

中華民國第 55 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國小組 物理科

第三名

080114

『虹』透半邊天-全圓彩虹登場!

學校名稱：嘉義市東區嘉北國民小學

作者：	指導老師：
小六 楊芯縈	李見智
小六 劉雨牧	林秀貞
小六 賴采臻	
小六 曾薇誼	

關鍵詞：彩虹、折射、玻璃珠

摘要

我們的實驗以噴水以及玻璃珠的方式來製造穩定的彩虹，實驗中我們發現，利用玻璃珠製造全圓彩虹比水滴簡單許多，我們也發現折射率較高的玻璃珠所做出來的全圓彩虹上下可視角約 $44^{\circ}\sim 46^{\circ}$ 度，而小水滴不適合的原因是因為可視角太大上下整個圓可視角約 85° ($42.5^{\circ}\times 2$)，明顯超過人眼能同時見到的可視角，所以我們只能看到一整個圓彩虹的一部分，而彩虹的圓心就出現在反日點；另外我們也發現玻璃珠的大小確實會影響彩虹的寬度、仰角、複虹、白色弧形區域以及霧虹的產生與變化。

壹、研究動機

我們無意間在網路上看到了一則新聞——澳洲攝影師柯林·萊昂哈特(Colin Leonhardt)在搭乘飛機進行高空拍攝工作時拍到了罕見且完美的全圓彩虹，我們心裡就想：「為什麼彩虹會是一個圓形呢？要在什麼位置才能看到全圓彩虹呢？有可能製造出穩定且完整的全圓彩虹嗎？」於是，我們試著以噴水製造彩虹，並用相機拍攝，拼湊成一個完整的「全圓彩虹」；再使用細小玻璃珠做出近距離就能看到的完美人工彩虹。(教材相關性：南一版四年級光的單元)

貳、研究目的

一、探討太陽光底下以噴水的方式所製造出的彩虹成像

- (一) 看的方向對彩虹成像的影響
- (二) 看的仰角對彩虹成像的影響
- (三) 不同時間對彩虹成像的影響

二、以細小玻璃珠製造穩定的彩虹

- (一) 看的距離不同對彩虹成像的影響
- (二) 不同大小的玻璃珠對彩虹成像的影響

三、不同顆粒大小及色光對彩虹可視角、寬度及複虹的影響

- (一) 玻璃珠顆粒大小對彩虹可視角及寬度的影響
- (二) 不同色光對可視角及寬度的影響
- (三) 玻璃珠顆粒大小對複虹可視角及寬度的影響

參、研究設備及器材

01. 皮尺	02. 噴霧器	03. 指北針
04. 單眼相機	05. 腳架	06. 細木條(24cm)
07. 黑色瓦楞版	08. 鋁尺	09. 粗木條(170cm)
10. 膠帶	11. 粉筆	12. 方位表
13. 燒杯	14. 細小玻璃珠	15. 全開黑色丹迪紙
16. 雙面膠	17. 特製萬能噴膠	18. 木板
19. 迴紋針	20. 大型黑色塑膠袋	21. 偏光片
22. 大型三角板	23. 夾子	24. Tracker 軟體

肆、研究過程及討論

一、探討太陽光底下以噴水的方式所製造出的彩虹成像

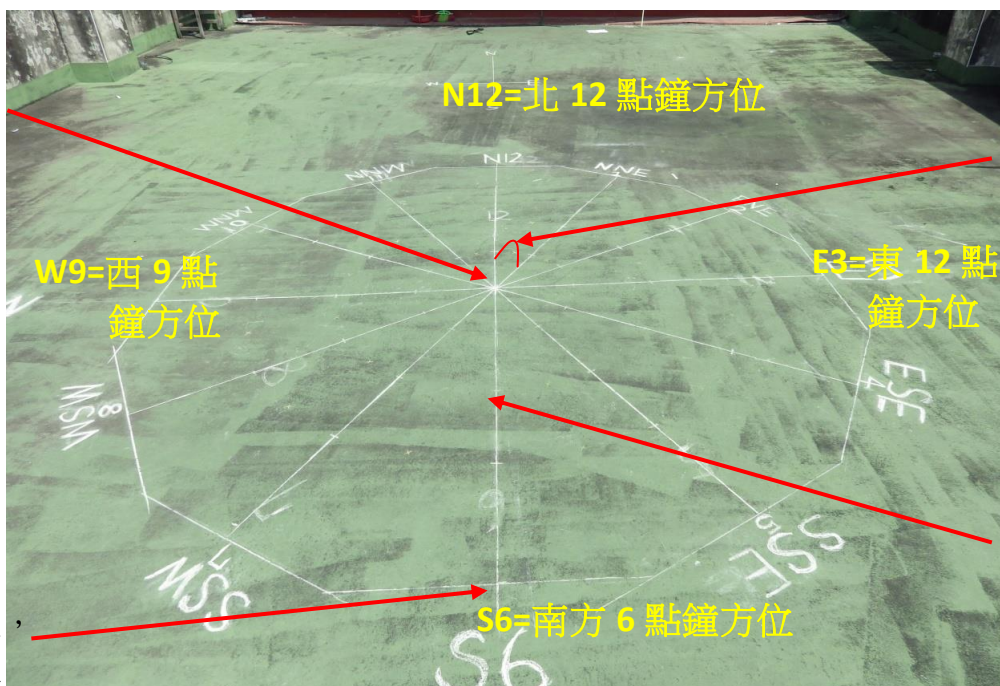
(一) 前置作業：

1. 場地準備

- (1) 以指北針在實驗場地測量方位，精準標示東西南北方。
- (2) 將東西方、南北方連線，可得到兩條垂直、交叉的十字。
- (3) 從北方開始，每 30 度對準十字中心，畫一條長 170 公分的直線。
- (4) 完成上述步驟，即可得到 12 個方向，標示英文、數字，例如：「N12」，N 表示北方，12 表示 12 點鐘方向。

噴水的位置

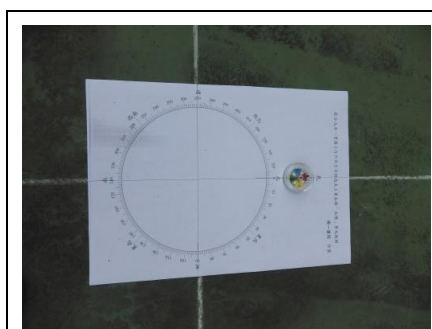
相機擺放位置，
不同看的方位



圖一-1：噴水實驗場地佈置圖。

2. 測量太陽仰角、方位的過程

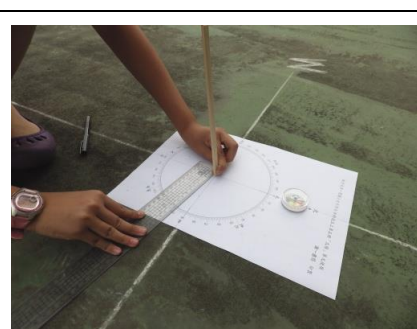
- (1) 將方位表(360 度)平放實驗場地，並且對齊東西南北。
- (2) 將長 24 公分的木條直立於方位表上的中心點。
- (3) 用尺量出木條影子的長度和方位。
- (4) 木條影子的方位加 180 度即是太陽的方位。
- (5) 將木條的物長、影長輸入電腦計算太陽仰角。



圖一-2：方位表對齊東西南北



圖一-3：竹籤直立方位盤中點



圖一-4：量影長與影子方位

(二) 實驗步驟：

1. 改變以下變因，分別進行不同的實驗

【實驗一-1】看的方向：1~12 點鐘方向。

【實驗一-2】看的仰角：仰角-60 度~+60 度，每 10 度為一個間隔。

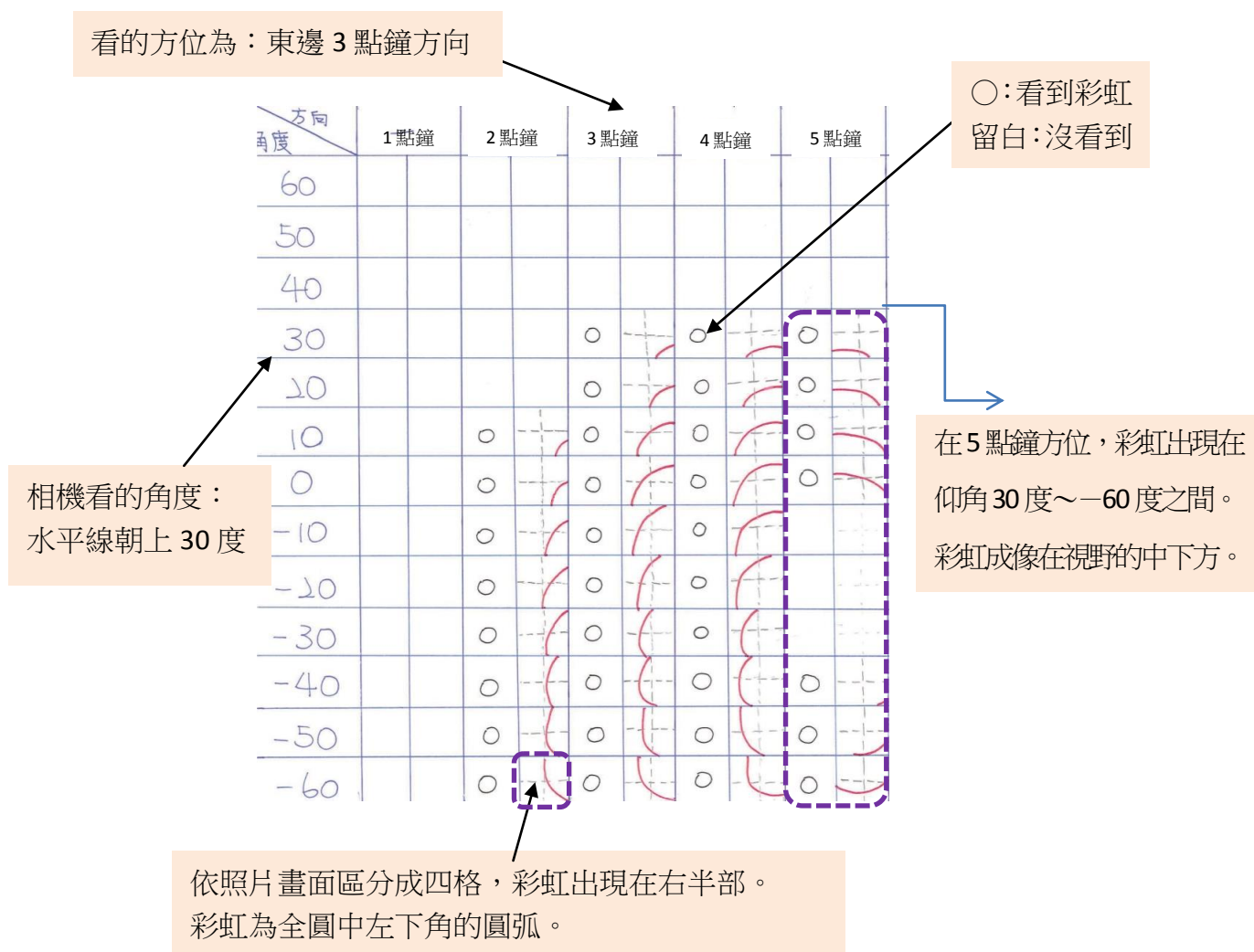
【實驗一-3】不同時間：早上 9 點、早上 11 點、中午 12 點、下午 1 點、下午 3 點。

2. 噴水位置維持在中心點持續噴水製造小水滴。

3. 用相機拍下實驗結果。

4. 在表格中紀錄彩虹成像，紀錄方法如表一-1 所示：

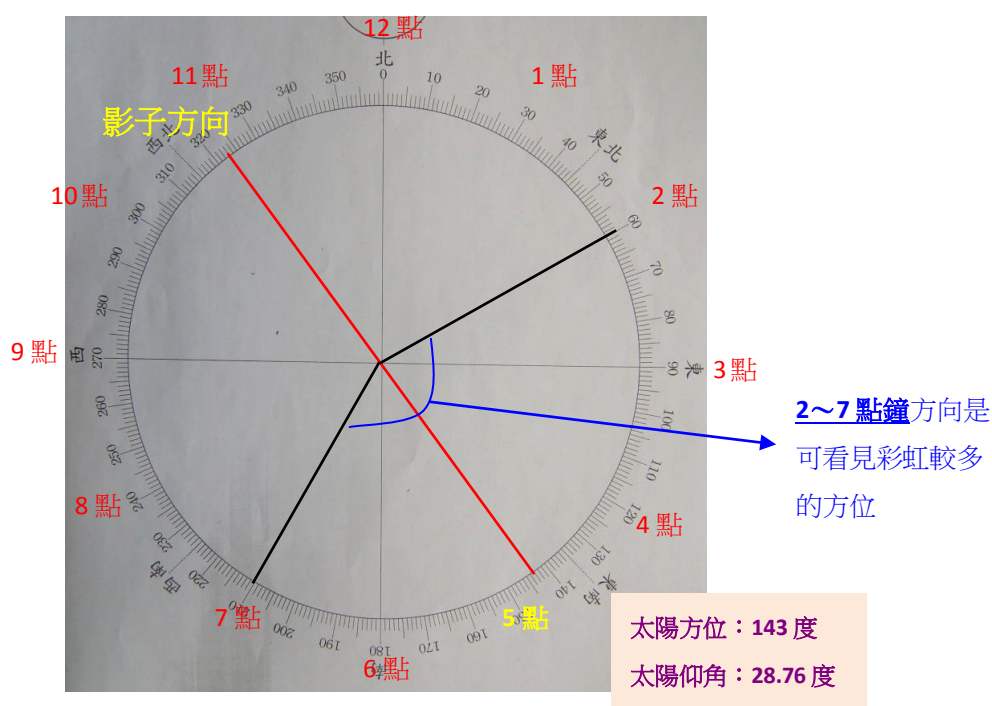
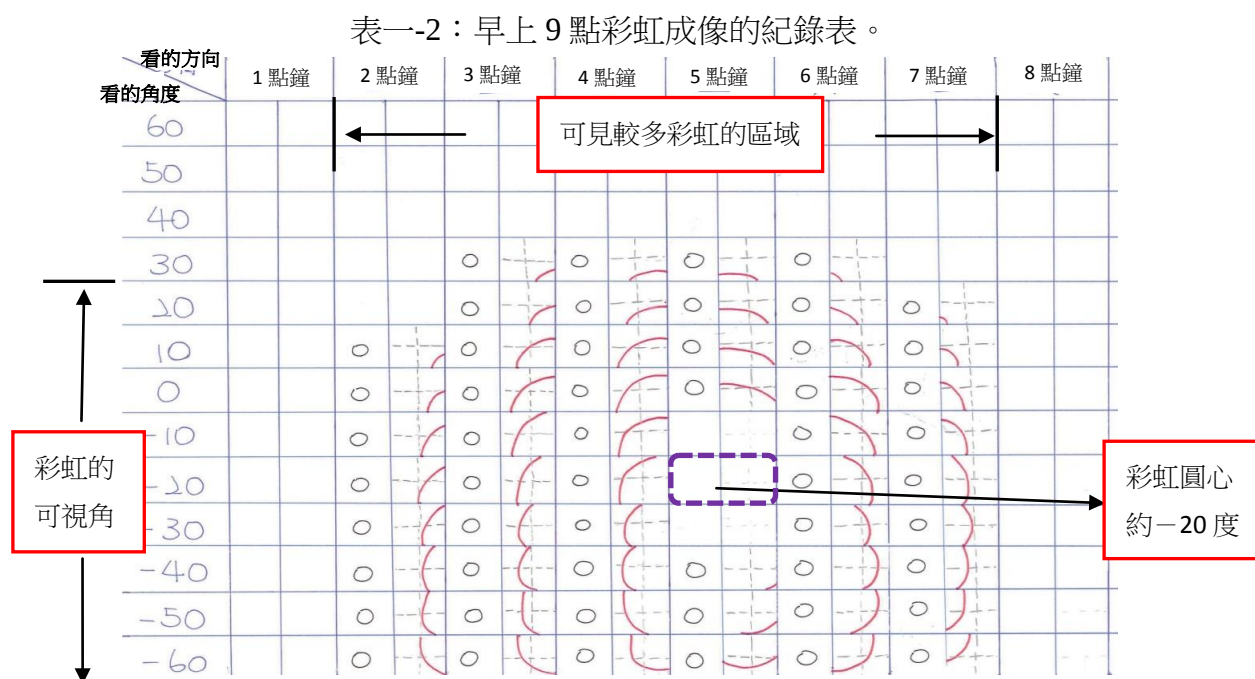
表一-1：紀錄彩虹成像的表示法。



(三) 結果：

1. 時間：早上 9 點 日期：12 月 22 日

- (1) 此時太陽在接近 5 點鐘方位，測量出方位角 143 度、仰角 28.76 度(圖一-5)，由表一-2 中得知，不同仰角出現較多彩虹的方位在 2~7 點鐘方向之間。
- (2) 由表一-2 得知，從 5 點鐘方位看過去，視野中出現於相同位置的彩虹，位於在仰角為 20~ -60 度，所以可視角約 80 度(20+60)。
- (3) 早上 9 點，太陽仰角為 28.76 度，由表一-2 可以推估彩虹圓心在約 -20 度的區域。

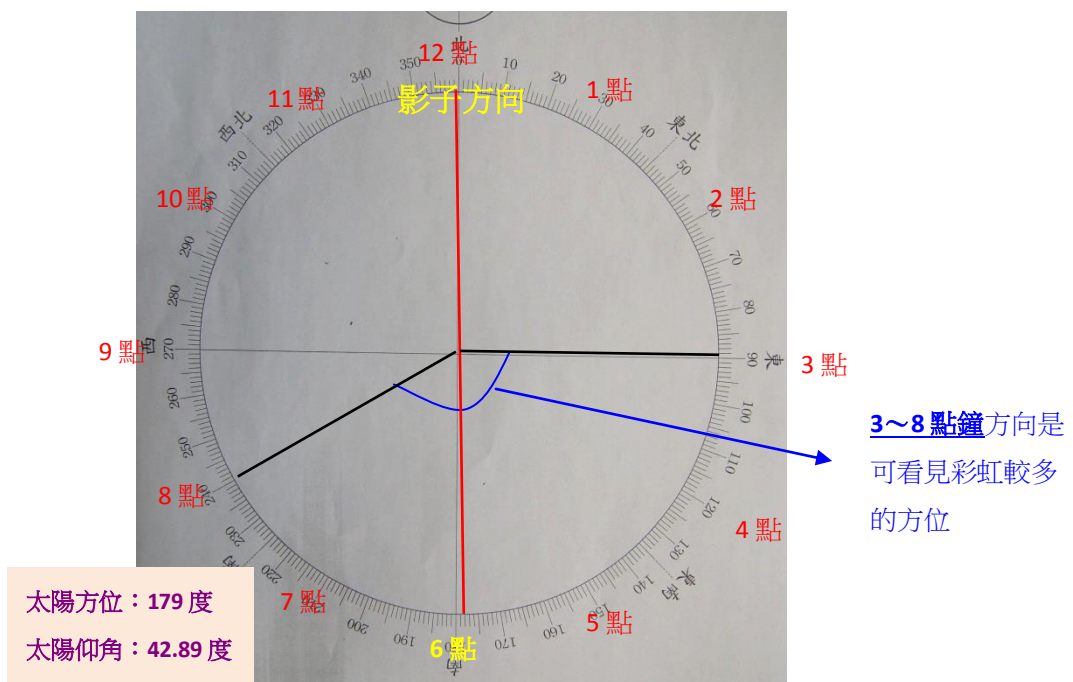
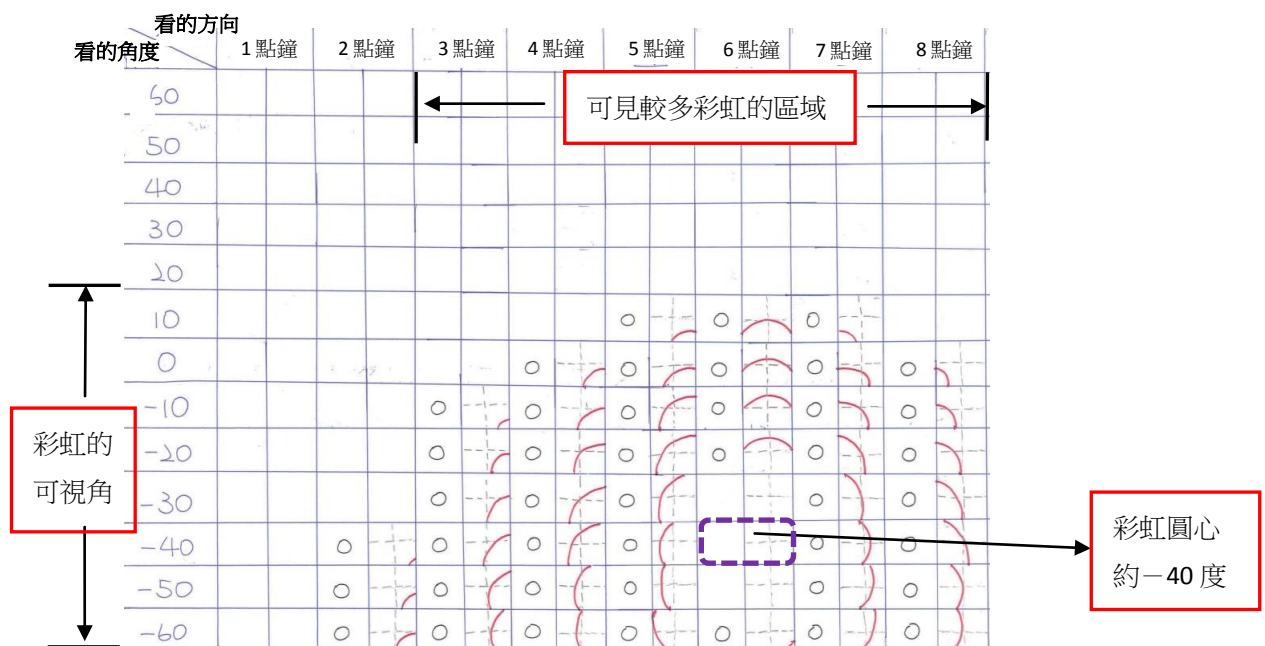


圖一-5：早上 9 點彩虹成像的方位圖。

2. 時間：早上 11 點 日期：12 月 22 日

- (1) 此時太陽在接近 6 點鐘方位，測量出方位角 179 度、仰角 42.89 度(圖一-6)，由表一-3 中得知，不同仰角出現較多彩虹的方位在 3~8 點鐘方向之間。
- (2) 由表一-3 得知，從 6 點鐘方位看過去，視野中出現於相同位置的彩虹，位於在仰角為 10~-60 度，所以可視角約 70 度(10+60)。
- (3) 早上 11 點，太陽仰角為 42.89 度，由表一-3 可以推估彩虹圓心在約 -40 度的區域。

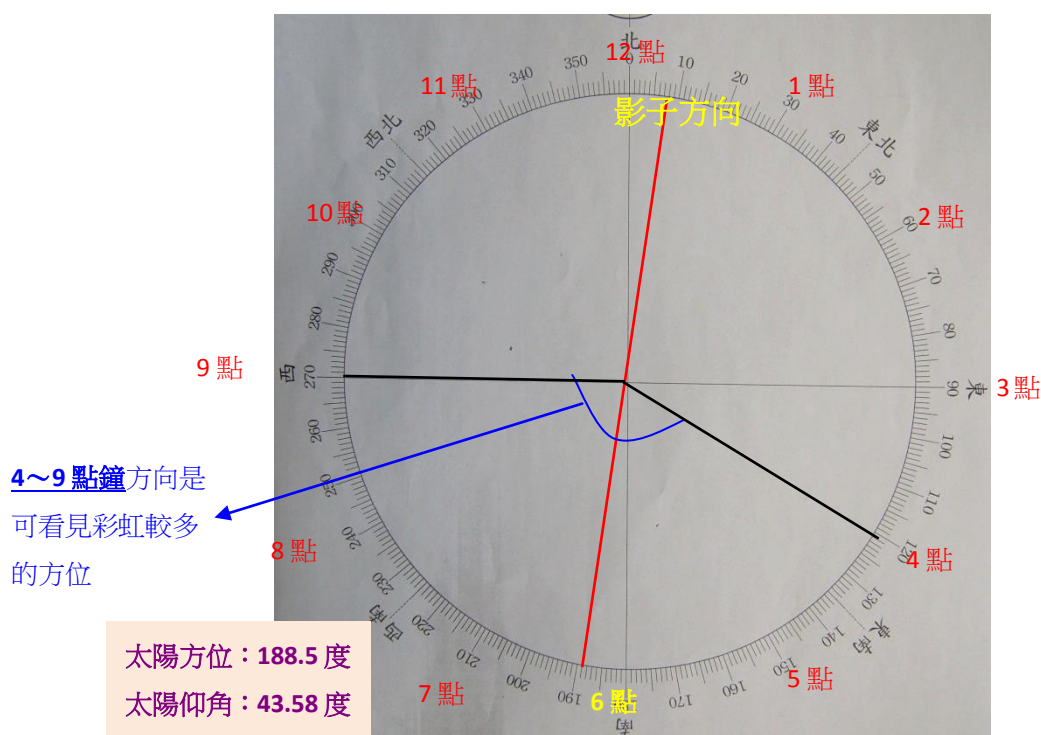
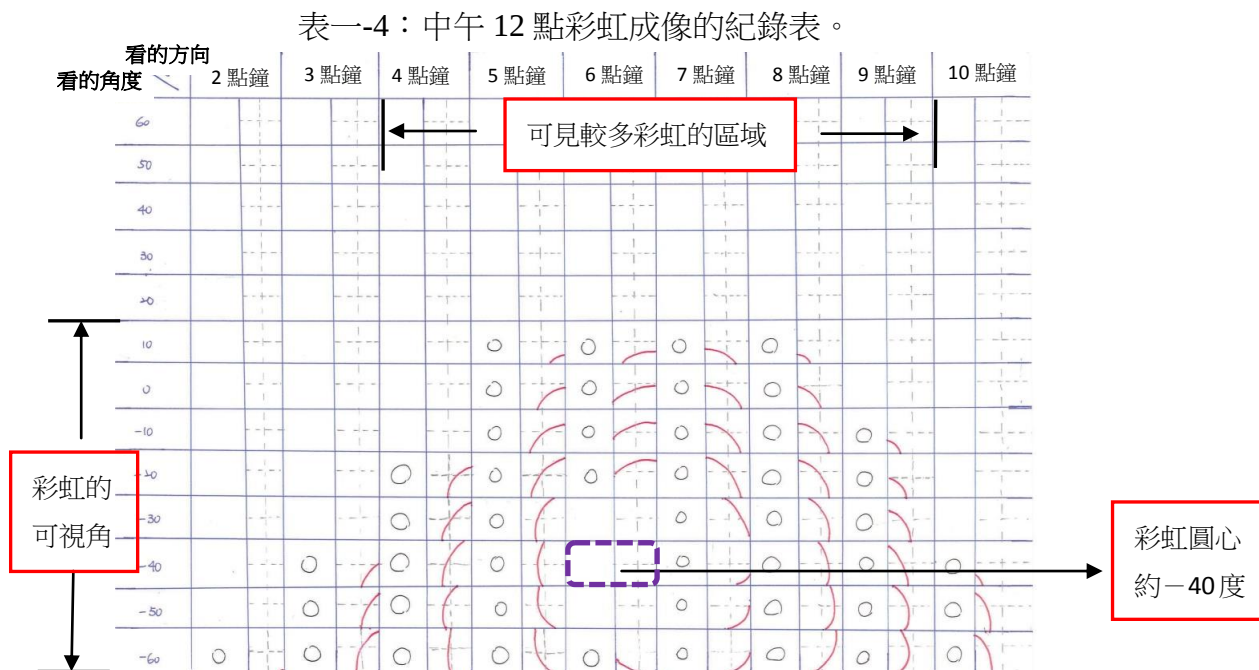
表一-3：早上 11 點彩虹成像的紀錄表。



圖一-6：早上 11 點彩虹成像的方位圖。

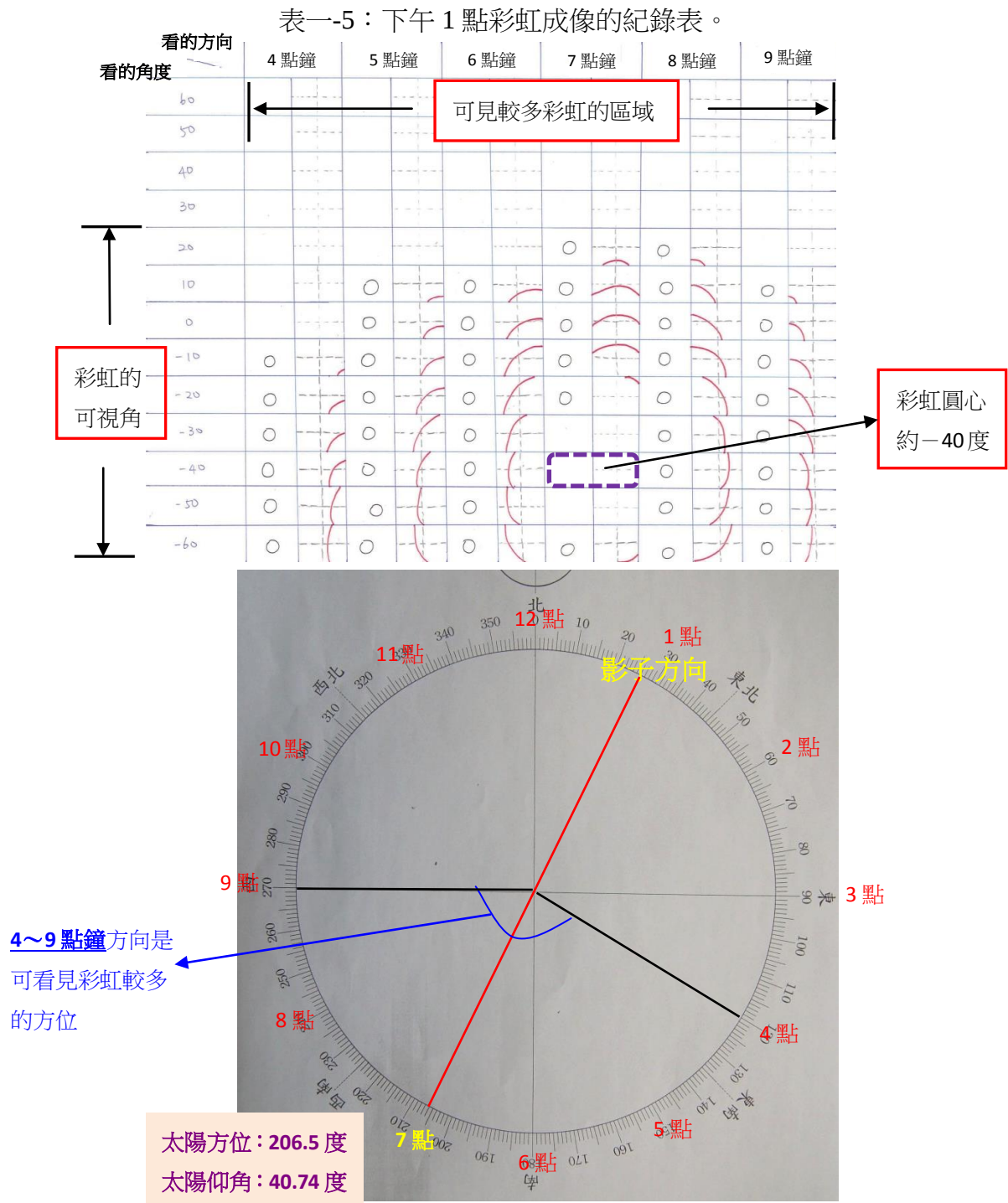
3. 時間：中午 12 點 日期：12 月 22 日

- (1) 此時太陽在接近 6 點鐘方位，測量出方位角 188.5 度、仰角 43.58 度(圖一-7)，由表一-4 中得知，不同仰角出現較多彩虹的方位在 4~9 點鐘方向之間。
- (2) 由表一-4 得知，從 6 點鐘方位看過去，視野中出現於相同位置的彩虹，位於在仰角為 10~-60 度，所以可視角約 70 度(10+60)。
- (3) 中午 12 點，太陽仰角為 43.58 度，由表一-4 可以推估彩虹圓心在約 -40 度的區域。



4. 時間：下午 1 點 日期：12 月 22 日

- (1) 此時太陽在接近 7 點鐘方位，測量出方位角 206.5 度、仰角 40.74 度(圖一-8)，由表一-5 中得知，不同仰角出現較多彩虹的方位在 4~9 點鐘方向之間。
- (2) 由表一-5 得知，從 7 點鐘方位看過去，視野中出現於相同位置的彩虹，位於在仰角為 20~ -60 度，所以可視角約 80 度(20+60)。
- (3) 下午 1 點，太陽仰角為 40.74 度，由表一-5 可以推估彩虹圓心在約 -40 度的區域。

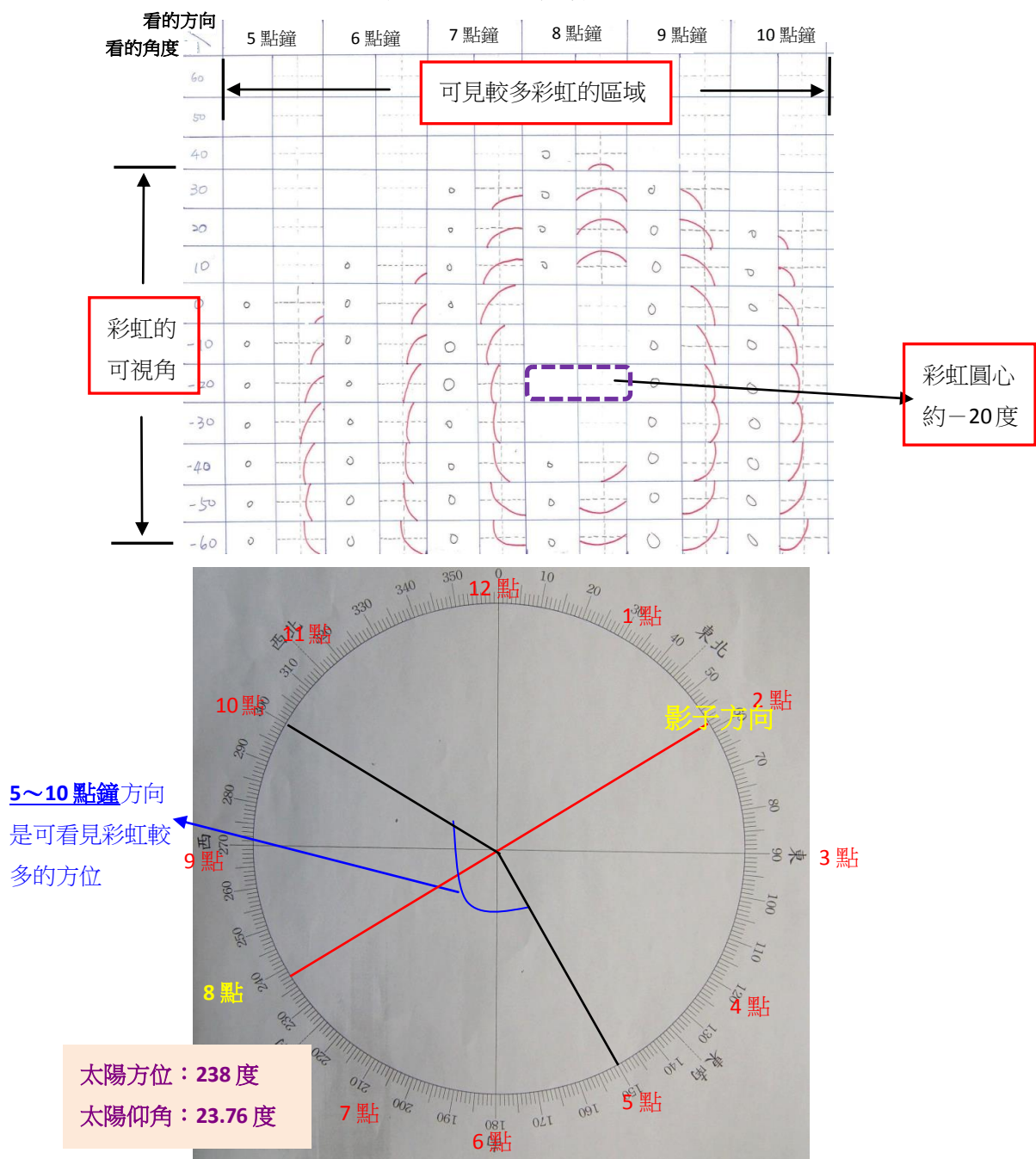


圖一-8：下午 1 點彩虹成像的方位圖。

5. 時間：下午 3 點 日期：12 月 22 日

- (1) 此時太陽在接近 8 點鐘方位，測量出方位角 238 度、仰角 23.76 度(圖一-9)，由表一-6 中得知，不同仰角出現較多彩虹的方位在 5~10 點鐘方向之間。
- (2) 由表一-6 得知，從 8 點鐘方位看過去，視野中出現於相同位置的彩虹，位於在仰角為 30~-60 度，所以可視角約 90 度(30+60)。
- (3) 下午 3 點，太陽仰角為 23.76 度，由表一-6 可以推估彩虹圓心在約 -20 度的區域。

表一-6：下午 3 點彩虹成像的紀錄表。



圖一-9：下午 3 點彩虹成像的方位圖。

(四) 討論：

1. 【實驗一-1】看的方向對彩虹成像的影響

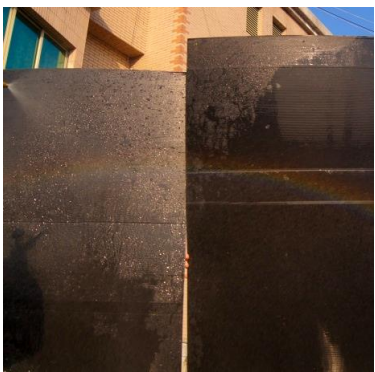
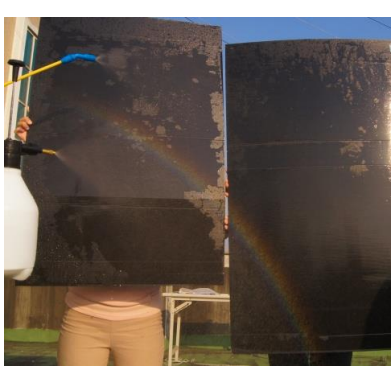
由表一-7 及表一-8 中 2 個紀錄結果可以得知，觀察的仰角不變，改變看的方向，彩虹成像的部位是與移動方向相反的。例如：太陽在 8 點鐘方向，背對太陽時，

當觀察者往右移(7 點鐘方向)，可以看見的是彩虹的左上角。

當觀察者往左移(9 點鐘方向)，可以看見的是彩虹的右上角。

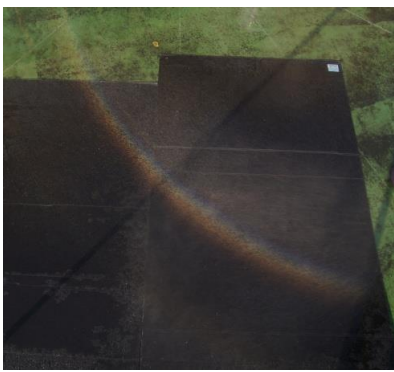
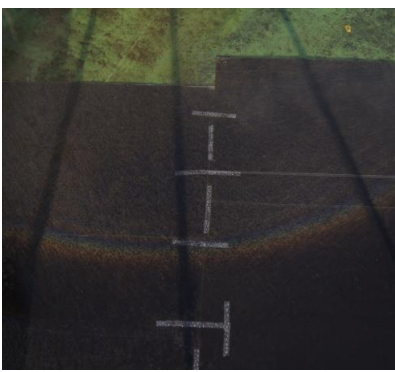
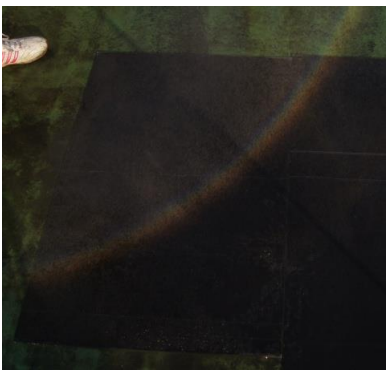
(1) 下午 3 點 太陽方位在 8 點鐘方向 仰角+10 度

表一-7：仰角+10 度時 改變看的方向產生的彩虹成像。

圖 片			
看的方向	7 點鐘方向	8 點鐘方向	9 點鐘方向
彩虹部位	左上角	上緣	右上角

(2) 下午 3 點 太陽方位 8 點鐘方向 仰角水平線下 -60 度

表一-8：仰角-60 度時 改變看的方向產生的彩虹成像。

圖 片			
看的方向	3 點鐘方向	5 點鐘方向	6 點鐘方向
彩虹部位	左下角	下緣	右下角

2. 【實驗一-2】看的仰角對彩虹成像的影響

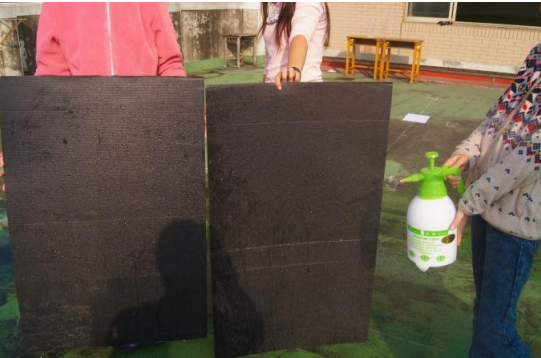
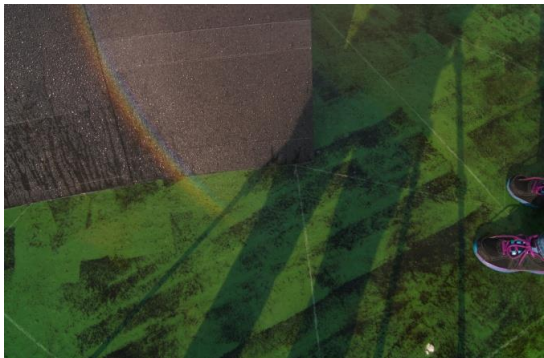
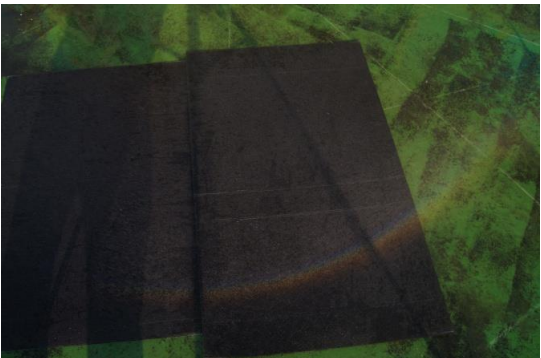
從表一-9 中看的方向 4、5 點鐘的 2 個結果都可以得知，若觀察者的方位不變，改變觀察彩虹的仰角，所看見的彩虹部位是與移動方向相同的。

例如：當觀察位置背對太陽時，

觀察者仰角往上移時(仰角+10 度)，可以看見的是彩虹的左上角。

觀察者仰角往下移時(仰角-60 度)，可以看見的是彩虹的左下角。

表一-9：改變看的仰角產生的彩虹成像。

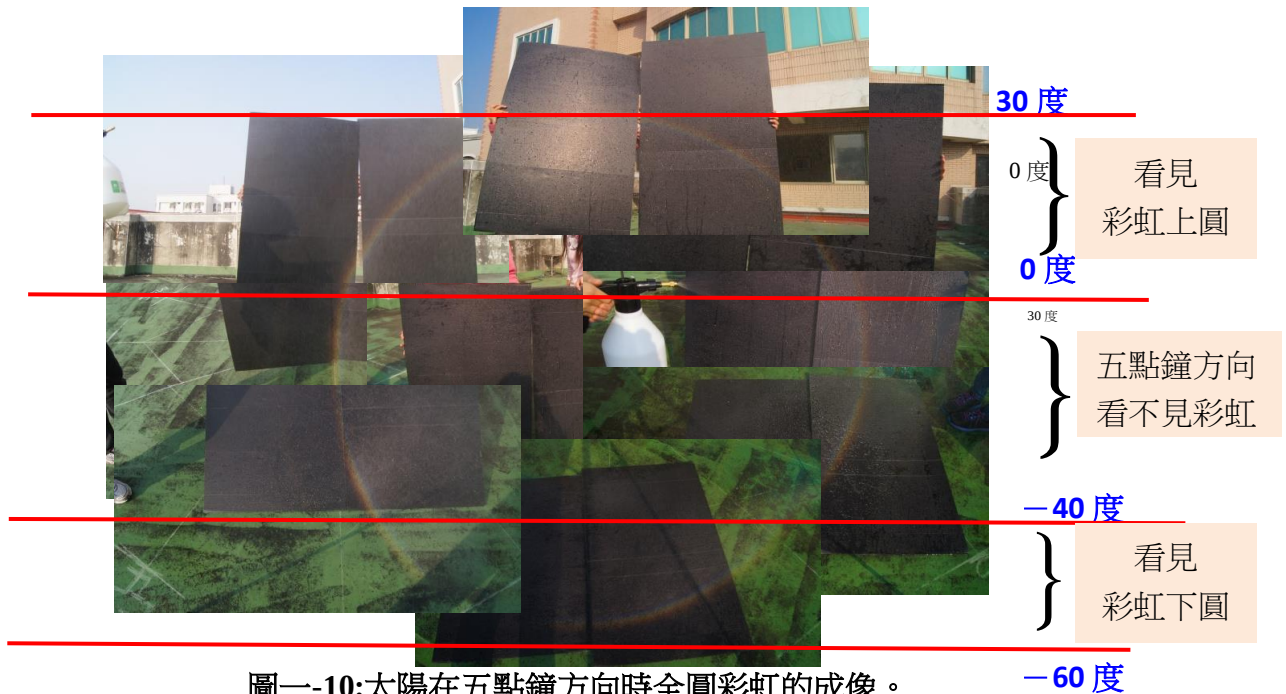
	早上 9 點 看的方向 4 點鐘	早上 9 點 看的方向 5 點鐘
+10 度		
-30 度		
-60 度		

3. 【實驗一-3】不同時間對彩虹成像的影響

(1) 早上 9 點：太陽的方位在 5 點鐘方向，仰角是 28.76 度時。

A. 可看見彩虹上圓的仰角是 0~30 度；可看見彩虹下圓的仰角是 -40~-60 度。

B. 太陽在 5 點鐘方向時，我們在 5 點鐘方向的 -10~-30 度看不見彩虹。

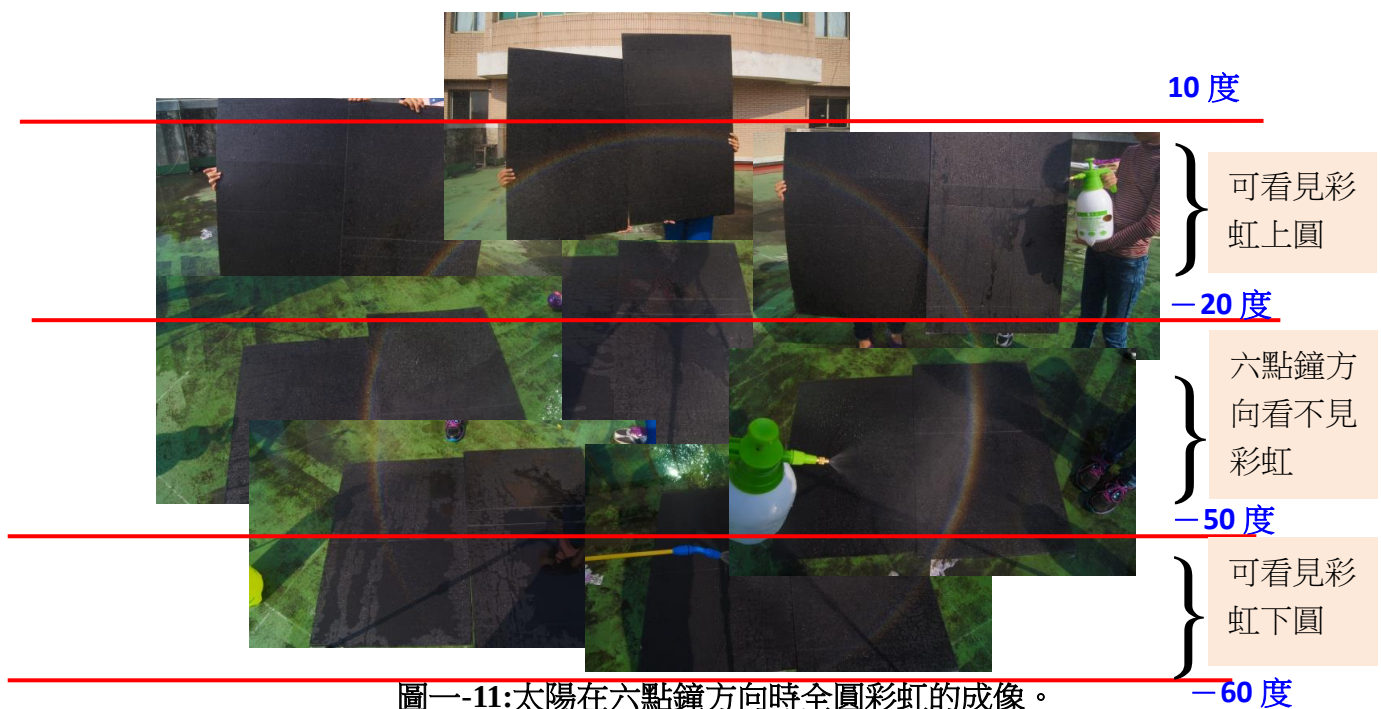


圖一-10:太陽在五點鐘方向時全圓彩虹的成像。

(2) 中午 12 點：太陽的方位在 6 點鐘方向，仰角是 43.58 度時。

A. 可看見彩虹上緣的仰角是 10~-20 度；可看見彩虹下緣的仰角是 -50~-60 度。

B. 太陽在 6 點鐘方向時，我們在 6 點鐘方向的 -30~-50 度看不見彩虹。

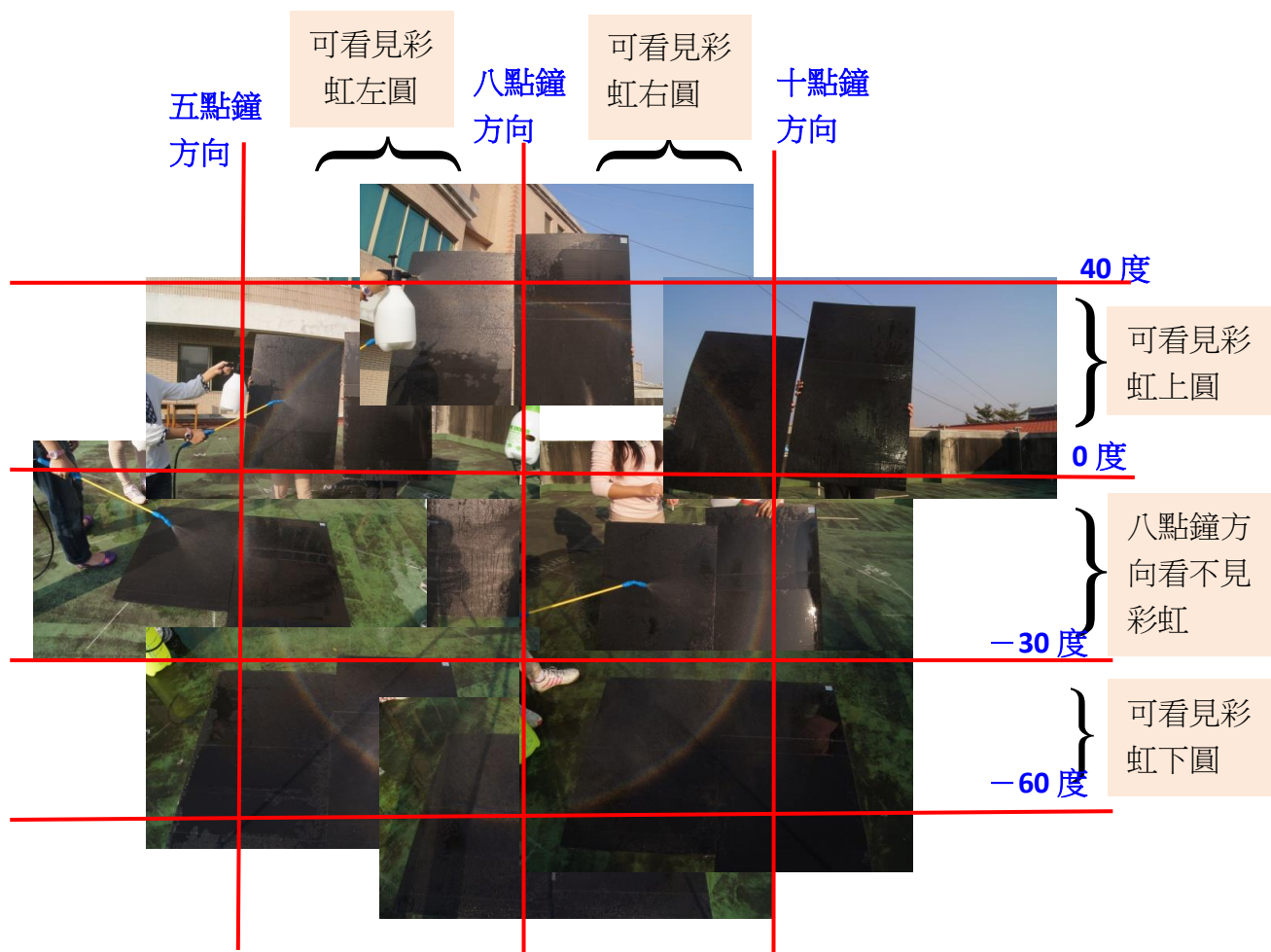


圖一-11:太陽在六點鐘方向時全圓彩虹的成像。

(3) 下午 3 點：太陽的方位在 8 點鐘方向，仰角是 23.76 度時。

A. 可看見彩虹上緣的仰角是 0~40 度；可看見彩虹下緣的仰角是 -30~-60 度。

B. 太陽在 8 點鐘方向時，我們在 8 點鐘方向的 0~-30 度無法看見彩虹。



圖一-12 太陽在八點鐘方向時全圓彩虹的成像。

(4) 不同的時間點，彩虹產生條件整理表，表一-10：

表一-10: 彩虹產生條件整理表。

項目 實驗時間	太陽方位	不同仰角可見 較多彩虹方向	中間無法看 見彩虹區域	太陽仰角	可見彩虹仰角
早上 09 點	5 點鐘	2~7 點鐘	5 點鐘 -10~-30 度	28.76 度	20° ~ -60°
早上 11 點	6 點鐘	3~8 點鐘	6 點鐘 -30~-50 度	42.89 度	10° ~ -60°
中午 12 點	6 點鐘	4~9 點鐘	6 點鐘 -30~-50 度	43.58 度	10° ~ -60°
下午 01 點	7 點鐘	4~9 點鐘	7 點鐘 -30~-50 度	40.74 度	20° ~ -60°
下午 03 點	8 點鐘	5~10 點鐘	8 點鐘 -30~-50 度	23.76 度	30° ~ -60°

4. 綜合以上三個實驗之討論：

- (1) 表一-11 是各時間點在不同仰角時，可見較多彩虹的方向，可以得知，就方位而言，最適合看彩虹的是背對陽光。

表一-11：各時間點可看見較多彩虹的方位。

時間	早上 9 點	早上 11 點	中午 12 點	下午 1 點	下午 3 點
太陽方位	5 點鐘方向	6 點鐘方向	6 點鐘方向	7 點鐘方向	8 點鐘方向
可見彩虹方位	2~7 點鐘	3~8 點鐘	4~9 點鐘	4~9 點鐘	5~10 點鐘
圖示					

- (2) 實驗中，我們發現五個時間都出現相同狀況，如果看的方向是完全背對太陽的話，中間有一段是無法看見彩虹的，看不見的仰角如下所示：

- A. 早上 9 點(太陽在 5 點鐘方向，仰角為 28.76 度)：5 點鐘方向的 $-10^{\circ} \sim -30^{\circ}$ 度。
- B. 早上 11 點(太陽在 6 點鐘方向，仰角為 44 度)：6 點鐘方向的 $-30^{\circ} \sim -50^{\circ}$ 度。
- C. 中午 12 點(太陽在 6 點鐘方向，仰角為 43.58 度)：6 點鐘方向的 $-30^{\circ} \sim -50^{\circ}$ 度。
- D. 下午 1 點(太陽在 7 點鐘方向，仰角為 40.74 度)：7 點鐘方向的 $-30^{\circ} \sim -50^{\circ}$ 度。
- E. 下午 3 點(太陽在 8 點鐘方向，仰角為 23.76 度)：8 點鐘方向的 $-0^{\circ} \sim -30^{\circ}$ 度。

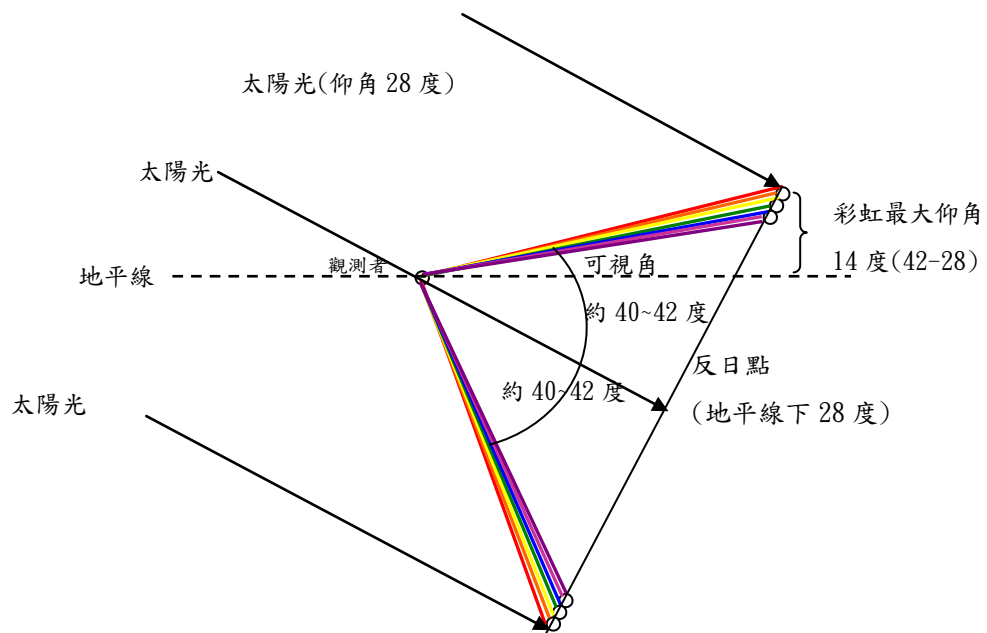
所以就仰角而言，最適合看彩虹的並不是完全背對陽光，因為中間有一段是無法看見彩虹的，此範圍就是彩虹的圓心。

- (3) 綜合前面二點，我們認為觀察彩虹的最佳方位並非教科書寫的完全背對太陽，因為此時正好面向彩虹的圓心，無法看見彩虹；應該是要與太陽方位呈 45° 度角看見彩虹的仰角才是最多的。

- (4) 早上 9 點太陽仰角在 28.76 度時，我們看不見彩虹的區域(彩虹圓心)剛好就是在 -20° 度的區域其他時間也出現相同情況，所以反日點就是彩虹的圓心。

(5) 早上 9 點，太陽仰角是 28.76 度，彩虹的圓心在 -28.76 度，可見彩虹此時最大的仰角是 14 度；中午 12 點，太陽仰角是 43.58 度，彩虹的圓心在 -43.58 度，可見彩虹最大的仰角是 -1.58 度。

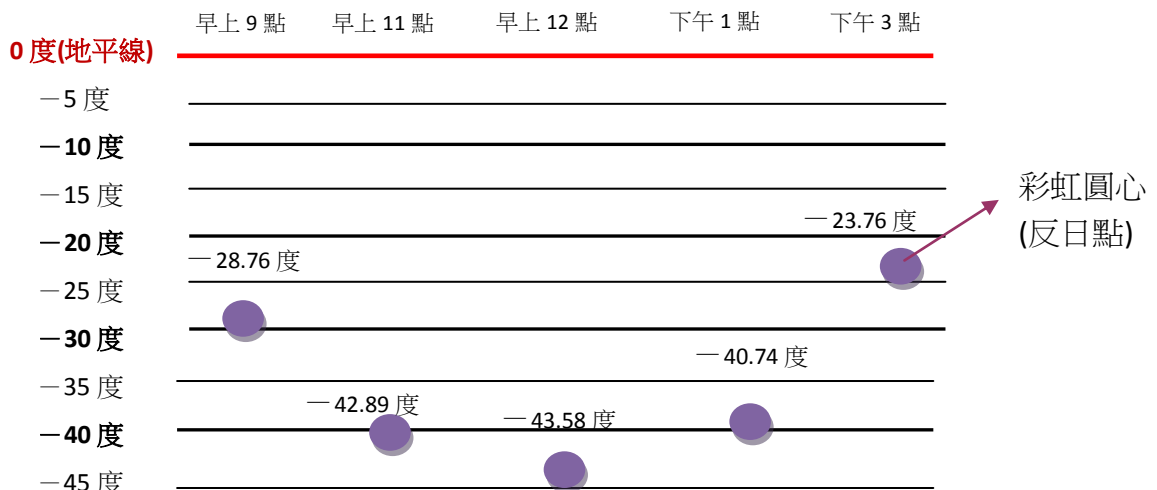
- A. 我們發現當太陽仰角低，彩虹的位置就高，如：早上及下午，這時比較容易在大自然中觀察到彩虹的，因為不容易被建築物遮住。
- B. 當太陽仰角高，彩虹的位置就低，如：中午，這時較不容易在大自然看到彩虹，但在這時要噴水做全圓彩虹卻比較容易，上、下午也可以做出全圓彩虹，只是難度較高。



圖一-13：彩虹仰角、圓心、反日點說明圖(舉早上 9 點為例)。

(6) 從圖一-14 我們發現太陽及彩虹在空中的位置(仰角)是完全相反的。

從早上→中午→下午，太陽的仰角是從「低→高→低」：彩虹仰角則是從「高→低→高」。



圖一-14：一天中彩虹圓心仰角的高低變化圖。

(7) 看的方向及看的仰角都會影響我們看見彩虹的部份，也就是說在不同位置或不同仰角做觀察我們都只能看見全圓彩虹的一小部份。

(8) 從以上實驗我們可以明顯得知彩虹確實是圓形的，只是因為用小水滴製造出的全圓彩虹太大了，可視角約 84 度，人眼無法同時看見一整個圓。所以我們接著試用折射率不同的物質，想辦法做出一個人眼能同時看見且穩定的全圓彩虹。

二、以細小玻璃珠製造穩定的彩虹

(一) 前置作業

1. 製造玻璃珠紙

- (1) 將全開的黑色丹迪紙折出盒子的形狀，並均勻噴灑噴膠。
- (2) 玻璃珠倒薄薄的一層在丹迪紙上。
- (3) 將黑色丹迪紙輕輕搖晃，使玻璃珠平均黏在紙上，並靜至 10 分鐘。
- (4) 最後把多餘、不會黏上的玻璃珠到回燒杯。
- (5) 重複以上實驗步驟，分別做出以下不同規格的細小玻璃珠。

BL : 0.595~0.42mm

AF : 0.149~0.074mm

C : 0.42~0.25mm

AG : 0.105~0.053mm

AB : 0.297~0.21mm

AH : 0.088mm~0.044mm

AC : 0.25~0.149mm

AI : 0.053~0.044mm

AD : 0.21~0.105mm

AQ : 0.044mm~less

註：以下實驗，我們每種大小的玻璃珠只顯示其範圍的最大值，如：BL：0.595~0.42mm，以 0.595mm 表示。

		
圖二-1:將玻璃珠均勻倒在紙上	圖二-2:使玻璃珠均勻黏於紙上	圖二-3:將多餘的玻璃珠倒回

(二) 看的距離不同對彩虹成像的影響

1. 實驗步驟:

- (1) 玻璃珠紙(選用大小 0.297mm 的玻璃珠)放置於太陽光底下。
- (2) 將玻璃珠紙上貼上固定 9.85cm 當作長度的參考物體。
- (3) 調整紙面與太陽光垂直；調整相機鏡頭與太陽光水平。
- (4) 照片使用 tracker 分析彩虹的大小，方法如圖二-4:

步驟二：標示參考物體，並輸入長度。

步驟一：將十字中心瞄準彩虹圓心。

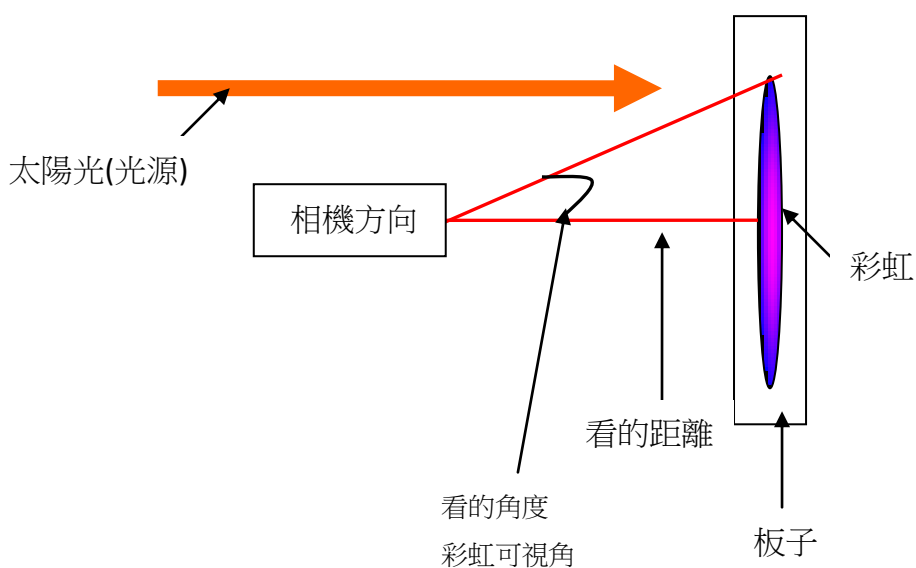


步驟四：將各質點的 X 軸位置複製於 Excel 上，找出右邊最大值與左邊最小值相減，即是彩虹直徑的大小。

圖二-4:使用 tracker 分析彩虹的大小。

步驟三：沿著彩虹的最外圈(紅色外圍)在左右兩邊各點上。

- (5) 利用測得的彩虹大小及看的距離算出看的角度(可視角)。
- (6) 測量方法如下圖所示：



圖二-5：利用彩虹大小及看的距離算出看的角度說明圖。

2. 實驗結果：

		
圖二-6：拍攝距離 20cm。	圖二-7：拍攝距離 40cm。	圖二-8：拍攝距離 60cm。
		
圖二-9：拍攝距離 80cm。	圖二-10：拍攝距離 100cm。	圖二-11：拍攝距離 120cm。

(1) 當看的距離為 120 公分時，彩虹的直徑為 102.18 公分，呈現最大值；

當看的距離為 20 公分時，彩虹的直徑為 16.78 公分，呈現最小值。

(2) 看的距離 20 公分到 120 公分時，彩虹的角度介於 22~23，差距不大。

表二-1：不同看的距離彩虹的直徑大小及看的角度。

看的距離	20cm	40cm	60cm	80cm	100cm	120cm
彩虹直徑(cm)	16.78	33.2	50.20	66.75	83.49	102.18
角度	22.76	22.54	22.70	22.64	22.66	23.06

3. 實驗討論：

(1) 我們發現看的距離會影響彩虹的大小，距離越近，彩虹的直徑越小；距離越遠，彩虹的直徑則越大。

(2) 實驗中發現，玻璃珠製造的彩虹比研究所使用的小水滴小很多，用一般相機就可以一次拍下整個全圓彩虹，不需以拼接的方式呈現，因為彩虹的可視角約 22~23 度而已。

(3) 也因為小水滴的二次折射後的角度較大(約 42.5 度)，所以產生的全圓彩虹也會比較大，從表二-2 得知當噴水的距離為 20cm 時，彩虹的直徑大小是 36.66cm 已經超過人臉的大

小，所以就算近距離噴水也不可能同時看到全圓彩虹，因為已經超過人眼的可視範圍了。

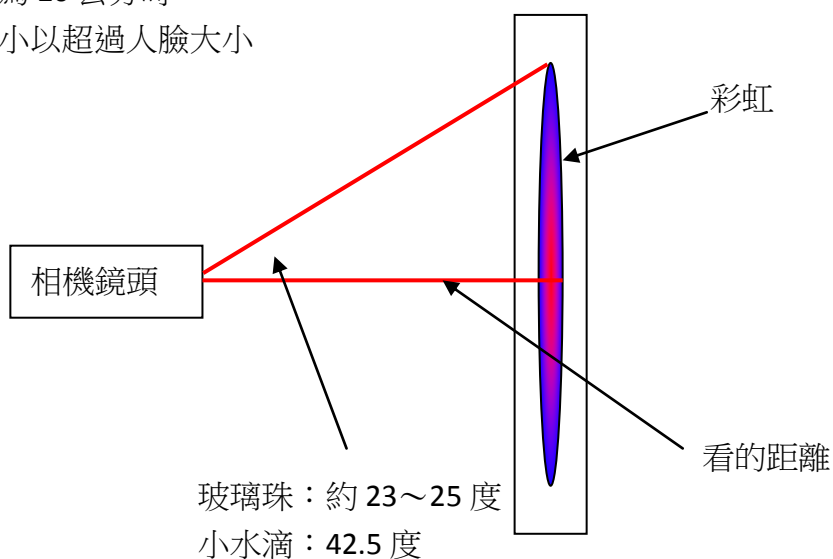
- (4) 綜合以上 3 點，我們認為，決定人眼是否能同時看見全圓彩虹的重點是彩虹的可視角，並不是看的距離。

表二-2：玻璃珠及小水滴看的距離不同所產生彩虹的直徑大小。

單位：cm

看的距離	20cm	40cm	60cm	80cm	100cm	120cm
玻璃珠彩虹的直徑	16.78	33.20	50.20	66.75	83.49	102.18
小水滴彩虹的直徑	36.66	73.32	105.98	146.64	183.3	219.96

噴水的位置為 20 公分時
全圓彩虹大小以超過人臉大小



圖二-12：

(三) 不同大小的玻璃珠對彩虹成像的影響

1. 實驗步驟：

- (1) 調整紙面與太陽光垂直；調整相機鏡頭與太陽光水平，並將拍攝距離固定為 57 公分。
- (2) 利用單眼相機將 10 種不同大小的玻璃珠實驗拍攝下。
- (3) 將拍攝好的照片作顏色分析，方法如下：

A. 用 12 色色環將每種顏色訂定彩度(Hue)標準於 Image J 軟體。

紅色: 0~10

橙色:20~30

黃色:30~40

綠色:110~120

藍色:140~150

紫色:190~200

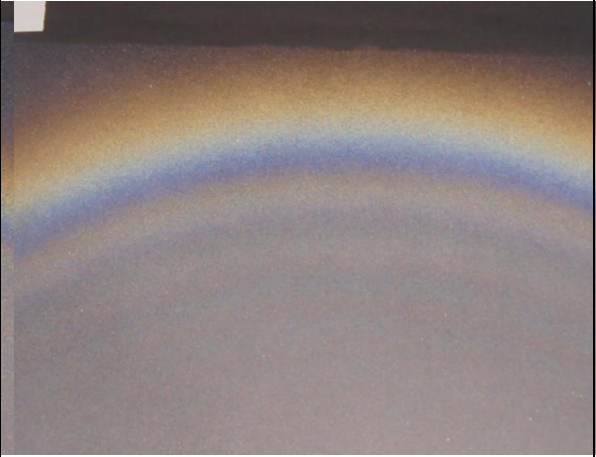
B. 一次匯入一張照片，且一次分析一種顏色，將照片的彩度調整至以上標準，照片就會只出現此範圍的彩度，其餘部分成為白色。

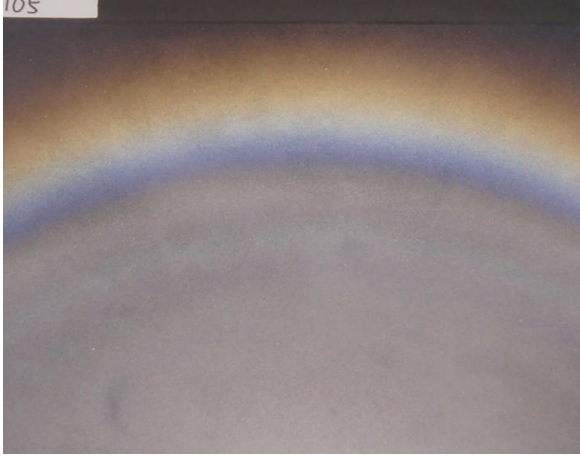
C. 完成上述步驟，假如有出現明顯的一條圓弧狀，表示彩虹有該顏色。

2.實驗結果:

顆粒大小	0.595mm						0.42mm					
照片												
看到顏色	紅	橙	黃	綠	藍	紫	紅	橙	黃	綠	藍	紫
	○	○	○	○	X	X	○	○	○	○	○	○

顆粒大小	0.297mm						0.25mm					
照片												
看到顏色	紅	橙	黃	綠	藍	紫	紅	橙	黃	綠	藍	紫
	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

顆粒大小	0.21mm						0.149mm					
照片												
看到顏色	紅	橙	黃	綠	藍	紫	紅	橙	黃	綠	藍	紫
	○	○	○	○	○	○	○	○	○	X	○	○

顆粒大小	0.105mm						0.088mm					
照片												
看到顏色	紅	橙	黃	綠	藍	紫	紅	橙	黃	綠	藍	紫
	○	○	○	X	○	X	○	○	○	X	○	X

顆粒大小	0.053mm						0.044mm					
照片												
看到顏色	紅	橙	黃	綠	藍	紫	紅	橙	黃	綠	藍	紫
	X	○	○	X	○	X	X	X	○	X	○	X

表三-1：玻璃珠大小對彩虹成像整理表。

項 目 顆粒大小 (mm)	複虹數量	出現顏色的數量	是否出現白色區域	是否為霧虹	說明
0.595	0	4	X	X	顏色明亮鮮豔，寬度最窄
0.420	0	6	X	X	六種顏色都齊全且平均
0.297	2	6	X	X	開始出現複虹 各顏色齊全明亮，最適合觀測彩虹
0.250	3	6	X	X	複虹與主虹有明顯分離
0.210	2	6	X	X	綠色開始變得不明顯
0.149	4	5	X	X	能看見複虹數最多 綠色消失
0.105	2	4	O	X	綠色消失後中間出現白色弧形區域
0.088	0	4	O	X	彩虹開始變清楚，無法明顯區別複虹
0.053	0	3	O	O	各顏色界線已無法明顯區別，開始變霧虹
0.044	0	2	O	O	霧虹，顏色以黃、藍色為主

3. 實驗討論：

(1) 玻璃珠顆粒大小對彩虹顏色的影響：

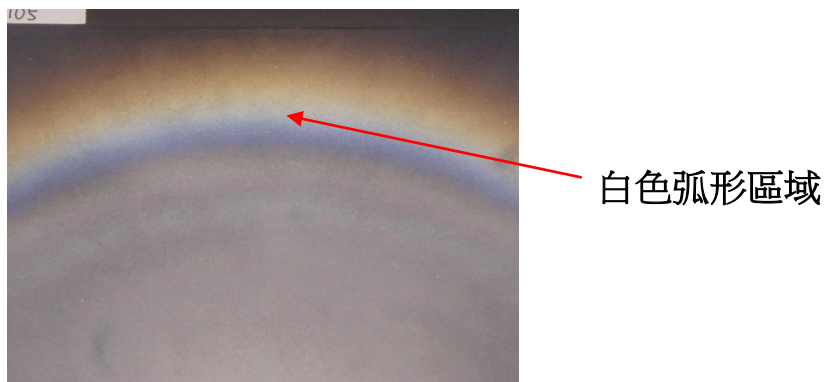
- A. 我們發現，黃色在 0.595mm~0.25mm 時並沒有特別的地方，但它到了 0.21mm 時範圍似乎有往綠色的部分逐漸擴大，在 0.053mm 時，他成為彩虹上半部最明顯的顏色。
- B. 我們也看到綠色在 0.21mm 時範圍有縮小，在 0.149mm 時，我們幾乎沒看到綠色，綠色與黃色的情況是完全相反的。
- C. 從研究一及研究二發現，以小水滴及玻璃珠產生彩虹的顏色、情形明顯不同，我們參考文獻(Marcel Minnaert, 1995)得知不同大小水滴產生彩虹的情況，比較我們實驗中不同大小玻璃珠的成像情形彙整的差異比較如下表。

表三-2：不同大小玻璃珠的成像情形彙整。

種類 直徑	小水滴	玻璃珠
0.5mm	紅色不明亮。比較少的複虹，但仍為粉紅色和綠色。	此時的彩虹比其他的來的細。 彩虹的顏色比較鮮豔，紅、橘、綠色都非常明顯，但是藍紫色已經消失了。
0.2~ 0.3mm	紅色沒有出現，但其他顏色變寬和更完整。複虹變淡並發黃。	這時候的彩虹是最漂亮的，所有的顏色都出現了，且明亮程度也夠，內圈似乎有看到複虹的現象，但是並不明顯。
0.08~ 0.1mm	彩虹變寬和變淡，只有紫色仍很鮮艷。第一道複虹泛白，並和主虹明顯分開。	這時候的彩虹是所有大小裡面複虹最明亮且明顯的，不只一圈。
0.06mm	彩虹中有一條明顯的白色。	顆粒越小，彩虹的寬度也跟著變寬，複虹已經快看不見了，彩虹又更不明顯了
小於 0.05mm	產生霧虹，要很仔細看才會看到，寬度很寬，但所有的顏色都非常不明顯。	開始產生霧虹，要很仔細看才有辦法看到，寬度是最寬的，同時也是最模糊的。

(2) 玻璃珠顆粒大小對彩虹寬度及白色弧形區域的影響：

- A. 從以上照片可明顯得知玻璃珠的顆粒越小彩虹的寬度就越寬且色彩越黯淡。
- B. 我們也發現，彩虹在綠色消失後的下一個大小—0.149mm 從最中間出現了一弧形條白色區域，取代了綠色原本的位置，且隨著玻璃珠的顆粒越來越小，白色區域越來越寬，如圖三-1 所示：



圖三-1：出現白色弧形區域。

- C. 我們認為會形成白色區域是因為當玻璃珠顆粒變小時，彩虹整個變寬了，使彩虹的各顏色寬到了極點，而從彩虹中間產生重疊的地方，各色的光又聚合起來回到了最原始的白光。所以接著我們設計下一個實驗來驗證白色區域的產生是因為各種顏色的光都變寬了，因而重疊產生白色弧形區域。

(3) 玻璃珠顆粒大小對霧虹的影響：

- A. 所謂的霧虹是指各顏色間已無明顯的界線，但彩虹的弧形仍然可判斷。
- B. 我們也發現，上述的白色區域擴大到一定程度時，彩虹就成了霧虹(實驗中的 0.053mm 及 0.044mm)，霧虹幾乎整條是白色，有時在霧虹上方會看見一點黃色，在下方看到一點藍色。霧虹如圖三-2 所示：



圖三-2：利用玻璃珠製造出霧虹(0.053mm)。

霧虹

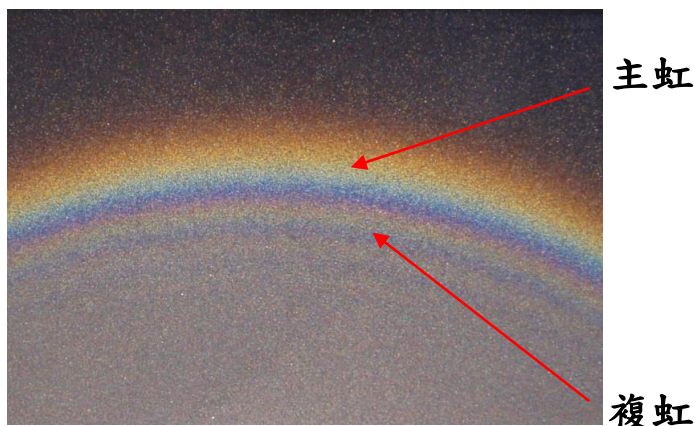


圖三-3：大自然界中的霧虹。

(4) 玻璃珠顆粒大小對複虹的影響：

A. 我們發現彩虹在玻璃珠顆粒 0.297mm 時，在主虹的內圈出現了 2 道複虹，並逐漸變多，在 0.149mm 時到達了最高峰 4 道，但在 0.088mm 時完全沒看到複虹了。

複虹如圖三-3 所示：



圖三-3：實驗中的複虹 (0.25mm)。



圖三-4：大自然中的複虹。

B. 會形成複虹是因為是平行入射光在射入小水滴(玻璃珠)時，它們的入射角是不同的，但卻有相同的觀測角。所以這兩條光線會形成光程差，就會造成干涉現象，干涉現象就是複虹的成因。

C. 在複虹有出現的顆粒中，我們隱約發現，當玻璃珠的顆粒越小，每道複虹之間的距離似乎有越遠的情形，且複虹越來越寬，所以接著我們設計下一個實驗，觀察各大小的玻璃珠複虹之間的關係。

三、顆粒大小及不同色光對彩虹可視角、寬度及複虹的影響

(一) 實驗步驟：

1. 改變以下變因，分別進行不同的實驗

【實驗三-1】玻璃珠顆粒大小對彩虹可視角及寬度的影響

【實驗三-2】不同色光對彩虹可視角及寬度的影響

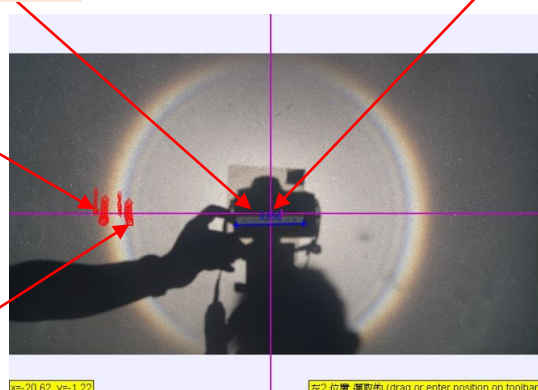
【實驗三-3】玻璃珠顆粒大小對複虹可視角及寬度的影響

2. 使用 tracker 測彩虹可視角及寬度，方法如下圖所示：

步驟二：標示參考物體，
並輸入長度。

步驟一：將十字中心瞄準彩虹圓心。

步驟三：沿著彩虹左邊的最外圈(紅色外圍)點上 10 點質點，命名為「左」。



步驟四：沿著彩虹右邊的最內圈(紫色內圍)點上 10 點質點，命名為「右」。

圖三-5：利用 tracker 測量
角度及寬度。

步驟五：將各質點的 X 軸位置複製於 Excel 上，
找出「右」的最小值與「左」的最小值
相減，即是彩虹的寬度。

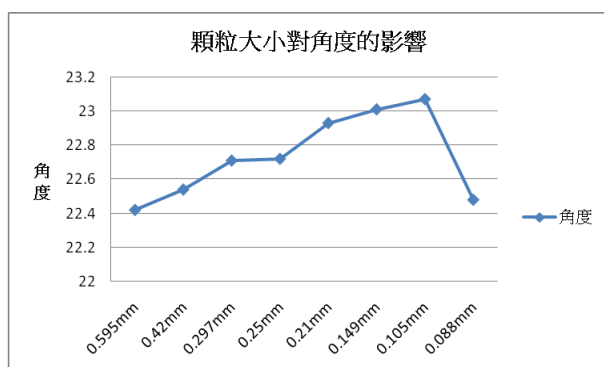
3. 其餘設定皆與實驗三相同。

(二) 實驗結果：

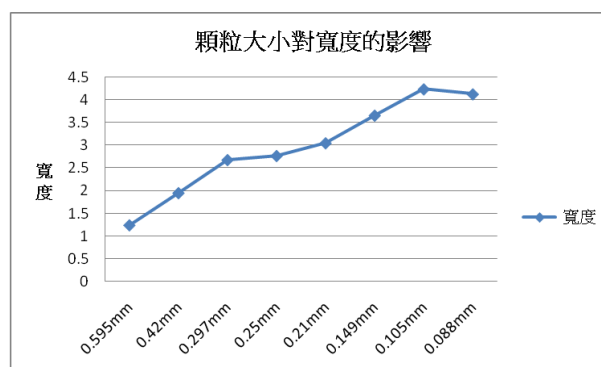
【實驗三-1】玻璃珠大小對彩虹可視角及寬度的影響

表三-3：太陽光底下不同大小的玻璃珠角度

顆粒大小(mm)	0.595	0.420	0.297	0.250	0.210	0.149	0.105	0.088
角度(度)	22.42	22.54	22.71	22.72	22.93	23.01	23.07	22.48
寬度(cm)	1.24	1.95	2.68	2.77	3.05	3.66	4.24	4.13



圖三-6：顆粒大小對角度影響。



圖三-7：顆粒大小對寬度影響。

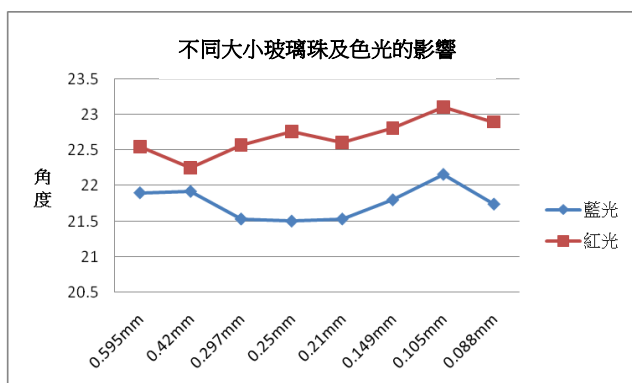
【實驗三-2】不同色光對可視角及寬度的影響

表三-4：玻璃珠大小及色光對於可視角的影

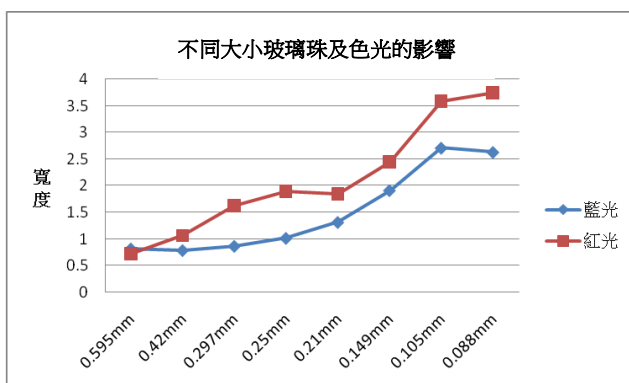
顆粒大小(mm)	0.595	0.420	0.297	0.250	0.210	0.149	0.105	0.088
紅光(度)	22.55	22.25	22.57	22.76	22.61	22.81	23.11	22.90
藍光(度)	21.90	21.92	21.53	21.50	21.53	21.80	22.16	21.74

表三-5：玻璃珠大小及色光對於寬度的影

顆粒大小(mm)	0.595	0.420	0.297	0.250	0.210	0.149	0.105	0.088
紅光(度)	0.72	1.06	1.62	1.89	1.84	2.44	3.58	3.74
藍光(度)	0.81	0.78	0.86	1.01	1.31	1.91	2.71	2.63



圖三-8：玻璃珠大小及色光對角度的影響。



圖三-9：玻璃珠大小及色光對寬度的影響。

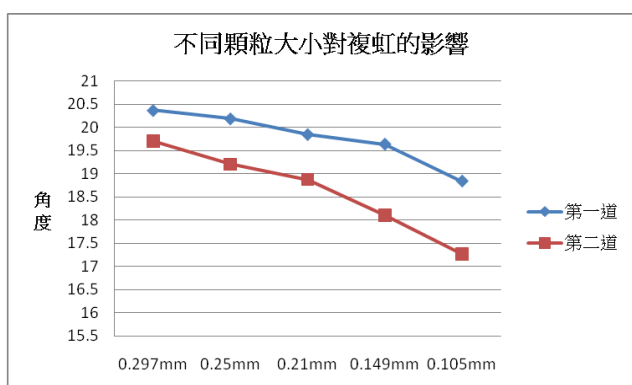
【實驗三-3】玻璃珠大小對複虹可視角及寬度的影響

表三-6：顆粒大小對複虹可視角的影響。

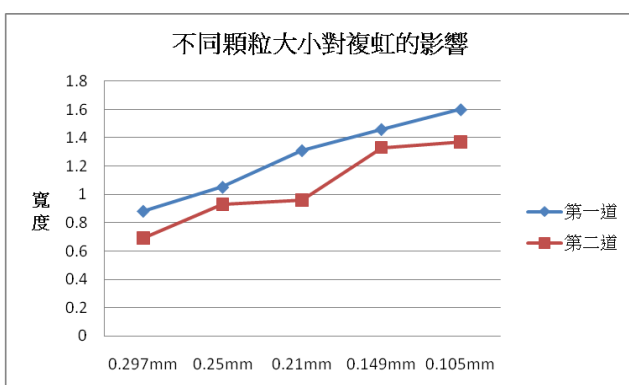
複 虹 顆粒大小(mm)	第一道	第二道	第三道
0.297	20.37	19.71	
0.250	20.19	19.21	18.24
0.210	19.85	18.88	
0.149	19.64	18.11	16.60
0.105	18.84	17.27	

表三-7：顆粒大小對複虹寬度的影響。

複 虹 顆粒大小(mm)	第一道	第二道	第三道
0.297	0.88	0.69	
0.250	1.05	0.93	0.43
0.210	1.31	0.96	
0.149	1.46	1.33	1.05
0.105	1.60	1.37	



圖三-10：玻璃珠大小對複虹角度的影響。



圖三-11：玻璃珠大小對複虹寬度的影響。

(三) 實驗討論：

(1) 太陽光底下不同大小的玻璃珠角度及寬度變化情形：

- 以顆粒 0.595mm 的彩虹最窄，為 1.24 公分；以顆粒 0.105mm 的最寬為 4.24 公分。
- 由這個實驗可以知道，彩虹的寬度確實跟顆粒大小有關，顆粒越小彩虹越寬，如下頁表三-8 所示。
- 角度的部分似乎有隨著顆粒變小而逐漸向外擴張，但是 0.088mm 卻反而縮小，角度部分似乎沒有非常明顯的規則。

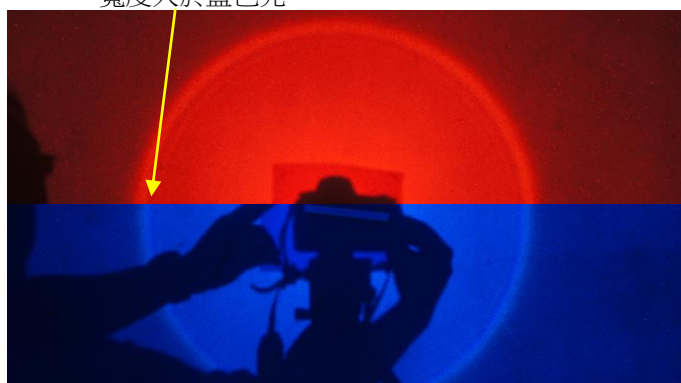
表三-8：顆粒大小影響彩虹的角度及寬度圖。

			
0.595mm	0.420mm	0.297mm	0.250mm
			
0.210mm	0.149mm	0.105mm	0.088mm

(2) 不同色光對可視角及寬度的影響：

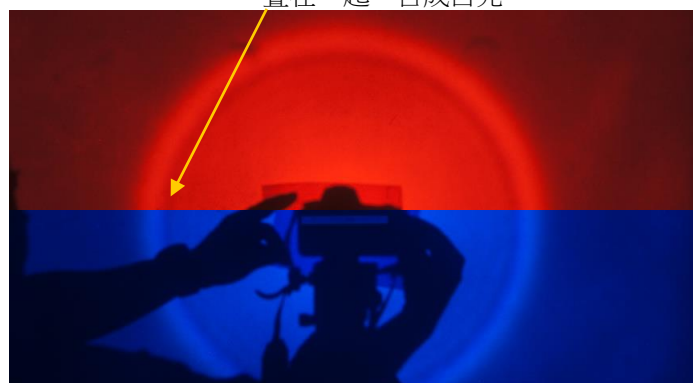
- 紅光的可視角約 22 度，藍光的可視角約 21 度，紅光的可視角度明顯大於藍光。
- 顆粒大小越小，紅光及藍光的寬度都變寬了，紅光的寬度為 0.72~3.74 公分；藍光則為 0.81~2.63 公分。
- 紅光的寬度幾乎都比藍光的寬度來的寬。
- 由下圖三-12 及圖三-13 可以知道隨著顆粒變小，彩虹的寬度也逐漸變寬，最後重疊在一起，紅光、藍光以及各種不同的光因重疊在一起而合成白光，重疊最多處由彩虹的中間開始，也與之前白色弧形區域出現在中間的現象相同。
- 當玻璃珠顆粒越小，各顏色的寬度也越寬，隨著重疊面積變大，各顏色的界線也逐漸消失，最後形成了顏色以白色為主，無明顯界線的霧虹。

紅色光的可視角及
寬度大於藍色光。



圖三-12：顆粒 0.297mm 紅藍光成像圖

紅光及藍光逐漸變寬後重
疊在一起，合成白光。



圖三-13：顆粒 0.105mm 紅藍光成像圖

(3) 顆粒大小對於複虹可視角及寬度的影響：

A. 角度部分：

- a. 顆粒越小第一道複虹的可視角也越小，與主虹的距離也越遠。
- b. 相同大小的玻璃珠，不同道的複虹可視角越小，且越往圓心靠。

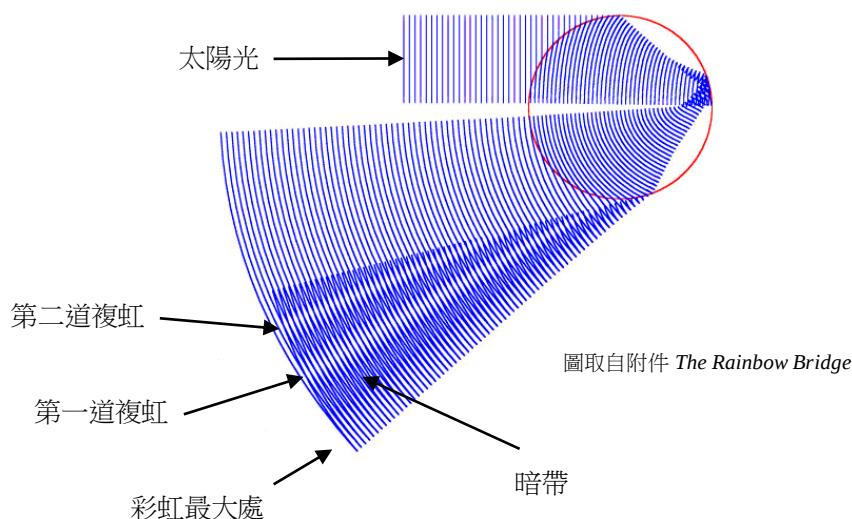
B. 寬度部分：

- a. 不同大小的玻璃珠，第一道複虹的寬度隨著玻璃珠變小而變寬。
- b. 相同大小的玻璃珠，不同道複虹，可視角越小越靠近圓心，且寬度越窄。

C. 顆粒大小均勻，且顆粒越小複虹越容易產生，但是顆粒小到一定程度時，卻反而因為變寬、光線變弱，而無法看見明顯的界線，最後消失不見。

D. 由實驗結果可以知道顆粒大小確實會影響複虹的產生，以顆粒大小 0.105mm 最適合觀測複虹，可以清楚的看到 4 道複虹。

E. 複虹產生的原因主要是要是平行射入的一束光，在射入細小玻璃珠時，它們的入射角是不同的，但是經過折射、反射後，卻有相同的觀測角，也因為這一束光在玻璃珠內會形成光程差，就會造成干涉現象，若是互相重疊亮度則會變亮形成複虹(亮帶)，若是互相干擾抵銷，則就形成暗帶；顆粒越小越接近光波長干擾越大，也越容易形成複虹。



圖三-13：複虹成像圖。

伍、結論

一、太陽光底下以噴水的方式製造彩虹探討：

(一) 我們認為噴水實驗中，最合適觀察彩虹的條件為，與太陽方位成 45 度角，這時候

能看見彩虹的仰角是最多的，背對陽光時反日點左右反而無法看見彩虹。

(二) 彩虹的圓心位置出現在太陽的反日點，太陽的仰角是從「低→高→低」:彩虹仰角則是從「高→低→高」，所以最適合看彩虹的時間為早上與下午。

(三) 噴水實驗中，不易觀測到全圓彩虹的原因是因為水的折射率太低，造成彩虹的可視角太大，超過人眼可視範圍，而無法同時看到一整個圓

二、以細小玻璃珠製造穩定的彩虹探討：

(一) 看的距離會影響彩虹的大小，距離越近，彩虹直徑越小；距離越遠，彩虹則越大。

(二) 決定人眼是否能同時看見全圓彩虹的重點是彩虹的可視角，並不是看的距離，因為玻璃珠彩虹上下 44~46 度的可視角在人眼可視範圍內，所以可以同時看到整個圓

(三) 玻璃珠的顆粒大小會影響彩虹的明亮度和寬度。顆粒越大，彩虹色彩就越明亮，但寬度越窄；顆粒越小，彩虹色彩就越黯淡，但寬度越寬。

三、顆粒大小及色光對於彩虹可視角、寬度及複虹的影響：

(一) 玻璃珠的顆粒越小彩虹的寬度也越寬，當寬度大到一定範圍，就會重疊而產生白色弧形區域，當白色弧形區域的範圍擴大，大到了一定程度時，彩虹就成了霧虹，霧虹幾乎整條呈現白色，缺乏色彩。

(二) 當玻璃珠的顆粒越小，越接近光波時，這時候的干擾也越明顯，越容易出現複虹，我們認為玻璃珠製造彩虹實驗中，以顆粒大小 0.149mm 最適合，因為這時候可以明顯看見的複虹數量最多，我們看到四道複虹，而顆粒更小的則是因為干擾越嚴重，不同複虹因寬度變寬重疊，而無法明顯區別。

陸、參考資料

1. Marcel Minnaert(1995). *Light and Color in the Outdoors*. Berlin, Germany
2. 林泰生(無日期)。以細小玻璃珠示範彩虹現象。逢甲大學光電學系 暨物理教學研究中心。2015 年 3 月 25 日，取自：http://myweb.fcu.edu.tw/~T82029/course_unit/rainbow%20demo.pdf
3. 趙方綺(2012)彩虹分身了—Supernumerary Rainbows。第 52 屆全國科展。2015 年 3 月 25 日。取自：<http://activity.ntsec.gov.tw/activity/race-1/52/pdf/040107.pdf>
4. Raymond L. Lee、Alistair B. Fraser(2001). *The Rainbow Bridge*, Bellingham, WA

【評語】 080114

對實驗項目內容理解透徹。