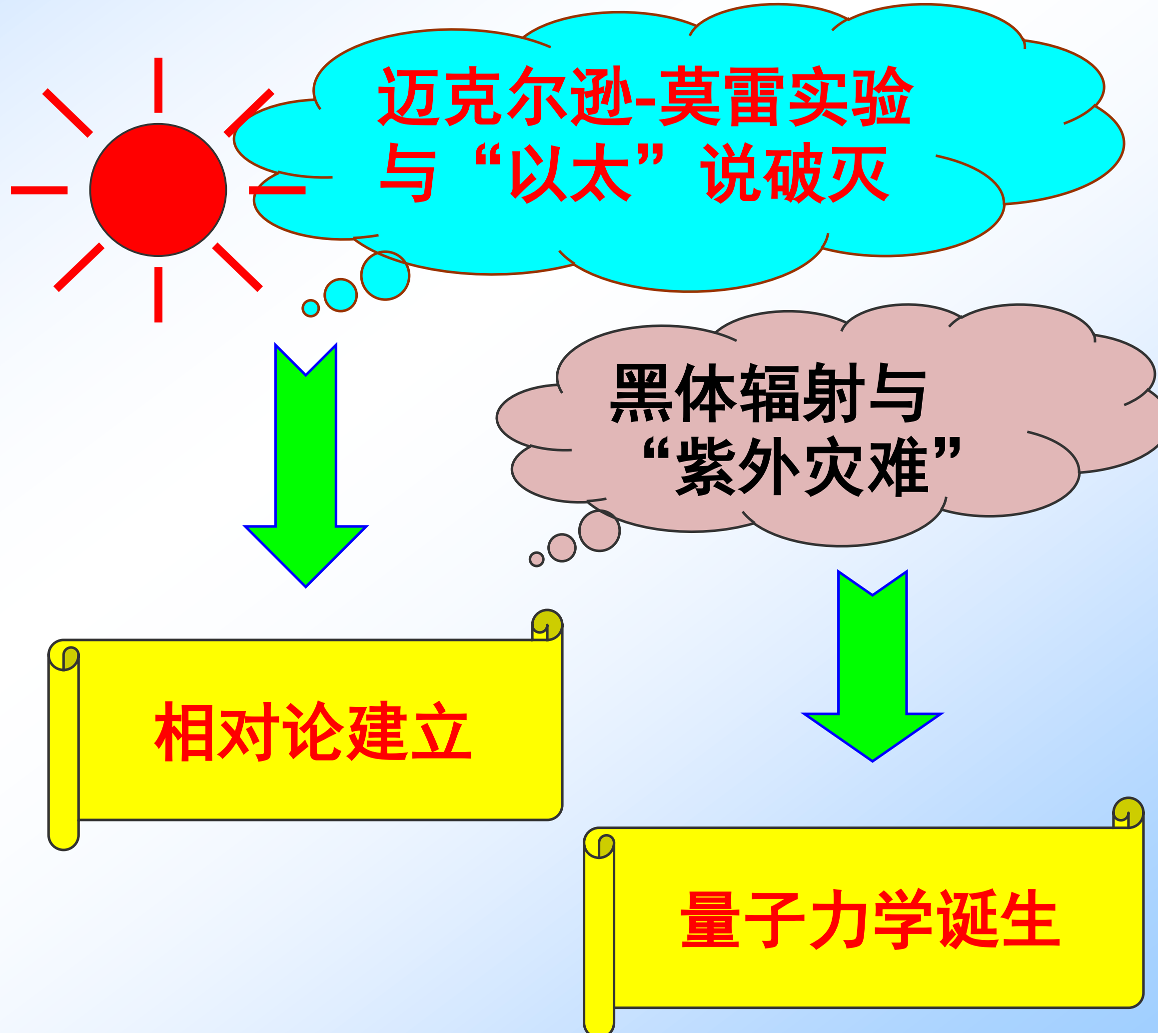
前言：19世纪末，“完美”的经典物理学

物理学晴朗天空飘着‘两朵乌云’：



“The beauty and clearness of the dynamical theory, which asserts heat and light to be modes of motion, is at present obscured by two clouds”

----Kelvin

相对论和量子论是现代物理学的两大支柱

第六篇
量子物理

第六篇
第15章 量子物理

第15章 早期量子论

第15章 量子力学基础

早期量子论

光具有波动性

- 干涉: 杨氏双缝、洛埃镜 …
- 衍射:单缝、双缝、光栅、圆孔、X射线 …
- 偏振:偏振态、双折射、色偏振 …

那么，用光的波动性可否解释光的所有行为呢?

不尽然

量子力学的诞生与发展

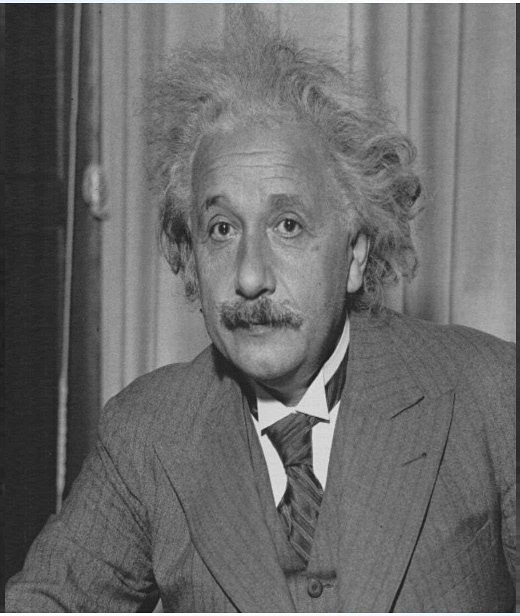
早期量子论：量子概念的形成

普朗克
能量子假说

爱因斯坦
光量子假说

康普顿
康普顿效应

玻尔
原子结构

1918
Nobel Price

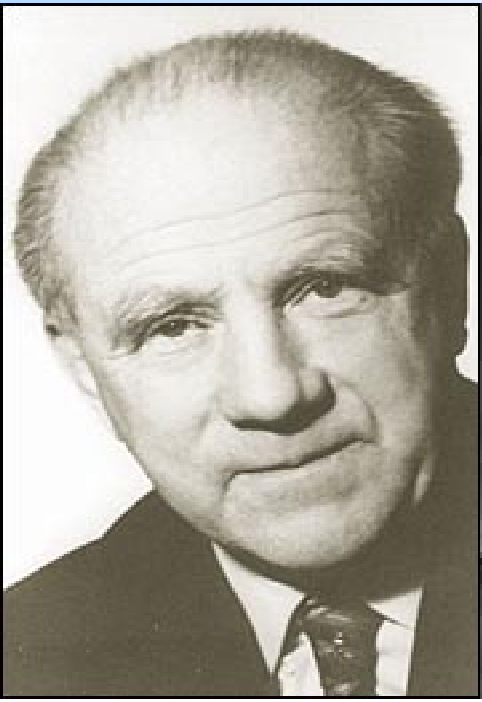
1921
Nobel Price

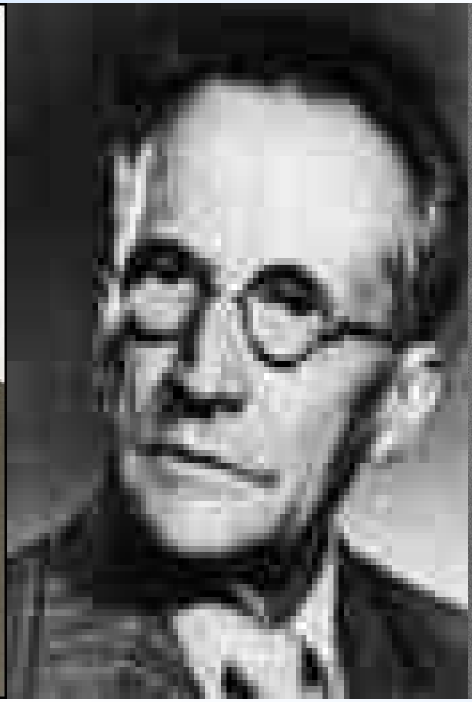
1927
Nobel Price

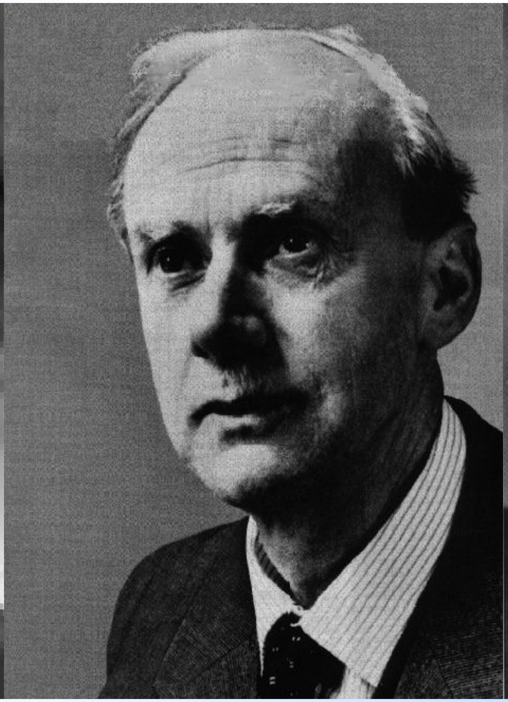
1922
Nobel Price

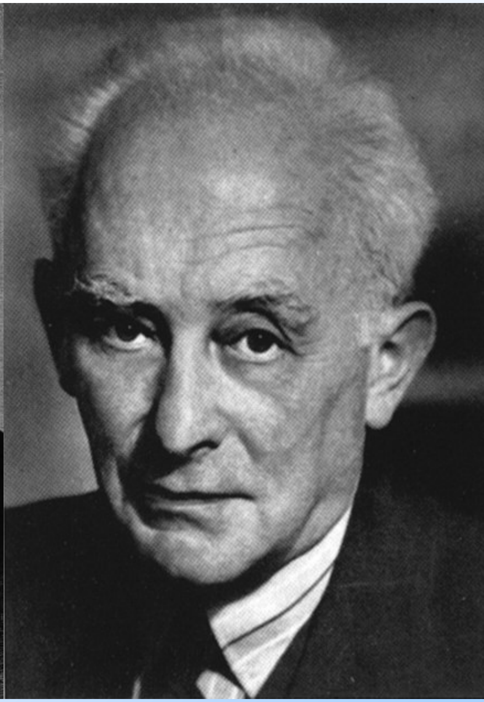
量子力学的诞生

海森堡创立量子力学　薛定谔、狄拉克引入量子力学波动方程　　波恩统计解释









1932 Nobel Price　　**1933 Nobel Price**　　**1954 Nobel Price**

1918年 普朗克— 能量子 （1900）

1921年 爱因斯坦—光子说和光电效应解释 （1905）

1922年 玻尔—原子模型及其发光 （1913）

1923年 密立根—电子电量测量(1911)和*h*的测量(1914)

1925年 弗兰克和赫兹—电子原子碰撞实验 （1914）

1927年 康普顿和威尔逊—康普顿效应 (1922)

1929年 德布罗意—物质波（1924）

1932年 海森伯—量子力学（1925）

1933年 薛定谔和狄拉克—量子波动力学(1925、1927)

1937年 戴维逊和汤姆逊—电子衍射实验 （1927）

1945年 泡利—泡利不相容原理 （1924）

1954年 玻恩—波函数统计解释（1926）

1986年 毕宁和罗尔—扫描隧道显微镜（1981）

1927年第五届索尔维会议（29人中先后获诺奖17人）

第十五章

量子物理

-1

早期量子论

早期量子论

The early Quantum Theory

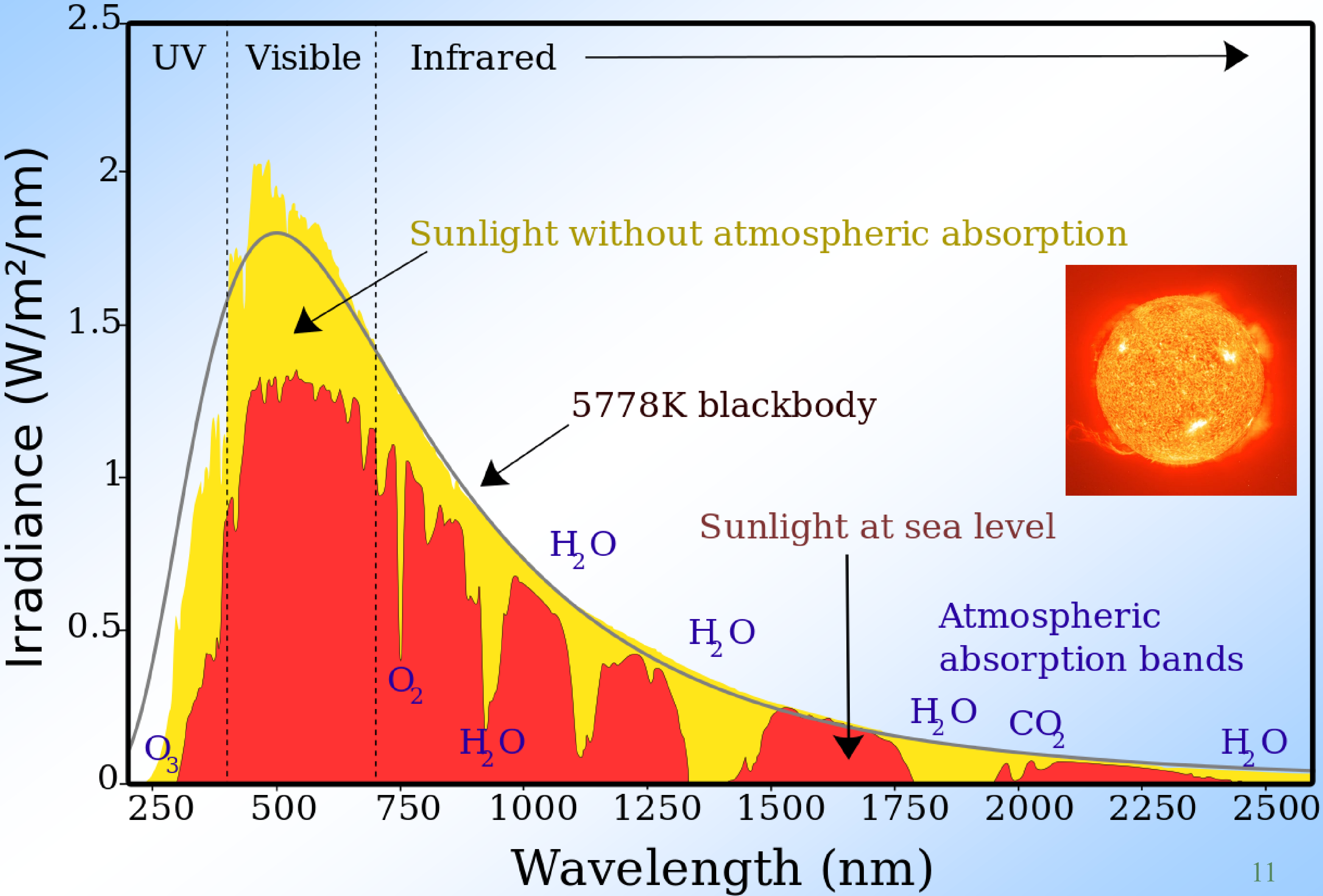
第1节　黑体辐射 普朗克能量子

第2节　光电效应

第3节　康普顿效应

第4节　玻尔量子理论

Spectrum of Solar Radiation (Earth)



第1节 黑体辐射 普朗克能量子

Radiation of Black Body Quantum Theory of Planck

一 黑体 黑体辐射

- **热辐射** 任何物体在任何温度下都会发射不同频率的电磁波的现象称为热辐射. 物体在任何时候都存在发射和吸收电磁辐射的过程.

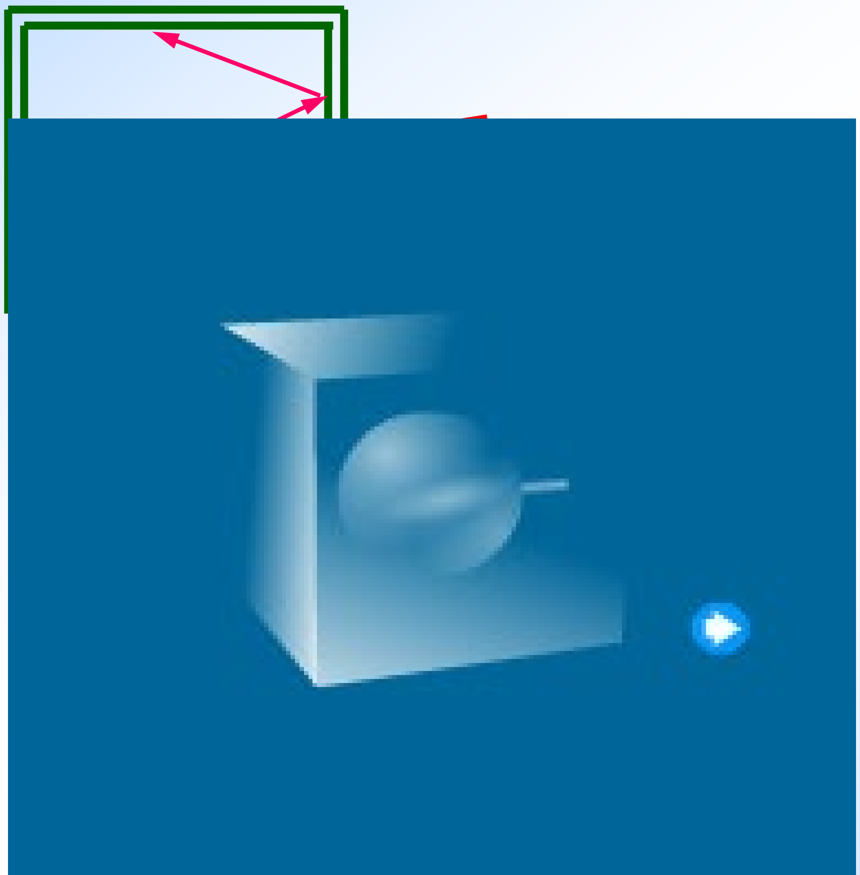
- 实验证明热辐射具有如下规律:

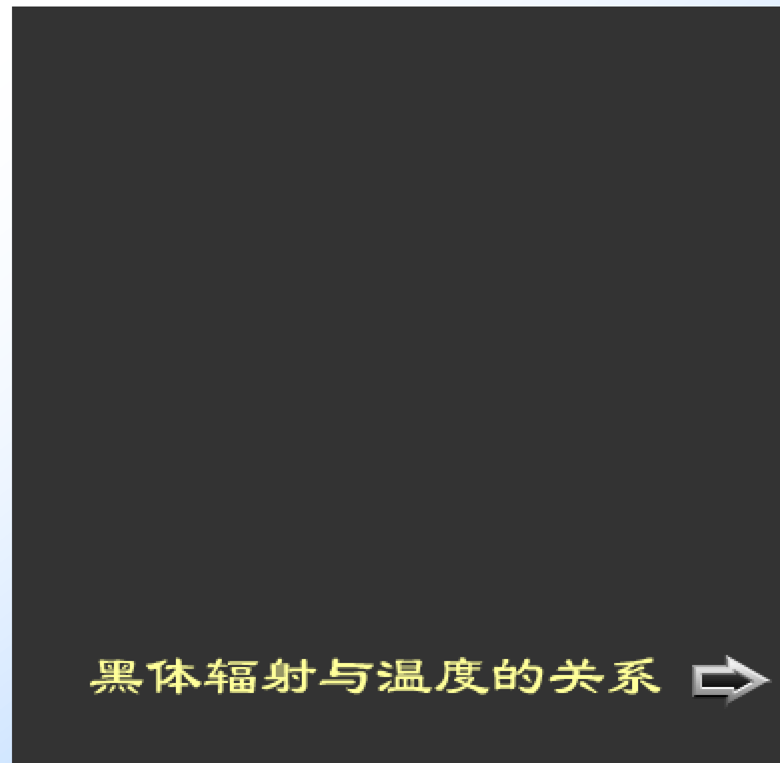
  1. 辐射能量按频率的分布随温度而不同.

  2. 不同物体在某一频率范围发射和吸收辐射的能力不同；同一物体在某一频率范围发射越强，吸收也越强 .

实验表明　辐射能力越强的物体，其吸收能力也越强.

➢　黑体　能完全吸收照射到它上面的各种频率的电磁辐射的物体称为黑体．（黑体是理想模型）





- 定量研究热辐射的有关物理量

1. 单色辐射出射度 单位时间内从物体单位面积发出的波长在 λ 附近单位波长区间（或频率在 ν 附近单位频率区间）的电磁波的能量 .

单色辐射出射度 $M_{\lambda}(T)$ 单位：$\mathrm{W/m^3}$

单色辐射出射度 $M_{\nu}(T)$ 单位：$\mathrm{W/(m^2 \cdot Hz)}$

2. 辐射出射度（辐出度） 单位时间，单位面积上所辐射出的各种波长（或各种频率）的电磁波的能量总和.

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

二、黑体辐射定律

1. 斯特藩—玻尔兹曼定律

$$\boxed{M_0(T)=\int_0^{\infty} M_\lambda(T)\mathrm{d}\lambda=\sigma T^4}$$

斯特藩—玻尔兹曼常量

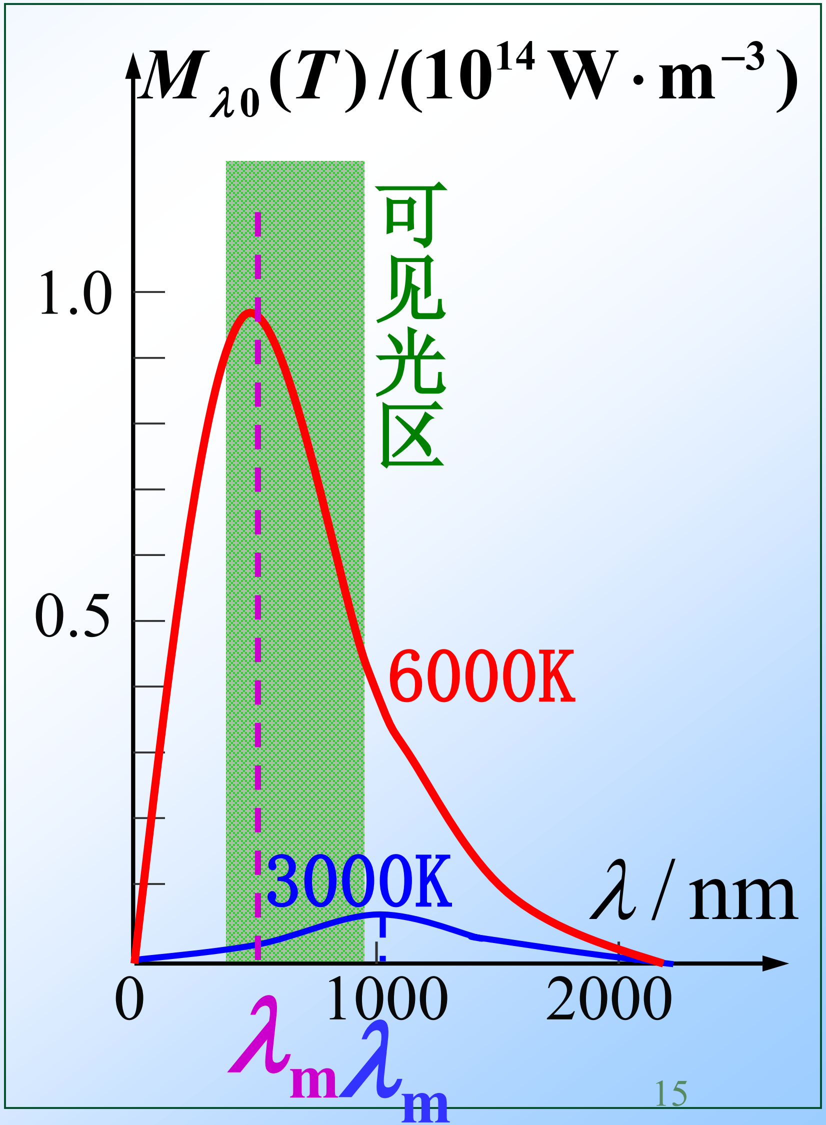
$\sigma = 5.670\times10^{-8}\,\mathrm{W/(m^2\cdot K^4)}$

2. 维恩位移定律

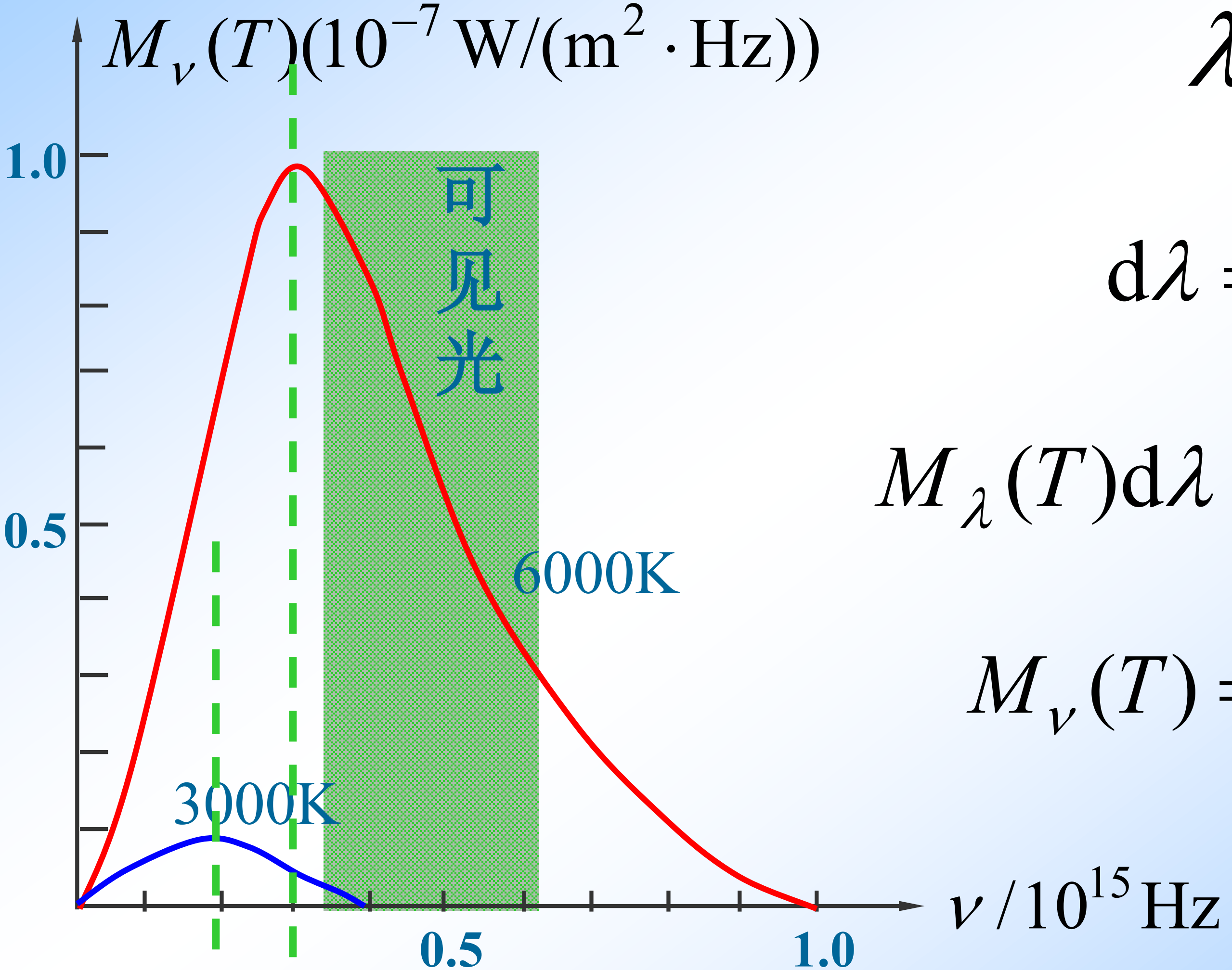
$$\boxed{\lambda_{\mathrm{m}} T = b}$$

峰值波长

常量 $b = 2.898\times10^{-3}\,\mathrm{m\cdot K}$



黑体单色辐出度实验曲线



$M_\lambda(T)$ 和 $M_\nu(T)$ 关系

$$\lambda\nu = c$$

$$\mathrm{d}\lambda = -\frac{\lambda^2}{c}\mathrm{d}\nu$$

$$M_\lambda(T)\mathrm{d}\lambda = -M_\nu(T)\mathrm{d}\nu$$

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

例15-1 计算下列情况下辐射体的辐射能谱峰值对应的波长：（1）人体皮肤的温度为 35°C；（2）点亮的白炽灯中，钨丝的温度为 2000 K 。（计算时假设以上物体均为黑体）

解: 根据维恩位移定律 $\lambda_m T = b$

（1） $\lambda_m = \dfrac{b}{T} = \dfrac{2.898\times10^{-3}}{308} = 9.4\mu$ 位于红外波段

（2） $\lambda_m = \dfrac{b}{T} = \dfrac{2.898\times10^{-3}}{2000} = 1.449\mu$

这个波长同样位于红外波段，这表明白炽灯辐射出的可见光能量相对较少 。

例15-2　太阳的单色辐出度的峰值波长 $\lambda_{\mathrm{m}}=500\mathrm{nm}$，试由此估算太阳表面的温度和辐出度.

解　根据维恩位移定律　$\lambda_m T = b$

$$T=\frac{b}{\lambda_m}=\frac{2.898\times10^{-3}}{500\times10^{-9}}=5800K$$

另由斯特藩—玻耳兹曼定律，可计算出太阳表面辐射的辐出度

$$M(T)=\sigma T^4=5.67\times10^{-8}\times5800^4$$

$$=6.4\times10^{7}\quad \mathrm{W\cdot m^{-2}}$$

例3 （1）温度为室温$(20^\circ\mathrm{C})$的黑体，其单色辐出度的峰值所对应的波长是多少？（2）若使一黑体单色辐出度的峰值所对应的波长在红色谱线650nm ，其温度应为多少？（3）以上两辐出度之比为多少？

解:（1）由维恩位移定律

$$\lambda_{\mathrm{m}} = \frac{b}{T} = \frac{2.898\times10^{-3}}{293}\mathrm{m} = 9890\mathrm{nm}$$

（2）取 $\lambda_{\mathrm{m}} = 650\mathrm{nm}$

$$T' = \frac{b}{\lambda_{\mathrm{m}}} = \frac{2.898\times10^{-3}}{6.5\times10^{-7}}\mathrm{K} = 4.46\times10^{3}\mathrm{K}$$

（3）由斯特藩—玻耳兹曼定律

$$M(T')/M(T) = (T'/T)^4 = 5.37\times10^4$$

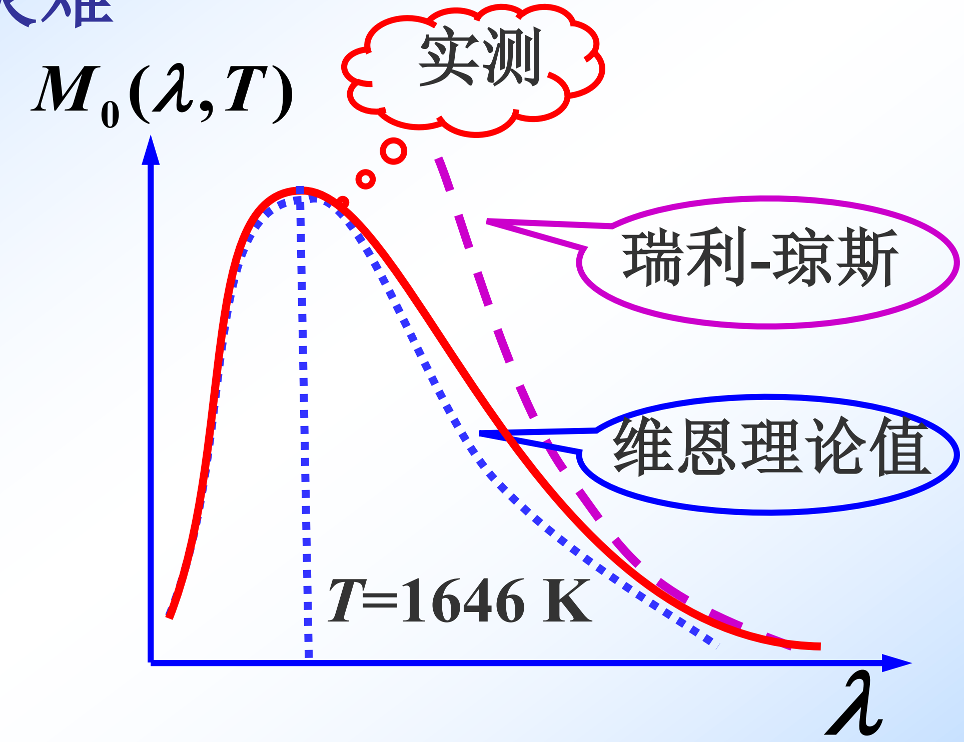
3. 经典物理论的“紫外灾难”

（1）维恩(Wien)

根据经典热力学和麦克斯韦速率分布得出

$$M_0(\lambda,T)=\frac{C_1}{\lambda^5}\mathrm{e}^{-\frac{C_2}{\lambda T}}$$

—只适于短波



（2）瑞利-琼斯

用能量均分定理和电磁理论得出

$$M_0(\lambda,T)=\frac{2\pi ckT}{\lambda^4}\left\}\begin{array}{l}\text{只适于长波}\\ \text{短波——“紫外灾难”}\end{array}\right.$$

在黑体辐射研究中经典物理面临不可克服的困难！

三、普朗克假设 普朗克公式

1. 普朗克的能量子假说

(1) 组成黑体腔壁的分子或原子视为带电的线性谐振子

(2) 这些谐振子和空腔中的辐射场相互作用过程中吸收和发射的能量是量子化的，只能取一些分立值：

ε, 2ε, 3ε, … , $n\varepsilon$

(3) 频率为 ν 的谐振子，吸收和发射能量的最小值称为能量子简称量子

$\varepsilon = h\nu$ $h = 6.626176\times10^{-34}\ \mathrm{J\cdot s}$ —普朗克常数

2. 普朗克黑体辐射公式

$$\boxed{M_0(\lambda,T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5}\frac{1}{e^{hc/(\lambda kT)}-1}}$$

在全波段与实验结果惊人符合!

普朗克公式

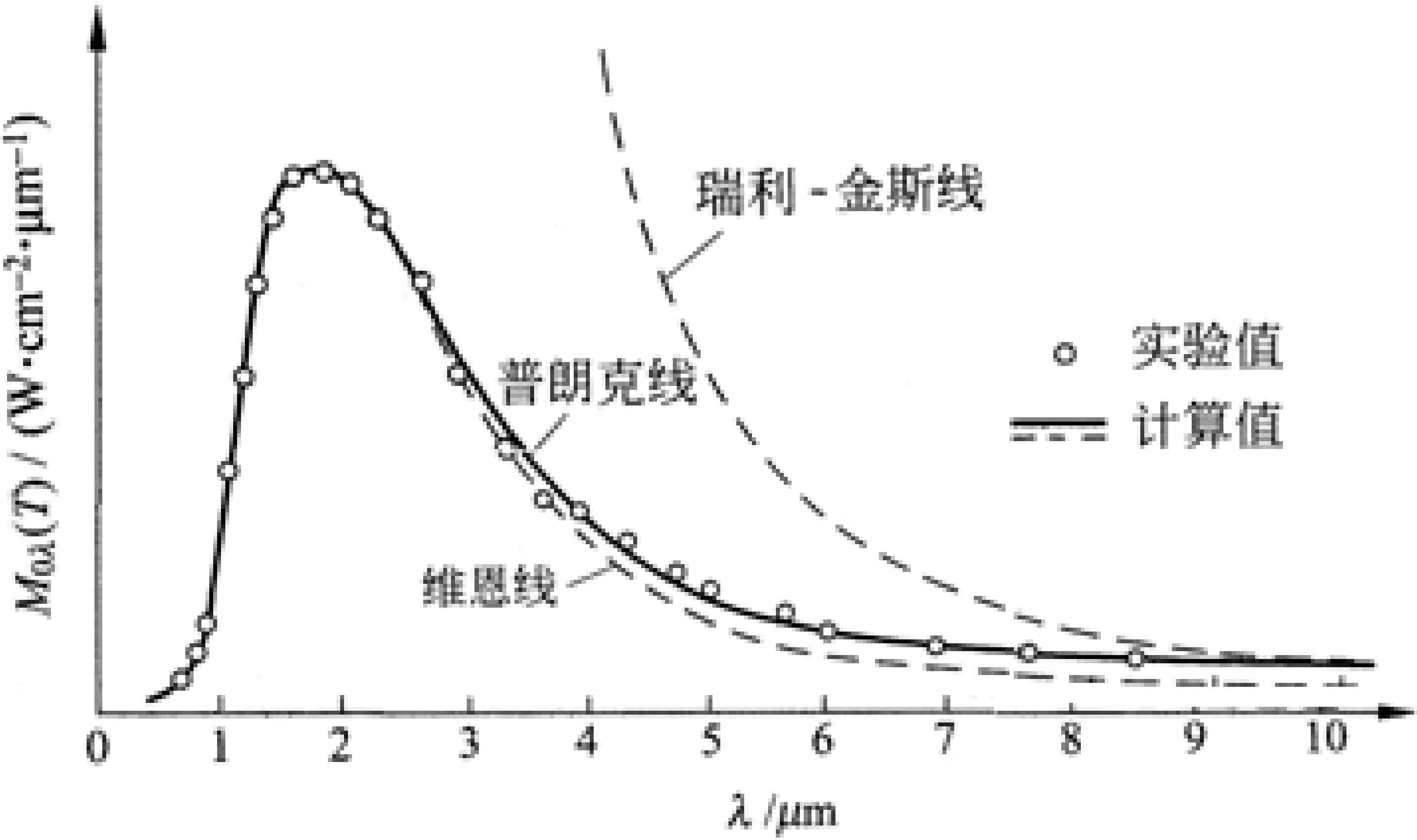
$$M_{0\lambda}(T)=\frac{2\pi hc^2}{\lambda^5}\frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}}-1}$$

在短波段转化为维恩公式：

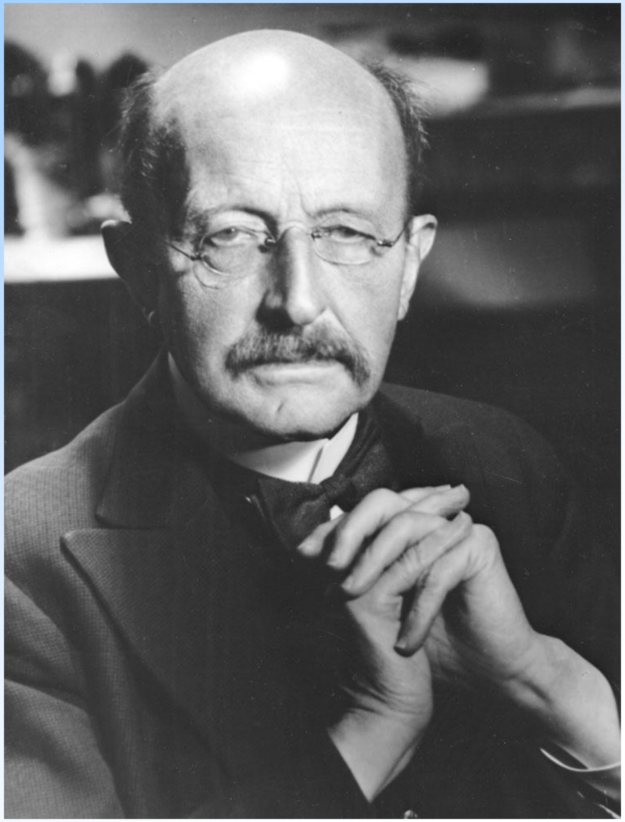
$$M_{0\lambda}(T)=\frac{c_1}{\lambda^5}\exp(-\frac{c_2}{\lambda T})$$

在长波段转化为瑞利—金斯公式：

$$M_{0\lambda}(T)=\frac{2\pi\cdot c}{\lambda^4}kT$$



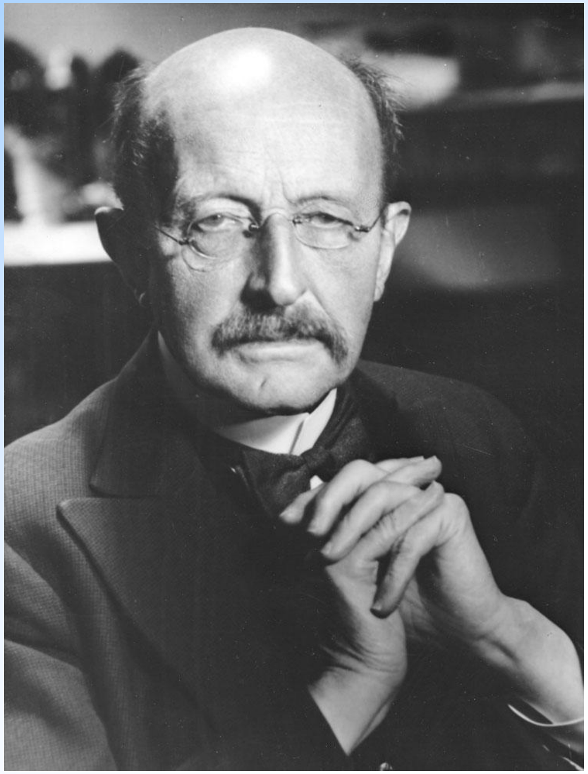
黑体辐射公式和实验值



普朗克（Max Karl Ernst Ludwig Planck，1858 – 1947） 德国理论物理学家，量子论的奠基人.1900年12月14日他宣读了以《关于正常光谱中能量分布定律的理论》为题的论文，提出能量量子化的假设，并导出黑体辐射能量分布公式．劳厄称这一天是“量子论的诞生日”．

1905年爱因斯坦在能量量子化的启发下提出了光量子的假设，并成功解释了光电效应.

量子观念在“非难”中得到发展.



诚实、严谨的科学态度

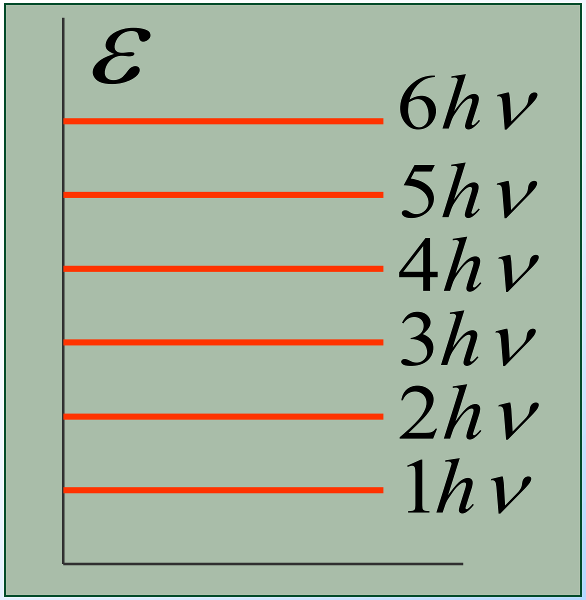
普朗克晚年对自己工作的评论:

“ 我徒劳无益的使基本量子论和经典理论一致的企图继续了许多年花了我极大的精力，我的同行中的许多人几乎把这看成悲剧，但我对他的看法是不同的，因为我从这工作中得到的对我的想法的深刻的澄清，对我有极大的价值．现在我的确知道，作用量子的基本意义比我原来所想象的要大得多.”

普朗克假设

普朗克假设：金属空腔壁中电子的振动可视为一维谐振子，它吸收或者发射电磁辐射能量是量子化的（不连续）.

能量子 $\varepsilon = h\nu$



普朗克常量

$$h = 6.6260755 \times 10^{-34}\ \mathrm{J \cdot s}$$

- 带电谐振子吸收或发射能量为

$$\varepsilon = nh\nu \quad (n = 1,2,3,\cdots)$$

例15-3 设弹簧振子的质量为 m=10g，弹性系数为 20 N·m-1，振幅为 A=1.0 cm，求：（1）若弹簧振子的能量是量子化的，那么量子数 n 有多大？（2）若 n 改变为1，则能量的相对变化有多大?

解（1）因为 $$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

有 $$\nu = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{20}{10\times10^{-3}}} = 7.1\text{Hz}$$

振子的机械能

$$E = \frac{1}{2}kA^2 = \frac{1}{2}\times 20\times(1.0\times10^{-2})^2 = 10^{-3}J$$

量子数 $n=\dfrac{E}{h\nu}=\dfrac{10^{-3}}{6.6\times10^{-34}\times7.1}=2.1\times10^{29}$

（2）能量的相对变化为

$$\frac{\Delta E}{E}=\frac{h\nu}{nh\nu}=\frac{1}{n}\approx 4.8\times10^{-30}$$

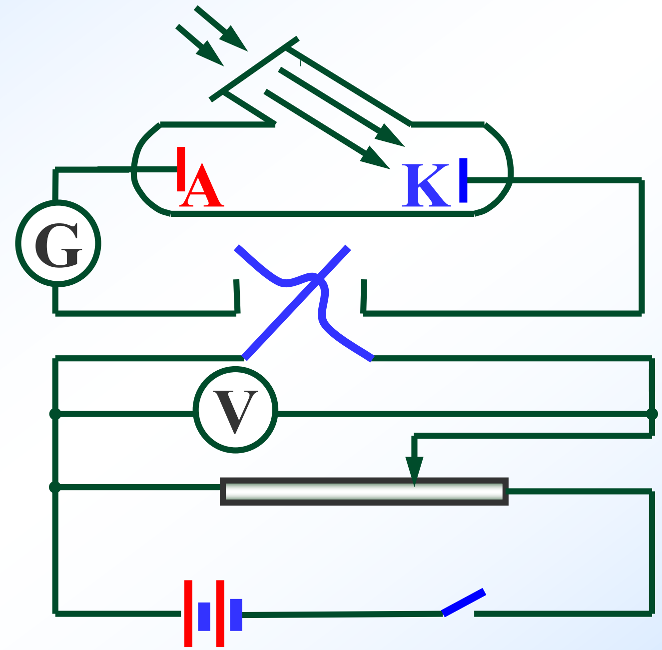
由上述计算可见，量子数 n 很大，能量的量子本性不明显。

第2节 光电效应

Photoelectric Effect

光电效应实验

一. 实验装置见右图



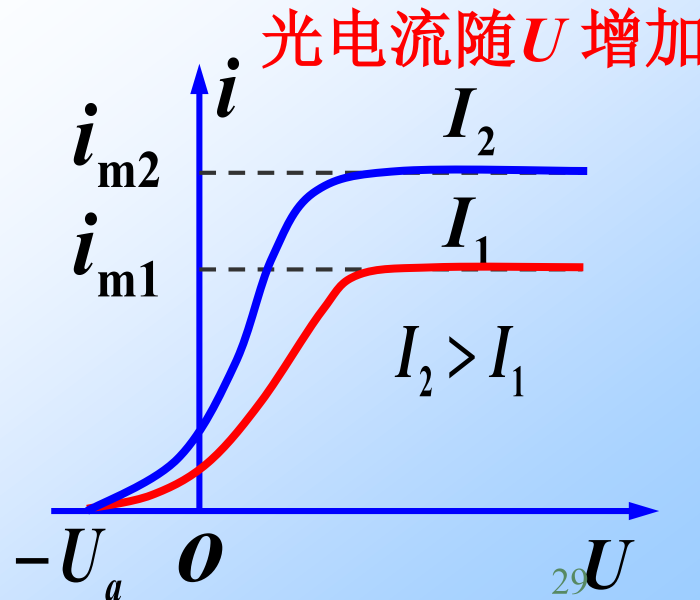
二. 实验规律

(1) 对一定光强，光电流强度i随电压 U 增加；

(2) 饱和光电流强度与入射光强度成正比；

(3) i=0 时 $U=-U_a$，

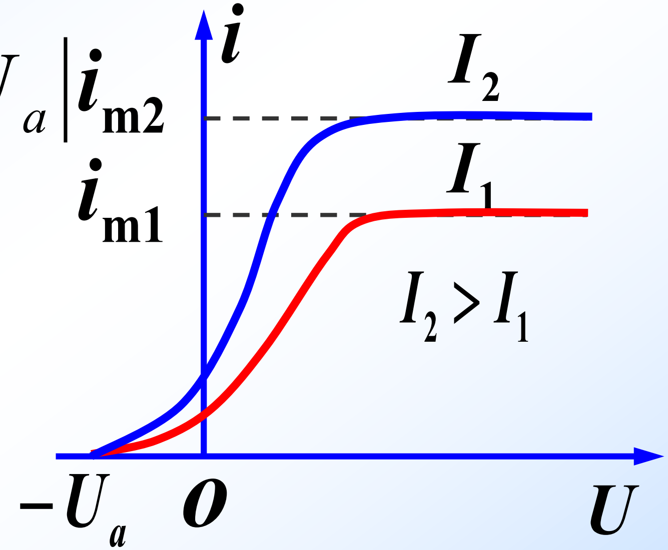
U_a : 遏止电压；



(4) 光电子的初动能与入射光频率的关系

电子的最大初动能 $\frac{1}{2}m\upsilon^2 = e|U_a|$

实验发现，光强的大小对遏止电势差没有影响，但入射光的频率与 U_a 有关，光的频率越高遏止电势差也越大。



相同频率不同入射光强度

两者关系 $|U_a| = K\nu - U_0$

光电子的初动能与入射光频率的关系

$$\frac{1}{2}m\upsilon^2 = eK\nu - eU_0$$

由于 $\frac{1}{2}m\upsilon^2 \geq 0$ 所以 $eK\nu - eU_0 \geq 0$

即 $\nu \geq \frac{U_0}{K}$

截止频率： $\nu_0 = \frac{U_0}{K}$

或红限频率

截止频率与材料有关与光强无关 .

几种纯金属的截止频率	金属	铯	钠	锌	铱	铂
	截止频率 $\nu_0/10^{14}\,\mathrm{Hz}$	4.545	4.39	8.065	11.53	19.29

(5) 光电效应与时间的关系 瞬时性

当光照射到金属表面上时，几乎立即就有光电子逸出, 延迟 时间不超过 10^{-9} s

三　光电效应与光的波动理论的矛盾

◆ 红限问题　　　　　　　　　　经典理论遇到的困难

按经典理论, 无论何种频率的入射光, 只要其强度足够大，就能使电子具有足够的能量逸出金属 . 与实验结果不符.

◆ 瞬时性问题

按经典理论，电子逸出金属所需的能量，需要有一定的时间来积累，一直积累到足以使电子逸出金属表面为止. 与实验结果不符 .

四　光子 爱因斯坦方程

（1）“光量子”假设　光子的能量为 $\varepsilon = h\nu$

（2）解释实验

爱因斯坦方程 $h\nu = \frac{1}{2}mv^2 + W$

逸出功与材料有关

- 对同一种金属，W一定，$E_k \propto \nu$，与光强无关

几种金属的逸出功

金属	钠	铝	锌	铜	银	铂
W / eV	1.90 ~2.46	2.50 ~3. 60	3.32 ~3.57	4.10 ~4.50	4.56 ~4.73	6.30

爱因斯坦方程 $h\nu = \frac{1}{2}mv^2 + W$

爱因斯坦方程对光电效应实验规律的圆满解释

（1）对饱和电流与入射光强度成正比的解释

入射光的强度 与单位时间内通过单位垂直面积的光子数成正比，即 $I_A = Nh\nu$

当入射光的强度 I_A 增加时，在单位时间内到达金属表面单位面积的光子数也增多，光子与金属中自由电子碰撞的次数也增多，因而单位时间内逸出的光电子数也增多。

所以 $I_S \propto I_A$

（2）对逸出光电子初动能与入射光频率成性线关系的解释

$$\frac{1}{2}m\upsilon^2 = eK\nu - eU_0$$

对于一定的金属，逸出功是一定的 $W = $ 恒定

$$\frac{1}{2}m\upsilon^2 = h\nu - W \quad \rightarrow \frac{1}{2}m\upsilon^2 \propto \nu$$

（3）对存在截止频率的解释

$$\frac{1}{2}m\upsilon^2 \geq 0 \quad \rightarrow \nu \geq \frac{W}{h}$$

截止频率 $\nu_0 = \frac{W}{h}$

$$h = eK$$

$$W = eU_0$$

（4）对光电效应的瞬时性问题的解释

当一个光子与金属中的一个自由电子相碰撞时，电子能一次全部吸收掉光子的能量，这个过程几乎是立即发生的，而无需能量的积累时间。

- 光子射至金属表面，一个光子携带的能量 $h\nu$ 将一次性被一个电子吸收，若 $\nu > \nu_0$ ，电子立即逸出，无需时间积累（瞬时性）.

（5） h 的测定

爱因斯坦方程

$$h\nu = \frac{1}{2}mv^2 + W$$

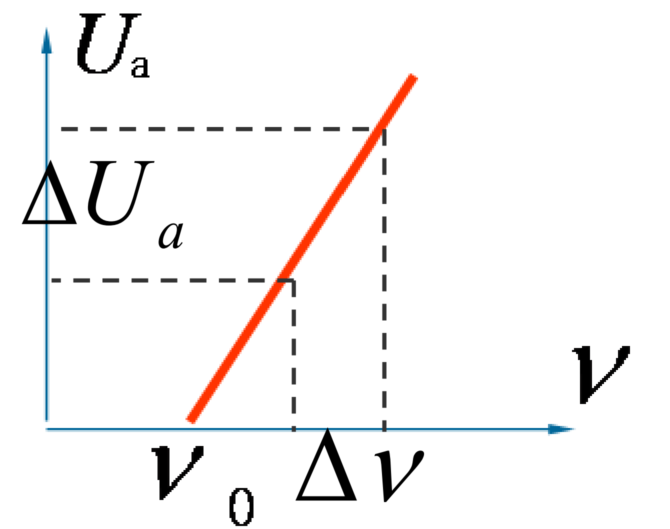
$$h\nu = eU_a + W$$

$$U_a = \frac{h}{e}\nu - \frac{W}{e}$$

$$\Delta U_a / \Delta\nu = h/e$$

$$h = \frac{\Delta U_a}{\Delta\nu}e$$

遏止电势差和入射光频率的关系



例13-4 已知红限波长 $\lambda_0 = 6520\overset{0}{A}$ 的铯感光层被波长为 $\lambda = 4000\overset{0}{A}$ 的单色光照射，求铯释放出来的光电子的最大初速度。

解 根据爱因斯坦方程，光电子的最大初动能为

$$\frac{1}{2}m\upsilon^2 = h\nu - W$$

即光电子的最大初速度为

$$\upsilon = \sqrt{\frac{2}{m}(h\nu - W)} = \sqrt{\frac{2}{m}(\frac{hc}{\lambda} - W)}$$

将 $W = h\nu_0 = \frac{hc}{\lambda_0}$ 代入得

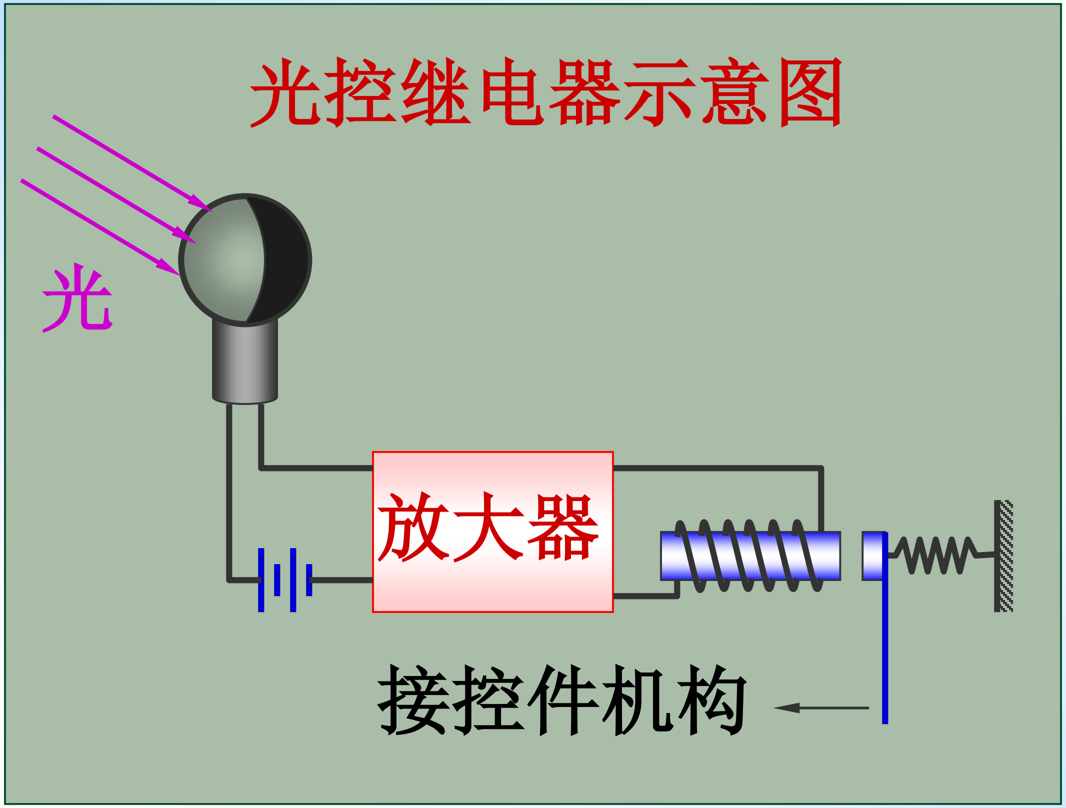
$$\upsilon = \sqrt{\frac{2hc}{m}\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0}\right)}$$

将已知数据代入得

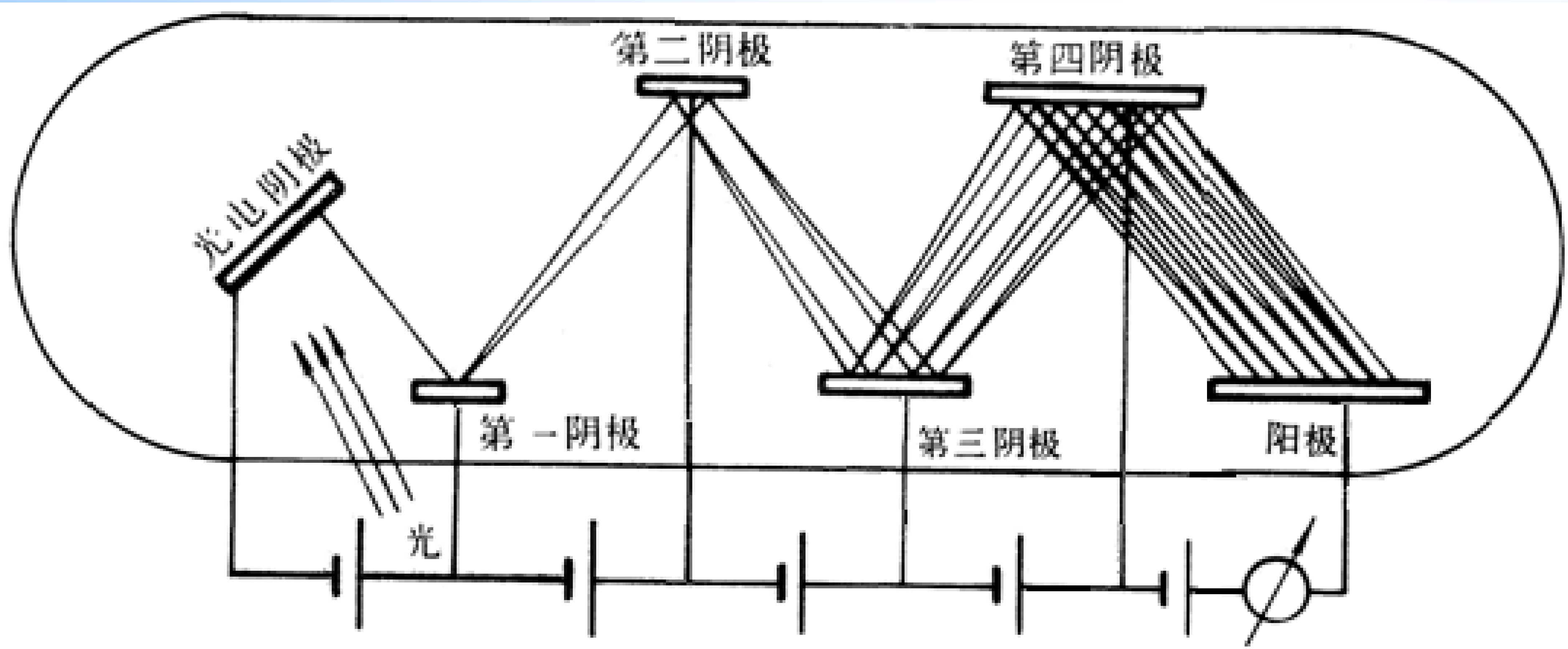
$$\upsilon = 6.50 \times 10^5 \ \mathbf{m \cdot s^{-1}}$$

* 五　光电效应在近代技术中的应用

光控继电器、自动控制、自动计数、自动报警等.



光电倍增管



第二阴极
第四阴极
光电阴极
第一阴极
第三阴极
阳极
光