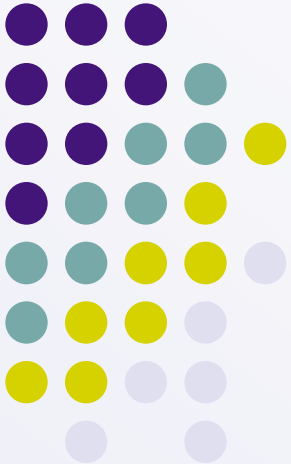
Universidade de São Paulo
Instituto de Matemática e Estatística

Introdução à Computação Gráfica

Marcel P. Jackowski
mjack@ime.usp.br

Aula #18



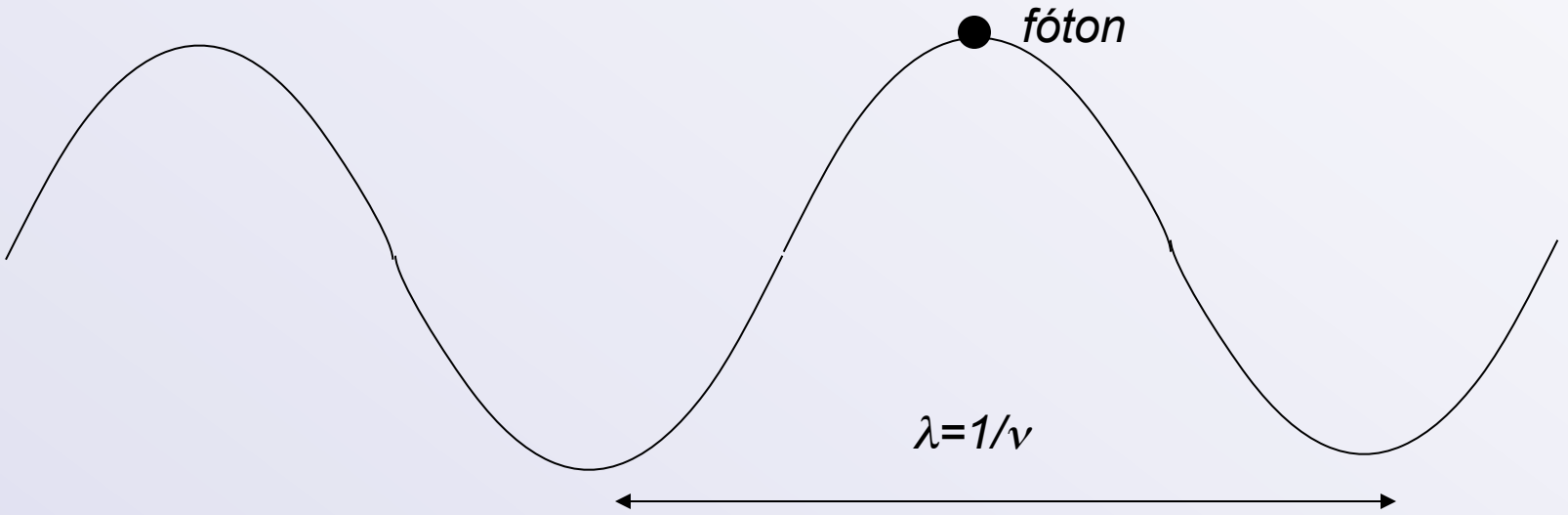
Alguns slides de: http://stellar.mit.edu/S/course/6/fa11/6.837/materials.html

Cor

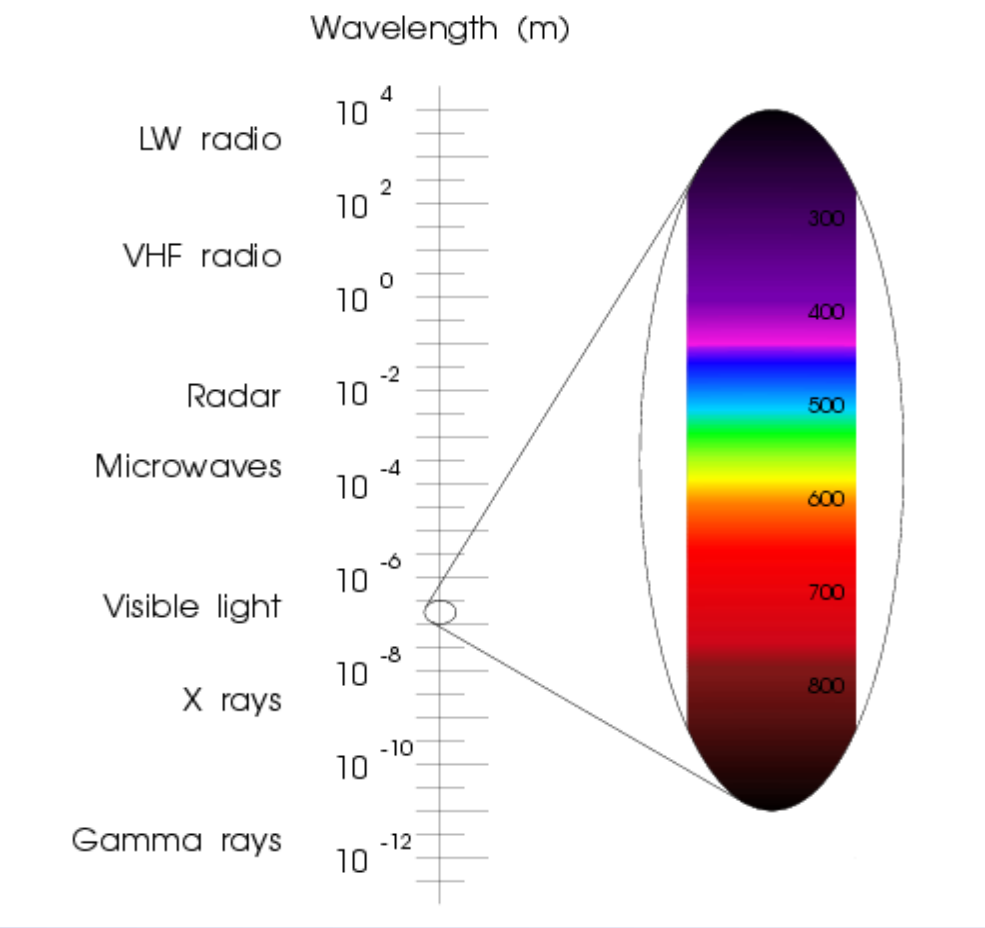
- O que é cor?
  - Cor é uma **sensação** produzida no nosso cérebro pela luz que chega aos nossos olhos.
  - É um problema psico-físico.

Modelo Espectral de Cor

- Luz é uma **radiação** eletro-magnética que se propaga a $3x10^5$ km/s ($v = \lambda . f$).
- Luz branca é uma *mistura* de radiações com diferentes comprimentos de onda.



Espectro eletromagnético

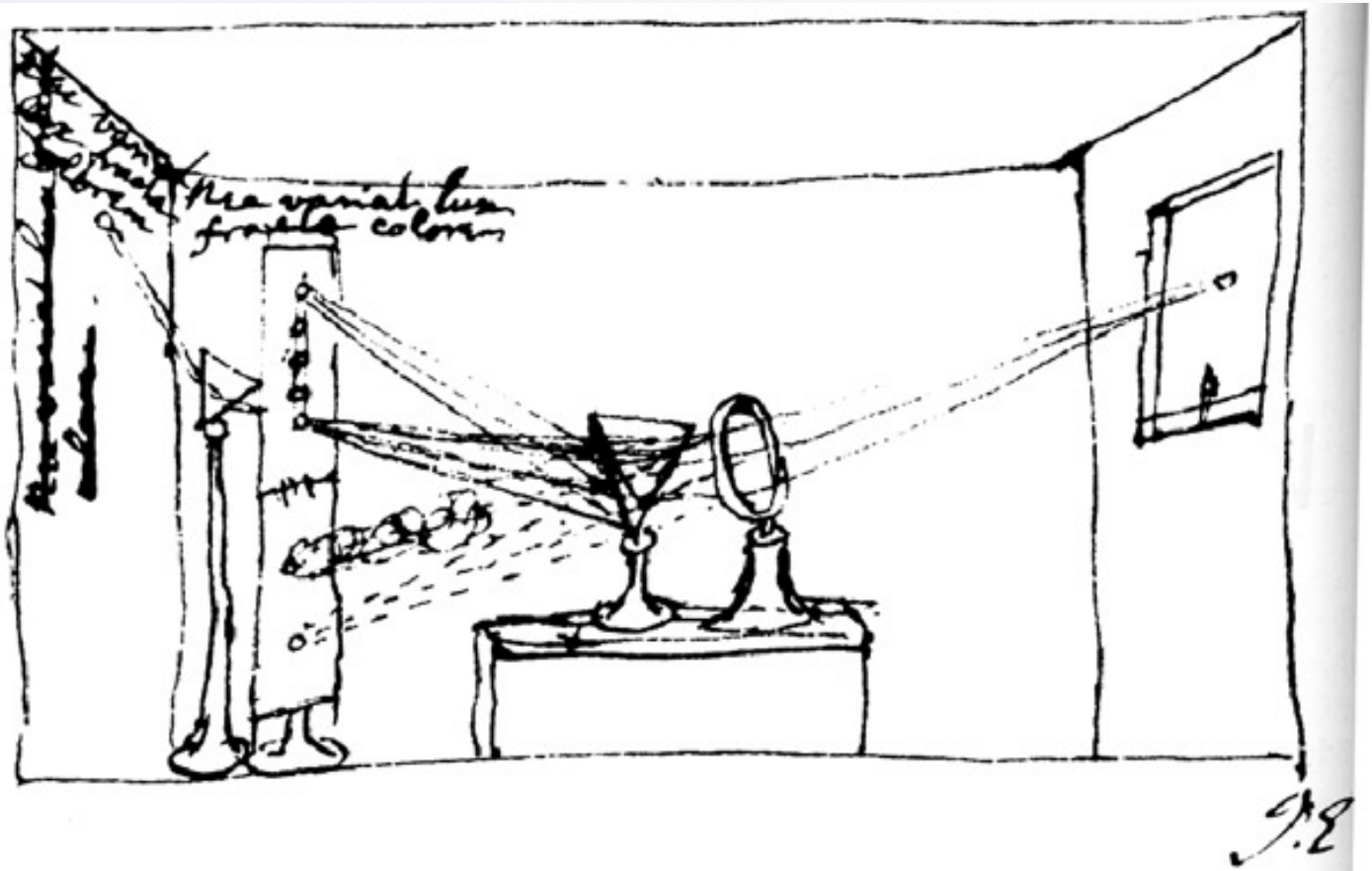


Range (nm)	Colour
380 – 450	Violet
450 – 490	Blue
490 – 560	Green
560 – 590	Yellow
590 – 640	Orange
640 – 730	Red

Algumas indagações

- Se as cores representam diferentes espectros, por que usamos 3 números para representá-las ?
- Por que utilizamos um círculo de cores ? O que existe entre o vermelho e o azul ?
- Os filtros RGB de um câmera digital são os mesmos de um projetor ? Eles tem a mesma resposta espectral dos nossos olhos?

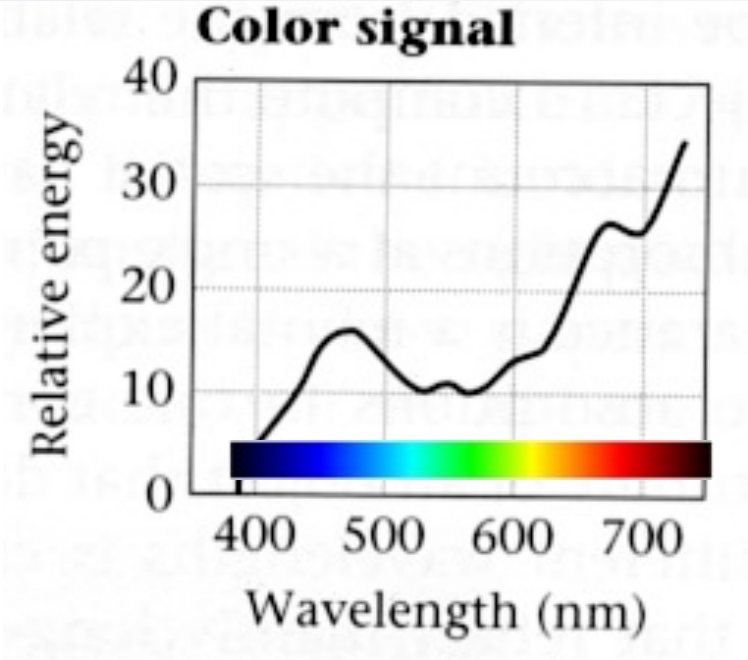
Cor



4.1 **NEWTON'S SUMMARY DRAWING** of his experiments with light. Using a point source of light and a prism, Newton separated sunlight into its fundamental components. By reconverging the rays, he also showed that the decomposition is reversible.

From Foundations of Vision, by Brian Wandell, Sinauer Assoc., 1995

Espectro visível



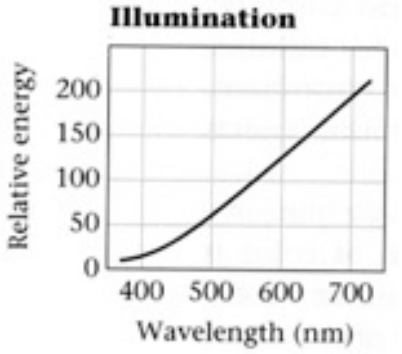
Light is characterized by its spectrum:
amount of energy at each wavelength
This is a full distribution:
one value per wavelength (infinite number of values)

Interação luz-matéria

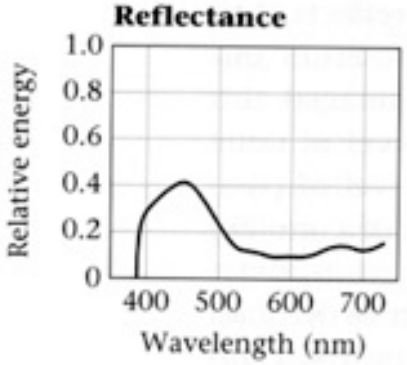
Where spectra come from:
- light source spectrum
- object reflectance (aka spectral albedo)

get multiplied wavelength by wavelength

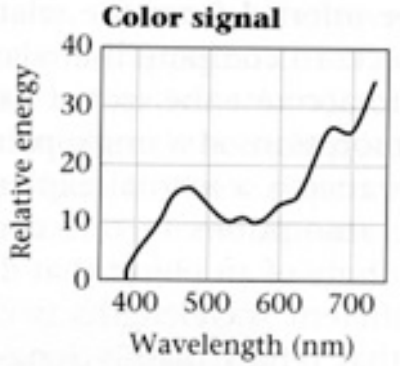
There are different physical processes that explain this multiplication
e.g. absorption, interferences



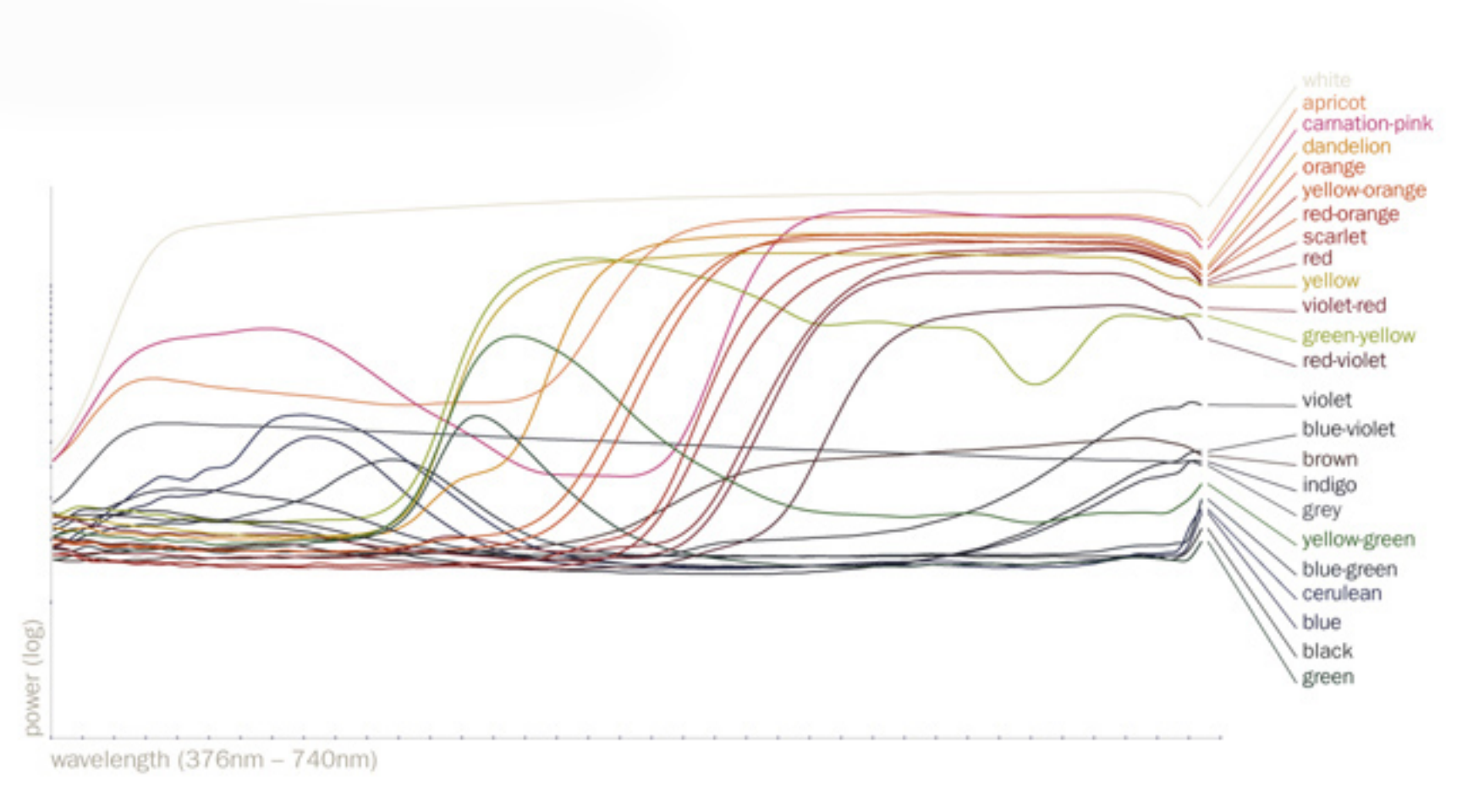
.*



=

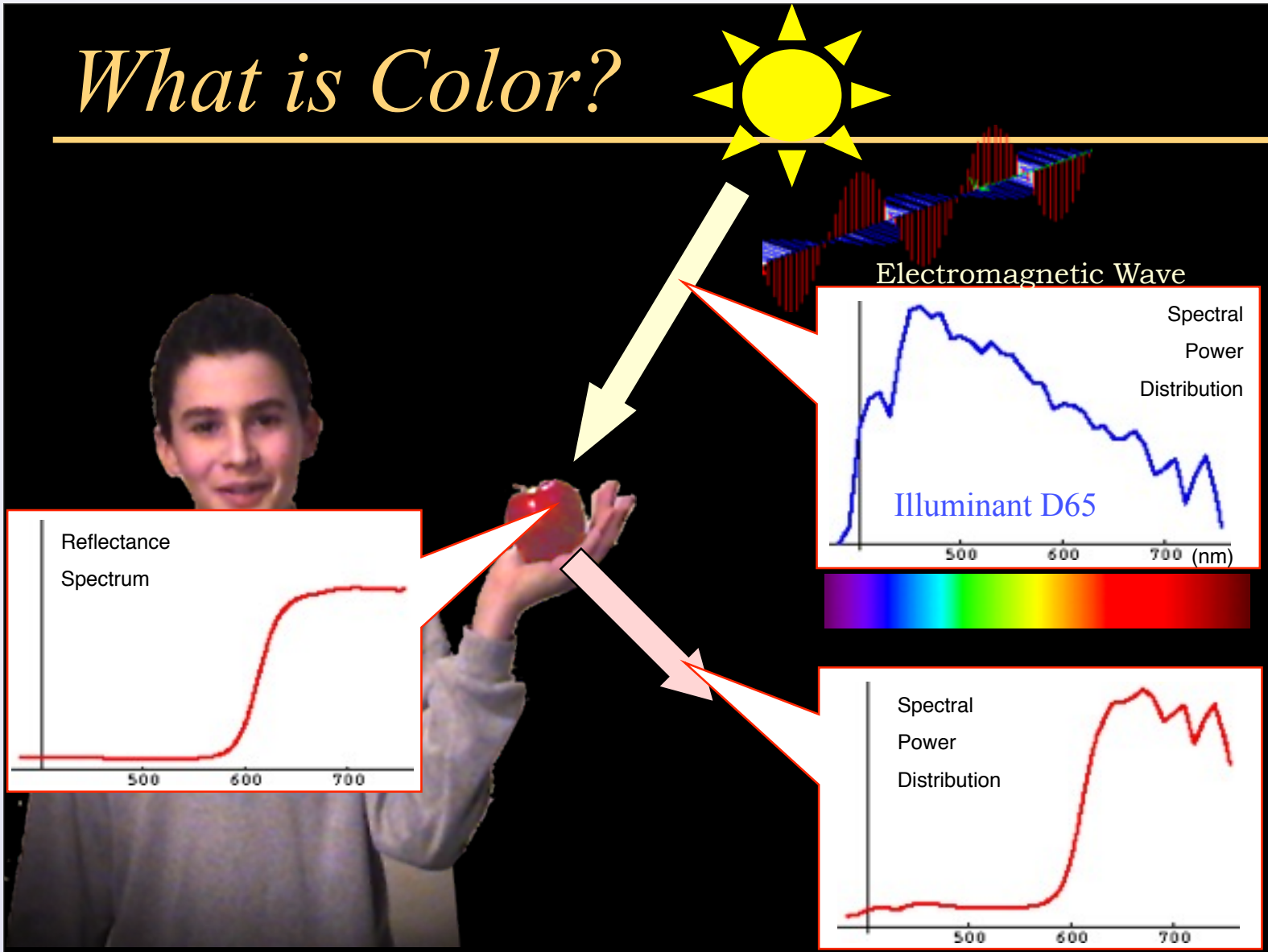


Crayons

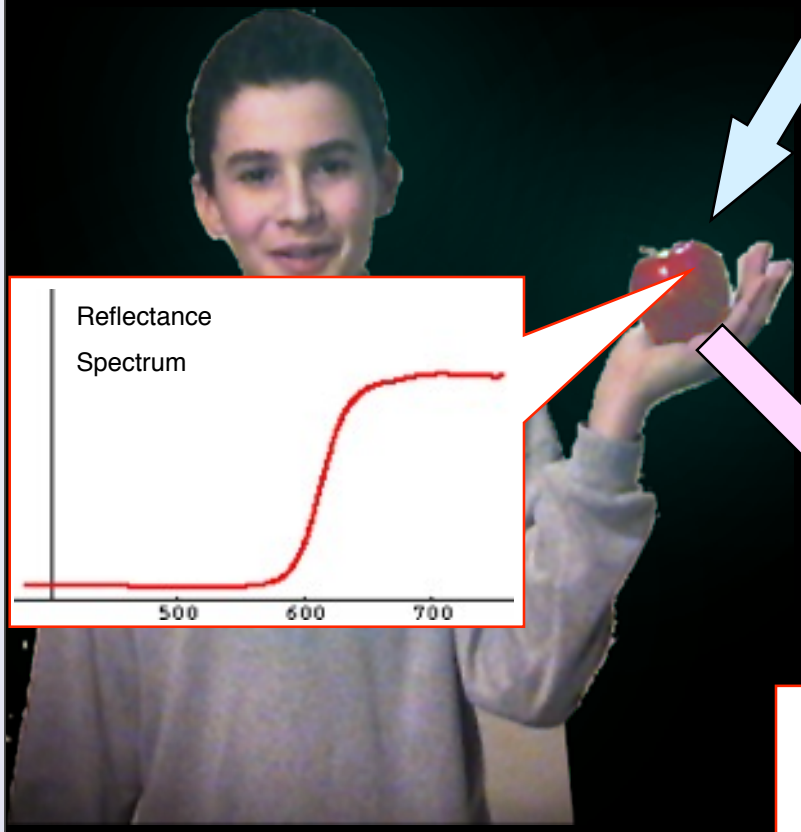


http://www.photo-mark.com/notes/2011/sep/20/crayon-colors/

What is Color?



What is Color?



Neon Lamp

Spectral
Power
Distribution

Illuminant F1

500 600 700

Reflectance
Spectrum

500 600 700

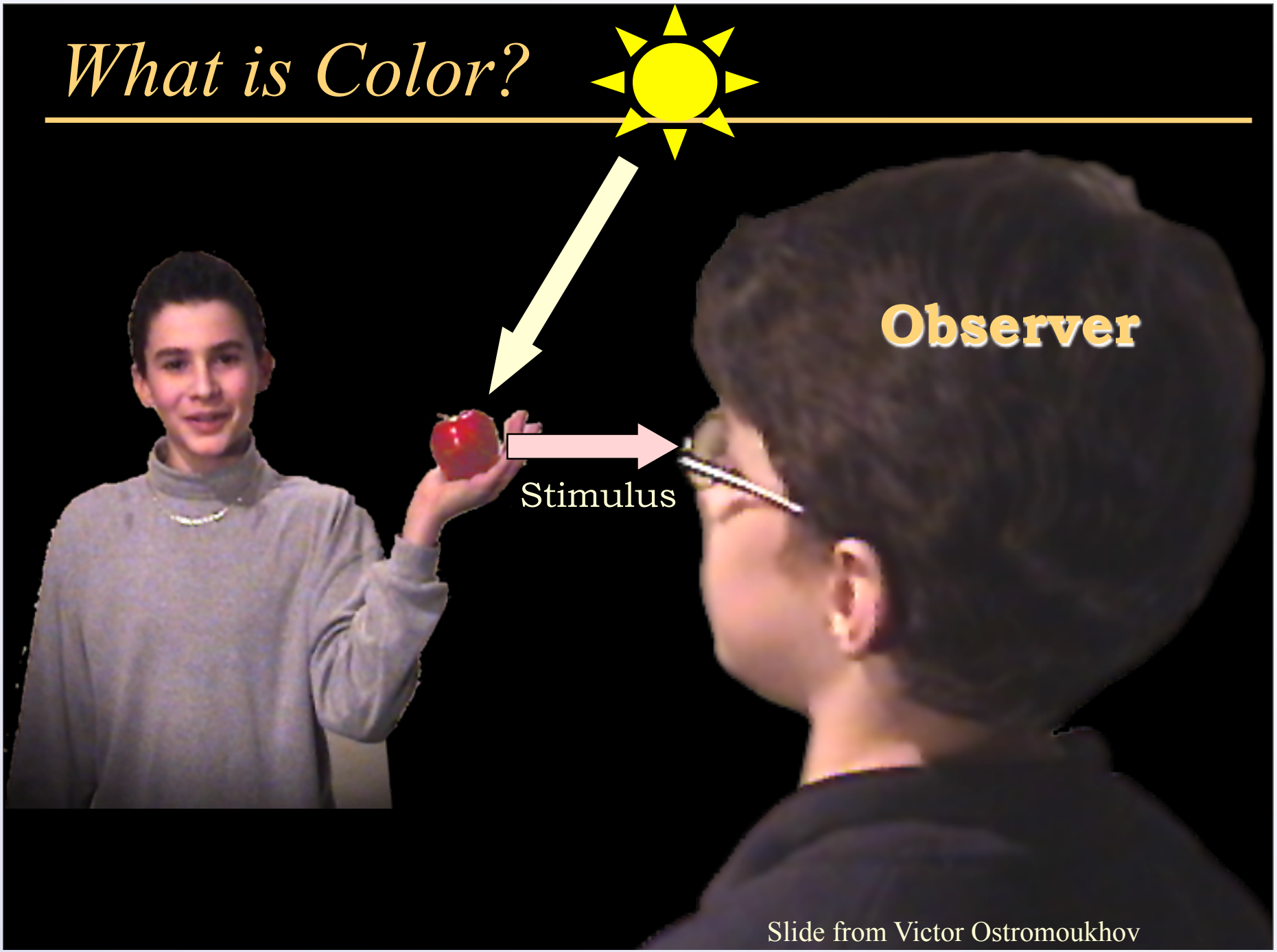
Spectral
Power
Distribution
Under D65

600 700

Spectral
Power
Distribution
Under F1

500 600 700

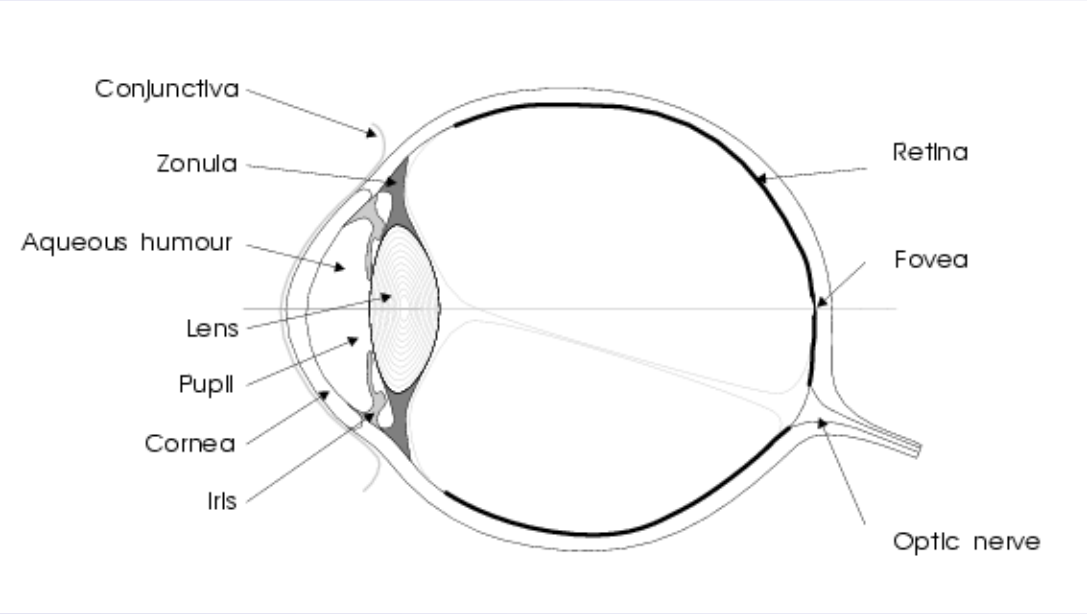
What is Color?



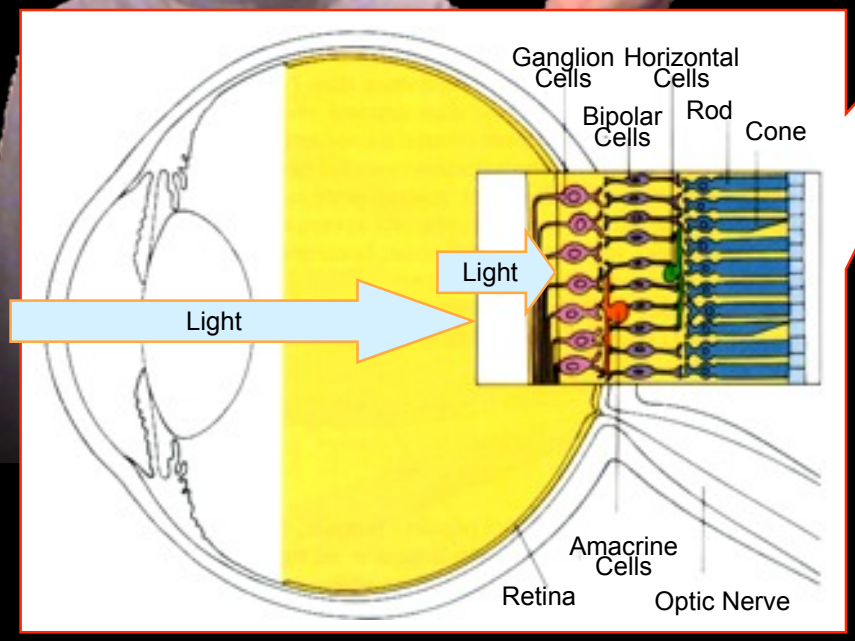
Slide from Victor Ostromoukhov

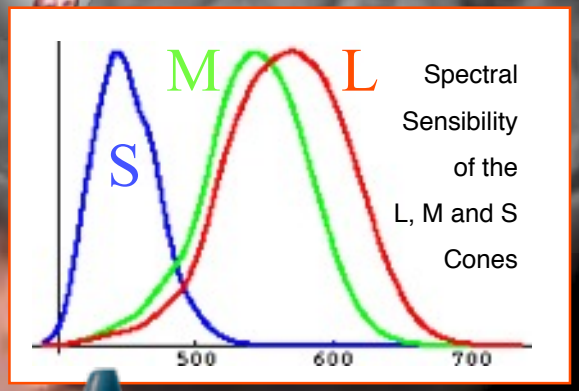
O olho humano

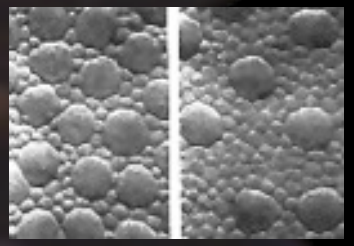
- O olho é um sistema físico de processamento de cor (sistema refletivo).
  - Similar a uma câmera de vídeo.
  - Converte luz em impulsos nervosos.



What is Color?







Distribution of Cones and Rods

Slide from Victor Ostromoukhov

Percepção de Cor

- Diferente para cada espécie animal.
- Dentre os mamíferos, só o homem e o macaco enxergam cores.
- Aves têm uma visão muito mais acurada do que a nossa.

Demo

Cones

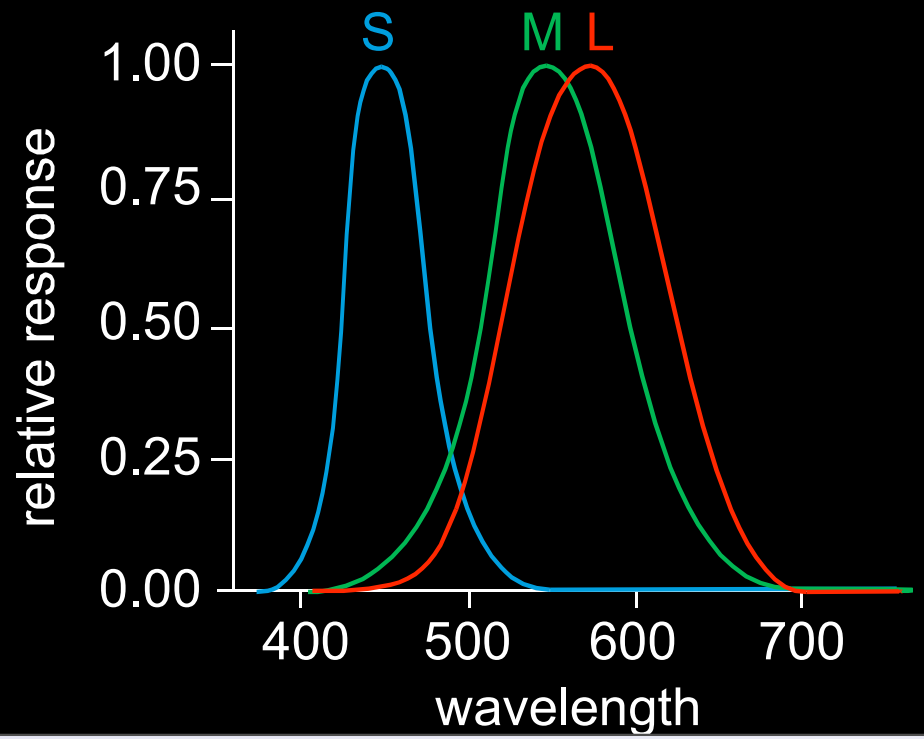
- De acordo com a teoria tri-estímulo, a cor que vemos é o resultado das respostas relativas dos cones para as luzes vermelha, verde e azul.
- O olho humano consegue distinguir cerca de 200 intensidades de vermelho, verde e azul.
- O olho humano possui de 6 a 7 milhões de cones, concentrados em uma pequena porção da retina chamada de fóvea.
- Cada cone possui sua própria célula nervosa, possibilitando discernir pequenos detalhes.
  - Para ver um objeto em detalhe, olhamos diretamente à ele para trazer a imagem até a fóvea.

Bastonetes

- 75 a 150 milhões de bastonetes estão posicionados na retina ao redor da fóvea.
- Uma única célula nervosa possui vários bastonetes ligados à ela, o que faz que com detalhes de objetos não sejam percebidos.
- Os bastonetes são super-sensíveis a baixos níveis de luminosidade ao contrário dos cones.
  - Durante a noite, por exemplo, é melhor não olhar diretamente para um objeto para que a imagem seja detectada fora da fóvea.

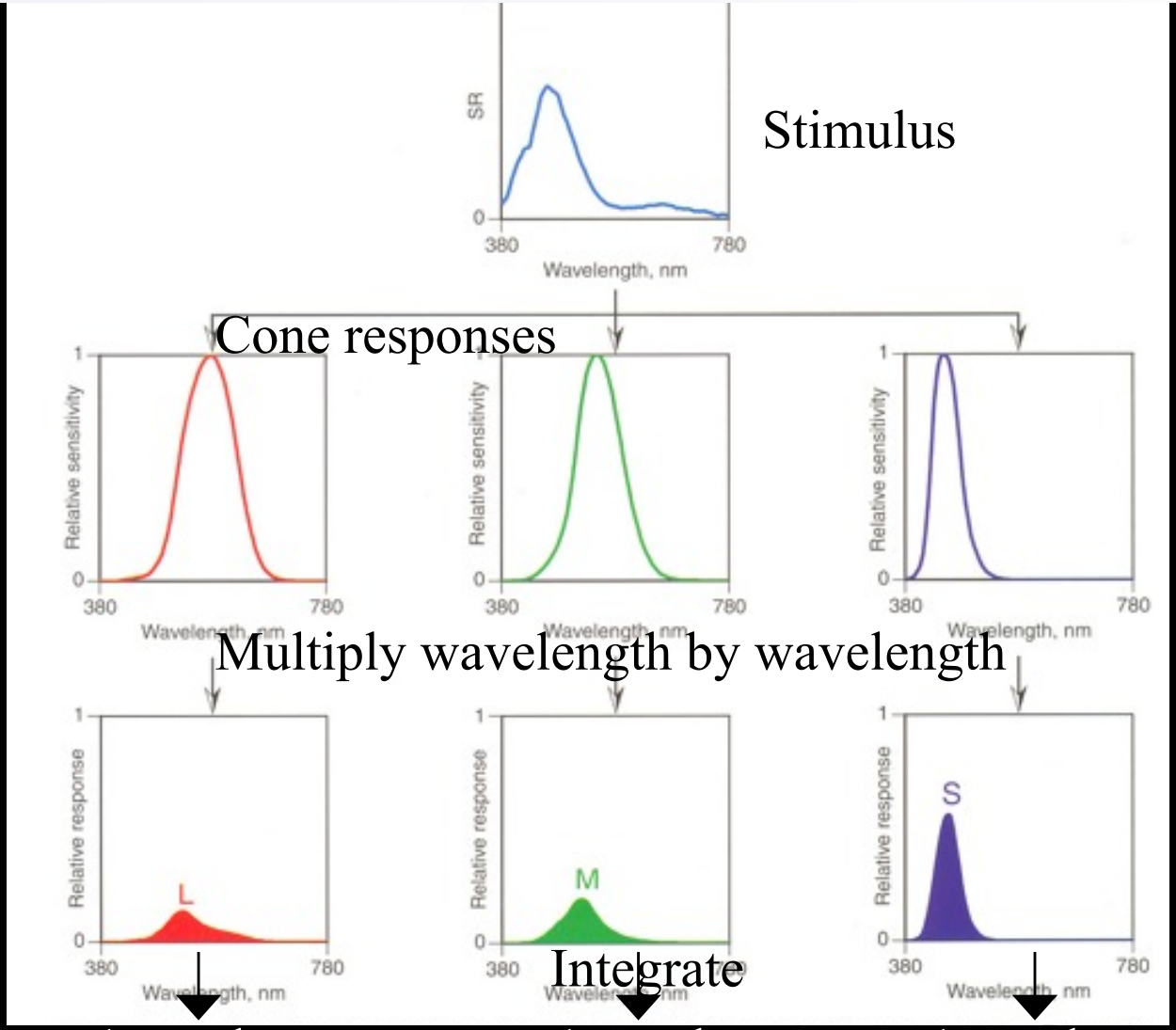
Sensibilidade espectral dos cones

- Short, Medium and Long wavelength
- Response for a cone
  $= \int_{\lambda} \text{stimulus}(\lambda) * \text{response}(\lambda)\, d\lambda$



Resposta do cone

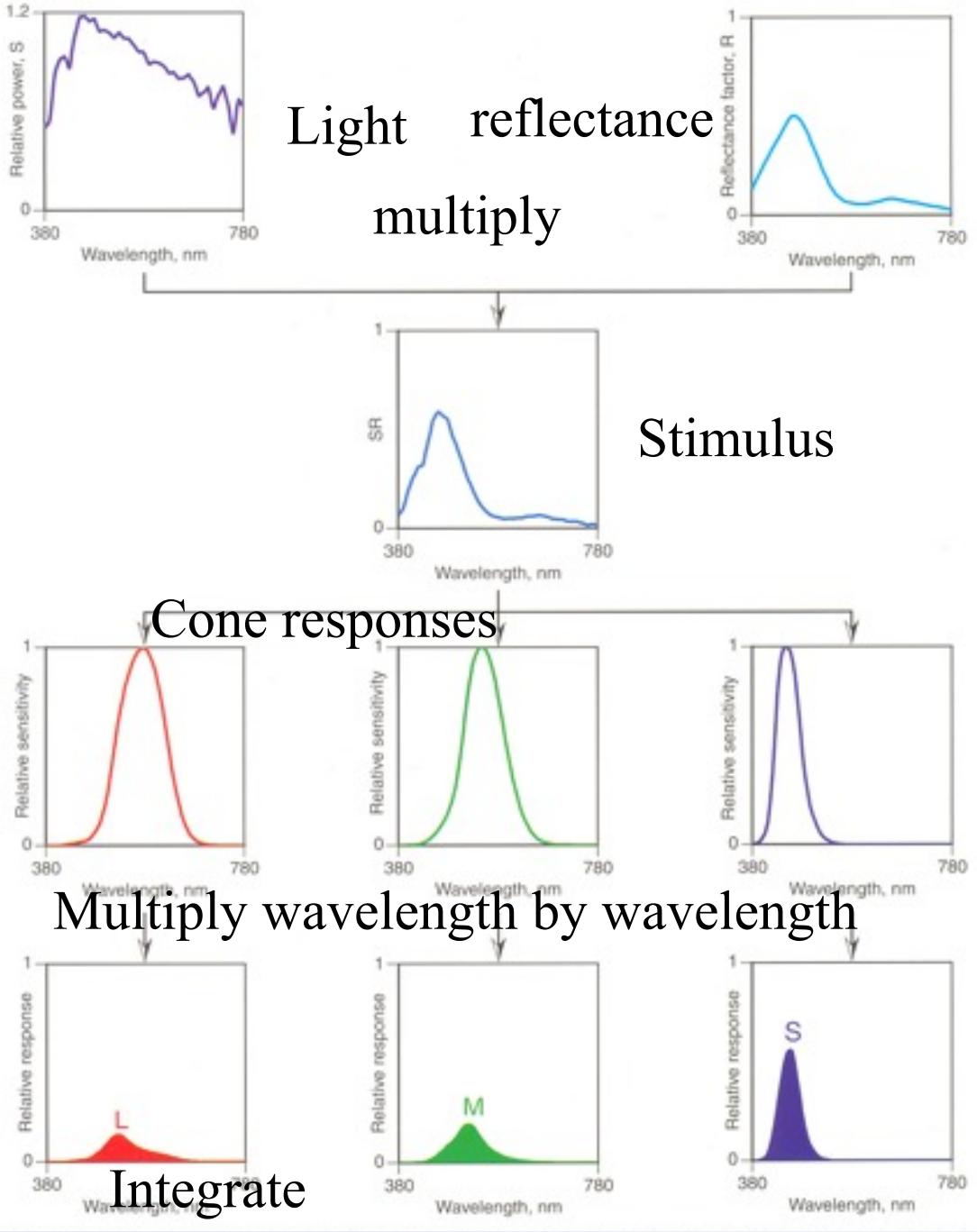
Start from infinite number of values (one per wavelength)



End up with 3 values (one per cone type)

Big picture

- It's all linear!

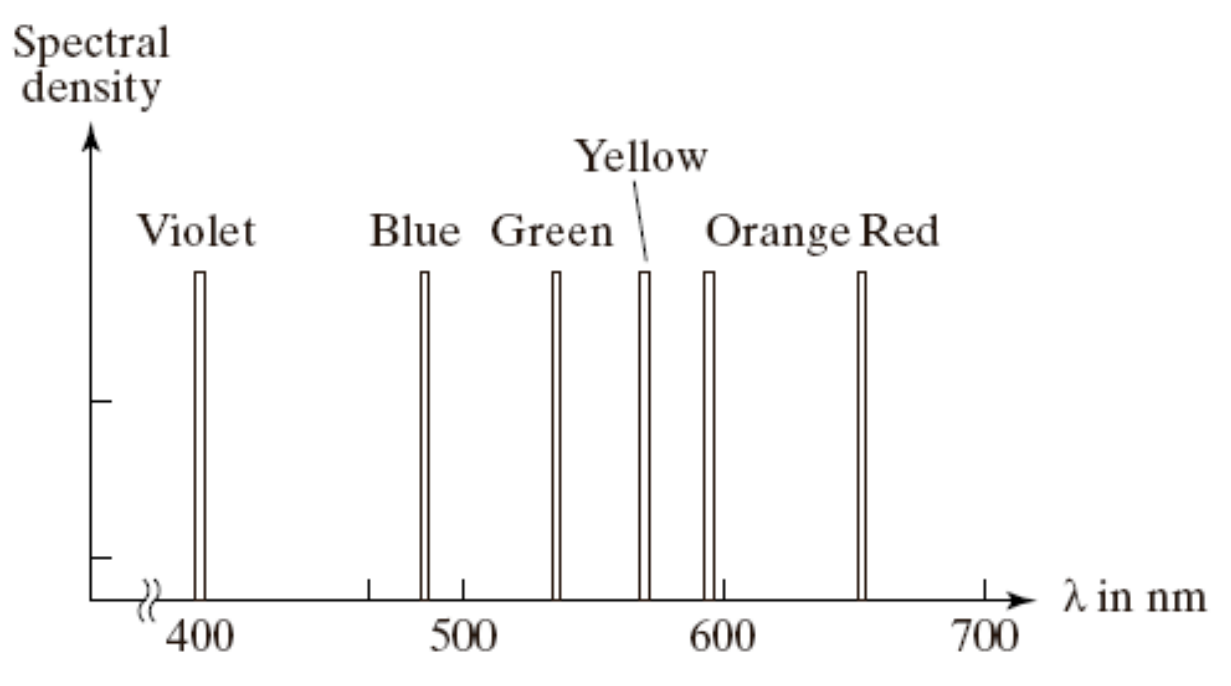


Representação

- Amostragem gera uma representação **finita** de uma função de distribuição espectral.
- Todo sistema refletivo possui um número **finito** de sensores, que fazem uma amostragem em *n* faixas do espectro.

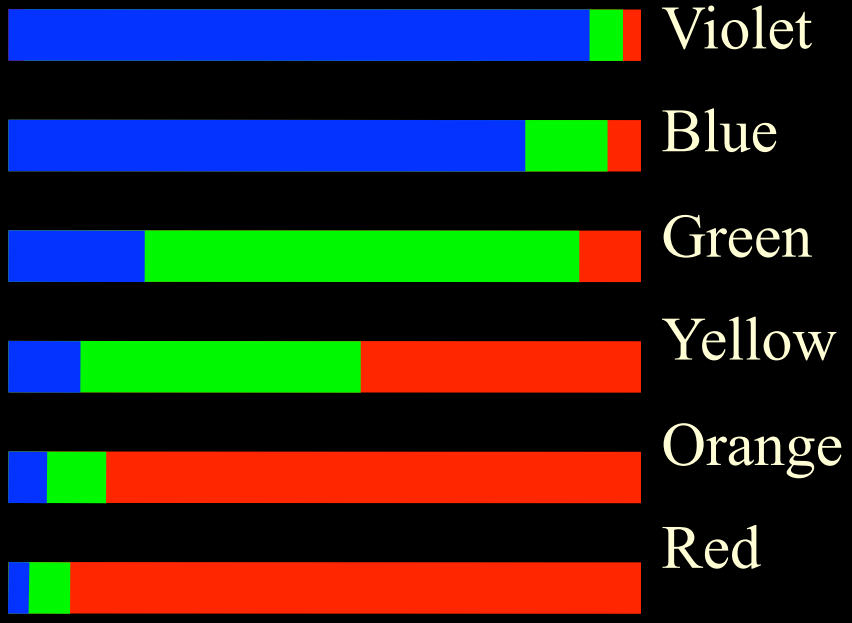
Densidade espectral

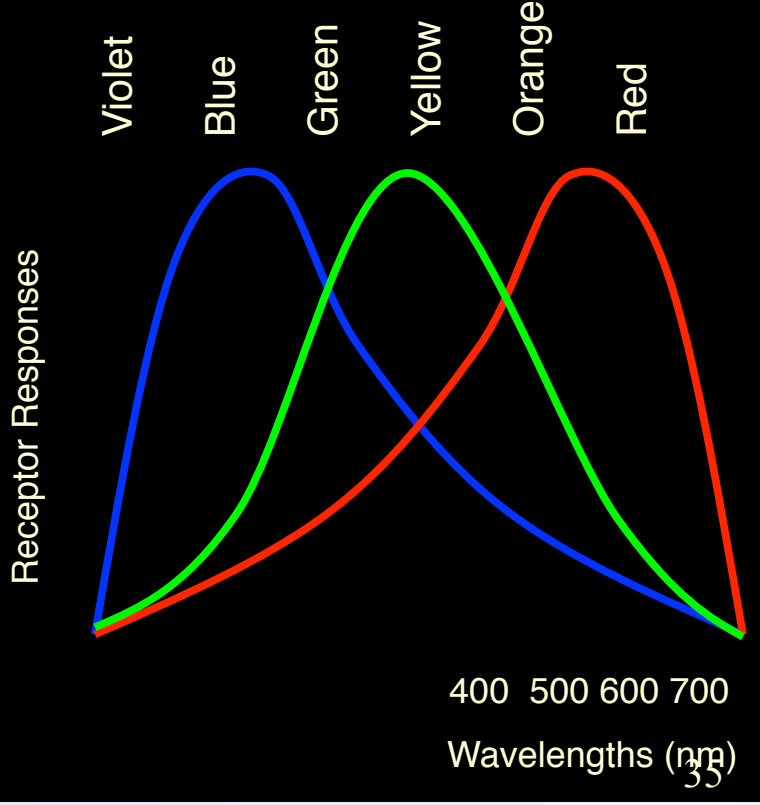
- A figura abaixo mostra **densidades espectrais S**(λ) (potência por unidade de comprimento de onda) para luzes puras e os seus nomes respectivos.



von Helmholtz 1859: Trichromatic theory

- Colors as relative responses (ratios)



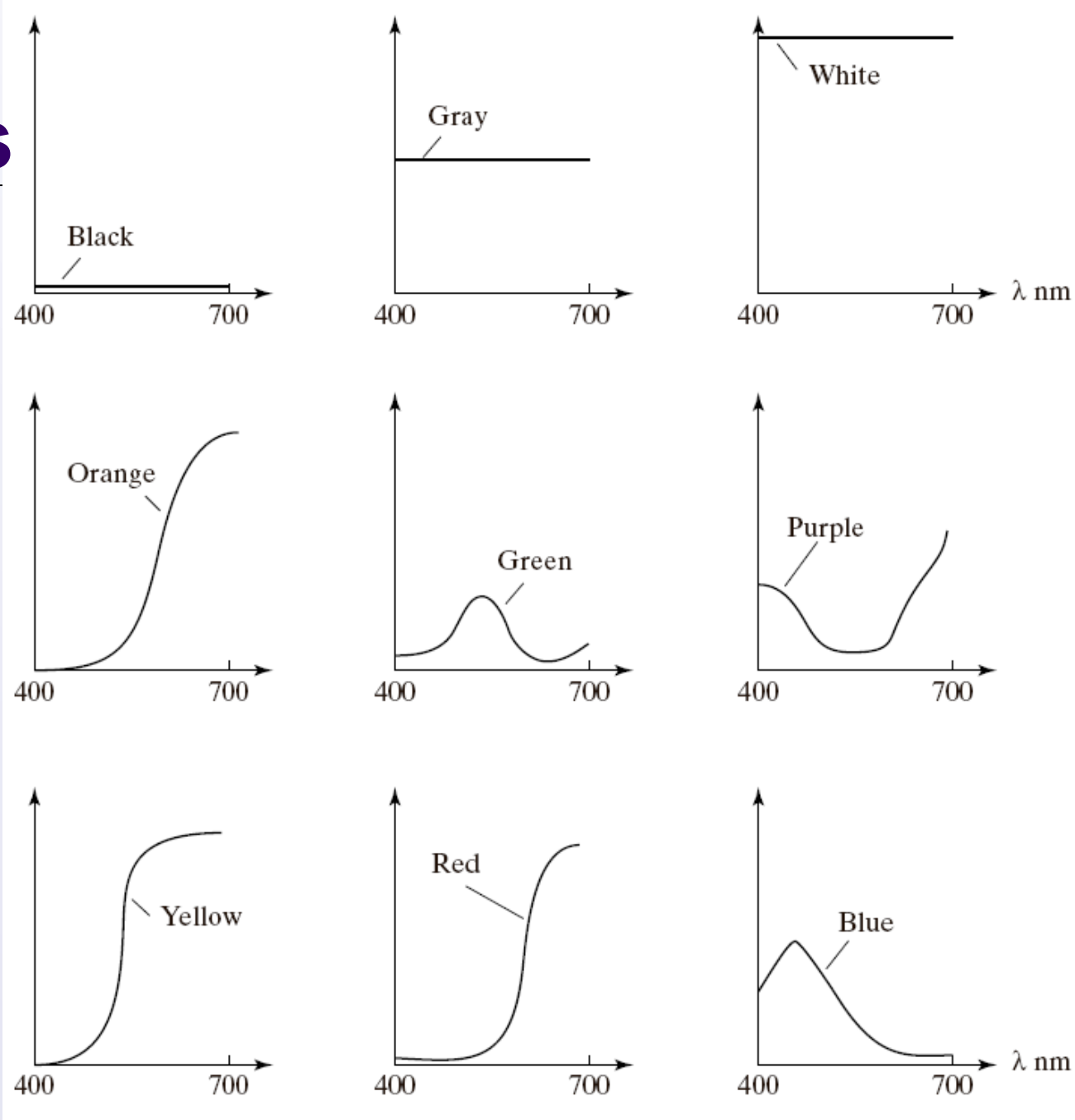


Short wavelength receptors

Medium wavelength receptors

Long wavelength receptors

Exemplos

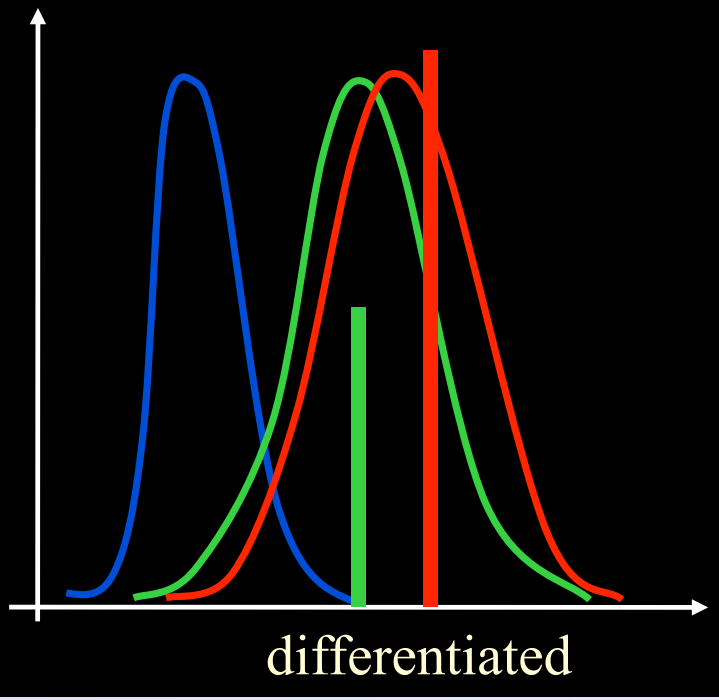

Black
400
700
Gray
400
700
White
400
700
λ nm
Orange
400
700
Green
400
700
Purple
400
700
Yellow
400
700
Red
400
700
Blue
400
700
λ nm

Eficiência Luminosa

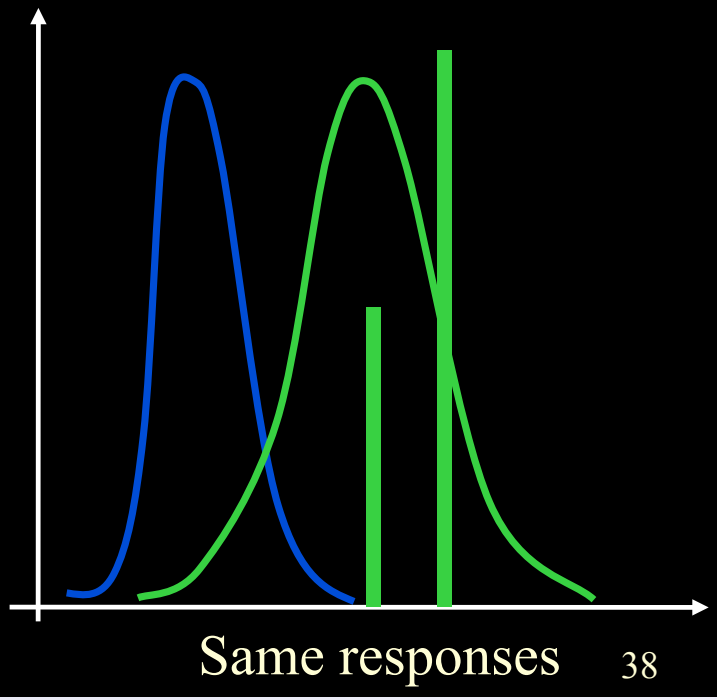
- Brilho aparente varia com o comprimento de onda.
- Pico do brilho é diferente para níveis baixos (bastonetes), médios e altos (cones).
  - Máximo na faixa do verde.

Daltonismo

- Classical case: 1 type of cone is missing (e.g. red)
- Makes it impossible to distinguish some spectra



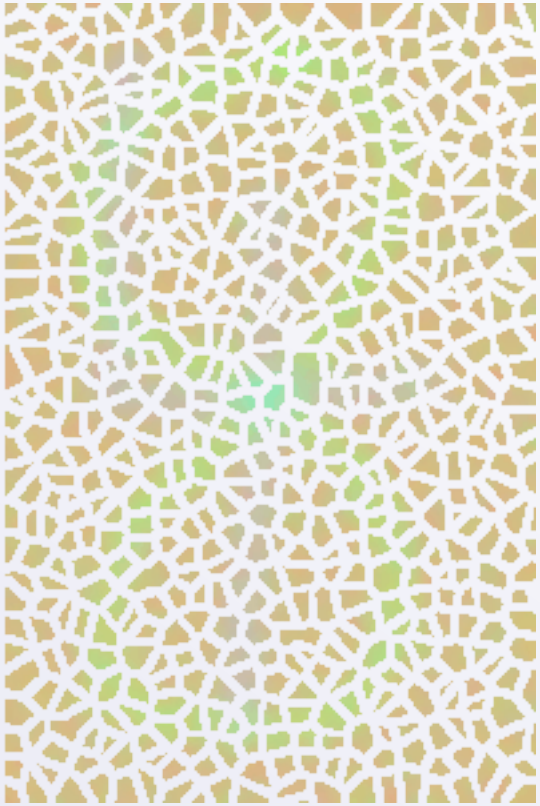
differentiated



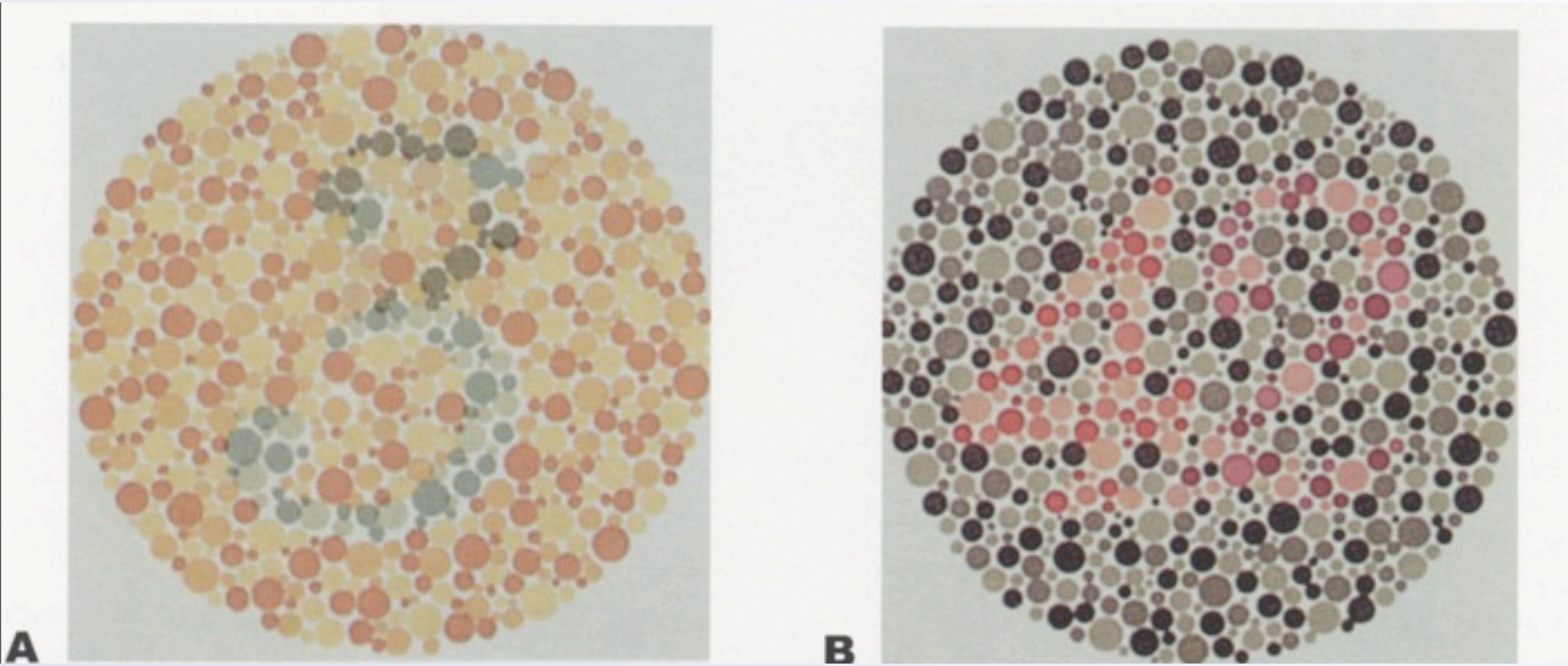
Same responses

Daltonismo

- John Dalton, século 18
- 8% sexo masculino, 0.6% mulheres
- Origem genética
- Dicromatas
  - 1 tipo de cone faltando
  - L (protanopia), M (deuteranopia), S (tritanopia)
- Tricromatas



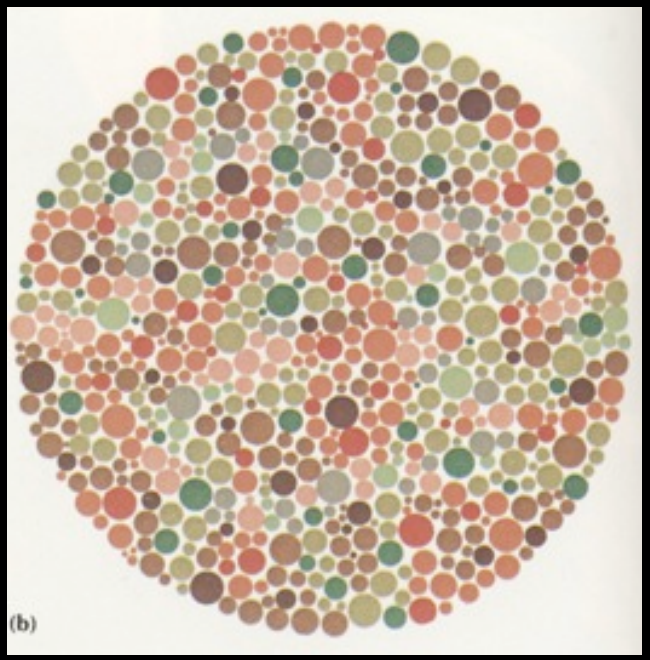
Teste #1



http://www.vischeck.com/vischeck/

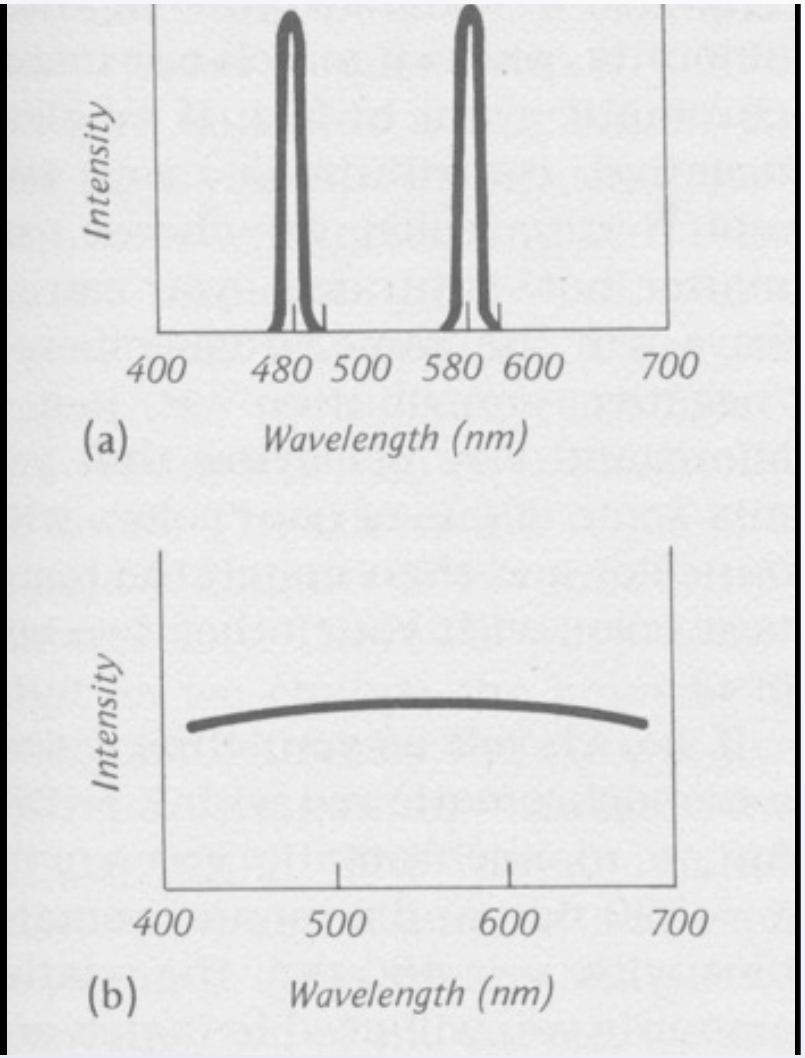
Teste #2

- Color contrast overrides intensity otherwise

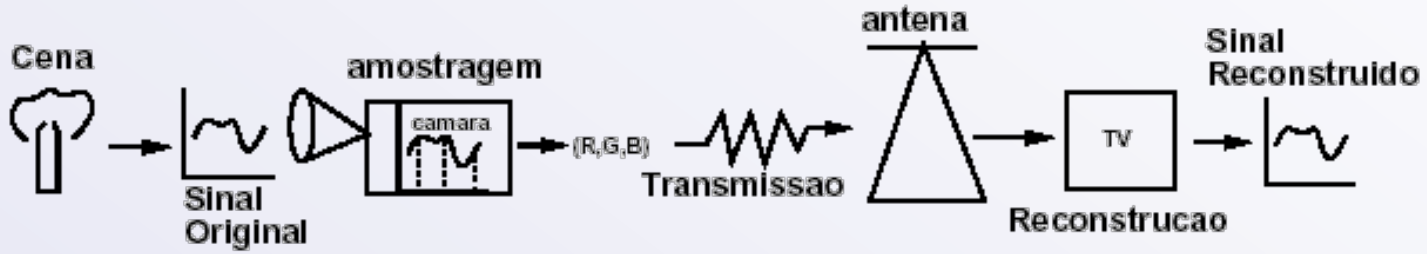


Metamerismo

- We are all color blind!
- These two different spectra elicit the same cone responses
- Called metamers



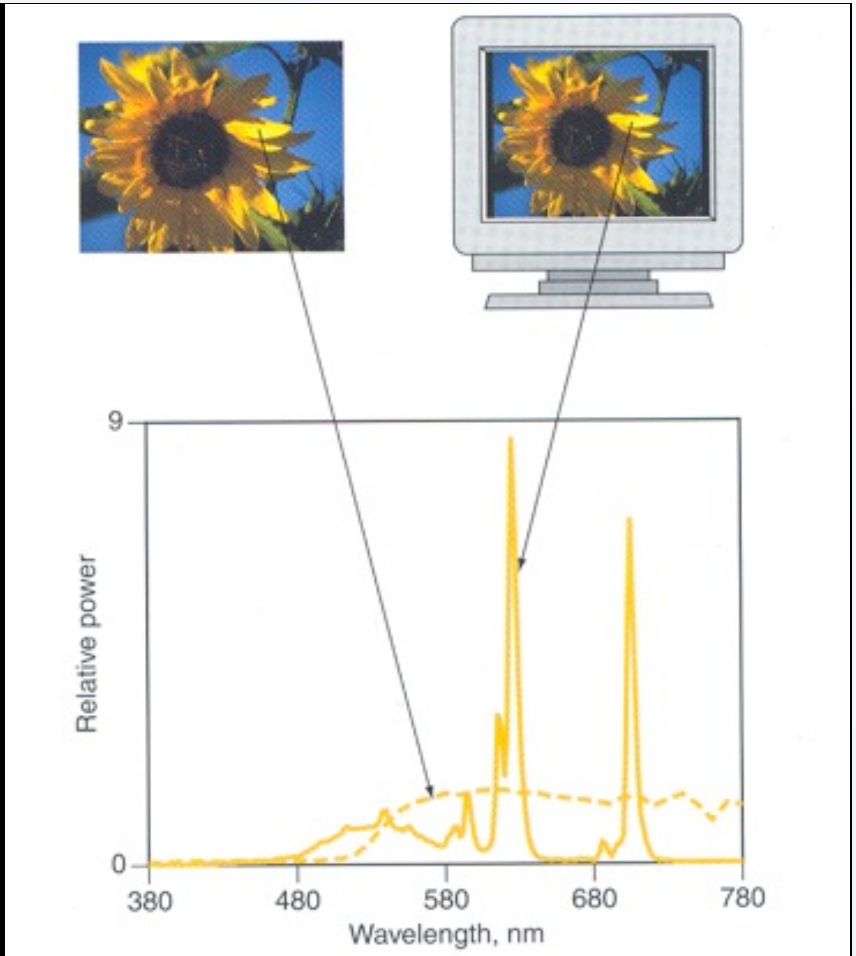
Amostragem e Reconstrução



- A cor reconstruída deve ser perceptualmente igual a cor original.
  - É possível devido ao **metamerismo.**
  - Cores metaméricas são perceptualmente idênticas.

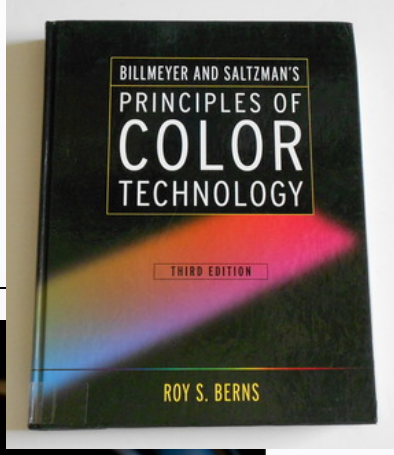
Reprodução de cores

- 3 primaries are (to a first order) enough to reproduce all colors

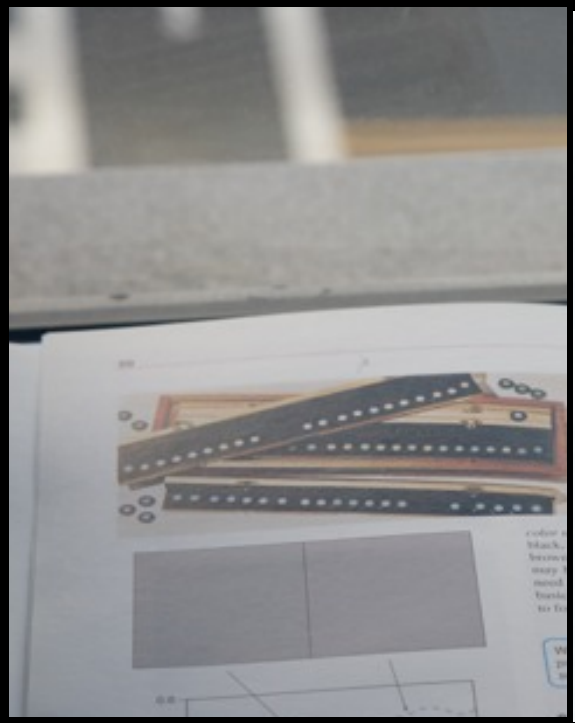


The dashed line represents daylight reflecting from sunflower petals, while the solid line represents the light emitted by a color CRT display adjusted to match the color of the sunflower.

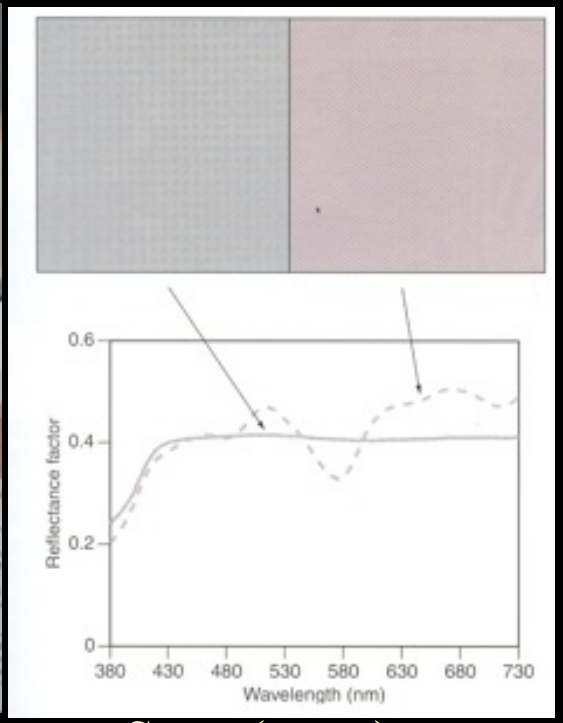
Influência da iluminação



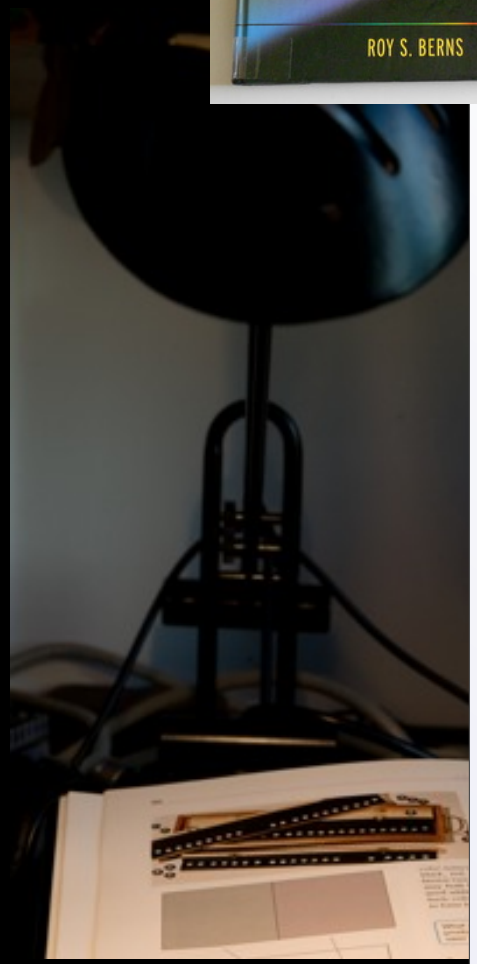
- Two grey patches in Billmeyer & Saltzman's book look the same under daylight but different under neon or halogen



Daylight



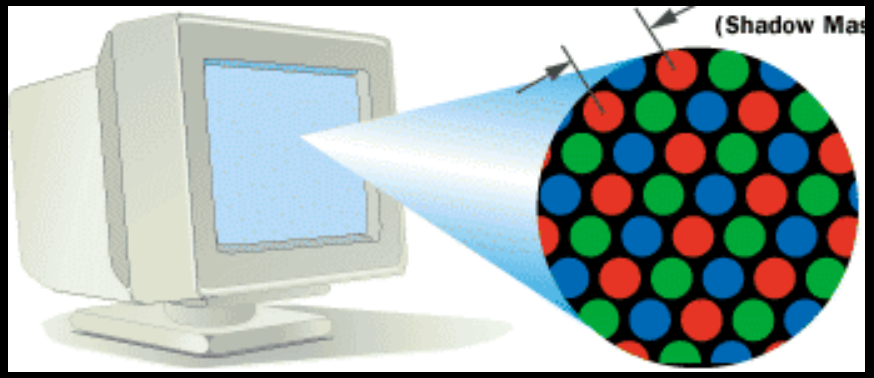
Scan (neon)



Hallogen

Síntese de cores

- Focus on additive color synthesis
- We'll use 3 primaries (e.g. red green and blue) to match all colors

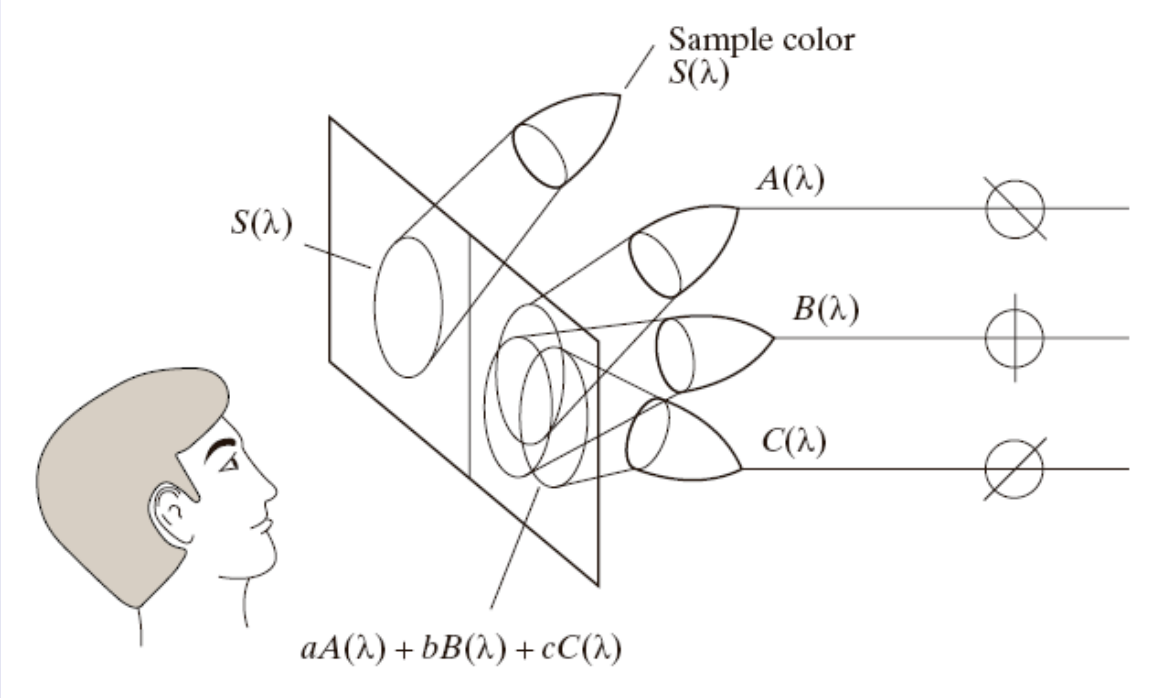


http://www.iriscam.info/PIXELS.html

- What should those primaries be?
- How do we tell the amount of each primary needed to reproduce a given target color?

Resposta Espectral

- Cor espectral desconhecida à esquerda
- Uso de três cores fundamentais
- Intensidade de cada cor padrão varia de forma independente.

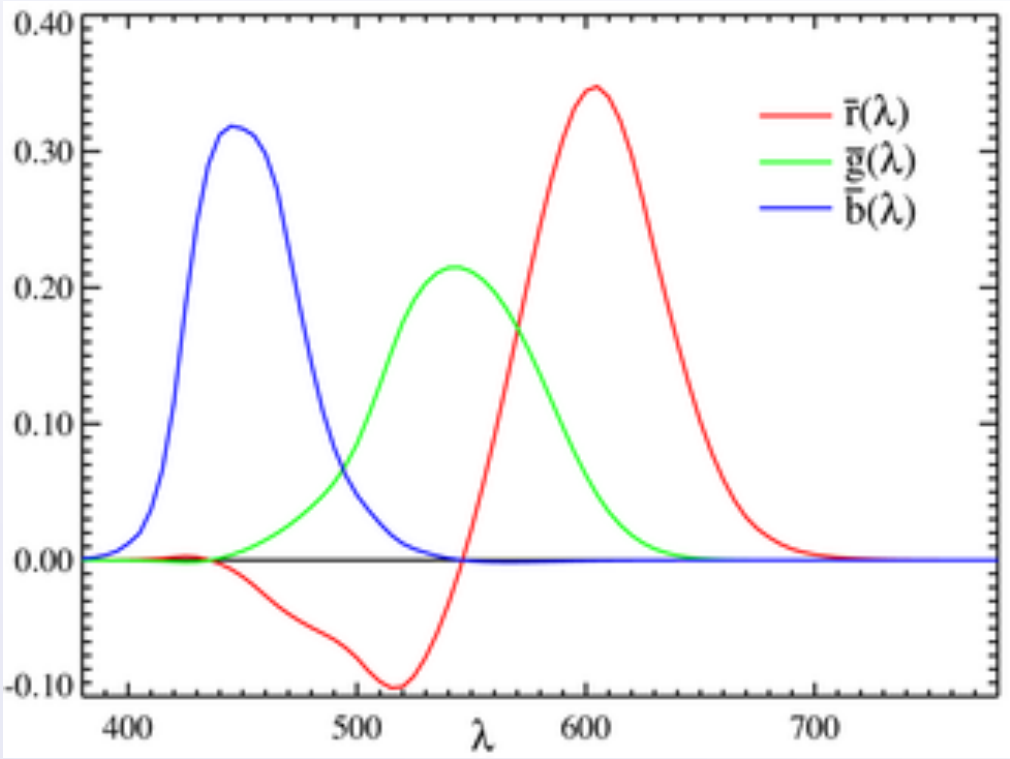


Teoria Tri-Estímulo

- As primárias usadas foram as cores monocromáticas vermelha, verde e azul nas faixas de 700 nm, 546 nm, and 436 nm, respectivamente.
- As funções $r(\lambda)$, $g(\lambda)$, e $b(\lambda)$ mostram o quanto destas cores são necessárias para formar uma cor espectral pura em λ, $mono(\lambda) = r(\lambda)R + g(\lambda)G + b(\lambda)B$.

Teoria Tri-Estímulo

- Examplo: luz laranja pura *mono*(600) é idêntica a combinação 0.37 R + .08 G.
- O espectro da luz laranja não é igual ao espectro da soma, mas as duas luzes parecem as mesmas.



Teoria Tri-Estímulo

- Problema: Para certas escolhas de *R*, *G*, e *B*, alguns dos escalares *r,* g, and *b* devem ser *negativos* para que $C = rR + gG + bB$ seja verdade.
- Por exemplo, $r(\lambda)$ é negativo em $\lambda = 520$.
- Qual é o significado físico do sinal de menos em uma cor como $C = 0.7R + 0.5G - 0.2B$? Luz que não está presente, não pode ser removida.

Teoria Tri-Estímulo

- Rescreve a equação como $C + 0.2B = 0.7R + 0.5G$.
- *C* por si só não pode ser reconstruído com a superposição das primárias.
- A cor $C + 0.2B$ deve ser reconstruída com valores positivos de of *R* and *G*.
- Muitas cores podem ser frabricadas (usando coeficientes positivos de *r*, *g*, e *b*), mas algumas não poderão, e uma das primárias deverá ser colocada no outro lado da equação.

Escalando as Funções de Cores

$$\bar{r}(\lambda) = \frac{r(\lambda)}{r(\lambda) + g(\lambda) + b(\lambda)}$$

$$\bar{g}(\lambda) = \frac{g(\lambda)}{r(\lambda) + g(\lambda) + b(\lambda)}$$

$$\bar{b}(\lambda) = \frac{b(\lambda)}{r(\lambda) + g(\lambda) + b(\lambda)}$$

$$\bar{r}(\lambda) + \bar{g}(\lambda) + \bar{b}(\lambda) = 1$$

Escalando as Funções de Cores (2)

- Os valores escalados são chamados de *valores de cromacidade* para a cor *mono*(λ).
- Eles definem quantidades de cada uma das primárias necessárias para reproduzir uma luz de brilho unitário em λ.
- Removendo as variações de brilho, podemos representar cores através de dois números

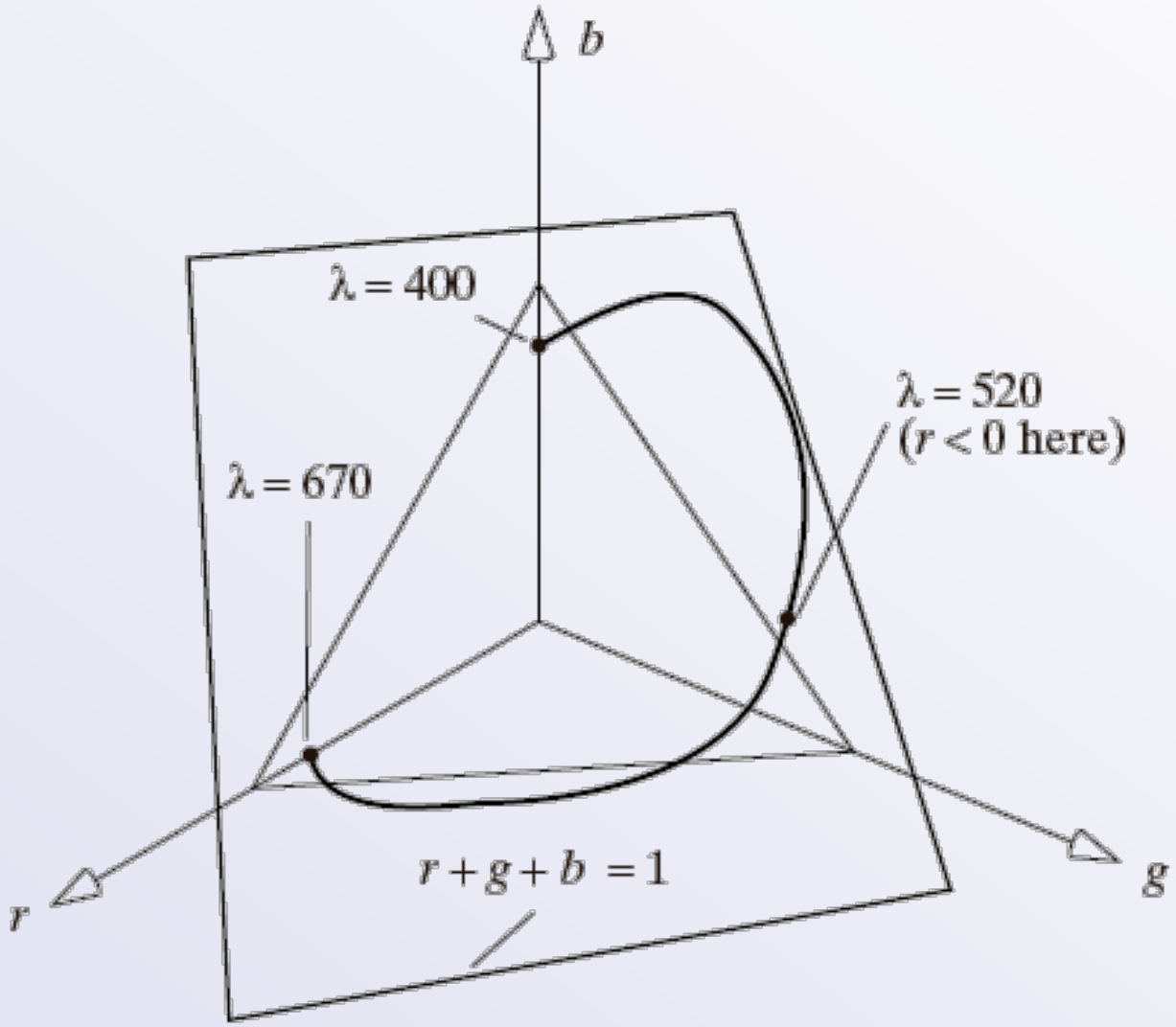
$$(\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda))$$

$$\bar{b}(\lambda) = 1 - \bar{r}(\lambda) - \bar{g}(\lambda)$$

Escalando as Funções de Cores (3)

- Podemos plotar a posição de $(\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda))$ variando λ dentro do espectro visível.
- Todos os pontos da curva pertencem ao plano $r + g + b = 1$.
- Porque algumas das coordenadas são negativas em λ, a curva não está totalmente no octante positivo deste espaço.

Escalando as Funções de Cores (4)

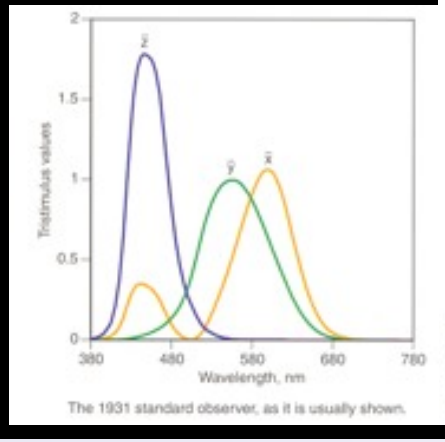


O Padrão CIE

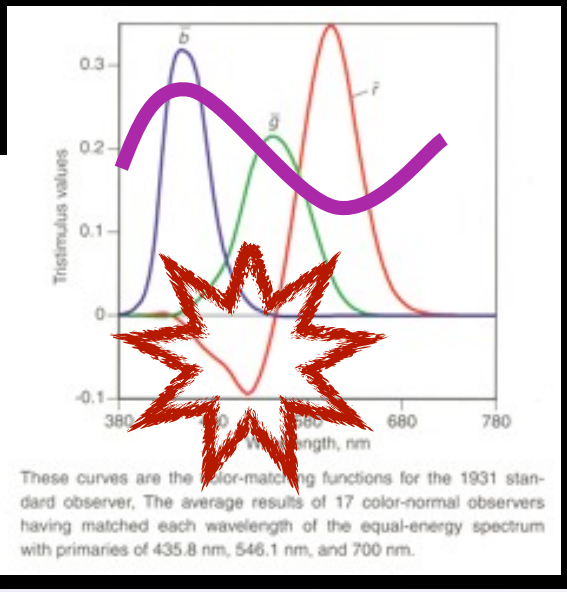
- Padrão criado em 1931 pela Comissão Internacional de Iluminação (Commission Internationale de l'éclairage, or CIE).
- Este padrão define três primárias supersaturadas, *X*, *Y*, and *Z*.
- Elas não correspondem a cores reais, porém possuem a propriedade que todas as cores reais podem ser representadas por combinações positivas.

Problema anterior

- =>new set of tristimulus curves
  - linear combinations of b, g, r
  - pretty much add enough b and g until r is positive



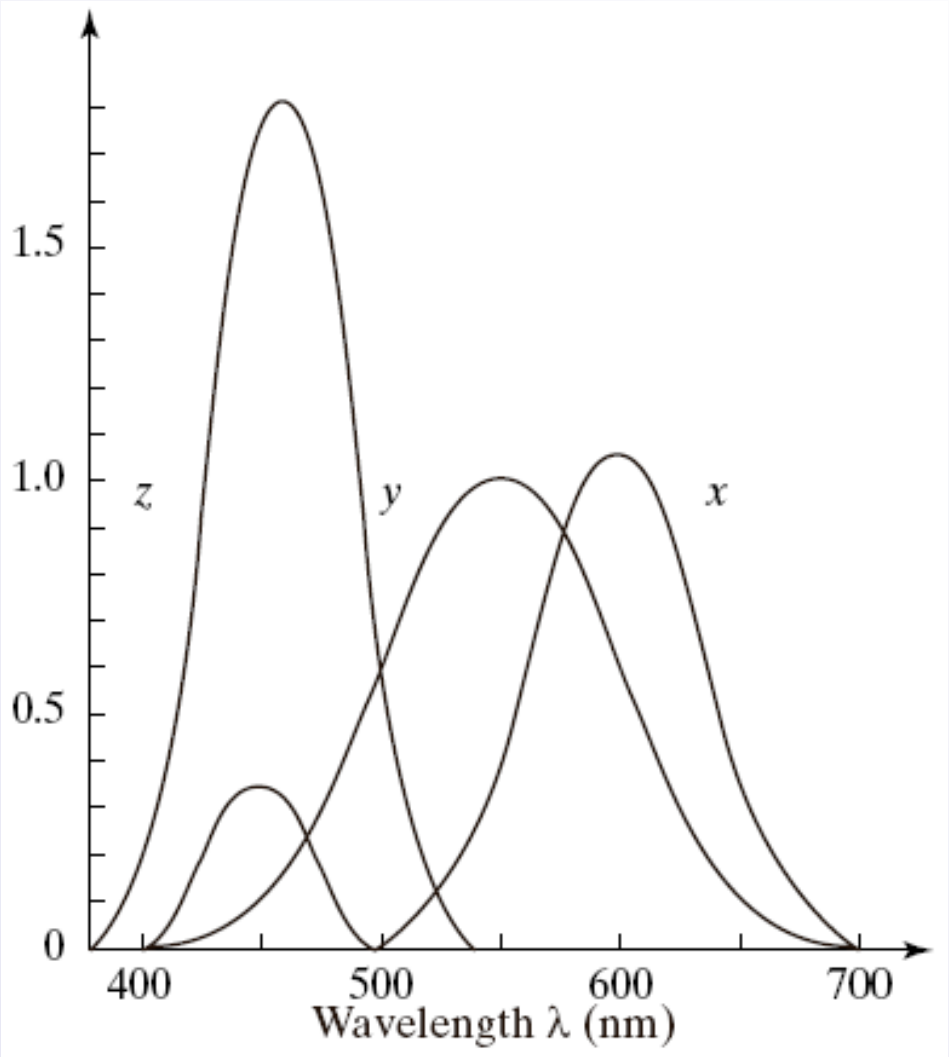
The 1931 standard observer, as it is usually shown.



These curves are the color-matching functions for the 1931 standard observer, The average results of 17 color-normal observers having matched each wavelength of the equal-energy spectrum with primaries of 435.8 nm, 546.1 nm, and 700 nm.

O Padrão CIE

- Uma luz monocromática de comprimento λ é representada por umam combinação linear destas três primárias especiais: mono(λ) = x(λ)X + y(λ)Y + z(λ)Z.



O Padrão CIE

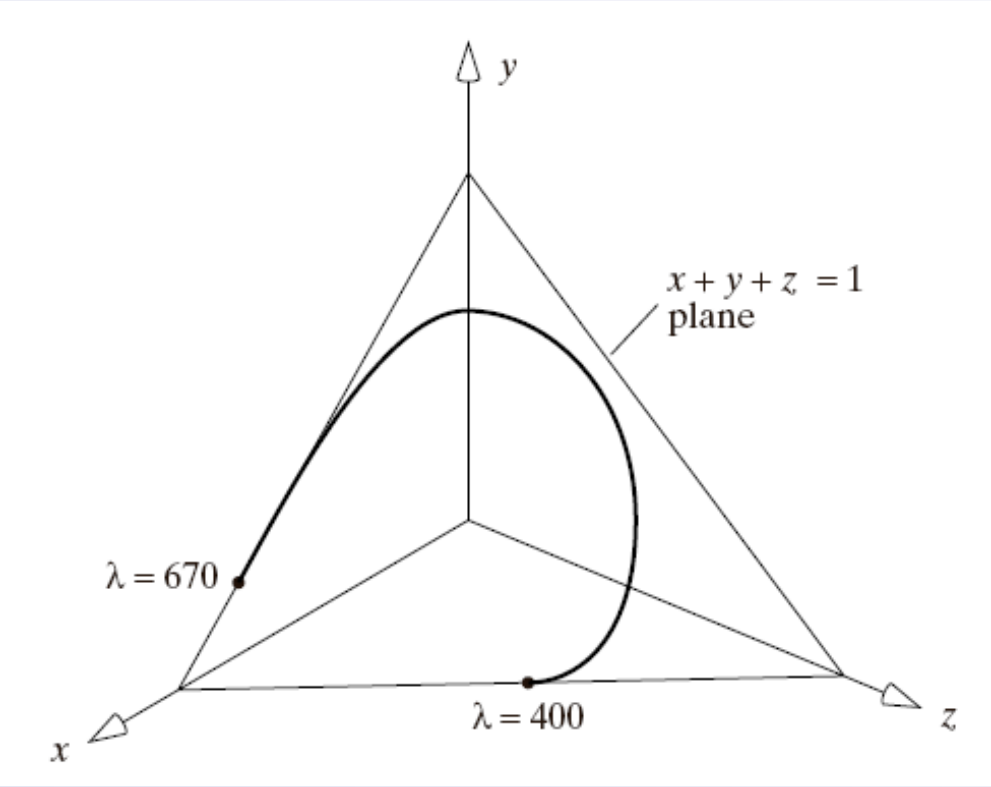
- Podemos normalizar os valores para manter brilho unitário:

$$\bar{x}(\lambda) = \frac{x(\lambda)}{x(\lambda) + y(\lambda) + z(\lambda)} \qquad \bar{y}(\lambda) = \frac{y(\lambda)}{x(\lambda) + y(\lambda) + z(\lambda)}$$

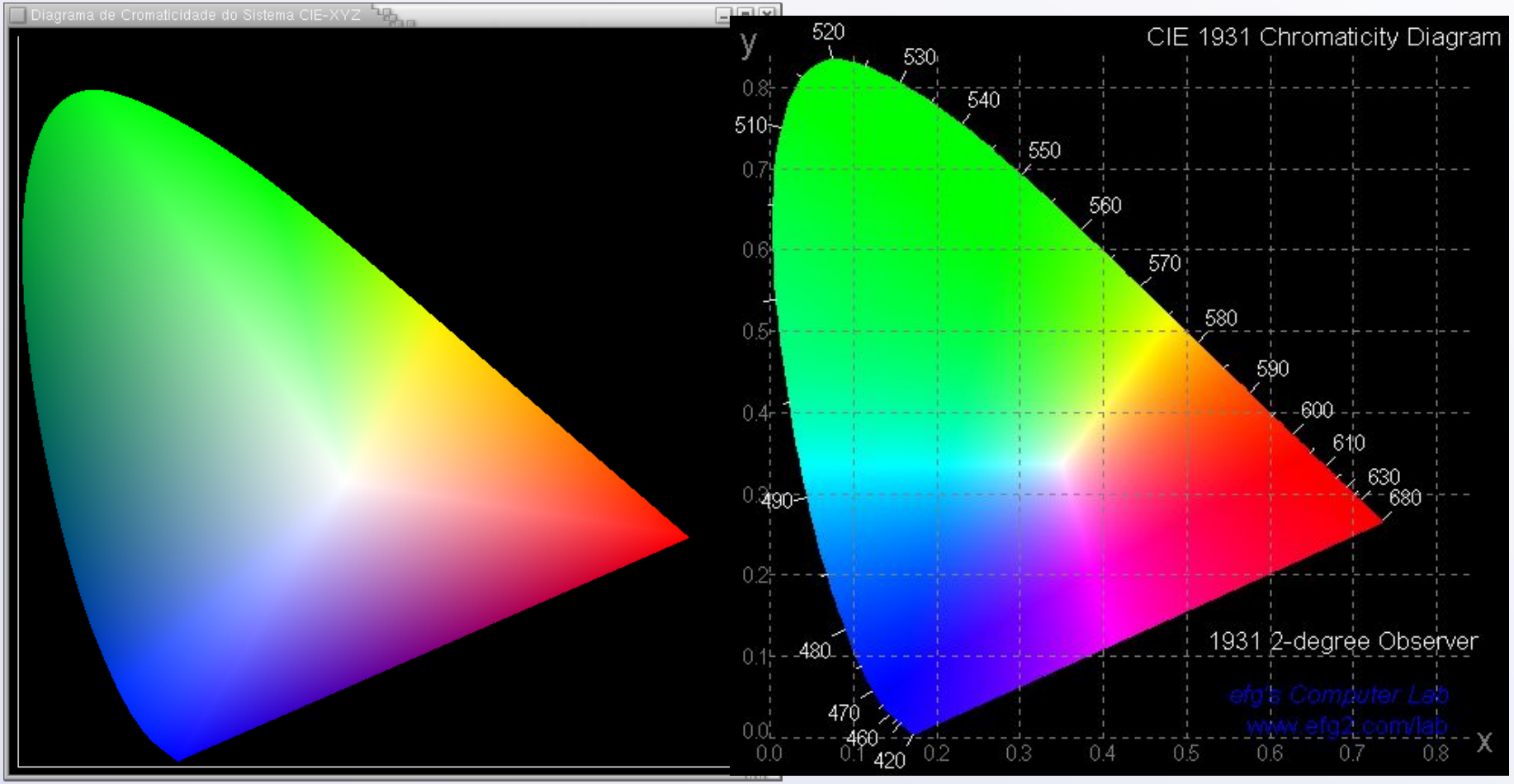
$$\bar{z}(\lambda) = \frac{z(\lambda)}{x(\lambda) + y(\lambda) + z(\lambda)} \qquad \bar{z}(\lambda) = 1 - \bar{x}(\lambda) - \bar{y}(\lambda)$$

O Padrão CIE

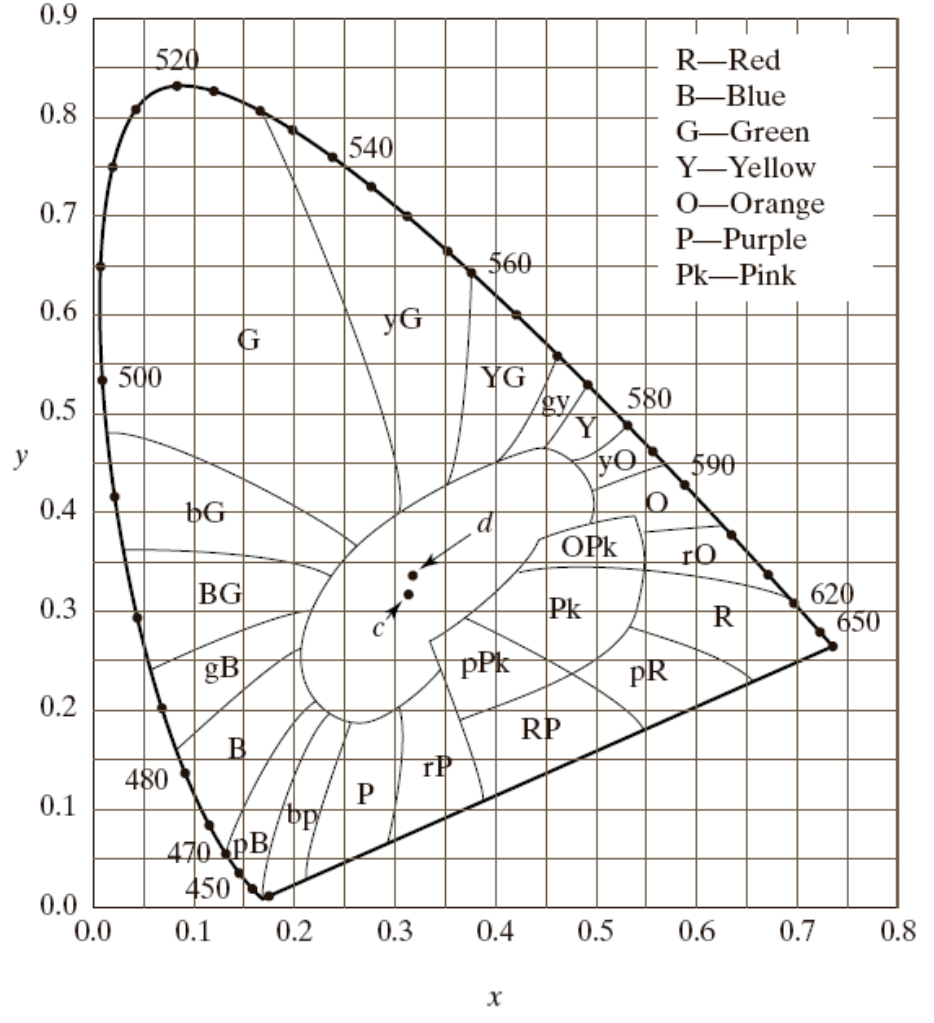
- A figura mostra a curva $s(\lambda) = (\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda))$ que se encontra no octante positivo do plano xyz.



O diagrama CIE



O diagrama CIE

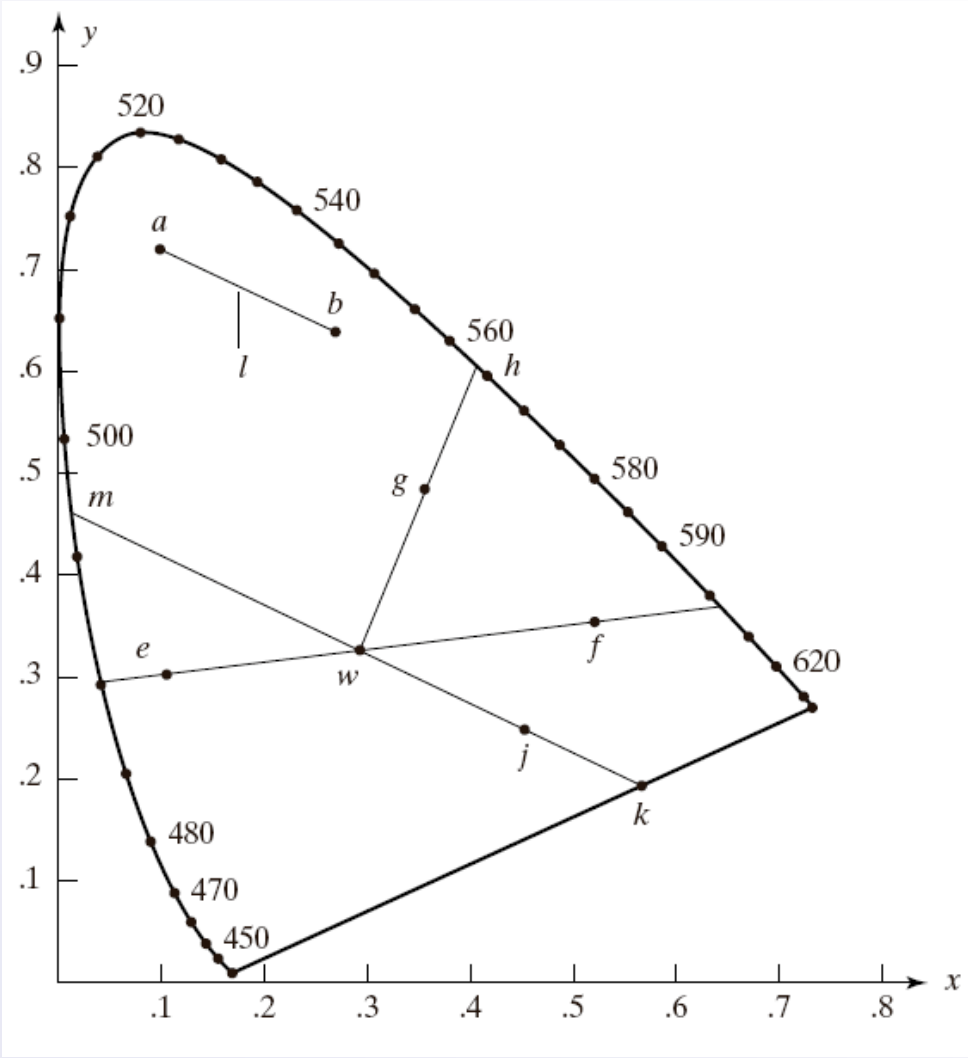


O diagrama CIE

- Nas fronteiras temos todas as cores espectrais puras de acordo com o seu comprimento de onda.
- Dentro do gráfico temos todas as outras cores.
- Pontos fora desta região não correspondem a luz visível.

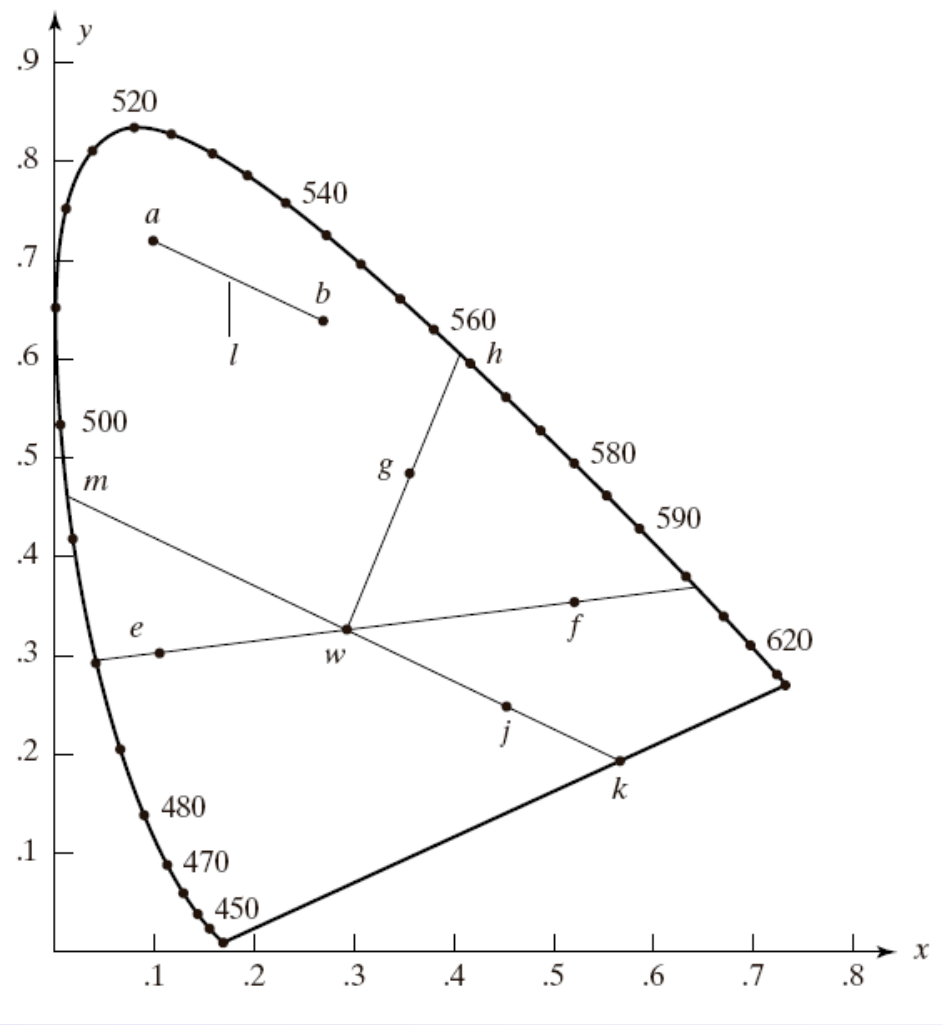
Usando o diagrama CIE

- Todos os pontos da linha *l* entre *a* e *b* são combinações convexas de *a* e *b*, $(\alpha)a + (1 - \alpha)b$ for $0 \leq \alpha \leq 1$.
- Cada cor é legítima, e qualquer cor na linha reta pode ser gerada através do display de quantidades de *a* e *b*.

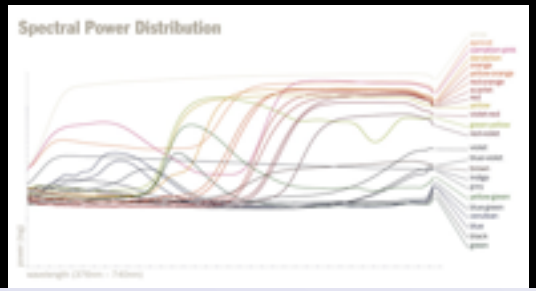


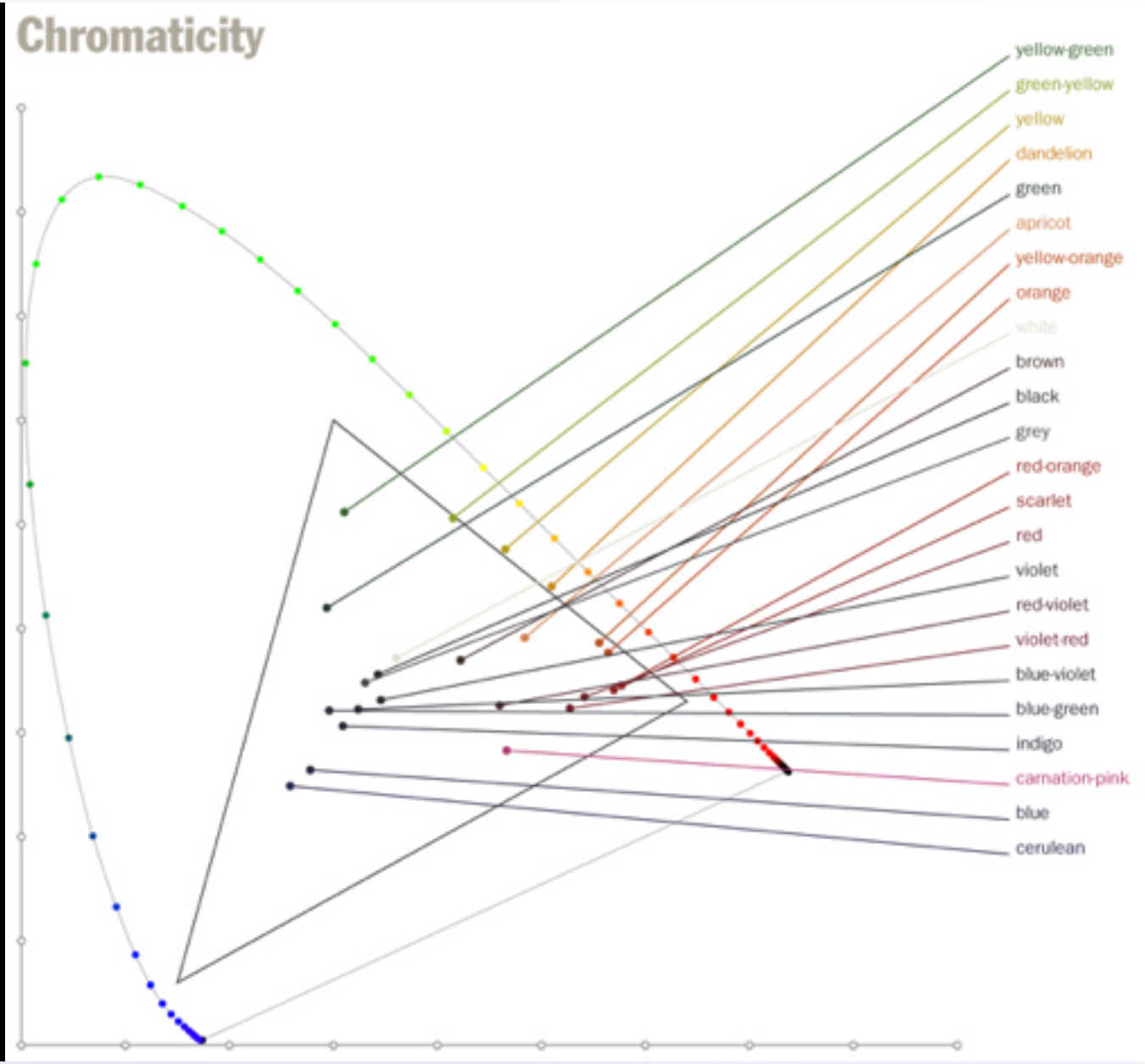
Usando o diagrama CIE

- Quando duas cores são adicionadas e a sua soma é a cor branca, dizemos que tais cores são complementares.
- *e* (azul-verde) and *f* (laranja-rosa) são cores complementares porque quando combinadas formamos a cor branca, *w*.



- http://www.photo-mark.com/notes/2011/sep/20/crayon-colors/





Sistemas de Cor

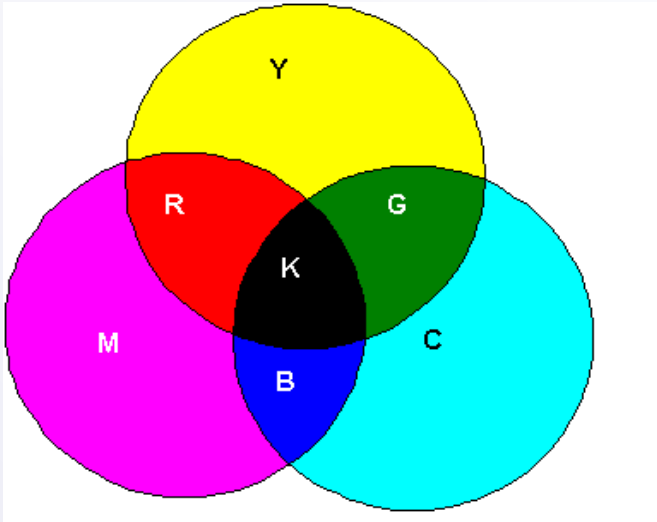
- Espaço de cor + sistema de coordenadas.
  - Sistemas padrão
  - Sistemas dos dispositivos
  - Sistemas computacionais
  - Sistemas de interface

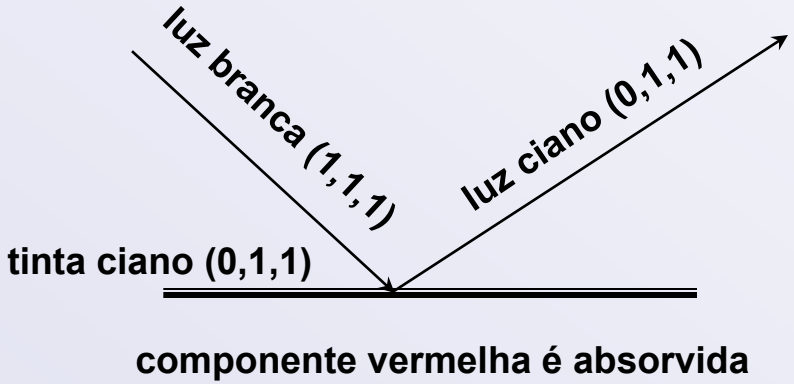
Sistemas padrão

- Independentes de dispositivos físicos.
- CIE-RGB.
  - 700 *n*m (Red), 546 *n*m (Green), 435.8 *n*m (Blue).
- CIE-CMY.
  - Ciano (azul piscina), Magenta (violeta), Amarelo.
- CIE-XYZ.

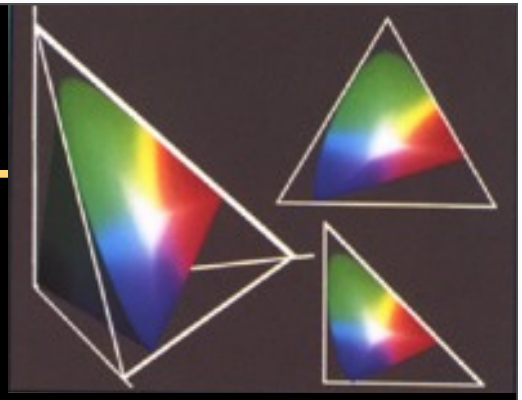
Sistema CMY

- Sistema das Impressoras.
  - CMY ou CMYK.
- Processo predominantemente subtrativo.

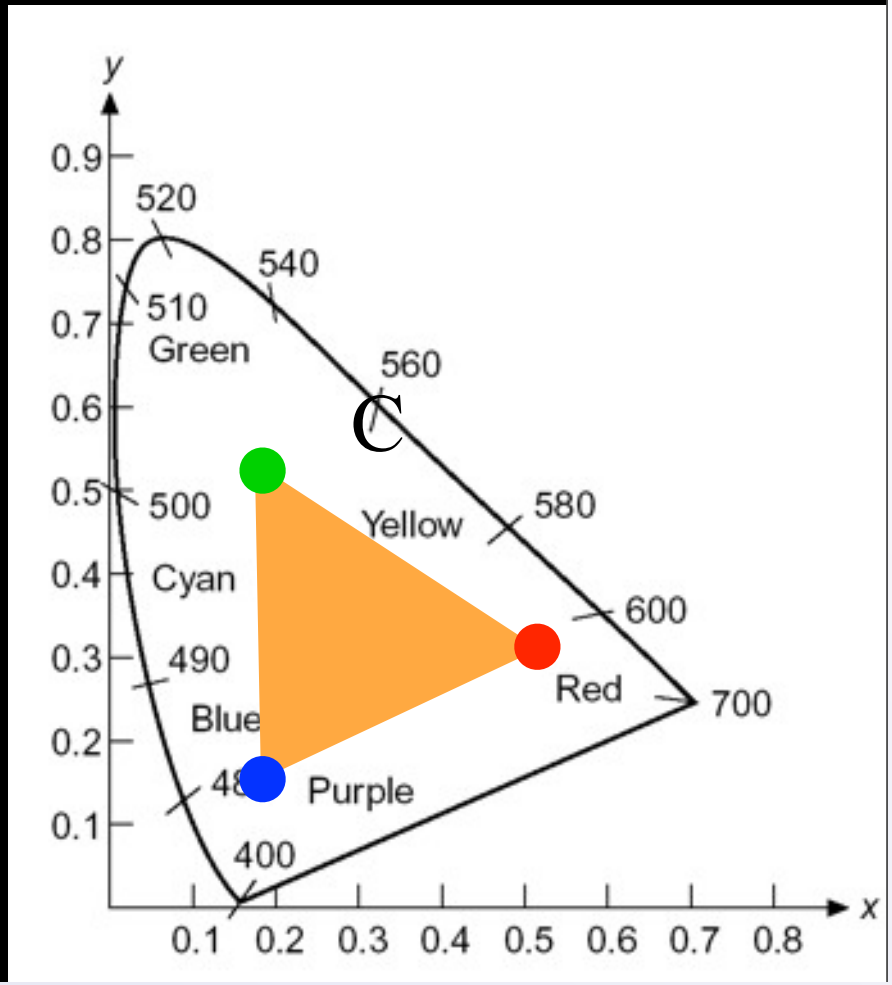




Color gamut

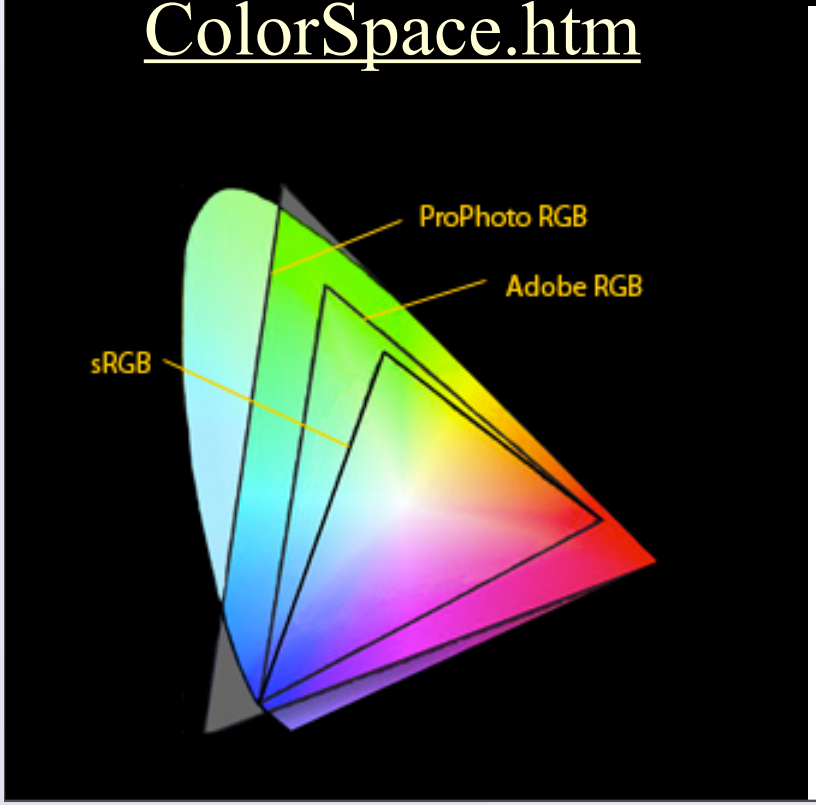


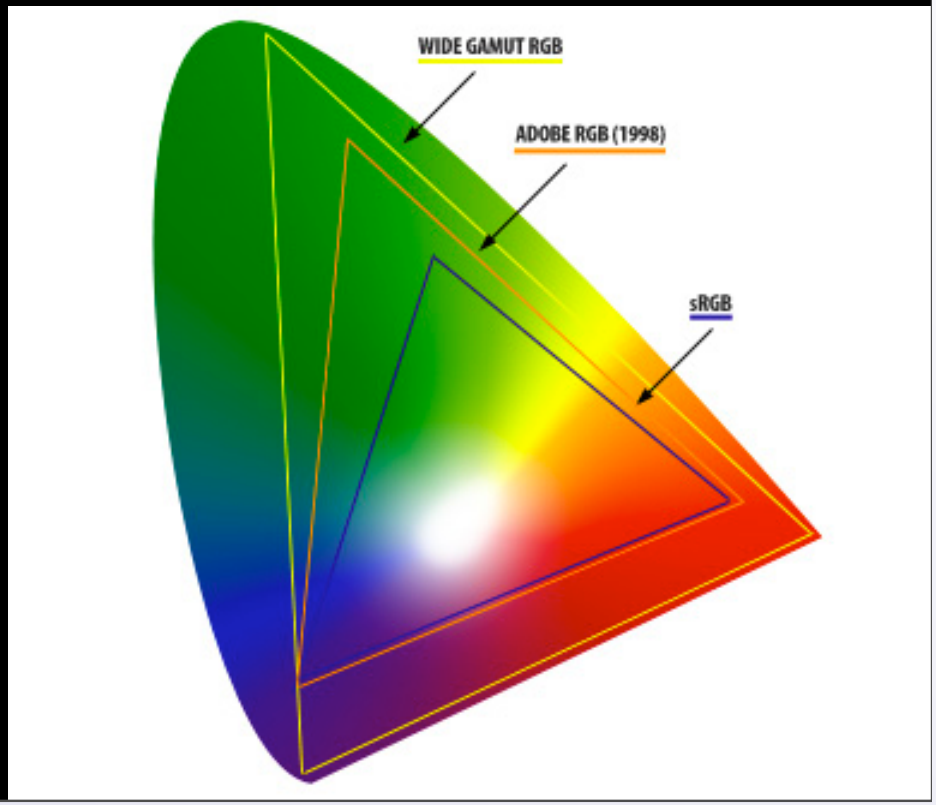
- Given 3 primaries
- The realisable chromaticities lay in the triangle in xy chromaticity diagram
- Because we can only add light, no negative light



Gamute de cores

- http://dba.med.sc.edu/price/irf/Adobe_tg/manage/images/gamuts.jpg
- http://www.petrvodnakphotography.com/Articles/ColorSpace.htm





Sistemas de interface

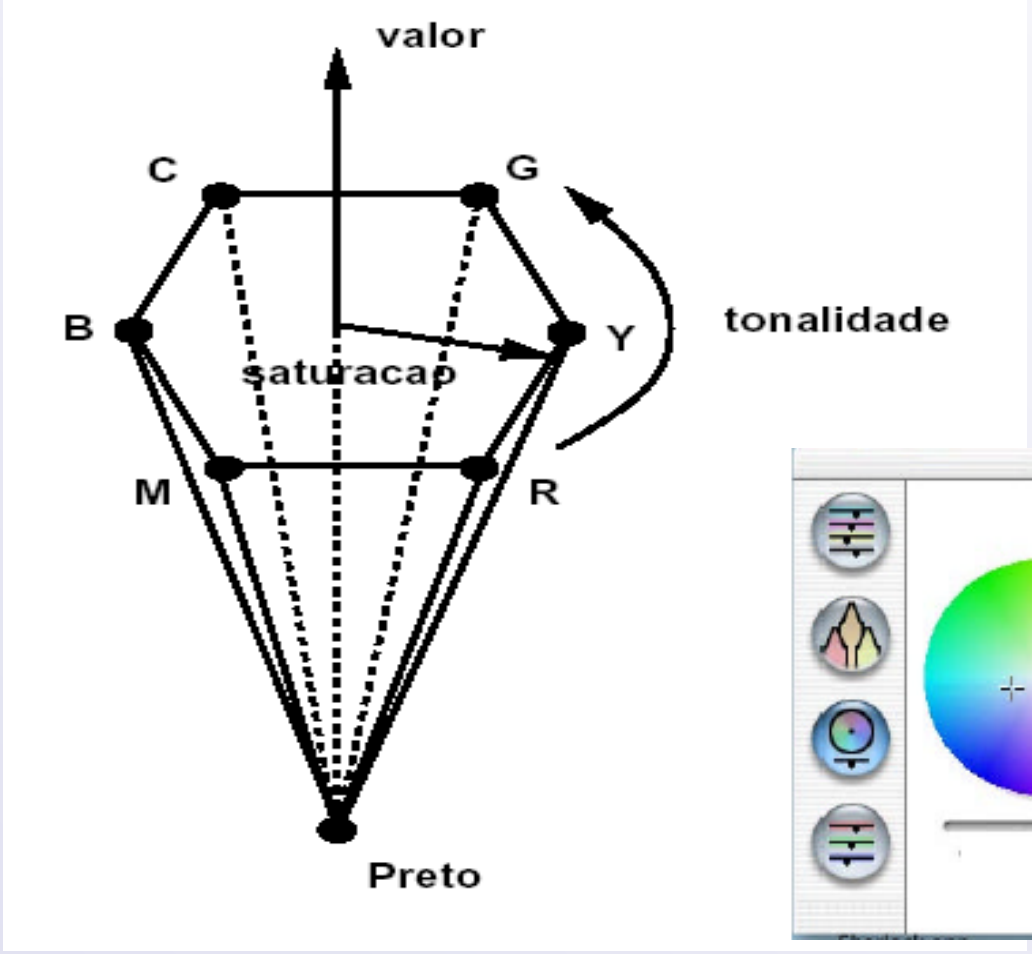
- Oferecem uma **interface** adequada a especificação de cores por um usuário comum.
- Em geral, especificam cores através de três parâmetros: matiz, saturação e luminância.

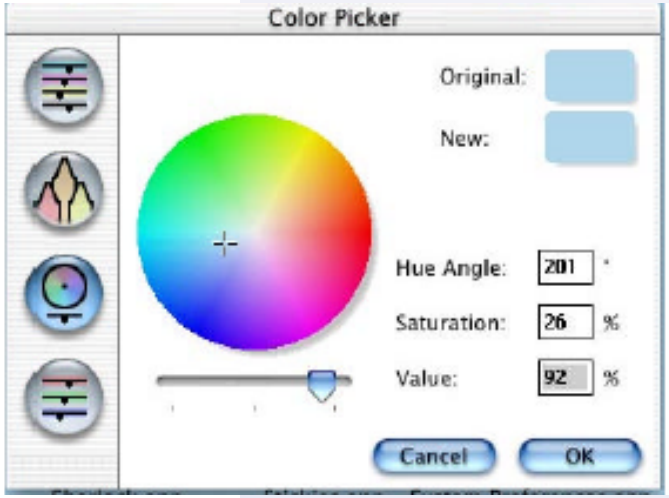
Tipos de Sistema de Interface

- Baseados em **coordenadas**: HSV, HSL.
- Baseados em **amostras**: Pantone, Munsell.


PANTONE®
PANTONE Cool Gray 6 C R 181 G 176 B 173 HTML B5B0AD
PANTONE 182 C R 252 G 184 B 196 HTML FCB8C4
PANTONE 7485 C R 227 G 230 B 209 HTML E3E6D1
PANTONE 290 C R 199 G 217 B 230 HTML C7D9E6
PANTONE 317 C R 199 G 230 B 227 HTML C7E6E3
PANTONE 256 C R 222 G 191 B 217 HTML DEBFD9
PANTONE 100 C R 242 G 237 B 130 HTML F2ED82
PANTONE 719 C R 242 G 207 B 176 HTML F2CFB0
PANTONE Cool Gray 7 C R 163 G 161 B 156 HTML A3A19E
PANTONE 183 C R 252 G 140 B 161 HTML FC8CA1
PANTONE 7486 C R 196 G 227 B 161 HTML C4E3A1
PANTONE 291 C R 173 G 207 B 230 HTML ADCFE6
PANTONE 318 C R 153 G 219 B 222 HTML 99DBDE
PANTONE 257 C R 209 G 163 B 204 HTML D1A3CC
PANTONE 101 C R 245 G 237 B 89 HTML F5ED59
PANTONE 720 C R 240 G 176 B 156 HTML F0C49E
PANTONE Cool Gray 8 C R 150 G 148 B 145 HTML 969491
PANTONE 184 C R 247 G 92 B 117 HTML F75C75
PANTONE 7487 C R 148 G 222 B 110 HTML 94DE6E
PANTONE 292 C R 120 G 179 B 224 HTML 78B3E0
PANTONE 319 C R 74 G 204 B 212 HTML 4ACCD4
PANTONE 258 C R 150 G 69 B 148 HTML 964594
PANTONE 102 C R 245 G 232 B 20 HTML F5E814
PANTONE 721 C R 230 G 176 B 128 HTML E6B080
PANTONE Cool Gray 9 C R 135 G 135 B 133 HTML 878785
PANTONE 185 C R 230 G 13 B 46 HTML E60D2E
PANTONE 7488 C R 102 G 212 B 61 HTML 66D43D
PANTONE 293 C R 0 G 71 B 186 HTML 0047BA
PANTONE 320 C R 0 G 156 B 163 HTML 009CA3
PANTONE 259 C R 112 G 18 B 107 HTML 70126B
PANTONE Yellow C R 247 G 224 B 23 HTML F7E017
PANTONE 722 C R 214 G 143 B 84 HTML D68F54
PANTONE Cool Gray 10 C R 115 G 115 B 115 HTML 737373
PANTONE 186 C R 207 G 20 B 43 HTML CF142B
PANTONE 7489 C R 107 G 171 B 77 HTML 6BAB4D
PANTONE 294 C R 0 G 56 B 130 HTML 003882
PANTONE 321 C R 0 G 133 B 138 HTML 00858A
PANTONE 260 C R 97 G 23 B 89 HTML 611759
PANTONE 103 C R 196 G 173 B 15 HTML C4AD0F
PANTONE 723 C R 191 G 115 B 41 HTML BF7329
PANTONE Cool Gray 11 C R 102 G 99 B 102 HTML 666366
PANTONE 187 C R 176 G 28 B 46 HTML B01C2E
PANTONE 7490 C R 97 G 145 B 61 HTML 61913D
PANTONE 295 C R 0 G 46 B 99 HTML 002E63
PANTONE 322 C R 0 G 112 B 115 HTML 007073
PANTONE 261 C R 92 G 28 B 79 HTML 5C1C4F
PANTONE 104 C R 168 G 150 B 10 HTML A8960A
PANTONE 724 C R 148 G 77 B 3 HTML 944D03
PANTONE 188 C R 125 G 33 B 43 HTML 7D212B
PANTONE 7491 C R 110 G 130 B 51 HTML 6E8233
PANTONE 296 C R 0 G 41 B 64 HTML 002940
PANTONE 323 C R 0 G 97 B 99 HTML 006163
PANTONE 262 C R 82 G 33 B 69 HTML 522145
PANTONE 105 C R 128 G 115 B 15 HTML 80730F
PANTONE 725 C R 128 G 61 B 3 HTML 803D03
Refer to page i for Icon Definitions
C = Coated Paper
52 C
14 C
104 C
30 C
34 C
25 C
2 C
90 C

Visualização do Sistema HSV





HSV color picker from Mac OS X's Finder

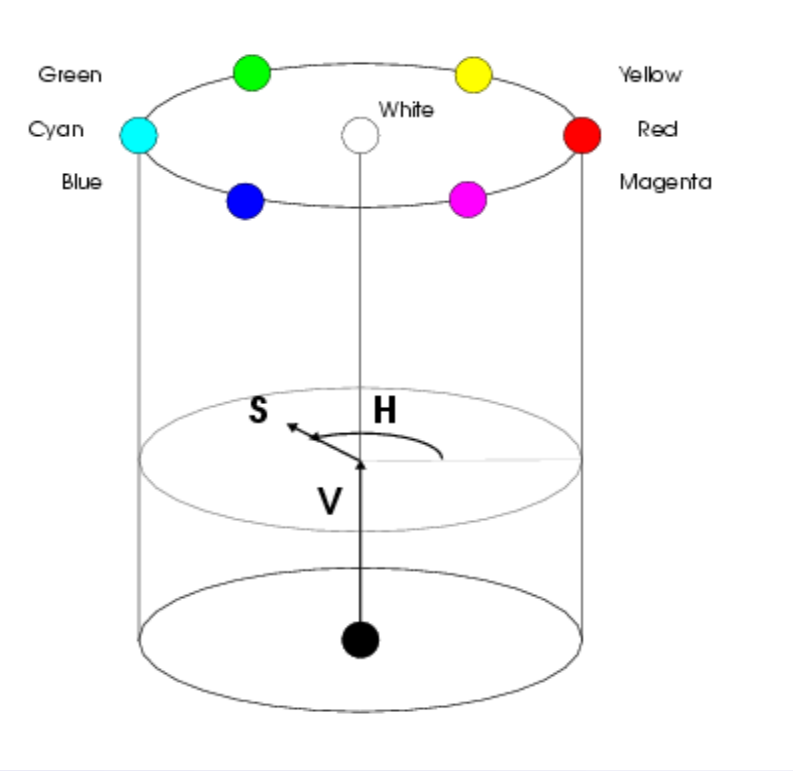
Sistema HSL

- Sistema

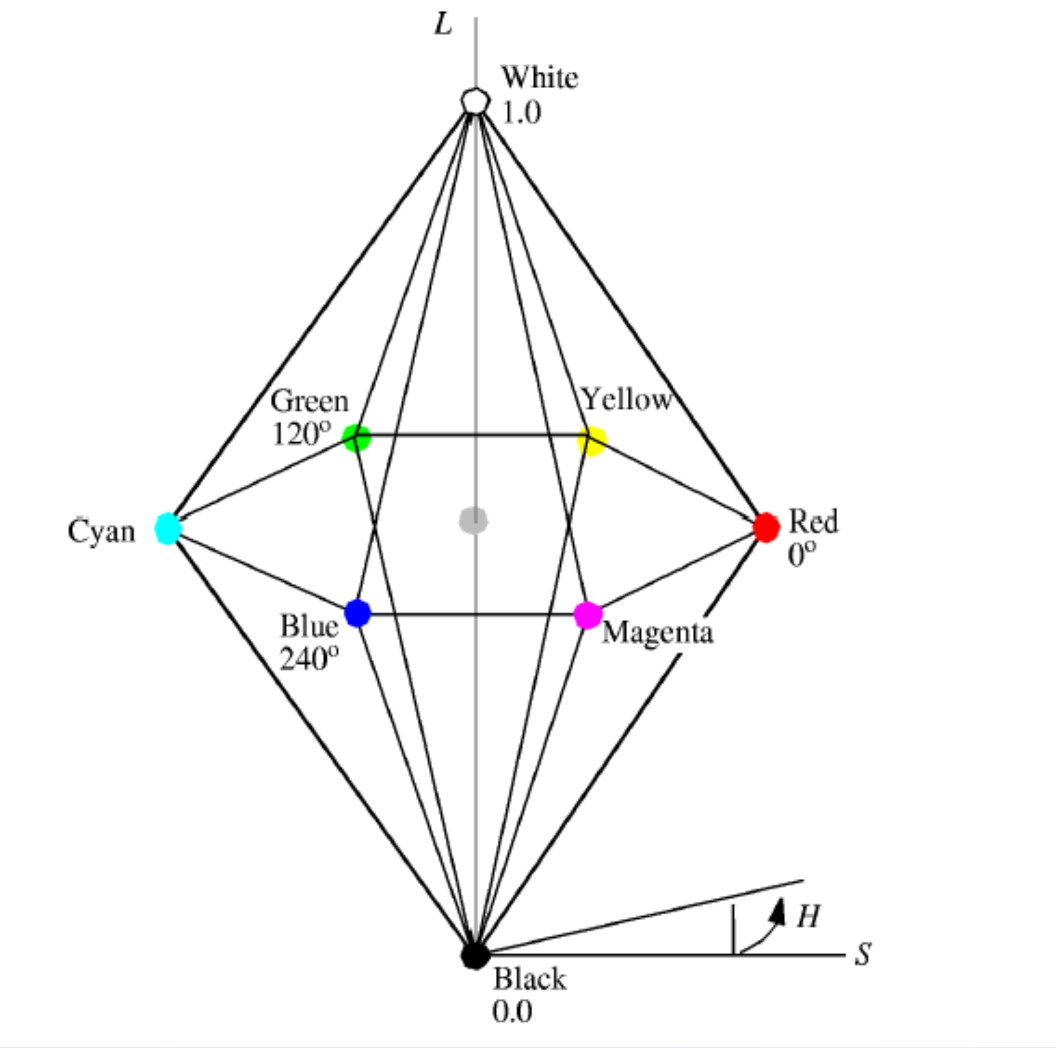
  H (Hue)

  S (Saturation)

  L (Lightness)
  - Patenteado pela Tektronix.
- Baseado no HSV.



Sistema HSL


L
White
1.0
Green
120°
Yellow
Cyan
Red
0°
Blue
240°
Magenta
H
S
Black
0.0

Applets on line

- http://graphics.stanford.edu/courses/cs178-10/applets/locus.html
- http://graphics.stanford.edu/courses/cs178-10/applets/colormatching.html
- http://graphics.stanford.edu/courses/cs178-10/applets/threedgamut.html
- http://graphics.stanford.edu/courses/cs178-10/applets/gamutmapping.html
- http://graphics.stanford.edu/courses/cs178-10/applets/colormixing.html
- http://graphics.stanford.edu/courses/cs178-10/applets/gamma.html