

# 核磁共振

方尤乐<sup>1</sup>

北京大学物理学院 学号：2000012416

本实验探究核磁共振现象，用扫场、扫频的方法寻找并观测了“水”样品（掺有三氯化铁）中质子的共振信号，由此验证了核磁共振现象，并观察了不同实验条件对共振信号的影响，并在此基础上，探究了核磁共振在原子物理中的基本应用，对永磁铁的磁场进行了校准，并利用校准后的磁场测定了氟核的  $g$  因子，估计了聚四氟乙烯中氟核的横向弛豫时间。

**关键词：**核磁矩，核磁共振，弛豫时间，尾波

## I. 引言

1924 年 Pauli 在研究某些元素光谱的精细结构时首先提出了核磁矩与核自旋的钙奶呢。1949 年 Purcell 和 Pound 与 Bloch 和 Hansen 同时独立设计了近代磁共振技术，用简单的实验方法提高了核磁矩测量的精度。核磁共振技术在医学、工程等领域有重要作用，本实验利用教材[1]中介绍的实验装置探究核磁共振的原理，观测“水”样品（掺有三氯化铁）中质子的共振信号，利用扫场、扫频的方法，调节射频场频率直到找到质子的共振信号，验证了核磁共振现象。然后改变实验条件，观测共振信号的变化，并从核磁共振的原理出发对这些现象作出了解释。利用了样品的质子共振信号和质子回旋频率的标准值对永磁铁的磁场进行了校准，并进一步利用校准后的磁场测定了四氟乙烯样品中氟核的  $g$  因子。此外，本实验通过测量信号的半宽度  $\Delta\omega$ ，利用量子力学的计算推导得到了聚四氟乙烯中氟核的横向弛豫时间。

## II. 理论

当自旋非零的原子核处于强磁场  $B_0$  中，由于磁矩非零，原子核能级发生塞曼分

---

<sup>1</sup> 2000012416@stu.pku.edu.cn; 15313960363

裂，塞曼能为  $E = -\boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B}_0$ 。原子核的共振频率为

$$h\nu = \Delta E = \Delta\mu B_0 \quad (1)$$

引入核磁子  $\mu_N = \frac{e\hbar}{2m_p}$ ，那么  $\mu = \gamma J = g_0 \frac{q}{2m} J = g \frac{e}{2m_p} J = g\mu_N \frac{J}{\hbar}$ ， $\gamma$  为原子核的

磁旋比， $g$  为原子核的  $g$  因子。根据量子力学，角动量是量子化的，因此

$$h\nu = \Delta\mu B_0 = g\mu_N B_0 \Rightarrow \frac{\nu}{B_0} = g \frac{\mu_N}{2\pi\hbar} = \frac{\gamma}{2\pi} \quad (2)$$

当在垂直  $B_0$  方向加上强度适当的射频场  $B_1$ ，且射频场频率与回旋频率对应时，原子核受激跃迁。在经典图像上，磁矩在恒强  $B_0$  下发生 Larmor 进动，而射频场贡献了  $\boldsymbol{\mu} \times \mathbf{B}_0$  方向的力矩，使得  $\boldsymbol{\mu}, \mathbf{B}_0$  之间的夹角  $\theta$  发生变化，导致了能级跃迁。如果  $B_1$  平行于磁场  $\mathbf{B}$ ，那么力矩不改变  $\theta$ ，在绝热近似下不会导致能级跃迁。

样品磁化强度  $\mathbf{M}$  是微观磁矩之和  $\mathbf{M} = \sum \boldsymbol{\mu}_i$ 。粒子数在上、下能级的分布服从 Boltzmann 分布，设上下能级间的粒子数差异为  $n_0$ ，那么

$$\mathbf{M} = n_0 \boldsymbol{\mu} = \frac{N\mu^2}{2kT} \mathbf{B}_0 = \frac{\gamma\hbar B_0}{2kT} N\mu \quad (3)$$

样品中存在自旋自旋相互作用以及自旋晶格相互作用，横向射频磁场扰动核样品中的弛豫过程都会对磁化强度  $\mathbf{M}$  造成影响。设样品纵向弛豫时间为  $T_1$ ，横向弛豫时间为  $T_2$ 。射频磁场的一个圆偏振分量使样品共振激发；另一圆偏分量频率相反，影响可以忽略。设  $u, v$  是  $\mathbf{M}_\perp$  的两个分量， $u$  分量总是与旋转磁场  $\mathbf{B}_1$  的方向垂直，那么最终得到的稳态解是布洛赫方程式[1]：

$$u = \frac{\gamma B_1 T_2^2 (\omega_0 - \omega) M_0}{1 + T_2^2 (\omega_0 - \omega)^2 + \gamma^2 B_1^2 T_1 T_2}$$

$$v = \frac{-\gamma B_1 M_0 T_2}{1 + T_2^2 (\omega_0 - \omega)^2 + \gamma^2 B_1^2 T_1 T_2}$$

$$M_z = \frac{\left[1 + T_2^2 (\omega_0 - \omega)^2\right] M_0}{1 + T_2^2 (\omega_0 - \omega)^2 + \gamma^2 B_1^2 T_1 T_2}$$

可以看到  $(\omega - \omega_0)/\gamma \approx 0$  处存在共振峰。谱线的宽度实际上可归结为粒子在能级上的平均寿命。当取的扰动磁场  $B_1$  较小时,  $\gamma^2 B_1^2 T_1 T_2 \ll 1$ , 因此吸收谱线的半高宽为

$$\frac{\Delta\omega}{2} = \frac{1}{T_2} \quad (4)$$

实验中磁场的非均匀性可能会导致不同地方粒子的 Lamour 进动频率不同, 因此粒子进动过程中相位不一致, 因此实际测得的有效横向弛豫过程  $T_2^*$  比样品固有的  $T_2$  要小。

## II. 实验

本实验采取的实验装置示意图为图 1 :

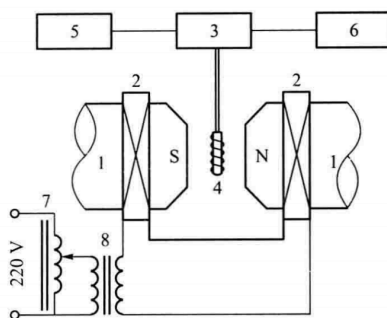


图 6-1-9 核磁共振实验方框图

1—永久磁铁;2—扫场线圈;3—电路盒;4—样品和振荡线圈;5—数字频率计;  
6—示波器;7—可调变压器;8—220 V/6 V 变压器

图1. 实验装置示意图

本实验利用扫场方法, 即在  $B_0$  上附加一个 50 Hz 交变磁场  $B'$ , 使得恒磁场在  $B_0 \pm \Delta B$  之间连续变化。对于给定的射频场频率, 当共振条件所对应的场强在扫场变化范围内, 就可以观察到共振信号。再调节射频场频率使得共振信号之间的间隔为  $\sim 10$  ms (即每一个扫场周期内等间隔地出现两次共振信号)。再不断减小扫场的范围  $\Delta B$ , 重复以上过程, 减小  $\Delta B$  到一个适当的值, 保证仍能清晰地观测到共振信号, 就可以通过射频场频率计算得到永磁体的磁场。通过调节射频场频率, 观察共振峰的出现和消失, 可以估计扫场场强的上下界所对应的共振频率, 从而得到永磁体磁场测量值的不确定度。 $\Delta B$  越小, 永磁体磁场的测量值就越精确。本实验用同样的方法观测了四氟乙烯样品的共振信号, 并利用永磁体磁场校准值计算得到氟核的  $g$  因子, 并通过共振峰的半高宽, 估计了样品的有效横向弛豫时间的大小。

本实验中, 扫场的过程如果充分地缓慢, 就可近似地得到共振的稳态行为, 即布

洛赫方程式所预言的结果。但实际上参数变化并不满足准静态要求，常常会观察到瞬态现象，其中最为典型的即为尾波。尾波是共振激发后  $M'$  感生电动势频率与射频场频率间微小不同所造成的拍现象。扫场速度不同时所观察到的核磁共振吸收信号如图 1 所示。

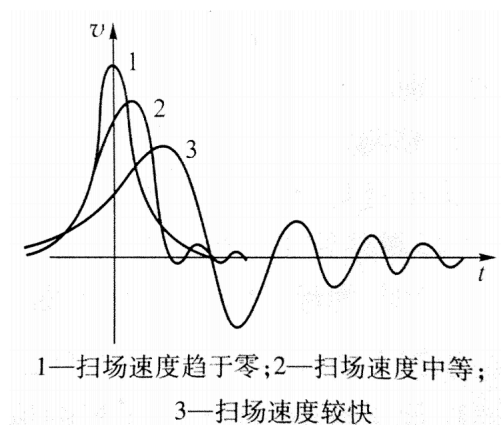


图2. 扫场速度不同时所观察到的核磁共振吸收信号

有效弛豫时间  $T_2^*$  越短，越容易达到稳态，暂态现象越不明显；而磁场的均匀性将使  $T_2^*$  值减小，故外磁场越均匀，尾波频次越多。利用这一点可以判断磁场均匀性。

### III. 结果及讨论

#### 一、观察共振信号

将  $\text{H}_2\text{O}(\text{FeCl}_3)$  样品置于磁场中央，调整扫场电压 100V（简记为扫场 100），调整射频场频率直到示波器上出现共振峰。可以观测到扫场周期当中有 2 个共振峰值，相邻两个共振峰间距是 10 ms。当调节射频场频率，可以看到共振信号如下变换：

示波器上开始存在正弦信号。随着射频场频率增大，在其波谷附近出现又高又尖的共振峰，随后一分为二成两个小共振峰，到等间距（10 ms）分布，再逐渐靠近，在波峰附近合二为一成一个大共振峰后消失。分析：当  $B_0$  恰好对应射频场频率时，扫场过程中观测到的共振峰等间距分布；当射频场增大和减小，所对应的场强在  $B_0 + \Delta B, B_0 - \Delta B$  附近时，扫场的一个周期内两次经过共振频率的时间间隔较小，因此在此在示波器上表现为两个小共振峰靠拢为一个共振峰。

并且还可以观测到，两个共振峰分裂后和合并前那一刻，共振峰的一侧出现密集的尾波。分析：正弦交变磁场的扫场速度在  $B_0 + \Delta B, B_0 - \Delta B$  处趋于 0，满足准静态

要求，因此在示波器上大共振峰分裂前和合并后观测不到尾波。

减小扫场幅度，并调射频场频率使共振信号等 10 ms 间距。观测到，扫场越弱，尾波越稀疏且出现次数越小。分析：扫场幅度越小，扫场的速度也越小，因此越接近准静态要求，因此尾波越少；且  $\Delta\omega$  减小，那么在示波器上 10 ms 所对应的频率间隔减小。反之，如果增大扫场幅度，可以观测到尾波变得密集且出现次数变多。

## 二、利用核磁共振校准磁场

对于“水”样品，共振信号等 10 ms 间距时，测得共振频率  $\nu_H = 21.11685$  MHz，上界频率为  $\nu'_H = 21.12237$  MHz， $\nu''_H = 21.10501$  MHz，那么

$$\Delta B_0 = \frac{(\nu'_H - \nu''_H)/20}{(\gamma/2\pi)_H} = 0.00002 \text{ T}$$

$$B_0 = \nu_H/(\gamma/2\pi)_H = \frac{21.11685 \text{ MHz}}{42.576375 \text{ MHz/T}} = (0.49597 \pm 0.00002) \text{ T}$$

对于聚四氟乙烯样品，测得  $\nu_F = 19.86072$  MHz，上界频率为  $\nu'_F = 19.87066$  MHz， $\nu''_F = 19.85129$  MHz。那么利用式(2) 和磁场标准值，可以得到  $g = \frac{\nu_F/B_0}{\mu_N/h} = 5.25436$ 。计算相对不确定度：

$$\frac{\Delta g}{g} = \sqrt{\left(\frac{\Delta \nu_F}{\nu_F}\right)^2 + \left(\frac{\Delta B_0}{B_0}\right)^2} = 6 \times 10^{-5}$$

$$g = 5.2544 \pm 0.0003$$

调整变压器到适当的扫场幅度，并观测 10 ms 间隔时的共振峰半高宽，由此得到

$$k = \frac{\Delta B}{2B'} = \frac{4.5}{43}，\text{相对误差来源于示波器上数格子带来的测量误差，约为}$$

$\Delta k/k = 0.5/4.5 = 11\%$ 。射频场频率  $\nu = 19.85531$  MHz，上界频率为

$\nu' = 19.89843$  MHz， $\nu'' = 19.82730$  MHz，因此可以计算有效横向弛豫时间：

$$T_2 = \frac{1}{\pi k(\nu' - \nu'')} = 42.84 \mu\text{s}$$

相对误差约为  $\Delta T_2/T_2 = \sqrt{(\Delta k/k)^2 + (\Delta \nu/\nu)^2} = 0.12 = 12\%$ ，因此

$$T_2 = (43 \pm 5) \mu\text{s}。$$

## IV. 结论

本实验探究核磁共振现象，用扫场、扫频的方法寻找并观测了“水”样品（掺有三氯化铁）中质子的共振信号，由此验证了核磁共振现象，并观察了调节射频场频率和扫场幅度所导致的共振信号变化规律，分析了共振信号出现的暂态现象，从而验证了核磁共振物理理论的正确性。在此基础上，本实验利用了水样品的标准数据对永磁铁的磁场进行了校准，得到了精度较好的结果： $B_0 = (0.49597 \pm 0.00002) \text{ T}$ 。并利用校准后的磁场测定了氟核的  $g$  因子  $g = 5.2544 \pm 0.0003$ ，估计了聚四氟乙烯中氟核的横向弛豫时间  $T_2 = (43 \pm 5) \mu\text{s}$ 。

## V. 致 谢

感谢薛老师和对实验流程和思想的讲解以及在实验过程中对我的指导。

---

[1] 吴思诚, 荀坤. 近代物理实验[M]. 第4版. 北京: 高等教育出版社, 2015.