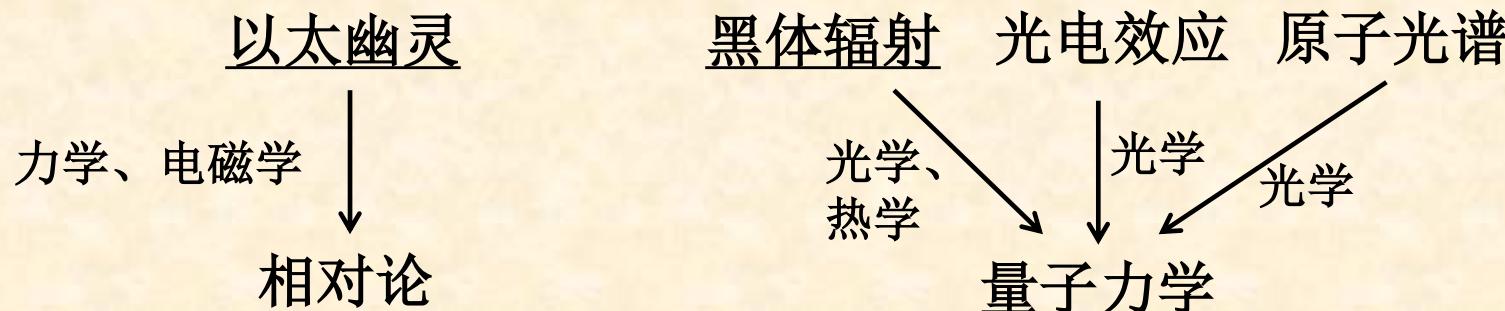


第六篇 量子物理学

1900年开尔文说，“十九世纪末物理学晴朗天空的天际飘浮着两朵乌云（实际上N朵乌云，此处列出四朵）：



一些最基本
的现象、概念和
规律是本课程的
内容。

第二十章 电磁辐射的量子性 (黑体辐射、光电效应、康普顿效应)

§ 20.1 热辐射

一、基本概念

1. 热辐射

物体因内部带电粒子热运动而发射电磁波的现象称为热辐射。频率通常在红外、可见、紫外区域。(太阳光的波段主要也是热辐射)

2. 平衡热辐射

物体向外发射的辐射能和从周围环境吸收的辐射能相等时的热辐射称为平衡热辐射。

平衡热辐射对应于特定的温度 T 。

3. 单色辐射出射度(单色辐出度)

设物体单位时间、单位面积发射出的波长在 $\lambda-\lambda+d\lambda$ 之间的辐射能为 dM_λ , 单色辐出度定义为

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

4. 辐射出射度

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

5. 吸收系数 α , 反射系数 r

α 、 r 与 λ 、 T 有关。

温度为 T 时的单色吸收系数和单色反射系数分别用 $\alpha(\lambda, T)$ 和 $r(\lambda, T)$ 表示。

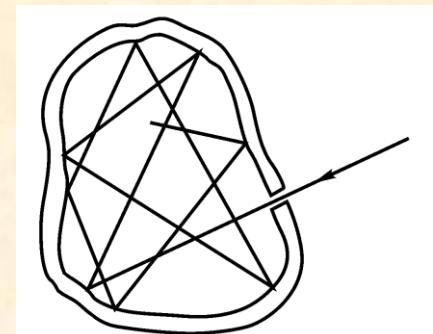
对于不透明物体,

$$\alpha(\lambda, T) + r(\lambda, T) = 1.$$

6. 黑体

在任何温度 $\alpha_B(\lambda, T) = 1.$

黑体的辐射不含外来辐射的反射部分, 理论上比较简单; 当时的工业(炼铁炉)对黑体辐射研究有强烈需求。



黑体(基尔霍夫1859年提出)

二、基尔霍夫(1824-1887, 德国)定律

在热平衡系统中各种不同的物体1, 2, ...在同一温度下对任一波长有

$$\frac{M_{1\lambda}(T)}{\alpha_1(\lambda, T)} = \frac{M_{2\lambda}(T)}{\alpha_2(\lambda, T)} = \dots = \frac{M_{B\lambda}(T)}{\alpha_B(\lambda, T)}.$$

$$\boxed{\frac{M_\lambda(T)}{\alpha(\lambda, T)} = M_{B\lambda}(T).}$$

基尔霍夫的学生中有两位的名字分别叫普朗克和赫兹。

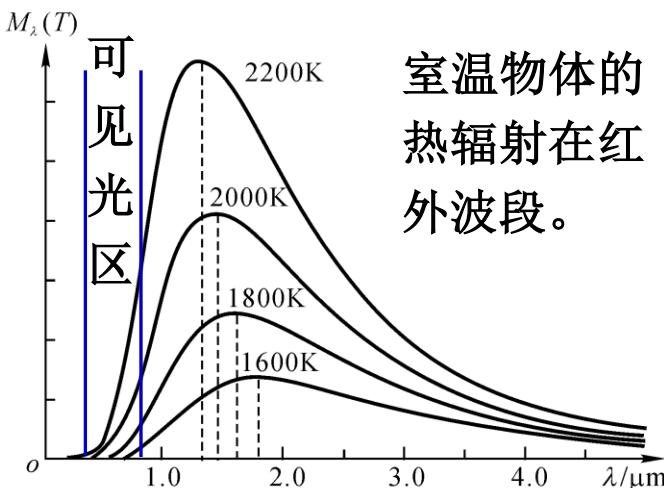
因此, 黑体辐射规律还具有理论上的普遍意义!

$$M_{B\lambda}(T) \equiv M_B(\lambda, T) = ?$$

三、黑体辐射实验定律

典型实验结果见右图。

根据大量实验数据总结出两个定律:



1. 斯忒藩-玻尔兹曼定律

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

式中 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$. T 为热力学温标，即以 K 为单位。

工业上有应用：测出 $M_B(T)$ 便可计算出炼钢炉里的温度。

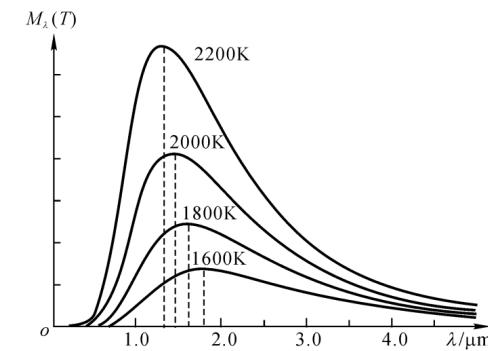
2. 维恩位移定律

$$T\lambda_m = b.$$

式中 $b = 2.898 \times 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{K}$, λ_m 为 $M_\lambda(T)$ - λ 曲线的峰值波长。

太阳辐射 $\lambda_m = 490 \text{ nm} \Rightarrow T = 5900 \text{ K}$.

(粗暴地把阳光当成黑体辐射以得到太阳表面温度的估计值。)



$$M_{B\lambda}(T) \equiv M_B(\lambda, T) = ?$$

§ 20.2 普朗克能量子假设

一、普朗克之前的两个关于 $M_{B\lambda}(T)$ 的不太成功的理论

1. 维恩公式(半经验公式)

$$M_{B\lambda}(T) = \frac{C_1}{\lambda^5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T}}.$$

能导出斯忒藩-玻尔兹曼定律的 T^4 规律，但 σ 的数值相差很大。

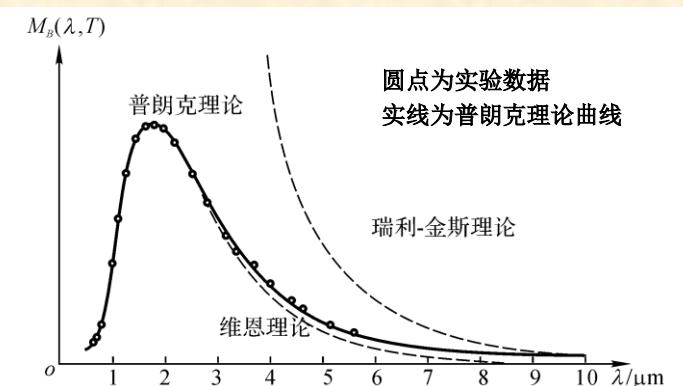
直接和实验数据对照，长波部分有明显误差。

2. 瑞利-金斯公式(纯电动力学+热力学理论)

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

式中 k 为玻尔兹曼常数， c 为光速。

瑞利-金斯公式完全不符合斯忒藩-玻尔兹曼定律；和实验对照，只在长波部分符合。这在历史上被称为“紫外灾难”，就是开尔文所说的二朵乌云之一。



二、普朗克公式

普朗克首先猜(凑)出了 $M_{B\lambda}(T)$ 的正确表达式

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

完全符合斯忒藩-玻尔兹曼定律和维恩位移定律。

式中 $h=6.63\times 10^{-34}\text{J}\cdot\text{s}$, 称为普朗克常数。 c 为光速。

然后, 普朗克试图推导这个公式。在经典物理范围内都失败了。再后来, 普朗克发现, 如果作几个“显然错误”的假设, 从这几个假设出发可以推导出普朗克公式。

三、能量子三假设

1. 构成黑体腔壁的原子可看作是在各自平衡位置附近作简谐振动的带电的线性谐振子;

2. 设谐振子的频率为 ν , 则其能量是 $h\nu$ 整数倍: $h\nu, 2h\nu, 3h\nu, \dots, nh\nu, \dots;$

3. 谐振子在吸收和发射能量时只能一份一份地得到或失去大小为 $h\nu$ 的能量。

后两个假设严重违背直觉以及经典物理中变化的连续性。然而，从这些假设出发可以推导出普朗克公式。详见课本p164–165。

例1. 一个质量为 0.2Kg 的物体挂在倔强系数 $k=2.0\text{N/m}$ 的弹簧上，作振幅为 $A=1\times10^{-2}\text{m}$ 的谐振动。试问：(1) 如果谐振子的能量是量子化的，则 n 有多大？(2) 如果谐振子的能量改变一个能量最小单位，则能量变化的百分比是多少？

解：(1) $E = \frac{1}{2}kA^2 = 1\times10^{-4} \text{ J}, \quad \nu = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} = 0.5 \text{ s}^{-1},$

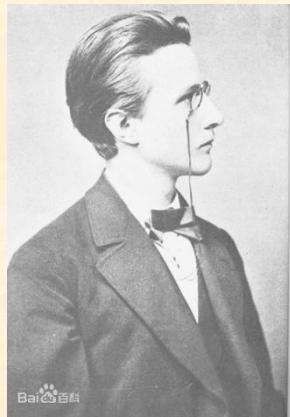
$$n = \frac{E}{h\nu} = \frac{1\times10^{-4}}{6.63\times10^{-34}\times0.5} = 3.0\times10^{29}.$$

(2) $\frac{\Delta E}{E} = \frac{h\nu}{nh\nu} = \frac{1}{n} = 3.3\times10^{-30}.$ 可以认为能量是连续变化的。

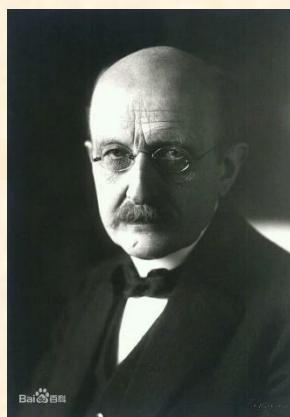
普朗克的假设被爱因斯坦(1905年)、玻尔(1912年)等年青人接受和发扬，导致量子力学的出现。量子力学、量子物理等名词中的“量子”就是指普朗克提出的物理量的不连续性，“一份、一份，即量子”。

普朗克本人仍试图在经典物理范围内解决黑体辐射问题，结果是带着遗憾离开世界——科学发展的规律，在某些十分重大的问题上，不是新人说服旧人，而是旧人离世，更新的人一接触的就是新知识，于是新知识得以普及。

旧人(洛伦兹、普朗克等造诣精深的中老年科学家)对科学革命的作用同样是巨大的！



普朗克(德国，1858-1947)



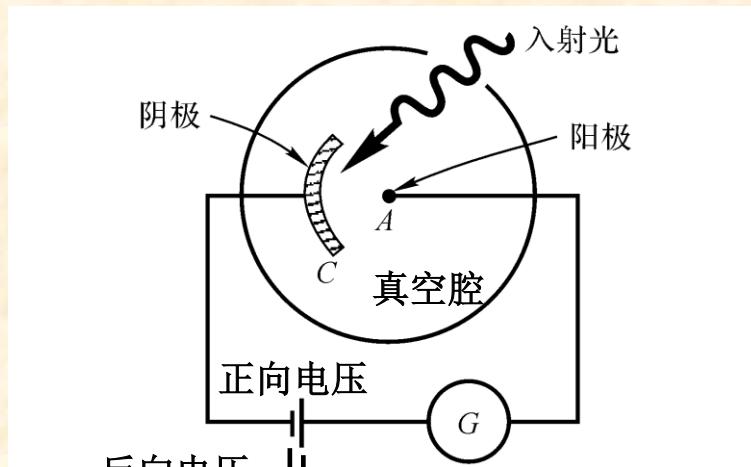
知识分子世家，1918年
获诺贝尔物理学奖。

前面这两节背景知识较多，同学们复习时可根据自己的具体情况重点掌握以下内容：

- § 20.1的斯忒藩-玻尔兹曼定律和韦恩位移定律。
- § 20.2的能量子假设(参考例1)。

§ 20.3 光电效应

一、光电效应现象



赫兹1887年实验的装置原理图

在光的照射下，电流计发生偏转，即出现电流。

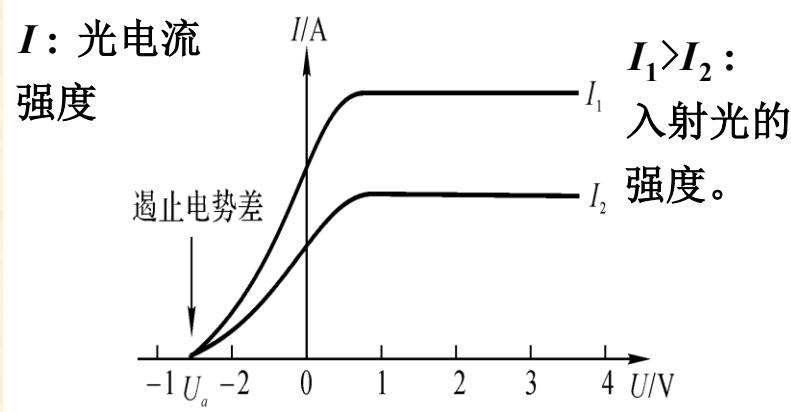
增大正向电压，电流增大，直至饱和。加反向电压，光电流减小，直至为0。

上述现象表明光从金属中打出了带负电的粒子(十年后知道了是电子)。知道电子后关于光电效应的一些标准定义：

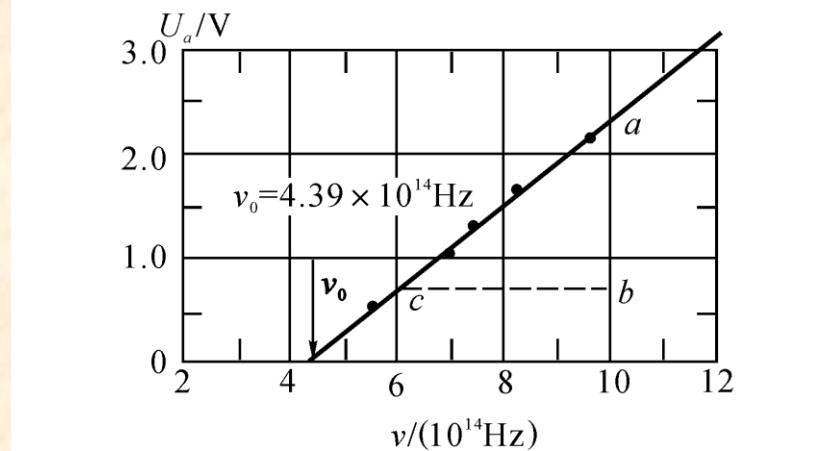
在光的照射下电子从金属表面逸出的现象叫光电效应。因光照而逸出的电子叫光电子，部分光电子到达阳极而形成的电流叫光电流。使光电流为0的最小反向电势差的大小叫遏止电势差(U_a)。

离开金属表面后的光电子的动能有大有小，设最大值为 E_{km} 。 E_{km} 和 U_a 的关系如下： $e|U_a| = E_{km}$ 。

二、光电效应的一些实验规律



典型实验数据1: $I-U$ 曲线。



典型实验数据2: U_a-v 成直线关系。
(可见光的频率范围 $3.8-8.0 \times 10^{14} \text{ Hz}$)

- 饱和光电流(单位时间内从阴极逸出的光电子数)与入射光强成正比。
- 遏止电势差 U_a 与入射光强无关, 但与入射光频率正比。

$$|U_a| = kv - U_0. \quad (kv > U_0 \text{ 时})$$

$$E_{km} = ekv - eU_0.$$

式中比例系数 k 是普适常数, 对任何材料是一样的! U_0 (直线与纵轴的截距的绝对值, 图中未画出)则与具体材料有关。 eU_0 叫逸出功(当代科学通常称为功函数)。

3. 当入射光频率小于某极限频率 v_0 时，无论光的强度多大，都不发生光电效应。 v_0 叫红限频率。
4. 光电效应没有时间滞后，不需要积累光强。

经典理论无法解释 U_a 与光强无关这一实验事实，更无法解释 U_a 对频率的线性依赖关系。

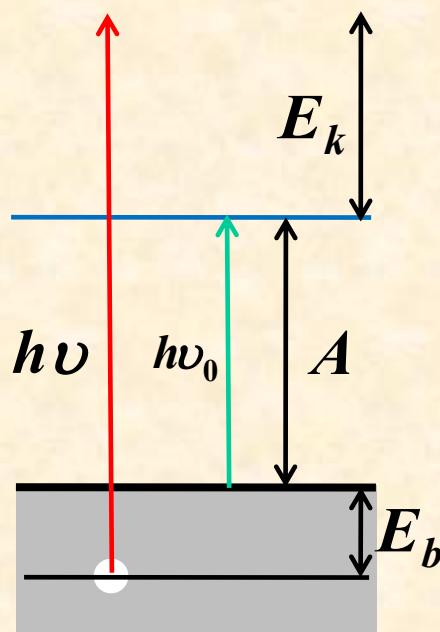
爱因斯坦注意到了普朗克的假设，能量与频率有关！

三、爱因斯坦光子理论(1905年，26岁)

1. 光电效应方程

爱因斯坦认为，一束频率为 ν 的光由一份份能量= $h\nu$ 的光子组成。 h 即普朗克假设中的普朗克常数。(牛顿的光的粒子说复活)

他还认为在光电效应中，光只能以光子为基本单元被吸收。一个光子被吸收后，其能量的一部分被用于电子克服原子或固体的限制而电离，余下的能量成为电子的动能。具体过程可用下图表示。



图中粗黑水平线代表原子或固体内部能量最高的电子所处能量位置。

E_b 为物质内部某个电子的结合能(相对于能量最高的电子的能量，取绝对值)。

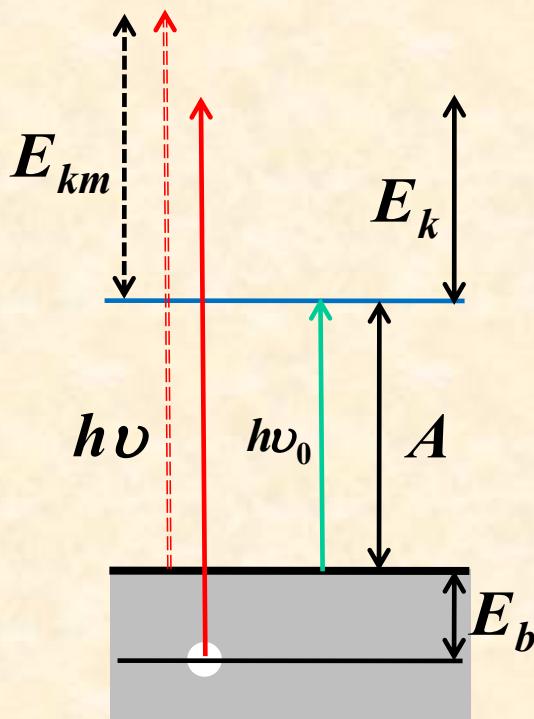
蓝色水平线代表电子刚刚能够脱离原子或固体，但已失去动能的能量位置。

A 即逸出功 eU_0 。

原子或固体的限制包括 E_b 和 A 。

红线代表某一种光子的能量。

绿线代表光电效应所需的最小光子能量



根据上图，

$$h\nu_0 = A, \quad \text{红限频率 } \nu_0 = \frac{A}{h}.$$

如果 $\nu > \nu_0$, 则有

$$h\nu = E_b + A + E_k.$$

上式叫爱因斯坦光电效应方程。

对于能量为 $h\nu$ 的光子, 最大初动能 E_{km} 的光电子在固体中时(电离前) $E_b=0$,

$$h\nu = E_{km} + A.$$

可得遏止电压为

$$|U_a| = \frac{E_{km}}{e} = \frac{1}{e}(h\nu - A).$$

和实验公式 $|U_a| = k\nu - U_0$
对照, 还可得

$$k = h/e, \quad U_0 = A/e.$$

和具体的实验数据对照, 发现 k 确实等于 h/e ! 到此解释了光电效应的所有实验事实。爱因斯坦因此获得1921年诺贝尔物理学奖。

2. 光子的基本性质 光有粒子性 人类对光的本性认识进入第三个阶段

$$\text{光子的能量 } E = h\nu = h \frac{c}{\lambda}.$$

$$\text{光子的质量 } m = \frac{E}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2}, \text{ 静质量 } m_0 = 0.$$

$$\text{光子的动量 } p = mc = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}.$$

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - c^2 / c^2}} = \frac{m_0}{0},$$
$$\therefore m_0 = 0.$$

例2. $\lambda=0.207 \mu m$ 的光照射在金属钯表面产生光电效应。已知钯的红限频率 $v_0=1.21\times 10^{15} Hz$, 则遏止电压 $U_a=?$

解法一：从光电效应的物理机理出发。

$$\text{光子能量 } E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{0.207 \times 10^{-6}} = 9.609 \times 10^{-19} J = 6.01 eV.$$

$$\text{逸出功 } A = h\nu_0 = 6.63 \times 10^{-34} \times 1.21 \times 10^{15} = 8.022 \times 10^{-19} J = 5.01 eV.$$

$$\text{光电子最大初动能 } E_{km} = E - A = 1.0 eV.$$

$$\text{遏止电压 } U_a = \frac{E_{km}}{e} = \frac{1.0 eV}{e} = \frac{1.0 \times 1.6 \times 10^{-19} J}{1.6 \times 10^{-19} C} = 1.0 V.$$

解法二：套公式。

$$A = h\nu_0 = 6.63 \times 10^{-34} \times 1.21 \times 10^{15} = 8.022 \times 10^{-19} J.$$

$$\begin{aligned} U_a &= \frac{1}{e}(h\nu - A) = \frac{1}{1.6 \times 10^{-19}} \left(\frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{0.207 \times 10^{-6}} - 8.022 \times 10^{-19} \right) \\ &= 1.0 V. \end{aligned}$$

例3. $\lambda=300\text{ nm}$ 的光照射在某金属表面时，光电子能量范围从 $0-4.0\times10^{-19}\text{ J}$ ，则遏止电压 $U_a=?$ 红限频率 $v_0=?$

解： $E_{km} = 4.0 \times 10^{-19}\text{ J}.$

$$U_a = \frac{E_{km}}{e} = \frac{4.0 \times 10^{-19}}{1.6 \times 10^{-19}} = 2.5\text{ V}.$$

$$A = h\nu - E_{km}$$

$$= 6.63 \times 10^{-34} \times \frac{3 \times 10^8}{300 \times 10^{-9}} - 4.0 \times 10^{-19}$$

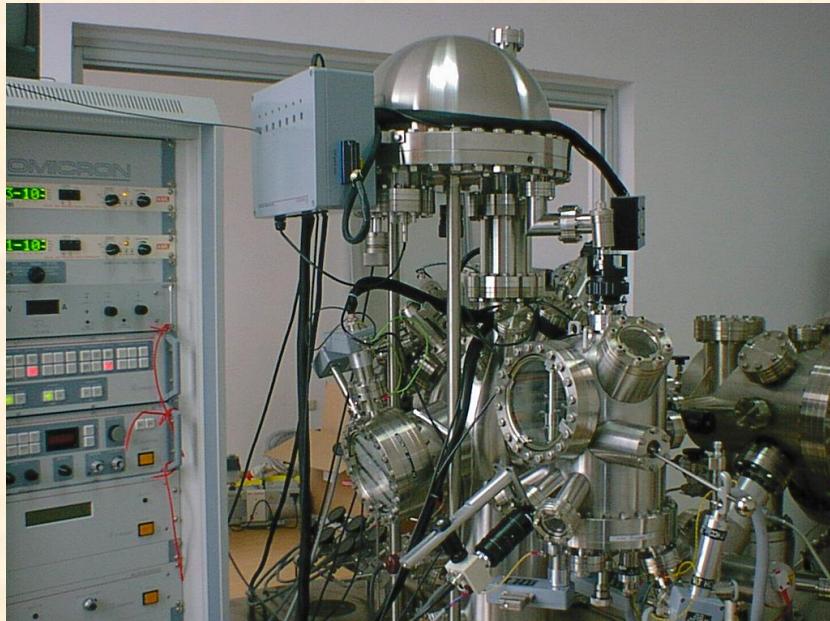
$$= 2.63 \times 10^{-19}\text{ J}$$

$$= 1.64\text{ eV.}$$

教科书中通常有少量不符合实际情况的理论计算结果。实际上，几乎不存在逸出功小于 3.0 eV 的材料。

$$v_0 = \frac{A}{h} = \frac{2.63 \times 10^{-19}}{6.63 \times 10^{-34}} = 3.97 \times 10^{14}\text{ Hz.}$$

当代光电效应研究仪器 光电子能谱仪



三种光源：
21.2 eV,
1253.6 eV,
1486.6 eV.

浙江大学物理学院凝聚态物理研究所仪器(德国Omicron公司产品)

§ 20.3节加红框的式子多，需认真复习消化。

作业

20.2, 20.4, 20.5, 20.7, 20.9, 20.12.