цвет глазами человека и компьютера

Цвет фона: #FFA500



Андрей Гейн

# Дисклеймер

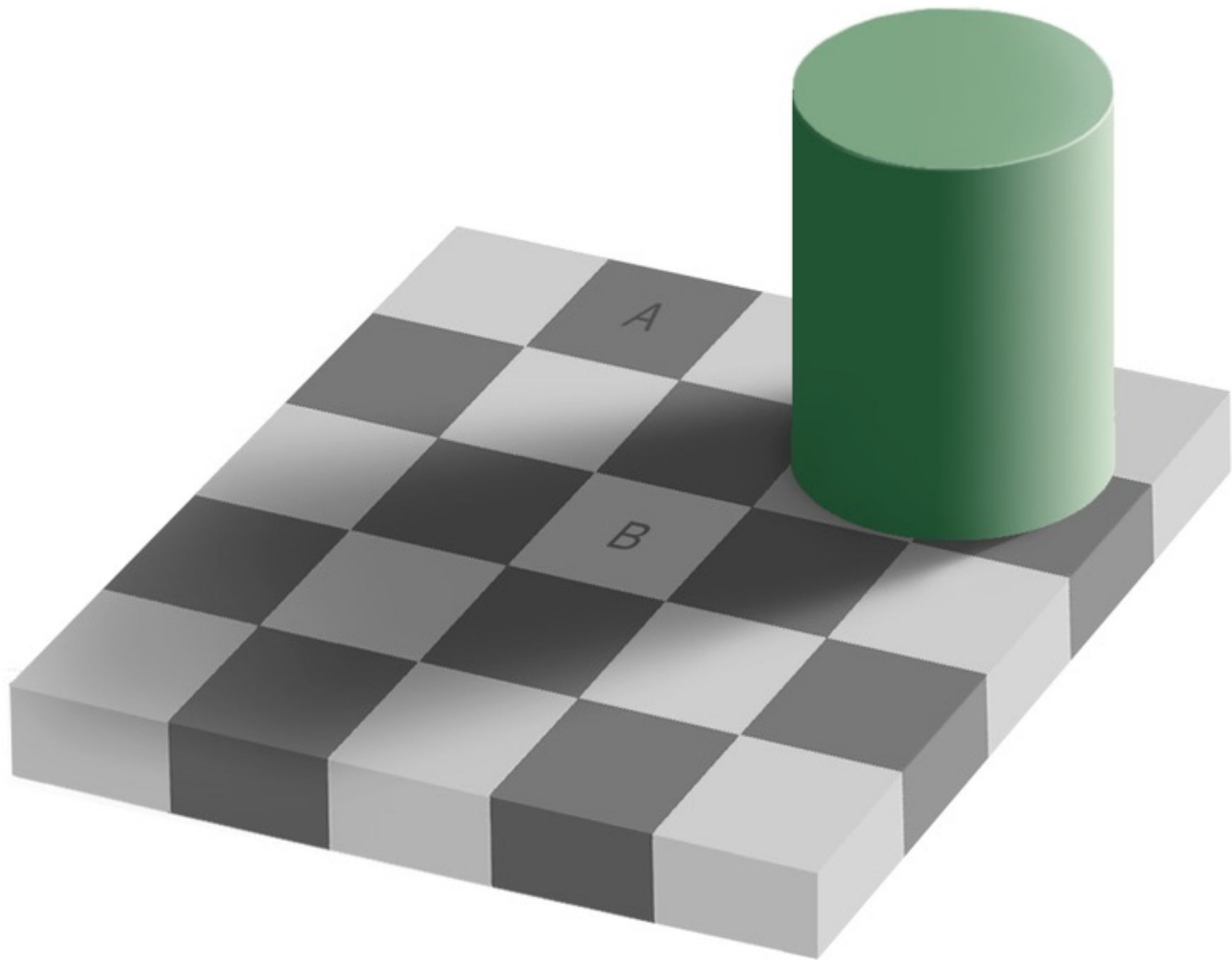
- <https://jamie-wong.com/post/color/>
- <https://medium.com/hipster-color-science/a-beginners-guide-to-colorimetry-401f1830b65a>
- <https://youtu.be/SUCVj3qBmNQ>
- <https://discoveryeye.org/way-eyes-work/>
- ...











# Ретина

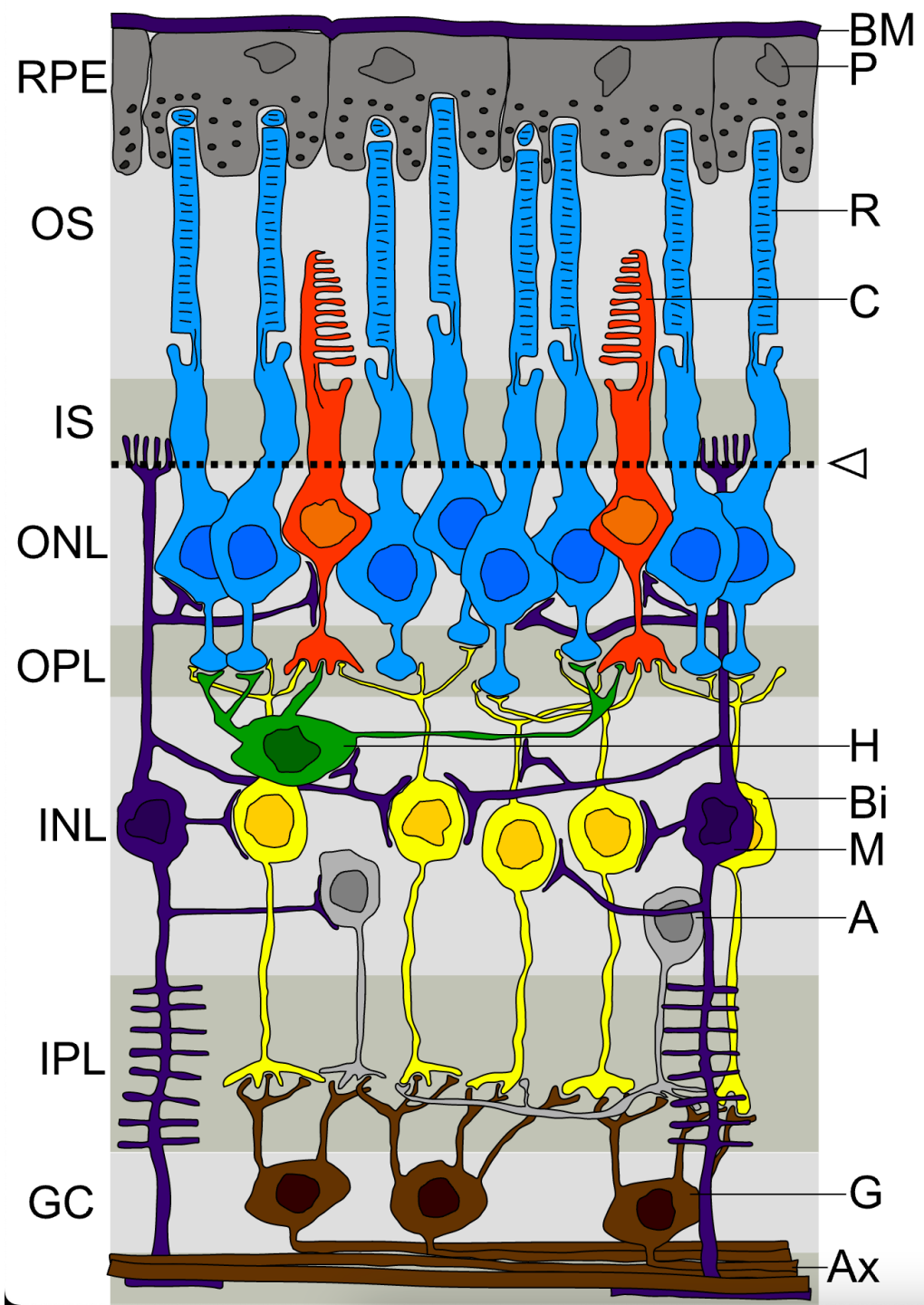








# Сетчатка



# Сложнааа

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

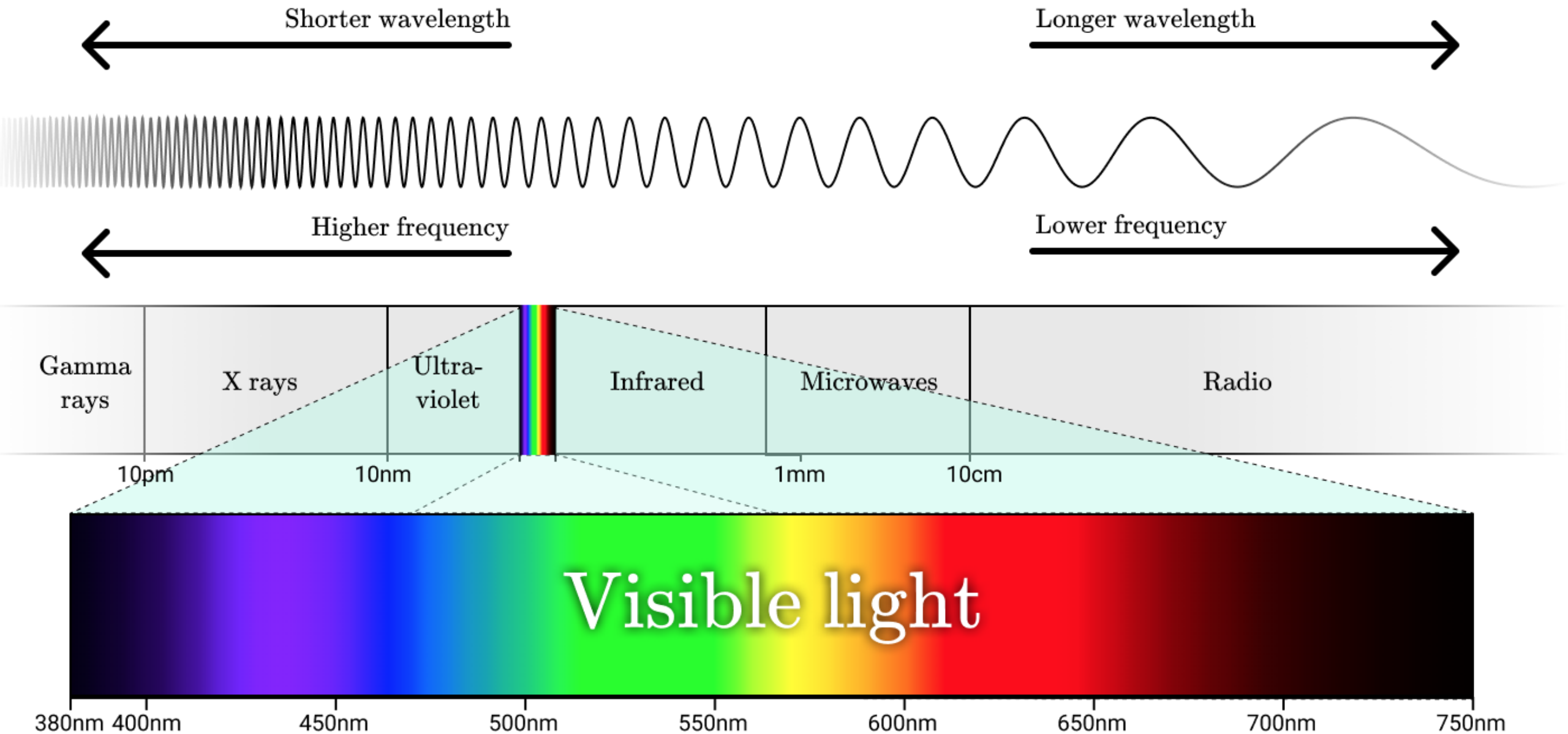
# Фоторецепторы — палочки и колбочки





# 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?

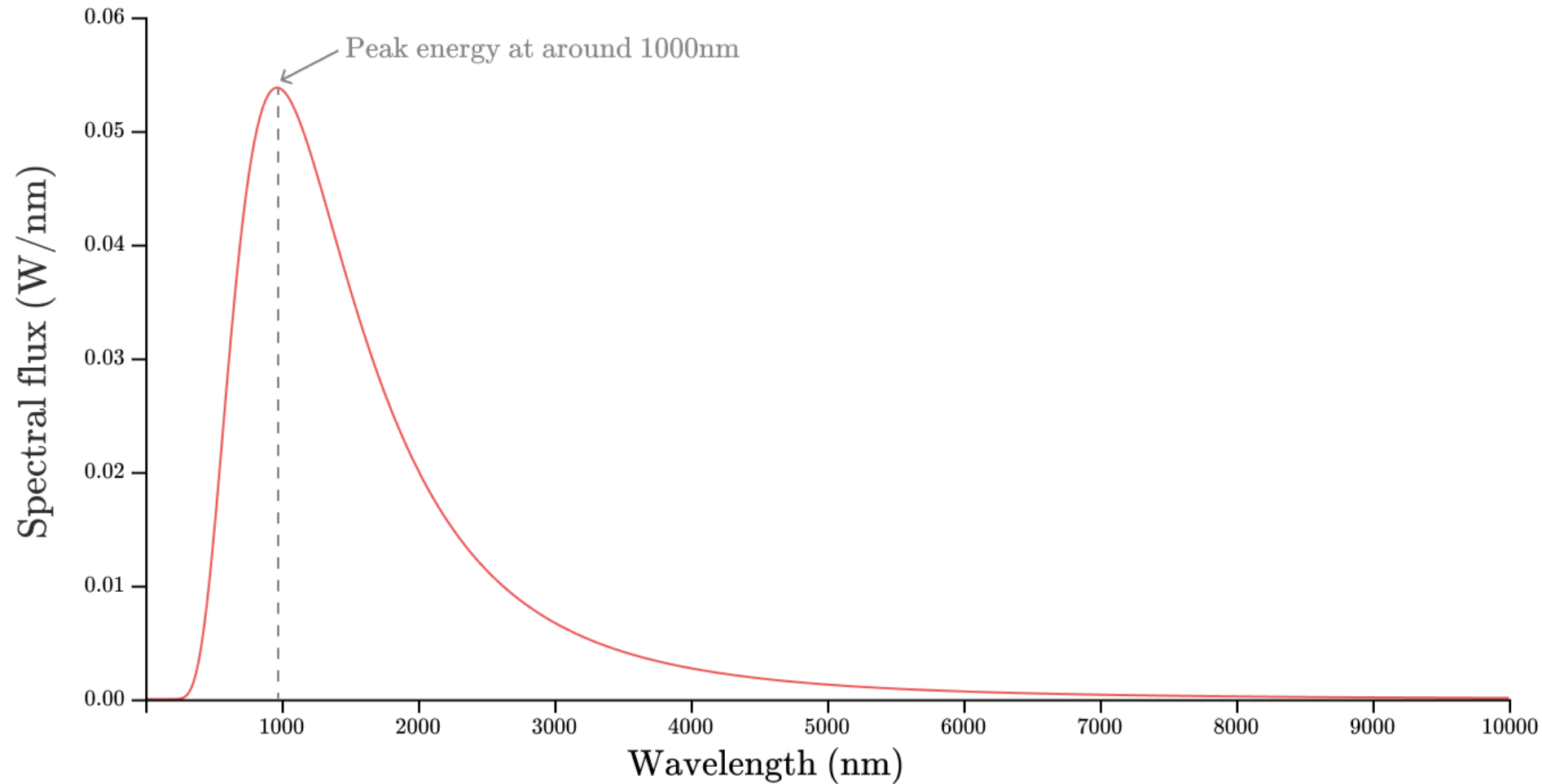


# Мощность, энергия, ватты, ...

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

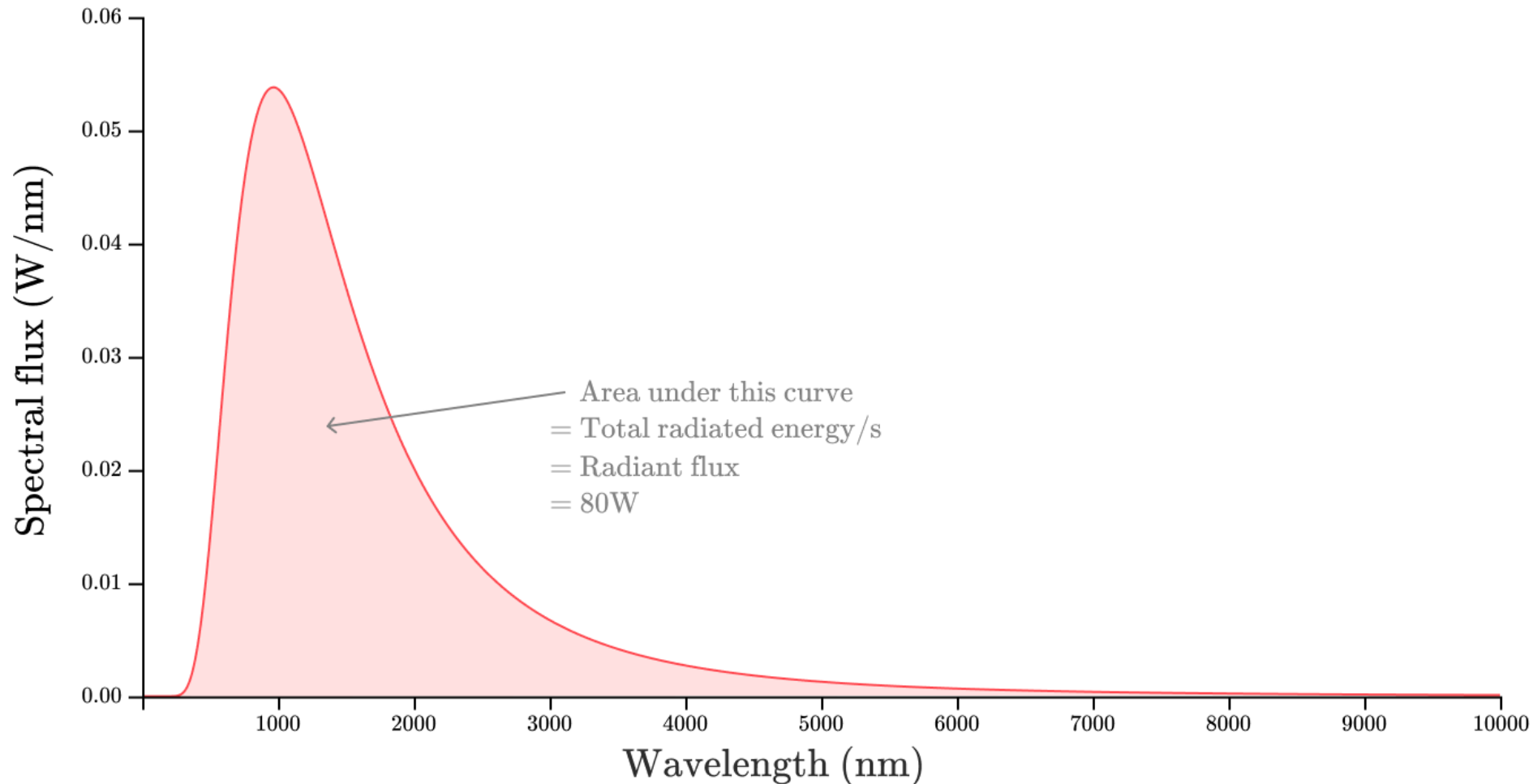
# Спектральная плотность излучения

## Radiated power by wavelength



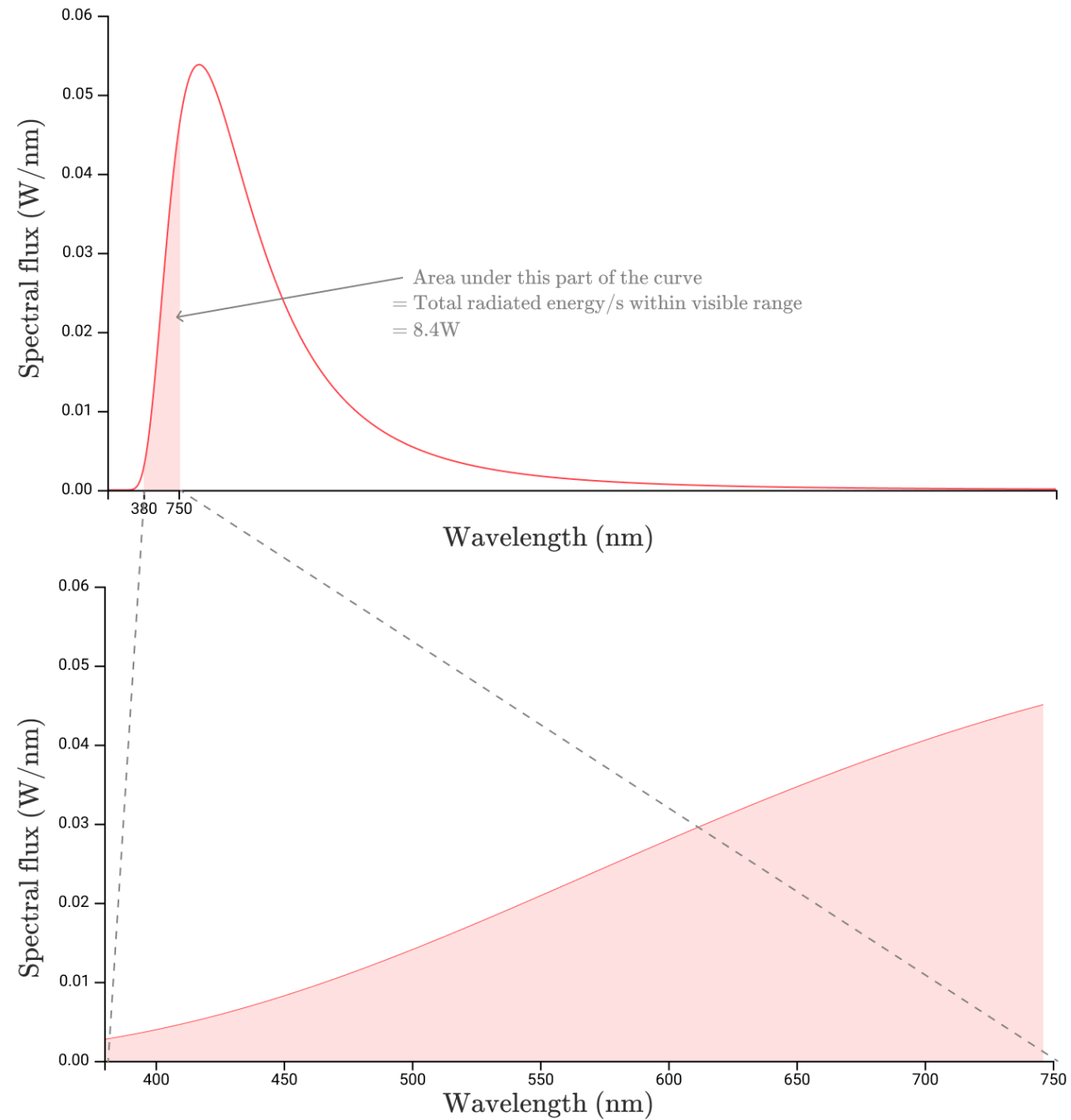
# Спектральная плотность излучения

Radiated power by wavelength



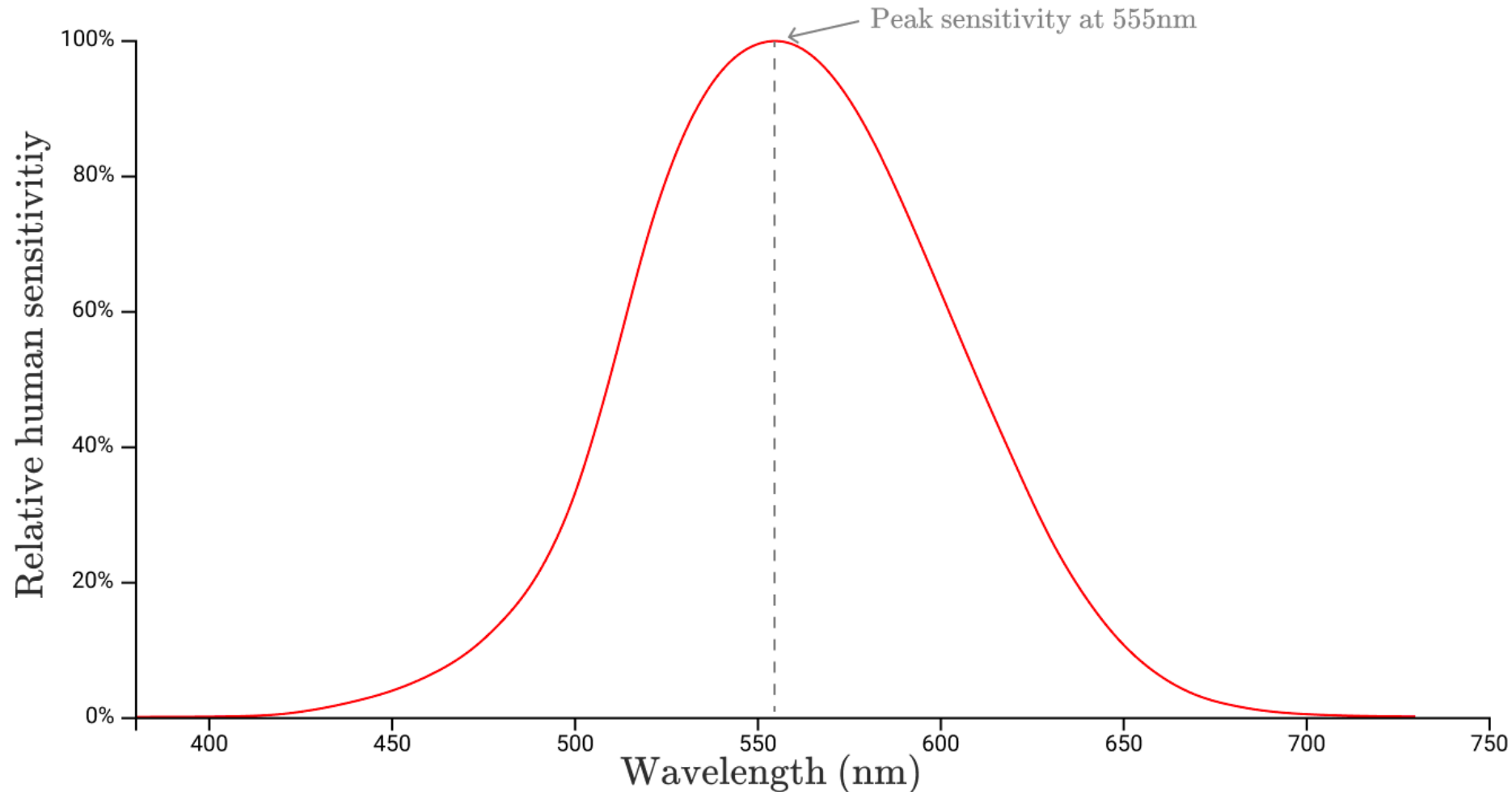


## Radiated power by wavelength



# Относительная спектральная световая эффективность монохроматического излучения

Relative human sensitivity by wavelength

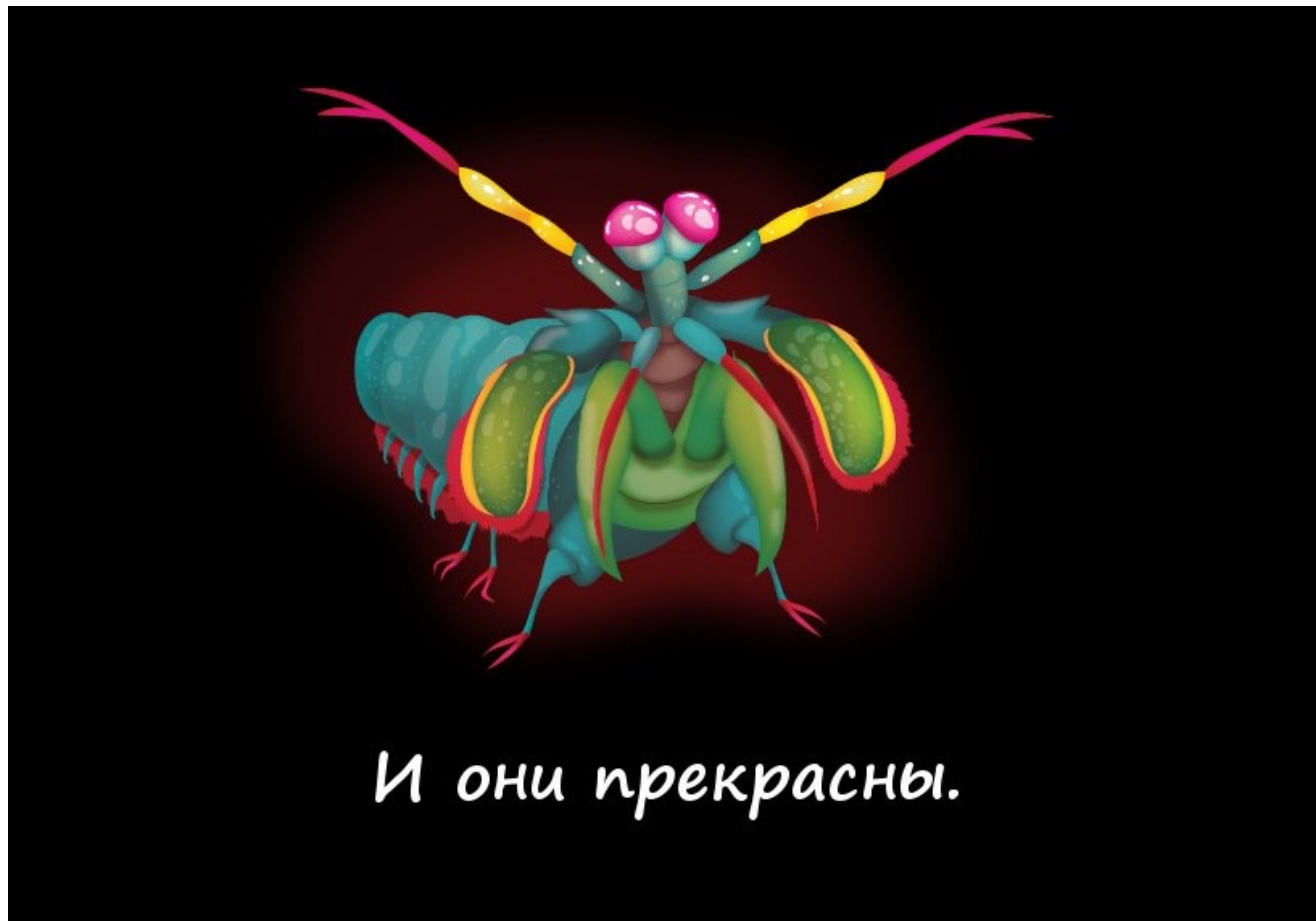


# Видимые диапазоны

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



# Рак-богомол



[https://theoatmeal.com/comics/mantis\\_shrimp](https://theoatmeal.com/comics/mantis_shrimp)

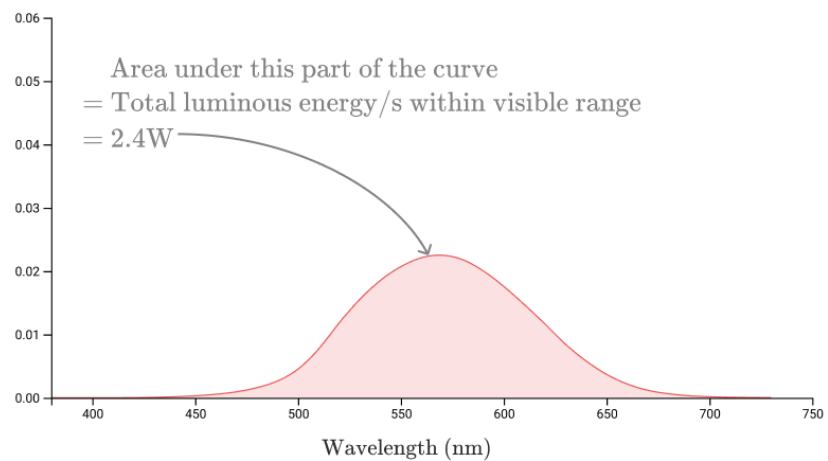
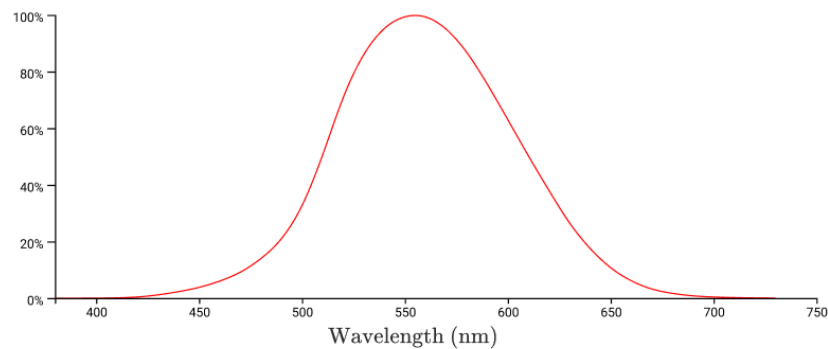
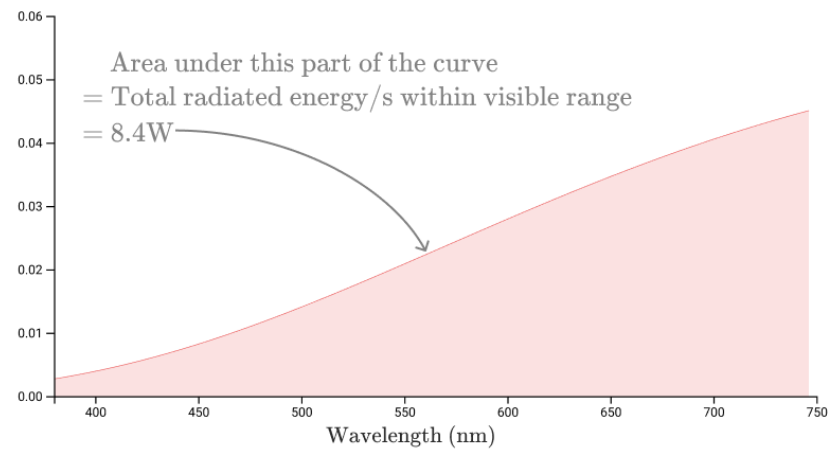
Spectral flux  
(W/nm)

×

Relative human  
sensitivity

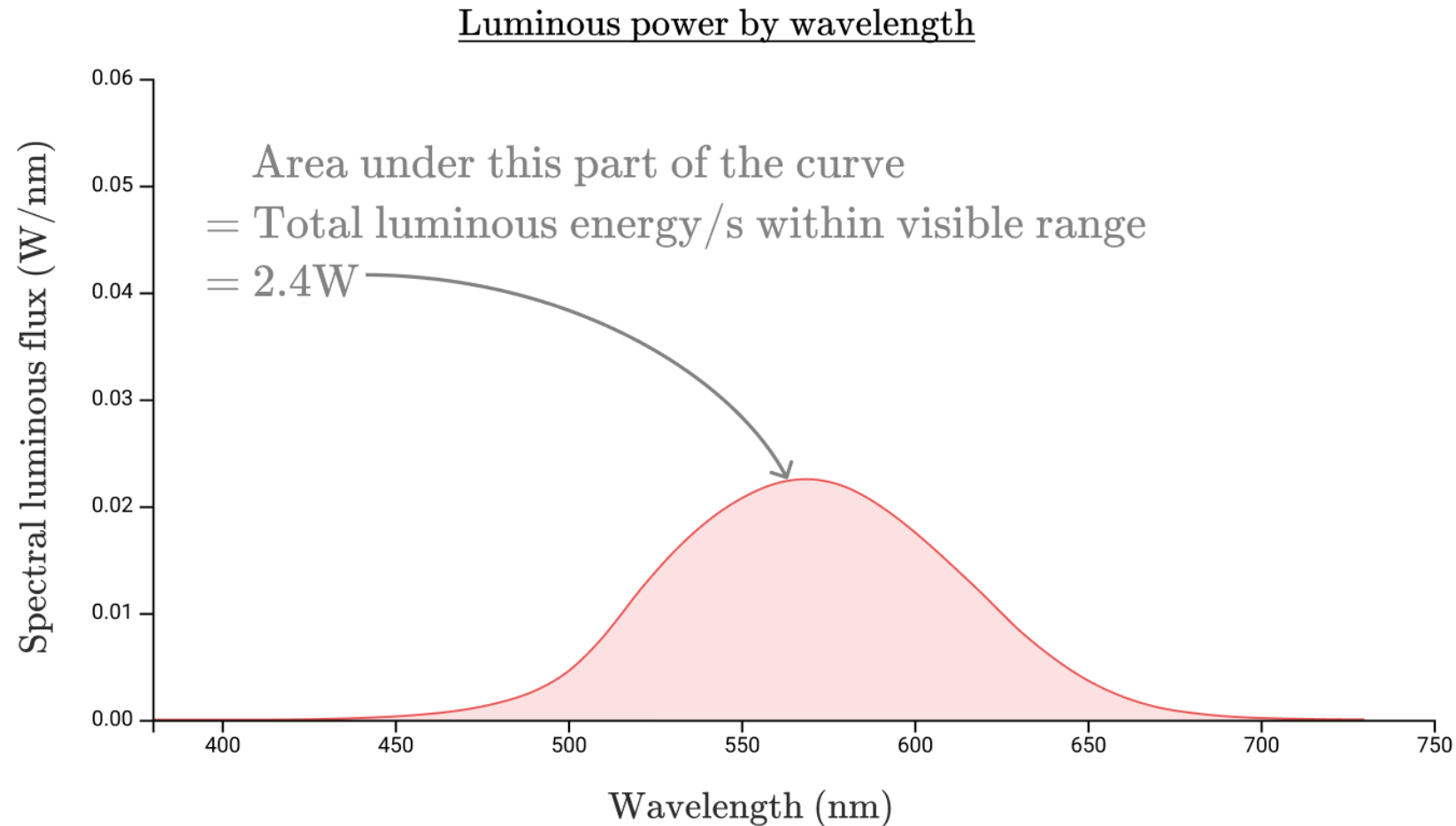
=

Spectral  
luminous  
flux  
(W/nm)

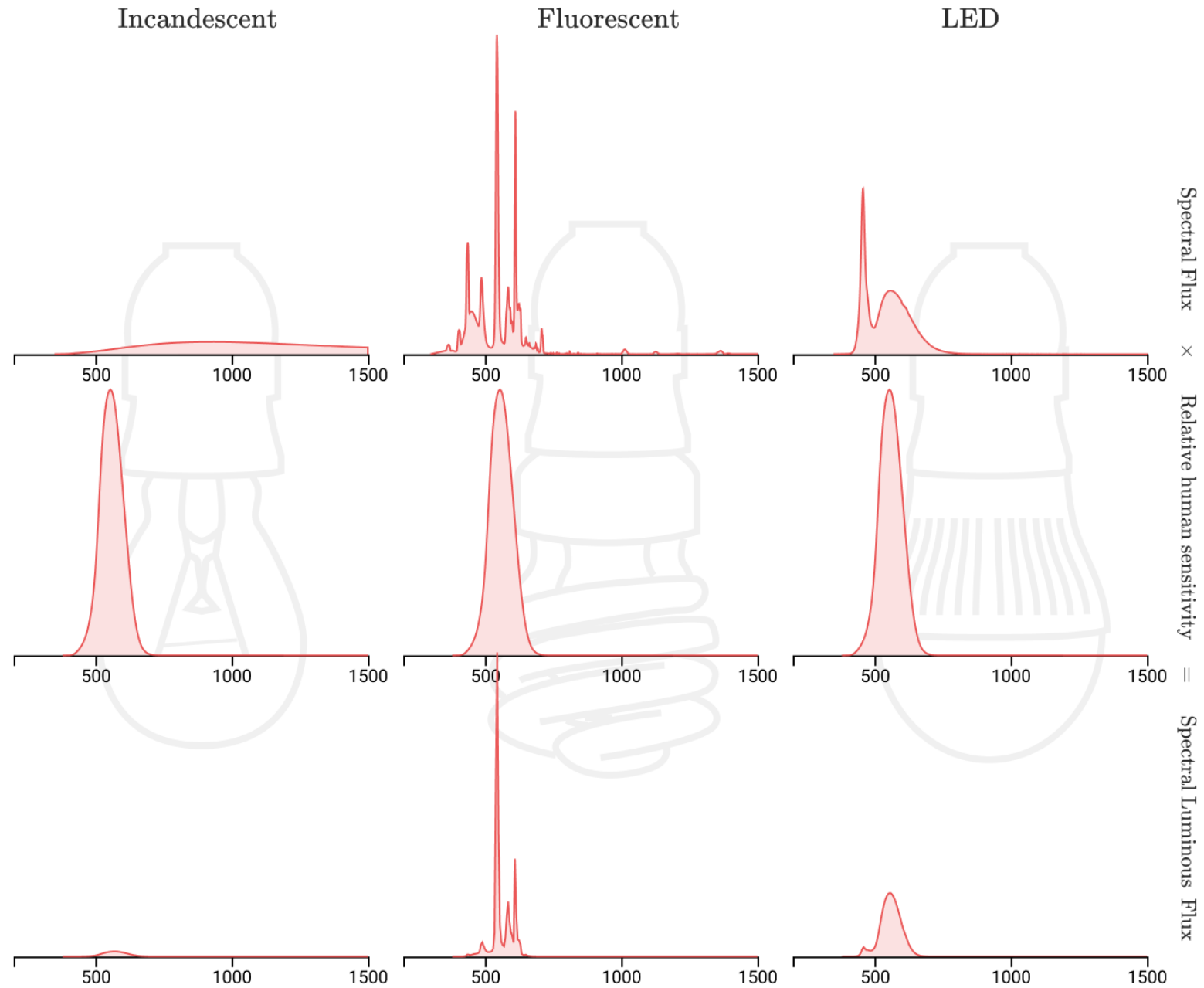




# Спектральная плотность светового потока



# 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

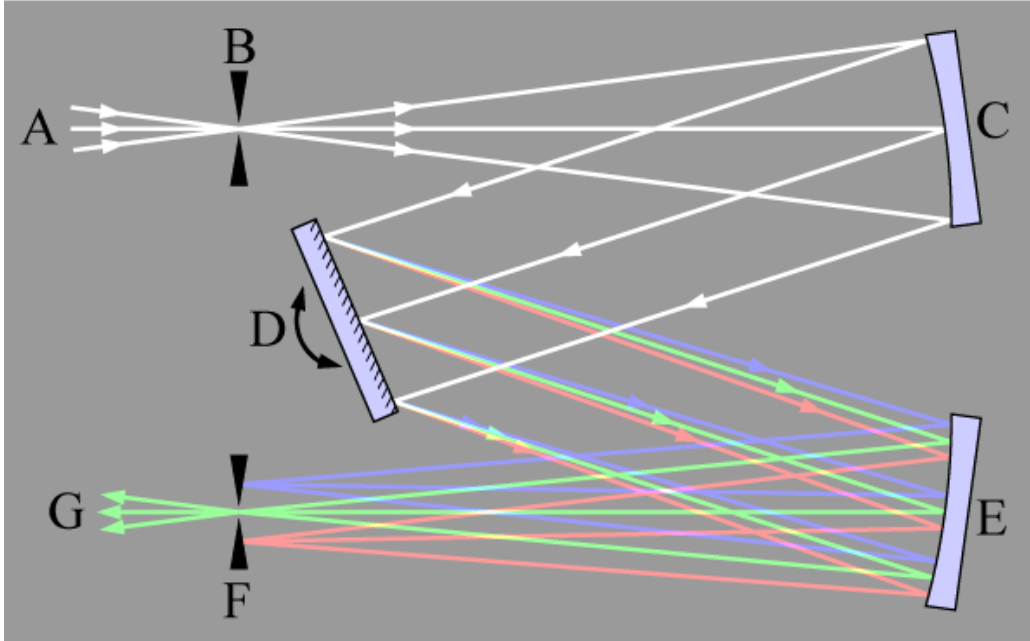






# Цвет

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

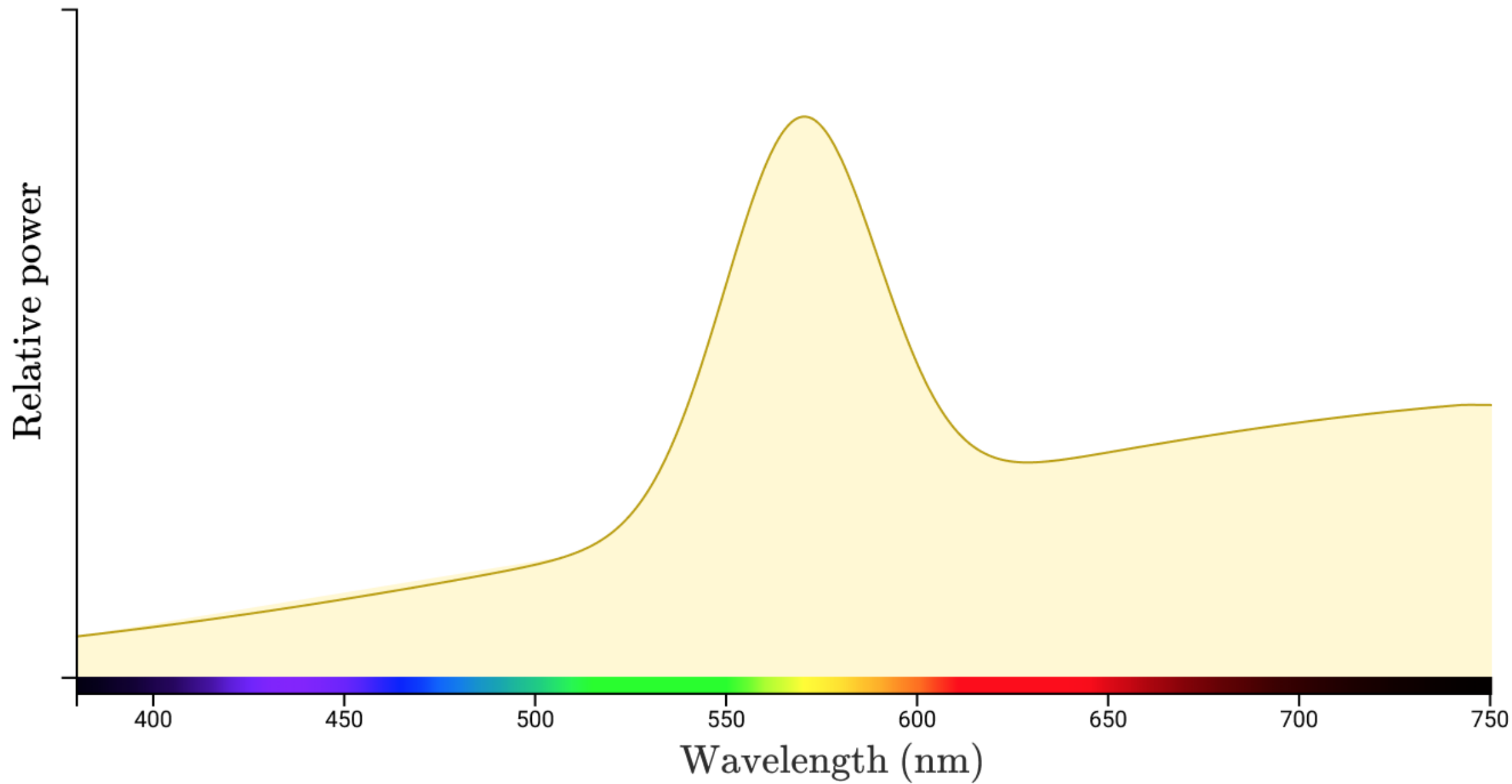


# Цвет

- 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

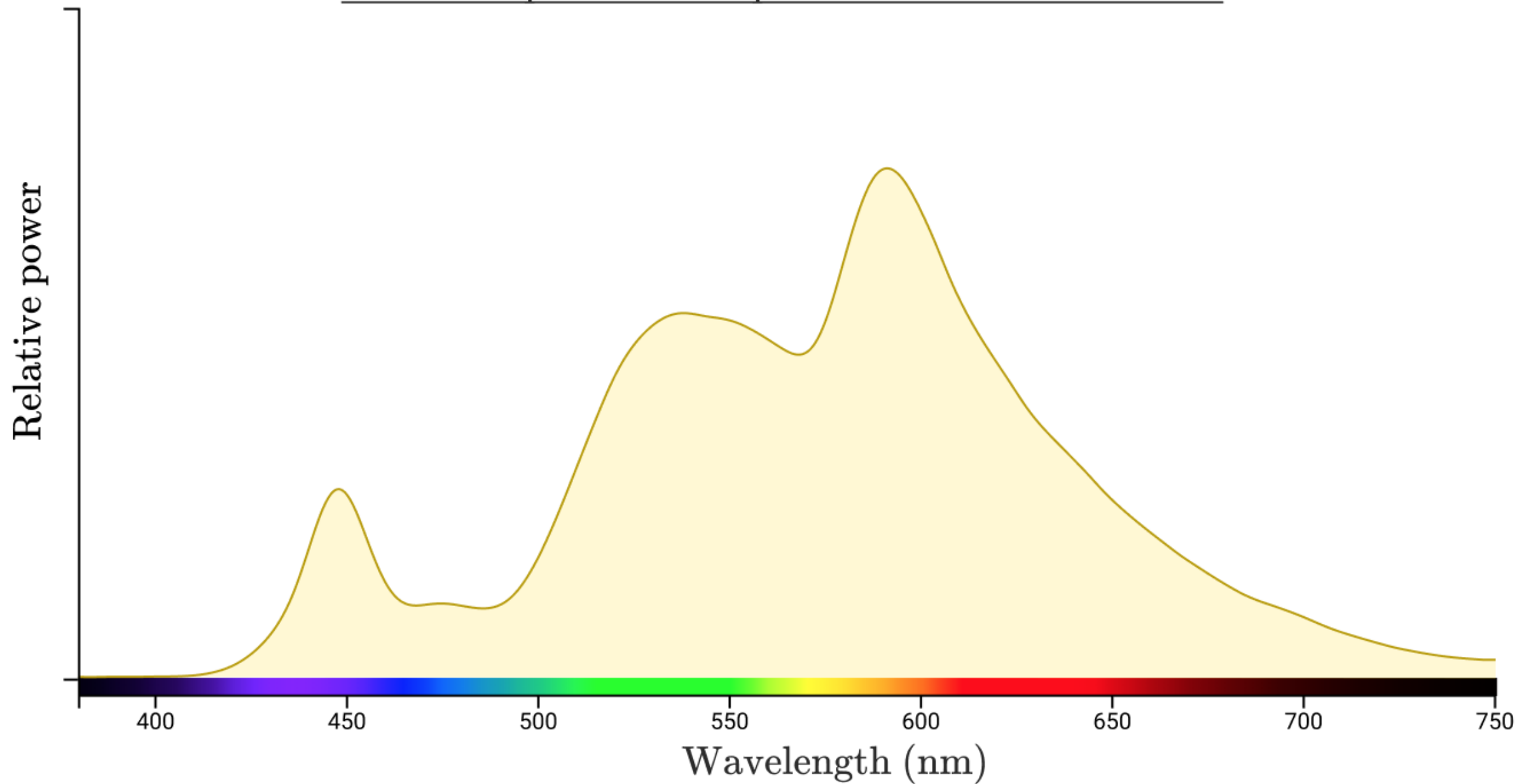




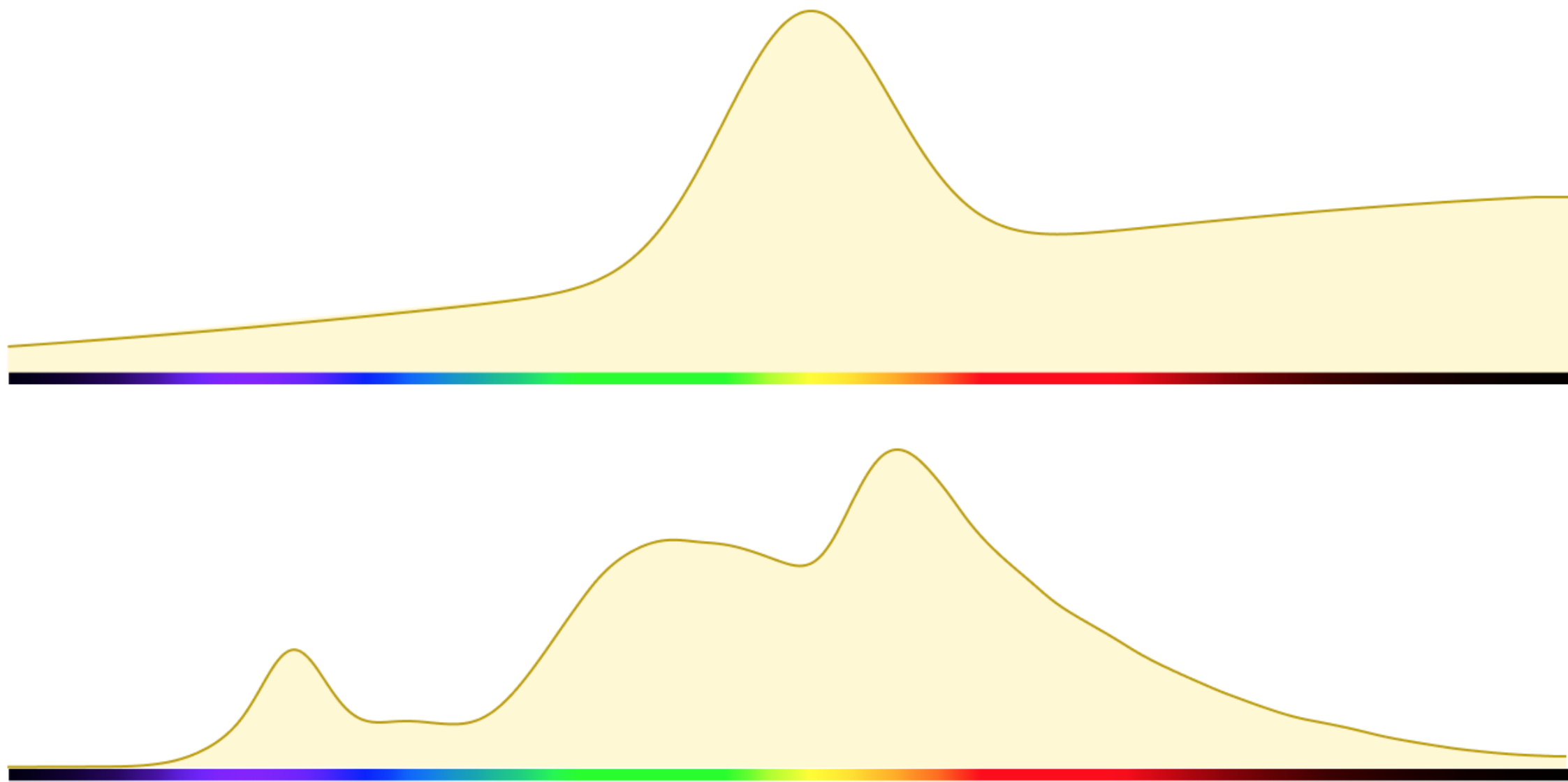




# Emission spectrum of a pixel of a lemon on a screen



## Two metamers of a specific yellow

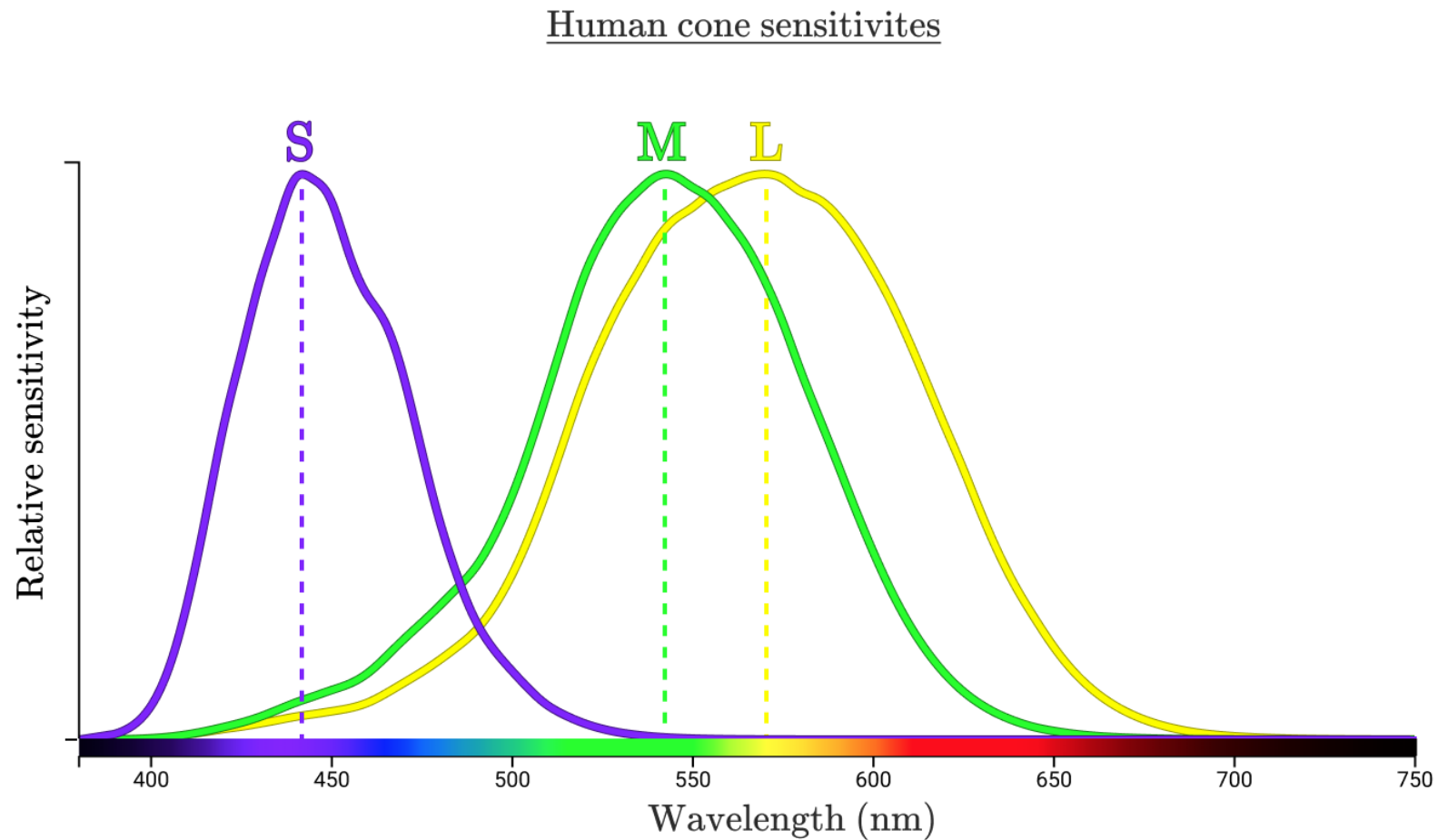


# Вопросы

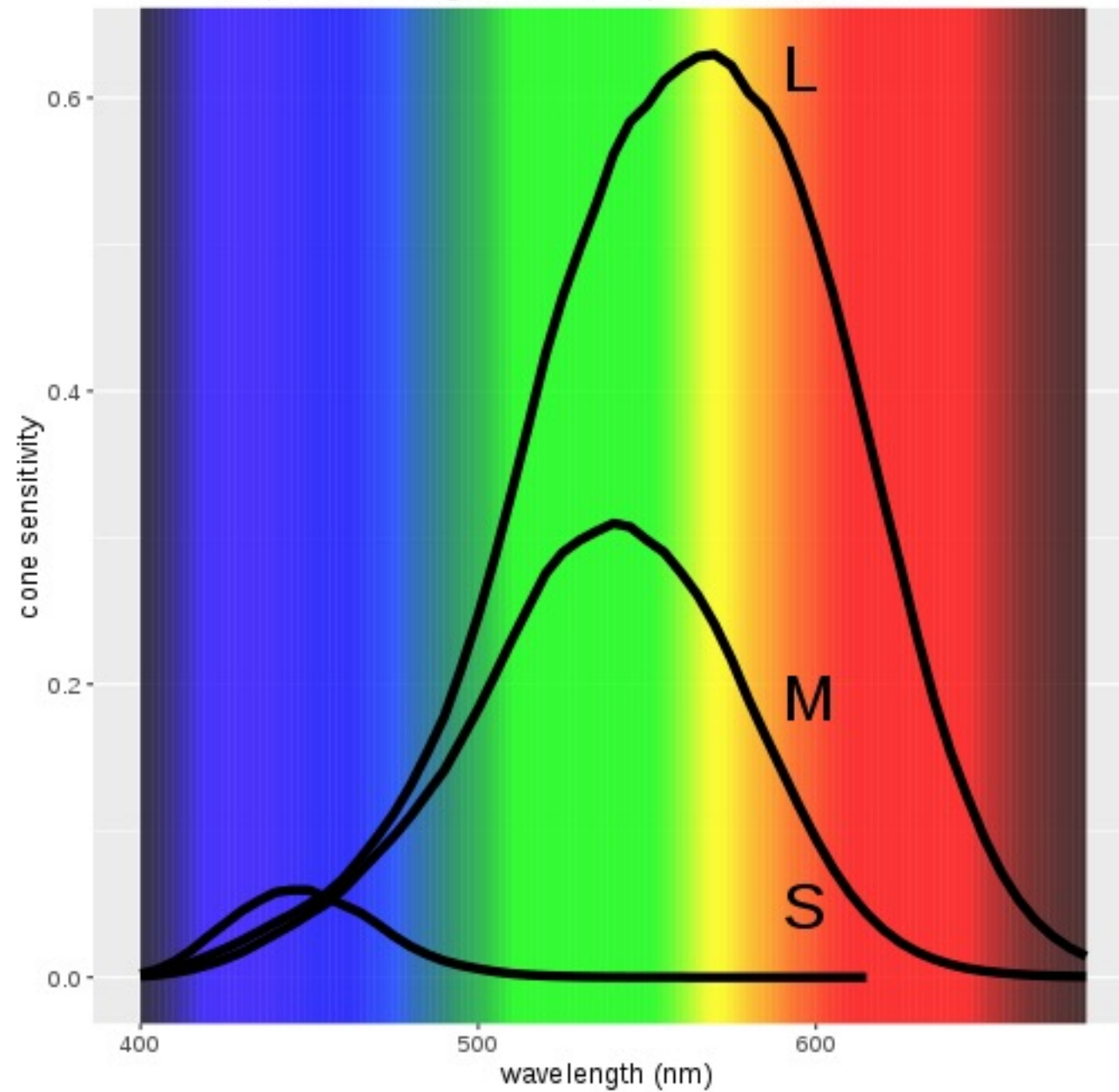
- Все ли люди увидят жёлтые метамеры одинаковыми?
- Все ли живые существа увидят их одинаковыми?



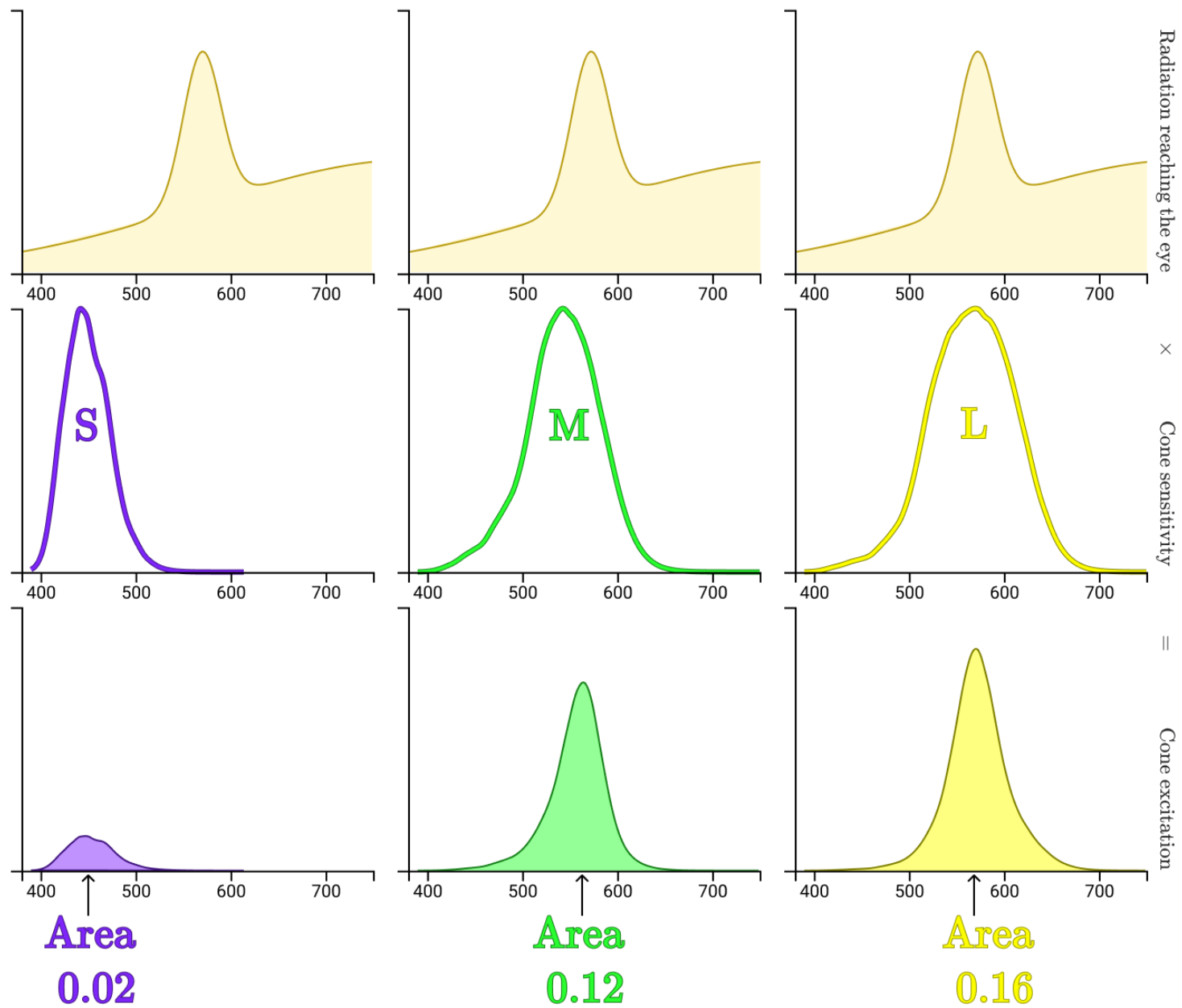
# Вспоминаем про колбочки



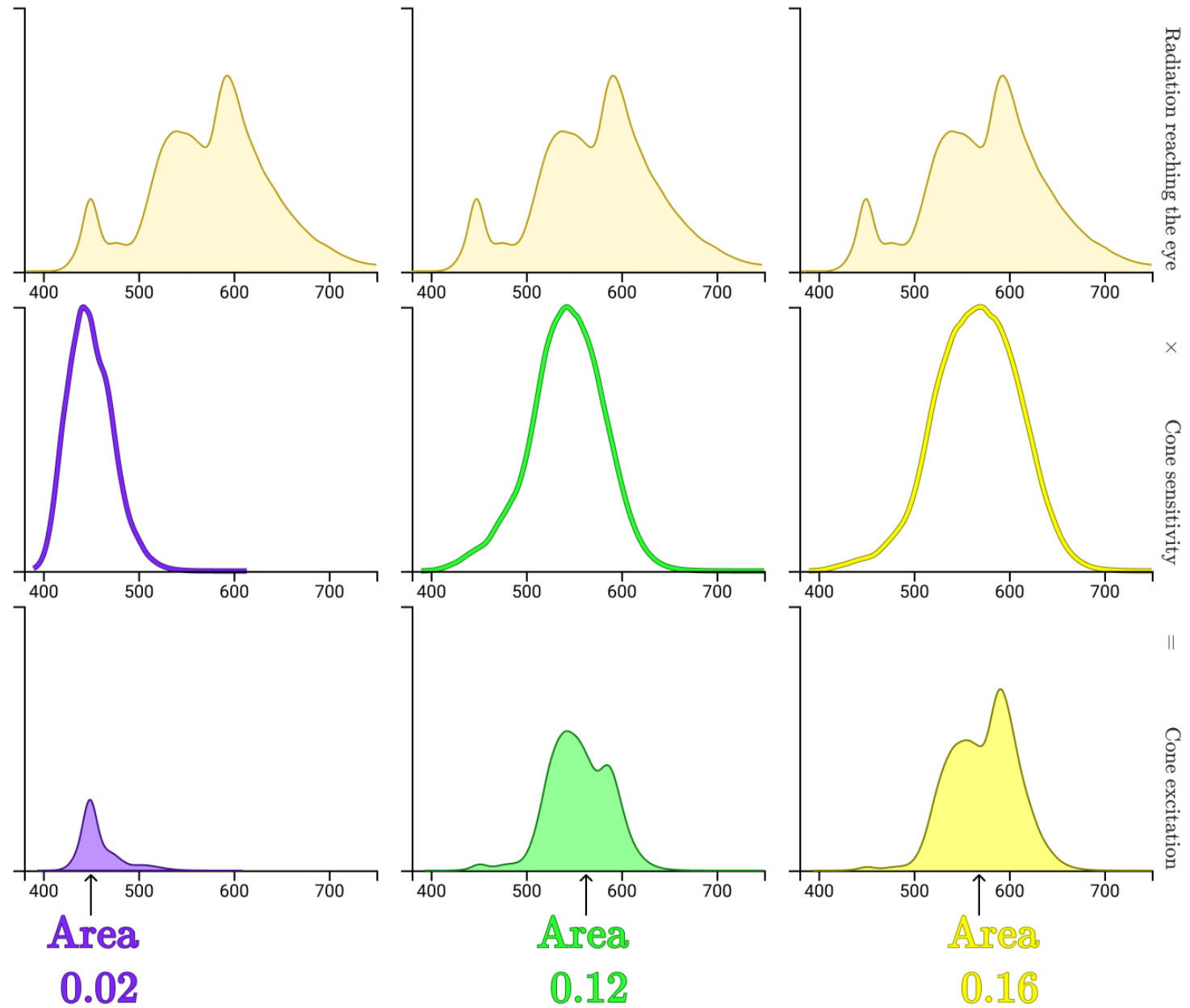
Population Weighted Cone Spectral Sensitivities



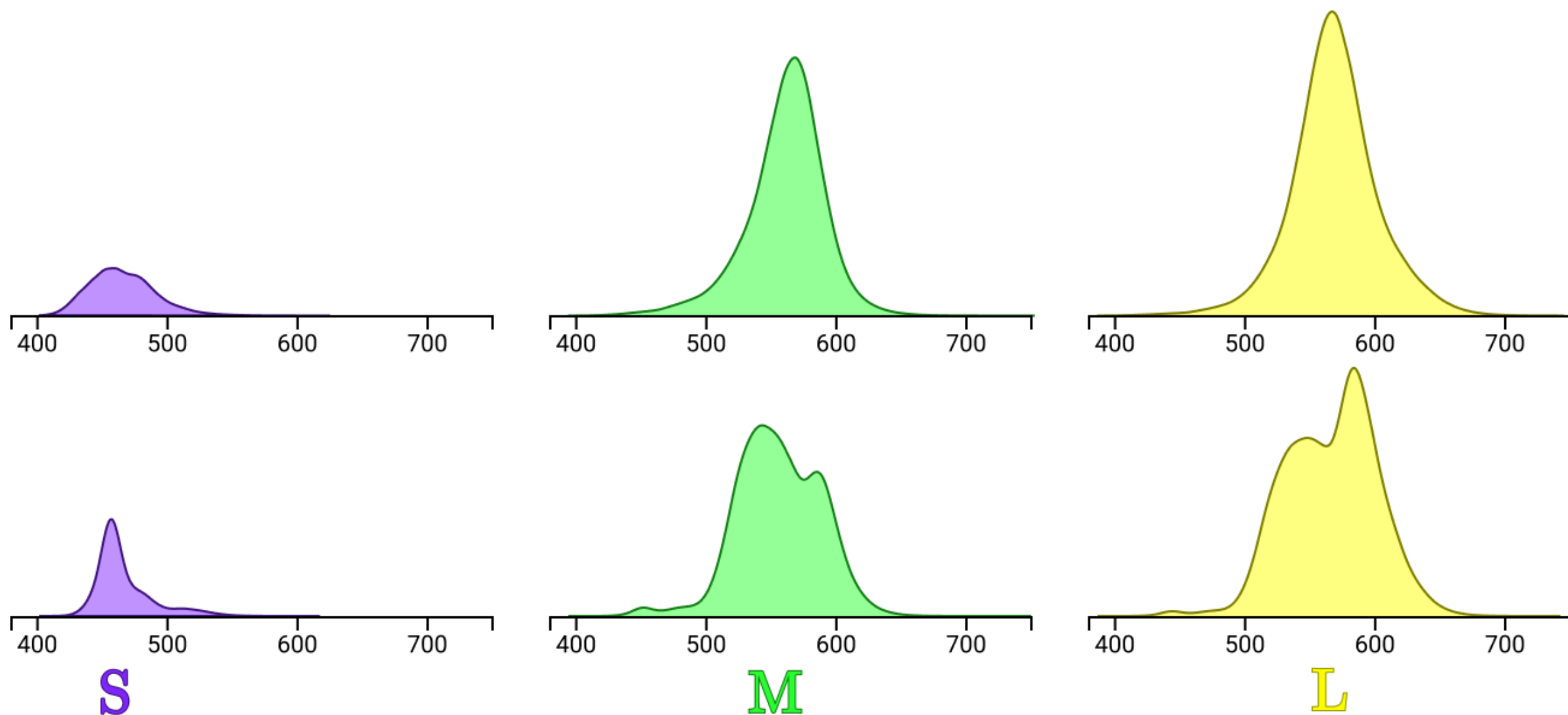
## Cone excitation by a point on a lemon



# Cone excitation by a pixel of a lemon on a screen



## Cone stimulation of two metamers



# 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





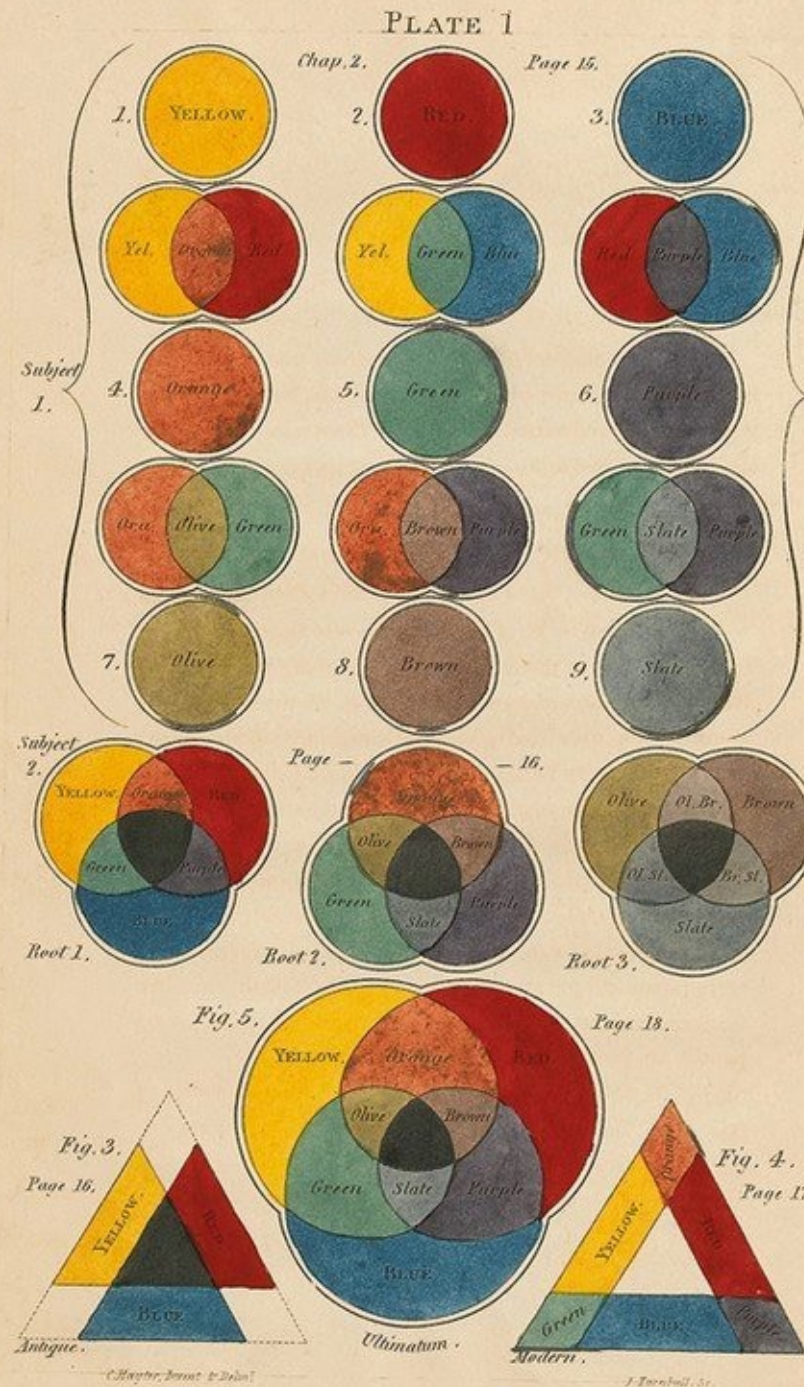
# SML — наше первое пространство!

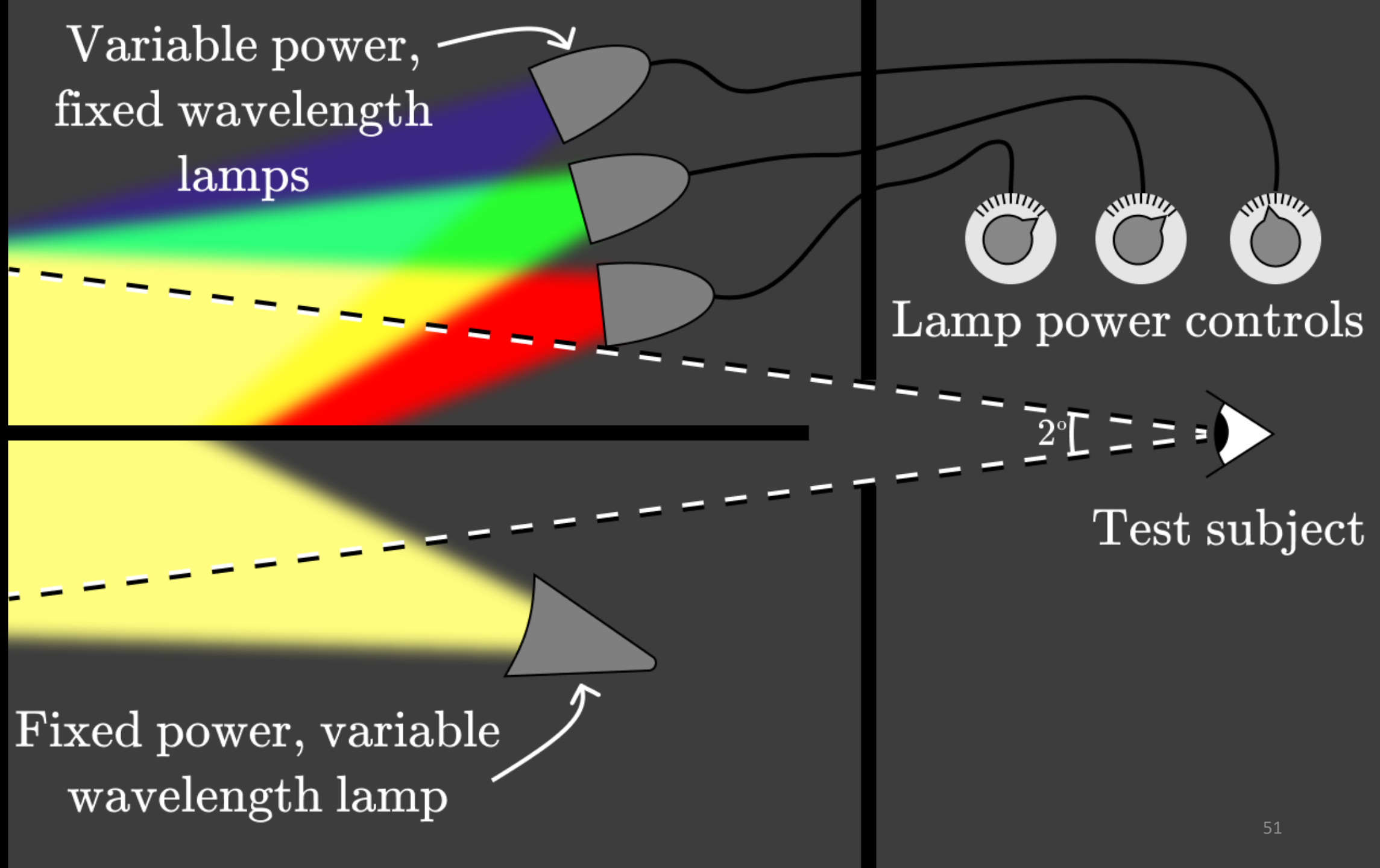
- Не все тройки возможны
- Откуда вообще человечеству известно, что колбочек всего три вида?

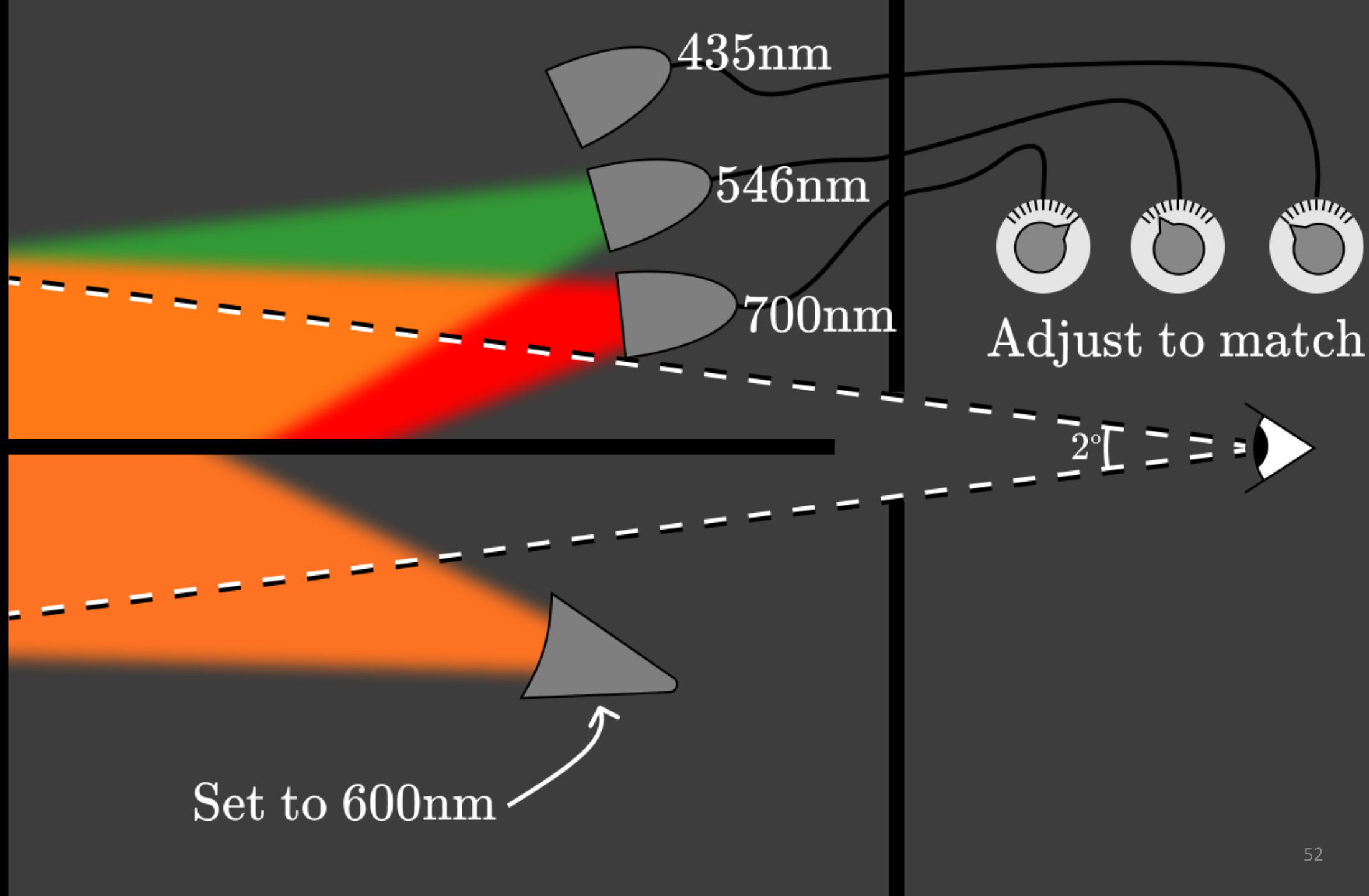
# Эксперименты Райта и Гилда, 1920-е

1826 г.

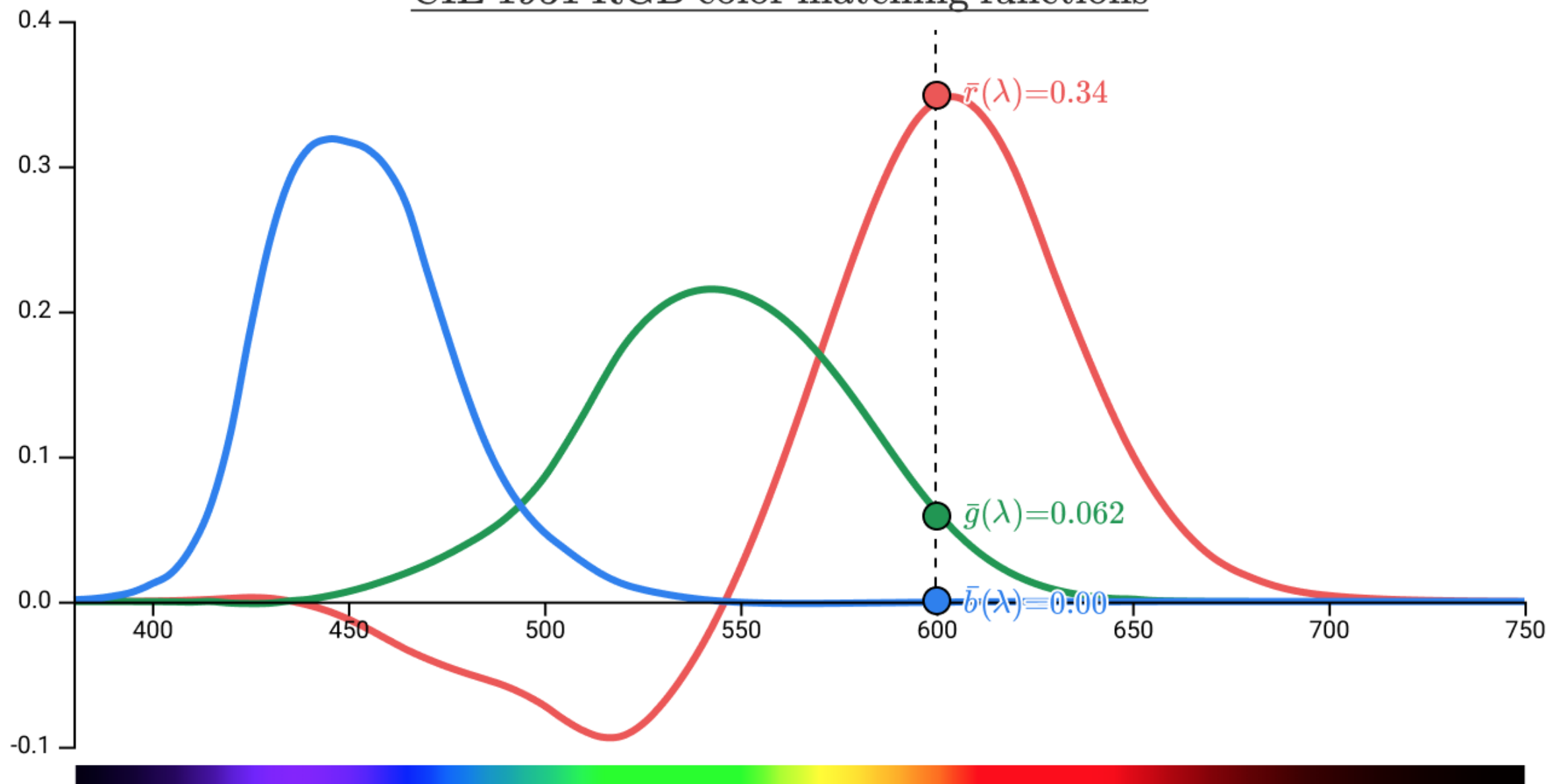
## Трёхцветная теории цвета Чарльза Хейтера







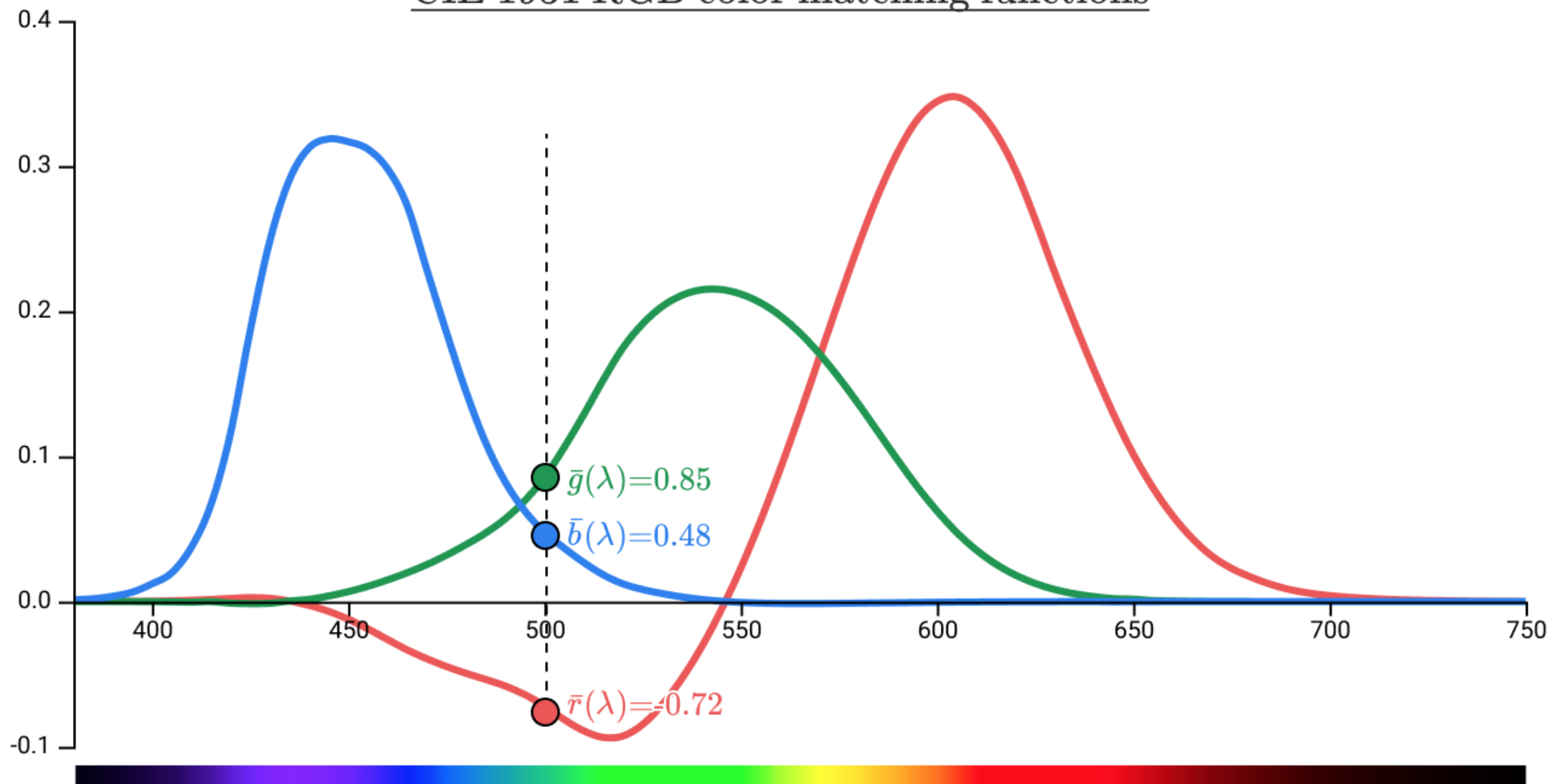
## CIE 1931 RGB color matching functions



RGB — наше второе пространство!

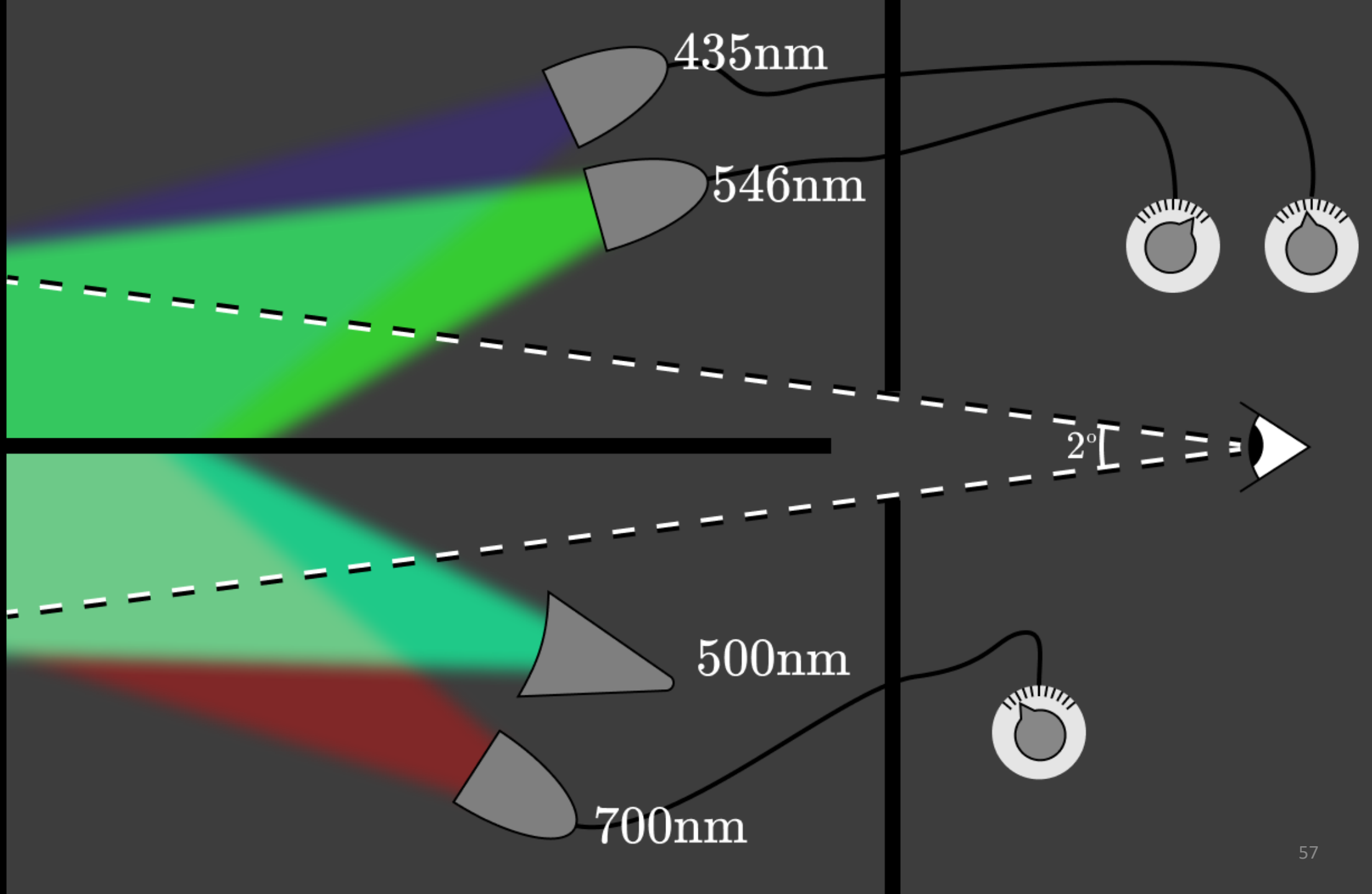


## CIE 1931 RGB color matching functions

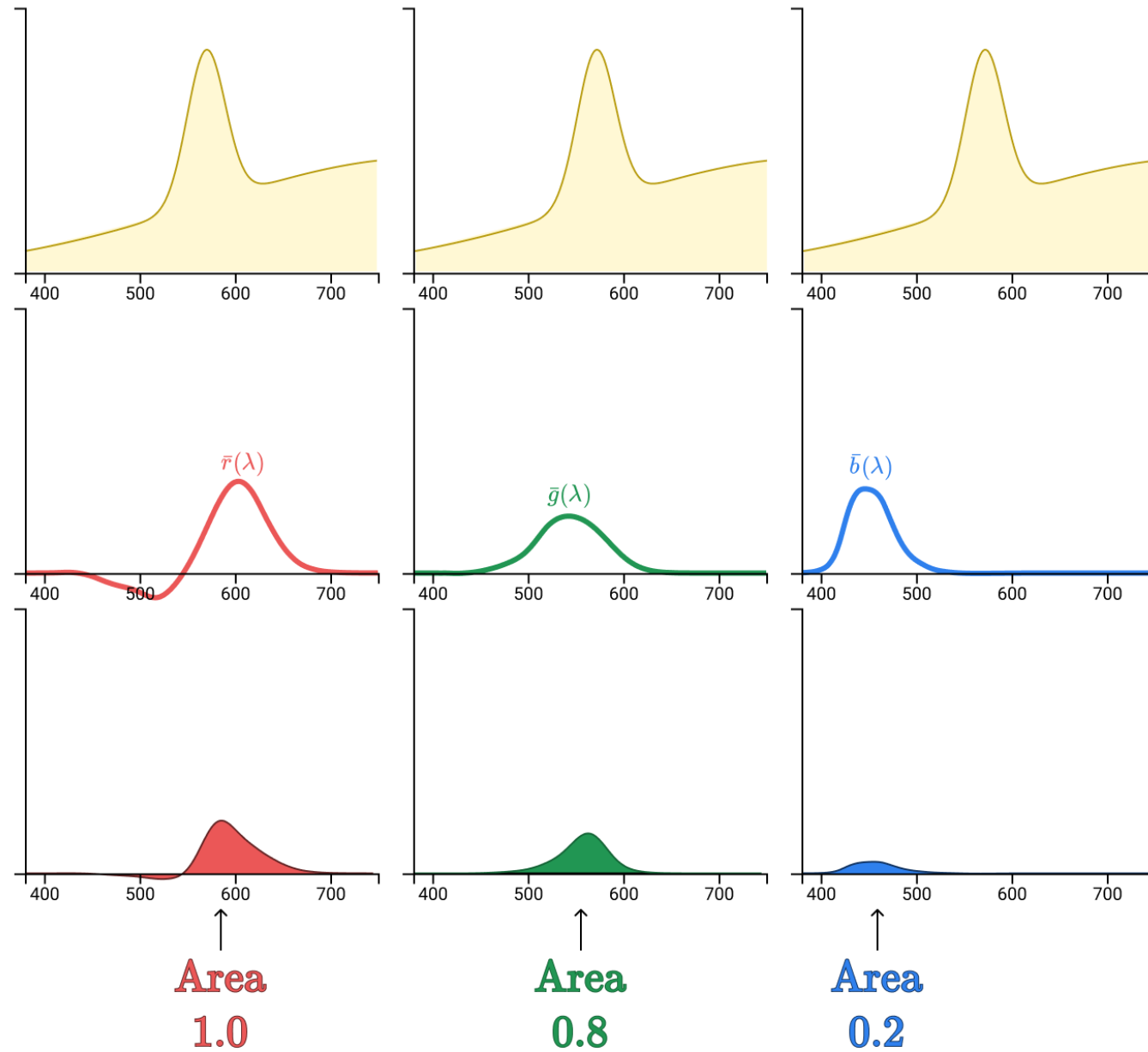


# Отрицательные координаты?!





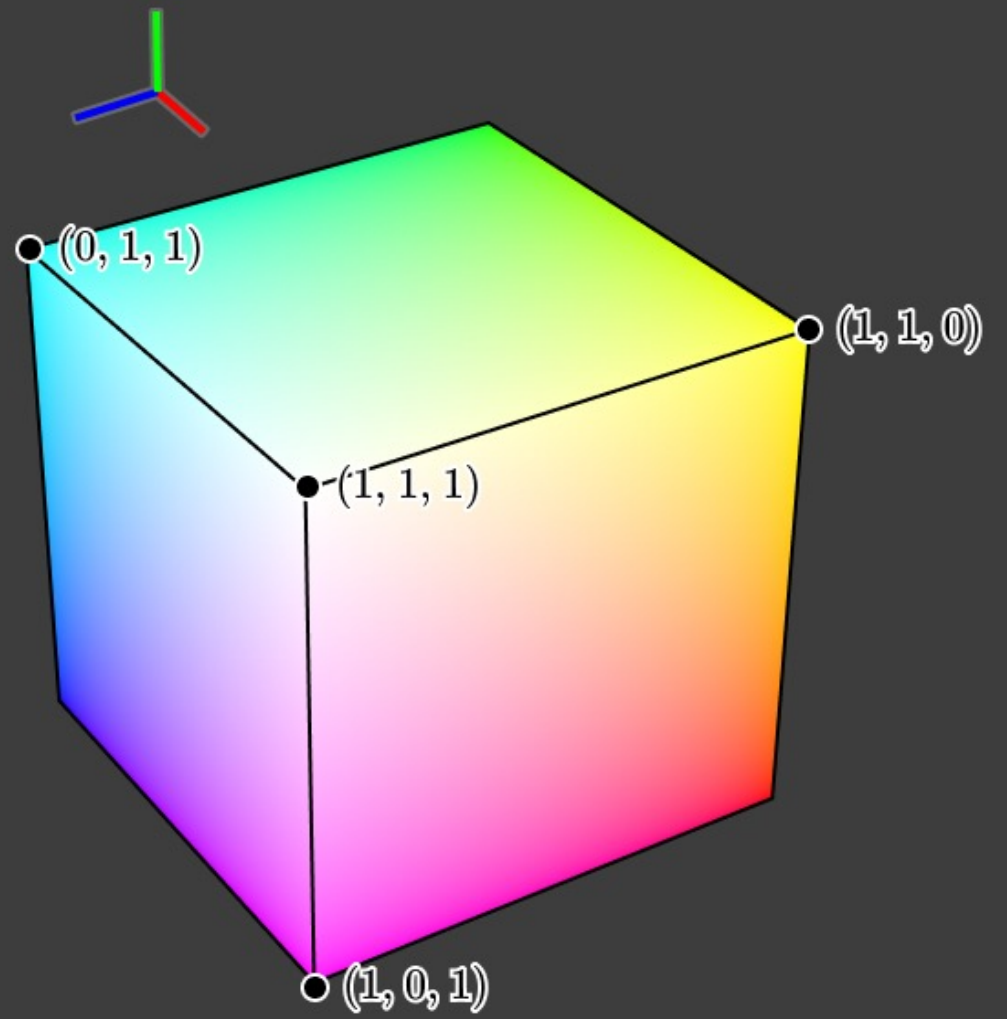
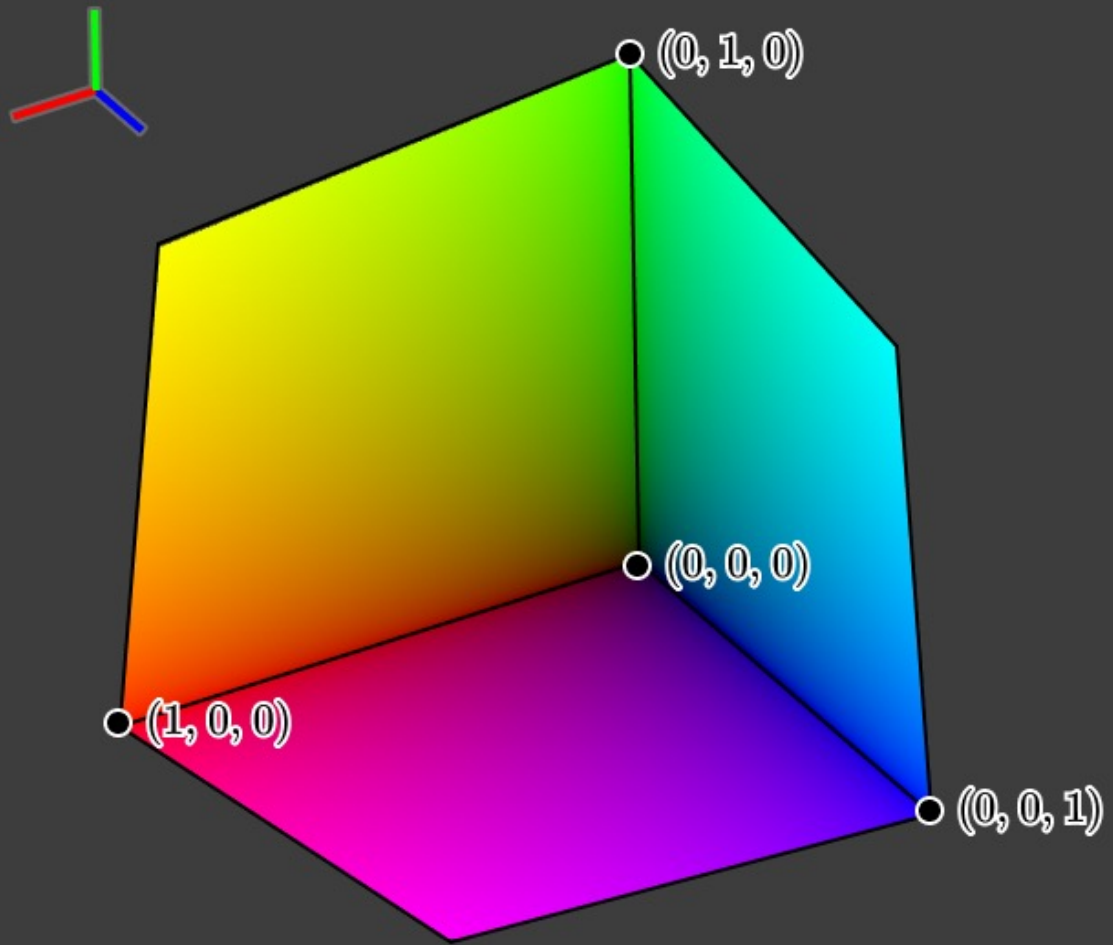
# CIE 1931 RGB color matching of a point on a lemon



# LMS vs RGB

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

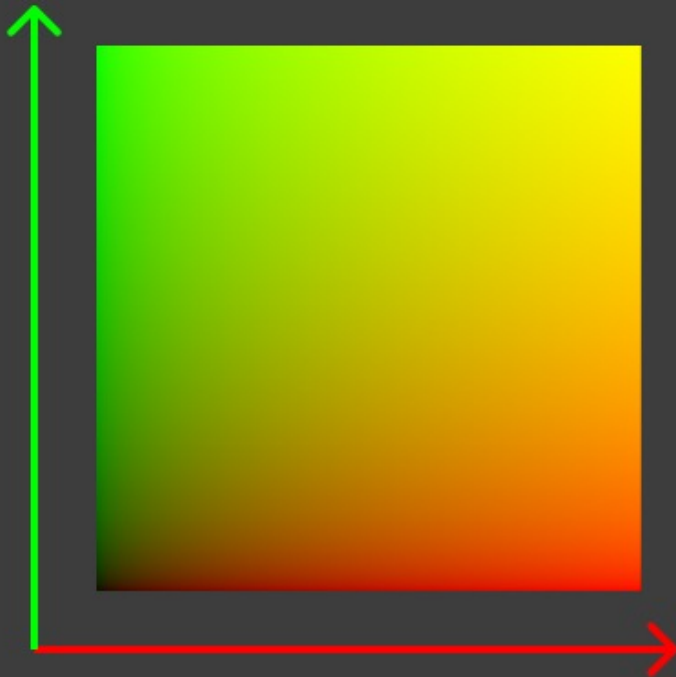
Перейдём в 3D!



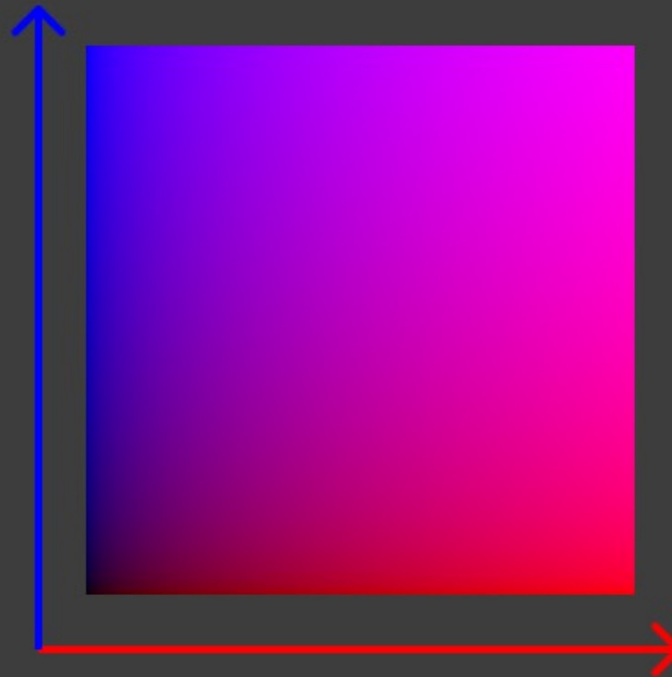


$$R \times G \times B = 0$$

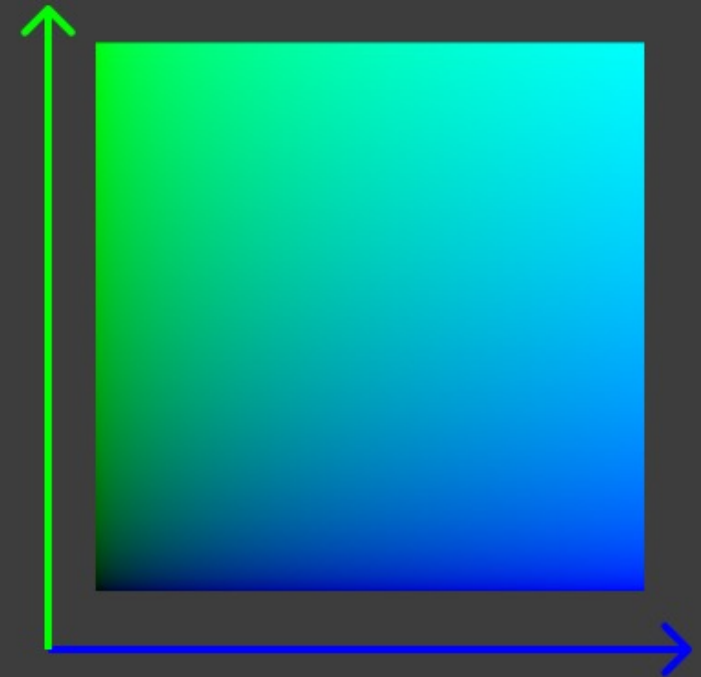
Constant Blue = 0



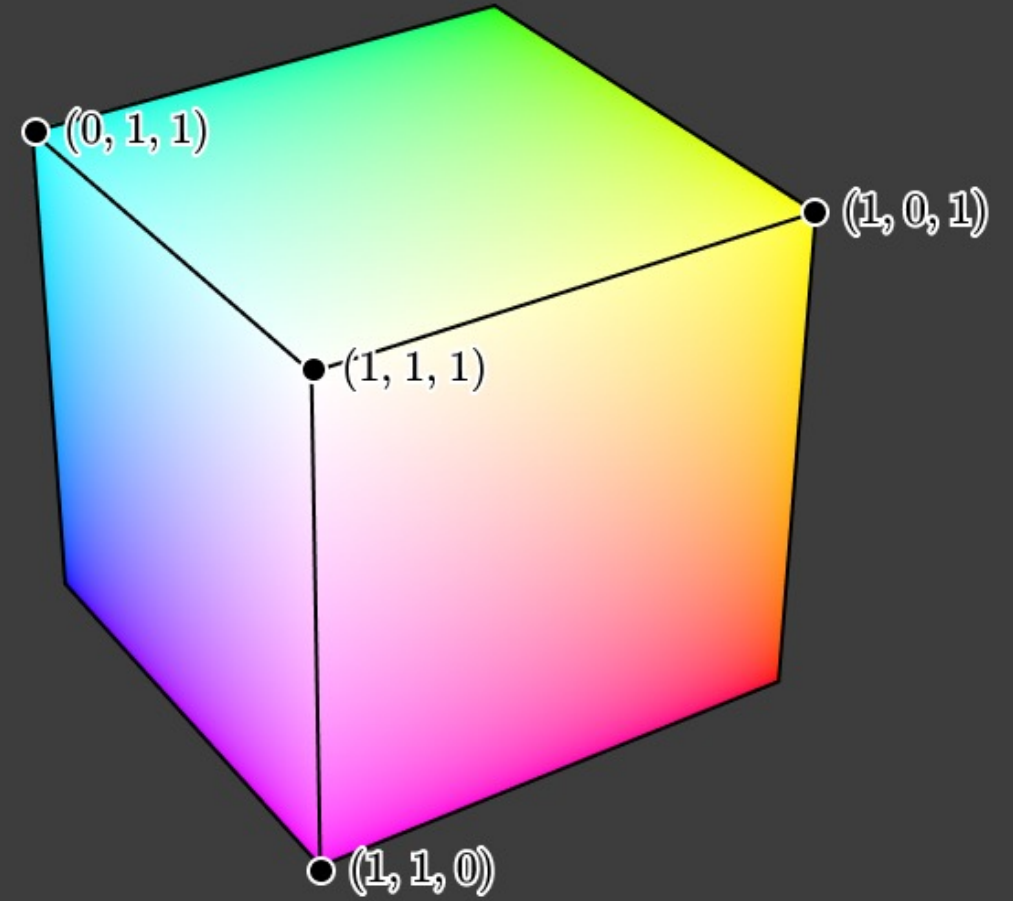
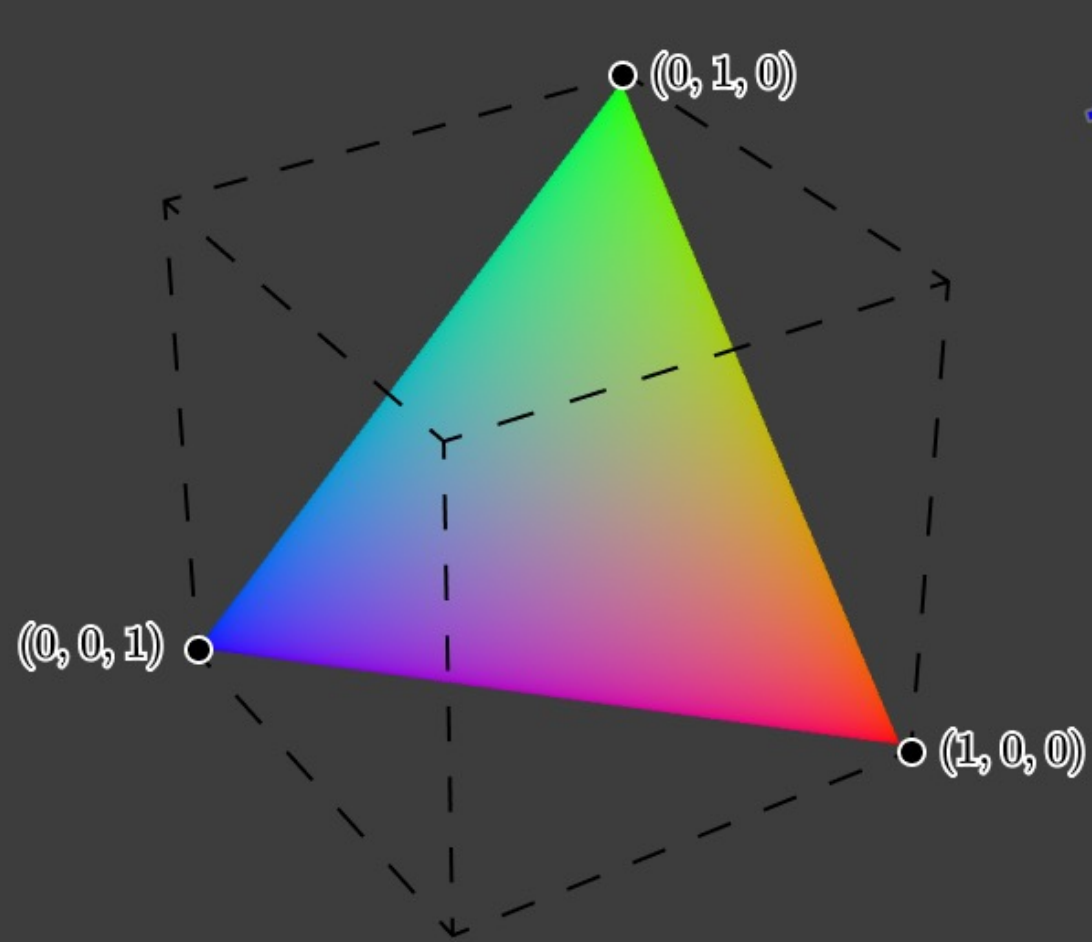
Constant Green = 0



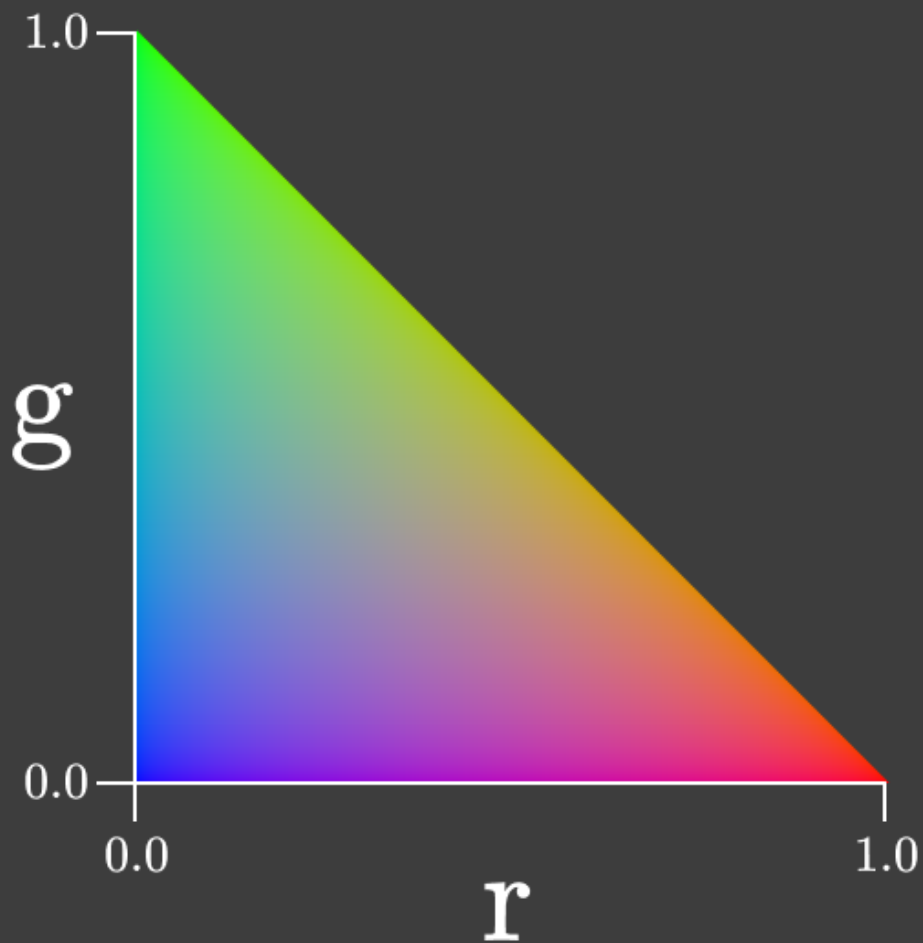
Constant Red = 0



$$R + G + B = 1$$



# rg-хроматичность

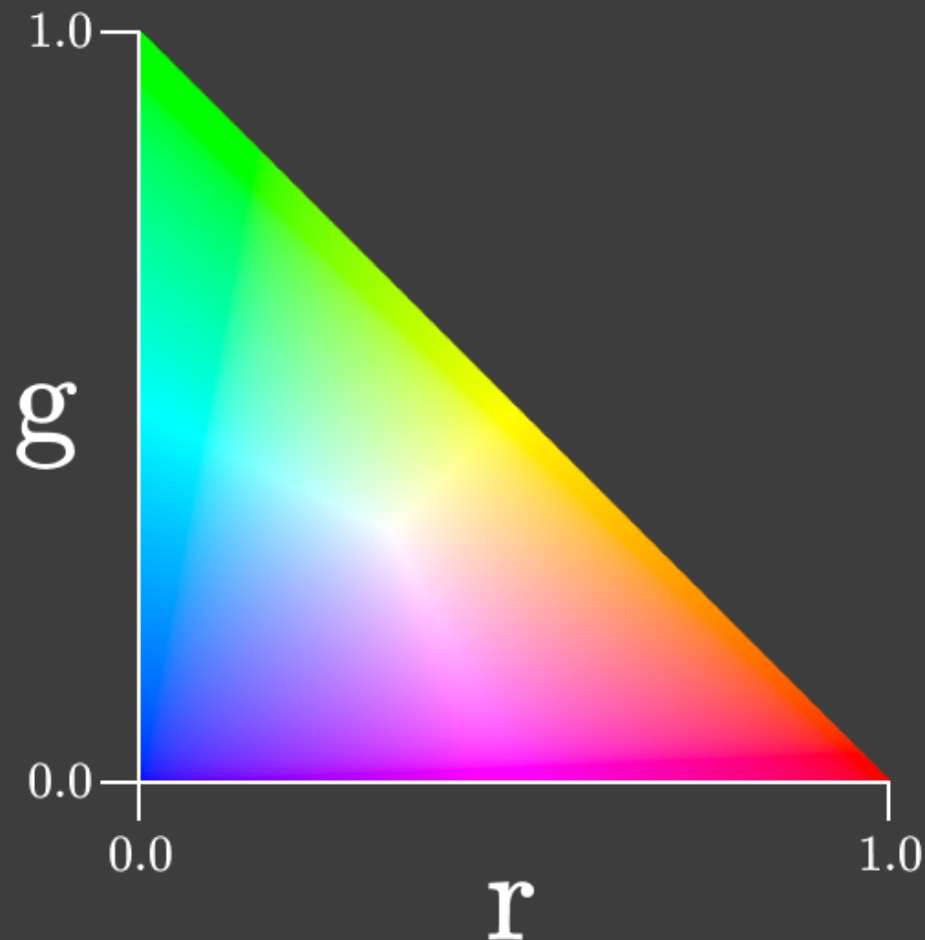


$$R = r$$

$$G = g$$

$$B = 1 - g - r$$

# rg-хроматичность



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

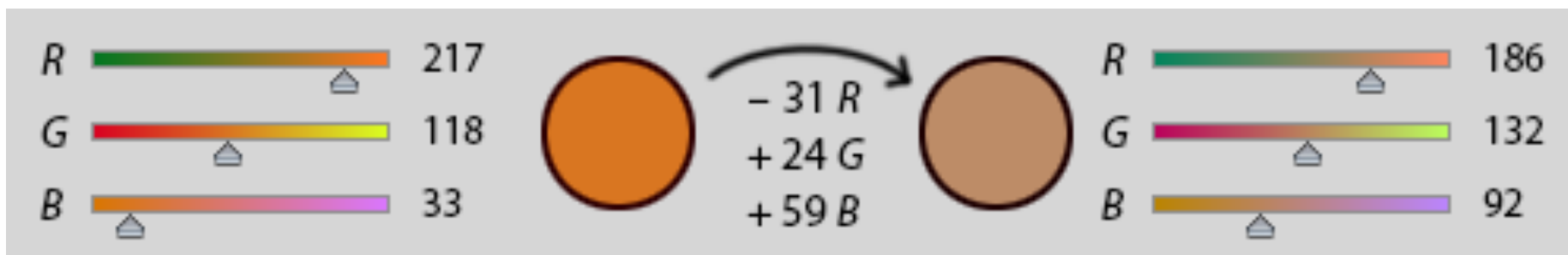
$$R = r/k$$

$$G = g/k$$

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

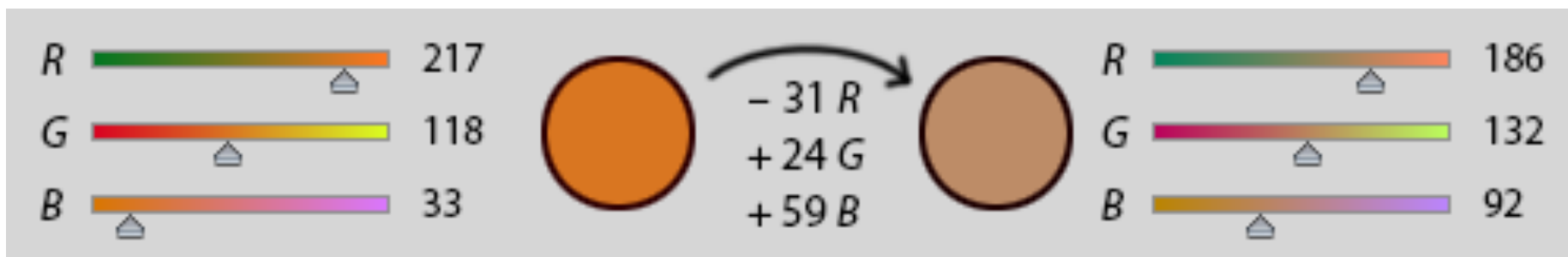
# Возможно, вы слышали о HSL и HSV

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



# Возможно, вы слышали о HSL и HSV

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



- Нелинейные преобразование RGB

# Школа-то математическая...

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

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

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



# RGB $\rightarrow$ HSV

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

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

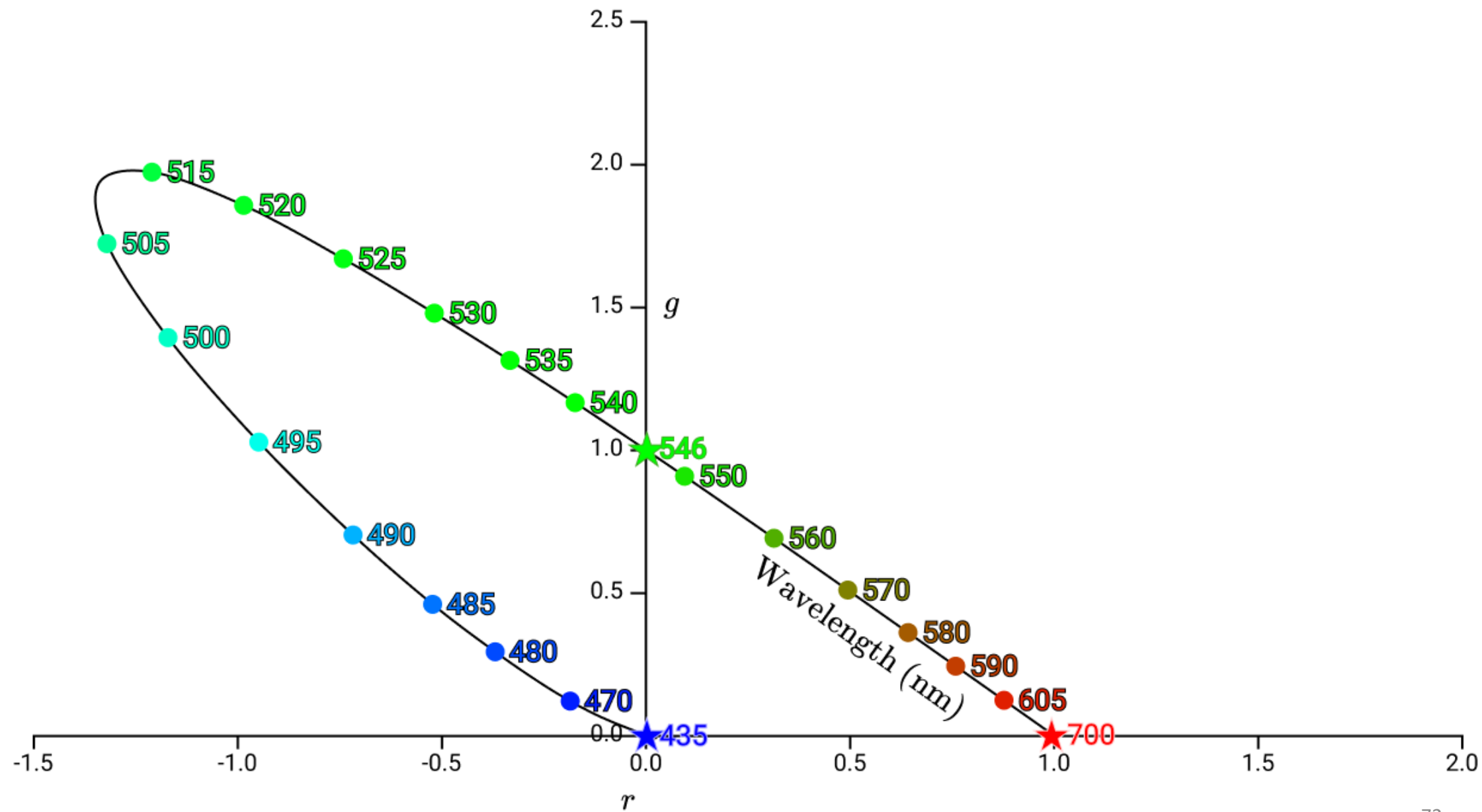
$$V = MAX$$

# Что там про отрицательные R и G?

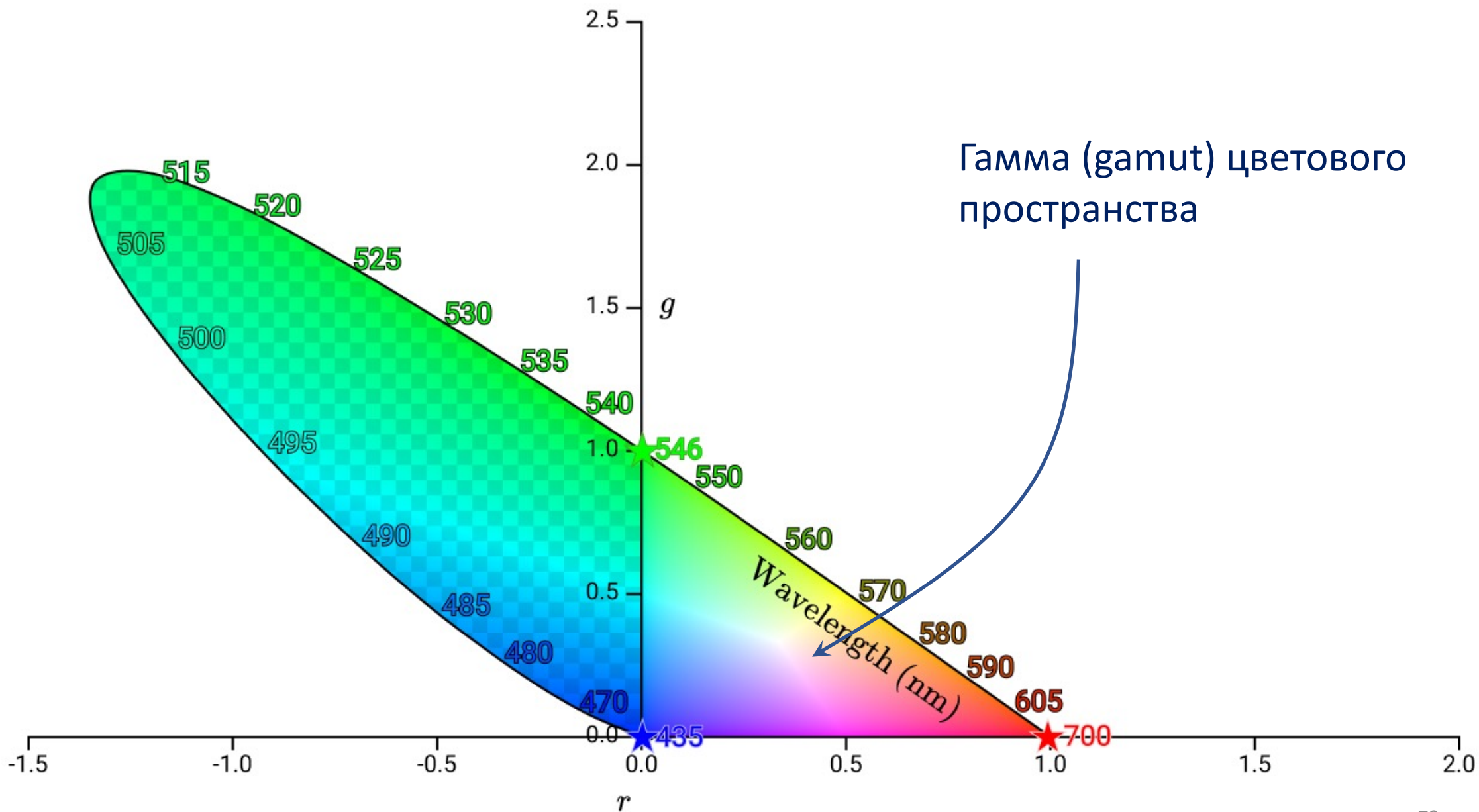
- Всё ещё можем воспроизвести не все цвета спектра!

# Спектральный локус

## rg chromaticities of the spectral locus



## rg chromaticities of the spectral locus



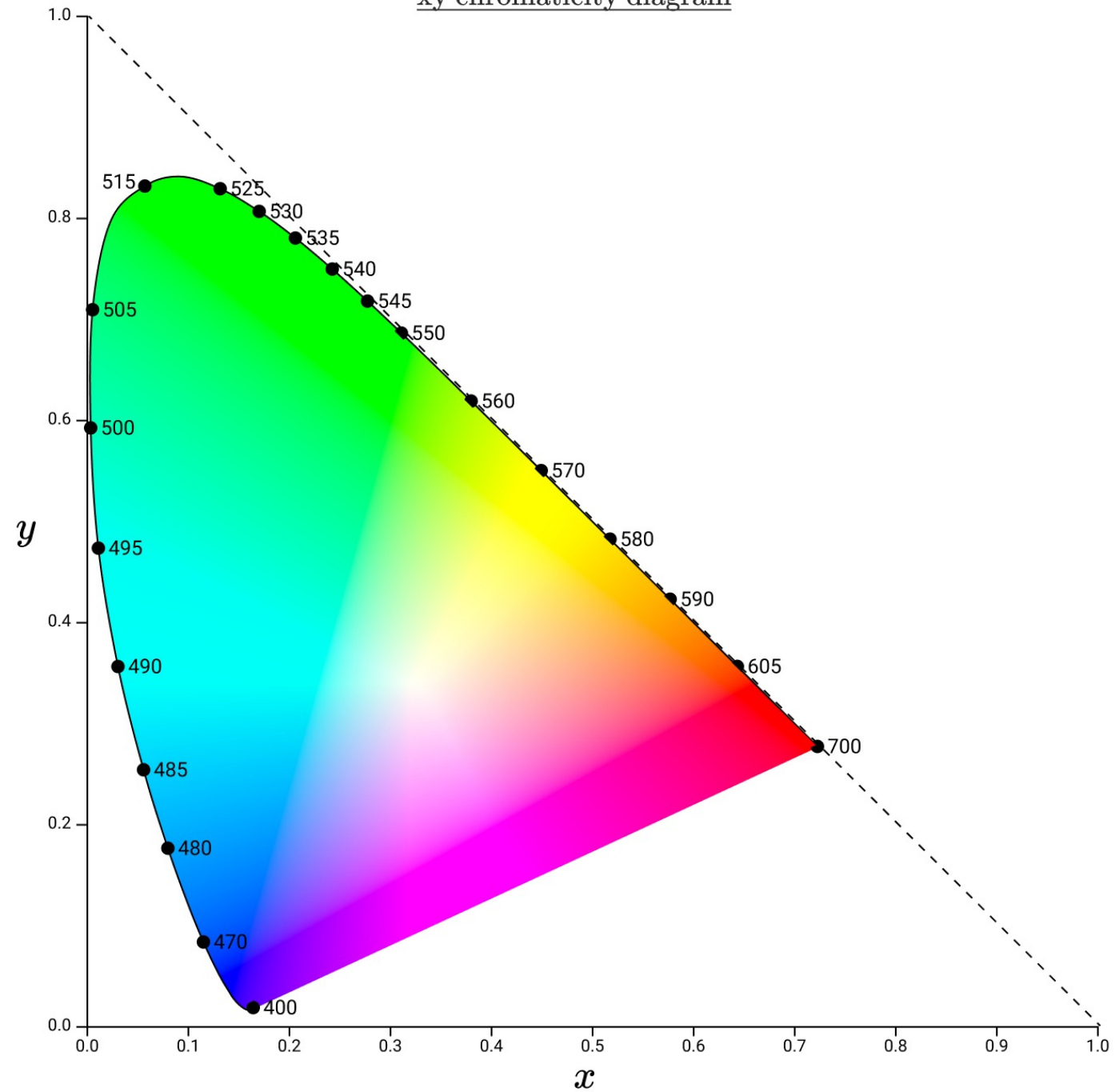
# Международная комиссия по освещению, 1931

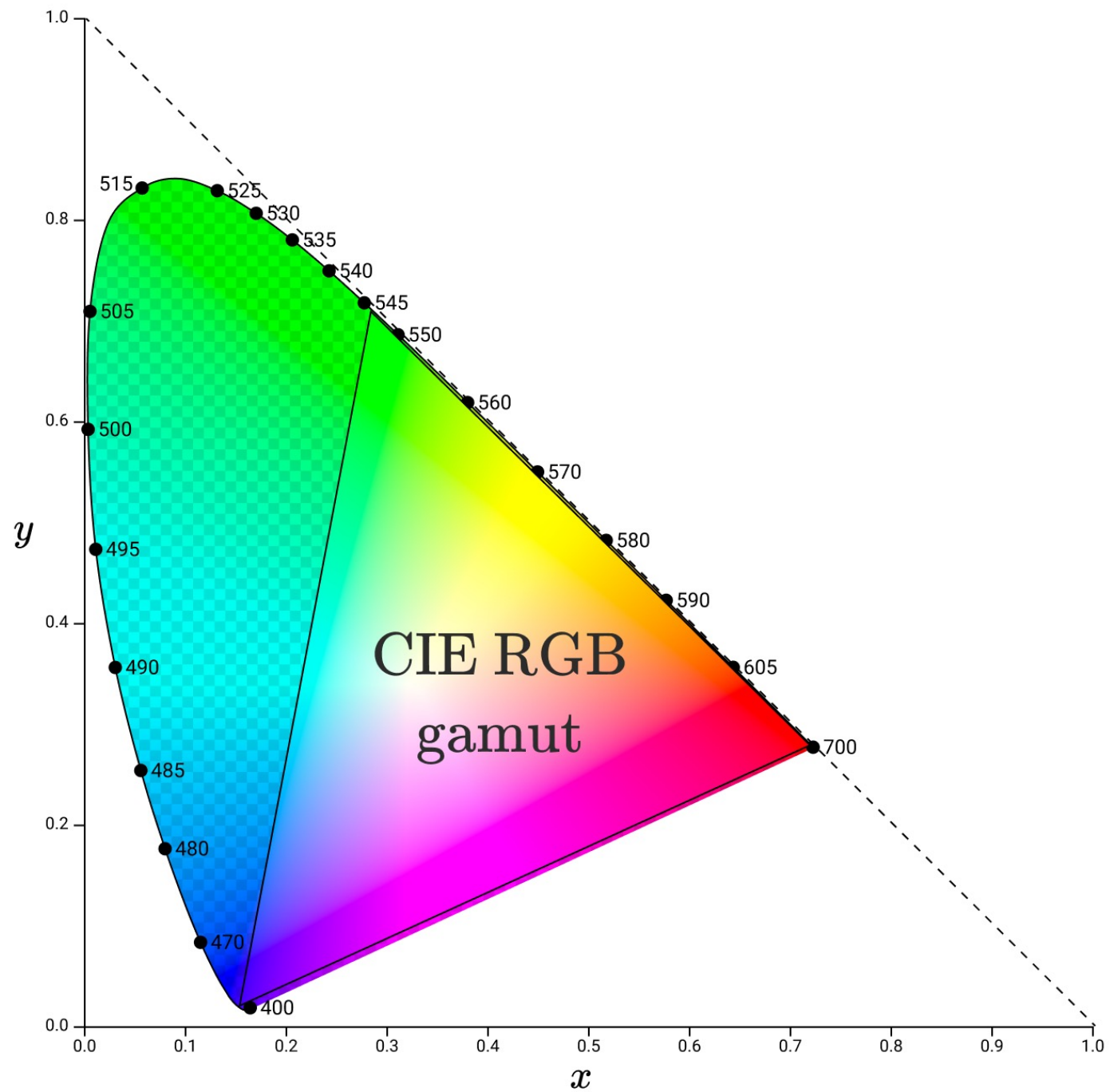
- RGB — как у Райта и Гилда
- XYZ — все компоненты (для спектральных цветов) должны быть положительными

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \frac{1}{b_{21}} \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \frac{1}{0.17697} \begin{bmatrix} 0.49000 & 0.31000 & 0.20000 \\ 0.17697 & 0.81240 & 0.010630 \\ 0.00000 & 0.010000 & 0.99000 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

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

xy chromaticity diagram

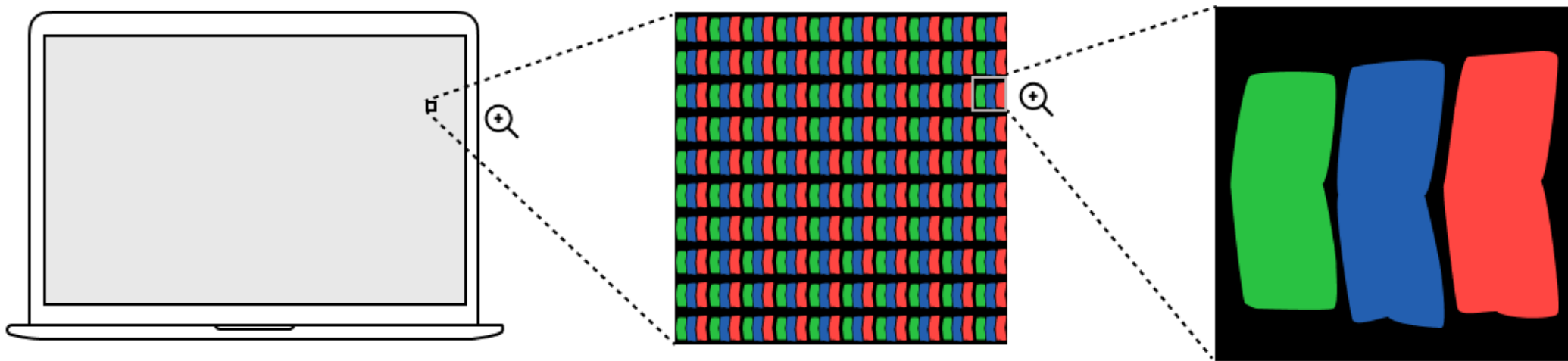




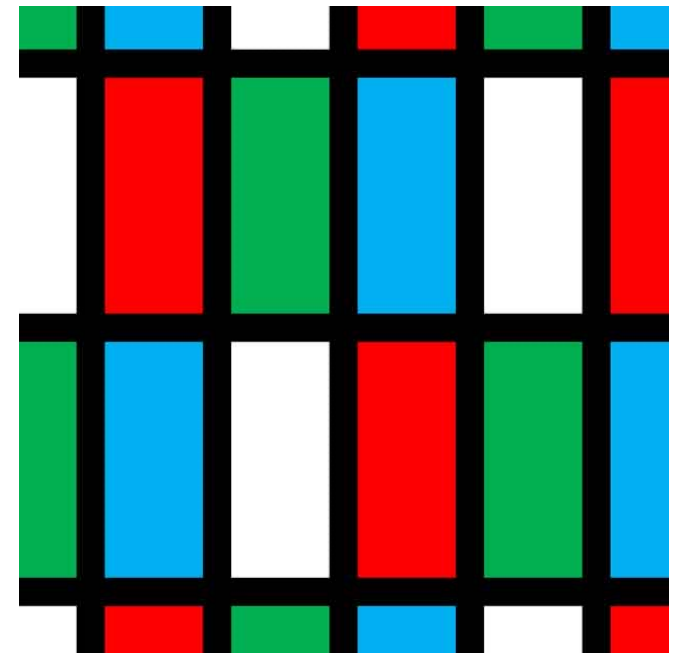
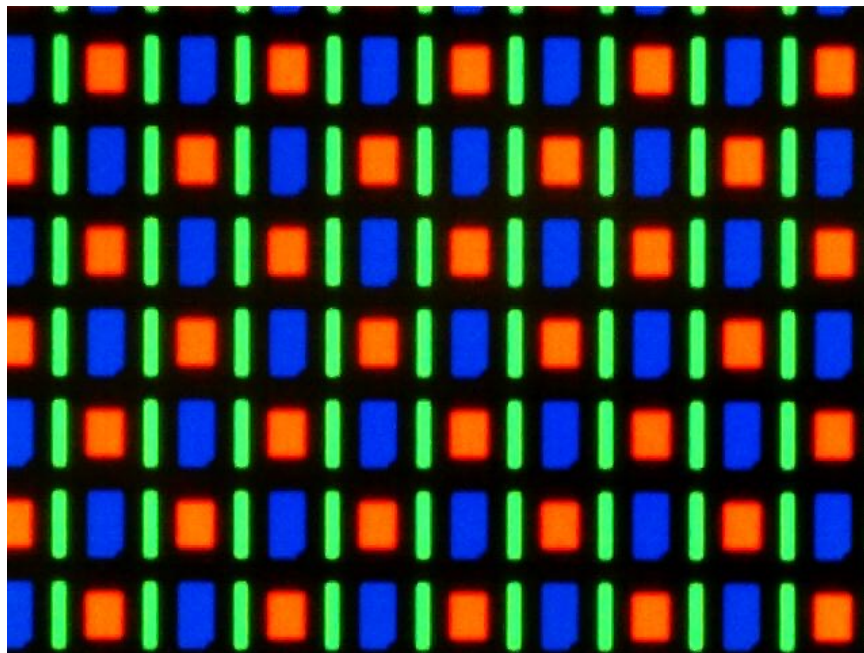
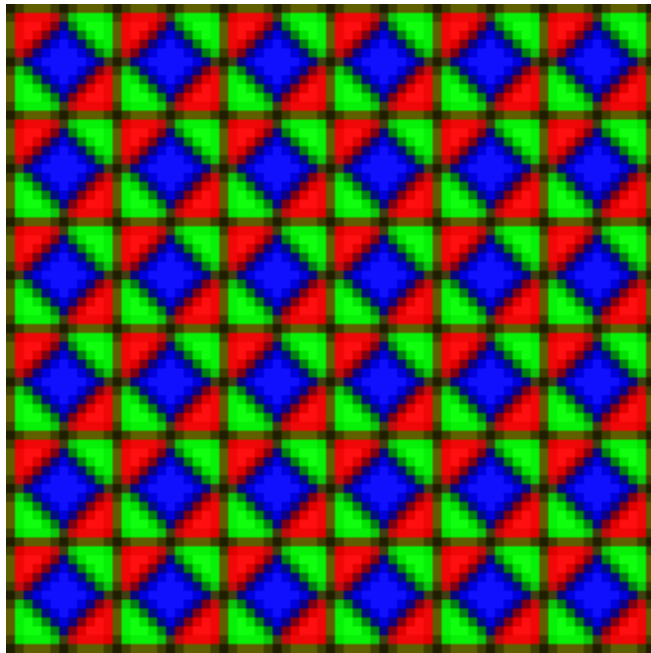


Как нарисовать цвет?

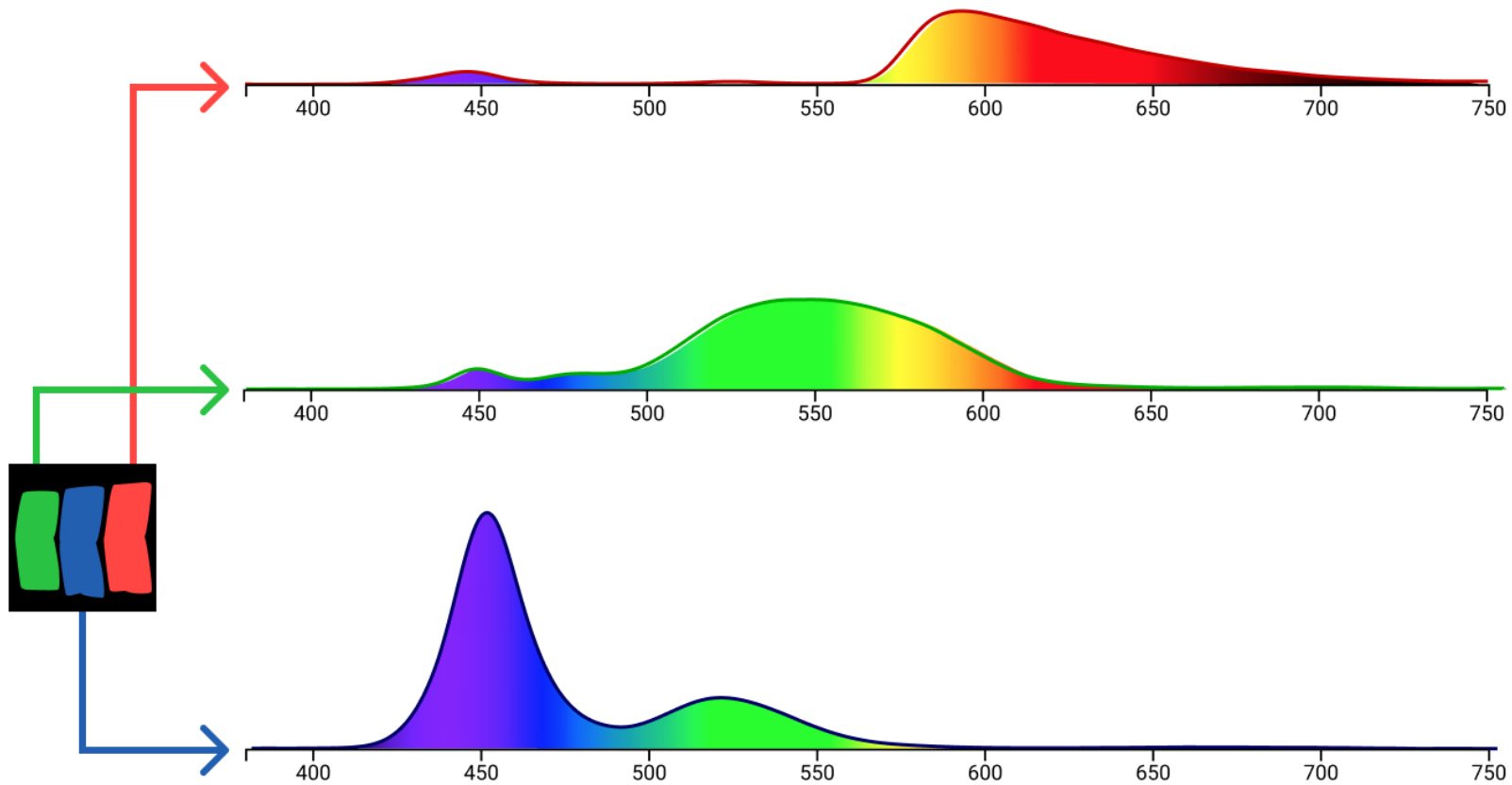
# Пиксели и субпиксели

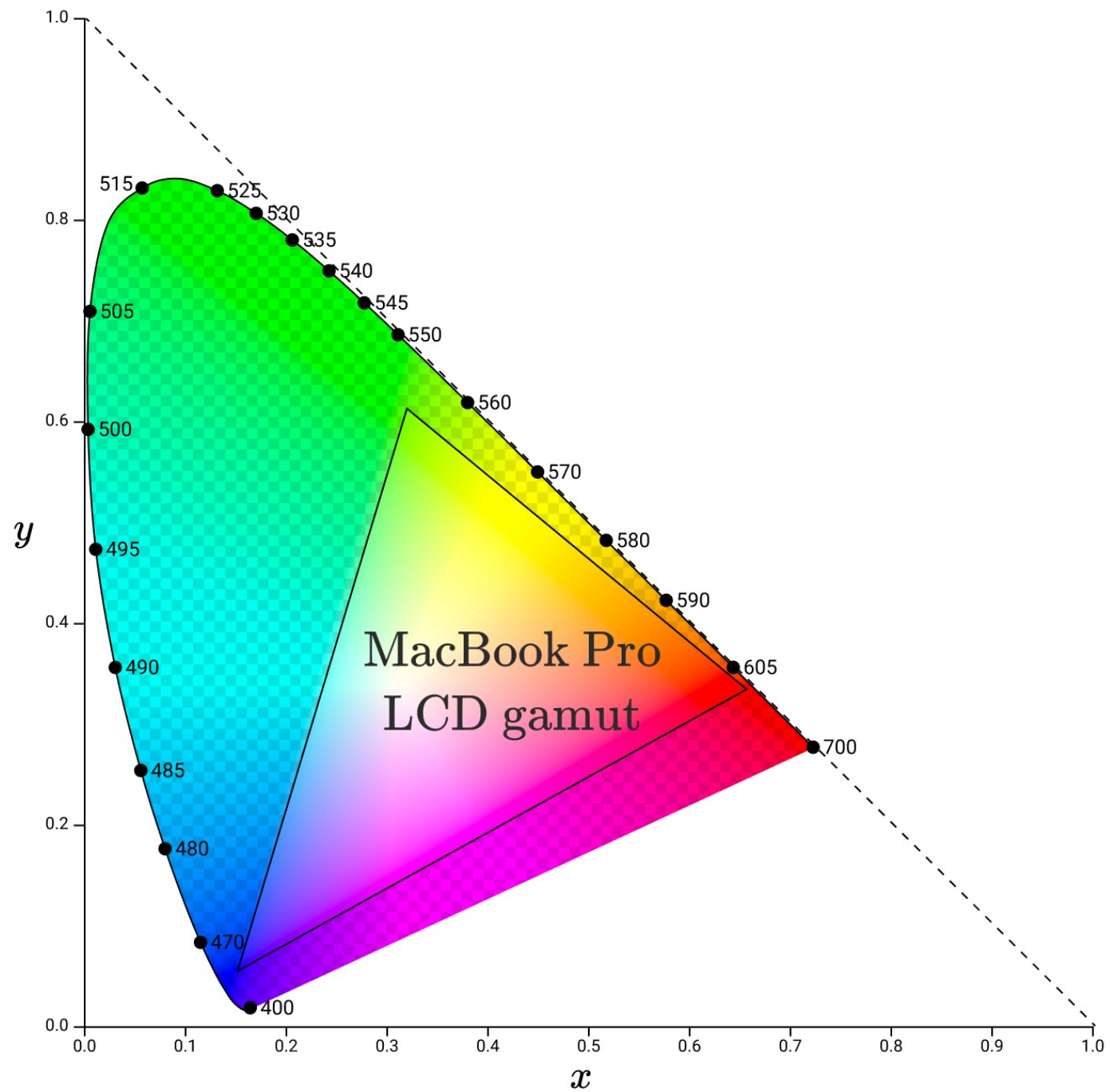


# PenTile



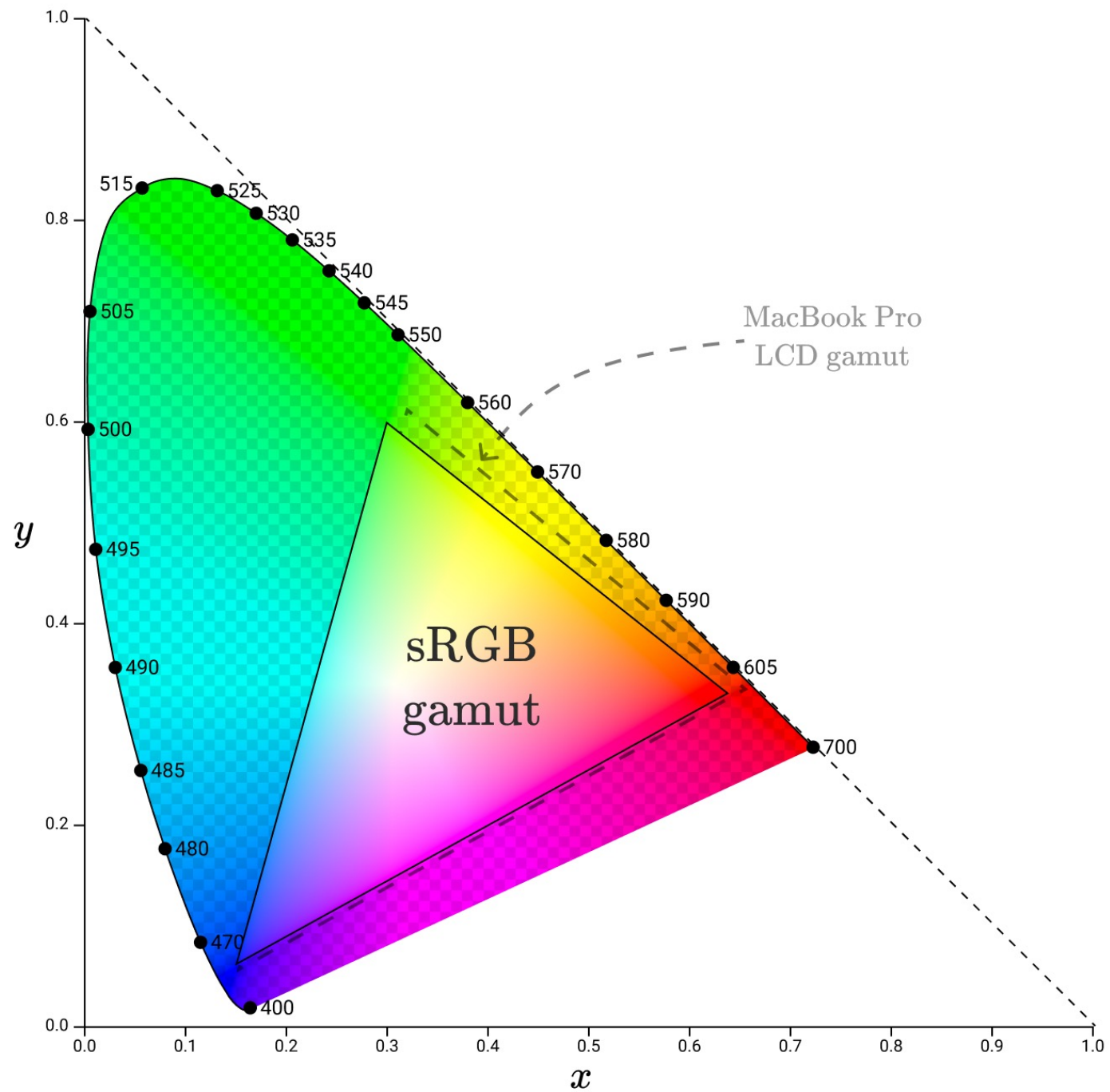
# Субпиксели — не монохроматоры

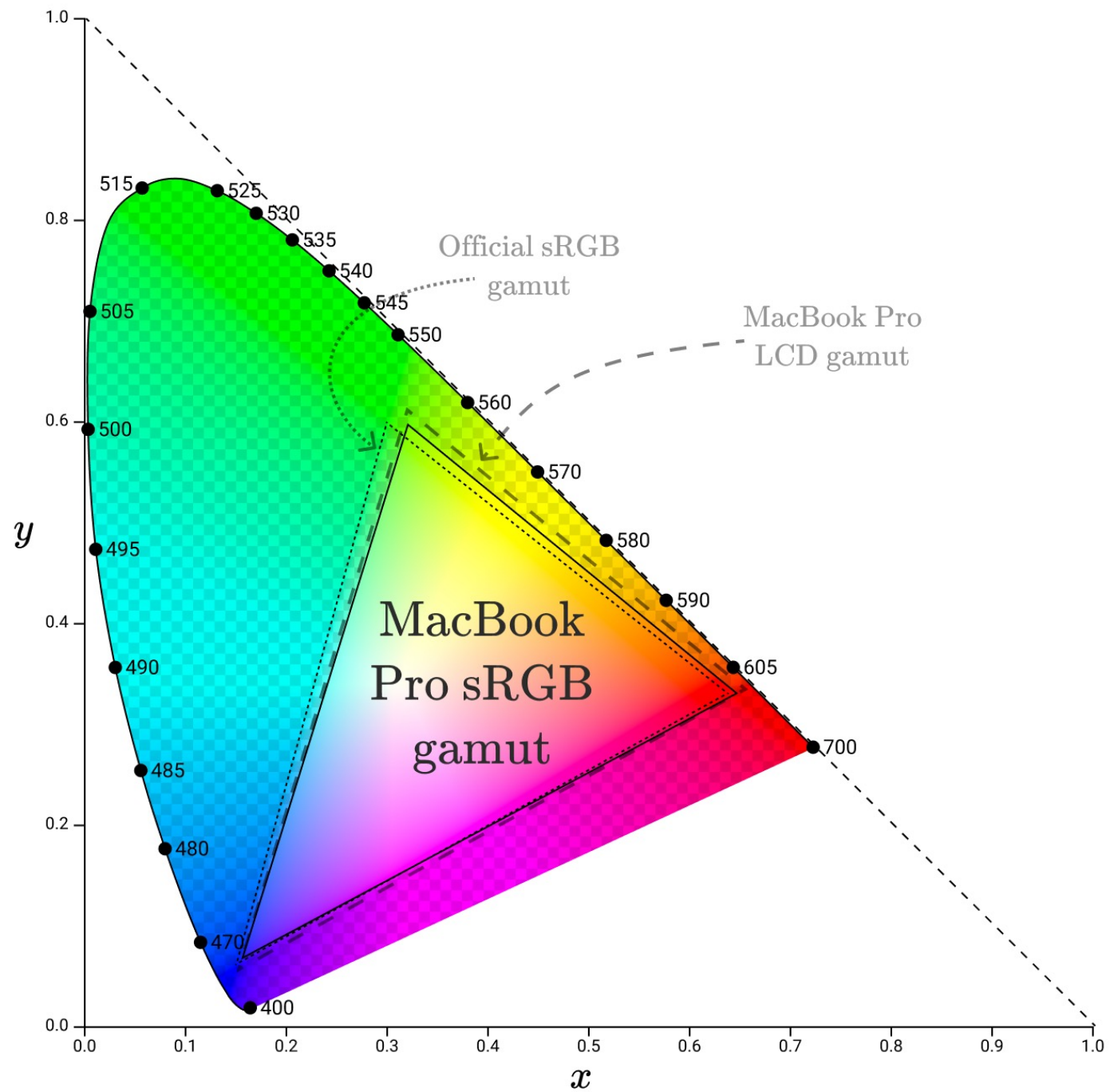




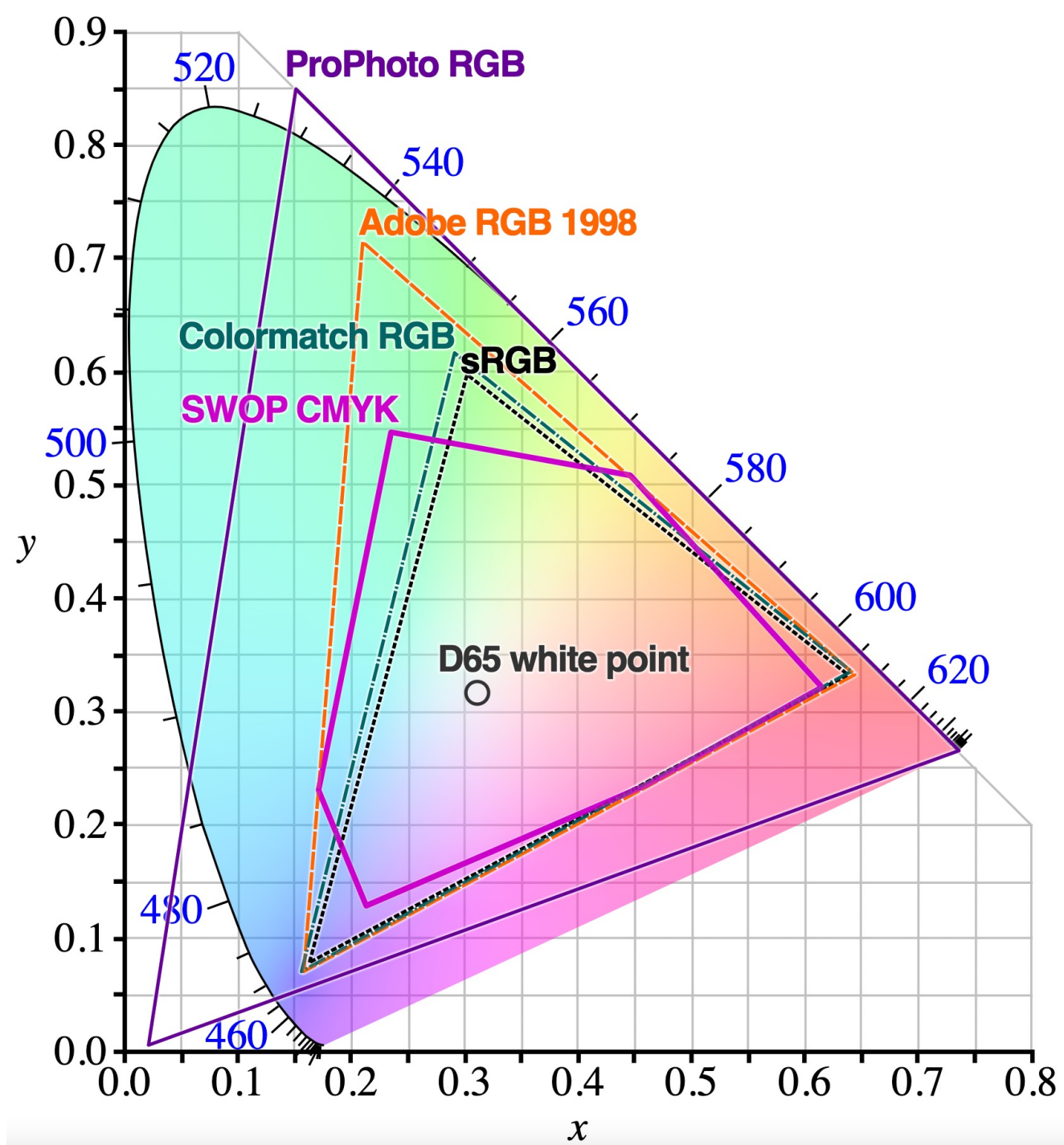
# sRGB

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



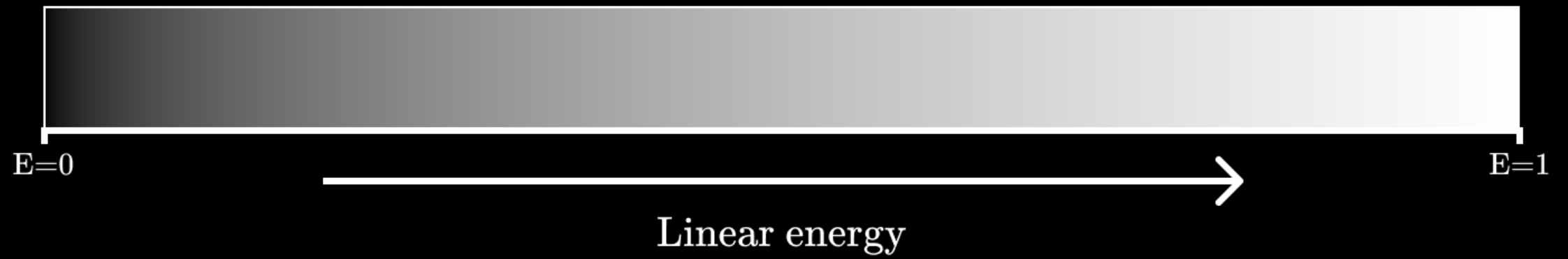




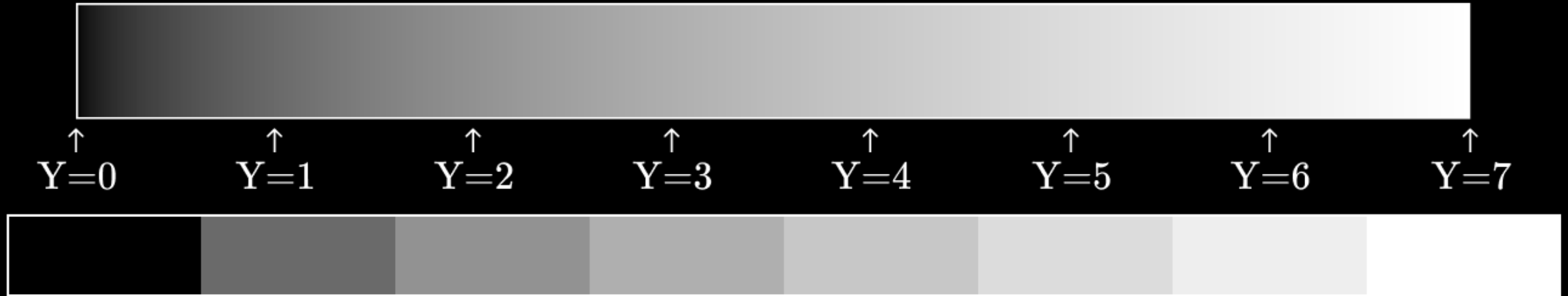


# Гамма-коррекция

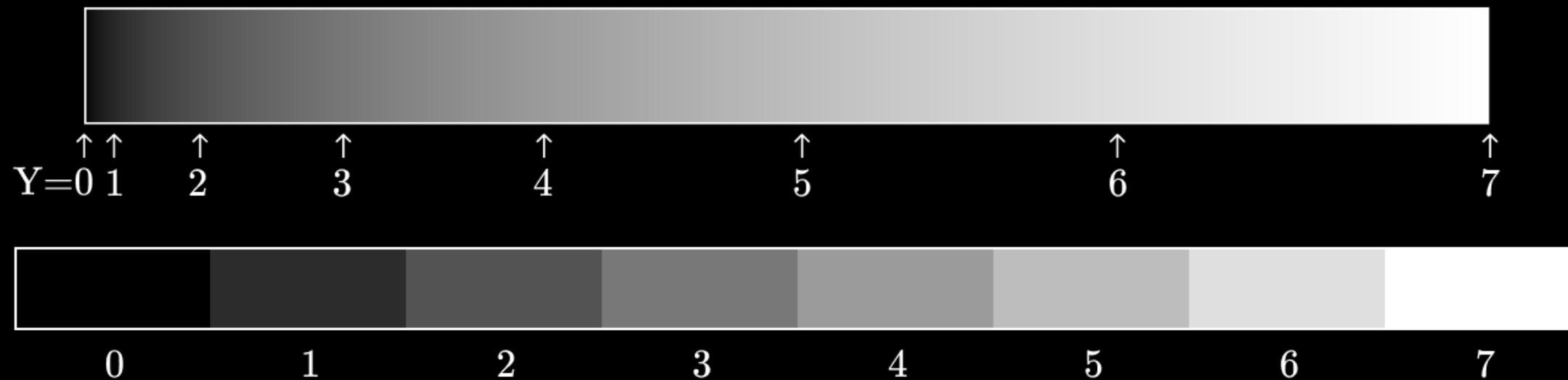
- #030000 и #040000 отличается так же, как #F40000 и #F50000?



## Linear energy



Linear energy

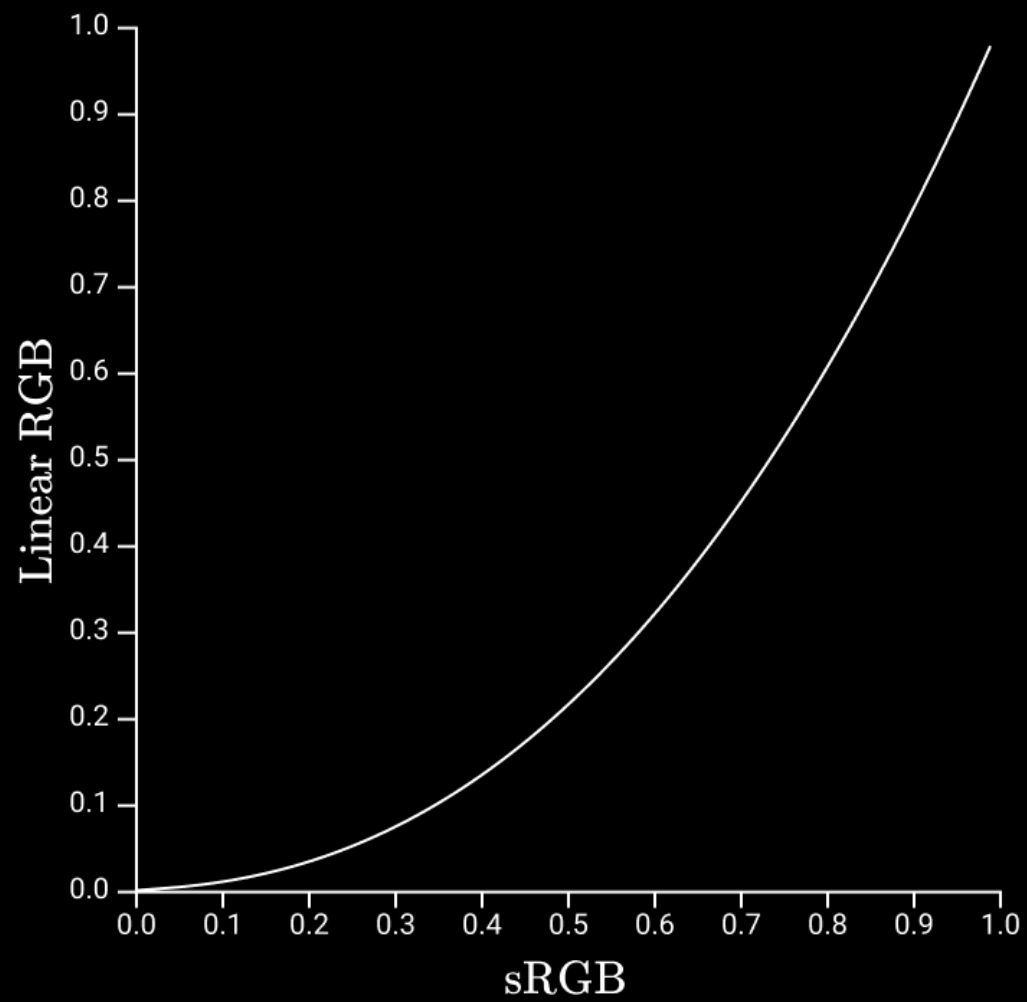


$$Y = \left( \frac{[8E]^2}{8} \right)$$

# 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 energy

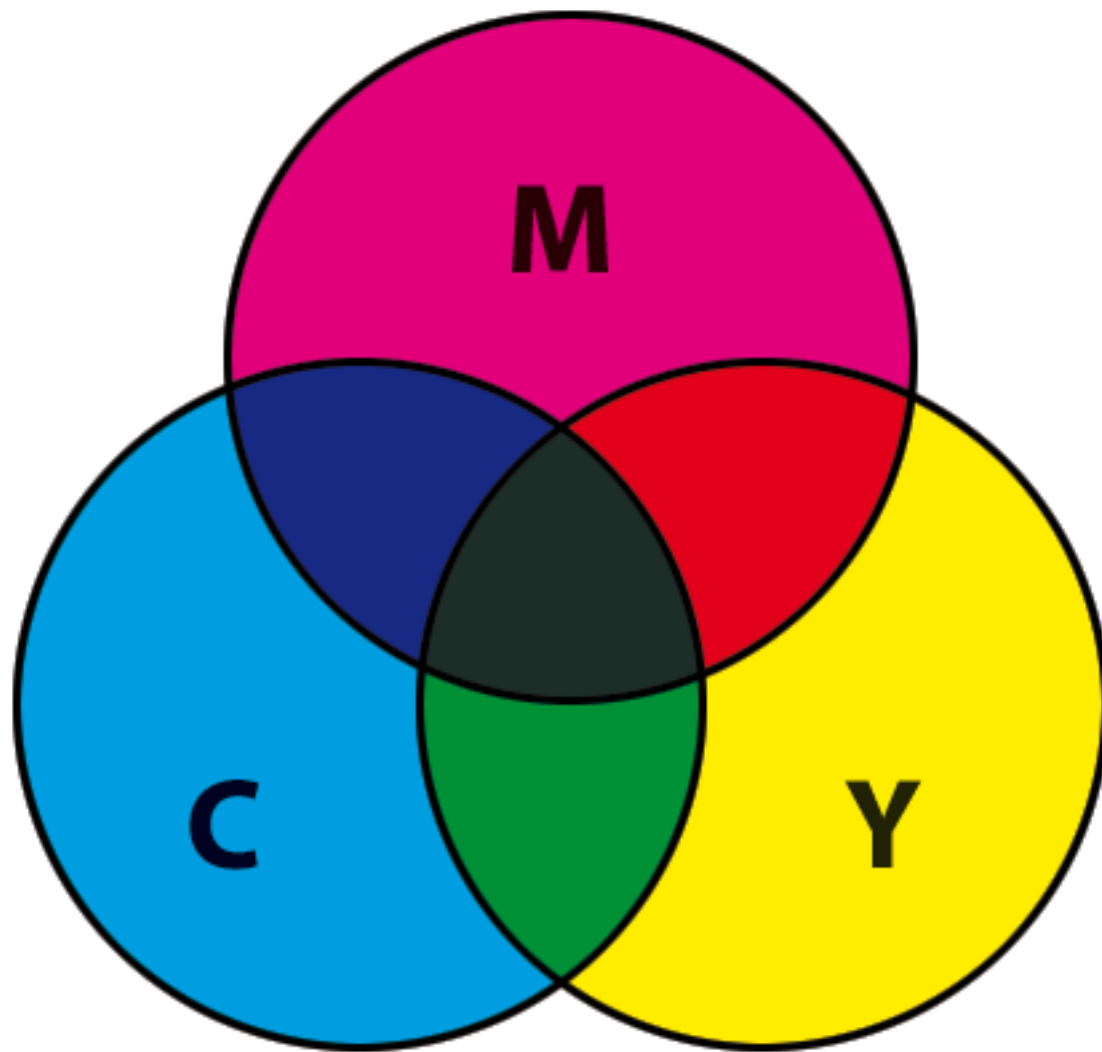


Linear perceived brightness



# CMYK

А ещё бывает  
CMYK LcLm





# 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



Хвалить и ругать



Презентация:  
[andgein.ru/color-2023](https://andgein.ru/color-2023)

