

§15.1 量子物理学的诞生—普朗克量子假设

一、黑体辐射

物体由其**温度**所决定的**电磁辐射**称为**热辐射**。物体辐射的本领越大，吸收的本领也越大，反之亦然。能够全部吸收各种波长的辐射能而完全不发生反射和透射的物体称为**黑体**。

二、普朗克的量子假设：

1. 组成腔壁的原子、分子可视为带电的一维线性谐振子，谐振子能够与周围的电磁场交换能量。
2. 每个谐振子的**能量**不是任意的数值，频率为 ν 的谐振子，其能量只能为 $h\nu, 2h\nu, \dots$ **分立值**，

$$E = nh\nu$$

其中 $n = 1, 2, 3, \dots$ ， $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ 为**普朗克常数**。

3. 当谐振子从一个能量状态变化到另一个状态时，辐射和吸收的能量是 $h\nu$ 的**整数倍**。

§15.2 光电效应 爱因斯坦光量子理论

一、光电效应的实验规律

金属及其化合物在**光照射下发射电子**的现象称为**光电效应**。逸出的电子为光电子，所测电流为光电流。

截止频率：对一定金属，只有入射光的频率大于某一频率 ν_0 时，电子才能从该金属表面逸出，这个频率叫**红限**。

遏制电压：当外加电压为零时，光电流不为零。因为从阴极发出的光电子具有一定的初动能，它可以克服减速电场而到达阳极。当外加电压反向并达到一定值时，光电流为零，此时电压称为遏制电压。

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

二、爱因斯坦光子假说和光电效应方程

1. 光子假说

一束光是一束以光速运动的**粒子流**，这些粒子称为**光子**；频率为 ν 的每一个光子所具有的**能量**为 $\varepsilon = h\nu$ ，它不能再分割，只能**整个地**被吸收或产生出来。

2. 光电效应方程

根据能量守恒定律，当金属中一个电子从入射光中吸收一个光子后，获得能量 $h\nu$ ，如果 $h\nu$ 大于该金属的电子**逸出功** A ，这个电子就能从金属中逸出，并且有

$$h\nu = A + \frac{1}{2}mv_m^2$$

上式为**爱因斯坦光电效应方程**，式中 $\frac{1}{2}mv_m^2$ 为光电子的最大初动能。当 $h\nu < A$

时，电子无法获得足够能量脱离金属表面，因此存在**红限** $\nu_0 = A/h$ 。

三、光（电磁辐射）的波粒二象性

$$\text{光子能量 } E = mc^2 = h\nu$$

$$\text{光子质量 } m = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{c\lambda}$$

$$\text{光子动量 } p = mc = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

光具有**波粒二象性**。光在传播过程中，波动性比较显著，光在与物质相互作用时（发射和吸收），粒子性比较显著。

四、光电效应的应用

利用光电效应可以制成光电成像器件，能将可见或不可见的辐射图像转换或增强成为可观察记录、传输、储存的图像。

§15.3 康普顿效应及光子理论的解释

一、康普顿效应

X 射线通过散射物质时，在散射线中除了有波长与原波长相同的成分 λ_0 ，还出现了波长较长的成分 λ 。

二、光子理论的解释

电磁辐射是光子流，每一个光子都有确定的动量和能量。**X 射线光子**与散射物质中那些**受原子核束缚较弱的外层电子**的相互作用，可以看成光子与静止自由电子的**弹性碰撞**，且动量和能量都守恒。康普顿散射**波长改变量**为

$$\lambda - \lambda_0 = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \theta)。$$

光子除了与受原子核束缚较弱的电子碰撞外，还与**受原子核束缚很紧的内层电子**发生碰撞，这种碰撞的**散射波长不变**。

§15.4 氢原子光谱 波尔的氢原子理论

一、氢原子光谱

1. 从红光到紫光有一系列**分立的谱线**，每条谱线对应确定的波长（或频率）。
2. 每一条谱线的波数可以表示为 $\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ （里德伯常量

$$R_H = 1.097 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$$

二、波尔的氢原子理论

基本假设

（1）**定态假设**：原子只能处在一系列具有不连续能量的稳定状态，称为定态。相应于定态，核外电子在一系列不连续的稳定圆轨道上运动，但并不辐射电磁波。

（2）**跃迁假设**：当原子从一个能量 E_k 的定态跃迁到另一个能量为 E_n 的定态时，会发射或吸收一个频率为 ν_{kn} 的光子 $\nu_{kn} = (E_k - E_n) / h$ 。

（3）**角动量量子化假设**：电子在稳定圆轨道上运动时，其轨道角动量 $L = mvr$ 必须等于 $h / 2\pi$ 的整数倍，即 $L = mvr = n \frac{h}{2\pi} = n\hbar$ 。式中 $\hbar = h / 2\pi$ 称为约化普朗克常数， n 为主量子数。 $n = 1$ 的定态为**基态**，其他均为**受激态**。

§15.5 微观粒子的波粒二象性 不确定关系

一、微观粒子的波粒二象性

德布罗意**物质波**假设：不仅光具有波粒二象性，一切实物粒子如电子、原子、分子等也具有波粒二象性，其波长为

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = \frac{h}{m_0 v} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

戴维孙—革末电子衍射实验、汤姆孙电子衍射实验、电子的多缝干涉实验证实了物质波的假设。

二、不确定关系

微观粒子具有波动性，以致它的某些成对物理量（如动量和位置，能量和时间）**不可能同时具有确定的值**。一个量确定的越准确，另一个量的不确定程度就越大。

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}, \quad \Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

§15.6 波函数 一维定态薛定谔方程

一、波函数及其统计解释

微观粒子具有波动性，1925 年奥地利物理学家薛定谔首先提出用**物质波波函数**描述微观粒子的运动状态。

$$\Psi(x, t) = \psi_0 e^{-i \frac{2\pi}{h}(Et - px)}$$

物质波波函数是复数，它本身并不代表任何可观测的物理量。**波函数绝对值平方** $|\Psi(r, t)|^2$ 代表 t 时刻，粒子在空间 r 处的单位体积中出现的**概率**，又称概率密度，这是**波函数的物理意义**。波函数必须单值、有限、连续。

归一化条件：粒子在整个空间出现的**概率为 1**： $\iiint |\Psi(\vec{r}, t)|^2 dx dy dz = 1$ 。

二、薛定谔方程

1926 年薛定谔提出了适用于低速情况下的，**描述微观粒子在外力场中运动的微分方程**，称为**薛定谔方程**。

$$\left[-\frac{\hbar}{2m} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) + V(r, t) \right] \Psi(r, t) = i\hbar \frac{\partial \Psi(r, t)}{\partial t}$$

其中， $V = V(r, t)$ 是粒子的势能。

粒子在稳定力场中运动，势能 V 、能量 E 不随时间变化，粒子处于**定态**，波函数写为 $\Psi(\vec{r}, t) = \Psi(\vec{r}) e^{-i \frac{E}{\hbar} t}$

$$\text{定态薛定谔方程: } \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \Psi(\vec{r}) + \frac{2m}{\hbar^2} (E - V) \Psi(\vec{r}) = 0$$

§15.7 氢原子的量子力学描述电子自旋

一、氢原子的量子力学结论

通过求解定态薛定谔方程可得：

(1) **主量子数** n (1, 2, 3, ...): 大体上决定了电子能量。

(2) **副量子数** l (0, 1, 2, ..., $n-1$, 共 n 个): 决定电子的轨道角动量大小 $L = \sqrt{l(l+1)}\hbar$, 对能量也有稍许影响。

(3) **磁量子数** m_l (0, ± 1 , ± 2 , ..., $\pm l$, 共 $2l + 1$ 个): 决定电子轨道角动量空间取向 $L_z = m_l \hbar$ (其中 z 为外加磁场方向)(塞曼效应)。

(4) **自旋磁量子数** m_s ($1/2$, $-1/2$, 共 2 个): 决定电子自旋角动量空间取向 $S_z = m_s \hbar$ (斯特恩—盖拉赫实验)(自旋角动量大小 $S = \sqrt{s(s+1)}\hbar$)。