

# 光磁共振

(南京大学物理学院 江苏南京 210000)

摘要：光磁共振是利用光抽运的方法，进一步提高磁共振灵敏度的技术。本实验依据光磁共振技术，运用“光抽运—磁共振—光探测”的方法，测量地磁场垂直分量和水平分量以及铷原子的相关参量。

关键词：光磁共振；光抽运；磁共振；塞曼效应；塞曼子能级；地磁场；朗德因子

## 一、实验目的

1. 掌握“光抽运—磁共振—光探测”的思想方法和实验技巧，研究原子超精细结构塞曼子能级间的射频磁共振。
2. 测定铷原子  $^{87}\text{Rb}$  和  $^{85}\text{Rb}$  的参数：基态朗德因子  $g_F$  和原子核的自旋量子数  $I$ 。
3. 测定地磁场  $B_{\text{地}}$  的垂直分量  $B_{\text{地垂直}}$ 、水平分量  $B_{\text{地水平}}$  及其倾角  $\theta$ 。

## 二、实验原理

光磁共振技术是根据动量守恒原理，用光学抽运来研究原子超精细结构塞曼子能级间微波或射频磁共振现象的双共振技术。特点是兼有波谱学方法的高分辨率和光谱学方法的高探测灵敏度。

### 1. 铷原子的超精细结构及其塞曼分裂

铷是一价碱金属原子，有一个价电子，处于第五壳层，主量子数  $n=5$ ，电子轨道量子数  $L=0, 1, 2, 3, \dots, n-1$ ，电子自旋  $S=1/2$ 。铷原子中价电子的轨道角动量  $P_L$  和自旋角动量  $P_S$  发生轨道—自旋耦合（LS 耦合），得到电子总角动量  $P_J$ ，其数值

$P_J = \sqrt{J(J+1)}\hbar$ ,  $J = L + S, L + S - 1, \dots, |L - S|$ 。当不考虑铷原子核的自旋时，铷原子总

磁矩  $\mu_J = -g_J \frac{e}{2m_e} P_J$ ，其中  $-e, m_e$  分别为电子的电荷、质量。朗德因子

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

从而形成原子的超精细结构能级，这时，铷原子的基态能级  $n^{2S+1}S_J$  对应于  $n=5, L=0, S=1/2, J=1/2$ ，即为  $5^2S_{\frac{1}{2}}$ ，相应的朗德因子  $g_J = 2$ ；铷原子的第一激发态能级

$n^{2S+1}P_J$  对应于  $n=5, L=1, S=1/2, J=1/2, 3/2$ ，是双重态，即为  $5^2P_{\frac{1}{2}}$  和  $5^2P_{\frac{3}{2}}$ ，相应的朗德因子

$g_J = \frac{2}{3}, \frac{4}{3}$ 。  $5^2P_{\frac{1}{2}} \rightarrow 5^2S_{\frac{3}{2}}$  的能级跃迁产生光谱线  $D_1$  线 ( $\lambda_1 = 794.76\text{nm}$ )；  $5^2P_{\frac{3}{2}} \rightarrow 5^2S_{\frac{3}{2}}$

的跃迁产生光谱线  $D_2$  线 ( $\lambda_2 = 780.0\text{nm}$ )。本实验观测与  $D_1$  线有关的能级的超精细结构及其在弱磁场中的塞曼分裂。

通常原子核也具有角动量，记原子核的总角动量为  $P_I$ ，它是核中质子和中子的轨道角动量和自旋角动量的矢量和，核的总角动量的数值  $P_I = \sqrt{I(I+1)}\hbar$ ，通常也称为核自旋，其中  $I$  称为核的自旋量子数， $I$  为整数或半整数，已知稳定的原子核的  $I$  值在  $0 \sim 7.5$  之间。核的总角动量  $P_I$  的最大可测的分量值为  $I\hbar$ 。当  $I \neq 0$  时，原子核的总磁矩为

$$\mu_I = g_I \frac{e}{2m_p} P_I = g_I \sqrt{I(I+1)} \mu_N$$

朗德因子  $g_I$  的具体数值还没法由其它量子数算出来，只能由实验测定。

$$\mu_N = \frac{e\hbar}{2m_p}$$

为核磁子，质子质量是电子质量的 1836 倍，因此核磁子  $\mu_N$  比波尔磁子

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e} (\approx 0.5788 \times 10^{-4} \text{ eV/T})$$

小三个数量级。原子核总角动量  $P_I$  和电子总角动量  $P_J$

耦合（称为 IJ 耦合）成原子总角动量  $P_F$ ，其数值  $P_F = \sqrt{F(F+1)}\hbar$ ，F 为原子总角动量：

$F=I+J, I+J-1, \dots, |I-J|$ 。F 不同取值的个数为  $2I+1$  (当  $I \leq J$ ) 或  $2J+1$  (当  $J \leq I$ )。从而

原子的超精细结构能级细分为由总量子数 F 标定的超精细结构能级。天然铷中主要含有两种同位素： $^{87}\text{Rb}$  和  $^{85}\text{Rb}$ ，其含量分别约为 28% 和 78%。提纯后的  $^{87}\text{Rb}$  和  $^{85}\text{Rb}$  非常昂贵，

本实验使用天然铷，既可以同时观测两种铷原子的光磁共振现象，又大大降低实验器材费用。原子的基态  $5^2S_{1/2}$  和第一激发态  $5^2P_{1/2}$  都分成两个超精细结构能级，对  $^{87}\text{Rb}$  而言， $I=1.5$ ，

分别由量子数  $F=I+J=2$  和  $F=I-J=1$  来表征；而对  $^{85}\text{Rb}$ ， $I=5/2$ ，则由  $F=3$  和  $F=2$  来表征。原子总角动量  $P_F$  与原子总磁矩  $\mu_F$  之间的关系为：

$$\mu_F = -g_F \frac{e}{2m_e} P_F$$

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

导出上面两个式子时本应包含两项，分别与  $\mu_I$  和  $\mu_J$  有关，由于跟  $\mu_I$  有关的项比跟  $\mu_J$  有关的另一项要小得多，因此被略去了。

在弱的外磁场中，由于磁场较弱未能破坏耦合，必须考虑原子核的总角动量和原子核的总磁矩的影响，用 IJ 耦合后的  $P_F$  和  $\mu_F$  作为原子的总角动量和总磁矩。本实验中作为非磁性物质的铷原子处于弱磁场 B（通常表征磁场的物理量，在非磁性物质中和磁性物质的外部用磁感应强度 B，再磁性物质内部用磁场强度 H）中，铷原子获得附加的能量  $E_{m_F} = -\mu_F B = m_F g_F \mu_B B$ ，其中  $\mu_B$  为波尔磁子，磁量子数  $m_F = F, F-1, \dots, -F$ ，共  $2F+1$  个数值，因此对应于总量子数 F 的超精细结构能级分裂成  $2F+1$  个塞曼子能级。相邻子能级之间的数量差均为  $E_{m_F} - E_{m_F-1} = g_F \mu_B B$ 。当外磁场  $B = 0$  时，塞曼子能级简并为超精细结构能级。铷原子的能级如下图所示，

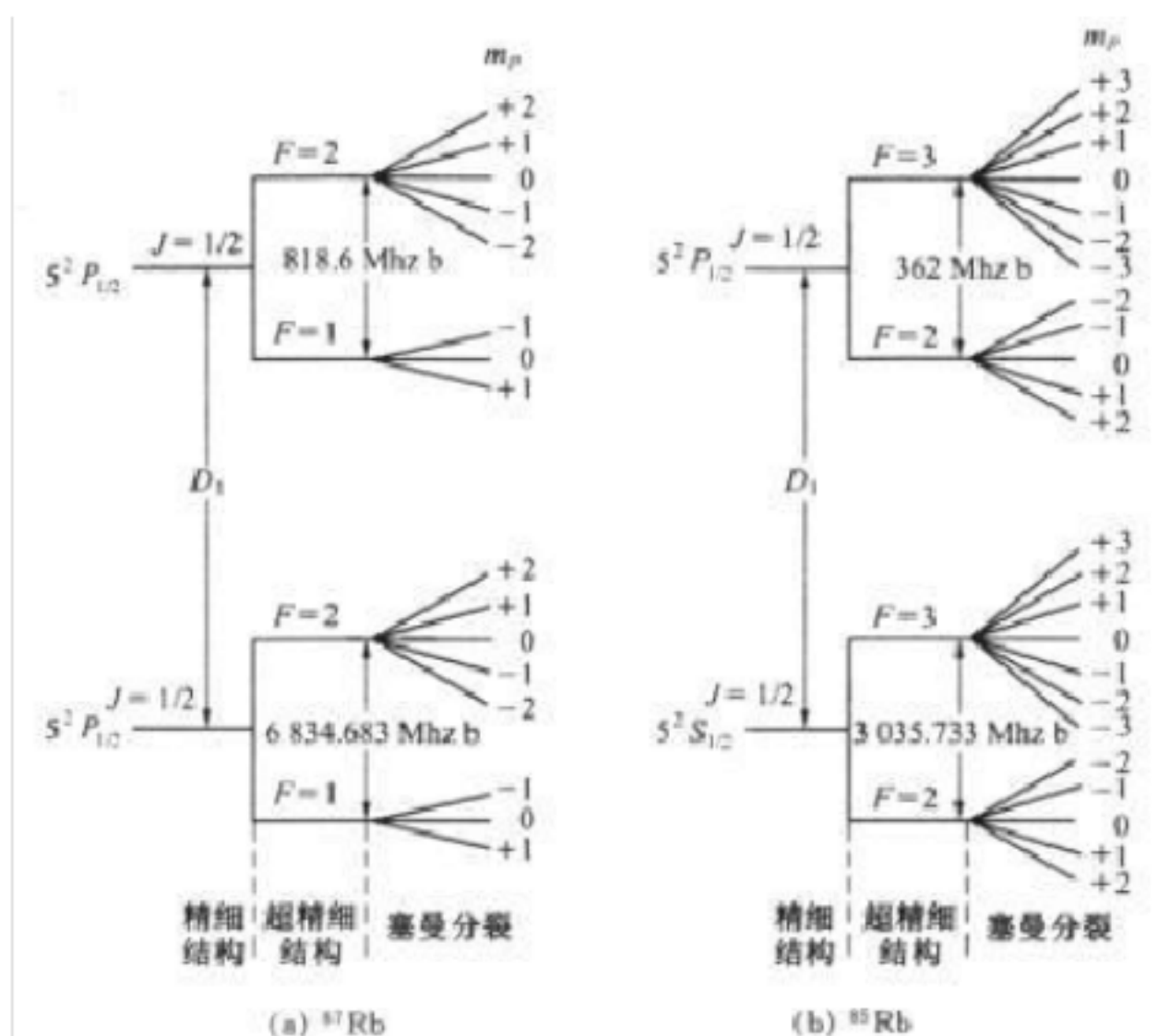


图 1 铷原子能级

铷原子  $^{87}\text{Rb}$  和  $^{85}\text{Rb}$  的基态  $5^2S_{\frac{1}{2}}$  和第一激发态  $5^2P_{\frac{1}{2}}$  的朗德因子  $g_F$  和相邻塞曼子能级

间能量间隔  $|g_F \mu_B B|$  的理论值列在下表中。

$^{87}\text{Rb}$	F	J	I	$g_J$	$g_F$ 理论值	$ g_F \mu_B B $
$5^2P_{\frac{1}{2}}$	2	$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{2}{3}$	1/6	$\frac{1}{6} \mu_B B$
	1	$\frac{2}{2}$	$\frac{2}{2}$	$\frac{3}{3}$	-1/6	
$5^2S_{\frac{1}{2}}$	2	$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{2}$	2	1/2	$\frac{1}{2} \mu_B B$
	1	$\frac{2}{2}$	$\frac{2}{2}$	2	-1/2	

$^{85}\text{Rb}$	F	J	I	$g_J$	$g_F$ 理论值	$ g_F \mu_B B $ 理论值
$5^2P_{\frac{1}{2}}$	3	$\frac{1}{2}$	$\frac{5}{2}$	$\frac{2}{3}$	1/9	$\frac{1}{9} \mu_B B$
	2	$\frac{2}{2}$	$\frac{2}{2}$	$\frac{3}{3}$	-1/9	
$5^2S_{\frac{1}{2}}$	3	$\frac{1}{2}$	$\frac{5}{2}$	2	1/3	$\frac{1}{3} \mu_B B$
	2	$\frac{2}{2}$	$\frac{2}{2}$	2	-1/3	

表 1  $^{87}\text{Rb}$  和  $^{85}\text{Rb}$  相邻塞曼子能级间的能量间隔  $|g_F \mu_B B|$  的理论值

在热动平衡条件下，原子在各能级的分布数遵循波尔兹曼分布  $N = N_0 \exp(-E / kT)$ ，

由于基态各塞曼子能级的能量差很小，故可认为原子均衡地分布在基态各塞曼子能级上。

如果在引起超精细结构能级分裂的弱磁场的垂直方向上加一个射频磁场，当射频光子能量

等于基态  $5^2S_{\frac{1}{2}}$  相邻塞曼子能级的能量间隔  $|g_F \mu_B B|$  时， $h\nu = |g_F \mu_B B|$ ，会诱导产生这些子

能级间的磁共振跃迁，当一个原子发射一份射频光子能量，向下跃迁到相邻塞曼子能级上，但是宏观上没有电磁能量的净吸收或净发射，因而无法从实验上检测出这种磁共振跃迁。若要从实验上检测出磁共振跃迁必须在基态塞曼子能级之间造成显著的粒子数差。光抽运现象就起到这样的作用。

## 2. 圆偏光对铷原子的光抽运效应



以铷光谱灯发射的  $D_1$  光入射到铷蒸气原子样品上时，会产生原子在基态  $5^2S_{1/2}$  的塞曼子能级与第一激发态  $5^2P_{1/2}$  的塞曼子能级之间的跃迁，这种光跃迁起作用的是光的电场部分，必须满足能量守恒和角动量守恒，其选择定则为  $\Delta L = \pm 1, \Delta F = 0, \pm 1, \Delta m_F = 0, \pm 1$ 。如果用的是  $D_1\sigma^+$  光，它是电场矢量绕磁场方向左旋的圆偏光，在磁场方向，角动量为  $+\hbar$ ，它与原子相互作用时，原子不仅吸收光子的能量，也吸收光子的角动量。原子的角动量增加了  $+\hbar$ ，因而只能发生  $\Delta m_F = +1$  的跃迁。由于  $^{87}\text{Rb}$  的基态  $5^2S_{1/2}$  和第一激发态  $5^2P_{1/2}$  的  $m_F$  最大值都是  $+2$ ，基态  $5^2S_{1/2}$  中  $m_F \neq +2$  的塞曼子能级上的原子跃迁到激发态  $5^2P_{1/2}$  的允许子能级上，而处于基态的  $m_F = +2$  子能级上的原子不能跃迁，否则违反了选择定则。原子从  $5^2P_{1/2}$  态会发射光子自发退激返回基态  $5^2S_{1/2}$ ，这是无辐射跃迁，按选择定则  $\Delta m_F = 0, \pm 1$ ，以同样的概率返回基态各子能级，从而使得基态的  $m_F = +2$  子能级上的原子数增加。经过若干次激发和退激后，基态的  $m_F = +2$  子能级上的原子数大大增加，好像基态的  $m_F \neq +2$  的较低子能级上的大量原子被“抽运”到基态基态的  $m_F = +2$  的子能级上，造成粒子数反转，这就是光抽运效应（亦称“光泵”）。光抽运造成原子的非平衡分布，随着基态的  $m_F \neq +2$  子能级上原子数的减少， $^{87}\text{Rb}$  原子对光的吸收减弱，直至饱和不再吸收。 $m_F$  的每一个数只代表原子总磁矩  $\mu_F$  在磁场中的一种取向，光抽运的结果使得所有原子磁矩从各个量子化方向的均匀取向变成只有  $m_F = +2$  方向的取向，样品获得净磁化，称为“偏极化”。外加恒磁场下光抽运的目的就是要造成基态子能级的偏极化，使得基态子能级间的磁共振跃迁得以实现。 $D_1\sigma^-$  光（电场矢量绕磁场方向右旋的圆偏光，在磁场方向，角动量为  $-\hbar$ ）也有光抽运作用，不过它的作用跟  $D_1\sigma^+$  光正好相反，将大量原子“抽运”到基态的  $m_F = -2$  的子能级上。当用  $\pi$  光（电场矢量与磁场方向平行的线偏振光，在磁场方向，角动量为零）， $^{87}\text{Rb}$  原子对光有强的吸收，由于  $\Delta m_F = 0$ ，没有光抽运效应。

对于  $^{85}\text{Rb}$  原子，基态  $5^2S_{1/2}$  和激发态  $5^2P_{1/2}$  的  $m_F$  最大值都是  $+3$ ，用  $D_1\sigma^+$  或  $D_1\sigma^-$  做光抽运时，原子则被抽运到基态的  $m_F = \pm 3$  的子能级上。

### 3.弛豫过程

原子系统由非热平衡的偏极化状态趋向于热平衡分布状态的过程称为弛豫过程。它主要是由于铷原子与容器壁碰撞，以及原子之间的碰撞，使系统返回到热平衡的波尔兹曼分布，及基本上是均衡分布。

系统的偏极化程度取决于光抽运和弛豫过程相互竞争的结果。为使偏极化程度高，可采用加大光强以提高光抽运效率，选择合适的温度以合理控制原子密度，充压强约  $1.3 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ （ $1.0 \text{ mmHg}$  柱）的磁性很弱的缓冲气体，由于缓冲气体分子与铷原子的碰撞对铷原子能态的影响很小，而缓冲气体的密度比铷蒸气原子的密度高 6 个数量级，这将大大减小铷原子与器壁的碰撞机会，加快偏极化的进程，并能较长时间保持铷原子高度的偏极化。

### 4.基态塞曼子能级之间的射频磁共振

光抽运造成偏极化，光呼吸停止。这时若在垂直于弱磁场  $\vec{B}$  的方向上加一个频率为  $\nu$  的右旋圆偏振 ( $\sigma^-$ ) 射频场，并使辐射光子能量  $h\nu$  等于基态  $5^2S_{1/2}$  的  $F = 2$  的相邻塞曼子能级间能量间距：

$$h\nu = g_F \mu_B$$

则基态  $5^2S_{1/2}$  的  $F = 2$  的塞曼子能级之间将产生磁共振，使得被抽运到  $m_F = +2$  子能级的原子产生感应诱导跃迁，跃迁的选择定则为  $\Delta F = 0, \Delta m_F = \pm 1$ 。从  $m_F = +2$  子能级依次跳到  $m_F = +1, 0, -1, -2$  等子能级，结果使原子趋向均衡分布，破坏了偏极化，由于抽运光  $D_1\sigma^+$  的存在，光抽运过程也随之出现。这样，感应跃迁与光抽运这两个相反的过程将达到一个新的动态平衡。

产生磁共振时除能量守恒外还需要角动量守恒。频率为  $\nu$  的射频场是加在垂直于恒定水平磁场方向的线偏振场，此线偏振场可分解为一右旋和一左旋圆偏振场，此线偏振场可分解为一右旋和一左旋圆偏振场，为满足角动量守恒，只是与原子磁矩作拉莫进动同向的那个圆偏振场起作用。例如当用  $D_1\sigma^+$  光照射时，起作用的是角动量为  $+\hbar$  的右旋偏振 ( $\sigma^-$ ) 射频场。

## 5. 光探测

磁共振的感应跃迁信号是很微弱的，特别是对于密度非常低的气体样品的信号就更加微弱，由于探测功率正比于频率，直接观测是困难的。为此利用射到样品上的  $D_1\sigma^+$  光，它一方面起光抽运的作用，另一方面透过样品的光兼作探测光，及一束光起了抽运与探测两个作用。

由于磁共振，气态铷原子对  $D_1\sigma^+$  光的吸收发生变化，当磁共振时偏极化被破坏，塞曼子能级上的原子又重新均匀分布，光抽运便又开始了，这时光吸收最强，达到探测器的光最弱，因此测量通过样品泡的  $D_1\sigma^+$  透射光就能得到磁共振信号，从而实现磁共振的光探测。

利用磁共振触发光抽运，将射频共振的信号通过透射光表达出来，便是巧妙地将对低频（射频， $1\text{ MHz} \sim 10\text{ MHz}$ ）光子的探测转换成对高频（光频，约  $10^8\text{ MHz}$ ）光子的探测，这就使观测信号的功率大大提高，使射频磁共振的探测灵敏度提高了七八个甚至十几个数量级。

## 三、实验装置

实验装置包括光（泵）磁共振实验仪、射频信号发生器、数字频率计、二通道型数字存储示波器、直流数字电压表等，光（泵）磁共振实验仪由主体单元和辅助源两部分组成。主题单元如图所示：

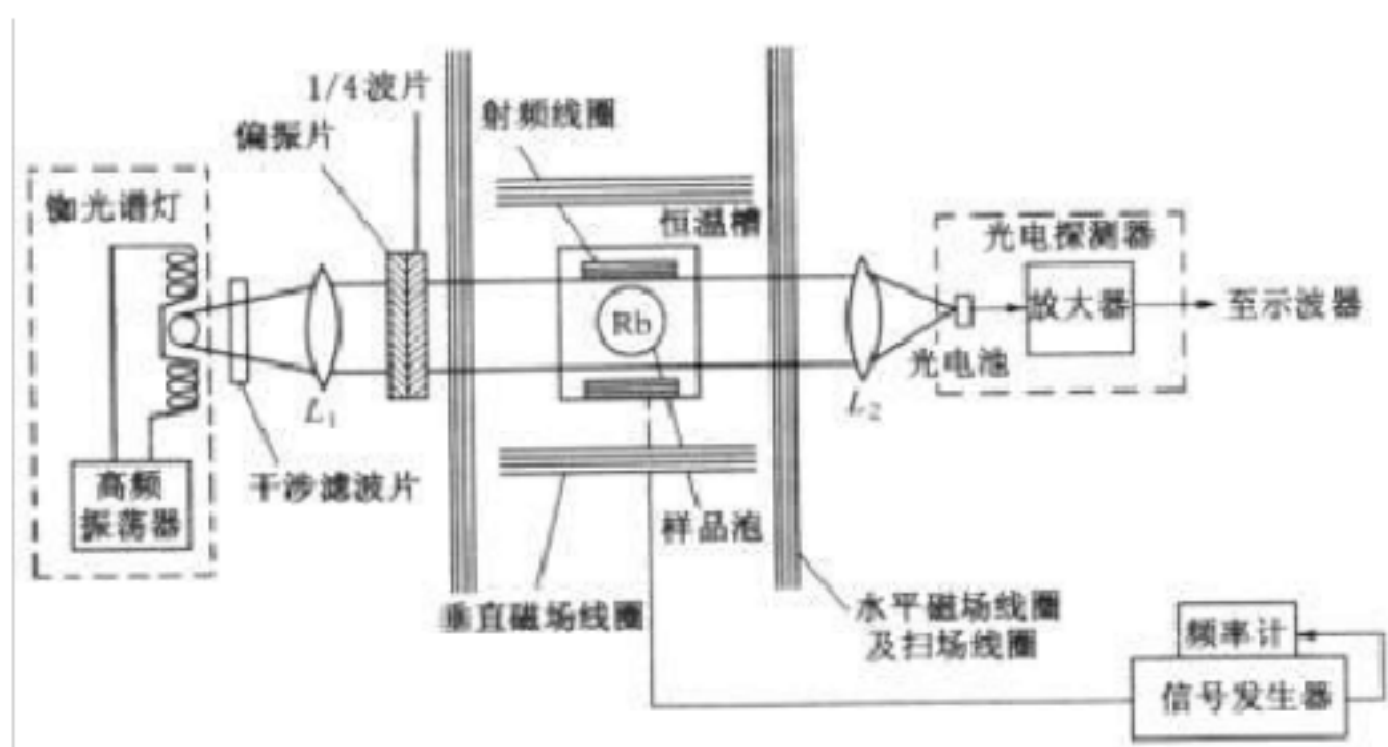


图 2 实验装置主题单元

主体单元由三部分组成： $D_1$  抽运光源、吸收室区和光电探测器。 $D_1$  抽运光源由铷光谱灯、干涉滤光片、偏振片、 $1/4$  波片和透镜组成。铷光谱灯是一种高频无极气体放电泡，处于高频振荡回路的电感线圈中，受高频电磁场的激励，无极放电而发光。由于 $D_1$  光的光抽运效率较高，本实验就用 $D_1$  光，为此选用一片中心波长约  $795.0\text{ nm}$  的干涉滤光片，可以很好地滤去 $D_2$  光，而只让 $D_1$  光通过。偏振片和  $1/4$  波片的作用是获得左旋圆偏振的  $D_1\sigma^+$  光或右旋圆偏振的  $D_1\sigma^-$  光。

吸收室区的中央是充以天然铷原子蒸气和缓冲气体的玻璃吸收泡。该泡两侧对称放置一对射频线圈，为铷原子系统的磁共振提供射频磁场，射频磁场在垂直方向，与在水平方向的光轴垂直。射频场源由射频信号发生器提供，其信号频率有数字频率计显示。吸收泡和射频线圈都置于恒温槽内（称它们为吸收池），槽内温度从  $40$  到  $60$  连续可调，在此温度范围  $^{87}\text{Rb}$  和  $^{85}\text{Rb}$  的信号有最大值。吸收池放在两对相互垂直的赫姆霍兹线圈的中心。较小的一对线圈为垂直（直流）磁场线圈，产生的垂直磁场  $B_{\text{垂直}}$  用来抵消地磁场的垂直分量  $B_{\text{地垂直}}$ ；较大的一组线圈有两个绕组均产生水平方向的磁场，一组称为水平（直流）磁场线圈，为铷原子提供使超精细结构能级产生塞曼分裂的水平磁场  $B_{\text{水平}}$ ，另一组称为扫描磁场线圈，扫描磁场（扫场） $B_{\text{扫}}$  有两部分，在水平直流磁场上叠加一个调制磁场（方波或三角波），其电压波形或水平方向总的磁场波形由二通道型数字存储示波器的一个通道显示。

光电探测器是硅光电池，它接受透过吸收泡的  $D_1\sigma^+$  光或  $D_1\sigma^-$  光，转换成电信号，放大滤波后送到二通道型数字存储示波器的另一通道显示。

铷光谱灯、恒温槽、各线圈绕组以及光电探测器的电源均由辅助源提供，其中水平线圈和垂直线圈的电压由数字电压表读出。

#### 四、实验内容

##### 1. 仪器准备

加热样品吸收泡约至  $40 \sim 60$ ；将光源、透镜、吸收池、光电探测器等的位置调到准直，调整使其沿南北方向水平放置，调节前后透镜的位置，让光源和光电池位于透镜的

焦点上；调节  $1/4$  玻片使其光轴与偏振方向夹角为  $\frac{\pi}{4}$  或  $\frac{3\pi}{4}$  以获得圆偏振光；调整示波器，使其一个通道显示扫场的电压波形或水平方向总的磁场波形，另一个通道显示光电探测器的信号。



## 2.测定地磁场的垂直分量 $B_{\text{地垂直}}$

- 先用指南针判断扫场、水平场、垂直场相对于地磁场的方向。
- 水平线圈磁场方向开关置于“-”挡，水平线圈的电压置于零。扫场波形选择“方波”，选择扫场的方向，使扫场的方向与地磁场的水平分量方向相反。由于地磁场的垂直分量对光抽运现象有很大影响，本实验中用垂直磁场来消除地磁场垂直分量的影响，调整垂直磁场的方向使其跟地磁场垂直分量方向相反，将垂直线圈的电压从零开始逐步加大，当垂直磁场跟地磁场的垂直分量完全抵消时，示波器上出现最佳光抽运信号，记下直流数字电压表上此时的电压值。代入公式

$$B = \frac{16\pi}{5^2} \frac{g}{r} \frac{NI}{R} \times 10^{-7} \text{T}$$

得到地磁场垂直方向的分量。垂直磁场跟地磁场垂直分量相抵消的状态，要一直保持下去。

## 3.测定地磁场的水平分量 $B_{\text{地水平}}$

- 让水平场  $B_{\text{水平}}$  的方向和地磁场水平分量  $B_{\text{地水平}}$  与扫场  $B_{\text{扫}}$  的方向相同，调节射频信号频率至共振频率  $\nu_1$ ，对应  $h\nu_1 = |g_F| \mu_B B_1 = |g_F| \mu_B (B_{\text{水平}} + B_{\text{扫}} + B_{\text{地水平}})$ 。
- 同时改变  $B_{\text{水平}}$  和  $B_{\text{扫}}$  的方向，使之跟地磁场水平分量  $B_{\text{地水平}}$  方向相反，测得射频共振频率  $\nu_2$ ，有  $h\nu_2 = |g_F| \mu_B B_2 = |g_F| \mu_B (B_{\text{水平}} + B_{\text{扫}} - B_{\text{地水平}})$ 。两式相减，得到

$$B_{\text{地水平}} = \frac{h\nu}{\mu_B |g_F|},$$

$$\text{其中 } \nu = \frac{\nu_1 - \nu_2}{2}。$$

- 只改变  $B_{\text{水平}}$  的方向，得到共振频率  $\nu_3$ 。同上，有

$$h\nu_3 = |g_F| \mu_B B_3 = |g_F| \mu_B (-B_{\text{水平}} + B_{\text{扫}} + B_{\text{地水平}})$$

$B_{\text{水平}}$  可由已知条件求出，联立三个方程组可以求出三个未知量  $|g_F|$ 、 $B_{\text{扫}}$ 、 $B_{\text{地水平}}$ 。

## 4.其它相关量

$$I = \frac{g_J - g_F}{2g_F}$$

基态  $g_J = 2$ ，从而可以求出核自旋量子数  $I$ 。

$$B = \sqrt{B_{\text{低水平}}^2 + B_{\text{地垂直}}^2}$$

$$\tan \theta = \frac{B_{\text{地垂直}}}{B_{\text{低水平}}}$$

在求出地磁场的垂直分量和水平分量后，就可以求出地磁场以及其倾角。

## 五、数据处理

### 1.测定地磁场垂直分量 $B_{\text{地垂直}}$

根据磁感应强度计算公式

$$B = \frac{16\pi}{5^2} \frac{g}{r} NI \times 10^{-7} \text{T}$$

代入  $I = 0.063\text{ A}$ ,  $N = 100$ ,  $r = 0.1530\text{ m}$  可以算得地磁场的垂直分量为

$$B_{\text{地垂直}} = 1.851 \times 10^{-5} \text{ T}$$

2.测量铷原子基态的朗德因子  $g_F$  和核自旋量子数  $I$

铷原子基态朗德因子的计算公式为

$$|g_F| = \frac{h(\nu_1 + \nu_2)}{2\mu_B B_{\text{水平}}}$$

测得水平磁场  $B_{\text{水平}} = 1.325 \times 10^{-4} \text{ T}$  ,

测得的  $^{87}\text{Rb}$  和  $^{85}\text{Rb}$  频率  $\nu$  如下表 ,

原子	$\nu_1 / \text{kHz}$	$\nu_2 / \text{kHz}$
$^{87}\text{Rb}$	1462.1	412.5
$^{85}\text{Rb}$	958.2	279.2

表 2 两种原子的共振频率

代入上式中得  $^{87}\text{Rb}$  和  $^{85}\text{Rb}$  的朗德因子分别为

$$g_F^{87} = 0.5054 \approx 1/2, g_F^{85} = 0.3336 \approx 1/3$$

可以看出实验值与理论值相差较小。

知原子的核自旋量子数为

$$I = \frac{g_J - g_F}{2g_F}$$

把求出的朗德因子代入即可计算出核自旋量子数为

$$I^{87} = 1.4786 \approx 3/2, I^{85} = 2.4974 \approx 5/2$$

可见核自旋的实验值和理论值也相当吻合。

3.测量地磁场水平分量  $B_{\text{低水平}}$  和倾角  $\theta$

地磁场水平分量的计算公式为

$$B_{\text{地水平}} = \frac{h(\nu_1 - \nu_3)}{2\mu_B |g_F|}$$

$^{87}\text{Rb}$  和  $^{85}\text{Rb}$  频率  $\nu$  和朗德因子  $g_F$  如下表 ,

原子	$\nu_1 / \text{kHz}$	$\nu_3 / \text{kHz}$	$g_F$
$^{87}\text{Rb}$	1462.1	731.7	0.5054
$^{85}\text{Rb}$	958.2	492.1	0.3336

表 3 两种原子的共振频率和朗德因子

代入上面的式子中可以得到地磁场的水平分量为

$$B_{\text{地水平}} = (5.163 + 4.991)/2 \times 10^{-5} = 5.077 \times 10^{-5} \text{ T}$$

地磁场的大小为

$$B = \sqrt{B_{\text{地水平}}^2 + B_{\text{地垂直}}^2} = 5.404 \times 10^{-5} \text{ T}$$

地磁场的倾角为

$$\tan \theta = \frac{B_{\text{地垂直}}}{B_{\text{地水平}}} = \frac{1.851}{5.077} = 0.365, \theta \approx 20.03^\circ$$



## 六、思考题

1.  $^{87}\text{Rb}$  的基态  $F=1$  与  $F=2$  的塞曼子能级排列相反， $^{85}\text{Rb}$  的基态  $F=2$  与  $F=3$  的塞曼子能级排列也相反，是何原因？

根据  $g_F = g_J \frac{F(F+1) + J(J+1) - I(I+1)}{2F(F+1)}$ ，对  $^{87}\text{Rb}$  而言，将  $F=1, I=3/2, J=1/2$  代入，得  $g_F = -\frac{1}{2}g_J$ ，将  $F=2, I=3/2, J=1/2$  代入得  $g_F = \frac{1}{4}g_J$ ，所以  $F=1$  与  $F=2$  时  $g_F$  符号相反，也就是塞曼子能级排列相反；对  $^{85}\text{Rb}$  而言，将  $F=3, I=5/2, J=1/2$  代入得  $g_F = \frac{1}{6}g_J$ ，将  $F=2, I=5/2, J=1/2$  代入得  $g_F = -\frac{1}{4}g_J$ ，所以  $F=3$  与  $F=2$  时  $g_F$  符号相反，也就是塞曼子能级排列相反。

2. 测量  $g_F$  值时，将水平换向得到的频率为  $\nu = \frac{\nu_1 + \nu_2}{2}$ ，为什么不是  $\nu = \frac{\nu_1 - \nu_2}{2}$ ？必须满

足的条件是什么？测地磁场水平分量时，得到的频率为什么是  $\nu = \frac{\nu_1 - \nu_3}{2}$ ？相应的条件又是什么？

i. 测量  $g_F$  时，水平换向前，有共振条件

$$h\nu_1 = B_{\text{水平}} + B_{\text{扫}} + B_{\text{地水平}}$$

水平换向后，有

$$h\nu_2 = B_{\text{水平}} - B_{\text{扫}} - B_{\text{地水平}}$$

两式相加消去  $B_{\text{扫}}$  和  $B_{\text{地水平}}$ ，故得到的频率为  $\nu = \frac{\nu_1 + \nu_2}{2}$ 。

必须满足的条件是， $B_{\text{水平}} > B_{\text{扫}} + B_{\text{地水平}}$ 。

ii. 测量  $B_{\text{地水平}}$  时，水平换向前，有共振条件

$$h\nu_1 = B_{\text{水平}} + B_{\text{扫}} + B_{\text{地水平}}$$

水平换向后，有

$$h\nu_2 = B_{\text{水平}} + B_{\text{扫}} - B_{\text{地水平}}$$

两式相减消去  $B_{\text{水平}}$  和  $B_{\text{扫}}$ ，故得到的频率为  $\nu = \frac{\nu_1 - \nu_2}{2}$ 。

必须满足的条件是， $B_{\text{水平}} + B_{\text{扫}} > B_{\text{地水平}}$ 。

3. 为什么实验要在抵消地磁场垂直分量的状态下进行？

地磁场的垂直分量对光抽运信号有很大影响，当垂直磁场跟地磁场的垂直分量完全抵消时，示波器上出现最佳光抽运信号。

4. 扫场在实验中的作用是什么？

扫描场的作用就是使光抽运反复出现，以便于实验观测。

5. 为什么射频磁场必须在竖直方向，跟产生塞曼子能级的稳定弱磁场相垂直？

这样可以防止光抽运造成的偏极化，使原子趋向均衡分布，平衡感应光和光抽运这两个相反的过程。垂直方向的射频场为线偏振场，可分解为一右旋和一左旋圆偏振场，为满足角动量守恒，只是与原子磁矩作拉莫进动同向的那个圆偏振场起作用。

6.如果射频信号频率是相邻塞曼子能级间隔的两倍，能否产生由振？为什么？

不能，违反了跃迁的选择定则  $\Delta m_F = \pm 1$ 。

$m_F = +2$  到  $m_F = 0$  的磁共