



印刷色彩学

蔡圣燕

天津科技大学包印学院

2013年3月

3月1日：印度荷丽节（holi） （洒红节、色彩节）

印度三大节日之一，源于古人期盼丰收的活动，并迎接春天的到来。人们相互泼洒彩色颜料。



《印刷色彩学》课程解构



3

CIE色度学体系

如何描述千变万化的颜色？



颜色数字化的需要



目前的解决方案提供者

国际照明委员会——专门研究光与照明问题的国际组织

英语：International Commission on Illumination

法语：Commission Internationale de l'éclairage

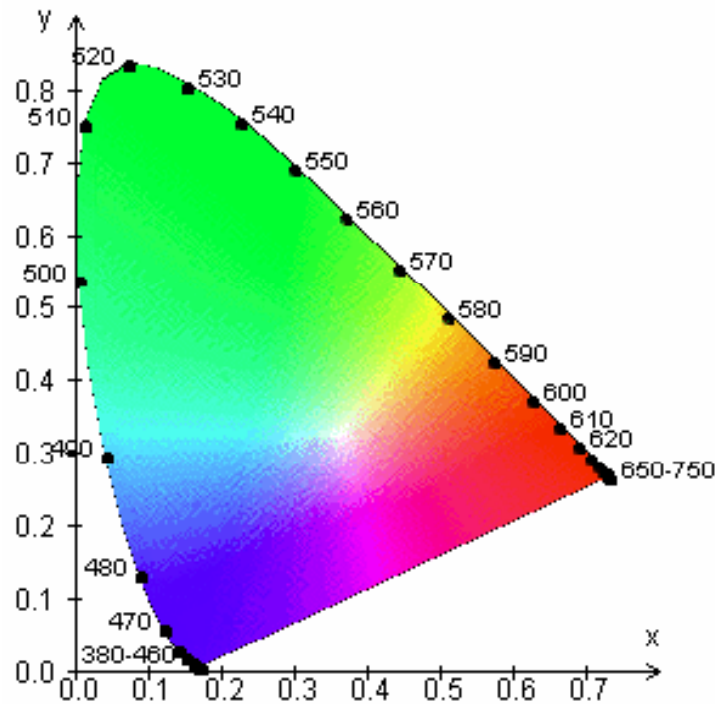
法语简称CIE。

颜色是其主要研究方向之一。

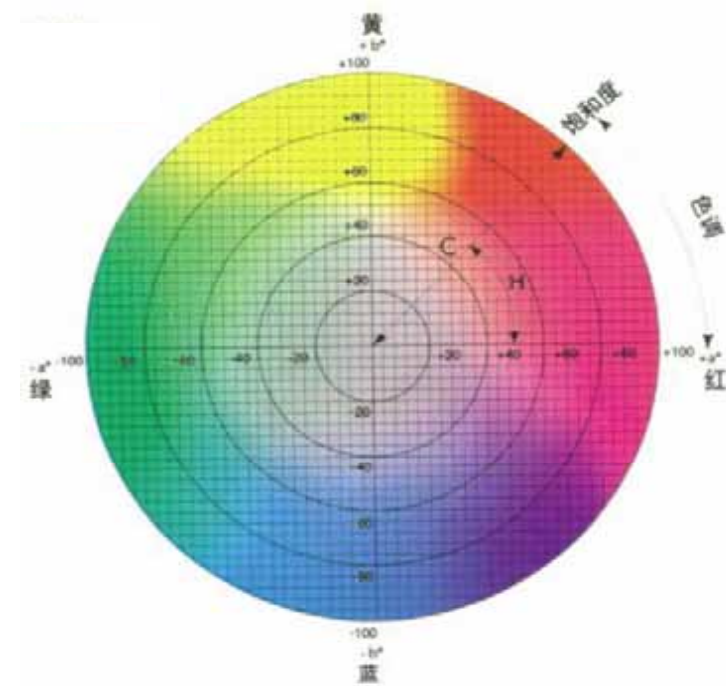


CIE成果

CIE标准色度系统是近代色度学的基本组成部分，是颜色测量、计算和表示的基础。

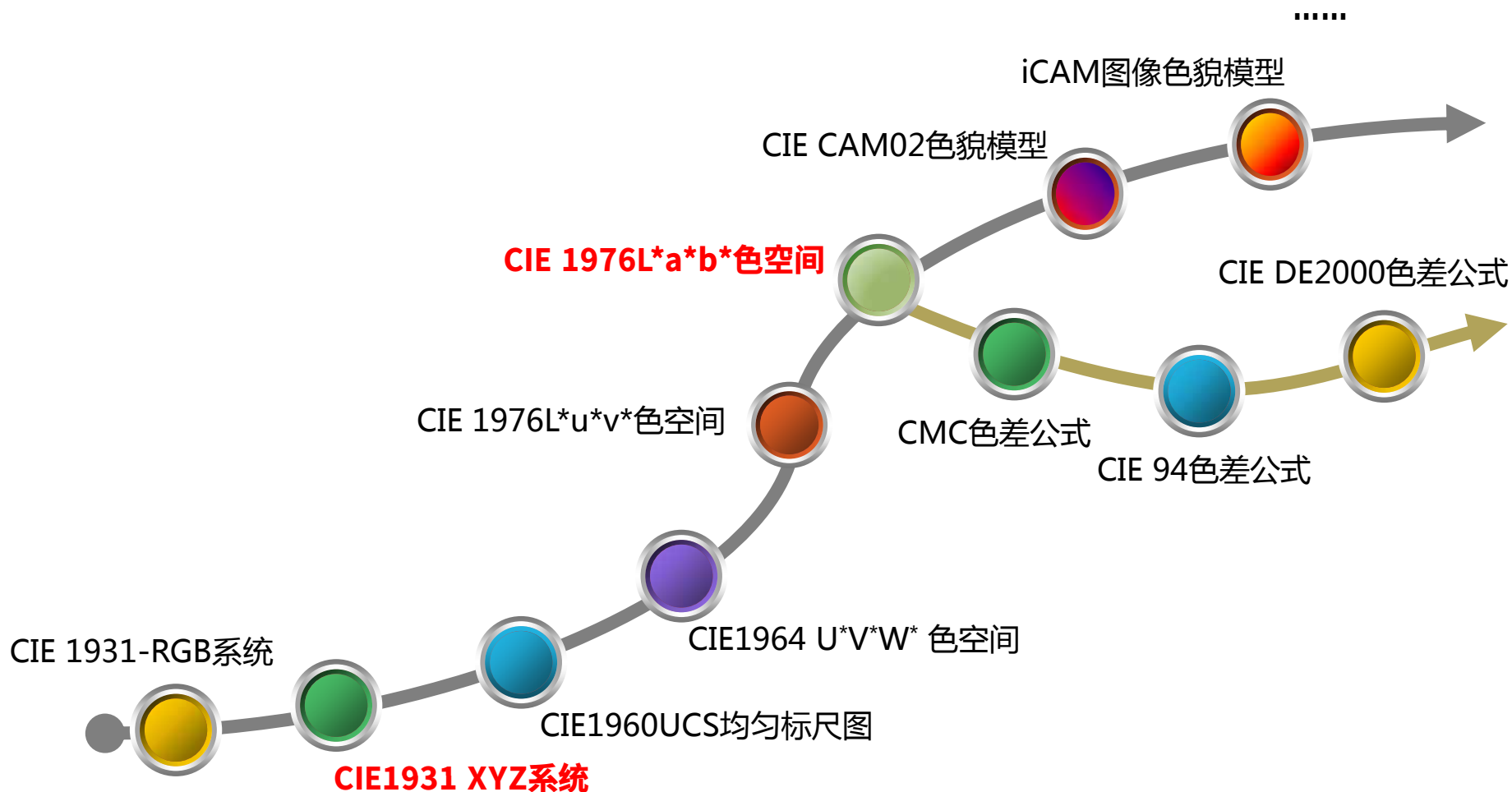


CIE 1931标准色度系统



CIE LAB 均匀色空间

CIE 成果发展轨迹



颜色表示法分类

混色系统表色法

- 混色系统表色法是基于三原色能够混合匹配出各种不同颜色所归纳的系统。
- 例：1931 CIE XYZ 色度系统、密度计测色法

显色系统表色法

- 显色系统表色法是根据色彩的外貌，按直观颜色视觉的心理感受，对颜色进行表示。
- 例：CIE LAB 色空间、孟塞尔系统、自然颜色系统

3 CIE色度学体系

- 3.1 CIE色度系统理论基础 (理论基础)
- 3.2 CIE1931 标准色度系统 (核心部分)
- 3.3 CIE色度计算方法 (核心部分)
- 3.4 主波长和色纯度
- 3.5 均匀颜色空间 (核心部分)
- 3.6 色差公式的发展
- 3.7 同色异谱

3.1 CIE色度系统理论基础

如何定量表示颜色？

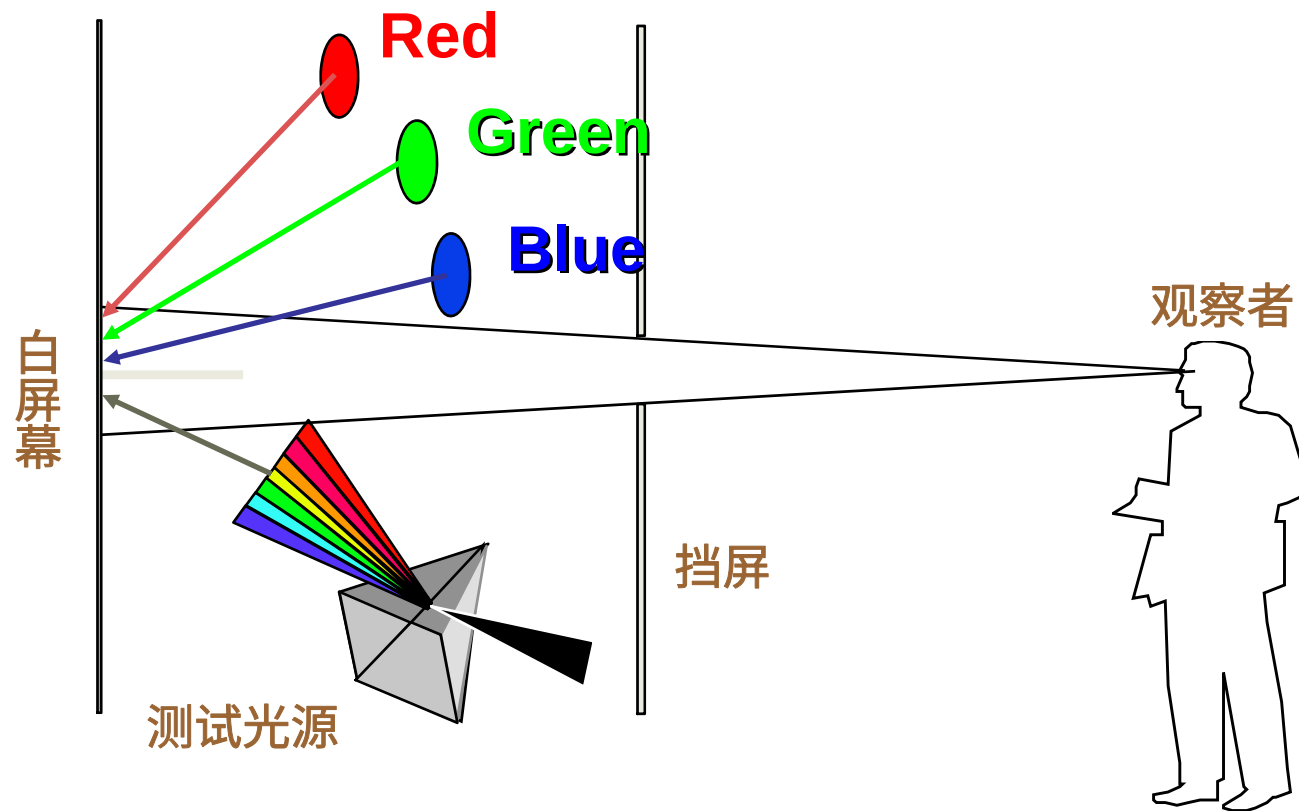


一、颜色匹配实验

根据三色学说，所有颜色都可以由红绿蓝三原色混合产生。

颜色匹配 (Color Matching)：把两种颜色调节到视觉上相同或相等的过程。

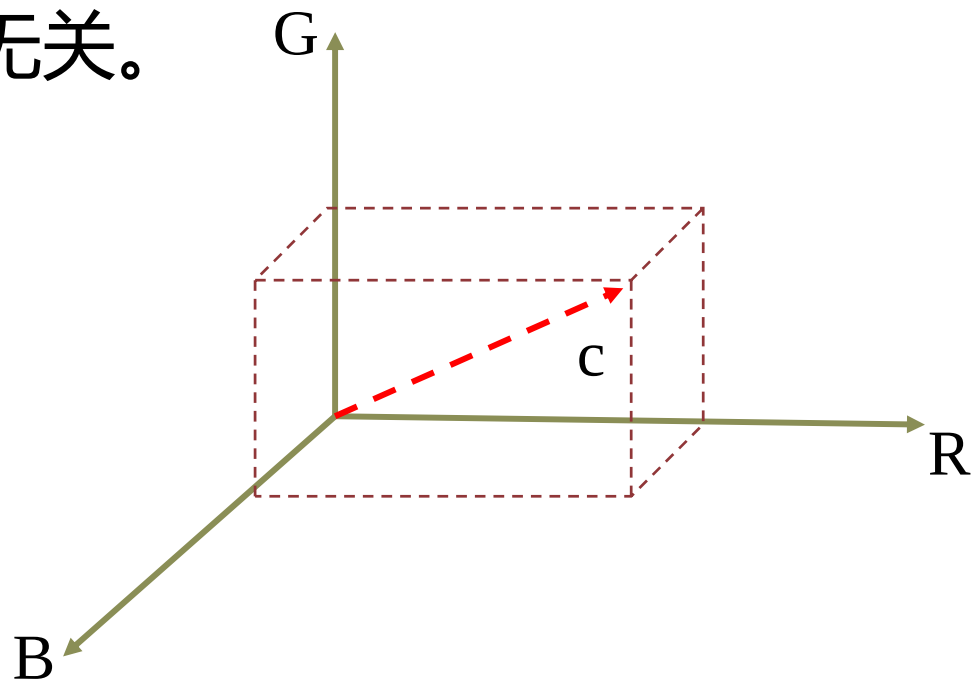
颜色匹配实验



1. 三原色

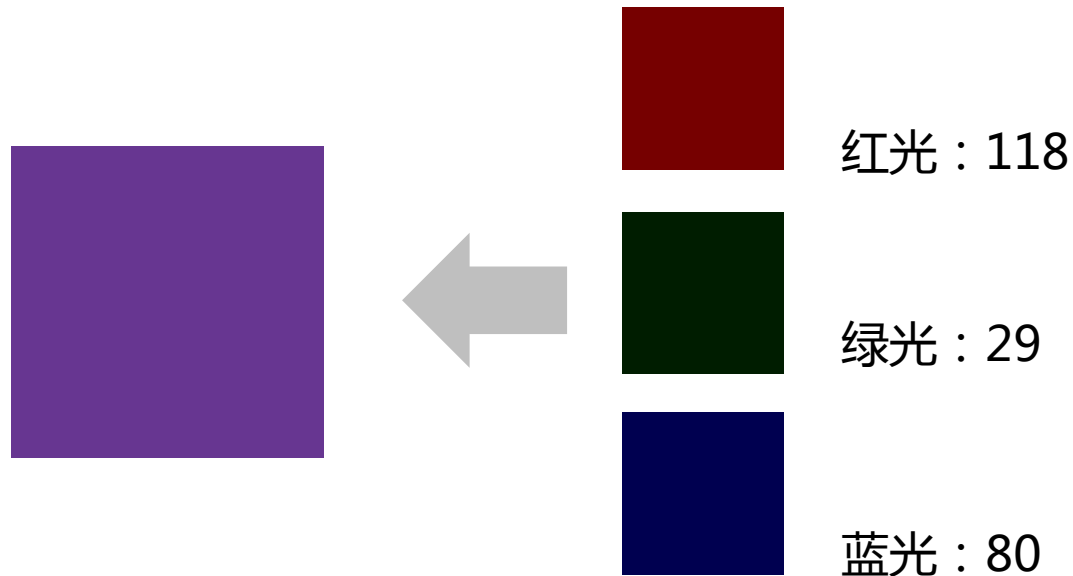
三原色：颜色匹配中，用于混合产生各种颜色的三种基本颜色。

三原色条件：任意一种原色不能由其余两种原色光混合得到，即线性无关。

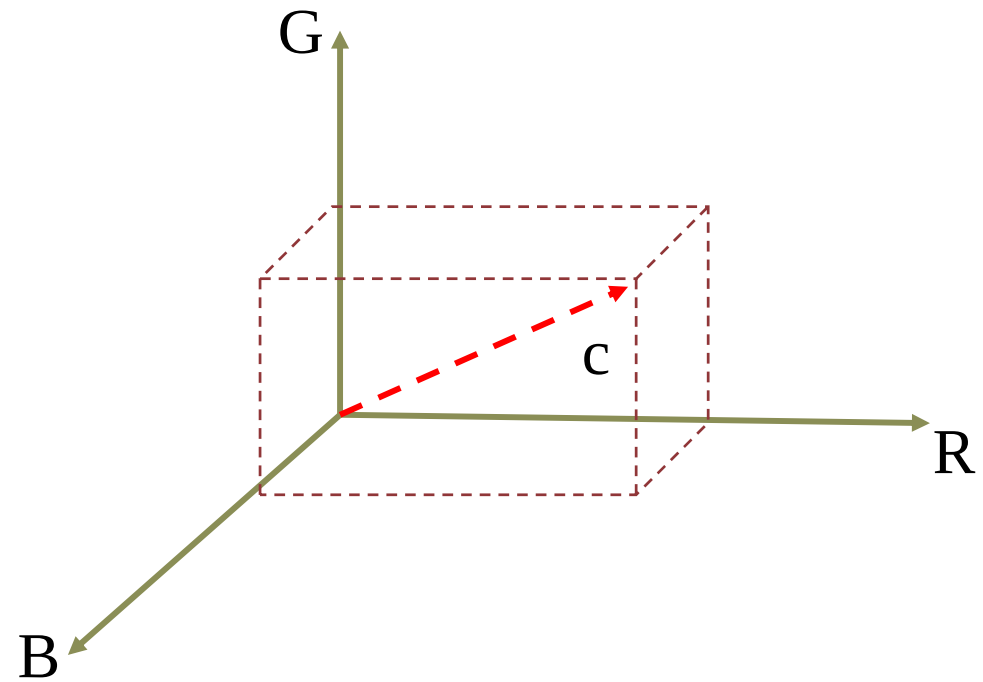


2. 三刺激值

三刺激值：颜色匹配实验中，与待匹配色实现颜色匹配时所需要的三原色数量。



三刺激值空间



3. 颜色方程

在三刺激值空间，颜色可以用一个矢量表示，该矢量对应的方程就称为颜色匹配方程，简称颜色方程。

用(R)、(G)、(B)表示三原色，当与颜色 C 匹配时，可以表示为：

$$C(C) \equiv R(R) + G(G) + B(B)$$

矢量长度

矢量方向

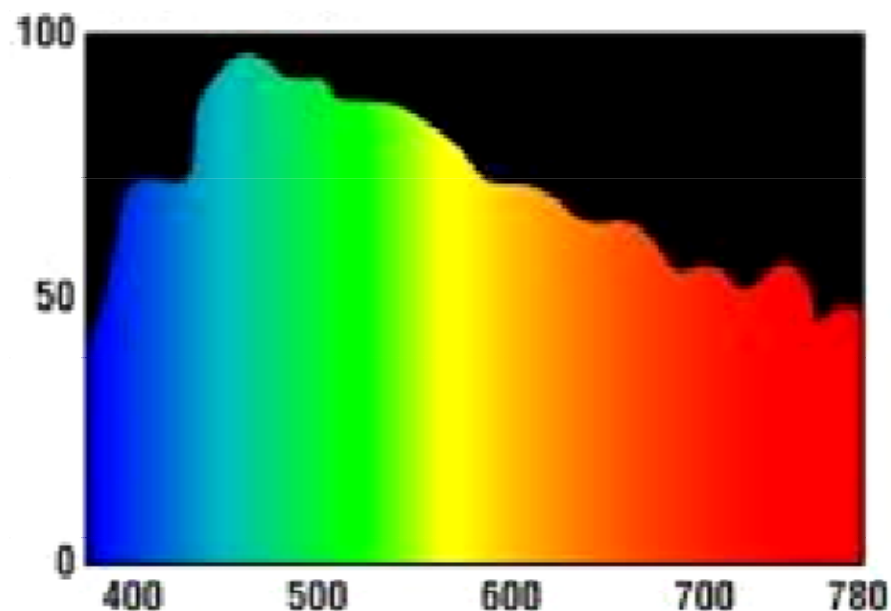
颜色相互匹配

三刺激值

单位矢量

问题：如何计算任意颜色的三刺激值？

不同颜色的光谱能量分布不同。



二、色光混合规律（格拉斯曼定律）

若两个色光C1和C2，

$$(C1) \equiv R1(R) + G1(G) + B1(B)$$

$$(C2) \equiv R2(R) + G2(G) + B2(B)$$

则它们的混合色C：

$$(C) \equiv R(R) + G(G) + B(B)$$

$$\equiv (C1) + (C2)$$

$$\equiv R1(R) + G1(G) + B1(B)$$

$$+ R2(R) + G2(G) + B2(B)$$

接下页.....

色光混合计算

因此：

$$R = R1 + R2$$

$$G = G1 + G2$$

$$B = B1 + B2$$

此公式可以推广到任意多个颜色的混合。

$$R = R1 + R2 + \dots$$

$$G = G1 + G2 + \dots$$

$$B = B1 + B2 + \dots$$

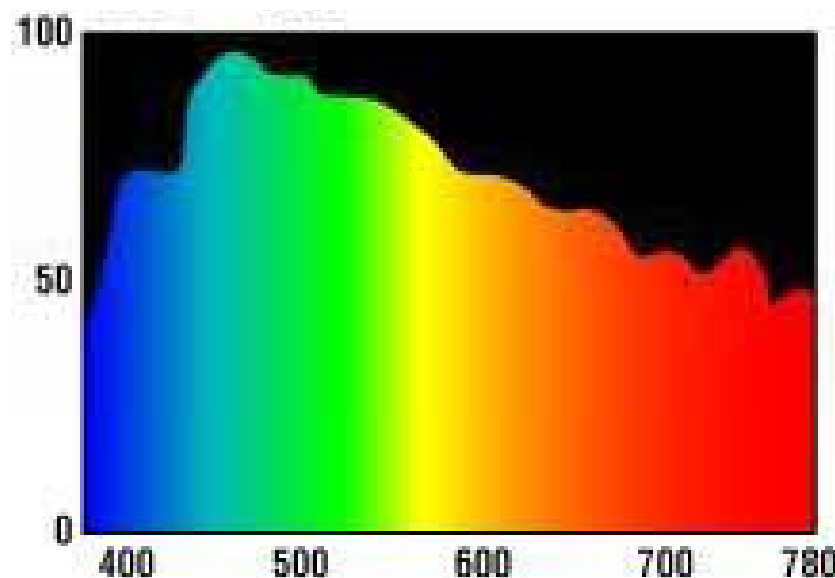
三、任意颜色三刺激值计算思路

因此任意颜色的三刺激值可以通过其各单色光的三刺激值相加得到。

$$R = \sum R(\lambda)$$

$$G = \sum G(\lambda)$$

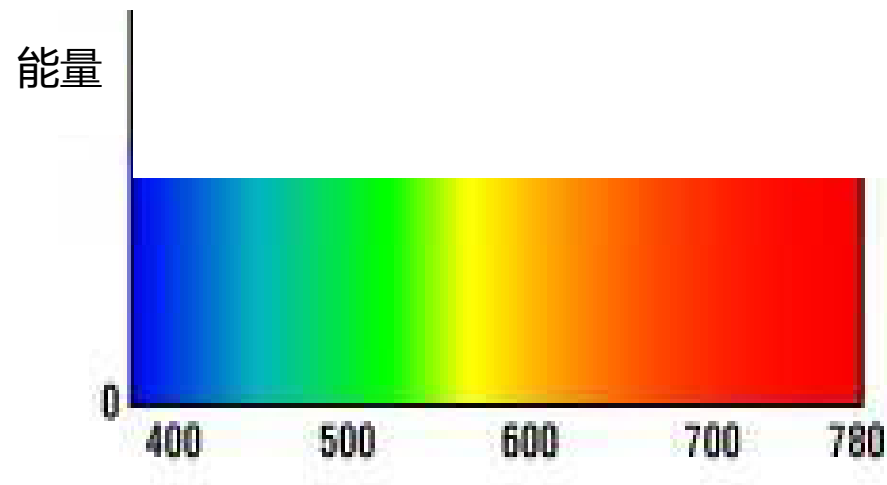
$$B = \sum B(\lambda)$$



那么就**需要知道各单色光的三刺激值**！实际颜色各单色光的能量都不相同，该如何计算其三刺激值？

1. 引入一个重要概念——等能光谱

等能光谱：整个可见光光谱范围内，各波长单色光能量都相等的光谱分布。

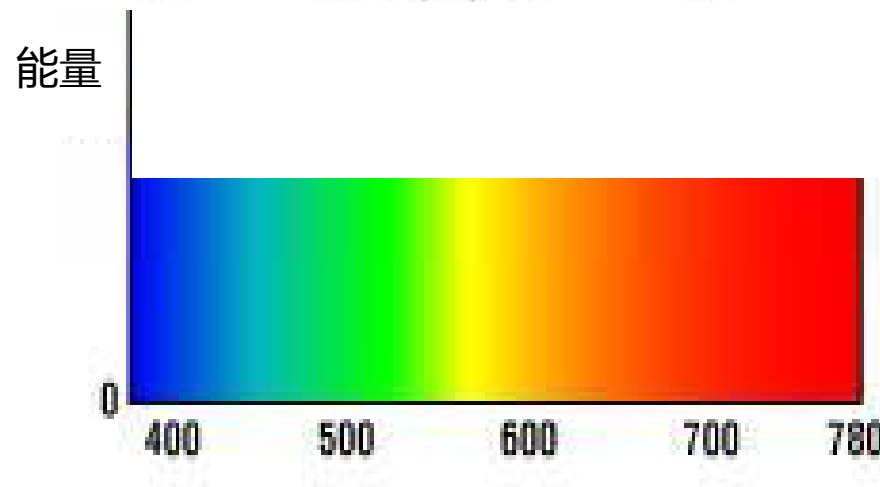
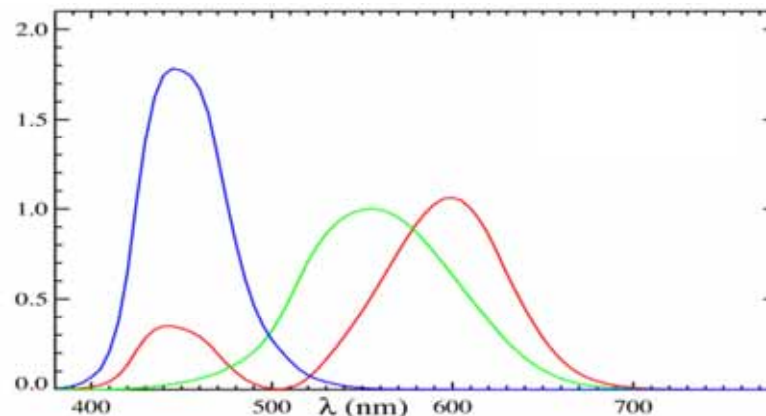


问题：为什么提出“等能光谱”概念？

2. 一套基准数据——光谱三刺激值

光谱三刺激值：匹配等能光谱各单色光所需的三原色数量。

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



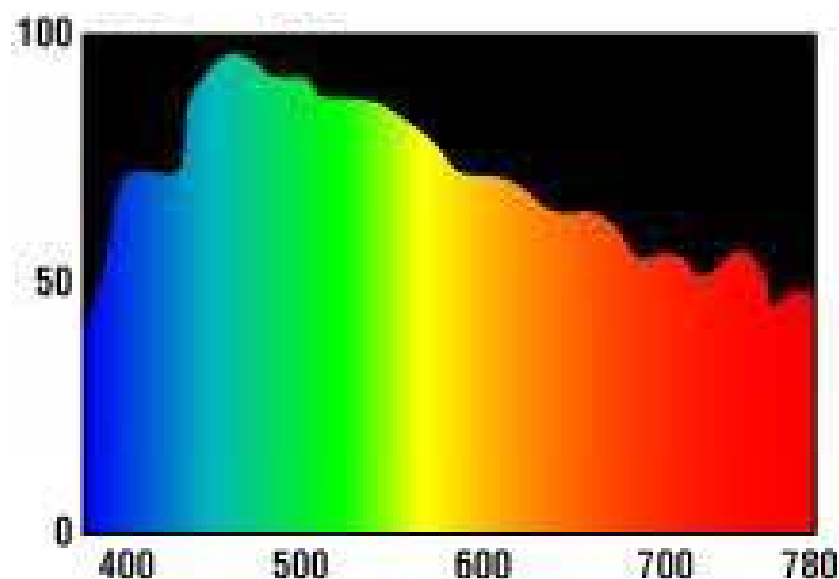
3. 任意单色光三刺激值计算

设任一颜色的相对能量
比例关系为 $\phi(\lambda)$ ，则匹
配各单色光所需的三刺
激值为：

$$\phi(\lambda)\bar{r}(\lambda)$$

$$\phi(\lambda)\bar{g}(\lambda)$$

$$\phi(\lambda)\bar{b}(\lambda)$$



4. 任意颜色三刺激值计算

根据色光相加原理，任意颜色三刺激值就是各单色光三刺激值的混合。

$$R = k \int \phi(\lambda) \cdot \bar{r}(\lambda) \cdot d\lambda$$

$$G = k \int \phi(\lambda) \cdot \bar{g}(\lambda) \cdot d\lambda$$

$$B = k \int \phi(\lambda) \cdot \bar{b}(\lambda) \cdot d\lambda$$

CIE 颜色计算的最基本公式！

三刺激值单位的确定

三刺激值单位可以任意选择，只要保持三原色相对比例即可。

通常方法：匹配标准白光所用的红绿蓝三原色数量为一个单位的(R)、(G)、(B)。

三刺激值为心理物理量，是人眼对颜色的感觉量。感觉量相等，并不意味着能量和亮度相等。

四、色品坐标

很多情况下，人们只关心颜色的彩色特征，而不关心明度，此时就可以用色品坐标来表示。

$$r = R / (R + G + B)$$

$$g = G / (R + G + B)$$

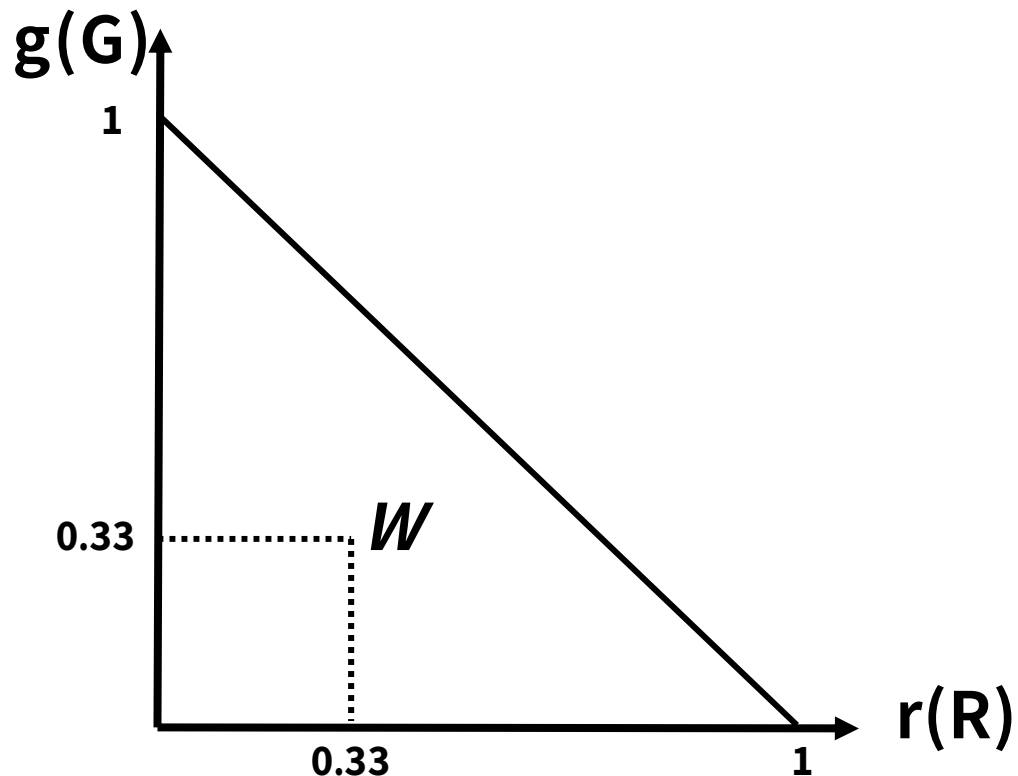
$$b = B / (R + G + B)$$

$$\text{则：} r + g + b = 1$$

色品图

色品图：以色品坐标 r , g 表示的平面图。

美国科学家麦克斯韦首先提出，因此又称为做**麦克斯韦颜色三角形**。



思考题

标准白光的色品坐标是多少？



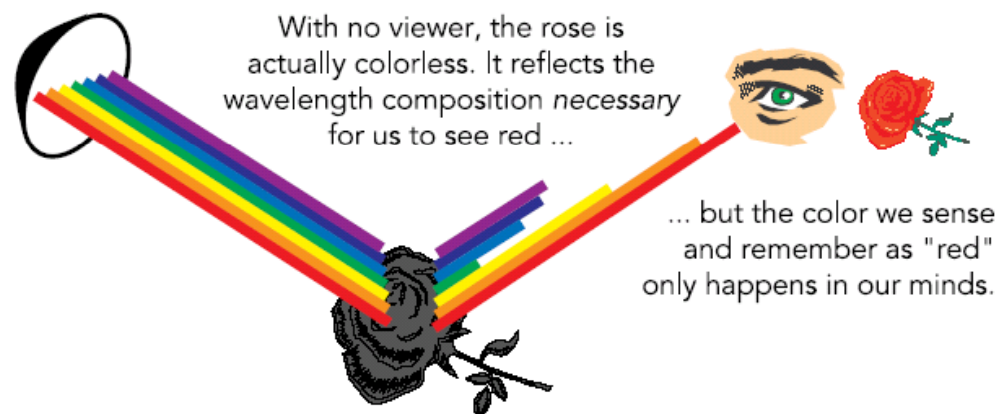
CIE色度系统理论基础

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

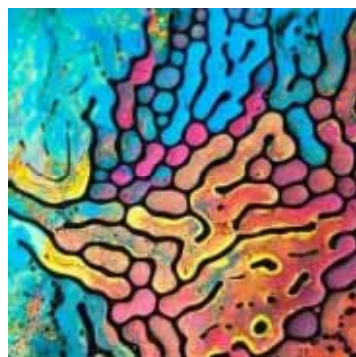
用达到匹配时的三刺激值来表示各种颜色感觉，这就是CIE色度系统的基本出发点，是颜色数字化的方法，也是三色学说的具体体现，代表了眼睛在视网膜阶段的颜色感觉。

一个重要观点

颜色不是客观存在的属性。它不仅取决于外界的光辐射，而且取决于人眼的视觉特性，因此颜色测量与标定必须与人的观察结果相符合才有实际意义。所以需要**通过匹配实验得到光谱三刺激值**作为颜色计算的根据。



新浪微博



@蔡圣燕：我们看到的“颜色”并不是客观存在的东西，而只是大脑对不同波长光波的感觉。“颜色”只存在我们的感觉里。可以认为，“颜色”是人脑在长期进化过程中炼就的一种特异功能——**光波“可视化”功能**，有助于对不同波长光波的识别。人脑太高级了！要知道，很多动物眼里的世界是灰色的，如狗和牛。

3.1 思考题

1. 等能光谱是假想的光谱，有什么意义？
2. 三原色选取的原则？
3. 三刺激值与光谱三刺激值的区别？
4. 三刺激值计算公式的理解！

3.2 CIE标准色度系统

3.2.1 CIE 1931-RGB系统

3.2.2 CIE 1931 标准色度系统

3.2.3 CIE 1964补充色度系统

3.2.1 CIE 1931-RGB系统

基于莱特和吉尔德的颜色匹配实验数据。

二人实验的观察视场都为 2° 以内，且结果非常相似，于是CIE综合二人的研究成果，制定了CIE 1931-
RGB系统。

莱特试验

三原色选择：**650 nm、530 nm、460 nm**

三原色单位的确定方法：

红光和绿光匹配出582.5nm的黄色时，红光和绿光的量为一个单位；用一个单位的绿光与一定量的蓝光匹配出490.0nm的蓝绿光时，此时的蓝光数量为一个单位。

观察者：10名。

吉尔德试验

三原色光：630nm、542nm、460nm，用滤色片产生。

三原色单位的确定方法：

匹配4800K的白色所对应的三原色数量为三原色单位。

观察者：7名。

CIE 1931-RGB色度系统三原色

三原色：700 nm(R)、546.1 nm(G)、435.8 nm(B)

三原色单位的确定方法：

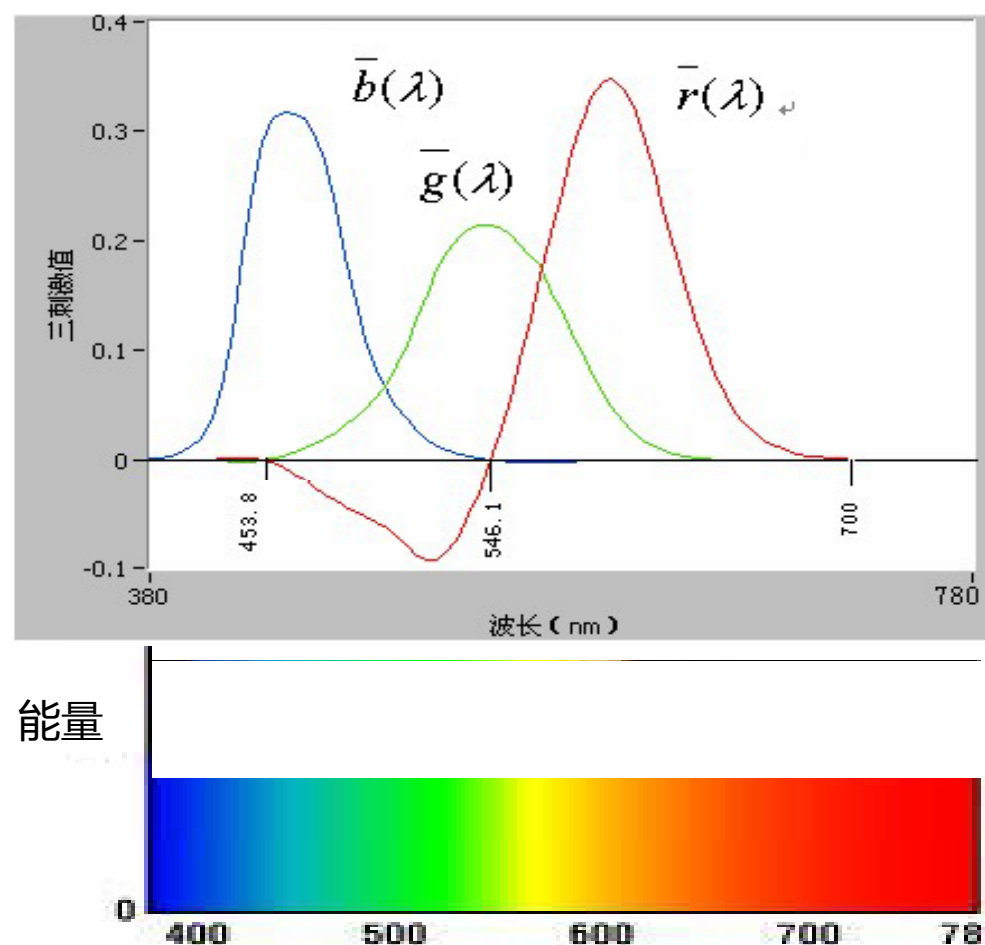
匹配等能白光（E光源）需要的三原色数量。

等能白光色品： $r=g=b=1/(1+1+1)=0.33$

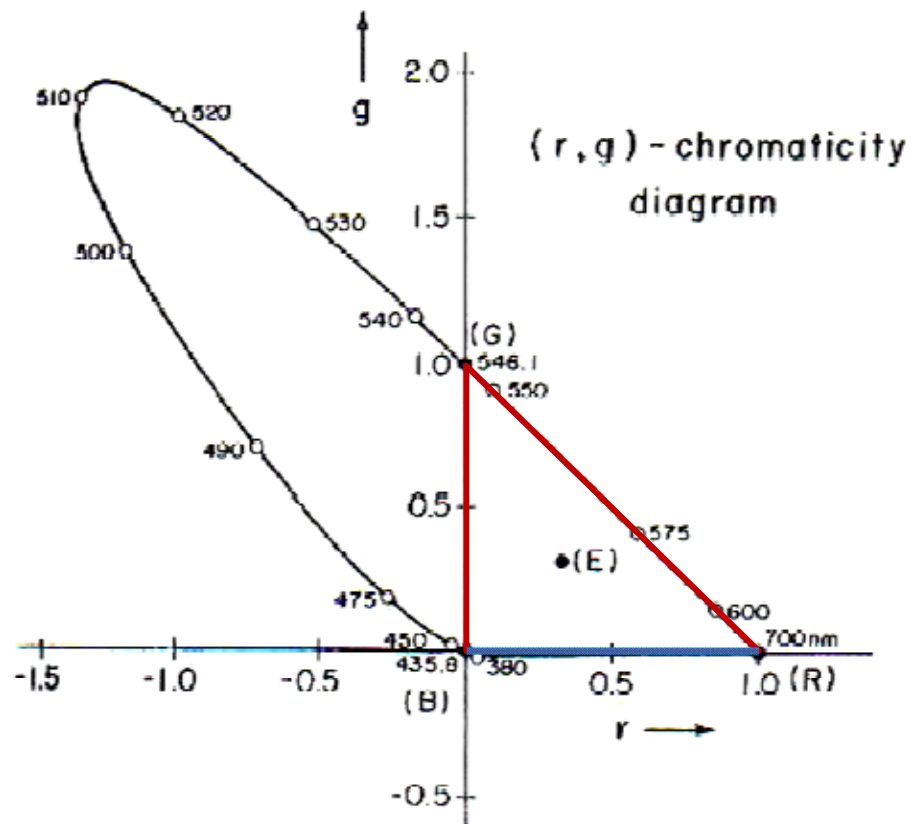
光亮度： $L_r:L_g:L_b=1.000:4.5907:0.0601$

辐亮度： $E_r:E_g:E_b=72.0962:1.3791:1.0000$

CIE 1931-RGB 系统标准色度观察者 (光谱三刺激值曲线)



CIE 1931-RGB系统色品图



1. 色品图中，**光谱轨迹**是一个偏马蹄形曲线。
2. 光谱轨迹很大一部分的坐标值是负值，超出了红色三角形。
3. **光谱轨迹两端连线**（蓝色）没有单色光对应。
4. 光谱轨迹整个区域涵盖了所有可实现的颜色，即真实颜色，包括单色和混合色。

光谱三刺激值出现负值！

对光谱色进行匹配时，由于有些光谱色纯度太高，用三原色匹配无论如何不能直接匹配出，需要用三原色之一加入光谱色，以降低其纯度，才能使混合色与其他两色实现颜色匹配。如：

$$(C) + R(R) \equiv G(G) + B(B)$$

$$\text{则：} (C) \equiv -R(R) + G(G) + B(B)$$

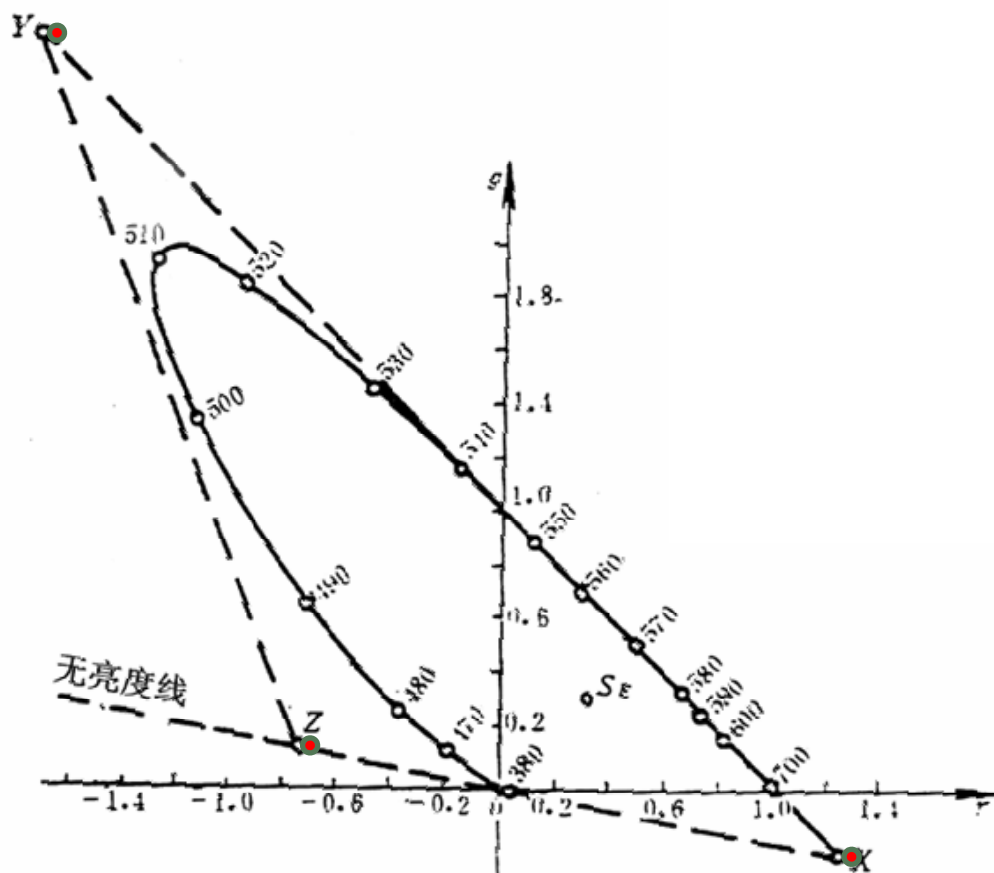
3.2.2 CIE 1931标准色度系统

CIE 1931-RGB 系统刺激值和色品坐标都出现了负值，计算起来不方便，也不易理解。

于是CIE对其进行**数学变换**，用**三个假想的三原色X、Y、Z**建立了一个新的色度系统，称为“**CIE 1931标准色度系统**”或“**CIE 1931-XYZ系统**”。

新的光谱三刺激值称为“**CIE 1931标准色度观察者**”。

坐标变换思路



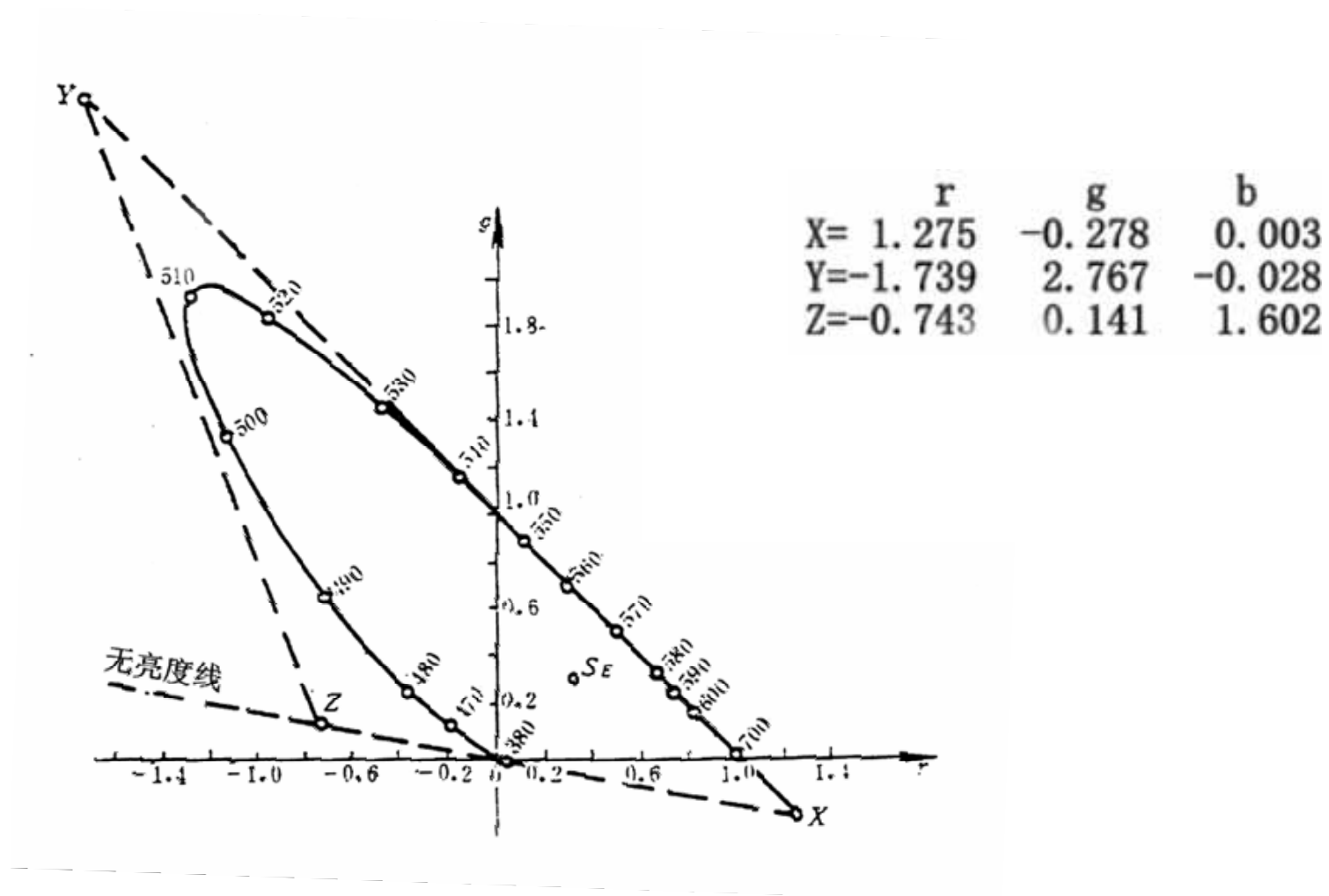
确定X、Y、Z三点（三原色）：

1. XYZ三点形成的三角形完全包围光谱轨迹。
2. XZ直线：无亮度直线($Y = 0$)。X与Z只表示彩色，没有亮度，全部亮度由Y表示。
3. XY直线：700 - 540 nm光谱轨迹近似是一条直线，XY直线与之重合。
4. YZ直线：定义为与光谱轨迹503nm相切的直线

三原色单位的确定方法：

匹配等能白光（E光源）需要的三原色数量为三原色单位。

XYZ三原色在rg 色品图的位置

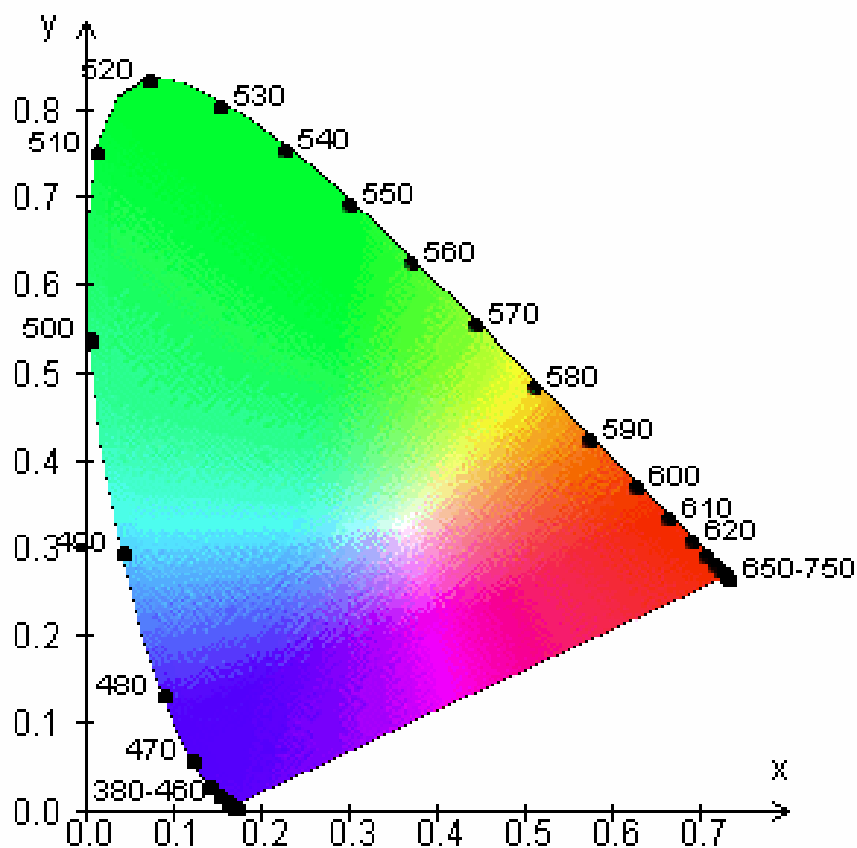


XYZ系统与RGB系统的转换公式

$$\begin{cases} (X) = 2.7689(R) + 1.7517(G) + 1.1302(B) \\ (Y) = 1.0000(R) + 4.5907(G) + 0.0601(B) \\ (Z) = 0.0000(R) + 0.0565(G) + 5.5943(B) \end{cases}$$

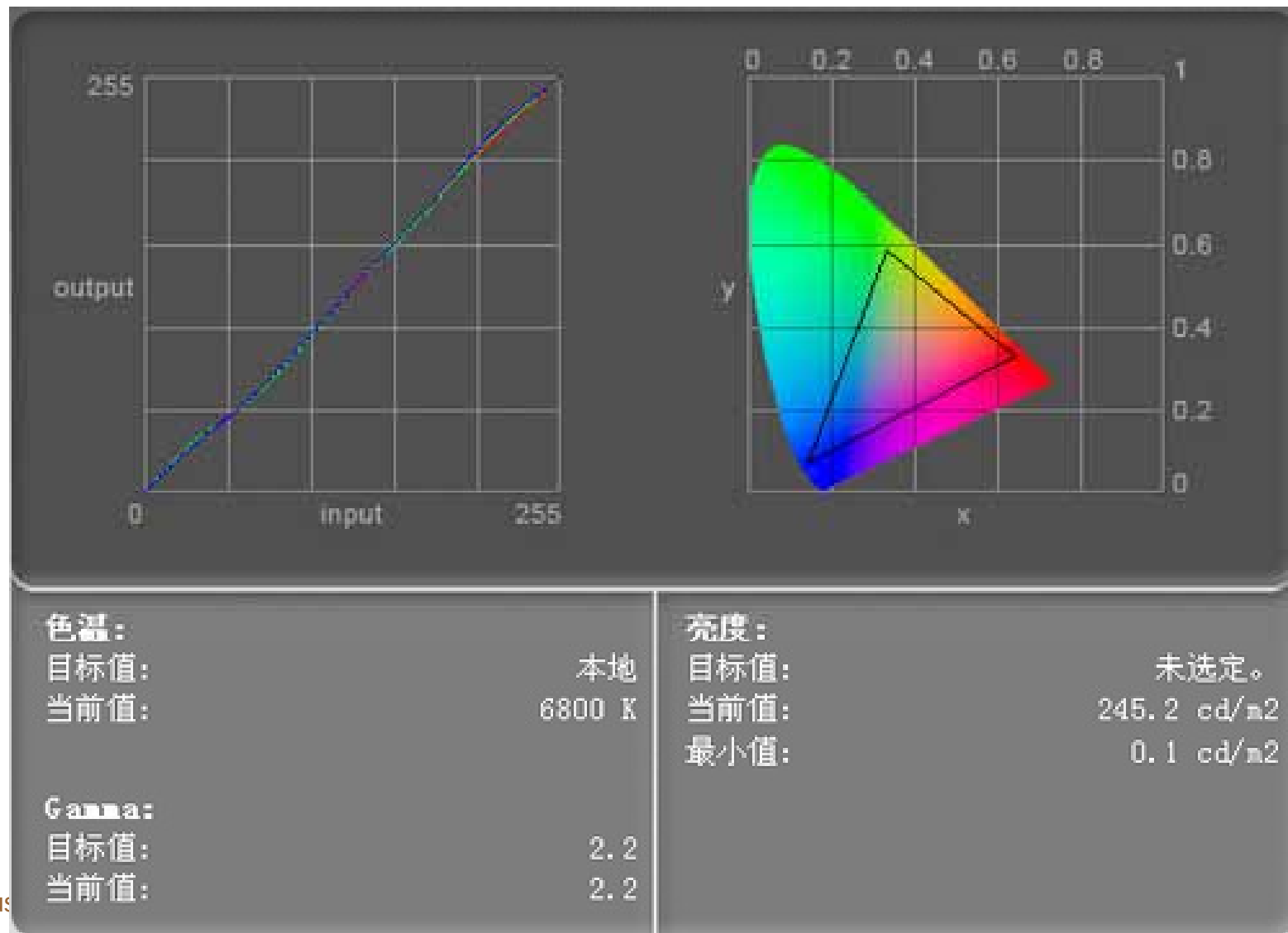
$$\begin{cases} (R) = 0.41844(X) - 0.15866(Y) - 0.08283(Z) \\ (G) = -0.09117(X) + 0.25242(Y) + 0.01570(Z) \\ (B) = 0.00092(X) - 0.00255(Y) + 0.17858(Z) \end{cases}$$

CIE 1931色品图

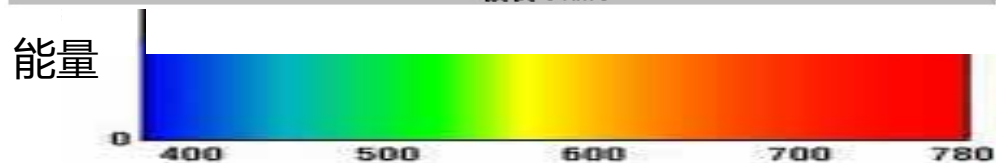
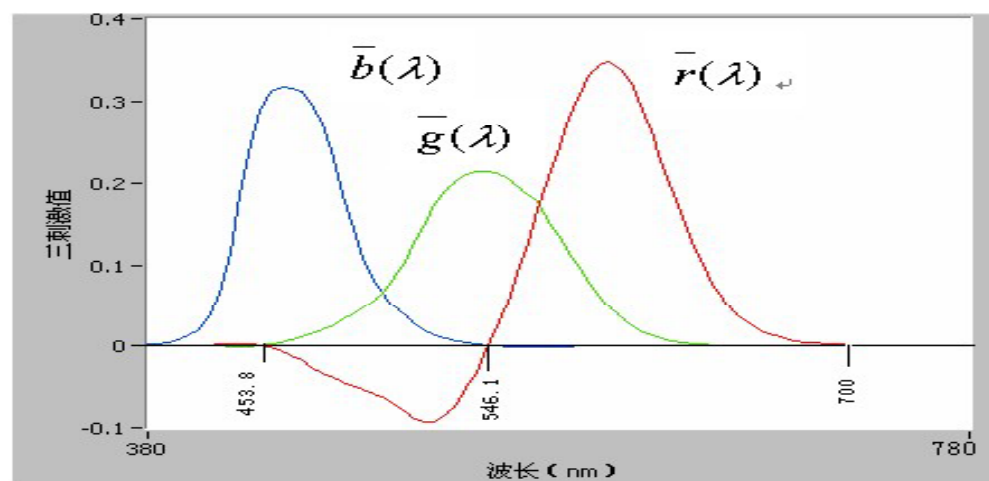
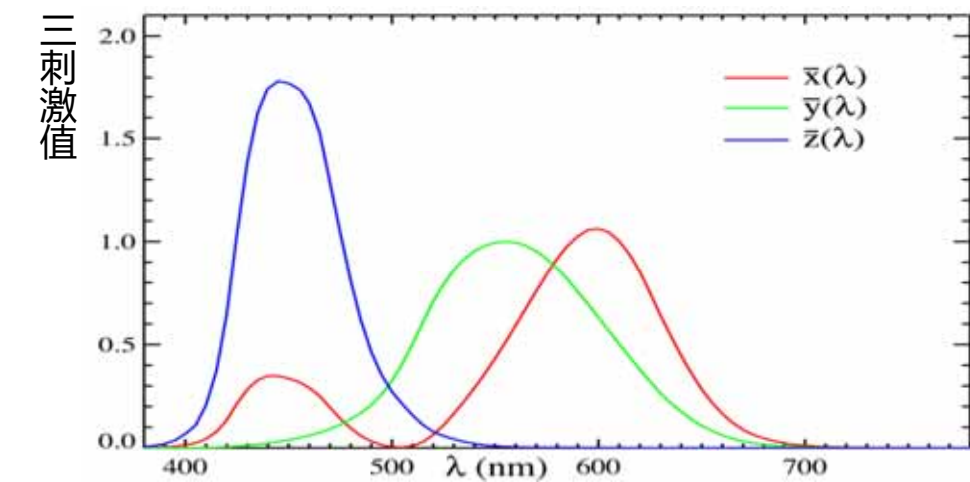


1. 用来表示所有可感知颜色的色度特性；
2. 色品图中心为白点；
3. 光谱轨迹上的点代表不同波长的光谱色，饱和度最高；
4. 围绕色品图中心不同的角度，颜色的色调不同；
5. 连接400 nm与700 nm光谱坐标点的直线不是光谱色，称为紫红线；
6. 540nm到700nm的光谱轨迹位于 $x+y=1$ 的直线上。

三星F2370H显示器网上测评报告



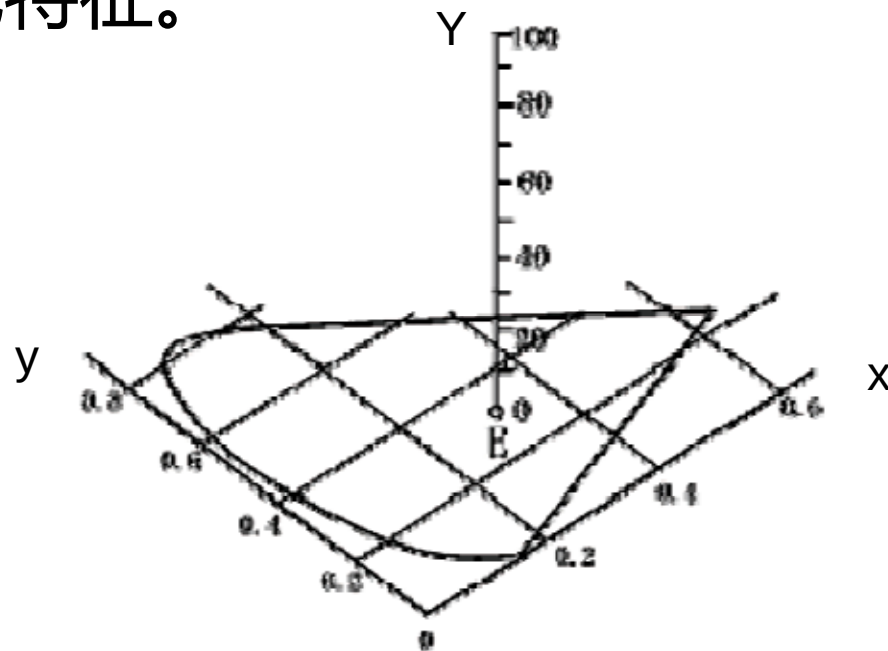
CIE1931标准色度观察者（光谱三刺激值）



Yxy表色方法

$y(\lambda)$ 函数曲线与明视觉光谱光视效率 $V(\lambda)$ 一致，即 $y(\lambda) = V(\lambda)$ 。

因此常用Yxy方法表示颜色变量，Y表示亮度，xy表示颜色的彩色特征。



3.2.3 CIE 1964补充色度系统

在大面积视物观察条件下($>4^\circ$)，由于杆体细胞的参与及中央凹黄素的影响，颜色视觉发生一定变化，主要表现为饱和度降低及颜色视场出现不均匀的现象。

实验表明：人眼小视场观察颜色，颜色差异辨别力较低。当视场从 2° 增大到 10° ，颜色匹配精度提高。但视场再增大，颜色匹配精度提高就不大了。

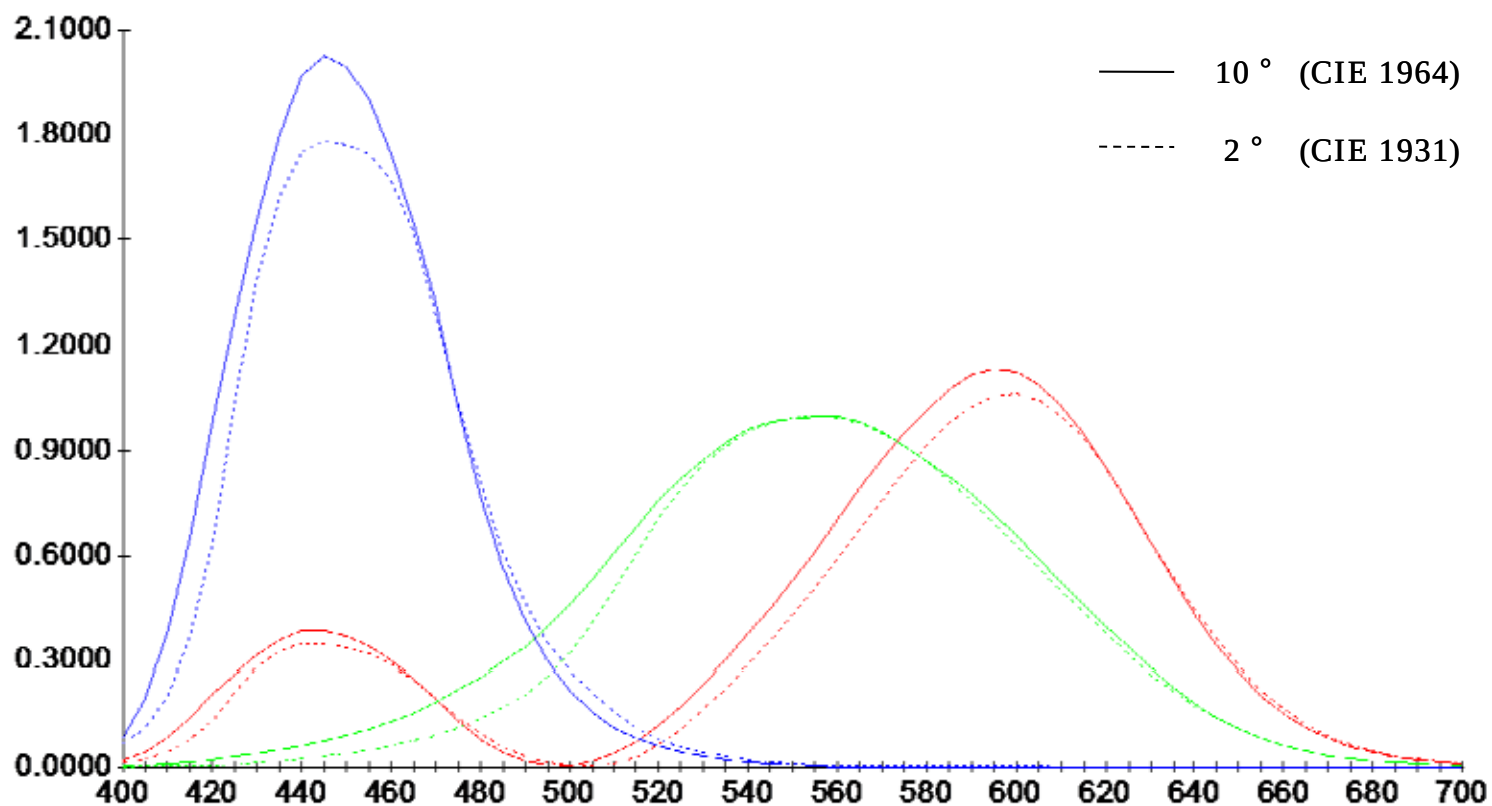
CIE 1964 补充色度系统

1. 大视场标准色度观察者函数（光谱三刺激值）

$$\bar{x}_{10}(\lambda), \bar{y}_{10}(\lambda), \bar{z}_{10}(\lambda)$$

2. 三刺激值 X_{10} 、 Y_{10} 、 Z_{10} ，相当于红、绿、蓝光的含量。
3. 色品坐标 x_{10} ， y_{10} 及色品图。

两个色度系统比较



3.2 CIE标准色度系统 小结

三原色的选择、三刺激值单位的确定都不是唯一的。为了统一，CIE规定了一系列颜色测量和计算方法，称为CIE标准色度系统。

1. CIE1931标准色度观察者光谱三刺激值， 1° - 4° 视场
2. CIE1964补充标准色度观察者光谱三刺激值，大于 4° 视场

CIE标准色度系统组成

1. **标准观察者函数（光谱三刺激值）**：最基本数据，通过颜色匹配实验得到
2. **三刺激值**：根据标准观察者函数计算出
3. 用**色品图和色品坐标**表示颜色

CIE标准色度系统建立过程

1. 用RGB三原色进行光谱色匹配实验，建立人眼观察光谱色的响应函数——**RGB标准色度观察者函数**；
2. 通过数学变换建立CIE XYZ颜色系统——**CIE标准观察者函数**；
3. 根据CIE XYZ颜色三刺激值建立CIE x-y 色品坐标图。



思考题

1. CIE 1931 XYZ标准色度系统的三原色是否真实存在？
2. CIE 1931 XYZ标准色度系统光谱三刺激值能否通过匹配实验得到？



3.3 CIE 色度计算方法

3.3.1 三刺激值计算公式

3.3.2 颜色相加计算

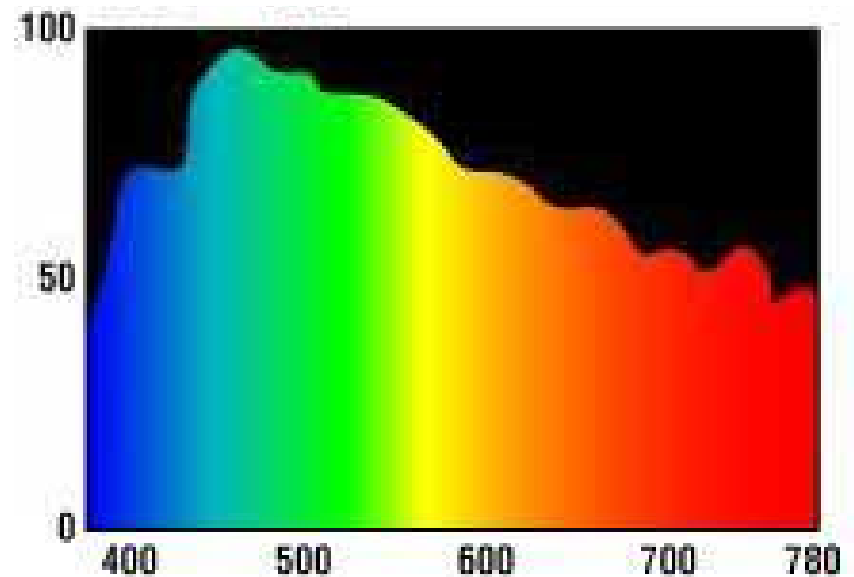
3.3.1 三刺激值计算公式

进入眼睛的光能量随波长的分布称为颜色刺激函数 $\Phi(\lambda)$ 。

$\Phi(\lambda) = S(\lambda)$ 自发光物体

$\Phi(\lambda) = S(\lambda)\tau(\lambda)$ 透射物体

$\Phi(\lambda) = S(\lambda)\rho(\lambda)$ 反射物体



三刺激值计算公式

$$X = k \int_{\lambda} \Phi(\lambda) \bar{x}(\lambda) d(\lambda)$$

$$Y = k \int_{\lambda} \Phi(\lambda) \bar{y}(\lambda) d(\lambda)$$

$$Z = k \int_{\lambda} \Phi(\lambda) \bar{z}(\lambda) d(\lambda)$$

$$Y = 100 = k \int_{\lambda} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d(\lambda)$$

$$k = \frac{100}{\int_{\lambda} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d(\lambda)}$$

k : 亮度调整因数, 将光源的Y值调整为100。

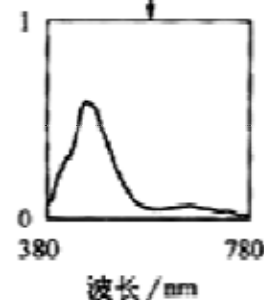
Y值同时是物体的反射率。

三刺激值计算公式图解

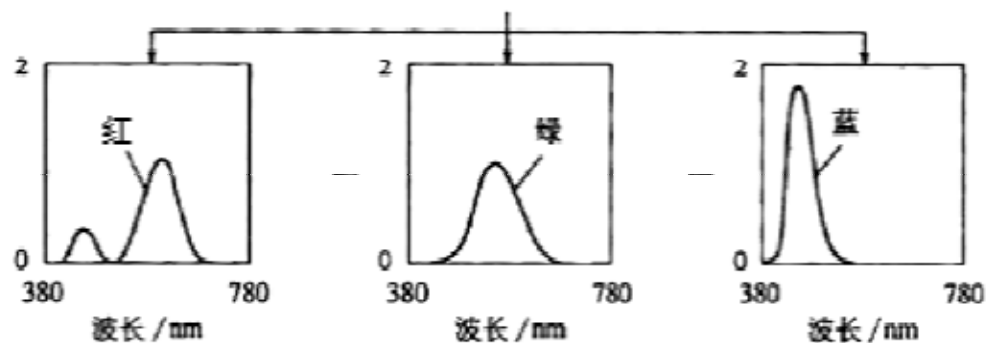
$$S(\lambda), \rho(\lambda)$$



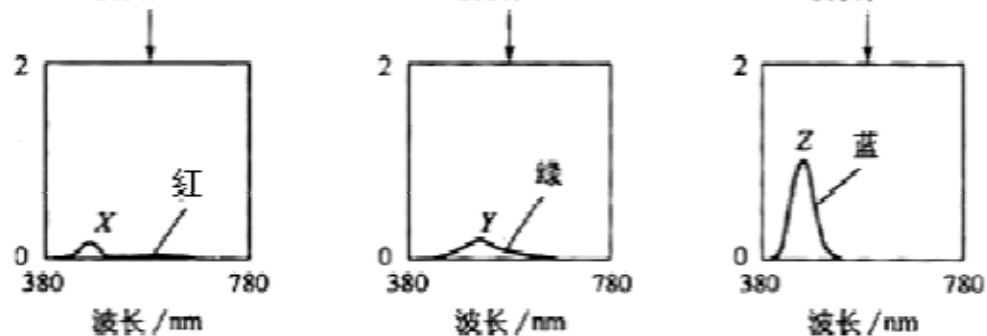
$$\Phi(\lambda)$$



$$\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$$



$$R(\lambda), G(\lambda), B(\lambda)$$



三刺激值实际计算公式

$$\left\{ \begin{array}{l} X = k \sum_{380-780} S(\lambda) \rho(\lambda) \bar{x}(\lambda) \Delta\lambda \\ Y = k \sum_{380-780} S(\lambda) \rho(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda \\ Z = k \sum_{380-780} S(\lambda) \rho(\lambda) \bar{z}(\lambda) \Delta\lambda \end{array} \right.$$

见教材p75计算实例！



CIE标准色品坐标计算公式

$$\left\{ \begin{array}{l} x = \frac{X}{X + Y + Z} \\ y = \frac{Y}{X + Y + Z} \\ z = \frac{Z}{X + Y + Z} \end{array} \right.$$

测色仪器——X-Rite EyeOne pro



新浪微博



@蔡圣燕：分光光度计通过分光测量光谱反射率，据此可以计算各种光源和观察条件下的三刺激值。色度计使用滤色片调节光源和三个探测器，使之模拟特定标准光源和标准观察者特性，直接得到三刺激值。因此色度计只能测量特定光源和观察条件下的三刺激值，而分光光度计则不限。前者如X-Rite 520, 后者如528, 530, i1。

思考题

1. 反射色样的三刺激值与测量光源有关吗？
2. 反射色样的颜色是否固定？
3. 反射色样有哪些固定特性？
4. 根据光源相对能量分布和物体光谱反射率计算物体的三刺激值。



3.3.2 颜色相加计算

1. 计算法
2. 作图法

颜色相加计算之计算法

当两种或两种以上已知三刺激值的色光混合，混合色的三刺激值为：

$$\begin{cases} X = X_1 + X_2 + \dots + X_n \\ Y = Y_1 + Y_2 + \dots + Y_n \\ Z = Z_1 + Z_2 + \dots + Z_n \end{cases}$$

注意：颜色相加是三刺激值相加，而非色品坐标相加。

由色品坐标计算三刺激值

已知某颜色的 Yxy ，求它的三刺激值。

$$\left\{ \begin{array}{l} X = \frac{x}{y} Y \\ Y = Y \\ Z = \frac{z}{y} Y = \frac{1-x-y}{y} Y \end{array} \right.$$



推导一下下！

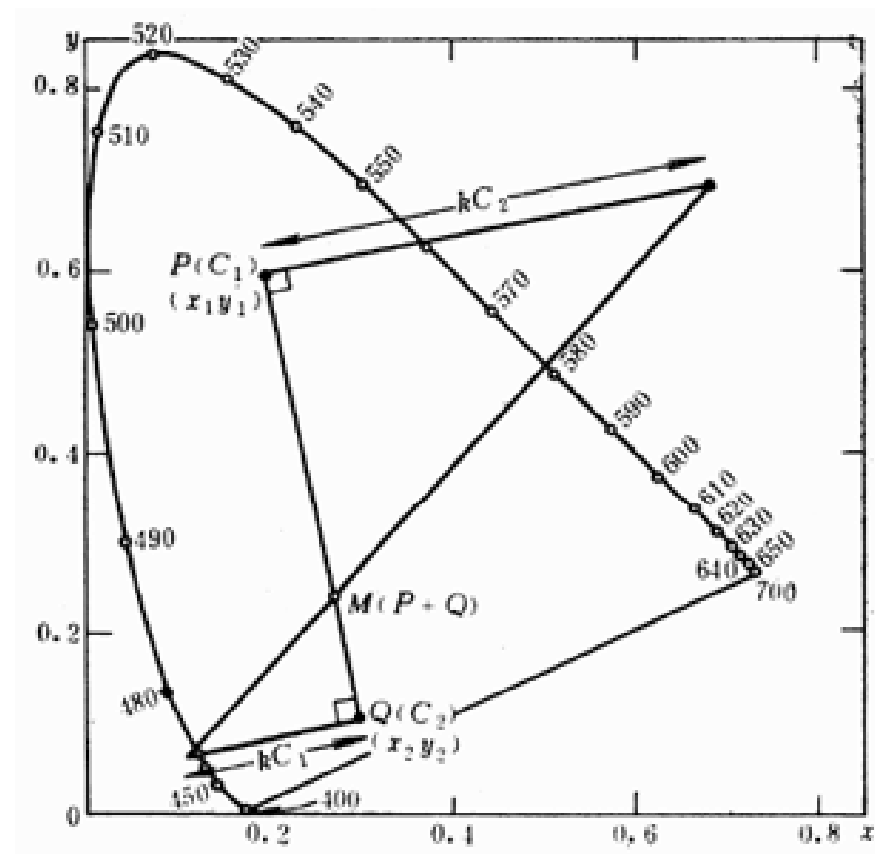
颜色相加计算之作图法

CIE 1931x-y色品图上，两颜色相加产生的混合色总是位于连接两颜色的直线上，位置取决于两颜色三刺激值总和的比例。

$$C_1 = X_1 + Y_1 + Z_1$$

$$C_2 = X_2 + Y_2 + Z_2$$

$$\frac{QM}{MP} = \frac{C_1}{C_2} = \frac{X_1 + Y_1 + Z_1}{X_2 + Y_2 + Z_2}$$



色度计算习题1



已知某颜色380nm--730nm之间的光谱反射率 $\rho(\lambda)$ ，请计算D50，2°视角条件下，该颜色的三刺激值、色品坐标，说明思路，列出公式。D50光源的光谱概率分布见教材4.2部分内容。

色度计算习题2



已知两色光的色品坐标如下，请计算这两个色光的混合光的色品坐标。

	Y	x	y
色光1	50	0.2	0.6
色光2	20	0.3	0.1

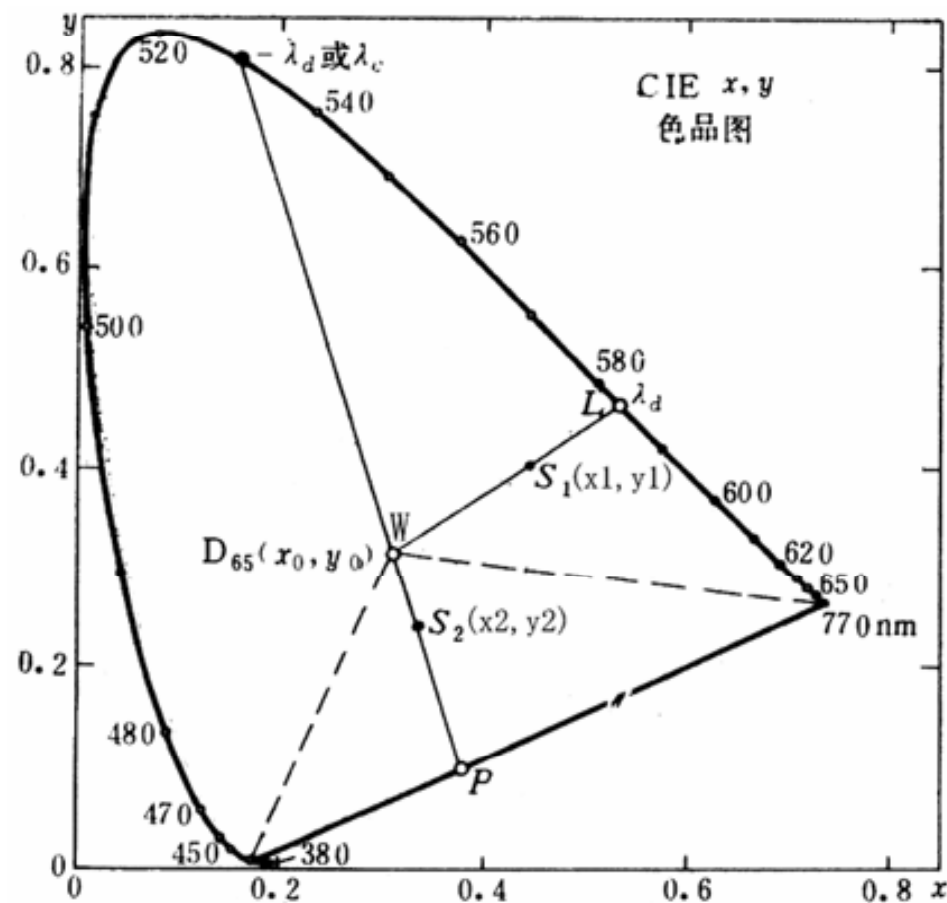


3.4 主波长与色纯度

三刺激值只能表示红绿蓝三原色的混合比例，不能直接表达颜色的感觉属性（明度、色相、饱和度）。为了弥补该缺陷，使用主波长和色纯度大致描述颜色的感觉属性。

主波长

主波长：与样品色具有相同色调感觉的光谱色的波长。



色纯度

色纯度：样品色与其主波长光谱色的接近程度，又称兴奋纯度，用 P_e 表示。色纯度大致反映颜色的饱和度。

$$P_e = \frac{WS}{WL}$$

