

中華民國第 58 屆中小學科學展覽會 作品說明書

高級中等學校組 物理與天文學科

051812

障礙物繞射理論與實驗之探討

學校名稱：國立臺灣師範大學附屬高級中學

作者： 高二 邱昱豪 高二 陳昇鴻	指導老師： 高銘宏 潘冠錡
-------------------------	---------------------

關鍵詞：繞射、細線繞射、高斯分布

摘要

本實驗主要探討科學教育月刊第 246 期中雷射光對細線繞射的現象，論文中分析了造成細線繞射時中央亮帶旁暗線的成因，但在實驗的部分著墨較少。因此本科展主要進行細線繞射的實驗，並利用 C++ 程式語言進行理論模擬，最後進行理論模擬與實驗的比較，研究不同雷射光到細線的距離下，不同細線到屏幕的距離對繞射圖形的變化，解釋細線繞射中，中央亮帶及第一亮帶內細小暗紋的成因，並提出相關解釋說明。經實驗發現，造成此小暗紋的原因是細線旁兩個光源的干涉，而此干涉類似於雙狹縫干涉，但仍與雙狹縫干涉有差異。

壹、 研究動機

在物理專題研究課程中，老師介紹了繞射實驗以及細線繞射，在細線繞射的實驗中，按照理論分析應與單狹縫的繞射條紋相同，但實際進行實驗後卻發現，在中央亮帶內發現了不該出現的暗線，因此對其產生了好奇，故我們上網搜尋了有關細線繞射的文獻，但發現文章中主要進行理論計算與模擬，對於實驗的部分則較少著墨，故我們對細線繞射著手進行研究。



圖一:細線繞射時的光束圖，我們利用噴霧器將水噴灑至空中，藉以利用單眼相機拍攝下光徑。

貳、 研究目的

- 一、 利用細線繞射測量綠光雷射波長。
- 二、 觀察細線繞射圖形中中央亮帶內的暗線及成因。
 - (一)利用 C++ 進行理論模擬。
 - (二)拍攝細線繞射的條紋，並利用 ImageJ 進行亮度分析。
 - (三)比較理論模擬與實驗圖形。
- 三、 觀察光源到細線在不同距離下，細線繞射的圖形所產生的變化。

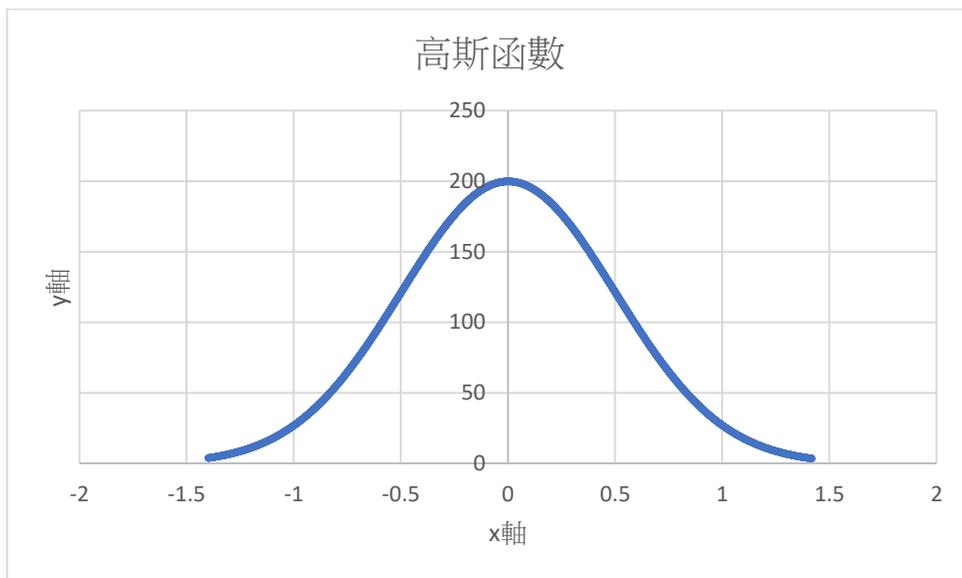
參、 研究設備及器材

單狹縫片	綠光雷射	Image j
		
漆包線	螺旋測微器	捲尺
		

肆、 研究過程或方法

一、 實驗原理

(一) 高斯函數



圖二:高斯函數示意圖。

1. 高斯函數為常態分布，可表示為 $f(x) = ae^{-\frac{(x-b)^2}{2c^2}}$ ， a 、 b 、 c 為實數。
2. a 為跟 c 有關的常數，可表示為 $\frac{1}{c\sqrt{2\pi}}$ ，為大於 0 的實數。
3. b 為位置參數，代表所有 x 的平均值，可影響最高點的位置。
4. c 是尺度參數，為所有 x 的標準差， c 越大則圖形越扁平。

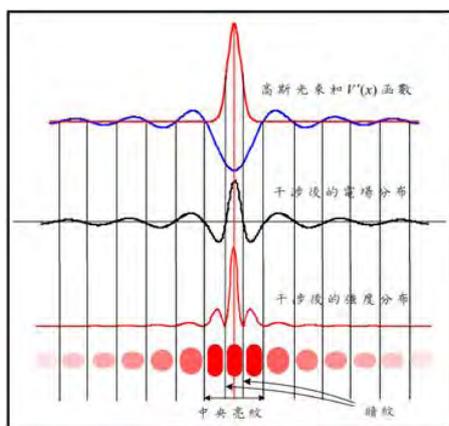
(二) 巴比涅原理

假設光源的原電場為 E_0 ，細線繞射在屏幕上的電場 E_1 ，單狹縫繞射在屏幕上的電場為 E_2 ，根據疊加原理， $E_1 + E_2 = E_0$ ，當 $E_0 = 0$ 時，可得 $E_1 = -E_2$ ，然而光的強度與電場的平方成正比，故看起來單狹縫繞射和細線繞射的圖形是一樣的。

二、 文獻探討

(一) 依照巴比涅原理，我們可以知道單狹縫繞射圖形和細線繞射圖形應該一樣，但是實際上，經過我們實驗上拍攝出來的圖形來進行比較後，發現它們還是有一些細部上的差異。

(二) 我們參考了科學教育月刊第 246 期中雷射光對細線繞射的現象，進而了解造成此暗線的主要因為我們所使用的雷射光並非平面光而是高斯分布的光源，所謂高斯光源就是同一平面上光源強度並非一樣，如果使用 imagej 分析會發現它的光源強度為高斯分布，也就是中央亮度大於兩側亮度的光源。由於雷射光的強度並非均勻，當細線繞射的圖形與雷射光強度的高斯分布進行疊加時，中央亮帶的兩側會出現相消的情況，導致暗線的出現。

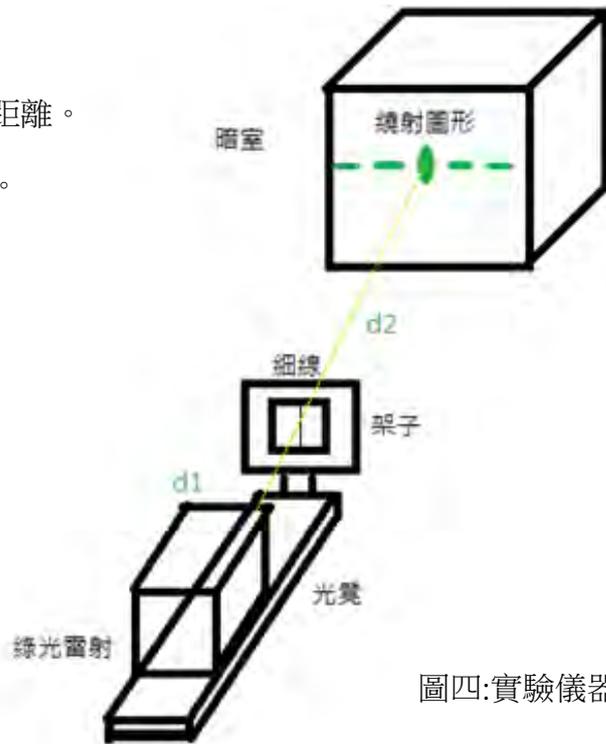


圖三:雷射對細線繞射的示意圖。最上面的紅色曲線為雷射的高斯光束電場分布，藍色曲線為細線繞射的電場分布，黑色曲線為兩者重疊干涉後的電場分布函數，而在下面的紅色曲線則為干涉後的強度分布圖。圖三引用自徐國誠的碩士論文。

三、 儀器架設

(一) d_1 為雷射光口到細線的距離。

(二) d_2 為細線到屏幕的距離。



圖四:實驗儀器架設示意圖

四、 實驗軟體介紹~image j

(一) 介紹

ImageJ 是一個基於 java 的公共的圖像處理軟體，除了基本的圖像操作，比如縮放，旋轉，扭曲，平滑處理外，ImageJ 還能進行圖片的區域和像素統計、間距、角度計算，能建立柱狀圖和剖面圖，進行傅立葉變換。

(二) 操作方法

1. 利用相機拍攝屏幕上的圖形
2. 利用 image j 先設定照片中的比例尺
3. 接著使用 image j 內建的測定亮度的功能，即可出現屏幕上圖形的強度分布圖

五、 實驗步驟

(一) 實驗一: 利用細線繞射測量綠光雷射波長

1. 利用螺旋測微器測量細線的線徑。
2. 使用綠光雷射照射細線，測量細線到屏幕的距離，以及測量屏幕上暗帶到暗帶的間距。
3. 利用單狹縫繞射的公式，即可算出綠光雷射的波長。

(二) 實驗二:討論細線繞射圖形中中央亮帶內的暗線及成因

1. 確定所使用的綠光雷射為高斯分布

- (1) 利用綠光雷射照射黑色屏幕，並用相機拍下屏幕上的圖形。
- (2) 利用 image j 分析實驗結果，即可得到雷射光的強度圖。

2. 高斯擬合曲線製作

- (1) 由於我們所使用的綠光雷射並非很完美的高斯分布，所以我們決定製作高斯擬合曲線，之後這條曲線即可代表我們所使用的光源強度。
- (2) 首先，將高斯函數同取 \ln ， $\ln(y)=\ln(a)-\frac{(x-b)^2}{2c^2}$ ，對 y 軸平移，可以將 b 消掉，得到 $\ln(y)=\ln(a)-\frac{(x)^2}{2c^2}$ 。
- (3) 將光源照到屏幕上的圖用 image j 分析，其 x 軸表示位置， y 軸表示光源強度，將 x^2 與 $\ln(y)$ 作圖，利用 excel 作回歸直線，其斜率為 $-\frac{1}{2c^2}$ 與 y 軸截距為 $\ln(a)$ ，求出 a 和 c 帶回原方程式，打在 excel 上，即可求出擬合的高斯曲線。

3. 巴比涅原理實驗

- (1) 先用雷射照射一條 0.4 mm 的細線，用相機拍下屏幕上的圖，利用 image j 分析強度圖。
- (2) 接著使用 excel，利用已知單狹縫公式，算出雷射照射寬度 0.4 mm 的單狹縫時的強度圖。
- (3) 將此兩圖疊合，即可驗證巴比涅原理。

4. 理論模擬

使用程式來模擬細線繞射實驗，並比較實驗結果及程式模擬的強度分布圖，詳細的程式內容請參閱附錄。

(三) 實驗三:討論不同距離下的細線繞射圖形

1. 在實驗二中，我們發現障礙物在離光源一段距離後，會在圖形中產生類似雙狹縫的干涉條紋，我們推測我們的實驗裝置可能跟雙狹縫干涉有些類似，

因此我們運用如圖四中的實驗器材，並改變光源到障礙物的距離或障礙物到屏幕的距離，做不同的實驗。

2. 由螺旋測微器測出來細線線徑為 0.019 cm
3. 定義光源到細線的距離為 d_1 ，細線到屏幕的距離為 d_2 ，如圖四。
4. 實驗方法
 - (1) 使 d_1 固定，改變不同 d_2 ，將雷射照射細線，利用照相機拍攝屏幕上的圖片。
 - (2) 利用 image j 測量照片中第一亮帶內暗紋的間距，並用雙狹縫干涉的公式推算出等效的雙狹縫間距。
 - (3) 利用 excel 將第一亮帶內暗紋的間距對 d_2 作圖，並做出迴歸直線。

伍、 實驗結果

一、 實驗一: 利用細線繞射測量綠光雷射波長(實驗結果照片如圖五)



圖五:細線繞射實驗圖

(一) 細線線徑:0.019 cm

(二) 改變不同細線到屏幕的距離，測量暗帶間距，利用單狹縫公式求出綠光雷射波長。

利用細線繞射求出綠光雷射波長的數據，我們測出來綠光雷射的平均波長為 532.9 nm，如表一。

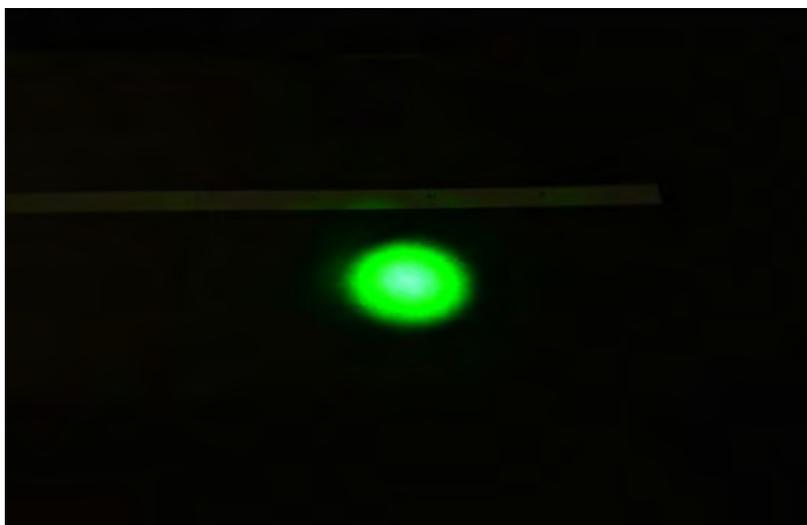
表一:實驗一之實驗數據

	細線到屏幕的距離(cm)	暗帶間距(cm)	綠光波長(cm)
第一次	357	1.00	536.3
第二次	620	1.75	532.2
第三次	860	2.40	530.2

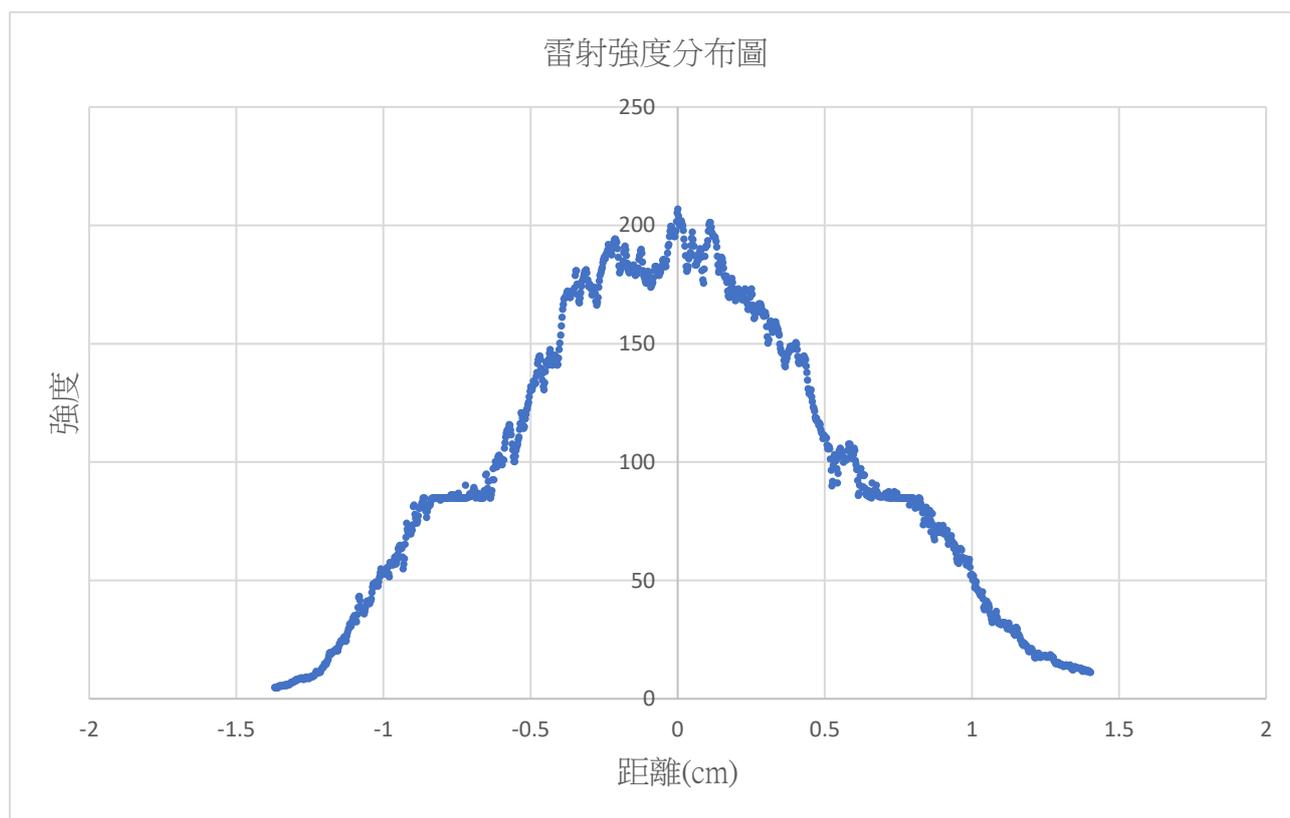
二、 實驗二: 討論細線繞射圖形中中央亮帶內的暗線及成因

(一) 測量綠光雷射強度是否為高斯分布

我們利用照相機拍攝雷射光照到 20 公尺外屏幕的圖形，如圖六，並使用 image j 分析出來的光源強度圖。



圖六:雷射光實驗照片



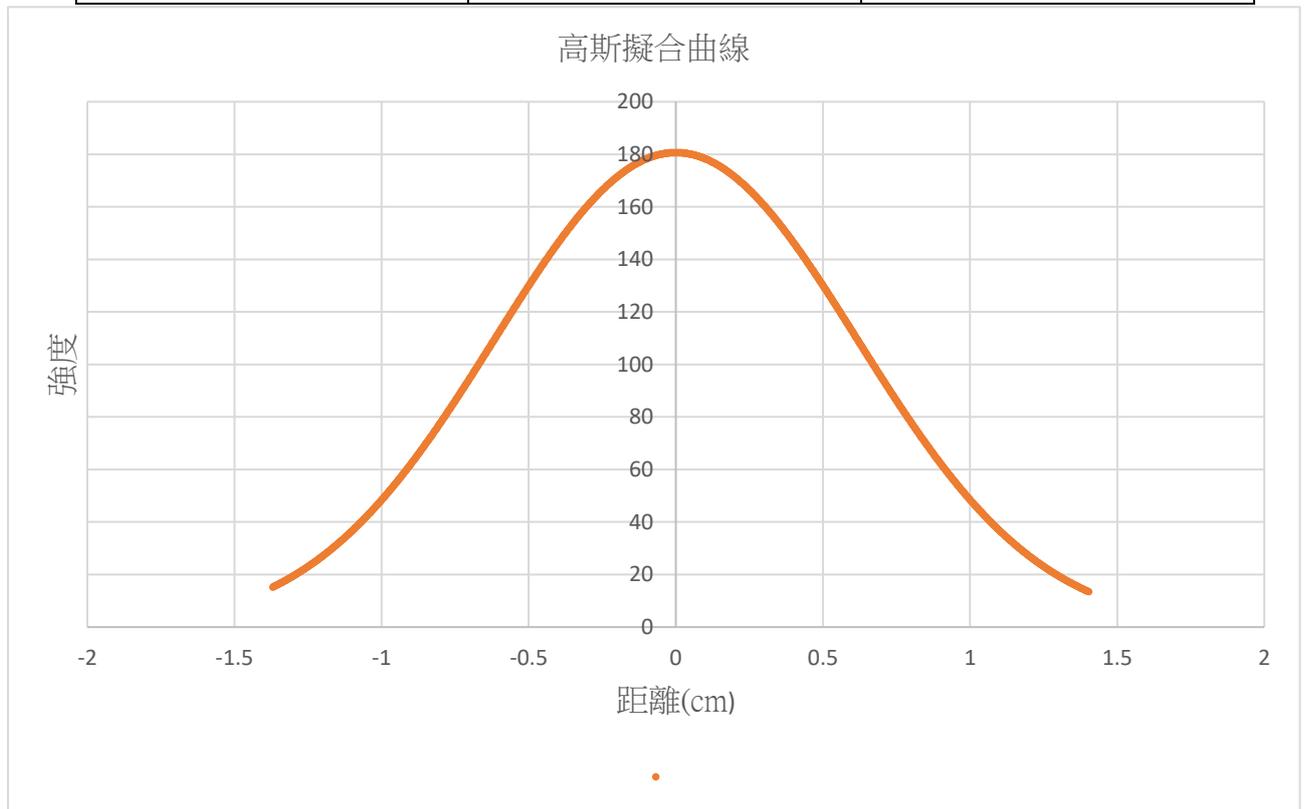
圖七:使用 image j 分析的光源強度圖。

(二) 高斯擬合曲線製作

由於我們的實驗結果中雷射光的強度圖形跟高斯曲線有些落差，因此我們決定製作高斯擬合曲線來代表此雷射的光源強度。將實驗圖的數據利用 excel 做出回歸直線，求出高斯函數的常數 a、c，如表二。之後再帶回方程式，求出擬合高斯函數，如圖八。

表二:高斯函數常數 a 和 c

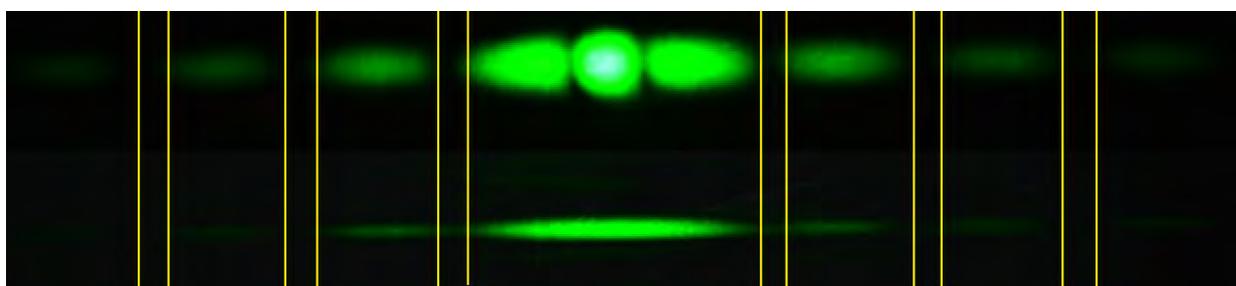
	a(常數)	c(常數)
第一次	204.123	0.598
第二次	196.667	0.639
第三次	194.803	0.615
平均	198.531	0.617



圖八:表二中的數據求出的高斯擬合曲線。

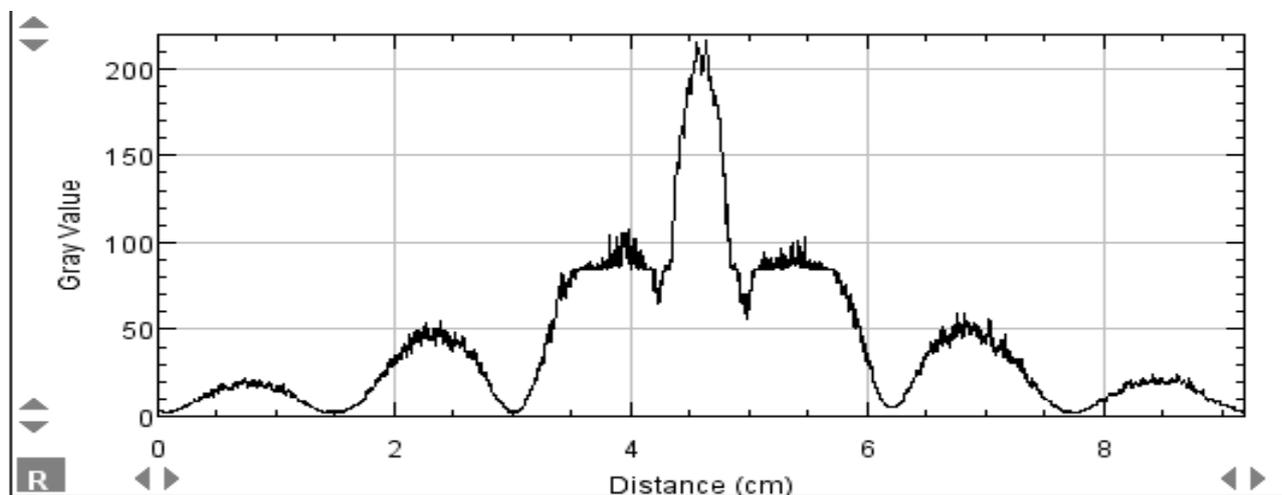
(三) 巴比涅原理實驗

我們使用綠光雷射照射線徑為 0.4 mm 細線的繞射圖形及單狹縫繞射的圖形，除了細線繞射有中央亮帶內的暗線，其他的部分如亮帶跟暗帶的長度和位置都是吻合的，如圖九。之後我們使用 image j 分析並得到的強度圖，在圖中可以看出中央亮帶旁強度有下降的趨勢，代表圖九中細線繞射中央亮帶內的暗線，如圖十。之後我們使用 excel 模擬單狹縫實驗，如圖十一，並與細線繞射的強度圖進行比較，如圖十二。在圖十三中，可以清楚觀察到單狹縫繞射和細線繞射中的亮帶和暗帶的位置吻合。

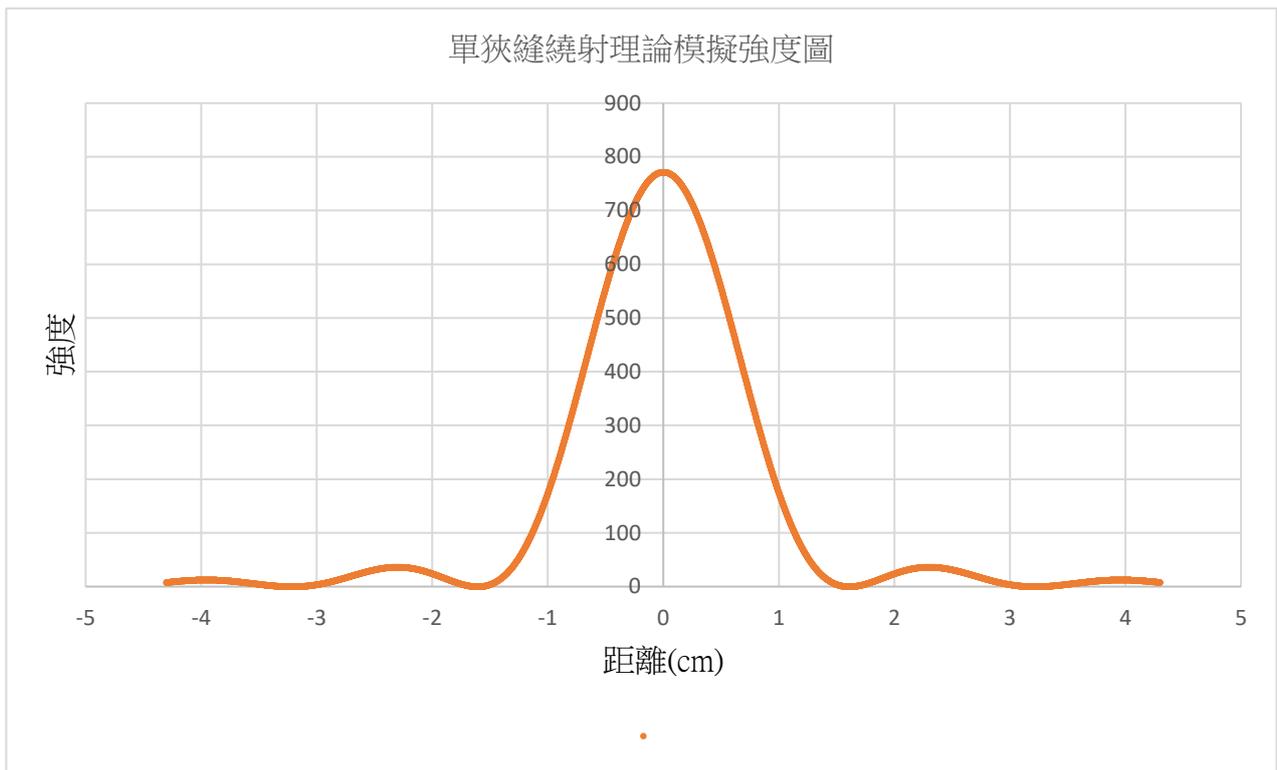


第三暗帶 第二暗帶 第一暗帶 第一暗帶 第二暗帶 第三暗帶

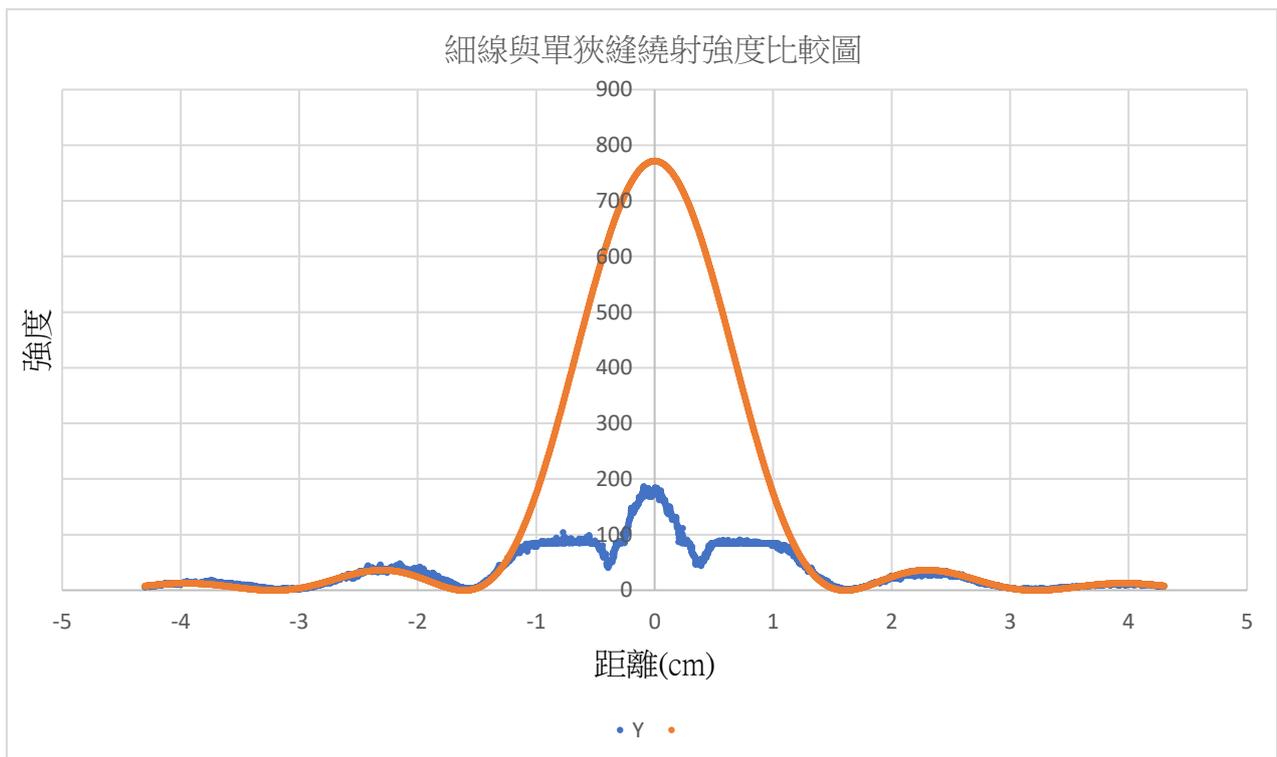
圖九:細線繞射與單狹縫繞射比較圖



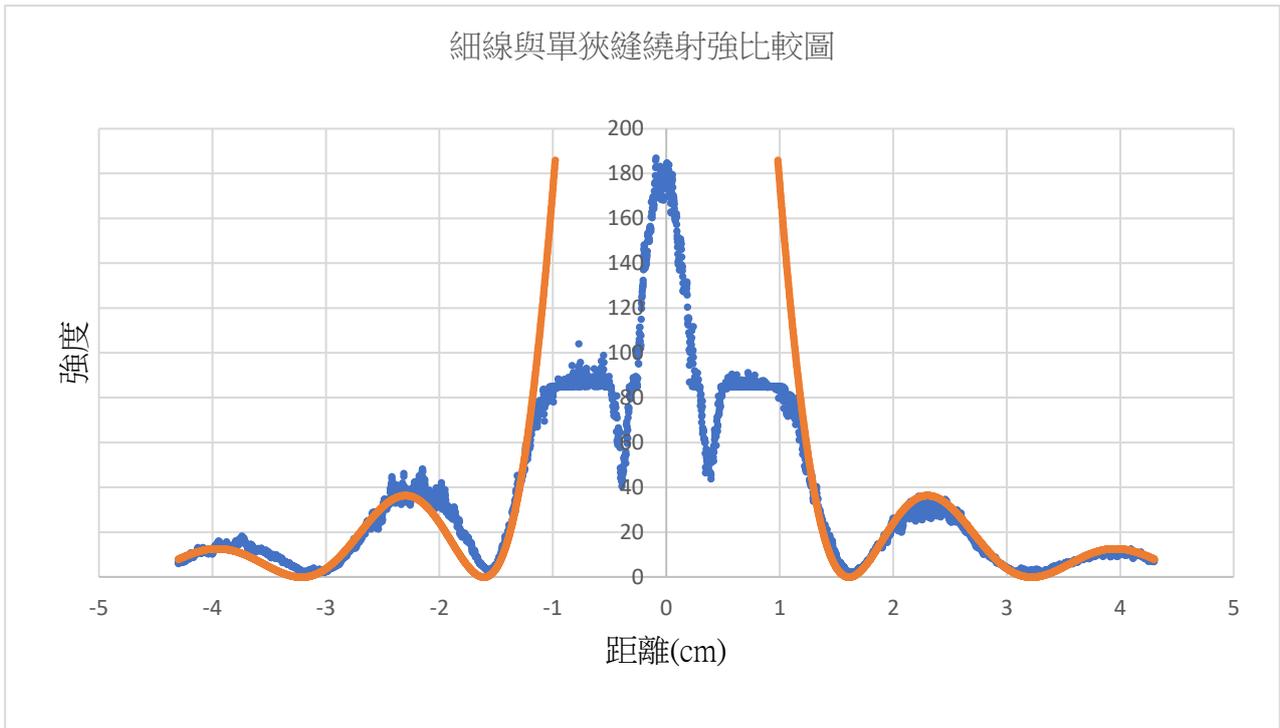
圖十:細線繞射實驗強度圖



圖十一:單狹縫繞射實驗模擬圖



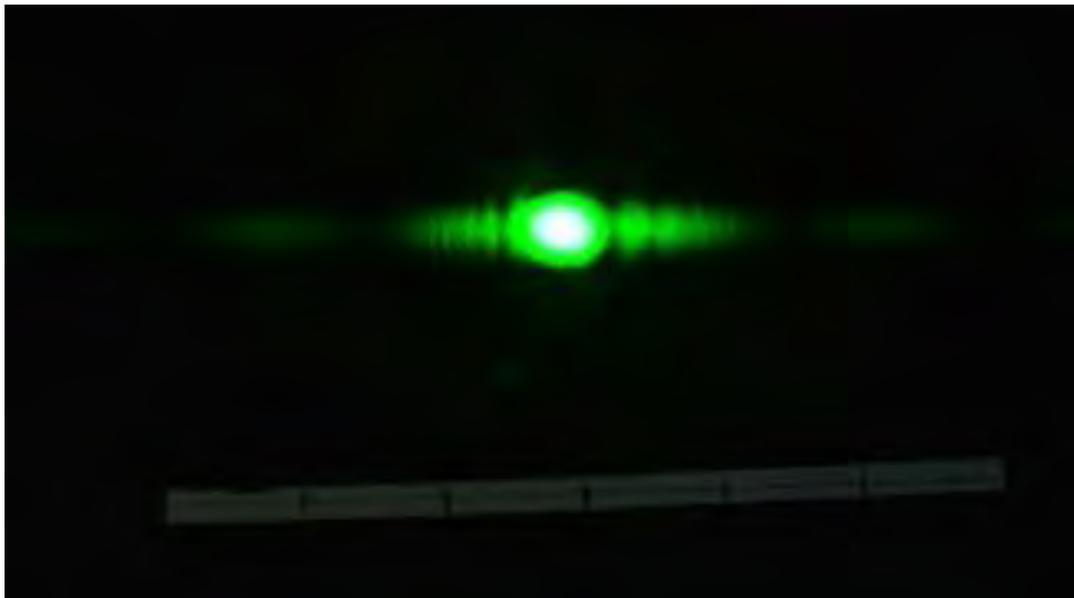
圖十二:細線繞射與單狹縫繞射強度比較圖



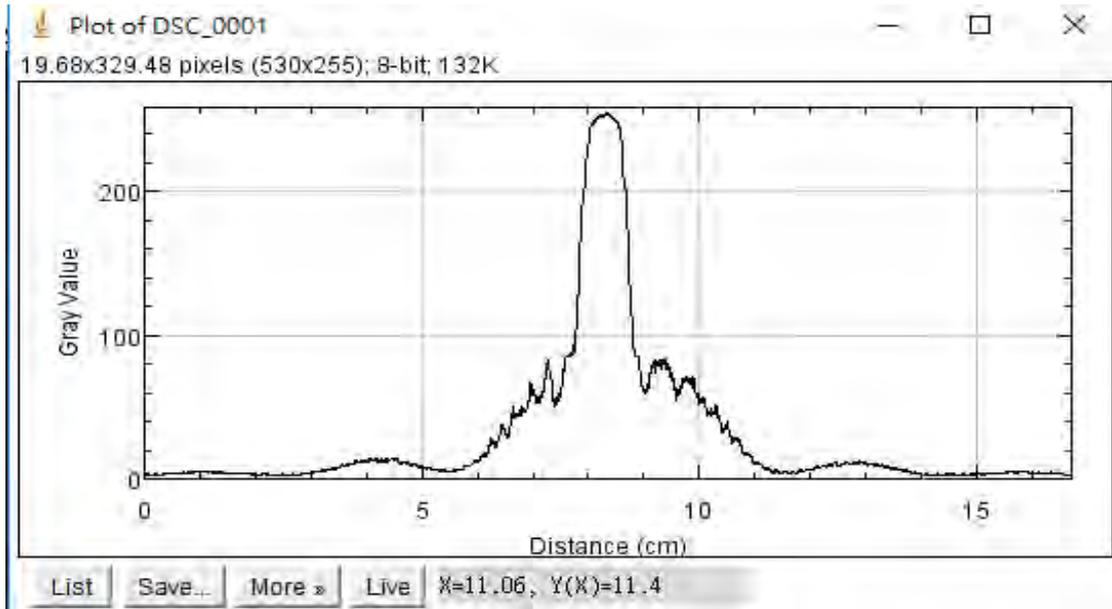
圖十三:圖十二中央局部放大圖。

(四) 理論模擬

1. 我們用雷射照射距離雷射 160 公分的細線，使用照相機拍攝實驗圖片，如圖十四，並使用 image j 分析得到強度圖，如圖十五。之後我們使用同學所寫的程式模擬實驗，如圖十六，並進行實驗與程式模擬強度的比較，如圖十七。



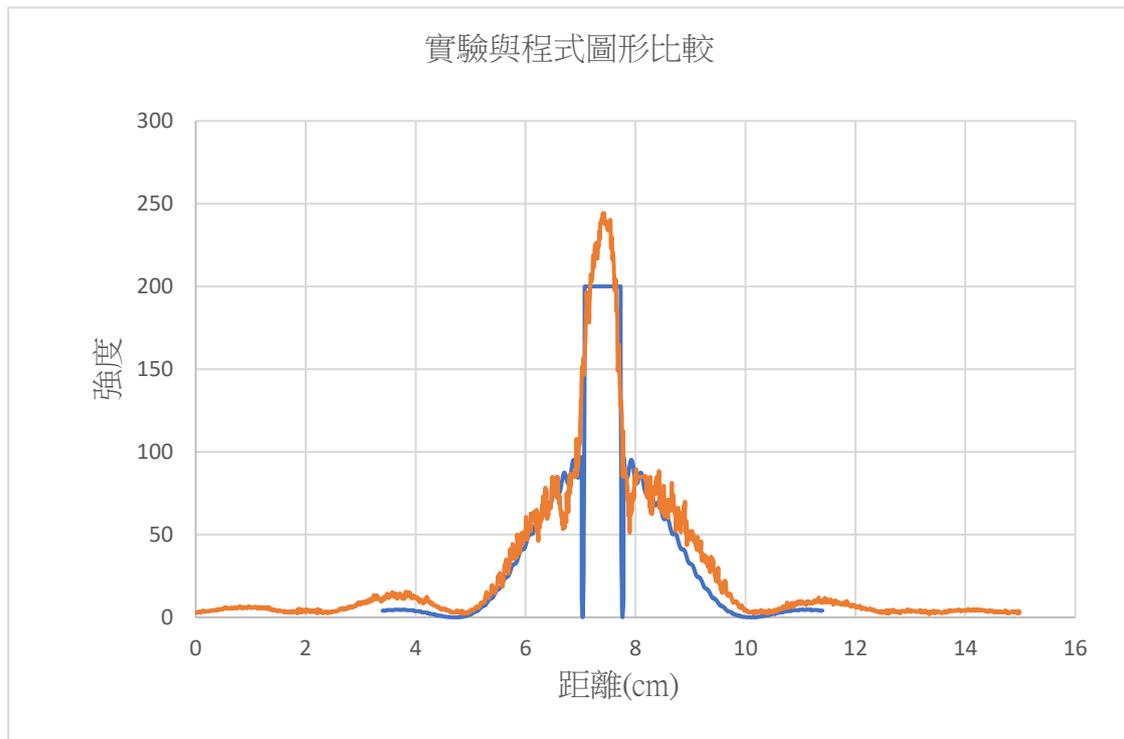
圖十四:雷射照射距離雷射 160 公分的細線，使用照相機拍攝屏幕上的繞射圖形



圖十五:image j 分析圖十四的強度圖

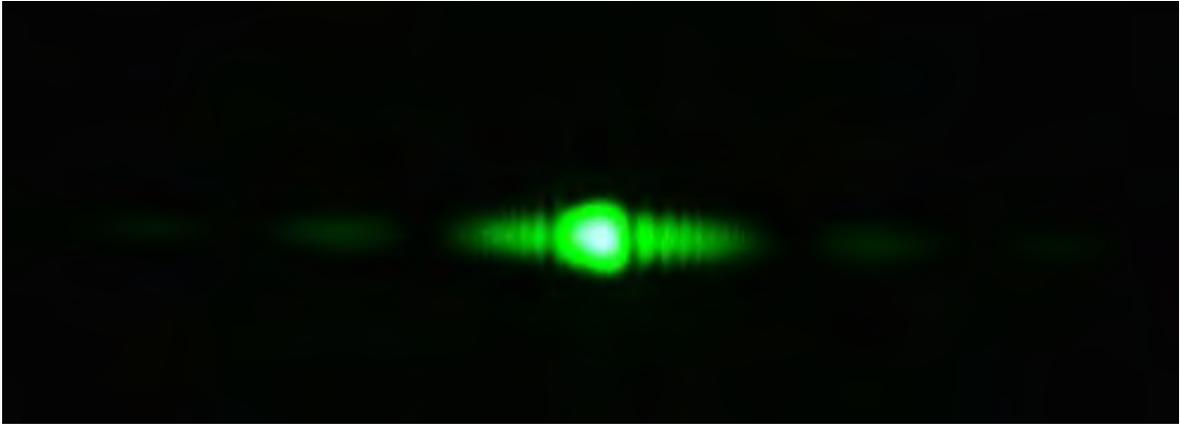


圖十六:程式模擬出的實驗圖

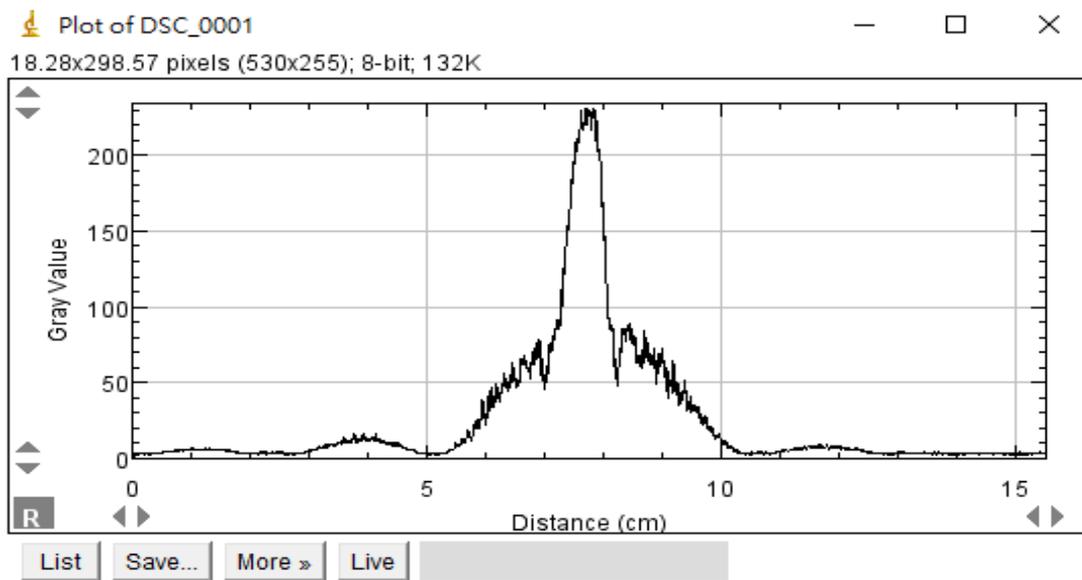


圖十七:強度圖的比較，其中橙色資料為實驗的強度圖，而藍色資料為程式模擬實驗強度圖。

2. 我們用雷射照射距離雷射 260 公分的細線，使用照相機拍攝實驗圖片，如圖十八，並使用 image j 分析得到強度圖，如圖十九。之後我們使用同學所寫的程式模擬實驗，如圖二十，並進行實驗與程式模擬強度的比較，如圖二十一。



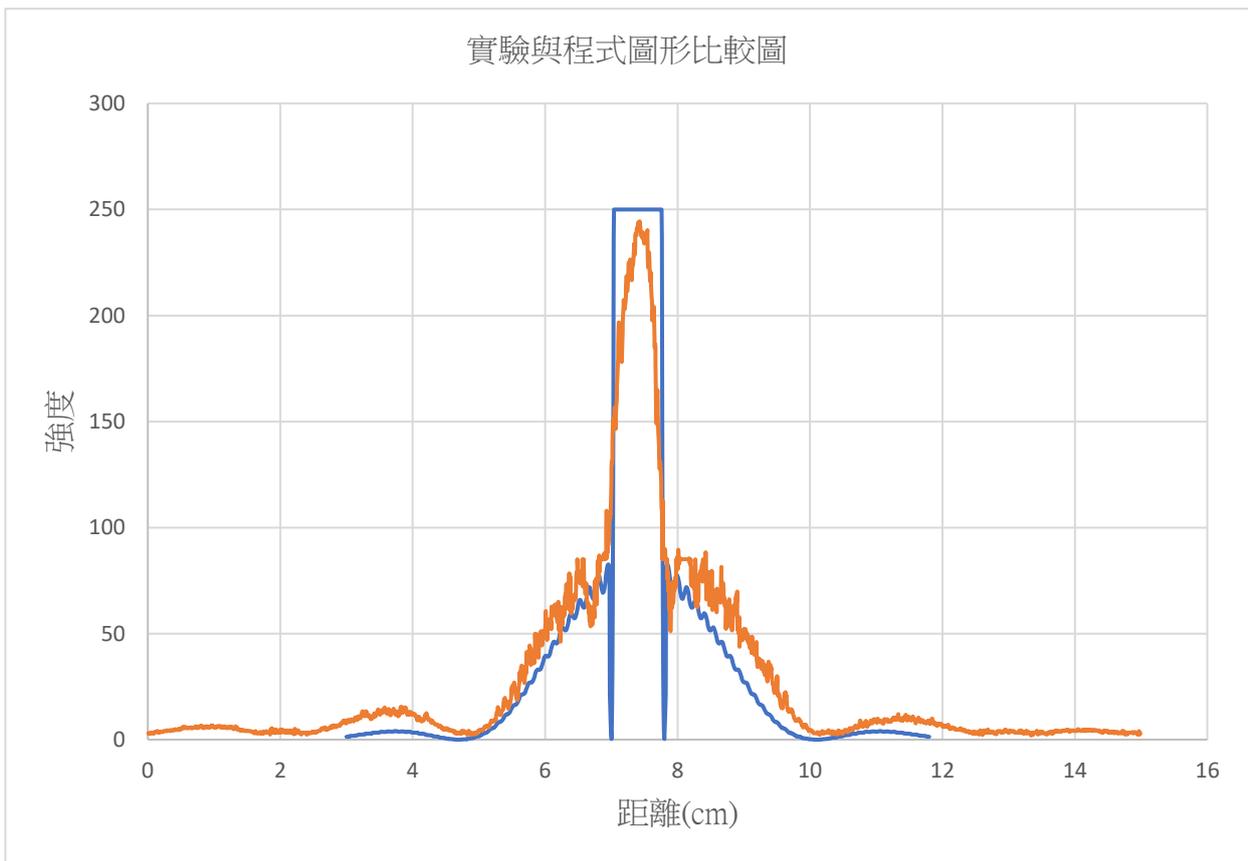
圖十八: 雷射照射距離雷射 260 公分的細線，使用照相機拍攝屏幕上的繞射圖形



圖十九: image j 分析圖十八的強度圖。



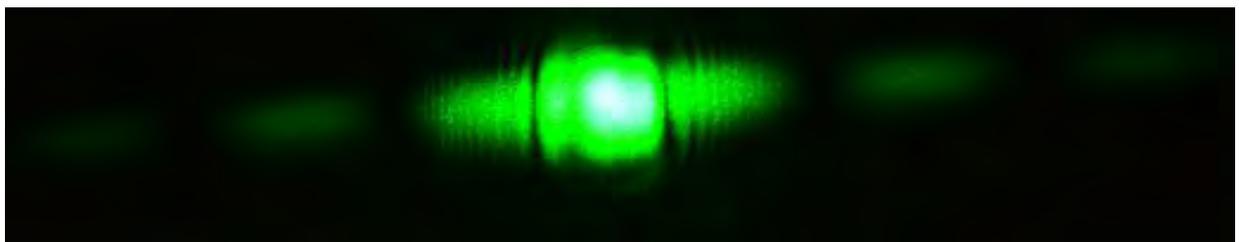
圖二十:程式模擬出的實驗圖



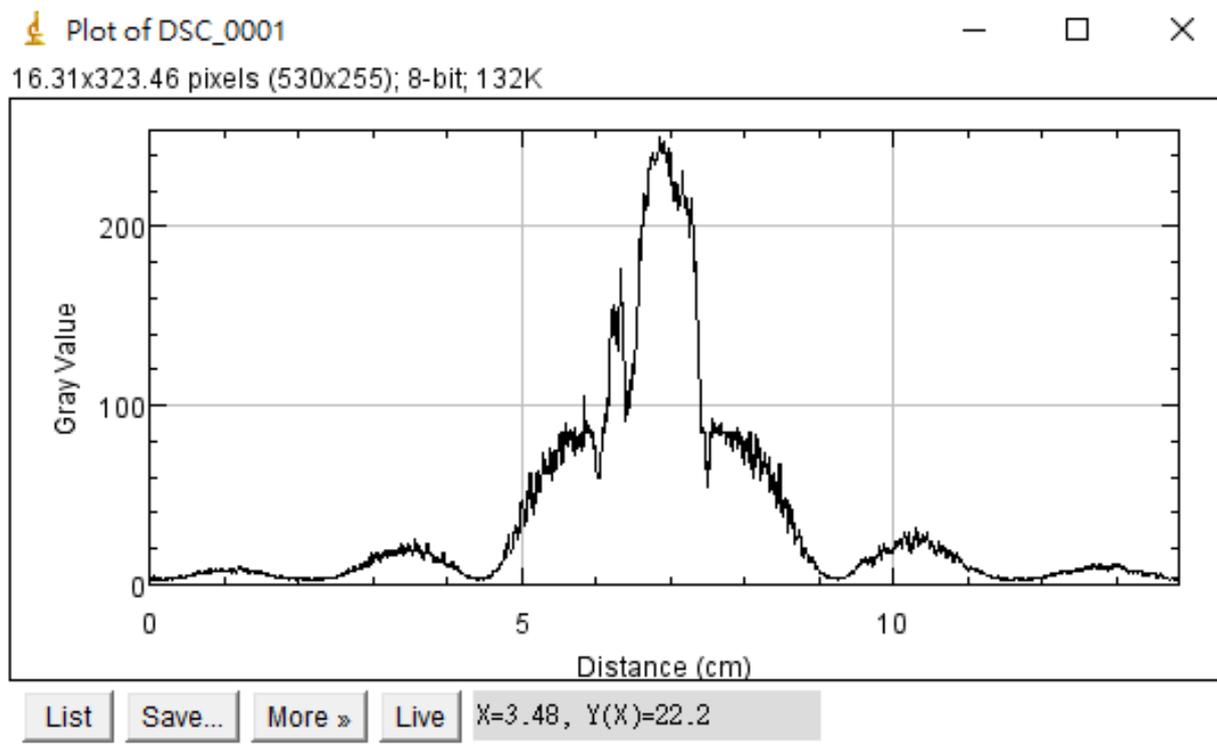
圖二十一:強度圖的比較，其中橙色資料為實驗強度圖，而藍色資料為程式模擬強度圖。

三、 實驗三: 討論不同距離下的細線繞射圖形

(一) 當 $d_1=300$ 公分，我們改變不同細線到屏幕的距離(d_2)，利用 image j 量出第一亮帶內的小暗紋間距，並用 excel 做出迴歸直線，如圖二十四。圖中可以清楚看到第一亮帶內的暗紋間距與 d_2 呈線性關係，由此可知道雙狹縫的公式在這裡是適用的。



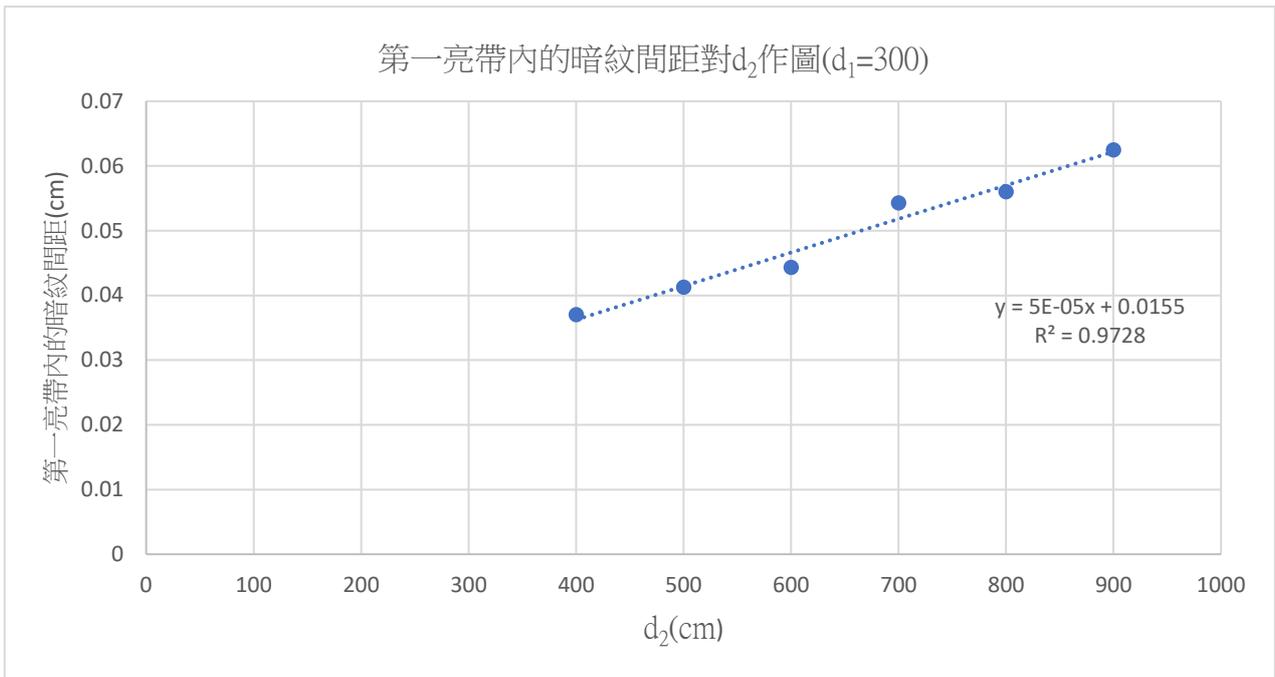
圖二十二:實驗三中細線繞射實驗圖。



圖二十三:使用 image j 分析的實驗強度圖。

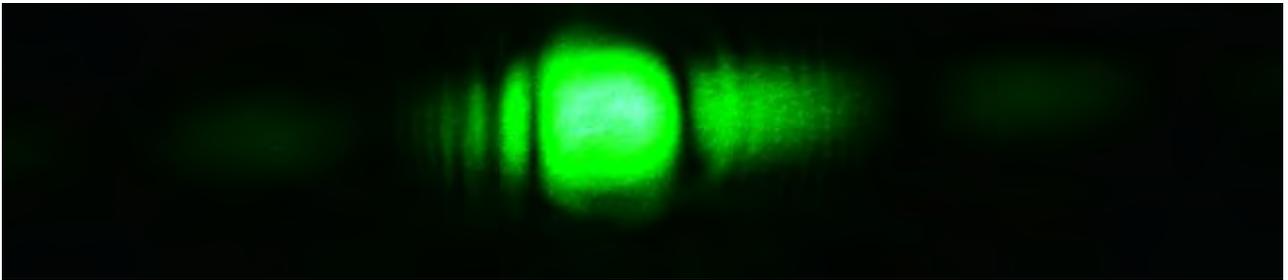
表三:實驗數據

$d_s(\text{cm})$	第一亮帶內的暗紋間距 (cm)	等效雙狹縫間距(cm)
400	0.037	0.575
500	0.041	0.644
600	0.044	0.721
700	0.054	0.686
800	0.056	0.760
900	0.062	0.766

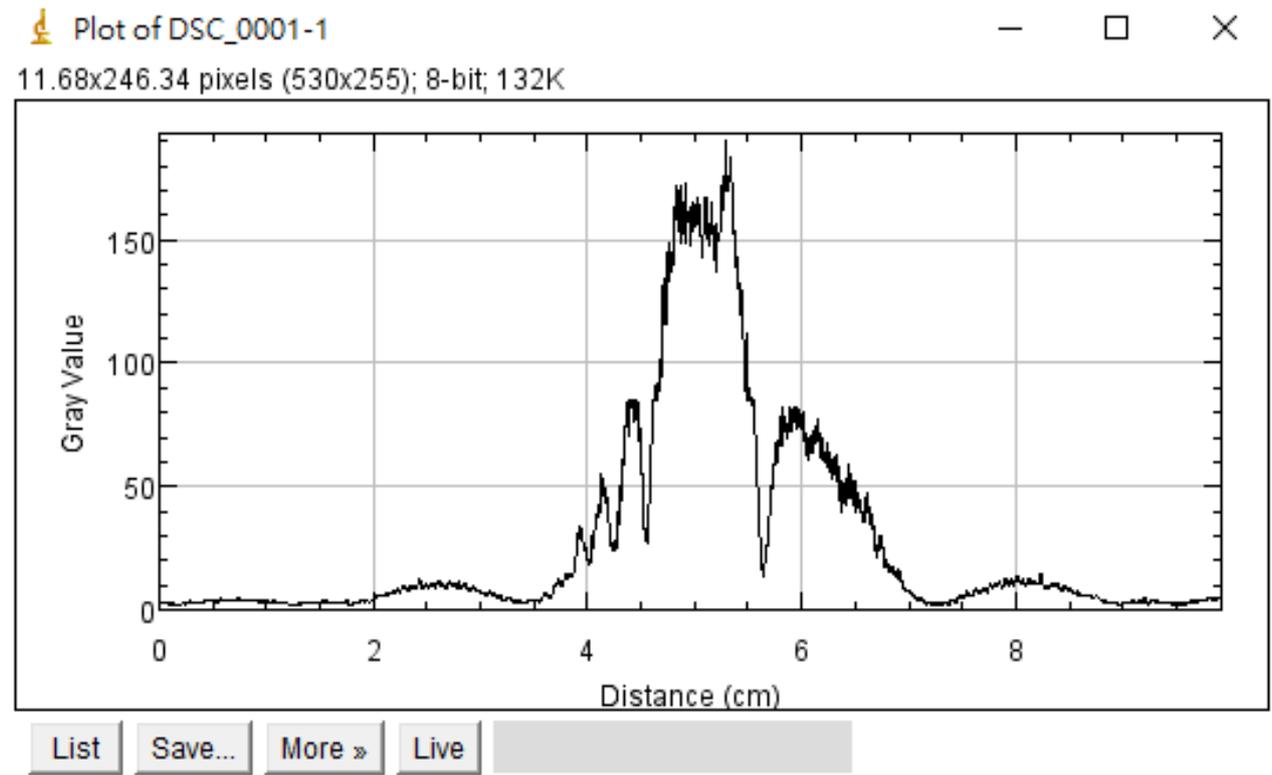


圖二十四:第一亮帶內的暗紋間距對 d_2 作圖

(二) $d_1=200$ 公分，我們改變不同細線到屏幕的距離(d_2)，利用 image j 量出第一亮帶內的小暗紋間距，並用 excel 做出回歸直線，如圖二十七。圖中可以清楚看到第一亮帶內的暗紋間距與 d_2 呈線性關係，由此可知道雙狹縫的公式在這裡是適用的。



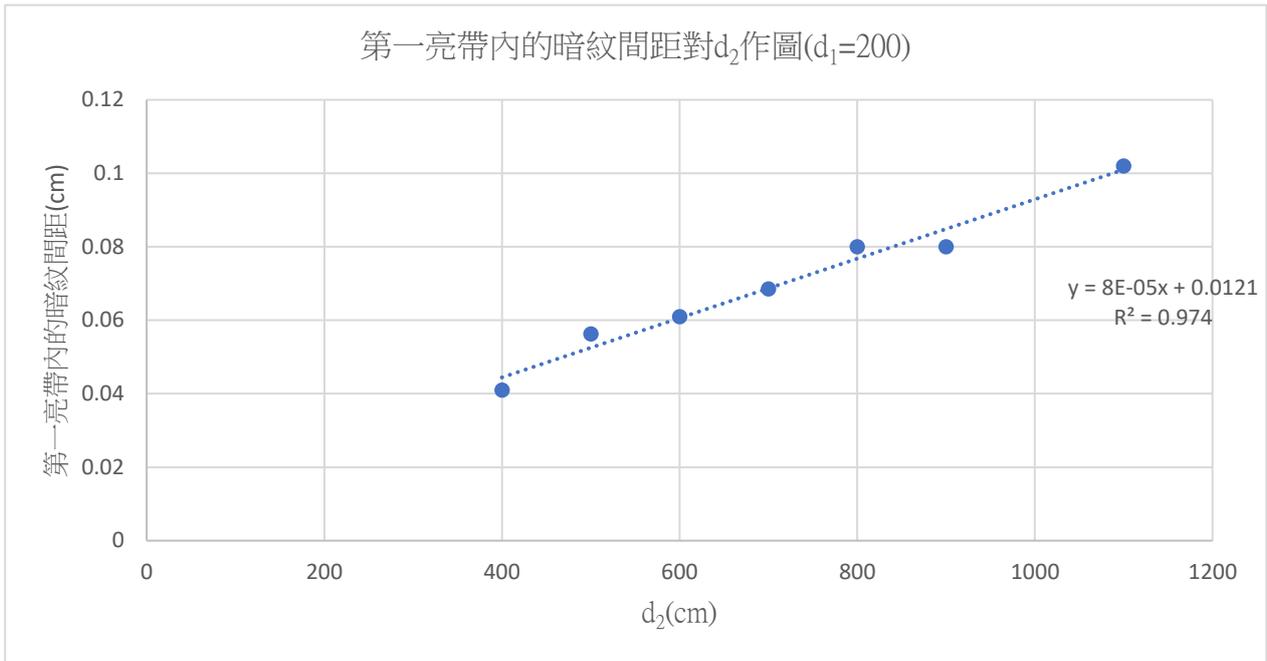
圖二十五: $d_1=200$ 公分， $d_2=700$ 公分的細線繞射圖



圖二十六:使用 image j 分析的實驗強度圖。

表三:實驗數據

$d_2(\text{cm})$	第一亮帶內的暗紋間距(cm)	等效雙狹縫間距(cm)
400	0.041	0.519
500	0.056	0.472
600	0.061	0.523
700	0.068	0.543
800	0.080	0.532
900	0.080	0.588



圖二十七: 第一亮帶內的暗紋間距對 d_2 作圖

陸、 討論

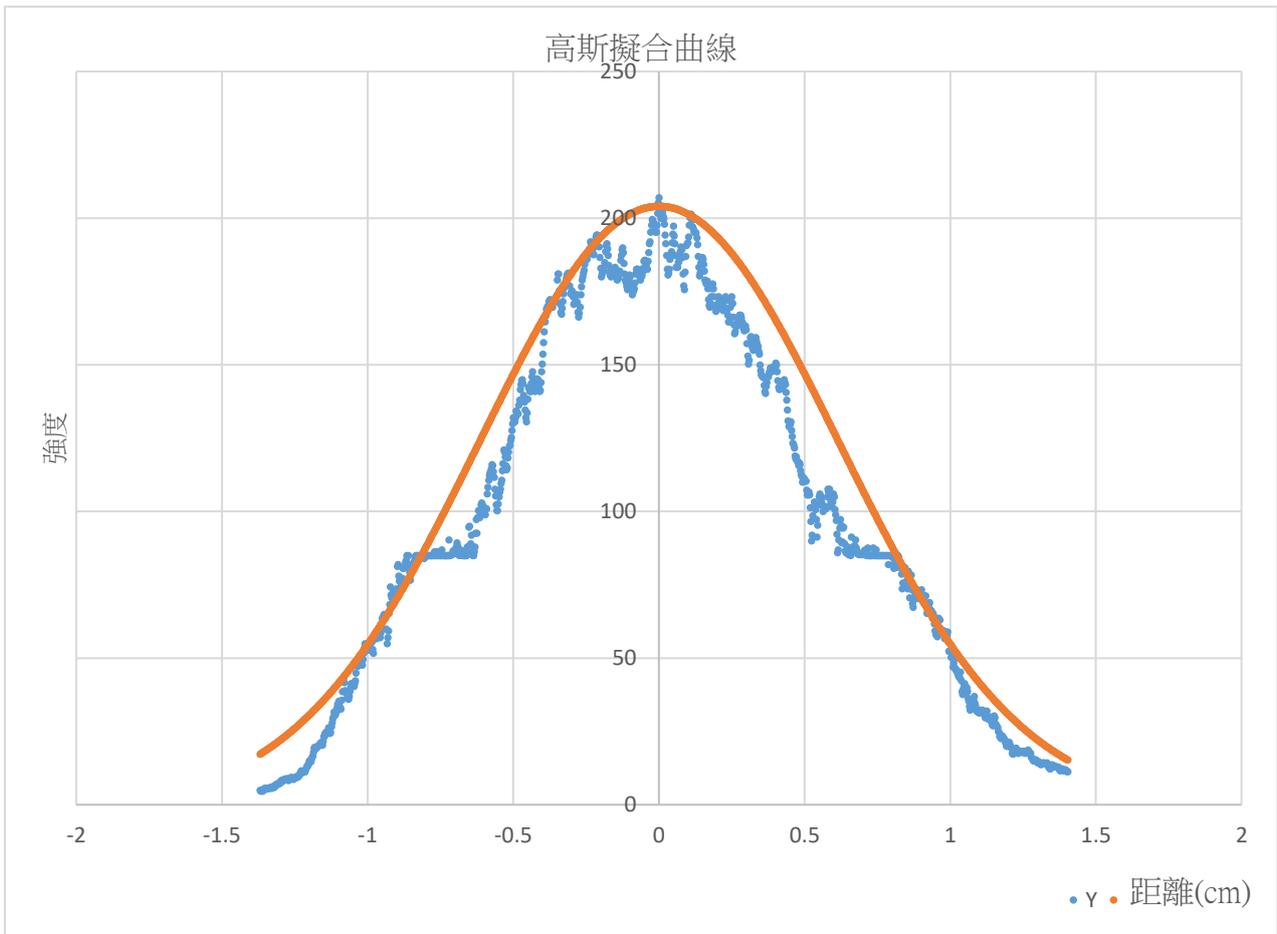
一、利用細線繞射測量綠光雷射波長

由表一可得知綠雷射的平均波長為 532.9 nm，與公認值 532 nm 相差甚小，實驗誤差為 0.17%，所以我們以後假如要測定雷射光波長，即使沒有單狹縫或雙狹縫，只要身邊有細線，像是漆包線或頭髮，重複我們的實驗，利用單狹縫繞射的公式，也能求出雷射光的波長。

二、討論細線繞射圖形中中央亮帶內的暗線及成因

(一) 我們所使用的屏幕為黑色屏幕，這是因為黑色的屏幕相比其他顏色的屏幕更不容易反射光線，而能減少實驗誤差。

(二) 由圖二十八可得知我們所使用的綠光雷射，它的強度分布圖跟高斯曲線接近，所以我們所使用的雷射不為平面光源而為高斯光源，與參考文獻的內容吻合。



圖二十八:高斯擬合曲線

- (三) 由圖十二和圖十三可得知單狹縫繞射圖形和細線繞射圖形在 image j 下分析是非常接近的，這也跟巴比涅原理中提到的內容是吻合的。
- (四) 我們可以從圖九清楚的看出來中央亮帶內的暗線，而我們的實驗從 image j 的強度分析圖也能看出來中央亮帶旁有強度掉下來的趨勢，如圖十，而造成這個現象的原因就是因為雷射光源是高斯分布的關係，而將高斯分布和細線繞射強度圖疊在一起時，會發生相消的情況，導致中央亮帶內暗線的產生。
- (五) 我們的實驗結果和同學的程式模擬結果吻合，如圖十七和圖二十一，可以清楚看到中央亮帶旁暗線的位置接近，而且從強度比較圖內也能看到中央亮帶內有鋸齒狀的下降，這代表我們實驗中中央亮帶內的小暗紋，在理論模擬也會出現。

三、討論不同距離下的細線繞射圖形

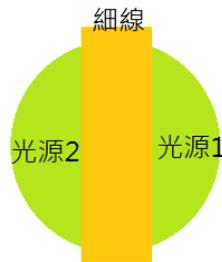
(一) 由圖二十四和圖二十七可以知道第一亮帶內的小暗紋間距和細線到屏幕的距離呈線性關係，這代表我們的雙狹縫公式在這裡也是適用的。

(二) 我們用雙狹縫干涉公式推算出的等效雙狹縫間距，如表五。且發現推算出的等效雙狹縫間距都大於細線寬度並且小於光源寬度。

表五: 不同 d_1 下，實驗所得到的平均等效雙狹縫間距及光源直徑

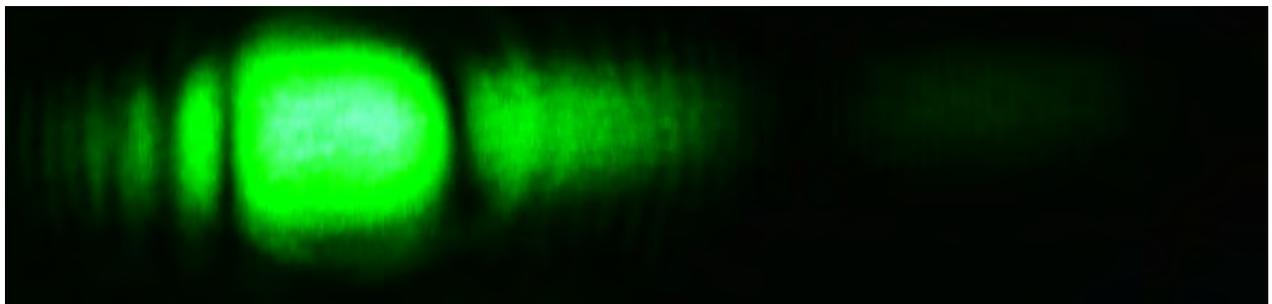
	細線線徑	平均等效雙狹縫間距	光源直徑
$d_1=200$ 公分	0.019 公分	0.53 公分	0.77 公分
$d_1=300$ 公分	0.019 公分	0.69 公分	0.83 公分

(三) 因此我們覺得造成小暗紋產生的原因類似雙狹縫干涉，因為在細線繞射條紋內有類似雙狹縫干涉的條紋，所以我們推論出一個模型。圓形的雷射光經過細線時被分開成兩個光源，分別為光源 1 和光源 2，而這兩個光源進行干涉，才會造成中央亮帶和第一亮帶內的小暗紋，如圖二十九。



圖二十九:細線繞射示意圖

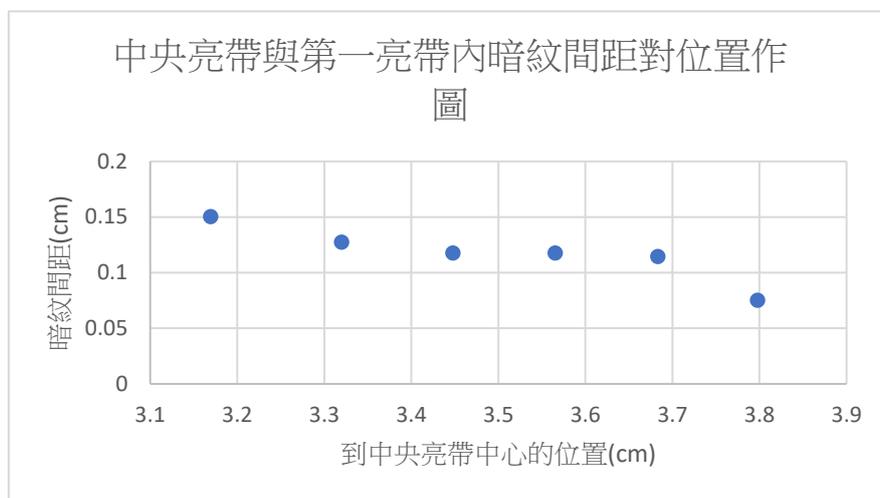
(四) 由實驗三可以得知，不管 d_1 的大小是多少，中央亮帶內的小暗紋都會比第一亮帶內的小暗紋還要大，如圖三十。



圖三十:中央亮帶與第一亮帶內小暗紋的實驗圖

(五) 因為中央亮帶內的小暗紋間距和第一亮帶內小暗紋間距大小不一樣，所以我們將亮帶內的小暗紋間距與屏幕上的位置作圖，得到圖三十一，我們可以發現，亮帶內小

暗紋的間距隨著到中央亮帶的距離減少而有下降的趨勢，因此推論細線繞射實驗中，中央亮帶與第一亮帶內的小暗紋並不完全可以視為雙狹縫干涉，只有當位置接近，小暗紋間距相近時，才可適用於雙狹縫干涉。



圖三十一:中央亮帶與第一亮帶內暗紋間距對位置作圖

柒、結論

- 一、我們利用細線繞射測量綠光雷射的波長 $\lambda = 532.9 \text{ nm}$ ，與公認值 532 nm 的誤差約為 0.17% 。這證實了細線繞射也能產生單狹縫繞射的條紋，而且我們能用細線取代單狹縫或雙狹縫來測量雷射光的波長。
- 二、我們證實了雷射光源遵守高斯分佈，以及細線繞射的繞射條紋和單狹縫繞射條紋相同，此一現象遵守巴比涅原理，並發現利用程式模擬的結果與實驗結果大致吻合。
- 三、將細線稍微遠離光源做細線繞射實驗，會在亮帶內看到小暗紋，而這些小暗紋可以視為細線旁兩個光源的干涉結果，但無法完全視為雙狹縫干涉處理。

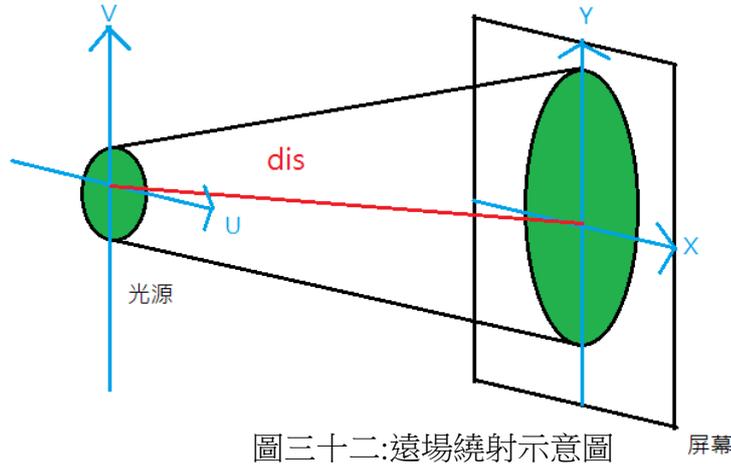
捌、參考資料

- 一、劉威志、徐國誠(2002)·雷射對細線繞射的探討·載於科學教育月刊第 246 期(45-48 頁)
- 二、Eugene Hecht(2002). Optics(4th Edition). Diffraction(Eds), Babinet's Principle(pp. 508-509). New York: Addison-Wesley.
- 三、David Halliday、Robert Resnick、Jearl Walker(2015) ·物理(下) 第 35-36 章 ·台北市：全華。

附錄

一、 理論:

要利用傅立葉轉換來計算 2D 平面的遠場繞射結果。對於屏幕上每一點(x, y)的強度利用 $E(x, y)$ 表示，光源上每一點(u, v)的強度以 $E(u, v)$ 表示。



圖三十二:遠場繞射示意圖

計算方法: $E(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} E(u, v) e^{i\phi} dvdu$ ①式

其中 $\phi = 2\pi \frac{\sqrt{(x-u)^2 + (y-v)^2 + dis^2}}{\lambda} = 2\pi \frac{\sqrt{x^2 + y^2 + dis^2}}{\lambda} \left(1 - \frac{ux + vy}{\sqrt{x^2 + y^2 + dis^2}}\right)$ ②式

令 $r = \sqrt{x^2 + y^2 + dis^2}$ 帶回②式

所以 $\phi = 2\pi \frac{r}{\lambda} - 2\pi \frac{ux + vy}{r}$

帶回①式

$$E(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} E(u, v) e^{2\pi i \frac{r}{\lambda} - 2\pi i \frac{ux + vy}{r}} dvdu$$

因為 $dis^2 \gg x^2 + y^2$

所以 r 幾乎為定值

所以 $E(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} E(u, v) e^{-2\pi i \frac{ux + vy}{r}} dvdu$

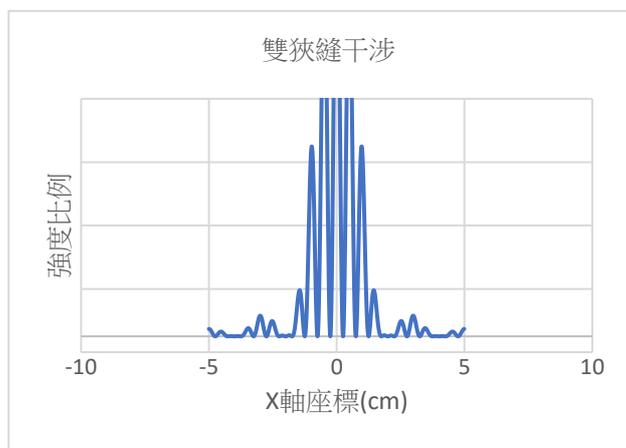
其中 $E(x, y)$ 的實部平方就為點(x, y)的強度，如果要計算不同的遮蔽情形，只需要更改 $E(u, v)$ 就可以計算得到，如果點(u, v)被遮蔽， $E(u, v)$ 就定為 0，而未被遮蔽就不變，這樣利用同一程式計算不同的遮蔽情形只需更改 $E(u, v)$ 就可以計算。

二、 驗證:

利用平面光源打雙狹縫干涉，圓孔繞射，方孔繞射，來驗證程式沒有問題。

雙狹縫干涉:

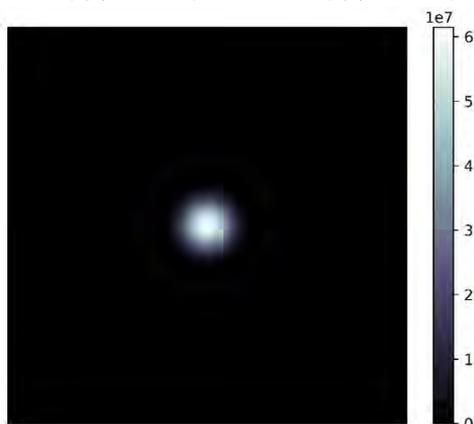
以狹縫寬為 0.5 mm，狹縫間距 2 mm，光源波長 500 nm，屏幕距離 20 m，可經由理論計算得到中央亮帶為 $\frac{2*2000*0.00005}{0.05} = 4(\text{cm})$ ，第一亮帶寬度為 $\frac{2000*0.00005}{0.05} = 2(\text{cm})$ ，每一個小亮紋的寬度為 $\frac{2000*0.00005}{0.2} = 0.5(\text{cm})$ ，可以看到一個小亮紋的寬度為 0.5 cm，中央亮帶的寬度為 4 cm，第一亮紋的寬度為 2 cm，由此可證由電腦計算的結果與理論計算結果相同。



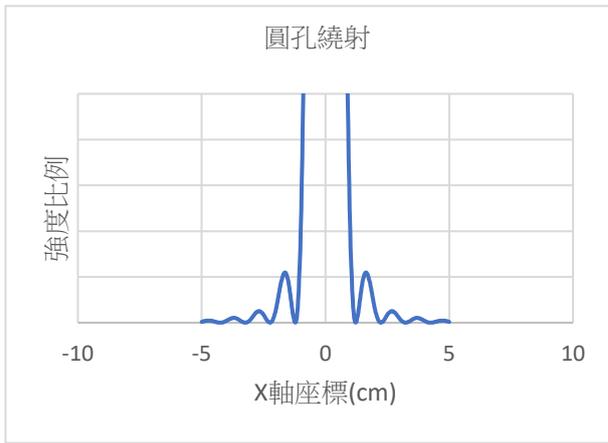
圖三十三:雙狹縫干涉程式模擬圖

三、 圓孔繞射:

以圓孔直徑 1 mm，光源波長 500 nm，屏幕距離 20 m，經由理論計算可得到第一暗帶為 $\frac{1.22*2000*0.00005}{0.1} = 1.22(\text{cm})$ ，經由電腦計算可得到第一暗帶的位置為 1.22 cm，因為電腦計算的結果與理論計算的結果相同，由此可證電腦計算是正確的。



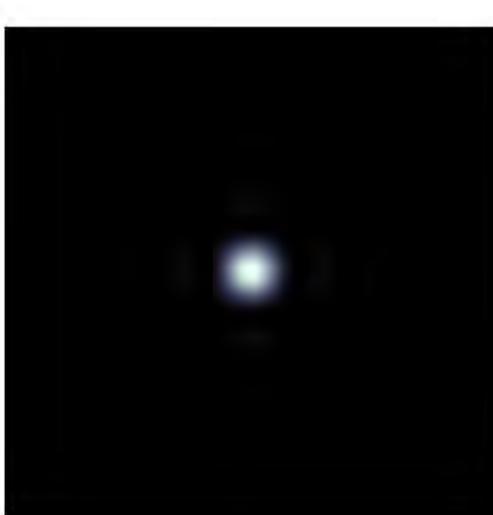
圖三十四:圓孔繞射程式實驗模擬圖



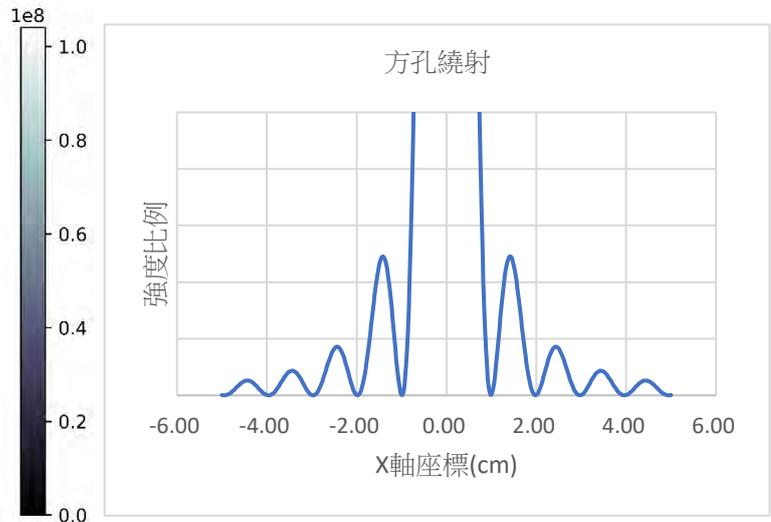
圖三十五:圓孔繞射程式強度模擬圖

四、方孔繞射:

以方孔邊長為 1 mm，光源波長 500 nm，屏幕距離 20 m，經由理論計算可得到第一暗帶位置為 $\frac{2000*0.00005}{0.1} = 1(\text{cm})$ ，第二暗帶的位置為 $\frac{2*2000*0.00005}{0.1} = 2(\text{cm})$ ，利用電腦計算可得到第一暗帶的位置為 1 cm，第二暗帶的位置為 2 cm，因為理論計算與電腦計算的結果相同，由此可證電腦計算是正確的。



圖三十六:方孔繞射程式實驗模擬圖



圖三十七:方孔繞射程式強度模擬圖

因為雙狹縫干涉，方孔繞射與圓孔繞射電腦計算與理論計算的結果相同，所以電腦計算沒有問題。

程式碼:

```

#include <bits/stdc++.h>          #include <fstream>
#pragma GCC optimize "-O3"      #pragma GCC optimize ("unroll-loops")
#pragma GCC target ("avx")      using namespace std;
const double _pi=3.1415926535897932,_e=2.718281828459045;
double maxx,R,colx,row,col,dis,length,now[5000][5000],radius,uu[2000],ee[2000][2000],xx[5000],yy
[5000];int aaa,bbb,rown,coln,radiusn; /* */ int main(){string s,ss; cin>>s;
    ofstream out0("data"+s+"-0.txt");    ofstream out11("data"+s+"-1.txt");
    ofstream out21("data"+s+"-1.py");    ofstream out12("data"+s+"-5.txt");
    ofstream out22("data"+s+"-5.py");    ofstream out13("data"+s+"-10.txt");
    ofstream out23("data"+s+"-10.py");    ofstream out14("data"+s+"-25.txt");
    ofstream out24("data"+s+"-25.py");    ofstream out15("data"+s+"-50.txt");
    ofstream out25("data"+s+"-50.py");    ofstream out16("data"+s+"-75.txt");
    ofstream out26("data"+s+"-75.py");    ofstream out17("data"+s+"-100.txt");
    ofstream out27("data"+s+"-100.py");  cout<<"輸入屏幕寬度:";
    cin>>row;    cout<<"輸入屏幕寬度格數:";    cin>>rown;
    cout<<"輸入屏幕高度:";    cin>>col;    cout<<"輸入屏幕高度格數:";
    cin>>coln;    cout<<"輸入屏幕距離:";    cin>>dis;    cout<<"輸入波長:";
    cin>>length;    cout<<"輸入光源半徑:";    cin>>radius;    cout<<"輸入光源半徑格數:";
    cin>>radiusn;    cout<<"輸入障礙物寬度:";    cin>>colx;
    cout<<"預計運算時間:"<<rown*coln*radiusn*radiusn/65000/4<<endl;
    system("pause");    double time_start=clock();
    out0<<","<<row<<","<<rown<<","<<col<<","<<coln<<","<<radius<<","<<radiusn<<","<<dis
<<","<<length<<"\n";
    out11<<","<<row<<","<<rown<<","<<col<<","<<coln<<","<<radius<<","<<radiusn<<","<<di
s<<","<<length<<"\n";

```

```

out12<<","<<row<<","<<rown<<","<<col<<","<<coln<<","<<radius<<","<<radiusn<<","<<dis
s<<","<<length<<"\n";
out13<<","<<row<<","<<rown<<","<<col<<","<<coln<<","<<radius<<","<<radiusn<<","<<dis
s<<","<<length<<"\n";
out14<<","<<row<<","<<rown<<","<<col<<","<<coln<<","<<radius<<","<<radiusn<<","<<dis
s<<","<<length<<"\n";
out15<<","<<row<<","<<rown<<","<<col<<","<<coln<<","<<radius<<","<<radiusn<<","<<dis
s<<","<<length<<"\n";
out16<<","<<row<<","<<rown<<","<<col<<","<<coln<<","<<radius<<","<<radiusn<<","<<dis
s<<","<<length<<"\n";
out17<<","<<row<<","<<rown<<","<<col<<","<<coln<<","<<radius<<","<<radiusn<<","<<dis
s<<","<<length<<"\n"; aaa=bbb=0;for(int x=0;x<=rown;x++){    aaa++;
xx[x]=(double)x/rown*row-row/2;    out11<<","<<xx[x];    out12<<","<<xx[x];
out13<<","<<xx[x];    out14<<","<<xx[x];    out15<<","<<xx[x];    out16<<","<<xx[x];
out17<<","<<xx[x];    }
for(int y=0;y<=coln;y++){    bbb++;    yy[y]=(double)y/coln*col-col/2; }
for(int u=0;u<=radiusn*4;u++){    uu[u]=(double)u/radiusn*radius-radius*2; out0<<","<<uu[u];}
colx/=2;    out11<<"\n";    for(int v=0;v<=radiusn*4;v++){    out0<<uu[v];
for(int u=0;u<=radiusn*4;u++){    if(uu[u]<=colx&&uu[u]>=-colx){    ee[u][v]=0; }else{
ee[u][v]=pow(_e,-2*(uu[u]*uu[u]+uu[v]*uu[v])/radius/radius); }    out0<<","<<ee[u][v]; }
out0<<"\n"; }    cout<<s<<"\n\n";

out21<<"import matplotlib.pyplot as plt;\nimport numpy as np;\nprint(\"1\");\na=np.array([";
out22<<"import matplotlib.pyplot as plt;\nimport numpy as np;\nprint(\"1\");\na=np.array([";
out23<<"import matplotlib.pyplot as plt;\nimport numpy as np;\nprint(\"1\");\na=np.array([";
out24<<"import matplotlib.pyplot as plt;\nimport numpy as np;\nprint(\"1\");\na=np.array([";
out25<<"import matplotlib.pyplot as plt;\nimport numpy as np;\nprint(\"1\");\na=np.array([";

```

```

out26<<"import matplotlib.pyplot as plt;\nimport numpy as np;\nprint("\n1\n");\na=np.array([";
out27<<"import matplotlib.pyplot as plt;\nimport numpy as np;\nprint("\n1\n");\na=np.array([";
for(int y=0;y<=coln;y++){ cout<<y<<"\n"; for(int x=0;x<=rown;x++){ now[x][y]=0;
R=sqrt((double)dis*x*x+y*y);for(intv=0;v<=radiusn*4;v++){for(intu=0;u<=radiusn*4;u++){
now[x][y]+=ee[u][v]*cos(-1*2*(uu[u]*xx[x]+uu[v]*yy[y])*_pi/R/length); } }
now[x][y]=now[x][y]*now[x][y]; maxx=max(maxx,now[x][y]); } }
for(int y=0;y<=coln;y++){ out11<<yy[y]; out12<<yy[y]; out13<<yy[y]; out14<<yy[y];
out15<<yy[y]; out16<<yy[y]; out17<<yy[y]; for(int x=0;x<=rown;x++){
if(now[x][y]/maxx*1>1){ out11<<","<<1; out21<<1<<","; }else{
out11<<","<<now[x][y]/maxx*1; out21<<now[x][y]/maxx*1<<","; }
if(now[x][y]/maxx*5>1){ out12<<","<<1; out22<<1<<","; }else{
out12<<","<<now[x][y]/maxx*5; out22<<now[x][y]/maxx*5<<","; }
if(now[x][y]/maxx*10>1){out13<<","<<1;out23<<1<<","; }else{ out13<<","<<now[x]
[y]/maxx*10; out23<<now[x][y]/maxx*10<<","; }
if(now[x][y]/maxx*25>1){ out14<<","<<1; out24<<1<<","; }else{
out14<<","<<now[x][y]/maxx*25; out24<<now[x][y]/maxx*25<<","; }
if(now[x][y]/maxx*50>1){ out15<<","<<1; out25<<1<<",";
}else{ out15<<","<<now[x][y]/maxx*50; out25<<now[x][y]/maxx*50<<","; }
if(now[x][y]/maxx*75>1){ out16<<","<<1; out26<<1<<","; }else{
out16<<","<<now[x][y]/maxx*75; out26<<now[x][y]/maxx*75<<","; }
if(now[x][y]/maxx*100.0>1){ out17<<","<<1; out27<<1<<",";
}else{ out17<<","<<now[x][y]/maxx*100; out27<<now[x][y]/maxx*100<<","; } }
out11<<"\n"; out12<<"\n"; out13<<"\n"; out14<<"\n"; out15<<"\n"; out16<<"\n";
out17<<"\n"; }out21<<").reshape("<<bbb<<","<<aaa<<");\nprint("\n2\n");\nplt.imshow(a,interp
olation='nearest',cmap='bone',origin='upper');\nplt.colorbar();\nprint("\n3\n");\nplt.xticks();\nplt.

```

```

yticks(0);\nplt.savefig(\"square(\"<<row<<\",\"<<rown<<\",\"<<col<<\",\"<<coln<<\",\"<<radius<<\"
,\"<<radiusn<<\",\"<<colx<<\")-\"<<s<<-1-1.png\",dpi=600,format=\"png\");\nprint(\"4\");";
out22<<)].reshape(\"<<bbb<<\",\"<<aaa<<\");\nprint(\"2\");\nplt.imshow(a,interpolation='nearest',
cmap='bone',origin='upper');\nplt.colorbar();\nprint(\"3\");\nplt.xticks(0);\nplt.yticks(0);\nplt.sav
efig(\"square(\"<<row<<\",\"<<rown<<\",\"<<col<<\",\"<<coln<<\",\"<<radius<<\",\"<<radiusn<<\",\"<<
colx<<\")-\"<<s<<-1-5.png\",dpi=600,format=\"png\");\nprint(\"4\");";
out23<<)].reshape(\"<<bbb<<\",\"<<aaa<<\");\nprint(\"2\");\nplt.imshow(a,interpolation='nearest',
cmap='bone',origin='upper');\nplt.colorbar();\nprint(\"3\");\nplt.xticks(0);\nplt.yticks(0);\nplt.sav
efig(\"square(\"<<row<<\",\"<<rown<<\",\"<<col<<\",\"<<coln<<\",\"<<radius<<\",\"<<radiusn<<\",\"<<
colx<<\")-\"<<s<<-1-10.png\",dpi=600,format=\"png\");\nprint(\"4\");";
out24<<)].reshape(\"<<bbb<<\",\"<<aaa<<\");\nprint(\"2\");\nplt.imshow(a,interpolation='nearest',
cmap='bone',origin='upper');\nplt.colorbar();\nprint(\"3\");\nplt.xticks(0);\nplt.yticks(0);\nplt.sav
efig(\"square(\"<<row<<\",\"<<rown<<\",\"<<col<<\",\"<<coln<<\",\"<<radius<<\",\"<<radiusn<<\",\"<<
colx<<\")-\"<<s<<-1-25.png\",dpi=600,format=\"png\");\nprint(\"4\");";
out25<<)].reshape(\"<<bbb<<\",\"<<aaa<<\");\nprint(\"2\");\nplt.imshow(a,interpolation='nearest',
cmap='bone',origin='upper');\nplt.colorbar();\nprint(\"3\");\nplt.xticks(0);\nplt.yticks(0);\nplt.sav
efig(\"square(\"<<row<<\",\"<<rown<<\",\"<<col<<\",\"<<coln<<\",\"<<radius<<\",\"<<radiusn<<\",\"<<
colx<<\")-\"<<s<<-1-50.png\",dpi=600,format=\"png\");\nprint(\"4\");";
out26<<)].reshape(\"<<bbb<<\",\"<<aaa<<\");\nprint(\"2\");\nplt.imshow(a,interpolation='nearest',
cmap='bone',origin='upper');\nplt.colorbar();\nprint(\"3\");\nplt.xticks(0);\nplt.yticks(0);\nplt.sav
efig(\"square(\"<<row<<\",\"<<rown<<\",\"<<col<<\",\"<<coln<<\",\"<<radius<<\",\"<<radiusn<<\",\"<<
colx<<\")-\"<<s<<-1-75.png\",dpi=600,format=\"png\");\nprint(\"4\");";
out27<<)].reshape(\"<<bbb<<\",\"<<aaa<<\");\nprint(\"2\");\nplt.imshow(a,interpolation='nearest',
cmap='bone',origin='upper');\nplt.colorbar();\nprint(\"3\");\nplt.xticks(0);\nplt.yticks(0);\nplt.sav
efig(\"square(\"<<row<<\",\"<<rown<<\",\"<<col<<\",\"<<coln<<\",\"<<radius<<\",\"<<radiusn<<\",\"<<
colx<<\")-\"<<s<<-1-100.png\",dpi=600,format=\"png\");\nprint(\"4\");";

```

```
out11<<(double)clock()-time_start<<"\n"; out12<<(double)clock()-time_start<<"\n";  
out13<<(double)clock()-time_start<<"\n"; out14<<(double)clock()-time_start<<"\n";  
out15<<(double)clock()-time_start<<"\n"; out16<<(double)clock()-time_start<<"\n";  
out17<<(double)clock()-time_start<<"\n"; cout<<(double)clock()-time_start<<"\n";  
system("pause"); return 0; }
```

【評語】 051812

本作品以雷射之繞射束來探討細線繞射結果，實驗結果能完全符合其推論的公式，在觀測雷射光的傳遞時，能利用水霧來呈現是一個不錯的想法。本作品能從實驗設計，數據的分析與討論都有完整表達。本身的創新性和新穎性可以再加強，雷射的高斯光特性在實驗上並不會改變物理結果，不需特別強調。

摘要

本實驗主要探討科學教育月刊第246期中雷射光對細線繞射的現象，論文中分析了造成細線繞射時中央亮帶旁暗線的成因，但在實驗的部分著墨較少。因此本科展主要進行細線繞射的實驗，並利用C++程式語言進行理論模擬，最後進行理論模擬與實驗的比較，研究不同雷射光到細線的距離以及不同細線到屏幕的距離對繞射圖形的變化，並且解釋細線繞射中，中央亮帶及第一亮帶內細小暗紋的成因，提出相關解釋說明。經實驗發現，造成此小暗紋的原因是細線旁兩個光源的干涉，而此干涉類似於雙狹縫干涉，但仍與雙狹縫干涉有差異。

壹、研究動機

在物理專題研究課程中，老師介紹了繞射實驗以及細線繞射，在細線繞射的實驗中，按照理論分析應與單狹縫的繞射條紋相同，但實際進行實驗後卻發現，在中央亮帶內發現了不該出現的暗線，因此對其產生了好奇，故我們上網搜尋了有關細線繞射的文獻，但發現文章中主要進行理論計算與模擬，對於實驗的部分則較少著墨，故我們對細線繞射著手進行研究。圖一為細線繞射的示意圖。



圖一:細線繞射時的光束圖

貳、研究目的

- 一、利用細線繞射測量綠光雷射波長。
- 二、觀察細線繞射圖形中中央亮帶內的暗線及成因。
 - (一)利用C++進行理論模擬。
 - (二)拍攝細線繞射的條紋，並利用ImageJ進行亮度分析。
 - (三)比較理論模擬與實驗圖形。
- 三、觀察光源到細線在不同距離下，細線繞射的圖形所產生的變化。

參、研究設備及器材

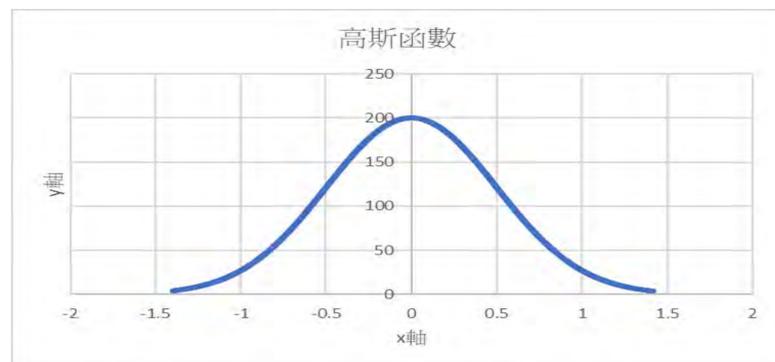


肆、研究過程或方法

一、實驗原理

(一)高斯函數

1. 高斯函數為常態分布，可表示為 $f(x) = \frac{1}{c\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-b)^2}{2c^2}}$ ， b 、 c 為實數。圖二為高斯函數， $b=0$ 、 $c=1$ 。
2. b 為位置參數，代表所有 x 的平均值，可影響最高點的位置。 c 是尺度參數，為所有 x 的標準差， c 越大則圖形越扁平。



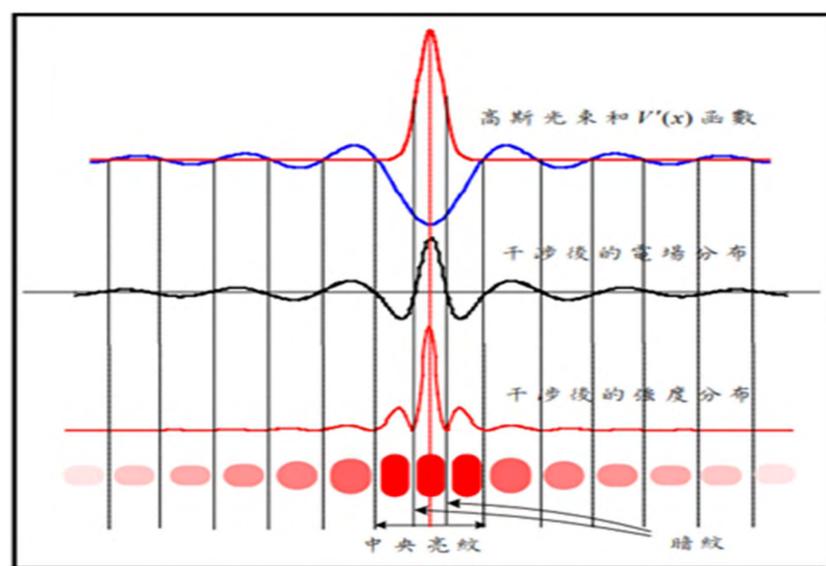
圖二:高斯函數示意圖

(二)巴比涅原理

假設光源的原電場為 E_0 ，細線繞射在屏幕上的電場 E_1 ，單狹縫繞射在屏幕上的電場為 E_2 ，根據疊加原理， $E_1 + E_2 = E_0$ ，當 $E_0 = 0$ 時，可得 $E_1 = -E_2$ ，然而光的強度與電場的平方成正比，故看起來單狹縫繞射和細線繞射的圖型是一樣的。

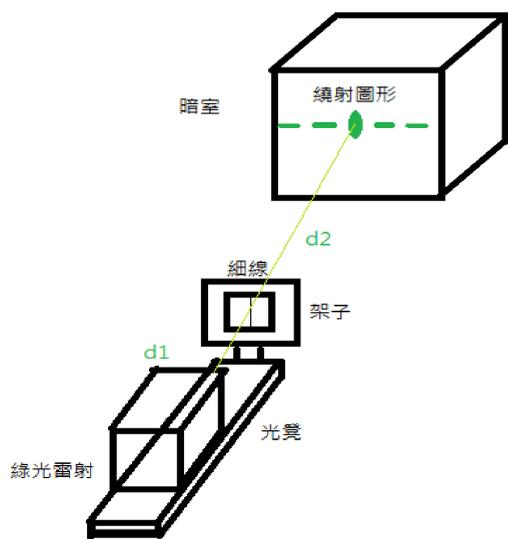
二、文獻探討

- (一) 依照巴比涅原理，我們可以知道單狹縫繞射圖形和細線繞射圖形應該一樣，但是實際上，經過我們實驗上拍攝出來的圖形來進行比較後，發現其還是有一些細部上的差異。
- (二) 我們參考了科學教育月刊第246期中雷射光對細線繞射的現象，進而了解造成此暗帶的主要原因為我們所使用的雷射光並非平面光而為高斯分布的光源。圖三為雷射對細線繞射的示意圖。最上面的紅色曲線為雷射的高斯光束強度曲線，藍色曲線為細線繞射的圖形，黑色曲線為兩者重疊干涉後的電場分布函數。圖三引用自徐國誠的碩士論文。



圖三:雷射對細線繞射的示意圖

三、儀器架設



圖四:實驗儀器架設示意圖

四、實驗軟體介紹~image j

(一) 介紹

Image J是一個基於java的公共的圖像處理軟體，有基本的圖像操作外Image J還能進行圖片的區域和像素統計，並建立柱狀圖和剖面圖。

(二) 操作方法

1. 利用相機拍攝屏幕上的圖形
2. 利用image j先設定照片中的比例尺
3. 接著使用 image j內建的測定亮度的功能，即出現屏幕上圖形的強度分布圖

五、實驗步驟

(一) 實驗一:利用細線繞射測量綠光波長

1. 利用螺旋測微計測量細線的寬度。
2. 使用綠光雷射去照射細線，測量細線到屏幕的距離，以及測量屏幕上暗帶到暗帶的間距。
3. 利用單狹縫繞射的公式，即可算出綠光雷射的波長。

(二) 實驗二:討論細線繞射圖形中中央亮帶內的暗線及成因

1.確定所使用的綠光雷射為高斯分布

- (1)利用綠光雷射照射黑色屏幕，並用相機拍下屏幕上的圖形。
- (2)利用image j分析實驗結果，即可得到雷射光的強度圖。

2.製作高斯擬合曲線

3.巴比涅原理實驗

- (1)先用雷射照射一條0.4 mm的細線，用相機拍下屏幕上的圖，利用image j分析強度圖。
- (2)接著使用excel，利用已知單狹縫公式，算出雷射照射寬度0.4 mm的單狹縫時的強度圖。
- (3)將此兩圖疊合，即可驗證巴比涅原理。

4.理論模擬

(三)實驗三:討論不同距離下的細線繞射圖形

1.在實驗二中，我們發現障礙物在離光源一段距離後，會在圖形中產生類似雙狹縫的干涉條紋，我們推測我們的實驗裝置可能跟雙狹縫干涉有些類似，因此我們運用如圖四中的實驗器材，並改變光源到障礙物的距離或障礙物到屏幕的距離，做不同的實驗。

2.由螺旋測微器測出來細線寬度為0.019 cm

3.定義光源到細線的距離為d1，細線到屏幕的距離為d2，如圖四。

4.實驗步驟

- (1)使d1固定，改變不同d2，將雷射照射細線，利用照相機拍攝屏幕上的圖片。
- (2)利用image j測量照片中第一亮帶內暗紋的間距，並用雙狹縫干涉的公式推算出等效的雙狹縫間距。
- (3)利用excel將第一亮帶內暗紋的間距對d2作圖，並做出迴歸直線。

伍、實驗結果

一、實驗一: 利用細線繞射測量綠光雷射波長

(一)細線線徑:0.019 cm

(二)改變不同距離，測量暗帶間距，利用單狹縫公式求出綠光雷射波長。利用細線繞射求出綠光雷射波長的數據，我們測出來綠光雷射的平均波長為532.9 nm。如表一。

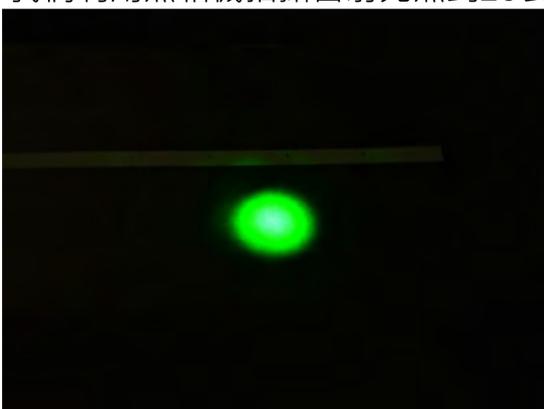
	細線到屏幕的距離(cm)	暗帶間距(cm)	綠光波長(nm)
第一次	357	1.00	536.3
第二次	620	1.75	532.2
第三次	860	2.40	530.2

表一:實驗一之實驗數據

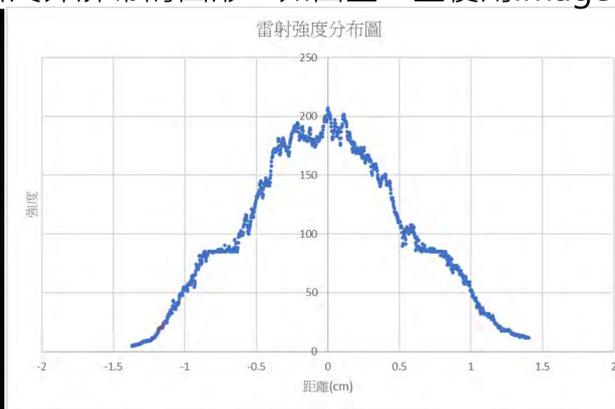
二、實驗二: 討論細線繞射圖形中中央亮帶內的暗線及成因

(一)測量綠光雷射強度是否為高斯分布

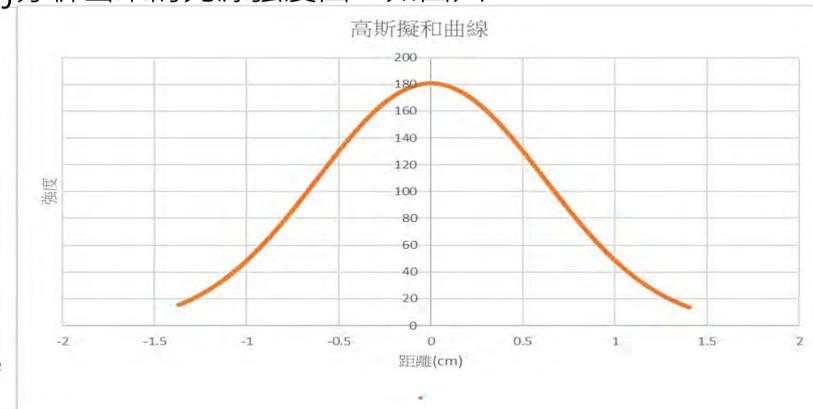
我們利用照相機拍攝雷射光照到20公尺外屏幕的圖形，如圖五，並使用image j分析出來的光源強度圖，如圖六。



圖五:雷射光實驗照片



圖六使用image j分析出來的光源強度圖



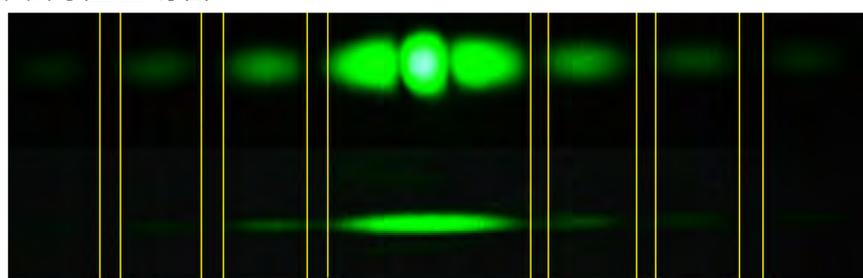
圖七:表二中的數據求出的高斯擬合曲線

(二) 高斯擬合曲線製作

由於我們的實驗結果中雷射光的強度圖形跟高斯曲線有些落差，因此我們決定製作高斯擬合曲線來代表此雷射的光源強度。如圖七。

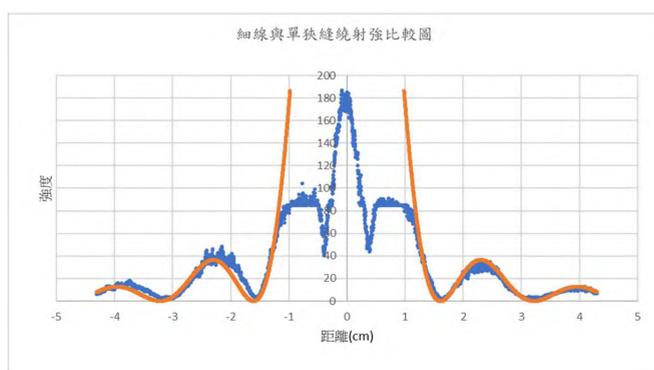
(三) 巴比涅原理實驗

使用線徑為0.4 mm細線的繞射圖形及單狹縫繞射的圖形，除了細線繞射有中央亮帶內的暗線，其他的部分如亮帶跟暗帶的長度和位置都是吻合的，如圖八。將單狹縫繞射與細線繞射的強度圖進行比較，如圖九。在圖九中，可以觀察到單狹縫繞射和細線繞射中的亮帶和暗帶的位置吻合。



第三暗紋 第二暗紋 第一暗紋 第一暗紋 第二暗紋 第三暗紋

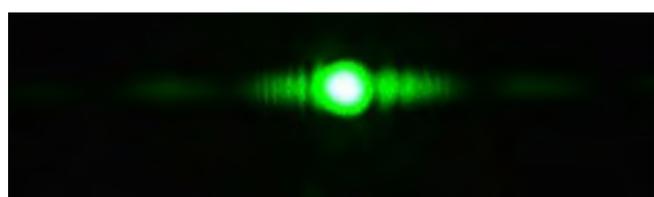
圖八:細線與單狹縫繞射比較圖



圖九:細線繞射與單狹縫繞射強度比較圖

(四) 理論模擬

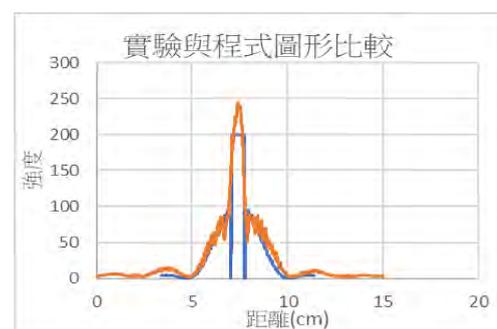
1.我們用雷射照射距離雷射160公分的細線，使用照相機拍攝實驗圖片，如圖十。之後我們使用程式模擬實驗，如圖十一，並進行實驗與程式模擬強度的比較，如圖十二。



圖十:雷射照射距離雷射160公分的細線，使用照相機拍攝屏幕上的繞射圖形

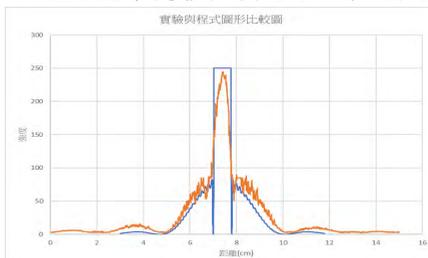
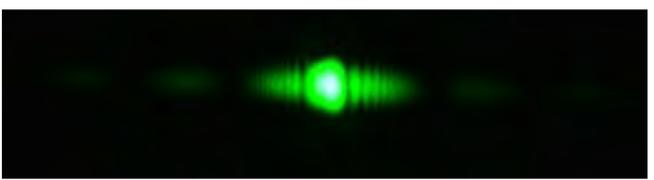


圖十一:程式模擬出的實驗圖



圖十二:強度圖比較，橙色為實驗強度圖，藍色為程式模擬實驗強度圖

2.我們用雷射照射距離雷射260公分的細線，使用照相機拍攝實驗圖片，如圖十三。之後我們使用同學所寫的程式模擬實驗，如圖十四，並進行實驗與程式模擬強度的比較，如圖十五。



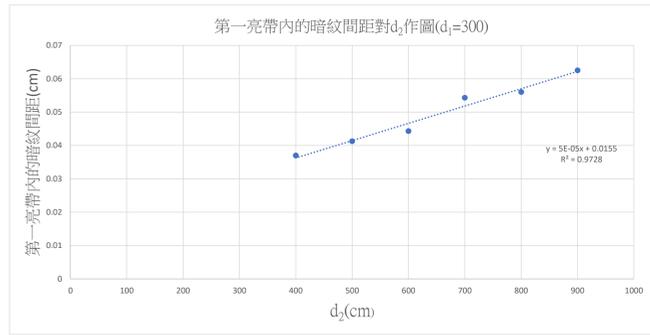
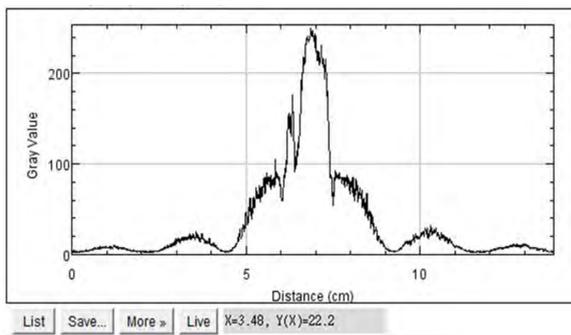
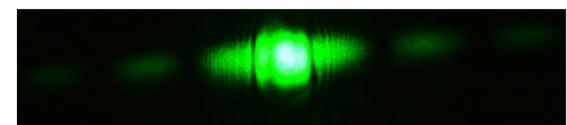
圖十三:雷射照射距離雷射260公分的細線，使用照相機拍攝屏幕上的繞射圖形

圖十四:程式模擬出的實驗圖

圖十五:強度圖比較，橙色為實驗強度圖，藍色為程式模擬強度圖。

三、 實驗三: 討論不同距離下的細線繞射圖形

(一) 當 $d_1=300$ 公分，我們改變細線到屏幕的距離(d_2)，利用image j量出第一亮帶內的小暗紋間距，並用excel做出迴歸直線，如圖十八。圖中可以看到第一亮帶內的暗紋間距與 d_2 呈線性關係，由此可知道雙狹縫的公式在這裡是適用的。

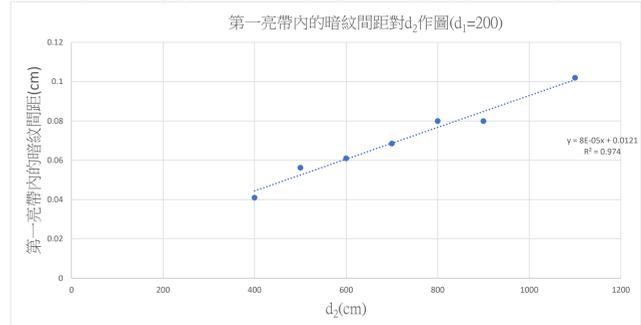
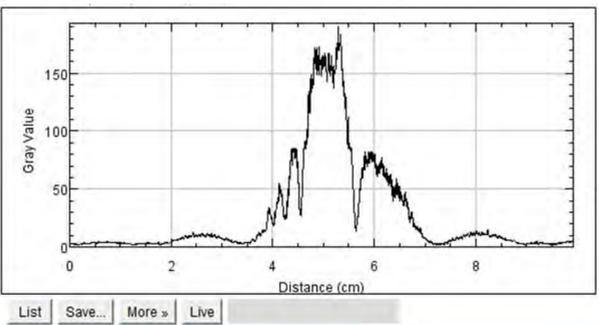
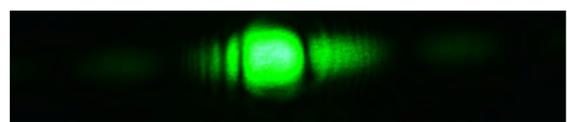


圖十六:實驗三中細線繞射實驗圖

圖十七:使用image j分析的實驗強度圖

圖十八:第一亮帶內的暗紋間距對 d_2 作圖

(二) $d_1=200$ 公分，我們改變不同細線到屏幕的距離(d_2)，利用image j量出第一亮帶內的小暗紋間距，並用excel做出迴歸直線，如圖二十一。圖中可以看到第一亮帶內的暗紋間距與 d_2 呈線性關係，由此可知道雙狹縫的公式在這裡是適用的。



圖十九:實驗三中細線繞射實驗圖

圖二十:使用image j分析的實驗強度圖

圖二十一:第一亮帶內的暗紋間距對 d_2 作圖

陸、 討論

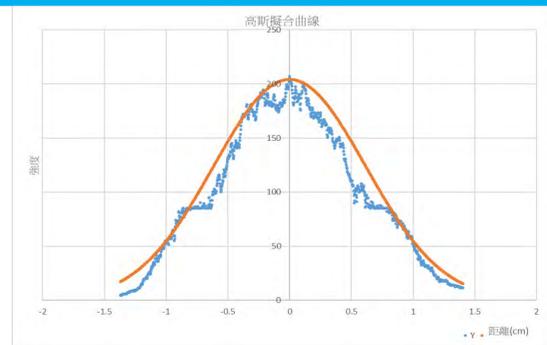
一、 利用細線繞射測量綠光雷射波長

由表一可得知綠雷射的平均波長為532.9 nm，與公認值532.0 nm相差甚小，實驗誤差為0.17%，所以我們以後假如要測定雷射光波長，只要身邊有細線，重複我們的實驗，利用單狹縫繞射的公式，也能求出雷射光的波長。

二、 討論細線繞射圖形中中央亮帶內的暗線及成因

(一) 我們所使用的屏幕為黑色屏幕，這是因為黑色的屏幕相比其他顏色的屏幕更不容易反射光線，而能減少實驗誤差。

(二) 由圖二十二可得知我們所使用的綠光雷射，它的強度分布跟高斯曲線接近，所以我們所用的雷射不為平面光源而為高斯光源，與參考文獻的內容穩合。



圖二十二:高斯擬合曲線

(三) 由圖九可得知單狹縫繞射圖形和細線繞射圖形在image j下分析是非常接近的，這跟巴比涅原理中的內容吻合。

(四) 我們可以從圖十清楚的看出來中央亮紋內的暗線，而造成這個現象的原因就是因為雷射光源是高斯分布的關係，而將高斯分布和細線繞射強度圖疊在一起時，會發生相消的情況，導致中央亮帶內暗線的產生。

(五) 我們的實驗結果和同學的程式模擬結果吻合，如圖十二和圖十五，可以看到中央亮帶旁暗線的位置接近，而且從強度圖能看到中央亮帶內有鋸齒狀的下降，這代表我們實驗中中央亮帶內的小暗紋，在理論模擬也會出現。

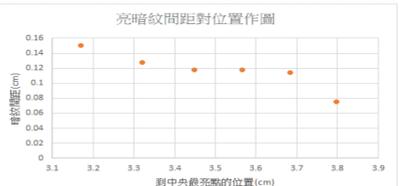
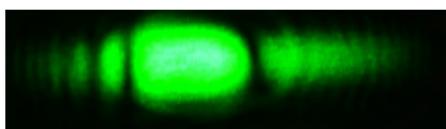
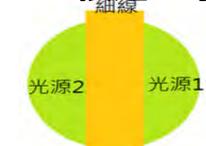
三、 討論不同距離下的細線繞射圖形

(一) 由圖十八和圖二十一可以知道第一亮帶內的小暗紋間距(Δy)和細線到屏幕的距離(d_2)呈線性關係，這代表我們的雙狹縫公式在這裡也是適用的。

(二) 我們用單狹縫繞射公式推算出的等效雙狹縫間距都大於細線寬度並且小於光源寬度如表二。

(三) 因此我們覺得造成小暗紋產生的原因可能類似於雙狹縫干涉，因為在細線繞射條紋內有雙狹縫的條紋，所以我們推論出一個模型。圓形的雷射光經過雷射光時被分開成兩個光源，分別為光源1和光源2，而這兩個光源進行干涉，才會造成中央亮帶和第一亮紋內的小暗紋，如圖二十三。

(四) 由實驗三得知，不管 d_1 的大小是多少，中央亮帶的小暗紋都會比第一亮帶內的小暗紋大，如圖二十四。由圖二十五中可以發現，亮帶內小暗紋的間距隨著屏幕上的位置有下降的趨勢，因此推論細線繞射實驗中只有當位置接近，才可適用於雙狹縫干涉。



d_1 (cm)	細線寬度(cm)	平均等效雙狹縫間距(cm)	光源寬度(cm)
200	0.019	0.53	0.77
300	0.019	0.69	0.83

圖二十三:細線繞射示意圖

圖二十四:中央亮帶與第一亮帶內小暗紋的實驗圖

圖二十五:中央亮帶與第一亮帶內暗紋間距對位置作圖

表二:不同 d_1 得到的平均等效雙狹縫間距和光源直徑

柒、 結論

一、我們利用細線繞射測量綠光雷射的波長 $\lambda = 532.9$ nm，與公認值532 nm的誤差約為0.17%。這證實了細線繞射也能產生單狹縫繞射的條紋，而且我們能用細線取代單狹縫或雙狹縫來測量雷射光的波長。

二、我們證實了雷射光源遵守高斯分佈以及細線繞射的繞射條紋和單狹縫繞射條紋相同，此一現象遵守巴比涅原理並發現利用程式模擬的結果與實驗結果大致吻合。

三、將細線稍微遠離光源做細線繞射實驗會在亮帶看到小暗紋，而這些小暗紋可以視為細線旁兩個光源的干涉結果，但無法完全視為雙狹縫干涉處理。

捌、 參考資料

一、劉威志、徐國誠(2002).雷射對細線繞射的探討.載於科學教育月刊第246期(45-48頁)

二、EugeneHecht(2002).Optics(4th Edition).Diffraction(Eds),Babinet's Principle(pp. 508-509).New York:Addison-Wesley.

三、David Halliday、Robert Resnick、Jearl Walker(2015)·物理(下)第35-36章·台北市：全華