大学物理

University Physics

华 中 科 技 大 学 物 理 学 院

王宁

ningwang@hust.edu.cn

《必做演示实验目录》

电磁学

- 电流相互作用
- 巴克豪森效应
- 楞次定律
- 自感系数与磁导率的关系

振动与波

- 弹簧纵波演示
- 音叉演示拍现象
- 激光垂直振动合成
- 弦驻波
- 电磁波演示仪

光学

- 双缝干涉
- 单缝衍射
- 光栅衍射
- 光栅色散
- 起偏与检偏
- 方解石的双折射
- 偏振光的干涉

期末卷面分占6分。

题型：（与上学期类似）

一. 选择题（30分）

二. 填空题（30分）

三. 计算题（4题40分）

1. 电磁学
2. 波的干涉尤其是驻波；
3. 光的干涉、衍射等问题；
4. 量子力学。

参考方略：作业→课堂例题→课本例题

借一本学习指导书热身、勤答疑。

第九章 恒定磁场

1. 霍尔效应、磁致聚焦、磁约束
2. 磁场对载流线圈的作用
3. 介质的磁化
★4. 有介质的安培环路定律
5. 磁介质的分类

洛伦兹力 $\vec{F}=q\vec{v}\times\vec{B}$　安培力 $\mathrm{d}\vec{F}=I\mathrm{d}\vec{l}\times\vec{B}$　$\vec{F}=\int_L I\mathrm{d}\vec{l}\times\vec{B}$

载流线圈在磁场中所受力矩 $\boxed{\therefore\vec{\tau}=\vec{P}_m\times\vec{B}}$

磁化强度和磁化电流 $\boxed{\oint_L\vec{M}\cdot\mathrm{d}\vec{l}=\sum I'}$

磁化电流面密度

磁介质的分类

$\vec{M}\times\vec{n}=\vec{i}\,'$ 或 $M_t=i'$

第九章 恒定磁场

★有介质时的安培环路定理

$$\oint_L \vec{H}\cdot d\vec{l} = \sum I_0$$

$$\boxed{\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}}$$

磁化率 χ_m

$\vec{B}, \vec{M}, \vec{H}$ 三矢量之间的关系

解题一般步骤：

$$\text{由}I_{传} \xrightarrow{\oint_L \vec{H}\cdot \mathrm{d}\vec{l} = \sum_i I_i} \vec{H} \xrightarrow{\vec{B} = \mu\vec{H}} \vec{B}$$

$$\vec{H} \xrightarrow{\vec{M} = \chi_m \vec{H}} \vec{M}$$

$$\vec{M} \xrightarrow{\vec{i}' = \vec{M}\times\vec{e}_n} \vec{i}'$$

第十章 电磁感应

1. 电磁感应定律
★ 2. 感生与动生电动势
3. 互感与自感
4. RL暂态电路与磁能
★ 5. 麦克斯韦方程组（位移电流，全电流定理）

$$\boxed{\varepsilon_i = -\frac{\mathrm{d}\Phi_B}{\mathrm{d}t}}$$ → 法拉第电磁感应定律 楞次定律

感应电动势 $\begin{cases} \text{动生电动势} \\ \text{感生电动势} \end{cases}$

感生电动势 → 感应电场（涡旋电场）$\vec{E}_i$

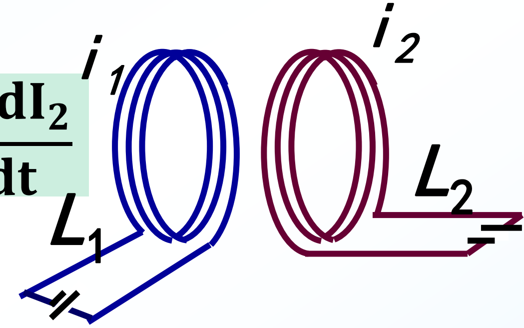
感应电场的性质

感应电场环路定理 →

$$\boxed{\oint_L \vec{E}_i \cdot \mathrm{d}\vec{l} = -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot \mathrm{d}\vec{S}}$$

第十章 电磁感应

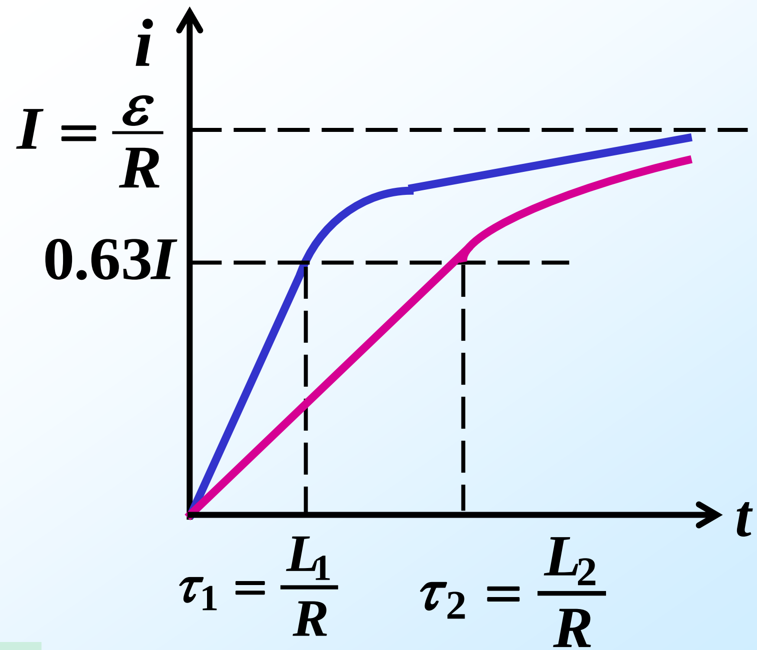
互感 $\varepsilon_{12}=-\frac{dN_1\Psi_{12}}{dt}=-\frac{MdI_1}{dt}$ $\varepsilon_{21}=-\frac{dN_2\Psi_{21}}{dt}=-\frac{MdI_2}{dt}$



自感 $\varepsilon=-\frac{d\Psi}{dt}=-L\frac{dI}{dt}$

L----对电路"电磁惯性"的度量

RL暂态电路 特征时间$\tau=\frac{L}{R}$



线圈充磁 $i=\frac{\mathcal{E}}{R}(1-e^{-Rt/L})$

线圈放磁 $i=\frac{\mathcal{E}}{R}e^{-Rt/L}$

磁能 $\boxed{A=W=\frac{1}{2}LI^2}$ $\boxed{W_m=\frac{B^2}{2\mu_0}V}$

磁能密度 $\boxed{w_m=\frac{W_m}{V}=\frac{B^2}{2\mu_0}=\frac{1}{2}\vec{B}\cdot\vec{H}}$

第十章 电磁感应

涡旋电场

★麦克斯韦方程组

传导电流+位移电流=全电流

位移电流

$$\left\{\begin{array}{l}\oint_S \vec{D}\cdot d\vec{S}=\sum_S q_i \\ \oint_L \vec{E}\cdot d\vec{l}=0 \\ \oint_S \vec{B}\cdot d\vec{S}=0 \\ \oint_L \vec{H}\cdot d\vec{l}=\sum_L I_i\end{array}\right.$$

任意电场 →

变化磁场 → 产生电场

任意磁场 →

变化电场 → 产生磁场

$$\oint_S \vec{D}\cdot d\vec{S}=\sum_S q_i \quad ①$$

$$\oint_L \vec{E}\cdot d\vec{l}=-\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\cdot d\vec{S} \quad ②$$

$$\oint_S \vec{B}\cdot d\vec{S}=0 \quad ③$$

$$\oint_L \vec{H}\cdot d\vec{l}=I+\int_S \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}\cdot d\vec{S} \quad ④$$

⇒ 麦克斯韦方程组

★麦克斯韦方程组的物理意义

④即为全电流定理

第十章 电磁感应

电磁波

电场能量密度： $w_e = \frac{1}{2}\vec{\boldsymbol{E}} \cdot \vec{\boldsymbol{D}} = \frac{1}{2}\varepsilon E^2$

$\boxed{B = uE = \sqrt{\mu\varepsilon}E}$

磁场能量密度： $w_m = \frac{1}{2}\vec{\boldsymbol{B}} \cdot \vec{\boldsymbol{H}} = \frac{1}{2}\mu H^2$

总能量密度： $w = \frac{EH}{u}$

能流密度： $\boxed{\vec{\boldsymbol{S}} = w\vec{\boldsymbol{u}} = \vec{\boldsymbol{E}} \times \vec{\boldsymbol{H}}}$ ——玻印亭矢量

第十一章 振动与波动

振动

1. 简谐振动（振动方程、振动物理量、旋转矢量法）
2. 振动的合成和分解
3. 阻尼振动、受迫振动和共振

谐振子系统的能量特点

弹簧振子

单摆

$$\boxed{\frac{d^2x}{dt^2} + \omega_0^2 x = 0}$$

$$E = E_k + E_p = \frac{1}{2}kA^2$$

——常量

$$\boxed{x = A\cos(\omega_0 t + \varphi)}$$

求特征量 A、 ω_o、 φ

$$\boxed{\omega_0 = \sqrt{k/m}}$$

周期，频率和角频率都由系统性质决定！

相位差→同相和反相、超前和落后

第十一章 振动与波动

★ **简谐振动的合成：**

1. 同方向同频率→解析法、旋转矢量法
2. 同方向不同频率→拍频
3. 同频率振动方向垂直→利萨如图
4. 不同频率振动方向垂直→利萨如图

阻尼振动、受迫振动和共振的条件及运动特点

- 临界阻尼
  过阻尼
  弱阻尼
- 频率与驱动力频率一样
  振幅与驱动力及系统自身性质有关
- 频率满足一定条件
  受迫振动振幅最大

第十一章 振动与波动

机械波（产生条件）

1. 波函数、波动方程　2. 波的干涉和衍射 ★

3. 多普勒效应　4. LC电磁振荡与电磁波

机械波传播条件：波源+弹性介质

一维简谐波函数的几种常用等价表示要熟悉

$$\begin{cases} y = A\cos\left[\omega\left(t-\frac{x}{u}\right)+\varphi\right] \\ y = A\cos[(\omega t - kx)+\varphi] \\ y = A\cos\left[2\pi\left(\frac{t}{T}-\frac{x}{\lambda}\right)+\varphi\right] \end{cases}$$

波动方程的物理意义

$$\boxed{\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{u^2}\frac{\partial^2 y}{\partial t^2}}$$

不同时刻，任意质点的振动情况

同一时刻，每一质点的振动情况

第十一章 振动与波动

机械波的能量特征（能量传递！）

$$W_k = W_p = \frac{1}{2}\rho\Delta V\omega^2 A^2 \sin^2\omega\left(t-\frac{x}{u}\right)$$

与振动不同！！
对比复习

$$W = W_k + W_p = \rho\Delta V\omega^2 A^2 \sin^2\omega\left(t-\frac{x}{u}\right)$$

总能量
不守恒!

平衡位置处质元：动能最大、势能最大、总能量最大!

最大位移处质元：动能为零、势能为零、总能量为零!

$$y = A\cos(\omega t+\varphi)$$

传播时间Δt ⟹

$$y(x,t) = A\cos[\omega(t-\frac{x}{u})+\varphi]$$

$$y(x,t) = A\cos(\omega t-\frac{2\pi x}{\lambda}+\varphi)$$

任意点比参考点晚振动，减去传播时间Δt;
任意点比参考点早振动，加上传播时间Δt 。

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta x$$

第十一章 振动与波动

★波的衍射和干涉

惠更斯原理

波传播具有独立性和叠加性

干涉相干条件：①频率相同②振动方向相同③相位差恒定

$$\boxed{A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos\Delta\varphi}$$

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}\delta$$

$$\delta = r_2 - r_1$$ ——波程差

干涉条件为：

$$\delta = r_2 - r_1 = \pm k\lambda,\ \ k = 0,1,2,3,\cdots$$ 干涉相长

$$\delta = r_2 - r_1 = \pm(2k+1)\frac{\lambda}{2},\ \ k = 0,1,2,3,\cdots$$ 干涉相消

第十一章 振动与波动

★ 驻波（干涉特例）

驻波方程：

$$\boxed{y = y_1 + y_2 = 2A\cos\frac{2\pi}{\lambda}x \cdot \cos\omega t}$$

驻波的特点不是振动的传播，而是媒质中各质点都作振幅为$\left|2A\cos\frac{2\pi}{\lambda}x\right|$，角频率为$\omega$的简谐振动。

驻波的特点
- 波腹的位置
- 波节的位置

相邻波节之间的各点同相，任一波节两侧的质点反相。

驻波系统不向任何方向传播能量

势能集中在波节
动能集中在波腹

★反射波波函数

★半波损失

多看相关例题

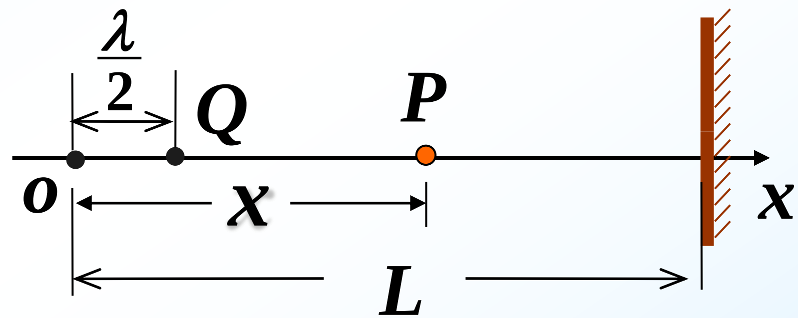
例. 波长为 λ 的平面简谐波沿x正向传播，已知在 $x=\dfrac{\lambda}{2}$ 处振动方程为$y_Q=A\cos(\omega t-\pi)$。波在$x=L=5\lambda$处遇到一波密媒质反射面，且反射波振幅仍为A。求：

1、该平面简谐波方程。

2、反射波方程。

3、合成驻波方程。

4、在L范围内有几个波腹。



解： 1、P的振动位相落后Q：

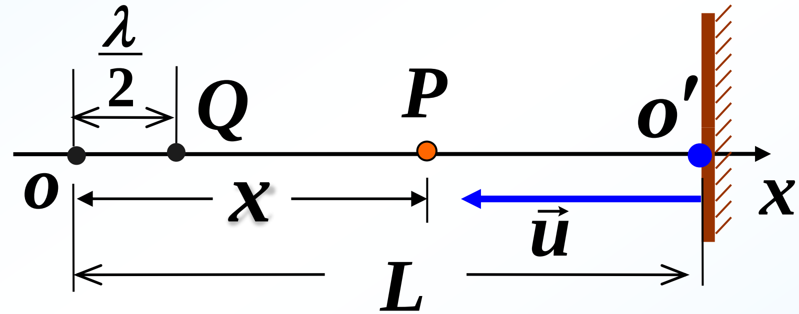
$$\frac{2\pi}{\lambda}\left(x-\frac{\lambda}{2}\right)=\frac{2\pi}{\lambda}x-\pi$$

故波动方程为： $y=A\cos[\omega t-\dfrac{2\pi x}{\lambda}]$

2、求反射波方程

$$y = A\cos[\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda}]$$

入射波在 O' 产生的振动方程为：



$$y_{O'} = y|_{x=5\lambda} = A\cos\omega t$$

以 O' 为波源产生的反射波方程：

$$y_{反} = A\cos[\omega t - \frac{2\pi}{\lambda}(5\lambda - x) + \pi]$$

$$= A\cos[\omega t + \frac{2\pi}{\lambda}x + \pi]$$

反射时必须考虑半波损失！

3、合成驻波

$$y_{合} = 2A\cos\left[\frac{2\pi x}{\lambda} + \frac{\pi}{2}\right]\cos\left[\omega t + \frac{\pi}{2}\right]$$

$$y_{合}=2A\cos\left[\frac{2\pi x}{\lambda}+\frac{\pi}{2}\right]\cos\left[\omega t+\frac{\pi}{2}\right]$$

4、对于波腹 $\left|\cos\left[\frac{2\pi x}{\lambda}+\frac{\pi}{2}\right]\right|=1$ 则：

$$\sin\left[\frac{2\pi x}{\lambda}\right]=\pm 1$$

于是有：$x=\frac{\lambda}{4},\frac{3\lambda}{4}\cdots\cdots\frac{19\lambda}{4}$，共10个波腹。

第十一章 振动与波动

声波的多普勒效应

1. 波源和接收器都静止 $\nu_R = \nu_S$

2. 波源静止, 接收器运动 $\nu_R = (1 \pm \frac{v_R}{u})\nu_S$ $\begin{cases} +: & \text{接收器靠近} \\ -: & \text{接收器远离} \end{cases}$

3. 接收器静止, 波源运动 $\nu_R = \frac{u}{u \mp v_S}\nu_S$ $\begin{cases} -: & \text{波源靠近} \\ +: & \text{波源远离} \end{cases}$

4. 波源和接收器都运动 $\nu_R = \frac{u \pm v_R}{u \mp v_S}\nu_S$

电磁波的多普勒效应

$$\boxed{\nu_R = \sqrt{\frac{1 \pm v/c}{1 \mp v/c}}\,\nu_S}$$

靠近：频率变高，波长变短，蓝移

远离：频率变低，波长变长，红移

注意 $\begin{cases} \text{靠近运动，取上面符号} \\ \text{远离运动，取下面符号} \end{cases}$

第十一章 振动与波动

LC电磁振荡和电磁波

电流的变化超前电量 $\pi/2$

电磁振荡 $\boxed{\dfrac{d^2q}{dt^2} + \omega_0^2 q = 0}$ 振荡频率 $\omega_0 = \dfrac{1}{\sqrt{LC}}$

电流和电量充放电特点

电磁波产生的条件

电磁波波动方程

$$\boxed{\frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = \frac{1}{\mu\varepsilon}\nabla^2 \vec{B}} \qquad \boxed{\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \frac{1}{\mu\varepsilon}\nabla^2 \vec{E}}$$

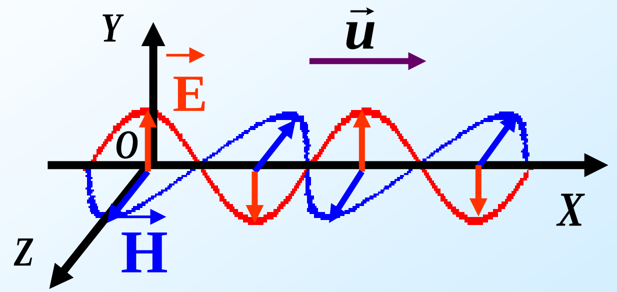
平面电磁波特点

a). $\vec{E} \perp \vec{H}$，$\vec{E}, \vec{H}, \vec{r}$ 右手螺旋；

b). $\vec{E}$和$\vec{H}$ 同相位；

$\boxed{\sqrt{\varepsilon}E = \sqrt{\mu}H}$ $\quad E = \mu u H$

d). 速度 $u = \dfrac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} = \dfrac{c}{\sqrt{\mu_r \varepsilon_r}} = \dfrac{c}{n}$



$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} = 3 \times 10^8 m/s$$

第十三章 波动光学

1. 基本概念

★2. 光的干涉（分振幅、分波阵面）

★3. 光的衍射

★4. 光的偏振（双折射、偏振光的干涉）

相干光源

光矢量—电磁强度E

折射率（$n=\sqrt{\varepsilon_r\mu_r}$）

$$v=\frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r\mu_r}}=\frac{c}{n}$$（c为真空光速）

光程 $L=\Sigma(\mathrm{n_i d_i})$

光程差

$$\text{位相差}=2\pi\frac{\text{光程差}}{\lambda}$$

第十三章 波动光学

★ 光的干涉

干涉条件：光程差

光源

1. 时间相干性

（$L=\lambda^2/\Delta\lambda$）

2. 空间相干性

（$b_0=\frac{R}{d}\lambda$）

重点

1. 分波阵面干涉（杨氏双缝干涉）
2. 分振幅干涉（薄膜干涉）

1. 杨氏双缝干涉

$$I_\theta=4I_0\cos^2\left(\frac{\pi d\sin\theta}{\lambda}\right)$$

$\Delta x\propto\lambda$ 可测量波长

明条纹 $d\sin\theta=\pm k\lambda$

暗条纹 $d\sin\theta=\pm(2k+1)\frac{\lambda}{2}$

$$\Delta x=\frac{D}{d}\lambda$$

$\Delta x\propto\frac{1}{d}$ $d\downarrow,\ \Delta x\uparrow$ 条纹越清晰易分辨。

条纹特点

洛埃镜：光程差加半波，条纹的不同？

迈克耳逊干涉仪：$\Delta d=\Delta N\frac{\lambda}{2}$

第十三章 波动光学

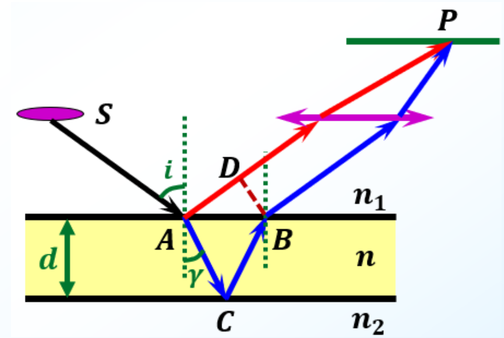
★光的干涉

2. 薄膜干涉

①等倾干涉
②等厚干涉（劈尖干涉+牛顿环）

等倾干涉：厚度均匀的薄膜所形成的干涉。

$$2d\sqrt{n^2 - n_1^2\sin^2 i} = \begin{cases} k\lambda & k = 1,2,\cdots \quad \text{明纹} \\ (2k+1)\dfrac{\lambda}{2} & k = 0,1,2,\cdots \quad \text{暗纹} \end{cases}$$



等厚干涉

$$\delta = 2nd + \frac{\lambda}{2} = \begin{cases} k\lambda & k = 1,2,\cdots \quad \text{明纹} \\ (2k+1)\dfrac{\lambda}{2} & k = 0,1,2,\cdots \quad \text{暗纹} \end{cases}$$

有无半波长看具体情况

等倾干涉条纹特点

等厚干涉条纹特点

了解两个例子及其应用

劈尖干涉

牛顿环

第十三章 波动光学

★光的衍射

重点

①单缝衍射
②双缝衍射
③光栅衍射

$$\boxed{d\sin\theta = \pm k\lambda}$$

$$(k = 0,1,2,\cdots)$$

——光栅方程

光栅分辨率

单缝衍射 → 双缝衍射 → 光栅衍射 $R = kN$

$$I_\theta = I_0\left(\frac{\sin\alpha}{\alpha}\right)^2$$

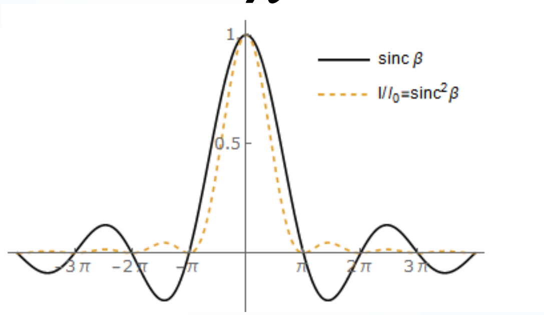
$$I_\theta = I_0\left(\frac{\sin\alpha}{\alpha}\right)^2\cos^2\beta$$

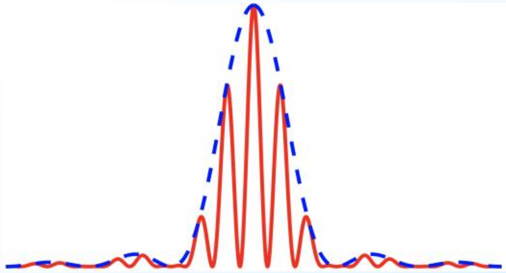
$$I_\theta = I_0\left(\frac{\sin\alpha}{\alpha}\right)^2\left(\frac{\sin(N\beta)}{\sin\beta}\right)^2$$

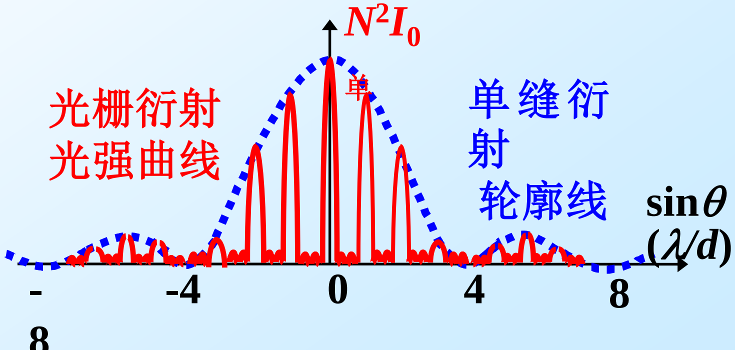
$$\alpha = \frac{\pi a}{\lambda}\sin\theta$$

$$\alpha = \frac{\pi a}{\lambda}\sin\theta \quad \beta = \frac{\pi d}{\lambda}\sin\theta$$

$$\alpha = \frac{\pi a}{\lambda}\sin\theta \quad \beta = \frac{\pi d}{\lambda}\sin\theta$$







第十三章 波动光学

★光的衍射

单缝衍射 → 双缝衍射 → 光栅衍射

$R = kN$

$$d\sin\theta = \pm k'\lambda$$

$$a\sin\theta = \pm k\lambda$$

极大、极小条件
光强分布(条纹)特点
位置：θ, x

圆孔衍射

$$\delta\varphi = 1.22\frac{\lambda}{D}$$

a, d, N, 缺级,
半角宽度
光栅方程、色散

注意I_o不同

$$I_\theta = I_o\left(\frac{\sin\alpha}{\alpha}\right)^2\left(\frac{\sin N\beta}{\sin\beta}\right)^2$$

X射线衍射

$$2d\sin\theta = k\lambda$$

第十三章 波动光学

★光的偏振　　马吕斯定律

$$I_0 = \frac{I_自}{2}$$

$$I = I_0 \cos^2\alpha$$

光的偏振状态分类及鉴别

布儒斯特定律

自然光
部分偏振光

线偏振光
圆偏振光
椭圆偏振光

$$\tan i_B = \frac{n_2}{n_1}$$

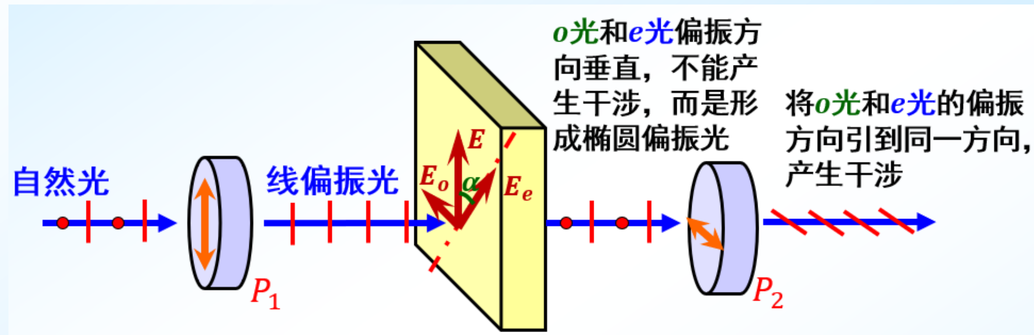
$$i_B + \gamma_0 = 90^{\circ}$$

光线以布儒斯特角入射时，反射光与折射光的传播方向垂直，反射光只有垂直分量。

玻璃堆起偏

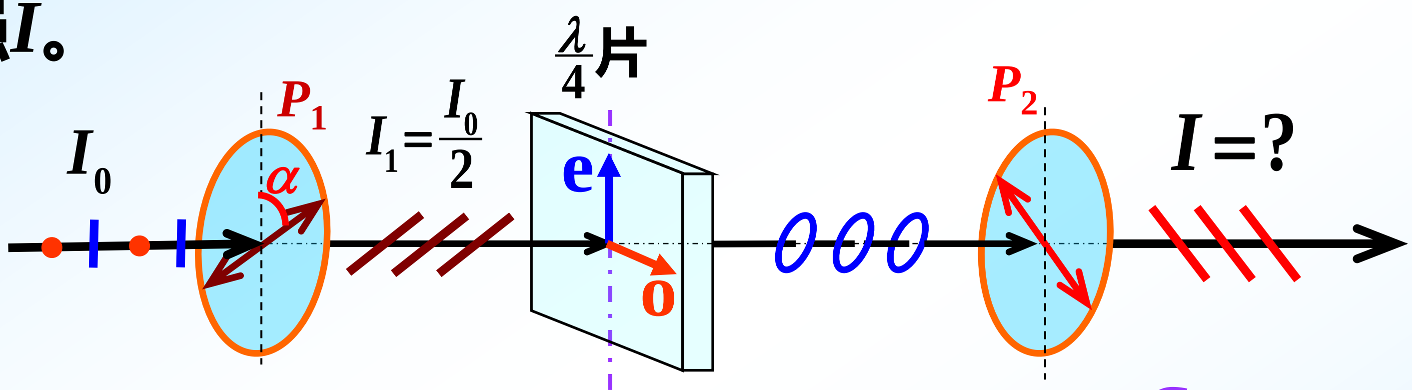
偏振光的干涉

双折射(o 光、e光)；
1/4波晶片的作用。



例2. 在相互正交的偏振片 P_1和P_2之间插入一块 $\dfrac{\lambda}{4}$ 波片，波片的光轴与 P_1 的偏振化方向间的夹角为 60º，光强为 I_0的单色自然光垂直入射于P_1，求透过 P_2的光强I。

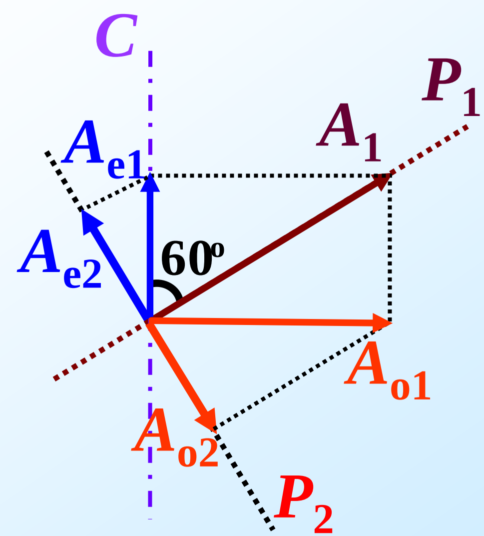
解:



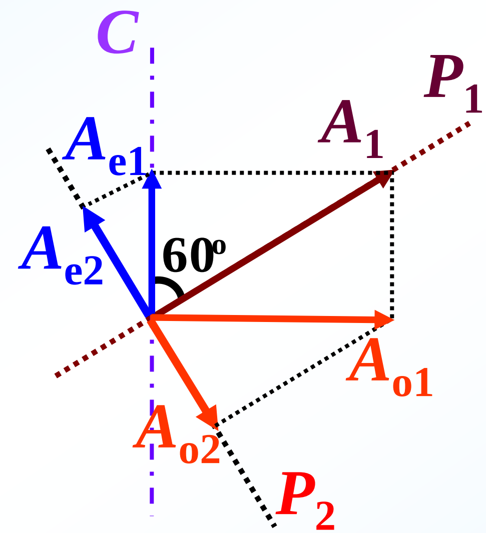
透出 P_1 的线偏振光的强度：

$$I_1=\frac{I_0}{2}=A_1^2$$

作通过两偏振片和波片的光振动的振幅关系图。



从 P_2 透出的两相干线偏振光的振幅相等，分别为



$$A_{o2}=A_{e2}=A_1\sin 60^{o}\cos 60^{o}=\frac{\sqrt{3}}{4}A_1$$

它们之间有固定的位相差：

$$\Delta\varphi=\pm\frac{\pi}{2}+\pi$$

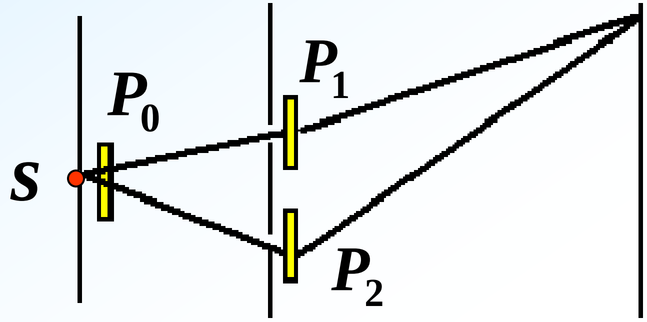
透过 P_2 的光是这两个线偏振光的相干叠加，合振幅为：

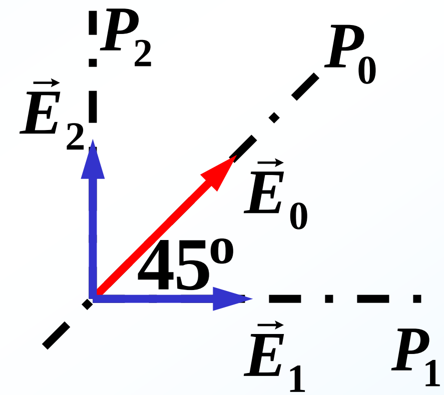
$$A^2=A_{o2}^2+A_{e2}^2+2A_{o2}A_{e2}\cos\Delta\varphi=A_{o2}^2+A_{e2}^2=2A_{o2}^2$$

则透过 P_2 的光强为：

$$I=A^2=2\times\frac{3}{16}A_1^2=\frac{3}{8}\times\frac{I_0}{2}=\frac{3}{16}I_0$$

例3. 杨氏双缝干涉实验中，加三个偏振片，偏振化方向为 $P_2 \perp P_1$，P_0 与 P_2、P_1 各成 45^{o} 角。问：



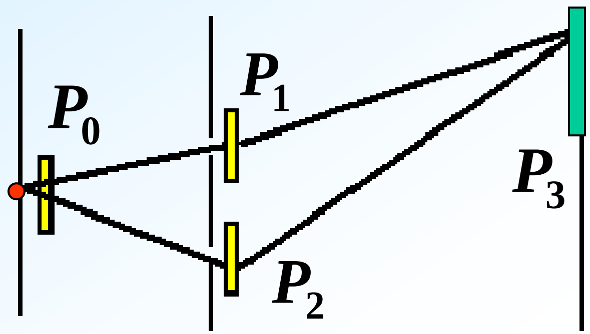


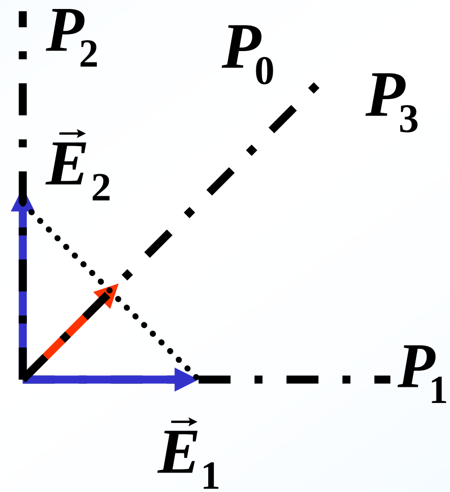
（1）屏上有无干涉条纹？**无干涉条纹**

（2）屏上各处偏振态如何？

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot d\sin\theta = \begin{cases} k\pi & \text{原明、暗纹处为线偏振光} \\ (2k \pm 1)\pi/2 & \text{时，为圆偏振光} \\ \text{其它值时，为椭圆偏振光} \end{cases}$$

（3）屏前加偏振片P_3，且偏振化方向$P_3 // P_0$屏上有无条纹?





有干涉条纹，条纹位置与原来相同。

（4）若去掉P_0（无P_3）屏上有无条纹? **无干涉条纹**

（5）若去掉所有的偏振片，屏上有无条纹? **有干涉条纹**

第十四章 早期量子论

➢ 黑体辐射 普朗克能量子

黑体辐射指<u>处于热力学平衡态的黑体</u>发出的电磁辐射

经典理论解释

①. 瑞利和金斯用能量均分定理加麦克斯韦电磁理论——只适用于长波

②. 维恩根据经典热力学和麦克斯韦分布律——只适用于短波

普朗克能量子假说：在全波段与实验结果符合一致！

能量量子化：每个频率的光都是一份一份的发射

$\varepsilon = nh\nu$ “为我们打开了通往量子物理学的大门”

第十四章 早期量子论

➢ 光电效应

光的波粒二象性

$$\varepsilon_0 = h\nu \qquad p = \frac{h}{\lambda}$$

爱因斯坦光子方程

利用光量子理论解释光电效应

$$\frac{1}{2}mv^2 = h\nu - \boxed{A}$$

——光电效应方程

逸出功

➢ 康普顿散射

$$\boxed{\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = \lambda_c(1 - \cos\theta)}$$

康普顿波长

$$\lambda_c = \frac{h}{m_0 C} = 0.024263\text{Å}$$

原子量小的，康普顿散射强。

康普顿散射实验的意义

进一步证明光具有波粒两象性，证明了光子能量、动量表示式的正确性，证明在光电相互作用中严格遵守能量、动量守恒定律。

第十四章 早期量子论

➢ 玻尔氢原子理论

卢瑟福α粒子散射实验

氢原子光谱

$$\boxed{\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2}\right)}$$

里德伯公式(广义巴耳末公式)

$k = 1, 2, 3, \cdots$

$n = k+1, k+2, \cdots$

玻尔三个假设

1. 定态假设($E_1 < \mathbf{E}_2 < \mathbf{E}_3 < \cdots$)

2. 跃迁假设 ($\nu = \frac{E_n - E_k}{h}$)

3. 轨道量子化假设($L = m_e v r = n\hbar = n\frac{h}{2\pi}$)

$(n = 1, 2, \cdots)$

量子数

第十四章 早期量子论

➢ 玻尔氢原子理论

玻尔对氢原子的解释

1. 氢原子轨道半径量子化
2. 能级量子化
3. 光谱解释

$$\boxed{r_n = \frac{4\pi\varepsilon_0\hbar^2}{e^2m_e}n^2}$$

$$\boxed{r_n = n^2r_1}$$

$$r_1 = 0.53\text{Å}$$

第一玻尔轨道半径

$$\boxed{E_n = -\frac{e^4m_e}{8\varepsilon_0^2h^2}\frac{1}{n^2}}$$

$$\boxed{E_n = -\frac{13.6}{n^2}eV}$$

$$E_1 = -13.6eV$$ ---基态

$$\boxed{\nu = Rc\left(\frac{1}{k^2}-\frac{1}{n^2}\right)}$$

$$R = \frac{e^4m_e}{8\varepsilon_0^2h^3c} = 1.097373\times10^7m^{-1}$$

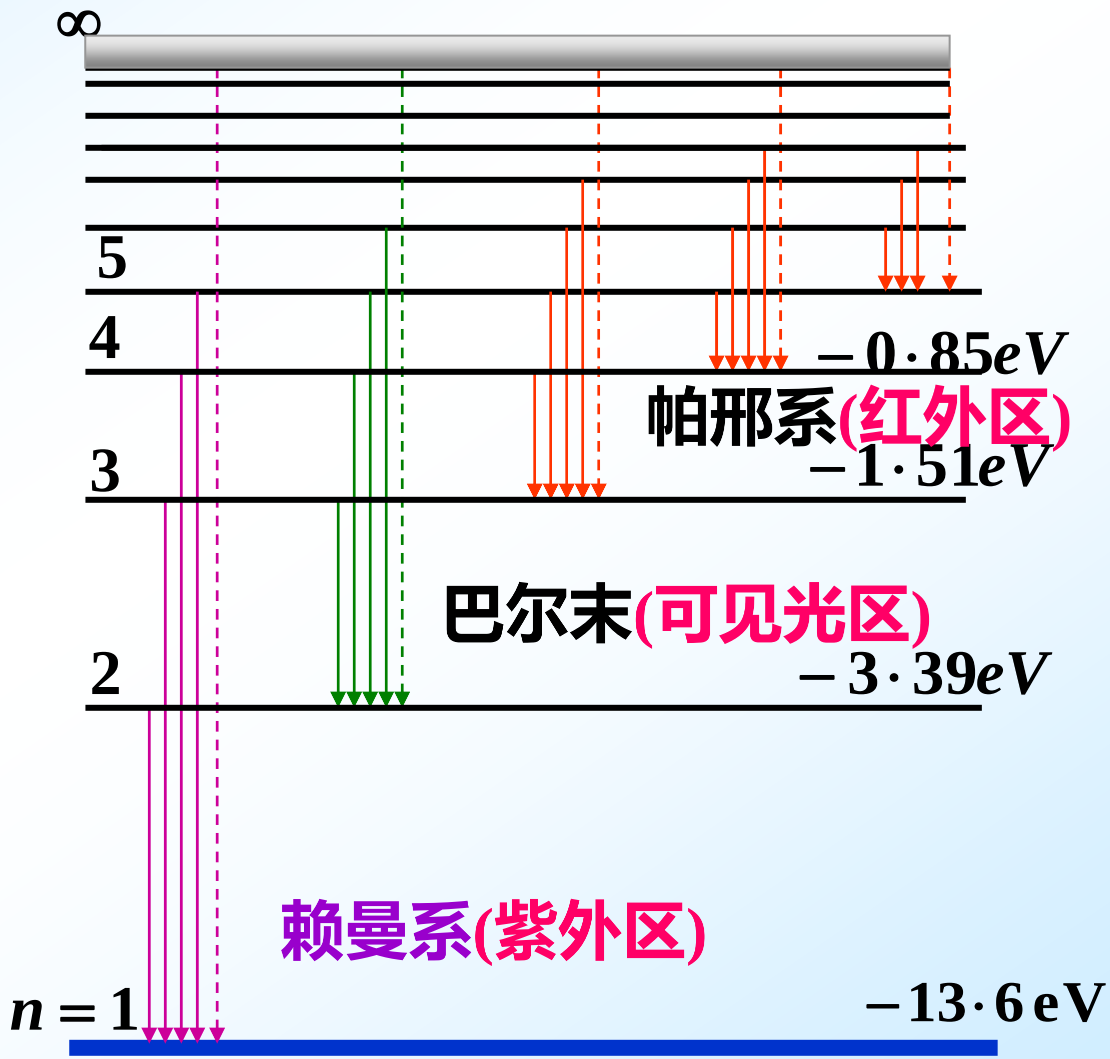
玻尔理论的成功与局限性

第十四章 早期量子论

氢原子能级图

每一个光谱项都对应一个确定能级（名称）

$$\frac{R}{n^2}=\frac{E_n}{hc}$$



第十五章 量子力学基础

1. 德布罗意物质波方程
2. 波函数（性质、意义）
3. ★ 不确定性关系
4. ★ 一维无限深势阱（定态薛定谔方程的应用）
5. 薛定谔方程与玻尔理论处理氢原子的异同
6. ★ 四个量子数（电子自旋、壳层结构）

➢ 德布罗意关系

所有的实物粒子都具有波粒二象性

$$\boxed{E = h\nu \qquad p = \frac{h}{\lambda}}$$

物质波的验证实验：

1. 戴维逊-革末电子衍射实验
2. 电子的双缝干涉实验

微观粒子波动性的应用——电子显微镜

$$v << c \qquad \lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m_0 v} = \frac{h}{\sqrt{2m_0 E_k}} = \frac{h}{\sqrt{2m_0 eU}} = \frac{1.23}{\sqrt{U}}\ \text{nm}$$

第十五章 量子力学基础

量子力学的两条基本假设

➢ 波函数的性质

单值、连续、有限、归一化

某时刻，在空间某地点，粒子出现的几率，正比于该时刻，该地点的波函数的模的平方。

$$\boxed{W \propto |\Psi|^2 = \Psi\Psi^*}$$

——物质波是几率波

★ ➢ 不确定性关系

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq h \qquad \Delta E \cdot \Delta t \geq h$$

★ 应用:(估算氢原子、势阱中粒子的基态能量)

试用相对论的能量与动量关系证明时间和能量的不确定关系：

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq h$$

相对论的能量与动量的关系：

$$\boxed{E^2 = p^2c^2 + m_o^2c^4}$$

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

$$\mathrm{d}E = \frac{1}{2\sqrt{p^2c^2 + m_o^2c^4}} \cdot 2c^2 p\mathrm{d}p$$

$$= \frac{c^2 p}{E}\mathrm{d}p = \frac{c^2 p}{mc^2}\mathrm{d}p = \frac{p}{m}\mathrm{d}p = v\mathrm{d}p$$

$$\therefore \quad \Delta E = v\Delta p$$

$$\Delta E \cdot \Delta t = v\Delta p \Delta t = \Delta p \Delta x \geq h$$

$$\therefore \Delta E \cdot \Delta t \geq h$$

1、若令 $\lambda_c = \dfrac{h}{m_0 c}$（电子的康普顿波长）。当电子的动能等于它的静止能量时，它的德布罗意波长为 $\underline{\quad \lambda_c / \sqrt{3} \quad}$。

$$mc^2 - m_0 c^2 = m_0 c^2 \qquad m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}} = 2m_0 \qquad v = \frac{\sqrt{3}}{2} c$$

2、德布罗意波的波函数与经典波的波函数的本质区别是__________________________________。

德布罗意波是概率波，波函数不表示物理量在空间的波动，其振幅无实在的意义。

第十五章 量子力学基础

重点
1. 计算过程
2. 物理意义
3. 不确定原理结合

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2+U(\vec{r})\right]\psi(\vec{r})=E\psi(\vec{r})$$

---定态薛定谔方程

★ ➢ 一维无限深方势阱

$$V(x)=\begin{cases}0 & (0<x<a)\\ \infty & (x\le 0, x\ge a)\end{cases}$$

薛定谔方程的解：

$$\psi(x)=\begin{cases}0 & (x\le 0, x\ge a)\\ \sqrt{\frac{2}{a}}\sin\frac{n\pi}{a}x & (0<x<a)\end{cases}$$

因此，一维无限深势阱中粒子的本征波函数：

$$\Psi_n(x,t)=\sqrt{\frac{2}{a}}\sin\left(\frac{n\pi}{a}x\right)e^{-\frac{i}{\hbar}E_n t}\qquad E_n=\frac{\pi^2\hbar^2}{2ma^2}n^2\qquad (n=1,2,\cdots)$$

第十五章 量子力学基础

➢ 氢原子问题

1. 能量量子化
2. 角动量量子化
3. 角动量空间量子化
4. 电子波函数和空间几率分布

定态薛定谔方程的解表为：

$$\psi_{nlm_l}(r,\theta,\varphi)=R_{nl}(r)Y_{lm_l}(\theta,\varphi)$$

角向函数，与θ、φ及角量子数l和轨道磁量子数m_l有关。

径向函数，与r及主量子数n和角量子数l有关。

电子空间概率密度分布：

$$\rho_{nlm_l}(r,\theta,\varphi)=\left|\psi_{nlm_l}(r,\theta,\varphi)\right|^2=\left|R_{nl}(r)\right|^2\cdot\left|Y_l^{m_l}(\theta,\varphi)\right|^2$$

1. 径向几率

径向概率密度：$\rho_{nl}(r)=R_{nl}^2(r)r^2$

2. 角向概率

第十五章 量子力学基础

★ ➢ 电子的稳定状态由四个量子(n,ℓ,m_ℓ,m_s)数决定

1）主量子数：$\boxed{n}$

$$E_n=-\frac{me^4}{8\varepsilon_0^2h^2}\cdot\frac{1}{n^2}$$

氢原子能量状态主要取决于 n

角量子数：$\boxed{l}$

$$L=\sqrt{l(l+1)}\ \hbar$$

角动量的量子化由 l 决定

磁量子数：$\boxed{m_l}$

$$L_z=m_l\,\hbar$$

决定角动量空间量子化

自旋磁量子数 $\boxed{m_s}$

$$L_{sz}=m_s\hbar$$

$$N_n=2n^2$$

2）特别注意各量子数的取值法则：

$$\begin{cases}n=1,2,3\cdots\\ l=0,\ 1,\ 2,\cdots\ \ n-1 & \text{可取}n\text{个值}\\ m=0,\ \pm1,\ \pm2\cdots\ \pm l & \text{可取 }2l+1\text{个值}\\ m_s=+\dfrac{1}{2},\ \ -\dfrac{1}{2}\end{cases}$$

能级的高低由：
$n+0.7\,l$ 决定

例：氢原子态电子波函数的径向部分为：

$$R_{2p}(r)=\frac{1}{(2a_0)^{3/2}}\frac{r}{\sqrt{3}a_0}e^{-\frac{r}{2a_0}}$$ （式中a_0为玻尔半径）

计算在$r \to r+dr$的球壳内$2p$电子出现的几率密度。

解：

$$w_{2p}(r)=\left|R_{2p}(r)\right|^2 r^2=\frac{r^4}{24a_0^5}e^{-\frac{r}{a_0}}$$

计算几率密度最大的位置

$$\frac{dw_{2p}(r)}{dr}=0 \Rightarrow r=4a_0 \qquad \because \left.\frac{d^2w_{2p}(r)}{dr^2}\right|_{r=4a_0}<0$$

$\therefore$ $r=4a_0$时几率密度最大，恰好对应第二玻尔半径。

14-2. 试用能量守恒定律、动量守恒定律证明：
一个自由电子不能一次完全吸收一个光子。

证明1： 用反证法。设 一个自由电子一次完全吸收一个光子后，其速率为v。

由能量守恒定律得：$h\nu + m_0c^2 = mc^2 = \dfrac{m_0c^2}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}}$

由动量守恒定律得：

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

$$\frac{m_0 vc}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}} + m_0c^2 = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}}$$

解得：$v=0$ 或 $v=c$

这两个解均不合理。

14-2.证明2：

设 一个自由电子一次完全吸收一个光子后，其速率为v。

依能量守恒：

$$h\nu + m_0 c^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$ 解得：$$v = \frac{\sqrt{h\nu(h\nu + 2m_0 c^2)}}{h\nu + m_0 c^2}$$

依动量守恒：

$$\frac{h\nu}{c} = \frac{m_0 v}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$ 解得：$$v = \frac{h\nu}{\sqrt{h^2\nu^2 + m_0^2 c^4}}$$

两结果矛盾！即此过程不能同时遵守能量守恒和动量守恒，故不能实现。

15-3. 若电子和光子的波长均为0.20 nm，则它们的动量和动能各为多少？

解： 由德布罗意方程 $\lambda = \dfrac{h}{p}$

可知，电子和光子的λ 相同，则它们的动量大小相同。

所以电子和光子的的动量大小均为：

$$p = \frac{h}{\lambda} = \frac{6.626\times10^{-34}}{0.2\times10^{-9}} = 3.313\times10^{-24}\ \mathrm{m/s}$$

电子的动能：$E_e = \dfrac{p^2}{2m_e} = 6.02\times10^{-18}\ \mathrm{J}$

光子的动能：$\varepsilon = h\nu = \dfrac{hc}{\lambda} = 9.94\times10^{-16}\ \mathrm{J}$

15-4. 铀核的线度为 $7.2\times10^{-15}\,\mathrm{m}$ 。根据不确定关系估算：核中的α粒子（$m_\alpha=6.7\times10^{-27}\,\mathrm{kg}$）的动量值和动能值各约是多少？一个电子在核中动能的最小值约是多少（ $m_e=9.11\times10^{-31}\,\mathrm{kg}$ ）？

解： 根据不确定关系进行估算。取铀核的线度为粒子位置的不确定值，即 $\Delta x=d=7.2\times10^{-15}\,\mathrm{m}$

由不确定关系式 $\Delta p_x\Delta x\geq\dfrac{h}{4\pi}$

$$p_{\min}=\Delta p_{\min}=\frac{h}{4\pi d}=7.3\times10^{-21}\,\mathrm{kg\cdot m/s}$$ 取为粒子的动量

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

（1）若核内有α 粒子，则

$$cp=3\times10^8\times7.3\times10^{-21}=2.19\times10^{-12}\ \mathrm{J}$$

$$m_\alpha c^2=6.7\times10^{-27}\times(3\times10^8)^2=6.03\times10^{-10}\ \mathrm{J}$$

由于cp项比 $m_\alpha c^2$ 项小两个数量级，作为估算可以不考虑相对论效应

得 $$E_k=\frac{p^2}{2m_\alpha}=3.97\times10^{-15}\,\mathrm{J}=2.5\times10^4\,\mathrm{eV}$$

（2）若核内有电子，则

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

$$cp = 3\times10^8\times7.3\times10^{-21} = 2.19\times10^{-12}\ \mathrm{J}$$

$$m_ec^2 = 9.1\times10^{-31}\times9\times10^{16} = 8.2\times10^{-14}\ \mathrm{J}$$

由于cp项比m_ec^2项大两个数量级，必须考虑相对论效应。作为估算

取 $E_k = pc = 7.3\times10^{-21}\times3\times10^8\ \mathrm{J}$

$$= 21.9\times10^{-13}\,\mathrm{J} = 13.3\ \mathrm{MeV}$$

15-5. 氦氖激光器所发出的红光波长$\lambda = 632.8\text{nm}$，谱线宽度$\Delta\lambda = 10^{-9}\text{nm}$。试求该光子沿运动方向的位置不确定量（即波列长度）。

解： 由德布罗意关系式 $\lambda = \dfrac{h}{p}$，有 $\Delta p = \dfrac{h}{\lambda^2}\Delta\lambda$

代入不确定关系式 $\Delta x \Delta p \geq \dfrac{h}{4\pi}$

得 $\Delta x \geq \dfrac{h}{4\pi\Delta p} = \dfrac{\lambda^2}{4\pi\Delta\lambda}$

代入数值得 $\Delta x = 31.9\ \text{km}$

第十六章 半导体和激光简介

➢ 半导体

半导体的定义

能带理论

能带中电子排布原则：
1. 服从泡利不相容原理
2. 服从能量最小原理

★导体、绝缘体、半导体的能带特点

本征半导体

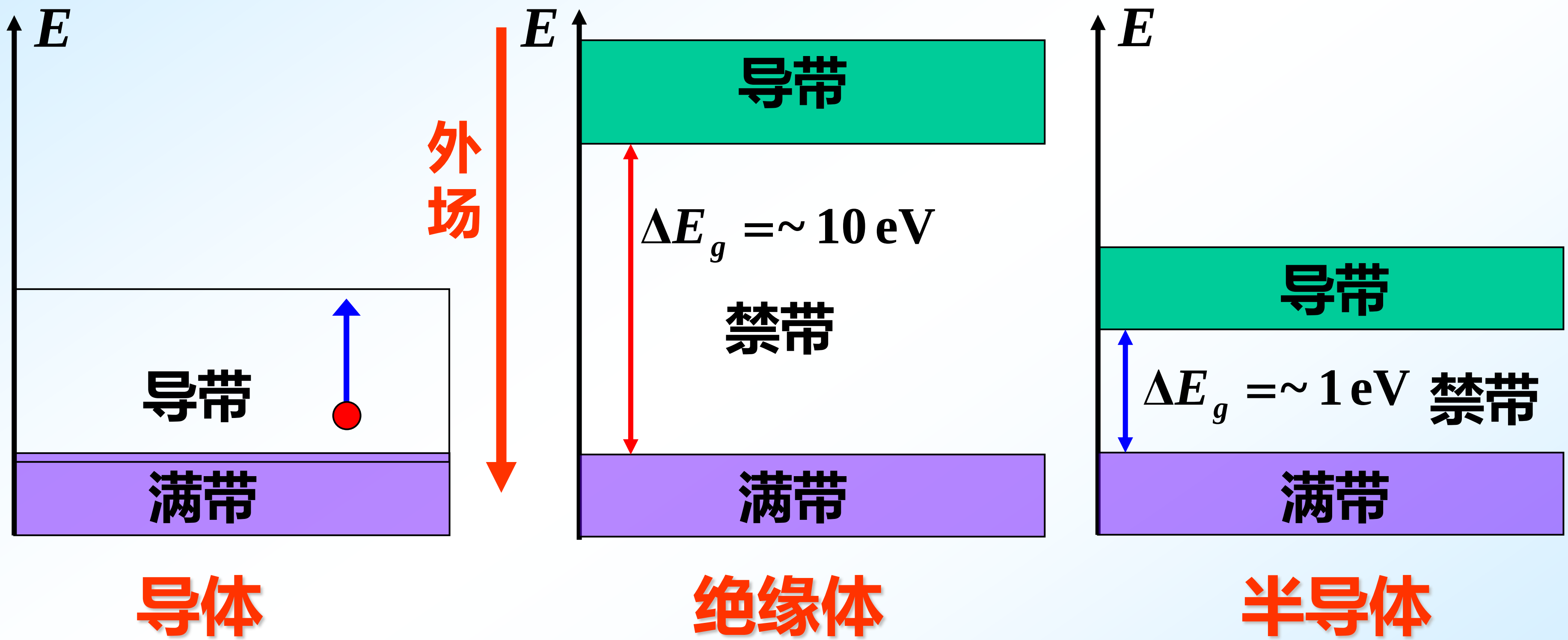
★N型半导体 （电子型半导体）

★P型半导体 （空穴型半导体）

PN结的特点：单向导电性

第十六章 半导体和激光简介

导电性能不同的原因：**能带结构不同**



没有禁带，可显示很强的导电性。

禁带很宽，满带中的电子很难进入导带，形不成电流，导电性很差。

禁带较窄，满带中的电子较易进入导带而导电。

第十六章 半导体和激光简介

➢ 激光

激光的特点

与发光相关的三种能级跃迁方式：
自发辐射、受激吸收、受激辐射

粒子数反转----产生激光的必要条件

★产生激光的必要条件

1.激励能源（使原子激发）

2.粒子数反转（有合适的亚稳态能级）

3.光学谐振腔（方向性，光放大，单色性）

★ 光学谐振腔的作用 （准直、放大、选频）

He-Ne激光器中，
He是辅助物质，Ne是激活物质(实现粒子数反转)。

第十七章 原子物理基础

➢ 原子核的基本性质

原子核由质子（p）和中子（n）组成。

质子和中子称为核子

原子核的电荷与质量近似球对称分布

★ $^{A}_{Z}\mathrm{X}$

质子和中子都有自旋角动量与轨道角动量，其矢量和称总角动量，称之为核的自旋。自旋量子数均为1/2 。

结合能：由质子和中子形成原子核时所放出的能量。

$$\boxed{\Delta E = \Delta mc^2}$$

平均结合能越大，原子核越稳定。

第十七章 原子物理基础

➢ 了解放射性衰变的基本规律并能简单计算

α衰变（释放带正电的氦核，α粒子）

β衰变（释放电子）

γ衰变（释放光子，伴随α或β衰变）

放射性衰变过程遵守电荷守恒、质量数守恒、能量守恒、动量守恒、角动量守恒。

$${}_{Z}^{A}\mathrm{X} \to {}_{Z-2}^{A-4}\mathrm{Y} + {}_{2}^{4}\mathrm{He}$$（α衰变）

$${}_{Z}^{A}\mathrm{X} \to {}_{Z+1}^{A}\mathrm{Y} + {}_{-1}^{0}\mathrm{e}$$（β衰变）

★ 放射性衰变定律

$$\boxed{N = N_0 \mathrm{e}^{-\lambda t}}$$

半衰期τ

$$\boxed{\tau = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}}$$

放射性活度（放射性强度）

$$\boxed{A = A_0 \mathrm{e}^{-\lambda t}} = A_0 \times 2^{-t/\tau}$$

上述知识点复习仅供同学们参考复习，
预祝各位同学期末取得理想成绩！

考前两次答疑：

第一次：18周周五晚上 7:00-9:00

第二次：19周周二下午 4:00-6:00

东九B204

第二次网测答案

1. (10分)一质点质量为0.1 kg, 它同时参加互相垂直的两个运动，其振动表达式分别为

$$x = 0.06\cos\left(\frac{\pi}{3}t + \frac{\pi}{3}\right),$$
$$y = 0.03\cos\left(\frac{\pi}{3}t - \frac{\pi}{3}\right),$$

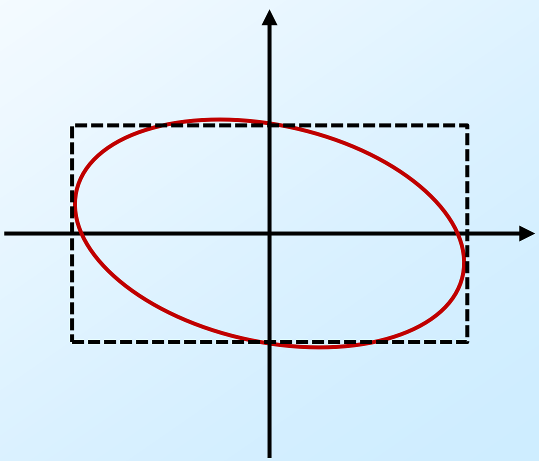
试写出质点运动的轨迹方程，画出图形，并指明是左旋还是右旋。

解：消去t, 有 $$\frac{x^2}{A_1^2} + \frac{y^2}{A_2^2} - \frac{2xy}{A_1A_2}\cos(\varphi_2 - \varphi_1) = \sin^2(\varphi_2 - \varphi_1)$$

$$A_1 = 0.06 \qquad A_2 = 0.03 \qquad \varphi_1 = \frac{\pi}{3} \qquad \varphi_2 = -\frac{\pi}{3}$$

$$x^2 + 2xy + y^2 = 2.7\times10^{-3}$$

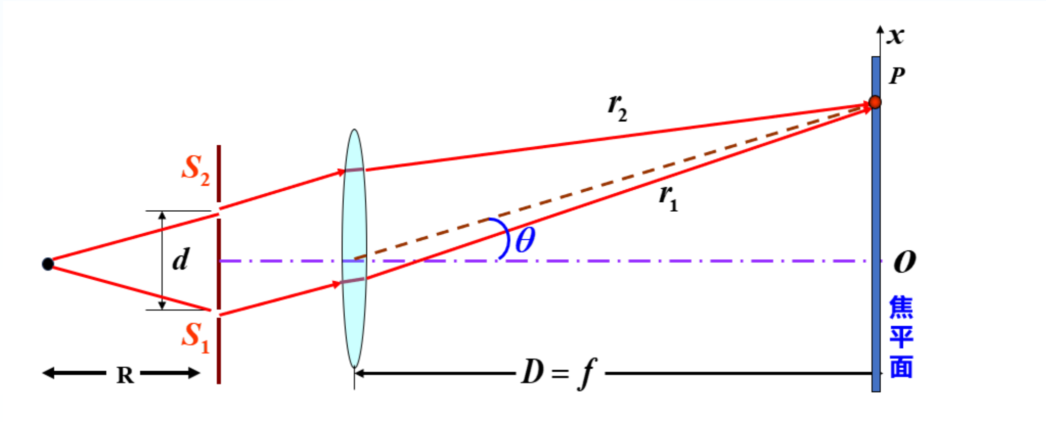
$$t = 0, x = 0.06\cos\pi/3\,, y = 0.03\cos(-\pi/3)$$



t增加，x减小y增大，左旋

2. （50分）杨氏双缝干涉装置示意图如图1所示，两狭缝S_1,S_2相距$d = 0.6\,mm$,观测屏距狭缝$D = 2.5\,m$。由线光源S照明，光波波长为 550 nm。

(1) 求屏上相邻明条纹中心的距离；第5级亮条纹中心的位置；



解：（1）两相邻明纹之间的距离为

$$\Delta x = \frac{D}{d}\lambda = 2.29\,mm$$

第五级亮纹所在屏上的位置为：

$$x_5 = 5\frac{D}{d}\lambda = 11.45\,mm$$

(2) 如果缝间距减小为$d' = 0.30\ mm$，求第5级亮条纹中心的位置，并分析其位置改变的原因。
(3) 保持两狭缝缝距$d' = 0.30\ mm$，在光路r_2中插入一个透明介质薄片，折射率为$n = 1.58$，厚$h = 0.01\ mm$，求此时第5级亮条纹的位置。

(2) 当缝间距变为$d' = 0.30\ mm$时，第5级亮纹中心位置为

$$x_5' = 5\frac{D}{d'}\lambda = 22.9\ mm$$

(3) 透明介质放在光路r_2后，增大了r_2光路的光程，此时两束光的光程差为

$$\delta = r_1 - [nh + (r_2 - h)] = r_1 - r_2 - (n-1)h$$

对于第五级亮条纹 $\delta = 5\lambda$

且 $d'\sin\theta - (n-1)h = 5\lambda$

$$\sin\theta \approx \tan\theta = \frac{x}{D} = \frac{5\lambda + (n-1)h}{d'}$$

$$x \approx D\frac{5\lambda + (n-1)h}{d'} = 7.125\ cm$$

(4) 如光源S距离狭缝$R = 0.5\ m, d' = 0.30\ mm$,求光源的极限宽度$b_0$。如光源宽度为$b = 0.5\ mm$，求$R = 0.5\ m$和$R = 1\ m$时的相干间隔。

(5) 如入射光改为波长为550~650 nm的复色光，求此时最多能看到第几级条纹，最大光程差是多少?

（4）光源的极限宽度为

$$b_0 = \frac{\lambda R}{d'} = 0.917\ mm$$

若 $b = 0.5\ \mathrm{mm}, \mathrm{R} = 0.5\ \mathrm{m}$,

相干间隔 $$\mathrm{d} = \frac{\lambda R}{\mathrm{b}} = 0.55\ \mathrm{mm}$$

$b = 0.5\ \mathrm{mm}, \mathrm{R} = 1\ \mathrm{m}$,

相干间隔 $$\mathrm{d} = \frac{\lambda R}{\mathrm{b}} = 1.1\ \mathrm{mm}$$

(5) 如入射光改为波长为550~650 nm的复色光，求此时最多能看到第几级条纹，最大光程差是多少？

(5) 其中心波长为 $\lambda = 600\ nm$，谱线宽度为$\Delta\lambda = 100\ nm$

条纹衬度为0时的条件为 $(m+1)\left(\lambda - \frac{\Delta\lambda}{2}\right) = m(\lambda + \frac{\Delta\lambda}{2})$

其最高相干级次为

$$m_{max} + \frac{1}{2} = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = 6$$

因为m只能取整数，所以能看到的最高级次为第5级。

最大光程差为 $\delta = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} = 3.6\ \mu m$

3. （30分）一光栅，宽2.0 cm,共有6000条缝。

(1) 如以钠黄光（$\lambda = 589.3\ nm$）垂直入射，问共能看到多少条亮纹（主极大），其最高级次是多大?

(2) 如钠黄光改为斜入射，其方向与光栅法线的方向成30°角，求各亮纹的位置，其最高级次是多大?

(3) 589.3 nm实际上是钠双线$\lambda_1 = 589.0\ nm$与$\lambda_2 = 589.6\ nm$的平均波长。求在最高级条纹中此双线分开的角距离及在屏上分开的线距离（设光栅后透镜的焦距为2 m）。

解：（1）由题目知光栅常数$d = \frac{1}{3000}cm$, 再由光线正入射时$sin\ \theta = 1$可得条纹的最高级次为

$$m_{max} = \frac{d}{\lambda} = 5.66$$

可见，最高级次的条纹为第5级。屏上共可看到11条亮纹

由光栅方程得它们得叫位置为

$$\boldsymbol{sin\,\theta = \pm\frac{m\lambda}{d} = \pm 0.1768\,m}$$

$$\boldsymbol{\theta = arcsin(\pm 0.1768\,m)}$$

$$m = 0, \theta = 0$$
$$m = 1, \theta = \pm 10.18^{o}$$
$$m = 2, \theta = \pm 20.71^{o}$$
$$m = 3, \theta = \pm 32.03^{o}$$
$$m = 4, \theta = \pm 45.01^{o}$$
$$m = 5, \theta = \pm 62.13^{o}$$

（2）光线斜入射，因$i = 30^o$, 由光栅方程

$$d(\sin\theta - \sin i) = \pm m\lambda$$

$$\sin\theta = \pm 0.1768m + 0.5$$

$m = 0, \theta = 30^o$

$m = 1, \theta = 18.86^o, 42.59^o$

$m = 2, \theta = 8.42^o, 58.61^o$

$m = 3, \theta = 1.74^o$

$m = 4, \theta = -11.96^o$

$m = 5, \theta = -22.58^o$

$m = 6, \theta = -34.11^o$

$m = 7, \theta = -47.53^o$

$m = 8, \theta = -66.12^o$

可见，仍为11条亮纹，但最高级次为第8级。

（3）λ_1和λ_2在第m级条纹中分开得角距离为

$$\delta\theta = D_\theta \delta\lambda = \frac{m}{d\cos\theta_m}\delta\lambda$$

光线正入射时，最高级次为第5级，相应$\boldsymbol{\theta_m = 62.13^o}$，则可得

$$\delta\theta = 1.93\times 10^{-3} rad = 0.110^o$$

光线斜入射时，最高级次为第8级，相应$\boldsymbol{\theta_m = -66.12^o}$，则可得

$$\delta\theta = 3.56\times 10^{-3} rad = 0.204^o$$

可见，斜入射的时候，谱线分开的距离更大。

由于色散本领$R = mN$

正入射时：$R = mN = 5 \times 6000 = 3 \times 10^4$

斜入射时：$R = mN = 8 \times 6000 = 4.8 \times 10^4$

在最高级次条纹中，λ_1和λ_2的线距离为

正入射时：

$$\delta l = f\delta\theta = 2 \times 10^3 \times 1.93 \times 10^{-3} mm = 3.86\ mm$$

斜入射时：

$$\delta l = f\delta\theta = 2 \times 10^3 \times 3.56 \times 10^{-3} mm = 7.12 mm$$

4. （10分）请写出显微镜的分辨本领与什么有关？

圆孔衍射

$$\delta\varphi = 1.22\frac{\lambda}{D}$$