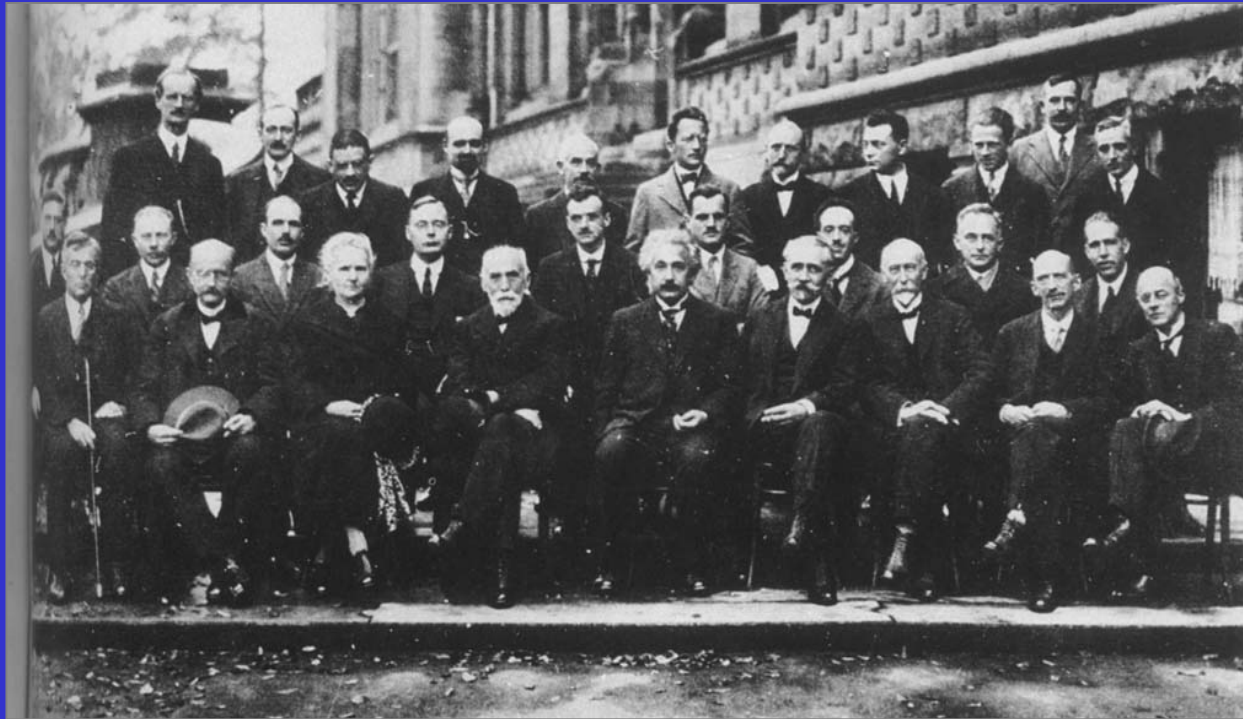


第7章 光的量子性



第五次索尔维会议与会者合影(1927年)

N.玻尔、M.玻恩、W.L.布拉格、L.V.德布罗意、A.H.康普顿、
M.居里、P.A.M 狄喇克、A.爱因斯坦、W.K.海森堡、
郎之万、W.泡利、普朗克、薛定谔等

经典物理（18—19 世纪）

牛顿力学 热力学 经典统计力学 经典电磁理论

19世纪末趋于完善

- 电磁理论解释了波动光学

开尔文：大厦基本建成 … 两朵乌云

M—M实验→

相对论

黑体辐射 →

量子论 量子力学

近代物理（20世纪）

- 相对论

1905 狭义相对论

1916 广义相对论 — 引力、天体

- 量子力学

A 旧量子论的形成（冲破经典—量子假说）

1900 Planck 振子能量量子化

1905 Einstein 电磁辐射能量量子化

1913 N.Bohr 原子能量量子化

B、量子力学的建立（崭新概念）

1923 de Broglie 电子具有波动性

1926 - 27 Davisson, G.P.Thomson

电子衍射实验

1925 Heisenberg 矩阵力学

1926 Schroedinger 波动方程

1928 Dirac 相对论波动方程

C、量子力学的进一步发展（应用、发展）

量子力学→原子、分子、原子核、固体

量子电动力学(QED)→电磁场

量子场论→原子核和粒子

进一步认识的问题. . . .

本课程的主要教学内容:

量子理论的基本概念

量子力学解决问题的基本思路和方法

对象的特点:

- 1) 微观: 对象线度小 活动范围小 10^9 米
- 2) 粒子除了具有粒子性 还具有明显的波动性
- 3) 粒子的能量 角动量等物理量取值分立

完全脱离了经典物理的模式

讲课思路:

1)突破性的实验

实验规律 (应掌握) 经典理论的困难

假设 确立新理论

2)实物粒子的波粒二象性 及量子力学解决问题的基本方法

3)证明量子理论的一些重要实验 (应掌握)

4)量子力学的应用举例

十七世纪以来，人们在经典理论的统治下，“一切自然过程都是连续的”这个概念被所有的人自然地接受。人们生活在宏观地世界上，对自然界的认识不可避免地有一定的局限性。

在研究黑体辐射规律时，经典理论遇到了困难，普朗克为了解释实验和理论之间的矛盾。提出了一个和经典理论格格不入的观点：能量取值是不连续的，在自然界中存在着最小的能量单元， $\varepsilon=h\nu$ ，即量子的概念，他指出：自然界中存在着这样一些变化，它们的发生是越变的，这个思想就象一把金钥匙，打开了微观世界的大门，普朗克的能量假说对经典物理是一个巨大的突破，由此量子物理诞生。(1900.12.25)

普朗克初次提出自然界存在不连续的能量设想时，当时并没有引起人们的注意，1908年总结1900年世界120项重大发现和发明时，并没有提到普朗克的量子假说，这在牛顿力学和麦氏电磁理论占统治地位的经典理论中不可能想象存在着不连续的能量，而普朗克本人也只是小心地透漏出这个不连续的设想，他只是为了解释黑体辐射中遇到的理论与实际不符的问题，并没有真正认识到量子概念在物理学中的地位，他甚至对自己提出的量子假设这一划时代的理论

而感到不安，而在1900年以后的几年内，他总想使自己的观点和经典理论调和起来，并纳入经典理论的范围，但都失败了。

然而普朗克的功绩是永不能抹杀的，20年后(1918年)，普朗克因为对量子理论的贡献而获得诺贝尔奖，并以他的名字命名常数 h ——现代物理学中最重要的普适恒量，可以和光速 c 相比，在德国成为享有极高荣誉德国科学家，2马克的硬币上印有普朗克的头象。

最早明确认识普朗克的能量子假设伟大意义的科学家之一是年轻的爱因斯坦，具有深刻洞察力的爱因斯坦意识到，经典理论是在一定条件下成立的理论，不能应用到微观世界发生的过程，他从普朗克能量子假设中得到重要的启示，他不仅支持能量子观点，而且还进一步发展能量子假说，提出光量子假说。

爱因斯坦认为光是由光子组成的粒子流，它不仅是一份份地被吸收、辐射，而且光所具有的能量也是聚集成一份份在空间传播，光子具有的能量也是 $\varepsilon=h\nu$ 。

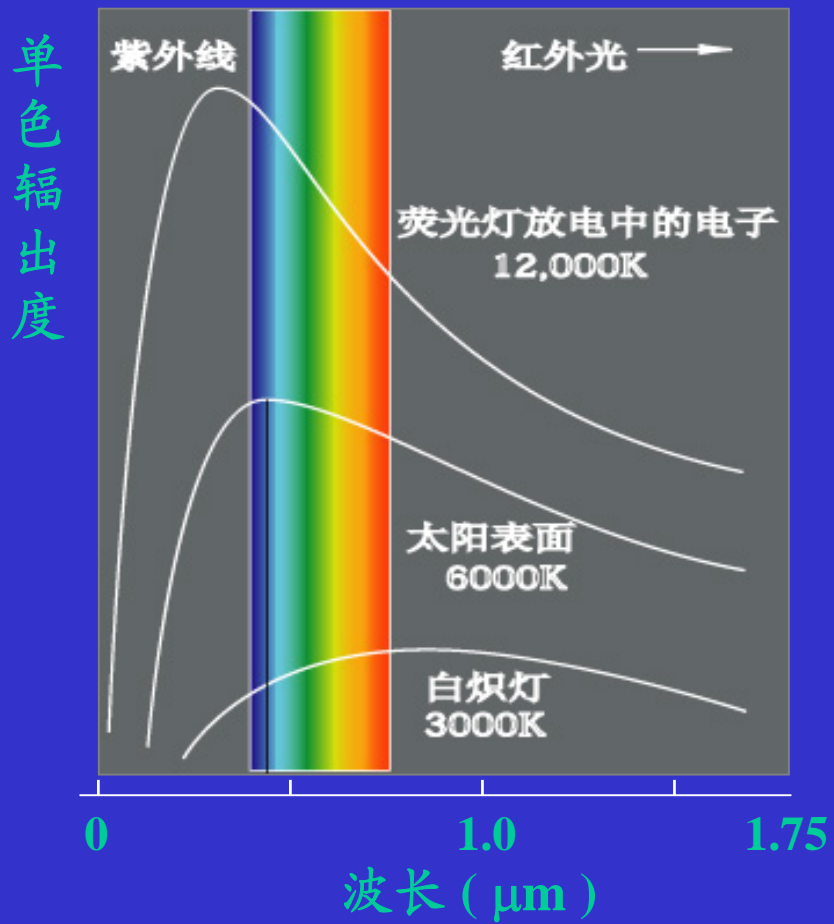
用光量子理论成功地解释了光电效应。

第一节

热辐射 普朗克能量量子假设

一. 热辐射

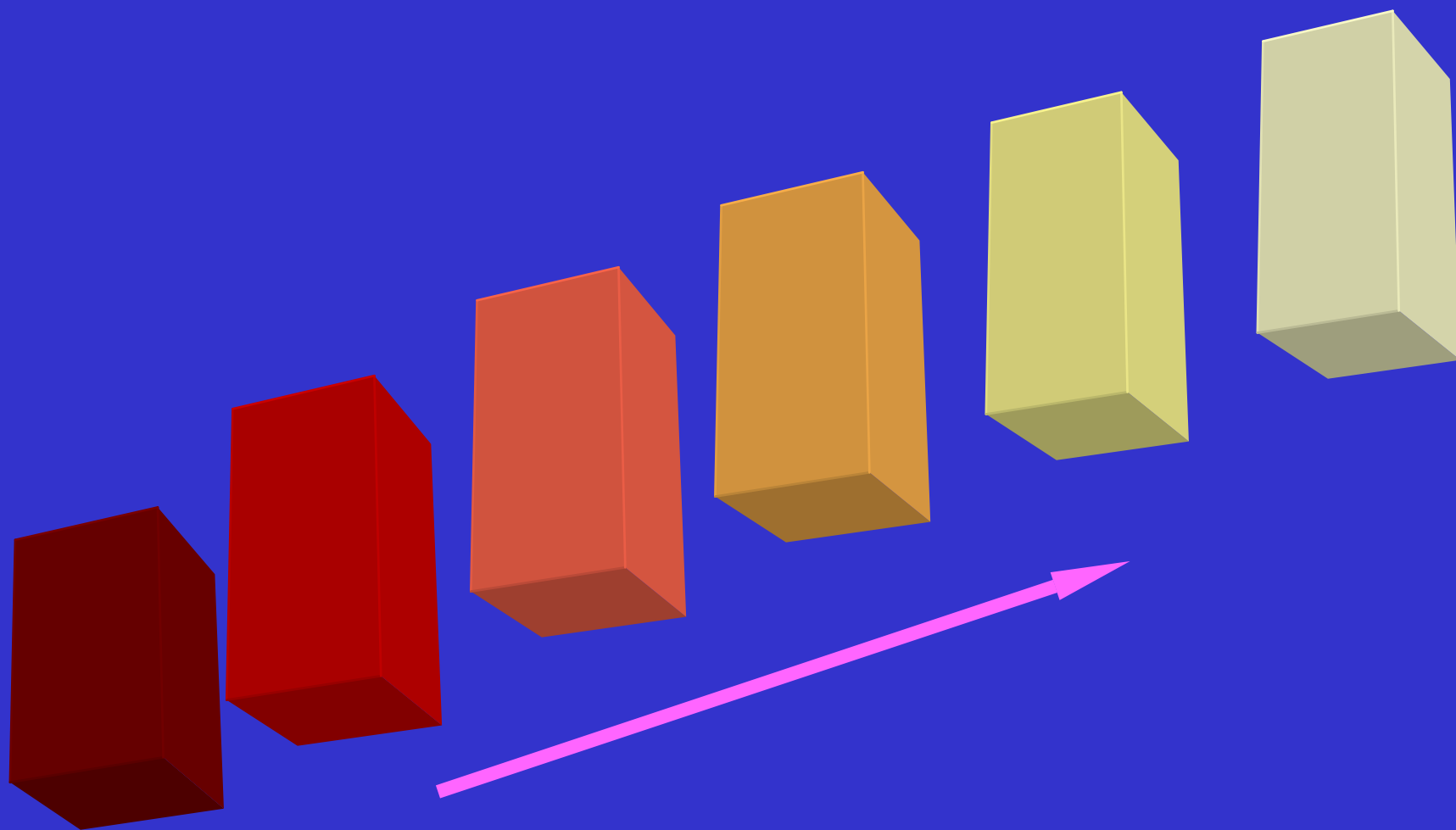
热辐射：由温度决定的物体的电磁辐射。



头部热辐射像

头部各部分温度不同，因此它们的热辐射存在差异，这种差异可通过热象仪转换成可见光图象。

物体温度升高时温度的变化



直觉：

低温物体发出的是**红外光**

炽热物体发出的是**可见光**

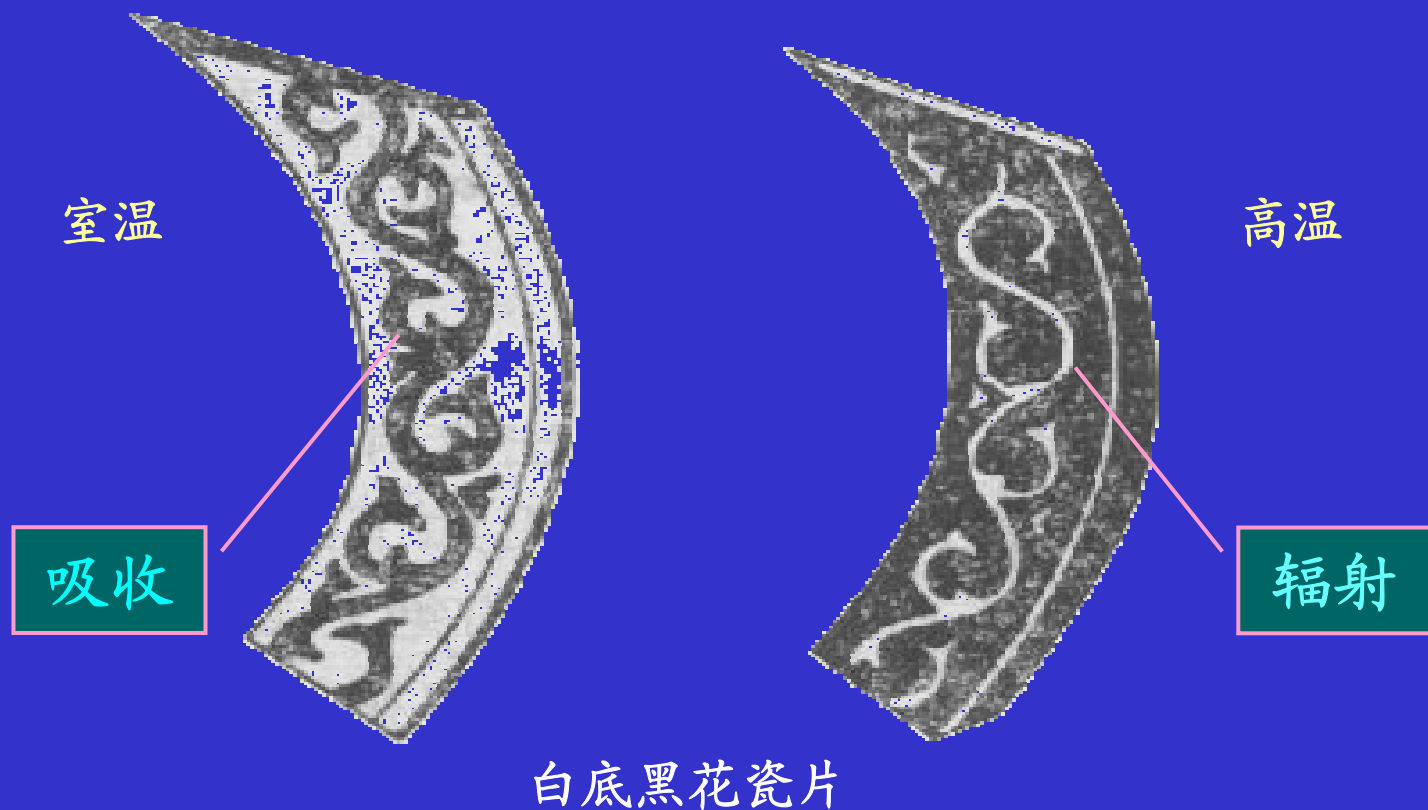
高温物体发出的是**紫外光**

注意：

热辐射与温度有关

激光 日光灯发光不是热辐射

物体辐射电磁波的同时，也吸收电磁波。物体辐射本领越大，其吸收本领也越大。



辐射和吸收达到平衡时，物体的温度不再变化，此时物体的热辐射称为平衡热辐射。

热辐射的一般特征：

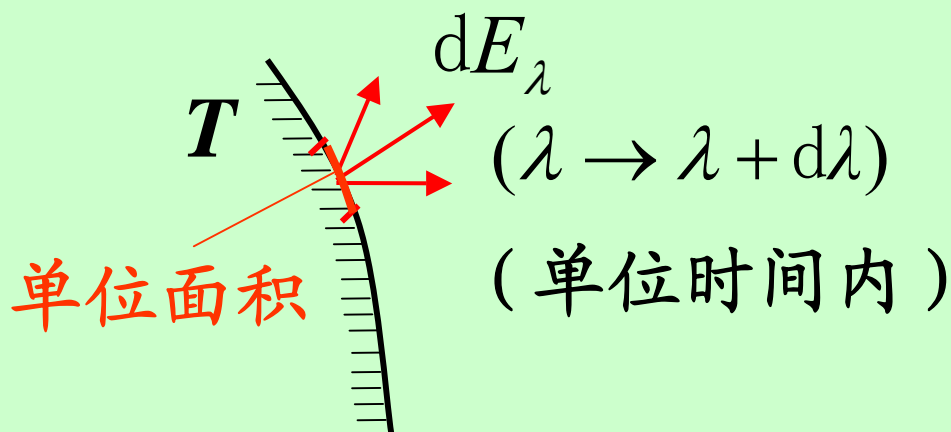
- (1)、物体的温度升高，辐射能量增加；
- (2)、辐射出电磁波波谱分布，温度升高， λ 降低；
- (3)、物体辐射能量的同时，还吸收周围能量。
吸收的辐射能 $>$ 辐射的能量 \rightarrow 物体温度升高
吸收的辐射能 $=$ 辐射的能量 \rightarrow 物体温度不变
- (4)、不同物体在某一频率范围内发射和吸收电磁辐射的能力不同，如深色物体比浅色物体吸收和发射电磁辐射电磁辐射的能力大。
- (5)、经典理论认为辐射或能量的取值是任意的,连续的。

二. 描述热辐射的基本物理量

1) 光谱辐射出射度(也称单色辐射本领)

单位时间内从物体单位表面向半球发出的波长在 λ 附近单位波长间隔内的电磁波的能量

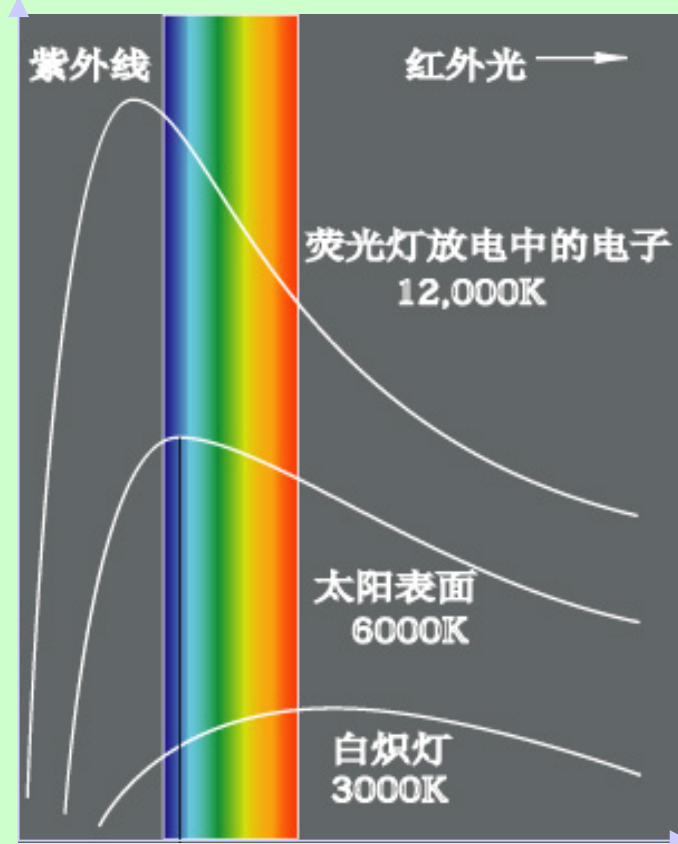
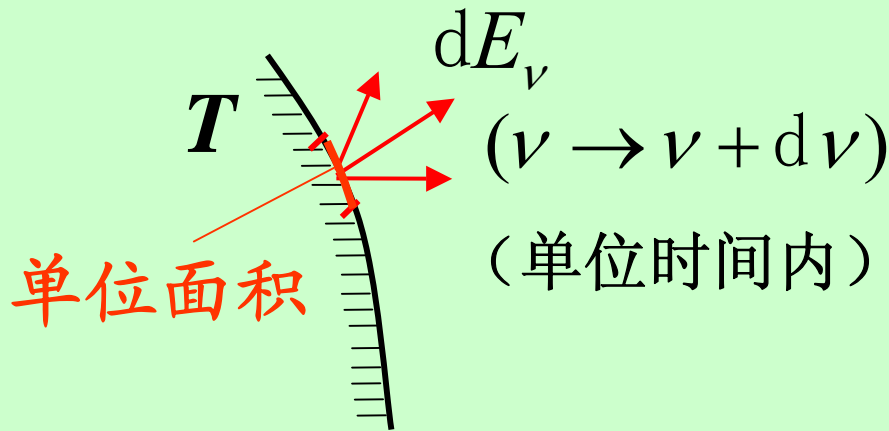
$$M_{\lambda} = \frac{dM}{d\lambda}$$



或按频率定义

单位时间内从物体单位表面
向
前方半球发出的频率在 ν 附近单位
频率间隔内的电磁波的能量

$$M_\nu = \frac{dE_\nu(T)}{d\nu}$$



$\left\{ \begin{array}{l} T \\ \lambda(\nu) \\ \text{物质种类} \\ \text{表面情况} \end{array} \right.$

辐射出射度与 $\left. \begin{array}{l} T \\ \lambda(\nu) \\ \text{物质种类} \\ \text{表面情况} \end{array} \right\}$ 有关

2) 总辐出度 (总辐射本领)

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

单位: $\mathbf{w/m^2}$

或

$$M(T) = \int_0^{\infty} M_{\nu}(T) d\nu$$

★ 说明

温度越高, 辐出度越大。辐出度还与材料性质有关。

温度



物体热辐射



材料性质

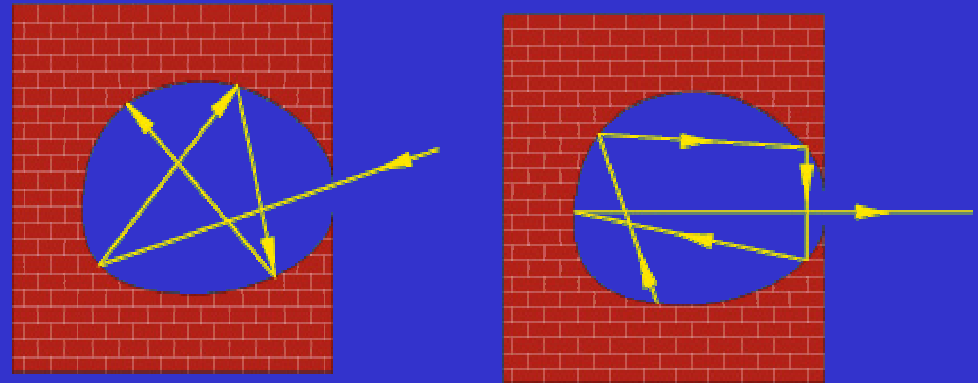
三. 黑体辐射

绝对黑体(黑体): 能够全部吸收各种波长的辐射且不反射和透射的物体。





煤烟

约99%



黑体模型

黑体辐射的特点：

- 温度  黑体热辐射  材料性质
- 与同温度其它物体的热辐射相比，黑体热辐射本领最强

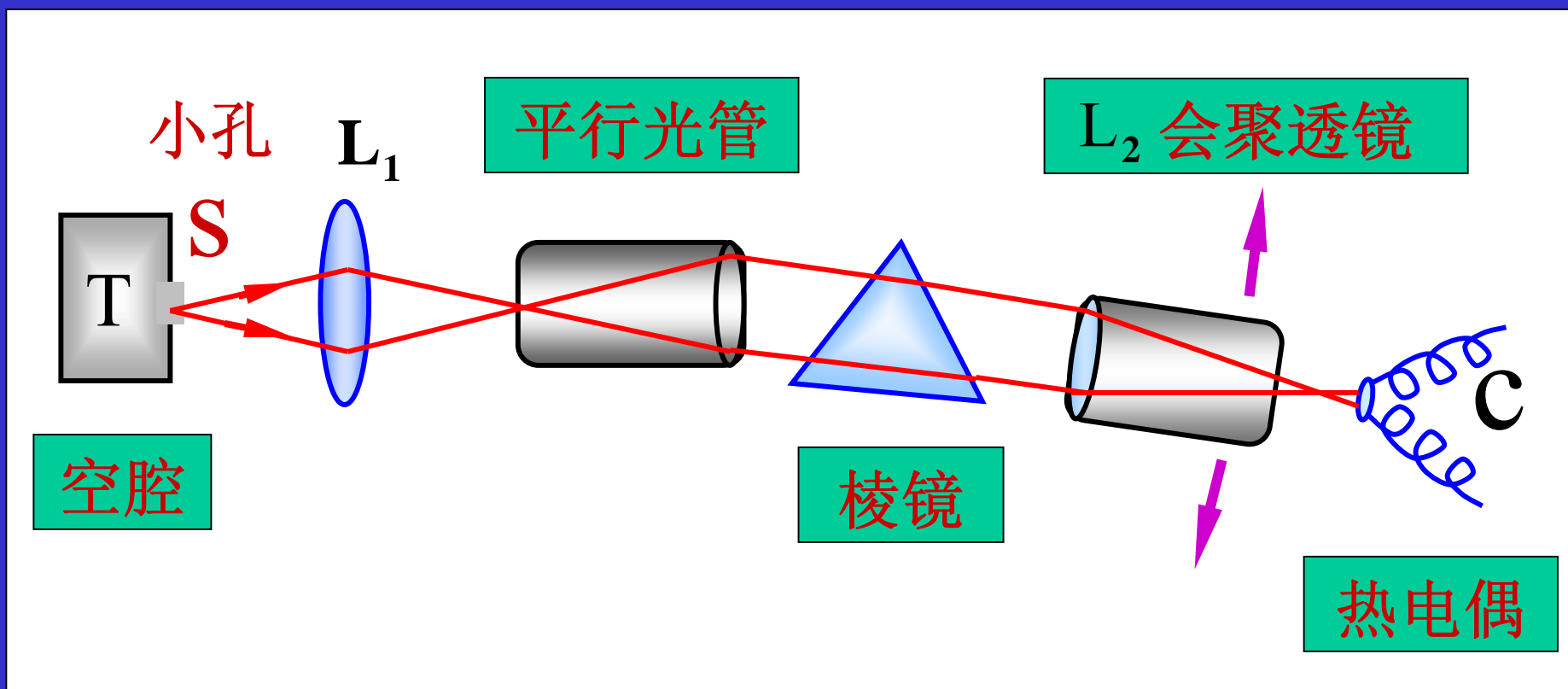
1859年 基耳霍夫证明：

平衡态时 黑体辐射只依赖于物体的温度
与构成黑体的材料 形状无关

- 实验和理论均证明：

在各种材料中 黑体的光谱辐射度最大

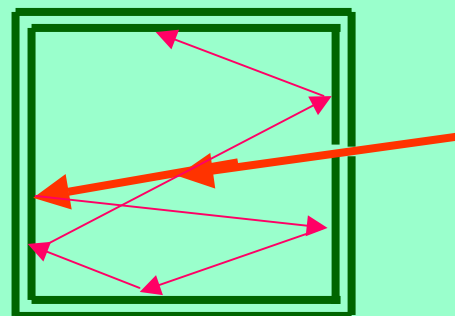
测量黑体辐射出射度实验装置



维恩设计的黑体

空腔上的小孔

炼钢炉上的小洞



向远处观察打开的窗子

近似黑体



1. 斯特藩——玻耳兹曼定律

$$M_B(T) = \int_0^{\infty} M_{B\lambda}(T) d\lambda = \sigma T^4$$

式中 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$

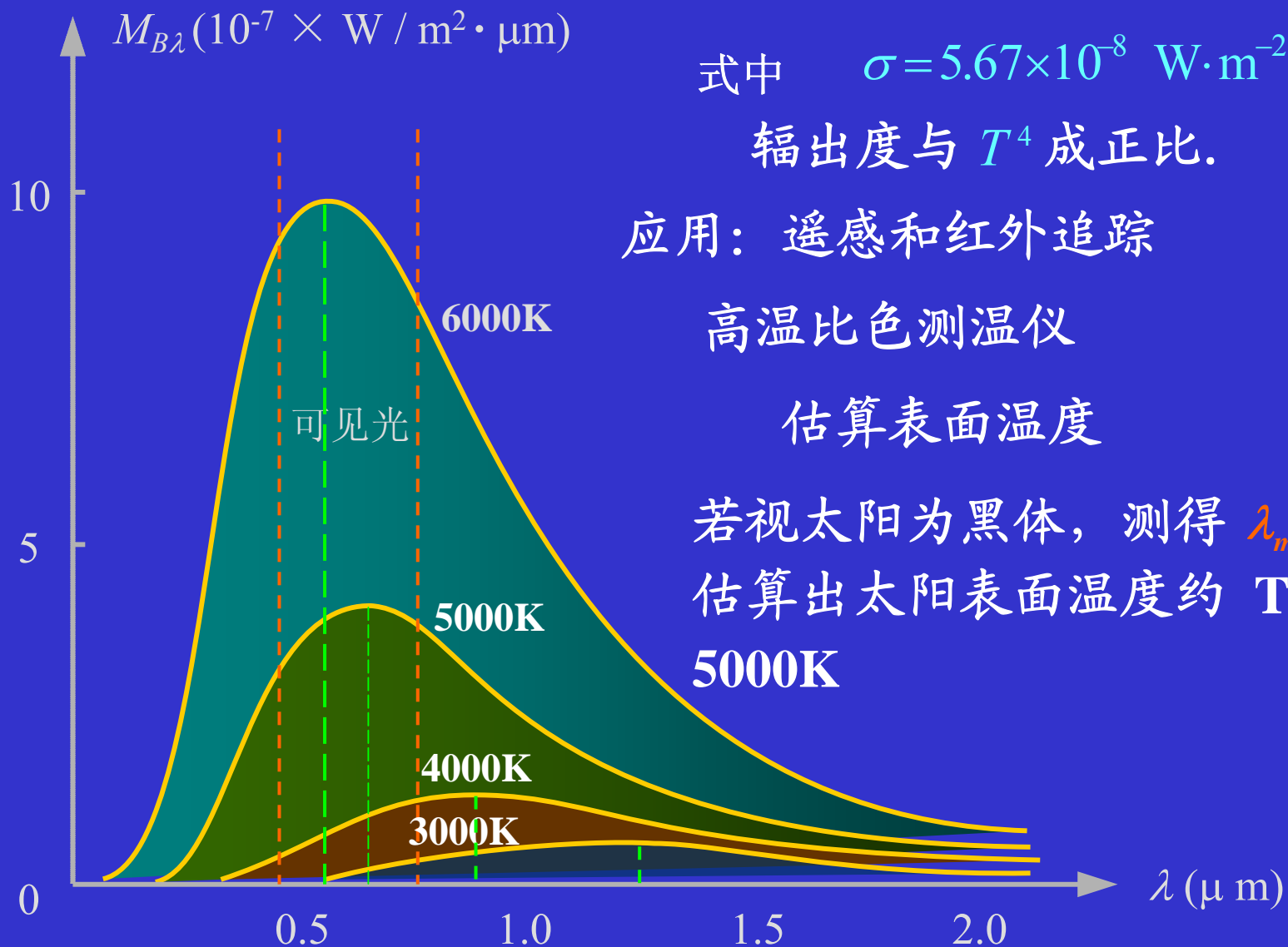
辐出度与 T^4 成正比。

应用：遥感和红外追踪

高温比色测温仪

估算表面温度

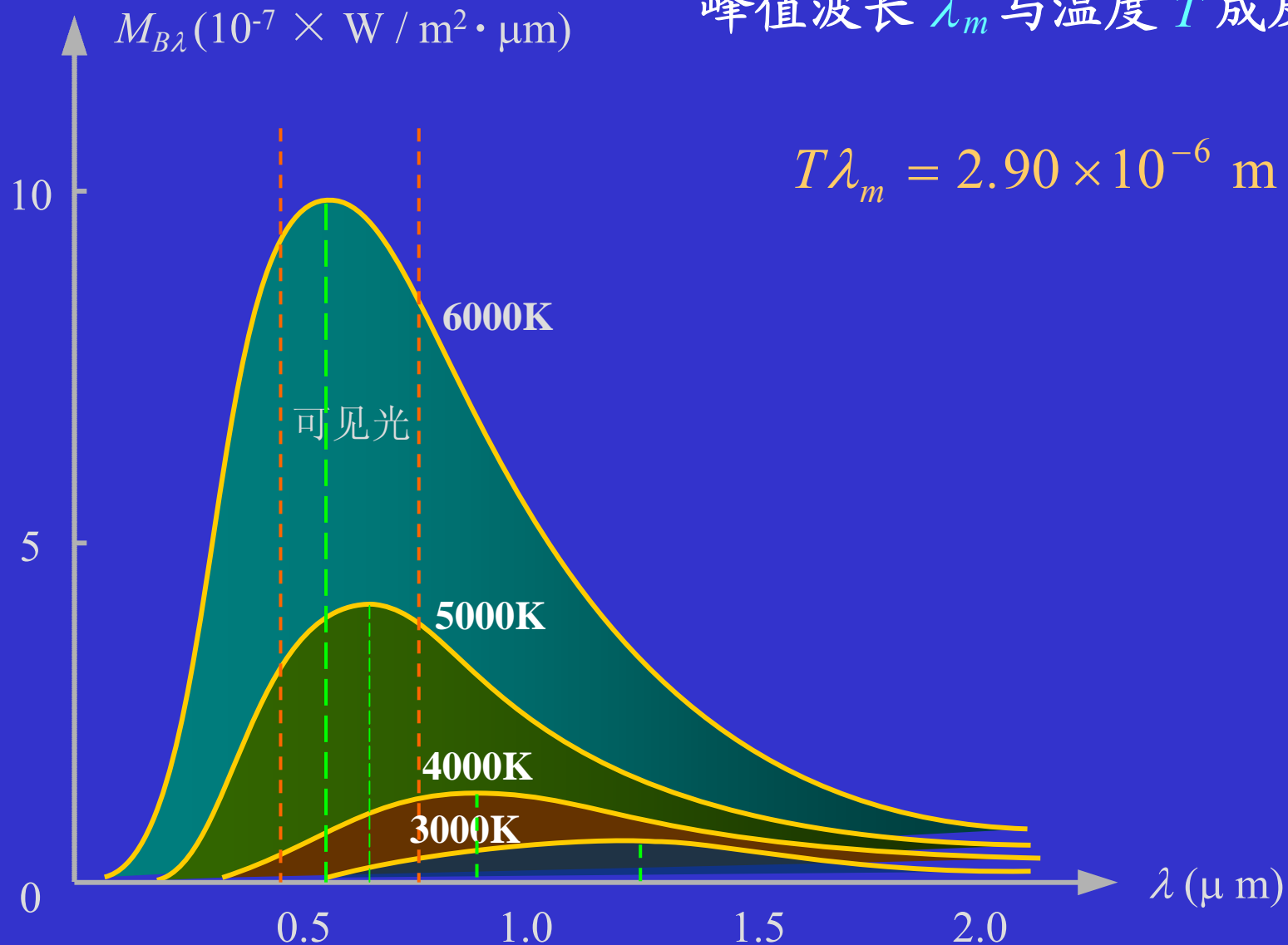
若视太阳为黑体，测得 $\lambda_m \approx 550 \text{ nm}$
估算出太阳表面温度约 $T_{\text{表面}} \approx 5000 \text{ K}$



2. 维恩位移定律

峰值波长 λ_m 与温度 T 成反比

$$T\lambda_m = 2.90 \times 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{K}$$



红外夜视仪



(a)



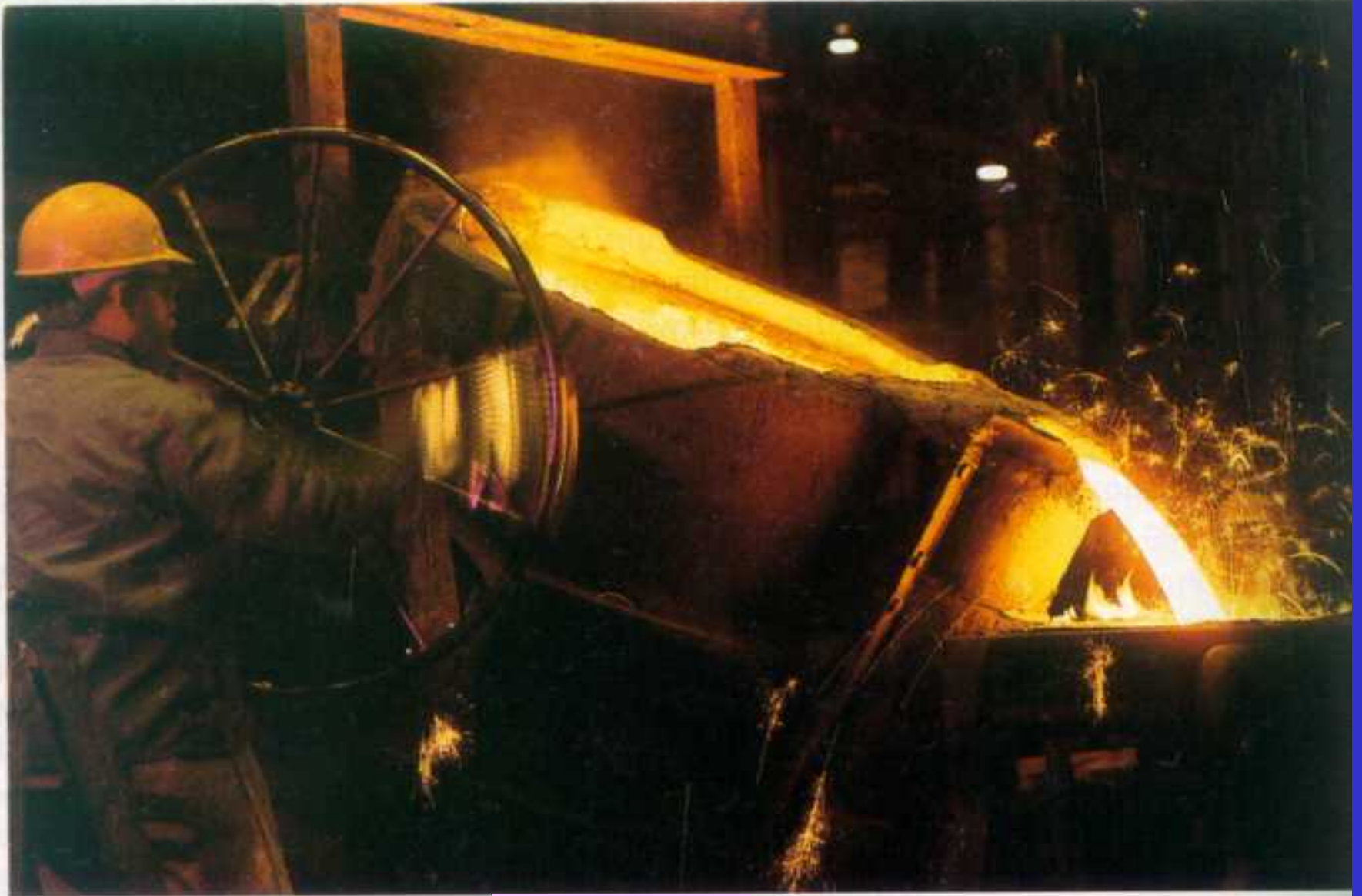
(b)

FIGURE 41AB-1 (a) A hand-held night vision
(b) a view at night using this device.



红外夜视图

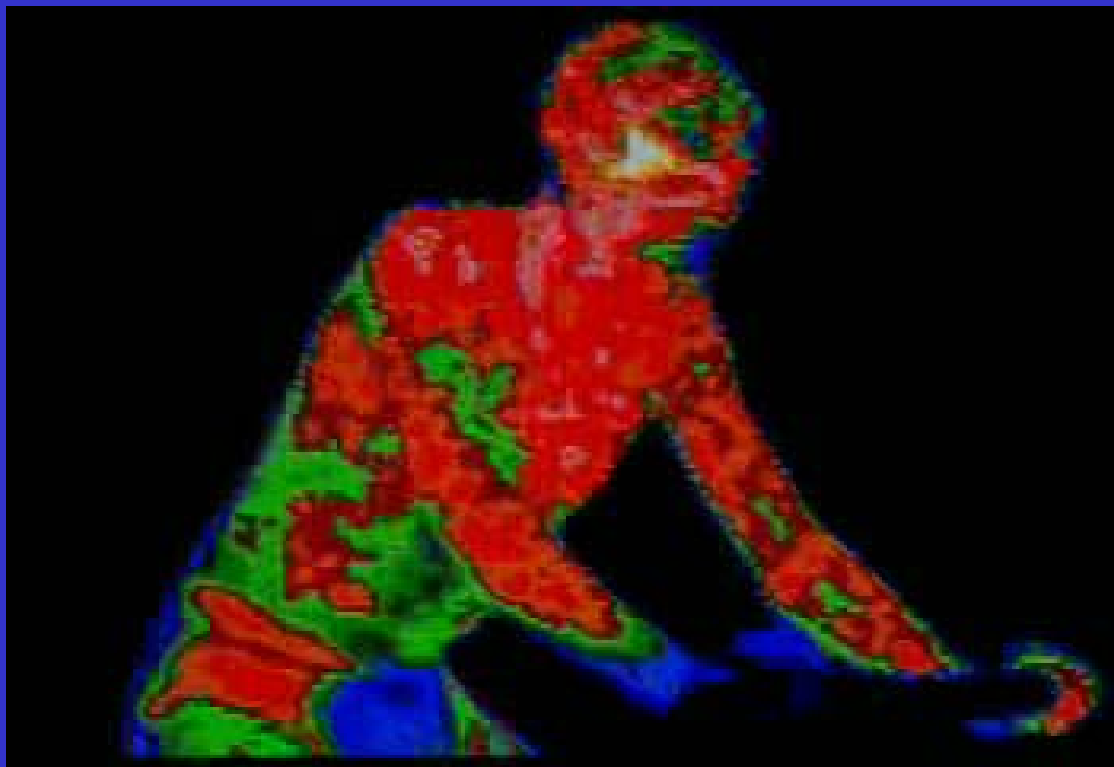
FIGURE 21-16 In a thermogram, film sensitive to infrared radiation reveals the location of regions of significant thermal energy transport. The white areas are the regions of greatest heat loss to cold ambient air.



The properties of materials depend on temperature. At high temperatures, even sturdy metals become liquid.

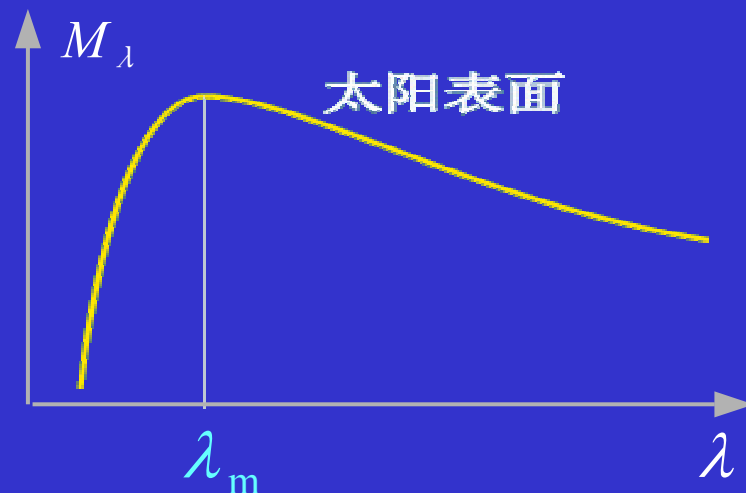
钢水

e. At high temperatures, even sturdy metals become liquid.



运动时各部分温度的分布

例 测得太阳光谱的峰值波长在绿光区域，为 $\lambda_m = 0.47 \mu\text{m}$ 。试估算太阳的表面温度和辐出度。



解 太阳表面温度

$$T_s = \frac{2.9 \times 10^{-6}}{\lambda_m} = \frac{2.9 \times 10^{-6}}{0.47 \times 10^{-6}} = 6166 \text{ K}$$

辐出度

$$M_B(T) = \sigma T_s^4 = 8.20 \times 10^7 \text{ W/m}^2$$

★ 说明

太阳不是黑体，所以按黑体计算出的 T_s 低于太阳的实际温度； $M_B(T)$ 高于实际辐出度。

四、经典物理学遇到的困难

如何从理论上找到符合实验的函数式?
理论物理学家做了艰苦地努力

1. 维恩公式

1896年维恩从经典热力学理论
及实验数据的分析得出

$$M_{\nu}(T) = \alpha \nu^3 e^{-\beta \nu / T}$$

α β 为常数

短波方向与实验符合较好

2. 瑞利-金斯公式

1900年从经典电动力学和统计物理学理论推导而得

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

$$k = 1.380658 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$$

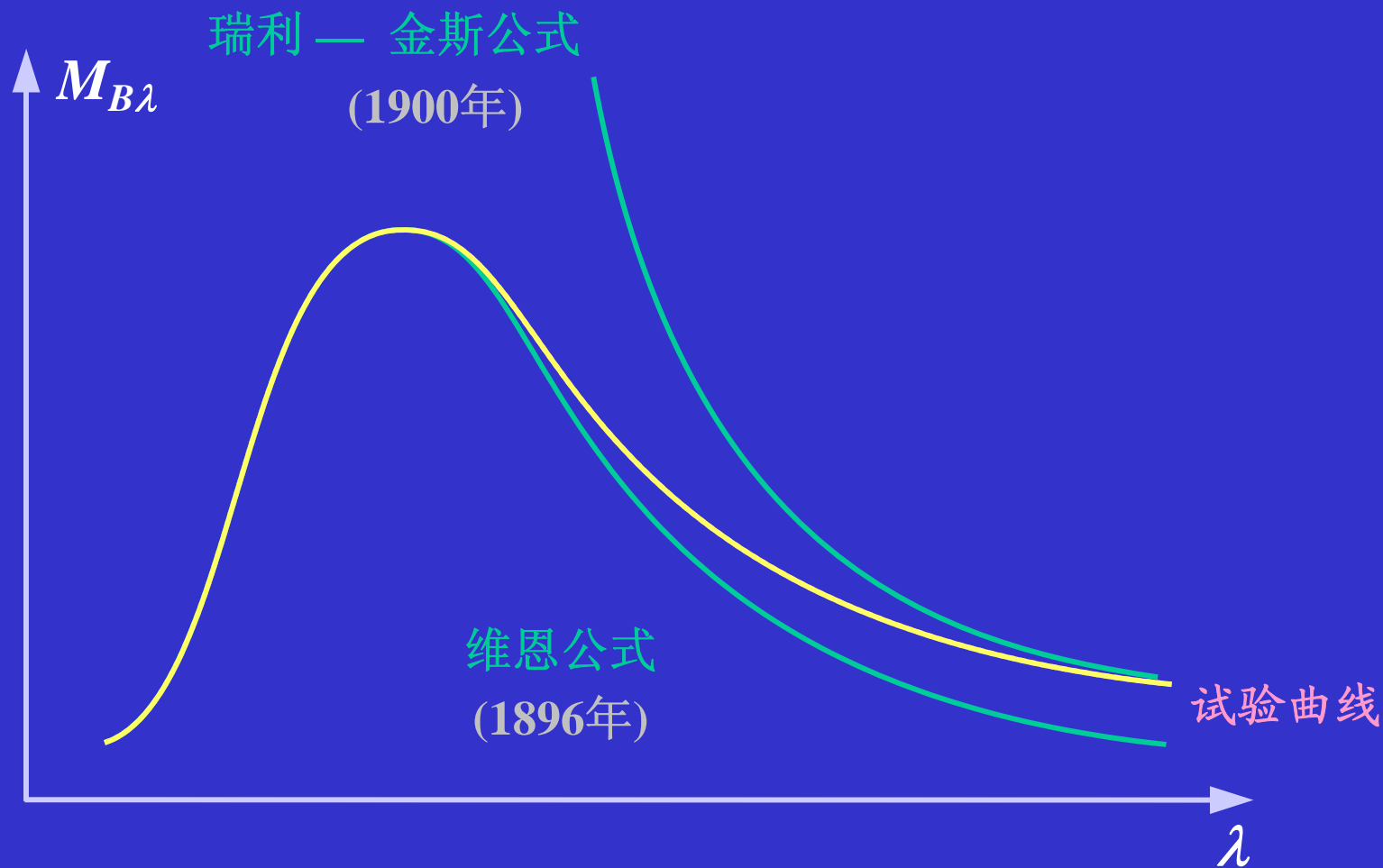
长波方向与实验符合较好

短波方向得出灾难性的结论

“紫外灾难”——经典物理有难

由经典理论导出的 $M_\nu(T) \sim \nu$ 公式都与实验结果不符合!

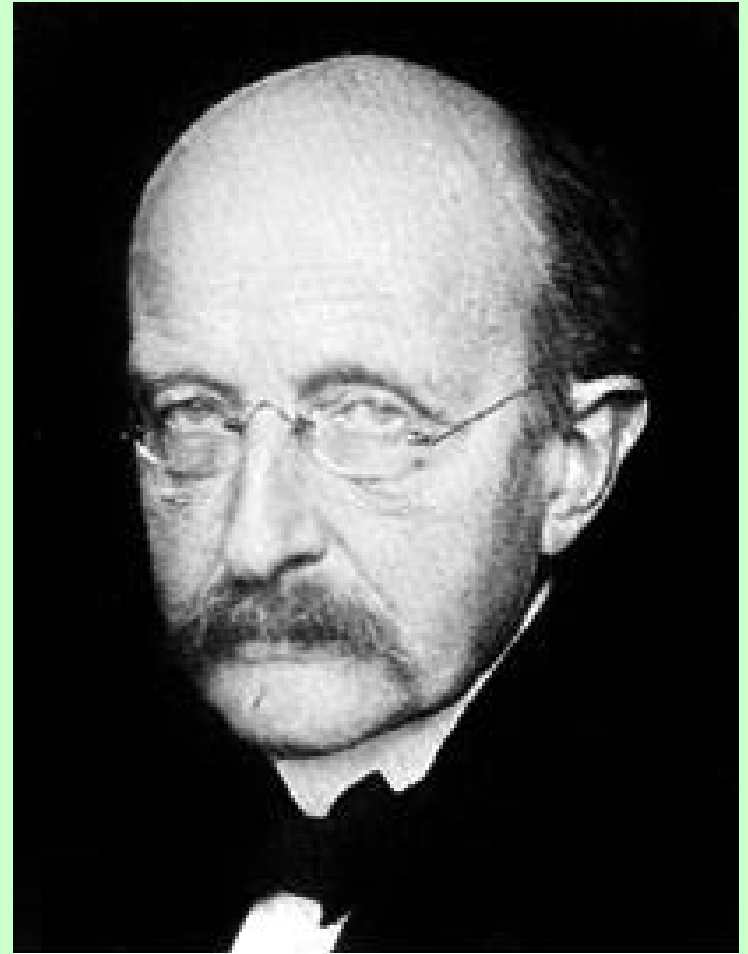
物理学晴朗天空中的一朵乌云!



1900. 10. 19 普朗克在德国物理学会会议上提出一个黑体辐射公式

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

$$h = 6.55 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

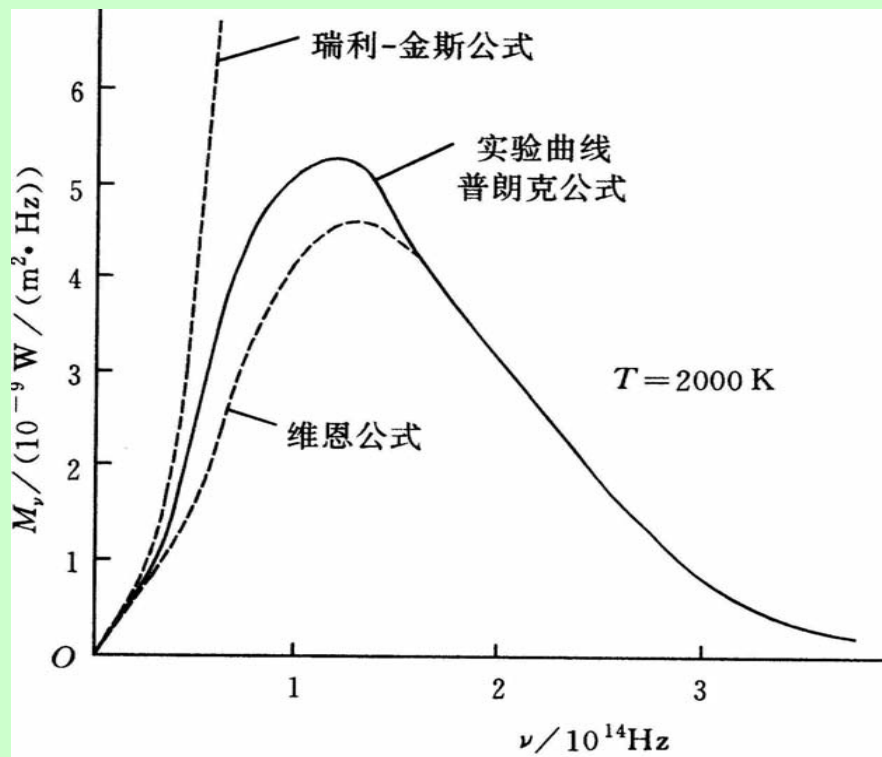


M. Planck 德国人 1858
—1947

用内插法得出(短波趋向维恩 长波趋向瑞利)

实验物理学家鲁本斯 (**Rubens**) 把它同最新的实验结果比较 发现:

在全波段与实验
结果惊人符合



2. 普朗克的能量量子假说

基本物理思想:

- 辐射黑体中的分子 原子可看作线性谐振子
- 振动时向外辐射能量 (也可吸收能量)
- 普朗克能量量子假定: 振子的能量不连续

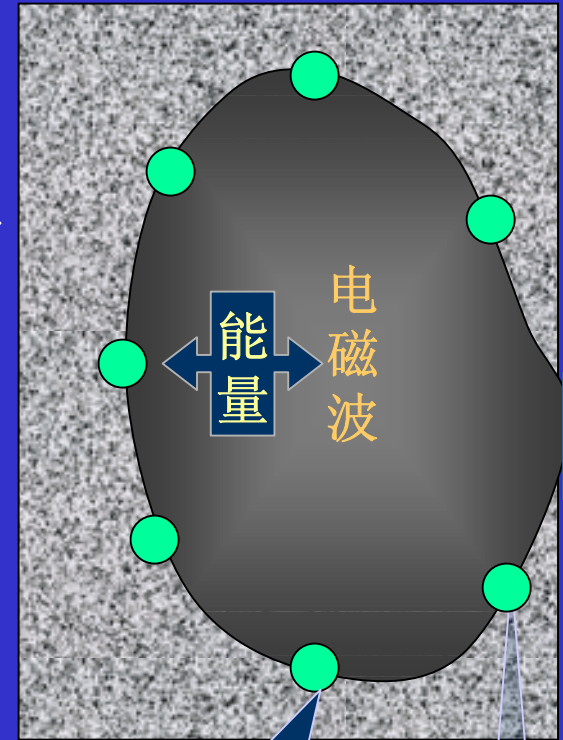
$$E = n \varepsilon \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

$$\varepsilon = h\nu \quad - \text{能量子}$$

- 物体发射或吸收电磁辐射时 交换能量的最小单位是“能量子” $\varepsilon = h\nu$

$$\Delta E = (\Delta n) h\nu$$

若谐振子频率为 ν , 则其能量是
 $h\nu, 2h\nu, 3h\nu, \dots, nh\nu, \dots$



腔壁上的原子

由此得到了普朗克的热辐射公式：

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

$$h = 6.55 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

ν 大时： \longrightarrow 维恩公式

ν 小时： \longrightarrow 瑞利-金斯公式

六、量子假说的意义及其与宏观现象的关系

$$E = n\varepsilon \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

$$\varepsilon = h\nu$$

- 打破“一切自然过程能量都是连续的”经典看法
- 说明了宇宙辐射背景
- 敲开量子力学的大门

例 设有一音叉尖端的质量为0.050kg，将其频率调到 $\nu = 480\text{Hz}$ 振幅 $A = 1.0\text{mm}$ **求**

(1) 尖端振动的量子数；

(2) 当量子数由 n 增加到 $n + 1$ 时，振幅的变化是多少？

解 (1)

$$E = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 = \frac{1}{2} m (2\pi \nu)^2 A^2 = 0.227\text{J}$$

$$E = n h \nu \quad n = \frac{E}{h \nu} = 7.13 \times 10^{29}$$

$$\text{基元能量 } h \nu = 3.18 \times 10^{-31} \text{ J}$$

$$(2) \quad E = nh\nu$$

$$A^2 = \frac{E}{2\pi^2 m \nu^2} = \frac{nh}{2\pi^2 m \nu}$$

$$2A dA = \frac{h}{2\pi^2 m \nu} dn$$

$$\Delta A = \frac{\Delta n}{n} \frac{A}{2} \quad \Delta n = 1$$

$$\Delta A = 7.01 \times 10^{-34} \text{ m}$$

在宏观范围内，能量量子化的效应是极不明显的，即宏观物体的能量完全可视作是连续的。

例：设想一质量为 $m = 1 \text{ g}$ 的小珠子悬挂在一个小轻弹簧下面作振幅 $A = 1 \text{ mm}$ 的谐振动弹簧的劲度系数 $k = 0.1 \text{ N/m}$ ，按量子理论计算此弹簧振子的能级间隔多大？减少一个能量量子时 振动能量的相对变化是多少？

解：弹簧振子的频率

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{6.28} \sqrt{\frac{0.1}{10^{-3}}} = 1.59 \text{ s}^{-1}$$

能级间隔

$$\Delta E = h\nu = 6.65 \times 10^{-34} \times 1.59 = 1.05 \times 10^{-33} \text{ J}$$

振子能量

$$E = \frac{1}{2}kA^2 = \frac{1}{2} \times 0.1 \times 10^{-6} = 5 \times 10^{-8} \text{ J}$$

相对能量变化

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{1.05 \times 10^{-33}}{5 \times 10^{-8}} \cong 2 \times 10^{-26}$$

这样小的相对能量变化在现在的技术条件下还不可能测量出来, 现在能达到的最高的能量分辨率为:

$$\frac{\Delta E}{E} \approx 10^{-16}$$

所以宏观的能量变化看起来都是连续的

