

一、原子钟是现代时间频率测量的核心设备，它利用原子内部电子在不同能级之间跃迁时吸收或释放的特定频率电磁波作为计时基准。由于原子能级由量子力学规律决定，其跃迁频率具有极高的稳定性和复现性，远超传统机械钟或石英钟。原子钟的精度直接关系到全球定位系统（GPS）、通信网络同步、基础科学研究等诸多领域。因此，选择合适的原子及其跃迁作为时间基准至关重要。

已知数据：

1. 氢原子（H）的基态超精细跃迁频率约为 1.42 GHz。
2. 铯原子（Cs）的基态超精细跃迁频率约为 9.19 GHz。
3. 铷原子（Rb）的基态超精细跃迁频率约为 6.8 GHz。

（1）钇原子基态为 2D ，用这种原子进行施特恩-盖拉赫实验室，原子束分裂为 4 束，求原子基态总磁矩及其在外磁场方向上的投影（结果用波尔磁子表示）

（2）当处于基态的氢原子被 12.3eV 光子激发后，被激发的氢原子可能产生几条谱线，求出相应谱线的频率（用波尔理论，不考虑电子自旋）

（3）请比较氢、铯、铷、钇这四种原子给出的跃迁频率，并简要说明频率高低可能对原子钟的计时精度有何影响？（5 分）

（4）除了频率高低，原子能级的稳定性也是决定原子钟精度的关键因素。请分析哪些因素会影响原子能级跃迁的稳定性？并解释为什么超精细跃迁通常比普通电子能级跃迁更适合用于原子钟？

（5）结合以上分析，详细说明为什么铯原子（Cs）比氢原子（H）、铷原子（Rb）更适合作为原子钟的工作物质？

答案：

（1）

三、（15 分）（1）基态 2D 的钇原子束在外磁场中分裂为 $2j+1=4$ 束，由此得 $j=\frac{3}{2}$ ，由

2D 得 $L=2, S=\frac{1}{2}$ ，求得 $g=\frac{3}{5}$ 。（5 分）

（2） $\mu_J = g \frac{e}{2m_e} P_J = \frac{3\sqrt{15}}{10} \mu_B$ 。（5 分）

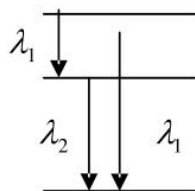
（3） $\mu_{Jz} = g \frac{e}{2m_e} P_{Jz} = g M_J \frac{e\hbar}{2m_e} = \left(\frac{-9}{10}, \frac{-3}{10}, \frac{3}{10}, \frac{9}{10} \right) \mu_B$ 。（5 分）

(2)

二、(20 分) 基态的氢原子被 12.3eV 光子激发后，跃迁到 $n = 3$ 的能级。(5 分)

被激发的氢原子可能产生 3 条谱线，相应谱线的频率分别是

$\lambda_1 = 2.918 \times 10^{15} \text{ Hz}$, $\lambda_2 = 2.46 \times 10^{15} \text{ Hz}$, $\lambda_3 = 4.57 \times 10^{15} \text{ Hz}$ 。(15 分)



(3) 比较跃迁频率：氢 (1.42 GHz) < 铷 (6.8 GHz) < 铯 (9.19 GHz)，频率越高，单位时间内发生的跃迁次数越多，计时分辨率越高，理论上精度越高。但高频率也意味着更难实现精确的频率控制和检测。

(4)

影响能级跃迁稳定性的因素包括：

- 外部电磁场（电场、磁场）的干扰。
- 温度变化导致的多普勒频移。
- 原子之间的碰撞频移。
- 自然线宽（由能级寿命决定）。

超精细跃迁比普通电子能级跃迁更适合原子钟的原因：

- 超精细能级对电场不敏感（电偶极矩小），对磁场敏感度可通过磁屏蔽降低。
- 超精细跃迁的自然线宽极窄（寿命长），稳定性高。
- 超精细能级位于基态，不易受激发态能级寿命限制。

(5)

铯原子钟的优势：

- 频率适中 (9.19 GHz)：高于氢 (1.42 GHz)，便于高分辨率计时；低于铷 (38.4 THz)，易于实现技术控制。
- 稳定性高：基态超精细跃迁对外场不敏感，自然线宽窄，多普勒效应和碰撞频移可抑制。
- 技术成熟：铯原子钟发展早，硬件（微波腔、磁选态等）成熟可靠。
- 能级结构简单：基态超精细结构只有 $F=3$ 和 $F=4$ 两个能级，易于操控。
- 国际标准：铯跃迁频率被定义为秒的标准，具有权威性和广泛认可。