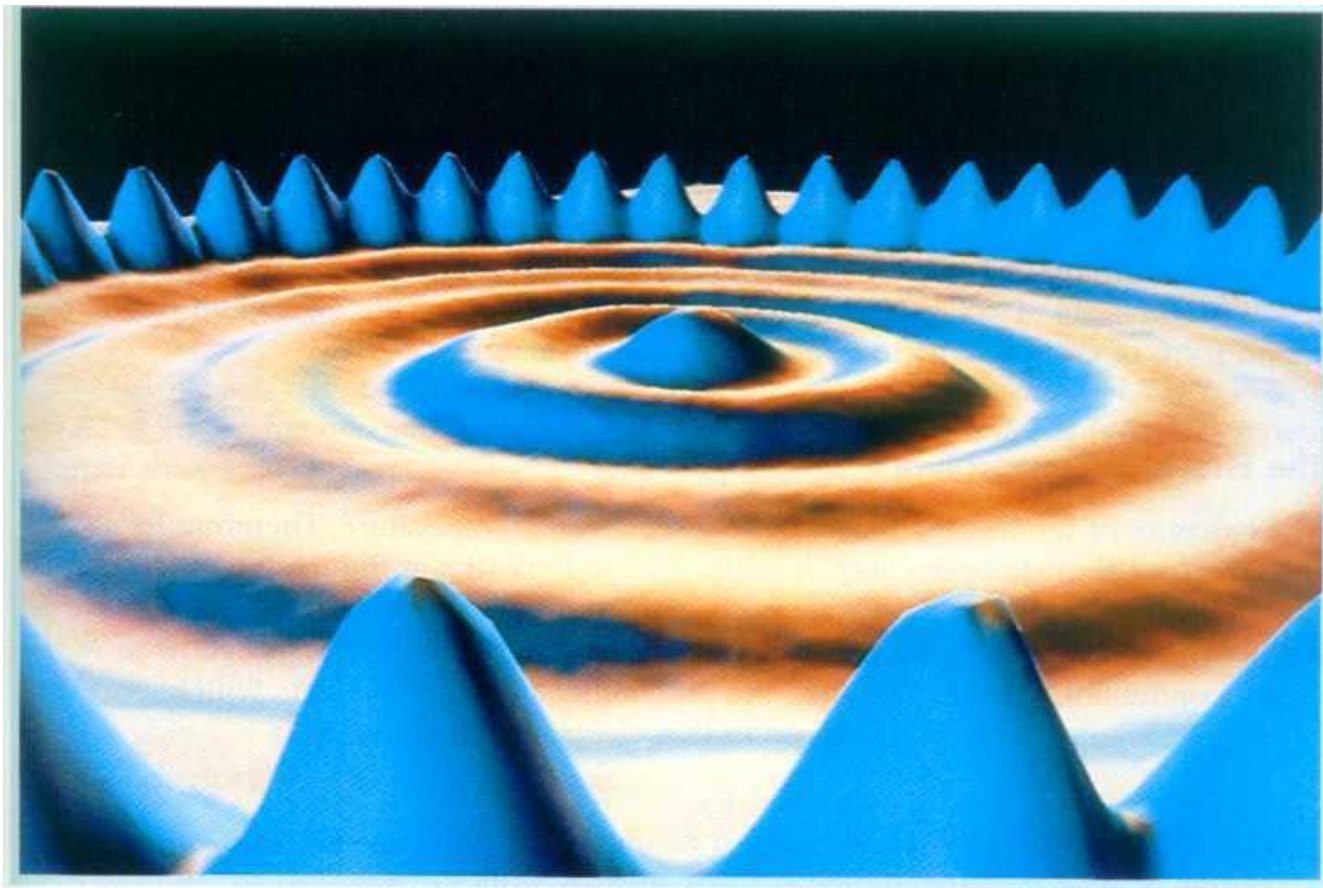


第六篇 量子物理基础



前言

经典物理19世纪末趋于完善。使人感到，经典物理似可解决所有问题：

- 海王星的发现（Leverrier, 1846）

“不必向天空看一眼就发现了这颗新行星”

“是在Leverrier的笔尖下看到的，……”

迈克尔孙—
莫雷实验

黑体辐射

相对论

量子论

近代物理的理论基础

解决了经典物
理宏观、低速
的局限性

本篇的主要教学内容：

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

敲开量子物理大门的首要问题

是 关于光的本质的认识

光具有波动性 已被大量实验证明

但 光与物质相互作用的大量实验

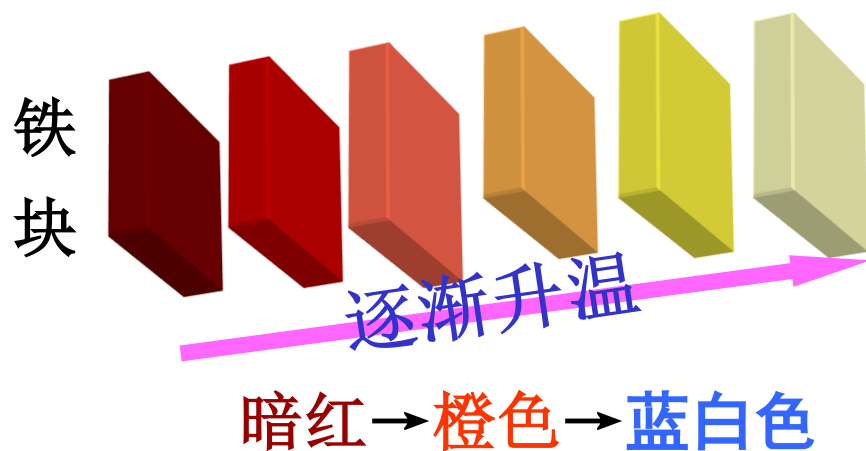
使经典的波动理论遇到无法克服的困难

§ 1 黑体辐射和普朗克的能量量子假说

一、热辐射及其特点

1. 热辐射

任何宏观物体在任何温度下都要向外辐射电磁波，称为**热辐射**。



人体的热辐射

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。

温度 \uparrow \rightarrow 辐射的能量 \uparrow \rightarrow 电磁波的短波成分 \uparrow

温度不同时，辐射的电磁波**能量**及**波长**分布不同。

2、描述热辐射的基本物理量

1) 光谱辐射度（也称单色辐射本领）

单位时间内从物体单位表面辐射出的波长在 λ 附近单位波长间隔内的电磁波的能量。用 $M_\lambda(T)$ 或 $M_\nu(T)$ 表示。

$M_\lambda(T)$ 与 T 、 $\lambda(\nu)$ 、物质种类、表面情况 有关

2) 总辐出度（总辐射本领）

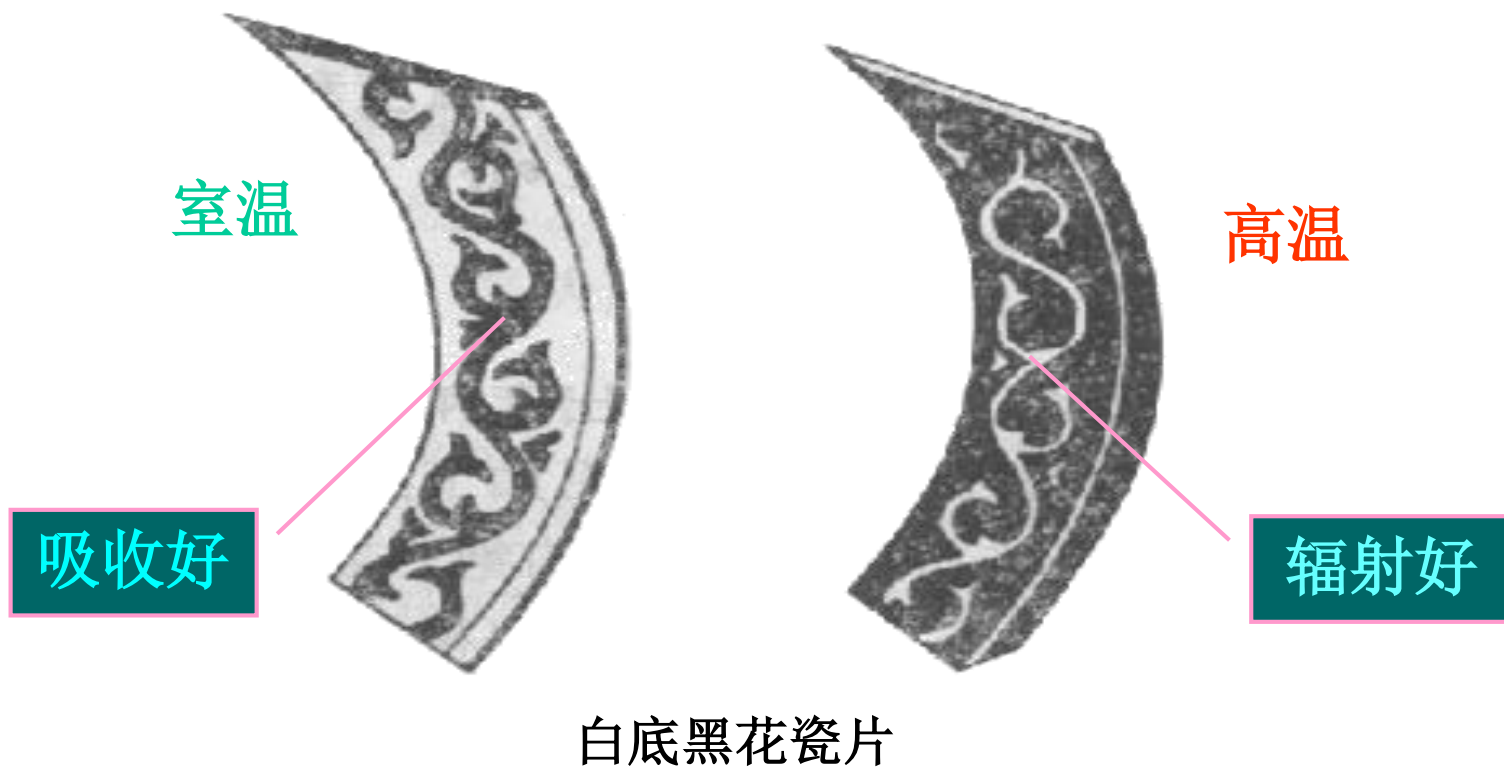
单位时间内从物体单位表面辐射出的各种波长的电磁波的能量总和。用 $M(T)$ 表示。

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

单位： W/m^2

二、平衡热辐射

加热一物体，物体所**吸收**的能量**等于**在同一时间内**辐射**的能量，物体的温度不再变化，此时物体的热辐射称为**平衡热辐射**



好的辐射体一定也是好的吸收体

三、黑体 ----研究热辐射的理想模型

黑体： 可吸收全部到达它表面的电磁辐射

- 在各种材料中 黑体的光谱辐射度最大

黑体是吸收（辐射）能力最强的物体。

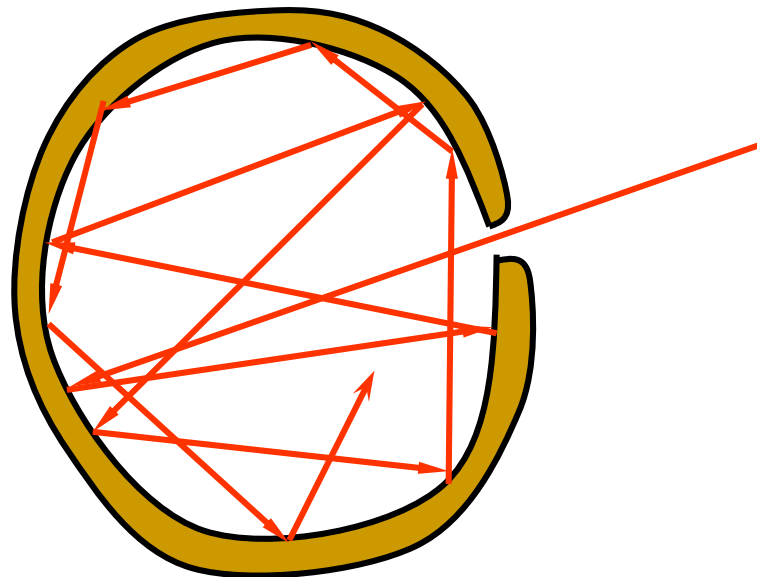
1859年 基耳霍夫证明：

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

维恩设计的黑体

不透明介质空腔开一小孔，小孔面积远小于空腔内表面积，电磁波射入小孔后，很难再从小孔中射出，几乎全被吸收。

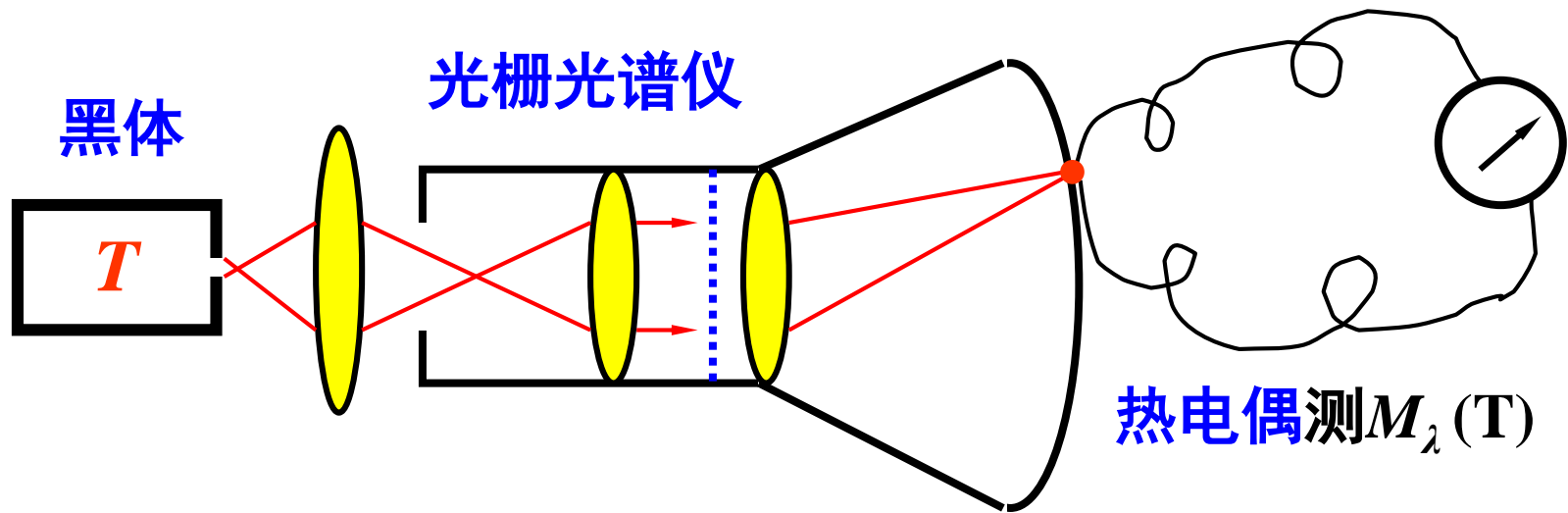
小孔能完全吸收各种频率的入射电磁波，**是黑体**。



远处打开的窗子
近似黑体



四、黑体辐射的实验规律



测量黑体辐射谱 ($M_\lambda \sim \lambda$ 关系) 的实验装置

对黑体加热 → 热辐射发射电磁波

用光栅分光把辐射按频段分开

用热电偶测各频段辐射强度，得 $M_\lambda(T)$

1、维恩位移定律

$$T \uparrow \rightarrow \lambda_m \downarrow$$

$$\lambda_m \cdot T = b$$

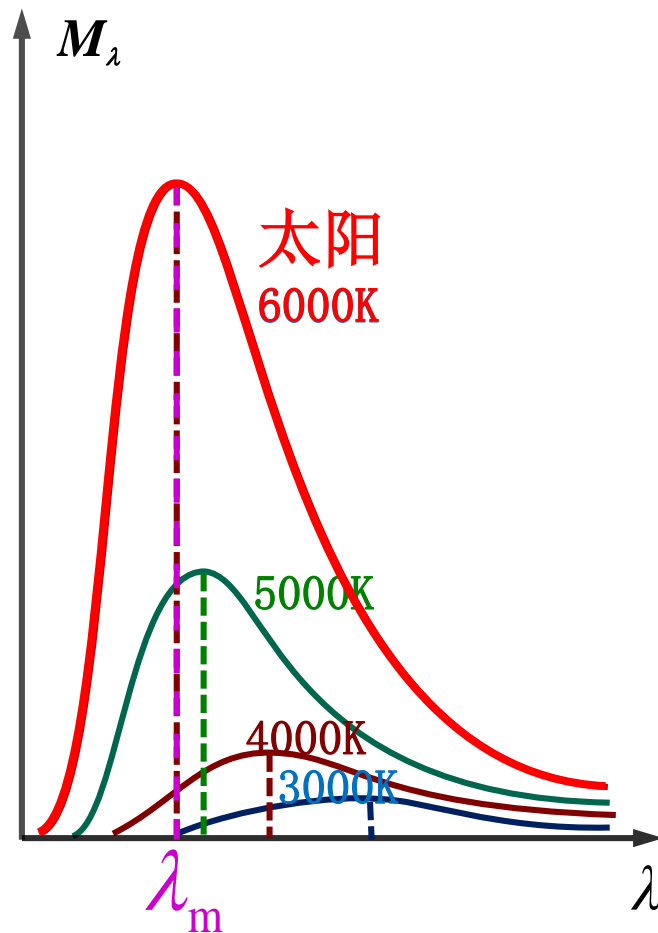
$$b = 2.897756 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$

2、斯特藩 - 玻耳兹曼定律

$$M(T) = \sigma T^4$$

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

高温测量、遥感和红外追踪等技术的物理基础



每条曲线有一极值波长 λ_m

曲线与横轴围的面积就是总辐出度 $M(T)$

五、黑体辐射的实验规律

为了从理论上找到符合实验结果的 $M_\nu(T)$ 函数式，理论物理学家做了艰苦的努力。

1. 维恩公式

1896年维恩从经典热力学理论及实验数据分析得出

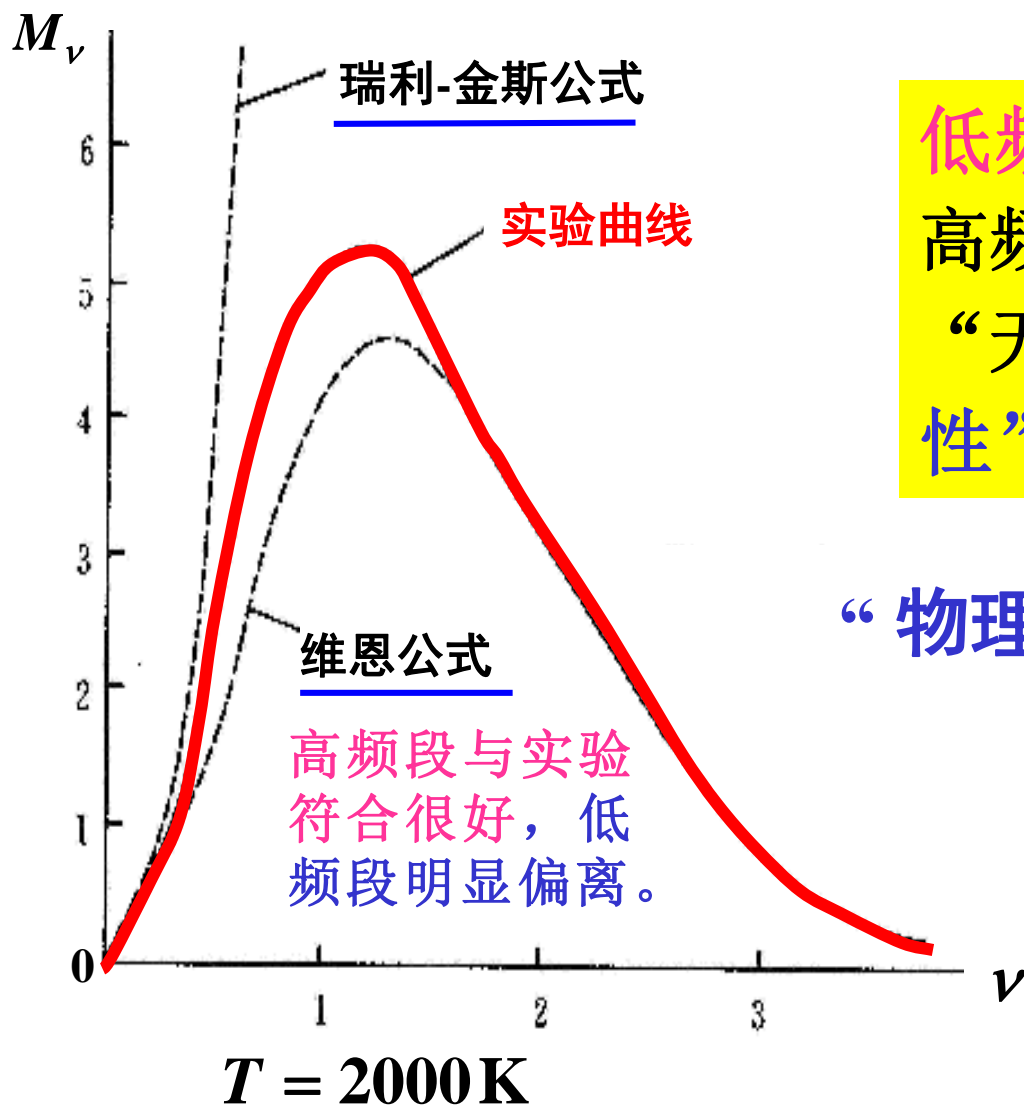
$$M_\nu(T) = \alpha \nu^3 e^{-\beta \nu / T}$$

$\alpha \beta$ 为常数

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

$$M_\nu(T) = \frac{2\pi \nu^2}{c^2} kT$$
$$k = 1.38066 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$$



低频段与实验符合较好，
高频段的单色辐射本领趋于
“无限大”，出现“灾难
性”偏离——“紫外灾难”

“物理学晴空中的一朵乌云!”

符号实验曲线的函数式 $M_\nu(T) = ?$

六、普朗克的能量子假说和黑体辐射公式

1. 黑体辐射公式

1900年10月，普朗克利用数学上的内插法，把适用于高频的维恩公式和适用于低频的瑞利—金斯公式衔接起来，得到一个半经验公式，即普朗克黑体辐射公式：

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

$$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

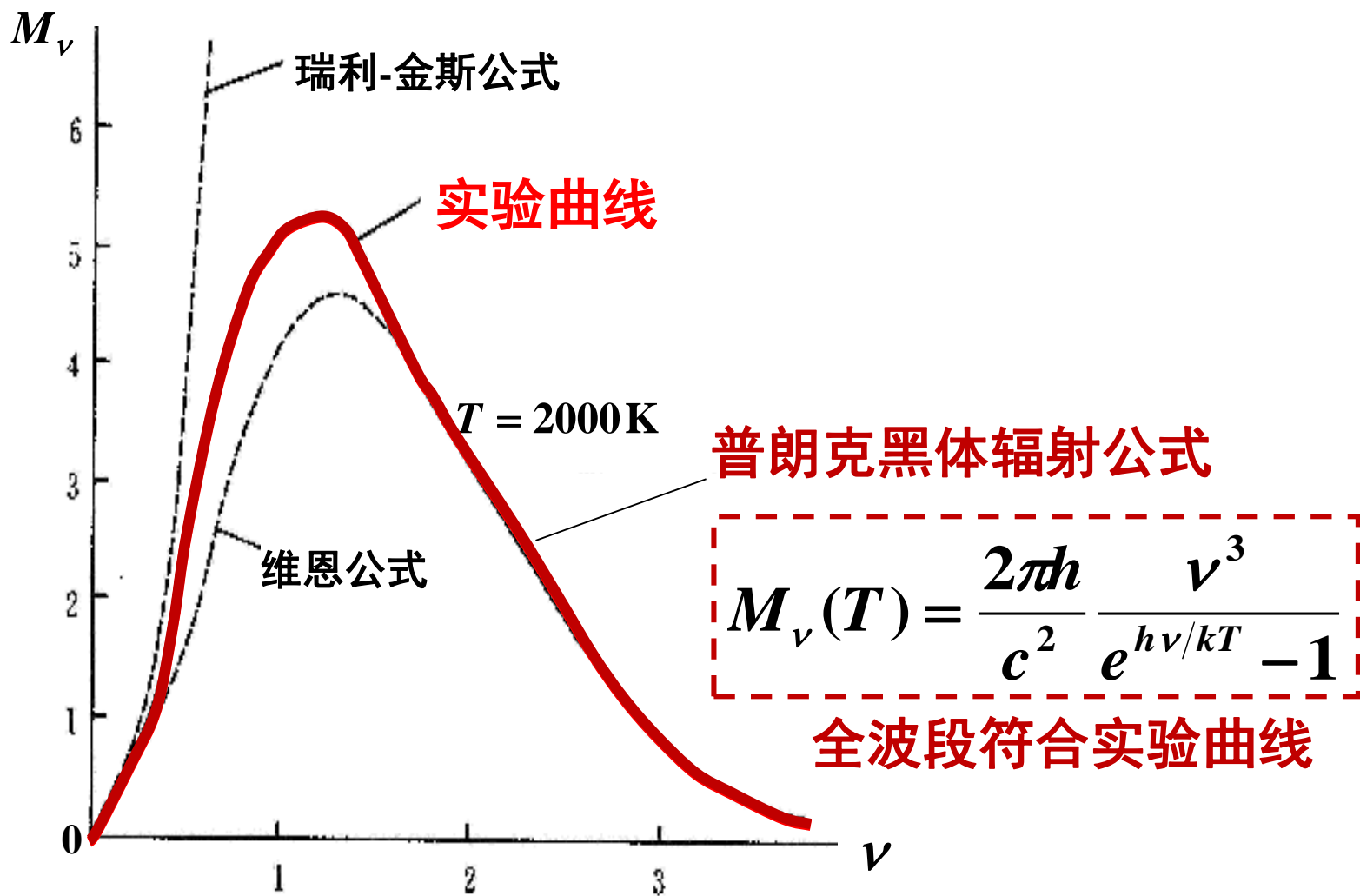


M. Planck

德国人

1858—1947

实验物理学家鲁本斯（Rubens）把它同实验结果比较，发现：在全波段与实验结果惊人地符合！



2. 普朗克的能量子假设

普朗克不满足“侥幸猜到”的半经验公式，要“不惜任何代价”地去揭示真正的物理意义。

普朗克认为：黑体的分子和原子可看做线性谐振子；这些谐振子振动时向外辐射能量（也可吸收能量）。

- 普朗克能量子假设：谐振子的能量不连续，只能是（与振子频率 ν 成正比的）最小能量 $\varepsilon = h\nu$ 的整数倍：

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

即谐振子的能量是量子化的

- 物体发射或吸收电磁辐射时，交换能量的最小单位：能量子： $\varepsilon = h\nu$ ， $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J s}$ ----普朗克常数

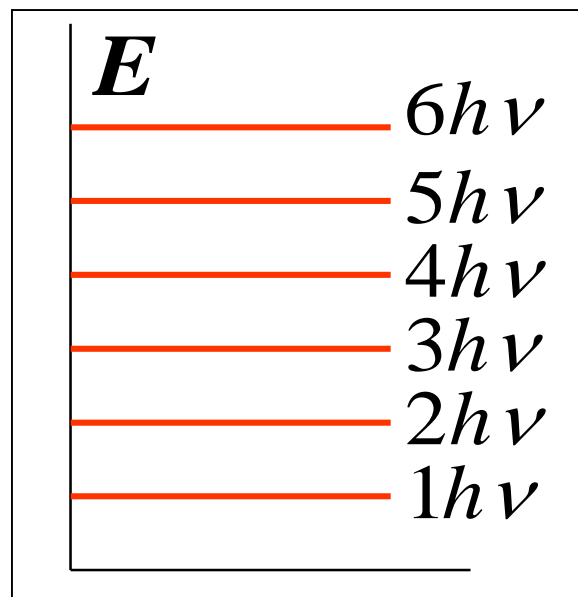
在这一假说基础上，再运用经典的统计物理方法，普朗克得出黑体辐射公式。

3、普朗克能量量子假说的意义

普朗克的能量量子假说打破了“一切自然过程能量都是连续的”经典理论。这不仅成功地解决了热辐射中的难题，而且标志着人类对自然规律的认识已经从宏观领域进入微观领域，能量子概念的提出标志了量子力学的诞生，普朗克为此获得1918年诺贝尔物理学奖。

普朗克常数 h ，是最基本的自然界常数之一，体现了微观世界的基本特征。

为什么在宏观世界中观察不到能量分立的现象？



例：质量为 $m = 1 \text{ g}$ 的小珠子挂在轻弹簧下面作振幅 $A = 1 \text{ mm}$ 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？

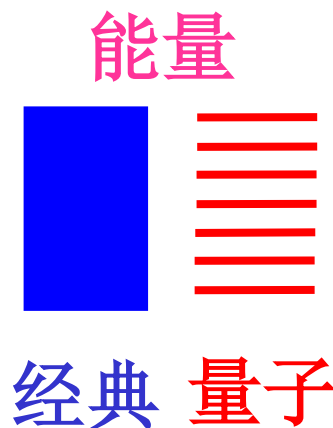
解：弹簧振子的频率 $\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{6.28} \sqrt{\frac{0.1}{10^{-3}}} = 1.59 \text{ s}^{-1}$

能级间隔 $\Delta E = h\nu = 6.626 \times 10^{-34} \times 1.59 = 1.05 \times 10^{-33} \text{ J}$

振子能量 $E = \frac{1}{2} k A^2 = \frac{1}{2} \times 0.1 \times 10^{-6} = 5 \times 10^{-8} \text{ J}$

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

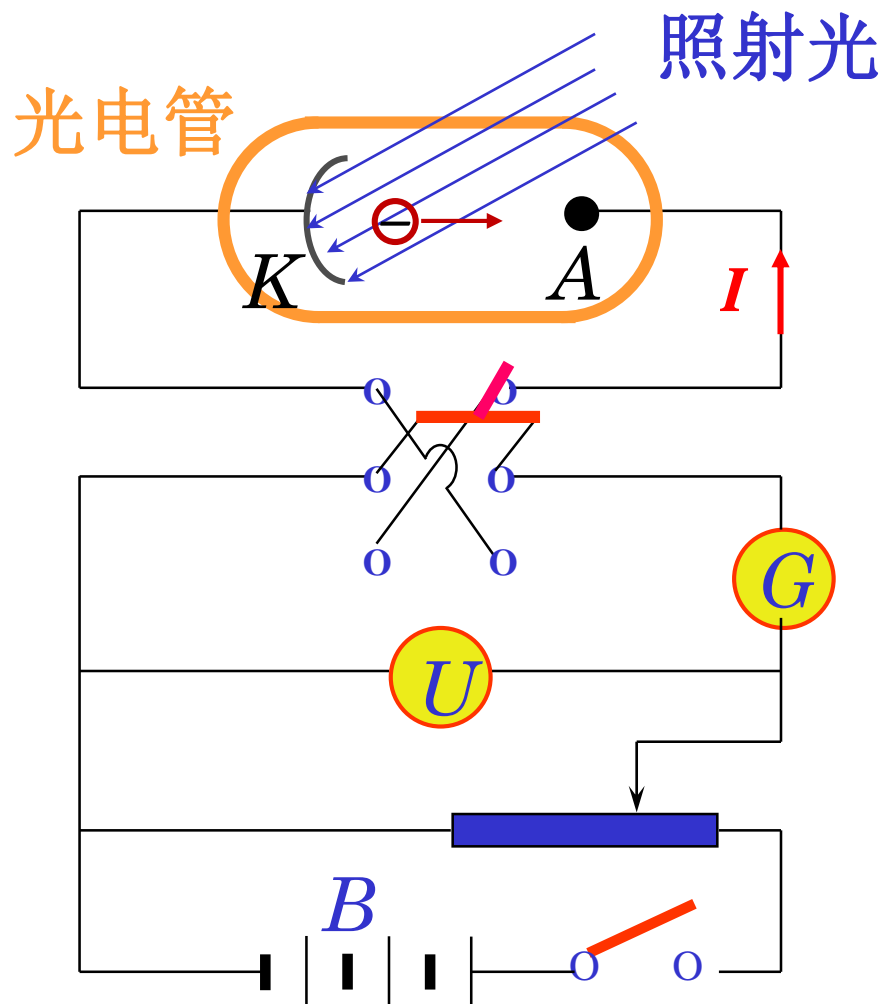
现在的技术还不能测量出这样小的相对能量变化。所以宏观的能量变化看起来都是连续的。



§ 2 光电效应 爱因斯坦的光量子论

光照射下某些金属表面逸出电子的现象叫**光电效应**。所逸出的电子叫**光电子**，由光电子形成的电流叫**光电流**，使电子逸出某种金属表面所需的功称为该种金属的**逸出功**。

• 不加电压，也有光电流，说明光电子有**初动能**



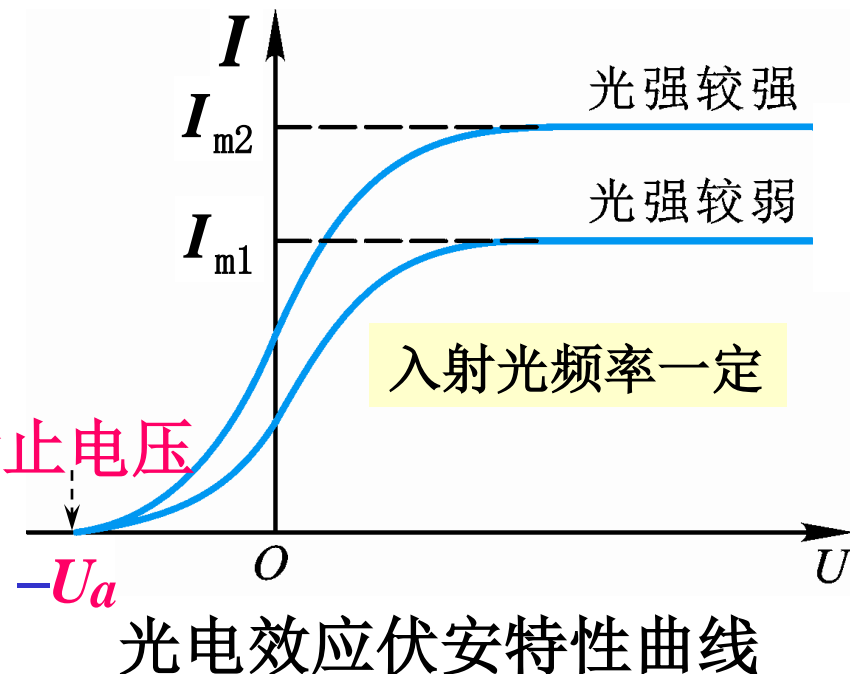
改变加速电压？ 改变照射光强度、频率？

一、光电效应的实验规律

1. 饱和光电流 I_m

加速电压增大时光电流增大，加速电压增大到一定值时光电流达到饱和。

$$I_m \propto \text{入射光强度}$$

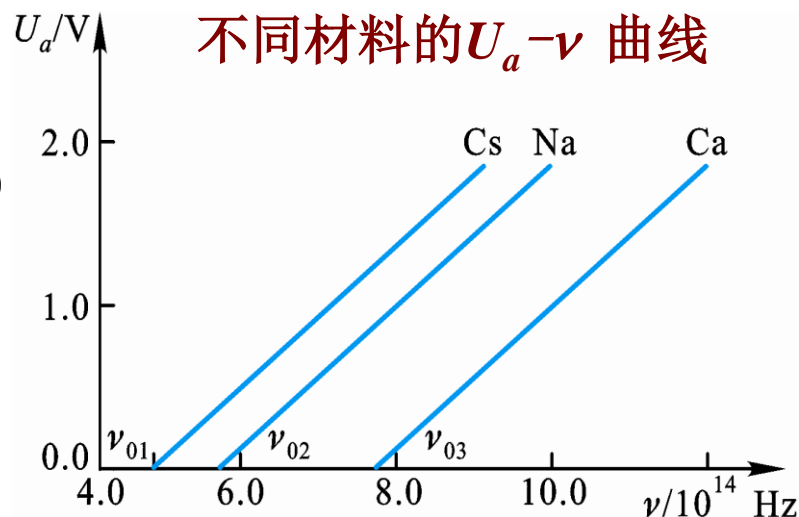


2. 截止电压 U_a

截止电压与照射光强无关，
与频率成正比： $U_a = K(\nu - \nu_0)$

光电子的最大初动能

$$\frac{1}{2}mv_m^2 = eU_a = eK(\nu - \nu_0)$$



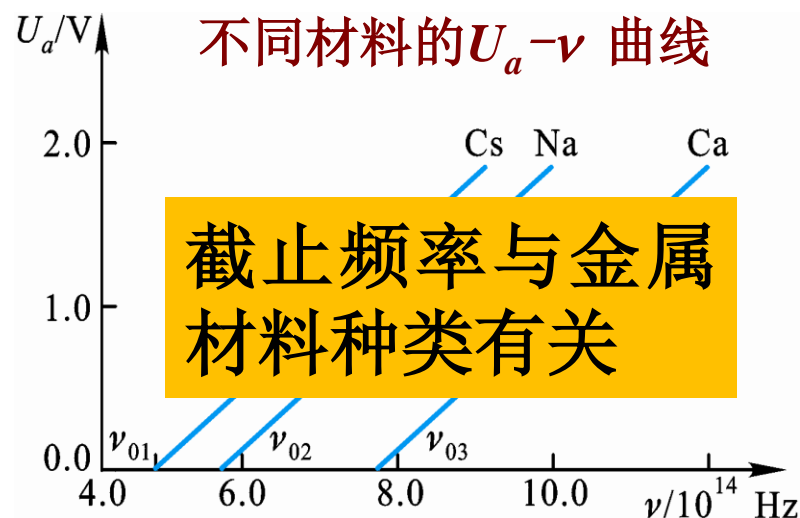
3. 红限频率 ν_0

当入射光的频率小于 ν_0 时，不管照射光的强度多大，不会产生光电效应。

$$\frac{1}{2}mv_m^2 = eU_a = eK(\nu - \nu_0)$$

光电子的最大初动能 $\propto \nu_{\text{照}}$ ，而与入射光强无关

4. **瞬时性**：光电子在光照射的**瞬间**可逸出，**驰豫时间**不超过 10^{-9} s。



二、波动理论所遇到的困难

波动理论：金属在光的照射下,其中的电子吸收光波的能量 I_{photon} ,克服逸出功 A 以**初动能**逸出金属表面。

$$\frac{1}{2} m v_m^2 + A = I_{\text{photon}}$$

光的波动理论

● **初动能与光强有关**

● **无红限**

不论什么频率,只要光足够强,总可连续供给电子足够的能量而逸出。

● **响应快慢取决光强**

光强越弱,电子从连续光波中吸收并累积能量到逸出所需的时间越长。

光电效应实验规律

● **初动能与光强无关**

● **有红限**

● **瞬时响应**

只要 $\nu > \nu_0$ 不论光强多弱,几乎同时观察到光电效应。
(小于 10^{-9} s)

三、 爱因斯坦的光量子论

普朗克假设只涉及发射或吸收, 未涉及电磁辐射在空间的传播。是不协调的。

1、 爱因斯坦光子假说（1905年）

- 电磁辐射由以光速运动的、局限于空间某一小范围的**光量子（光子）**组成，频率为 ν 的光的一个**光子的能量**为 $\varepsilon = h\nu$
- 光量子具有“**整体性**”：一个光子只能整个地被电子吸收或放出。

光的发射、传播、吸收都是量子化的！

2. 爱因斯坦光电效应方程

一个光子将全部能量交给一个电子，电子用此克服金属对它的束缚，从金属中逸出。

$$eU_a = \frac{1}{2}mv_m^2 = h\nu - A$$

爱因斯坦光电效应方程

3. 对光电效应的解释

(1) 截止电压或最大初动能与频率成正比，与光强无关

(2) 若 $\nu < A/h$ ，不发生光电效应

红限频率

$$\nu_0 = \frac{A}{h}$$

•一束光就是一束以速率 c 运动的光子流。单位时间打到单位面积上的粒子总能量即**光强**

$$I = N h \nu \quad N \text{ 粒子流密度}$$

$I \uparrow \rightarrow$ 光子数 $N \uparrow \rightarrow$ 打出光电子多 $\rightarrow i_m \uparrow$

在确定的光强下 $I = N h \nu$

能够打出的最大电子数就是 $N \rightarrow$ **饱和电流**

(3) 饱和电流强度与光强成正比

(4) 若 $\nu > \nu_0$ ，一个光子的能量 $h\nu$ 将一次性被一个电子吸收，电子瞬时逸出。 (**瞬时性**)

光量子假设解释了光电效应的全部实验规律！

1916年密立根（R.A.Milikan）做了精确的光电效应实验，进一步证实了爱因斯坦的光子理论。



1879 — 1955

爱因斯坦由于对光电效应的理论解释和对理论物理学的贡献，获得1921年诺贝尔物理学奖



1868 — 1953

密立根由于研究基本电荷和光电效应，特别是通过著名的油滴实验，证明电荷有最小单位，获得1923年诺贝尔物理学奖

四、光子的性质

能量

$$E = h\nu$$

质量

$$\because E = mc^2 \quad \therefore m = \frac{h\nu}{c^2}$$

有限确定值

$$\text{又} \begin{cases} m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \\ v = c \end{cases}$$

$$m = \frac{P}{c}$$

则 光子的静止质量 $m_0 = 0$

$$\text{动量} \quad P = mc = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

$$P = \frac{h}{\lambda}$$

五、光的波粒二象性

1. 近代认为**光具有波粒二象性**

一些情况下 突出显示**波动性**

一些情况下 突出显示**粒子性**

2. 基本关系式

粒子性： 能量 E 动量 P

波动性： 波长 λ 频率 ν

$$E = h \nu \quad P = \frac{h}{\lambda}$$

光的波动性和粒子性通过**普朗克常数**联系在一起

小 结

• 黑体辐射 普朗克能量量子假说

- 黑体 黑体辐射
- 斯忒藩—玻耳兹曼定律 维恩位移定律
- 黑体辐射的瑞利—金斯公式 经典物理的困难
- 普朗克假说 普朗克黑体辐射公式

• 光电效应 光的波粒二象性

- 光电效应的实验规律 光子 爱因斯坦方程
- 光电效应的应用 光的波粒二象性

光电效应的常用公式小结:

$$h\nu = \frac{1}{2}m\nu^2 + A$$

逸出功:

$$A = h\nu_0 = \frac{hc}{\lambda_0}$$

$$\frac{1}{2}m\nu^2 = eU_a$$

$$E = h\nu$$

$$P = \frac{h}{\lambda}$$

课堂练习

波长 $\lambda = 3000 \text{ \AA}$ 的紫外线照射某金属表面，光电子能量范围从0到 $4.0 \times 10^{-19} \text{ J}$ ，其遏止电压 $|U_a| = \text{---} \text{ V}$ ，金属红限频率 $\nu_0 = \text{---}$

思考答案

$$\frac{1}{2} m v_{\max}^2 = e |U_a| = 4.0 \times 10^{-19} \text{ J} \quad \longrightarrow \quad |U_a| = 2.5 \text{ V}$$

$$A = h \nu - \frac{1}{2} m v_{\max}^2 = 2.63 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$\nu_0 = \frac{A}{h} = \frac{2.63 \times 10^{-19}}{6.63 \times 10^{-34}} = 4 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

例：已知铯的逸出功 $A = 1.9 \text{ eV}$ ，用钠黄光 $\lambda = 589.3 \text{ nm}$ 照射铯。计算：（1）黄光光子的能量、质量和动量；（2）铯在光电效应中释放的光电子的动能；（3）铯的遏止电压、红限频率。

解：（1） $E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = 3.4 \times 10^{-19} \text{ J}$

$$m = \frac{h\nu}{c^2} = 3.8 \times 10^{-36} \text{ kg}$$

$$p = \frac{h\nu}{c} = 1.1 \times 10^{-27} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

$$\text{(2)} \quad E_k = \frac{m_e v^2}{2} = h\nu - A = 0.36 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$\text{(3)} \quad U_a = E_k / e = 0.225 \text{ V} \quad \nu_0 = \frac{A}{h} = 4.6 \times 10^{14} \text{ Hz}$$