

第一章 几何光学

第十一节 光度学基本概念

第十一节 光度学基本概念

11.1 辐射能通量和光通量

11.2 发光强度和亮度

11.3 余弦发射体和定向发射体

11.4 照度

11.1 辐射能通量和光通量

光度学（计量可见光）：研究光的强弱 → 人眼（主观）

辐射度学（计量电磁辐射）：研究辐射强弱 → 功率（物理）

辐射能通量 $\Psi = \int \psi(\lambda) d\lambda$ 单位：W

视见函数： $\psi(\lambda)$ 被称为辐射能谱密度

$V(\lambda)$ 明

$V'(\lambda)$ 暗

$V_{\max}(555nm) = 1$ 归一化

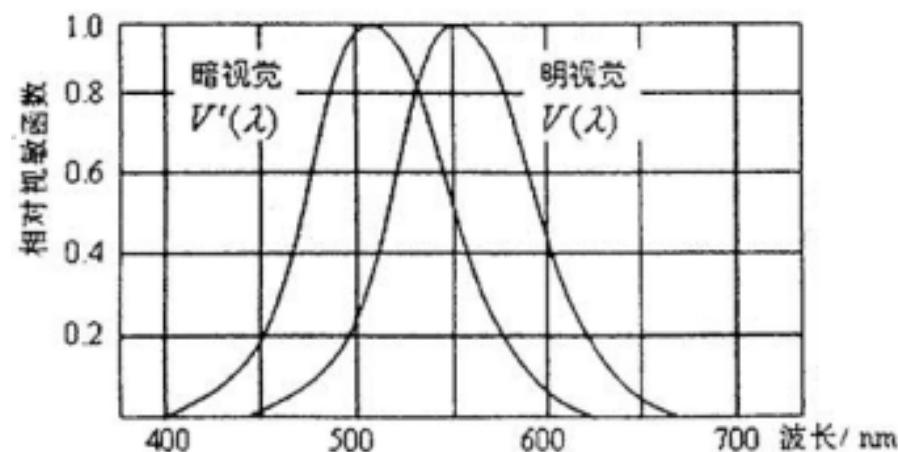


图1 相对视敏函数曲线

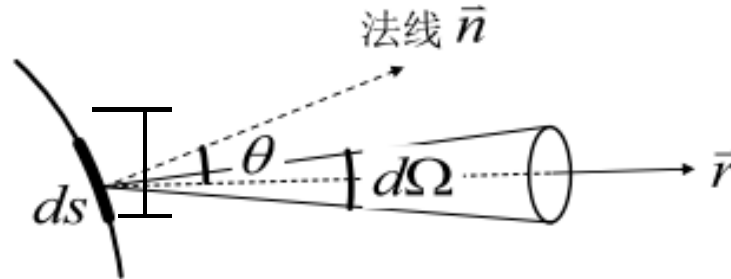
光通量： $\Phi = K_M \int V(\lambda) \psi(\lambda) d\lambda$ 单位：lumen, lm, 流明

$K_M = 683lm / W$ 最大光功当量 (555nm)

11.2 发光强度和亮度

发光强度(luminous intensity): **点光源**沿某方向单位立体角内发出的光通量

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad \text{单位: Candela, Cd, 坎德拉,} \quad \frac{lm}{sr}$$



亮度(brightness): **面元**沿某方向单位投影面积的发光强度

$$B = \frac{d\Phi}{d\Omega ds \cos \theta} = \frac{dI}{ds \cos \theta} \quad \text{单位: Stilb, Sb, 熙提} \quad \frac{lm}{m^2 sr}$$

辐射强度 (radiation intensity) 和 **辐射亮度** (radiation brightness)

将上述公式中的 Φ 换为 Ψ , 单位 W / sr , 以及 $W / m^2 \cdot sr$

11.3 余弦发射体和定向发射体

余弦发射体 (漫射体, 朗伯发光体)

$$dI \propto \cos \theta \quad \text{Lambert定律}$$

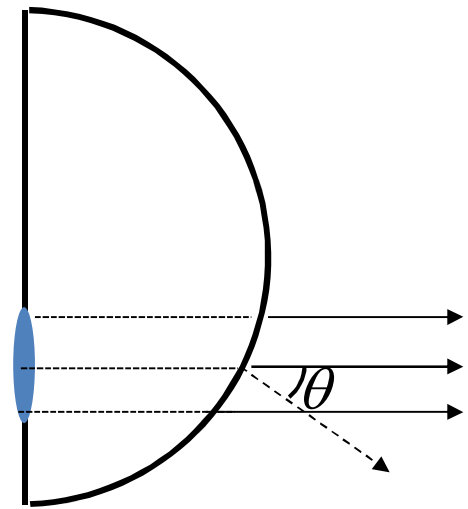
定向发射体

激光: $\Delta\theta \approx 2' \approx 6 \times 10^{-4} \text{ rad}$
 $\Delta\Omega = \pi\Delta\theta^2 \approx \pi\theta^2 \approx 10^{-6} \text{ sr}$

面积 1mm^2 , 10mW 的HeNe激光, 其辐射亮度

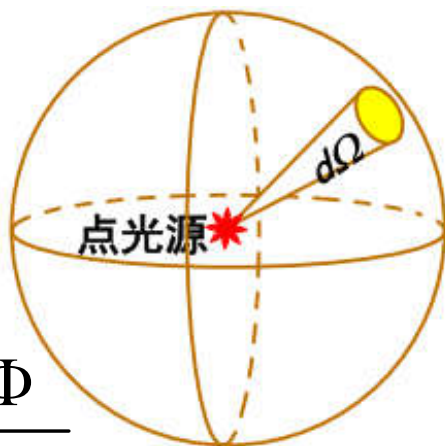
$$B = \frac{\Delta\Psi}{\Delta\Omega\Delta s \cos \theta} \approx \frac{\Delta\Psi}{\Delta\Omega\Delta s} \approx 10^{10} \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{sr}$$

太阳的辐射亮度 B : $3 \times 10^6 \text{ W} / \text{m}^2 \times \text{sr}$

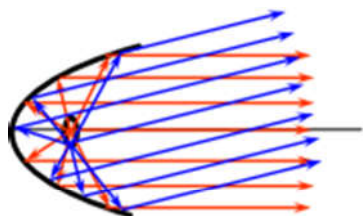


半球面源在指向发光者的方向上的发光强度和投影面积相同

11.3 余弦发射体和定向发射体



$$B = \frac{d\Phi}{d\Omega ds}$$



常见光源的亮度:

大气层外看太阳: $\sim 190,000$ 熙提

地面看太阳: $\sim 150,000$ 熙提

白炽灯: $\sim 500-1,500$ 熙提

蜡烛火焰: ~ 0.5 熙提

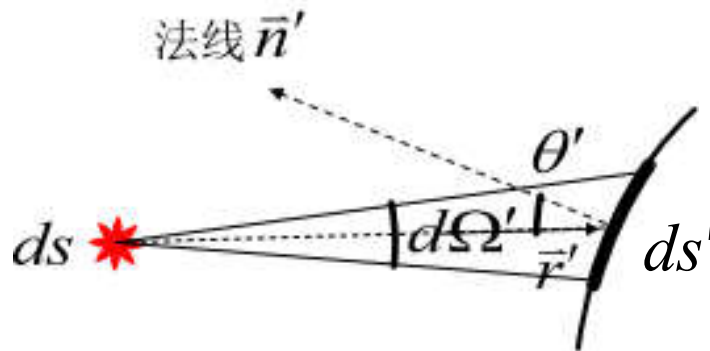
地面看满月: ~ 0.25 熙提

无月夜空: $\sim 10^{-8}$ 熙提

11.4 照度

照度 (illuminance) : 照射在单位面积上的光通量

$$E = \frac{d\Phi'}{ds'} \quad \text{单位: Lux, lx, 勒克斯, } \frac{\text{lm}}{\text{m}^2}$$



点光源产生的照度:

$$d\Phi' = I d\Omega = I ds' \cos \theta' / r^2$$

面积元 ds' 对发光点所张的立体角

$$E = \frac{d\Phi'}{ds'} = \frac{I \cos \theta'}{r^2} \quad I: \text{点光源的发光强度}$$

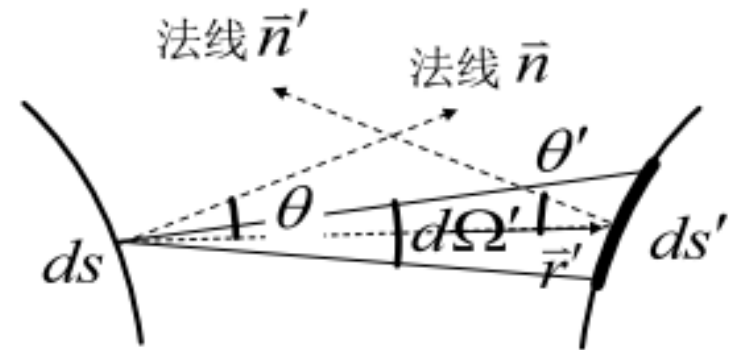
11.4 照度

面光源产生的照度：

$$d\Phi' = Bd\Omega ds \cos \theta = \frac{Bd\Omega ds ds' \cos \theta \cos \theta'}{r^2}$$

ds'上的照度 $E = \iint \frac{Bds \cos \theta \cos \theta'}{r^2}$

B : 面光源的亮度



常见实际情况的照度：

晴朗夏日室外非阳光直射处： 1,000—10,000勒克斯

晴朗夏日采光良好的室内： 100—500勒克斯

天顶满月时的地面： ~0.2勒克斯

无月夜的地面： $\sim 2 \times 10^{-4}$ 勒克斯

办公场所的要求： ~20—100勒克斯

第一章 几何光学

第十二节 像的亮度、照度和主观亮度

第十二节 像的亮度、照度和主观亮度

12.1 像的亮度

12.2 像的照度

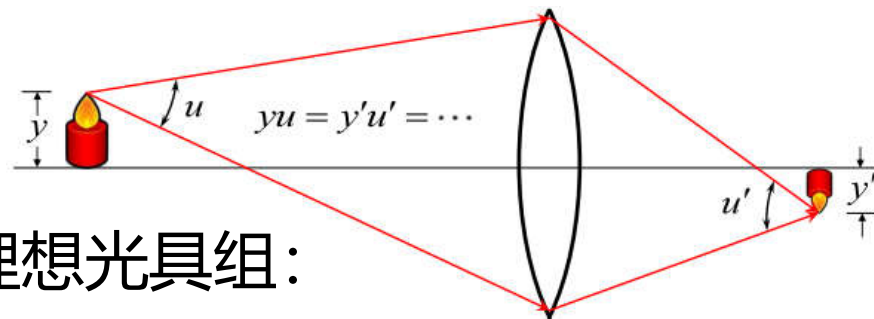
12.3 主观亮度

12.1 像的亮度

人眼瞳孔接收很小的立体角，像的亮度是单位立体角像的光通量：

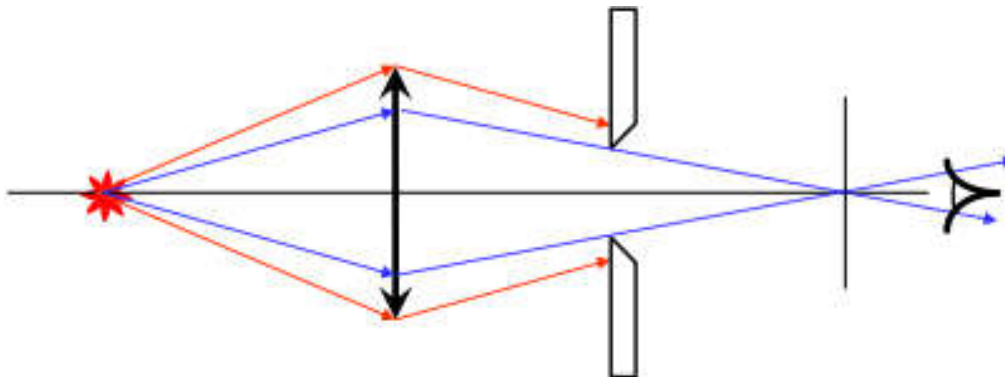
光具组：
$$\frac{B'}{B} = k \left(\frac{n'}{n} \right)^2$$
 k ：光具组的透过率（透光系数）

B' ：像的亮度； B ：物的亮度



物像方折射率相等且忽略损耗的理想光具组：

$$B' = B \quad (\text{光具组基本不改变像的亮度})$$



12.2 像的照度

投射到单位面积上的光通量。

对余弦反射体： $B = \frac{E}{\pi}$ B : 反射光的亮度； E : 入射光的照度

对光具组：傍轴近似下像面的照度

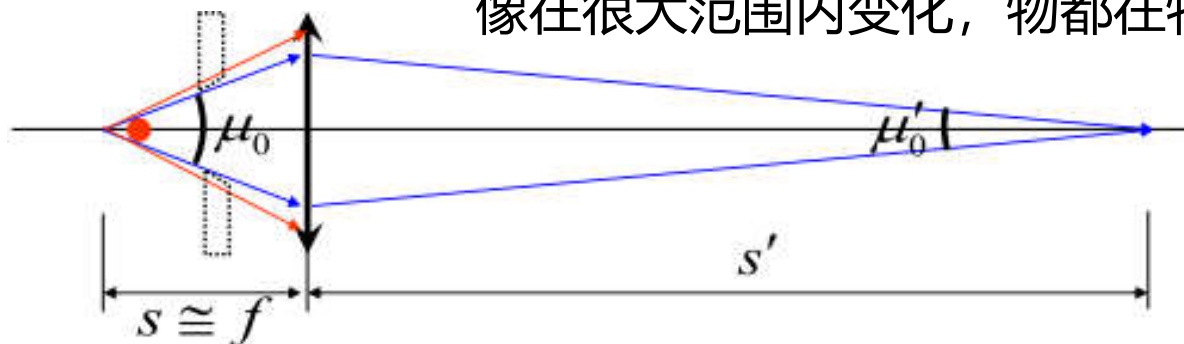
$$E = k\pi B \left(\frac{n'}{n} \right)^2 \mu_0'^2 = \frac{k\pi B \mu_0^2}{V^2} \quad V \text{ 是横向放大率}$$

一、像距远大于焦距（投影机）：

$\mu_0 \approx \text{常数}$

幕远 $\rightarrow V$ 大 $\rightarrow$ 像暗

像在很大范围内变化，物都在物方焦平面附近



12.2 像的照度

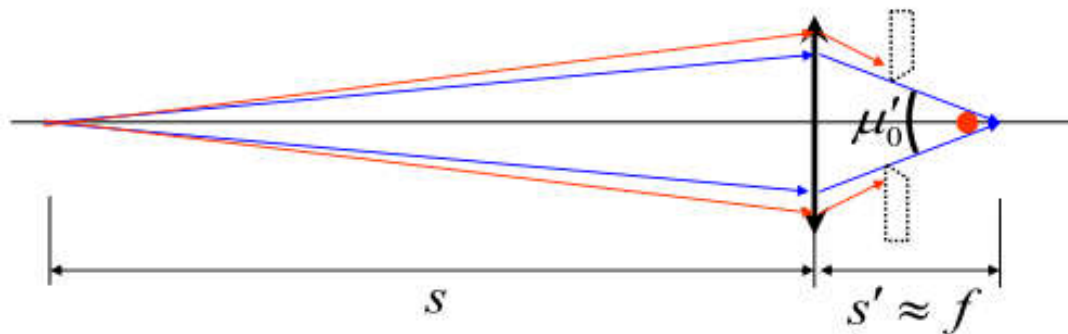
二、照相机、眼睛（物距远大于焦距）：

物在很大范围内变化，像都在像方焦平面附近

$$E = k\pi B \left(\frac{n'}{n} \right)^2 \mu_0'^2 = \frac{k\pi B \mu_0^2}{V^2} \mu_0' \approx \text{常数} \quad E = \text{常数} = \frac{k\pi B}{4} \left(\frac{D}{f} \right)^2$$

远近物体的感
光程度一致

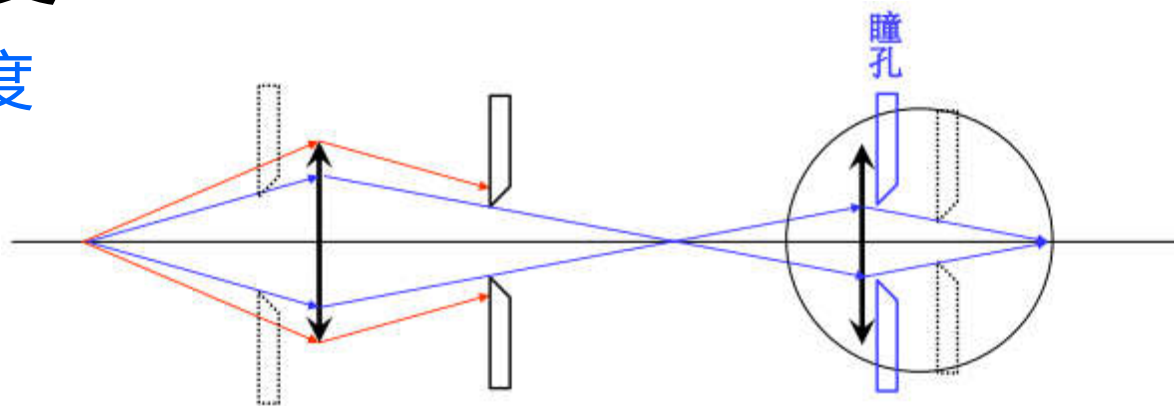
f/D : 光圈: 1.4, 2, 2.8, 4, 5.6, ...



以上光照度的结论严格来说只适用于傍轴小物条件，对于大物面（像空间视场角大），像面上的光照不均匀。

12.3 主观亮度

一、天然主观亮度



1、扩展光源（成像较大）：就是视网膜上像的照度

天然主观亮度： $H_0 \equiv E = \left(\frac{n'}{n}\right)^2 \frac{k\pi B}{4} \left(\frac{D_e}{f_e}\right)^2 D_e$: 瞳孔直径
 f_e : 眼睛焦距

2、点光源（只覆盖一个神经元）：视网膜上的单个视细胞上的光通量。

$$\Delta\Phi_v = \frac{\pi D^2}{4r^2} I$$

D : 眼睛入射光瞳的直径

r : 发光点到眼睛的距离

I : 发光点的强度

12.3 主观亮度

二、仪器：

望远镜 $D' = D / M$

显微镜 $D' \propto N.A. / M$

出射光瞳的大小
与
放大倍数成反比

放大率 < 正常放大率 (出射光瞳 > 瞳孔)

$B' \approx B$ 主观亮度 $\approx$ 天然亮度

放大率 > 正常放大率 (出射光瞳 < 瞳孔)

$B' < B$ 主观亮度 < 天然亮度

高倍显微镜视场暗的原因，加大数值孔径可改善主观亮度

对于平行光来说，视网膜上光斑小于视神经单元

主观亮度 $\propto$ 光瞳直径

加大望远镜镜头尺寸可提高主观亮度

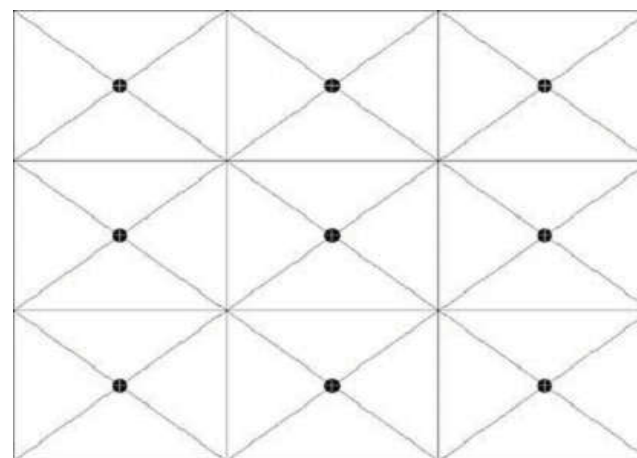
思考：相机拍摄或用望远镜观察夜晚的星空与人眼直接观测的效果是否一致？

实例

例1：投影仪亮度的标定

“light out”是投影机主要的技术指标，“light out”通常以光通量来表示，单位是流明。投影机表示光通量的国际标准单位是ANSI流明，ANSI流明是美国国家标准化协会制定的测量投影机光通量的方法，测定环境如下：

- 1) 投影机与幕之间距离：2.4米。
- 2) 幕为60英寸。
- 3) 用测光笔测量屏幕“田”字形九个交叉点上的各点照度。
- 4) 乘以面积，得到投影画面的9个点的亮度。
- 5) 求出9个点亮度的平均值，就是ANSI流明。



美能达照度计

第一章 几何光学

补充：色度学(colorimetry)基本概念

补充：色度学(colorimetry)基本概念

1. 三元色、刺激度和视见函数

2. CIE坐标

3. 实例

补充1 三元色、刺激度和视见函数

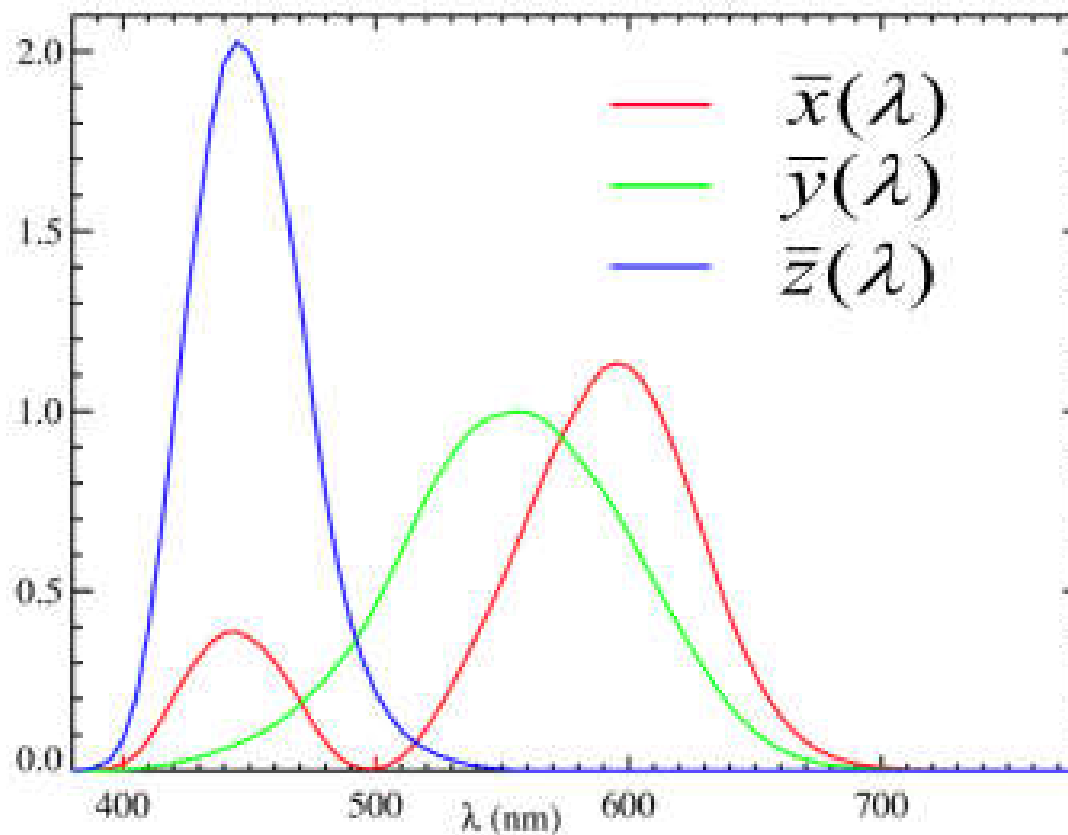
三原色

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

刺激度:

$$\begin{cases} X(\lambda) = K \int \varphi(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ Y(\lambda) = K \int \varphi(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ Z(\lambda) = K \int \varphi(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{cases}$$

CIE1931标准色度观察者光谱三刺激值曲线



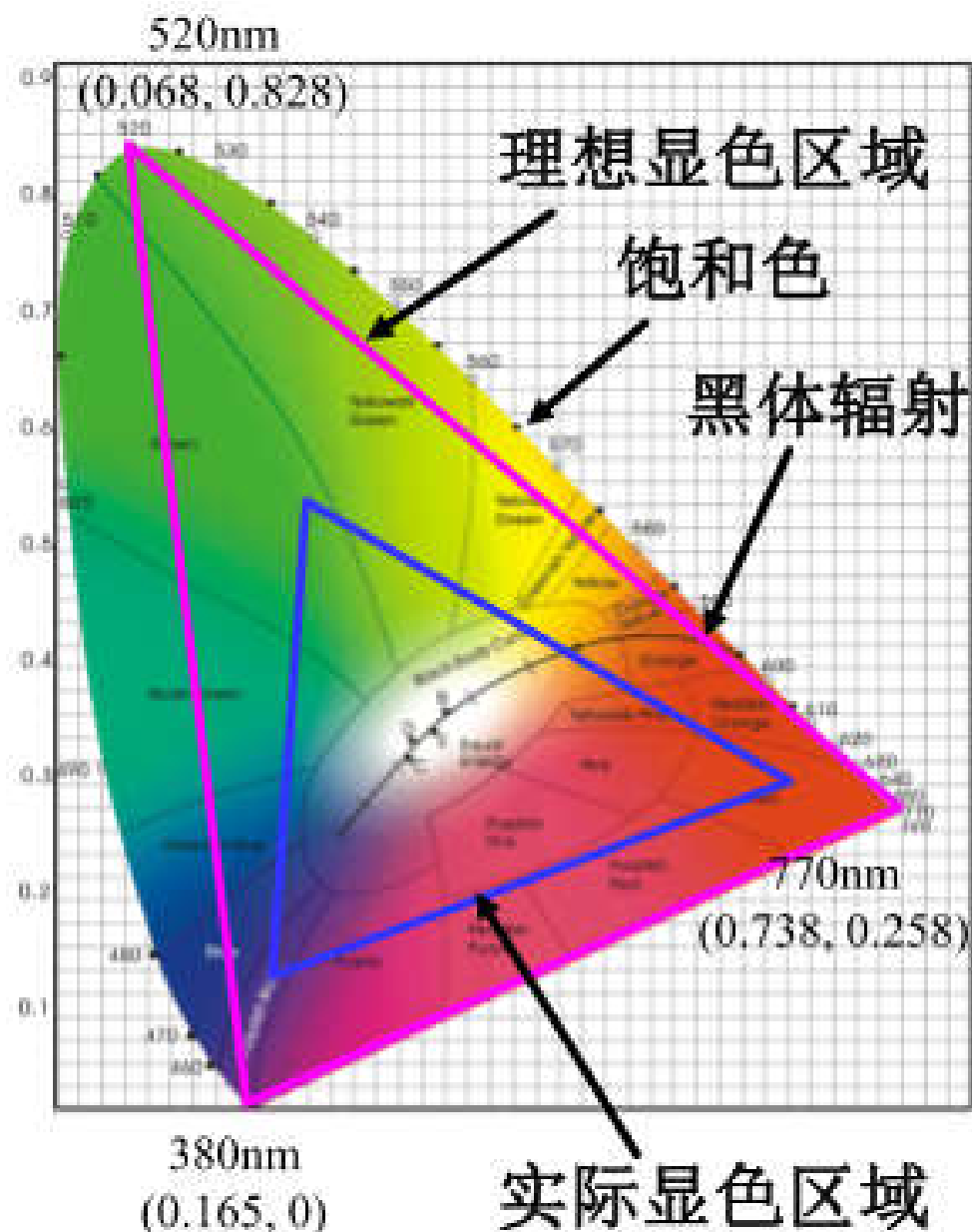
补充2 CIE坐标

色坐标: x-y, CIE1931

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

加法规则 (线光谱):

$$\begin{cases} x = \frac{H_1x_1 + H_2x_2}{H_1 + H_2} \\ y = \frac{H_1y_1 + H_2y_2}{H_1 + H_2} \end{cases}$$



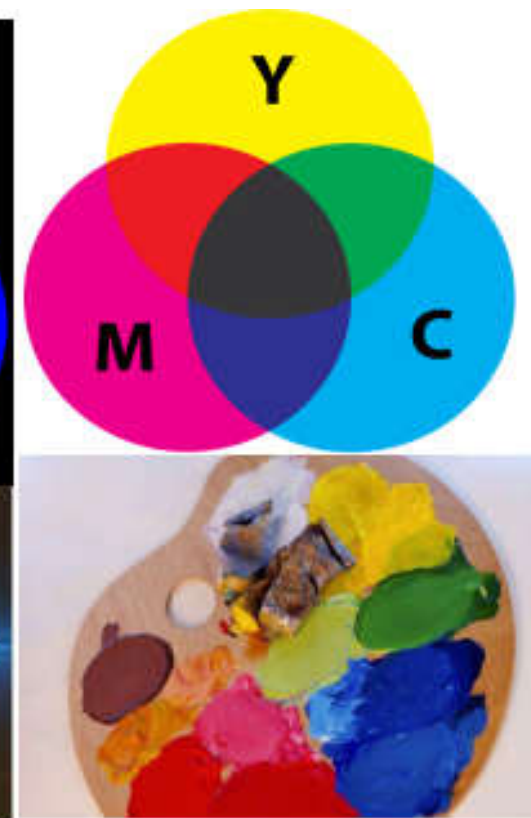
补充2 CIE坐标

加法规则（连续光谱）

$$\begin{cases} x = \frac{\int x(\lambda) dH}{\int dH} \\ y = \frac{\int y(\lambda) dH}{\int dH} \end{cases}$$



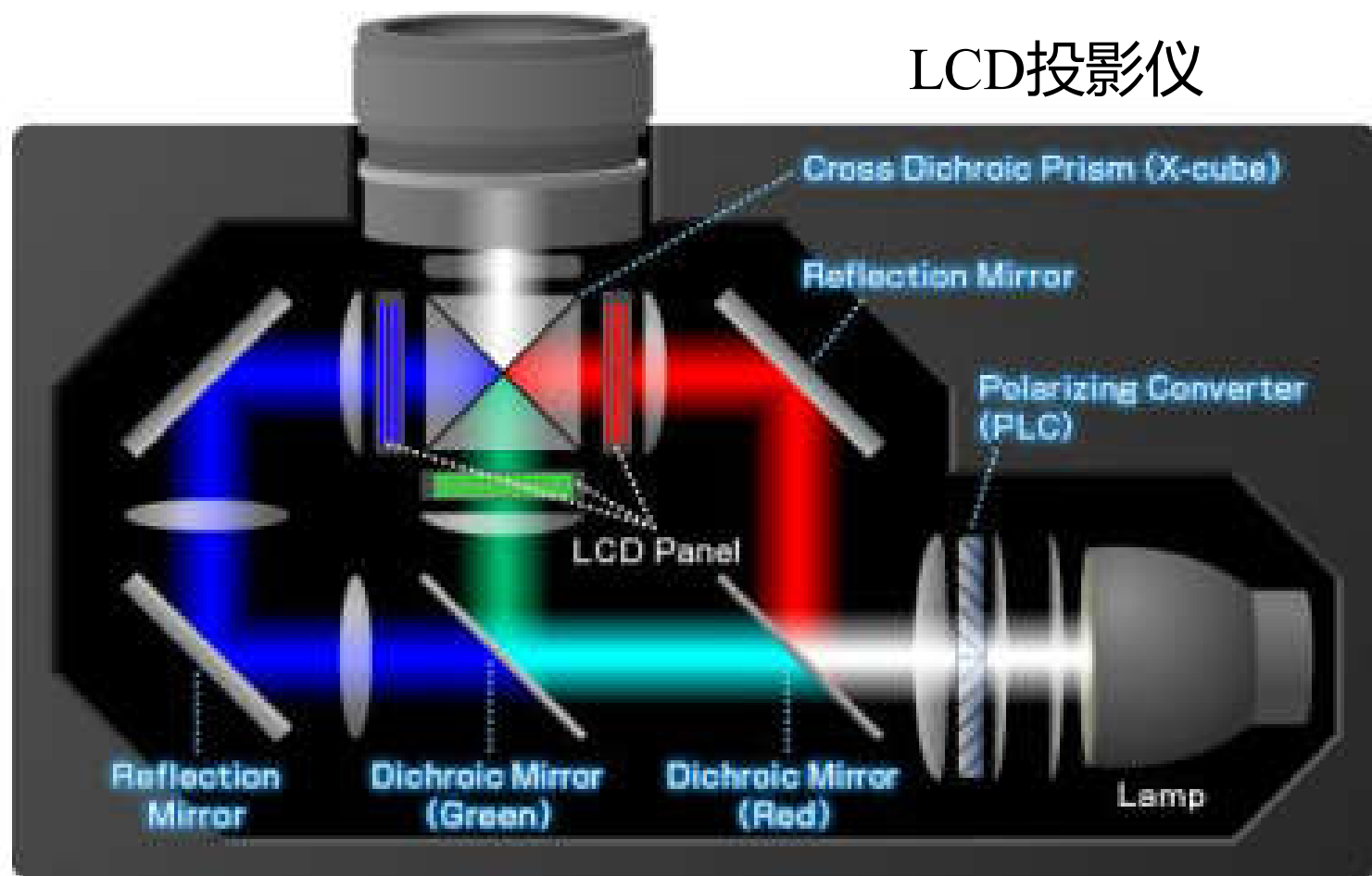
加法混色



减法混色

3 实例

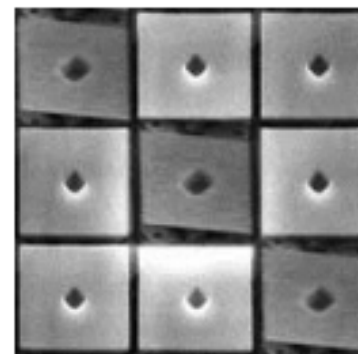
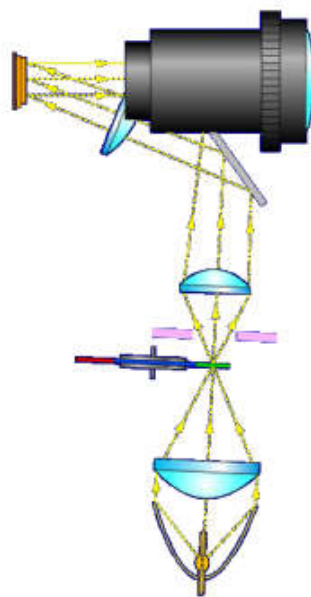
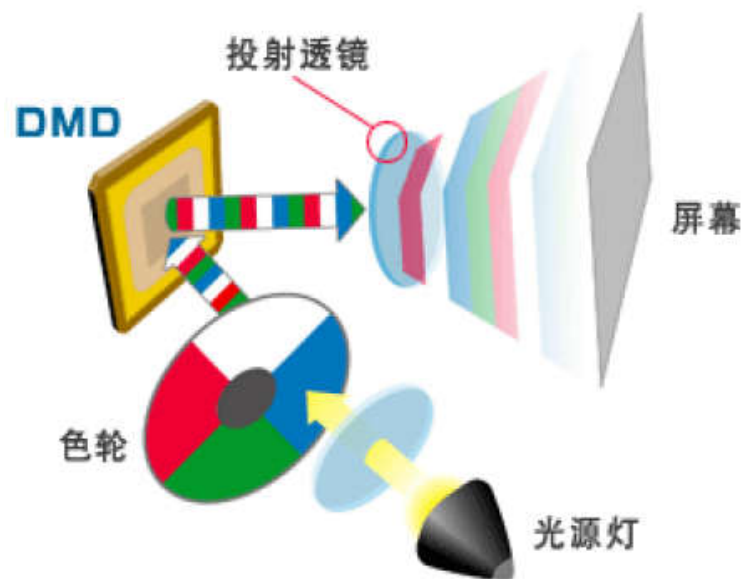
例2：投影仪的色彩



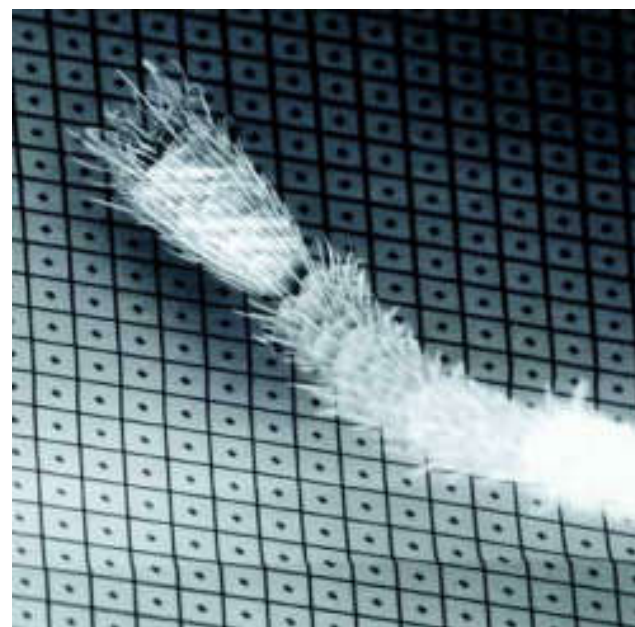
3 实例

例2：投影仪的色彩

单DLP 投影仪



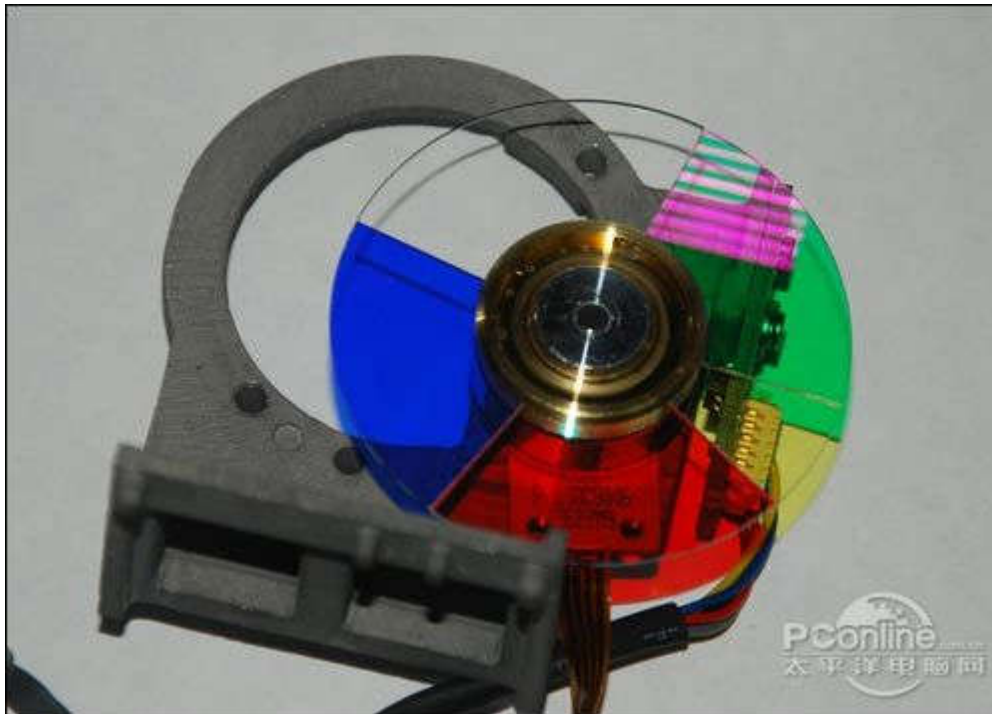
DMD
(Digital Micromirror Device)



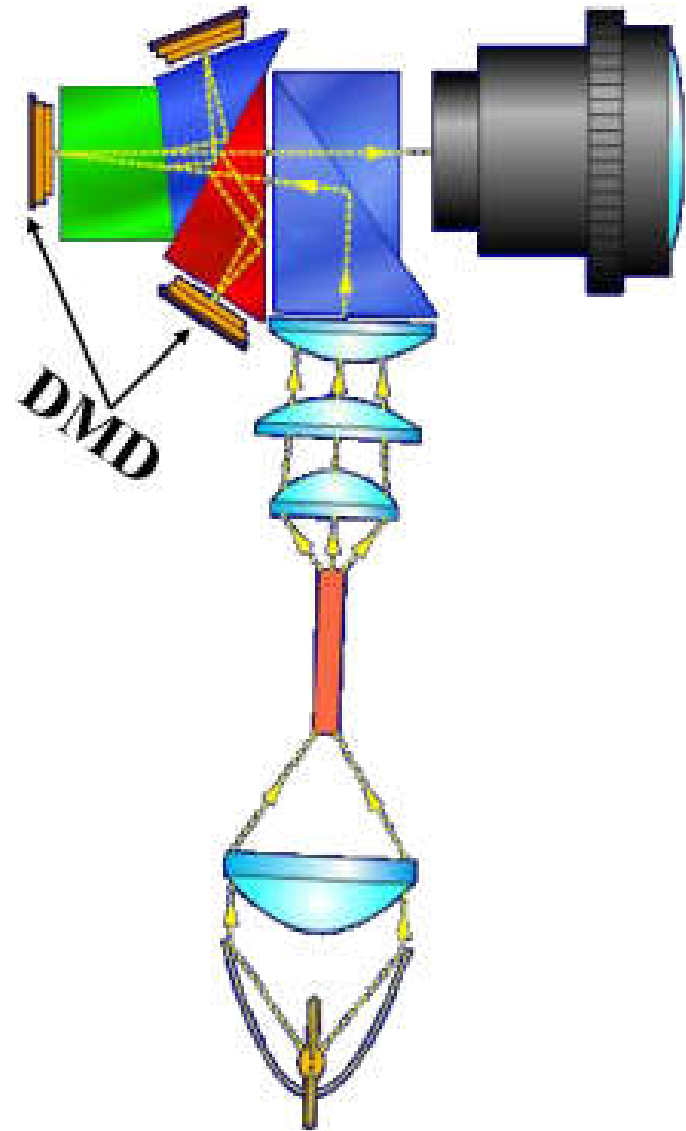
3 实例

例2：投影仪的色彩

色轮



明基MP724投影机的色轮

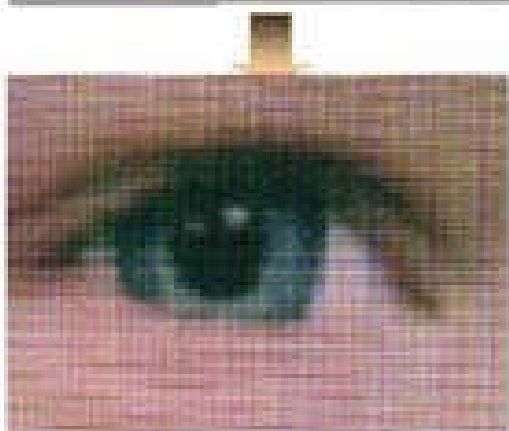
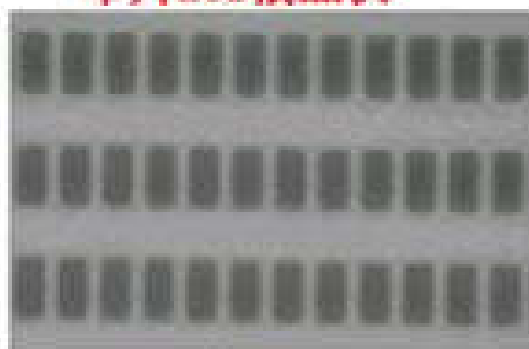


三 DLP 投影仪

3 实例

LCD（液晶投影机）与DLP（数码投影机）的影像比较

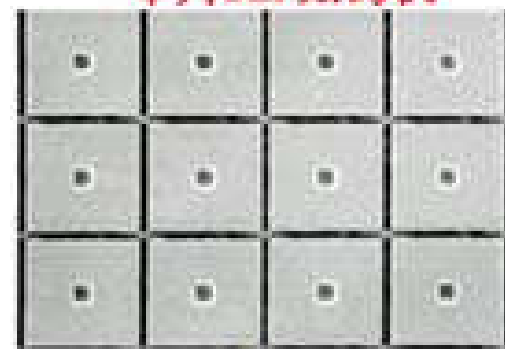
单片LCD液晶机



三片LCD液晶机



单片DLP数码机



作业

P133-5, (重排版p98) P138-2,5 (重排版p102)

思考题

1. 生活中哪些场合会出现颜色失真?
2. 为什么我们在屏幕中看到的颜色, 和直接打印出来的颜色看上去经常有较大的差异?

本节重点

1. 照度和亮度的基本概念（理解）
2. 不同装置像的亮度的度量方法（理解）