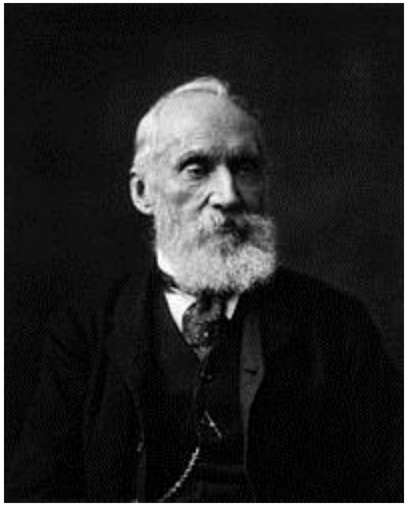
两朵乌云：

在1900年4月27日，开尔文勋爵在英国皇家研究所做了一篇名为《在热和光动力理论上空的十九世纪乌云》的发言，演讲中开尔文声称：

动力学理论认为热和光都是运动的方式，现在这一理论的优美和明晰，正被两朵乌云笼罩着。

1.迈克尔逊-莫雷实验测量的零结果→相对论

2.黑体辐射理论（紫外灾难）→量子力学



William Thomson
(Lord Kelvin)
(1824–1907)

第八章：光的量子性 激光

8-01 热辐射

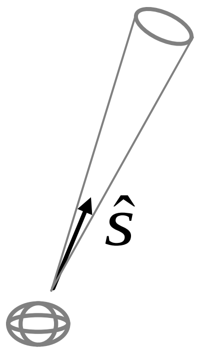
1. 一般特征及定量描述
2. 基尔霍夫定律
3. 绝对黑体
4. 斯特藩—波耳兹曼（Stefan-Boltzmann）定律和维恩（Wein）位移定律
5. 维恩公式和瑞利—金斯（Rayleigh-Jeans）公式
6. 普朗克（Planck）公式和能量子假说
7. 光测高温、红外测温

§补充：光源

1. 一般特征及定量描述

一般特性：温度高辐射强，且向短波移动

描述： **辐射能分布函数：** $f(\upsilon,\hat{s},\vec{r},t)$



$(\vec{r},t)$

υ: 频率

$\hat{s}$: 辐射方向单位矢量

$\vec{r}$: 位置

t: 时刻

此方向单位波段、单位立体角中的辐射能：

$$f(\upsilon,\hat{s},\vec{r},t)d\upsilon d\Omega$$

(1)辐射场的能量密度： 单位体积内的辐射能

$$U(\vec{r},t)=\int u(\upsilon,\vec{r},t)d\upsilon$$ 谱密度

$$u(\upsilon,\vec{r},t)=\oiint f(\upsilon,\hat{s},\vec{r},t)d\Omega$$

各向同性 → $=4\pi f(\upsilon,\vec{r},t)$

(2)辐射场的亮度： 沿某方向单位立体角内的辐射能流密度

$$B(\hat{s},\vec{r},t)=\int b(\upsilon,\hat{s},\vec{r},t)d\upsilon$$ 谱密度

$$b(\upsilon,\hat{s},\vec{r},t)=cf(\upsilon,\hat{s},\vec{r},t)$$

(3) 辐射通量：

沿某方向通过单位面积的辐射功率

$$\Delta\Psi(\vec{r},t)=\int\Delta\psi(\upsilon,\vec{r},t)d\upsilon$$

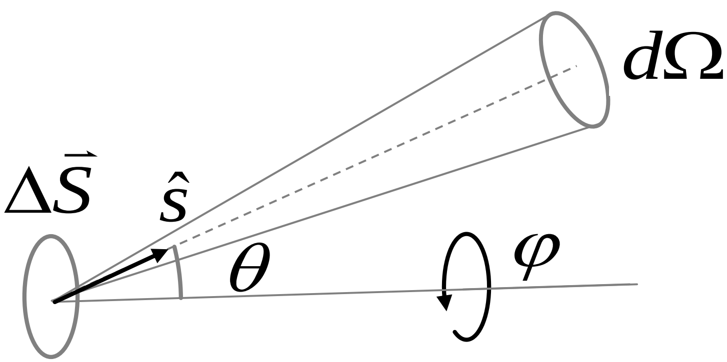
谱密度

$$\Delta\psi(\upsilon,\vec{r},t)=\iint_{2\pi}b(\upsilon,\hat{s},\vec{r},t)\hat{s}\cdot\Delta\vec{S}d\Omega$$

$$=\iint_{2\pi}cf(\upsilon,\hat{s},\vec{r},t)\hat{s}\cdot\Delta\vec{S}d\Omega$$

$$=\pi cf(\upsilon,\hat{s},\vec{r},t)\Delta S$$

各向同性



辐射场与物体的相互作用：

(1)辐射本领：$R = \int r(\upsilon) d\upsilon$ → 谱密度

从物体单位面积发出的辐射通量

$$r(\upsilon) = \frac{d\psi(\upsilon)}{ds}$$

(2)辐射照度：$E = \int e(\upsilon) d\upsilon$ → 谱密度

照射在物体单位面积上的辐射通量

$$e(\upsilon) = \frac{d\psi'(\upsilon)}{ds}$$

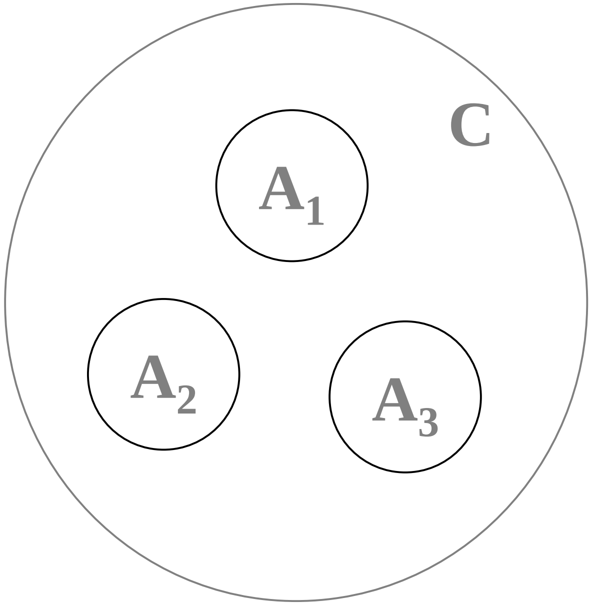
各向同性时：$e(\upsilon) = \frac{c}{4} u(\upsilon)$

(3)吸收本领：

$$a(\upsilon) = \frac{d\psi''(\upsilon)}{d\psi'(\upsilon)} \qquad 0 \le a(\upsilon) \le 1$$

2. 基尔霍夫定律

绝热体系最终达到热平衡



辐射本领 → $r(\upsilon,T)$

吸收本领 → $a(\upsilon,T)$

$$\frac{r(\upsilon,T)}{a(\upsilon,T)} = F(\upsilon,T)$$

$$r_1(\upsilon,T) = a_1(\upsilon,T)e_1(\upsilon,T)$$

$$r_2(\upsilon,T) = a_2(\upsilon,T)e_2(\upsilon,T)$$

$$\vdots$$

$$e_1(\upsilon,T) = e_2(\upsilon,T) = \cdots = \frac{c}{4}u_T(\upsilon)$$

$$\frac{r_1(\upsilon,T)}{a_1(\upsilon,T)} = \frac{r_2(\upsilon,T)}{a_2(\upsilon,T)} = \cdots = \frac{c}{4}u_T(\upsilon)$$

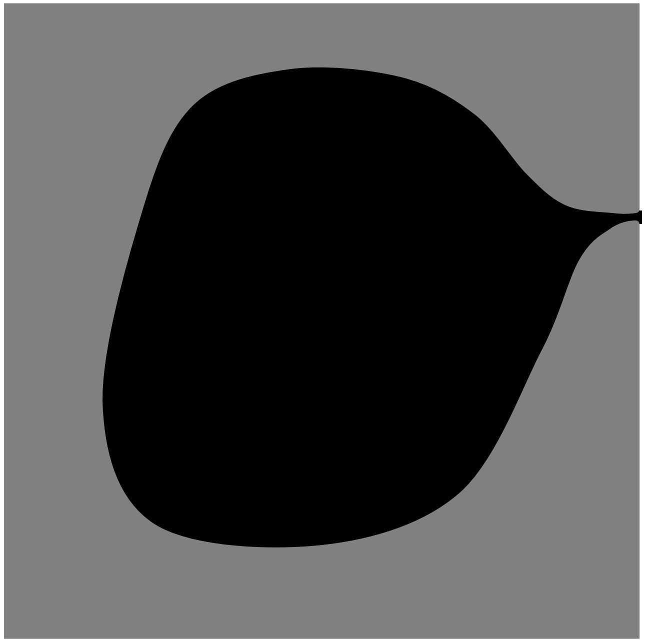
$u_T(\upsilon)$ → 标准能谱

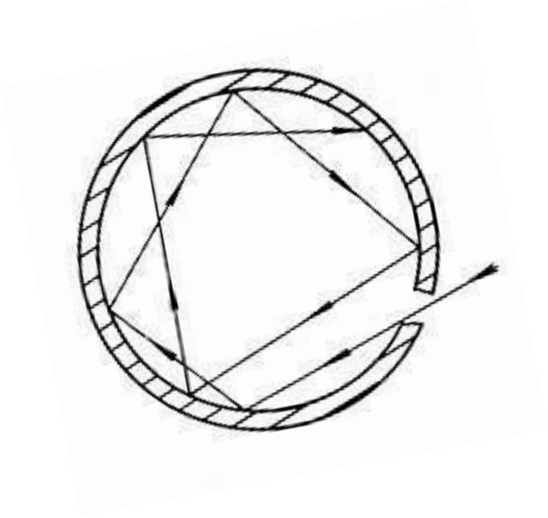
3. 绝对黑体

定义： $\alpha_0(\upsilon, T) \equiv 1 \quad r_0(\upsilon, T) = \frac{c}{4} u_T(\upsilon)$

全波段吸收

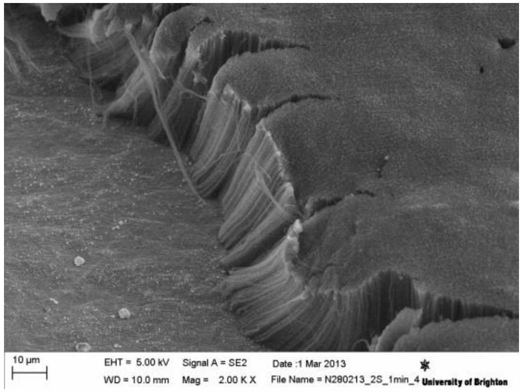
空腔黑体

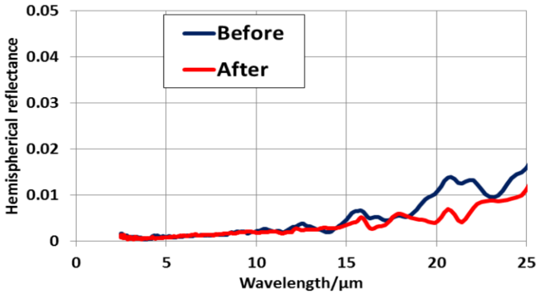


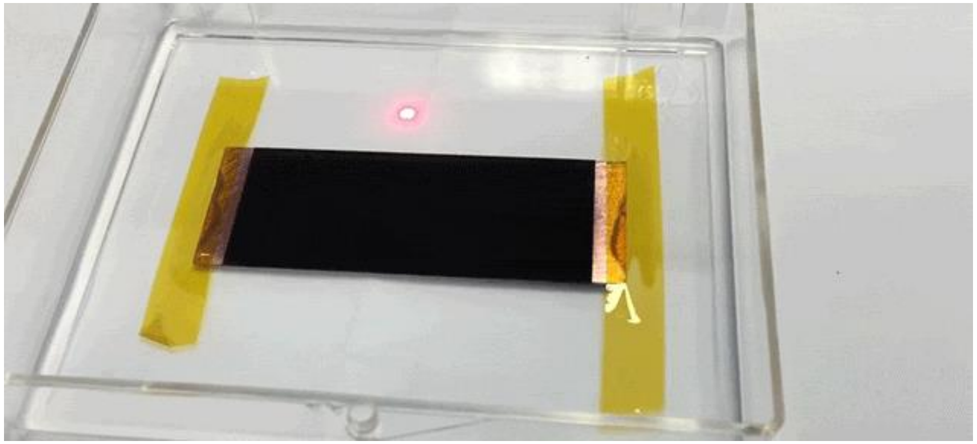


Vantablack (Vertically Aligned NanoTube Arrays)

-absorbs up to 99.965 percent of incoming radiation, including visible light and other common frequencies like microwaves and radio waves.

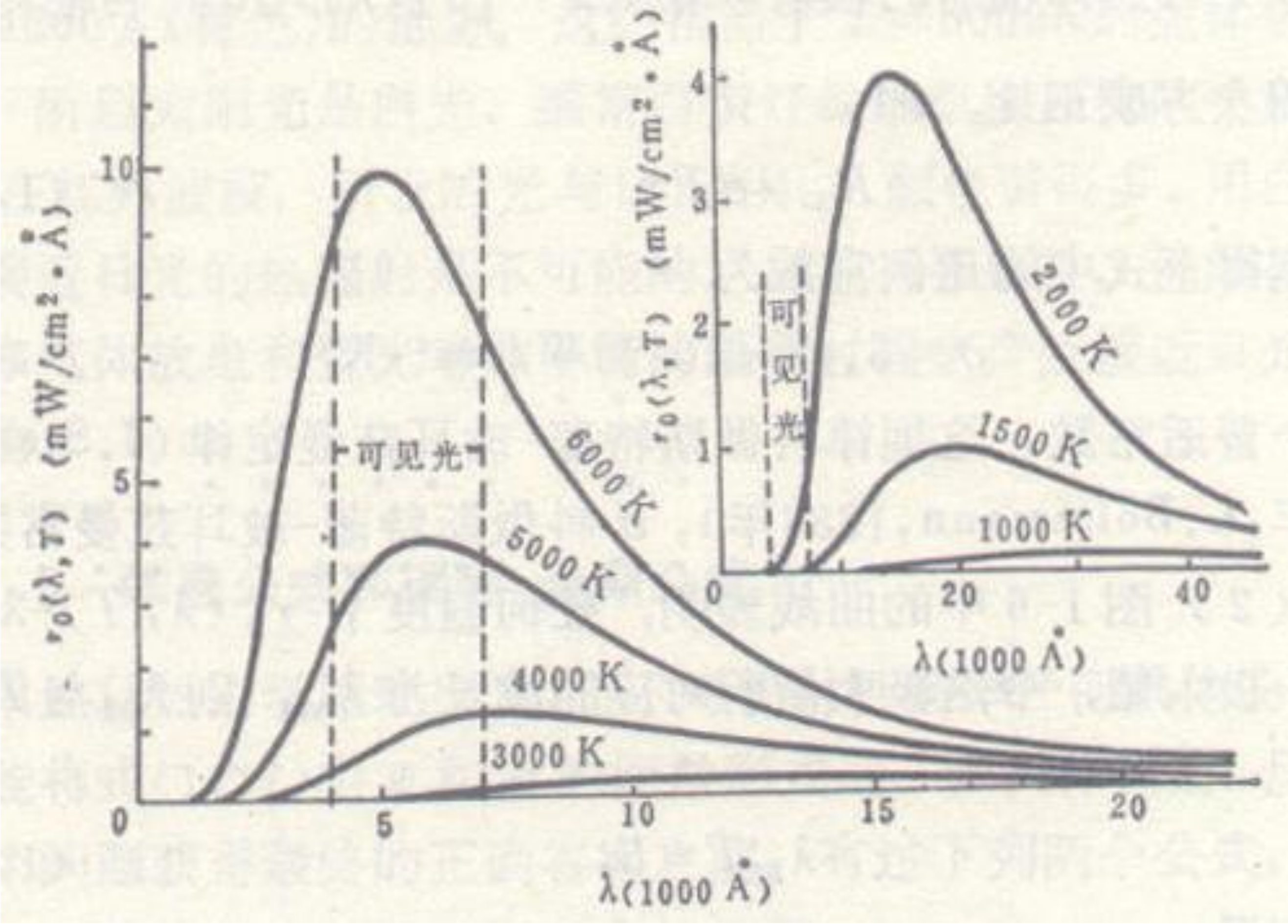






OPTICS EXPRESS 22 7290 (2014)

黑体辐射的定性描述


10
5
0
5
10
15
20
λ(1000 Å)
$r_0(\lambda,T)$ (mW/cm² · Å)
可见光
6000 K
5000 K
4000 K
3000 K
4
3
2
1
0
20
40
λ(1000 Å)
可见光
2000 K
1500 K
1000 K

4. 斯特藩—波耳兹曼（Stefan-Boltzmann）定律和维恩（Wein）位移定律

Wein根据热力学原理证明：绝对黑体的辐射谱

$$r_0(v,T)=c\upsilon^3\varphi\left(\frac{\upsilon}{T}\right)$$

$$r_0(\lambda,T)=\frac{c^5}{\lambda^5}\varphi\left(\frac{c}{\lambda T}\right)$$

Stefan-Boltzmann定律：绝对黑体的辐射本领

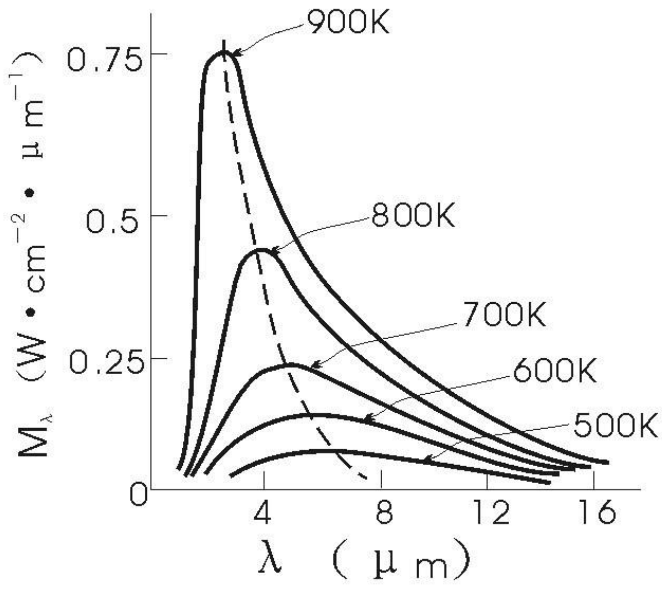
$$R_T=\int r_0(\lambda,T)d\lambda=\sigma T^4$$

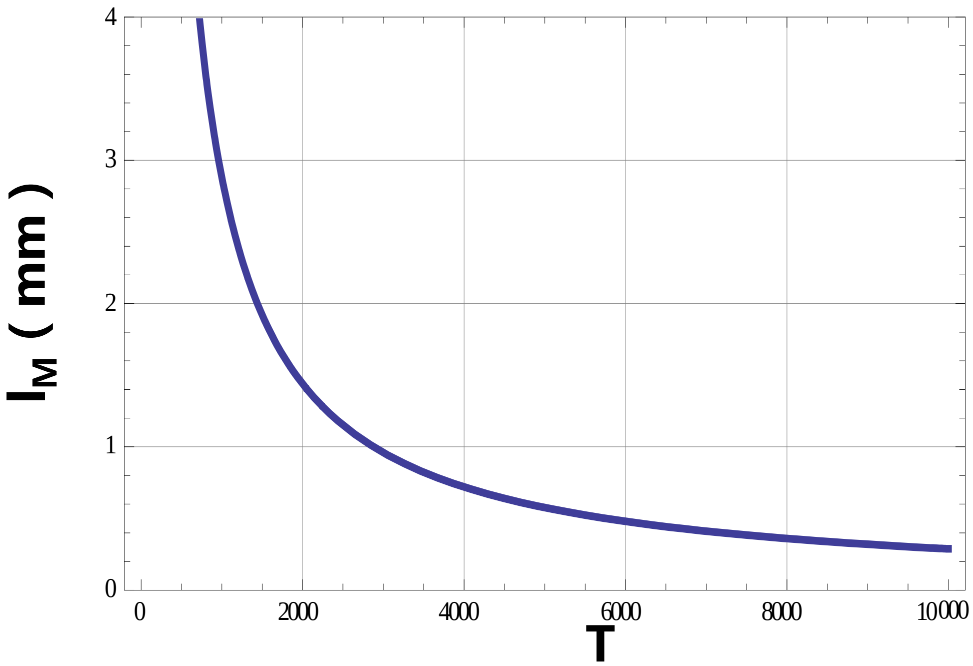
$$\sigma=5.67\times10^{-12}\,W/_{cm^2\cdot K^4}$$

Wein位移定律：

色温的定义
（极大值波长）

$$\lambda_M T = b \qquad b = 0.288cm \cdot K$$





5. 维恩公式和瑞利—金斯（Rayleigh-Jeans）公式

Wein公式：辐射频率υ只与速度有关

短波符合

$$r_0(\upsilon,T)=\frac{\alpha\upsilon^3}{c^2}e^{-\beta\upsilon/T}$$

或

$$r_0(\lambda,T)=\frac{\alpha c^2}{\lambda^5}e^{-\beta c/\lambda T}$$

瑞利公式：能量按自由度分布

Boltzmann常数

长波符合

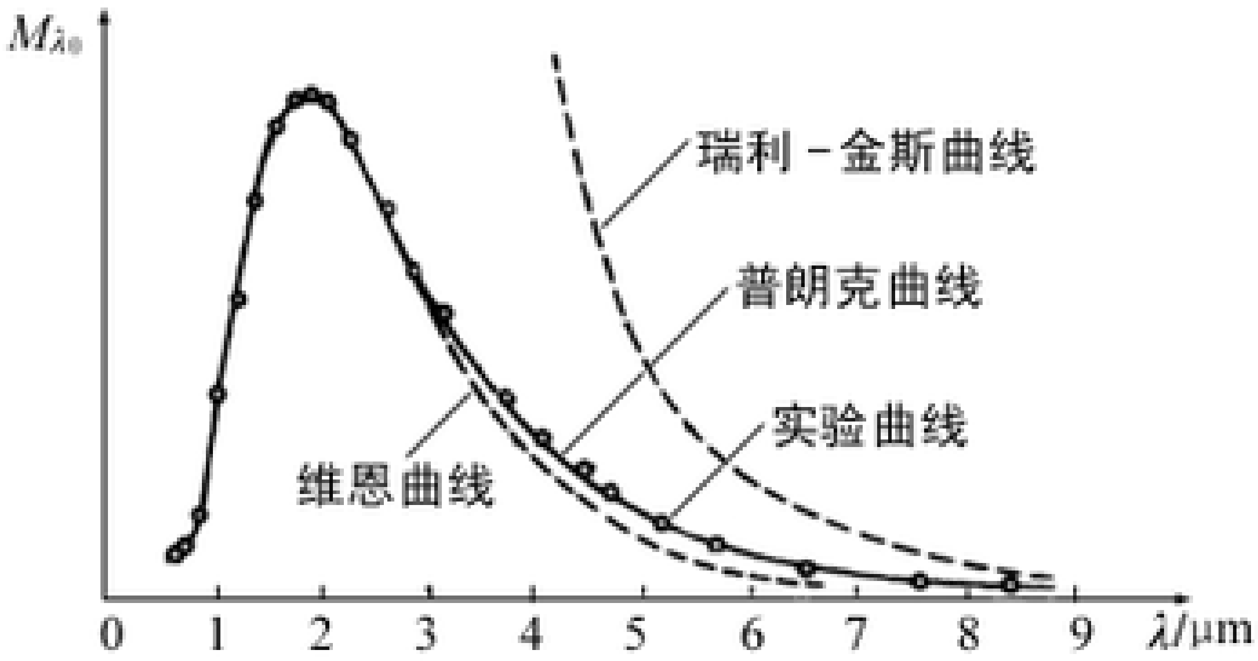
$$r_0(\upsilon,T)=\frac{2\pi}{c^2}\upsilon^2kT$$

或

$$r_0(\lambda,T)=\frac{2\pi c}{\lambda^4}kT$$

→ 紫外灾难

Wein公式：辐射频率 υ只与速度有关



6. 普朗克（Planck）公式和能量子假说

固有频率为 υ 的谐振子通过吸收与辐射与辐射场交换能量，达到热平衡：

$$u_T(\upsilon)=\frac{8\pi\upsilon^2}{c^3}\,\overline{\varepsilon}(\upsilon,T)$$

谐振子模式密度

谐振子在温度T时能量的平均值

振子能量平均分布→瑞利金斯公式

谐振子能量连续分布：

$$\overline{\varepsilon}(\upsilon,T)=\frac{\int_0^\infty \varepsilon e^{-\varepsilon/kT}d\varepsilon}{\int_0^\infty e^{-\varepsilon/kT}d\varepsilon}=kT$$

玻尔兹曼正则分布

$$u_T(\upsilon)=\frac{8\pi\upsilon^2}{c^3}kT$$

振子能量平均分布→瑞利金斯公式
→紫外灾难

Planck假说：谐振子能量量子化，只能取：

$$\varepsilon_0, 2\varepsilon_0, 3\varepsilon_0, 4\varepsilon_0, \cdots$$

$$\bar{\varepsilon}(\upsilon, T) = \frac{\sum_0^{\infty} n\varepsilon_0 e^{-n\varepsilon_0/kT}}{\sum_0^{\infty} e^{-n\varepsilon_0/kT}}$$

$$= \frac{\varepsilon_0}{e^{-\varepsilon_0/kT} - 1}$$

$$r_0(\upsilon, T) = \frac{2\pi\upsilon^2}{c^2} \frac{\varepsilon_0}{e^{-\varepsilon_0/kT} - 1}$$

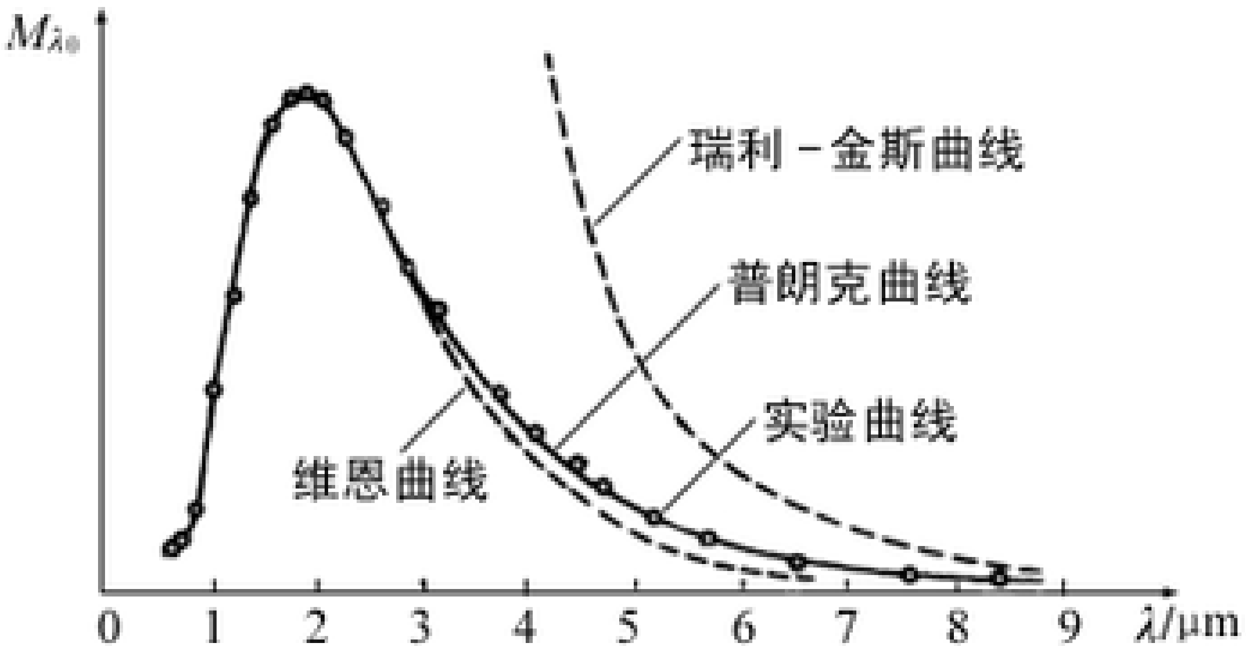
$\varepsilon_0 = h\upsilon$

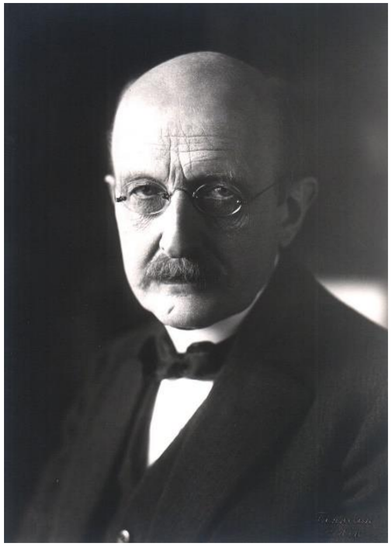
能量子→光子

1918 Nobel Laureate

$h = 6.63 \times 10^{-34}$ J·s **普朗克常数**

υ: **光子频率**





Max Planck
(1858–1947)

7. 光测高温、红外测温

色温法：最强辐射

$$\lambda_M T = b$$

亮温法（消丝高温计）

辐射测温法：总辐射能

$$R_T = \int r_0(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4$$

红外测温法：


Palm
250
DIGITAL

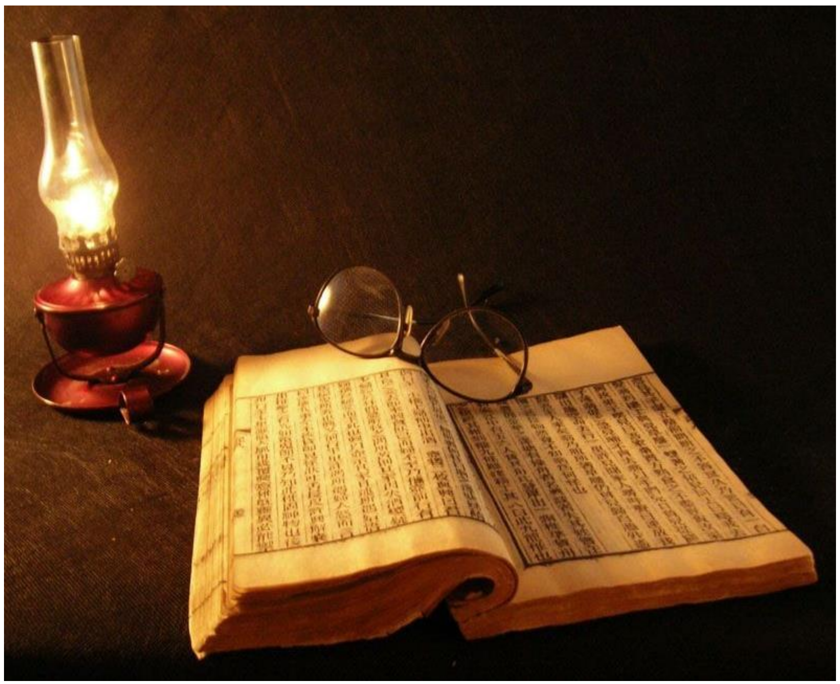

© AFP/GETTY IMAGES

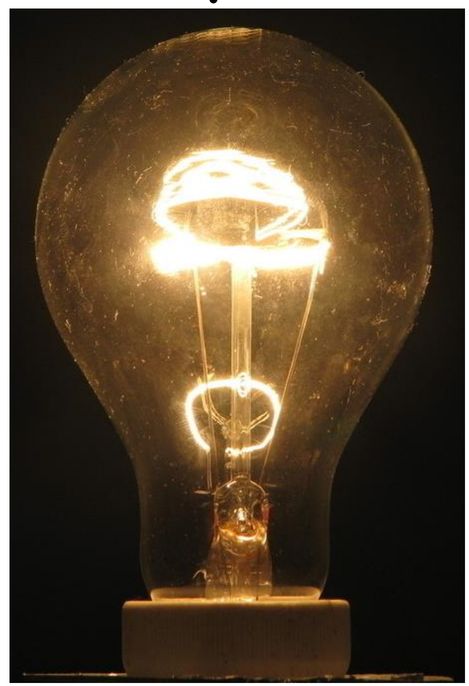
光源

照明需要光源，人工光源的大规模开发利用是人类文明进步的一大标志。

燃烧

电光源



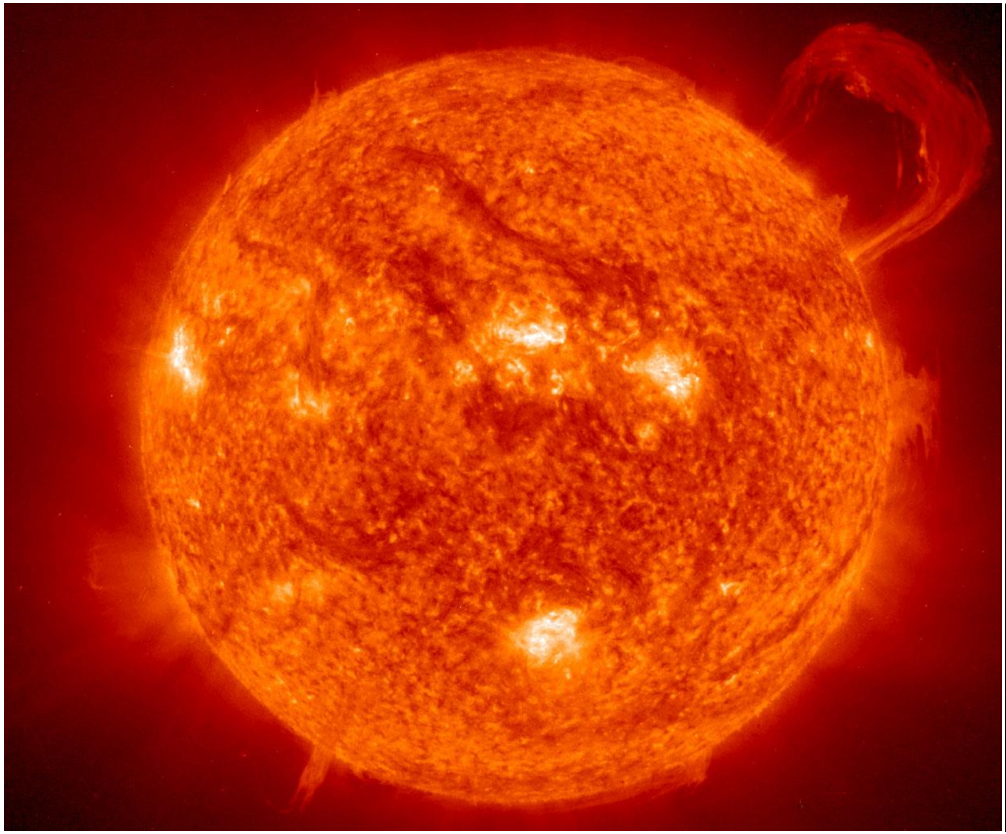


热光源

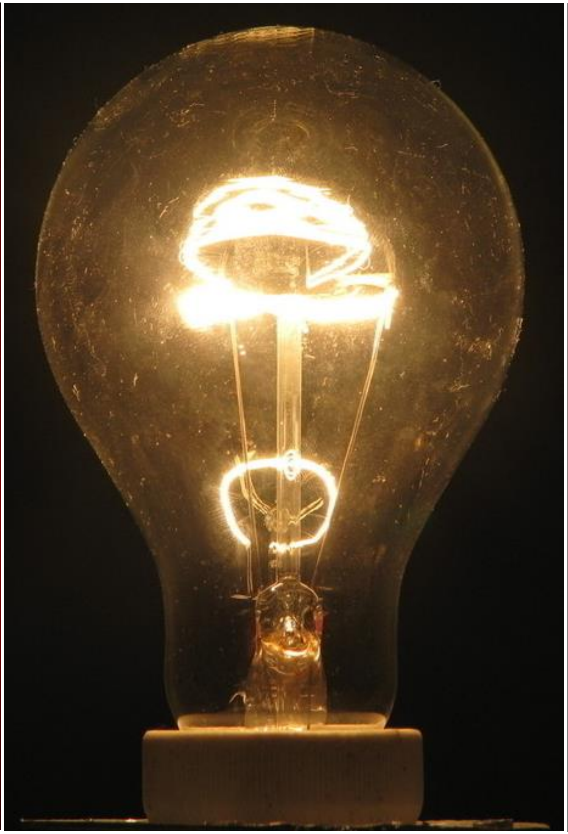
卤钨灯、氙灯、……

冷光源

热光源



6000K



约2500K

约1000K

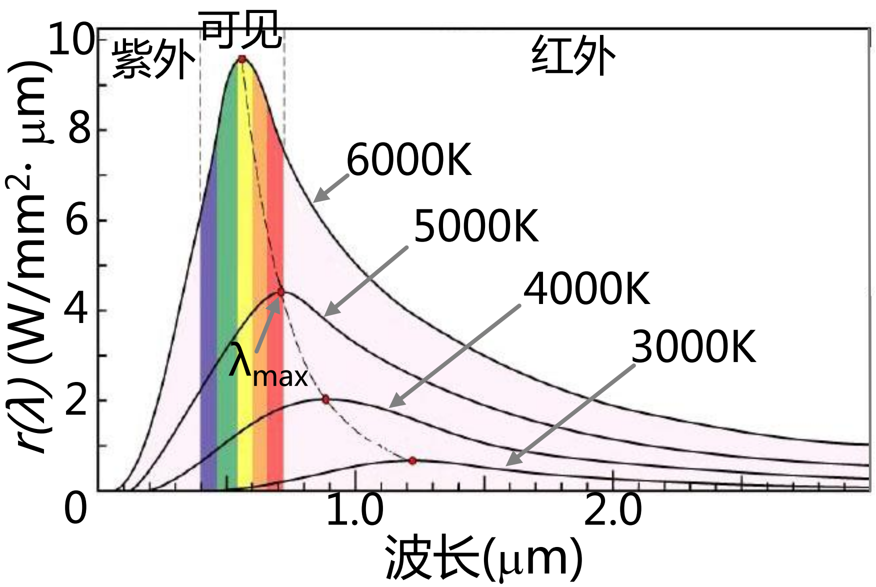
照明光源发展


OSRAM FH 14W/840
Recyclable
Italy
Radium NL 18 W/840
Spectralux Plus
Cool White
Recyclable Germany

视见函数

发光效率（lm/W）

$$\eta = \frac{K_M \int V(\lambda) r(\lambda) d\lambda}{\int r(\lambda) d\lambda}$$



白炽灯

绝对黑体的发光效率

$$r(\lambda) = r_0(\lambda)$$

T(K)	2000	3000	5000	6000	8000
η(lm/W)	15.2	19.2	74	84	78

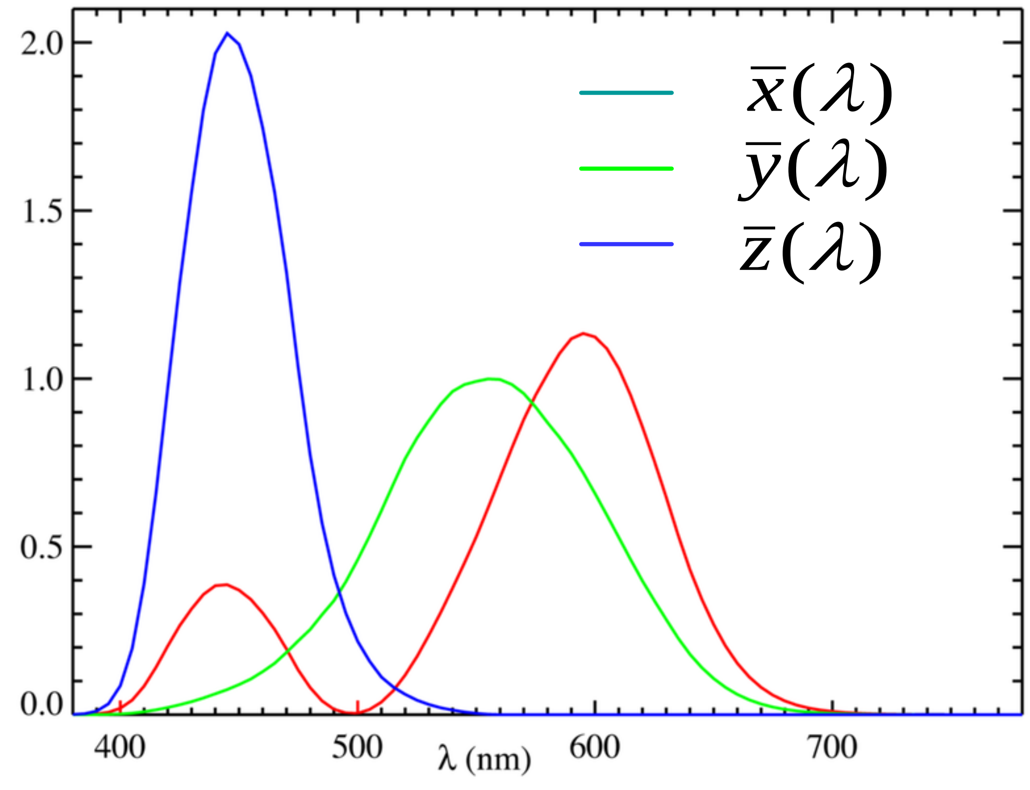
寿命：1000小时，显色指数：99

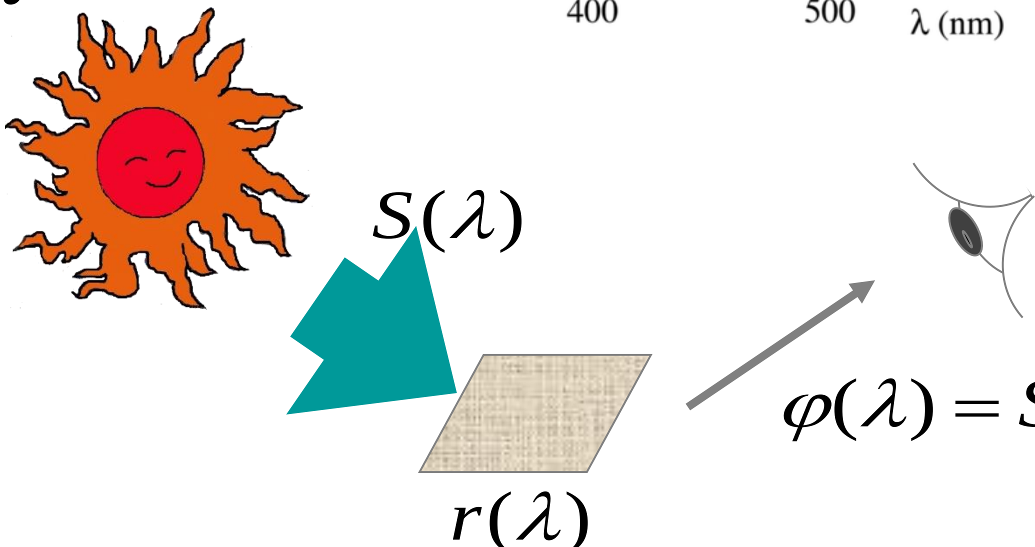
三元色：

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

刺激度：

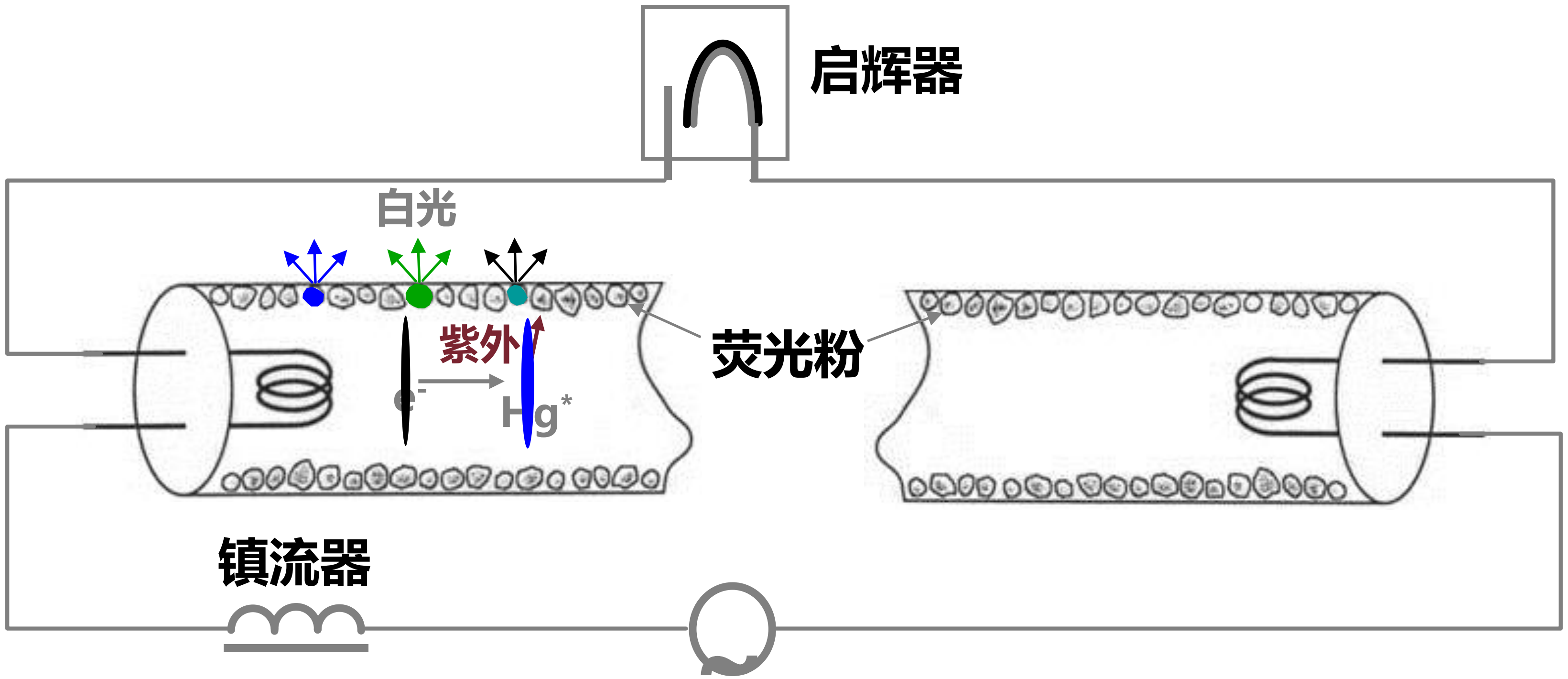
$$\begin{cases} X(\lambda) = K\int \varphi(\lambda)\bar{x}(\lambda)d\lambda \\ Y(\lambda) = K\int \varphi(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda \\ Z(\lambda) = K\int \varphi(\lambda)\bar{z}(\lambda)d\lambda \end{cases}$$





$$\varphi(\lambda) = S(\lambda)r(\lambda)$$

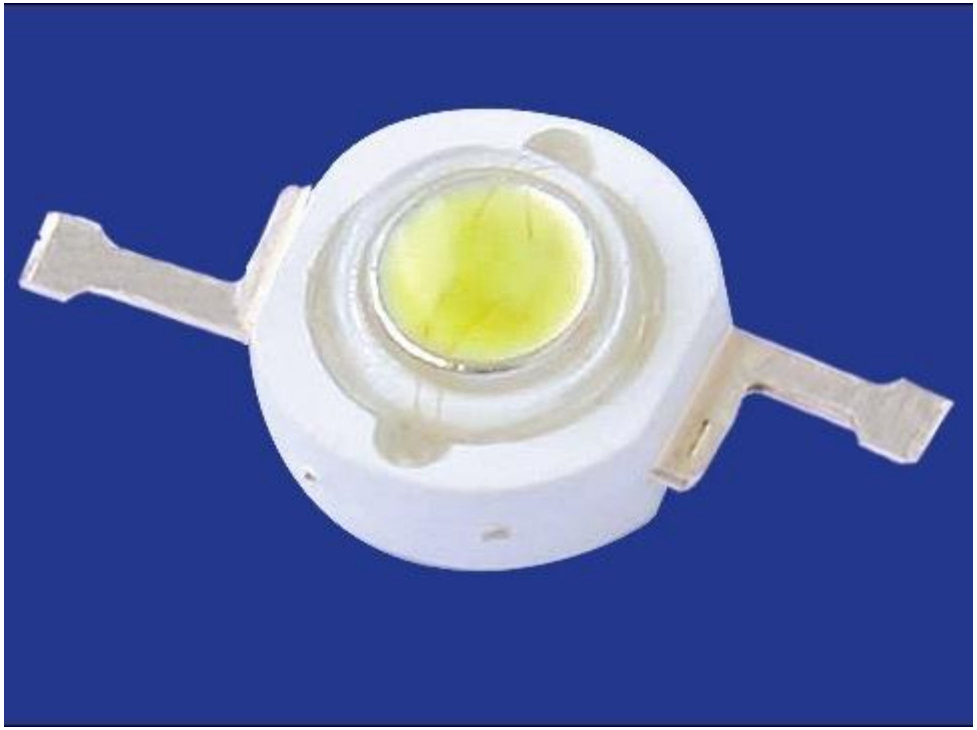
荧光灯

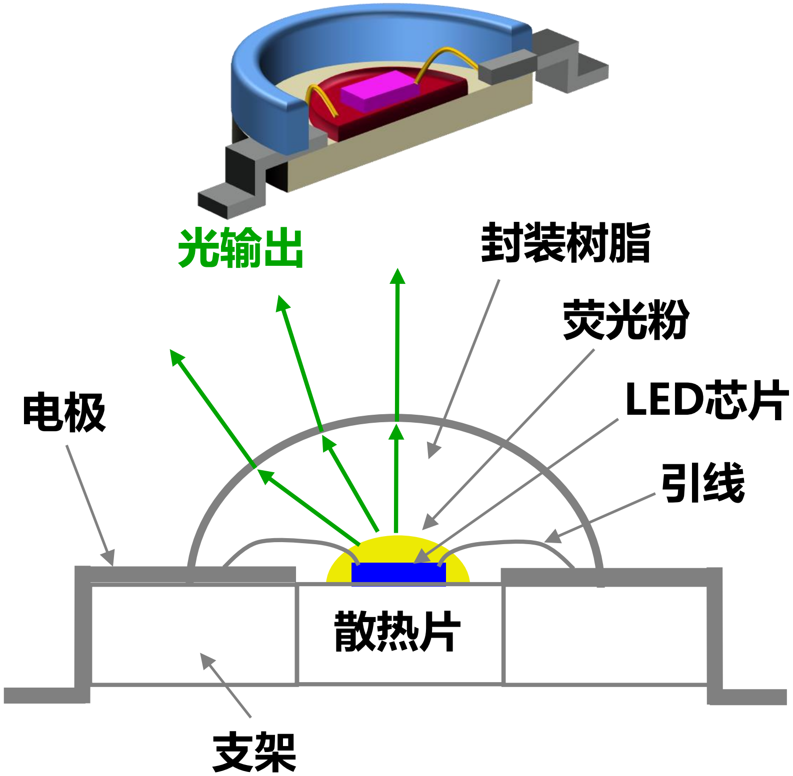


~80lm/W，寿命5000-10000小时，显色指数：80

有环境污染

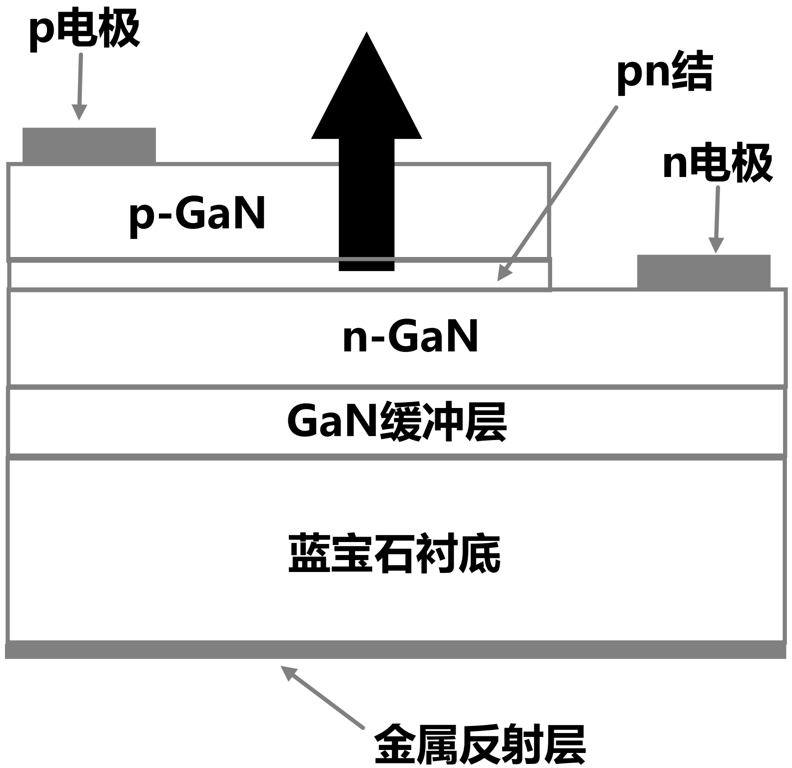
发光二极管（Light Emitting Diode， LED）

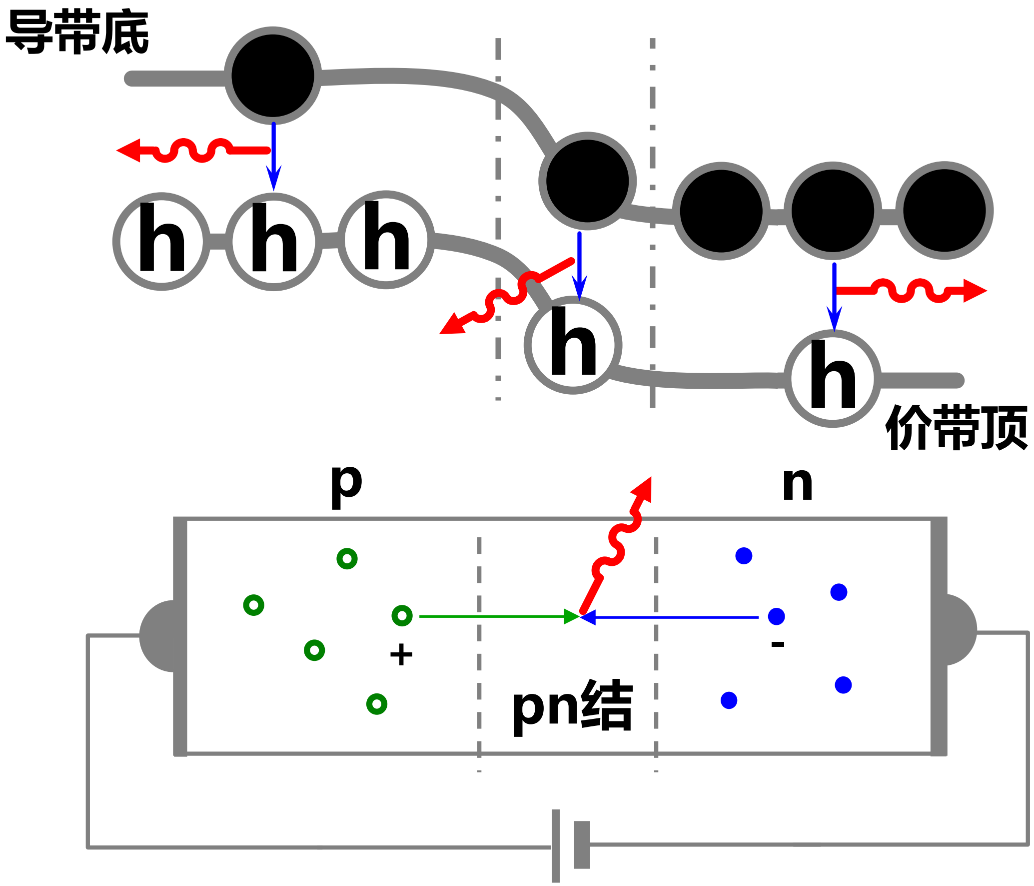




100-200lm/W，寿命10万小时，显色指数：70-90
固体器件（抗震），无污染

LED芯片的工作原理

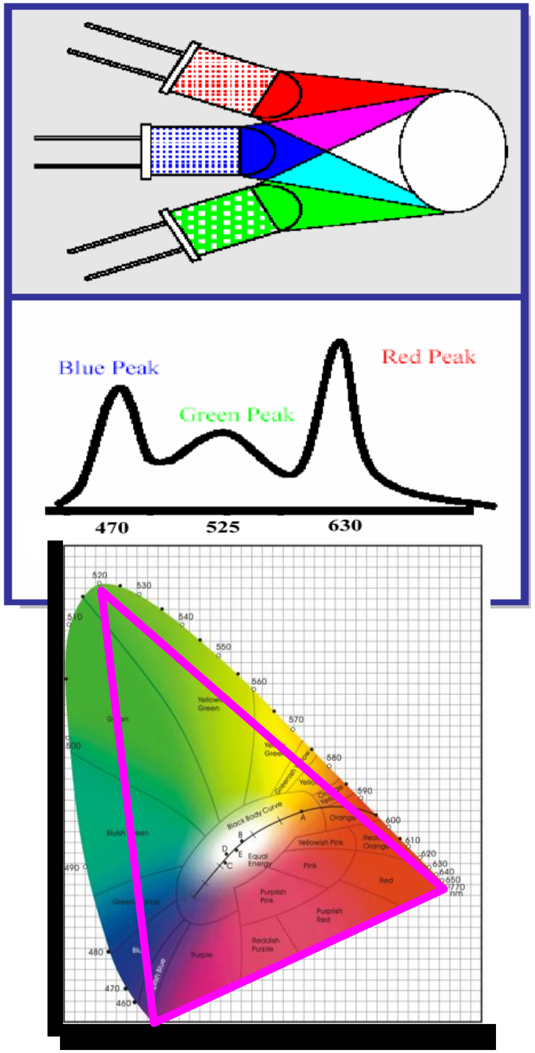




全反射、荧光材料

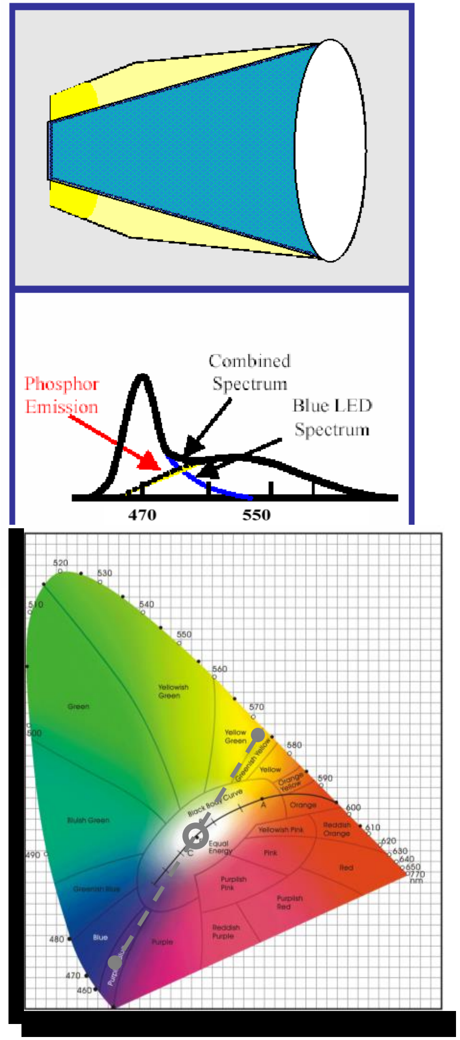
白光LED的配色方案及显色能力

R + G + B LEDs



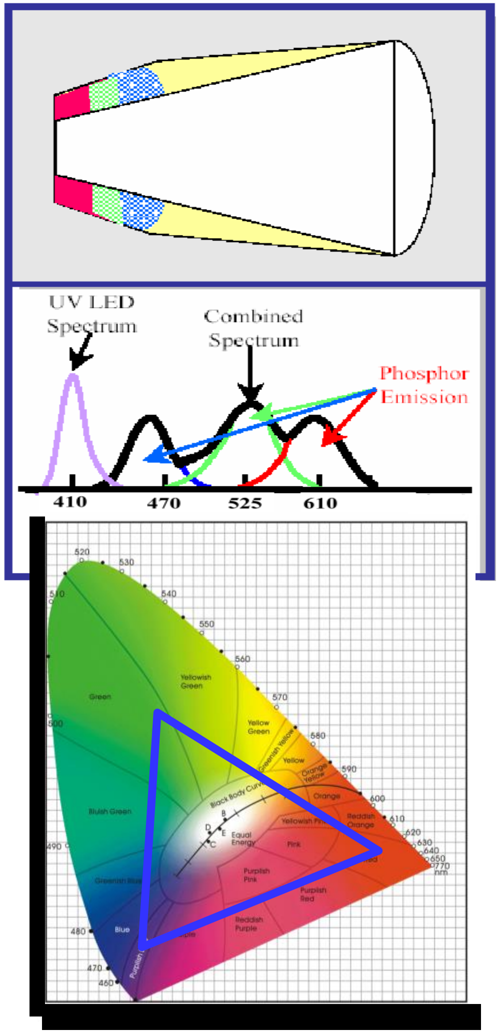
Blue LED + Yellow Phosphor

（芯片：460~480nm）



UV LED + RGB Phosphors

（芯片：380~400nm）



视频公开课：

http://www.icourses.cn/viewVCourse.action?courseCode=10358V010

The Nobel Prize in Physics 2014

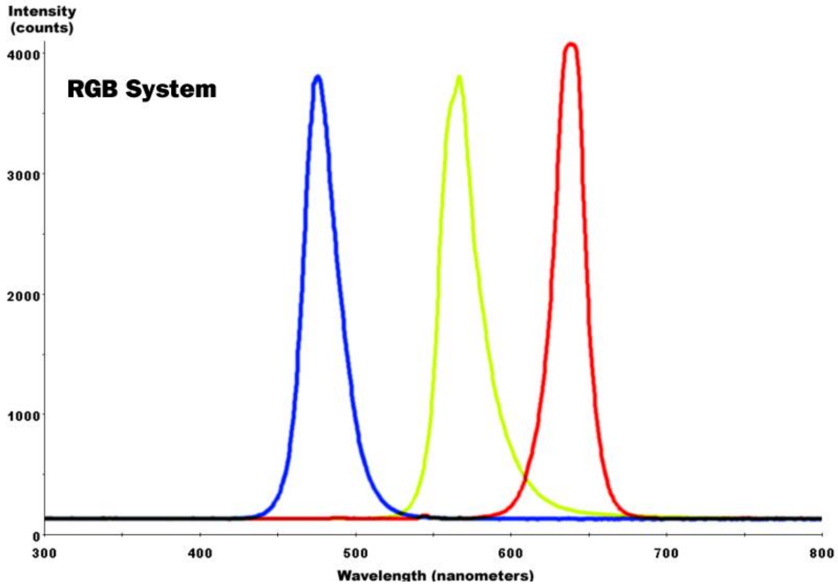
"for the invention of efficient blue light-emitting diodes which has enabled bright and energy-saving white light sources"

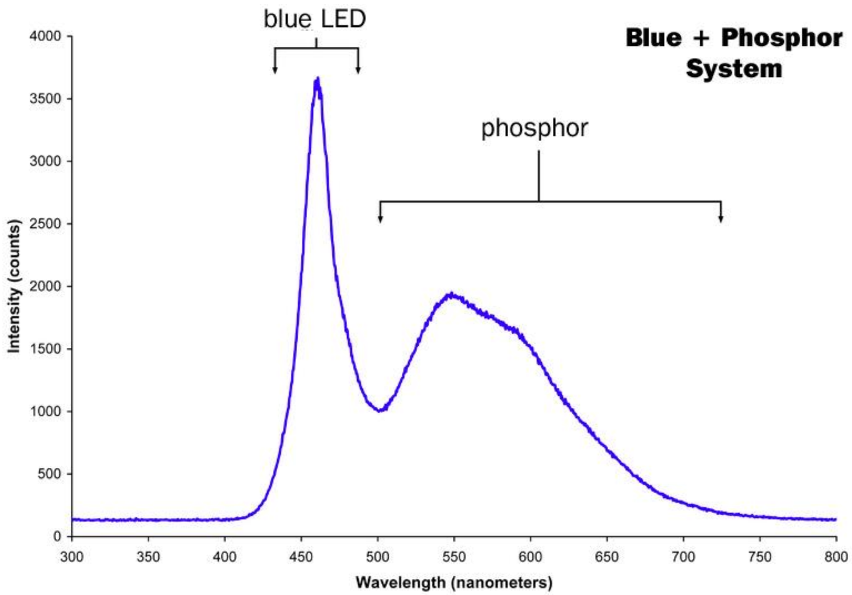
Isamu Akasaki （赤崎勇）, Meijo University

Hiroshi Amano （天野浩）, Nagoya University

Shuji Nakamura （中村修二）, University of California, Santa Barbara

Why Blue LEDs ?





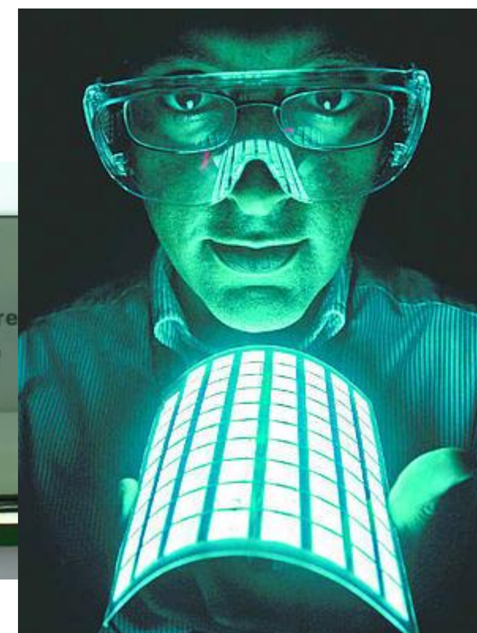
- **First high brightness blue LEDs which opened the way for developing white LEDs.**
- **If all the lights in the World were LEDs with 200 lm/W luminous efficacy, there would be a saving of 40% of the World's generating capacity.**


40 inch AMOLED
SAMSUNG


SONY


COMEDD


Vision Begins
Transpare
MOLED



作业：

P275: 2, 3, 4