

光磁共振实验方法改进及新问题探索

霍家伟 0519037

摘要 基于光磁共振实验中共振条件, 本文提出通过线性拟合的方法测量 g_F 因子和地磁场水平分量的改进方案。通过实验, 分析用这种方法的合理性及优点。最后对测量中观测到的次级信号进行一番讨论。这两项工作对理解光磁共振的物理内涵都有很大帮助。

关键词 光磁共振; g_F 因子; 线性拟合; 次级信号

Improvement on the Experiment of Optical Magnetic Resonance and New Exploration

J. W. Huo

Department of Physics, Fudan University, Shanghai 200433, China

Abstract Based on the conditions of magnetic resonance signals, a method of measuring the g_F factor and horizontal component of the earth's magnetic field through linear regression is put forward. Then the advantages will be analyzed. Finally, a new problem found in the process of measurement is to be discussed—the observation of subordinate signals. Both of the two tasks are to be great help to understand the optical magnetic resonance.

Key Words optical magnetic resonance; g_F factor; linear regression; subordinate signals

引言

光磁共振实验是大学近代物理实验的经典实验^[1]。它的基本思想是通过光抽运打破原子能级间的热平衡分布, 造成粒子数的偏极化, 再用相应频率的射频场激励原子, 发生磁共振。这一方法在基础物理学研究和磁场的精细测量等方面都有广泛应用。本实验物理内容十分丰富, 得到了师生的广泛重视。如王洪涛等研究了光磁共振实验最佳扫场参数并分析了抽运信号图^[2], 至于实验的测量方法, 也有很多人进行了不同的研究^[3~8]。本文阐述了光磁共振实验中测量的改进方案——线性拟合法, 并就实验过程中发现的次级信号进行适当的讨论。方法的改进和现象的探讨可以使实验内容更加丰富, 并加深对实验原理的理解。

实验原理简述

根据电子的轨道量子数和自旋量子数耦合, 铷(Rb)原子的基态能级是 $5^2S_{1/2}$ 。样品泡中的铷原子能级在磁场的作用下产生塞曼分裂。铷灯产生的左旋圆偏振光使铷原子 $5^2S_{1/2}$ 状态上的 $m_F=2$ 子能级产生偏极化从而富集。在射频场的作用下, 当满足共振条件时

$$h\nu = g_F \mu_B B \quad (1)$$

塞曼子能级间可以产生共振跃迁。磁共振破坏了原子分布的偏极化, 铷原子对左旋偏振光的吸收就相应增加, 通过光检测系统可观察到吸收峰, 就是共振信号。

实验装置

本实验中使用的实验装置是DH807A型光泵磁共振仪，主体结构如下图。配用仪器有XJ1630型函数发生器和数字式示波器以及AS3343型频率计。

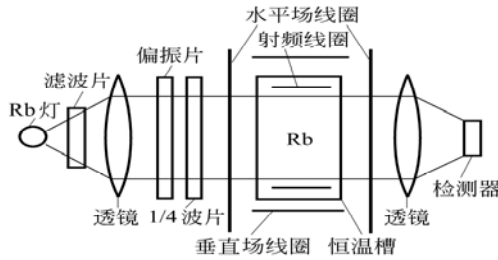


图1 光磁共振主体装置示意图^[7]

实验内容与评述

首先看一下光磁共振的一般方案。

用指南针确定水平磁场线圈、水平扫场线圈、竖直线圈产生的各磁场方向与地磁场水平和垂直方向的关系，调出图2所示的光抽运信号，调节偏振片和1/4波片之间的夹角，使铷灯发出圆偏振光。通过改变垂直线圈产生的磁场，找出垂直线圈产生的磁场抵消地磁场垂直分量的位置，此时抽运信号最强^[8]。以后的实验就保持垂直磁场大小和方向不变。

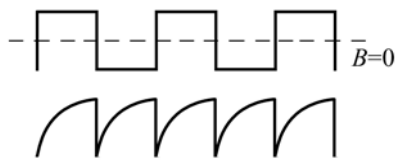


图2 光抽运信号示意图

保持水平三角波扫场 B_S 的大小不变，并加上射频磁场，当地磁场水平分量与水平扫场以及水平磁场都同向时，磁共振产生的条件为

$$h\nu_1 = g_F \mu_B (B_0 + B_S + B_E) \quad (2)$$

即当水平场大小不变，改变射频场的频率，上式满足时可以观察到共振信号，如下图



图3 光磁共振信号示意图

同理，当让直流水平磁场反向，且水平场足够大，磁共振条件变为

$$-h\nu_2 = g_F \mu_B (-B_0 + B_S + B_E) \quad (3)$$

如果水平场与扫场同时反向，共振条件由变为

$$-h\nu_3 = g_F \mu_B (-B_0 - B_S + B_E) \quad (4)$$

由(2)(3)式可以得到朗德因子

$$g_F = \frac{h(\nu_1 + \nu_2)}{2\mu_B B_0} \quad (5)$$

由(2)(4)式可以得到地磁场的水平分量

$$B_E = \frac{h(\nu_1 - \nu_3)}{2\mu_B g_F} \quad (6)$$

以上就是实验的惯常方案。不足的地方有三处。第一，单次测量的偶然误差比较大，因此必须多次测量求平均。第二，(3)式满足的条件是水平磁场必须大于地磁场与扫场之和，有一定的局限性。第三，为了测量两个物理量，必须进行两度反向操作，流程比较繁琐；而且操作次数越多，读数的不稳定性会增加，从而影响结果的精度。

改进方案

为了解决上述方案的不足之处，下面提出改进方案。由共振条件可以看出，射频场频率与磁场的大小成正比，因此可以考虑用线性拟合的方法进行实验^[4]。具体来说，当地磁场水平分量、水平扫场与水平磁场三者同向时，共振条件可以改写为

$$\nu = \frac{g_F \mu_B}{h} (B_0 + B_E + B_S) \quad (8)$$

具体方法是测量得到 (ν, B_0) 一组数据，用计算机软件对这些数据进行线性拟合

$y=k_1x+b_1$ ，由直线斜率可以求出 g_F 因子^[4]，而由直线的截距可以求出地磁场水平分量与扫场之和，即

$$b_1 = \frac{g_F \mu_B}{h} (B_E + B_S) \quad (9)$$

在这个基础上，把扫场反向，大小不变，共振条件变为

$$\nu = \frac{g_F \mu_B}{h} (B_0 + B_E - B_S) \quad (10)$$

这种情况下得到的 (ν, B_0) 一组数据，通过拟合直线 $y=k_2x+b_2$ ，同样可以求出 g_F 因子，但截距反映的是地磁场与扫场之差，即

$$b_2 = \frac{g_F \mu_B}{h} (B_E - B_S) \quad (11)$$

由(8)(10)两式可以求出地磁场水平分量

$$B_E = \frac{h}{g_F \mu_B} (b_1 + b_2) \quad (12)$$

由此便可以通过拟合的结果同时得到待测的朗德 g_F 因子和地磁场水平分量。

拟合结果

这里给出 (ν, B_0) 分别在扫场同向和反向情况下的拟合结果，频率 ν 的单位为kHz，水磁场 B_0 的单位为Gs，

对于 Rb^{87} 的共振信号，

$$\nu_{\text{同向}} = 700.0B_0 + 423.4 \quad (13)$$

$$\nu_{\text{反向}} = 706.4B_0 - 75.7 \quad (14)$$

由此可以得到 Rb^{87} 的 g_F 因子为 0.5000 ± 0.0006 和 0.5044 ± 0.0008 ，而地磁场水平分量为 $(2.48 \pm 0.07) \times 10^{-5} T$ 。

同理，对于 Rb^{85} ，

$$\nu_{\text{同向}} = 466.6B_0 + 282.4 \quad (15)$$

$$\nu_{\text{反向}} = 471.2B_0 - 50.1 \quad (16)$$

g_F 因子为 0.3334 ± 0.0005 和 0.3367 ± 0.0009 ，地磁场水平分量为 $(2.49 \pm 0.09) \times 10^{-5} T$ 。

四条拟合直线如下图所示

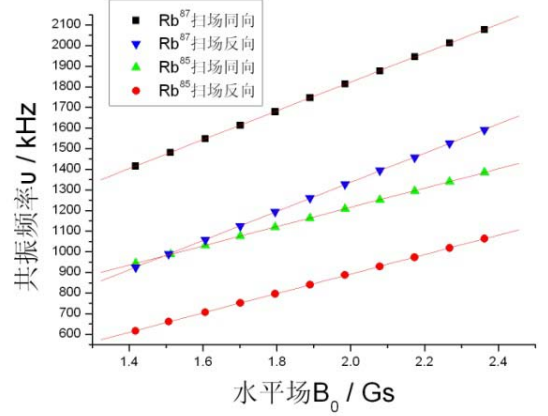


图4 $\nu \sim B_0$ 关系图

结果分析

接下来对改进方案的合理性和优点进行分析。

首先，对于存在线性关系的数据，采用线性拟合的办法不仅符合物理规律，而且可以得到精确的结果。对于本实验的结果，线性拟合相关系数达0.99999，而且测量结果与理论值0.5000和0.3333都十分接近，可见直线拟合方法的合理性与准确性。

同时，与传统的实验方法相比，可以在很大的程度上减小偶然误差。因为线性拟合的结果是多次测量综合得到的，相当于根据误差的大小对测量结果加权平均，比多次测量再直接取平均值更加合理。

其次，一般的方法在磁场反向时要求水平磁场必须大于地磁场与扫场之和，而改进方案没有这个限制，只要求扫场不能太大，适用性得到增强。

再次，新的方案解决了一般方案操作复杂的弊端。平均每次测量，只需要进行一次磁场的反向操作就可以同时得到朗德因子和地磁场水平分量大小的信息。对于多次重复性测量，可以大大缩短整个实验的流程，从而提高可操作性。

最后，方案的改进体现了对实验原理——共振条件——的深层思考，不仅开阔了实验的物理内容，还可以提高实验者的思考能力。

总之,改进的实验方案拥有其传统方案所无法比拟的优势。

新问题探索

使用改进后的方案进行实验不免多次改变水平磁场和频率大小寻找共振信号。而在多次实验的过程中,发现除Rb⁸⁷和Rb⁸⁵的光磁主信号外,在一定条件下还观察到其它的共振信号,由于它们的幅度比主信号小,故称为次级信号。该发现与类似的报道相符^[9~10]。以下对此进行一系列研究。

正常情况下对应于一个水平场,有一个Rb⁸⁷和一个Rb⁸⁵的共振吸收峰,但在实验中发现,除了这两个峰外还有多个小共振峰出现。如当垂直场线圈电流0.058A,水平场电流0.404A,射频场幅度4.0V时,其测量数据如下表所示:

序号	f / kHz	强度/mV	Rb ⁸⁷	Rb ⁸⁵
			1755.0/f	1168.3/f
1	1755.0	40.0	1	
2	1168.3	32.0		1
3	886.1	9.2	2	
4	586.4	21.2	3	2
5	390.3	16.8		3
6	351.2	11.6	5	
7	232.7	7.4		5

表1 共振信号的频率与强度

从上表可以看到,在该实验条件下观测到七个射频共振频率。其中第一个信号来自Rb⁸⁷,第二个来自Rb⁸⁵,这两个是满足共振条件的主信号,强度最大。最后两列给出的是主信号与所有信号频率之间的比值,由此可以看出次级信号的频率与主频率之间存在整数倍的关系,误差在2%内。

另外由第三列信号强度的数据可以清楚看到次级信号的强度确实比主信号小40%以上。但频率为586.4kHz的信号强度相对较强,有可能是Rb⁸⁷和Rb⁸⁷两种同位素产生的信号叠加而成。原因是该频率正好同时与两个主信号的频率满足整数倍关系。

为了进一步研究该现象,我们还研究了次

级信号强度与射频场振幅之间的关系。如垂直场线圈电流0.058A,水平场电流0.404A,共振频率为886.1kHz,也就是上表的第三个信号,其数据如下表所示:

射频场振幅 / V	信号强度 / mV
小于2	无信号
3.0	4.2
3.6	7.0
4.0	9.0
4.6	9.4
5.0	11.6
5.6	13.4
6.0	14.6
6.6	19.4
7.0	22.0

表2 次级信号强度与射频振幅的关系

由上表可以看出次级信号的强度与射频场振幅密切相关。特别是当振幅较小时,无法观测到次级信号。这就是次级信号不容易被发现的重要原因。由于实验仪器的精度有限,无法较准确地定量分析信号强度的变化规律,所以进一步的研究请看相关报道,如汪华英等经研究认为小信号的强度与射频场振幅之间存在二次函数的关系^[9]。

至于产生次级信号的原因有二:第一,射频场振幅较大时频率可能发生畸变,产生谐波,即同时产生 ν , 2ν , 3ν ……等频率的正弦波,则当射频场频率与共振频率满足倍数关系时也可以产生共振信号。

第二,小信号的产生也可能是多量子跃迁的结果,即跃迁条件变为

$$nh\nu = g_F \mu_B B \quad (17)$$

也就是说,第一个磁共振信号的频率对应单能量量子的跃迁,那么频率是它一半的磁共振信号对应于能量小一倍的双量子跃迁^[10]。双量子跃迁对应的是Rb原子同时吸收两个能量为 $h\nu$ 的“光子”进行跃迁。对于双量子跃迁,跃迁几率正比于射频场振幅的平方^[9],这也能说明从表2得到的结论,即射频场强度越大(即能量越大)磁共振信号强度也越大。用这种观点解释,一般情况下多量子跃迁的磁共振信号太弱,很难检测到,当射频场能量增加时,参与这些子

能级跃迁的粒子数增加,因此可以观测到次级信号。

在无法排除射频场产生倍频谐波的情况下,比较合理的解释是上述两种所用综合而成的结果,即一部分由倍频谐波产生,一部分由多量子跃迁贡献。

结束语

在原子内部所发生的微观物理过程,是看不见、摸不着的,只能运用特定的实验手段配以相应的仪器进行观测;而不断地改进实验方法,从而提高实验的精度是科学研究中必不可少的一环。本文提供的改进方案不仅概念和原理明确,而且精度高,实用性和可操作性强,引发广大师生不断观察、分析、思考的兴趣。

同时,由于改进方案所引起对实验中反常小信号的观测和研究体现了科学探索的精神,鼓励大家不断挖掘出新的内涵。

总之,本实验无论在实验方法或者现象分析的层面上都蕴藏着极丰富的物理内容。这对教师和学生提出了一定的挑战,带来了难得的机遇。

参考文献

- [1] 吴思诚,王祖铨.近代物理实验.北京大学出版社,1995
- [2] 王洪涛等.光磁共振实验最佳扫场参数的确定和抽运信号图分析.物理测试,2005,23(2):45~48
- [3] 赵汝光等.关于光泵磁共振实验中的几个问题.物理实验,1986,6(4):147~150,154
- [4] 李潮锐.光磁共振实验的数据拟合方法.物理实验,2004,24(7):37~39
- [5] 熊正焯,吴奕初,郑裕.光磁共振实验中测量 g_F 值方法的改进.物理实验,2000,20(1):3~4,15
- [6] 严雯,王秋君.探讨光磁共振实验中测量 g_F 值的方法.物理实验,2000,20(12):40~42
- [7] 侯清润等.光泵磁共振实验中测量地磁场水平分量的方法.物理与工程,2007,17(3):35~38
- [8] 侯清润,曾蓓,张薇薇等.磁场对光抽运信号的影响.物理实验,2001,21(12):9~12
- [9] 汪华英,李兰秀,张仲秋,林露芳等.光泵磁共振信号幅度与射频场振幅的关系.物理实验,2005,25(7):30~32
- [10] 张清,陈一冰,王煜,张桂樵.光泵磁共振实验中小信号的讨论.物理实验,2000,20(10):48~49