二十世纪初物理学上空的两朵乌云

热学中的能量均分定则在气体比热和辐射能谱的解释中与实验结果不符，其中尤其以黑体辐射中的“紫外灾难”最为突出。

量子力学

迈克尔逊—莫雷实验的结果和以太漂移说之间的矛盾

相对论

1900年新春，开尔文在送别旧世纪时做演讲…

量子物理的产生

一、量子物理的产生---旧量子论

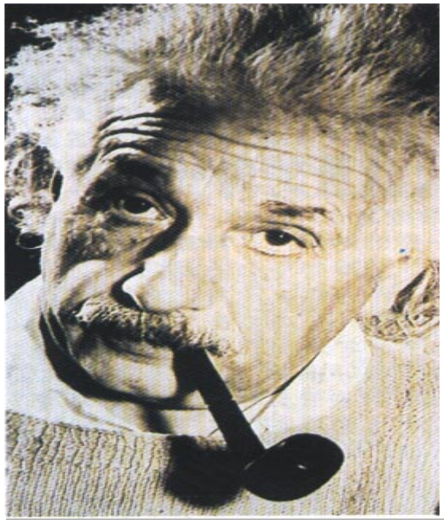
从经典物理学到量子力学过渡时期

1、黑体辐射和普朗克量子假说

2、光电效应和爱因斯坦光量子理论

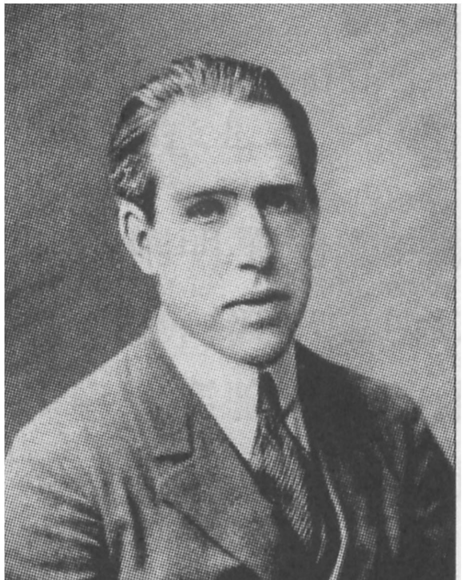
3、玻尔氢原子理论

1918年诺奖



爱因斯坦（德）

1921年诺奖



玻尔（丹麦）

1922年诺奖

量子物理的产生

二、量子力学的建立

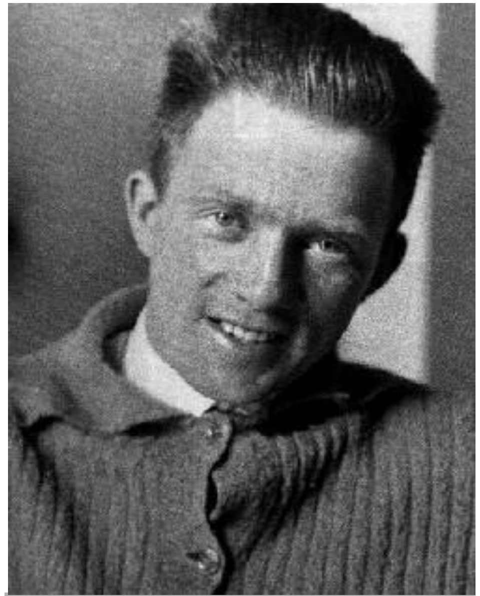
1、薛定谔的波动方程

2、海森伯的矩阵力学

3、狄拉克的《量子力学原理》 (1930)

1926年，海森堡和薛定谔从不同出发点建立了量子力学。

狄拉克统一相对论和量子论。



海森堡（德）

1932年获诺奖

薛定谔（奥地利）

1933年诺奖

狄拉克（英）

1933年诺奖

1927年第五届索尔威会议

实验基础与基本原理

19.1 量子物理学的早期证据

19.2 康普顿效应

19.3 微观粒子的波动性

19.4 概率波与概率幅

§1 量子物理学的早期证据

一、黑体辐射和普朗克量子假设

(一)几个新概念

1. 热辐射

实验表明：任何温度下，物体都向外辐射各种频率电磁波。

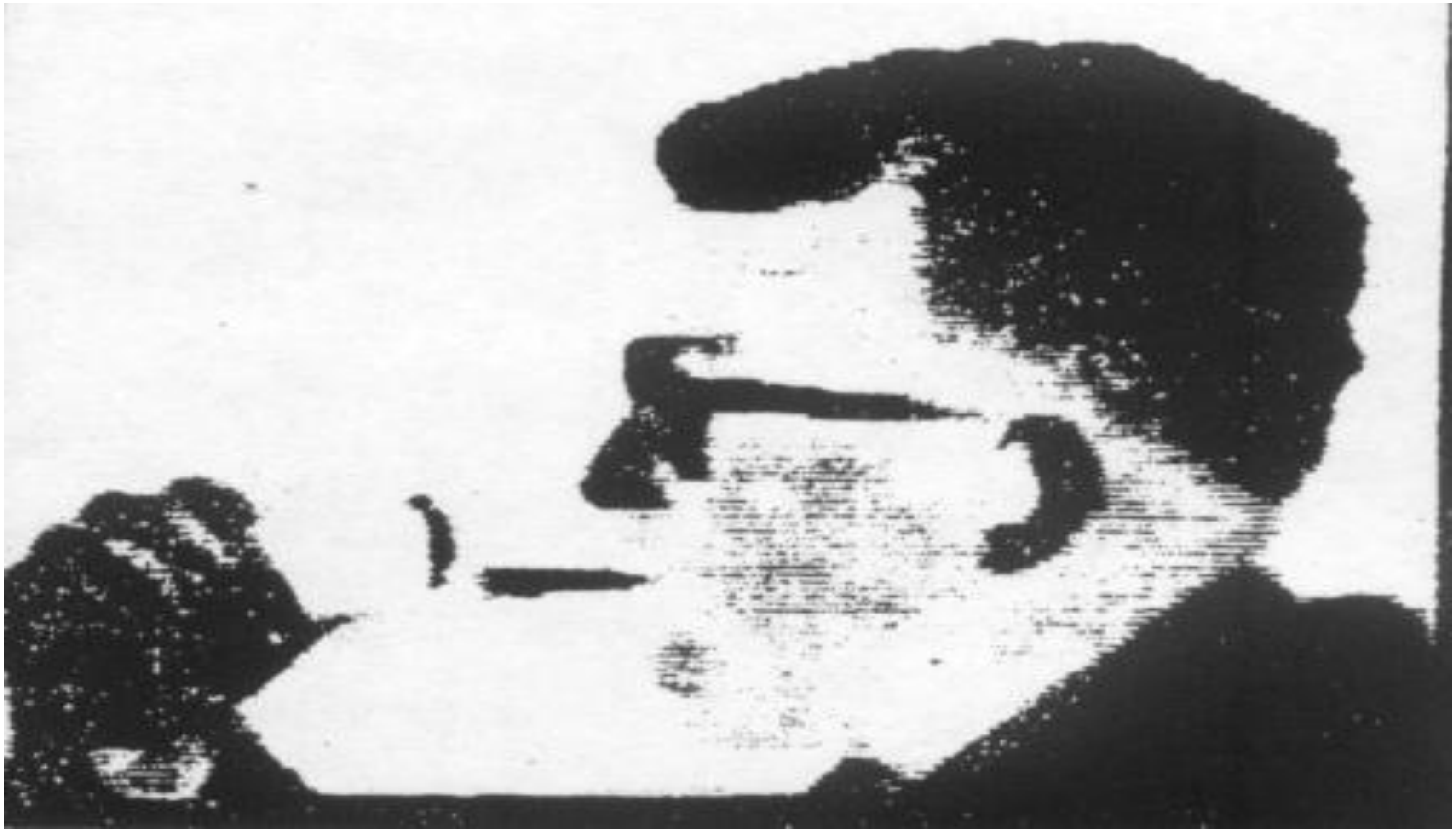
不同温度下，所发出各种电磁波的能量按频率有不同的分布。

实验：

基本性质： 温度↑ ⇨发射的能量↑ ⇨ 电磁波的短波成分↑

分子的热运动使物体辐射电磁波。这种辐射与温度有关，称为热辐射

低温物体（例如人体）也有热辐射，但辐射较弱，并且主要成分是波长较长的红外线。



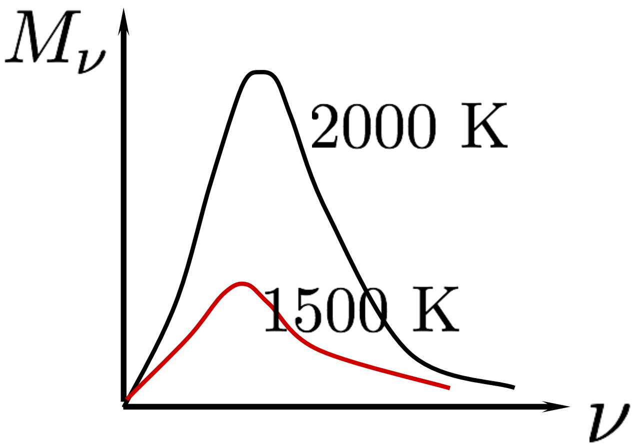
红外照相机拍摄的人的头部的热图

热的地方显白色，冷的地方显黑色

2. 单色辐射出射度 M_ν

单位时间内从温度为 T 的物体单位表面发出的频率在 $\nu - \nu + \mathrm{d}\nu$ 范围的电磁波的能量为 $\mathrm{d}M$

定义 $M_\nu = \dfrac{\mathrm{d}M}{\mathrm{d}\nu}$ 单位 W/(m²·Hz)



（总）辐射出射度 $M(T)$ —单位时间内从温度为 T 的物体单位表面发出的各种频率电磁波的能量总和

曲线下面积 ⟸ $M = \int_0^\infty M_\nu \mathrm{d}\nu$ 单位：W/m²

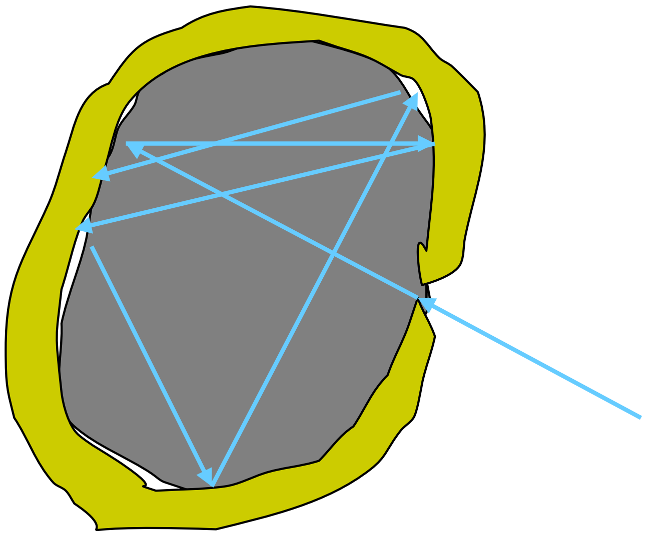
§1 量子物理学的早期证据

3. 黑体

实验表明：辐射能力越强的物体，其吸收能力也越强

能够完全吸收照射到它上面的各种频率的电磁波的物体称为黑体。

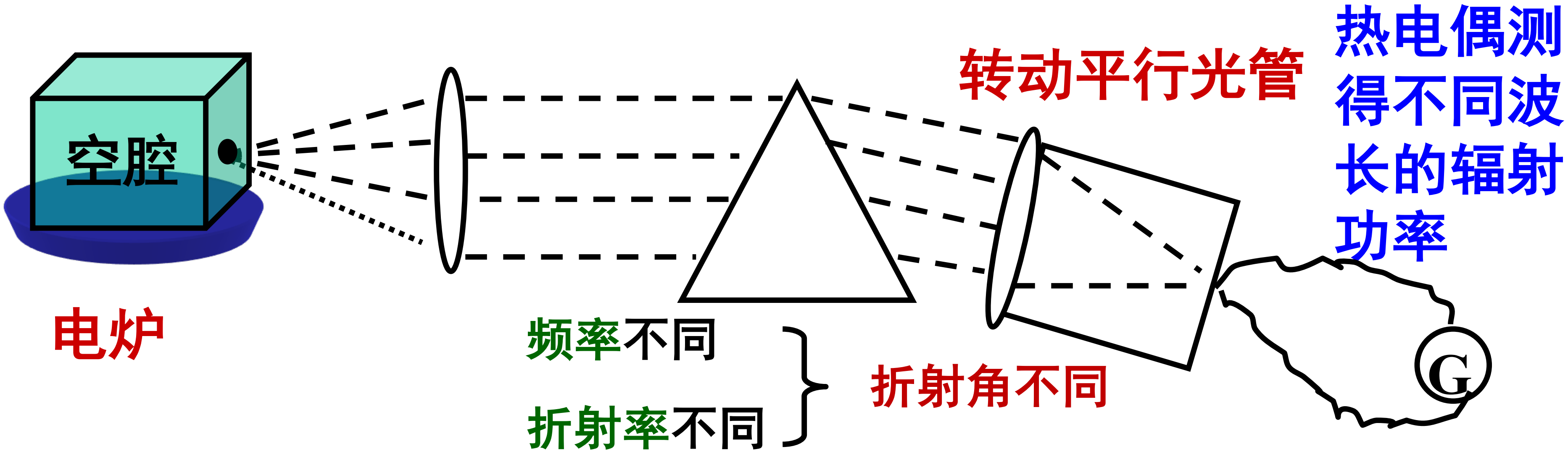
黑体不一定是黑色的，黑色的也不一定是黑体。



§1 量子物理学的早期证据

（二）两个实验定律

1. 斯特番—玻尔兹曼定律（1874年、1884年）



实验 ： 控制不同的恒定温度

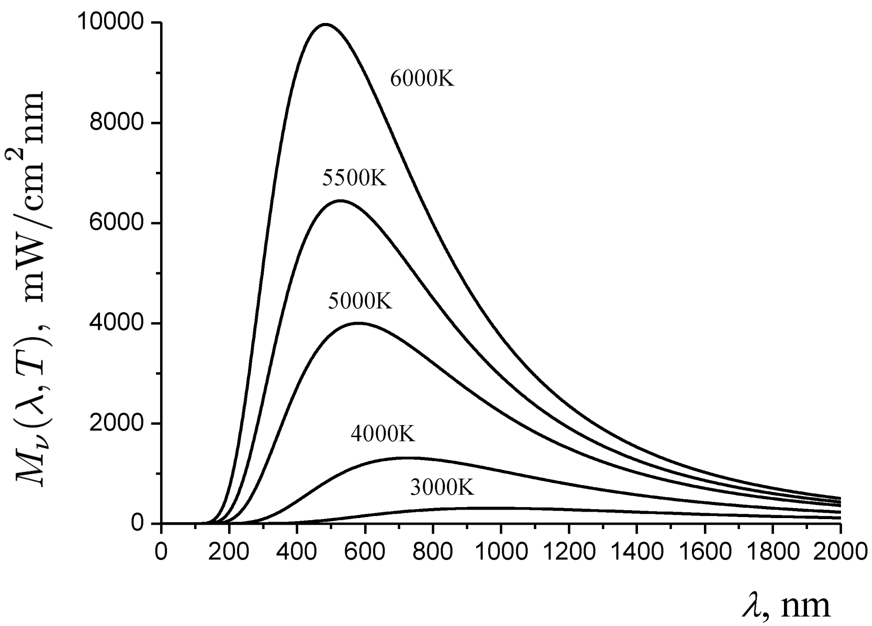
设置色散装置

测量黑体的单色辐出度

§1 量子物理学的早期证据

1. 斯特番—玻尔兹曼定律（1874年、1884年）

德国物理学家斯忒藩从实验结果中得出了黑体单位表面积单位时间的热辐射总能量与绝对温度的**四次方**成正比的定律，这个结果在1884年被玻耳兹曼从光的电磁理论和热力学理论做出了论证。



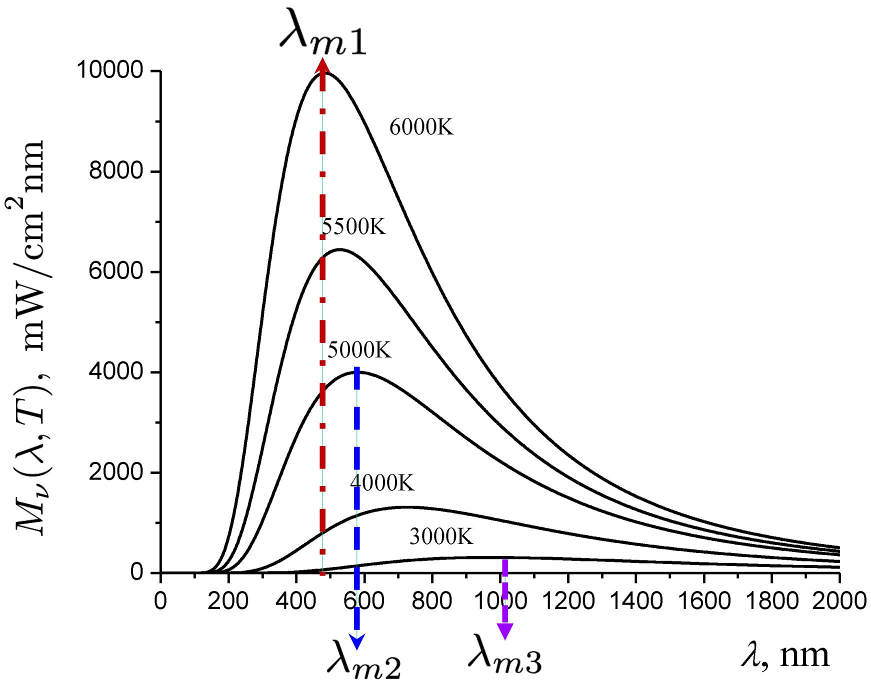
$$\boxed{M = \sigma T^4}$$

$$\sigma = 5.71 \times 10^{-8} (W/m^2K^4)$$

斯特藩-玻尔兹曼常数

§1 量子物理学的早期证据

2. 维恩位移定律



$$\boxed{\lambda_m T = b}$$

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

$$T_1 > T_2 > T_3$$

$$\lambda_{m1} < \lambda_{m2} < \lambda_{m2}$$

维恩，1911年诺贝尔物理学奖

斯特番-玻尔兹曼定律和维恩位移定律是黑体辐射的基本定律，现代广泛应用于高温测量、遥感、红外追踪等。

估算物体表面温度：

若太阳近似看作黑体，从太阳光谱测得

$$\lambda_m = 0.49\ \mu\text{m} \quad \text{(紫外区)}$$

$$T = \frac{b}{\lambda} = \frac{2.897 \times 10^{-3}}{0.49 \times 10^{-6}} \approx 5900\ \text{K}$$

估计地面的热辐射波段：

地球表面温度约为300 K

$$\lambda_m = \frac{b}{T} = \frac{2.897 \times 10^{-3}}{300} \approx 10\ \mu\text{m}$$

地面的热辐射主要处在红外波段 —— 红外遥感技术

§1 量子物理学的早期证据

例题： 先后两次测得炼钢炉测温孔单色辐出度的峰值波长 $\lambda_{m1}=0.8\ \mu m$、$\lambda_{m2}=0.4\ \mu m$ ，
求：（1）相应的温度比；（2）相应的辐射本领之比。

解：（1）根据维恩位移定律

$$\lambda_m T = b \rightarrow \frac{T_1}{T_2} = \frac{\lambda_{m2}}{\lambda_{m1}} = \frac{1}{2}$$

（2）根据斯特番-玻尔兹曼定律

$$M = \sigma T^4 \rightarrow \frac{M_1}{M_2} = (\frac{T_1}{T_2})^4 = \frac{1}{16}$$

§1 量子物理学的早期证据

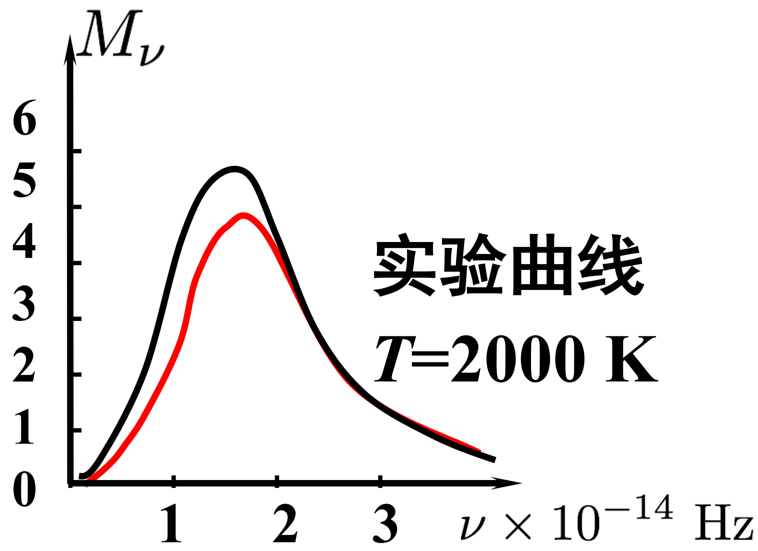
(三) 经典物理的困难

19世纪末，物理学最引人注目的课题之一——从理论上导出 M_ν 的数学式。

（1）维恩公式

1896年，维恩假设气体分子辐射的频率只与其速率有关，首先从理论上推出一个黑体辐射公式

$$M_\nu = \alpha \nu^3 e^{-\frac{\beta \nu}{T}}$$



短波范围与实验符合

§1 量子物理学的早期证据

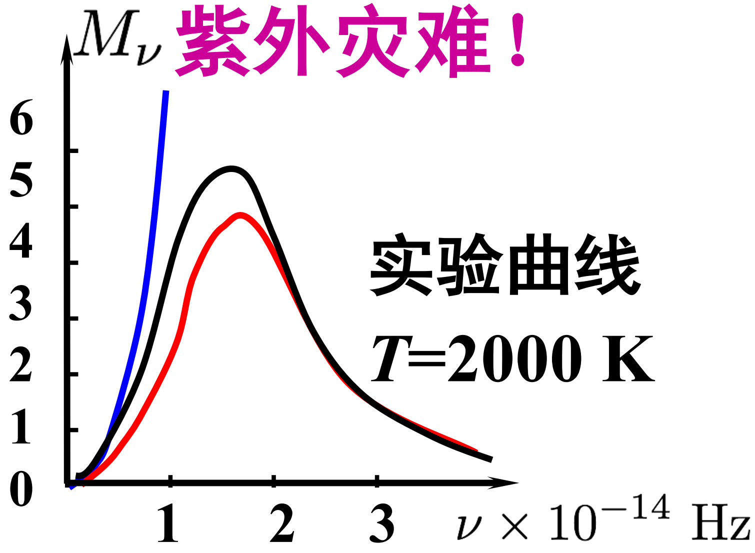
(三) 经典物理的困难

（2）瑞利—金斯公式

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

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

$k = 1.38 \times 10^{-23}$ s/K 玻尔兹曼常数



长波范围与实验符合，短波方向发散

$$\nu \to \infty, M_\nu \to \infty$$

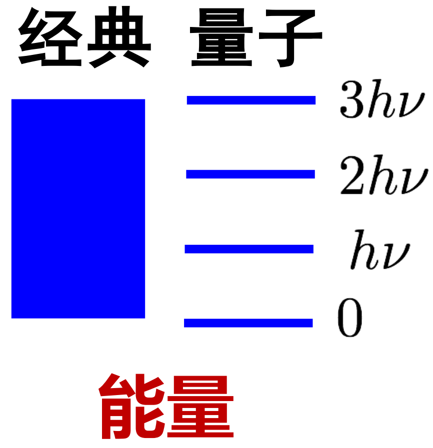
§1 量子物理学的早期证据

(四) 普朗克的能量子假设

辐射体由许多带电谐振子组成，谐振子的能量不连续。

1900年，普朗克提出能量子 $h\nu$

$$E = nh\nu \ (n = 1, 2, 3, \dots)$$



并根据玻尔兹曼统计法推出黑体辐射公式

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

与实验结果惊人符合！

$h = 6.63 \times 10^{-34}$ J.s

—— **普朗克常数**

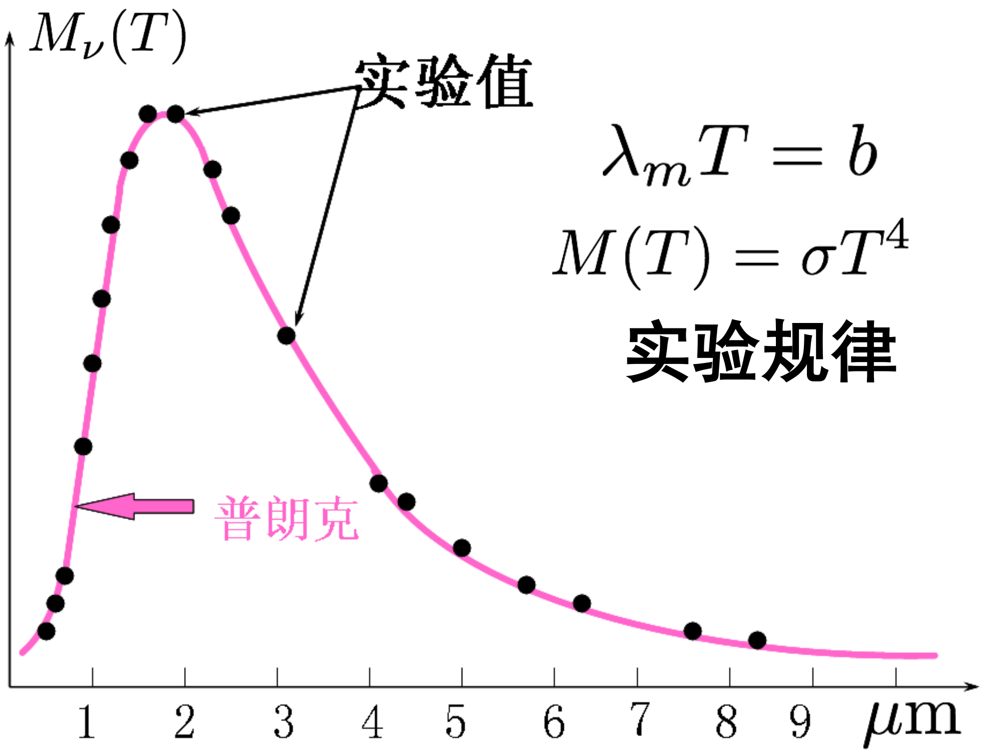
能量子概念的提出标志着量子力学的诞生

(四) 普朗克的量子假设

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

$$\frac{\mathrm{d}M_\lambda}{\mathrm{d}\lambda} = 0 \rightarrow \lambda_m T = b$$

$$M(T) = \int_0^\infty M_\nu \mathrm{d}\nu = \sigma T^4$$



$$\lambda_m T = b$$

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

实验规律

长波段： $h\nu \ll kT \quad \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \approx \frac{1}{1 + \frac{h\nu}{kT} - 1} = \frac{kT}{h\nu}$

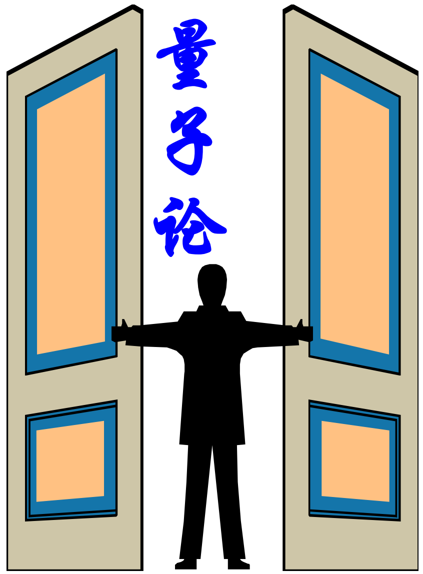
$M_\nu = \frac{2\pi\nu^2}{c^2}kT$ **瑞利—金斯公式**

短波段： $h\nu \gg kT \quad \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \approx \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}}} = e^{-\frac{h\nu}{kT}}$

$M_\nu = \alpha\nu^3 e^{-\frac{\beta\nu}{T}}$ **维恩公式**

普朗克的量子假设揭示了物质与辐射相互作用的普遍规律。
他比喻：能量如商店里卖啤酒，只能一瓶一瓶卖出。

他对自己的理论忐忑不安，“经典理论给了我们这样多有用的东西，因此，必须以最大的谨慎对待它，维护它......除非绝对必要，否则不要改变现有的理论。”
1910年，他提出发射能量不连续，吸收连续，啤酒卖出去后就成了流体。1914年，发射也连续只有相互碰撞时才不连续。



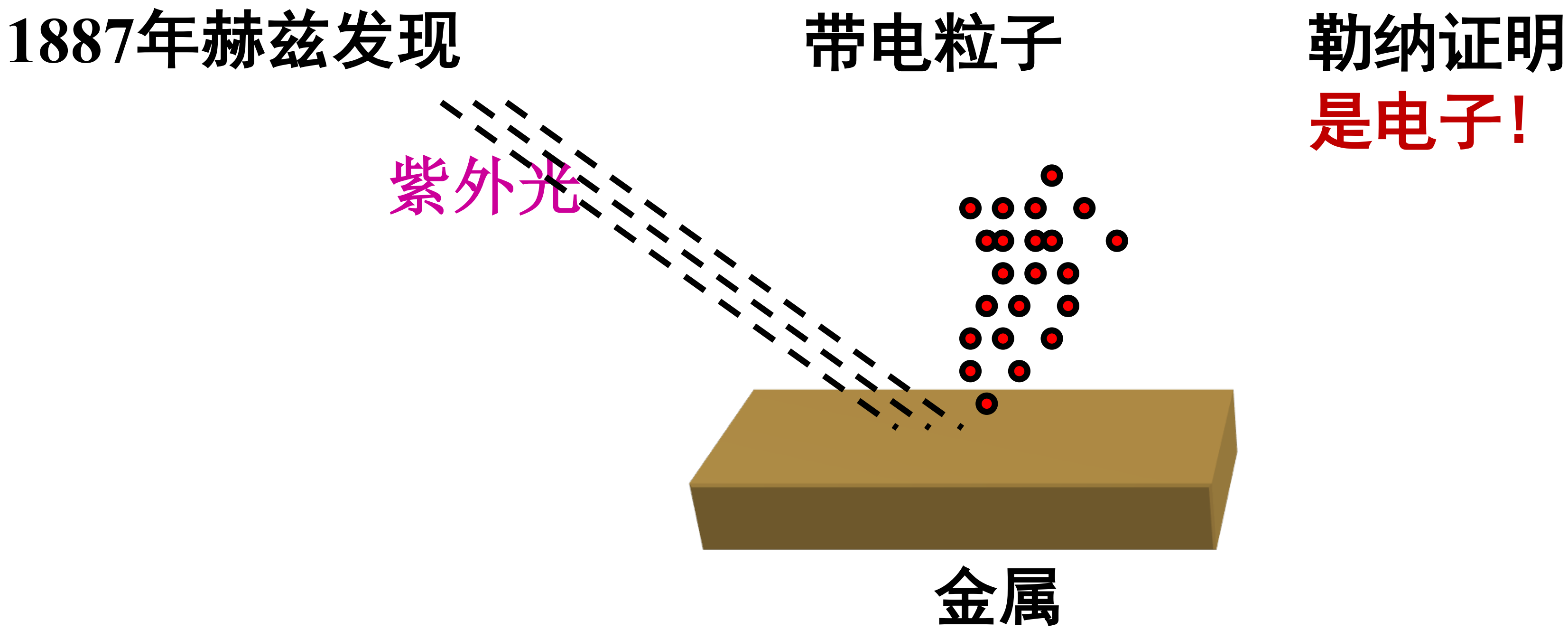
爱因斯坦、玻尔
勇敢地闯了进去！

“企图使基本作用量子与经典理论调和起来的这种徒劳无功的打算，我持续了很多年，它使我付出了巨大的精力”

墓碑上只刻着他的姓名和 $h = 6.62 \times 10^{-27}$ erg.s

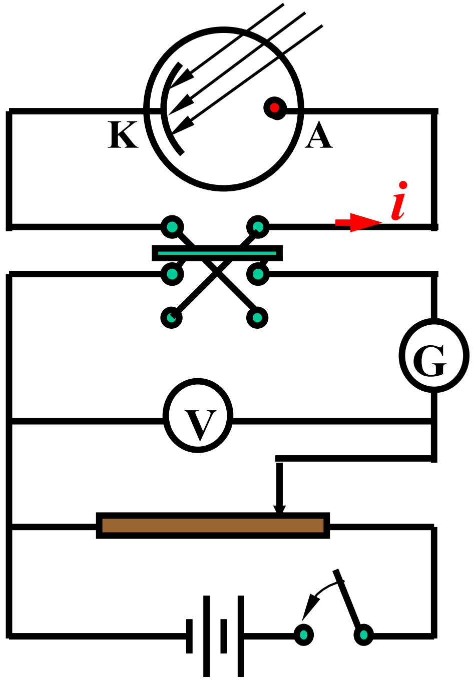
§1 量子物理学的早期证据

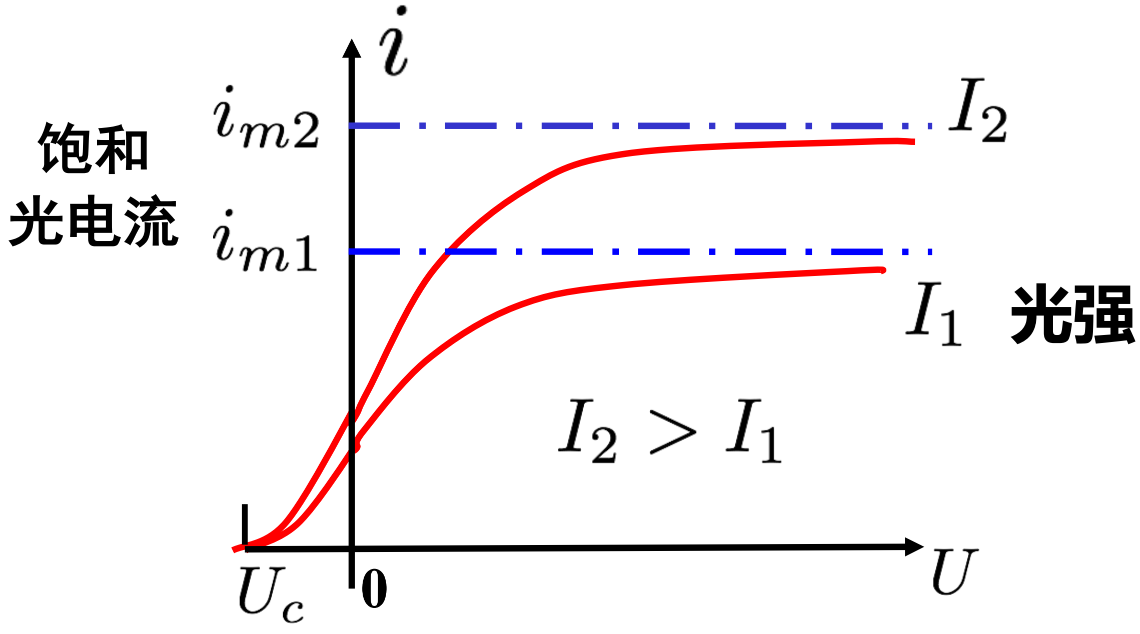
二、光电效应



电磁波照射下金属发射电子的现象称为光电效应

（一）光电效应的实验规律





1、存在饱和光电流：打出来的光电子全部被阳极吸收，饱和光电流的大小反映光电子的多少；

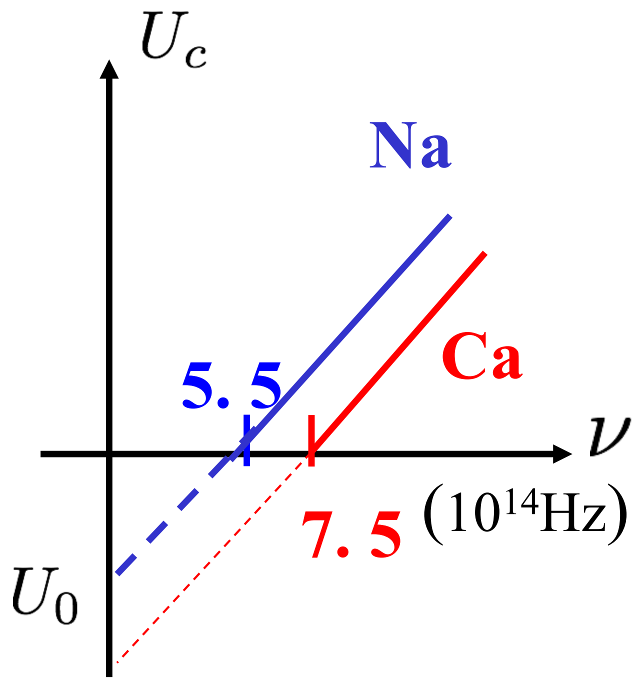
$$i_m \propto I$$

2、存在遏止电压：说明从阴极打出的最快的光电子由于受到电场的阻力，也不能达到阳极；

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

§1 量子物理学的早期证据

（一）光电效应的实验规律



3、遏止电压与光强无关，只与频率有关

$$U_c = K\nu - U_0 \begin{cases} \text{斜率}K\text{与材料无关} \\ \text{截距}U_0\text{与材料有关} \end{cases}$$

4、存在红限频率 ν_0

$\nu > \nu_0$ ：尽管光强极弱，光电效应也会在瞬间产生；

$\nu < \nu_0$ ：即使光强再强，也不会产生光电效应。

（二）经典物理学所遇到的困难

光的经典电磁理论：

电子从表面逸出，要克服原子的束缚即克服逸出功。外界给电子能量则可克服逸出功

1、光强大→电子获得的动能大→ U_c大。光波的强度与频率无关，电子吸收的能量也与频率无关

实验：U_c与光强无关、与频率成正比

2、只要光强足够，就应产生光电效应，不应存在红限频率ν_0！

实验：存在截止频率！

3、电子积累能量克服逸出功需要一段时间，光电效应不可能瞬时发生！实验：瞬时发生

§1 量子物理学的早期证据

（三）爱因斯坦光量子假设

1. 光量子　《关于光的产生和转化的一个启发性观点》1905

一束光就是一束以光速运动的粒子流，这些粒子称为**光量子（光子）**。不同颜色的光，其光子的能量不同，频率为 ν 的光，其一个光子的能量为：

$$\varepsilon = h\nu$$

h：普朗克常数

单色光的强度：$I = Nh\nu$　　N：光子数目

光量子具有**“整体性”**：只能作为一个整体被辐射或吸收

2. 对光电效应的解释

电子吸收一个光子能量之后，一部分用于电子从金属表面逸出所需的逸出功 ，另一部分转化为光电子的动能：

$$\boxed{h\nu = \frac{1}{2}mv^2 + A}$$ —— **光电效应方程**

1、光强大，单位体积光子数多，单位时间内释放的光电子也多，所以饱和光电流也大；

2、电子只要吸收一个光子就可以从金属表面逸出，所以无须时间的累积；

3、遏止电压： $eU_c = \frac{1}{2}mv^2 = h\nu - A$

4、红限频率： $h\nu - A = \frac{1}{2}mv^2 \geq 0 \rightarrow \nu_0 = \frac{A}{h}$

3. 光子的特征量

粒子性

$$\varepsilon = h\nu$$

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

$$p = mc = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

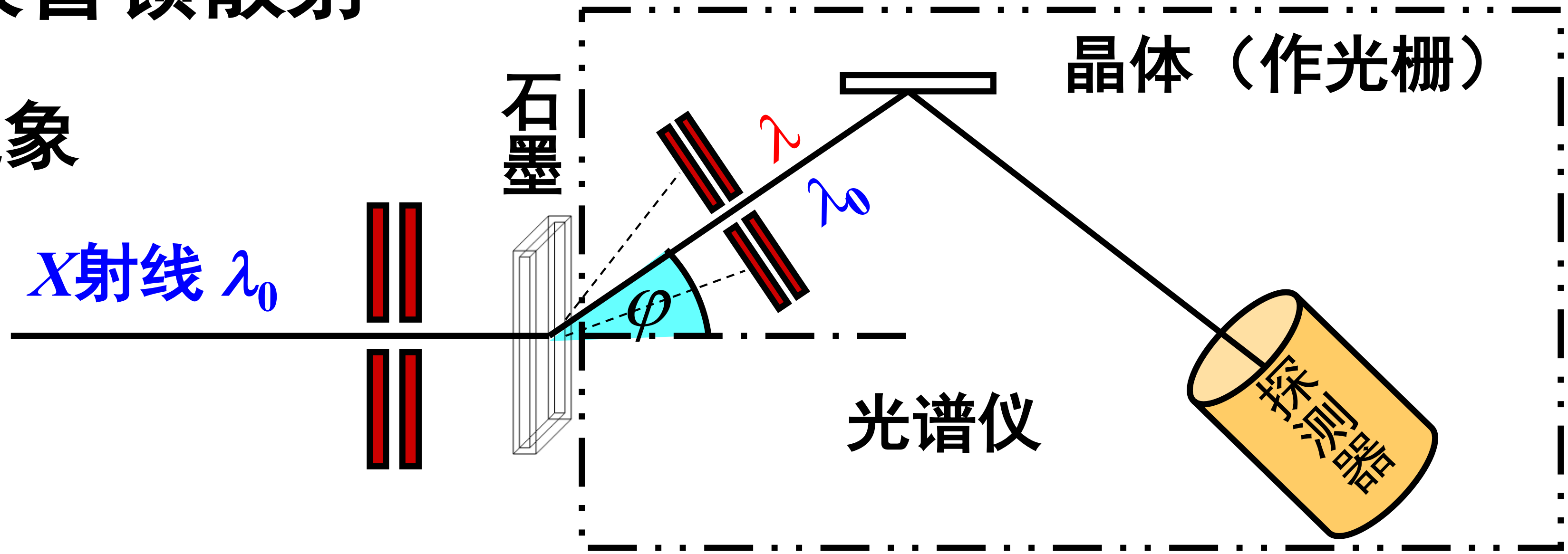
$$m_0 = 0$$

波动性

光具有波粒二象性

§ 2 康普顿散射

一、现象

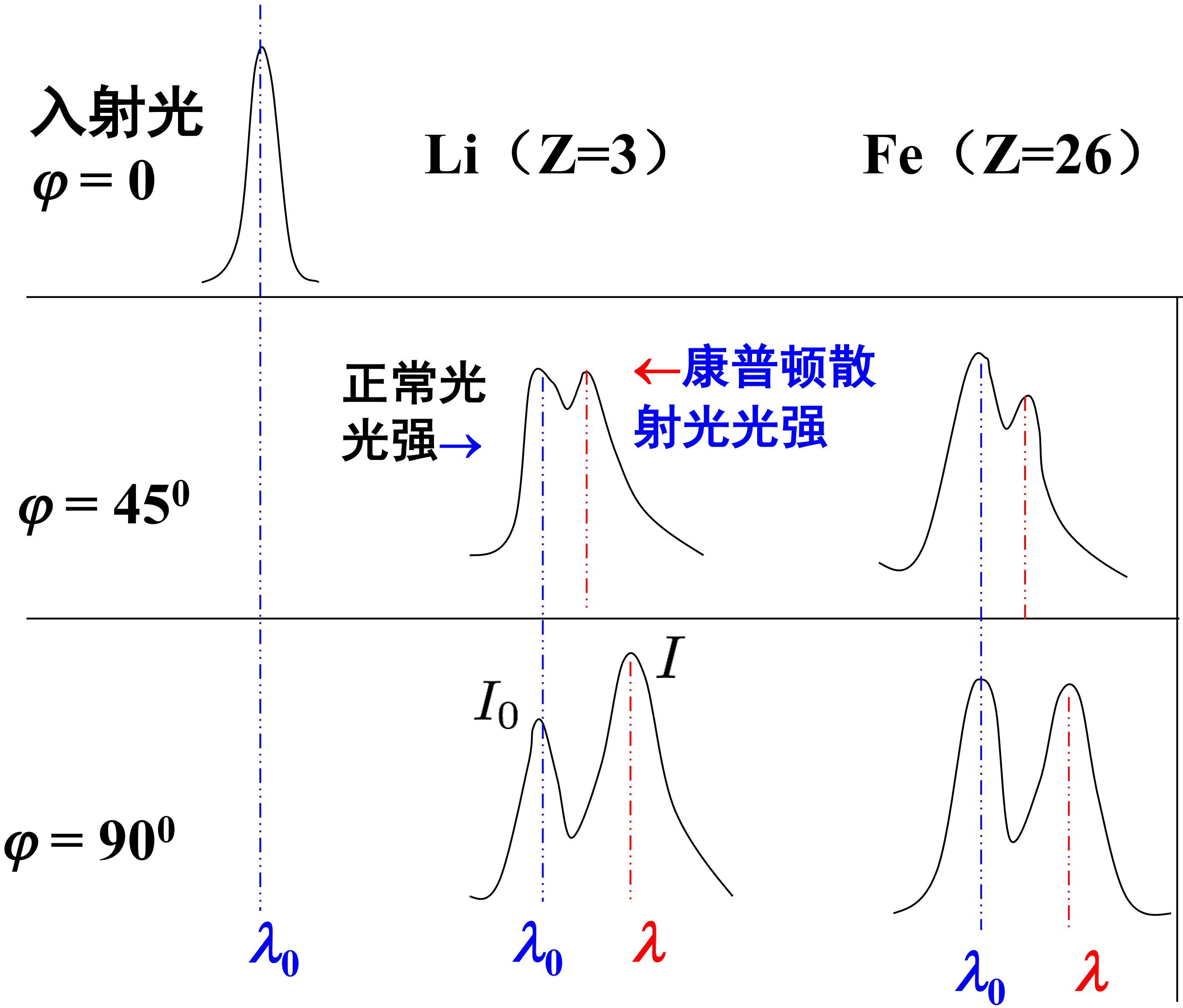


光谱仪测得散射光波长 $\begin{cases} \lambda_0：正常光 \\ \lambda\ (>\lambda_0)\ 康普顿散射光 \end{cases}$

1、 $\lambda - \lambda_0 = 2 \times 0.0024 \sin^2 \dfrac{\varphi}{2}\ (\mathrm{nm})$

2、同一散射角，不同的散射物，康普顿散射光光强占总光强的比例不同。 $\begin{cases} 轻原子比例大 \\ 重原子比例小 \end{cases}$

二、散射光谱图 $\lambda-\lambda_0=2\times 0.0024\sin^2\frac{\varphi}{2}\ (\mathrm{nm})$



$$\lambda_{Li}=\lambda_{Fe}$$

$$\frac{I}{I+I_0}(\mathrm{Li})>\frac{I}{I+I_0}(\mathrm{Fe})$$

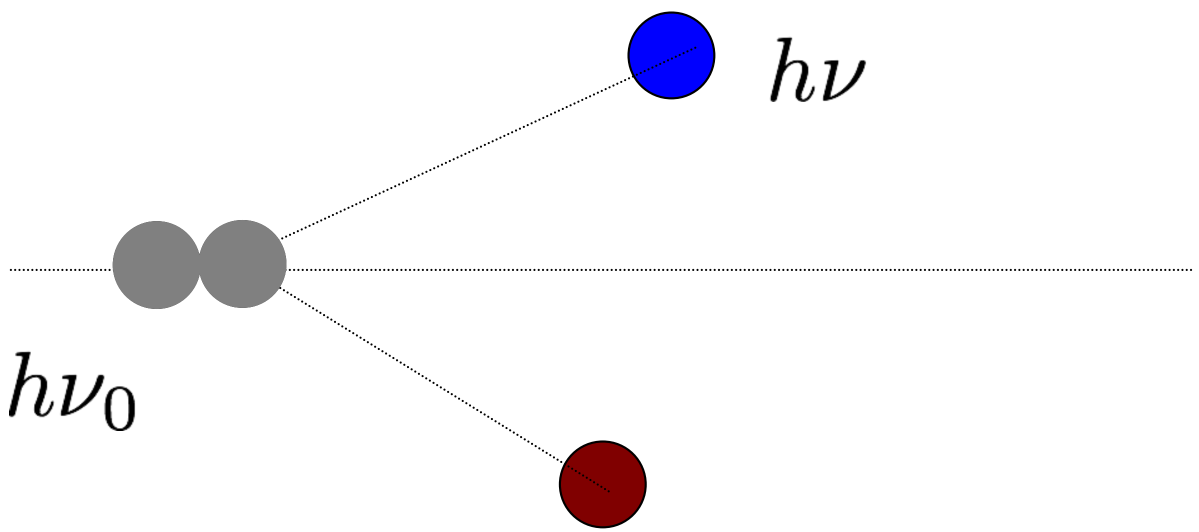
三、康普顿的解释

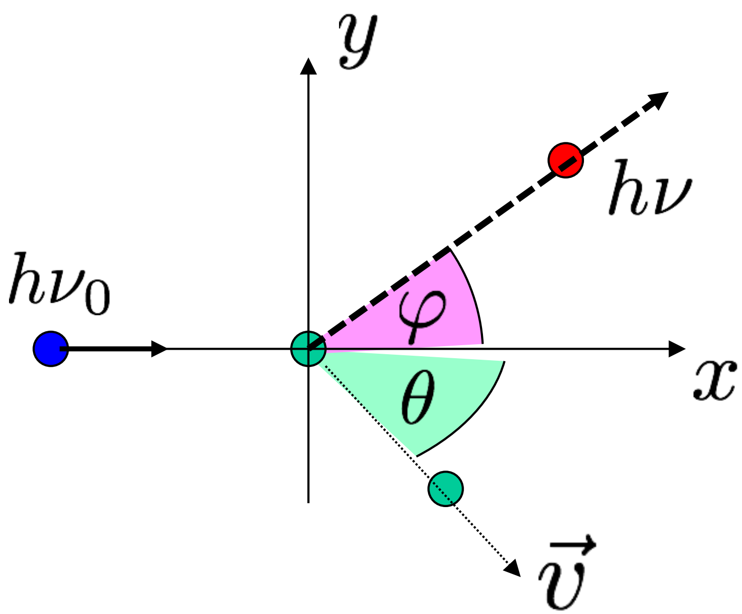
经典波动理论：电磁波 (λ_0, ν_0) → 散射物（电子受迫振荡）→ 辐射电磁波的波长、频率是 (λ_0, ν_0)

光子理论：外层电子与光子碰撞时获得一部分能量，光子能量减小

$$\nu \downarrow \rightarrow \lambda \uparrow$$ ：**康普顿散射光**

X 射线光子与“静止”的“自由”电子碰撞 —— 弹性碰撞





考虑：

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$\nu_0 = \frac{c}{\lambda_0} \quad \nu = \frac{c}{\lambda}$$

能量守恒 $h\nu_0 + m_0c^2 = h\nu + mc^2$

***X*方向动量守恒** $\dfrac{h}{\lambda_0} = \dfrac{h}{\lambda}\cos\varphi + mv\cos\theta$

***Y*方向动量守恒** $\dfrac{h}{\lambda}\sin\varphi - mv\sin\theta = 0$

$$\lambda - \lambda_0 = \frac{2h}{m_0c}\sin^2\frac{\varphi}{2}$$

$$\lambda_c = \frac{h}{m_0c} = 0.002426\ (\mathrm{nm})$$

λ_c：**康普顿波长**

$$\boxed{\lambda - \lambda_0 = 2\lambda_c \sin^2 \frac{\varphi}{2}}$$

说明： 1、散射光中 $\lambda = \lambda_0$ 的解释

光与被束缚很紧的电子相碰，交换能量，也就是与整个原子交换能量，而原子的质量 $m >> m_e$

光子与内层电子碰撞→相当于和整个原子碰撞

→不损失能量 →λ 不变——正常光。

2、原子量大的物质，对核外电子束缚得紧，自由电子少，所以散射光中正常成分比较多。

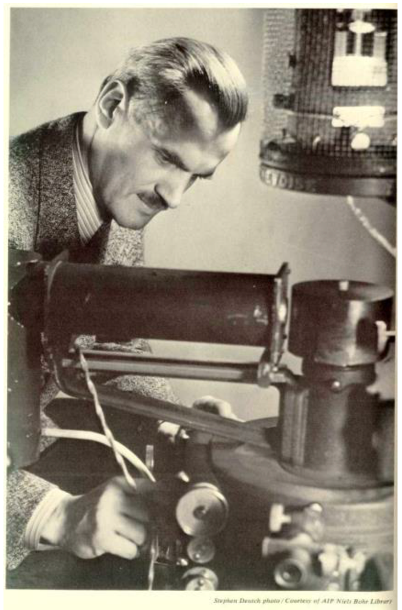
原子量小的物质，自由电子多，散射光中正常成分少。

3、入射波长与 λ_c 可比拟时，散射明显。

康普顿散射的意义：

（1）证明了X射线的粒子性，支持了光量子的概念。

（2）第一次从实验上证实了爱因斯坦提出的关于光量子具有动量的假设，且首次证明了在微观的单个碰撞事件中，动量和能量守恒定律仍然是成立的。



康普顿：美国实验物理学家，芝加哥大学教授。
因发现康普顿效应而获得1927年诺贝尔物理学奖。

例：λ_0=0.01nm的X射线与静止的自由电子碰撞。在与入射方向成90°的方向上观察时，康普顿散射光的波长多大？反冲电子的动能和动量？

解： $\varphi = 90^\circ \rightarrow \Delta\lambda = 2\lambda_c \sin^2\dfrac{\varphi}{2} = \lambda_c$

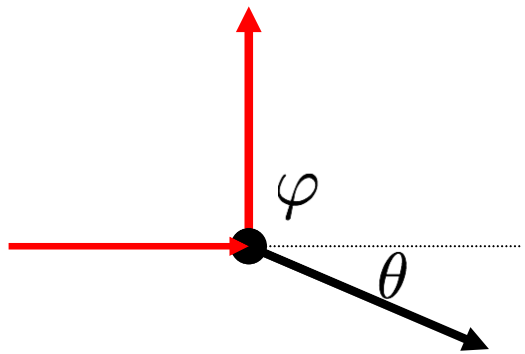
康普顿散射光的波长：$\lambda = \lambda_0 + \Delta\lambda = 0.0124\ \mathrm{nm}$

反冲电子 $E_k = h\nu_0 - h\nu = hc(\dfrac{1}{\lambda_0} - \dfrac{1}{\lambda}) = 3.8\times10^{-15}\ \mathrm{J}$

动量守恒

$$p_{ex} = \frac{h}{\lambda_0} = mv\cos\theta$$

$$p_{ey} = \frac{h}{\lambda} = mv\sin\theta$$



$$p = 8.5\times10^{-23}\ \mathrm{kg.m/s},\ \theta = 38^\circ 44'$$

例: 在康普顿效应中，入射光子的波长为3×10^{-3} nm，反冲电子的速度为光速的 60%，求散射光子的波长和散射角。

解: $$\frac{hc}{\lambda}+m_0c^2=\frac{hc}{\lambda'}+\frac{m_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}}c^2 \qquad v=0.6c$$

$$\to \lambda'=4.34\times10^{-12}\ \mathrm{m}$$

$$\Delta\lambda=\lambda'-\lambda=\frac{2h}{m_0c}\sin^2\frac{\varphi}{2}$$

$$\sin\frac{\varphi}{2}=\sqrt{\frac{\Delta\lambda m_0c}{2h}}\to\varphi=65.7^\circ$$