

光泵磁共振实验

[实验背景]

最初利用光谱学的方法研究物质内部结构，但光谱学方法受仪器分辨率的以及谱线宽度的限制。在此情况下发展了波谱学的方法，它利用物质的吸收或发射光共振研究原子的精细结构、超精细结构以及因磁场存在而分裂形成的塞曼能级，提高了分辨率。

一般来说，在恒温条件下，磁共振涉及的能级上粒子分布差别很小，偏振度几乎也较小，因此核磁共振波谱学方法也有如何提高信息强度等问题。对于固态和液态光谱学，由于样品浓度大，配合高灵敏度的电子探测器，可以有足够强的共振信号，一般可用核磁共振(NMR)和电子顺磁共振(EPR)技术。而对于气态自由原子，样品浓度降低了几个数量级，必须引入新的技术。

A. Kastler 等人提出用圆偏振光激发气态原子以实现原子在研究时间内的布居差(偏极化)，并以泵浦光的强度变化来探测射频场激发的原子磁共振，巧妙地用频率 10^{14} Hz量级的光信号的变化来探测共振频率在 10^6 Hz量级附近，大大提高了探测灵敏度，可以在1966年获诺贝尔物理学奖。

应用：精测弱磁场，测量原子磁矩、自因子、射线寿命、射线结构等。

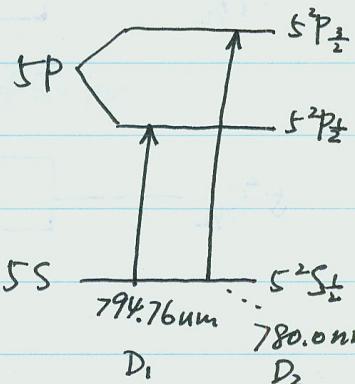
[实验原理]

(一) 铷(Rb)原子的原子基态及最低激发态能量。

Rb：一行碱金属，基态 $5S_{\frac{1}{2}}$ ， $L=0$ ， $S=\frac{1}{2}$

经过 $L-S$ 耦合形成 J ， $J=L+S, \dots, |L-S|$

最低激发态 $5^2P_{\frac{1}{2}}, 5^2P_{\frac{3}{2}}$ 的双重态，仅有碱金属双线



对于 L-S 耦合. (价电子)

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{P}_J = -g_J \frac{e}{2m} \vec{P}_J \\ g_J = \frac{3}{2} + \frac{1}{2} \left(\frac{\hat{s}^2 - \hat{l}^2}{\hat{j}^2} \right) = \frac{3}{2} + \frac{S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)} \end{array} \right.$$

g_J 是精细因子, 是反映物质内部运动的主要物理量 $\underline{g_L=1}, \underline{g_S=2}$
序走电子总角动量.

* 川上走轨道-自旋耦合.

由于核具有自旋与磁矩 \vec{M}_I , 将 I 耦合进来, I-J 耦合

$$\text{有: } \left\{ \begin{array}{l} \vec{M}_F = -g_F \frac{e}{2m} \vec{P}_F \\ g_F = g_J \left(\frac{1}{2} + \frac{J(J+1) - I(I+1)}{2F(F+1)} \right) \end{array} \right.$$

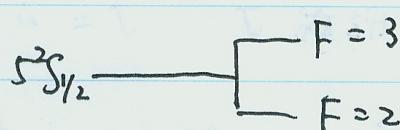
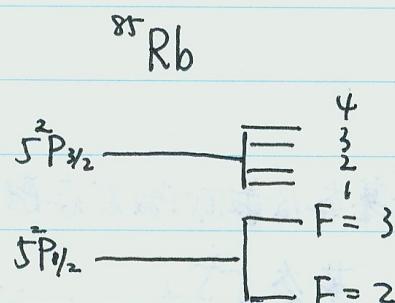
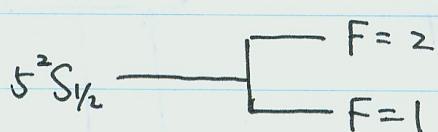
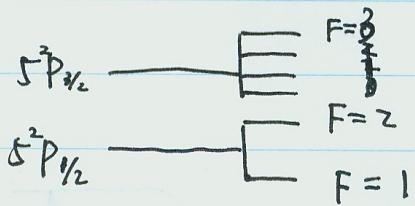
* Rb 元素在自然界有两种同位素

^{87}Rb (27.85%) ^{85}Rb (72.15%)

$$\Downarrow \quad \begin{array}{l} I = \frac{3}{2} \\ I = \frac{5}{2} \end{array}$$

$$F = |I+J|, |I+J-1|, \dots, |I-J|$$

如 ^{87}Rb I-J 耦合精细能级



* 加上磁场后精细结构进一步发生 Zeeman Effect

两个超精细能级分裂成 $2F+1$ 个能级.

两塞曼子能级能量差相等 ($\Delta M_F = \pm 1$)

$$\Delta E = g_F \mu_B B$$

为何略去 B ? 实验中 B 的大小与地磁场的大小可比拟,

估算: $\Delta E \approx \mu_B B = \frac{e}{4\pi m} h = 1.4 \times 10^{-10} \text{ Hz} \cdot h$

$$\approx \underbrace{10^4 \text{ MHz}}_{\text{MHz}} \cdot h$$

(2) 精子数的偏振化 (塞曼效应)

(1) 一定频率的光(电磁波)可引起原子的能级跃迁.

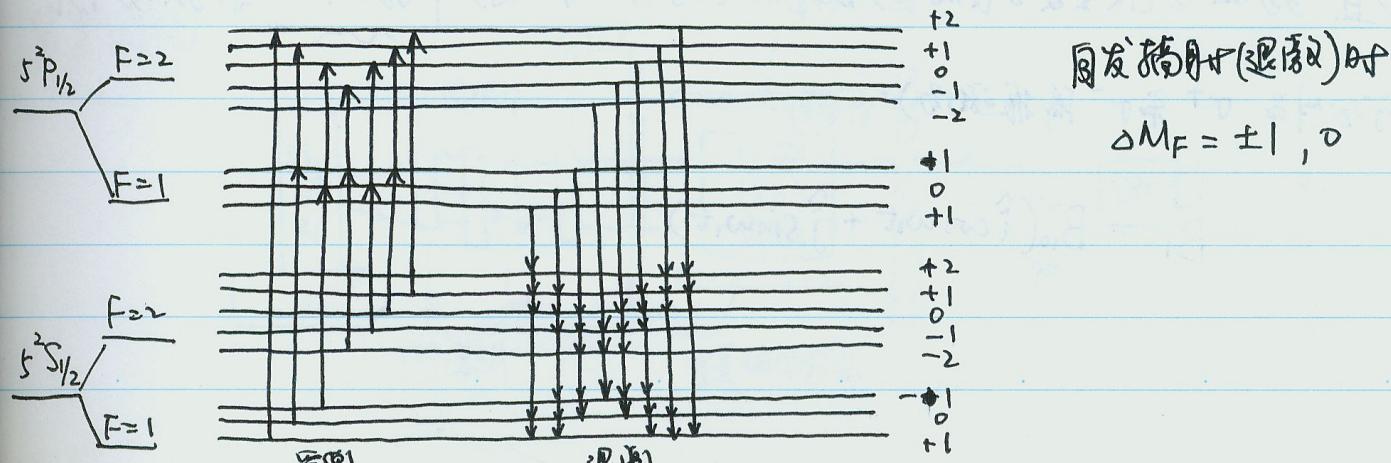
(1) QM 角度, 相当于 $\hat{H} = \hat{H}_0 + \hat{H}'$, $\hat{H}' = -\vec{\mathbf{A}} \cdot \vec{\mathbf{E}}$

$$W_{LL} = \frac{\pi}{2\hbar^2} e^2 E^2 |W_{L'F'M'F, LM_F}|^2 \delta(\omega_{LL} - \omega)$$

可得选择定则:

^{87}Rb 元素原子反力, σ^+ (左旋圆偏振光, 角动量为 \hbar) DAP,

$$\Delta L = \pm 1, \quad \Delta F = \pm 1, 0, \quad \Delta M_F = \pm 1$$



从而是激时 $M_F = +2$ 约近几率为 0

退激时 有新的原子退回 $M_F = +2$

故 经过若干循环后, $M_F = +2$ 子能级上的粒子数大大增加

大量粒子被“捕获”到 $F=2$, $M_F = +2$ 的子能级上, 从而实现偏极化

(1) 坐标 - 选择粒子捕获, $M_F = -2$ 子能级上)

(三) 振荡时间 捕获过程

捕获过程: 子能级非热平衡状态趋向热平衡的分布状态

被捕获后各能级处于非平衡状态

平衡态 玻尔兹曼分布

$Rb \leftrightarrow Rb$ 原子间碰撞 Spin-spin 支持加强 (弹性)

Rb 原子与容器壁之间碰撞

$\times Rb$ 原子与缓冲气体间碰撞 (缓冲气体磁矩小 (N_2) 且 Rb 原子的磁矩小
偏极化几乎不受影响)

实验中, 充入缓冲气体延长偏极化捕获时间

(四) 塞曼子能级间的磁共振。

捕获后 ^{87}Rb 原子饱和后 (偏极化), Rb 蒸汽不再吸收 D_1 原子光, 从而辐射最强

在垂直强磁场 (使塞曼分裂的场) \vec{B}_0 的方向加一圆频率为 ω_1 的射频场 \vec{B}_1

(\vec{B}_1 可分解为 σ^+ 和 σ^- 偏振磁场)

$$\vec{B}_1 = B_{10} (\hat{i} \cos \omega_1 t + \hat{j} \sin \omega_1 t)$$

当发生共振时， ω_1 满足

$$\hbar\omega = g_F \mu_B B_0 \quad (*)$$

$$\text{即 } \frac{\hbar}{2\pi}\omega_1 = \Delta E_{mp} = g_F \mu_B B_0$$

此时发生共振， $M_F = \pm 2$ 的粒子大量跃迁回 $M_F = +1$ 。（依次跃迁至 $0, -1, -2$ ）
同时又重新偏极化，此时的透射率减少（Rb 原子偏极化未饱和又重新吸收入射光）
直到达到新的平衡。 $(D_1\sigma^+)$

由(*)可知有两种控制磁共振的方法：

① 改变 ω_1 ，固定 \vec{B}_0 ：扫描法

② 固定 ω_1 ，改变 \vec{B}_0 ：扫描法

本实验采用的是 扫描法

手写批注：
手写批注！

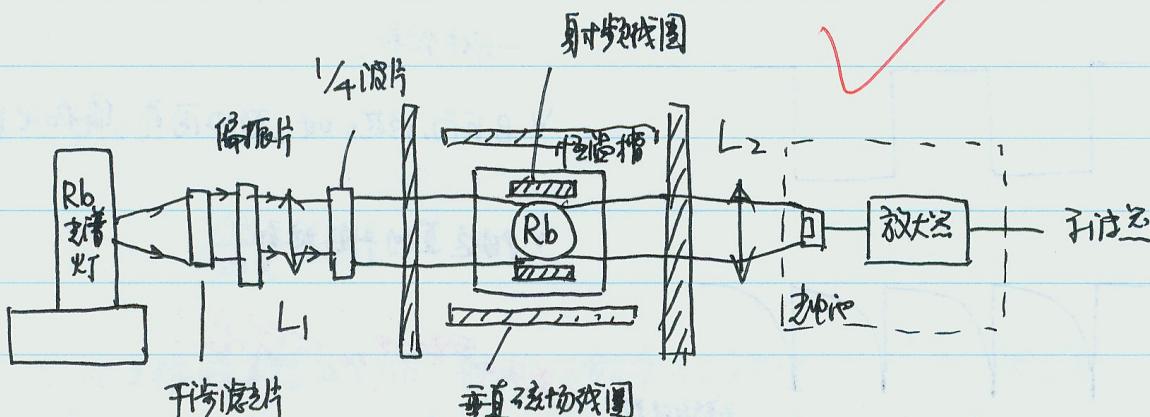
(五) 支持例 (妙)

射到样品上的 $D_1\sigma^+$ 光既起到 光抽运作用，其透射光又起到 探测光作用。

测量探测光的变化 (扫描场) 即可观察光抽运磁共振。

射频光 $10^6 \text{ Hz} \rightarrow$ 支持 10^{14} Hz 信号，信号功率增加了 $7 \sim 8$ 倍

装置简图：



器件作用：

干涉片：去除 D_2 线

1/4 波片： D_1 线圆偏振

L_1 ：产生平行光， L_2 ：会聚平行光束光路。

两个 Helmholtz 线圈：

竖直：抵消地磁场

水平：产生 B_0

射频线圈：产生拘场。

射频场 \rightarrow 拘场线圈与水平场平行，家

石磁场 (Helmholtz) 中央恒磁场区：

$$B_0 = \frac{16\pi}{5^{3/2}} \frac{N}{r} I \times 10^{-3} (\text{Gs})$$

N 为匝数， r 为半径 (m)， I 为电流 (A)

[实验方法]

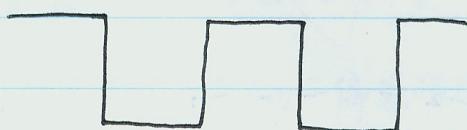
1. 改变信号观察。

改变了哪些条件？

我以为这里是记录！

拘场：方波

拘场

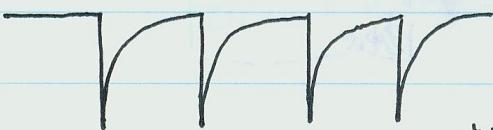


一开始饱和。

↓ B 反向，经过 0 时，饱和消失，偏振消失

↓ 拘场直到平衡饱和

信号

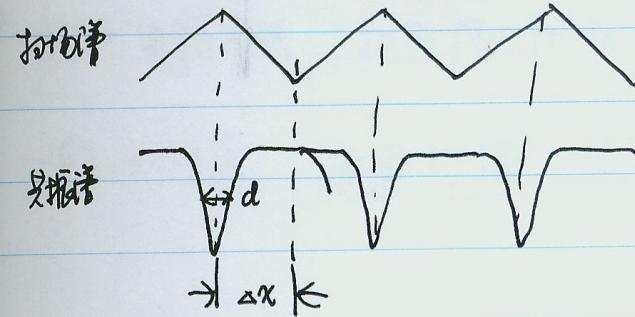


探测电容中的 RC 常数！

衰减过程。

2. 磁共振信号的观察

扫描：3角波。



$$\text{表达式 } h\nu = g_F \mu_B B \text{ 时有共振。}$$

↓ 偏移量减小，反射率减小。

↓ 共振信号。

$\otimes\otimes$ 共振峰对应扫描峰

3. 测量 g_F 因子：

实验中是这样：

$$B = B_0 + B_{\text{扫描}} + B_{\text{梯度}}$$

B_0 可通过改变 I 的方向，改变正负，则有

$$\left\{ \begin{array}{l} B_+ = B_0 + B_{\text{梯度}} + B_{\text{扫描}} \\ B_- = -B_0 + B_{\text{梯度}} + B_{\text{扫描}} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} h\nu_1 = g_F \mu_B B_+ \\ h\nu_2 = g_F \mu_B B_- \end{array} \right.$$

$$\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} h\nu_1 = g_F \mu_B B_+ \\ h\nu_2 = g_F \mu_B B_- \end{array} \right.$$

$$\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} h\nu_1 = g_F \mu_B B_+ \\ h\nu_2 = g_F \mu_B B_- \end{array} \right.$$

$$\Rightarrow g_F = \frac{h}{\mu_B B_0} \frac{\nu_1 + \nu_2}{2}$$

(√)

4. 共振线宽测量

$$\delta = \frac{\Delta\nu}{\Delta x} d$$

$\Delta\nu$ 为使共振峰平移 Δx 的射频场频率的改变量。 d 为表高宽

5. 测地磁场水平分量

拍场，水平场，地磁场水平分量应相同，调节射频场 v_1 ，
共振后得到 v_1

使拍场，水平场反向，
共振后得 v_2

$$\text{则 地磁场水平分量 对频率 } v = \underbrace{\frac{v_1 - v_2}{2}}$$

$$B_{||} = \frac{h}{\mu_0 g_F} \underbrace{\frac{v_1 - v_2}{2}}$$

[实验内容]

1. 粗调走步，旋转偏振片，选择最小水平场和垂直场及合适的拍场方向和大小。

优化走步，使拍场信号最大

2. 分别以直波、调波拍场，观察不同条件下信号的形状与幅度变化，得出结论。

3. 加上射频场，改变 v 调出共振信号，测量 δ ，并计算地磁场。

4. 测量地磁场水平分量

5. 测量共振带宽。

No.

Date

4.11

Time 10:10

开始调整电路。

* 打开电源开关，加热样品匣和 Rb 灯

一段时间后，泡温灯温灯先亮起。

灯已呈玫瑰紫色。稳定。

泡温灯温度

实验的影响

讨论。

地磁场 $\sim 10^{-2} \text{ mT}$.

该实验 B_0 约等于 10^{-2} mT 相当。

八峰八谷。

多强磁场？

不可忽略 10^{-2} mT 地磁场影响。

~~调整之路~~

考虑哪些因素，怎么调整？得到什么？

~~实验~~

在池上加一指南针，先断开电源，确定 N-S

通电源，观察 N-S 针摆动

改变线圈使 N-S 逆向。

打开扫描、水平场，垂直 off

0.022A

① 调隔振片，使信号最大。

② 调整 L_1, L_2 高度，~~使信号最大~~

~~前向位置~~

~~使信号最大~~

方波：半周期还是全周期？

扫描：20.00 ms/格

$\times 2.5$ 格

$$T = 50 \text{ ms}$$

$$\Rightarrow f = 20 \text{ Hz}$$

有无扫描信号最大位置

* 扫描幅度对扫描信号。

①
②

No.

Date

B₀: 水场调节.

B_{θz}: 抱场调节

B_{θz//}: 垂直方向水平分量.

$$B = B_{\theta z} + B_0 + B_{\theta z//}$$

这部份实验，如何下?

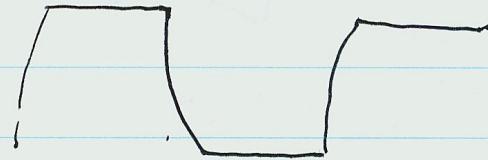
①. 垂直场 I 的调节. 抱场方向不等于 ± 0.098

单位: I : (A)

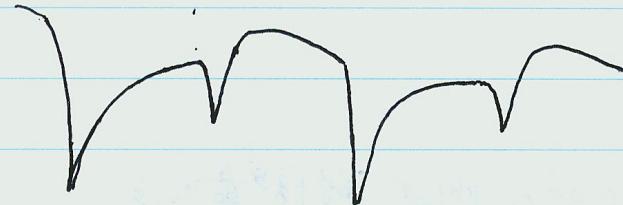
θ

0.018

波形:



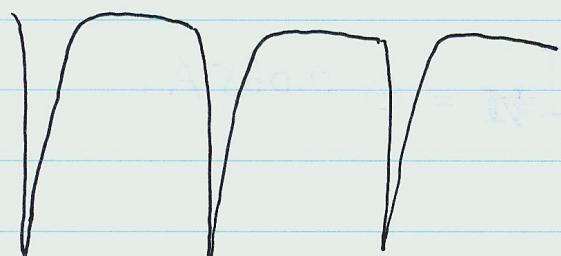
saved (2)



θ 0.068

信号幅度大

而且周期变短
超过了相干.



saved (3)

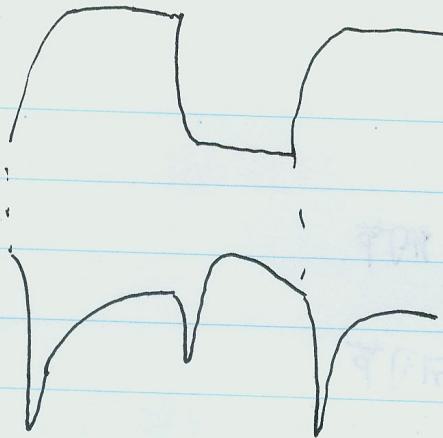
No.

Date

Saved (4)

 $\Theta \quad 0.104$

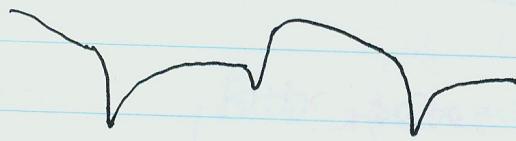
信号又重新变大
一个周期内有了信号强度不同。



将垂直场反向

 $\oplus \quad 0.026$

无波器刻度



Saved (5)

 $\oplus \quad 0.101$ 

Saved (6)

信号减弱？还有什结果？

重新回正向。

用 V_{pp} 在 $\Theta 0.06 A$ 附近测信号最大值。

$$V_{pp\ max} = 0.824 \text{ mV}$$

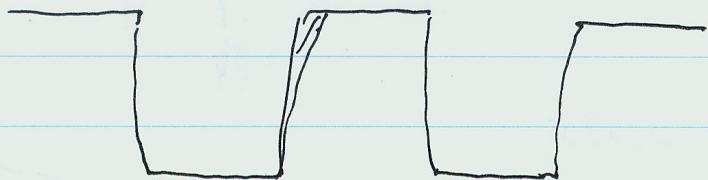
$$V_{f2} = ?$$

$$\text{由图 } I_{\text{基}} = \Theta 0.065 A.$$

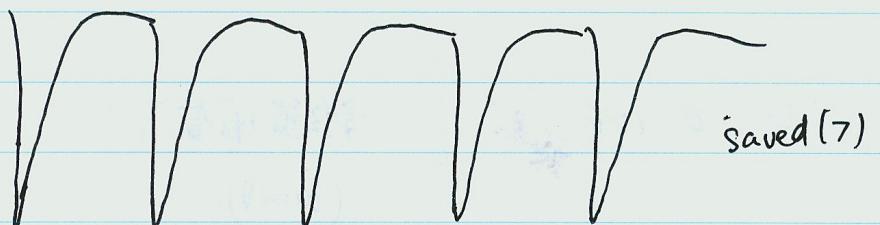
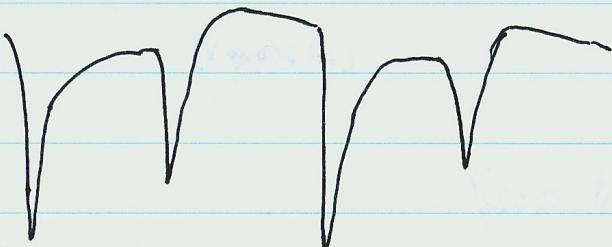
I: (A)

② 改变水平场，场强方向 \oplus 磁场 \ominus $0.065 A$.

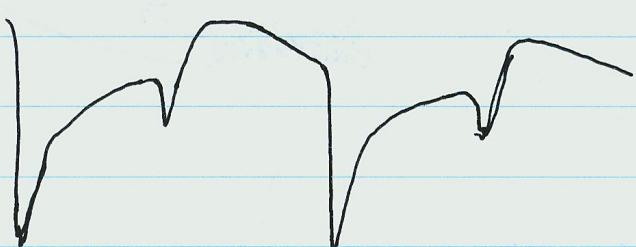
(波形)

 $\Theta = 0.019$  $V_{pp} = 752 mV$

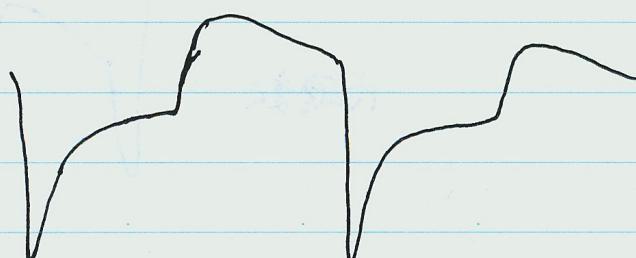
两个信号强度几乎一样。

 $\Theta = 0.052$ 

saved (8)

 $\Theta = 0.058$ 

saved (9)

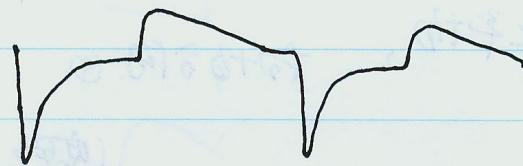
 $\Theta = 0.062$ 

saved (10)

No.

Date

θ 0.069



(11)

θ 0.075



(12)

θ 0.104

高幅低頻

(10mV)



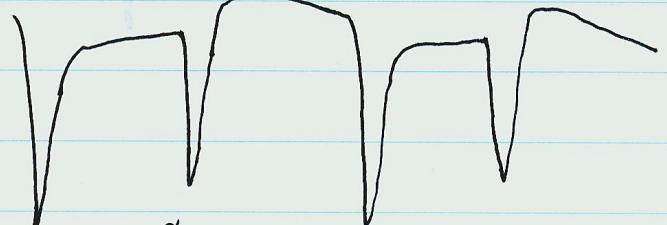
(13)

反丁圖

(↑ 200mV)

⊕ 0.028 0.027

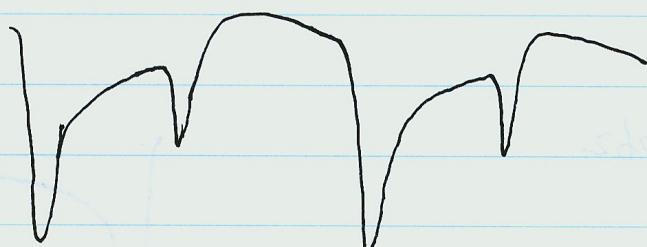
高幅低頻



(14)

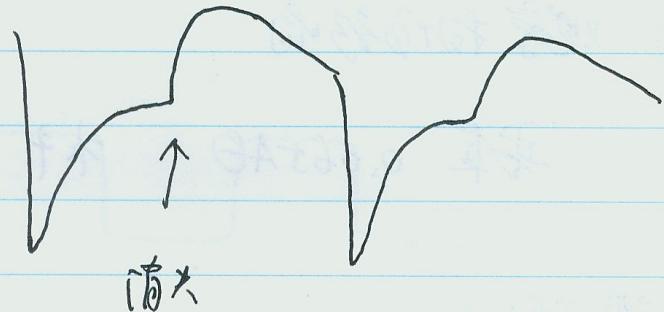
⊕ 0.033

高幅高頻



(15)

④ 0.03)



(16)

④ 0.040



(17)

④ 0.048



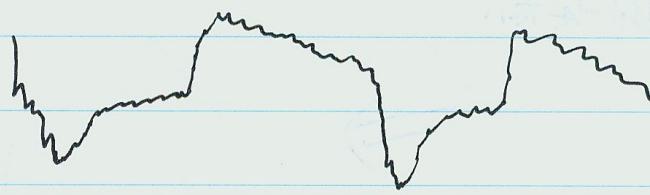
(18)

1号导联弱

5日方向趋势相同

④ 0.073

(每段波 10.0mV)



(19)

很好!

建议每部分的内容完成时，加上总结自己的“收获”。

(3) 观察磁场影响

基座 $0.065A\Theta$ 水平 $\Theta 0.026A$.

拘捕正向 \oplus

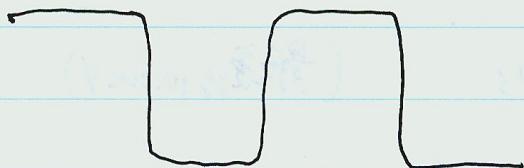
拘捕幅值较小
定量?



适度调大.



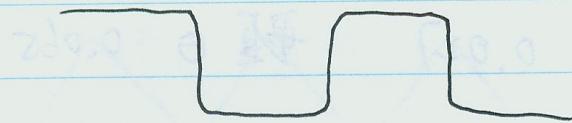
调节一定大小.



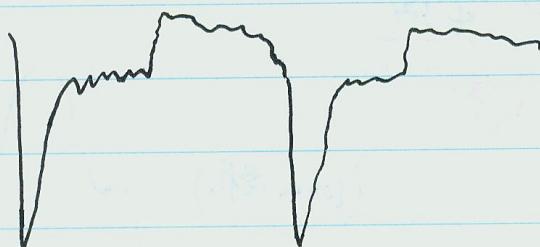
之后增大对磁场几乎没有影响.

拘掙场 ⊕

调制最大：



量程 10.0mV



且调+后，信号更上。

拘掙中幅度不同对结果的影响？

说明 拘掙 ⊕ 土地磁场 反向 ✓ 含有明显的走相延时

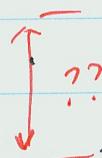
未⊕ 土地磁场 反向 ✗ ⊕ 拘掙 反向

磁共振后的观察

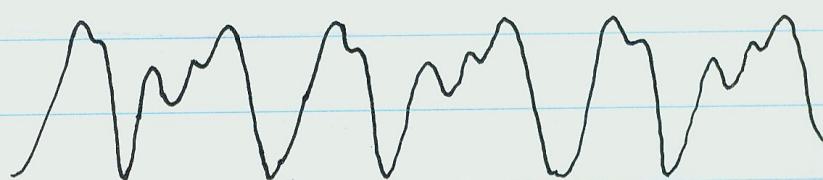
为何？

拘掙 ⊕ , 拘掙幅度 1/4 圈全合, 打开脚步频率

水平场 0.025 A



成形}.



补：三相波图形。（无负载）

水压 Θ 0.027 电压 Θ 0.065

① 物场

$\oplus \frac{1}{4}$ 圆

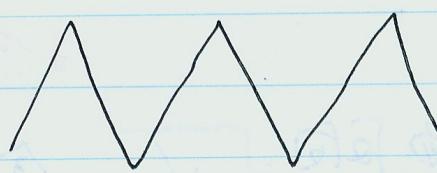
不准使用！

(100mV/格)

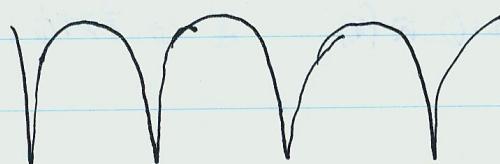


saved (25)

$\oplus \frac{1}{2}$ 圆



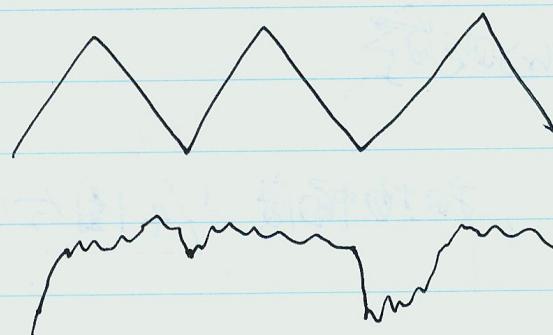
(20mV)



saved (26)

$\oplus \frac{3}{4}$ 圆

(10mV)

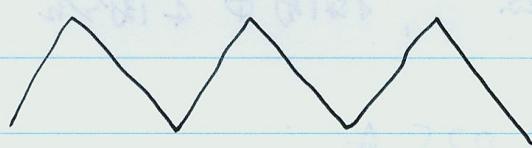


反向 Θ

N_P没有信号，只是某个条件下结果还是一直如此？

② 水中调整. (场强 $\oplus \frac{1}{4}$ 圈/分. 磁 0.065 A)

① 0.019



② 0.029

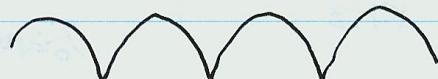


双信号消失.

增大水平场 信号越小.

减小 \oplus 信号小.

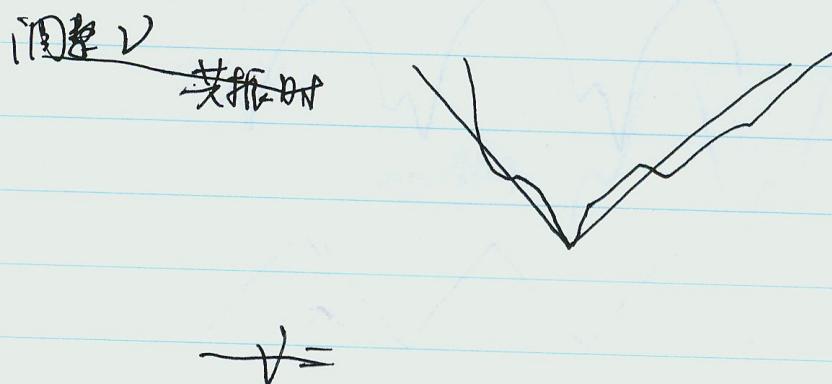
增大水平场, 信号越小.



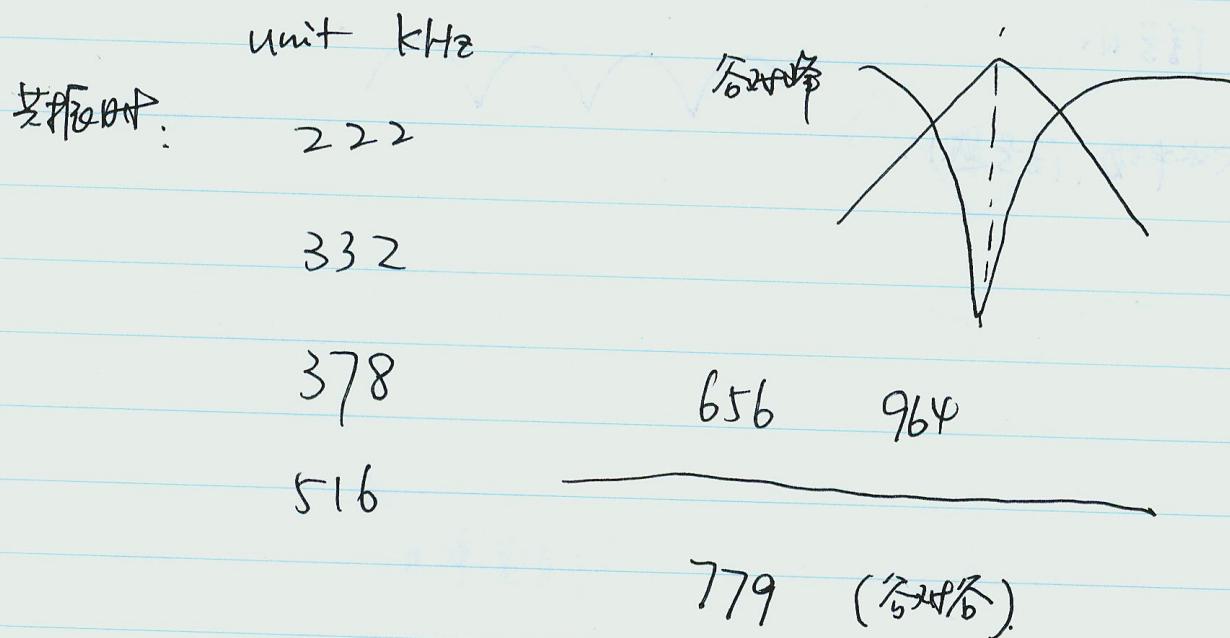
磁共振 演示

打开信号发生器，扫场 \oplus 1 圈左右 磁场 \ominus 0.065 A

水平 \ominus 0.025 A



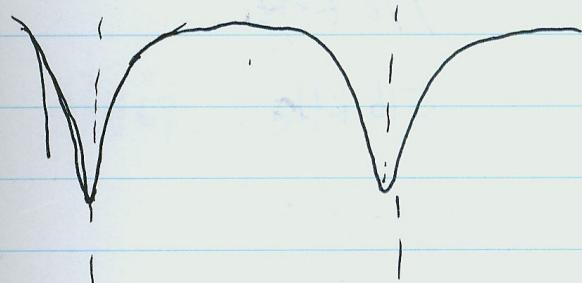
水平 \oplus 0.25 A



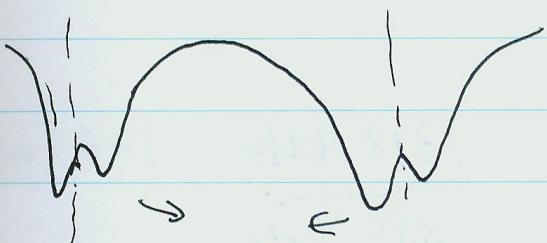
如果出现多个可能实验值，难以区分哪个是合理值时，可以用理论公式计算。有了理论基础，再来分析这些结果会更容易理解。

~~VDE~~ 水平 \oplus 0.25A.

观察现象：



↓ 增大 f



↓ t_{ref}

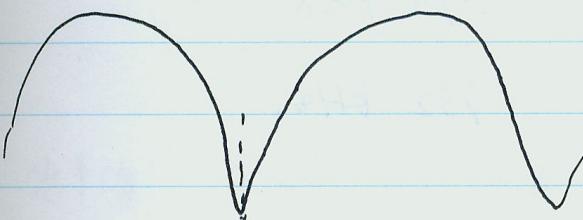
$$hv = g_F M_B (B_0 + B_{\text{散}})$$



$B_{\text{散}}=0$ 时

B_0 起先振幅

$B_{\text{散}} \uparrow$ 时 散振峰分离而变



$B_0, B_{\text{散}}$ 共同时, $f \downarrow$, 峰峰并了

变小

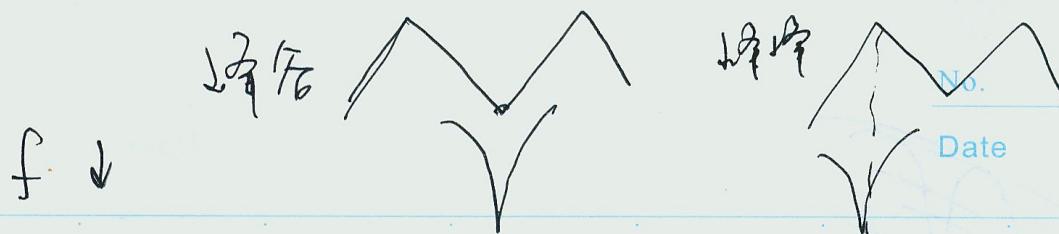
$$B = B_0 + B_{\text{散}}$$

分析很好!

乙

$B_0, B_{\text{散}}$ 反向时 $f \uparrow$

$$B = B_0 - B_{\text{散}}$$



①

$\oplus 0.25A$

峰谷

峰谷

875 kHz

583 kHz

$\ominus 0.25A$

峰谷

峰峰

993 kHz

658 kHz

峰峰

660 kHz

峰谷

770 kHz

441 kHz

516 kHz

怀疑是 ^{85}Rb , ^{87}Rb ? 如何确认是共振信号?

(2)

$\oplus 0.35A$

$\ominus 0.35A$

峰谷

1209 kHz

峰峰

1318 kHz

805 kHz

880 kHz

峰峰

986 kHz

峰谷

1098 kHz

662 kHz

732 kHz

(3) 0.449 A

 \oplus \ominus 峰 \oplus 1538 kHz峰 \ominus

1647 kHz

1023 kHz

1098 kHz

峰 \oplus 1316 kHz峰 \ominus 1426 kHz

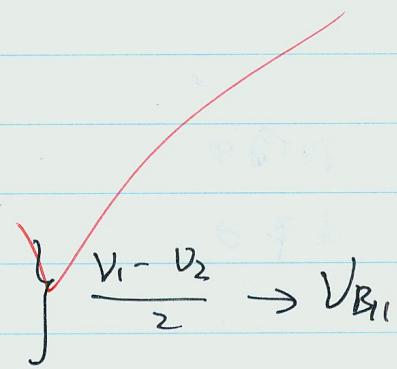
878 kHz

951

+ 地磁场 水平分量

$$\textcircled{1} \quad B_1 = B_o + B_{\text{地}} + B_{\text{地}||} \Rightarrow v_1$$

$$\textcircled{2} \quad B_2 = -B_o - B_{\text{地}} + B_{\text{地}||} \Rightarrow -v_2$$

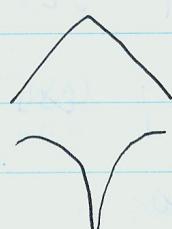
$$\frac{v_1 - v_2}{2} \rightarrow V_{B_1}$$


水滴 0.500 0.498 A.

水滴 水滴

 \ominus \oplus

峰对称



水滴 水滴

 \oplus \ominus

1804

1205

$$V = \frac{1804 - 1439}{2} \\ 2162 \\ 1439$$

~~x~~

水平 0.396A

拘束 0

1821 kHz

水平 0

1215 kHz

拘束 0

1472 kHz

水平 0

982 kHz

~~x~~ 水平

0.300A

拘束 0

1505 kHz

水平 0

1001 kHz

拘束 0

1153 kHz

水平 0

772 kHz

水平 0 拘束 0 0.500A

1) 2162 1942

5) 483 433

2) 1439 1301

6) 361 323

3) 1086 766 970

7) 541 485

4) 724 647

8) 240

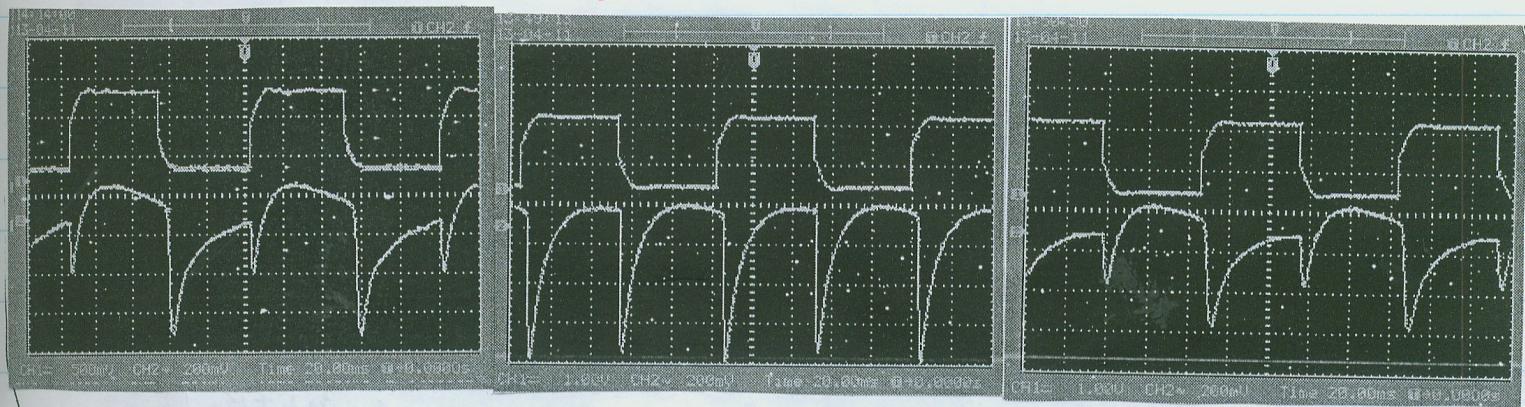
~~(x)~~ 4.11

数据处理了噪音部分。

1). 垂直场对信号(支柱附近信号)的影响:

撤销地磁场上方向分量

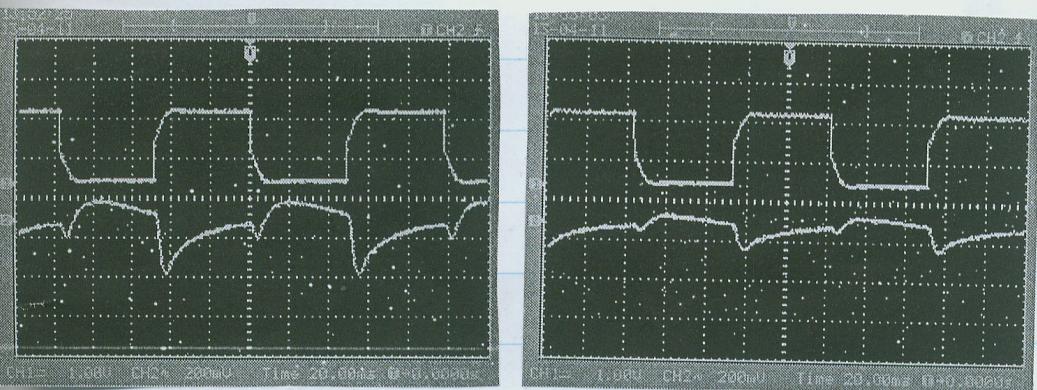
拘物, 水平场 方向, 大小保持不变, 拘物方波,
定量



$$I = -0.018A$$

$$I = -0.068A$$

$$I = -0.104A$$



$$I = +0.026A$$

$$I = +0.101A$$

- + 取向^m定义!

可见当 $I = -0.068A$ 附近时, 有最大的支柱附近信号。调整后 $I = -0.065A$

$$V_{pp\max} = 824 \text{ mV}$$

$$\text{代入 } B = \frac{16\pi}{5^{3/2}} \cdot \frac{N}{r} \cdot I \times 10^{-3} \text{ Gs}$$

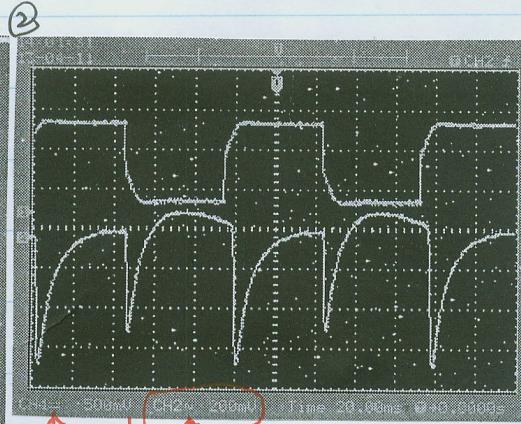
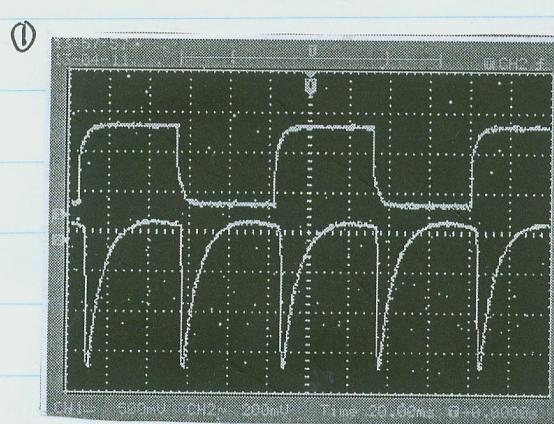
$$(N=100, r=0.1530 \text{ m})$$

$$B_{\perp} = \frac{16\pi}{5^{3/2}} \times \frac{100}{0.1530} \times (-0.065) \times 10^{-3} = 0.191 \text{ Gs} = 0.0191 \text{ mT}$$

+ 方向与 B_{ext} 同向, - 方向与 B_{ext} 反向均可计算。

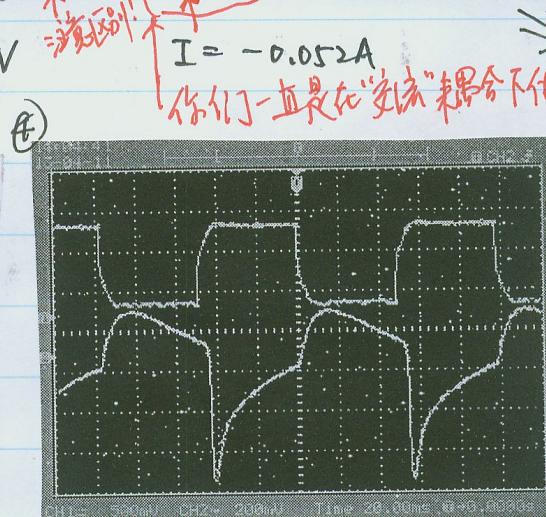
2) 水平场对翻转信号影响

恒定场强，方向、^{幅度}不变，垂直场 $I = -0.065A$



两个吸收峰的高度相等

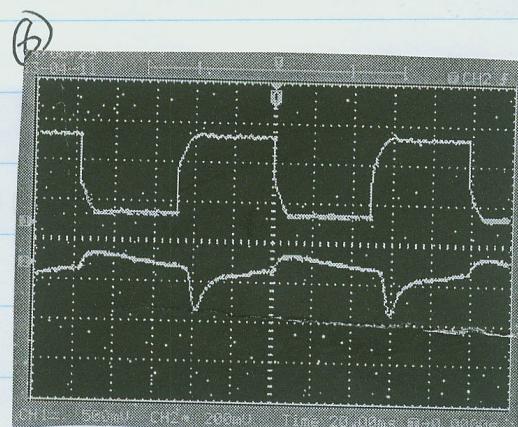
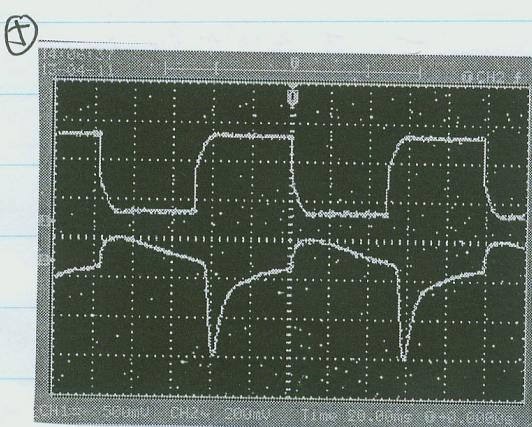
$$\begin{aligned} \Rightarrow ① & |B_{\text{水平}} + B_{\parallel} + B_{\perp}| \\ & = |+B_{\text{水平}} + B_{\parallel} + \cancel{B_{\perp}}| \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} \Rightarrow ② & |B_{\text{水平}} + B_{\parallel} + B_{\perp}| \\ & > |B_{\text{水平}} + B_{\parallel}| \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow ④ & |B_{\text{水平}} + \vec{B}_{\parallel} + \vec{B}_{\perp}| \\ & > |\vec{B}_{\text{水平}} + \vec{B}_{\parallel}| \end{aligned}$$

同向了，平衡不再
而且，而是向更进一步
的饱和趋势

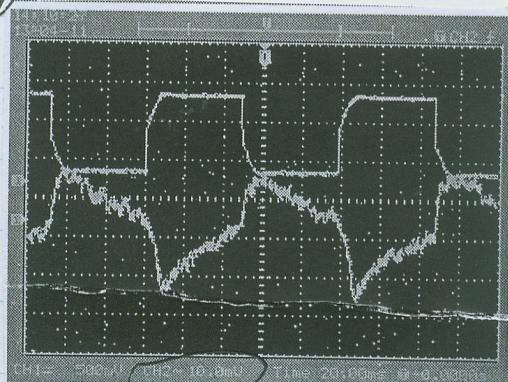


$I = -0.069A$

$I = -0.075A$

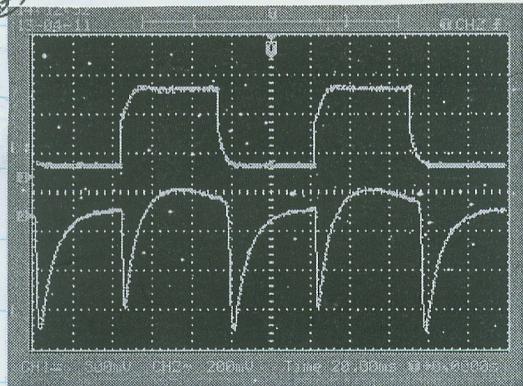
(7)

有噪声出现



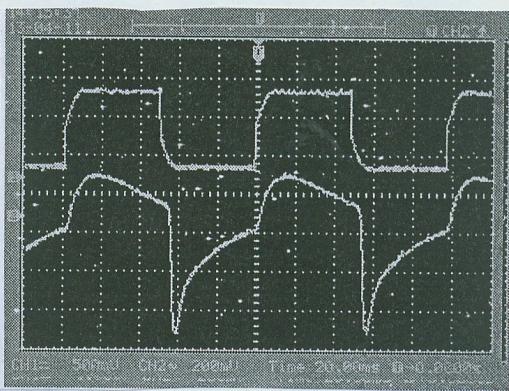
$$I = -0.104 \text{ A}$$

(8)



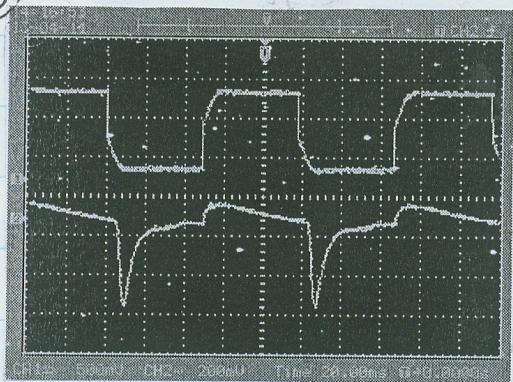
$$\xrightarrow{\text{反向}} I = +0.027 \text{ A}$$

(9)



$$I = +0.037 \text{ A}$$

(10)

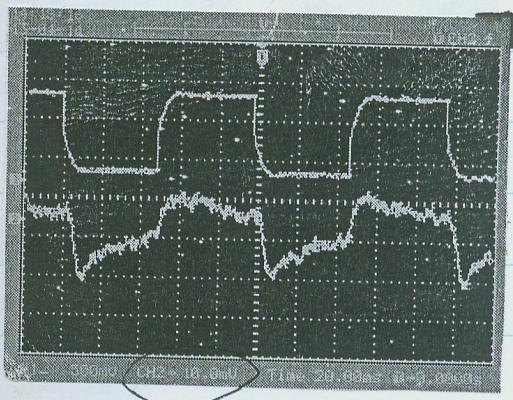


$$I = +0.040 \text{ A}$$

有振荡出现?

可能是电路的原因
这一些可能会给出非常
信服的解释。

(11)



$$I = +0.073 \text{ A}$$

结论是：

水平场电流的 \ominus 方向与 B_{ext} 方向相反

电流相对变化很小，电机速度信号变化很大。

可见物理过程灵敏

只需要分析总场(水平方向)

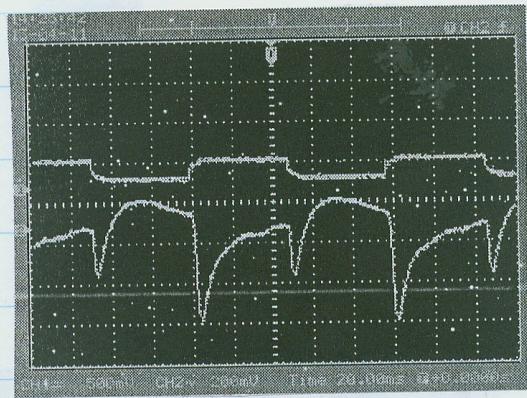
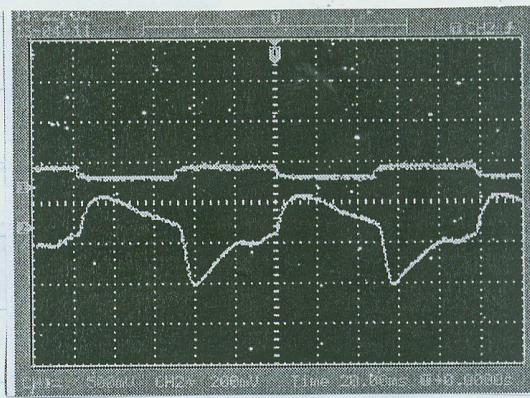
$$\vec{B}_E = \vec{B}_{\text{地磁场}} + \vec{B}_{\text{地场}} + \vec{B}_{\text{外部}}$$

- 丁波典型的如图(1) 的起始信号, B_E 在 0 和 B 的变化过程中, 希使总场有瞬时等于 0

的时刻，可以使塞曼子能级简并，偏振比消失，重新开始新的光抽运。
但当 $B_{\text{抽}}$ 的大小较大时，塞曼子能级不再简并，抽场变化改变了光抽运的饱和度而已。

3) 抽场对光抽运信号的影响。

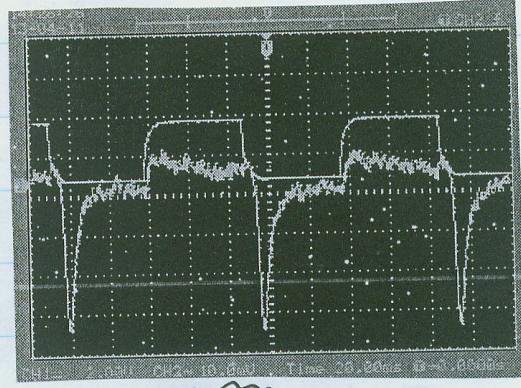
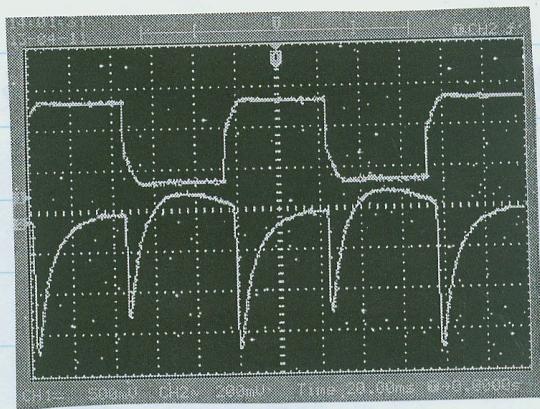
垂直场 $-0.065A$, 水平场 $-0.626A$, 方波抽场



正向，幅度较小 $\frac{1}{4}$ 圈

正向 $\frac{1}{2}$ 圈

为何从示波器上读值？



正向 $\frac{3}{4}$ 圈。

反向 最大

扫描量程 $10.0mV$

之后增加抽场方波幅度

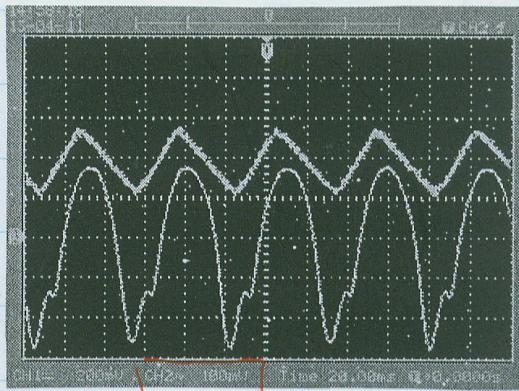
光抽运信号变大

光抽运信号没有明显变化。

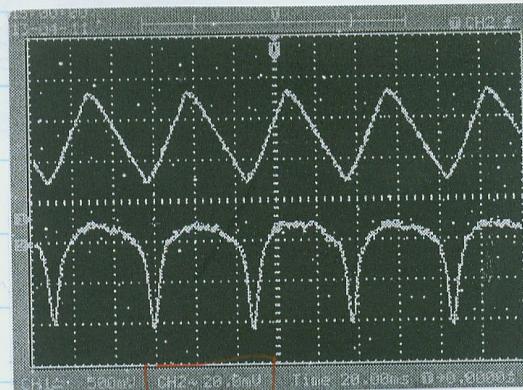
结论：正向抽场与地磁场反向，使抽场加上后，含有总场离子的瞬间，

(4) 拉场设为漏波后的变化.

① 改变拉场幅度 水平 $-0.027A$ 垂直 $-0.065A$

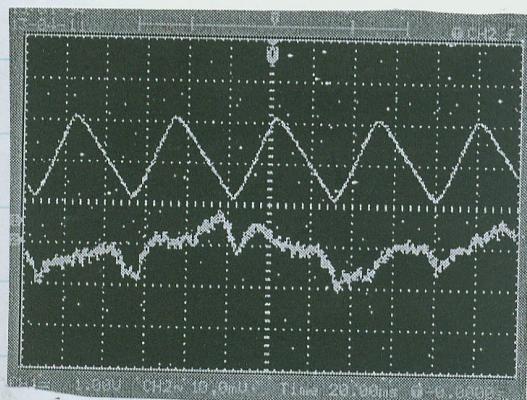


+ 1/4 圈



+ 1/2 圈

亥慢有变化, 应说明!



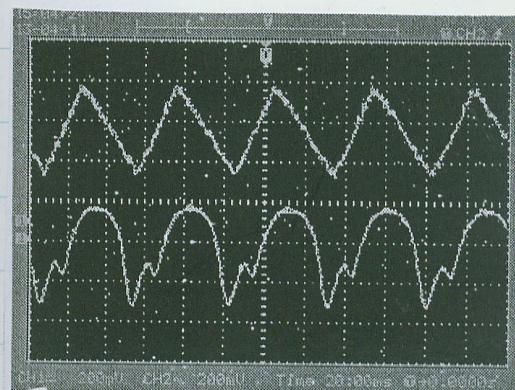
+ 3/4 圈

向几乎没有信号

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_{\parallel} + \vec{B}_{\perp} (\text{漏})$$

正向是 \vec{B}_{\parallel} 方向相反的, ^① 有两峰证明在三向拉场场向进程中经历了两次能级简并, 消除偏振化的过程与反向相比, 拉场幅度连级变化, 偏振比饱和度也会随之变化没有固定的值, 饱和区域呈弧形.

② 改变水平场, 拉场 + 1/4 圈. 垂直 $-0.065A$ 即高拉场太大会, 每次简并退偏振化的移子步, 信号始终处于高饱和状态, 反向亦是如此.

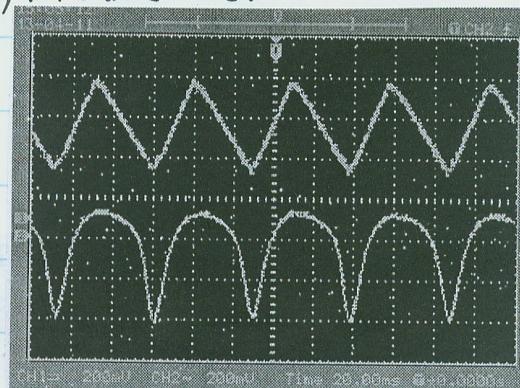


重叠.

双信号消失

$$I = -0.019A$$

对称同上



$$I = -0.029A$$

判断重叠时. f 的不确定度有多大?

正向 ① 方向 信号极+, 且电流越大, 信号越小,

(5). 加入射频场后的磁共振信号

现象：(未倒谱形成波形，更浅)

水平场： $I = \pm 0.25A$ ，垂直场： $I = \pm 0.065A$

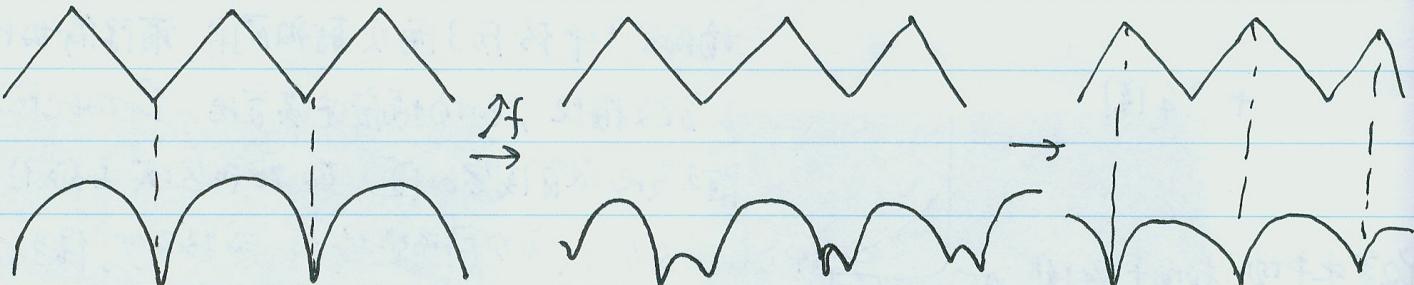
磁场： $\oplus \frac{1}{2}$ 圆方向。

① 水平场 $I = -0.25A$

\vec{B}_0 (水平场) $\pm \vec{B}_\text{rf}$ 同向。

有共振区域：

增加射频频率 $f \uparrow$ | 观察到滴波峰对应该共振信号（重合）
 进一步增加 f ，
 这应是观察到！ | 共振信号在波谷处一分为二，分别向反向的
 两个滴波峰移动，并在滴波峰处与另一共振峰重合。



② 水平场反向 $I = +0.25A$

$\vec{B}_0 \pm \vec{B}_\text{rf}$ 反向。

\pm ① 中情况相反，增加 f 是先观察到波峰有共振信号，

然后信号一分为二，反向移动重合于波谷处

现象解释：

$$\text{考虑共振时 } \omega = g_F M_B (\vec{B}_0 + \vec{B}_{\text{RF}})$$

当 $\vec{B}_0, \vec{B}_{\text{RF}}$ 同向时 $|\vec{B}_{\text{RF}}|$ 增大, $|\vec{B}_0 + \vec{B}_{\text{RF}}|$ 减小, 故观察到共振峰与波谷重合。

增大 ω 后, 共振峰向着 $|\vec{B}_0 + \vec{B}_{\text{RF}}|$ 较大的方向移动, 相对于波谷, 两边的共振峰是对称的, 对应相等的 $|\vec{B}_{\text{RF}}|$ 。

反之, 当 $\vec{B}_0 + \vec{B}_{\text{RF}}$ 反向时, $|\vec{B}_{\text{RF}}| \approx |\vec{B}_0 + \vec{B}_{\text{RF}}|$ 且相等, 观察到峰是反的。

又, 观察到 对称的共振峰幅度不一致, 是否可能是电路影响? B_{RF} 上升和下降实际上是什么样的?

不明白什么意思!

(b) 八峰八谷。

本实验比较有趣的现象是所谓的“八峰八谷”:

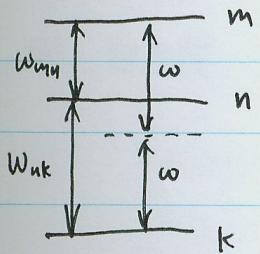
在共振频率 f 的整数倍分之一处, 同样可以观察到共振假形, 且 n 越大, 波形中幅度越小。

$$f/2, f/3, f/4 \dots$$

越小。

一种合理的解释是多量子跃迁, 错!

当射频场强度过大时



k, m 之间有多条过限带。

理论推导可知*, 当有两条过限带 $w = \frac{1}{2} (w_{mn} + w_{nk})$ 的电子同时被吸收(或辐射)时, 将出现双量子共振峰

当中存在虚能级

这里的射频场强度大于我们的实验!

* 参见《近代物理实验》(清华大学出版社) P356

这种跃迁是附合射量级量子运动的规则。
通过假设的假定，其本附合选择定则。

只是相对于一级共振峰，其扁了高阶次，共振峰幅度远不及一级共振峰。同样，只要射频场足够强，其在仪经精度范围内就能观察到多量子效应。

实验中，双用方波射频，将能观察到远不止八峰八谷($n \leq 3$)

原因是方波由正弦波通过傅立叶级数和而成，其高阶次本身就存在于射频中，达到共振跃迁的频率当然比正弦波射频要大。

\uparrow
多量子 双量子 还可能“四量子”“八量子”也这么容易测到！

若信号中已经有高阶谐波，即在 $\frac{1}{2}f_0$ 处，也有 f_0 的信号，这还叫“多量子”过程吗？
 \downarrow 输出物

7). ^{87}Rb , ^{85}Rb 四量子的测定。

水平电流 $I = 0.25\text{A}$

$$B_0 = \frac{16\pi}{f^{3/2}} \cdot \frac{250}{0.2379} \times 0.25 \times 10^{-3} \text{ Gs} = 1.181 \text{ Gs} = 0.1181 \text{ mT}$$

$$\textcircled{1} \quad v_1 = 660 \text{ kHz}, \quad v_2 = 993 \text{ kHz} \quad \bar{v}_1 = 826.5 \text{ kHz}$$

$$\textcircled{2} \quad v_1 = 441 \text{ kHz}, \quad v_2 = 658 \text{ kHz} \quad \bar{v}_2 = 549.5 \text{ kHz}$$

$$g_F = \frac{\hbar}{\mu_B B_0} \cdot \bar{v} = \begin{cases} 0.5000 \\ 0.3324 \end{cases}$$

~~四量子~~ 同理可得：

$$I = 0.35 \text{ A}$$

$$B_0 = 0.1653 \text{ mT}$$

$$\textcircled{1} \quad v_1 = 986 \text{ kHz} \quad v_2 = 1318 \text{ kHz} \quad \bar{v}_1 = 1152 \text{ kHz}$$

$$\textcircled{2} \quad v_1 = 662 \text{ kHz} \quad v_2 = 880 \text{ kHz} \quad \bar{v}_2 = 771 \text{ kHz}$$

$$g_F = \frac{h}{\mu_B B_0} \bar{v} = \begin{cases} 0.4979 \\ 0.3332 \end{cases}$$

注意能取哪個數字？

$$I = 0.449 A \quad B_0 = 0.212 \text{ mT}$$

$$\textcircled{1} \quad v_1 = 1316 \text{ kHz} \quad v_2 = 1647 \text{ kHz} \quad \bar{v}_1 = 1481.5 \text{ kHz}$$

$$\textcircled{2} \quad v_1 = 878 \text{ kHz} \quad v_2 = 1098 \text{ kHz} \quad \bar{v}_2 = 988 \text{ kHz}$$

$$g_F = \frac{h}{\mu_B B_0} \bar{v} = \begin{cases} 0.4991 \\ 0.3328 \end{cases}$$

* 諸值直計算。

$$\begin{aligned} {}^{87}\text{Rb} : \quad g_F &= 1 + \frac{J(J+1) - L(L+1) + S(S+1)}{2J(J+1)} = 1 + \frac{\frac{3}{2} \times \frac{5}{2} + \frac{1}{2} \times \frac{3}{2} + 1 \times 2}{2 \times \frac{3}{2} \times \frac{5}{2}} = \cancel{\frac{2}{2}} \\ {}^{87}\text{Rb} : \quad g_F &= g_J \frac{F(F+1) + J(J+1) - I(I+1)}{2F(F+1)} = \cancel{\frac{2}{2}} \times \frac{2 \times 3 + \frac{1}{2} \times \frac{3}{2} - \frac{3}{2} \times \frac{5}{2}}{2 \times 2 \times 3} = \frac{1}{2} \end{aligned}$$

${}^{85}\text{Rb}$ 同理可得 ($I = \frac{5}{2}$)

$$g_F = \frac{1}{3}$$

$$\text{[1] 實驗值 } {}^{87}\text{Rb}, \quad g_{F\text{[1]}} = \frac{0.5000 + 0.4979 + 0.4991}{3} = 0.499.$$

$$\gamma = \frac{0.5 - 0.499}{0.5} = 0.2\%$$

$$\text{[2] } {}^{85}\text{Rb}, \quad g_{F\text{[2]}} = \frac{0.3324 + 0.3332 + 0.3328}{3} = 0.3328$$

$$\gamma = \frac{\frac{1}{3} - 0.3328}{\frac{1}{3}} = 0.16\%$$

(8) 求~~極化~~磁場水平分量(i) 水平分量 $I = 0.396 \text{ A}$

$$^{87}\text{Rb} : \nu_1 = 1821 \text{ kHz}, \nu_2 = 1472 \text{ kHz}, g_F = \frac{1}{2}, \frac{\nu_1 - \nu_2}{2} = 174.5 \text{ kHz}$$

$$^{85}\text{Rb} : \nu_1 = 1215 \text{ kHz}, \nu_2 = 982 \text{ kHz}, g_F = \frac{1}{3}, \frac{\nu_1 - \nu_2}{2} = 116.5 \text{ kHz}$$

$$B_{II} = \frac{\hbar}{\mu_B g_F} \frac{\nu_1 - \nu_2}{2}$$

$$= \begin{cases} 2.494 \times 10^{-5} \text{ T} = 0.02494 \text{ mT} \\ 2.497 \times 10^{-5} \text{ T} = 0.02497 \text{ mT} \end{cases}$$

(ii) $I = 0.300 \text{ A}$

$$^{87}\text{Rb} : \nu_1 = 1505 \text{ kHz}, \nu_2 = 1153 \text{ kHz}, B_{II} = \frac{\hbar}{\mu_B g_F} \frac{\nu_1 - \nu_2}{2} = 0.02515 \text{ mT}$$

$$^{85}\text{Rb} : \nu_1 = 1001 \text{ kHz}, \nu_2 = 772 \text{ kHz}, B_{II} = \frac{\hbar}{\mu_B \times \frac{1}{3}} \times \frac{\nu_1 - \nu_2}{2} = 0.02454 \text{ mT}$$

(iii) $I = 0.498 \text{ A}$

$$^{87}\text{Rb} : \nu_1 = 2162 \text{ kHz}, \nu_2 = 1804 \text{ kHz}, B_{II} = \frac{\hbar}{\mu_B \times \frac{1}{2}} \times \frac{\nu_1 - \nu_2}{2} = 0.02558 \text{ mT}$$

$$^{85}\text{Rb} : \nu_1 = 1439 \text{ kHz}, \nu_2 = 1205 \text{ kHz}, B_{II} = \frac{\hbar}{\mu_B \times \frac{1}{3}} \times \frac{\nu_1 - \nu_2}{2} = 0.02508 \text{ mT}$$

$$B_{II} / \text{mT} \quad 0.02494 \quad 0.02497 \quad 0.02515 \quad 0.02454 \quad 0.02558, 0.02508$$

$$\bar{B}_{II} = 0.02504 \text{ mT}$$

$$\Delta(\bar{B}_{II}) = 0.0003 \text{ mT}$$

地磁场水平方向分量

$$B_H = (0.0250 \pm 0.0003) \text{ mT}$$

地磁场竖直分量已知

$$B_L = 0.0191 \text{ mT}$$

$$B^2 = \sqrt{B_H^2 + B_L^2} = \sqrt{0.0250^2 + 0.0191^2} = 0.0314 \text{ mT}$$

$$\text{地磁倾角 } \alpha = \arctan\left(\frac{B_L}{B_H}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{0.0191}{0.0250}\right) = 37.38^\circ.$$

结论?

5.1.