



# 应用光学

# Applied Optics

任课教师：陈 瑞

电子邮箱：chenr229@mail.sysu.edu.cn

助教安排：柳夏、石福隆

答疑时间：周四下午2:30-3:30，爪哇堂307

中山大学 物理学院  
2021-1

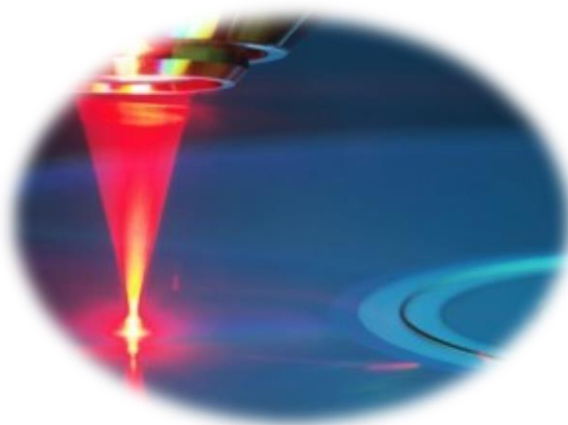
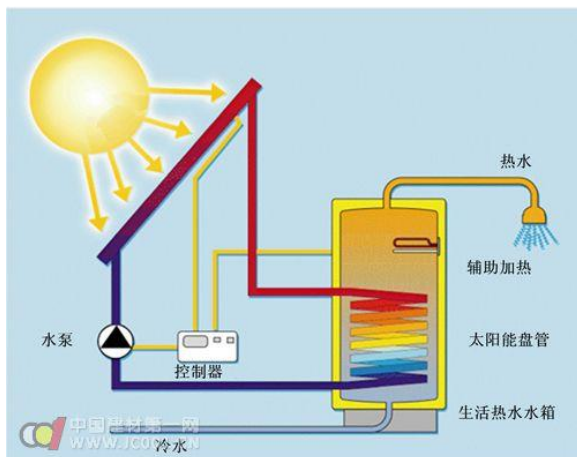


## 第六章 光能及其传播计算

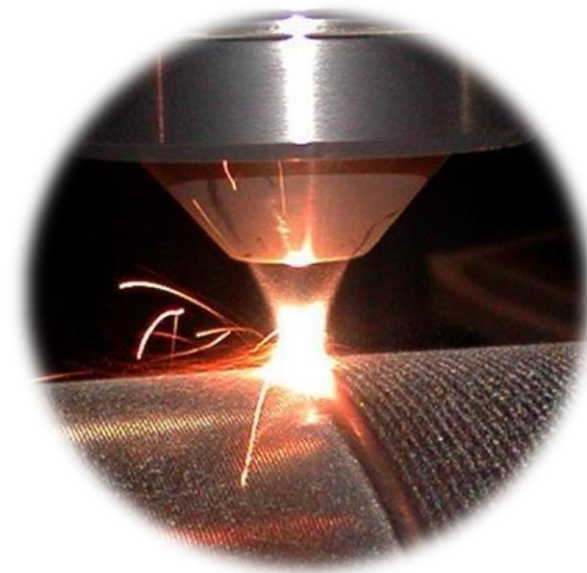
光是具有能量的，光束是能量的载体；



● 太阳能热水器



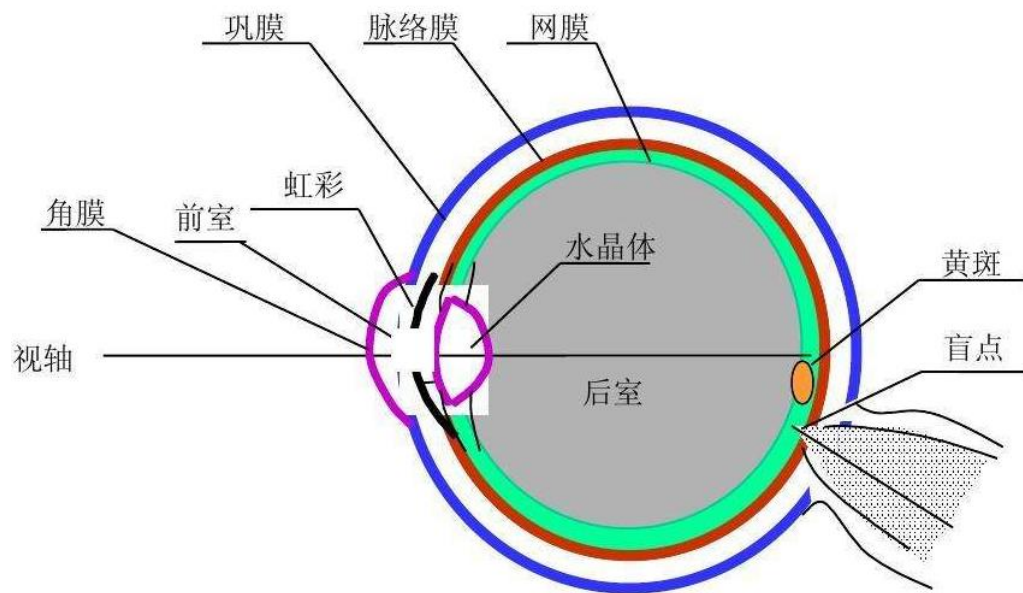
● 激光加工



## 第六章 光能及其传播计算

### 光学系统是能量传输系统;

- 光能量从光源发出，经过空气等中间介质和光学系统，最后由接收器所接收。



- 太阳光经过空气、眼睛到达视网膜（接收器）



## 第六章 光能及其传播计算

光是具有能量的，光束是能量的载体；

光学系统是能量传输系统；

本章研究光学系统传输光能量的数量规律；

- 分析光能量传递过程中影响其变化的因素和规律；
- 如何有效地利用光能量、减少传递过程中的能量损失；
- 成像过程中保证像面上获得所必需的光能量。



## 第六章 光能及其传播计算

光线不仅是波面的法线而且还是携带光能的载体，只有携带了足够的光能，到达像空间的光才能有一定的光度水准。

### 主要内容

- 6.1 辐射量与光学量
- 6.2 光学量基本概念
- 6.3 光传播过程中光学量的变化规律
- 6.4 光学系统的光能损失
- 6.5 成像系统像面的光照度



## 第六章 光能及其传播计算

光线不仅是波面的法线而且还是携带光能的载体，只有携带了足够的光能，到达像空间的光才能有一定的光度水准。

### 主要内容

- 6.1 辐射量与光学量
- 6.2 光学量基本概念
- 6.3 光传播过程中光学量的变化规律
- 6.4 光学系统的光能损失
- 6.5 成像系统像面的光照度





## 6.1 辐射量与光学量

### 一. 辐射度学与光度学

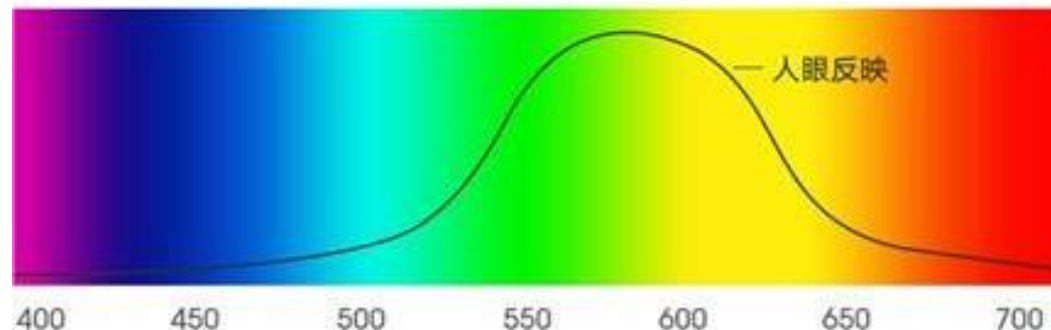
**辐射度学：**研究电磁波辐射的测试、计量和计算的学科

辐射度学主要研究频率为 $3 \times 10^{11} \sim 3 \times 10^{16} \text{Hz}$ 的光辐射，对应于 $0.01 \sim 1000 \mu\text{m}$ 的波长。波段范围包括红外、可见光、紫外线等。

**光度学：**研究可见光的测试、计量和计算称为光度学。

与辐射度学类似，但只处理人眼可感知的光，即可见光：波长为 $400 \text{nm} \sim 760 \text{nm}$ 范围内的电磁波。

可见光波谱





# 6.1 辐射量与光学量

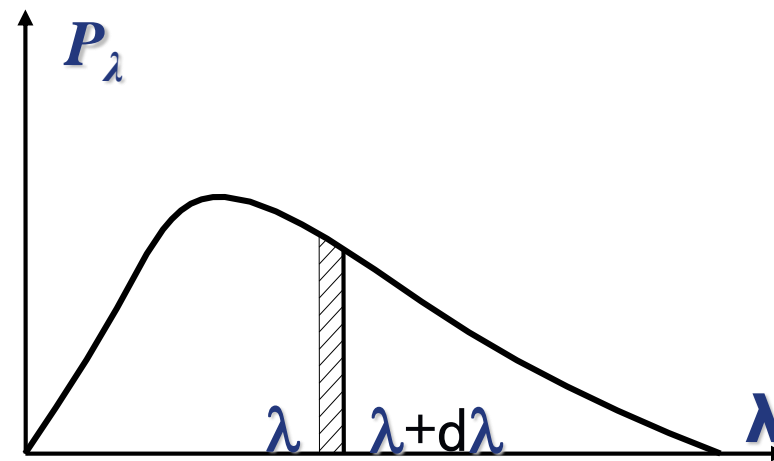
## 二. 辐射量

**辐射能**：以电磁辐射形式发射、传输或接收的能量， $E$ , 单位: 焦耳 (J)

**辐射能通量**：单位时间内通过某一面积的全部辐射能， $W$ , 单位: 瓦 (W)

➡ 
$$W = \frac{dE}{dt}$$

- 为全面表征辐射能，不仅要知道**功率**，还要知道其**光谱分布**，即辐射能中所包含的各种波长的单色辐射能通量的大小
- 辐射能总包含一定的光谱范围， $P_\lambda$ 是某一波长附近单位波长间隔内所具有的功率，**称为辐射能通量随波长的分布函数**。



辐射体的能量分布曲线

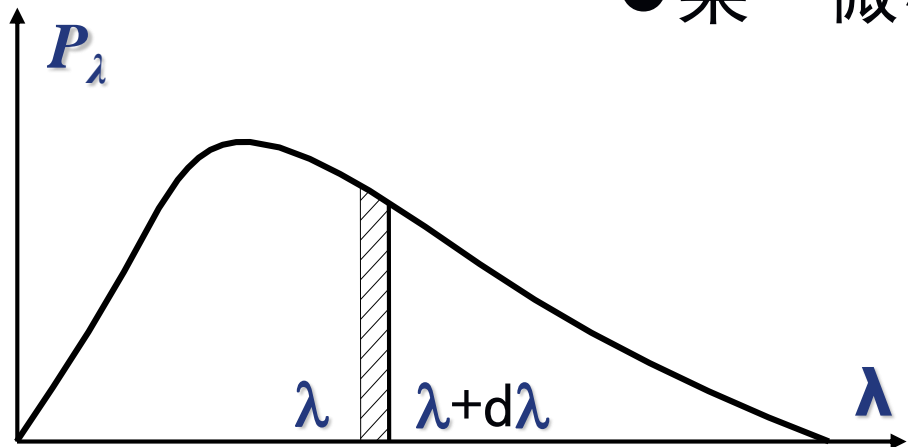




## 6.1 辐射量与光学量

### 二. 辐射量

- 某一微小波长范围 $d\lambda$ 内所包含的辐射能通量：



$$dW = P_\lambda d\lambda$$

$$\Rightarrow W = \int dW = \int P_\lambda d\lambda$$

- 任何辐射能接收器都只能接收某一光谱范围内的能量，即对不同光谱范围有不同的灵敏度。
- 如人眼， $\lambda = 400 \sim 760\text{nm}$ 为可见光。在此范围内，人眼能比较光谱波长及能量大小。
- 各种波长的光引起人眼感觉、灵敏度不同

光谱光视效率 (视见函数)  
(Spectral luminous efficiency)



## 6.1 辐射量与光学量

### 三. 光学量

- **光能：** 人眼仅能感受的波长400–760nm区域的辐射能；
- **光通量：** 按辐射能通量所引起的光作用而确定的功率 $\Phi_\lambda$ ；

单位：流明（lumen）。

- 单位波长内具有 $P_\lambda$ 瓦的辐射能通量相当于 $\Phi_\lambda$ 流明光通量，则其比值 $K_\lambda$ 表示1瓦单色辐射能通量所相当的流明数。

$$K_\lambda = \frac{\Phi_\lambda}{P_\lambda}$$

- 人眼对波长为555nm的黄绿光最为敏感，因此555nm的黄绿色光这一数值最大。由实验可知，1瓦频率为 $540 \times 10^{12}$ Hz（黄绿光555nm）的单色辐射能通量等于683lm的光通量。

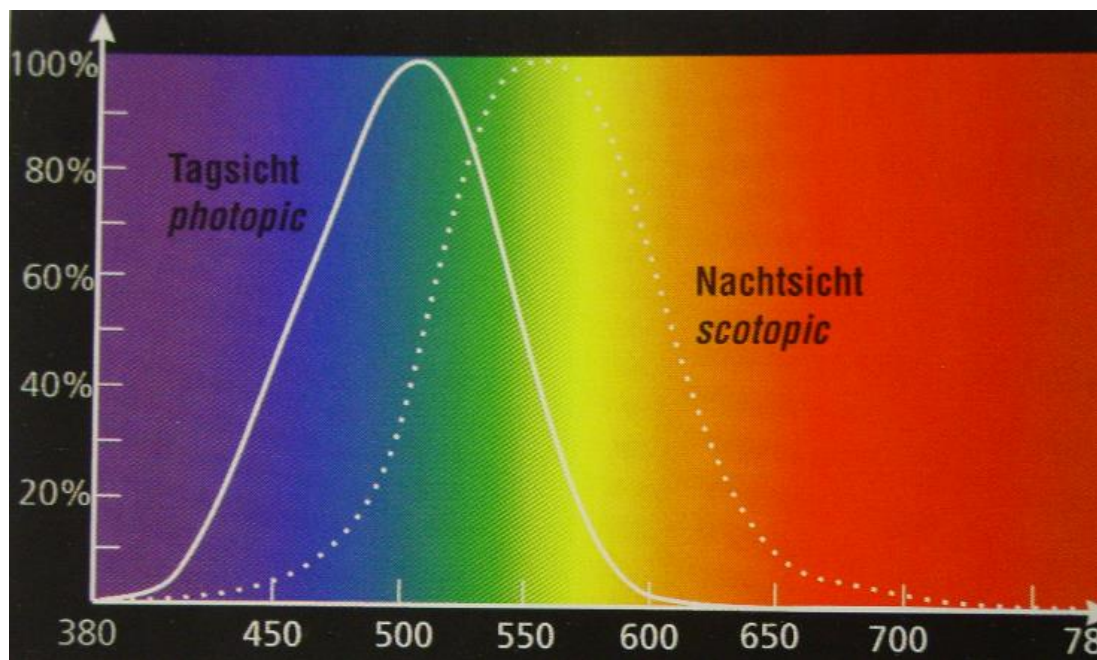


## 6.1 辐射量与光学量

### 三. 光学量

**光谱光视效率（视见函数）：**任一其它波长的单色光的值 $K_\lambda$ 与 $K_{555}$ 之比表征了人眼对该单色辐射的相对灵敏度。

$$V_\lambda = \frac{K_\lambda}{K_{555}}$$



**明视觉光谱光视函数：**

将黄绿光 $\lambda=555\text{nm}$ 的感觉量定为1，其余波长光的感覺量都小于1，如图中虚线。

**暗视觉光谱光视函数**

以蓝绿光 $\lambda=510\text{nm}$ 的感觉量定为1，如图中实线。



## 6.1 辐射量与光学量

### 三. 光学量

1瓦辐射能通量所相当的流明数:

$$K_{\lambda} = \frac{\Phi_{\lambda}}{P_{\lambda}}$$

视见函数:  $V_{\lambda} = \frac{K_{\lambda}}{K_{555}}$

单位波长内:  $\Phi_{\lambda} = K_{\lambda} P_{\lambda} = V_{\lambda} P_{\lambda} K_{555}$

$$d\Phi_{\lambda} = V_{\lambda} P_{\lambda} d\lambda K_{555}$$

整个光谱范围内:  $\Phi = K_{555} \int V_{\lambda} P_{\lambda} d\lambda$  (lm) **光通量**

**发光效率:** 辐射体发出的总光通量与总辐射能通量之比

$$\eta = \frac{\Phi}{W} \quad (\text{lm/W})$$



## 6.1 辐射量与光学量

### 三. 光学量

为什么荧光灯比白炽灯省电？



#### 常见光源的发光效率：

白炽灯		10-20lm/w
卤钨灯		15-20lm/w
荧光灯		50-70lm/w
高压钠灯	$\eta = \frac{\Phi}{W}$ (lm/ W)	70-120lm/w
金卤灯		60-90lm/w
LED(白)		60-90lm/w



## 第六章 光能及其传播计算

光线不仅是波面的法线而且还是携带光能的载体，只有携带了足够的光能，到达像空间的光才能有一定的光度水准。

### 主要内容

- 6.1 辐射量与光学量
- 6.2 光学量基本概念
- 6.3 光传播过程中光学量的变化规律
- 6.4 光学系统的光能损失
- 6.5 成像系统像面的光照度



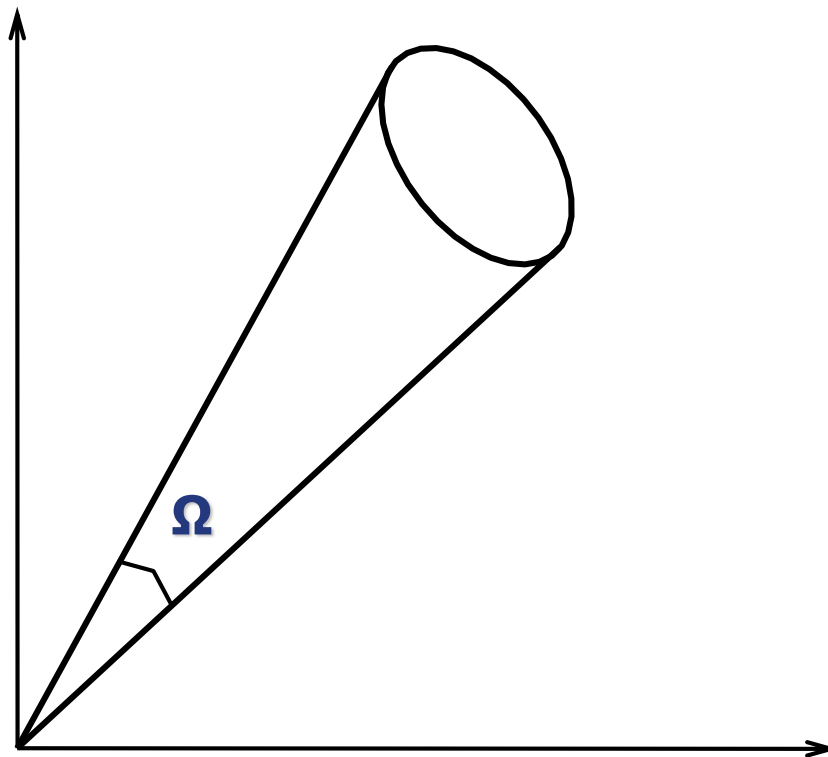


## 6.2 光学量基本概念

### 一. 立体角

#### 立体角的意义和它在光度学中的应用

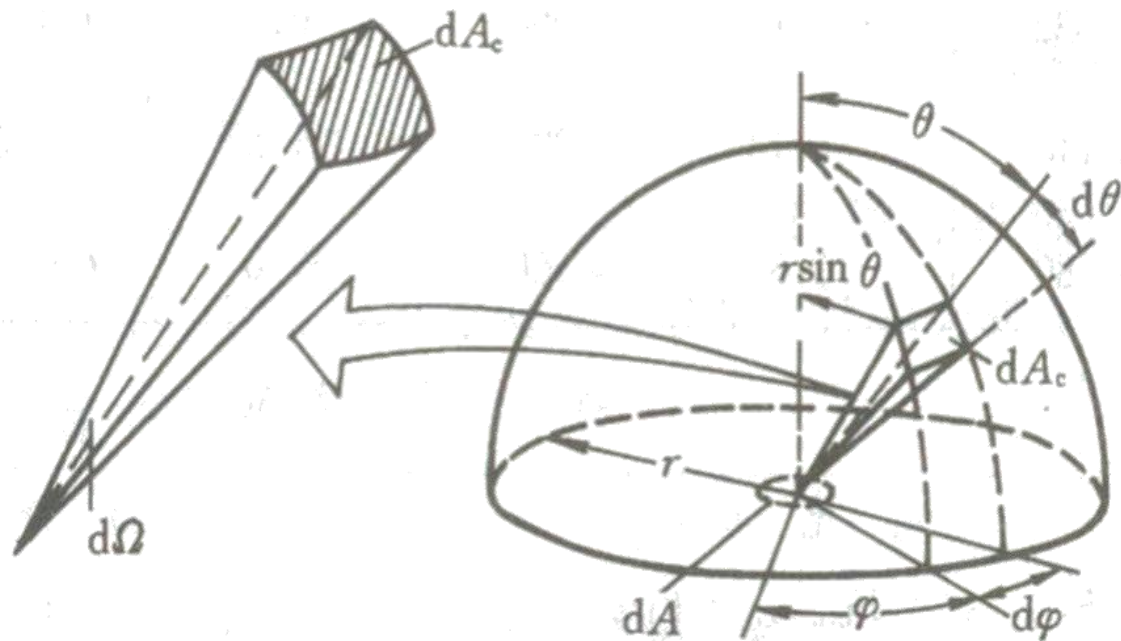
- 立体角的定义：  
一个任意形状的封闭  
锥面所包含的空间称为  
立体角，用  $\Omega$  表示。





## 6.2 光学量基本概念

### 一. 立体角



立体角定义图

$$ds = r d\theta \times r \sin \theta d\varphi$$

$$= r^2 \sin \theta d\theta d\varphi$$

$$d\Omega = \frac{ds}{r^2} = \sin \theta d\theta d\varphi$$

假定一个圆锥面的半顶角为 $\alpha$ ,  
该圆锥所包含的立体角为

$$\Omega = \pi \alpha^2$$

$\alpha$ 较小时

$$\Omega = \int d\Omega$$

$$= \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\alpha \sin \theta d\theta = 4\pi \sin^2 \frac{\alpha}{2}$$



## 6.2 光学量基本概念

### 一. 立体角

**立体角单位：**以锥顶为球心，以 $r$ 为半径作一圆球，若锥面在圆球上所截出的面积等于 $r^2$ ，则该立体角为一个“球面度”（ $sr$ ）。

➤整个球面的面积为 $4\pi r^2$ ，对于整个空间有

$$\Omega = \frac{4\pi r^2}{r^2} = 4\pi$$

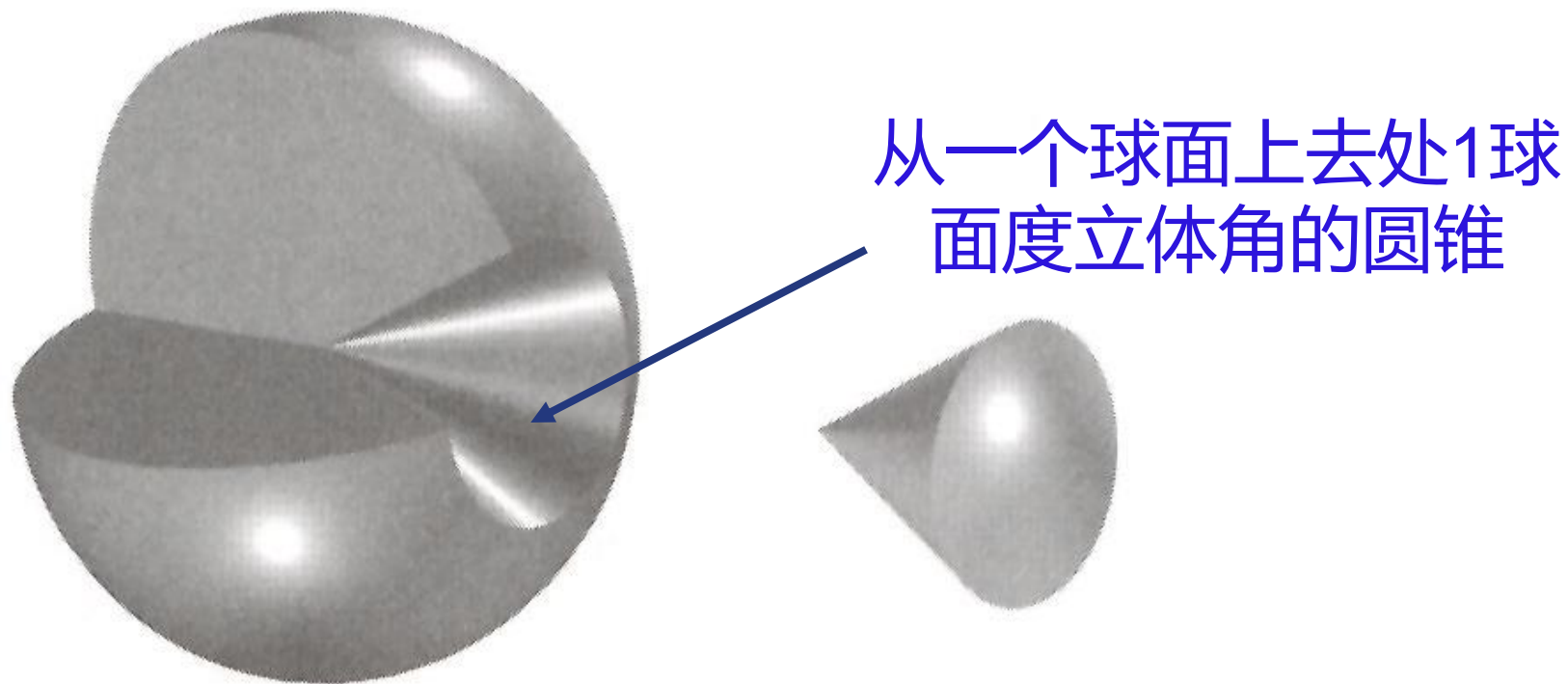
即整个空间等于 **$4\pi$ 球面度**



## 6.2 光学量基本概念

### 一. 立体角

- ❖ 立体角是平面角向三维空间的推广。在二维空间， $2\pi$ 角度覆盖整个单位圆。
- ❖ 在三维空间， $4\pi$ 的球面度立体角覆盖整个单位球面。





## 6.2 光学量基本概念

### 二. 发光强度

**发光强度：**描述光源在各个方向上的发光特性，点光源沿某一给定方向上在单位立体角内发出的光通量：

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$$

单位：坎德拉cd， $1\text{cd} = 1\text{lm/sr}$ ，即在单位球面度(立体角)内发出的光通量；

- 国际单位制中七个基本单位之一，光度学中其它单位都是导出单位。该定义是1979年第十六届国际度量衡会议规定的；
- **1坎德拉** 代表发光体发出的电磁波频率为 $540 \times 10^{12}$ 赫兹的单色辐射（即波长为555nm的单色光），在光源给定方向上的辐射强度为 $1/683 = \text{W/sr}$ 或 $1\text{lm/sr}$ 。



## 6.2 光学量基本概念

### 二. 发光强度

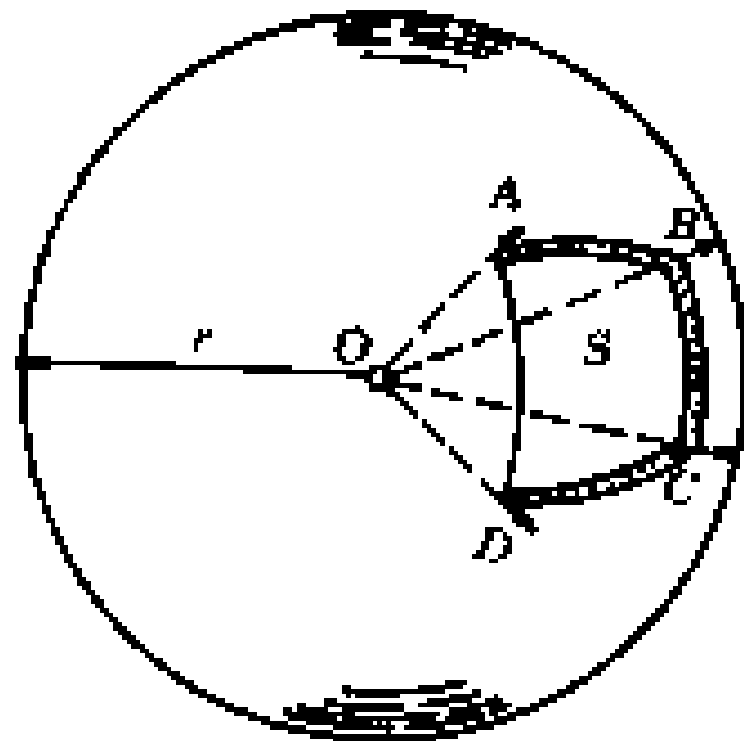
如图，在一半径为  $r$  的球心  $O$  处放一光源，它向球表面ABCD所包围面积 $S$ 上发出 $\Phi$  lm的光通量。

面积 $S$  在球心形成的立体角为 $w$ :  $w = S/r^2$

则这一方向的发光强度为:  $I = \Phi / w$

对于均匀点光源,发出光通量 $\Phi$ : 则发光强度  
(Luminous Intensity) 为:

$$I = \frac{\Phi}{4\pi}$$



常用光强的介绍: 探照灯  $\sim 10^6$ cd; 路灯(400W)  $\sim 5000$ cd

矿灯: 1200cd; 烛光: 1cd.

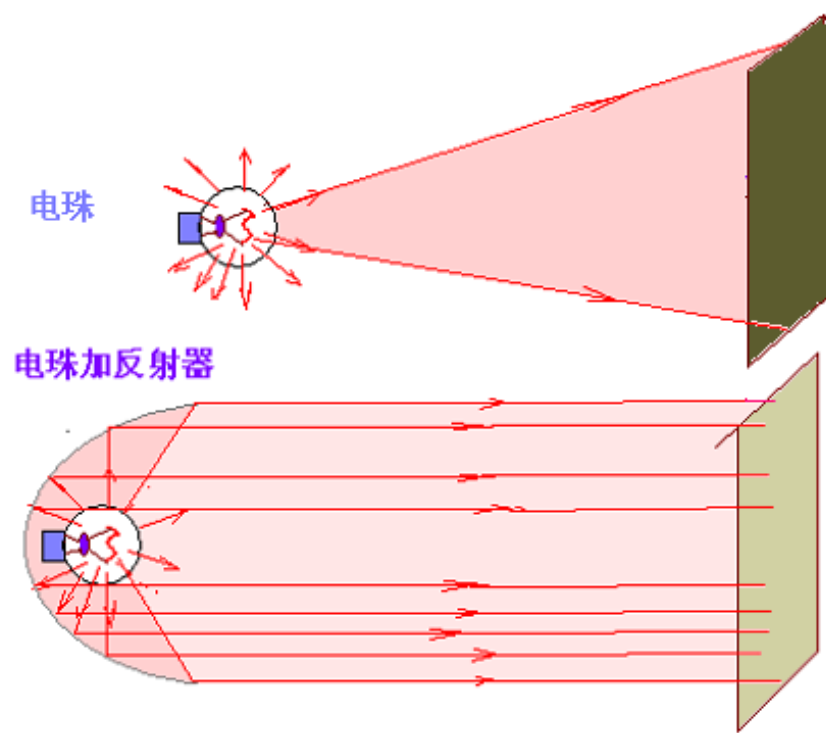




## 6.2 光学量基本概念

### 二. 发光强度

光源发出的全部光通量不可能被任何光学系统增大，但是光学系统够可以改变光通量的分布，以使它集中于某一方向上，比如普通的电珠以及放在手电筒的光强图示。



说明光强的图示



## 6.2 光学量基本概念

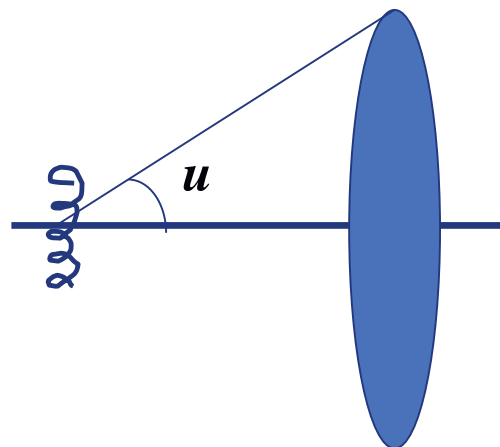
### 二. 发光强度

例：仪器用6V 15W钨丝灯泡，已知其发光效率为14lm/W, 该灯泡和一聚光镜连用，灯丝中心对聚光镜所张的孔径角为 $\sin u = 0.25$ . 若把灯丝看成是各向均匀发光的点光源，求灯泡的总光通量和进入聚光镜的光通量。

解：总光通量： $\Phi = \eta \times W = 14 \times 15 \text{lm} = 210 \text{lm}$

聚光镜的光通量为：

$$\Phi_{\text{聚}} = 4\pi I_0 \sin^2 \frac{u}{2} = 4\pi \frac{\Phi}{4\pi} \sin^2 \frac{u}{2} = 3.3 \text{ lm}$$





## 6.2 光学量基本概念

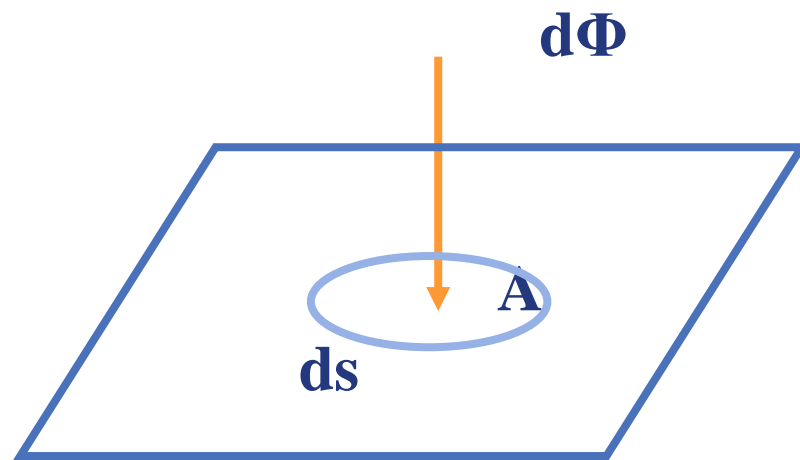
### 三. 光照度

光照度(illuminance): 单位面积上接收到的光通量大小, 表征了受照面被照明的亮暗程度。

$$E = \frac{d\Phi}{dS} \quad \text{单位: 勒克斯 (lux), 国际代号Lx}$$

$$1 \text{ lx} = 1 \text{ lm/m}^2 = 1 \text{ cd} \cdot \text{sr/m}^2$$

1米半径的圆球球心上放一发光强度为1坎德拉的点光源, 则在球面上产生的光照度正好是1勒克斯。





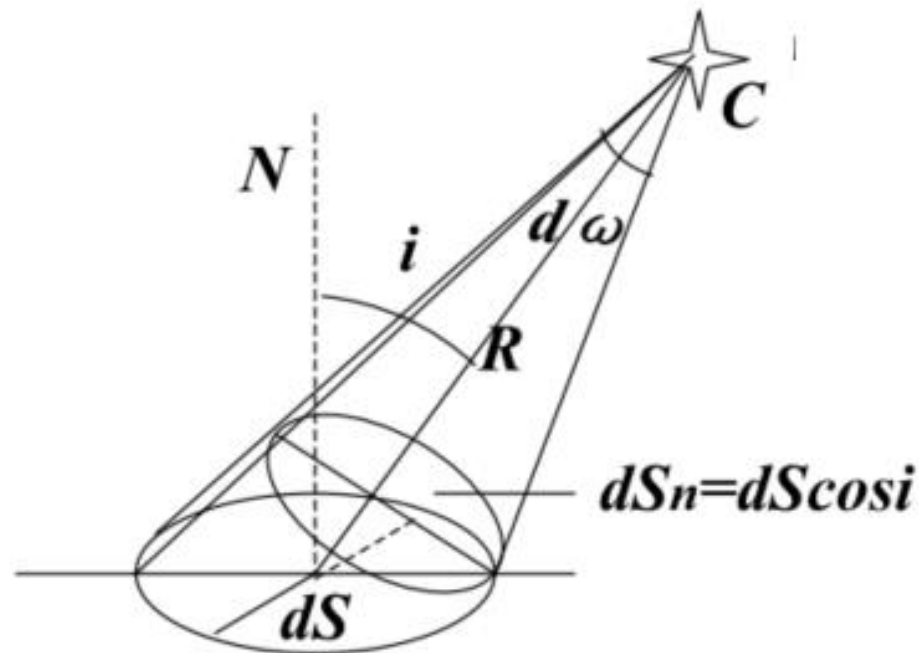
## 6.2 光学量基本概念

### 三. 光照度

如右图 点光源照明某个面积，有

$$d\Phi = Id\omega = I \frac{dS_n}{R^2}$$

$$E = \frac{d\Phi}{dS} = I \frac{dS_n}{dS \cdot R^2} = \frac{I}{R^2} \cos i$$



自习教室占座位，如果要求 $E$ 大些，应占何处？



## 6.2 光学量基本概念

### 三. 光照度

#### 典型值

晚间无月光时的光照度:  $3 \times 10^{-4} \text{ lx}$

夏天的太阳下: 80000-100000lx

月光下的光照度: 0.2 lx

办公室: 500 lx

车间一般照明: 150-300 lx

体育场(国际): 垂直1200 lx



## 6.2 光学量基本概念

### 三. 光照度

**例：**一个40W 的钨丝灯发出的总的光通量为500 lm，设各向发光强度相等，求以灯为中心，半径分别为 $r=1m$ ， $2m$ ， $3m$ 时的球面的光照度是多少？

$$\because E = \frac{\Phi}{S}$$

$$r = 1m \Rightarrow S = 4\pi r^2 = 4\pi, \quad E = \frac{500}{4\pi} \approx 40lx$$

$$r = 2m \Rightarrow S = 4\pi r^2 = 16\pi, \quad E = \frac{500}{16\pi} \approx 10lx$$

$$r = 3m \Rightarrow S = 4\pi r^2 = 36\pi, \quad E = \frac{500}{36\pi} \approx 4.4lx$$





## 6.2 光学量基本概念

### 三. 光照度

例：一房间，长、宽、高分别为： $5m$ ， $3m$ ， $3m$ ，一个发光强度为 $I=60cd$ 的灯挂在天花板中心，离地面 $2.5m$ ，1) 求灯正下方地板上的光照度；2) 在房间角落处地板上的光照度。

解：据点光源照度的计算公式有

$$E = \frac{I \cos i}{r^2}$$

当分析灯正下方地板上的光照度时， $i = 0$ ，有：

$$E = \frac{I \cos 0}{r^2} = \frac{60 \times 1}{2.5^2} = 9.6lx$$



## 6.2 光学量基本概念

### 三. 光照度

例：一房间，长、宽、高分别为： $5m$ ， $3m$ ， $3m$ ，一个发光强度为 $I=60cd$ 的灯挂在天花板中心，离地面 $2.5m$ ，1) 求灯正下方地板上的光照度；2) 在房间角落处地板上的光照度。

2)灯到角落的距离 $r$ 和 $i$ 容易求得为：

$$r = \sqrt{2.5^2 + \left(\frac{5}{2}\right)^2 + \left(\frac{3}{2}\right)^2} = 3.841m \quad \cos i = \frac{2.5}{r}$$

根据照度公式有

$$E = \frac{I \cos i}{r^2} = \frac{60 \times 2.5/r}{r^2} = 2.65lx$$

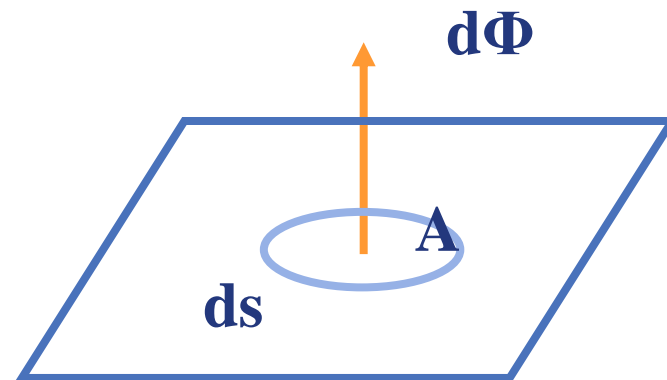


## 6.2 光学量基本概念

### 四. 光出射度

**光出射度**：用单位面积所发射的光通量描述光源上某点的发光本领，表征了光源上不同位置的发光特性。

$$M = \frac{d\Phi}{dS} \quad \text{单位：勒克斯,} \\ 1 \text{ lx} = 1 \text{ lm/m}^2$$



透射面或反射面接受光通量，可作为二次光源发出光通量。 $M=\rho E$ ， $\rho$ 为透射率或反射率，与波长有关，因而物体呈现彩色。

对所有波长， $\rho$  值相同且接进于1，这种物体称为**白体**；

对所有波长， $\rho$  值接近于0的物体称为**黑体**。



## 6.2 光学量基本概念

### 四. 光出射度

#### 发光体光出射度的典型值:

钨丝灯、HID灯:  $\sim 10^6 \text{ cd/m}^2$ .

荧光灯:T12:  $3\text{-}4000 \text{ cd/m}^2$ .

T8卤粉:  $> 8000 \text{ cd/m}^2$ .

三基色粉:  $> 10000 \text{ cd/m}^2$ .

T5:  $16000 \text{ cd/m}^2$ .

CFL:  $40000 \text{ cd/m}^2$ .

#### 人眼适应的 最好亮度:

**$100 \text{ cd/m}^2$ .**

白云:  $8000 \text{ cd/m}^2$ .

道路:  $0.5\text{-}2.0 \text{ cd/m}^2$ .



## 6.2 光学量基本概念

### 五. 光亮度

- 单位面积上接收到的光通量大小，并没有计入辐射的方向，不能全面表征受照面或发光面在不同方向上的辐射特性

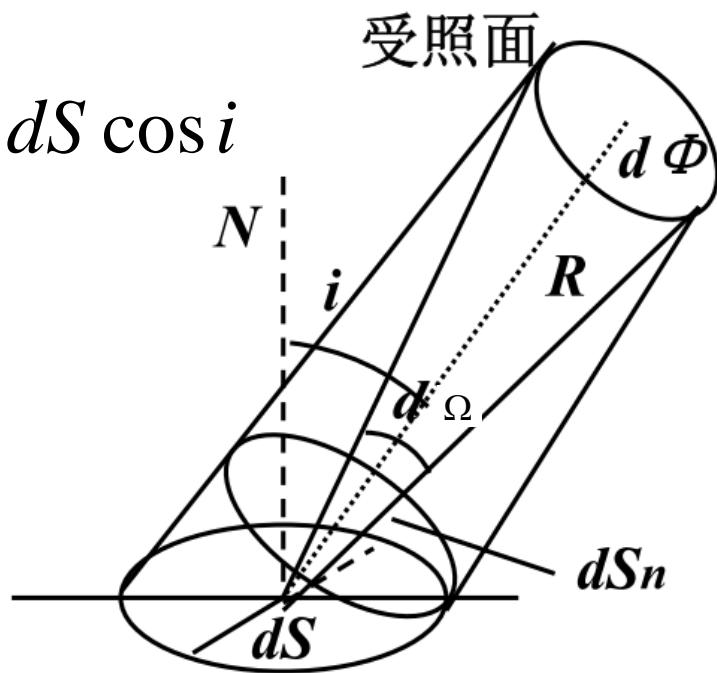
光亮度(brightness):  $d\Phi \propto d\Omega$ ,  $d\Phi \propto dS_n$ ,  $dS_n = dS \cos i$

给出比例系数 $L_i$ :  $d\Phi = L_i \cdot d\Omega \cdot dS \cos i$

$L_i$ ---光源在与法线成 $i$ 角方向上的光亮度

单位: 尼特 (nit), 国际代号nt  $1 \text{ nt} = 1 \text{ cd/m}^2$

1尼特: 面积1平方米的发光表面在法线方向的发光强度为1cd时的亮度。





## 6.2 光学量基本概念

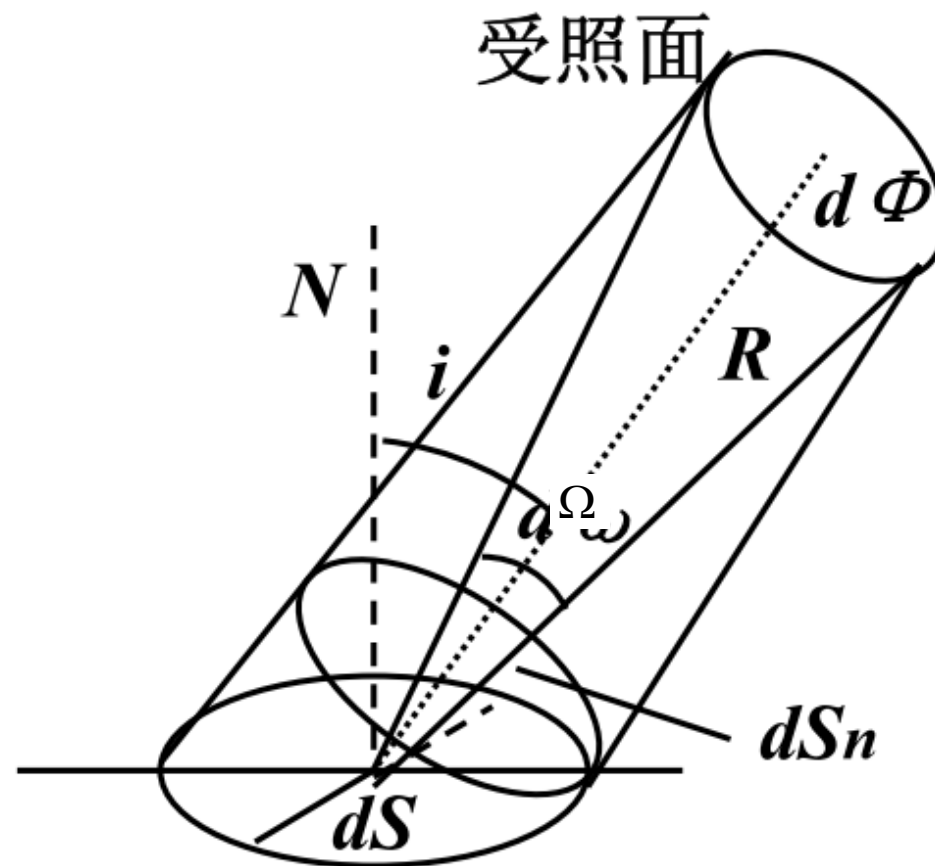
### 五. 光亮度

$$L_i = \frac{d\Phi}{d\Omega \cdot dS \cos i}$$

考虑发光强度:  $I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$

➔  $L_i = \frac{I_i}{dS_n}$

$i$  方向单位面积上的  
发光强度





## 6.2 光学量基本概念

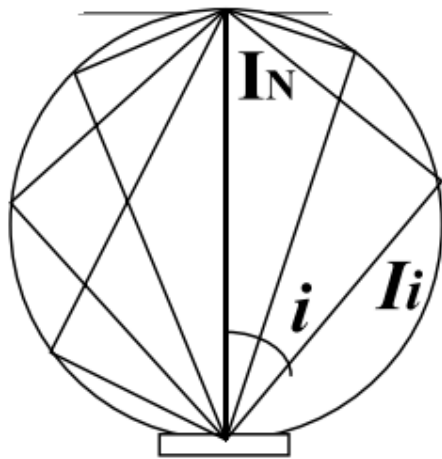
### 五. 光亮度

**余弦辐射体**：光源各个方向上的**发光强度**随方向角*i* 的余弦而变化，**光亮度**为常数。

$$I_i = I_N \cos i$$

$$L_i = \frac{I_i}{dS_n} = \frac{I_N \cos i}{dS_n}$$

$$= \frac{I_N \cos i}{dS \cdot \cos i} = \frac{I_N}{dS} = \text{常数}$$



Johann Heinrich Lambert  
(1728–1777)

Swiss Nationality: Mathematician, physicist,  
astronomer, and philosopher

Known for

- First Proof that  $\pi$  is irrational
- Beer–Lambert law
- Lambert's cosine law
- Transverse Mercator projection
- Lambert W function



## 6.2 光学量基本概念

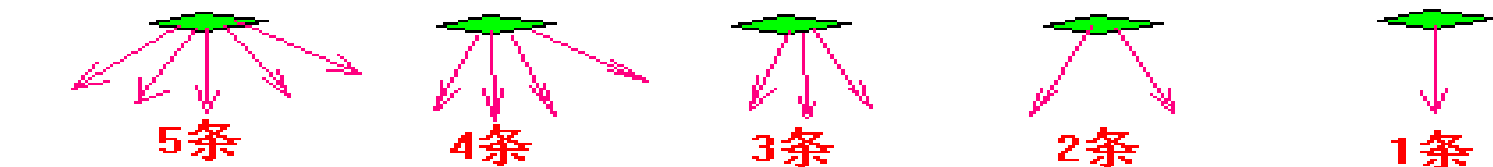
### 光度学中的基本量

物理量	单位	关系
发光强度	坎德拉 (cd)	基本单位 $1\text{cd} = 1\text{lm/sr}$
光通量	流明 (lm)	$1\text{lm} = 1\text{cd}\cdot\text{sr}$
光照度	勒克斯 (lx)	$1\text{lx} = 1\text{lm}/\text{m}^2 = 1\text{cd}\cdot\text{sr}/\text{m}^2$
光出射度	与光照度相同	
光亮度	尼特 (nt) 熙提 (st)	$1\text{nt} = 1\text{cd}/\text{m}^2$ $1\text{nt} = 1\text{cd}/\text{cm}^2$



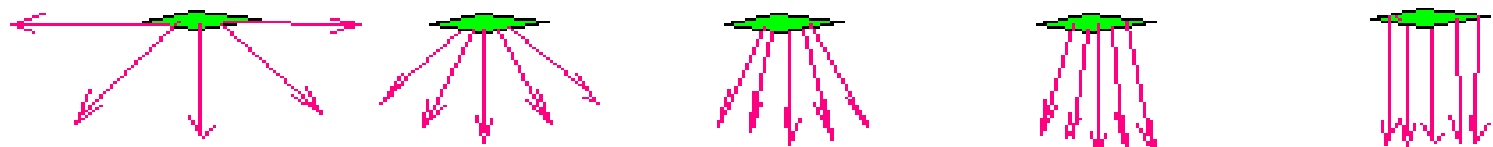
## 6.2 光学量基本概念

### 光度学中的基本量



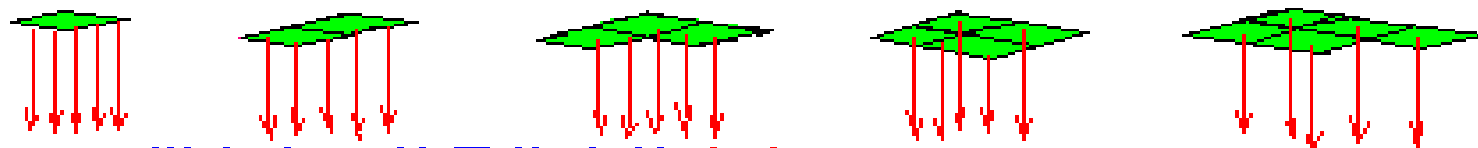
同样时间内发出的光线有多少

光通量



同样多的光线 光线的方向不同

发光强度



同样方向和数量的光线来自的发光面积不同

光亮度

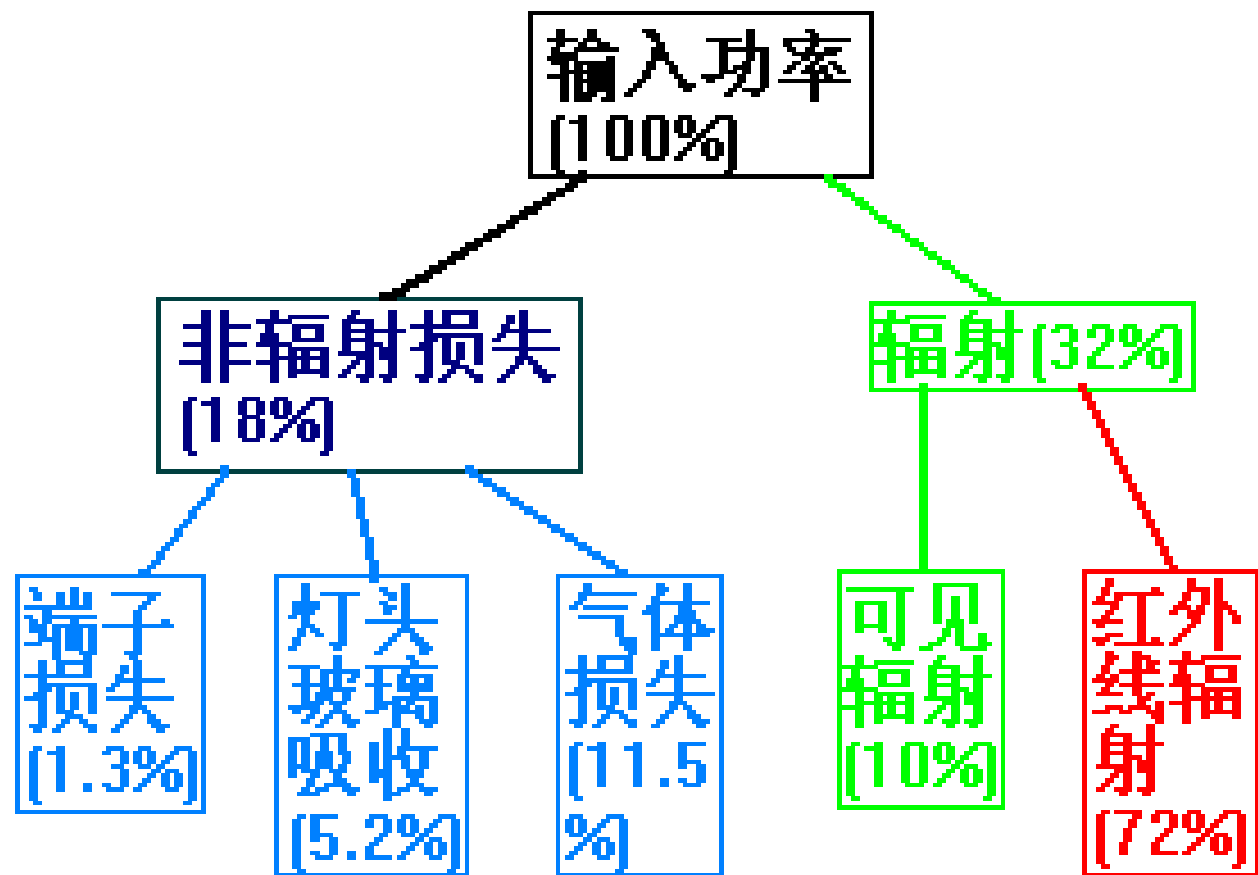


光照度



## 6.2 光学量基本概念

### 光度学中的基本量



白炽灯的能量分布图

光通量

发光强度

光亮度

光照度



## 第六章 光能及其传播计算

光线不仅是波面的法线而且还是携带光能的载体，只有携带了足够的光能，到达像空间的光才能有一定的光度水准。

### 主要内容

- 6.1 辐射量与光学量
- 6.2 光学量基本概念
- 6.3 光传播过程中光学量的变化规律
- 6.4 光学系统的光能损失
- 6.5 成像系统像面的光照度



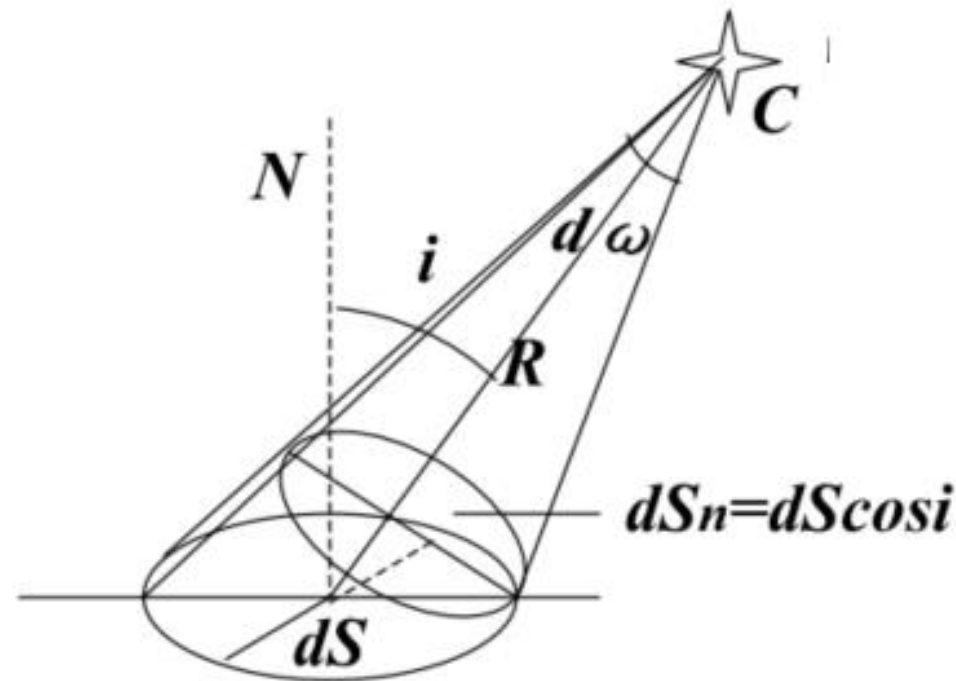
## 6.3 光传播过程中光学量的变化规律

### 一. 点光源光照度的计算

如右图 点光源照明某个面积 $dS$ , 有

$$d\Phi = Id\omega = I \frac{dS_n}{R^2}$$

$$E = \frac{d\Phi}{dS} = I \frac{dS_n}{dS \cdot R^2} = \frac{I}{R^2} \cos i$$



点光源直接照射到某一面积所产生的光照度与光源的发光强度成正比，与光源到受照面积的距离平方成反比，并且还与照射方向有关。

## 6.3 光传播过程中光学量的变化规律

### 二. 面光源的光照度

光源的发光面积 $dA_s$ ，光源亮度 $L$ ，在距离为 $r$ 的 $dA$ 平面上形成的光照度

$$E = \frac{d\Phi}{dA}$$

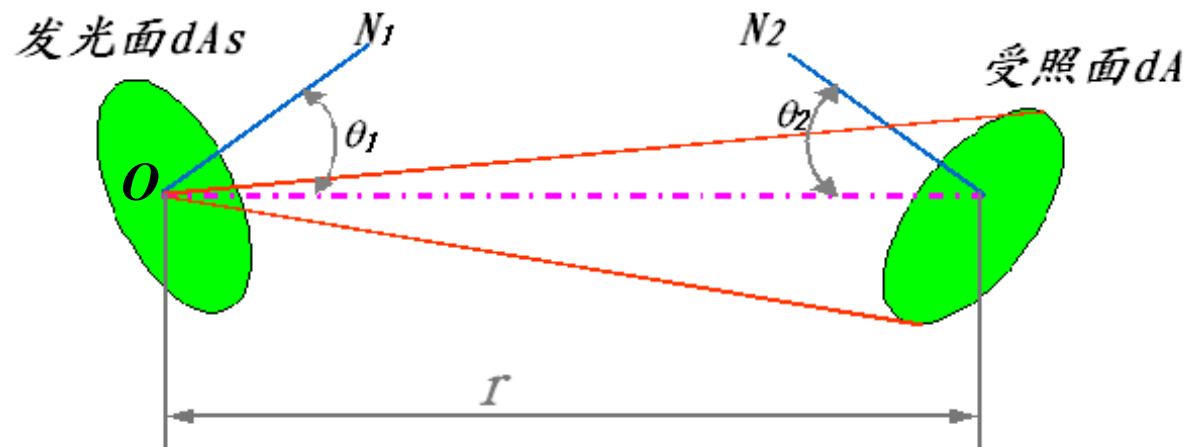
$$d\Phi = LdA_s \cos \theta_1 d\Omega$$

$d\Omega$ 为受照面 $dA$ 对 $O$ 点所张立体角。

$$E = \frac{d\Phi}{dA} = \frac{LdA_s \cos \theta_1 \cos \theta_2}{r^2}$$

$$d\Omega = \frac{dA \cdot \cos \theta_2}{r^2}$$

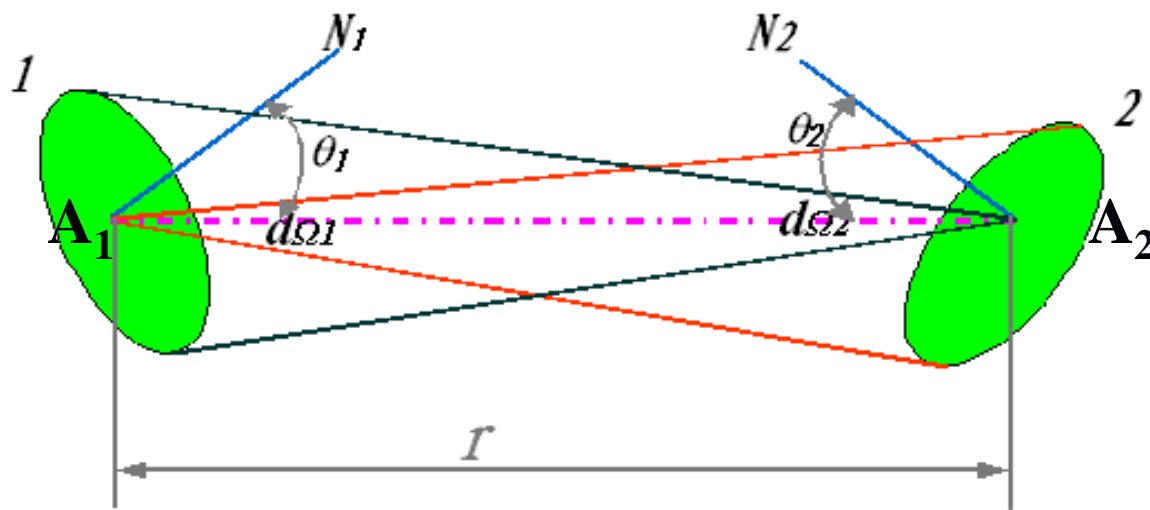
**互易性：**  $dA$ 以相同亮度 $L$ 发光照射 $dA_s$ ，当二者面积相等，则得出同样的光照度，即二者可互易



如果是受照面 $dA$ 照射 $dA_s$ 呢？

## 6.3 光传播过程中光学量的变化规律

### 三. 光亮度在同一介质中的传递-光束的光亮度



假定 $A_1A_2$ 直线为均匀透明介质中的一条光线

讨论：元面积 $A_1$ 和 $A_2$ 在光线前进方向上的 $L_1$ 和 $L_2$ 之间的关系

**元光管**：中心相距 $r$ 的元面积 $dS_1$ 和 $dS_2$ 限定的从一个元面积到另一个元面积光束的通道；





## 6.3 光传播过程中光学量的变化规律

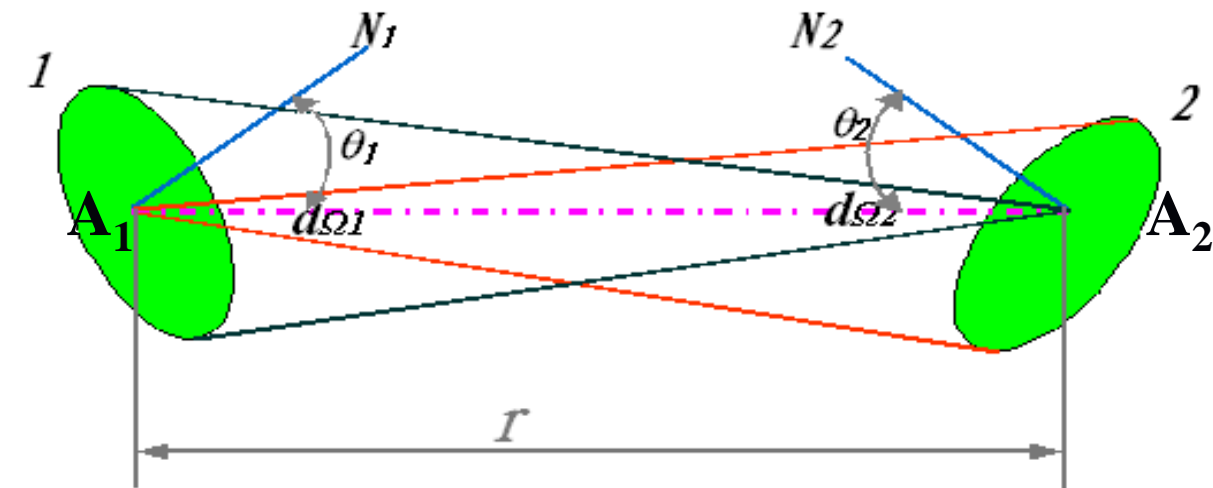
### 三. 光亮度在同一介质中的传递-光束的光亮度

❖  $dS_1$  输入到  $dS_2$  内的光通量为  $d\Phi_1$

$$\begin{aligned} d\Phi_1 &= L_1 dS_1 \cos \theta_1 d\Omega_1 \\ &= L_1 dS_1 \cos \theta_1 \frac{dS_2 \cos \theta_2}{r^2} \end{aligned}$$

❖  $dS_2$  输入到  $dS_1$  内的光通量为  $d\Phi_2$

$$\begin{aligned} d\Phi_2 &= L_2 dS_2 \cos \theta_2 d\Omega_2 \\ &= L_2 dS_2 \cos \theta_2 \frac{dS_1 \cos \theta_1}{r^2} \end{aligned}$$



❖ 若不考虑光能损失

$$d\Phi_1 = d\Phi_2 \quad \longrightarrow \quad L_1 = L_2$$

光在同一介质中传播，忽略散射及吸收，则在传播中的任一截面上，光通量与亮度不变。光束的亮度就是光源的亮度



## 6.3 光传播过程中光学量的变化规律

### 四. 光束经界面反射和折射后的亮度变化

利用元光管分析反射光束和折射光束的亮度变化规律。（忽略散射、吸收损失的情况下）

$$d\Phi = LdS \cos i d\Omega = LdS \cos i (\sin i \cdot di \cdot d\varphi)$$

$$d\Phi' = L'dS \cos i' d\Omega' = L'dS \cos i' (\sin i' \cdot di' \cdot d\varphi')$$

$$d\Phi'' = L''dS \cos i'' d\Omega'' = L''dS \cos i'' (\sin i'' \cdot di'' \cdot d\varphi'')$$

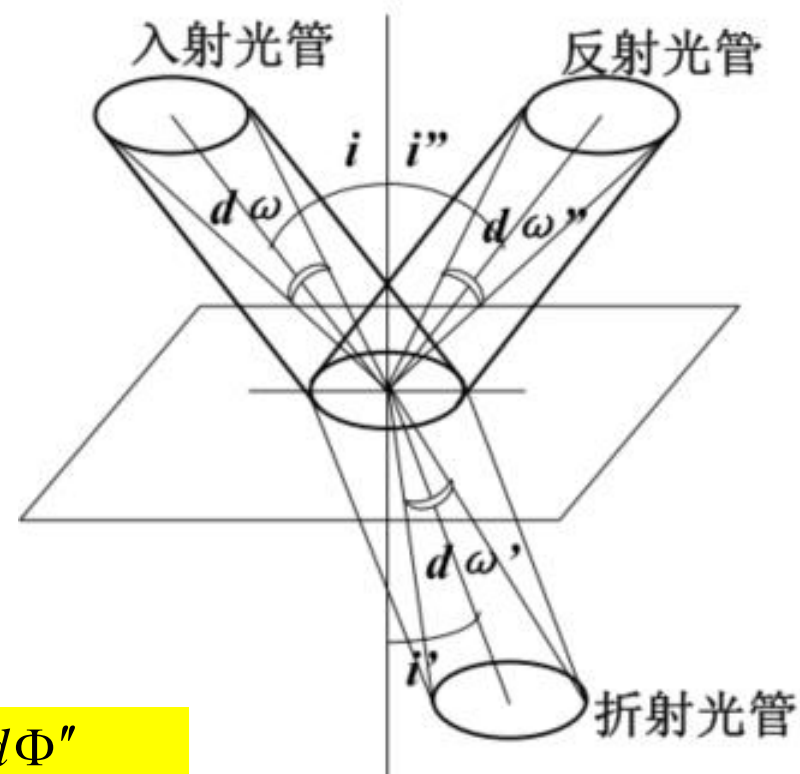
$$\varphi = \varphi' = \varphi'' \quad \longrightarrow \quad d\varphi = d\varphi' = d\varphi''$$

$$i = i'' \quad \longrightarrow \quad di = di''$$

$$\frac{L''}{L} = \frac{d\Phi''}{d\Phi} = \rho$$

$$d\Phi = d\Phi' + d\Phi'' \quad \longrightarrow \quad d\Phi' = (1 - \rho)d\Phi \quad \longrightarrow \quad \frac{d\Phi'}{d\Phi} = 1 - \rho$$

$$\frac{L'}{L} = (1 - \rho) \frac{\cos i \sin i \cdot di}{\cos i' \sin i' \cdot di'} = (1 - \rho) \frac{\cos i \cdot di}{\cos i' \cdot di'} \frac{n'}{n} = (1 - \rho) \left( \frac{n'}{n} \right)^2$$



## 6.3 光传播过程中光学量的变化规律

### 四. 光束经界面反射和折射后的亮度变化

- 空气中的光学系统，入射光束L和出射光束L'的光亮度关系为：

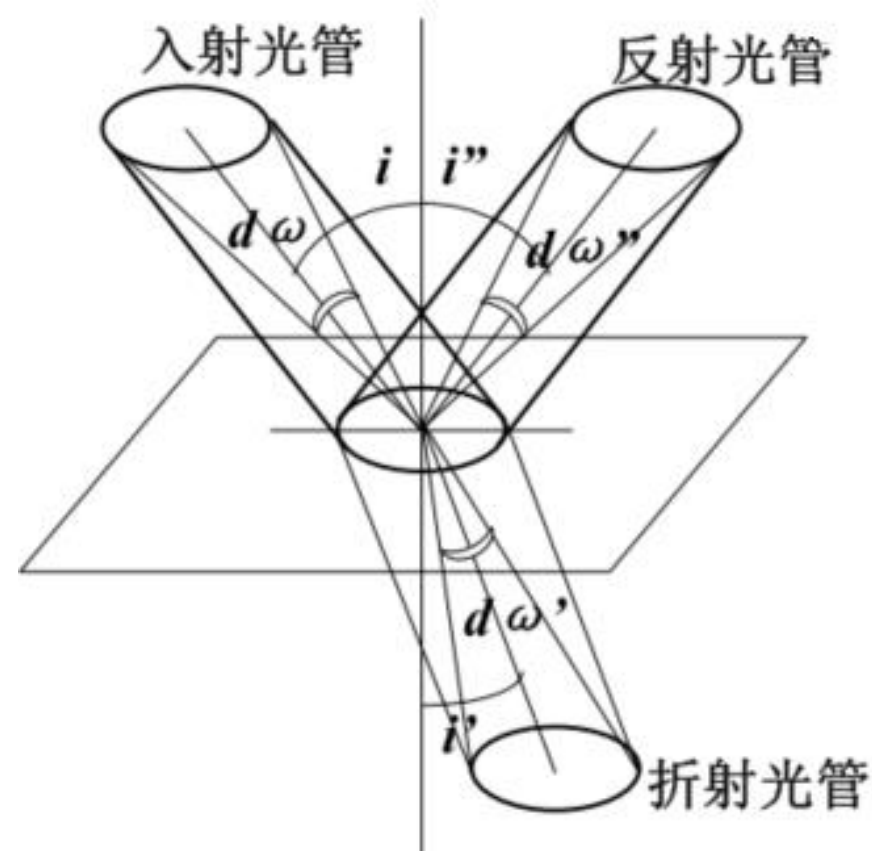
$$L' = L(1 - \rho)$$

- 若光束在界面折射时不存在反射损失  $\rho=0$ ，折射前后光通量相等，则有：

$$\frac{L'}{L} = \left(\frac{n'}{n}\right)^2 \quad \longrightarrow \quad \frac{L}{n^2} = \frac{L'}{n'^2}$$

- 任意多介质中：
$$\frac{L_1}{n_1^2} = \frac{L_2}{n_2^2} = \dots = \frac{L_n}{n_k^2} = L_0$$

**折合光亮度**





## 第六章 光能及其传播计算

光是具有能量的，光束是能量的载体；

光学系统是能量传输系统；

本章研究光学系统传输光能量的数量规律；

- 分析光能量传递过程中影响其变化的因素和规律；
- 如何有效地利用光能量、减少传递过程中的能量损失；
- 成像过程中保证像面上获得所必需的光能量。



# 光度学中的基本量

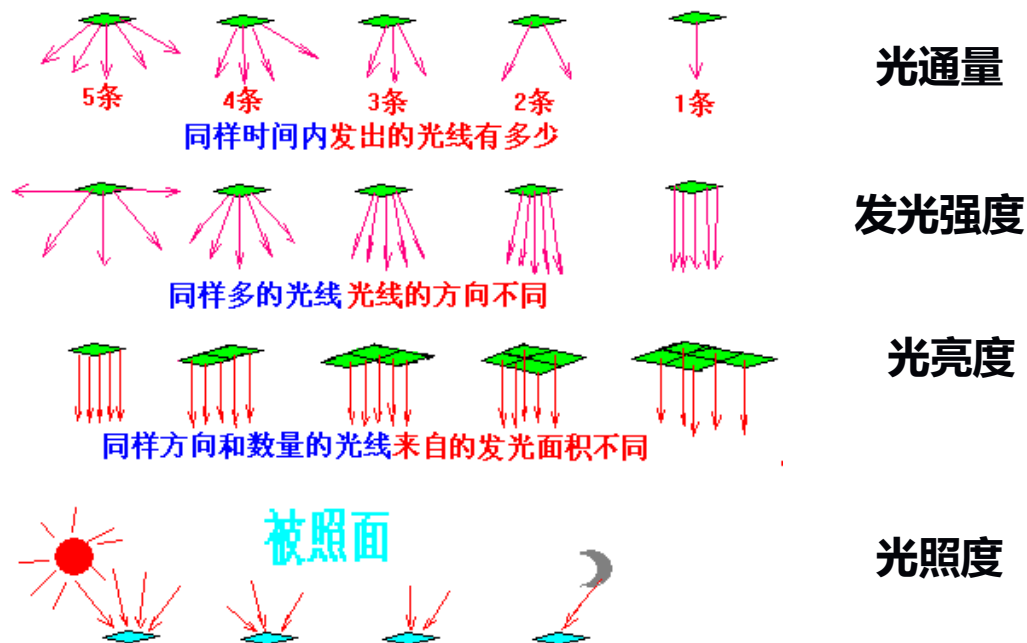
**光通量(Luminous flux):** 按辐射能通量所引起的光作用而确定的功率  $\Phi$

**发光强度 (luminous intensity) :** 描述光源在各个方向上的发光特性, 点光源沿某一给定方向上在单位立体角内发出的光通量:  $I$

**光照度(illuminance):** 单位面积上接收到的光通量大小, 表征了受照面被照明的亮暗程度,  $E$

**光出射度 (luminous exitance) :** 用单位面积所发射的光通量描述光源上某点的发光本领, 表征了光源上不同位置的发光特性,  $M$ 。

**光亮度(Luminance):** 单位面积上接收到的光通量大小, 表征了受照面被照明的亮暗程度,  $L$ 。(单位面积上的发光强度)



## 光度学中的基本量

物理量	单位	关系
发光强度	坎德拉 (cd)	基本单位, $1\text{cd} = 1\text{lm/sr}$
光通量	流明 (lm)	$1\text{lm} = 1\text{cd}\cdot\text{sr}$
光照度	勒克斯 (lx)	$1\text{lx} = 1\text{lm}/\text{m}^2$ , $1\text{lx} = 1\text{cd}\cdot\text{sr}/\text{m}^2$
光出射度		与光照度相同
光亮度	尼特 (nt)	$1\text{nt} = 1\text{cd}/\text{m}^2$ , $1\text{nt} = 1\text{cd}/\text{cm}^2$

# 光度学中的基本量

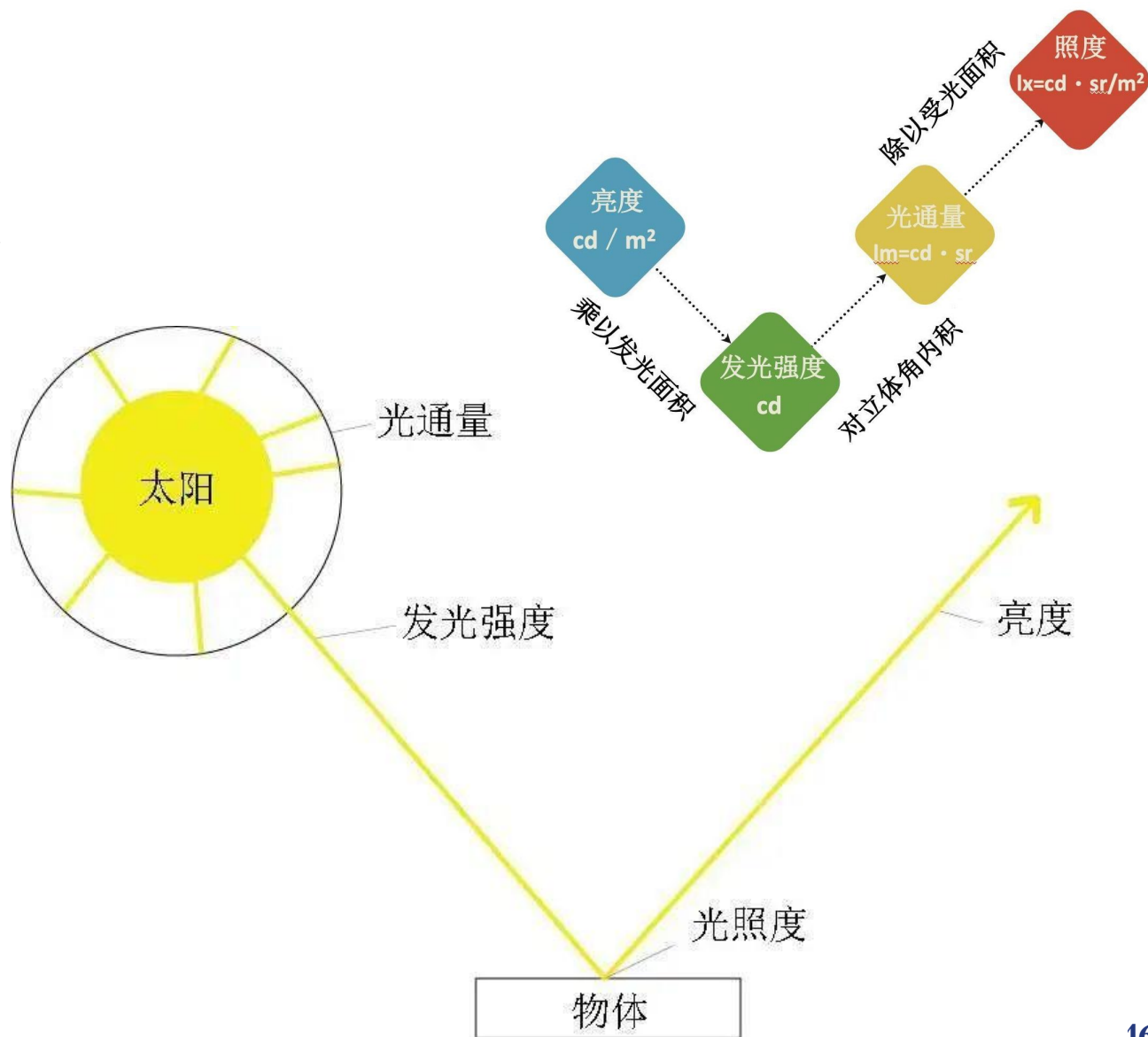
**光通量(Luminous flux):** 按辐射能通量所引起的光作用而确定的功率  $\Phi$

**发光强度 (luminous intensity) :** 描述光源在各个方向上的发光特性, 点光源沿某一给定方向上在单位立体角内发出的光通量:  $I$

**光照度(illuminance):** 单位面积上接收到的光通量大小, 表征了受照面被照明的亮暗程度,  $E$

**光出射度 (luminous exitance) :** 用单位面积所发射的光通量描述光源上某点的发光本领, 表征了光源上不同位置的发光特性,  $M$ 。

**光亮度(Luminance):** 单位面积上接收到的光通量大小, 表征了受照面被照明的亮暗程度,  $L$ 。(单位面积上的发光强度)

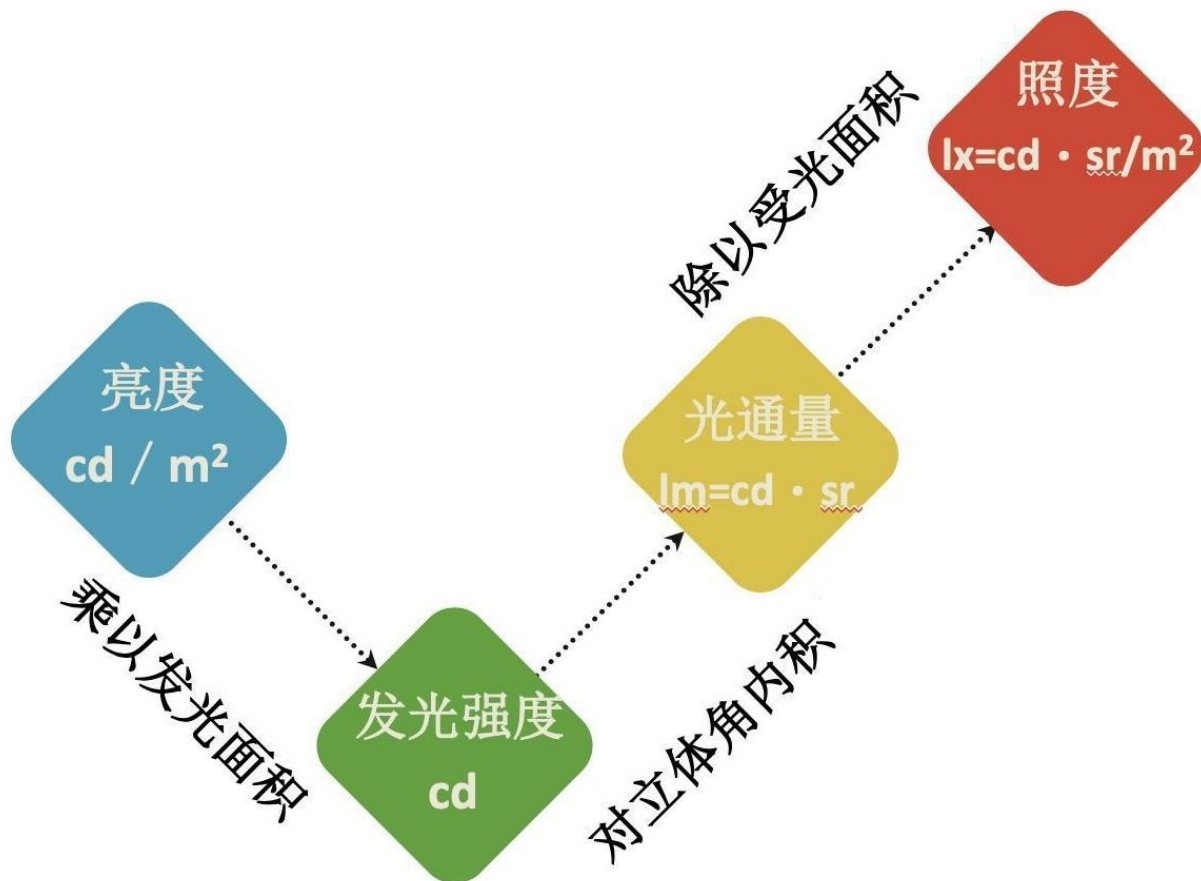




# 光度学中的基本量



怎么选台灯?





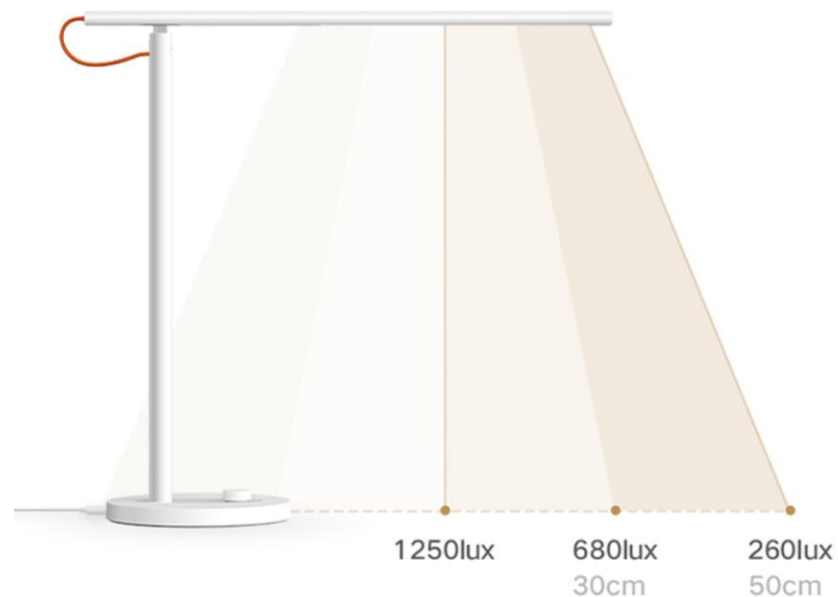


# 光度学中的基本量



国标GB/T 9473-2017《读写作业台灯性能要求》

- 分为国A和国AA两个等级。
- 国A级要求台灯离圆心半径距离在50cm的三分之一扇形区域内照度为250LX以上，
- 同等条件下的国AA级台灯照度要求在500LX以上，若是照度不够的话，就会影响使用者的视力，且专注力也会不集中。







## 第六章 光能及其传播计算

光线不仅是波面的法线而且还是携带光能的载体，只有携带了足够的光能，到达像空间的光才能有一定的光度水准。

### 主要内容

- 6.1 辐射量与光学量
- 6.2 光学量基本概念
- 6.3 光传播过程中光学量的变化规律
- 6.4 光学系统的光能损失
- 6.5 成像系统像面的光照度



## 6.4 光学系统的光能损失

### 光能损失

透射面的反射损失

透射材料的吸收损失

反射面不完全反射光能损失

- 光学零件与空气接触面；
- 胶合面----前后折射率差不多，损失可忽略；
- 漫反射、散射、多次反射-改善材料及加工质量。
- 空气中的吸收可以忽略；
- 光学零件中的吸收---损失 $1 - \tau$ ， $\tau$ 为介质的内部透过率
- 镀膜反射面，损失 $1 - \rho_r$

光学系统的全部损失，示例P89



## 6.4 光学系统的光能损失

### 一. 透射面的反射损失

光线从一介质透射到另一介质时，在抛光界面处必然伴随有反射损失。

从物理光学知，一个抛光界面透射时反射损失近似地为

$$\rho = \left( \frac{n - n'}{n + n'} \right)^2$$

$n$ 、 $n'$  是界面前、后介质的折射率。

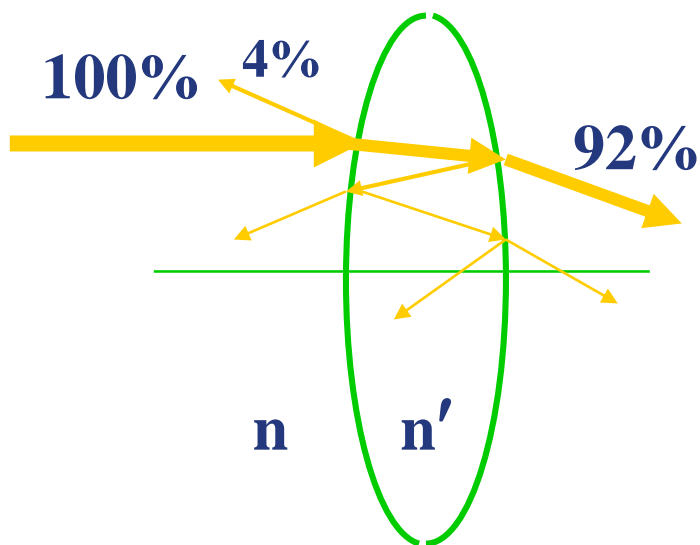
$\rho$ ：折射时的反射率，该面的反射光通量与入射光通量之比。

- 该近似计算式，适用于入、折射角小于全反射角的情况。
- 从该式可见，当界面两边的折射率差较大时（例如空气与玻璃的界面），不论光线由光疏介质进入光密介质或是反之，都有一部分光被反射损失。

## 6.4 光学系统的光能损失

### 一. 透射面的反射损失

#### 光学玻璃表面的反射光能损失



玻璃与空气的接触面数	透过率	反射损失
1	$0.96^1 = 0.96$	0.04
2	$0.96^2 = 0.92$	0.08
5	$0.96^5 = 0.82$	0.18
10	$0.96^{10} = 0.67$	0.33
15	$0.96^{15} = 0.46$	0.46
20	$0.96^{20} = 0.44$	0.56

折射率为1.5的玻璃与空气交接面上的反射损失达到了4%。

镀增透膜可以使每面的反射率 $r$ 可降到0.02~0.01以下，即 $\tau=0.98\sim0.99$ 。20个镀增透膜面的透过率： $\tau=0.99^{20}\approx0.82$ ，



## 6.4 光学系统的光能损失

### 二.透射材料的吸收损失

除反射损失外，光经介质传播时的吸收损失也是不能忽略的。如果光束在介质中某一位置的光亮度 $L_0$ ，传播了 $d$  cm路程后去掉被吸收部分所剩余的亮度为：

$$L = L_0 \tau^d$$

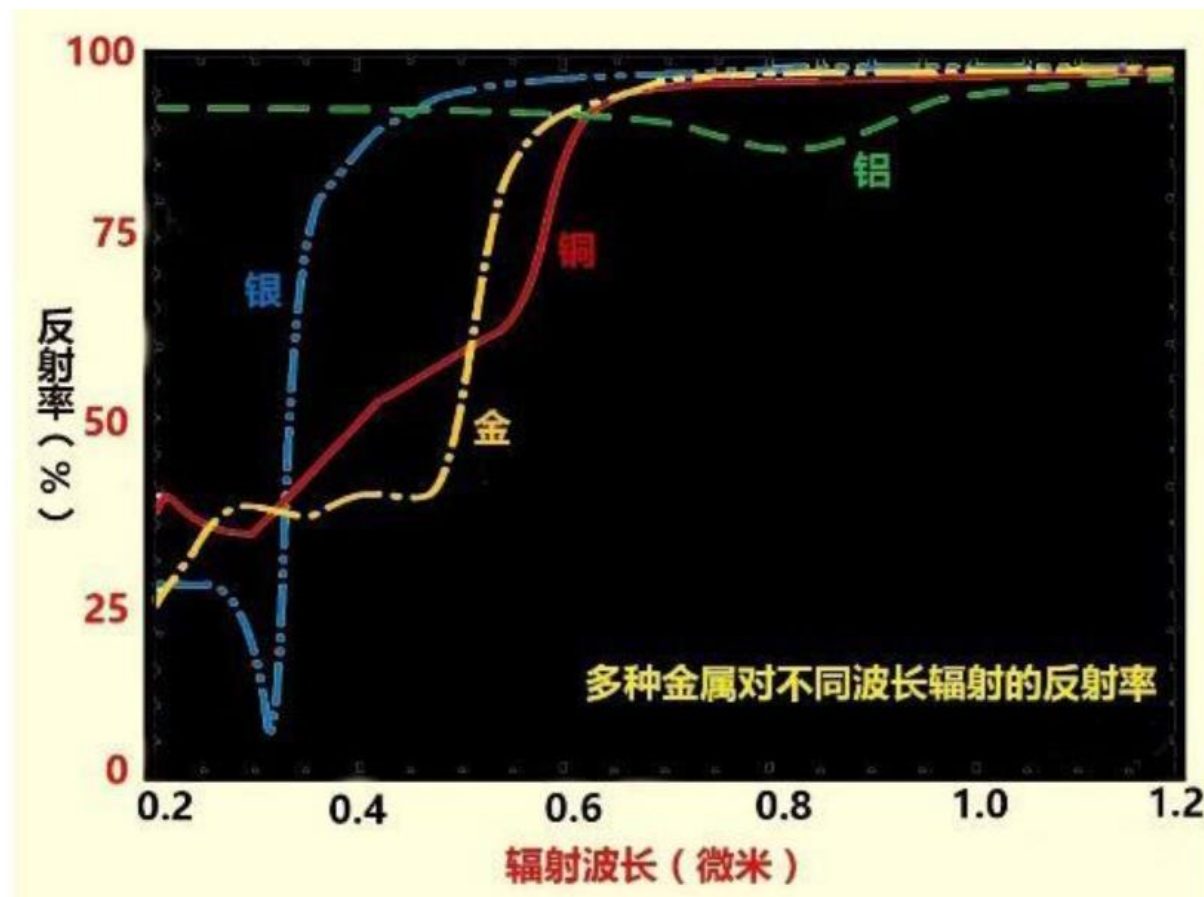
- $\tau$  是介质内部的透过率 (internal transmittance)  $1 - \tau$ 为介质的吸收率。
- 吸收率的大小与介质本身的性质和光的波长有关。



## 6.4 光学系统的光能损失

### 三.反射面不完全反射损失

- 光学系统的金属层反射面也不能把入射于其上的光能全部反射，是因为它也要吸收光能；



- 金属层反射面的光学特性由其反射率决定，且随波长而异，可见光范围内常用的是镀银和镀铝面。



## 6.4 光学系统的光能损失

### 四.光学系统的损失计算

为计算光经整个光学系统后的全部损失，须知道：

- 系统中与空气接触的**折射面数**、光学零件的**沿轴厚度**、**折射率和吸收率**；
- 如果折射面有**增透膜**，须知道增透膜以后的实际反射率；
- 如果系统中有**反射镜**还应该已知其**面数和反射率**，但一般不计全反射时的损失；
- 具体算例参见教材p91。

$$L' = \left( \frac{n'_k}{n_1} \right)^2 L \rho_r^m \prod_{i=1}^k (1 - \rho_i) \prod_{j=1}^{k-1} \tau_j^{d_j} = KL \left( \frac{n'_k}{n_1} \right)^2$$

经过光学系统后的光亮度

$k$ : 系统总面数

$K$ : 系统的总透过率

$m$ : 金属反射面数

$d$ : 各光学元件近似的沿轴厚度



## 第六章 光能及其传播计算

光线不仅是波面的法线而且还是携带光能的载体，只有携带了足够的光能，到达像空间的光才能有一定的光度水准。

### 主要内容

- 6.1 辐射量与光学量
- 6.2 光学量基本概念
- 6.3 光传播过程中光学量的变化规律
- 6.4 光学系统的光能损失
- 6.5 成像系统像面的光照度



## 6.5 成像系统像面的光照度

### 一. 通过光学系统的光通量

假设物体为余弦辐射体（光亮度 $L$ 在各方向上是定值），物面上 $dS$ ，在 $u$ 方向 $d\Omega$ 立体角内的光通量为：

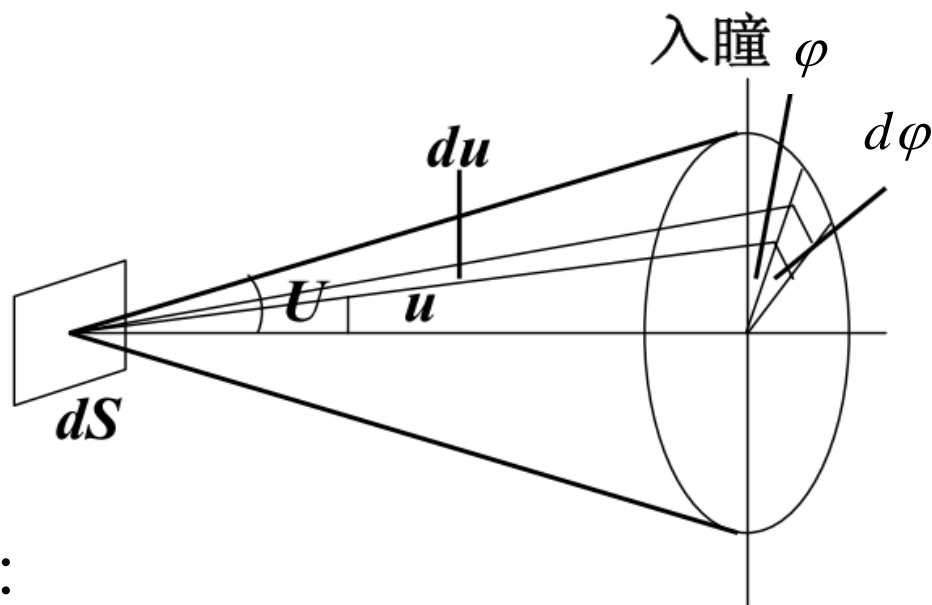
$$d\Phi = L \cos u dS d\Omega = L \cos u dS (\sin u \cdot du \cdot d\varphi)$$

则 $dS$ 发出的能进入系统入瞳的的总的光通量为：

$$\Phi = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^U L \cos u \sin u du \cdot dS = 2\pi L dS \int_0^U \cos u \sin u du = \pi L dS \sin^2 U$$

如果系统的能量透过率为 $K$ ，则由出瞳出射的光通量为：  $\Phi' = \pi K L dS \sin^2 U$

同理，从像面 $dS'$ 可得出出瞳出射的光通量：  $\Phi' = \pi L' dS' \sin^2 U'$





## 6.5 成像系统像面的光照度

### 二.轴上像点的光照度

$$\Phi' = \pi K L dS \sin^2 U \quad \longrightarrow \quad E' = \frac{\Phi'}{dS'} = \pi K L \sin^2 U \frac{dS}{dS'} = \frac{1}{\beta^2} \pi K L \sin^2 U$$

$$\Phi' = \pi L' dS' \sin^2 U' \quad \longrightarrow \quad E' = \frac{\Phi'}{dS'} = \pi L' \sin^2 U' = \pi K L \sin^2 U' \left( \frac{n'}{n} \right)^2$$

$L' = KL \left( \frac{n'}{n} \right)^2$

||



正弦条件:  $\beta = \frac{n}{n'} \frac{\sin U}{\sin U'}$

- 正弦条件是实际光学系统对垂轴小面积以宽光束成完善像的条件，从能量角度而言，表示无光能分散；
- 光学系统孔径越大，像面照度越大；
- 系统放大率越大，像面照度越小（若放大率较大，为了保证像面足够的像面照度，更要求照明好，孔径角要大。）

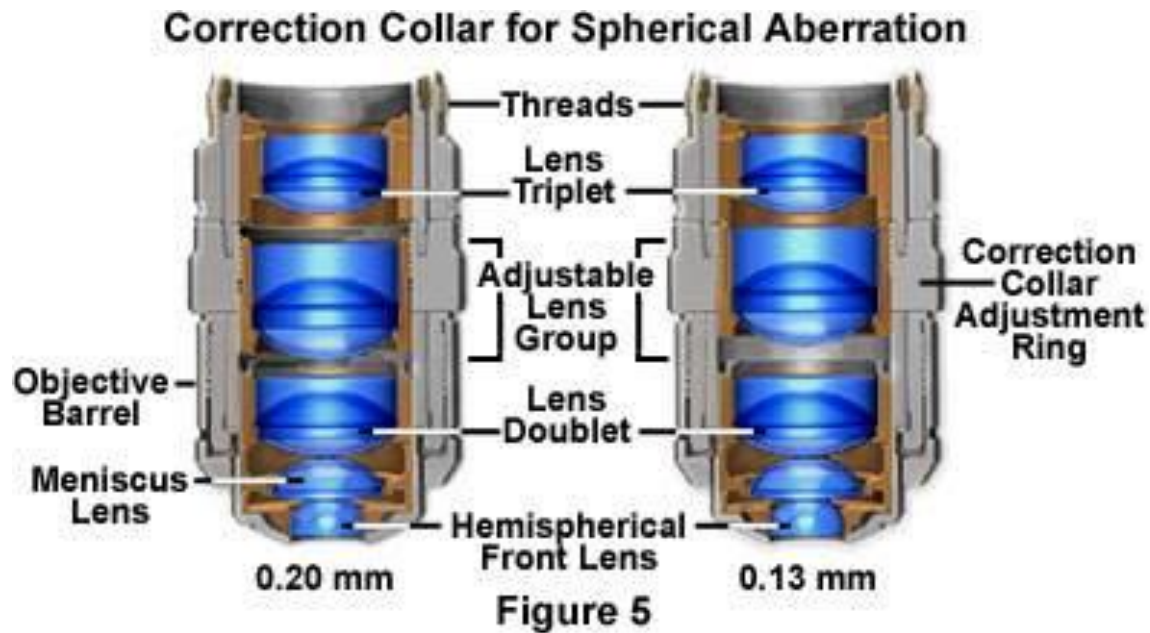


高倍显微镜是应该选择大孔径还是小孔径？



## 6.5 成像系统像面的光照度

### 二.轴上像点的光照度



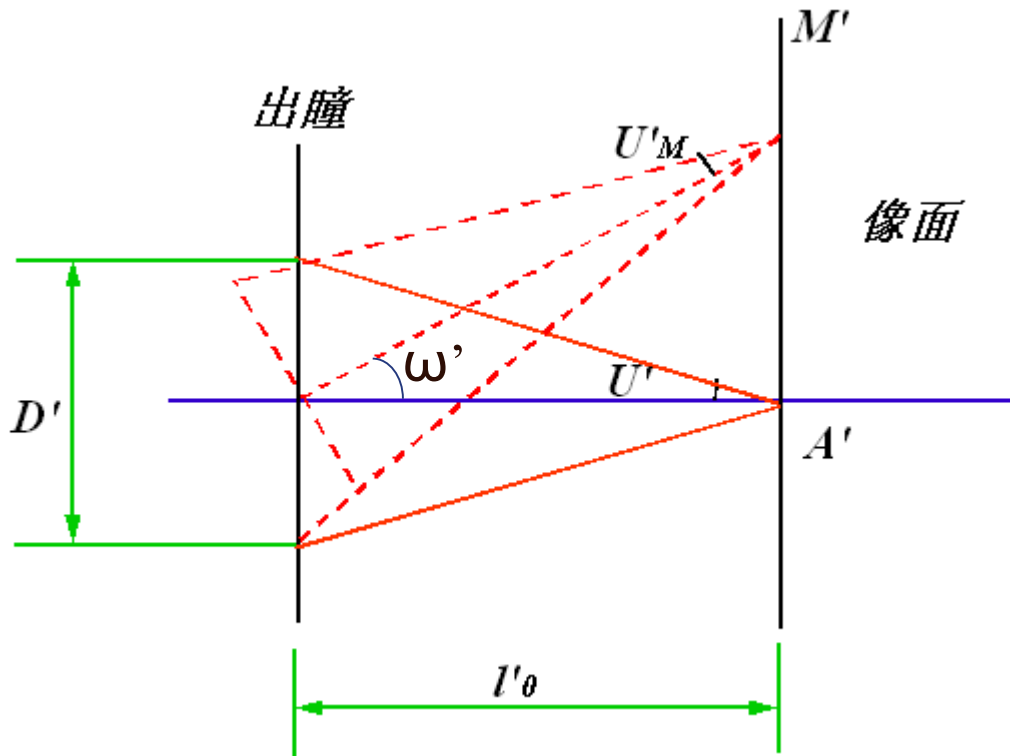
物镜

## 6.5 成像系统像面的光照度

### 三.轴外像点的光照度

轴外点 $M'$

- 轴外像点 $M'$  的主光线和光轴间的夹角 $\omega'$
- 轴外点 $M$ 的像方视场角  $U'_M$
- 轴外点的像方孔径角



当物面亮度均匀时,

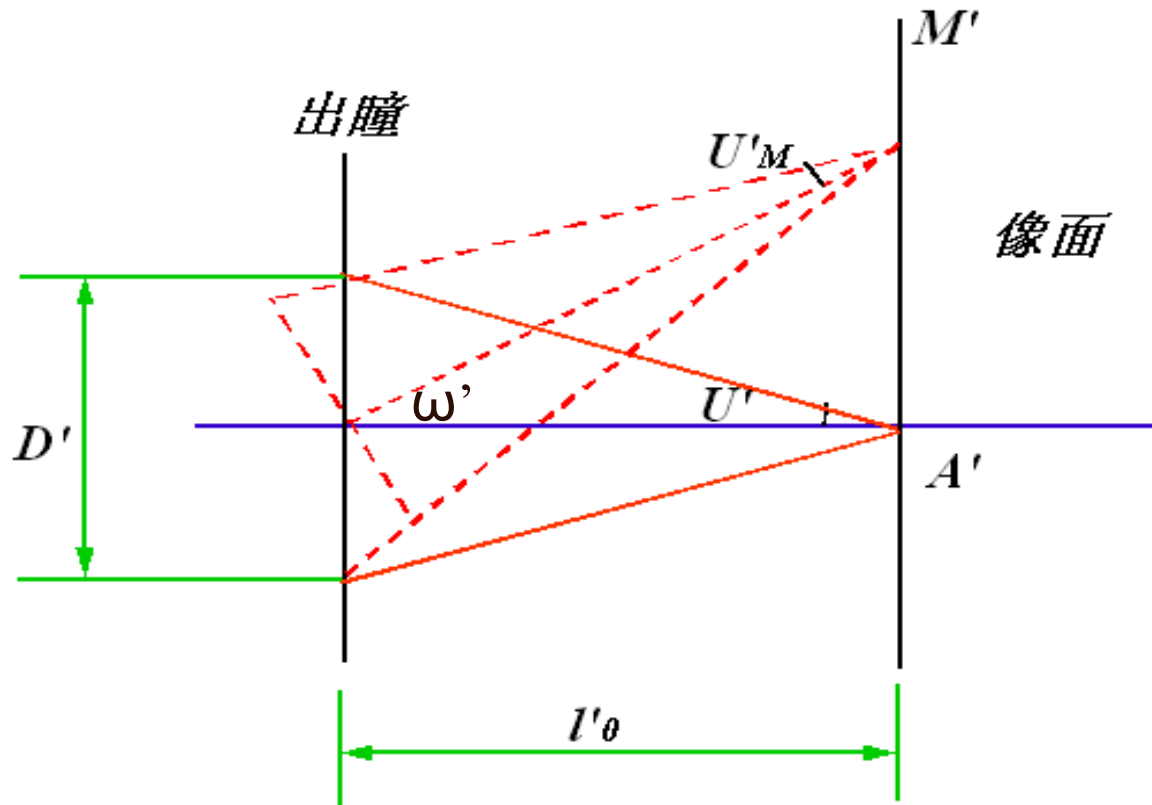
$$E'_M = \frac{n'^2}{n^2} K \pi L \sin^2 u'_M$$


$$E'_M = \frac{n'^2}{n^2} K \pi L \sin^2 u'_M$$

$$\sin u'_M \approx \tan u'_M$$

$$= \frac{\frac{D'}{2} \cos \omega'}{\frac{l'_0}{\cos \omega'}} = \frac{D' \cos^2 \omega'}{2l'_0}$$

$$\approx \sin u' \cos^2 \omega'$$



$$E'_M = E' \cos^4 \omega'$$

## 满足条件?

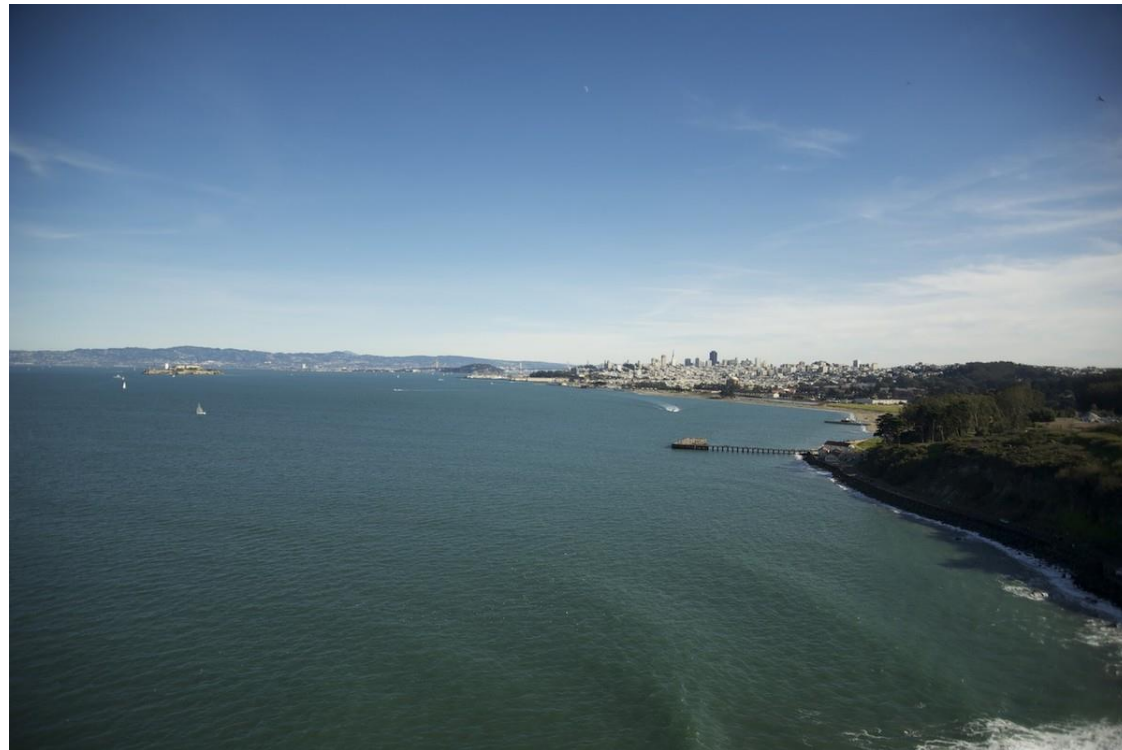
轴外像点的光照度随视场角余弦的四次方而降低。





## 6.5 成像系统像面的光照度

### 三.轴外像点的光照度



为什么有时候拍摄的照片边缘较暗或者发黑？





## 6.5 成像系统像面的光照度

### 三.轴外像点的光照度

- 镜头的“暗角效应”或叫“边沿失光”：每款镜头都或多或少的存在这个问题，因此暗角是否严重也就成为镜头评测的一个重要内容。
- 暗角通常会随着光圈的收缩而减弱直至消失，也可采用相机自带的暗角修正或在后期进行修正。
- 镜头的暗角问题属于目前技术条件下无法解决的问题，只能想办法减轻但是不能彻底去除。

为什么短焦镜头拍的照片边缘较暗或者发黑？





## 习题练习

例1：有一钨丝白炽灯，各方向的平均发光强度正好与灯泡的功率(瓦数)相同，问该灯泡每瓦电功率的发光效率为多少？

解：发光效率：

$$\eta = \frac{\Phi}{W} = \frac{4\pi I_0}{I_0} = 12.57 \quad (\text{lm/W})$$

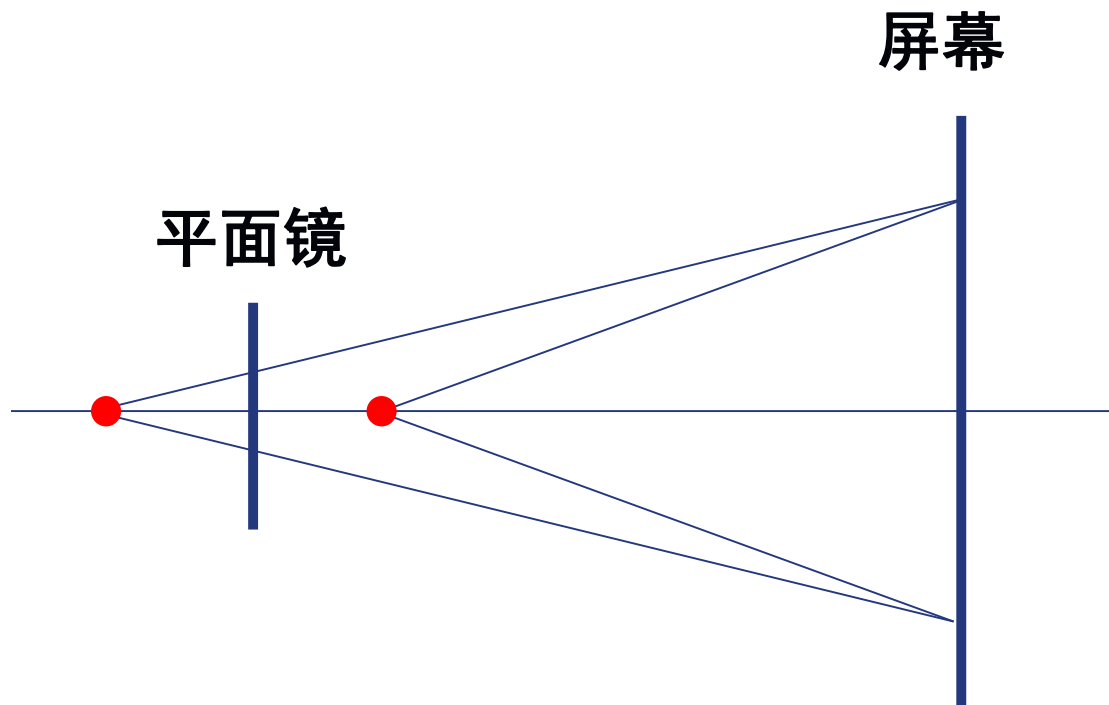




## 习题练习

例2：与一平面镜相距2.5m处有一与之平行的屏幕，其间距平面镜0.5m处有一发光强度为20坎德拉的均匀发光点光源，设平面镜的反射率为0.9，求屏幕上与法线交点处的照度。

分析：平面镜的加入相当于屏幕被点光源和点光源经平面镜所成像像同时照明。



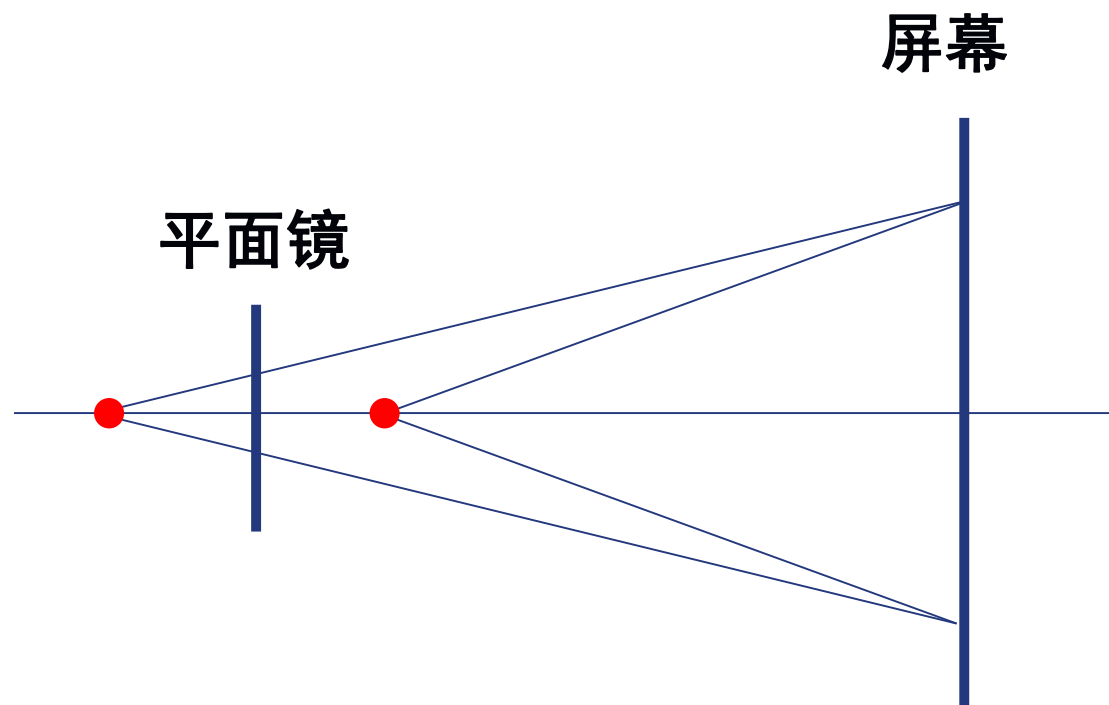


## 习题练习

例2：与一平面镜相距2.5m处有一与之平行的屏幕，其间距平面镜0.5m处有一发光强度为20坎德拉的均匀发光点光源，设平面镜的反射率为0.9，求屏幕上与法线交点处的照度。

解：总的光照度为：

$$\begin{aligned} E &= \frac{I_1}{R_1^2} + \frac{I_2}{R_2^2} = \frac{I_1}{R_1^2} + \frac{\rho I_1}{R_2^2} \\ &= \frac{20}{(2.5 - 0.5)^2} + \frac{0.9 \times 20}{(2.5 + 0.5)^2} = 7(\text{lx}) \end{aligned}$$





## 习题练习

**例3：**拍照时，为获得底片的适度曝光，根据电子测光系统指示，在取曝光时间为1/255 秒时，光圈数(即相对孔径的倒数)应为8。现在为了拍摄快速运动目标，需将曝光时间缩短为1/500秒，问光圈数应改为多少？反之，希望拍照时有较大的景深，需将光圈数改为11，问曝光时间应为多少？

**分析：**像面照度E与相对孔径平方成正比，曝光量等于像面照度乘以曝光时间，光圈数就是相对孔径倒数。

$$Q = Et \propto \left(\frac{D}{f'}\right)^2 t \text{ 为定值}$$

$$t_1 = 1/255, \left(\frac{D}{f'}\right)_1 = \frac{1}{8}; \quad t_2 = 1/500, \therefore \left(\frac{D}{f'}\right)_2 \approx 5.7$$

$$\left(\frac{D}{f'}\right)_3 = \frac{1}{11} \therefore t_3 \approx 1/135(s)$$



## 习题练习

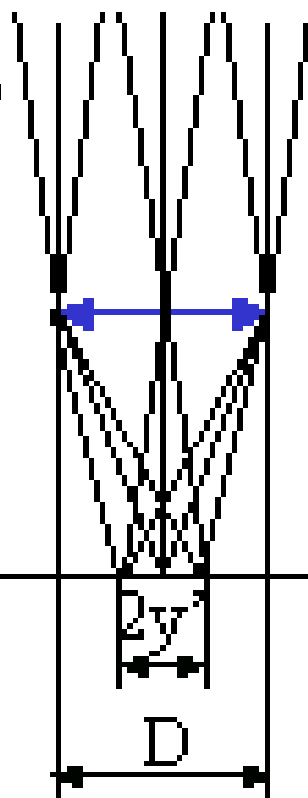
**例4：**阳光直射时，地面的照度约为 $105 \text{ lx}$ ，现经一无像差的薄透镜组来聚焦时（焦距为 $100\text{mm}$ 和相对孔径 $0.2$ ），所得照度为多少？已知太阳对地面的张角为 $32'$ ，假设光组的透过率为 $1$ 。

经透镜后，原照到 $D$ 范围内的光通量被聚焦到 $2y'$ 范围内。

$$y' = f' \tan 16'$$

$$E_1 \cdot \pi \left( \frac{D}{2} \right)^2 = E_2 \cdot \pi y'^2, \quad E_1 = 10^5, \quad D = \frac{f'}{5} = 20$$

$$\therefore E_2 = \frac{E_1 \cdot (D/2)^2}{y'^2} = \frac{10^5 \times 10^2}{(100 \tan 16')^2} = 4.616 \times 10^7 (\text{lx})$$





## 习题练习

**例5：**一个光学系统，对100倍焦距处的物面成一缩小到1/50倍的像，物方孔径角为 $\sin U \approx u = 0.005$ ，物面的照度为1000勒克斯，反射系数为 $\rho = 0.75$ ，系统的透过率是 $K = 0.8$ ，求像面的照度。

$$d\Phi = L_i \cdot d\Omega \cdot dS \cos i$$

$$\Phi = \int d\Phi = LdS \int \cos i \cdot d\Omega$$

$$= LdS \int \cos i \cdot d\Omega$$

$$= LdS \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} \sin i \cos i di = \pi LdS$$

$$L = \frac{M}{\pi} = \frac{\rho E}{\pi}$$

$$E' = \frac{1}{\beta^2} K \pi L \sin^2 U$$

$$= 50^2 \times 0.8 \pi \bullet \frac{\rho E}{\pi} \sin^2 U$$

$$= 50^2 \times 0.8 \times 0.75 \times 1000 \times 0.005^2$$

$$= 37.5(\text{lx})$$



## 第六章 光能及其传播计算

光线不仅是波面的法线而且还是携带光能的载体，只有携带了足够的光能，到达像空间的光才能有一定的光度水准。

### 主要内容

- 6.1 辐射量与光学量
- 6.2 光学量基本概念
- 6.3 光传播过程中光学量的变化规律
- 6.4 光学系统光能损失的计算
- 6.5 成像系统像面的光照度



# 第六章 光能及其传播计算

## 辐射量与光学量

- 辐射度学与光度学
- 辐射量
- 光学量：光能，光通量

## ★光学量的基本概念

- 立体角概念
- 发光强度
- 光照度、光出射度
- 光亮度

## ★光传播时光学量

- 点光源光照度
- 面光源光照度
- 光束的光亮度
- 光束反折射亮度变化

## 第六章 光能及其传播计算

## ★成像系统相面的光照度

- 通过光学系统的光通量
- 轴上像点的光照度
- 轴外像点的光照度

## 光能损失计算

- 透射面的反射损失
- 透射材料的吸收损失
- 反射面的不完全反射损失
- 光学系统的损失计算