

核磁共振实验报告

姓名：张积翔 学号：PB23020595

摘要：

本实验通过使用扫频法来观察核磁共振信号，观察并讨论了扫场频率与射频频率的改变对核磁共振信号的影响，并通过测量含 1CuSO_4 水溶液共振频率得到 ^1H 的 γ_H 因子为 $2.6946 \times 10^8 \text{ s}^{-1} \cdot \text{T}^{-1}$ 和 g_H 因子为 5.6262。同时还分别测量了不同位置处磁场强度以及 ^{19}F 的 γ_F 因子为 $2.5360 \times 10^8 \text{ s}^{-1} \cdot \text{T}^{-1}$ 和 g_F 因子为 5.2950，最后测得调制磁场 B_m 大小为 0.120mT。

关键词：核磁共振；稳态法；朗德因子

1. 引言

核磁共振 (nuclear magnetic resonance, NMR) 是指具有磁矩的原子核在恒定磁场中由电磁辐射引起的共振跃迁现象。1939 年美国物理学家拉比 (Rabi) 在德国物理学家斯特恩 (Stern) 分子束法测质子磁矩实验的基础上，利用分子束磁共振方法测量氢核磁矩，观察到了磁共振。

由于磁共振能反映物质结构和物质内部动态信息而又不破坏物质结构本身，而且具有较高的灵敏度和分辨本领，也已成为确定物质分子结构、组成和性质的重要实验方法，因而核磁共振技术涉及到物理、电子、计算机、磁学、化学、生物医学研究中的重要实验手段。近年来，随着量子计算的迅猛发展，核磁共振量子计算方面的研究为提高量子计算实验研究水平和我国跻身于该领域的世界先进行列具有重要意义。

本实验则利用核磁共振来测量磁场强度以及原子核的朗德因子。

2. 实验原理

2.1 量子力学观点的磁共振

微观粒子的自旋磁矩 μ 和自旋角动量 p 的关系为

$$\mu = \gamma p$$

其中 $\gamma = g \frac{q}{2m}$ 称为旋磁比，式中 q 、 m 分别为粒子的电荷和质量， g 为朗德因子。

微观粒子自旋角动量和自旋磁矩在空间的取向是量子化的， p 在外磁场方向 (z 方向)

的分量为

$$p_z = m\hbar(m = l, l-1, \dots, -l+1, -l)$$

其中 l 为表征粒子性质的自旋量子数， m 称为磁量子数，在外磁场 B_0 中，磁矩 μ 与 B_0 的相互作用能为

$$E = -\mu \cdot B_0 = -\gamma m \hbar B_0$$

因而一个能级分裂为 $2l+1$ 个次能级，即塞曼能级，每个次能级与磁矩在空间的不同取向相对应，对于最简单的氢核 ^1H （或电子），其 $l = \frac{1}{2}$ ，则 $m = \pm \frac{1}{2}$ ，故有两个次能级，其磁矩取向及其能级示意如图1所示。

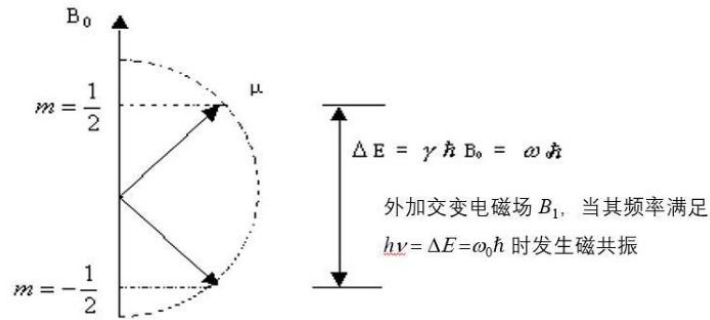


图 1: $l = \frac{1}{2}$ 的粒子磁矩在磁场中的取向及能级

两个能级能量差为

$$\Delta E = \gamma \hbar B_0 \equiv \omega_0 \hbar$$

ω_0 称为拉莫尔频率。若在外磁场 B_0 的垂直方向施加一个交变电磁场，当其频率 ν 满足

$$h\nu = \gamma \hbar B_0$$

时，会发生粒子对电磁场能量的吸收（或辐射），因而引起粒子在能级间的跃迁。

2.2 稳态法进行核磁共振实验

稳态法，是指用连续的射频场（即旋转磁场 B_1 ）作用到核系统上，观察到核磁共振的频率响应信号。稳态法又分为两种，第一是固定 B_0 ，让 B_1 的频率 ω_1 连续变化而通过共振区，当 $\omega_1 = \omega_0 = \gamma B_0$ 时，则出现共振信号，此为扫频法；第二种是使的 B_1 频率不变，让 B_0 连续变化而扫过共振区，则为扫场法。本实验使用的是扫频法。

本实验为实现核磁共振，在永磁铁 B_0 上叠加一个低频交变调制磁场 $\tilde{B} = B_m \cos \omega t$ ，使样品所在的实际磁场为 $B = B_0 + \tilde{B}$ 即扫场。如果调节射频场的频率 ν ，使射频场的能量进入氢质子两能级能量差的连续变化范围，则当

$$B = \frac{2\pi\nu}{\gamma}$$

时，发生共振，通过边限振荡器的探测装置在示波器上可观测到共振信号如图 2 所示。

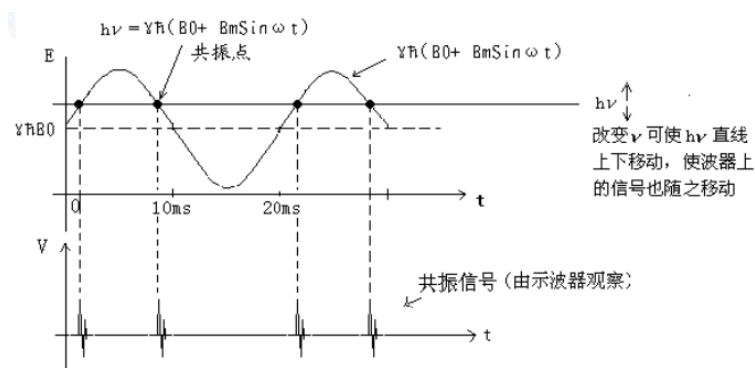


图 2：核磁共振信号

因此由图 2 可知，当调节射频场使共振信号等间距时，恰有 $h\nu = \gamma\hbar B_0$ ，此时 ν 为共振信号等间距时的频率，由此可得

$$\gamma = \frac{2\pi\nu}{B_0}$$

3. 实验内容

3.1 实验仪器

如下图 3 为实验装置图，包括边限振荡器及插在其上的样品、频率计、电磁铁、永磁铁、示波器等，其中永磁铁参数为 483mT。

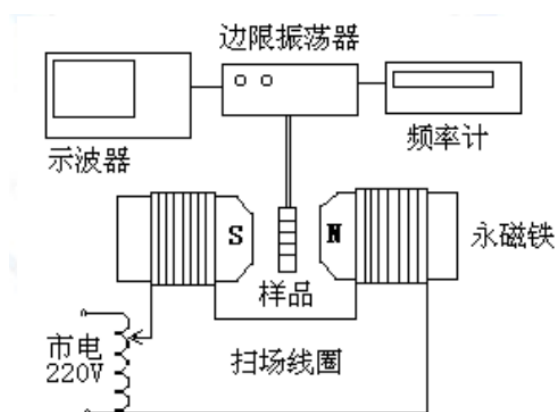


图 3：核磁共振实验装置图

边限振荡器提供了核磁共振所需的射频场 B_1 ， $B_0 = 483\text{mT}$ 则由永磁铁提供。

实验样品选择含 $1\%\text{CuSO}_4$ 水溶液来提供 ^1H 粒子，以及含氟样品提供 ^{19}F 粒子。

3.2 基础内容

1. 含 $1\%\text{CuSO}_4$ 水溶液插入边限振荡器盒子的长管并置于永久磁铁中心，接好示波器，

打开电源，调节射频频率，至发现有共振信号闪过，再反向仔细调节微调旋钮，直至调出稳定的共振信号。

2. 观察调制磁场 \tilde{B} 频率的改变(调节扫场频率)及射频频率 ν 对 H(CuSO_4 水溶液)共振信号的影响，并对共振信号波形随调制场频率及射频频率 ν 变化的现象进行讨论。

3. 根据测量 γ 的原理，测量等间距时含 1% CuSO_4 水溶液的共振频率，并计算 ^1H 的 γ_H 因子和 g_H 因子。

3.3 提升内容

1. 改变含 1% CuSO_4 水溶液在磁场中的 4 个不同位置，测出对应位置的 B_0 。

2. 根据测量 γ 的原理，测量等间距时含氟样品的共振频率，并计算 ^{19}F 的 γ_F 因子和 g_F 因子。

3.4 进阶内容

设计实验方案，测量得出调制磁场的 B_m 的大小。

4. 实验结果与讨论

4.1 基础内容

4.1.1 观察调制磁场 \tilde{B} 频率的改变(调节扫场频率)及射频频率 ν 对 H(CuSO_4 水溶液)共振信号的影响：

调节扫场频率，现象为：共振信号波形与扫场信号波形一致地在横向进行等比例缩放，即扫场频率减小时，共振信号在横向放大；扫场频率增大时，共振信号在横向收缩，而纵向大小无明显变化。解释：共振信号峰值对应着 $\omega_1 = \gamma(B_0 + B_m \sin \omega t)$ 时刻，因而当扫场信号频率增大时，波峰所对应的时间间隔 Δt 减小，表现为信号波形的横向收缩。

调节射频频率，现象为：共振信号波峰之间的间隔改变，当单调改变射频频率时，共振信号波峰从非等间隔逐渐变为等间隔，再由等间隔变为非等间隔。解释：由于波峰对应方程 $\omega_1 = \gamma(B_0 + B_m \sin \omega t)$ 的解，方程的图像如图 2 所示，由图像可知改变射频频率 ω_1 会使得不同解之间的间隔改变，在共振信号图像上则表现为共振信号波峰间隔的改变。

4.1.2 根据测量 γ 的原理，测量等间距时含 1% CuSO_4 水溶液的共振频率，并计算 ^1H 的 γ_H 因子和 g_H 因子：

实验测得含 1% CuSO_4 水样品的共振频率 ν 为 20.7141MHz，故可计算得 ^1H 的 γ_H 因子为：

$$\gamma_H = \frac{2\pi\nu}{B_0} = \frac{2 \times 3.1416 \times 20.7141\text{MHz}}{483\text{mT}} = 2.6946 \times 10^8 \text{ s}^{-1} \cdot \text{T}^{-1}$$

^1H 的 g_H 因子为:

$$g_H = \frac{\gamma_H \hbar}{\mu_N} = \frac{2.6946 \times 10^8 \text{s}^{-1} \cdot \text{T}^{-1} \times 1.05457 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}}{3.15245 \times 10^{-14} \text{MeV} \cdot \text{T}^{-1}} = 5.6262$$

4.2 提升内容

4.2.1 改变含 1% CuSO_4 水样品在磁场中的 4 个不同位置, 测出对应位置的 B_0 :

通过改变样品在磁场中的位置, 将 B_0 取最大值 (即共振峰最高) 处定位坐标 $x=0$ 处, x 表示样品在平行于样品方向上的坐标。

由仪器参数知, 当 $x = 0.0\text{cm}$ 时, $B_0 = 483\text{mT}$.

当 $x = 0.5\text{cm}$ 时, 测得共振频率 $\nu = 20.7127\text{MHz}$, 则 B_0 为:

$$B_0 = \frac{2\pi\nu}{\gamma_H} = \frac{2 \times 3.1416 \times 20.7127\text{MHz}}{2.6946 \times 10^8 \text{s}^{-1} \cdot \text{T}^{-1}} = 482.973\text{mT}$$

当 $x = 1.0\text{cm}$ 时, 测得共振频率 $\nu = 20.7120\text{MHz}$, 则 B_0 为:

$$B_0 = \frac{2\pi\nu}{\gamma_H} = \frac{2 \times 3.1416 \times 20.7120\text{MHz}}{2.6946 \times 10^8 \text{s}^{-1} \cdot \text{T}^{-1}} = 482.957\text{mT}$$

当 $x = 1.5\text{cm}$ 时, 测得共振频率 $\nu = 20.7106\text{MHz}$, 则 B_0 为:

$$B_0 = \frac{2\pi\nu}{\gamma_H} = \frac{2 \times 3.1416 \times 20.7106\text{MHz}}{2.6946 \times 10^8 \text{s}^{-1} \cdot \text{T}^{-1}} = 482.925\text{mT}$$

当 $x = 2.0\text{cm}$ 时, 测得共振频率 $\nu = 20.7078\text{MHz}$, 则 B_0 为:

$$B_0 = \frac{2\pi\nu}{\gamma_H} = \frac{2 \times 3.1416 \times 20.7078\text{MHz}}{2.6946 \times 10^8 \text{s}^{-1} \cdot \text{T}^{-1}} = 482.859\text{mT}$$

4.2.2 根据测量 γ 的原理, 测量等间距时含氟样品的共振频率, 并计算 ^{19}F 的 γ_F 因子和 g_F 因子:

实验测得等间距时含氟样品的共振频率为 19.4950MHz , 故可计算得 ^{19}F 的 γ_F 因子为:

$$\gamma_F = \frac{2\pi\nu}{B_0} = \frac{2 \times 3.1416 \times 19.4950\text{MHz}}{483\text{mT}} = 2.5360 \times 10^8 \text{s}^{-1} \cdot \text{T}^{-1}$$

^{19}F 的 g_F 因子为:

$$g_H = \frac{\gamma_F \hbar}{\mu_N} = \frac{2.5360 \times 10^8 \text{s}^{-1} \cdot \text{T}^{-1} \times 1.05457 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}}{3.15245 \times 10^{-14} \text{MeV} \cdot \text{T}^{-1}} = 5.2950$$

4.3 进阶内容

设计实验方案, 测量得出调制磁场的 B_m 的大小:

设计实验方案如下: 将 1% CuSO_4 水样品置于永磁铁中心, 调节射频频率 ν 使得共振图样恰好产生重叠的共振峰, 根据图 2 知此时对应的磁场 $B = B_0 \pm B_m$, 记录射频频率 ν 并计算。

实验测得射频频率 $\nu = 20.7190\text{MHz}$, 故 B_m 为:

$$B_m = B - B_0 = B - \frac{2\pi\nu}{\gamma_H} = \frac{2 \times 3.1416 \times 20.7190 \text{MHz}}{2.6946 \times 10^8 \text{s}^{-1} \cdot \text{T}^{-1}} - 483 \text{mT} = 0.120 \text{mT}$$

5. 实验报告思考题

5.1 B_0 、 B_1 、 \tilde{B} 的作用是什么？如何产生，它们有何区别？

B_0 作用是提供外磁场，与磁矩产生相互作用能，从而产生赛曼能级； B_1 作用是提供可供粒子吸收或辐射的电磁场能量，从而引起粒子在不同能级间的跃迁； \tilde{B} 则是给 B_0 增加了宽度，使得无需严格要求 $h\nu = \gamma\hbar B_0$ ，只需 $h\nu$ 落在 $B = B_0 + \tilde{B}$ 范围即可观察到共振信号，这大大降低了调频所需时间与难度。

在实验中， B_0 通过永磁铁产生，射频场 B_1 通过边限振荡器产生，调制场 \tilde{B} 则通过绕在永磁铁外的磁感应线圈以及调压变压器产生。

这三者的区别为： B_0 与 \tilde{B} 方向相同，而 B_1 则与前两者方向垂直； B_0 是稳定磁场，而 B_1 是可通过频率 ν 控制的射频场， \tilde{B} 是随时间变化的交变磁场。

5.2 试述如何用核磁共振测量 B_0 的方法

在已知 ^1H 的 γ_H 因子下，将含1% CuSO_4 水溶液插入边限振荡器盒子的长管并置于永久磁铁中心，调节射频频率，至共振信号的共振峰等间隔，此时则对应 $B = B_0$ ，记录对应的射频频率 ν ，根据 $B_0 = \frac{2\pi\nu}{\gamma_H}$ 计算得到 B_0

6. 总结

本实验讨论了扫场频率与射频频率的改变对核磁共振信号的影响及解释，并通过测量含1% CuSO_4 水溶液的共振频率得到 ^1H 的 γ_H 因子为 $2.6946 \times 10^8 \text{s}^{-1} \cdot \text{T}^{-1}$ 和 g_H 因子为5.6262。同时还分别测量了不同位置处磁场强度以及 ^{19}F 的 γ_H 因子为 $2.5360 \times 10^8 \text{s}^{-1} \cdot \text{T}^{-1}$ 和 g_H 因子为5.2950，最后设计实验并测得调制磁场 B_m 大小为0.120mT。

7. 参考文献

[1]. 磁共振实验. 实验讲义. 2025

[2]. 徐克尊, 陈向军. 近代物理学[M], 第四版. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2019. 1



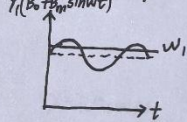
张积翔 PB23020595
中国科学技术大学

UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY OF CHINA
Hefei, Anhui. 230026 The People's Republic of China

一、1. 调节扫描频率：共振信号波形与扫描信号^{波形}一致地在横向进行^{等比例}缩放；即扫描频率减小，共振信号在横向~~放大~~；扫描频率增大，共振信号在横向收缩。而纵向大小几乎不受影响。
解释：共振信号峰是由 $\omega_1 = \gamma(B_0 + B_m \sin \omega t)$ 时刻给出的，因而当扫描频率~~增大~~，波峰所对应的时间间隔 Δt 减小，表现为信号波形横向收缩。

调节射频频率：共振信号波峰间隔改变，单调改变射频频率，共振信号波峰从非等间隔变为等间隔再变为非等间隔。

解释：由于 $\omega_1 = \gamma(B_0 + B_m \sin \omega t)$ ，波峰对应该方程的解，^{不同的}解是右侧图像如下图所示：



因而可见改变射频频率即改变 ω_1 时会使^{不同}解之间的间隔改变，

表现为共振信号波峰间隔改变。

2. 1% CuSO_4 水样品的共振频率：20.7141 MHz

$$^1\text{H 的 } \gamma_{\text{H}} \text{ 因子为: } \gamma_{\text{H}} = \frac{2\pi\nu}{B_0} = \frac{2 \times 3.1416 \times 20.7141 \text{ MHz}}{483 \text{ mT}} = 2.6946 \times 10^8 \text{ s}^{-1} \cdot \text{T}^{-1}$$

$$g_{\text{H}} \text{ 因子为: } g_{\text{H}} = \frac{\gamma_{\text{H}} \hbar}{\mu_{\text{N}}} = \frac{2.6946 \times 10^8 \text{ s}^{-1} \cdot \text{T}^{-1} \times 1.05457 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}}{3.15245 \times 10^{-14} \text{ MeV} \cdot \text{T}^{-1}}$$

$$= 9.0141 \times 10^{-13} \text{ J} \cdot (\text{MeV})^{-1}$$

$$= 5.6262$$

张积翔

PB23020595



中国科学技术大学

UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY OF CHINA

Hefei, Anhui. 230026 The People's Republic of China

二、改变样品在磁场位置: 记 B_0 max 时位置坐标 $x=0$.

$$x=0 \text{ 时, } B_0 = 483 \text{ mT}$$

$$x=0.5 \text{ cm 时, } \nu = 20.7127 \text{ MHz}$$

$$B_0 = \frac{2\pi\nu}{\gamma_H} = \frac{2 \times 3.1416 \times 20.7127 \text{ MHz}}{2.6946 \times 10^8 \text{ s}^{-1} \cdot \text{T}^{-1}} = 482.973 \text{ mT}$$

$$x=1.0 \text{ cm 时, } \nu = 20.7120 \text{ MHz}$$

$$B_0 = \frac{2\pi\nu}{\gamma_H} = \frac{2 \times 3.1416 \times 20.7120 \text{ MHz}}{2.6946 \times 10^8 \text{ s}^{-1} \cdot \text{T}^{-1}} = 482.957 \text{ mT}$$

$$x=1.5 \text{ cm 时, } \nu = 20.7106 \text{ MHz}$$

$$B_0 = \frac{2\pi\nu}{\gamma_H} = \frac{2 \times 3.1416 \times 20.7106 \text{ MHz}}{2.6946 \times 10^8 \text{ s}^{-1} \cdot \text{T}^{-1}} = 482.925 \text{ mT}$$

$$x=2.0 \text{ cm 时, } \nu = 20.7078 \text{ MHz}$$

$$B_0 = \frac{2\pi\nu}{\gamma_H} = \frac{2 \times 3.1416 \times 20.7078 \text{ MHz}}{2.6946 \times 10^8 \text{ s}^{-1} \cdot \text{T}^{-1}} = 482.859 \text{ mT}$$

2、含氧样品共振频率 $\nu = 19.4950 \text{ MHz}$

$$^{19}\text{F} \text{ 的 } \gamma_F \text{ 因子为: } \gamma_F = \frac{2\pi\nu}{B_0} = \frac{2 \times 3.1416 \times 19.4950 \text{ MHz}}{483 \text{ mT}} = 2.5360 \times 10^8 \text{ s}^{-1} \cdot \text{T}^{-1}$$

$$g_F \text{ 因子为: } g_F = \frac{\gamma_F \hbar}{\mu_{\text{NV}}} = \frac{2.5360 \times 10^8 \text{ s}^{-1} \cdot \text{T}^{-1} \times 1.05457 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}}{3.15245 \times 10^{-14} \text{ MeV} \cdot \text{T}^{-1}}$$

$$= 5.2950$$

张积翔 PB23020595



中国科学技术大学

UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY OF CHINA

Hefei, Anhui. 230026 The People's Republic of China

三、测量 B_m 实验方案: 将 1% CuSO_4 水样品置于永磁铁中心, 调节 ν 使得恰好产生共振波峰, 记录并计算。
重叠的

记录 $\nu = 20.7190 \text{ MHz}$

$$B_m + B_0 = \frac{2\pi\nu}{\gamma_H} = \frac{2 \times 3.1416 \times 20.7190 \text{ MHz}}{2.6946 \times 10^8 \text{ s}^{-1} \cdot \text{T}^{-1}} = 483.120 \text{ mT}$$

又 $B_0 = 483 \text{ mT}$

得 $B_m = 0.120 \text{ mT}$