

中華民國第 58 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國中組 物理科

第三名

030109

魔法光學-探討光的折射現象

學校名稱：花蓮縣立國風國民中學

作者： 國二 林憶儒 國二 彭靖文	指導老師： 黃耀輝 戴淑萍
---------------------------------	-----------------------------

關鍵詞：一字雷射、彎曲雷射、干涉條紋

摘要

研究雷射光在玻璃棒中的行進路徑，並探討雷射光通過玻璃棒時所產生的折射現象。結果發現:當水平雷射光入射垂直立於地面玻璃棒時，原先的雷射光點水平散開成「一」字狀，且玻璃棒越細，散開的一字越長，即散開的角度較大。當雷射光非垂直入射玻璃棒時(玻璃棒傾斜)，折射後的圖案是彎曲的，且玻璃棒越細或是傾斜角度越大，折射光彎的幅度就會越大。當雷射光通過不透光的細銅線或是透光的釣魚線時，投射出不一樣的干涉條紋，遵循不一樣的干涉模式。我們釐清此干涉條紋形成的原因，並找到消除干涉條紋的方法。

壹、 研究動機

上學期有物理系教授來學校演示了一堂有關光學的課程，當時雷射光通過光柵片時，折射光是散開成「一」字狀，而不是一個雷射光點，還分成一節一節的。且當光柵片傾斜時，折射出的光是彎曲的，傾斜程度越大，光越彎曲。

我們覺得這個折射現象十分有趣，也想進一步了解其形成原因，因此我們開始設計了以下實驗。

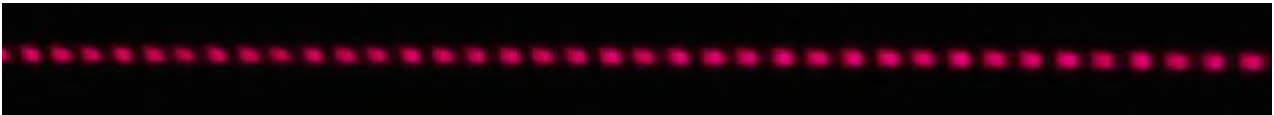


圖 1、雷射光通過光柵片時分節的情形



圖 2、雷射光通過傾斜光柵片時彎曲的情形

貳、 研究目的

- 一、 研究雷射光垂直入射不同粗細的玻璃棒的中心或旁邊時，散開角度的不同。
- 二、 研究雷射光非垂直入射不同粗細的玻璃棒時，散開角度及上揚角度的不同。
- 三、 研究雷射光通過不透光細銅線及透光細釣魚線產生的干涉條紋。

參、 研究設備及器材

- 一、 自製圓柱形測量箱:(厚紙板、玻璃棒、影印量角器、熱熔膠槍、熱溶膠條、三秒膠)。

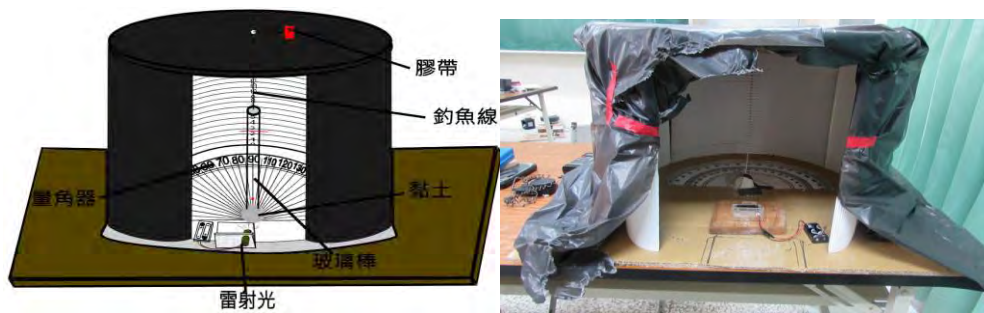


圖 3 圓柱形測量箱

- 二、 模擬玻璃棒的保麗膠模形：(保麗膠、硬化劑、紅色色膏、培養皿、蠟、紙筒、量筒、滴管、容器、熱熔膠槍、熱溶膠條)。



圖 4 灌模所需的材料

- 三、 自製磨平機:(電風扇馬達、轉軸、木板、螺絲起子)。



圖 5 自製旋轉磨平機



圖 6 保麗膠模型

- 四、 相機、厚紙板、膠帶、美工刀、剪刀、雷射頭、電池、鑽頭、木板、培養皿、紅墨水、滴管、砂紙、雙面膠、釣魚線、銅線、壓克力板、光柵片、鋸子。

- 五、 煙霧箱：壓克力、線香。



圖 7 使用磨平機



圖 8 製作相機固定架

肆、研究過程與方法

一、研究雷射光垂直入射不同粗細的玻璃棒的中心或旁邊時，散開角度的不同。

(一) 研究一的實驗步驟:

1. 組裝圓柱形測量箱，並用二層黑色垃圾袋覆蓋並固定。
注意：因為不同亮度會使得光的明顯度不同，所以圓柱形測量箱內的亮度固定在 1.31~1.33LUX 之間。
2. 使用熱融膠將釣魚線及玻璃棒連接，並將玻璃棒插在黏土上。
注意:雷射光入射到玻璃棒的光點，必須在圓柱形測量箱的中心上。
3. 用雷射光照玻璃棒，若投射出的光為水平，則玻璃棒已垂直立於地面。
4. 依序測量直徑 10mm、8mm、7mm、6mm、4mm 的玻璃棒，並拍照記錄。

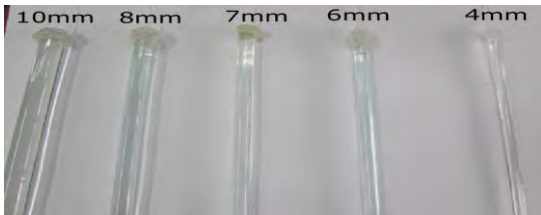


圖 9：實驗用的不同粗細玻璃棒

5.待測數據:

- (1)雷射光通過每根玻璃棒中心點時，在後方布幕散開的角度(如圖 13)。
- (2)雷射光通過每根玻璃棒最右邊時，在後方布幕散開的角度(如圖 13)。

註:如圖 10、11 當雷射光通過玻璃棒,在圓柱形測量箱散開的一字,如果散開的光對稱於中間軸線,則是雷射光打到玻璃棒中心;
如果雷射光移動到玻璃棒邊緣,投射些微光亮擦邊玻璃棒直接打在圓柱形測量箱而產生微弱亮點,則是雷射光打到邊緣。

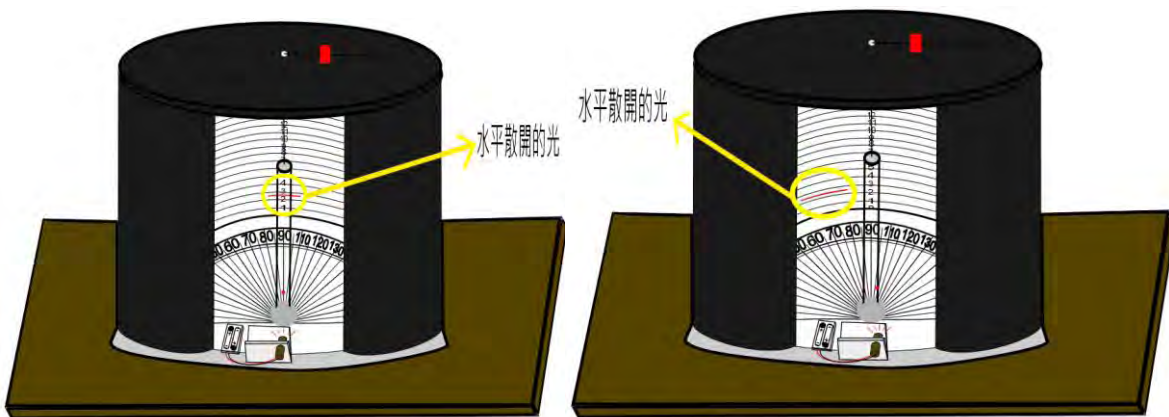


圖 10:玻璃棒中心入射，雷射散開對稱於中軸線 圖 11:玻璃棒右邊入射，雷射向左偏折

二、研究雷射光非垂直入射不同粗細的玻璃棒時，散開的角度和上揚的角度。

(一)研究二的實驗步驟:

1. 裝置如實驗一。
2. 使玻璃棒傾斜成和桌面夾角 70 度、50 度、30 度數據，並拍照記錄。
注意:雷射光入射到玻璃棒的光點，必須在圓柱形測量箱的中心上。
3. 依序測量直徑 10mm、8mm、7mm、6mm、4mm 的玻璃棒。

4. 待測數據

- (1) 雷射光通過每根玻璃棒 70、50、30 度的中心時散開的角度(如圖 13)。
- (2) 雷射光通過每根玻璃棒 70、50、30 度的中心時二邊上揚的角度(如圖 14、15)。

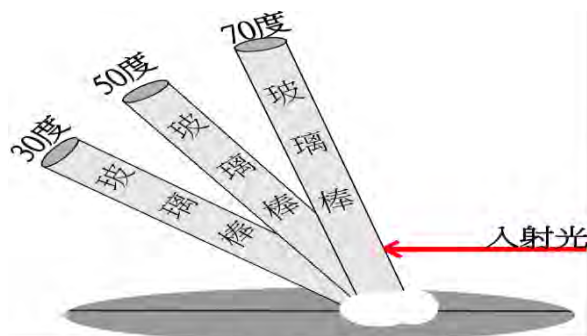


圖 12：雷射光水平入射玻璃棒，不同傾斜角度入射示意圖

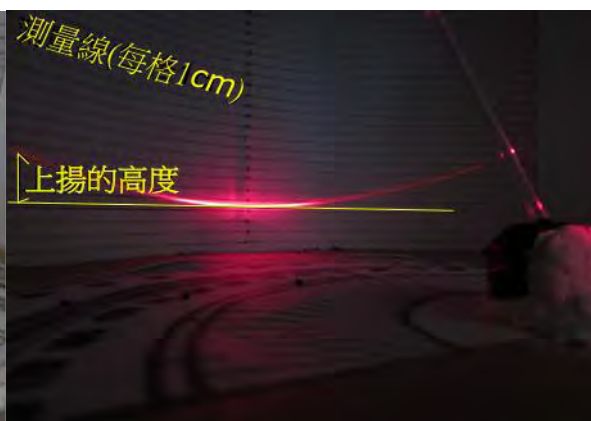
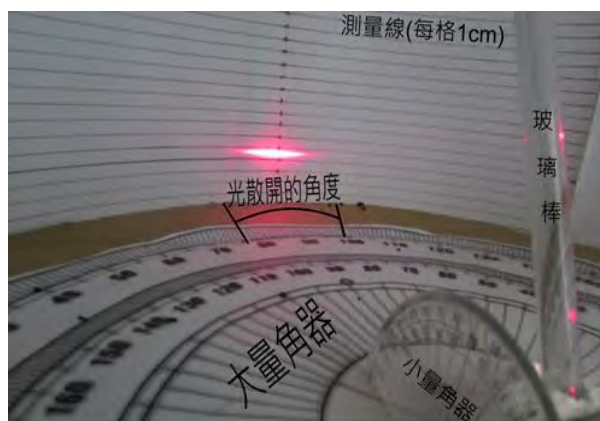


圖 13：在圓柱形測量箱測量散開角度

圖 14：在圓柱形測量箱測量上揚高度

說明：實際上測量到的數據是雷射光在圓柱形測量箱中散開後兩端的上升高度(cm)

代入三角函數 $\tan(\text{上揚角度}) = \text{上揚高度} / \text{圓柱形測量箱半徑}$ 。

再使用 \tan 反三角函數，就可以求出上揚的角度

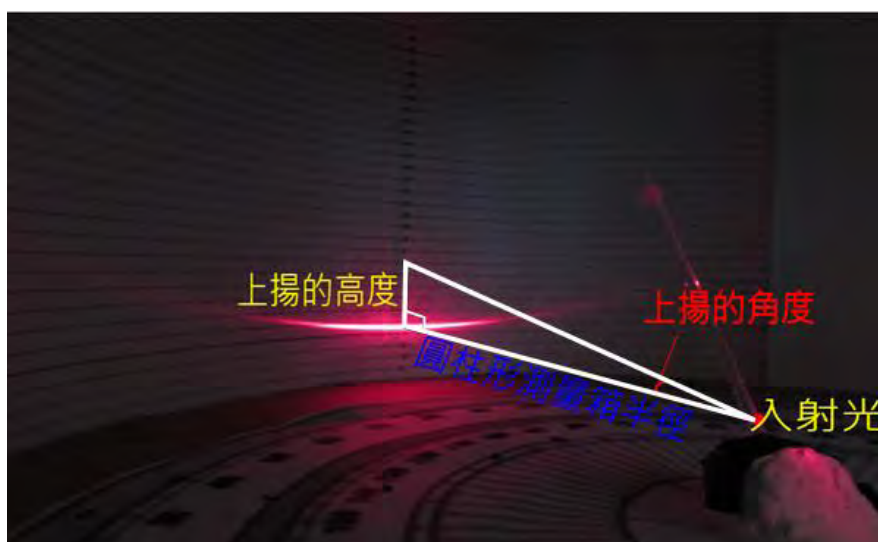


圖 15：測量上揚高度和上揚角度的關係圖

三、研究雷射光通過不透光銅線及不透光細釣魚線產生的干涉條紋。

(一)研究三的原理及實驗方法:

干涉原理：引用揚氏雙狹縫干涉理論：

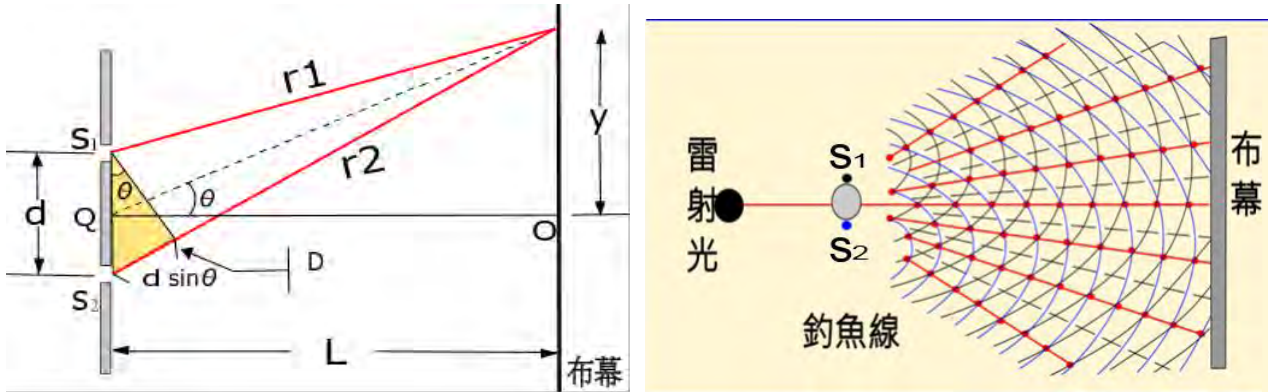


圖 16 揚氏雙狹縫示意圖

1. 由上圖，當雷射光通過雙狹縫，可視為兩個新的波源 S_1 、 S_2 ，(雙狹縫間距 d)，在遠方產生重疊，因為雙狹縫到後方布幕的距離有所不同，兩道光到達的距離不同，出現的路程差距稱為波程差。
2. 偏折的角度 θ 極小，在靠近中心處遠方布幕(原本雷射光行進的路徑)，波程差幾乎等於 $d \sin \theta$ ，且 $d \sin \theta$ 幾乎等於 $d \tan \theta = d \cdot \frac{y}{L}$
3. 如果波程差為 $(\frac{1}{2} + n)$ 個波長，由原本的全部都是同為波峰或同為波谷，變為波峰對波谷，造成破壞性疊加，出現暗紋的干涉條紋，第一暗紋波程差 $\frac{1}{2} \lambda$ ，第二暗紋波程差 $\frac{3}{2} \lambda$ ，其餘依此類推。
4. 所以波程差每間隔 1 個波長 λ ，會出現一的暗紋，所以 $d \cdot \frac{y}{L} = \lambda$ ，於是暗紋間隔 $y = \frac{L \lambda}{d}$ ，其中雙狹縫間距 d 愈小， y 愈大，愈能看清楚分節現象。
5. 上式可得雙狹縫間距 $d = \frac{L \lambda}{y}$ ；已知 $L=4.7\text{m}$ 、 $\lambda=650\text{nm}$ ，實驗測得條紋間距 y 可算出 d 。

研究方法：

依序以雷射光照射不透光細銅線及透光細釣魚線

1. 將銅線(漆包線)用油漆筆塗黑，以確保外層的漆不透光，用經過測微尺校正過的 USB 顯微鏡分別測量其直徑(粗細)。

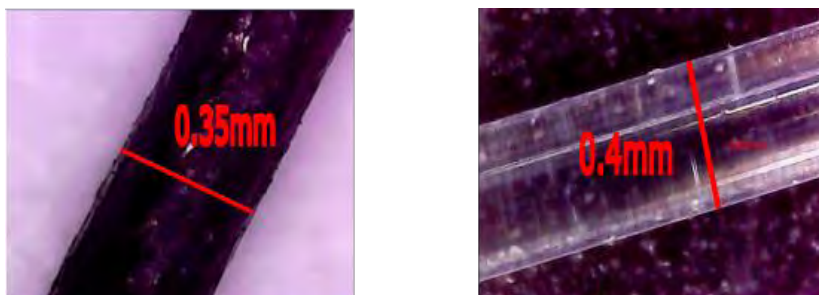


圖 17 USB 顯微鏡分別測量圖黑油漆的細銅線(左)及釣魚線(右)直徑

- 依序測量雷射光通過細銅線及細釣魚線時投射到前方牆壁(距離 $L=4.7\text{m}$)的干涉條紋間距 y ，一次測量 6 到 10 個間距，並求平均。

說明:如圖 18 所示，一亮紋加上一暗紋為一間距，測量多個間距後再求平均值。

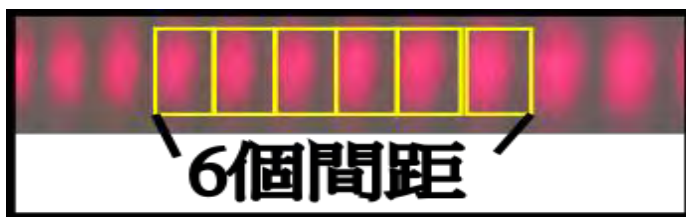


圖 18 干涉條紋間距 y 的定義

光柵片:(這裡的光柵片指的是規律性重複的結構，做法是剪數段釣魚線整齊緊密並排)

- 將數根釣魚線並排，為確保每根釣魚線間沒有縫隙，在每根中間填充黑墨水，以確保雷射光不會從顯微鏡也看不見的縫隙穿過。



圖 19: 左、中是市售光柵片以 USB 顯微鏡測量間距；圖右是以釣魚線緊密排列的自製光柵片

- 將已經緊密排好的釣魚線用不透光膠帶貼至剩下二根，如圖 19 左 所示。
- 依序測量不同粗細光柵片的條紋間距，並拍照記錄。
- 採用一標準光柵片(間距 0.3mm)，用不透光膠帶貼至剩下三根(如圖 19 中)、四根，測量間距，並和二根的做比較。

伍、 研究結果

一、玻璃棒垂直於桌面，雷射光從不同粗細玻璃棒中心及右邊入射，散開角度測量

玻璃棒垂直於桌面，雷射光從不同直徑玻璃棒中心及右邊入射，散開角度測量圖表

玻璃棒直徑	右邊入射	中心入射	有機玻璃棒直徑	中心入射	右邊入射
4mm	89	74	1.5mm	149 度	
6mm	70	42	1.8mm	142 度	
7mm	65	34	3mm	95 度	82 度
8mm	58	32	4mm	62 度	100 度
10mm	48	25			

表 1: 雷射光分別從玻璃棒及有機玻璃棒中心和右邊入射，不同直徑的玻璃棒使雷射光散開不同的角度。

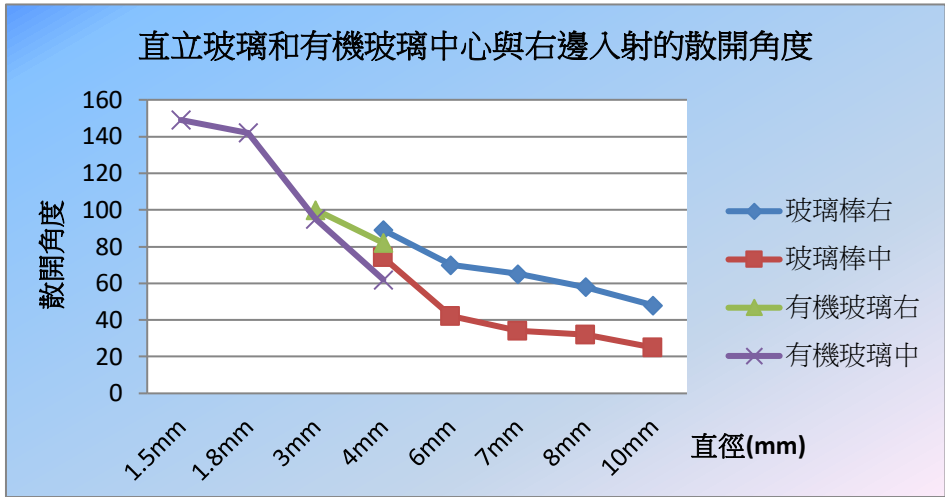


圖 20：雷射光分別從玻璃棒中心和右邊入射，散開的角度
綜觀圖 20，可發現：

- (1)玻璃棒愈細，散開的角度愈大。
- (2)照射右邊比照射中心散開角度大。
- (3)同樣 4mm，玻璃比有機玻璃散開角度大。

二、雷射光非垂直入射不同直徑的玻璃棒時，散開角度及上揚角度的測量

雷射光非垂直入射不同粗細的玻璃棒中央及右邊時散開的角度實驗數據：

	4mm	6mm	7mm	8mm	10mm
中 30	70	66	64	59	48
中 50	68	65	62	57	44
中 70	67	63	60	49	42
右 30	50	55	63	60	60
右 50	67	65	68	63	69
右 70	83	78	77	77	77

表 2:雷射光從中心及右邊入射不同傾斜角度玻璃棒散開的角度

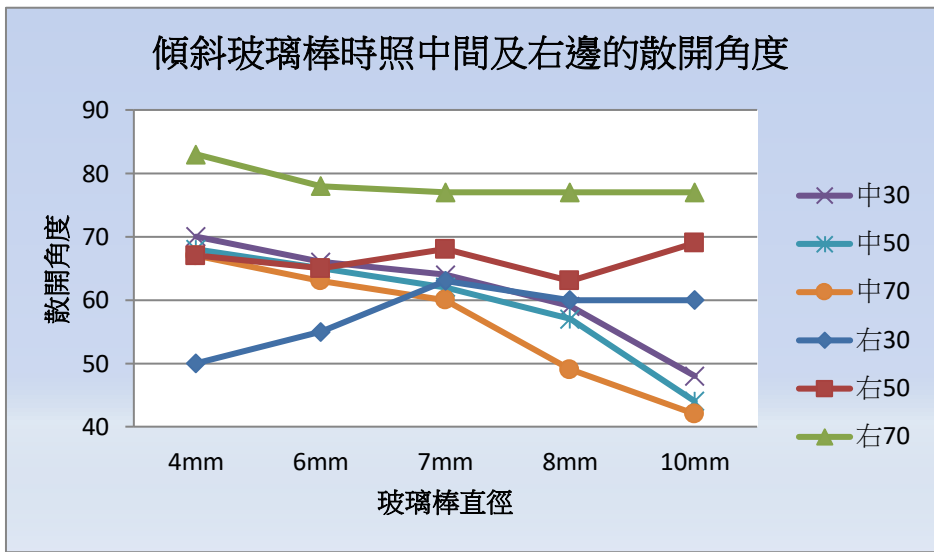


圖 21:雷射光從中心及右邊入射不同傾斜角度玻璃棒散開的角度
由圖 21 可知：

- (一)照射中心，玻璃棒愈細、愈傾斜，散開角度越大。

(二)照射右邊，70 度的，情況和照射中心類似，玻璃棒直徑大，散開角度小；50 度和 30 度反而都是相反。

雷射光非垂直入射玻璃棒中間上揚角度實驗數據:

	4mm	6mm	7mm	8mm	10mm
中 30	15.9	3.3	3.3	1.9	1
中 50	6.2	2.1	1.7	1.2	0.4
中 70	2.7	1.6	1.1	1	0.2
右 30	41.4	40.1	39.1	37.9	34.4
右 50	34.8	34	33.5	31.4	30
右 70	32.8	32.6	30	16.4	14.8

表 3 雷射光入射不同傾斜角度直徑玻璃棒中間及右邊上揚角度

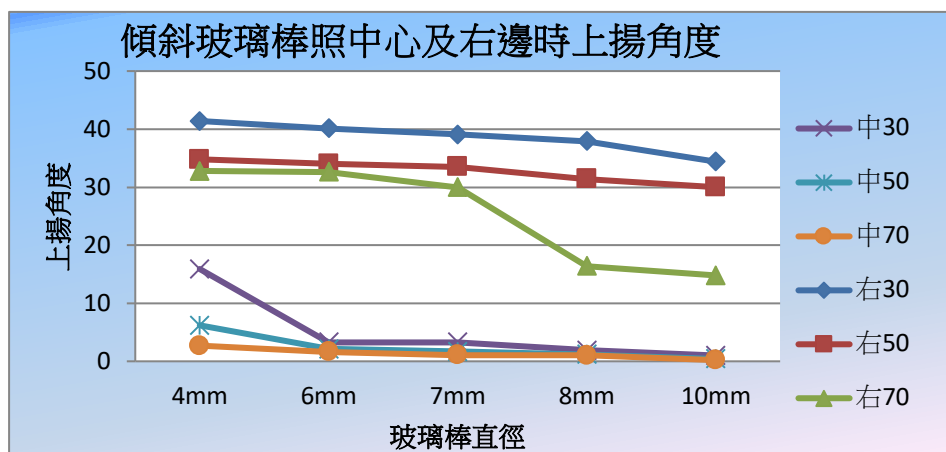


圖 22 雷射光非垂直入射不同直徑玻璃棒中間上揚角度

由圖 22 由圖可發現無論從中央或右邊入射，玻璃棒越細，折射光上揚的角度越大，且玻璃棒越傾斜，折射光上揚的角度越大，右邊入射上揚的角度都比從中間入射的大。

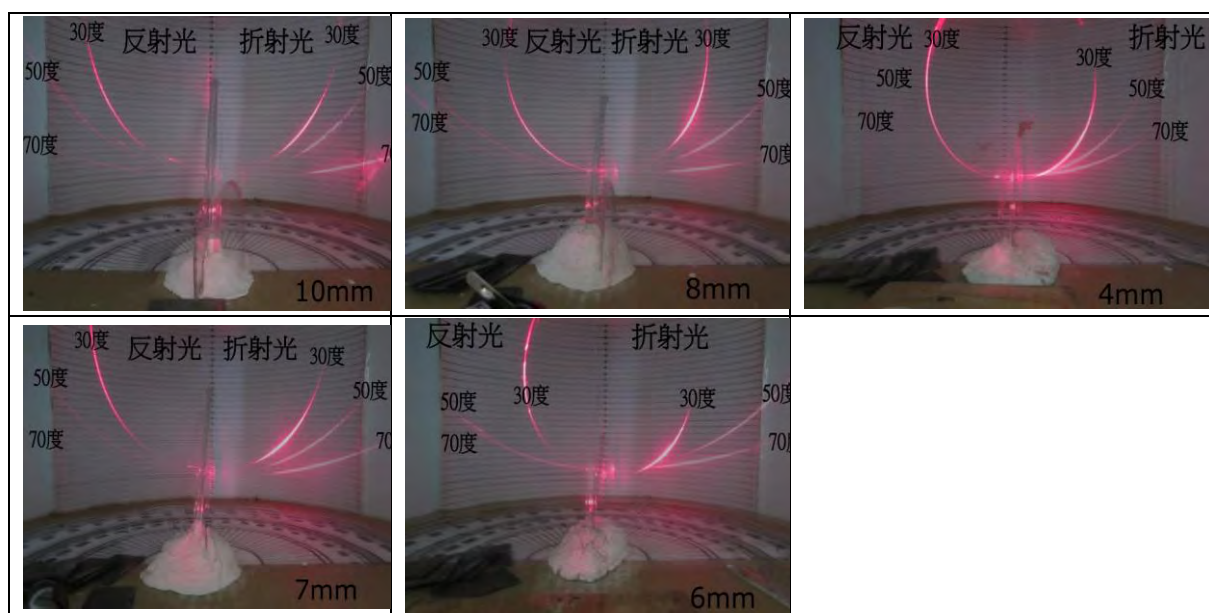


圖 23 照射不同傾斜角度(30、50、70 度)玻璃棒左邊時呈現的圖像疊加

三、研究雷射光通過不透光銅線及透光細鈎魚線產生的干涉條紋。

(一)不透光細銅線及透光細鈎魚線:

我們發現:雷射光經過**細銅線**兩端投射出的干涉條紋間距只有一種，而**細釣魚線**的干涉條紋間距有二種，靠近中央的稱為第一區，偏兩側的稱為第二區，而釣魚線則是分為第一區及第二區分別測量。

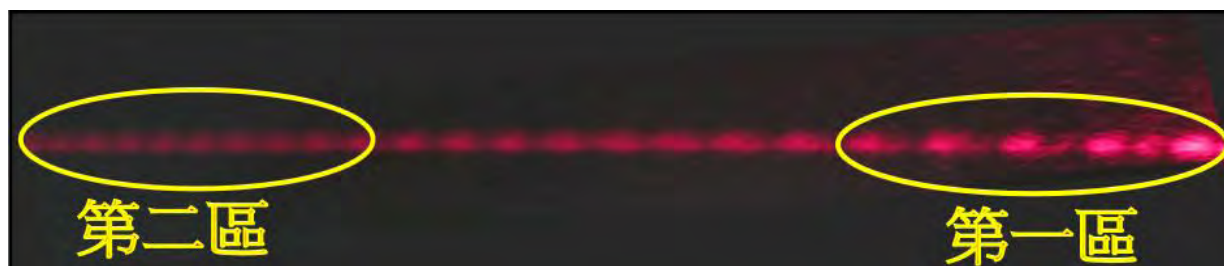


圖 24 光經過釣魚線投射的干涉條紋，接近中央者標示為第一區，旁邊是第二區

銅線粗細(mm)	0.35	0.647	0.83	0.913	0.976	1.153	1.157
條紋間距(mm)	8.8	4.91	3.7	3.44	3.07	2.56	2.57

表 4 雷射光通過細銅線產生的干涉條紋間距:

釣魚線粗細(mm)	0.259	0.267	0.294	0.314	0.364	0.401
第一區條紋間距(mm)	11.8	11.5	10.5	9.75	8.3	7.6
第二區條紋間距(mm)	24.8	22.9	20.3	19.3	17.1	14.7

表 5 雷射光通過細釣魚線，在第一、二區產生的干涉條紋間距:

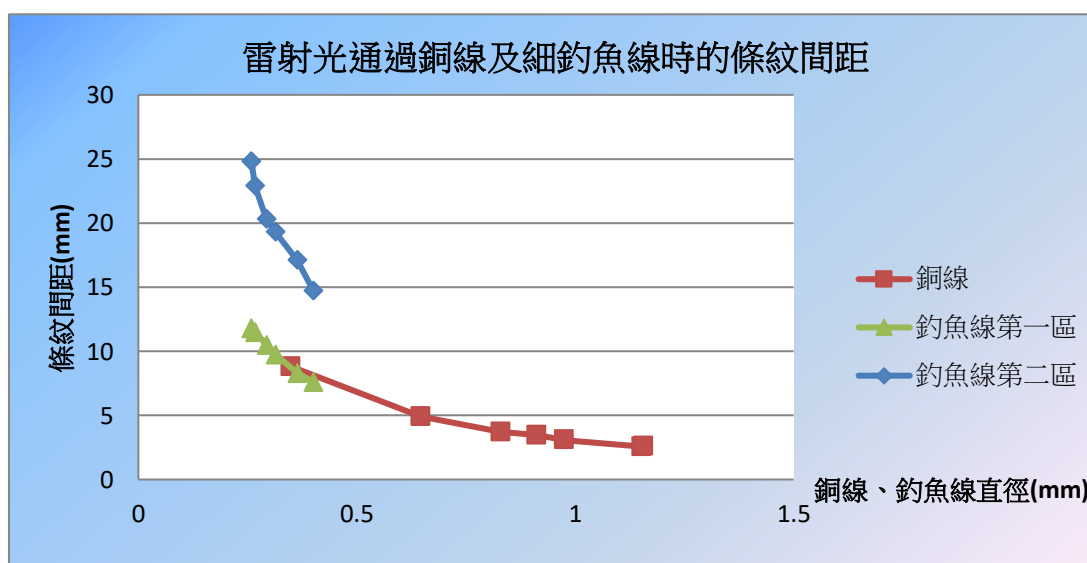


圖 25 雷射光通過銅線及釣魚線一、二區時產生的干涉條紋間距:

由圖 25 可發現:不論是銅線還是釣魚線，或是第一區和第二區，條紋間距皆和直徑呈反比關係；也就是線愈細，干涉條紋間距愈大。且釣魚線第二區條紋間距較第一區的大。

陸、討論

為了說明雷射光通過玻璃棒散開成「一」字，分別把雷射光打入裝紅墨水的培養皿和自製的紅色保力膠(壓克力)模型，觀察雷射光從空氣射介質中的偏折狀況。經由折射定律的規範，可以

解釋雷射光前進的路徑及其他相關現象。

一、 探討水及保力膠(壓克力)模型的折射路徑:

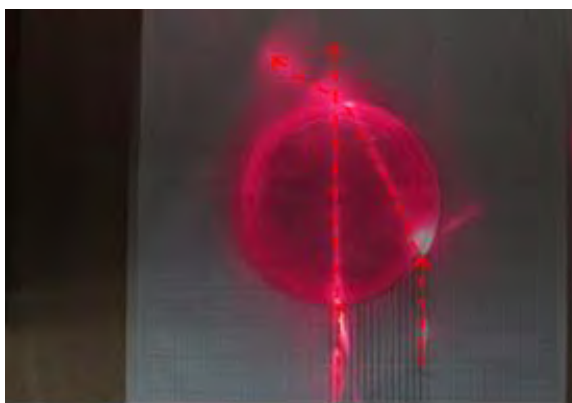
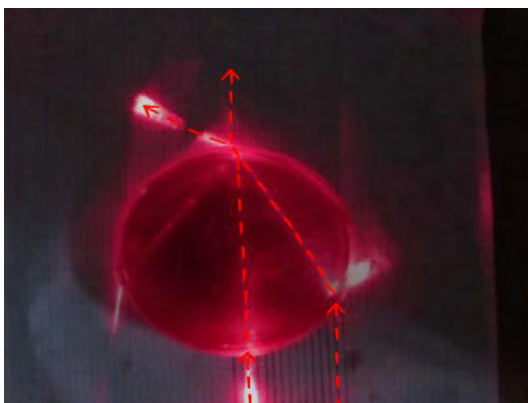


圖 26:雷射光通過紅墨水的折射路徑

圖 27:雷射光通過紅色壓克力的折射路徑

從圖 26、27 可以發現：

- (1)光從右邊入射，折射後向左偏。
- (2)愈靠右邊入射，向左偏折愈多。
- (3)每個折射發生時必定也有反射產生。

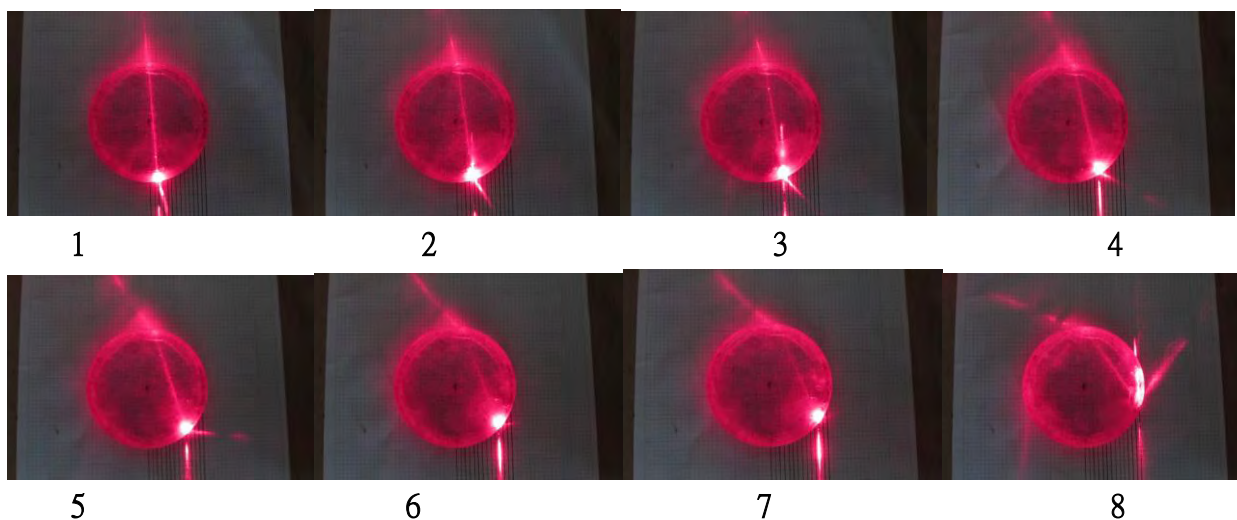


圖 28:連續不同入射位置的雷射光通過扁圓柱形壓克力的折射路徑

從以上連續圖形的變化，可以看出：照射位置愈靠近圓形壓克力邊緣，反射的量愈多，折射的量愈少。(進入紅色圓形壓克力為折射；向圖片右方者為反射)

為說明光線折射路徑，就必須使用折射定律：

原理:根據 Snell 定律(如下)，探討水及保力膠模型的折射率

$$\text{Snell 定律} : n_1 \cdot \sin(\text{入射角}) = n_2 \cdot \sin(\text{折射角})$$

即介質一的折射率乘 $\sin(\text{入射角})$ 等於介質二的折射率乘 $\sin(\text{折射角})$ ，已知空氣的折射率為一，得

$$n_2 = \sin(\text{入射角}) / \sin(\text{折射角})$$

測量在不同入射角與折射角下(不含光通過圓心時)，不同物質的折射率，共測量 15 組數據，每次向培養皿邊緣移動約 5mm。

測量角度的方法：用相機拍攝雷射光行進路徑，再使用廣泛使用的 USB 數位顯微鏡附贈程

式測量角度，先練習測量水的折射率為 1.33，確認測量方法可行之後，再測量出保力膠模型(壓克力)的折射率。

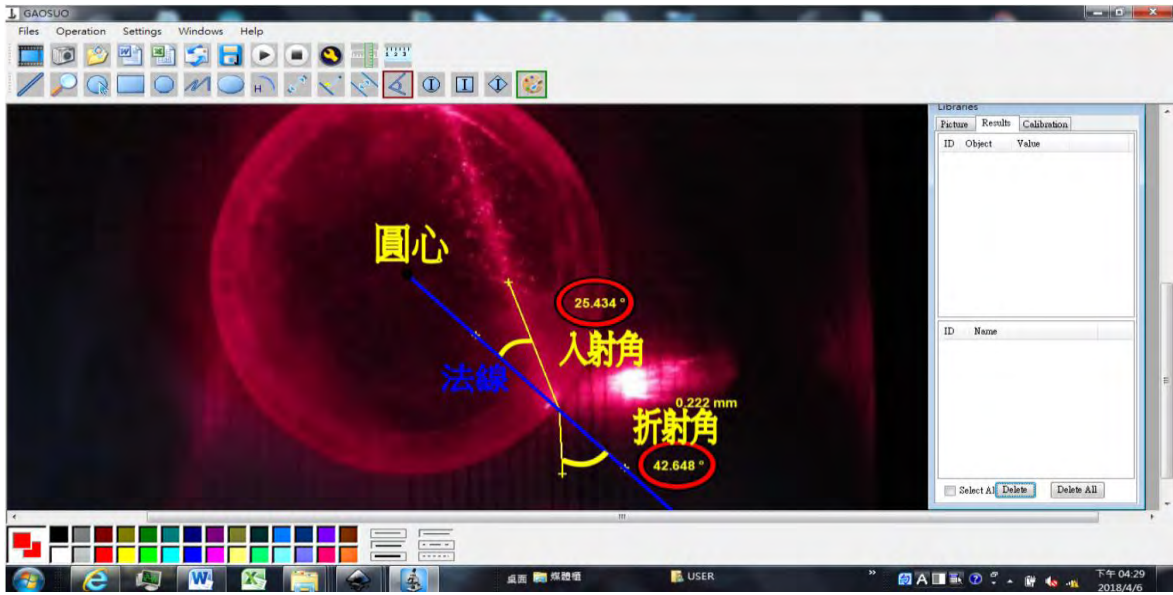


圖 29:測量入射角折射角的方法

在不同入射角，水及壓克力的折射率測量結果如下：

入射角	壓克力的折射率	入射角	水的折射率
7.123	1.588541633	5.33	1.32241869
11.924	1.59200744	7.238	1.378237598
16.042	1.602654007	10.62	1.303174839
18.014	1.616518394	13.697	1.382353055
21.592	1.585238617	16.179	1.367133773
28.493	1.601785515	21.994	1.328805928
30.472	1.588182426	24.962	1.290232965
37.235	1.627567604	30.158	1.326674338
40.9	1.57061954	33.632	1.341027852
42.648	1.57750403	40.982	1.297703213
59.288	1.615779276	43.158	1.31334794
69.571	1.600379381	51.575	1.327803048

表 6：改變入射角，測量壓克力(由保力膠製成)和水的折射率。

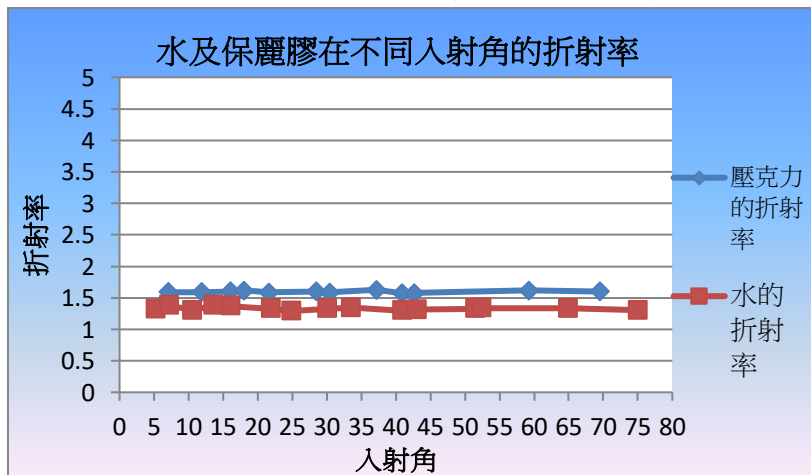


圖 30：水和壓克力(保力膠製成)不同入射角測到的折射率。

經過代入 Snell 定律計算後，水的折射率為 1.33 ± 0.05 。而保力膠(壓克力)的折射率為 1.59 ± 0.03 。

二、探討光在直立玻璃棒中的行進路徑:

(一)利用自製的保力膠模型模擬光在玻璃棒中的行進路徑，並觀察。將雷射光照到靠近模型圓心時及照到邊緣時的二張照片疊加，觀察光在不同入射角下的行進路徑，如圖:

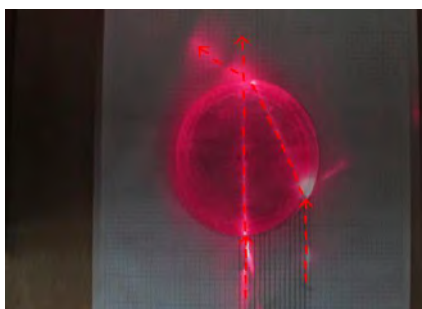


圖 31：分別的兩道雷射光束通過圓形壓克力之路徑疊加圖。可看出更多雷射光線通過後將散開一個角度。

將此圖視為玻璃棒俯視圖，將二束不同的光視為雷射光光帶邊緣，可看見光在折射出模型後，形成交點並散開成一個角度，投射在布幕上時，即水平散開成「一」字狀。

(二)根據討論一結果，光照到保力膠模型邊緣時折射的角度大，照到接近圓心時折射的角度小，因此當雷射光照到玻璃棒邊緣時，散開的角度較照到接近圓心時散開的角度大。如下圖所示。

(三)若玻璃棒越細，光照到玻璃棒的表面積越大，則水平散開的角度也越大(如圖 32)。

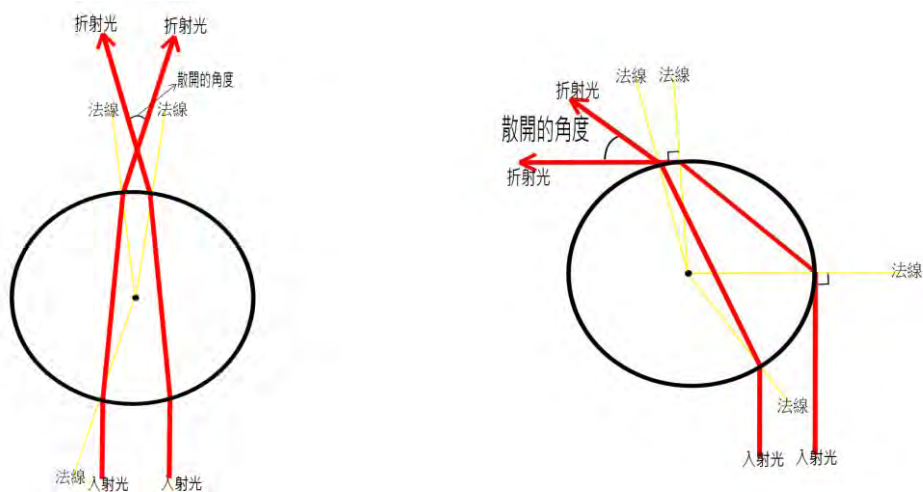


圖 32：雷射光束照到玻璃棒的表面積越大，則散開的角度也越大示意圖。

(四)如果有機玻璃棒細到跟雷射光粗細一般，雷射光同時照到整支玻璃棒，折射光及反射光會呈環形。如圖 33。

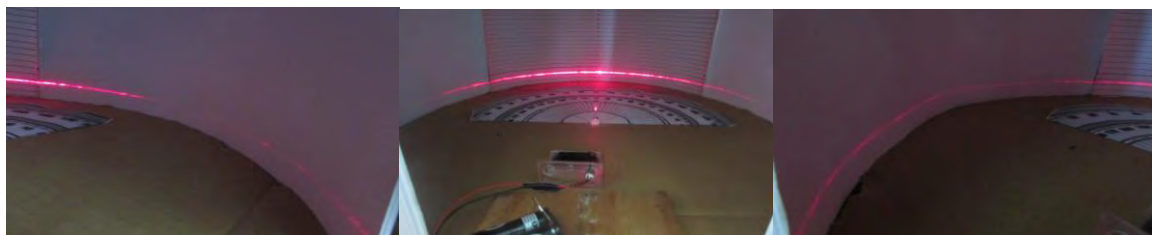


圖 33：光成環形，三張圖皆為同一根玻璃棒。近中央處光比較亮，是折射造成；兩側光比較弱，是反射造成。

以下我們自行推演了一個數學公式和作圖方法，可以更精確說明散開角度計算的方法和影響的因素（詳細推論過程請參考附錄一、二）。

公式如下(射玻璃棒半徑 r 、雷射光寬 d 、折射率 n):

雷射光入射玻璃棒中心時，散開的角度為

$$4 \left[\sin^{-1}\left(\frac{d}{2r}\right) - \sin^{-1}\left(\frac{d}{2nr}\right) \right]$$

因為反三角函數無法再化簡，無法從公式上直接理解。

但是正弦函數 $\sin \theta$ 數值和角度 θ 正相關(不是正比)，所以 $\sin \theta$ 數值相差愈大就表示角度 θ 相差愈大(散開角度愈大)。於是以 $\sin \theta$ 值， $\left(\frac{d}{2r} - \frac{d}{2nr}\right)$ 相減帶入就可以推測散開角度的大小：

$$\text{散開角度正相關於 } \left(\frac{d}{2r} - \frac{d}{2nr}\right) = \frac{d}{2r} \left(1 - \frac{1}{n}\right)$$

若 $d < r$ ， r 愈小或是 n 愈大，帶入得到的數值會較大，散開角度也愈大。

可以得知玻璃棒愈細，散開角度愈大。且，同樣直徑為 4mm 的玻璃棒和有機玻璃棒，玻璃棒的折射率大於有機玻璃棒，表示玻璃的折射率大於有機玻璃折射率。

理論上，雷射光被視為平行光束， d 應該是定值，但是實務上很難達到，它會繞射，中心會散開。

雷射光入射玻璃棒邊緣時，散開的角度

$$2 \left[90^\circ - \sin^{-1}\left(\frac{1}{n}\right) \right] - 2 \left[\sin^{-1}\left(\frac{r-d}{r}\right) - \sin^{-1}\left(\frac{r-d}{nr}\right) \right]$$

已知在同介質下，公式中前項， $2 \left[90^\circ - \sin^{-1}\left(\frac{1}{n}\right) \right]$ 為一定值，若是公式中後項，

$2 \left[\sin^{-1}\left(\frac{r-d}{r}\right) - \sin^{-1}\left(\frac{r-d}{nr}\right) \right]$ 愈小，則散開的角度愈大。

仿照上面討論，以 $\sin \theta$ 值，代入相減就可以推測散開角度的大小：

$$\text{公式後項} : \frac{r-d}{r} - \frac{r-d}{nr} = \frac{r-d}{r} \left(1 - \frac{1}{n}\right) = \left(1 - \frac{d}{r}\right) \left(1 - \frac{1}{n}\right)$$

若 $d < r$ ， r 愈小，代入後項得到的數值會較小，散開角度也愈大。

再將實驗結果及理論值相比較，如下圖表

	4mm	6mm	7mm	8mm	10mm
理論值右	97.26	83.77	79.41	75.85	70.24
實驗值右	89	70	65	58	48
實驗值中	74	42	34	32	25
理論值中	42.81	26.98	22.87	19.87	15.76

表 7：從玻璃棒中心入射及最右邊入射，散開角度的實驗值和理論值比較。

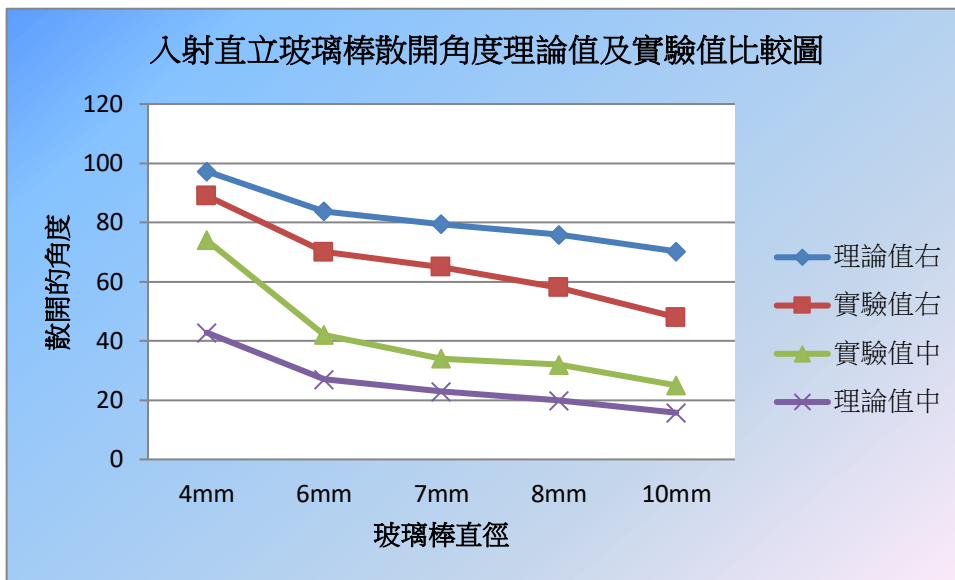


圖 34：從玻璃棒中心入射及最右邊入射，散開角度的實驗值和理論值比較。

將理論值及實驗值比較後卻發現:

1. 雷射光由中間入射玻璃棒時，實驗值較理論值大。
2. 雷射光由右邊入射玻璃棒時，實驗值較理論值小。

推測原因如下:

1. 雷射光由中間入射玻璃棒時，因為雷射光非平行光，因此照射到遠的地方，會比照射近的地方時，雷射光寬度還大，只是極不明顯，通過玻璃棒後散開的角度也變得更大，使得實驗值較理論值大。
2. 雷射光由右邊入射玻璃棒時，因為當雷射光越接近玻璃棒邊緣入射，也就是入射角接近九十度時，反射的亮度會比折射的亮度還要亮許多，也就是折射穿過玻璃棒的光更少，所以我們用同一標準觀測折射光散開的角度時，就會忽略一些肉眼看不到，更暗的光。再加上我們在測量時，為了確保雷射光已經是最邊緣入射，因此沒有使整束雷射光都照到玻璃棒(如圖 36 所示，漏出一點光)，導致雷射光小於原本的寬度，實驗值才會比理論值小。



圖 35：雷射光照射玻璃棒邊緣，漏出些微的光，使得照到玻璃雷射光小於原本的寬度。

三、探討光在傾斜玻璃棒中的行進路徑:

在煙霧箱當中放入自製的保力膠模型(紅色壓克力棒)並傾斜，模擬當光非垂直入射玻璃棒時，觀察雷射光在空氣和壓克力中的行進路徑。

(一)細保力膠(壓克力棒)模型的行進路徑：雷射光從壓克力棒左緣入射

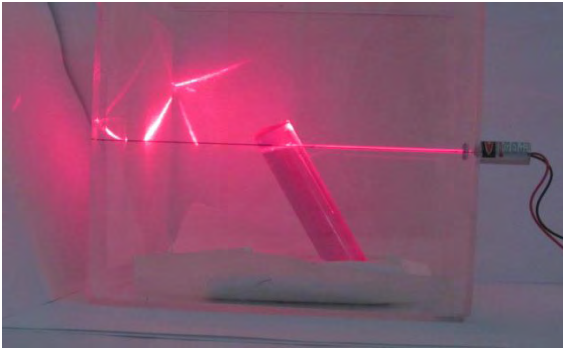


圖 36：雲霧箱觀測細壓克力棒側視圖

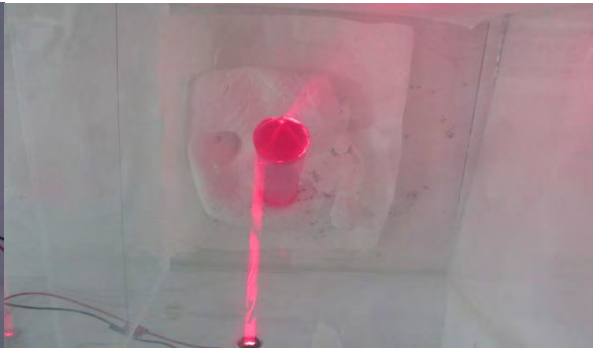


圖 37：雲霧箱觀測細壓克力棒俯視圖

(二)粗保力膠(壓克力)模型的行進路徑：雷射光從壓克力棒左側入射

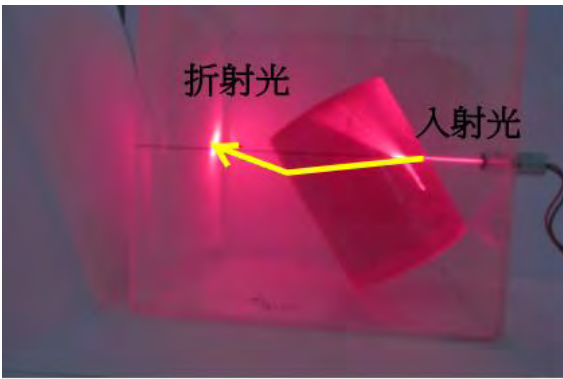


圖 38：雲霧箱觀測粗壓克力棒側視圖

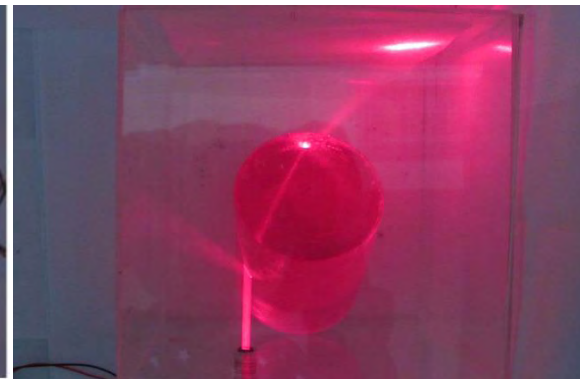


圖 39：雲霧箱觀測粗壓克力棒俯視圖

- (1) 從側視圖可以看出雷射光在壓克力棒裡面略往下降，通過壓克力後往上升
- (2) 從俯視圖可以看出雷射光在壓克力棒裡面向右偏折，通過壓克力後再往右偏，越過玻璃棒中心線。這很像雷射通過水平放置的紅墨水或是扁的壓克力模型狀況。

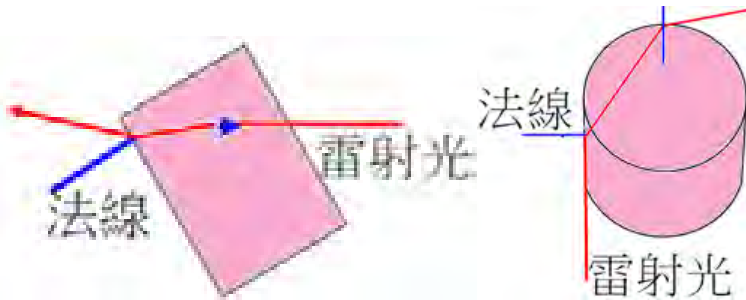


圖 40：光通過壓克力棒，偏折在不同位置的行進方向和法線示意圖。

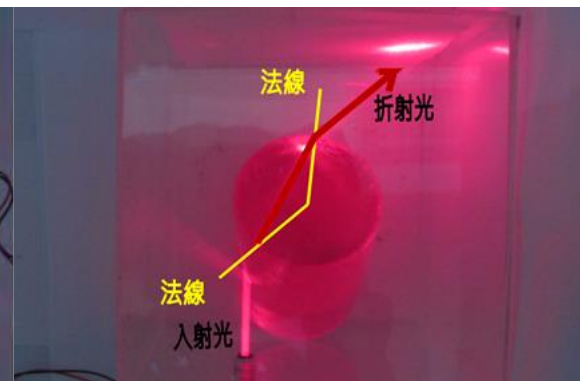
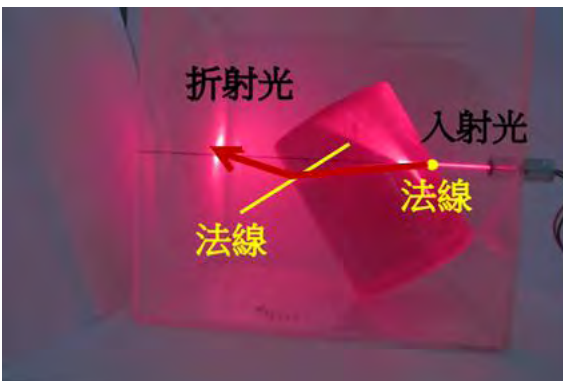


圖 41：光通過壓克力棒，偏折在不同位置的行進方向和法線關係。

(1)如果從玻璃棒中央位置入射：

從側面看，進入和離開壓克力棒時法線平行，光線只是向下偏移一點，基本上保持直線前進。所以即使玻璃棒傾斜，從玻璃棒正中央水平入射的雷射光高度不變，所以從傾斜玻璃棒中央入射的上揚角度小。

(2)從玻璃棒邊緣(以左側為例)位置入射的光：必須把光線和法線(垂直於圓柱面的入射位置)的夾角分成鉛直方向的夾角和水平方向的夾角。

當雷射光從左側邊緣入射紅色壓克力棒，此時法線幾乎與雷射光在同一水平面上，鉛直方向夾角幾乎等於零，水平方向夾角幾乎等於 90 度，所以幾乎只是向右偏折，沒有向下偏折。

當光線從壓克力棒穿出時，此時法線向下，折射角變大，於是會向上揚起。

四、探討干涉條紋形成的原因

在先前的實驗中，我們曾使用釣魚線來測量其產生的干涉條紋間距，發現不論是銅線還是釣魚線，或是第一區和第二區，條紋間距皆呈反比關係的結果，以下將說明：

(一) 刀片為何未產生干涉條紋、銅線產生干涉條紋的原因及關係

(二) 釣魚線產生干涉條紋的原因、分區，以及關係

(三) 光柵片的干涉條紋及關係

(四) 如何消除干涉條紋以及如何增強干涉條紋

(一) 刀片為何未產生干涉條紋、銅線產生干涉條紋的原因及關係

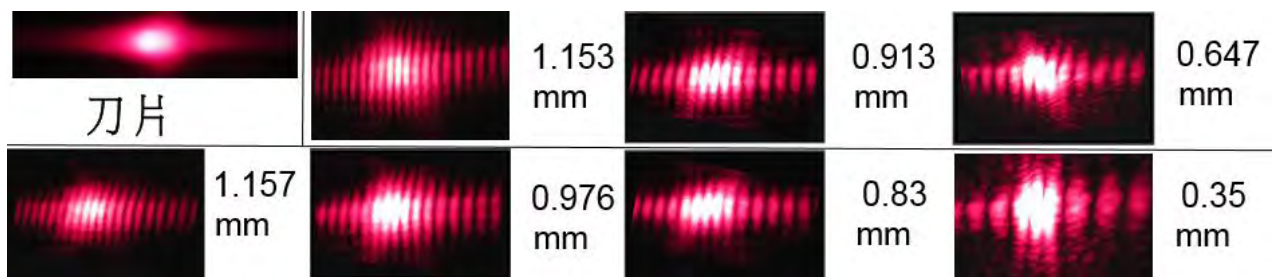


圖 42：刀片及銅線的干涉條紋

由圖 43 可說明，當雷射光通過美工刀刀片邊緣時，僅產生一個 S_1 ，但是如果要產生干涉條紋，一定要二道光進行疊加，所以雷射光通過美工刀刀片邊緣時，並未產生干涉條紋。

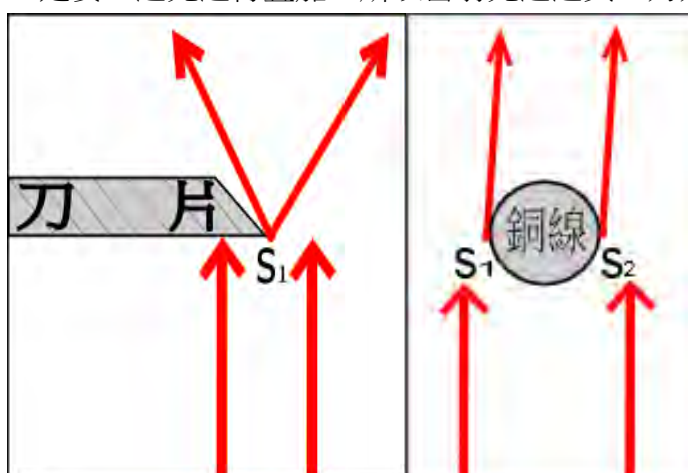


圖 43 :雷射光通過美工刀刀片邊緣 圖 44 :雷射光通過銅線邊緣

如圖 45 所示，銅線產生干涉條紋的原因則是，由雷射光通過**銅線兩旁**，會形成 2 個光源： S_1 、 S_2 ，如同兩個狹縫，使得光在後方布幕進行疊加，產生干涉條紋。將測出的條紋間距數據代入揚氏雙狹縫公式($L=4.7m$ 、 $\lambda=650 \times 10^{-9}m$)

$$y=L*\lambda/d$$

代入後數據如下:

銅線直徑(mm)	0.35	0.647	0.83	0.913	0.976	1.153	1.157
計算後雙狹縫間距 d 為(mm)	0.35	0.622	0.83	0.89	0.995	1.19	1.189

表 8:銅線粗細(直徑)及計算後雙狹縫間距 d 比較

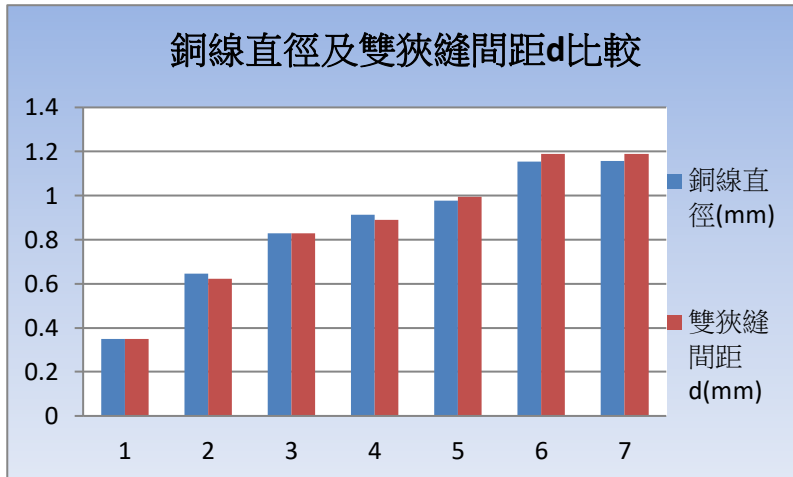


圖 45 :銅線直徑及計算後雙狹縫間距 d 比較

由圖 45 可發現，對於不透光的細銅線，雙狹縫間距 d 等於直徑(線的粗細)。雖然有誤差，但誤差皆極小，約在百分之一到百分之三之間。我們稱細銅線的干涉條紋遵守直徑模式。

(二)釣魚線產生干涉條紋的原因、分區，以及關係

我們用了幾款不同粗細的釣魚線(標示直徑)，看看分節現象有何不同，詳細數據請見研究結果。

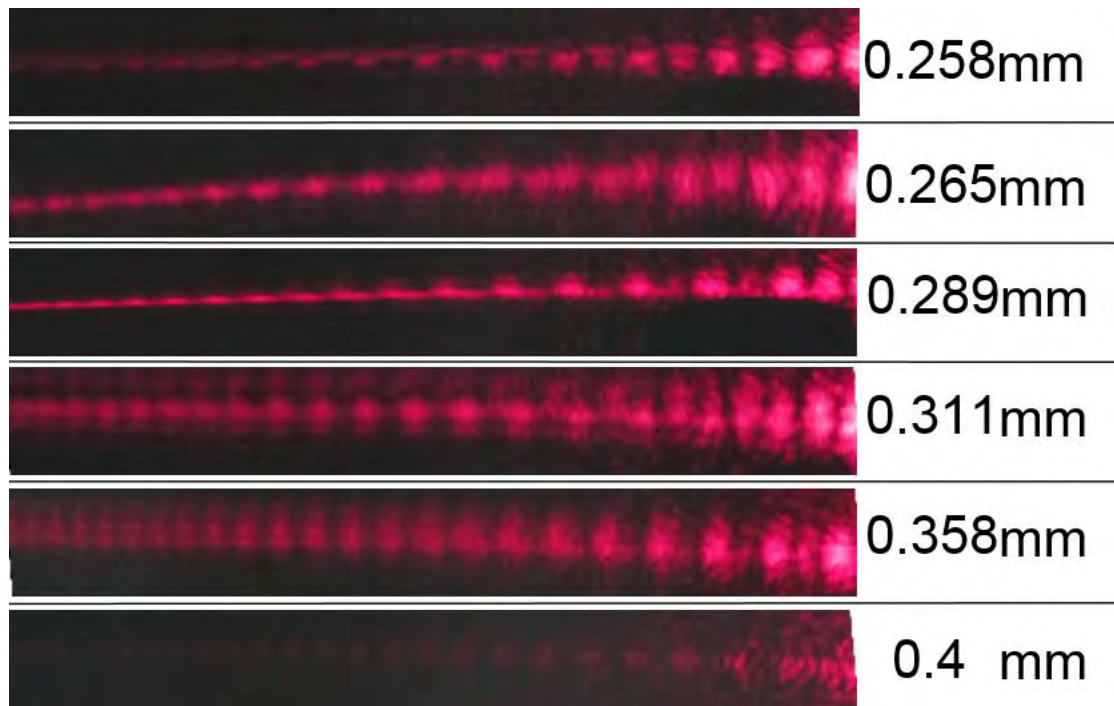


圖 46：比較雷射光通過直徑不同釣魚線的干涉圖形

由上圖可發現，越粗的釣魚線，條紋間距越小，越細的釣魚線，距離則越大，且分成二區，各區有不同的條紋間距 y ，以雷射光點為中心，第一區最靠近中心(圖中右側)，且條紋間距較小，第二區(左側)條紋間距較大。

我們發現，第一區間距代入公式後，理論的雙狹縫間距 d 較接近直徑，第二區間距代入公式後， d 較接近半徑，因此將釣魚線直徑、半徑和雙狹縫間距 d 做比較

釣魚線直徑(mm)	0.259	0.267	0.294	0.314	0.364	0.401
第一區雙狹縫間距 d	0.259	0.266	0.291	0.313	0.368	0.4
釣魚線半徑(mm)	0.129	0.133	0.146	0.156	0.179	0.2
第二區雙狹縫間距 d	0.123	0.133	0.15	0.158	0.179	0.21

表 9: 代入揚氏雙狹縫公式後釣魚線直徑及 d 比較

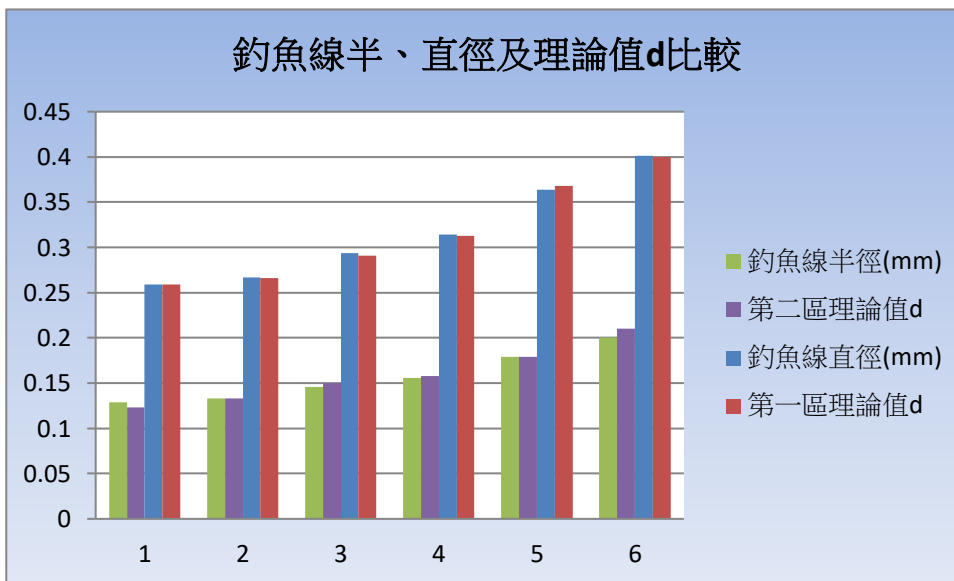


圖 47: 代入揚氏雙狹縫公式後釣魚線直徑、半徑及雙狹縫間距 d 比較

由圖 47 可發現，雖然有誤差，但誤差皆極小，約在百分之一到百分之三之間，我們稱雙狹縫間距 d 和半徑 r 相等的干涉模式為**半徑模式**。產生干涉條紋，推測原因如下：

第一區:

如圖 49 所示，雷射光通過釣魚線時，除了和細銅線一樣在邊緣形成光源 S_1 、 S_2 之外，另也由 a 、 c 或 b 、 c 兩道光到後方布幕疊加，產生干涉條紋。也就是同時遵守**直徑模式**和**半徑模式**。但是半徑模式的條紋間距剛好是直徑模式的兩倍，且兩者重疊而無法察覺。

第二區:

由刀片邊緣的繞射圖形可以推測，直徑模式的光，投射到兩旁時迅速衰減。所以，雷射光通過釣魚線時，是由圖 49 的 a 、 b 或 b 、 c 反射光和折射光到後方布幕疊加的半徑模式主導而產生干涉條紋。因此第二區的條紋間距 y 較大。

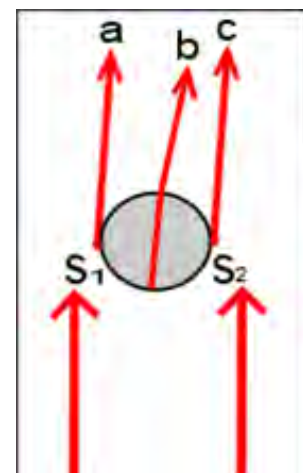


圖 48: 雷射光通過釣魚線示意圖

在第二區更旁邊的地方，未產生干涉條紋，推測是因為反射光到了此處，因為大角度而變得太弱，因此無法和折射光疊加產生干涉條紋，由此可知，若要產生干涉條紋，進行疊加的兩道光劑量必須旗鼓相當，否則無法產生明顯的干涉條紋。

為了證明圖 48 半徑模式中，兩邊緣的反射光線有參與疊加而產生干涉現象，我們把釣魚線並排並在交界處填充黑墨水以消除兩邊緣反射光，用黑膠帶遮蔽到只剩下一條釣魚線，照射雷射光時真的沒有呈現干涉條紋。我們又想，如果剩兩條釣魚呢？會有干涉現象嗎？於是進行下一個實驗：

(二)光柵片：二根不同粗細(間距)的光柵片

以下是兩條不同間距的光柵片(釣魚線並排)呈現的干涉條紋：

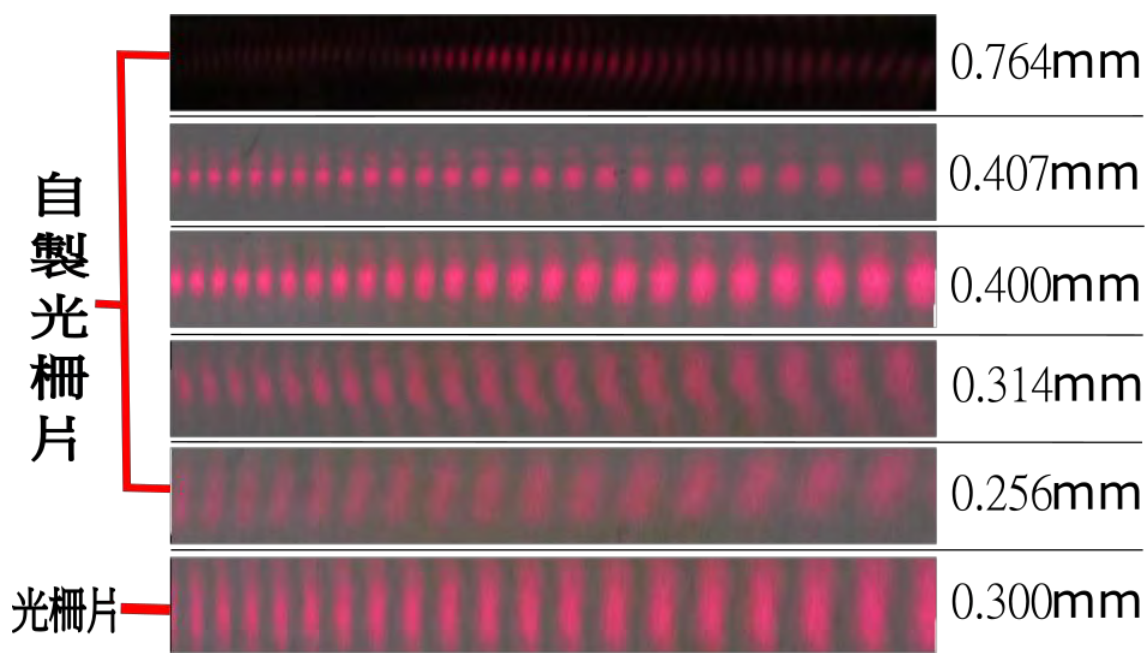


圖 49:不同間距的光柵片呈現疏密不同的干涉條紋

整理數據如下：

光柵片間距(mm)	0.256	0.3	0.301	0.33	0.372	0.399	0.764
條紋間距(mm)	11.7	10.5	10.5	9.32	8.14	7.62	4

表 10 雷射光通過二根光柵片時產生的干涉條紋間距:

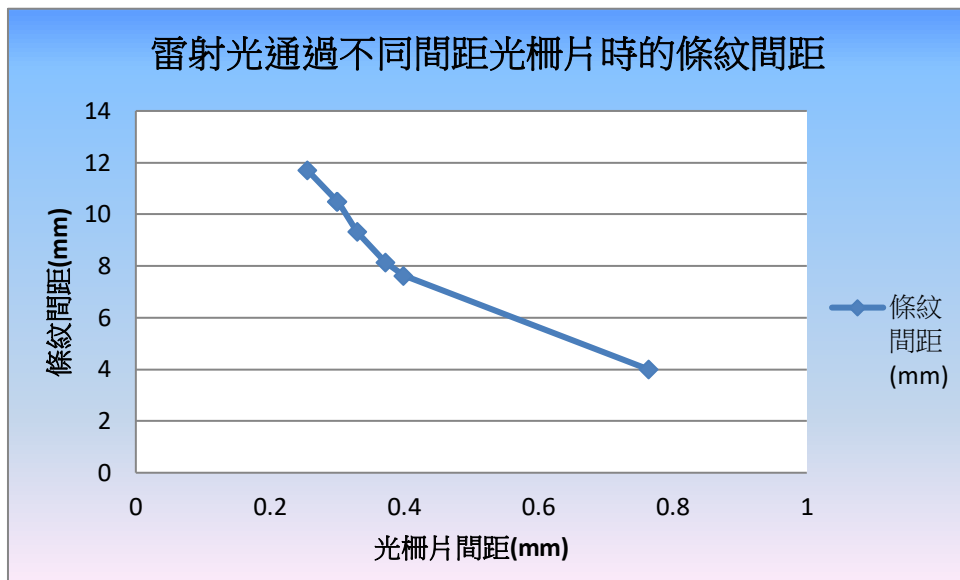


圖 50 雷射光通過光柵片時產生的干涉條紋間距:

由圖 50 可發現，可發現:光柵片間距和條紋間距呈反比關係。

(三)光柵片的干涉條紋及關係

根據實驗結果，並帶入揚氏雙狹縫公式後，我們發現， d 為光柵片的間距，數據如下:

光柵片間距(mm)	0.256	0.3	0.301	0.33	0.372	0.399	0.764
計算後 d 為(mm)	0.261	0.29	0.291	0.328	0.375	0.401	0.764

表 11: 光柵片間距(由顯微鏡測量)及理論狹縫間距 d (計算得到)的比較：

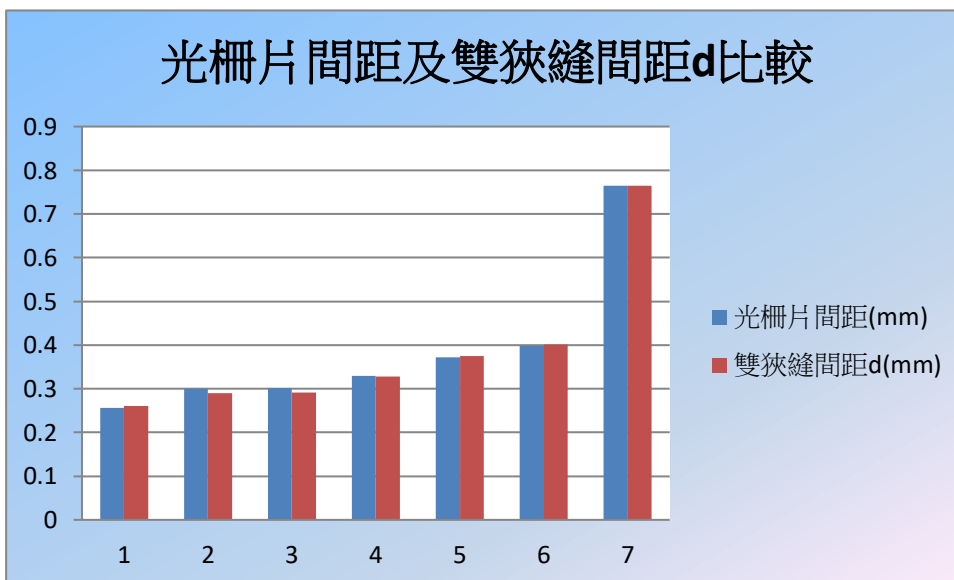


圖 51: 光柵片間距及雙狹縫間距 d 比較

由圖 51 可發現，光柵片間距和計算後的 d 幾乎相等，也就是光柵片間距就是雙狹縫間距 d ，誤差在百分之一到百分之三之間。因此我們推測，雷射光通過光柵片的行進路徑如下:

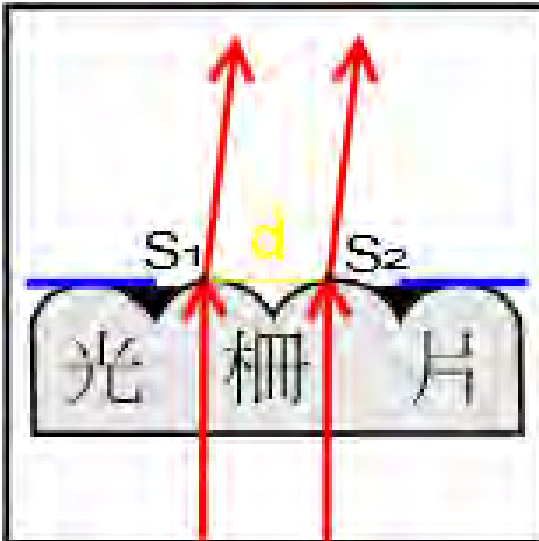


圖 52:雷射光通過光柵片行干涉條紋的原因

由圖 52 可發現，我們將光柵片貼至剩下二條時，S1、S2 通過光柵片到後方布幕進行疊加而形成干涉條紋。

我們又上網查詢了有關光柵片的資料，發現維基百科上說明當雷射光通過剩下二條的光柵片，及通過剩下五條的光柵片時，產生的干涉條紋相同，因此我們決定將光柵片用膠帶貼至剩下二根、三根、四根，觀察干涉條紋。我們決定採用間距 0.3mm 的市售光柵片來做實驗。

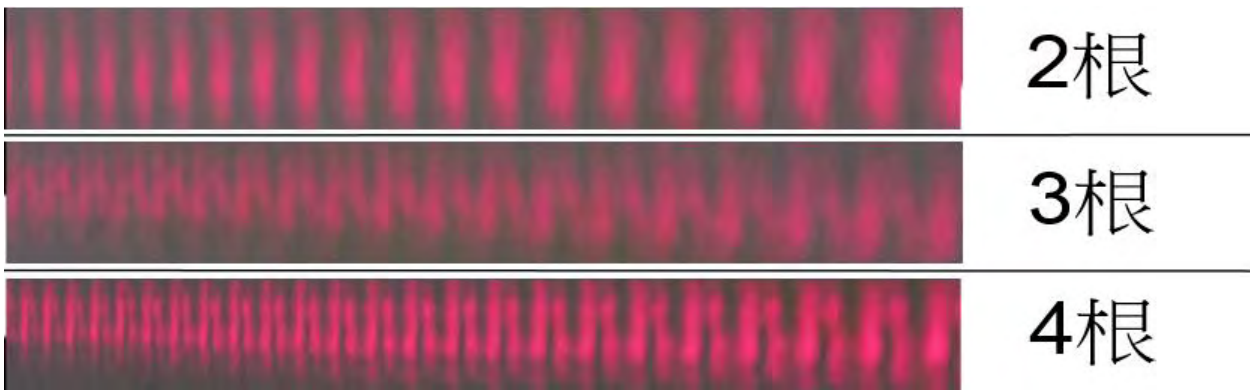


圖 53，當雷射光通過二根、三根、四根的光柵片時的干涉條紋

由圖 53 可發現，二根的干涉條紋最整齊清晰，三根的條紋變得雜亂，四根變得更加雜亂，但是我們仔細測量條紋間距後，發現條紋間距都相同，主要的周期性架構是一樣的，只是通過的光源增加，條紋就愈複雜。

由此可知，雷射光通過剩下二條的光柵片，及通過剩下五條的光柵片不可能相同，二根干涉條紋較整齊，五根的干涉條紋較雜亂。

我們又設想，既然雷射光通過光柵片，皆是以光柵片間距為 d ，誤差也都很小，那麼就可以將它當作是一個測量雷射光波長的工具，一未知波長的雷射光，通過光柵片，測量間距，再代入揚氏雙狹縫公式，就可以知道此雷射光波長。

(四)如何消除干涉條紋以及如何增強干涉條紋

1. 消除干涉條紋:

我們推論：如果能消除兩道光線中的一道光線，就能阻礙兩光線疊加，就能消除干涉條紋。

方法是：1.用黑色油漆筆把釣魚線右側塗黑，消除從右側**反射**的雷射光。(如圖 54、56 所示)

2.使細玻璃管中充滿黑墨水，消除靠近中心處**折射**的雷射光。(如圖 55、57 所示)

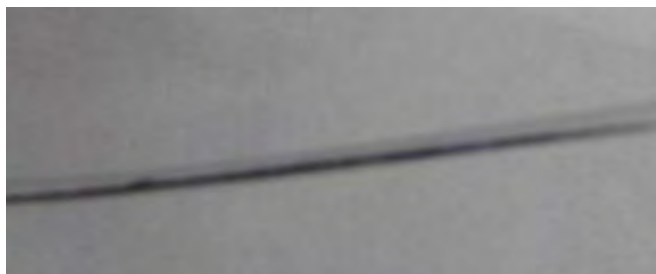


圖 54：黑色油漆筆把釣魚線右側塗黑

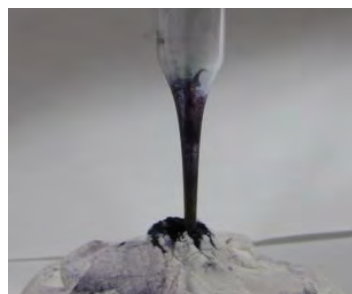


圖 55：細玻璃管中充滿黑墨水

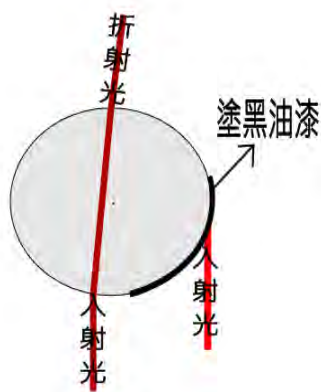


圖 56：釣魚線右側塗黑阻擋反射光示意圖

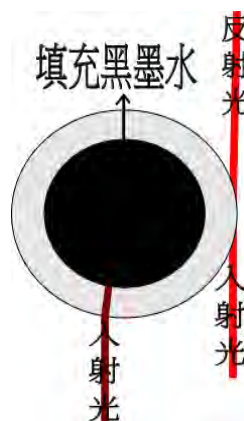


圖 57：細玻璃管中墨水阻擋折射光示意圖

實驗的結果如右圖所示：消除兩道光其中之一，干涉條紋消失。

此實驗結果可以驗證我們的假設

但是當我們使用更細的釣魚線，仿照之前的方法，也使用油漆筆將釣魚線一側塗黑，想看看是否也能成功消除干涉條紋，結果卻發現無法消除。

推測原因如下:

因為釣魚線過細，比雷射光還細，因此，釣魚線二側為雙狹縫，光通過狹縫後在布幕上產生干涉條紋，此時不論有沒有將釣魚線一側塗黑，皆對產生干涉條紋沒有影響。我們對細漆包線照射也會產生干涉條紋，原因相同。

所以要用以上的方法消除干涉條紋，前提是雷射光不行照到釣魚線以外，雷射光束要夠細或是釣魚線要稍微粗。

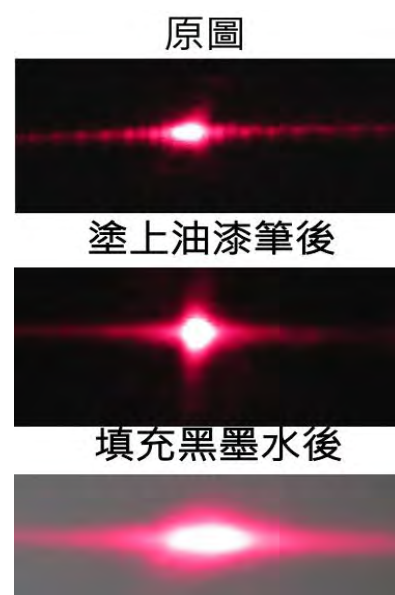


圖 58：消除反射或折射光線其中之一後，干涉條紋消失

2.增強干涉條紋:

我們還好奇地使用了外徑 1.3mm 的玻璃管，想看干涉條紋有甚麼差異。意外發現干涉條紋和釣魚線的不同。釣魚線的干涉條紋，是中間明顯二邊不明顯；玻璃管的干涉條紋反而是兩邊比較明顯，中間不明顯。推測通過釣魚線後，二邊反射的劑量較少，所以雖然有疊加，不過看不出來。但是(圖 59)的玻璃管形成的干涉條紋卻是中間不明顯二邊明顯。

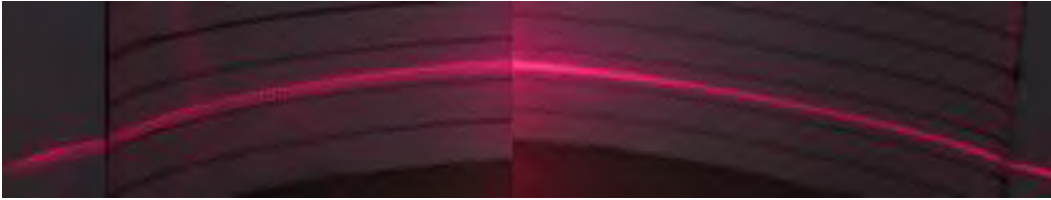
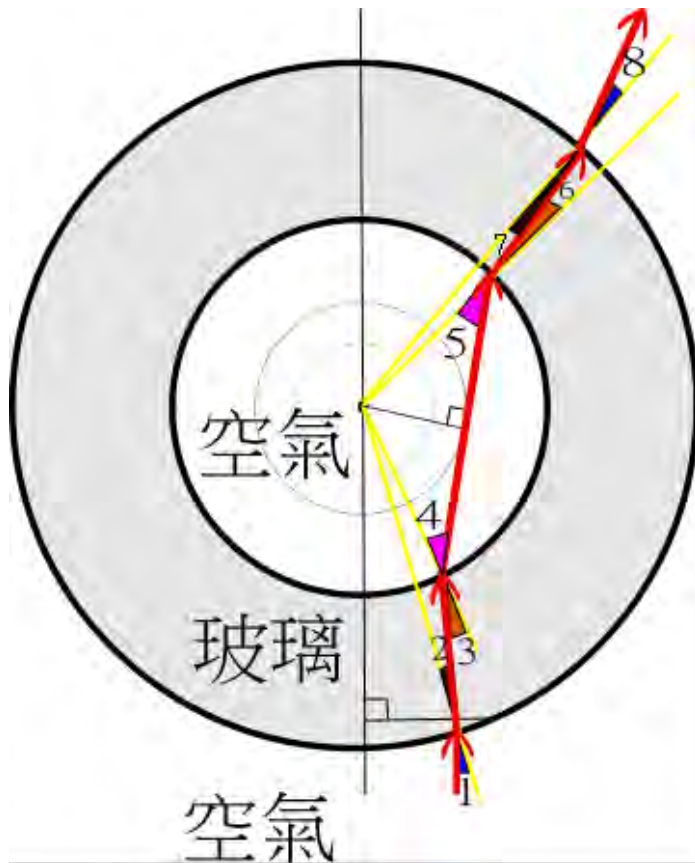


圖 59：雷射光通過細玻璃管後分別在布幕左右兩側產生比較明顯的干涉條紋。

推測原因如下:一束平行的雷射光由(圖 60)下方入射玻璃管，通過中間空氣的光線軌跡



使用附錄二的作圖方法，模擬雷射光在玻璃管中的行進路徑(如圖 60 所示)，原本在玻璃棒中要折射到左邊的光，經過空氣後，反而折射到右邊，所以通過管內空氣的雷射光會有向兩側散開的傾向。

把通過管內空氣折射的光加上只經過玻璃折射的光，整理如圖 61：

圖 60：雷射光通過玻璃管內空氣，折射後呈發散狀態

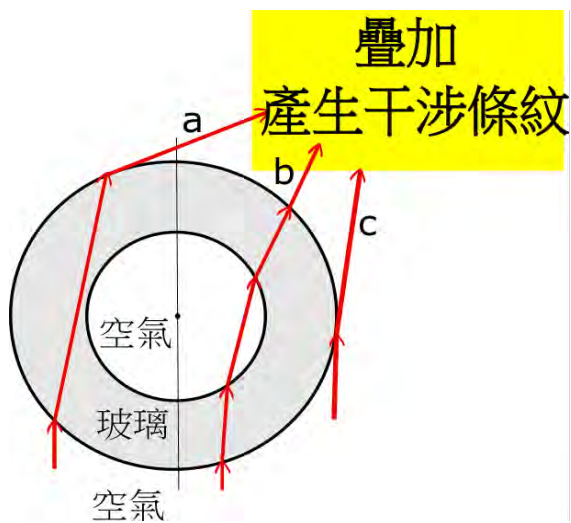


圖 61：玻璃管折射反射光線的軌跡

a 折射光、b 折射光、c 反射光在後方布幕重疊，產生干涉條紋，由於 a、b 折射光二者劑量旗鼓相當，就沒有像發生在釣魚線中，反射光太弱的問題。

所以，若要增強干涉條紋，可以採用細玻璃管做干涉實驗。

因此我們推測二邊干涉較明顯的原因如下:主要由相鄰的兩束折射光線(圖 61，a 和 b)疊加。

柒、結論

1. 玻璃棒愈細，雷射光照射時散開的角度愈大，投射出來的一字和玻璃棒垂直。
2. 雷射光照玻璃棒邊緣比照設玻璃棒中心散開的角度大。
3. 雷射光照傾斜玻璃棒，會使得雷射光圖案彎曲。玻璃棒愈細，圖案彎曲程度愈大；玻璃棒傾斜程度愈大雷射光彎曲程度愈大。
4. 當玻璃棒傾斜，雷射光照傾斜玻璃棒邊緣仍然比照設玻璃棒中心散開的角度大。
5. 雷射光通過不透光的細銅線產生的干涉現象，是通過細銅線兩旁邊緣的光線疊加形成，此為直徑模式。
6. 釣魚線產生的干涉現象，是通過釣魚線兩邊緣的光形成的直徑模式，和經由釣魚線中心折射的光線和釣魚線兩邊緣反射的光線，由這兩道光線產生的疊加作用的半徑模式共同形成；靠近中央，條紋密集，直徑模式較明顯；靠近兩旁處，因來自邊緣直徑模式的光衰減很快，半徑模式較明顯。
7. 光柵片的規律結構可以形成類似多狹縫的干涉效果，形成的干涉條紋仍然具有規律性，但圖案複雜。如果遮蔽至剩下兩條結構，條紋清晰容易測量，這和網路上的資料並不一樣。這種容易測量的特性，可以發展成穩定的測量工具，測定未知波長。
8. 使釣魚線表面部分塗漆以遮蔽反射光線；或是使細玻璃管內充滿黑色墨水遮蔽折射光線，都能消除細釣魚線或細玻璃管產生的干涉現象。
9. 通過玻璃管內空氣的光線有發散現象，這和另一側只經玻璃折射的光線偏折方向相同(如圖 61 的 a 和 b 光線)，投射到遠端產生更加明顯的干涉現象。

捌、參考資料

1. 折射率-維基百科，自由的百科全書

<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%8A%98%E5%B0%84%E7%8E%87>

2. 二氧化矽的物理性質-中鎢在線

<http://cn.chinatungsten.com/big5/Si/eyhgdwlxz.html>

3. 不飽和聚脂樹脂-中國複合材料網

http://www.ourfrp.com/top/02/ourfrp_02_01.htm

4. 壓克力（有機玻璃）的折射率是多少？-知乎

<https://www.zhihu.com/question/20432125>

5. 請問有機玻璃折射率是多少-百度知道

<https://zhidao.baidu.com/question/476899056.html>

6. 生活勇者系列番外篇 1——保麗膠灌模經驗(保利膠、保力膠)-痞客邦@卡美拉星球

<http://mimi62211.pixnet.net/blog/post/29273594-%E7%94%9F%E6%B4%BB%E5%8B%87%E8%80%85%E7%B3%BB%E5%88%97%E7%95%AA%E5%A4%96%E7%AF%871%E7%BC%8D%E4%BF%9D%E9%BA%97%E8%86%A0%E7%81%8C%E6%A8%A1%E7%B6%93%E9%A9%97%28%E4%BF%9D>

7. 廣華電子商城-一字紅光雷射模組(直線)->1mW DC3V 紅色一字雷射頭

<http://shop.cpu.com.tw/product/45270/info/>

8. 折射定律-維基百科，自由的百科全書

<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%96%AF%E6%B6%85%E5%B0%94%E5%AE%9A%E5%BE%8B>

9. 司乃耳定律（Snell's Law）-科學 online 高瞻自然科學教育資源平台

<http://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?p=1239>

10. 雙縫實驗-維基百科，自由的百科全書

<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%99%E7%B8%AB%E5%AF%A6%E9%A9%97>

11. 波動光學

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

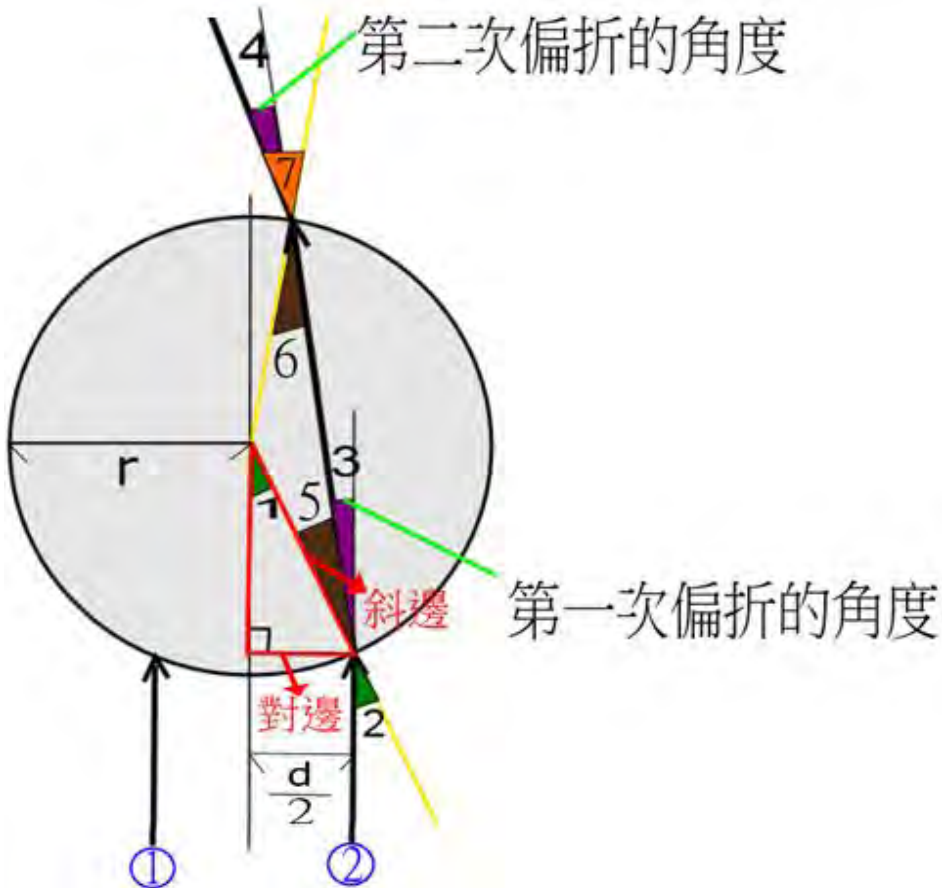
12. 康軒版，國中自然與生活科技，第三冊，第四章

玖、附錄

附錄一、

一、雷射光由玻璃棒中心及右邊入射時，散開的角度計算公式

(一) 雷射光由玻璃棒中心入射時，散開的角度計算公式:

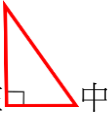


原理說明:①、②為雷射光束的邊緣，寬度 d ，對稱於中央線

1. 設玻璃棒半徑為 r ，折射率為 n ；空氣折射率為 1 。

2. 圖中， θ_2 為入射角， θ_5 為折射角。 根據 Snell's 定律： $1 \cdot \sin \theta_2 = n \cdot \sin \theta_5$

3. 因為雷射光平行於中央線，所以入射角 θ_2 等於圓心角 θ_1 。 所以 $\sin \theta_1 = n \cdot \sin \theta_5$

4. 在  中 $\sin \theta_1 = \frac{\text{對邊}}{\text{斜邊}} = \frac{d/2}{r} = \frac{d}{2r}$ 代入上式，得 $\frac{d}{2r} = n \cdot \sin \theta_5$ ，所以 $\sin \theta_5 = \frac{d}{2nr}$

$$\theta_5 = \sin^{-1}\left(\frac{d}{2nr}\right) \quad \text{且} \quad \theta_1 = \sin^{-1}\left(\frac{d}{2r}\right)$$

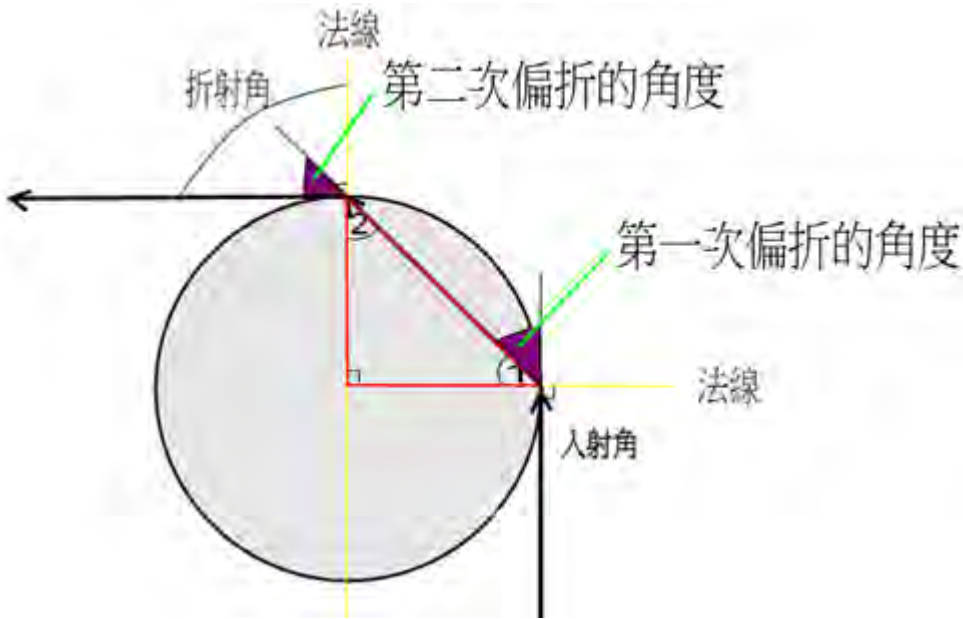
原理說明:①、②為雷射光束的邊緣

1.設玻璃棒半徑為 r ，雷射光的寬為 d ，折射率為 n 。

2.二紫色角相加($\theta_3 + \theta_4$)為雷射光①總共偏折的角度，且二角相等

仿照從中央入射的過程，雷射光①總共偏折的角度 = $2 [\sin^{-1}(\frac{r-d}{r}) - \sin^{-1}(\frac{r-d}{nr})]$

3. 雷射光②從玻璃棒最右緣入射，再畫一張圖來說明他的偏折角度如下：



4.當雷射光照到玻璃棒最邊緣時，入射角是 90 度，二紫色角相加為偏折角度

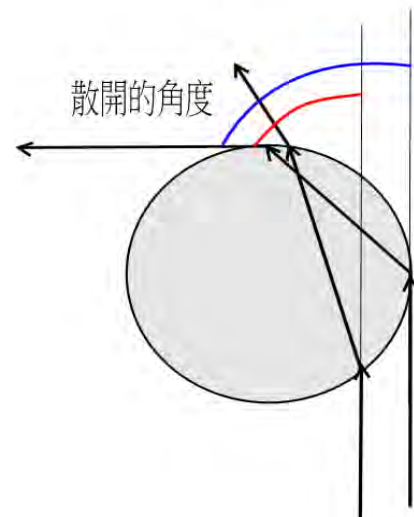
5.已知 $\sin(90^\circ)$ 為 1，根據 Snell 定律化簡可得折射角為

$$\text{折射角 } \theta_1 = \sin^{-1}\left(\frac{1}{n}\right)$$

6.入射角減折射角為偏折角度，連續偏折 2 次後為總共偏折角度為：

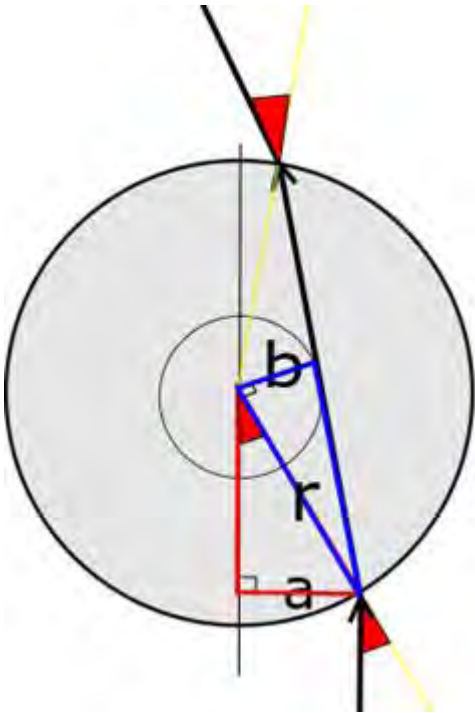
$$2 \left[90^\circ - \sin^{-1}\left(\frac{1}{n}\right) \right]$$


7. 因為 2 道雷射光束都向左偏折，所以偏折後的夾角(散開的角度)必須相減，如下圖所示，其結果為：




$$\text{散開角度} = 2 \left[90^\circ - \sin^{-1}\left(\frac{1}{n}\right) \right] - 2 \left[\sin^{-1}\left(\frac{r-d}{r}\right) - \sin^{-1}\left(\frac{r-d}{nr}\right) \right]$$

附錄二、使用尺規作圖，根據折射定律規範的入射折射關係，再運用切線垂直於切點和圓心的連線，畫出雷射光(當成一條線)行進路徑上的偏折路徑。




1.如上圖所示，在  中 $\sin(\text{入射角}) = \frac{a}{r}$ ，

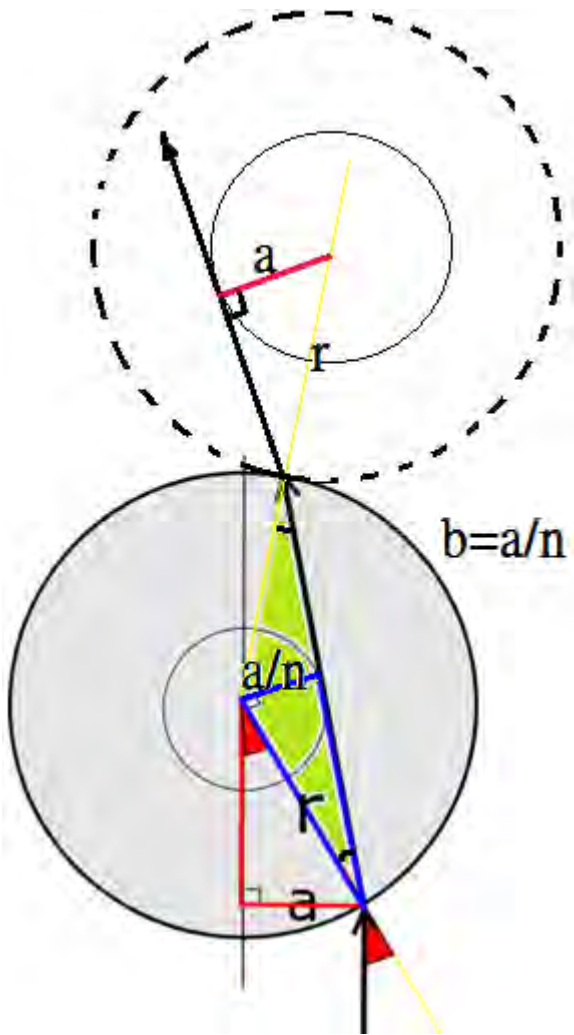
Snell's 定律： $1 \cdot \sin \text{入射角} = n \cdot \sin \text{折射角}$ $1 \cdot \frac{a}{r} = n \cdot \sin(\text{折射角})$

2. 在  中 $\sin(\text{折射角})$ 為 $\frac{b}{r}$ ，代入上式

$$1 \cdot \frac{a}{r} = n \cdot \frac{b}{r} \quad \text{所以} \quad b = \frac{a}{n}$$

3.先用直尺測量得到 a 值，除以折射率 n 得到 b 值，並利用圓規以 b 為半徑畫圓，並從入射點向圓的邊緣作切線，畫出光的折射路徑。

4.因為圓半徑相同，故綠色三角形  為等腰三角形，第二次入射角和第一個折射角相等，根據對稱，折射回到空氣中會偏離法線，在法線上離入射點 r 的位置為圓心，以 a 為半徑作圓，沿著圓的切線可畫出第二次折射光的折射路徑，如圖所示。



5. 以相同的作圖法則，再畫出第二條線的折射路徑，就可以用量角器測量兩條線之間的夾角（散開的角度）

※ 這樣作圖的優點是可以不必使用工程計算機計算，在視覺上理解光線的偏折狀況。

【評語】 030109

本作品利用雷射通過或照射障礙物產生繞射條紋，並據以分析條紋與障礙物(細線、多條細線、光柵、刀片)的關係。可改進之處包括：

- (1) 光源可使用模態較佳(接近 TEM00)的雷射光源
- (2) 繞射條紋量測的距離應有遠近的比較
- (3) 解釋的模型需稍修正，應考慮單狹縫，與邊緣繞射、非僅雙狹縫。

整體而言，實驗的設計用心，且能清楚表達關鍵的觀念與重要的結果，對相關的物理光學原理有極佳的了解，值得讚許。

摘要

探討雷射光通過玻璃棒時的折射路徑，結果發現：當水平雷射光入射垂直立於地面玻璃棒時，原先的雷射光點水平散開成「一」字狀，且玻璃棒越細，散開的角度越大。當雷射光入射傾斜玻璃棒時，折射後的圖案是彎曲的，且玻璃棒越細或是傾斜角度越大，折射光彎的幅度就會越大。當雷射光通過不透光的細銅線或是透光的釣魚線時，投射出不一樣的干涉條紋，遵循不一樣的干涉模式。我們釐清此干涉條紋形成的原因，並找到消除干涉條紋的方法。

壹、研究動機

上學期有物理系教授來學校演示了一堂有關光學的課程，當時雷射光通過光柵片時，折射光是散開成「一」字狀，而不是一個雷射光點，還分成一節一節的。且當光柵片傾斜時，折射出的光是彎曲的。我們覺得這個折射現象十分有趣，也想進一步了解其形成原因，因此我們開始設計了以下實驗。



貳、研究目的

- 一、研究雷射光垂直入射不同粗細的玻璃棒的中心或旁邊時，散開角度的不同。
- 二、研究雷射光入射不同粗細的傾斜玻璃棒時，散開角度及上揚角度的不同。
- 三、研究雷射光通過不透光細銅線及透光細釣魚線產生的干涉條紋。

參、研究設備及器材

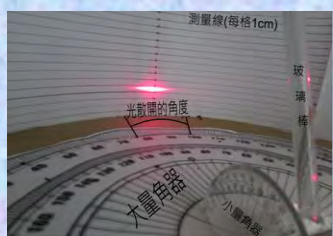
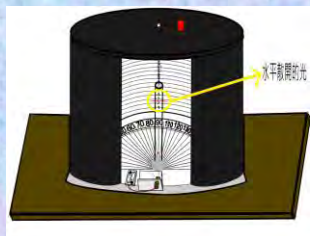
- 一、自製圓柱形測量箱。
- 二、模擬玻璃棒的保力膠模形。
- 三、自製圓柱磨平機。
- 四、相機、壓克力、雷射頭、培養皿、釣魚線、漆包線。



肆、研究過程與方法

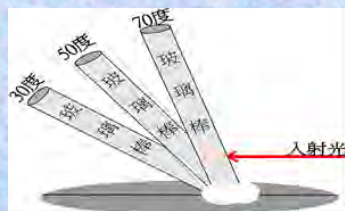
一、雷射光垂直入射不同粗細的玻璃棒的中心或旁邊時，散開角度的不同：

1. 用雷射光照玻璃棒，若投射出的光為水平，則玻璃棒已垂直立於地面，依序測量不同直徑的玻璃棒。
2. 雷射光通過每根玻璃棒中心點時，依據平放的量角器，記錄在後方布幕散開的角度(如下圖)。

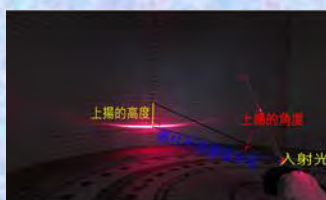


二、雷射光入射不同粗細的傾斜玻璃棒時，散開的角度和上揚的角度：

玻璃棒傾斜成和桌面夾角 70 度、50 度、30 度數據，並拍照記錄。



測量到的數據是雷射光在圓柱形測量箱中散開後兩端的上升高度(cm)，代入三角函數 $\tan(\text{上揚角度}) = \text{上揚高度} / \text{測量箱半徑}$ ，使用 \tan 反三角函數，就可以求出上揚的角度

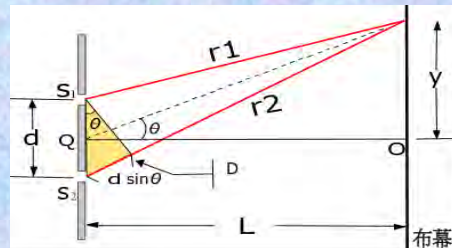


三、雷射光通過銅線及透光細釣魚線產生的干涉條紋：

干涉原理：引用揚氏雙狹縫干涉理論：

$$\text{雙狹縫間距 } d = \frac{L\lambda}{y}$$

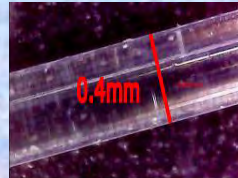
$L=4.7\text{m}$ 、 $\lambda=650\text{nm}$ ，實驗測得條紋間距 y 可算出 d 。



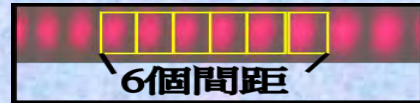
研究方法：

一、依序以雷射光照射不透光細銅線及透光細釣魚線

1. 用校正過的 USB 顯微鏡分別測量其直徑(粗細)。

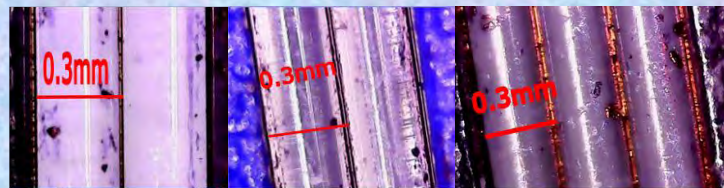


2. 測量雷射光通過細銅線及細釣魚線時投射到後方牆壁(距離 $L=4.7\text{m}$)的干涉條紋間距 y ，一次測量 6 到 10 個間距，並求平均。



二、光柵片:(這裡的光柵片指的是規律性重複的結構)

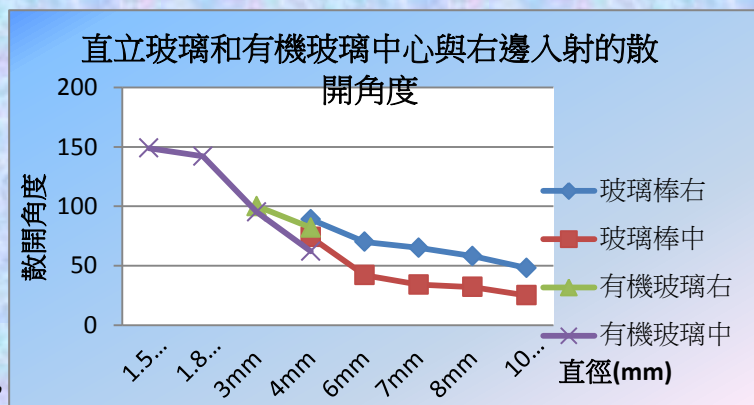
1. 將數根釣魚線並排，在每根中間填充黑墨水，以確保雷射光不會從顯微鏡也看不見的縫隙穿過，用不透光膠帶貼至剩下二根，如下圖左所示。



2. 市售光柵片(間距 0.3mm)，用不透光膠帶貼至剩下二根(如上圖中)、三根(如上圖右)、四根，測量間距，並和二根的做比較。

伍、研究結果

一、玻璃棒垂直於桌面，雷射光從不同粗細玻璃棒中央及右邊入射，散開角度測量：實驗結果如下：

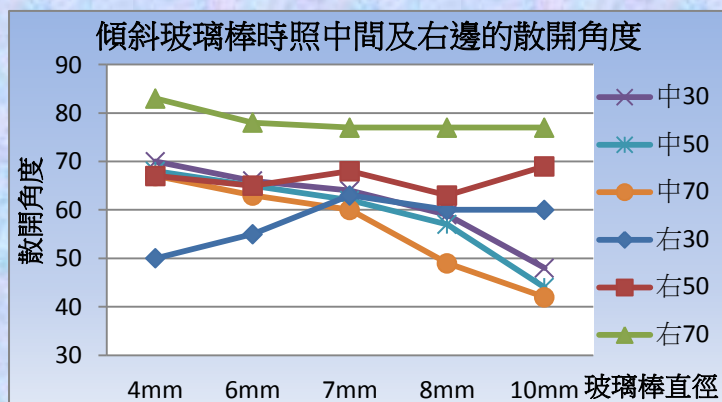


可看出：(1)玻璃棒愈細，散開的角度愈大。

(2)照射右邊比照射中央散開角度大。

(3)同樣 4mm，玻璃比有機玻璃散開角度大。

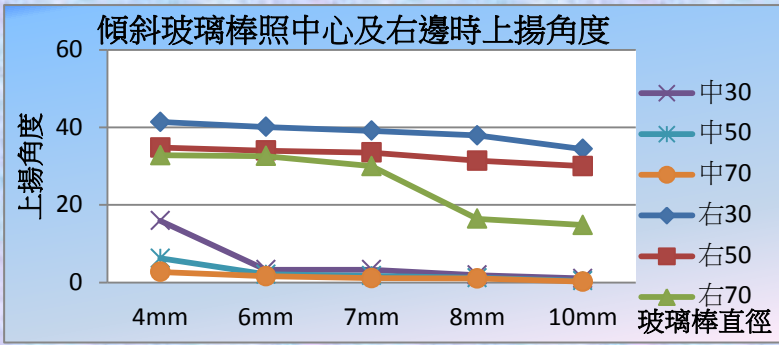
二、(1)雷射光入射不同粗細的傾斜玻璃棒時，散開角度的測量：實驗結果如下：



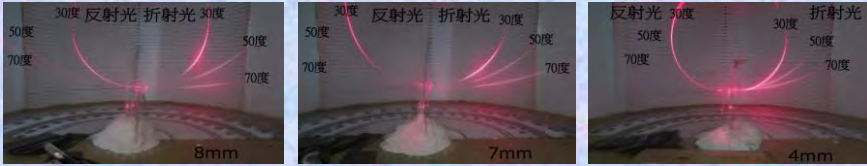
(一)照射玻璃棒右邊、愈細、愈傾斜，散開角度越大。

(二)照射右邊，70 度的，情況和照射中心類似，玻璃棒愈細，散開角度大；50 度和 30 度反而都是相反。

(2) 雷射光入射不同粗細的傾斜玻璃棒時，上揚角度的測量：



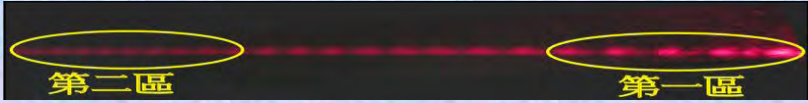
無論從中心或右邊入射，玻璃棒越細、越傾斜，折射光上揚的角度越大，右邊入射上揚的角度都比從中間入射的大。



三、研究雷射光通過銅線及透光細鈞魚線產生的干涉條紋：

(一)不透光細銅線及透光細鈞魚線：

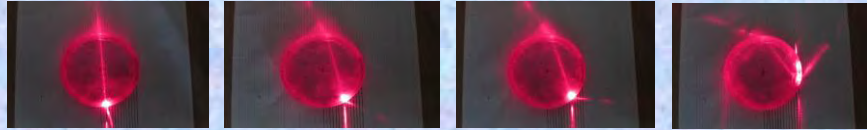
雷射光經過細銅線兩端投射的干涉條紋間距只有一種，細鈞魚線的有二種，靠近中央的稱為第一區，偏兩側的稱為第二區，而鈞魚線則是分為第一區及第二區分別測量。



不論是銅線還是鈞魚線、第一區或第二區，線徑愈細，干涉條紋間距愈大。且鈞魚線第二區條紋間距較第一區的大。

陸、討論

一、保力膠(壓克力)模型的折射路徑探討光在玻璃棒中的偏折：



愈靠右邊入射，向左偏折愈多，且反射的愈多。

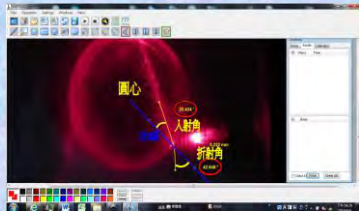
探討水及保力膠模型的折射率，依據 Snell 定律：

$$n_1 \cdot \sin(\text{入射角}) = n_2 \cdot \sin(\text{折射角})$$

空氣的折射率為一，得

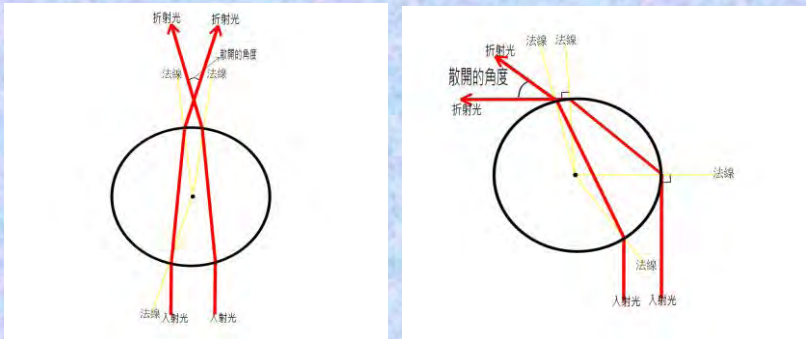
$$n_2 = \sin(\text{入射角}) / \sin(\text{折射角})$$

拍攝雷射光行進路徑，使用 USB 數位顯微鏡附贈程式測量角度，水的折射率為 1.33 ± 0.05 。而保力膠(壓克力)的折射率為 1.59 ± 0.03 。



二、探討光在直立玻璃棒中的行進路徑：

根據以上觀察，模擬一束雷射光由中心和邊緣通過玻璃棒如下：



可以看出雷射光照到玻璃棒中心時散開角度小，照到玻璃棒邊緣時散開角度大。玻璃棒越細，入射光照到玻璃棒的入射角越大，偏折越多，水平散開的角度也越大。

我們推演了一個數學公式，可以更精確說明散開角度計算的方法和影響的因素。(設玻璃棒半徑 r 、雷射光寬 d 、折射率 n):

雷射光入射玻璃棒中心時，散開的角度：

$$4 \left[\sin^{-1}\left(\frac{d}{2r}\right) - \sin^{-1}\left(\frac{d}{2nr}\right) \right]$$

正弦函數 $\sin \theta$ 數值和角度 θ 正相關(不是正比)，所以 $\sin \theta$ 數值相差愈大就表示角度 θ 相差愈大(散開角度愈大)。於是以 $\sin \theta$ 值，

$$\left(\frac{d}{2r} - \frac{d}{2nr}\right)$$

相減帶入，散開角度正相關於 $\frac{d}{2r} \left(1 - \frac{1}{n}\right)$

r 愈小或是 n 愈大，得到的數值會較大，散開角度也愈大。

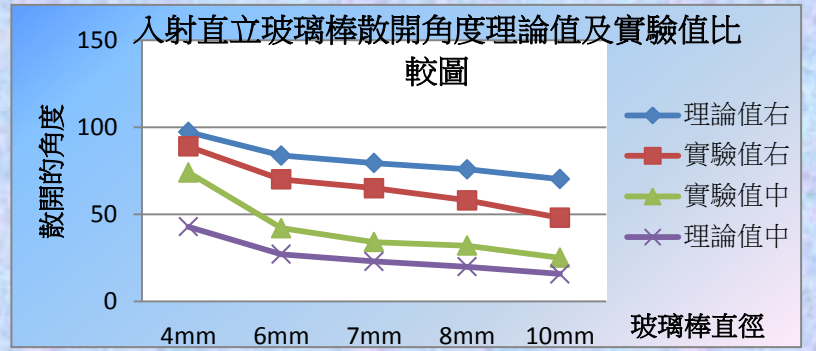
雷射光入射玻璃棒邊緣時，散開的角度：

$$2 \left[90^\circ - \sin^{-1}\left(\frac{1}{n}\right) \right] - 2 \left[\sin^{-1}\left(\frac{r-d}{r}\right) - \sin^{-1}\left(\frac{r-d}{nr}\right) \right]$$

仿照上面討論，以 $\sin \theta$ 值，代入相減就可以推測散開角度的大

$$\text{小：公式後項} : \frac{r-d}{r} - \frac{r-d}{nr} = \frac{r-d}{r} \left(1 - \frac{1}{n}\right) = \left(1 - \frac{d}{r}\right) \left(1 - \frac{1}{n}\right)$$

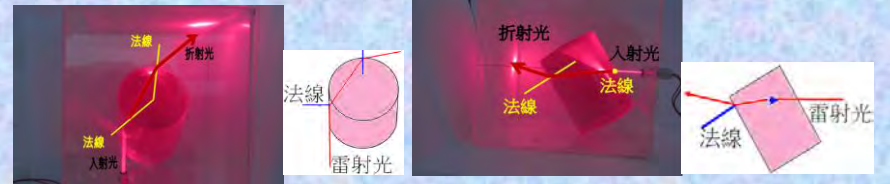
若 $d < r$, r 愈小，代入後項得到的數值會較小，散開角度也愈大。將理論值及實驗值比較：



1. 雷射光由中間入射玻璃棒時，實驗值較理論值大。
2. 雷射光由右邊入射玻璃棒時，實驗值較理論值小。

三、探討光在傾斜玻璃棒中的行進路徑：

在煙霧箱中放入自製的保力膠模型，觀察雷射光在空氣和壓克力中的行進路徑。

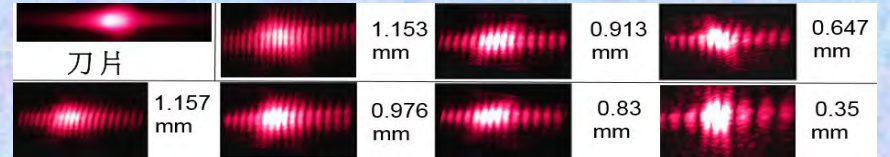


(1) 從俯視圖可以看出雷射光在壓克力棒裡面向右偏折，這很像雷射通過水平放置的壓克力模型狀況。

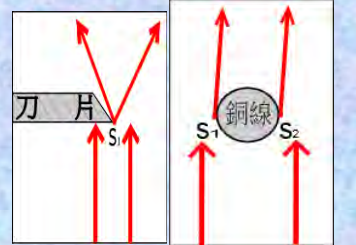
(2) 從側視圖可以看出雷射光在壓克力棒裡面向下偏折，通過壓克力後，因法線偏離水平面，所以雷射光往上升。

四、探討干涉條紋形成的原因：

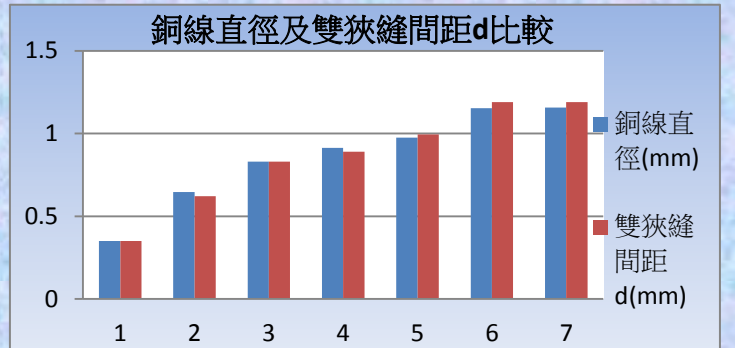
(一)刀片未產生干涉條紋、銅線產生干涉條紋的原因及關係：



雷射光通過刀片邊緣時，僅產生一個 S_1 ，不能產生干涉條紋。通過銅線兩旁，會形成 2 個光源： S_1 、 S_2 ，如同兩個狹縫，產生干涉條紋。將測出的條紋間距數據代入揚氏雙狹縫公式，

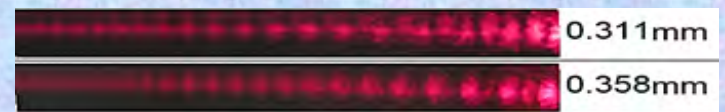


比較雙狹縫間距 d 和銅線直徑如下：



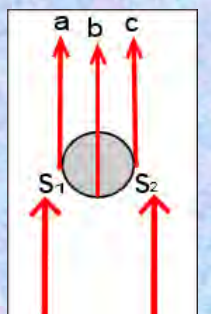
等於直徑(線的粗細)。我們稱細銅線的干涉現象遵守直徑模式。

(二)鈞魚線產生干涉條紋的原因、分區，以及關係：

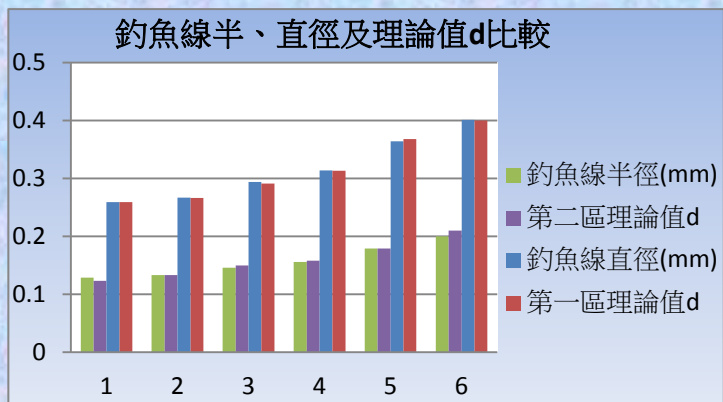


我們稱雙狹縫間距 d 和半徑 r 相等的干涉模式為半徑模式。產生干涉條紋，推測原因如下：

第一區：雷射光通過鈞魚線時，除了和細銅線一樣在邊緣形成光源 S_1 、 S_2 之外，另也由 a、b 或 b、c 兩道光到後方布幕疊加，產生干涉條紋。同時遵守直徑模式和半徑模式。但是半徑模式的條紋間距剛好是直徑模式的兩倍，且兩者重疊而無法察覺。



第二區:由刀片邊緣的繞射圖形可以推測，直徑模式的光，投射到兩旁時迅速衰減。所以，離中央較遠的第二區，只剩半徑模式主導而產生干涉條紋。



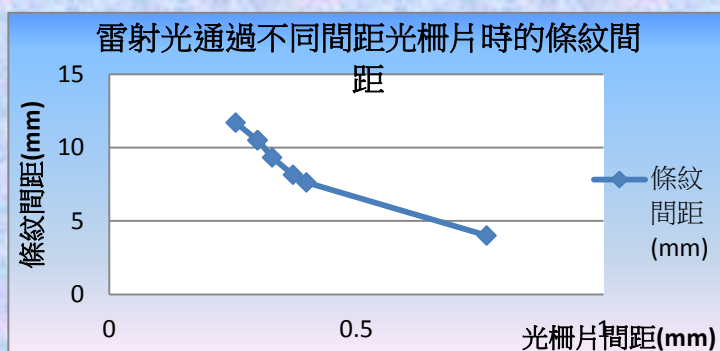
為了證明兩邊緣的反射光線有參與疊加而產生干涉現象，釣魚線並排並在交界處填充黑墨水以消除兩邊緣反射光，用黑膠帶遮蔽到只剩一條釣魚線，就真的沒有呈現干涉條紋。但如剩兩條釣魚線呢？會有干涉現象嗎？

(三)光柵片：二根光柵片的干涉現象：

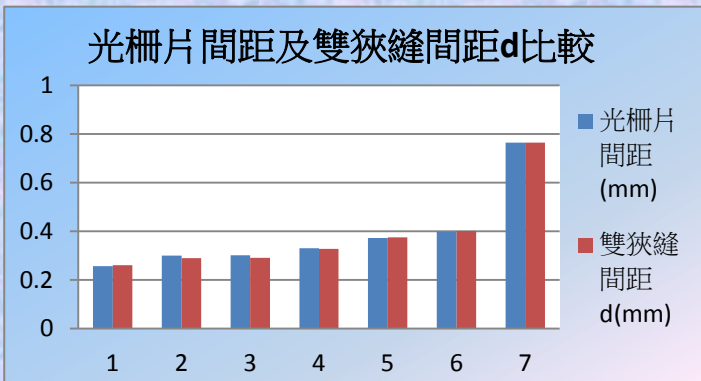
不同間距的光柵片(釣魚線並排)呈現的干涉條紋：



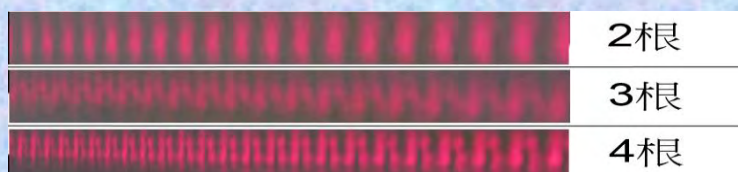
雷射光通過二根光柵片時產生的干涉條紋間距：



帶入揚氏雙狹縫公式後，我們發現光柵片間距和計算後的d幾乎相等，也就是光柵片間距就是雙狹縫間距d。



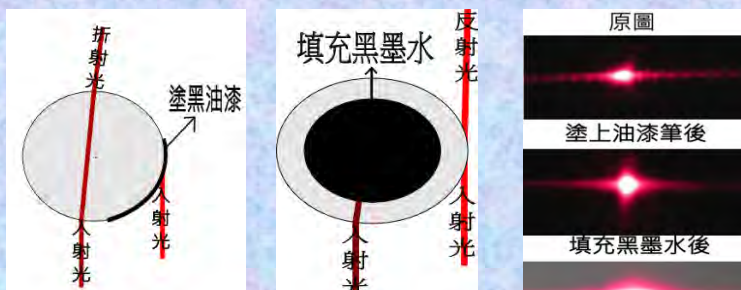
我們推測，雷射光通過光柵片的行進路徑如右：S1、S2 通過光柵片到後方布幕進行疊加而形成干涉條紋。維基百科上說明當雷射光通過剩下二條和五條的光柵片，產生的干涉條紋相同，我們將光柵片用膠帶貼至剩下二根、三根、四根，觀察干涉條紋如下：



主要的週期性架構是一樣的，但通過的光源增加，條紋就愈複雜。二條和五條光柵片，干涉條紋不可能相同。

消除干涉條紋：

我們推論：如果能消除兩道光線中的一道光線，就能阻礙兩光線疊加，就能消除干涉條紋。方法是：1.消除從右側反射的雷射光。2.細玻璃管中充滿黑墨水，消除靠近中心處折射的雷射光。

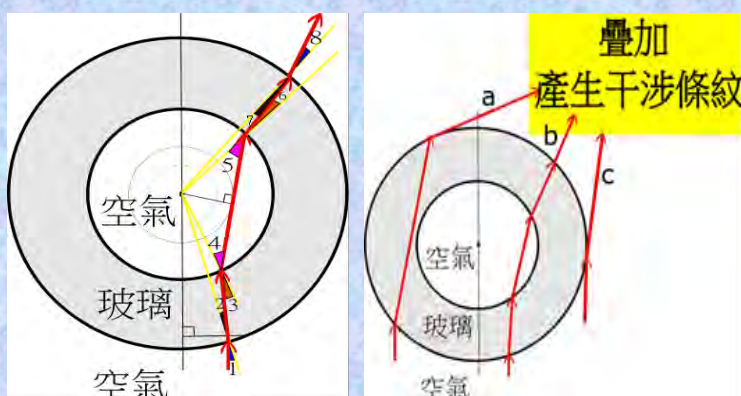


我們使用了外徑 1mm 玻璃管，意外發現干涉條紋和釣魚線的不同。通過玻璃管干涉條紋是二邊比中間明顯。

推測原因如下：一束平行的雷射光由下圖下方入射玻璃管，通過中間空氣的光線軌跡模擬來看，雷射光通過玻璃管內空氣，折射後呈發散狀態。



推測原因如下：一束平行的雷射光由下圖下方入射玻璃管，通過中間空氣的光線軌跡模擬來看，雷射光通過玻璃管內空氣，折射後呈發散狀態。



我們推測：折射光 a、折射光 b、反射光 c，在布幕重疊，產生干涉條紋，由於反射光 c 因角度增大而減弱，a、b 折射光二者劑量旗鼓相當，於是干涉條紋明顯。所以，若要增強干涉條紋，可以採用細玻璃管做干涉實驗。

柒、結論

1. 玻璃棒愈細，雷射光照射時散開的角度愈大，投射出來的一字和玻璃棒垂直。
2. 雷射光照射傾斜玻璃棒，會使得雷射光圖案彎曲。玻璃棒愈細、越傾斜雷射光彎曲程度愈大。
3. 不論玻璃棒傾斜與否，雷射光照玻璃棒邊緣都比照射中心散開的角度大。
4. 雷射光通過不透光的細銅線產生的干涉現象，是通過細銅線兩旁邊緣的光線疊加形成，此為直徑模式。
5. 釣魚線產生的干涉現象，是通過釣魚線兩邊緣的光形成的直徑模式，和經由釣魚線中心折射的光線和釣魚線兩邊緣反射的光線，由這兩道光線產生的疊加作用的半徑模式共同形成；靠近中央，直徑模式較明顯；靠近兩旁處，半徑模式較明顯。
6. 光柵片的規律結構可以形成類似多狹縫的干涉效果，形成的干涉條紋仍然具有規律性，但圖案複雜。如果遮蔽至剩下兩條結構，條紋清晰容易測量，這和網路上的資料並不一樣。這種容易測量的特性，可以發展成穩定的測量工具，測定未知波長。
7. 使釣魚線表面部分塗漆以遮蔽反射光線；或是使細玻璃管內充滿黑色墨水遮蔽折射光線，都能消除細釣魚線或細玻璃管產生的干涉現象。
8. 通過玻璃管內空氣的光線有發散現象，這和另一側只經玻璃折射的光線偏折方向相同，投射到遠端產生更加明顯的干涉現象。

捌、參考資料

1. 國中自然與生活科技，第三冊，第四章
2. 雙縫實驗-維基百科，自由的百科全書