

## 大学物理实验报告

实验名称：

核磁共振

学院：理学院      专业：应用物理学    班级：应物 1601

学号：20161413      姓名：谢尘竹      电话：18640451671

实验日期： 2019 年 7 月 17 日

第 二十 周 星期 三 第 一 节

实验室房间号：122

实验组号：2

成绩

指导教师

批阅日期

高茜

2019 年 7 月 17 日

1. 实验目的：

- ①.了解核磁共振现象及实验原理；
- ②.掌握测定核的自旋比 $\gamma$ 和朗德 g 因子的方法。

2. 实验器材：

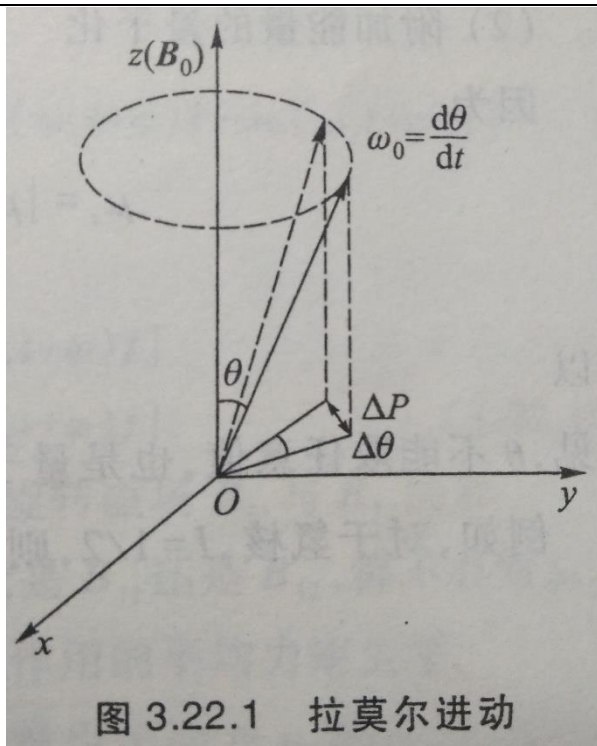
名称	编号	型号	精度
核磁共振边限振荡器	12009		
示波器	S1120010752	GES831528	
磁场			
频率计			
调制磁场电源	12009		
待测样品			

3. 实验原理（请用自己的语音简明扼要地叙述，注意原理图需要画出，测试公式需要写明）

## 1. 经典理论

按照经典的电磁理论，由于原子核具有自旋运动，并且是带电体，所以存在核自旋角动量 $\mathbf{p}_S$ 和自旋磁矩 $\boldsymbol{\mu}$ ，并且二者间满足 $\boldsymbol{\mu} = g \frac{e}{2m_N} \mathbf{p}_S = g \frac{\mu_N}{\hbar} \mathbf{p}_S = \gamma \mathbf{p}_S$ ，其中 $m_N$ 为原子核质量； $\mu_N = \frac{e\hbar}{2m_N}$ 叫核磁子，它是仿照玻尔磁子 $\mu_B = \mu_e = \frac{e\hbar}{2m_e}$ 提出来的概念。

若在 $z$ 轴方向施加外磁场 $\mathbf{B}_z$ ，且刚开始 $\boldsymbol{\mu}$ 与 $\mathbf{B}_z$ 存在一定夹角，则 $\boldsymbol{\mu}$ 受到力矩 $\mathbf{L} = \boldsymbol{\mu} \times \mathbf{B}_z$ ，联立 $\mathbf{L} = \frac{d\mathbf{p}_S}{dt} = \frac{1}{\gamma} \frac{d\boldsymbol{\mu}}{dt}$ ，解得 $\boldsymbol{\mu}$ 的拉摩尔旋进频率 $\omega_0 = \gamma B_z$ 。

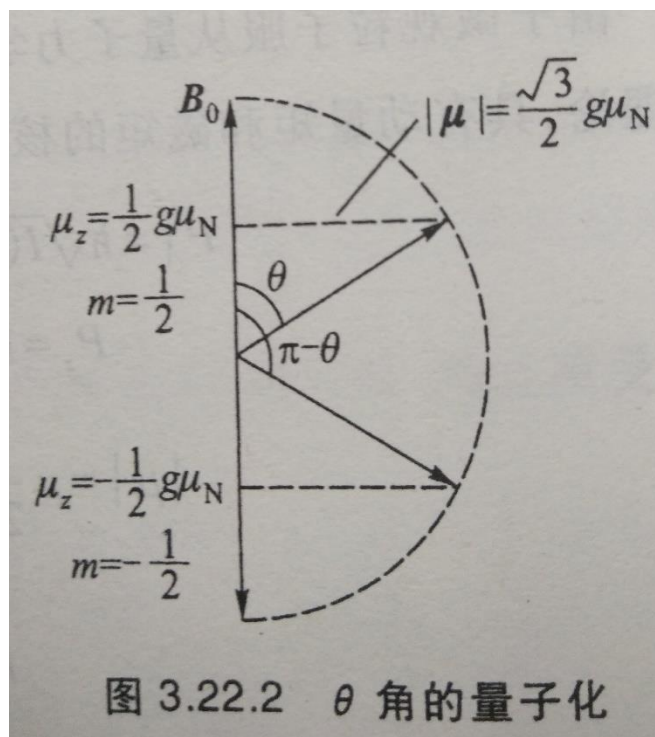


可见 $\omega_0 \propto B_z$ ，不过比例系数 $\gamma$ 会因 $g$ 而异，而不同原子核的 $g$ 不同，所以只有同一类原子核，其 $\gamma$ 才相同，在同一磁场下的转动频率 $\omega_0$ 才相同。

## 2.量子理论

(1).  $|\mathbf{p}_S| = \sqrt{I(I+1)}\hbar$ ,  $p_z = m\hbar$ , 其中 $I$ 为 $\geq 0$ 的半整数,  $m$ 为 $\in [-I, I]$ 的、间隔为1的半整数。代入 $\boldsymbol{\mu} = \gamma \mathbf{p}_S = g \frac{\mu_N}{\hbar} \mathbf{p}_S$ , 即得:  $|\boldsymbol{\mu}| = g\mu_N \sqrt{I(I+1)}$ ,  $\mu_z = g\mu_N m$ 。此即核自旋角动量的量子化, 导致了核自旋磁矩的量子化。

其中，当原子核的质量数  $A$  为偶数时，若质子数为偶数，则  $I=0$ ，若质子数为奇数，则  $I=1$ ；当原子核的  $A$  为奇数时， $I$ =半整数。



(2). 由于  $\mu$  的量子化，最终也会导致原子核磁矩在外磁场中的附加势能的量子化：比如对于氢核， $I=\frac{1}{2}$ ， $m=\pm\frac{1}{2}$ ，则

$\mu_{zm}=g\mu_N m$  有两个取值，相应的在外场中的附加势能

$E_m = -\mu \cdot B_z = -\mu_z B_z = -g\mu_N m B_z$ ，也有两个值  $E_{+\frac{1}{2}}, E_{-\frac{1}{2}}$ 。

于是  $\Delta E = E_{-\frac{1}{2}} - E_{+\frac{1}{2}} = g\mu_N B_z = \hbar\omega_0$ ，其中用到了

$$\omega_0 = \gamma B_z = g \frac{\mu_N}{\hbar} B_z。$$

对于  $I$  为其他值的原子核，尽管分裂的级数不同，但相

邻两能级间的间隔都是 $\hbar\omega_0$ ，所以只要利用核磁共振技术测出 $\omega_0$ ，除以 $B_z$ 就能得出 $\gamma=g\mu_N/\hbar$ ，再算出特定原子核的 $g$ ，即可得到该原子核的 $\mu_N$ 。

### 3. 旋转磁场的产生和应用

为了实现核磁共振，沿 $\perp B_z$ 的方向(定为  $x$  轴方向)加一个具有一定射频范围的线偏振磁场 $B_1=2B_{10}\cos(\omega_1 t + \varphi)i$ ，而它等价于两个沿相反方向圆形旋转的两个旋转磁场的磁场 $B_{11}=B_{10}[\cos(\omega_1 t + \varphi)i + \sin(\omega_1 t + \varphi)j]$ 、 $B_{12}=B_{10}[\cos(\omega_1 t + \varphi)i - \sin(\omega_1 t + \varphi)j]$ 之和。

【注意这可不是虚数  $\cos\theta+i \cdot \sin\theta=e^{(i\theta)}$ ； $i$  表基矢量】

(1). 当 $\omega_1$ 与 $\omega_0$ 相差较多时，无论是 $B_{11}$ 还是 $B_{12}$ ，对 $\mu$ 的平均力矩均=0。

(2). 当 $\omega_1=\omega_0$ 时，与 $\mu$ 运动方向相反的旋转磁场分量仍不会对其产生作用，但另一个旋转磁场分量将与 $\mu$ 相对静止，从而对其产生稳定指向和大小的力矩，使得其进动并改变

$\Delta \theta$ 角，对应着原子核吸收能量 $\hbar\omega_0$ ， $\mu$ 的方向从原 $\theta$ 角，朝着 $\theta = \langle \mu, B_z \rangle$ 变大的方向，突然改变一个 $\Delta m = -1$ 对应的 $\Delta \theta > 0$ ，跃迁到另一个 $m - 1$ 对应的 $\theta' = \arccos \frac{\mu_z}{|\mu|} = \arccos \frac{m-1}{\sqrt{I(I+1)}}$ 角上去。

【吸收一个 $\hbar\omega_0$ 后， $\omega_0$ 没变， $\omega_1$ 可能会降低(外磁场能量被吸走了减小？但按理说 $B_1$ 的大小与其频率无关)，所以不会继续往上跃迁到更高  $m$  的能级，并继续吸收能量？如果能保持 $\omega_1 = \omega_0$ 不变的话， $m$  会不会最终到达最高值 $I$ ？】

## 4. 实际样品核磁共振的微观机理

(1). 在某一时间断面下，各个原子磁矩停止转动；将这些小磁矩的起点均移到 $B_z$ 上的同一点上，则每个 $\theta_m$ 所对应的锥面上，都均匀分布着小磁矩；不同锥面上的磁矩长度相等，但磁矩个数 or 密度不同，这是因为热平衡时，磁矩的能量遵循玻尔兹曼分布，高能级即 $\theta_m$ 较大、 $m$ 较小的锥面上的磁矩个数更少，即该磁量子态上的粒子数少。

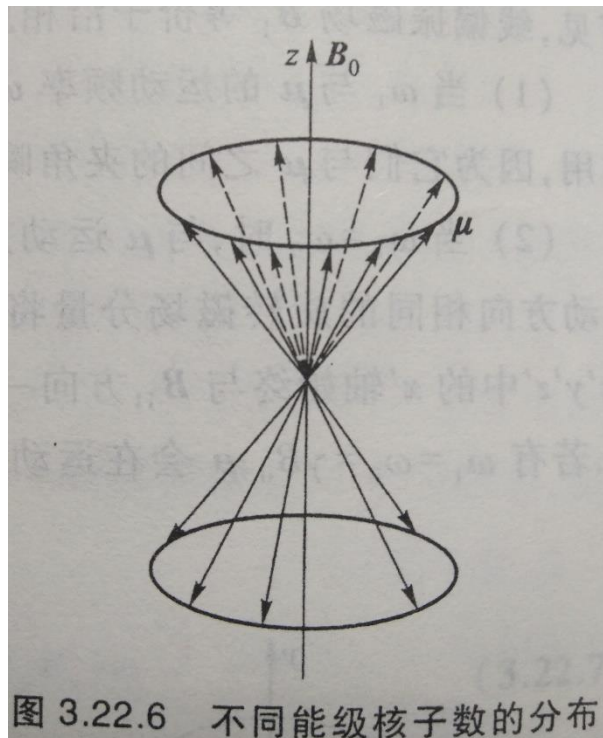


图 3.22.6 不同能级核子数的分布

定量地说，设热平衡时第  $m$  号能级量子态简并度为

$g_m$ ，则该能级上的平均粒子数为  $N_{0m} = g_m e^{-\frac{E_m}{kT}}$ ，0 表示热平

衡态；那么  $\frac{N_{0,m+1}}{N_{0m}} = \frac{g_{m+1}}{g_m} e^{-\frac{E_{m+1}-E_m}{kT}} = \frac{g_{m+1}}{g_m} e^{\frac{\hbar\omega_0}{kT}} > 1$ ，设核自旋引

入的各个磁能级在热平衡时的量子态简并度都相等

$g_m = g_{m+1}$ ，则高能级粒子数与相邻低能级粒子数之比为

$$\frac{N_{0m}}{N_{0,m+1}} = e^{-\frac{\hbar\omega_0}{kT}}。$$

于是低能级上多出的超量核子数(相当于高能级多出的反转粒子数的负值、相反数)，即低能级粒子数比高能级粒子数多出来的这部分粒子数

$$N_{0,m+1} - N_{0m} =$$



$$(e^{\frac{\hbar\omega_0}{kT}} - 1)N_{0m}$$

$$\xrightarrow{\hbar\omega_0 \ll kT \text{ (当然其实用玻尔兹曼分布已经暗示此条件)}} \frac{\hbar\omega_0}{kT} N_{0m}$$

$$= \frac{g\mu_N B_z}{kT} N_{0m} = \frac{\gamma \hbar B_z}{kT} N_{0m}。$$

受激辐射减去受激吸收，不至于使得核子数分布反转，因此数量级上只有这些低能态的少量超量核的受激跃迁，对信号才有贡献，这便是考虑的实空间主体。而磁能级之间的间距很小，可以忽略自发辐射，因此考虑的爱因斯坦激光理论过程，主要只包括(低能级到高能级的)受激辐射和(高能级到周围其他粒子系统如晶格的)无辐射跃迁。

$$(2). \text{宏观上需要查看磁化强度矢量 } \mathbf{M} = \frac{\sum \mu_i}{\Delta V}。$$

在只有  $\mathbf{B}_z$  时，热平衡态下，不同锥面上均匀分布着数量不同的磁矩  $\mu$ ， $\theta_m$  小的核子多。设  $\mathbf{M}$  在  $z$  方向的投影为  $M_z$ ，当  $\perp \mathbf{B}_z$  施加一个合适频率 ( $\omega_1 = \omega_0$ ) 的  $\mathbf{B}_1$ ，使得发生核磁共振时， $\theta_m$  较小的低能级核子受激跃迁到  $\theta_m$  较大的高能级锥面上去，低能级核子数减少，高能级核子数增多， $M_z$  往  $-\mathbf{B}_z$  方向增加， $\mathbf{M}$  向  $-\mathbf{B}_z$  方向偏离和靠近；但同时低能级超量核数减少，维持核磁共振的动力减弱，现象趋于消失。

同时，处于高能级的核子又将能量通过无辐射热弛豫跃迁，将能量传递给周围其他粒子系统如给晶格振动，该过程又会使得粒子数趋于热平衡分布，维持低能级的超量核数，也就维持了核磁共振。——这就要求在样品中加入一些顺磁性物质，增加超量核数，加大弛豫效果，增强热弛豫过程。

## 4. 实验内容与步骤

### 1. 实验装置的连接

(1)将样品放入边限振荡器的探头线圈中，注意要将样品及线圈置于磁场最均匀处。

(2)按照图 3.22.7 进行连接：

①.扫描输出接磁铁的扫描线圈；

②.X 轴输出接示波器的输入端；

③.扫描电源的电源输出接头通过航空接头连接线与边限振荡器的电源输入接头连接；

④.频率输出接频率计；

⑤.信号输出接示波器 Y 轴输入端。

### 2. 观察质子的核磁共振

(1)接通 220V 电源，打开电源开关旋转幅度调节旋钮，使射频场振幅至最佳频幅度。

(2)将扫描场幅度调节至最大，旋转频率调节至共振，可以在示波器上观察到子的核磁共振波形。

### 3.观察各种因素对核磁共振现象的影响

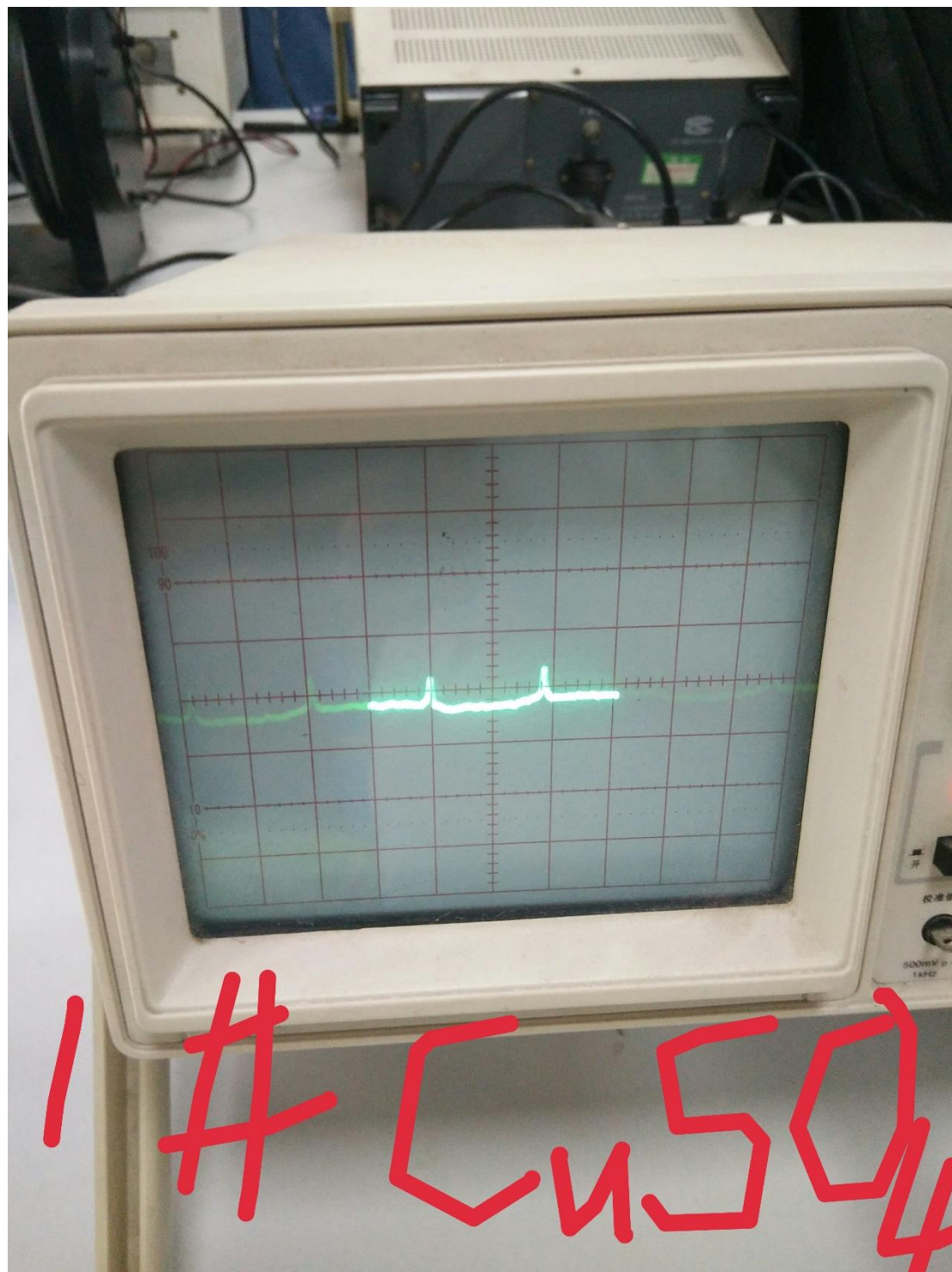
- (1)改变射频场 $B_1$ 的强度;
- (2)改变扫描场幅度;
- (3)观察磁场 $B_0$ 的均匀度变化(将装有样品的探头向磁场区的外边缘移动)对共振信号的影响;
- (4)观察顺磁离子的影响(用不同样品比较)

### 4.待测样品

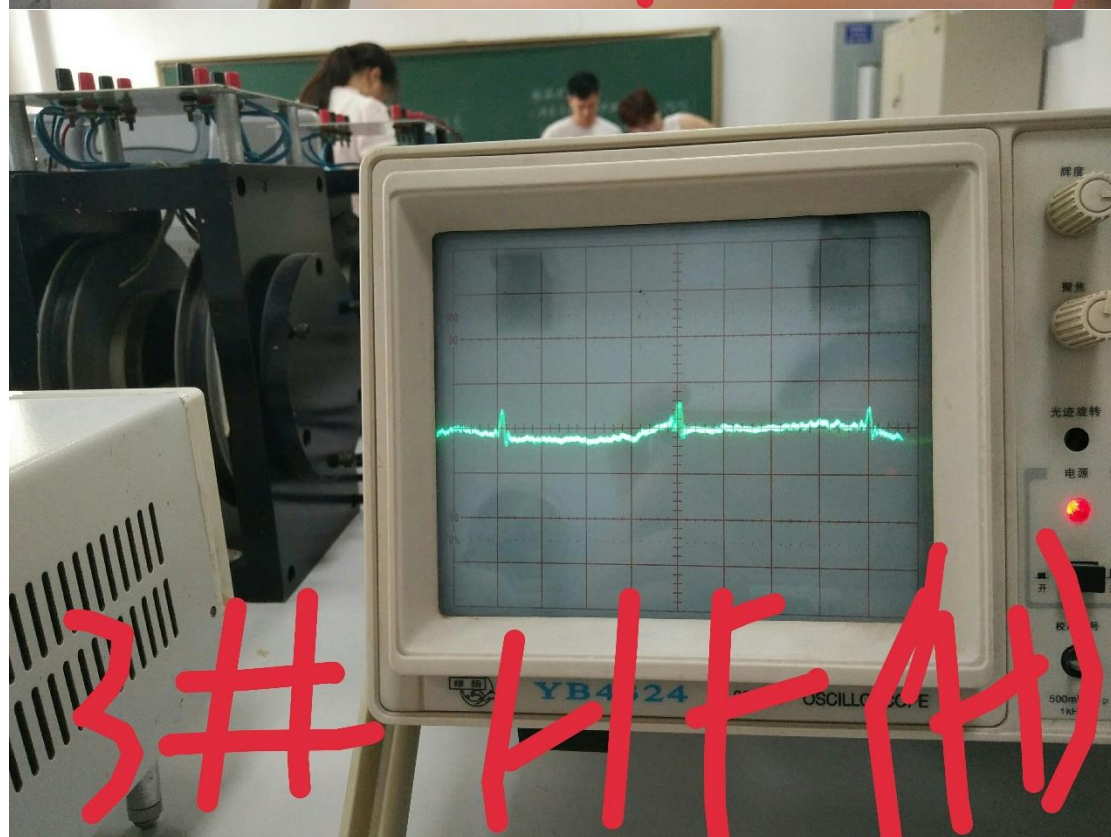
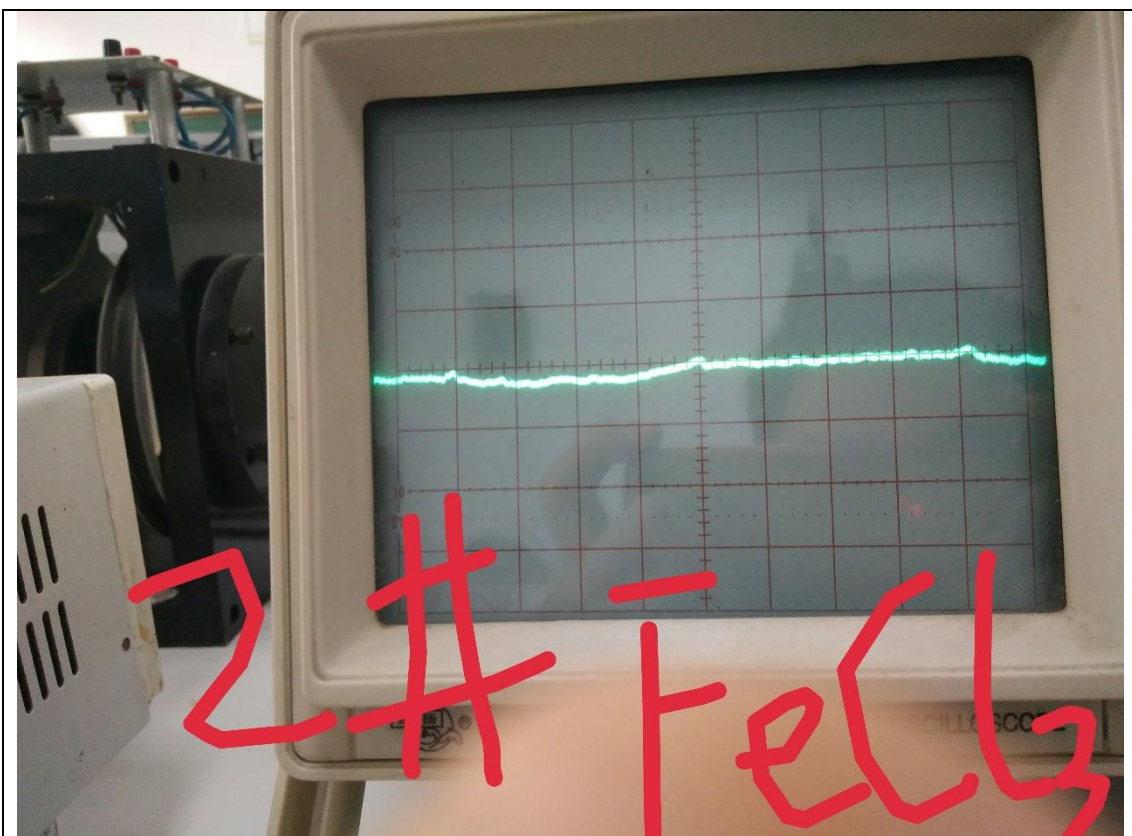
- (1)掺入 $\text{CuSO}_4$ 的水溶液样品, 可以获得 $^1\text{H}$ 核共振;
- (2)掺入 $\text{FeCl}_3$ 的水溶液样品, 可以观察顺磁离子对 $^1\text{H}$ 核共振的影响;
- (3)液态 $\text{HF}$ 样品, 可以观察 $^{19}\text{F}$ 核的共振;
- (4)液态丙三醇样品, 可以观察有机化合物中的 $^1\text{H}$ 核共振;
- (5)纯 $\text{H}_2\text{O}$ 样品, 可以观察弱的 $^1\text{H}$ 核共振;
- (6) $\text{MnSO}_4$ 样品, 可以获得强的 $^1\text{H}$ 核共振。

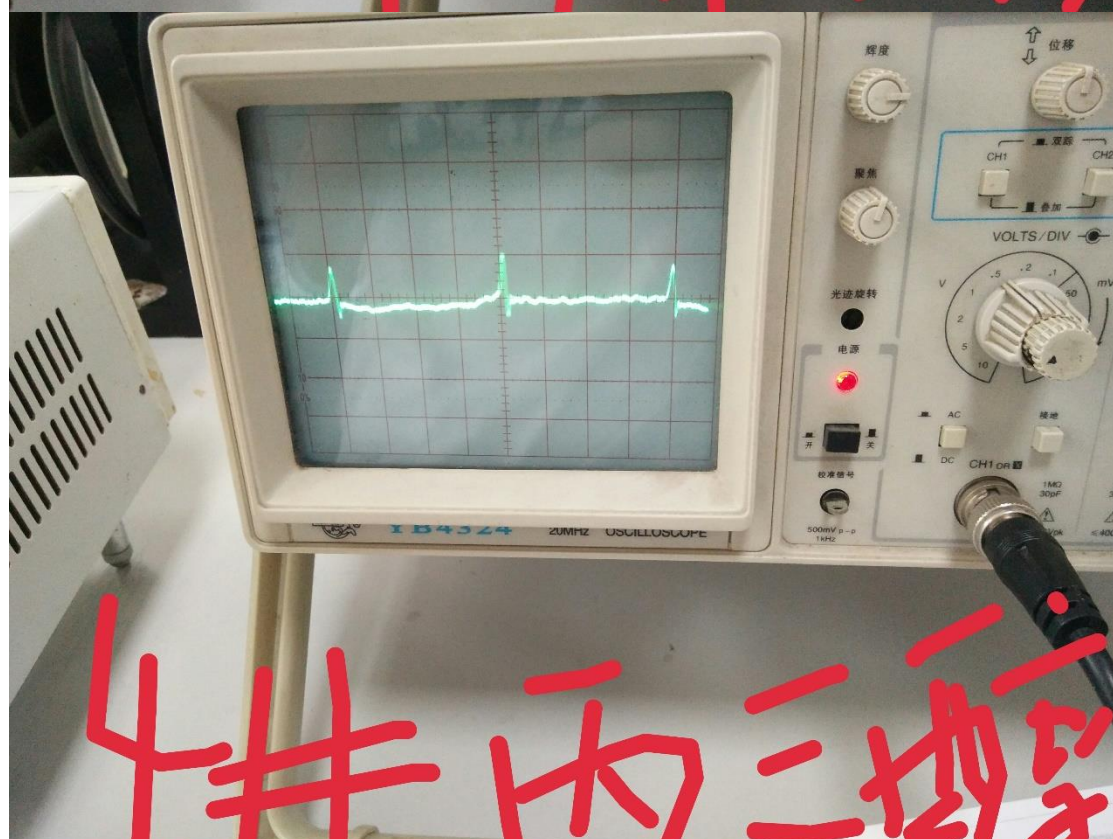
5. 实验记录（注意：单位、有效数字、列表）

一. 调出各样品的共振吸收峰，并拍照

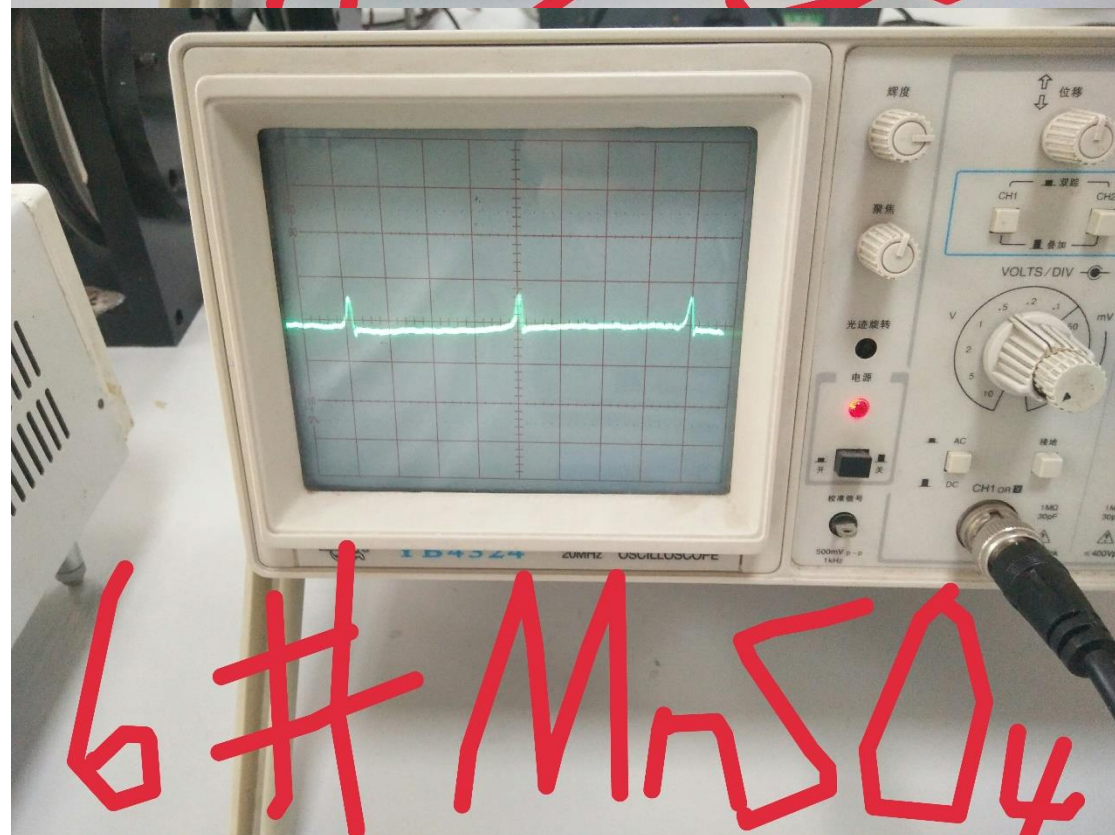
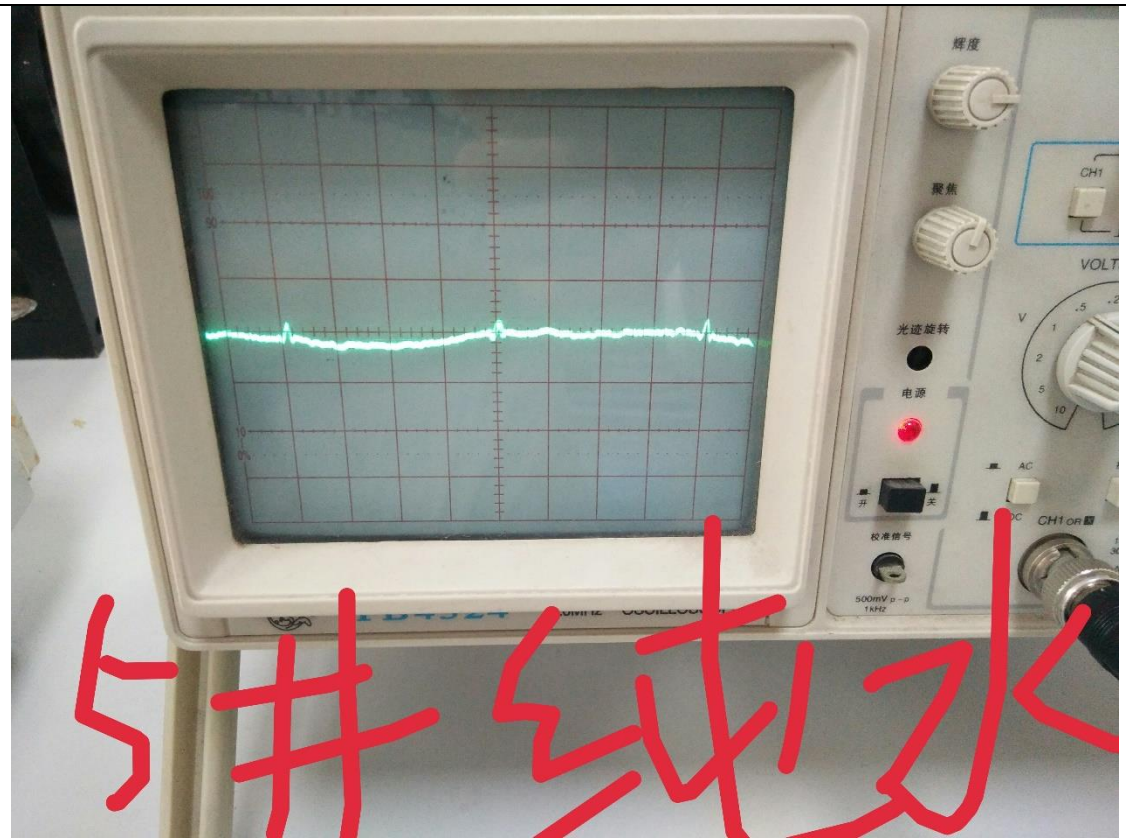














## 二.记录相应的共振频率

1	20.3854 MHz
2.	20.3881 MHz
3. (F)	19.1733 MHz
3 (H)	20.3794 MHz
4.	20.3772 MHz ✓
5.	20.3780 MHz
6.	20.3773 MHz

2019. 7. 17

## 6. 数据处理及误差分析

一.用所有含氢样品求出氢的共振频率,用含氟样品测出氟的共振频率,参考 P246:

待测样品 序号	待测样品 化学式	共振频率 f/MHz	共振角频 率 $\omega_1$
1	<b>CuSO<sub>4</sub></b>	20.3854	128.085
2	<b>FeCl<sub>3</sub></b>	20.3881	128.102
3	<b>HF(<sup>19</sup>F)</b>	19.1733	120.469
3	<b>HF(<sup>1</sup>H)</b>	20.3794	128.048
4	丙三醇	20.3772	128.034
5	纯水	20.3780	128.039
6	<b>MnSO<sub>4</sub></b>	20.3773	128.034

①.氢的共振角频率的平均值 $\overline{\omega_0}$ =

$$\frac{128.085+128.102+128.048+128.034+128.039+128.034}{6} =$$

128.057rad · Hz, 共振频率平均值为 $\frac{128.057}{2\pi}=20.381\text{MHz}$ 。

其相对于 H 的标准共振频率 20429Khz 的百分差误差为

$$E_s = \frac{|20.381 - 20.429|}{20.429} \times 100\% = 0.235\%。$$

②. 氟的共振角频率为 $\omega_0 = 120.469\text{rad} \cdot \text{Hz}$ 。

其相对于 F 的标准共振频率 19218Khz 的百分差误差为

$$E_s = \frac{|19.1733 - 19.218|}{19.218} \times 100\% = 0.233\%。$$

## 二.P246 的后续数据处理：

由于已知磁场强度  $B = 4798\text{Gs} = 0.4798\text{T}$ ，则

$$\gamma = \frac{\omega_0}{B_z} = \frac{128.057}{0.4798} = 266.882 \text{ (rad} \cdot \text{Hz/T)}, \text{ 或写为 } \frac{\gamma}{2\pi} =$$

42.478 (Hz/T)。

同理也可算出 F 的 $\gamma$ ，以及二者的朗德 g 因子 $= \frac{\gamma \hbar}{\mu_N}$ 。

## 三.用到的数据：



## 7. 思考题及实验小结

以下内容为报告保留内容，请勿填写或删除，否则影响实验成绩

上课时间： 上课地点： 任课教师：
报告得分：  教师留言：
操作得分：  教师留言：
预习得分： 预习情况：