

第二十屆旺宏科學獎

成果報告書

參賽編號：SA20-057

作品名稱：正倒立皂膜之干涉現象探討

姓名：張庭浩

關鍵字：表面張力、皂膜、馬倫哥尼效應

摘要

經過光的照射，球狀的皂膜泡泡上會因干涉而顯現一條一條不同顏色的干涉條紋，一般認為這些干涉條紋會因重力而積在底部，造成皂膜泡泡頂端薄底部厚，而顯現出不同的色彩。本作品運用自行調配的泡泡，正放和倒立，實驗觀測皂膜泡泡上的干涉條紋在不同方向所產生的厚度差異變化，並分析皂膜泡泡在不同時刻的照片。實驗後我們以程式畫出其厚度對照的色彩厚度對應圖，並對照更多角度的皂膜泡泡變化，確定使皂膜厚度產生變化的原因，並歸納出皂膜泡泡穩定的機制。

本研究主要有 2 個發現，(1)倒立泡泡有較佳的穩定性，(2)皂膜泡泡具有指向穩定性。

壹、研究動機

以前只會覺得泡泡上的色彩就是皂膜泡泡的象徵，長大開始會對於皂膜上光鮮亮麗的色彩感到好奇，開始進行一連串的調查，才發現上面的色彩來自於泡膜厚度的差異所產生出來的干涉紋，而泡泡上的干涉條紋會隨時間而往下堆積，推測是重力所產生的結果。而在研究的過程說，我們無意間研讀到一篇報導，把皂膜泡泡給倒過來(泛科學，2020)，此時我們才發現相關泡泡實驗的資料皆是正立的泡泡做分析，沒有倒立泡泡的分析報告。因此，為釐清造成干涉條紋堆積在泡泡底部的原因，我們改進實驗裝置，並嘗試設計倒立泡泡的觀測方法，設計實驗變項來深入探討皂膜泡泡。

貳、研究目的

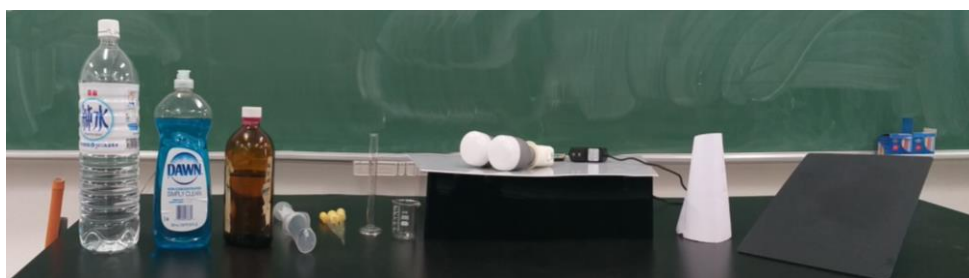
- 一、探討正立與倒立的皂膜泡泡特性差異。
- 二、詳細探討皂膜泡泡正立和倒立之側視及正視的干涉條紋與厚度分佈。
- 三、研究不同階段皂膜泡泡在不同位置的厚度分佈。

參、研究設備與器材

一、分析設備

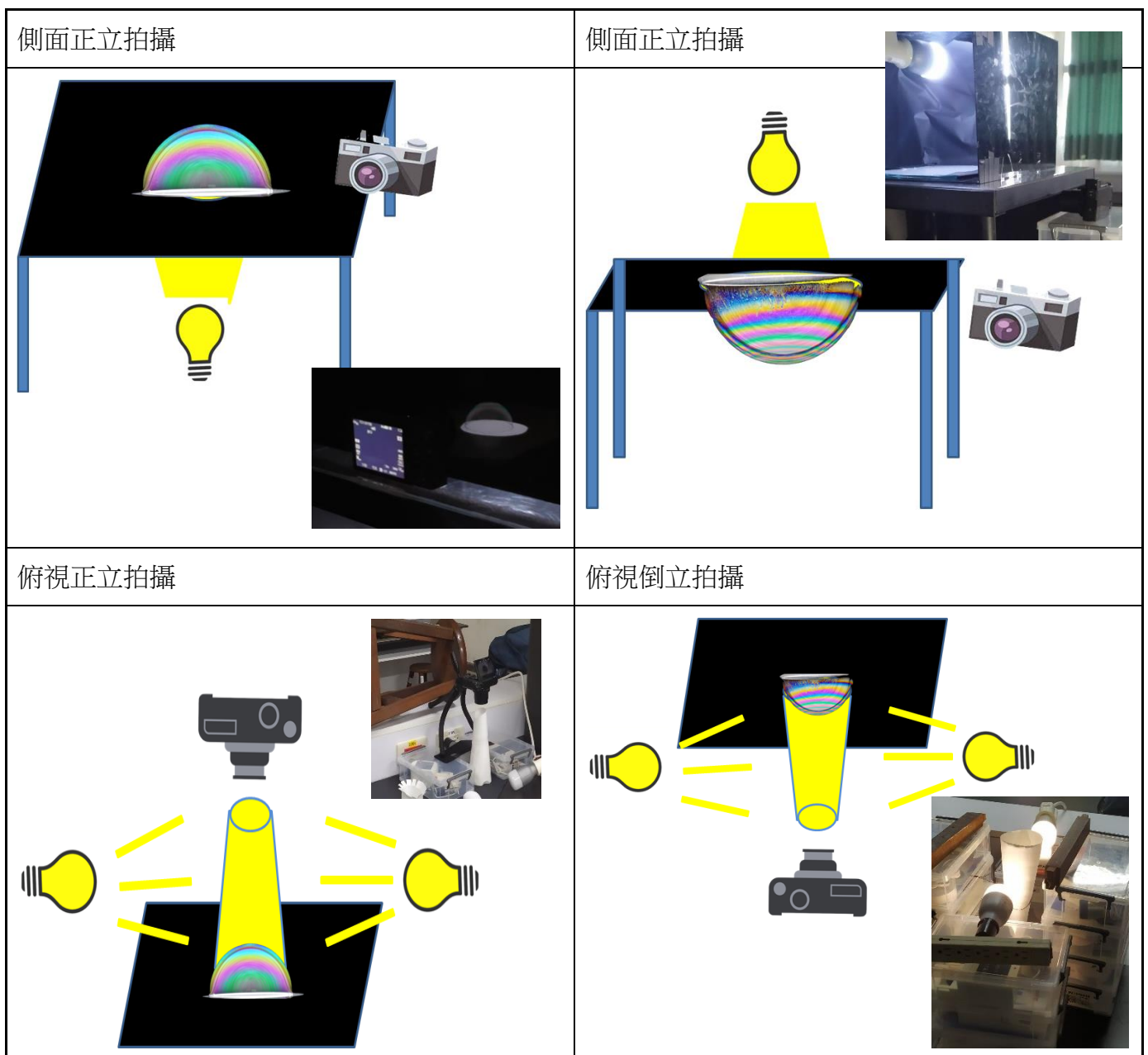
電腦、相機、Image j(光學分析軟體)、Microsoft Excel(軟體)

二、實驗器材



編號	研究設備與器材	用途
1.	水、甘油、DAWN 洗碗精	依不同情況調配不同比例的觀察用泡泡
2.	針筒	決定泡泡大小並將其擠在(6.)上
3.	量筒、滴管、燒杯	調配泡泡比例工具
4.	智慧燈炮、LED 燈箱	提供光線照明以產生干涉條紋
5.	Double A 白紙	將光線擴散並柔化
6.	黑色墊子	將泡泡擠在上面以觀察

三、觀測裝置如下圖表示，運用自製打光設備使泡泡產生干涉條紋

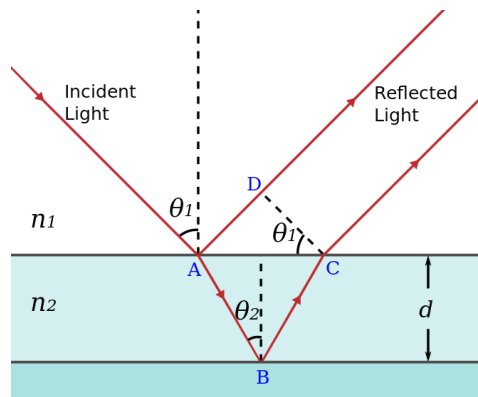


肆、研究過程

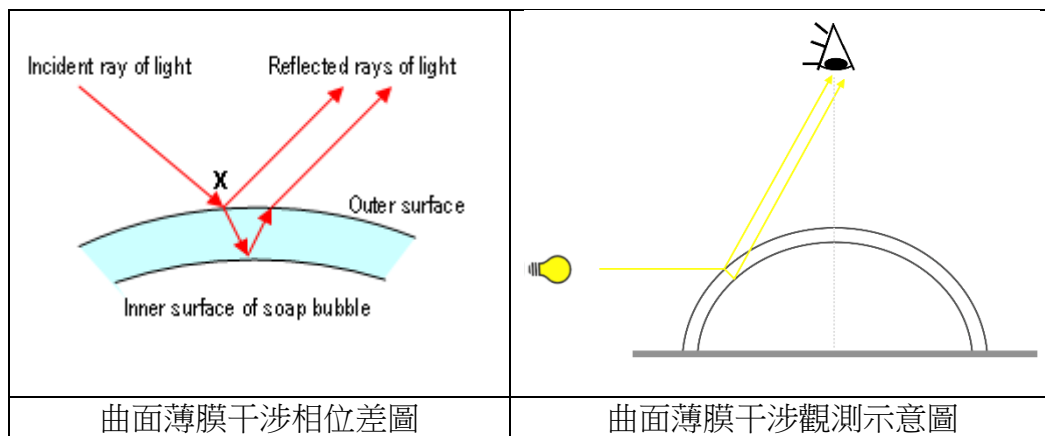
一、原理介紹

(一)、皂膜干涉現象形成原理

泡泡的形成是由「介面活性劑」的親油端和親水端兩者因表面張力所形成的圓球體，擁有兩層膜中間包裹著空氣，在光線射入泡泡內，些許光線會被第一層膜反射，剩下一些光線則是穿過第一層膜，被第二層膜反射而穿出，此兩道光反射出來時有光程差，因而產生干涉作用，在泡泡表面產生不同的顏色。泡泡各部位的厚度從 $25nm$ 到 $1000nm$ 不等，造成泡泡各地方產生不一樣的顏色。



由上圖可推導出兩光程差為 $2d \times n_2 \times \cos\theta + \lambda/2$ ，當光程差為 $N \times \lambda$ ，干涉互相增幅，當光程差為 $(N+1/2) \lambda$ ，干涉互相抵銷(Bryan)。但是本作品的薄膜干涉並非等厚度，泡泡分析不可用平面皂膜方式，而是三維的球面，因此參考維基百科及 Afanasyev(2011)的論文研究，以平面理論為基礎，我們再整理出以下的分析方式，讓判斷出來的厚度值再精確一些：



本實驗觀察到的光譜是由 R、G、B 三色光值積分合成，如式(1)

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \int_0^{\infty} I(\lambda) \begin{bmatrix} r(\lambda) \\ g(\lambda) \\ b(\lambda) \end{bmatrix} d\lambda \quad (1)$$

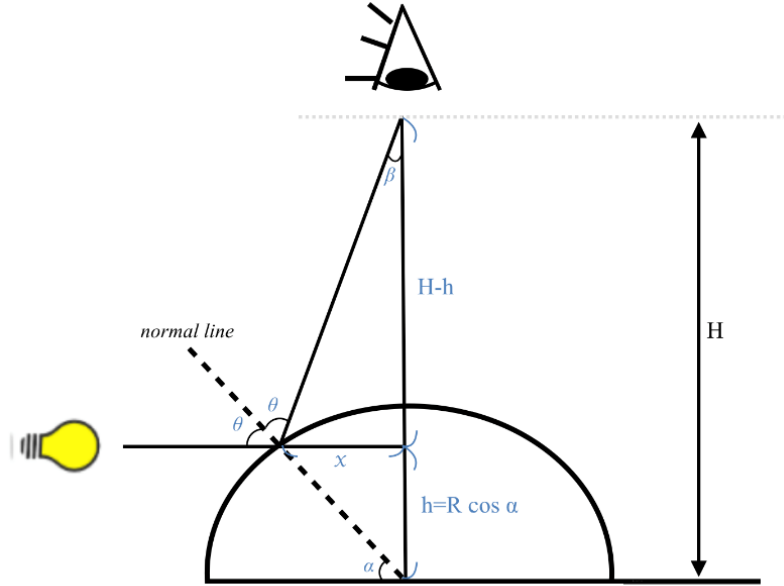


圖 1、皂膜泡泡垂直觀察幾何路徑圖(正視)

$I_{in}(\lambda)$ 是對應波長入射光源的強度，不同位置對應的值为 $I_r(\lambda) = R_\lambda I_{in}(\lambda)$ ，其中 R_λ 為式(2)

$$R_\lambda = R_s^2 \frac{1+\cos\varphi}{1+R_s^4+2R_s^2\cos\varphi} + R_p^2 \frac{1+\cos\varphi}{1+R_p^4+2R_p^2\cos\varphi} \quad (2)$$

藉由 Fresnel equations 可以得知兩方向偏振係數與角度、折射率的關係

$$R_s = \frac{\cos\theta - \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}}{\cos\theta + \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}} \quad (3)$$

$$R_p = \frac{n^2 \cos\theta - \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}}{n^2 \cos\theta + \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}} \quad (4)$$

我們由圖 1 可知對應的角度關係

$$\varphi(\lambda, \theta) = \frac{4\pi t}{\lambda} \sqrt{n^2 - \sin^2\theta} + \pi \quad (5)$$

$$\theta = \alpha + \beta \quad (6)$$

$$\alpha = \sin^{-1} x/R \quad (7)$$

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{x}{H-h} \right) \quad (8)$$

將以上方程式使用 Python 程式進行計算，可以得到半徑為 3 公分的皂膜泡泡上各點的厚度顏色對照圖。

(二)、光路徑探討

因光線碰到皂膜泡泡表面約有 4% 光線會被反射出來，剩下的 96% 的光線進入泡泡，而泡泡中約有 4% 的光線經折射後再反射出來，兩光線強度相當卻有不同的光程差，因此讓我們觀測到彩色的條紋(傅宗玫、陳正平，2001)。但為了避開直接穿透的光線，觀測者需視線與光源路徑垂直是最理想的。因此，若是要由正上方向觀察，則光源需由側邊打光；但若要側面觀察，則要由上或由下打光才可看到皂膜泡泡的干涉現象。

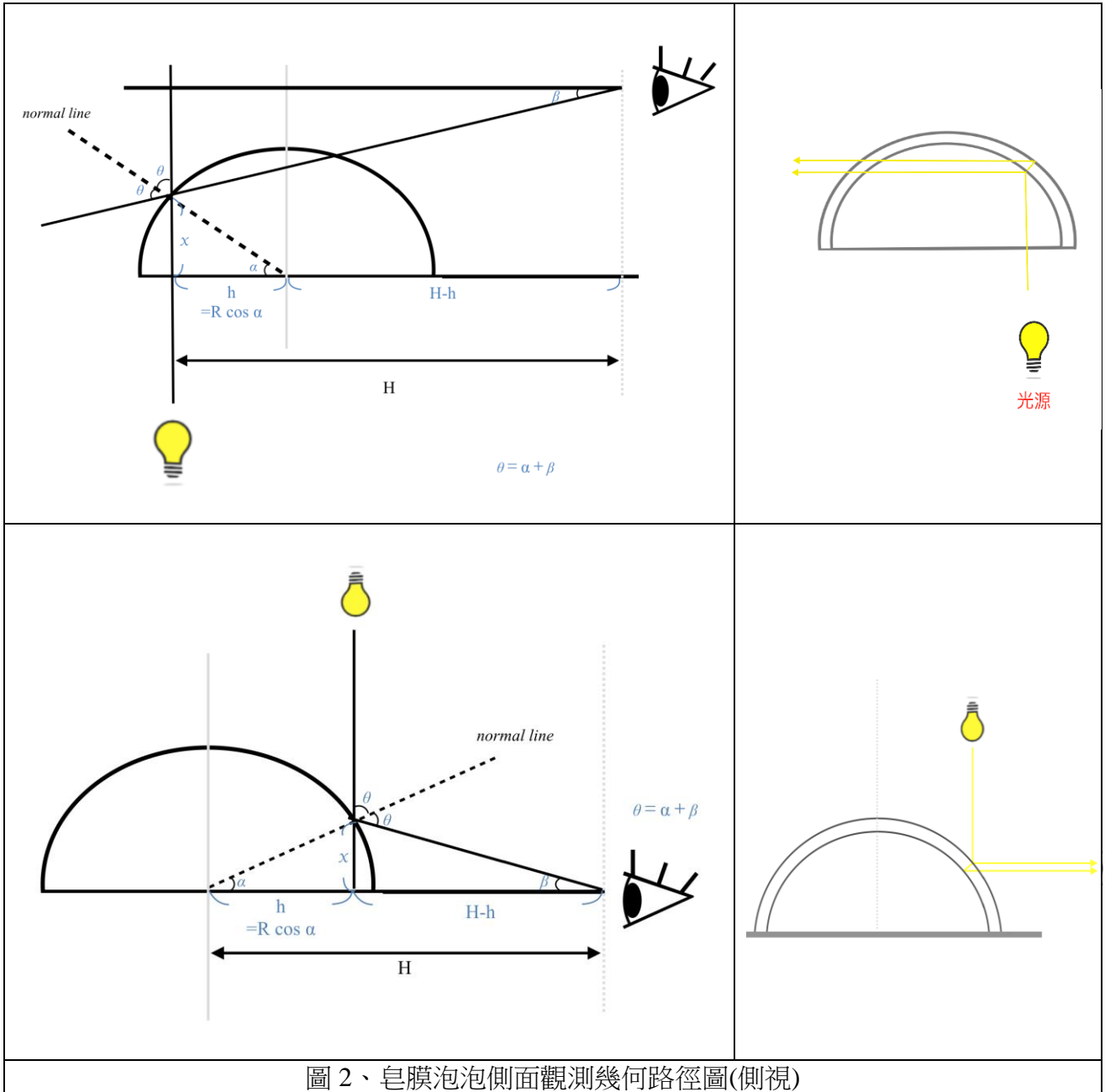


圖 2、皂膜泡泡側面觀測幾何路徑圖(側視)

由圖 2 可知，經幾何路徑的分析配合半球的對稱性，不論是由上或由下打光，皆可正確觀測到泡泡厚度，唯一的差別在由底部打光觀察到的是後半部的干涉條紋，反之，由上打光則是看到前半的干涉條紋。

(三)、皂膜厚度與顏色對應圖

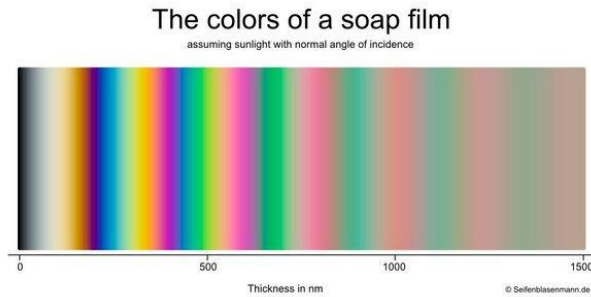


圖 3、薄膜皂膜干涉厚度色彩對照圖

圖 3 為網路資料(Soap Bubble Wiki)所繪製的平面皂膜厚度與色彩的對照圖，但結果可能會有一點不符我們的實驗情況。經過資料查詢(ColorPy)，運用 Excel 巨集功能，可畫出皂膜厚度分析的對應圖(泡泡水折射率為 1.33)。圖 4 是我們進階以 Python 程式，畫出距離中心 0-3 公分厚度色彩圖做為本報告的分析對照。0 到 1000nm 的皂膜厚度與 0-3 公分距離色彩對應圖，每個像素點都對應著一種厚度，對照實驗的照片就可以得知實驗所對應的厚度。不過 x 值較小或厚度較薄處，就像圖 3 是比較均勻的，但隨著 x 值的增加，變化就愈明顯，因此若要簡單判別厚薄趨勢，以圖 3 來對照也是個不錯的方法。

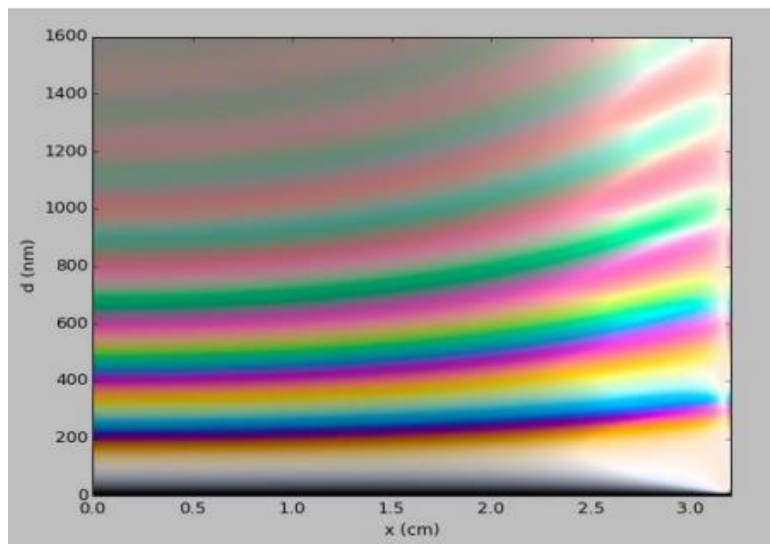


圖 4、半球薄膜干涉厚度顏色對照圖

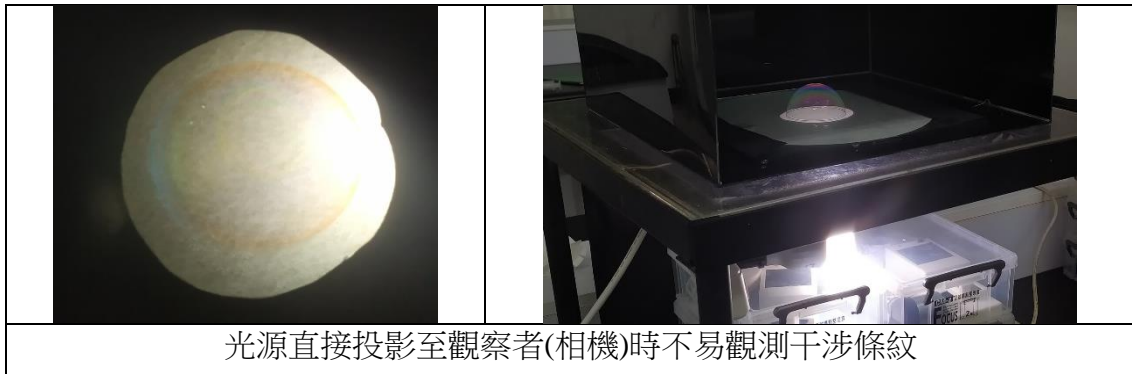
二、實驗裝置介紹

(一)、調配泡泡水

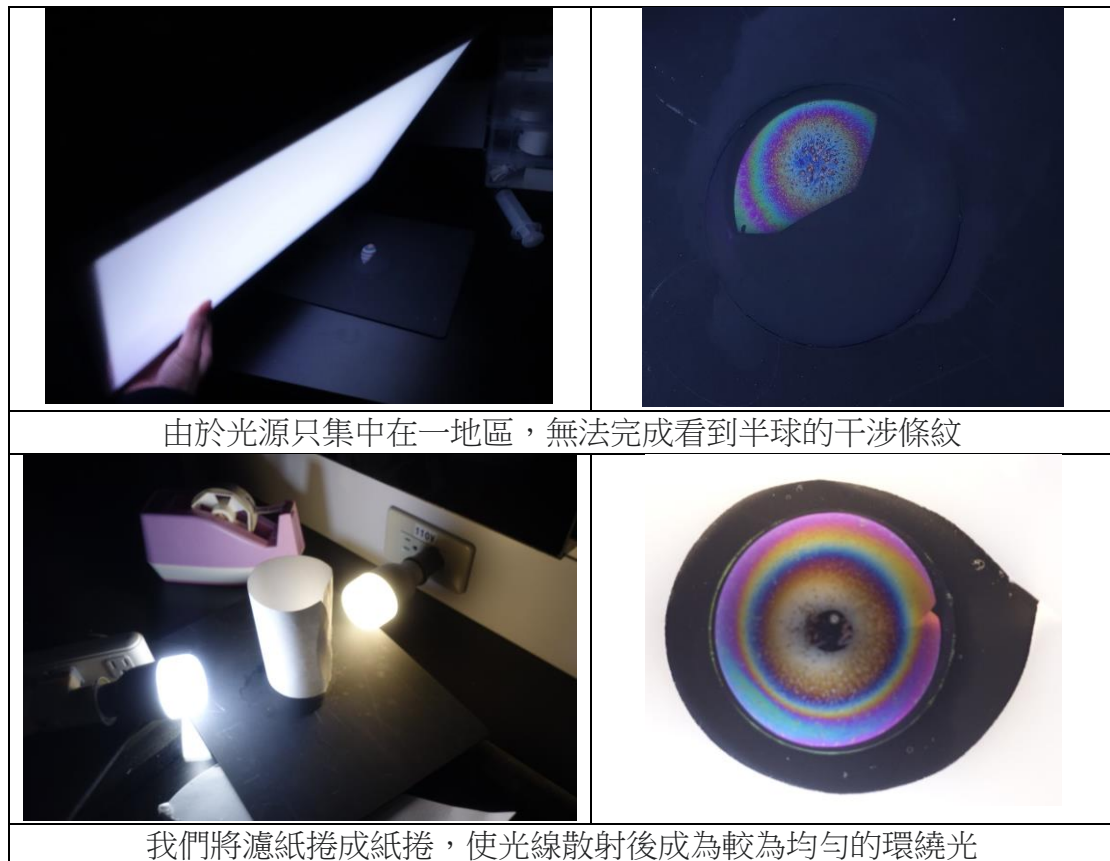
試過不同比例的泡泡水，我們發現純水會使泡泡濃度變稀，更容易產生干涉條紋，清潔劑過多造成純水表面張力降低，泡泡不易持久，甘油使泡泡黏稠，會使皂膜溶液流動的速度變慢，但加入太多的甘油，干涉條紋不易形成和變化。經過測試，我們發現 10:2:1 (水:DAWN 洗碗精:甘油)為最好觀察的比例，容易產生干涉條紋、夠持久使我們觀察，泡泡的大小訂為 60ml，將其正反倒立、以正視和側視拍攝。

(二)、正拍

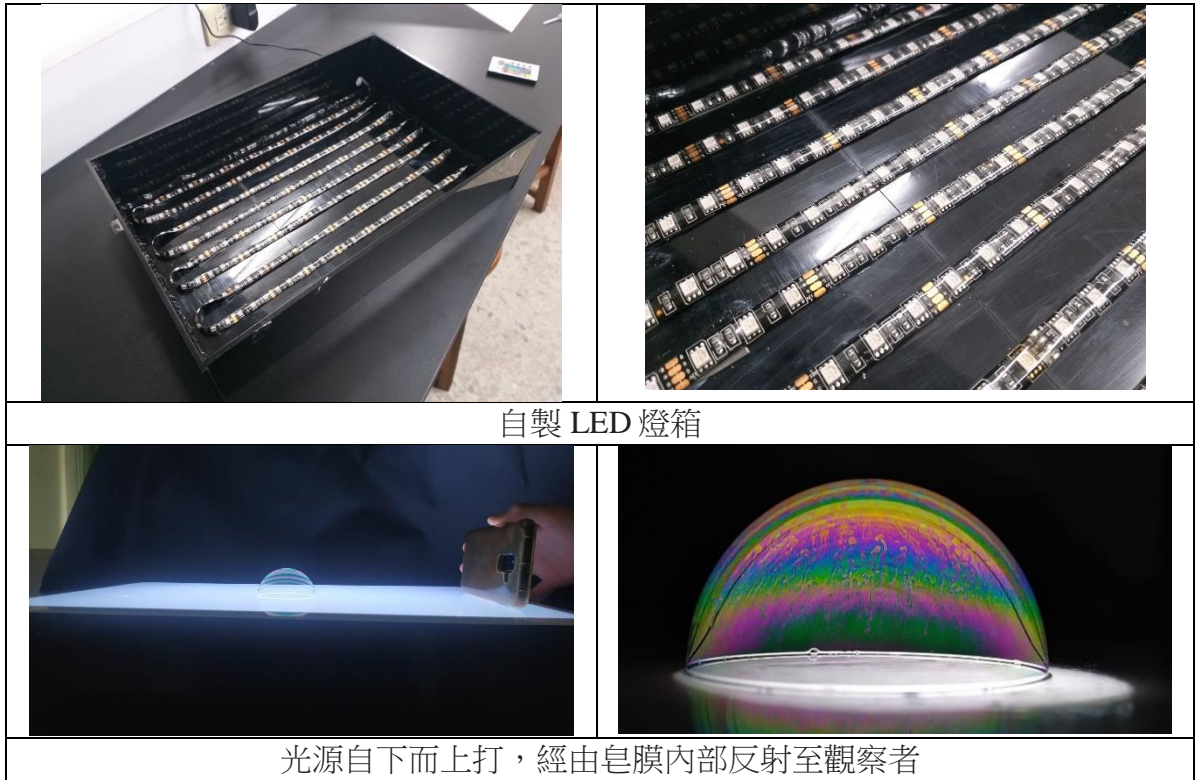
從側面拍能較易觀察皂膜干涉條紋的垂直分佈情形，但若要呈現同心圓狀的皂膜干涉變化就必須要以俯視的方式拍攝，但光源是自下往上，干涉光的亮度比光源弱，因此攝影器材無法捕捉到干涉的紋路。



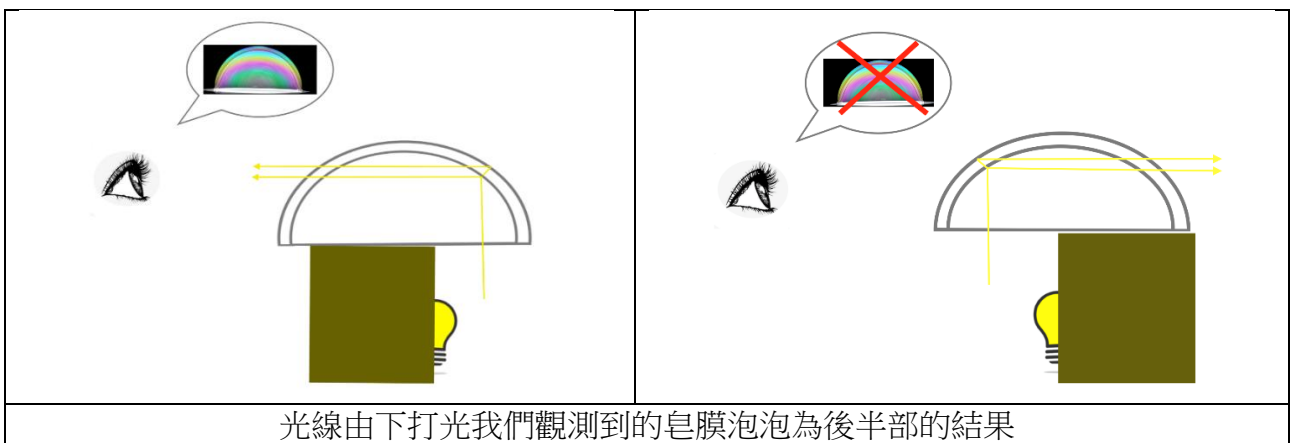
皂膜泡泡的干涉條紋會因時間而往下移動，起初我們以大面積照明的光箱去做照明，卻只能拍出局部的干涉條紋，我們推測是沒有環繞的光線，以致於只有局部皂膜被照射到，為了方便實驗的進行，我們運用現有的材料製作可以觀察完整範圍皂膜的設備。



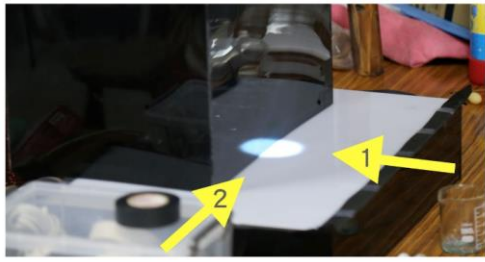
(三)、側拍



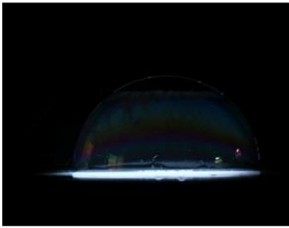
由於要觀察干涉現象必須要有充足且來自單一方向的光源，所以我們使用雷射雕刻機和燈條製作觀察皂膜干涉條紋的燈箱，起初猜測燈光的路徑會由底下向上，碰到皂膜後就均勻產生干涉。但在某次拍攝過程中偶然發現當光源只有照到皂膜的後半部時也能夠捕捉到完整的干涉光，於是我們試著讓皂膜泡泡只有前半部照光時，則無法觀察到。



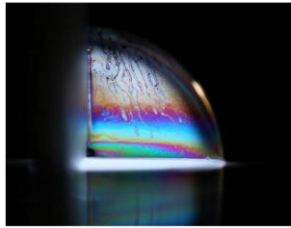
如下圖所示，我們為了更進一步地去論證此觀點，因此用黑色物體將後半部直接遮住，擠出一顆四分之一的皂泡，光源照舊由下往上，若由正面(拍攝方向 1)觀察不到干涉光，即前面的假設正確，並且以側面拍攝實際皂膜干涉光加以對照。之後又再思考，由下而上的光源照到背面皂膜凹面會形成向前的干涉光，因此都是觀察到背面皂膜；但如果光源由上而下會照射到皂膜的凸面，或許就能看到前面的皂膜，因此我們將上述實驗的光源由下往上改至由上往下。



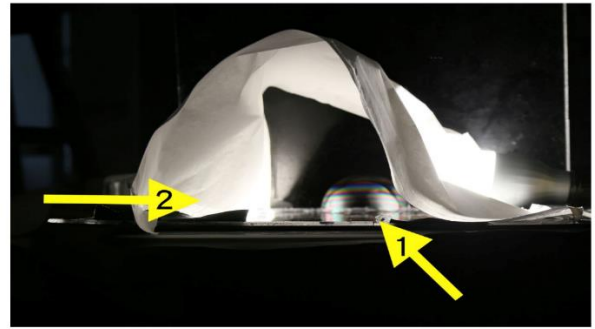
拍攝方向1:



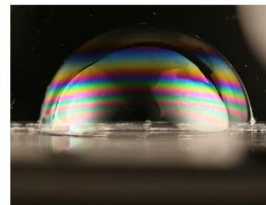
拍攝方向2:



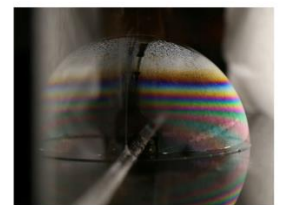
由上圖可以看出，正面(拍攝方向 1)無法觀察到干涉光的，因此實際上看到的干涉光是由背面的皂膜反射而來的。



拍攝方向1:



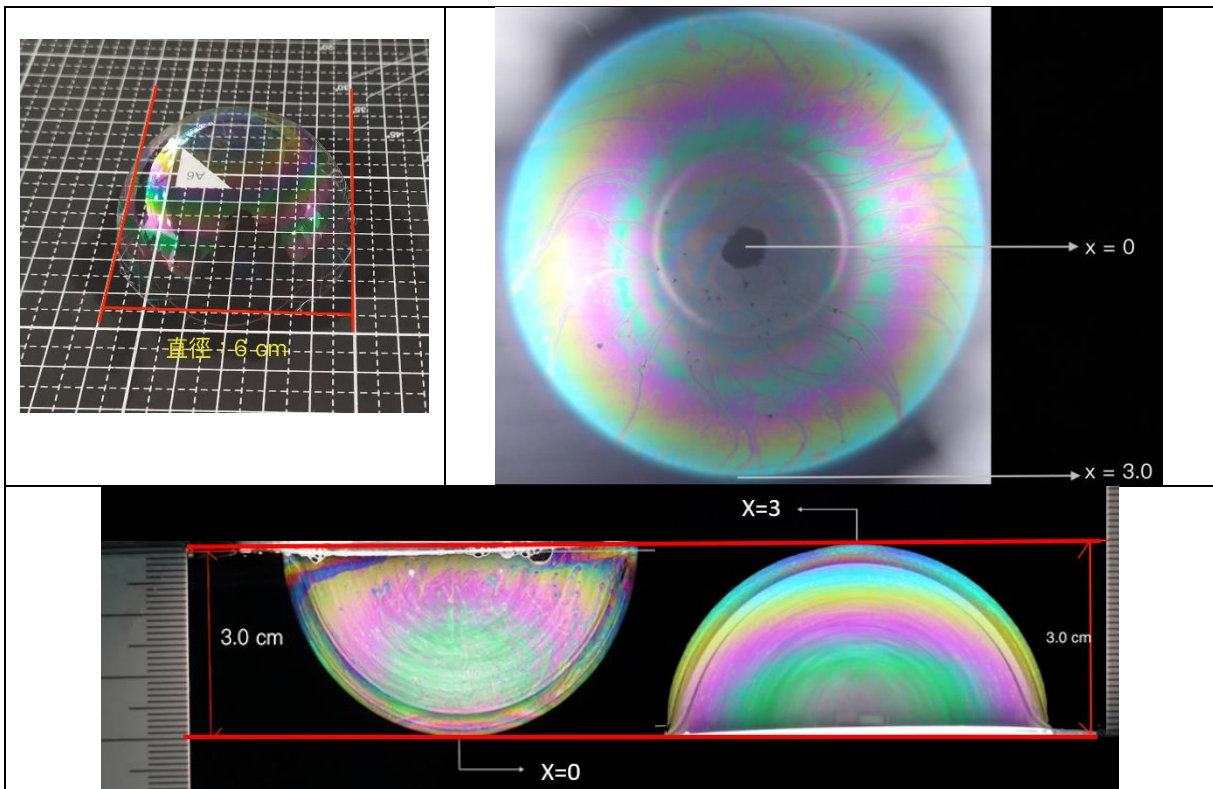
拍攝方向2:



將光源改成由外向內照射後，正面(拍攝方向 1)就能觀察到干涉光的存在，可知由外向內的光源所形成的干涉光是從正面直接反射而來。

(四)、定義皂膜泡泡位置

本實驗泡泡的體積約為 60 ml，半徑及高度皆為 3 cm，正視泡泡頂端位置定義為 0 cm，由徑向增加至 3cm；側視泡泡則定義最底處為 0cm，隨高度增加至 3cm。



(五)、分析皂膜照片上的 RGB 值

實驗後把照片與皂膜泡泡照片做對應，我們分析的泡泡大小為 60ml，半徑約為 3 公分，坐標定為 X，運用 Image J 與 Python 進行 RGB 分析，使用上述提及到的皂膜厚度顏色分析程式，計算出泡泡各部位的厚度，並將離採樣位置最近的 50 個像素之值平均。

(六)、皂膜厚度與圓心距離對應

藉由圖 5 來配對皂膜上距離圓心不同距離點的厚度，從圖 5 可以看出倒立泡泡圓頂部分厚度最厚，越往上其厚度會遞減，圖 6 則相反，可看出影響厚度的分布主要是因為重力，若泡泡厚度小於 30nm 此時無干涉條紋產生(傅宗玫、陳正平，2001)，而厚度小於 25 奈米(肥皂泡，維基百科)就有機會破掉。

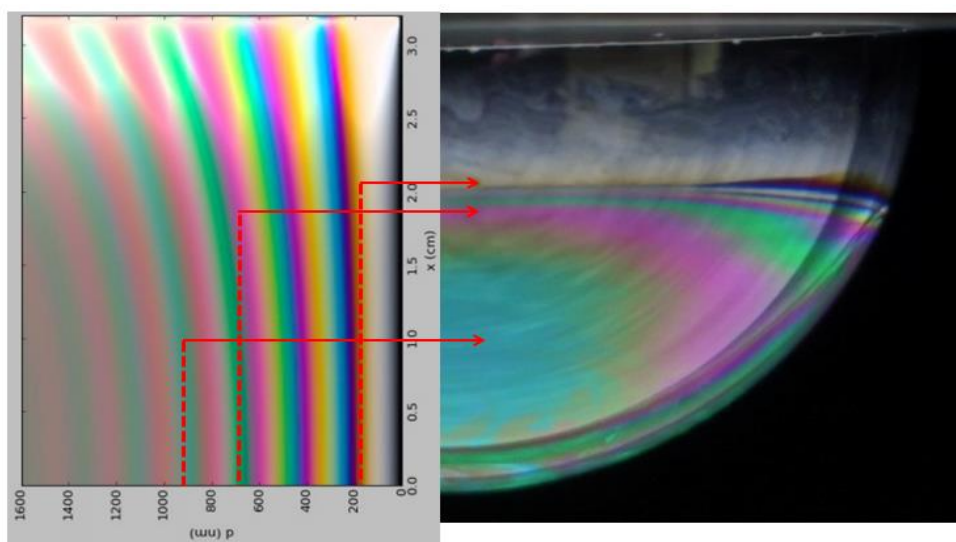


圖 5、倒立泡泡和厚度對應圖

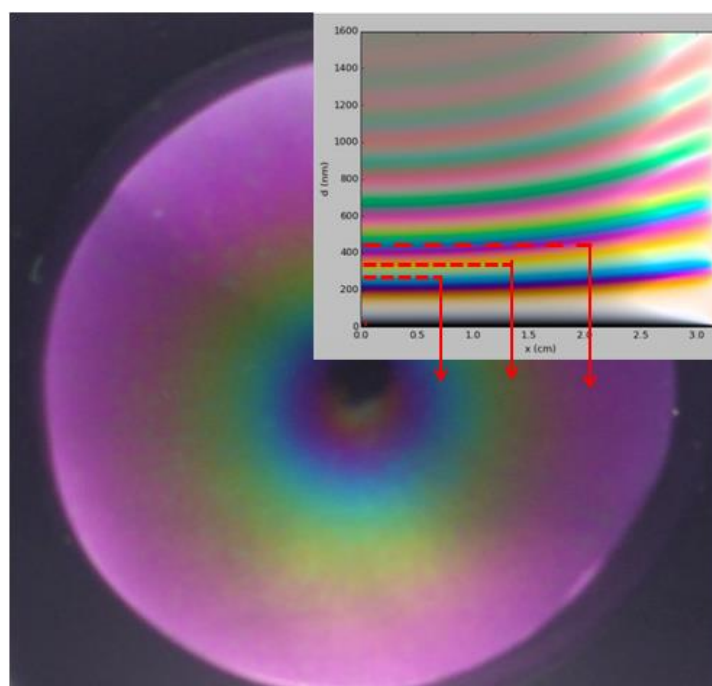


圖 6、正立泡泡和厚度對應圖

伍、實驗結果

正視的拍攝方式會使頂點因缺少光線反射而產生黑色區域，將黑色區域部分厚度訂為 30 nm。正立的皂膜表面初期有明顯分層的干涉條紋，隨著越接近後期，能觀察到皂膜頂端已經因為厚度小於 30nm 因而顯現成黑色。

一、正立泡泡拍攝


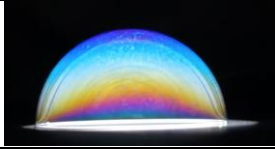
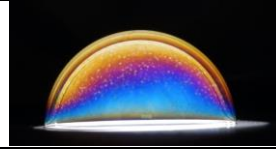
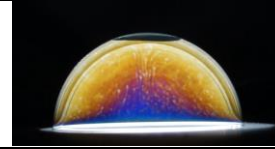
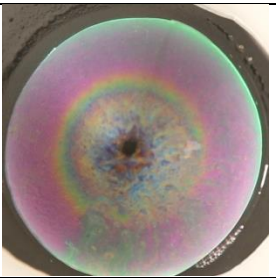
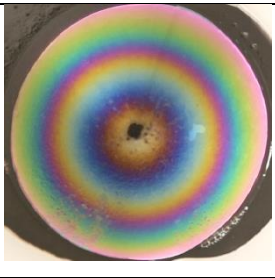
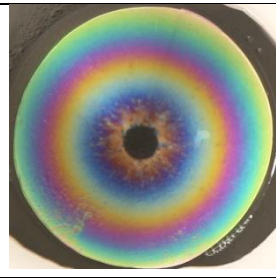
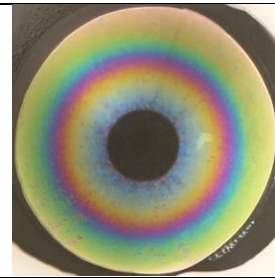
正立側視 泡泡狀態				
時間(s)	120	180	280	723
正立俯視 泡泡狀態				
時間(s)	10	80	170	450

圖 7、正立泡泡側視及俯視

二、倒立泡泡拍攝

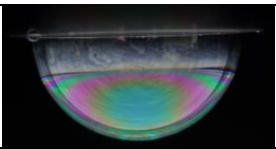
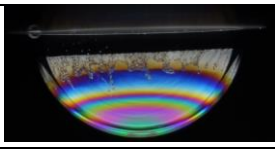
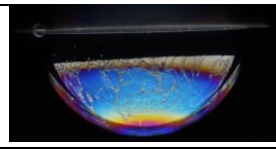
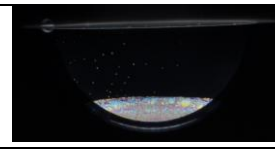
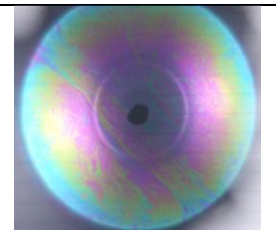
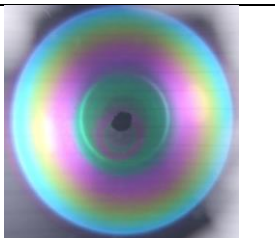
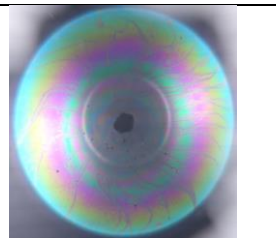
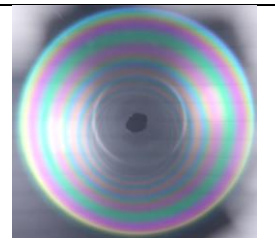
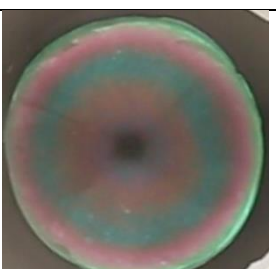
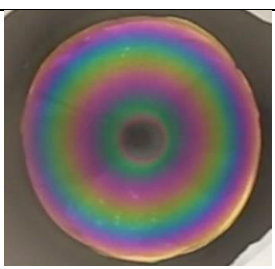
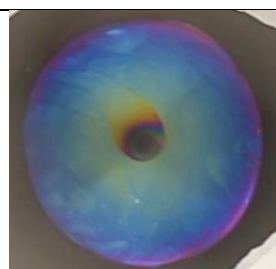
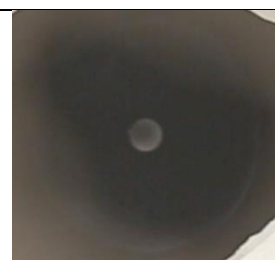
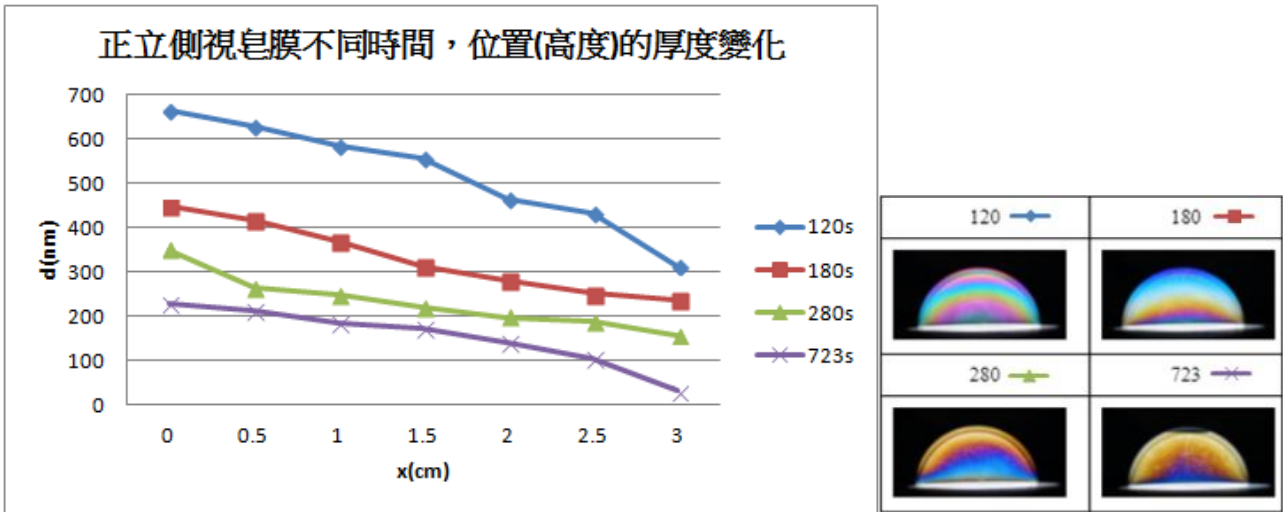
倒立側視 泡泡狀態				
時間(s)	5	100	160	464
倒立俯視 泡泡狀態 (a)高溼度 環境				
時間(s)	0	180	637	1140
倒立俯視 泡泡狀態 (b)正常溼 度環境				
時間(s)	0	152	318	930

圖 8、倒立泡泡側視及正視

三、皂膜表面厚度及干涉條紋變化

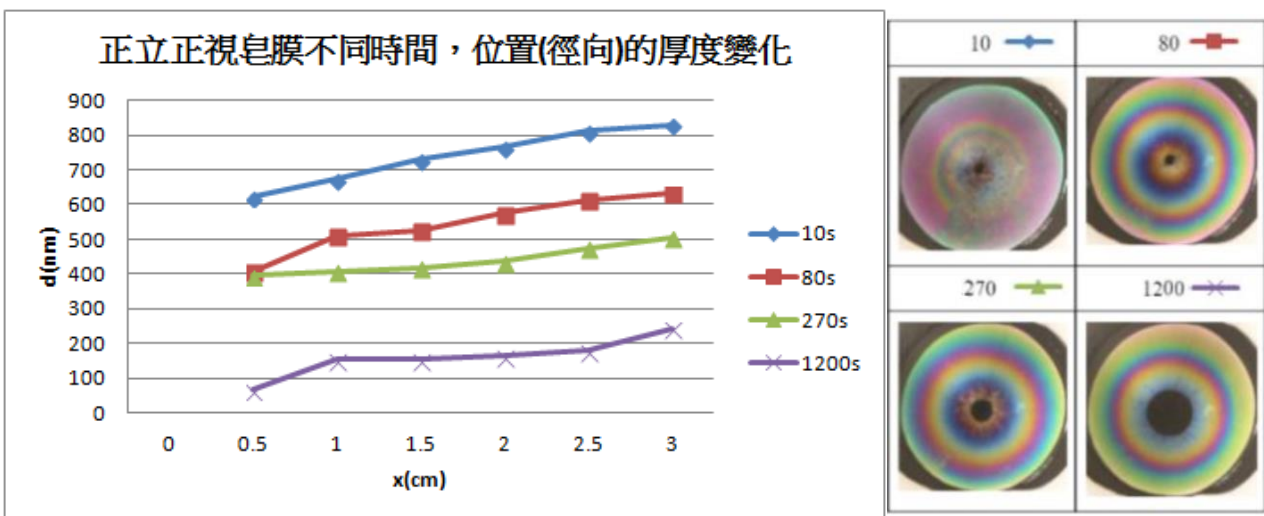
正視的泡泡呈現同心圓的結果，但在側視的實驗結果可以觀察到，彩色泡泡的相同色彩並沒有完美的水平而是略有彎曲，而黑色區域與彩色區域的交接面為接近水平直線，這是因為泡泡在相同的高度會具有相同的厚度，但視覺上由本報告圖 5 的結果可以簡單說明，在不同的位置對應的顏色呈現會有所偏差所致。

(一)、正立側視



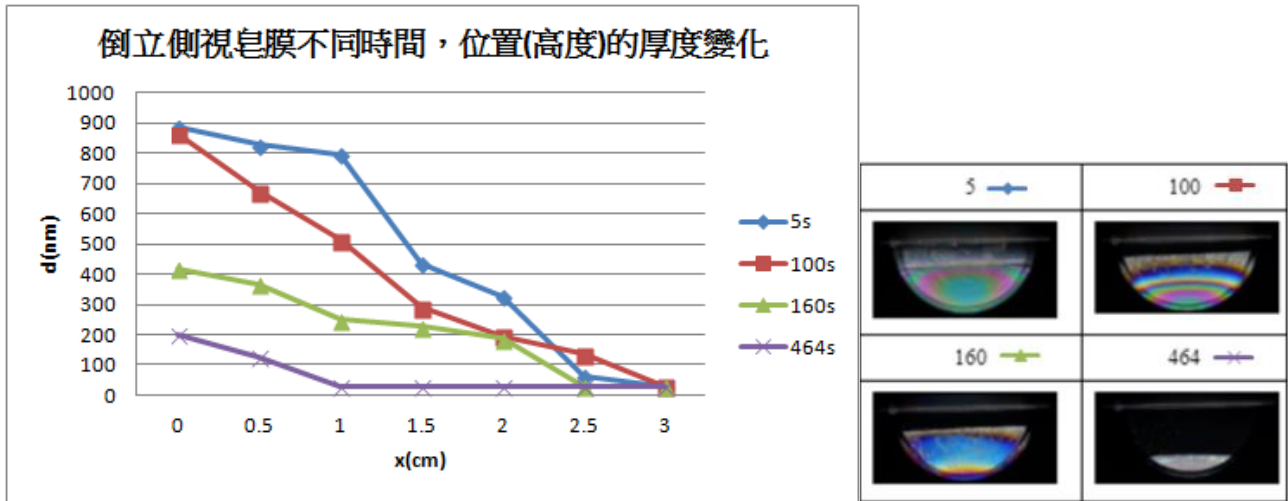
在正立側視中，泡泡的同心圓在泡泡形成的 10 秒內就已存在，而在 723 秒時上端開始出現厚度極薄的黑色區域；13 分 40 秒時，馬倫哥尼效應加劇，原先分層明顯的干涉條紋被分成數個區塊，使得厚度較大的皂膜，到最後幾乎都變成較均勻的分佈。

(二)、正立正視



在正立正視中，在 80 秒時泡泡的同心圓以形成，受重力的影響，泡泡頂端的黑色區域不斷擴大在時，皂膜上的干涉條紋顏色分層開始不明顯，跟正立側視一樣，黑色皂膜區域下降到一定程度時，泡泡就破了。

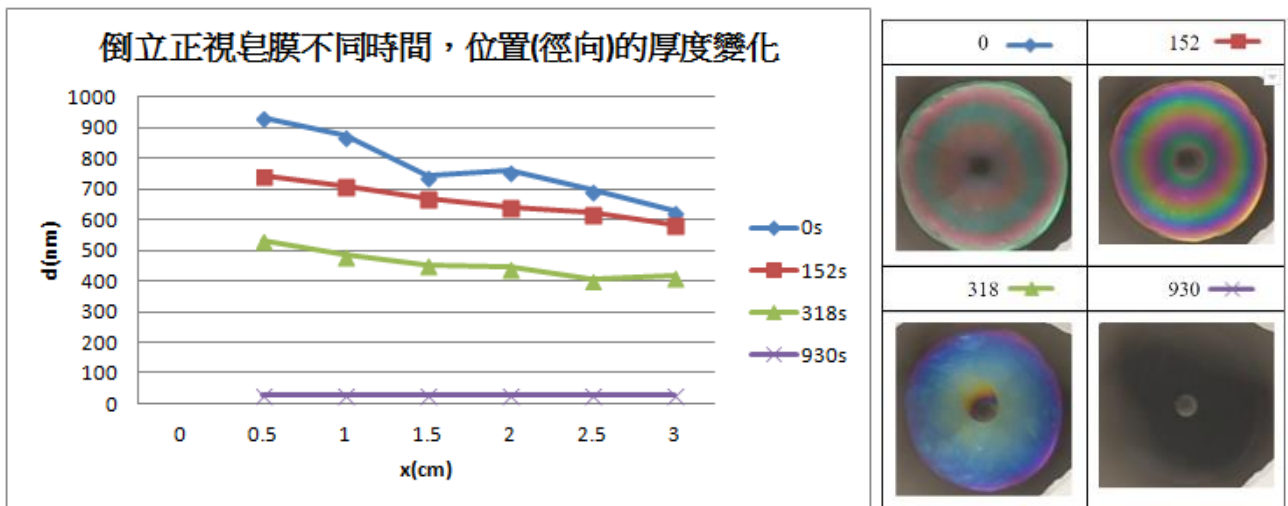
(三)、倒立側視



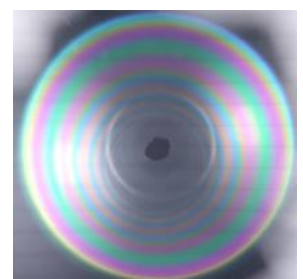
泡泡擠好時，由接觸面往下約 1cm 的位置由一條土黃色的干涉條紋作為界線，下面是由黃、綠、紅組成的干涉條紋同心圓，在土黃色的干涉條紋上則是干涉顏色為乳白色的區域，在這之上為黑色的區域，在 100 秒的時候，乳白色的區域產生破壞性干涉條紋，並且受重力的影響，干涉條紋持續下降，黑色區域擴大，在後期時的時候整顆變成黑色的，且有皂膜厚度較厚的白色部分逐漸往下流動堆積。

(四)、倒立正視

情況一，正常溼度環境下，由於 930 秒的泡泡中間有一團顏色在一起不好辨別厚度，將整顆泡泡的厚度資料訂為 30nm。



情況二、在高溼度環境下，第 0 秒時，皂膜上有 3 種顏色，從中間往外分別是:紫、黃、藍，而紫色和黃色部分有些許區域交互，直到第 20 秒才形成分層清楚的干涉條紋，並在 10 分鐘時左右出現環狀干涉條紋，在第 19 分時(右圖)黑色皂膜還未出現，過程如第 11 頁圖 8(a)。



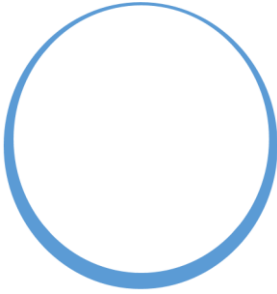

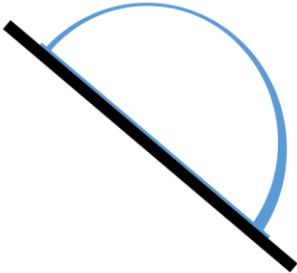

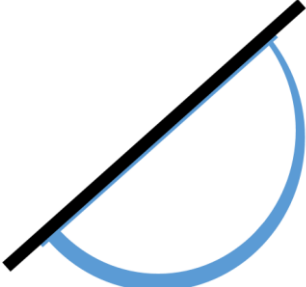

(五)、正立倒立泡泡綜合比較

我們在衡量泡泡持久度時盡量不以持續的時間來做比較，因為實驗資源有限，要精準的控制實驗變因實屬困難，像溫度、濕度、針筒上皂液的量、甚至是在擠泡泡時的力度或氣流的因素均會使泡泡維持時間有明顯的不同，因此會以階段變化來衡量皂膜的持久程度。

觀察這四種泡泡的厚度變化圖表，我們發現倒立的皂膜厚度隨著時間，泡泡整體的厚度會趨近於一致。正立的泡泡在我們拍攝時，總是當黑色皂膜區域出現，或最多下降至一半時就破掉了，但觀察的過程中可以發現正立的皂膜泡泡厚度比較整體的均勻變薄。大致上，本系列實驗可得知處於倒立狀態下的泡泡較正立時穩定。

四、泡泡的穩定態方向特性

(一)、角度定義

		
重力狀態下泡泡厚度分佈	0°(正立泡泡)	45°
		
90°	135°	180°(倒立泡泡)

我們將擠好的正立泡泡進行 360°的旋轉，可以發現在旋轉中泡泡會因慣性使得干涉條紋保持在原來的位置，而其他部位則產生新的干涉條紋，就像一顆有許多顏色的球只是從不同的角度去看它。在旋轉的泡泡中，可以發現干涉條紋也是會隨著重力往下移動造成頂部產生厚度較薄的黑色皂膜，而不論怎麼旋轉，黑色區域的皂膜都會保持在同一個位置，在整顆泡泡的上方，隨著時間而擴大，不過將 180°的泡泡靜置一段時間讓干涉條紋產生上半部黑色，下半部彩色的狀況，圖 9 皂膜泡泡整體厚度以顏色分佈來看，和圖 10 是不一樣的情況。

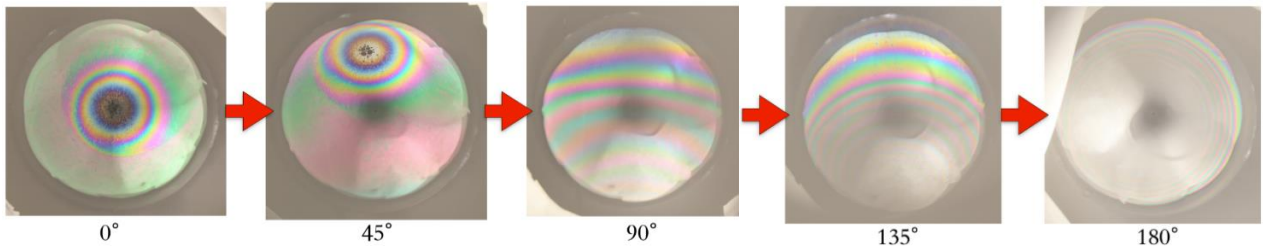


圖 9、同顆泡泡動態改變不同底板角度(a 泡泡)

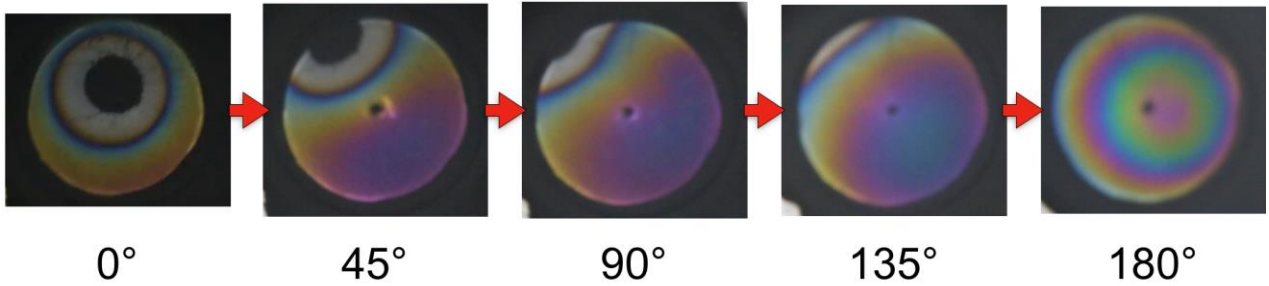


圖 10、同顆泡泡動態改變不同底板角度(b 泡泡)

五、不同角度的時變比較

(一)、泡泡持久時間的判定

要進行 45°、90°、135°的皂膜泡泡實驗，在吹泡泡前一定要確實底板的乾燥以避免實驗過程中泡泡的滑動。因此，本系列的實驗，皆以燈箱實驗並控制底板確實乾燥，再擠上皂膜泡泡液後進行實驗觀察。

(二)、正立 0°皂膜側視干涉條紋拍攝

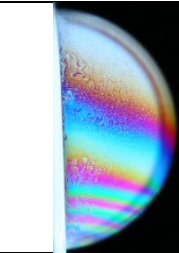
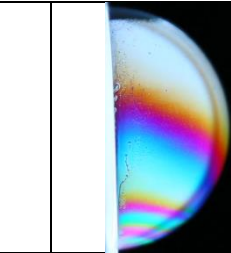
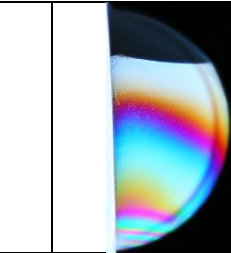
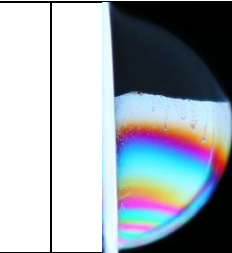
泡泡狀態				
時間(s)	10	60	200	400

(三)、45°側視皂膜泡泡干涉條紋拍攝

泡泡狀態				
時間(s)	0	62	190	335

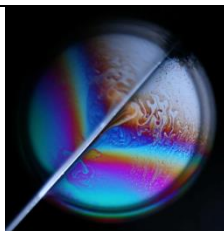
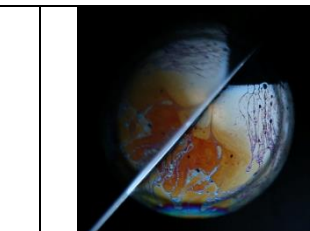
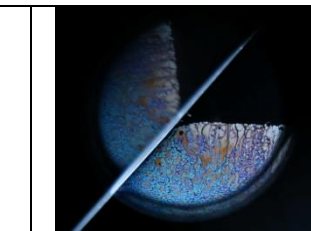
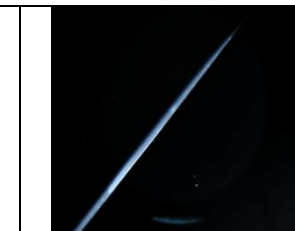
和 0°正立的泡泡類似，45°的泡泡也相當容易破裂，在還未出現大範圍黑色區域時就已經破裂了。

(四)、90°皂膜干涉條紋拍攝

泡泡 狀態				
時間(s)	0	64	278	400

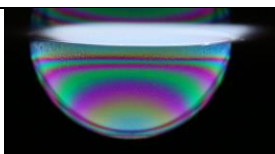
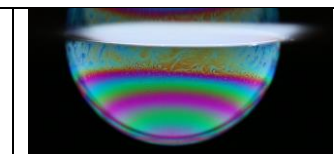
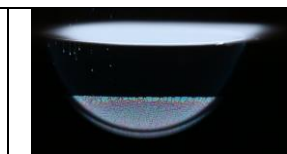

90°的泡泡有時候一出現黑色區域就破了，有時候黑色區域可以達到 1/3 球的高度。

(五)、135°皂膜泡泡側視干涉條紋拍攝

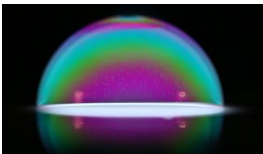
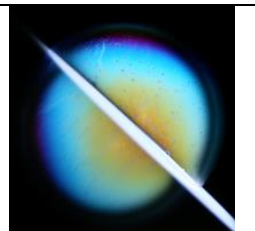
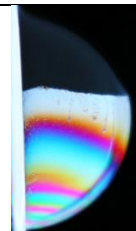
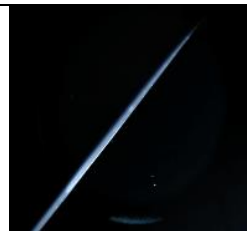

泡泡 狀態				
時間(s)	27	85	126	400

135°的泡泡特性與倒立的有點相像，最後幾乎是整體都是黑色，只剩底部有些殘色，能在這種整體極薄的狀態維持不破一段時間，與 180°倒立泡泡都有黑色區域變大，干涉條紋漸不明顯的情況。

(六)、180°側視皂膜泡泡干涉條紋拍攝

泡泡 狀態				
時間(s)	0	30	300	600

(七)、各種角度泡泡破掉前狀態

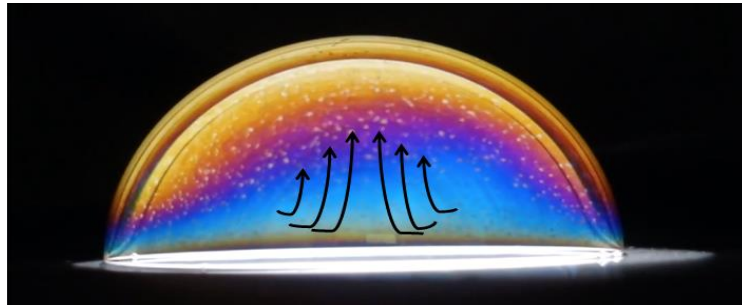
破 掉 前 狀 態					
角度	0°	45°	90°	135°	180°

本實驗的系列觀察可知，以 90°為分界，0°-90°泡泡較容易破掉，而 90°-180°泡泡可以到很薄都不容易破掉，幾乎呈現無色彩狀態還能持續很久的時間不破。

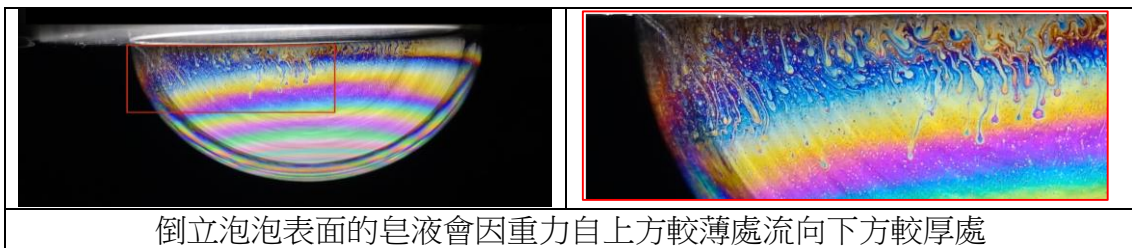
陸、討論

一、馬倫哥尼效應(Marangoni effect)

馬倫哥尼效應是指在流體界面，因為表面張力變化 ΔT 而造成的流動現象。當不同厚度皂膜相接觸時，上方皂膜較薄，表面水分子較多，表面張力較大；下方皂膜較厚，表面水分子較少，表面張力較小，導致液體會由表面張力小的厚膜區向表面張力大的薄膜區流動的現象。馬倫哥尼效應可視為皂膜自我修復能力，快破裂之薄區獲得厚區之液體補充才能避免破裂。且壓力差越大，造成向上流動的量越多越明顯。如下圖所示。



正立泡泡因馬倫哥尼效應形成皂液向上流動的現象



倒立泡泡表面的皂液會因重力自上方較薄處流向下較厚處

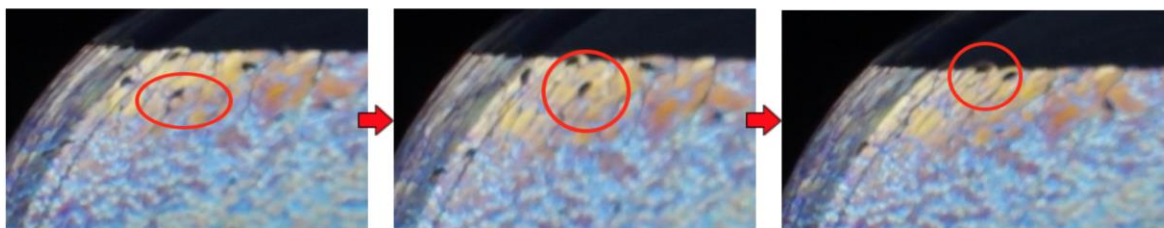


圖 11、正立泡泡黑點上移的過程

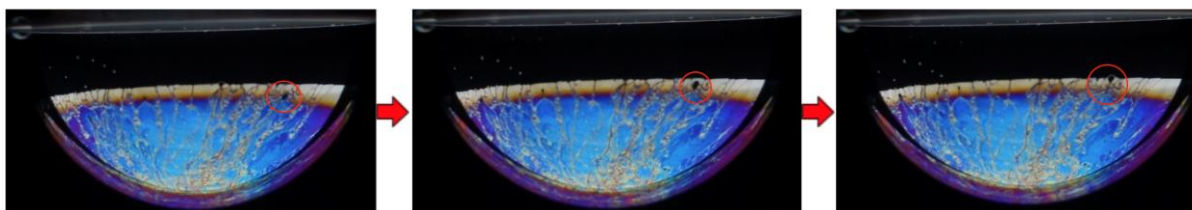


圖 12、倒立泡泡黑點上移的過程

由圖 12 可看出，厚度甚薄的小黑點會向上移動，黑點上方皂膜較厚處(金黃色約 150nm)的皂液因重力往下流動至原先黑點的區塊(約 30nm)，隨著時間演進，使得原先黑點上方的金黃色區域變薄成黑膜；原先小黑點區塊因皂液補充變厚呈黃金色，故造成泡泡上厚度較薄的小黑點會隨著時間向上移動。

二、正立與倒立的泡泡穩定性

(一)、時變的觀察

正立的泡泡比起倒立的泡泡馬倫哥尼效應更加劇烈，並且更容易破裂，如圖 13 最到最右圖即破裂，總計約 25 分鐘。

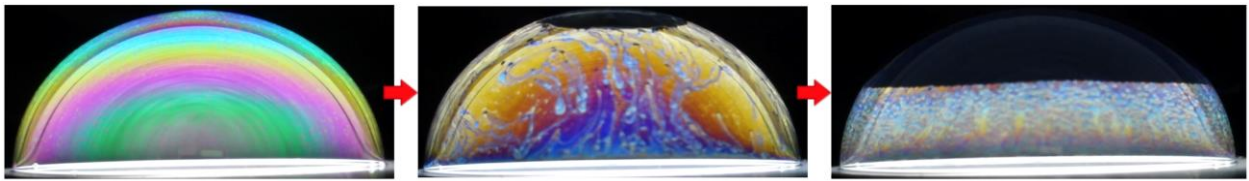


圖 13、正立泡泡時變狀態

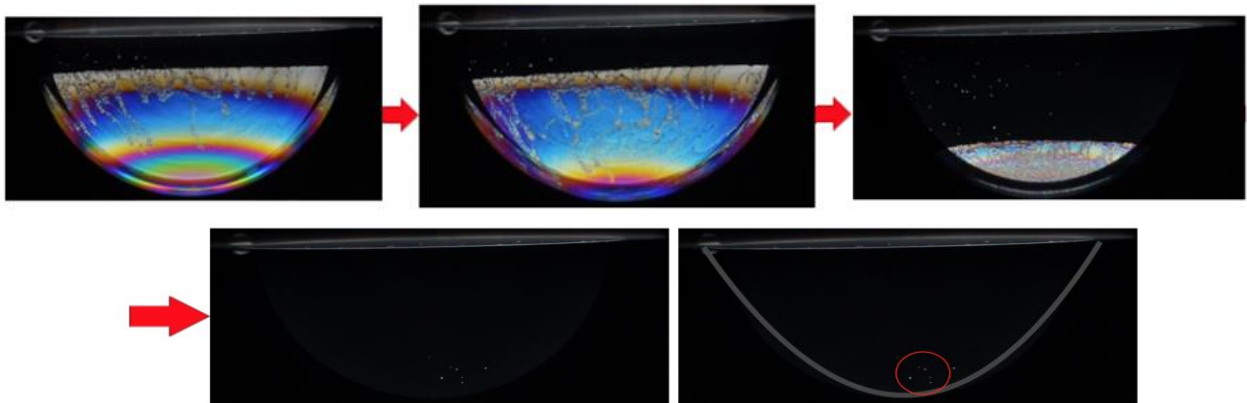
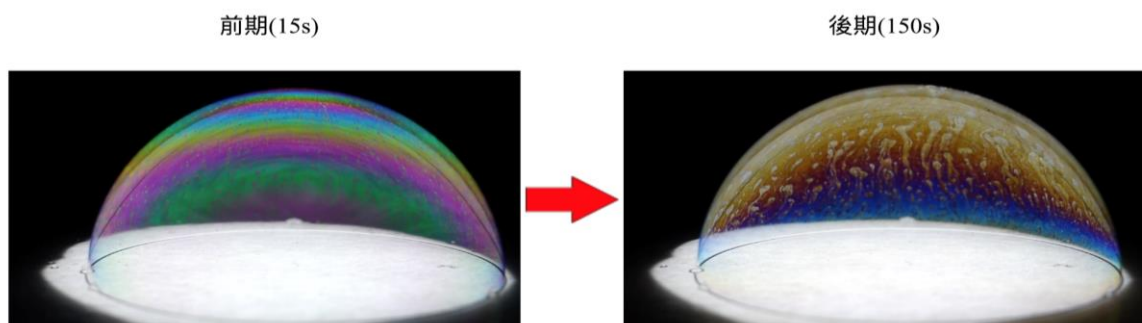


圖 14、倒立泡泡時變狀態

而倒立的泡泡到整體都在 30 nm 以下時，泡泡還維持了很長一段時間都沒有破裂，圖 14 右下為泡泡加上簡易輪廓、紅圈圈為些許流動皂液，持續時間 1 小時 30 分鐘。倒立泡泡研究的過程中，甚至有泡泡放置至隔天還沒有破的情況被觀察到。

(二)、色彩隨時間變化

皂膜在前期厚度變化的幅度較大，而到後期時，除了厚度為 30 nm 以下的地方以外厚度都比較平均，干涉光色彩也較前期單一。



可以很明顯地看出前期的干涉光色彩繁多，厚度變化大，到後期時逐漸趨向單一色光，厚度變化逐趨平緩。

(三)、厚度變化探討

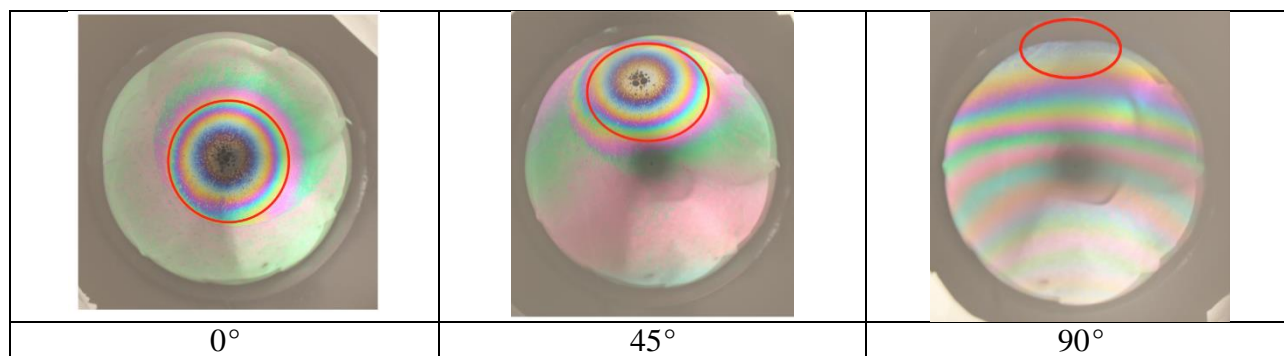
有三種主要因素會影響皂膜上的干涉條紋，重力，表面張力，馬倫哥尼效應，其中以重力的影響最為顯著，不論正立或倒立，泡泡都會因重力而往下堆積，導致干涉條紋向下移動。倒立的泡泡會因重力導致干涉條紋由上而下堆積，最終整顆變成黑色的，黑色皂膜上一出現就有零星的白色小點，這些小白點也會跟隨著干涉條紋的下沉。我們猜想，此時泡泡最厚的地方在干涉條紋堆積的最底圓頂處，對照圖 14 可以看到當皂膜顏色為黑色時，整顆泡泡所對應的厚度為 30 nm 以下。從側面觀察，不論正立或倒立的泡泡，皂膜表面上的干涉條紋顏色分布都會因為重力成凹口朝下的圓弧形，這主要是因為相同水平面不同位置泡泡的厚度雖然相同(可以由正視泡泡驗證)，但不同位置所對應的色彩圖本身顏色就會不同所致。

(四)、色彩厚度判定

在研究過程中所提到的運用照片顏色分析皂膜厚度，但由於照片上的 RGB 值會受到相機光圈、快門速度、ISO 值、背景光，與拍攝厚度圖相機設定差異，等因素影響，皂膜實際的厚度和分析出來的資料會有些許差異，但不影響整體趨勢判斷。

三、皂膜泡泡的定位特性

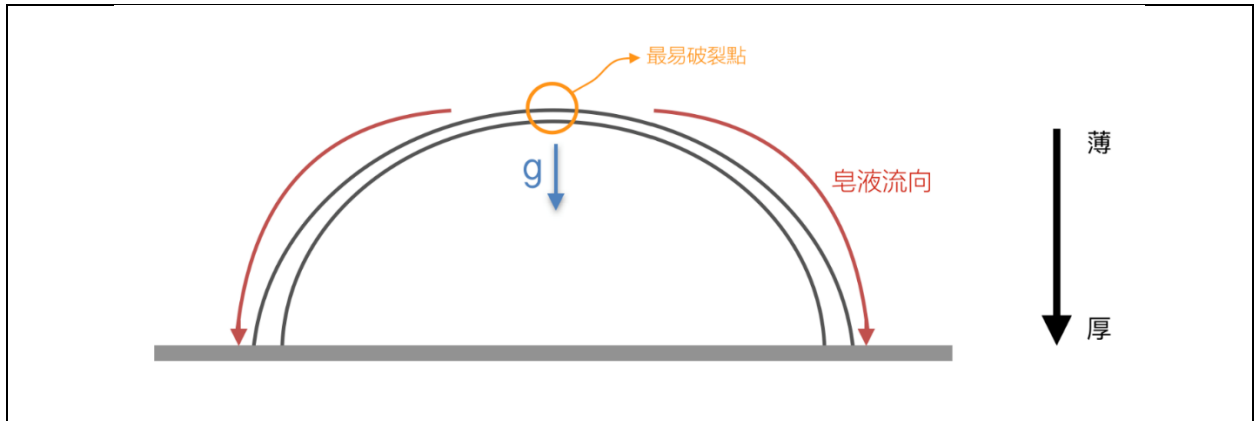
如圖 9 與圖 10 所示(第 15 頁)，我們在旋轉底板的過程中可觀察到泡泡只有一定的指向性，同心圓的圓心不論底板的位置，皆是垂直指向上方。



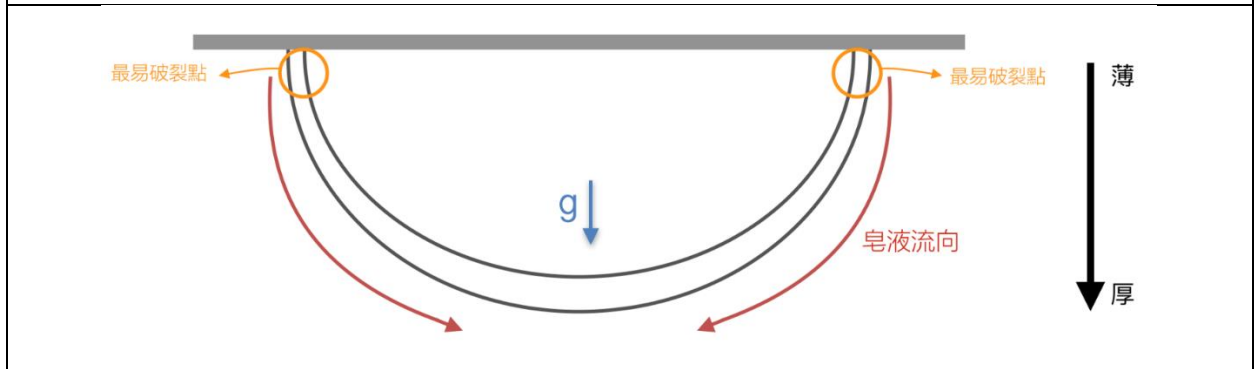
可以由上圖看出，當角度為 0°時，皂膜干涉光所形成的同心圓圓心(紅圈區所指處)為地面向上，當皂膜旋轉成 45°時，同心圓的位置會偏移，但圓心的方向依舊為地面向上，因此當旋轉角度逐漸增加到垂直向上時，同心圓的圓心也會隱沒在底板之下。

四、皂膜泡泡不破的原因

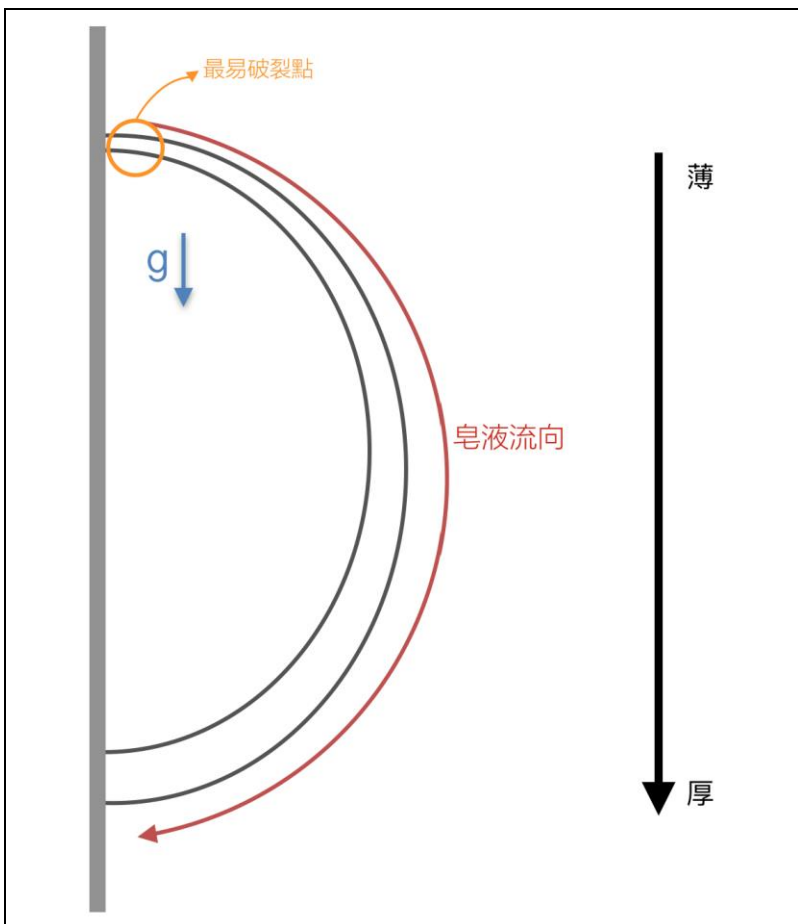
從實驗中我們可以依重力和表面張力的作用方向將 0°和 45°分為一類，135°和 180°為一類，90°為一類，由於蒸發會導致整體泡泡厚度不斷變薄，蒸發的皂液需要泡泡接觸面的皂液來補充，當泡泡最脆弱的點也就是最薄的點產生破洞，表面張力失衡就會使泡泡整顆破掉，0°和 45°由於泡泡厚度最薄點在上方，上方會受蒸發使得厚度越來越薄，最終超過臨界值時，表面張力不平衡而破掉。0°和 45°由於皂液補充的路徑需抵抗重力使補充皂液的速度會小於蒸發的速度，相反的 135°和 180°的泡泡最薄的部分在泡泡與平面所接觸的地方，皂液要補充相較於 0°和 45°而言快速許多。理論上，如果能一直補充在平面上的皂液就能使 135°和 180°的泡泡一直存在。



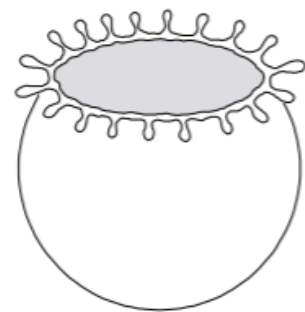
正立泡泡最高點為最易破裂點，不易補充皂液



倒立泡泡與平面接觸點最易破裂點處，容易補充皂液



(左圖) 90°做為泡泡不破與易破的分界點主要原因就是半球泡泡最易破裂處，若能與平面接觸，就能補充皂液。



(上圖) 一個皂膜泡泡若沒受干，破掉的點會位在最薄處，以只受重力的圓球泡泡為例，就是在最高點處(傅宗玫、陳正平，2001)。

柒、結論

- 一、皂膜的干涉條紋會因重力而往下堆積，且皂膜厚度變化會隨著時間趨於平緩。
- 二、倒立的泡泡較正立的穩定且持續時間較久。
- 三、在泡泡不破的情況下改變底板角度，泡泡依然具有穩定指向的能力。

捌、應用

本研究最初發現，倒立的半球泡泡較正立的泡泡持久不破，而在開始研究多角度的變化時，又意外發現半球泡泡置於底板，開始旋轉底板，泡泡雖呈半球，但維持有重力狀態下的樣子不變，有指向及定位(類似陀螺儀)的功能，因泡泡膜是研究液體表面現象最簡單的方法之一，不論是探討介面活性劑或是隱形眼鏡表面的特性等等，甚至有醫學研究用於肺表的應用研究(CASE 報科學，2016)。本實驗觀察到倒立的皂膜泡泡，可以變成整顆是奈米級的超薄厚度而不破掉，或許在以上的應用層面下，再掌握了本研究所發現的倒立泡泡不易破裂及泡泡膜的指向特殊物理特性，未來可以有突破性的再應用。

玖、參考資料

1. CASE 報科學(2016)。捕捉泡泡上的紋路。檢自：<https://case.ntu.edu.tw/blog/?p=25796>
2. 泛科學(2013)。有沒有不破的泡沫。檢自：<https://pansci.asia/archives/34085>
3. 泛科學(2020)。好奇心讓你登上《科學》封面！泡泡為什麼會破，把它放顛倒再戳破就知道了。檢自：<https://pansci.asia/archives/191693>
4. 傅宗政，陳正平(2001)。冒泡的美。科學發展月刊，第29卷，第11期，788-796。
5. 維基百科。肥皂泡。檢自：<https://zh.wikipedia.org/wiki/肥皂泡>
6. 維基百科。菲涅耳方程式。檢自：<https://zh.wikipedia.org/wiki/菲涅耳方程>
7. Y. D. Afanasyev, G. T. Andrews, C. G. Deacon(2011), Measuring soap bubble thickness with color matching, American Journal of Physics, 79(10), 1079-1082.
8. Bryan Rolfe, Photography of Bursting Bubbles Using an Arduino. 檢自：<https://www.instructables.com/Photography-of-Bursting-Bubbles-Using-an-Arduino/>
9. ColorPy. A Python package for handling physical descriptions of color and light spectra. 檢自：<http://markkness.net/colorpy/ColorPy.html>
10. Soap Bubble Wiki. Color and Film Thickness. 檢自：https://soapbubble.fandom.com/wiki/Color_and_Film_Thickness