

试题名称:

原子物理

(注:“选择题”和“填空题”的答案写在答题纸上)

一. 选择题(共 10 题, 每题 2 分, 共 20 分, 均为单选题)

- 卢瑟福由 α 粒子散射实验得出原子核式结构模型时, 所依据的理论基础是:
 - 普朗克能量量子假设;
 - 爱因斯坦的光量子假设;
 - 狭义相对论;
 - 经典理论
- 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 ΔE_n 则正比于:
 - n^{-2} ;
 - n^{-3} ;
 - n^{-1} ;
 - n 。
- 在氢原子中电子处于第二玻尔轨道的德布罗意波长是:
 - $\lambda = \frac{p}{h}$;
 - $\lambda = 4\pi a_0$;
 - $\lambda = 8\pi a_0$;
 - $\lambda = \frac{h}{p}$ 。
- 氢原子处于基态的径向波函数是 $R_{10} = ce^{-r/a_0}$ 。那么, 它的归一化常数等于
 - $2(\frac{1}{a_0})^{3/2}$;
 - $2(\frac{1}{a_0})^{2/3}$;
 - $(\frac{2}{a_0})^{3/2}$;
 - $(\frac{2}{a_0})^{2/3}$ 。
- 下列各元素中最外层电子的电离能最小的是:
 - 氟 (F, $Z=9$);
 - 氖 (Ne, $Z=10$);
 - 钠 (Na, $Z=11$);
 - 镁 (Mg, $Z=12$)。
- 某原子处于朗德因子 $g = \frac{6}{5}$ 态下, 当微波发生器频率调到 $2.52 \times 10^{10} \text{ Hz}$ 时, 观察到顺磁共振现象。此时恒定磁场的 B 值为:
 - 1.2T;
 - 1.50T;
 - 10.0T;
 - 0.15T。
- 形成超精细结构,
 - 是电子自旋与轨道运动相互作用的结果。
 - 仅是由于电子自旋磁矩与原子核相互作用的结果。
 - 是价电子运动轨道在原子实中贯穿的结果。
 - 是电子磁矩 (包括自旋与轨道) 与核磁矩之间作用及核四极矩与电子电场梯度之间相互作用的结果。
- 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?
 - 100,000;
 - 100;
 - 1000;
 - 10,000。
- 考虑自旋之后, 对碱金属原子所形成的自旋-轨道耦合能 W 与主量子数 n 的关系为:
 - $W \propto 1/n^2$;
 - $W \propto 1/n^3$;
 - $W \propto n^2$;
 - $W \propto 1/n^4$ 。

10. 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, 下列哪个说法是明显错误的。
- 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。

二. 填空题(共 10 题, 共有 50 分)

- 假定金核($Z=79$)的半径为 7.0fm , 则 α 粒子的动能至少为 _____, 才能在对心碰撞时, 刚好达到金核的表面。
- 按氢原子的玻尔理论, $n=2$ 时只有一个能级。若考虑了电子自旋-轨道耦合等相对论效应, 则此能级将分裂为 _____ 个能级。若再考虑兰姆移动的影响, 则此玻尔能级将分裂为 _____ 个能级。今知氢原子的核自旋量子数 $I=1/2$, 故若再考虑超精细结构, 则玻尔能级将分裂为 _____ 个能级。其中兰姆移动的影响比上述 _____ 对玻尔能级的影响小得多。
- 根据原子结构理论和洪德定则可知, 钠原子($Z=11$)、一次电离的钠离子(Na^+)和二次电离的钠离子(Na^{++})基态时的原子态分别为 _____、_____ 和 _____。
- 某原子 K, L, M 壳层的能级分别为 $E_K = -69.7\text{keV}$, $E_L = -10.9\text{keV}$, $E_M = -2.3\text{keV}$, 若用工作电压为 80kV 的 X 射线管产生的辐射照射在该原子上, 则从 K, L, M 壳层击出的电子的最大动能分别为 _____ 和 _____ 和 _____。
- 某二价原子的两个价电子处于 $2s3d$ 组态, 按 jj 耦合法, 可构成的原子态个数为 _____ 个, 其总角动量量子数 J 的值分别为 _____ 和 _____。
- 设钙原子($Z=20$)最外层的两个电子分别被激发到 $4p$ 和 $4d$ 轨道, 由此构成的原子态(LS 耦合)直接向 $4s4p\ ^3P_{2,1,0}$ 态跃迁可产生 _____ 条谱线, 直接向钙的基态跃迁可产生 _____ 条谱线。
- 在量子力学中, 粒子存在不为零的 _____, 即使是处在最低能量值的粒子也不可能是绝对静止的, 这是 _____ 原理必然导致的结果。
- 刚性分子模型不能解释当 J 值增大时, 谱线间隔稍微 _____ 的现象, 这是由于 J 增大时, 转动角速度增大, 由于 _____ 的作用, 使核间距拉长的缘故。
- 设粒子在沿 x 轴运动时, 速率的不确定度为 $\Delta v_x = 1\text{cm/s}$, 则坐标的不确定度分别为: (1) 电子 $\Delta x_1 \geq$ _____, (2) 质量为 10^{-13}kg 的布朗粒子 $\Delta x_2 \geq$ _____, (3) 质量为 10^{-4}kg 的小弹丸 $\Delta x_3 \geq$ _____。
- 氢原子的光谱也可分为主线系、第一辅线系、第二辅线系等, 在单重线系中, 各线系的每一条谱线都是 _____ 重线; 其中主线系的波数公式可写为 $\tilde{\nu} = T(1s1s\ ^1S_0) - T(1snp\ ^1P_1)$, 则第一辅线系的波数公式 $\tilde{\nu} =$ _____ $- T(1snd\ ^1D_2)$, 第二辅线系的波数公式为 $\tilde{\nu} = T(1s2p\ ^1P_1) -$ _____。

三、计算题(共 5 题, 共有 80 分)

1. (16 分) 设在相对论情况下有 $H = (p^2 c^2 + m^2 c^4)^{\frac{1}{2}} - \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r}$, 用不确定关系求类氢离子的基态能量, 此结果对所有 Z 都正确吗?

2. (16 分) 今测得氢原子 $n = 3$ 是由谱项自下至上依次相差 0.1082cm^{-1} 与 0.0361cm^{-1} 的三能级所构成。试问其赖曼系的第二条实际是由波长相差多少的两谱线构成的?

3. (16 分) HCl 分子有一个近红外光谱带, 其相邻的几条谱线的波数是 2925.78 、 2906.25 、 2865.09 、 2843.56 和 2821.49cm^{-1} , H 和 Cl 的原子量分别是 1.008 和 35 。试计算这个谱带的基线波数 $\tilde{\nu}_0$ 和这种分子的转动惯量, 并估计两核之间的距离。已知 $\hbar = 6.58 \times 10^{-22} \text{MeV} \cdot \text{s}$, $u = 1.66 \times 10^{-27} \text{kg}$ 。

4. (18 分) 对于 ^{208}Pb ($Z=82$) 的 π^- 介子原子 ($m_\pi = 273 m_e$, 带有 $-e$ 电荷)。(1) 按玻尔理论计算头两个玻尔轨道半径; (2) 按玻尔理论计算共振线光子的能量; (3) 在以上的计算中把铅核视为点电荷, 实际上核电荷是分布在一个有限大小的体积中的, 设 ^{208}Pb 的核半径是 7.1fm , 考虑到这一因素(2)中的结果将如何变化?(变大, 变小还是不变?)为什么?((1)、(2) 结果只需两位有效数字)。

5. (14 分) 原子两个单重项之间的跃迁形成 $\lambda = 5350$ 埃的谱线, 要用分辨本领 $\lambda/\delta\lambda = 1.0 \times 10^5$ 的光谱仪分开该谱线的各个成分。若在 (1) 平行于磁场方向进行观察; (2) 垂直于磁场方向进行观察; 试问磁感应强度的最小值分别为多大时这才是可能的?

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	$u = 1.66 \times 10^{-27} \text{kg} = 931 \text{MeV}/c^2$

试题名称:

原子物理

一. 选择题(共 10 题, 每题 2 分, 共 20 分)

1. D ----(2 分)

2. B ----(2 分)

3. B ----(2 分)

提示: 根据 $\oint p_{\varphi} d\varphi = mvr2\pi = nh$, 可得周长 $s = 2\pi r = \frac{nh}{mv} = n \frac{h}{p} = n\lambda$

本题 $n=2$, $r = a_0 n^2 = 4a_0$, 所以 $\lambda = \frac{2\pi r}{n} = \pi r = 4\pi a_0$ 。

4. A ----(2 分)

5. C ----(2 分)

6. B ----(2 分)

提示:

$$B = \frac{h\nu}{g\mu_B} = \frac{6.626 \times 10^{-34} \times 2.52 \times 10^{10}}{\frac{6}{5} \times 9.274 \times 10^{-24}} \text{ T} = 1.50 \text{ T}$$

7. D ----(2 分)

8. C ----(2 分)

9. B ----(2 分)

10. D ----(2 分)

二. 填空题(共 10 题, 共有 50 分)

1. 33MeV ----(3 分)
2. 2 (2 分); 3 (2 分); 6 (2 分); 电子自旋-轨道耦合等相对论效应 (2 分)。 ----(8 分)
3. $^2S_{1/2}$; 1S_0 ; $^2P_{3/2}$ 。(每空 2 分) ----(6 分)
4. 10.3keV; 69.1keV; 77.7keV。(每空 1 分) ----(3 分)
5. 4 (2 分); 1、2; (2 分) 2、3 (2 分)。 ----(6 分)
6. 0; 1 (每空 2 分)。 ----(4 分)
7. 零点能; 不确定性。(每空 2 分) ----(4 分)
8. 缩小; 离心力。(每空 2 分) ----(4 分)
9. $5.8 \times 10^{-3} \text{m}$; $5.3 \times 10^{-20} \text{m}$; $5.3 \times 10^{-29} \text{m}$ (每空 2 分)。

[提示]: (1) 对于电子, $m_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{kg}$,

$$\Delta x_1 \geq \frac{h}{4\pi m_e \Delta v} = 5.8 \times 10^{-3} \text{m}.$$

(2) 对于 $m_2 = 10^{-13} \text{kg}$ 的布朗粒子,

$$\Delta x_2 \geq \frac{h}{4\pi m_2 \Delta v} = 5.3 \times 10^{-20} \text{m}.$$

(3) 对于 $m_3 = 10^{-4} \text{kg}$ 的小弹丸,

$$\Delta x_3 \geq \frac{h}{4\pi m_3 \Delta v} = 5.3 \times 10^{-29} \text{m}.$$

----(6 分)

10. 单; $T(1s2p \ ^1P_1)$; $T(1sns \ ^1S_0 (n > 2))$ (每空 2 分)。 ----(6 分)

三. 计算题(共 5 题, 共有 80 分)

1. [解]:

由不确定关系可得

$$p \approx \Delta p \approx \frac{\hbar}{\Delta r} \approx \frac{\hbar}{r}, \quad (2 \text{ 分})$$

$$H(r, p) = (p^2 c^2 + m^2 c^4)^{\frac{1}{2}} - \frac{Z e_s^2 p}{\hbar} = E(p), \quad (2 \text{ 分})$$

其中 $e_s = \frac{e}{\sqrt{4\pi\epsilon_0}}$.

对基态有 $\frac{dE}{dp} = \frac{pc^2}{(p^2 c^2 + m^2 c^4)^{\frac{1}{2}}} - \frac{Z e_s^2}{\hbar} = 0, \quad (3 \text{ 分})$

所以 $p^2 c^2 = [Z(\frac{e_s^2}{\hbar c})]^2 (p^2 c^2 + m^2 c^4) = [Z\alpha]^2 (p^2 c^2 + m^2 c^4) \quad (2 \text{ 分})$

其中精细结构常数 $\alpha = \frac{e_s^2}{\hbar c} = \frac{e^2}{2\epsilon_0 \hbar c} = \frac{\mu_0 c e^2}{2h}$. 由上式可解得

$$pc = \frac{\alpha Z m c^2}{(1 - \alpha^2 Z^2)^{\frac{1}{2}}} = p_0 c, \quad (2 \text{ 分})$$

基态能量为 $E_0 = E(p_0) = mc^2 \sqrt{1 - \alpha^2 Z^2}. \quad (2 \text{ 分})$

显然, 以上结果仅对 $\alpha Z < 1 (Z < 1/\alpha)$ 正确, (3 分)

而且, 对 $\alpha Z \ll 1$ 有

$$E(p_0) \approx mc^2 (1 - \frac{\alpha^2 Z^2}{2}) = mc^2 - \frac{Z e_s^2}{2a_0},$$

与非相对论结果相差 mc^2 .

----(16 分)

2. [解]:

(1) 赖曼系第二条由下列跃迁形成: $3^2P_{3/2} \rightarrow 1^2S_{1/2}$ 与 $3^2P_{1/2} \rightarrow 1^2S_{1/2}$. (3 分)

$$n = 3 \text{ 能级顺序: } E_3(3^2D_{5/2}) > E_2(3^2D_{3/2}, 3^2P_{3/2}) > E_1(3^2S_{1/2}, 3^2P_{1/2})$$

$$\therefore \Delta\tilde{\nu} = 0.1082 \text{ cm}^{-1} \quad (3 \text{ 分})$$

(2) $\because \tilde{\nu} = 1/\lambda \cong R(1/1^2 - 1/3^2) = \frac{8}{9}R$ (不考虑精细结构) (5 分)

(3) $\Delta\tilde{\nu} = -\frac{\Delta\lambda}{\lambda^2} = -\tilde{\nu}^2 \Delta\lambda \quad (2 \text{ 分})$

$$\therefore |\Delta\lambda| = \frac{\Delta\tilde{\nu}}{\tilde{\nu}^2} = \frac{\Delta\tilde{\nu}}{\left(\frac{8}{9}R\right)^2} = \frac{0.1082 \times 10^2 \times 10^{10} \text{ }^\circ}{\left(\frac{8}{9} \times 1.097 \times 10^7\right)^2} \text{ }^\circ \text{A} = 1.14 \times 10^{-3} \text{ }^\circ \text{A} \quad (3 \text{ 分})$$

(由于 $\Delta\lambda$ 可直接表示数值, 不表示变化, 故直接写 $\Delta\lambda = \Delta\tilde{\nu}/\tilde{\nu}^2$ 也算正确)

----(16 分)

3. [解]

$\tilde{\nu}_1$ 、 $\tilde{\nu}_2$ 、 $\tilde{\nu}_3$ 、 $\tilde{\nu}_4$ 、 $\tilde{\nu}_5$ 之间间隔分别为 19.53、41.16、21.53、22.07 cm^{-1} 。 (2 分)

对振转谱线而言, P 支谱线之间, 或 R 支谱线之间, 相邻谱线的波数差为 $2B$, 但 P 支与 R 支之间相差 $4B$ 。

\therefore 上述谱线中 $\tilde{\nu}_1$ 、 $\tilde{\nu}_2$ 为 R 支, $\tilde{\nu}_3$ 、 $\tilde{\nu}_4$ 、 $\tilde{\nu}_5$ 为 P 支。

$$\tilde{\nu}_0 = (\tilde{\nu}_2 + \tilde{\nu}_3)/2 = 2885.67 \text{ cm}^{-1} \quad (6 \text{ 分})$$

$$I = \hbar / (2\pi c \Delta\tilde{\nu})$$

$$= (6.58 \times 10^{-22} \text{ MeV} \cdot \text{s}) / (2\pi \times 3 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1} \times 19.53 \text{ cm}^{-1})$$

$$= 2.87 \times 10^{-47} \text{ m}^2 \cdot \text{kg} \quad (5 \text{ 分})$$

$$r = \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2}} I = 1.29 \times 10^{-10} \text{ m} \quad (3 \text{ 分})$$

若用平均值:

$$\Delta\tilde{\nu} = 2B = (2925.78 - 2821.49)/5 = 20.86 \text{ cm}^{-1}$$

$$I = 2.68 \times 10^{-47} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

----(16 分)

4. [解]:

$$(1) r_n = a_0 \frac{m_e n^2}{\mu Z} \quad (4 \text{ 分})$$

$$= 5.29 \times 10^{-2} \times \frac{n^2}{273 \times 82} \text{ nm} = 2.36 \times 10^{-6} n^2 \text{ nm}$$

$$r_1 = 2.4 \times 10^{-6} \text{ nm}, \quad r_2 = 2.36 \times 10^{-6} \times 4 = 9.5 \times 10^{-6} \text{ nm} \quad (4 \text{ 分})$$

$$(2) h\nu = E_2 - E_1 = 13.6 \times 273 \times 82^2 \times 3/4 = 19 \text{ MeV} \quad (6 \text{ 分})$$

(3) 因 r_1 处于核内, 故对于 $n=1$ 状态, π 介子受到有限大小核的束缚要比受到点核的束缚来得小, 所以 E_1 将比点核时略高, 而 r_2 在核外, E_2 可视作不变, 故 $E_2 - E_1$ 减小, 即共振线光子能量将要变小。

(4 分)

----(18 分)

5.[解]:

两个单重项之间的跃迁 $S_1=S_2=0$

(1 分)

 \therefore 在磁场中发生正常塞曼效应。

(2 分)

(1) 平行于磁场方向观察

$$\Delta\left(\frac{1}{\lambda}\right) = (-1, 1)L$$

$$\frac{\Delta\lambda_1}{\lambda^2} = 2L = \frac{2\mu_B B}{hc} \quad \Delta\lambda_1 \text{ 表示相邻谱线间距}$$

(3 分)

$$\Delta\lambda_1 = \frac{2\mu_B B_1}{hc} \lambda^2 = \delta\lambda$$

(2 分)

$$\therefore \frac{\lambda}{\delta\lambda} = 1.0 \times 10^5 \quad \therefore \delta\lambda = \frac{\lambda}{1.0 \times 10^5}$$

$$\therefore B_1 = \frac{hc}{2\mu_B \lambda \times 1.0 \times 10^5} = \frac{1240 \times 10}{2 \times 5.788 \times 10^{-5} \times 5350 \times 10^5 \times 1.0} \text{ T}$$

$$\approx 0.200 \text{ T}$$

(2 分)

(2) 垂直于磁场方向观察 $\Delta\left(\frac{1}{\lambda}\right) = (-1, 0, 1)L$

$$\frac{\Delta\lambda_2}{\lambda^2} = L = \frac{\mu_B B}{hc} \quad \Delta\lambda_2 = \frac{\mu_B B_2}{hc} \lambda^2 = \delta\lambda \quad \Delta\lambda_2 \text{ 表示相邻谱线间距。}$$

(2 分)

$$\therefore B_2 = 2B_1 = 2 \times 0.200 \text{ T} = 0.400 \text{ T}$$

(2 分)

----(14 分)