

# 色度学基本概念

赵福利

2019年3月21日



## 颜色的定义

- **美国光学学会 (Optical Society of America) 色度学委员会：**颜色是除了空间的和时间的不均匀性以外的光的一种特性，即光的辐射能刺激视网膜而引起观察者通过视觉而获得的景象。
- **我国国家标准GB5698-85：**颜色是光作用于人眼引起除形象以外的视觉特性。



## 一、颜色的视觉特性

### ● 视觉二重性(Duality of Vision)

#### ➤ 明视觉(Photopic Vision)：

物体细节、红黄绿蓝等彩色

#### ➤ 暗视觉(Scotopic Vision)：

物体轮廓、无色或白灰黑等中性色

## ● 颜色视觉的生理学基础

### ➤ 不同感光细胞执行不同视觉功能

暗视觉：杆状细胞

明视觉：锥状细胞

### ➤ 视网膜上感光细胞分布不均匀

锥状细胞：主要分布于中央凹附近

杆状细胞：分布于中央凹外围

不同视角下颜色匹配实验结果有差异

### ➤ 不同波长光刺激下视觉系统感光程度不同

## ● 颜色视觉功能

### ➤ 颜色辨认

正常视觉系统可分辨各种颜色；  
对不同波长范围内的颜色辨认精度不同。  
478 nm（蓝）、503 nm（绿）、572 nm（黄）

### ➤ 颜色对比

同一视场中相邻区域不同颜色可相互影响；  
每一颜色均在其周围诱导出其补色。

### ➤ 颜色适应

视觉系统对某一颜色适应后，再观察另一颜色时，对后者的颜色视觉会发生变化。

## ● 颜色的属性:

- ✓ **色相 (色调Hue)**: 彩色彼此互相区别的特性, 即红、黄、绿、蓝、紫等。
- ✓ **明度 (lightness)**: 物体表面的明亮程度 (即有多少光能从物体进入视觉系统)。
- ✓ **饱和度 (Saturation)**: 颜色的纯洁性, 与颜色的鲜艳度有关。饱和度越高, 颜色越纯。可见光谱中的各种单色光是最饱和的彩色。

## 四、颜色混合规律

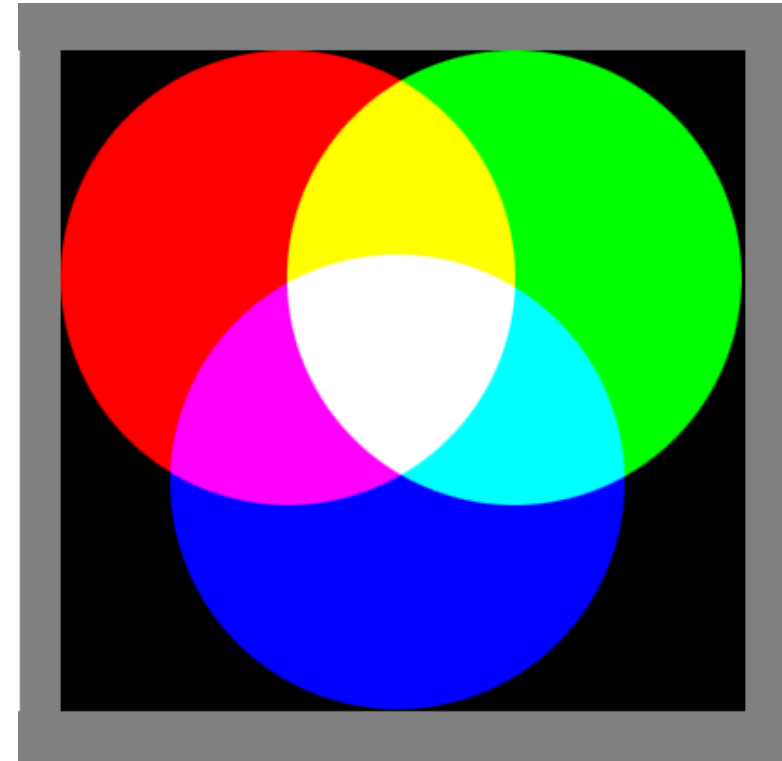
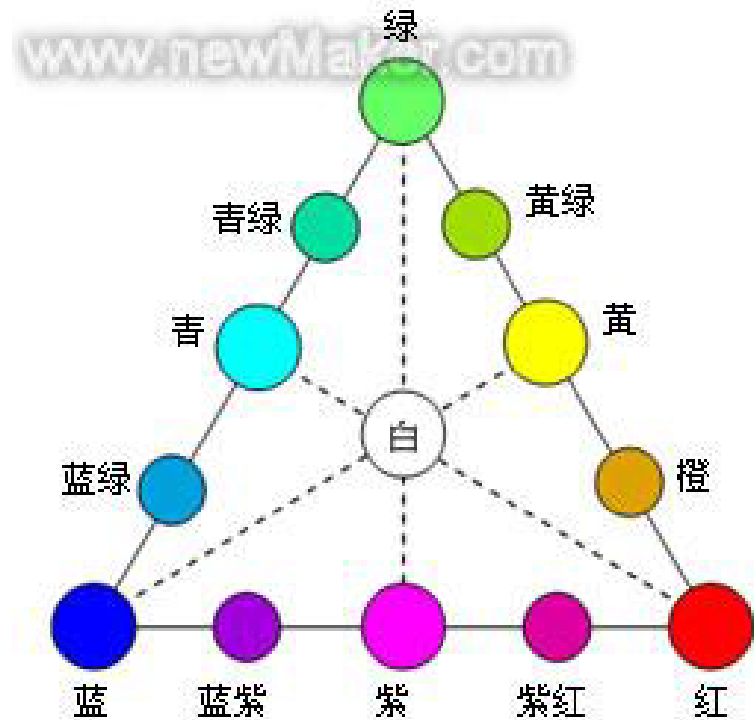
- 加法混色与减法混色;
- Grassmann 颜色混合定律



# ● 加法混色与减法混色

## 加法混色

光谱中的任何一种颜色的光，都可以找到另一种颜色的光，按一定比例与之混合得到白光，这一对色光称为互补色。如果不是互补色混合，得到的将是它们两者之间的中间色。实践证明，所有颜色都可以由红、绿、蓝三基色以适当比例混合得到（RGB颜色模式）。三基色的选择应使得其中任何一个都不能由其它两个混合产生。



# 加法混色

## ✓ 时序混色法（时间混色）

将两种以上的颜色以40~50 Hz以上的交替频率作用于人眼，利用人眼的视觉惰性形成混色状态。

## ✓ 空间混色法

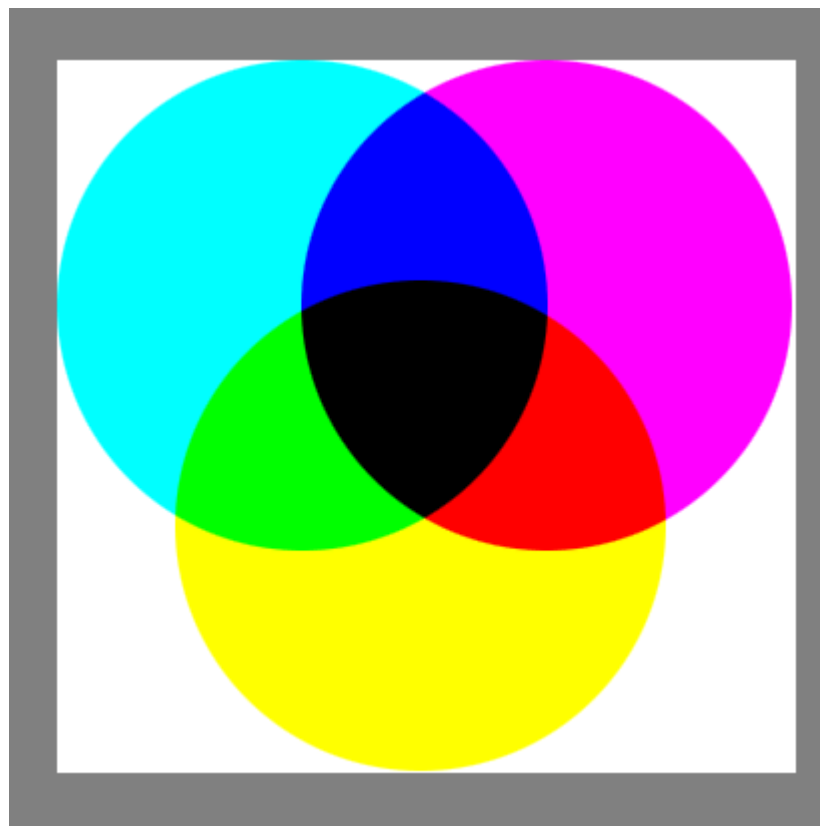
红、绿、蓝三基色组成3个发光点，当它们互相靠得很近，近到人眼不能分辨时，这3个发光点便在人眼中产生混色效应。

## ✓ 生理混色法

当两只眼睛同时分别观看不同的颜色，也会产生混色效应。例如，两只眼睛分别戴上红、绿滤波眼镜，当两眼分别单独观看时，只能看到红光或绿光；当两眼同时观看时，正好是黄色，这就是生理混色法。

# 减法混色

日常生活中颜料、油漆等按不同颜色比例混合得到的颜色属于减法混色。因为颜料和油漆等之所以显色是因为它们吸收了某些特定波长的光，而将它们混合起来相当于增加了被吸收的光。减法混色中的三基色是黄(Yellow)、品红(紫)(Magenta)和青(Cyan)（CMYK颜色模式）。



## 减法混色的一些规律

黄 = 白 - 蓝

品红 = 白 - 绿

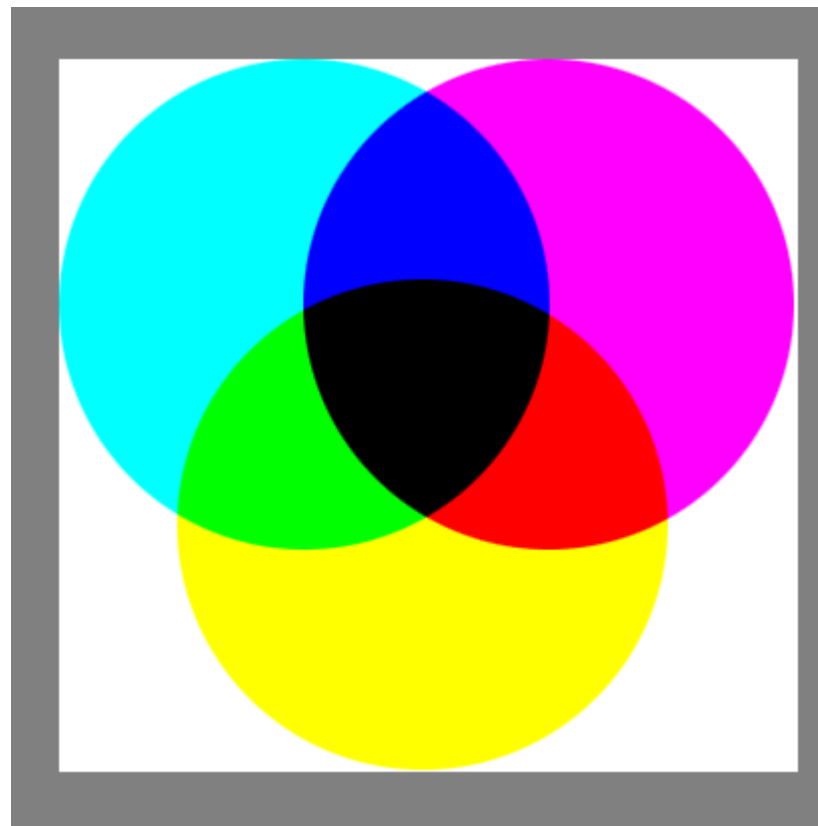
青 = 白 - 红

黄 + 品红 = 白 - 蓝 - 绿 = 红

黄 + 青 = 白 - 蓝 - 红 = 绿

品红 + 青 = 白 - 绿 - 红 = 蓝

黄 + 品红 + 青 = 白 - 蓝 - 绿 - 红 = 黑



# Grassmann 颜色混合定律 (加法混色)

① 人类视觉仅能分辨颜色的明度、色调与饱和度等三种外貌特征的变化。

② 在由二个成分组成的混合色中，若一个成分连续变化，则混合色的外貌亦连续变化。

**补色定律：**若某一颜色与其补色以适当比例混合，便产生白色和灰色。如果按照别的比例混合，则产生近似于比重较大的颜色的非饱和色；

**中间色定律：**任意两种非补色混合，则产生一中间色，其色调决定于原二颜色的相对数量，其饱和度决定于原二颜色在色调顺序上的远近程度。

③ 颜色外貌相同的光，无论其光谱组成是否相同，其在颜色混合中具有相同效果，即色视觉上相同的颜色在混色中是等效的。

**颜色代替定律：**若颜色 A 与 B 等效 ( $A = B$ )，颜色 C 与 D 等效 ( $C = D$ )，则颜色 A 与 C 混合等效于颜色 B 与 D 混合 ( $A + C = B + D$ )，即等效色混合后仍等效(现代色度学基础)。

④ 混合色总亮度等于组成混合色的原各颜色的亮度总和(亮度相加定律)。

## 五、CIE标准表色系统

- 颜色匹配实验;
- CIE1931- $RGB$ 系统;
- CIE1931- $XYZ$ 系统;
- CIE1964系统;



## ● 颜色的数字化

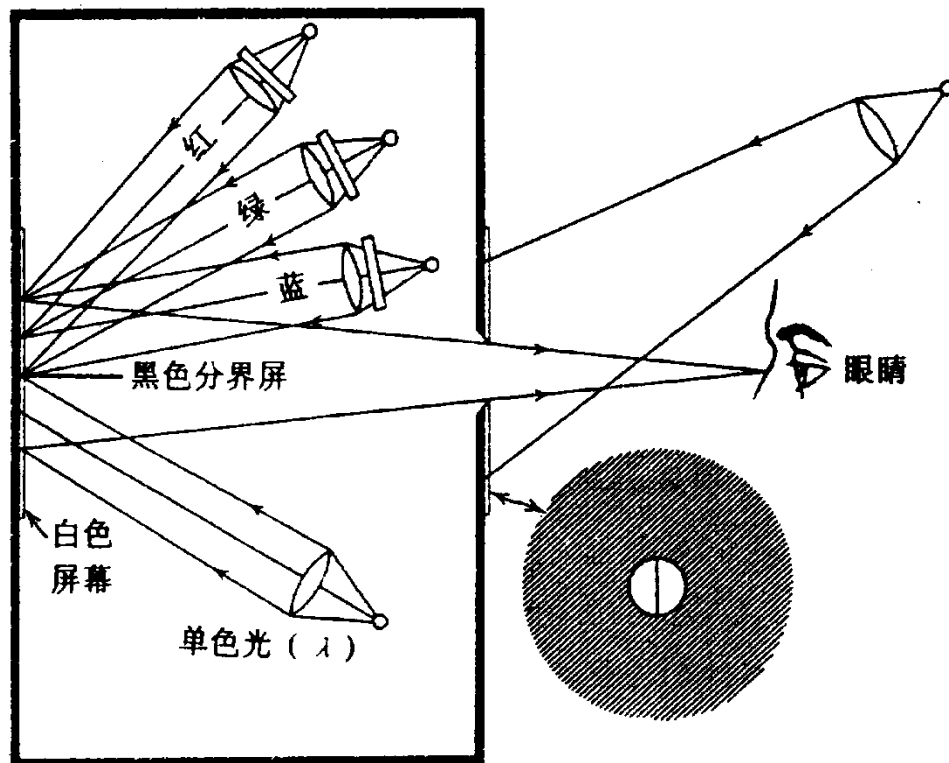
◆ 物体颜色是视觉器官对光刺激的反应，如何将观察者的颜色感觉数字化？

◆ 颜色视觉由三色产生，可以认为所有颜色都由三原色混合产生，以三原色的数量表示颜色的量。

◆ CIE标准色度学系统是以颜色匹配实验为出发点建立起来的。用组成每种颜色的三原色数量来定量表达颜色。

# ● 颜色匹配实验

颜色匹配实验是色度学中最基本的心理物理学实验，是利用色光的相加混色来实现的。最初的标准选择2° 视场进行。这实验是颜色定量化的基础。



- **同色异谱:**  
光谱组成不同而视觉等效
- **原色选择原则:**  
各原色中任一色无法由其余原色相加混合得到

- **最优三原色:**

红(R) - 700.0 nm

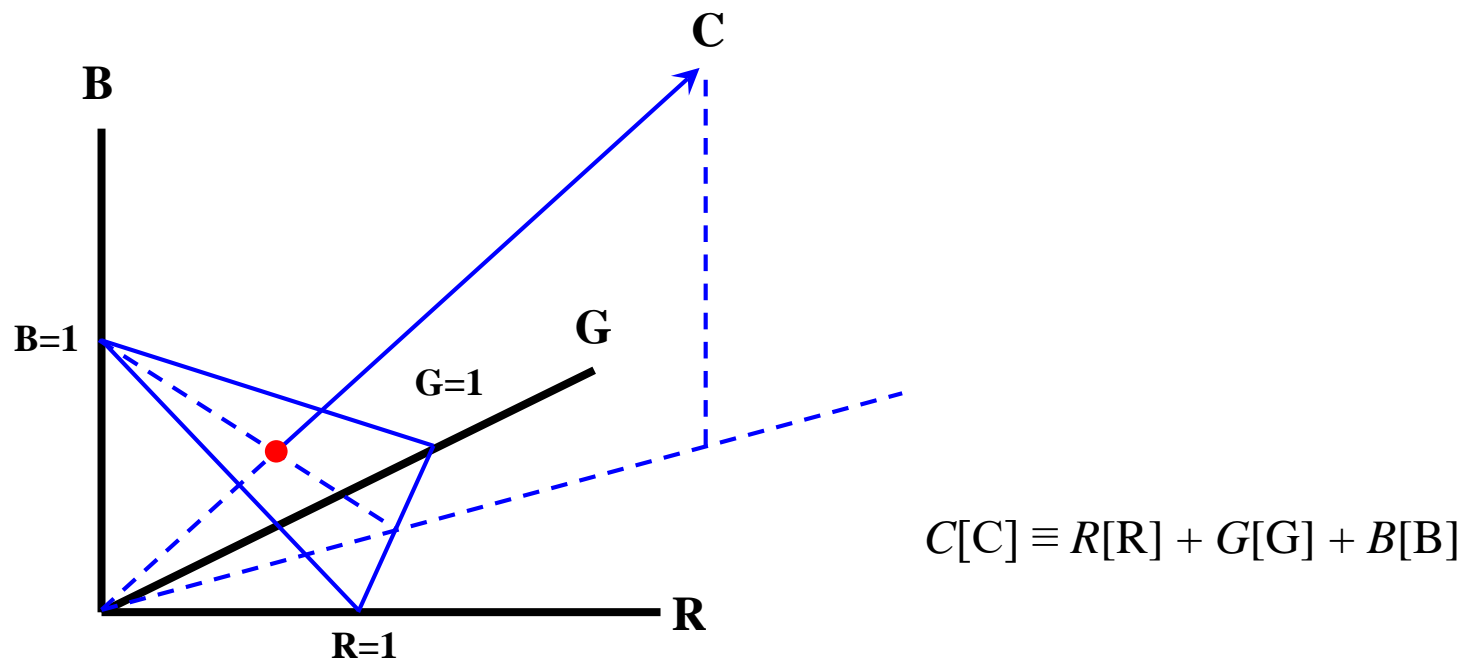
绿(G) - 546.1 nm

蓝(B) - 435.8 nm

- **颜色匹配方程**

$$C[C] \equiv R[R] + G[G] + B[B]$$

- 颜色匹配方程的矢量表示形式



- 颜色匹配恒常律

两个视觉上相互匹配的颜色，尽管处在不同条件下，两个颜色仍始终保持匹配，即不管颜色周围的环境如何变化，或者人眼已经对其他色光适应后再来观察，视场中两种颜色始终保持匹配。

## ● 颜色的三刺激值

在颜色匹配实验中，与待测颜色达到色匹配时所需要的三原色的数量，称为该待测颜色的三刺激值。也就是颜色匹配方程里面的R、G、B值。选定三原色后，任一种颜色与一组R、G、B数值相对应，颜色感觉可以通过三刺激值来定量表示。任意两种颜色，只要它们的三刺激值相同，则它们所引起的视觉颜色效果是一样的。

$$C[C] \equiv R[R] + G[G] + B[B]$$

$$C=R+G+B$$

### 三原色亮度系数：色度学单位

三刺激值采用色度学单位，其确定方法是：选定一个特定的白光，然后调节三原色的数量使之相加混合与该标准白光达到视觉匹配，此时的三原色数量即确定为各自的色度学单位。

$$[R] = X_R \text{ lm}$$

$$[G] = Y_R \text{ lm}$$

$$[B] = Z_R \text{ lm}$$

$$R = F_R/X_R$$

$$G = F_G/Y_R$$

$$B = F_B/Z_R$$

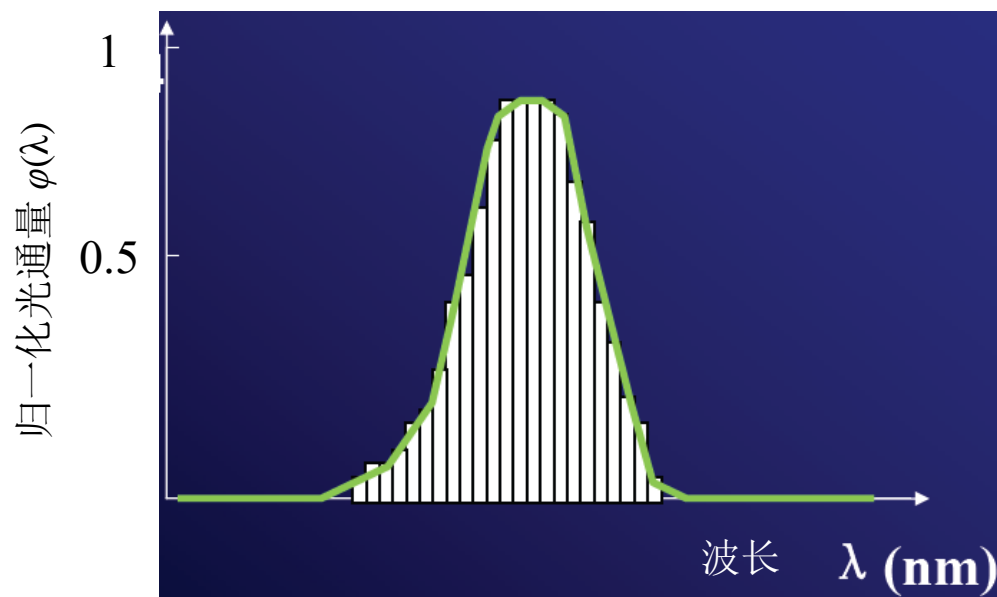
## ● 光谱三刺激值

在颜色匹配实验中，匹配**辐射能量相等**的各种单色光所需要的三刺激值，用符号  $\bar{r}$ ,  $\bar{g}$ ,  $\bar{b}$  表示。光谱三刺激值又称为颜色匹配函数，它的数值取决于人眼的视觉特性。光谱三刺激值是颜色色度计算的基础。

## ● 三刺激值的计算公式

任意色光都是由单色光组成的，如果各单色光的光谱三刺激值预先测得，根据Grassmann混色原理就能计算出该色光的三刺激值来。

$$\begin{cases} R = \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} k\varphi(\lambda)\bar{r}(\lambda)d\lambda \\ G = \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} k\varphi(\lambda)\bar{g}(\lambda)d\lambda \\ B = \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} k\varphi(\lambda)\bar{b}(\lambda)d\lambda \end{cases}$$



## ● 色度坐标

合成一个颜色时，所需要的三原色的刺激值各自在三个刺激值总量中的相对比例。用符号 $r$ ， $g$ ， $b$ 表示。

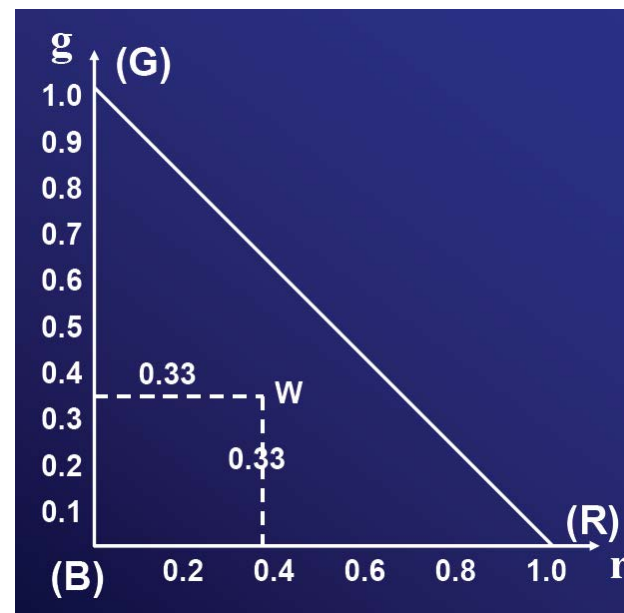
$$r = \frac{\bar{R}}{\bar{R} + \bar{G} + \bar{B}}$$

$$g = \frac{\bar{G}}{\bar{R} + \bar{G} + \bar{B}}$$

$$b = \frac{\bar{B}}{\bar{R} + \bar{G} + \bar{B}}$$

从色度坐标的定义可以看出， $r + g + b = 1$ 。因此色度坐标实际只有两个独立变量。标准白光的色度坐标为 $r = g = b = 1/3 = 0.33$ ；

以色度坐标表示的平面图称为色度图，其顶点代表三原色点，只需给出 $r$ 和 $g$ 两个坐标就可以确定任意颜色在色度图上的位置。色度图实际上就是颜色合成矢量表示里面的单位平面。 $r + g + b = 1$ 。





## ● CIE1931-RGB 系统

用三刺激值来定量描述颜色是一种可行的方法。为了测得物体颜色的三刺激值，首先必须研究人眼的颜色视觉特性，测出光谱三刺激值。实验证明，不同观察者的视觉特性是有差异的，但是具有正常颜色视觉人的差异是不大的，故有可能根据一些观察者进行的颜色匹配实验，将他们的实验数据加以平均，确定一组匹配等能光谱色所需要的三原色数据，以此来代表人眼的平均颜色视觉特性。1931年英国剑桥举行的CIE第八次会议上，统一了上述实验结果，对测量反射面的照明观测条件进行了标准化，从而建立起了CIE1931标准色度系统，奠定了现代色度学的基础。

- 基于莱特和吉尔德的颜色匹配实验数据实验的观察视场为 $2^\circ$ 以内。
- 二人的实验结果非常接近。
- CIE综合二人的研究成果，统一而成。

# CIE1931-XYZ与CIE1931-RGB系统间的色度坐标变换

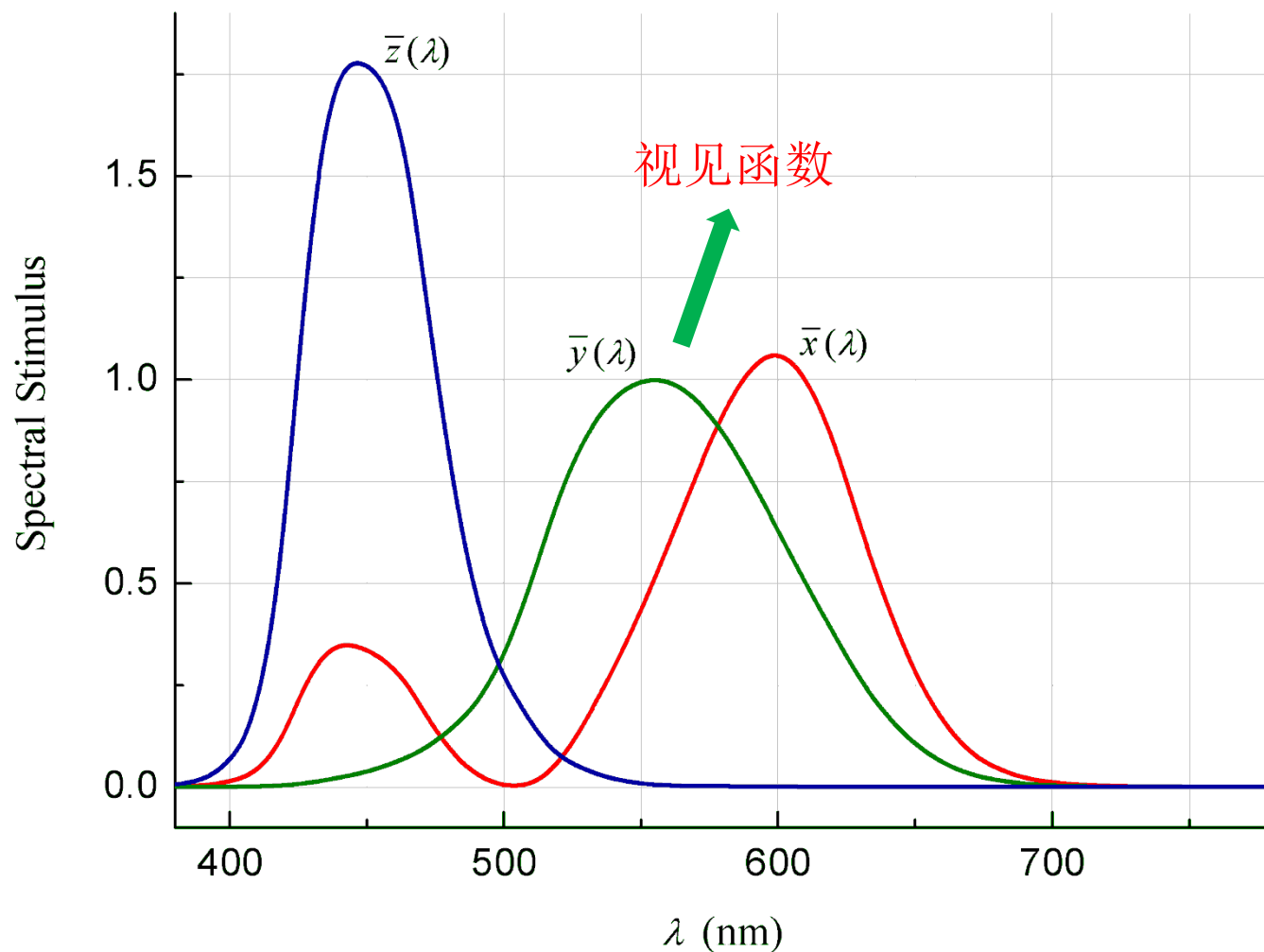
$$\begin{cases} X = 0.490002R + 0.309997G + 0.200001B \\ Y = 0.176980R + 0.812379G + 0.010641B \\ Z = 0.000000R + 0.009983G + 0.990016B \end{cases}$$

$$\begin{cases} x = \frac{X}{X + Y + Z} \\ y = \frac{Y}{X + Y + Z} \\ z = \frac{Z}{X + Y + Z} \end{cases}$$

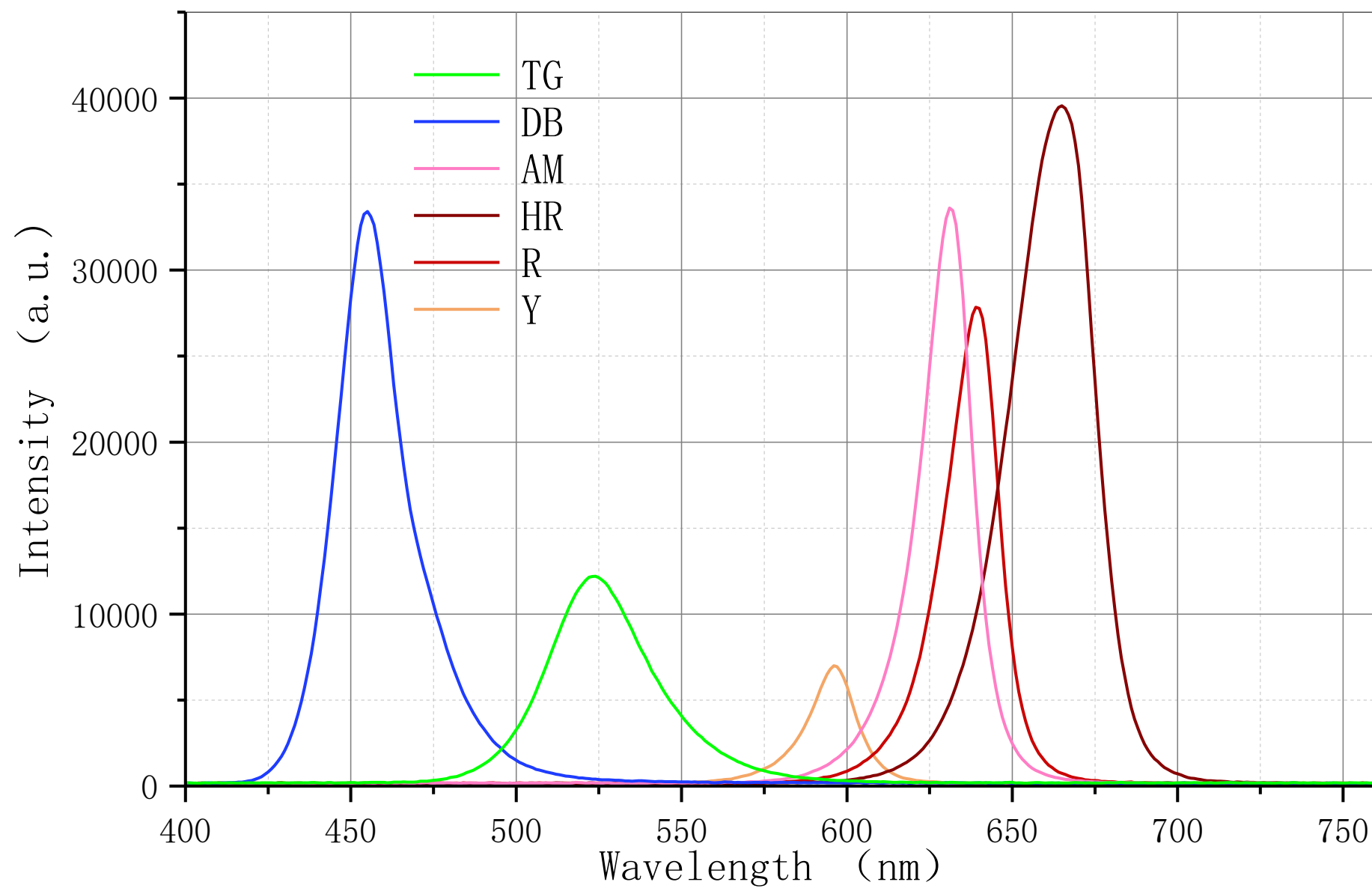
$$\begin{cases} x(\lambda) = \frac{0.490002r(\lambda) + 0.309997g(\lambda) + 0.200001b(\lambda)}{0.666982r(\lambda) + 1.132359g(\lambda) + 1.200658b(\lambda)} \\ y(\lambda) = \frac{0.176980r(\lambda) + 0.812379g(\lambda) + 0.010641b(\lambda)}{0.666982r(\lambda) + 1.132359g(\lambda) + 1.200658b(\lambda)} \\ z(\lambda) = \frac{0.000000r(\lambda) + 0.009983g(\lambda) + 0.990016b(\lambda)}{0.666982r(\lambda) + 1.132359g(\lambda) + 1.200658b(\lambda)} \end{cases}$$

平面影射变换

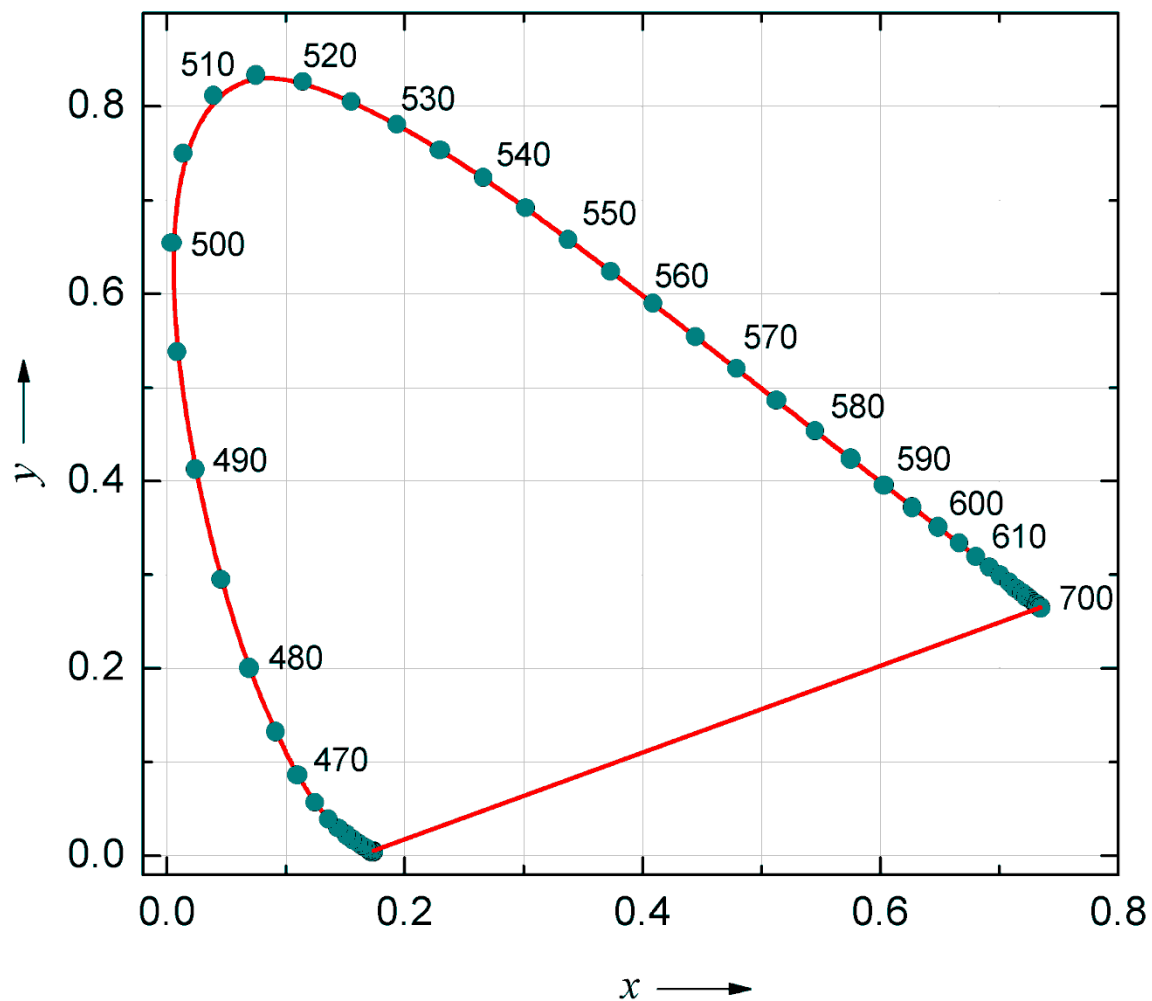
# CIE1931-XYZ系统间的光谱三刺激值



CIE1931-XYZ 标准色度观察者光谱三刺激值曲线



# CIE1931-XYZ系统间的色度图



CIE1931-XYZ 色度图