



物理学国家级实验教学示范中心

National Demonstration Center for Experimental Physics Education



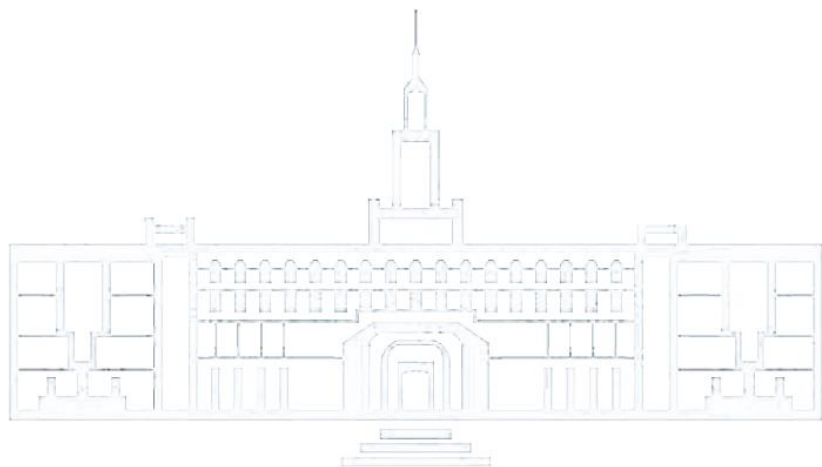
黑 体 辐 射

Black Body Radiations

主讲：王 鹏
李训栓
杨文革

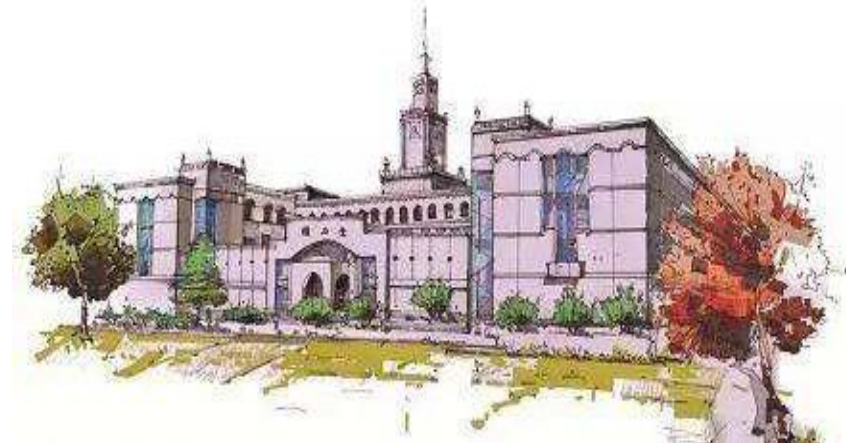
堅守·奮斗

2023.07





◀ 目 录 ▶



01

黑体与黑体辐射

04

黑体辐射瑞丽-金斯公式

02

斯特藩-玻尔兹曼
定律

05

普朗克黑体辐射公式

06

实验内容

03

维恩位移定律

07

实验仪器

08

实验思考题

堅守 · 奮斗



01

黑体与黑体辐射





黑体

任何物体都具有不断辐射、吸收、发射**电磁波**的本领。辐射出去的电磁波在各个波段是不同的，也就是具有一定的谱分布。这种谱分布与物体本身的特性及其温度有关，因而被称之为**热辐射**。为了研究不依赖于物质具体物性的**热辐射规律**，物理学家们定义了一种理想物体——**黑体** (black body)



1、单色幅出度

从热力学温度为 T 的黑体的单位组面积上，单位时间内，在波长附近单位波长范围内所辐射的电磁波能量，称为单色幅射出射度，简称单色幅出度。

◆单色幅出度也可表示为随频率的变化

2、幅出度

在单位时间内，从温度 T 的黑体的单位面积上，所幅出的各种波长的电磁波的能量总和，称为幅射出射度，简称幅出度。



02

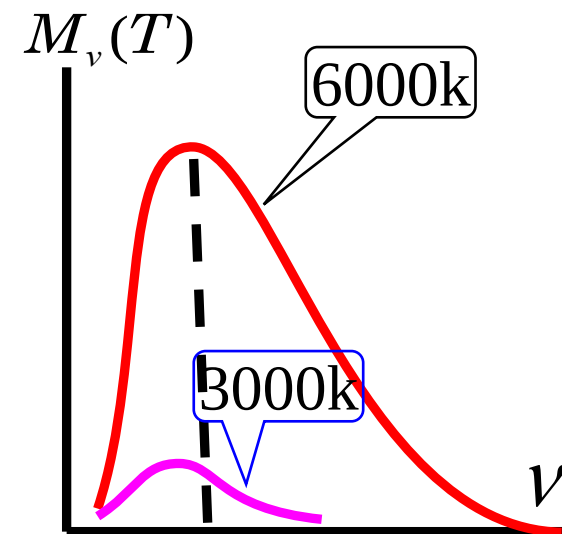
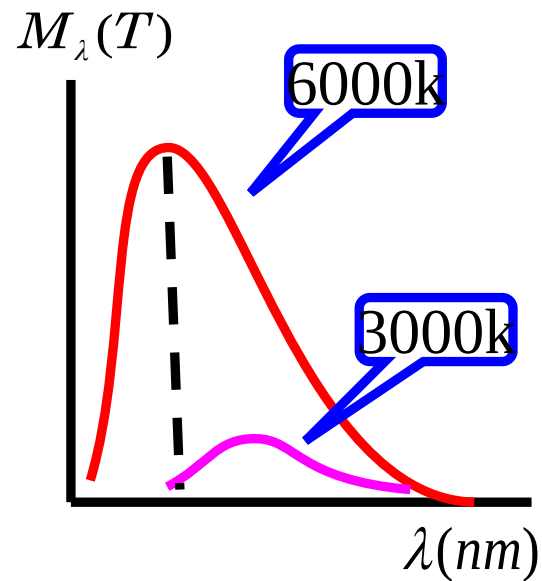
斯特藩-玻尔兹曼定律





斯特藩-玻尔兹曼定律

1879年奥地利物理学家斯特藩从实验中发现：
黑体的单色幅出度与波长 λ 之间的关系如图所示：





斯特藩得出曲线的面积，即黑体的幅出度 $M(T)$ 与黑体的热力学温度 T 的四次方成正比，即

$$M(T) = \int_0^{\infty} M(T) d\lambda = \sigma T^4$$

上式常称为斯特藩-玻尔兹曼定律
式中 σ 叫做斯特藩-玻尔兹曼常数，
其值为 $5.670 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ 。



维恩位移定律



03

维恩位移定律





维恩位移定律

随着黑体温度的升高，每一曲线的峰值波长 λ_m 与 T^{-1} 成比例的减小，韦恩找到他们的关系：

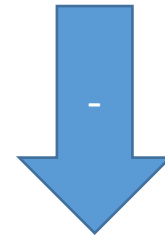
$$\lambda_m T = b$$

式中**b**为常数，其值为 $2.898 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$ 。上式表明，当黑体的热力学温度升高时，在 $M_\lambda(T) - \lambda$ 曲线上，与单色辐出度 $M_\lambda(T)$ 的峰值相对应的波长 λ_m 向短波方向移动，这称为**维恩位移定律**。

$$M_\lambda(T) d\lambda = -M_\nu(T) d\nu$$

$$\lambda = c / \nu \Rightarrow d\lambda = -\frac{c}{\nu^2} d\nu = -\frac{\lambda^2}{c} d\nu$$

$$M_\nu(T) = M_\lambda(T) \frac{\lambda^2}{c}$$



黑体辐射的瑞利-金斯公式



04

黑体辐射瑞丽-金斯 公式

★瑞丽-金斯公式 ★ 紫外灾难





瑞丽-金斯公式

物理学家**瑞丽**和**金斯**按照经典电磁场理论和经典统计物理进行计算，得出波长从 λ 到 $\lambda+d\lambda$ 辐射的能量

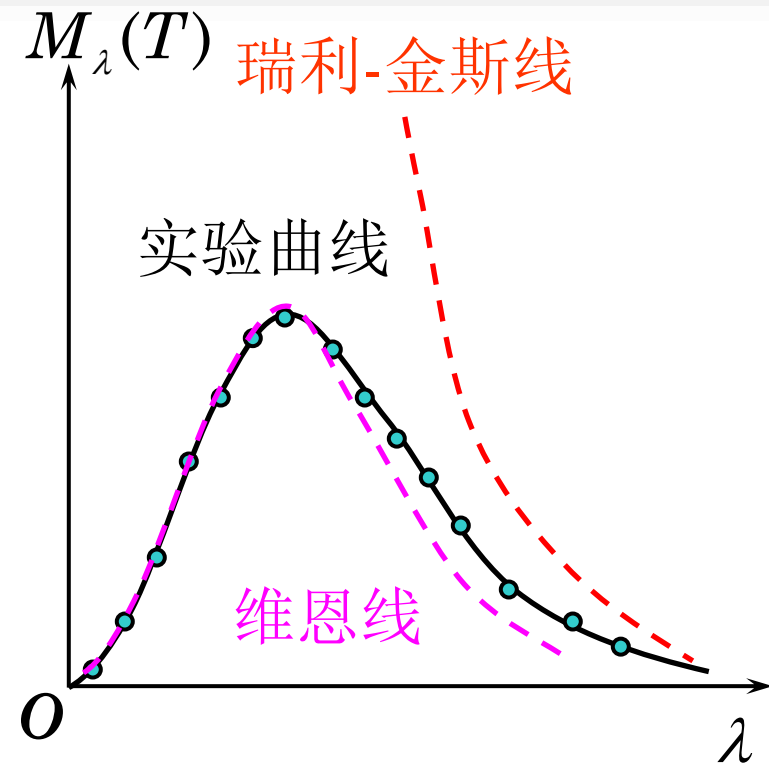
$$M_{\lambda}(T)d\lambda = \frac{2\pi c}{\lambda^4} kT d\lambda$$

频率从 ν 到 $\nu+d\nu$ 辐射

的能量 $d\nu = \frac{c}{\lambda^2} d\lambda$

$$M_{\nu}(T)d\nu = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT d\nu$$

瑞丽金斯公式



经典物理困难



Rayleigh-Jeans公式在长波（低频）部分与实验结果符合得较好，而Wien公式（未讲）则在短波（高频）端与实验结果符合得很好。

当波长变短，单色辐出度趋于无穷大，而实验指出应趋于零。常称为“紫外灾难”。由于理论与实验之间的不可调和性，给物理学界带来很大困难。正如1900年开尔文指出的那样，晴朗的物理学理论大厦上空飞来“两朵乌云”之一，它动摇了经典物理理论的基础。





紫外灾难

-----百度百科



紫外灾难，是指用于计算黑体辐射强度的瑞利—金斯定律在辐射频率趋向于无穷大时计算结果和实验数据无法吻合的物理史事件。黑体辐射试验后，瑞利、金斯和韦恩分别对试验进行了基于经典物理情景下的公式耦合，但是瑞利金斯的公式在长波也就是靠近红光区的部分与实验耦合的很好，但是当波长趋近于零的时候，公式所得出的功率或者能量数值趋近于无穷大，这被称为紫外灾难





05

普朗克黑体辐射公式



★ 普朗克假设

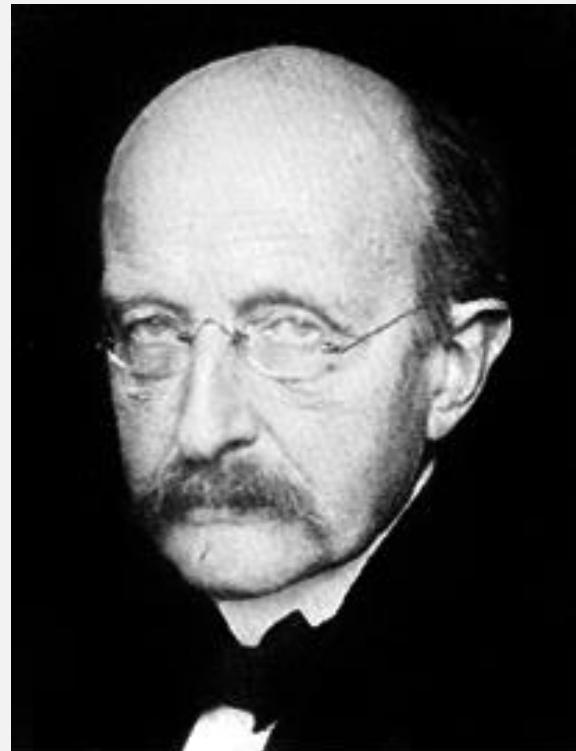
★ 普朗克黑体辐射公式

普朗克假设

- 1) 金属空腔壁中电子的振动可视为一维谐振子，它吸收或发射电磁波辐射能量时，其吸收或发射的能量是不连续的，只能取一些特定的分立值
- 2) 吸收或发射的最小基本能量单元——**能量子**的能量与振子的频率成正比，即

$$\varepsilon = h\nu$$

普朗克常数 $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ Js}$



普朗克, M.

- 3) 空腔壁上带电谐振子吸收或发射的能量，只能是 $h\nu$ 的整数倍，即

$$E = nh\nu \quad n = 1, 2, 3 \dots$$

普朗克黑体辐射公式

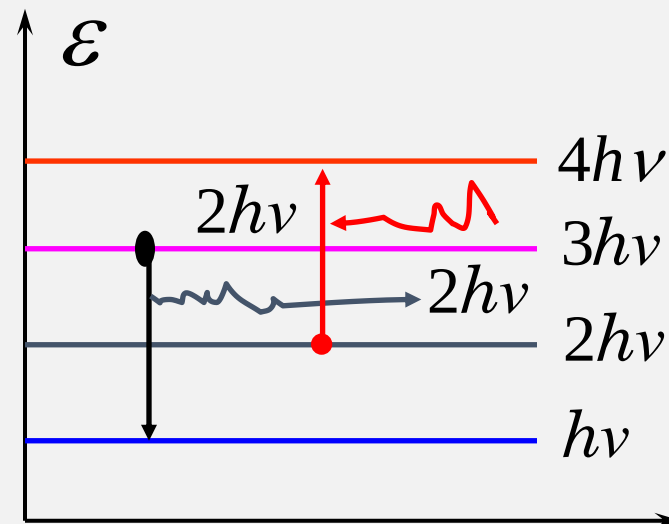
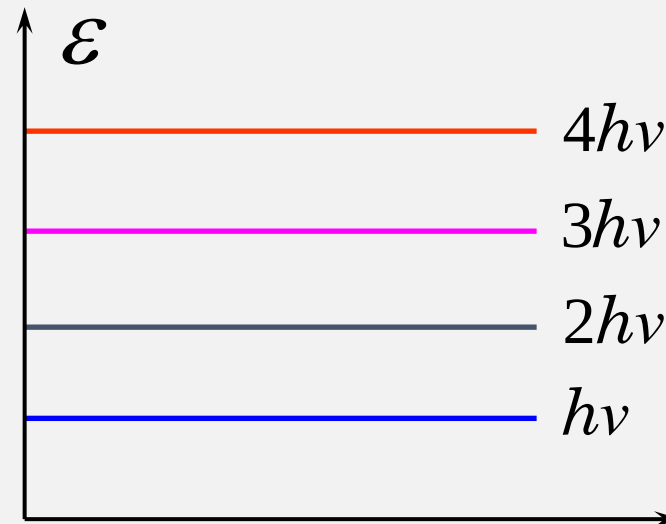
当带电谐振子与周围电磁场交换能量时，吸收或发出的能量以量子化方式进行。

普朗克利用经典统计理论和上述能量子假设，导出温度为 T 的黑体，在单位时间、单位面积上，频率在 $\nu + d\nu$ 范围内辐射的能量为

$$M_\nu(T)d\nu = \frac{2\pi h\nu^3}{c^2} \frac{d\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

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

这就是著名的普朗克黑体辐射公式



$$M_\nu(T)d\nu = \frac{2\pi h \nu^3}{c^2} \frac{d\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

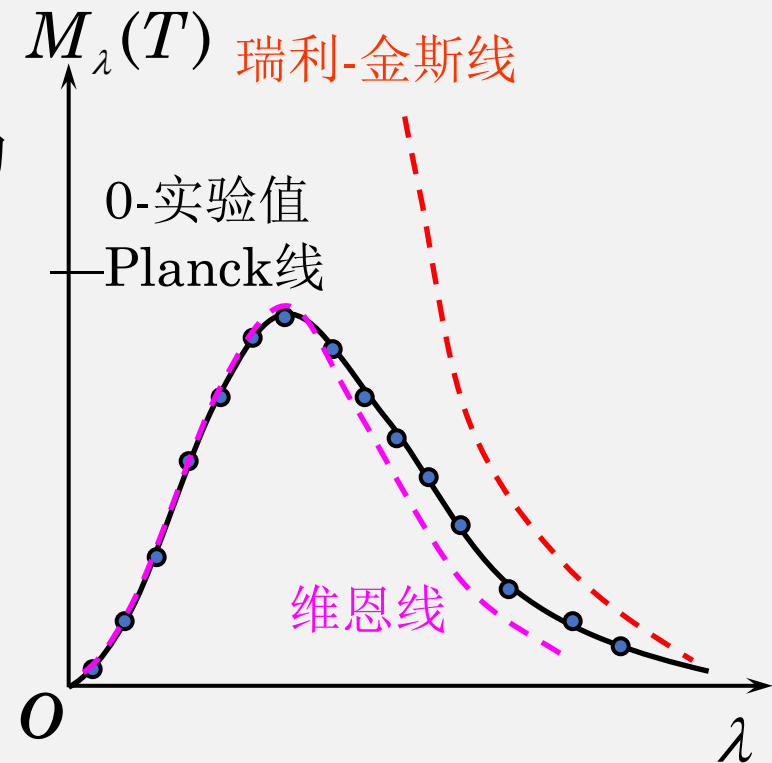
$$M_\lambda(T)d\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{d\lambda}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

k 和 c 分别是玻尔兹曼常数和光速。

普朗克黑体辐射公式

普朗克假说不仅圆满地解释了绝对黑体的辐射规律，也解决了在经典热力学中固体比热与实验不符的问题。**Planck**提出的全新概念——**能量量子化**，已成为现代物理理论的重要概念

普朗克在1900年10月19日的德国物理学会上说：“即使这个辐射公式能证明是绝对精确的，但是如果仅仅是一个侥幸猜测出来的内插公式，那么它的价值也是有限的。”普朗克由于提出了能量量子假设和黑体辐射公式，为此获1918年诺贝尔物理学奖。





06

实验内容





1. 建立传递函数曲线

任何型号的光谱仪在记录辐射光源的能量时都受光谱仪的各种光学元件、接受器件在不同波长处的响应系数影响，习惯称之为传递函数。为了扣除这部分影响，该实验仪器的溴钨灯光源能量曲线是经过标定的，另外在软件内存储了一条该标准光源在2940K时的能量谱线。实验中以“基线”方式记录溴钨灯在2940K下的全波段图谱：该光谱曲线包含了传递函数的影响；将该光谱曲线与已知的光源能量曲线相除，即得到传递函数曲线，并自动保存。在测量能量谱线时，只要将软件界面上“☐传递函数”前的“☐”中打“√”，则测量的未知光源的辐射能量结果已扣除了仪器传递的影响。



2. 黑体辐射测量

扣除仪器传动的的影响，考虑到溴钨灯与黑体辐射之间的关系，实验中采集5个不同温度下的黑体辐射能量曲线进行以下定律的验证，在进行普朗克定律和斯忒藩—玻尔兹曼定律的验证前，应先进性归一化处理，即将采集到的数据对同温度的理论黑体的数据进行归一化处理。

- 1) 验证维恩位移定律；
- 2) 验证斯特藩-玻尔兹曼定律；
- 3) 验证普朗克辐射定律；



07

实验仪器





仪器介绍——WGH-10型黑体辐射仪

WGH-10型黑体实验装置的控制系统采用WINDOWS 95/98/XP系统下均能使用，功能强大、操作简便。控制软件中，根据普朗克公式可以计算出任意温度下的绝对黑体的理论曲线，可以根据需要提取。WGH-10型黑体实验装置所配的光源是溴钨灯，溴钨灯的谱线大致类似于黑体，但是由于钨的发射系数不是1，所以需要进行修正。软件可以对不同温度下溴钨灯的曲线进行发射系数 ε （仅限于溴钨灯）的修正。





WGH-10型黑体辐射仪主要参数

WGH-10型黑体实验装置的规格参数：

相对孔径 $D/F=1/7$

焦距 302.5mm

色散元件 300L光栅

狭缝 0-2mm连续可调，示值精度0.01mm/格，最大高度20mm

主机尺寸 $360 \times 300 \times 160$

WGH-10型黑体实验装置主要技术指标：

波长范围 800-2500nm

波长精度 $\pm 6\text{nm}$

波长重复性 3nm

杂散光 $\leq 0.3\%T$



仪器的光学系统示意图

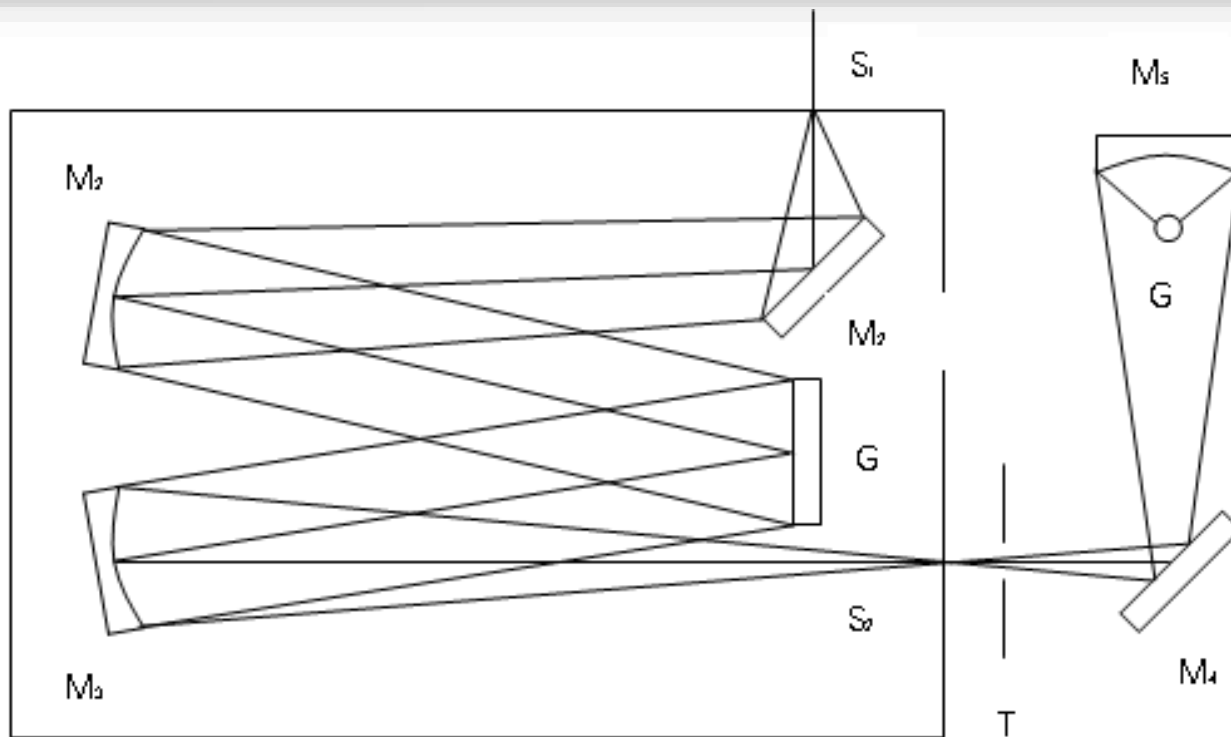


图1. 黑体辐射实验装置光学系统示意图

M_1 反射镜 M_2 准光镜 M_3 物镜 M_4 反射镜 M_5 深椭球镜 T 调制器

G 平面衍射光栅 S_1 入射狭缝 S_2 出射狭缝 D 光电倍增管



08

实验思考题



课程思考题：



(1) 有一金属圆柱体的表面积为 S ，其内部装有电热丝，通电流后可以生热，供热的功率为 P ，起始时圆柱体的表面以砂纸磨亮，其辐射发射率可视为零。经通电加热后，利用热电偶测得圆柱体表面达成热平衡时的温度为 T_1 。现利用蜡烛将该圆柱体表面熏黑，其辐射发射率可视为1，以同样的方式通电加热，则圆柱体表面的热平衡温度为 T 。设当时金属圆柱体周围的环境温度为 T_0 ，在实验期间稳定不变，因热传导和对流而损失的热量功率，可合理假设为正比于圆柱体表面温度和环境温度的差值。试求 T 和上述已知量，即 S 、 P 、 T_1 和 T_0 之间的数学关系式为何？



本次课程结束，祝同学们
学业有成！

