1. 钠原子（Na, 原子序数Z=11）最著名的光谱特征是其在可见光区域的黄光双线（D线），它源于价电子从 **3p** 能级到 **3s** 能级的跃迁。正是由于电子的自旋与轨道运动发生相互作用（自旋-轨道耦合），导致 **3p** 能级分裂为两个靠得很近的子能级，从而产生了这两条谱线。这是原子物理学中验证电子自旋存在及其效应的最经典案例之一。（实验测得的钠原子 **3p** 能级分裂能量：ΔE\_Na(3p) ≈ 2.1 meV (2.1 × 10⁻³ eV)。理论计算的氢原子 **2p** 能级分裂能量：ΔE\_H(2p) ≈ 4.5 × 10⁻⁵ eV）
2. 在自旋-轨道耦合理论被完善之前，施特恩-盖拉赫实验首次为电子自旋的存在提供了无可辩驳的证据。请简述该实验的基本设置和观测到的现象，并阐明它得出的两个最核心的物理结论。
3. 电子自旋可否看作为旋转着的牛顿球？（提示：假设电子是一个质量为 m\_e、半径为 r\_e 的均匀带电牛顿球。如果它的自旋角动量大小为 S = ħ/2，请计算其赤道处的线速度 v 会是多少。）根据你的计算结果，论述怎样理解电子自旋。
4. 估算出钠原子价电子在 **3p** 轨道上感受到的内部磁场 B\_内 的强度大约是多少特斯拉（T） （1 eV ≈ 1.6 × 10⁻¹⁹ J）
5. 碱金属原子的能级分裂公式为 ΔE ∝ Z\*⁴ / n³l(l+1)。请利用背景信息中给出的钠原子 **3p** 能级和氢原子 **2p** 能级的分裂能量数据，估算出钠原子 **3p** 电子感受到的有效核电荷 Z\* 大约是多少？这个结果如何体现了原子实对价电子的屏蔽效应？
6. 现在，考虑将上述发光的钠原子置于一个弱外部磁场中。由于塞曼效应，钠黄光双线会进一步分裂。请分别说明，原本的 D₁ 线 (²P₁/₂ → ²S₁/₂) 和 D₂ 线 (²P₃/₂ → ²S₁/₂) 各自会分裂成几条谱线？请写出你的分析过程，并明确指出所依据的选择定则。
7. 多电子原子的能级结构和光谱有着不同于单电子体系的特点，对于多体系统的研究有着重要的意义。泡利不相容原理、洪特定则在原子物理学中起着至关重要的作用。
8. 洪特定则是用于确定 L-S 耦合近似下，给定电子组态的能量最低的原子态的一套经验定则。请分别阐述洪特定则的三条主要内容。
9. 实验发现，氦原子光谱由两套几乎不发生相互跃迁的谱线系统组成，分别对应其单重态和三重态能级。简要解释为什么其能级会因为电子总自旋的不同而分裂成这两套系统。哪一套能级（单重态 vs. 三重态）的能量整体上更低？请简要解释原因。
10. 考虑一个处于激发态的硅原子（Si, Z=14），其价电子组态为 3p4p。依据 L-S 耦合规则，请推导出该电子组态可能形成的所有光谱项（写出 ^(2S+1)L 形式即可）。
11. 对于你在上一问中得到的 3p4p 组态的所有光谱项，请根据洪特定则，找出其中能量最低的光谱项。并进一步考虑自旋-轨道耦合效应，写出这个最低光谱项所对应的能级（写出 ^(2S+1)L\_J 形式）。
12. 依据 L-S 耦合规则和泡利不相容原理，推导 (np)² 电子组态（两个等价的p电子）可以形成哪些原子态？（请写出最终的光谱项 ^(2S+1)L 即可，无需推导过程）。
13. 请写出以下原子的基态电子排布式，并依据洪特定则确定它们的基态光谱项符号 ^(2S+1)L\_J：  
    (a) 氮（N, Z=7）  
    (b) 氯（Cl, Z=17）

参考答案：

1.（1）

**基本设置：**

**原子束源：** 将银原子加热蒸发，形成一束中性原子流。

**准直器：** 通过小孔使原子束变得细直。

**非均匀磁场：** 让原子束穿过一个磁场强度有梯度的特殊磁场（例如，一个磁极是刀刃状）。这是实验的关键，因为只有非均匀磁场才能对磁偶极子产生净推力。

**探测屏：** 在磁场后放置一个收集屏，观察银原子的落点分布。

**观测现象：**  
实验最终在探测屏上观测到的是**两条清晰分离**的谱带，而不是经典物理所预测的一条连续、弥散的谱带。

**核心结论：**

**空间量子化的直接证明：**原子束的分裂现象表明，原子磁偶极矩在空间中的取向不是任意和连续的，而是不连续的、量子化的。

**电子自旋的存在及 s=1/2 的证据：**实验结果是**两条**谱线，这个偶数分裂无法用当时已知的轨道角动量（其分裂数 2l+1 必为奇数）来解释。它直接导出了电子必须具有一种新的、内禀的、只有两个量子态的角动量，即自旋，其量子数 s=1/2，从而导致了 2s+1=2 的分裂。

（2）

角速度 ω 与角动量 S 的关系为 S = Iω，其中 I = (2/5)m\_e r\_e²。

所以 ω = S / I = (ħ/2) / ((2/5)m\_e r\_e²) = 5ħ / (4m\_e r\_e²)。

赤道处的线速度 v = ωr\_e = (5ħ / (4m\_e r\_e²)) \* r\_e = 5ħ / (4m\_e r\_e)。

代入数值：  
v = (5 × 1.05 × 10⁻³⁴ J·s) / (4 × 9.11 × 10⁻³¹ kg × 2.8 × 10⁻¹⁵ m)  
v ≈ 5.25 × 10⁻³⁴ / 1.02 × 10⁻⁴⁴ ≈ 5.15 × 10¹⁰ m/s。

**论述：**  
计算出的电子赤道线速度约为 5.15 × 10¹⁰ m/s，这个速度远远超过了真空中的光速 c ≈ 3.0 × 10⁸ m/s。根据爱因斯坦的狭义相对论，任何有质量的物体的运动速度都不能超过光速。因此，将电子自旋角动量理解为一个经典牛顿球体通过宏观旋转产生的模型，在物理上是完全错误的，它会导致与基本物理原理（相对论）的严重冲突。  
**结论：** 电子自旋并非一种机械运动，而是一种与质量、电荷一样，与生俱来的内禀属性它在数学上遵循角动量的运算法则，但没有经典的物理对应物。

（3）

B\_内 = ΔE / (2μ\_B) = (3.36 × 10⁻²² J) / (2 × 9.27 × 10⁻²⁴ J/T)  
B\_内 ≈ 3.36 × 10⁻²² / 1.854 × 10⁻²³ T ≈ 18.1 T。

（4）

ΔE\_Na(3p) / ΔE\_H(2p) = (Z\*\_Na⁴ / n\_Na³) / (Z\*\_H⁴ / n\_H³)

Z\*\_Na⁴ = (Z\*\_H⁴) \* (ΔE\_Na / ΔE\_H) \* (n\_Na³ / n\_H³)

Z\*\_Na = (157.5)^(1/4) ≈ 3.54

估算得出钠原子 3p 电子的有效核电荷 Z\* 约为 3.5。  
这个结果体现了原子实的不完全屏蔽效应。如果内层电子能完美屏蔽原子核，价电子感受到的有效核电荷应为 Z\* = Z - (Z-1) = 1。然而，Z\* ≈ 3.5 远大于1，这说明 3p 电子的轨道会部分穿透到内层电子云内部，从而在部分路径上感受到一个被屏蔽得较弱的、更强的原子核吸引力，导致其平均感受到的有效核电荷显著增加。

（5）

**依据的选择定则：**  
在弱磁场中，塞曼效应的分裂遵循针对**总角动量**的选择定则：Δj = 0, ±1 和 Δm\_j = 0, ±1 (但 j=0→j=0 和 m\_j=0→m\_j=0 if Δj=0 是禁戒的)。

**D₁ 线 (²P₁/₂ → ²S₁/₂) 的分裂：**

**²P₁/₂ (j=1/2) 分裂：** 分裂成 m\_j = +1/2, -1/2 两个子能级。

**²S₁/₂ (j=1/2) 分裂：** 分裂成 m\_j = +1/2, -1/2 两个子能级。

**允许的跃迁 (Δm\_j = 0, ±1)：**

+1/2 → +1/2 (Δm\_j=0)

-1/2 → -1/2 (Δm\_j=0)

+1/2 → -1/2 (Δm\_j=-1)

-1/2 → +1/2 (Δm\_j=+1)

**结论：** D₁ 线会分裂成 **4** 条谱线。

**D₂ 线 (²P₃/₂ → ²S₁/₂) 的分裂：**

**²P₃/₂ (j=3/2) 分裂：** 分裂成 m\_j = +3/2, +1/2, -1/2, -3/2 四个子能级。

**²S₁/₂ (j=1/2) 分裂：** 分裂成 m\_j = +1/2, -1/2 两个子能级。

**允许的跃迁 (Δm\_j = 0, ±1)：**

从上层到 m\_j=+1/2：+3/2→+1/2 (Δm\_j=-1), +1/2→+1/2 (Δm\_j=0)

从上层到 m\_j=-1/2：+1/2→-1/2 (Δm\_j=-1), -1/2→-1/2 (Δm\_j=0), -3/2→-1/2 (Δm\_j=+1)

±3/2 到 ∓1/2 的 Δm\_j=±2 是禁戒的）

**结论：** D₂ 线会分裂成 **6** 条谱线。

2.（1）对一给定的电子组态，能量最低的原子态必定具有泡利不相容原理所允许的最大S值

在S值相同的状态中，L 值最大的原子态的的能量最低

对于同科电子(*nl*)*v*

*v<= 2l+1* J值最小的能量最低 🡪 正常次序；

*v > 2l+1* J值最大的能量最低 🡪 倒转次序

（2）因为氦原子有两个电子，它们的自旋角动量可以有两种不同的耦合方式：自旋反平行耦合，总自旋 S=0，形成单重态；自旋平行耦合，总自旋 S=1，形成三重态

三重态的能量整体上更低。原因： 根据泡利不相容原理的推广，当电子自旋平行时（三重态），它们在空间上倾向于相互“躲避”，导致它们之间的平均距离增大。由于电子之间是库仑排斥力，平均距离增大使得库仑排斥能减小，因此系统的总能量更低、更稳定.

（3）对于 3p4p 电子组态（两个不等价的p电子），l₁=1, l₂=1, s₁=1/2, s₂=1/2。

1. 总自旋S的确定： S = s₁ + s₂ 到 |s₁ - s₂|。所以 S = 1, 0。
   * S=1 对应 三重态 (³)。
   * S=0 对应 单重态 (¹)。
2. 总轨道角动量L的确定： L = l₁ + l₂ 到 |l₁ - l₂|。所以 L = 2, 1, 0。
   * L=2 对应 D 态。
   * L=1 对应 P 态。
   * L=0 对应 S 态。
3. 组合所有可能的光谱项： 将S和L的所有可能值进行组合，得到的光谱项为：
   * 三重态：³D, ³P, ³S
   * 单重态：¹D, ¹P, ¹S

（4）能量最低的能级是 ³D₁

（5）对于 (np)² 电子组态（两个等价的p电子），由于泡利不相容原理的限制，不是所有L和S的组合都是允许的。通过详细的量子态分析（如表格法），可以得出其允许的光谱项为：  
¹S, ³P, ¹D

（6）（a）电子排布式： 1s²2s²2p³。基态光谱项： ⁴S₃/₂

(b) 电子排布式： 1s²2s²2p⁶3s²3p⁵。基态光谱项： ²P₃/₂