

第15章

量子物理基础

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。人们生活在宏观世界中，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。1900年普朗克为了解释实验和理论之间的矛盾。提出：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，它们的发生是跃变的。这个思想就象一把金钥匙，打开了微观世界的大门，普朗克的能量假设对经典物理是一个巨大的突破，由此量子物理诞生。

1918年，普朗克因为对量子理论的贡献而获得诺贝尔奖。

1905年，爱因斯坦从普朗克能量量子假说中得到重要的启示，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。

1913年，玻尔将量子的思想应用于原子有核模型，提出玻尔氢原子理论，成功的解释了氢原子光谱的实验规律。

1924年，德布罗意在光的波粒二象性的启发下，提出微观粒子也具有波粒二象性，并提出物质波假说。

1926年，薛定谔提出波动力学，后来与海森堡、波恩的矩阵力学统一为量子力学。

量子力学的建立揭示了微观世界的基本规律，使人们对自然的认识产生了一次飞跃。应用到固体物理领域，促进了固体材料、激光、半导体和超导的研究。

§ 15.1 热辐射 普朗克能量量子假设

一. 热辐射现象

热辐射：任何物体在任何温度下都在发射各种波长的电磁波，这种发射电磁波的现象称为**热辐射**。

（物体中的原子或分子受到热激发）
相应的能量称为**辐射能**

热辐射的一般特征：

(1) 物体的温度升高，辐射能量增加；

(2) 物体辐射能量的同时，还吸收周围能量。

物体辐射本领越大，其吸收本领也越大。

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

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**。

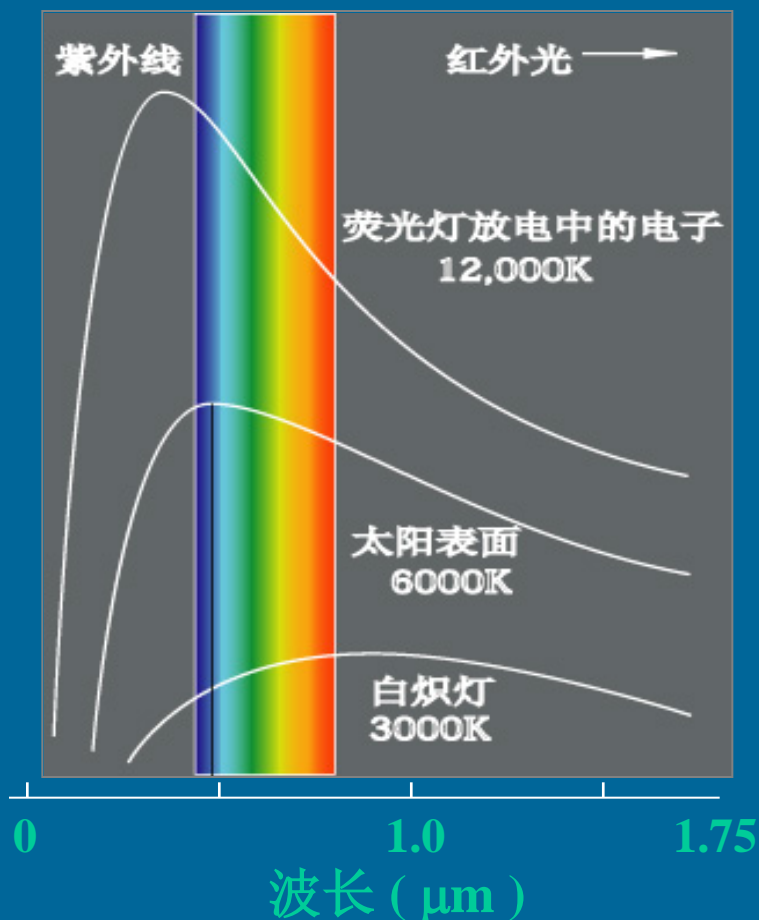
(3) 热辐射具有连续的辐射能谱，波长自远红外区延伸到紫外区。辐射能按波长分布情况与温度有关。

为了描述物体热辐射按波长的分布规律，引入以下物理量

1 单色辐射出射度（单色辐出度）：一定温度 T 下，物体单位面元在单位时间内发射的波长在 $\lambda \sim \lambda + d\lambda$ 内的辐射能 dM_λ 与波长间隔 $d\lambda$ 的比值

$$M_\lambda(T) = \frac{dM_\lambda}{d\lambda}$$

单色辐出度



① 对于给定物体，在一定温度下，单色辐出度 $M_\lambda(T)$ 随辐射波长 λ 而变化；温度升高，单色辐出度增大。

——单色辐出度是温度 T 和波长 λ 的函数

② $M_\lambda(T)$ 与物体的材料及表面情况等也有关系

2 辐出度：物体（温度 T ）单位面元在单位时间内发射的辐射能

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

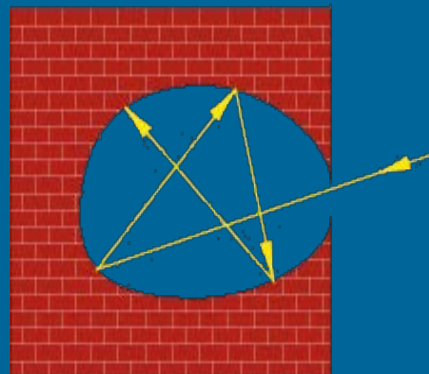
注：温度越高，辐出度越大。另外，辐出度还与材料性质有关。

二. 黑体辐射

绝对黑体(简称黑体): 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%

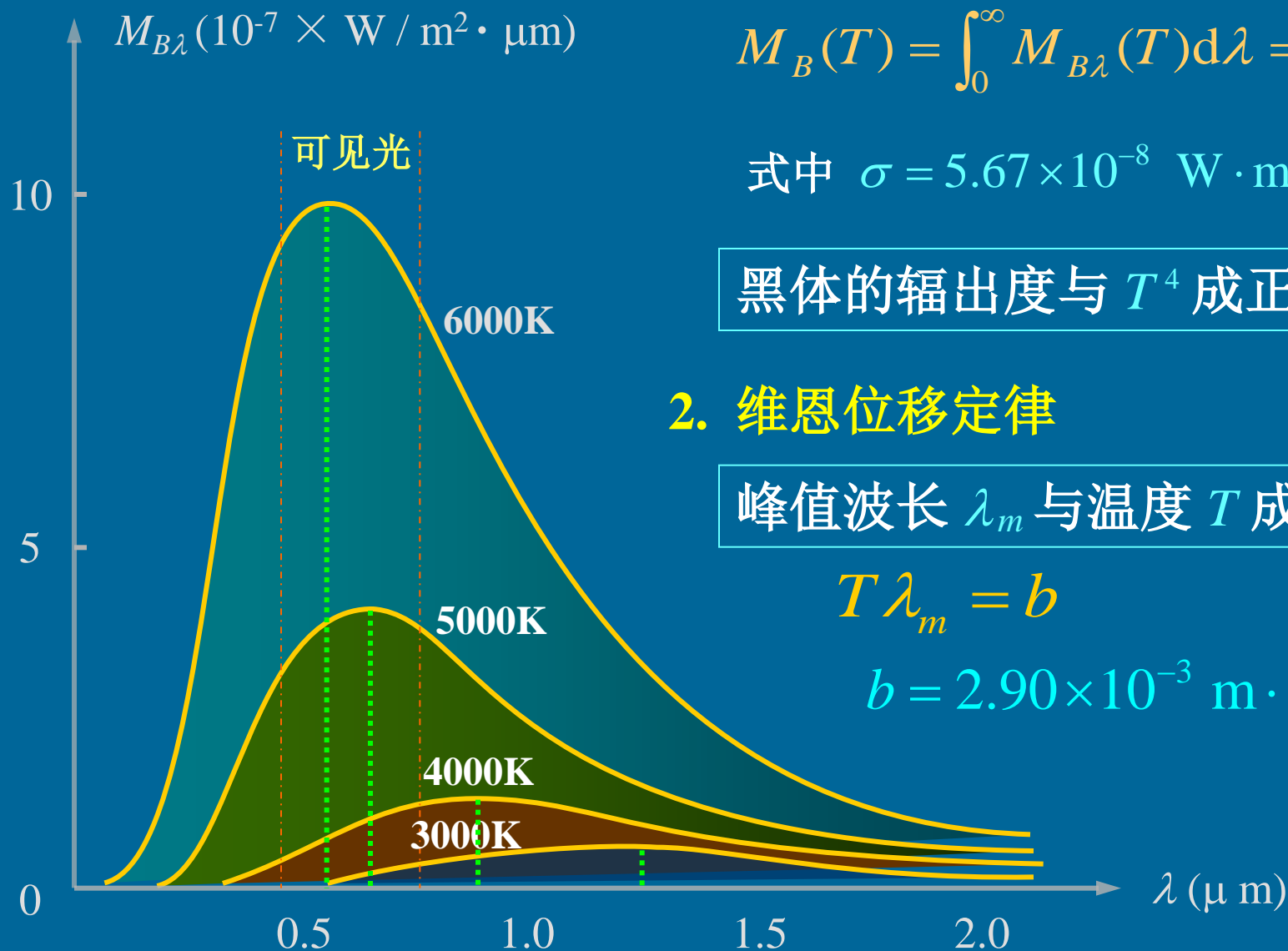


黑体模型

黑体辐射的特点：

- 黑体的单色辐出度仅于 λ 、 T 有关，与表面状况和材料无关
- 与同温度其它物体的热辐射相比，黑体热辐射本领最强
- 黑体只是一个理想模型，在自然界并不存在。实际中用上面的模型作为黑体

绝对黑体的辐射定律



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

黑体的辐出度与 T^4 成正比.

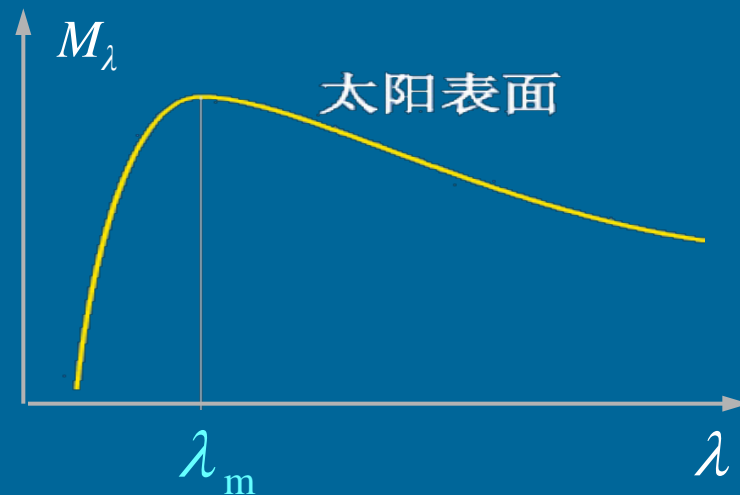
2. 维恩位移定律

峰值波长 λ_m 与温度 T 成反比

$$T \lambda_m = b$$

$$b = 2.90 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$

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

$$T_s = \frac{2.9 \times 10^{-3}}{\lambda_m} = \frac{2.9 \times 10^{-3}}{0.47 \times 10^{-6}} = 6166 \text{ K}$$

辐出度

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

三. 经典物理的解释及普朗克公式

经典理论的困难

前面给出 $M_{B\lambda} \sim \lambda, T$ 的关系曲线都是实验的结果, 如何从理论上写出符合实际曲线的函数式 $M_{B\lambda} = f(\lambda, T)$?

许多物理学家在经典物理理论的基础上做了大量的工作, 但所推导的公式和实验结果不完全相符, 其中最典型的有2个。

①瑞利—金斯公式(红外公式)

$$M_{B\lambda}(T) = C_1 \lambda^{-4} T$$

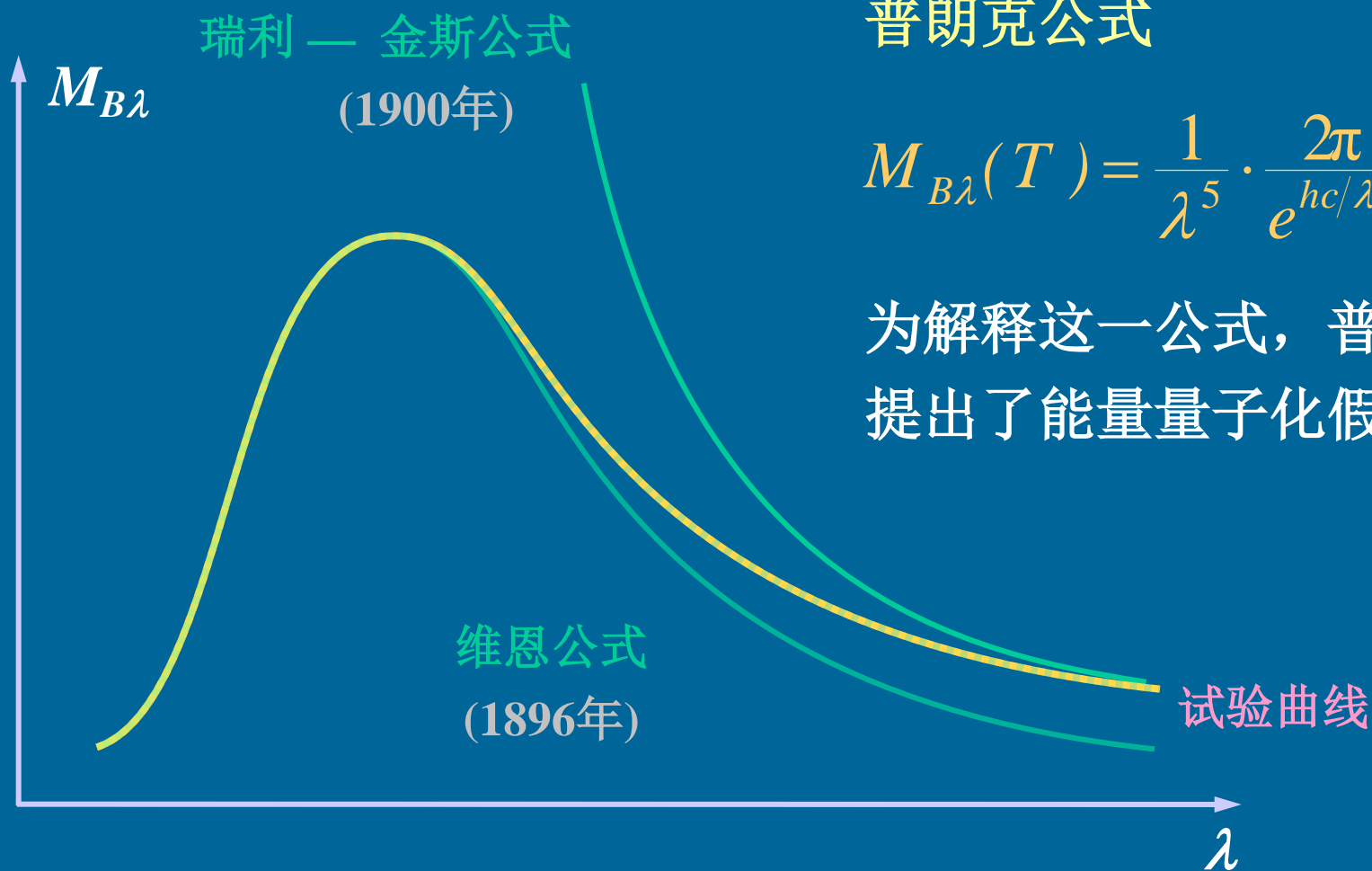
此公式在长波波段和实际符合, 在短波波段不符。
物理学上称为紫外区的灾难。

②维恩公式(紫外公式)

$$M_{B\lambda}(T) = C_2 \lambda^{-5} e^{-\frac{C_3}{\lambda T}}$$

此公式在短波波段和实验相符, 在长波波段和实验不符。

1900年，德国物理学家普朗克提出了普朗克公式，和实验结果完全符合，而且在短波波段能推导出维恩公式，在长波波段能推导出瑞利—金斯公式。



普朗克公式

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

为解释这一公式，普朗克提出了能量量子化假设。

四. 普朗克能量量子假设

① 辐射物质中的分子、原子可视作谐振子，谐振子振动时向外辐射电磁波，每个谐振子发出一条单色谱线，全部谐振子发出连续的辐射谱；

② 每个谐振子只能处于某些分立状态，其能量的取值是不连续的，在这些状态中，相应的能量只能取某一个最少能量 ε 的整数倍。

$$0, \varepsilon, 2\varepsilon, \dots n\varepsilon \dots$$

③ ε — 能量子

对频率为 ν 的谐振子：

$$\varepsilon = h\nu$$

h — 普朗克常量 $6.63 \times 10^{-34} J \cdot s$

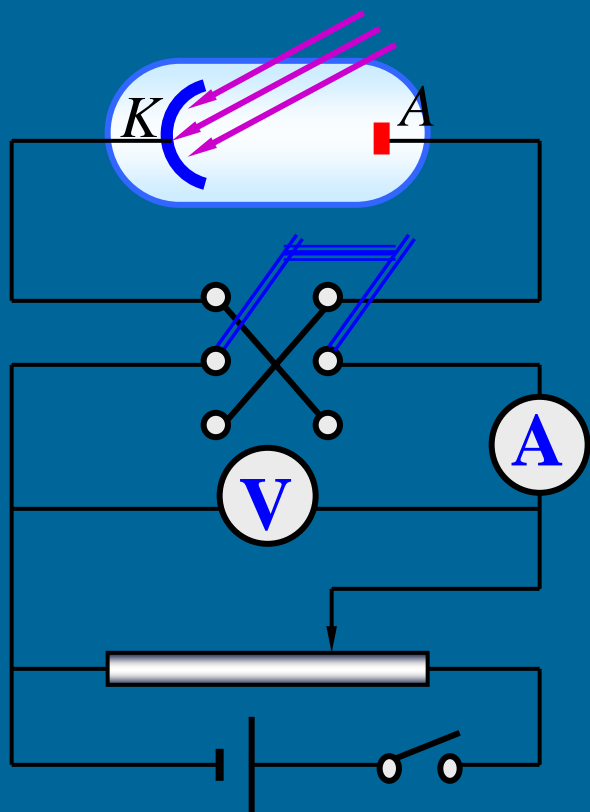
谐振子的状态发生变化时，辐射或吸收能量只能是 ε 的整数倍

说明

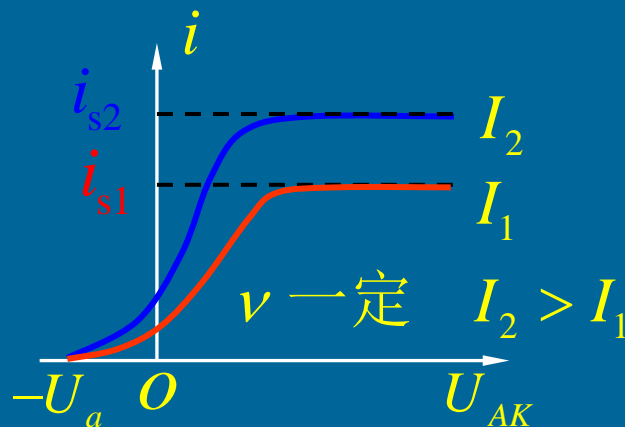
首次提出微观粒子的能量是量子化的，
打破了经典物理学中能量连续的观念。

§ 15.2 光电效应 爱因斯坦光子假说

一. 光电效应的实验规律 光电效应：金属及其化合物在光照射下发射电子的现象。

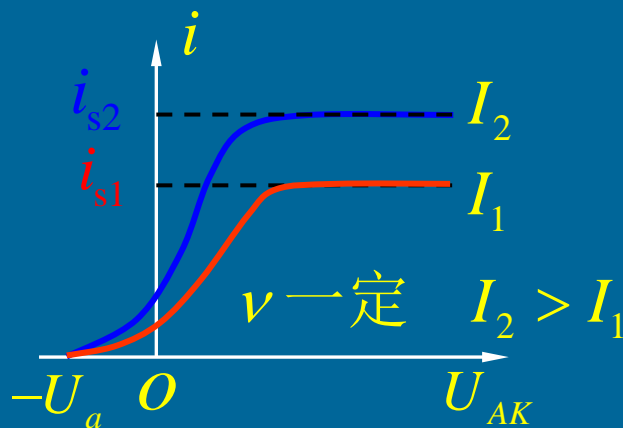


如图一个抽成真空的玻璃泡内装有金属电极A(阳极) K(阴极)。当适当频率的光照射阴极K时有光电子从K表面溢出，给AK两端加上电压 U_{AK} 光电子被加速形成光电流。(如图) U_{AK} 增大，光电流*i*随之增大，而后趋于饱和电流 i_s



① 阴极 K 在单位时间内发射的光电子总数与照射光的光强 I 成正比

(饱和电流 $i_s \propto$ 单位时间发射的光电子数 \propto 光强 I) ;



在保持光照射不变的情况下，当 $U_{AK} = 0$ 时，仍有电流，使 $U_{AK} < 0$ ，当反向 U_{AK} 增大到一定值时，光电流才降为零，此时的 $|U_{AK}|$ 称为遏止电压，用 U_a 表示：

遏止电压 U_a 与光强 I 无关。

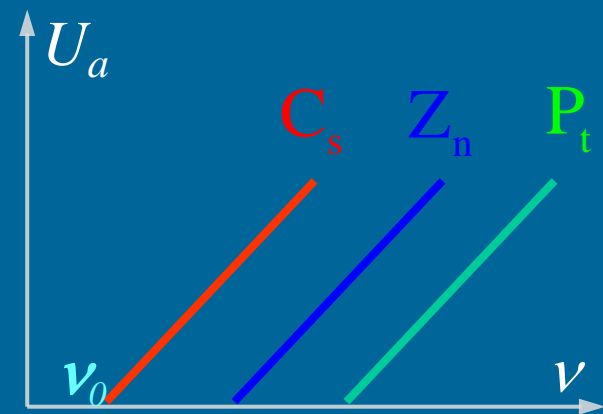
② 存在红限，即当照射光频率 ν 小于某个最小值 ν_0 时，不管光强多大，照射时间多长，都没有光电子逸出， ν_0 称为截止频率（也称红限，常用 λ_0 表示）；

③ 光电子的最大初动能与照射光的强度无关，而与频率成线性关系。

$$\frac{1}{2}mv_m^2 = eU_a \quad U_a \text{ 与 } I \text{ 无关}$$

实验表明：遏止电压 U_a 与照射频率 ν 成线性关系

$$U_a = K(\nu - \nu_0)$$



遏止电压与频率关系曲线

K 是与材料性质无关的普适恒量

④ 光电子是即时发射的，滞后时间不超过 10^{-9} 秒。

二. 经典物理与实验规律的矛盾

1. 初动能应和入射光强度 I 成正比

入射光强度 I 增强 \Rightarrow 电子获得能量增加 \Rightarrow 电子从金属表面逸出时的动能 $m\boldsymbol{v}^2/2$ 增加。但实验指出 $m\boldsymbol{v}^2/2$ 与 I 无关。

2. 光电子的产生应与入射光频率 ν 无关

只要入射光强度 I 足够大， e 获得的能量大于逸出功 A ，光电子就可以逸出。

但实验指出，当入射光频率小于截止频率 ν_0 时，无论 I 多大，照射的时间多长，也不会发生光电效应。

3. 光电子的产生应与光照时间有关

若入射光强度 I 较小，但照射时间长，能量积累的时间长，金属中的电子从入射光波中吸收的能量积累到大于逸出功 A 时，才可释放出来。

但实验指出，只需 $\nu > \nu_0$ ，无论入射光强多弱，光电子立即逸出。

三. 爱因斯坦光子假说

1905年爱因斯坦提出光子理论，成功地解释了光电效应。

- ① 光是以 c 运动的粒子流，这些粒子称为光子；
- ② 每个光子具有能量 $\varepsilon = h\nu$ ，不同频率 ν 的光子，具有不同的能量，频率越高，能量越大；
- ③ 光的强度决定于单位时间内通过垂直单位面积的光子的数目 N ，即： $I = Nh\nu$

四. 光电效应方程

入射光照射到金属表面上，金属内一个电子吸收一个光子的能量后，一部分用来克服逸出功，一部分转为电子的最大初动能，根据能量守恒与转换定律有：

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

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

——爱因斯坦光电效应方程

由爱因斯坦的光子理论解释光电效应实验规律：

1. 饱和电流 $i_s \propto$ 光强 I

由 $I = Nh\nu$ 知， ν 一定、光强 I 越强， N 越大，到达阴极的光子越多，则逸出的光电子越多。 $\Rightarrow i_s$ 越大。

2. 方程中，若 $\frac{1}{2}mv_m^2 = 0$ 时，光子所具有的能量全部交给电子，克服逸出功，电子才有可能脱离金属表面，即存在红限。 $h\nu_0 = A \Rightarrow \nu_0 = A/h$

3. 光电子最大初动能和光频率 ν 成线性关系。

4. 光照在金属上，电子吸收一个光子即可逸出，不需要长时间的能量积累，即光电效应的发生是瞬时的。

五. 光的波粒二象性

光的干涉、衍射等现象支持光的波动说，光电效应的实验结果却与波动说存在着深刻的矛盾。实验表明光既具有波动性又具有粒子性，即具有**波粒二象性**

光子能量

$$E = m_{\varphi} c^2 = h\nu$$

光子质量

$$m_{\varphi} = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{c\lambda}$$

光子动量

$$p = m_{\varphi} c = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

上面两式将粒子性参量 m_{φ} p 和波动性参量 λ ν 联系起来

六. 光电效应的应用

光电成像器件能将可见或不可见的辐射图像转换或增强成为可观察记录、传输、储存的图像。

红外变像管
像增强器

红外辐射图像
微弱光学图像



可见光图像



高亮度可见光学图像



光电倍增管

测量波长在 200~1200 nm 极微弱光的功率

★ 总结

1. 黑体的辐射定律

1) 斯特藩——玻耳兹曼定律（黑体的辐出度与 T^4 成正比）

$$M_B(T) = \sigma T^4 \quad \sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$$

2) 维恩位移定律（峰值波长 λ_m 与温度 T 成反比）

$$T\lambda_m = b \quad b = 2.90 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$

2. 普朗克能量子假设 $\varepsilon = h\nu$

3. 爱因斯坦光子假说 $\varepsilon = h\nu \quad I = Nh\nu$

4. 爱因斯坦光电效应方程 $h\nu = \frac{1}{2}mv_m^2 + A$

5. 光的波粒二象性

光子能量

$$E = m_\phi c^2 = h\nu$$

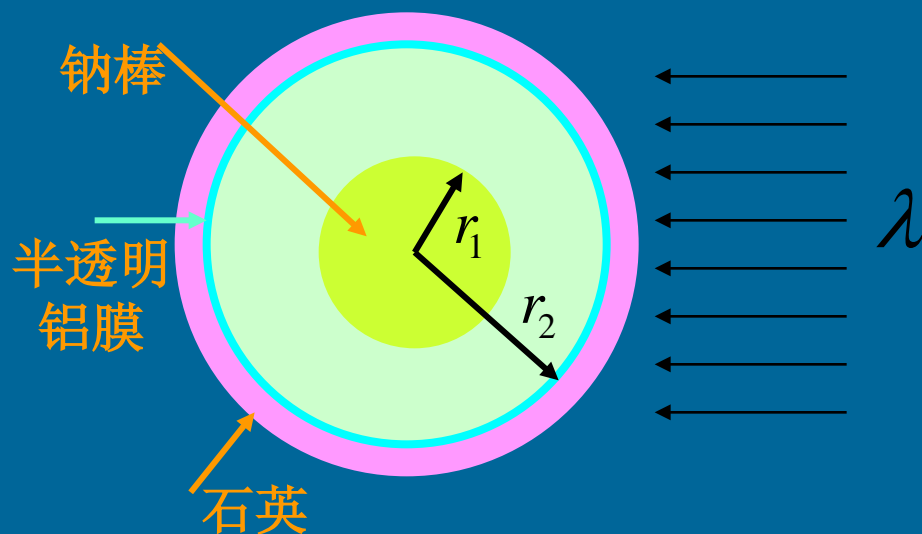
光子质量

$$m_\phi = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{c\lambda}$$

光子动量

$$p = m_\phi c = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

例 一共轴系统的横截面如图所示，外面为石英圆筒，内壁敷上半透明的铝薄膜，内径 $r_2=1\text{cm}$ ，长 20cm ，中间为一圆柱形钠棒，半径 $r_1=0.6\text{cm}$ ，长亦为 20cm ，整个系统置于真空中，今用波长 $\lambda=3000\text{埃}$ 的单色光照射系统，忽略边缘效应。求：平衡时钠棒所带的电量，已知钠的红限波长为 $\lambda_m=5400\text{埃}$ ，铝的红限波长为 $\lambda'_m=2960\text{埃}$ （ $e=1.6\times 10^{-19}\text{C}$ ， $h=6.63\times 10^{-34}\text{J}\cdot\text{s}$ ， $\varepsilon_0=8.85\times 10^{-12}\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$ ）



解 红限波长 $\lambda_m = \frac{c}{\nu_0}$

已知入射光波长

$$\lambda = 3000 \text{ \AA}$$

铝: $\lambda > \lambda_m = 2960 \text{ \AA}$

钠: $\lambda < \lambda_m = 5400 \text{ \AA}$

不能产生光电效应

能产生光电效应

钠在光照下发射光电子，它们的最大初动能

$$\frac{1}{2}mv_m^2 = \frac{hc}{\lambda} - \frac{hc}{\lambda_m} \dots\dots\dots(1)$$

这些光电子聚集在铝膜上，使钠棒和铝膜分别带上正负电荷 Q ，系统达到平衡时，电势差满足下式

$$e\Delta U = \frac{1}{2}mv_m^2 \dots\dots\dots(2)$$

忽略边缘效应，由高斯定理，可求出钠棒与铝膜间的电场

$$E = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 l r} \dots\dots\dots(3)$$

$$\Delta U = \int_{r_1}^{r_2} E dr = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 l} \ln \frac{r_2}{r_1} \dots\dots\dots(4)$$

由 (1) (2) (4) 知 $Q = \frac{2\pi\epsilon_0 l}{e \ln \frac{r_2}{r_1}} \left(\frac{hc}{\lambda} - \frac{hc}{\lambda_m} \right) = 4 \times 10^{-11} C$