

光泵磁共振实验报告

Zric 物理学系

摘要：本实验利用光抽运-磁共振-光探测技术观察了 Rb 气态自由原子的光抽运信号和磁共振现象，分别测量了： ^{85}Rb 的朗德因子 $g_F = 0.343 \pm 0.003$ ， ^{87}Rb 的朗德因子 $g_F = 0.514 \pm 0.002$ ，并用 ^{87}Rb 磁共振信号测量了地磁场大小 $B_{\text{地磁}} = 4.81 \times 10^{-5}\text{T}$ 和地磁倾角 $\alpha = 45.1^\circ$ 。

一、引言

在五十年代初期 A. Kastler 等人提出了光抽运（Optical Pumping，又称光泵）技术。光抽运利用圆偏振光束激发气态原子的方法以打破原子在所研究的能级间的玻尔兹曼热平衡分布，造成所需的布居数差，从而在低浓度的条件下提高了共振强度，这时再用相应频率的射频场激励原子的磁共振。在探测方面，不直接探测原子对射频量子的发射或吸收，而是采用光探测的方法，探测原子对光量子的发射或吸收。由于光量子的能量比射频量子高七八个数量级，所以探测信号的灵敏度得以提高。

过去几十年来人们用光抽运-磁共振-光探测技术对于许多原子、离子和分子进行了大量的研究，增进了对微观粒子结构的了解。如原子的磁矩和朗德 g 因子、能级寿命、能级结构、塞曼分裂与斯塔克分裂等。^[1]^[2]

二、实验原理

2.1 铷原子能级分裂

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。原子能级的精细结构用总角动量量子数 J 来标记， $J = L+S, L+S-1, \dots, L-S$ 。对于基态， $L=0$ 和 $S = 1/2$ ，因此铷原子基态只有 $J = 1/2$ ，其标记为 $5^2S_{1/2}$ 。铷原子最低激发态是 $5^2P_{1/2}, 5^2P_{3/2}$ 。 $5^2P_{1/2} \rightarrow 5^2S_{1/2}$ 跃迁产生波长 7947.6\AA 的 D_1 谱线， $5^2P_{3/2} \rightarrow 5^2S_{1/2}$ 跃迁产生波长 7800\AA 的 D_2 谱线。

核磁矩与上述原子的电子总磁矩之间相互作用造成能级的附加分裂，称为超精细结构。由量子数 F 标记， $F = I+J, I+J-1, \dots, |I-J|$ 。 ^{87}Rb 的 $I=3/2$ ，它的基态 $J=1/2$ ，具有 $F=2$ 和 $F=1$ 两个状态。 ^{85}Rb 的 $I=5/2$ ，它的基态 $J=1/2$ ，具有 $F=3$ 和 $F=2$ 两个状态。

如果处在外磁场 B 中，由于总磁矩 μ_F 与磁场 B 相互作用，超精细结构中的各能级进一步发生塞曼分裂形成塞曼子能级。各相邻塞曼子能级之间的能量差为 $\Delta E =$

$g_F \mu_B B$, 其中 g_F 是对应于原子总磁矩 μ_F 与原子总角动量 P_F 关系的朗德因子:

$$\mu_F = g_F \frac{e}{2m} P_F \quad (1)$$

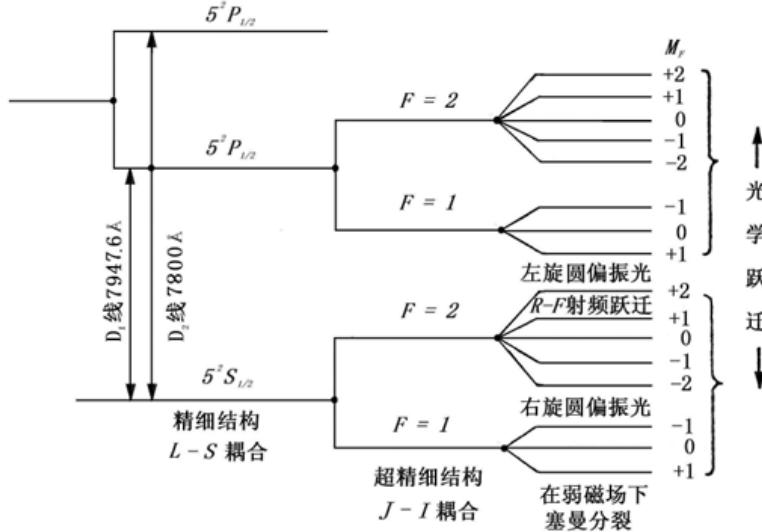


Figure 1 ^{87}Rb 原子能级结构

2.2 粒子数偏极化

气态 ^{87}Rb 原子受 $D_1\sigma^+$ 左旋圆偏振光照射时, 遵守光跃迁选择定则: $\Delta F = \pm 1, 0$; $\Delta M_F = +1$ 。基态中 $M_F = +2$ 子能级上的粒子不能跃迁, 而由 $5^2P_{1/2} \rightarrow 5^2S_{1/2}$ 的向下跃迁中 (发射光子), $\Delta M_F = 0, \pm 1$, 各子能级上的跃迁都是允许的, 经过多次的上下跃迁, 基态中 $M_F = +2$ 子能级上的粒子数只增不减, 这样就增大了粒子布居数的差别。这种非平衡分布称为粒子数偏极化。原子受光照激发, 在上下跃迁过程中使某个子能级上粒子过于密集称之为光抽运。光抽运的目的就是造成基态能级中的偏极化。

2.3 驰豫时间

系统由非热平衡分布状态趋向于平衡分布状态的过程称为驰豫过程。促使系统趋向平衡的机制就是原子之间以及原子与其它物质之间的相互作用。在实验过程中要保持原子分布有较大的偏极化程度, 就要尽量减少返回玻耳兹曼分布的趋势。因此通过在铷样品泡中充入氮气, 使它的密度比铷蒸气原子的密度大 6 个数量级, 这样可减少铷原子与容器以及与其它铷原子的碰撞机会, 从而保持铷原子分布的高度偏极化。

2.4 塞曼能级间磁共振

因光抽运而使⁸⁷Rb原子分布偏极化达到饱和以后，铷蒸气不再吸收D₁σ⁺光，从而使透过铷样品泡的D₁σ⁺光增强。这时，在垂直于产生塞曼分裂的磁场B的方向加一频率为ν的射频磁场，当ν和B之间满足磁共振条件 $h\nu = g_F\mu_B B$ 时，在塞曼子能级之间产生感应跃迁，称为磁共振。铷原子将从M_F=+2的子能级向下跃迁到各子能级上，因此磁共振破坏了原子分布的偏极化，射频场频率ν和外磁场（产生塞曼分裂的）B两者可以固定一个，改变另一个以满足磁共振条件，周期性地扫描磁场，则称为扫场法（射频场频率固定）。

2.5 光探测

对铷样品加一射频场（同时存在着使铷原子产生塞曼分裂的磁场），将D₁σ⁺光同时作为抽运光和探测光照射铷样品泡，测量透过样品泡的光强，就实现了光抽运-磁共振-光探测。在探测过程中射频（10⁶Hz）光子的信息转换成了频率高的光频（10¹⁴Hz）光子的信息，使信号功率提高了8个数量级。

三、实验装置及过程

3.1 实验装置

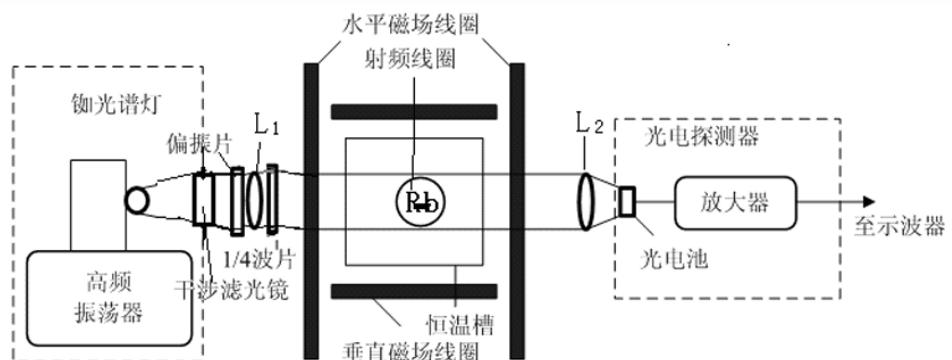


Figure 2 实验装置示意图

光源为铷原子光谱灯，由高频振荡器（频率约为55 - 65 MHz），控温装置（80 - 90°C）及铷灯泡组成。铷灯泡在高频电磁场的激励下进行无极放电而发光，产生铷光谱，包括D₁=7948 Å 及 D₂=7800 Å 光谱线。D₂光谱线对光抽运过程有害，出射光先通过一干涉滤光片，去掉D₂线，再通过1/4波片使D₁线成为圆偏振光。透镜L₁使光

源发出的光变为平行光（焦距较小为宜），透镜 L_2 将透过样品泡的平行光会聚到光电接收器上。

主体中央为铷样品泡及磁场线圈部分。同位素比例为天然成分的铷和缓冲气体充在一直径为 52 mm 的玻璃泡内，在铷样品泡的前后两侧对称放置一对小射频线圈，它为铷原子磁共振跃迁提供射频场。铷样品泡和射频线圈都置于圆柱形恒温槽内，称之为吸收池。槽内温度控制在最佳范围内温度。吸收池安放在两对亥姆霍兹线圈的中心。一对竖直线圈产生的磁场用以抵消地磁场的竖直分量，另一对水平线圈有两套绕组，一组在外，为产生水平直流磁场的线圈。另一组在内，为扫场线圈，扫场是在直流磁场上叠加的一个调制磁场（方波或三角波）。使铷原子的超精细结构能级发生塞曼分裂的是水平方向的总磁场。

光电探测器由光电接收元件及放大电路组成，本实验以光电池作光电接收元件。

水平和垂直线圈产生磁场大小由公式给出：

$$B_{\text{水平}} = \frac{16\pi NI}{5^{3/2}R} \times 10^{-7}\text{T} \quad (2)$$

$$B_{\text{垂直}} = \frac{32\pi NI}{5^{3/2}R} \times 10^{-7}\text{T} \quad (3)$$

其中 N 为线圈匝数，R 为线圈半径，I 为线圈电流。

3.2 光抽运信号和磁共振信号观察

观察磁共振信号时扫场方式选择为“方波”，调大扫场幅度。将指南针置于吸收池上面，改变扫场方向，设置扫场的方向与地磁场水平方向相反，然后将指南针拿开。预置垂直场电流为 0.08A 左右，用来抵消地磁场竖直分量。然后旋转偏振片的角度、调节扫场幅度及垂直场大小和方向，使抽运信号幅度最大，再仔细调节光路聚焦，使光抽运信号最大。注意水平场电流调到零。记下垂直场的电流 I，并在以后保持此值。使用不同的扫场，加入或不加入垂直线圈磁场及水平线圈磁场，以及改变它们的励磁电流大小和方向，观察光抽运信号变化。

观察磁共振信号时用三角波扫场。每当磁场 B 与射频频率 ν 满足共振条件时，铷原子分布的偏极化被破坏，产生新的抽运。光抽运信号反映两个能带间的光学跃迁，磁共振信号反映塞曼子能级之间的射频跃迁。磁共振破坏了粒子分布的偏极化，从而引起新的光学抽运。这两种信号都是由透过样品泡的光强变化来探测的。所以，从探测到的光强变化鉴别所发生的是单纯光抽运过程，还是磁共振过程引起的，要根据他们产生的条件设法区分。

3.3 g_F 因子与地磁场水平分量测量

当地磁场的垂直分量被抵消后，加上外磁场，调节射频场的频率 ν ，用三角波扫场。先使扫场 $B_{\text{扫}}$ 、水平场 B_0 与地磁场水平分量 $B_{\text{地磁}/\!/\!}$ 方向相同，此时的总磁场为

$$B_+ = B_0 + B_{\text{扫}} + B_{\text{地磁}/\!/\!} = \frac{h\nu_1}{g_F\mu_B} \quad (4)$$

测量时 g_F 因子保持扫场的幅度和方向不变，改变水平场方向，则有

$$B_- = -B_0 + B_{\text{扫}} + B_{\text{地磁}/\!/\!} = -\frac{h\nu_2}{g_F\mu_B} \quad (5)$$

将两式相减可得 g_F 因子：

$$g_F = \frac{h}{\mu_B B_0} \frac{\nu_1 + \nu_2}{2} \quad (6)$$

类似的，测量地磁场水平分量时，保持扫场的幅度不变，改变扫场和水平场方向：

$$B_- = -B_0 - B_{\text{扫}} + B_{\text{地磁}/\!/\!} = -\frac{h\nu'_2}{g_F\mu_B} \quad (7)$$

$$B_{\text{地磁}/\!/\!} = \frac{h}{g_F\mu_B} \frac{\nu_1 - \nu'_2}{2} \quad (8)$$

由 $B_{\text{地磁}/\!/\!}$ 和 $B_{\text{地磁}\perp}$ 可算出地磁场的大小，由 $\tan \alpha = B_{\text{地磁}\perp}/B_{\text{地磁}/\!/\!}$ 求出地磁倾角 α

四、实验结果和分析

4.1 光抽运信号观察

调节偏振片角度，扫场幅度，调节垂直场电流 $I=0.058A$ ，垂直场方向与地磁场竖直分量相反，光抽运信号达到最大。采用方波扫场，改变水平场方向，观察到清晰的光抽运信号，如图所示。

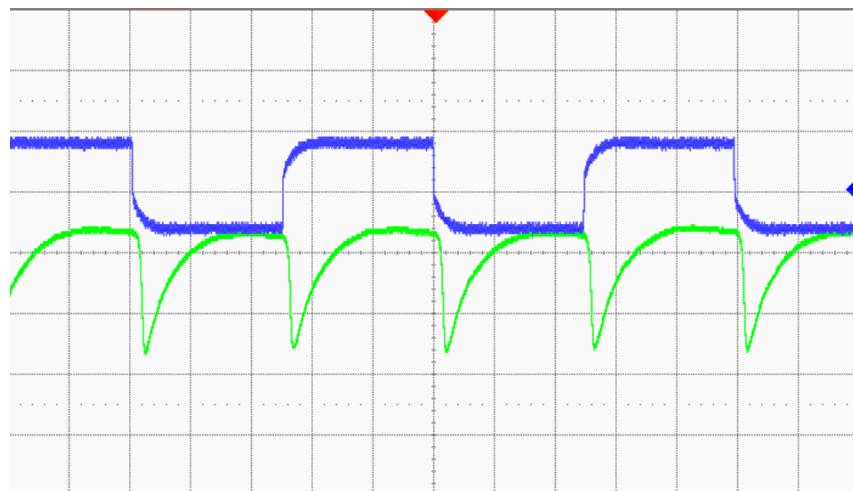


Figure 3 光抽运信号波形图

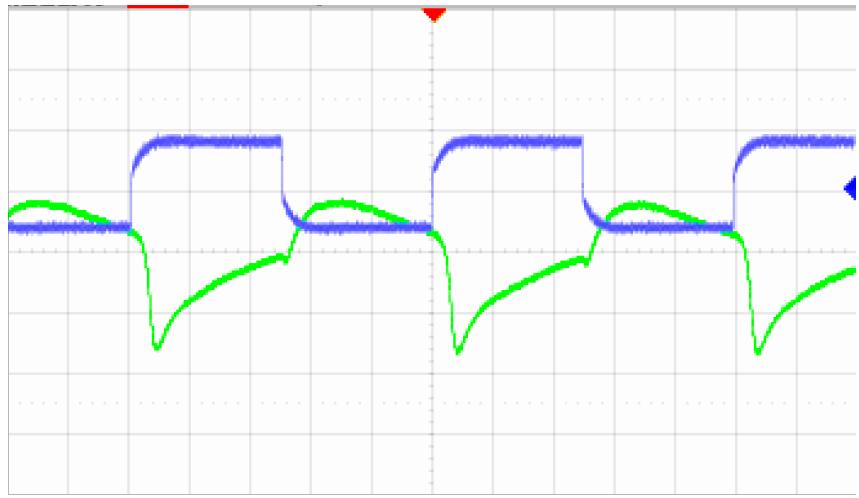


Figure 4 光抽运信号波形图

由于使用光电池作为光电探测器，会受到外部光源信号的干扰，实验中需要遮挡光路进行测量，否则会出现额外高频信号。

当总水平磁场周期性达到零(指水平方向的总磁场为零)然后增大时，各塞曼子能级跟随着发生简并随即再分裂。能级简并时铷原子分布由于碰撞等导致自旋方向混杂而失去了偏极化，所以重新分裂后各塞曼子能级上的粒子数又近似相等，对 $D_1\sigma^+$ 光的吸收又达到最大值，这样就观察到了周期性光抽运信号^[3]。

图 3 中水平场置于与扫场反向，扫场使总磁场周期性达到零，能够出现弛豫后达到饱和的光抽运信号；图 4 中水平场置于与扫场同向，扫场使总水平磁场周期性增大，Rb 原子在第一个磁场值下还未充分弛豫就进入第二个磁场值，因此没有饱和弛豫信号出现，两种情况下光抽运信号周期均与扫场周期一致。

4.2 磁共振信号观察

三种磁共振信号如下图所示。当扫场大小达到磁共振条件时，铷原子分布的偏极化被破坏，产生新的抽运，透过样品泡的光强发生变化，形成磁共振信号。图 5 中在扫场峰值处达到磁共振条件，因此扫场信号和共振信号“峰对谷”；图 6 中在扫场谷值处达到磁共振条件，因此扫场信号和共振信号“谷对谷”，两者磁共振信号周期和扫场周期一致；而图 7 中在扫场上上升和下降过程中均达到磁共振条件，因此每个周期有两个磁共振信号峰。

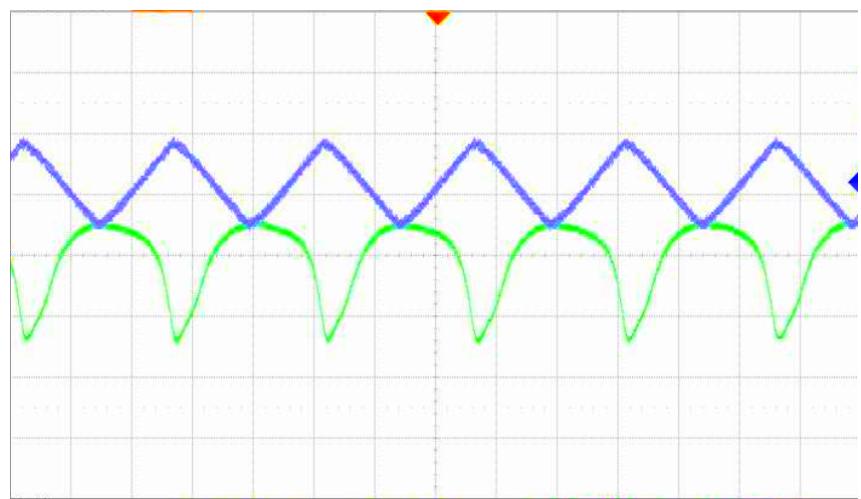


Figure 5 磁共振信号波形图

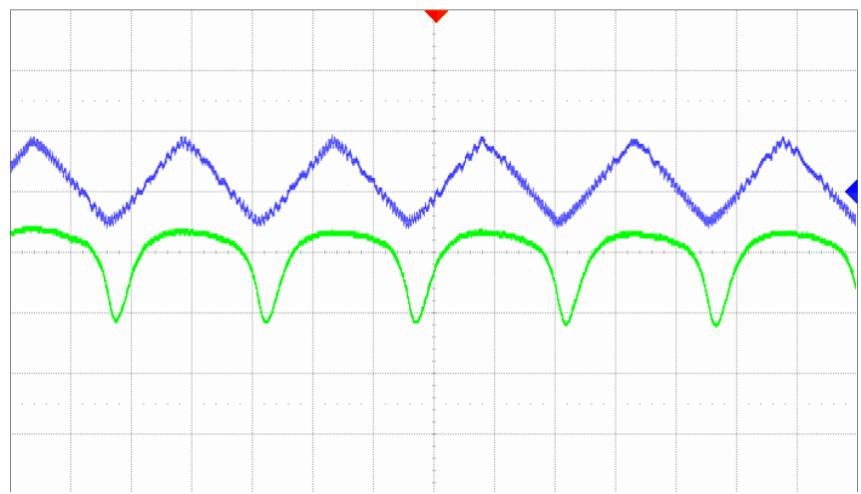


Figure 6 磁共振信号波形图

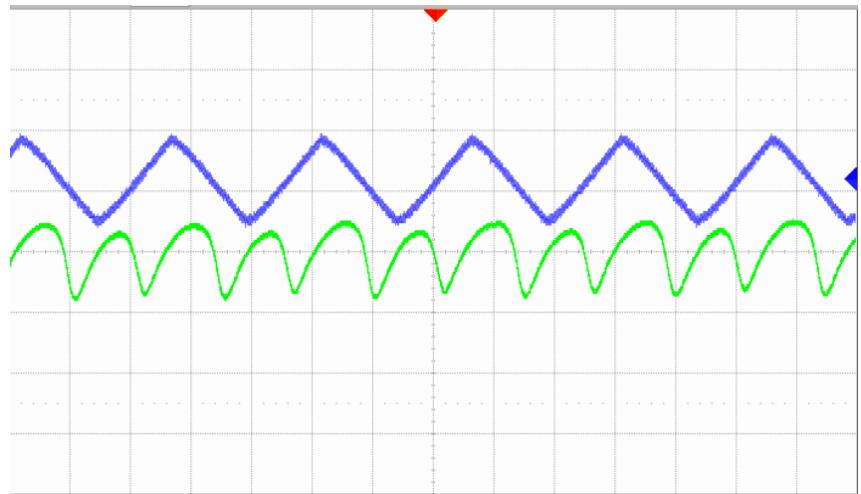


Figure 7 磁共振信号波形图

4.3 g_F 因子测量

采用三角波扫场，测量 g_F 因子，数据如下表所示。

Table 1 $^{85}\text{Rb}g_F$ 因子测量数据

	I = 0.25A	I = 0.30A	I = 0.40A
$\nu_1(\text{MHz})$	0.368	0.462	0.726
$\nu_2(\text{MHz})$	0.732	0.842	1.061
$g_F(\text{实验值})$	0.343	0.339	0.349

$g_F = 0.343 \pm 0.003$, 相对标准值 $\frac{1}{3}$ 误差 $\eta = 3.1\%$

Table 2 $^{87}\text{Rb}g_F$ 因子测量数据

	I = 0.25A	I = 0.30A	I = 0.40A
$\nu_1(\text{MHz})$	0.561	0.743	1.088
$\nu_2(\text{MHz})$	1.074	1.239	1.545
$g_F(\text{实验值})$	0.511	0.516	0.515

$g_F = 0.514 \pm 0.002$, 相对标准值 $\frac{1}{2}$ 误差 $\eta = 2.8\%$

4.4 地磁场测量

$B_{\text{地磁}} = 3.41 \times 10^{-5}\text{T}$, 使用 ^{87}Rb 磁共振信号测量水平地磁场，取 $g_F = 0.514$ ，这里我们测量时采用谷对谷的磁共振信号，即 $B_{\text{扫}} = 0\text{ T}$ 时达到磁共振条件^[4]，得到以下数据：

Table 3 ^{87}Rb 地磁测量数据

	$I = 0.25\text{A}$	$I = 0.30\text{A}$	$I = 0.40\text{A}$
$B_{\text{地磁}}// (10^{-5}\text{T})$	3.58	3.44	3.17

$B_{\text{地磁}}// = 3.40 \pm 0.12 \times 10^{-5}\text{T}$, 地磁倾角 $\alpha = 45.1^\circ$, 理论参考值 $\alpha = 47.1^\circ$ ^[5], 相对误差 4.2%。地磁场大小 $B_{\text{地磁}} = 4.81 \times 10^{-5}\text{T}$, 理论参考值 $B_{\text{地磁}} = 4.92 \times 10^{-5}\text{T}$, 相对误差 2.2%。

五、 实验结论

本实验利用光抽运-磁共振-光探测技术观察了 Rb 气态自由原子的光抽运信号和磁共振现象, 分别测量了: ^{85}Rb 的朗德因子 $g_F = 0.343 \pm 0.003$, 相对标准值 $\frac{1}{3}$ 误差 $\eta = 3.1\%$, ^{87}Rb 的朗德因子 $g_F = 0.514 \pm 0.002$, 相对标准值 $\frac{1}{2}$ 误差 $\eta = 2.8\%$

并用 ^{87}Rb 磁共振信号测量了地磁场大小 $B_{\text{地磁}} = 4.81 \times 10^{-5}\text{T}$ 和地磁倾角 $\alpha = 45.1^\circ$ 。实验结果与理论值较为接近, 验证了光抽运-磁共振-光探测技术的有效性。

六、 参考文献

- [1] 周健, 俞熹, and 王煜. 光磁共振实验中异常光抽运信号的深入探讨. 物理实验, 29(4):1–5, 2009.
- [2] 周格, 李伟, 龚欣欣, and 等. 光泵磁共振过程的理论和实验研究. 大学物理, 32(11):55–58, 2013.
- [3] 王洪涛, 王振国, and 金清理. 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, (02):45–48, 2005.
- [4] 邸淑红 and 宋庆功. 光磁共振测量地磁场的改进方法. 中国民航学院学报, (04):22–24, 2002.
- [5] <https://www.magnetic-declination.com/>.