



Lecture 20: 颜色

SSE315: 计算机图形学
Computer Graphics

陈壮彬

软件工程学院

chenzhb36@mail.sysu.edu.cn

Course roadmap

光栅化 Rasterization

计算机图形学介绍
基于采样的光栅化
空间变换
纹理映射、深度和透明度

几何 Geometry

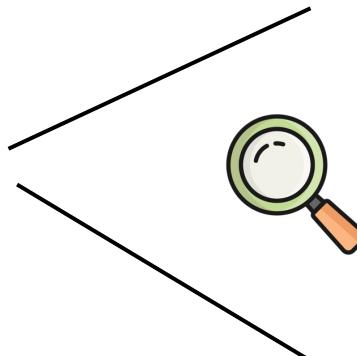
几何介绍
曲线与曲面
几何处理

材质与光线 Materials and Lighting

光线几何
光线追踪
辐射度量学
材料与高级渲染
相机与颜色

动画 Animation

相机与颜色



Today's topics

□颜色的基本介绍

□色彩空间

Why do we need to be able to talk precisely about color?

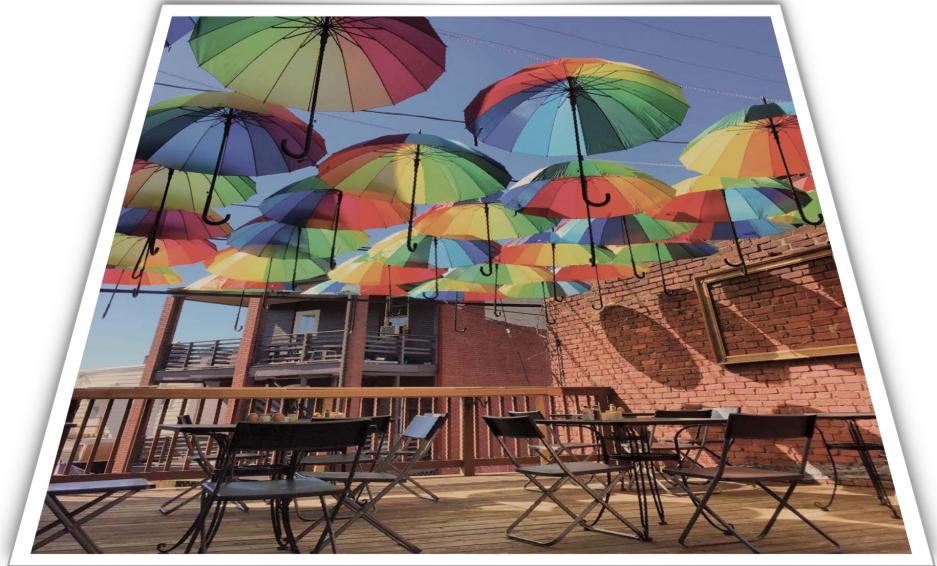








on screen

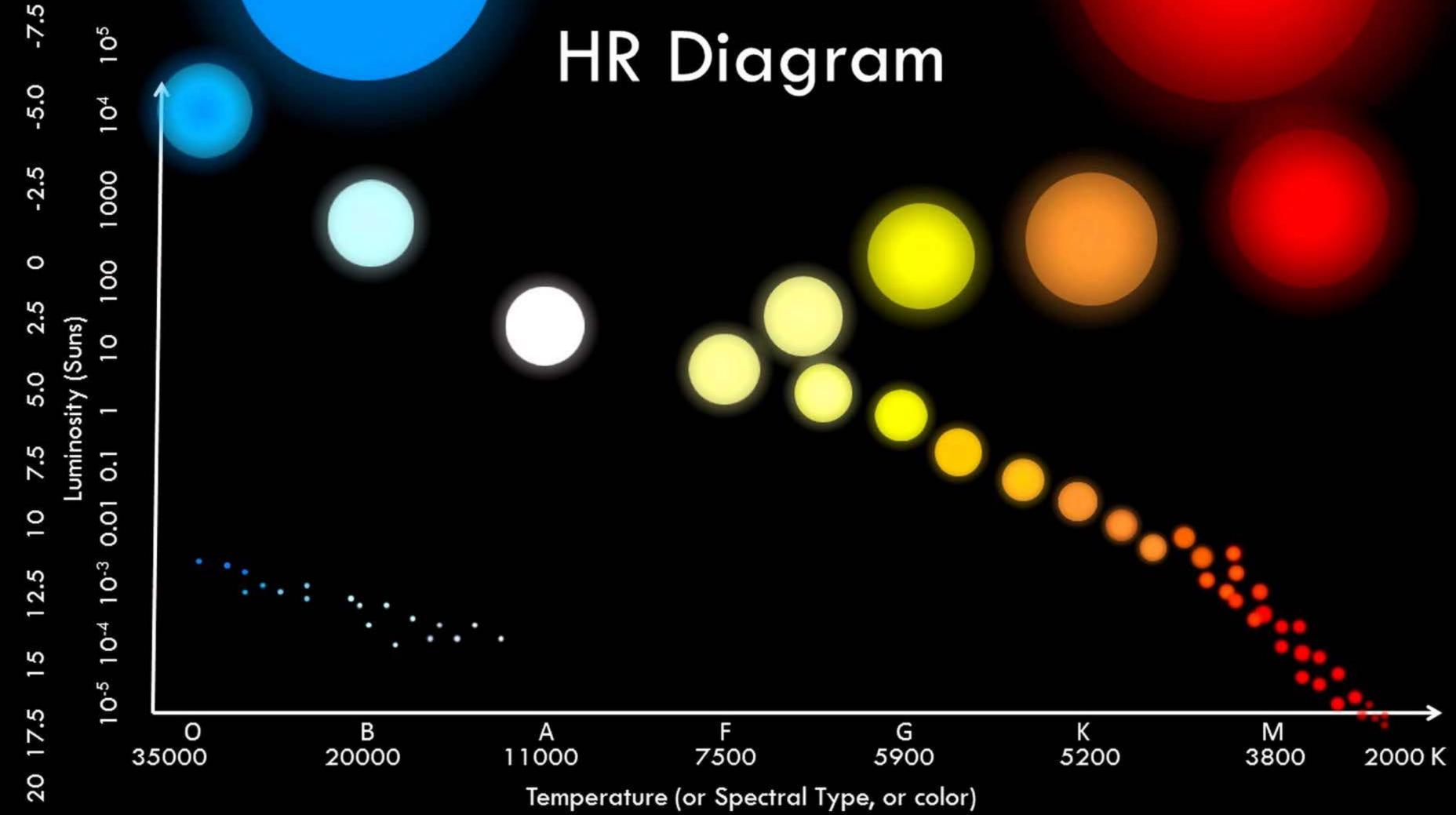


printed



Zhangye Danxia Geological Park, China

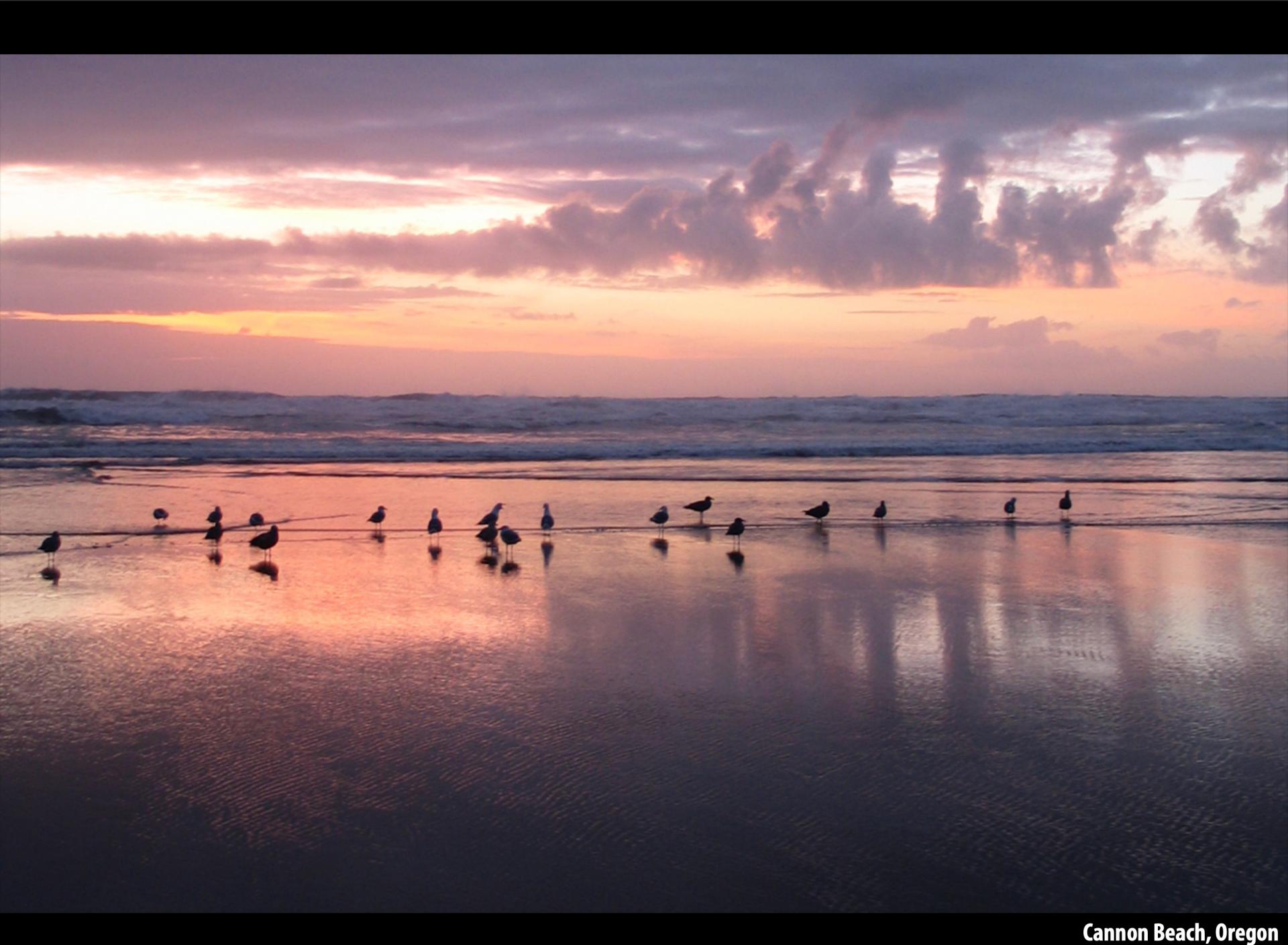
HR Diagram



Hertzsprung-Russell diagram



Starry Night, Van Gogh

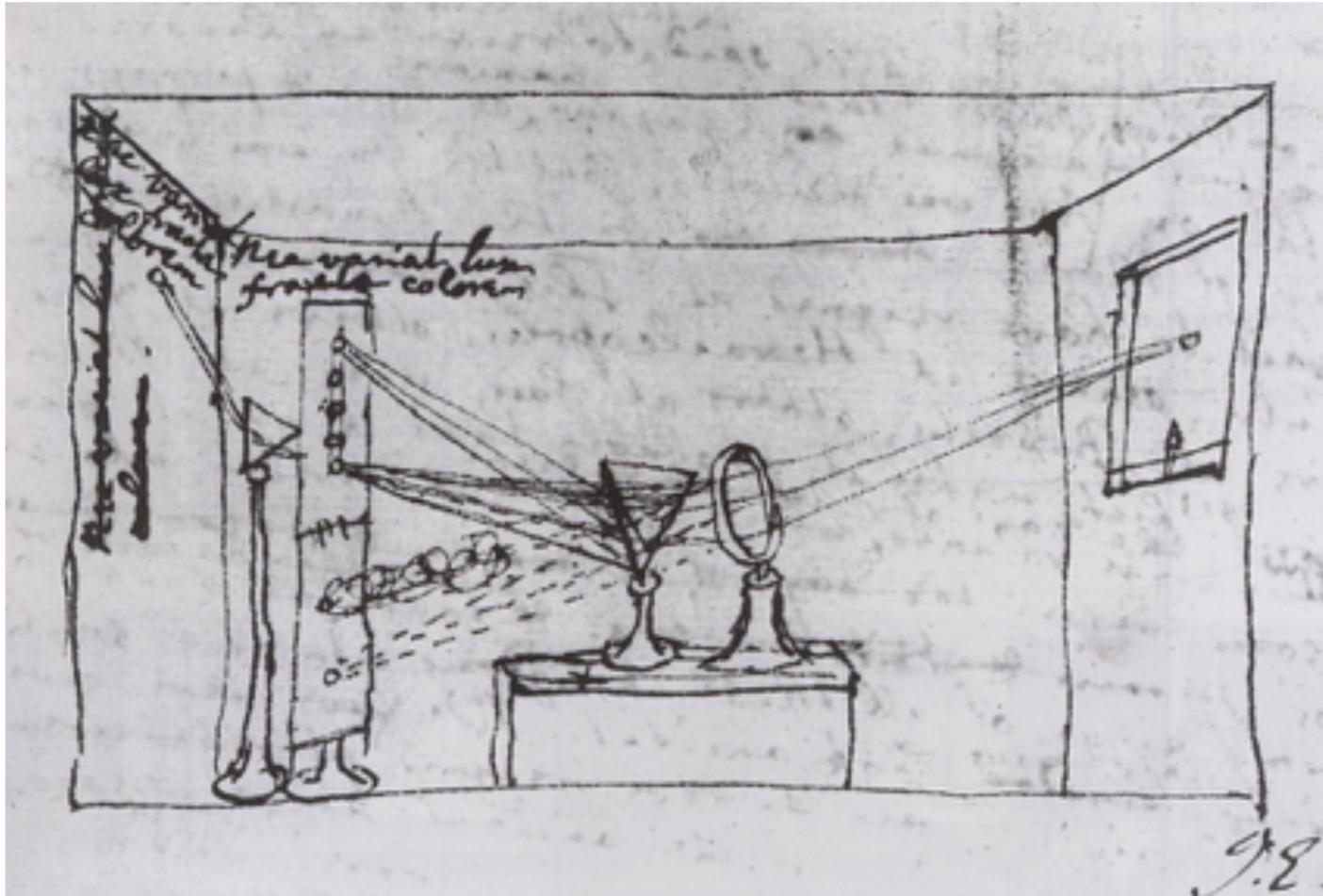


Cannon Beach, Oregon

颜色的物理基础

Physical Basis of Color

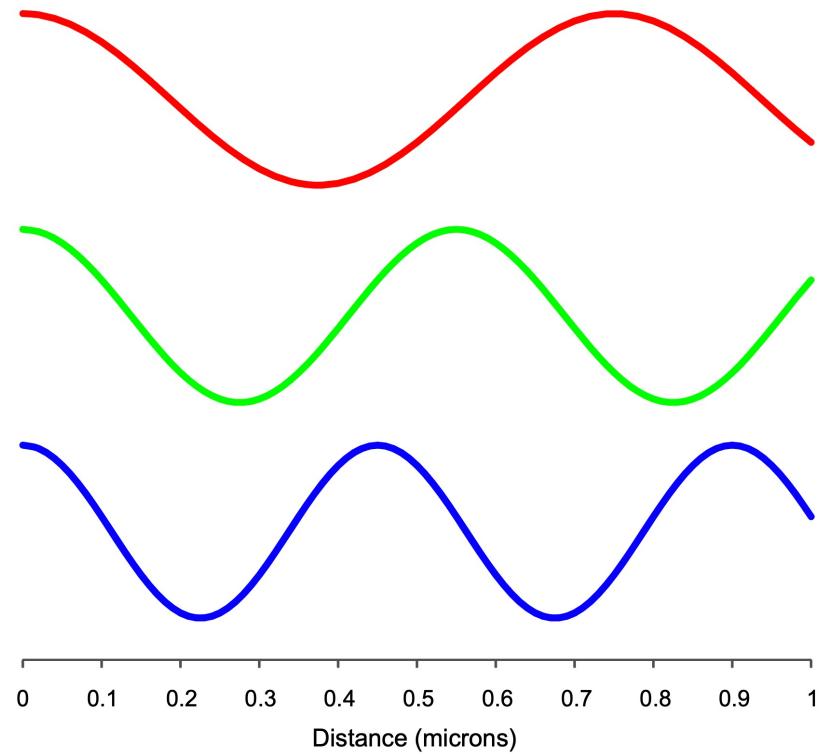
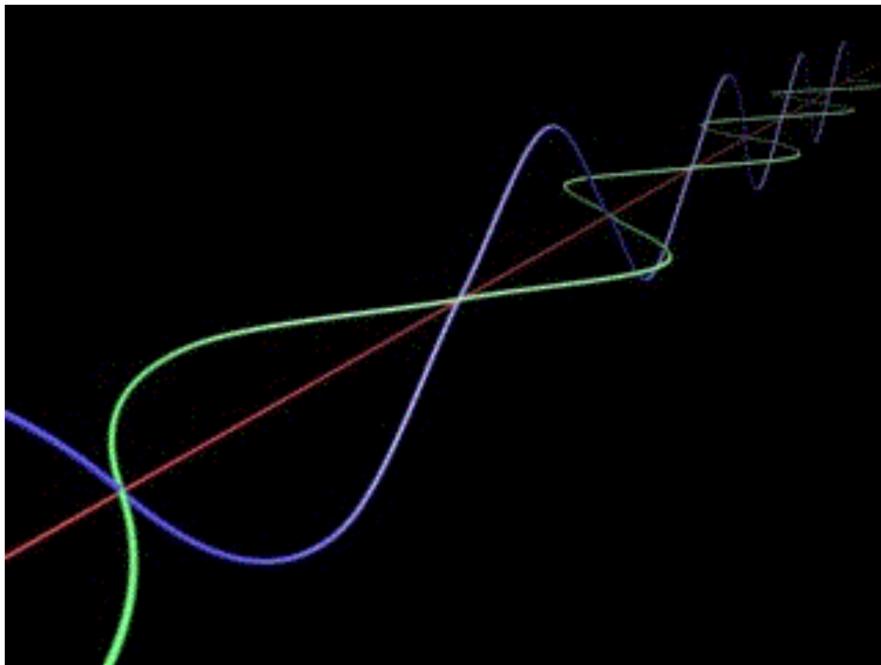
光的基本成分



- 牛顿证明了太阳光可以用棱镜细分为彩虹
- 产生的光不能用第二个棱镜进一步细分

光属于电磁辐射；颜色由频率决定

- 口光是振荡的电场与磁场
- 口核心要点：频率决定光的颜色
- 口提问：频率与波长的区别是什么？



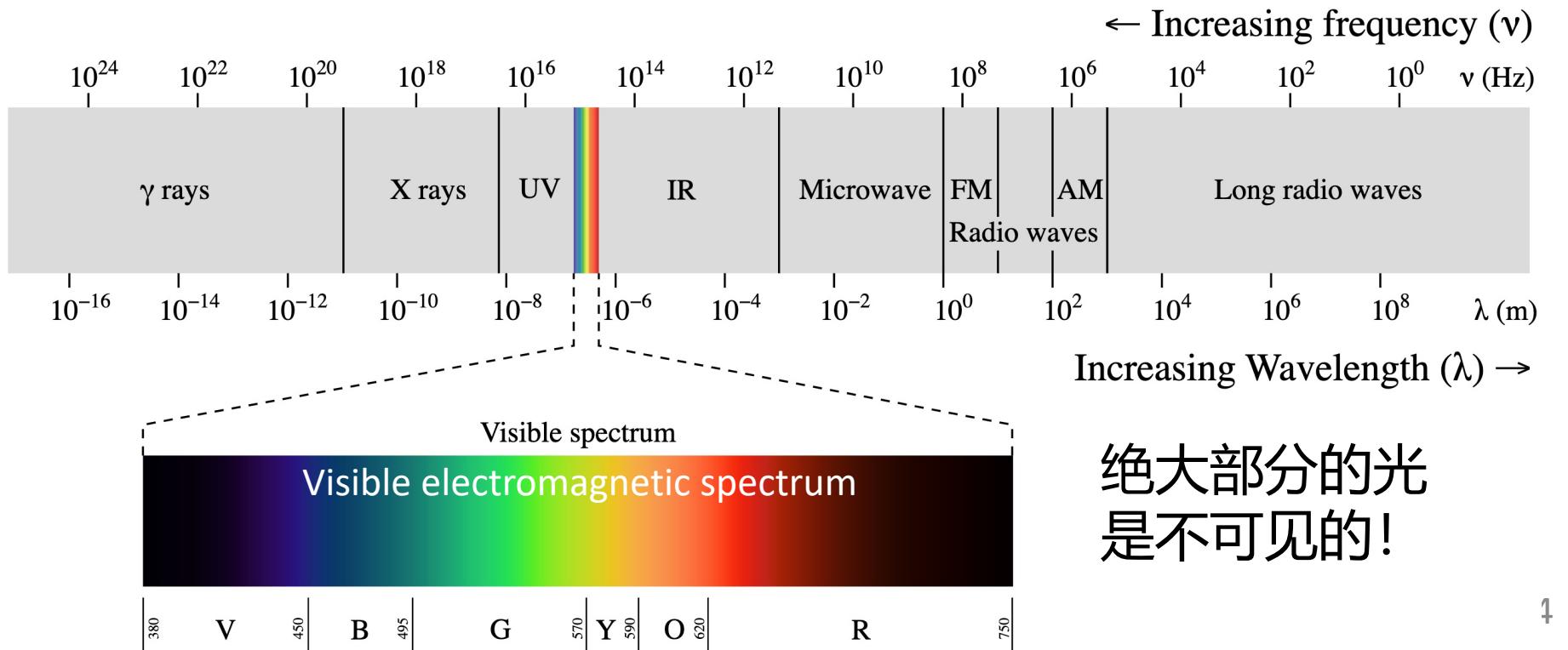
可见光光谱 (The visible spectrum of light)

口电磁辐射 (Electromagnetic radiation)

- 不同频率 (波长) 的光有不同折射率

口光谱

- 光的能量在不同波长上的分布



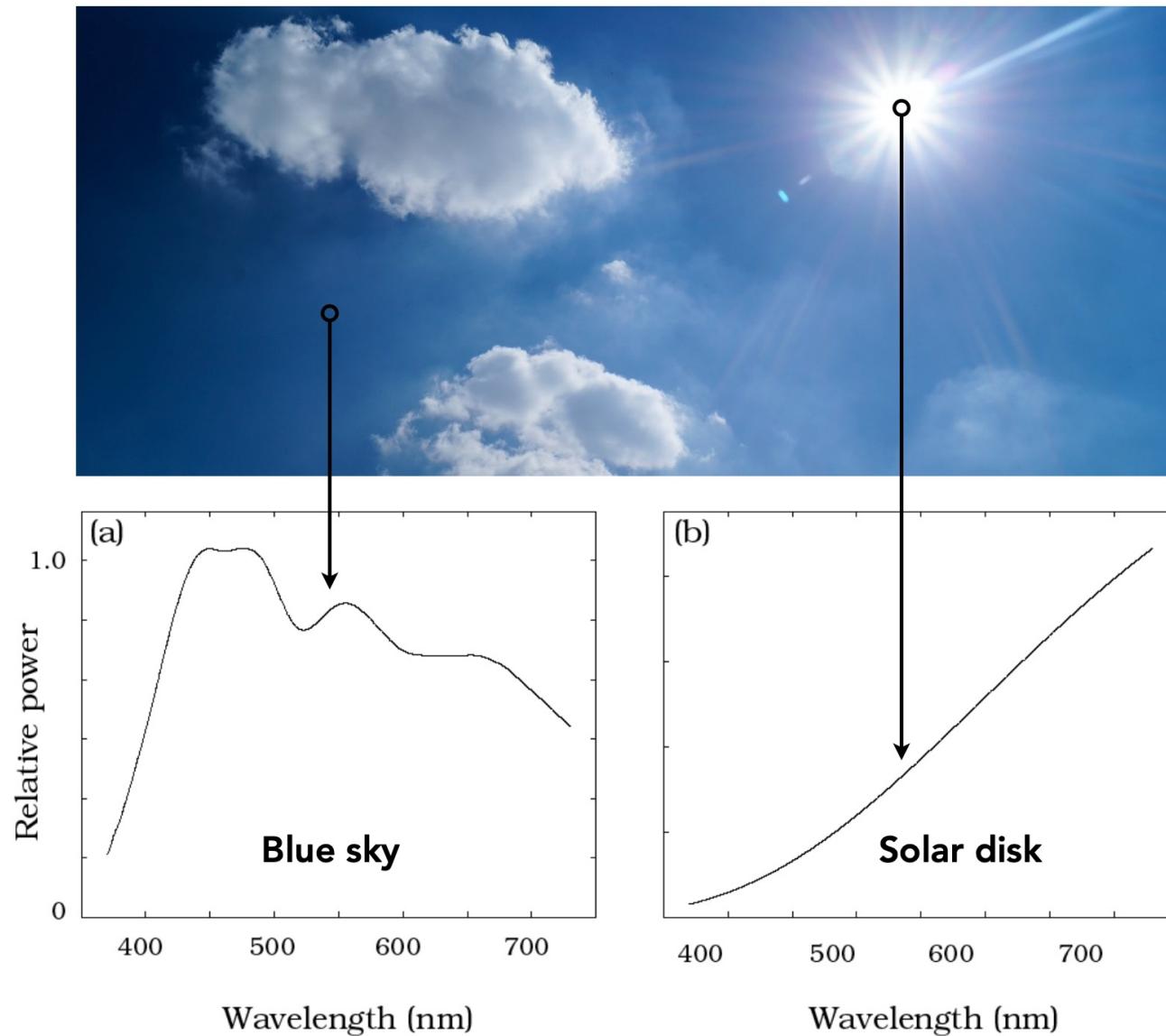
谱功率密度 (Spectral power distribution, SPD)

口是一个描述光源发出光线的颜色和亮度分布的物理量

- 表示为光源在每个波长 (或频率) 上发出的功率
- 具体来说，光的谱功率密度 $S(\lambda)$ 是光源在波长 λ 处的功率，单位通常为瓦特/纳米 (W/nm)

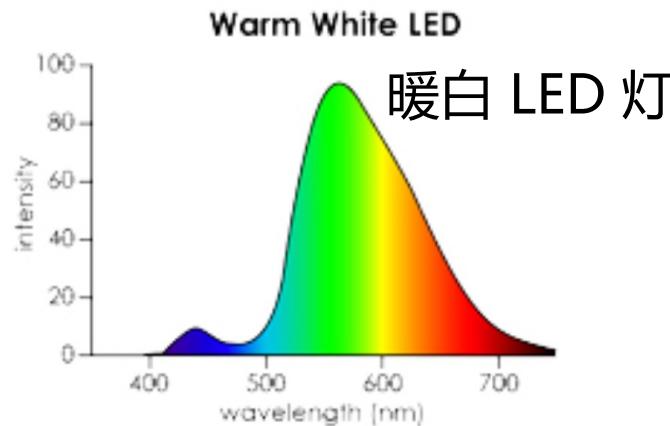
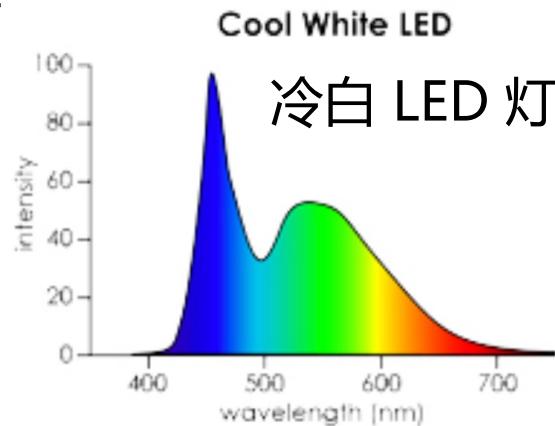
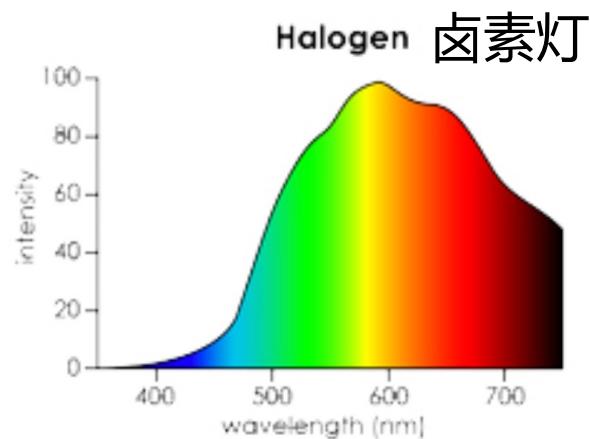
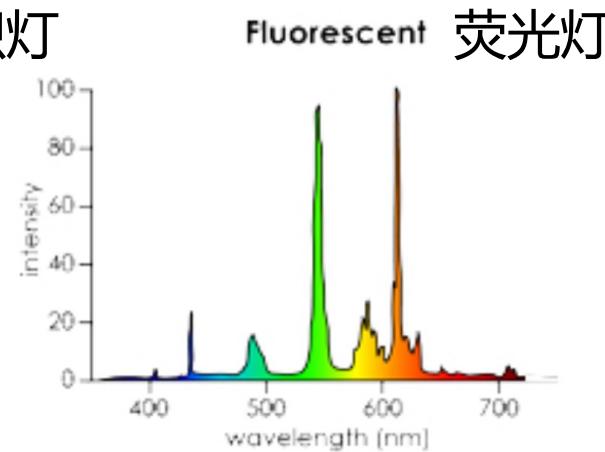
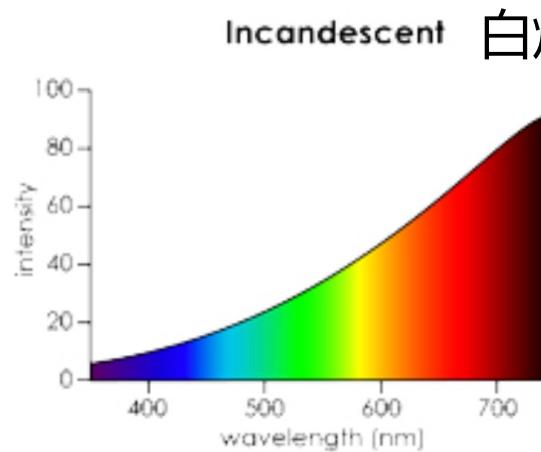
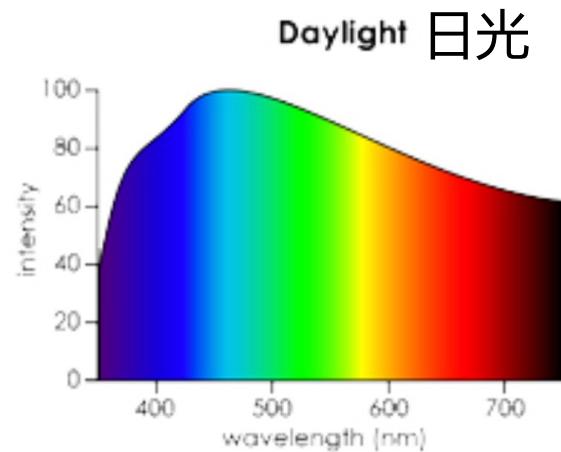
口用于描述光源的色温、色彩饱和度等特性

日光的谱功率密度



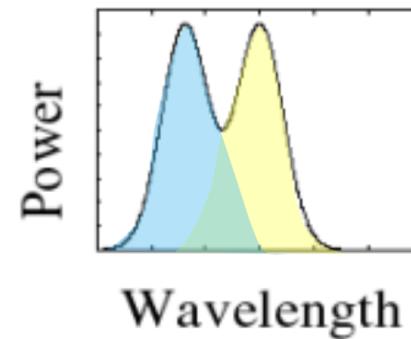
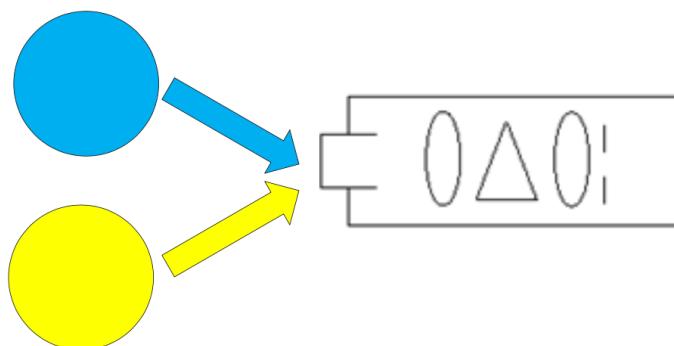
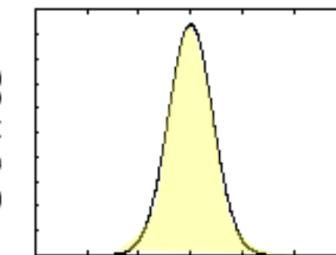
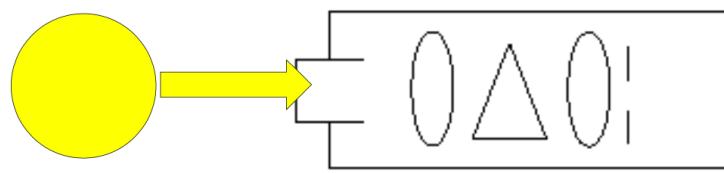
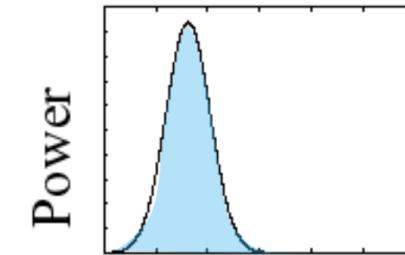
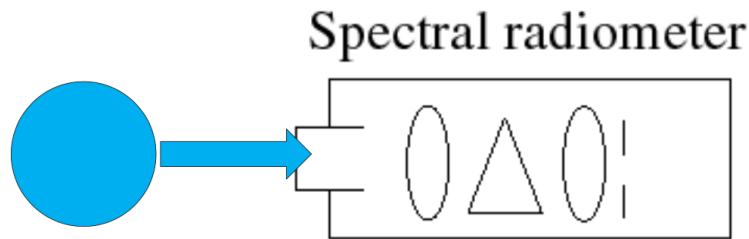
光源的谱功率密度

口描述按波长划分的能量分布



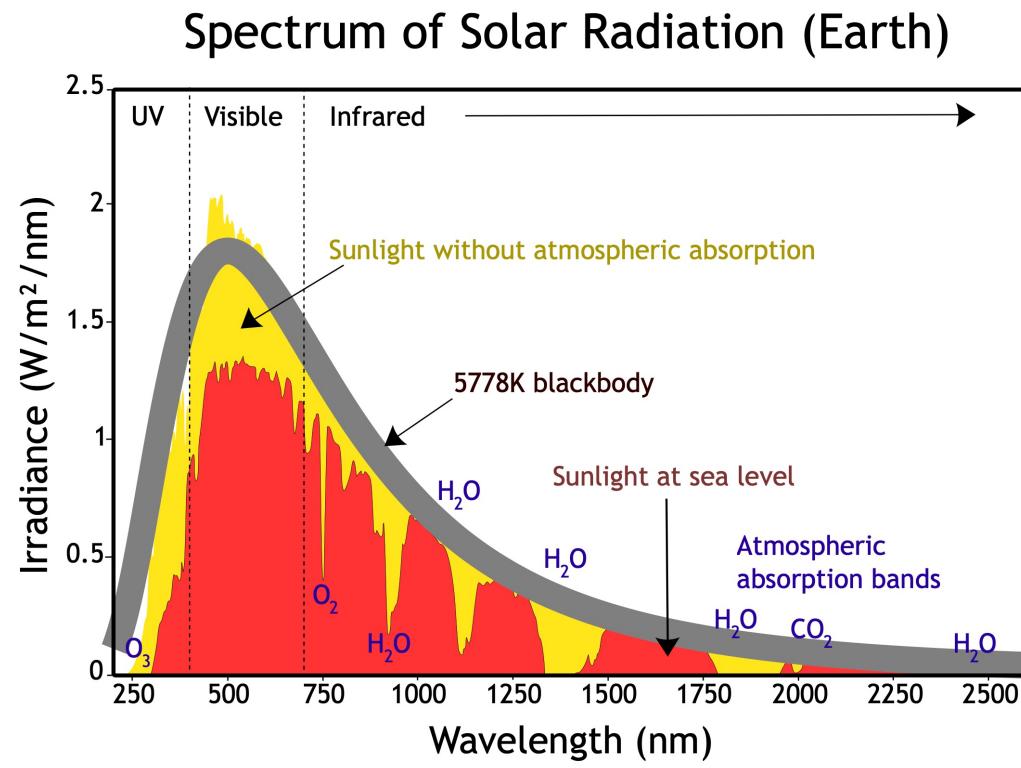
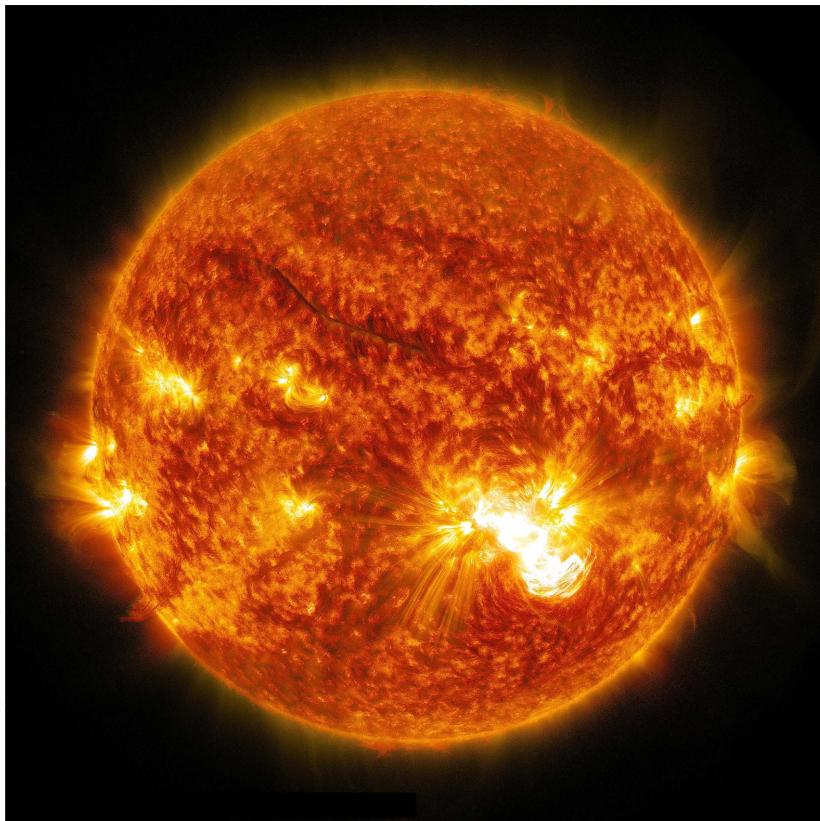
谱功率密度的线性性质 (linearity)

口混合光源等于混合它们的谱功率密度



自然光是多种频率的混合体

- “白”光实则是所有（可见光）频率的混合
- 例如，太阳光



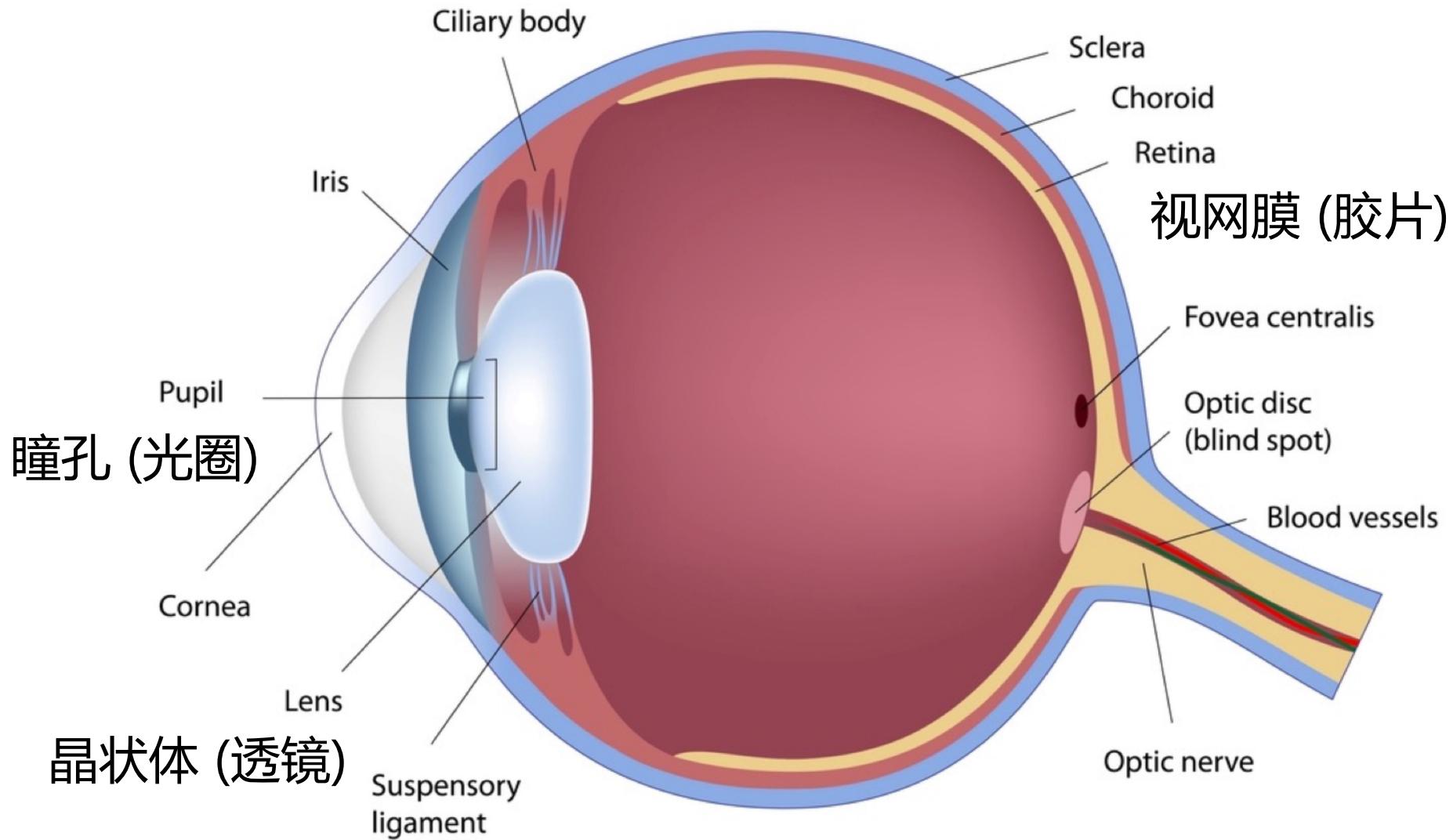
什么是颜色？

- 颜色是人类感知的一种现象；它不是光的普遍性质
- 不同波长的光不是“颜色”，只是基于人类感知的描述

颜色的生理基础

Biological Basis of Color

人眼解剖学



视网膜光受体细胞：视杆细胞和视锥细胞

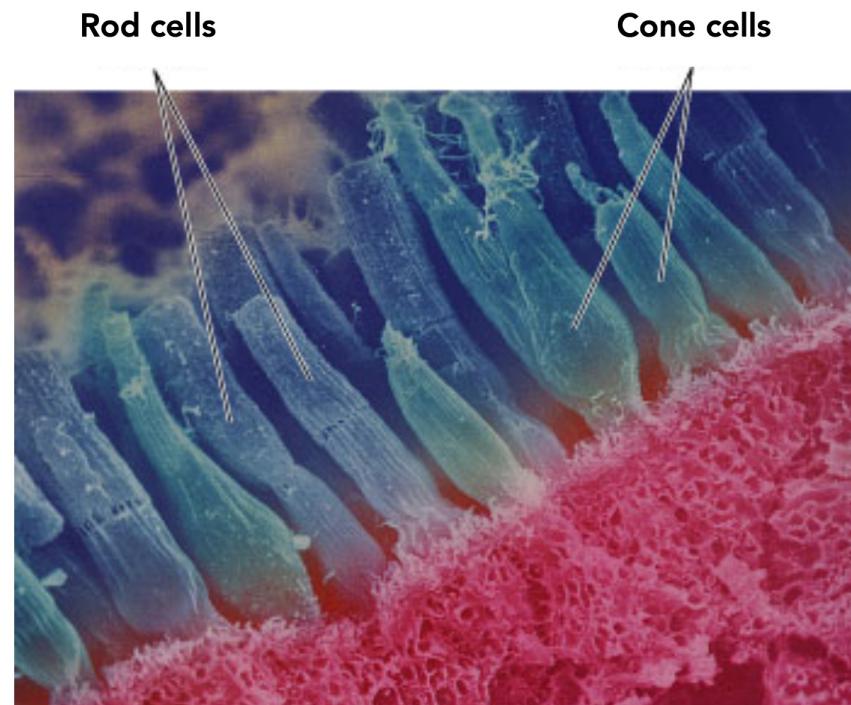
□ 在极低的光线，如昏暗的月光下，

视杆细胞是主要受体 (暗视觉)

- 约 1.2 亿个视杆细胞
- 只感知光的强度，没有颜色 (灰度图)

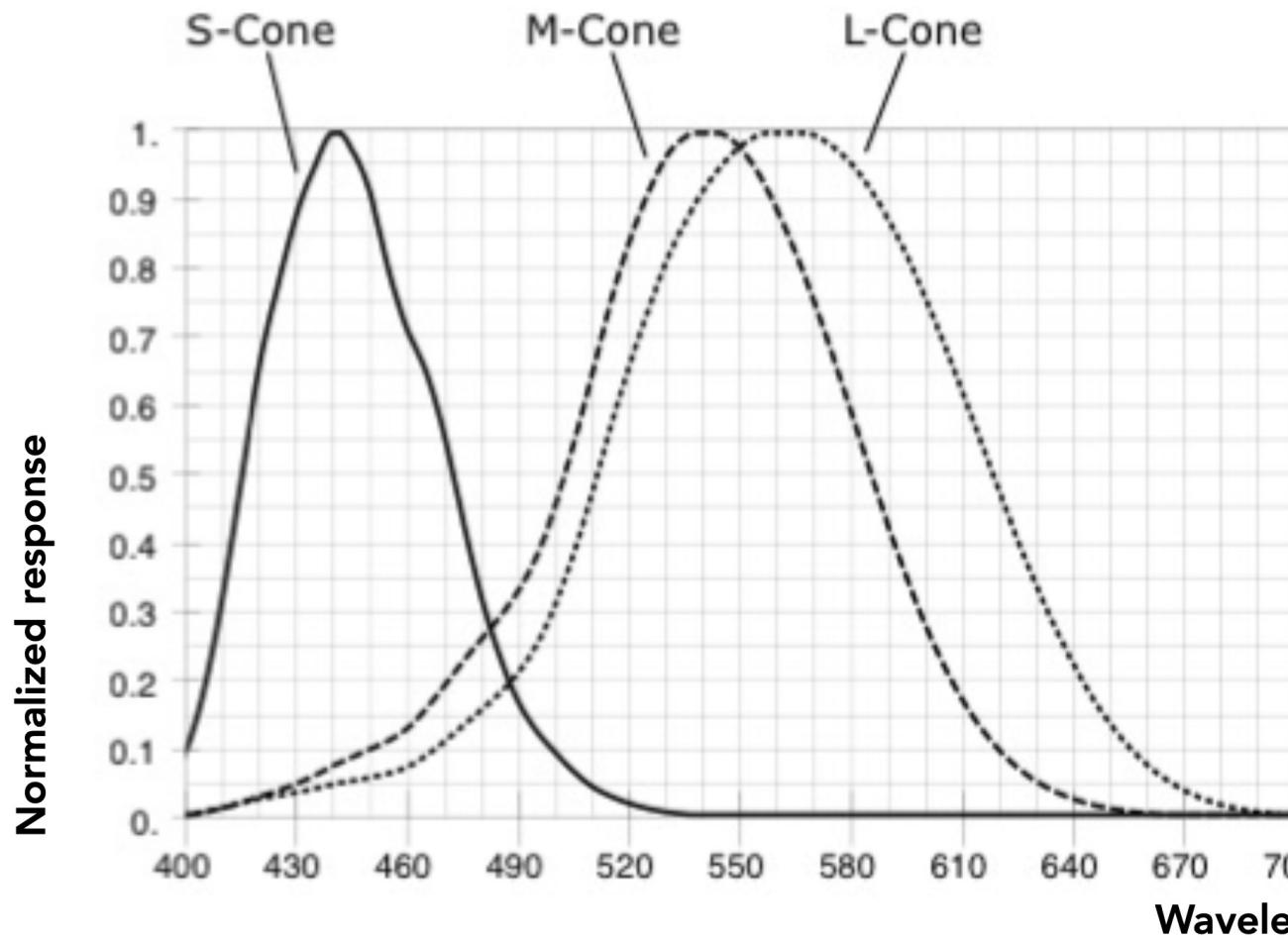
□ 正常光照条件下，视锥细胞是主要受体 (明视觉)

- 约 6-7 百万个视锥细胞
- 提供色彩感
- 三种类型的锥体，每种锥体具有不同的光谱灵敏度



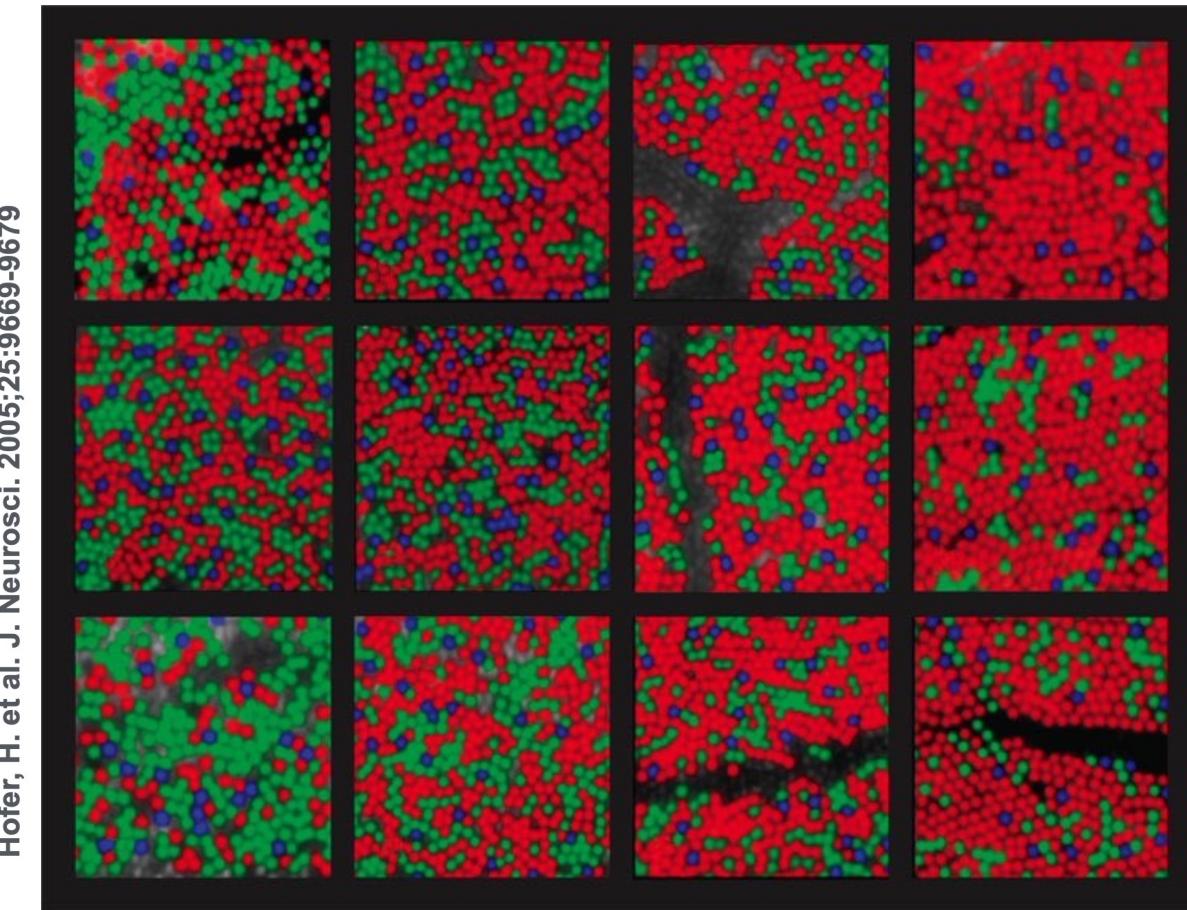
视锥细胞的光谱反应

三种类型的锥细胞：S、M 和 L (对应于短波、中波和长波的峰值响应)



视锥细胞对不同波长的光的相应曲线

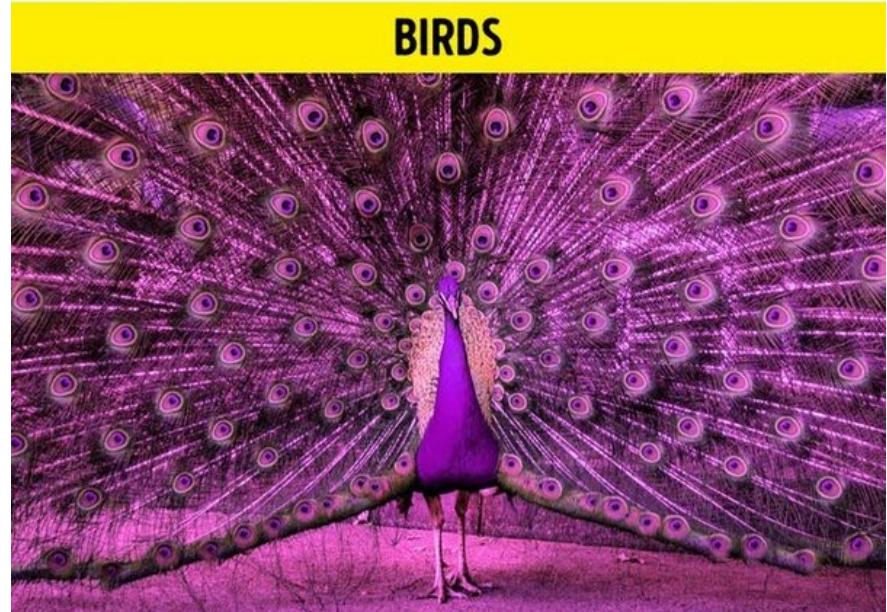
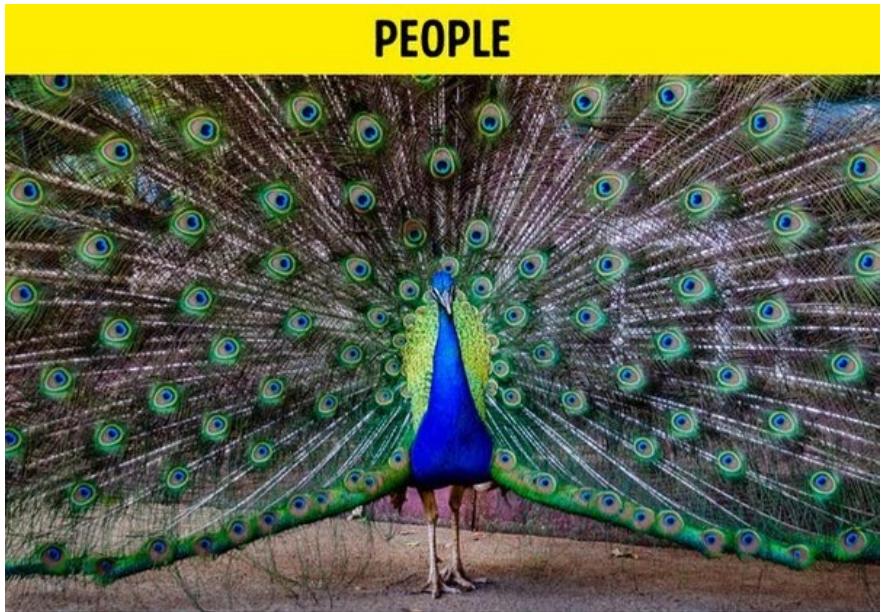
三种锥细胞类型的比例差异很大



□ 12 个色觉正常的人不同类型视锥细胞的分布

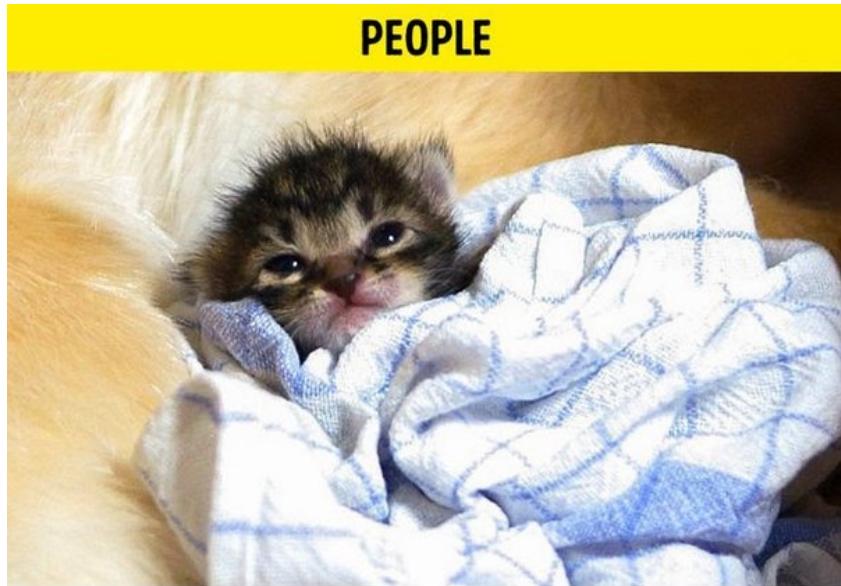
人与动物的视觉差异

□鸟类



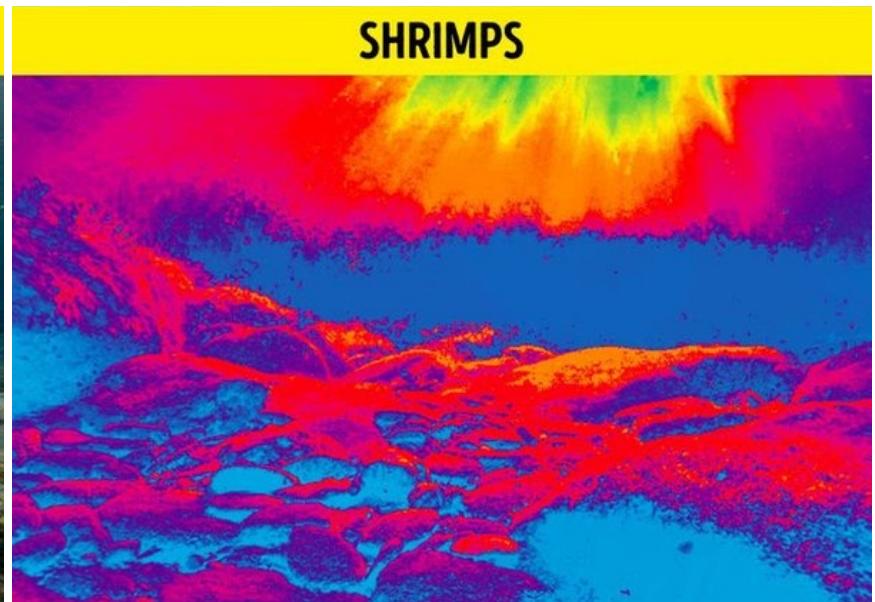
人与动物的视觉差异

□ 猫



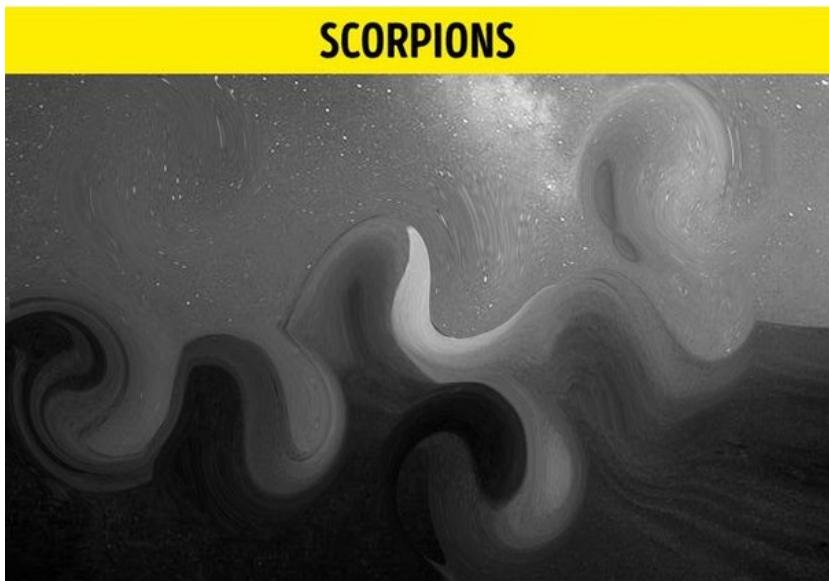
人与动物的视觉差异

口皮皮虾



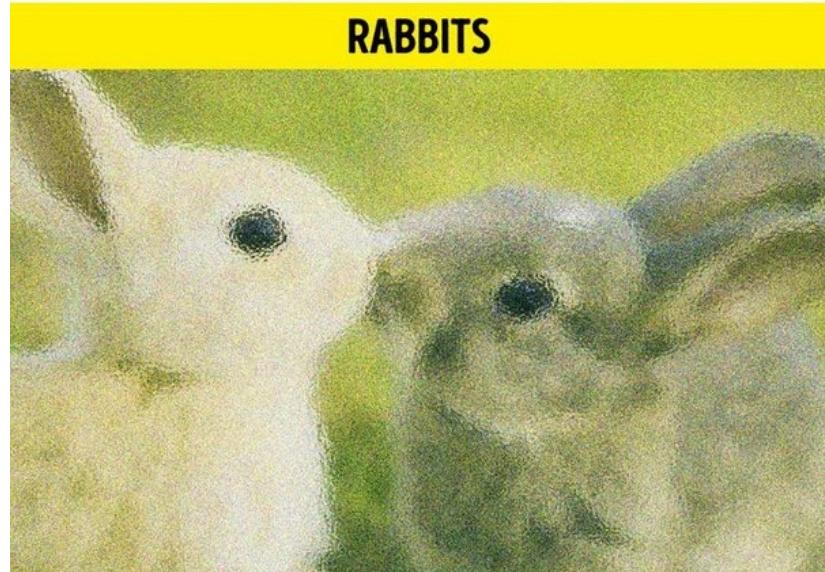
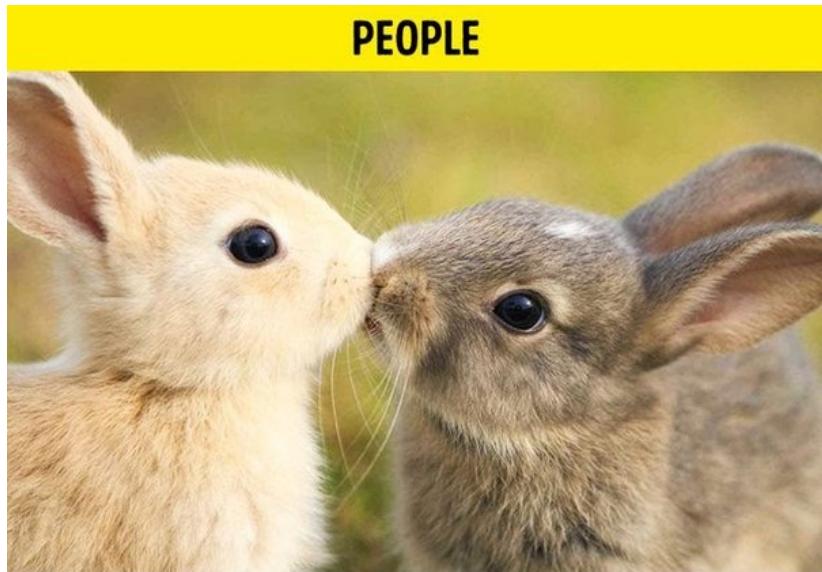
人与动物的视觉差异

口蝎子



人与动物的视觉差异

口兔子



颜色的三刺激理论

Tristimulus Theory of Color

人视锥细胞的光谱反应

现在我们有三个探测器 (即 S、M、L 视锥细胞), 每个探测器都有不同的光谱响应曲线

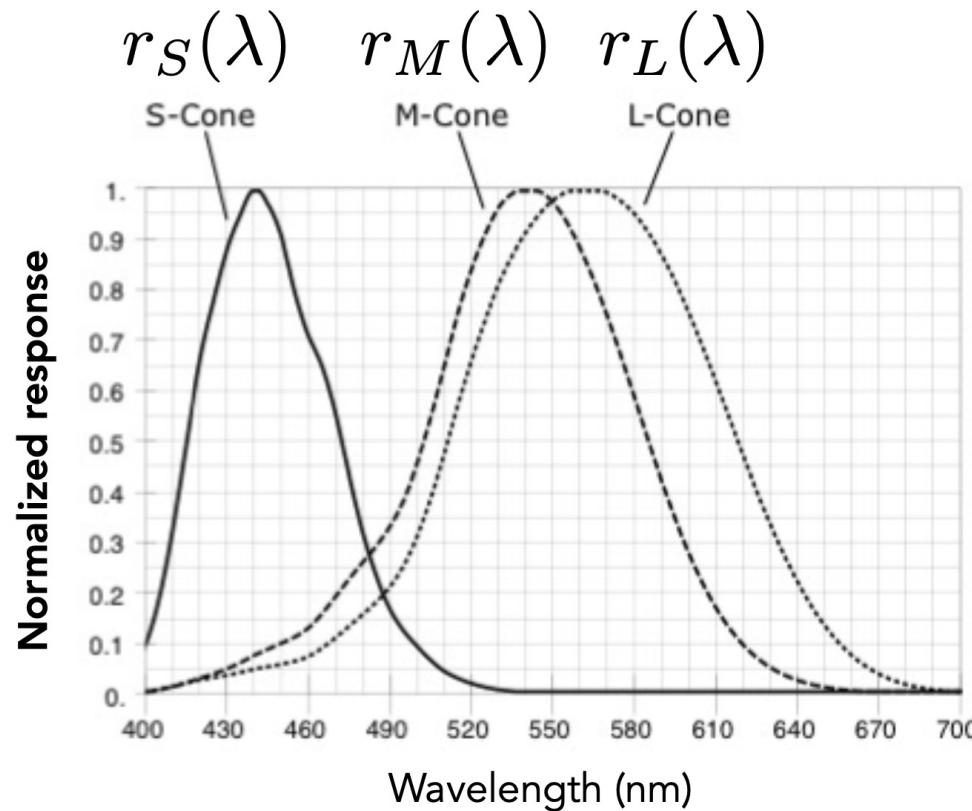
光的感知结果 (决定具体看到的颜色)

$$S = \int r_S(\lambda) s(\lambda) d\lambda$$

$$M = \int r_M(\lambda) s(\lambda) d\lambda$$

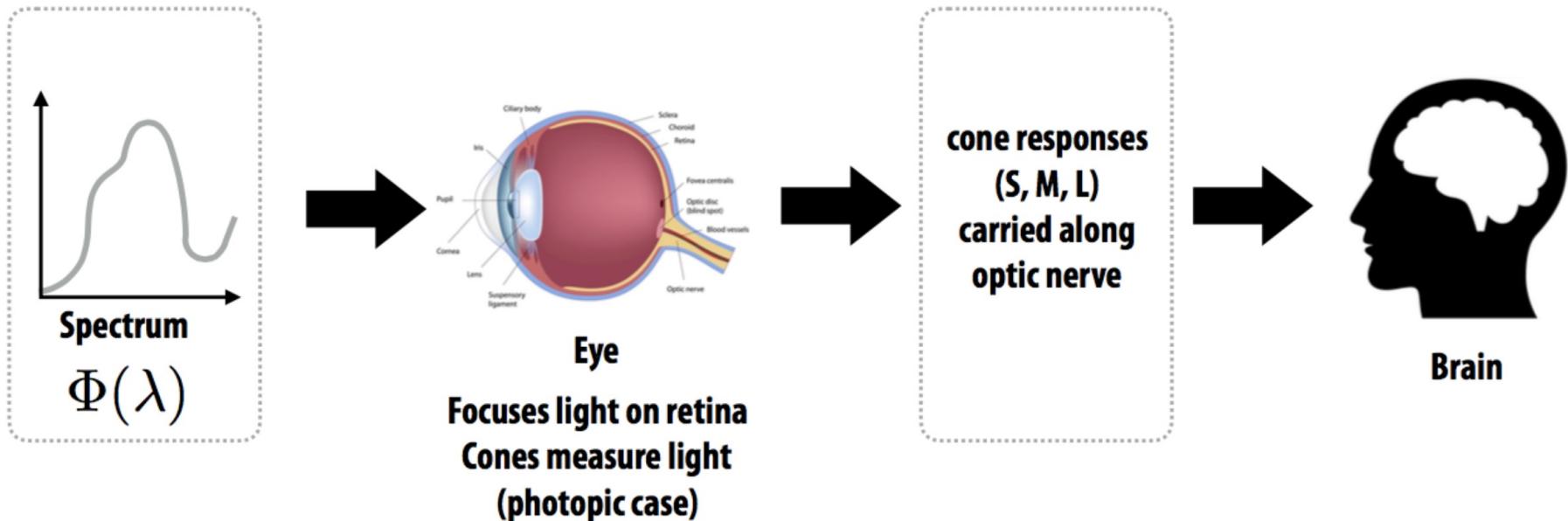
$$L = \int r_L(\lambda) s(\lambda) d\lambda$$

S、M、L 决定具体看到的颜色, 而不是光线的 SPD



人类视觉系统

- 人眼无法测量，大脑也无法接收到每种波长的光的信息
- 相反，眼睛只“看到”三个反应值 (S、M、L)，这是大脑唯一可用的信息



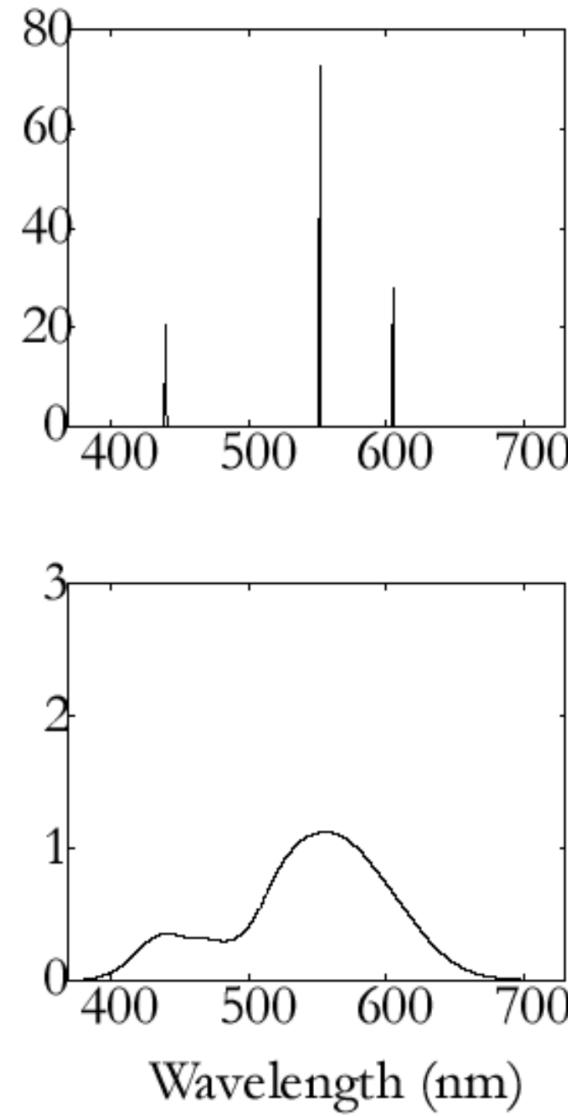
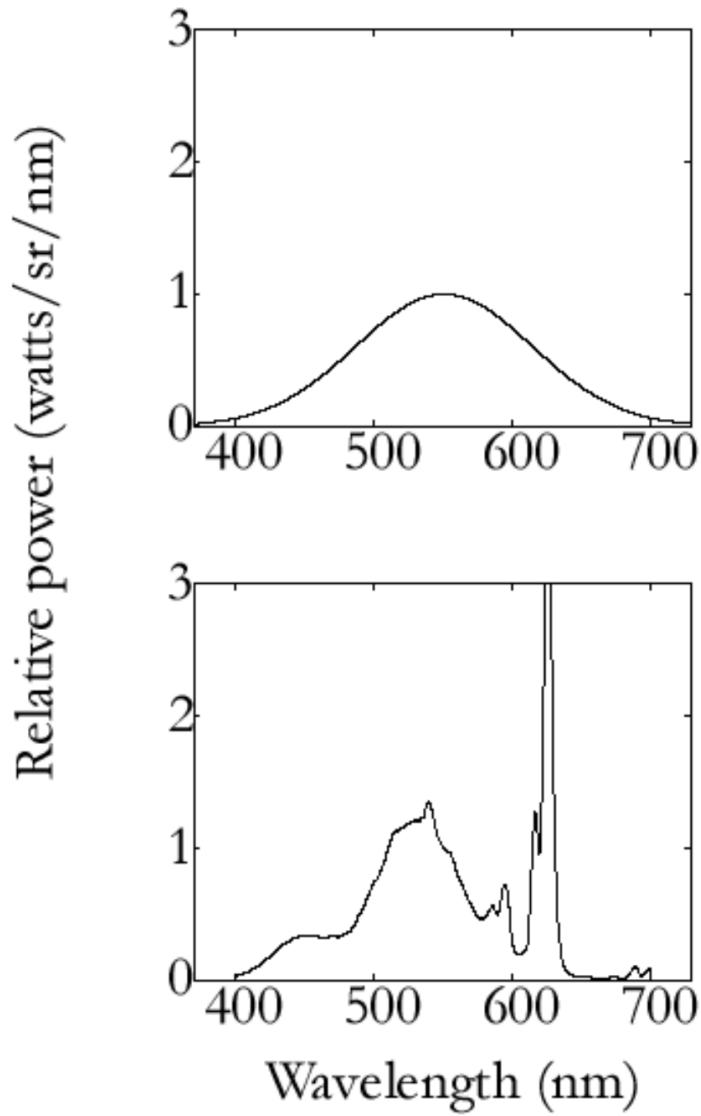
同色异谱现象

Metamerism

同色异谱现象

- 在特定的观察条件下，两种或多种物体的颜色相同，但它们的光谱分布却不同
- 因为人眼对颜色的感知是由三种视锥细胞的响应决定的，而不是由物体的实际光谱分布决定的
- 同色异谱特性能帮助我们再现颜色，但不必再现真实世界场景的全光谱
- 示例：照明工程、色彩打印等

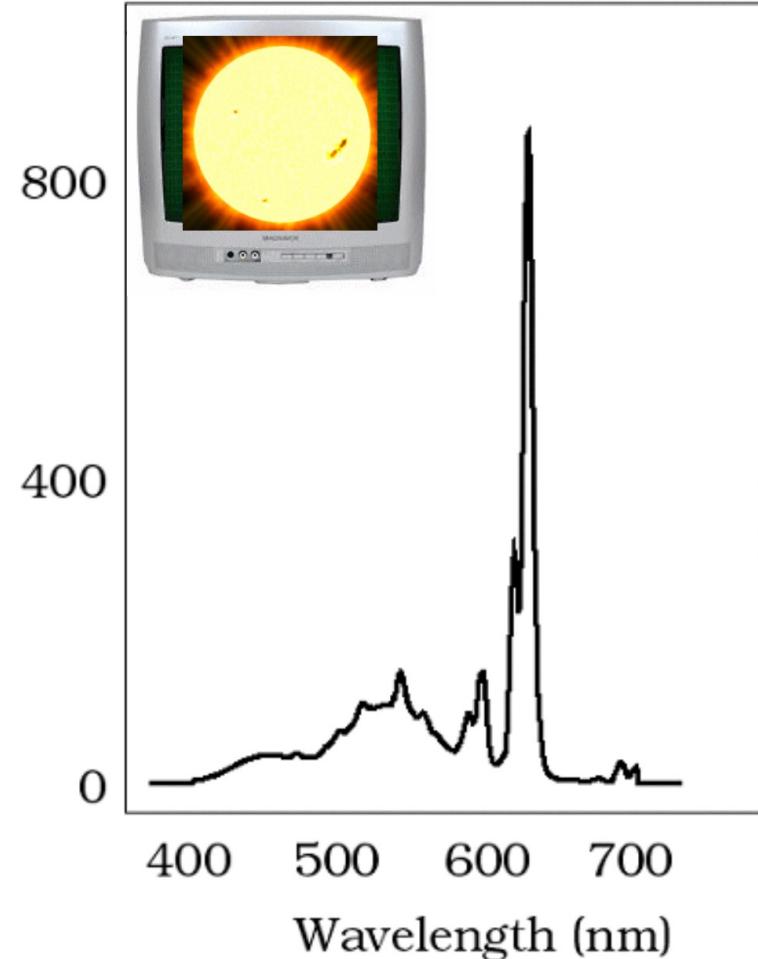
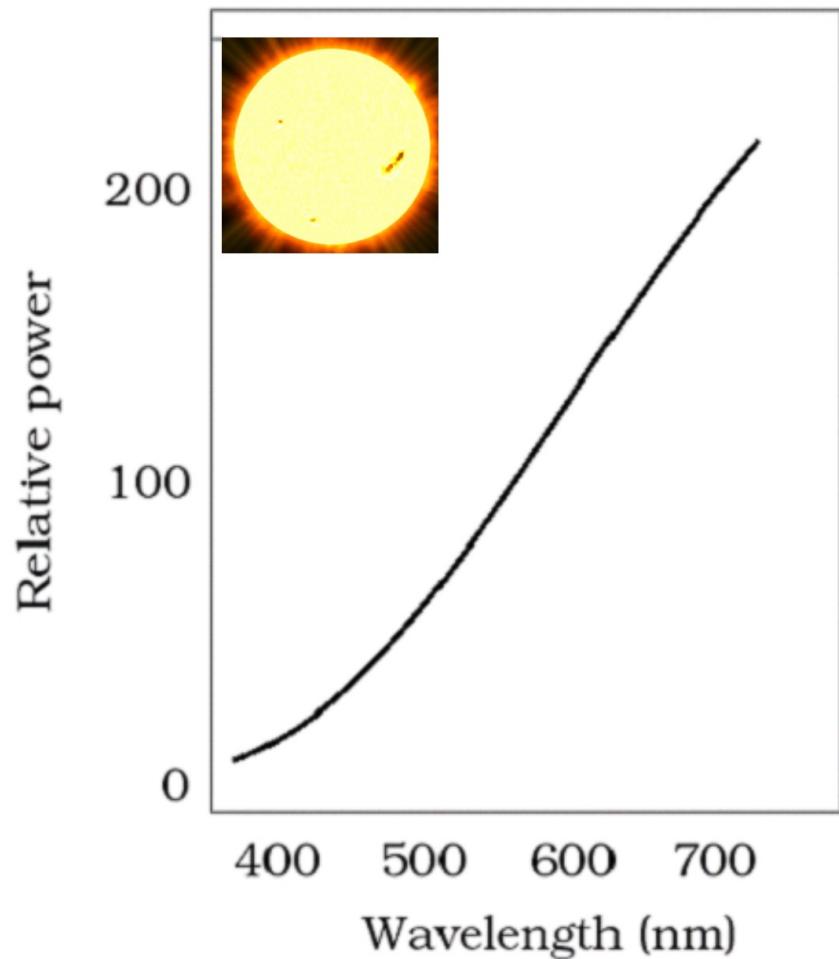
同色异谱现象



Brian Wandell

同色异谱

颜色匹配 (Color matching) 背后的理论

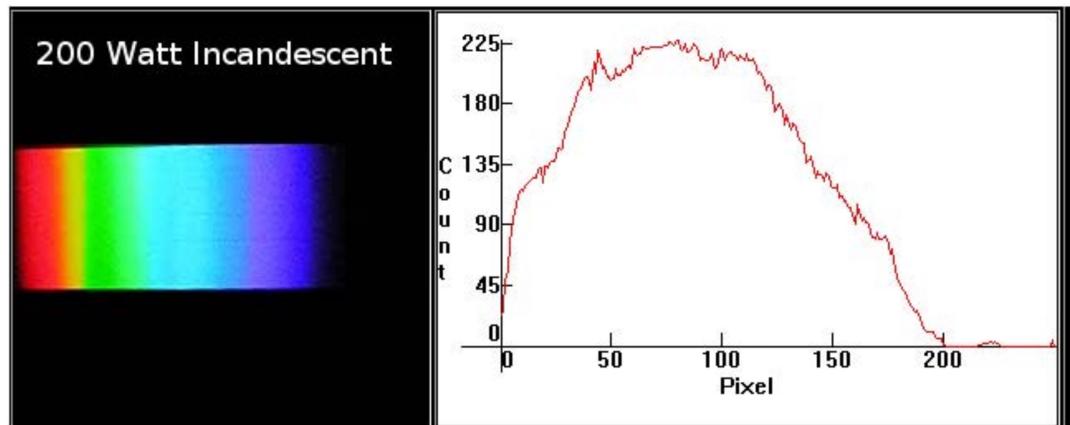


同色异谱特征的应用：模拟灯泡

用灯泡模拟日光，同时节能

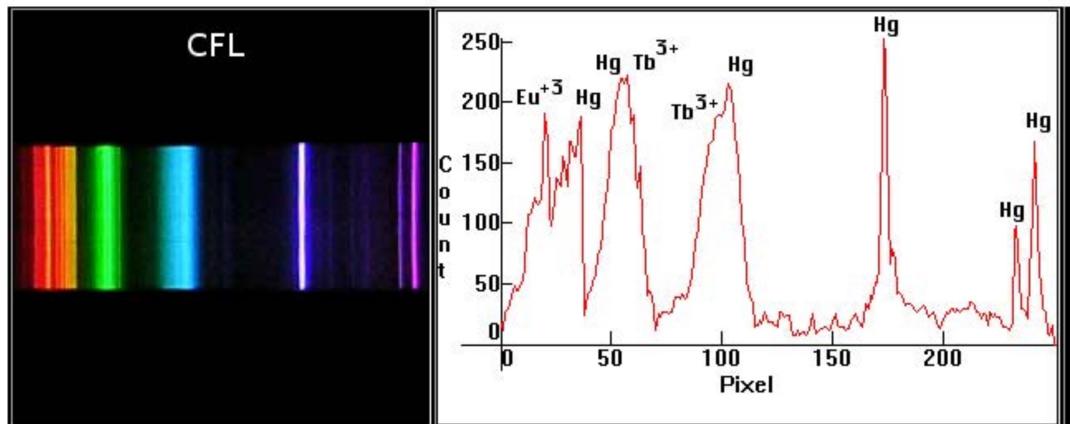
白炽灯

- 更像太阳光
- 高能耗



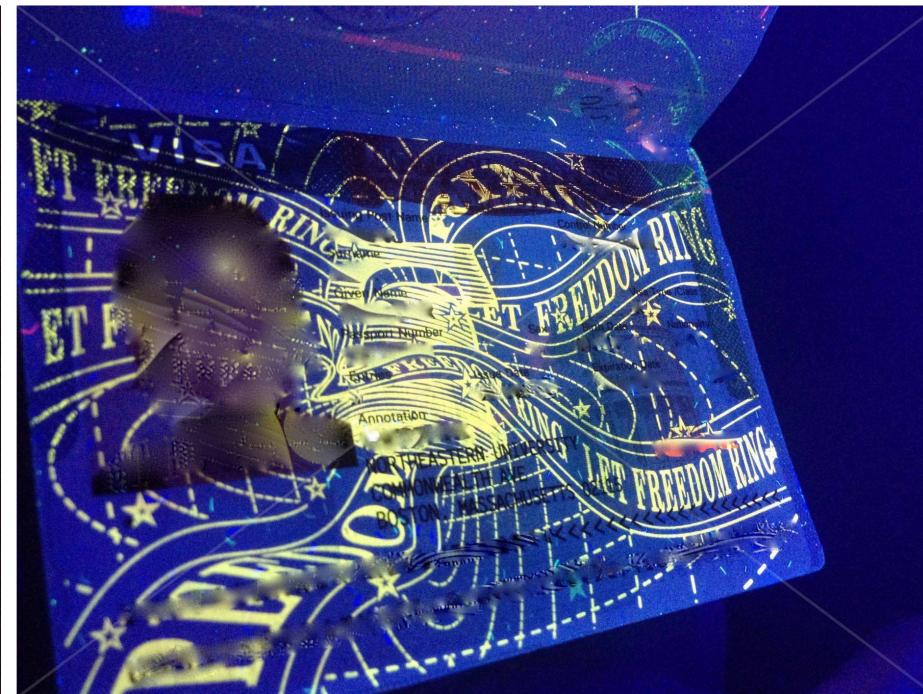
荧光灯

- 能利用不连贯的光谱模拟太阳光
- 低能耗



同色异谱特征的应用：假币检测

许多国家使用特殊墨水打印货币、护照等，在紫外线下会产生不同的外观



颜色复制/匹配
Color
reproduction/matching

加色系统 (Additive color)

口给定一组原色的光谱分布 (例如 RGB)

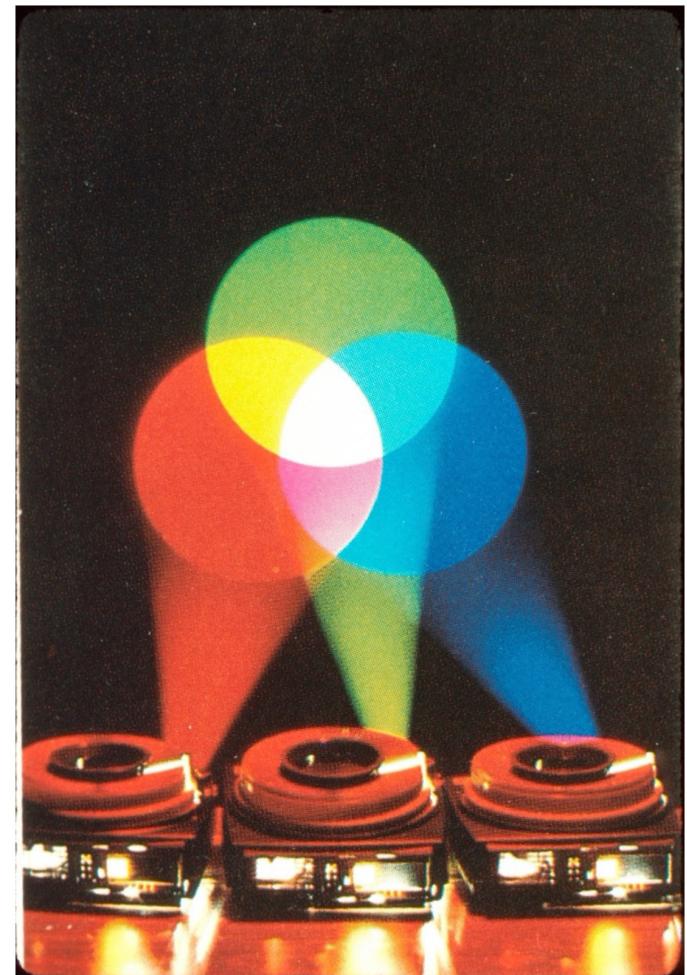
$$s_R(\lambda), s_G(\lambda), s_B(\lambda)$$

口调整颜色的强度 (brightness)，并将它们加起来，得到新的颜色

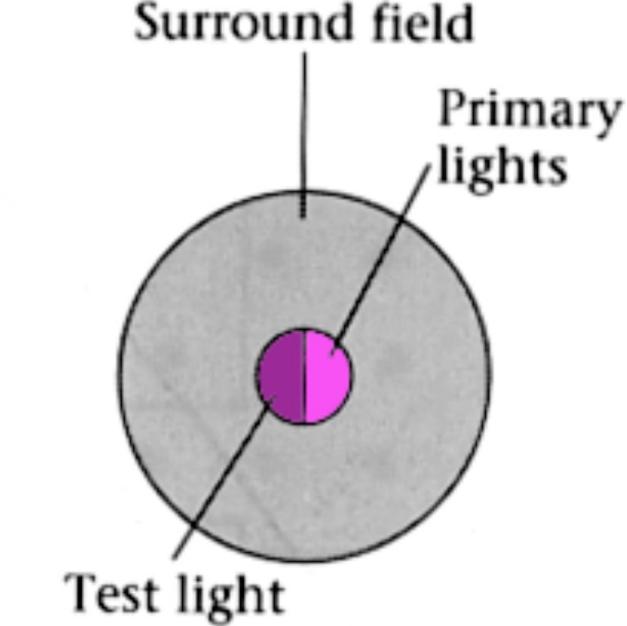
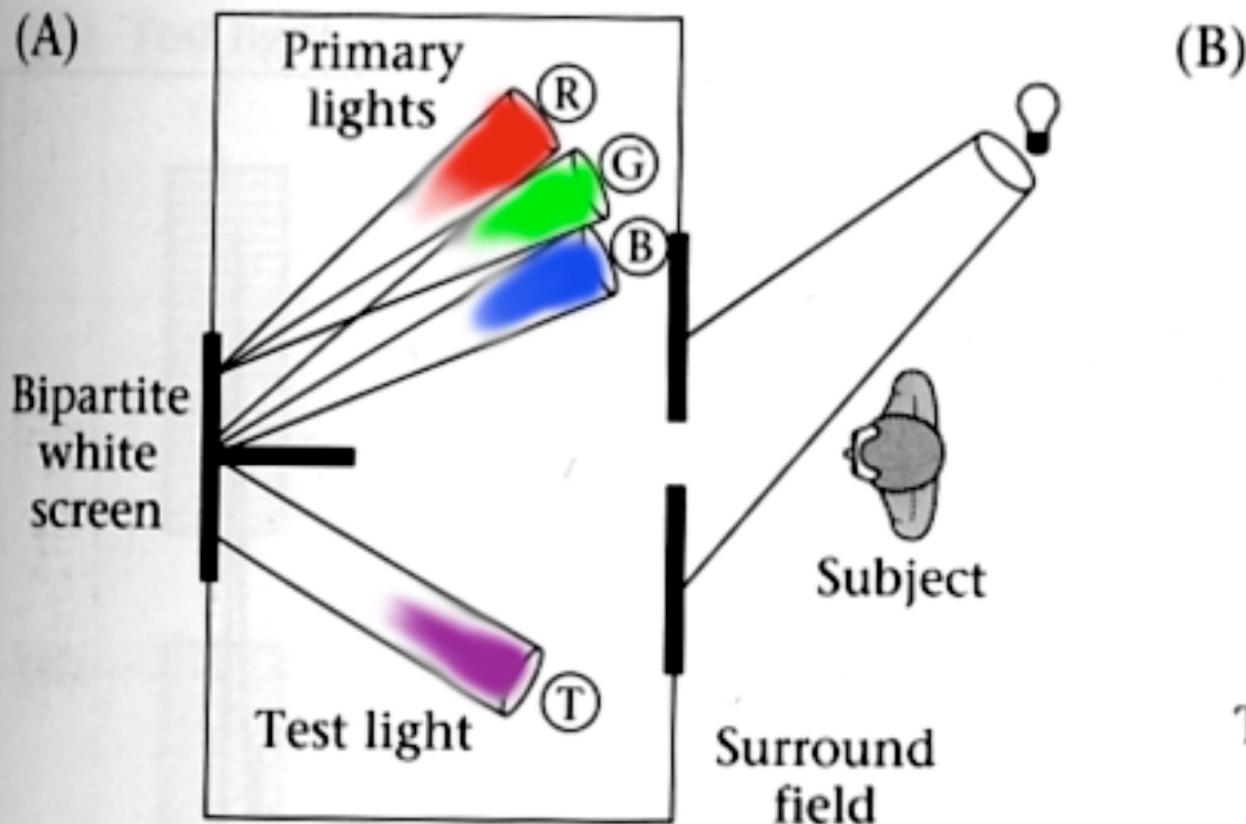
$$Rs_R(\lambda) + Gs_G(\lambda) + Bs_B(\lambda)$$

口该颜色可用系数 R, G, B 描述

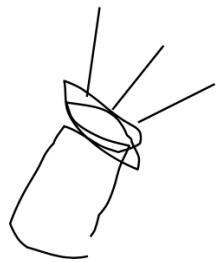
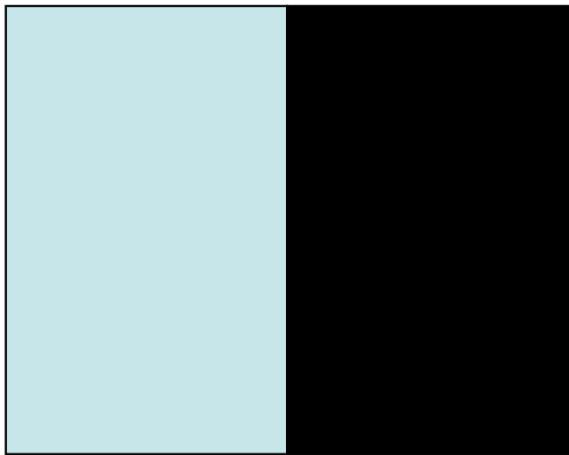
口减色系统？



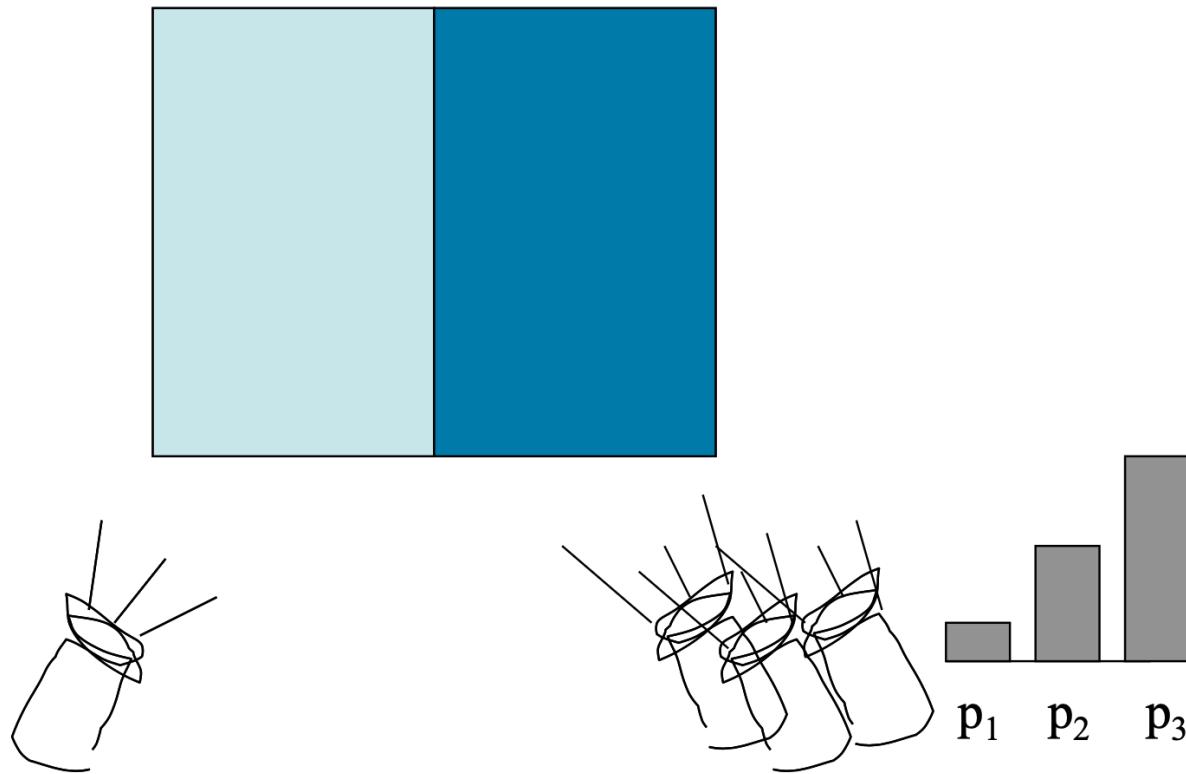
加性颜色系统的配色实验



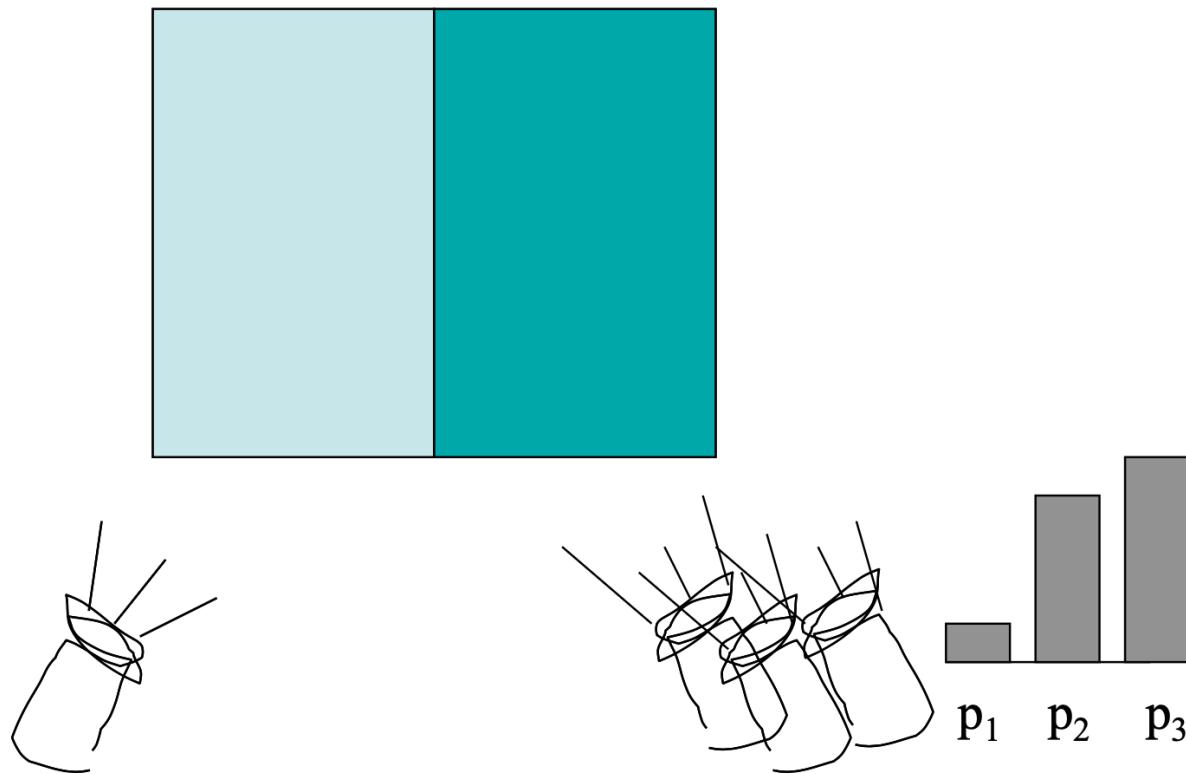
实验例子 1



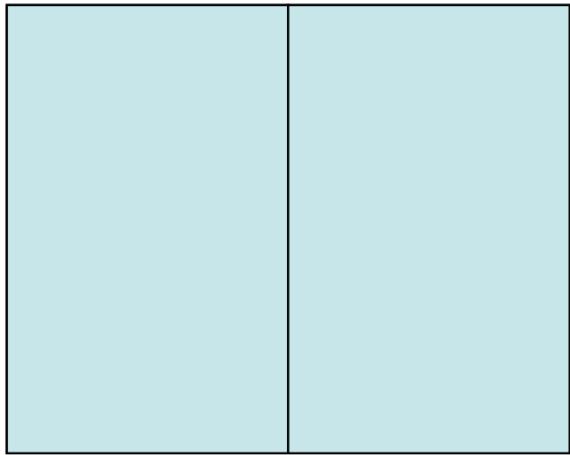
实验例子 1



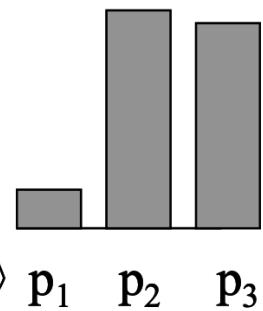
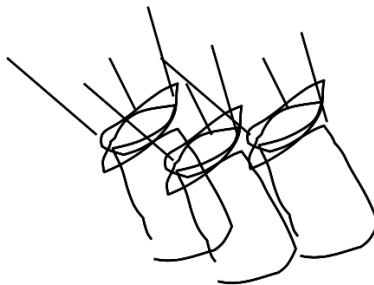
实验例子 1



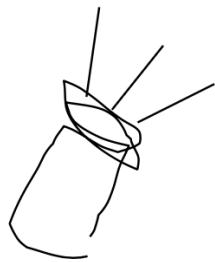
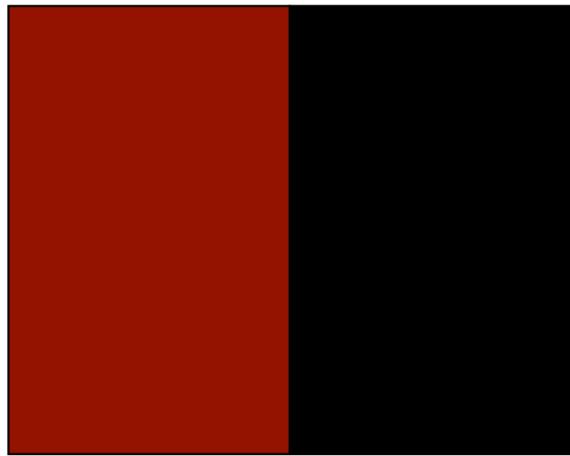
实验例子 1



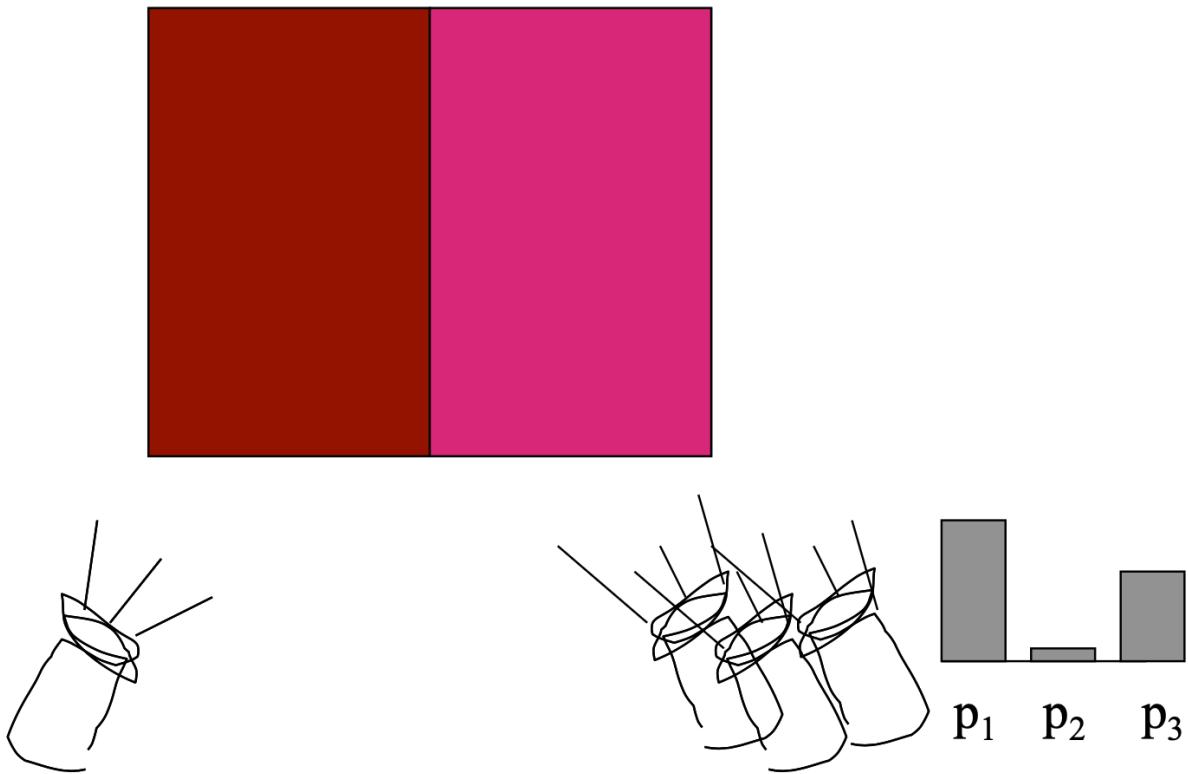
需要的不同主
色量用以配色



实验例子 2

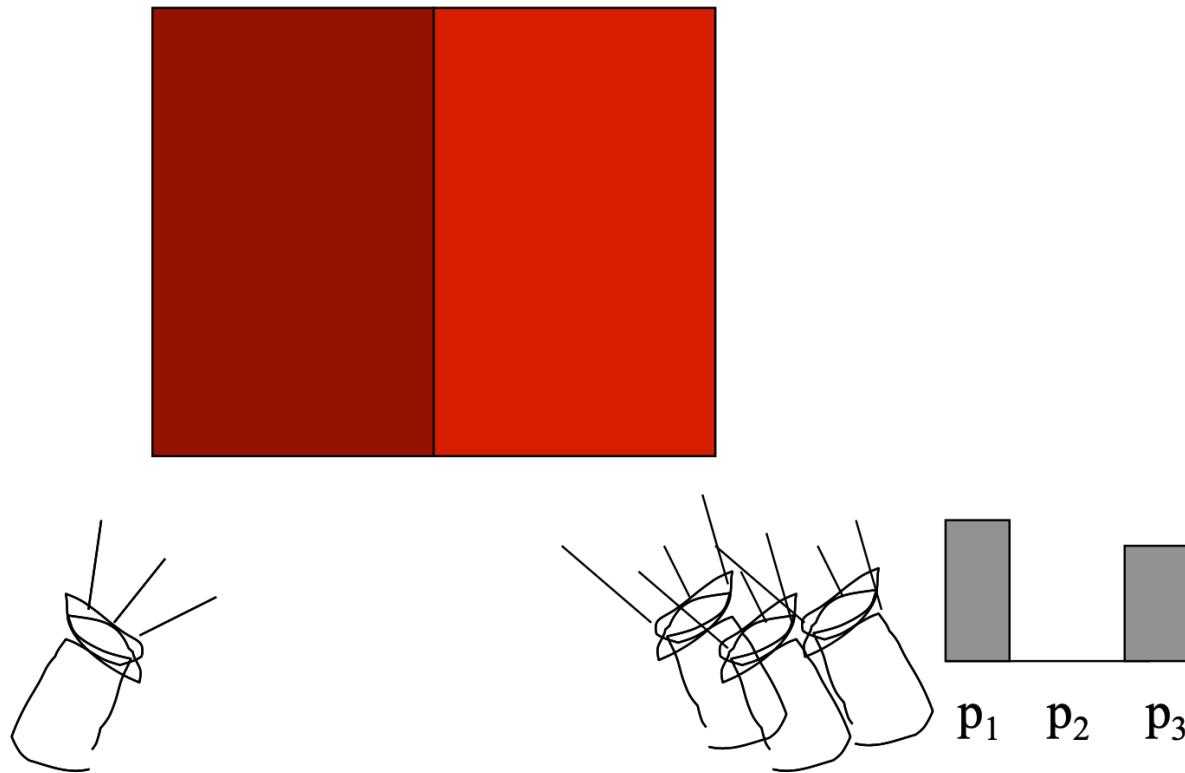


实验例子 2



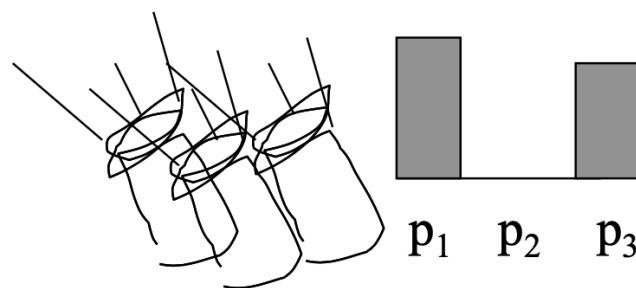
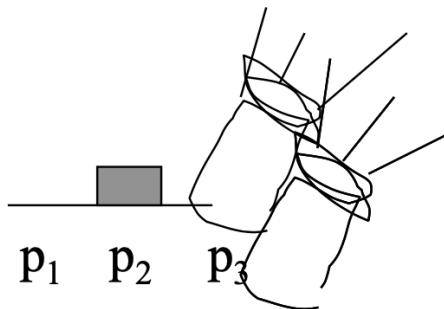
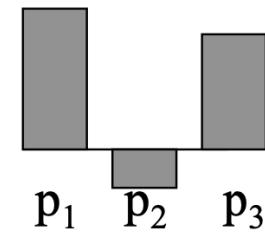
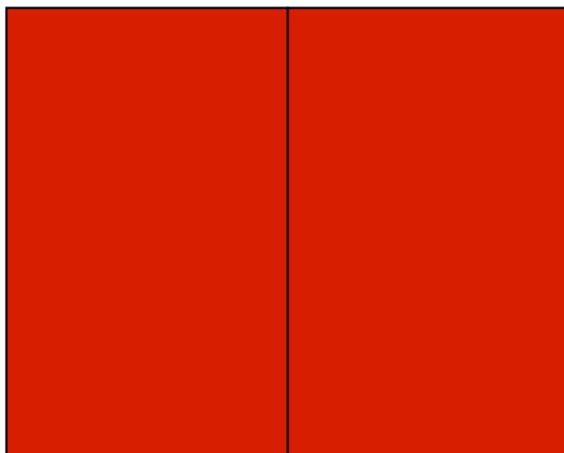
实验例子 2

口目标颜色在 RGB 色彩空间中可能无法直接表达



实验例子 2

用“负数”量的颜色原色进行颜色匹配，可理解为在目标颜色上加上“正数”量的对应原色

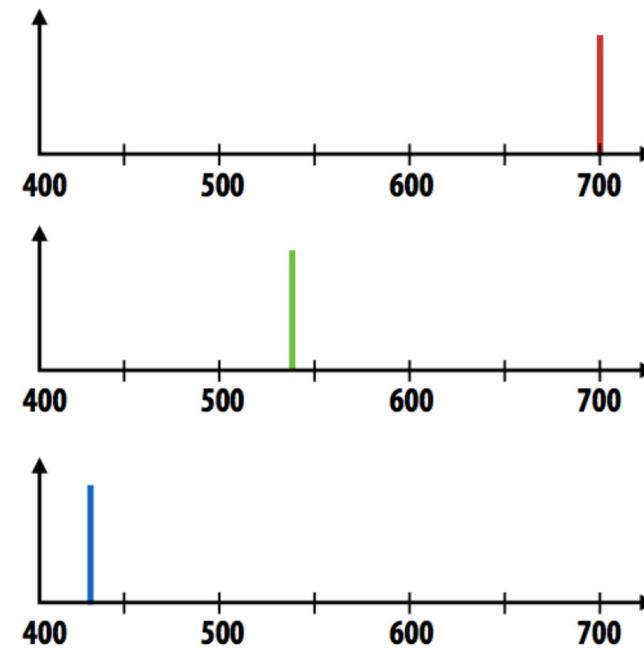


CIE RGB 颜色匹配

□ 与之前的配色设置相同，但原色是单色光
monochromatic light (单波长)



□ 测试光也是单色光

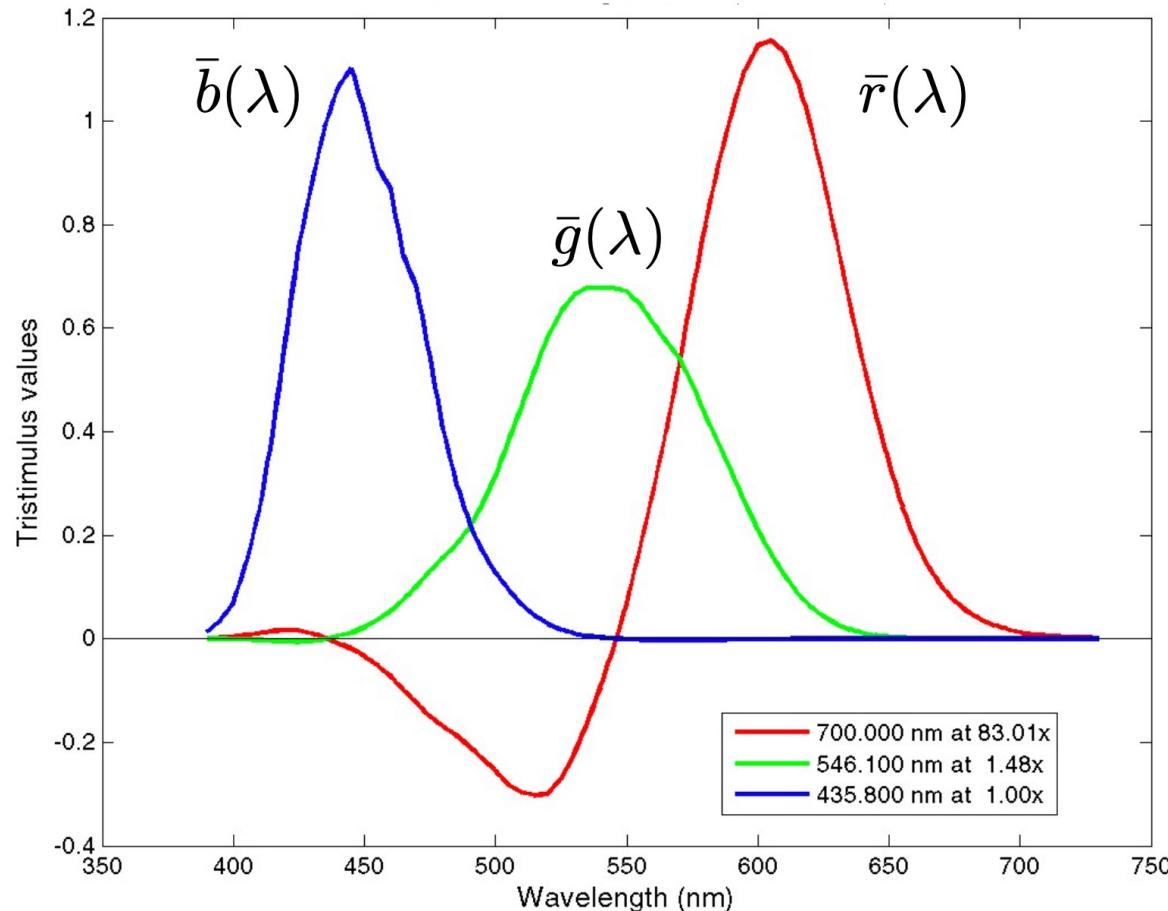


Kayvon Fatahalian

CIE RGB 颜色匹配函数

图表绘制了必须组合多少 CIE RGB 主光才能匹配 x 轴上给定波长的单色光

Careful: these are not response curves or spectra!



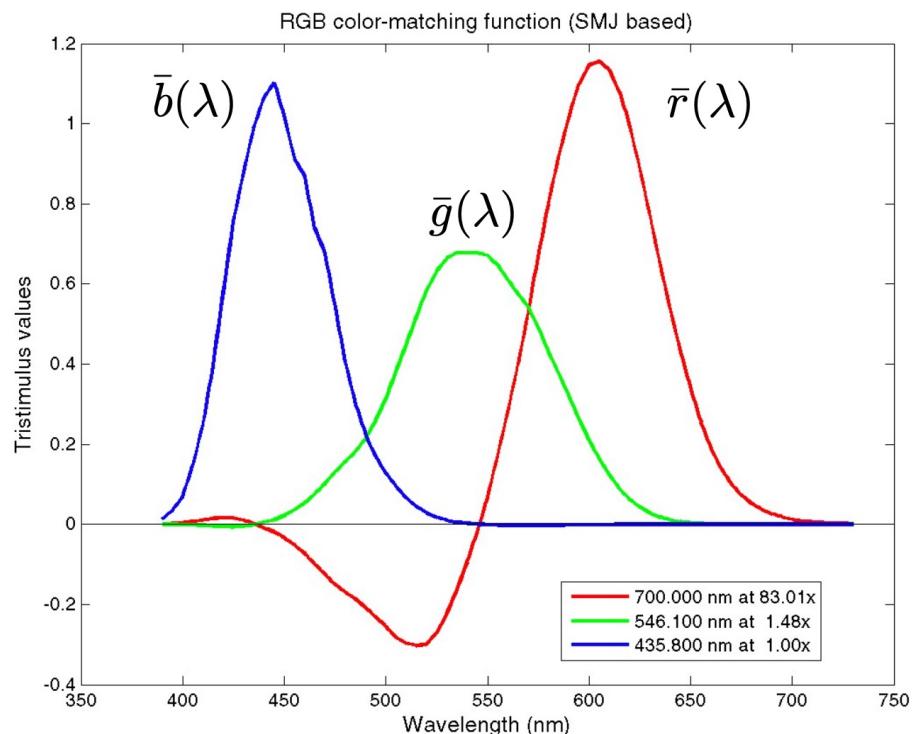
具有匹配功能的色彩重构

对于任何光谱 $s(\lambda)$, 感知的颜色可以通过 CIE RGB 颜色匹配函数得到

$$R_{\text{CIE RGB}} = \int_{\lambda} s(\lambda) \bar{r}(\lambda) d\lambda$$

$$G_{\text{CIE RGB}} = \int_{\lambda} s(\lambda) \bar{g}(\lambda) d\lambda$$

$$B_{\text{CIE RGB}} = \int_{\lambda} s(\lambda) \bar{b}(\lambda) d\lambda$$



Careful: these are not response curves or primary spectra!

色彩空间 Color spaces

色彩空间

□ 是一种颜色的数学模型

- 使用三个或更多的维度来表示颜色
- 可以精确地描述颜色的属性，包括色相、饱和度和亮度

□ 典型例子

- RGB 色彩空间使用红色、绿色和蓝色三个维度来表示颜色
- CIE XYZ 色彩空间使用 X, Y, Z 三个维度

标准色彩空间

□ 标准 RGB (sRGB)

- 这才是我们平时用的 RGB
- 由惠普和微软开发的，旨在为显示器、打印机和互联网定义一个标准的色彩空间
- 基于一组特定的原色 (RGB) 和一个标准的伽玛校正曲线
- sRGB 与 CIE XYZ 有一个固定的转换关系，但覆盖的颜色 (色域) 比人眼能看到的范围 (CIE XYZ) 小得多，约 35%

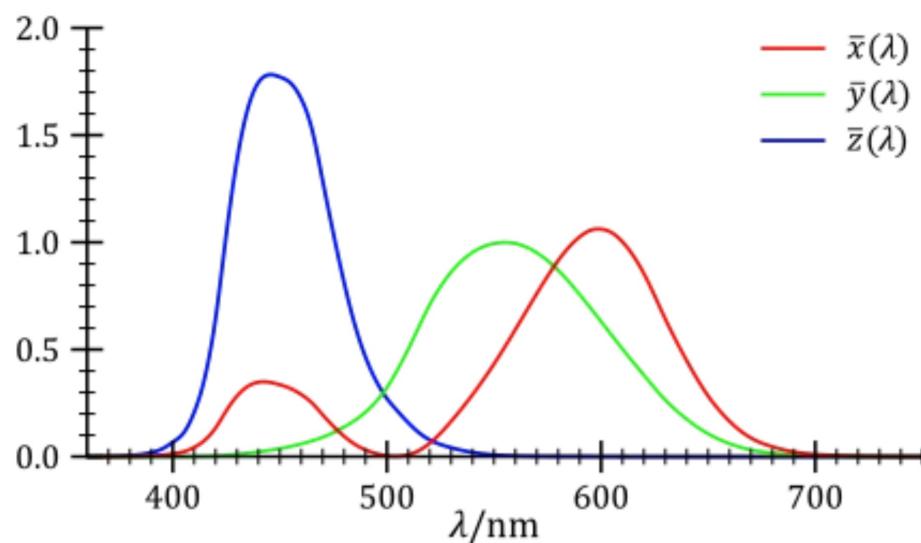
通用色彩空间：CIE XYZ

□ CIE XYZ 色彩空间是一个想象中的标准色彩原色集合

- 与之匹配的原色并不存在
- Y 表示亮度 (与颜色无关)

□ 设计目的

- CIE RGB 可能产生负值，不易用于实际应用
- CIE RGB 不能覆盖所有可观察的颜色
- CIE XYZ 色彩空间是从 CIE RGB 线性变换而来的*



CIE XYZ 颜色匹配函数

* <https://www.hunterlab-xinlian.com/article-detail/CIE-XYZ>

分离亮度、色度

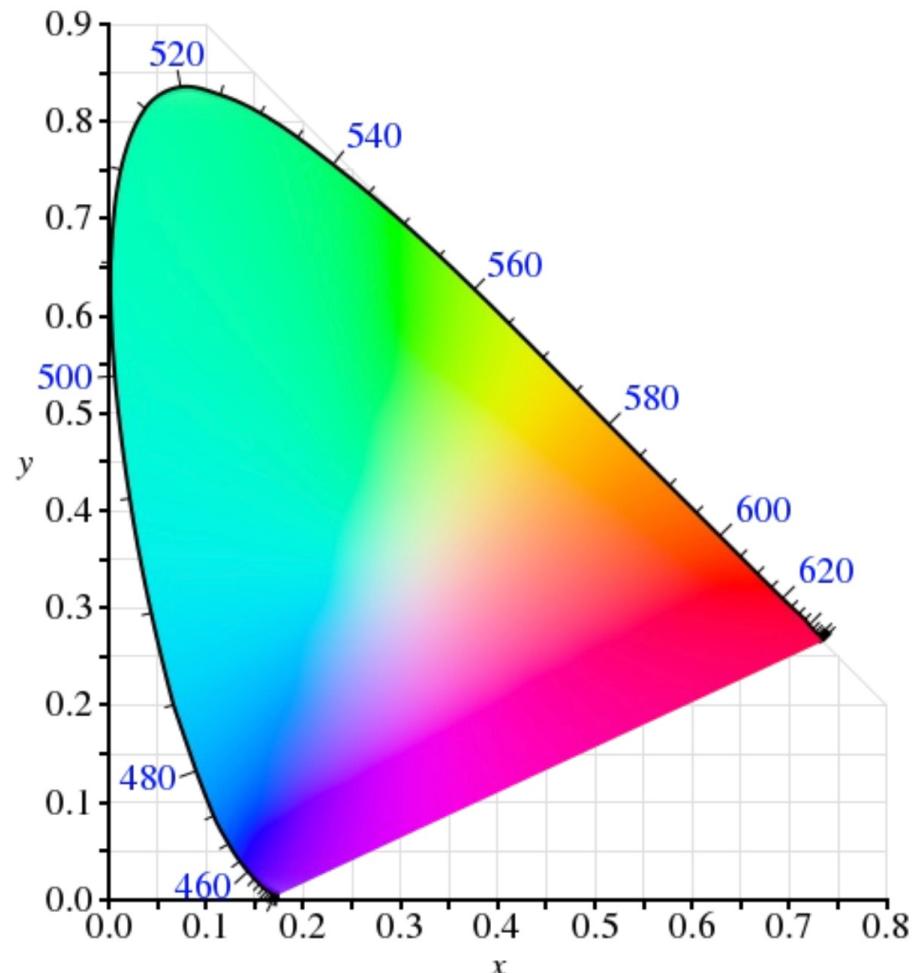
口亮度 (Luminance): Y

口色度 (Chromaticity): 由 X、Y、Z 归一化得到

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

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

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



可视化 CIE XYZ 色彩空间 (色度图)

口由于 $x+y+z=1$, 通常仅使用 x 和 y 表示色度

- 色度图显示了在特定亮度 Y 下的颜色分布

CIE 色度图

口色度图 (Chromaticity Diagram)

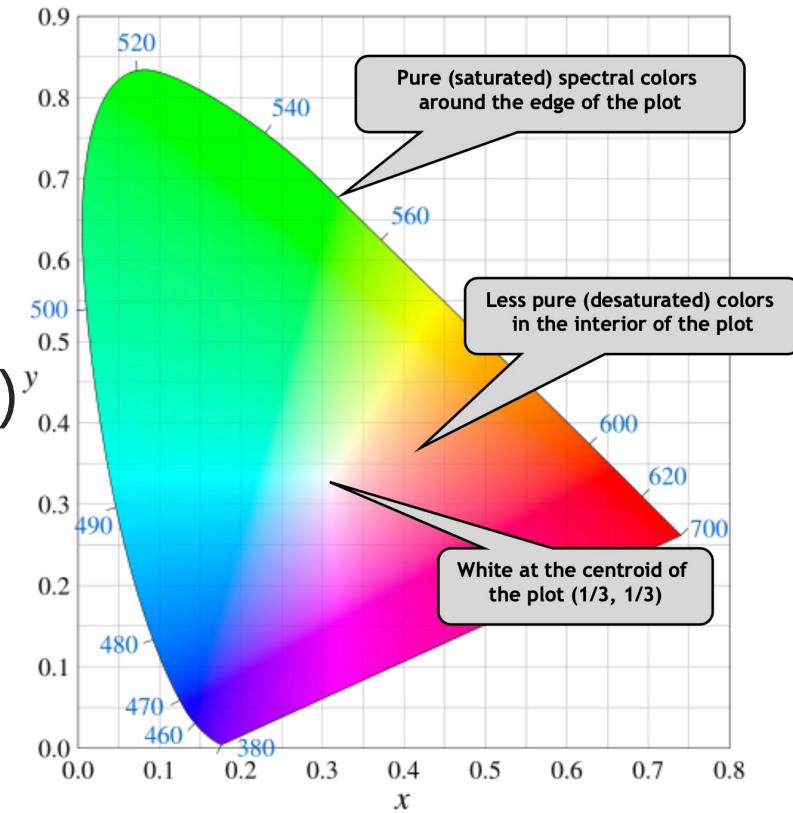
- 一种用于表示色彩空间中颜色的二维图形
- 只包含色相和饱和度两个维度，不包括亮度

口色度图的边界

- 表示纯色光的色度（每个点表示单一波长的纯色）
- 命名为光谱轨迹 (spectral locus)

口直观地表示色彩空间中的颜色

- 比如设备的色域，也就是设备能够显示或输出的颜色范围

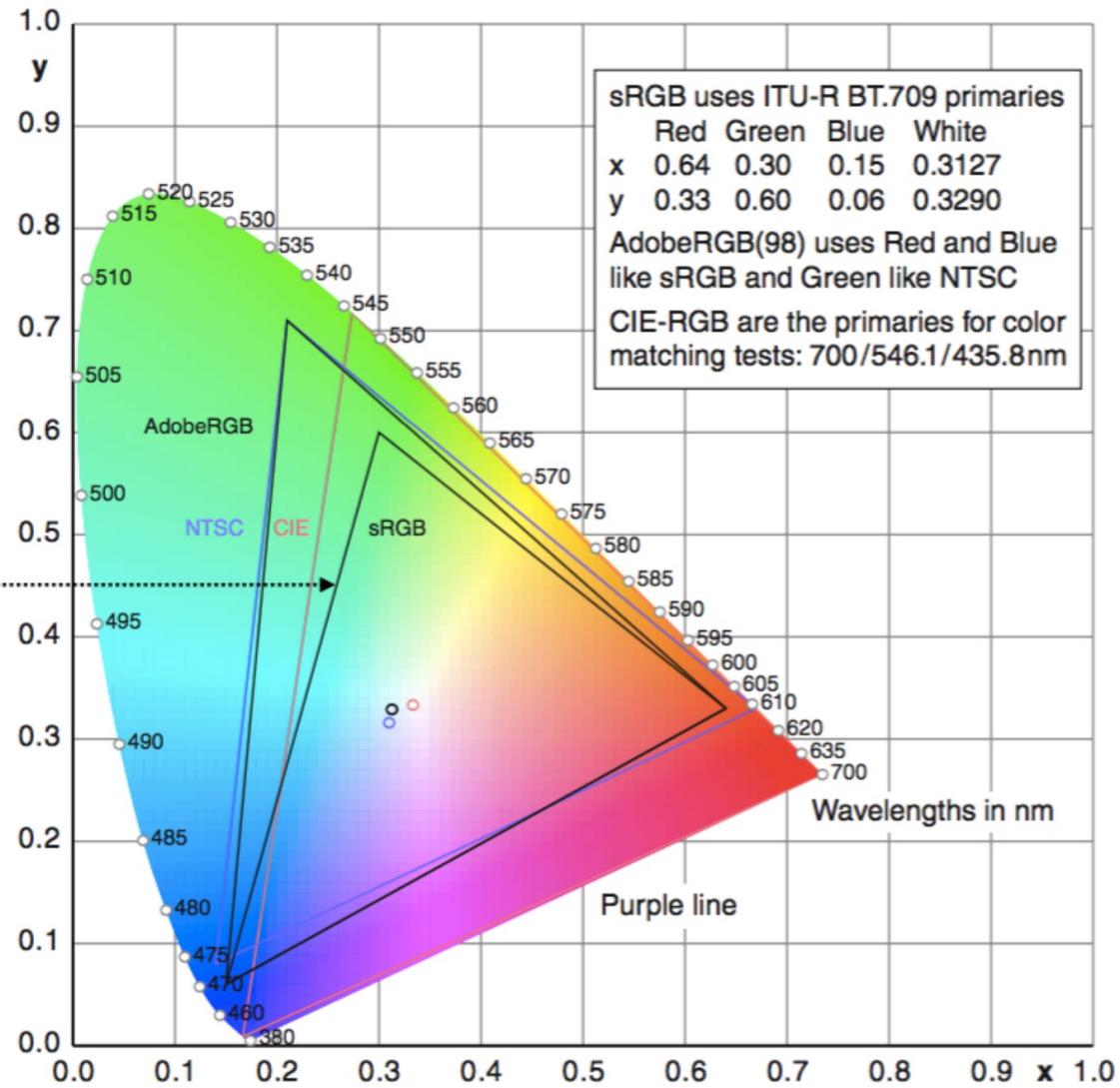


色域 (Gamut)

- Gamut 是由一组原色生成的色度集
- 不同的色彩空间表示不同的颜色范围
- 它们有不同的色域，即它们覆盖了色度图上的不同区域

色域

sRGB is a common color space used throughout the internet

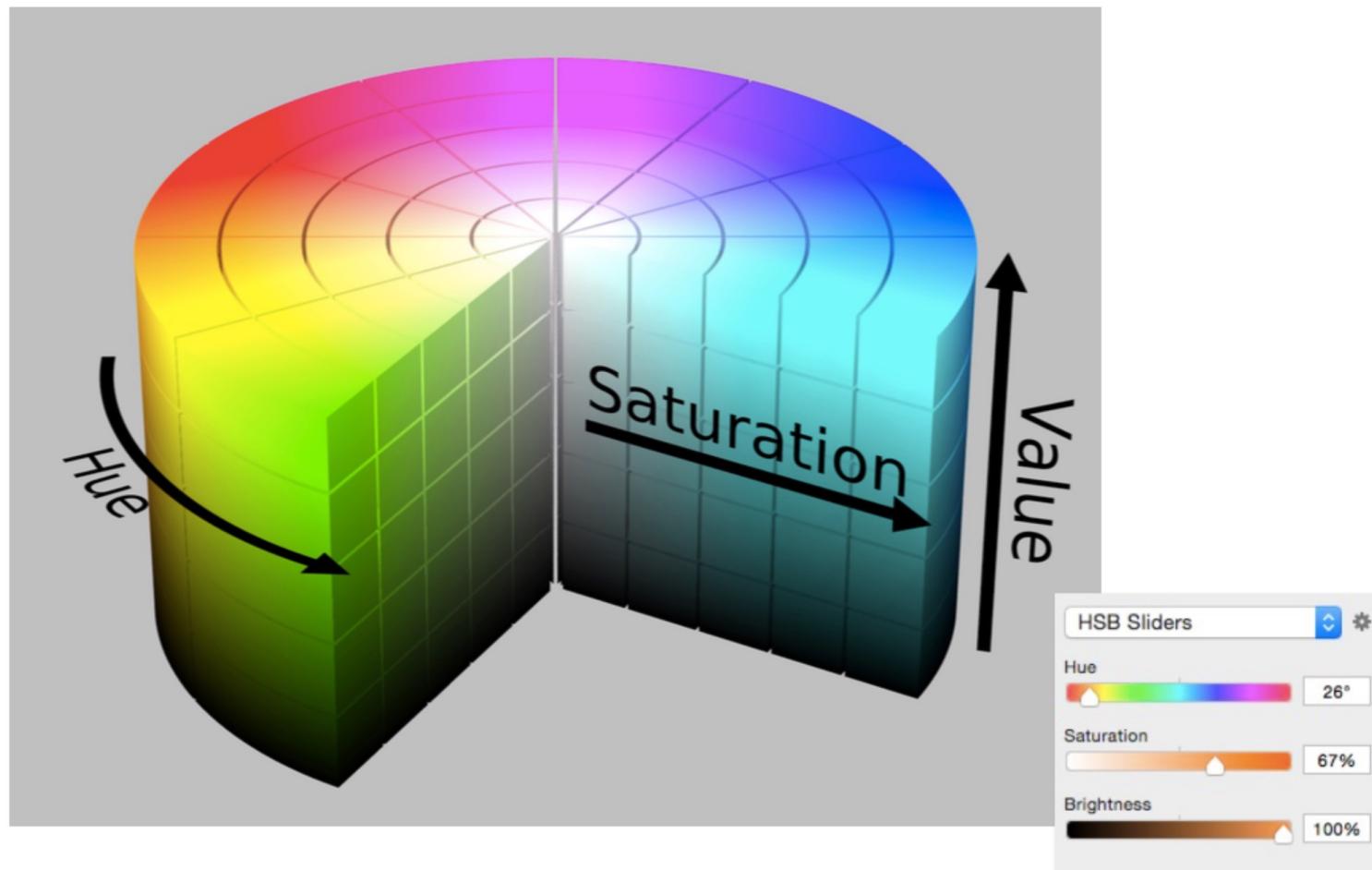


基于感知的色彩空间

Perceptually organized color spaces

HSV 色彩空间 (色调-饱和度-亮度)

- 口坐标轴对应于色彩的艺术特征，被艺术家广泛使用
- 口广泛用于“颜色拾取器 (color picker)”中



颜色的感知维度

口色调 (Hue)

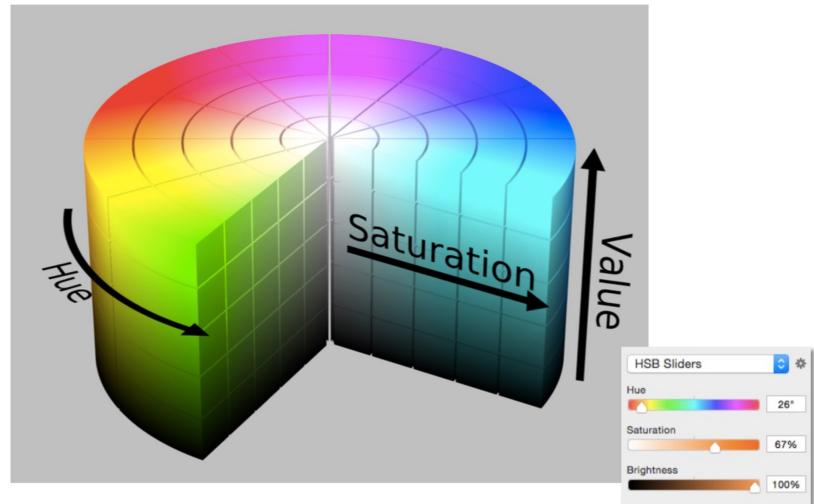
- 颜色的 “种类”
- 色度学关联：波长
- 艺术家关联：选择的颜料颜色

口饱和度 (Saturation)

- 颜色的纯度 (越不纯越接近白色)
- 色度学关联：纯度 (彩色和白色的比例)
- 艺术家关联：颜色的丰富程度或深浅程度

口亮度 (Lightness or value)

- 光的总量
- 色度学关联：亮度 (光的强度或明亮程度)
- 艺术家关联：颜色看起来有多亮或多暗



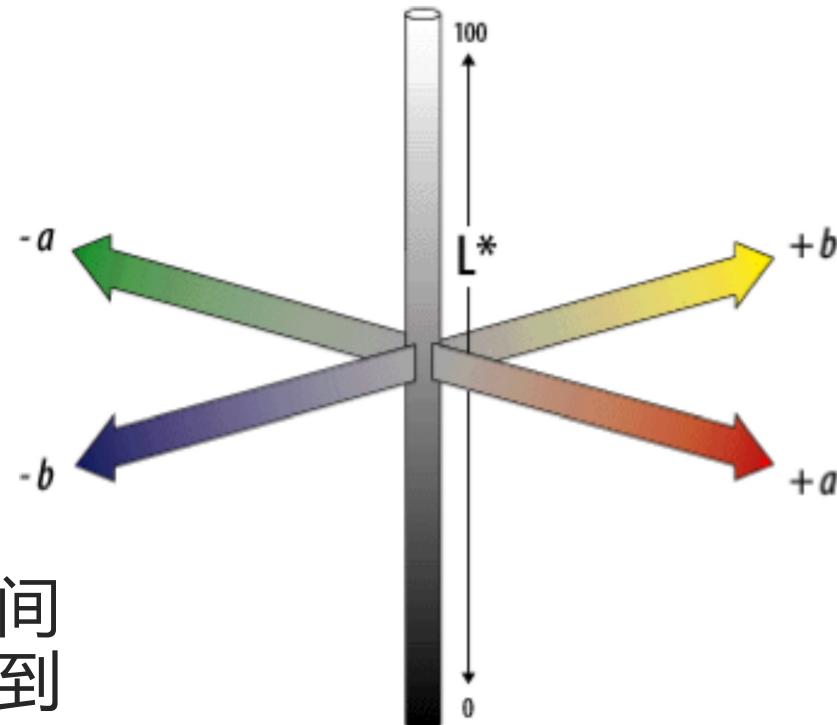
CIELAB 空间 (a.k.a L*a*b*)

□ 一种常用的色彩空间，主要用于颜色测量和管理

- L^* 是亮度 (亮度)
- a^* 和 b^* 是一对互补色
 - a^* 是红绿色
 - b^* 是蓝黄色

□ 力求感知的一致性

- 若两种颜色在 CIELAB 色彩空间中的距离相等，那么人眼感知到的颜色差异也应该相等
- 因此，CIELAB 色彩空间常常用 于颜色差的计算和颜色质量控制



互补色理论 (Opponent color theory)

□ CIELAB 中的色彩空间维度有很好的神经学基础

- 大脑早期似乎使用三个轴对颜色进行编码
 - 白色--黑色, 红色--绿色, 黄色--蓝色
- 白-黑轴表示亮度
- 其他决定色调 (Hue) 和饱和度 (Saturation)

互补色理论的证据 – 证据一

□ 观察事实：

- 我们能看见混色：蓝绿色（青）、黄绿色、紫红色
- 我们无法看见混色：红绿色

□ 核心逻辑：

- 红色和绿色就像球赛中对立的两支球队
- 可以轮流赢，或者打平（灰色/黄色），但不可能同时获胜

□ 科学原理：拮抗过程理论 (Opponent Process)

- 神经机制：大脑通过同一条“信道”传输红绿信号
- 这条信道就像一个“跷跷板”
 - 红光让它向上（兴奋），绿光让它向下（抑制）
 - 跷跷板不可能同时既向上又向下

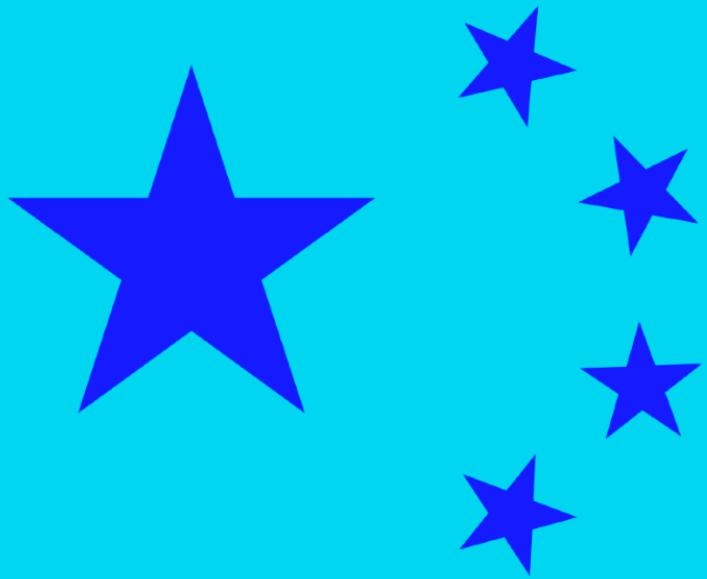
互补色理论的证据 – 证据二

口实验现象

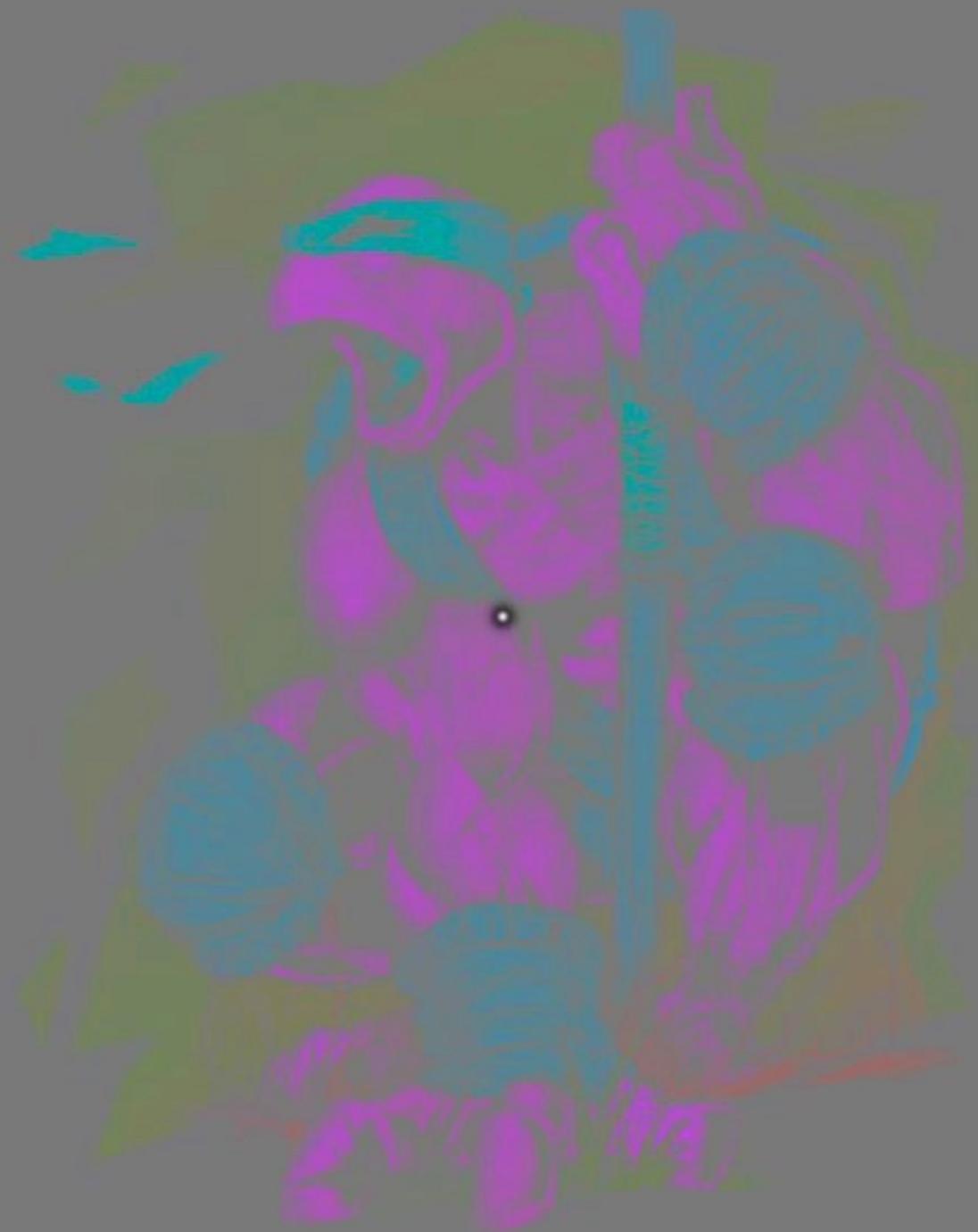
- 操作：长时间注视红色图片，突然看白墙
- 结果：眼前会浮现出一个绿色的虚影
- （反之亦然：注视蓝色，会看到黄色后像 Afterimage）

口科学原理：神经适应 (Neural Adaptation)

- “球员疲劳” 效应：当眼睛一直盯着红色，负责红色的神经元因为过度工作而疲劳（敏感度降低）
- “对手反攻” 效应：
 - 当你转向白墙（白光 = 红+绿+蓝），疲劳的红色神经元无法响应
 - 此时，对立的绿色信号没有了压制，在大脑中瞬间占据上风

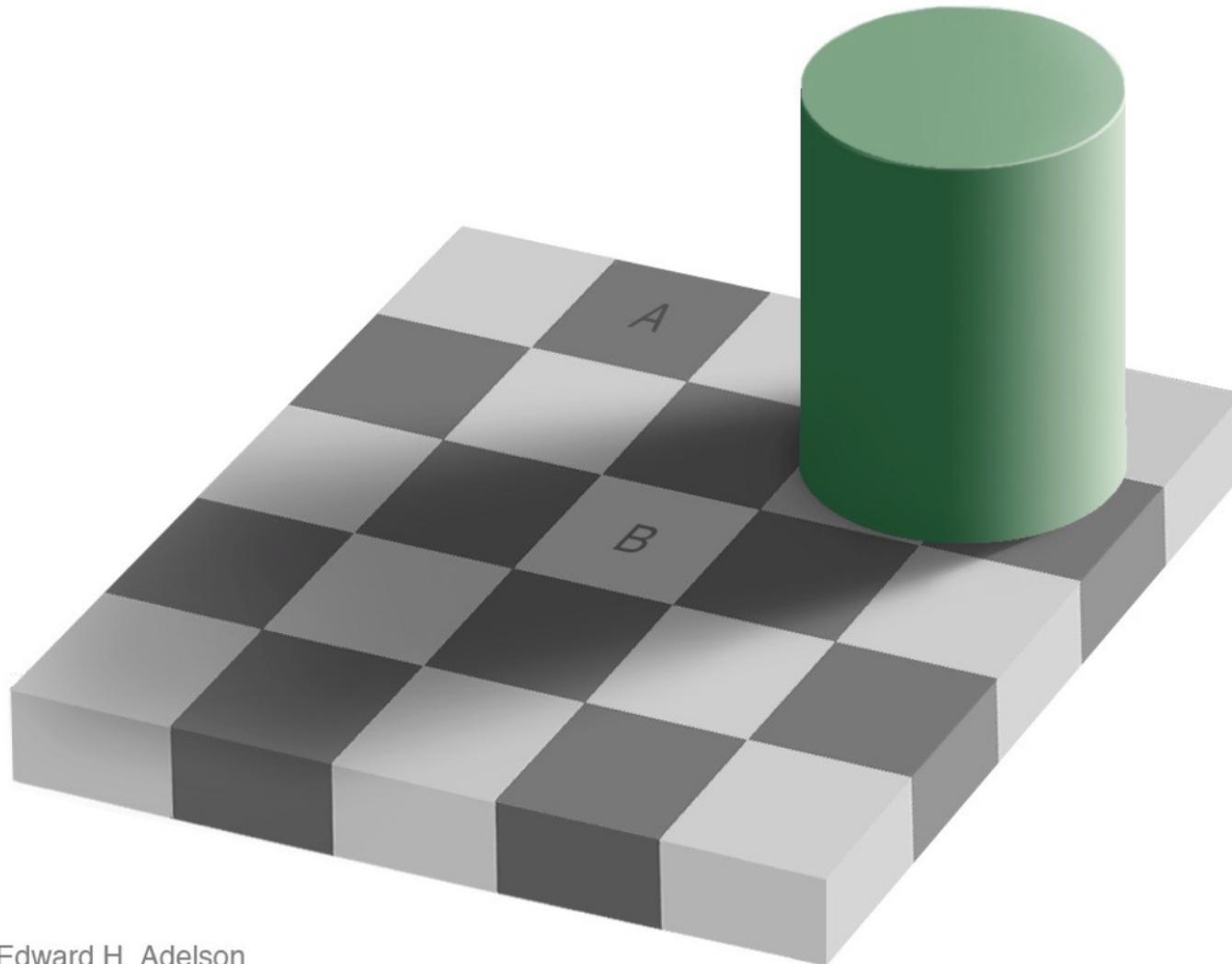


.



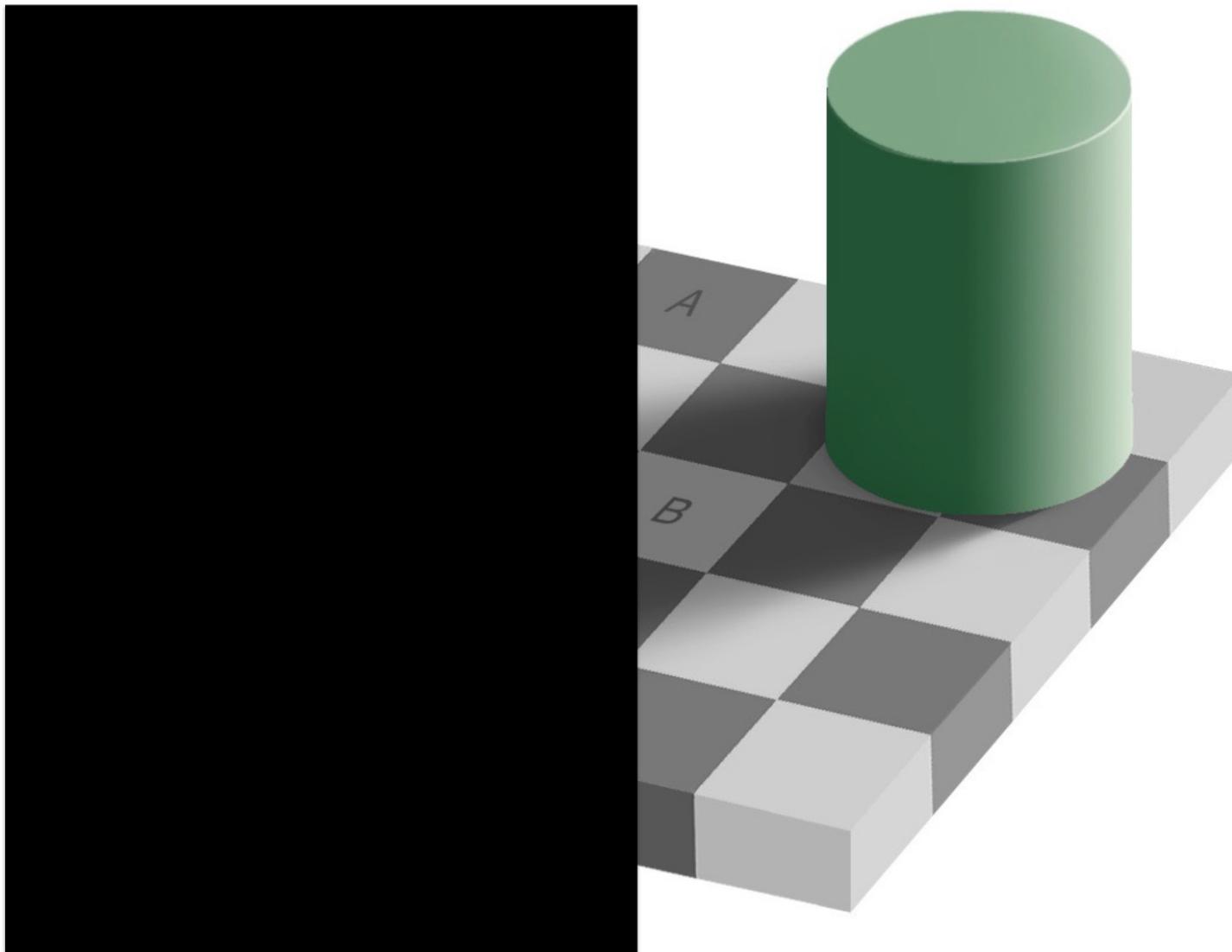


颜色是相对的

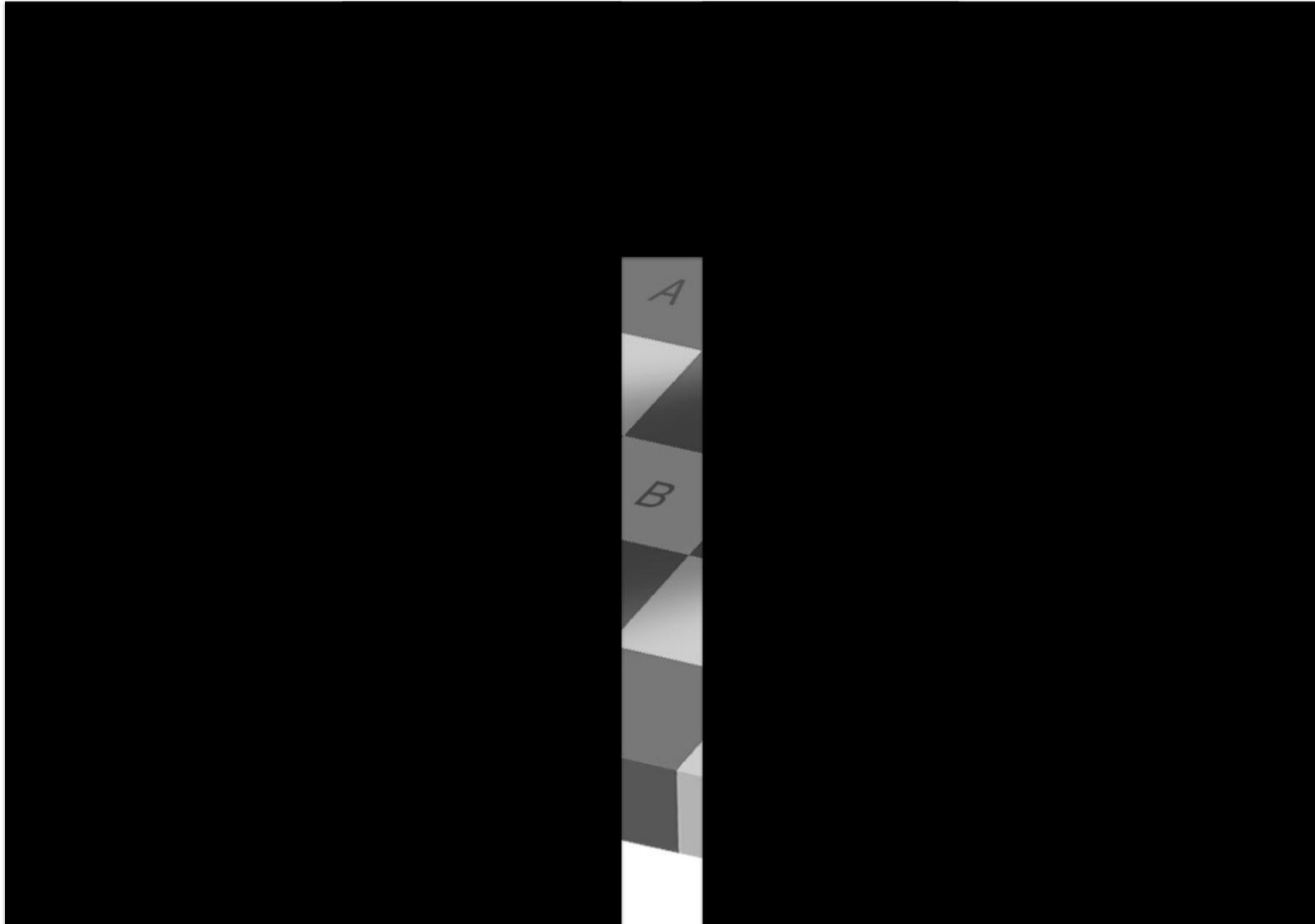


Edward H. Adelson

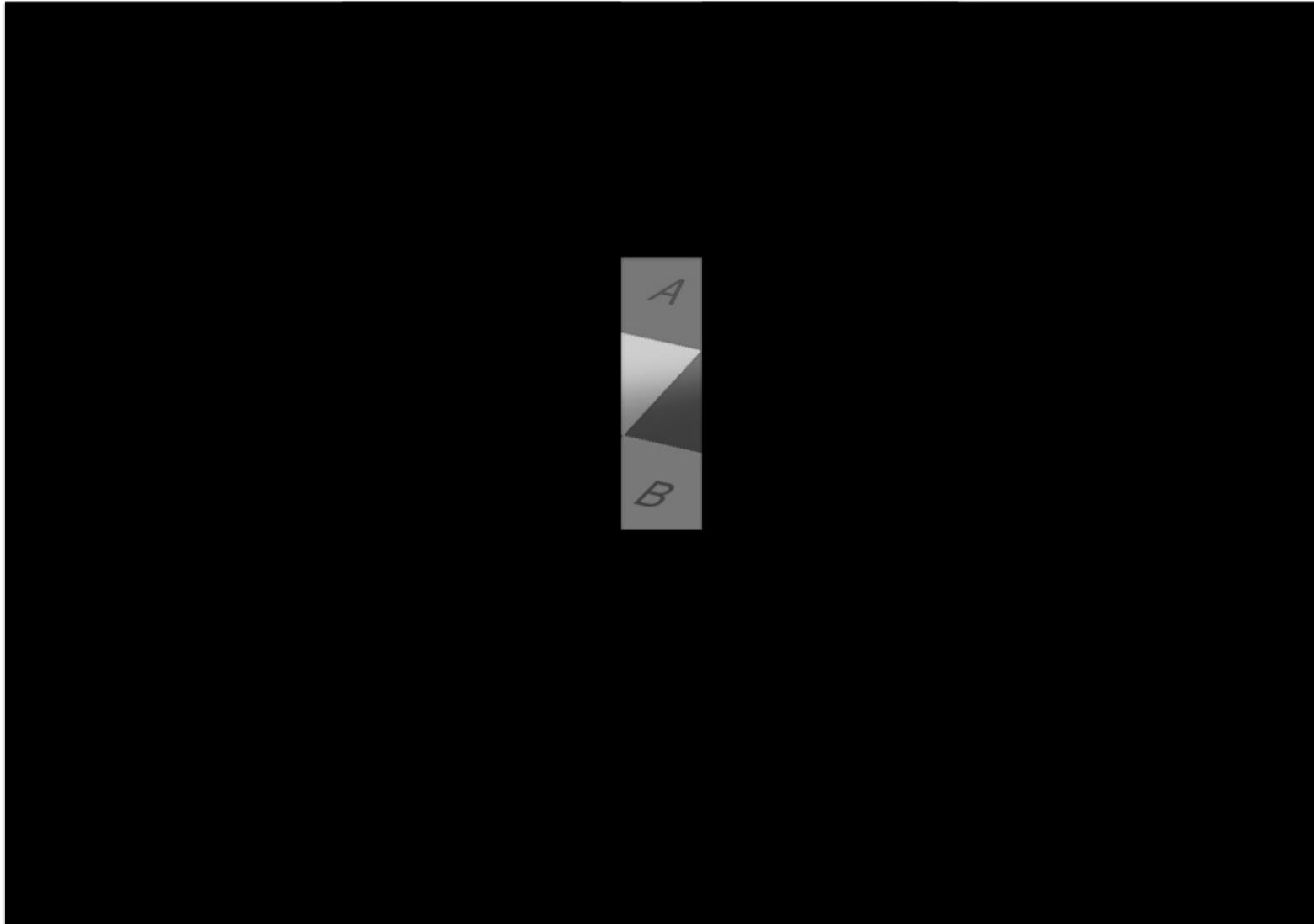
颜色是相对的



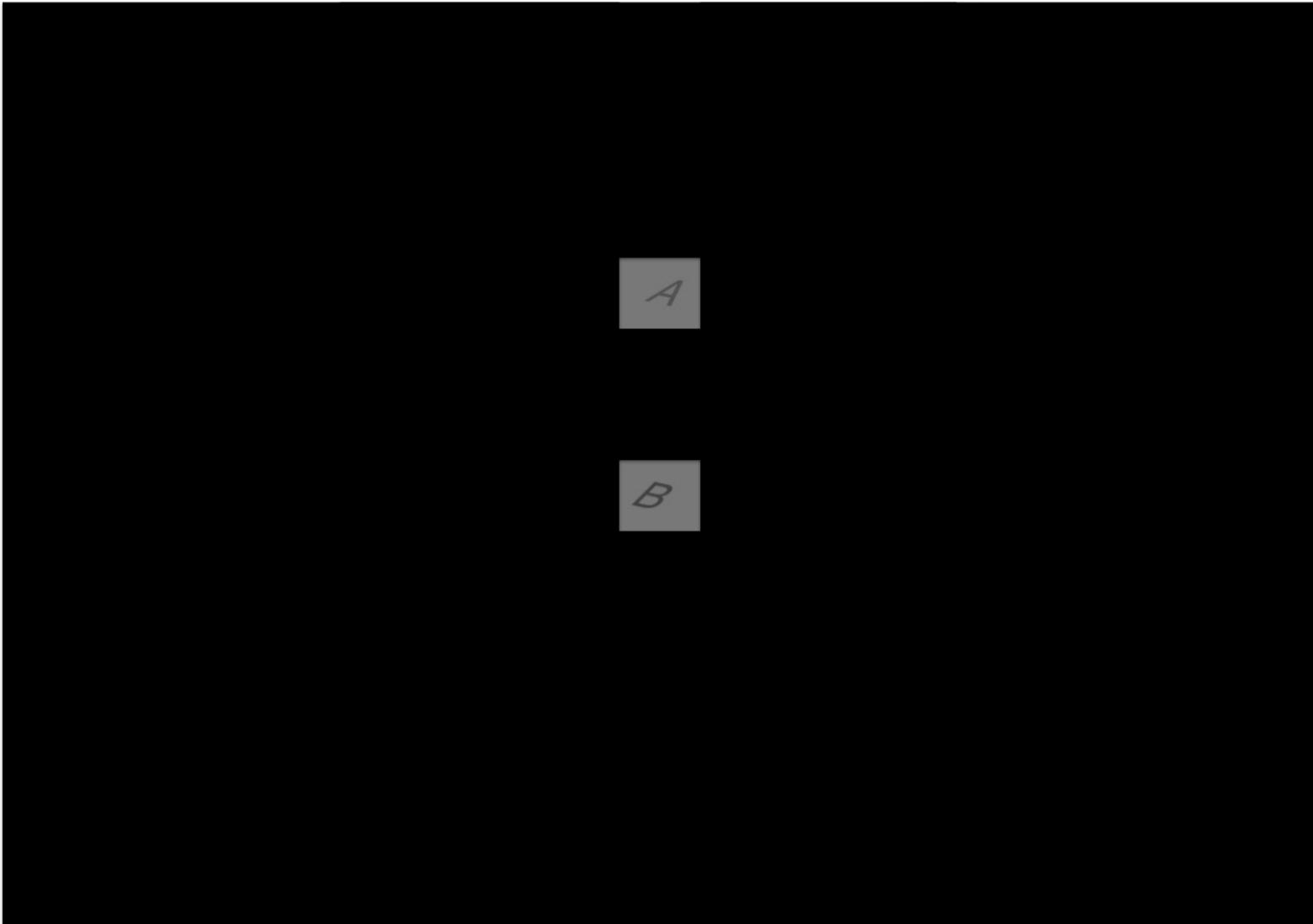
颜色是相对的



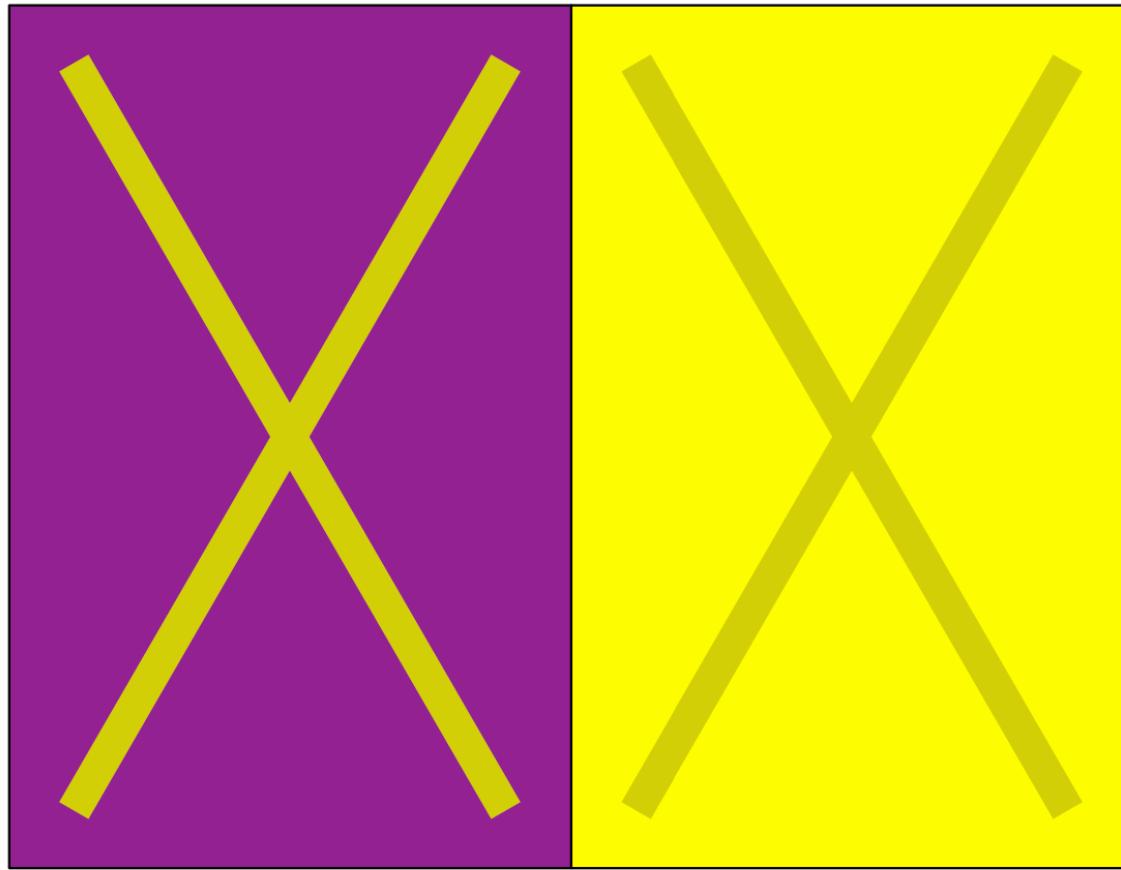
颜色是相对的



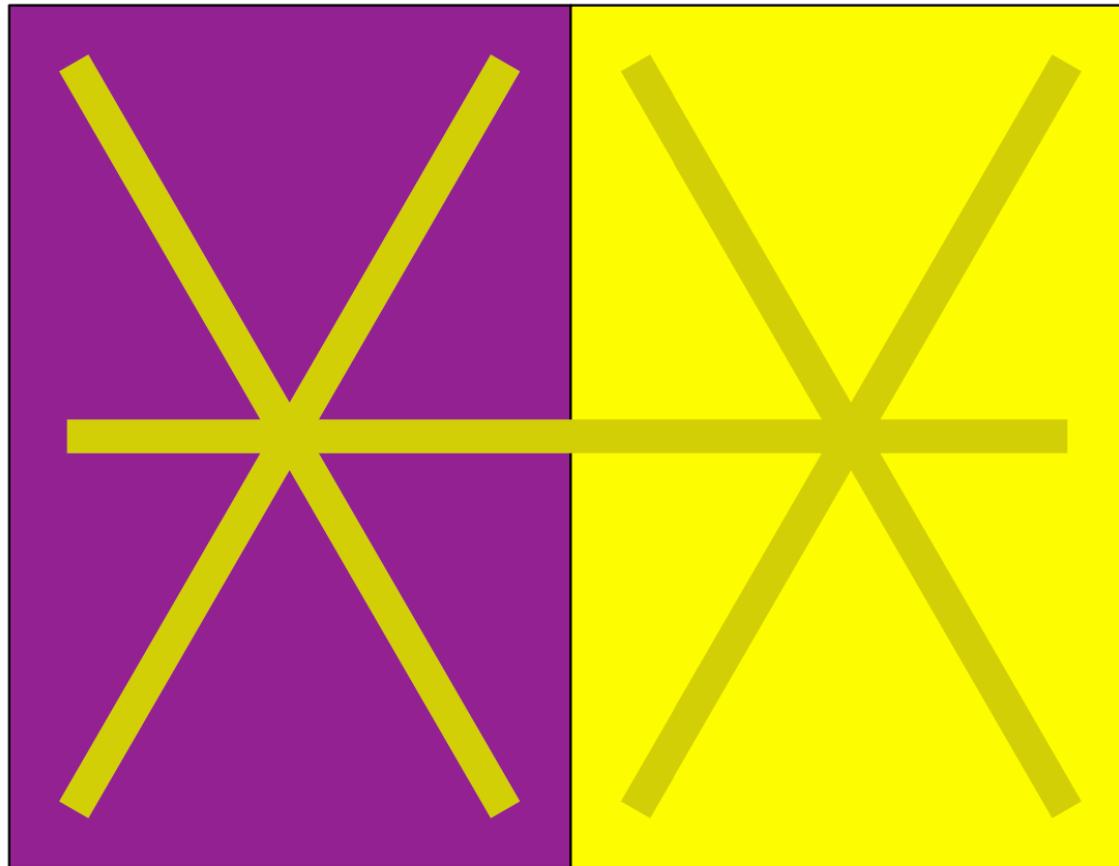
颜色是相对的



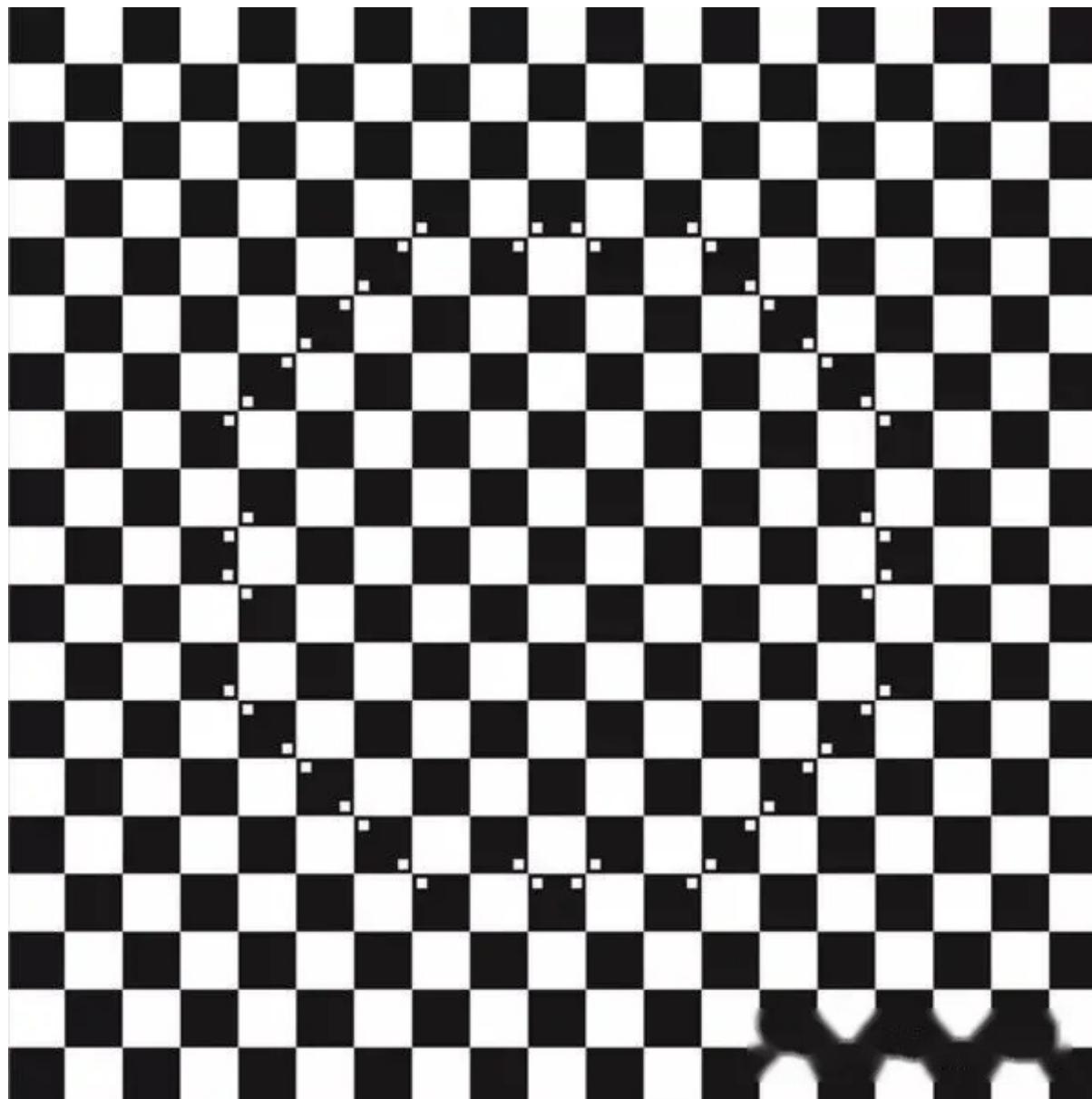
颜色是相对的



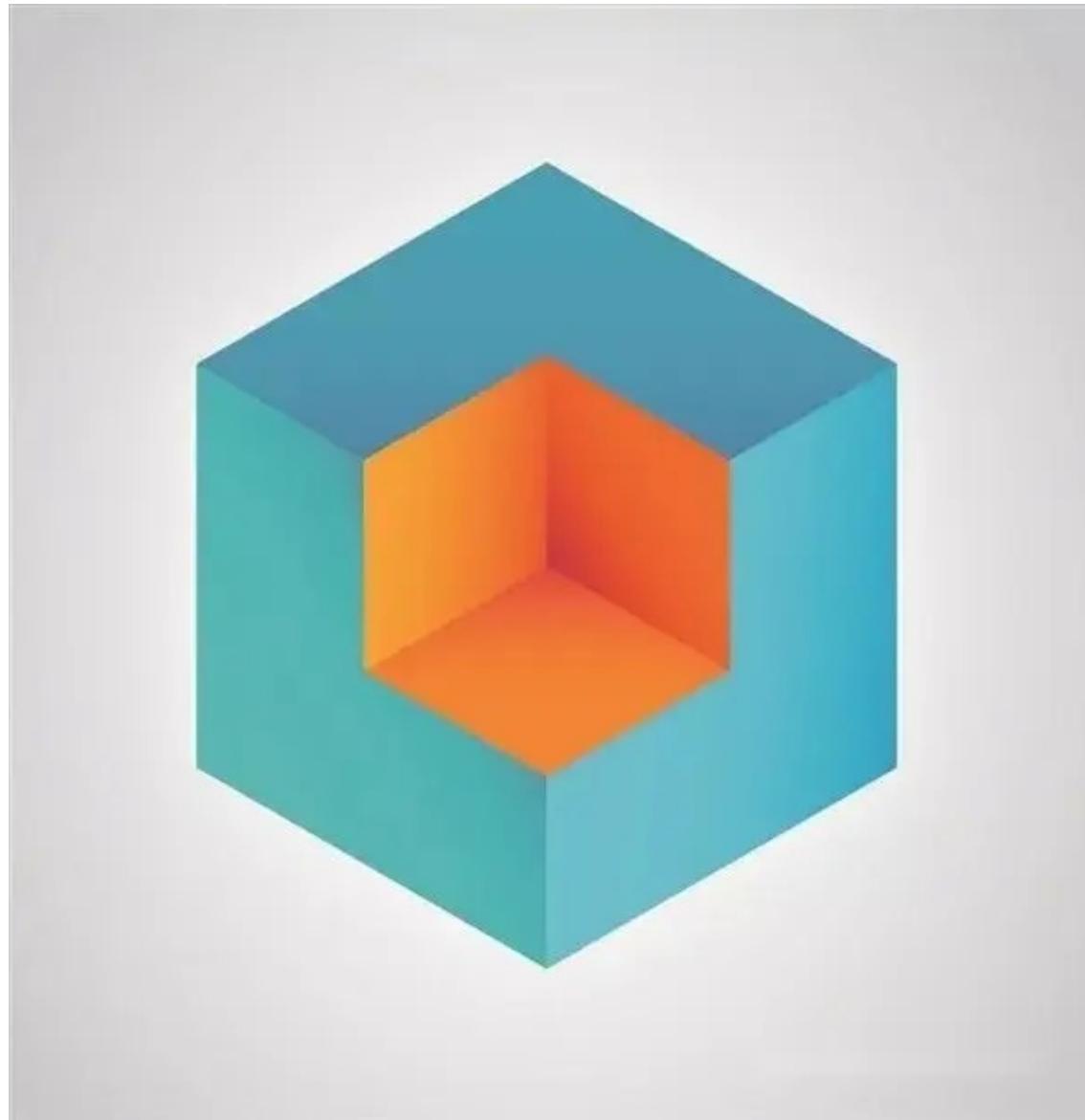
颜色是相对的



视觉错觉



视觉错觉



视觉错觉



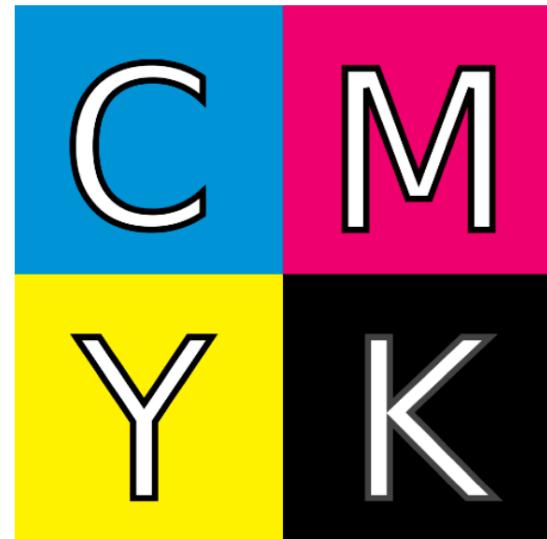
CMYK：一个减法颜色模型

□ Cyan、Magenta、Yellow 和 Key

□ 减法颜色模型

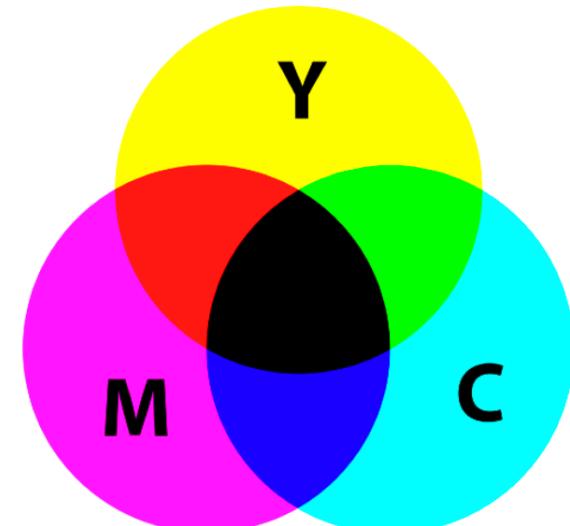
- 混合得越多，颜色就越深

□ 广泛用于印刷



□ 问题：

- 既然混合 C, M 和 Y 能够得到 K,
为什么模型还需要 K?





中山大學 软件工程学院
SUN YAT-SEN UNIVERSITY SCHOOL OF SOFTWARE ENGINEERING

谢谢

陈壮彬
软件工程学院
chenzhb36@mail.sysu.edu.cn