

第26章 波粒二象性

第26章 波粒二象性

26.1 黑体辐射

热辐射概念

描述热辐射的基本物理量

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

波函数

统计解释对波函数的要求

26.7 不确定关系

26.1 黑体辐射

热辐射概念

- 不同温度下，物体会发出频率不同的电磁波——任何温度下物体向外发射各种频率的电磁波——不同的温度下，电磁波按频率的分布不同。
- 热辐射：**能量按频率分布随温度而不同的电磁辐射（热能转化成电磁能）
- 平衡热辐射：**同一时间内，物体表面辐射的电磁波的能量和它吸收的电磁波的能量相等。

描述热辐射的基本物理量

- 光谱辐射出射度** M_ν : 频率为 ν 的光谱辐射出射度是指单位时间内从物体单位表面积发出的频率在 ν 附近单位频率区间的电磁波的能量。用 M_ν 表示，单位为 $W/(m^2 \cdot Hz)$
- 光谱吸收比** $a(\nu)$: 温度为 T 时，物体表面吸收的频率在 ν 到 $\nu + d\nu$ 区间的辐射能量占全部入射的该区间的辐射能量的份额，称做物体的光谱吸收比，用 $a(\nu)$ 表示。
- 光谱反射比** $\rho_\nu(T)$
- 基尔霍夫辐射定律：**同一温度下， $M_\nu/a(\nu)$ 是一个与材料种类无关的确定的值。（辐射能力越强，吸收能力也越强。）
- 黑体：** $a(\nu)=1$ ，完全吸收照射到它上面的各种频率的光，同时，光谱辐射出射度也是最高的。
- 普朗克黑体辐射公式：**

$$M_\nu = \frac{2\pi h}{c^2} \frac{\nu^3}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad h = 6.6260755 \times 10^{-34} J \cdot s$$

- 维恩位移律**(光谱辐射出射度最大的频率点):

$$\nu_m = C_\nu T \quad C_\nu = 5.880 \times 10^{10} Hz/K$$

- 斯特藩-玻尔兹曼定律：**

$$M = \int_0^\infty M_\nu d\nu = \sigma T^4 \quad \text{斯特藩-玻尔兹曼常量: } \sigma = 5.67051 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$$

- 能量量子化：**

$$E = nh\nu$$

26.2 光电效应

- **饱和光电流** i_m : 当光强一定时, 随着加速电压增加, 电流强度增加, 但当加速电压增加到一定值时, 光电流达到某一最大值。
 - $i_m \propto I$, 也说明单位时间内从阴极逸出的光电子数目与光强成正比。
- **截止电压**
- **逸出功**
- **红限频率/红限波长**: 此时刚好没有光电子逸出。 (光电子能量=逸出功)

26.3 光的二象性 光子

- **光子能量**: $E = h\nu$
- **光子质量**: $m = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{c\lambda}$
- **光子动量**: $p = \frac{h}{\lambda} = \frac{h\nu}{c}$
- **相对论能量-动量关系**: $E^2 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4$
- **光强**: 单位时间打到单位面积上的粒子总能量 $I = N h\nu$, N 粒子流密度。

26.4 康普顿散射

- **康普顿散射**: X射线通过物质时, 会出现波长改变的散射。
 - X射线的散射是单个光子和单个电子发生弹性碰撞的结果。
- 研究康普顿散射:
 - 电子在碰撞前可以看作是静止的
 - 碰撞前后动能, 动量守恒。
 - 反冲电子速度可能很大, 因此采用相对论质量。

设光子的轨迹偏转角为 φ

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

$$\text{也写作: } \frac{c}{\nu} - \frac{c}{\nu_0} = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \varphi)$$

$\frac{h}{m_0 c}$ 具有波长的量纲, 称为电子的康普顿波长 $\lambda_c = 2.43 \times 10^{-3} nm$

- **瑞利散射**: 有些光子与电子发生碰撞, 但波长不变。 (因为是看作光子与整个原子发生了碰撞, 质量差很大)

26.5 粒子的波动性

- **德布罗意公式**: 实物也具有波动性 (德布罗意波)

$$\nu = \frac{E}{h} = \frac{mc^2}{h}$$

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

- **汤姆孙电子衍射实验**

26.6 概率波与概率幅

- **玻恩**: 德布罗意波是概率波
- **电子双缝衍射实验**

波函数

- 波函数（概率幅）：时间与空间的函数

$$\Psi = \Psi(x, y, z, t)$$

- 概率密度（概率分布）：

$$P = |\Psi|^2 = \Psi\Psi^*$$

- 双缝衍射的概率叠加：

$$P_{12} = |\Psi_{12}|^2 = |\Psi_1 + \Psi_2|^2$$

统计解释对波函数的要求

- 有限性：在空间任何有限体积元 ΔV 中找到粒子的概率必须为**有限值**
- 归一性：在空间各点的概率总和必须为**1**
- 单值性：波函数应该是**单值的**
- 连续性：势场性质和边界条件要求波函数及其一阶导数（反应概率流）是**连续的**

26.7 不确定关系

- 不确定性关系：

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{h}{4\pi}$$

$$\Delta y \Delta p_y \geq \frac{h}{4\pi}$$

$$\Delta z \Delta p_z \geq \frac{h}{4\pi}$$

若令 $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1.0545887 \times 10^{-34} J \cdot s$

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}$$

$$\Delta y \Delta p_y \geq \frac{\hbar}{2}$$

$$\Delta z \Delta p_z \geq \frac{\hbar}{2}$$