

第一章 量子物理的现象

§1.1 经典物理的回顾

经典物理

对象	粒子	波
物理	力学	电磁学
规律	牛顿定律	麦克斯韦方程
	↓	↓
	迈莫实验	黑体辐射实验
	↓	↓
	相对论	量子物理

将低速情况下的牛顿力学推广到
高速情况下的相对论

光速不变
$$P = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - (\frac{v}{c})^2}} \quad E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - (\frac{v}{c})^2}}$$

$$E = \sqrt{c^2 p^2 + m_0^2 c^4}$$

该公式可以给出 $E = mc^2$

其中 m 为动质量
$$m = \sqrt{m_0^2 + \frac{p^2}{c^2}}$$

Example: 质子 + 中子 → 氘核 的反应, 该聚变反应所释放的能量

质子质量 $m_p = 1.67265 \times 10^{-27} \text{ kg}$

中子质量 $m_n = 1.67496 \times 10^{-27} \text{ kg}$

氘核质量 $m_D = 3.34365 \times 10^{-27} \text{ kg}$

相当于 C 原子的化学反应释放能量的 10^{12} 倍

$$\begin{aligned}
 E &= \Delta m c^2 = (m_D + m_p + m_n) c^2 \\
 &= 0.00296 \times 10^{-27} \times 9 \times 10^{16} \\
 &= 3.564 \times 10^{-13} \text{ J}
 \end{aligned}$$

波动的概念 $E = E_0 \cos(\omega t + \varphi_0)$

波的干涉 $E_1 = E_{01} \cos(\omega t + \varphi_{01})$ $E_2 = E_{02} \cos(\omega t + \varphi_{02})$

合成波 $E = E_1 + E_2$

合成波强度 $I = E^2 = (E_1 + E_2)^2 = E_{01}^2 + E_{02}^2 + E_{01}E_{02} \cos \varphi_{12}$
交替项 / 干涉项

$$\begin{aligned}\varphi_{12} &= \varphi_1 - \varphi_2 = \omega t_1 + \varphi_{01} - (\omega t_2 + \varphi_{02}) = \omega(t_1 - t_2) + (\varphi_{01} - \varphi_{02}) \\ &= \omega \left(\frac{r_1}{v} - \frac{r_2}{v} \right) + (\varphi_{01} - \varphi_{02}) \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} (r_1 - r_2) + (\varphi_{01} - \varphi_{02})\end{aligned}$$

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta L + \Delta\varphi_0$$

路程差 初始相位差

当 $\varphi_{12} = \pi n$ 时 I 最大
干涉相长

当 $\varphi_{12} = \pi n + \frac{\pi}{2}$ 时 I 最小
干涉相消

即两个波的合成或干涉依赖于两者的波程差与波长

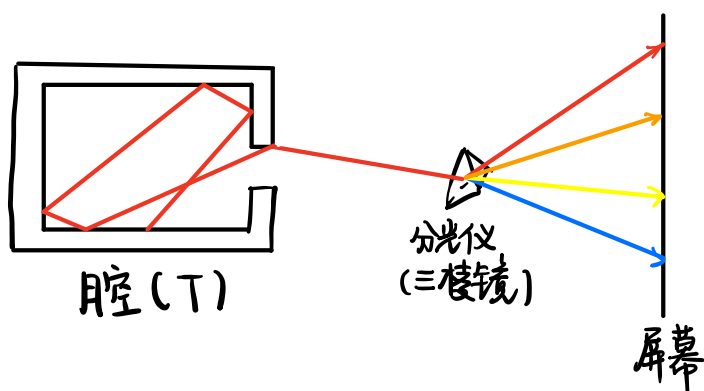
粒子 低速 牛顿力学
 高速 相对论
 能量、动量

波 电磁学 波动
 量子物理 波粒二象性
 波的干涉

§ 1.2 电磁波的量子化

(1) 黑体辐射

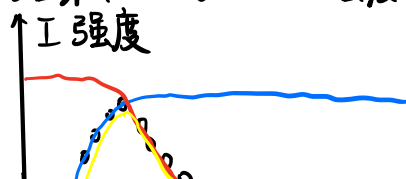
实验内容：一个热的物体发射出的电磁波

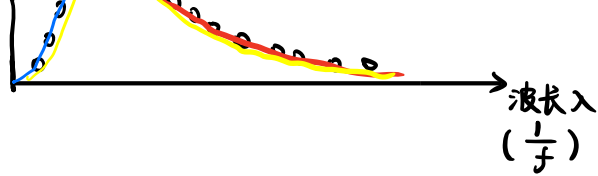


电偶极子

- △ 热是粒子运动的表现
- △ 大量电偶极子振动产生电磁波辐射

实验结果：电磁波强度与频率的关系





Wien 实验

Wien 根据经典电磁学
(电磁场能量 - 电磁波强度)

Rayleigh-Janes 根据经典电磁学

短波长与实验相符
长波长与实验不相符
短波长与实验不相符
长波长与实验相符

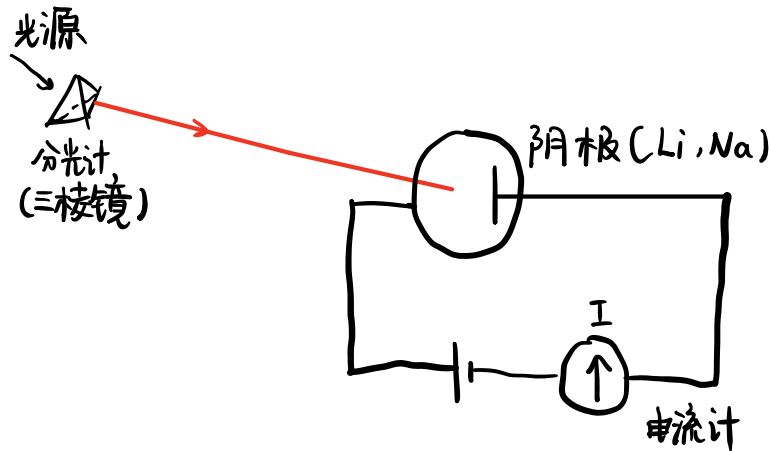
Planck 电磁场能量与频率有关 $E = h\nu$

h : 普朗克常数 $6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

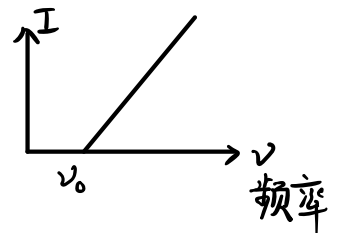
(2) 光电效应

实验内容: 一个(轻元素)物质表面吸收电磁波过程

实验装置:



实验结果: 光电流信号与电磁波强度无关, 只与其频率有关
光电流信号有一个截止频率



理论解释: (Hertz 密立根)

根据经典电磁波理论完全不能解释实验现象

爱因斯坦提出电磁波(不光是发射、吸收)能量都是一份份的能量
一份份基本单元 "光子" photon

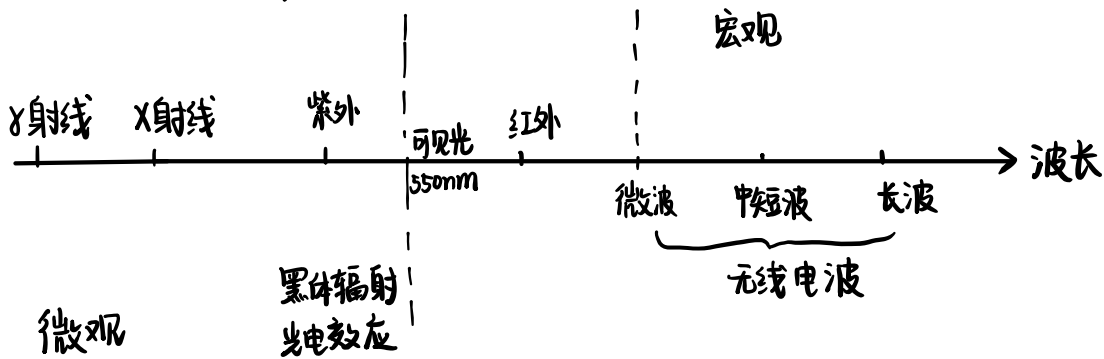
$$E = h\nu$$

光子能量 \rightarrow 电子能量

$$E_e = E_p - W \text{ (束缚能)}$$

$$I = h\nu - W$$

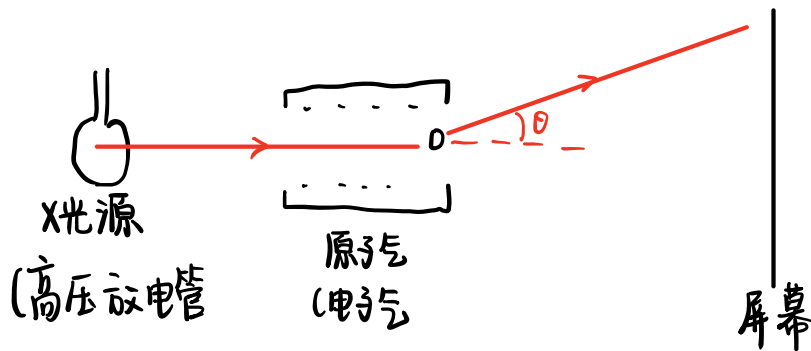
截止频率 $E_e = 0 \Rightarrow h\nu_0 = W \Rightarrow \nu_0 = \frac{W}{h}$



(3) Compton 散射

实验内容: X射线被电子所散射的过程

实验装置: (X射线管的黑体辐射/光电效应)



实验结果: X射线被电子散射

随着散射角度 θ 增长, X射线波长也会发生改变

理论解释: 经典电磁波 完全不能解释

Compton 的量子化理论

不是电磁波与电子作用, 而是电磁场的能量单元“光子”与电子相互作用



初始	X光子	能量	$E = h\nu$	电子	能量	$E = mc^2$
		动量	$p = \frac{h\nu}{c}$		动量	0
末了	X光子	能量	$E = h\nu'$	电子	能量	$\frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v_e^2}{c^2}}}$
		动量	$p = \frac{h\nu'}{c}$		动量	$\frac{mve}{\sqrt{1 - \frac{v_e^2}{c^2}}}$

* 能量守恒
$$h\nu + mc^2 = h\nu' + \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v_e^2}{c^2}}}$$

动量守恒 水平方向
$$\frac{h\nu}{c} = \frac{h\nu'}{c} \cos\theta + \frac{mve}{\sqrt{1 - \frac{v_e^2}{c^2}}} \cos\phi$$

垂直方向
$$0 = \frac{h\nu'}{c} \sin\theta - \frac{mve}{\sqrt{1 - \frac{v_e^2}{c^2}}} \sin\phi$$

上述3个方程联立求解:
$$\nu' - \nu = \frac{2h}{mc^2} \nu \nu' \sin^2 \frac{\theta}{2}$$

$$\frac{1}{\nu'} - \frac{1}{\nu} = \frac{2h}{mc^2} \sin^2 \frac{\theta}{2}$$

由 $\lambda = cT = \frac{c}{\nu}$ 得

$$\lambda' - \lambda = \frac{2h}{mc} \sin^2 \frac{\theta}{2}$$

Example: 100W 的灯炮每秒钟发射的光子数是多少?

解: $\lambda = 500\text{nm}$

$$E = nh\nu \quad n = \frac{E}{h\nu} = \frac{100 \cdot \lambda}{h c} = \frac{100 \times 500 \times 10^{-9}}{6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8} = 2.5 \times 10^{20}$$

§ 1.3 量子结构的量子化

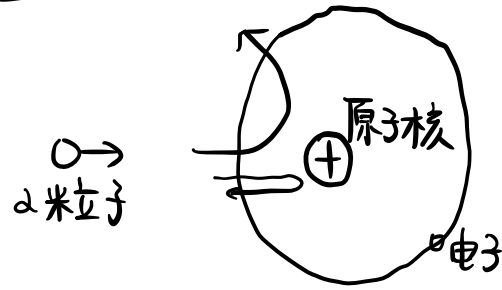
(1) 2 粒子 散射实验

实验内容: 2 粒子向金片散射

实验结构: 绝大多数 2 粒子都是直接穿过

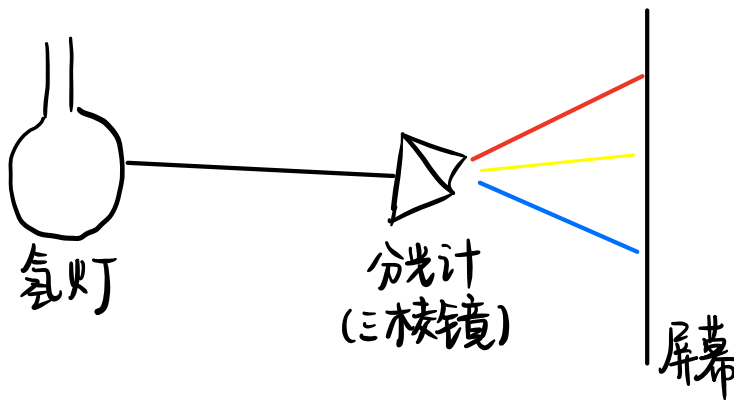
万分之一左右 α 粒子被大角度散射, 甚至 180° 弹回

理论模型: 有核模型

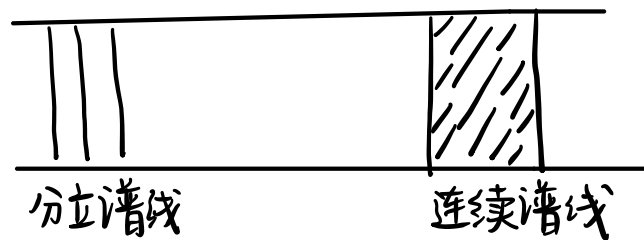


(2) 氢原子光谱

实验内容



实验结果



巴尔末公式
$$\nu = R_H c \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

里德堡整数 $R_H = 1.0967758 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$

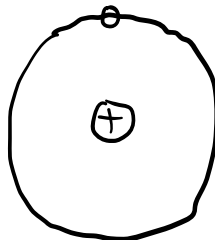
理论解释:

电子绕原子核转

会发射电磁波,

能量减少, 塌缩到原子核上

经典理论, 原子结构不稳定



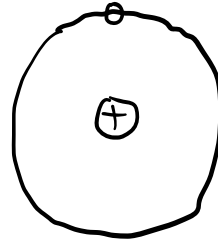
(3) 波尔 原子结构理论

第1条假设 定态假设 电子在原子核外的轨道只能取一些分立的状态

第2条假设 角动量量子化假设 在每个轨道上角动量 $L = mvr = n \frac{h}{2\pi}$, 只能 $\frac{h}{2\pi}$ 的整数倍

第3条假设 跃迁假设 电子从一个轨道跃迁到另一个轨道能量以电磁波形式发射出去

$$\begin{cases} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} = m \frac{v^2}{r} \\ mvr = \frac{nh}{2\pi} \rightarrow v = \frac{nh}{2\pi mr} \end{cases}$$



$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 mv^2} = r = \frac{e^2 4\pi^2 m^2 r^2}{n^2 h^2 m 4\pi\epsilon_0} = \frac{e^2 \pi m r^2}{\epsilon_0 n^2 h^2}$$

$$\rightarrow r = \frac{\epsilon_0 n^2 h^2}{e^2 \pi m}$$

电子绕原子核转的能量

$$E = E_{\text{动}} + E_{\text{势}} = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{e^2}{r} \cdot \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

$$= \frac{n^2 h^2}{8\pi^2 m r^2} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{e^2 \pi m}{\epsilon_0 n^2 h^2}$$

$$= \frac{e^4 m}{8 \epsilon_0^2 n^2 h^2} - \frac{e^4 m}{4 \epsilon_0^2 n^2 h^2}$$

$$= -\frac{me^4}{8\epsilon_0^2 n^2 h^2} \sim \frac{1}{n^2}$$

当电子从 n_2 轨道跃迁到 n_1 轨道

释放能量 $\Delta E = E_1 - E_2 = \frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$

ΔE 会以电磁波的形式放射出去 ($\Delta E = h\nu$)

$$\nu = \frac{E}{h} = \frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^3} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

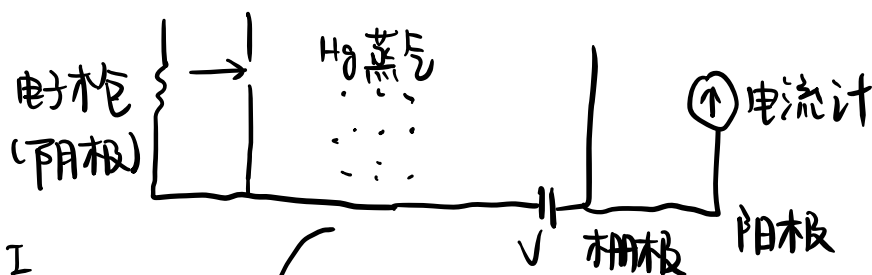
实验: $\nu = R_H C \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$ $R_H = 1.0967758 \times 10^{-7} \text{ m}^{-1}$

理论: $\nu = \frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^3} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$ $R_H = 1.0967731 \times 10^{-7} \text{ m}^{-1}$

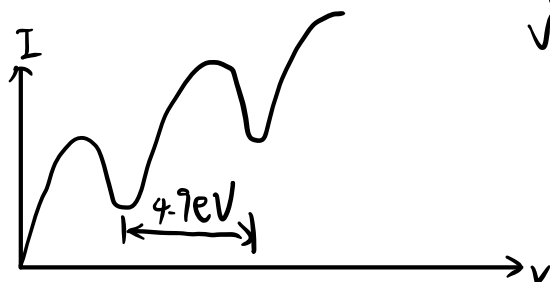
(4) Frank - Hertz 实验

实验内容: 原子吸收电子的过程 (电子与原子相互碰撞/作用)

实验装置:



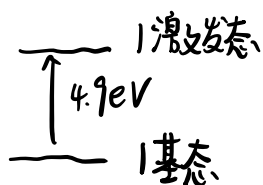
实验结果:



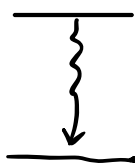
形成一系列的峰谷结构且每个峰/谷的间距都是 4.9V

理论解释: Hg 原子的能级是量子化的

当电子通过 Hg 蒸汽时被原子吸收, 原子能量是 4.9eV



能级间隔



$$\Delta E = 4.9 \text{ eV} = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$$

$$\lambda = \frac{hc}{\Delta E} = 2530 \text{ \AA} = 2.53 \times 10^{-8} \text{ m}$$

实验上测 Hg 原子光谱, 出现一条光谱线 2530 \AA

§ 1.4 波粒二象性

(1) 德布罗意理论

光 电磁波

光子 \rightarrow

波长 λ 频率 ν

能量 E 动量 p

$$E = h\nu \quad p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

能量 $E = h\nu$ 频率

动量 $p = \frac{h}{\lambda}$ 波长

德布罗意的理论：一切微观物体（光电子...）都具有波粒二象性

既可以看作粒子 能量 E 动量 p

又可以看作波 频率 ν 波长 λ

一般情况 $\lambda = \frac{h}{p}$

非相对论情况 $E = \frac{p^2}{2m}$ $p = \sqrt{2mE}$ $\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mE}}$

有温度情况 $E = \pi k_B T$ $p = \sqrt{2m\pi k_B T}$ $\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m\pi k_B T}}$

(2) 光的波粒二象性

粒子性

黑体辐射

光电效应

波动性

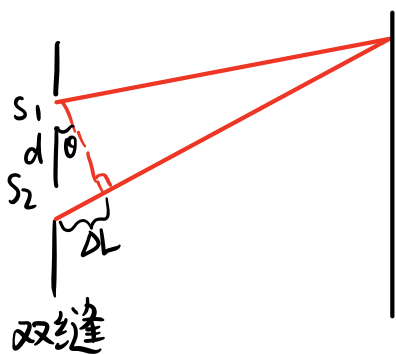
干涉(衍射)

光学显微镜、光谱

* 光波动性 一 晶格衍射

任意两个波 E_1, E_2 叠加

$$I \sim \Phi_{12} \sim \frac{2\pi}{\lambda} \Delta L \text{ 光程差}$$



光波 S_1 和光波 S_2 到达屏幕上光程差

$$\Delta L = d \sin \theta$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta L = d \sin \theta = k\lambda \text{ 干涉相长 亮纹} \\ \Delta L = d \sin \theta = (k + \frac{1}{2})\lambda \text{ 干涉相消 暗纹} \end{array} \right.$$

衍射方程

(3) X射线的波粒二象性

粒子性

波动性

X射线晶格衍射

Compton 散射

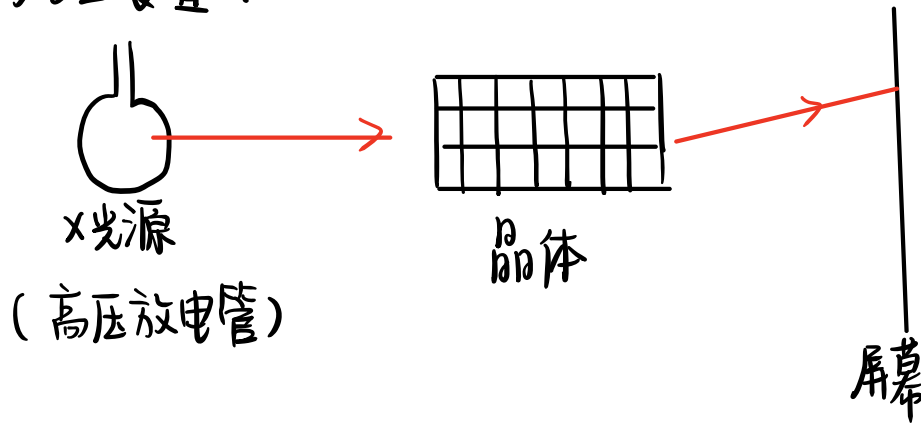
X射线显微镜

X射线光谱

X射线晶格衍射

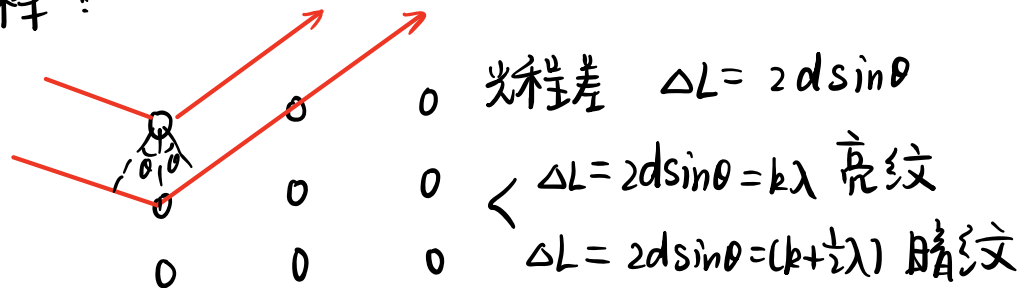
实验内容：X射线/X光经过晶体发生干涉现象

实验装置：



实验结果：明暗相间条纹

理论解释：



(4) 电子的波粒二象性

粒子性

波动性

衍射

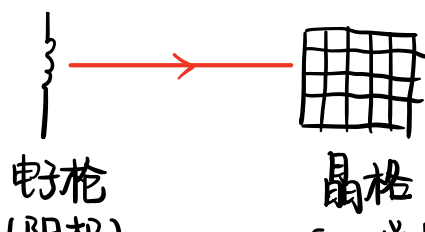
Compton 散射

电子显微镜

电子光谱

* 电子的晶格衍射

实验装置：



(阴极)

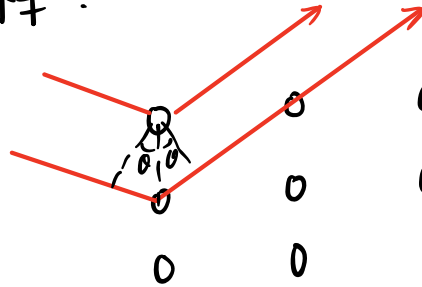
(Ni 单晶)

屏幕

电流计

实验结果：明暗相间条纹

理论解释：



光程差 $\Delta L = 2d \sin \theta$

$\Delta L = 2d \sin \theta = k\lambda$ 亮纹

$\Delta L = 2d \sin \theta = (k + \frac{1}{2})\lambda$ 暗纹

(5) 中子的波粒二象性

粒子性

中子射线

波动性

中子显微镜

衍射

(6) 原子的波粒二象性

粒子性

Bohr 氢原子理论

F-H 实验

波动性

"巨原子"效应

超流 BEC

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2\pi m k_B T}}$$

质量小、温度低、波长长、波动性明显

(7) 分子的波粒二象性

粒子性

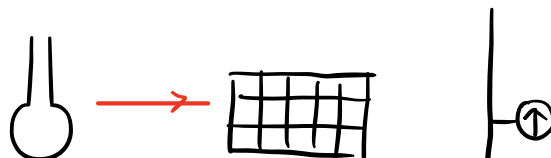
化学反应基本粒子

波动性

衍射

实验内容：C60 的衍射实验

实验装置：



光源

晶格

屏幕

实验结果：明暗相间模型

§ 1.5

	力学	电动力学	量子物理
现象	天地运动	电、磁	量子化现象
唯象规律	开普勒三定律	高斯定理、安培环路定理	德布罗意公式 $E = h\nu$ $p = \frac{h}{\lambda}$
理论	牛顿方程 $F = ma$	麦克斯韦方程 {	薛定谔方程 $i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = H\psi$