

脉冲核磁共振成像实验

郭美琪 08300190079 指导老师：俞熹
复旦大学 物理学系 200433

摘要：本文通过使用 NMI20Analyst 台式核磁共振成像仪，进行一系列原理性实验对 NMR 的基本原理有一清晰的了解，对现代核磁共振谱仪作一初步接触，然后测量乙醇的化学位移和对植物油，芝麻，大米进行成像，进而对核磁共振成像有了初步的了解。

关键词：核磁共振 原理 匀场 化学位移 成像

引言：核磁共振 (Nuclear Magnetic Resonance, NMR) 指处在外界恒定磁场为 B_0 的具有磁矩的原子核，产生塞曼 (Zeeman) 能级分裂，若在垂直以 B_0 方向加一射频 (Radio Frequency, RF) 场，当射频场的频率等于相邻塞曼能级间的跃迁频率时 (即满足 $\omega_0 = \gamma B_0$) 核磁矩做磁偶极跃迁，则称发生了核磁共振。核磁共振成像 (nuclear magnetic resonance imaging, NMRI) 技术是现代医学中最重要的影像诊断手段之一。NMI20 台式核磁共振教学成像设备是专门用来教学的成像实验仪。

本实验利用 NMI20 台式核磁共振教学成像仪，进行了一系列原理性测量，进而测量了乙醇的化学位移，以及芝麻油，芝麻和大米的二维成像图。

实验原理及内容

实验仪器如图一所示



图一.核磁共振实验仪器

其中把含样品的样品管放于右侧的核磁共振分析仪中

1. 核磁共振原理概述

近代物理实验

原子由原子核与核外电子构成。原子核内的核子 (质子和中子) 有相对运动，也有自旋运动，由自旋量子数 I 描述。质子数和中子数都为奇数或者其中之一为奇数的原子核，其自旋角动量都不为零。

将一个核磁矩放入磁场中，磁矩与磁场之间将具有相互作用能。由于量子效应， μ_z 有

$2I+1$ 种取向，即原子和的能级将裂成 $2I+1$ 个能级，相邻能级之间的能级差相同，均为

$$\Delta E = \gamma \hbar B_0 \dots\dots\dots (1)$$

对与 H 原子，共有两个取向。

单个自旋核在磁场中的运动除了不断绕自身轴作转动之外，还以磁场为轴作进动。进动的频率遵循拉莫尔公式：

$$\omega_0 = \gamma B_0 \dots\dots\dots (2)$$

在垂直于外磁场的方向施加与拉莫尔频率相等的射频电磁波，即可使得宏观此话适量发生偏转，即核磁共振现象。该条件可以表示如下：

$$f = \nu_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \gamma \frac{B_0}{2\pi} \dots\dots (3)$$

本实验采用的傅里叶变换法，是采用一定时间宽度的射频脉冲进行激励，射频有的一定带宽，相当于多个单频连续波核磁共振波谱仪在同时进行激励，因此在较大范围内可以观察到核磁共振现象。目前医学核磁共振成像基本上都是脉冲式的。

2. 电子匀场的调节

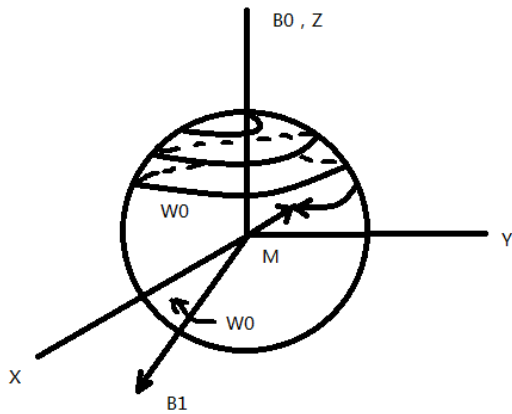
磁场的均匀性是指在特定的容积限度内磁场的同一性，即穿过单位面积的磁力线数目

的等同程度。在本实验中，均匀性是以主磁场的百万分之一（ppm）作为一个偏差单位来度量的，其数学定义为

$$1\text{ppm} = \frac{B_{\max} - B_{\min}}{B_0} \times 10^6 = \frac{\Delta B_0}{B_0} \times 10^6 \dots \dots \dots (4)$$

弛豫时间：宏观磁化量 M_z 以 B_1 为轴做圆周运动，即章动。在脉冲傅里叶变化核磁共振实验中，施加的射频脉冲使得磁化矢量偏离 z 方向一个角度 θ ，即 $\theta = \gamma B_1 \tau \dots \dots \dots (5)$

θ 为 90° 的称为 90° 射频脉冲，同样也有 180° 射频脉冲。当射频脉冲施加完毕后，磁化量会恢复沿 z 轴的方向，这一时间称为弛豫时间。



图二. 宏观磁化矢量的运动轨迹

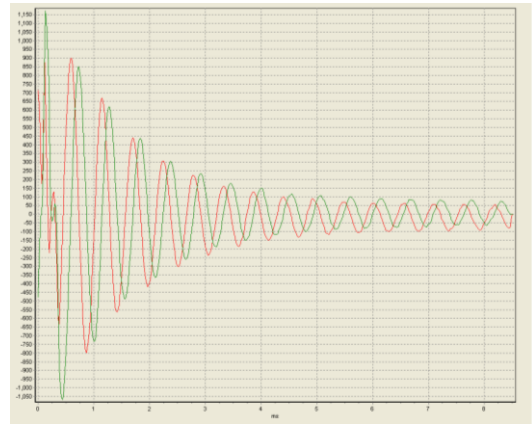
T_1 : 纵向弛豫时间，自旋核释放激励过程中吸收的射频能量返回到基态过程所需要的时间。此过程以 M_z 的恢复为标志。

T_2 : 横向弛豫时间，激励过程是质子进动相位的一致性逐渐散相（即逐渐失去相位一致性）的过程所需要的时间。此过程以横向磁化矢量 M_{xy} 为标志。

FID 信号：在磁矩收到脉冲扰动产生核磁共振信号后的自由衰减信号，故称为 FID (free induction decay) 信号。

电子匀场是利用通电线圈在线圈周围产生磁场，通过给不同方向的线圈施加合适的电

流产生微小磁场来对主磁场的均匀性进行精细修正。实验中拖过反复缓慢地调整梯度电子柜面板上的 GxShim, GyShim, GzShim 电位器旋钮是 FID 信号衰减达到最缓慢，及拖尾最长（见图三），此时，测量得到主磁场的均匀性为 4.930ppm.



图三. 电子匀场之后的 FID 信号图像

3. 乙醇的化学位移测量：

物质的化学位移特性源于自旋核外的电子云对外加静磁场 B_0 的磁屏蔽效应。原子和分子中的原子核（质子）并不是裸露的，周围被电子云所围绕。考虑电子云对静磁场的屏蔽作用后，原子核(质子)实际所受到的磁场强度为 $B_{核} = B_0 - \sigma B_0 = B_0(1 - \sigma)$ ，其中

σ 是屏蔽系数，是个小量，其值 $< 10^{-3}$ 。因此，分子中的核与其他原子所结合的化学键不同，屏蔽系数 σ 也不同，从而共振频率有 $\omega_0 = \gamma(1 - \sigma)B_0 \dots \dots \dots (6)$

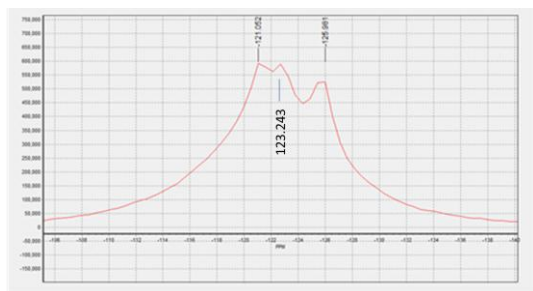
实际的化学位移用无量纲的 δ 表示，单位是 ppm.

$$\delta = \frac{\sigma_R - \sigma_S}{1 - \sigma_S} \times 10^6 \approx (\sigma_R - \sigma_S) \times 10^6 \dots (7)$$

式中， σ_R, σ_S 为参照物和样品的屏蔽参数。

用 δ 表示化学位移，只取决于考虑样品与参照物屏蔽常数之差值。

乙醇的化学分子式中包含一个 OH 键， CH_2 键以及 CH_3 键。在调节好主磁场均匀性的前提下，测量到其核磁共振信号如下图所示

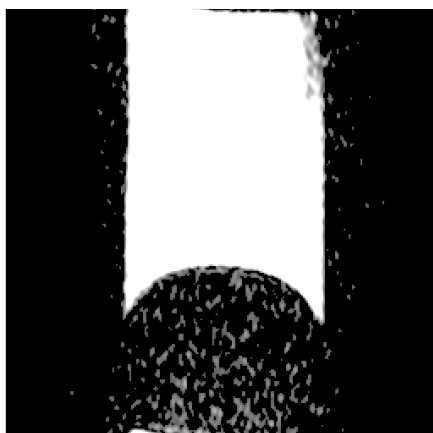


图四 乙醇的化学位移测量（主磁场的均匀性为 4.930ppm）

从图中可以看出，其三个峰值分别在 121.052ppm,123.243ppm 和 125.981ppm 处。其中第二个峰值软件未能成功读出，读数方法为测量它与其他两个峰的距离，然后推算出来具体位置。

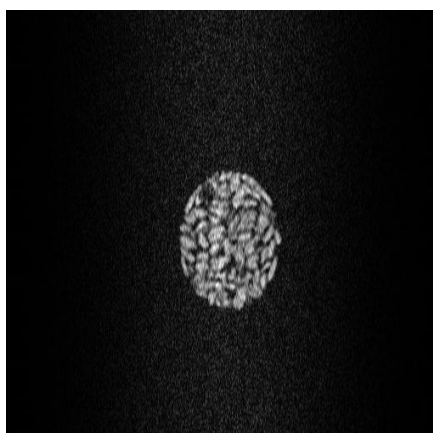
4. 自旋回波权重像

通过设置合适的实验参数，得到了试管中的芝麻油的核磁共振图像（见图五）

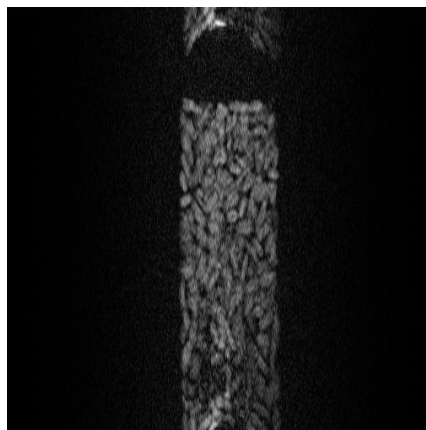


图五 试管中的芝麻油成像

随后，在试管中加入芝麻，再次成像得到图六

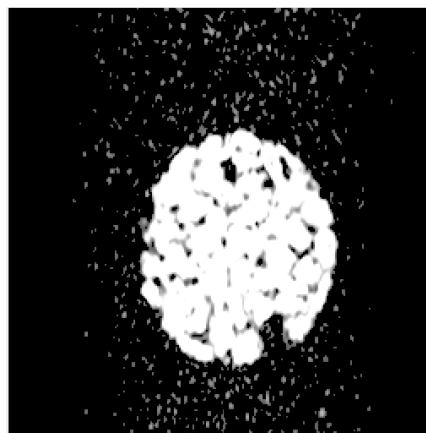


图六（1）芝麻横断面图



图六（2）芝麻测视图

然而，当把试管中的芝麻换成大米后却成不出来想要的大米的像。图七为大米芝麻混合样品的图像，其中的黑色空洞就是大米的位置



图七. 大米加芝麻的像

为了证明实验者的猜想，最后的样品是芝麻油加大米，成像效果见图八



图八.芝麻油加大米的像

结果与讨论

1. 实验在调整电子匀场的时候,发现在一定的范围内, FID 信号的拖尾并没有显著的变化,并且因为信号采集是有时间间隔的,所以每次采集出来的信号都有偏移有跳动。这是导致电子匀场后主磁场偏移率不高的主要原因。
2. 乙醇化学位移的测量中软件并没有识别出三个峰值的原因是主磁场的均匀性不够,导致第二个峰和第三个峰没有更明显的分开。但是通过峰的分裂可以肯定的是由于氢原子周围的电子云的影响核磁共振频率发生了不同程度的“位移”。进而证明了化学位移的存在。
3. 从大米加芝麻和芝麻油加大米的图像中可以看出,大米不能通过核磁共振成像。而成像的主要元素是油脂。因为大米中的所以。用油脂包裹主大米是可以描绘出大米的大致轮廓的。图八中之所以大

米的轮廓比较少是因为在实验结束把样品管取出时发现很多大米粒已经被油浸润,所以不能成像。而各种测固定参数回波的实验对固体如大米,玉米都没有效果,所以说固体核磁共振成像仍是一个有待探索的领域。

小结

从这次实验中可以初步了解核磁共振的工作原理,为以后更深入的研究工作打下了坚实的基础。并且,通过对不同样品及样品组合的成像可以看出,图像中亮的部分主要是油中的 H 质子核,而大米中的元素不能成像。

致谢

感谢俞熹老师和姚红英老师的指导,感谢指导本学期实验的周鲁卫老师,杨新菊老师,汪人甫老师,感谢我的搭档刘璐同学。

参考文献

- [1] 汪红志,张学龙,武杰.核磁共振成像技术实验教程[M].北京:科学出版社,2008.
- [2] 戴道宣,戴乐山.近代物理实验[M].北京:高等教育出版社,2006.
- [3] 杨福家.原子物理学 第四版[M].北京:高等教育出版社,2008.
- [4] 实验中心网站 <http://phylab.fudan.edu.cn/doku.php?id=exp:mri>