

中国科学技术大学  
2015-2016学年第二学期考试试卷

课程名称: \_\_\_\_\_ 课程代码: \_\_\_\_\_

开课院系: \_\_\_\_\_ 考试形式: \_\_\_\_\_

姓名: 参考答案 学号: \_\_\_\_\_ 专业: \_\_\_\_\_

一、选择题 (每题 3 分, 共 30 分, 请将答案填入下表中)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C	B	A	C	B	B	B	A	C	B

1. 卢瑟福根据  $\alpha$  粒子散射实验的结果提出了原子的核式结构模型, 否定了“葡萄干布丁模型”, 主要依据是

- A.  $\alpha$  粒子很容易穿透金属箔      B. 实验中应用了盖革计数器  
 C. 只有集中在很小空间范围内的正电荷才能使  $\alpha$  粒子产生大角散射  
 D. 只有在金属箔中经过多次散射的  $\alpha$  粒子才可能有大于  $90^\circ$  的散射角

2. 根据玻尔模型, 若记氦 (He) 的里德伯常数为  $R_A$ , 则正一价氦离子 ( $\text{He}^+$ ) 从第一激发态向基态跃迁, 发出的光谱线的波长为

- A.  $\frac{4}{3R_A}$       B.  $\frac{1}{3R_A}$       C.  $\frac{1}{2R_A}$       D.  $\frac{1}{R_A}$

3. 根据玻尔模型, 正二价铍离子的电子在  $n = 3$  的轨道, 其角动量为

- A.  $3\hbar$       B.  $\hbar$       C.  $\frac{\hbar}{3}$       D.  $\frac{\hbar}{9}$

4. 弗兰克-赫兹实验中, 当加速电压为 4.9V 时, 回路中的电流强度显著下降, 这时若做光谱测量, 能够测得光谱线的波长为

- A. 184.9nm      B. 120.9nm      C. 253.7nm      D. 108.6nm

5. 在斯特恩-格拉赫实验中, 若使 1 束具有相同速度的基态的氦原子通过有梯度的磁场 (原子速度方向与磁场梯度方向垂直), 会发现通过磁场的原子

- A. 均匀散开      B. 仍为 1 束      C. 分为 2 束      D. 分为 3 束

6. Li (锂) 原子能量最低的两个能级的原子态为

- A.  $^1S_0, ^1P_1$       B.  $^2S_{1/2}, ^2P_{1/2}$       C.  $^2S_{1/2}, ^2P_{3/2}$       D.  $^1S_0, ^3P_2$

7. Ba (钡) 原子的  $6s6p$  电子组态按照 LS 耦合的方式形成原子态, 其能量从低到高的次序为

- A.  $^1P_1, ^3P_0, ^3P_1, ^3P_2$       B.  $^3P_0, ^3P_1, ^3P_2, ^1P_1$   
 C.  $^3P_2, ^3P_1, ^3P_0, ^1P_1$       D.  $^1P_1, ^3P_2, ^3P_1, ^3P_0$

8. 氢原子电子的波函数为  $\psi(r, \theta, \varphi) = \frac{1}{54\sqrt{\pi}} \left(\frac{r}{a_1}\right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{r}{a_1}\right)^2 e^{-\frac{r}{3a_1}} \sin^2\theta e^{2i\varphi}$ , 式中  $a_1$  为第一玻尔半径. 则该电子的轨道角动量在  $z$  方向的分量为  $\hbar$ .   
 (Handwritten notes:  $n=3, l=2, m=2$ )

- A.  $2\hbar$  B.  $\sqrt{6}\hbar$  C.  $\hbar$  D.  $\sqrt{2}\hbar$

9. 基态 Ca (钙) 原子核外电子组态为  $[\text{Ar}]4s^2$ , 其中的 1 个  $4s$  可被激发到  $4p$ 、 $3d$ 、 $5s$  等轨道, 从而形成单重态和三重态. 若 Ca 的某一个三重态能级比基态能级分别高  $20335.4\text{cm}^{-1}$ ,  $20349.3\text{cm}^{-1}$ ,  $20371.0\text{cm}^{-1}$ , 则形成该三重态的电子组态为  $4s3d$ .   
 (Handwritten notes:  $F(7p) - E(4s) = \{L, S\} L^2 + S^2$ ,  $J=0, 1, 2$ )

- A.  $4s^2$  B.  $4s4p$  C.  $4s3d$  D.  $4s5s$

10. Zn (锌) 原子的电子组态从  $4s4d$  跃迁到  $4s4p$ , 发出的波长不同的光谱线的数目为 7.   
 (Handwritten note:  $6+1$ )

- A. 6 B. 7 C. 8 D. 9

二、填空题 (每空 3 分, 共 30 分, 请将答案直接填在本试卷中)

1. 基态碳原子, 核外电子组态为  $1s^2 2s^2 2p^2$ , 其中的电子进行 LS 耦合, 所能够形成的原子态用符号表示为  $2^1S_0, 2^3P_{2,1,0}, 2^1D_2$ .   
 (Handwritten note:  $3P_0$ )

答  $3P_0$  也可以. 多写扣 1 分.

2. 考虑能级的精细结构, 氢原子的核外电子在  $n = 3$  的壳层, 所形成的原子态为  $3^2S_{1/2}, 3^2P_{1/2}, 3^2P_{3/2}, 3^2D_{3/2}, 3^2D_{5/2}$ ; 在  $n = 2$  的壳层, 所形成的原子态为  $2^2S_{1/2}, 2^2P_{1/2}, 2^2P_{3/2}$ . 若不考虑兰姆移位, 电子从  $n = 3$  的壳层向  $n = 2$  的壳层跃迁, 能够发出的波长不同的光谱线的数目为 5.   
 (Handwritten notes:  $\Delta l = \pm 1$ ,  $\Delta J = 0, \pm 1$ )

3. 电子自旋的朗德因子  $g_s = 2$ , 轨道的朗德因子  $g_l = 1$ .

4. 若阴极射线管的电压为  $10\text{kV}$ , 管中电子的 de Broglie (德布罗意) 波长最短为  $0.0123\text{nm}$ ; 若电子撞击阳极的瞬间, 将其动能全部转化为电磁辐射, 则所发出的电磁波最短波长为  $0.124\text{nm}$ . (不考虑相对论效应)   
 数量级错扣 1 分, 两个空写反扣 3 分.   
 (Handwritten notes:  $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2me\phi}}$ ,  $\lambda = \frac{hc}{\phi}$ )

5. 黑体在加热过程中, 其辐射本领最大的波长, 由  $0.60\mu\text{m}$  变成了  $0.40\mu\text{m}$ . 则总辐射本领增加了 4.0625 倍.   
 或  $65/16$ . 未减 1 扣 1 分;  $(3/2)^4$  扣 1 分.   
 (Handwritten note:  $\sim 6T^4 \sim 6/\lambda^4$ )

6. 波长为  $2000\text{\AA}$  的光照在铝表面上. 已知铝的脱出功为  $4.2\text{eV}$ , 则光电效应的遏止电压为  $2\text{V}$ .   
 -2V 扣 1 分; 2eV 扣 1 分.   
 (Handwritten note:  $1.999$ )

三、(10%) 自旋轨道耦合能

$$\hat{W} = -\hat{\mu}_s \cdot \hat{B} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{2m_e^2 c^2 r^3} \hat{s} \cdot \hat{L}$$

计算此力学量与总角动量算符  $\hat{J}_k$  以及轨道角动量算符  $\hat{L}_k$  的对易子,

$$[\hat{J}_k, \hat{W}] = ? \quad [\hat{L}_k, \hat{W}] = ?$$

解:

$$\begin{aligned} [\hat{J}_k, f(r)] &= [\hat{L}_k, f(r)] = \left[ -i\hbar \epsilon_{klm} r_k \frac{\partial}{\partial r_m}, f(r) \right] = -i\hbar \epsilon_{klm} r_k \left[ \frac{\partial}{\partial r_m}, r \right] \\ &= -i\hbar \epsilon_{klm} r_k \frac{r_m}{r} = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [\hat{J}_k, \hat{W}] &= \left[ \hat{J}_k, \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{2m_e^2 c^2 r^3} \hat{s} \cdot \hat{L} \right] = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{2m_e^2 c^2 r^3} [\hat{J}_k, \hat{s} \cdot \hat{L}] = \\ &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{2m_e^2 c^2 r^3} (\hat{s}_l [\hat{J}_k, \hat{L}_l] + [\hat{J}_k, \hat{s}_l] \hat{L}_l) \\ &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{2m_e^2 c^2 r^3} (\hat{s}_l i\epsilon_{klm} \hat{L}_m + i\epsilon_{klm} \hat{s}_m \hat{L}_l) \\ &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{2m_e^2 c^2 r^3} i(\epsilon_{klm} \hat{s}_l \hat{L}_m + \epsilon_{klm} \hat{s}_m \hat{L}_l) = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [\hat{L}_k, \hat{W}] &= \left[ \hat{L}_k, \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{2m_e^2 c^2 r^3} \hat{s} \cdot \hat{L} \right] = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{2m_e^2 c^2 r^3} [\hat{L}_k, \hat{s} \cdot \hat{L}] \\ &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{2m_e^2 c^2 r^3} \hat{s}_l [\hat{L}_k, \hat{L}_l] = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{2m_e^2 c^2 r^3} \hat{s}_l i\epsilon_{klm} \hat{L}_m \\ &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{2m_e^2 c^2 r^3} i(\hat{s} \times \hat{L})_k \end{aligned}$$

四、(10%) 考虑宽度为  $a$  的一维无限深势阱

$$V(x) = \begin{cases} 0, & \text{if } |x| < \frac{a}{2}; \\ +\infty, & \text{if } |x| \geq \frac{a}{2}. \end{cases}$$

$t = 0$  时在  $x = 0$  处释放一个点粒子.

(1) 求粒子处于第二激发态和基态的几率之比.

(2) 这个比值是否会随时间改变?

解: 基态波函数

$$u_1(x) = \begin{cases} 0, & \text{if } |x| \geq \frac{a}{2}; \\ \sqrt{\frac{2}{a}} \cos \frac{\pi}{a} x, & \text{if } |x| < \frac{a}{2}. \end{cases}$$

第二激发态波函数

$$u_3(x) = \begin{cases} 0, & \text{if } |x| \geq \frac{a}{2}; \\ \sqrt{\frac{2}{a}} \cos \frac{3\pi}{a} x, & \text{if } |x| < \frac{a}{2}. \end{cases}$$

初态

$$\psi(x, t = 0) = \delta(x)$$

处于基态的几率幅为

$$A_1 = (u_1, \psi) = \int_{-\infty}^{+\infty} u_1^*(x) \delta(x) dx = u_1^*(0) = \sqrt{\frac{2}{a}}$$

处于第二激发态的几率幅为

$$A_3 = (u_3, \psi) = u_3^*(0) = \sqrt{\frac{2}{a}}$$

几率之比为  $\left| \frac{A_1}{A_3} \right|^2 = 1$ .

比值不随时间变化, 原因是  $t$  时刻的波函数为

$$\psi(x, t) = \sum_{n=1}^{+\infty} A_n u_n(x) e^{-\frac{iE_n t}{\hbar}}$$

几率幅不变。

五、(10%) 钠原子从  $3^2P_{1/2} \rightarrow 3^2S_{1/2}$  跃迁的光谱线波长为  $589.6\text{nm}$ , 在  $B = 2.5\text{T}$  的磁场中发生塞曼分裂. 问从垂直于磁场的方向观察, 其分裂为多少条谱线, 并给出各谱线波长.

P168 4.14

$$g = 1 + (g_s - 1) \frac{J(J+1) - L(L+1) + S(S+1)}{2J(J+1)}$$

$$h\nu' = E'_2 - E'_1 = (E_2 + g_2\mu_B B_0 M_{J_2}) - (E_1 + g_1\mu_B B_0 M_{J_1}) = h\nu + \mu_B B_0 (g_2 M_{J_2} - g_1 M_{J_1})$$

$$g_2: L = 0, S = \frac{1}{2}, J = \frac{1}{2} \Rightarrow g_2 = 2$$

$$g_1: L = 1, S = \frac{1}{2}, J = \frac{1}{2} \Rightarrow g_1 = \frac{2}{3}$$

$$\Delta \frac{1}{\lambda} = (g_2 M_{J_2} - g_1 M_{J_1}) \frac{\mu_B B_0}{hc} = \left( \pm 1 \pm \frac{1}{3} \right) \frac{eB_0}{4\pi m_e c} \quad \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0} = \dots$$

$$\Delta \lambda = (g_2 M_{J_2} - g_1 M_{J_1}) \frac{\mu_B B_0}{hc} \lambda^2 = \left( \pm 1 \pm \frac{1}{3} \right) \times 0.6406\text{nm}$$

$$= 589.546, 589.573, 589.627, 589.654\text{nm} \quad \lambda = \frac{1}{\frac{1}{\lambda_0} + \dots}$$

4 条,  $589.546\text{nm}$ ,  $589.573\text{nm}$ ,  $589.627\text{nm}$ ,  $589.654\text{nm}$

六、(10%) 能量为  $0.41\text{MeV}$  的 X 射线光子, 与静止的自由电子碰撞, 反冲电子的速度为光速的  $0.6$  倍. 求散射光的波长以及散射角.

解: 由能量守恒

$$h\nu_0 + m_0 c^2 = h\nu + mc^2$$

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{m_0}{\sqrt{1 - 0.6^2}} = 1.25m_0$$

得散射光子能量

$$h\nu = h\nu_0 + m_0 c^2 - mc^2 = 0.41\text{MeV} + 0.511\text{MeV} \times (1 - 1.25) = 0.28\text{MeV}$$

散射光波长为

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{hc}{h\nu} = \frac{1.24 \times 10^{-6} \text{m} \cdot \text{eV}}{0.28\text{MeV}} = 0.044\text{\AA}$$

动量守恒

$$\frac{h\nu_0}{c} \vec{k}_0 = \frac{h\nu}{c} \vec{k} + m\vec{v}$$

其中  $\vec{k}_0, \vec{k}$  为单位矢量, 是光的入射方向和出射方向. 可得

$$\left( \frac{h\nu_0}{c} \vec{k}_0 - \frac{h\nu}{c} \vec{k} \right)^2 = m^2 v^2$$

$$(h\nu_0)^2 + (h\nu)^2 - 2h\nu_0 h\nu \cos \theta = \frac{m_0^2 c^2 v^2}{1 - v^2/c^2} = m_0 c^2 mc^2 \frac{v^2/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$0.41^2 + 0.28225^2 - 2 \times 0.41 \times 0.28225 \times \cos \theta = 0.511^2 \times 1.25 \times \frac{0.6^2}{0.8}$$

$$\cos \theta = 0.436, \quad \theta = 1.12 = 64^\circ$$

可能会用到的公式及物理常数

光速  $c = 2.99792458 \times 10^8 \text{m/s}$  Planck 常数  $h = 6.626069 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$

$\hbar = h/2\pi = 1.0545716 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s} = 6.58212 \times 10^{-22} \text{MeV} \cdot \text{s}$

$\hbar c = 197.3 \text{MeV} \cdot \text{fm}$   $hc = 1.24 \times 10^{-6} \text{m} \cdot \text{eV}$

真空磁导率  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{N} \cdot \text{A}^{-2}$  真空介电常数  $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{C}^2 \cdot \text{J}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$

阿伏伽德罗常数  $N_A = 6.022 \times 10^{23} \text{mol}^{-1}$  玻尔兹曼常数  $k = 8.62 \times 10^{-5} \text{eV} \cdot \text{K}^{-1}$

电荷单位  $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{C}$  原子单位  $1u = 1.66 \times 10^{-27} \text{kg} = 931.5 \text{MeV}/c^2$

电子质量  $m_e = 0.511 \text{MeV}/c^2 = 9.11 \times 10^{-31} \text{kg}$

电子的经典半径  $r_e = e^2/(4\pi\epsilon_0 m_e c^2) = 2.818 \times 10^{-15} \text{m}$

精细结构常数  $\alpha = e^2/(4\pi\epsilon_0 \hbar c) \approx 1/137.036$

Stefan-Boltzmann 常数  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$

Wien 位移定律常数  $b = 2.898 \times 10^{-3} \text{m} \cdot \text{K}$

类氢原子能级的精细结构修正  $\Delta E_{nj} = E_n \frac{\alpha^2 Z^2}{n^2} \left( \frac{n}{j+1/2} - \frac{3}{4} \right)$

物质波 de Broglie 关系  $E = h\nu$ ,  $\vec{p} = \hbar \vec{k}$ ,  $p = h/\lambda$

Einstein 质能关系  $E = mc^2$ ,  $E^2 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4$

轨道角动量算符

$$\hat{L} = -i\hbar \vec{r} \times \nabla, \quad \hat{L}^2 = -\hbar^2 \left\{ \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} \right\}$$

薛定谔方程  $i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi = \hat{H} \psi$

单粒子定态薛定谔方程  $\left( -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\vec{r}) \right) u(\vec{r}) = E u(\vec{r})$

力学量随时间的演化  $\frac{d\hat{A}(t)}{dt} = \frac{\partial \hat{A}(t)}{\partial t} + \frac{1}{i\hbar} [\hat{A}(t), \hat{H}]$

测不准关系  $\Delta x \Delta p_x \geq \hbar/2$

Bohr 半径  $a_\infty = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{m_e e^2} = r_e \alpha^{-2} = 0.529 \times 10^{-10} \text{m}$

Bohr 磁子  $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e} = 0.927 \times 10^{-23} \text{J} \cdot \text{T}^{-1} = 5.788 \times 10^{-5} \text{eV} \cdot \text{T}^{-1}$

Rydberg 能量  $hcR_\infty = m_e c^2 \alpha^2 / 2 = 13.6 \text{eV}$

Rydberg 常数  $R_\infty = 1.0973731534(13) \times 10^7 \text{m}^{-1}$

单光子跃迁选择定则  $\Delta l_i = \pm 1$ ,  $\Delta m_i = 0, \pm 1$ ,  $\Delta l_{j \neq i} = 0$

多电子原子 LS 耦合跃迁选择定则

$$\Delta S = 0; \Delta L = 0, \pm 1; \Delta J = 0, \pm 1 (J = 0 \rightarrow J = 0 \text{ 除外}); \Delta M_J = 0, \pm 1$$

朗德间隔定则  $E_{J+1} - E_J = \hbar^2 \zeta(L, S)(J+1)$

塞曼效应能级修正  $E_{mag}^{(1)} = g_J \mu_B B_0 M_J$ ,  $g = 1 + (g_s - 1) \frac{J(J+1) - L(L+1) + S(S+1)}{2J(J+1)}$

中国科学技术大学  
2015—2016学年第二学期考试试卷-答案

考试科目: 原子物理学 得分: \_\_\_\_\_  
 学生所在系: \_\_\_\_\_ 姓名: \_\_\_\_\_ 学号: \_\_\_\_\_

物理学常数:

电子电荷  $e = 1.60 \times 10^{-19} \text{C}$ , 电子质量  $m_e = 9.11 \times 10^{-31} \text{kg} = 0.511 \text{MeV}/c^2$

Planck常数  $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$ , 真空光速  $c = 3.00 \times 10^8 \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

真空磁导率  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{N}\cdot\text{A}^{-2}$ , 真空介电常数  $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{C}^2\cdot\text{J}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$

Rydberg常数  $R_\infty = 10973731 \text{m}^{-1}$ , 原子质量单位  $u = 1.66 \times 10^{-27} \text{kg} = 931 \text{MeV}/c^2$

玻尔半径  $a_1 = 0.529 \times 10^{-10} \text{m}$ , 阿伏伽德罗常数  $N_A = 6.022 \times 10^{23} \text{mol}^{-1}$

玻尔兹曼常数  $k = 8.62 \times 10^{-5} \text{eV}\cdot\text{K}^{-1}$

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{\hbar c} = \frac{1}{137.036}, \quad \mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e} = 0.927 \times 10^{-23} \text{J}\cdot\text{T}^{-1}$$

精细结构常数  $\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{\hbar c} = \frac{1}{137.036}$ , Bohr磁子  $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e} = 0.927 \times 10^{-23} \text{J}\cdot\text{T}^{-1}$

组合常数:

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} = 1.44 \text{fm}\cdot\text{MeV}, \quad m_e c^2 = 0.511 \text{MeV}, \quad hc = 1.240 \text{nm}\cdot\text{keV}$$

一. 选择题 (每题3分, 共30分, 请将答案填入下表中)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	C	D	B	C	C	C	B	B	D

在一次使用金箔做 $\alpha$ 粒子散射实验的过程中, 探测器分别在散射角  $120^\circ$ 和 $90^\circ$ 处, 相同时间内测量到的粒子数之比为

- A. 2: 3    B. 4: 9    C. 9: 16    D. 16: 9

A

2. 导致碱金属原子能级精细结构分裂的原因是

- A. 原子实的极化和轨道贯穿    B. 运动的相对论效应

- C. 自旋-轨道相互作用    D. 以上三者都是

C

3. 在弗兰克-赫兹实验中, 观测到Hg原子发出的波长为184.9nm的光谱线, 若不考虑反冲, 使Hg原子发出该谱线的电子的动能应当为  
 A. 4.68eV B. 4.9eV C. 5.78eV **D. 6.73eV**
4. 在戴维逊-革末实验中, 通过测量被Ni晶体散射的电子束在空间的分布特征,  
 A. 确定了e/m的值 **B. 证实了电子的波动性**  
 C. 认定了光电效应的确实性 D. 测量了Ni原子的大小
5. 基态氧原子核外电子的排布为 $1s^2 2s^2 2p^4$ , 依据泡利原理和洪德定则, 其能量最低的原子态为  
 A.  $2^1S_0$  B.  $2^3P_0$  **C.  $2^3P_2$**  D.  $2^3S_1$

6. Be为周期表中第4号元素, 在基态和激发态, 其价电子按LS耦合的方式形成原子态。若将Be原子激发为 $2s3p$ 的电子组态, 通过电偶极跃迁能够发出的光谱线的数目为  
 A. 4 B. 9 C. 10 **D. 6**

7. 基态Sc原子(原子序数为21)核外电子排布为 $[Ar]3d4s^2$ , 一束基态的Sc原子通过斯特恩-格拉赫磁场后将成为  
 A. 2束 B. 3束 **C. 4束** D. 6束

8. 根据能级多重性的交替规律, 周期表中第二主族的锶原子( $Z=38$ )能级多重结构是  
 A. 双重 **B. 一、三重** C. 单重 D. 二、四重

9. 基态氢原子在波导腔中, 当微波发生器频率调到 $1.40 \times 10^{10}$  Hz时, 发生了磁共振。此时恒定磁场的B值应为  
 A. 0.02T **B. 0.500T** C. 5.00T D. 1.40T

10. 电子组态 $2p3d$ 可形成 $^3D_{3,2,1}$ ,  $2s2p$ 可形成 $^3P_{2,1,0}$ ,  $^3D_{3,2,1} \rightarrow ^3P_{2,1,0}$  电偶极辐射跃迁所产生的光谱线的数为  
 A. 9 B. 7 C. 6 **D. 0**

二. 填空题 (每空2分, 共30分, 请将答案直接填在本试卷中)

1. 按照玻尔的氢原子模型, 电子从 $n=5$ 的轨道向 $n=2$ 的轨道跃迁, 发出的光谱线的波长为 434.1 nm, 跃迁后原子的角动量为  $2\hbar$  ( $L=n\hbar$  波粒二象性)
2. 氢原子亚稳态 $2^1S_{1/2}$ 的寿命为 $10^{-1}$ s, 激发态 $2^3P_{1/2}$ 的寿命为 $10^{-9}$ s, 这两个能级的自然宽度相差  $10^8$  倍.  $\Gamma = \frac{\hbar}{\tau}$
3. 处于 $^3P_0$ 态的镁原子, 在弱磁场中将分裂为 1 个能级. 而处于 $^3P_2$ 态的镁原子, 在弱磁场中将分裂为 5 个能级.  $2I+1=2$
4. Ti原子 $3d^3 4s$ 组态形成的5重态能级相对于基态分别高出 $6556.833 \text{ cm}^{-1}$ ,  $6598.764 \text{ cm}^{-1}$ ,  $6661.004 \text{ cm}^{-1}$ ,  $6742.755 \text{ cm}^{-1}$ ,  $6842.965.0 \text{ cm}^{-1}$ , 该5重态为 $^5F_{-12345}$  其中能量最低能级的总角动量子数 $J =$  1.

问答题



5. 钷原子的电子组态为  $[\text{Xe}]4f^4 6s^2$ , 基态能级为  $^5I_4$ , 铊原子的电子组态为  $[\text{Xe}]4f^{12} 6s^2$ , 基态能级为  $^3H_4$ . 已知上述两原子中的电子均以LS方式耦合.

6. Hg原子的电子组态为  $6s6d$ , 按jj耦合方式, 形成的能级数为 4, 耦合结果

表示为  $(\frac{1}{2}, \frac{3}{2})_{1,2}$ ,  $(\frac{1}{2}, \frac{5}{2})_{2,1}$ .

7. 从X射线管发出的  $K\alpha$  线的波长为  $0.071\text{nm}$ , 该射线管阳极靶材料的原子序数为 42.  $K\alpha$  X射线是由  $2p \rightarrow 1s$  或  $^2S_{1/2} \rightarrow ^2P_{1/2}$  跃迁产生的, 实际上包含 2 条波长很接近的谱线. 4.3?

8. 由实验测得  $\text{H}^{35}\text{Cl}$  分子的转动常数  $B=10.397\text{cm}^{-1}$ , 该分子的约化质量为  $1.63 \times 10^{-27}\text{kg}$ , 则  $\text{HCl}$  分子中两原子的平衡距离为 0.129 nm.

三. 计算题 (共40分, 请将解答写在试卷上)

1. (10分) 氢原子中电子的波函数为  $\Psi_{211} = \frac{1}{8\sqrt{\pi}} (\frac{r}{a_1})^{\frac{3}{2}} (\frac{r}{a_1}) e^{-\frac{r}{a_1}} \sin\theta e^{i\phi}$ , 其中  $a_1$  为第一玻尔半径.

- (1) 计算电子沿径向分布的几率密度;
  - (2) 求出电子沿径向出现几率极大的壳层的半径;
  - (3) 这一状态的电子, 轨道角动量是多少? 该角动量在z方向的分量是多少?
- 解: (1) 沿径向分布的几率密度为

$$R_{21}^2 r^2 = r^2 \iint |\Psi_{211}|^2 \sin\theta d\theta d\phi = \frac{1}{64\pi} (\frac{1}{a_1})^3 (\frac{r}{a_1})^2 e^{-\frac{r}{a_1}} r^2 \int_0^\pi \sin^2\theta d\theta \int_0^{2\pi} d\phi$$

$$= \frac{2\pi}{64\pi} (\frac{1}{a_1})^3 (\frac{r}{a_1})^2 e^{-\frac{r}{a_1}} r^2 \int_0^\pi \frac{1 - \cos 2\theta}{2} d\theta = \frac{\pi}{64} (\frac{1}{a_1})^3 (\frac{r}{a_1})^2 r^2 e^{-\frac{r}{a_1}} = \frac{\pi}{64} (\frac{1}{a_1})^5 r^4 e^{-\frac{r}{a_1}}$$

$$(2) \frac{d(R_{21}^2 r^2)}{dr} = \frac{\pi}{64} (\frac{1}{a_1})^5 \frac{d(r^4 e^{-\frac{r}{a_1}})}{dr} = \frac{\pi}{64} (\frac{1}{a_1})^5 (4r^3 e^{-\frac{r}{a_1}} - \frac{r^4}{a_1} e^{-\frac{r}{a_1}})$$

$$= \frac{\pi}{64} (\frac{1}{a_1})^5 (\frac{4}{r} - \frac{1}{a_1}) r^4 e^{-\frac{r}{a_1}}$$

$r=0$ ,  $r=4a_1$  导数为零, 取极大值的条件为  $r=4a_1$ .  $n=2$ .

(3) 轨道角动量  $p_l = \sqrt{l(l+1)} \hbar = \sqrt{2} \hbar$

轨道角动量在z方向的分量  $p_{lz} = +1 \hbar$

电子组态	原子态	能级( $\text{cm}^{-1}$ )
3s	$3^2S_{1/2}$	0.000
3p	$3^2P_{1/2}$	16956.172

3p	$3^2P_{3/2}$	16973.368
4s	$4^2S_{1/2}$	25739.991
3d	$3^2D_{3/2}$	29172.839
3d	$3^2D_{5/2}$	<b>29172.889</b>
4p	$4^2P_{1/2}$	30266.99
4p	$4^2P_{3/2}$	30272.58

2. (8分) 右表为Na原子的几个能量较低的能级与基态能级的差值。

(1) Na原子是单个价电子的原子；原子态为双重态，但某些双重态只有单一能级，为什么？  $\Delta l = 1$  不分壳

(2) 将表中的电子组态（只需要写出价电子态即可）和原子态填写完整；

(3) 若原子被激发到  $29172.889 \text{ cm}^{-1}$  的能级，向低能级跃迁能够产生哪些电偶极辐射？

(4) 若原子被激发到  $30272.58 \text{ cm}^{-1}$  的能级，向低能级跃迁能够产生哪些电偶极辐射？

解：(1) S能级是单层的，因为轨道角动量为0，没有自旋-轨道相互作用，因而不会导致能级分裂。或者，总角动量量子数只能取单一的1/2，因而能级是单层的。

(2) 见表。

(3) 这一能级的原子态为  $3^2D_{5/2}$ ，可能的电偶极跃迁为  $3^2D_{5/2} \rightarrow 3^2P_{3/2}$ ，以及  $3^2P_{1/2} \rightarrow 3^2S_{1/2}$

3. (8分) Ge原子基态的电子组态为  $4s^2 4p^2$ ，某一激发态的电子组态为  $4s^2 4p5s$ ，电子按LS方式耦合成原子态。

(1)  $4s^2 4p^2$  能形成哪些能级，基态能级是什么？  $3P_0, 1D_2, 1S_0, 3P_{2,1,0}$

(2)  $4s^2 4p5s$  能形成哪些能级？  $1P_1, 3P_{2,1,0}$

(3) 从组态  $4s^2 4p5s$  向组态  $4s^2 4p^2$  的电偶极辐射跃迁有哪些？能够发出多少条光谱线？  $3P_{2,1,0} \rightarrow 3P_{2,1,0}$  6条  $1P_1 \leftarrow 1S_0$   $1D_2 \rightarrow 1P_1$

4. (8分) 钇原子 (Y) 的波长为  $407.7359 \text{ nm}$  的谱线是  $^2F_{3/2} \rightarrow ^2D_{3/2}$  跃迁发出的，在1T的弱外磁场中，该谱线将产生塞曼分裂。

(1) 分别计算上述相关能级的朗德因子；  $\frac{6}{7}, \frac{10}{5}$

(2) 画图表示相关能级在外磁场中的分裂情况；

(3) 上述光谱线分裂为几条谱线？计算分裂后的谱线相对于原谱线移动的波数；  $g = \frac{1+4J}{3}$

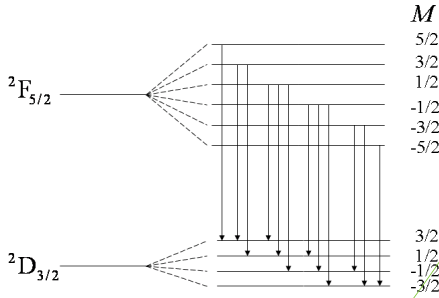
(4) 在垂直于磁场方向能观察到几条谱线？在平行于磁场方向能观察到几条谱线？

$$(1) g_{LS} = 1 + \frac{J^*^2 - L^*^2 + S^*^2}{2J^*^2} = 1 + \frac{J(J+1) - L(L+1) + S(S+1)}{2J \times (J+1)}$$

$${}^2F_{3/2} \text{ 能级 } g_2 = 1 + \frac{5/2 \times (5/2 + 1) - 3 \times 4 + 1/2 \times (1/2 + 1)}{2 \times 5/2 \times (5/2 + 1)^2} = \frac{6}{7}$$

$${}^2D_{3/2} \text{ 能级 } g_1 = 1 + \frac{3/2 \times (3/2 + 1) - 2 \times 3 + 1/2 \times (1/2 + 1)}{2 \times 3/2 \times (3/2 + 1)^2} = \frac{4}{5}$$

(2)  ${}^2F_{3/2}$  能级分裂为6个能级,  ${}^2D_{3/2}$  能级分裂为4个能级



$$(3) \Delta E = (M_2 g_2 - M_1 g_1) \frac{\mu_B B}{hc} = (M_2 g_2 - M_1 g_1) L$$

$$L = \frac{\mu_B B}{hc} = 0.467 \text{ cm}^{-1}$$

$M$  5/2 3/2 1/2 -1/2 -3/2 -5/2

$$g_2 = 6/7 \quad M_2 g_2 \quad 15/7 \quad 9/7 \quad 3/7 \quad -3/7 \quad -9/7 \quad -15/7$$

$$g_1 = 4/5 \quad M_1 g_1 \quad 6/5 \quad 2/5 \quad -2/5 \quad -6/5$$

$$\Delta M = +1 \quad \sigma^+ \quad 33/35 \quad 31/35 \quad 29/35 \quad 27/35$$

$$M_2 g_2 - M_1 g_1 \quad \Delta M = 0 \quad \pi \quad 3/35 \quad 1/35 \quad -1/35 \quad -3/35$$

$$\Delta M = -1 \quad \sigma^- \quad -27/35 \quad -29/35 \quad -31/35 \quad -33/35$$

共分裂为12条, 移动的波数分别为

$$\frac{33}{35}L, \frac{31}{35}L, \frac{29}{35}L, \frac{27}{35}L, \frac{3}{35}L, \frac{1}{35}L, -\frac{1}{35}L, -\frac{3}{35}L, -\frac{27}{35}L,$$

$$-\frac{29}{35}L, -\frac{31}{35}L, -\frac{33}{35}L$$

$$= 0.440 \text{ cm}^{-1}, 0.414 \text{ cm}^{-1}, 0.387 \text{ cm}^{-1}, 0.360 \text{ cm}^{-1}, 0.040 \text{ cm}^{-1}, 0.013 \text{ cm}^{-1},$$

$$-0.013 \text{ cm}^{-1}, -0.040 \text{ cm}^{-1}, -0.360 \text{ cm}^{-1}, -0.387 \text{ cm}^{-1}, -0.414 \text{ cm}^{-1}, -0.440 \text{ cm}^{-1}$$

(4) 在垂直于磁场方向上观察到12条, 平行于磁场方向上观察到8条。

5. (6分)  ${}^{12}\text{C}^{18}\text{O}$  分子的键长  $R_0 = 0.1128 \text{ nm}$ .

(1) 该分子转动谱线的间隔是多少? (2分)

(2) 若测量该分子的拉曼散射, 计算小拉曼位移移光谱线的间隔以及第一条反斯

振转: 2分 答: 4分

4分

托克斯线与第一条斯托克斯线之间的波数差

$\frac{h}{8\pi^2 I c}$   
 $B = \frac{h}{8\pi^2 I c}$

解：跃迁的选择定则为  $\Delta J = \pm 1$ ，纯转动谱线波数

$\nu_{2J_2} - \nu_{2J_1} = 2BJ_2$

相邻谱线间隔  $\Delta \nu_{2J} = \frac{h}{8\pi^2 I c} [2J_2 - 2(J_2 - 1)] = \frac{2h}{8\pi^2 I c} = 2B$ ，其中  $B = \frac{h}{8\pi^2 I c}$

转动惯量  $I = \mu R_0^2 = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} R_0^2 = \frac{12 \times 18}{12 + 18} \times 1.66 \times 10^{-27} \times (0.1128 \times 10^{-9})^2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$   
 $= 1.521 \times 10^{-46} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

转动常数  $B = \frac{h}{8\pi^2 I c} = 184.0 \text{ cm}^{-1} = 1.840 \text{ cm}^{-1}$

或  $I = \mu R_0^2 = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} R_0^2 = \frac{12 \times 18}{12 + 18} \text{ u} \times (0.1128 \text{ nm})^2 = 0.0916 \text{ u} \cdot \text{nm}^2$

或  $B = \frac{hc}{8\pi^2 I c^2} = \frac{1.24 \text{ nm} \cdot \text{keV}}{8\pi^2 \times 0.0916 \times 931 \times 10^3 \text{ keV} \cdot \text{nm}^2} = 1.842 \times 10^{-7} \text{ nm}^{-1} = 1.842 \text{ cm}^{-1}$

于是  $\Delta \nu_{2J} = 2B = 3.680 \text{ cm}^{-1}$  或  $\Delta \nu_{2J} = 2B = 3.683 \text{ cm}^{-1}$

(2) 小拉曼散射位移是在转动能级上产生的，选择定则为  $\Delta J_k = 0, \pm 2$ 。  
 于是小拉曼位移光谱线的间隔为

$\nu_{2J_0} - \nu_{2J_2} = 4B = 7.360 \text{ cm}^{-1}$  或  $\nu_{2J_0} - \nu_{2J_2} = 4B = 7.365 \text{ cm}^{-1}$

第1条斯托克斯线和第1条反斯托克斯线之间

$\nu_{2J_0} - \nu_{2J_0} = 12B = 22.08 \text{ cm}^{-1}$  或  $\nu_{2J_0} - \nu_{2J_0} = 12B = 22.10 \text{ cm}^{-1}$





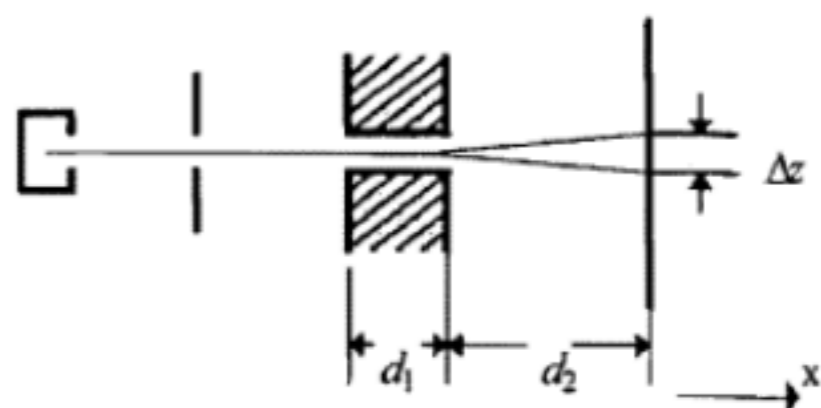
三. 计算题(共 5 题, 共有 84 分)

1. 试对氢原子、单电离的氦离子和二次电离的锂离子分别求其在主量子数  $n = 3$  的状态中的最大与最小谱项值之间的波数间隔。(17 分)

2. 有一质量为  $m$  的粒子在三维势箱中运动, 势箱的长、宽、高各为  $a$ 、 $b$ 、 $c$ , 势箱外的势能为  $V = \infty$ , 势箱内的势能为  $V = 0$ , 求粒子可能具有的能量。(17 分)

3. 在斯特恩—盖拉赫实验中, 处于基态的银原子

束通过极不均匀的横向磁场并射到屏上, 磁场梯度为  $\partial B/\partial Z = 10^3 \text{T}\cdot\text{m}^{-1}$ , 磁极的纵向长度  $d_1 = 0.04 \text{m}$ , 磁极端面到屏的长度  $d_2 = 0.1 \text{m}$ (如图所示), 如果原子的速率  $v = 500 \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 在屏上两束分开的距离为  $0.002 \text{m}$ , 试求原子磁矩在磁场方向上投影  $\mu_z$  的大小(忽略磁场的边缘效应)。银原子的质量为  $107.90 \text{u}$ 。(17 分)



4. 钨的  $K$  吸收限为  $0.0178 \text{nm}$ ,  $K$  线系的平均波长  $\lambda_{k\alpha}$  为  $0.0211 \text{nm}$ ,  $\lambda_{k\beta}$  为  $0.0184 \text{nm}$ ,  $\lambda_{k\gamma}$  为  $0.0179 \text{nm}$ 。

(1) 试画出钨的 X 射线能级简图;

(2) 若用高压为  $80 \text{kV}$  的 X 射线管产生的辐射照在钨上, 利用能级图计算从  $K, L$  和  $M$  壳层击出的电子的最大动能;

(3) 若用  $80 \text{keV}$  的光子照射钨, 则从  $N$  壳层到  $n = \infty$  之间各层击出的电子的动能范围为多大?(18 分)

5.  $^1\text{H}^{35}\text{Cl}$  吸收带的中心频率为  $f_0 = 8.66 \times 10^{13} \text{Hz}$ , 在中心两侧的各个吸收峰之间的间隔都约为  $\Delta f \approx 6 \times 10^{11} \text{Hz}$ 。求: (1)  $\text{HCl}$  分子的零点振动能; (2)  $\text{HCl}$  分子的转动惯量; (3)  $\text{HCl}$  分子的平衡距离 ( $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$ )。(15 分)

常数表

普朗克常数	$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s} = 4.136 \times 10^{-15} \text{eV}\cdot\text{s}$	里德堡常数	$R_{\infty} = 1.097 \times 10^7 \text{m}^{-1}$
基本电荷	$e = 1.602 \times 10^{-19} \text{C}$	阿伏伽德罗常数	$N_A = 6.022 \times 10^{23} \text{mol}^{-1}$
复合常数	$hc = 1240 \text{eV}\cdot\text{nm}$	玻耳兹曼常数	$k = 1.380 \times 10^{-23} \text{J}\cdot\text{K}^{-1} = 8.617 \times 10^{-5} \text{eV}\cdot\text{K}^{-1}$
电子质量	$m_e = 9.11 \times 10^{-31} \text{kg} = 0.511 \text{MeV}/c^2$	质子质量	$m_p = 1.67 \times 10^{-27} \text{kg} = 938 \text{MeV}/c^2$
复合常数	$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} = 1.44 \text{eV}\cdot\text{nm}$	玻尔磁子	$\mu_B = 9.274 \times 10^{-24} \text{J}\cdot\text{T}^{-1} = 5.788 \times 10^{-5} \text{eV}\cdot\text{T}^{-1}$
玻尔半径	$a_0 = 0.529 \times 10^{-10} \text{m}$	原子质量单位	$u = 1.66 \times 10^{-27} \text{kg} = 931 \text{MeV}/c^2$

# 中国科学院—中国科学技术大学

2004 年招收攻读硕士学位研究生入学考试试题参考答案

试题名称： 原子物理学

一. 选择题(共 10 题, 每题 2 分, 共 20 分)

1. B 提示:

$$\because L=0 \quad \therefore g=2$$

$$B = \frac{h\nu}{g\mu_B} = \frac{6.626 \times 10^{-34} \times 1.40 \times 10^{10}}{2 \times 9.274 \times 10^{-24}} \text{T} \approx 0.500 \text{T}$$

2. A

3. B

4. D

5. D (违反拉波特定则)。

6. A

$$\text{提示: } J=L+S, \mu_J = \mu_L + \mu_S = \frac{-e(L+2S)}{2m} = \frac{-e(J-S+2S)}{2m} = \frac{-e(J+S)}{2m}$$

7. A

8. C

提示: 对  $H_2$ :  $\mu = m_H/2$

$$\Delta E = h\nu_0 = \frac{h}{2\pi} \sqrt{\frac{2k}{m_H}} = \hbar c \sqrt{\frac{2k}{m_H c^2}} = 197 \times 10 \text{eV} \cdot \text{\AA} \sqrt{\frac{2 \times 35.5 \text{eV} / \text{\AA}^2}{938 \times 10^6 \text{eV}}}$$

$$= 0.542 \text{eV}$$

9. B

10. C

二. 填空题(共 8 题, 每空 2 分, 共有 46 分)

1. 33;  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^3$ ;  $^4S_{3/2}$ 。

2.  $6.6 \times 10^{-25} \text{nm}$ . 提示:  $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$

3. 转动;

4.  $A(e^{\frac{ipx}{\hbar}} + e^{-\frac{ipx}{\hbar}})$ ;  $A(e^{\frac{ipx}{\hbar}} - e^{-\frac{ipx}{\hbar}})$ 。

提示: 前者为偶宇称, 后者为奇宇称。

5. (1)  $\frac{eB}{4\pi mc}$  或  $\frac{\mu_B B}{\hbar c}$ ; (2)  $\frac{eB}{4\pi m}$  或  $\frac{\mu_B B}{\hbar}$ ; (3)  $\frac{eB}{4\pi mc} \lambda^2$  或  $\frac{\mu_B B}{\hbar c} \lambda^2$ ;

(4)  $\lambda - \frac{eB}{4\pi mc} \lambda^2$  或  $\lambda - \frac{\mu_B B}{\hbar c} \lambda^2$ ; (5)  $\lambda \pm \frac{eB}{4\pi mc} \lambda^2$  或  $\lambda \pm \frac{\mu_B B}{\hbar c} \lambda^2$ 。

6.  $4s4s$  (或  $4s^2$ );  $^1S_0$  (或  $4s4s \ ^1S_0$ ); 单(或三); 三(或单)。

7. 3; 12; 21; 3; 3; 3。

8.  $3 \times 10^{-3}$

试题名称: 原子物理学

共 4 页 第 1 页



三. 计算题(共 5 题, 共有 86 分)

1. 解:

对类氢离子, 考虑相对论效应与自旋-轨道相互作用能:

$$E = -\frac{RhcZ^2}{n^2} - \frac{Rhc\alpha^2 Z^4}{n^3} \left( \frac{1}{j+1/2} - \frac{3}{4n} \right)$$

$$n=3, l=0, 1, 2 \quad l=0, j=1/2; \quad l=1, j=1/2, 3/2; \quad l=2, j=3/2, 5/2;$$

$$\therefore \text{共有三个不同能级: } E_{\max} \text{ 对应 } j_{\max} = 5/2; \quad (2 \text{ 分})$$

$$E_{\min} \text{ 对应 } j_{\min} = 1/2; \quad (2 \text{ 分})$$

$$\therefore \text{边缘谱项波数差: } \Delta\tilde{\nu} = \frac{R\alpha^2 Z^4}{n^3} \left( \frac{1}{j_{\min} + 1/2} - \frac{1}{j_{\max} + 1/2} \right) \quad (6 \text{ 分})$$

氢原子  $Z=1$

$$\Delta\tilde{\nu}_H = \frac{1.097 \times 10^7 \times 10^{-2}}{137^2 \times 3^3} \times \left( \frac{1}{1/2+1/2} - \frac{1}{5/2+1/2} \right) \text{cm}^{-1} \approx 0.144 \text{cm}^{-1} \quad (2 \text{ 分})$$

$$\text{He}^+ \quad Z=2 \quad \Delta\tilde{\nu}_{\text{He}^+} = \Delta\tilde{\nu}_H Z^4 = 0.144 \times 2^4 \text{cm}^{-1} = 2.31 \text{cm}^{-1} \quad (2 \text{ 分})$$

$$\text{Li}^{++} \quad Z=3 \quad \Delta\tilde{\nu}_{\text{Li}^{++}} = \Delta\tilde{\nu}_H Z^4 = 0.144 \times 3^4 \text{cm}^{-1} = 11.7 \text{cm}^{-1} \quad (2 \text{ 分})$$

----(17 分)

2. 解:

在势箱外,  $V = \infty$ , 所以有  $u = 0$ 。

$$\text{在势箱内, 薛定谔方程为: } -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 u = Eu, \quad (3 \text{ 分})$$

设  $u = u_x u_y u_z$ ,  $E = E_x + E_y + E_z$ , 则可分别得三个一维无限高势垒方程。

在  $x$  方向上, 其解为  $u_x = A \cos k_1 x + B \sin k_1 x$

$$E_x = \frac{\hbar^2 k_1^2}{2m} \quad (2 \text{ 分})$$

$$\text{在 } x=0 \text{ 处的边界条件导致 } A=0, u_x = B \sin k_1 x \quad (3 \text{ 分})$$

在  $x=a$  处  $B \sin k_1 a = 0$ , 因此有

$$k_1 a = n\pi, \quad E_x = \frac{\hbar^2 k_1^2}{2m} = \frac{\hbar^2 n^2 \pi^2}{2ma^2} \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (3 \text{ 分})$$

同样可求得  $E_y, E_z$ 。所以, 有

$$\psi = \sqrt{\frac{8}{abc}} \sin \frac{n\pi x}{a} \sin \frac{k\pi y}{b} \sin \frac{l\pi z}{c}, \quad (3 \text{ 分})$$

$$E = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m} \left( \frac{n^2}{a^2} + \frac{k^2}{b^2} + \frac{l^2}{c^2} \right) \quad n, k, l = 1, 2, 3, \dots \quad (3 \text{ 分})$$

----(17 分)

3. 解:

$$\text{原子受力: } f = \mu \frac{dB}{dZ} \cos \beta = \mu_z \frac{dB}{dZ} \quad (4 \text{ 分})$$

$$\text{而 } f = ma$$

$$\text{故 } \mu_z = ma / \frac{dB}{dZ} \quad (4 \text{ 分})$$

$$\text{而 } d_1 = vt_1$$

偏移量  $z_1 = \frac{1}{2}at^2 = \frac{1}{2}a\left(\frac{d_1}{v}\right)^2$

又  $d_2 = vt_2$

偏移量  $z_2 = v_1t_2 = at_1t_2 = a\frac{d_1d_2}{v^2}$

即  $\Delta z = 2z_1 + 2z_2 = a\left(\frac{d_1}{v}\right)^2 + 2a\frac{d_1d_2}{v^2} = \frac{ad_1(d_1 + 2d_2)}{v^2}$  (3分)

故  $a = \frac{\Delta Zv^2}{d_1(d_1 + 2d_2)}$

$$\mu_z = \frac{\Delta Zmv^2}{d_1(d_1 + 2d_2)\frac{\partial B}{\partial Z}}$$

$$= \frac{107.9 \times 1.66 \times 10^{-27} \times (5 \times 10^2)^2 \times 0.002}{0.04 \times (0.04 + 2 \times 0.10) \times 10^3}$$

$$= 9.3 \times 10^{-24} (\text{J} \cdot \text{T}^{-1})$$

(6分)

此即一个玻尔磁子的理论值。

---(17分)

4. 解:

设 K, L, M... 能级的能量分别为  $E_1, E_2, E_3 \dots$ , 而  $E_\infty = 0$ 。

(1) K 吸收限为 0.0178nm, 可知 K 电子的电离能

$$|E_1| = \frac{hc}{\lambda_1} = \frac{1.24 \text{keV} \cdot \text{nm}}{0.0178 \text{nm}} = 69.7 \text{keV}$$

(3分)

所以  $E_1 = -69.7 \text{keV}$ , 由  $\lambda_{K\alpha} = 0.0211 \text{nm}$  可知 K, L 能级的间距为

$$E_2 - E_1 = \frac{hc}{\lambda_{K\alpha}} = \frac{1.24}{0.0211} = 58.8 (\text{keV})$$

(2分)

$$\therefore E_2 = E_1 + 58.8 = -10.9 (\text{keV})$$

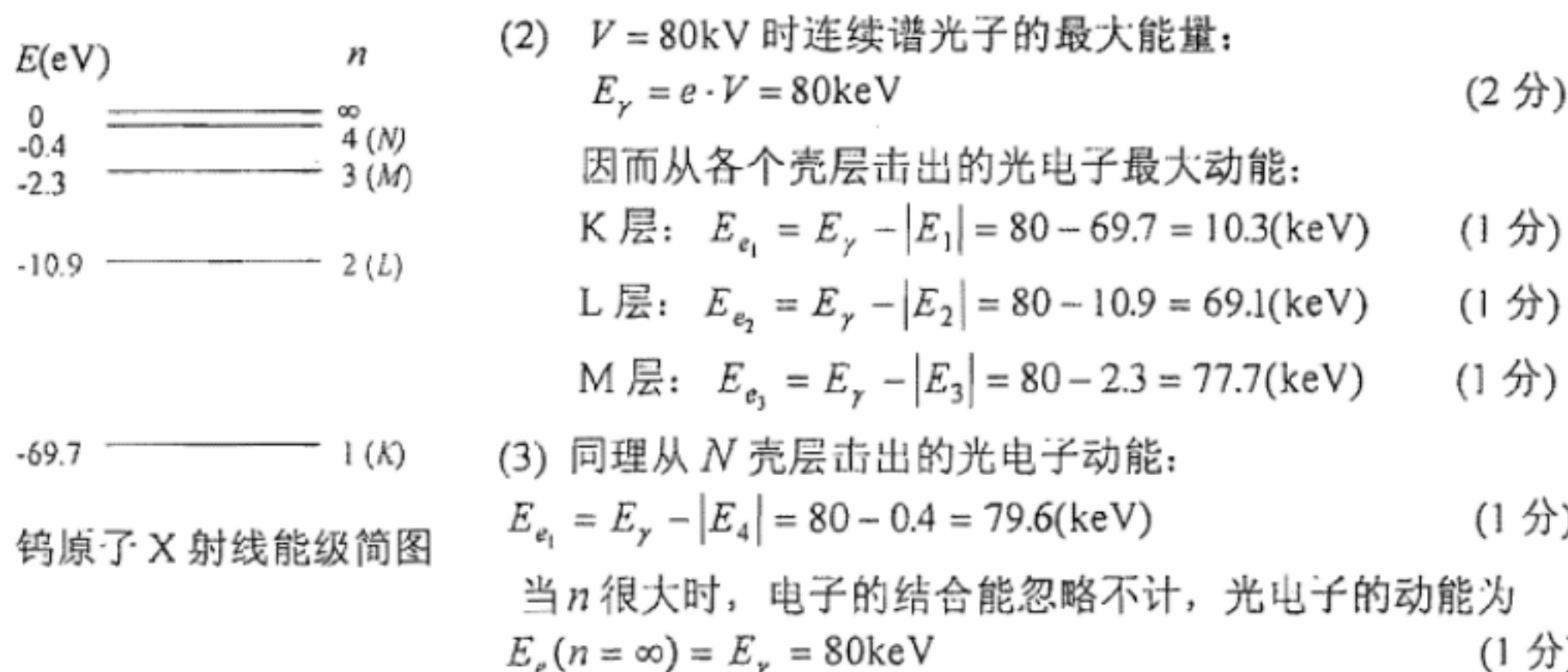
(2分)

同理:  $E_3 = E_1 + hc/\lambda_{K\beta} = -69.7 + 1.24/0.0184 = -2.3 (\text{keV})$  (1分)

$$E_4 = E_1 + hc/\lambda_{K\gamma} = -69.7 + 1.24/0.0179 = -0.4 (\text{keV})$$

(1分)

据此即可作出钨的 X 射线能级图:



钨原子 X 射线能级简图

所以从 N 层以外各层击出的光电子动能范围为 79.6 ~ 80keV (2分)

注: 若给的是原子在失去一个内层电子时能量的 X 射线能级图, 同样是正确的。(18分)

5. 解:

$$(1) \text{ 零点能: } E_0 = \frac{1}{2} h f_0 = \frac{1}{2} \times 6.63 \times 10^{-34} \times 8.66 \times 10^{13} \text{ J} \\ = 2.87 \times 10^{-20} \text{ J} = 0.179 \text{ eV} \quad (5 \text{ 分})$$

$$(2) 2B = \frac{\Delta f}{c} = 6 \times 10^{11} \text{ Hz} / (3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}) = 2 \times 10^3 \text{ m}^{-1}$$

$$\text{转动惯量: } I = \frac{h}{8\pi^2 Bc} = 2.8 \times 10^{-47} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (5 \text{ 分})$$

$$(3) \mu = \frac{35}{36} \times 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg} = 1.614 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\text{平衡距离: } r = \sqrt{\frac{I}{\mu}} = 1.32 \times 10^{-10} \text{ m} = 0.132 \text{ nm} \quad (5 \text{ 分})$$

----(15 分)

# 中国科大理学院 04 级原子物理期末考试试卷

(共 100 分)

姓名: \_\_\_\_\_ 学号: \_\_\_\_\_ 成绩: \_\_\_\_\_

## 一. 选择题(共 10 题, 共有 30 分)

[ ] 1. 对 Cu ( $Z=29$ ) 原子, 失去一个 K 壳层电子的原子能量比失去一个价电子的原子能量差不多大多少倍?

- A. 100,000;      B. 100;      C. 1000;      D. 10,000.

[ ] 2. 某原子处在  $^2S_{1/2}$  态时, 当微波发生器频率调到  $1.40 \times 10^{10}$  Hz 时, 发生了顺磁共振. 此时恒定磁场的  $B$  值应为

- A. 0.02T;      B. 0.500T;  
C. 5.00T;      D. 1.40T.

[ ] 3. 在解氢原子定态薛定谔方程的过程中, 经分离变量后, 对  $L^2$  的本征值方程求解得

到:  $Y_{lm}(\theta, \varphi) = BP_l^m(\cos\theta)e^{im\varphi}$ ,  $L = \sqrt{l(l+1)}\hbar$ , 并限定  $l$  的取值为:

- A.  $0, 1, 2, \dots$ ;      B.  $0, 1, 2, \dots, (n-1)$ ;  
C.  $0, 1, 2, \dots, n$ ;      D.  $0, \pm 1, \pm 2, \dots$ .

[ ] 4. 当公布了兰姆移位的测量结果之后, 人们才弄清了氢原子下列能级顺序应为:

- A.  $2^3P_{3/2} > 2^2P_{1/2} > 2^2S_{1/2}$ ;      B.  $2^2S_{1/2} > 2^2P_{3/2} > 2^2P_{1/2}$ ;  
C.  $2^2P_{3/2} > 2^2S_{1/2} > 2^2P_{1/2}$ ;      D.  $2^2P_{1/2} > 2^2P_{3/2} > 2^2S_{1/2}$ .

[ ] 5. 正电子与电子相遇可形成一种类氢结构的“电子偶素”, 其  $H_\alpha$  线的波长等于:

- A.  $9/(4R_\infty)$ ;      B.  $18/(5R_\infty)$ ;      C.  $36/(5R_\infty)$ ;      D.  $72/(5R_\infty)$ .

[ ] 6. 双原子分子的转动运动可以近似为刚性转子绕着通过其质心垂直于连接两原子的刚棒的轴转动, 如果转子绕转动轴的惯性矩为  $I$ , 转动量子数为  $J$ , 则分子的转动动能是多少?

- A.  $hJ$ ;      B.  $\frac{Jh}{2I}$ ;      C.  $\frac{2J^2h^2}{I}$ ;      D.  $\frac{J(J+1)h^2}{8\pi^2I}$ .

[ ] 7. 对  $^4P_{3/2}$  态, 其  $L \cdot S$  的值是 (以  $\hbar^2$  为单位):

- A. 3;      B.  $3/2$ ;      C. 2;      D.  $-3/2$ .

[ ] 8. 当氢离子至少处于如下温度时, 其巴耳末系才会在吸收谱中有相当的份量 (当  $T=300K$  时,  $k_B T \approx 1/40eV$ )

- A.  $10^3K$ ;      B.  $10^5K$ ;      C.  $10^7K$ ;      D.  $10^9K$ .

[ ] 9. 按照壳层结构理论, 电子在填充主量子数为  $n$  的壳层时, 如果有过渡元素, 则这些过渡元素是由于填充下列哪一支壳层所形成:

- A.  $nd$ ;      B.  $(n-1)d$ ;      C.  $(n-2)d$ ;      D.  $(n-2)f$ .

[ ] 10.  $1.00MeV$  的质子射向静止的金原子核 ( $Z=79$ ) 时, 所能达到的最近距离为:

- A.  $11.4 \times 10^{-18}m$ ;      B.  $11.4 \times 10^{-14}m$ ;  
C.  $11.4 \times 10^{-12}m$ ;      D.  $11.4 \times 10^{-10}m$ .

以下备选

[ ] 11. 在双原子分子的带状光谱中, 有些谱带具有这样的特征: 一边(称谱带头)密集而朝另一边是漫散的且逐渐减弱, 有关具有这样特征带的组成, 下列哪个说法是正确的?

- A. 振转谱带中(即没有电子跃迁)一般不会出现具有这样特征的带;
- B. 由于不同转动能级组间的跃迁产生的带光谱, 组成各谱带的谱线彼此分开;
- C. 谱带头可以出现在光谱低波数即红端;
- D. 无论什么光谱带, 谱带头必定在同一组转动量子数间跃迁产生。

[ ] 12. 某原子处于多重性为 5、 $J$  的简并度为 7 的状态时, 其轨道角动量的最大值为(以  $\hbar$  为单位):

- A.  $\sqrt{6}$ ;
- B.  $\sqrt{12}$ ;
- C.  $\sqrt{20}$ ;
- D.  $\sqrt{30}$ .

[ ] 13. 质量为  $M$  的原子核与质量为  $m_e$  的电子结合成一个单电子离子。该离子的里德伯常数  $R_M$  与  $R_\infty$  的关系为:

- A.  $R_M = R_\infty$ ;
- B.  $R_M = R_\infty (1 + \frac{m_e}{M})$ ;
- C.  $R_M = R_\infty / (1 + \frac{m_e}{M})$ ;
- D.  $R_M = R_\infty \frac{m_e}{M}$ .

[ ] 14. 在 CO 的近红外光谱中, 有一个  $2144\text{cm}^{-1}$  的强带, 问 CO 的零点能约为多少焦耳?  
A.  $2 \times 10^{-21}$ ; B.  $5 \times 10^{-20}$ ; C.  $2 \times 10^{-20}$ ; D.  $2 \times 10^{-19}$ . ( $h = 6.63 \times 10^{-34}\text{J}\cdot\text{s}$ )

[ ] 15. 氢原子分别处于  $3^2D_{3/2}$ ,  $3^2P_{3/2}$  和  $3^2P_{1/2}$  状态, 这些状态对应的能级是否相同(不考虑兰姆位移)?

- A. 都不同;
- B.  $3^2P_{3/2}$  和  $3^2P_{1/2}$  相同;
- C. 都相同;
- D.  $3^2D_{3/2}$  和  $3^2P_{3/2}$  相同。

二. 填空题(共 5 题, 共有 20 分)

1. 各种原子半径是不同的, 但都具有  $10^{-10}$  米的量级。
2. 某原子基态时  $n=1, 2, 3$  的壳层和  $4s$  支壳层均已填满,  $4p$  支壳层上只填了一半, 则其原子序数  $Z = \underline{\quad}$ , 此时的电子组态为  $\underline{\quad}$ , 基态的原子态是  $\underline{\quad}$ 。
3.  $LS$  耦合和  $jj$  耦合是角动量耦合的两种极端情况。当原子中不同电子间的自旋(或轨道)作用远大于同一电子的自旋-轨道作用时, 适用  $\underline{\quad}$  耦合法; 当同一电子的自旋-轨道作用远大于不同电子间的自旋(或轨道)作用时, 则适用  $\underline{\quad}$  耦合法。对于高激发态原子或重原子多适用  $\underline{\quad}$  耦合法。
4. 处于  $^3P_0$  态的镁原子, 在弱磁场中将分裂为  $\underline{\quad}$  个能级。而处于  $^3P_2$  态的镁原子, 在弱磁场中将分裂为  $\underline{\quad}$  个能级。
5. 已知钠原子( $Z=11$ )的里德伯常数为  $R$ , 光谱项的量子数亏损值为  $\Delta_s = 1.35$ ,  $\Delta_p =$

$0.86$ ,  $\Delta_d = 0.01$ , 则钠原子主线系的波数表达式为:  $\tilde{\nu}_n = \underline{\quad}$ , 第

一辅线系的波数表达式为:  $\tilde{\nu}_n = \underline{\quad}$ , 第二辅线系的波数表达

式为:  $\tilde{\nu}_n = \underline{\quad}$ 。

以下备选

6. 喇曼位移反斯托克斯线的强度要比斯托克斯线的强度\_\_\_\_得多, 但随温度升高, 反斯托克斯线的强度\_\_\_\_, 而斯托克斯线的强度\_\_\_\_\_。

7. 碳原子 ( $Z=6$ ) 的一个最外层电子被激发到  $3s$  态, 这时构成的原子态有\_\_\_\_\_, 它们向低能态跃迁时共可产生\_\_\_\_\_条谱线, 其中单重线有\_\_\_\_\_条, 多重线有\_\_\_\_\_条。

三. 计算题(共 5 题, 共有 50 分)

1. 已知磁场的  $B=0.500$  特斯拉, 计算发生正常塞曼效应的汞原子谱线  $\lambda=5790.7$  埃的波长变化。设分光计的精确度为  $0.1$  埃, 问需多大的  $B$  才可以观测到该跃迁的塞曼效应?

2. 镁原子 ( $Z=12$ ) (1) 画出镁原子基态和  $3s3p, 3s4s, 3s4p$  组态所形成的原子态的能级示意图 (标明  $LS$  耦合下的光谱符号); (2) 在能级图上标出一种允许跃迁, 一种禁戒跃迁, 一条能产生正常塞曼效应的谱线, 一条能产生反常塞曼效应的谱线。

3. 已知中性碳原子的某一激发态有三个精细结构能级 (正常次序)。其能量分别比基态高出  $60333\text{cm}^{-1}, 60353\text{cm}^{-1}$  和  $60393\text{cm}^{-1}$ 。

(1) 利用朗德间隔定则确定该精细结构的  $S, L, J$  值;

(2) 碳原子基态谱项为  $^3P$ , 也是三重态, 其中  $^3P_1$  和  $^3P_2$  分别比  $^3P_0$  高出  $16\text{cm}^{-1}$  和  $43\text{cm}^{-1}$ 。由上述激发态向这基态谱项三重态跃迁时可产生多少精细结构谱线 (上、下两谱项的字称是相反的)? 画出能级跃迁图并计算各谱线的波数 ( $\text{cm}^{-1}$ )。

4. 若一粒子位置的不准确量等于该粒子的德布罗意波长, 试求其速度的不准确量与速度本身之比。

5. 在  $\text{H}^{35}\text{Cl}$  分子中, 氢原子与氯原子之间相互作用力常数为  $516\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$ , 问在室温下  $\text{HCl}$  分子是否会处于第一激发振动态?

以下备选

6. 初速度为  $c/20$  的  $\alpha$  粒子与静止的银原子核 ( $Z=47$ ) 发生弹性散射, 散射的  $\alpha$  粒子远离银核的速度在垂直于初始运动方向上的分量为  $\sqrt{3}c/40$ , 试求瞄准距离。 ( $c$  为光速)。

7. 若两个非等效  $d$  电子有强的自旋-轨道作用, 从而导致  $jj$  耦合, 试求它们总角动量量子数  $J$  的可能值; 若它们发生  $LS$  耦合, 则它们总角动量量子数  $J$  的可能值又如何? 比较两种情况下可能的原子态数目及  $J$  值。

### 常数表

普朗克常数	$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s} = 4.136 \times 10^{-15} \text{eV}\cdot\text{s}$	里德堡常数	$R_\infty = 1.097 \times 10^7 \text{m}^{-1}$
基本电荷	$e = 1.602 \times 10^{-19} \text{C}$	阿伏伽德罗常数	$N_A = 6.022 \times 10^{23} \text{mol}^{-1}$
玻耳兹曼常数	$k = 1.380 \times 10^{-23} \text{J}\cdot\text{K}^{-1} = 8.617 \times 10^{-5} \text{eV}\cdot\text{K}^{-1}$	玻尔磁子	$\mu_B = 9.274 \times 10^{-24} \text{J}\cdot\text{T}^{-1} = 5.788 \times 10^{-5} \text{eV}\cdot\text{T}^{-1}$
电子质量	$m_e = 9.11 \times 10^{-31} \text{kg} = 0.511 \text{MeV}/c^2$	质子质量	$m_p = 1.67 \times 10^{-27} \text{kg} = 938 \text{MeV}/c^2$
玻尔半径	$a_0 = 0.529 \times 10^{-10} \text{m}$	原子质量单位	$u = 1.66 \times 10^{-27} \text{kg} = 931 \text{MeV}/c^2$

2

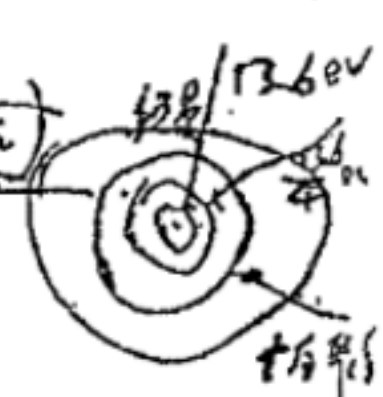




4. 对于  $Li^{2+}$  离子, 第二个 Bohr 轨道的半径为 (其中  $a_1$  为第一 Bohr 半径) (d)

- (a)  $2a_1$  (b)  $a_1$  (c)  $9a_1$  (d)  $\frac{4}{3}a_1$

$\frac{4}{3}a_1$   
 $\sqrt{\frac{n^2}{Z}} \cdot \frac{4}{3}$



5. H 原子的 Balmer 线系的线系限波长为 (a)

- (a) 364.7nm (b) 182.4nm (c) 91.2nm (d) 729.4nm

$R_{\infty}(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}) = \frac{1}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{900}{1.0967758 \times 10^7} \times 10^9$

6. 对于由正负电子对所形成的电子偶对原子体系, Rydberg 常数为 (其中  $R_{\infty}$  为原子核质量视为无限大时单电子原子的 Rydberg 常数) (a) (说明, 原题所给答案错误, 将 (a) 更改)

- (a)  $\frac{1}{2}R_{\infty}$  (b)  $\frac{2}{3}R_{\infty}$  (c)  $3R_{\infty}$  (d)  $R_{\infty}$

7. 在多电子原子中, 电子轨道贯穿的结果是 (a)

- (a) 使价电子受到的引力增大 (b) 使价电子受到的引力减小  
 (c) 原子能量增大 (d) 原子实的有效电荷数减少

8. 电子自旋磁矩的分量为 (c)

- (a)  $\frac{1}{2}h$  (b)  $\frac{1}{2}\sqrt{3}h$  (c)  $\mu_B$  (d)  $\sqrt{3}\mu_B$

$\mu_s = -g_s \mu_B \frac{S}{\hbar}$   
 $2 \cdot \frac{1}{2} \mu_B$

9. 如考虑氢原子的 LS 相互作用, 则当  $j=l+s$ , 即自旋向上时, 分裂后的能级 (a)

- (a) 升高 (b) 降低 (c) 可能升也可能降 (d) 分裂后的上能级与分裂前的能级位置相等

10. 在由同一电子组态所形成的  $^3D_{3,2,1}$  三能级体系中, 如设  $^3D_3$  与  $^3D_2$  的间隔为  $\Delta E_1$ ;  $^3D_2$  与  $^3D_1$  的间隔为  $\Delta E_2$ , 则  $\Delta E_1 : \Delta E_2$  为 (d)

- (a) 1: 2 (b) 2: 1 (c) 2: 3 (d) 3: 2

11.  $^3S$  能级结构为 (a)

- (a) 单重 (b) 双重 (c) 三重 (d) 由总角动量量子数 J 的值决定

$l=0, s=1 \Rightarrow J=1$

12. P 能级的结构为 (c)

- (a) 单重 (b) 双重 (c) 三重 (d) 四重

$l=1, s=\frac{1}{2} \Rightarrow J = \frac{3}{2}, \frac{1}{2}$

13. 单电子原子的 Lande 因子不可能取的数值为 (a)

- (a) 1 (b) 2 (c) 0 (d)  $2/3$

$g = \frac{1 + \frac{J(J+1) - L(L+1) + S(S+1)}{2J(J+1)}}$

14. 单重态原子的 Lande 因子 g 的值为 (b)

- (a) 1 (b) 2 (c)  $1/2$  (d)  $2/3$

$s=0$

15. 某种原子  $^1D_2 \rightarrow ^1P_1$  跃迁的光谱线, 在外磁场中将分裂, 在沿着磁场的方向可观察到 (a)

- (a) 2 条 (b) 3 条 (c) 6 条 (d) 9 条

$g=3$   
 $m_l = 2, 1, 0, -1, -2$   
 $2, 1, 0, -1, -2$

14、Zeeman 效应的经典理论预言：在磁场中给定的一条光谱线将分裂成三个分量。有些谱线分裂成多于三个分量的事实已成功地得到量子力学的解释，这基本上是由于：

- (a) 在磁场的作用下，选择定则  $\Delta M = 0, \pm 1$  不再成立
- (b) Lande  $g$  因子随不同能级而改变
- (c) 电子受到非平方反比的静电力的作用
- (d) 参与形成谱线跃迁的电子不止一个

15、Hund 定则告诉我们，由同一电子组态经  $LS$  耦合所形成的能级中，

- (a)  $L$  相同， $S$  大能级高； $S$  相同， $L$  大能级低
- (b)  $L$  相同， $S$  大能级低； $S$  相同， $L$  大能级低
- (c)  $L$  相同， $S$  大能级高； $S$  相同， $L$  大能级高
- (d)  $L$  相同， $S$  大能级低； $S$  相同， $L$  大能级高

## 第二部分 简答题（每题 5 分，共 15 分）

- 1、写出 Bohr 氢原子模型三个基本假设：
- 2、Rydberg 常数是否可以完全从 Bohr 假设导出？（只须回答“是”或“否”）
- 3、从波粒二象性出发，通过对波包的分析，说明不确定关系。（只需作定性解释即可）

## 第三部分（共 40 分）

一、（10 分）写出下列原子的基态

(1) Ce (铈,  $Z=58$ ), 基态电子组态为  $[\text{Xe}]4f^1 5d^1 6s^2$ ;

(2) Cr (铬,  $Z=24$ ), 基态电子组态为  $[\text{Ar}]3d^5 4s^1$ .

二、（20 分）基态 Zn (锌,  $Z=30$ ) 原子的电子组态为  $[\text{Ar}]3d^{10} 4s^2$ 。其中一个  $4s$  电子可以被激发到  $4p$ 、 $5s$ 、 $4d$ 、 $5p$  等次壳层，从而形成一系列激发态能级。

- (1) 写出 Zn 的基态和一个  $4s$  电子被激发到上述次壳层时，按  $LS$  耦合可以形成的激发态，并画出有关的能级图；
- (2) 如果电子从  $5p$  次壳层向低能态跃迁，可以产生哪些光谱线？在图上画出相应的跃迁；指出其中第二辅线系（锐线系， $S \rightarrow P$  跃迁）的单线和三线；
- (3) 讨论上述第二辅线系的三线在外磁场中（磁感应强度为  $B$ ）进一步分裂的情况（在垂直于磁场方向上观察），通过计算得出分裂后的光谱线数目及谱线间的裂距。

三、（10 分）金属 W ( $Z=74$ ) 的  $L_I$ 、 $L_{II}$ 、 $L_{III}$  吸收限分别是  $0.1021\text{nm}$ 、 $0.1071\text{nm}$  和  $0.1211\text{nm}$ 。

- (1) 画出 W 的 K、L、M 电离态能级，准确标出能级符号及能级高低次序；
- (2) 计算 W 的 K、L 各电离态能级相对于基态的能量

# 中国科学技术大学

2005—2006 学年第二学期考试试卷

考试科目: 普通物理(3) 原子物理学 得分: \_\_\_\_\_

学生所在系: 少年班 姓名: \_\_\_\_\_ 学号: \_\_\_\_\_

物理学常数:

$$\text{电子电荷 } e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C} = 3.0 \times 10^{-10} \text{ c.g.s.e.}$$

$$\text{电子质量 } m_e = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg} = 9.11 \times 10^{-28} \text{ g} = 0.511 \text{ MeV}/c^2$$

$$\text{Planck 常数 } h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s} = 6.63 \times 10^{-27} \text{ erg}\cdot\text{s}$$

$$\text{真空光速 } c = 3.00 \times 10^8 \text{ m/s} = 3.00 \times 10^{10} \text{ cm/s}$$

$$\text{真空介电常数 } \epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{J}\cdot\text{m}) \quad (\text{SI 单位制})$$

$$\text{原子质量单位 } u = 931 \text{ MeV}/c^2 \quad c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$\text{Rydberg 常数 } R_\infty = 10973731 \text{ m}^{-1}$$

$$\text{Bohr 磁子 } \mu_B = 0.92732 \times 10^{-23} \text{ A}\cdot\text{m}^2$$

$$\text{精细结构常数 } \alpha = 1/137.036$$

组合常数:

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} = 1.44 \text{ MeV}\cdot\text{fm}, \quad mc^2 = 0.511 \text{ MeV}, \quad \hbar c = 197 \text{ fm}\cdot\text{MeV}, \quad hc = 12.4 \text{ keV}\cdot\text{\AA}$$

说明: 题目全部做在试卷上相应的位置, 也可以写在试卷背面。如需附纸, 务必写上姓名。

## 第一部分 单项选择题 (每题 3 分, 共 45 分)

1、Rutherford 是基于以下实验事实否定了 Thomson 的原子模型

- (a)  $\alpha$  粒子很容易穿透金箔 (b) 散射后的  $\alpha$  粒子没有损失动能 (c) 大约有 1/8000 的  $\alpha$  粒子的散射角大于  $90^\circ$  (d)  $\alpha$  粒子没有将金原子中的正电荷打出来

2、Rutherford 的  $\alpha$  粒子散射理论中, 关于微分散射截面 (有效散射截面) 的正确表述是

- (a) 金箔的面积 (b) 金箔被  $\alpha$  粒子轰击的面积 (c) 金箔中每一个原子的横截面积 (d) 一个 Rutherford 原子附近的圆环的面积, 凡是瞄向该圆环的  $\alpha$  粒子, 都将被散射到某一空间立体角中。

3、实验测得某光谱线系可以表示为  $\bar{\nu} = R \left[ \frac{1}{(m/3)^2} - \frac{1}{(n/3)^2} \right]$ , 则可以判断光谱来自于 (其中  $R$  为 Rydberg 常数,  $m, n$  为整数)

- (a)  $H^+$  (b)  $Li^{2+}$  (c)  $He^+$  (d)  $Be^{3+}$

4、Urey 发现氢的同位素（氘）的理论依据是

- (a) 两者质量密度不同 (b) 两者里德堡常数不同 (c) 两者磁矩不同 (d) 两者角动量不同

5、波粒二象性是物质的普遍属性，但宏观物体的波动性却难以体现，这是由于

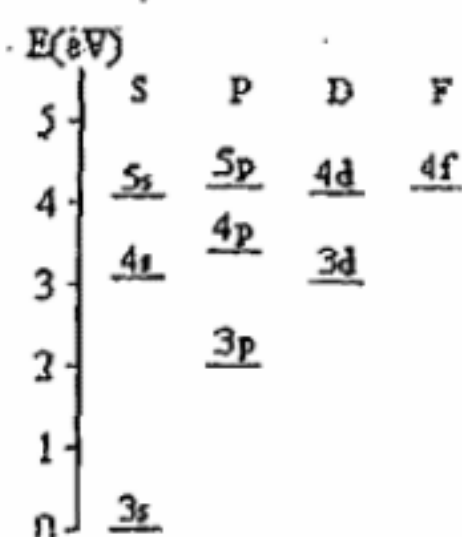
- (a) 其 de Broglie 波长太长 (b) 其 de Broglie 波长太短 (c) 只有微观物质才有波粒二象性 (d) 宏观物体只有处于束缚态时才有波动性

6、我们在 X 射线管上加上电压做 X 射线实验时，发现 X 射线的连续谱有一确定的短波极限。这个极限

- (a) 只取决于加在管子上的电压，而与靶的材料无关。  
 (b) 取决于加在管子上的电压，也取决于靶的材料。  
 (c) 只取决于靶的材料，而与加在管子上的电压无关。  
 (d) 取决于靶原子的电离能。

7、钠原子的部分能级如右图。下面哪个光跃迁是不允许的

- (a)  $5s-3p$  (b)  $4p-3s$  (c)  $4p-4s$  (d)  $4d-3s$



8、Fe 原子( $Z=26$ )的基态电子组态是 $[Ar]4s^23d^6$ ，其原子基态为

- (a)  $^1D_2$  (b)  $^5D_4$  (c)  $^5D_0$  (d)  $^1F_3$

9、基态氢原子半径的数量级为

- (a)  $10^{-4}cm$  (b)  $10^{-6}cm$  (c)  $10^{-7}cm$  (d)  $10^{-8}cm$

10、Pauli 不相容原理说：

- (a) 自旋为整数和半整数的粒子不能处在同一态中  
 (b) 自旋为整数的粒子不能处在同一态中  
 (c) 自旋为半整数的粒子能处在同一态中  
 (d) 自旋为半整数的粒子不能处在同一态中

11、量子数为  $\ell_1=3$  和  $\ell_2=2$  的双电子原子的总轨道角动量量子数的不同取值为

- (a) 5, 4, 3, 2, 1 (b)  $\pm 5; \pm 1$  (c)  $\pm 5, \pm 4, \pm 3, \pm 2, \pm 1$  (d) 5, 1

12、在 Stern-Gerlach 实验中处于基态的银原子束分裂成两条，以此判断下列哪一项可能是银原子的基态

- (a)  $^1S_0$  (b)  $^2P_{3/2}$  (c)  $^2S_{1/2}$  (d)  $^1P_1$

13、如果  $L$  是一个原子中电子的总轨道角动量量子数， $S$  是总自旋角动量量子数， $J$  是总角动量量子数。则由自旋-轨道耦合引起能级分裂，对给定的  $L$  和  $S$ ，相邻能级间的间隔与这两个能级的  $J$  值间的关系是

- (a) 与两个  $J$  值中较大的值成正比  
 (b) 与两个  $J$  值中较小的值成正比  
 (c) 与  $J(J+1)$  成正比， $J$  是两个值中较大的  
 (d) 与  $J(J+1)$  成正比， $J$  是两个值中较小的

- $(=1, S=2, g=0 \Rightarrow j=1)$ 
 $u_j = g \sqrt{j(j+1)} \mu_B$
16. 某原子处于 5 重态  $^5F$  时, 总磁矩为 0, 则其总角动量量子数  $J$  为 (a)
- (a) 1      (b) 2      (c) 3      (d) 4

17. X 射线管的外加电压为 30kV, 所产生的连续谱的最短波长为(a)
- (a) 0.041nm      (b) 0.053nm      (c) 0.039nm      (d)  $0.031 \text{nm} \cdot \frac{1224 \text{nm}}{E(\text{eV})}$

18. 某阳极靶所发出的 X 射线的  $K_\alpha$  线的波长为 0.1949nm, 则靶材料的原子序数为(d)
- (a) 22      (b) 23      (c) 25      (d) 26

19. 量子力学的物理基础是(a)
- (a) 波粒二象性      (b) 测不准原理      (c) Bohr 理论      (d) 原子的核式模型

20. 从量子力学的观点来看, 双缝干涉是(b)
- (a) 两个光子相互作用的结果      (b) 一个光子本身不同态之间叠加的结果  
 (c) 光子按位相相加的结果      (d) 光子湮灭的结果

21. 一维自由粒子的动能算符为(d)

- (a)  $\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d}{dx}$       (b)  $-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d}{dx}$       (c)  $\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2}$       (d)  $-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2}$

## 第二部分 简答题 (每题 6 分, 共 18 分)

在原子物理学的发展史上, 有一些重要的实验。简要描述下面实验中所观察到的现象, 并阐述由该实验所得到的重要结论。

### 1. Stern-Gerlach 实验:

一束银原子通过有梯度的磁场后分列为两束, 说明原子的有效总磁矩在空间的取向是量子化的, 即原子的总角动量在空间的取向是量子化的, 即得到了空间量子化的结论。

### 2. Frank-Hertz 实验:

在充有汞蒸气的管中, 热阴极发射出的电子束的强度不是随加速电压的增加单调上升, 而是在电压达某些值时突然下降, 说明此时汞原子吸收了电子的能量而被激发。由于汞原子每次只吸收一定量的能量, 证明了其能量是量子化的。

### 3. Compton 散射实验:

单色化的 X 射线被物体散射后, 除了波长不变的成分之外, 还有一部分散射光的波长变长 (非相干散射) 这一现象只有将 X 射线视为光子才能得到解释, 证明了光的粒子性。

## 第三部分 (共 40 分)

一、 (6分) 写出下列原子的基态

(1) Sm (钐,  $Z=62$ ), 基态电子组态为  $[Xe]4f^6 6s^2$ ;

(2) Ni (镍,  $Z=28$ ), 基态电子组态为  $[Ar]3d^8 4s^2$ .

Sm:  $4f^6 6s^2$

$3 \uparrow \downarrow / 0 \uparrow \downarrow / 2 \uparrow \downarrow / 3 \uparrow \downarrow$   
 $\boxed{\uparrow \downarrow \uparrow \downarrow \uparrow \downarrow \uparrow \downarrow}$

$S = 6 \times \frac{1}{2} = 3, L = 3 + 2 + 1 + 0 - 1 - 2 = 3$ , 按 Hund 规则, 取最小  $J = 0$ , 其基原子态为  $^7F_0$ .

Ni:  $3d^8 4s^2 = 3d^8$

$\boxed{\uparrow \downarrow \uparrow \downarrow \uparrow \downarrow \uparrow \downarrow}$

$S = 5 \times \frac{1}{2} - 3 \times \frac{1}{2} = 1, L = (2 + 1 + 0 - 1 - 2) + 2 + 1 + 0 = 3$ , 按 Hund 规则, 取最大  $J = 4$ .

基原子态为  $^3F_4$  或用  $d^2$  代替

2s  
 $\uparrow$   
 $\downarrow$   
 解法3

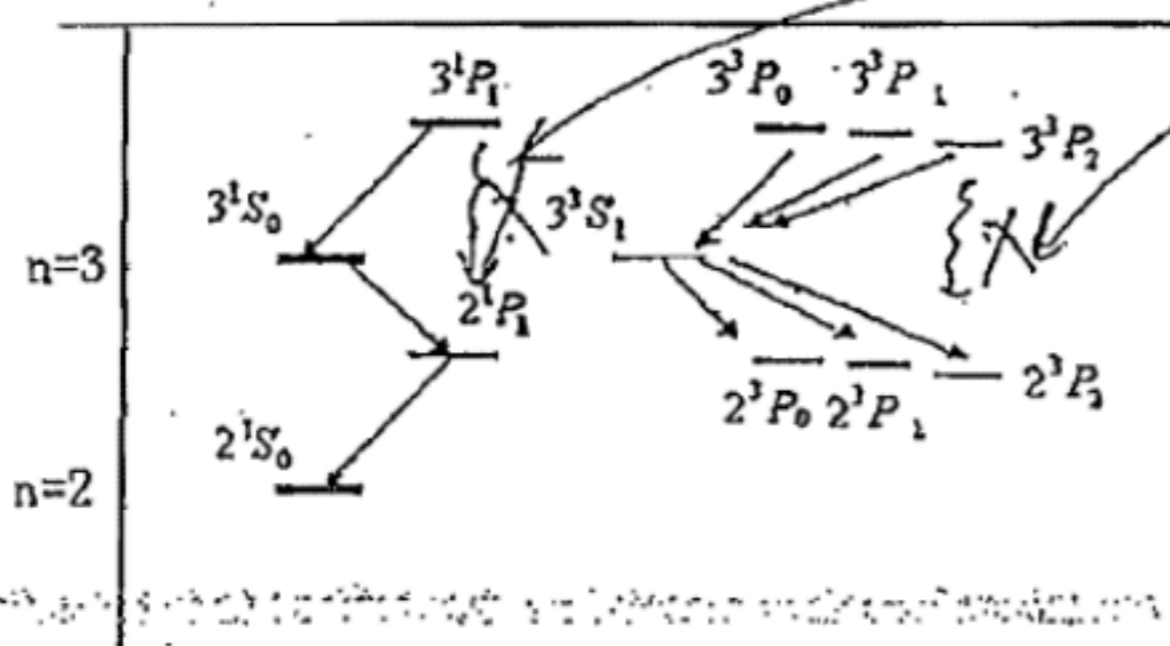
二、 (10分) Be (铍,  $Z=4$ ) 原子的基态电子组态为  $1s^2 2s^2$ , 若其中一个电子被激发到  $3p$  态, 按 LS 耦合可以形成哪些原子态? 写出原子态的符号。如果从该激发态向低能态跃迁, 可以产生哪些光谱线? 画出相应的能级跃迁图。

$2s3p$  电子组态, 按 LS 耦合,  $L=1, S=0, 1$ . 原子态为  $3^1P_1$  和  $3^3P_{2,1,0}$

还有能量较低的激发态:  $2s2p: 2^1P_1$  和  $2^3P_{2,1,0}$ ;  $2s3s: 3^1S_0$  和  $3^3S_1$

基态:  $2^1S_0$   $2s^2$

$\Delta l = 1, 0, 1$   
 $\Delta m = 0, \pm 1$   
 跃迁选择定则



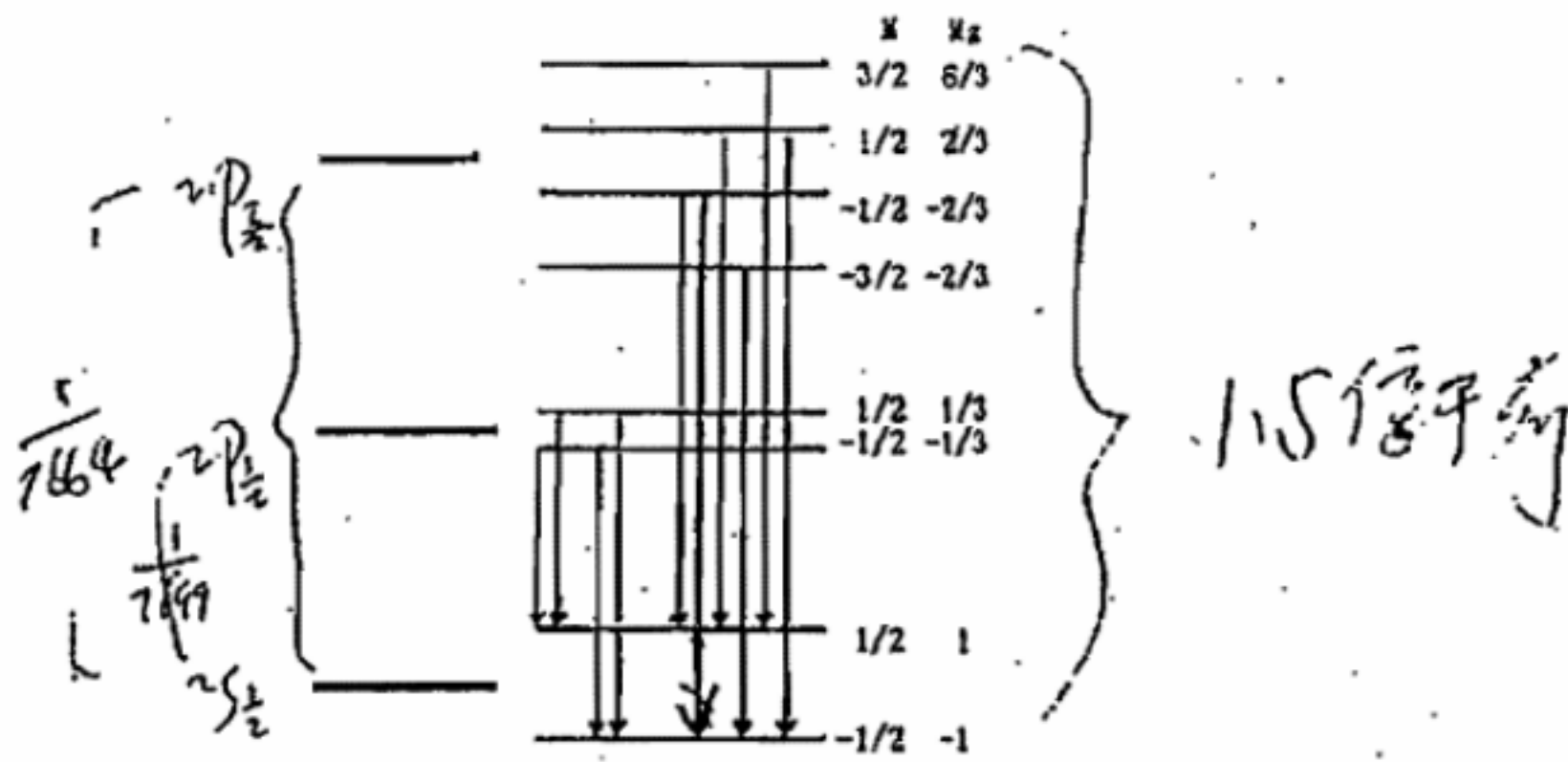
共有图示的 9 条光谱线

三、 (14分) K ( $Z=19$ ) 原子从第一激发态向基态跃迁时, 产生两条精细结构谱线,

波长分别为  $7664 \text{ \AA}$  和  $7699 \text{ \AA}$ . 现将该原子置于磁场  $B$  中, 谱线将进一步分裂。

- 计算分裂的大小, 画出相应的能级图。
- 如欲使分裂后的最高能级与最低能级的差距等于原来能级差距的 1.5 倍, 所加的磁场  $B$  应为多大?

K 原子的电子组态为  $4s^1$ , 基态为  $^2S_{1/2}$ . 第一激发态的电子组态为  $4p^1$ , 原子态为  $^2P_{3/2}$ ,  $^2P_{1/2}$ . 两条精细结构谱线对应的跃迁为  $^2P_{3/2} \rightarrow ^2S_{1/2}$  和  $^2P_{1/2} \rightarrow ^2S_{1/2}$ . 其 Lande 因子为  $^2S_{1/2}, g_l=2, ^2P_{3/2}, g_l=4/3, ^2P_{1/2}, g_l=2/3$ , 在磁场中能级分裂情况如图所示。

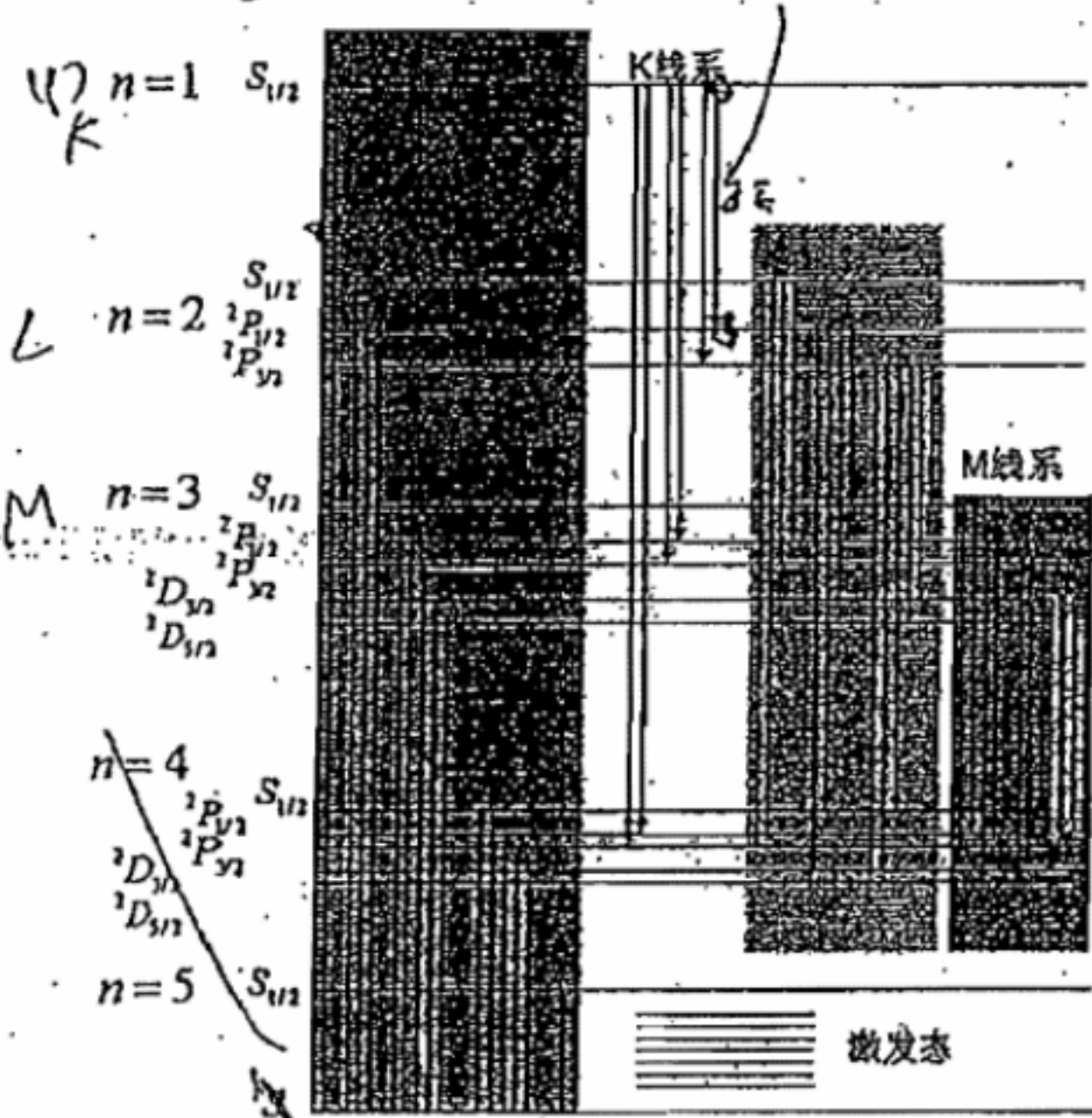


原来能级差为  $1/7664$ ，分裂后能级差为  $(M_I g_I \mu_B - M_I g_J \mu_B) / hc + 1/7664$ ，最大的能级差为  $(6/3+1) \mu_B / hc + 1/7664$ ，即  $3 \mu_B / hc + 1/7664 = 1.5/7664$ ，

$$3 \mu_B / hc = 0.5/7664, 3 \mu_B / hc = 0.5/7664 B = \frac{hc}{2 \times 3 \times 7664 \mu_B} = 3.7 \times 10^{10} \text{T 可以算出}$$

四、(10分) Ag ( $Z=47$ ) 原子波长最短的几个吸收边依次是  $0.0485 \text{nm}$ ,  $0.324 \text{nm}$ ,  $0.351 \text{nm}$  和  $0.369 \text{nm}$

- (1) 画出 Ag 的 K, L, M 电离态能级，准确标出能级的符号及能级的高低次序。
- (2) 电离 Ag 的一个 1s 电子至少需要多少能量？电离一个 2p 电子至少需要多少能量？
- (3) Ag 的 K 线系的最长的波长为多少



$$\sim 8$$

$$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6$$

$$\Delta l = \pm 1, \Delta j = 0, \pm 1$$

$$(2) E_1 = \frac{hc}{\lambda} = \frac{12.4}{0.485} \text{keV} = 25.6 \text{keV}, E_2 = \frac{hc}{\lambda} = \frac{12.4}{3.69} \text{keV} = 3.36 \text{keV}$$

$$(3) \Delta E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{12.4}{0.485} - \frac{12.4}{3.51} \text{keV} = 25.6 - 3.53 \text{keV} = 21.87 \text{keV}, \lambda = \frac{hc}{\Delta E} = \frac{12.4}{21.87} = 0.563 \text{\AA}$$

## 第五章 多电子原子

### 1. 选择题:

(1) 关于氦原子光谱下列说法错误的是:

- A. 第一激发态不能自发的跃迁到基态;    B.  $1s2p^3P_{2,1,0}$  能级是正常顺序;  
 C. 基态与第一激发态能量相差很大;     D. 三重态与单态之间没有跃迁

(2) 氦原子由状态  $1s2p^3P_{2,1,0}$  向  $1s2s^3S_1$  跃迁, 可产生的谱线条数为:

- A. 0;    B. 2;     C. 3;    D. 1

(3) 氦原子由状态  $1s3d^3D_{3,2,1}$  向  $1s2p^3P_{2,1,0}$  跃迁时可产生的谱线条数为:

- A. 3;    B. 4;     C. 6;    D. 5

(4) 氦原子有单态和三重态两套能级, 从而它们产生的光谱特点是:

- A. 单能级各线系皆为单线, 三重能级各线皆为三线;  
 B. 单重能级各线系皆为双线, 三重能级各线系皆为三线;  
 C. 单重能级各线系皆为单线, 三重能级各线系皆为双线;  
 D. 单重能级各线系皆为单线, 三重能级各线系较为复杂, 不一定是三线

(5) 下列原子状态中哪一个为氦原子的基态?

- A.  $1P_{1,1}$ ;    B.  $3P_{1,1}$ ;    C.  $3S_{1,1}$ ;     D.  $1S_0$ ;

(6) 氦原子的电子组态为  $n_1pn_2s$ , 则可能的原子态:

- A. 由于  $n$  不确定不能给出确定的  $J$  值, 不能决定原子态;  
 B. 为  $n_1pn_2s^3D_{2,1,0}$  和  $n_1pn_2s^1D_1$ ;  
 C. 由于违背泡利原理只存单态不存在三重态;  
 D. 为  $n_1pn_2s^3P_{2,1,0}$  和  $n_1pn_2s^1P_1$ .

(7)  $C^{2+}$  离子由  $2s3p^3P_{2,1,0}$  到  $2s3s^3S_1$  两能级的跃迁, 可产生几条光谱线?

- A. 6 条;     B. 3 条;    C. 2 条;    D. 1 条.

(8) 氦原子有单态和三重态, 但  $1s1s^3S_1$  并不存在, 其原因是: *Pauli B.*

- A. 因为自旋为  $1/2$ ,  $l_1=l_2=0$  故  $J=1/2 \neq 1$ ;    B. 泡利不相容原理限制了  $1s1s^3S_1$  的存在;  
 C. 因为三重态能量最低的是  $1s2s^3S_1$ ;    D. 因为  $1s1s^3S_1$  和  $1s2s^3S_1$  是简并态

(9) 泡利不相容原理说:

- A. 自旋为整数的粒子不能处于同一量子态中;     B. 自旋为整数的粒子能处于同一量子态

中;  
 C. 自旋为半整数的粒子能处于同一量子态中;    D. 自旋为半整数的粒子不能处于同一量子态中.

(10) 若某原子的两个价电子处于  $2s2p$  组态, 利用 L-S 耦合可得到其原子态的个数是:  C

- A. 1;    B. 3;    C. 4;    D. 6.

(11)  $l=1, m=1$  态的值是: A.  $-3\hbar^2$ ;    B.  $3\hbar^2$ ;    C.  $-2\hbar^2$ ;    D.  $2\hbar^2$

(12) 一个 p 电子与一个 s 电子在 L-S 耦合下可能有原子态为:

- A.  $3P_{0,1,2}, 3S_1$ ;    B.  $3P_{0,1,2}, 1S_0$ ;     C.  $1P_1, 3P_{0,1,2}$ ;    D.  $3S_1, 1P_1$

(13) 设原子的两个价电子是 p 电子和 d 电子, 在 L-S 耦合下可能的原子态有:

- A. 1 个;    B. 9 个;     C. 12 个;    D. 15 个;

(14) 电子组态  $2p4d$  所形成的可能原子态有:

- A.  $1P, 3P, 1F, 3F$ ;     B.  $1P, 1D, 1F, 3P, 3D, 3F$ ;  
 C.  $3F, 1F$ ;    D.  $1S, 1P, 1D, 3S, 3P, 3D$ .

(15) 硼 ( $Z=5$ ) 的  $B^+$  离子若处于第一激发态, 则电子组态为:

- A.  $2s2p$     B.  $2s2s$     C.  $1s2s$     D.  $2p3s$



(16) 铍 (Be) 原子若处于第一激发态, 则其电子组态: *Ground state is  $2s^2$*

- A.  $2s2s$ ; B.  $2s3p$ ; C.  $1s2p$ ;  D.  $2s2p$

(17) 若镁原子处于基态, 它的电子组态应为:

- A.  $2s2s$  B.  $2s2p$   C.  $3s3s$   D.  $3s3p$

(18) 今有电子组态  $1s^2p, 1s^2p, 2d^3p, 3p3s$ , 试判断下列哪些电子组态是完全存在的:

- A.  $1s2p, 1s1p$  B.  $1s2p, 2d3p$  C.  $2d3p, 3p3s$   D.  $1s2p, 3p3s$

(19) 电子组态  $1s2p$  所构成的原子态应为:

- A.  $1s2p^1P_1, 1s2p^3P_{2,1,0}$  B.  $1s2p^1S_0, 1s2p^3S_1$   
 C.  $1s2p^1S_0, 1s2p^1P_1, 1s2p^3S_1, 1s2p^3P_{2,1,0}$  D.  $1s2p^1S_0, 1s2p^1P_1$

(20) 判断下列各谱项中那个谱项不可能存在:

- A.  $^3F_2$ ; B.  $^4P_{3/2}$ ; C.  $^2F_{7/2}$ ; D.  $^3D_{1/2}$

易错

(21) 试判断原子态:  $1s1s^3S_1, 1s2p^3P_2, 1s2p^1D_1, 2s2p^3P_2$  中下列哪组是完全存在的?

- A.  $1s1s^3S_1, 1s2p^3P_2, 2s2p^3P_2$  B.  $1s2p^3P_2, 1s2p^1D_1$   
 C.  $1s2p^3P_2, 2s2p^3P_2$  D.  $1s1s^3S_1, 2s2p^3P_2, 1s2p^1D_1$

(22) 在铍原子中, 如果  $^3D_{1,2,3}$  对应的三能级可以分辨, 当有  $2s3d^3D_{1,2,3}$  到  $2s2p^3P_{2,1,0}$  的跃迁中可产生几条光谱线?

- A. 6 B. 3 C. 2 D. 9

选择定则

(23) 有状态  $2p3d^3P \rightarrow 2s3p^3P$  的跃迁:

- A. 可产生 9 条谱线 B. 可产生 7 条谱线  
 C. 可产生 6 条谱线 D. 不能发生

(24) 已知 Cl ( $Z=17$ ) 原子的电子组态是  $1s^22s^22p^63p^5$ , 则其原子组态是:

- A.  $^2P_{1/2}$ ; B.  $^4P_{1/2}$ ; C.  $^2P_{3/2}$ ; D.  $^4P_{3/2}$

(25) 原子处在多重性为 5,  $J$  的简并度为 7 的状态, 试确定轨道角动量的最大值:

- A.  $\sqrt{6}h$ ; B.  $\sqrt{12}h$ ; C.  $\sqrt{15}h$ ; D.  $\sqrt{30}h$

由通印  
印油

(26) 试确定  $D_{3/2}$  谱项可能的多重性:  $(2l+1)$  or  $(2l+1)$

- A. 1, 3, 5, 7; B. 2, 4, 6, 8; C. 3, 5, 7; D. 2, 4, 6

(27) 某系统中有三个电子分别处于 s 态, p 态, d 态, 该系统可能有的光谱项个数是:

- A. 7; B. 17; C. 8; D. 18

(28) 钙原子的能级应该有几重结构?

- A. 双重; B. 三重; C. 四重; D. 单重

2. 简答题:

(1) 简要解释下列概念: 泡利不相容原理、洪特定则、朗德间隔定则。

(2) L-S 耦合的某原子的激发态电子组态是  $2p3p$ , 可能形成哪些原子态? 若相应的能级顺序符合一般规律, 应如何排列? 并画出此原子由电子组态  $2p3p$  向  $2p3s$  可能产生的跃迁。

(3) 写出两个同科 p 电子形成的原子态, 那一个能级最低?

(4) 写出两个同科 d 电子形成的原子态, 那一个能级最低?

(5) 写出 5 个同科 p 电子形成的原子态, 那一个能级最低?

(6) 写出 4 个同科 p 电子形成的原子态, 那一个能级最低?

(7) 汞原子有两个价电子, 基态电子组态为  $6s6s$  若其中一个电子被激发到  $7s$  态 (中间有  $6p$  态) 由此形成的激发态向低能级跃迁时有多少种可能的光谱跃迁? 画出能级跃迁图。

(8) 某系统由一个 d 电子和一个  $^2P_{3/2}$  原子构成, 求该系统可能的光谱项。

(9) 某系统由 spd 电子构成, 试写出它的光谱项。

(10) 碳原子的一个价电子被激发到  $3d$  态,

$2p^2 \rightarrow 2p3d$

$6s7s \rightarrow 6s6s$

$6s7s \rightarrow 6s6p \rightarrow 6s6s$

2. (1) 朗德间隔定则

- ① 写出该受激原子的电子组态以及它们在 L-S 耦合下形成的原子态;  
 ② 画出对应的能级图并说明这些能级间能否发生电偶极跃迁?为什么?  
 (11) 什么叫电子组态?为什么电子组态确定后,原子的状态还会有若干个?  
 (12) 什么叫 L-S 耦合?什么叫 j-j 耦合?它们反映了原子内部什么性质的相互作用?  
 (13) 什么叫能级的多重性?为什么在 L-S 耦合中统一用  $2s+1$  决定?谱线的多重性又由什么决定?  
 (14) 什么叫电子的量子态?什么叫同科电子?什么叫亚稳态?  
 (15) 对于氦原子,指出下列那些状态不存在,并说明理由,对存在的状态列出由低能态到高能态的次序,并指出基态.

(16) 氦及周期系第二族元素原子的光谱有何规律性?

(17) 试述洪特定则及朗德间隔定则,它们的应用条件是什么?

(18) 多电子原子光谱的一般规律有哪些?

3. 计算题:

(1) 试计算氦离子 ( $He^+$ ) 的  $2p \rightarrow 1s$  谱线双重线成分间的波长差.

(2) 给出  $4s3d$  电子组态的 LS 耦合能级分裂图,应用朗德间隔定则预期每个多重态的精细结构分裂的比例,以光谱学符号标志各能级. (3) 已知镁原子 ( $Z=12$ ) 是二价原子,它符合 LS 耦合,问由价电子组态  $3p4p$  直接跃迁到  $3s3p$  有多少种辐射跃迁?用原子态符号表示这些可能的跃迁,并做跃迁图.

(4) 已知原子处于 F 态,此状态对应于有同样的多重性,但量子数 J 取不同值的五个谱项,试确定量子数 S、L、J; 并写出五个谱项符号,并求出最大可能的总角动量.

(5) 氦原子中两个电子分别被激发到  $2p$  和  $3d$  状态.试求原子轨道总角动量量子数 L 的可能值和在各种情况下  $P_{11}$  和  $P_{12}$  之间的夹角,并以角动量矢量图表示之.

(6) 对于  $S=1/2$  和  $L=2$  计算  $P_L, P_S$  的可能值.

(7) 按 LS 耦合,下列电子组态可能形成哪些原子态  $2p3s, 2p3p, 3s4d$



LS coupling



jj coupling

$$2 \vec{A} \cdot \vec{B} = (\vec{A} + \vec{B})^2 - A^2 - B^2$$

$$= C(C+1) - a(a+1) - b(b+1)$$

Handwritten notes in Chinese: "将交点坐标代入以取能级公式,精细结构的来源."

# 原子物理学总结 (乙型)

## 物理实验

Rutherford 的  $\alpha$  粒子散射实验: 证实了原子的核式结构  
Frank—Hertz 实验: 证实了原子内部分立能级的存在  
Davision—Germer 实验: 证实了电子的波动性  
Compton 散射实验: 证实了光的粒子性  
Stern—Gerlach 实验: 证实了磁场中原子角动量空间取向的量子性  
Zeeman 效应、顺磁共振实验、核磁共振实验: 证实了磁场中原子能级的分裂

## Rutherford 原子模型

微分散射截面  $d\sigma$  的物理意义

实验上可验证的公式:  $\frac{dn}{d\Omega} \sin^4 \frac{\theta}{2} = \text{const.}$

小角散射误差的原因

## Bohr 氢原子模型

氢原子的光谱线系

Rydberg 方程:  $\tilde{\nu} = R_H \left[ \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right], m = 1, 2, 3, \dots; n = m + 1, m + 2, m + 3, \dots$

光谱项:  $T(n) = \frac{R_H}{n^2}$

Bohr 模型的三个基本假设: 1、定态条件 (分立轨道假设); 2、频率条件; 3、角动量量子化假设

由 Bohr 模型获得

电子轨道:  $r_n = a_1 \frac{n^2}{Z}, a_1 = 0.529166 \times 10^{-10} \text{ m} = 0.53 \text{ \AA}$

原子能级:  $E_n = -13.6 \left( \frac{Z}{n} \right)^2 \text{ eV}$

Rydberg 常数:  $R_\infty$ , 在质心系中  $R_A = R_\infty \frac{1}{1 + m_e / M}$

类氢离子的光谱线系: 半整数光谱线, 谱线的蓝移。

激发电势, 电离电势

## 量子力学初步

Compton 散射:  $\Delta\lambda = \lambda_c (1 - \cos\theta), \lambda_c = \frac{h}{m_0 c} = 0.0242621 \text{ \AA}$ , Compton 波长

波粒二象性:  $\lambda = \frac{h}{p}$ , de Broglie 的物质波

由波粒二象性获得：束缚粒子（驻波）的量子态；不确定关系  
 Schrödinger 方程的含义、力学量的算符、力学量的平均值  
 Hamilton 方程的本征值、本征函数  
 氢原子的量子力学解：角动量及其量子数  $n, l, m_l$  的意义

$$p_l^2 = l(l+1)\hbar^2, \quad p_z = m_l\hbar; \quad m = -l, \dots, 0, \dots, l$$

### 单电子原子的能级和光谱

碱金属原子的能级和光谱线系

电子轨道运动的磁矩： $\mu_l = -\frac{ep_l}{2m_e} = \sqrt{l(l+1)}\mu_B, \quad \mu_B = \frac{e\hbar}{2m}$ , Bohr 磁子

电子的自旋：角动量， $p_s = \sqrt{s(s+1)}\hbar = (\sqrt{3}/2)\hbar, \quad s = 1/2, \quad p_{sz} = m_s\hbar = \pm \frac{1}{2}\hbar$

自旋磁矩： $\mu_s = -\frac{ep_s}{m}$ , 相关的量子数

自旋—轨道相互作用：

总角动量及其量子数： $p_j = p_l + p_s, \quad p_j = \sqrt{j(j+1)}\hbar, \quad j = l+s, l+s-1, \dots, |l-s|$

原子态的符号表示： $n^{2s+1}L_j$

辐射跃迁的选择定则： $\Delta l = \pm 1, \quad \Delta j = 0, \pm 1$

精细结构常数的含义  $\alpha \sim \frac{1}{137}$

### 多电子原子

氦原子的光谱与能级：单重态和三重态

电子组态

价电子的耦合（包括多个价电子的耦合）：角动量的耦合，LS 耦合

原子态： $^{2S+1}L_j$

Hund 规则（包括对于同科电子的附加定则）

(1) L 相同的能级，S 大的能级位置较低；

(2) S 相同的能级中，L 大的能级位置较低

(3) 次壳层的电子数小于半满时，J 最小的能量最低。正常次序

次壳层的电子数大于半满时，J 最大的能量最低。倒转次序（反常次序）

Landè 间隔定则：在多重态中，一对相邻的能级之间的间隔与有关的两个 J 之中较大的那个值成正比

全同粒子的交换对称性与交换反对称性

Pauli 原理：不能有两个电子处于同样的状态；或者，电子的波函数是交换反对称性的

等效电子： $n, l$  相同的电子称作等效电子，或同科电子；同科电子形成原子态时，必须考虑

Pauli 原理的限制

复杂原子的能级与光谱：位移率，多重性的交替律

原子的壳层结构：壳层与支（次）壳层，各个量子数的物理意义

由原子的壳层结构确定原子的基态：1、S取最大值；2、L取最大值；3、按Hund定则判定J值。

### 磁场中的原子

原子的磁矩：电子的轨道磁矩、自旋磁矩，原子的有效总磁矩

Landè g 因子：

单电子原子

$$\mu_l = -g_l \frac{e}{2m_e} p_l, \quad g_l = 1; \quad \mu_s = -g_s \frac{e}{2m_e} p_s, \quad g_s = 2$$

$$\mu_j = -g_j \frac{e}{2m_e} p_j, \quad g_j = 1 + \frac{j^2 - l^2 + s^2}{2j^2}$$

$$\text{LS 耦合} \quad g_{LS} = 1 + \frac{J^2 - L^2 + S^2}{2J^2}$$

外磁场中原子能级的分裂： $\Delta E = Mg \frac{e\hbar}{2m} B = Mg\mu_B B$ ,  $M = -J, -J+1, \dots, J-1, J$

顺磁共振： $h\nu = g\mu_B B$ ，可以测量 Landè g 因子

Zeeman 效应：

光谱线的移动： $\Delta \tilde{\nu} = (M_2 g_2 - M_1 g_1) \frac{\mu_B B}{hc} = (M_2 g_2 - M_1 g_1) L$ ,  $L = \frac{\mu_B B}{hc}$ , Lorentz 单位

选择定则： $\Delta M = M_2 - M_1 = 0, \pm 1$ , ( $\Delta J = 0$ 时,  $0 \rightarrow 0$ 除外)

Grotrian 图 

### X 射线

X 射线的产生：

连续谱，韧致辐射， $\lambda_0 = \frac{hc}{eV} = 12398.10 \text{ \AA/V} = 12.4 \text{ k \AA/V}$ ；

标识谱，内壳层电子跃迁

Moseley 定律

$$K_\alpha: \tilde{\nu} = R(Z-1)^2 \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right); \quad L_{\beta 1}: \tilde{\nu} = R(Z-7.4)^2 \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} \right)$$

能级和谱线的标记

$n=1, 2, 3, 4, 5, \dots$

K, L, M, N, O,  $\dots$

电离态的能级图、X 射线光谱线系的命名

辐射跃迁的选择定则： $\Delta L = \pm 1$ ,  $\Delta J = 0, \pm 1$

中国科学技术大学

2007—2008 学年第二学期期末考试试卷

考试科目：原子物理学

得分：\_\_\_\_\_

学生所在系：\_\_\_\_\_ 姓名：\_\_\_\_\_

学号：\_\_\_\_\_

一、(50%) 选择题

( ) 1. 在卢瑟福的 $\alpha$ 粒子散射实验中，碰撞参数 $b$ 与 $\alpha$ 粒子的散射角 $\theta$ 一一对应；截面 $2\pi b|db|$ 表示单位面积靶内有一个原子

(A) 使 $\alpha$ 粒子散射、并且散射角为 $\theta$ 的概率。

(B) 使 $\alpha$ 粒子散射、并且散射角介于 $\theta \rightarrow \theta + d\theta$ 之间的概率。

(C) 使 $\alpha$ 粒子散射、并且散射角大于或等于 $\theta$ 的概率。

(D) 使 $\alpha$ 粒子散射至 $\theta$ 方向单位立体角内的概率。

( ) 2. 按宇宙大爆炸模型，宇宙创生的极早期温度非常高。在 $10^{10}$ K温度下，黑体辐射每立方厘米质量约为

(A) 1吨 (B) 1克 (C)  $10^{-6}$ 克 (D)  $10^{-16}$ 克

( ) 3. 波长为 $\lambda$ 的光子，被质量为 $m_p$ 的质子散射。散射到 $90^\circ$ 角的光子，其波长增加

(A)  $\lambda/137$  (B)  $\lambda/1836$  (C)  $h/m_e c$  (D)  $h/m_p c$

( ) 4. 一个光源发射功率为0.6W、波长为 $6 \times 10^{-7}$ m的单色可见光，则每秒发射的光子数约为

(A)  $2 \times 10^6$  (B)  $6 \times 10^7$  (C)  $2 \times 10^{18}$  (D)  $6 \times 10^{25}$

( ) 5. 在光电效应实验中，单色光子打在清洁的铜板表面，必须加1伏特的截止电压才能保证没有光电流。已知铜的脱出功为4eV，那么光子的波长接近于

(A) 1200nm (B) 400nm (C) 300nm (D) 250nm

( ) 6. 如果电子被限制在原子核的尺寸范围内，那么根据测不准关系可估算出其动能约为

(A) 0.2eV (B) 200MeV (C) 40GeV (D) 4keV

( ) 7. 为了使电子的物质波长为原子的尺度(1Å)，电子动能为

(A)  $1.56 \times 10^6$ eV (B) 24.4eV (C)  $2.44 \times 10^5$ eV (D) 151eV

姓名和学号: \_\_\_\_\_

本张考卷得分: \_\_\_\_\_

( ) 8. 下面的几个因素, 哪个对氢原子能级的修正最小?

- (A) 电子自旋与质子自旋的耦合 (B) 电子的自旋-轨道耦合  
(C) 电子动能的相对论修正 (D) 接触势

( ) 9. 氢原子能级公式的形式为

- (A)  $C\left(n + \frac{1}{2}\right)$  (B)  $C(1 - n^2)$  (C)  $C\left(-\frac{1}{4} + \frac{1}{n^2}\right)$  (D)  $-C/n^2$

其中C是正常数, n为主量子数。

( ) 10. Rydberg 态是指原子、分子中主量子数n很大的量子态。估算n = 100的氢原子 Rydberg 态的平均半径:

- (A) 5nm (B) 10 $\mu$ m (C) 500nm (D) 100nm

( ) 11. 薛定谔猫态的波函数是“活”和“死”两种本征态的叠加。按照量子力学的基本原理, 下面的说法哪个正确?

- (A) 打开盒子后, 猫的状态是生死两种状态的叠加。  
(B) 打开盒子前, 猫既不是活的, 也不是死的。  
(C) 打开装猫的盒子前, 猫已经确定了生死, 只不过我们不知道。  
(D) 理论上我们可以通过求解薛定谔方程, 预言猫的生死。

( ) 12. 下列的物理量, 哪些不能同时精确测量?

- (A) x, y (B) z,  $\hat{p}_y$  (C)  $\hat{L}_x, \hat{L}_z$  (D)  $\hat{p}_y, \hat{L}_y$

( ) 13. 氢原子的 $2p_{3/2}$ 态的平均寿命为 $1.6 \times 10^{-19}$ 秒, 该能级的自然宽度为

- (A) 0.23eV (B)  $4.1 \times 10^{-7}$ eV (C)  $5.8 \times 10^{-16}$ eV (D) 13.6eV

( ) 14. 氢原子中处于n = 3的能级, 则 $\vec{l} \cdot \vec{s}$ 不可能的取值为

- (A)  $-2\hbar^2$  (B)  $-\hbar^2$  (C)  $\frac{1}{2}\hbar^2$  (D)  $-\frac{3}{2}\hbar^2$

( ) 15. 两个同科电子的电子组态是 $3p^2$ , 并处于自旋三重态, 则轨道量子数L为

- (A) 0 (B) 1 (C) 2 (D) 3

( ) 16. 考虑电子的自旋量子数, 氢原子n = 2的能级有多少个不同状态?

- (A) 2 (B) 6 (C) 8 (D) 12

( ) 17. 氢原子处于第一激发态, 则其有效磁矩的 $\hat{\mu}_z$ 本征值不可能为

- (A)  $2\mu_B$  (B)  $\frac{2}{3}\mu_B$  (C)  $\frac{1}{3}\mu_B$  (D)  $\frac{4}{3}\mu_B$

( ) 18. 反常 Zeeman 效应是由什么原因造成的?

- (A) 相对论效应 (C) 原子磁矩和外磁场的耦合  
(B) 自旋轨道耦合 (D) 核磁矩与电子磁场的耦合

( ) 19. 假设原来静止的氢原子从  $n=4$  的状态发出一个光子,

跃迁到  $n=1$  的状态, 则氢原子的反冲速率为

- (A)  $1 \times 10^{-3} \text{ m/s}$  (B)  $4 \text{ m/s}$  (C)  $3 \times 10^3 \text{ m/s}$  (D)  $2 \times 10^5 \text{ m/s}$

( ) 20. 电子偶素是一个正电子和一个负电子形成的束缚态, 类似于氢原子。氢原子的基态结合能为  $13.6 \text{ eV}$ , 电子偶素的结合能为

- (A)  $\frac{1}{4} \times 13.6 \text{ eV}$  (B)  $\frac{1}{2} \times 13.6 \text{ eV}$  (C)  $13.6 \text{ eV}$  (D)  $2 \times 13.6 \text{ eV}$

( ) 21. 两个电子处于总自旋为 0 的状态, 交换两个电子的空间坐标, 则

- (A) 波函数变号 (B) 波函数不变  
(C) 波函数变成了完全不同的另一种函数 (D) 以上都不对

( ) 22. 氦、氖、氩原子的基态都是

- (A)  $^1S_0$  (B)  $^2S_{1/2}$  (C)  $^3S_1$  (D)  $^1P_1$

( ) 23. 当你从原子中心向外看时, 电子云密度

- (A) 按 Gauss 分布减弱 (B) 按指数分布减弱  
(C) 振荡并逐步减弱 (D) 基本保持不变

( ) 24. Stern-Gelach 实验中, 他们成功观察到银原子束在不均匀磁场中的偏转, 并且

- (A) 由于银原子磁矩减小, 观测到一个偏转束  
(B) 由于银原子磁矩有两个分量, 观测到两个偏转束  
(C) 观测到 3 个偏转束, 分别由中性原子、正离子、负离子形成  
(D) 因为原子磁矩取向随机, 观测到连续分布的束流

( ) 25. 关于量子力学中粒子的全同性, 下面哪些说法正确?

- (A) 全同粒子不可分辨是由于缺乏足够精确的测量手段  
(B) 两个相同的粒子, 其波函数必然是对称的或反对称的  
(C) 两个电子的波函数, 其空间部分必然反对称  
(D) 由粒子的全同性可以推出测不准关系



姓名和学号: \_\_\_\_\_

本张考卷得分: \_\_\_\_\_

二、(10%) 质量为 $m$ 的粒子在一维 $\delta$ 势阱中运动,

$$V(x) = -\alpha\delta(x), \quad \alpha > 0.$$

(1) 设粒子从左边入射, 求定态波函数。

(2) 写出粒子的透射率和反射率。

三、(8%) 已知角动量算符 $\hat{L}$ 以及自旋算符 $\hat{S}$ 之间的对易关系为

$$[\hat{L}_x, \hat{L}_y] = i\hat{L}_z, \quad [\hat{L}_y, \hat{L}_z] = i\hat{L}_x, \quad [\hat{L}_z, \hat{L}_x] = i\hat{L}_y,$$

$$[\hat{S}_x, \hat{S}_y] = i\hat{S}_z, \quad [\hat{S}_y, \hat{S}_z] = i\hat{S}_x, \quad [\hat{S}_z, \hat{S}_x] = i\hat{S}_y,$$

$$[\hat{S}_x, \hat{L}_x] = 0, \quad [\hat{S}_x, \hat{L}_y] = 0, \quad \dots, \quad [\hat{S}_z, \hat{L}_z] = 0.$$

证明 $[\hat{S} \cdot \hat{L}, \hat{S}_x + \hat{L}_x] = 0$ 。(注意: 没有计算过程不得分)

四、 (12%)

- (1) 按照电子壳层的填充规则, 写出碳原子基态的电子组态。
- (2) 叙述在LS耦合下, 确定基态原子态的洪特定则。
- (3) 利用洪特规则写出碳原子基态的原子态。

五、 (10%) 已知质量为 $m$ 的粒子作一维运动, 其定态波函数为

$$u(x) = \frac{\sqrt{m\alpha}}{\hbar} \exp\left\{-\frac{m\alpha}{\hbar^2}|x|\right\}$$

求动量平均值 $\langle \hat{p}_x \rangle$ 和动能平均值 $\langle \hat{T} \rangle$ 。

六、(10%) 某种原子服从 LS 耦合, 它的一个三重态相邻能级间隔之比为 3:5, 确定这些能级的量子数  $L$ 、 $S$ 、 $J$ , 并把这些态用原子态符号表示。

### 可能会用到的公式及物理常数

光速  $c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$  Planck 常数  $h = 6.626069 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

$\hbar = h/2\pi = 1.0545716 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} = 6.58212 \times 10^{-22} \text{ MeV} \cdot \text{s}$

$\hbar c = 197.3 \text{ MeV} \cdot \text{fm}$   $hc = 1.24 \times 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{eV}$

电荷单位  $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$  原子单位  $1u = 931.5 \text{ MeV}/c^2$

电子质量  $m_e = 0.511 \text{ MeV}/c^2 = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$

Stefan-Boltzmann 常量  $\sigma = 5.6704 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$

辐射本领与能量密度的关系  $r = \frac{c}{4} \rho$

精细结构常数  $\alpha = e^2/(4\pi\epsilon_0 \hbar c) \approx 1/137.036$

物质波 de Broglie 关系  $E = h\nu, \vec{p} = \hbar\vec{k}, p = h/\lambda$

Einstein 质能关系  $E = mc^2, E^2 = p^2c^2 + m_0^2c^4$

电子的 Compton 散射  $\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta)$

薛定谔方程  $\left(-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\vec{r})\right) \psi(\vec{r}, t) = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(\vec{r}, t)$

定态薛定谔方程  $\left(-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\vec{r})\right) u(\vec{r}) = Eu(\vec{r})$

测不准关系  $\Delta x \Delta p_x \geq \hbar/2$

电子的经典半径  $r_e = e^2/(4\pi\epsilon_0 m_e c^2) = 2.818 \times 10^{-15} \text{ m}$

Bohr 半径  $a_\infty = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{m_e e^2} = r_e \alpha^{-2} = 0.529 \times 10^{-10} \text{ m}$

Rydberg 能量  $hcR_\infty = m_e c^2 \alpha^2 / 2 = 13.6 \text{ eV}$

Rydberg 常数  $R_\infty = 1.0973731534(13) \times 10^7 \text{ m}^{-1}$

单电子原子的朗德因子  $g = 1 + \frac{j(j+1) + s(s+1) - l(l+1)}{2j(j+1)}$

朗德间隔定则  $E_{j+1} - E_j = \hbar^2 \zeta(L, S)(j+1)$

## 中国科学技术大学

## 2008—2009 学年第二学期期末考试试卷

考试科目: 原子物理学

得分: \_\_\_\_\_

学生所在系: \_\_\_\_\_ 姓名: \_\_\_\_\_

学号: \_\_\_\_\_

## 一、(44%) 选择题

( ) 1. 静止的正负电子对湮灭后产生光子, 其最大波长是多少?

- (A) 2426fm (B) 386fm (C) 0.529Å (D) 1.24 $\mu$ m

( ) 2. 北京正负电子对撞机储存环中的电子动能为 1GeV, 则其 de Broglie 波波长大约为

- (A) 40fm (B) 0.2fm (C) 1.2km (D) 1.2fm

( ) 3. 假设原子核中的中子是被关在一个半径为 2fm 的球内, 利用测不准关系, 可以估算出中子的动能为

- (A) 0.97MeV (B) 1.29MeV (C) 0.32MeV (D) 3.88MeV

( ) 4. 关于碰撞截面, 下面的那种说法不正确?

- (A) 碰撞截面就是靶粒子的横截面;  
 (B) Rutherford 散射的总截面为无穷大;  
 (C) 在经典力学和量子力学中都可以定义散射截面;  
 (D) 碰撞截面和粒子被散射的概率有关。

( ) 5. 下面的哪个公式, 不可以用来辐射测温:

- (A) Stefan-Boltzmann 定律; (B) Wien 位移定律;  
 (C) Planck 公式; (D) Kirchhoff 辐射定律。

( ) 6. 关于波粒二象性, 正确的说法是:

- (A) 光和物质粒子有时是经典粒子, 有时是经典的波;  
 (B) 光和物质粒子是经典力学中的粒子;

(C) 光和物质粒子是经典力学中的波;

(D) 光和物质粒子既不是经典力学中的粒子, 也不是经典的波。

( ) 7. 哪一个不是量子力学的基本假设?

- (A) 薛定谔方程 (B) 叠加原理  
 (C) 测不准关系 (D) 波函数的统计解释

- ( ) 8. 下列哪几组物理量不能够同时精确测量?  
 (A)  $x, p_y$       (B)  $L_x, L_y$       (C)  $p_x, p_y$       (D)  $L_x, p_x$
- ( ) 9. 北极星的辐射光谱中, 辐射本领最大的波长为  $3500\text{\AA}$ , 可得星体的表面温度 \_\_\_\_\_  
 (A)  $8300\text{K}$       (B)  $6000\text{K}$       (C)  $10600\text{K}$       (D)  $5500\text{K}$
- ( ) 10. 绝对黑体的辐射本领和物体的绝对温度  $T$  的几次方成正比? (A)  $\frac{1}{T}$       (B)  $T$       (C)  $T^2$       (D)  $T^4$
- ( ) 11. 在光电效应实验中, 已知钾的红限  $\lambda_0 = 5.5 \times 10^{-5}\text{cm}$ , 现在用波长为  $4400\text{\AA}$  的蓝色光照射钾金属表面, 则遏止电压为  
 (A)  $0.56$  伏特      (B)  $5.1$  伏特      (C)  $0.09$  伏特      (D)  $0.81$  伏特
- ( ) 12. 在电子的杨氏双缝干涉实验中,  
 (A) 电子随机选择通过其中一条缝;  
 (B) 电子一分为二, 分别通过两条缝;  
 (C) 如果入射电子流很弱, 每次只有一个电子通过双缝时, 在屏幕上将不会看到相干条纹;  
 (D) 如果严格跟踪每个电子的轨迹, 则屏幕上不会有相干条纹。
- ( ) 13.  $\mu$  子和电子一样, 带有一个单位的负电荷, 质量为  $m_\mu = 207m_e$ ; 正  $\mu$  子具有相同的质量, 但是带有单位正电荷。按 Bohr 理论, 由正负  $\mu$  子组成的基态“原子”, 粒子之间的距离为  
 (A)  $0.53\text{\AA}$       (B)  $1.06\text{\AA}$       (C)  $0.0051\text{\AA}$       (D)  $0.0026\text{\AA}$
- ( ) 14. 氢原子从  $n = 4$  的激发态回到基态, 可以有多种方式。在这过程中发射的光谱线, 在可见光范围内的有几条?  
 (A) 1      (B) 2      (C) 3      (D) 4
- ( ) 15. 氢原子中处于  $n = 2$  的能级, 则  $\vec{l} \cdot \vec{s}$  不可能的取值为  
 (A) 0      (B)  $-\hbar^2$       (C)  $\frac{1}{2}\hbar^2$       (D)  $\hbar^2$
- ( ) 16. 氢原子处于基态, 则其磁矩的  $\hat{\mu}_z$  本征值可能为  
 (A)  $\mu_B$       (B)  $2\mu_B$       (C)  $\sqrt{3}\mu_B$       (D) 0
- ( ) 17. Zeeman 效应是由什么原因造成的?  
 (A) 相对论效应      (B) 自旋轨道耦合  
 (C) 轨道磁矩和外磁场的耦合      (D) 核磁矩与电子磁场的耦合
- ( ) 18. 已知氢原子  $s = \frac{1}{2}, j = \frac{5}{2}$ , 朗德因子  $g = 6/7$ , 原子态为

(A)  ${}^2S_{5/2}$

(B)  ${}^2P_{5/2}$

(C)  ${}^2D_{5/2}$

(D)  ${}^2F_{5/2}$

( ) 19. 关于两电子波函数的交换对称性, 哪种说法正确?

(A) 两个电子的自旋波函数必然反对称。

(B) 两个电子的空间波函数必然反对称。

(C) 两个电子的总波函数反对称。

(D) 两个电子的总波函数对称。

( ) 20. 为使电子的德布罗意波长为  $1\text{\AA}$ , 需要用多大的电压加速静止电子?

(A)  $1.51 \times 10^6\text{V}$

(B)  $24.4\text{V}$

(C)  $2.44 \times 10^5\text{V}$

(D)  $151\text{V}$

( ) 21. 对多电子原子, 所谓的残余相互作用是指

(A) 电子之间的自旋-轨道耦合。

(B) 相对论效应。

(C) 电子之间的排斥势与平均场的差。

(D) 交换力。

( ) 22. 下列与粒子的全同性无关的是

(A) 超导

(B) 超流

(C) 泡利不相容原理

(D) 氢原子的波函数

二、(12%)

(1) 按照电子壳层的填充规则, 写出硫原子基态的电子组态。

(2) 叙述在 LS 耦合下, 确定基态原子态的洪特定则。

(3) 利用洪特规则写出硫原子基态的原子态。

姓名和学号: \_\_\_\_\_

本张考卷得分: \_\_\_\_\_

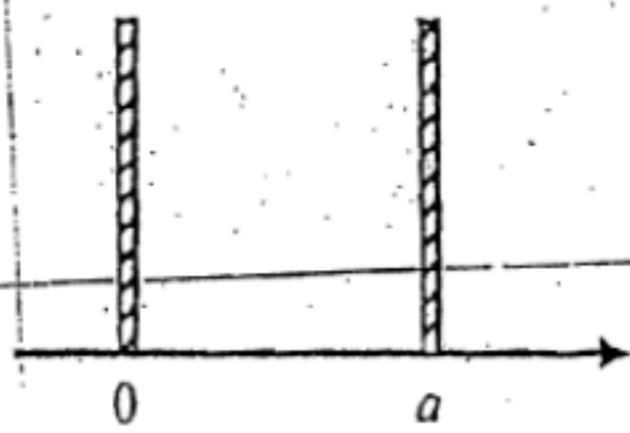
三、(6%) 试判断处于基态的氢原子能否吸收可见光:

---

四、(10%)  $\mu$ 轻子和电子类似, 带有一个单位的负电荷, 但是质量是电子的 207 倍。 $\mu$ 轻子可以和  $Z=1$  的原子核组成一个电中性的原子。设核质量为  $M$ , 利用 Bohr 理论计算

- (1) 原子的能级;
- (2) 当原子核是氘核时, 原子基态的能量;
- (3) 当原子核是氘核, 并且系统处于第一激发态时,  $\mu$ 轻子与核的距离。

五、(20%) 质量为  $m$  的粒子处于宽度为  $a$  的一维无限深势阱之中，



$$V(x) = \begin{cases} 0, & 0 < x < a; \\ +\infty, & x < 0 \text{ or } x > a. \end{cases}$$

(1) 写出能级和归一化的定态波函数。

(2) 现在假设在  $t = 0$  时，粒子处于基态。

在  $x = -a$  处设立一个无限高势垒，并突然把  $x = 0$  处的隔板撤除，即势函数突然变成

$$V'(x) = \begin{cases} 0, & -a < x < a; \\ +\infty, & x < -a \text{ or } x > a. \end{cases}$$

求粒子处于新的基态的概率。

(3) 试求撤除隔板后， $t = \Delta t$  时，在势阱右半边 ( $0 < x < a$ ) 找到粒子的概率(最后的积分可以不求出结果)。



姓名和学号: \_\_\_\_\_

本张考卷得分: \_\_\_\_\_

六、(8%) 已知氢原子的归一化波函数为

$$u_{nlm}(r, \theta, \varphi) = \frac{1}{8\sqrt{\pi}a_0^{3/2}} \frac{r}{a_0} \exp\left\{-\frac{r}{2a_0}\right\} \cos\theta$$

求电子的角动量算符的平均值, 其中

$$\hat{l}^2 = -\hbar^2 \left[ \frac{1}{\sin\theta} \frac{\partial}{\partial\theta} \left( \sin\theta \frac{\partial}{\partial\theta} \right) + \frac{1}{\sin^2\theta} \frac{\partial^2}{\partial\varphi^2} \right]$$

$$\hat{l}_z = -i\hbar \frac{\partial}{\partial\varphi}$$

### 可能会用到的公式及物理常数

光速  $c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$  Planck 常数  $h = 6.626069 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

$\hbar = h/2\pi = 1.0545716 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} = 6.58212 \times 10^{-22} \text{ MeV} \cdot \text{s}$

$\hbar c = 197.3 \text{ MeV} \cdot \text{fm}$   $\hbar c = 1.24 \times 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{eV}$

电荷单位  $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$  原子单位  $1u = 931.5 \text{ MeV}/c^2$

电子质量  $m_e = 0.511 \text{ MeV}/c^2 = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$

Stefan-Boltzmann 常量  $\sigma = 5.6704 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$

辐射本领与能量密度的关系  $r = \frac{c}{4} \rho$

精细结构常数  $\alpha = e^2/(4\pi\epsilon_0\hbar c) \approx 1/137.036$

物质波 de Broglie 关系  $E = h\nu, \vec{p} = \hbar\vec{k}, p = h/\lambda$

Einstein 质能关系  $E = mc^2, E^2 = p^2c^2 + m_0^2c^4$

电子的 Compton 散射  $\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos\theta)$

薛定谔方程  $\left( -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\vec{r}) \right) \psi(\vec{r}, t) = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(\vec{r}, t)$

定态薛定谔方程  $\left( -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\vec{r}) \right) u(\vec{r}) = Eu(\vec{r})$

测不准关系  $\Delta x \Delta p_x \geq \hbar/2$

电子的经典半径  $r_e = e^2/(4\pi\epsilon_0 m_e c^2) = 2.818 \times 10^{-15} \text{ m}$

Bohr 半径  $a_\infty = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{m_e e^2} = r_e \alpha^{-2} = 0.529 \times 10^{-10} \text{ m}$

Rydberg 能量  $hcR_\infty = m_e c^2 \alpha^2 / 2 = 13.6 \text{ eV}$

Rydberg 常数  $R_\infty = 1.0973731534(13) \times 10^7 \text{ m}^{-1}$

单电子原子的朗德因子  $g = 1 + \frac{l(j+1) + s(s+1) - l(l+1)}{2j(j+1)}$



# 原子物理

姓名: \_\_\_\_\_ 学号: \_\_\_\_\_ 成绩: \_\_\_\_\_

2008/05/21

## 选择题

1. Li原子 ( $Z=3$ ) 从3P态向基态跃迁时, 能产生的谱线条数为 (不考虑精细结构):

- A. 1条; B. 3条; C. 4条; D. 6条.

2. 假定氢原子中的电子向较大半径的轨道跃迁, 则下面各量的变化情况为:

- A. 角动量、总能量、动能及旋转频率都增加;  
B. 角动量、总能量及动能增加, 而旋转频率减少;  
C. 角动量、总能量及旋转频率增加, 而动能减少;  
D. 角动量及总能量增加, 而动能及旋转频率减少.

3. 如果氢原子中质子与电子的电荷值都加倍, 则由  $n=2$  跃迁到  $n=1$  所产生的辐射光子能量将乘以下列哪个数?

- A. 1; B. 32; C. 4; D. 16.

4. 氢原子和氦原子的里德伯态从  $n=109$  到  $n=108$  的跃迁发出的光子波长之比  $\lambda_H / \lambda_{He}$  约等于:

- A. 1/4; B. 1/2; C. 1; D. 4.

5. 已知里德伯原子的结合能  $|E_n|$  正比于  $n^{-2}$ , 而相邻能级间隔  $\Delta E_n$  则正比于:

- A.  $n^{-2}$ ; B.  $n^{-3}$ ; C.  $n^{-1}$ ; D.  $n$ .

6. 正电子与电子相遇可形成一种类氢结构的“电子偶素”。其电离能等于:

- A. 13.6eV; B. 10.2eV; C. 6.8eV; D. 5.1eV.

7. 密立根是通过以下方法来测定电子电荷的:

- A. 测量电子束在电场和磁场中的偏转;  
B. 利用威尔逊云室, 测定过饱和蒸汽雾滴的数目和总电量;  
C. 测量极小带电油滴在重力、空气浮力和阻力以及已知电场作用下运动时的收尾速率;  
D. 采用电解方法测量电解一定量物质所需要的电量.

8. 在卢瑟福的  $\alpha$  粒子散射实验中, 碰撞参数  $b$  与  $\alpha$  粒子的散射角  $\theta$  相对应, 则截面  $2\pi b|db|$  表示:

- A. 单位面积靶内一个原子使  $\alpha$  粒子散射, 且散射角等于  $\theta$  的概率;  
B. 单位面积靶内一个原子使  $\alpha$  粒子散射, 且散射角介于  $\theta \rightarrow \theta + d\theta$  之间的概率;  
C. 单位面积靶内一个原子使  $\alpha$  粒子散射, 且散射角大于或等于  $\theta$  的概率;

D. 单位面积靶内一个原子使 $\alpha$ 粒子散射至 $\theta$ 方向单位立体角内的概率。

9. 原子核式结构模型的提出是为了解释 $\alpha$ 粒子散射实验中:

- A. 绝大多数散射角近 $180^\circ$ ;
- B.  $\alpha$ 粒子只偏 $2^\circ\sim 3^\circ$ ;
- C. 以小角散射为主, 也存在大角散射;
- D. 以大角散射为主, 也存在小角散射。

10. 关于原子光谱的特点, 下面哪个说法是错误的?

- A. 光谱是线状的, 谱线有确定的波长值;
- ~~B. 每一谱线的波数都可以表示成两个光谱项的差;~~
- C. 不同原子的光谱项的具体形式有所不同;
- D. 同一谱线系中的谱线可以有共同的光谱项; 而同一原子不同谱线系中的谱线则没有共同的光谱项。

11. 若赖曼系、帕邢系和巴耳末系第一条谱线的波长分别为 $\lambda_L$ 、 $\lambda_P$ 和 $\lambda_B$ , 则它们之间满足:

- A.  $\lambda_L > \lambda_P > \lambda_B$ ;
- B.  $\lambda_L < \lambda_P < \lambda_B$ ;
- C.  $\lambda_L < \lambda_B < \lambda_P$ ;
- D.  $\lambda_B < \lambda_L < \lambda_P$ 。

12. 基于德布罗意假设得出的公式 $\lambda = \frac{1.226}{\sqrt{U}} \text{ nm}$ 的适用条件是:

- A. 自由电子, 非相对论近似;
- B. 一切实物粒子, 非相对论近似;
- C. 被电场束缚的电子, 相对论结果;
- D. 带电的任何自由粒子, 非相对论近似。

13. 电子的狭缝衍射实验直到1961年才实现, 其原因是:

- A. 人们怀疑电子具有波动性;
- B. 人们不关心这类实验;
- C. 电子的德布罗意波长太短;
- D. 电子的德布罗意波长太长。

14. 不确定关系是微观物质的客观规律, 它来源于:

- A. 在微观范围轨道概念不适用;
- B. 实物粒子具有波粒二象性;
- C. 对微观体系, 目前实验精度不够;
- D. 实验上发现能级有一定宽度。

15. 对波函数 $\psi$ 的下列描述, 其中不正确的是:

- A. 波函数是对概率密度的一种描述;
- B. 波函数是对粒子统计行为的一种描述;
- C. 波函数必须是有限、连续、单值的;
- D. 由于粒子在整个空间找到的概率为1, 因而波函数绝对值不能大于1。

16. 在一般情况下, 波函数 $\psi$ 本身是

- A. 可以被测量到的;
- B. 不可以被测量到的, 能被测量到的只是波函数的实部;
- C. 不可以被测量到的, 能被测量到的只是波函数的虚部;
- D. 不可以被测量到的, 能被测量到的只是波函数的模方或 $|\psi|^2$ 。