

光泵磁共振

李宇豪[†]✉ 李哲[‡]

[†] 中山大学物理学院, 广东广州, 510275

[‡] 实验合作者

✉ liyh536@mail2.sysu.edu.cn

摘要: 利用光抽运来研究原子超精细结构的塞曼子能级间的磁共振, 具有很高的分辨率和灵敏度。在本次实验中, 我们首先观察了铷原子在方波和三角波扫场中的光抽运现象。我们发现水平磁场偏置会破坏抽运动力学的 Z_2 对称性, 使抽运信号发生变形; 而垂直磁场偏置不会破坏 Z_2 对称性, 只会降低抽运信号的强度。我们使用方波扫场测量了广州的地磁场强度为 476.5mGs。通过添加射频场, 我们观察到了铷原子的磁共振现象, 并且测量了铷原子的两种同位素 ^{85}Rb 和 ^{87}Rb 的朗德因子分别为 0.339 和 0.497。

关键词: 光泵磁共振, 光抽运, 扫场, 磁共振, 朗德因子

Acousto-optic effect

Yuhao Li and Zhe Li

School of Physics, Sun Yat-sen University, Guangzhou, Guangdong, China

November 13, 2023

Abstract: It has high resolution and sensitivity to study the magnetic resonance between Zeeman levels of ultra-fine structure of atoms by optical pumping. In this experiment, we first observed the optical pumping phenomenon of rubidium atoms in square wave and triangular wave scanning fields. We find that the horizontal magnetic field bias will destroy the Z_2 symmetry of pumping dynamics and deform the pumping signal. However, the vertical magnetic field bias will not destroy the Z_2 symmetry, but will only reduce the intensity of the pump signal. We measured the geomagnetic field intensity of Guangzhou as 460 by square wave scanning field. By adding radio frequency field, we observed the magnetic resonance phenomenon of rubidium atom, and measured the Lande factors of two isotopes of rubidium atom, ^{85}Rb and ^{87}Rb , which were 0.339 and 0.497 respectively.

Keywords: Optically pumped magnetic resonance, Optical pumping, Sweep field, magnetic resonance, Lande factor

1 引言

法国物理学家卡斯特勒等人提出光抽运技术，并采用光抽运——磁共振——光探测方法（即光泵磁共振方法）来研究原子基态和激发态的细致结构，其灵敏度比一般磁共振探测技术高几个数量级，这在磁共振波谱学方面是一项突破。这一方法在基础物理学研究、磁场的精确测量以及原子频标技术等方面都有广泛的应用。卡斯特勒本人由于在这一实验技术上的杰出贡献，荣获了 1966 年度的诺贝尔物理奖。

几十年来，利用光抽运—磁共振—光检测技术对许多原子、离子和分子进行了大量研究，增进了对微观粒子结构的了解。对原子的磁矩和朗德 g 因子、能级寿命、能级结构、塞曼分裂与斯塔克分裂，特别是对碱金属原子激发态精细与超精细结构研究，在理解微观粒子结构理论方面起了很大的推动作用。此外，光抽运技术在激光、原子频标和精测弱磁场等方面都有重要的应用。

2 原理

铷原子具有两种同位素 ^{85}Rb 和 ^{87}Rb ，分别占比 72.15% 和 27.85%。铷原子是碱金属原子，具有一个价电子，主量子数为 5。基态为 $5^2S_{1/2}$ ，最低激发态为 $5^2P_{1/2}$ 和 $5^2P_{3/2}$ 双重态。塞曼效应导致超精细结构中的能级在外磁场中进一步分裂。原子总磁矩 μ_F 与外磁场 B 的相互作用能量为：

$$E = -\mu_F \cdot B = g_F m_F \mu_B B \quad (1)$$

其中， g_F 为朗德因子， m_F 为磁量子数。

在热平衡下，能级 E_1 和 E_2 上的粒子数之比 N_1/N_2 由能级差 ΔE 决定：

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right) \quad (2)$$

光抽运利用偏振光改变原子能级的粒子布居数，使粒子布居数偏极化。对于 ^{87}Rb ， $D_1\sigma^+$ 可以使 $m_F = +2$ 子能级上的粒子数增加， $D_1\sigma^-$ 可以使 $m_F = -2$ 子能级上的粒子数增加；对于 ^{85}Rb ， $D_1\sigma^+$ 可以使 $m_F = +3$ 子能级上的粒子数增加， $D_1\sigma^-$ 可以使 $m_F = -3$ 子能级上的粒子数增加。

弛豫现象使能级系统重新趋向平衡分布状态，其机制一般是原子之间或原子和周围物质碰撞并交换能量。在实验中，可通过加入缓冲气体、控制温度等方法降低弛豫现象的影响。

在光抽运产生的偏极化状态下，铷原子对入射光的吸收较少。当发生磁共振跃迁时，原子对入射光的吸收增大，透过样品的光强减弱。测量透射光强的变化可用于检测磁共振信号。投射到样品的圆偏振光既起抽运作用，又可通过透射光强变化检测磁共振信号。通过共振条件

$$h\nu = g_F \mu_F B \quad (3)$$

可以测量朗德因子 g_F 。

3 实验

3.1 观察光抽运现象

我们首先定性观察水平磁场偏置对光抽运现象的影响，分别使用方波和三角波扫场。调节垂直磁场线圈的电流，使其恰好抵消地磁场的垂直分量，通过改变水平磁场线圈的电流，观察不同的水平磁场偏置对光抽运信号产生的影响，如图 1、2 所示。

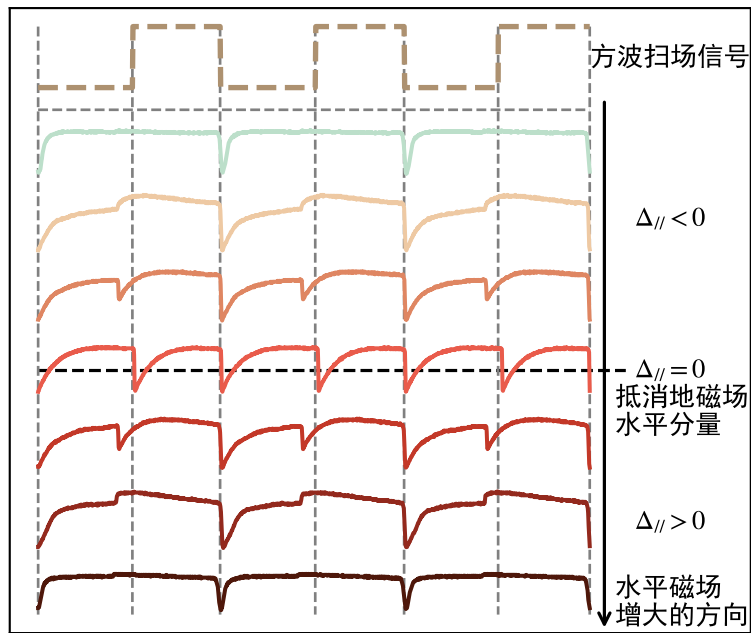


图 1 水平磁场偏置对方波扫场光抽运信号的影响

在恰好抵消地磁场水平分量时，每个扫场周期内发生两次抽运，在磁场发生反转时产生抽运吸收峰。当水平磁场出现偏置时，与方波扫场叠加，会使总磁场反转的位置发生偏离，因此抽运吸收峰的位置也会发生偏离。水平磁场偏置较大时，即使扫场信号反转，总磁场的方向也不会变化，一个扫场周期中只出现一次抽运。当水平磁场偏置过大时，光抽运速度很快，并且扫场信号反转不会使总磁场方向改变，因此一个周期内只有一次抽运，并且粒子数很快达到饱和。水平磁场偏置的方向对光抽运现象没有影响。

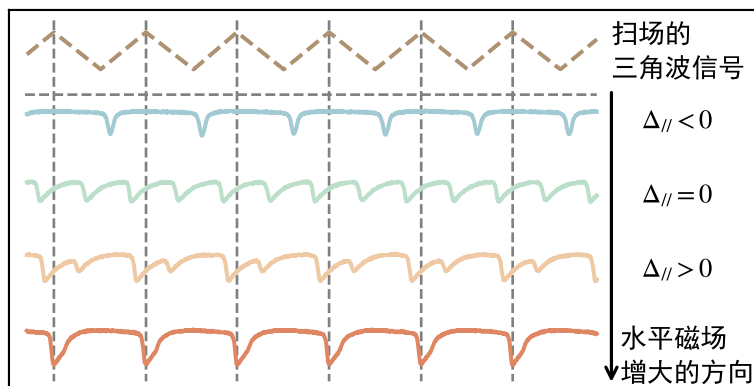


图 2 水平磁场偏置对三角波扫场光抽运信号的影响

现象与方波扫场基本相同，但是三角波的方向是连续改变至反向，并且其零点存在偏置，抽运信号并不与扫场信号对齐。

接下来我们观察垂直磁场偏置对光抽运现象的影响。调节水平磁场线圈的电流，使其恰好抵消地磁场的水平分量，通过改变垂直磁场线圈的电流，改变垂直磁场偏置的大小，得到方波和三角波扫场的光抽运信号如图 3 所示。

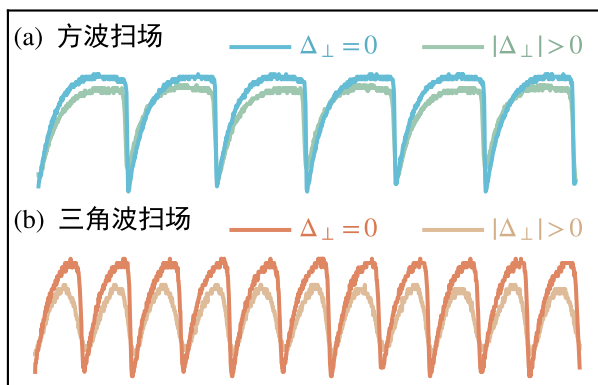


图 3 垂直磁场偏置对方波和三角波扫场光抽运信号的影响

无论是方波扫场还是三角波扫场，在恰好抵消地磁场垂直分量时光抽运信号达到最大。存在垂直磁场偏置时，无论偏置是向哪个方向，都会使光抽运信号减小。但是垂直磁场偏置的强弱不会破坏抽运信号的形状和吸收峰的位置。

3.2 测量地磁场强度

为了避免三角波的零点偏置产生的影响，我们使用对称的方波测量地磁场，分别调节水平和垂直线圈的电流大小，使得一个周期内出现稳定的两次抽运，并且抽运信号达到最大，记录水平和垂直线圈的电流大小，并根据亥姆霍兹线圈的参数（见附录表 3）换算为磁场强度，如表 1 所示。

表 1 抵消地磁场时水平和垂直线圈数据

	线圈电流 (mA)	磁场强度 (mGs)
水平分量	98	455.2
垂直分量	48	141.1

计算得到实验室的地磁场强度为

$$B = \sqrt{B_{\perp}^2 + B_{//}^2} = 476.5\text{mGs} \quad (4)$$

使用世界地磁场模型（WMM）计算得到的广州地磁场强度为 460.7mGs，因此我们的测量结果基本准确。

3.3 测量铷原子的朗德因子 g_F

在垂直光轴方向加入频率为 ν 的射频场，只有水平磁场强度为 $B_{//} = \pm h\nu / (g_F \mu_F)$ 时才会发生强烈的共振吸收。为了方便观察磁共振现象，我们使用连续变化的三角波扫场，并且使用抽运信号定位法读取发生共振时的水平磁场强度。我们实验中记录的数据见附录表 4，由此绘制水平磁场强度与射频场频率的关系，如图 4 所示。

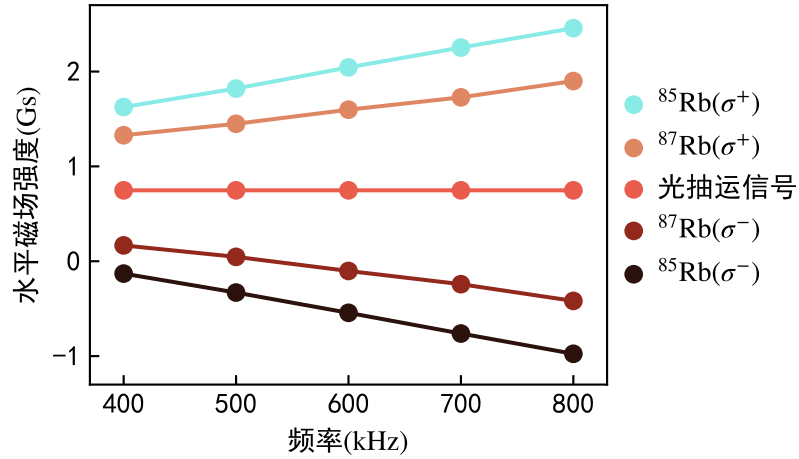


图 4 抽运信号定位法中水平磁场强度与射频场频率的关系

应当指出，我们使用抽运信号定位法读取的水平磁场强度并非发生共振时的磁场强度，这是一个瞬时值，并不能直接读取。这种方法的实质是在磁共振发生时，调整水平偏置使光吸收信号呈现某一固定的形态，此时的水平偏置磁场强度与共振时的瞬时磁场强度差一个常数。不过这没关系，反正我们计算朗德因子时用的是斜率。拟合图 4 中的斜率，并根据共振条件 (3) 分别计算朗德因子，如表 2 所示。

表 2 光泵磁共振水平磁场强度与频率的线性关系的拟合结果

信号	$^{85}\text{Rb}(\sigma^+)$	$^{87}\text{Rb}(\sigma^+)$	$^{87}\text{Rb}(\sigma^-)$	$^{85}\text{Rb}(\sigma^-)$
斜率 (mGs/kHz)	209.5	142.1	-145.9	-212.3
拟合优度 R^2	0.9997	0.9966	0.9960	0.9998
朗德因子 g	0.336 ± 0.027	0.490 ± 0.039	0.503 ± 0.041	0.341 ± 0.027

由此可以计算得到

$$g(^{85}\text{Rb}) = \frac{g(^{85}\text{Rb}^+) + g(^{85}\text{Rb}^-)}{2} = 0.339 \pm 0.027$$

$$g(^{87}\text{Rb}) = \frac{g(^{87}\text{Rb}^+) + g(^{87}\text{Rb}^-)}{2} = 0.497 \pm 0.040$$

文献^[1]测定的铷原子的朗德因子为 $g(^{85}\text{Rb}) = 0.366$ ， $g(^{87}\text{Rb}) = 0.498$ ，我们与其相对误差分别为 0.8%、0.2%。

4 讨论

4.1 三角波扫场的偏置

我们在实验中观察到三角波扫场并不是一个关于零点对称的信号，而是存在一定的偏置。抵消地磁场的水平分量和垂直分量后，图 5 展示了方波抽运信号和三角波抽运信号的区别。方波扫场中出现了稳定的抽运现象，而三角波扫场中的抽运信号出现变形，这正是三角波的不对称性导致的。因此我们在图 2 中所说的恰好抵消地磁场水平分量，

实际上还用水平偏置场抵消了三角波扫场的不对称性。这也是为什么我们测量地磁场时使用方波而非三角波。

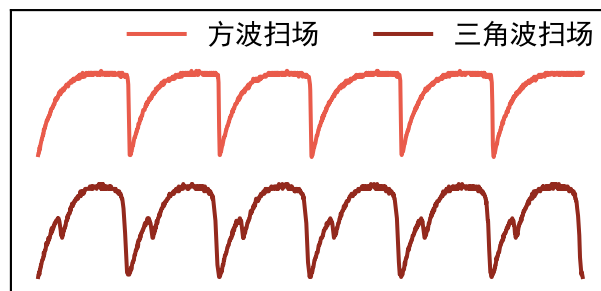


图 5 抵消地磁场后方波与三角波抽运信号的对比

4.2 光抽运的非平衡动力学

本小节中我们讨论光抽运现象产生的条件。只要铷原子在外磁场的作用下打开超精细能级的间隙，在圆偏振光的作用下就会产生抽运，直至粒子数饱和。文献^[2]说明了抽运信号以指数形式趋于饱和，这与图 5 中方波抽运信号趋于饱和的现象一致。

使用方波扫场时，磁场迅速归零，超精细能级间隙迅速关闭，文献^[3]指出原子激发态的平均寿命约为 10^{-8} s，因此铷原子会快速退激发。当磁场方向反转时，超精细能级的间隙迅速打开，再次发生抽运现象。使用三角波扫场时，由于磁场是连续变化的，磁场归零时的非平衡弛豫过程还受到磁场强度的影响，抽运现象也由驱动相变的动力学描述，抽运强度与布居数比以及驱动速率有关。前面已经提到，我们使用的三角波扫场不是对称的，因此来回两个方向的驱动速率并不相等，在图 5 中我们可以看到三角波扫场破坏了这种 Z_2 对称性。

我们在第 3.1 小节中观察到的现象也是如此。水平磁场偏置破坏了沿光轴方向的 Z_2 对称性，会使回来两次扫场的非平衡弛豫和驱动动力学过程不同，因而吸收峰的形态不同。而垂直磁场偏置不会破坏 Z_2 对称性，因此不会出现动力学过程的不同。

4.3 光抽运—磁共振跃迁的平衡动力学

上一小节我们已经说明，光抽运现象实质上是从一种有序相转变为另一种有序相的非平衡动力学过程。而磁共振现象的本质是一个由外界条件诱导产生的平衡态。我们使用连续变化的三角波扫场观察磁共振现象，当三角波扫场速率足够慢时，我们可以认为扫场时的每一个磁场强度下系统都达到了平衡态，光吸收信号呈现了共振点附近的平衡动力学。在图 2 的绿线（抵消地磁场水平分量）中，我们可以观察到信号的最低点实际上略微呈现一高一低的状态，这说明我们实验中使用的扫场频率（15Hz）正好处于系统能否在扫场时完成弛豫过程的临界值，如果能够将扫场频率调低一点就更好了。

参考文献

- [1] 李潮锐. 光磁共振实验的数据拟合方法. 物理实验, 2004, 27(7): 3.
- [2] 钱庆凯, 陈宜保, 张晓平. 光抽运信号的理论分析. 物理实验, 2011: 40-42, 46.

[3] MARXER H SPRUCH L. Semiclassical estimation of the radiative mean lifetimes of hydrogenlike states. Physical Review A, 1991, 43(3): 1268-1274.

附录

a. 仪器参数

本实验的主要仪器为 DH807A 型光泵磁共振实验仪，其线圈参数如下：

表 3 亥姆霍兹线圈的参数

	水平场线圈	扫场线圈	垂直场线圈
线圈匝数	250	250	100
有效半径 (m)	0.242	0.242	0.153

b. 补充材料

实验中记录的原始数据如下：

表 4 光泵磁共振数据记录 电流单位为 mA

频率 (MHz)	$^{85}\text{Rb}(\sigma^+)$	$^{87}\text{Rb}(\sigma^+)$	抽运信号	$^{87}\text{Rb}(\sigma^-)$	$^{85}\text{Rb}(\sigma^-)$
400	-28	36	161	286	350
500	-71	10	161	312	392
600	-117	-22	161	344	440
700	-164	-52	161	372	485
800	-210	-90	161	409	529

本实验的数据处理及绘图代码均可在 <https://lyhspace.com/share/> 中获取。

c. 预习报告教师签名页

Handwritten data table and signature on lined paper:

频率/kHz	$^{85}\text{Rb} \sigma^-$	$^{87}\text{Rb} \sigma^-$	抽运	$\text{Rb}^{87} \sigma^+$	$^{85}\text{Rb} \sigma^+$	单位 mA
400	-28	36	161	286	350	
500	-71	10	161	312	392	
600	-117	-22	161	344	440	
700	-164	-52	161	372	485	
800	-210	-90	161	409	529	

Signature: 刘新宇
Date: 2023.10.30