

光泵磁共振实验中关于异常共振信号的尝试性解释

张巍山

(复旦大学材料科学系 上海 200433)

摘要 通过光泵磁共振的方法观察测量 ^{85}Rb 和 ^{87}Rb 两分裂的塞曼能级间的磁共振信号时, 在一定的条件下会观察到多于两个共振频率。本文通过对不同条件下共振频率的测量, 对各个信号的成因提出了可能的解释, 认为这种可能是由于多量子跃迁或射频信号中含有干扰信号造成的。

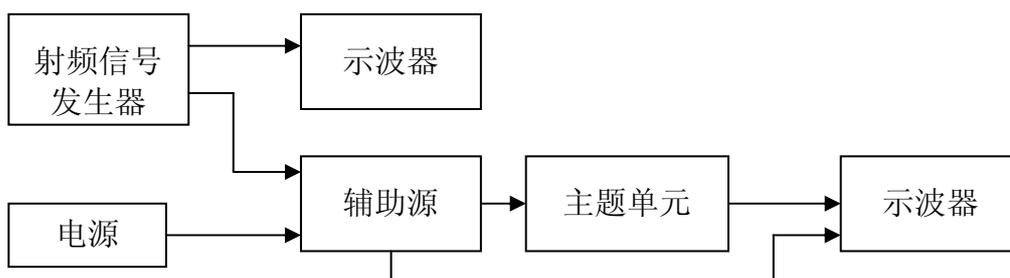
关键词 光泵磁共振 多量子跃迁 谐波 磁共振吸收信号 射频信号强度

Abstract More than two frequencies of magnetic resonance absorption signal are observed when observing the magnetic resonance absorption signal of ^{85}Rb and ^{87}Rb by using the method of optical-magnetic resonance. This article raises two possible explanations by measuring these frequencies in different conditions. The two possible explanations are multi-quantum transition and harmonic wave.

Key word optical-magnetic resonance; multi-quantum transition; harmonic wave; magnetic resonance absorption signal; ;intensity of RF field

引言 光抽运-磁共振-光探测技术是目前研究微观粒子结构的一个重要方法。光抽运 (Optical Pumping, 又称光泵) 技术是在五十年代初期由 A • Kastler 等人提出的。光抽运技术运用以圆偏振光激发在磁场中形成塞曼分裂气态原子的方法, 加之跃迁定则的限制, 打破原子在所研究的能级间的波尔兹曼热平衡分布, 造成所需的布局数差。这时再用相应频率的射频场激发原子的磁共振, 并用光探测的方法通过检测原子对光量子的吸收来检测磁共振吸收信号。它的优点在于在低浓度下提高了共振强度, 并利用光量子提高了检测灵敏度。几十年来, 用光抽运-磁共振-光探测技术对许多原子的磁矩和 g 因子、能级寿命、能级结构、塞曼分裂与斯塔克分裂进行了大量研究, 增进了我们对微观粒子结构的了解。另外, 光抽运技术在激光、电子频率标准和精测弱磁场等方面也有重要的应用。本文通过对光泵磁共振技术的运用, 测量了 ^{85}Rb 和 ^{87}Rb 在磁场中形成塞曼分裂后, 产生磁共振吸收信号的频率。在能级宽度一定的情况下, 理论上应只出现两个共振信号频率, 但是却出现了多于两个。本文通过对不同射频信号强度情况下的共振信号的不同结果提出两种可能的原因来解释这一现象。

实验装置



理论部分 本实验研究对象是铷的气态原子。铷有两种同位素，即 ^{85}Rb 和 ^{87}Rb 。

由于电子的自旋与轨道运动的相互作用（即 L-S 耦合）而发生能级分裂称为精细结构。原子核也具有自旋和磁矩，核自旋量子数用 I 表示，核磁矩与电子总磁矩（用 J 表示）之间相互作用造成能级的附加分裂，成为超精细结构，用量子数 F 表示。整个原子的总磁矩表示为 μ_F 。在有外场的作用下，由于整个原子的总磁矩与外磁场的相互作用，超精细结构中的各个能级会进一步发生塞曼分裂，形成塞曼子能级。用磁量子数 M_F 来表示，则 $M_F = F, F-1, \dots, -F$ ，即分为 $2F+1$ 个子能级，其间距相等。原子总磁矩 μ_F 与外磁场磁感应强度 B 的相互作用能为

$$E = M_F g_F \mu_B B$$

各相邻子能级能量差为

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

此时光跃迁选择定则为

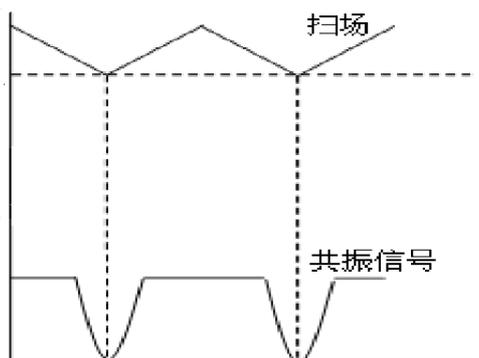
$$\Delta F = 0, \pm 1, \quad \Delta M = 0, \pm 1$$

以 ^{87}Rb 为例，由于跃迁定则的限制，当气态原子受 $D_1 \sigma^+$ 左旋偏振光照射时，只能产生出 $\Delta M_F = +1$ 的跃迁。因为 $5^2 P_{1/2}$ 上最高的 $M_F = +2$ ，这样基态中 $M_F = +2$ 能级上的电子就不能跃迁到 $5^2 P_{1/2}$ 上。但 $5^2 P_{1/2}$ 向 $5^2 S_{1/2}$ 跃迁时， $\Delta M = 0, \pm 1$ ，所以可以到 $5^2 S_{1/2}$ 的各能级上，这样，基态 $M_F = +2$ 子能级上电子数只增不减，这样就增大了布局数之差。当光抽运使 ^{87}Rb 原子分布偏激化达到饱和以后，它将不再吸收 $D_1 \sigma^+$ 光，从而使透过样品泡的 $D_1 \sigma^+$ 光增强。这时，在垂直于产生塞曼分裂的磁场 B 的方向加一个频率为 ν 的射频磁场，当 ν 和 B 之间满足共振条件 $h\nu = g_F \mu_B B$ 时，在塞曼子能级之间会产生由于磁共振引起的感应跃迁，此跃迁的选择定律为

$$\Delta F = 0, \quad \Delta M = 0, \pm 1$$

此时在各塞曼子能级上的电子都可能发生这种跃迁。由于在基态 $M_F = +2$ 子能级上的电子数达到了饱和，大量的电子会由基态 $M_F = +2$ 子能级跃迁到基态的其他子能级上，这样，偏极化就被打破了，与此同时，就又有电子可以吸收 $D_1 \sigma^+$ 光而进行新的抽运，于是透射光就变弱了。光跃迁速率远大于磁共振跃迁速率，此时如果共振条件中 $h\nu = g_F \mu_B B$ 中的射频频率 ν 或 B 发生改变而使共振条件被破坏，光抽运就会很快又重新达到饱和，透射光将因此重新变强。

实验部分 首先调节垂直线圈的电流大小，使其的大小与地磁场垂直分量相同。之后调节水平磁场。水平磁场由三部分组成：地磁场水平分量，水平场和扫场。将扫场调至三角波。先使用指南针确定水平场和扫场的方向，之后对它们进行调节，使地磁场水平分量、水平场和扫场的方向一致。调节扫场幅度至适当值，使其幅度不要太大。调整水平场电流至 0.35A 左右，固定水平场电流、垂直场电流及扫场幅度。之后加一射频信号，射频信号幅度略大一些。之后调节射频信号的频率，就可以在某些特定频率看到磁共振吸收信号，信号如下图所示



在整个射频信号的频率范围内寻找这样的共振信号，记录出现如上图所示的共振信号出现的频率和当时的条件。

本来在测量共振频率时，预期测到的共振频率个数为两个（ ^{87}Rb 与 ^{85}Rb 各有一个共振频率）但是在 $0\sim 900\text{kHz}$ 的频率范围中却测到了 12 个共振频率。所得数据如下表所示
水平场电流：0.400A 垂直场电流：0.065A

编号	1	2	3	4	5	6
频率 (kHz)	103.0	129.3	147.6	172.5	193.7	206.8
编号	7	8	9	10	11	12
频率 (kHz)	259.0	309.5	344.2	387.5	517.0	774.8

之后在另外一套仪器上对射频磁场强度进行了变化，分别记录了当时 $0\sim 2000\text{kHz}$ 范围内出现的共振频率和共振频率的强度，得到如下数据：

水平场电流：0.400A 垂直场电流：0.051A 扫场幅度：1.5V

射频强度为 $9.0\text{V}\sim 14.0\text{V}$ 时

编号	1	2	3	4	5	6	7
频率 (kHz)	146.4	203.7	340.5	510.0	774.2	1025.0	1548.1
振幅 (mV)	20	44	70	90	80	160	150

射频强度为 $5.0\text{V}\sim 9.0\text{V}$ 时

编号	1	2	3	4	5	6
频率 (kHz)	203.7	350.0	510.7	772.3	1019.0	1533.1
振幅 (mV)	40	30	80	80	150	160

射频强度为 $1.8\text{V}\sim 3.2\text{V}$ 时

编号	1	2	3	4
频率 (kHz)	338.1	510.5	1022.6	1539.2
振幅 (mV)	18	20	120	140

射频强度为 $0.8\text{V}\sim 1.4\text{V}$ 时

编号	1	2
频率 (kHz)	1016.6	1527.1
振幅 (mV)	100	120

上述数据中频率的不确定度较小，为 $\pm 0.1\text{kHz}$ ，而振幅的不确定度较大，因为示波器所显示的波形振幅并不稳定。射频信号的强度为一个范围而不是一个值的原因是，在固定强度旋钮位置不变的情况下，射频信号的强度会随着频率的增大而增大。

实验结果分析 所期望的情况是总共出现两个磁共振吸收频率，因为样品泡中有 ^{87}Rb 与

^{85}Rb ，它们的 g_F 因子可使用公式

$$g_F = g_J \frac{F(F+1) + J(J+1) - I(I-1)}{2F(F+1)}$$

计算得到， g_J 可由公式

$$g_J = 1 + \frac{J(J+1) - L(L+1) + S(S+1)}{2J(J+1)}$$

计算得到。计算得 ^{87}Rb 与 ^{85}Rb 的 g_F 因子的理论值：

^{87}Rb 的 g_F 因子等于 $\frac{1}{2}$ ， ^{85}Rb 的 g_F 因子等于 $\frac{1}{3}$ 。

由于两者的 g_F 是不同的，但外磁场 B 是相同的，因此根据共振条件

$$h\nu = g_F \mu_B B$$

可知，两这应该各有一个共振频率且这两个共振频率不同。下面计算 ^{87}Rb 与 ^{85}Rb 的磁共振吸收频率的理论值：

共振条件为 $h\nu = g_F \mu_B B$

其中 $B = B_{\text{水平场}} + B_{\text{扫场}} + B_{\text{地磁水平分量}}$

由于共振信号的波谷对应扫场的波谷，所以上式中的 $B_{\text{扫场}} = 0\text{T}$ ，其中 $B_{\text{地磁水平分量}}$ 经测量为

$2.6 \times 10^{-5}\text{T}$ ， $B_{\text{水平场}}$ 的值可由水平场电流代入公式

$$B_0 = \frac{16\pi}{5^2} \frac{N}{r} I \times 10^{-3} (\text{Gs})$$

算得的 $B_{\text{水平场}} = 1.88 \times 10^{-4}\text{T}$ ，则由此，可得总磁场 $B = 2.14 \times 10^{-4}(\text{T})$ 。将此结果代入共振条件中，可得 ^{87}Rb 的磁共振吸收信号的理论频率为 1496.1kHz ， ^{85}Rb 的磁共振吸收信号的理论频率为 997.4kHz 。

可以在第二次测得的数据中看出，不管射频信号的强度如何变化，在这两个频率处附近的确总有两个实际的共振频率。则可以得知，在所测数据中位于 1020kHz 左右的频率应是 ^{85}Rb 的磁共振吸收信号的频率，而在 1540kHz 左右的频率应是 ^{87}Rb 的磁共振吸收信号的频率。先将这两个频率成为基频。

但是在射频信号强度在 $9\sim 14\text{V}$ 时，可以看到还有其他一些共振频率。观察这些共振频率，可以发现各共振信号频率之间有一定的规律性，即除两与理论值极其接近的共振频率外，其他的各频率几乎都可以由与理论值接近的共振频率除以整数倍的到，如下表所示

倍数 基频 (kHz)	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{7}$
1025.0	510.0	340.5	\	203.7	\	146.4
1548.1	774.2	510.0	\	\	\	\

这种情况在第一次测得的数据中更为明显，出现了两基频从 1 到 $\frac{1}{5}$ 的所有频率。而且通过第二次测得的四组数据可以看出，随着射频信号强度的减弱，频率较低的共振信号会渐渐依次消失。

对于产生这种现象的原因，我认为有两种可能的解释：

第一种可能，基于出现的基频之外的共振信号频率与基频的倍数关系，我们可以改写共振条件为

$$nh\nu = g_F \mu_B B, \quad (n=1, 2, 3\cdots)$$

这意味着多个射频子能量相同且能量和与相邻塞曼能级相同时，可以引发所谓的多量子跃迁。由原子物理中有关多量子跃迁的理论可知，当几个光量子的频率相同且能量总和与塞曼能级相同时，可能发生多量子跃迁。双量子跃迁的概率小于单量子的跃迁，跃迁的强度正比于射频信号强度的平方，量子数越多的跃迁发生概率越低，且强度也随射频信号的强度增加而增加。由实验所得数据可以看出，在射频信号强度为 9~14V，观察到的共振信号频率数量最多，共七个，而射频信号强度为 5~9V 时，共振频率有六个，射频信号强度为 1.8~3.2 时，有四个共振信号频率，射频信号强度为 0.8~1.4V 时，共振频率只有两个基频。在同一射频强度的情况下，频率越小（n 值越大）的共振信号强度越弱。且同频率的共振信号强度也随射频的强度增大而增大。定性的说，这些现象都很好的和理论符合了。但是在 1/7 基频处的共振信号也能被看到，理论上说这时的跃迁概率已经非常非常弱，振动程度已经远小于信号噪声强度，但还是能被观察到，于是提出第二种可能。

第二种可能性，射频信号中本身带有一些干扰信号，这些干扰信号的频率呈所显示的频率的整数倍，且倍数越高干扰的强度也越低。理论上来说有没有这么一种干扰信号呢？在一些电力系统如信号发生器中，的确有一种特征近似的干扰信号，叫做谐波，它是畸变周期波形的分量，频率是基波的整数倍。如果有这种干扰信号的存在，尽可能在基频除以某整数的到的频率时看到有共振信号的出现。但是在对射频信号发生器所产生的信号直接进行观察时，发现信号与严格正弦的差别很小，其中没有发现明显的干扰信号，所以推测可能是此信号进入辅助源和主题单元的过程中因为某种原因产生了谐波。

误差原因分析 可以看到在所得数据中会出现这样的情况：在射频幅度为 9~14V 所得的共振频率中， $\frac{1}{4}$ 倍频处没有清晰的共振信号而在 $\frac{1}{5}$ 处存在共振信号。可能的原因有以下几个：

1. 仪器本身的识别问题。由于频率较低时出现的共振信号强度非常的弱，很可能因为仪器的原因而观察不到或者未把此信号作为共振信号。
2. 在频率较小时，由于共振信号出现的频率密度会大大增加，不同级次之间的共振信号之间的干扰会越来越强烈，这会造成的结果是看不到明显的共振信号。

结论 通过上述分析，本文对光泵磁共振实验中出现的多磁共振吸收信号的现象的原因提出了两种可能的观点，即多光子跃迁和谐波干扰。

参考文献

- [1] 吴思诚，王祖铨 近代物理实验 北京大学出版社 1999
- [2] 孙昕，崔海峰，彭慰光等 光磁共振实验中双量子跃迁及射频场谐波干扰 物理实验 2001 21卷 第3期
- [3] 张孔时，丁慎训 物理实验教程(近代物理实验部分) 清华大学出版社 1991
- [4] 容健纲，张文亮 电力系统谐波 华中理工大学出版社 1994