

光泵磁共振实验的拓展

0529043 廖云翔

摘要: 光泵磁共振实验中利用磁共振信号测 g_F 因子和地磁场。判断总磁场的方向时可能会有误判, 本文提出了改进的方法, 同时拓展了原有实验。

关键词: 光泵磁共振 朗德因子 地磁场

1 实验原理简述

光抽运使 Rb 原子分布达偏极化饱和后, 在垂直于产生塞曼分裂的磁场 B 方向加频率为 ν 的射频磁场。当 $h\nu = u_B g_F B$ 成立时, 发生磁共振, 偏极化破坏, 同时原子又进行新的抽运。透射光的强弱反映了光抽运磁共振的信息。利用磁共振时满足的关系式可以测 g_F 以及地磁场的大小。

2 测 g_F 因子

在地磁场垂直分量被抵消时, 使直流水平线圈磁场 B_0 、三角波扫场 $B_{扫}$ 和地磁场的水平分量 B_e 三者同向。当出现磁共振信号时, 射频场频率 ν_1 满足

$$h\nu_1 = u_B g_F (B_0 + B_{扫} + B_e) \quad (1)$$

改变 B_0 方向使其与地磁场水平分量反向, 大小不变, 出现共振信号时的频率 ν_2 满足

$$h\nu_2 = u_B g_F (B_0 - B_{扫} - B_e) \quad (2)$$

$$\text{由(1)(2)求得 } g_F = \frac{h(\nu_1 + \nu_2)}{2u_B B_0} \quad (3)$$

实际上当扫场反向时, (2) 并不总成立, 当水平磁场电流很小以致于 $B_0 < B_{扫} + B_e$ 时, 应满足

$$h\nu_2 = u_B g_F (-B_0 + B_{扫} + B_e) \quad (4)$$

$$\text{而 } g_F \text{ 则应根据 } g_F = \frac{h(\nu_1 - \nu_2)}{2u_B B_0} \text{ 算得} \quad (5)$$

如何判断 B_0 与 $B_{扫} + B_e$ 的大小, 进而选择合适的方法算 g_F 。实际上, 实验过程中根据 $h\nu_2 = u_B g_F \left| -B_0 + B_{扫} + B_e \right|$, 只需在变化 B_0 的时候观察相应 ν_2 的变化趋势, 即可判断。因为在 $B_0 > B_{扫} + B_e$ 时, 增大 B_0 的值相应的 ν_2 也会增大, 反之则减小。但是若 B_0 与 $B_{扫} + B_e$ 的大小相差不大或者 B_0 变化范围很大时, $B_0 > B_{扫} + B_e$ 或者 $B_0 < B_{扫} + B_e$ 不能总成立, 此时用这种方法判断, 就可能判断错误。为了避免这种情况的发生, 可做如下的改进。

扫场峰点出现共振信号时, 频率 $\nu_{峰}$ 满足

$$h\nu_{\text{峰}} = u_B g_F | -B_0 + B_S + B_e | \quad (6)$$

三角波扫场峰点对应的大小记为 B_S ，谷点大小为 0 。而当谷点对应共振信号时满足

$$h\nu_{\text{谷}} = u_B g_F | -B_0 + B_e | \quad (7)$$

若 $B_0 < B_{\text{扫}} + B_e$ 则 $\nu_{\text{峰}} > \nu_{\text{谷}}$ ；反之， $B_0 > B_{\text{扫}} + B_e$ 时 $\nu_{\text{峰}} < \nu_{\text{谷}}$ 。实际上根据：

$$h\nu_2 = u_B g_F | -B_0 + B_{\text{扫}} + B_e |$$

减少频率值，观察磁共振所对应的扫场的点的变化情况。若从谷点附近的点逐渐上升，变为峰点附近的点，则说明 B_0 是大于 $B_{\text{扫}} + B_e$ 的。

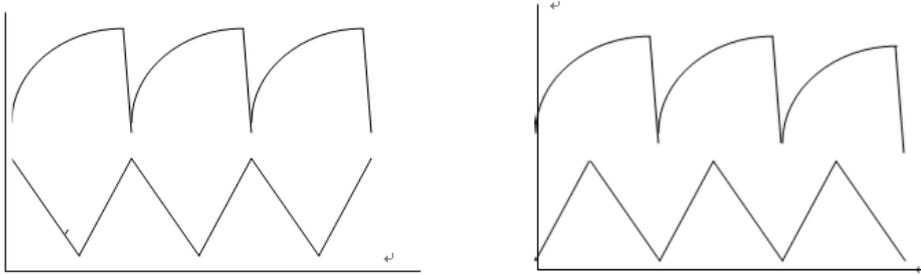
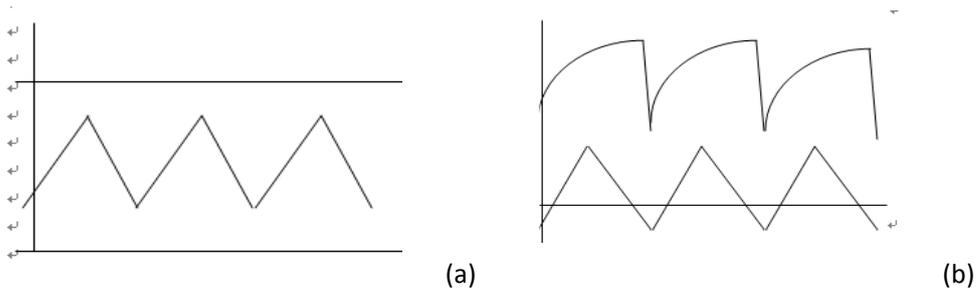


图 1 (a)共振信号在峰点

(b) 共振信号在谷点

文献¹又提供了另一种方法，利用光抽运信号来设置 B_0 的值。设置适当的扫场幅度并与地磁场同向。 B_0 与之反向，调节其大小至最小。此时的总磁场见图 2a.由于总磁场方向不改变，不能重新进行塞曼分裂破坏偏极化，观察不到抽运信号。逐渐加大 B_0 ，直至抽运信号在谷点附近出现。图 2b.说明此时总磁场为 0 的点在谷点附近，磁场扫过这点磁场方向改变，重新进行光抽运。信号逐渐移向峰点，图 2.根据以上的分析此时，磁场为 0 的点在峰点附近。继续增大 B_0 的值，抽运信号消失。说明此时水平方向，总磁场与地磁场反向，即有 $B_0 > B_{\text{扫}} + B_e$.继续增大 B_0 的大小至一合适的值。加上射频场之后测得 ν_2 ，再将 B_0 反向测得 ν_1 .即可根据(3)式求出 g_F 。用这种方法还可以大致看到地磁场水平分量的大小和扫场的大小.谷点对应抽运信号时 $B_0 \approx B_e$ ，而峰点对应抽运信号时， $B_0 \approx B_e + B_{\text{扫}}$



(a)

(b)

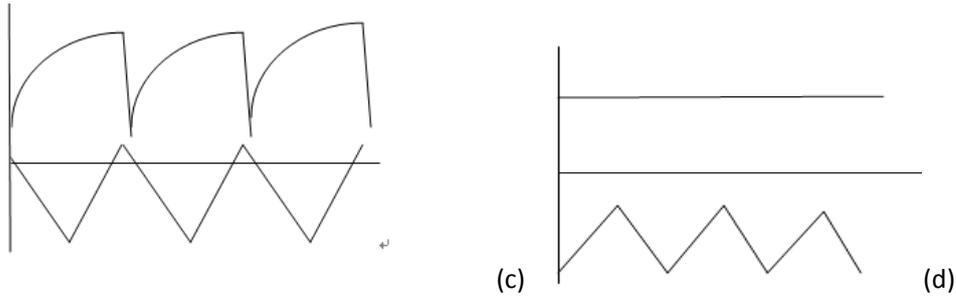


图 2 (a) 无信号 (b) 共振信号在谷点附近 (c)共振信号在峰点附近 (d) 无信号

这里再举另一个测 g_F 因子的方法，这种方法不用事先判断 B_0 与 $B_{扫} + B_e$ 的相对大小。扫场、地磁场水平分量以及水平线圈三者同向时满足 $h\nu_1 = u_B g_F (B_0 + B_{扫} + B_e)$ ，由于不知道 $B_{扫}$ 与 B_e 的值不能直接根据 ν_1 和 B_0 值算出 g_F 因子。改变 B_0 的大小，得到多组 (ν_1, B_0) ，若以 ν_1 和 B_0 分别作为 X 和 Y ，两者满足 $Y=bx+a$ ，其中 $b=\frac{h}{u_B g_F}$ (8)。拟合得 a, b 的值，由此可以求出 g_F 的大小。这种方法不用将 B_0 反向，但是对于反向的情况同样可以做以上处理，只是此时要根据数据点的走向判断 b 的符号，这时(8)式不再成立二十满足

$$|b| = \frac{h}{u_B g_F}$$

但是要注意测量过程中 B_0 与 $B_{扫} + B_e$ 相对大小关系得不变。否则对应两段斜率反向的直线。

另外利用 $|a|=B_{扫} + B_e$ ，可以测地磁场的大小。扫场谷点满足共振时， $B_{扫} = 0$ ，此时 $|a|=B_e$ ，截距的大小即为地磁场水平分量大小。只有在扫场谷点观测到共振信号时，才能用这种方法求地磁场的大小，否则只能测得地磁场与扫场两者之和。

2.测地磁场水平分量

测地磁场的一般方法如下。

当 B_0 、 $B_{扫}$ 、 B_e 同向时频率满足

$$h\nu_1 = u_B g_F (B_0 + B_{扫} + B_e) \quad (8)$$

若改变 B_0 、 $B_{扫}$ 方向使其与地磁场反向，保持 B_0 大小不变，此时成立

$$h\nu_2 = u_B g_F (B_0 + B_{扫} - B_e) \quad (9)$$

可求得地磁场水平分量大小为 $B_e = \frac{h(\nu_1 - \nu_2)}{2u_B g_F}$ 。用这种方法求地磁场的大小还需先测 g_F 因子。

若保持频率不变，改变 B_0 与扫场方向与地磁场反向，并改变 B_0 大小使得共振条件满足，则

有

$$h\nu_1 = u_B g_F (B'_0 + B_{\text{扫}} - B_e) \quad (10)$$

利用(8)(10)可以求得 B_e 的大小为 $B_e = \frac{B'_0 - B_0}{2}$, 其中 B_0 和 B'_0 的大小可以根据线圈中电流的值求得。当然用这种方法时, 和测 g_F 相同, 当 $B'_0 + B_{\text{扫}}$ 与 B_e 反向时同样要判断他们的相对大小, 但是由于 B_e 值较小只要设置适当的值就可。

3 小结

以上的整个讨论是围绕共振条件 $h\nu = u_B g_F B$ 展开的, 这里的 B 是地磁场水平分量 B_e , 扫场 $B_{\text{扫}}$ 以及直流线圈产生的磁场 B_0 三者的叠加。其中 ν 、 B_0 是大小可变并可以准确读出的, 而 B_0 、 $B_{\text{扫}}$ 方向也可改变。利用共振信号对应的扫场点位置的不同还可以改变 $B_{\text{扫}}$ 的大小但不能读出准确值。改变其中的一个条件, 观察相应的变化情况就可以得到丰富的信息。以上提出的实验拓展就是利用这点。测 g_F 因子时为了判断 B_0 与 $B_{\text{扫}} + B_e$ 的相对大小, 可以改变 B_0 大小, 观察共振频率的变化, 除特殊情况外可以基本判断出。而且还可以利用将得到的 (B_0, ν) 进行拟合利用斜率求得朗德因子。另一种方法比较不同扫场点共振信号相应频率大小, 也可以判断 B_0 与 $B_{\text{扫}} + B_e$ 的相对大小。最后本文还提到另一种测地磁场的方法, 改变 B_0 与 $B_{\text{扫}}$ 的方向以及 B_0 的大小, 保持频率不变来求得地磁场的水平分量。

参考文献:

- ①米丽琴, 对光磁共振实验中测量 g_F 值的方法的评述和改进, 物理实验, 3, 47~48
- ②吴思诚, 王祖铨. 近代物理实验, 北京大学出版社
- ③邱淑红, 光磁共振中测量地磁场的改进方法, 中国民航学院学报