

# 第1章 量子论与量子力学的诞生

量子论及量子力学诞生于经典物理理论与实验的深刻矛盾中，19世纪末20世纪初经典物理在黑体辐射实验、光电效应实验、原子结构与氢原子光谱和康普顿电子散射实验的理论解析中遇到了困难，即20世纪初的物理天空中飘着几朵“乌云”。为克服经典物理的困境，普朗克提出了黑体辐射的量子假设，成功地解析了黑体辐射实验，爱因斯坦、玻尔、德布罗意等进一步挣脱经典物理理论的束缚，大胆地提出了微观粒子的波粒二象性理论、物质波、原子中电子的量子化条件，成功地解释了光电效应实验、原子结构与氢光谱和康普顿电子散射实验，标志着朴素的量子论的诞生，迎来了量子力学萌芽的春天。量子论的诞生与成功深化了人们对自然的认识，对哲学问题的思考。玻尔提出了“互补原理”、“对应原理”，创建了哥本哈根学派，打破了思想的禁固，为量子力学的创立提供了认识论和方法论，最终由薛定谔、海森堡、泡利、狄拉克、玻恩为代表的一大批富有创新精神的青年才俊在20世纪20年代创建了量子力学。

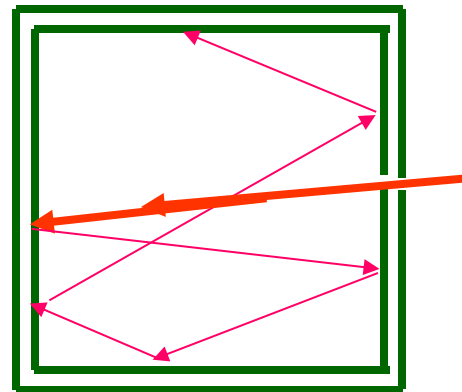
# 第一节 经典物理的困难

## 一、黑体辐射

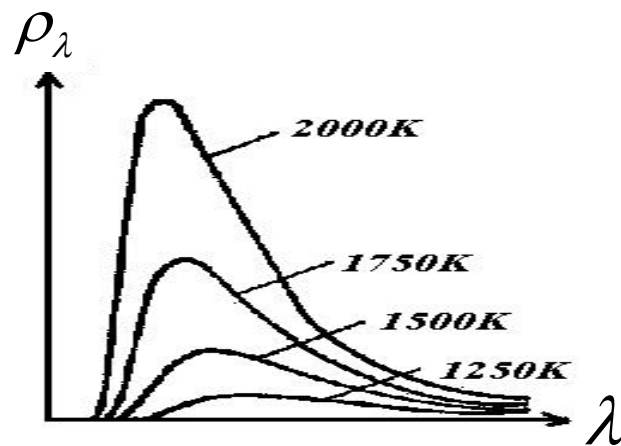
1、黑体：物体对于外来的辐射有反射和吸收作用。如果在任何温度一个物体能全部吸收投射在它上面的辐射而无反射，这种物体称为黑体。

2、辐射热平衡状态：处于某一温度  $T$  下的腔壁，单位面积所发射出的辐射能量和它所吸收的辐射能量相等时，辐射达到热平衡状态。

3、实验结论：热平衡时，空腔辐射的能量密度，与辐射的波长的分布曲线，其形状和位置只与黑体的绝对温度  $T$  有关，而与黑体的形状和材料无关。



一个开有小孔的封闭空腔可看作是黑体。



实验曲线

## 4、经典理论解释的困境

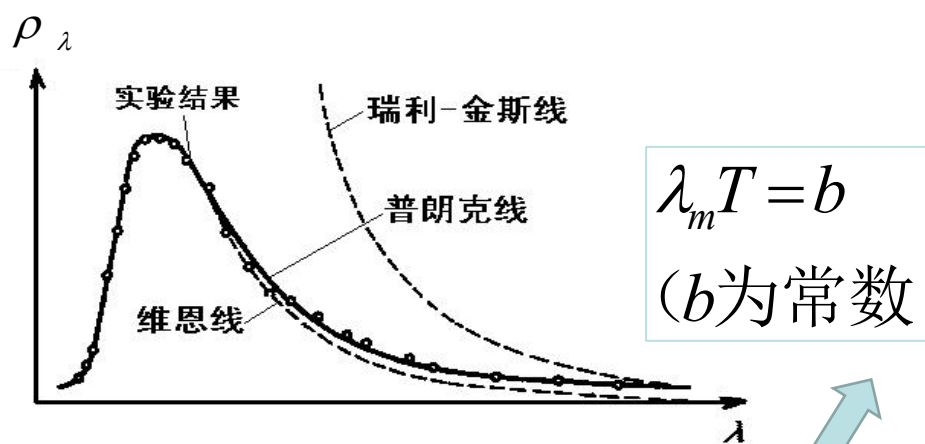
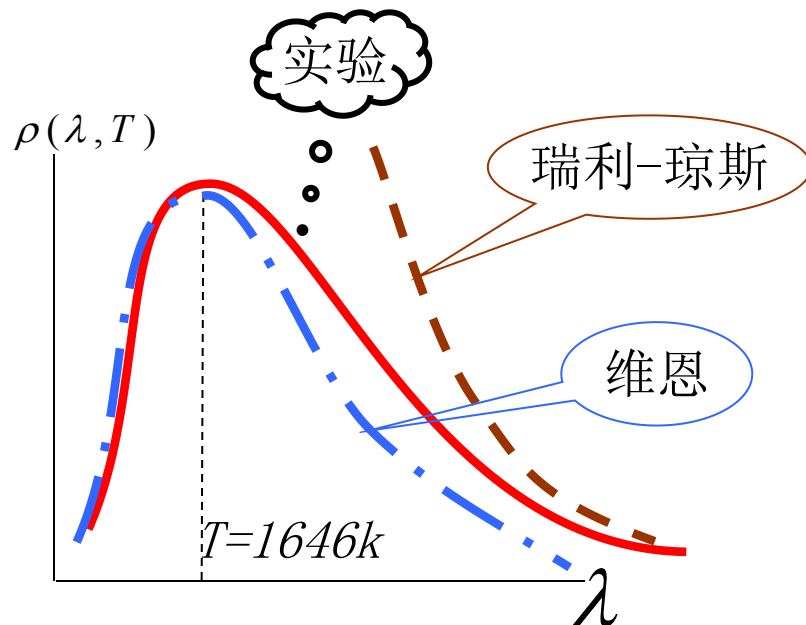
1896年，维恩公式  
(短波吻合好，长波段不一致)

1900年，瑞利和琼斯 (紫外灾难)

## 5、1900年，普朗克黑体辐射的量子理论

黑体与辐射场交换能量只能一份一份的交换，亦即黑体吸收或发射电磁辐射能量的方式是不连续的，只能量子地进行，每个“量子”的能量为  $\varepsilon = h\nu$ ,

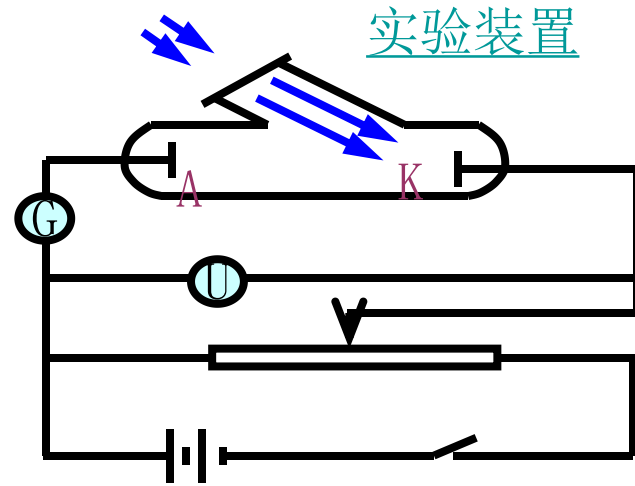
$$h = 6.62559 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{S}$$



$$\rho(\nu)d\nu = \frac{8\pi}{C^3} \frac{h\nu^3}{e^{h\nu/KT} - 1} d\nu$$

## 二、光电效应

1、光电效应：光照射到金属上，使金属中的电子逸出现象，这种现象称为光电效应，逸出的电子称为“光电子”



2、实验结果：试验发现光电效应有两个突出的特点：

(1) . 临界频率： 只有当光的频率大于某一定值时，才有光电子发射出来。若光频率小于该值时，则不论光强度多大，照射时间多长，都没有电子产生。光的这一频率称为临界频率。

(2) . 电子的能量只是与光的频率有关，与光强无关，光强只决定电子数目的多少。

(3) . 此外，光电效应具有瞬时性，其响应速度很快 $10^{-9}$  秒。经典认为光能量分布在波面上，吸收能量需要时间。

### 3、爱因斯坦的光电效应理论(1905年)

爱因斯坦提出了“光量子”的概念，认为，不仅黑体与辐射场的能量交换是量子化的，而且辐射（光）是由一颗颗具有一定能量的粒子组成的粒子流，这些粒子称为光子（光量子）。

$$\text{光子的能量: } E = h\nu = \hbar\omega$$

光的波粒二象性

$$\text{光子的动量: } \vec{P} = \frac{E}{c} \vec{n} = \frac{h\nu}{c} \vec{n} = \frac{h}{\lambda} \vec{n} = \hbar \vec{k}$$

注：

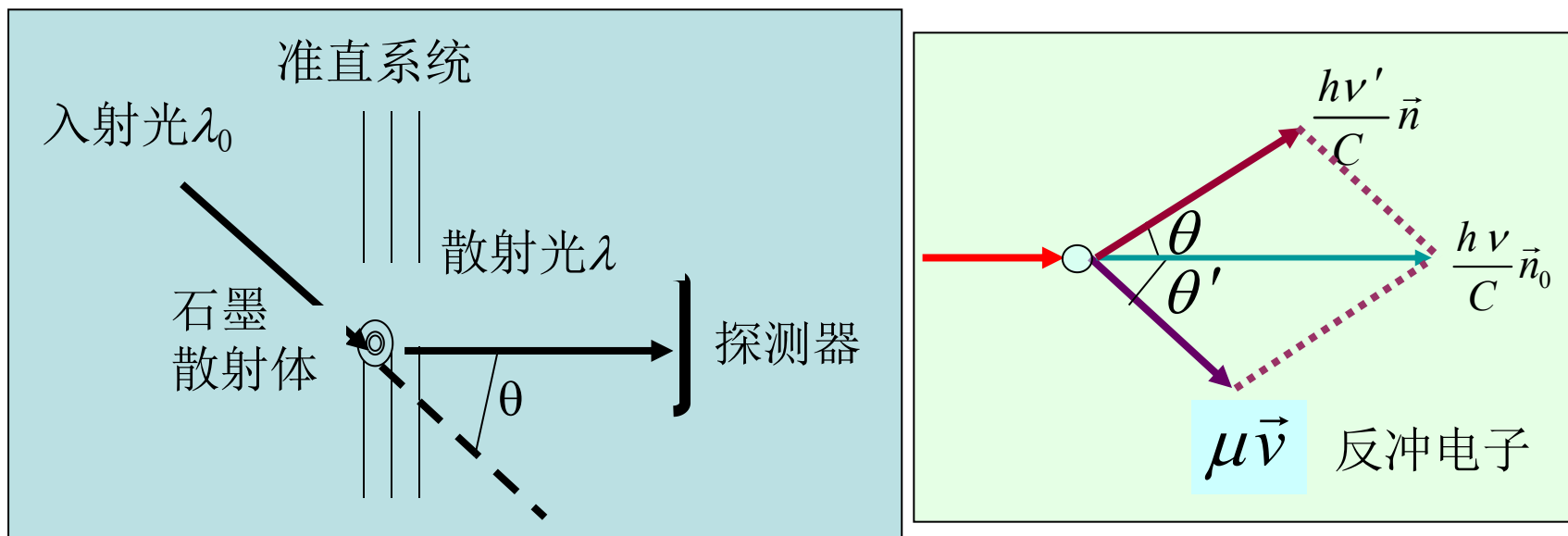
相对论的粒子能量与动量

$$E^2 = m_0^2 c^2 + c^2 p^2, \quad E = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} c^2$$

$$\frac{1}{2} \mu v^2 = h\nu - w_0 = h(\nu - \nu_0)$$

(光电效应方程)

### 三、康普顿散射1923年



散射的射线中有与入射波长 $\lambda_0$ 相同的射线, 也有波长  $\lambda' > \lambda_0$  的射线.

$$\begin{cases} h\omega + \mu c^2 = h\omega' + \frac{\mu c^2}{\sqrt{1-\beta^2}} \\ \frac{h\omega}{c} \vec{n}_0 = \frac{h\omega'}{c} \vec{n} + \frac{\mu \vec{v}}{\sqrt{1-\beta^2}} \end{cases} \longrightarrow \Delta\lambda = 2\lambda_0 \sin^2 \frac{\theta}{2}$$

康普顿散射是对光的粒子性的进一步证实。

## 四、原子的结构和氢原子光谱

经典的力学和电磁理论得不到稳定结构的原子和离散的原子谱线

### 1、波尔的原子结构的量子理论

1913年提出原子结构的半经典理论，其假设有两点：

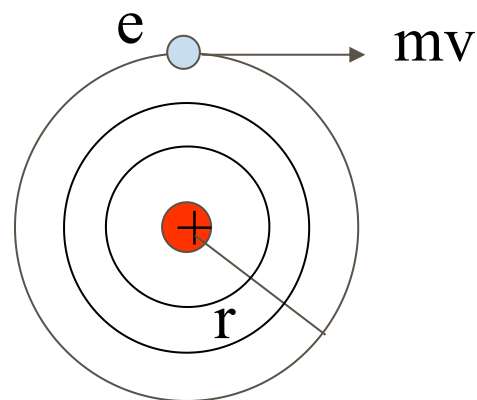
#### (1) 特定的定态轨道

轨道量子化条件：

$$\oint m v r d\phi = nh, n = 1, 2, 3$$

#### (2) 定态跃迁频率

原子处于定态时不辐射，但是因某种原因，电子可以从一个能级  $E_n$  跃迁到另一个较低（高）的能级  $E_m$ ，同时将发射（吸收）一个光子。光子的频率为：



$$\nu = \frac{E_m - E_n}{h}$$

能量  $E = T + U = \frac{1}{2} \mu v^2 - \frac{e_s^2}{r} = -\frac{\mu e_s^4}{2n^2 \hbar^2} \equiv E_n$

里德伯方程:

$$\nu = \frac{E_m - E_n}{h} = R c \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$

里德伯常数

$$R = \frac{\mu e_s^4}{4 \pi \hbar^3 c} = 1.09677576 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$$

与实验完全一致

2、理论的缺陷

不适用于比类氢离子更复杂的原子；不能解析光谱强度，....

## 第二节 实物粒子的波粒二象性

1924年，德布罗意考查了光子的波粒二象性的认识的发展历史，结合波尔关于原子中电子的运动的认识及存在的问题提出了实物粒子（电子）的波粒二象性假说。

1、一切物质粒子（原子、电子、质子等）都具有粒子性和波动性，在一定条件下，表现出粒子性，在另一些条件下体现出波动性。

$$\text{自由粒子的能量} \quad E = h\nu,$$

$$\text{自由粒子的动量为} \quad \vec{P} = \frac{h}{\lambda} \vec{n} = \hbar \vec{k}$$

$$\text{由低速运动的自由粒子的能量} \quad E = \frac{P^2}{2m} \Rightarrow P = \sqrt{2mE}$$

$$\therefore \lambda = \frac{h}{\sqrt{2mE}}$$

微观粒子的状态用波函数描述

例如：自由粒子的能量 $E$ 和动量 $\vec{P}$ 为常量，与它相联系的波是 $E$ 和 $\vec{P}$ 都不变的平面单色波：

$$\psi_{\vec{p}}(\vec{r}, t) = Ae^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} = Ae^{i\frac{1}{\hbar}(\vec{p} \cdot \vec{r} - Et)}$$

称为  
德布罗意波

**Ex.1** 求经电势差为V伏特的电场加速后的电子的波长。

能量  $E = eV$

$$\therefore \lambda = \frac{h}{\sqrt{2\mu eV}} = \frac{12.25}{\sqrt{V}} (\text{\AA})$$

$$e = 1.60210(2) \times 10^{19} \text{ 库仑}$$

$$m_e = 9.10908(13) \times 10^{-31} \text{ 千克}$$

$$h = 6.62559 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{S}$$

若V=150伏,  $\lambda = 1\text{\AA} = 10^{-10} \text{ m} = 0.1 \text{ 纳米}$

若V=100000伏,  $\lambda = 4 \times 10^{-3} \text{ 纳米}$

(1纳米=10<sup>-9</sup>m)

电子波长比可见光的波长 ( $\lambda \sim 10^{-7}\text{m}$ ) 小5个数量级, 比原子的半径 (0.1 - 0.2纳米) 还小得多。

**Ex.2** 求飞行的子弹  $m=10^{-2}\text{kg}$ , 速度  $V=5.0 \times 10^2\text{m/s}$  对应的德布罗意波长

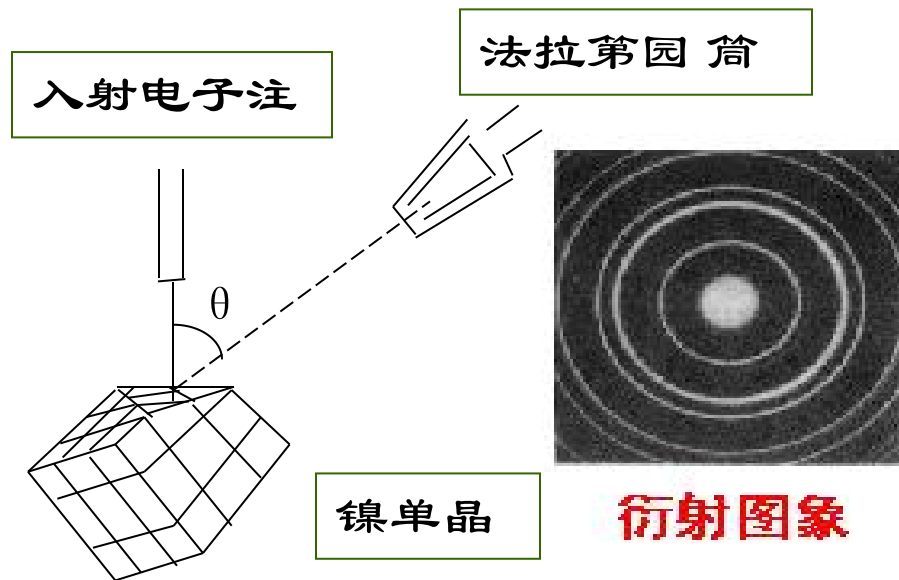
$$E = \frac{1}{2}mv^2$$

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mE}} = \frac{h}{mv} = 1.3 \times 10^{-25} \text{ nm}$$

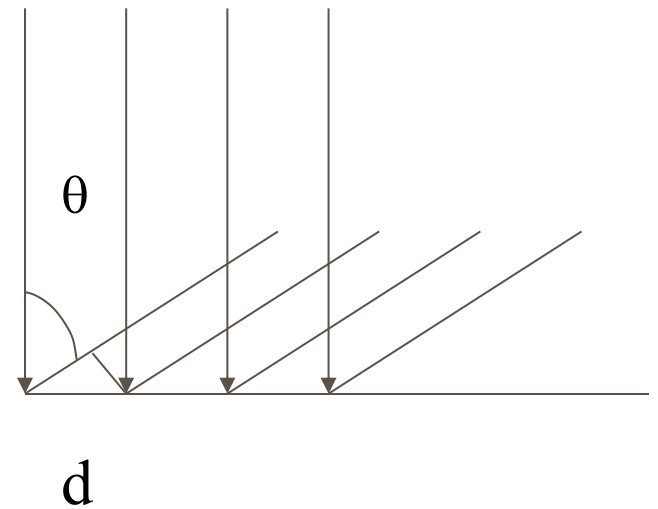
波长太小, 在宏观上测不到!

## 2、德布罗意波假设的实验验证

de Broglie 波1924年提出后，1927-1928年由戴维逊 (Davisson) 和革末 (Germer) 以及汤姆逊 (G. P. Thomson) 的电子衍射实验所证实。

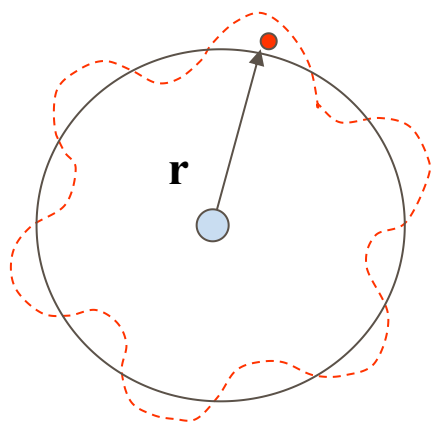


戴维逊-革末实验



汤姆逊实验

### 3、对于有限区域运动的粒子的状态用驻波描述



$$2\pi r = n\lambda$$

$$n = 1, 2, 3, \dots$$

可求氢原子能级、一维无限深势阱中粒子的能级。

海森堡在波尔的对应原理启发下建立了描述微观粒子运动的矩阵力学；薛定谔由德布罗意的假说出发建立了描述微观粒子运动的波动力学。后来，薛定谔和狄拉克证明了波动力学和矩阵力学是描述微观粒子运动的两个不同的表象，两者是等价的。微观粒子的波动力学与矩阵力学构成为量子力学。结合相对论，描述微观粒子高速运动的量子理论称为量子电动力学；把粒子看成为场，则理论发展为微观粒子的量子场理论。