



# 第六章 辐射度学和光度学基础



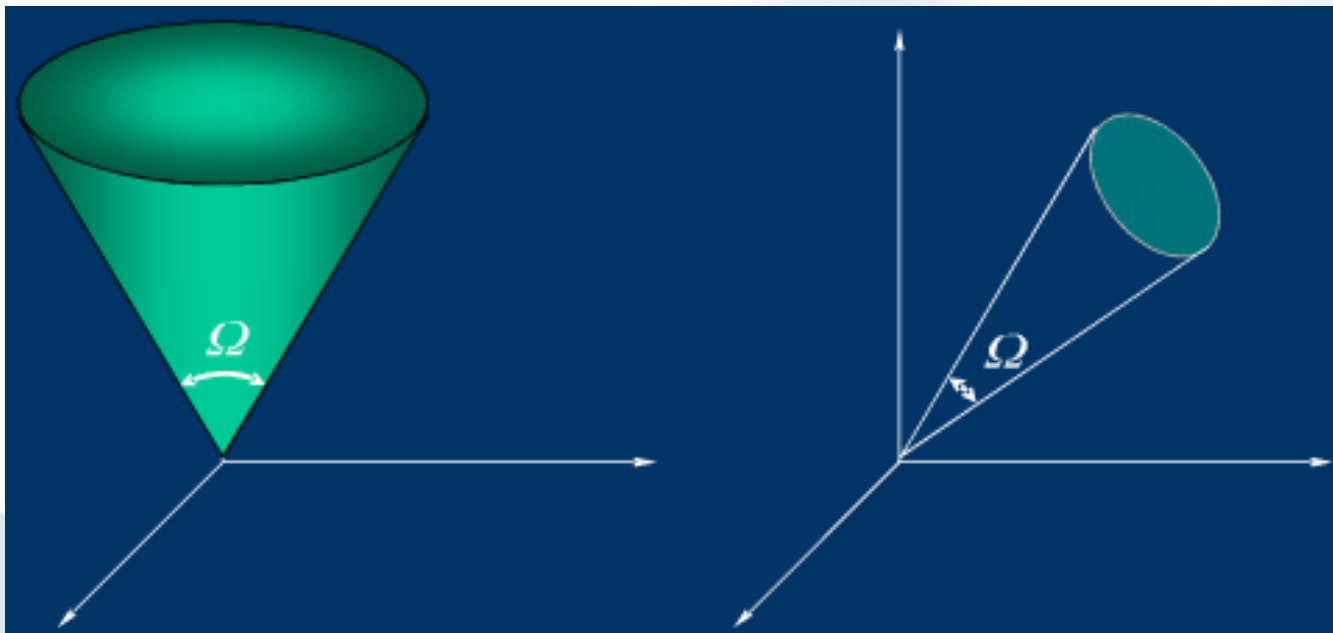
- ◆ 可见光：波长在380nm-760nm的**电磁辐射**，
- ◆ 可以用**辐射量**和**光学量**这两种量值系统来度量可见光：
  - 把可见光做为纯物理现象——**辐射量**量值系统
  - 研究与人的视觉有关问题——**光学量**量值系统

# 6.1 立体角的意义、在光度学中的应用



## ◆ 立体角 $\Omega$

➤ 一个任意形状的封闭锥面所包含的空间，单位：球面度sr。



# 6.1 立体角的意义、在光度学中的应用



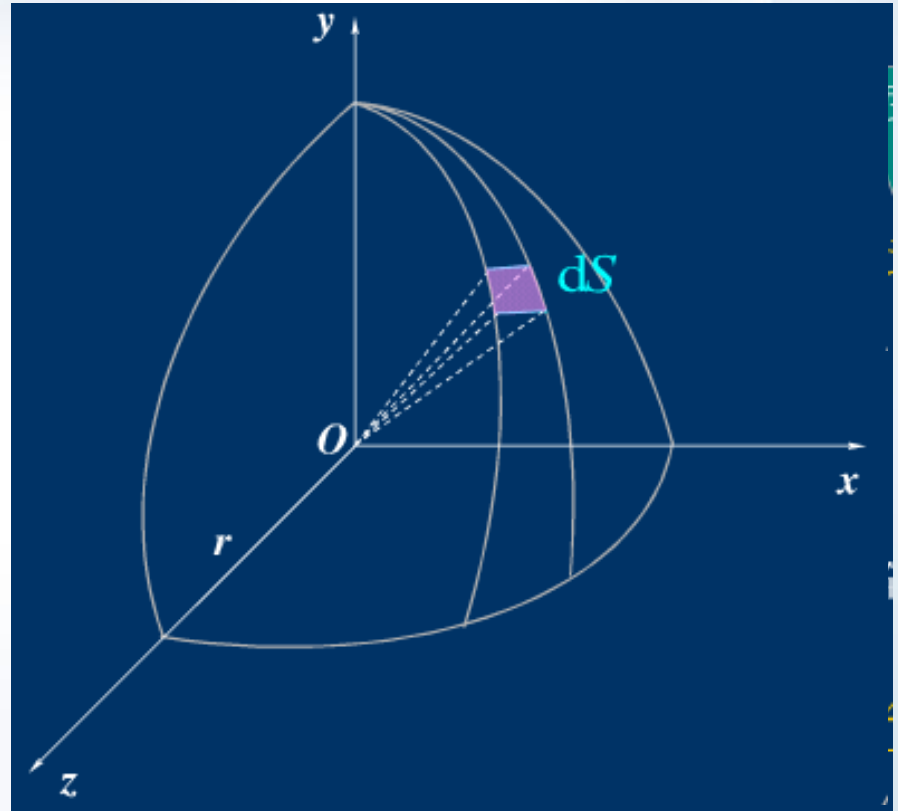
## ◆ 立体角的单位

以锥顶为球心，以 $r$ 为半径作一圆球，如果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）

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

整个空间的立体角：

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

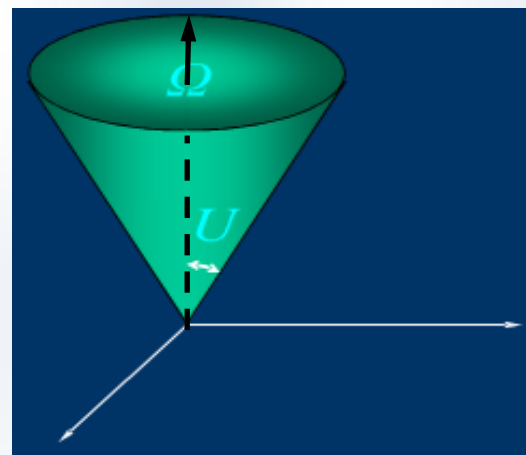
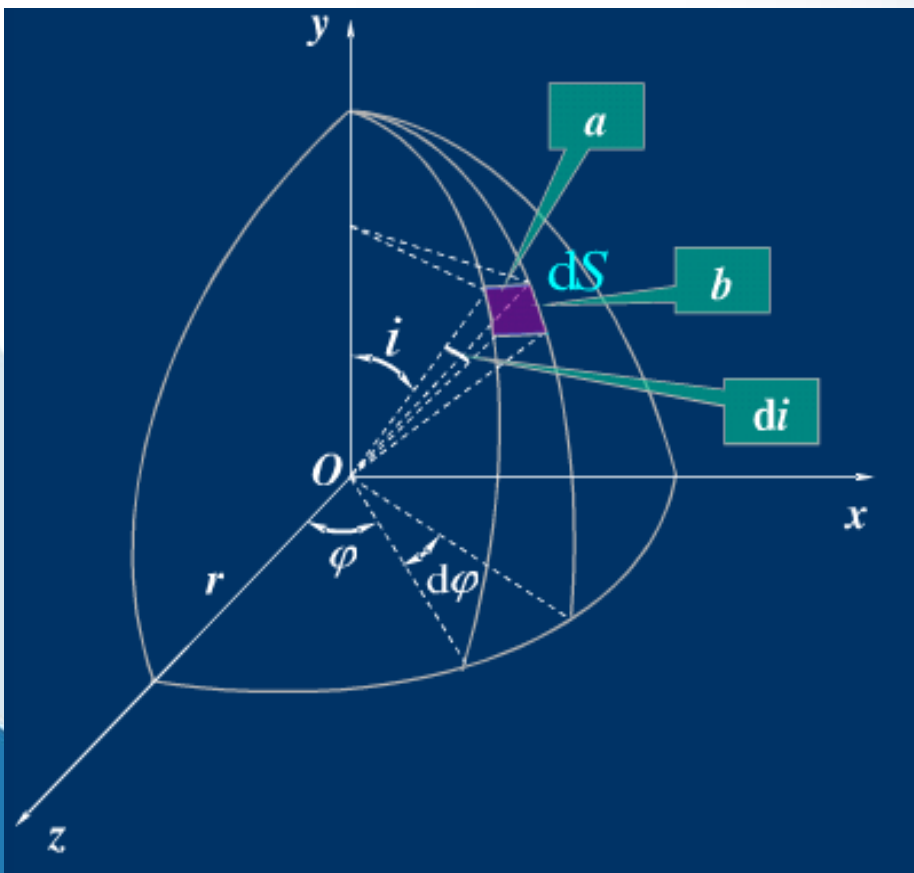


◆ 立体角的计算  $\left. \begin{array}{l} a = r \sin i d\varphi \\ b = r di \end{array} \right\} \Rightarrow dS = ab = r^2 \sin i d\varphi di$

$$d\Omega = dS / r^2 = \sin i d\varphi di \Rightarrow \Omega = \int_{\varphi=0}^{2\pi} d\varphi \int_{i=0}^U \sin i di$$

$$= 2\pi (-\cos U - (-1)) = 4\pi \sin^2 \frac{U}{2}$$

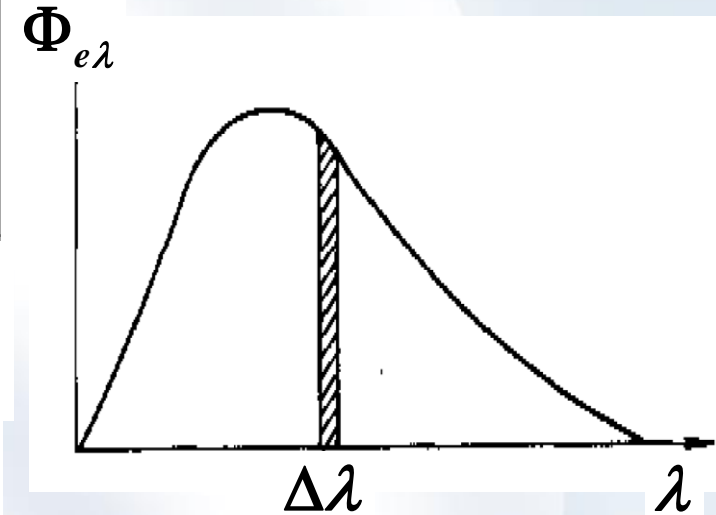
$$U \text{ 很小时, } \sin \frac{U}{2} \approx \frac{U}{2} \Rightarrow \Omega = \pi U^2$$



## 6.2 辐射度学中的基本量



辐射能 $Q_e$	电磁辐射形式 发射、传输或 接收的能量	J
-----------	---------------------------	---



$\Phi_{e\lambda}$ :

辐射通量的光谱密集度，  
辐射通量按波长的分布  
特性

$$d\Phi_e = \Phi_{e\lambda} d\lambda$$

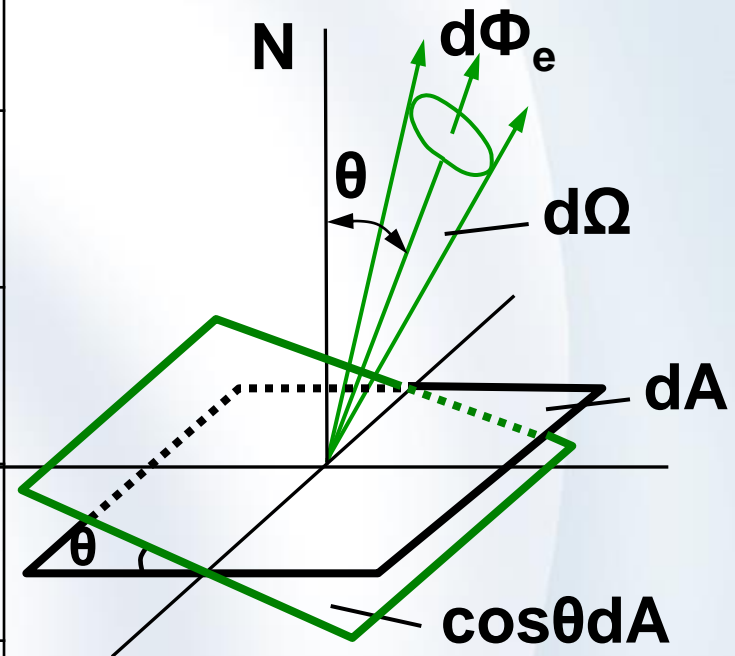
总辐射功率：

$$\Phi_e = \int_0^{\infty} \Phi_{e\lambda} d\lambda$$

## 6.2 辐射度学中的基本量

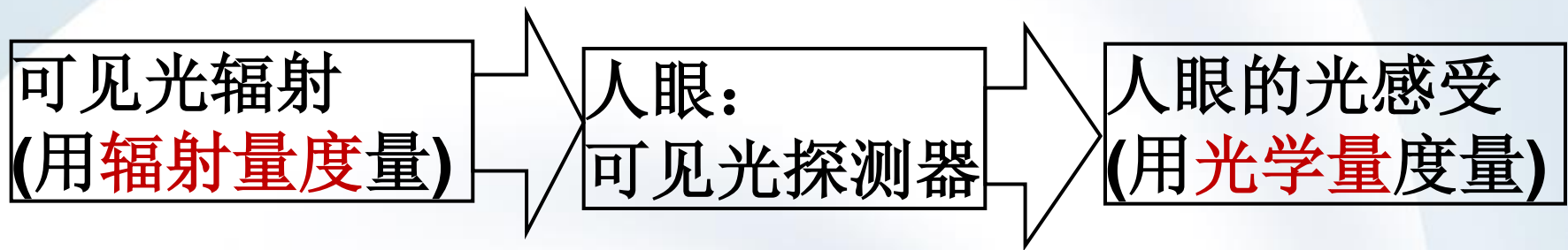


辐射能 $Q_e$	电磁辐射形式 发射、传输或 接收的能量	J
辐射通量	$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt}$	W
辐射出射度	$M_e = \frac{d\Phi_e}{dA}$	W/m <sup>2</sup>
辐射照度	$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA}$	W/m <sup>2</sup>
辐射强度	$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega}$	W/sr
辐射亮度	$L_e = \frac{d\Phi_e}{\cos \theta \cdot dA \cdot d\Omega}$	W/(sr· m <sup>2</sup> )



**辐射亮度：**表示辐射体表面不同位置、不同方向上的辐射特性

## 6.3 人眼的视见函数



- ◆ 人眼视觉的强弱，与辐射体在观察方向上的**辐射强度**及**辐射波长**有关。
  - 人对不同波长光响应的灵敏度是波长的函数，称之为**视见函数**（**光谱光效率函数**）。
  - 观察场**明暗不同**时，光谱光效率函数亦稍有不同。观察环境光照较好时为**明视觉**环境。





国际照明委员会 (International Commission on Illumination, CIE) 正式推荐两种光谱光效率函数:

明视觉光谱光效率函数  $V(\lambda)$

暗视觉光谱光效率函数  $V'(\lambda)$

$V(\lambda)$ : 相同辐射亮度、波长不同的光, 人眼感受的光亮度不同;  
归一化函数

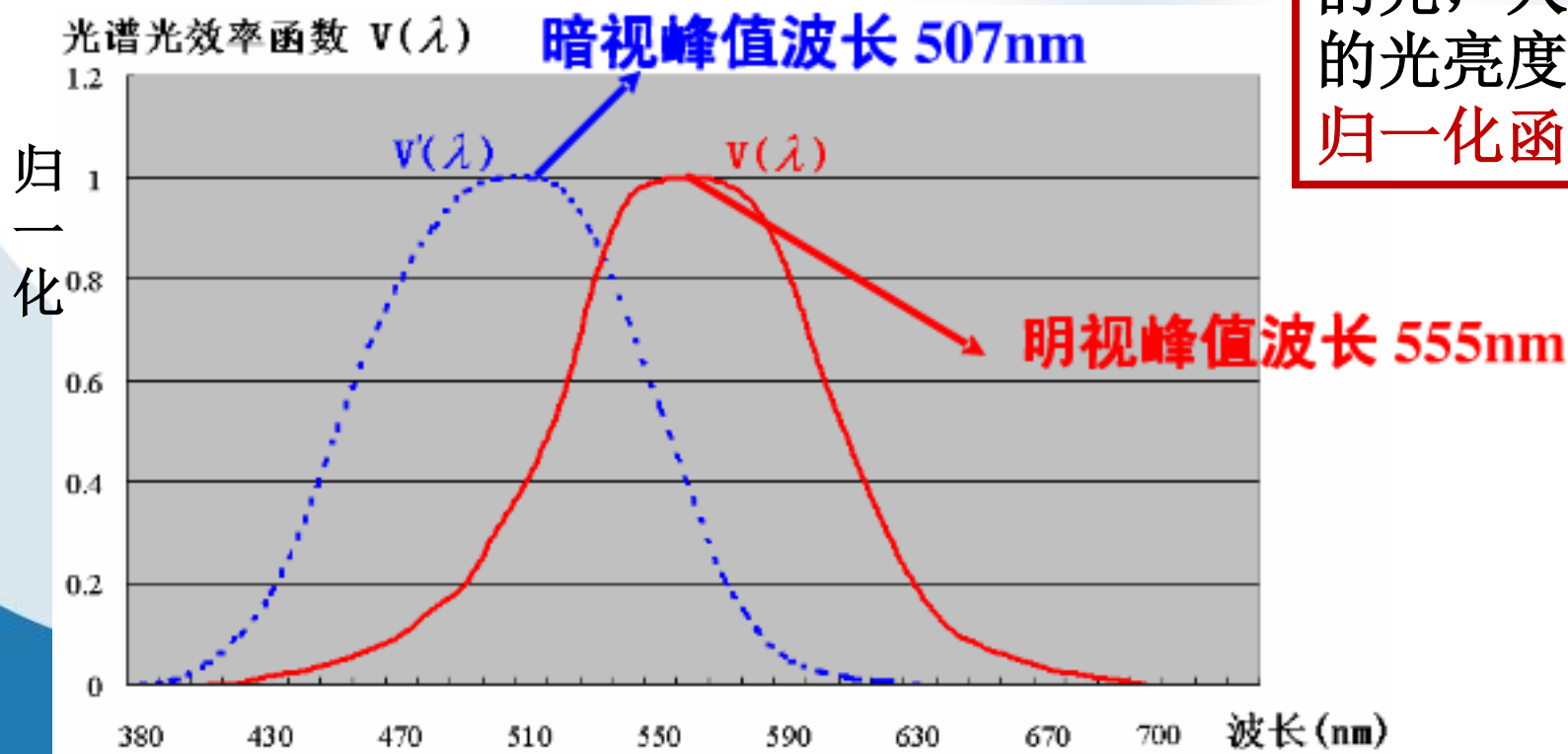
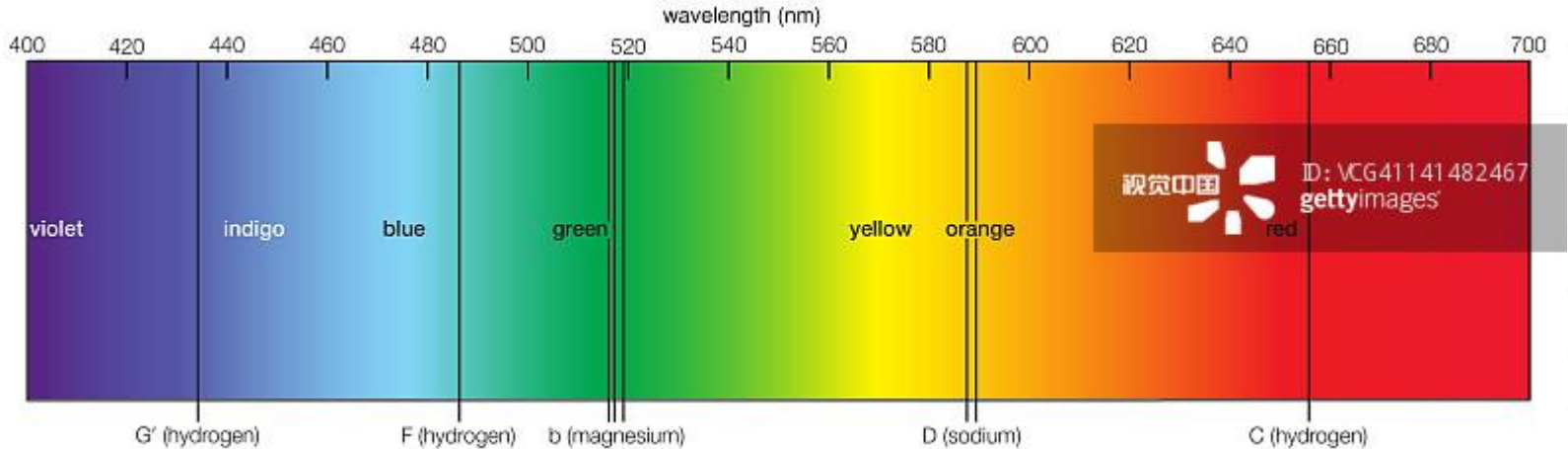


表 6-1 明视觉视见函数国际标准

光线颜色	波长 (nm)	$V_\lambda$	光线颜色	波长 (nm)	$V_\lambda$
紫	400	0.0004	黄	580	0.8700
紫	410	0.0012	黄	590	0.7570
靛	420	0.0040	橙	600	0.6310
靛	430	0.0116	橙	610	0.5030
紫	440	0.0000	黄	620	0.3810
					
绿	520	0.7100	红	700	0.0041
绿	530	0.8620	红	710	0.0021
黄	540	0.9540	红	720	0.00105
黄	550	0.9950	红	730	0.00052
黄	555	1.0000	红	740	0.00025
黄	560	0.9950	红	750	0.00012
黄	570	0.9520	红	760	0.00006



### ◆ 光通量

波长 $\lambda$ 的辐射源，人眼观察方向的辐射强度 $I_e$ ，  
人眼瞳对其张角为 $d\Omega$ ，人眼接收到的辐射通量：

$$d\Phi_e = I_e d\Omega$$

人眼产生的视觉强度：

$$\begin{cases} \text{明视觉条件下: } d\Phi_v(\lambda) = K_m V(\lambda) d\Phi_e \\ \text{暗视觉条件下: } d\Phi_v(\lambda) = K'_m V'(\lambda) d\Phi_e \end{cases}$$

$K(\lambda) = K_m V(\lambda)$ :  $\lambda$  波长的光谱光视效能

$d\Phi_v$ : 按人眼视觉强度来度量的辐射通量，**光通量**



### ◆ 发光强度

$$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega}$$

- 指定方向上光源发光的强弱，单位：坎(德拉)(cd)
- 发光强度是光学基本量，是国际单位制中七个基本量之一
- 明视觉条件下，一个光源发出频率为 $540 \times 10^{12} \text{Hz}$ （波长555nm）的单色光，在一定方向的辐射强度为（1/683）W/sr，则此光源在该方向上的发光强度为1坎德拉



$$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega} = \frac{K_m V(\lambda) d\Phi_e}{d\Omega} = \frac{K_m V(\lambda) I_e d\Omega}{d\Omega} = K_m V(\lambda) I_e$$

明视觉条件下:  $V(555) = 1, I_e = \frac{1}{683} (W / sr), I_v = 1(cd)$

$\Rightarrow K_m = 683(cd \cdot sr / W)$  最大光谱光视效能

暗视觉条件下:  $V(507) = 1, K'_m = 1755(cd \cdot sr / W)$

光通量:  $d\Phi_v = I_v d\Omega$

单位: 流明 $lm$

$1lm = 1cd \cdot sr$



◆整个可见光范围内，**光学量和辐射量间的关系：**

**总光通量：**  $\Phi_v = \int_0^\infty K_m V(\lambda) d\Phi_e = \int_0^\infty K_m V(\lambda) \Phi_{e\lambda} d\lambda$

**发光体的光视效能：**  $K = \frac{\Phi_v}{\Phi_e} = \frac{\int_0^\infty K_m V(\lambda) \Phi_{e\lambda} d\lambda}{\int_0^\infty \Phi_{e\lambda} d\lambda}$

单位( $lm/W$ ),表示辐射体消耗1W功率所发出的流明数

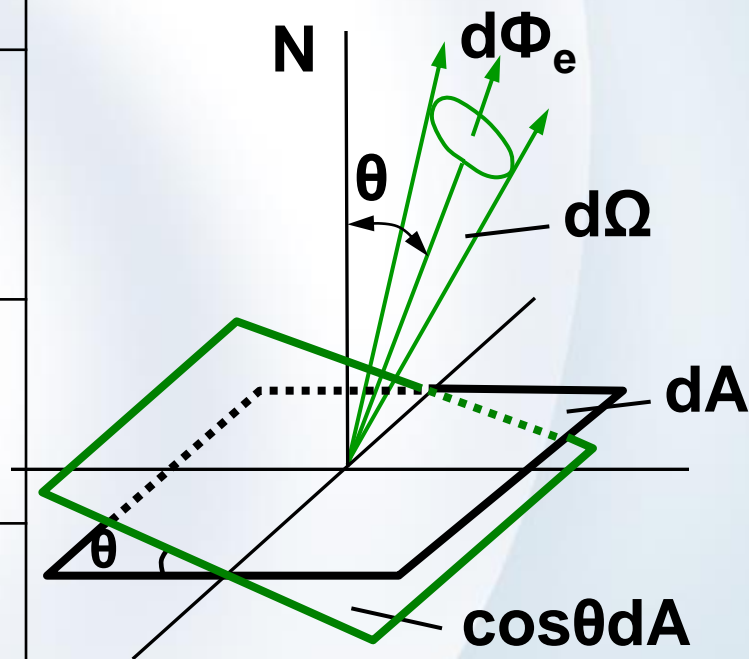
表 6-2 常用光源光视效能

光源种类	光视效能(lm/W)	光源种类	光视效能(lm/W)
钨丝灯(真空)	8~9.2	日光灯	27~41
钨丝灯(充气)	9.2~21	高压水银灯	34~45
石英卤钨灯	30	超高压水银灯	40~47.5
气体放电管	16~30	钠光灯	60

## 6.4 光度学中的基本量



光通量 $\Phi_v$	可见光对人眼的 视觉刺激程度	流[明] (lm)
发光强度 $I_v$	$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega}$	坎[德拉] (cd)
光照度 $E_v$	$E_v = \frac{d\Phi_v}{dA}$	勒克斯 (lx) =lm/m <sup>2</sup>
光出射度 $M_v$	$M_v = \frac{d\Phi_v}{dA}$	lm/m <sup>2</sup>
光亮度 $L_v$	$L_v = \frac{d\Phi_v}{\cos \theta \cdot dA \cdot d\Omega}$ $= \frac{I_v}{\cos \theta \cdot dA}$	cd/m <sup>2</sup> =nt尼特



光亮度

表 6-3 常见的物体光照度值

观看仪器的示值	30~50lx
一般阅读及书写	50~75
精细工作(修表等)	100~200
摄影场内拍摄电影	1 万
照相制板时的原稿	3 万~4 万
明朗夏日采光良好的室内	100~500
太阳直照时的地面照度	10 万
满月在天顶时的地面照度	0.2
无月夜天光在地面产生的照度	$3 \times 10^{-4}$

表 6-4 常见物体的光亮度

光源名称	光亮度( $\text{cd}/\text{m}^2$ )	光源名称	光亮度( $\text{cd}/\text{m}^2$ )
<u>在地球上看到的太阳</u>	$1.5 \times 10^9$	在地球上看到的月亮表面	$2.5 \times 10^3$
普通电弧	$1.5 \times 10^8$	人工照明下书写阅读时的纸面	10
钨丝白炽灯灯丝	$(5 \sim 15) \times 10^6$	白天的晴朗天空	$5 \times 10^3$
太阳照射下漫射的白色表面	$3 \times 10^4$		





➤例： He-Ne激光器：辐通量（光功率）10mw,  $\lambda=632.8\text{nm}$ ,  $V_\lambda=0.24$ , 激光器输出端光束直径 $D=2\text{mm}$ , 发散角 $\theta=1\text{mrad}$ , 求光亮度 $L$

解：  $d\Phi=683V_\lambda d\Phi_e=683 \times 0.24 \times 10 \times 10^{-3}=1.6392(\text{lm})$

$$d\Omega=\pi(0.5\theta)^2=3.14 \times (0.5 \times 10^{-3})^2$$

$$ds=\pi(0.5D)^2$$

$$L=d\Phi/ (ds d\Omega)=6.64 \times 10^{11}(\text{cd/m}^2)$$



$$L = d\Phi / (ds \, d\Omega) = 6.64 \times 10^{11} (\text{cd/m}^2)$$

$$L_{\text{太阳}} \sim 10^9 (\text{cd/m}^2)$$

激光亮度高，  
勿对着眼睛照射！

激光炫目枪：

利用激光高亮度  
引起暂时失明

**雄鹰集团 HAWK GROUP**

**PY131A型激光炫目器**



被打击目标眩目时间：10s-60s

中国军事医学科学院权威认证报告

该产品采用世界上效率最高、体积最小的大功率固态激光器，结合可以自动调节打击效果的智能控制系统，可以发射直径20-30公分的高性能激光光束，作用在被打击目标的双眼，使目标产生10秒-60秒的短暂失明，不会造成任何永久伤害（非致伤）。全面保证了其作为非致伤防暴炫目器的有效性和安全性，是目前国际上技术水平最高的单兵非致伤激光炫目器。


产品功能：可实现目标10-60秒短暂失明，具备使用管理授权系统，同时具有记录击发时间、使用人员信息等功能。

“闪电”系列警用激光炫目枪是唯一成功通过中国人民解放军军事医学科学院生物效能鉴定的激光炫目产品。作为国内唯一具备激光伤害研究资质的权威单位，军科院通过对动物和人眼的系统测试结果，保证了闪电系列激光炫目枪兼具有效性和安全性。

**技术参数**

项目	参数
整枪重量	<5.4kg
整枪体积	756mm×224mm×91mm
激光波长	532nm
作战波段	眩目10-60秒（可调节）
单次充电击发	10-20次
打击距离	10-500m
操作方式	手动
管理功能	全面记录使用情况
待机时间	>100h

环球军事  
mil.huanqiu.com



◆例：有一个各向均匀发光的点光源，在距离光源  $100mm$  处放置一个通光口径为  $200mm$  的聚光透镜，光源经聚光透镜后照明前方一定距离上直径为  $2m$  的圆，要求被照明圆内的平均光照度大于  $200lx$ ，光源的光视效能为  $30lm/W$ ，问光源辐射功率至少应为多少？

进入聚光镜的光通量： $\Phi_1 = E \cdot S = E \cdot \pi r^2 = 200 \times \pi \times 1^2 = 628.3(lm)$

光源对聚光镜的孔径角： $U = \frac{\pi}{4}$ ，立体角  $\Omega_1 = 4\pi \sin^2\left(\frac{U}{2}\right) = 1.84(sr)$

光源发出的总光通量  $\Phi_v$ ： $\frac{\Phi_1}{\Phi_v} = \frac{\Omega_1}{4\pi}$ ， $\Rightarrow \Phi_v = 4\pi \times \frac{628.3}{1.84} = 4300(lm)$

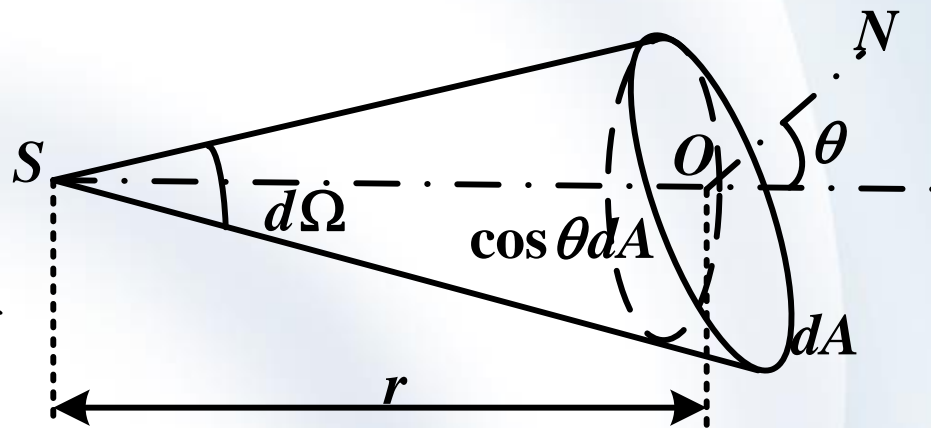
辐射功率： $\Phi_e = \frac{\Phi_v}{K} = \frac{4300}{30} = 143.3(W)$

## 6.5 光传播过程中光学量的变化规律



### 一、点光源的光照度

点光源S，其**发光强度**为I，在距光源为r处有一元面积为dA的平面，其法线与r方向成 $\theta$ 角。点光源S在dA面上形成的照度为E。

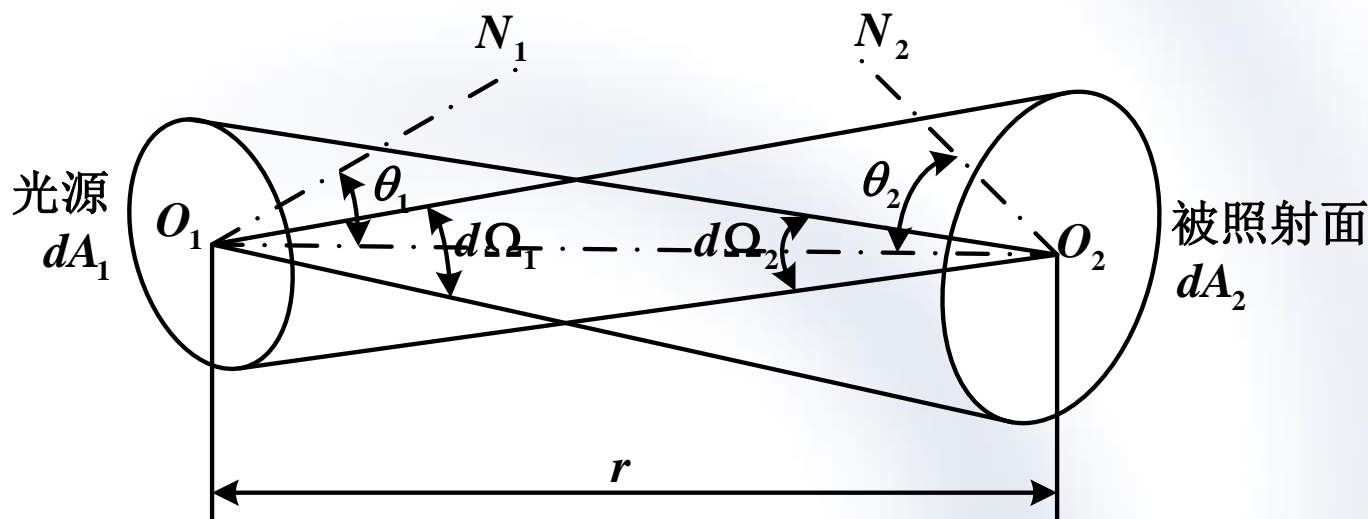


$$d\Omega = \frac{\cos \theta dA}{r^2} \Rightarrow d\Phi = I \cdot d\Omega = \frac{I \cos \theta dA}{r^2} \Rightarrow E = \frac{d\Phi}{dA} = \frac{I}{r^2} \cos \theta \text{ (lx)}$$

点光源在被照表面上形成的照度：

- 1) 与 $\cos \theta$ 成正比（ $\theta$ ：被照表面倾斜角）；
- 2) 与被照面到光源距离的平方成反比，即**照度平方反比定律**

## 二、面光源在与之距离为r处的表面上形成的照度



光源的元发光面积为 $dA_1$ ；光源的**光亮度**为 $L$ ；

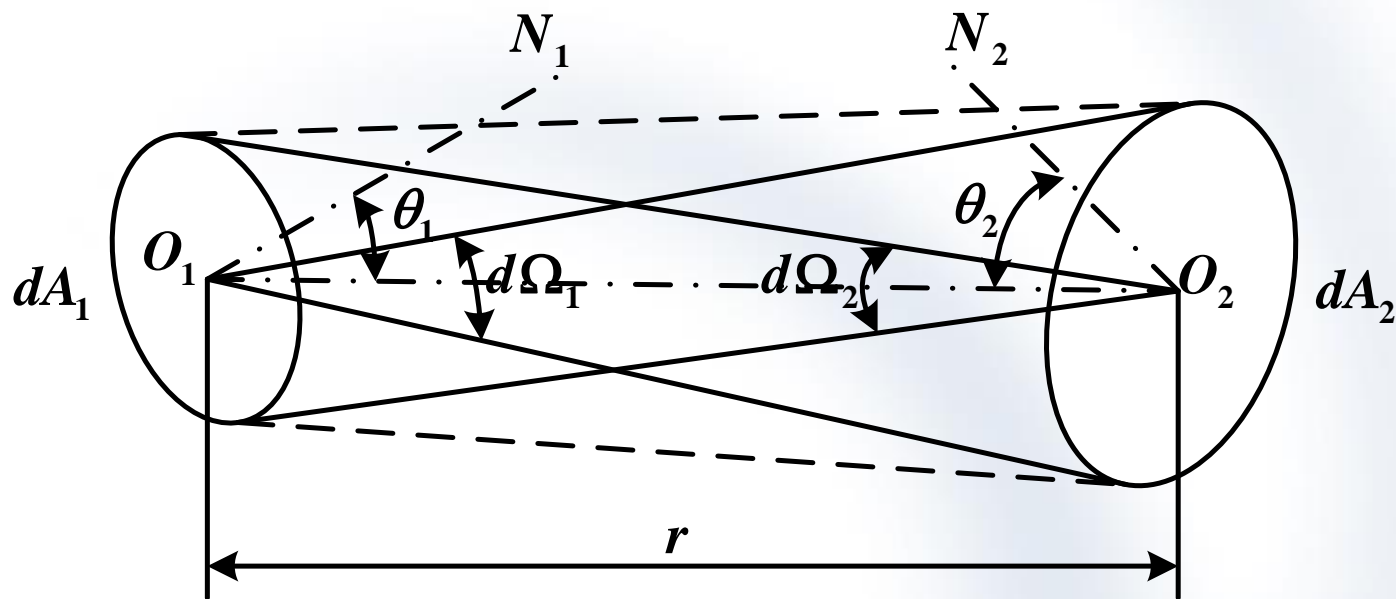
由 $dA_1$ 发出并照射在 $dA_2$ 为上的光通量为 $d\Phi$ ；

$dA_1$ 在与之距离为 $r$ 、面积为 $dA_2$ 平面上形成**光照度** $E$ ，则

$$\left. \begin{aligned} d\Phi &= L \cos \theta_1 \cdot dA_1 \cdot d\Omega_1 \\ d\Omega_1 &= \frac{dA_2 \cdot \cos \theta_2}{r^2} \end{aligned} \right\} \Rightarrow E = \frac{d\Phi}{dA_2} = \frac{L \cdot dA_1 \cos \theta_1 \cos \theta_2}{r^2}$$

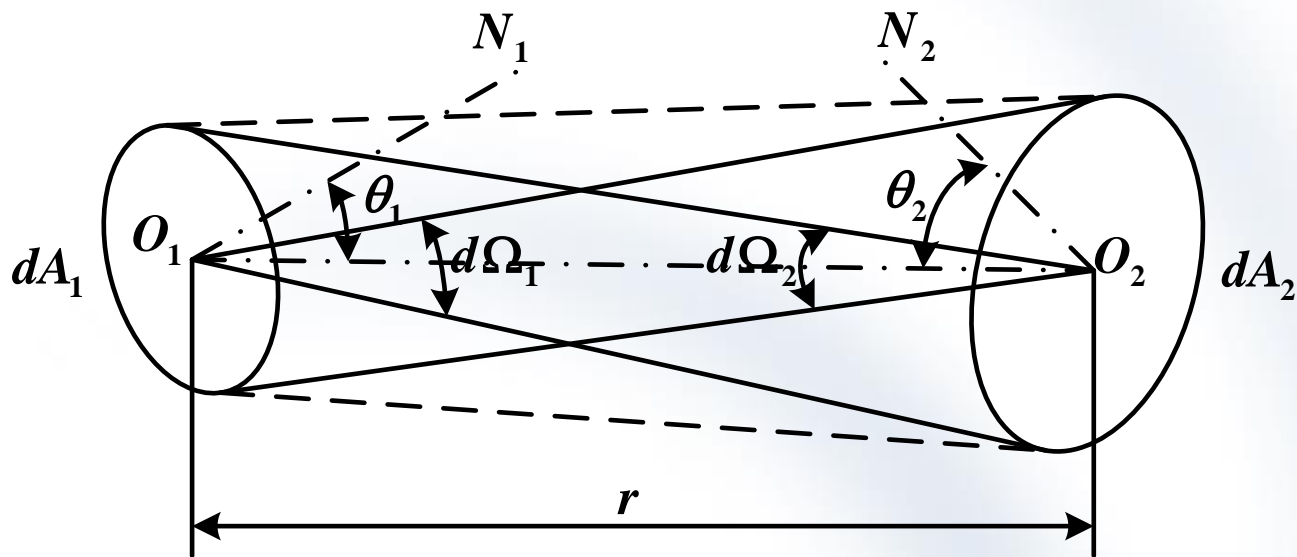
面积较大时？

### 三、光亮度在单一介质元光管内的传递



**元光管**：两个面积很小的截面构成的直纹曲面包围的空间。  
可看成均匀透明介质中的一根光线。

光在元光管内传播，不从侧壁溢出，**无光能损失**



$$\begin{aligned} d\Phi_1 &= L_1 \cos \theta_1 dA_1 d\Omega_1 = L_1 \cos \theta_1 dA_1 \frac{dA_2 \cos \theta_2}{r^2} \\ d\Phi_2 &= L_2 \cos \theta_2 dA_2 d\Omega_2 = L_2 \cos \theta_2 dA_2 \frac{dA_1 \cos \theta_1}{r^2} \end{aligned} \quad \left. \begin{array}{l} \text{不考虑} \\ \text{光损耗} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{红色箭头} \\ d\Phi_1 = d\Phi_2 \end{array} \quad L_1 = L_2$$

**结论：**光在单一介质元光管内传播，各截面上的光亮度相同；即，均匀透明介质中，若不考虑光能损失，位于同一条光线上的各点在光线进行方向上**光束亮度不变**。



## 四、光亮度在界面上传递

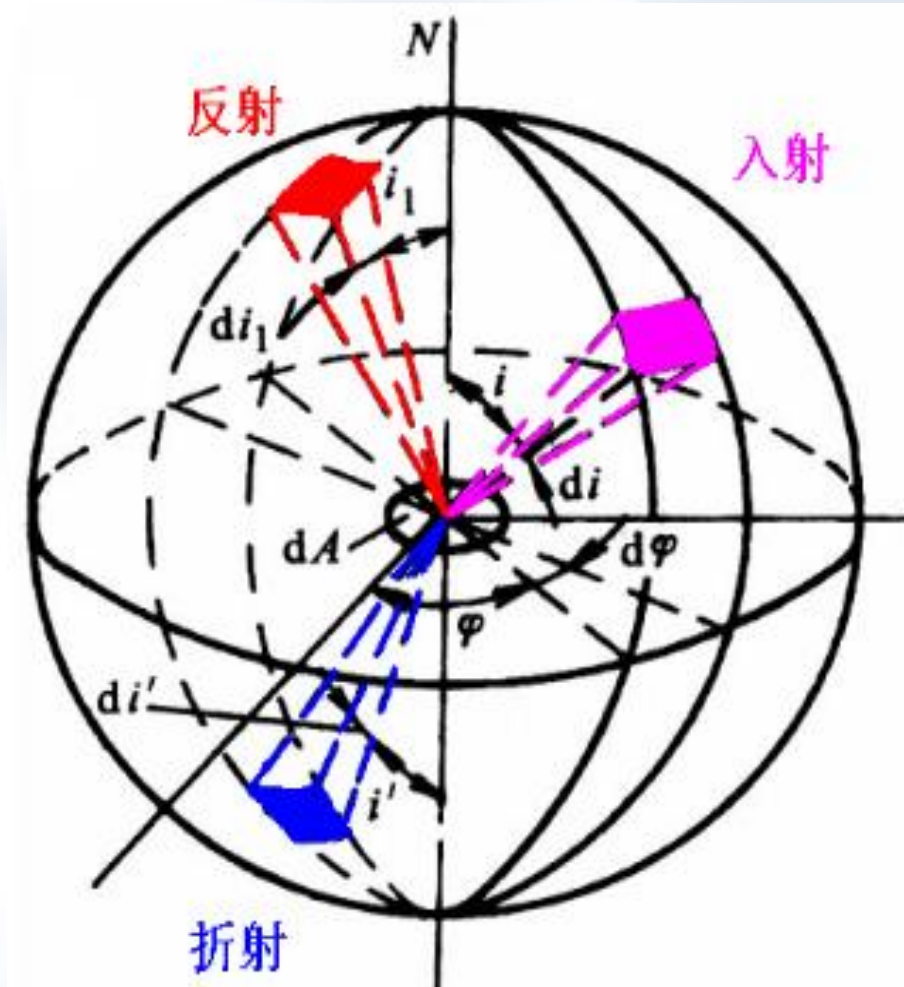
入射光束  $d\Phi = L \cos i d\Omega dA$

反射光束  $d\Phi_1 = L_1 \cos i_1 d\Omega_1 dA$

折射光束  $d\Phi' = L' \cos i' d\Omega' dA$

根据反射定律,  $i_1=i$ ,  $d\Omega_1=d\Omega$  :

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\Phi_1}{d\Phi} &= \frac{L_1 \cos i_1 d\Omega_1 dA}{L \cos i d\Omega dA} = \frac{L_1}{L} \\ d\Phi_1/d\Phi &= \rho \text{ 界面反射率} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \text{反射光亮度: } L_1 = \rho L$$





能量守恒:  $d\Phi' = d\Phi - d\Phi_1 = (1 - \rho)d\Phi$

$$n \sin i = n' \sin i' \Rightarrow n \cos i di = n' \cos i' di'$$

$$\Rightarrow n^2 \sin i \cos i di = n'^2 \sin i' \cos i' di'$$

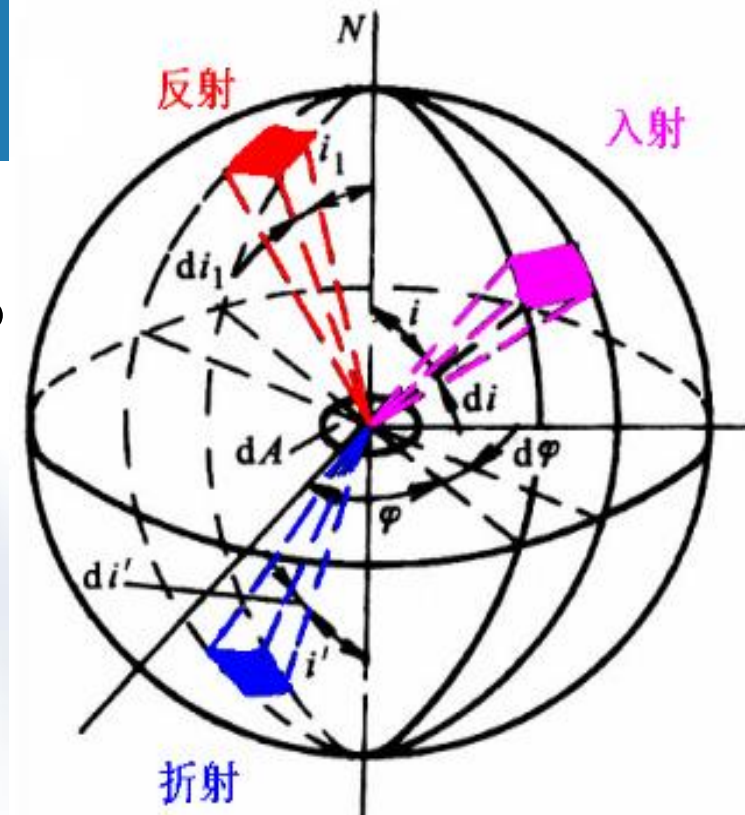
折射前后立体角元:

$$d\Omega = \sin i di d\varphi, \quad d\Omega' = \sin i' di' d\varphi$$

$$\Rightarrow \frac{d\Phi'}{d\Phi} = \frac{L' \cos i' d\Omega' dA}{L \cos i d\Omega dA} = \frac{L' n^2 \sin i di \sin i' di' d\varphi}{L n'^2 \sin i' di' \sin i di d\varphi} = \frac{L' n^2}{L n'^2} = 1 - \rho$$

$$\Rightarrow L' = \frac{(1 - \rho) L n'^2}{n^2} = \frac{\tau L n'^2}{n^2}, \quad \tau \text{ 透过率} \xrightarrow{\rho=0 \text{ 时}} \frac{L'}{n'^2} = \frac{L}{n^2}$$

光束经理想折射后, 光亮度将发生变化, 但  $L/n^2$  值保持不变



## 五、余弦辐射体，发光强度余弦定律

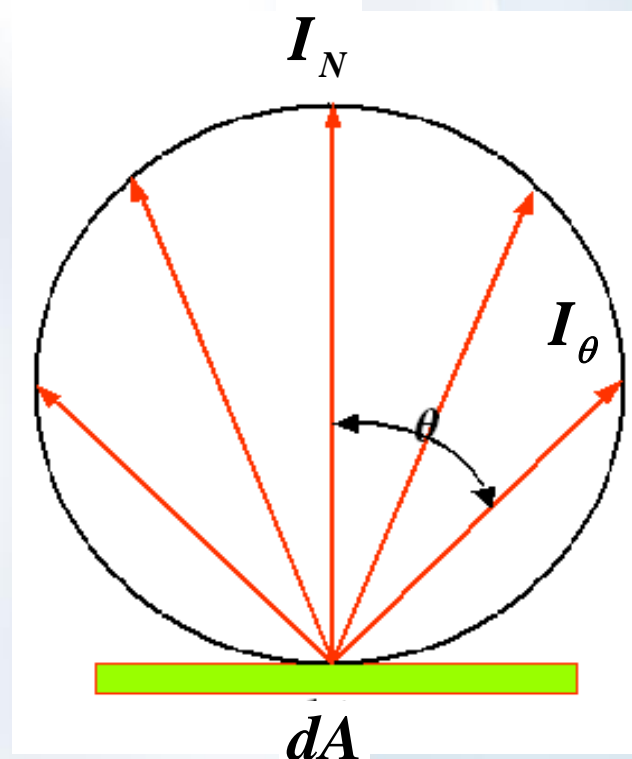
余弦辐射体（或朗伯发射面）：各个方向的光亮度相同

$$L = \frac{I_{\theta}}{dA \cos \theta} = \frac{I_N}{dA \cos 0^\circ}$$

$$\Rightarrow I_{\theta} = I_N \cos \theta$$

一个亮度在各方向均相等的发光面，在某方向的发光强度 $I_{\theta}$ 等于该面垂直方向的发光强度 $I_N$ 乘以方向余弦——

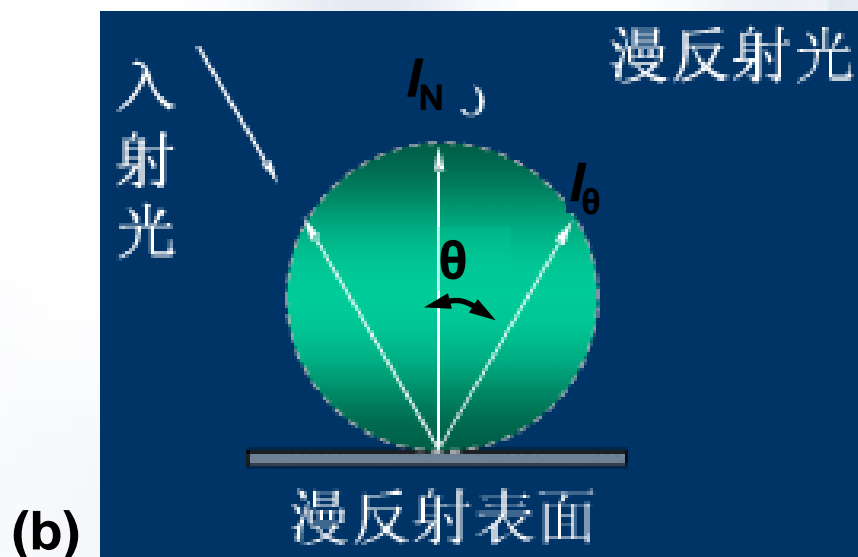
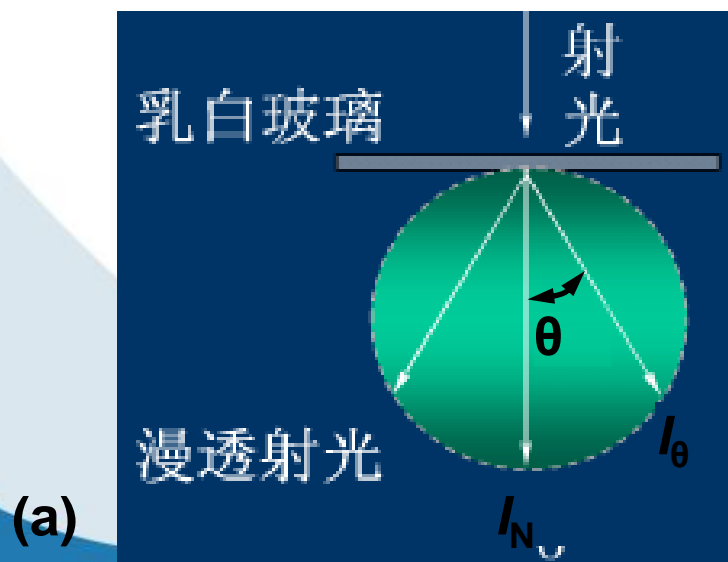
发光强度的余弦定律（或朗伯定律）





➤ 余弦辐射体可能是自发光面（如平面灯丝钨灯等），也可能是透射或反射体。

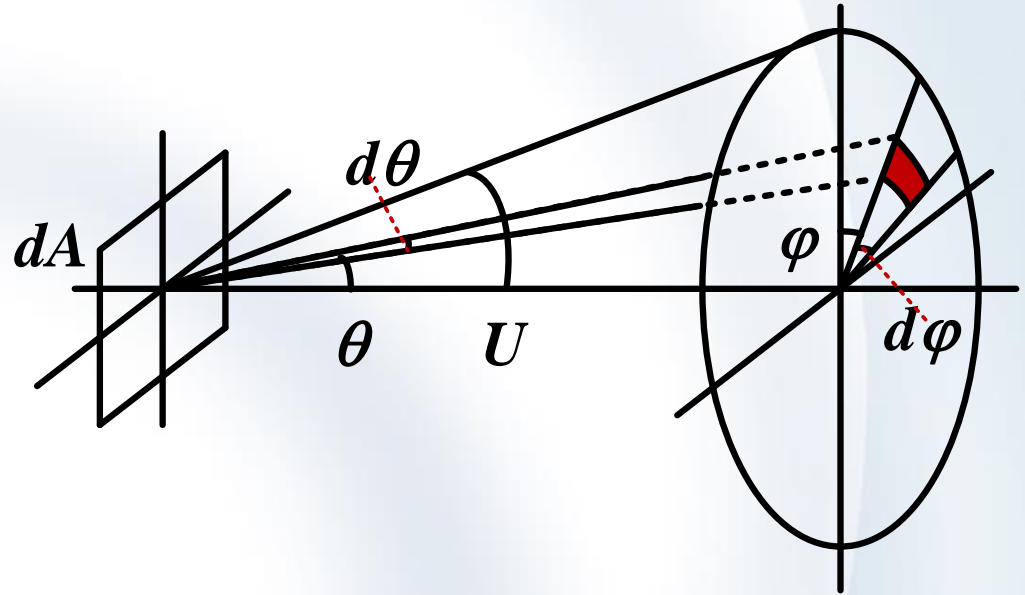
- ✓ **漫透射体**：受光照射经透射形成的余弦辐射体，如乳白玻璃
- ✓ **漫反射面**：反射形成的余弦辐射体，如，硫酸钡涂层表面
- ✓ 一般的漫反射表面都近似地具有余弦辐射特性。





➤ 余弦辐射体向平面孔径角为 $U$ 的立体角范围内发出的光通量

$$d\Omega = \sin \theta d\varphi d\theta$$



$$\Phi = LdA \int_{\varphi=0}^{\varphi=2\pi} \int_{\theta=0}^{\theta=U} \cos \theta \sin \theta d\theta d\varphi = \pi LdA \sin^2 U$$

单面发光:  $U = \pi/2$ ,  $\Phi = \pi LdA$ ,  $M = \Phi/dA = \pi L$

两面发光:  $U = \pi$ ,  $\Phi = 2\pi LdA$



➤ **全扩散表面**：被照明物体在各个方向上光亮度相同，具有余弦辐射特性。

设 **漫反射系数**为 $\rho$ ，反射的总光通量： $d\Phi' = \rho d\Phi = \rho E dA$

**单面**，光通量： $d\Phi' = \pi L dA \Rightarrow \pi L dA = \rho E dA$

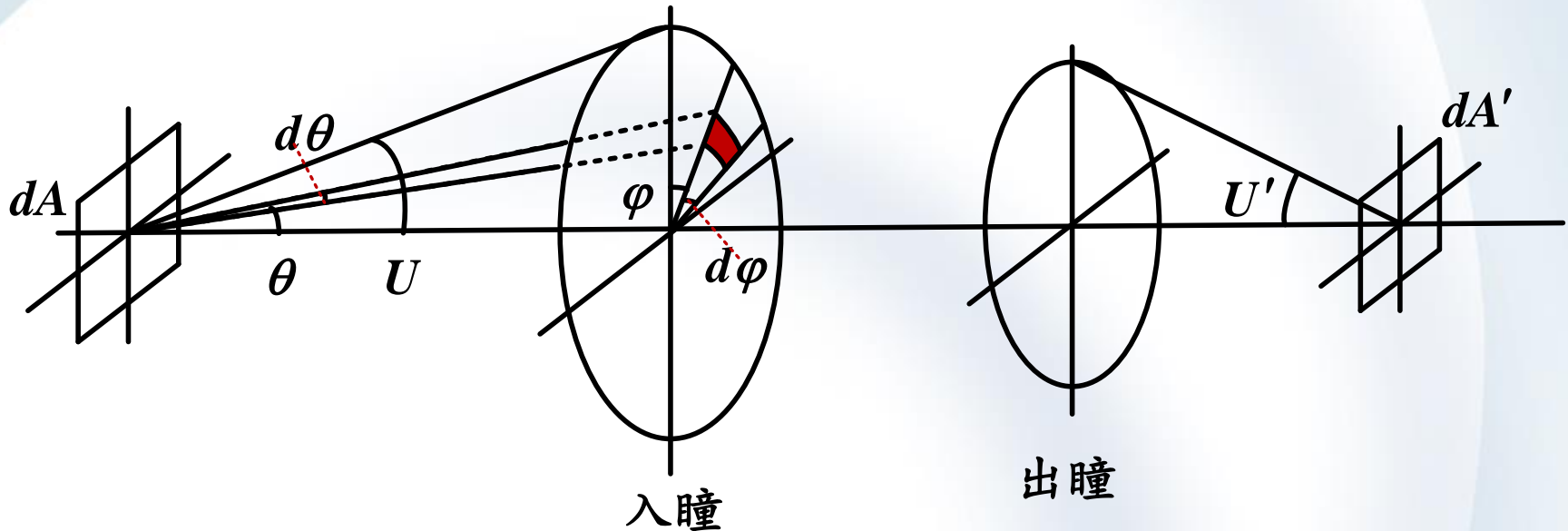
$$\Rightarrow \text{全扩散表面光亮度: } L = \frac{\rho E}{\pi}$$

表 6-5 物体表面漫反射系数值

照 明 表 面	漫反射系数(%)	照 明 表 面	漫反射系数(%)
氧化镁	96	粘土	16
石灰	91	月亮	10~20
雪	78	黑土	5~10
白纸	70~80	黑呢绒	1~4
白砂	25	黑丝绒	0.2~1



## 一、轴上像点的光照度



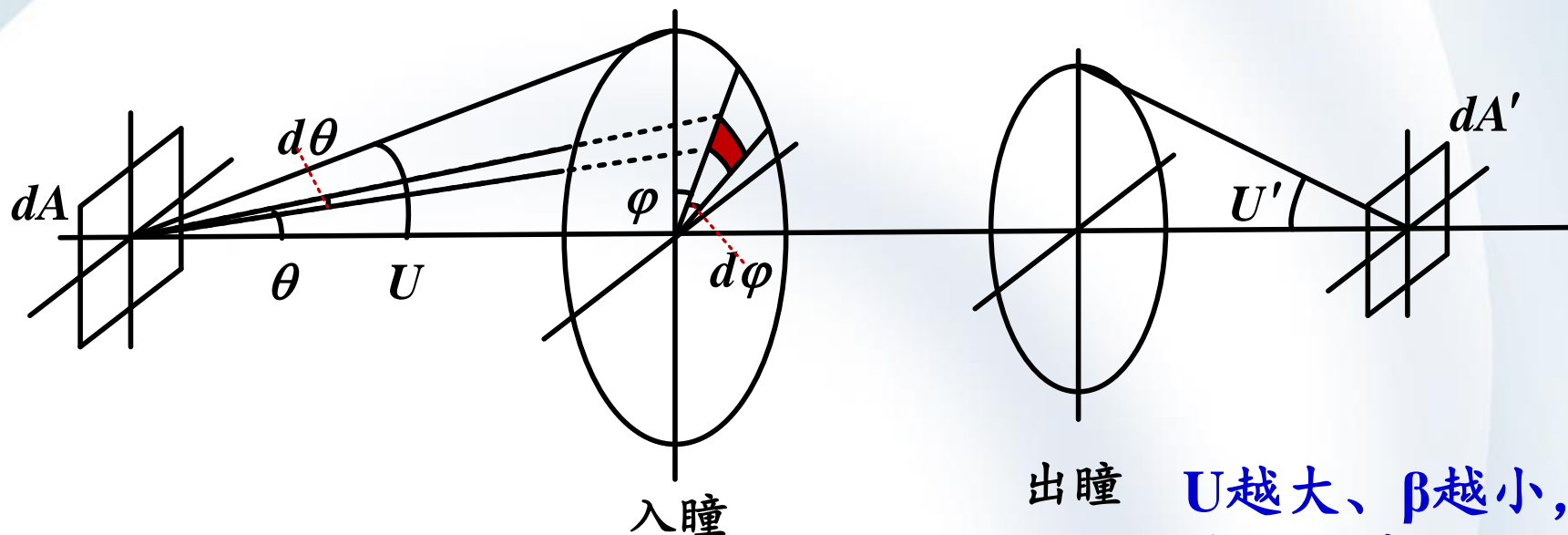
◆ 若物被看做是余弦辐射体，则微面积  $dA$  向孔径角为  $U$  的成像光学系统发出的光通量  $\Phi$  为：  

$$\Phi = \pi L dA \sin^2 U$$

◆ 从出瞳入射到像面  $dA'$  微面积上的光通量  $\Phi' = \pi L' dA' \sin^2 U'$

考虑透射比时： $\Phi' = \tau \Phi = \tau \pi L dA \sin^2 U$

# 一、轴上像点的光照度



$U$ 越大、 $\beta$ 越小，  
像面照度越好

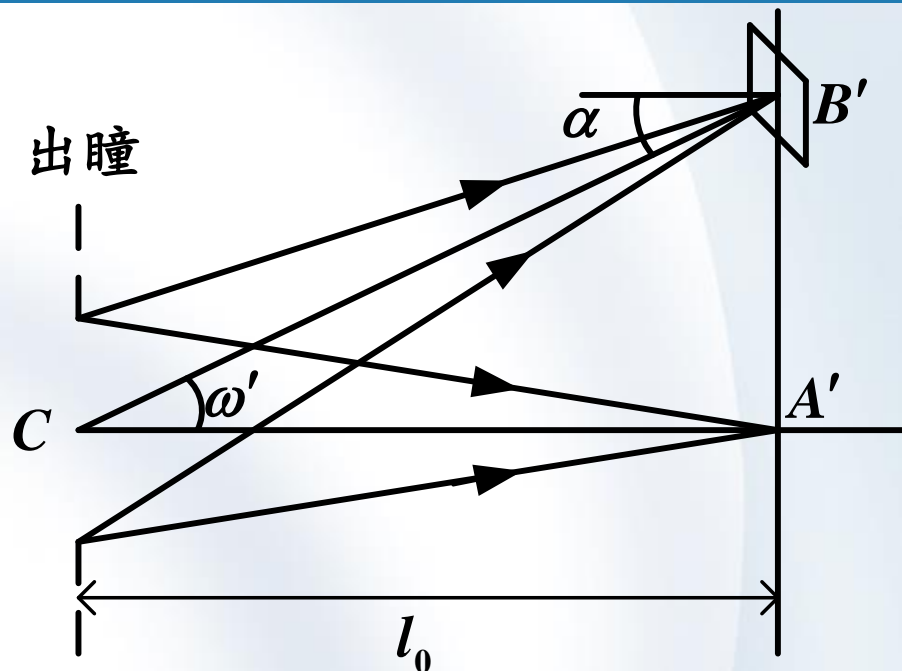
轴上像点光照度：  $E' = \frac{\Phi'}{dA'} = \frac{\tau\pi L dA \sin^2 U}{dA'}$   $\left. \begin{array}{l} \\ \frac{dA'}{dA} = \beta^2 \end{array} \right\} \Rightarrow E' = \frac{1}{\beta^2} \tau\pi L \sin^2 U$

理想光学系统：  $\beta = \frac{y'}{y} = \frac{n \sin U}{n' \sin U'}$   $\Rightarrow E' = \frac{n'^2}{n^2} \tau\pi L \sin^2 U'$

## 二、轴外像点的光照度

像方视场角 $\omega'$ ，假定物平面光亮度均匀，不存在斜光束渐晕。

把出瞳看成发光面， $l_0 \gg$  出瞳直径时，像面上的光照度：



$$E' = \frac{L \cdot dS_C \cos \theta_1 \cos \theta_2}{r^2} = \frac{I_0 \cos \omega' \cos \alpha}{|CB'|^2} \quad \left. \begin{array}{l} I_0 \text{ 轴向发光强度, } |CB'| = \frac{l_0}{\cos \omega'}, \alpha = \omega' \end{array} \right\} \Rightarrow E' = \frac{I_0 \cos^4 \omega'}{l_0^2}$$

轴上 $\omega' = 0, E'_0 = \frac{I_0}{l_0^2} \Rightarrow \frac{E'}{E'_0} = \cos^4 \omega'$  存在渐晕时  $\frac{E'}{E'_0} = K \cos^4 \omega'$



## 6.9 照相物镜像平面的光照度和光圈数



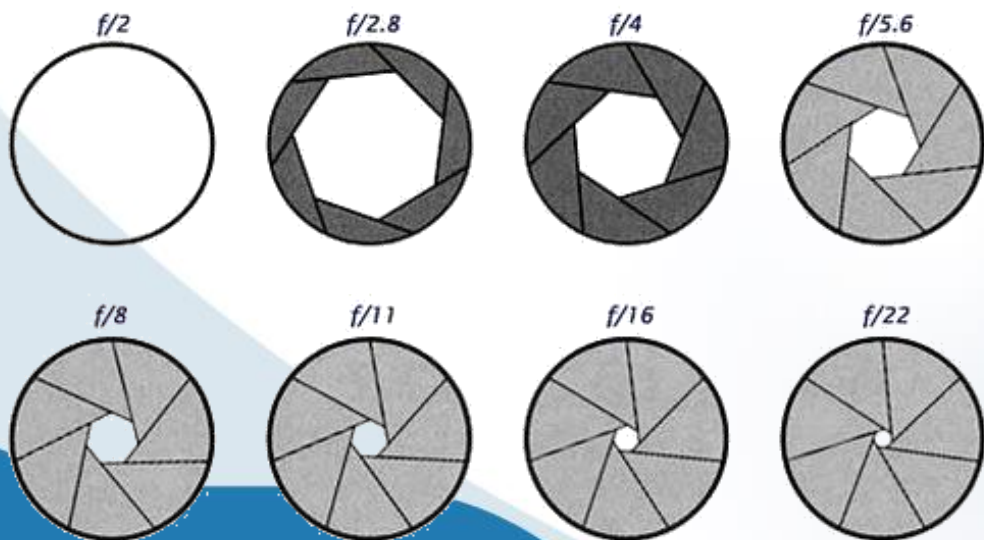
通常物距 $\gg$ 物镜焦距，像平面近似位于物镜的像方焦平面上

$$\text{轴上: } \sin u'_{\max} \approx \frac{D}{2f'}, \quad E'_{\text{轴上}} = \tau \pi L \sin^2 U' = \frac{\pi}{4} \tau L \left( \frac{D}{f'} \right)^2$$

$\frac{D}{f'}$ : 相对孔径

$$\text{光圈数} = \frac{1}{\text{相对孔径}} = \frac{f'}{D}$$

**分度的方法:** 每一刻度值对应的像平面光照度依次减少一半,



相对孔径按  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  等比级数变化

光圈值按  $\sqrt{2}$  等比级数变化



◆单位面积上接受的**曝光量**： $H=E t$

◆例：

在晴朗的白天进行外景摄影，要求天空在底片上的曝光量 $H=0.4$  (lx s)，假定取曝光时间 $t=1/100$  s,物镜的透过率 $\tau=0.85$ ,问应选多大的光圈数？(晴朗白天天空的光亮度为 $5000\text{cd/m}^2$ )

$$E_0' = \frac{\pi}{4} \tau L \left( \frac{D}{f'} \right)^2 = \frac{H}{t} = 40(\text{lx})$$

$$\frac{D}{f'} = \sqrt{\frac{4E_0'}{\pi \tau L}} = 0.11 = \frac{1}{9.1}$$

## 6.12 光学系统中光能损失的计算



- 光能损失的原因：反射损失；吸收损失
- 导致成像光亮度下降、像对比度（清晰度）下降

### ①透射面的反射损失

入射光通量  $\Phi$  = 透射光通量  $\Phi'$  + 反射光通量  $\Phi''$

$$\text{反射比: } \rho = \frac{\Phi''}{\Phi}$$

$$\rho = \frac{1}{2} \left[ \frac{\sin^2(i - i')}{\sin^2(i + i')} + \frac{\tan^2(i - i')}{\tan^2(i + i')} \right] \xrightarrow{\text{小角度入射时}} \left( \frac{n' - n}{n' + n} \right)^2$$

第1个界面上:  $\Phi_1' = \Phi_1(1 - \rho_1)$

第2个界面上:  $\Phi_2' = \Phi_1(1 - \rho_1)(1 - \rho_2)$

第 $k$ 个界面上:  $\Phi_k' = \Phi_1(1 - \rho_1)(1 - \rho_2) \dots (1 - \rho_k)$



## ②透射材料的吸收损失

光通量为 $\Phi$ 的光束，通过厚度为 $dl$ 的薄层介质时，  
被吸收的光通量： $d\Phi = -k\Phi dl$   **$k$** ：介质的吸收系数（ $\text{m}^{-1}$ ）

透射光通量： $\Phi = \Phi_0 e^{-kl} = \Phi_0 P^l$

$P = e^{-k}$   **$P$** 代表光通过单位厚度**1cm**介质层时出射光通量与入射光通量之比，称为**介质的透明率**

## ③反射面的光能损失 $\Phi_1 = \rho\Phi_0$

造成光能损失的主要原因是反射损失  
几乎所有的光学零件表明都要镀增透膜



- ◆ 余弦辐射体在各个方向上的（ 光亮度 ）相同。
- ◆ 一个功率为60W的钨丝充气灯泡(其光效视能为15lm/W)，假定它在各个方向上均匀发光，它的发光强度是（ 71.62cd ）。
- ◆ 对于一个朗伯发光体，它符合什么定律？写出该定律  
答：朗伯余弦定律。发光强度空间分布可用式  
 $I_{\theta} = I_N \cos \theta$ ，式中 $I_N$ 为发光面在法线方向的发光强度， $I_{\theta}$ 为与法线成任意角度 $\theta$ 方向的发光强度。



- ◆ 一房间的长、宽、高分别为5m、3m、3m，一个发光强度  $I=60\text{cd}$  的白炽灯挂在天花板中心，离地面2.5m，求：
- 1) 灯正下方地板上的光照度（3分）
  - 2) 房间角落处地板上的光照度（3分）
  - 3) 若要求房间角落处书桌（高0.5m）的光照度不低于  $50\text{lx}$ ，则需要换用发光强度多少的灯？



根据点光源照度的计算公式有:  $E_v = \frac{I \cos \theta}{r^2}$

$$1) \text{当分析灯正下方地板上的光照度时, } \theta = 0 \left. \vphantom{\frac{I \cos \theta}{r^2}} \right\} \Rightarrow E = \frac{I}{r^2} = \frac{60}{2.5^2} = 9.6 \text{ lx}$$

$$2) \text{设灯到角落的距离为 } r, \text{ 则: } r = \sqrt{2.5^2 + \left(\frac{5}{2}\right)^2 + \left(\frac{3}{2}\right)^2} = 3.84 \text{ m}$$

根据光照度的公式:

$$E = \frac{I \cos \theta}{r^2} \text{ --- } \cos \theta = ?$$

$$\cos \theta = \frac{2.5}{r}$$

$$\text{故有: } E = \frac{I \cos \theta}{r^2} = \frac{I \frac{2.5}{r}}{r^2} = 2.65 \text{ lx}$$

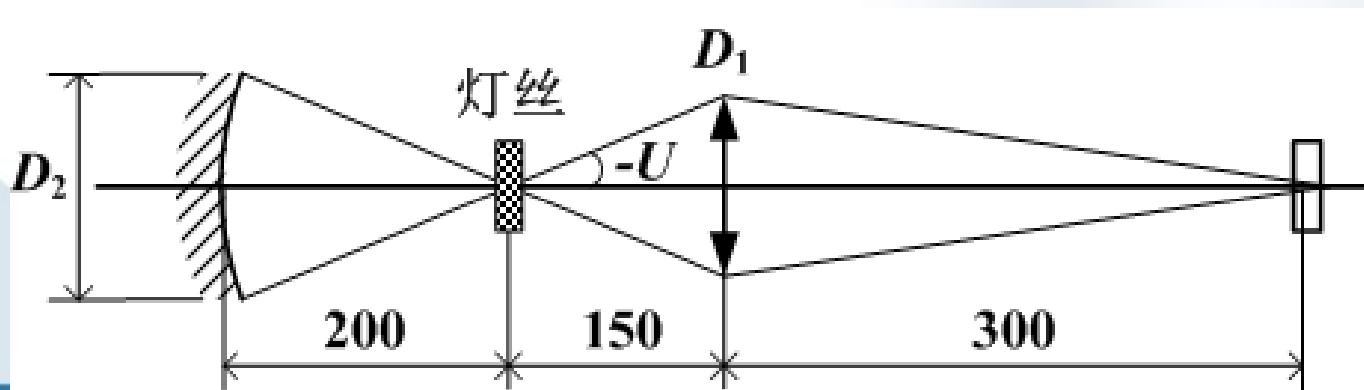
$$3) \quad r = \sqrt{\left(\frac{5}{2}\right)^2 + \left(\frac{3}{2}\right)^2 + \left(\frac{2.5}{2}\right)^2} = 3.17$$

$$\cos \theta = 2.5 / 3.17$$

$$I = 50 * r^2 / \cos \theta = 637 \text{ cd}$$



- ◆ 如图所示，聚光透镜直径 $D_1=80\text{mm}$ ，灯丝中心与聚光透镜距离为 $150\text{mm}$ ，灯丝为余弦辐射体，面积为 $4.5*6.5\text{mm}^2$ ，单面光通量为 $3500\text{lm}$ ，总光通量为 $7000\text{lm}$ 。为了提高光能利用率，在灯丝后面装有球面反射镜，反射率为 $0.88$ ，灯丝中心位于其球心。实际使用时，适当调整灯丝位置，使其反射像正好位于灯丝的空隙部分，这样可使照明更均匀，被照明表面位于灯丝的像面，与透镜距离为 $300\text{mm}$ 。试求：
- 1) 球面反射镜直径 $D_2$ ；
  - 2) 聚光透镜焦距及拉赫不变量 $J$ ；
  - 3) 灯丝亮度；
  - 4) 未加球面反射镜时，进入聚光透镜的光通量；
  - 5) 加球面反射镜后，进入聚光透镜的光通量理论值。







$$(1) D_{\perp} \approx \frac{D_1 200}{150} = 106.67 \text{ mm}$$

(2) 聚光镜焦距及拉赫不变量  $J$

$$f' = \frac{l'l'}{l - l'} = \frac{300 \times (-150)}{-150 - 300} \text{ mm} = 100 \text{ mm}$$

$$J = ny \operatorname{tg} U = 1 \times \left( -\frac{4}{15} \right) \frac{-\sqrt{4.5^2 + 6.5^2}}{2} = +1.0541$$

(3) 灯丝亮度

$$\begin{aligned} L &= \frac{F}{\pi dS} = \frac{3500 \text{ lm}}{\pi \text{ sr} \times 0.0045 \times 0.0065 \text{ m}^2} \\ &= 3808.83 \times 10^4 \text{ cd/m}^2 \end{aligned}$$

(4) 未加球面反射镜时进入聚光镜的光通量  
由式 (6-19) 得

$$\begin{aligned} F_0 &= \pi L dS \sin^2 U = \pi \text{ sr} \times 3808.83 \times 10^4 \text{ cd/m}^2 \\ &\times 0.0045 \times 0.0065 \text{ m}^2 \times (-0.257663)^2 = 232.37 \text{ lm} \end{aligned}$$

(5) 加球面反射镜后进入聚光镜的光通量

$$F = (1 + \rho) F_0 = (1 + 0.88) \times 232.37 = 436.85 \text{ lm}$$



- ◆ 功率为 $5mW$ 的氦氖激光器，发光效率为 $152lm/W$ ，发光面直径 $\Phi=1mm$ ，发散角（光束半顶角）为 $1mrad$ ，求：
- (1) 激光器发出的总光通量？（3分）
  - (2) 发光强度？（4分）
  - (3) 激光器发光面的光亮度？（4分）
  - (4) 激光束在 $10m$ 远处屏幕上产生的光照度？（4分）

解：（1） $\phi = \eta P = 152lm/W \times 5mW = 0.76lm$  （3 分）。

……（2）由于激光器的发散角 $\theta$ 很小，对应的立体角为

…………… $\Omega = \pi\theta^2$  （2 分）。

…………… $I = \frac{\phi}{\Omega} = \frac{0.76}{\pi\theta^2} = \frac{0.76}{\pi \times (0.001)^2} = 2.42 \times 10^5(cd)$  （2 分）。

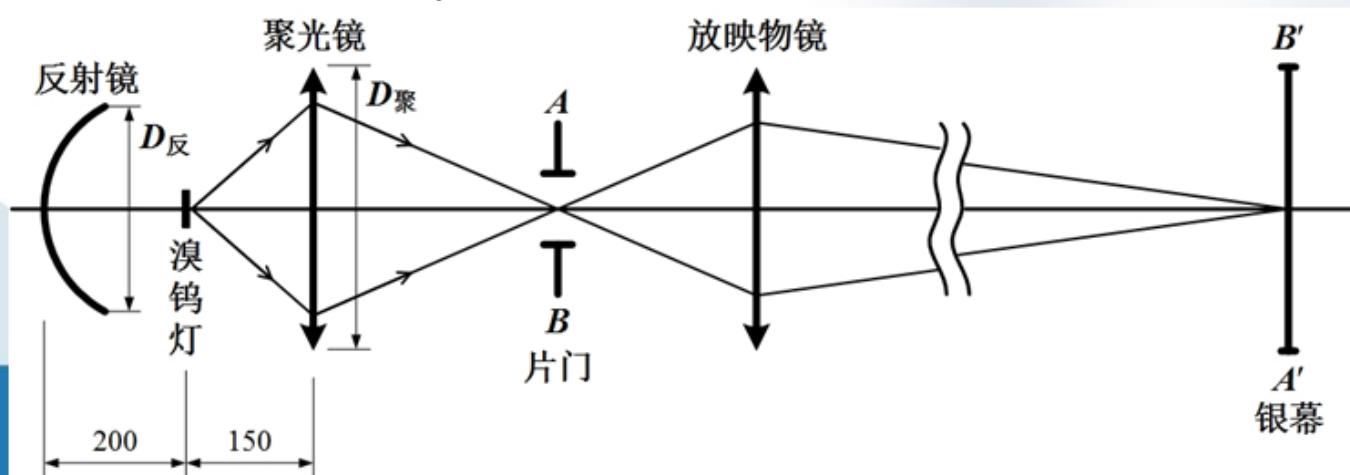
…………（3）
$$L = \frac{I}{ds_n}$$
  
（公式 2 分，答案 2 分）  
$$= \frac{2.42 \times 10^5}{\pi \times (0.5 \times 10^{-3})^2} = 3.08 \times 10^{11}(cd / m^2)$$

$$E = \frac{I}{r^2}$$
  
→ （公式 2 分，答案 2 分）。  
$$= \frac{2.42 \times 10^5}{10^2} = 2.42 \times 10^3(lx)$$



- ◆ 用 250W 溴钨灯做电影放映机的光源，发光效率  $\eta=30\text{lm/w}$ ，灯丝为双面发光的余弦辐射体，面积为  $3.5\times 5\text{mm}^2$ 。系统光路如图所示，已知聚光镜通光直径  $D_{\text{聚}}=80\text{mm}$ ，灯丝中心点 A 离开聚光镜距离为  $150\text{mm}$ 。为了提高光能利用率，在灯丝后面安装曲率半径为  $200\text{mm}$  的球面反射镜，使灯丝的平均光亮度提高  $50\%$ ，灯丝 A 点位于它的球心上。灯丝成像在放映机的片门处，像的大小正好充满片门，尺寸为  $7\times 10\text{mm}^2$ 。银幕宽为  $4\text{m}$ ，放映物镜相对孔径为  $1/1.8$ ，系统透过率  $\tau=0.6$ 。求：

- ① 球面反射镜的通光直径  $D_{\text{反}}$ ；（2分）
- ② 聚光镜焦距  $f'_{\text{聚}}$ ；（4分）
- ③ 灯丝亮度  $L$ ；（4分）
- ④ 银幕中心处的光照度  $E'_0$ 。（5分）



①· 根据相似三角形的性质, 有  $\frac{D_{\text{聚}}}{D_{\text{反}}} \approx \frac{150}{200} \rightarrow 1 \text{ 分}$

可得球面反射镜通光直径  $D_{\text{反}} = \frac{200}{150} D_{\text{聚}} \approx 106.67 \text{ mm} \rightarrow 1 \text{ 分}$

或者  $\frac{\frac{D_{\text{反}}}{2}}{\sqrt{200^2 - \left(\frac{D_{\text{反}}}{2}\right)^2}} = \frac{\frac{D_{\text{聚}}}{2}}{150} \rightarrow 1 \text{ 分} \quad D_{\text{反}} \approx 103.06 \text{ mm} \rightarrow 1 \text{ 分}$

②· 由聚光镜的垂轴放大率  $\beta_{\text{聚}} = \frac{y'}{y} = \frac{l'}{l} \rightarrow 1 \text{ 分}$

可得, 聚光镜到片门的距离  $l' = \frac{y'}{y} l = -\frac{10}{5} \times (-150) = 300 \text{ mm} \rightarrow 1 \text{ 分}$

由物像位置关系公式  $\frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \frac{1}{f'}$  可得  $\rightarrow 1 \text{ 分}$

$$f' = \frac{l'l}{l - l'} = \frac{300 \times (-150)}{-150 - 300} = 100 \text{ mm} \rightarrow 1 \text{ 分}$$



③· 溴钨灯光源的光通量···  $\Phi = \eta P = 250 \times 30 = 7500 \text{ lm}$  → 1 分

→ ∴灯丝为双面发光的余弦辐射体···

$$\begin{aligned} \rightarrow \therefore \text{灯丝的亮度} \cdots L &= \frac{\frac{\Phi}{2}}{\pi dS} && \rightarrow 2 \text{ 分} \\ &= \frac{3750}{\pi \times 3.5 \times 5 \times 10^{-6}} \approx 6820.93 \times 10^4 \text{ cd/m}^2 && \rightarrow 1 \text{ 分} \end{aligned}$$

④· 安装球面反射镜，平均光亮度提高50%，即

$$\begin{aligned} L &= 1.5L \\ &= 1.5 \times 6820.93 \times 10^4 \approx 10231.4 \times 10^4 \text{ cd/m}^2 && \rightarrow 1 \text{ 分} \end{aligned}$$

$$\rightarrow \text{放映物镜的垂轴放大率} \cdots \beta_{\text{放}} = \frac{y'}{y} = \frac{4}{-10 \times 10^{-3}} = -400 \quad \rightarrow 1 \text{ 分}$$

→ 银幕中心处的光照度

$$E'_0 = \frac{1}{\beta_{\text{放}}^2} \tau \pi L \sin^2 U \approx \frac{1}{4\beta_{\text{放}}^2} \tau \pi L \left( \frac{D}{f'} \right)^2 \quad \rightarrow 2 \text{ 分}$$

$$= \frac{1}{4 \times (-400)^2} \times 0.6 \times \pi \times 10231.4 \times 10^4 \times \left( \frac{1}{1.8} \right)^2$$

$$\approx 93 \text{ lx}$$

→ 1 分