

利用脉冲核磁共振测量弛豫时间 并实现核磁共振成像

杨佳宇*

北京大学物理学院 学号: 1800011409

2020 年 11 月 26 日

本实验使用脉冲核磁共振仪, 并利用自旋回波法和反转恢复法对三种浓度的 CuSO_4 溶液的横向弛豫时间 (T_2) 与纵向弛豫时间 (T_1) 进行了测量, 根据实验结果验证了 $T_1 > T_2$ 这一理论结果, 并发现了弛豫时间随溶液浓度增大而减小的关系. 利用核磁成像仪观察了三棱柱样品的截面图, 并调节了相关参数进行比较. 通过本次实验, 加深了对脉冲核磁共振和核磁共振弛豫过程的认识, 也深入理解了核磁共振成像的原理.

关键词: 弛豫时间 脉冲核磁共振 核磁共振成像

*1800011409@pku.edu.cn; Tel: (+86) 180 9268 9592

1 引言

核磁共振 (Nuclear Magnetic Resonance, NMR) 是指核磁矩在静磁场中被磁化以后, 在射频场中产生的共振吸收现象. 自旋原子核在吸收能量之后, 会与周围物质相互作用, 发出频率与共振频率相同的射频辐射进行退激. 物质的种类、结构以及所处环境不同, 其共振频率和退激的弛豫时间不同, 因此可以利用核磁共振测定物质的结构. 再通过对核磁共振信号进行空间编码与解码, 就能够实现核磁共振成像 (Nuclear Magnetic Resonance Imaging, NMRI).

在核磁共振中, 将脉冲的射频场作用在核系统上, 观察核系统对脉冲射频场的响应, 并利用快速傅里叶变换技术得到频域信号, 被称为脉冲核磁共振. 脉冲核磁共振在核磁共振成像中被广泛应用, 目前绝大多数核磁共振谱仪和核磁共振成像仪均使用脉冲核磁共振的方法.^[1]

1972 年, P. C. LAUTERBUR 提出了核磁共振成像的思路和方法^[2], 为核磁成像技术的发展奠定了基础. 1978 年, 在 LAUTERBUR 的思路的基础上, 英国 EMI 制造出第一台核磁共振成像仪, 将核磁成像由理论变成了现实. 现如今, 核磁共振成像凭借着成像过程对人体无电离辐射损伤、空间分辨率高、对比度大等优点, 广泛应用于医学领域.

本实验利用脉冲核磁共振对三种浓度的 CuSO_4 溶液的核磁共振信号进行观测. 根据其自由感应衰减 (Free Inductivce Decay, FID) 信号得到其共振频率以及 π 脉冲、 $\frac{\pi}{2}$ 脉冲的相关参数, 并利用自旋回波法, 使用 Carr-Purcell Meiboom-Gill (CPMG) 脉冲序列测量样品横向弛豫时间 T_2 , 利用反转恢复 (Inversion Recovery, IR) 序列测量样品的纵向弛豫时间 T_1 . 最后, 本实验对 CuSO_4 溶液中浸泡的三棱柱样品进行了核磁共振成像, 对其核磁成像的结果图进行观察分析.

2 理论

2.1 核磁共振中的弛豫过程^[1]

原子核的磁矩在外磁场中会发生拉莫进动. 宏观上, 考察系统的磁化强度矢量 \mathbf{M} , 即单位体积内磁矩的总和. 当系统在恒定的外磁场 \mathbf{B}_0 中, 平衡态时每个磁矩都在绕 \mathbf{B}_0 转动, 且彼此之间相位随机. 因此宏观上 \mathbf{M} 与 \mathbf{B}_0 有一致的取向. 当系统受到扰动时, 例如外加一个脉冲射频场, 会偏离平衡态, \mathbf{M} 会旋转至另一个取向并在 \mathbf{B}_0 的作用下发生拉莫进动. 脉冲信号结束后, \mathbf{M} 又会逐渐恢复与 \mathbf{B}_0 取向相同的平衡态. 这一逐渐恢复平衡态的过程称为弛豫过程.

从微观的角度来看, 弛豫过程的机理可分为两类. 一类是自旋-晶格弛豫, 也称纵向弛豫. 自旋-晶格弛豫是由于自旋磁矩与周围介质的相互作用使得 \mathbf{M} 沿外磁场 \mathbf{B}_0 方向分量 M_z 逐渐恢复平衡态时的 M_0 . 自旋-晶格弛豫通常以纵向弛豫时间 T_1 来表征. 另一类是自旋-自旋弛豫, 也称横向弛豫. 自旋-自旋弛豫是由于核磁矩之间的相互作用使得各个核磁矩旋进的相位逐渐趋于无序, 从而使 \mathbf{M} 垂直于外磁场 \mathbf{B}_0 方向分量 M_{xy} 逐渐趋于 0.

对于纵向弛豫过程和横向弛豫过程, 其数学表达式为:

$$\begin{cases} \frac{dM_z}{dt} = -\frac{(M_z - M_0)}{T_1} \\ \frac{dM_x}{dt} = -\frac{M_x}{T_2} \\ \frac{dM_y}{dt} = -\frac{M_y}{T_2} \end{cases} \quad (1)$$

可以根据(1)式解得:

$$\begin{cases} M_z = M_0 + (M_z^0 - M_0) \cdot e^{-t/T_1} \\ M_{xy} = M_{xy}^0 \cdot e^{-t/T_2} \end{cases} \quad (2)$$

此外, 根据 T_1 与 T_2 的定义, 我们可以得知, 当 $M_z = M_0$ 时一定有 $M_{xy} = 0$, 但是当 $M_{xy} = 0$ 时, 未必有 $M_z = M_0$. 因此系统达到 T_1 , 纵向平衡时, 横向一定平衡, 一定已经达到过 T_2 . 但当系统达到 T_2 , 横向平衡时, 却未必纵向也是平衡的. 因此可以得到:

$$T_1 > T_2 \quad (3)$$

2.2 弛豫时间的测量

2.2.1 自由感应衰减 (FID) 信号

当我们在垂直于 \mathbf{B}_0 方向加一脉冲旋转磁场 \mathbf{B}_1 , 使得 \mathbf{B}_1 的转动角速度恰好等于核磁矩在磁场中拉莫进动的拉莫角速度 $\omega_0 = \gamma B_0$. 此时在 ω_0 转动参考系中, \mathbf{M} 将以 $\omega_1 = \gamma B_1$ 绕着 \mathbf{B}_1 进行转动. 脉冲信号作用时间为 τ , 则脉冲信号结束之后, \mathbf{M} 与 \mathbf{B}_0 方向将存在一个夹角 θ 且满足

$$\theta = \gamma B_1 \tau \quad (4)$$

当 $\theta = \frac{\pi}{2}$ 时, 恰好将 \mathbf{M} 从转动系的 z' 方向转到 y' 方向. 此时由于自旋-自旋弛豫, M_{xy} 将从 M_0 减小至 0. 而在这一过程中, \mathbf{M} 始终也在绕 \mathbf{B}_0 进动. 在 y 方向放置一个线圈来检测这一周期性信号, 得到的即为自由感应衰减 (FID) 信号. 该信号将进行正弦振荡, 并且其

振幅按照以下规律指数衰减:

$$S(t) = Ae^{-t/T_2} \quad (5)$$

2.2.2 自旋回波方法测量 T_2

由于外磁场的非均匀性, 使用 FID 信号测出来的等效横向弛豫时间 T_2^* 不仅包括了系统自身自旋-自旋弛豫所对应的弛豫时间 T_2 , 还包括了不均匀磁场中不同位置的核磁矩进动角速度的不均匀, 使得其相位更快地趋于随机分布所对应的弛豫时间 T_2' . 如(6)式所示. 因此我们为了得到原子核自身的弛豫时间 T_2 , 还应消除外磁场不均匀性对其弛豫过程的影响.

$$\frac{1}{T_2^*} = \frac{1}{T_2} + \frac{1}{T_2'} \quad (6)$$

通过 $\frac{\pi}{2}$ 脉冲使得 \mathbf{M} 从转动系的 z' 方向转到 y' 方向, 再过时间 τ 使得各个原子核磁矩按照各自进动角速度绕着 z 轴旋转一定角度 θ . 再沿 x' 方向外加一个 π 脉冲, 使得 M_y 全部反转, 相当于给所有核磁矩附加了一个不同的相位, 这个相位与其转动角速度相关. 随后再经过时间 τ , 在进动、反转、再进动之后, 所有核磁矩再次会聚到同一个方向. 此时外场不均匀性对弛豫过程的影响被完全消除掉. 重复这一过程, 所观察到的会聚时的 M_{xy} 信号强度的衰减过程即为仅包括核磁矩自身自旋-自旋弛豫的弛豫过程.

Carr-Purcell Meiboom-Gill(CPMG) 脉冲序列为 $\frac{\pi}{2} - \tau - \pi - 2\tau - \pi \cdots$ 系列脉冲, 通过对每次会聚时的信号峰值的衰减过程进行分析即可测得系统自身的横向弛豫时间 T_2 .

2.2.3 反转恢复 (IR) 序列测量 T_1

IR 序列为 $\pi - \tau - \frac{\pi}{2}$ 脉冲序列. 加 π 脉冲使得沿 z 轴的 \mathbf{M} 反向, 在自旋-晶格弛豫的作用下, \mathbf{M} 会逐渐恢复为沿 z 轴正方向的 M_0 . 根据(2)式可以得到:

$$M_z(\tau) = M_0(1 - 2e^{-\tau/T_1}) \quad (7)$$

在经过时间 τ 之后, 加 $\frac{\pi}{2}$ 脉冲使得 $M_z(\tau)$ 转至 y' , 通过 FID 信号的幅度可以测得 $M_z(\tau)$. 测量不同时间 τ 下的 $M_z(\tau)$ 即可得到 T_1 .

2.3 核磁共振信号的空间编码与反演

在均匀外磁场 \mathbf{B}_0 中叠加一个同向非均匀场 $\mathbf{B}(x, y, z)$, 共振频率 ν_0 就是空间位置的函数, 某一频率共振信号的强弱反应的是核密度的大小. 我们将测出的 FID 或自旋回波信号进行傅里叶变换, 得到的频谱分布 $F[\nu(x, y, z)]$ 即核密度的空间分布.

因此我们要核磁成像, 就要对核磁共振信号进行空间编码, 即附加一个特定的非均匀场 $\mathbf{B}(x, y, z)$. 编码方式并不唯一, 本实验采用的编码方式分以下三步.

首先是 z 方向选层, 通过施加 $B_z = G_z z$ 来实现. 此时共振条件为:

$$\omega(z) = \gamma(B_0 + G_z z) \quad (8)$$

同时施加带宽 $\Delta\omega$ 的 $\frac{\pi}{2}$ 脉冲 ω_1 , 只有对应的 $z_1 \pm \Delta z$ 横断层内的原子核处于共振状态, 这部分原子核的磁矩被转至 y' 方向并以 ω_1 绕 z 轴旋转, 从而达到了选层的目的.

其次是 y 方向相位编码, 通过在撤去 $B_z = G_z z$ 后施加 $B_z = G_y y$ 来实现. 该附加场持续时间为 t_y , 其可以使得选层内的原子核以 $\omega(y) = \gamma G_y y$ 的角速度进动, 在 t_y 时间后, 为不同 y 坐标的原子附加一个相位 $\Phi(y)$, 满足

$$\Phi(y) = \omega(y)t_y = \gamma G_y y t_y \quad (9)$$

从而实现了 y 方向的编码.

最后是 x 方向频率编码, 通过撤去 $B_z = G_z z$ 后附加场 $B_z = G_x x$ 来实现, 此时不同 x 位置的核磁矩转动角速度不同, 满足:

$$\omega(x) = \gamma G_x x + \omega(z_1) \quad (10)$$

从而实现了 x 方向的编码.

完成空间编码后, 反演过程只需要对测得的核磁共振信号进行傅里叶变换. 首先对特定 G_x, G_y 得到的核磁共振信号 $S(t)$ 进行傅里叶变换, 得到频谱 $F(\omega)$, 考虑到(10)式, 频率 ω 与 x 为线性关系, 因此频谱图像也就是核密度在 x 方向的剖面图.

对于一组 g_y , 取 $g_{ym} = nG_y$, 可以得到 N 个 $F[\omega(x), g_{ym}]$, 对其进行离散傅里叶变换, 结合(9)式中 $\Phi(y)$ 与 y 的线性关系, 即可得到核密度的二维分布 $\rho(x, y)$.

实际上, 将共振信号看做 t_x, t_y 的函数, 可以得到:

$$S(t_x, t_y) = k \iint \rho(x, y) e^{-t/T_2} e^{i(\omega_x t_x + \omega_y t_y)} dx dy \quad (11)$$

进行傅里叶逆变换, 就可以根据核磁共振信号得到核密度加权分布.

$$\rho(x, y) e^{-t/T_2} = h \iint S(t_x, t_y) e^{-i(\omega_x t_x + \omega_y t_y)} dt_x dt_y \quad (12)$$

3 实验

3.1 装置介绍

实验装置方框图如图1所示.

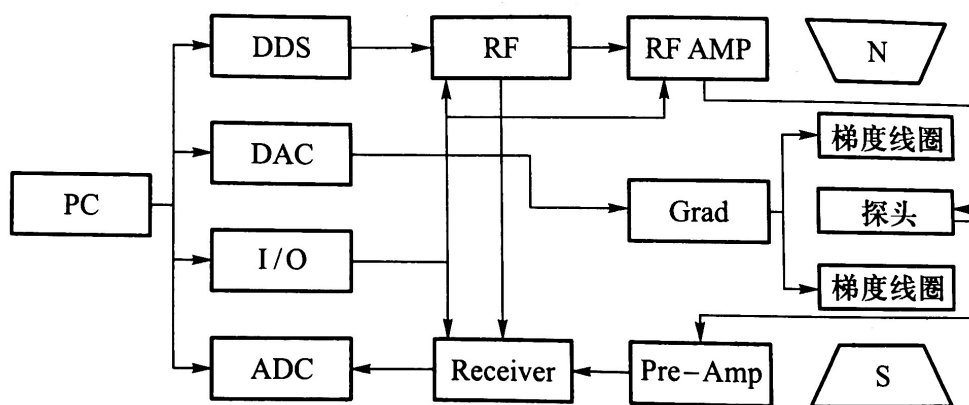


图 1. 核磁共振成像仪框图^[1]

该装置分为三个部分, 分别为主磁体系统、电路系统和以计算机为核心的控制、采集、处理及显示系统.

主磁体系统包括主磁体和射频线圈、三组梯度线圈, 分别用于产生静磁场 B_0 、射频场以及三组梯度场.

电路系统包括发射单元和接收单元. 数字信号发生器 (RF) 由计算机的直接数字频率合成源 (DDS) 控制, 输出的信号经过功率放大器 (RF AMP) 放大后加到探头上. 接收的信号也先进入预放大器 (Pre-Amp) 后再进入接收器 (Receiver).

计算机内包括模-数转换器 (ADC)、数-模转换器 (DAC) 以及控制输入/输出 (I/O) 工作状态的 A/D 卡, 以及前面提到的 DDS 卡. 它们的工作均受纽迈核磁共振分析软件的控制, 可在软件内直接进行参量设定、输出采集、数据处理、图像显示.

3.2 实验方法和条件

本次实验使用纽迈核磁共振分析软件及其配套的核磁共振分析仪器进行实验. 首先对仪器自带的标准样品进行 T_1 和 T_2 的测量, 对仪器进行检查. 再分别测量浓度为 0.5%、1.0%、2.0% 的 CuSO_4 溶液的 T_1 和 T_2 , 对其结果进行分析讨论. 测量前现对不同的样品进行 FID 实验, 来测量共振频率并调节各个参数, 在通过 CPMG 实验进行 T_2 的测量, 通过 IR 实验进行 T_1 的测量.

随后使用配套的核磁共振成像软件来进行核磁共振成像的观测, 将固态三棱柱样品插

入到 2.0% 的 CuSO_4 溶液中进行二维核磁共振成像, 对成像结果进行观察和分析. 适当改变参数, 并重新进行实验, 并讨论其中一些参数对核磁共振成像实验的影响.

4 结果与讨论

4.1 T_1 与 T_2 的测量

分别对浓度为 0.5%、1.0%、2.0% 的 CuSO_4 溶液进行 FID 实验、CPMG 实验和 IR 实验, 实验结果如表1所示.

表 1. T_1 与 T_2 的测量实验结果

浓度	SF+O1/MHz	$P_1/\mu\text{s}$	$P_2/\mu\text{s}$	T_1/ms	T_2/ms
0.5%	21.97517580	20.00	38.00	29.151	24.771
1.0% ¹	21.97517580	19.00	39.04	21.544	21.544
2.0% ²	21.97507814	20.00	39.04	9.326	10.723
1.0% 重测	21.97507814	21.00	39.04	21.544	18.738
新制 1.0% ³	21.97507814	20.00	39.04	28.480	24.771

¹ 因为仪器问题, 本次实验数据有问题 ($T_1 = T_2$), 因此重新测量.

² 本组实验数据也因为仪器问题有问题 ($T_1 < T_2$), 但因时间有限, 没有来得及重新测量.

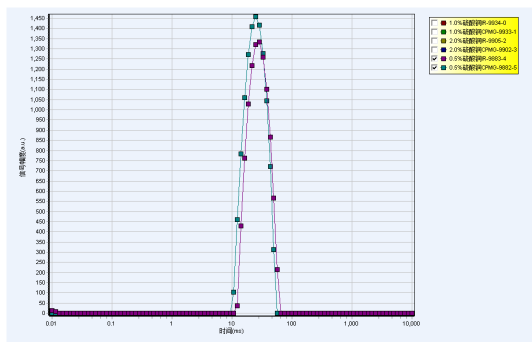
³ 在实验室中使用新制的 CuSO_4 溶液取代放置一段时间的 CuSO_4 溶液, 重新实验.

实验分析软件给出的反演图如图2所示.

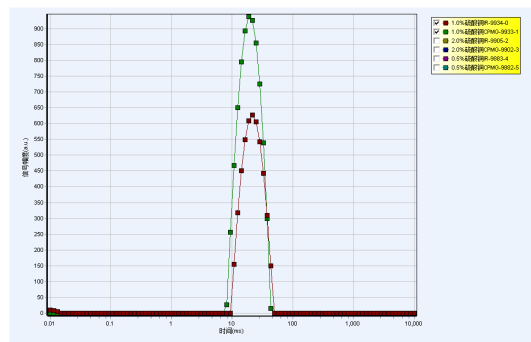
根据(3)式, 实验结果应保证 $T_1 > T_2$, 从表1和图2中均可以看出, 大部分情况下这一点是可以得到保证的. 只有表1第一组 1.0% 浓度的实验结果和 2.0% 的实验结果与这一点相悖. 这是仪器自身不稳定性导致的结果. 1.0% 浓度重新测量后的实验结果依然满足 $T_1 > T_2$.

从表1和图2(e)、2(f)中可以看出, 随着 CuSO_4 溶液浓度的增大, T_1 和 T_2 均减小. 这是因为溶液浓度增大时, 溶液中顺磁离子浓度增大, 其附近的局部场大大增强, 对水中质子的弛豫作用的促进效果大大增强, 其恢复平衡态的能力大大增强, 因此弛豫时间会减小.

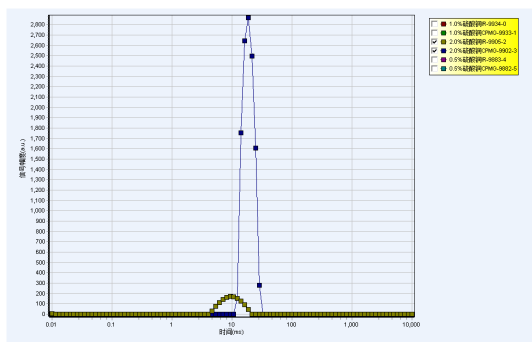
另外, 从表1中还可以看出, 新制的 1.0% CuSO_4 溶液的 T_1 与 T_2 的测量结果与久置的 0.5% CuSO_4 溶液测量结果相近. 造成这一结果一方面可能是因为仪器自身的不稳定性, 另一方面可能是因为 0.5% CuSO_4 溶液在久置后, 其中的水会蒸发, 但 CuSO_4 溶质不会减少, 因此随着放置时间的增长, 其浓度会增大. 可能这里久置的 0.5% CuSO_4 实际浓度已经相对较为接近 1.0%.



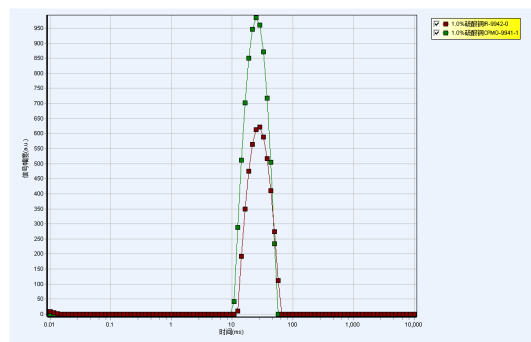
(a) 0.5% 的 CuSO_4 溶液实验结果反演图



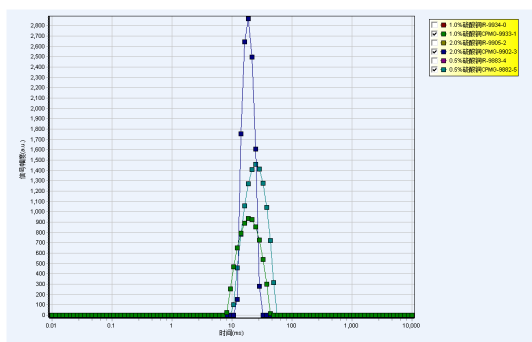
(b) 1.0% 重测的 CuSO_4 溶液实验结果反演图



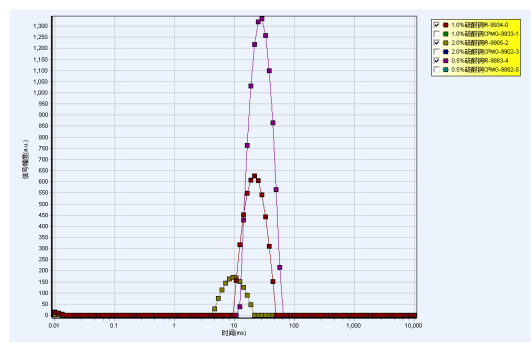
(c) 2.0% 的 CuSO_4 溶液实验结果反演图



(d) 新制 1.0% 的 CuSO_4 溶液实验结果反演图



(e) 三种浓度溶液度 CPMG 实验结果反演图



(f) 三种浓度溶液 IR 实验结果反演图

图 2. CPMG 和 IR 实验结果反演图, 图像的峰值代表 T_1 或 T_2 的测量值

4.2 核磁共振成像的观测

将三棱柱样品放入 2.0% 的 CuSO_4 溶液中, 观察其核磁成像结果图. 并对某些参数进行调节, 再次观察其核磁成像结果图. 如图3所示.

图3中出现的白斑并非成像过程中实际存在, 而是仪器自身的问题导致的. 从图中依然可以清楚地看到圆形试管中三棱柱样品的截面图.

在第一次成像后, 将参数 TR 下调至171.59 ms, 将参数 TE 下调至18.13 ms, 将参数 Average 调至 3, 开启了 Auto GA1, Optimal Slice 设置为 2. 从图3中可以看出调参后得到的图像与调参前并没有显著差异, 但是在成像过程中成像用时更短, 速度更快, 大大提高了核磁成像的效率.

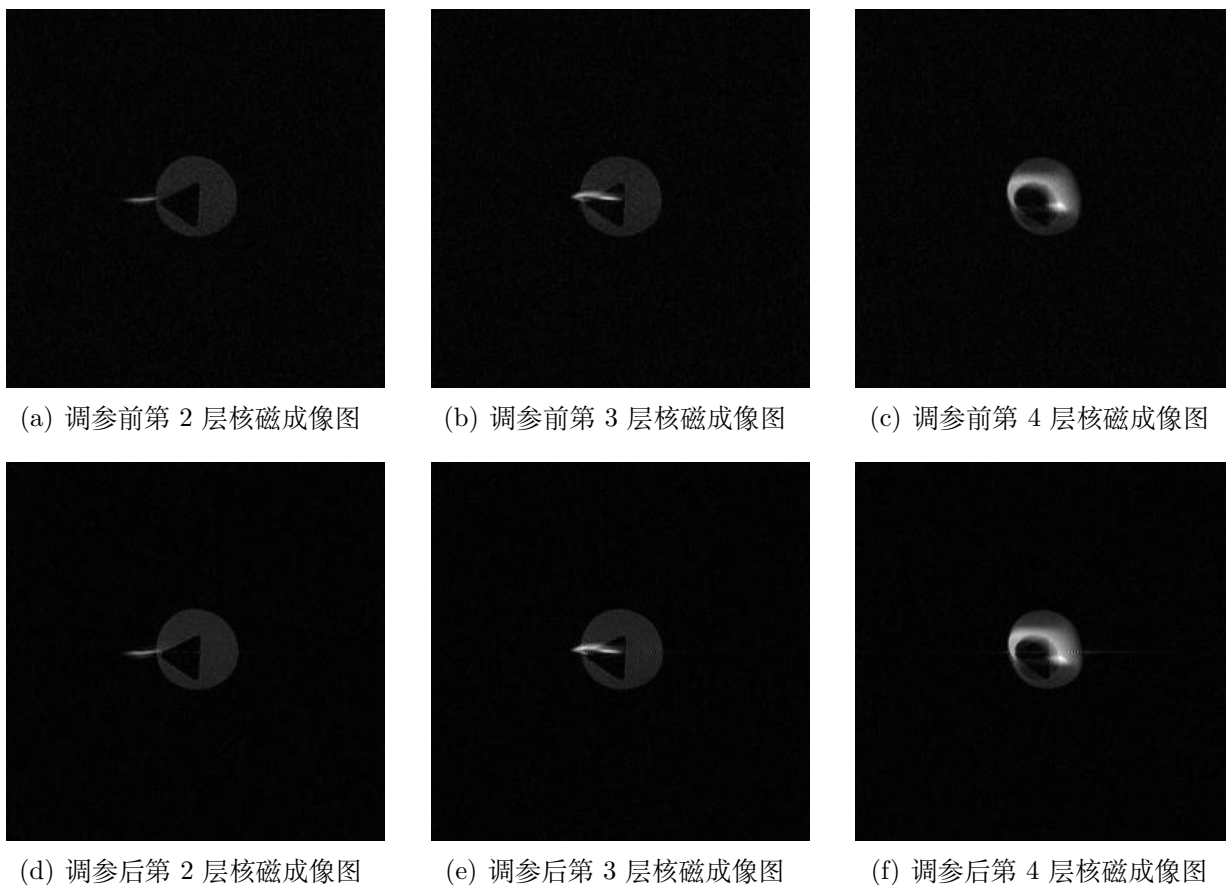


图 3. 三棱柱样品核磁成像结果图, 选层时第 1 层与第 5 层中没有样品

5 结论

本实验测量得到 0.5% 的 CuSO_4 溶液的 $T_1 = 29.151 \text{ ms}$, $T_2 = 24.771 \text{ ms}$; 1.0% 的 CuSO_4 溶液的 $T_1 = 21.544 \text{ ms}$, $T_2 = 18.738 \text{ ms}$; 2.0% 的 CuSO_4 溶液的 $T_1 = 9.326 \text{ ms}$, $T_2 = 10.723 \text{ ms}$; 新制 1.0% 的 CuSO_4 溶液的 $T_1 = 28.480 \text{ ms}$, $T_2 = 24.771 \text{ ms}$. 从而从实验上验证了 $T_1 > T_2$ 的理论结果. 通过实验发现横向与纵向弛豫时间均随着浓度的升高而减小. 同时本实验观察到了三棱柱样品的核磁共振成像图, 并通过参数调节提高了成像效率. 通过本实验的观察与分析, 加深了对核磁共振中的弛豫过程以及对核磁成像原理的理解.

6 致谢

感谢薛建明老师在开始实验前的悉心讲解以及在整个实验过程中的耐心指导, 这是同薛老师完成的核磁共振相关的第三个实验, 在这三次实验的整个过程中我受益匪浅!

附录

装着样品的圆形试管的一维剖面图应该是什么样子的曲线?

一维剖面曲线如图4所示.

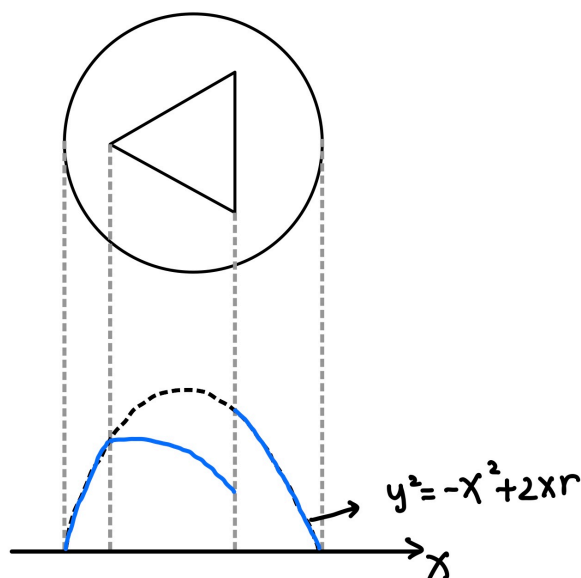


图 4. 圆形试管对应一维剖面图分析, 图中蓝线为最终剖面图结果, 上方为以三棱柱样品为例的二维截面图

从图中可以看出, 一维剖面图的每一点对应着该 x 坐标下所有 y 坐标包含的质子数目. 水溶液均匀分布, 三棱柱所占区域内没有水中质子, 因此只需要考虑每个 x 坐标对应圆形内、三角形外的 y 坐标长度即可. 在没有到达样品时为一个二次抛物线, 到达样品处依然为抛物线, 只不过抛物线方程中一次项系数减小了.

实空间图像的空间分辨率由什么因素决定?

根据(9)式和(10)式, 可知我们最终得到的 ω_x 与 ω_y 图像, 由于其分别与 x 、 y 呈线性关系, 所以才能看作是 $\rho(x, y)$ 分布图像. 因此图像分辨率与 $\omega_x(x)$ 、 $\omega_y(y)$ 线性斜率相关, 该斜率越大, 说明图像中单位长度对应的 $\Delta x, \Delta y$ 越小, 说明图像分辨率越高. 而 γ 对于水中质子而言是一个常数, 因此磁场梯度 G_x, G_y 越大, 其分别对应的 x, y 分辨率就越高.

如何实现被 T_2 加权的核密度 $\rho(x, y, T_2)$?

可以将不同浓度的 CuSO_4 溶液放入不同口径的试管中, 并将小试管浸入大试管中进行观察. 水中的质子的密度 $\rho(x, y)$ 基本一致, 但由于浓度大的溶液 T_2 较小, 因此可以观察到

截面图中二者存在差异.

在实际实验中, 也应注意增大成像时间 t , 这样可以将权重因子 e^{-t/T_2} 的影响增强, 使实验结果更为明显.

参考文献

- [1] 吴思诚, 荀坤 2015 近代物理实验 (第 4 版)(北京: 高等教育出版社) P260-P273
- [2] P. C. LAUTERBUR, *Image Formation by Induced Local Interactions: Examples Employing Nuclear Magnetic Resonance*. Nature 242, 190–191(1973). <https://doi.org/10.1038/242190a0>