装订线 答题时不要超过此线

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：<u>原子物理学</u> 得分：_____

学生所在系：_____ 姓名：_____ 学号：_____

物理学常数：

电子电荷 $e = 1.60\times10^{-19}$C， 电子质量 $m_e = 9.11\times10^{-31}$kg = 0.511MeV/c^2

Planck常数 $h = 6.63\times10^{-34}$J×s， 真空光速 $c = 3.00\times10^{8}$m×s^{-1}

真空磁导率 $\mu_0=4\pi\times10^{-7}$N×A^{-2}， 真空介电常数 $\varepsilon_0 = 8.85\times10^{-12}$C^2×J^{-1}×m^{-1}

Rydberg常数 R_∞=10973731m^{-1}， 原子质量单位 u=1.66$\times10^{-27}$kg = 931MeV/c^2

玻尔半径$a_1 = 0.529\times10^{-10}$m， 阿伏伽德罗常数 $N_A = 6.022\times10^{23}$mol^{-1}

玻尔兹曼常数 k=8.62$\times10^{-5}$eV×K^{-1}

精细结构常数 $\alpha = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0}\frac{1}{?} = \frac{1}{137.036}$，Bohr磁子 $\mu_B = \frac{e?}{2m_e}$=0.927$\times10^{-23}$J×T^{-1}

403.648

组合常数：

$\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0}$=1.44fm×MeV，$m_ec^2$=0.511MeV，$hc$ = 1.240nm×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

1． 在一次使用金箔做α粒子散射实验的过程中，探测器分别在散射角120°和90°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劈裂的原因是

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

$\frac{N\pi t a^2}{4\sin^2\frac{\theta}{2}}$ $dn = \int \frac{nNt}{16} a^2 \frac{d\Omega}{\sin^4\frac{\theta}{2}}$

$E=\frac{hc}{\lambda}$

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**

D

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

B

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

C

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

C

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

C

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

B

9．基态氢原子在波导腔中，当微波发生器频率调到1.40×10^{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

B

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**

D

$RA(\frac{1}{16}-\frac{1}{25})$　　$p=n\hbar$

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_2ħ_.

2．氢原子亚稳态$2^2S_{1/2}$的寿命为10^{-1}s，激发态$2^2P_{1/2}$的寿命为10^{-9}s，这两个能级的自然宽度相差__10^8__倍.

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.

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6556.833cm^{-1}、6598.764 cm^{-1}、6661.004cm^{-1}、6742.755 cm^{-1}、6842.965.0 cm^{-1}，该5重态为$^5F_{12345}$，其中能量最低能级的总角动量量子数J=__1__.

5．钕原子的电子组态为$[Xe]4f^4 6s^2$，基态能级为__$^5I_4$__，铒原子的电子组态为$[Xe]4f^{12}6s^2$，基态能级为__$^3H_6$__．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 $(\frac{1}{2},\frac{3}{2})_{1,2}$ ， $(\frac{1}{2},\frac{5}{2})_{2,3}$ __．

7．从X射线管发出的Kα线的波长为0.071nm，该射线管阳极靶材料的原子序数为__42__．KαX射线是由__2p→1s或$^2S_{1/2}\to{}^2P_{1/2}$__跃迁产生的，实际上包含__2__条波长很接近的谱线．

8．由实验测得$^1H^{35}Cl$分子的转动常数B=10.397cm^{-1}，该分子的约化质量为1.63×10^{-27}kg，则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 $\psi_{211}=\frac{1}{8\sqrt{\pi}}(\frac{1}{a_1})^{\frac{3}{2}}(\frac{r}{a_1})e^{-\frac{r}{2a_1}}\sin\theta\, e^{i\varphi}$ ，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

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

$$=\frac{2\pi}{64\pi}(\frac{1}{a_1})^3(\frac{r}{a_1})^2e^{-\frac{r}{a_1}}r^2\int_0^{\pi}\frac{1-\cos2\theta}{2}d\theta=\frac{\pi}{64}(\frac{1}{a_1})^3(\frac{r}{a_1})^2r^2e^{-\frac{r}{a_1}}=\frac{\pi}{64}(\frac{1}{a_1})^5r^4e^{-\frac{r}{a_1}}$$

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

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

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

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

轨道角动量在z方向的分量 $p_{lz}=+1$□

电子组态	原子态	能级(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	$3^2D_{5/2}$	**29172.889**
4p	$4^2P_{1/2}$	30266.99
4p	$4^2P_{3/2}$	30272.58

$l=1$

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?

（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** 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30272.58cm^{-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$3^2D_{5/2}\to 3^2P_{3/2}$，以及$3^2P_{3/2}\to 3^2S_{1/2}$

3. **（8分）**Ge原子基态的电子组态为$4s^24p^2$，某一激发态的电子组态为$4s^24p5s$，电子按LS方式耦合成原子态.

（1）$4s^24p^2$能形成哪些能级，基态能级是什么?

（2）$4s^24p5s$能形成哪些能级?

（3）从组态$4s^24p5s$向组态$4s^24p^2$的电偶极辐射跃迁有哪些？能够发出多少条光谱线?

4. **（8分）**钇原子（Y）的波长为407.7359nm的谱线是$^2F_{5/2}\to{}^2D_{3/2}$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；

（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；

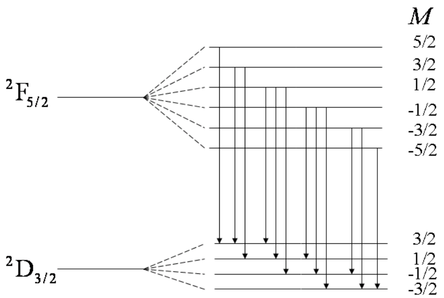
（4）在垂直于磁场方向能观察到几条谱线？在平行于磁场方向能观察到几条谱线?

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

$^2F_{5/2}$能级 $g_2 = 1 + \dfrac{5/2\times(5/2+1) - 3\times4 + 1/2\times(1/2+1)}{2\times5/2\times(5/2+1)^2} = \dfrac{6}{7}$

$^2D_{3/2}$能级 $g_1 = 1 + \dfrac{3/2\times(3/2+1) - 2\times3 + 1/2\times(1/2+1)}{2\times3/2\times(3/2+1)^2} = \dfrac{4}{5}$

（2）$^2F_{5/2}$能级分裂为6个能级，$^2D_{3/2}$能级分裂为4个能级



（3）$\Delta\tilde{\nu} = (M_2g_2 - M_1g_1)\dfrac{\mu_B B}{hc} = (M_2g_2 - M_1g_1)L$

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

		M	$5/2$	$3/2$	$1/2$	$-1/2$	$-3/2$	$-5/2$
$g_2 = 6/7$		M_2g_2	$15/7$	$9/7$	$3/7$	$-3/7$	$-9/7$	$-15/7$
$g_2 = 4/5$		M_1g_1		$6/5$	$2/5$	$-2/5$	$-6/5$	

	$\Delta M = +1$	σ^+	$33/35$	$31/35$	$29/35$	$27/35$
$M_2g_2 - M_1g_1$	$\Delta M = 0$	π	$3/35$	$1/35$	$-1/35$	$-3/35$
	$\Delta M = -1$	σ^-	$-27/35$	$-29/35$	$-31/35$	$-33/35$

共分裂为12条，移动的波数分别为

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

$= 0.440\text{cm}^{-1}$，0.414cm^{-1}，0.387cm^{-1}，0.360cm^{-1}，0.040cm^{-1}，0.013cm^{-1}，-0.013cm^{-1}，-0.040cm^{-1}，-0.360cm^{-1}，-0.387cm^{-1}，-0.414cm^{-1}，-0.440cm^{-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）** $^{12}C^{18}O$分子的键长R_0=0.1128nm.

（1）该分子纯转动谱线的间隔是多少?

（2）若测量该分子的拉曼散射，计算小拉曼位移光谱线的间隔以及第一条反斯

托克斯线与第一条斯托克斯线之间的波数差.

解：跃迁的选择定则为$\Delta J=\pm1$，纯转动谱线波数$\nu ? \frac{h}{8\pi^2 Ic}2J_2 = 2BJ_2$，

相邻谱线间隔$\Delta\nu ? \frac{h}{8\pi^2 Ic}[2J_2 - 2(J_2 - 1)] = \frac{2h}{8\pi^2 Ic} = 2B$，其中$B = \frac{h}{8\pi^2 Ic}$

转动惯量$I = \mu R_0^2 = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}R_0^2 = \frac{12\times18}{12+18}\times1.66\times10^{-27}\times(0.1128\times10^{-9})^2\mathrm{kg\cdot m^2}$

$=1.521\times10^{-46}\mathrm{kg\cdot m^2}$

转动常数$B = \frac{h}{8\pi^2 Ic} = 184.0\mathrm{m^{-1}} = 1.840\mathrm{cm^{-1}}$

或$I = \mu R_0^2 = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}R_0^2 = \frac{12\times18}{12+18}\mathrm{u}\times(0.1128\mathrm{nm})^2 = 0.0916\mathrm{lu\cdot nm^2}$

$B = \frac{hc}{8\pi^2 Ic^2} = \frac{1.24\mathrm{nm\cdot keV}}{8\pi^2\times0.0916\times931\times10^3\mathrm{keV\cdot nm^2}} = 1.842\times10^{-7}\mathrm{nm^{-1}} = 1.842\mathrm{cm^{-1}}$

于是$\Delta\nu ? 2B = 3.680\mathrm{cm^{-1}}$或$\Delta\nu ? 2B = 3.683\mathrm{cm^{-1}}$

（2）小拉曼散射位移是在转动能级上产生的，选择定则为$\Delta J_R = 0, \pm2$。
于是小拉曼位移光谱线的间隔为

$\nu ?_1 - \nu_J ?4B = 7.360\mathrm{cm^{-1}}$或$\nu ?_1 - \nu_J ?4B = 7.365\mathrm{cm^{-1}}$

第1条斯托克斯线和第1条反斯托克斯线之间

$\nu ?_0 - \nu_{J'} ? 12B = 22.08\mathrm{cm^{-1}}$或$\nu ?_0 - \nu_{J'} ? 12B = 22.10\mathrm{cm^{-1}}$