



第二章：光辐射与光源



第一节：光辐射简介
第二节：多种光源介绍



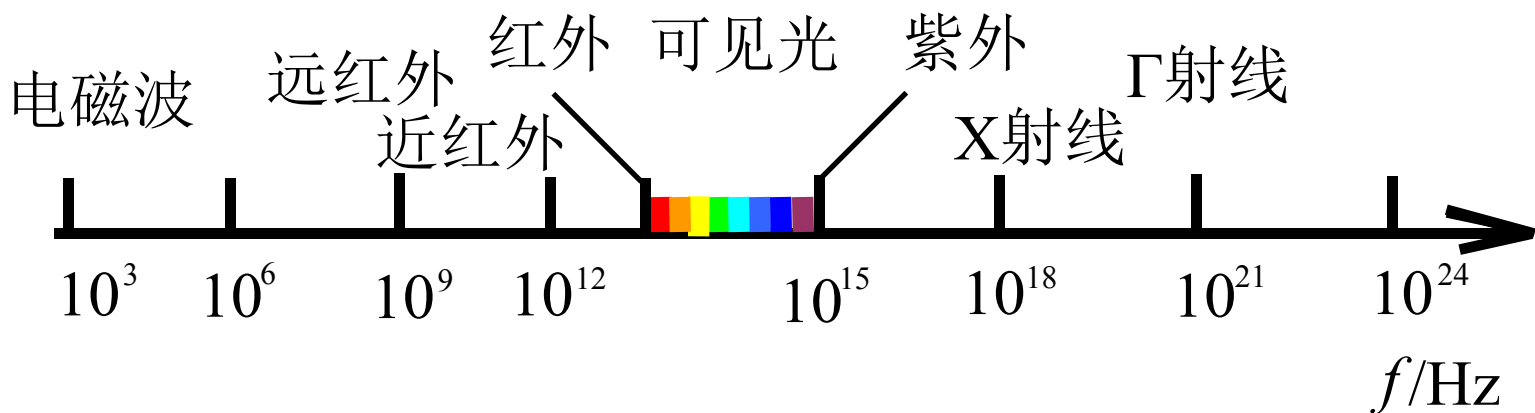
第一节：光辐射简介

- 一、与光源有关的辐射度参数与光度参数
- 二、与接收器有关的辐射度参数与光度参数
- 三、辐射度参数与光度参数的关系
- 四、光谱辐射量



电磁波谱

电磁波谱的频率范围很宽，涵盖了由宇宙射线到无线电波（ $10^2 \sim 10^{25} \text{Hz}$ ）的宽阔频域。光辐射仅仅是电磁波谱中的一小部分，它包括的波长区域从几纳米到几毫米，即 $10^{-9} \sim 10^{-3} \text{m}$ （ **$0.001 \sim 1000 \mu\text{m}$** ）的范围。在这个范围内，只有 **$0.38 \sim 0.78 \mu\text{m}$** 的光才能引起人眼的视觉感，故称这部分光为可见光。





在光学中，用来定量地描述辐射能强度的量有两类：

- 一类是物理的——辐射度量（ $0.001\sim 1000\mu\text{m}$ ），是用能量单位描述光辐射能的**客观物理量**；
- 另一类是生理的——光度量（ $0.38\sim 0.78\mu\text{m}$ ），是描述光辐射能为平均人眼接受所引起的视觉刺激大小的强度。即光度量是具有标准人眼视觉特性的人眼所接收到辐射量的度量，为**主观量**；

因此，辐射度量和光度量两者在研究方法和概念上非常类似，它们的基本物理量也是一一对应的。只是光度量只在光谱的可见波段($380\text{—}780\text{nm}$)才有意义。为避免混淆，辐射度量加下标“e”（emission），光度量加下标“v”（visual）。



一、与光源有关的辐射度参数与光度参数

■ 1. 辐（射）能和光能

辐（射）能：以辐射形式发射、传播或接收的能量，用符号 Q_e 表示，其计量单位为焦耳（J）。

光能：光通量在可见光范围内对时间的积分，以 Q_v 表示，其计量单位为流明秒（lm·s）。

■ 2. 辐（射）通量和光通量

➤ 辐射通量：又称辐射功率 P ，是辐射能的时间变化率(单位时间内发射、传播或接收的辐射能)，以符号 Φ_e 表示，单位为瓦（W），即

$$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt} \quad (1) \quad \text{或} \quad \Phi_e = \frac{Q_e}{t} \quad (2)$$



光通量：对可见光，光源表面在无穷小时间段内发射、传播或接收的所有可见光谱，光能被无穷短时间间隔 dt 来除，其商定义为光通量 Φ_v ，即

$$\Phi_v = \frac{dQ_v}{dt} \quad (3)$$

若在 t 时间内发射、传播或接收的光能不随时间改变，则上式简化为

$$\Phi_v = \frac{Q_v}{t} \quad (4)$$

Φ_v 的计量单位为：流(明) (lm)。

显然，辐(射)通量对时间的积分称为辐(射)能，而光通量对时间的积分称为光能。



3. 辐(射)出(射)度和光出(射)度

辐(射)出(射)度：对有限大小面积 A 的面光源，表面某点处的面元向半球面空间内（ 2π ）发射的辐通量 $d\Phi_e$ 与该面元面积 dA 之比，定义为辐(射)出(射)度 M_e ，即

$$M_e = \frac{d\Phi_e}{dA} \quad (5)$$

M_e 的计量单位是：瓦（特）每平方米 $[W / m^2]$ 。面光源 A 向半球面空间内发射的总辐通量为

$$\Phi_e = \int_{(A)} M_e dA \quad (6)$$

2 π 空间（半球空间）：因扩展源有面积，不同于点光源，不能向下或向内辐射。



光出(射)度：对于可见光，面光源 A 表面某一点处的面元向半球面空间发射的光通量 $d\Phi_v$ 、与面元面积 dA 之比称为光出(射)度 M_v ，即

$$M_v = \frac{d\Phi_v}{dA} \quad (7)$$

其计量单位为：勒(克司)[lx]或[lm/m²]。

对均匀发射辐射的面光源有

$$M_v = \frac{\Phi_v}{A} \quad (8)$$

由式(7)，面光源向半球面空间发射的总光通量为

$$\Phi_v = \int_{(A)} M_v dA \quad (9)$$



4. 辐(射)强度和发光强度

辐(射)强度:对点光源在给定方向的立体角元 $d\Omega$ 内发射的辐通量 $d\Phi_e$, 与该方向立体角元 $d\Omega$ 之比定义为点光源在该方向的辐(射)强度 I_e , 即

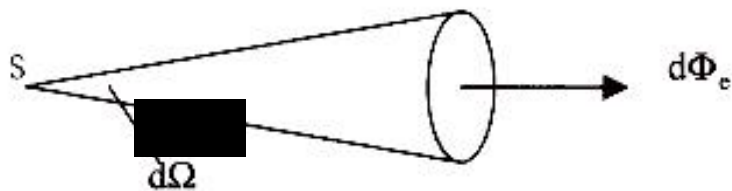


图 14 点辐射源的辐射强度

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega} \quad (10)$$

辐(射)强度的计量单位为: 瓦 (特) 每球面度 $[W / sr]$ 。

点光源在有限立体角 Ω 内发射的辐通量为

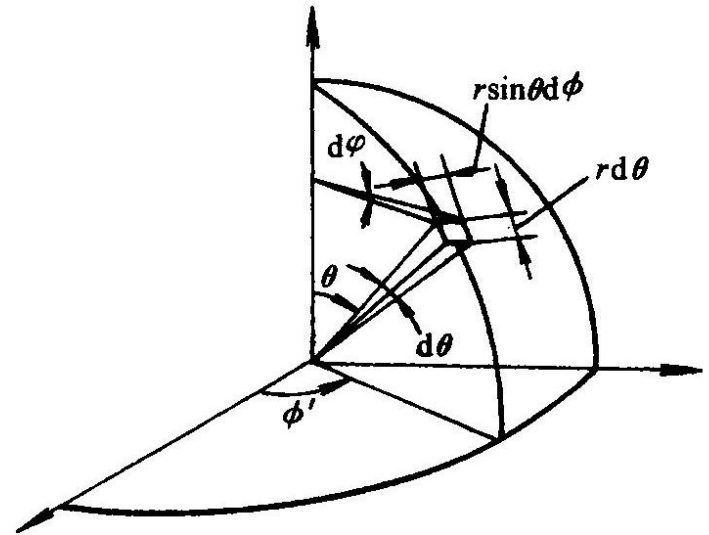
$$\Phi_e = \int_{\Omega} I_e d\Omega \quad (11)$$

各向同性的点光源(在所有方向上辐射强度都相同的点辐射源)向所有方向发射的总辐通量为

$$\Phi_e = I_e \int_0^{4\pi} d\Omega = 4\pi I_e \quad (12)$$



实际上，一般辐射源多为各向异性的辐射源，其辐射强度随方向而变化，如图所示。



点辐射源在整个空间发射的辐通量为：

$$\Phi_e = \int I(\varphi, \theta) d\Omega = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\pi I(\varphi, \theta) \sin \theta d\theta$$



发光强度：对可见光，与式（9）类似，定义发光强度为

$$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega} \quad (13)$$

对各向同性的点光源向所有方向发射的总光通量为

$$\Phi_v = \int_{\Omega} I_v d\Omega \quad (14)$$

一般点光源是各向异性的，其发光强度分布随方向而异。

发光强度的单位是：坎德拉（candela），简称为坎[cd]。1979年第十六届国际计量大会通过决议，将坎德拉定义为：在给定方向上能发射 $540 \times 10^{12} \text{Hz}$ （波长为555nm）的单色辐射源，在此方向上的辐强度为（1/683）W/sr，其发光强度定义为一个坎德拉[cd]。

由式（13），对发光强度为1cd的点光源，向给定方向1球面度(sr)内发射的光通量定义为：1流明（lm）。发光强度为1cd的点光源在整个球空间所发出的总光通量为 $=4\pi I_v = 12.566 \text{ lm}$ 。



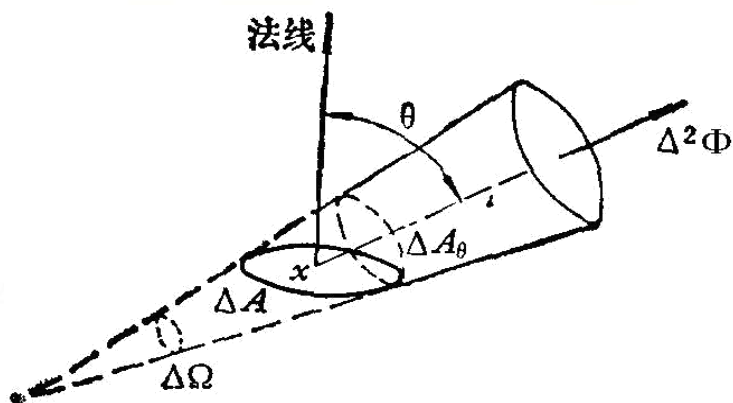
5. 辐(射)亮度和亮度

辐射亮度：光源表面某一点处的面元在给定方向上的辐强度除以该面元在垂直于给定方向平面上的正投影面积，称为辐射亮度 L_e ，即

$$L_e = \frac{dI_e}{dA \cos \theta} = \frac{d^2 \Phi_e}{d\Omega dA \cos \theta} \quad (15) \quad \text{W}/(\text{sr} \cdot \text{m}^2)$$

式中， θ 为所给方向与面元法线之间的夹角。

$$L_e = dI_e / (dS \cos \theta) = d^2 \Phi_e / (d\Omega dS \cos \theta)$$



在 θ 方向看到的源面积是 ΔA 的投影面积：

$$\Delta A_\theta = \Delta A \cos \theta$$

辐射亮度定义



亮度：对可见光，亮度 L_v 定义为光源表面某一点处的面元在给定方向上的发光强度除以该面元在垂直给定方向平面上的正投影面积，即

$$L_v = \frac{dI_v}{dA \cos \theta} = \frac{d^2 \Phi_v}{d\Omega dA \cos \theta} \quad (16)$$

L_v 的计量单位是：坎德拉每平方米[cd/m²]或 lm/(m².sr)

常用：熙提(sb)=lm/(cm².sr)

常见光源亮度

晴天：10000 cd/m² 晴天日落后：1 cd/m²

蜡烛火焰：约0.5sb 钨丝灯泡：约500sb



三个发射量的区别和关系

	辐射强度I	辐射出射度 M	辐射亮度L
源特点	点源	面源	面源
辐射特点	立体角内	2π 空间	立体角内



二、与接收器有关的辐射度参数与光度参数

从接收器的角度讨论辐射度与光度的参数。接收光源发射辐射的接收器可以是探测器，也可以是反射辐射的反射器，或两者兼有。与接收器有关的辐射度参数与光度参数有以下2种。

■ 1. 辐照度与光照度

辐照度 E_e 是照射到物体表面某一点处面元的辐通量 $d\Phi_e$ 除以该面元的面积 dA 的商，即

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA} \quad (17)$$

E_e 的计量单位是：瓦（特）每平方米 $[W / m^2]$ 。



若辐通量是均匀地照射在物体表面上，则式（17）简化为

$$E_e = \frac{\Phi_e}{A} \quad (18)$$

光照度：对可见光，照射到物体表面某一面元的光通量 $d\Phi_v$ 除以该面元面积 dA 称为光照度 E_v ，即

$$E_v = \frac{d\Phi_v}{dA} \quad (19) \quad \text{或} \quad E_v = \frac{\Phi_v}{A} \quad (20)$$

E_v 的计量单位是：勒（克司）[lx]。

典型照度：

办公室工作： 20~100 lx

满月的地面： 0.2 lx

晴朗夏日采光良好的室内： 100~500 lx



2. 辐照量和曝光量

辐照量与曝光量是光电接收器接收辐射能量的重要度量参数，光电器件的输出信号常与所接收的入射辐射能量有关。

辐照量:照射到物体表面某一面元的辐照度 E_e 在时间 t 内的积分称为辐照量 H_e ，即

$$H_e = \int_0^t E_e dt \quad (21)$$

辐照量 H_e 的计量单位是:焦尔每平方米 $[J/m^2]$ 。

如果面元上的辐照度 E_e 与时间无关，式（21）可简化为

$$H_e = E_e t \quad (22)$$



曝光量:与辐照量 H_e 对应的光度量是曝光量 H_v , 它定义为物体表面某一面元接收的光照度 E_v 在时间 t 内的积分, 即

$$H_v = \int_0^t E_v dt \quad (23)$$

H_v 的计量单位是:勒(克司)秒[lx.s]。

如果面元上的光照度 E_v 与时间无关, 式(23)可简化为

$$H_v = E_v t$$



辐射度量和光度量的对照表

表 1-1 辐射度量与光度量的定义

辐射度参量				光度参量			
量的名称	量的符号	量的定义	单位符号(单位名称)	量的名称	量的符号	量的定义	单位符号(单位名称)
辐能	Q_e		J [焦(耳)]	光量	Q_v		lm·s [流(明)秒]
辐通量 (辐功率)	Φ_e	$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt}$	W [瓦(特)]	光通量 (光功率)	Φ_v	$\Phi_v = \frac{dQ_v}{dt}$	lm [流(明)]
辐出度	M_e	$M_e = \frac{d\Phi_e}{dA}$	W/m ² [瓦(特)每平方米]	光出度	M_v	$M_v = \frac{\Phi_v}{A}$	lm/m ² [流(明)每平方米]
辐强度	I_e	$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega}$	W/sr [瓦(特)每球面度]	发光强度	I_v	$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega}$	cd [(坎)德拉]
辐亮度	L_e	$L_e = \frac{I_e}{dA \cos\theta}$ $= \frac{d^2\Phi_e}{d\Omega dA \cos\theta}$	W/(sr·m ²) [瓦(特)每球面度平方米]	光亮度	L_v	$L_v = \frac{I_v}{dA \cos\theta}$ $= \frac{d^2\Phi_v}{d\Omega dA \cos\theta}$	cd/m ² [(坎)德拉每平方米]
辐照度	E_e	$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA}$	W/m ² [瓦(特)每平方米]	光照度	E_v	$E_v = \frac{d\Phi_v}{dA}$	lx [勒(克司)]
辐照量	H_e	$H_e = \int_0^t E_e dt$	J/m ² [焦(耳)每平方米]	曝光量	H_v	$H_v = \int_0^t E_v dt$	lx·s [勒(克司)秒]



四个单位的图示:

发光体



5条



4条



3条



2条



1条

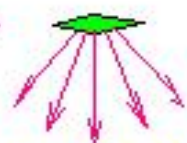
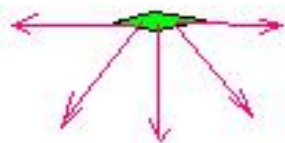
同样时间内发出的光线有多少

光功率
(光通量)

70W和400W
灯的区别



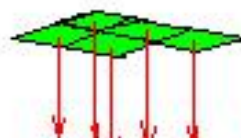
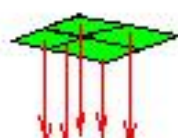
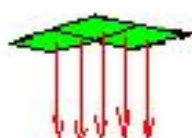
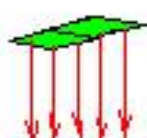
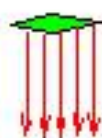
70W 400W



同样多的光线光线的方向不同

发光强度

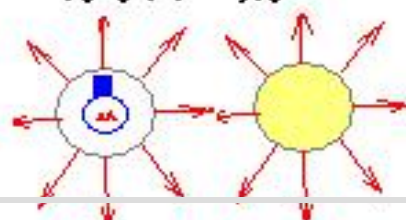
低层高灯和高
层高灯的区别



同样方向和数量的光线来自的发光面积不同

亮度

乳白色球和透
明球的区别



被照面



照度

太阳光和月
光的区别



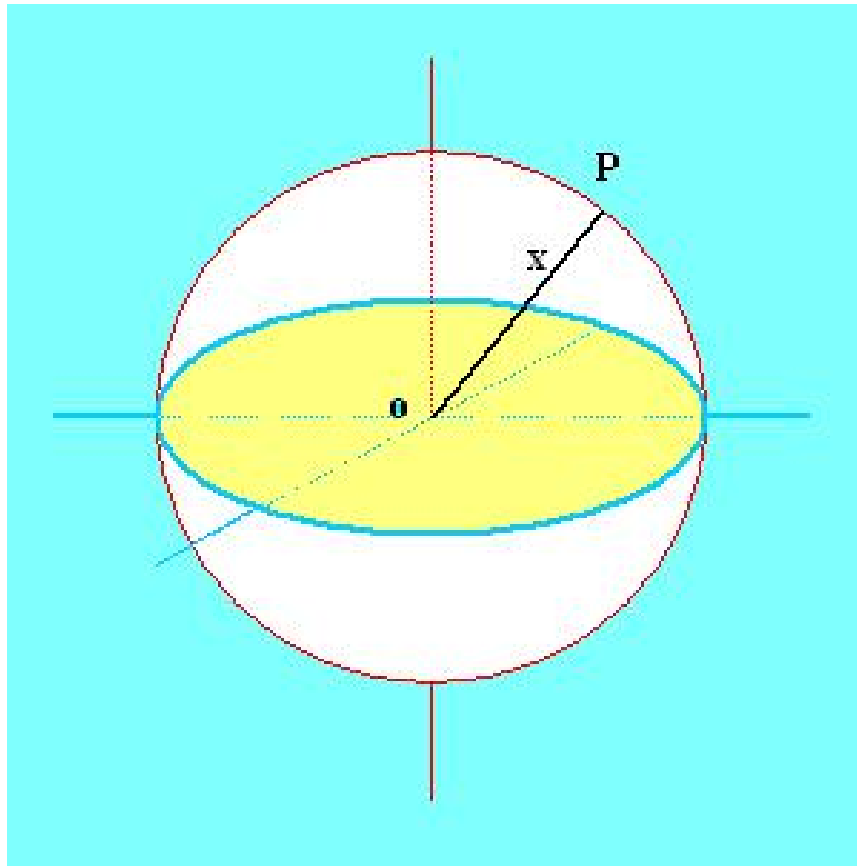
几点注意

1. 注意不要把辐照度 E_e 与辐出度 M_e 混淆起来。E和M的单位相同，区别：
 - 辐照度是从物体表面接收辐射通量的角度来定义的，描述辐射接收面（探测器）所接收的辐射特性；
 - 辐出度是从面光源表面发射辐射的角度来定义的，描述扩展辐射源向外发射的辐射特性。
2. 对同一个光源来说，光源离光照面越远，光照面上的照度越小；光源离光照面越近，光照面上的照度越大。
3. 光源与光照面距离一定的条件下，垂直照射与斜射比较，垂直照射的照度大；光线越倾斜，照度越小。（在通量不变的情况下，被照面积越大照度越小。）
4. 点辐射源：（相对概念）辐射源与观测点之间距离大于辐射源最大尺寸**10**倍时，可当做点源处理，否则称为扩展源（有一定面积）。
5. 辐射强度是描述点源特性的辐射量。
6. 同灯同距照在白纸和黑纸上，照度相同，亮度不同。



思考题

在O点处，有一点光源，发光强度为 1cd ，
求：空间任意一点P的光照度 $E_v=?$





解1: $OP=x$, P点所在球面的面积为:

$$s=4\pi x^2$$

●通过s的光通量:

$$\Phi = I\Omega = 4\pi (lm)$$

●因为是点光源, 均匀辐射, 则P点的光照度:

$$E_v = \Phi/s = 4\pi / 4\pi x^2 = 1/x^2$$

$$\text{当 } x=1m, \quad E_v=1 \quad (lx)$$

$$\text{当 } x=2m, \quad E_v=0.25 \quad (lx)$$



三、辐射度参数与光度参数的关系

辐射度参数与光度参数是从不同角度对光辐射进行度量的参数，这些参数在一定光谱范围内（可见光谱区）经常相互使用，它们之间存在着一定的转换关系；有些光电传感器件采用光度参数标定其特性参数，而另一些器件采用辐射度参数标定其特性参数，因此讨论它们之间的转换是很重要的。掌握了这些转换关系，就可以对用不同度量参数标定的光电器件灵敏度等特性参数进行比较。



1. 光谱光视效率

- 人的视神经对各种不同波长光的感光灵敏度是不一样的。对绿光最灵敏，对红、蓝光灵敏度较低。由于受视觉生理和心理作用，不同的人对各种波长光的感光灵敏度也有差异。
- 国际照明委员会(CIE)根据对许多人的大量观察结果，确定了人眼对各种波长光的平均相对灵敏度，称之为“标准光度观察者”光谱光视效率，或称之为视见函数。



❖ 明视觉光谱光视效率：亮度大于 3cd/m^2 时，此时的视觉主要由人眼视网膜上分布的锥体细胞的刺激所引起。用各种单色辐射分别刺激正常人（标准观察者）眼的锥状细胞，当刺激程度相同时，发现波长 $0.555\mu\text{m}$ 处的光谱辐射亮度 $L_{\text{e},\lambda_{\text{m}}}$ 大于其它波长的光谱辐亮度 $L_{\text{e},\lambda}$ 。把波长 $=0.555\mu\text{m}$ 的光谱辐射亮度 $L_{\text{e},\lambda_{\text{m}}}$ 作为基准，其它波长的光谱辐亮度 $L_{\text{e},\lambda}$ 与之相比，定义为正常人眼的明视觉光谱光视效率 $V(\lambda)$ ，即

$$V(\lambda) = \frac{L_{\text{e},\lambda}}{L_{\text{e},555\text{nm}}}$$

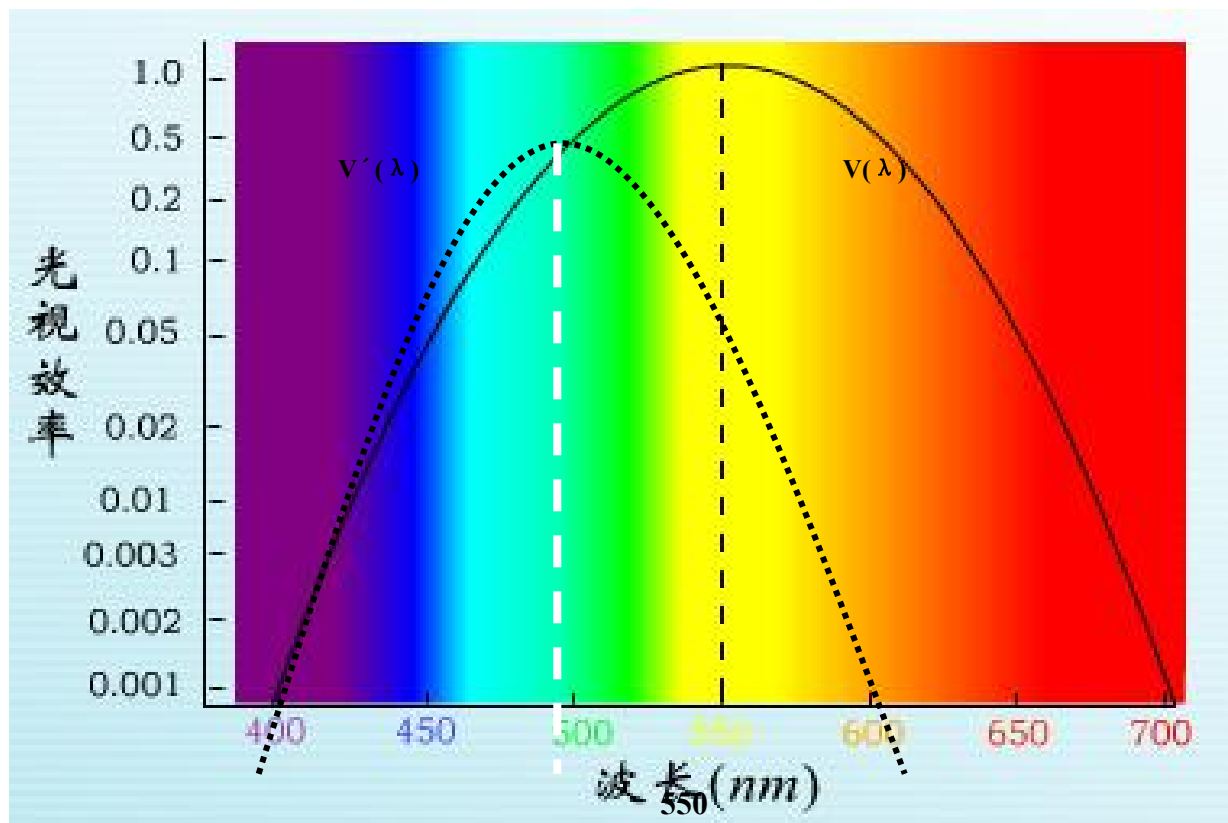


暗视觉光谱光视效率：亮度小于 $0.001\text{cd}/\text{m}^2$ 时，此时的视觉主要由人眼视网膜上分布的圆柱细胞刺激所引起。用微弱的各种单色辐射分别刺激正常人（标准观察者）眼的圆柱细胞，当刺激程度相同时，发现波长 $0.507\mu\text{m}$ 处的光谱辐射亮度 $L_{\text{e},\lambda_{\text{m}}}$ 大于其它波长的光谱辐亮度 $L_{\text{e},\lambda}$ 。把波长 $=0.507\mu\text{m}$ 的光谱辐射亮度 $L_{\text{e},\lambda_{\text{m}}}$ 作为基准，其它波长的光谱辐亮度 $L_{\text{e},\lambda}$ 与之相比，定义为正常人眼的暗视觉光谱光视效率 $V'(\lambda)$ ，即

$$V'(\lambda) = \frac{L_{\text{e},\lambda}}{L_{\text{e},507\text{nm}}}$$



实线是明视觉光谱光视效率，用 $V(\lambda)$ 表示，虚线是暗视觉光谱光视效率，用 $V'(\lambda)$ 表示





人眼的光谱光视效率的数值

波长(nm)	明视觉 $V(\lambda)$	暗视觉 $V'(\lambda)$	波长(nm)	明视觉 $V(\lambda)$	暗视觉 $V'(\lambda)$
380	0.00004	0.000589	590	0.757	0.0655
390	0.00012	0.002209	600	0.631	0.03315
400	0.0004	0.00929	610	0.503	0.01593
410	0.0012	0.03484	620	0.381	0.00737
420	0.0040	0.0966	630	0.265	0.003335
430	0.0116	0.1998	640	0.175	0.001497
440	0.023	0.3281	650	0.107	0.000677
450	0.038	0.455	660	0.061	0.0003129
460	0.060	0.567	670	0.032	0.0001480
470	0.091	0.676	680	0.017	0.0000715
480	0.139	0.793	690	0.0082	0.00003533
490	0.208	0.904	700	0.0041	0.00001780
500	0.323	0.982	710	0.0021	0.00000914
510	0.503	0.997	720	0.00105	0.00000478
520	0.710	0.935	730	0.00052	0.000002546
530	0.862	0.811	740	0.00025	0.000001379
540	0.954	0.650	750	0.00012	0.000000760
550	0.995	0.481	760	0.00006	0.000000425
560	0.995	0.3288	770	0.00003	0.0000002413
570	0.952	0.2076	780	0.000015	0.0000001390
580	0.870	0.1212			



2.光谱光视效能

明视觉的最大光谱光视效能：由于人眼对等能量的不同波长的可见光辐射能所产生的光感觉是不同的，因而按人眼的视觉特性 $V(\lambda)$ 来评价的辐射通量 Φ 即为光通量 Φ_v ，这两者的关系为：

$$\Phi_{v,\lambda} = K_m \Phi_{e,\lambda} V(\lambda)$$

式中 $K_m = 683 \text{ lm/W}$ （国际实用温标IPTS-68的理论计算值），为明视觉的最大光谱光视效能，亦称光功当量，它表示在波长为555nm处，即人眼光谱光视效率最大处($V=1$)，1W的辐射通量对应相当的光通量为683 lm；
换句话说，此时1lm相当于1 / 683W。



- 暗视觉的最大光谱光视效能：对于暗视觉，为

$$\Phi'_{v,\lambda} = K'_m \Phi_{e,\lambda} V'(\lambda)$$

式中 $K'_m = 1725 \text{ lm/W}$ 为暗视觉的最大光谱光视效能，它表示在波长为 507nm 处，即人眼暗视觉光谱光视效率最大处($V'=1$)， 1W 的辐射通量对应相当的光通量为 1725 lm 。



■ K_m 、 K'_m 确定之后，即可对光度量和辐射度量之间进行准确的换算，由此可进一步探讨辐射度和光度基准的统一。

■ 同理，其它光度量也有类似的关系。用一般的函数表示光度量与辐射量之间的关系：

$$X_V = K_m \int_{380}^{780} X_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda$$

$$X'_V = K'_m \int_{380}^{780} X_{e,\lambda} V'(\lambda) d\lambda$$



光通量:

$$\Phi_v = K_m \int_{380nm}^{780nm} V(\lambda) \Phi_{e\lambda} d\lambda$$

对于明视觉:

$$\Phi_v = 683 \int_{380nm}^{780nm} V(\lambda) \Phi_{e\lambda} d\lambda$$

对于暗视觉:

$$\Phi'_v = 1725 \int_{380nm}^{780nm} V'(\lambda) \Phi_{e\lambda} d\lambda$$



思考题

例 已知某He-Ne激光器的输出功率为3mW，
试计算其发出的光通量为多少lm？



❖解 He-Ne激光器输出的光为光谱辐射通量，计算出它发出的光通量为

$$\Phi_{V, \lambda} = K_{\lambda, e} \Phi_{e, \lambda} = K_m V(\lambda) \Phi_{e, \lambda}$$

$$= 683 \times 0.24 \times 3 \times 10^{-3}$$

$$= 0.492 \text{ (lm)}$$



★几点说明：

- 对于相同的辐射能量，光视效率不同。
- “光视效率的最大值在 $\lambda=555\text{nm}$ 处”是实验证明。
- 绝大部分人眼符合此规律，略有小差异（尤其在可见光波段两端）。
- 通过这个结论，可知辐射量与光度量的换算关系

$$X_{v\lambda} = K_m V(\lambda) X_{e\lambda}$$

$X_{v\lambda}$ ——光度量； $X_{e\lambda}$ ——辐射量； K_m 是常数； $V(\lambda)$ 查表。

- 明视觉和暗视觉：人眼在环境亮度不同时对颜色的视觉效率不同。

明视觉：光亮度大于几个 cd/m^2 ；

暗视觉：光亮度小于 0.001cd/m^2 。



四. 光谱辐射量

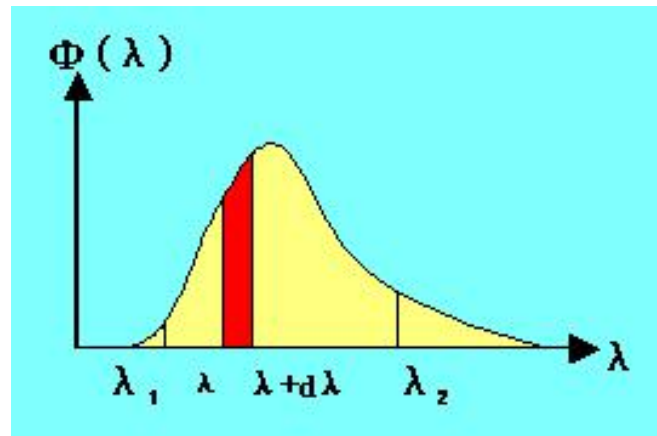
也称之为辐射量的光谱密度，也称单色辐射量。辐射源所辐射的能量往往由许多不同波长的单色辐射所组成，为了研究各种波长的辐射通量，需要对某一波长的单色光的辐射能量作出相应的定义。光谱辐射量是辐射量随波长的变化率。

● **例：单色辐射通量 Φ_λ ：**辐射源发出的光在波长 λ 处的单位波长间隔内的辐射通量。辐射通量与波长的关系如图。其关系式为

$$\Phi_\lambda = \frac{d\Phi}{d\lambda}$$

单位：W / μm (瓦/微米)

或 W / nm(瓦/纳米)





前面介绍的几个重要的辐射量，都有与光谱辐射量相对应的关系：

单色辐射通量：

$$\Phi_{\lambda} = \frac{d\Phi}{d\lambda}$$

单色辐射照度：

$$E_{\lambda} = \frac{dE}{d\lambda}$$

单色辐射出射度：

$$M_{\lambda} = \frac{dM}{d\lambda}$$

单色辐射强度：

$$I_{\lambda} = \frac{dI}{d\lambda}$$

单色辐射亮度：

$$L_{\lambda} = \frac{dL}{d\lambda}$$

辐射源的总辐射通量：

$$\Phi = \int_0^{\infty} \Phi_{\lambda} d\lambda$$



辐射度量和光谱辐射量的对照表

辐射度量	符号	单位	光谱辐射量	符号	单位
辐射能	Q	J			
辐射通量	Φ	W	单色辐射通量	Φ_{λ}	$W \cdot \mu m^{-1}$
辐照度	E	$W \cdot m^{-2}$	单色辐射照度	E_{λ}	$W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$
辐出度	M	$W \cdot m^{-2}$	单色辐射出射度	M_{λ}	$W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$
辐射强度	I	$W \cdot sr^{-1}$	单色辐射强度	I_{λ}	$W \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$
辐射亮度	L	$W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}$	单色辐射亮度	L_{λ}	$W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$



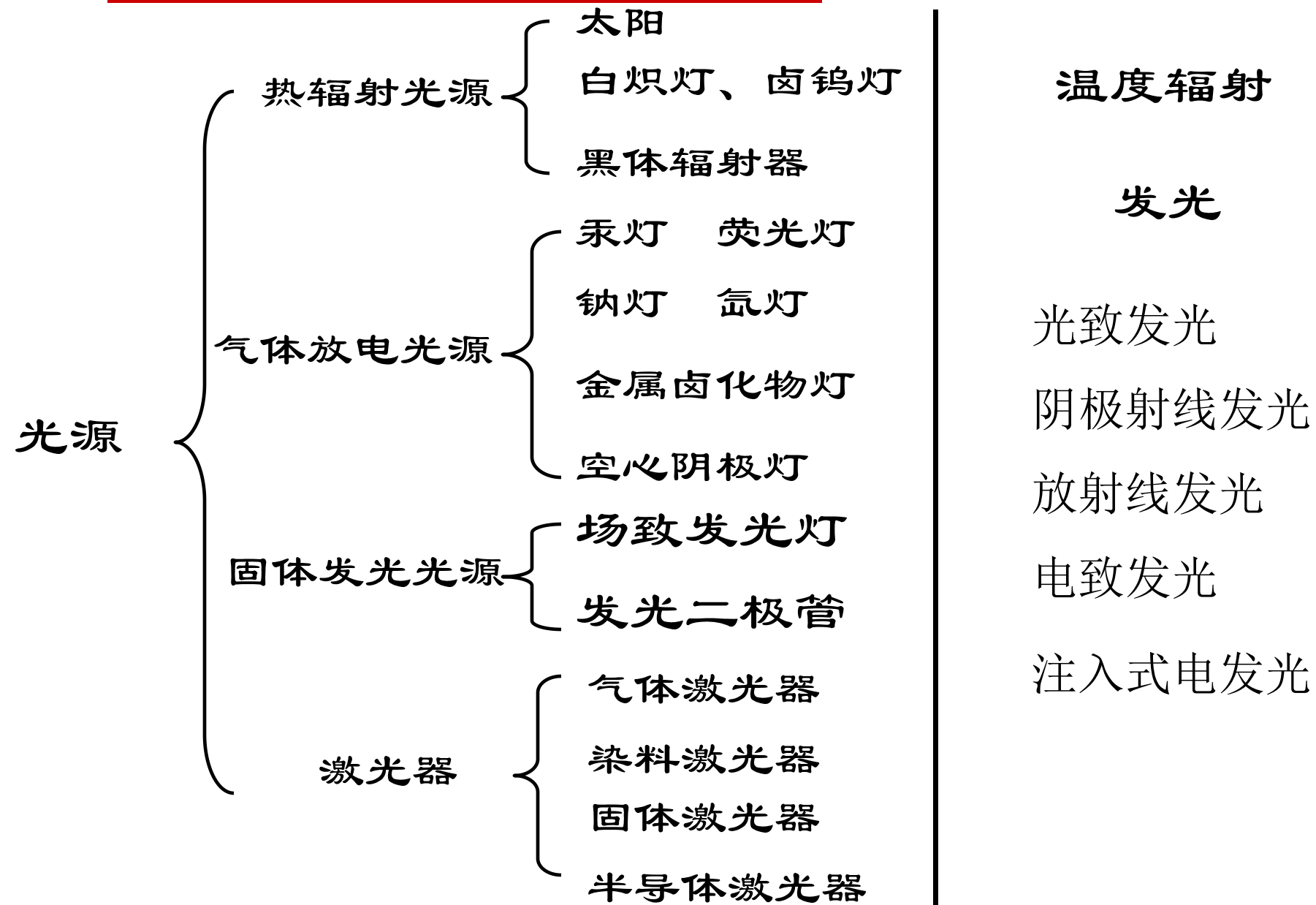
第二节：多种光源介绍

一、光电仪器中的常用光源

二、黑体辐射



一. 光电仪器中的常用光源





1. 光源的基本特性参数

(1) 辐射效率和发光效率

辐射效率：在给定 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波长范围内，某一光源发出的辐射通量与产生这些辐射通量所需的电功率之比

$$\eta_e = \frac{\Phi_e}{P} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_e(\lambda) d\lambda}{P}$$

发光效率：某一光源所发射的光通量与产生这些光通量所需的电功率之比

$$\eta_v = \frac{\Phi_v}{P} = \frac{K_m \int_{380}^{780} \Phi_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{P} \quad \text{单位：lm/W}$$



常用光源的发光效率

光源种类	发光效率(lm/W)	光源种类	发光效率(lm/W)
普通钨丝灯	8 ~ 18	高压汞灯	30 ~ 40
卤钨灯	14 ~ 30	高压钠灯	90 ~ 100
普通荧光灯	35 ~ 60	球形氙灯	30 ~ 40
三基色荧光灯	55 ~ 90	金属卤化物灯	60 ~ 80

LED发光效率:

2008年: 100 lm/W

2010年: 140~170 lm/W

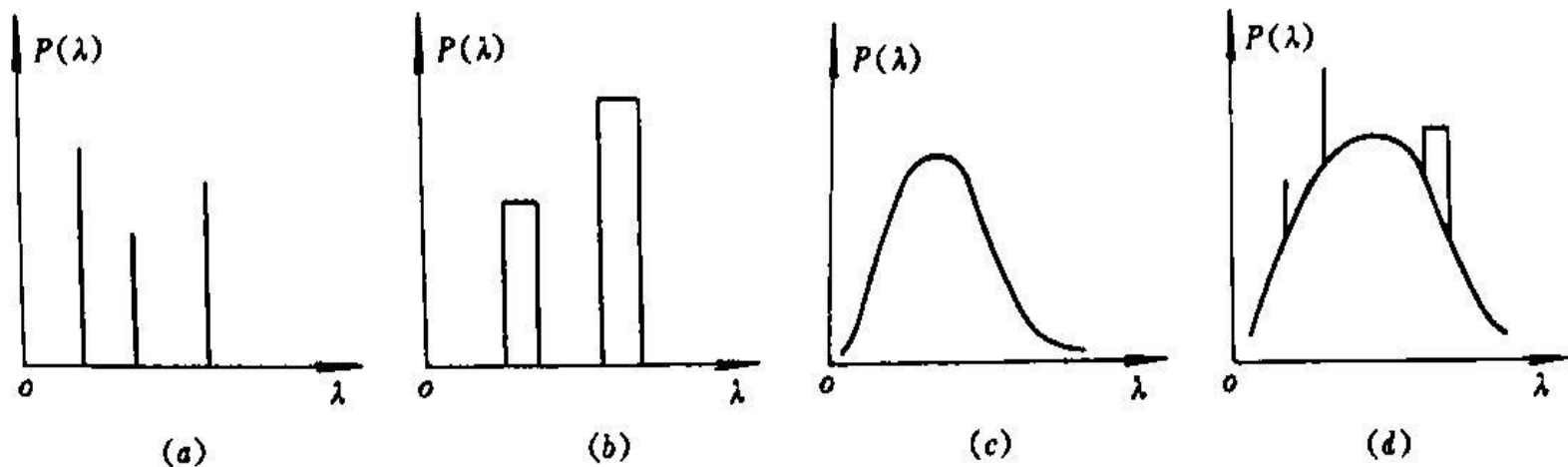
2011年: 150~200 lm/W

LED的发光效率的上限: 250lm/W左右



(2) 光谱功率分布

- 1) 线光谱源：其光谱在紫外到红外有一些分立的窄带，如低压汞灯、气体放电灯和磷光灯。
- 2) 带状光谱：如高压汞灯、高压钠灯
- 3) 连续光谱源：通常是热激发源，覆盖从紫外到红外范围的发射波长，如白炽灯。
- 4) 混合光谱：如荧光灯



四种典型的光谱分布



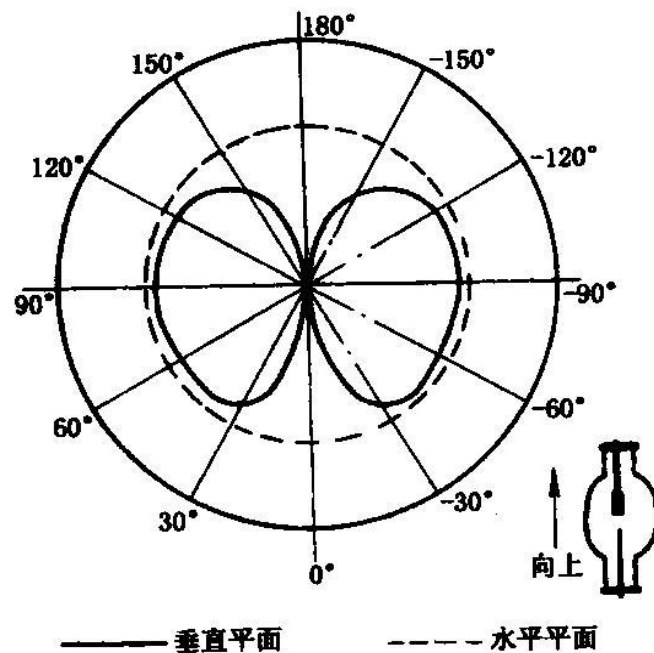
在选择光源时，它的光谱功率分布应由测量对象的要求来决定：

- 在目视光学系统中，一般采用可见区光谱辐射比较丰富的光源。
- 对于彩色摄像用光源，为了获得较好的色彩还原，应采用类似于日光色的光源，如卤钨灯、氙灯。
- 在紫外分光光度计中，通常采用氘灯、紫外汞氙灯等紫外辐射较强的光源。



(3) 空间光强分布

对于各向异性光源，其发光强度在空间各方向上是不相同的。若在空间某一截面上，自原点向各径向取矢量，矢量的长度与该方向的发光强度成正比。将各矢量的端点连起来，就得到光源在该截面上的发光强度曲线，即配光曲线。配光曲线其实就是表示一个灯具或光源发射出的光在空间中的光强分布情况。



超高压球形汞灯光强分布



■配光曲线的分类：配光曲线按照其对称性质通常可分为如下三类：

–轴向对称：又称为旋转对称，指各个方向上的配光曲线都是基本对称的，一般的筒灯、工矿灯都是这样的配光。

–对 称：当灯具C0° 和C180° 剖面配光对称，同时C90° 和C270° 剖面配光对称时，这样的配光曲线称为对称配光

–非对称：就是指C0° - 180° 和C90° - 270° 任意一个剖面配光不对称的情况。

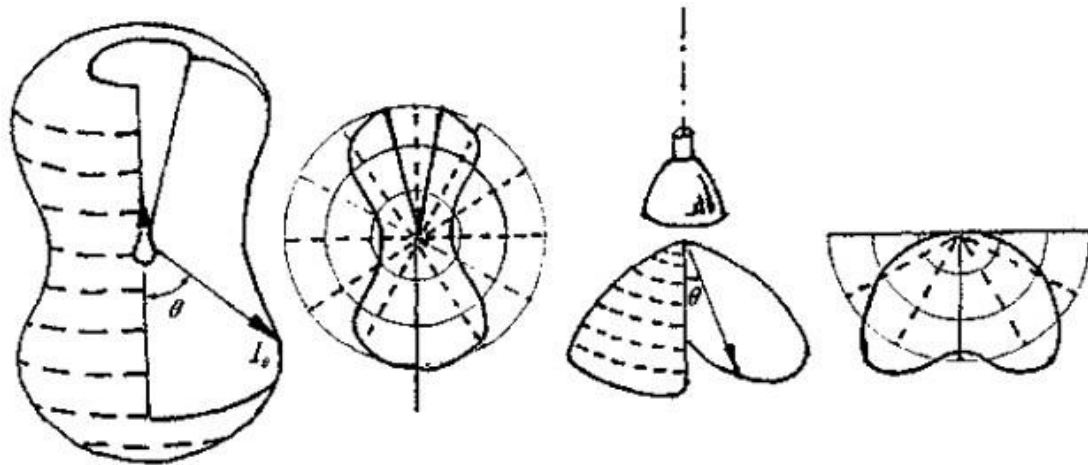
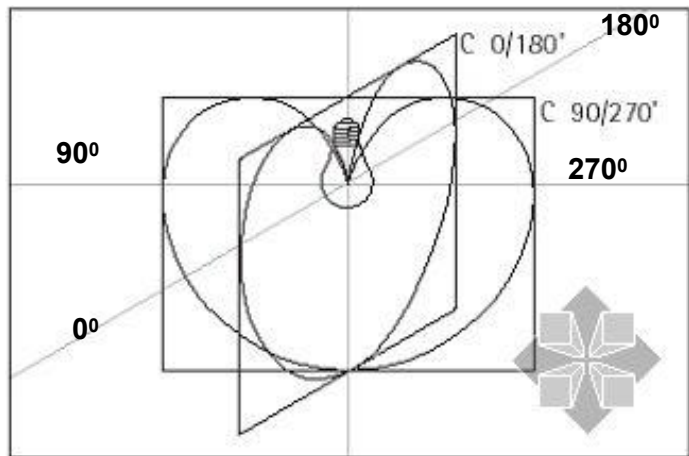
■配光曲线按照其光束角度通常可分为：

窄配光 ($< 20^\circ$)

中配光 ($20^\circ > 40^\circ$)

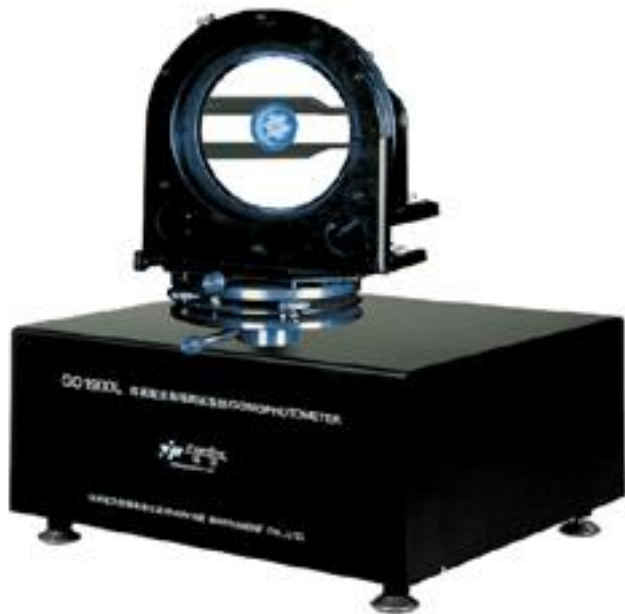
宽配光 ($> 40^\circ$)

实际应用中，各个厂家的对宽、中、窄的定义也略有不同。





杭州远方GO1900L 灯具配光曲线测试系统



http://www.everfine.cn/product_view.asp?id=927&sstyle=yuangong171&bdclkid=OQL_J2s2toTvyWCdY6csSGtT8u4K0gscMogsMeL7ILTP

- 工作原理：
GO1900L测量是通过转动灯具并且保持探测器不动来实现的。因为灯具转轴通过灯具的光学中心，这就相当于探测器绕着灯具在离灯具一定距离的球面上作圆周运动。照度值**E**由仪器测出，光源到探头的距离由用户实际测出，根据光学计算公式就可以得到光强值**I**。
- 技术特性：
 - 1.灯具可绕水平轴（**C**轴）转动，转动范围： **$0^{\circ} \sim 360^{\circ}$** ；
 - 2.灯具可绕垂直轴（**Y**轴）转动： **$-90^{\circ} \sim +90^{\circ}$** ；
 - 3.扫描间隔： **0.1° 、 0.2° 、 0.5° 、 1° 、 2° 、 5°** ；
 - 4.转角精度： **$\pm 0.05^{\circ}$** ；
 - 5.照度测量精度：一级或标准级；
 - 6.探测器**V**（ λ ）修正水平高，达到国家标准级**CLASS A**要求（国内唯一，国际先进）；
 - 7.转轴最大承载：**10kg**；
 - 8.灯具最大口面直径：**130mm**。



(4) 光源的色温

1) 分布色温（温度）

辐射源在某一波长范围内辐射的相对光谱功率分布与黑体在某一温度下辐射的相对光谱功率分布一致，那么该黑体的温度就称为辐射源的分布色温。

2) 辐射源的色温

辐射源发射光的颜色与黑体在某温度下辐射光的颜色相同，则黑体的这一温度称为辐射源的色温。由于一种颜色可以由多种光谱分布产生，所以色温相同的光源，它们的相对光谱功率分布不一定相同。



(5) 光源的颜色

色表：用眼睛直接观察光源时看到的颜色称为光源的色表。例如高压钠灯的色表呈黄色，荧光灯的色表呈白色。

显色性：当光源照射物体时，物体呈现的色表颜色（也就是物体反射光在人眼内产生的颜色感觉）与该物体在标准光源照射下所呈现的颜色的一致性程度称为光源的显色性。用显色指数CRI（**Color Rendering Index**）表征。通常光源显色指数为80或以上就可认为该光源显色性好。

光源的颜色从根本上是由其光谱能量分布所决定的。



色品：颜色品质的综合指标。

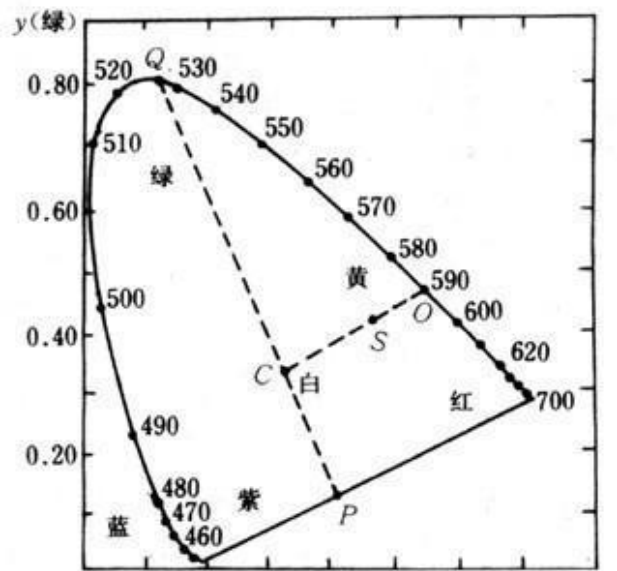
色品图：以不同位置的点表示各种色品的平面图。1931年由国际照明委员会(CIE)制定，故称CIE色品图。

色品用如下3个属性来描述：①色调。色光中占优势的光的波长称主波长，由主波长的光决定的主观色觉称色调。②亮度。由色光的能量所决定的主观明亮程度。③饱和度。描述某颜色的组分中纯光谱色所占的比例，即颜色的纯度。

图中 x —红原色的比例， y —绿原色的比例， z —蓝原色（由 $x+y+z=1$ 推出）。图中弧线上的各点代表纯光谱色，此弧线称为光谱轨迹。中心点 C 代表白色，相当于中午太阳光的颜色，其色品坐标为 $x=0.3101$ ， $y=0.3162$ 。

例：色品图上任给一点 S ，可立刻得到 S 点所代表的颜色的色调和饱和度。

作图法：连结 CS ，其延长线交光谱轨迹于 O 点， O 点处的波长即颜色 S 的主波长，决定了颜色 S 的色调。从 C 到 S 点和 O 点的距离之比 CS / CO 为该颜色的饱和度。从光谱轨迹上任一点通过 C 点引一直线到达对侧光谱轨迹上的另一点，则该直线两端的颜色互为补色。



chromaticity diagram



2. 光源选择的基本要求

(1) 对光源发光光谱特性的要求：

匹配系数（光源与探测器配合工作时产生的光电信号与光源总通量的比值）尽可能大；

(2) 对光源发光强度的要求：

过低会造成信号弱；过强会导致系统的非线性或损坏探测器。必须正确估计探测器的最小、最大光通量。

(3) 对光源稳定性要求：

依据不同的检测量和精度要求来确定。

(4) 其它

如结构要求、光源的空间分布等。



二. 黑体辐射

物体通常以两种不同形式发射辐射能量。第一种称为发光（光辐射），第二种称为热辐射

1. 光辐射：光源发射光波的过程称为光辐射

- （1） 跃迁辐射与受激辐射
- （2） 湮灭辐射
- （4） 场致发光
- （5） 同步辐射



2. 热辐射

- 任何温度在绝对温度以上的物体都存在热辐射；
- 热辐射的光谱是连续光谱；
- 热辐射的光谱分布取决于发射体的温度和性质.



3. 发射本领与吸收本领

- 发射本领：即物体的发射率, 指实际物体的辐射能力 $M(T)$ 与同温度下黑体辐射能力 $M_b(T)$ 的比值：

$$\varepsilon(T) = \frac{M(T)}{M_b(T)}$$

- ε 不仅依赖于波长和温度，也依赖发射角度。
- 但大多数常见物体的 ε 与发射角度的依赖关系基本上可忽略，与波长和温度的依赖关系也很微弱。为实用方便，常把 ε 作为常数。

- 吸收本领：即物体的吸收比 α ， α 也与波长和温度有关，故写成 $\alpha_{\lambda T}$ 。被物体吸收的辐射通量占射到物体上的辐射通量的百分比。



常见物体发射率

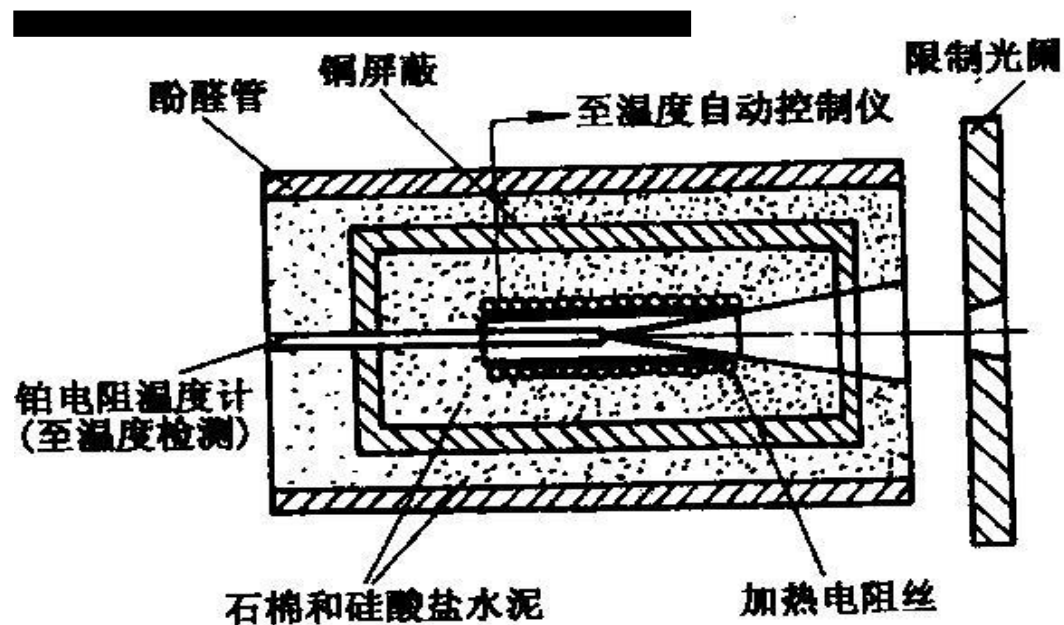
物质	发射率	物质	发射率
沥青	0.9~0.98	布（黑色）	0.98
混凝土	0.94	人体皮肤	0.98
水泥	0.96	肥皂泡	0.75~0.80
沙子	0.90	木炭（粉末）	0.96
泥土	0.92~0.96	漆器	0.80~0.95
水	0.92~0.96	漆器（无光泽）	0.97
冰	0.96~0.98	橡胶（黑色）	0.94
雪	0.83	塑料	0.85~0.95
玻璃	0.90~0.95	木材	0.90
陶瓷	0.90~0.94	纸	0.70~0.94
大理石	0.94	铬氧化物	0.81
石膏	0.80~0.90	铜氧化物	0.78
灰泥	0.89~0.91	铁氧化物	0.78~0.82
砖	0.93~0.96	不锈钢及铝材	0.2~0.3



黑体：能够完全吸收从任何角度入射的任意波长的辐射，并且在每一个方向上都能最大限度地发射任意波长辐射能的物体，称为黑体。黑体的吸收率为1，发射率也为1。

■ 黑体的应用价值（实用意义）：

1. 标定各类辐射探测器的响应度；
2. 标定其他辐射源的辐射强度；
3. 测定红外光学系统的透射比；
4. 研究各种物质表面的热辐射特性；
5. 研究大气或其他物质对辐射的吸收或透射特性。主要做光源（辐射源）



人造黑体辐射源原理

- 人造黑体辐射源（黑体模拟器）：内芯是热传导优良材料（如黄铜），空腔可以是锥状、圆柱状或圆柱—锥状。外面绕电热丝，筒外覆石棉或硅酸盐水泥等绝热层。用温度计可测得温度信号，再用自动控温仪控温。由光阑小孔射出的即为黑体辐射。



4. 黑体辐射定律

(1) 普朗克定律：黑体光谱辐射出射度 $M_{eb}(\lambda, T)$ 是黑体温度 T 和波长 λ 的函数

$$M_{eb,\lambda}(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/kT\lambda} - 1)} = \frac{c_1}{\lambda^5 (e^{c_2/T\lambda} - 1)}$$

式中, $M_{eb}(\lambda, T)$ —— 黑体光谱辐射出射度, $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$;

λ ——指定的辐射波长(μm);

T ——黑体的热力学温度 K ;

h ——普朗克常数, $h = (6.6256 \pm 0.0005) \times 10^{-34} \text{W} \cdot \text{s}^2$;

k ——波尔兹曼常数, $k = (1.38054 \pm 0.00018) \times 10^{-23} \text{W} \cdot \text{s} \cdot \text{K}^{-1}$;

c ——光在真空中的传播速度, $c = 2.99793 \times 10^{10} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$;

c_1 ——第一辐射常数, $c_1 = (3.7415 \pm 0.0003) \times 10^4 \text{W} \cdot \mu\text{m}^4 \cdot \text{cm}^{-2}$;

c_2 ——第二辐射常数, $c_2 = (1.43879 \pm 0.00019) \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ 。



(2) 维恩 (Wien) 位移定律:

任何温度下黑体的发射本领都有一最大值, 它对应的波长和绝对温度成反比, 即

$$\lambda_m = \frac{2898}{T} (\mu\text{m})$$

它表明: 随温度的提高, 辐射本领的最大值向短波方向移动。根据它可判断热辐射颜色与温度的关系。

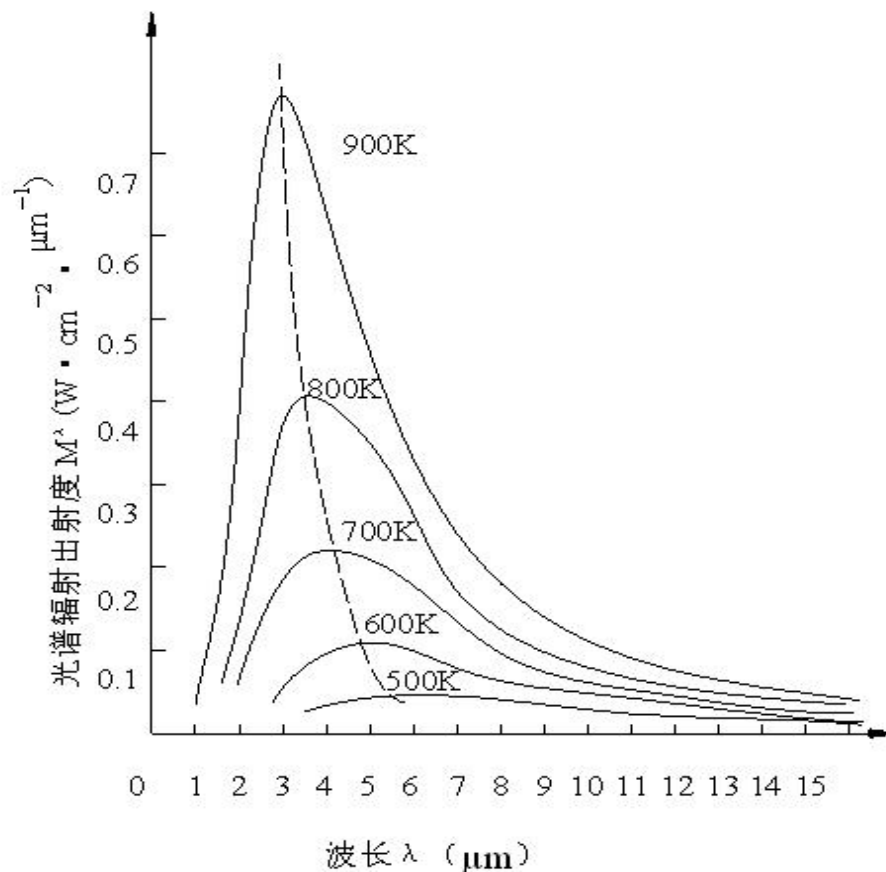
(3) 斯忒藩—波尔兹曼 (Stefan-Boltzman) 定律

$$M_{\text{eb}} = \int_0^{\infty} M_{\text{eb}, \lambda}(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4 \quad \sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15h^3 c^2} = 5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$$

波长从 $0 \rightarrow \infty$ 的黑体总辐射出射度 (普朗克公式积分) 和绝对温度的四次方成正比 (全辐射出射度 M 是曲线下面积)



图示绘出了黑体辐射的辐射出射度与波长的等温关系曲线。图中每一条曲线都有一个最大值，最大值的位置随温度升高向短波方向移动。



各种温度下黑体的光谱辐射出射度



将维恩公式代入普朗克公式，得到黑体的峰值光谱辐出度

$$M_{eb, \lambda_m} = bT^5 = 1.2862 \times 10^{-15} T^5 \quad \text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$$

上式是维恩位移定律的另一种形式。

它表明：黑体的峰值光谱辐出度与绝对温度的5次方成正比。

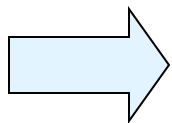


5. 黑体辐射计算

(1) $f(\lambda T)$ 表

称为相对光谱辐射出射度函数表，是某温度下、某波长上的辐射出射度 M_λ 和该温度下峰值波长处的辐射出射度 M_{λ_m} 之比。
即

$$f(\lambda T) = \frac{M_\lambda}{M_{\lambda_m}}$$



$$M_\lambda = f(\lambda T)M_{\lambda_m} = f(\lambda T)BT^5$$

(2) $F(\lambda T)$ 表

称为相对辐射出射度函数表（无“光谱”），是某温度下、某波段的辐射出射度 $M_{0\sim\lambda}$ 和该温度下全辐射出射度 $M_{0\sim\infty}$ 之比。



黑体辐射通用函数表

$\lambda T (\mu\text{m} \cdot \text{K})$	$\frac{M_B(\lambda, T)}{M_B(\lambda_m, T)} = f(\lambda T)$	$\frac{M_B(0 \sim \lambda T)}{M_B(0 \sim \infty)} = F(\lambda T)$
500	0.29616×10^{-6}	0.12982×10^{-8}
550	0.25158×10^{-5}	0.13488×10^{-7}
600	0.14405×10^{-4}	0.99202×10^{-7}
650	0.61605×10^{-4}	0.46724×10^{-6}
700	0.20490×10^{-3}	0.18381×10^{-5}
750	0.57125×10^{-3}	0.59470×10^{-5}
800	0.13721×10^{-2}	0.16431×10^{-4}
850	0.29189×10^{-2}	0.38891×10^{-4}
900	0.56170×10^{-2}	0.87008×10^{-4}
950	0.99429×10^{-2}	0.17350×10^{-3}
1000	0.16406×10^{-1}	0.32071×10^{-3}
1250	0.95541×10^{-1}	0.30838×10^{-2}
1500	0.26149	0.12849×10^{-1}
1750	0.47634	0.33686×10^{-1}
2000	0.68312	0.66725×10^{-1}
2250	0.84358	0.11030
2500	0.94594	0.16135



例：斯忒藩—波尔兹曼定律 ($M = \sigma T^4$) 给出了波长从 $0 \rightarrow \infty$ 的黑体总辐射出射度，但在实际工程问题中，经常要遇到的问题是计算某一波段 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 范围内的辐出度 $M_{\lambda_1 \sim \lambda_2}$

解： $M_{\lambda_1 \sim \lambda_2} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{eb}(\lambda, T) d\lambda = \int_0^{\lambda_2} M_{eb}(\lambda, T) d\lambda - \int_0^{\lambda_1} M_{eb}(\lambda, T) d\lambda$

$$\frac{M_{\lambda_1 \sim \lambda_2}}{M} = \frac{\int_0^{\lambda_2} M_{eb}(\lambda, T) d\lambda}{M} - \frac{\int_0^{\lambda_1} M_{eb}(\lambda, T) d\lambda}{M}$$

$$= F_{0 \sim \lambda_2} - F_{0 \sim \lambda_1}$$

$$= F_{\lambda_1 \sim \lambda_2}$$

$$M = \sigma T^4$$

黑体分数

$$M_{\lambda_1 \sim \lambda_2} = \sigma T^4 \cdot F_{\lambda_1 \sim \lambda_2}$$



思考题

例：已知黑体温度 $T = 1000\text{K}$ ，求：其峰值波长、光谱辐射度峰值、在 $\lambda = 4\mu\text{m}$ 处的光谱辐射出射度、 $\lambda = 3 \sim 5\mu\text{m}$ 波段的辐射出射度。



1. 峰值波长

根据维恩位移定律

$$\lambda_m = \frac{b}{T} = \frac{2898 \mu m \cdot K}{1000 K} = 2.898 \mu m$$

2. 光谱辐射度峰值

根据维恩最大发射本领定律

$$M_{\lambda_m} = BT^5 = 1.2867 \times 10^{-11} \times (1000)^5 = 1.2867 \times 10^4 W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$$

3. 在 $\lambda=4\mu m$ 处的光谱辐射出射度

$$\begin{aligned} M_{\lambda} &= M_{4\mu m} = f(\lambda T) M_{\lambda_m} = f(\lambda T) BT^5 \\ &= f(4 \times 1000) \times 1.2867 \times 10^4 \\ &= 1.0297 \times 10^4 W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1} \end{aligned}$$

4. 在 $\lambda=3\sim 5\mu m$ 波段内的辐射出射度

$$\begin{aligned} M_{3-5\mu m} &= [F(5 \times 1000) - F(3 \times 1000)] \sigma T^4 \\ &= (0.63372 - 0.27322) \sigma T^4 \\ &= 2.0441 \times 10^4 W \cdot m^{-2} \end{aligned}$$



思考题

例：若可以将人体作为黑体，正常人体温的为 **36.5°C** ，

(1) 试计算正常人体所发出的辐射出射度为多少 **W/m^2**

(2) 正常人体的峰值辐射波长为多少 **μm** ？峰值光谱辐射出射度 **M_{eb, λ_m}** 为多少？

(3) 人体发烧到 **38°C** 时峰值辐射波长为多少？发烧时的峰值光谱辐射出射度 **M_{eb, λ_m}** 又为多少？



解：（1）人体正常体温的绝对温度为 $T=36.5+273=309.5\text{K}$ ，根据斯特藩-波尔兹曼辐射定律，正常人体的辐射出射度为

$$M_{eb} = \sigma T^4 = \sigma \times 309.5^4 = 520.3 \text{ W} / \text{m}^2$$

（2）由维恩位移定律，正常人体的峰值辐射波长为

$$\lambda_m = \frac{2898}{T} \mu\text{m} = 9.36 \mu\text{m}$$

峰值光谱辐射出射度为

$$M_{eb,\lambda_m} = 1.2862 \times 10^{-15} T^5 (\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \mu\text{m}^{-1}) = 3.72 (\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \mu\text{m}^{-1})$$

（3）人体发烧到 38°C 时峰值辐射波长为

$$\lambda_m = \frac{2898}{273+38} = 9.32 \mu\text{m}$$

发烧时的峰值光谱辐射出射度为：

$$M_{eb,\lambda_m} = 1.2862 \times 10^{-15} T^5 (\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \mu\text{m}^{-1}) = 3.81 (\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \mu\text{m}^{-1})$$