

嘉義縣第五十五屆中小學科學展覽會 作品說明書

科 別：物理科

組 別：國小組

作品名稱：「看見光的指紋」－紋路對光前進路徑之影響

關 鍵 詞：繞射、干涉

編 號：

目 錄

一、摘要	02
二、研究動機	02
三、文獻探討	03
四、研究目的	05
五、研究設備及器材	06
六、研究過程及方法	07
七、研究結果及討論	12
(一)實驗 1：探討不同的布料對光的路徑所造成的影響	12
(二)實驗 2：探討不同光源的狀況對光的路徑所造成的影響	13
(三)實驗 3：探討不同的光柵狹縫對光的路徑所造成的影響	15
(四)實驗 4：探討不同的光柵編織方式對光的路徑所造成的影響	17
(五)實驗 5：探討不同的距離對光的路徑所造成的影響	20
(六)實驗 6：探討不同的透光區域對光的路徑所造成的影響	22
八、結論與建議	24
九、參考資料	25

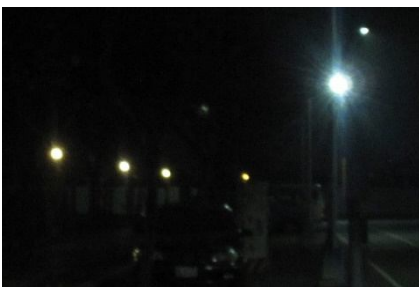
一、摘要

本研究欲探討各式的光線通過不同的布料或光柵時，光的前進方向所發生的變化，以及形成的光影。從實驗結果發現：

- (一) 光源通過易透光且編織條紋規則的布料時，容易出現繞射的光影。
- (二) 光柵狹縫間距愈小時，形成的繞射光影愈寬；狹縫的粗細不會影響亮點間的視角。
- (三) 交錯的兩組條紋可建構出田字型平行四邊形。
- (四) 封閉的三角形、正方形與菱形之發散光柵會形成三叉形、十字形與 X 形光影；而圓形與橢圓光柵則會形成圓形與橢圓。
- (五) 光源離光柵愈遠則繞射的角度愈大。光柵到相機的距離愈遠，則繞射的視角愈小。
- (六) 多狹縫的每個極大值範圍內，由一群亮點所組成。
- (七) 每個光柵會對繞射條紋貢獻特定光影，最後拼湊出一個完整影像。

二、研究動機

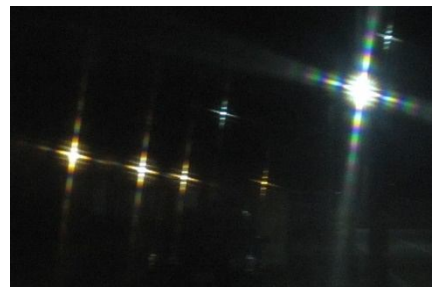
前一陣子台灣經歷了一次選舉，路上旗幟飄揚，我跟爸爸在回家的路上，偶然發現當我們隔著旗幟看著 LED 路燈時，原本單一的亮光呈現了不同的樣貌，變成了一幅排列整齊的圖案且具有彩虹的色調。回到家後我興奮的用了不同的燈源來測試，看的結果居然不盡相同，例如，使用紅光時，卻沒有看到彩虹，這個現象讓我覺得很新奇，但又充滿疑惑，所以我就找老師討論，老師認為這是一個很好的探索主題，建議我不妨來動手研究看看，因此我便邀請同學一同來進行這個有趣的科學之旅。



肉眼直視路燈



隔著旗幟觀看



隔著絲巾觀看

三、文獻探討

在本研究的探討過程中，涉及一些物理相關的概念，為了能更為正確的將實驗結果進行討論，我們需先進行相關概念的探討，包含了四個主題，以下分段敘述。

(一) 繞射

繞射現象是指水波、光波等任何形式的波源遇到障礙物時會偏離原來傳遞方向，這些障礙物包含了狹縫、孔洞等，而波會產生彎曲或發散的傳播。以光波為例，如果放置一個障礙物於光源和布幕之間，則可在布幕上看到明暗相間的複雜圖形，這就稱為繞射。在適當的情況下，波通過孔隙時多具有繞射性質，只是程度會有所差異。

(二) 干涉

如果障礙物具有多個孔隙，例如雙狹縫、網狀物，則我們便可觀察到更為複雜的繞射分布。這是因為不同位置的波以不同的路徑或角度傳播到布幕或觀察者的位置，發生波的疊加而形成的現象，當兩波之間的相位差為 2π 時，會有相長效果而形成亮紋，若相位差為 π 時，則會有相消效果而形成暗紋，即是干涉現象。

(三) 單狹縫繞射

將一個不透明的擋板，用刀在上面刻畫出一條狹長、透光的縫隙，便可當成是單狹縫，如上圖的左半部分為單縫繞射的示意圖，右半部分為觀察屏上的輻照度分布，我們假設狹縫到觀察屏的距離 L 遠大於狹縫寬度 d ，所以這些光束與狹縫垂直平分線的夾角均可以假設 θ 。實際上，狹縫中間分布著大量點光源，繞射圖樣是這些點光源的共同作用結果。在觀察屏上任意位置的光影，是狹縫中所有點光源所疊加出來。因為每個點光源到觀察屏的給定位置路徑不同，所以光程也不同，因此相位也會不同。如果相位差為 2π ，則會干涉相長；如果相位差為 π ，則會干涉相消。如此我們便可找到光線繞射及干涉結果之極大值或極小值，也就是明暗條紋。

由上圖可知，如果狹縫寬度為 d ，兩個點光源的距離為狹縫長度的一半，也就是 $d/2$ 。光線的波長為 λ ，狹縫中點連線與狹縫垂直平分線的夾角為 θ ，兩束光的光程差等於半個波長，即 $(d/2)\sin\theta = \lambda/2$ ，兩者將發生干涉相消，或者可以簡化為 $\sin\theta = \lambda/d$ ，可看出角度、波長與狹縫寬度三者之關係。

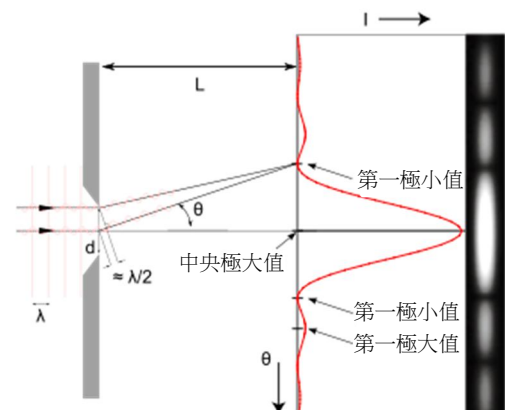


圖 3-1 單狹縫繞射現象

引自 [http:// zh.wikipedia.org/wiki/衍射](http://zh.wikipedia.org/wiki/衍射)

(四) 雙狹縫繞射

當我們討論雙狹縫干涉時，為了簡化問題，會假設縫隙的寬度遠小於入射光的波長。而產生的圖樣是干涉、繞射效應的總和。雙狹縫干涉圖樣的輻照度受到兩個因素所影響，包含了兩個狹縫的干涉現象及每個狹縫個自的繞射。這樣是為了便於分析問題，但是干涉與繞射是常常是同時發生的，實際的雙狹縫條紋的輻照度可以用公式 $I(\theta)=I_m(\cos^2\beta)(\sin\alpha/\alpha)^2$ 計算，其中 $\beta=(\pi d/\lambda)\sin\theta$ ，為干涉因子，主要受到狹縫間距為 d 的雙狹縫干涉效應；而 $\alpha=(\pi a/\lambda)\sin\theta$ 為繞射因子，則是狹縫寬度 a 的單狹縫繞射效應。

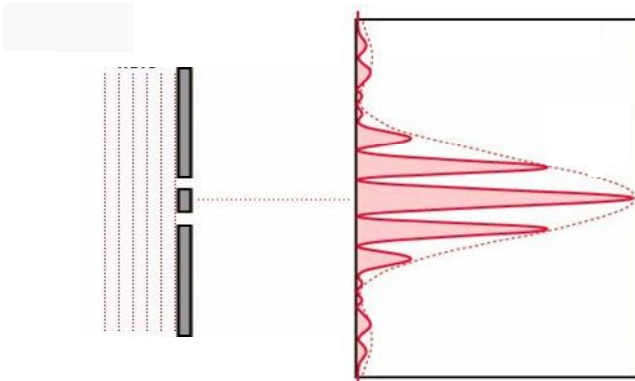


圖 3-2 雙狹縫繞射現象

引自 <http://www.scu.edu.tw/physics/science-scu/M302/19.htm>

四、研究目的

本研究的目的可分為六項主要實驗項目，而每一項主要實驗包含所屬相關的子實驗，共計十二項子實驗，說明如下：

實驗一：探討不同的布料對光的路徑所造成的影響。

實驗二：探討不同光源對光的路徑所造成的影響。

2-1 不同的光源種類對光的路徑所造成的影響。

2-2 不同的光源顏色對光的路徑所造成的影響。

實驗三：探討不同的光柵狹縫對光的路徑所造成的影響。

3-1 不同的光柵狹縫間隔對光的路徑所造成的影響。

3-2 不同的光柵狹縫粗細對光的路徑所造成的影響。

實驗四：探討不同的光柵編織方法對光的路徑所造成的影響。

4-1 不同夾角的兩個重疊光柵對光的路徑所造成的影響。

4-2 不同條紋形狀的橫向光柵對光的路徑所造成的影響。

4-3 不同封閉形狀的放射光柵對光的路徑所造成的影響。

實驗五：探討不同的距離對光的路徑所造成的影響。

5-1 不同的光源到光柵距離對光的路徑所造成的影響。

5-2 不同的光柵到眼睛距離對光的路徑所造成的影響。

實驗六：探討不同的透光區域對光的路徑所造成的影響。

6-1 不同的狹縫數量對光的路徑所造成的影響。

6-2 不同透光區域對光的路徑所造成的影響。

五、研究設備及器材

表 5-1 實驗設備所需工具及材料

外管軌道	工具	圓鋸機、線鋸機
	材料	PVC 水管(80mm 口徑)、木板、捲尺、膠帶
光柵管	工具	圓鋸機
	材料	PVC 水管(65mm 口徑)、各式光柵、不織布、膠帶、壓克力板、螺絲
光源管	工具	圓鋸機、線鋸機
	材料	PVC 水管(65mm 口徑)、壓克力板、螺絲、木板、電池座、電池、各式 LED 燈、色紙

表 5-2 實驗器材所需工具及材料

光源	紅色、橘色、綠色及藍色 LED 燈、白熾燈、省電燈泡、蠟燭
光柵	電腦、Flash Professional CS5 軟體、影印用投影片、影印機
拍攝記錄	單眼相機(Olympus E300、Nikon D7000)、腳架
影像剪裁	電腦、Photoimpact 12 軟體、Photoshop CS5 軟體

六、研究過程及方法

(一) 研究流程

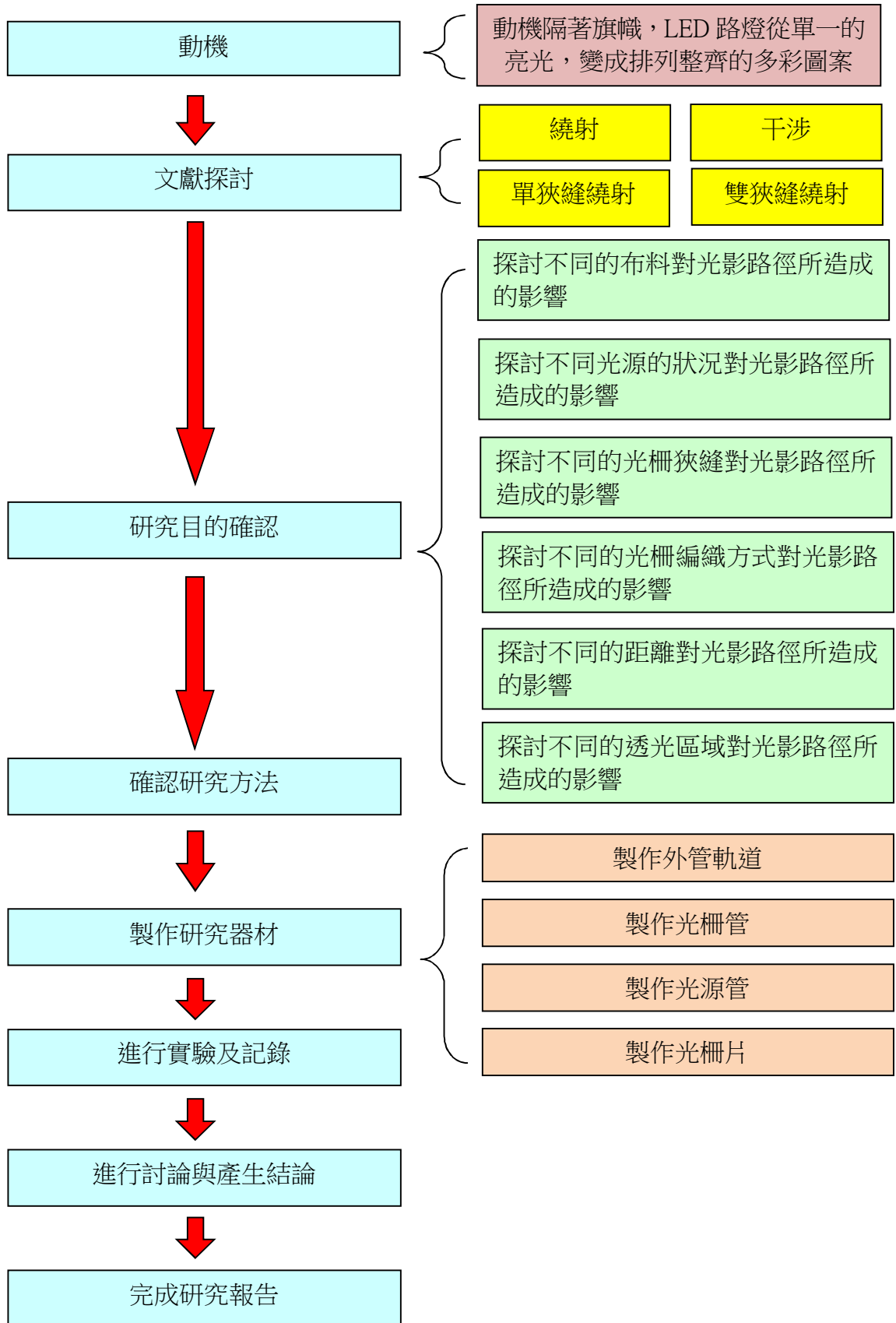


圖 6-1 研究流程圖

(二) 研究設計

整個研究共分為六個主要項目，分別是探討各種布料、光源、距離、光柵條紋形狀、光柵編織方式及透光區域對於光前進路徑之影響。研究的主要實驗設備有四項，分別為外管軌道、光柵管、光源管以及布料固定框；而實驗器材，可分類為光源、光柵、拍攝記錄、影像剪裁等四項用途，以下將針對整體的實驗設備以圖片介紹，並說明外管軌道、光柵管、光源管與光柵片的製作方法。

1. 實驗設備介紹：以下詳細說明各項實驗設備之結構與名稱

(1) 外管軌道：

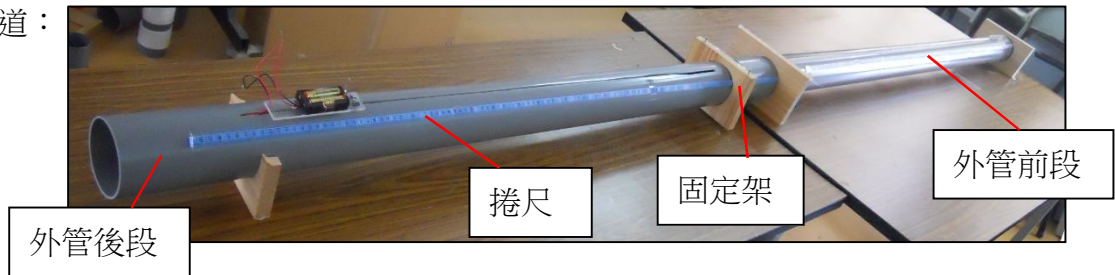


圖 6-2 外管軌道介紹

(2) 光柵管：



圖 6-3 光柵管介紹

(3) 光源管：

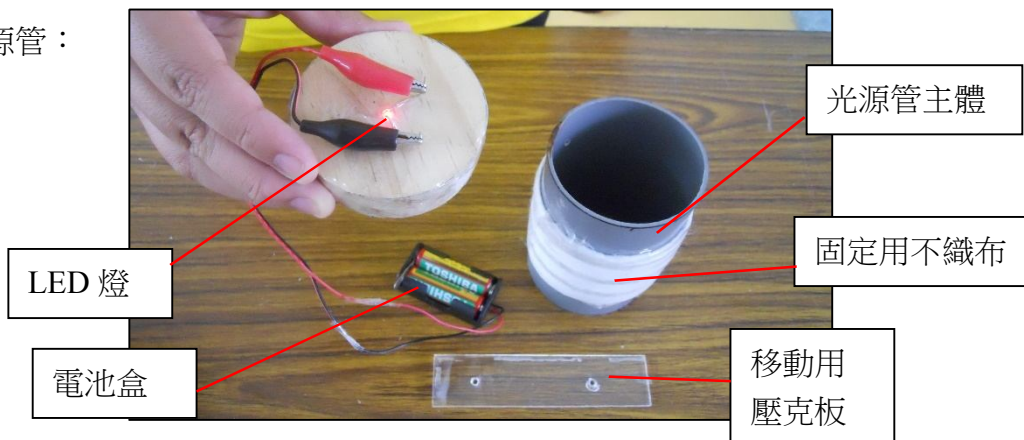


圖 6-4 光源管介紹

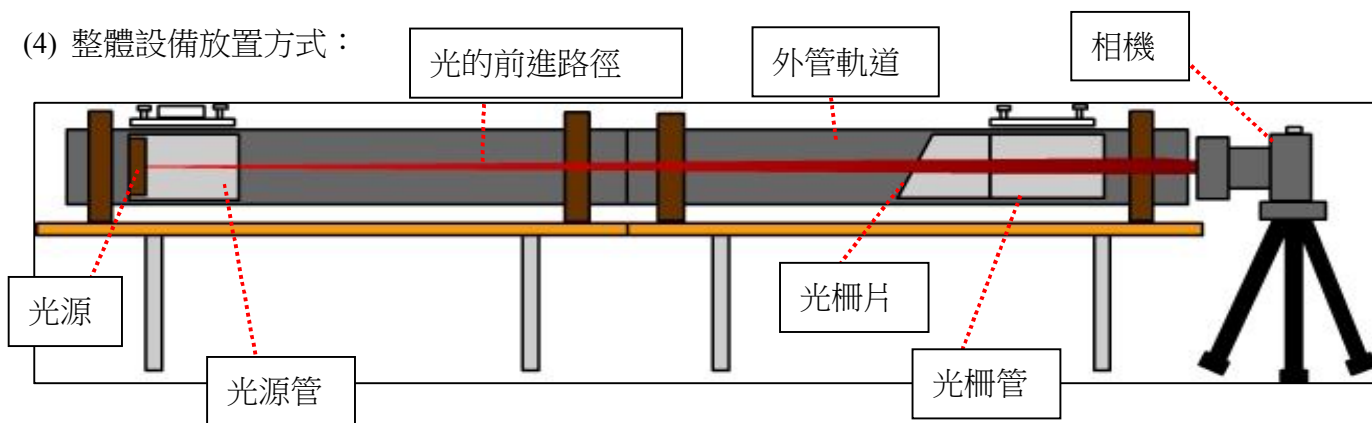


圖 6-5 整體設備介紹示意圖

2.外管軌道的製作：為了能拍攝角度大小正確的實驗影像，並且能達到遮光及調整距離的目的，我們採用 PVC 水管來固定光源與光柵。

- (1) 將 80mm 口徑之 PVC 水管，請老師協助裁切成兩枝 180 公分，方便我們可以串接延長。
- (2) 並且將水管的一側，同樣利用圓鋸機切出長條形的切口，並在長條形切口旁貼上捲尺(圖 6-6)，使我們能精準的控制內部的光源管與光柵管之位置。
- (3) 接著在木板上描繪出 15 公分見方的正方形及外管的圓周(圖 6-7)，老師利用線鋸機協助我們切下所需的木板，共需要四個，然後將這些木板套在外管上，做為固定架之用(圖 6-8)。



圖 6-6 在水管上貼上捲尺



圖 6-7 在木板上描出水管圓周



圖 6-8 將固定架套在外管上

3.光柵管的製作：為了使光柵的角度正確被固定，我們將製作好的光柵片貼在較外管略小的水管上，使光柵管能在外管內移動，並且彼此維持平行。

- (1) 我們使用口徑為 65mm 的水管，由老師協助裁切成 15 公分的長度，做成套筒，另外，為了縮小光柵的密度，我們將水管做 60 度斜角的裁切，用於本研究之實驗 2-1、2-2 及 3-1。
- (2) 接著將不織布繞在光柵管主體外側的前端與後端(圖 6-9)，使光柵管在放入外管時，其鬆緊度能適當，具有固定與可移動的功能。
- (3) 在光柵管套筒貼上光柵片，需維持光柵片的表面平整，避免造成不必要的反光(圖 6-10)。
- (4) 最後在光柵管主體上先鑽出兩個與水管平行的洞，將光柵管放入外管中，取一片大小適中的壓克板，利用螺絲將壓克板隔著外管與光柵管結合(圖 6-11)，做為推動光柵管之握把。



圖 6-9 不織布繞在光柵管外



圖 6-10 將光柵片貼在套筒上

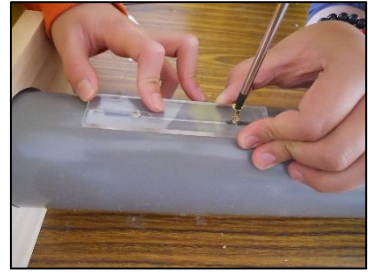


圖 6-11 結合壓克力板與光柵管

4.光源管的製作：與光柵管的製作目的相同，我們仍需要將光源固定在水管上，製作過程略有不同，以下僅針對其相異處進行說明。

- (1) 取一木板，在板子上繪製一光源管的內側圓周，由老師協助利用線鋸機切下圓形木板。
- (2) 在此木板的圓心上，以手搖鑽鑽出一個圓洞(圖 6-12)，大小可插入 LED 燈，為了讓產生的光點更小，我們在圓洞的另一側貼上一張黑色色紙(圖 6-13)，使用牙籤戳出一個小洞。
- (3) 最後，將木板放入光源管中，利用螺絲將光源管與壓克力板結合，並將一電池座固定在壓克力板上，結合 LED 燈(圖 6-14)。

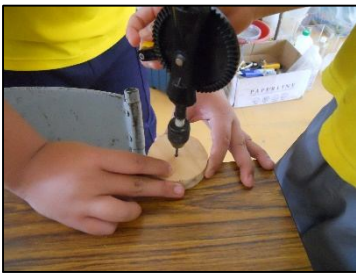


圖 6-12 在木板上鑽出圓孔



圖 6-13 在圓孔上貼上黑紙

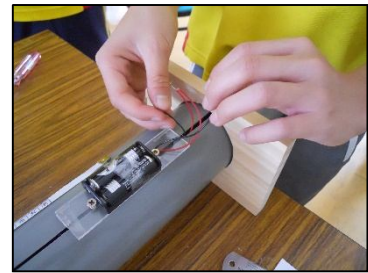


圖 6-14 結合電池座與 LED 燈

5.光柵片的製作：為了做出我們所需大小與形狀的光柵，我們嘗試用不同的方法製作，首先我們將兩隻梳子固定在木框上，然後在梳子上繞細線，但是線容易滑掉，且大小不易更改，後來我們突發奇想，模仿科技產業印刷電路板的方式，利用影印的方式製作光柵片，以下針對過程進行說明。

- (1) 我們先確認所需的光柵之種類與尺寸，然後在 Flash 軟體上畫上所需的線條，並設定粗細及位置，利用複製的方式，把全部的圖形排列完成(圖 6-15)。
- (2) 將投影片放入影印機中，即可印出我們所需的光柵片，但是受限於 Flash 軟體與影印機的列印能力，無法輸出太小的線條。
- (3) 最後我們將光柵管套筒之圓周描在光柵片上，然後剪下並貼在套筒上(圖 6-16、17)。

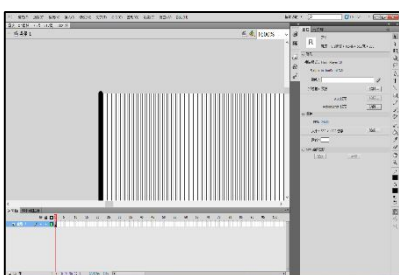


圖 6-15 在 Flash 上繪製條紋



圖 6-16 在光柵片上描出水管圓周



圖 6-17 完成的光柵管套筒

(三)實驗方法：為了能拍攝到最為精確的實驗畫面，我們依靠外管軌道控制方向，並且將光柵管與光源管固定好，最後設定好相機的拍攝係數，以下進行說明。

1. 放置光柵管與光源管：將光柵管與光源管放入外管軌道內，其排列順序依序為相機、光柵管與光源管，接著固定好壓克力板，推到預定的位置，並調整好光柵的條紋方向，使其呈現水平，將光源管上的 LED 燈開啟。
2. 固定相機及拍攝：我們將單眼相機固定於腳架上，確保不會晃動，接著將相機的焦距調至最遠，維持每次拍攝畫面的大小皆相同，並採取自動對焦，提升畫面的清晰度，以及同一系列的實驗固定好其光圈大小以及 ISO 值，然後小心按下快門(圖 6-18)。
3. 影像剪裁：因為拍攝的照片是要進行實驗比對，所以皆不進行影像處理，但需剪裁成大小相同，我們採用 Photoimpact 軟體進行剪裁的動作，但是在實驗 6-2 及 6-3，因為需要將不同透光區域的畫面合併起來，所以我們採用 Photoshop 軟體的圖層功能。
4. 視角的換算：我們認為如果將影像中光點的距離轉換成視角的大小，會更貼近實際視覺觀察，我們採用的方法是將相機調成與實驗時相同的最長焦距，在前方 160 公分處放置一把直尺(圖 6-19)，然後拍下照片，將此照片中的直尺剪裁下來(圖 6-20)，再將直尺畫面與實驗的影像畫面合併，即判斷出光點的距離，接著將此距離代入公式 $\theta_{\text{視角}} = \text{ATAN}(\text{光點距離} \div 160) \times 180 \div \pi$ 中，以求取 $\theta_{\text{視角}}$ 。
5. 影像合併與分析：將剪裁好的畫面與直尺圖片合併，進行中央光點與第一極大值光點的距離判斷(圖 6-21)，將結果輸入 Excel 軟體中，換算出視角。



圖 6-18
對準光源進行拍攝



圖 6-19
拍攝距離 160 公分的直尺

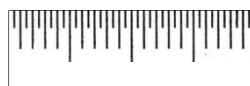


圖 6-20
剪裁後的直尺畫面



圖 6-21
判斷光點間的距離

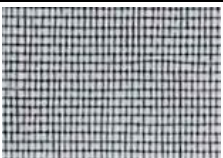
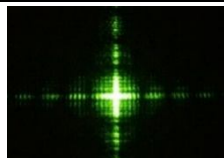
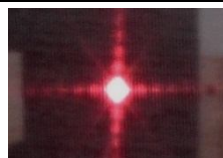

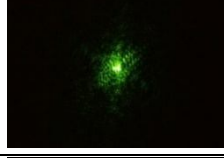


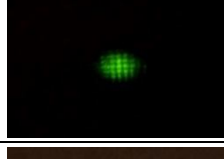
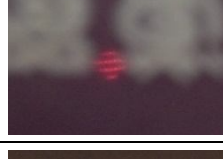
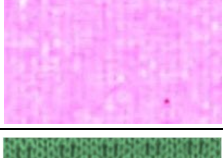
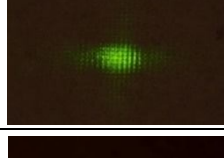



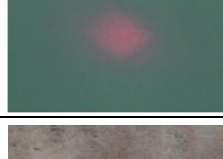

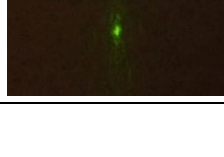
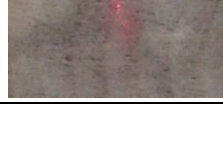
七、研究結果及討論

以下針對各實驗的方法進行說明，並依據實驗結果進行討論

(一)實驗 1：探討不同的布料對光的路徑所造成的影響

我們想要探討不同的布料是否皆會像旗幟一樣，讓光影產生改變，所以我們收集了生活中常見的布料進行實驗，並且為了能清楚的觀察結果，我們決定使用兩種方式拍攝，其一是拍攝雷射光穿透布料後在黑紙上的反射光，其二是拍攝 LED 燈光線穿透布料的光影。

表 7-1 實驗一實驗結果

材質	掃描布料纖維	布料特性	拍攝雷射光穿透布料後在黑紙上的反射光	拍攝 LED 燈光線穿透布料的光線
絲巾		紋路規則，具透光性，縫隙 0.04 公分		
浴巾		紋路彎曲，不易測量		
旗幟 1		紋路規則，具透光性，縫隙 0.02 公分		
旗幟 2		紋路規則，具透光性，縫隙 0.015 公分		
排汗衫		厚度太厚		
擦拭布		編織不規則		

討論：

從實驗所拍攝的畫面中，我們可發現實驗的布料中，絲巾、旗幟 1 與旗幟 2 皆產生可識別的繞射光影，在進一步歸納後，我們發現如果布料材質太厚會導致不易透光，或者編織條紋不規則，則不容易出現繞射光影；反之，如絲巾、旗幟 1 與旗幟 2 三者，布料薄、編織又整齊，則效果相當明顯。



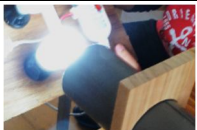


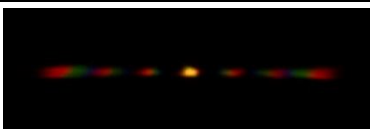

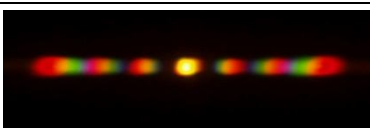


並且光柵方向與光線繞射方向需彼此垂直，所以光影的排列會受到布料方向影響。

(二)實驗 2：探討不同光源對光的路徑所造成的影響

我們將光源管中的 LED 燈取下，將外管對準光源，使各種不同的光源穿透光源管孔隙，成為一道細小光束，並以條紋光柵測試各種不同的常見光源是否會產生不同的繞射光影，所使用的光源包含了人工與自然的光源，共有白色 LED 燈、螺旋式燈管、黃色燈泡、蠟燭及陽光等五種。

1. 實驗 2-1：不同的光源種類對光的路徑所造成的影響

表 7-2 實驗 2-1 實驗結果

光源種類	光源照片	圖片	特徵描述
白色 LED 燈泡			中央光點為白色，繞射光影出現彩虹般的光譜，而以紅綠藍為主
螺旋式燈管			中央光點為白色，繞射光影則出現紅綠藍三種主要色光
黃色燈泡			中央光點偏黃，且繞射光源以紅綠二色為主，藍色光點相當微弱
蠟燭			中央光點偏黃，且繞射光源以紅綠二色為主，無藍色光點
陽光			中央光點為白色，繞射光影則出現如彩虹般的光譜

討論：


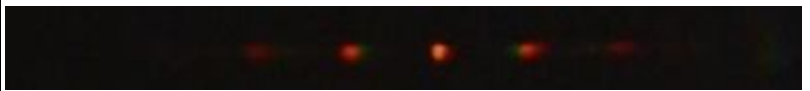


從實驗結果中，我們可以發現這五種光源在經過了光柵的繞射後，皆產生不同顏色的光點，因此可以說明這些光源是由不同頻率之色光組成。

其次，不同的光源有不同的色調，例如黃色燈泡與蠟燭所產生的光影中，以紅綠兩色居多，藍光相當的少，由此可知這些暖色的光源，較為缺少藍色的光。

另外，我們可以發現這些白光的光影幾乎是由三原色紅綠藍的圓點所組成，而在圓點之間又會混合出不同顏色，例如紅點與綠點混合出黃色，而後一節的藍點與前一節的紅點則混合出紫色。

市面上的白色 LED 燈，大部份是由特定比例的紅綠藍三色光來混合而成，所以在光柵繞射的結果可看到明顯的三種色斑，為了確認這個想法，我們使用了其他顏色的 LED 來測試，包含了白、橘、黃、紫等四色，得到了表 7-3 的圖片，可以發現生活中的許多 LED 燈是由不同的光所混合，通常是不同比例的紅綠藍光，經由繞射就可以明顯的分出內含的純色光。

表 7-3 LED 燈的混色分析結果

LED 燈顏色	照片	特徵描述
白色		由紅綠藍三色混合
橘色		由紅綠二色混合
黃色		由綠色混合少量的紅色而成
紫色		由紅藍二色混合

其他的四種燈源則非人工混色，但是繞射後的光斑仍是以紅綠藍三色為主，為了更清楚的分析所看到的光影顏色，我們使用三稜鏡確認陽光內含的光譜顏色，發現陽光含有多種不同色光(圖 7-1、7-2)，然後，我們使用更為密集的光柵重新拍攝陽光的繞射光影(圖 7-3)，從畫面中明顯可看出光影是由紅綠藍三色所組成。

我們認為可能的原因有三項，其一是相機及電腦的記錄與顯示方式是以紅綠藍三色為主體進行混合，所以可能在這個過程中，造成了部份顏色的增加與減少；其二是我們的眼睛的感光細胞對於紅綠藍是相對的敏銳，所以在相同的亮度下，則會造成紅綠藍三色較為明顯的現象；其三是各種光的干涉過程中，經過建設與破壞後，結果紅綠藍被保留了下來，所以無法看到連續的七彩光帶。

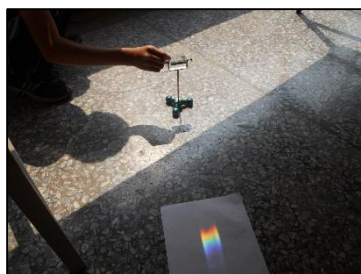


圖 7-1 使用三稜鏡分光

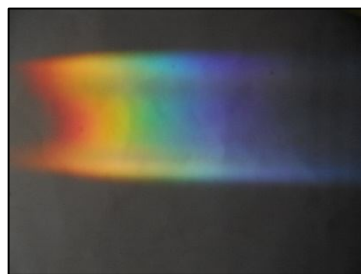


圖 7-2 陽光受三稜鏡分光後的光譜

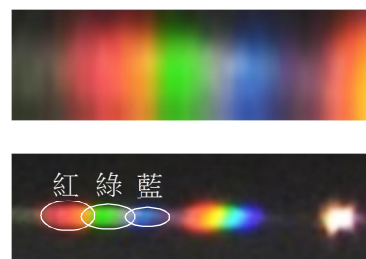
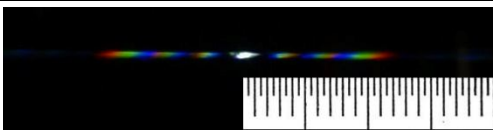
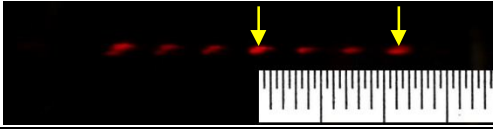
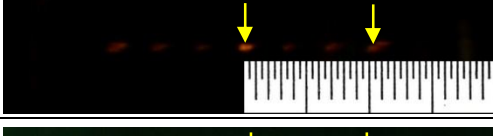
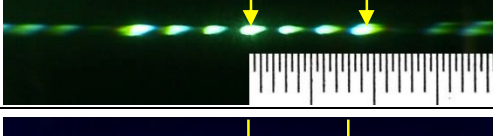
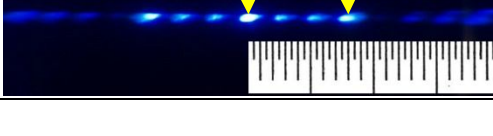


圖 7-3 陽光受光柵分光後的光影

2.實驗 2-2：不同的光源顏色對光的路徑所造成的影響

我們更進一步的討論，認為應該直接使用不同的單色光來分析，可以獲得更清楚的結果，因此我們更換光源管中的 LED 燈，採用白色、紅色、橘色、綠色與藍色的 LED 燈來進行實驗比較，比較其中央亮點與第二個亮點(第一極大值)之間的視角大小。

表 7-4 實驗 2-2 實驗結果

LED 燈顏色	波長	圖片	視角(度)
白色	390nm~ 700nm		依藍綠紅順序，由近到遠排列
紅色	680nm		0.393902
橘色	630nm		0.368836
綠色	520nm		0.333028
藍色	440nm		0.275734

討論：

我們從實驗結果可以發現，如果是白色的 LED 燈，則可看到光影是一節又一節的由藍到紅帶狀排列，而且愈往外，則長度範圍愈大。

當我們使用各種單色光時，則光影也只有同一種顏色，代表皆是同一頻率的光，而且形狀與我們的光源管的黑色色紙孔洞相似，維持圓點狀，且排列相當整齊，但是仍可觀察到除了中央亮點外，約固定一段距離後又會出現一個較亮的點，符合雙狹縫的繞射與干涉條紋。

另外，我們發現波長愈短的光，中央亮點與第二個亮點的距離愈小，與繞射條紋的公式 $\sin\theta = \lambda/d$ 呈現的結果相同，藍光波長較短，所以繞射的夾角較小。

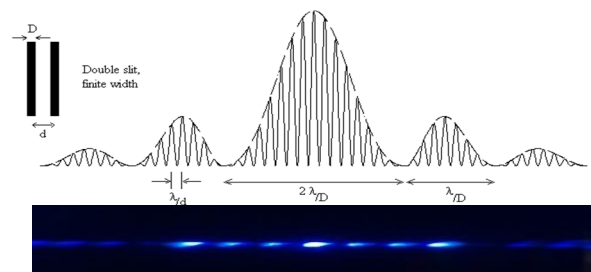


圖 7-4 雙狹縫繞射條紋

引自 <http://www.colorado.edu/physics/phys2020/>

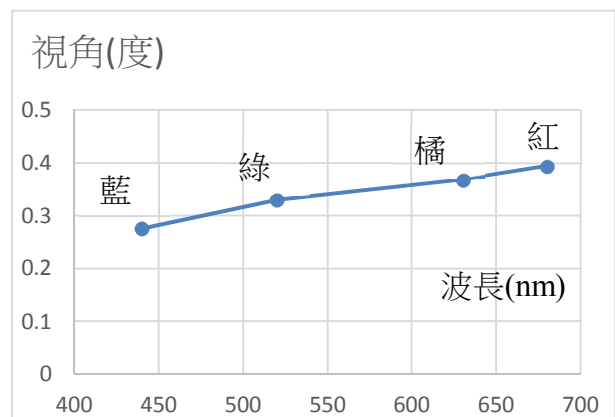


圖 7-5 實驗 2-2 結果 xy 分布圖

(三)實驗 3：探討不同的光柵狹縫對光的路徑所造成的影響

我們討論認為光柵狹縫的狀態對於光的繞射情形可能會有影響，因此我們列印了多種不同的光柵片，包含了不同的光柵狹縫間隔以及光柵狹縫粗細，藉此探討不同的光柵狹縫對光的路徑所造成的影響。

1.實驗 3-1：不同的光柵狹縫間隔對光的路徑所造成的影響

本實驗針對光柵間隙進行改變，並且為了突破影印機的限制，我們採用 60 度斜角的光柵管，以減小光柵狹縫間的距離，距離大小有由 0.016 公分至 0.096 公分。

表 7-5 實驗 3-1 實驗結果

狹縫間隔	光柵(放大 400%)	圖片	視角(度)
$0.032 \times \cos 60^\circ$ =0.016 公分			0.157563
$0.064 \times \cos 60^\circ$ =0.032 公分			0.082363
$0.096 \times \cos 60^\circ$ =0.048 公分			0.057296
$0.128 \times \cos 60^\circ$ =0.064 公分			0.046553
$0.160 \times \cos 60^\circ$ =0.080 公分			0.039391
$0.192 \times \cos 60^\circ$ =0.096 公分			0.028648

討論：

我們從實驗結果可發現，當光柵狹縫間的距離愈寬時，則所形成的繞射光影反而就愈窄，從單狹縫光譜公式 $(d/2)\sin\theta=\lambda/2$ 就能說明之間的關聯性，當光的波長固定，則 d 與 $\sin\theta$ 成反比，也就是狹縫寬度 d 愈大， $\sin\theta$ 愈小，繞射角度 θ 也就愈小，與實驗結果相符(如圖 7-6)。

本實驗雖然並非單一狹縫，但卻是由多個單狹縫的光影所合併，因此本實驗清楚的發現光柵狹縫的間距愈大時，繞射的角度愈小，則光影主要集中在中央附近；反之，當間距變小時，則可以看到各個光點分散的距離變大許多，並且可以觀察到各極大值中夾雜著一些較弱的亮點。

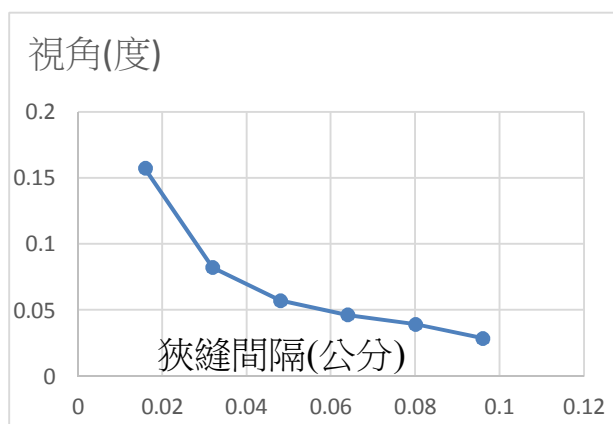


圖 7-6 實驗 3-1 結果 xy 分布圖

2.實驗 3-2：不同的光柵狹縫粗細對光的路徑所造成的影響

我們認為光柵狹縫的粗細同樣可能對光的路徑產生影響，於是更改了光柵片的設計，改變光柵狹縫粗細程度。

表 7-6 實驗 3-2 實驗結果

狹縫粗細	光柵(放大 800%)	圖片	視角(度)
0.008 公分			0.0895246
0.012 公分			0.0895246
0.016 公分			0.0895246
0.020 公分			0.0895246
0.024 公分			0.0895246
0.028 公分			0.0895246

討論：

我們從實驗結果可以發現隨著條紋愈粗，光影的亮度愈暗，但是亮點的距離相同，換算出的視角也相同。

因每個狹縫的位置並沒有變化，所以不論繞射的角度大小，每個狹縫所繞射出的波到達特定位置的距離是相同的，因此波的相消與相加情形是相同的，也導致相似的亮紋分布。

另外，如果光柵愈粗，則狹縫的寬度就愈小，則穿透的光量也就愈少，因此光影就會愈暗。

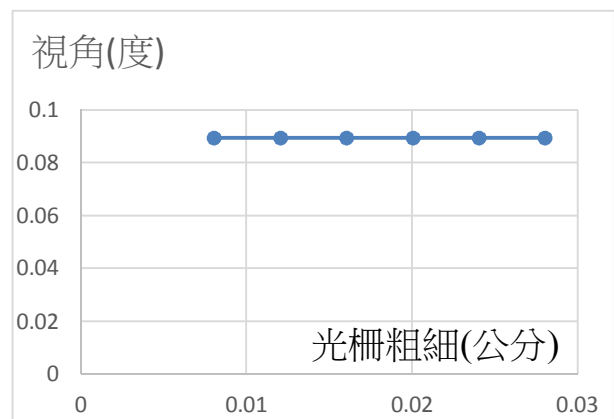


圖 7-7 實驗 3-2 結果 xy 分布圖

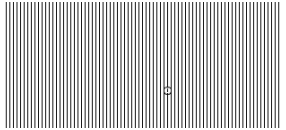
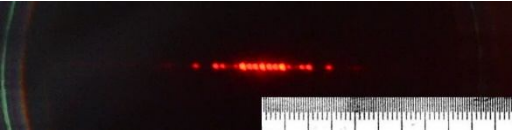
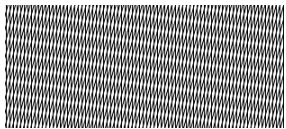
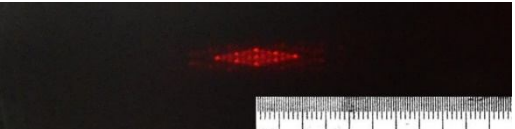
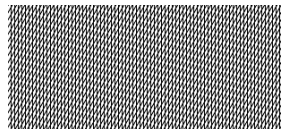
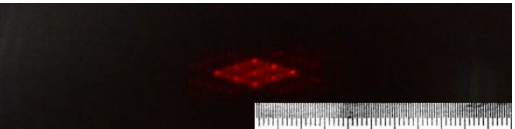
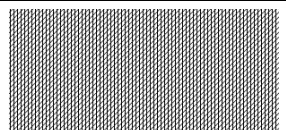
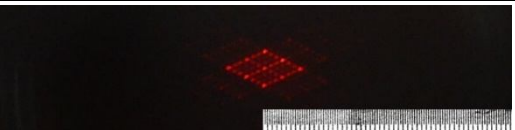
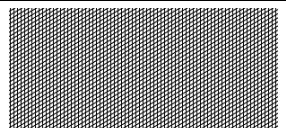
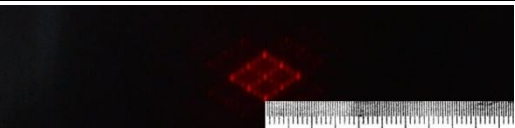
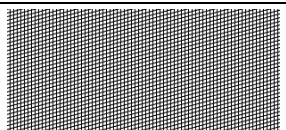
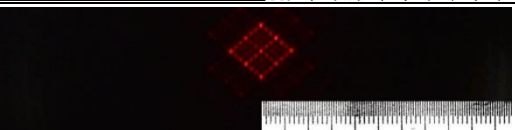
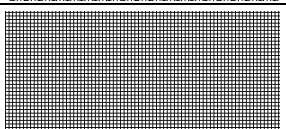
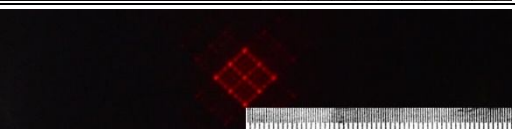
(四)實驗 4：探討不同的光柵編織方法對光的路徑所造成的影響

我們對於不同的光柵編織方式是否也會影響光影路徑感到好奇，除了較常見的條紋與井字之排列外，我們討論出三個特殊的編排方式，分別是兩個條紋光柵以不同角度重疊、不同條紋形狀以及不同封閉形狀，以下分別來進行說明。

1.實驗 4-1：不同夾角的兩個重疊光柵對光的路徑所造成的影響

我們列印兩張單向條紋光柵片，重疊貼於光柵管上，分別調整夾角為 0 度至 90 度。

表 7-7 實驗 4-1 實驗結果

光柵夾角	光柵(放大 800%)	圖片	特徵描述
0 度			只有單一方向的繞射亮紋
15 度			出現角度為 15 度的田字型平行四邊形
30 度			出現角度為 30 度的田字型平行四邊形
45 度			出現角度為 45 度的田字型平行四邊形
60 度			出現角度為 60 度的田字型平行四邊形
75 度			出現角度為 75 度的田字型平行四邊形
90 度			出現角度為 90 度的田字型平行四邊形

討論：

從實驗結果，我們清楚發現兩組條紋以不同角度交錯，這個角度決定了光影的形狀，不同的條紋夾角會建構出一個不同夾角的田字型平行四邊形，並且可清晰看到九個較亮的節點。

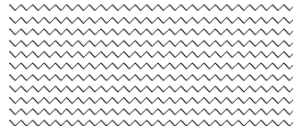
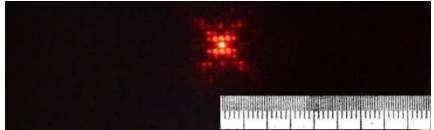
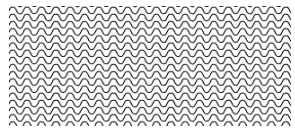
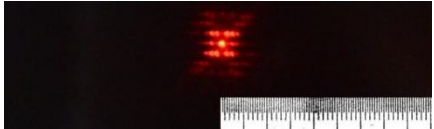
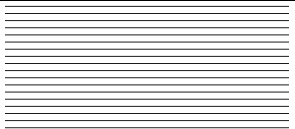
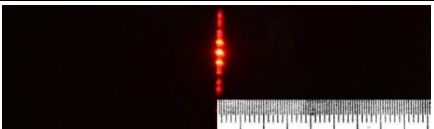
形成的原因可能是不同方向的光柵個自形成繞射干涉的亮紋，如本實驗的角度 0 度，因為夾角為 0 時，所以當然產生的圖案就如同一般的條紋光柵之繞射亮紋，而當夾角不為 0 時，則圖案就是由兩組繞射干涉的亮紋交織而成。

並且，中央亮點與第一極大值之亮點相對於其他亮點而言，是比較亮的，所以在光源管的限制下，其他的亮點亮度極低，幾乎快看不到，只看到 3×3 的光點組合，也就是我們所見的田字型平行四邊形。

2.實驗 4-2：不同條紋形狀的橫向光柵對光的路徑所造成的影響

我們用 Flash 軟體繪製三種不同形狀的條紋，分別為折線型、波浪型、直線，且條紋間的上下間隔相同。

表 7-8 實驗 4-2 實驗結果

光柵條	光柵(放大 800%)	圖片	特徵描述
折線型			以中央亮點為中心向外發散成 X 形
波浪型			以中央亮點為中心向外發散成 X 形
直線型			只有單一方向的繞射亮紋

討論：

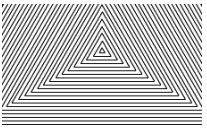
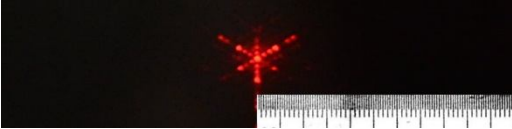
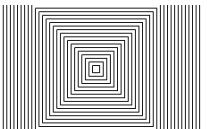
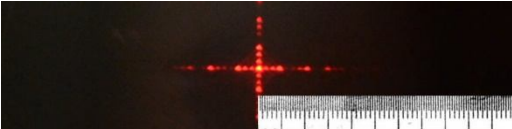
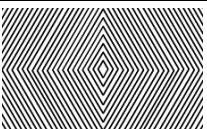
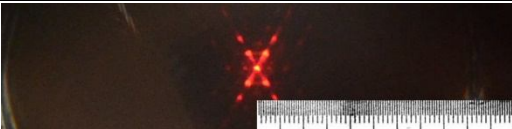
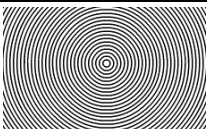
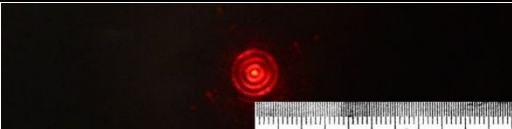
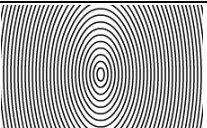

我們發現除了直線型的條紋是單一方向的繞射亮紋，其餘二者則為以中央亮點為中心向外發散成 X 形，差異不大。

我們認為光的繞射方向與條紋的方向是互相垂直，所以水平方向的直線條紋會呈現鉛垂方向的亮紋，而折線型與波浪型因為具有皺折與彎曲，所以產生亮點的位置也較分散，但以垂直方向為主，因此出現的圖形較類似不規則的 X 形。

3.實驗 4-3：不同封閉形狀的放射光柵對光的路徑所造成的影響

我們將原本的條紋型光柵更進一步改成封閉形狀的放射光柵，包含了五種圖形，實驗時需將光源對準光柵圖形的中心，再將畫面拍下。

表 7-9 實驗 4-3 實驗結果

封閉圖形	光柵(放大 800%)	圖片	特徵描述
三角形			以中央亮點為中心的三叉形光影
正方形			以中央亮點為中心的十字形光影
菱形			以中央亮點為中心的 X 形光影
圓形			以中央亮點為中心的圓形光影
橢圓形			以中央亮點為中心的橢圓形光影

討論：

我們從實驗結果可以發現不同的封閉形光柵，形成相當多元的圖案，但這些圖形皆屬於有中央亮點、對稱的特性。

我們認為中央亮點即是原本光源的路徑，而外圍的圖形則是受到光柵的繞射所形成，光的繞射方向是與光柵方向互相垂直，因此三角形、正方形與菱形光柵會形成與邊垂直的三叉形、十字形與 X 形光影；而圓形與橢圓則因為邊的方向並不固定，所以繞射光點仍會互相連結，而形成與原光柵相同的圓形與橢圓形。

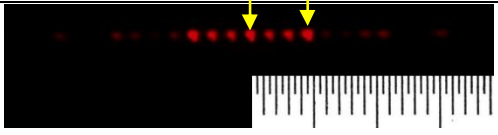
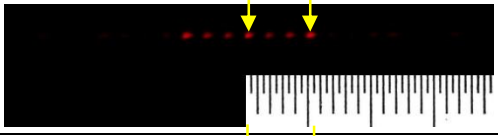
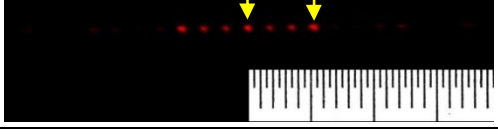
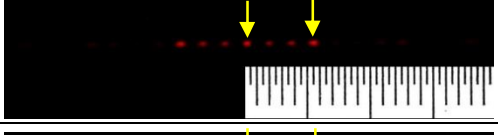
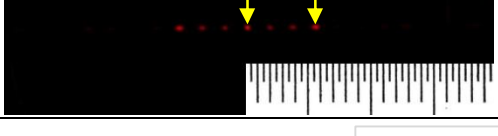
(五)實驗 5：探討不同的距離對光的路徑所造成的影響

我們在觀察路燈穿透旗幟時，發現到當觀察者、旗幟與路燈三者的距離有變化時，所觀察的圖形也會改變，因此特別進行與距離相關的實驗。

1.實驗 5-1：不同的光源到光柵距離對光的路徑所造成的影響

我們固定光柵與相機的距離為 50 公分，而改變光源與光柵的距離為 90~250 公分。

表 7-10 實驗 5-1 實驗結果

光源與光柵距離	圖片	視角(度)
90 公分		0.171887
130 公分		0.204115
170 公分		0.214858
210 公分		0.225601
250 公分		0.232763

討論：

我們從實驗結果發現當光源離光柵愈遠則視角會愈大，但是亮度愈來愈小。

我們認為可能的原因是當光源愈遠時，以相同角度到達光柵之光束距離中心愈遠，因此形成繞射的同一級極大值時，距離中央亮點愈遠。

另外，點光源的亮度是與距離平方成反比，因此相同角度範圍的光量愈小，繞射光影也愈暗。

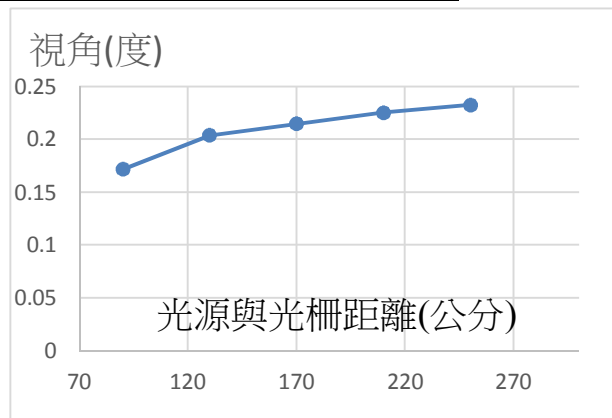


圖 7-8 實驗 5-1 結果 xy 分布圖

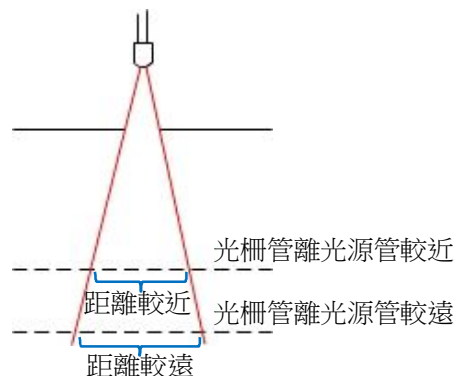
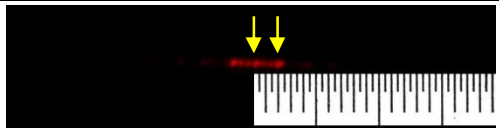
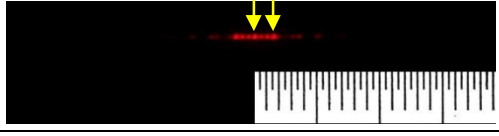
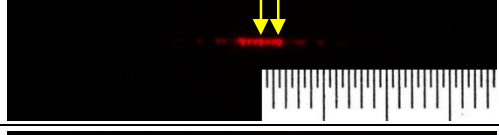
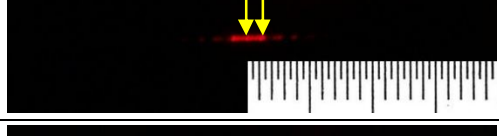
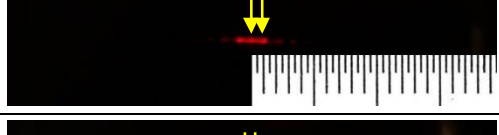
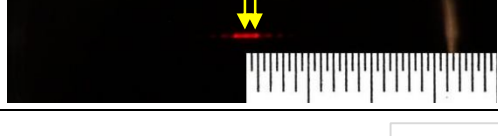


圖 7-9 光源光柵間距離不同示意圖

2.實驗 5-2：不同的光柵到眼睛距離對光的路徑所造成的影響

接著我們固定光源與光柵的距離為 40 公分，改變光柵與相機的距離為 110 至 260 公分。

表 7-11 實驗 5-2 實驗結果

光柵與眼睛距離	圖片	視角(度)
110 公分		0.0716197
140 公分		0.0572958
170 公分		0.0465528
200 公分		0.0393908
230 公分		0.0358099
260 公分		0.0250669

討論：

我們從實驗結果中發現光柵到相機的距離愈遠，則視角愈小，亮度卻是相近的。

我們認為固定了光源與光柵的距離，也就固定了光的繞射與干涉的狀態，只改變觀察者的位置，從圖 7-11 可以發現，當觀察者愈靠近光柵，則中央亮點與第一極大值亮點的實驗光線距離雖然大致相同，但是就視覺的角度而言卻是變大的，與實驗結果相同。

而在光視的強弱上，則因為光源管所射出的光量是相同的，所以在亮度上並不會有太大的改變。

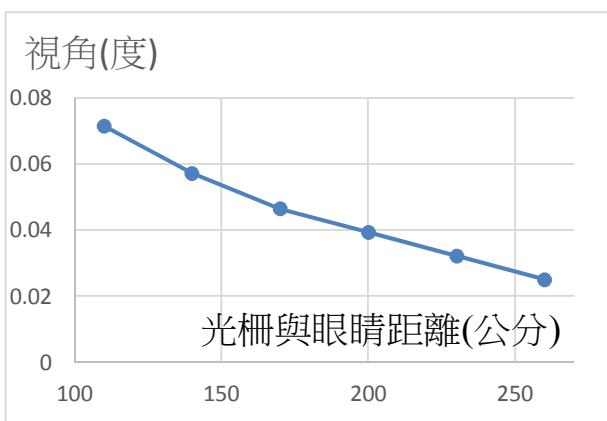
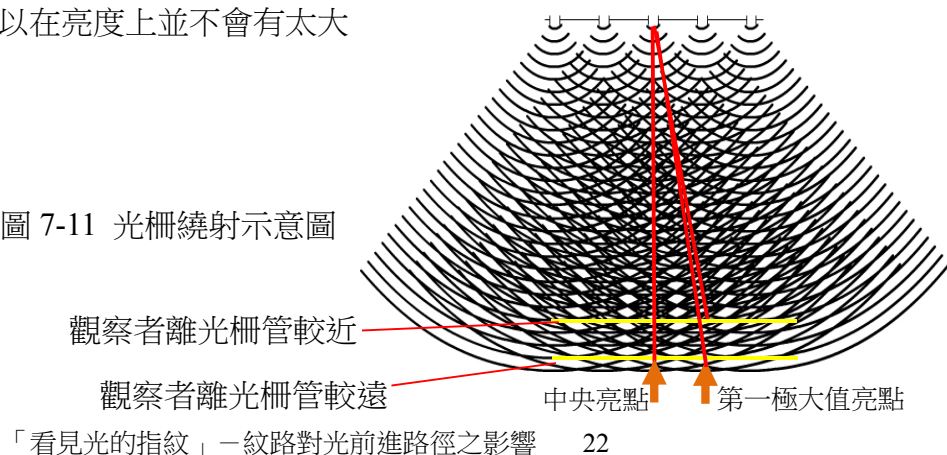


圖 7-10 實驗 5-2 結果 xy 分布圖

圖 7-11 光柵繞射示意圖



「看見光的指紋」－紋路對光前進路徑之影響 22


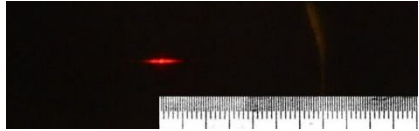

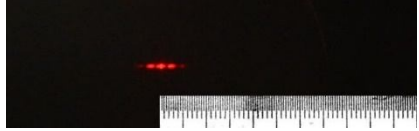

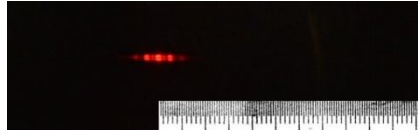



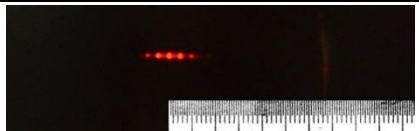

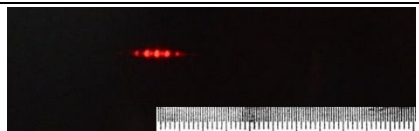
(六)實驗 6：探討不同的透光區域對光的路徑所造成的影響

最後我們想要了解在光柵繞射的過程中，不同的狹縫數量以及不同的透光區域對於整體的繞射之影響。

1.實驗 6-1：不同的狹縫數量對光的路徑所造成的影響

我們製作了狹縫數量 1~6 的光柵片，取代光柵管上條紋式光柵片。

表 7-12 實驗 6-1 實驗結果

狹縫數量	光柵(放大 800%)	圖片	特徵描述
1			只能看到中央亮點以及左右的橫線
2			中間有三個較亮的光點，更外面的兩個亮點則較明顯較暗
3			同上
4			同上
5			同上
6			同上

討論：

我們從實驗結果發現，單狹縫光柵出現的亮紋與其他光柵片之亮紋相差較多，並且狹縫數量愈多時，第二極大值亮點則變得較清楚，但是狹縫數量到達 4 以上時，則無明顯差異。

我們認為單狹縫與其他數量狹縫皆有繞射現象，但是單狹縫只有狹縫內的不同波程差之干涉現象，而其他狹縫數量則有狹縫之間的波之干涉，因此我們從文獻中，也可了解到單狹縫的每個極大值範圍內只有一個亮點，而雙狹縫則有一群亮點所組成(如圖 7-12、7-13)。

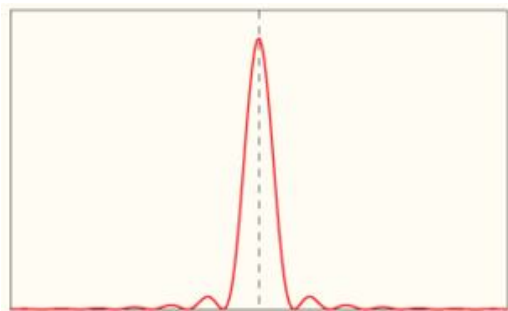


圖 7-12 單狹縫亮紋示意圖

引自維基百科---海森堡不確定性原理

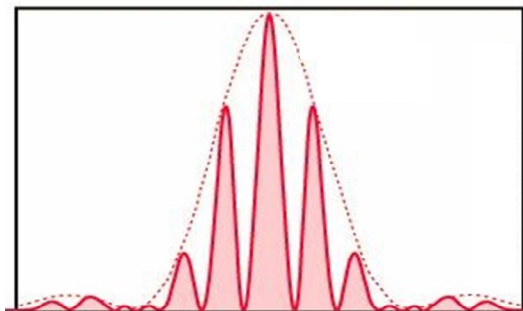


圖 7-13 雙狹縫亮紋示意圖

引自 <http://www.scu.edu.tw/physics/science-scu/M302/19.htm>

2.實驗 6-2：不同透光區域對光的路徑所造成的影響

我們將光柵片改為邊長 0.1 公分的正方形透光區域，由右至左遮蔽井字型與條紋型光柵，最後再以 Photoshop 軟體將影像合併，藉此與未遮蔽之影像進行比較。

表 7-13 實驗 6-2 實驗結果

透光區域	透光區域	井字型光柵圖片	條紋型光柵圖片
右三			
右二			
右一			
中央			
左一			
左二			
左三			
疊合			
未遮蔽			

討論：

我們從實驗結果發現當透光區域離原光源愈近時，光影愈亮，並且將這些部份遮蔽之影像疊合後，所獲得的影像與未遮蔽之影像頗為相似，但較不清晰。

我們認為在光柵的繞射過程中，對於觀察者而言，每個不同角度的狹縫都貢獻其特定的光影，最後拼湊出一個完整的影像，因此也可以解釋當我們面對旗幟時，不論我們往前後左右移動位置，仍可以看到一個清晰固定的路燈繞射光影，此現象與觀察彩虹相似，如圖 7-14，當產生彩虹的天空，有部份的區域沒有小水珠時，則觀察到的彩虹就會不完整，但是與本研究的光影有差別，彩虹形成的原理是光的折射與反射，而本研究的光影是屬於光的繞射與干涉。



圖 7-14 不完整的彩虹

引自 [http:// commons.wikimedia.org/wiki/](http://commons.wikimedia.org/wiki/)

另外，疊合與未遮蔽的影像有差異的原因有二，首先是遮蔽的情況下，會造成少數狹縫可能皆被遮蔽或未遮蔽二次；其次，原本可能會彼此相消的光，在 Photoshop 軟體的疊合處理下，皆只有相長而已，所以結果會略有不同。

八、結論與建議

綜合本研究六大目的之十二個實驗所獲得之結果及討論，我們推論出下列九項結論及四項建議，以下依序說明。

(一)結論：

1. 光源在通過較易透光且編織條紋規則的布料時，容易出現繞射的光影。
2. 不同色調的光源通過光柵時會有不同比例的紅綠藍色光之組合，並且在可見光中，藍光繞射角度較小，紅光最大。
3. 光柵狹縫間距愈小時，則所形成的繞射光影愈寬，並且可以觀察到每隔一段角度就會出現較亮的亮點。
4. 光柵條紋愈粗，光影的亮度愈亮，但是亮點間的視角相同。
5. 光線通過特定角度交錯的兩組條紋時，會建構出一個特定夾角的田字型平行四邊形，並且可清晰看到九個明亮的節點。
6. 光通過封閉形狀的發散型光柵時，會產生不同形狀的光影，三角形、正方形與菱形光柵會形成與邊垂直的三叉形、十字形與 X 形光影；而圓形與橢圓形則會形成圓形與橢圓形光影。
7. 光源離光柵愈遠則繞射的角度愈大，但是亮度愈來愈小。光柵到相機的距離愈遠，則繞射的視角愈小，但亮度相近。
8. 單狹縫亮紋的每個極大值範圍內只有一個亮點，而雙狹縫亮紋及多狹縫則有一群亮點所組成。
9. 對於觀察者而言，每個不同角度的光柵都會對繞射條紋貢獻其特定的光影，而這些光影最後拼湊出一個完整的影像。

(二)建議：

1. 經過特殊設計的光柵可以產生獨特光影，因此若更加深入的研究，光柵應該在視覺美學上有很好的發揮的地方。
2. 光源、光柵與觀察者之間的距離會影響著光影的樣貌與大小，所以若有精心的設計，也許能做為測量距離的一項工具。
3. 不同的光源通過光柵後，就能將不同頻率的光波分離出來，因此只要能善加利用，就能做為簡易分析光源種類的器材。
4. 肉眼雖然可以感受可見光範圍內的各種色光，但常受到週遭景物的影響，干擾了對顏色的判斷，若以光經過光柵所產生的繞射狀態進行分析，便能客觀的確認光的顏色。

九、參考資料

John M. Cowley (民 90 年)。繞射物理學。台北市。曉園。

許招墉 (民 92 年)。物理光學。台北市。俊傑書局。

Physics 2020, Department of Physics University of Colorado boulder, 102 年 2 月 12 日，取自：
http://www.colorado.edu/physics/phys2020/phys2020_sp15/

不確定性原理 (民 104)。維基百科。民 103 年 2 月 10 日，取自：<http://zh.wikipedia.org/wiki/不確定性原理>

波動光學。東吳大學物理系網站。民 102 年 2 月 12 日，取自：
<http://www.scu.edu.tw/physics/science-scu/M302/19.htm>

繞射 (民 104)。維基百科。民 103 年 2 月 10 日，取自：[http:// http://zh.wikipedia.org/wiki/衍射](http://zh.wikipedia.org/wiki/衍射)