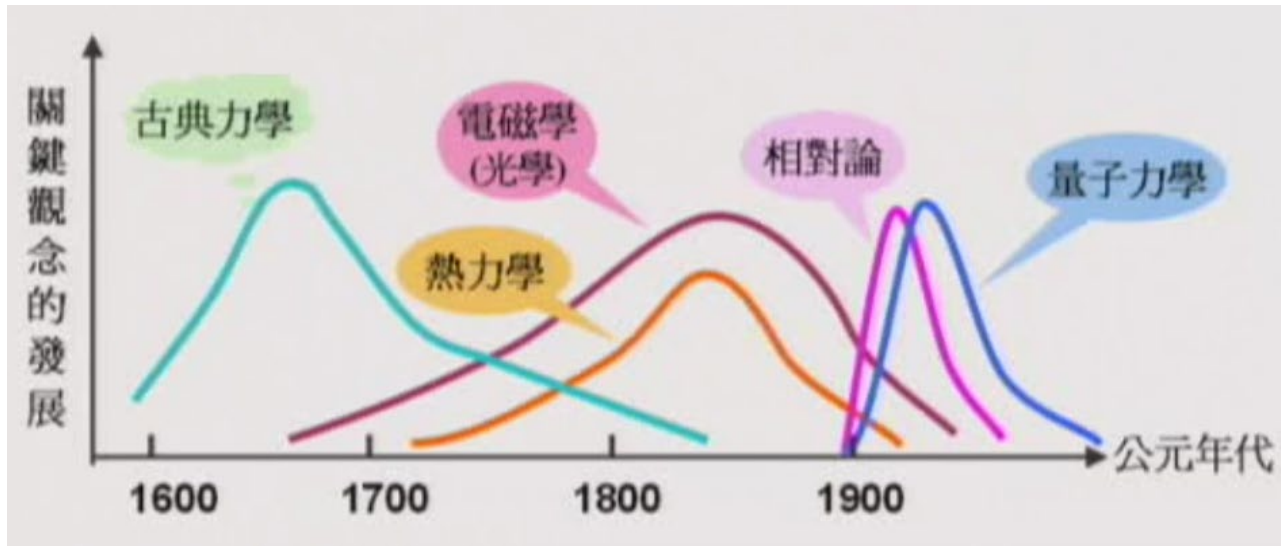


第15章 量子物理基础



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 狄拉克、A.爱因斯坦、
W.K.海森堡、郎之万、W.泡利、普朗克、薛定谔 等

量子物理基础



十九世纪末，经典物理已相当成熟。

在喜悦的气氛中，有两朵小小的令人不安的乌云

★ 寻找以太的零结果

★ 热辐射的紫外灾难

§ 15-1 量子物理学的诞生 普朗克的量子假设

1、热辐射 (heat radiation) 现象

一切有温度的物体都会发光——辐射电磁波。

热辐射的能谱是连续谱，从远红外到紫外。

当物体温度升高，辐射的电磁能量增加；且其中 短波成分 的比例增大。

例如：加热铁，随着物体温度的升高，铁的颜色，由暗红→橙红→黄白→蓝白...



800K



1000K



1200K



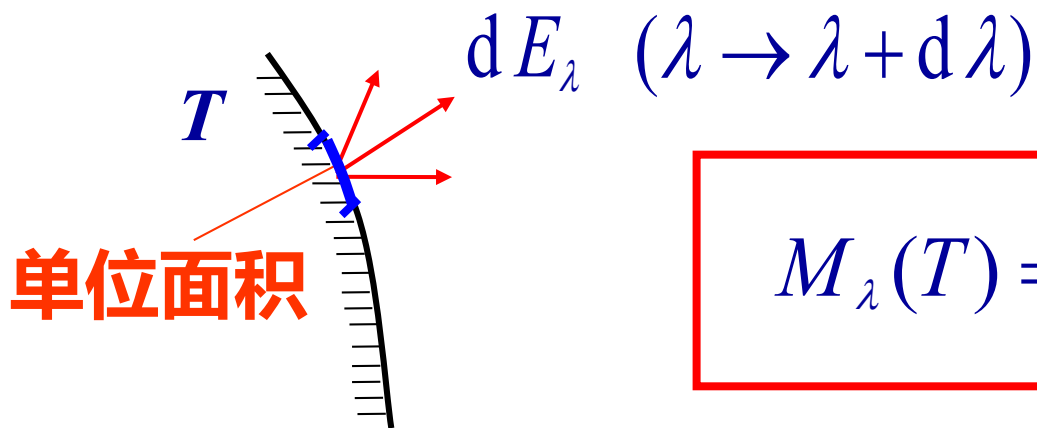
1400K

这种与温度有关的电磁辐射称为热辐射。

2、基尔霍夫辐射定律

★ 单色辐出度（单色辐射本领）：

单位时间内，温度为 T 的物体，单位面积上发射的，波长在 λ 到 $\lambda+d\lambda$ 范围内的辐射能量 dE_λ ，与波长间隔 $d\lambda$ 的比值，用 $M_\lambda(T)$ 表示。



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

$(T, \lambda, \text{材料, 表面})$

辐出度： 温度为 T 的物体单位面积在单位时间内的辐射能，为

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

单色吸收比：

在波长 λ 到 $\lambda+d\lambda$ 范围内，被物体吸收的能量，与入射能量之比，称为单色吸收比，用 $a_{\lambda}(T)$ 表示。

单色反射比：

波长 λ 到 $\lambda+d\lambda$ 范围内，反射的能量与入射能量之比，称为单色反射比，用 $r_{\lambda}(T)$ 表示。

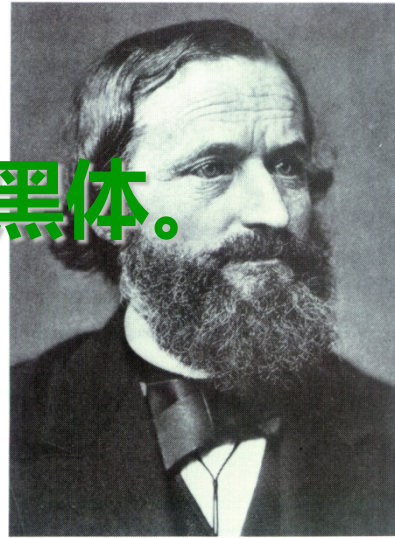
基尔霍夫辐射定律：

在同样的温度下, 不同物体对相同波长的单色辐出度与单色吸收比的比值均相等, 并等于该温度下**黑体**对同一波长的单色辐出度。

能完全吸收各种波长电磁波的物体, 叫**黑体**。

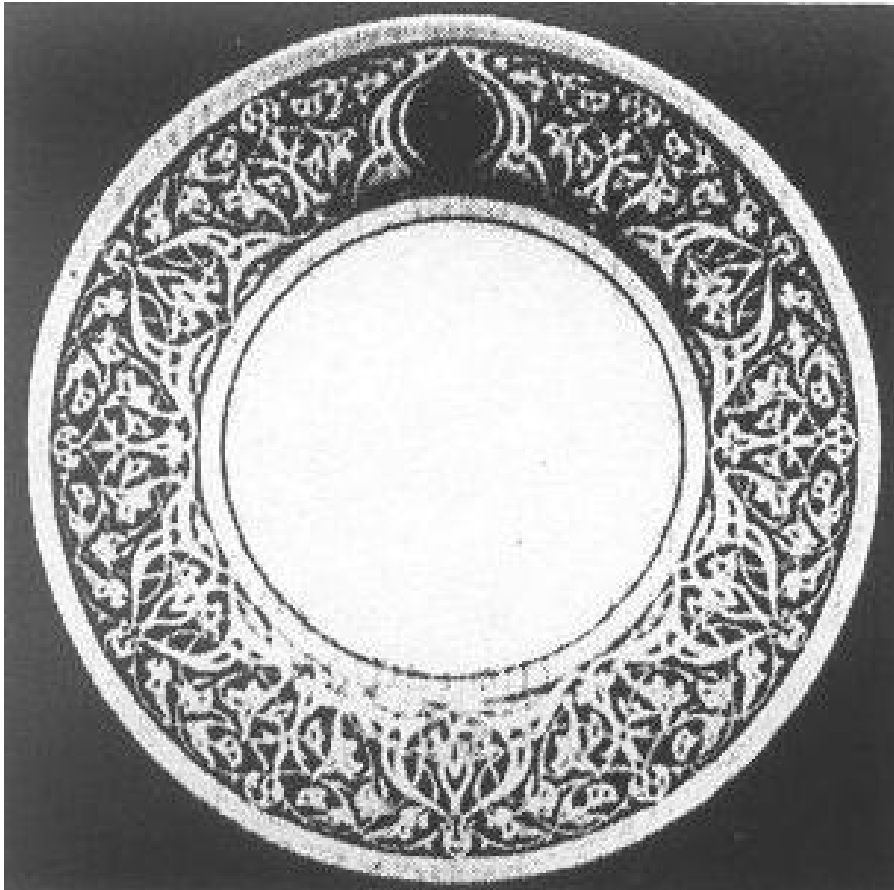
$$\frac{M_{1\lambda}(T)}{a_{1\lambda}(T)} = \frac{M_{2\lambda}(T)}{a_{2\lambda}(T)} = \cdots = M_{0\lambda}(T).$$

即：好的吸收体也是好的辐射体。

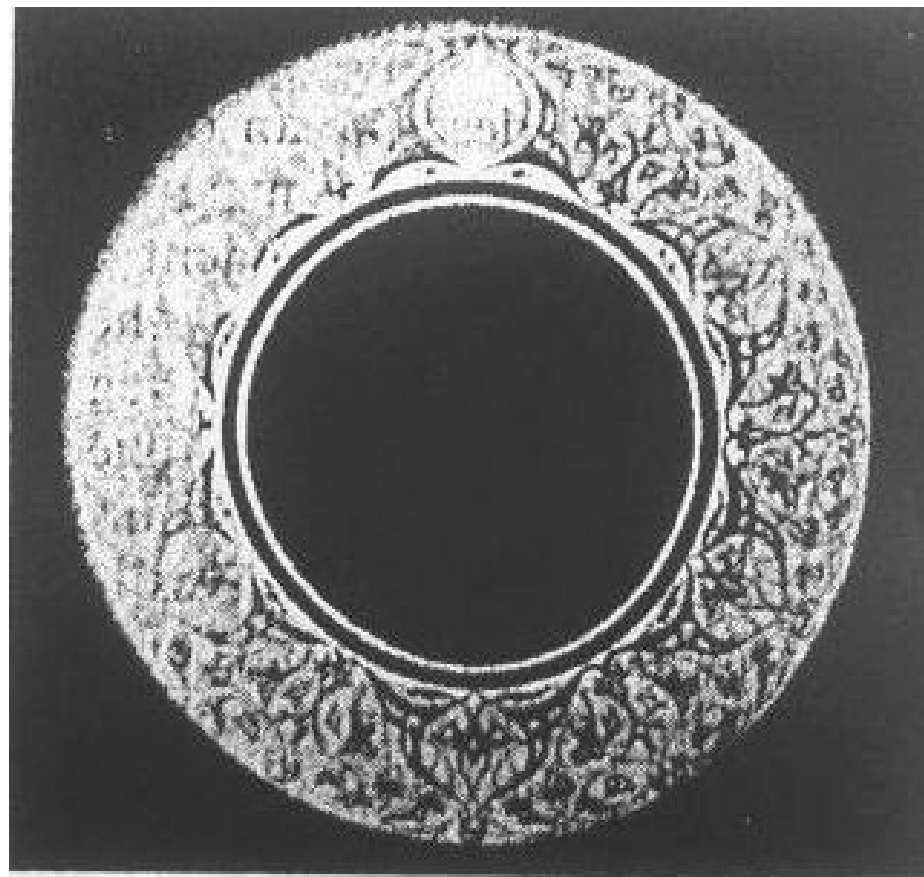


Gustav R. Kirchhoff

基尔霍夫
(1824 - 1887)



室温下，反射光



1100K，自身辐射光

一个黑白花盆子的两张照片

演示：黑色的 M_λ 和吸收均较白色的大

温度



物体热辐射



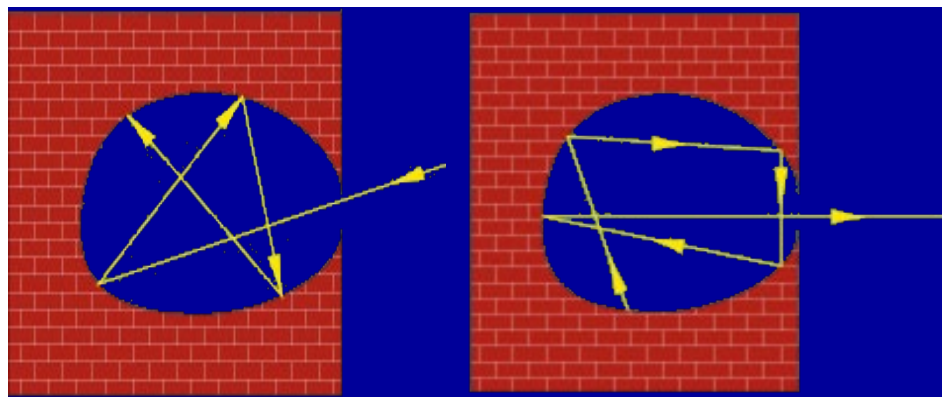
材料性质

3. 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%



维恩设计的黑体模型

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

★ 实验规律

*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

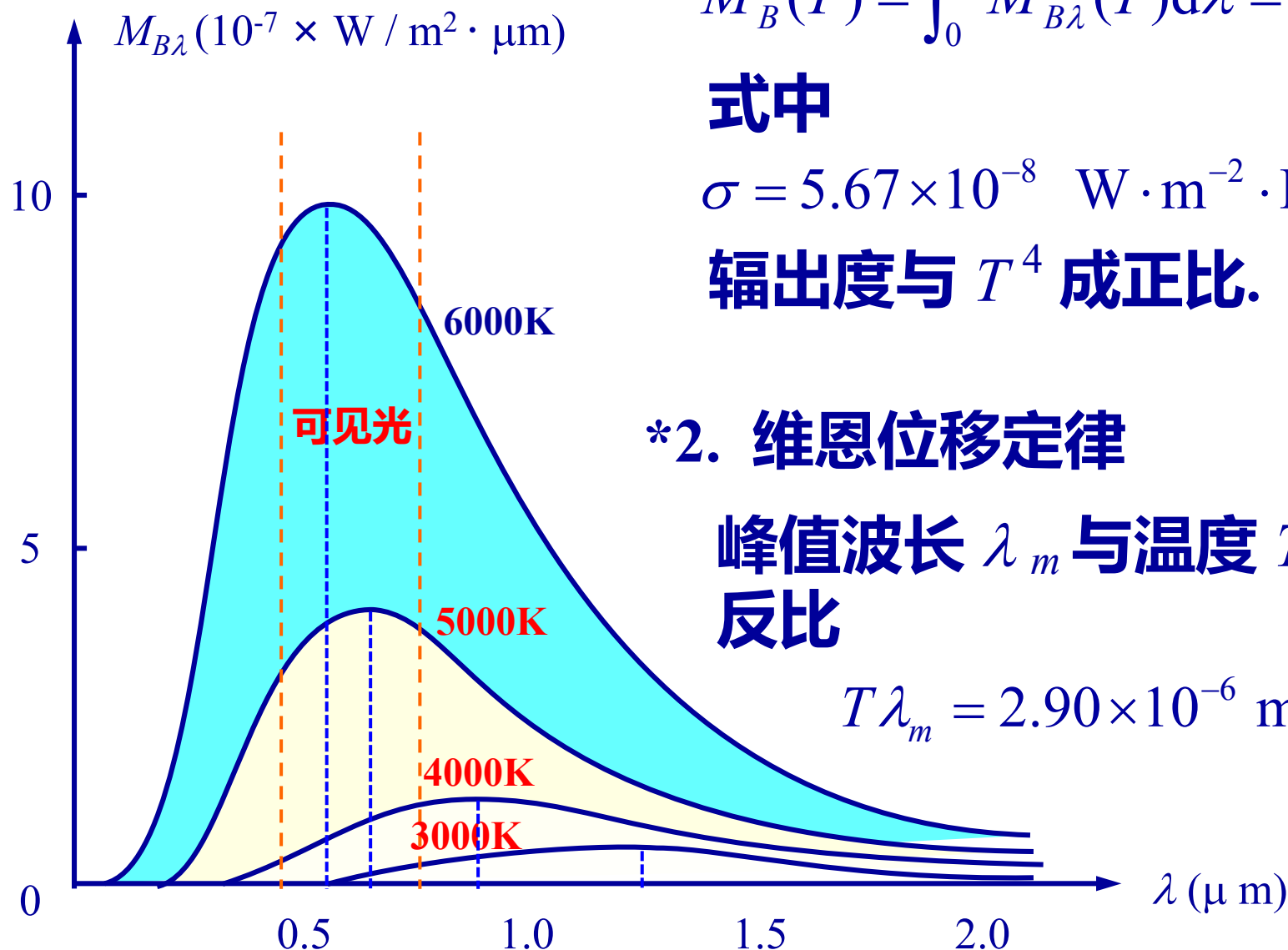
$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$$

辐出度与 T^4 成正比.

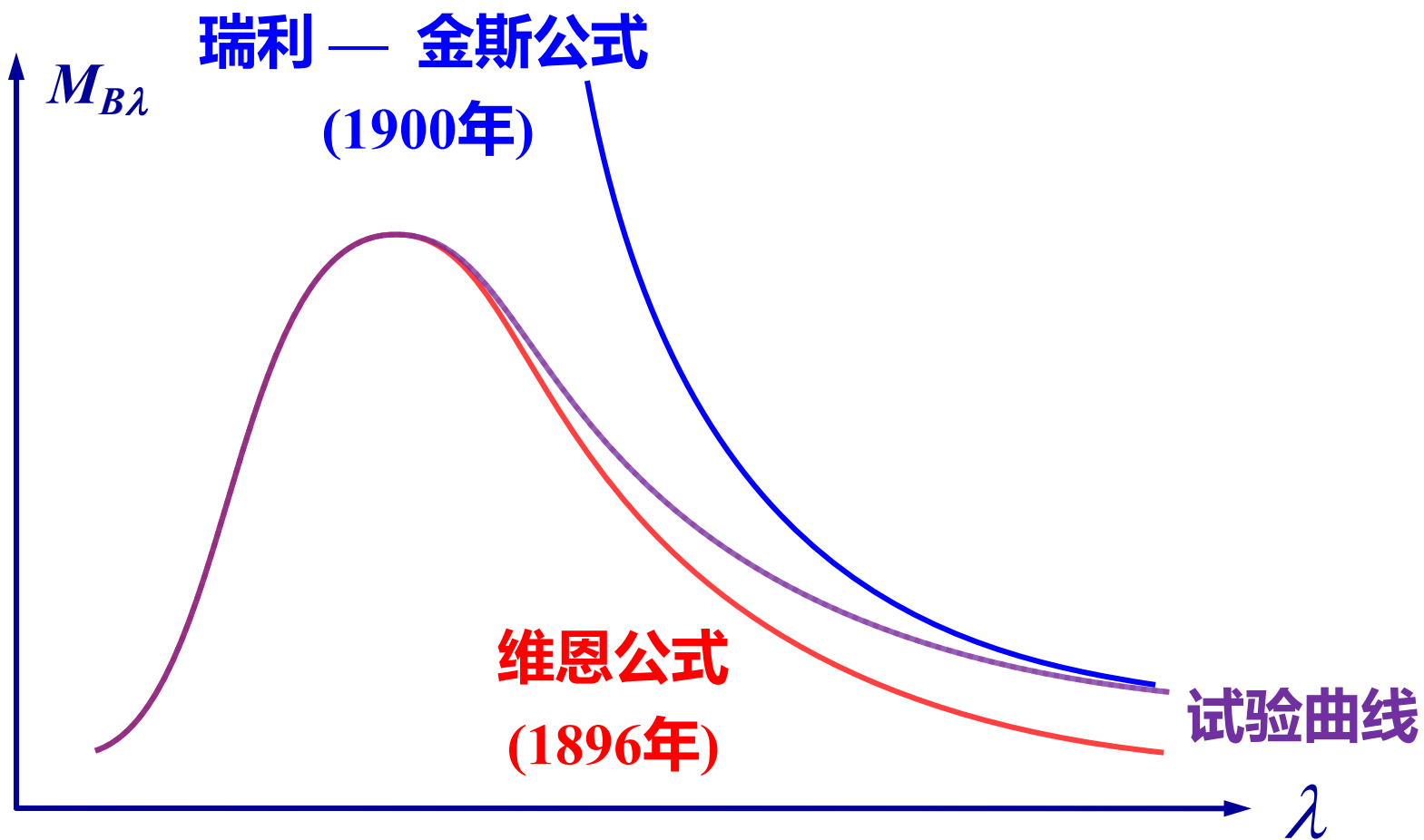
*2. 维恩位移定律

峰值波长 λ_m 与温度 T 成反比

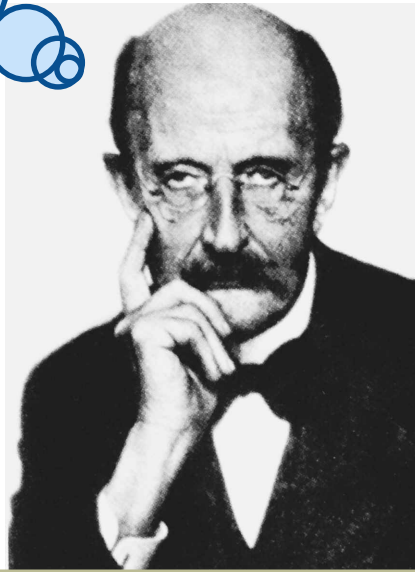
$$T\lambda_m = 2.90 \times 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{K}$$



4. 经典物理解释及普朗克公式



$$\lambda_m T = b$$



抛开理论假设不管，先凑出一个可以满足所有波段的公式！

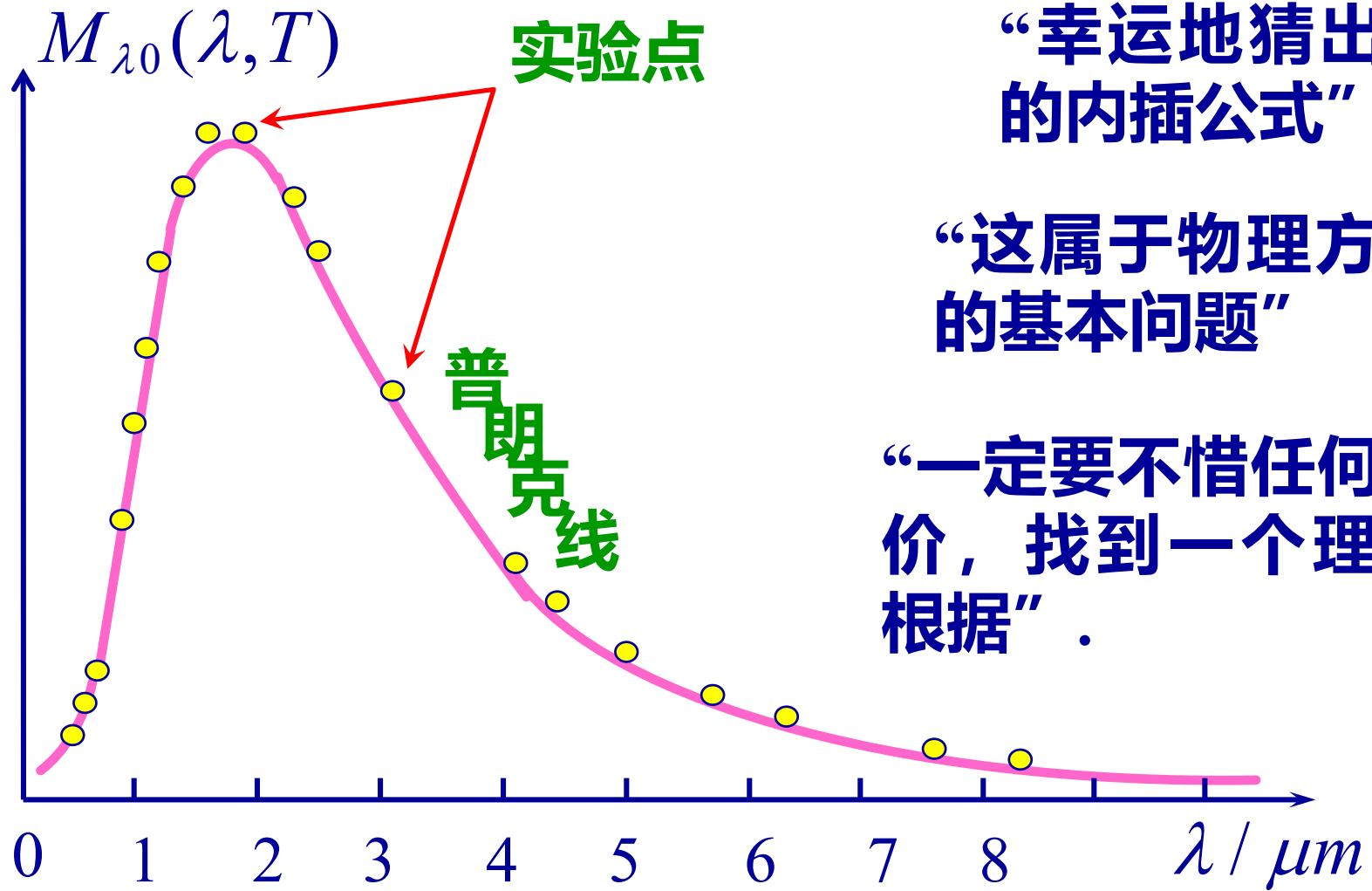
$$\frac{2\pi ckT}{\lambda^4} d\lambda$$

M. Planck
德国
1858-1947

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

普朗克公式(1900年)

普朗克公式和实验数据的比较：



“幸运地猜出来的内插公式”

“这属于物理方面的基本问题”

“一定要不惜任何代价，找到一个理论根据”。

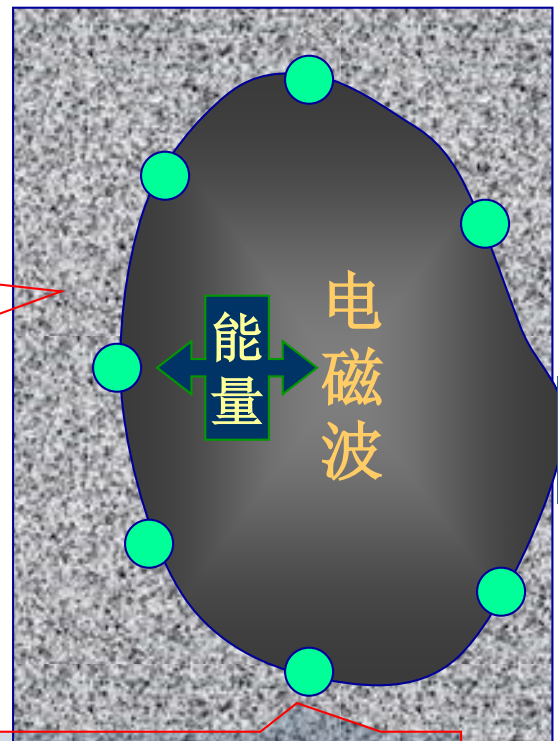
5. 普朗克能量量子假设

若谐振子频率为 ν ，则其能量是

$$h\nu, 2h\nu, 3h\nu, \dots, nh\nu, \dots$$

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

与腔内电磁场交换能量时，谐振子能量的变化是 $h\nu$ 的整数倍。



腔壁上的原子

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。

能量



经典



量子

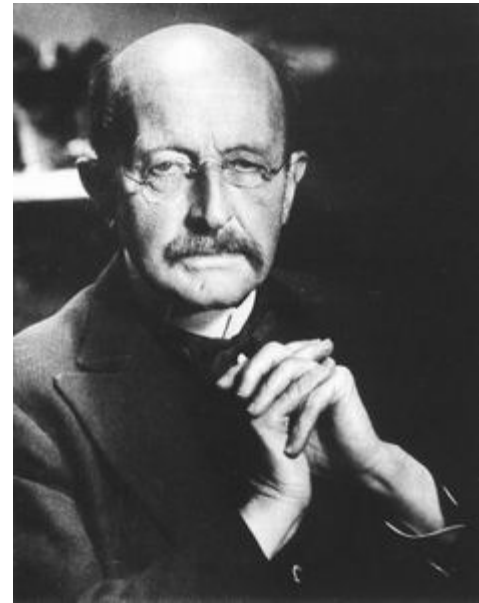
1900年12月14日，在德国物理学会会议上，普朗克报告了他的发现，这一天被认为是量子理论的誕生日。普朗克因此成为量子理论的奠基人，并荣获了1918年诺贝尔物理学奖。



学物理前



学物理后



物理学家

§ 15-2 光电效应 爱因斯坦的光子理论

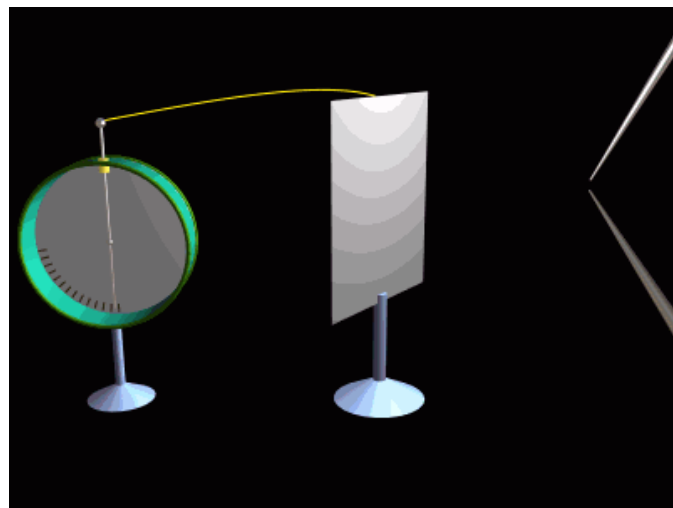
1. 光电效应的实验规律

光电效应：当波长较短的可见光或紫外光照射到某些金属表面上时，金属中有电子逸出的现象。

金属板释放的电子称为光电子，光电子在电场作用下在回路中形成光电流。

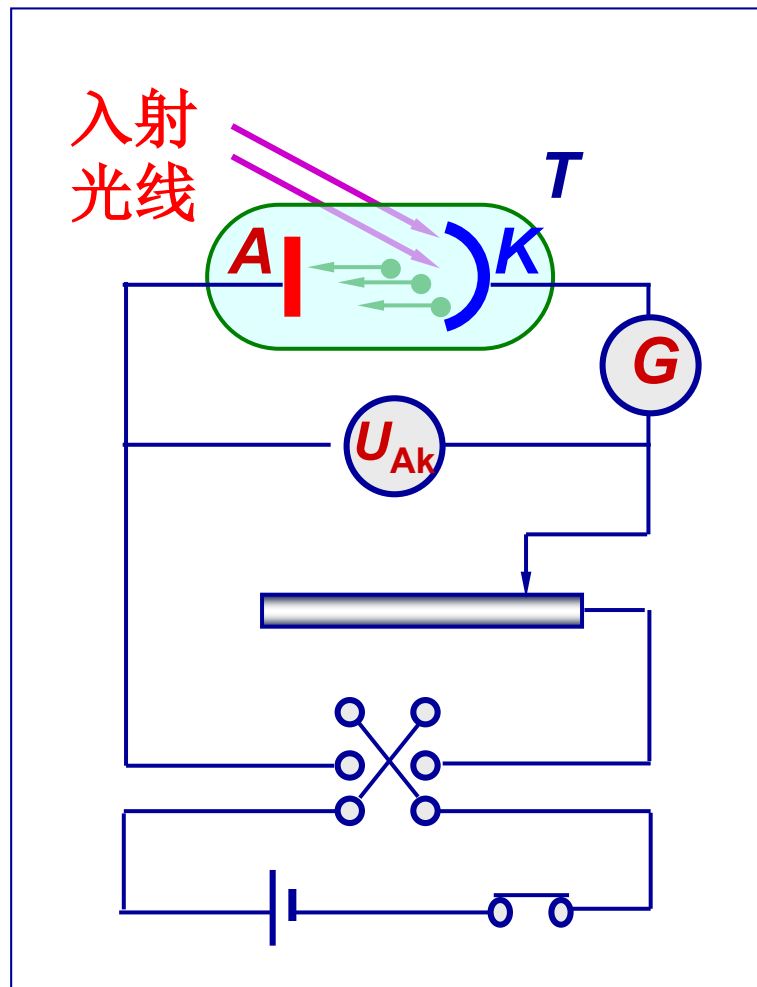
此现象最早由 赫兹 发现

对于特定金属，**能不能打出电子**，由光的**频率**说了算；
而能打出多少电子，则由光的**强度**说了算。



实验原理

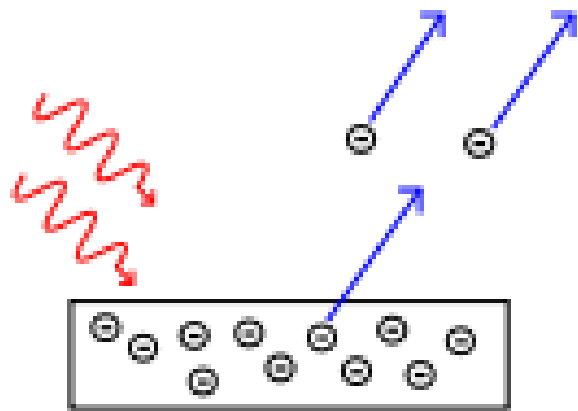
T 为真空管, K 为发射电子的阴极, A 为阳极, 用一定频率和强度的单色光照射 K 时, 金属将释放出光电子, 若在两极上加一定的电压 U , 则回路中就出现光电流。



实验规律

(1) **截止频率** 对一定金属，只有入射光的频率大于某一频率 ν_0 时，电子才能从该金属表面逸出，这个频率叫**红限**。与红限对应的能量为逸出功。

如果入射光的频率小于截止频率**则无论入射光强度多大，都没有光电子逸出。**



★ ν 不能小于 ν_0

几种金属的逸出功和红限

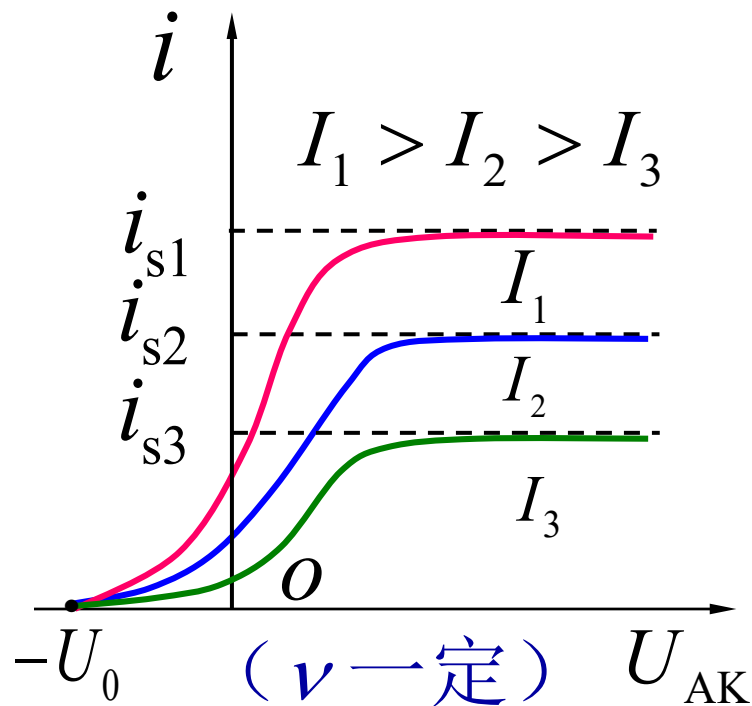
参数 \ 金属	铯 Cs	钾 K	钠 Na	锌 Zn	钨 W	银 Ag
逸出功/eV	1.94	2.25	2.29	3.38	4.54	4.63
红限 $\nu_0/10^{14}$ Hz	4.69	5.44	5.53	8.06	10.95	11.19
红限 $\lambda_0/\mu\text{m}$	0.639	0.551	0.541	0.372	0.273	0.267

不同物质的红限不同，多数金属的红限在紫外区。

(2) 光电流 阴极 K 在单位时间内发射的**光电子数**与入射光的**强度 I** 成正比。

光电流 I 随 U_{AK} 增大而增大，趋于饱和电流 i_s 。饱和电流与单位时间从阴极发射的光电子数成正比。

★ $i \propto I$

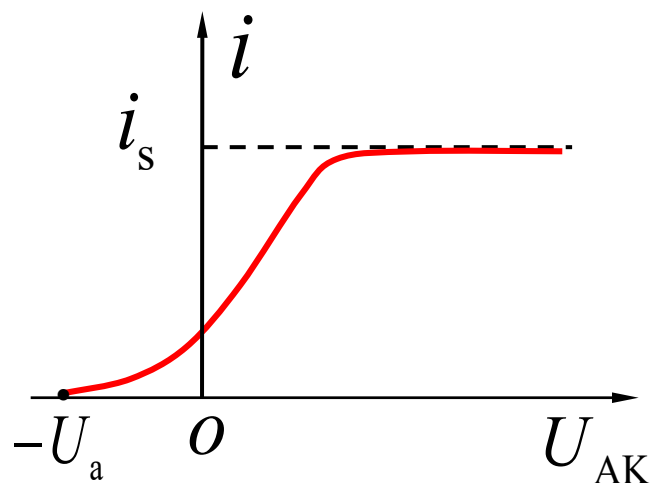


光电效应的伏安特性曲线

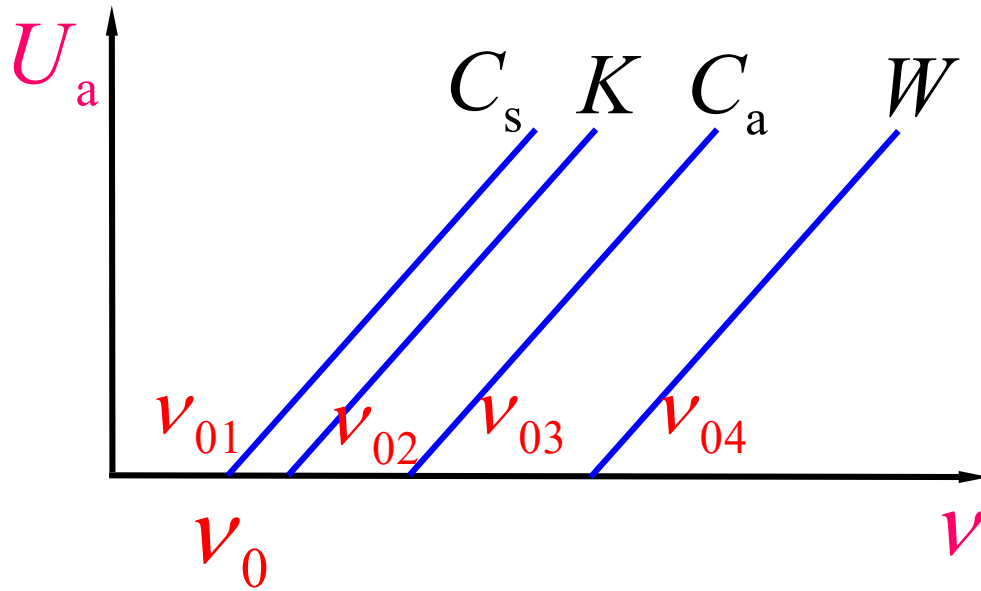
(3) 遏制电压 当 $U_{AK} = 0$ 时, 光电流 $i \neq 0$ 。因为从阴极发出的光电子具有一定的初动能, 它可以克服减速电场而到达阳极。当 $U_{AK} < 0$ 并达到一定值时, $i = 0$, 此时电压称为遏制电压 U_a 。表明在此电压下, 逸出金属后具有最大初速度 v_m 的光电子也不能到达阳极。

此时有

$$\frac{1}{2}mv_m^2 = eU_a$$



遏制电压与照射光的频率成线性关系。



★ $U_a \propto \nu$

(4) 瞬时性 光电效应具有瞬时性，响应速度很快，延迟时间不超过 10^{-9} 秒。

2、经典物理解释的困难

- 根据波动说，光电子的初动能应决定于入射光的光强，即决定于光的振幅，而不决定于光的频率。
- 无法解释入射光的频率红限的存在。
- 无法解释：光电效应的产生几乎无须时间的积累。

3、爱因斯坦光子假说和光电效应方程

光子假说

光的发射、传播、吸收都是量子化的——光子

$$\varepsilon = h\nu$$

金属中一个电子从入射光中吸收一个光子

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

—— 爱因斯坦光电效应方程

A 为逸出功，即一个电子脱离金属表面时为克服表面阻力所做的功。

爱因斯坦对光电效应的实验解释

(1) 当 $h\nu < A$ 时, 电子无法获得足够能量脱离金属表面, 因此存在红限 ν_0 。

$$\nu_0 = A/h$$

(2) 入射光的强度 I 取决于单位时间内垂直通过单位面积的光子数 n 。

$$I = nh\nu$$

入射光较强时, 含有的光子数较多, 所以获得能量而逸出的电子数也多, 饱和电流自然也就大。

(3) 根据 $h\nu = \frac{1}{2}mv_m^2 + A$, $eU_a = \frac{1}{2}mv_m^2$

得 $U_a = \frac{h\nu}{e} - \frac{A}{e}$

遏止电压与入射光的**频率**成正比（与实验结果符合），比例系数与材料的性质无关。

1916年美国实验物理学家密立根，利用光电效应测定了普朗克常量 h ，证实了爱因斯坦光子论的正确性。

(4) 入射光中光子的能量被金属表面的电子一次吸收，因此具有**瞬时性**。

拍卖会

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



入场费：逸出功 A

4、光（电磁辐射）的波-粒二象性

光不仅具有波动性，还具有粒子性。这种双重性称为 波-粒二象性。

波动性和粒子性之间的联系如下：

能量： $\varepsilon = h\nu$

质量： $m_{\phi} = \frac{\varepsilon}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2}$

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

光在传播过程中，波动性比较显著，光在与物质相互作用时（发射和吸收），粒子性比较显著。

5、光电效应的应用

利用光电效应可以制成光电成像器件，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。

例如，红外变像管可以使红外辐射图像转变为可见光图像。

光电倍增管可以将微弱光信号转换成可测电信号。



例1 波长为 450 nm 的光照射到金属钠表面，逸出功为 2.28 eV。求 (1) 光子的能量和动量； (2) 光电子的逸出动能； (3) 如果光子的能量为 2.40eV，其波长为多少？

解 (1) 光子能量

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = 4.42 \times 10^{-19} \text{ J}$$

以电子伏特为能量单位，则

$$E = \frac{4.42 \times 10^{-19}}{1.60 \times 10^{-19}} \text{ eV} = 2.76 \text{ eV}$$

光子的动量

$$p = \frac{h}{\lambda} = \frac{E}{c} = 1.47 \times 10^{-27} \text{ kg m s}^{-1}$$

(2) 由爱因斯坦方程 $h\nu = A + \frac{1}{2}mv_{\text{m}}^2$

由于逸出功 $A = 2.28 \text{ eV}$

$$E_K = 2.76 - 2.28 = 0.48 \text{ eV}$$

(3) 如果光子能量为 2.40 eV , 则

波长 $\lambda = \frac{hc}{E} = 5.18 \times 10^{-7} \text{ m} = 518 \text{ nm}$

例2 钾的光电效应红限为 $\lambda_0 = 6.2 \times 10^{-7} \text{m}$ 。

求 (1) 电子的逸出功;

(2) 在波长为 $3.0 \times 10^{-7} \text{m}$ 的紫外线照射下, 遏止电压为多少?

(3) 电子的初速度为多少?

解 (1) 逸出功

$$\begin{aligned} A &= h\nu_0 = \frac{hc}{\lambda_0} \\ &= \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{6.2 \times 10^{-7}} \text{ J} = 3.21 \times 10^{-19} \text{ J} \end{aligned}$$

(2) 利用 $h\nu = \frac{1}{2}mv_{\text{m}}^2 + A, \quad \frac{1}{2}mv_{\text{m}}^2 = eU_{\text{a}}$

遏止电压 $U_{\text{a}} = \frac{h\nu - A}{e} = \frac{hc}{e\lambda} - \frac{A}{e} = 2.14 \text{ V}$

(3) 电子的初速度

$$\begin{aligned} v_{\text{m}} &= \sqrt{\frac{2eU_{\text{a}}}{m}} \\ &= \sqrt{\frac{2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 2.14}{9.1 \times 10^{-31}}} \text{ ms}^{-1} = 8.67 \times 10^5 \text{ ms}^{-1} \end{aligned}$$