

基于光泵磁共振的铷原子同位素自然丰度测量

戴鹏辉¹, 杨舒云¹, 黄罗琳¹, 丁侯凯¹

¹ 中山大学 物理与天文学院 广东 珠海 519000

摘要: 自然丰度是元素同位素组成的重要特征参数。本研究利用光泵磁共振 (Optically Pumped Magnetic Resonance, OPMR) 技术, 对铷 (Rb) 蒸汽样品中两种稳定同位素 (^{85}Rb 和 ^{87}Rb) 的自然丰度进行了实验测定。实验通过选择性光抽运, 并施加射频扫描磁场诱导磁共振跃迁, 破坏光抽运建立的偏极化状态, 导致探测光吸收信号发生变化。通过精确测量 ^{85}Rb 和 ^{87}Rb 各自的磁共振信号强度, 计算得到了两种同位素的自然丰度比值。实验结果表明, 测得比值与公认值在误差范围内相符, 验证了光泵磁共振技术用于同位素丰度测量的可行性和精确性。本研究作为实验课程的一部分, 成功实践了光泵磁共振技术, 加深了对原子超精细结构、光与原子相互作用以及磁共振原理的理解。

目 录

1	引言	2
1.1	铷同位素简介	2
1.2	地质与物理领域的应用	2
1.3	光泵磁共振 (OPMR) 技术的优势与挑战	2
1.4	研究目标与论文结构	2
2	实验基本原理	3
2.1	光泵磁共振原理	3
2.2	磁共振与信号检测	3
2.3	实验装置与组成	3
2.4	光抽运信号与丰度比的测量原理	4
3	实验方法与步骤	5
3.1	光抽运信号的获取	5
3.2	共振信号检测	5
4	结果与讨论	6
5	结论与展望	6
6	致谢	6
	参考文献	7

1 引言

1.1 铷同位素简介

铷元素 (Rb) 在自然界主要以两种同位素形式存在：稳定的 ^{85}Rb ，丰度约 72.15%；以及放射性同位素 ^{87}Rb ，丰度约 27.85%，其半衰期为 4.97×10^{10} 年。精准测量两者的自然丰度，不仅是地质年代学（如 Rb-Sr 同位素定年法）等地球科学领域的基础，还对环境示踪分析、原子物理实验以及现代量子技术均有重要意义。

1.2 地质与物理领域的应用

在地质年代学中， ^{87}Rb 通过 β 衰变生成稳定的 ^{87}Sr ，Rb-Sr 年代法因此可以借助原子丰度比例和 Sr 同位素构成，推算岩石与矿物的年代；Rb 在地壳—地幔分异过程中易溶性特性又使其成为研究地壳物质来源与演化轨迹的利器。在物理学领域， ^{85}Rb ($I=5/2$) 和 ^{87}Rb ($I=3/2$) 因其独特的核自旋和超精细结构，成为核磁共振 (NMR) 与光泵磁共振 (OPMR) 实验的重要研究对象，广泛应用于核参数测定与精密频率标准构建等方面。尤其是 ^{87}Rb ，在玻色-爱因斯坦凝聚 (BEC)、原子钟和原子干涉仪等量子传感器中担当核心角色，得益于其 780 nm 和 795 nm 激光轻易激发的跃迁特性。

1.3 光泵磁共振 (OPMR) 技术的优势与挑战

传统丰度测量方法（如质谱）准确但设备复杂、成本高昂，且通常要求实验室条件下操作。相比之下，OPMR 技术以其设备简洁、测量非破坏性、可现场快速实施等优势引人注目。该方法将偏振激光用于光泵，将原子自旋极化，再通过射频 (RF) 或微波引发同位素特征的 Zeeman 共振，并由激光吸收或透射变化检测共振信号。得益于 ^{85}Rb 和 ^{87}Rb 在 Zeeman 分裂 g 因子、 m_F 选择规则等方面的差异，它们的谱线可清晰区分，实现同位素特异识别。

然而，OPMR 方法也存在挑战：光泵极化效率受限于激光功率、频率稳定性等条件；外场磁场非均匀性会导致谱线展宽，进而降低分辨率；信号噪声与谱线重叠可能妨碍峰值积分精度；校准系数与系统误差难以完全消除等。因此，要在测量中实现高精度与可靠性，需对实验参数进行优化控制与系统误差评估。

1.4 研究目标与论文结构

本研究以光泵磁共振为核心技术，采用铷光谱灯泵浦天然铷蒸汽样品，结合射频扫描 Zeeman 共振谱线，实现 ^{85}Rb 与 ^{87}Rb 丰度比的测量。全文结构如下：

- 实验基本原理：OPMR 原理、实验装置及丰度比测量原理；
- 实验方法与步骤：介绍详细的实验步骤；
- 结果与讨论：计算测量丰度比，与文献值对比，并分析误差；
- 结论与展望：总结研究成果，展望方法推广到其他同位素及应用前景。

本研究作为物理实验课程的一部分，成功实践了光泵磁共振技术，加深了对原子超精细结构、光与原子相互作用以及磁共振原理的理解。

2 实验基本原理

本实验基于光泵磁共振技术，通过激光极化和射频共振测量，以获得铷两个同位素的自然丰度比。

2.1 光泵磁共振原理

光泵技术由 A. Kastler 提出[1]，通过偏振激光将原子自旋驱动到特定 Zeeman 子能级，形成非热平衡下的自旋极化分布。我们采用铷泵浦灯，锁定至铷原子 D1 线，使光子角动量被圆偏振光传递给原子，推动电子吸收偏振光后跃迁至高 m_F 状态，经自发弛豫后仍倾向于累积在这一“暗态”。在持续吸收-发射过程中，所有原子最终被抽到特定 m_F 子能级（如 ^{85}Rb 的 $F = 3, m_F = +3$ 或 ^{87}Rb 的 $F = 2, m_F = +2$ ）——这是光泵的核心机制。

2.2 磁共振与信号检测

在建立稳态极化后，通过施加射频（RF）磁场扫描共振频率。当射频频率与 Zeeman 恢复频率匹配时，该频率会扰动原子极化分布，导致激光透过率发生变化，可由光电探测器记录。Zeeman 分裂的能量关系为：

$$\Delta E = \mu_B g_F m_F B$$

不同同位素因 g_F 参数不同，其共振频率有差异[2]。实验中扫描 RF 频率并记录透射变化，即可获取两条清晰谱线，分别对应 ^{85}Rb 和 ^{87}Rb 。

2.3 实验装置与组成

实验装置实物图见图 1，具体设置如下：

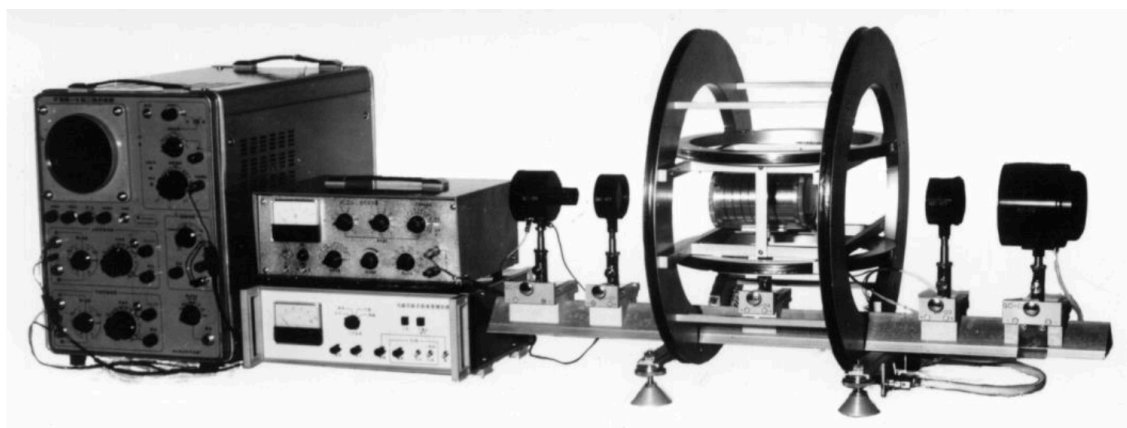


图 1: 实验装置实物图

- **电源系统：**四路直流电源提供水平/垂直磁场控制（0-1 A 和 0-0.2 A）及光谱灯、温控与扫场供电（24 V/2 A 和 20 V/0.5 A）。
- **辅助源：**产生三角/方波信号用于磁场扫描，并可由示波器外部信号替代，方便同步调制。

- 射频发生器：频率范围 100 kHz-1 MHz，功率 ≥ 0.5 W，向吸收池射频线圈供电，刺激 Zeeman 共振。
- 主体单元：
 - 铷光谱灯工作温度约 90 °C，发出 D1 波段光用作泵浦。
 - 光学系统：干涉滤波、偏振器、准直与聚光透镜（焦距 77 mm），构成偏振泵浦光路。
 - 吸收池：天然 Rb 蒸汽与缓冲气玻璃泡，恒温约 55 °C，置于两对 Helmholtz 线圈间；小线圈用于抵消地磁，主线圈提供扫磁 + 偏置磁场，射频线圈紧贴吸收泡。
 - 探测与显示：硅光电池接收透过光，经放大器（增益 >100 ）后由示波器捕获光强变化信号。
- 示波器：同步显示共振谱线及光抽运调制信号，用于扫描控制。

2.4 光抽运信号与丰度比的测量原理

通过光电探测器记录的光抽运强度，是我们测量两种铷同位素丰度的量度基础。

实验中获得 ODMR 光谱表现为两条共振峰，分别对应 ^{85}Rb 和 ^{87}Rb 。信号的稳定值与最低值之差则记为光抽运信号大小，二者之比则为两种同位素的丰度比。

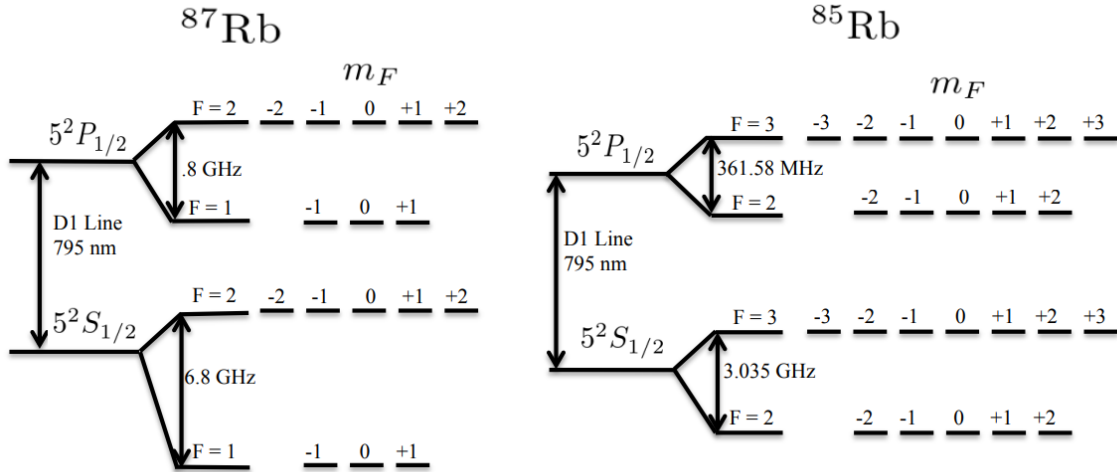


图 2: ^{87}Rb 和 ^{85}Rb 原子的能级结构图

尽管所有跃迁满足选择定则 $\Delta m_F = 0, \pm 1$ ，但并非每种跃迁方式都能贡献光抽运信号。因此需要进行矫正。

图 2 展示了 ^{85}Rb 和 ^{87}Rb 原子的能级结构。泵浦光采用右旋圆偏振光 (σ^+)，对应选择定则为 $\Delta m_F = +1$ 。

由等概率原理及辐射跃迁的选择定则，大量 ^{87}Rb 和 ^{85}Rb 原子在辐射跃迁中，落在 $m_F = +2$ 和 $m_F = +3$ 能级上的概率分别为 3/38 和 3/62。 ^{87}Rb $m_F = +2$ ， ^{85}Rb $m_F = +3$ 子能级上的粒子数以相同的概率跃迁至其他子能级；因此透过样品泡的透射光强变化，反映了磁共振信号，也统计地反映了参与共振跃迁的粒子数。由此，假设样品中 ^{87}Rb 与 ^{85}Rb 的原子个数分别为 m, n ；磁共振信号的强度分别为 p, q ；则可得： $(3/62)m : (3/38)n = p : q$ ， $m/n = 1.632p/q$ [3]。

3 实验方法与步骤

3.1 光抽运信号的获取

首先，对系统进行预热，用 $D1\sigma^+$ 泵浦光照射样品，并配置光电探测器监测透射光强。施加水平方波扫场，即可看到周期性脉冲信号，即光抽运信号。调节竖直磁场线圈电流大小、1/4 玻片角度，使得光抽运信号最大。

3.2 共振信号检测

水平线圈扫场模式选择为“三角波”，调节射频线圈发生器频率，观察到共振信号，其中频率较小的对应 ^{85}Rb ，频率较大的对应 ^{87}Rb 。仔细调节射频线圈频率，当三角波的最高点对应共振频率时（如图 3 所示），记录此时的光抽运信号的大小。

我们在同一水平磁场强度下，改变不同的射频线圈强度，记录发生共振时的光抽运信号大小，数据记录如表 1 所示。

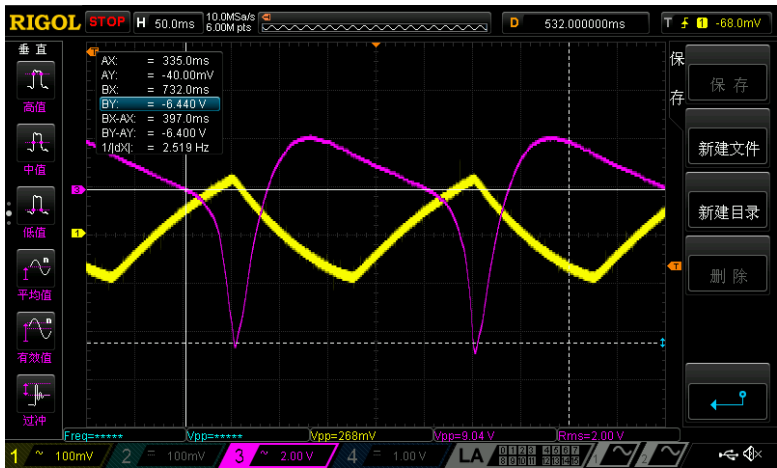


图 3: 发生共振时的光抽运信号

水平磁场 B_0 (A)	射频线圈强度 (Vpp)	共振频率 (kHz)		共振信号强度 (V)		m/n
		ν_1	ν_2	p	q	
0.198	1	332	483	7.24	4.48	2.637
0.196	6	317	476	6.44	3.96	2.654
0.196	15	317	475	4.04	3.24	2.035
0.224	1	381	572	6.16	5.04	2.642
0.224	6	381	570	6.56	4.08	2.624
0.222	15	374	561	4.04	3.28	2.010

表 1: 铷原子同位素丰度比数据测量记录

4 结果与讨论

已知天然铷中 ^{85}Rb 与 ^{87}Rb 的丰度比标准值为 2.590。在本实验所获取的数据（表 1）中，有两组测量值明显偏离趋势，属于异常值。剔除这两组数据后，其余数据的平均测量结果为：

$$\frac{m}{n} = 2.639 \pm 0.01244$$

计算得相对误差为 $\eta = 1.91\%$ ，表明本实验在控制误差的前提下取得了较为可靠的丰度比结果。

从表 1 可以看出，随着射频线圈驱动电压的增加，光抽运信号的强度呈下降趋势。这主要归因于射频场增强所引发的磁共振跃迁加剧。当射频场强度较高时，更多原子由原本的高度偏极化态（如 $m_F = +2$ 或 $m_F = +3$ ）被激发到其他 Zeeman 子能级，导致整体能级分布趋于均匀，原子的偏极化程度显著降低。由于光抽运信号强度与原子偏极化程度密切相关，偏极化的削弱直接导致光抽运信号减弱。换言之，射频场破坏了原有的自旋极化状态，降低了光抽运效率，导致信号幅度下降。

此外，射频场强度增加还会引起频率展宽效应。随着跃迁概率的上升，基态超精细 Zeeman 子能级之间的跃迁频率不再集中于某一特定值，而是扩展为一个频率带宽范围。在这种情况下， ^{85}Rb 和 ^{87}Rb 的磁共振频率区间可能出现重叠，进而导致两种同位素在信号响应上的相互干扰。这样一来，原本可以直接通过信号强度比推导丰度比的前提条件被破坏，导致测量结果偏离真实丰度比。

因此，对于受到显著频率展宽和偏极化破坏影响的数据，应予以剔除，以保证测量结果的准确性与代表性。本实验正是基于此原则，排除了两组不符合物理规律的数据，从而得到了更接近真实值的丰度比结果。

5 结论与展望

本研究基于光泵磁共振（OPMR）技术，成功测量了天然铷中 ^{85}Rb 与 ^{87}Rb 的丰度比。通过构建完整的激光泵浦、射频共振与光学探测系统，结合磁场调控与信号采集分析，我们获得了稳定清晰的共振谱线，并据此计算出丰度比 $m/n=2.639\pm0.012$ ，与文献值 2.590 相比，相对误差仅为 1.91%，验证了该方法的可靠性与实用性。

实验中观察到射频强度对光抽运信号幅度和共振线宽的显著影响，提示我们在实际应用中需合理控制射频功率，以避免信号展宽带来的系统误差。此外，通过引入校准因子，进一步增强了测量的准确性，为后续的同位素分析提供了可推广的修正方法。

展望未来，光泵磁共振方法在便携式同位素分析仪器、现场环境监测以及教育实验平台等领域具有广泛应用潜力。进一步结合激光稳频技术、闭环磁场控制与自动信号处理算法，将有望实现更高精度、更强抗干扰能力的同位素丰度测量系统。同时，该方法也可推广至其他具有超精细结构的元素，拓展其在原子物理与量子精密测量中的应用场景。

6 致谢

本实验论文的顺利完成，离不开刘老师的悉心指导和同组同学的密切配合。在实验过程中，刘老师不仅详细讲解了光泵磁共振的基本原理和操作方法，还耐心解答了我们在实验中遇到的问题，使我们在理论与实践的结合中受益匪浅。最后，感谢本组成员在实验各环节中的积极合作与认真投入，让本次学习过程充实而富有意义。

参考文献

- [1] Kastler, A. Quelques Suggestions Concernant La Production Optiques Et La Detection Optique Dune Inegalite De Population Des Niveaux De Quantification Spatiale Des Atoms - Application A l'experience De Stern Et Gerlach Et A La Resonance Magnetique[J]. *Journal De Physique Et Le Radium*, 1950, 11(6):255-265.
- [2] Westerdale, S. Measuring Optical Pumping of Rubidium Vapor[R]. *MIT Department of Physics*, 2010, <https://web.mit.edu/shawest/Public/jlab/OpticalPumping/opticalPaper.pdf>.
- [3] 邵先亦 光泵磁共振法测量同位素铷的丰度比 [J]. *台州学院学报*, 2003, (03):52-53.