乐学物理，“物”出真理

——大学物理期末复习讲座

曾代敏

2018.1.7

目录

- 课程目的
- 内容提要
- 考试提醒

课程目的

- 描述物质世界运动的最基本的概念、原理；
- 学习物理学的基本思想、理论框架及研究方法；
- 为后续技术基础课及专业基础课奠定必要的物理基础；
- 培养唯物主义思想和科学的方法论，以及在科学进步中不断探索的献生精神。

内容提要

题型：

选择题　　填空题　　计算题　　综合题

内容提要

- 热学（6、7）：～20%
- 振动和波动（14、15、16）：～25%
- 波动光学（17、18、19）：～25%
- 近代物理（20、21、22、23）：～30%

气体动理论

理想气体物态方程

$$pV = \nu RT$$

$$p = nkT$$

气体动理论

理想气体微观模型

理想气体的压强 $$p=\frac{2}{3}n\overline{E_t}$$

理想气体的温度 $$\overline{E_t}=\frac{3}{2}kT$$

气体动理论

自由度 $i=t+r$

能量按自由度均分原理 $\overline{E}=\frac{i}{2}kT$

理想气体内能

$$E=\frac{i}{2}\nu RT=\frac{i}{2}pV$$

气体动理论

分子的速率分布 $f(v)=\dfrac{dN}{Ndv}$

统计平均速率 $\overline{g(v)}=\int_0^\infty g(v)\cdot f(v)dv$

理想气体特征速率 $\boxed{\bar{v}=\sqrt{\dfrac{8RT}{\pi M_{mol}}}}$ $\boxed{\sqrt{\overline{v^2}}=\sqrt{\dfrac{3RT}{M_{mol}}}}$ $\boxed{v_p=\sqrt{\dfrac{2RT}{M_{mol}}}}$

气体动理论

分子平均碰撞频率

$$\boxed{\overline{Z}=\sqrt{2}n\pi d^2\overline{v}}$$

分子平均自由程

$$\boxed{\overline{\lambda}=\frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n}=\frac{V}{\sqrt{2}\pi d^2 N}=\frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 p}}$$

热力学

准静态过程

热力学第一定律

内能、做功和热量

$$Q=\Delta E+A\quad\begin{cases}\Delta E=\dfrac{i}{2}\nu R\Delta T=\dfrac{i}{2}\Delta(pV)\\ A=\displaystyle\int_{V_1}^{V_2}pdV\\ Q=\nu C_m\Delta T\end{cases}$$

$$\boldsymbol{C_m=\frac{dQ}{\nu dT}=\frac{i}{2}R+\frac{pdV}{\nu dT}}$$

热力学

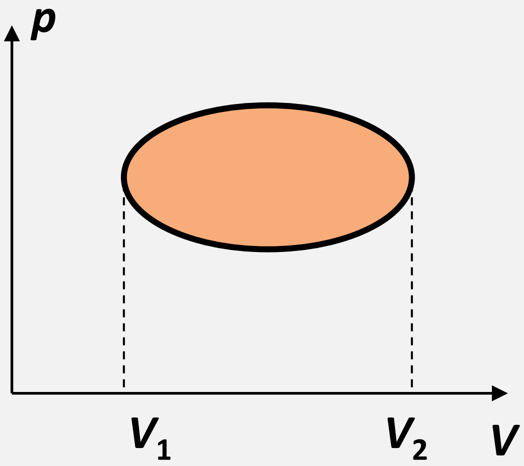
过程	过程方程	内能增量ΔE	做功A	热量Q	摩尔热容Cm
等体	V=常量	$\nu C_{V,m}(T_2-T_1)$ $\frac{i}{2}V(p_2-p_1)$	0	$Q=\Delta E$	$\frac{i}{2}R$
等压	p=常量	$\nu C_{V,m}(T_2-T_1)$ $\frac{i}{2}p(V_2-V_1)$	$p(V_2-V_1)$	$Q=\Delta E+A$	$\frac{i}{2}R+R$
等温	T=常量	0	$\nu RT\ln\frac{V_2}{V_1}$	$Q=A$	∞
绝热	$pV^{\gamma}=$常量	$\nu C_{V,m}(T_2-T_1)$ $\frac{i}{2}(p_2V_2-p_1V_1)$	$A=-\Delta E$	0	0

热力学

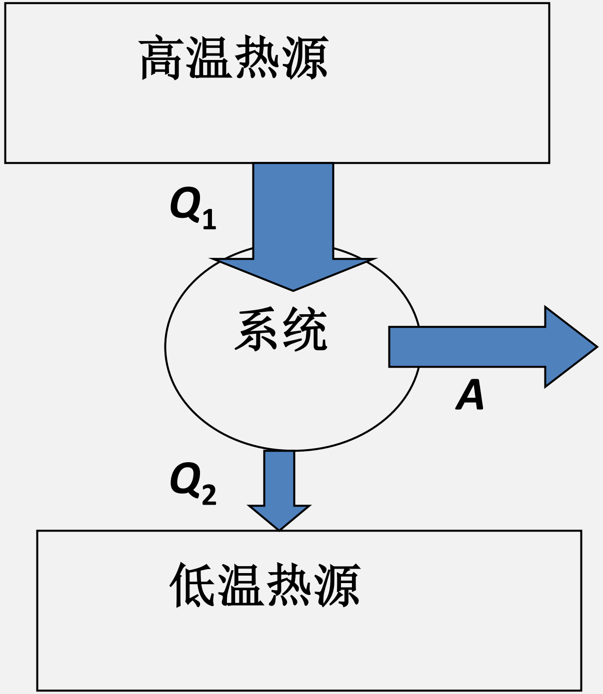
循环过程

（1） $\Delta E = 0, Q = A$

（2） $A =$ 循环曲线所包围的面积

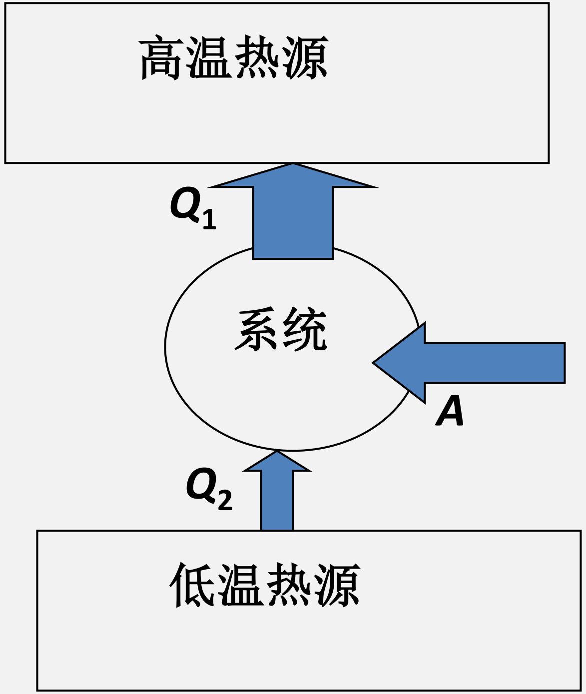


热机



$$\eta = \frac{A}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

制冷机



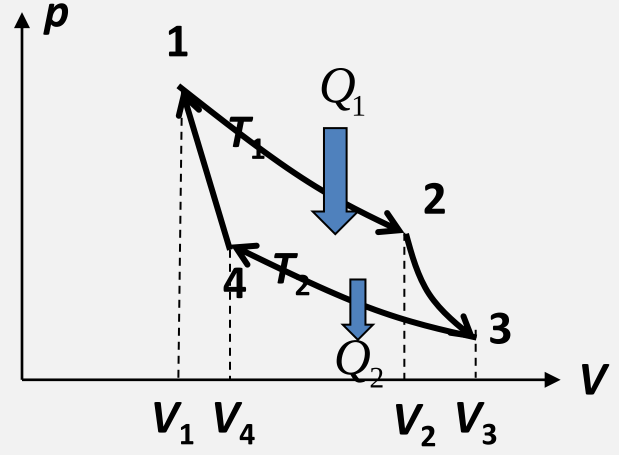
$$\omega = \frac{Q_2}{A} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}$$

热力学

卡诺循环

$$\eta_c = \frac{A}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

$$\omega_c = \frac{Q_2}{A} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$



热力学

热力学第二定律的两种表述

可逆与不可逆过程

自发的热力学过程是不可逆的，且总是向着

无序度增加的方向进行

包含微观态数目更多的宏观态的方向进行

熵增加原理

简谐振动

谐振方程

谐振曲线

旋转矢量

简谐振动

简谐振动的动力学

质点 $F = -kx$ $T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$

刚体 $M = -k\theta$ $T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\sqrt{\frac{J}{k}}$

简谐振动

简谐振动的能量

动能

$$E_k = \frac{1}{2} kA^2 \sin^2(\omega t + \varphi)$$

势能

$$E_p = \frac{1}{2} kA^2 \cos^2(\omega t + \phi)$$

机械能

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

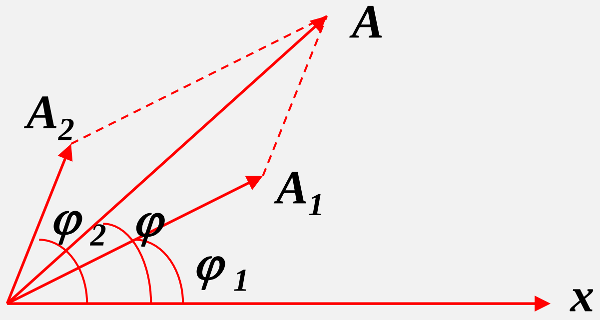
简谐振动

同方向同频率谐振的合成

$$x_1 = A_1\cos(\omega t + \varphi_1)$$

$$x_2 = A_2\cos(\omega t + \varphi_2)$$

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



$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(\varphi_2 - \varphi_1)}$$

机械波

平面谐波传播的特点：

介质中各质点振动频率、振幅相同，且与波源的振动频率、振幅相同。

只有相位在波的传播方向上依次落后。

机械波

波动方程：

振动曲线、波形曲线

原点的初相

某点的振动方程

波动方程

机械波

机械波的能量：

质元的动能、势能 $W_k = W_p = \frac{1}{2}\rho\Delta V A^2\omega^2\sin^2\omega(t-\frac{x}{u})$

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

能量密度、能流密度

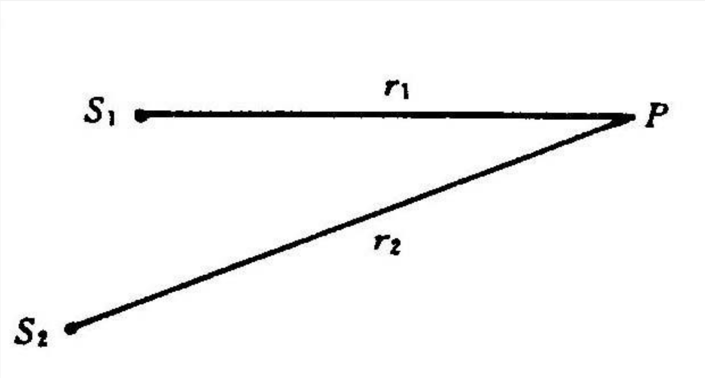
机械波

波的叠加与干涉

相干波：频率相同、振动方向相同、相位差恒定

$$A=\sqrt{A_1^2+A_2^2+2A_1A_2\cos\Delta\Phi}$$

$$\Delta\Phi=\varphi_2-\varphi_1-2\pi\frac{r_2-r_1}{\lambda}$$



机械波

干涉强弱条件

干涉极大点：$\Delta\Phi = 2k\pi \quad (k = 0, \pm1, \pm2, \ldots)$

合振幅：$A = A_1 + A_2$　　若：$A_1 = A_2$，则$A = 2A_1$

干涉极小点：$\Delta\Phi = (2k+1)\pi \quad (k = 0, \pm1, \pm2, \ldots)$

合振幅：$A = \left|A_1 - A_2\right|$　若：$A_1 = A_2$，则$A = 0$干涉静止点

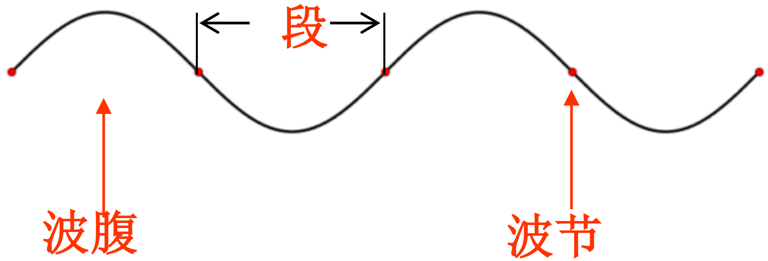
机械波

驻波特点：

波腹、波节等间距排列；

同段同相，邻段反相；

只有相位的突变，没有相位的传播。



机械波

驻波方程：

入射波方程、反射波方程、驻波方程

波腹、波节的位置

半波损失

机械波

驻波的能量

驻波的能量不断地由波腹转移到波节，

再由波节转移到波腹，

能量来回震荡，而没有能量的定向传播。

机械波

多普勒效应

$$\boxed{\nu_R = \frac{u + v_R}{u - v_s} \nu_s}$$

$$\begin{cases} \text{两者相向运动：} & v_R > 0,\ v_S > 0 \\ \text{两者背离运动：} & v_R < 0,\ v_S < 0 \end{cases}$$

电磁振荡和电磁波

- 电磁振荡：LC振荡电路
- 电磁波的基本性质：横波　E、H、u右手关系
  E、H同相
- 电磁波方程：E、H
- 电磁波的能量密度 坡印亨矢量

光的干涉

相干光：

由同一光源、同一点发出（同一光波列）的光分光后，再经不同的路径会合实现相干叠加。

分波面法、分振幅法

光的干涉

光程： $l = nx$

光程差： $\delta = l_2 - l_1$

相位差： $\Delta\Phi = \dfrac{2\pi}{\lambda}\delta$

光的干涉

光的干涉明暗纹条件：

$$\delta = \begin{cases} k\lambda, & \text{干涉相长(明纹)} \\ (2k+1)\dfrac{\lambda}{2}, & \text{干涉相消(暗纹)} \end{cases} \qquad k = 0, \pm1, \pm2, \ldots$$

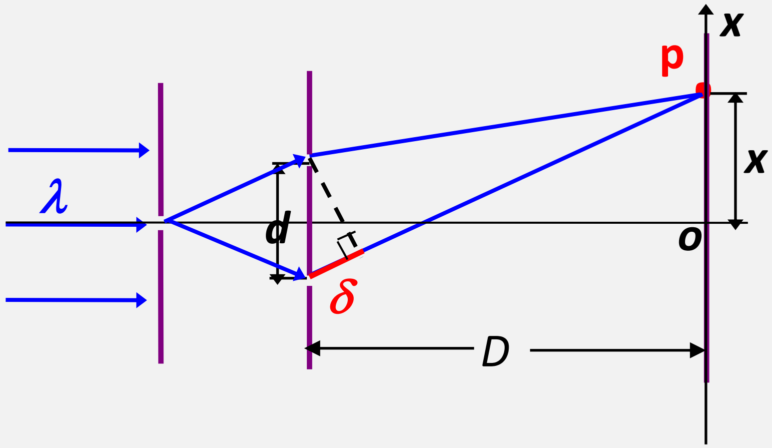
光的干涉

双缝干涉

光程差：$\delta = d \cdot \dfrac{x}{D}$

明、暗纹的位置

条纹宽度：$\boxed{\Delta x = \dfrac{D}{d}\lambda}$



光的干涉

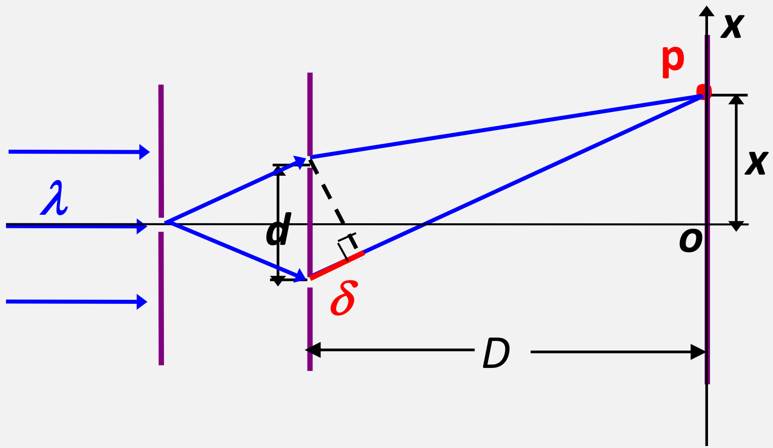
双缝干涉

单缝位置移动；

一缝贴膜；

侵入液体中；

……



光的干涉

薄膜干涉（垂直入射反射光）

当$n_1 < n_2 > n_3$，$n_1 > n_2 < n_3$

$$\delta = 2n_2 e + \frac{\lambda}{2}$$

当$n_1 < n_2 < n_3$，$n_1 > n_2 > n_3$

$$\delta = 2n_2 e$$

增反膜

增透膜

光的干涉

等厚干涉——劈尖干涉

$$\delta \approx 2ne+\frac{\lambda}{2}=\begin{cases} k\lambda & (k=1,2,\cdots) \quad \max \\ (2k+1)\lambda/2 & (k=0,1,2\cdots) \quad \min \end{cases}$$

同一厚度e对应同一级干涉条纹——等厚干涉

光的干涉

等厚干涉——劈尖干涉

K级纹的厚度

K级纹到棱边的距离

相邻两纹的厚度差

相邻两纹的距离

平板移动，条纹如何移动？

测物体厚度

测凹槽（突出物）深度

光的干涉

等厚干涉——牛顿环干涉

光程差：$\delta = 2ne + \dfrac{\lambda}{2}$

明、暗环半径：明暗条件的应用、几何关系的应用

增加空气膜的厚度，条纹如何变化？

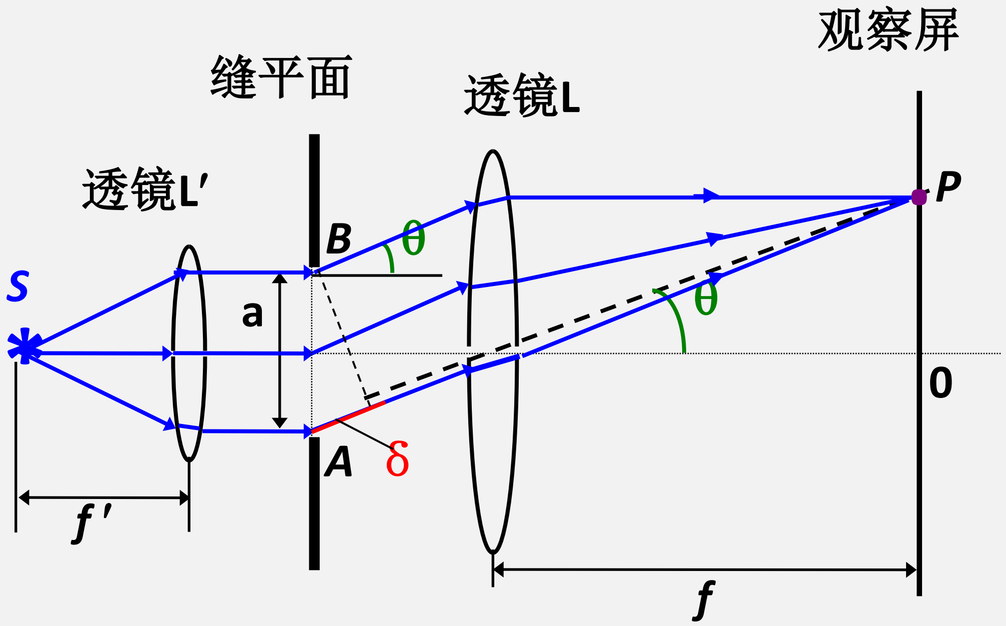
光的干涉

迈克尔逊干涉

$$\boxed{\Delta d = N \cdot \frac{\lambda}{2}}$$

光的衍射

单缝夫琅和费衍射



缝端光程差：

$$\delta = a\sin\theta$$

半波带法

光的衍射

单缝衍射的明暗纹条件：

$$\delta = a\sin\theta = \pm(2k+1)\frac{\lambda}{2},\quad k = 1,2,3\cdots$$ ——近似明纹中心

$$\delta = a\sin\theta = \pm k\lambda,\quad k = 1,2,3\cdots$$ ——暗纹中心

$$\delta = a\sin\theta = 0$$ ——中央明纹(中心)

光的衍射

单缝衍射

明暗纹中心的角位置

明暗纹在屏上的位置

明纹宽度：$\Delta x = \dfrac{f}{a}\lambda$

中央明纹宽度：$2\Delta x$

光的衍射

圆孔衍射

第一级暗环的衍射角 θ_1 满足：$\sin\theta_1 \approx 1.22\dfrac{\lambda}{D}$

光学仪器分辨本领

最小分辨角：$\delta\theta = \theta_1 \approx 1.22\dfrac{\lambda}{D}$

光学仪器的分辨率：$R \equiv \dfrac{1}{\delta\theta} = \dfrac{D}{1.22\lambda}$

光的衍射

光栅衍射

单缝衍射暗纹条件：$a\sin\theta' = \pm k'\lambda,\quad k' = 1, 2, \cdots$

多缝干涉主极大条件：$d\sin\theta = \pm k\lambda,\quad k = 0, 1, 2, \cdots$

（光栅方程）

当 $\dfrac{d}{a} = \dfrac{k}{k'}$ 时，$\theta = \theta'$ 会出现缺级现象

光的衍射

光栅衍射

光栅衍射主极大的最高级次：$k < \dfrac{d}{\lambda}$

不发生重叠的级次满足：$k < \dfrac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}$

光的衍射

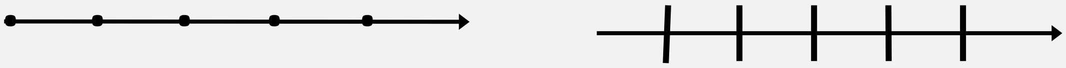
X射线衍射

面间散射光干涉加强条件：

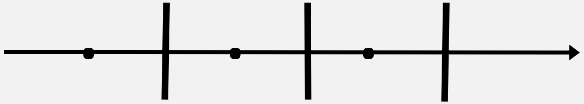
$$2d \cdot \sin\Phi = k\lambda \quad (k = 1, 2, \cdots)$$ —布喇格公式

光的偏振

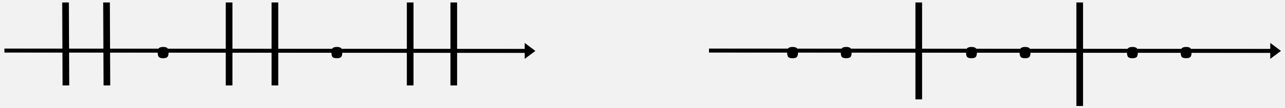
线偏振光的表示法：



自然光的表示法：

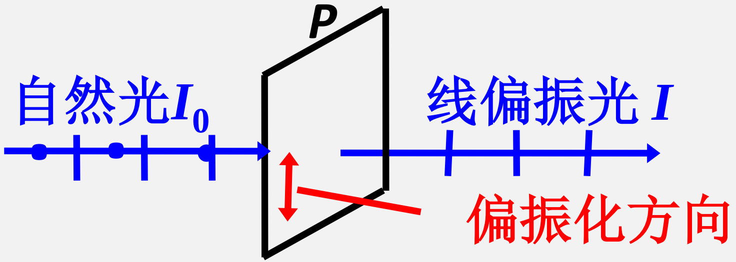


部分偏振光的表示法：



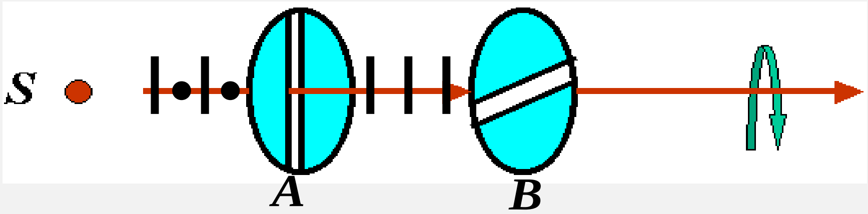
光的偏振

起偏



$$I=\frac{1}{2}I_0$$

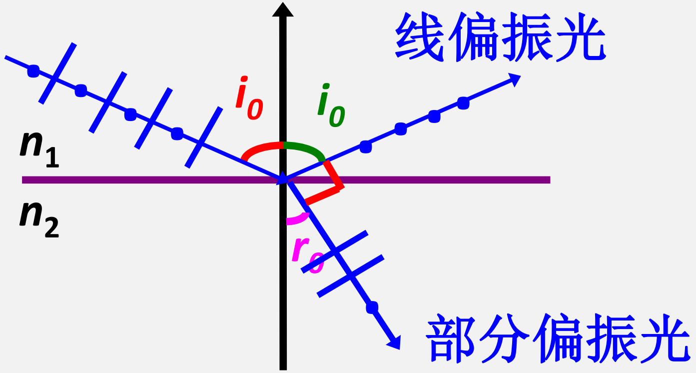
检偏



马吕斯定律：$\boxed{I=I_0\cos^2\alpha}$

光的偏振

反射和折射时光的偏振



布儒斯特定律：

$$\boxed{\operatorname{tg} i_0 = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}}$$

狭义相对论

爱因斯坦的狭义相对论原理

1. 在一切惯性系中，真空中的光速都具有相同的值c

—— 光速不变原理

2. 在一切惯性系中，物理规律都是相同的

------ 狭义相对性原理

狭义相对论

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

同时性的相对性

时间延缓效应 $\boxed{\Delta t = \gamma \Delta t' \quad \Delta t' = \gamma \Delta t}$

长度收缩效应 $\boxed{L' = L/\gamma \quad L = L'/\gamma}$

洛伦兹变换

$$\begin{cases} x' = \gamma(x - vt) \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = \gamma\left(t - \dfrac{v}{c^2}x\right) \end{cases} \qquad \begin{cases} x = \gamma(x' + vt') \\ y = y' \\ z = z' \\ t = \gamma\left(t' + \dfrac{v}{c^2}x'\right) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Delta x' = \gamma(\Delta x - v\Delta t) \\ \Delta y' = \Delta y \\ \Delta z' = \Delta z \\ \Delta t' = \gamma\left(\Delta t - \dfrac{v}{c^2}\Delta x\right) \end{cases} \qquad \begin{cases} \Delta x = \gamma(\Delta x' + v\Delta t') \\ \Delta y = \Delta y' \\ \Delta z = \Delta z' \\ \Delta t = \gamma\left(\Delta t' + \dfrac{v}{c^2}\Delta x'\right) \end{cases}$$

相对论速度变换公式

$$\begin{cases} \boxed{u'_x = \dfrac{u_x - v}{1 - \dfrac{v}{c^2} u_x}} \\ u'_y = \dfrac{u_y}{\gamma(1 - \dfrac{v}{c^2} u_x)} \\ u'_z = \dfrac{u_z}{\gamma(1 - \dfrac{v}{c^2} u_x)} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \boxed{u_x = \dfrac{u'_x + v}{1 + \dfrac{v}{c^2} u'_x}} \\ u_y = \dfrac{u'_y}{\gamma(1 + \dfrac{v}{c^2} u'_x)} \\ u_z = \dfrac{u'_z}{\gamma(1 + \dfrac{v}{c^2} u'_x)} \end{cases}$$

相对论质量：$$m=\frac{m_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}}=\gamma m_0$$

相对论动量公式：$$p=mv=\gamma m_0 v$$

相对论动能公式：$$E_k=mc^2-m_0c^2=(\gamma-1)m_0c^2$$

爱因斯坦质能关系：$$E=mc^2$$

相对论能量动量关系：

$$E^2=p^2c^2+m_0^2c^4=p^2c^2+E_0^2$$

结合能：$$\Delta E=\Delta mc^2$$

电磁辐射的量子理论

普朗克能量量子化假设

能量不是连续变化的，是离散的，且只能是某一最小能量$\varepsilon = h\nu$ 的整数倍：

$$E = n\varepsilon = nh\nu \quad n = 1, 2, 3, \ldots$$

最小能量 $\varepsilon = h\nu$ 称为能量子

电磁辐射的量子理论

爱因斯坦光量子理论：

- 光子能量 $$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$
- 光子质量 $$m = \frac{E}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{c\lambda}$$
- 光子动量 $$p = mc = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$
- 光强 $$S = Nh\nu$$

电磁辐射的量子理论

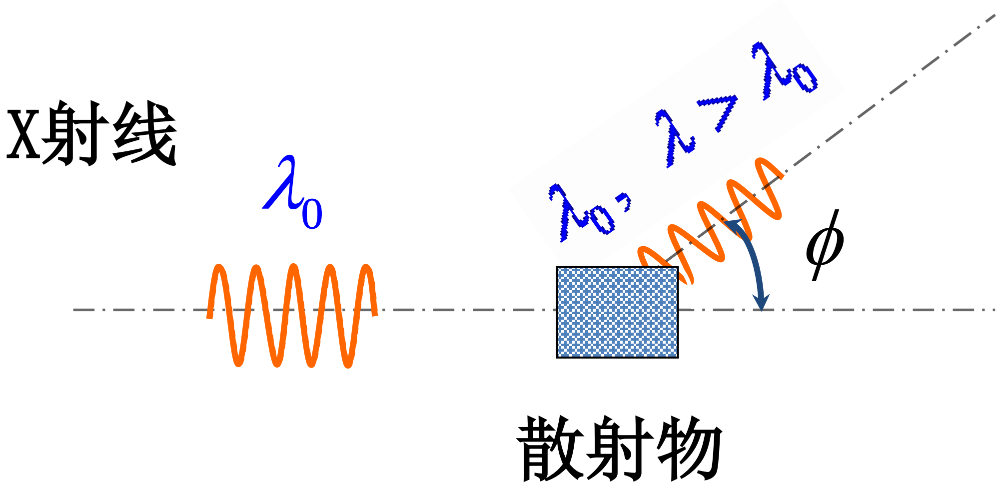
光电效应

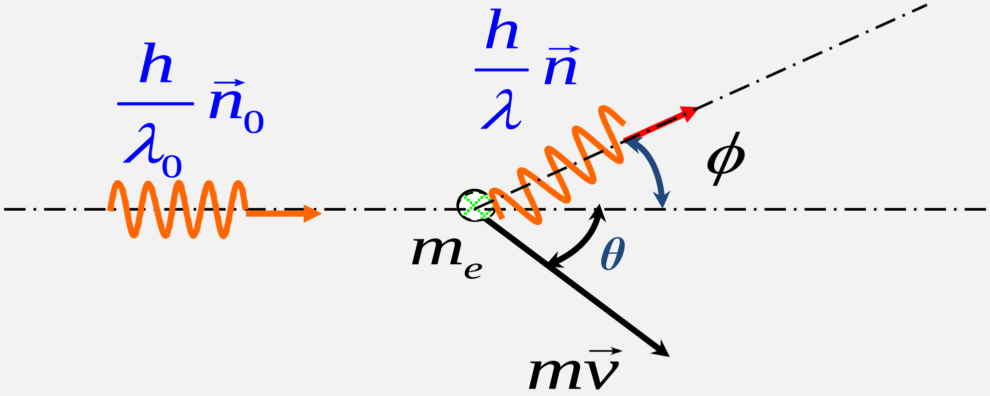
光电效应方程：$\boxed{\frac{1}{2}m_e v_m^2 = h\nu - A}$

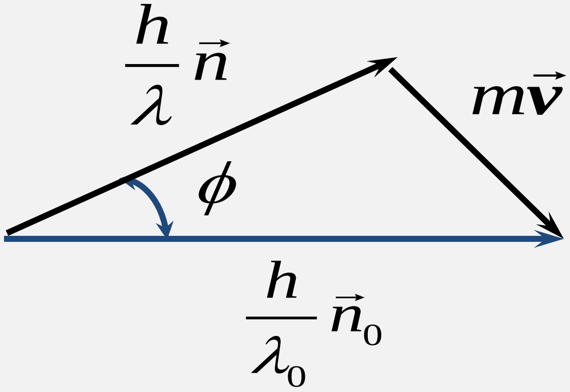
- 红限频率：$\boxed{\nu_0 = \frac{A}{h}}$
- 遏止电压：$\frac{1}{2}m_e v_m^2 = e|U_a|$

电磁辐射的量子理论

康普顿效应







能量守恒： $\frac{hc}{\lambda_0} + m_e c^2 = \frac{hc}{\lambda} + mc^2$ (1)

动量守恒： $(mv)^2 = (\frac{h}{\lambda_0})^2 + (\frac{h}{\lambda})^2 - 2(\frac{h}{\lambda_0})(\frac{h}{\lambda})\cos\phi$ (2)

康普顿散射公式： $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = \lambda_c(1 - \cos\phi)$

电磁辐射的量子理论

氢原子光谱:

$$\sigma = R\left(\frac{1}{m^2}-\frac{1}{n^2}\right)=\frac{R}{m^2}-\frac{R}{n^2} \qquad m=1,2,3,\ldots;$$

对每一个m, $n=m+1, m+2, m+3, \ldots$

m=1, n=2、3、4……莱曼系

m=2, n =3、4、5……巴耳末系

m=3, n=4、5、6 ……帕邢系

m=4, n=5、6、7……布拉开系

m=5, n=6、7、8 ……普丰德系

玻尔的三条基本假设

(1) 量子化定态假设

(2) 量子化跃迁的频率法则：

$$h\nu = E_n - E_m$$

(3) 角动量量子化的假设：

$$L = m_e r v = n\frac{h}{2\pi} = n\hbar \qquad n = 1, 2, 3, \ldots$$

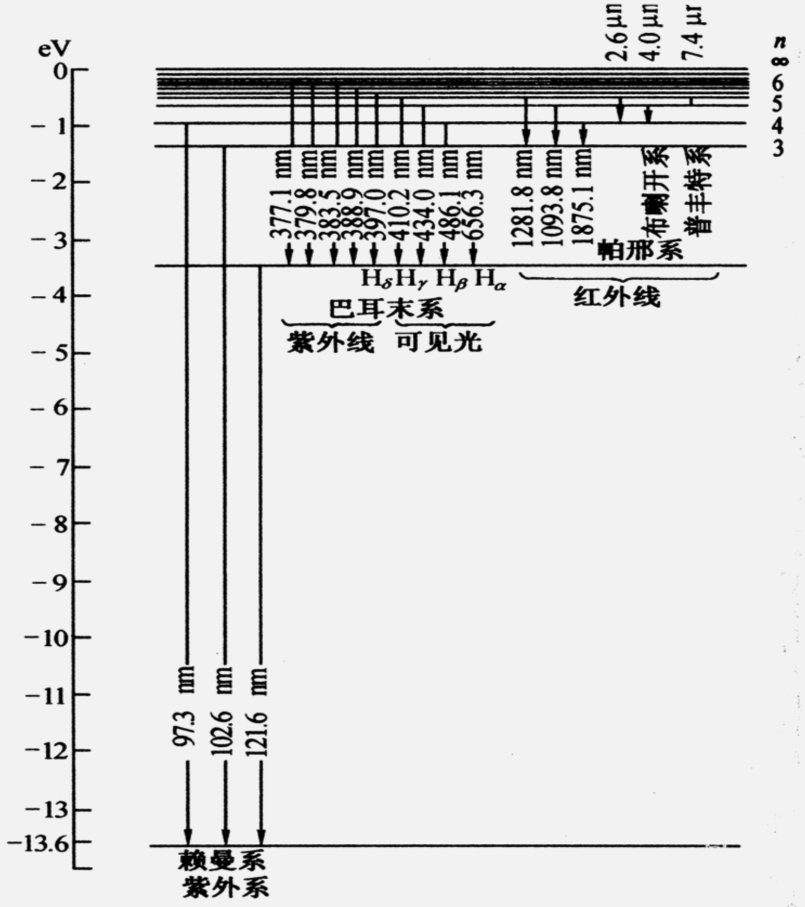
氢原子的能级和光谱

$$r_n = n^2 a_0$$

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

$$E_n = \frac{1}{n^2} E_1$$

$$(E_1 = -13.6\text{eV})$$



氢原子能级图与发射的光谱

量子力学

德布罗意假设

一切实物粒子都具有波粒二象性。

德布罗意关系 $\boxed{\nu=\dfrac{E}{h}\quad,\quad \lambda=\dfrac{h}{p}}$

量子力学

物质波的统计解释

玻恩指出：实物粒子的波动性是一种统计行为，

实物粒子波是概率波。

波函数的统计意义

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

波函数的模方：粒子在 t 时刻出现在空间 r 处的**概率密度**。

$\int_{V_1}^{V_2} |\Psi|^2 \, dV$ ：$V_1 \sim V_2$ 区间内发现粒子的概率

波函数满足的条件

- 波函数标准化条件：**单值**、**连续**和**有限**
- 归一化条件：$\int_V |\Psi|^2 dV = 1$　　$(V - \text{全空间})$

量子力学

位置与动量不确定性关系： $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar / 2$

能量与时间不确定性： $\Delta E \Delta \tau \geq \hbar / 2$

不确定关系的物理本质：实物粒子具有波粒二象性

量子力学

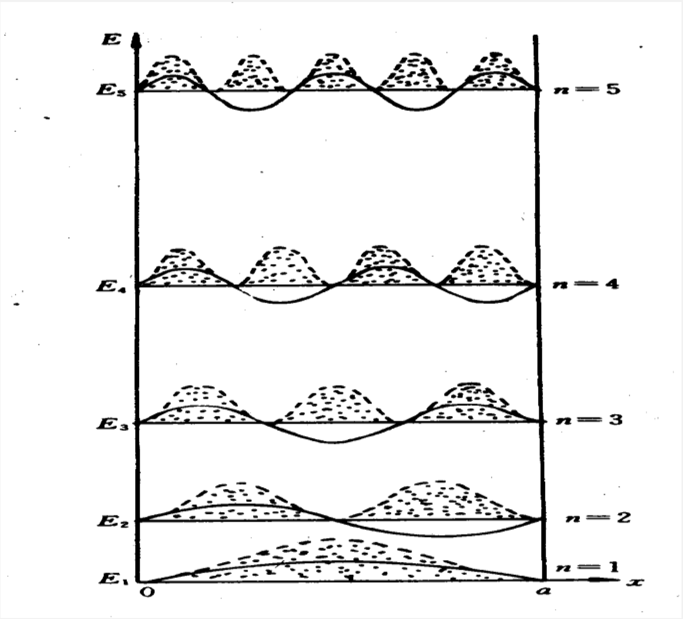
一维无限深势阱的量子力学求解

能量量子化： $E_n = n^2 E_1, \quad n = 1,2,3,\ldots$

零点能： $E_1 = \dfrac{h^2}{8ma^2}$

势阱内的波函数： $\psi_n(x)=\sqrt{\dfrac{2}{a}}\sin\dfrac{n\pi}{a}x \qquad (n=1,2,3,\ldots)$

势阱内的概率密度函数： $\boxed{\rho_n(x)=|\psi_n(x)|^2=\dfrac{2}{a}\sin^2\dfrac{n\pi}{a}x}$



原子中的电子

1. 主量子数 *n* 和能量的量子化

能量量子化形式

$$\boxed{E=-\frac{1}{n^2}\cdot\frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^2},\quad n=1,2,3,\ldots}$$

n 称为主量子数

2. 角量子数 l 和角动量的量子化

角动量量子化的形式

$$\boxed{L=\sqrt{l(l+1)}\hbar,\qquad (l=0,1,2,\ldots n-1)}$$

l 称为角量子数

3. 磁量子数 m_l 和空间取向的量子化

角动量L在z方向的投影：

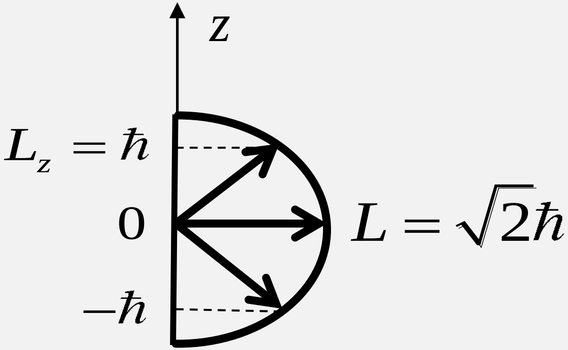
$$\boxed{L_z = m_l \hbar, \qquad (m_l = l, l-1, \ldots, -l)}$$

m_l称为磁量子数

角量子数 *l* =1

$$L=\sqrt{l(l+1)}\hbar=\sqrt{2}\hbar$$

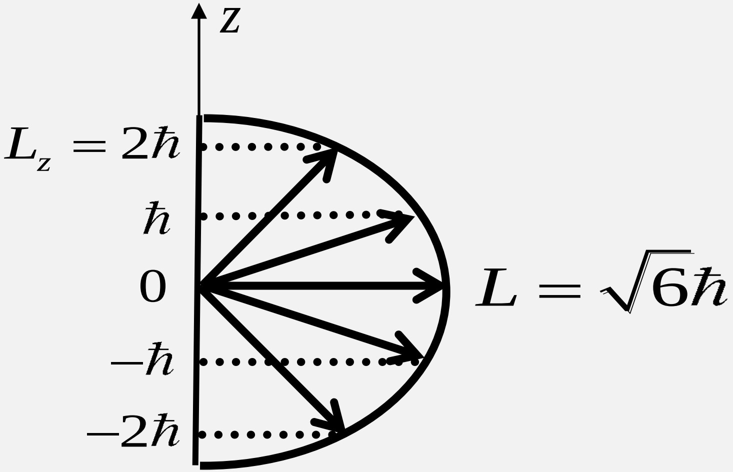
$$L_z=m_l\hbar=\hbar,0,-\hbar$$



角量子数 *l* =2

$$L=\sqrt{l(l+1)}\hbar=\sqrt{6}\hbar$$

$$L_z=m_l\hbar=2\hbar,\hbar,0,-\hbar,-2\hbar$$



电子的自旋角动量：

$$S=\sqrt{s(s+1)}\hbar=\frac{\sqrt{3}}{2}\hbar$$ 自旋角量子数 $s=\frac{1}{2}$

电子自旋取向量子化：

$$S_z=m_s\hbar$$ 自旋磁量子数 $m_s=\pm\frac{1}{2}$

电子的量子态——四个量子数(n, l, m_l, m_s)

1. 主量子数 $n=1,2,3\ \cdots\cdots$

2. 轨道角量子数 $l=0,1,2,3\ \cdots\cdots(n-1)$

3. 轨道磁量子数 $m_l = l, l-1, \cdots\cdots; -l$

4. 自旋磁量子数 $m_s= \pm 1/2$

泡利不相容原理

同一个原子中，不可能有两个或两个以上的电子处于完全相同的状态；换句话说，不可能有两个或两个以上的电子具有完全相同的四个量子数。

每一个支壳层最多可以容纳的电子数：

$$N_l = 2(2l+1) \quad 个$$

每一个主壳层最多可以容纳的电子数：

$$N_n = \sum_{l=0}^{n-1} 2(2l+1) = 2n^2 \quad 个$$

能量最低原理

原子在正常状态时，每个电子在不违背泡利不相容原理的前提下，总是趋向占有最低能量的状态，以使原子系统的能量具有最小值。

（1）n 越小，能量越低。

（2） n相同, *l* 越小，能量越低 。

（3） 当 n, *l* 都不相同时，可能出现能级交错现象。

考试提醒

- 不用计算器
- 带铅笔、直尺、橡皮
- 严禁作弊

感谢聆听！