

台灣二〇〇二年國際科學展覽會

科 別：物理科

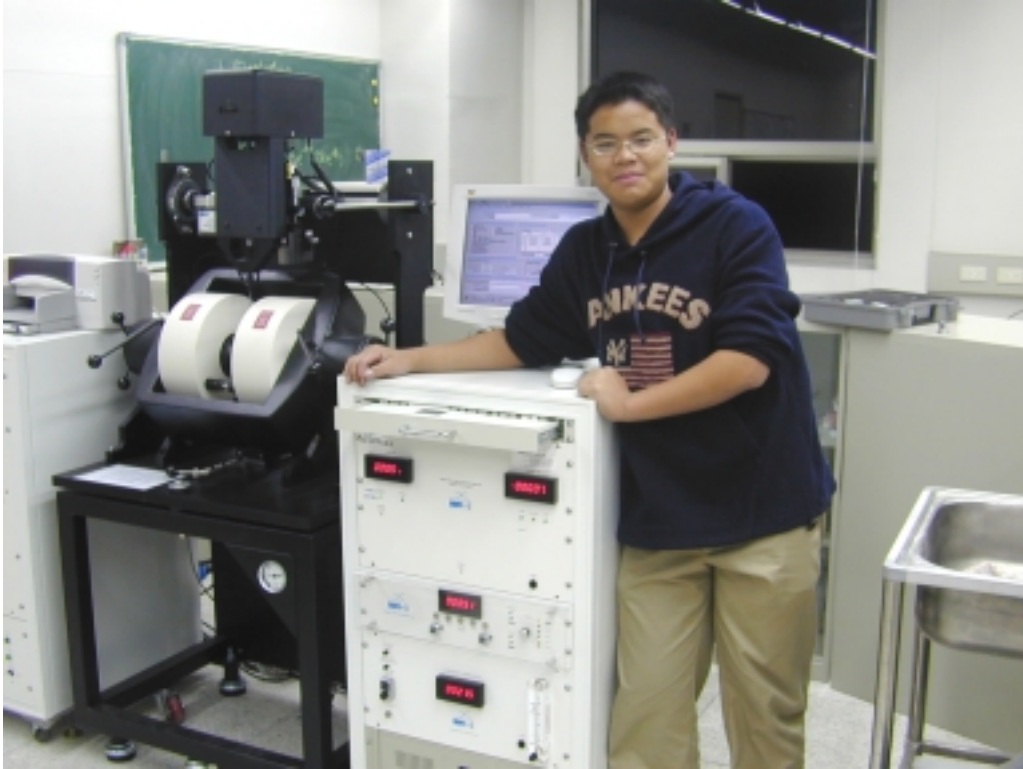
作品名稱：磁流體的浪潮－磁場梯度下磁流波紋之研究

得獎獎項：物理科第三名
候補代表:第一名

學 校：基隆市立銘傳國民中學

作 者：趙贊新

作者簡介



我叫趙贊新，從小每逢假日，爸爸就帶我們全家坐火車沿途下車旅遊，且常全家去國外旅行，因此我培養了喜愛大自然，觀賞風景並畫畫能力，尤其啟發我對周遭環境觀察研究的興趣；爸爸數理很好，常出有趣的問題考我，帶我到圖書館查資料，參觀各項科展，培養我研究的能力。

中文摘要

在本次實驗中，我們發現在不同厚度的磁流體薄膜中，會因本身磁性粒子結合，而呈現不同的影像圖形。隨著薄膜厚度增加，其磁性粒子會由鏈狀排列成塊狀叢集，可是一旦外加磁場後，又要全部轉向磁力線方向集結。

另一個發現是將磁流體薄膜放在一個不均勻的磁場梯度中，則樣品內的磁流體粒子，不僅會隨著磁力線方向排列移動，更會出現磁流波紋，其行進路徑是沿著垂直於磁力線的方向，向磁力線密集處移動。

我們亦發現在不同的薄膜厚度及不同外加磁場下，其“磁流波紋”的波速亦會隨之改變。一般而言，樣品的厚度愈厚，或外加磁場愈大，其“磁流波紋”的波速愈快，反之則愈慢。最後，我們列出了一些磁流波紋的應用，相信是精采可期！

ABSTRACT

In this experiment , we find that in different thickness of magnetic fluid different images will appear , because of the connection of magnetic particles. With the increasing of thickness the magnetic particles will change its shape from chains to blocks. But when we add external magnetic field , they will get in line one by one to the direction of magnetic line of force.

We also find that we put the magnetic fluid film in the uneven magnetic gradient , the magnetic particles in the sample not only follow the direction of magnetic line of force but also show the “magnetic wave ” . Its move path is perpendicular to the direction of magnetic line of force.

In the different film thickness of magnetic field , the wave velocity of the “ magnetic wave ” will change. In generally , the thicker the sample is , or the larger the magnetic field is , the faster the wave velocity of magnetic wave is and adverse is true.

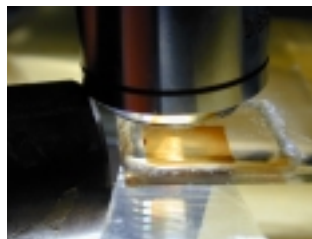
At last , we list the applications of “magnetic wave ” , we believe they are marvelous !

磁場梯度下磁流波紋研究

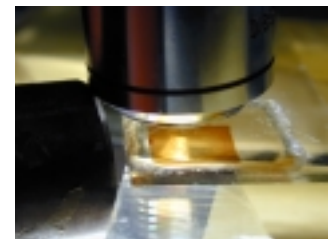
壹、前言

理化課觀賞阿波羅 13 號的影片後，老師問：太空人的頭盔何以在外太空能自由轉動，而其內部的氣體卻不會洩漏出來？，老師說：是因為在其轉動的部分灌有磁性流體，才能如此的密不透風，老師又告訴我們，事實上，磁流體的應用很多，如用於醫療上，超音波組件，微波元件以及化學反應中的觸媒等，雖然我聽不太懂，但老師的話引起我研究磁流體的興趣。

於是我們先以共沈法，製造四氧化三鐵的超微粒子，之後，我們以銅油當作介面活性劑來製造磁流體，本來我是想用這些磁流體做一系列光偏振的實驗，並想用我們自製的磁流體製成的薄膜，去探討偏振對光的影響，可是卻意外發現，若對磁性流體施以外加磁場時，其內部的強磁性膠體粒子，不僅會沿著磁力線方向排列而流動，更會在沿著垂直於磁力線的方向產生流動，而形成“波紋”，這個發現十分奇特，和平常我們所熟知的小磁針會沿著磁力線的方向移動的觀念不同，於是我們便設計了一系列的實驗以探究其原因。



光偏前



光偏後

貳、研究目的

一、觀察在磁流體薄膜

中，其磁性粒子因外加磁場後所產生的變化。

二、觀察在上述條件中，其磁性膠體粒子叢集及特殊波紋的流動模式及形成原因。

參、研究設備及器材

一、研究設備

數位相機、攝影機、電源供應器、電磁鐵、磁流體、電視機、錄影機、顯微鏡、蓋玻片、載玻片、電腦。

二、觀測平台（如圖 1）

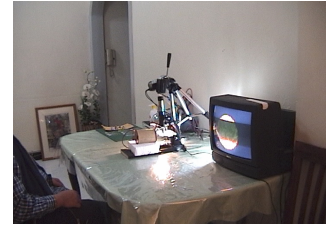
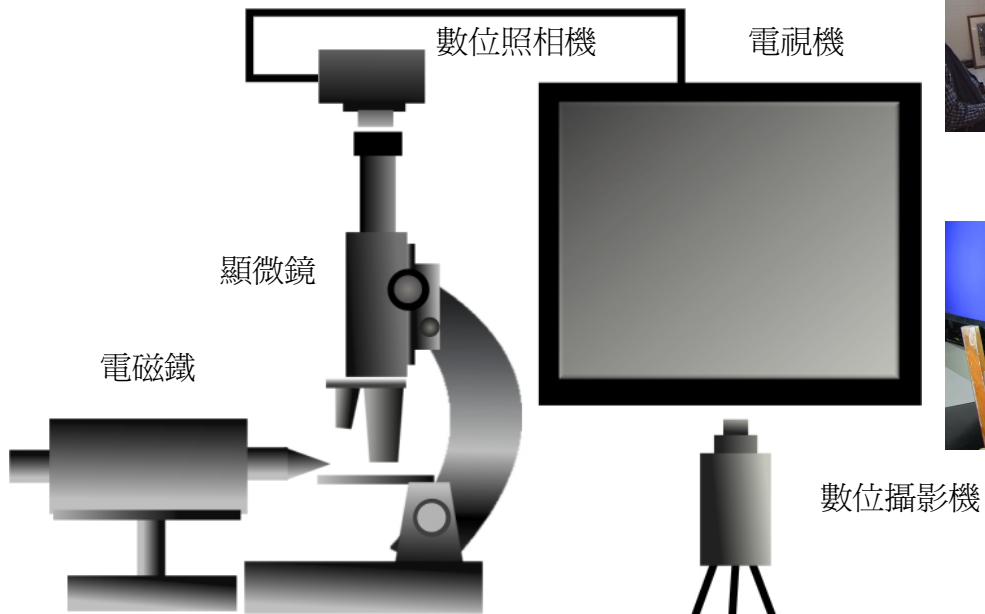
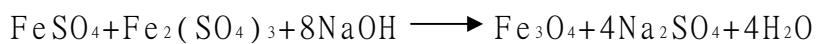


圖 1 觀測平台

三、所用磁流體之製作及性質

1. 以共沈法製作 Fe_3O_4



2. 將 Fe_3O_4 50C.C. 配上銅油 150C.C. 共煮 1 小時 (80°C)，待沈澱後將下層雜質去除。
3. 配上甲苯以約 1:3 混合，並使之沈澱。
4. 外加磁場 8000(gauss)，將未溶入甲苯的 Fe_3O_4 膠體粒子和雜質析出，剩餘者為純化的磁流體
5. 將純化後的磁流體，放入震動式磁



圖 2 製作磁流體



儀 (VSM) 中測量磁滯曲線。其結果如下圖 3，由其顯示的 H_c 及 M_r 知道，此磁流體呈現幾近超順磁的特性，顯示磁流體品質良好！

6. 取 0.0684g 的磁流體，蒸乾後剩 0.006g，計算出該磁流體的重
量百分率濃度為 8.7% 左右。

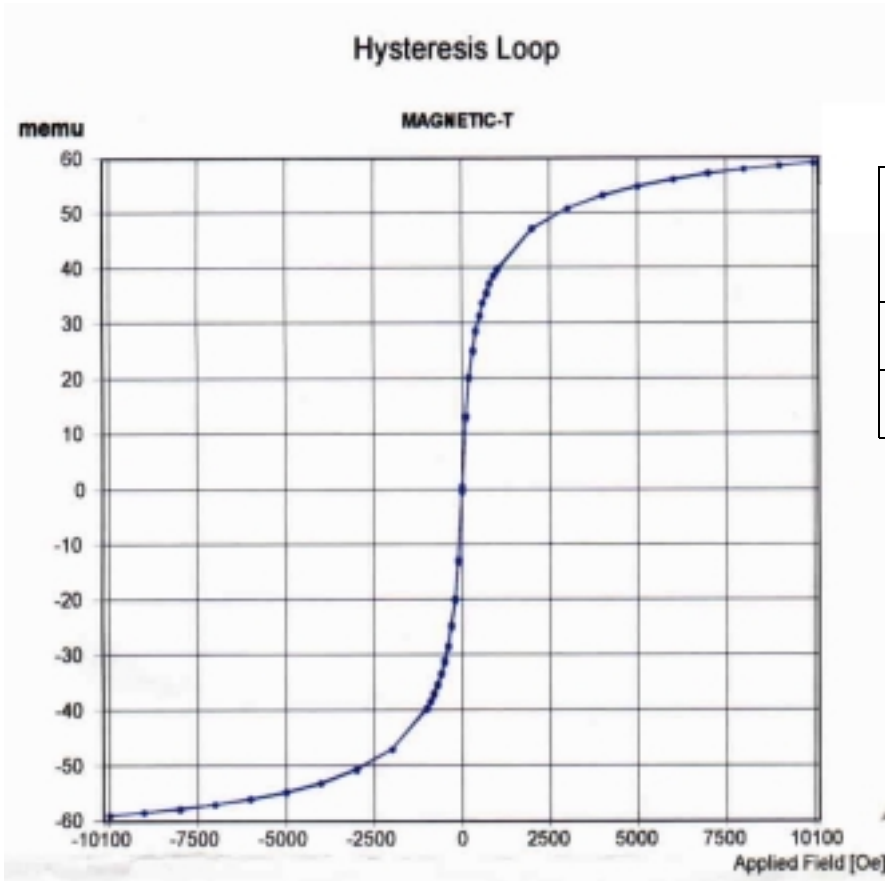
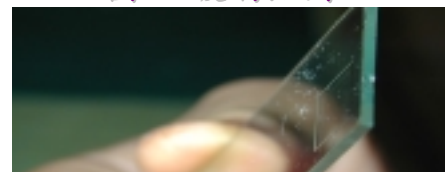


圖 3 磁滯曲線

	Upward Part	Downward part	Average
H_c Oe	3.04	-2.89	2.96
M_r emu	-4.049E-4	3.820E-4	3.934E-4



圖 4 玻璃蝕刻



四、薄膜：蝕刻及製作

1. 將膠布割出 1cm x 1cm 的缺口。
2. 貼上載玻片。
3. 配製氫氟酸溶液 ($p\%=55\%$)，以
氫氟酸溶液比水 1:30 混合。
4. 將載玻片，投入溶液中，經過
40，50，100，200 分鐘後，依序拿出清洗。
5. 將磁流體滴入載玻片的凹槽中，蓋上蓋玻片，周圍以 AB 膠

密封。

五、樣品名稱之簡化

爲了避免過於冗長的樣品名稱，於是我們利用樣品形狀及厚度作爲分辨的方法，詳情如下所示：

蝕刻時間和深度的關係(by α -step)

時間(分鐘)	深度(μ m)
40	16
50	20
100	40
200	80

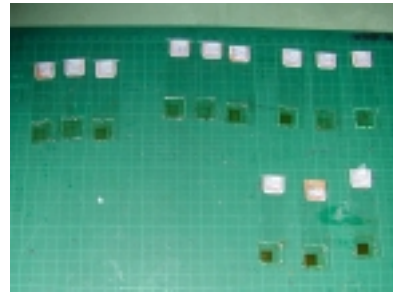
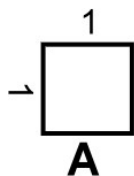
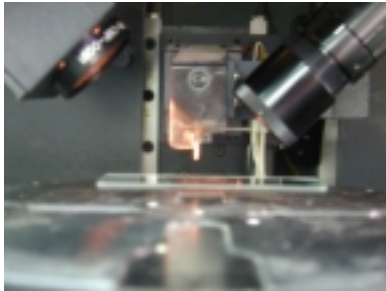


圖 5 磁流體樣品



大小爲 1cm x 1cm 深度爲 16 μ m 以 A16 表示，其他以此類推。

大小爲 1cm x 1cm 深度爲 40 μ m 以 A40 表示，其他以此類推。

單位：公分

六、磁極分類及磁場方向

1. 磁極分類

①尖頭磁極：磁力從尖點射出

可供應較大的磁梯度變化。



②平頭磁極：磁力均勻射出可

供應樣品均勻的磁場。

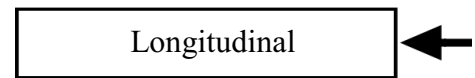
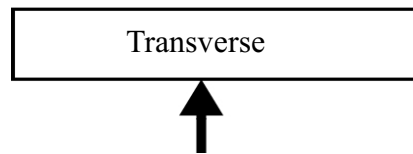


2. 磁場方向分類：



① Transverse 簡稱 T 方向。

② Longitudinal 簡稱 L 方向。



肆、研究過程或方法

實驗一：觀察磁流體在磁場內，其磁力線排列的情形。

1. 取樣品 A80 置入 T 方向的尖點磁場中 (850 gauss)，觀察並記錄樣品各點的磁力線方向 (如圖 6 所示)。
2. 改變磁力線的入射位置 (如圖 7 所示)，並重覆上述步驟。

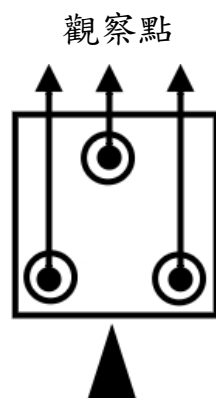


圖 6

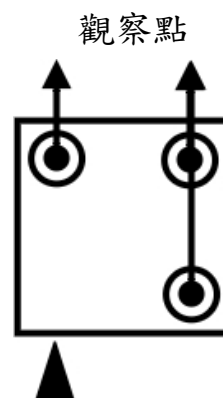


圖 7

實驗二：觀察薄膜的厚度對磁流體的影響。

1. 取樣品 A16、A20、A40、A80 依序置入 T 方向的均勻磁場中。
2. 記錄磁場強度為零時，各樣本的圖形。
3. 此時將磁場強度加至 850gauss，並記錄各樣品的形。
4. 關掉磁場，觀察並記錄各樣品的圖形變化。

實驗三：觀測磁流波紋

1. 取樣品 A20、A40、A80，分別置入 T 方向的尖頭磁場中，

- 此時固定磁力線入射位置在觀察點的左側(如圖 8 所示)。
2. 開啓磁場 (850gauss)，並仔細觀察強磁膠體粒子叢集及波紋是否產生，並記錄其流動方向。
 3. 將磁極移至觀察點的右側，並重覆上述步驟。

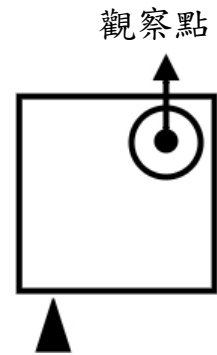


圖 8

實驗四：驗證我們對磁流波紋成因的推論

1. 取樣品，A40，A80 依次放入傾斜 50 度的均勻磁場中(如圖 9 所示)。
2. 改變磁場大小，觀察磁流波紋的波速是否改變並記錄。
3. 取樣品 A80，平置於平台上逐步改變磁場的入射角度並重覆上序步驟。

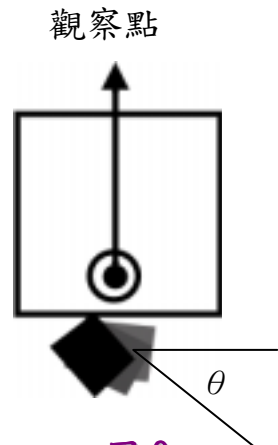


圖 9

伍、實驗結果

一、在實驗一中，所觀測到的結果如下圖 10，

圖 11 所示，顯然的，在磁流體的薄膜中，

其磁性膠體粒子會因外加磁場而聚集，且聚集的方向正好是在磁力線上。我們利用所觀測的結果，推論出該樣品在外加磁場時，其磁力線的分布，亦如圖 10 及圖 11 所示一般。

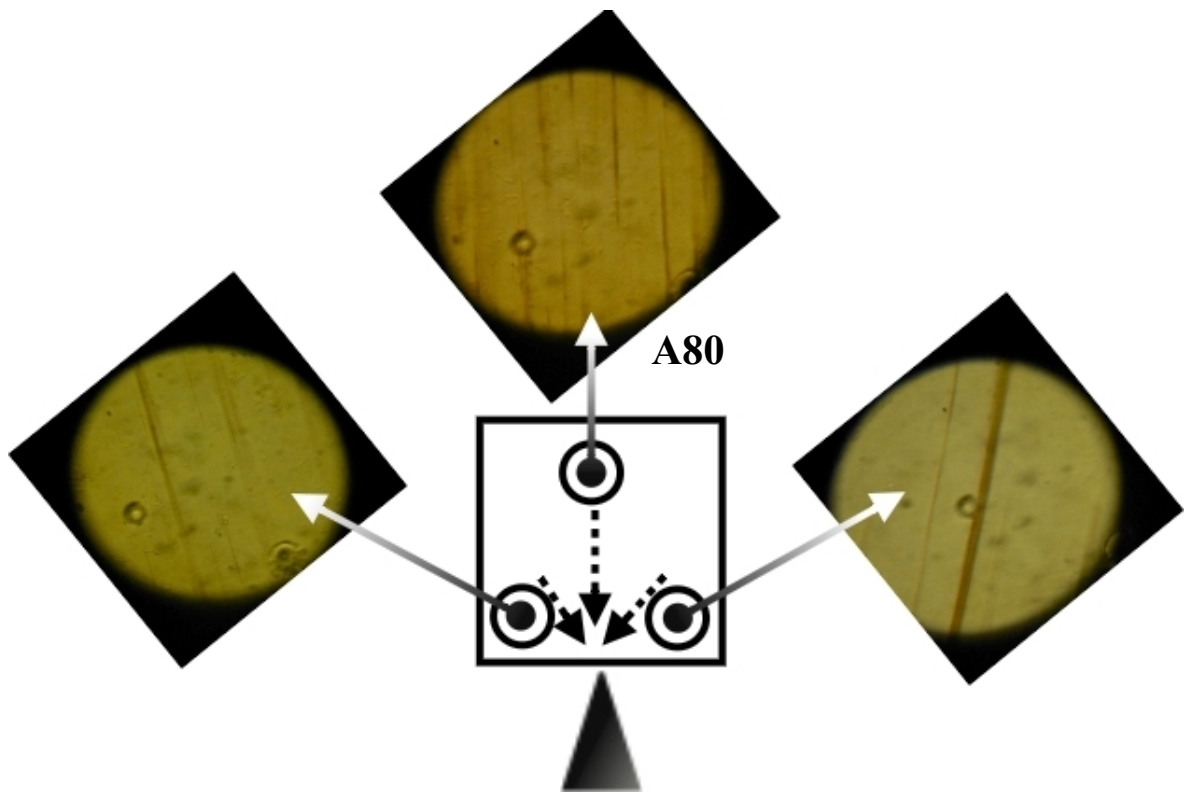


圖 10

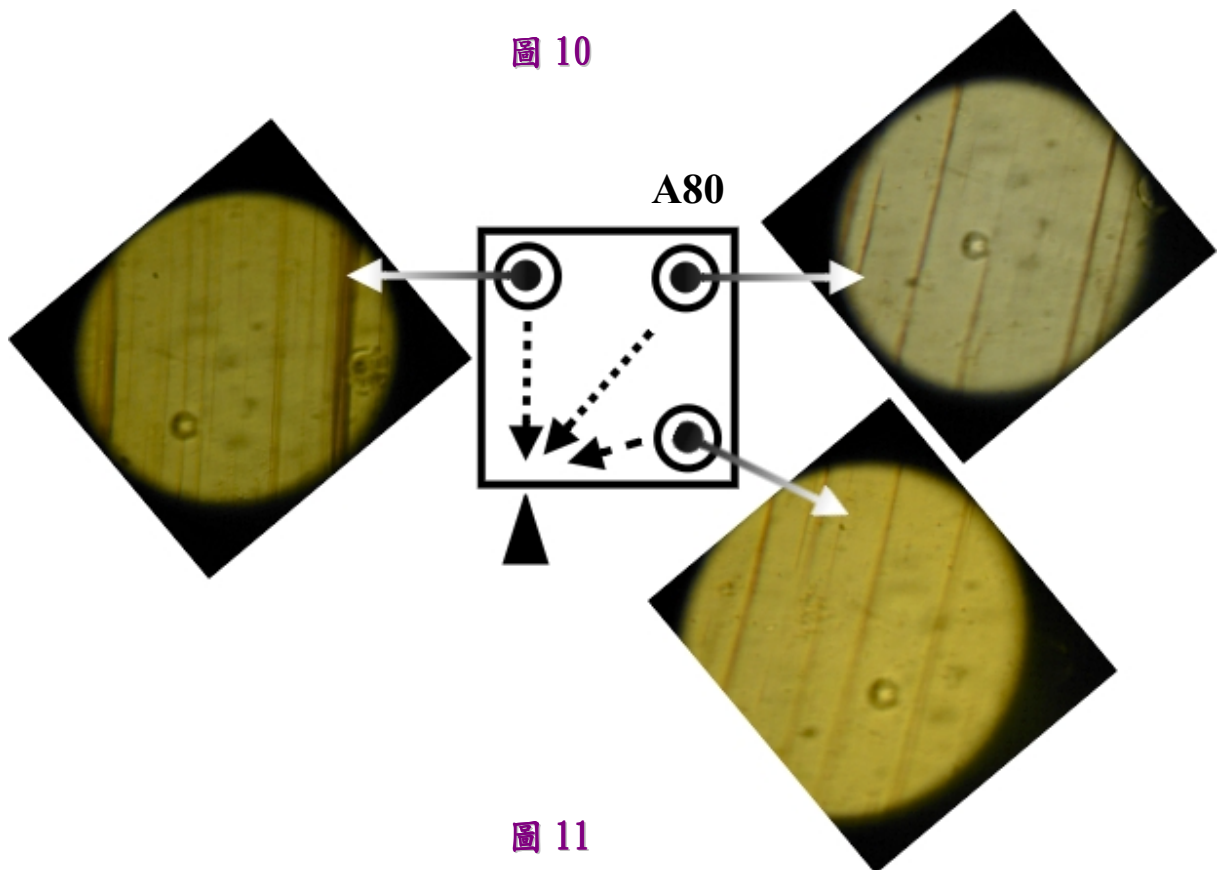


圖 11

二、在實驗二中，我們比較了不同厚度的薄膜在經過從未加磁場到外加 850gauss 的磁場過程後，得到一系列不同的圖形，如圖

12 所示：

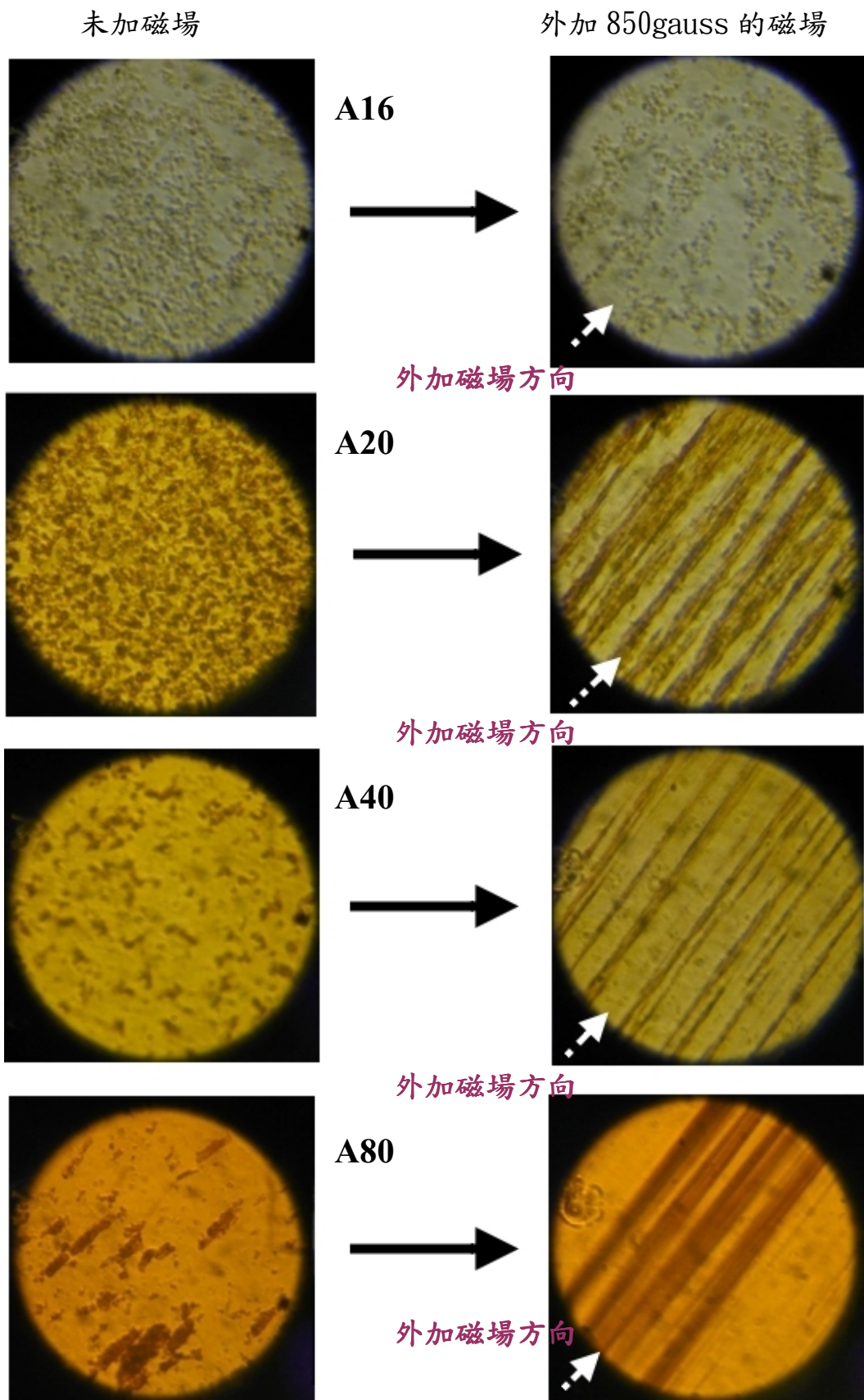


圖 12

顯然的，不管有無磁場，薄膜的厚度都會影響樣品所呈現出來的圖形：

1.在未加磁場時

①樣品的厚度為 $16\mu\text{ m}$ (A16)

許多小的強磁性膠體粒子，互相聯結成長鏈狀，並且呈現無序狀態（如圖 13）

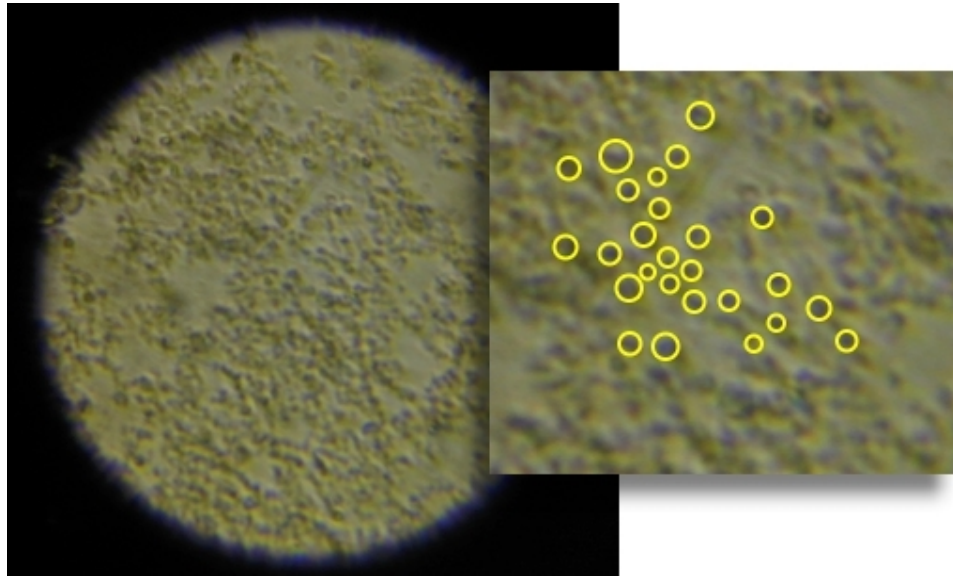


圖 13

②樣品的厚度為 $20\mu\text{ m}$ (A20):

樣本的小點已成為較大的點，且互相聯結的鏈長也較上述要短，於是形成像迷宮狀的「迷津圖形」（如圖 14）

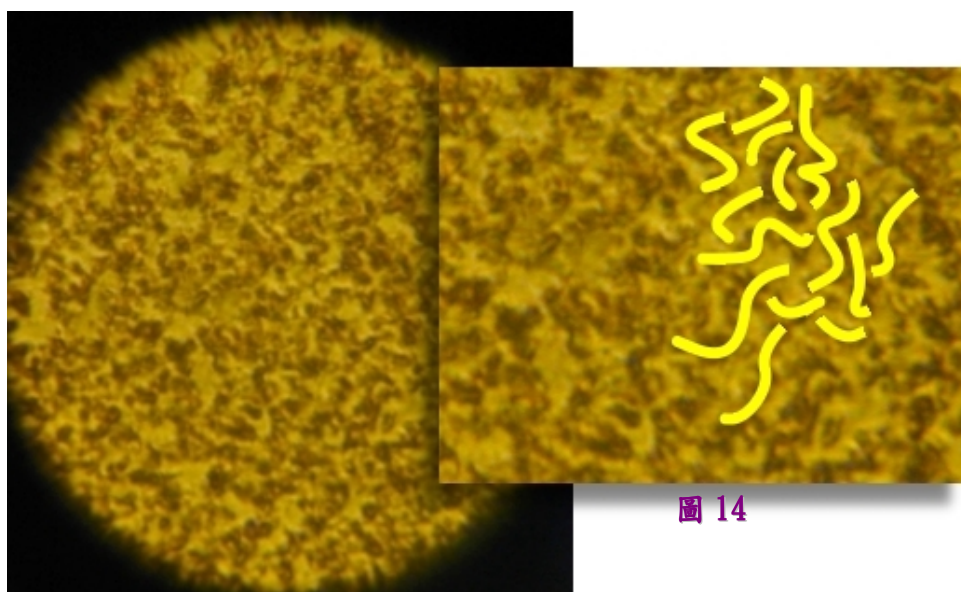


圖 14

③樣品的厚度為 $40\mu\text{ m}$ (A40)：

其黑點更加增大，而聯結的鏈長更短（如圖 15）

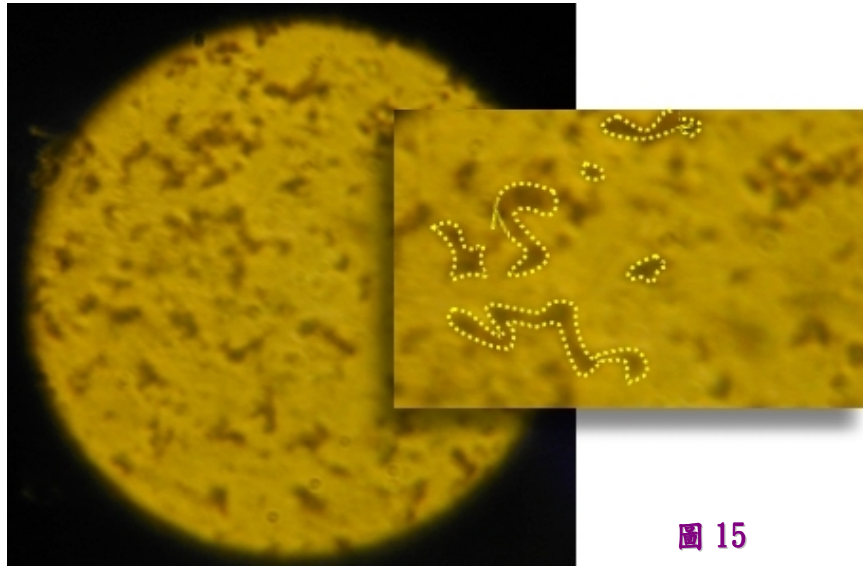


圖 15

④樣品的厚度為 $80\mu\text{ m}$ (A80)：

顯然強磁性膠體粒子已呈現塊狀叢集（如圖 16）。

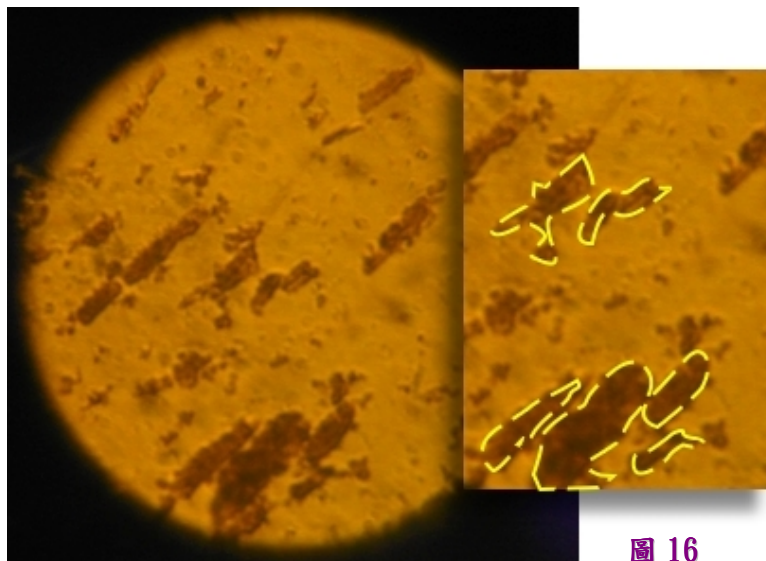


圖 16

⑤未加磁場時，可看見樣品 A80 中，小顆粒的磁性膠體粒子不停的抖動，此為熱運動所造成的布朗運動，而且厚度愈小，抖動的



的粒子愈少，至於在 A16 中就不容易看到有抖動的粒子，顯然的，在愈薄的薄膜中，磁性粒子愈不易移動，而這樣的結果對實驗四的討論有圖 17

很大的幫助

2.外加磁場 (850gauss) 時

①樣品的厚度為 $16\mu\text{m}$ (A16) :

磁性膠體粒子有往磁場方向移動，但仍以鏈狀聯結為主 (如圖 18)。

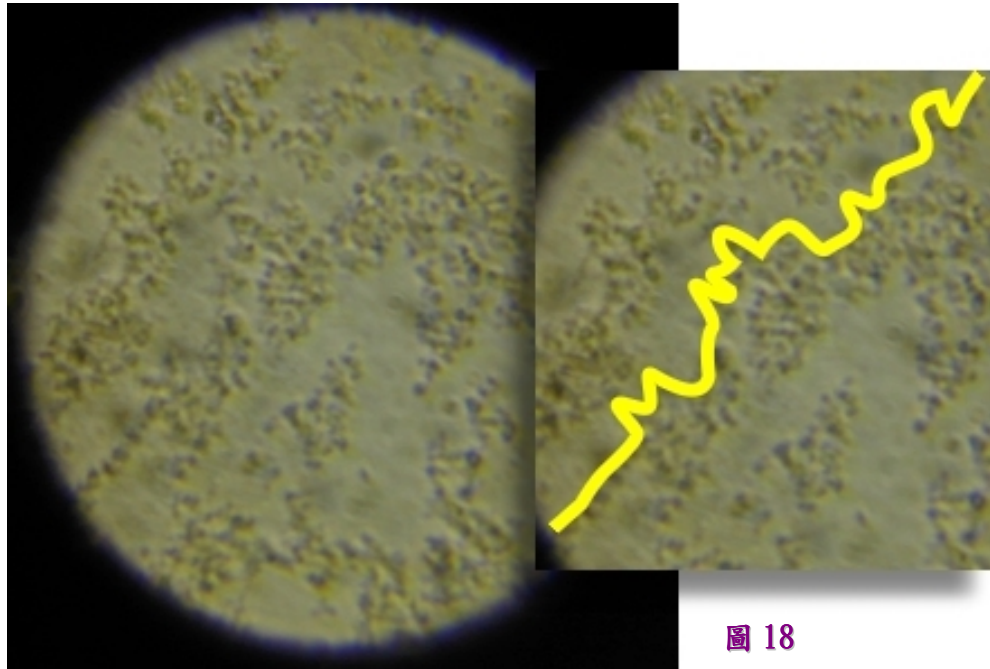


圖 18

②樣品的厚度為 $20\mu\text{m}$ (A20) :

磁性膠體粒子開始沿磁力線方向排列，但稀疏不定 (如圖 19)

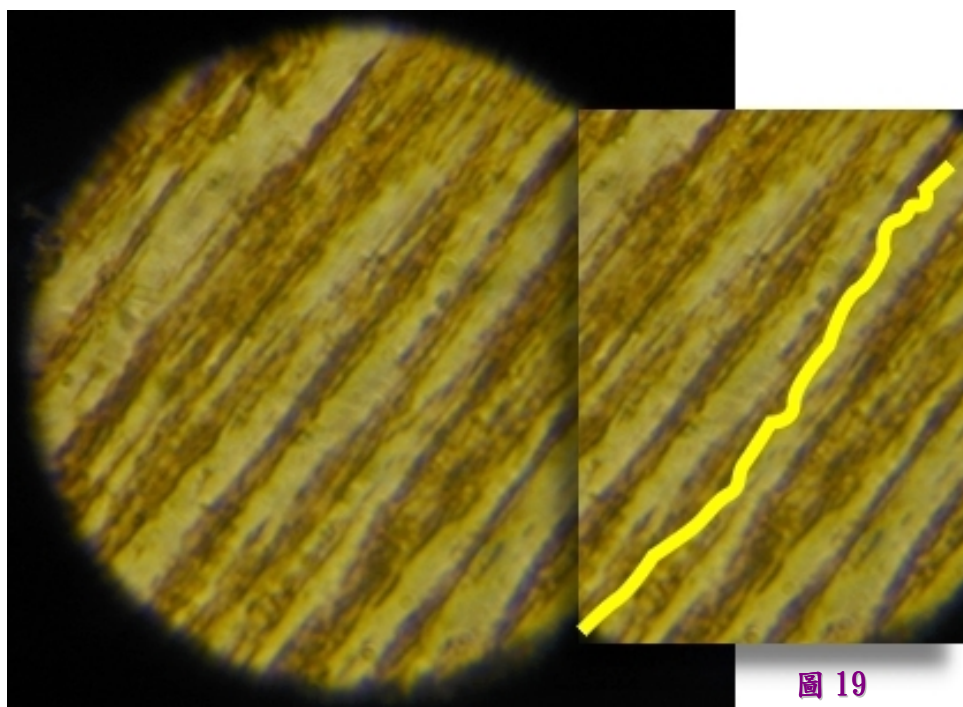


圖 19

③樣品的厚度為 $40\mu\text{ m}$ (A40)：

磁性膠體粒子沿磁力線方向排的更緊實。(如圖 20)

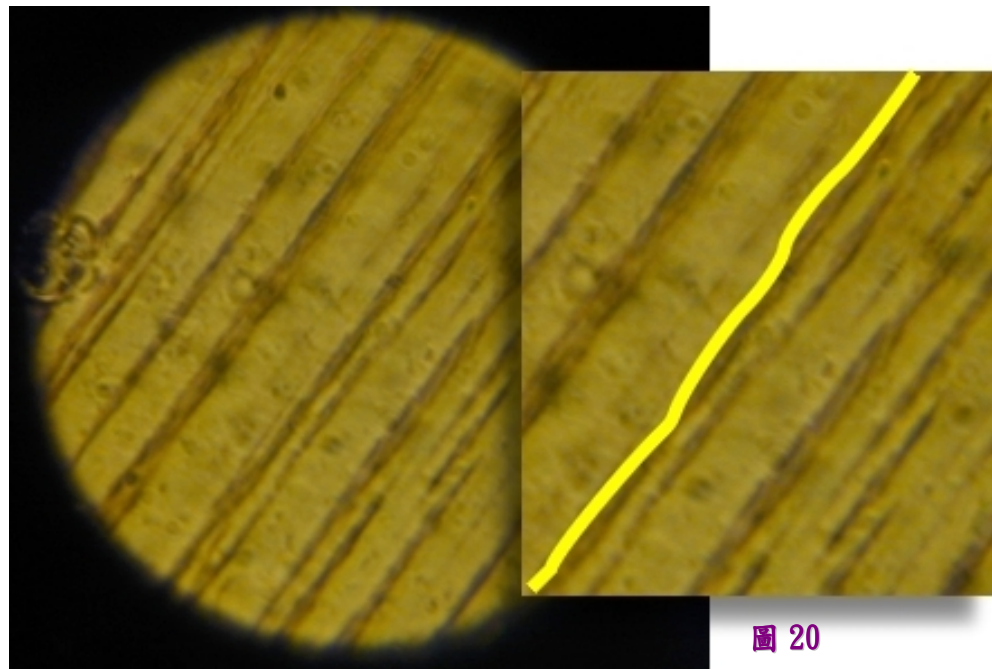


圖 20

④樣品的厚度為 $80\mu\text{ m}$ (A80)：

磁性膠體粒子完全沿磁力線方向排列。(如圖 21)

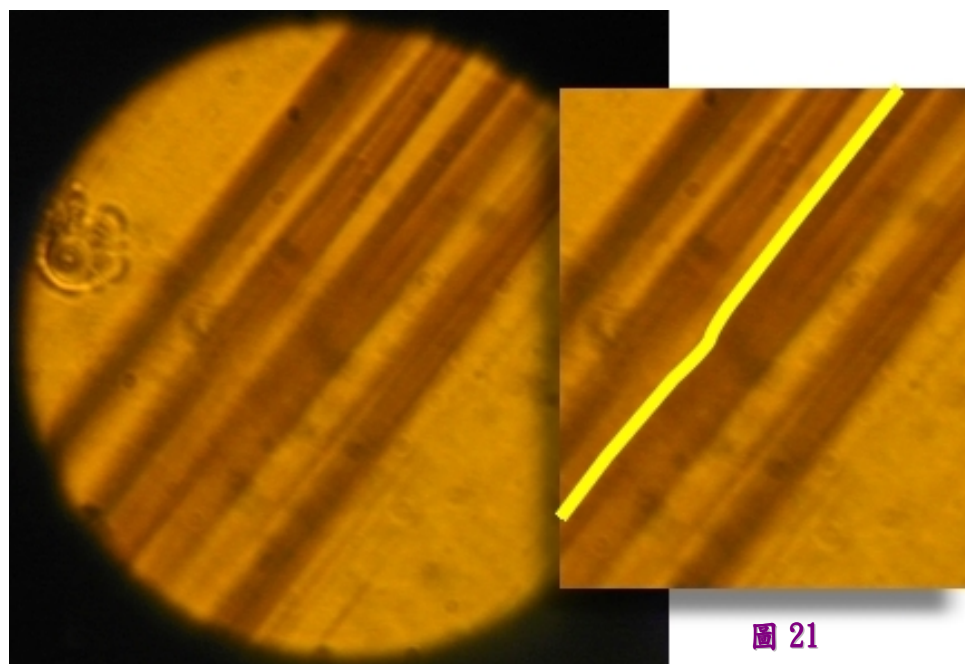


圖 21

⑤在圖 18 到圖 21 各選一個磁性膠體粒子叢集，將其邊緣形狀描繪在下圖中，用以比較各叢集的雜亂度：

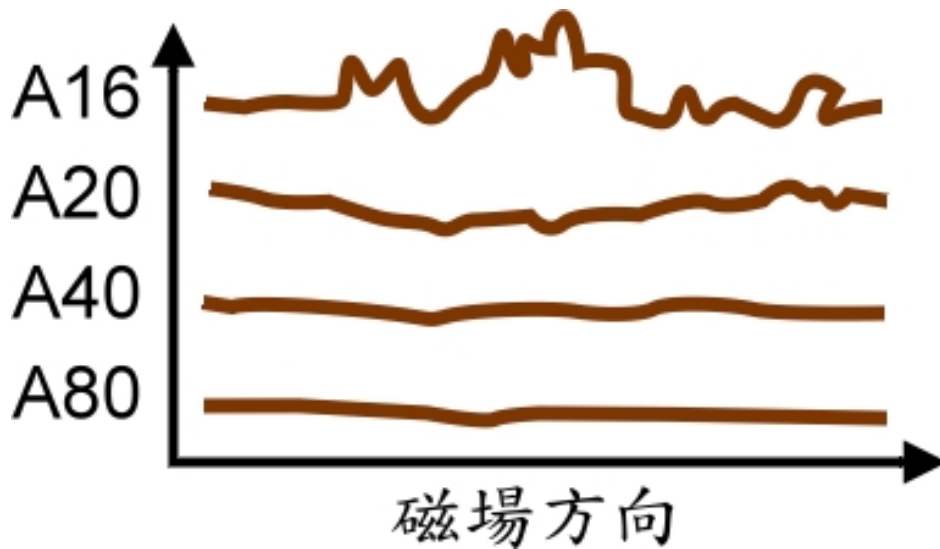
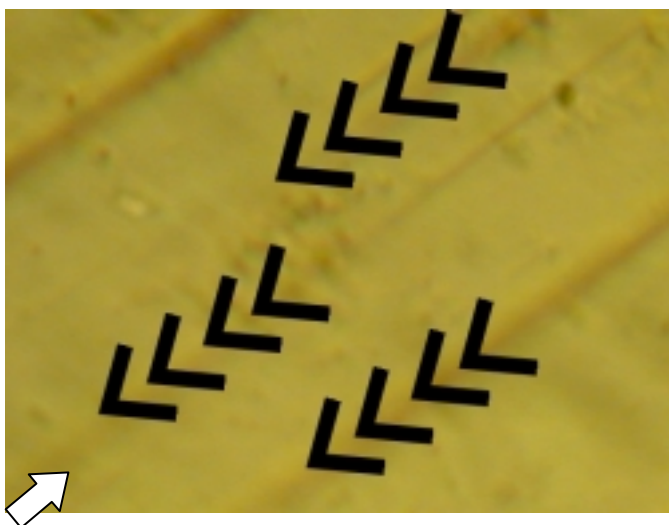


圖 22

三、在實驗三中

1.我們在 A20，A40，A80 中，皆觀察到磁性膠體粒子沿磁力線排列，而其中的磁性物質會沿著磁力線的方向往磁極移動，如圖 23 所示：



外加磁場方向

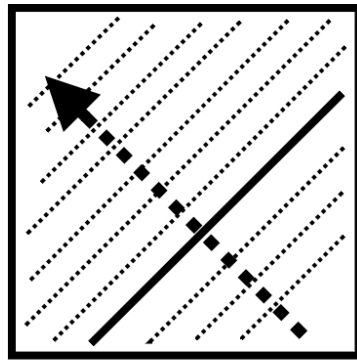
圖 23

說明：

表磁性粒子移動方向。

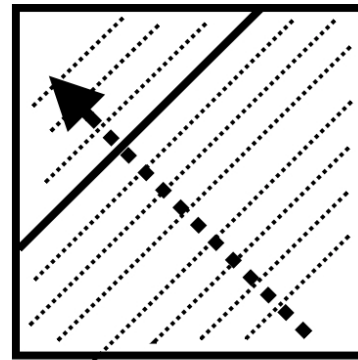
2.此時，略把焦距往上移動一點點，我們可在樣品 A40 及 A80 觀察

到有一奇特的波紋產生；其波紋方向和磁力線一致，不過其波動方向卻是沿著垂直於磁力線的方向，且遠離磁極。（如圖 24-1，24-2）



波動方向 t=0.1 sec

圖 24-1



波動方向 t=0.5 sec

圖 24-2

3. 由焦距判斷，此波紋應該位在強磁性膠體粒子叢集之上，如圖 25 所示：

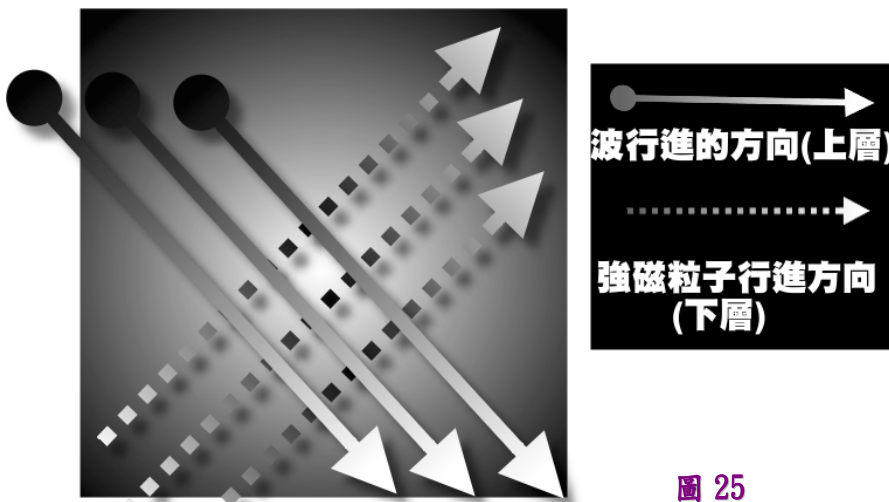


圖 25

4. 在 A20 中無法看到此種波紋產生。
5. 若將磁極改變位置，其結果亦是如此。

四、在實驗四中

1. 爲了避免量測初始值的困難，我們皆用最大磁場下的波速作歸一化(normalized)。

2.我們嘗試改變磁場大小，發現其波紋速度會因厚度及磁場大小而改變，其結果如表 2 及圖 26 所示：

表 2 **A40**

磁場大小	速度 (normal)	速度 (normalized)
850 gauss	5/6.48	1
600 gauss	5/7.8	0.83
400 gauss	5/9.23	0.7
200 gauss	5/12.2	0.53
0	0	0

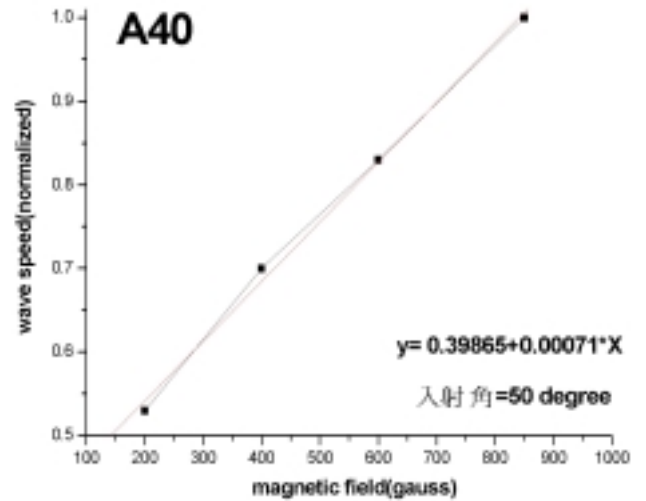


圖 26

表 3

磁場大小	速度 (normal)	速度 (normalized)
850 gauss	5/0.64	1
600 gauss	5/1.2	0.533
400 gauss	5/2.42	0.264
200 gauss	5/3.31	0.193
0	0	0

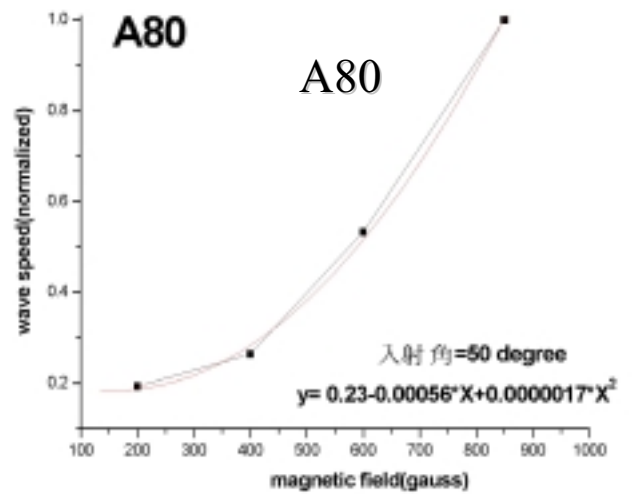


圖 27

3.顯然的，薄膜的厚度愈大或磁場愈大，其波紋的波速愈快，反之厚度愈小或磁場愈小，其波紋的波速愈慢。

4.此波紋的流動在出現後不久（一般約 4-5 分鐘）即告停止，顯然磁流體只作單向流動，使流動終止處的壓力急速增大，而達到平衡之故。

5.另外在實驗四中，我們嘗試去改變磁場的入射角（即改變磁場

梯度) 並得到下列的數據 :

A80(已歸一化)	角度 磁力	45°	55°	70°	一化)
	1000gauss	1	1	1	
	820gauss	0.575	0.795	0.615	

表 4

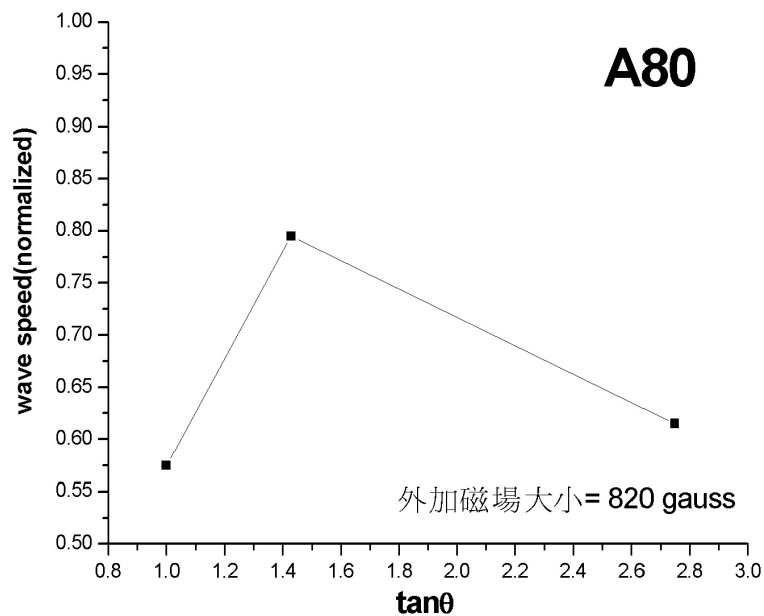
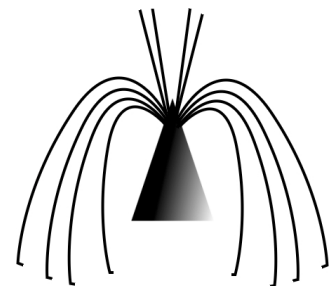


圖 28

陸、討論

一、 從實驗一的結果

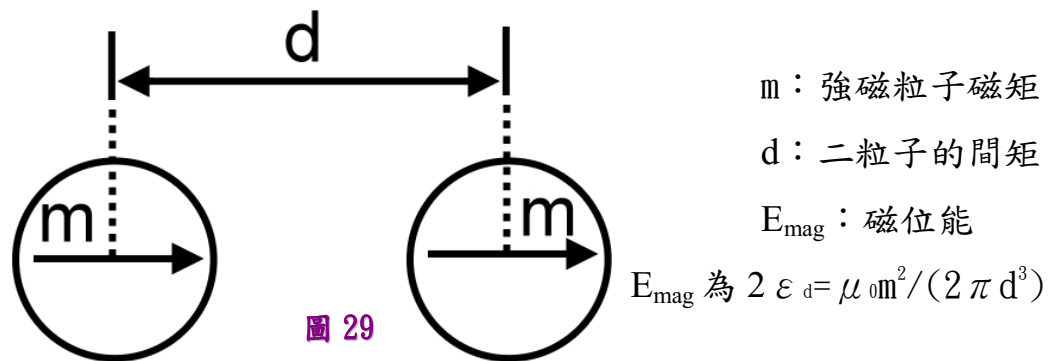
我們發現，其所推得的磁力線，其交集並不是指向磁極尖端，而是略向尖端的下半部偏移，其原因顯然是因為其尖端的尖銳度尚不足夠的原因，也因此若把此種尖端磁源視為完美的點磁源，就會有一些



不可避免的誤差，這個誤差將在實驗三的討論中詳述。

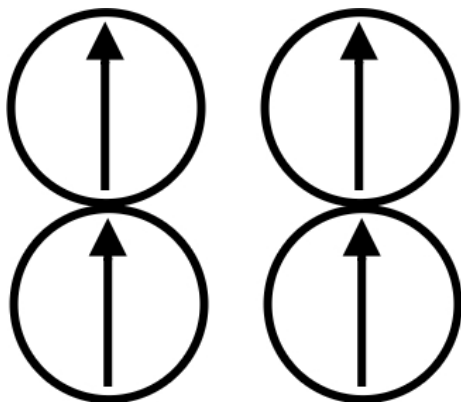
二、從實驗二的結果

1. 在未加磁場時，隨著厚度的增加其磁性粒子由鏈狀排列變成塊狀叢集。
2. 在外加磁場下，隨著厚度的增加，其磁性粒子由較不規則的鏈狀排列逐漸變成緊實的直鏈狀叢集。
3. 造成上述二種奇特的現象，其原因應該是來自於二種力量的競爭的結果，其中一是磁偶極之間的作用力 (Dipole-dipole)，二是由強磁粒子聚集後所產生的磁矩 (magnetic moment) 與外加磁場之間的作用力結果，簡述如下：

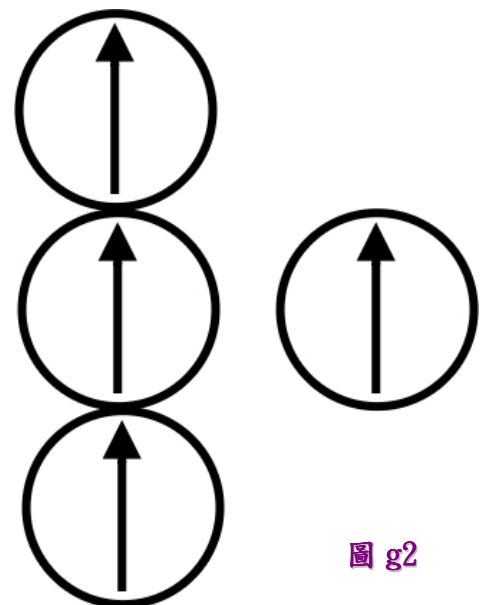


若考慮下列四種磁偶極粒子的排列與其結合能及自由度的關係

A; 當粒子數量較少時

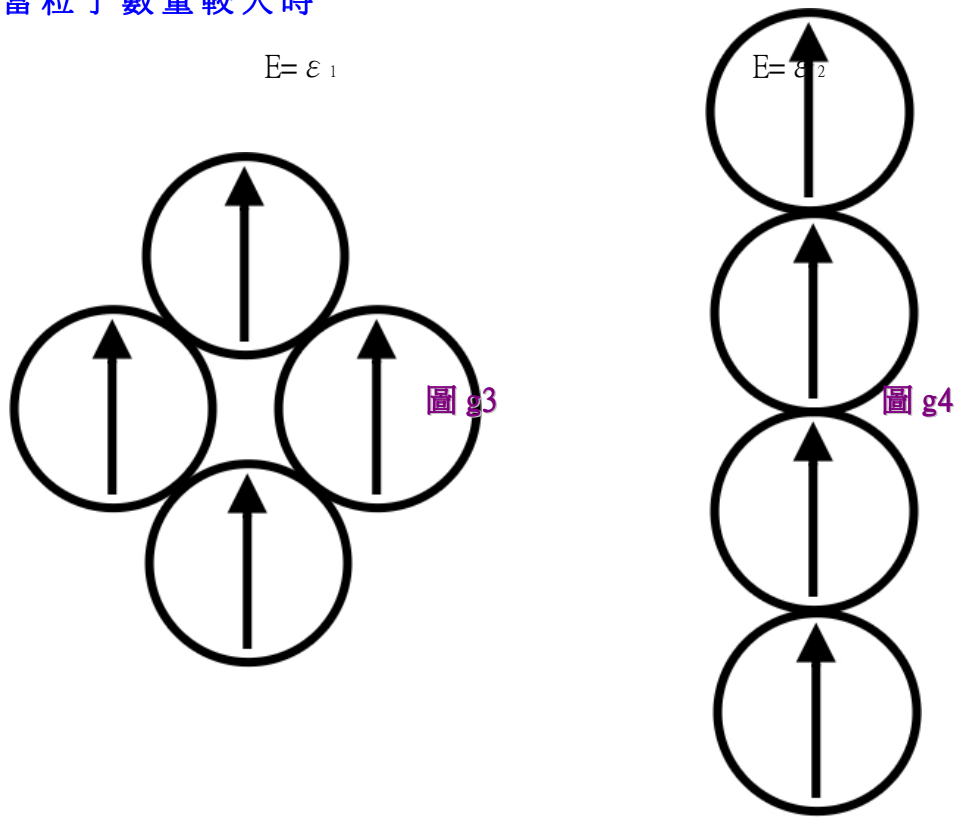


$$E = -4 \epsilon_d$$



$$E = -4.25 \epsilon_d$$

B: 當粒子數量較大時



$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 + 0.13 \varepsilon_d$$

- ① 無外加磁場時，若樣品的粒子數量較少者，是以鏈狀排列為優先，若粒子數量較多者，會以塊狀集結為優先。
- ② 外加磁場時，樣品內的強磁粒子的磁矩會被磁化而聚集，由 g3 和 g4 的比較，顯然是鏈狀排列有最低的自由度，亦即最穩定。
- ③ 但樣品的面積都是一樣的，故知樣品內的強磁粒子數量正比於樣品的厚度，即在無外加磁場時，厚度由大而小，其粒子聚集會由塊狀而鏈狀。
- ④ 有外加磁場時，厚度由大而小，其粒子皆以鏈狀聚集，符合我們在實驗二的觀察。

三、在實驗三中

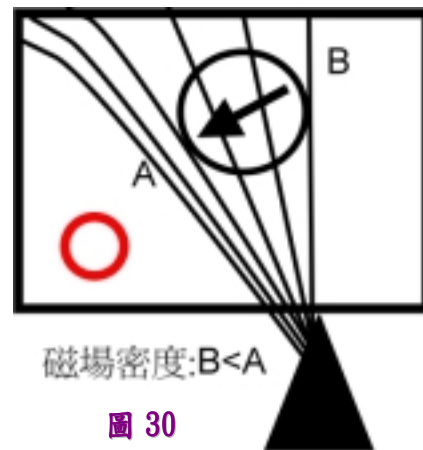
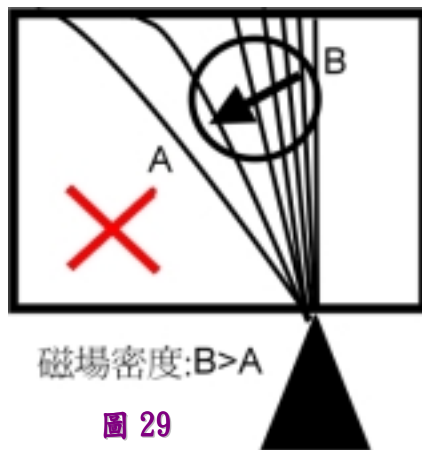
- ① 我們發現在外加磁場後，其強磁性膠體粒子沿磁力線聚集，且

聚集成塊狀後，總會磁極方向移動，這樣的結果，其實是可以理解的，因為逐漸聚集成塊後，會產生較大的 magnetic moment，故會逐漸往磁極移動。

②但同時我們發現樣品內產生另一個垂直於磁力線行進的波紋，我們稱它為“磁流波紋”，且該波紋會逐漸遠離磁極，這樣的結果令人百思不得其解，我們進行了許多的實驗，都無法解釋，後來看到實驗一中，尖頭磁極所形成的磁力線，於是我們便推論，該磁流波紋的行進方向是由磁力線疏鬆處往磁力線密集處流動，如圖 30 所示；因此，其磁流波紋形成的原因，應該是來自磁場梯度不同所造成的，於是我們便設計了一些實驗內容（實驗四），希望能證明我們的推論。

原先的認知（想像的）

由實驗一的結果所得到認知（真實的）



四、磁流波紋的理論探討

1. 理論說明

若磁流波紋的成因如我們所推論，是來自磁場梯度所引起，則根據含有磁能變化的白努利定律 (Bernouilli)

$$\frac{1}{2} \rho v^2 + \rho gh + P - \int_0^H M(H') dH' =$$

其中：

ρ : 液體密度

h : 位置高度

H : 外加磁場

M : magnetic moment

P : 壓力

$M = \chi H$ (χ : magnetic susceptibility)

又已知樣品平置台面，故 $h=0$

且令 $v = 0$ 以觀察粒子受力情形

$$p = \int_0^H M(H') dH'$$

$$\text{又 } F = \oint P ds = m \left(\frac{dv}{dx} \right)$$

$$\text{所以 } \frac{dv}{dx} = KH \left(\frac{dH}{dx} \right) \equiv A$$

其中：

K 為常數

$\frac{dH}{dx}$ 為磁場梯度

又磁流體本身具有很大的黏滯力，因此，粒子在磁流體中運行是有很大的阻力。

故令在 **A80** 中，其黏滯力正比於波速 (v)

即 $f = \lambda v$ (λ : 黏滯係數)

而在 **A40** 中，其黏滯力正比於波速 (v) 的平方

即 $f = \lambda v^2$

(說明：因為在較薄的樣品中，粒子運動除受磁流體的阻力外，更受到來自兩側的阻力，故 **A40** 遠比 **A80** 的阻力大)

① 黏滯力 $f = \lambda v$ 時 (**A80**)

由上述的運動方程式可得

$$\begin{aligned} \frac{dv}{dt} &= A - \lambda v \\ \Rightarrow v &= \left(\frac{A}{\lambda} \right) - Ce^{-\lambda t} \\ &= K \left(\frac{H}{\lambda} \right) \left(\frac{dH}{dx} \right) - Ce^{-\lambda t} \end{aligned}$$

故在 t 較大時，指數項消失，

$$\Rightarrow v_{A80} \propto H \frac{dH}{dx}$$

$$\text{因為 } \frac{dH}{dx} \propto H$$

$$\text{所以 } v_{A80} \propto H^2$$

② 黏滯力為 $f = \lambda v^2$ 時 (A40)

由上述的運動方程式

$$\Rightarrow \frac{dv}{dt} = A - \lambda v^2$$

$$\Rightarrow v = a (e^{2a\lambda t} - 1) / (e^{2a\lambda t} + 1)$$

其中

$$a^2 \equiv K \left(\frac{H}{\lambda} \right) \left(\frac{dH}{dx} \right)$$

因為在 t 較大時，指數項消失，

$$\text{所以 } v_{A40} \propto a$$

$$\text{即 } v_{A40} \propto \sqrt{H(dH/dx)}$$

$$\text{又因為 } \frac{dH}{dx} \propto H$$

$$\text{所以 } v_{A40} \propto \sqrt{H^2}$$

$$\Rightarrow v_{A40} \propto H$$

2. 比較結果

① 由實驗四中的圖 26 知，A40 的波速與外加磁場的關係呈現 $v \propto H$ 的關係，符合我們先前理論的預測。

② 由實驗四中的圖 27 知，A80 的波速與外加磁場的關係，呈現 $v \propto H^2$ 的關係，符合我們先前的理論預測。

③ 在圖 28 中，我們用已歸一化的數據比較磁梯度的改變，發現並未呈現預期現象，推測可能是在磁極作較大偏轉後，磁場強度轉弱之故。

3. 誤差的探討

在上述的實驗中，我們討論了，實驗結果有較大誤差的原因，並歸納出下列幾點：

- ① 方程式並未考慮許多條件，例如磁波波紋的單向流動，會有壓力飽和之慮。
- ② 磁梯度變化不易測得。
- ③ 較大塊的強磁粒子移動，干擾波紋前進。

柒、結論

- 一、在磁流體內有許多強磁性膠體粒子，就像一個很小很小的指南針，一旦外加磁場，即會沿著磁力線排列及移動。由於在磁流體內，有“磁偶極-磁偶極”結合，及“磁偶極-外加磁場”的，有效勢能之互相競爭，使得在無外加磁場時，其樣品的圖形，隨厚度增加，會逐漸由鏈狀叢集→迷津圖形→小的塊狀叢集→大的塊狀叢集，在外加強磁場下，其樣品的圖形隨厚度增加，會逐漸由較不規則的鏈狀排列→規則的長直鏈狀叢集。
- 二、依目前我們所推論的而得的結果，磁流波紋產生的原因，應該是由磁梯度變化所形成，而且由理論和實驗結果證明，這樣的波紋將垂直於磁力線的方向，且往磁梯度密集處前進，並且只作單向流動(有去無回)，故在一小段時間內，即告停止，而流動的波速亦受外加磁場的大小，磁流體的黏滯情況及薄膜厚薄的影響。
- 三、一般而言，磁流波紋的波速(v)在黏滯力較大及薄膜較薄的情況下，其波速 $v \propto H$ 反之則 $v \propto H^2$ 。

捌、展望與應用

關於這一次我們意外發現的磁流體波紋，給了我們很大的鼓舞，可是由於器材及經驗的不足，並未能作更深入的研究，我們甚至不知道在更厚的磁流體薄膜裏，會不會發現另一層磁流

體波紋存在，希望有一天，我們能解開這個磁流體波紋之謎，其次從磁流體波紋現象，我覺得，磁流體似乎可作為以下的應用：

一、可以用來製作量測微小尺度的推進系統。

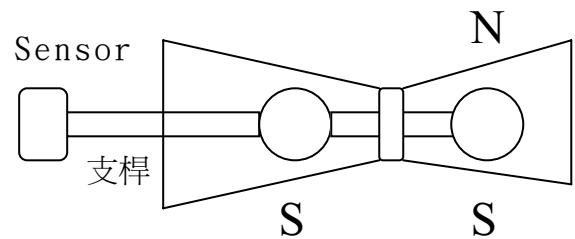
一般而言在如 AFM(原子力顯微鏡)，TEM (穿透式顯微鏡) . . . 等，量測微小變化的儀器，中常須要靠壓電陶瓷等昂貴材料，去推動感應 sensor，但如果用我們所發現的“磁流波紋效應”，即可使花費降到最低，而且十分耐用。圖示如下：

1. 右側磁場開啓則 Sensor 向

左行進。

2. 左側磁場開啓，則

Sensor 向右行進



二、可以用來製作人工心臟

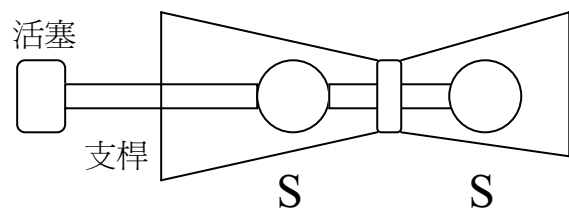
圖示如下：舉例來

說，可用微小晶片控

制電流，使左右磁場

交替開關，便可產生推動

pump 的力量。



玖、參考資料

(一) 國中物理第三冊(國編本/國立編譯館)民 90

(二) 磁性流體理論應用(黃忠良編著/復漢出版社)民 88

(三) 物 理(蔡文仁總審訂/大揚出版社)民 88

(四) Charles Kittel “Introduction to Solid State Physics”
Sixth Edition, 士華圖書

(五) David J.Griffiths “Introduction to
Electrodynamics” Second Edition, Prentice-Hall
Internationl ,Inc.

(六) J.D.Jackson “Classical Electrodynamics” Second Edition,
美亞書版股份有限公司

評 語

- (1) 對磁流體受磁場影響的機制有深入探討，液體所呈現的波紋是創新性的發現。
- (2) 惜在理論的解釋方面有點牽強，以液體的橫向速度來解釋波紋，不太切合。