

# 弱磁場中質子的自由进动和一个 野外測磁場的實驗\*

吳蒼生 戴光曦 刘功諱 丁 渝

## 提 要

本文报导了我们在弱場中进行的核矩預极化和核矩自由进动的实验和分析。主要研究了极化磁場衰減过程中核矩的运动、讯号的绝对强度，并观察到探头转动对讯号频率的影响，指出了这是測核磁矩正负号的最直接的方法。

此外，弱磁場中质子自由进动现象在高空磁場测量、地质探矿、石油开采等方面都有重要的实际应用，本文的结果对解决这些应用中的具体问题是有帮助的。

为了检验全套仪器在野外工作时的性能，以及观察周围大体积的磁性物质对讯号频率的影响，我们在野外进行了一系列的測磁实验，获得了肯定的结果。測磁的相对精密度达到  $1 \times 10^{-5}$ 。

## 前 言

1954 年 Packard 和 Varian<sup>[1]</sup> 首先在弱磁場中观察到質子的自由进动现象。这个现象很快就被用于弱磁場的测量，如地面和高空地磁場的测量和航空地质勘探等。稍后，在石油的开采方面<sup>[2]</sup>还有用它来测量油田岩石的孔隙中的水中質子的弛豫时间。几年以前，我們曾經对这个现象作了下列的实验工作，如极化磁場衰減过程对磁矩运动的影响；讯号绝对强度实验值和理論值的比較；引起讯号强度不重复的原因等。这些在已有的文献中尚未見有詳細的分析和报导。通过这些工作，我們做到用 50 毫升样品和 450 高斯的极化磁場，获得 40:1 的初始讯号噪声比（讯号是逐漸衰減的）。样品体积的縮小在实际应用上是有意义的。

近年来，在磁共振的工作中，发展了数种双共振的方法（如順磁核磁双共振和光磁双共振等），并都已成功地应用到弱磁場的测量<sup>[2,3]</sup>。但上述的 Packard 和 Varian 方法仍然有其优点，而且精密度也已滿足目前測磁上提出的要求。估計最高精密度可达  $1 \times 10^{-6}$ ，而做到  $1 \times 10^{-5}$  则肯定是现实的。后者在地磁場的测量中相当于  $0.5\gamma$  的精密度。

## 一、原 理

核磁共振现象是 Bloch 和 Purcell<sup>[4,5]</sup> 等人在水的样品中首先观察到的。但是当恆定磁場在 1—2 高斯以下时，便不易观察到核磁共振的讯号。1954 年，Packard 和 Varian 利用原子核极化或退极化需要一定的時間間隔——弛豫時間——这一事实，使样品中的

\* 1964 年 12 月 1 日收到。

原子核預先在強磁場  $F_0$  中极化,此极化磁場大致和待測磁場  $H_0$  垂直,然后迅速地,即非寢变地<sup>1)</sup>,取消強磁場.那么在原子核还没有退极化的一段时间內,就观察到总磁矩  $\mathbf{M}$  繞待測磁場  $\mathbf{H}_0$  的进动(見图1),自由进动角速度为

$$\omega = -\gamma_p \mathbf{H}_0, \quad (1)$$

$\gamma_p$  为质子的迴轉磁比. 这就是熟知的拉摩进动. 如果样品周围繞有探測綫圈,  $\mathbf{M}$  的进动将在綫圈中感应一个交变电动势——訊号. 把訊号放大后,精确測量出頻率,根据式(1)便得出磁場的強度  $H_0$ , 这里  $\gamma_p$  是已經精密測定的常数.

为了分析的便利,下面假定极化磁場和  $H_0$  是垂直的. 在不垂直的情况下,只是探測到的进动訊号要弱一些,不影响分析的结果.

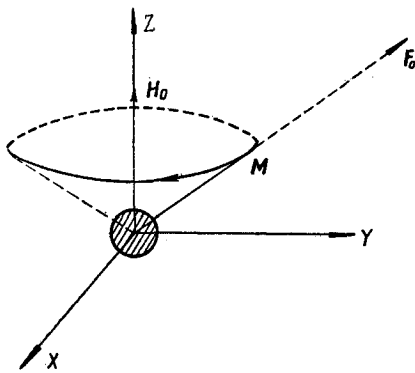


图1 质子合成磁矩的自由进动

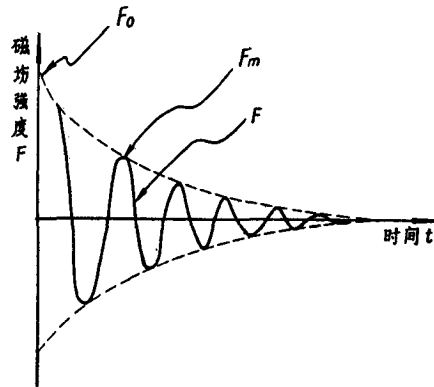


图2 极化磁場衰減振蕩的情况

$F_0$ ——衰減前的极化磁場強度;  
 $F_m$ ——衰減中的极化磁場強度;  
 $F$ ——极化磁場的瞬时值

关于磁場变化的非寢变条件,一般可写为<sup>[6]</sup>

$$|\dot{\mathbf{H}} \times \mathbf{H}|/H^2 \gg \gamma_p H. \quad (2)$$

实验中总磁場  $\mathbf{H} = F(t)\mathbf{i} + H_0\mathbf{k}$ ,  $\mathbf{i}$ ,  $\mathbf{k}$  分别为沿  $x$  軸及  $z$  軸的单位矢量,  $F$  为产生质子預极化的磁場,是逐渐衰滅的,  $H_0$  是待測磁場,是不变的. 从上式得极化磁場变化的非寢变条件为

$$|\dot{F}| \gg \gamma_p (F^2 + H_0^2)^{3/2}/H_0, \quad (3)$$

$F$  的变化由綫圈迴路的特性决定. 一般有两种形式: 一种是衰滅振蕩的, 近似地認为  $F(t) = F_0 e^{-\delta t} \cos \omega_0 t = F_m \cos \omega_0 t$ , 这里  $F_m = F_0 e^{-\delta t}$ ,  $\omega_0$  是綫圈的諧振頻率; 一种是单調衰滅的, 近似地認为  $F(t) = F_0 e^{-\Delta t}$ . 这两种形式都很难在整个衰滅过程中满足条件(3), 但是只要总磁矩能够保持和我們要測量的磁場  $H_0$  相垂直, 就可以观察到总磁矩自由进动的現象. 現在我們就来定性地分析在极化磁場衰滅的过程中, 要做到总磁矩保持与  $H_0$  垂直的具体条件.

(i) 我們先考虑  $F(t)$  为衰滅振蕩的情况(見图2), 并且分两个阶段来考虑:

1) 寢变过程 (adiabatic process in the ehrenfest sense) 是指一个量子力学体系在外界参数改变时的一种变化, 在此过程中不发生量子跃迁, 因此能级上的占有数保持不变. 这和热力学的绝热过程 (adiabatic process) 意义不同. 參看 A. Abragam 和 W. G. Proctor, *Phys. Rev.* **109** (1958), 1441 和物理学名詞.

第一階段: 衰減振蕩的瞬時振幅  $F_m \gg H_0$ . 在每個振蕩週期內, 極化磁場值  $F$  從  $+F_m$  變到  $-F_m$ :

(a) 在接近於振幅值時,  $\dot{F}$  接近於零, (3) 式不能滿足, 但此時  $|F| \gg H_0$ , 總磁場  $(\mathbf{F} + \mathbf{H}_0)$  的方向主要由  $\mathbf{F}$  決定, 它和總磁矩的方向一致或相差  $180^\circ$ . 在此磁場作用下, 總磁矩  $\mathbf{M}$  的取向不變 [ $\mathbf{M}$  的絕對值也不變, 後面還要說明].

(b) 當磁場值  $F$  落在  $+H_0$  到  $-H_0$  附近的區域時,  $|\dot{F}|$  較大, 特別是通過零點時,  $|\dot{F}|$  最大. 在此區域內(3)式可以滿足, 並且因  $\dot{F} \approx \omega_0 F_m$ , (3)式可以簡化為

$$\omega_0 \gg \omega_L \frac{H_0}{F_m} \quad (\text{注意 } F_m \gg H_0). \quad (4)$$

第二階段: 振蕩磁場瞬時振幅  $F_m$  衰減到近於  $H_0$ . 這時磁場方向變化較快, 變化的角速度接近  $\omega_0$ ; 而磁場值  $|\mathbf{F} + \mathbf{H}_0|$  則接近於  $H_0$ , 因為  $F \leq H_0$ , 並互相垂直. 因此總磁矩的進動角速度為  $\gamma|\mathbf{F} + \mathbf{H}_0| \approx \gamma H_0 = \omega_L$ , 只要

$$\omega_0 \gg \omega_L, \quad (5a)$$

$M$  仍然保持與  $H_0$  垂直. 這是因為在一個拉摩週期內, 往返變化多次的極化磁場對總磁矩的作用平均等於零.

綜合以上的分析, (4)式可以併入(5a)式. 這就是說, 只要探測線圈的自然頻率高於總磁矩  $M$  在  $H_0$  中的進動頻率, 那麼  $M$  就可以在整個極化磁場衰減的過程中保持與  $H_0$  垂直.

(ii) 極化磁場  $F$  按  $e^{-\Delta t}$  單調衰減的情況. 這時因  $|\dot{F}| = F \cdot \Delta$ , 根據類似的考慮, 可以把條件(3)化簡為

$$\Delta \gg \omega_L. \quad (5b)$$

在以上的討論中, 假定磁場從  $F \gg H_0$  衰減到  $F \ll H_0$  所需要的時間遠遠小於縱弛豫時間  $T_1$ , 因此不必考慮在這個過程中,  $\mathbf{M}$  的數值的變化. 關於非穩變條件, 在後面的實驗工作中, 還要作更多的討論和分析.

## 二、儀 器

整個儀器的安置如圖 3 所示. 質子自由進動探頭是一個用玻璃或塑料做成的容器, 容器內盛放樣品(如蒸餾水等), 容積從幾十毫升到一升左右. 容器周圍繞漆包線, 匝數約在 800 匝到 4000 匝之間. 最初採用的是環形線圈(圖 3), 這種線圈的優點是可以減少外界感應噪聲, 因此探頭只要加很薄的一層屏蔽就可以進行工作, 缺點是樣品分散, 不宜在磁場不均勻的條件下工作. 後來採用了直筒線圈, 其優點是樣品集中, 而且繞制簡便, 但容易感受外界干擾, 需要有良好的

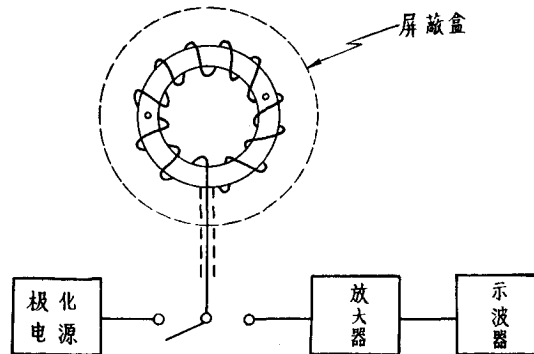
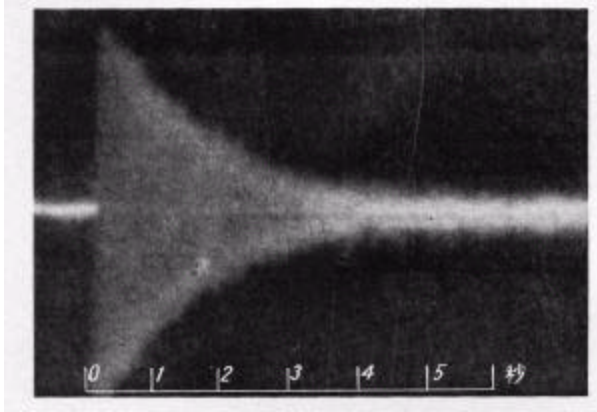


圖 3 訊號探測部分安置的示意圖

注: 環中小孔注入樣品用

的屏蔽,或补偿线圈,才能有良好的讯号噪声比。在实验中,我们使补偿线圈和探测线圈的等效二极矩互相抵偿到零,四极矩也互相抵偿到零,外界干扰的影响就大大减弱了。

我们用过的放大器,增益约从几千到十几万倍,其中之一在接 0.04 亨利电感的探测线圈时,输入噪声平均值约 0.55 微伏,增益为 12000,带宽 200 周。



光子自由进动讯号的衰减

外,都是由黄铜或紫铜做成的。在旋转轴(图上没有表示出来)上的金属套筒上装有三个弹簧铜的动片  $K$ , 分别连接环 1, 2 和 3。当转动转轴,动片在  $0-270^\circ$  之间滑动时,线圈经过  $A$  和极化电源连接,这时样品受极化场作用而磁化。动片  $K$  转过  $270^\circ$  而和极化电源断路后,线圈通过  $B$  和阻尼电阻并联,极化电流在这个阻尼回路迅速衰减为零。最后线圈接到放大器的输入端,这里接有谐振电容,与线圈组成谐振频率为  $\omega_L$  的回路;与此同时,环 3 的动片和  $B$  脱离,以免阻尼电阻使回路的  $Q$  值降低。

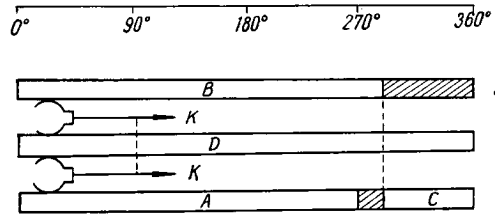


图 4 旋转开关示意图

$A$ ——接极化电源;  $B$ ——接阻尼电阻;  
 $C$ ——接放大器;  $D$ ——接线圈;  
 $K$ ——滑动片

### 三、质子预极化和自由进动的实验

#### 1. 极化磁场

当线圈和极化磁场断开后,线圈中的电流将根据回路参数的不同作不同情况的衰减。

设线圈电感为  $L$ , 电阻为  $R$ , 电容为  $C$  (通常为线圈的分布电容), 令  $\delta = \frac{R}{2L}$ ,

$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$ . 当  $\delta < \omega_0$ , 电流近似地按  $e^{-\delta t} \cos \omega_0 t$  作衰减振荡; 当  $\delta > \omega_0$ , 电流近似地

按  $e^{-\Delta t}$  单调衰减到零,  $\Delta = \delta - \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}$ . 当  $\delta = \omega_0$ , 电流衰减最快, 而又不产生往返振荡(见图 5)。在线圈的两端并联电容或电阻, 改变回路的参数, 便可以得到上述不同的衰减情况。

图 6 的装置是用来研究极化磁场不同的衰减情况对质子自由进动的影响。这里的开

我们也曾用双线圈(把励磁线圈和探测线圈分开)的办法,观察了质子进动讯号。

线圈从极化电源到放大器的转换开关,可以用单刀双掷的闸刀开关直接用手操作,也可以用马达带动的旋转开关或用装有时间控制的继电器,使操作能自动重复进行。

我们使用的旋转开关(图 4)的固定部分由 3 个同轴的圆环 1, 2 和 3 组成。圆环除了带有阴影的绝缘部分

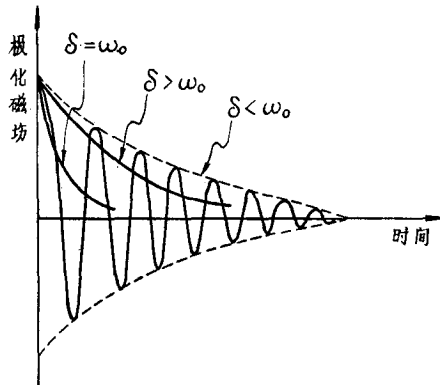


图5 极化磁場三种不同的衰減情况

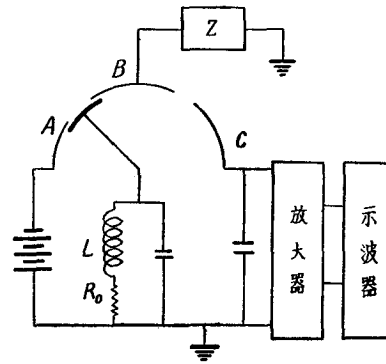


图6 非變条件实验布置图

关即是图4的旋轉开关。在綫圈和极化电源断开到接通放大器之間，綫圈和B連接，并經阻抗Z接地。

当Z为电容时，观察到如下的情况：电容等于零时，綫圈迴路的自然頻率  $\omega_0 = 10^3$  弧度/秒，极化磁場以頻率  $\omega_0$  作衰減振蕩，滿足前述的条件(5a)： $\omega_0 \gg \omega_L$ ，有很好的訊号強度。加上較小的并聯电容之后，訊号強度变化并不显著。但当逐漸增大电容，使迴路的諧振頻率逐漸趨向于  $\omega_L$ ，訊号強度便逐漸減弱。当  $\omega_0 \approx \omega_L$  时，訊号就完全消失了。这种情况和第一节中提出的非變条件的討論相合。但为了提高探測系統对于訊号頻率的选择性，也就是压低系統对于广泛的噪声頻率的响应，从而提高訊号噪声比，通常需要在放大器輸入端接上一个諧振电容。即使得  $\omega_0 \approx \omega_L$ ，而这样就会使得訊号強度完全消失。因此这个电容就只能在极化电流衰減到很小之后才和綫圈連接。究竟要衰減到多少，在第三节第2部分中研究了這個問題。

当Z为純电阻  $R'$  时，对不同的阻值，即相应于不同的  $\Delta$ ，我們观察到如表1的訊号噪声比<sup>1)</sup>，这里  $R'$  是并聯在探測綫圈两端的电阻，它的等效串聯电阻  $R$  为  $L/CR'$  (忽略綫圈本身的电阻)，因此  $\delta = R/2L \approx 1/2R'C$ 。当  $R' = 5$  千欧姆时，正达到临界情况。从表中訊号強度随  $\Delta$  的变化可以看出，当极化磁場的衰減不滿足(5b)的要求时，訊号強度显著減弱。

表1 并聯不同电阻值时的訊号噪声比

$R'$ (千欧)	$\infty$	8	4	2	1	0.5	0.3
$\omega_0/\omega_L$	6.7	6.7					
$\Delta/\omega_L$			3.5	1.4	0.67	0.033	0.02
訊号/噪声	20	20	20	18	10	4	2

注：綫圈  $L = 0.1$  亨， $C \approx 0.001$  微法拉， $R_0 = 30$  欧， $R_0$  是綫圈本身的电阻。

从表1还看出，电阻  $R'$  在4千欧姆以上时都有相同的訊号噪声比，但当  $R'$  很大或

1) 我们这个工作是1960年初作出的。以后我们看到了 M. B. РЫЖКОВ 等 [ИТЭ, № 5 (1960), 41] 也有关于这方面的工作，在极化磁場的衰減和訊号強度的关系这一部分，也仅仅这一部分和他们的数据是类似的。

开路时,  $\delta \ll \omega_0$ , 电流振幅衰减很慢, 必须延长线圈从极化电源到放大器之间的过渡时间, 才能得到重复的信号强度 (下段中详细讨论了这种现象)。因此在实际使用的开关中还是接入一个临界值的电阻。

## 2. 剩余极化磁场及谐振电容的影响

当探测线圈接到放大器时, 通常极化磁场已经衰减到比  $H_0$  小很多, 应当不再影响总磁矩的取向。上面提到, 为了提高信号噪声比, 在放大器的输入端通常接上一个谐振电容, 使得线圈回路的谐振频率  $\omega_0$  与进动频率  $\omega_L$  相近。因此线圈接到放大器后, 剩余电流即以此谐振频率  $\omega_0 \approx \omega_L$  振荡, 并按新的阻尼常数  $\delta_A = \omega_0/2Q$  衰减 ( $Q$  是接电容后回路的品质因素)。因为这个振荡频率和磁矩的进动频率很接近, 需要更仔细地考虑它对磁矩取向的影响。

设上述的衰减振荡电流产生的磁场  $F'$  为

$$F' = F'_0 e^{-\delta_A t} \cos \omega_0 t,$$

而且方向和  $H_0$  垂直, 这里  $F'_0$  等于或小于线圈接放大器时剩余极化磁场的瞬时振幅。可以把  $F'$  分解为振幅各等于  $F'_0 e^{-\delta_A t}/2$  的一个左旋分量和一个右旋分量; 其中左旋分量  $F'_-$  和  $M$  的转动方向相同, 由于频率接近, 位相也基本上保持恒定。在此磁场作用下,  $M$  绕  $F'_-$  的转动相角将是积累的。在随  $F'_-$  一齐转动的坐标中, 转角为

$$\theta' = \int_0^{\infty} \gamma_p F'_-(t) dt = \gamma_p F'_0 / 2\delta_A. \quad (6)$$

假设开始 ( $t=0$ ) 时,  $F'_-$  和  $M$  都在垂直于  $H_0$  的  $xy$  平面上, 经过上述脉冲作用 (以后脉冲即指整个衰减振荡的过程) 之后,  $M$  将绕出  $xy$  平面, 而不再同  $H_0$  垂直了。

例如, 要得到  $\theta' = \pi/2$  的转角, 约需  $F'_0 = 0.025$  高斯 (设  $Q = 30$ ), 即剩余磁场为  $H_0$  的  $1/20$  时就可能将  $M$  转过  $90^\circ$ 。如果又设  $F'_-$  和  $M$  的初始位相差  $\alpha$  为  $\pi/2$ , 那么在磁场脉冲作用后,  $M$  便将绕  $F'_-$  转至  $H_0$  的方向, 因而磁矩在线圈中的感应信号强度等于零, 因为在多次重复的实验观察中, 剩余磁场  $F'_0$  的值是不会次次相同的,  $\alpha$  的值也是不会次次相同的, 因而将引起信号强度的不重复。当然,  $F'_0$  若是非常小的话 ( $\ll H_0/20$ ), 转角  $\theta'$  便远远小于  $\pi/2$ , 这种信号不重复的情况便没有了。

在已发表的文献中, 有的作者<sup>[7]</sup>曾经提到, 在极化电流衰减过程中, 探测线圈并联适当的电阻可以得到重复性较好的信号强度, 但未分析引起不重复的原因以及如何选择适当的阻尼电阻值。我们在初期的实验中也观察到这种不重复的现象。我们认为这就是上面分析的剩余极化磁场和放大器输入端的谐振电容所引起的现象。为了考验这一点, 我们模拟剩余极化磁场的变化, 人为地产生一个衰减振荡磁场, 观察它对磁矩运动的影响。

因为探测线圈一般接近与磁场  $H_0$  垂直, 线圈内的剩磁场也是如此。因此可以将这个人造的磁场安排得与  $H_0$  垂直。为了减少感应, 也使这个人造磁场垂直于探测线圈。

这个人造的脉冲磁场是由直径等于 30 厘米的一对亥姆霍茨线圈产生的, 这个线圈还加上并联电容, 使回路的谐振频率接近于质子进动频率。把亥姆霍茨线圈接通直流电源, 可以产生一个从 0—0.12 高斯的直流磁场。当直流电源断开后, 亥姆霍茨线圈的电流便从初始值作衰减振荡, 于是就得到频率近于  $\omega_L$  的衰减振荡磁场。衰减的时间常数  $1/\delta = 1.7 \times 10^{-3}$  秒, 近于探测线圈的实际数值。

利用这种安排,我們作了下述的观察:

(i) 先使探測綫圈中的极化磁場非寢变地衰減到远远小于  $H_0/20$ , 然后綫圈接放大器, 从而得到重复性良好的訊号強度(見表 2 第一行及图 7 曲綫 a)。此时亥姆霍茨綫圈电流不变。

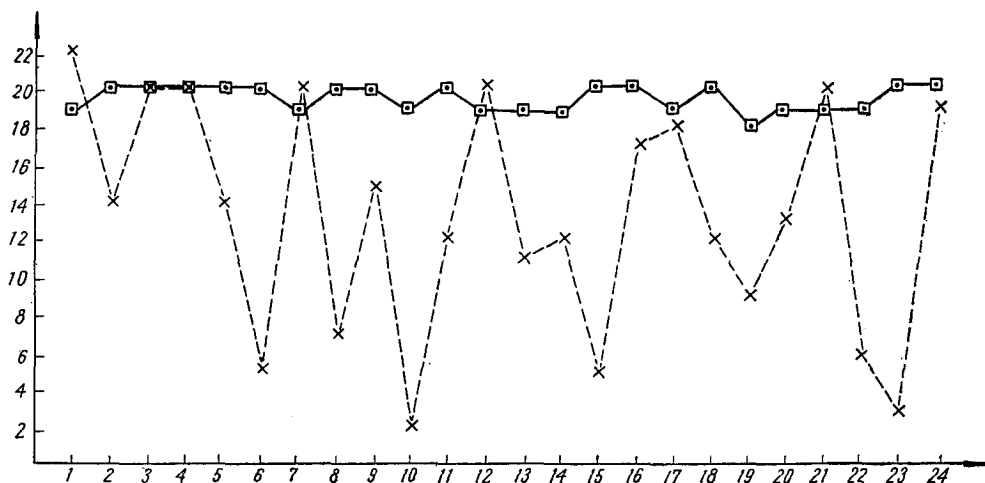


图 7 非寢变过程后脉冲磁場的不同初始振幅对訊号強度的影响

(a) □——脉冲磁場为零; (b) ×——脉冲磁場初始振幅为 0.069 高斯

(ii) 极化磁場仍然非寢变地衰減到零, 然后綫圈接放大器。不过在此同时, 把亥姆霍茨綫圈和直流电源断开, 产生一个脉冲振荡磁場, 就观察到訊号不重复的現象。表 2 第 2, 3, 4, 5 和 6 行分别列出了  $F'_0$  为 0.031, 0.048, 0.069, 0.075 和 0.1 高斯所对应的 24 次测量的訊号強度。在  $F'_0$  为 0.069 和 0.075 高斯时, 訊号強度变化最大。图 7 曲綫 b 显示了这种变化。因为这两个磁場值, 按式(6)計算对应的  $\theta'$  近于  $\pi/2$ , 按照上面的分析, 訊号強度变化的幅度也应当最大。

(iii) 先使探測綫圈中的极化磁場寢变地衰減到零。当綫圈接放大器时,  $\mathbf{M}$  已和  $\mathbf{H}_0$  平行, 訊号強度为零(見表 3 第一行)。然后利用亥姆霍茨綫圈加上衰減振荡磁場  $F'_0$ , 質子进动訊号便重又出現了。現在由于  $\mathbf{M}$  和  $\mathbf{F}'_0$  在开始时总是互相垂直, 因此对相同的  $F'_0$ , 出現的訊号強度也总是重复的(表 3 第二行)。在  $F'_0$  为 0.069 高斯时,  $\theta' = \pi/2$ , 在脉冲振荡磁場过后, 总磁矩  $\mathbf{M}$  又垂直于  $\mathbf{H}_0$ 。因而我們能够观察到質子进动訊号。而从表中我們看到, 这时訊号強度已接近极化磁場非寢变条件下的強度。

从表 2、表 3 中还可以看出, 当改变衰減振荡磁場的振荡頻率(改变亥姆霍茨綫圈的諧振电容), 使之远大于或远小于  $\omega_L$  时, 在上述(ii)和(iii)两种不同情况下, 都观察不到这个脉冲磁場对訊号強度的影响, 这当然是应有的結果。

由于在实验中, 脉冲磁場的振幅和衰減時間沒有作更精确的測量和控制, 上述的符合只能作为定性的說明。例如我們曾在(ii)的实验中, 加大  $F'_0$ , 使之相当于  $\theta' = \pi$ , 这时总磁矩在磁場脉冲过后仍应回到  $x-y$  平面, 因而不应当对訊号強度有影响, 但实验上仍看到訊号強度有不重复的現象, 只是变更的幅度較小而已。





經過上述的分析和實驗,關於極化磁場的衰減過程我們認為: 在 Packard-Varian 的實驗中,除了衰減速度要滿足非擾變條件而外,考慮到實際上放大系統的輸入端(和探測線圈相接處),通常總是接有諧振電容,還必須要求磁場衰減到很小的振蕩幅度:

$$F'_0 \ll \delta_A \pi / 2 \gamma_p \quad (7)$$

才能將探測線圈接通放大器的輸入端。這樣才能使得  $\theta' \ll \pi/4$ , 從而得到重復的訊號強度。當線圈迴路  $Q = 30$ 、觀察的原子核為質子時,從(7)式得

$$F'_0 \ll 0.015 \text{ 高斯} \quad \left( \approx \frac{H_0}{30} \right).$$

為了加快線圈中極化電流的衰減,可以在探測線圈兩端並聯適當的電阻,使迴路的阻尼接近於臨界的情況  $\delta = \omega_0$ , 這裡  $\omega_0$  是指線圈本身的自然頻率(未接諧振電容以前)。具體安排見 2 節旋轉開關部分。在我們大部分的實驗中都採用了這種安排。

### 3. 訊號強度

對於一個繞有  $n$  匝線圈、樣品截面為  $A$  的探頭,假設樣品的磁化強度為  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{M}$  和  $H_0$  垂直,在強度為  $H_0$  的磁場中,由於  $\mathbf{M}$  的進動而在線圈得到的感應訊號應為

$$V = nA \frac{4\pi\omega}{C} \eta M Q \cos \omega_L t, \quad (8)$$

式中  $\omega_L = \gamma_p H_0$ ;  $Q$  為線圈接振電容後迴路的品質因素。以水為樣品,在  $T = 291^\circ\text{K}$  時,  $M = 3.4 \times 10^{-10} F_0$ ,  $F_0$  是極化磁場的強度。取  $\gamma_p = (2.67525 \pm 0.0002) \times 10^4$  高斯<sup>-1</sup>秒<sup>-1</sup>[8];  $H_0 = 0.55$  高斯;  $\omega_L \approx 1.4 \times 10^{-4}$  秒<sup>-1</sup>; 訊號強度為

$$\begin{aligned} V &= \frac{4\pi}{3 \times 10^{10}} \times 1.4 \times 10^4 \times 3.4 \times 10^{-10} \eta A F_0 n Q = \\ &= 2 \times 10^{-15} \eta A F_0 n Q (\text{C. G. S.}) = \\ &= 6 \times 10^{-13} \eta A F_0 n Q (\text{伏特}), \end{aligned} \quad (9)$$

其中  $\eta$  可以由實驗測量,方法是用一個圓筒形線圈代替原來的樣品,其直徑和長度與樣品空間的直徑和長度相等,測量它和原來探頭上的線圈的互感。並算出圓筒形線圈為無限長時與探頭線圈的互感。這兩個互感值之比即為  $\eta$ 。我們用一個內徑和長度都是 6.6 厘米,樣品體積 200 毫升的圓筒形容積,外繞 2147 匝漆包線,測出  $Q = 28$ ,  $\eta = 0.60$ , 在極化磁場平均值  $\bar{F}_0 = 450$  高斯時,我們得到訊號強度初始值為 3.3 伏特(有效值),放大器增益 13800,相當於 240 微伏(有效值)的輸入訊號,或峯值 340 微伏;訊號噪聲比 240,按式(9)計算,應得訊號峯值為 330 微伏。我們還用另一台容積 50 毫升,  $n = 1151$  匝,  $Q = 25$ ,  $\eta = 0.55$  的線圈,在  $\bar{F}_0 = 450$  高斯時,得到 56 微伏(峯值)的輸入訊號;按式(9)計算應為 60 微伏(峯值)。可見實驗值和理論值相當符合。這種符合反映在極化磁場衰減之後,總磁矩  $\mathbf{M}$  能夠保持在和  $\mathbf{H}_0$  垂直的方向。

### 4. 探頭旋轉

在旋轉坐標上,總磁矩  $\mathbf{M}$  的運動方程為

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = \gamma_p \left[ \mathbf{M} \times \left( \mathbf{H}_0 + \frac{\omega_R}{\gamma_p} \right) \right],$$

$d/dt$  為旋轉坐標上對時間的微商,因此在旋轉坐標上可以看做磁矩受到一個附加

磁場

$$\Delta H = \frac{\omega_R}{\gamma_p}$$

的作用,相应的附加进动频率为

$$\Delta\omega_L = \gamma_p \cdot \Delta H = \omega_R. \quad (10)$$

可見,如果探头相对地面有轉动,而角速度在磁場  $\mathbf{H}_0$  方向投影不等于零,則測量的进动频率也将有  $\Delta\omega_L$  的变化。在实验中,当探测线圈旋轉的时候,样品也跟着旋轉,这是否也会使訊号频率发生变化?由于样品中原子核和晶格沒有超精細耦合,样品整体的轉动不引起自旋方向的变化,因此,旋轉整个探头(包括样品)和单独轉动线圈是一样的,仍然会引起訊号频率的变化。

为了观察探头旋轉对訊号频率的影响,我們做了下面的实验:把质子进动訊号接到示波器的  $y$  軸輸入,把另一个音频振荡器的輸出訊号接到  $x$  軸輸入;調节振荡器的频率,使荧光屏上出現的李薩茹图为一个稳定的椭圆,然后轉动探头,观察椭圆軸搖摆的次数,据此可以估計出进动频率增減的数值。后来我們又用测频仪器直接測量了这种频率变化。从实验結果看来,频率的增減和轉动方向的关系是和式(10)一致的。例如用水做样品时,实验观察到,当线圈轉动方向和磁場一致时,频率增高,反之則频率降低,这和  $\gamma_p$  为正值相符合。显然,上述这种实验可以用来决定原子核迴旋磁比  $\gamma_1$  的正負号(即决定磁矩的正負号),在可以找到原子核自由进动訊号的条件下,这是一种最直接和最簡便的方法。

利用质子自由进动测磁場时,如果探头的运载工具本身有巔簸,轉弯或旋轉,将造成測量频率的变化。按式(10)来估計,当探头在磁場方向的角速度分量为 0.3 弧度/秒,測量誤差将达  $1\gamma$ , 因此,在有轉动的时候还必须根据式(10)把频率讀数校正为地面坐标的拉摩进动频率。

除了上述实验外,我們对輻射阻尼效应也做了初步的观察,看到了它对訊号衰減有显著的影响。

#### 四、野外测磁場和探测磁性物质影响的实验

为了对仪器的实际应用做一个初步的考驗,我們做了一次水上的测磁实验,主要有以下結果:

##### 1. 探头运动的影响

当探头放入水中使用时,水浪冲击并不增加放大器噪声輸出,但是频率讀数在同一地点重复性比在地面定点測量(在地面測量短期重复到第六位)差一些。如果把探头拉动,測量它通过某一个固定点时的质子进动频率,起初发现讀数的重复性更差,甚至第四位也不重复。这是由于水浪的冲击或拉动探头时,探头除了移动之外,还产生一些无規律的轉动,因而引起測量频率的变化(見第三节第 4 部分的討論)。后来我們加了一些稳定的装置,可以使频率讀数的重复性得到改善(在第五位重复)。

##### 2. 磁性物质的影响

为了考驗我們的仪器,我們用磁性物质或用电流使待测磁場产生一个微小的已知变化,用质子进动测磁仪来測量磁場变化。表 4 是由质子自由进动訊号频率的变化所得出

的磁場變化(第二行  $\Delta H_{\text{實}}$ )。這種變化是由改變探頭和一個 10 厘米直徑鐵球之間的距離來產生的，距離是沿着待測磁場的方向測量的。假定鐵球在磁場中均勻磁化而計算出的磁場變化(第三行  $\Delta H_{\text{計}}$ )與實驗值是很符合的，當時的測磁準確度為  $\pm 2.5\gamma$ 。我們還安裝了平行導線並通過一定的電流，這樣產生的磁場變化是可以計算的，計算的結果和實驗測量的結果在儀器誤差範圍內完全符合。

表 4 直徑 10 厘米的鐵球在探頭不同距離引起的磁場變化

距離(米)	70	100	130	160	230
$\Delta H_{\text{實}} (\gamma)$	73	27	15	10	0
$\Delta H_{\text{計}} (\gamma)$	73	25	11.5	6	0.1

在水上實驗時，我們還在離一艘三噸鐵船不同距離處，測量它所引起的磁場變化(相對於沒有鐵船的磁場而言)。從表 5 可看到，在 47 米的距離，仍能看到 1—2 $\gamma$  的磁場變化。這超過了我們的預計。我們還在同一地點改變船頭的方向，測量磁場的變化(表 6)，觀察到船頭指南或北，不但磁場變化較預期為大，而且  $\Delta H$  的符號也隨船頭的指向而有所不同。後來證明這是船上發電機中的永久磁體引起的。從表中還可以看到，船頭兩種不同取向所引起的磁場變化符號雖然不同，但數值却很接近。這說明永久磁體對磁場的影響比船身磁化的影響大很多，因為鐵磁體在均勻磁場中的磁化和鐵磁體的取向無關(不計剩磁效應)。

表 5 鐵船與探頭在不同距離時的磁場相對變化

距離(米)	12	18	22.5	30	40	47
$\frac{\Delta H}{H_0} \times 10^8$	120	44	22	12	6	5

數據誤差：表中在同一地點的數據都是經過五、六次的重複測量，重複性誤差小於  $\pm 0.5$  (相當於  $\pm 0.25\gamma$ )。但在不同距離測量時，由於固定船的位置及測量距離等約需幾十分鐘，根據過去夜間的測量，地磁的變化之讀數約為  $\pm 3$  (相當於  $\pm 1.5\gamma$ )。因此最後兩點的數據有較大的相對誤差，但船對地磁場的影響仍然是明顯的。

表 6 船頭不同指向相應的磁場變化

船頭指向	北	南	西
距離(米)	24	25	27
$\Delta H (\gamma)$	16	-15.7	-9

此外，我們還安裝了一台調頻發射綫路，載波頻率約 48 兆赫茲，在野外發送質子進動訊號，並在距 500 米的實驗室中進行接收和測頻。經過測量，其訊號噪聲比和測頻準確度都保持原有的水平。發射綫路的安裝使得測頻系統可以分離，大大減輕了野外的探測設備。這對於飛行探礦或大面積地磁測量有實際的意義。

## 五、儀器的測頻部分

測磁儀的頻率測量是採用比較法<sup>[7]</sup>。在待測頻率為  $\nu_x$  的訊號中截取固定的波數  $n_0$



本工作开始时,地磁测量方面的仪器是从北京大学借来的,这对我們初期找訊号的工作是有帮助的。北京大学的周志尧同志和楊富民同志也参加了初期的电子学工作和一些实验工作。我們十分感謝已故 Ф. Е. Скрипов 副教授在我們工作初期的热心帮助和討論。他还提供我們直筒式探头补偿綫圈的具体計算。在实验开始后的一段时期內,刘殿臣、丁定、朱蓮等同志在实习期間也参加了一些实验工作。在此一并表示感謝。

### 参 考 文 献

- [1] Packard, M., Varian, R., *Phys. Rev.*, **93** (1954), 941.
- [2] Robert, Brown, J. S., *Trans, AIMME*, **207** (1956), 263.
- [3] Abragam, A., Combrisson, J., Solomon, I., *Compt. Rend.*, **245** (1957), 157.  
Beuder, P. L., *Archives des Sciences*, **13** (Sperial issue) (1960), 629.
- [4] Bloch, F., *Phys. Rev.*, **70** (1946), 460.
- [5] Purcell, E. M., *Phys. Rev.*, **69** (1946), 681.
- [6] Ramsey, N. F., *Molecular Beams*, Oxbord University Press, 1956, p. 149.
- [7] Walters, G. S., Francis, P. D., *J. Sci. Inst.*, **35** (1958), 88.
- [8] Andrew, E. R., *Nuclear Magnetic Resonance*, Cambridge University Press, 1955, p. 90.

## AN EXPERIMENTAL STUDY OF PROTON FREE PRECESSION IN A WEAK MAGNETIC FIELD AND ITS APPLICATION TO FIELD WORK

WU TSANG-SHENG TAI KWANG-SI LIU KONG-CHUN TING YU

### ABSTRACT

A Packard-Varian type experiment was done, in which the free precession of proton magnetic moment about a very weak magnetic field was observed, by first lining up the protons in an aqueous sample with a separate magnetic field and then allowing them to execute the free precession. In our experiment the studies on the non-adiabatic process of withdrawing the polarizing field, the absolute value of the signal strength and the reduction of sample size to minimize the effect of inhomogeneity of the magnetic field were emphasized. The effect of rotating the sample coil upon the measured signal frequency was also noted, and it is pointed out that this is the most direct way to determine the sign of the nuclear magnetic moment.

The phenomenon of proton free precession in weak magnetic field has important practical applications in earth's magnetic field measurement at high altitudes, in geological prospecting, and in petroleum recovery from oilfield rocks. The present studies may be helpful in solving the problems likely to occur in these applications.

In order to check the performance of the entire experimental set-up for field works, and especially to investigate the influence of magnetic substances in surroundings on the signal frequency, a series of experiments was carried out on a lake. Affirmative results were obtained. The relative accuracy of the measurement of the precessional signal frequency, which in turn determines the magnetic field strength, is  $1 \times 10^{-5}$ .