

通过关键问题逐步理解光泵磁共振实验的测量结果

王钦生 马 杰 冯 璐 段俊熙

(北京理工大学物理学院, 北京 100081)

摘 要 光泵磁共振实验利用光抽运效应研究原子超精细结构塞曼能级间的磁共振跃迁。这一实验可以加深学生对原子超精细结构、塞曼劈裂、光跃迁以及磁共振等物理现象的理解,是近代物理实验教学中重点内容之一。由于实验样品铷存在两种同位素、加在样品上的磁场有多个来源以及实验器材的局限性等因素,光泵磁共振实验也是近代物理实验教学中的一个难点。如何使学生在实验测量过程中,更好地理解实验原理,并真正懂得实验测量结果的意义,是光泵磁共振实验教学中的核心问题。本文将通过对实验中六个关键问题的逐步阐述,以及引入坐标这种图像化工具,搭建起实验物理原理与实验测量结果的桥梁,引导学生深入理解其中的物理过程。

关键词 光泵磁共振;光抽运;磁共振;扫场法;扫频法

UNDERSTAND THE MEASUREMENT RESULTS OF OPTICAL PUMPING MAGNETIC RESONANCE EXPERIMENTS THROUGH KEY QUESTIONS

WANG Qinsheng MA Jie FENG Lu DUAN Junxi

(School of Physics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

Abstract Optical pumping magnetic resonance (OPMR) utilizes the optical pumping effect to study the magnetic resonance transitions between the hyperfine Zeeman levels of atomic structures. This experiment can deepen students' understanding of atomic hyperfine structure, Zeeman splitting, optical transitions, and magnetic resonance, making it one of the key components in modern physics laboratory teaching. However, due to factors such as the presence of two isotopes of the experimental sample rubidium, multiple sources of the magnetic field applied to the sample, and limitations of the experimental equipment, OPMR experiments also pose a challenge in modern physics laboratory teaching. How to enable students to better understand the experimental principles during the measurement process and truly grasp the significance of the experimental results is the core issue in OPMR experimental teaching. In this paper, by gradually elaborating on six key issues in the experiment and introducing the graphical tool of coordinates, we aim to build a bridge between the experimental physical principles and the experimental measurement results. This approach will guide students to gain a

收稿日期: 2023-09-15

基金项目: 国家自然科学基金(12074036)。

通信作者: 段俊熙, junxi.duan@bit.edu.cn。

引文格式: 王钦生, 马杰, 冯璐, 等. 通过关键问题逐步理解光泵磁共振实验的测量结果[J]. 物理与工程, 2025, 35(4): 169-176.

Cite this article: WANG Q S, MA J, FENG L, et al. Understand the measurement results of optical pumping magnetic resonance experiments through key questions[J]. Physics and Engineering, 2025, 35(4): 169-176. (in Chinese)

deeper understanding of the underlying physical processes.

Key words optical pumping magnetic resonance; pumping signal; resonance signal; field scanning method; frequency scanning method

光泵磁共振实验是近代物理实验教学中的一个重要实验,涵盖了光学、电磁学以及原子物理等多方面内容^[1-3]。利用光抽运过程和射频磁共振过程,该实验可以在弱磁场下探测原子能级超精细结构塞曼能级间的磁共振跃迁,同时可以应用于地磁场等弱磁场的测量^[4-6]。通过该实验教学,可以加深对原子超精细结构、塞曼劈裂、光跃迁以及磁共振等物理现象的理解。

实验过程中,需要通过调节扫场幅度、水平磁场幅度以及射频信号频率等物理参数寻找磁共振信号,并依此计算出实验样品的 g_F 因子。目前近代物理实验广泛使用的 DH807 型光泵磁共振仪(北京大华无线电仪器厂)中的测试样品为⁸⁷Rb 和⁸⁵Rb 两种同位素的混合物。由于测试样品中两种同位素的 g_F 因子不同,实验观测中会呈现两套磁共振信号。如何准确找到磁共振信号并确认其来源是整个实验的要点和难点。然而,样品所处的磁场由外加直流磁场、交流扫场以及固定地磁场构成,而其中地磁场与扫场的幅度未知^[7]。此外,仪器输出的扫场以及射频信号并不理想,扫场除了交流部分还有一个直流分量,而射频信号则存在一定的畸变,从而包含基频及倍频分量^[8]。这些因素使得两种同位素产生的基频以及倍频信号相互错开(倍频现象也可能来源于相关能级之间的相干双光子吸收、三光子吸收等非线性过程,倍频来源本文不做讨论),缺乏一定的规律性,因此,在有限的教学时间内如何准确的找到磁共振信号,是实验的难点。基于多年的实验教学观察,学生在实验过程中缺乏对测量结果与物理过程之间关联的理解。因此,他们在寻找磁共振信号、确认磁共振信号来源以及最终计算 g_F 因子等步骤都存在疑问^[9-19]。本文在我们之前文章探讨的对光泵磁共振实验中实验参数选取原则的基础上^[20],进一步展开探讨,通过对实验中几个关键问题的逐步阐述,为学生建立起实验中物理过程的图像,加深对实验原理和实验结果的理解。

1 实验测量的是什麼? 与待研究问题的关系是什麼?

理解实验的第一个问题是理解实验测量的是

什麼,以及实验测量量与待研究问题的关系。我们将通过介绍实验测量装置,说明实验的测量量与待研究问题的关系。光泵磁共振实验中,实验样品置于磁场中。此时,样品中电子的简并态超精细结构能级发生塞曼劈裂,形成一系列塞曼能级。由于电子跃迁过程中需要满足角动量守恒,在有明确圆偏振的光激发下,不同塞曼能级上的电子数会存在差别,大量电子会被抽运到某个特定能级上,达到一个稳定的动态平衡状态,在该状态下,样品对圆偏振光的吸收较弱。实验中通过测量特定圆偏振光经过样品后的功率来探测样品的信息。当样品中原有的动态平衡状态被打破时,电子态会重新分布,从而导致对圆偏振光吸收的变化,这时,示波器上会出现一个吸收峰。本实验中,电子的动态平衡会在两种情况下被打破。一方面,当调节总磁场幅度经过零点时,塞曼能级恢复简并,电子会重新排布,导致样品对圆偏振光的吸收增强。因此,通过扫场使总磁场在零点附近振荡时,可以观测到非常明显的圆偏振光透过样品后的功率下降,即光抽运信号。另一方面,在总磁场远离零点时,可以通过合适频率的射频信号增强电子在塞曼能级间的跃迁,从而使得原来的动态平衡被打破,示波器上也会出现吸收峰。实验中通过调节磁场大小或者射频信号频率来达到磁共振条件,并利用共振条件测量朗德 g_F 因子。

2 如何判断实验中吸收信号的来源?

从上述实验原理可知,光抽运信号和磁共振信号都会在示波器上出现吸收峰,而对两种元素的朗德 g_F 因子的测量是利用磁共振信号的共振条件。由于光抽运信号的存在会对磁共振信号的辨认产生干扰,因此本实验的第二个关键问题是区分示波器上出现的吸收峰是光抽运信号还是磁共振信号。区分信号来源需要利用两种信号产生的条件。光抽运的信号发生在总磁场经过零点的时候,而磁共振信号需要射频频率与总磁场满足共振条件。两者可以分别表示为

$$B_t = B_{ex} + B_s + B_E = 0$$

$$h\nu = g_F \mu_B B_t$$

其中, B_t 、 B_{ex} 、 B_s 和 B_E 分别为总的水平磁场、外加水平磁场、外加水平扫场和地磁场水平分量(由于垂直方向的地磁场已经用外加垂直磁场抵消,故不再讨论), ν 为射频信号的频率, g_F 为样品的朗德因子, μ_B 为玻尔磁子。在实验过程中,可以通过固定射频频率改变磁场或者固定磁场改变射频频率两种方式实现共振,分别称为扫场法和扫频法。从光抽运信号和磁共振信号的出现条件可知,磁共振信号的出现必须依赖外加射频源。因此,判断磁共振信号最直接的方法是关闭射频源,如果射频源关闭后,吸收峰仍然存在,则该信号为抽运信号;如果射频源关闭后吸收峰消失,则信号为磁共振信号。另外,通过实验中观察可以发现,抽运信号与磁共振信号在示波器中的形状是有区别的。由于抽运过程的特征时间长于磁共振过程,因此抽运信号较为平滑而磁共振信号有陡峭的下降沿。

3 理想实验条件下,吸收信号的特征和出现规律是怎样的?

在确定吸收峰的来源后,我们接下来讨论的第三个关键问题是实验中吸收峰的特征和出现规律。在实验测量中,结合信号出现的特征和规律可以更为有效地寻找信号,同时避免信号的遗漏。为了对物理过程有直观理解,同时与在示波器上的观测有直接关联,引入如下示意坐标图:坐标横轴表示时间,纵轴表示磁场。样品所处的总磁场根据所加的扫场波形在坐标系中表现为一个随时间振荡的曲线。曲线的振荡幅度为扫场的幅度。当改变外加水平磁场时,总磁场曲线沿纵轴上下平移,当外加正向水平磁场时,总磁场向上平移;外加负向水平磁场时,总磁场向下平移。光抽运信号出现在总磁场曲线与横轴的交点($B_t = 0$),如图 1(a)所示。对于磁共振信号,从射频信号可以得出一个对应的磁场 $B_v = \frac{h\nu}{g_F \mu_B}$ 。这一磁场不随时间变化,在坐标图中用一个平行于横轴的虚线表示。从共振条件可知,磁共振信号出现在总磁场曲线与虚线的交点,如图 1(b)所示。以下将基于坐标图对实验涉及的物理过程以及测量数据展

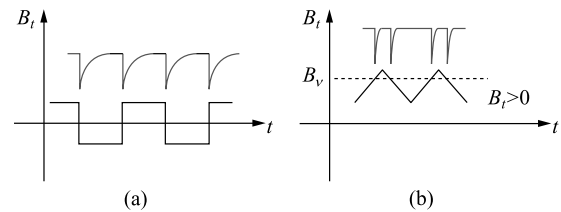


图 1 示意坐标图及抽运信号和磁共振信号例子
(a) 抽运信号; (b) 磁共振信号

开讨论。

我们首先基于坐标图讨论光抽运信号和磁共振信号出现的规律。为了便于讨论,先假设体系中只有一种同位素,因此从 g_F 因子可以得出一个 B_v 。由于沿水平轴两个相反方向的磁场都可以产生磁共振信号,因此在坐标图中可以画出 $+B_v$ 和 $-B_v$ 两条虚线,如图 2 所示。同时,我们首先忽略地磁场,在零水平磁场下,总磁场只有中心在零点的三角扫场。很显然,扫场幅度不能超过 B_v ,否则会出现同时出现抽运和磁共振信号,且抽运信号强于磁共振信号会导致没法准确观测磁共振信号。

下面考虑在固定射频频率下改变水平磁场时磁共振信号出现的规律,即扫场法。在扫场幅度小于 B_v 时,随着正向水平场的增大,总磁场曲线逐渐远离横轴向上移动,如图 2 所示。当总磁场曲线完全脱离横轴且未与 $+B_v$ 虚线接触时,示波器上将观测不到任何信号。这提供了一个确定正向第一个信号的判据。当正向水平磁场继续增大时,总磁场曲线将与 $+B_v$ 虚线接触,从而产生磁共振信号。很显然,正向情况下,三角扫场的峰位先碰到虚线,因此对应于该同位素的磁共振信号应该从三角波峰位开始出现。之后,总磁场曲线

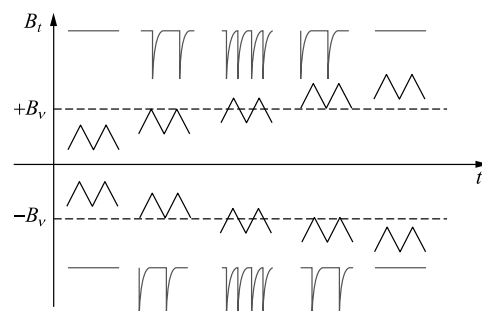


图 2 只有一种同位素时,正向和反向扫场的信号出现规律
从左到右外加水平磁场逐渐增大,对应黑色总磁场逐渐远离横轴,灰色曲线为磁共振信号图形

与虚线的交点从峰位一份为二,对应着磁共振信号劈裂成两个。随着水平磁场进一步增大,同一个峰位劈裂开来的磁共振信号逐渐远离对方往三角扫场的谷位移动,并与邻近峰位劈裂出来的共振峰靠近。当三角扫场的谷位与虚线接触的时候,两个靠近的共振峰合而为一出现在谷位。之后,总磁场曲线将离开 $+B_v$ 虚线,磁共振信号从谷位消失。因此,在正向水平场下,对应于一个同位素的信号应该按照从峰位出现-峰位劈裂-往谷位移动-在谷位合并-从谷位消失的规律出现。对于反向水平磁场,则恰好与正向相反,对应该同位素的信号按照从谷位出现-谷位劈裂-往峰位移动-在峰位合并-从峰位消失的规律出现。需要指出的是,以上所述峰位出现及消失的规律,对于抽运信号也适用,所以无法通过峰位出现及消失规律来判断信号是抽运信号还是磁共振信号。两种的信号差异在于,抽运信号出现在磁场与横轴($B_t = 0$)的交点处。

对于扫频法,则需要固定水平磁场。此时,总磁场曲线位于坐标图中一个固定位置。考虑总磁场曲线在正向一侧,将射频频率从高往低进行扫描(扫描从高往低的原因会在后面讨论)的过程。

由 $B_v = \frac{h\nu}{g_F \mu_B}$ 可知,当射频频率从高往低扫描时,坐标图中对应于该频率的 B_v 虚线将从纵轴正向朝横轴靠近。显然,虚线将先与总磁场曲线在三角扫场的峰位接触。因此,信号出现规律与正向扫场是一样的,即按照从峰位出现-峰位劈裂-往谷位移动-在谷位合并-从谷位消失的规律出现,如图3所示。而对于总磁场在负向一侧,则信号出现规律与反向水平磁场时的扫场信号一致。通过这些规律就可以准确地判断哪些峰谷信号是属

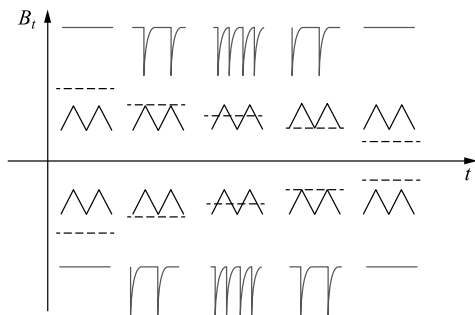


图3 只有一种同位素时,正向和反向扫频的信号出现规律从左到右射频频率逐渐减小,对应虚线 B_v 逐渐靠近横轴,灰色曲线为磁共振信号图形

于同一种同位素的,并且不容易产生遗漏。

4 实验中有哪些干扰? 实际实验过程中的磁共振信号是怎样的?

上部分中我们讨论了单一吸收峰的出现和消失的规律。显然,这些简洁的规律来源于开始的几个假设。我们接下来讨论实验中的第四个关键问题,即考虑实际操作过程的各种因素,磁共振信号会出现什么变化? 以下将逐步加入实验过程中实际存在的因素进一步讨论信号产生的规律。需要说明的是,由于扫场法与扫频法信号出现规律的一致性,以下讨论将只讨论扫场情形,对于扫频情形可以依照上面讨论类推。

首先,实际测试的样品中存在两种同位素,其中 ^{87}Rb 的 g_F 因子大于 ^{85}Rb 。因此对应一个固定的射频频率,可以在坐标图中画下与 ^{87}Rb 和 ^{85}Rb 对应的 B_v 虚线,分别记为 B_v^{87} 和 B_v^{85} ,其中 B_v^{87} 比 B_v^{85} 更靠近横轴,如图4(a)所示。显然,为了避免两种同位素的磁共振信号同时出现,扫场幅度除了小于 B_v^{87} 外,还需要小于 B_v^{87} 和 B_v^{85} 的间隔。在这种情况下,增大水平磁场的过程中,可以先观测到 ^{87}Rb 的磁共振信号,再观测到 ^{85}Rb 的信号。信号出现规律与前述只有一种同位素时一样。然而,由于事先并不知道 B_v^{87} 和 B_v^{85} 的间隔,也无法测量扫场的幅度,因此在实际操作过程中很容易出现扫场幅度大于 B_v^{87} 和 B_v^{85} 的间隔的情况。此

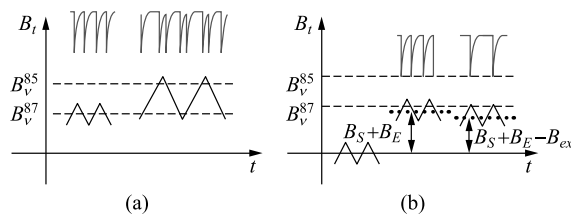


图4 实际实验中的磁共振信号。(a)有两种同位素时,坐标图中存在两条 B_v 虚线。左边表示扫场幅度小于两条虚线间距时信号出现的情况。右边表示在扫场幅度大于两条虚线间距时,会同时观测到在峰位和谷位出现的磁共振信号,分别来源于不同的同位素。(b)左边表示理想的扫场。中间表示由于存在非零地磁场以及扫场中非零水平分量,外加水平磁场为零时的磁共振信号。右边表示通过反向施加外加水平磁场可以将总磁场往下移动,重新将 B_v^{87} 对应的峰位信号找出来。点线表示的是扫场的中心值

(a) 扫场幅度的影响; (b) 地磁场的影响

时在扫场过程中就会出现两种同位素的磁共振信号同时存在。但只要清楚了信号的出现及演化规律,这种情况并不会对指认磁共振信号产生影响。通过前面的分析,可以肯定的是, ^{87}Rb 的共振峰(谷)信号一定先于 ^{85}Rb 的磁共振峰(谷)信号出现。唯一需要注意的是在扫场过程中仔细观察在峰或者谷位置新出现的信号。

其次,在上述讨论中,我们忽略了地磁场的存在,同时认为扫场信号是个理想的中心位于零点的三角波。实际上,地磁场一直存在,其水平分量相当于加了一个水平磁场。此外,由于设备电路设计问题,扫场信号并不仅仅只有随时间振荡的三角波形,还包含一个水平直流分量,即扫场输出 $B_s = B_{sD} + B_{sA}$ 。这里 B_{sD} 和 B_{sA} 分别是扫场信号中的直流分量和交流分量峰峰值的一半,且水平直流分量的幅度 B_{sD} 正比于扫场幅度。因此,若扫场幅度较大,即使外加水平磁场为零,地磁场水平分量与扫场中的直流分量也可以将总磁场往正向移动到与 B_v^{87} 甚至 B_v^{85} 有交点的情形,如图 4(b)所示。这就意味着,在外加磁场为正向的情况下,当 $B_{sD} + B_{sA} + B_E > B_v^{87}$ 时,扫描外加水平磁场的过程中,会有峰位的磁共振信号缺失。然而,从坐标图中可以清楚地看到,这些缺失的信号可以通过反向加水平磁场来获得。在扫场幅度较小时,即 $B_{sD} + B_{sA} + B_E < B_v^{87}$ 时,就可以肯定总磁场在正向时观测到的第一个峰位磁共振信号和总磁场在反向时观测到的第一个谷位磁共振信号都来源于 ^{87}Rb ,进而根据前述的讨论——指认其他磁共振信号。由于抽运信号的存在学生在指认信号起源时可能出现错误,判断信号来源中关键的一点是,我们在调节水平磁场初始状态 $B_{ex} \sim 0$ 时,准确判断总磁场 $B_t = B_{ex} + B_s + B_E = B_{sD} + B_{sA} + B_E$ 与目标磁场 B_v^{87} 及 B_v^{85} 的关系,以及 $B_t = B_{sD} - B_{sA} + B_E$ 与 0 的关系。在实际实验设备中,由于设备中 B_{sD} 总是略大于 B_{sA} ,因此 $B_{sD} - B_{sA} + B_E$ 总是大于 0。这就意味着,在外加水平场正向情况下,初始状态 $B_{ex} \sim 0$ 时,必定不会出现抽运信号,换言之,如果初始状态 $B_{ex} \sim 0$ 时出现信号,必定为磁共振信号。仅需要确认 $B_t = B_{sD} + B_{sA} + B_E$ 与 B_v^{87} 及 B_v^{85} 的关系。当 $B_{sD} + B_{sA} + B_E < B_v^{87}$ 时,初始状态无吸收信号,在扫描外加水平磁场的过程中,会逐渐按图 2 所示规律出现 ^{87}Rb 及 ^{85}Rb 的磁共振信号。当 $B_v^{87} < B_{sD} +$

$B_{sA} + B_E < B_v^{85}$ 时,初始状态会出现 ^{87}Rb 的吸收信号,且在扫描外加水平磁场的过程中,会缺失三角波峰位置出现的 ^{87}Rb 吸收信号。当 $B_{sD} + B_{sA} + B_E > B_v^{85}$ 时,初始状态会同时出现 ^{87}Rb 及 ^{85}Rb 的吸收信号,且在扫描外加水平磁场的过程中,会缺失三角波峰位置出现的 ^{87}Rb 及 ^{85}Rb 的吸收信号。

对于扫频法,上述几个因素也会产生类似于扫场下的影响。但是,在明确了信号出现规律的情况下,通过坐标图的方法就可以准确的指认出磁共振信号。

5 如何克服实际实验条件中的干扰?

当充分了解了磁共振信号出现的规律之后,我们讨论的第五个关键问题是如何克服实际实验条件中的干扰?我们首先分析磁共振信号一共有多少。理解这一问题不仅可以提高实验操作的效率,更重要的是能避免遗漏信号。从坐标图中可以看到,对于有两种同位素的测试样品,在一个固定频率下,坐标图中一共有正向和反向各两条 B_v 虚线。由于实验要求记录下对应于三角扫场峰位和谷位的磁共振信号数据。即使考虑上述几个实际因素,可以发现一共能观测到正向和反向各四个外加水平场 B_{ex} 强度,且峰位和谷位各占一半,如图 5 所示。

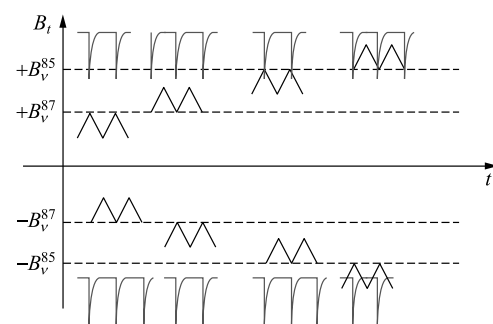


图 5 理想实验中的三角扫场峰位及谷位振信号个数

然而,在实际的扫场和扫频测试过程中会发现磁共振信号数目不止上面讨论的八个。对于这一情况,从扫场数据中并不能看出端倪,而扫频数据却展现出很好的规律。如前所述,在扫频测试中,将射频频率从设备允许的最高频率往低调节的过程对应于坐标图中 B_v 虚线往横轴靠近。仔细观察记录的数据,可以发现这些磁共振信号存在整数倍数的关系,见表 1 的数据。例如,对于第

一个出现的峰位磁共振信号,在频率为它的 $\frac{1}{2}, \frac{1}{3}$ 时也可以观察到峰位的磁共振信号。这一整数倍规律揭示了磁共振信号数目不止八个的原因。实验中用于激发磁共振信号的射频信号并不是理想的正弦波,因此它的频谱除了基频之外,还存在倍频分量。这就导致在施加频率为 ν 的射频信号时,体系实际上处于频率为 $\nu, 2\nu, 3\nu \dots$ 等射频信号中。在坐标图中,这些倍频信号表示为 $2B_\nu, 3B_\nu \dots$ 虚线,如图 6 所示。当射频频率从高往低调节时, B_ν 虚线先与总磁场曲线相交,给出了基频下的磁共振信号。当频率进一步降低时,倍频导致的 $2B_\nu, 3B_\nu$ 等虚线先后与总磁场曲线相交,导致了倍频下的磁共振信号。这就解释了为什么实际测量时能够观测到超过八个磁共振信号。这也同样解释了为什么在扫频过程中需要将频率从高往低扫描。若是从低往高扫描,在低频下会观测到非常多间隔很近甚至重合的磁共振信号,而这些信号都是倍频信号,并不适合用于计算 g_F 因子。相应的,在扫场过程中,对应于一个射频频率,坐标图中存在一系列 $B_\nu, 2B_\nu, 3B_\nu \dots$ 虚线。当逐渐增大水平磁场时,总磁场曲线会依次与这些虚线相交,从而产生多个磁共振信号。这导致学生在实验过程中对磁共振信号来源的确认经常产生错误。要正确确认信号来源,我们需要借助于抽运信号。由于抽运信号出现在 $B_t = 0$ 的位置,通过抽运信号及磁共振信号出现的顺序,可以准确确认磁共振信号的来源。从这也可以看出扫场时需要将水平磁场从低往高扫描的原因。但是,由于前述地磁场及扫场幅度的原因,在外加水平磁场 ~ 0 时,也可能出现总磁场与 B_ν^{87} 及 B_ν^{85} 相交的情况,即初始状态同时出现来自 ^{85}Rb 及 ^{87}Rb 的吸

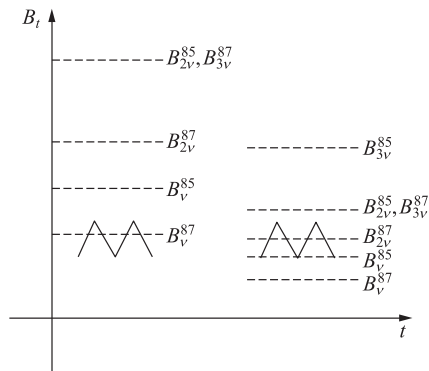


图6 磁共振信号的个数。左边的射频频率高于右边

收峰,在增加水平磁场时,又出现 $2B_\nu, 3B_\nu$ 等倍频信号引起的吸收峰,特别是,如果某一同位素的吸收峰幅值较低,信号不明显,在实验过程中可能会漏掉某组信号,从而导致对磁共振信号来源判断的错误,这一错误是学生实际实验中最常出现的错误,并最终导致计算的 g_F 因子与理论值相差很大。因此,在实验中我们需要准确确认磁共振信号来自 B_ν^{87} 还是 B_ν^{85} 。如上第三部分所述,可以通过抽运信号及磁共振信号出现的顺序,准确确认磁共振信号的来源。

表1 扫频法获得的磁共振信号

扫频 序号	水平场 0.22A, 正向			水平场 0.38A, 反向		
	$\nu /$ kHz	共振 位置	所属	$\nu /$ kHz	共振 位置	所属
1	1201	峰	^{87}Rb	993	谷	^{87}Rb
2	973	谷	^{87}Rb	759	峰	^{87}Rb
3	799	峰	^{85}Rb	664	谷	^{85}Rb
4	647	谷	^{85}Rb	506	峰	^{85}Rb
5	601	峰	^{87}Rb (二倍)	498	谷	^{87}Rb (二倍)
6	487	谷	^{87}Rb (二倍)	380	峰	^{87}Rb (二倍)

6 如何计算 g_F 因子?

经过前面的分析,已经可以全面观测并准确指出两种同位素由射频基频信号引起的共振信号了。接下来讨论实验的第六个关键问题,即如何通过上述磁共振信号计算两种同位素的 g_F 因子? 原则上,只要知道发生磁共振时的射频频率和总磁场大小即可通过式(2)计算出 g_F 因子。然而,如前所述,总磁场包括三个部分:外加水平磁场、地磁场水平分量、扫场,其中只有外加水平磁场可以通过仪表读出具体的数值,地磁场和扫场都未知。

因此,计算 g_F 因子的问题变成了如何消除地磁场和扫场幅度未知的影响。这一问题的解决方案可以很容易从坐标图中看出,如图 7 所示。以扫场法为例,射频频率对应 B_ν 。计算 g_F 因子就是要利用移动总磁场与 B_ν 相交来确定 B_ν 的数值。虽然地磁场和扫场幅度未知导致不能直接通

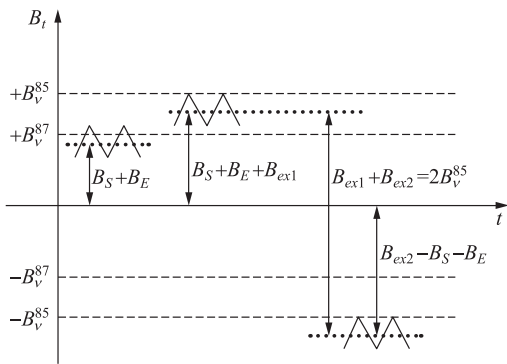


图7 如何计算 g_F 因子的示意坐标图。图中以利用峰位磁共振信号计算 ^{85}Rb 的 g_F 因子。左边表示有地磁场和扫场平移下零外加水平磁场时扫场的位置。中间表示通过施加正向外加水平磁场找到 ^{85}Rb 的峰位磁共振信号。右边表示通过施加反向外加水平磁场找到 ^{85}Rb 的峰位磁共振信号。对比中间和右边可以清楚看到,只有正反向考虑相同扫场位置的磁共振信号时,才能通过正反向外加水平磁场的值得到准确的 B_v 值

过调节水平磁场来确定 B_v 。但地磁场和扫场只是将零外加水平场下的总磁场进行了沿纵轴方向的平移。那么,在这两者不发生改变的情况下,就可以通过改变水平磁场来上下移动总磁场,进而测出 $+B_v$ 和 $-B_v$ 的间距,即 $2B_v$ 。这一解决方案在实际操作过程中就是通过施加正向和反向水平磁场来实现。

理解了如何利用正反向消除地磁场和扫场的影响后,接下来的问题就是如何确定 $2B_v$? 在实际操作中,指认了正向和反向条件下每种同位素在三角扫场的峰位和谷位发生磁共振时对应的水平磁场数值。上述问题可等价于,如果正向选取了某个同位素在峰位磁共振时的水平磁场数值,那么反向应该选取同一同位素在峰位还是谷位磁共振时的水平磁场数值呢? 这一问题同样可以从坐标图中得到答案。如图7所示,在改变水平磁场方向的时候,地磁场和扫场都没有发生变化。因此,为了得到 $2B_v$,反向应该选取和正向一样位置共振对应的水平磁场数值。此时,水平磁场总的移动距离才是 $2B_v$ 。

上述讨论给出了扫场下计算 g_F 因子的方法。那么利用扫频法怎么计算 g_F 因子呢? 结合坐标图,如图7所示,从上述讨论可以很直接地推广到扫频法。同样,为了消除地磁场和扫场未知的影响,需要得到正反向水平磁场下的数据。扫场法

中,固定的射频频率决定了 $+B_v$ 和 $-B_v$ 的位置,正反水平磁场量出了 $2B_v$ 的大小。扫频中,却是固定总磁场,通过改变频率来确定 B_v 的大小。为此,可以发现只要在正反向水平磁场下通过扫频确定出各自的磁共振信号,就可以计算出 g_F 因子。同样的,正反向需要选择相同峰位或者谷位的共振信号数据。首先,调节到一个合适的正向水平磁场 B_+ 。再通过扫频(从高往低扫描)找到某个同位素在峰(谷)位发生共振对应的频率 ν_+ 。其次,反向水平磁场,调节到一个合适的值 B_- 。然后通过扫频找到同一个同位素在峰(谷)位发生共振对应的频率 ν_- 。由共振条件可知, $g_F =$

$$\frac{h(\nu_+ + \nu_-)}{\mu_B(B_+ + B_-)}.$$

至此,通过对实验中几个关键问题的逐步阐述,我们已经构建了实验观测现象与物理过程的联系。坐标图提供了这一联系的直观图像,对理解整个实验有非常大的帮助。

7 结语

本文探讨了在光泵磁共振实验中如何通过提问的方式搭建起实验观测现象与实际物理过程间的桥梁。通过引入坐标这种图像化工具,得到实验常见问题的解决方案。

参 考 文 献

- [1] 吴思诚, 荀坤. 近代物理实验[M]. 北京: 高等教育出版社, 2015.
- [2] WU S C, XUN K. Modern Physics Experiments[M]. Beijing: Higher Education Press, 2015. (in Chinese)
- [2] 周格, 李伟, 龚欣欣, 等. 光泵磁共振过程的理论和实验研究[J]. 大学物理, 2013, 32(11): 55-58.
- [2] ZHOU G, LI W, GONG X X, et al. Theoretical and experimental study of optically pumped magnetic resonance process[J]. College Physics, 2013, 32(11): 55-58. (in Chinese)
- [3] 彭军. 光泵磁共振设计性实验思路 and 教学效果[J]. 大学物理实验, 2010, 23(1): 22-25.
- [3] PENG J. Design ideas and teaching effects of optically pumped magnetic resonance experiments[J]. Physical Experiment of College, 2010, 23(1): 22-25. (in Chinese)
- [4] 侯清润, 王钧炎, 王天时, 等. 光泵磁共振实验中测量地磁场水平分量的方法[J]. 物理与工程, 2007, 17(3): 35-38.
- [4] HOU Q R, WANG J Y, WANG T S, et al. Method for measuring the horizontal component of the Earth's magnetic

- field in optically pumped magnetic resonance experiments[J]. Physics and Engineering, 2007, 17(3):35-38. (in Chinese)
- [5] 刘安平, 韩忠, 陈曦, 等. 利用光泵磁共振实验测量重庆地区地磁场[J]. 大学物理实验, 2013, 26(5):19-21.
LIU A P, HAN Z, CHEN X, et al. Measuring the geomagnetic field in Chongqing using optically pumped magnetic resonance experiments[J]. Physical Experiment of College, 2013, 26(5):19-21. (in Chinese)
- [6] 高子鐸, 池水莲, 王彩强, 等. 光泵磁共振中确定地磁水平分量方向的改进方法[J]. 物理实验, 2018, 38(3):11-14.
GAO Z H, CHIS L, WANG C Q, et al. Improved method for determining the direction of the horizontal component of the geomagnetic field in optically pumped magnetic resonance[J]. Physics Experimentation, 2018, 38(3):11-14. (in Chinese)
- [7] 仲明礼, 张越, 夏顺保, 等. 关于光泵磁共振实验中三角波扫场信号的讨论[J]. 物理实验, 2003, 23(6):37-39.
ZHONG M L, ZHANG Y, XIA S B, et al. Discussion on the triangular wave sweeping signal in optically pumped magnetic resonance experiment[J]. Physics Experimentation, 2003, 23(6):37-39. (in Chinese)
- [8] 张飞雁, 黄水平, 裴积全. 光泵磁共振实验反常共振信号的判断与原因分析[J]. 宁波大学学报(理工版), 2010, 23(2):71-73.
ZHANG F Y, HUANG S P, PEI J Q. Judgment and cause analysis of abnormal resonance signals in optical magnetic resonance experiments[J]. Journal of Ningbo University (Science and Engineering Edition), 2010, 23(2):71-73. (in Chinese)
- [9] 黄水平, 张飞雁. 光泵磁共振实验测量 g_F 值方法的改进与拓展[J]. 物理实验, 2004, 24(1):35-37.
HUANG S P, ZHANG F Y. Improvement and extension of the method for measuring g_F value in optical pumping magnetic resonance experiment[J]. Physics Experimentation, 2004, 24(1):35-37. (in Chinese)
- [10] 刘海霞, 亓夫军, 徐铭. 光泵磁共振实验中扫场的作用和影响[J]. 大学物理, 2005, 24(12):40-43.
LIU H X, QI F J, XU M. The role and influence of scanning field in optically pumped magnetic resonance experiments[J]. College Physics, 2005, 24(12):40-43. (in Chinese)
- [11] 王书运, 钟世德, 马登良. 光泵磁共振实验中水平磁场及扫场水平分量的测定[J]. 山东师范大学学报(自然科学版), 2008, 23(1):58-59, 63.
WANG S Y, ZHONG S D, MA D L. Determination of horizontal magnetic field and horizontal component of scanning field in optically pumped magnetic resonance experiment[J]. Journal of Shandong Normal University (Natural Science Edition), 2008, 23(1):58-59, 63. (in Chinese)
- [12] 王书运. 光泵磁共振实验中 g_F 因子的测量[J]. 实验技术与管理, 2008, 25(11):48-52.
WANG S Y. Measurement of g_F factor in optical pumping magnetic resonance experiment [J]. Experimental Technology and Management, 2008, 25(11):48-52. (in Chinese)
- [13] 仲明礼. 光泵磁共振实验中关键问题的分析与对策[J]. 潍坊学院学报, 2009, 9(2):78-80.
ZHONG M L. Analysis and countermeasures of key issues in optical pumping magnetic resonance experiments[J]. Journal of Weifang University, 2009, 9(2):78-80. (in Chinese)
- [14] 周健, 俞熹, 王煜. 光泵磁共振实验中异常光抽运信号的深入探讨[J]. 物理实验, 2009, 29(4):1-5, 10.
ZHOU J, YU X, WANG Y. In-depth study of anomalous optical pumping signals in optically pumped magnetic resonance experiments[J]. Physics Experimentation, 2009, 29(4):1-5, 10. (in Chinese)
- [15] 张飞雁. 光泵磁共振实验中扫场和水平场关系的探究[J]. 大学物理实验, 2009, 22(4):9-12.
ZHANG F Y. Research on the relationship between scanning field and horizontal field in optically pumped magnetic resonance experiment[J]. Physical Experiment of College, 2009, 22(4):9-12. (in Chinese)
- [16] 冯正南, 宋文福. 光泵磁共振实验问题探讨[J]. 大学物理实验, 2010, 23(3):36-38.
FENG Z N, SONG W F. Discussion on experimental problems of optically pumped magnetic resonance[J]. Physical Experiment of College, 2010, 23(3):36-38. (in Chinese)
- [17] 曾昭明, 陈宜保, 袁科亮, 等. 光泵磁共振实验中光抽运信号波形成因的探究[J]. 物理与工程, 2011, 21(3):62-64.
ZENG Z M, CHEN Y B, YUAN K L, et al. Study on the formation of optical pumping signal wave in optically pumped magnetic resonance experiment[J]. Physics and Engineering, 2011, 21(3):62-64. (in Chinese)
- [18] 池水莲, 林斌, 谢汇章. 光泵磁共振实验中扫场及水平场取值关系的探讨[J]. 大学物理, 2012, 31(8):29-31.
CHI S L, LIN B, XIE H Z. Discussion on the relationship between the sweep field and the horizontal field in the optically pumped magnetic resonance experiment[J]. College Physics, 2012, 31(8):29-31. (in Chinese)
- [19] 高浩哲, 池水莲, 陈昕, 等. 光泵磁共振实验中扫场信号研究和测量[J]. 实验技术与管理, 2017, 34(2):66-69.
GAO H Z, CHI S L, CHEN X, et al. Research and measurement of scanning field signal in optically pumped magnetic resonance experiment[J]. Experimental Technology and Management, 2017, 34(2):66-69. (in Chinese)
- [20] 段俊熙, 冯璐. 光泵磁共振实验中实验参数选取的探讨[J]. 物理与工程, 2022, 32(1):136-142.
DUAN J X, FENG L. Discussion on the selection of experimental parameters in optically pumped magnetic resonance experiments[J]. Physics and Engineering, 2022, 32(1):136-142.