

## 26. 波粒二象性

26.1 黑体辐射

26.2 光电效应

26.3 光的二象性、光子

26.4 康普顿散射

26.5 粒子的波动性

26.6 概率波与概率幅

26.7 不确定关系

## 26.1 黑体辐射 (Black-body radiation)

### 一、热辐射的基本概念

#### 1、热辐射 (thermal radiation)

物体由大量原子组成，热运动引起原子碰撞使原子激发而辐射电磁波。原子的动能越大，通过碰撞引起原子激发的能量就越高，从而辐射电磁波的波长就越短。

热运动是混乱的，原子的动能与温度有关，因而辐射电磁波的能量也与温度有关。

**例如：**加热铁块，温度 $\uparrow$ ，铁块颜色由看不出发光 $\rightarrow$ 暗红 $\rightarrow$ 橙色 $\rightarrow$ 黄白色 $\rightarrow$ 蓝白色

这种与温度有关的电磁辐射，称为**热辐射**。

并不是所有发光现象都是热辐射，例如：

**激光、日光灯发光就不是热辐射。**

任何物体在任何温度下都有热辐射，波长自远红外区**连续**延伸到紫外区（**连续谱**）。

温度 $\uparrow$   $\rightarrow$  辐射中短波长的电磁波的比例 $\uparrow$

**几种温度下辐射最强的电磁波颜色**



**800K**



**1000K**



**1200K**



**1400K**

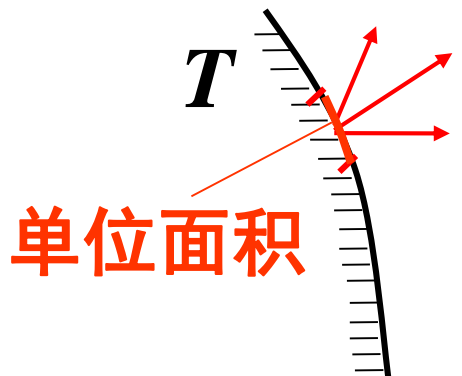
## 2、平衡热辐射

加热一物体，若物体所吸收的能量等于在同一时间内辐射的能量，则物体的温度恒定。这种**温度不变**的热辐射称为**平衡热辐射**。

## 3、光谱辐出度（单色辐出度） $M_\nu$

**monochromatic energy density of radiation**

$M_\nu$ —单位时间内，从物体单位表面发出的频率在 **$\nu$ 附近单位频率间隔内**的电磁波的能量。



$T$

$dE_\nu (\nu \rightarrow \nu + d\nu)$  (单位时间内)

单位面积

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

$M_\nu$ 取决于 **$T$ 、 $\nu$ 和材料种类和表面情况**

#### 4、（总）辐出度（总发射本领） $M(T)$

**radiant exitance**

$$M(T) = \int_0^{\infty} M_{\nu}(T) d\nu \quad \text{单位: } \text{W/m}^2$$

#### 5、单色吸收比（率） $\alpha_{\nu}(T)$

**monochromatic absorptance**

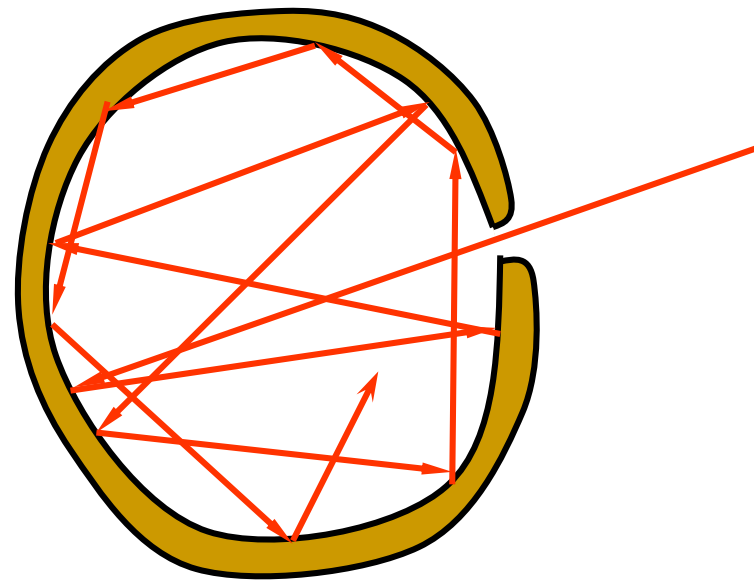
$$\alpha_{\nu}(T) = \frac{dE_{\nu(\text{吸收})}}{dE_{\nu(\text{入射})}}$$

## 二、黑体 (black body)

1、黑体:能完全吸收各种波长电磁波而无反射的物体, 即 $\alpha_\nu = 1$ 的物体。黑体是理想化模型, 即使是煤黑, 对太阳光的 $\alpha$ 也小于 99%。

维恩设计的黑体:

不透明介质空腔开一小孔, 电磁波射入小孔后, 很难再从小孔中射出。小孔表面是黑体。



## 2、基尔霍夫 (Kirchhoff) 辐射定律

### 热辐射的描述

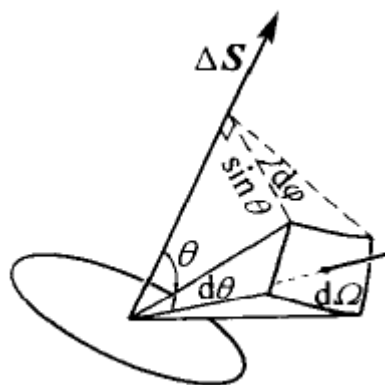
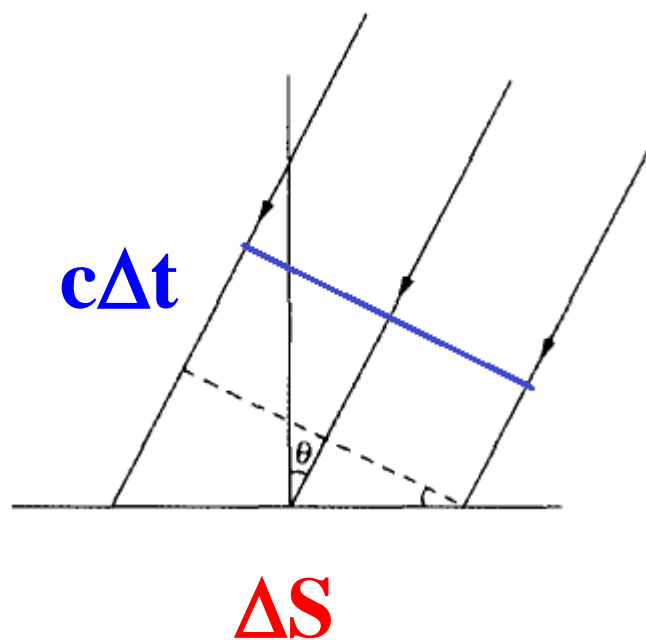
热辐射是均匀、稳定和各向同性的，与位置、时间和方向无关。在某一频率附近单位频率范围内的热辐射能量密度，只与频率  $\nu$  和温度  $T$  有关，用  $w(\nu, T)$  来表示，

$w(\nu, T)$  = 在频率  $\nu$  附近单位频率范围内的热辐射能量密度。

这个函数  $w(\nu, T)$  称为 热辐射能量的谱密度，简称 热辐射能谱 或 热辐射谱。对所有的辐射频率求和，就可得到 热辐射的能量密度  $W(T)$

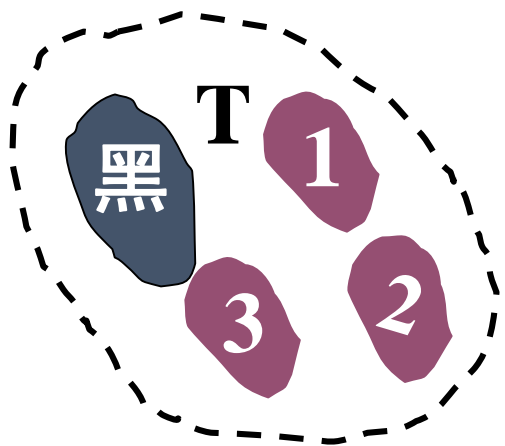
$$W(T) = \int w(\nu, T) d\nu.$$

知道了热辐射能谱  $w(\nu, T)$ ，就可以算出照射在物体单位表面积上的辐射通量谱  $I(\nu, T)$ 。



$$\begin{aligned}
 I(\nu, T) &= \frac{1}{\Delta S} \int c \Delta S \cos \theta \cdot \mathbf{w}(\nu, T) \frac{d\Omega}{4\pi} \\
 &= \frac{\mathbf{c} \mathbf{w}(\nu, T)}{4\pi} \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi/2} \sin \theta \cos \theta d\theta \\
 &= \frac{1}{4} \mathbf{c} \mathbf{w}(\nu, T)
 \end{aligned}$$





## 在平衡热辐射时

$$M_{\nu i} = \alpha_{\nu i} I(\nu, T)$$

$$\frac{M_{\nu 1}}{\alpha_{\nu 1}} = \frac{M_{\nu 2}}{\alpha_{\nu 2}} = \dots = I(\nu, T)$$

——与材料无关的普适函数

### 基尔霍夫热辐射定律

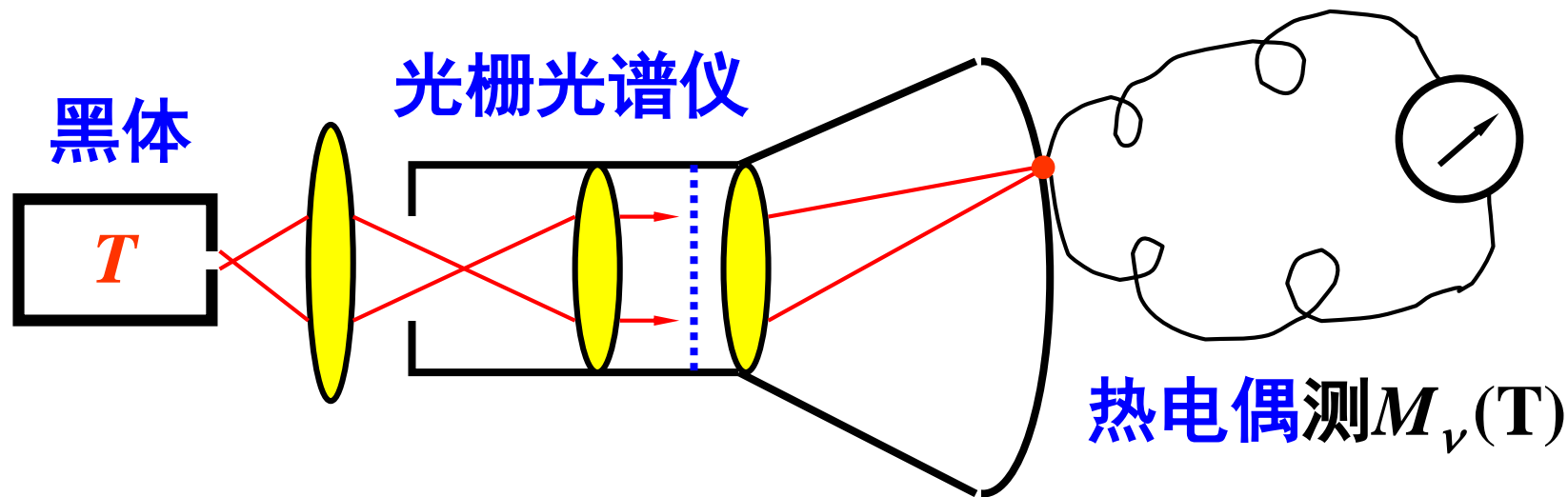
任何物体在同一温度下的辐射本领与吸收本领成正比，比值只与频率  $\nu$  和温度  $T$  有关，是一个与物质无关的普适函数，

$$\because \alpha_{\nu \text{黑体}} = 1 \quad \therefore \frac{M_{\nu 1}}{\alpha_{\nu 1}} = \frac{M_{\nu 2}}{\alpha_{\nu 2}} = \dots = M_{\nu \text{黑体}} = I(\nu, T) = \frac{c}{4} w(\nu, T)$$

●黑体的光谱辐出度最大，与构成黑体的材料无关。利用黑体可撇开材料的具体性质，普遍研究热辐射本身的规律。

●好的辐射体也是好的吸收体

### 三、黑体辐射谱 ( $M_\nu \sim \nu$ 关系)



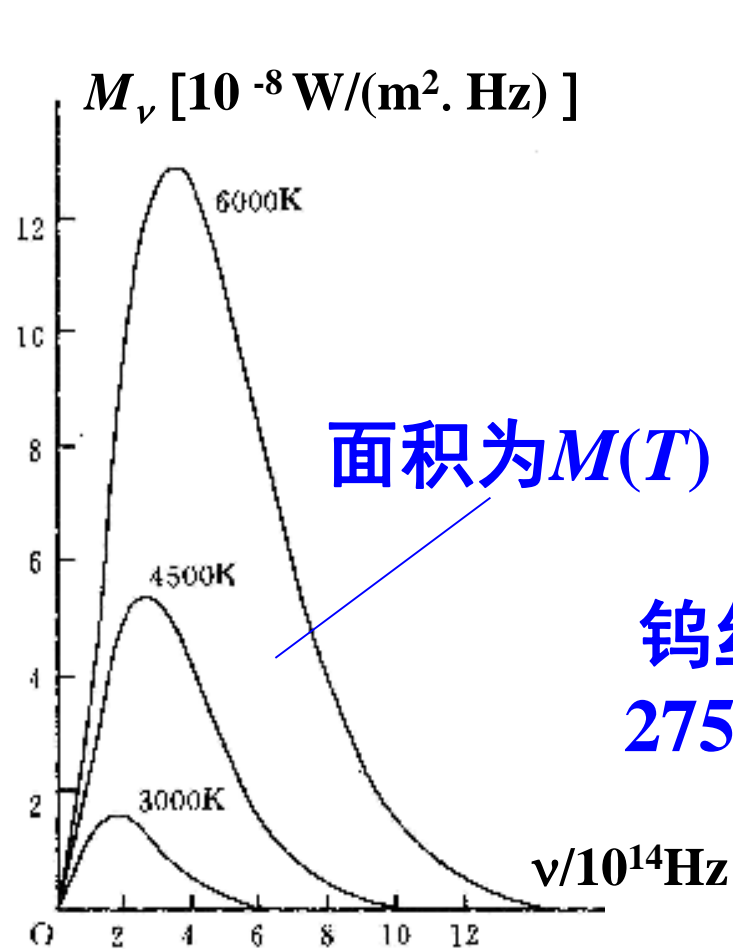
测量黑体辐射谱的实验装置

对黑体加热，放出热辐射。

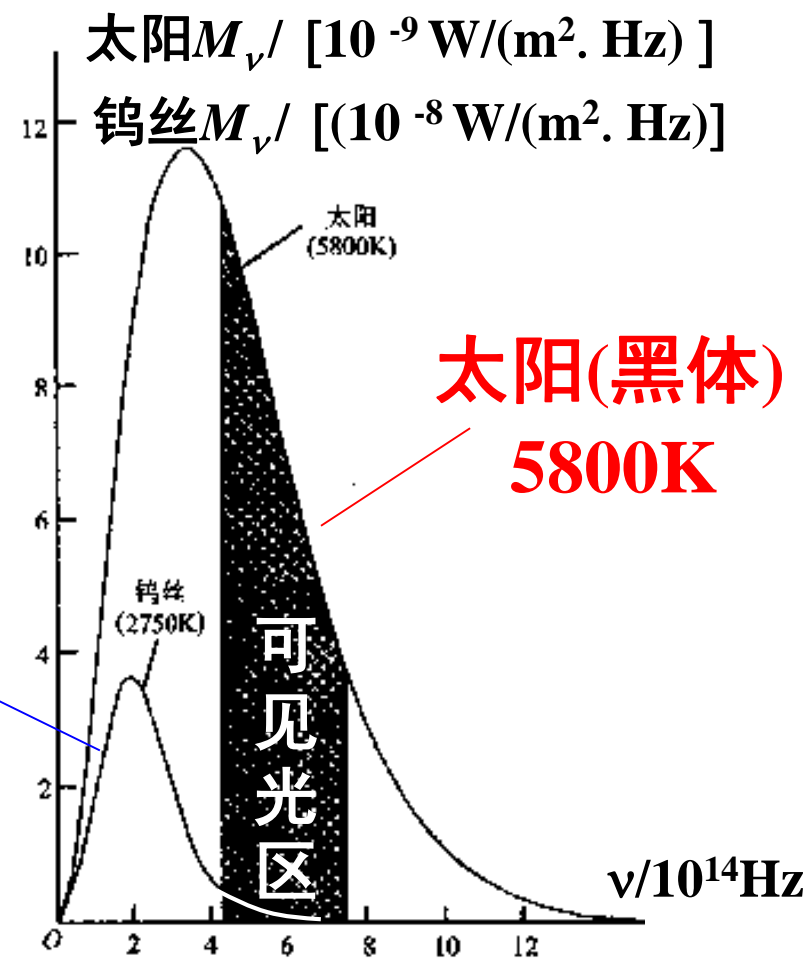
用光栅分光把辐射按频段分开。

用热电偶测各频段辐射强度，得  $M_\nu(T)$ 。

# 黑体辐射和热辐射实验曲线：



不同温度下的黑体辐射曲线



钨丝和太阳的热辐射曲线

# 黑体辐射的实验定律:

## 1、维恩位移定律

Wien displacement law

1893年由理论推导而得

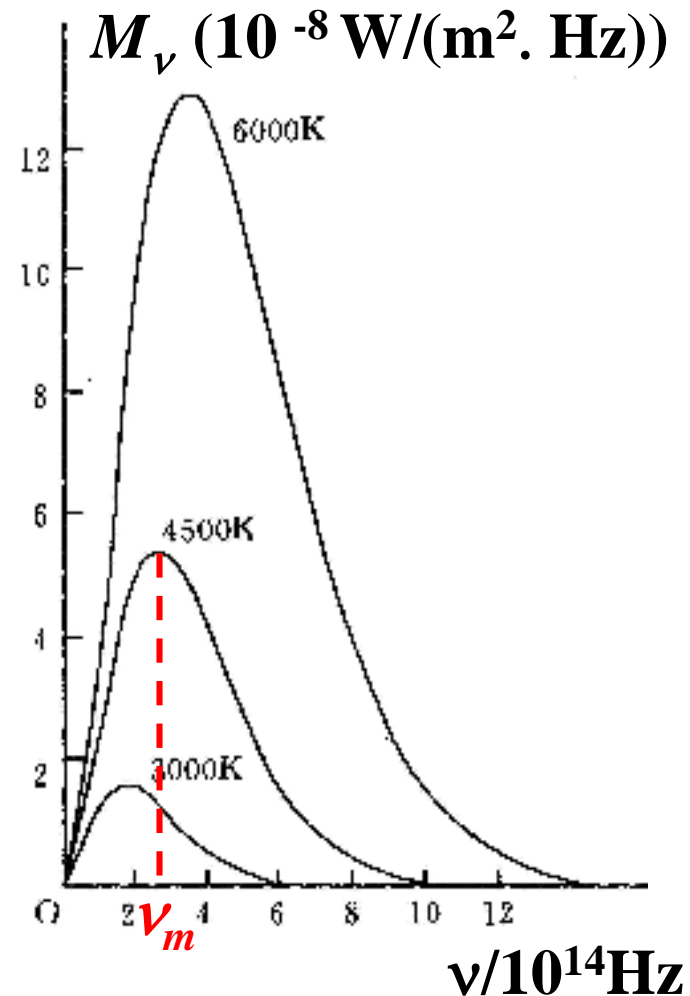
$$\nu_m = C_\nu T$$

$$C_\nu = 5.880 \times 10^{10} \text{ Hz/K}$$

或 
$$\lambda_m = \frac{b}{T}$$

$$b = 2.898 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$

设太阳为黑体, 测  $\lambda_m = 510 \text{ nm}$ , 得  $T_{\text{表面}} = 5700 \text{ K}$



## 2、斯特藩（Stefan） — 玻耳兹曼定律

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

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



Josef Stefan  
1835 -1893

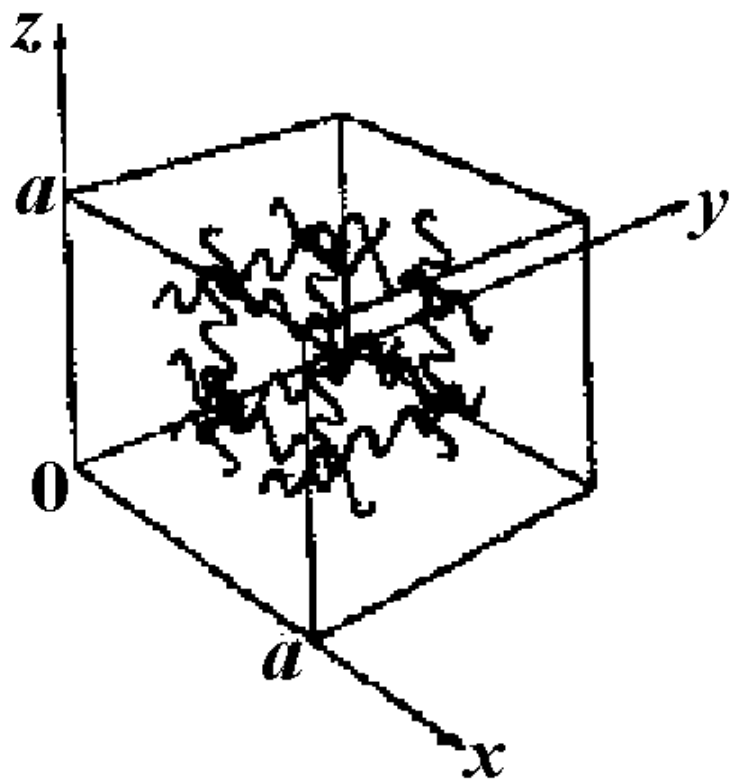
—— 斯特藩 — 玻耳兹曼常量

1879年斯特藩从实验上总结而得

1884年玻耳兹曼从理论上证明

斯特藩 — 玻耳兹曼定律和维恩位移定律是  
测量高温、遥感和红外追踪等的物理基础。

## 四、经典物理遇到的困难



辐射的振子模型

空腔壁产生的热辐射，  
可想象成是以壁为节点的  
许多驻波。

$$\lambda_n = \frac{2a}{n}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

如何从理论上找到符合实验的  $M_\nu(T)$  函数式？

# 维恩 (W. Wien) 公式



W. Wien (1864-1928)

1896年

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

其中  $\alpha$ ,  $\beta$  为常量。

高频段与实验符合很好，  
低频段明显偏离实验曲线。

## 瑞利(Rayleigh) — 金斯(Jeans)公式

1900年6月，瑞利按经典的能量均分定理，把空腔中简谐振子平均能量取与温度成正比的连续值，得到一个黑体辐射公式



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

$$k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$$

低频段与实验符合很好，高频段明显偏离实验曲线。

$$\nu \rightarrow \infty, M_{\nu} \rightarrow \infty$$

“紫外灾难”！

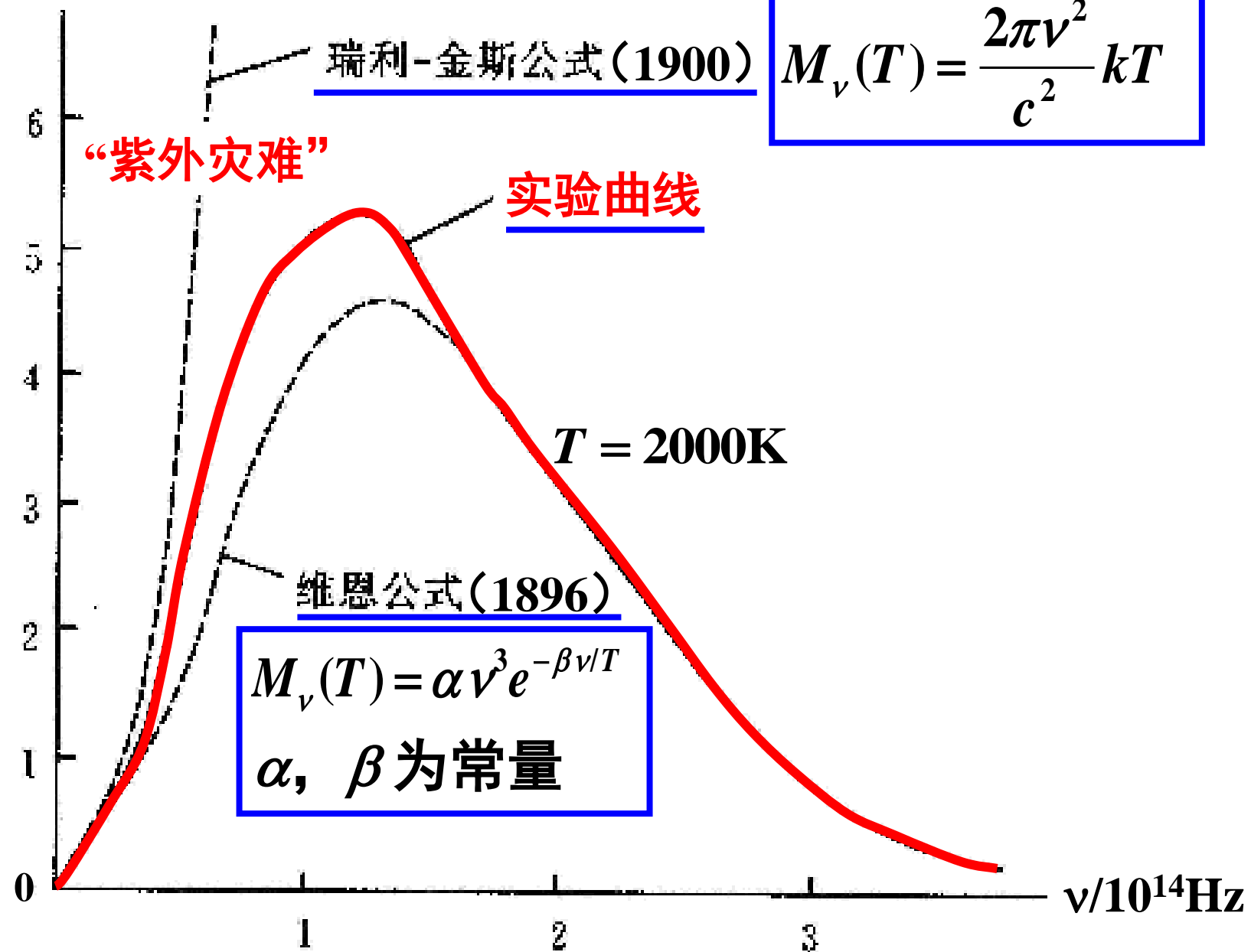
L. Rayleigh(1842-1919)





**James Jeans**  
**1877 - 1946**

$M_\nu$  ( $10^{-9}$  W/(m<sup>2</sup>·Hz))



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**：

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



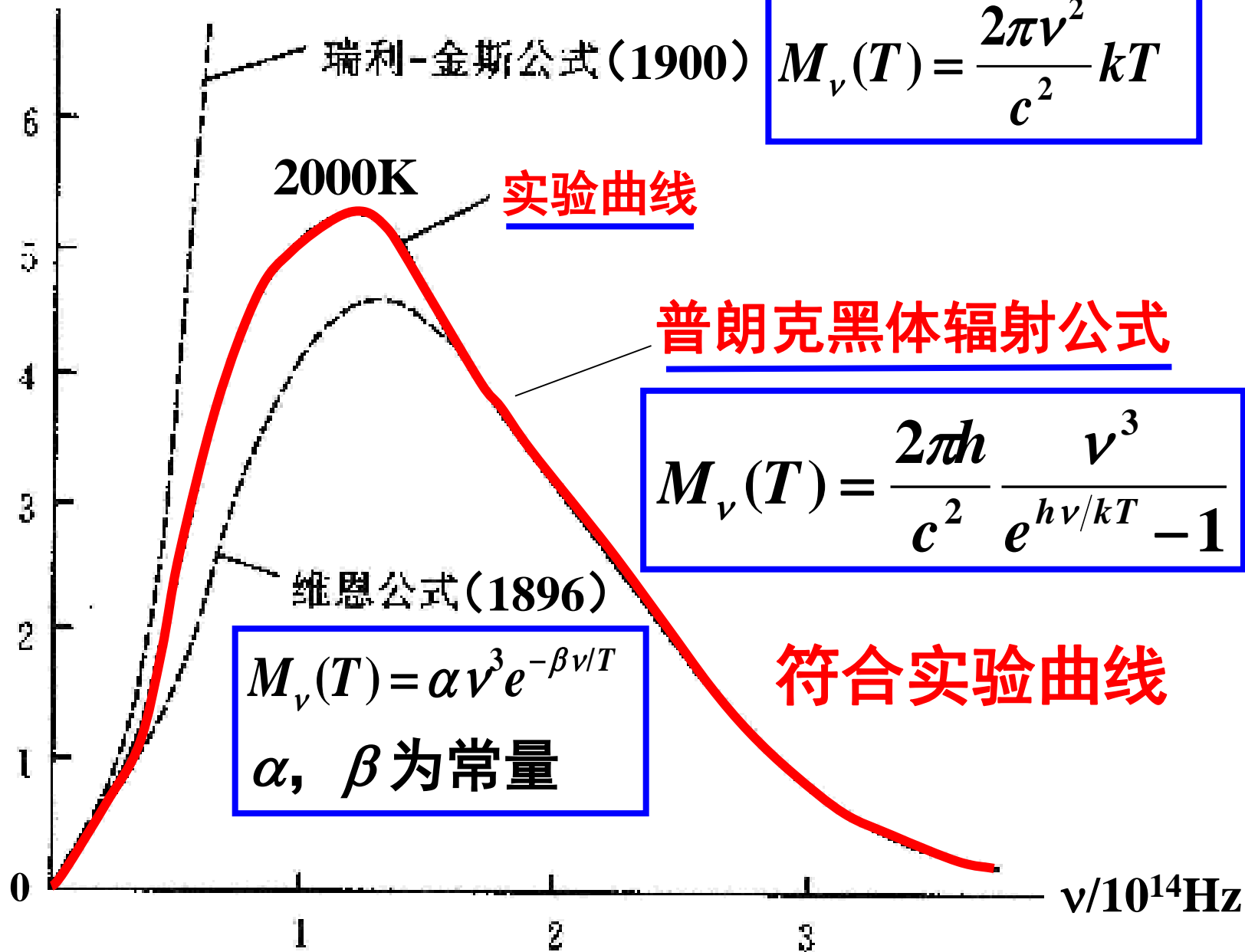
**普朗克常量：**  $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

$= 4.136 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$

Max Planck  
1858 - 1947

**在全波段与实验曲线惊人地符合！**

$M_\nu$  ( $10^{-9}$  W/(m<sup>2</sup>·Hz))



尽管与实验符合得很好,但是正如爱因斯坦所说,没有理论支持的经验,仍然是不可信的。所以,作为第二步,就需要为这个经验公式找到一个能够令人信服的理论解释。

**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：空腔内壁的分子、原子的振动可以看成是许多带电的简谐振子，这些简谐振子可以辐射和吸收能量，并与空腔内的辐射达到平衡。从空腔小孔辐射出的电磁波，就是由这些空腔内壁的简谐振子辐射出的。

普朗克大胆地假设：频率为  $\nu$  的简谐振子的能量值，只能取  $\varepsilon_0 = h\nu$  的整数倍。即，简谐振子的能量是量子化的（quantization），只能取下面的一系列特定的分立值

$$\varepsilon_0, 2\varepsilon_0, 3\varepsilon_0, \dots$$

能量  $\varepsilon_0 = h\nu$  称为**能量子**(quantum of energy),  
空腔内的辐射就是由各种频率的能量子组成。  
上述假设称为**普朗克能量子假设**。

在这一假设基础上，再运用经典的统计物理方法就可推出普朗克黑体辐射公式。

普朗克把上述推导写成了一篇论文，题为“正常谱能量分布律的理论”。这就是 1900 年 12 月 14 日普朗克向德国物理学会提交的论文，它宣告了量子论的诞生。

能量子的假设对于经典物理来说是离经叛道的，就连普朗克本人当时都觉得难以置信。为回到经典的理论体系，在一段时间内他总想用能量的连续性来解决黑体辐射问题，但都没有成功。





能量子概念的提出  
标志了量子物理学的诞生，普朗克为此获得  
1918年诺贝尔物理学奖。

普朗克 (1858—1947) 德国人  
(60岁获诺贝尔奖)

**在1918年4月普朗克六十岁生日庆祝会上，  
爱因斯坦说：**

在科学的殿堂里有各种各样的人：有人爱科学是为了满足智力上的快感；有的人是为了纯粹功利的目的。而普朗克热爱科学是为了得到现象世界那些普遍的基本规律，这是他无穷的毅力和耐心的源泉。… …他成了一个以伟大的创造性观念造福于世界的人。

由普朗克公式可导出其他所有热辐射公式：

$$M_{\nu}(T) = \frac{2\pi h}{c^2} \frac{\nu^3}{e^{h\nu/kT} - 1}$$
$$\left\{ \begin{array}{l} \text{积分} \rightarrow M = \sigma T^4 \\ \text{求导} \rightarrow \nu_m = C_{\nu} T \\ \text{低频} \rightarrow M_{\nu}(T) = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT \\ \text{高频} \rightarrow M_{\nu}(T) = \alpha \nu^3 e^{-\beta\nu/T} \end{array} \right.$$

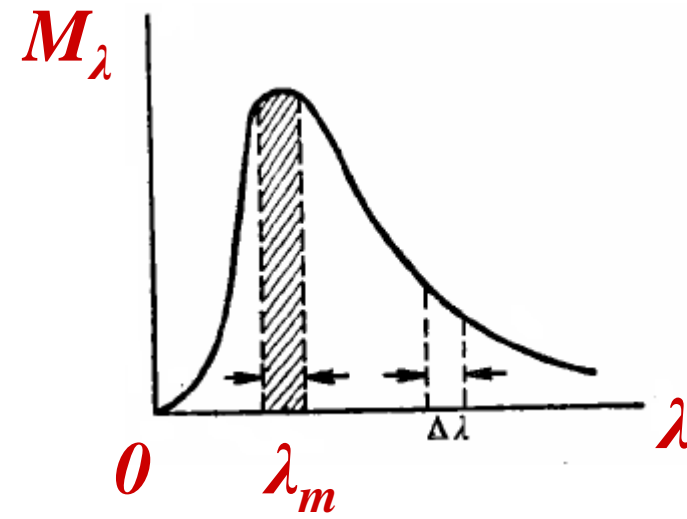
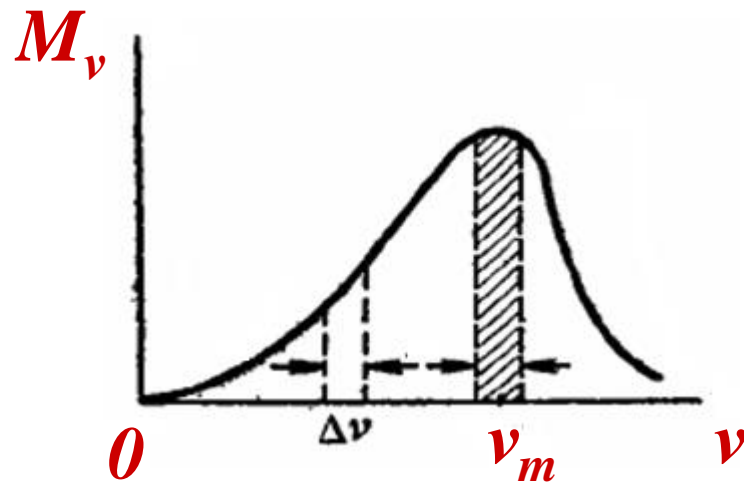
1921 年叶企孙, W.Duane, H.H.Palmer 测得：

$$h = (6.556 \pm 0.009) \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

$$1986 \text{ 年推荐值: } h = 6.6260755 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

$$1998 \text{ 年推荐值: } h = 6.62606876 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

$$\text{一般取: } h \approx 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$



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

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

$$\nu_m = C_{\nu} T$$

$$\lambda_m = b/T$$

$$\lambda_m \nu_m \neq c$$

$$C_{\nu} = 5.880 \times 10^{10} \text{ Hz/K}$$

$$b = 2.898 \times 10^{-3} \text{ m K}$$

例26.1 黑体在某一温度时的总辐射出射度为 $6.8\text{W}/\text{cm}^2$ ,  
试求这时光谱辐射出射度具有最大值的波长。

解：

$$M = \sigma T^4$$

$$\lambda_m T = b$$

$$\lambda_m = \frac{b}{T} = b \left( \frac{\sigma}{M} \right)^{1/4}$$

$$= 2.898 \times 10^{-3} \times \left( \frac{5.67 \times 10^{-8}}{6.8 \times 10^4} \right)^{\frac{1}{4}} \text{ m} = 2.8 \text{ } \mu\text{m}$$

## 26.2光电效应 (photoelectric effect)

**光电效应：**光照射某些金属时，能从表面释放出电子的效应。

**光电效应中**产生的电子称为“**光电子**”。

光电效应引起的现象是**赫兹**在1887年发现的，  
当1896年**J.J.汤姆孙**发现了电子之后，**勒纳德**才  
证明所发出的带电粒子是电子。

# 实验规律

## ① 饱和电流

在 $\nu$ 一定时,  $i_m \propto I$ 。

## ② 截止电压

光电子的最大初动能与光强无关。

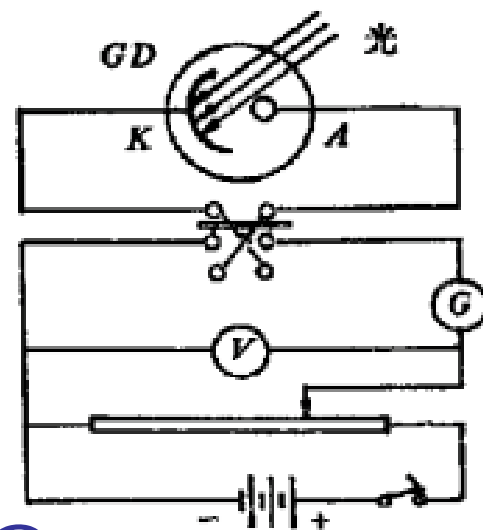
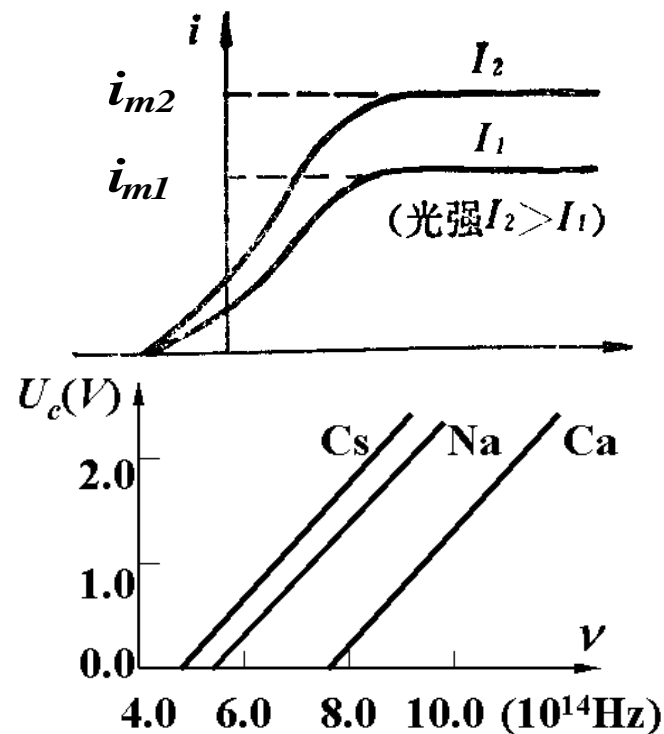
## ③ 截止频率（红限）

截止电压  $U_c = K\nu - U_0$  与  $I$  无关；

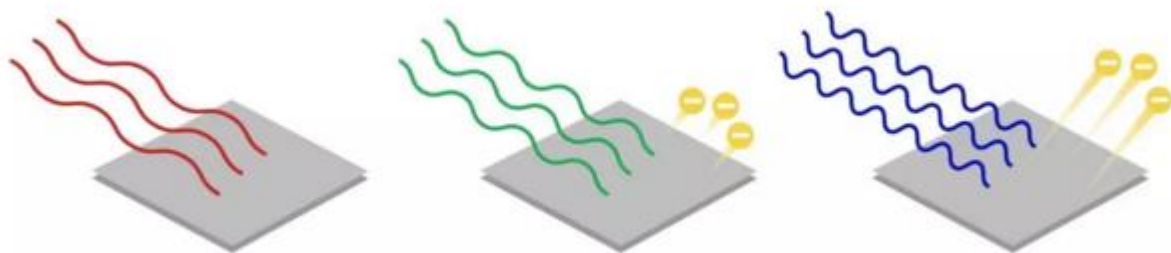
存在红限频率  $\nu_0 = \frac{U_0}{K}$ 。

## ④ 弛豫时间 $< 10^{-9}s$

波动理论的困难：不能解释以上②—④



金属	钨	钙	钠	钾	铷	铯
红限 $\nu_0$ ( $10^{14}\text{Hz}$ )	10.95	7.73	5.53	5.44	5.15	4.69
逸出功 $A(\text{eV})$	4.54	3.20	2.29	2.25	2.13	1.94





## 26.3 光的二象性、光子

### 一、爱因斯坦的光子理论

当普朗克还在寻找他的能量子的经典理论的根源时，爱因斯坦却大大发展了能量子的概念。

#### 爱因斯坦光量子假设（1905）：

- 电磁辐射由以光速  $c$  运动的局限于空间某一小范围的光的能量子单元 —— 光子 所组成，

$$\text{光子能量 } \varepsilon = h\nu$$

- 光量子具有 “整体性”

光的发射、传播、吸收都是量子化的。

一束光就是以速率  $c$  运动的一束光子流。

光强  $I = N \cdot h\nu$   $N$ : 光子数通量

## 二、光子理论对光电效应的解释

一个光子将全部能量交给一个电子，  
电子克服金属对它的束缚，从金属中逸出。

$$\frac{1}{2}mv_m^2 = h\nu - A \quad A: \text{逸出功}$$

●光子打出光电子是瞬时发生的( $10^{-9}\text{s}$ )

● $I \uparrow \rightarrow N \uparrow \rightarrow$  单位时间打出光电子多  $\rightarrow i_m \uparrow$

● $h\nu > A$  时才能产生光电效应，当  $\nu < A/h$  时，

不发生光电效应，所以存在：**红限频率**

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

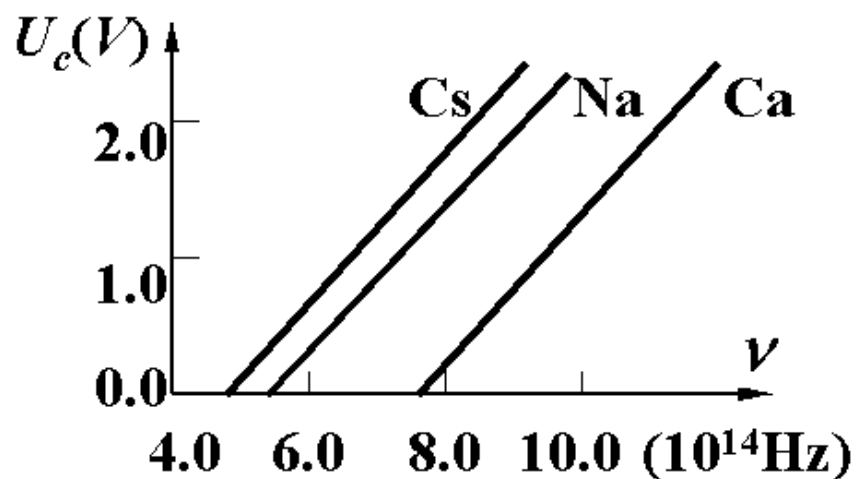
**光量子假设解释了光电效应的全部实验规律！**

但是光量子理论在当时并未被物理学界接受。

1913年，当普朗克、能斯特、鲁本斯、瓦尔堡联合提名爱因斯坦为普鲁士科学院院士时，在推荐书上说：

“总之，我们可以说，几乎没有一个现代物理学的重要问题是爱因斯坦没有做过巨大贡献的。当然他有时在创新思维中会迷失方向，例如，他对光量子的假设。可是我们不应该过分批评他，因为即使在最准确的科学里，要提出真正新的观点而不冒任何风险也是不可能的。”

1916年密立根 (R.A.Milikan) 做了精确的光电效应实验，利用  $U_c - \nu$  的直线斜率  $K$ ，定出  $h = 6.56 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$ 。



$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{2} m v_m^2 &= \underline{h \nu} - A \\ eU_c &= \underline{eK \nu} - eU_0 \end{aligned} \right\}$$

$\longrightarrow h = eK$

这和当时用其他方法定出的  $h$  符合得很好。从而进一步证实了爱因斯坦的光子理论。尽管如此，密立根还是认为光子理论是完全站不住脚的。可见，一个新思想要被人们接受是相当困难的。

### 三、光的波粒二象性 (dualism)

$$\begin{array}{ll} \text{波动性特征:} & \nu, \lambda \\ \text{粒子性特征:} & E, m, p \end{array} \left\{ \begin{array}{l} E = h\nu \\ m = \frac{h\nu}{c^2} \\ p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} \end{array} \right.$$

在前面提到的1913年的推荐书中被嘲笑的光量子假设指的就是上述爱因斯坦于 1905 年大胆提出的想法。可是爱因斯坦不理这些嘲笑，继续把他的想法向前推进，于 1916 年确定了光量子的动量，进而发展为对康普顿效应的划时代的认识。



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



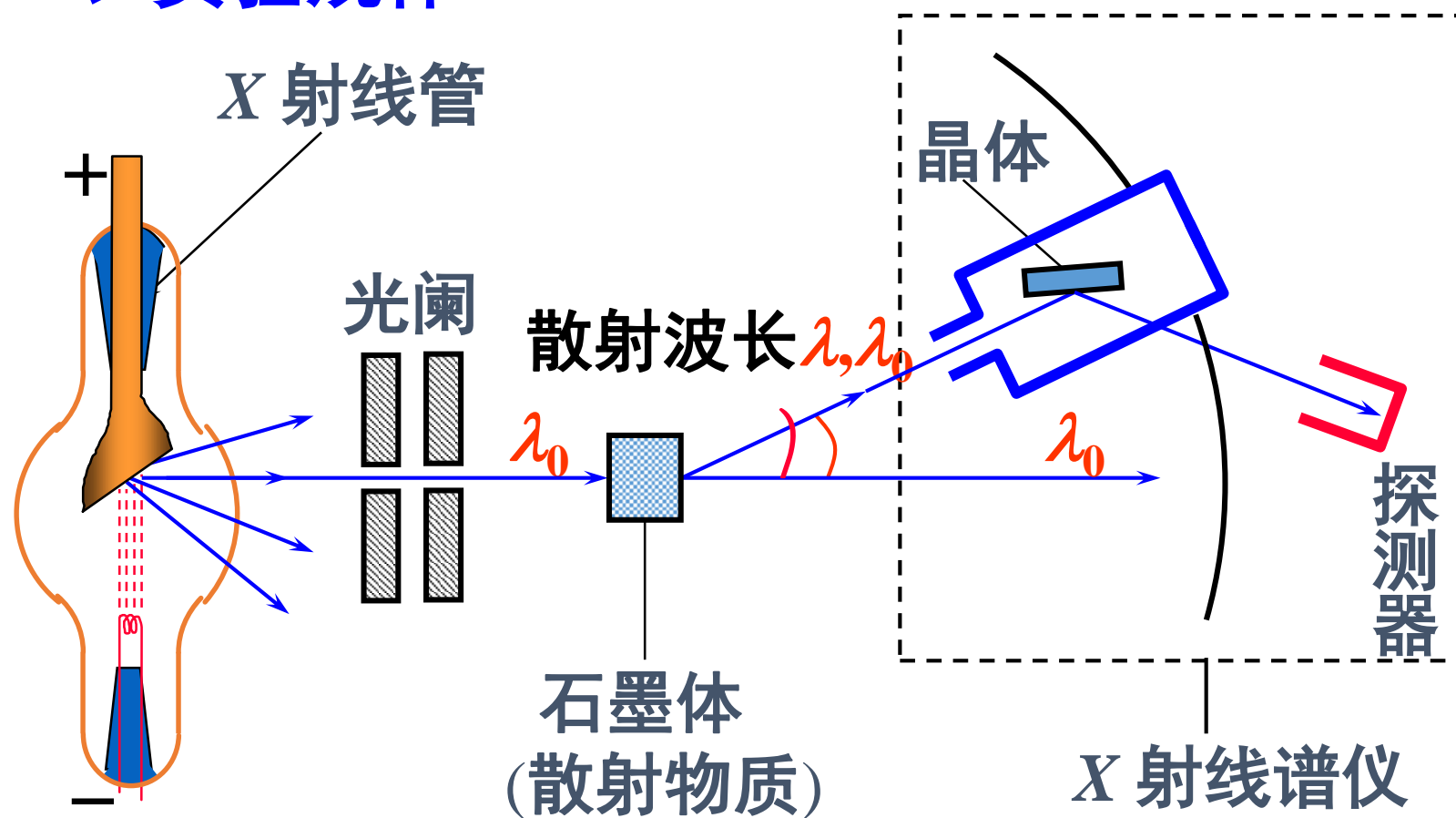
1868 — 1953

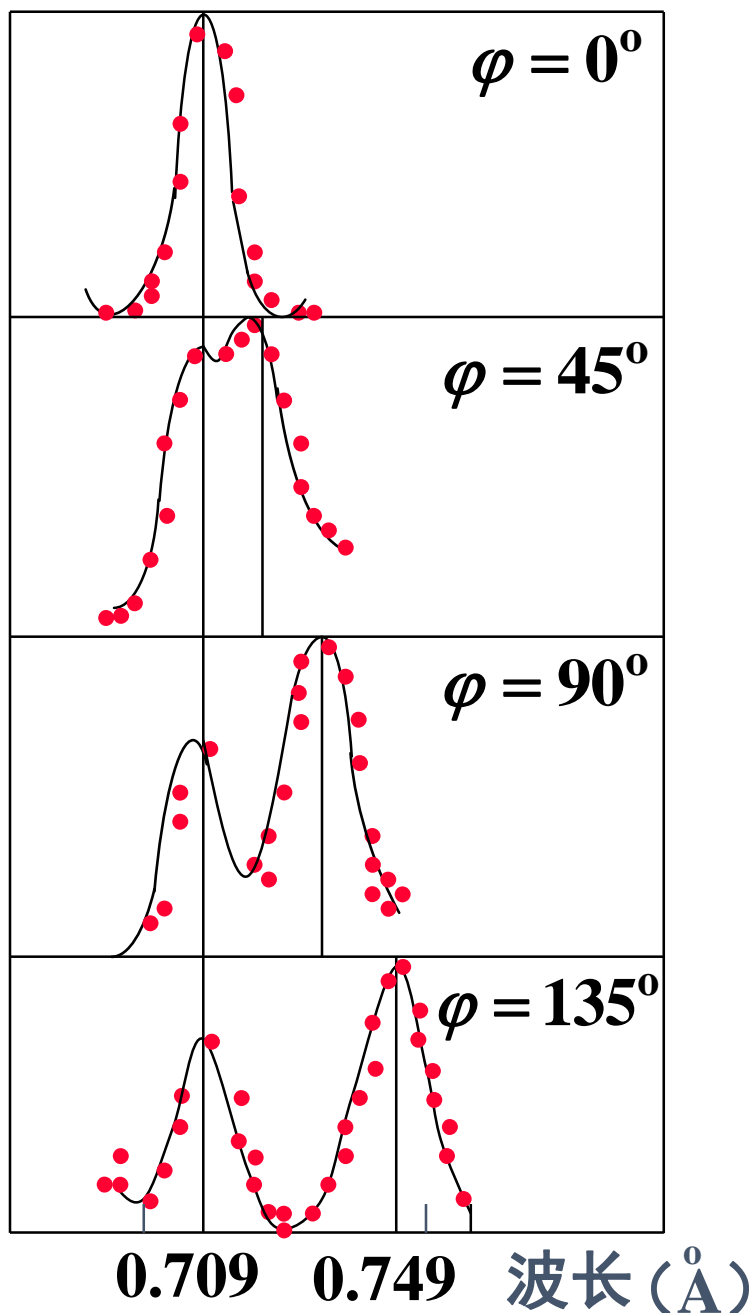
密立根由于研究基本电荷和光电效应，特别是通过著名的油滴实验，证明电荷有最小单位，获得1923年诺贝尔物理学奖

## 26.4 康普顿散射 (Compton effect)

1922–23年康普顿研究了X射线在石墨上的散射

### 一、实验规律





散射出现了 $\lambda \neq \lambda_0$ 的现象，  
称为康普顿散射。

散射曲线的三个特点：

1、除原波长 $\lambda_0$ 外，出现了  
移向长波方面的新的散射波  
长 $\lambda$ 。

2、新波长 $\lambda$ 随散射角 $\varphi$ 的  
增大而增大。

3、当散射角增大时，原波  
长的谱线强度降低，而新波  
长的谱线强度升高。



实验表明：新散射波长 $\lambda >$ 入射波长 $\lambda_0$ ，波长的偏移 $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$ 只与散射角 $\varphi$ 有关，和散射物质无关。实验规律是：

$$\Delta\lambda = \lambda_c (1 - \cos \varphi) = 2\lambda_c \sin^2 \frac{\varphi}{2}$$

$$\lambda_c = 0.0241\text{\AA} = 2.41 \times 10^{-3}\text{nm} \quad (\text{实验值})$$

$\lambda_c$  称为电子的康普顿波长

只有当入射波长 $\lambda_0$ 与 $\lambda_c$ 可比拟时，康普顿效应才显著，因此要用X射线才能观察到。

## 二、康普顿效应的理论解释

经典电磁理论难解释为什么有 $\lambda \neq \lambda_0$ 的散射，

康普顿用光子理论做了成功的解释：

- X射线光子与“静止”的“自由电子”弹性碰撞

（波长 $1\text{\AA}$ 的X射线，其光子能量 $\varepsilon \sim 10^4 \text{ eV}$ ，

外层电子束缚能 $\sim \text{eV}$ ，室温下 $kT \sim 10^{-2} \text{ eV}$ ）

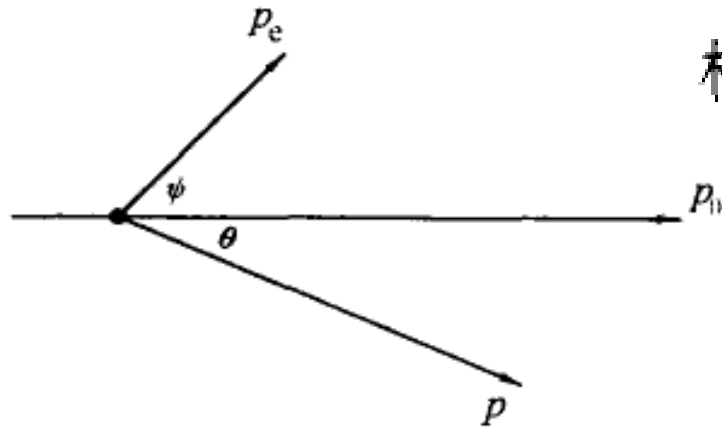
- 碰撞过程中能量与动量守恒

碰撞→光子把部分能量

传给电子 → 光子的能量↓

→ 散射X射线频率↓ 波长↑

设光子在散射前后的动量和能量分别为  $(\mathbf{p}_0, E_0)$  和  $(\mathbf{p}, E)$ ,  
 电子在散射后获得动量  $\mathbf{p}_e$  和动能  $E_k$ ,  
 散射光子和电子动量与入射光子动量的夹角分别为  $\theta$  和  $\psi$ ,

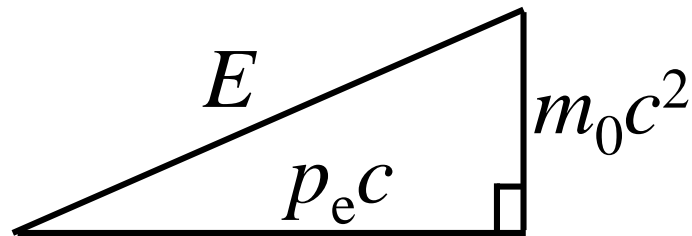


根据动量守恒和能量守恒可以写出

$$p_e^2 = p_0^2 + p^2 - 2p_0p \cos \theta \quad (1)$$

$$E_0 - E = E_k \quad (2)$$

其中 (2) 式可改写成



动质能三角形

$$(p_0 - p)c = \sqrt{p_e^2 c^2 + m_0^2 c^4} - m_0 c^2$$

$$\begin{aligned} p_e^2 &= (p_0 - p + m_0 c)^2 - m_0^2 c^2 \\ &= p_0^2 + p^2 - 2p_0 p + 2(p_0 - p)m_0 c \quad (3) \end{aligned}$$

(3) - (1)得:

$$(p_0 - p)m_0c = p_0p(1 - \cos \theta)$$
$$\frac{1}{p} - \frac{1}{p_0} = \frac{1}{m_0c}(1 - \cos \theta)$$

代入光子动量与波长的关系  $p = \frac{h}{\lambda}$ , 即得

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = \lambda_c (1 - \cos \theta)$$

等于实验值

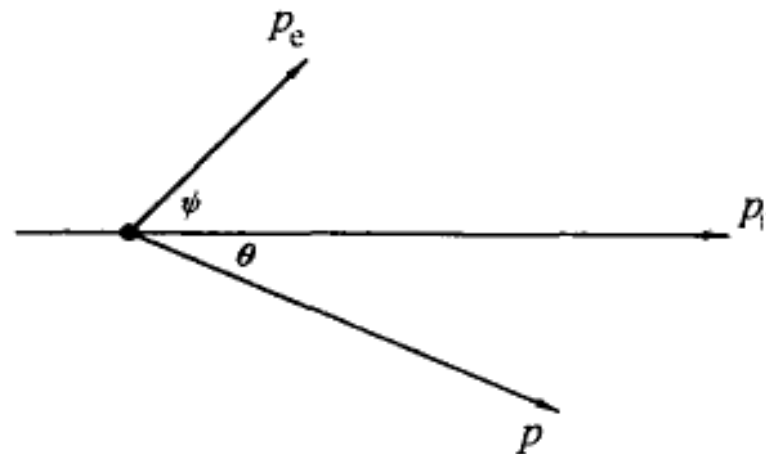
$$\lambda_c = \frac{h}{m_0c} = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{9.1 \times 10^{-31} \times 3 \times 10^8} \text{ m} = 2.43 \times 10^{-3} \text{ nm}$$

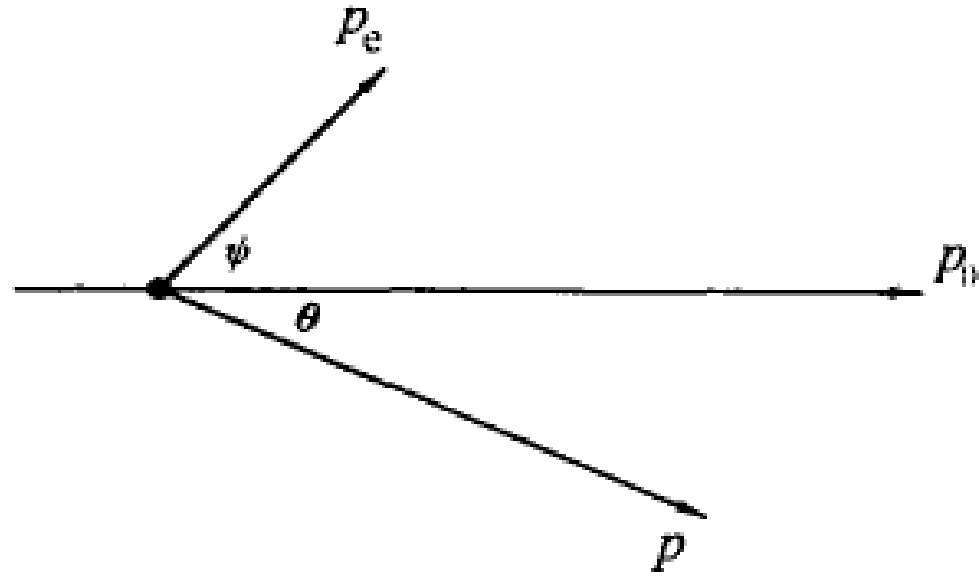
写出动量守恒的分量表达式

$$p_0 = p \cos \theta + p_e \cos \psi$$

$$p \sin \theta = p_e \sin \psi$$

还可推出电子反冲角  $\psi$  的公式





$$\begin{aligned}
 \tan \psi &= \frac{p \sin \theta}{p_0 - p \cos \theta} = \frac{\sin \theta}{p_0/p - \cos \theta} = \frac{\sin \theta}{\lambda/\lambda_0 - \cos \theta} \\
 &= \frac{\sin \theta}{(1 + \lambda_c/\lambda_0)(1 - \cos \theta)} = \frac{1}{(1 + \lambda_c/\lambda_0) \tan \frac{\theta}{2}}
 \end{aligned}$$

## 为什么康普顿散射中还有原波长 $\lambda_0$ 呢？

这是因为光子还可与石墨中被原子核束缚得很紧的电子发生碰撞。

内层电子束缚能 $10^3 \sim 10^4 \text{eV}$ ，不能视为自由，而应视为与原子是一个整体。所以这相当于光子和整个原子碰撞。  $\because m_{\text{原子}} \gg m_{\text{光子}}$

$\therefore$  在弹性碰撞中，入射光子几乎不损失能量，即 散射光子波长不变，散射线中还有与原波长相同的射线。

### 三、康普顿散射实验的意义

- 支持了“光量子”概念，进一步证实了

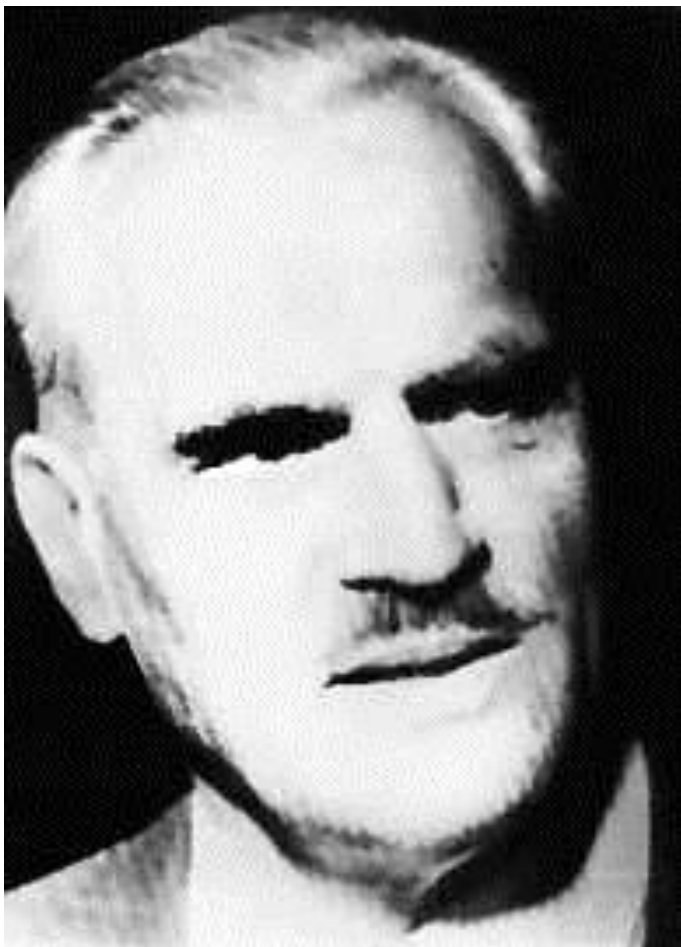
$$\varepsilon = h\nu$$

- 首次实验证实了爱因斯坦提出的“光量子具有动量”的假设

$$p = \varepsilon/c = h\nu/c = h/\lambda$$

- 证实了在微观领域的单个碰撞事件中，  
动量和能量守恒定律仍然是成立的。

康普顿获得1927年诺贝尔物理学奖。



**康普顿**  
**(A. H. Compton)**  
**美国人(1892-1962)**



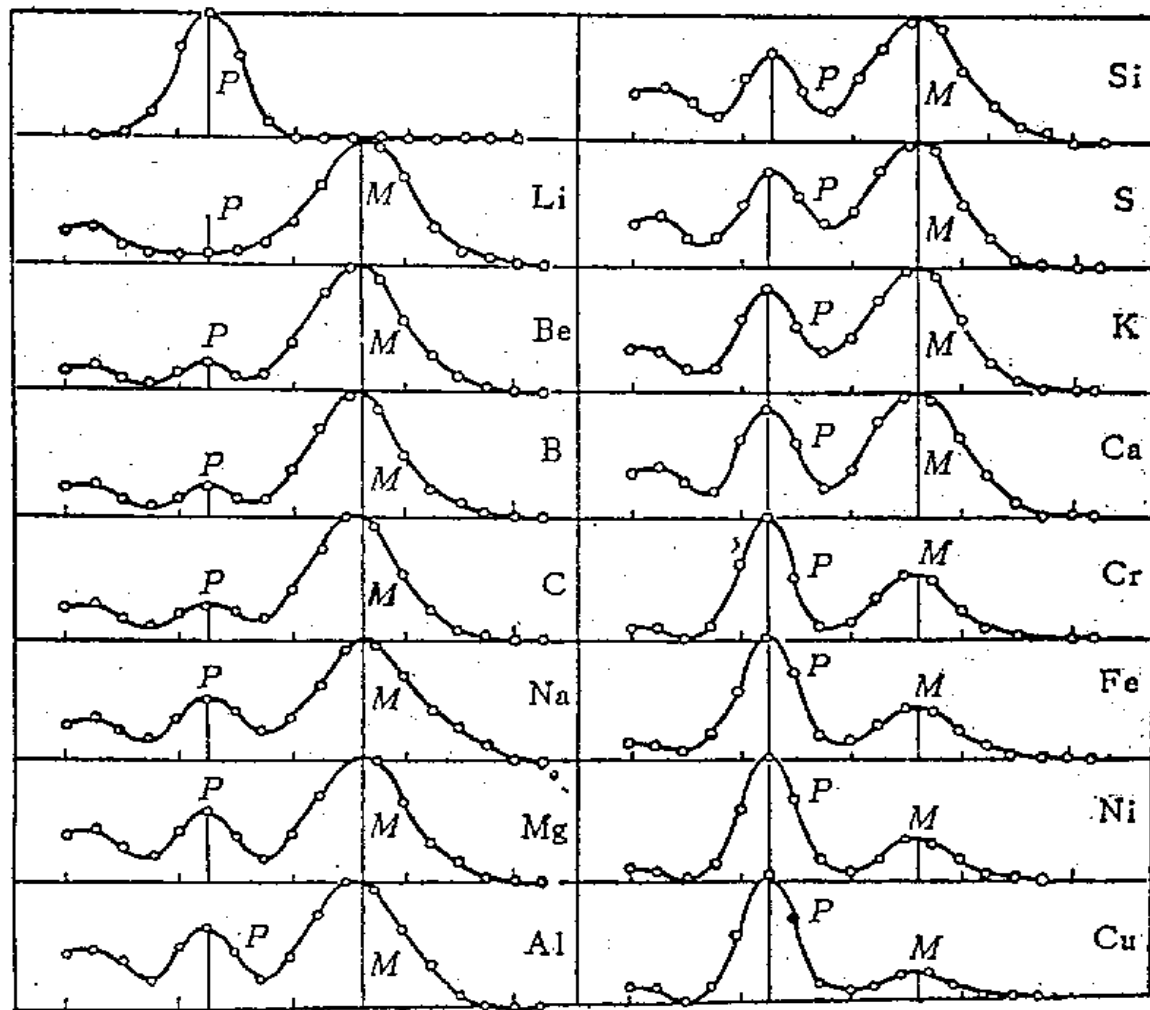


#### 四、吴有训对康普顿效应研究的贡献

吴有训1923年参加了发现康普顿效应的研究工作，1925–26年他用银的X射线（ $\lambda_0 = 5.62\text{nm}$ ）为入射线，以15种轻重不同的元素为散射物质，在同一散射角（ $\varphi = 120^\circ$ ）测量各种波长的散射光强度，作了大量X射线散射实验。这对证实康普顿效应作出了重要贡献。

吴有训的康普顿效应散射实验曲线：

散射角  
 $\varphi = 120^\circ$



曲线表明：1、 $\Delta\lambda$ 与散射物质无关，仅与散射角有关。

2、轻元素  $I_\lambda > I_{\lambda_0}$ ，重元素  $I_\lambda < I_{\lambda_0}$ 。

## 吴有训工作的意义：

- 证实了康普顿效应的普遍性
- 证实了两种散射线线的产生机制：

$\lambda$  — 外层电子（自由电子）散射

$\lambda_0$  — 内层电子（整个原子）散射

在康普顿的一本著作 “X – Rays in theory and experiment”（1935）中，有19处引用了吴有训的工作。



20世纪50年代的吴有训

**吴有训（1897—1977）**

**物理学家、教育家、  
中国科学院副院长，  
1928年被叶企孙聘为清  
华大学物理系教授，  
曾任清华大学物理系  
主任、理学院院长。**

**对证实康普顿效应  
作出了重要贡献**

**26a结束**