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=1.66×10^{-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 $\alpha = \dfrac{e^2}{4\pi\varepsilon_0}\dfrac{1}{\hbar c} = \dfrac{1}{137.036}$，Bohr 磁子 $\mu_B = \dfrac{e\hbar}{2m_e}$=$0.927\times10^{-23}$J·T^{-1}

组合常数：

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

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辟裂的原因是

   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**

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

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 $2\hbar$.

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 $3d^34s$ 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 $p_l=\sqrt{1(1+1)}\hbar=\sqrt{2}\hbar$

轨道角动量在 z 方向的分量 $p_{lz}=+1\hbar$

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？

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

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 $3^2P_{3/2} \rightarrow 3^2S_{1/2}$

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 $^2F_{5/2} \rightarrow {}^2D_{3/2}$ 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；

（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；

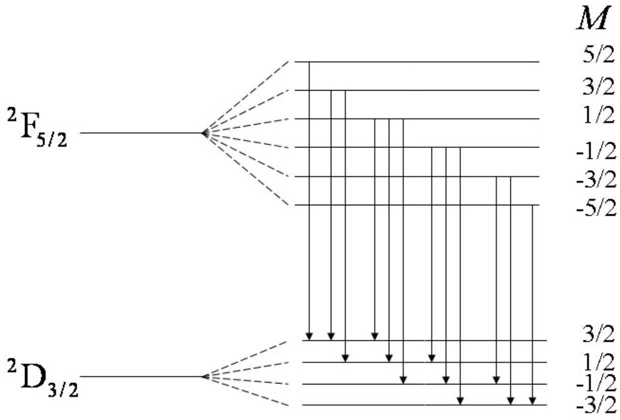
（4）在垂直于磁场方向能观察到几条谱线？在平行于磁场方向能观察到几条谱线？

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

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

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



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

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

	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		$6/5$	$2/5$	$-2/5$	$-6/5$	

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

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 $\Delta J=\pm 1$，纯转动谱线波数 $\tilde{v}_r=\dfrac{h}{8\pi^2 Ic}2J_2=2BJ_2$，

相邻谱线间隔 $\Delta\tilde{v}_r=\dfrac{h}{8\pi^2 Ic}[2J_2-2(J_2-1)]=\dfrac{2h}{8\pi^2 Ic}=2B$，其中 $B=\dfrac{h}{8\pi^2 Ic}$

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

$=1.521\times 10^{-46}\,\mathrm{kg\cdot m^2}$

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

或 $I=\mu R_0^2=\dfrac{m_1 m_2}{m_1+m_2}R_0^2=\dfrac{12\times 18}{12+18}\mathrm{u}\times(0.1128\mathrm{nm})^2=0.09161\mathrm{u\cdot nm^2}$

$B=\dfrac{hc}{8\pi^2 Ic^2}=\dfrac{1.24\mathrm{nm\cdot keV}}{8\pi^2\times 0.0916\times 931\times 10^3\,\mathrm{keV\cdot nm^2}}=1.842\times 10^{-7}\,\mathrm{nm^{-1}}=1.842\mathrm{cm^{-1}}$

于是 $\Delta\tilde{v}_r=2B=3.680\mathrm{cm^{-1}}$ 或 $\Delta\tilde{v}_r=2B=3.683\mathrm{cm^{-1}}$

（2）小拉曼散射位移是在转动能级上产生的，选择定则为 $\Delta J_R=0,\pm 2$。

于是小拉曼位移光谱线的间隔为

$\tilde{v}_{J+1}-\tilde{v}_J=4B=7.360\mathrm{cm^{-1}}$ 或 $\tilde{v}_{J+1}-\tilde{v}_J=4B=7.365\mathrm{cm^{-1}}$

第 1 条斯托克斯线和第 1 条反斯托克斯线之间

$\tilde{v}_{J=0}-\tilde{v}_{J'=0}=12B=22.08\mathrm{cm^{-1}}$ 或 $\tilde{v}_{J=0}-\tilde{v}_{J'=0}=12B=22.10\mathrm{cm^{-1}}$