

中華民國第 62 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國小組 物理科

第三名

080106

排對了會更強-磁鐵排列研究

學校名稱：新竹縣私立康乃蘭國民中小學

作者： 小五 賴柏睿 小五 黃品硯 小五 蘇上荃 小五 賴羿安	指導老師： 劉素惠 張芬如
---	---------------------

關鍵詞：磁鐵排列、磁力線、磁流體

摘要

本研究採用**程式推算**與**實測驗證實**的方式，試圖找出能產生**最強磁力的磁鐵排列組合**。實驗結果所找出的排列方式與**海爾貝克陣列 (Halback Array)** 一致。另外，我們嘗試製作「**磁力線魔鏡-Ferrocell**」來觀察上述實驗的**磁力線形狀**，探討磁力線與磁力的關係。

「磁力線魔鏡」可以方便、清楚的看到磁力線形狀，或許能成為課堂上不錯的教具。最後，我們進行引導磁力線的實驗，利用矽鋼片改變磁力線來增強磁力，觀察各種鋼片與磁鐵的搭配方式對磁力大小有什麼影響。同時也試做了**可以開啟、關閉磁力的「磁力開關」**，展示改變磁力線的實際應用。

壹、前言

一、研究動機

偶然間在Youtube看到**海爾貝克陣列 (Halback Array)** 的介紹，發現原來可以藉由特殊的磁鐵排列方式獲得更強的磁力，激起我們研究磁鐵排列的興趣。大部分海爾貝克陣列的介紹都是5個磁鐵的組合，我們也想看看2、3、4個磁鐵的最強磁力組合是怎麼樣的。

在蒐集資料的過程中我們知道磁力線越密集則磁力越強。如果我們能「看」見磁力線，是不是能發現它與磁力大小的關係？要怎樣才能看見磁力線呢？

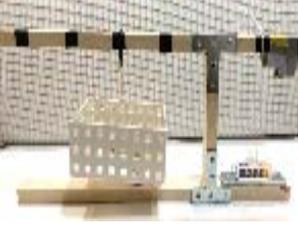
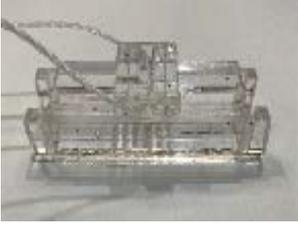
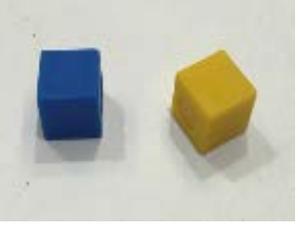
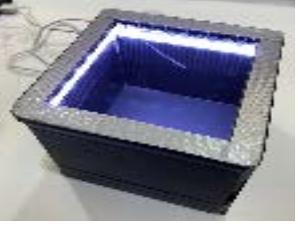
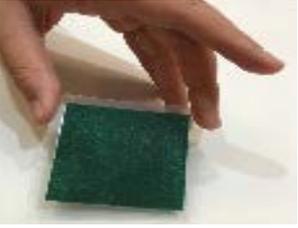
在三年級自然與生活科技「磁力」這個單元，介紹生活中磁鐵的應用。其中鉛筆盒應用磁鐵兩側增加一片鐵片，盒蓋即可牢牢吸住。於是我們也想看看鐵片與磁鐵怎麼樣的搭配可以讓磁力變強多少？

抱著種種的疑問，我們展開這次的磁力探索之旅。出發！

二、研究目的

- (一) 研究測量磁力大小的方法
- (二) 研究磁鐵的排列組合，怎麼快速找出磁力最強的組合
- (三) 研究「看見」磁力線的方法
- (四) 探討磁力線形狀與磁鐵強度的關係
- (五) 研究鐵片與磁鐵怎麼搭配可以增強磁力

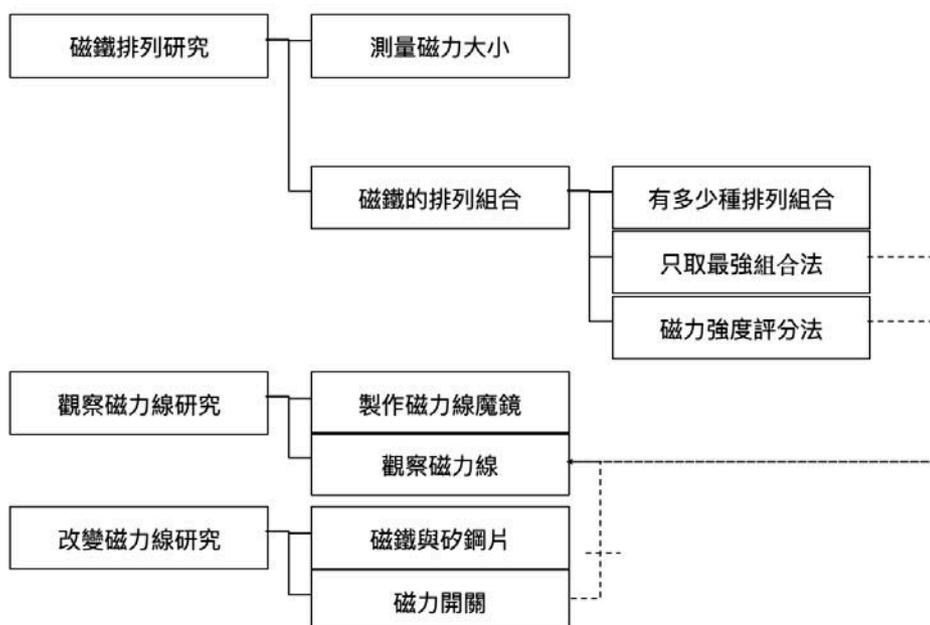
貳、研究設備及器材

<p>槓桿式實驗組</p> 	<p>壓克力盒</p> 	<p>1cm 鈷磁鐵若干 (已標記)</p> 	<p>1cm 塑膠方塊</p> 
<p>矽鋼片若干</p> 	<p>吊掛平台</p> 	<p>硬幣若干 (負重)</p> 	<p>自製燈盒</p> 
<p>行動電源</p> 	<p>磁流體</p> 	<p>WD-40</p> 	<p>壓克力板</p> 
<p>滴管</p> 	<p>手機 (拍照)</p> 	<p>磁顯片</p> 	<p>電子秤</p> 

參、研究過程或方法

我們的研究包含三個主題。第一個主題是研究磁鐵排列：測量不同磁鐵排列的磁力大小，並找出磁力最強的排列方式。首先我們先評估有多少種排列組合，然後為了讓實驗更有效率，我們提出兩種找出最強磁力排列的方法。第二個主題是觀察磁力線：利用自製的磁力線魔鏡觀察不同磁鐵排列方式的磁力線形狀，探討磁力線與磁力大小的關係。第三個主題是改變磁力線的研究：我們知道鐵磁性物質例如鐵片可以導引磁力線，想要觀察不同的鐵片與磁鐵的搭配方式與磁力大小的變化。

一. 研究流程



二. 研究內容

(一) 前置準備：

可以用線將磁鐵吊起，搭配手機上的指南針，指向北方的一側為N極。使用指甲油塗在磁鐵上標記。



(二) 磁鐵排列研究

1. 量測磁力大小

我們利用磁鐵能吊掛多少重物來測量（比較）磁力大小。最初的設計採用「直接吊掛」的方式，但發現存在一些缺點，於是改為「槓桿式」，並對一些細節做出改良。

改良後的磁力測量裝置如圖 1，主體是由木壓條與五金件組成的類似天平的裝置。當負重大於磁力時，裝磁鐵的壓克力盒會被拉起而脫離鐵塊。負重吊掛盒可根據磁力大小選擇不同的掛點，利用槓桿原理減少負載重量。

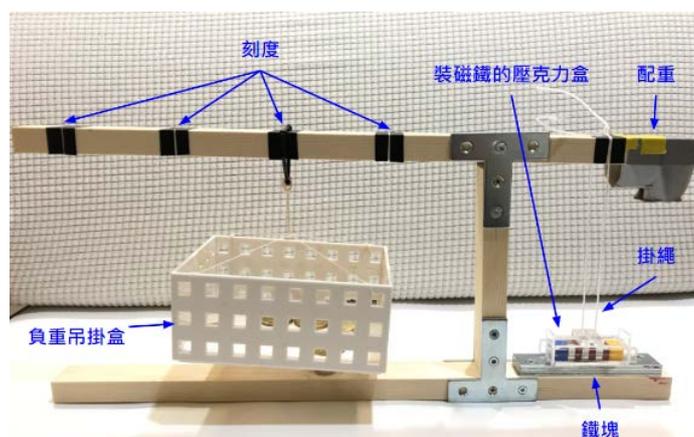


圖 1：槓桿式磁力測量裝置

裝磁鐵的盒子也進行了改良。利用壓克力板黏合的盒子可以塞入 5 顆磁鐵，空間剛好可以讓塞入的磁鐵不會因為排斥力而翻轉。左右兩邊有小檔板，可配合塑膠塊將磁鐵固定在中間位置。吊掛繩也置於盒子的中間，可避免拉力不平均從一側翹起，影響量測準確。磁鐵與鐵塊間相隔 2mm 的盒底，雖然會減弱磁力，但實驗都用相同的裝置操作，仍然可以比較出不同排列的磁力大小。

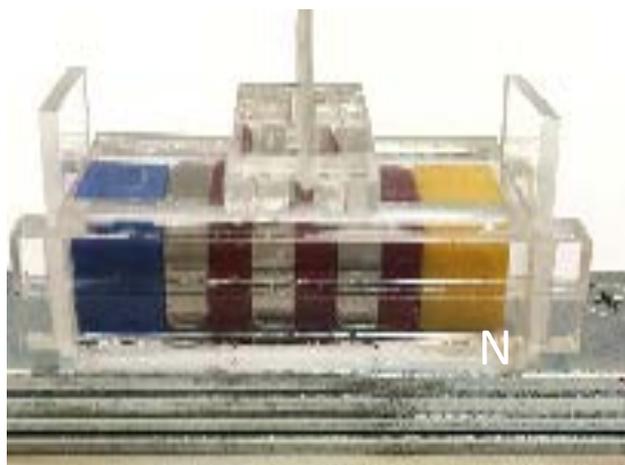


圖 2：改良後的用來裝磁鐵的壓克力盒

2. 磁鐵的排列組合

(1) 有多少種排列組合？

為了方便實驗與討論，我們首先定義一個磁鐵的方向如圖 3。單個磁鐵有 N 極分別朝下、左、上、右等四種排列方式（圖示為側視圖，與磁鐵相吸的鐵塊至於下方。紅色為 N 極），分別編號為 0, 1, 2, 3。依此定義，兩個磁鐵的排列組合如圖 4 所示，一共有編號 0-0...3-3 等 16 種排列方式。我們逐個測量出一個磁鐵與兩個磁鐵各種組合的磁力大小，並記錄於研究結果。



圖 3：單個磁鐵方向的定義

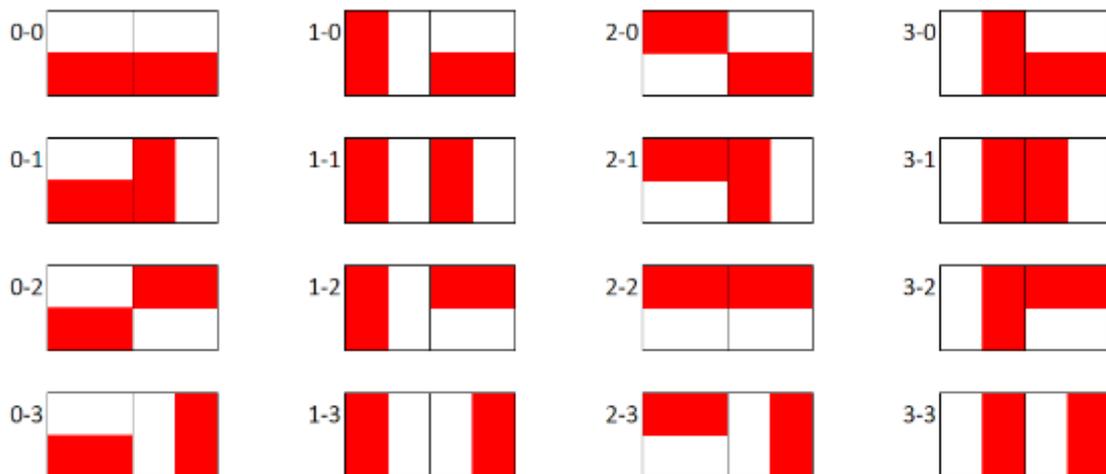


圖 4：兩個磁鐵的排列組合

可是我們發現，當增加為 3 個磁鐵時，總共的排列組合有 $4 \times 4 \times 4 = 64$ 種。4 個磁鐵與 5 個磁鐵的組合則有分別有 256 與 1024 種。想要在有限的時間內量出這些排列組合的磁力大小是件不容易的事；假設每次量測耗時 2 分鐘，利用窮舉法找出 1 到 5 個磁鐵的最強磁力排列，估計需要 $(4+16+64+256+1024) \times 2 = 2728$ 分鐘，也就是 45.47 小時。每天專心做實驗兩個小時，需要大約 23 天才能把數據全部蒐集完成，是一個費時費力的過程。

我們觀察表1的排列組合，可以發現有些排列是"相似的"。例如 0-1 與 3-0 是"左右翻轉"相似，而 0-1 與 2-3 則是"磁極相反"相似，0-1 與 1-2 則是"磁極相反"之後再"左右翻轉"的相似形。由於這幾個"相似形"與置於磁鐵底部鐵塊的接觸面幾何形狀相似，我們可以假設它們的磁力是一樣的（可由實際量測驗證），因此只要量測其中一種排列組合就能代表其他相似形的磁力大小。

表 1：相似形的操作與舉例

操作	舉例
左右翻轉	0-1  ⇒ 3-0 
磁極相反	0-1  ⇒ 2-3 
磁極相反+左右翻轉	0-1  ⇒ 2-3  ⇒ 1-2 

於是我們想到藉由刪除"相似形"來減少量測的次數，不過把圖形畫出來再由人工比對一樣不切實際，因此著手撰寫程式（使用Python）讓電腦進行自動比對。程式的流程圖如下，原理是把未發現相似形的組合貯存起來並與所有組相比對，最後貯列所存的組合即為沒有相似形的"基礎型組合"。

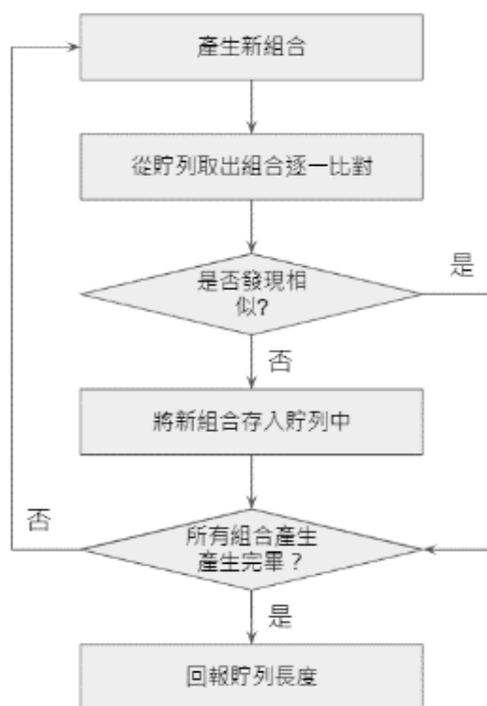


圖 5：排除相似形的程式流程

程式執行結果如表 2 所示，所剩下的基礎型組合約為所有可能組合總量的 1/4，已經大幅減少要量測的組合數量了。

表 2：排除相似形的組合數量

磁鐵個數	所有可能的組合（種）	排除相似形所剩的基礎型組合（種）
2	$4 \times 4 = 16$	6
3	$4 \times 4 \times 4 = 64$	20
4	$4 \times 4 \times 4 \times 4 = 256$	72
5	$4 \times 4 \times 4 \times 4 \times 4 = 1024$	272

(2) 只取最強組合法

不過，當磁鐵個數增加時，基礎型組合的數量仍然可觀。例如要找出 5 個磁鐵的最強磁力排列方式仍然有 272 種組合需要被量測，顯然不是很有效率。經過一番腦力激盪後，大家又提出新的方法；既然我們要找出磁力最強的组合方式，那我們可以在磁力最強的組合之上添加磁鐵，測量多一個磁鐵時的磁力，然後從中取出最強的組合再進行下一輪添加磁鐵的量測。圖 6 表示從兩個磁鐵增加到三個磁鐵的各種組合，因為兩個磁鐵的組合方式可能不是對稱的，因此需要在左、右兩邊分別加上一顆磁鐵來組成三顆磁鐵的排列，可以看到每增加一顆磁鐵會有 8 種組合需要量測。因此要找到 1-5 顆磁鐵的最強排列方式只需要進行 $2+8+8+8+8=34$ 次的量測，大幅降低量測次數。

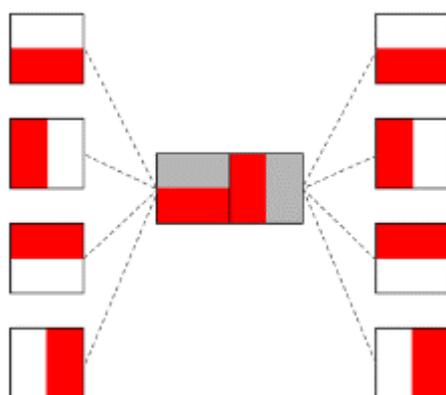


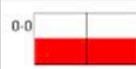
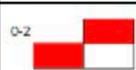
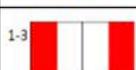
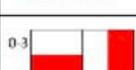
圖 6：從 2 個磁鐵增加到 3 個磁鐵的可能組合共 8 種

(3) 磁力強度評分法

實驗做到一半時，有人提出這些問題：如果我們一開始找錯了怎麼辦？有沒有可能磁力最強的組合在增加一顆磁鐵後因為磁力互相排斥或抵消而變弱了？反而是磁力第二強的組合在添加磁鐵後磁力變成最強的？我們是不是應該把前幾強的組合都拿出來比一比，而不是只找最強的。但是怎麼找出前幾強的組合呢？於是又經過一番腦力激盪，我們提出了幫排列組合打分數的方法，然後預測多一顆磁鐵時，哪種排列的分數高。

經由實驗得知，在一顆磁鐵的情況下，排列為 0 或 2 的磁力大於排列為 1 或 3 的方式。因此我們給 0 與 2 的排列 2 分，1 與 3 的排列 1 分。去掉相似後，兩顆磁鐵有 6 種基礎形，磁力由大到小分別是 [0-1], [0-0], [0-2], [3-1], [1-1], [0-3]，因此分別給它們以及它們的相似形 6 至 1 分，方便進行三顆磁鐵的預測分數，如表 3 所示。

表 3：兩顆磁鐵的給分表

實測磁力(g)	依磁力大小給分	排列方式	相似形
1742	給分 6		[1,2] [2,3] [3,0]
1617	給分 5		[2,2]
1452	給分 4		[2,0]
965	給分 3		[3,1]
678	給分 2		[3,3]
573	給分 1		[1,0] [2,1] [3,2]

然後我們利用這樣的給分來推測 3 顆磁鐵的強度，方法是把一顆的分數與兩顆的分數加成，如下圖說明。例如 [0-1-2] 這樣的排列，一顆一顆分開看的話，分數是 $2+1+2=5$ 分，兩顆一起看的話，有 [0-1] 與 [1-2] 兩種組合，分數是 $6+6=12$ ，因此 [0-1-2] 這樣的組合所得的預測分數總分為 $5+12=17$ 分。

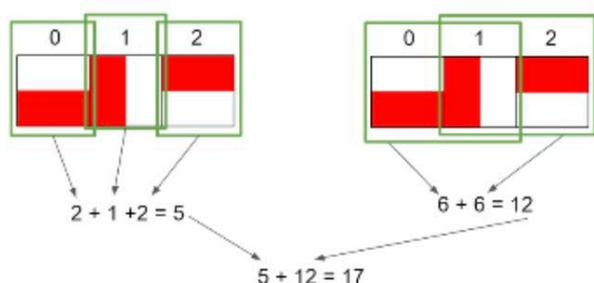


圖 7：總分的計算方法

於是我們可以推算出三顆磁鐵的各種排列的預測得分大小，然後取得分大的前幾名排列方式來進行量測。因為預測得分是計算的預測結果，與實際磁力大小的關係不一定相符，因此還要根據量測結果修正三顆磁鐵的給分，然後再根據給分預測四顆磁鐵的預測得分，並取前幾名進行量測。

分數的計算與排序一樣由程式來完成。整個流程大致是：

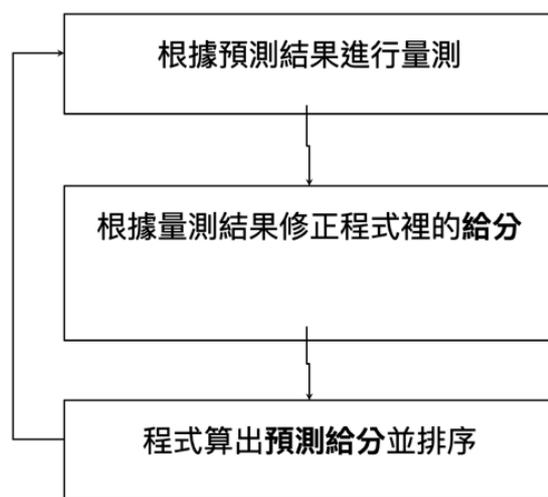


圖 8：分數的計算與排序流程圖

註：「給分」為實際量測排名後依據大小的分數，「預測給分」為依據排列組合使用程式計算後的分數。

```
main.py
9
10 import numpy as np
11 ''' 陣列形狀 '''
12 base_arr = np.array([[0,0],
13                     [1,1],
14                     [[1,0],
15                     [1,0],
16                     [[1,1],
17                     [0,0],
18                     [[0,1],
19                     [0,1]])
20
21 ''' 將陣列旋轉180度 '''
22 def rotate180(arr):
23     new_arr = arr.reshape(arr.size)
24     new_arr = new_arr[::-1]
25     new_arr = new_arr.reshape(arr.shape)
26     return new_arr
27
28 ''' 將陣列左旋90度 '''
29 def rotate90_left(arr):
30     new_arr = np.transpose(arr)
31     new_arr = new_arr[::-1]
32     return new_arr
33
34 ''' 將陣列右旋90度 '''
35 def rotate90_right(arr):
36
```

圖 9：使用Python程式

我們把同樣的流程推廣到五顆磁鐵的排列，找出磁力最強的排列方式。這個做法雖然步驟比較麻煩，但好處是磁力較大的前幾種排列都可能被量測並進行比較，可以避免"只取最強組合法"萬一取錯最強組合導致後面一連串的錯誤。

(三) 觀察磁力線研究-磁力線魔鏡

做完磁力大小的研究後，我們想要探討磁力線與磁力大小的關係。我們在找到單顆磁鐵的磁力線模擬圖如下，是個從N到S極的對稱圖形。可以想像當多顆磁鐵以不同方式排列時，磁力線會因為相互吸引或排斥而改變形狀。我們想看看最強的磁鐵排列它的磁力線會是什麼形狀。

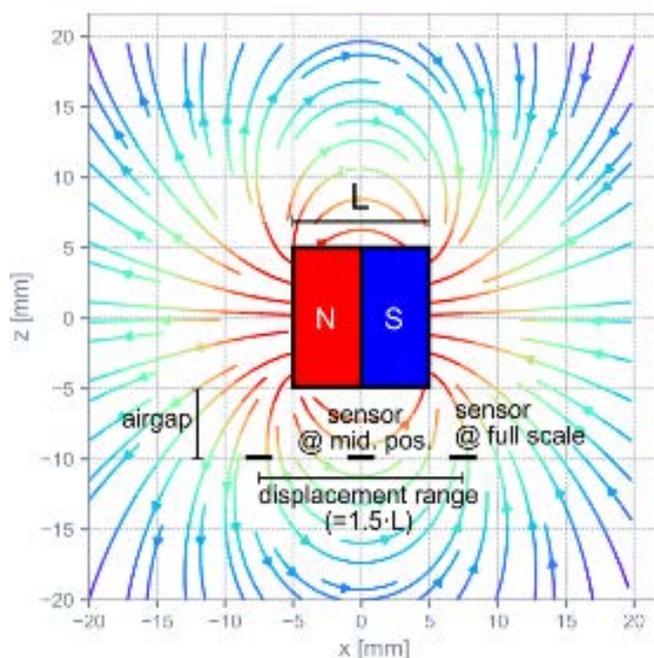


圖 10：（參考資料截圖）單顆磁鐵的磁力線模擬圖

一般常見的方法是利用鐵粉來觀察磁力線，但是鐵粉只能顯示磁力線大概的樣子，我們找到的參考資料如下圖。可以看見鐵粉會布滿整個磁鐵所在區域，並且延伸範圍有限，較難判別磁力線的密集程度。

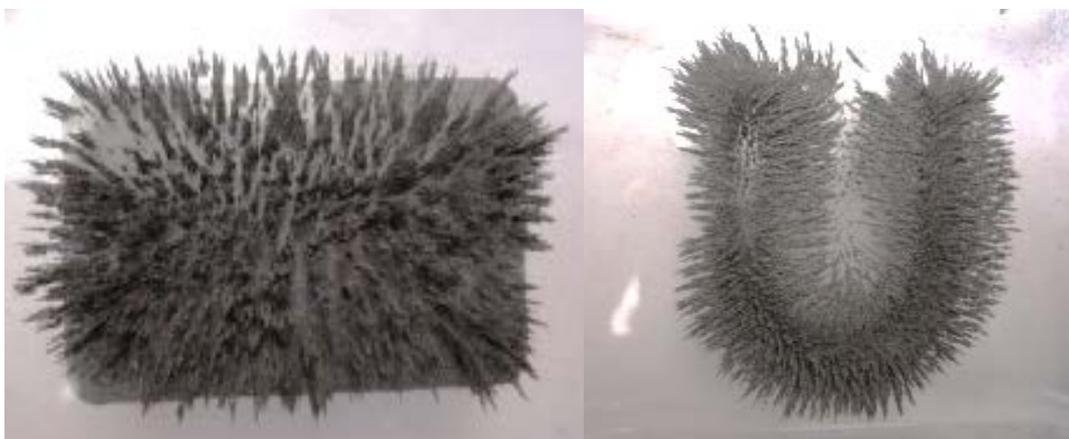


圖 11：（參考資料截圖）鐵粉觀察磁力線並不理想

研究過程中我們得知有一種叫「磁顯片」的東西也能用來觀察磁力，於是也買來試試。結果如下圖，由左至右分別是：

- 5x5cm磁顯片
- 將單顆磁鐵至於磁顯片底下，可看到N極與S極中間分開
- 觀察四顆磁鐵排列方式
- 磁顯片的影像

可以看見磁顯片能顯示磁場的形狀，以及深淺顏色代表磁場大小。但是跟上面的磁力線模擬圖形象差異很大，只能看到幾團黑影，不是觀察磁力線的理想方法。

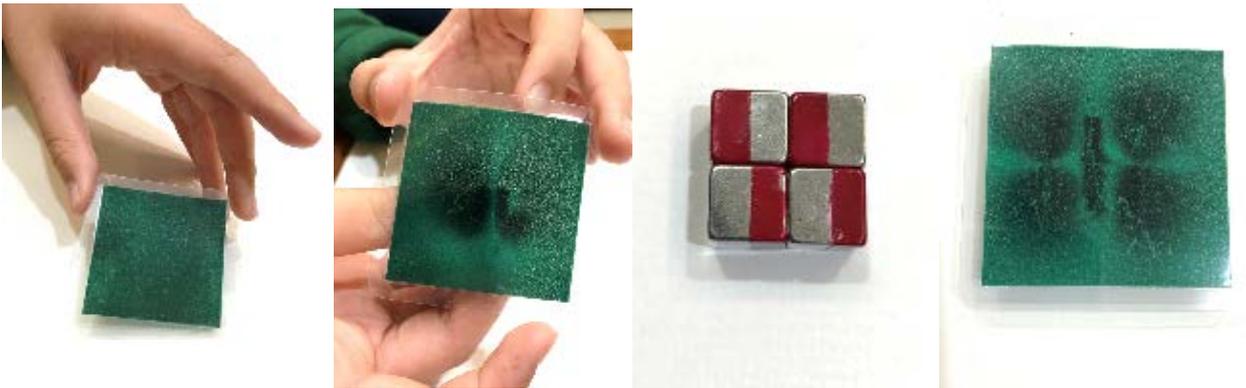


圖 12：磁顯片與磁鐵的影像

於是我們在網路上努力尋找觀察磁力線的方法，皇天不負苦心人，終於在 Youtube 一支名為“Magnetic Field Banding Light Paths”的影片裡看到光線會受磁力影響而出現彎曲線象，我們想到上課時觀察到的磁力線是鐵粉受磁力影響產生封閉曲線，又透過光的觀察，發現磁場改變造成磁流體改變，光線照射磁流體的分布也跟著改變，因此我們認為這樣的光線即為磁力線。磁力線魔鏡燈盒作法相當簡單，首先將以油性溶劑（如煤油）為基底的磁流體與WD-40（除鏽潤滑劑）以1:1的比例混合，滴於預先裁切好的12x12x0.2cm的壓克力板上，輕蓋上另一片壓克力然後將氣泡擠出。

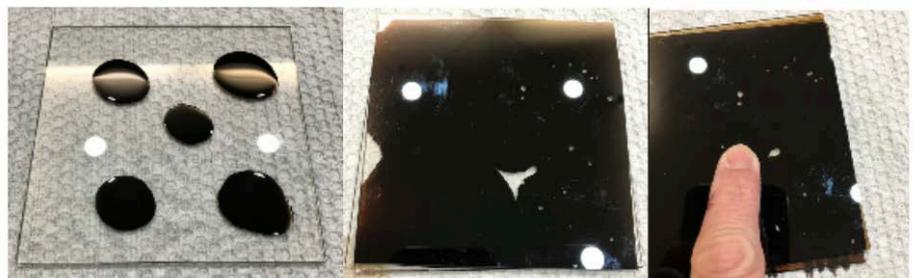


圖 13：製作磁力線魔鏡

另外利用PP瓦楞板圍成一個方形的盒子，距離頂部開口兩公分處黏上LED燈條。由於LED燈光會散射影響觀察，我們用PP瓦楞板做了一個開口上蓋。從頂部往下看時能遮住LED垂直方向的強光。然後將磁力線魔鏡與磁鐵放到燈盒上就能看到令人滿意的磁力線，效果與磁力線模擬圖相當接近。

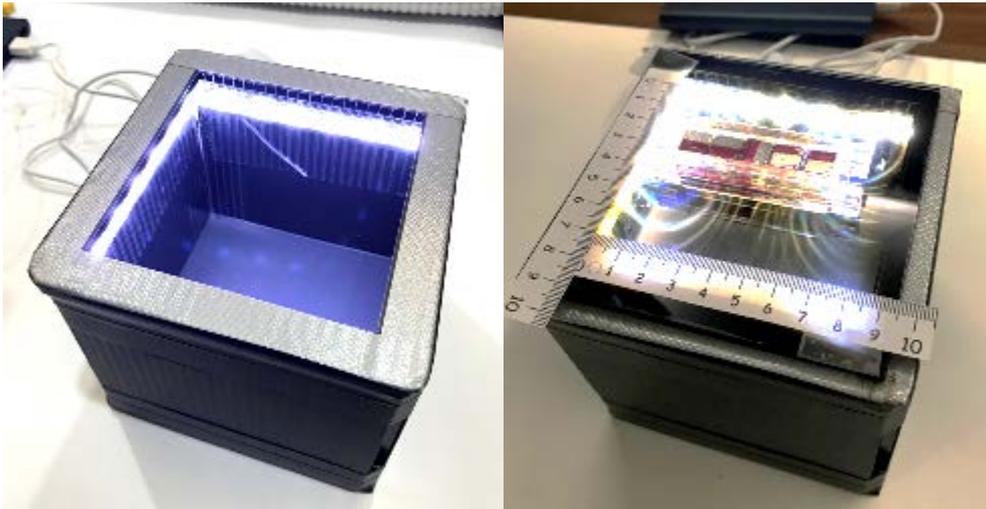


圖 14：磁力線魔鏡燈盒（左）、磁力線魔鏡於燈盒上使用（右）

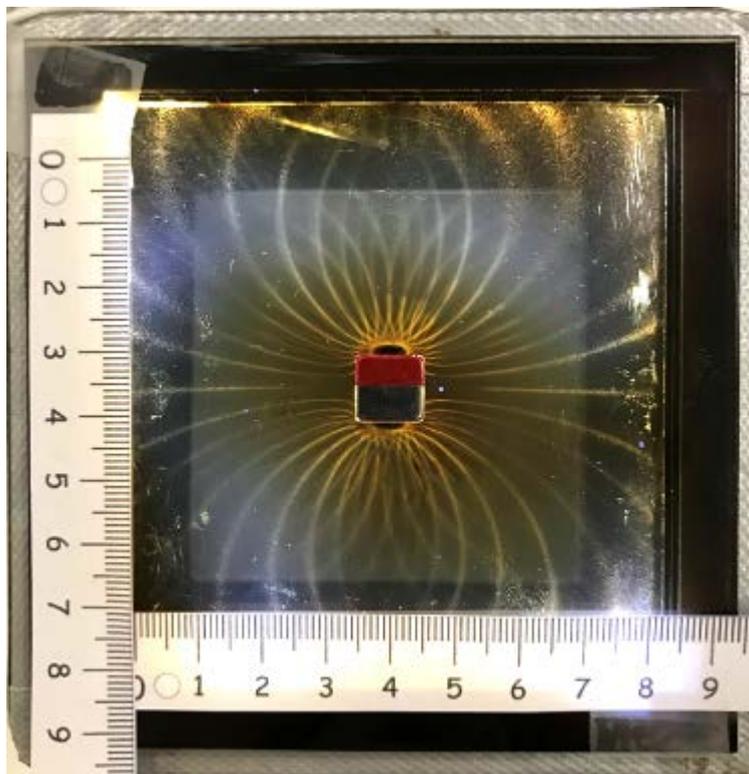


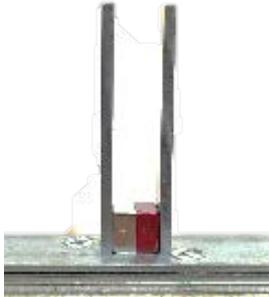
圖 15：一圈一圈的磁力線與模擬圖非常相似

(四) 改變磁力線方向研究

1. 鐵片與磁鐵的搭配

這部分的研究中，我們設計了以下幾種不同的鐵片與磁鐵的組合，並且利用磁力測量實驗組來量測磁力大小，看看哪種組合磁力最強。鐵片使用的是57x9.5x0.5mm 不會被磁化的矽鋼片，這個厚度的矽鋼片容易彎折或裁切。用三秒膠黏合多片矽鋼片就能組成不同厚度。由於鐵片較長，因此使用另一個吊掛平台，不過每個項目都在同一基礎上量測，不會影響磁力大小的比較。

表4：不同的鐵片與磁鐵的組合

搭配方式	1	2
圖示		
說明	不加鐵片作為對照組	疊成2.5mm厚的鐵片以直立的方式至於磁鐵兩邊，磁鐵與鐵片下緣平齊
搭配方式	3	4
圖示		
說明	疊成2.5mm厚的鐵片以橫置的方式至於磁鐵兩邊	彎成U字型的鐵片罩在磁鐵上面，鐵片下緣與磁鐵平齊。鐵片厚度約3mm

2. 磁力開關

在搜尋磁鐵的應用時，我們發現一個神奇的東西 - 開關式磁力座(ON/OFF type magnetic base)。磁力座是實驗室或鐵工廠裡常見的工具，可以用來將支架或器械固定在鐵器件上，或是用來拉起鐵板或鐵塊。當需要移動支架或放下鐵器件時，只要旋轉磁力座上面的開關，便可讓磁力消失，將磁力座與鐵器件分離。哇！真是太神奇了！這個東西不用裝電池或接電線，看來不是一個電磁鐵。它到底怎麼控制磁力的開與關呢？

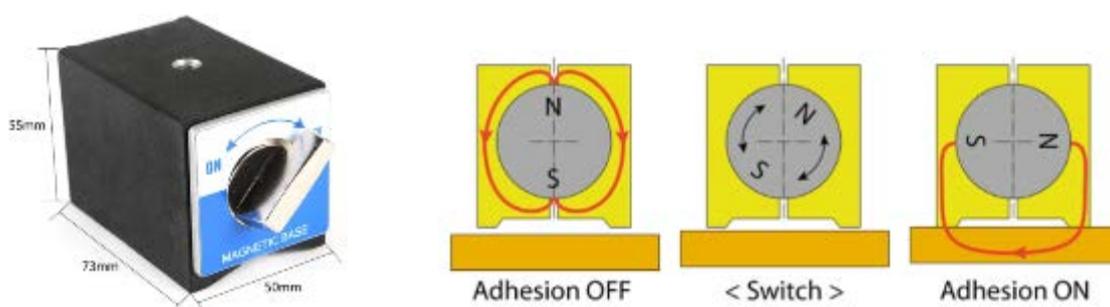


圖 16：（參考資料截圖）可開關的磁力座（左）、內部構造與原理（右）

經過一番網路搜尋查找，我們終於發現它的祕密。其實它不是打開或關閉磁力，而是讓磁力「顯現」或「隱藏」起來。磁力座的內部構造如上圖右，裡面是一個圓柱形的磁鐵，兩邊是可以導磁的金屬殼。當磁鐵南北極轉成垂直的方向，磁力線會收在金屬殼裡面，因此不顯現磁力。當磁鐵南北極轉成水平方向，有一邊的磁力線就會從底部露出來，可以吸住下面的鐵板。

了解磁力座的原理後，我們動手利用磁鐵與矽鋼片製作一個如圖 10 的簡易版磁力開關。簡易版磁力開關分為A、B兩節，這兩節靠在一起時可以互相吸引組成一個整體。預期翻轉A節然後與B節相接，可以使用我們的磁力線魔鏡來在紅圈處觀察磁力是否出現。我們將在實驗中觀察這個磁力開關是否如預期發揮作用。



圖 17：簡易版磁力開關

肆、研究結果

一. 量測磁力大小研究結果

(一) 只取最強組合法

1. 1 顆磁鐵的量測結果： (*黃色格標出最強磁力)

排列方式		
磁力(g)	716	407

註：磁力大小量測取三次平均值，小數第一位四捨五入後取整數的結果

2. 2 顆磁鐵的量測結果： (*黃色格標出最強磁力)

排列方式				
磁力(g)	1617	550	1446	1660
排列方式				
磁力(g)	1742	678	527	948
排列方式				
磁力(g)	1452	1678	1609	558
排列方式				
磁力(g)	573	965	1679	655

註：磁力大小量測取三次平均值，小數第一位四捨五入後取整數的結果。

3. 3 顆磁鐵的量測結果： (*黃色格標出最強磁力)

排列方式	0-0-1	1-0-1
磁力(g)	2300	2182
排列方式	2-0-1	3-0-1
磁力(g)	2260	2702
排列方式	0-1-0	0-1-1
磁力(g)	1302	1542
排列方式	0-1-2	0-1-3
磁力(g)	2902	1960

註：磁力大小量測取三次平均值，小數第一位四捨五入後取整數的結果。

4. 4 顆磁鐵的量測結果： (*黃色格標出最強磁力)

排列方式	0-0-1-2	1-0-1-2
磁力(g)	2742	2502
排列方式	2-0-1-2	3-0-1-2
磁力(g)	2226	2782
排列方式	0-1-2-0	0-1-2-1
磁力(g)	2702	2342
排列方式	0-1-2-2	0-1-2-3
磁力(g)	2752	2880

註：磁力大小量測取三次平均值，小數第一位四捨五入後取整數的結果。

5. 5 顆磁鐵的量測結果：（*黃色格標出最強磁力）

排列方式	0-0-1-2-3 	1-0-1-2-3 
磁力(g)	4742	3182
排列方式	2-0-1-2-3 	3-0-1-2-3 
磁力(g)	4506	4918
排列方式	0-1-2-3-0 	0-1-2-3-1 
磁力(g)	5450	3942
排列方式	0-1-2-3-2 	0-1-2-3-3 
磁力(g)	3210	3552

註：磁力大小量測取三次平均值，小數第一位四捨五入後取整數的結果。

(二) 磁力強度評分法

1. 3顆磁鐵的預測得分與實測結果

程式得出的預測得分與排列方式如下。可以看到不同的排列可能有相同的得分，但裡頭有些是相似形，已用之前找出相似形的方法（程式）排除，我們挑出紅色粗體字所標示的基礎型排列進行量測。

表5：3顆磁鐵預測得分

預測得分	排列方式
17	[0,1,2] [2,3,0]
16	[0,0,0] [0,0,1] [1,2,2] [1,2,3] [2,2,2] [2,2,3] [3,0,0] [3,0,1]
15	[0,0,2] [0,2,2] [0,2,3] [1,2,0] [2,0,0] [2,0,1] [2,2,0] [3,0,2]
14	[0,2,0] [2,0,2]
13	[0,1,3] [1,3,0] [2,3,1] [3,1,2]
12	[0,1,0] [0,1,1] [0,3,0] [1,1,2] [2,1,2] [2,3,2] [2,3,3] [2,3,0]

註：紅色部分為實際量測的組合，黑色為相似形。

[0,1,2]與[1,2,3]分別為磁力最強與次強的組合，分別給 6 分與 5 分。[0,0,1] 與 [0,1,0] 磁力差不多，給 4 分。可以發現[0,0,1] [0,2,3] [0,0,2] 的預測得分雖然是 4 分，但實際量測結果是不一致的，因此修正給予不同分數，如表6。(表格依實測磁力大小排序。)

表6：3 顆磁鐵實測結果與給分修正 (*黃色格標出最強磁力)

預測得分	實測磁力(g)	依磁力大小給分	排列方式	相似形
17	2902	給分 6	0-1-2	[2,3,0]
16	2702	給分 5	1-2-3	[3,0,1]
16	2300	給分 4	0-0-1	[2,2,3] [3,0,0] [1,2,3]
15	2260		0-2-3	[2,0,1] [1,2,0] [3,0,2]
15	2180	給分 3	0-0-2	[2,2,0] [2,0,0] [0,2,2]
12	1302	給分 2	0-1-0	[0,3,0] [2,3,2] [2,1,2]
其他	其他	給分 1	其他	其他

2. 4顆磁鐵的預測得分與實測結果

表7：4 顆磁鐵預測得分

預測得分	排列方式
35	[0,1,2,3] [1,2,3,0] [2,3,0,1] [3,0,1,2]
34	[0,0,1,2] [0,1,2,2] [2,2,3,0] [2,3,0,0]
32	[0,1,2,0] [0,2,3,0] [2,0,1,2] [2,3,0,2]
31	[1,2,2,3] [3,0,0,1]
28	[0,0,0,1] [0,2,2,3] [0,3,0,1] [1,2,0,1]

表8：4 顆磁鐵實測結果與給分修正 (*黃色格標出最強磁力)

預測得分	實測磁力(g)	依磁力大小給分	排列方式	相似形
35	2880	給分 6	0-1-2-3 	[1,2,3,0] [2,3,0,1] [3,0,1,2]
34	2742	給分 5	0-0-1-2 	[0,1,2,2] [2,2,3,0] [2,3,0,0]
32	2702		0-1-2-0 	[0,2,3,0] [2,0,1,2] [2,3,0,2]
31	2618	給分 4	1-2-2-3 	[3,0,0,1]
28	2558	給分 3	0-0-0-1 	[1,2,2,2] [2,2,2,3] [3,0,0,0]
28	2518		1-2-0-1 	[3,0,2,3]
28	2438		0-2-2-3 	[1,2,2,0] [2,0,0,1] [3,0,0,2]
28	1820	給分 2	0-3-0-1 	[1,2,3,2] [2,1,2,3] [3,0,1,0]
其他	其他	給分 1	其他	其他

3. 5顆磁鐵的預測得分與實測結果

表9：5 顆磁鐵預測得分

預測得分	排列方式
66	[0,1,2,3,0] [2,3,0,1,2]
63	[1,2,3,0,1] [3,0,1,2,3]
61	[0,0,1,2,3] [1,2,3,0,0] [2,2,3,0,1] [3,0,1,2,2]

59	[0,0,1,2,2] [2,2,3,0,0] [0,1,2,2,3] [1,2,2,3,0] [2,3,0,0,1] [3,0,0,1,2]
58	[0,2,3,0,1] [1,2,3,0,2] [2,0,1,2,3] [3,0,1,2,0]

表10：5顆磁鐵實測結果與給分修正（*黃色格標出最強磁力）

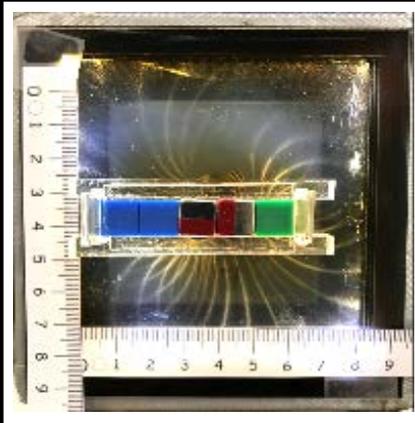
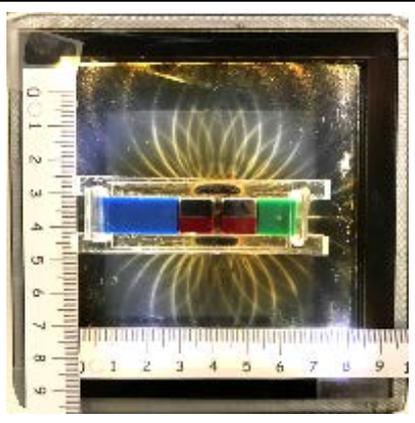
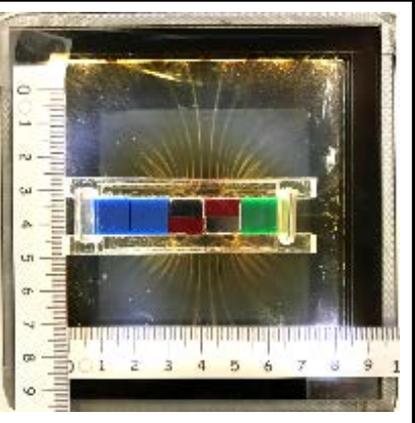
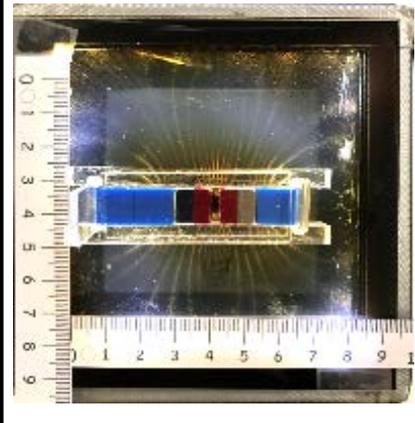
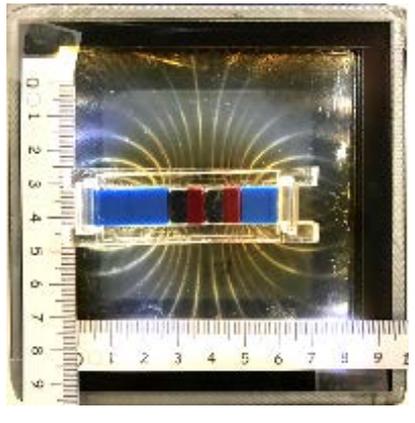
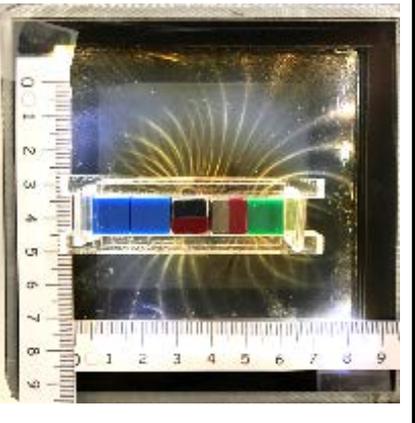
預測得分	實測磁力(g)	依磁力大小給分	排列方式	相似形
66	5450	給分 6	0-1-2-3-0 	[2,3,0,1,2]
63	4918	給分 5	1-2-3-0-1 	[3,0,1,2,3]
61	4742	給分 4	0-0-1-2-3 	[1,2,3,0,0] [2,2,3,0,1] [3,0,1,2,2]
59	4622	給分 3	0-0-1-2-2 	[2,2,3,0,0]
58	4422	給分 2	0-2-3-0-1 	[1,2,3,0,2] [2,0,1,2,3] [3,0,1,2,0]
59	4142	給分 1	0 1 2 2 3 	[1,2,2,3,0] [2,3,0,0,1] [3,0,0,1,2]

二. 觀察磁力線研究結果

(一) 2顆磁鐵的六種基礎型排列方式的磁力線

可以看到磁力最強的組合[0-1]的磁力線集中在下方，上方的磁力線相對較少，與磁力最弱的組合[0-3]正好上下顛倒。L型的組合有把磁力往L的長邊集中的現象。而組合[0-2], [1-3]則因為NS極互相吸引，所以延伸出的磁力線較短較弱。 [3-3]的磁力線與單顆磁鐵類似，形成一個更大的磁鐵。

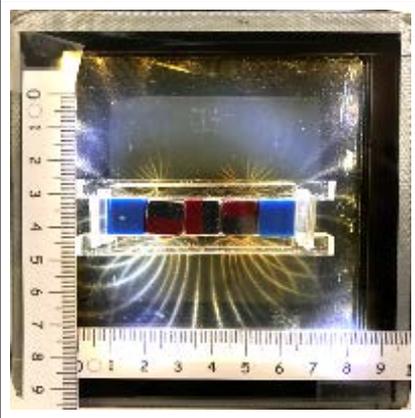
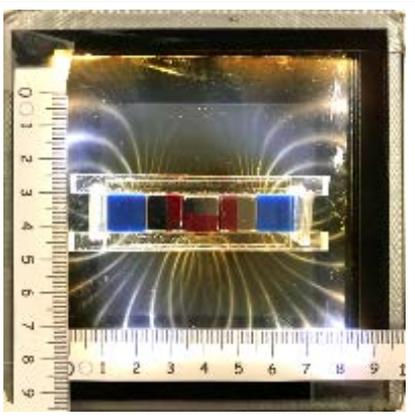
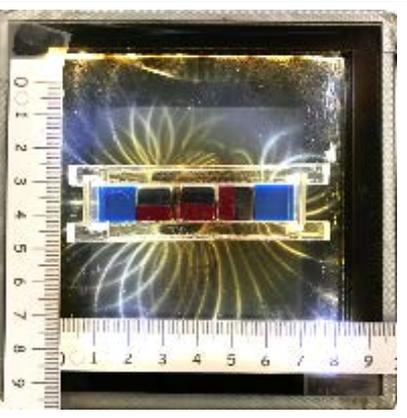
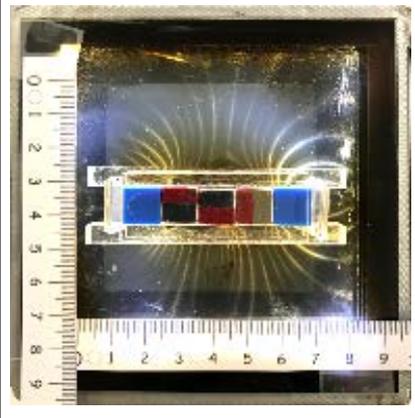
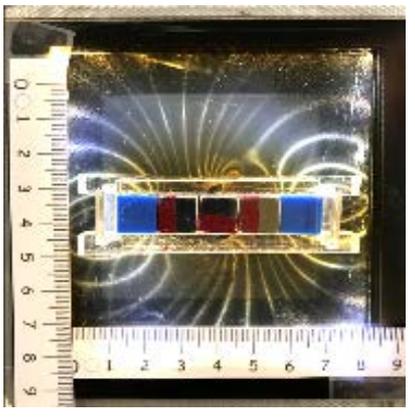
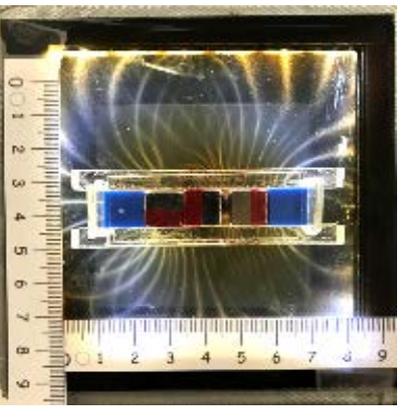
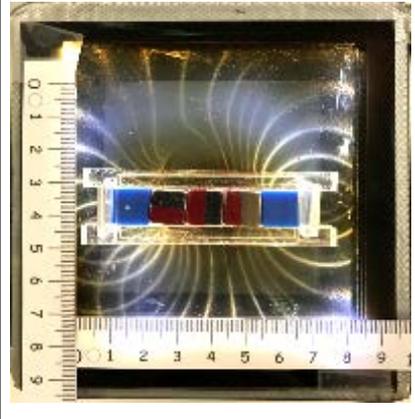
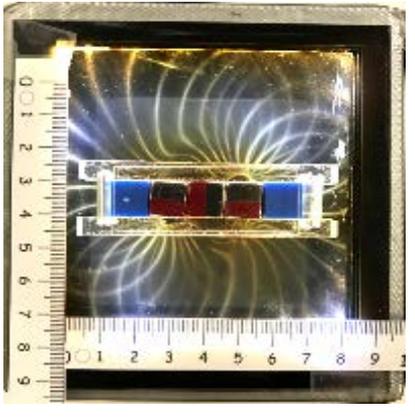
表11：2顆磁鐵不同排列方式之磁力線分布 (*黃色格標出最強磁力)

		
[0-1], 1742(g)	[0-0], 1617 (g)	[0-2], 1452(g)
		
[1-3], 965(g)	[3-3], 655(g)	[0-3], 573(g)

(二) 3顆磁鐵的磁力線 (這裡取用"磁力強度評分法"所預測的8種最強磁力組合)

磁力最強的[0-1-2]組合的磁力線不對稱性更加明顯，全部往下方集中，上方只有微弱的磁力線。

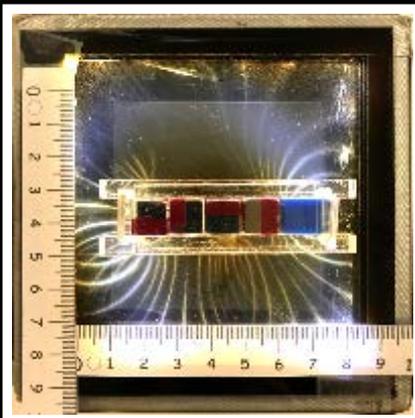
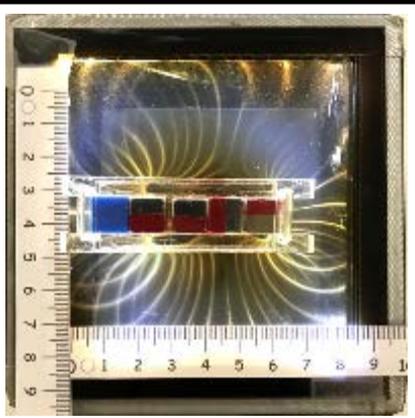
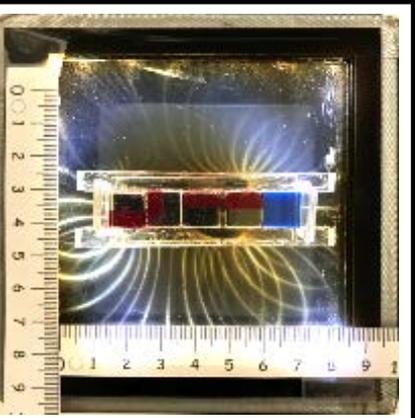
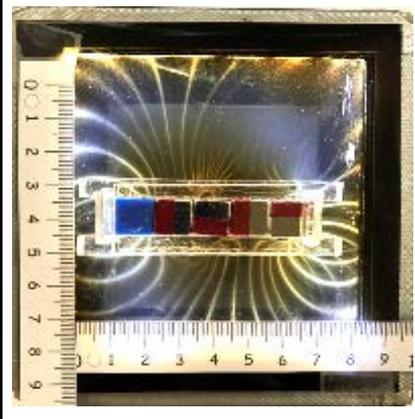
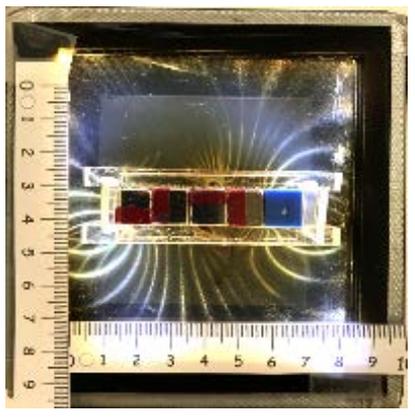
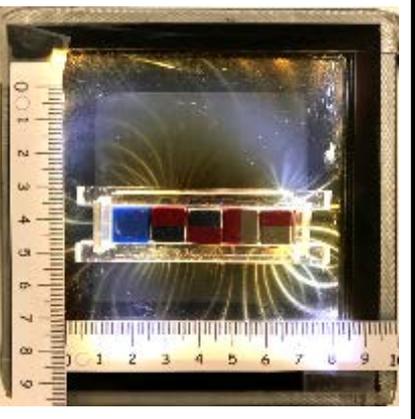
表12：3顆磁鐵不同排列方式之磁力線分布 (*黃色格標出最強磁力)

		
[0-1-2], 2923(g)	[3-0-1], 2807(g)	[0-0-1], 2300(g)
		
[2-0-1], 2260(g)	[1-0-1], 2182(g)	[0-1-3], 2060(g)
		
[0-1-1], 1660(g)	[0-1-0], 1302(g)	

(三) 4顆磁鐵的磁力線 (這裡取用"磁力強度評分法"所預測的 6 種最強磁力組合)

磁力最強的[0-1-2-3]組合的磁力線一樣呈現上下不對稱的形狀。其他磁力較強的組合也都是非對稱的形狀。

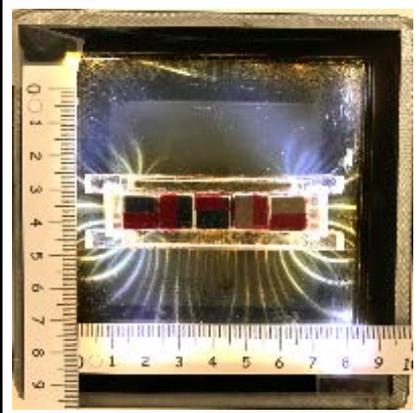
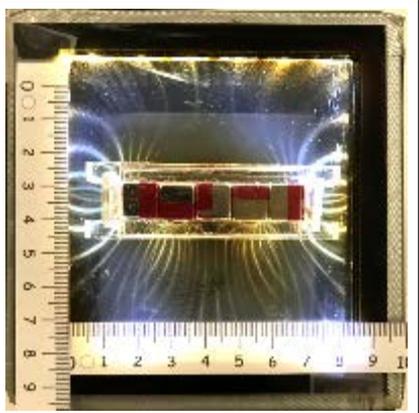
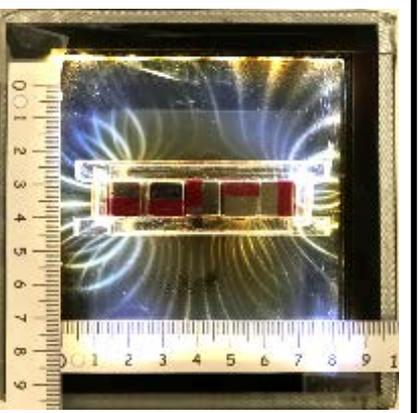
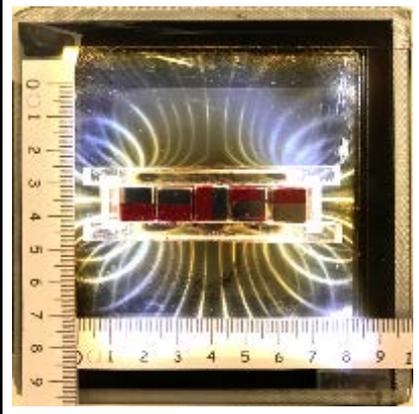
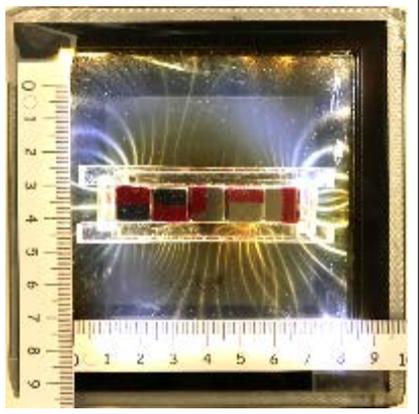
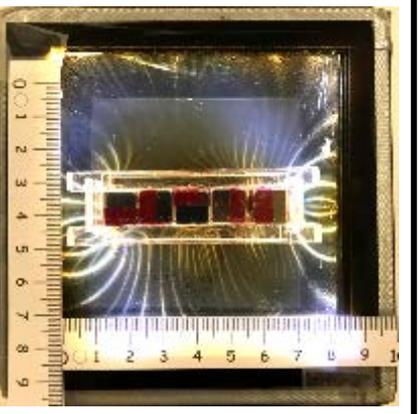
表13：4顆磁鐵不同排列方式之磁力線分布 (*黃色格標出最強磁力)

		
[0-1-2-3], 2880(g)	[0-0-1-2], 2742(g)	[0-1-2-2], 2742
		
[1-0-1-2], 2520(g)	[0-1-2-1], 2342(g)	[2-0-1-2], 2226

(四) 5顆磁鐵的磁力線 (這裡取用"磁力強度評分法"所預測的 6 種最強磁力組合)

磁力最強的[0-1-2-3]組合的磁力線一樣呈現上下不對稱的形狀。其他磁力較強的組合也都是非對稱的形狀。

表14：5顆磁鐵不同排列方式之磁力線分布 (*黃色格標出最強磁力)

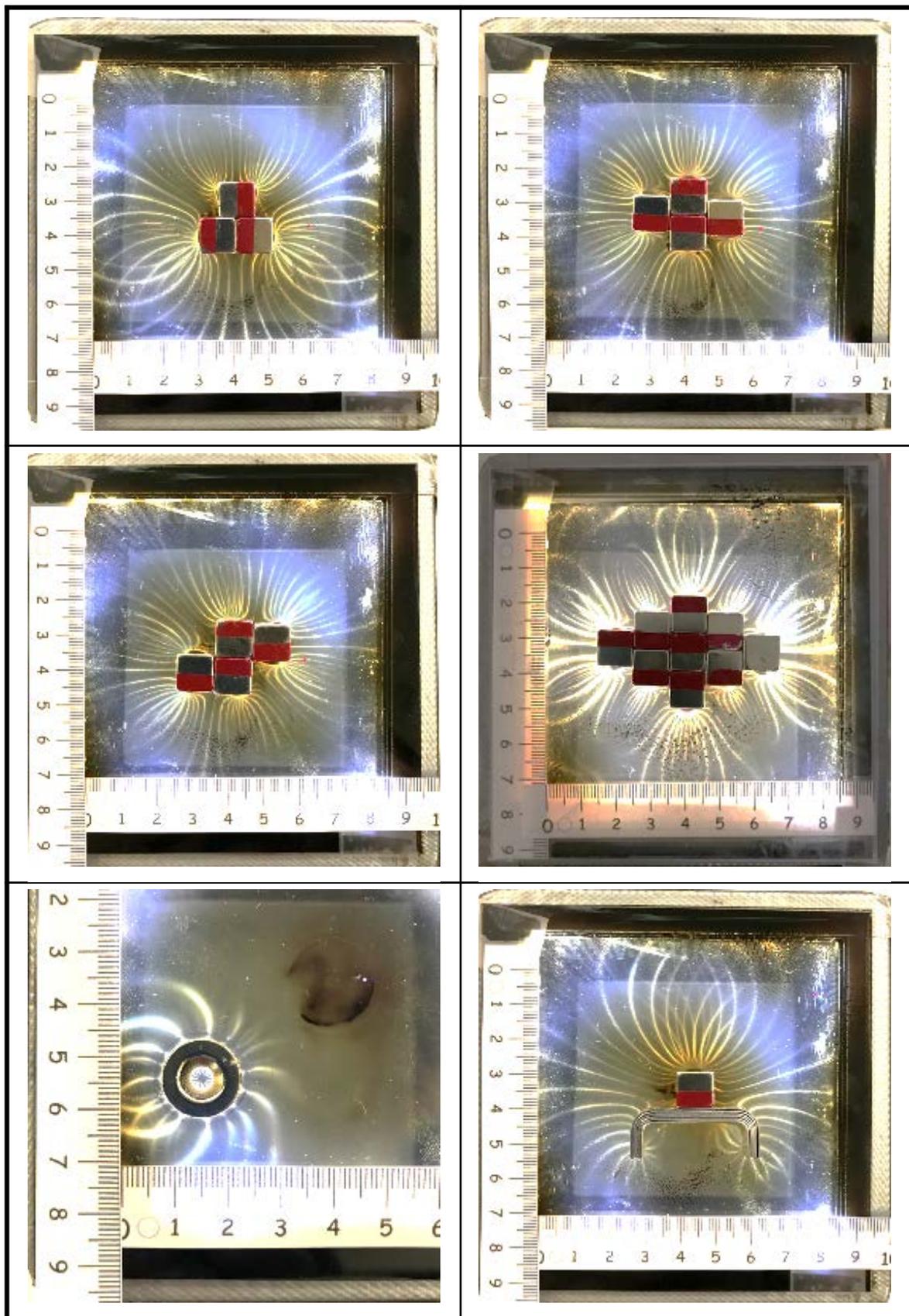
		
[0-1-2-3-0], 5450(g)	[3-0-1-2-3], 4918(g)	[0-0-1-2-3], 4742(g)
		
[0-0-1-2-2], 4662(g)	[2-0-1-2-3], 4422(g)	[0-1-2-3-1], 3942

綜合以上實驗結果發現，不管是2、3、4或5顆磁鐵，最強磁力的磁鐵排列，其磁力線均有分布在同一側的共同現象，因此推論其為磁力最強的原因。

(五) 美麗的磁力線

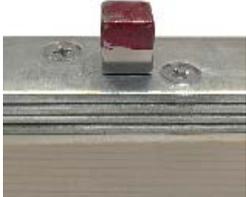
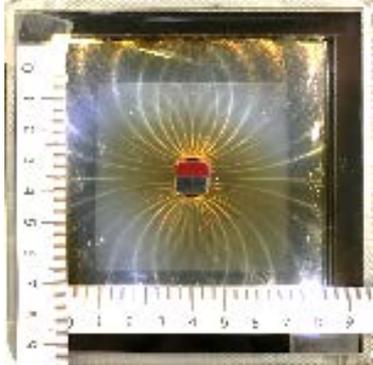
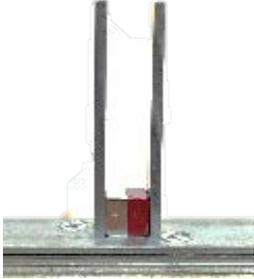
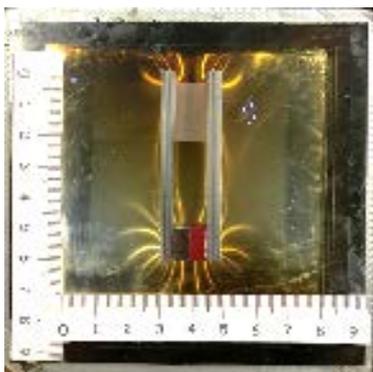
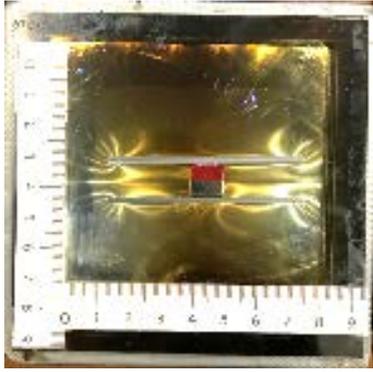
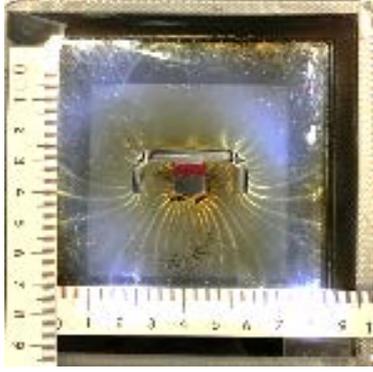
我們也另外觀察了幾種不同排列方式的磁力線，既美麗又夢幻。

表15：其他不同排列方式之磁力線分布



三. 改變磁力線研究結果

(一) 鐵片與磁鐵搭配的實驗結果

搭配方式	磁力(g)	磁力線形狀	說明
<p>1</p> 	1295		<p>➢ 不加鐵片作為對照組</p> <p>【發現】鉤磁鐵的磁力還真強啊！</p>
<p>2</p> 	456		<p>➢ 疊成2.5mm厚的鐵片以直立的方式至於磁鐵兩邊，磁鐵與鐵片下緣平齊。</p> <p>【發現】我們以為鐵片能引導南北極磁力線到下方鐵塊，磁力應該增強才對，但卻是減弱</p>
<p>3</p> 	406		<p>➢ 疊成2.5mm厚的鐵片以橫置的方式至於磁鐵兩邊。類似鉛筆盒磁鐵的擺法。</p> <p>【發現】我們以為鐵片的接觸面較方式2大，磁力應該也比方式2大，但卻相反</p>
<p>4</p> 	1639		<p>➢ 彎成U字型的鐵片罩在磁鐵上面，鐵片下緣與磁鐵平齊。鐵片厚度約2.8mm。</p> <p>【發現】沒想到U字型的鐵片的接觸面跟方式2差不多，但磁力卻大了很多！</p>

(二) 磁力開關

磁力開關設置如下圖的情況下，開關可以吸起鐵片。隱約可以看到A節的磁力把B節的磁力往下推，並觀察到磁力開關底部有明亮的磁力線。

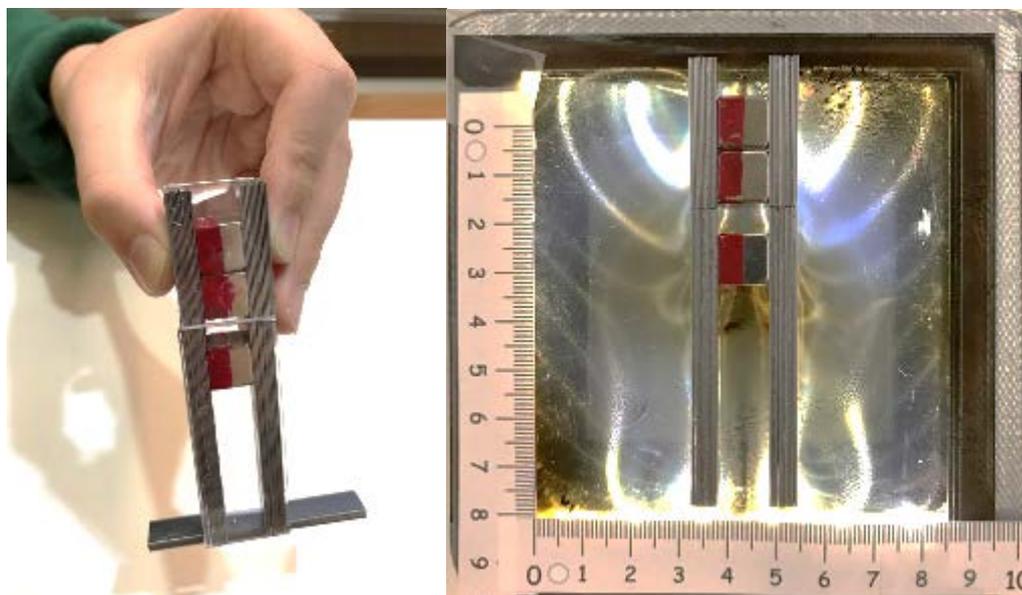


圖 18：磁力開關"打開"能夠吸起鐵片（左）、打開時的磁力線（右）

磁力開關設置為關閉的情況下，幾乎無法吸起鐵片。主要磁力線集中在A節與B節之間，磁力開關底部的磁力線變得很不明顯。

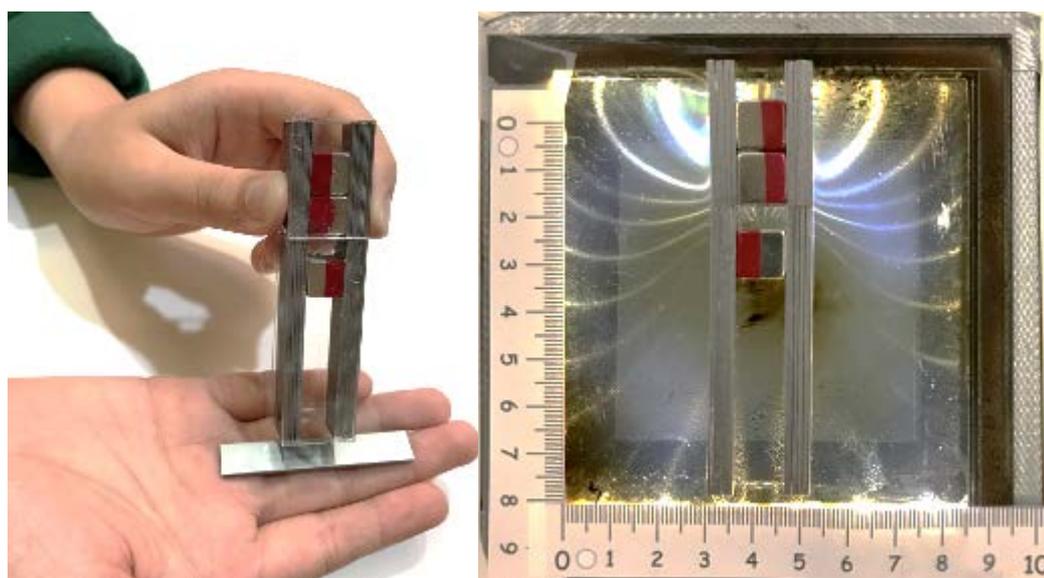


圖 19：磁力開"關閉"閉無法吸起鐵片（左）、關閉時的磁力線（右）

伍、討論

一. 量測磁力大小-相關討論

- (一) 實際操作我們才發現量測磁力大小不是一件容易的事。想要準確量測磁力大小必須有許多細節要注意；檢查磁鐵擺放位置是否置中、吊掛籃在槓桿上的刻度是否對準、添加負重時必須輕放並且等到吊掛籃靜止才能放開。
- (二) 我們發現同一個組合測量第一次、第二次、第三次時，磁力有變弱的現象，有可能是因為太大的衝擊力導致磁力分散，背後原因值得探討。
- (三) 相似形，例如[0-1]與[3-2]這種L形組合的磁力大小理論上應該一樣，但量測結果卻有差異。我們推論是因為這種組合的磁力本身就不左右對稱，因此從中間拉起時容易朝一邊先翹起。
- (四) 整理1、2、3、4、5顆最強磁力如下，可以發現海爾貝克排列法的磁力強度是單顆磁鐵的7.6倍！不是預想中的5倍。換算下來海爾貝克排法的單顆磁力為1顆磁鐵的1.52倍！

- (五) 4顆磁鐵的強度與3顆磁鐵差不多，我們認為可能是因為實驗誤差或者是磁力相互抵消，所以不像預期的，多加一顆磁鐵磁力會增加很多磁力。

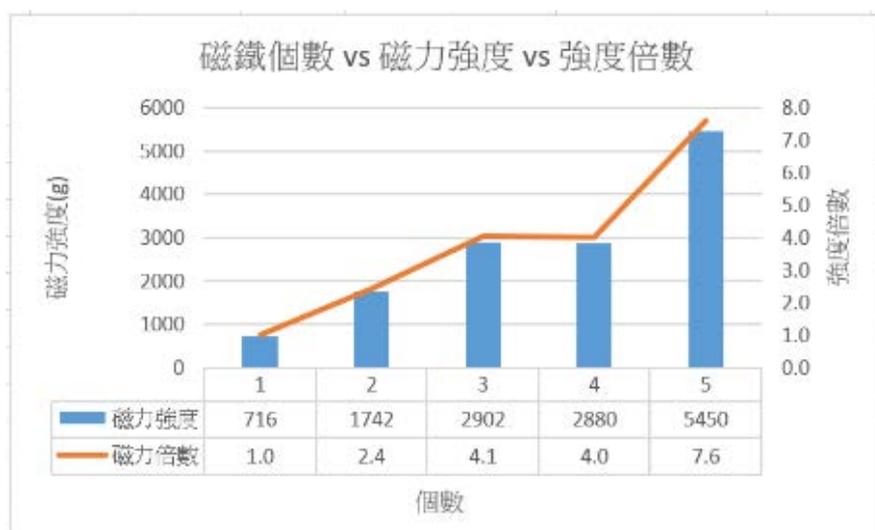


圖 20：磁鐵個數與最強磁力強度與強度倍數組合圖

- (六) 兩顆磁鐵的組合中，排除最強磁力[0-1]的相似形，次強組合為[0-0]。但是海爾貝克陣列排法中並沒有出現[0-0]的相似形。因此前述“有沒有可能磁力最強的組合在增加一顆磁鐵後因為磁力互相排斥或抵消而變弱了？反而是磁力第二強的組合在添加磁鐵後磁力變成最強的？”從結果反推似乎不成立，所以「磁力強度評分法」白做了嗎？我們認為不是的，因為假設一開始我們不曉得海爾貝克陣列的排法，就不會先得出這個結論。我們為了實嚴謹而設計兩種實驗方法交互驗證，並且證明結果一致，不正是科學精神的展現嗎？（可惜我們不是第一個找出最強磁力排法的人，不然就可以用我們的名字命名了！）

二. 觀察磁力線魔燈盒-相關討論

- (一) 磁力線魔鏡的原理是什麼呢？值得後續研究。
- (二) 透過觀察可以發現，磁場改變造成磁流體改變，光線照射磁流體的分布也跟著改變。理論上磁力線不相交，但磁力線魔燈盒卻觀察到相交的條紋，就此現象我們推測可能受光學因素影響有三。其一，雖然磁力線不相交，但是光線可以相交，因此產生交錯線條；其二，可能與不同厚度壓克力板影響光線折射現象有關；其三，可能與LED燈光源方向有關，因為影片中的光源來自360度，而我們自製的磁力線魔鏡燈盒為方型，光源只來自兩個方向，所以可能造成相交的條紋。
- (三) 實驗操作下來，我們發現磁力線魔燈盒有一些缺點可以改良：
 1. 磁流體的奈米鐵粒會因重力與磁力自然凝聚，使得磁流體分布不均，可以用手指輕壓或推移兩片壓克力板讓它均勻，雖然不會太影響磁力線的觀察，但建議可多加一些磁流體以及將壓克力板壓得更緊密。
 2. 因為沒有封邊，夾層中的磁流體會逐漸乾掉，無法顯示磁力線，可將其封邊效果可能會更好。
 3. 磁力較弱的磁鐵無法顯示磁力線；也許可選用更薄的壓克力板。
- (四) 由於，前面我們推論受磁力影響而彎曲的光線即為磁力線無實驗結果支持，因此，我們未來想要研究將磁力線魔燈盒與以沙拉油加鐵粉作為磁流體之實驗進行比較，觀察磁力線魔燈盒的光線與以沙拉油加鐵粉作為磁流體的磁力線之相關性，更能說明受磁力影響而彎曲的光線即為磁力線。以此結果推廣到自然課磁力單元的實驗中，取代傳統使用鐵粉作為觀察磁力線的媒介，達到環保的效果。

三. 改變磁力線方向-相關討論

- (一) 搭配方式 4 的磁力比方式 2 的磁力大很多，甚至比沒搭配鐵片的磁鐵磁力還要強，我們討論認為：方式 2 即使加了鐵片想要把磁力線盡量往下方傳遞，但鐵片與磁鐵本身的南北極距離很近，磁力線只要走很短的路徑就到達南極，因此經過下方鐵塊的磁力線相對是少的。方式 4 的南北極距離較遠，有較多空間讓磁力線經過下方鐵塊，因此磁力較強。方式 1 大部分用到南極磁力線，而方式 4 把南北極磁力線都利用到了，因此方式 4 的磁力比單顆磁鐵還要強。
- (二) 磁力開關在「關閉」的設置下，仍可吸住1g重的鐵片。有沒有辦法再降低外露的磁力呢？可後續再進行研究。

陸、結論

- 一. 我們設計"只取最強磁力法"與"磁力強度評分法"兩種不同的方法來找出磁力最強的排列。兩種方法的結果一樣，並且與**海爾貝克陣列 (Halback Array)** 排列法一致，驗證了我們的實驗是正確的。
- 二. 最強磁力排列方式會讓磁力線變得不對稱，磁力線會集中於上或下同一側。這就是磁力為什麼可以增強的原因。
- 三. 利用鐵片引導磁力線，讓磁力線集中也可以達到增強磁力的效果。
- 四. 可以藉由將磁力線"隱藏"起來的方式達到"關閉"磁力的效果。(磁力開關實驗)
- 五. 磁力線魔鏡的效果非常好，值得改良並推廣。
- 六. 這次的研究不僅讓我們學到了關於磁鐵的相關知識與研究，我們還學到如何設計實驗、進行邏輯思考、如何寫報告、整理資料等等技能。雖然中間過程很辛苦(被磁鐵夾了很多次)，也有很多次失敗，但我們獲得了寶貴經驗，也激發對科學研究的興趣，我們下次還要繼續參加科展活動！

柒、參考文獻資料

【政府出版品】

1. 吳冠穎、陳毅展、陳柔茜、蕭珖 (2012)。我知道磁鐵兩側加鐵片能增強磁力的秘密了。中華民國第52屆中小學科學展覽會作品。國立台灣科學教育館。
<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/52/pdf/080106.pdf>

【網路資源】

1. Wikipedia - Halback array
https://en.wikipedia.org/wiki/Halbach_array
2. Youtube - Permanent Magnet Switch | Magnetic Games
<https://www.youtube.com/watch?v=E6idrAEO6W0>
3. Ferro Cell USA
<https://www.ferrocell.us/>
4. Youtube - Magnetic Fields "Bending" Light Paths
<https://www.youtube.com/watch?v=GpEi-jSmcoA>
5. A Stray-Field-Immune Magnetic Displacement Sensor With 1% Accuracy (picture "Geometry and magnetic field lines for a cube magnet")
https://www.researchgate.net/figure/Geometry-and-magnetic-field-lines-for-a-cube-magnet_fig2_341722074
6. Is there any simple, low-energy way to make a permanent magnet able to turn "on and off" (similar to an electromagnet)?
<https://www.quora.com/Is-there-any-simple-low-energy-way-to-make-a-permanent-magnet-able-to-turn-on-and-off-similar-to-an-electromagnet>

【評語】 080106

這個工作主要為研究磁鐵在不同的排列情況下，個別的磁力大小的研究。同學自製了磁力線觀測設備。藉由這套設備，同學可以觀測各個磁鐵組合的情況下，磁力線的分布情況。就實驗觀測的結果歸納出，排列較不對稱的組合，會產生相對較強的組合。本作品主題為採用程式推算與實測驗證實的方式，試圖找出能產生最強磁力的磁鐵排列組合。另外，製作磁力線魔鏡來觀察探討磁力線與磁力的關係。結果發現最強磁力的磁鐵排列組合與海爾貝克陣列排列法一致，可以藉由將磁力線隱藏起來的方式達到關閉磁力的效果。

有趣的現象學習彙整與實測。本作品雖然大部分的資訊都可以從網絡上找到，但是同學們採用程式推算與實測驗證實的方式找到最強磁力的磁鐵排列組合，非常具有科學探索的精神。另外，利用自己製作磁力線魔鏡來觀察探討磁力線與磁力的關係，相當具有創意，的確值得進一步改進推廣。本作品是一件非常完整且具有參考價值的研究。

本作品的優點為：

1. 控制變因做得非常完整。
2. 現象觀察記錄得非常仔細，有定量及定性的分析。

3. 磁力線魔鏡的效果非常好，值得改良並推廣。

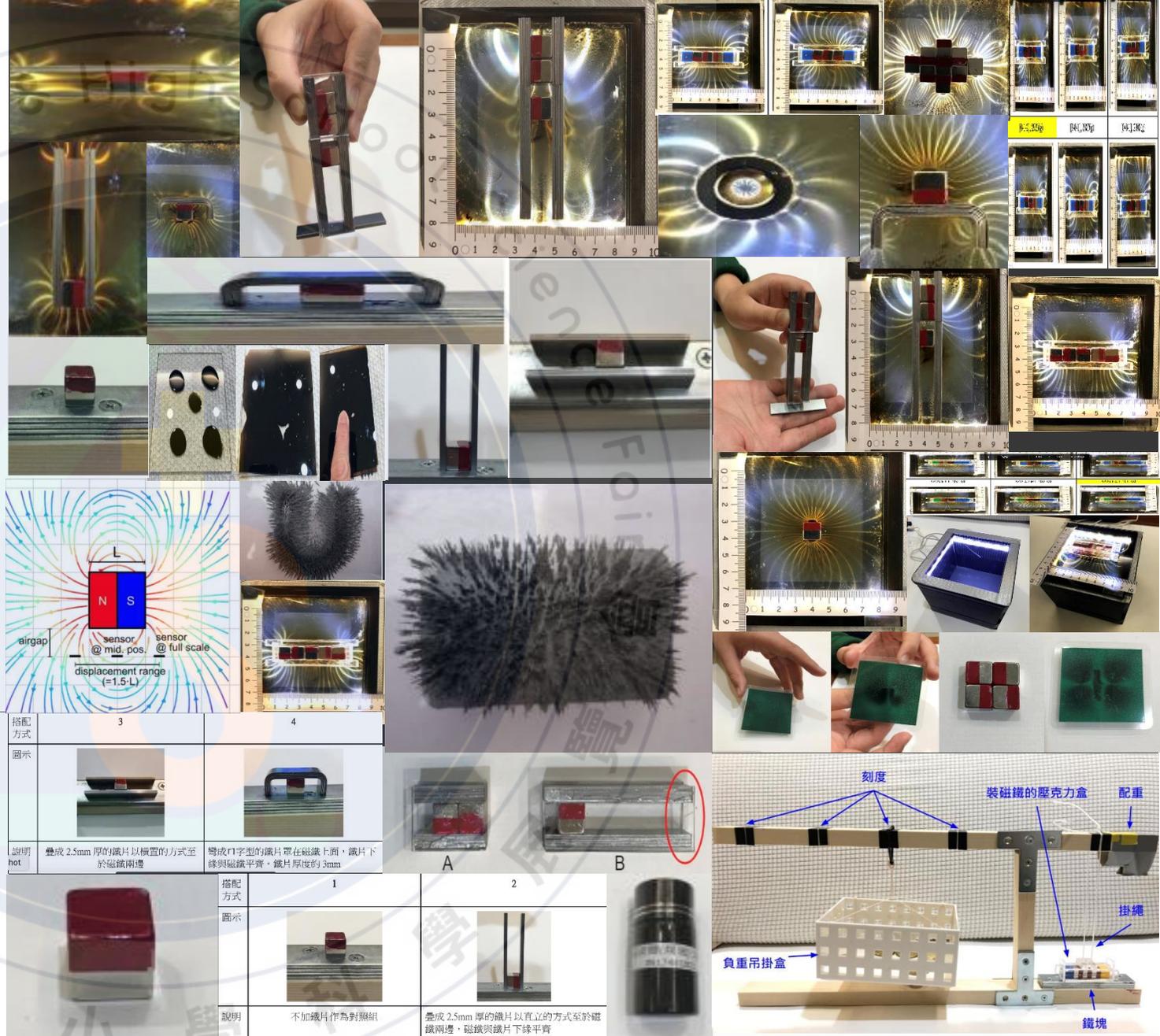
如果可以嘗試更進一步討論磁力線不對襯的比率跟磁力大小的相關性做一個半定量的比較會是一個更好的工作。

作品簡報

中華民國第62屆中小學科學展覽會

作品名稱：排對了會更強-磁鐵排列研究

科別：物理科
組別：國小組



搭配方式 3



說明
not

4



說明
not

A B



說明
not

搭配方式 1



說明
not

2

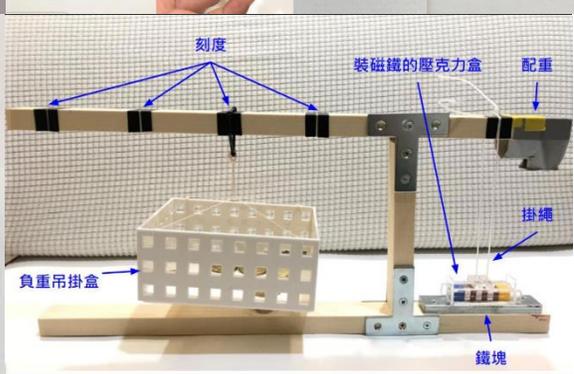


說明
not

說明
not

說明
not

刻度 裝磁鐵的壓克力盒 配重 掛繩 負重掛盒 鐵塊



摘要

- ◆ 本研究採用程式推算與實測驗證實的方式，試圖找出能產生**最強磁力的磁鐵排列組合**。實驗結果所找出的排列方式與**海爾貝克陣列**（Halback Array）一致。
- ◆ 我們嘗試製作「**磁力線魔鏡-Ferrocenell**」來觀察上述實驗的**磁力線形狀**，探討磁力線與磁力的關係。「磁力線魔鏡」可以方便清楚的看到磁力線形狀，**或許能成為課堂上不錯的教具**。
- ◆ 我們也進行引導磁力線的實驗，利用矽鋼片改變磁力線來增強磁力，觀察各種鋼片與磁鐵的搭配方式對磁力大小有什麼影響。並試做了**可以開啟、關閉磁力的「磁力開關」**，展示改變磁力線的實際應用。

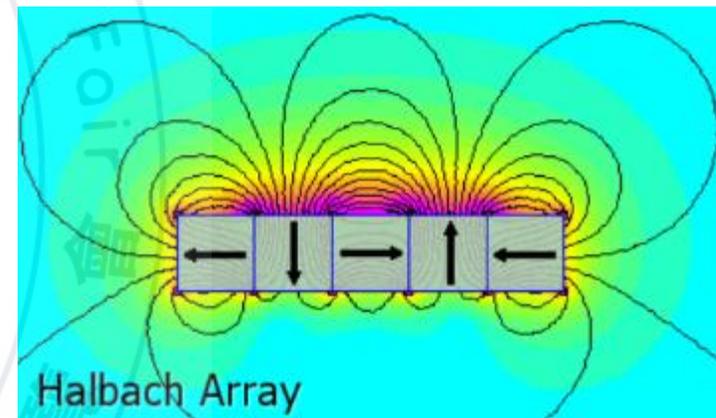
壹、前言

一、研究動機

因為國小三年級的時候，自然課有學到磁力的相關知識，知道原來磁力也有大小的分別。雖然老師有教我們基本的知識，但我們想要知道更深入的研究，於是我們幾個有興趣的同學們就一起組隊並找老師討論，開始上網找文獻、展開實驗與研究。

二、研究目的

- (一) 研究測量磁力大小的方法。
- (二) 研究磁鐵的排列組合，怎麼快速找出磁力最強的組合。
- (三) 研究「看見」磁力線的方法。
- (四) 探討磁力線形狀與磁鐵強度的關係。
- (五) 研究鐵片與磁鐵怎麼搭配可以增強磁力。



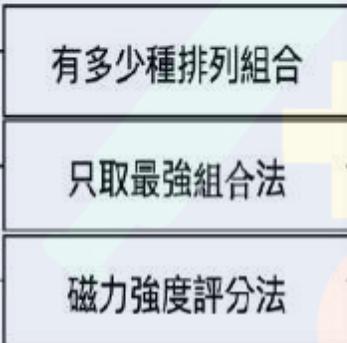
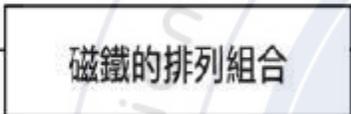
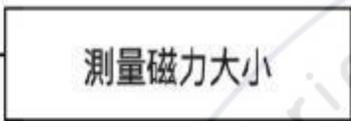
三、文獻探討-海爾貝克陣列

- ◆ 1979年，美國學者Klaus Halbach發現了這種特殊的磁鐵排列方式，能用最少量的磁體產生最強的磁場。
- ◆ 海爾貝克陣列的一側磁場為兩倍強度，另一側磁場非常微弱。
- ◆ 本科展題目由海爾貝克陣列發想，研究探討各種不同磁鐵排列方式所產生的效果。

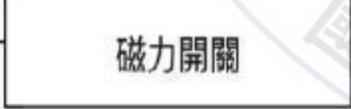
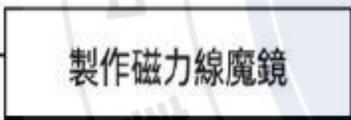
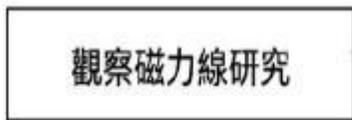
貳、研究方法



- ◆ 測量不同磁鐵排列的磁力大小，並找出磁力最強的排列方式。



- ◆ 利用自製的磁力線魔鏡觀察不同磁鐵排列方式的磁力線形狀，探討磁力線與磁力大小的關係。



- ◆ 磁性物質可以導引磁力線，我們想要觀察不同的鐵片與磁鐵的搭配方式以及了解磁力大小的變化。

- ◆ 磁鐵排列研究：

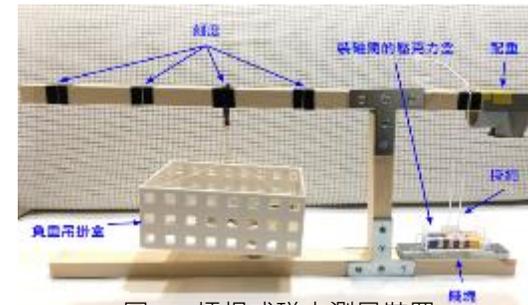


圖 1：槓桿式磁力測量裝置

- ◆ 觀察磁力線研究：



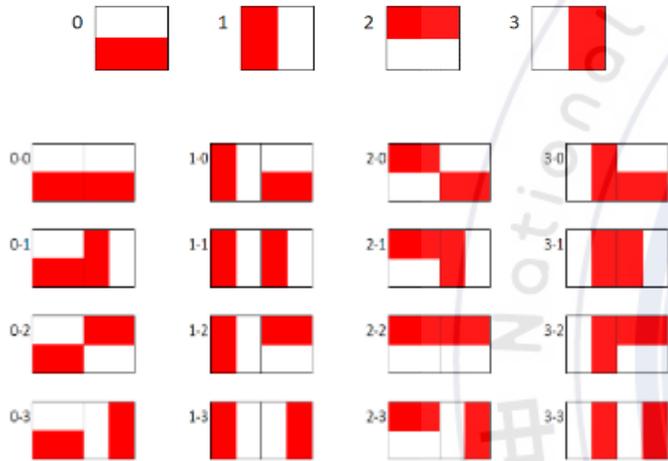
- ◆ 改變磁力線的研究：

搭配方式	1	2	3	4
圖示				
說明	不加鐵片作為對照組	疊成2.5mm厚的鐵片以直立的方式至於磁鐵兩邊，磁鐵與鐵片下緣平齊	疊成2.5mm厚的鐵片以橫置的方式至於磁鐵兩邊	彎成U字型的鐵片罩在磁鐵上面，鐵片下緣與磁鐵平齊。鐵片厚度約3mm

貳、研究方法

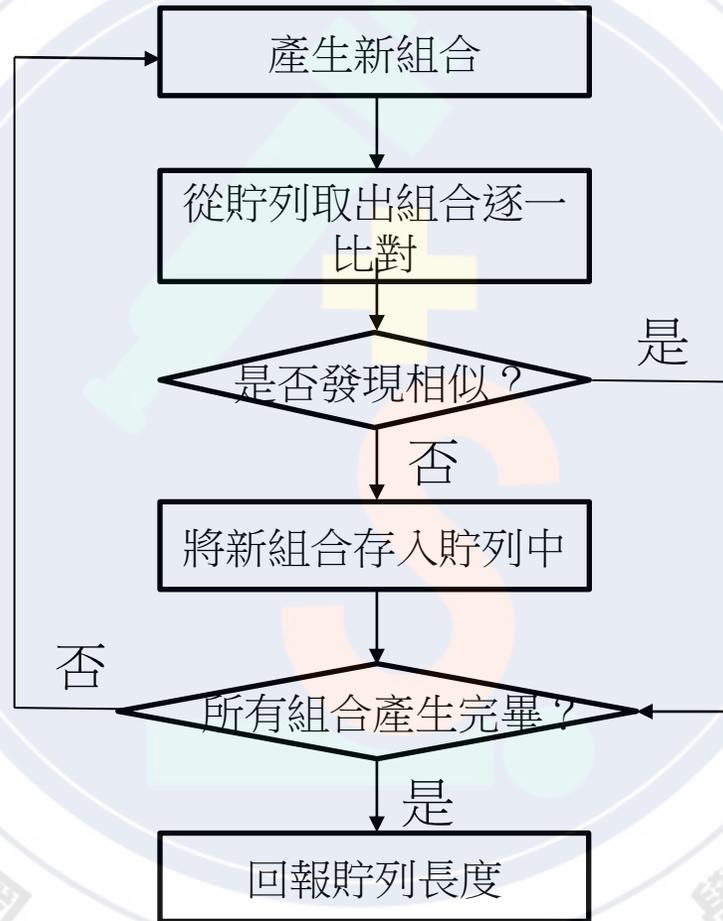
一、磁鐵排列研究

1. 有多少種排列組合？



操作	舉例
左右翻轉	0-1 ⇒ 3-0
磁極相反	0-1 ⇒ 2-3
磁極相反+左右翻轉	0-1 ⇒ 2-3 ⇒ 1-2

- ◆ 使用Python，讓電腦進行自動比對，流程圖如下。
- ◆ 原理是把未發現相似形的組合貯存起來並與所有組合比對，最後貯列所存的組合即為沒有相似形的「基礎型組合」



```

import numpy as np
''' 排列方式 '''
base_arr = np.array([[0,0],
                    [1,1],
                    [0,0],
                    [1,0]],
                    [[0,1],
                    [1,0]],
                    [[0,1],
                    [1,0]],
                    [[0,1],
                    [1,0]])

''' 將陣列旋轉180度 '''
def rotate180(arr):
    new_arr = arr.reshape(arr.size)
    new_arr = new_arr[::-1]
    new_arr = new_arr.reshape(arr.shape)
    return new_arr

''' 將陣列左側90度 '''
def rotate90_left(arr):
    new_arr = np.transpose(arr)
    new_arr = new_arr[::-1]
    return new_arr

''' 將陣列右側90度 '''
def rotate90_right(arr):

```

磁鐵個數	所有可能的組合 (種)	排除相似形所剩的基本型組合 (種)
2	$4*4=16$	6
3	$4*4*4=64$	20
4	$4*4*4*4=256$	72
5	$4*4*4*4*4=1024$	272

圖5：排除相似形的貯列流程

貳、研究方法

一、磁鐵排列研究

2. 只取最強組合法

- ◆ 在磁力最強的組合之上添加磁鐵，測量磁力。
- ◆ 每增加一顆磁鐵會有 8 種組合需要量測，5 顆要進行 $2+8+8+8+8=34$ 次的量測，大幅降低量測次數。

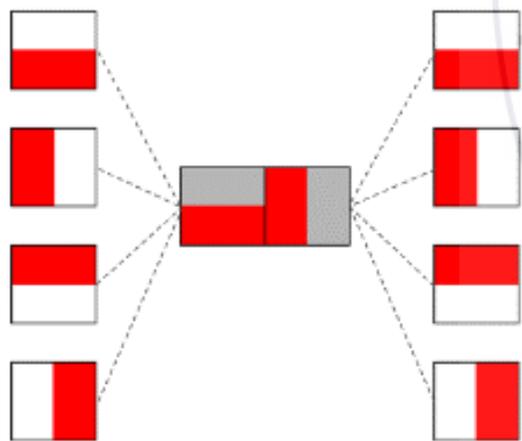


圖 6：從 2 個磁鐵增加到 3 個磁鐵的可能組合共 8 種

3. 磁力強度評分法

- ◆ 經實驗得知，在一顆磁鐵排列為 0 或 2 的磁力大於排列為 1 或 3 的方式。因此給 0 與 2 的排列 2 分，1 與 3 的排列 1 分。

實測磁力(g)	依磁力大小給分	排列方式	相似形
1742	給分 6	0-1	[1,2] [2,3] [3,0]
1617	給分 5	0-0	[2,2]
1452	給分 4	0-2	[2,0]
965	給分 3	1-3	[3,1]
678	給分 2	1-1	[3,3]
573	給分 1	0-3	[1,0] [2,1] [3,2]

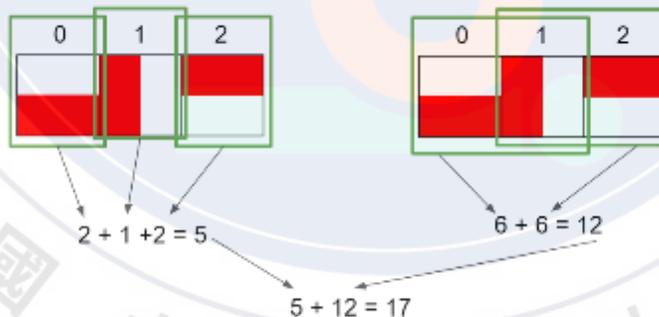


圖 7：總分的計算方法

- ◆ 利用這樣的給分來推測 3 顆磁鐵的強度，方法是把一顆的分數與兩顆的分數加成，如下圖說明。

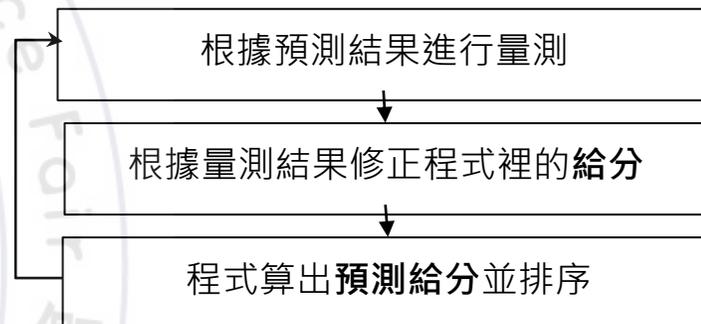


圖 8：分數的計算與排序流程圖

註：「給分」為實際量測排名後依據大小的分數，「預測給分」為依據排列組合使用程式計算後的分數。

參、研究結果

一、磁鐵排列研究

◆ 量測磁力大小與預測得分之結果(只列出最強磁力組)

磁鐵數	1 顆	2 顆	3 顆	4 顆	5 顆
排列方式	0	0-1	0-1-2	0-1-2-3	0-1-2-3-0
磁力(g)	716	1742	2902	2880	5450
預測得分	2	6	17	35	66

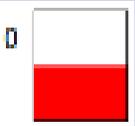
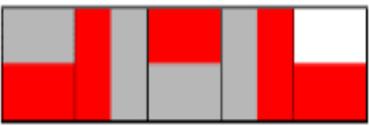
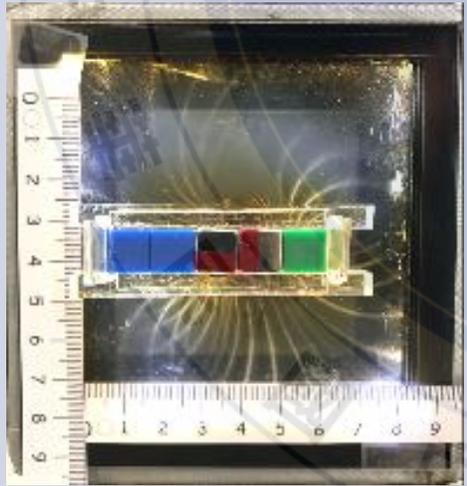
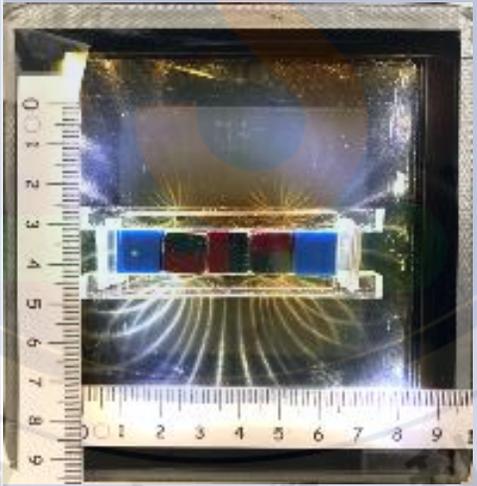
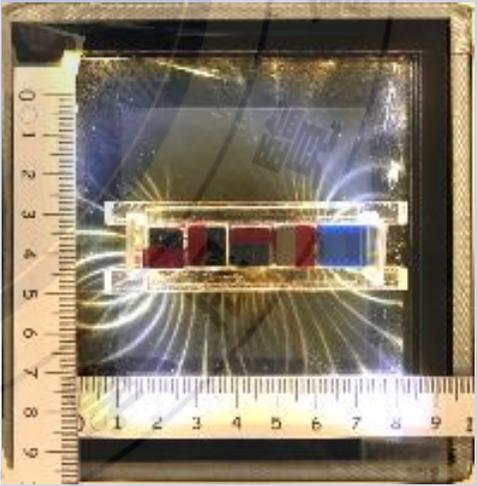
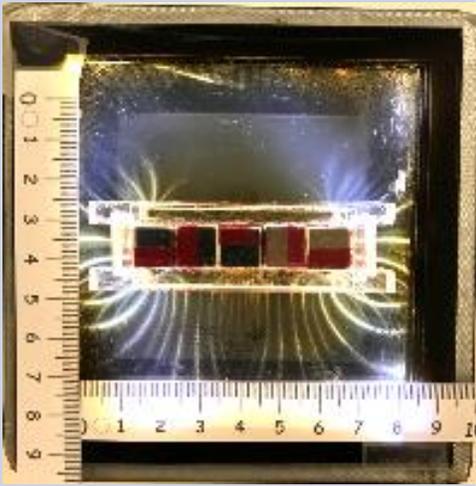
註1：磁力大小量測取三次平均值，小數第一位四捨五入後取整數的結果。

註2：預測得分皆為該組別之最高預測分數。

參、研究結果

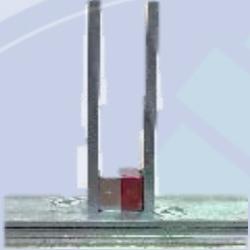
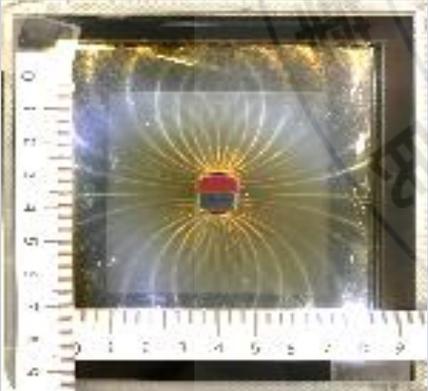
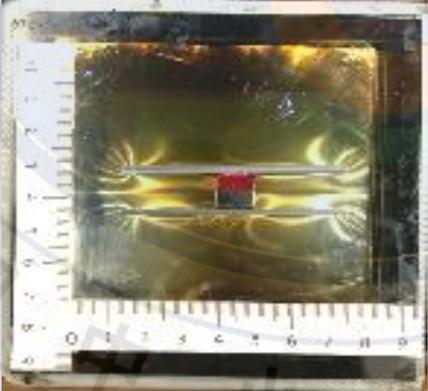
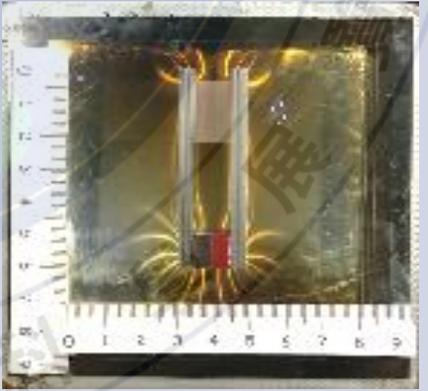
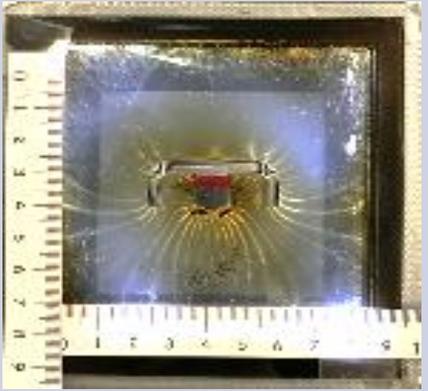
二、觀察磁力線研究結果

◆ 不同磁鐵數之磁力線分布(只列出最強磁力組)

磁鐵數	1 顆	2 顆	3 顆	4 顆	5 顆
排列方式	0 	0-1 	0-1-2 	0-1-2-3 	0-1-2-3-0 
磁力(g)	716	1742	2902	2880	5450
磁力最強排列方式的磁力線					

參、研究結果

三、改變磁力線研究結果

搭配方式				
磁力(g)	1295	456	406	1639
說明	不加鐵片作為對照組	疊成2.5mm厚的鐵片以直立的方式至於磁鐵兩邊，磁鐵與鐵片下緣平齊。		彎成口字型的鐵片罩在磁鐵上面，鐵片下緣與磁鐵平齊。鐵片厚度約2.8mm.
磁力線形狀				

肆、研究結果解釋

一、測量磁力大小相關討論

1. 根據實驗結果發現，我們在不同顆數磁鐵排列下的預測得分與實際測量到的磁力大小是符合的，即預測分數愈高，測得磁力也愈強。
2. 我們發現同一個組合測量第一次、第二次、第三次時，磁力有變弱的現象，有可能是因為太大的衝擊力導致磁力分散，背後原因值得探討。
3. 整理1,2,3,4,5顆最強磁力，可以發現海爾貝克排列法的磁力強度是單顆磁鐵的7.6倍！不是預想中的5倍。換算下來海爾貝克排法的單顆磁力為1顆磁鐵的1.52倍！

4. 4顆磁鐵的強度與3顆磁鐵差不多，我們認為可能是因為實驗誤差或者是磁力相互抵消，所以不像預期的，多加一顆磁鐵磁力會增加很多磁力。



肆、研究結果解釋

二、觀察磁力線相關討論

1. 透過觀察可以發現，磁場改變造成磁流體改變，光線照射磁流體的分布也跟著改變。
2. 理論上磁力線並不相交，但磁力線魔鏡卻看到相交的條紋。我們推測可能受光學因素影響有三：
 - (1) 雖然磁力線不相交，但是光線可以相交，因此產生交錯線條。
 - (2) 可能與不同厚度壓克力板影響光線折射現象有關；也有可能是光跟壓克力的反射倒影，因為較虛的線條與較明顯的磁力線是對稱的。
 - (3) 可能與 LED 燈光源方向有關，因為影片中的光源來自 360 度，而我們自製的磁力線魔鏡燈盒為方型，光源只來自兩個方向，所以可能造成相交的條紋。
 - (4) 如果能找出原因並避免上述現象，磁力線魔鏡就更完美了。

三、改變磁力線相關討論

1. 搭配方式 4 的磁力比方式 2 的磁力大很多，甚至比沒搭配鐵片的磁鐵磁力還要強，我們討論認為：
 - (1) 方式 2 即使加了鐵片想要把磁力線盡量往下方傳遞，但鐵片與磁鐵本身的南北極距離很近，磁力線只要走很短的路徑就到達南極，因此經過下方鐵塊的磁力線相對是少的。
 - (2) 方式 4 的南北極距離較遠，有較多空間讓磁力線經過下方鐵塊，因此磁力較強。
 - (3) 方式 1 大部分用到南極磁力線，而方式 4 把南北極磁力線都利用到了，因此方式 4 的磁力比單顆磁鐵還要強。

伍、結論

- 一. 我們設計"只取最強磁法"與"磁力強度評分法"兩種不同的方法來找出磁力最強的排列。兩種方法的結果一樣，並且與海爾貝克陣列 (Halback Array) 排列法一致，驗證了我們的實驗是正確的。
- 二. 最強磁力排列方式會讓磁力線變得不對稱，磁力線會集中於上或下同一側。這就是磁力為什麼可以增強的原因。
- 三. 利用鐵片引導磁力線，讓磁力線集中也可以達到增強磁力的效果。
- 四. 可以藉由將磁力線"隱藏"起來的方式達到"關閉"磁力的效果。(磁力開關實驗)
- 五. 磁力線魔鏡的效果非常好，值得改良並推廣。

陸、參考資料

1. 吳冠穎、陳毅展、陳柔茜、蕭珧 (2012)。我知道磁鐵兩側加鐵片能增強磁力的秘密了。中華民國第52屆中小學科學展覽會作品。國立台灣科學教育館。<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/52/pdf/080106.pdf>
2. Youtube - Magnetic Fields "Bending" Light Paths
<https://www.youtube.com/watch?v=GpEi-jSmcoA>
3. [A Stray-Field-Immune Magnetic Displacement Sensor With 1% Accuracy](https://www.researchgate.net/figure/Geometry-and-magnetic-field-lines-for-a-cube-magnet_fig2_341722074) (picture "Geometry and magnetic field lines for a cube magnet")
https://www.researchgate.net/figure/Geometry-and-magnetic-field-lines-for-a-cube-magnet_fig2_341722074