

2025 春原子物理 A 期末考试

注意事项:

1. 物理学常数

基本常数:

电子电荷 $e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ Planck 常数 $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$

真空光速 $c = 3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$ 真空磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N}\cdot\text{A}^{-2}$

真空介电常数 $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot \text{J}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 玻尔兹曼常数 $k = 8.62 \times 10^{-5} \text{ eV} \cdot \text{K}^{-1}$

阿伏伽德罗常数 $N_A = 6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

原子相关常数:

电子质量 $m_e = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg} = 0.511 \text{ MeV}/c^2$ 原子质量单位 $u = 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg} = 931 \text{ MeV}/c^2$

玻尔半径 $a_1 = 0.529 \times 10^{-10} \text{ m}$ Rydberg 常数 $R_\infty = 1.0973731 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$

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

精细结构常数 $\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} = \frac{1}{137.036}$

组合常数:

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

2. 本试卷为回忆版, 并对解答题的排版进行了一定的调整.

一、选择题 (每小题 3 分, 共 30 分)

- 正电子为中心粒子与电子组成电子偶素, 则其巴尔末系最长的波长为
A. 656.5 nm B. 1313.0 nm C. 328.3 nm D. 164.1 nm
- 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 60° 处, 相同时间内测量到的粒子数之比为
A. 1:1 B. 1:2 C. 1:4 D. 1:9
- 在计算电子的德布罗意波长时, 使用非相对论性动量, 则当电子的动能为多大时, 计算的误差为 10%
A. 0.105 MeV B. 0.215 MeV C. 0.420 MeV D. 0.053 MeV

4. 某粒子在一维无限深势阱中运动, 势阱的宽度为 L . 先将势阱宽度改为 $\frac{L}{2}$, 则
- A. 粒子的能量变为一半 B. 粒子的能量变为四倍, 概率波更加密集
- C. 粒子的波函数不变, 只有能量变化 D. 粒子的能级不变, 简并度上升
5. 在研究铯原子 (Sr^+ , $Z=42$) 在磁场中的跃迁时, 最外层电子: 上一能级为 $J_1 = \frac{1}{2}$, 下一能级为 $J_2 = \frac{5}{2}$. 则在平行磁场方向可以探测到几条谱线?
- A. 4 条 B. 2 条 C. 6 条 D. 10 条
6. 考虑精细结构, 碱金属原子的第一辅线系 (漫线系) 分裂为几条线
- A. 1 条 B. 2 条 C. 3 条 D. 4 条
7. 若把氢原子的两个电子换成两个自旋 $\frac{3}{2}$ 的粒子, 则 $n=1$ 能级的简并度为
- A. 3 B. 9 C. 6 D. 10
8. 对于非等效电子 $2p3d$, 考虑 jj 耦合, 忽略剩余静电势, 则能级的能量从低到高排列为
- A. $\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right) < \left(\frac{1}{2}, \frac{3}{2}\right) < \left(\frac{3}{2}, \frac{3}{2}\right) < \left(\frac{1}{2}, \frac{5}{2}\right)$ B. $\left(\frac{1}{2}, \frac{3}{2}\right) < \left(\frac{1}{2}, \frac{5}{2}\right) < \left(\frac{3}{2}, \frac{3}{2}\right) < \left(\frac{3}{2}, \frac{5}{2}\right)$
- C. $\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right) < \left(\frac{1}{2}, \frac{3}{2}\right) < \left(\frac{1}{2}, \frac{5}{2}\right) < \left(\frac{3}{2}, \frac{3}{2}\right)$ D. $\left(\frac{1}{2}, \frac{3}{2}\right) < \left(\frac{3}{2}, \frac{3}{2}\right) < \left(\frac{1}{2}, \frac{5}{2}\right) < \left(\frac{3}{2}, \frac{5}{2}\right)$
9. 关于不同原子的 X 射线, 下列说法正确的是
- A. 与阳极靶材料无关, 有相仿结构, 形成谱线系
- B. 与阳极靶材料无关, 无相仿结构, 形成谱线系
- C. 与阳极靶材料有关, 无相仿结构, 形成谱线系
- D. 与阳极靶材料有关, 有相仿结构, 形成谱线系
10. 对于 HCl 原子 (H 原子序数为 1, Cl 原子序数为 35), 测得其一组稳定间隔的吸收谱如下 (单位: cm^{-1}): 82.03, 103.73, 124.30, 145.03, 165.51, 185.86. 则 HCl 的两原子核间距为
- A. 0.258 nm B. 0.171 nm C. 0.516 nm D. 0.129 nm

二、填空题 (每小题 3 分, 共 30 分)

11. 分别用粒子束强度 (数密度) 和能量均相同的 α 粒子束和质子束轰击镍靶 (Ni , $Z=28$) 和钼靶 (Mo , $Z=42$) (α 粒子轰击镍, 质子轰击钼), 在相对于靶的同一方位的探测器在单位时间接收到的粒子数相同, 忽略金属原子的排列情况与金属密度区别, 则镍靶和钼靶的厚度比为 $\frac{\Delta}{\Delta}$.
12. 若基态氢原子中心的磁场强度为 13 T, 则 He^+ 中 $n=3$ 能级的电子在中心产生的磁场为 $\frac{\Delta}{\Delta}$.
13. 忽略原子核的运动, 氢原子莱曼系第一条谱线的波长, 与三次电离 Be ($Z=4$) 的 $\frac{\Delta}{\Delta}$ 跃迁的谱线波长相同.

14. 薛定谔将量子系统随时间的演化用一个方程高度概括为 _____▲_____.
15. 不考虑电子自旋与相对论效应, 对于氢原子 $n = 3$ 上的电子, 总的简并度为 _____▲_____; 考虑精细结构后分裂为 _____▲_____ 个能级, 各自的简并度分别为 _____▲_____.
16. 基态氢原子 (不考虑超精细结构) 在强度为 0.5 T 的磁场中, 能级间隔为 _____▲_____.
17. 简述多电子原子中的中心力近似: _____▲_____.
18. 对于 d^5 的电子, 考虑 L-S 耦合, 其基态为 _____▲_____, 总磁矩为 (以玻尔磁矩 μ_B 为单位) _____▲_____, 在弱磁场中分裂为 _____▲_____ 个能级.
19. 钼元素 (Mo , $Z = 42$) K_α 线波长为 λ_{Mo} , 另有一 Y 元素 K_α 线波长为 $\lambda_Y = 1.54\lambda_{\text{Mo}}$, 则 Y 元素的原子序数为 _____▲_____.
20. 拉曼散射的重要性体现在其可以研究 _____▲_____ 分子的 _____▲_____ 能级和 _____▲_____ 能级.

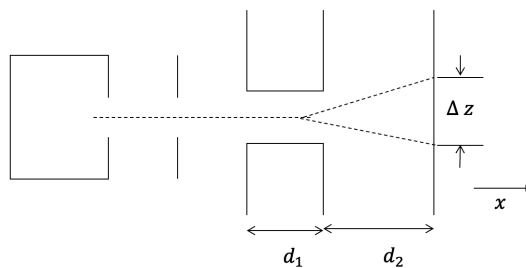
三、解答题 (共 40 分)

21. 考虑一个由铅核 ^{208}Pb ($Z = 82$) 与一个 π^- 介子 (其质量为 $m_\pi = 273 m_e$) 构成的类似氢原子的束缚体系. 用质子轰击该体系, 仅考虑玻尔模型:
 - (1) 想要发生非弹性碰撞, 试问质子所需的最小动能为多少?
 - (2) 若质子恰好具有上述最小动能, 则发生非弹性碰撞后 π^- 介子的速度和轨道大小变化分别为多少?

22. 对于二次电离氦离子 He^{++} 与一个 μ^- 缪子结合所形成的类似氢原子的体系 ($m_{\text{He}} = 7294 m_e$, $m_\mu = 207 m_e$), 回答以下问题:
 - (1) 该体系的 $n = 2$ 能级中, $2p$ 能级由于自然劈裂效应将分裂为多少个能级? 请分别写出每个能级对应的 (L, S, J) 值, 并计算自然劈裂所导致的能级间隔;
 - (2) 若对该体系施加一弱匀强磁场, 试求当磁场强度为多少时, $2p$ 态中自然劈裂能级中最高子能级的分裂间隔恰为自然劈裂能级间隔的 $\frac{1}{10000}$.

23. 在斯特恩-盖拉赫 (Stern-Gerlach) 实验中, 氢原子被激发至 $3d$ 态后, 以速度 $v = 1000 \text{ m/s}$ 沿 x 方向通过一个高度不均匀的磁场区域. 磁场沿 z 方向的梯度为 $\frac{\partial B}{\partial z} = 10 \text{ T/m}$, 装置如图所示, 其中 $d_1 = 0.1 \text{ m}$ 与 $d_2 = 0.4 \text{ m}$ (如图所示). 忽略重力、碰撞与电场影响. 若该氢原子处于简并度最高的能级, 试问:

- (1) 通过装置后在显示屏上将分裂出几条条纹?
- (2) 相邻条纹之间的垂直间距为多少?



24. 在温度 $T = 400 \text{ K}$ 下, 研究氯化氢 (HCl) 分子的拉曼散射特性, 已知以下实验信息 (不考虑跃迁速率, 忽略非谐性和离心畸变):

(1) HCl 分子的一个大拉曼位移中, 观测到反斯托克斯线与斯托克斯线的强度比为 $1 : 3000$. 试计算 HCl 分子中原子间相互作用力常数;

(2) 在同样温度下, 测得 HCl 分子的远红外吸收谱中各转动跃迁强度之比为 (波长从大到小) $1 : 2.78 : 3.98 : 4.43 : 4.20 \dots$, 其拉曼光谱中 S 支的前四条斯托克斯线 (即 $S(0)$ 到 $S(3)$) 的小拉曼位移.