

臺灣二〇〇四年國際科學展覽會

科 別：物理科

作品名稱：磁流體薄膜在磁場與電場下之繞射現象

學 校：國立臺灣師範大學附屬高級中學

作 者：林庭竹

作者簡介



姓名：林庭竹

學歷：花蓮縣立鑄強國小
花蓮縣立中華國小
花蓮縣立花崗國中
國立台灣師大附中

興趣：數學 物理

簡述：父親是高中數學老師，從小對數學有著濃厚的興趣和自信，高中經由學校課程和專研產生對自然科學的愛好，以及有幸能在大學裡跟隨教授學習，進而往物理領域發展，大學的目標也是物理系。

磁流體繞射探討

壹、摘要

本實驗主要是探討磁色效應，光通過狹縫會產生繞射現象產生繞射圖形，為了要了解繞射現象，要先瞭解光柵的結構。

要探討光柵，就要先探討磁流體的結構結構，磁流體乃是將一般磁性物質製成小粒子，再使其懸浮於非磁性液體中，根據統計力學，只要粒子夠小，就可經由布朗運動均勻散佈在溶液中。而散佈在溶液中的磁性粒子會因為磁力及凡得瓦力而聚集，所以一般都會在小粒子周圍覆蓋一層介面活性劑，防止發生『沈澱』的聚集現象。磁流體具有磁性特徵及流體特徵，磁性特徵是磁流體的居禮溫度和一般鐵磁固體相當，而且在外加磁場時磁性顆粒會連接成磁柱，而流體特徵則表現在其具有各式各樣的、流動性、黏滯性、揮發性、飽和性及導熱性。我分別將磁流體薄膜在加入不同磁增率的磁場、不同大小的電場、混入液晶等的狀態下，做各種的光柵樣本。

接著再打入平行光，觀察繞射圖形，其中加入磁場的，磁性顆粒會連接成磁柱，縱切面會形成點狀的六角行有序結構，非常適合做光柵，繞射圖形是一七彩圓環。

加入電場的，並沒有規則的排列，沒有如加上磁場般有規律的變化，但是觀察到很多磁性顆粒的擾動和聚集，還有電極邊界的一些變化。

而加入液晶混和均勻之後，為一個比原本顏色更深黑的流體，磁流體的粒子即固定不動，成黑色團塊混合乳白色的液晶，對電場磁場都沒有反應。

就實驗觀察到的，我們發現了，最是合作光柵的是在磁場下的磁流體，而電場對磁流體的結構也有一定的影響，在探討光柵的實驗中，也觀察到了很多磁流體的特殊現象。

貳、研究動機

高一基礎物理和高三的光學都有提到繞涉的實驗，包括單狹縫、雙狹縫、針孔等等，多狹縫的就叫光柵，對於繞涉現象的產生和繞涉的圖形我感到非常有興趣，這裡面有很多可以探討的東西。只要有很小的孔隙可以透光，就有繞涉形成的可能，利用這項特點，很多東西都可以拿來當作光柵，產生各種繞涉圖形。磁流體粒子是黑色的，但當作溶劑的煤油可以透光，磁性的微小物質在流體中，就像一顆顆超小磁鐵一樣可以被牽引，經過適當的排列之後就可以當作光柵。高一基礎物理中有提到磁鐵和磁場，而在高三的課程中又有電磁學更詳盡的介紹和計算，流體力學在高二的課程中也有討論。藉由一系列磁流體的實驗可以觀察到高中課程中提到的很多實驗現象，包括了光學、磁學、電學、力學，這些現象加在一起彼此影響而呈現出的東西是我覺最有趣的，而這過程一訂可以學到很多東西，所以我試著動手組裝實驗器材，以觀察現象為主要目的，展開實驗。

參、研究目的

- 一、光通過磁流體產生的繞射圖形（磁色效應）。
- 二、分別對磁流體薄膜加入不同磁增率的磁場，探討磁流體的排列。
- 三、將磁流體薄膜外加電場，探討磁流體的結構的變化。
- 四、將磁流體外加磁場和電場，探討磁流體的結構的變化，和互相的影響。
- 五、將磁流體中混入液晶外加不同磁增率的磁場，探討磁流體的結構變化。
- 六、將磁流體中混入液晶它外加電場，探討磁流體的結構的變化的變化。
- 七、將磁流體中混入液晶外加磁場和電場，探討磁流體的結構的變化和互相的影響。

肆、研究設備與器材

顯微鏡一台

電腦和顯微鏡連接線一條

電腦一台

電源供應器一台（最大電壓 20V）

電線數條（附鱷魚夾）

超音波振動儀一台

橡膠細水管數尺

銅製線圈兩個

漆包線（一大捆）

蓋玻片數片

載玻片數片

AB 膠一組

HF 氫氟酸一瓶

電工膠帶一卷

ITO 玻片（可導電的玻璃）

磁流體一瓶

液晶（5c. c.）

丙酮一瓶（清洗用）

鹵素燈一盞

光凳一架

鐵架一具

針孔一支

凸透鏡（焦距 20cm）兩支

粗水管（半徑 5cm）

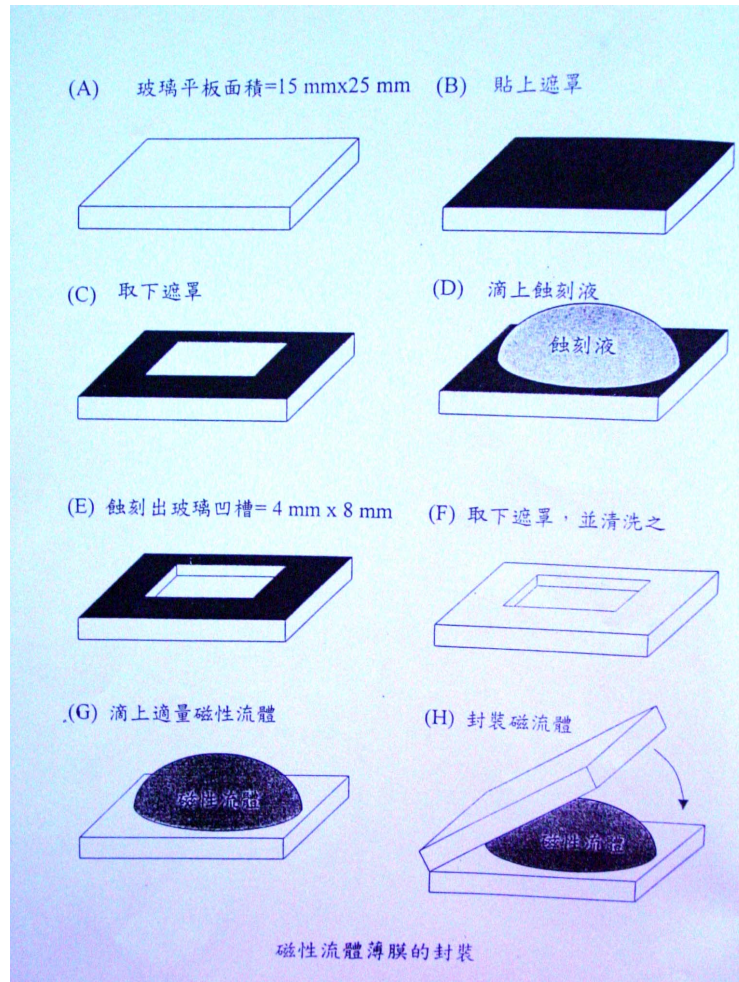
碳粉

大張底片一卷

無塵紙一盒（清潔擦拭用）

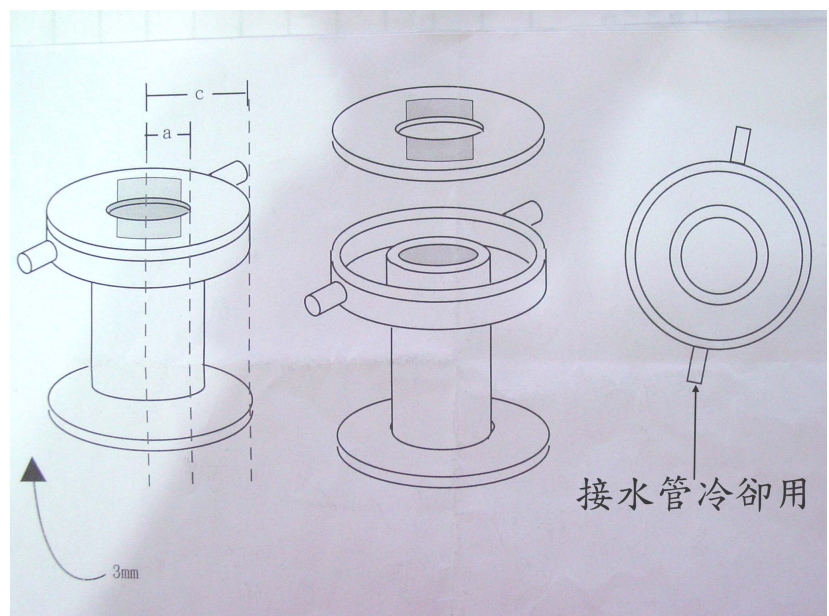
材料製備

(一) 蝕刻蓋玻片



(二) 製作線圈：

線圈原銅製，是自己設計在請外面訂做的，中空設計是為了要通冷水循環，以免漆包線過熱融化外圍的漆，會使全部的漆包線都倒通，線圈就不能用了，兩端的接頭是接水管的。



伍、研究過程與方法

實驗一

實驗目的：

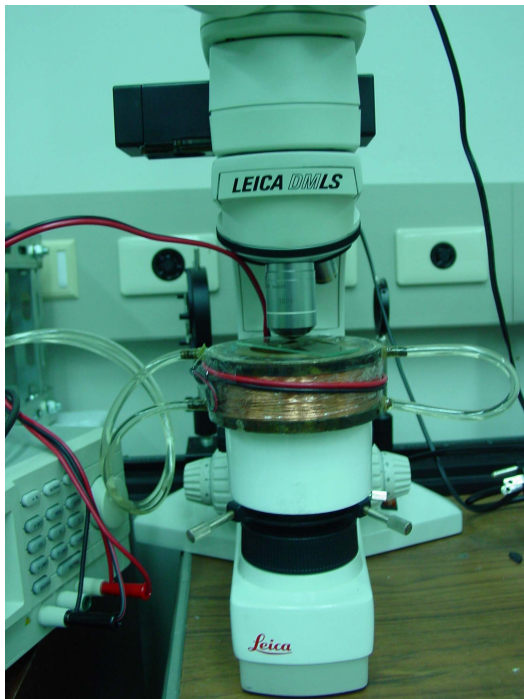
觀察磁流體在垂直於薄膜的磁場下，以不同磁增率加至最大磁場時磁柱的排列

實驗原理：

磁流體中的磁性小顆粒在磁場下會連結成磁柱，而磁柱的直徑、相鄰磁柱間的間距都和磁場的條件有關。磁場由兩個通電流的螺懸管提供，磁增率由電壓的增加控制，電壓加到 20V 時為最大磁場，磁流體封裝在刻有 0.5mm 凹槽的蓋玻片上，夾在兩螺懸管中間，用顯微鏡觀察。

實驗步驟：

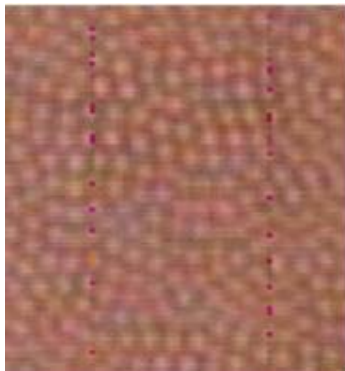
- (一) 將漆包線分四段繞滿一個銅製線圈，四段漆包線的末端再接起來，一起皆在電源供應器上。分成四段是為了使電阻減低（電阻可看成四小段並聯），如過用一條漆包線繞到底的話，電阻會非常大，線圈很快就會報廢。
- (二) 將另一個銅製線圈如此纏繞，再接上電源供應器，用一玻璃片夾在兩線圈之間，磁流體樣本（製作方法見研究器材）於玻璃片上。



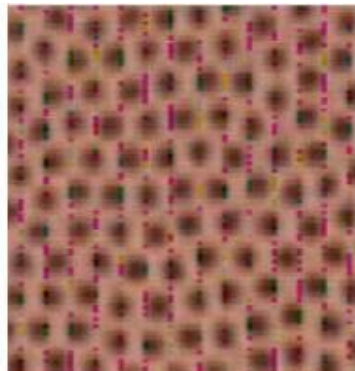
- (三) 將線圈和磁流體一起放置顯微鏡載物台上，如圖裝置，並打開水龍頭，讓冷水流經線圈殼中。
- (四) 控制電源供應器分別以 1.43v/s、0.74v/s、0.48v/s、0.38v/s、0.31v/s、0.25v/s 的速率加至 20V，以顯微鏡（100x）觀察，再用電腦紀錄每次的影像。

研究結果

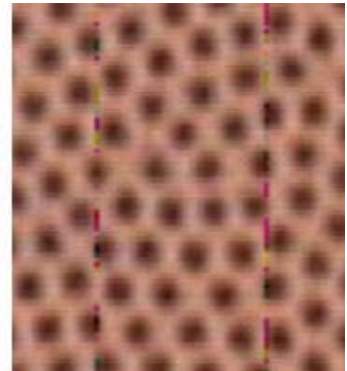
實驗一



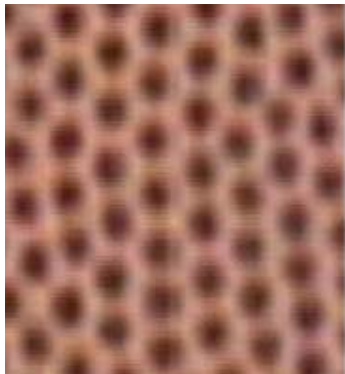
1.43v/s



0.74v/s



0.84v/s



0.38v/s



0.31v/s



0.25v/s

(一) 上面各圖磁流體在 1.43v/s、0.74v/s、0.84v/s、0.38v/s、0.31v/s、2.5v/s 的速率下，達到 20V 電流下線圈產生的最大磁場磁場時的結構，放大被率是 100 倍，形成特殊的六角形結構（與圖中任一點相鄰且距離最短的六點等距且排成正六邊形），磁增率越大，形成的顆粒越小也越緊密。

(二) 當磁流體位於直流固定磁場下時，懸浮於溶液中的磁性粒子便開始聚集，慢慢變成一條一條的磁束圓柱體，並且處在磁場下一段時間後，因為磁偶矩所產生的排斥力與磁束之磁偶矩和外加磁場的吸引力達到平衡，個別的磁束便會開始規則排列，（電壓 < 10V），磁流體呈現出一不規則的磁束圓柱體結構，開始出現圓圓一點一點的磁束雜亂的分佈在磁流體薄膜中。當電壓接近 10V 時，第一重的有序六角形晶格結構形成於磁流體薄膜中，開始有整齊的排列。當磁場繼續增加，磁流體開始由第一重的六角形有序晶格結構進入到過渡狀態，發生相變，此狀態中可見到磁流體磁束從一束分裂為二束的情形，最後在電壓於 16V 上下時，間距大致一定不再分裂，到 20V 時第二重更密的六角形有序晶格結構形成，也就是最後擷取的影像。

實驗二

實驗目的：

觀察垂直磁場下的磁流體的繞射效應

實驗原理：

磁流體磁柱間的縫隙可以當作狹縫，平行光通過時可以產稱繞射圖形，而此圖形受磁流體排列控制。

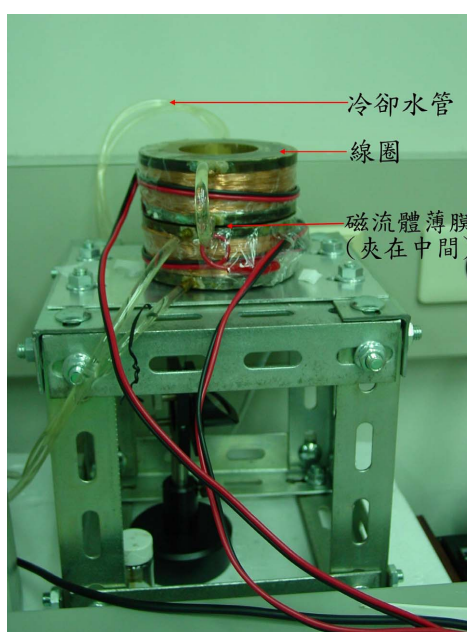
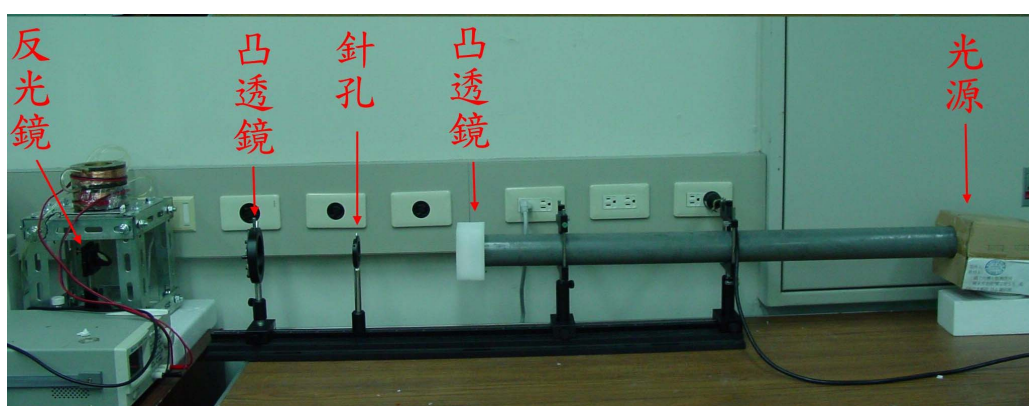
光路的設技是為了製造平行光，先將光通過內層塗碳粉的長管，使燈光更接近平行，將之在經過一凸透鏡 A 折射，大略會在焦點匯集，焦點上放一針孔，擋掉偏離太多的光，凸透鏡 A、B 焦點重疊，經過另一透鏡 B 折射，就更接近平行光了，因為考慮磁流體也是流體，不能豎直，所以在家一反射鏡將光線修改成垂直向上，透過線圈中間平放的磁流體薄膜。

本實驗主要是在觀察影像，對各變因沒有做很深入的探討。

實驗步驟：

- (一) 將漆包線分四段繞滿一個銅製線圈，四段漆包線的末端再接起來，一起皆在電源供應器上。分成四段是為了使電阻減低（電阻可看成四小段並聯），如過用一條漆包線繞到底的話，電阻會非常大，線圈很快就會報廢。
- (二) 再將另一個銅製線圈也如此纏繞，再接上電源供應器，用一玻璃片夾在兩線圈之間，磁流體樣本（製作方法見研究器材）於玻璃片上。
- (三) 將粗水管內塗上黏膠，在倒入許多碳粉搖晃，待其乾硬。
- (四) 將兩線圈中間夾磁流體樣本置於一有孔鐵架上（自行組裝），開孔中心對準線圈中心，讓磁流體薄膜在開孔之上。
- (五) 將鹵素燈至於光凳一端，粗水管置於鹵素燈前，罩住燈緣，不要讓燈光外洩。
- (六) 在粗水管另一開口放一個焦距 20cm 的凸透鏡，恐徑和水管開口差不多等大。
- (七) 再將離凸透鏡 20cm 處百放一針孔，調整高度對準凸透鏡中心。
- (八) 在具針孔 20cm 處再放置一個相同的凸透鏡，此透鏡射出的光通過磁流體薄膜正下方，用一傾斜 45° 之小反射鏡將此道光垂直向上反射致磁流體薄膜。

- (九) 將實驗室內所有燈都關掉，只留鹵素燈，有必要的話將鹵素燈和粗管間的縫隙用黑布蓋住，兩凸透鏡間用後紙板折成口字行長條遮住，再用一支手電筒包以黃色玻璃紙，作為操作用照明。
- (十) 將大張底片整捲貼在上面那一個線圈上。
- (十一) 控制電源供應器速率加至 20V。
- (十二) 以鹵素燈開關控制曝光時間，以 5s、10s、20s、30s 的曝光時間做測試，全部拍完之後，一定要確定底片都收好才能開燈。
- (十三) 沖洗相片。

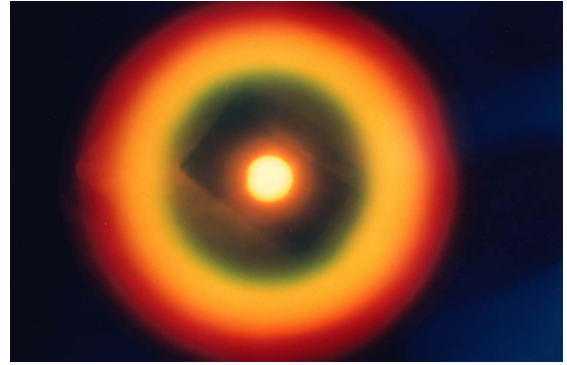


研究結果

實驗二



5s



10s



20s



30s

上面的照片是平行光通過時產生的繞射圖形，色澤的不同是因為曝光時間的差異，而此圖形受磁流體排列控制，磁色效應為淡淡的七彩光環，與有在磁流體加磁場後才觀察得到，而加了磁場之後原本黑褐色的磁流體薄膜也會呈現肥皂泡般的彩虹光澤，但顏色更深，磁場一消除就沒有了。

實驗三

實驗目的：

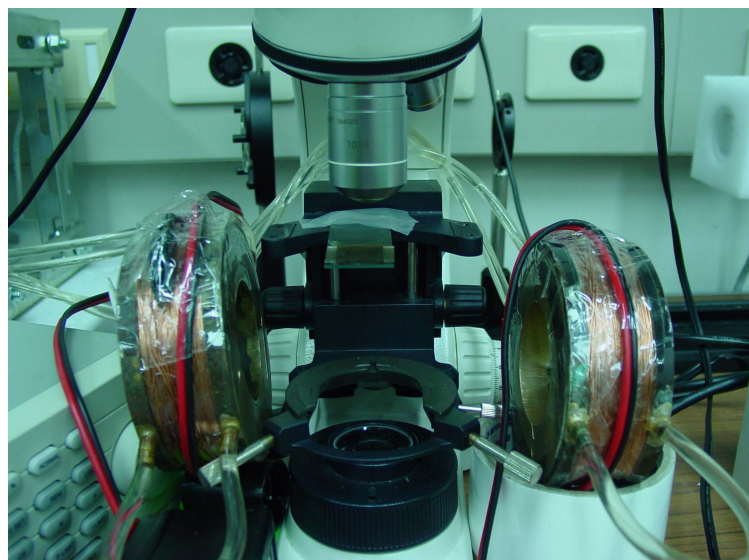
觀察磁流體在平行於薄膜的磁場下，以不同磁增率加至最大磁場時磁柱排列

實驗原理：

磁流體中的磁性小顆粒在磁場下會連結成磁柱，而磁柱的直徑、相鄰磁柱間的間距都和磁場的條件有關。磁場由兩個通電流的螺懸管提供，磁增率由電壓的增加控制，電壓加到 20V 時為最大磁場，磁流體封裝在刻有 0.5 μ m 凹槽的蓋玻片上，夾在兩螺懸管中間，用顯微鏡觀察。

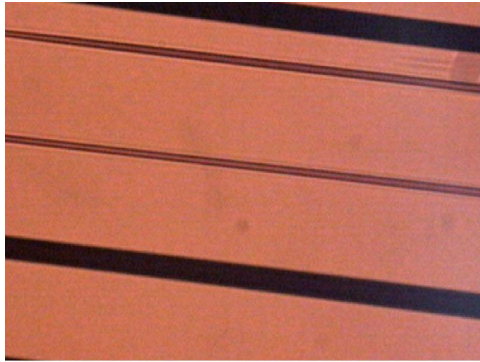
實驗步驟：

- (一) 將漆包線分四段繞滿一個銅製線圈，四段漆包線的末端再接起來，一起皆在電源供應器上。分成四段是為了使電阻減低（電阻可看成四小段並聯），如過用一條漆包線繞到底的話，電阻會非常大，線圈很快就會報廢。
- (二) 再將另一個銅製線圈也如此纏繞，再接上電源供應器，置磁流體樣本於載物台上，兩線圈垂直立起，至於載物台兩側，使磁流體樣本在兩線圈正中間，兩線圈靠越近越好。
- (三) 將線圈和磁流體（製作方法見研究器材）一起放置顯微鏡載物台上，如圖裝置，並打開水龍頭，讓冷水流經線圈殼中。
- (四) 控制電源供應器分別以 1.43v/s、0.74v/s、0.48v/s、0.38v/s、0.31v/s、0.25v/s 的速率加至 20V，以顯微鏡（100x）觀察，再用電腦紀錄每次的影像。

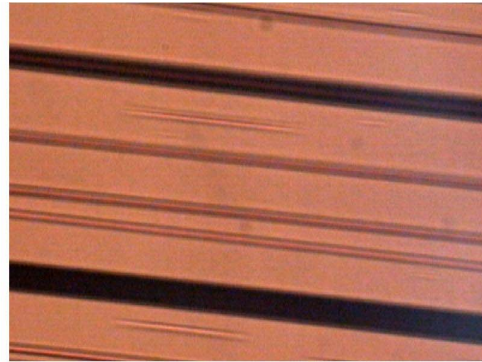


研究結果

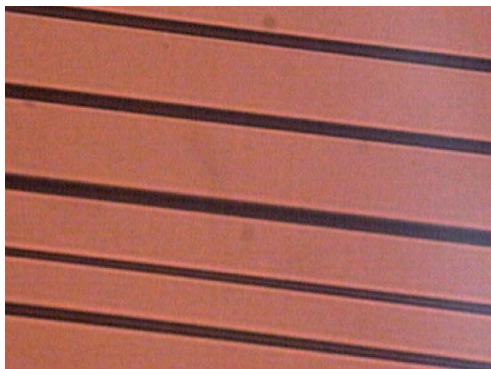
實驗三



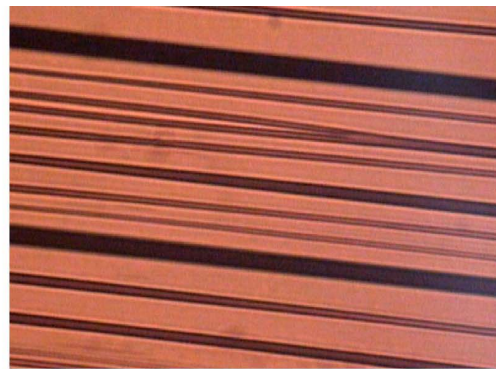
0.33v/s



0.48v/s



0.74v/s



1.43v/s

(三) 的側視圖，上面各圖磁流體在 1.43v/s、0.74v/s、0.84v/s、0.38v/s、0.31v/s、2.5v/s 的速率下，達到 20V 電流下線圈產生的最大磁場磁場時的結構，放大倍率是 100 倍，形成首尾相接的水平條狀圖形，磁增率越大，間距就越小，橫條也越細。

(四) 磁束結構縱切面是一點一點的，而磁場改為平形薄膜時觀察到的就是橫切面，就是一橫一橫的磁束，在磁場增加的過程中可以明顯的看見磁流體顆粒開始形成，彼此首尾聯接成串就成了一直線，粗細不一，也會受上下磁束的拉鋸，會上下移動，甚至併入另一條磁束中，如果有一小段磁束旁邊剛好有兩個磁束的開頭，它會將之接起來，成為一整條磁束，一開始磁流體是各自銜接，亂七八糟，然後再自行移動和合併，最後加至 10V 時磁束間的距離大致相等，達成一個平衡狀態，而且只剩下幾條連貫到底的磁束，但是磁場再加下去時磁束會出現分叉，分裂出去的磁束會彼此影響而移動，最後再達成一次平衡，就是在 20V 時我擷取的影像，這個結果和實驗一垂直磁場下的觀察大致吻合。

實驗四

實驗目的：

觀察水平磁場下磁流體的繞射效應

實驗原理：

磁流體磁柱間的縫隙可以當作狹縫，平行光通過時可以產稱繞射圖形，而此圖形受磁流體排列控制。

光路的設技是為了製造平行光，先將光通過內層塗碳粉的長管，使燈光更接近平行，將之在經過一凸透鏡 A 折射，大略會在焦點匯集，焦點上放一針孔，擋掉偏離太多的光，凸透鏡 A、B 焦點重疊，經過另一透鏡 B 折射，就更接近平行光了，因為考慮磁流體也是流體，不能豎直，所以在家一反射鏡將光線修改成垂直向上，透過線圈中間平放的磁流體薄膜。

本實驗主要是在觀察影像，對各變因沒有做很深入的探討。

實驗步驟：

- (一) 將漆包線分四段繞滿一個銅製線圈，四段漆包線的末端再接起來，一起皆在電源供應器上。分成四段是為了使電阻減低（電阻可看成四小段並聯），如過用一條漆包線繞到底的話，電阻會非常大，線圈很快就會報廢。
- (二) 再將另一個銅製線圈也如此纏繞，再接上電源供應器，用一玻璃片夾在兩線圈之間，磁流體樣本（製作方法見研究器材）於玻璃片上。
- (三) 將粗水管內塗上黏膠，在倒入許多碳粉搖晃，待其乾硬。
- (四) 將兩線圈中間夾磁流體樣本置於一有孔鐵架上（自行組裝），開孔中心對準線圈中心，讓磁流體薄膜在開孔之上。
- (五) 將鹵素燈至於光凳一端，粗水管置於鹵素燈前，罩住燈緣，不要讓燈光外洩。
- (六) 在粗水管另一開口放一個焦距 20cm 的凸透鏡，恐徑和水管開口差不多等大。
- (七) 再將離凸透鏡 20cm 處放一針孔，調整高度對準凸透鏡中心。
- (八) 在具針孔 20cm 處再放置一個相同的凸透鏡，此透鏡射出的光通過磁流體薄膜正下方，用一傾斜 45° 之小反射鏡將此道光垂直向上反射致磁流體薄膜。
- (九) 將實驗室內所有燈都關掉，只留鹵素燈，有必要的話將鹵素燈和

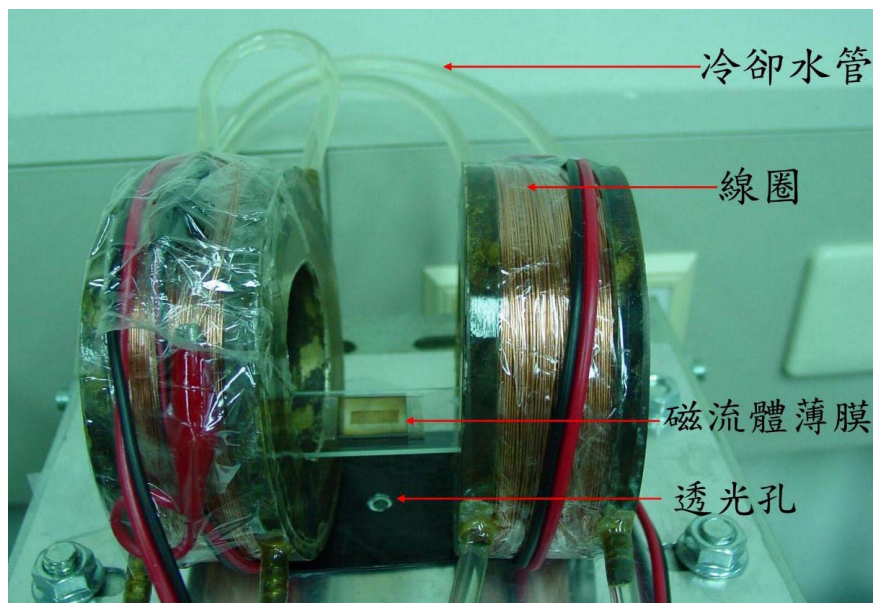
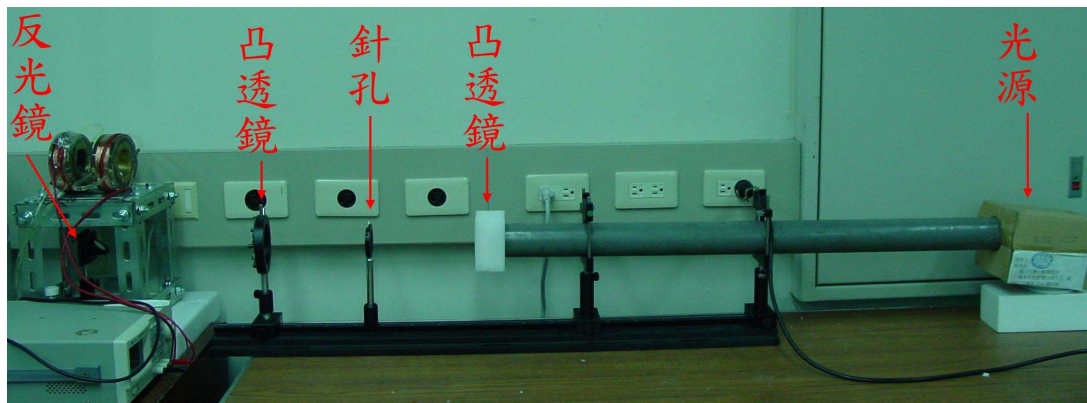
粗管間的縫隙用黑布蓋住，兩凸透鏡間用後紙板折成門字行長條遮住，再用一支手電筒包以黃色玻璃紙，作為操作用照明。

(十) 將大張底片整捲貼在上面那一個線圈上。

(十一) 控制電源供應器速率加至 20V。

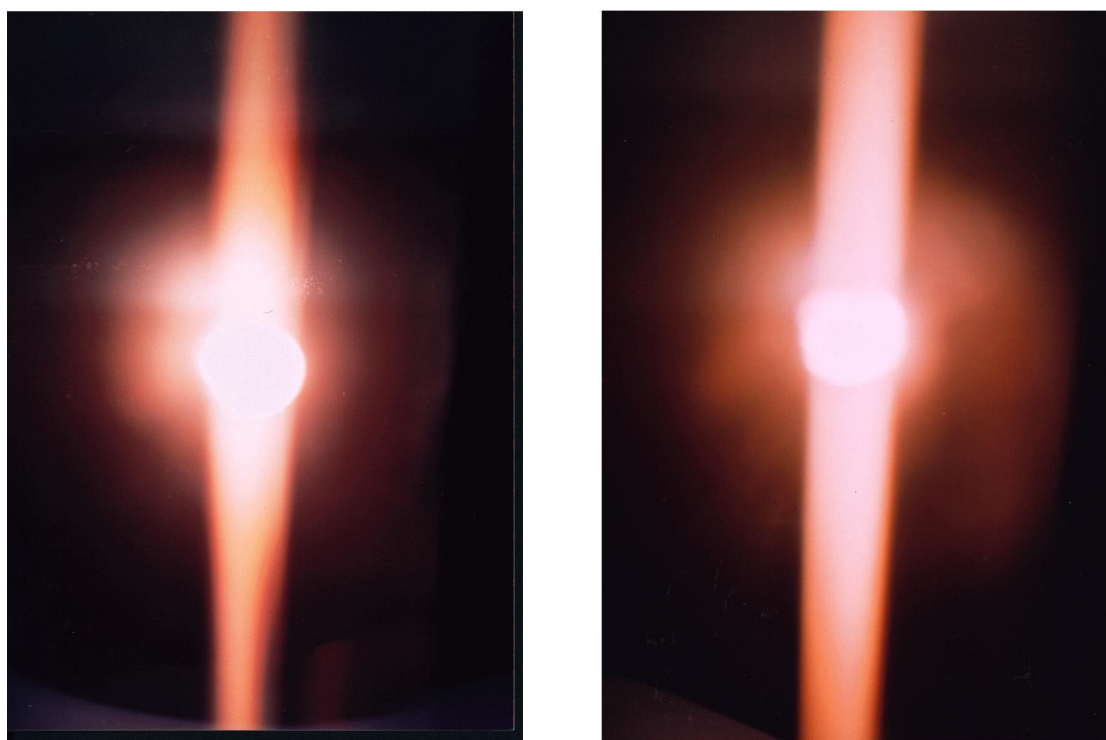
(十二) 以鹵素燈開關控制曝光時間，以 5s、10s、20s、30s 的曝光時間做測試，全部拍完之後，一定要確定底片都收好才能開燈。

(十三) 沖洗相片。



研究結果

實驗四



(曝光約 30 秒)

上面的照片是平行光通過時產生的繞射圖形，色澤的不同是因為曝光時間的差異，而此圖形受磁流體排列控制，為向兩邊延伸的光帶，與有在磁流體加磁場後才觀察得到，而加了磁場之後原本黑褐色的磁流體薄膜也會呈現肥皂泡般的彩虹光澤，但顏色更深，磁場一消除就沒有了。

實驗五

實驗目的：

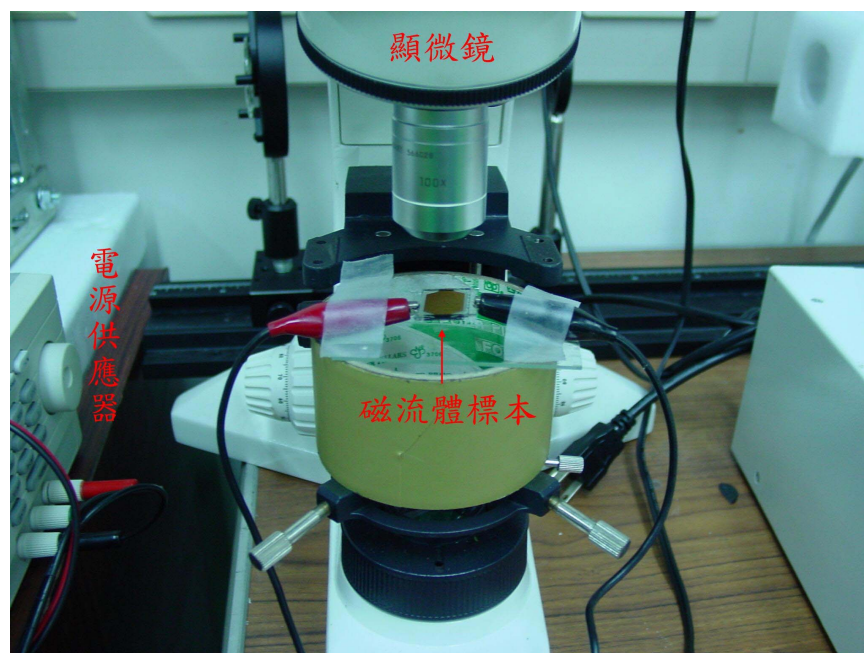
觀察磁流體在水平於薄膜的電場場下，不同電場磁流體排列的變化

實驗原理：

ITO 玻璃為能導電之透明材料，原是設計做液晶實驗的，構造為兩玻璃夾層，兩側有封住，另外兩側有開口，電極在玻璃夾層的上下兩面，用電源供應器提供電壓，再用顯微鏡觀察磁流體的擾動。

實驗步驟：

- (一) ITO 將玻璃直立，用針筒吸起一點磁流體，滴一小滴在 ITO 玻璃有開口那端讓他自行滲入，直至到達另一端開口，再用無塵紙擦拭乾淨兩端開口，接下來用 AB 膠封住兩端開口，待其乾硬。
- (二) 將線圈和剛封好的磁流體樣本一起放置顯微鏡載物台上，如圖裝置。控制電源供應器分別瞬間加上 5V、15V、10V、15V、20V 的電壓，以顯微鏡（10x）觀察，再用電腦紀錄每次的影像。



研究結果

實驗五

1



2



3



4



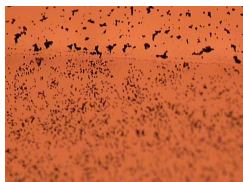
開始加 20V 的電場

切掉電源

1



2



3

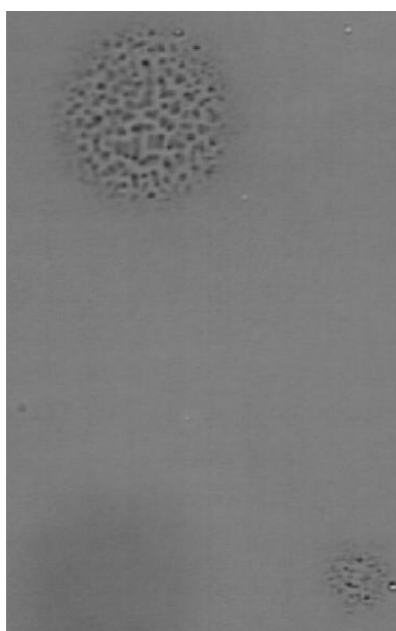


4



開始加 10V 的電場

切掉電源



上面的圖片是磁流體在瞬間加上電壓的結構照片，以 10x 被率放大，他並沒有規則的現象可以觀察，只觀察到在電極邊界上的一些擾動，包括有粒子在在通電後在電極邊界上震盪，還有產生較大的聚集沈澱凝聚，而通電的瞬間後幾秒看得到的黑色粒會有震一下的感覺，有一點像是磁流體中產生一個震波，顏色都會變深，而但電場消去的後幾秒也會有震一下的感覺，然後顏色又淡掉了，但是電極部分和非電極部分結構明顯不同（上方為非電極區，下方為電極），電壓瞬間加至 20V 時非常明顯，15V 時就弱很多，10V 以下就幾乎沒反應了。

左圖為其中一塊磁性物質聚集的圖片，黑色的物體會隨電場放射狀震動。

實驗六

實驗目的：

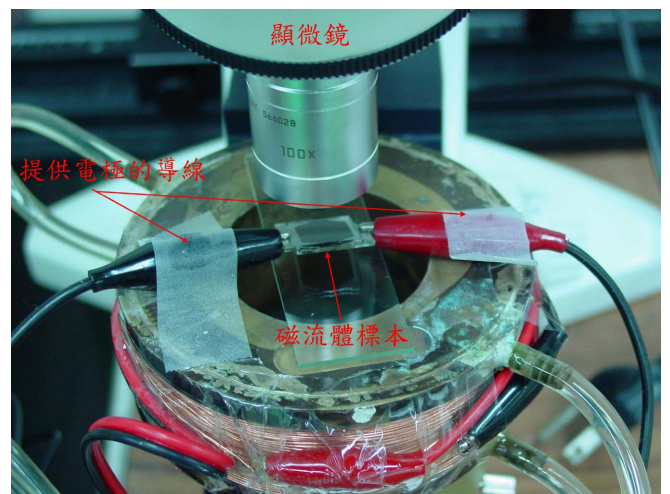
觀察磁流體在螺旋線通電產生垂直於薄膜的磁場下，再加以電場觀察其結構變化。

實驗原理：

磁場由兩個通電流的螺懸管提供，磁增率由電壓的增加控制，電壓加到 20V 時為最大磁場，磁流體封裝在 ITO 玻璃中，ITO 玻璃為能導電之透明材料，電極在玻璃夾層的上下兩面，用電源供應器提供電壓，最大 20V，再用顯微鏡觀察磁流體的擾動

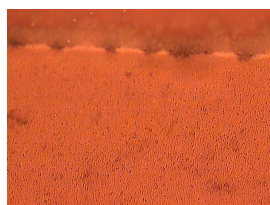
實驗步驟：

- (三) ITO 將玻璃直立，用針筒吸起一點磁流體，滴一小滴在 ITO 玻璃有開口那端讓他自行滲入，直至到達另一端開口，再用無塵紙擦拭乾淨兩端開口，接下來用 AB 膠封住兩端開口，待其乾硬。
- (四) 將漆包線分四段繞滿一個銅製線圈，四段漆包線的末端再接起來，一起皆在電源供應器上。分成四段是為了使電阻減低（電阻可看成四小段並聯），如過用一條漆包線繞到底的話，電阻會非常大，線圈很快就會報廢。
- (五) 再將另一個銅製線圈也如此纏繞，再接上電源供應器，用一玻璃片夾在兩線圈之間，將封於 ITO 玻璃磁流體樣本於玻璃片上。
- (六) 將 ITO 玻璃片的兩電極分別夾上兩條附鱷魚夾的線，接到電源供應器上。
- (七) 將線圈和剛封好的磁流體樣本一起放置顯微鏡載物台上，將電源供應器並聯接 ITO 玻璃上和銅線圈，如圖裝置。
- (八) 先將開關打開，瞬間加至 20V，以顯微鏡（10x）觀察，再用電腦紀錄最初影像。
- (九) 將接至線圈的電線拔掉，以顯微鏡（10x）觀察，電腦紀錄影像。
- (十) 將接至線圈的電線插回，以顯微鏡（10x）觀察，電腦紀錄影像。
- (十一) 將接至 ITO 玻璃的電線拔掉，以顯微鏡（10x）觀察，電腦紀錄在記錄一次影像。



研究結果

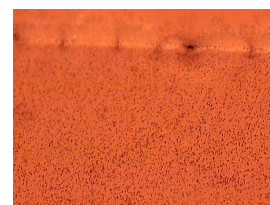
實驗六



磁場電場一起加



關掉磁場



關掉電場



無



磁場電場一起加



關掉磁場



加回磁場關掉電場

上面的圖片是磁流體在瞬間加上電壓 20V 產生磁場和電場的結構照片，以 10x 被率放大，它並沒有規則的現象可以觀察，只觀察到而隱約有一點一點的有序結構，電極下尤其明顯，但是還很混亂。電極邊界上有一些擾動，包括有粒子在在通電後在電極邊界上震盪，還有產生較大的聚集沈澱凝聚，而通電的瞬間後幾秒看得到的黑色粒會有震一下的感覺，有一點像是磁流體中產生一個震波，顏色都會變深，而但電場消去的後幾秒也會有震一下的感覺，然後顏色又淡掉了。電場和磁場本身沒有干擾，但是電極邊界上的變化劇烈。電極部分和非電極部分結構明顯不同（上方為非電極區，下方為電極）。

實驗七

實驗目的：

觀察磁流體混入液晶，觀察其性質的改變

實驗原理：

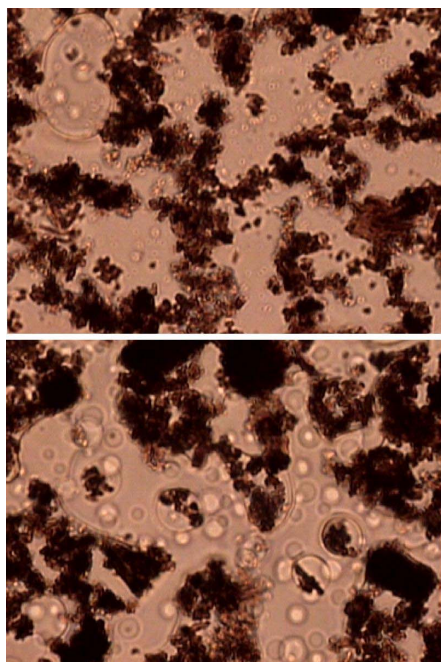
磁場由兩個通電流的螺懸管提供，磁增率由電壓的增加控制，電壓加到 20V 時為最大磁場，磁流體和液晶混和封裝在刻有 0.5mm 凹槽的蓋玻片上，夾在兩螺懸管中間，用顯微鏡觀察。

實驗步驟：

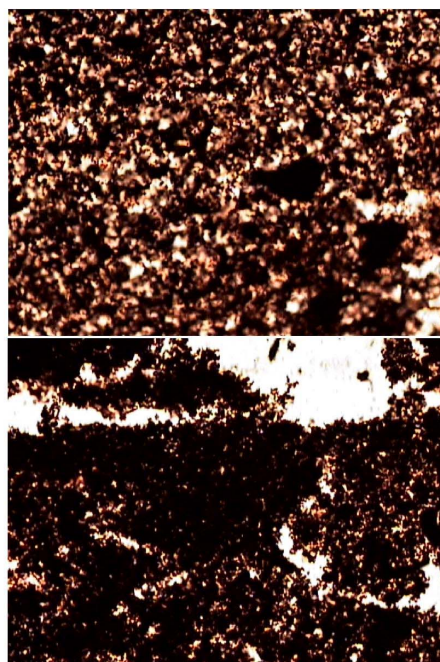
- (十二) 將磁流體與液晶混合，用超音波振均勻。
- (十三) 重複前述實驗。

研究結果

實驗七



100x



10x

上圖為液晶和磁流體混合後在顯微鏡底下的照片，液晶和磁流體是可以互相混和均勻的，使原本深褐色的液體變成更深黑色的流體，內有有大塊的沈澱，而且失去原本對磁場電場的反應和趨向，不再受影響，就這樣子固定不動了。

陸、討論

- (一) 磁色效應為一七彩光環，是平行光經磁流體磁柱間隙繞涉形成的，間隙的大小由磁場控制，光還的大小就隨磁束間的距離改變，而原本黑色的磁流體加磁場之後會呈現如肥皂泡膜表面的彩虹光澤，但是色澤更深，看起來很像路邊的油在反是蛋白石般的光，所以原理可能極類似，不同角度看顏色也不同，可是磁場一消除就沒有了，所以只有在規則的排列下才有辦法觀測。原本磁色效應我打算用數位相機拍攝，但是由於七彩圓環光度太弱，無法拍攝到影像，但是肉眼可以很清楚的看見，所以後來的方法是直接將磁色現象打在底片上，曝光一段時間。
- (二) 磁場對磁流體影響很大，液晶分子對電場很敏感，但是兩者加在一起，卻對磁場電場都沒有反應，可能是彼此間的吸引力牽制，推測有可能是因為液晶分子抓住了磁流體分子顆粒的周圍，使其無法運動，以致於電場磁場的影響被消除，而失去原本對磁場電場的反應和趨向，或是需要更大的磁場和電場才能使磁流體顆粒運動，如果磁場加大有可能會有反應，只是在目前的儀器下就只能提供 20 的電壓，銅線卷也是纏到了上限，所以在測量範圍內它是不會動的，但是如果電場或是磁場能再增加，結果就不得而知了。塊狀的沈澱，推測有可能是因為不同的物質加入彼此間吸引力不同，使原本就不穩定的磁流體產生磁性物質的聚集。
- (三) 加電場是比較新的想法，一般磁流體對磁場非常敏感，但是電場就沒有那麼規則的現象可以觀察。電場對磁流體的顆粒有干擾，他會促使磁性粒子聚集沈澱，成團塊狀，而通電後幾秒鐘中會使磁性物質震動，而顏色加深，電極邊界的顏色也會變深，目前而且最大的問題就是 ITO 玻璃太厚，大過 100X 鏡頭的物距，而我只有 10X 和 100X 的鏡頭，10X 下放大倍率有限，所以只觀察到在電極邊界上的一些擾動，包括有粒子在在通電後在電極邊界上震盪，還有產生較大的聚集沈澱凝聚，而通電的瞬間後幾秒看得到的黑色顆粒會有震一下的感覺，顏色都會變深，而但電場消去的後幾秒也會有震一下的感覺，然後顏色又淡掉了電壓瞬間加至 20V 時非常明顯，15V 時就弱很多，10V 以下就幾乎沒反應了，之前我直接將金原子鍍在蓋玻片和載玻片上，但是通電後兩電極相吸靠近，震盪太大，破壞了磁流體，

後來改良實驗，所以改用 ITO 玻璃，因為它是固定大小的，我認為不會有震盪的現象，但是結果有一點像是磁流體中產生一個震波，確切的原因還不瞭解，但有不排除可能是 ITO 玻璃也有些微震盪現象，只是當初我不知道，但是延遲的時間就無從解釋了。電極邊界的顏色會在通電後一直加深，後面原本咖啡色的煤油背景會有從電極發出一層明顯顏色更深色層邊界向外移動，直到整個畫面都一樣顏色，過幾秒又再出現一次，所以煤油顏色越來越深，但始終是均勻的，這個現象無法解釋，但是因為推測它是與煤油有關，和磁流體本身關係可能不大，所以沒有多做討論。

(四) 磁流體對電場，本實驗沒有得到很明確的關係，但是我猜測磁流體導電度與磁場間應該有某種關係，磁性粒子連接成磁束，磁束的直徑和疏密排列對電阻、電流應該會有影響，可以得到比較有規則的數據；利用液晶在光學上的特性，如果把液晶加磁流體的不規則物體透光或許會有繞涉或是其他的光學現象；還有對磁流體加電場更多方面的嘗試，或許可已有新的突破；然而磁流體的有序排列也可以當作光子晶體，控制光的反射，這些都是本實驗沒有討論完全的部分，日後可以繼續發展。

柒、結論

- (一) 磁流體磁柱間的縫隙可以當作狹縫，平行光通過時可以產生繞射圖形，而此圖形受磁流體排列控制，縫隙越小，繞射出的圖形也越小，磁色效應為淡淡的七彩光環，與有在磁流體加磁場後才觀察得到，而加了磁場之後原本黑褐色的磁流體薄膜也會呈現肥皂泡般的彩虹光澤，但顏色更深，磁場一消除就沒有了。
- (二) 磁流體的排列受磁增率、最大磁場、溫度、濃度、厚度影響，磁增率愈大，磁束分裂的就越細小，彼此間的距離也越小，而在不同的大小的磁場下會有類似“相變”的磁束從一穩定排列在一分為二達成另一個更密的穩定排列。
- (三) 當磁流體位於直流固定磁場下時，懸浮於溶液中的磁性粒子便開始聚集，慢慢變成一條一條的磁束圓柱體，並且處在磁場下一段時間後，因為磁偶矩所產生的排斥力與磁束之磁偶矩和外加磁場的吸引力達到平衡，個別的磁束便會開始規則排列，從上而下看，形成磁流體特殊的六角形結構（與圖中任一點相鄰且距離最短的六點等距且排成正六邊形）（實驗一結果），再將此影像轉灰階做傅力葉轉換，如果是完美的六角形結構傅利葉轉換出來的結果會是六個點，但一般都會是一個橢圓，比較的方法就是看兩張圖的橢圓長軸是不是一樣長，因為這個數據代表了磁束之間的距離正六邊行的六個頂點。在低磁場下（ $<10V$ ），磁流體呈現出一不規則的磁束圓柱體結構，開始出現圓圓一點一點的磁束雜亂的分佈在磁流體薄膜中。當電壓接近 $10V$ 時，第一重的有序六角形晶格結構形成於磁流體薄膜中，開始有整齊的排列。當磁場繼續增加，磁流體開始由第一重的六角形有序晶格結構進入到過渡狀態，發生相變，此狀態中可見到磁流體磁束從一束分裂為二束的情形，最後在電壓於 $16V$ 上下時，間距大致一定，就不再分裂，到 $20V$ 時第二重更密的六角形有序晶格結構於是形成，也就是最後擷取的影像。
- (四) 磁束結構縱切面是一點一點的，而磁場改為平行薄膜時觀察到的就是橫切面，就是一橫一橫的磁束（實驗二之結果），在磁場增加的過程中可以明顯的看見磁流體顆粒開始形成，彼此首尾聯接成串就成了一直線，粗細不一，也會受上下磁束的拉鋸，會上下移動，甚至併入另一條磁束中，如果有一小段磁束旁邊剛好有兩個磁束的開頭，它會將之接起來，成為一整條

磁束，一開始磁流體是各自銜接，亂七八糟，然後再自行移動和合併，最後加至 10V 時磁束間的距離大致相等，達成一個平衡狀態，而且只剩下幾條連貫到底的磁束，但是磁場再加下去時磁束會出現分叉，分裂出去的磁束會彼此影響而移動，最後再達成一次平衡，就是在 20V 時我擷取的影像，這個結果和實驗一垂直磁場下的觀察大致吻合。

- (五) 加電場是比較新的想法，一般磁流體對磁場非常敏感，但是電場就沒有那麼規則的現象可以觀察，而且最大的問題就是 ITO 玻璃太厚，大過 100X 鏡頭的物距，而我只有 10X 和 100X 的鏡頭，10X 下放大倍率有限，所以只觀察到在電極邊界上的一些擾動，包括有粒子在通電後在電極邊界上震盪，還有產生較大的聚集沈澱凝聚，而通電的瞬間後幾秒看得到的黑色顆粒會有震一下的感覺，有一點像是磁流體中產生一個震波，顏色都會變深，而但電場消去的後幾秒也會有震一下的感覺，然後顏色又淡掉了，電壓瞬間加至 20V 時非常明顯，15V 時就弱很多，10V 以下就幾乎沒反應了。
- (六) 磁流體和電場磁場的關係是互相獨立的，不會互相影響，電極附近的擾動不會破壞整體的有序結構，但是電場造成的聚集沈澱和震動依然可以觀察到。
- (七) 液晶和磁流體是可以互相混和均勻的，使原本深褐色的液體變成更深黑色的流體，內有大塊的沈澱，而且失去原本對磁場電場的反應和趨向，不再受影響。