

核磁共振实验报告

何金铭 PB21020660

摘要

核磁共振是一个重要的物理现象，也有很多实际应用。本实验利用扫频法来做实现核磁共振，并且会利用一个简单的实验装置来测量 H 的 γ_H, g_H 因子和 ^{19}F 的 γ_F, g_F 因子。并且利用了测得的 γ_H 来测量磁体于其它位置产生的 B_0 。最后测量了 5 个不同调制电压下的 B_m 。

关键词：核磁共振，扫频法，磁感应强度测量

1 引言

核磁共振是一个重要的物理现象，先简单叙述一下它的实验原理。

1.1 实验原理

1.1.1 Lamor 进动

由于原子核有轨道磁矩和自旋磁矩，故于外场 B_0 中会做进动，且有关系 $\omega_0 = \gamma B_0$ 。其中 ω_0 称为 Lamor 频率， $\gamma = g \frac{q}{2m}$ 称为旋磁比， g 为朗德因子

1.1.2 磁共振

于 x - y 平面中加入一个角频率与 Lamor 频率相同（即： $\omega = \omega_0 = \gamma B_0$ ）的外加旋转磁场 B_1 中。此时，磁矩与 B_1 相对静止，会使磁矩绕 B_1 产生进动，势能增加。

- 对于电子自旋共振， $\gamma = g \frac{\mu_B}{\hbar}$
- 对于核自旋共振， $\gamma = g \frac{\mu_N}{\hbar}$

1.1.3 塞曼分裂

含自旋的原子核会在外磁场中产生能级分裂，在适当波长中的电磁波诱导下，不同能级之间会有跃迁，产生强弱不同的共振信号。

1.1.4 检验共振信号

一般有吸收法、感应法、平衡法等几种方法，不同的方法有不同的特点，这里不详细展开叙述。

1.2 本实验中的具体测量方法

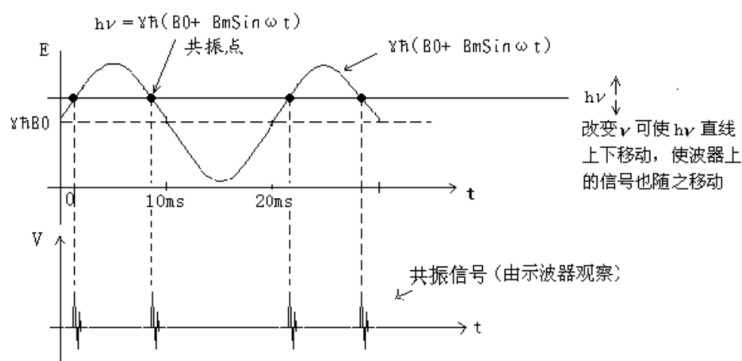


图 1: 实验方法示意图

当满足 $\omega_0 = \gamma(B_0 + B_m \sin 100\pi t)$ 时会出现共振信号, 且当共振信号等间距时, 有 $\omega_0 = \gamma B_m$

2 实验内容

2.1 实验仪器

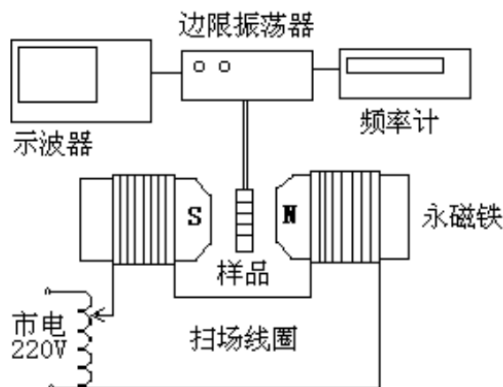


图 2: 实验仪器示意图

1. 样品水: 提供实验用的粒子, $^1H, ^{19}F$
2. 永磁铁: 提供稳恒外磁场 B_0 , 中心磁感应强度约为 0.58T。
3. 边限振荡器: 产生射频场, 提供一个垂直于稳恒外磁场的高频电磁场频率 (旋转磁场 B_1)。同时也将探测到的共振电信号放大后输出到示波器, 边限振荡器的频率由频率计读出。
4. 绕在永磁铁外的磁感应线圈: 提供叠加在永磁铁上的调制场 $B = B_m \sin 100\pi t$
5. 调压变压器: 为磁感应线圈提供 50Hz 的可调电压。
6. 频率计: 读取射频场的频率。
7. 示波器: 观察共振信号。

2.2 具体实验内容

1. 观察并分析调制场 \tilde{B} 的大小和射频频率 ν 对共振信号波形的影响
2. 计算 $\gamma_H, g_H, \gamma_F, g_F$
3. 计算不同位置的磁场强度 $B_0(x)$
4. 测量 5 个不同调制电压下 (0-100V) 的 B_m

3 原始实验数据

注：系统显示是 5 号座位，实际在 4 号位置操作

3.1 4 号位置已知实验参数

已知中心的磁场强度为 $0.58T$ 。当样品处于磁场中心时，边限振荡器的右侧的刻度为 $3.5cm$

3.2 实验现象描述

3.2.1 调制场 \tilde{B} 的大小对共振信号波形的影响

当增加接入的电压大时，调制场 \tilde{B} 的峰值 B_m 的变大。

发现，若在某时刻出现了共振信号，当射频频率不变的情况下，当 B_m 变大的时候共振信号的峰值也随之增加；而当 B_m 变小的时候，共振信号的峰值也随之减少，当 B_m 小于某个值时共振信号消失。

3.2.2 射频频率 ν 对共振信号波形的影响

发现，若在某时刻出现了共振信号，当调制场 \tilde{B} 不变的情况下，当 ν 变大到某个值后，共振信号会重叠，再变大后则会消失；当 ν 变小到某个值后，共振信号会重叠，再变小后则会消失；当 ν 取某个恰当的值时，会使共振信号变为等间距。

3.3 数据记录表

组数	1	2	3	4	5	6
ν/MHz	24.620713	24.621753	24.621300	24.621067	24.621513	24.621501

表 1: 1H 核磁共振时频率计读数记录表

组数	1	2	3	4	5	6
ν/MHz	23.162852	23.163111	23.162131	23.162203	23.162103	23.162861

表 2: ^{19}F 核磁共振时频率计读数记录表

ν/MHz	1	2	3	4	5	6
2cm	24.618354	24.616727	24.617720	24.618302	24.618877	24.618675
3cm	24.620753	24.620070	24.620269	24.620208	24.619898	24.619891
4cm	24.622112	24.622933	24.621642	24.622159	24.622527	24.621783
5cm	24.620847	24.622769	24.620229	24.621194	24.621755	24.622271

表 3: 不同位置 (外磁场 $B_0(x)$) 下 1H 核磁共振时频率计读数记录表

说明, 此处的 l 是边限振荡器右侧在磁体固定的刻度尺上的读数

电压 V/v	100	80	60	40	20
ν_1/MHz	24.582016	24.588243	24.596032	24.603952	24.611901
ν_2/MHz	24.659694	24.651687	24.644097	24.636851	24.629393

表 4: 不同调制电压下 1H 核磁共振时频率计读数记录表

4 数据处理与数据分析

4.1 实验现象的解释

产生共振信号需要满足的条件是:

$$2\pi\nu = \gamma(B_0 + B_m \sin 100\pi t) \quad (1)$$

4.1.1 调制场 \tilde{B} 的大小对共振信号波形的影响

改变 B_m 的大小会导致可能发生核磁共振的频谱范围发生了改变, 在 ν 不变的情况下, 当 B_m 变大时, 原来的核磁共振信号会变得更大大, 而当 B_m 变小时, 信号会变弱, 直到 B_m 脱离了核磁共振的范围, 此时核磁共振现象会消失, 其信号自然也随之消失。

与观察的现象相符。

4.1.2 射频频率 ν 对共振信号波形的影响

改变 ν 的大小, 就相当于改变了频率在频谱中的位置, 在 B_m 不变的情况下, ν 的取值范围为 $\nu \in \frac{\gamma}{2\pi}[B_0 - B_m, B_0 + B_m]$, 当 $\nu > \frac{\gamma}{2\pi}(B_0 + B_m)$ 或 $\nu < \frac{\gamma}{2\pi}(B_0 - B_m)$ 时, 核磁共振会消失, 而当 $\nu = \frac{\gamma}{2\pi}B_0$ 时, 共振信号为等间距。

与实验现象相符。

4.2 计算 $\gamma_H, g_H, \gamma_F, g_F$

计算得 $\nu_H = 24.621308MHz, \nu_F = 23.162544MHz$:

由 γ 和 g 的计算公式:

$$\gamma = \frac{2\pi\nu}{B_0} \quad (2)$$

$$g = \gamma \frac{\hbar}{\mu_N} \quad (3)$$

其中 $B_0 = 0.58T$, $\hbar = 1.0545718 \times 10^{-34} J \cdot s$, $\mu_N = 5.050783699 \times 10^{-27} J/T$
 分别代入 1H 和 ^{19}F 中的数据得:

$$\gamma_H = 2.667246 \times 10^8 \text{rad} \cdot T^{-1} \cdot s^{-1}, \quad g_H = 5.569042 \quad (4)$$

$$\gamma_F = 2.509216 \times 10^8 \text{rad} \cdot T^{-1} \cdot s^{-1}, \quad g_F = 5.239086 \quad (5)$$

发现测得的旋磁比与朗德因子均与理论的值相近。

4.3 计算不同位置的磁场强度 $B_0(x)$

得到不同位置处 $\bar{\nu}$ 的值见下表:

位置 l/cm	2	3	4	5
频率平均值 $\bar{\nu}/MHz$	24.618109	24.620182	24.622193	24.621511

表 5: 不同位置处的频率平均值 $\bar{\nu}$ 表

由计算公式:

$$B_0 = \frac{2\pi\bar{\nu}}{\gamma} \quad (6)$$

得:

位置 l/cm	2	3	4	5
磁感应强度 B_0/T	0.579925	0.579973	0.580021	0.580005

表 6: 不同位置处的磁感应强度 B_0/T 表

说明永磁铁中不同位置的磁场强度是不同的, 是不均匀的。但大体上可认为在中心的磁场强度是均匀。

4.4 测量 5 个不同调制电压下 (0-100V) 的 B_m

处理数据得:

电压 V/v	100	80	60	40	20
$(\nu_2 - \nu_1)/MHz$	0.077678	0.063444	0.048065	0.032899	0.017492

表 7: 不同调制电压下 1H 核磁共振时频率计读数差值记录表

由计算公式:

$$B_m = \frac{1}{2} \left(\frac{2\pi(\nu_2 - \nu_1)}{\gamma} \right) = \frac{\pi(\nu_2 - \nu_1)}{\gamma} \quad (7)$$

得:

电压 V/v	100	80	60	40	20
B_m/Gs	9.149236	7.472697	5.661294	3.874980	2.060280

表 8: 不同调制电压下产生的磁场强度峰值 B_m 记录表

发现不同调制电压产生的感应磁场磁感应强度峰值 B_m 是几乎呈线性的, 是符合物理直观的。

5 实验总结和误差分析

5.1 误差分析

在实验中还存在一些问题:

1. 观察共振信号是否等间距靠的是肉眼, 会产生较大误差。
2. 在测量不同位置的磁场强度时, 在边缘的点 $l = 2cm, 3cm$ 处。由于数字示波器不能检测到触发信号, 图像无法锁定, 故只能依靠模拟示波器进行粗略的估计, 共振信号不一定等间距。
3. 在利用频率计读数时, 由于频率计示数在不断的跳动, 所以会产生估读误差。
4. 实验中可能还存在一些系统误差, 但由于实验装置是集成的, 这里无法分析。

5.2 实验总结

1. 调制场 \tilde{B} 的峰值 B_m 和射频频率 ν 均会对共振信号波形产生影响, 实验中需要寻找合适的值才能观察到现象。
2. 实验中测得的 $^1H, ^{19}F$ 的旋磁比与朗德因子分别为 $\gamma_H = 2.667246 \times 10^8 rad \cdot T^{-1} \cdot s^{-1}$, $g_H = 5.569042$, $\gamma_F = 2.509216 \times 10^8 rad \cdot T^{-1} \cdot s^{-1}$, $g_F = 5.239086$ 且发现测量值与理论值相近。
3. 发现永磁铁中不同位置的磁感应强度是不同的, 不太均匀, 但大体上可认为中心磁感应强度是均匀的。
4. 发现不同调制电压产生的感应磁场磁感应强度峰值 B_m 是几乎呈线性的, 是符合物理直观的。

6 思考题

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

1. B_0 为稳恒外磁场, 是为了使得原子核在外磁场的作用下产生 Lamor 进动。其由装置中的永磁铁产生。
2. B_1 为垂直于稳恒磁场方向的外加磁场, 且绕稳恒磁场方向以角速度 ω 旋转, 是为了与外磁场中的原子核产生核磁共振。其由边限振荡器产生。
3. \tilde{B} 为沿稳恒磁场方向的外加交流磁场, 且在本次实验中, 其表达式为 $\tilde{B} = B_m \sin 100\pi t$, 是为了增加能够观察到核磁共振现象的频谱范围, 更加容易观察到核磁共振现象, 且更加方便测量。其由围绕着永磁铁的且外加交流电的线圈产生。

它们的区别由上分析显然得到, 它们的目的和产生机制都是不同的。

7 致谢

感谢一教物理实验中心提供的核磁共振实验仪器，也感谢王少敏助教的指导！

8 参考文献

1. 核磁共振实验实验讲义. 大学物理实验-现代物理实验.