

SA3-244

磁性溶液對雷射光之繞射現象

The Laser diffraction of magnetic solution

林健華

磁性溶液對雷射光之繞射現象
The Laser diffraction of magnetic solution
林健華

壹、研究動機

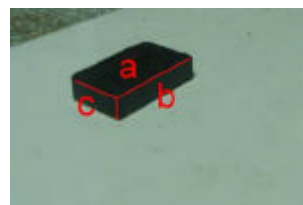
在一次老師的示範實驗中，發現當雷射光穿透磁性溶液時，會受到磁攪拌子的影響，而形成橢圓形的光影，和原本的圓形不同，於是進一步對這個特別的現象進行探討。

貳、研究目的

1. 探討雷射光束穿過磁性溶液時紙屏上光影圖形的產生原因。
2. 探討光影圖形與磁場的關係。
3. 探討光影圖形變化與磁場變化的關係。
4. 自製一個會旋轉的磁場，驅動磁性溶液中的磁性顆粒旋轉，為進一步的應用奠定基礎。
5. 模擬磁性顆粒在溶液中的運動方式。
6. 利用光影圖形判斷地磁方向及磁傾角。
7. 將非磁性物質接在磁性顆粒上，並隨之運動。

參、研究設備及器材

1. 氦氖雷射。
2. 雷射筆 (LR44 電池)
3. 玻璃樣品槽 (底面積 $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ 高 4.5 cm ，一對光通面和一對霧面) 以下簡稱 cell (圖一)
4. 大小為 A3 之白紙紙屏。
5. 燒杯。
6. 滴管。
7. 磁攪拌機和磁攪拌子。
8. 強力磁鐵 (分為 a.b.c 三種面，面積 $a > b > c$) (圖二)
9. 指北針。
10. 光學顯微鏡。
11. 光柵膠片。 (圖三)
12. 自製旋動磁場模擬器。
13. 數位相機：Dimage7，Cyber-shot。
14. DataStudio 磁感應器，高感度光感應器。
15. 高斯計
16. 影像編輯軟體：Ulead PhotoImpact7
17. 藥品：硫酸銨亞鐵，硫酸鐵，硝酸銀，醋酸鈉，濃氨水，鹽酸，RO 逆滲透水。



肆、研究過程及其結果

(一) 文獻探討

1. 磁性流體：磁性流體 (Magnetic fluid) 是將奈米磁性顆粒經界面活性劑處理，使其安定且均勻的分佈於溶液中，因為界面活性劑的作用，磁性顆粒不會發生凝聚現象，若外加強磁場，可使磁性顆粒隨磁場方向排列或往磁場方向運動，磁性顆粒的所有運動皆會帶動溶劑分子一起運動。
2. 共沉法：共沉法為磁性流體的製備方式之一，雖然它需經過多次清洗的過程，但因原理及設備相當簡單，適合工業大量生產，是目前最廣泛使用的方法，大部分的磁性流體製備過程皆由此出發，經過檢測，共沉法的上層溶液有一定比例的顆粒，粒徑屬於奈米層級。
3. 膠體溶液：當溶質顆粒直徑約為 $10^9\sim 10^7\text{m}$ 時，溶質顆粒會因電性相斥等原因，均勻分佈於溶液中，且會因受溶劑分子不均勻碰撞而產生雜亂的運動，稱為布朗運動，若將光線通過膠體溶液，會產生散射現象而看到光束的出現 (廷得耳效應)，此現象是真溶液所無法觀察到的。
4. 廷得耳效應：均勻液態介質中若有微粒懸浮，這些微粒都是漫無規律的隨機分佈，當光線通過時，可作為次波源。又因為粒子間的間隔遠大於光波波長，次波之間沒有固定的周相關係，所以不會產生干涉相消的現象，因而出現向各個方向的散射光，此現象稱為廷得耳效應 (Tyndall effect)。
5. 繞射：波在通過狹縫或障礙物時，若波長與狹縫或障礙物的大小 W 相比，波長大於 W 時，波在狹縫或障礙物後可形成明顯的點波源效應，也就是繞射現象。
6. 紅光波長：實驗中使用的氬氖雷射，波長約為 632nm，紅光雷射筆的紅光波長約為 635nm。

(二) 磁性溶液基本製程

1. 配製 1M 硫酸銨亞鐵水溶液及 1M 硫酸鐵水溶液，以體積比一比一混合。
2. 加入鹽酸降低 pH 值至 pH1。
3. 加入濃氨水生成 Fe_3O_4 。
4. 用 RO 逆滲透水將沈澱洗三次，將氨水洗去即可。
5. 得到上層 Fe_3O_4 膠體溶液，以下簡稱磁性溶液。(如圖四)



(三) 距離對磁力的影響

1. 測得所用強力磁鐵 a 面 (如圖二)(探棒距離表面 0cm) 為 800 高斯，若將兩塊強力磁鐵吸合後，a 面為 1100 高斯。
2. 將兩塊磁鐵 a 面 N-S 相對緊貼在 cell 左右，cell 中約為 1050 高斯。
3. 一般物理教學用磁鐵為 140 高斯。
4. 2cm 磁攪拌子約為 250 高斯。
5. 將探棒距離強力磁鐵 30cm 時，高斯計指數保持在 0 高斯，故確保實驗時周圍 30cm 內沒

有帶磁性的物質，便可忽視環境磁場的影響。

(四) 磁性溶液與水之光影比較

步驟：

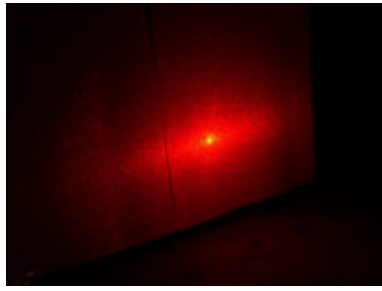
1. 牆上固定 A3 白紙，作為紙屏。
2. cell 距紙屏 3 公尺，分別內盛磁性溶液，並在 cell 旁放置磁鐵。使氦氣雷射光穿過 cell 光通面（雷射頭與 cell 前緣距離 5 公分），產生光影於紙屏上（調整 cell 使 cell 壁上的入射光和反射光重合以確保 cell 壁的法線與雷射光束平行）。（如圖五）



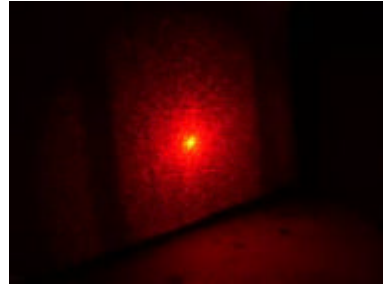
(圖五)

結果：

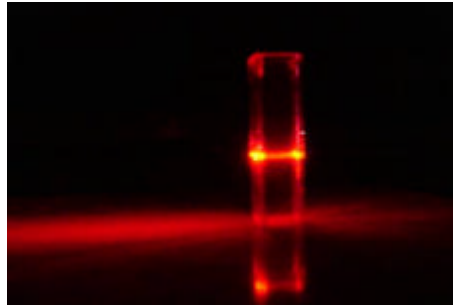
1. 發現溶液之雷射光影略成橢圓狀，可能為溶質顆粒受地磁的影響使粒子排列產生繞射（圖六 A）。而 RO 逆滲透水的雷射光影呈圓形對稱（圖六 B）。
2. 當雷射光通過溶液時，可見挺得耳效應（圖七），而水則無。
3. 比較圖六 A 及圖六 B 中投射在紙屏上的光影亮度，圖六 A 小於圖六 B。由紙屏上光影散射至水泥平台的光影強度也可看出，圖六 A 的水泥平台無紅色反光，圖六 B 的水泥平台有明顯的紅色反光，可能是磁性顆粒對雷射光產生繞射及散射後，使雷射光強度減弱所造成的現象。



(圖六 A) 磁性溶液之雷射光影



(圖六 B) RO 逆滲透水的雷射光影



(圖七)

(五) 強力磁鐵磁力線圖

步驟：

1. 桌上置一顆強力磁鐵，b 面在下，兩旁以書本墊高並使 A4 紙平鋪在上。
2. 從上方將鐵粉慢慢撒下，使其呈現出清楚的磁力線，以數位相機拍攝（圖八 A）。
3. 桌上置兩顆強力磁鐵（a 面 N, S 極相對，相距 4.5 公分），b 面在下，兩旁以書本墊高並使 A4 紙平鋪在上。
4. 從上方將鐵粉慢慢撒下，使其呈現出清楚的磁力線，以數位相機拍攝（圖八 B）。

結果：

1. 如圖八 A，長方形磁鐵的 S 極與 N 極分別在兩 a 面上。
2. 圖八 B 中的兩長方形磁鐵以 a 面相對時，兩磁鐵間形成一個平行磁場，磁場方向與磁鐵 b 面的法線垂直，而與地平面平行。



(圖八 A) 磁鐵 b 面朝上，看 a 面的磁力線



(圖八 B) 磁鐵 a 面相吸下的磁力線

(六) 平行磁場下之光影

步驟：

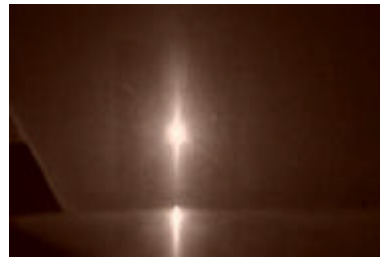
1. 牆上固定 A3 白紙，作為紙屏。
2. cell 距紙屏 3 公尺，內盛磁性溶液。使氦氖雷射光穿過 cell (雷射頭與 cell 前緣距離 5 公分)，產生光影於紙屏上。
3. 將兩強力磁鐵以實驗 (五) 之方式 (如圖八 B) 放置於 cell 左右，使 cell 置於左右平行的磁場中，觀察產生的光影，並比較其與實驗 (四) 中磁力線的關係。
4. 將兩強力磁鐵放置於 cell 上下，使 cell 置於上下平行的磁場中，觀察產生的光影並比較其與實驗 (五) 中磁力線的關係。
5. 將磁鐵緊貼在 cell 外壁，觀察圖形的差異。

結果：

1. 磁鐵沒有緊貼在外壁所產生的光影呈狹長橢圓狀，若是磁鐵貼緊外壁，則形成線狀光影。
2. 若磁鐵磁力線平行於地面，形成垂直於地面的光影 (圖九 A~B)。
3. 若磁鐵磁力線垂直於地面，形成平行於地面的光影 (圖九 C~D)。
4. 因為圖九 B 和 D 的線狀光影太強，故此實驗使用棕褐色濾鏡，否則會無法觀察。



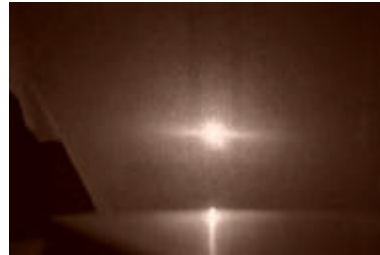
(圖九 A) 磁鐵不緊貼磁力線平行地面



(圖九 B) 磁鐵緊貼磁力線垂直地面



(圖九 C) 磁鐵不緊貼磁力線垂直地面



(圖九 D) 磁鐵緊貼磁力線垂直地面

(七) 驗證是否為繞射現象 與八種光柵膠片及其繞射圖形比對

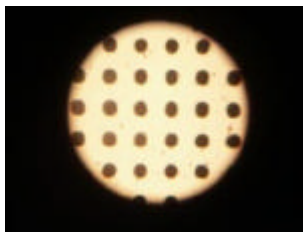
步驟：

1. 以拭鏡紙擦拭八種光柵膠片。
2. 將八種光柵膠片放置於光學顯微鏡下觀測其顆粒形狀及其排列，目鏡 10 倍，物鏡 40 倍。以數位相機拍攝 (圖十 A~H)。
3. 將八種光柵膠片分別放置於距紙屏 3 公尺處，使氦氖雷射光穿過，產生光影於紙屏上，以數位相機拍攝 (圖十一 A~H)。

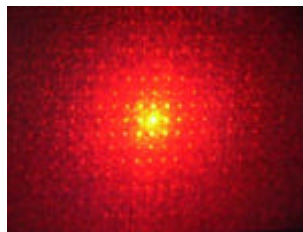
4. 比較實驗（六）光影圖形與本實驗圖形關係。

結果：

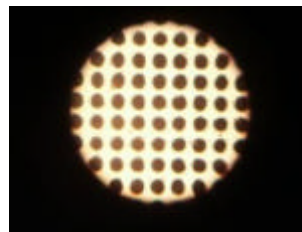
1. 光柵 A~H 的顆粒排列情形如圖十 A~H。
2. 雷射光通過 A~H 光柵後的繞射光影如圖十一 A~H。
3. 由光柵 A、B、E、F 之顆粒排列情形及繞射光影可知：
 - i 顆粒較小者，繞射光點較清楚明顯，光點散得較開，繞射圖形清晰可辨的區域較大。
 - ii 顆粒間距較小者，繞射光點較清楚明顯，光點散得較開，繞射圖形清晰可辨的區域較大。
4. 由光柵 C、D、G、H 之線條排列情形及繞射光影可知：
 - i 線條間距較小者，繞射光點散得較開。
 - ii 線條的方向與繞射光點的排列方向垂直。
5. 雷射光束穿過磁性溶液之光影長軸與磁力線垂直，光柵 C、D、G、H 的繞射光影長軸也與光柵線條垂直。
6. 由實驗（五）及實驗（六）可知，磁性顆粒依磁力線排列，可如很多層的 C、D、G 或 H 光柵一樣；再由本實驗可推論，當雷射光通過處於磁場中的磁性溶液時，會產生繞射現象。



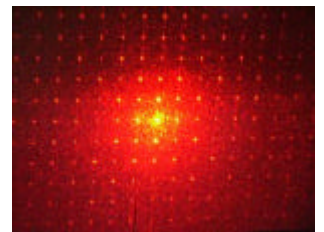
(圖十 A)



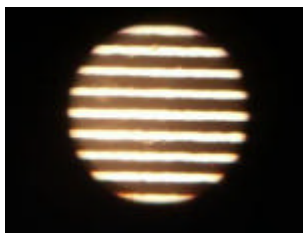
(圖十一 A)



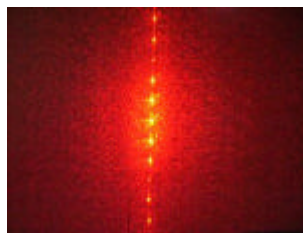
(圖十 B)



(圖十一 B)



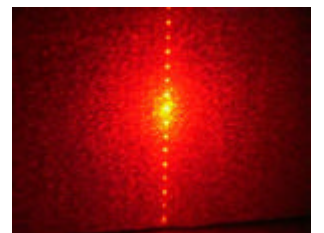
(圖十 C)



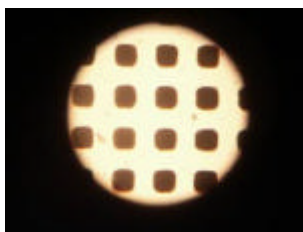
(圖十一 C)



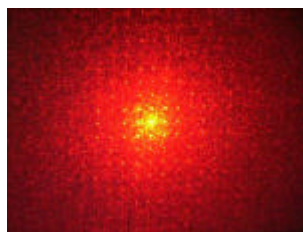
(圖十 D)



(圖十一 D)



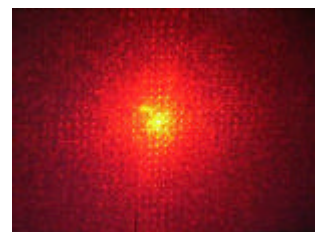
(圖十 E)



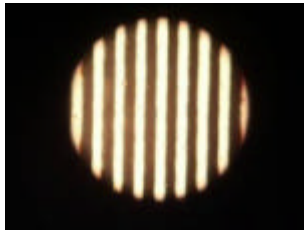
(圖十一 E)



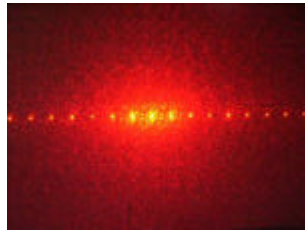
(圖十 F)



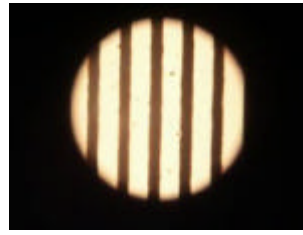
(圖十一 F)



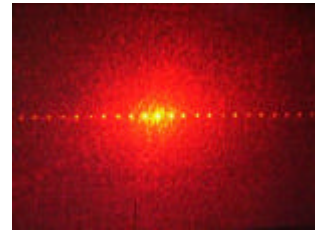
(圖十 G)



(圖十一 G)



(圖十 H)



(圖十一 H)

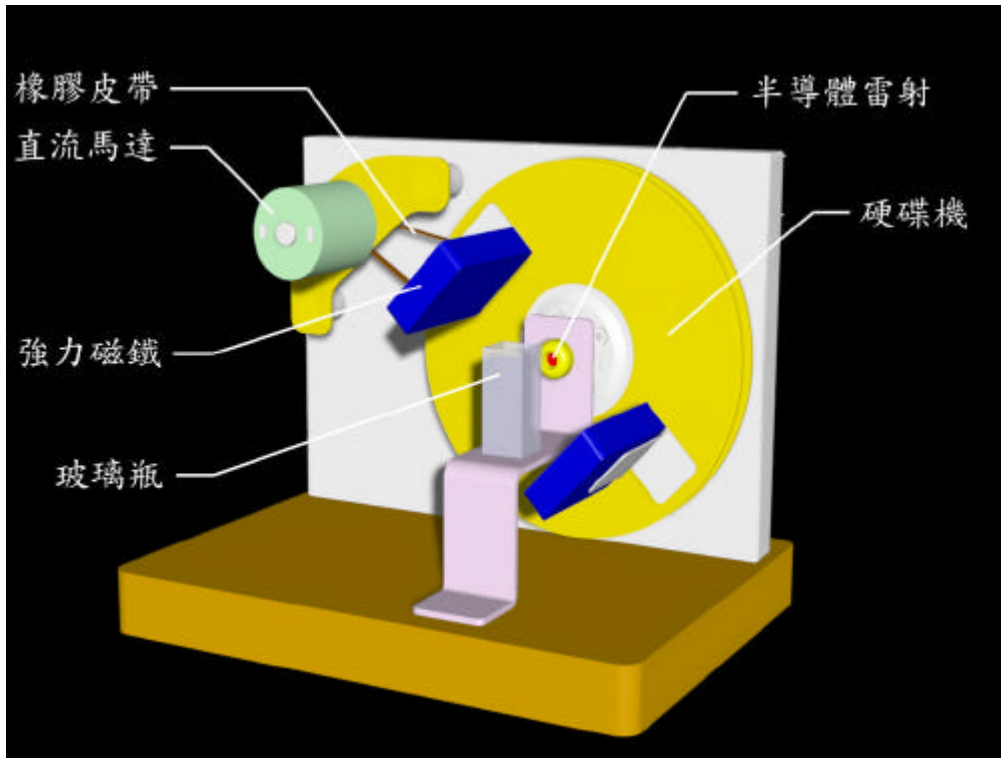
(八) 磁性顆粒趨動器的製做與初步測試

步驟：

1. 取出廢硬碟的碟盤、馬達及底座。
2. 在碟盤兩端固定兩顆強力磁鐵，a 面相對，製造出一個平行磁場來。
3. 磁頭座外加一顆直流馬達，並利用皮帶帶動碟盤轉動。
4. 製作脈衝寬度調變線路 (PWM)，控制直流馬達的轉速。
5. 取下雷射筆前端之半導體雷射。
6. 將上述結構固定於木製底座，並加上雷射頭支架，使雷射光由碟盤中心射出。
7. 完成結果如圖十二，並雷射光射出方向置一紙屏。
8. 將磁性溶液裝入 cell 中，使 cell 置於雷射頭支架上，開啟半導體雷射電源，用手輕輕轉動硬碟機，使垂直於雷射光前進方向的磁場跟著轉動，觀察紙屏上的光影是否變化。

結果：

1. 紙屏上的光影會隨磁鐵轉動而旋轉，如所附影片檔：Motor.AVI。
2. 目視光影的長軸方向與平行磁場中的磁力線方向，隨時保持垂直。



(圖十二) 微磁性顆粒驅動器

(九) 粒子轉動實驗—數以莫耳計的小磁鐵顆粒同步馬達

步驟：

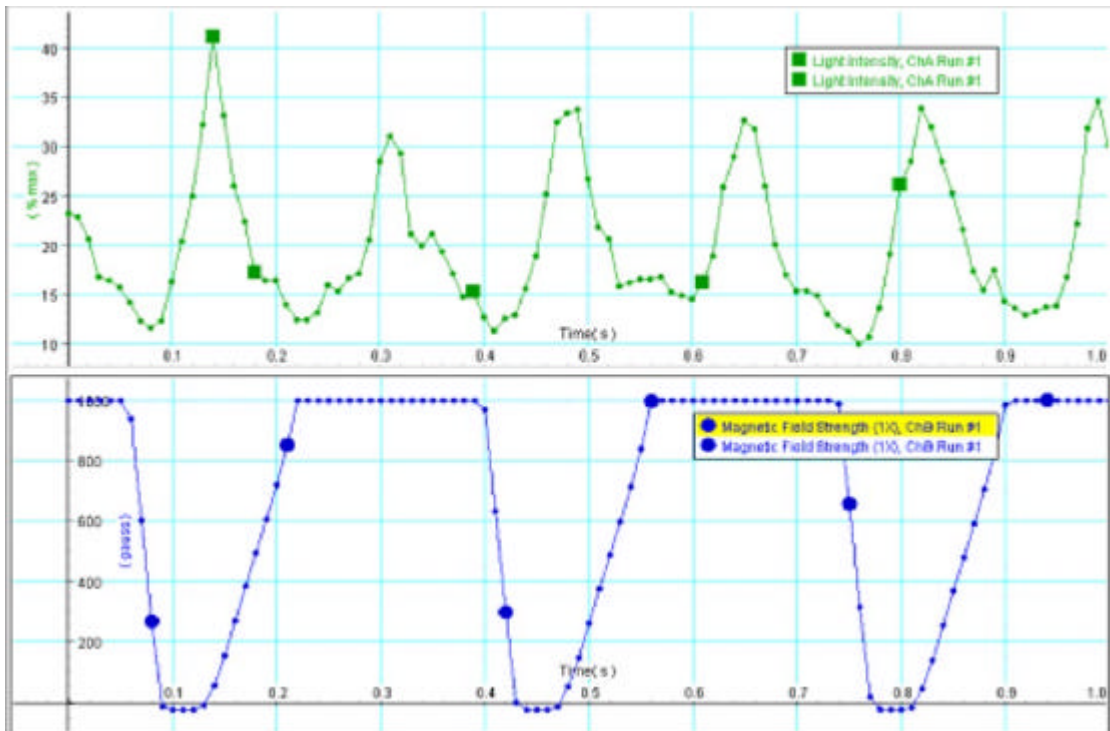
1. 將 DataStudio 的磁感應器放置於轉動磁性顆粒趨動器的磁鐵旁。
2. 放置 DataStudio 高感度光感應器於紙屏前，光感偵測孔面向雷射光射來的方向。
3. 改變脈衝寬度使磁鐵的轉速不同，同步記錄磁感應器及光感應器的訊號。
4. 記錄並比較磁鐵轉速和光影轉速。
5. 裝置圖如圖十三。

結果：

1. 3Hz、5Hz 和 8Hz 的磁力變化—光影變化對照圖如圖十四。
2. 圖十四的上曲線為光強變化圖，橫軸為時間、縱軸為感應器最大接收光強的百分比，圖形的兩周期表示裝置轉一圈。
3. 圖十四的下曲線為磁力變化圖，橫軸為時間、縱軸為高斯量，圖形的一週期表示裝置轉一圈（圖十四 A~C 的圖形上緣被切掉是因為磁場強度超過感應器的感應範圍，故將磁場改變後，圖十四 D 便可以感測到完整的週期變化圖）。
3. 四張圖中，磁力變化（下曲線）頻率和光影變化（上曲線）頻率完全符合預期。
4. 在趨動器轉速為 3、5 及 8Hz 時，隨著磁場的方向轉動，光影的長軸方向也同步轉動，可以推測有數以莫耳計的長型磁性顆粒在同步旋轉。

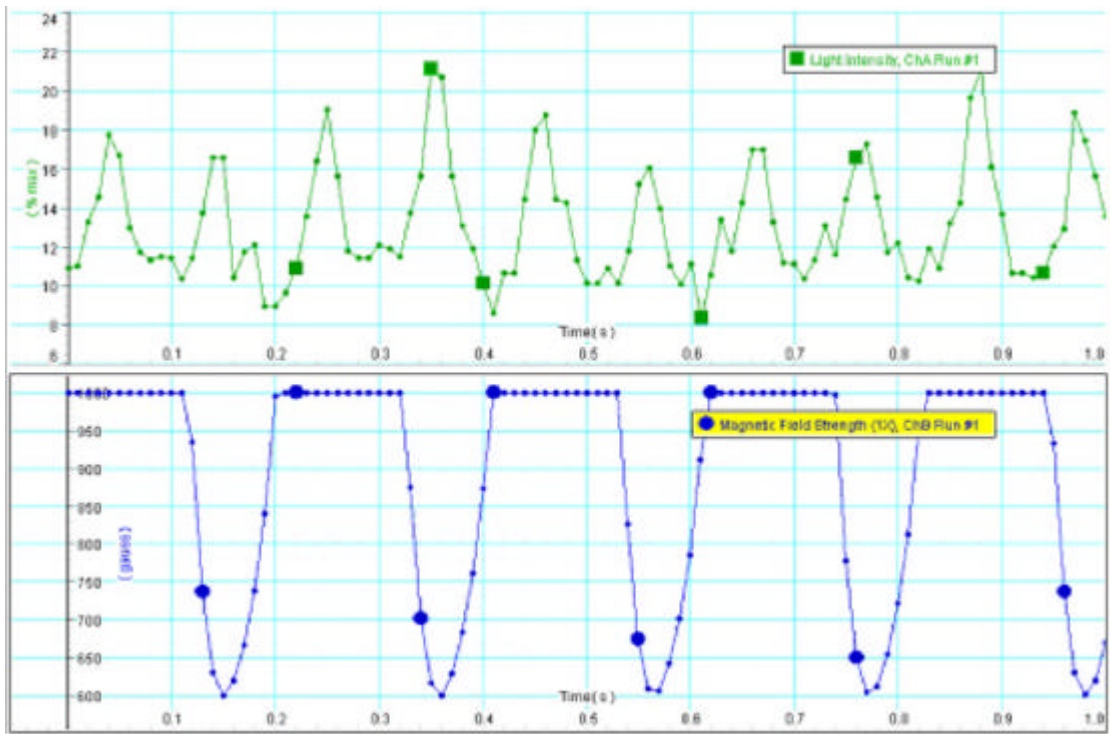


(圖十三)



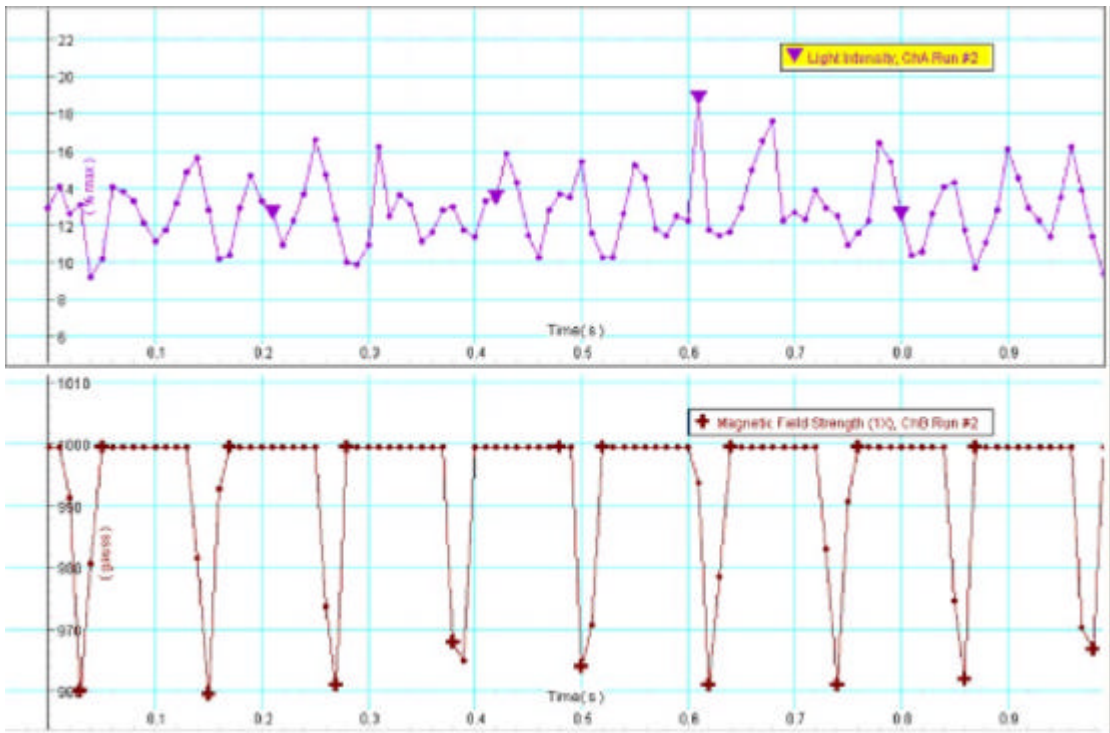
3Hz

(圖十四 A)



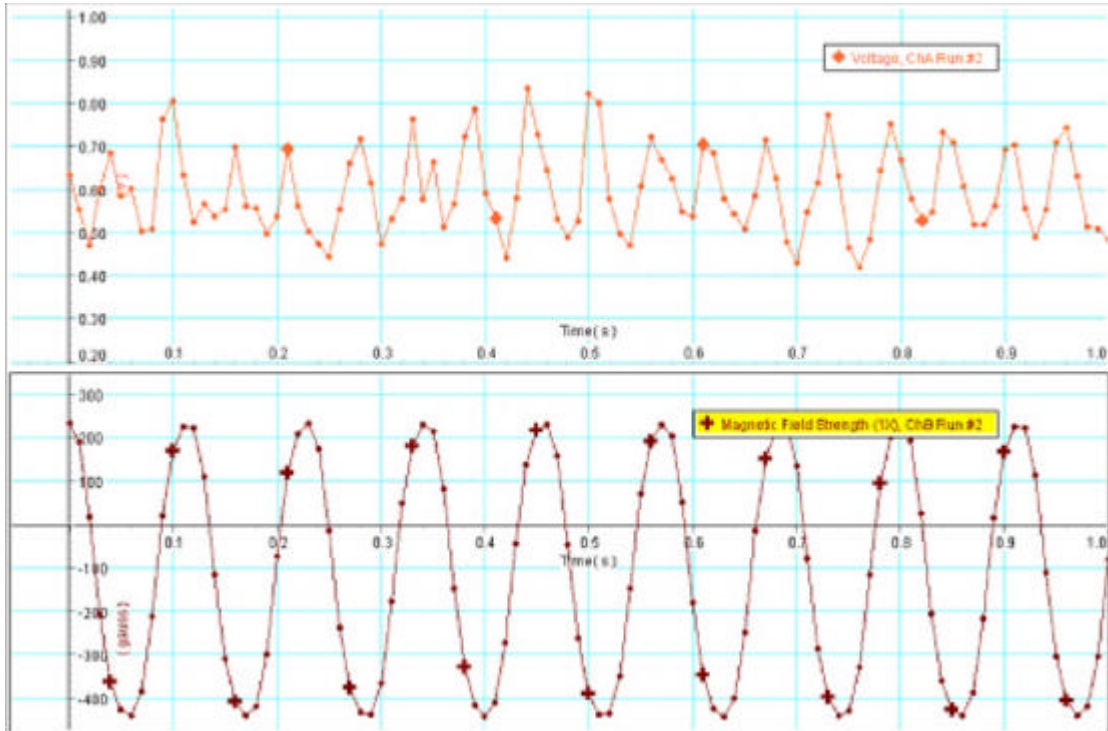
5Hz

(圖十四B)



8Hz

(圖十四C)



8Hz (磁場強度較小)

(圖十四 D)

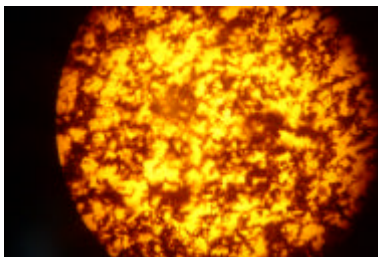
(十) 磁性顆粒在溶液中運動的觀察與模擬

步驟：

1. 將磁性顆粒滴在凹槽玻片上，蓋上蓋玻片後以顯微鏡觀察（需要吸取沉澱的大顆粒，以便觀察，如果只吸取上層膠體溶液，在光學顯微鏡下看不到顆粒）。
2. 在玻片兩旁用兩塊強力製造平行磁場，並以玻片為中心水平轉動。
3. 觀察並紀錄顆粒運動方式。

結果：

1. 在無外加磁場影響下，磁性顆粒會散亂的分佈於溶液中，如圖十五 A。
2. 若磁鐵不轉動，磁性顆粒會朝磁鐵方向移動並聚集成鏈狀，如圖十五 B。
3. 若磁鐵繞著玻片轉動，磁性顆粒會在原地打轉，如所附影片檔：In microscope.MPG。
4. 由此三點可模擬磁性顆粒運動模式。



(圖十五 A)



(圖十五 B)

(十一) 磁性顆粒受地磁影響形成光影圖形

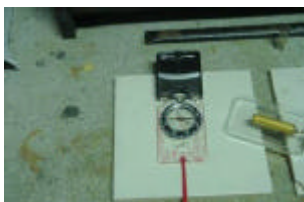
步驟：

1. 將磁性溶液放在強磁場中至少十分鐘。
2. 量測地磁方向，並放置 cell 使其光通面為正南北向。
3. 將溶液注入 cell 中，並使雷射筆的光束穿過 cell。
4. 將紙屏上之光影圖形用數位相機拍攝。
5. 將光通面轉 90 度，再以雷射光束通過 cell。
6. 將紙屏上之光影圖形用數位相機拍攝。
7. 比較不同地點的光影圖形。
8. 紀錄光影的地點分別為化學實驗室（二樓）、物理實驗室（三樓）、生物實驗室（四樓）、藝能科教室（二樓），在各實驗室紀錄時，三者的水平位置大致相同，垂直高度差距約 4 公尺，藝能科教室則在實驗室南方約 60 公尺、西方約 20 公尺處。

結果：

1. 指北針方位如圖十六 A~D
2. 朝正磁北光影圖形如圖十七 A~D
3. 朝正磁東光影圖形如圖十八 A~D
4. 由圖形十六 A~D 可知，成像方向為正磁北和正磁東。
5. 由圖形十七 A~D 可知，光影為水平方向，則磁力線為垂直方向，由此得磁力線為磁南北向。
6. 由圖形十八 A~D 可知：
 - i. 光影形成約 120 度正角的傾斜。
 - ii. 經光影傾斜角度可知，磁力線角度約為 30 度正角 ($120-90=30$)。

地點	二樓化學實驗室	三樓物理實驗室	四樓生物實驗室	藝能科教室
繞射圖角度（組距 0.5 度）	116.5	123.0	126.5	115.5
磁力線角度（組距 0.5 度）	26.5	33.0	36.5	25.5



(圖十六 A)



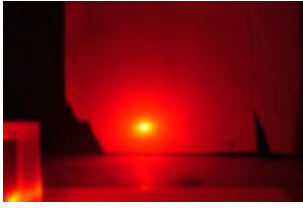
(圖十六 B)



(圖十六 C)



(圖十六 D)



(圖十七 A)



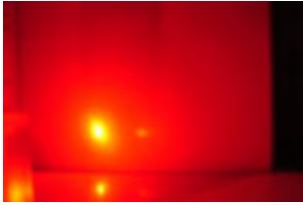
(圖十七 B)



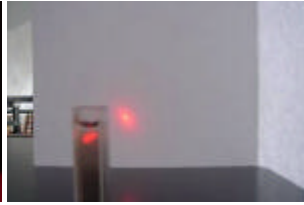
(圖十七 C)



(圖十七 D)



(圖十八 A)



(圖十八 B)



(圖十八 C)



(圖十八 D)

(十二) 磁性顆粒外接非磁性顆粒的初步實驗

步驟：

1. 配置 0.2M 醋酸銀過飽和溶液。
2. 待溶液冷卻後加入磁性膠體溶液，使醋酸銀析出於磁性顆粒表面，形成溶液 (Ag-Fe)。
3. 紀錄沉澱顏色及磁性。

結果：

1. 當磁性溶液滴入醋酸銀過飽和溶液時，會在滴入處生成白色沉澱。
2. 溶液 (Ag-Fe) 顏色如圖十九，A 為攪拌後，B 為重力和地磁影響的沉澱。
3. 磁性溶液的顏色如圖二十，A 為攪拌後，B 為重力和地磁影響的沉澱。
4. 將溶液 (Ag-Fe) (左) 和磁性溶液 (右) 分別裝入 cell 中如圖二十一，A 為裝入後攪拌，B 為靜置後一分鐘，C 為靜至後兩分鐘，D 為放置強力磁鐵於中間。
5. 由圖十九至圖二十一可知，溶液 (Ag-Fe) 顏色較接近灰色，而由圖可知磁性溶液的顏色為棕黑色。
6. 由圖二十一 A~C 可知溶液 (Ag-Fe) 沉澱速度較磁性溶液快。
7. 由圖二十一 D 可知：
 - i. 溶液 (Ag-Fe) 和磁性溶液皆容易被磁鐵吸引。
 - ii. 磁性顆粒較容易附著於 cell 壁上。
8. 溶液 (Ag-Fe) 在經過兩三小時後，顏色會漸漸加深，且磁性會逐漸減弱。



(圖十九 A)



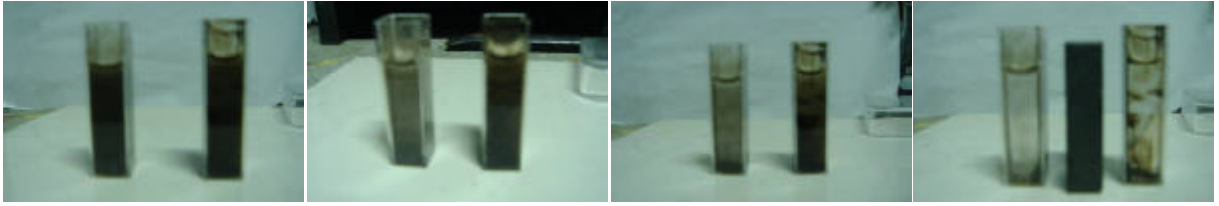
(圖十九 B)



(圖二十 A)



(圖二十 B)



(圖二十一 A)

(圖二十一 B)

(圖二十一 C)

(圖二十一 D)

(十三) 磁性顆粒外接非磁性顆粒的轉動實驗

步驟：

1. 將溶液 (Ag-Fe) 裝入 cell 中，並攪拌使顆粒均勻分布。
2. 放置強力磁鐵於 cell 旁。
3. 使雷射光束穿過 cell 並在紙屏上形成繞射光影。
4. 將強力磁鐵上下移動，並觀察光影圖形的變化。

結果：

1. 溶液 (Ag-Fe) 中的顆粒可隨磁力線排列，使雷射光束形成繞射光影。
2. 將強力磁鐵移動時，溶液中顆粒也可以隨磁力線變化形成變動的光影圖形。
3. 轉動的光影如所附影片檔：Stir.MPG。

伍、討論

1. 由實驗 (四) 可得知，當光線穿過溶液時，會造成光影圖形的變化，但光穿過水卻沒有變化，可知光影變化是因為磁性顆粒的緣故。
2. 實驗 (四) 中發現當雷射光穿過溶液時會發生挺得耳效應，推測此磁性顆粒為奈米顆粒。
3. 因為實驗 (五) 得知了磁鐵的磁力線方向，所以實驗 (六) 中，兩鐵磁的中心點為裝磁性溶液的 cell 放置點，也是雷射光通過處，其磁力線是互相平行的。由實驗 (七) 的結果得知，光影長軸方向和光柵方向垂直，將之和實驗 (六) 的結果比較後，證明光影的成因應是繞射。
4. 由實驗 (七) 得知，若是光柵排列為水平線，則會形成垂直分散的光點，但是當雷射光穿透過溶液時，卻形成一條線狀或橢圓的光影，推測是雷射光的穿透路徑較長所造成，因為 cell 的寬度對粒子而言是非常大的，可以看成是無數層的光柵，所以可能形成了無數次的繞射，疊加在一起就形成線狀光影，而橢圓形光影則是因為磁鐵距離 cell 較遠，磁力線並非完全平行，於是造成不規則的色散，推測主軸依然是繞射現象所造成的線狀光影。
5. 因為光影和磁力線的方向垂直，又加上挺得耳效應的發現，推測溶液中奈米磁性顆粒的排列式非常緊密的，且可以隨磁場變化運動，或許可以運用在科技產品中，例如用單層磁性顆粒製做非接觸式、可電訊控制且可高速變換方向的光柵。
6. 實驗 (九) 的結果可以得知，在 8Hz 之內，粒子的轉動都完全依循磁場的變化，表示我

們可以確切掌控磁性顆粒的運動。若是將轉速提高，而使粒子轉動速度和磁場變化速度開始有差異，再經由實驗（十）可以大略模擬磁性顆粒的運動模式，有可能可以利用顆粒和溶劑之間的摩擦力，造成光變化和磁變化不同步，間接量測出溶液中粒子的大小或是推測形狀。

7. 由實驗（十一）可知，在地磁的磁場下，雷射光穿過磁性溶液所形成的光影可以顯示地磁所造成的磁力線排列，表示磁性溶液可以作為微觀的指北針和磁傾角測量器，亦可能發展用來測量環境磁場的變化。
8. 在實驗（十一）中所測得的磁力線角度和網路取得的台北磁傾角有些差距，造成原因可能是環境磁場的影響或是高度的差異，若能取得校園的磁傾角精確度數和高度造成的誤差影響，便可發展精準的磁傾角測量器，且因顆粒較小，或許可得到較傳統磁傾角儀更精準的數據。
9. 在實驗（十二）中，溶液（Ag-Fe）的顏色會漸漸轉深和磁性減弱的現象，應該和 Ag^+ 的還原和 Fe^{2+} 的氧化有關，因為 $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+} + e^-$ 的電位為-0.771V，而 $\text{Ag}^+ + e^- \rightarrow \text{Ag}$ 的電位為 0.799V，可知銀被還原的反應是自發的，於是 Fe_3O_4 被破壞而生成 Ag 的黑色沉澱，於是影響溶液顏色和磁性。
10. 由實驗（十二）和實驗（十三）可知，似乎可以用析出的方式將非磁性物質接於磁性顆粒上，並由控制磁性物質間接影響外接的非磁性物質，但尚未經過嚴謹的證明此方法之正確。若可完成並證明外接非磁性物質的實驗，可能可以利用此性質，將之外接具旋光性的物質，或許可利用於光學異構物的分離。

陸、結論

1. 當雷射光穿透過磁性溶液會造成繞射光影，RO 逆滲透水則不會。
2. 磁性顆粒會依磁力線的方向排列成線。
3. 光影方向和磁力線方向垂直，為繞射現象。
4. 光柵的排列越密，所得繞射光點分佈越散，和磁力線密度對繞射光影的影響相符。
5. 溶液中的磁性顆粒會隨環境磁場方向的變化而原地轉動。
6. 在 8Hz 內，磁性顆粒的轉動和磁場方向之轉動速率完全一致。
7. 磁性溶液經雷射光束所得的繞射光影可用來判斷地磁的磁力線。

柒、展望

1. 製做特用光柵：用單層的磁性顆粒製做非接觸式、可電訊控制且可高速變換方向的光柵。
2. 製做磁性微粒粒徑或形狀測量器：改用非慣性磁場之磁性顆粒趨動器，提高轉速，試著用來檢測磁性微粒的粒徑大小或形狀。
3. 製做同步奈米馬達：若將磁性顆粒接上其他分子，再外加變動的磁場，可以發展各種不

同用途的同步奈米馬達。

4. 製做機器人導航器：藉由量測繞射光影的長軸立體方位，推測出環境磁場的方向，即藉著檢測小區域磁傾角及磁偏角，製作小區域的磁場地圖，為機器人作小區域的導航。
5. 寫電腦程式，模擬數以莫耳計的磁性顆粒在磁場中依磁力線排列下所造成的雷射光繞射現象。

捌、參考資料及其他

1. 磁性液體性質及應用 南京大學物理系 鍾偉、都有為
2. 神奇的磁性溶液 建國高中 王偉任、顏睿甫、林健華、楊翔宇
3. 中國再生金屬網 奈米磁性材料及其應用
<http://www.resource.com.cn/retrieve%20and%20utilize/02-06-008.htm>
4. M. Hwang, M.C.Abraham, T.A. Savas, H.I. Smith, R.J. Ram and C.A.Ross "Magnetic force microscopy study of interactions in 100 nm period nanomagnet arrays", J. Appl. Phys. 87 p5108 - 10 (2000)
5. J.Q. Wang L.M. Malkinski, Y. Hao, C.A. Ross, J.A. Wiemann and C.O.Connor, "Fabrication of pseudo-spin-valves and 100 nm sized periodic elements for magnetic memory application", Mater. Sci. Eng. B76 p1-5 (2000)
6. 台灣師大物理系物理實驗示範教學教室
<http://www.phy.ntnu.edu.tw/demolab/phpBB/viewtopic.php?topic=9079&forum=3&8>
7. 國立成功大學機械工程學系碩士論文
<http://etdncku.lib.ncku.edu.tw/ETD-db/ETD-search/getfile?urn=etd-0704103-213322&&filename=etd-0704103-213322.pdf>
8. 好好玩物理網
<http://home.phy.ntnu.edu.tw/~haha90/content/optic/fraunhofer.htm>