

# 中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

## 作品說明書

---

國小組 物理科

第一名

080115

“魔法隱身與穿牆術”-全反射與光穿隧效應

學校名稱： 臺北市大安區金華國民小學

|                   |                             |
|-------------------|-----------------------------|
| 作者：<br><br>小五 陳沛慈 | 指導老師：<br><br>許碧珊<br><br>宋家安 |
|-------------------|-----------------------------|

關鍵詞： 全反射、光穿隧效應、受抑全反射

## 得獎感言

### 光學的魔幻之旅

這次參加科展的過程，對我而言就像一場魔幻之旅，一開始為了要看清楚雷射光在壓克力中的行進路徑，我花費許多時間和力氣，用砂紙和牙膏研磨的方式去除表面刮痕，當壓克力逐漸變得透亮時，我開心地認為我的辛苦總算有了代價，但沒想到壓克力店老闆只是輕鬆地用氫氧火焰來回掃描幾下，就得到毫無刮痕的完美鏡面。當時的我真的是深受打擊，但也讓我深深地領悟一個道理，那就是要具備足夠的科學知識，才不會事倍功半。

後來在老師的指導下研究不同液體的臨界角，並觀看許多網路上的全反射實驗和遊戲，前人的經驗帶給我許多的啟示，因此產生了旋轉隱身與內外全反射的新構想。原本以為參加科展只是個簡單的過程，沒想到兩位認真的指導老師不斷地要求我改進實驗並擴大研究範圍，且多次來回地跟專家教授詢問和確認結果，我也因此放棄了許多休閒娛樂的時間，尤其是實驗不順利的時候，更是得犧牲睡眠時間來解決問題，那時候真是覺得好~累!但現在回想起來真的很感謝老師們當初的緊迫盯人以及溫暖的鼓勵。

有一句英國諺語“好奇心害死貓”，它的下一句是“滿足了就沒事”。我覺得好奇心是我參加科展並花費許多時間進行研究的動力，能獲得此次的成果，首先我要感謝家人們的支持和陪伴；再來我要感謝指導老師們的鼓勵與教導，不但教我如何正確且有系統地進行實驗，還教我如何從不同的角度來檢查並驗證實驗結果；我更要感謝和藹可親的專家教授和科展輔導老師們，把深奧的光學知識用簡單的比喻，讓我能快速理解並吸收，還親自示範光穿隧實驗讓我了解整個原理和過程，也因此才能有後續的新突破。

我還要感謝網路上的維基百科和Youtube上許多瘋狂的科學玩家們，他們賣力地演出各種搞笑的光學情境劇來介紹有趣的光學知識和遊戲，激發出我對光學的

好奇心和勇於嘗試新事物的決心。我知道我所窺探到的光學知識只是冰山的一小角，但這正是科學有趣的地方，一小點的光亮，就讓我們這群“科學貓”們好奇不已，想要繼續探索大自然中那些神奇的奧秘。



跟兩位指導老師合影

# “魔法隱身與穿牆術”-全反射與光穿隧效應

## 摘要

自然課學過反射、折射和稜鏡色散，於是利用壓克力和不同液體來探討全反射和光穿隧現象，發現降低表面粗糙度能減少散射，以利觀察雷射光路徑；而紅光和紫光的折射角差值可作為色散的簡易指標。此外，液體溫度、濃度及相變化也會影響臨界角；結合不同臨界角可達成「**魔法隱身**」；結合不同全反射，則可應用於液體高度警示。

同時也探討全反射在介面形成的漸逝波(Ref. [1])，利用液體填入介質空氣縫來降低折射率落差，或是將空氣縫隙減小到幾微米以下，都能讓漸逝波穿越空氣縫來實現「**魔法穿牆**」，此現象稱作**光穿隧(optical tunneling)效應**(Ref. [1])，或受抑全反射(frustrated total internal reflection) (Ref. [2])，未來可應用在精密測量領域。

## 壹、前言

### 一、研究動機

自然課介紹反射、折射和稜鏡色散，我很好奇雷射光經過不同的介質時，折射角度都一樣嗎？網路上演示的全反射遊戲中，如果介質相同，那麼臨界角還能透過其他方法改變嗎？是否還能研究出不同的新遊戲？為何全反射發生時，靠在反射點後面的手指會發亮？如果換成其他物體靠近反射點也會發亮嗎？

### 二、研究目的

- (一) 研究消除粗糙表面散射光的方法
- (二) 測量折射角並觀察瑞利散射及色散量化指標
- (三) 探討全反射臨界角的影響因素與應用
- (四) 探討漸逝波對光穿隧現象的影響並測量穿隧深度

### 三、文獻回顧

- (一) 文獻來源

1. 均一教育平台有介紹光全反射原理，也有許多 YouTube 科普頻道，介紹海市蜃樓、數字變化及黑蛋變銀蛋等全反射遊戲。其中，海市蜃樓現象是高溫路面加熱地表空氣使折射率下降，光從上方空氣入射到地表空氣時，發生全反射並把遠方的景象反射到觀察者眼睛而誤認為地表積水或是前方有綠洲。

此外，在白紙上畫一隻黑貓，而塑膠袋上則畫一隻未著色的貓外形，白紙放入塑膠袋內。在空氣中，可以看到一隻黑貓，當放入水中時，塑膠袋和白紙中間的空氣層使光發生全反射，於是，變成看見塑膠袋上未著色的白貓(Ref. [3])。同樣地，被蠟燭燻黑的雞蛋殼上的碳粒子會吸附空氣分子，放入水中後，水和空氣層發生全反射，使黑蛋看起來變銀蛋(Ref. [4])。這類全反射遊戲並未探討把不同臨界角結合在一起或研究光穿隧效應。

2. 在臺灣網路科教館搜尋歷屆中華民國中小學及國際科展參賽和得獎作品，以海市蜃樓全反射為主的作品共有五件(Refs. [5-9])，以折射定律測量折射率的作品有一件(Ref. [10])。但沒有找到以"光穿隧"或"受抑全反射"或"受挫全反射"為關鍵詞的作品。而上述幾項全反射得獎作品，主要內容是使用熱鐵板或學校場地加熱空氣；使用多層不同折射率液體或高濃度糖水擴散形成的折射率變化等，來觀察影像或雷射光源因溫度導致不同的偏折角度，進而探討海市蜃樓的發生條件。但都未探討把不同臨界角結合在一起或研究光穿隧效應。

## (二) 專家訪談

對於手指靠在全反射點後面會發亮的現象感到困惑，曾訪談某大學物理系教授，且教授提供兩篇中英文期刊論文，並翻譯論文局部重點，說明此為光穿隧現象，又叫做受抑全反射或受挫全反射(Refs. [1,2])。教授還親自用氦氖雷射和稜鏡組來演示光可以穿越全反射空氣間隙，進入距離幾微米外的另一個稜鏡(圖 1)。



圖 1：物理系教授演示光穿隧實驗。(指導教師拍攝)



## 貳、研究設備及器材

### 一、儀器設備

表 1：儀器設備

|                      |                 |                  |                  |                  |
|----------------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|
| 放大倍率可調顯微鏡(50X-1000X) | 筆記型電腦(含顯微鏡測量軟體) | 紅光(波長 650 nm)雷射筆 | 綠光(波長 532 nm)雷射筆 | 紫光(波長 405 nm)雷射筆 |
| LED 白光手電筒            | 精密旋轉台           | 直線滑軌             | 電子溫度計            | 水管剪              |
| 光學麵包板                | 示波器             | 螺旋測微儀            | 三軸位移平台           | 光電二極體            |
| 氫氧火焰拋光機(壓克力店家設備)     | 砂紙打磨機(壓克力店家設備)  | 手機及三腳架           | 自製白光光束準直器        | 自製液位高度偵測管        |

### 二、材料

表 2：實驗材料

|                               |    |    |      |               |
|-------------------------------|----|----|------|---------------|
| 壓克力板(長 22 cm，寬 7.5 cm，高 2 cm) | 豬油 | 砂紙 | 玻璃棒  | 紅色玻璃紙         |
| 半圓形壓克力板(半徑 5 cm，高度 3 cm)      | 矽油 | 水  | 標籤紙  | 量角器           |
| 半圓形壓克力槽(半徑 5.25 cm，寬度 5 cm)   | 甘油 | 海綿 | 樂高積木 | 塑膠墊(厚 0.3 mm) |
| 塑膠導光柱(直徑 2.5 mm，長度 12.7 mm)   | 針筒 | 牙膏 | 防水貼紙 | 洗碗精(泡舒)       |
| 芥花油(義美 100%純芥花油)              | 直尺 | 束帶 | 隱形膠帶 | 硬塑膠水管及接頭      |

### 二、自製設備

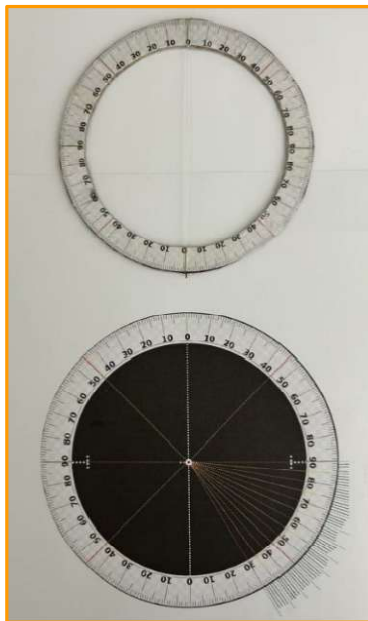


圖 2：自製四象限量角器(作者拍攝)

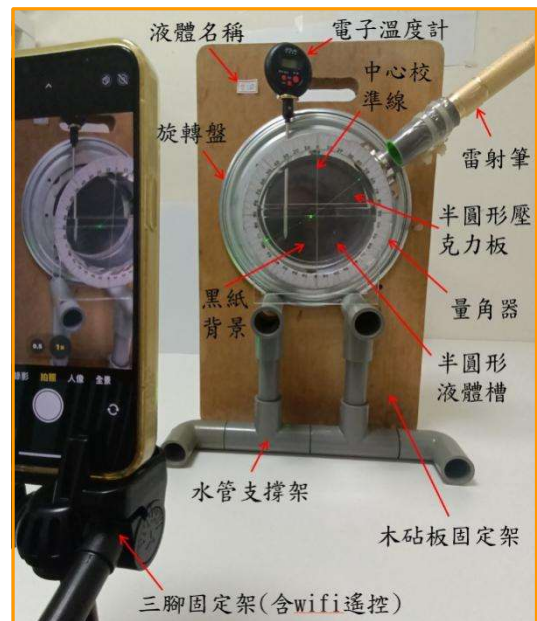


圖 3：自製臨界角旋轉測量記錄裝置(作者拍攝)

## 參、研究過程方法

一、研究表面散射的影響和消除方法，改進流程圖(圖 4)如下:

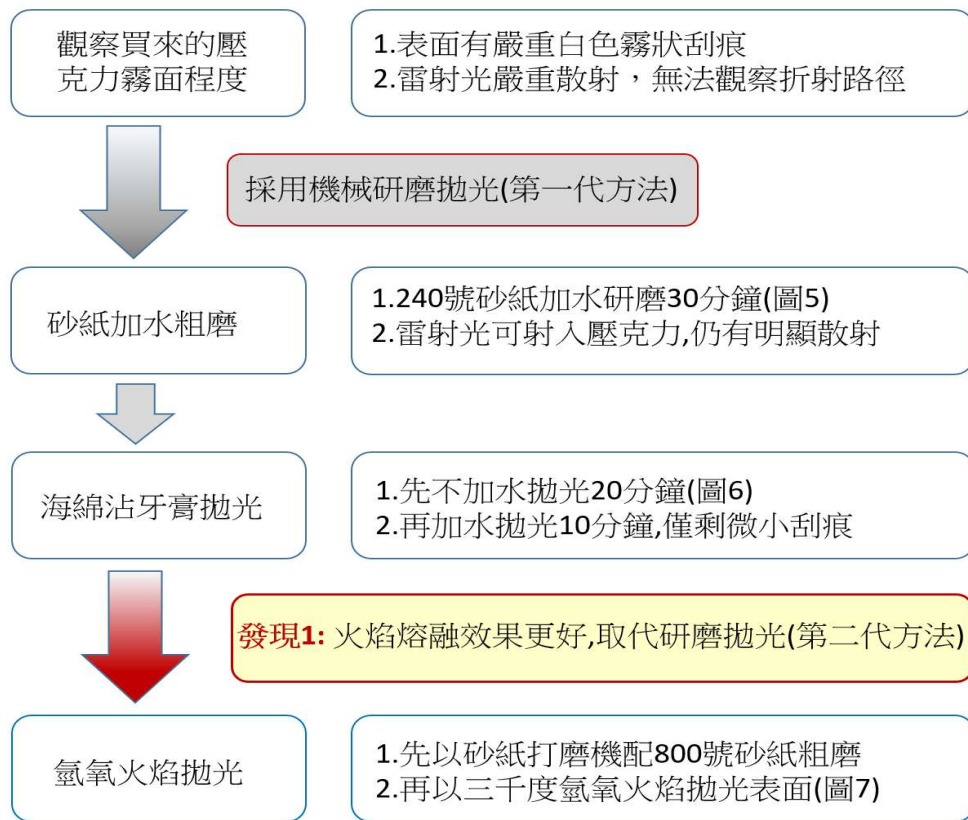


圖 4：去除刮痕方法流程圖。(作者繪製)



圖 5：砂紙研磨(指導教師拍攝) 圖 6：牙膏拋光(指導教師拍攝) 圖 7：火焰拋光(作者拍攝)

二、校正雷射平行度並觀察瑞利散射及材料色散

不同波長在壓克力中有不同的折射路徑；先校正紅光和紫光的平行度；其中，紅光在空氣中的光點大於紫光，但進入壓克力後，因瑞利散射使得紫光光束比紅光寬。此外，紅紫光的折射角差值可用做簡易色散指標(圖 8-13)。再者，考量瑞利散射和傷眼程度，將綠光做為第二代的雷射光源。

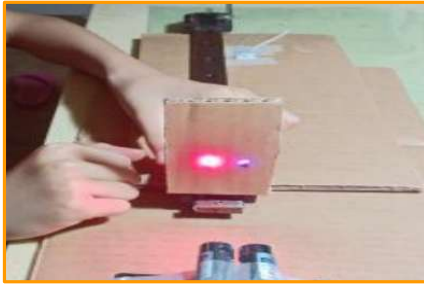


圖 8：雷射點近端標記(指導教師拍攝)

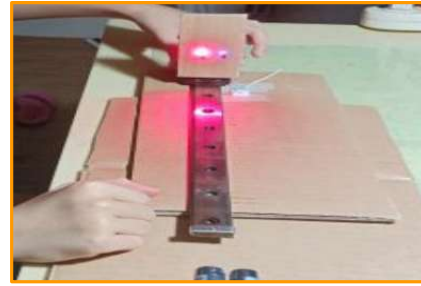


圖 9：雷射光遠端校正(指導教師拍攝)

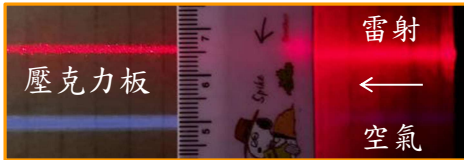


圖 10：靠近雷射一側(近端) (作者拍攝)

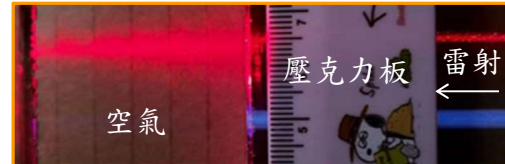
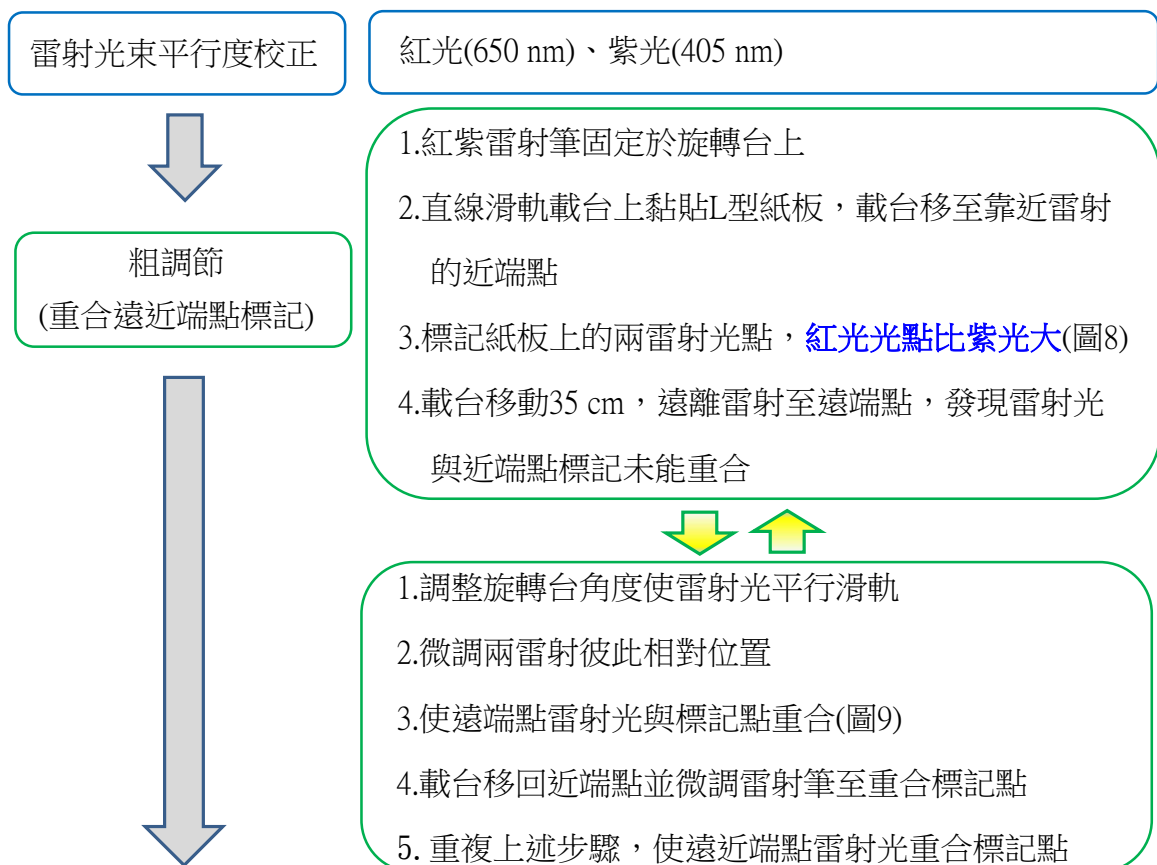


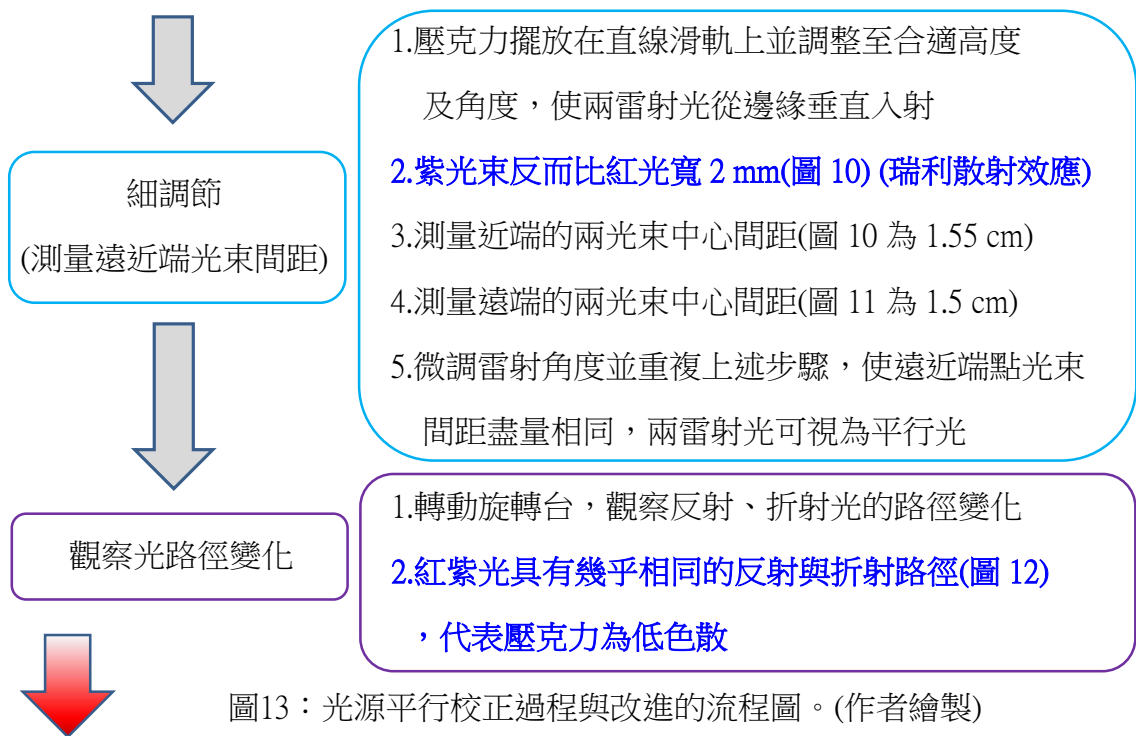
圖 11：遠離雷射一側(遠端) (作者拍攝)



圖 12：紅紫平行光束，以傾斜角度入射壓克力板。(作者拍攝)







#### 發現 2:

- 1.第一代光源用紫光和紅光，紫光束較寬較易觀察但傷眼，而紅光有時候瑞利散射不明顯，不易觀察光束路徑。
- 2.第二代光源改用綠光，因為視覺細胞對黃綠光最敏感，且綠光瑞利散射比紅光明顯。
- 3.綠光比紫光較不傷眼，但仍須用紅色玻璃紙貼在鏤空眼鏡架上，來減弱雷射光的刺激。

### 三、全反射的發生過程

#### (一) 全反射臨界角的發生條件

1. 雷射光從光密介質(高折射率)入射光疏介質(低折射率)時，當入射角持續增加，折射角也會偏離法線而不斷地增大，當折射角等於 $90^\circ$ 時折射光消失，此時入射角稱作**臨界角**。
2. 根據司乃耳定律，當壓克力和空氣的折射率(光在真空中的速度與光在介質中的速度的比值)，分別為1.585和1，臨界角為 $39.1^\circ$ ；**大於臨界角，發生全反射**。
3. 當光密介質的四周被光疏介質包覆時，大於臨界角的雷射光，可以不斷地往前傳遞，這是光纖導光的原理。

#### (二) 實驗觀察

為測量臨界角，使用半圓形壓克力板，以確保在 $0^\circ$ 到 $90^\circ$ 的範圍內，雷射都

能垂直射入壓克力，以利讀取角度，實驗步驟如下：

1. 將壓克力放置於量角器上，固定於旋轉台，由右下角打入紅光雷射，並旋轉平台，可觀察到折射光由左上角射出，反射光往左下角射出，二次反射光往右上角折射（圖14）。
2. 當入射角等於臨界角時，出現沿著界面的水平折射光往左射向拇指，此時折射角為 $90^\circ$ ，且反射光強度明顯增強（圖15）。

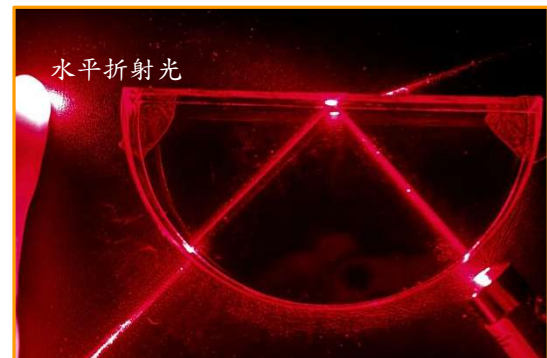
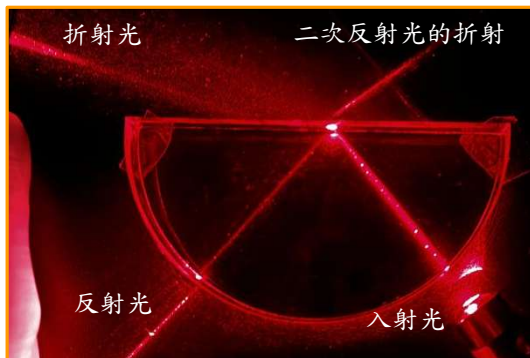


圖 14：壓克力板內的折射現象(作者拍攝)

圖 15：壓克力板內的全反射現象(作者拍攝)

#### 四、自製光束準直器和旋轉測量裝置

為測量不同材料的臨界角，並觀察全反射和光穿隧現象，須自製準直性較高的白光光源和旋轉測量臨界角裝置，步驟如下：

- (一)自製白光光束準直器：剪裁不同管徑水管組合而成。測量手電筒白光光束出口直徑 17 mm,發散角度達到 100 度(圖 16(a))，而自製準直器出口直徑 7 mm，發散角度大幅降低到 10 度且光強度明顯集中增強(圖 16(b))。

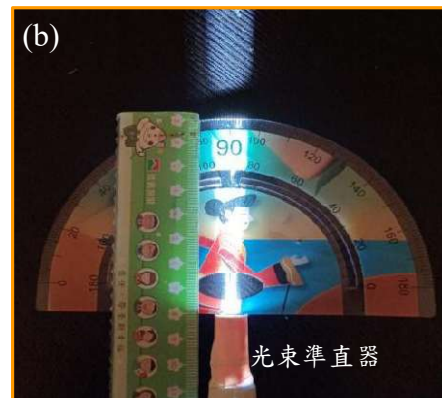


圖 16：(a)手電筒白光的發散角高達 100 度，(b)準直後發散角降至 10 度。(作者拍攝)

(二)自製旋轉測量臨界角裝置: 將旋轉盤、水管固定架、彎鉤等器材組合起來固定於木砧板上(圖 17(a))，環形量角器貼上半圓形液體槽，槽內放入半圓形壓克力板，量角器的水平線與液體和壓克力板的交界面校正對齊 (圖 17(b))。



圖 17：(a)製作臨界角旋轉測量裝置，(b)校正旋轉光束與量角器的對準方式。(指導教師拍攝)

## 肆、研究結果

### 一、粗糙表面散射光的影響和消除方法

- (一) 使用放大倍率可調的顯微鏡(圖 18(a))觀察尚未研磨的壓克力板粗糙霧面(圖 18(b))。
- (二) #240 砂紙加水研磨後的照片(圖 18(c))，牙膏加水拋光後的照片(圖 18(d))和#800 砂磨後火焰拋光成鏡面的照片(圖 18(e))，頭髮直徑 45 微米(螺旋測微儀測量)貼上鏡面協助對焦。
- (三) 雷射射入拋光後的壓克力各端面都沒有明顯散射，且可明顯觀察到內部的光路。

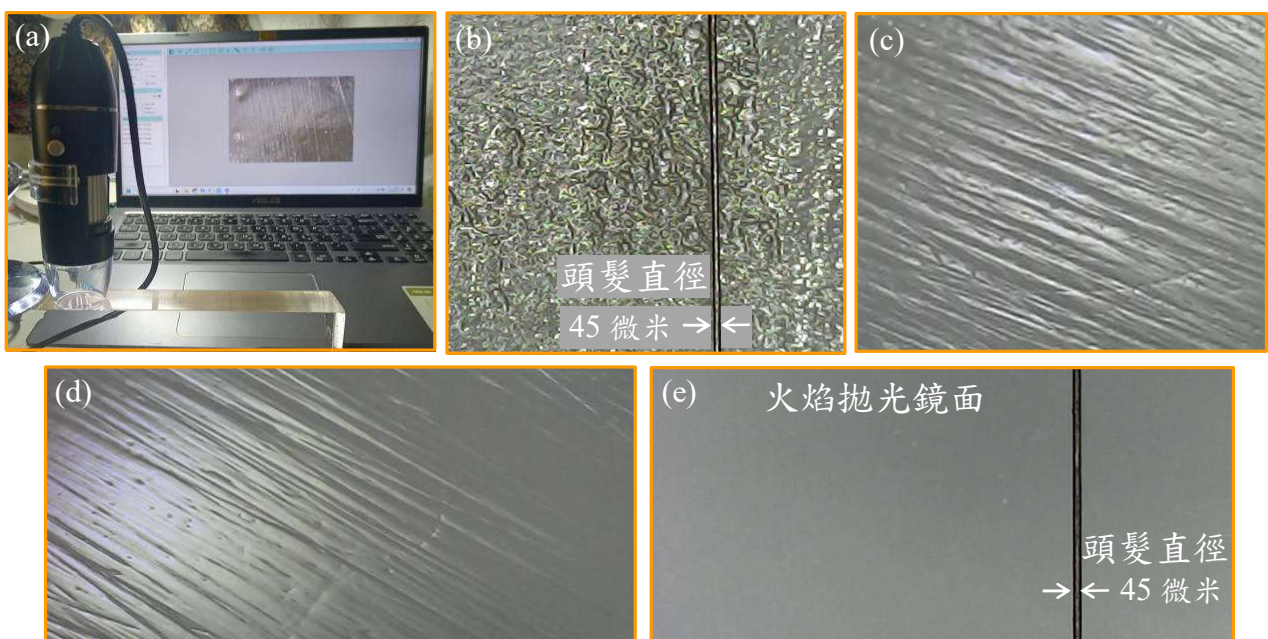


圖 18：(a)倍率可調顯微鏡，(b)原始粗糙霧面(顯微鏡)，(c) #240 砂紙加水研磨(顯微鏡)，(d)牙膏加水拋光(顯微鏡)，(e)#800 砂磨後火焰拋光鏡面(顯微鏡)。(作者拍攝)

## 二、測量折射角並觀察瑞利散射及材料色散

由圖19，入射光從介質1(折射率 $n_1$ )射向介質2(折射率 $n_2$ )且空氣折射率為1，反射定律為入射角 $\theta_1$ 等於反射角 $\theta_3$ ；介面的垂直線稱作法線，而法線與入射光和折射光的夾角，分別是入射角 $\theta_1$ 及折射角 $\theta_2$ 。

(一) 紅光雷射驗證反射與折射(司乃耳)定律，步驟如下:

1. 入射光1從右下角以45度，由空氣射入壓克力(圖20(a))，反射光從左下45°射出(滿足反射定律)。
2. 折射光1在壓克力內，折射角為26.5°(圖20(b))(滿足折射定律)。
3. 由司乃耳定律 $n_1 \times \sin \theta_1 = n_2 \times \sin \theta_2$ ；

$$1 \times \sin 45^\circ = n_2 \times \sin 26.5^\circ, n_2 = 1.585$$

光疏介質 → 光密介質

用google計算機計算得到的 $n_2$ ，與Ref. [11]相當接近。



4. 折射光1往上打到壓克力板邊界，上邊界為新的介面，上方量角器的0度線為新的法線(圖20(a))。
5. 折射光1同時也是入射光2，新的入射角為26.5°。
6. 折射光2進入空氣，新的折射角為45°，與原始入射角相同(圖20(c))。

光密介質 → 光疏介質



### 發現3:

1. 由光疏介質入射光密介質時，折射光偏向法線。(沒有機會全反射)
2. 由光密介質入射光疏介質時，折射光偏離法線。(才有機會全反射)
3. 雷射光由空氣射入壓克力會偏折，再射出到空氣後，恢復原角度，代表在相同介質中，雷射光的行徑角度相同。(重複進出相同折射率介質時不偏折)



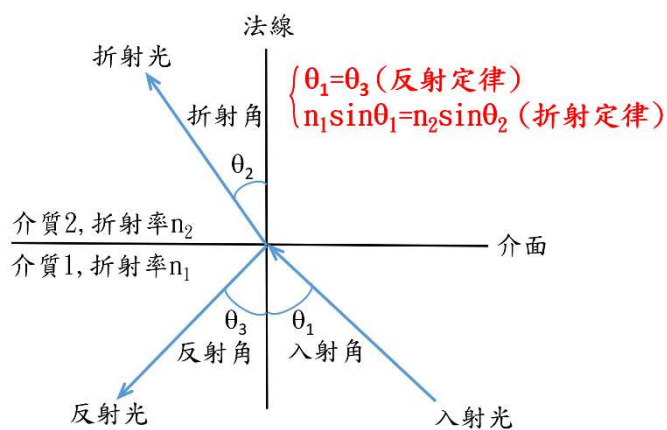


圖19：光學入射反射與折射關係。(作者繪製)

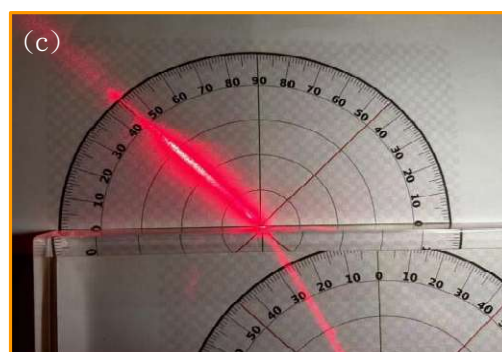
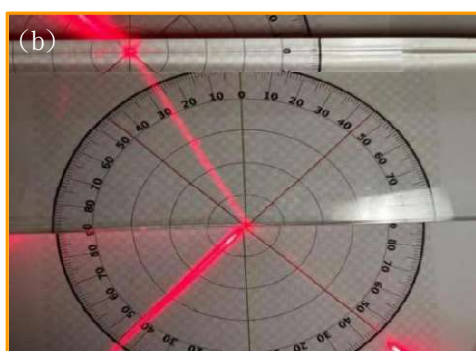
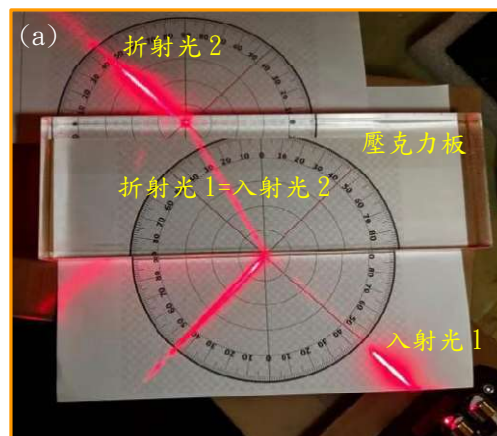


圖 20：(a) 紅光反射與折射現象，(b)下側放大圖，(c)上側放大圖。(作者拍攝)

(二) 改以紫光雷射重複上述實驗，結果如下：

- 1.入射角和反射角都是 $45^\circ$ (圖21(a))，折射角是 $26.5^\circ$ (圖21(b))，且折射出離壓克力後的折射角，同為 $45^\circ$ (圖21(c))。
- 2.紅光(650 nm)和紫光(405 nm)有相同的折射角，表示壓克力為低色散材料，**折射角差值可簡易地做為量化色散的指標。**

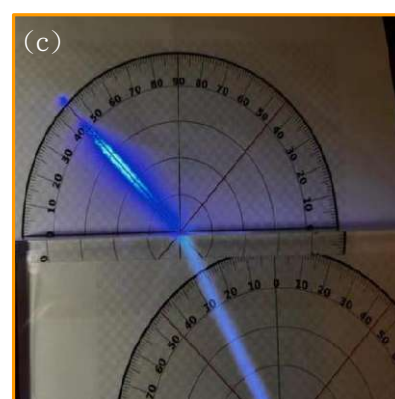
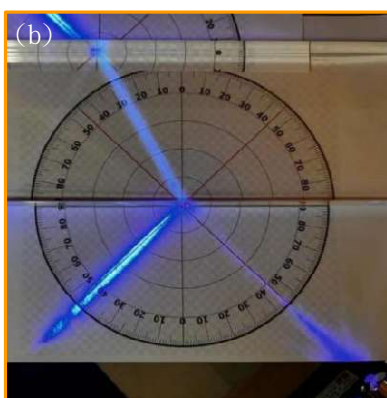
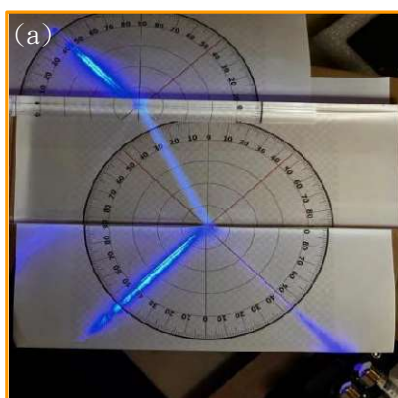


圖 21：(a)紫光反射與折射現象，(b)下側放大圖，(c)上側放大圖。(作者拍攝)



### 三、探討臨界角的影響因素及進行魔法隱身與穿牆實驗和應用

#### (一) 膠帶圍欄法(第一代方法)，實驗步驟如下：

1. 以隱形膠帶在壓克力上方築起一個圍欄並倒入高 1 cm 的水(圖 22(a))。
2. 用隱形膠帶覆蓋液體表面，破壞液體/空氣介面形成的干擾反射光。
3. 手動調整入射光至臨界角，出現水平折射光後，紀錄臨界角度(圖 22(b))。
4. 將水換為甘油，重複上述步驟。
5. 測量壓克力對空氣/水/甘油的臨界角，分別是  $43^\circ$ ， $64.5^\circ$ ， $82^\circ$ (圖 22(c))。

**優點：**方法簡單快速。

**缺點：**膠帶圍欄受表面張力和地心引力拉扯塌陷並遮住部分光路徑，不能更換液體(一次性)，手動調整入射角不穩定且不精確，不能調濃度和量溫度…



**發現 4：**空氣/水/甘油的折射率分別是 1/1.33/1.47，所以，**當兩介質的折射率相差越大時，臨界角越小，相反則越大。**

由實驗結果發現，液體放在壓克力上方會到處流動，所以，這不是個好方法，改用透明容器裝液體，並用樂高積木在液體中架起壓克力，雷射改由右上方往左下射入液體(第二代過渡方法)；實驗發現這方法還可以，但是調整量角器和壓克力對準時，浮力常讓積木翻倒，因此，再更換更穩定的作法。另外，還觀察到當壓克力的上下方都是空氣時，大於臨界角的雷射光，不斷地在上下介面之間發生**全內反射**(圖 23(a))且**手指輕觸全反射點會發亮**(前述光穿隧現象的研究動機)(圖 23(b))。所以，高折射率介質被低折射率介質包覆能傳導雷射光；此原理稍後應用在液位高度警示。

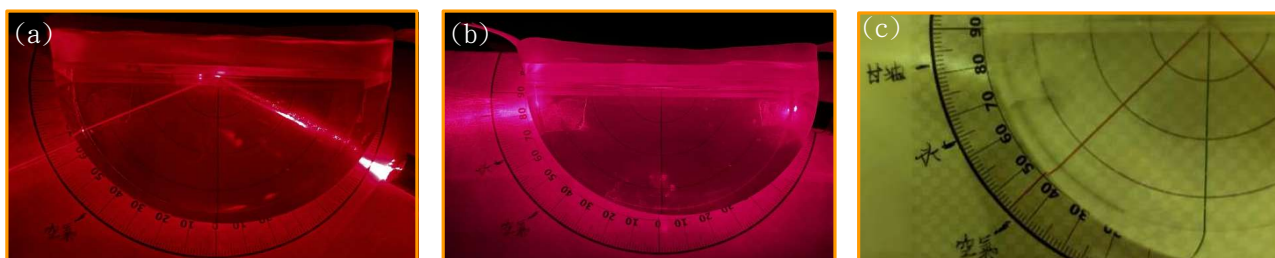


圖 22：(a)壓克力/水的臨界角，(b)壓克力/甘油的臨界角，(c)不同介質的臨界角。(作者拍攝)

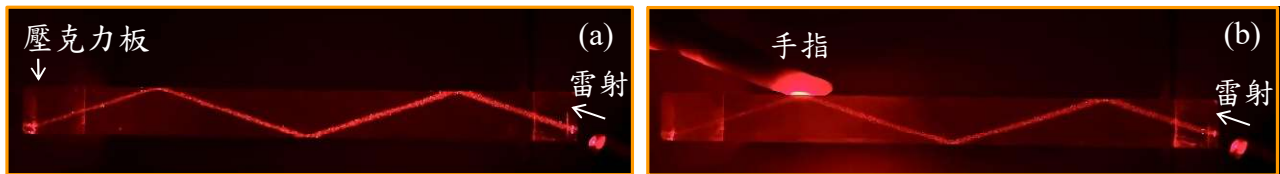


圖 23：(a)壓克力板內的全內反射，(b)手指接觸反射點，穿隧光使手指發亮。(作者拍攝)

## (二) 半圓形槽法測量臨界角(第三代方法)和影響因素

製作半圓形壓克力槽，用來盛裝液體，可以測量對空氣或對透明固體介質的臨界面角，並可改變液體溫度和濃度，實驗步驟如下：

1. 液體先預熱至 80 度以上，倒入槽內(圖 24(a))。(改變溫度的實驗)
2. 半圓形壓克力板卡入槽內上緣並輕觸液體，以針筒抽吸調整液位高度。
3. 插入電子溫度計，監測自然降溫並實時拍照記錄降溫過程中的溫度(圖 24(a))。
4. 清洗凹槽並更換液體(包含：矽油(礦物油)、芥花油(植物油)、豬油(動物油)、洗碗精、水、甘油)後，重複上述步驟。
5. 移除半圓形壓克力板，將液體更換為甘油，並以針筒抽出 15 ml 的甘油溶液後，回補等量的水，拍照紀錄臨界面角，且重複本步驟數次。(改變濃度的實驗)

豬油是上述液體唯一在室溫中發生相變化(液體轉固體)的液體(圖 24(b)中的凝固絮狀物)，主成分為飽和脂肪酸。芥花油主成分為不飽和脂肪酸。

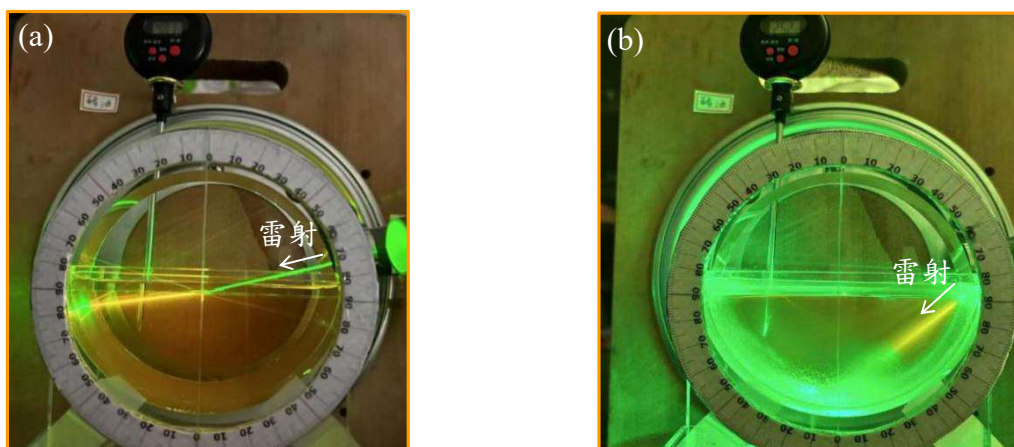


圖 24：(a)雷射打入豬油時的折射狀態，(b)豬油在室溫 25 度左右開始凝固。(作者拍攝)

(三) 溫度變化對臨界角的實驗數據(圖 25 及表 3、表 4)和觀察結果如下:

表 3：部分原始實驗數據

| 114年1月22日 |          | 114年1月23日 |          |
|-----------|----------|-----------|----------|
| 1.水與壓克力   |          | 2.芥花油與壓克力 | 3.豬油與壓克力 |
| 溫度(水)     | 臨界角(壓克力) | 溫度(芥花油)   | 臨界角(壓克力) |
| 67.7      | 63.5     | 60.3      | 80.9     |
| 64.1      | 63.5     | 59.8      | 81       |
| 60.5      | 63.5     | 58.8      | 81       |
| 55.2      | 63.5     | 58.6      | 81       |
| 39.6      | 63.5     | 56.3      | 80.5     |
| 38.8      | 63.5     | 55.9      | 80.9     |
| 35        | 63.5     | 55.6      | 80       |
| 34.9      | 63.5     | 54.9      | 80       |
| 32        | 63.5     | 54.4      | 80       |
| 29.8      | 63.5     | 53.3      | 80       |
|           |          | 52.8      | 80.5     |
|           |          | 51.9      | 80.2     |
|           |          | 49.3      | 80.9     |
|           |          | 48.7      | 80.9     |
|           |          | 48.3      | 80       |
|           |          | 47.9      | 80.5     |
|           |          | 46.2      | 80       |
|           |          | 45.8      | 80       |
|           |          | 44.1      | 80       |
|           |          | 43.2      | 80       |
|           |          | 40.1      | 81       |
|           |          | 38.2      | 81       |
|           |          | 32.5      | 81.5     |
|           |          | 31        | 81       |
|           |          | 30.9      | 81.5     |
|           |          | 30.8      | 81.5     |

| 溫度(豬油) | 臨界角(壓克力) |
|--------|----------|
| 67.6   | 77       |
| 65.6   | 77       |
| 63.1   | 77.5     |
| 60.3   | 77.5     |
| 58.8   | 77.5     |
| 52     | 77.8     |
| 49.4   | 77.5     |
| 47.8   | 77.5     |
| 46.1   | 77.8     |
| 40.4   | 78.5     |
| 39.4   | 78       |
| 37.8   | 78.5     |
| 35.1   | 78.5     |
| 32.4   | 79       |
| 29.7   | 79       |
| 27.7   | 79       |

| 溫度(洗碗精) | 臨界角(壓克力) |
|---------|----------|
| 57.3    | 67       |
| 57      | 67       |
| 56.7    | 67       |
| 56      | 67       |
| 55.5    | 67       |
| 53.2    | 67       |
| 52.9    | 66.5     |
| 52.7    | 66.7     |
| 51.6    | 66.5     |
| 51.2    | 67       |
| 51.1    | 67.3     |
| 51.1    | 67.3     |
| 48.9    | 66.5     |
| 48.8    | 66.5     |
| 48.6    | 66.6     |
| 48.5    | 66.5     |
| 47.8    | 66.5     |
| 46.5    | 66.5     |
| 45.5    | 66.5     |
| 44.5    | 66.5     |
| 44.4    | 66.5     |
| 43.2    | 67.3     |
| 42.6    | 67       |
| 42.5    | 66.5     |
| 42.3    | 66.7     |
| 42.1    | 66.5     |
| 42      | 66.5     |
| 41.3    | 66.5     |
| 39.1    | 66.5     |
| 38.7    | 66.5     |

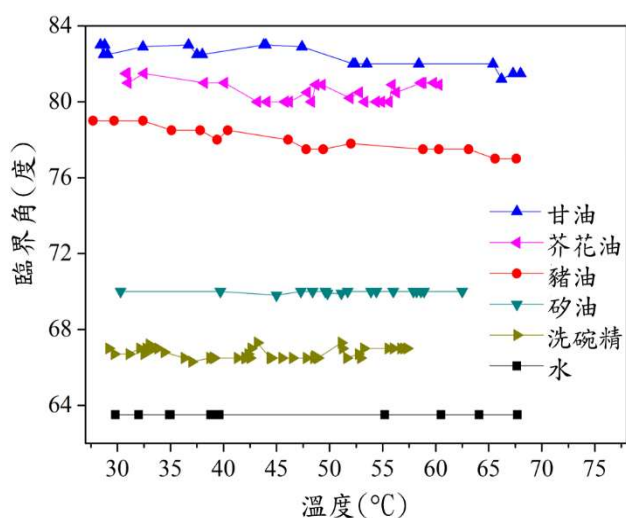


圖 25：臨界角對液體溫度的變化。(作者繪製)

表 4：圖 25 的分析參數

| 液體  | 斜率<br>( $^{\circ}/^{\circ}\text{C}$ ) | 決定係數<br>( $R^2$ ) | 線性關聯度<br>( $R^2=0.5$ 為標準) |
|-----|---------------------------------------|-------------------|---------------------------|
| 甘油  | -0.034                                | 0.687             | 很好                        |
| 芥花油 | -0.023                                | 0.159             | 很差                        |
| 豬油  | -0.049                                | 0.891             | 非常好                       |
| 矽油  | 0.001                                 | 0.042             | 很差(接近水平線)                 |
| 洗碗精 | 0.002                                 | 0.002             | 很差                        |
| 水   | 0                                     | 0                 | 水平線(XY無關聯)                |



### 觀察結果:

1. 芥花油的臨界角，相對豬油變化較大，推測是不飽和脂肪酸對溫度較不穩定。
2. 液體可區分為上群組(甘油、芥花油、豬油)和下群組(矽油、洗碗精、水)，且高折射率液體的臨界角更易受溫度影響。
3. 豬油在相變化過程中，折射率隨溫度下降而上升，但隨溫度的變化最規則，與飽和脂肪酸性質很穩定的特性相符。
4. 芥花油變化最不規則，與不飽和脂肪酸容易受溫度影響的特性相符，而洗碗精雖是複方成分，但變化沒有芥花油大，也與折射率低的液體比折射率高的液體較穩定的特性相符。
5. 水和矽油幾乎是水平線，所以溫度與臨界角之間，幾乎沒有關聯性。
6. 豬油斜率最陡，可能是因為在降溫過程中，發生相變化(液體轉化為固體)。



### 發現 5:

1. 兩介質的折射率相差越大，臨界角越小(發現 4)，所以，推測**折射率大小為甘油>芥花油>豬油>矽油>洗碗精>水**。
2. 成分越單一，臨界角受溫度影響越小。(洗碗精的臨界角變化較大)
3. **溫度上升會使折射率下降**，對高折射率液體較明顯，但變化還是很小，對低折射率液體則幾乎不明顯。
4. **相較於溫度的影響，相變化可能導致折射率發生較大的改變。**

### (四) 濃度變化對臨界角的影響

液體倒入半圓形壓克力槽，因為甘油可溶於水，用來測量液體濃度對臨界角的影響，實驗步驟及觀察結果如下：

1. 先將 196 毫升的甘油填滿半圓形壓克力槽，並以綠光雷射由右下方射入，量得對空氣的臨界角(圖 26)。
2. 折射率越大的液體，因為與空氣的折射率差也越大，使臨界角越小(發現 4)(表 5)。
3. 針筒吸出 15 毫升的甘油溶液，然後回補等量的水並攪拌均勻以稀釋甘油。

4. 重複上述步驟數次以測量濃度對臨界角的影響(圖 27)。
5. 紅色線性擬合直線(圖 27 中一條最吻合現有數據點的直線)和決定係數(圖 27 中黑點與紅線的貼合程度)幾乎接近 1，表示臨界角隨甘油濃度降低而增加(表 6)。

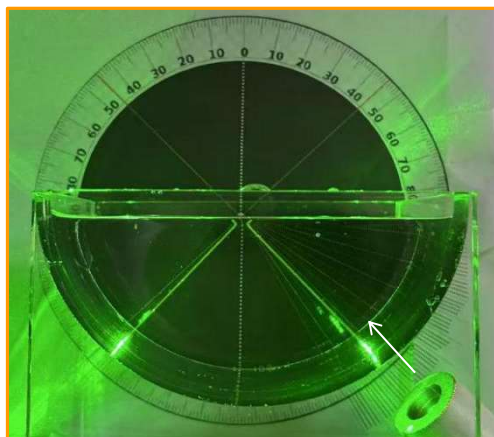


圖 26：液體對空氣的臨界角測量裝置。(作者拍攝)

表 5：液體對空氣在室溫下的臨界角

| 液 體 | 臨界角   |
|-----|-------|
| 甘油  | 42.8° |
| 芥花油 | 43.5° |
| 矽油  | 44°   |
| 洗碗精 | 46.5° |
| 水   | 50°   |

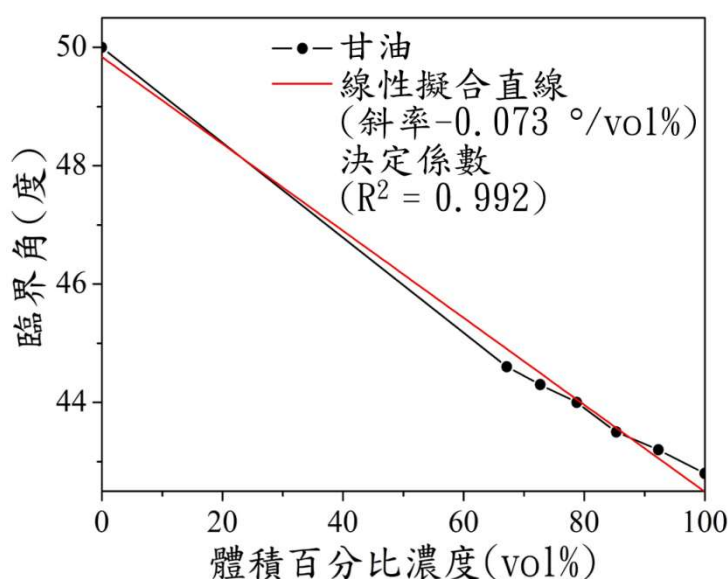


圖 27：甘油水溶液濃度對空氣的臨界角變化。(作者繪製)

表 6：不同甘油濃度的臨界角

| 甘油濃度(vol%)     | 臨界角   |
|----------------|-------|
| 196ml(100%)    | 42.8° |
| 181ml(92.3%)   | 43.2° |
| 167.2ml(85.3%) | 43.5° |
| 154.4ml(78.8%) | 44°   |
| 142.6ml(72.7%) | 44.3° |
| 131.7ml(67.2%) | 44.6° |
| 0ml(0%)(水)     | 50°   |

#### (五) 全反射應用在魔法隱身遊戲

**旋轉隱身術：**文獻來源中提到，許多全反射遊戲已被提出，我想出一個新的方法，把不同的臨界角整合在相鄰位置，形成不同可視角度的臨界角架構(圖 28)，以增加更多自由度。旋轉隱身的步驟如下，流程圖如圖 29 所示：



- (1) 三貼紙中，左邊貼紙不沾液體，中間貼紙沾水，右邊貼紙沾甘油。
- (2) 跟另一半圓形壓克力板組成一個圓形壓克力。
- (3) 放置在旋轉台上，此時可同時觀察到三張貼紙。(0 度視角)
- (4) 持續順時鐘旋轉後，左邊、中間、右邊貼紙依序消失。(約+85 度視角)
- (7) 反向逆時鐘旋轉，逐漸回到 0 度視角，右邊、中間、左邊貼紙依序重新出現。
- (8) 由 0 度視角開始逆時鐘旋轉，依舊是左邊、中間、右邊貼紙依序消失。  
(約-85 度視角)



**發現 6:**

1. 貼紙隱身和現身的順序與臨界角大小有關，與旋轉方向無關；消失順序 ABC，現身順序 CBA(圖 28 及圖 29)。
2. 貼紙沾不同液體會對應到不同的可視角度(圖 28)。

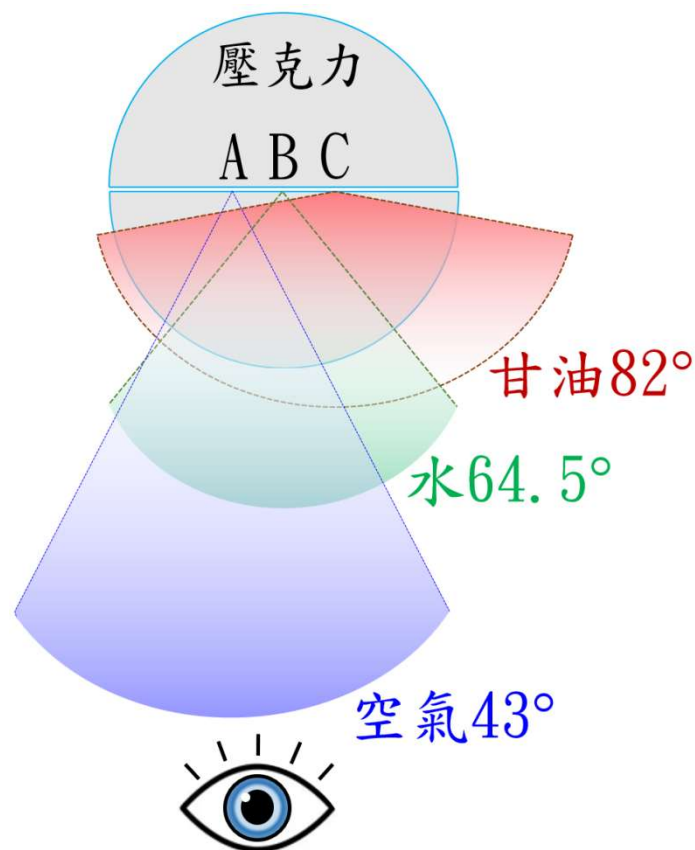


圖 28：不同臨界角的可視角度。(作者繪製)

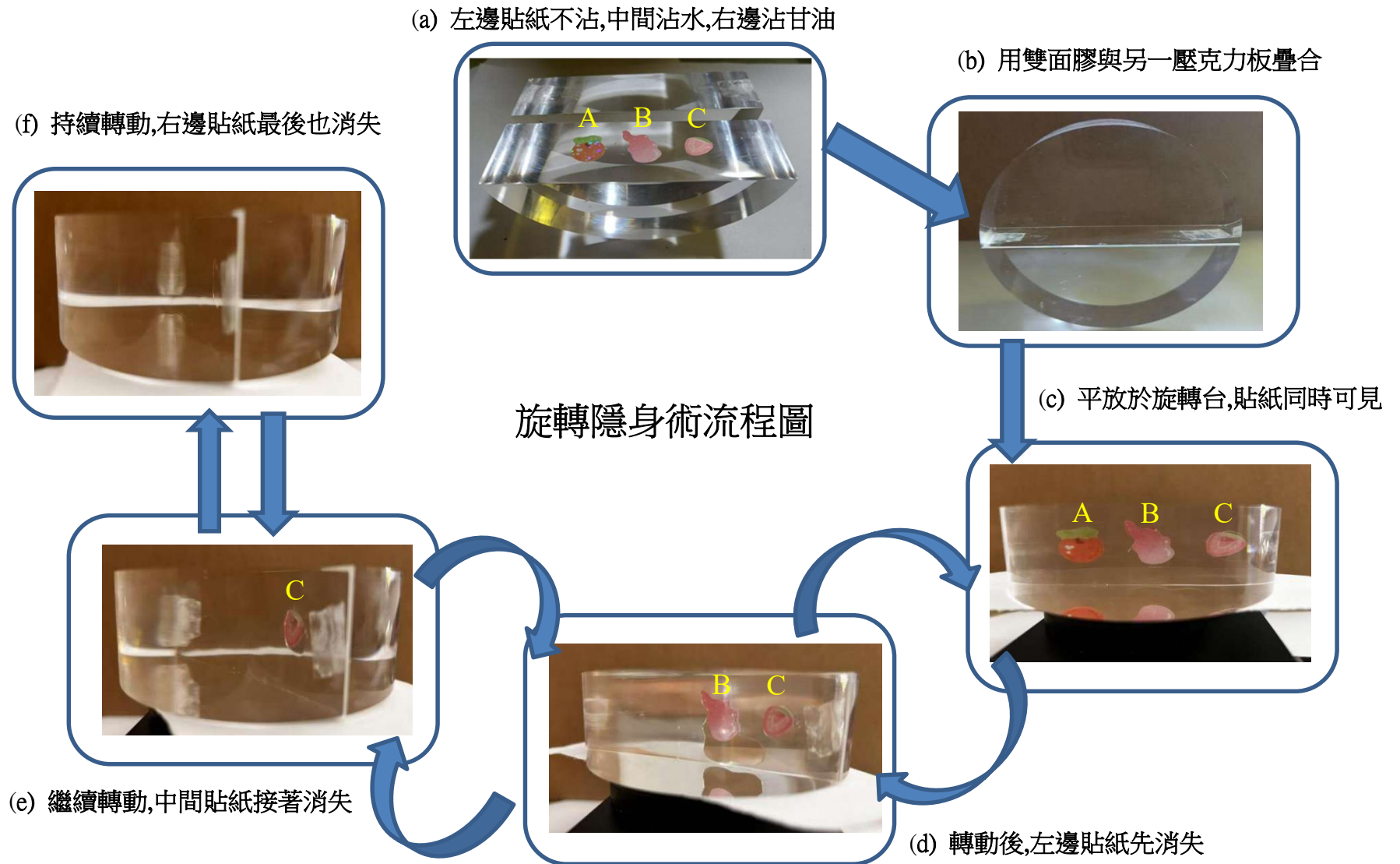


圖 29：旋轉隱身術依序隱身，(a)貼紙沾液體，(b)疊合，(c)平放時全可見，(d)順轉左邊消失，(e)中間接著消失，(f)右邊最後消失；消失順序 ABC，現身順序 CBA。(作者拍攝)

(六) 全反射應用在液位高度警示(圖 30)，這個自己想到的新構想實驗流程如下：

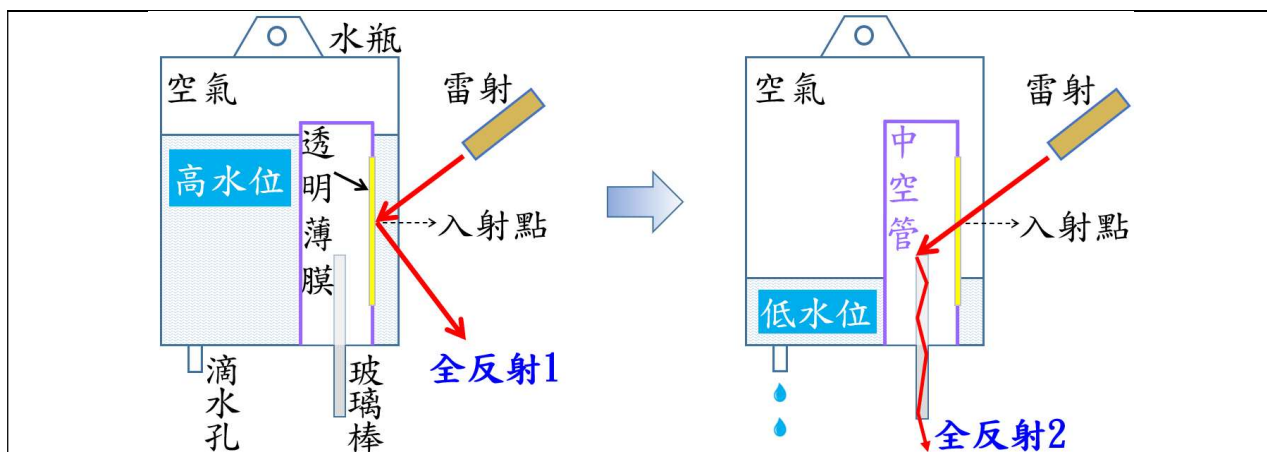
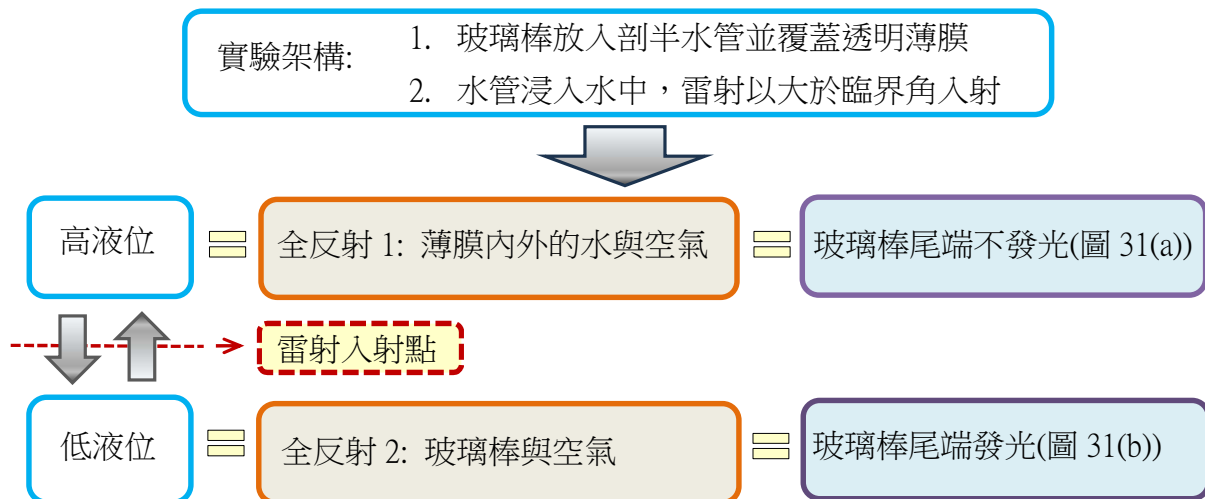


圖 30：自製液位高度偵測管，並應用於模擬醫療點滴液位警示示意圖。(作者繪製)

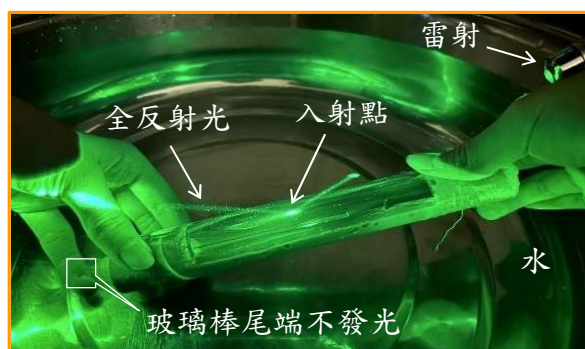


圖 31：(a)水位高過入射點，玻璃棒尾端不發光，(b)水位低過入射點，玻璃棒尾端發光。  
(指導教師拍攝)

雷射入射點的位置決定了液位高度警報的時機，利用液位高低不同，讓薄膜外側和玻璃棒內部，先後發生全反射的方法，有機會應用在智慧病房和各種液位檢測設備上。

### (七) 魔法穿牆術-打破全反射的光穿隧效應

圖 32(a)是最經典的宏觀狀態下的光穿隧效應(專家訪談)，在全反射時，只有緊密接觸介面的指紋脊線(凸紋)可見，而指紋的谷線(凹紋)則因為介面空氣間隙形成的全反射而無法看見，因此，光穿隧效應可使指紋等細微結構更易被清楚鑑定。

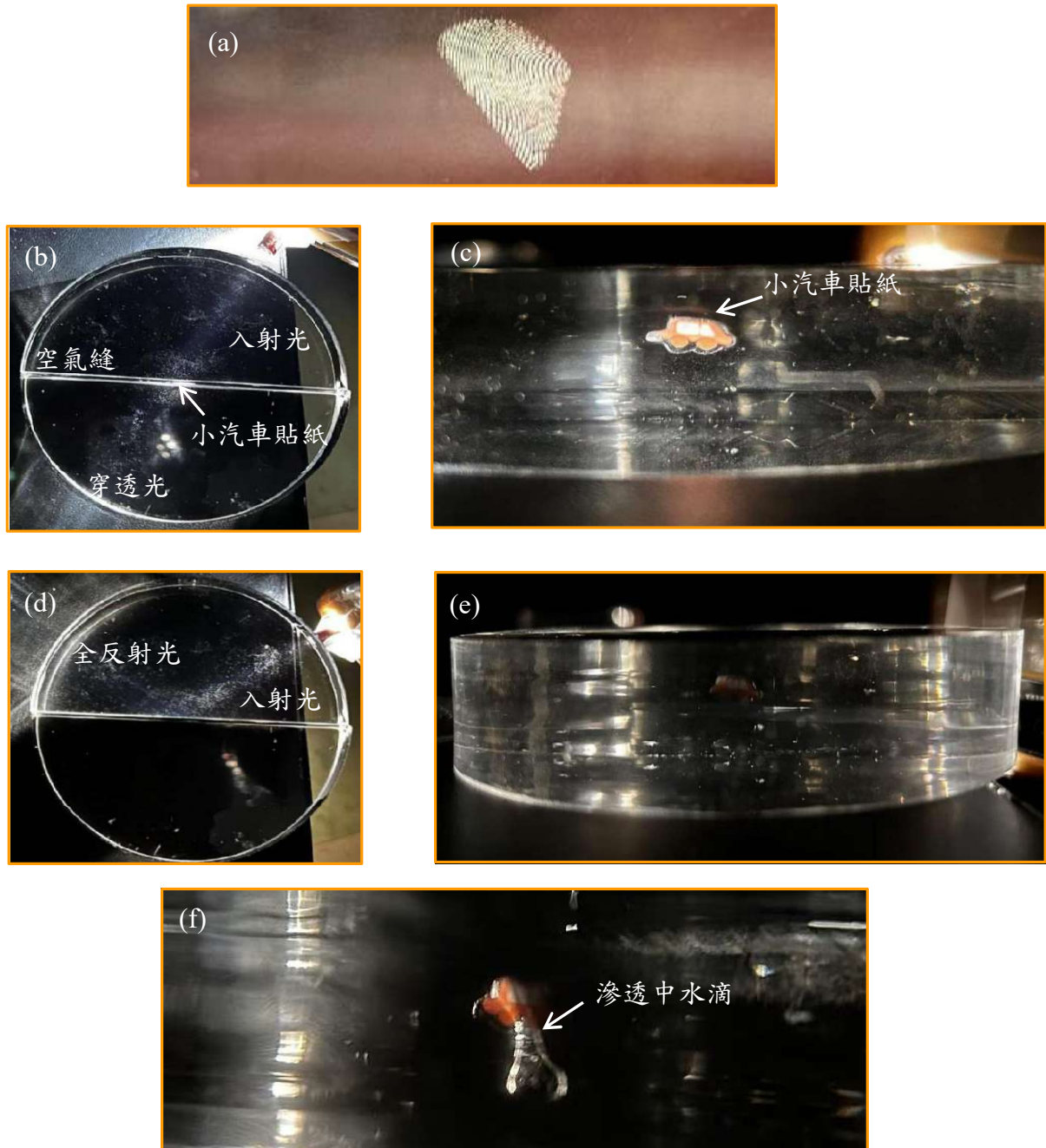


圖32：(a)光穿隧使指紋脊紋被看見，其餘地方則無法看見，(b)小於臨界角，白光穿透空氣縫，(c)另一側可看到小汽車，(d)大於臨界角，白光全反射，(e)全反射時，看不到小汽車，(f)水滴滲入空氣縫後，接觸到水的小汽車部分，再度現身。(作者拍攝)



## 1. 水滴輔助光穿隧(第一代方法)，實驗步驟如下:

- (1) 貼合兩半圓形壓克力板，介面中的其中一面貼上小汽車貼紙。
- (2) 將準直白光以小於臨界角的狀態入射並穿透介面(圖 32(b))，另一側可看到小汽車(圖 32(c))。
- (3) 調整白光以大於臨界角入射產生全反射(圖32(d))，在另一側看不到小汽車了(圖32(e))。
- (4) 將少量水滴滲入介面空氣縫中，滲透的過程中，部分白光可以發生穿隧，僅在被水滲入的部分，可以再度看見局部小汽車（圖32(f)）。

很明顯的，空氣縫(可看作一道很高的折射率障礙牆)形成的全反射，讓小汽車消失，而水滴可以減低障礙牆的高度，使白光能穿牆而過並讓小汽車再度現身。添加微量水滴是為了降低障礙牆，讓光通過；若不借助水滴，則必須讓介面空氣間隙小於數個波長，這也是物理系教授在訪談時，提醒要注意的地方。

## 2. 軟硬介面微距空氣的光穿隧(第二代方法):

雖然我們的壓克力表面已使用氫氧火焰拋光至鏡面，但是大範圍的平整度還是沒有好到能讓壓克力靠近到幾個微米的距離，也因此難以直接觀察穿越空氣縫的光穿隧現象。為突破困難，採用軟硬結合的方式，實驗過程如下:

- (1) 8 mm見方塑膠墊(厚度300微米)黏貼上螺旋測微儀(位移精度1微米)心軸；入射角53度，塑膠墊距離壓克力約2 mm時，尚未接觸漸逝波而不發光(圖33(a))。
- (2) 塑膠墊接觸壓克力時發亮，扭矩偵測器限制前進，位置刻度歸零(圖33(b))。
- (3) 心軸帶動塑膠墊離開壓克力，往外位移5微米時仍發亮(圖33(c))。
- (4) 持續往外位移，塑膠墊亮度逐漸變暗；當位移達到27微米時，轉為全暗(圖34)；自行定義穿隧深度為最低亮度可見的地方，此處為26微米。

此處的穿隧深度26微米，比Ref.[1]的6.5微米高出許多，推測是螺旋測微儀內部扭矩偵測器的設定，導致塑膠墊出現擠壓形變，引起位移偵測誤差。此方法雖然不夠精確，但已證明光波像成語「鑿壁借光」的情景，光在微米空氣牆中鑿出一條"光通道"溜過去另一個介質(圖35)。下面將改用硬質塑膠導光柱來避開塑膠墊被擠壓變形問題，且又可以在距離壓克力幾微米範圍內，精密微調移動。





圖 33：(a)塑膠墊與壓克力距離約 2 mm 時不發光，(b)塑膠墊接觸壓克力時發亮，並將位置刻度歸零，(c)塑膠墊離開壓克力，當往外位移 5 微米(0.005 mm)時依舊發亮。(作者拍攝)

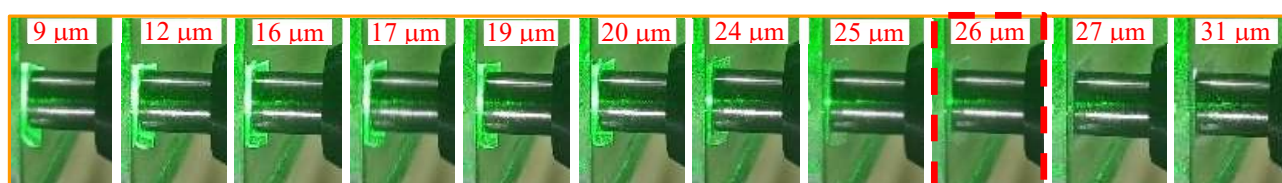


圖 34：當塑膠墊往外位移的距離，從 9 微米增加至 26 微米時，塑膠墊亮度逐漸變暗；當位移達 27 微米時，轉為全暗；自行定義穿隧深度為 26 微米。(作者拍攝)

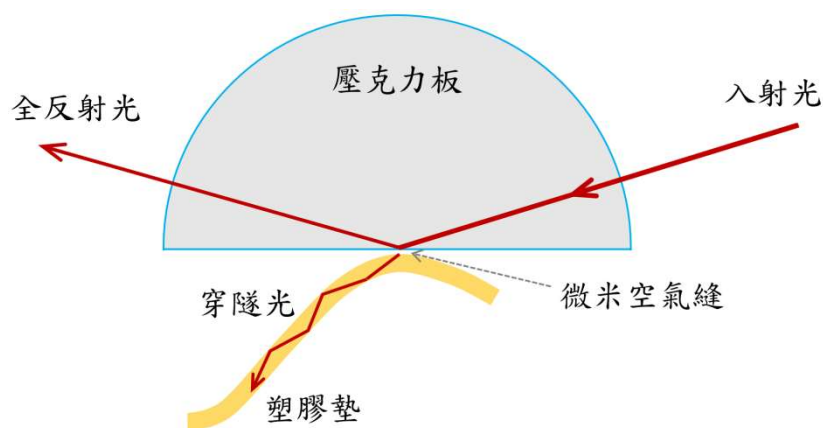


圖 35：鑿壁借光(光穿隧)示意圖。(作者繪製)

### 3. 導光柱微距空氣的光穿隧(第三代方法):

為克服第二代軟質塑膠墊被擠壓變形而產生位移誤差，此處改採直徑2.5 mm 的硬質導光柱將穿隧光傳導入光電二極體，同時以顯微鏡和示波器波形同時監測以提高穿隧深度的測量精度，實驗架構如圖36(a)，圖36(b)-(c)和(d)-(e)分別是空氣間隙為10和0(接觸發生)微米時，雷射分別關閉和打開的狀態，實驗過程如下：

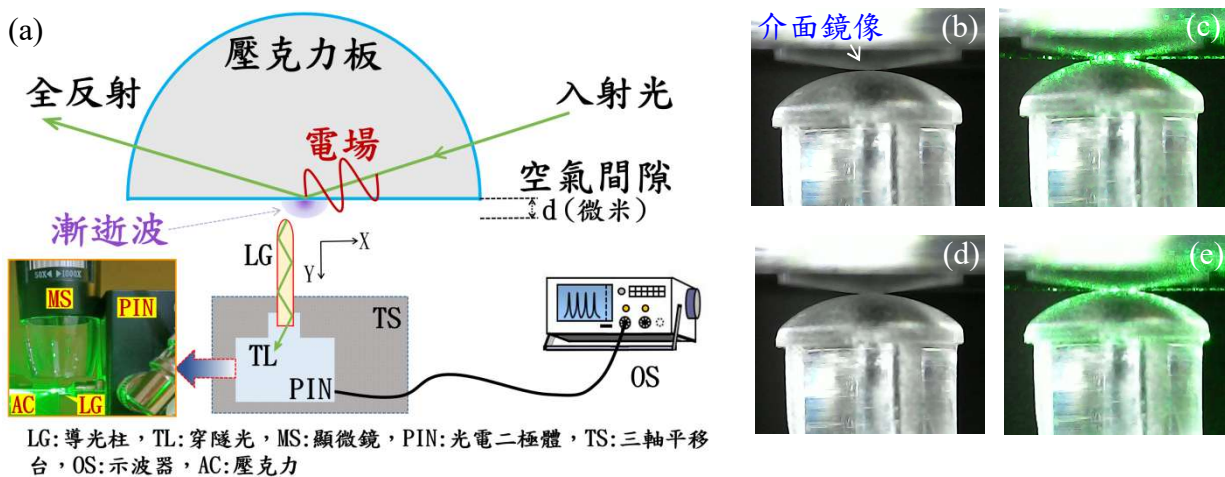


圖 36：(a)實驗架構，(b)  $d=10$  微米，雷射關，(c)  $d=10$  微米，雷射開，導光柱中心軸不發光，(d)  $d=0$  微米，雷射關，(e)  $d=0$  微米，雷射開，導光柱中心軸發亮。(指導教師繪製，作者拍攝)

- (1) 調整三軸平移台使導光柱沿Y軸方向對準全反射點並接近漸逝波(圖36(a))。
- (2) 觀察顯微鏡、示波器及導光柱亮度並將接觸點定為位移原點 (圖36(b)-(e))。圖36(b)中，導光柱與壓克力介面距離10微米，可看到壓克力鏡面反射的鏡像。
- (3) 沿Y軸方向移動導光柱離開漸逝波，並紀錄示波器上的信號電壓值，共紀錄兩次漸逝波強度衰減曲線(圖37(a)-(b))且對應的穿隧深度分別為9.5及8.5微米。
- (4) 沿X軸方向移動導光柱並記錄電壓值，測量漸逝波範圍和強度變化(圖37(c))。

由圖36(a)，發生全反射時，在介面附近的空氣中，光強度會隨距離呈指數衰減，稱為漸逝波。此處，採用圓頭硬質導光柱，分兩次測量到綠光在66度全反射入射角狀態下的穿隧深度分別為8.5和9.5微米，與Ref.[1]中玻璃稜鏡的穿隧深度6.5微米相近，相較於軟硬結合的第二代方法，此方法精確度已明顯提升。

測量時，採用光電二極體來放大微弱信號，並減去背景雜訊值，記錄示波器的電壓平均值，兩次的實驗數據如圖37(a)-(b)；其中信號的擬合曲線顯示強度都隨縱向(Y方向)距離呈指數衰減(與Ref.[1]相同)，決定係數分別達0.98和0.96。

另外，在導光柱輕觸反射介面情況下，由圖36(a)中，漸逝波的最左邊橫向移動至最右邊(沿X方向)，以測量漸逝波沿著介面的光強度分布(圖37(c))；實驗結果顯示漸逝波跟雷射(高斯光束)一樣，高度地( $R^2=0.996$ )吻合高斯分布(Ref.[12])。



#### 發現 7-1:

1. 漸逝波的強度在垂直介面的方向呈指數快速衰減，空氣中的穿隧深度平均約 9 微米。
2. 漸逝波的強度在介面的光行進方向呈高斯分布。

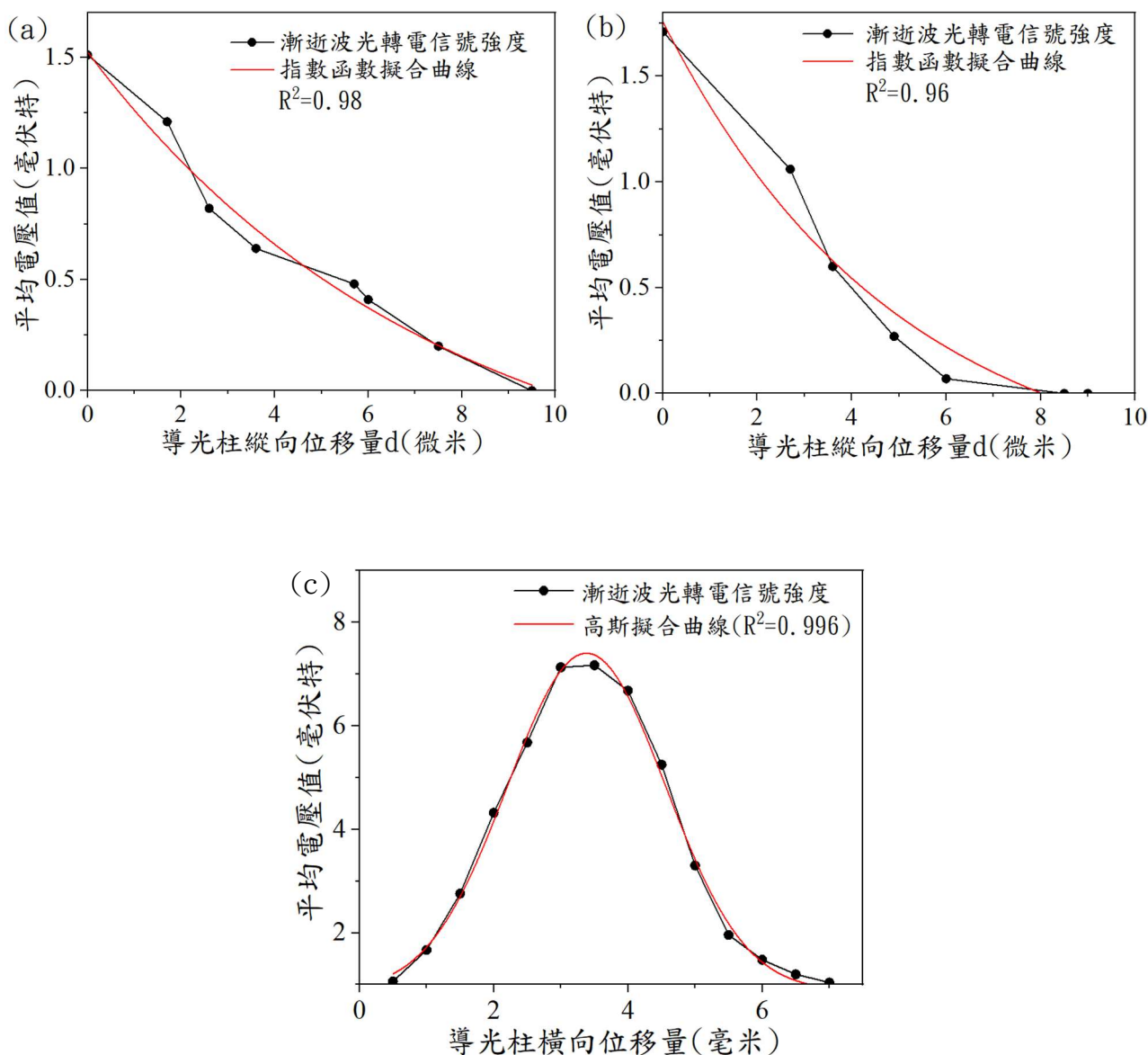


圖 37: 光電信號強度沿(a)第一次縱向(Y 方向)，(b)第二次縱向(重新回到第一次的原點位置開始)，(c)橫向(X 方向)分布圖。(指導教師繪製)

## 伍、討論

一、為了研究全反射和光穿隧現象，但過程中經歷許多觀察和測量上的困難；須依靠研究一和研究二的基礎鋪墊，才能順利進展至研究三，並在實驗過程中，衍生出全反射的新應用和觀察光穿隧的新方法，研究思路流程如圖 38。

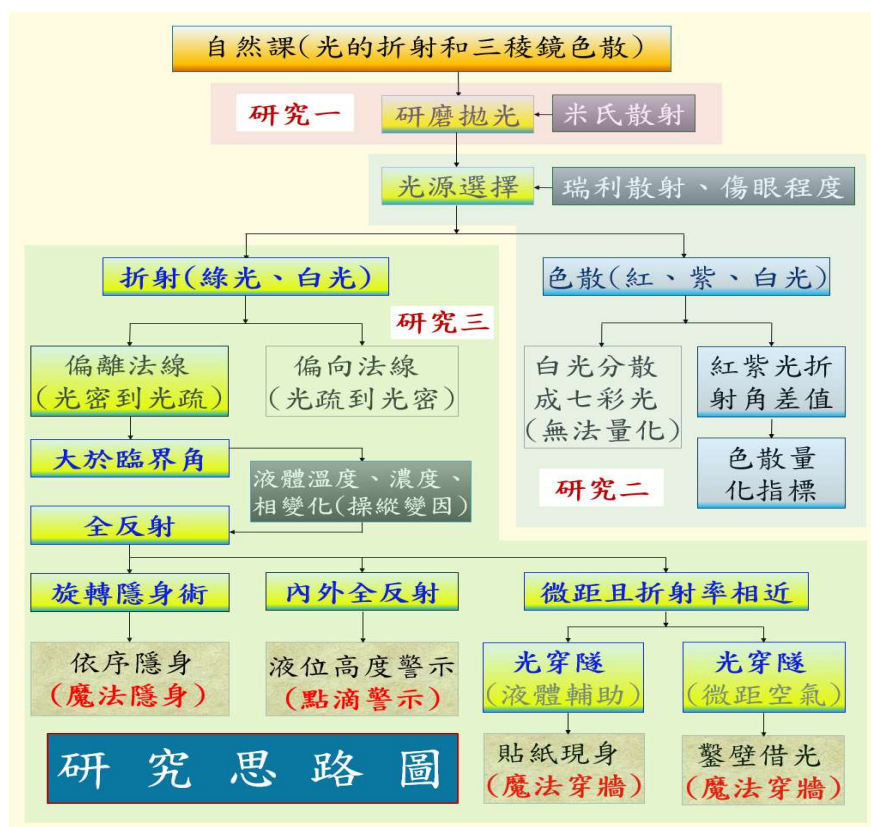


圖 38: 研究思路流程圖。(作者繪製)

## 二、表面粗糙度形成的散射光的影響和消除方法

- (一) 砂紙可以去除壓克力表面的裁切鋸痕；牙膏加水拋光，讓表面只剩少量刮痕；氫氧火焰拋光效果最好，可達鏡面。
- (二) 光穿隧實驗發現，壓克力雖然達到鏡面，但是大範圍的平整度並不是很好，無法讓壓克力緊密貼合到微米間距，所以看不到光穿隧現象。

## 三、測量折射角並觀察瑞利散射及簡易的色散量化指標

- (一) 校正兩光束平行度，可先用遠近端來回移動重合光點和標記點(粗調節)，但雷射光點大小不相同，有時候很難精準分辨，這時候就要依靠測量光束間距(細調節)來達成，但是兩個光束的寬度不一樣，於是取光束中心點來測量。
- (二) 原本因為瑞利散射讓紫光光束最寬最易觀察，但是在黑暗的房間裡做實驗，讓眼睛很不舒服，改用紅光，卻在有些地方看不到壓克力內的雷射路徑。查詢網路發現，視覺細胞對黃綠光最敏感，因此，改用綠光雷射，但還是有點刺眼，最後用兩層紅色玻璃紙貼在鏤空的眼鏡架上保護眼睛，發現效果非常好。
- (三) 紅紫兩雷射光在壓克力內的折射角都是  $26.5^\circ$ ，表示壓克力是低色散的材料。此後，



可用紅光和紫光折射角差值，來做為簡易地量化材料色散大小的指標。

(四) 準直白光對觀察光穿隧很重要；組合不同管徑的水管，做為光束準直器，可成功讓 LED 手電筒的發散角降為原本的 1/10 並應用在觀察光穿隧中的小汽車貼紙。

(五) 為了研究壓克力對液體的折射角，一開始很簡單地想到用膠帶在壓克力上面圍出一個圍欄(第一代方法)，也成功測量到臨界角了，但是如果要更換多種液體，還要有要測量液體溫度和濃度變化與臨界角關係時，就無法維持同樣的變因來交叉比較。

另外，一開始用手拿雷射來找臨界角，測量的精準度和穩定度很不好。因此，改成將液體放在透明容器內，並用樂高積木把壓克力架起來跟液體表面做接觸，但經常因為浮力使空心的積木翻倒，於是放棄這個方法(第二代過渡方法)。

最後，第三代方法採用壓克力液體槽解決上述問題，自製光束旋轉測量臨界角裝置，並把綠光雷射固定於旋轉盤上，環形量角器貼在液體槽外面，就可以精準穩定測量臨界角。實驗方法與設備改進過程如圖 39。

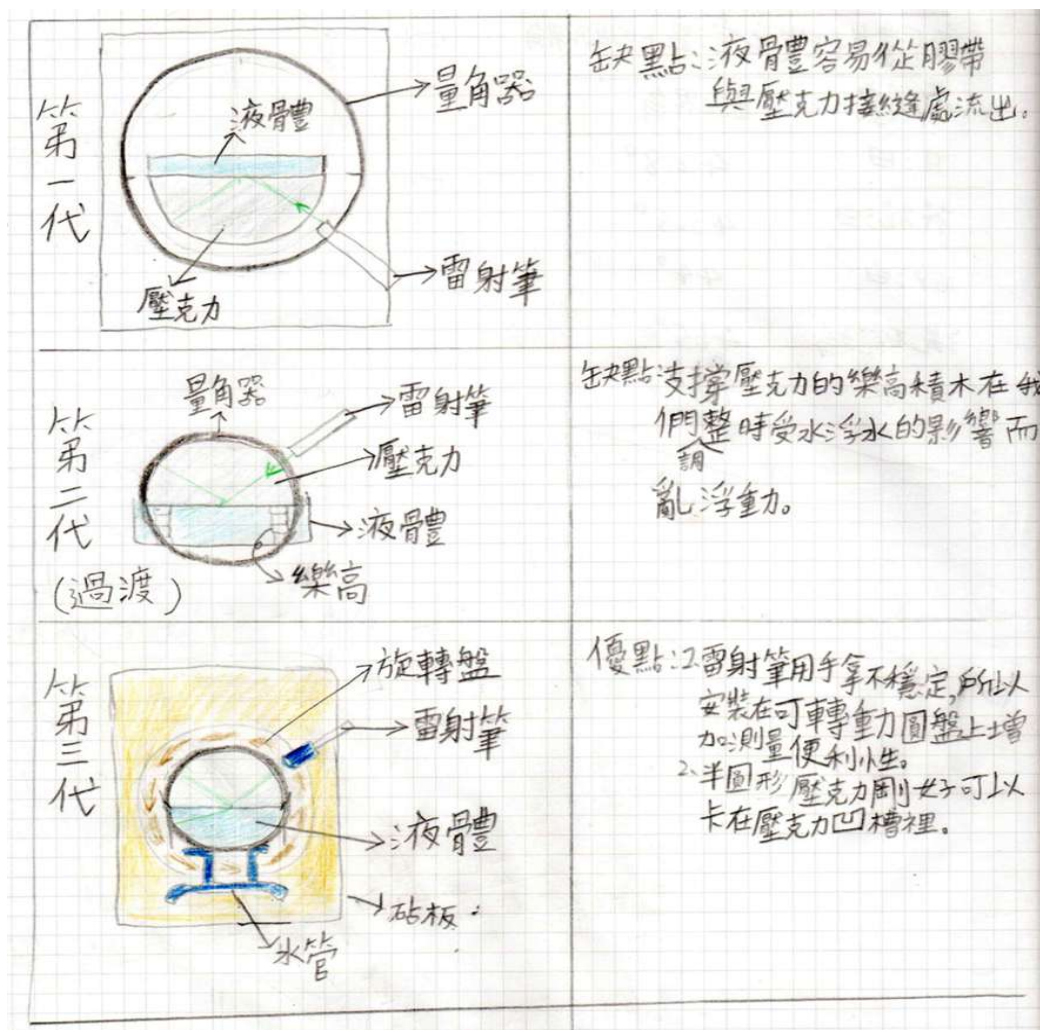


圖 39：實驗方法與設備的改進過程。(作者繪製)

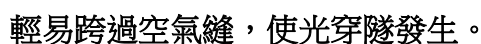


#### 四、探討臨界角的影響因素(液體溫度、濃度、相變化)

- (一) 藉由測量壓克力和不同液體之間的臨界角，並加入溫度及濃度的操縱變因後，發現許多有趣的現象。
1. 兩介質之間的折射率相差越大時，臨界角會越小；因此，可以推斷折射率大小為甘油>芥花油(植物油)>豬油(動物油)>矽油(礦物油)>洗碗精>水。
  2. 成分越單一的液體，臨界角對溫度的變動較小，成份較複雜的液體變動較大。
  3. 芥花油的數據顯示臨界角的變動也很劇烈，重複實驗的結果都一樣，查詢網路發現，芥花油含有較高比例的不飽和脂肪酸，會對溫度較不穩定。相反地，豬油主成分是飽和脂肪酸(對溫度很穩定)，所以，豬油臨界角折線的變化較規律。
  4. 臨界角隨溫度而變動的範圍並不大。相反地，**相變化可能比溫度的影響來得更大**，因為相變化可能會大幅改變分子的結構和密度，因而改變折射率和臨界角。
- (二) **甘油的水溶液濃度下降時，臨界角會增加**。因為甘油溶於水，所以濃度變化會影響折射率和臨界角。

#### 五、全反射在魔法隱身與漸逝波在魔法穿牆的實驗和應用

- (一) 旋轉隱身術用在連續旋轉的隱身/現身遊戲時，水滴容易因地心引力影響而流走，而甘油的黏稠度較高，不會有這個問題，所以，要注意控制水滴的量，並要讓兩壓克力緊密貼合，形成較強的毛細作用力來避免水滴流走。
- (二) 內外全反射切換可以用來模擬醫療點滴的液位高度警示；當液位降至警戒高度以下時，原本發生在透明薄膜外部的全反射，會轉變為玻璃棒內部的全反射，但是高水位的水壓會讓薄膜凹陷變形，以後可以換成硬度較高的透明薄膜。
- (三) 光穿隧效應僅可發生在介質相距幾個波長的近距離，才能使漸逝波穿隧空氣進入另一介質；但因為壓克力平整度不夠好，無法觀察到光穿隧，只能藉由水滴輔助看到；改用軟質塑膠墊和硬質導光柱接近壓克力就成功穿隧微米空氣牆了。
- (四) 液體輔助光穿隧和微距空氣光穿隧的原理，可以用下列的**示意圖**(圖 40)來說明:
1. 壓克力中間的空氣間隙為一個很大的折射率落差(可看作一道很高的障礙牆)(圖 40(a))，漸逝波在空氣中呈指數快速衰減，來不及穿越空氣牆就衰減消失。
  2. 水填入空氣縫，降低折射率落差(圖 40(b))，使漸逝波緩慢衰減，讓光穿隧發生。
  3. 甘油填入空氣縫，折射率落差更小，漸逝波更易進入另一邊壓克力(圖 40(c))。
  4. 當空氣縫距離小於幾個波長(圖 40(d))，即使不加任何液體，漸逝波(紅線)可以



1. 入射光(行進波)在介面一側發生全反射，另一側會出現漸逝波(衰減波)。

3. 介質間隙小於幾個波長時，不用液體，光可以直接穿透空氣，進入另一介質。

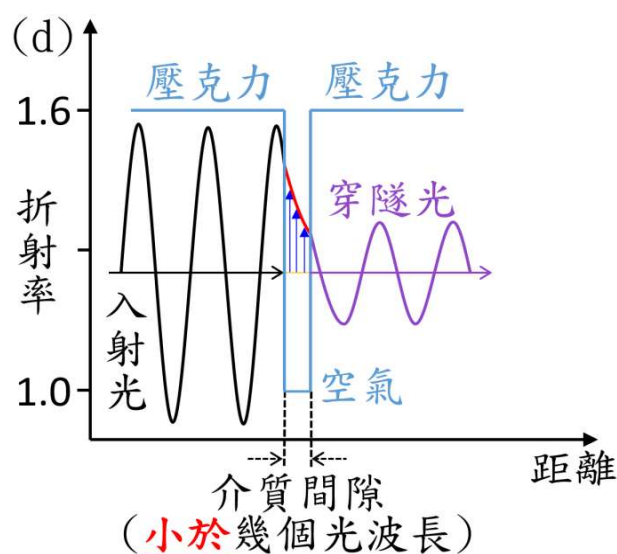
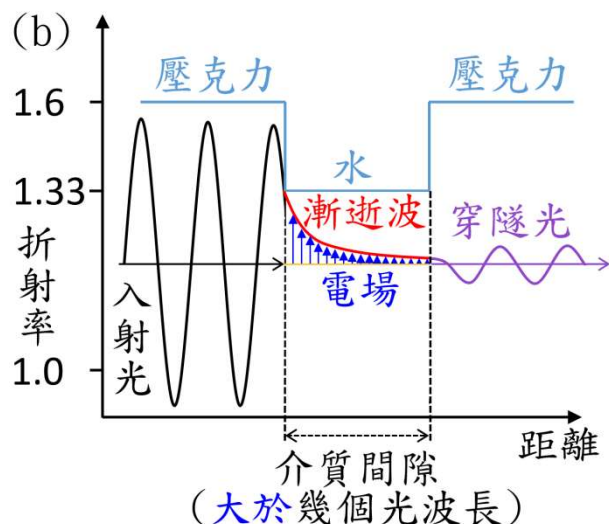


圖 40：光穿隧效應原理示意圖，(a)漸逝波衰減完畢前，無法穿越空氣縫，(b)空氣被水取代，折射率落差變小，漸逝波可穿越空氣而發生光穿隧，(c)空氣被甘油取代，折射率落差更小，漸逝波更輕易地穿隧進入另一邊的壓克力。(指導教師繪製)

## 陸、結論

經歷多次的嘗試和改進後，成功地得到四個創新的成果，包含：(1)結合不同臨界角來達成魔法隱身；(2)結合不同全反射來實現液體高度警示；(3)發現一種簡單的實驗方法，可以證明漸逝波在垂直全反射介面方向的強度變化，吻合指數衰減曲線，而在平行介面光行進方向的強度變化則與雷射(即高斯光束)本身一樣，吻合高斯分布曲線。相較於以往觀察光穿隧現象，大多使用昂貴的超高平整度玻璃稜鏡(Ref.[2])或是使用直徑 50 微米的鋼絲探針尖端來散射漸逝波，並偵測散射光強度的方法(Refs.[1,2])，此處採用圓頭硬質導光柱的方法非常簡單便宜，且又能精準測量漸逝波在縱向和橫向的強度變化，有助於光穿隧效應未來的發展應用；此外，亦提出(4)利用紅紫光的折射角差值，作為色散的簡化指標。具體的研究成果與結論條列如下：

### 一、七個實驗上的發現簡述:(完整內容見前述)

(一) 發現 1: 火焰拋光比研磨拋光更容易達成鏡面來消除表面散射光。

(二) 發現 2:

1. 紅紫光的折射角差值，可做為簡易的色散量化指標，且壓克力是低色散。
2. 第二代光源改用綠光，因視覺細胞對黃綠光最敏感，且綠光比紅光在壓克力中更明顯(瑞利散射)，也比紫光不傷眼，但仍須用紅色玻璃紙貼在鏤空眼鏡架上，來減弱綠光雷射對眼睛的刺激。

(三) 發現 3:

1. 由光疏介質入射光密介質時，折射光偏向法線。(沒有機會全反射)
2. 由光密介質入射光疏介質時，折射光偏離法線。(才有機會全反射)

(四) 發現 4: 兩介質的折射率相差越大時，臨界角越小，相反則越大。當液體折射率越小，代表與壓克力折射率差距越大，臨界角會越小。

(五) 發現 5:

1. 根據發現 4 推斷出液體折射率大小為甘油>芥花油>豬油>矽油>洗碗精>水。
2. 溫度上升會使折射率下降，但影響不大。
3. 相較於溫度的影響，相變化可能導致折射率發生較大的改變。

(六) 發現 6:

1. 貼紙隱身和現身的順序與臨界角大小有關，與旋轉方向無關。

2. 貼紙沾不同液體，會對應到不同的可視角度。

### (七) 發現 7:

1. 漸逝波的強度在垂直介面上呈指數衰減，空氣中的穿隧深度平均約 9 微米。
2. 漸逝波的強度在介面的光行進方向跟雷射一樣都是高斯分布。

### 3. 光穿隧發生的條件包含:

- (1) 入射光(行進波)在介面一側發生全反射，另一側會出現漸逝波(衰減波)。
- (2) 介質間隙大於幾個波長時，折射率落差必須夠小(使用液體填補間隙)。
- (3) 介質間隙小於幾個波長時，不用液體，光可以直接穿透空氣，進入另一介質。

## 二、研究過程中改良的實驗方法:

- (一) 機械研磨法轉成火焰拋光法(可達鏡面效果)。
- (二) 紅色玻璃紙貼上鏤空的眼鏡架來減弱綠光雷射，以取代紅光和紫光雷射(方便觀察且保護眼睛)。
- (三) 膠帶圍欄法改成半圓形液體槽法(精準且穩定地重複測量液體臨界角)。
- (四) 光穿隧實驗由水滴輔助和軟硬介面改成使用導光柱(漸逝波成功穿越微米空氣間隙)。

## 三、自製四種實驗設備:

- (一) 白光光束準直器(將 LED 白光的發散角大幅降為 1/10)。
- (二) 光束旋轉測量臨界角裝置(精準且穩定地重複測量各種液體的臨界角)。
- (三) 兩種四象限 90°量角器(精準測量臨界角)。
- (四) 液位高度偵測管(模擬醫療點滴液位警示)。

## 四、未來展望:

- (一) 旋轉隱身術讓不同視角的貼紙依序隱身/現身，可考慮應用在密室逃脫遊戲。
- (二) 光學式液位高度警示可應用在危險或偏遠環境(如飛機油箱、化學腐蝕液槽、電磁敏感區、山區洪水爆發偵測等)。
- (三) 光穿隧效應的位移精準度在微米等級，可以應用在精密位移感測器。



## 柒、參考文獻資料

1. D. A. Papathanassoglou and B. Bohnsen , (2003) Direct visualization of evanescent optical waves (71 670-677) , Am. J. Phys. Figure 2和Figure3.
2. 單曦辰，丁若禺，孫緒波，張文凱 · (2023) · 受抑全內反射原理及應用(42 13-17) · 大學物理· Figure 7和Figure 8.
3. 黑貓變白貓-科技大觀園 [https://www.youtube.com/watch?v=THDmeA\\_zZbA](https://www.youtube.com/watch?v=THDmeA_zZbA)
4. 利用全反射把雞蛋變成銀蛋 <https://www.youtube.com/watch?v=juju6IxUeuM>
5. 柯幸秀，簡孜芸，張雲清，林鴻源，高千惠 · 海市蜃樓 · 中華民國第44屆中小學科學展覽會作品說明書高中組物理科
6. 蔣儀宣，陳欣妤，張宜淳，謝宜和，呂台華 · 光的奇「蹟」-探索地面海市蜃樓 · 中華民國第49屆中小學科學展覽會作品說明書國中組物理科
7. 戴君容，陳冠樺 · 國王的海市蜃樓 · 臺灣2007年國際科學展覽會物理學科
8. 林姵妤，何世明，林俊元 · 實驗室裡的飛行荷蘭人--複雜蜃景之探究 · 2021年臺灣國際科學展覽會優勝作品專輯
9. 周芝含，孫瑩軒，劉湘瑀，鄭亞婷，陳華傑 · 光對空氣的折射率測定 · 中華民國第45屆中小學科學展覽會作品說明書高中組物理科
10. 高至洵，林韋辰，林恩圻，李湘君，高君陶 · 溶液深淺長短跑－創新方法精密測量折射率與液體濃度的關係，中華民國第63屆中小學科學展覽會作品說明書國中組物理科
11. 林憶儒，彭靖文，黃耀輝，戴淑萍 · 魔法光學-探討光的折射現象 · 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
12. 高斯光束·維基百科  
<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E9%AB%98%E6%96%AF%E5%85%89%E6%9D%9F>

## 【評語】 080115

本作品探討光的全反射以及有趣的光穿隧效應。研究目的探討全反射臨界角影響因素及測量光穿隧現象。詳實說明研究設計及過程，從觀察結果進行討論。這作品實驗架構完整，作者展現出高度的探究精神及解決問題的能力。整體來說，這是一件具有科學性，創新性 以及應用潛力的優良作品！

作品海報

# “魔法隱身與穿牆術”

—全反射與光穿隧效應



# 摘要

本研究利用壓克力和液體來探討**折射→全反射→光穿隧**的轉變過程。

研究一發現(1)粗糙度減小能降低散射光以利觀察；

研究二發現(2)瑞利散射使紫光看最清楚但因傷眼而改用綠光；

(3)紅光和紫光的折射角差值，可做為色散量化指標；

研究三探討(4)臨界角操縱變因；**旋轉隱身術**和**內外全反射**達成「**魔法隱身**」和**液位高度**警示；

(5)漸逝波能穿越微米空氣間隙，實現「**魔法穿牆**」。

## 壹、研究目的

- 一、探討消除粗糙表面散射的方法。
- 二、測量折射角並觀察瑞利散射及色散。
- 三、探討臨界角的操縱變因與應用。
- 四、探討光穿隧現象形成條件。

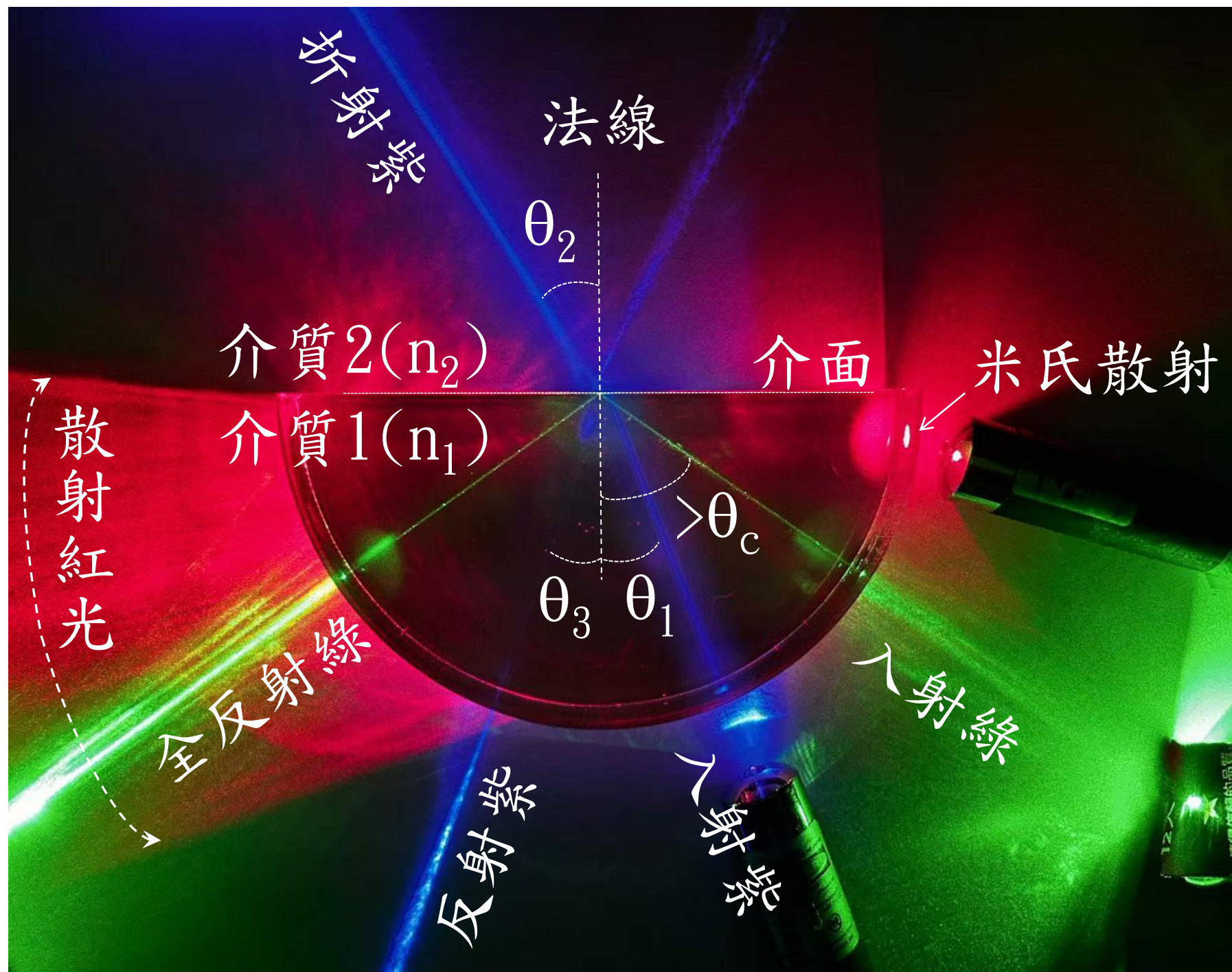


圖1. 散射、折射與全反射

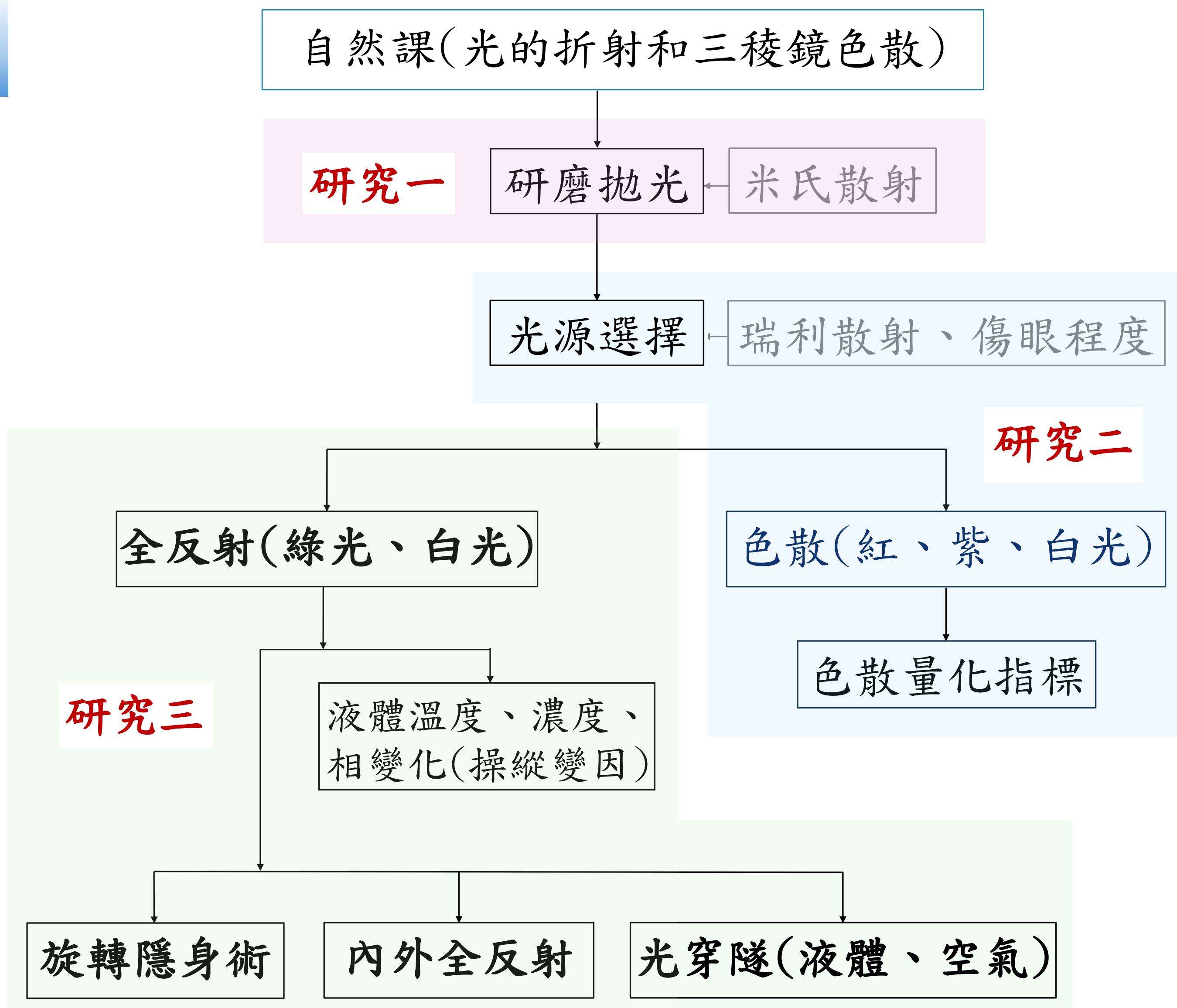


圖2. 研究架構

## 貳、研究過程與方法

### 研究二、調整雷射平行度並決定光源

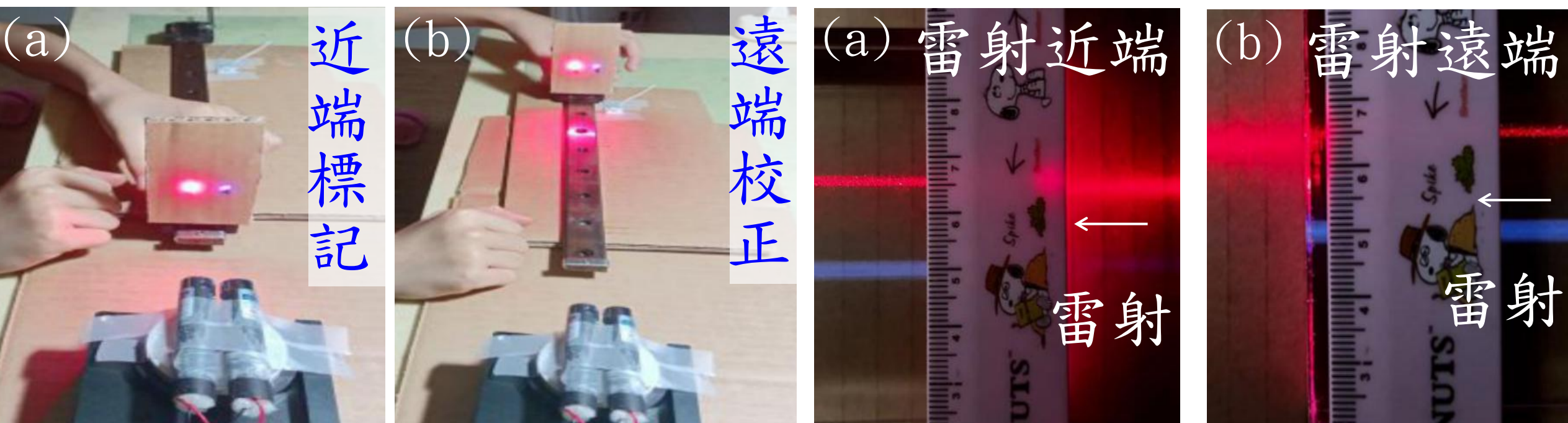


圖3. 重合(a)近(b)遠端點標記(粗調節)

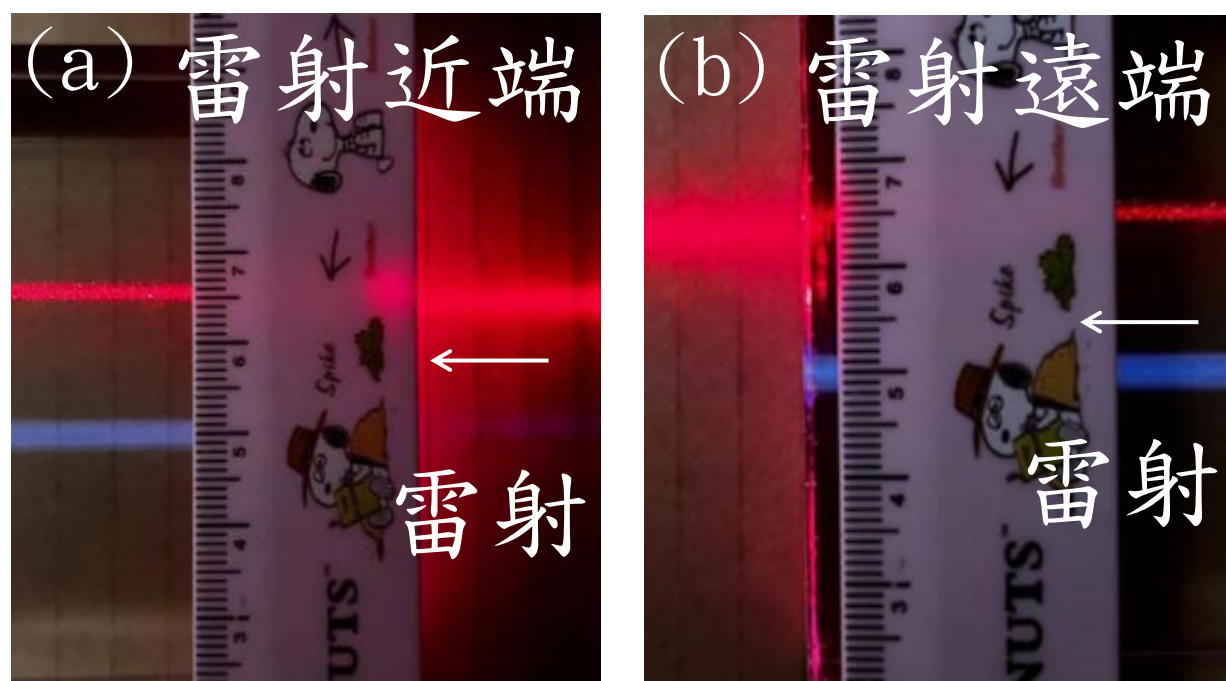


圖4. 測量(a)近(b)遠端光束間距(細調節)



圖5. 紫光光點較紅光小(圖3)，進入壓克力後的光束卻較寬(瑞利散射)，箭頭為雷射光入射方向

1. 火焰消除粗糙面米氏散射；瑞利散射讓紫光光束變最寬
2. 紫光易觀察但傷眼，紅光散射有時不明顯，改用眼睛敏感的綠光雷射
3. 仍須用2層紅色玻璃紙來減弱綠光雷射對眼睛的刺激

### 研究三、折射轉成全反射過程與條件

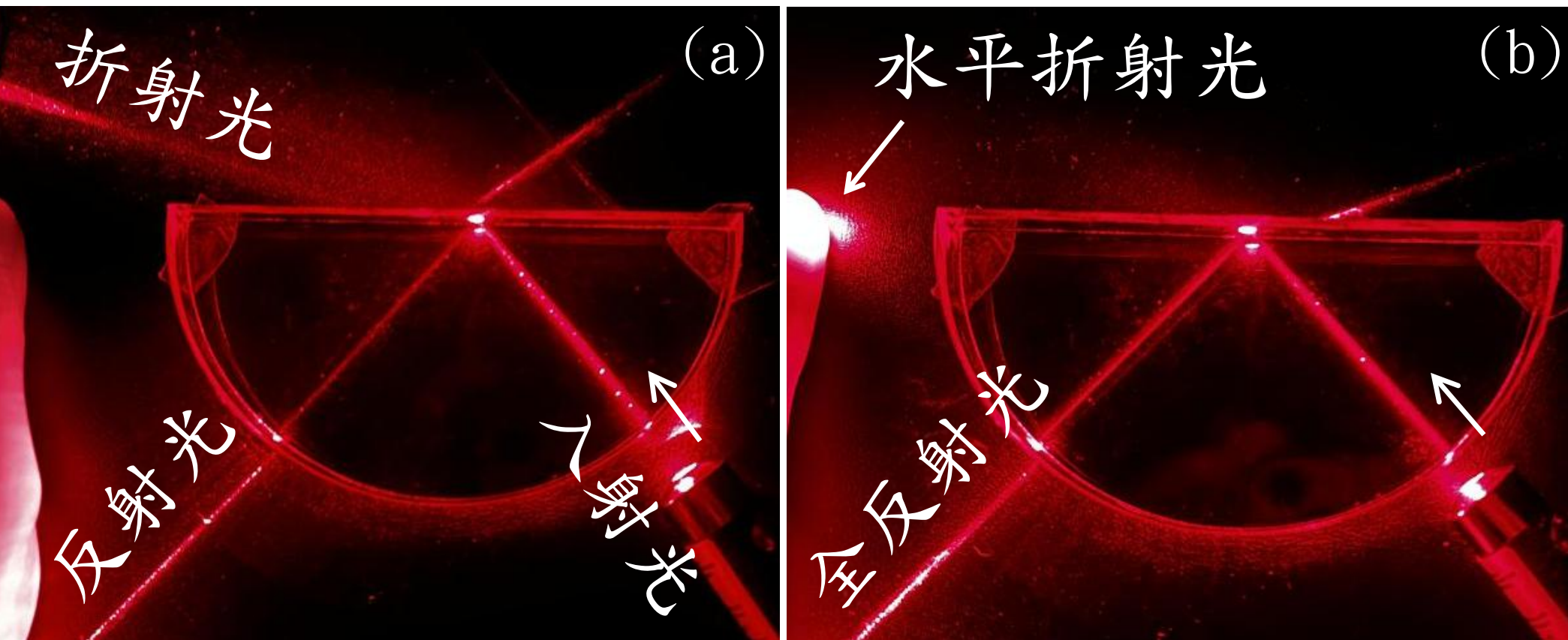


圖6. (a)折射 (b)臨界角入射

司乃耳定律  $n_1 \cdot \sin\theta_1 = n_2 \cdot \sin\theta_2$   
 $n_1 < n_2 \rightarrow \theta_1 > \theta_2 \rightarrow$  偏向法線 (✗ 全反射)  
 $n_1 > n_2 \rightarrow \theta_1 < \theta_2 \rightarrow$  偏離法線 (✓ 全反射)  
 $n_1 \gg n_2 \rightarrow \theta_1 \ll \theta_2 \rightarrow$  更快達到全反射

1. 介質折射率相差越大，臨界角越小，更快達到全反射
2. 臨界角入射得水平折射光；大於臨界角，全反射發生

## 參、研究結果

### 研究一、壓克力表面顯微照片

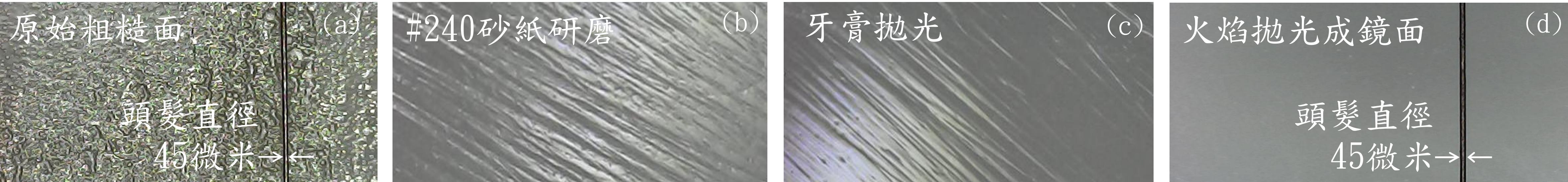


圖7. (a)原始粗糙面 (b)砂紙研磨 (c)牙膏拋光 (d)火焰拋光成鏡面的顯微放大圖

### 研究二、紅紫光折射角差值與色散

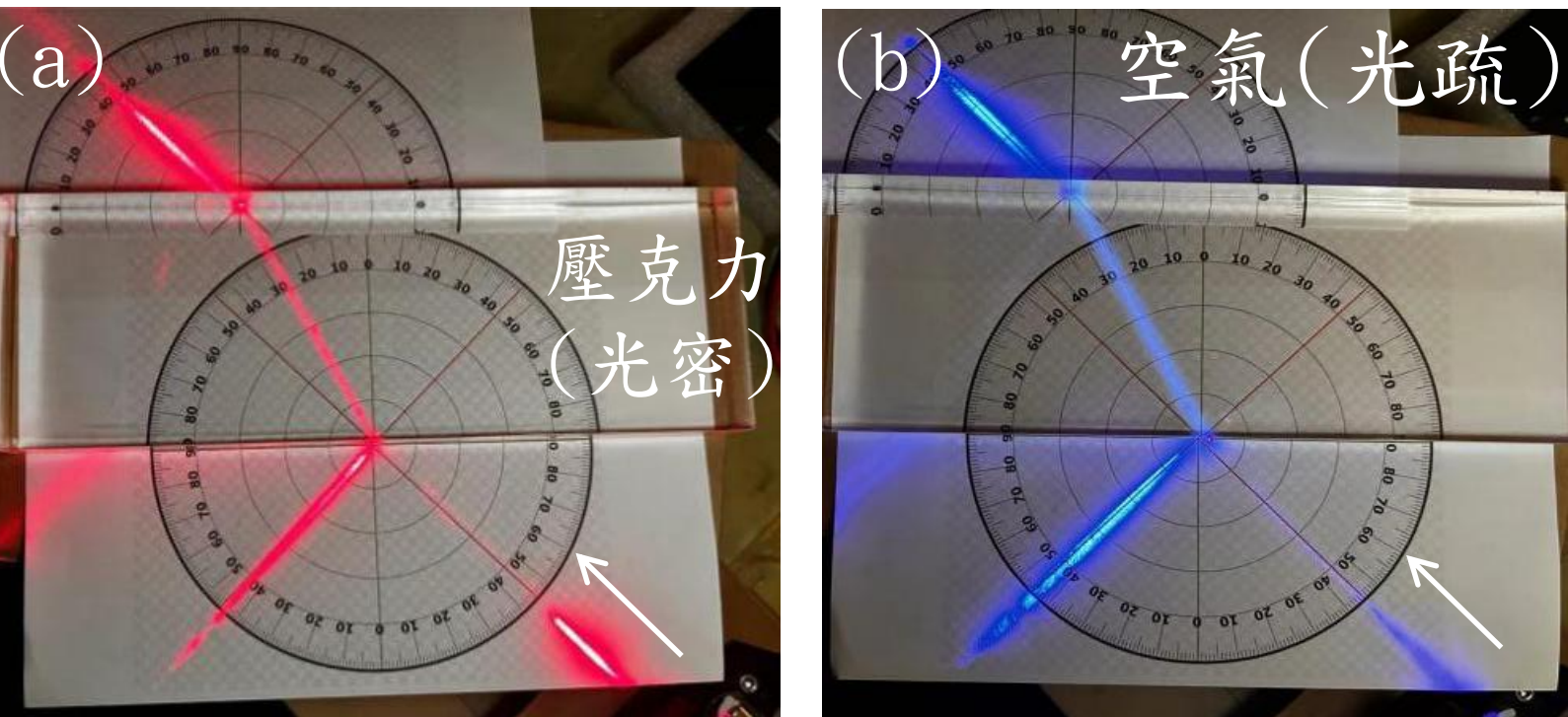


圖8. (a)紅光及(b)紫光在光疏和光密介質間的折射

1. 由空氣45°射入壓克力，折射角皆為26.5°
2. 由壓克力26.5°射入空氣，折射角皆為45°
3. 紅紫光折射角差值可做為色散量化指標

1. 由光密射入光疏介質，偏離法線 (有機會全反射)
2. 由光疏射入光密介質，偏向法線 (沒機會全反射)
3. 紅紫光折射角差值為0 ➡ 低色散



研究三、臨界角的操縱變因、全反射應用和光穿隧

一、臨界角操縱變因：

(一)、液體溫度及相變化的實驗步驟：

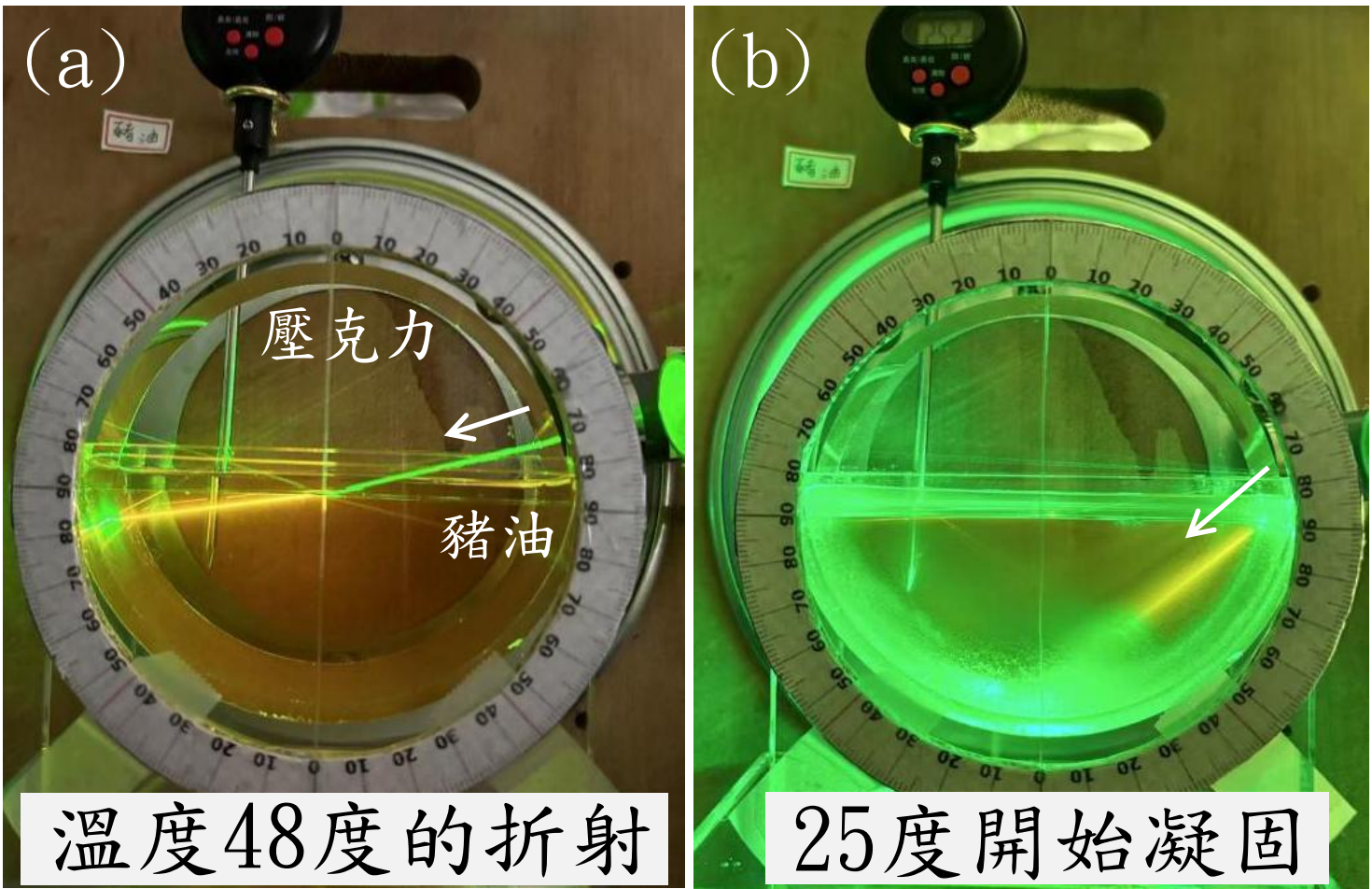
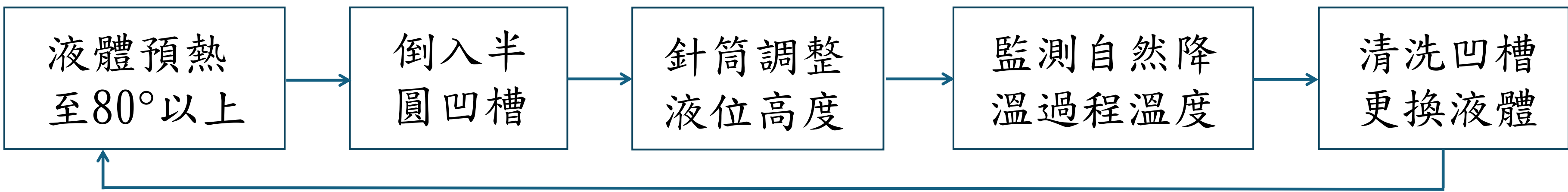


圖9. 豬油(a)折射和(b)室溫凝固(相變化)

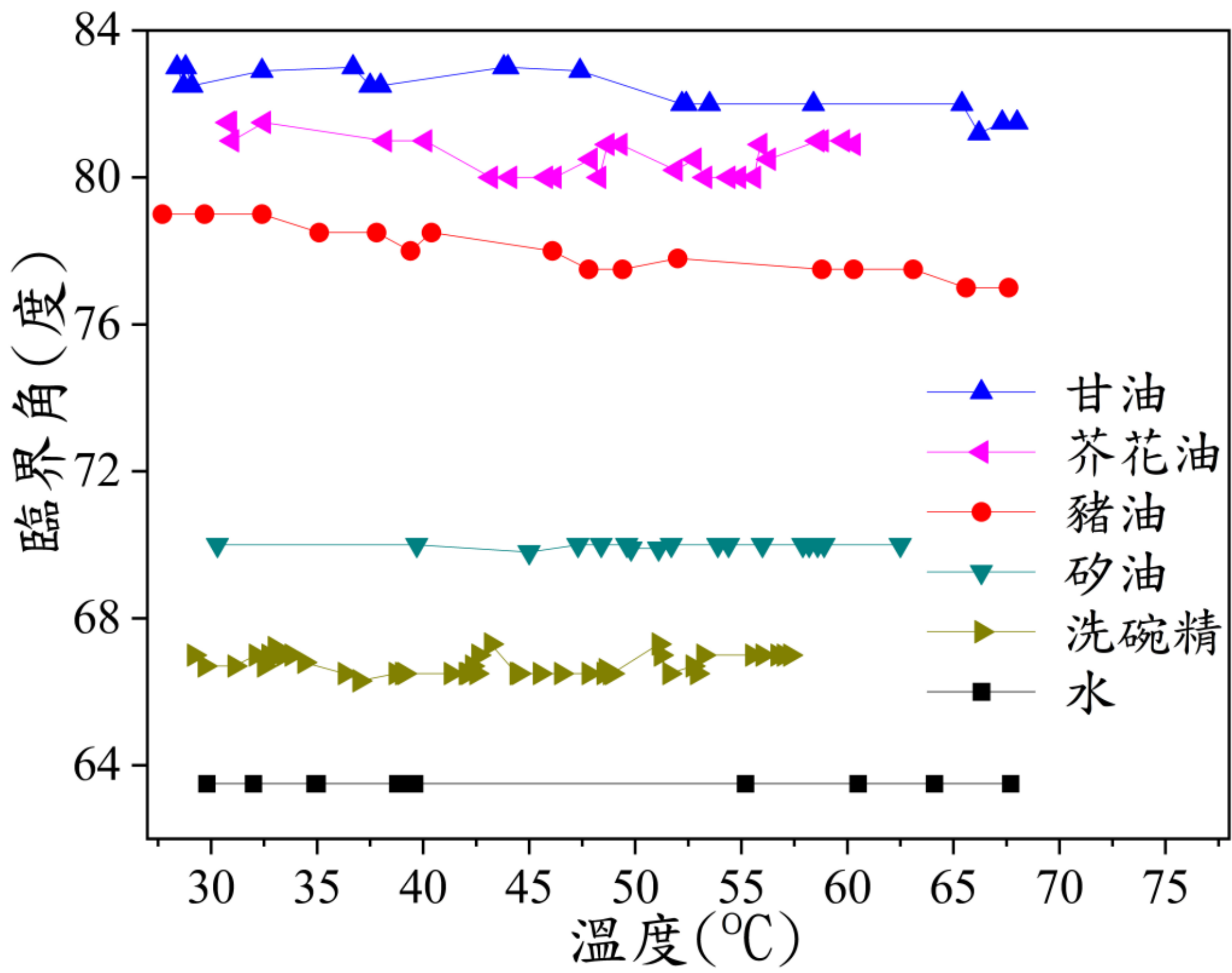


圖10. 液體臨界角對溫度變化

| 液體  | 斜率(°/°C) | 決定係數(R <sup>2</sup> ) |
|-----|----------|-----------------------|
| 甘油  | -0.034   | 0.687                 |
| 芥花油 | -0.023   | 0.159                 |
| 豬油  | -0.049   | 0.891                 |
| 矽油  | 0.001    | 0.042                 |
| 洗碗精 | 0.002    | 0.002                 |
| 水   | 0        | 0                     |

| 線性關聯度(R <sup>2</sup> =0.5為準) |
|------------------------------|
| 很好                           |
| 很差                           |
| 非常好                          |
| 很差(接近水平線)                    |
| 很差                           |
| 水平線(XY軸無關聯)                  |

- 溫度下降使臨界角上升，雖變化很小，對高折射率液體較明顯，低折射率液體則不明顯
- 成分較複雜(洗碗精)或對溫度不穩定(芥花油)的液體，臨界角變動大
- 相變化似乎比溫度對臨界角的影響大(豬油斜率最陡)

(二)、甘油水溶液濃度變化的實驗步驟：

| 純甘油   | 甘油濃度(vol%)      | 臨界角   |
|-------|-----------------|-------|
| 196毫升 | 196.0 mL(100%)  | 42.8° |
| ↓     | 181.0 mL(92.3%) | 43.2° |
| ↓     | 167.2 mL(85.3%) | 43.5° |
| ↓     | 154.4 mL(78.8%) | 44.0° |
| ↓     | 142.6 mL(72.7%) | 44.3° |
| ↓     | 131.7 mL(67.2%) | 44.6° |
| ↓     | 0.0 mL(0%)(水)   | 50.0° |

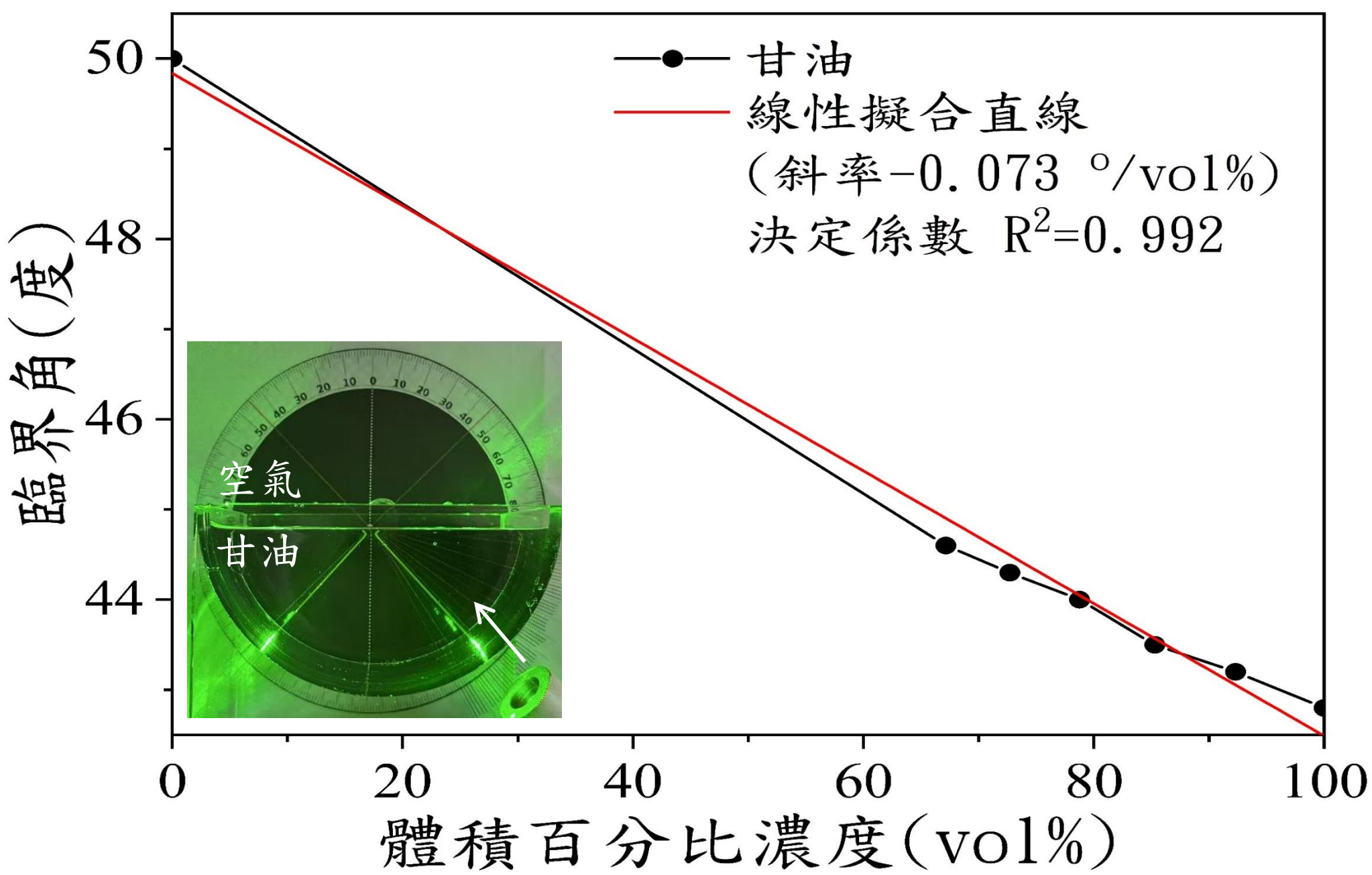


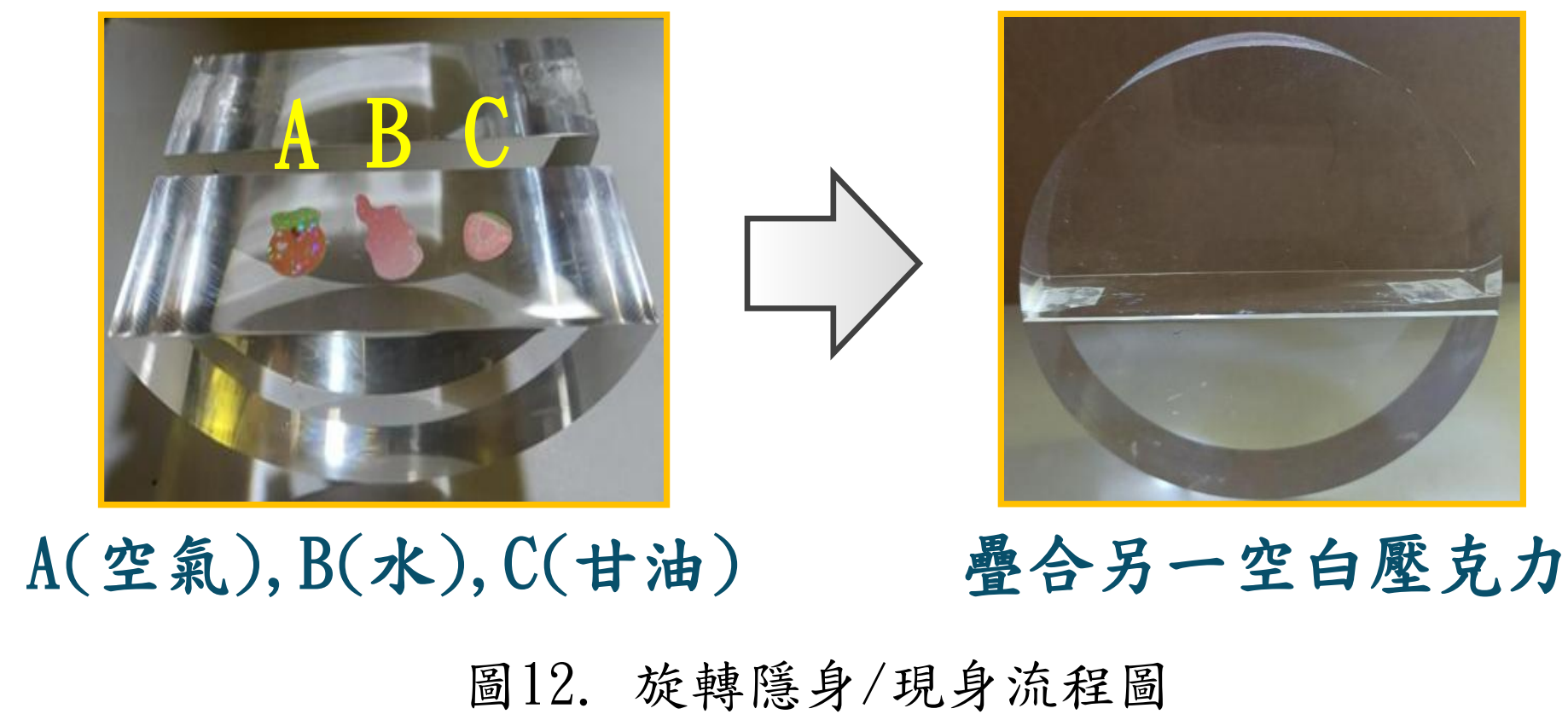
圖11. 臨界角對甘油濃度變化

線性擬合直線(一條最吻合現有數據點的直線):顯示濃度下降，臨界角增加

決定係數(黑點與紅線的貼合程度):幾乎為1，高度貼合

二、兩種原創的全反射應用

(一)、旋轉隱身術依序隱身



隱身順序ABC，現身順序CBA，與臨界角大小有關，與旋轉方向無關

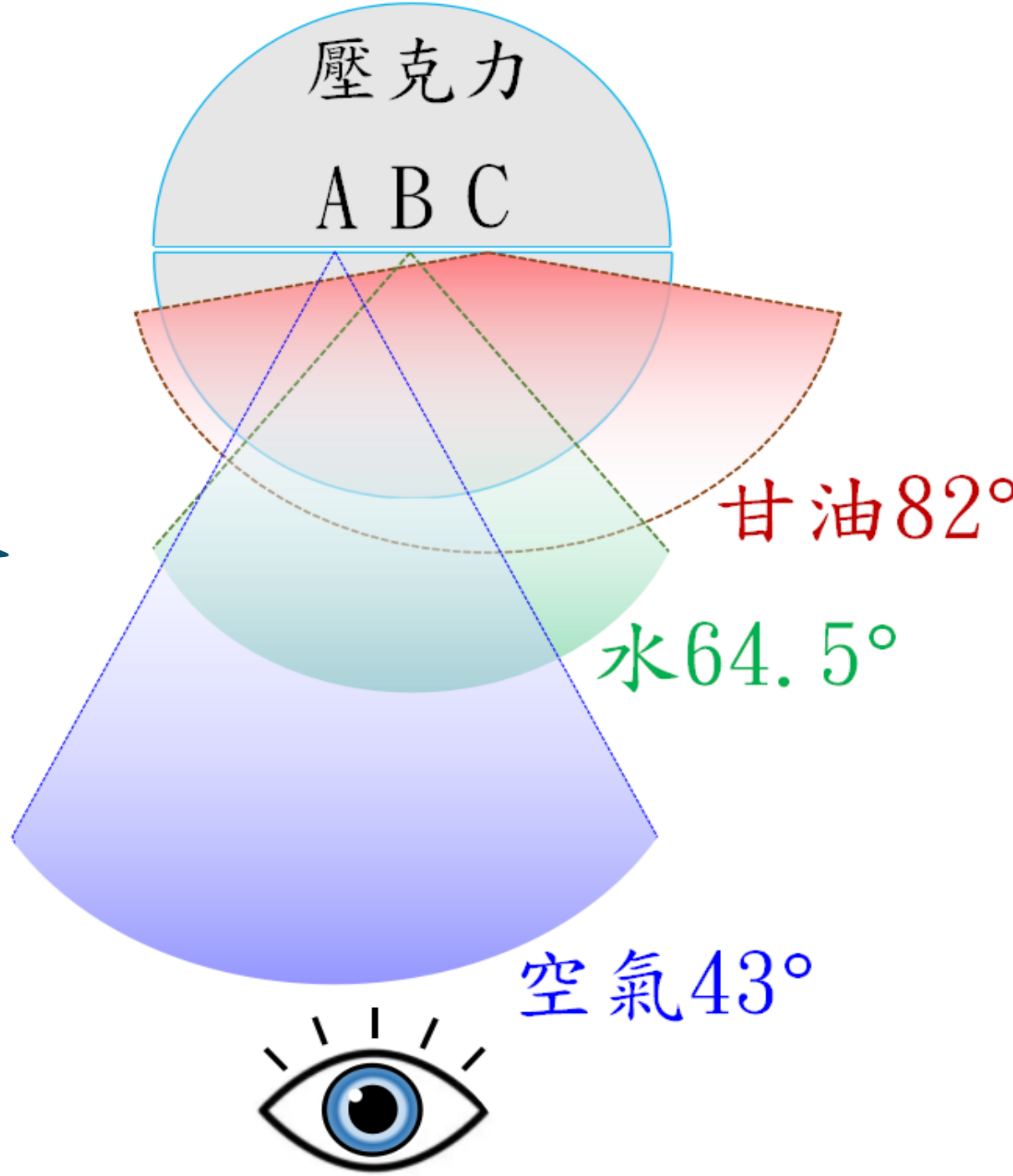
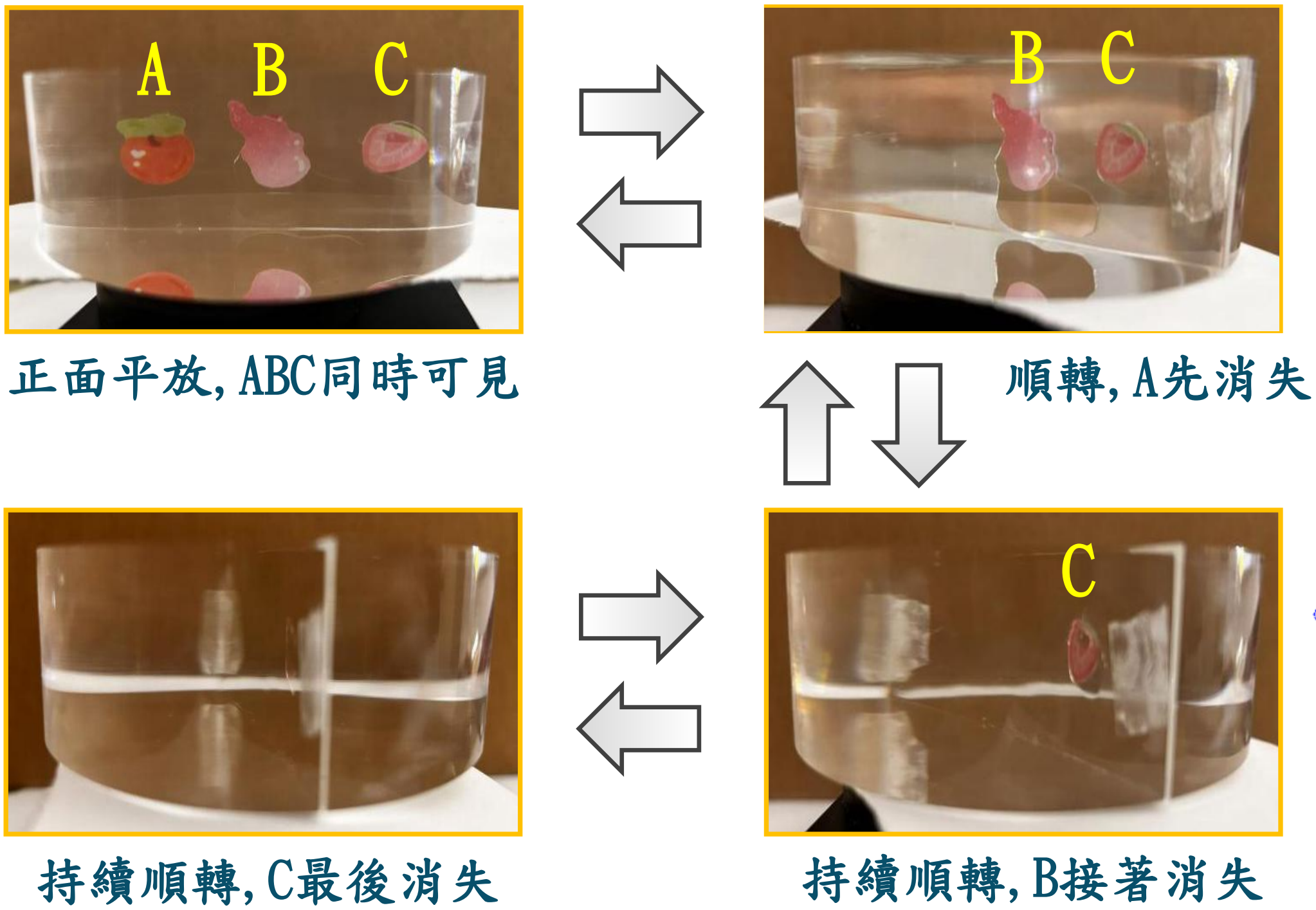


圖13. 不同臨界角的可視角度

(二)、內外全反射模擬點滴高低液位偵測

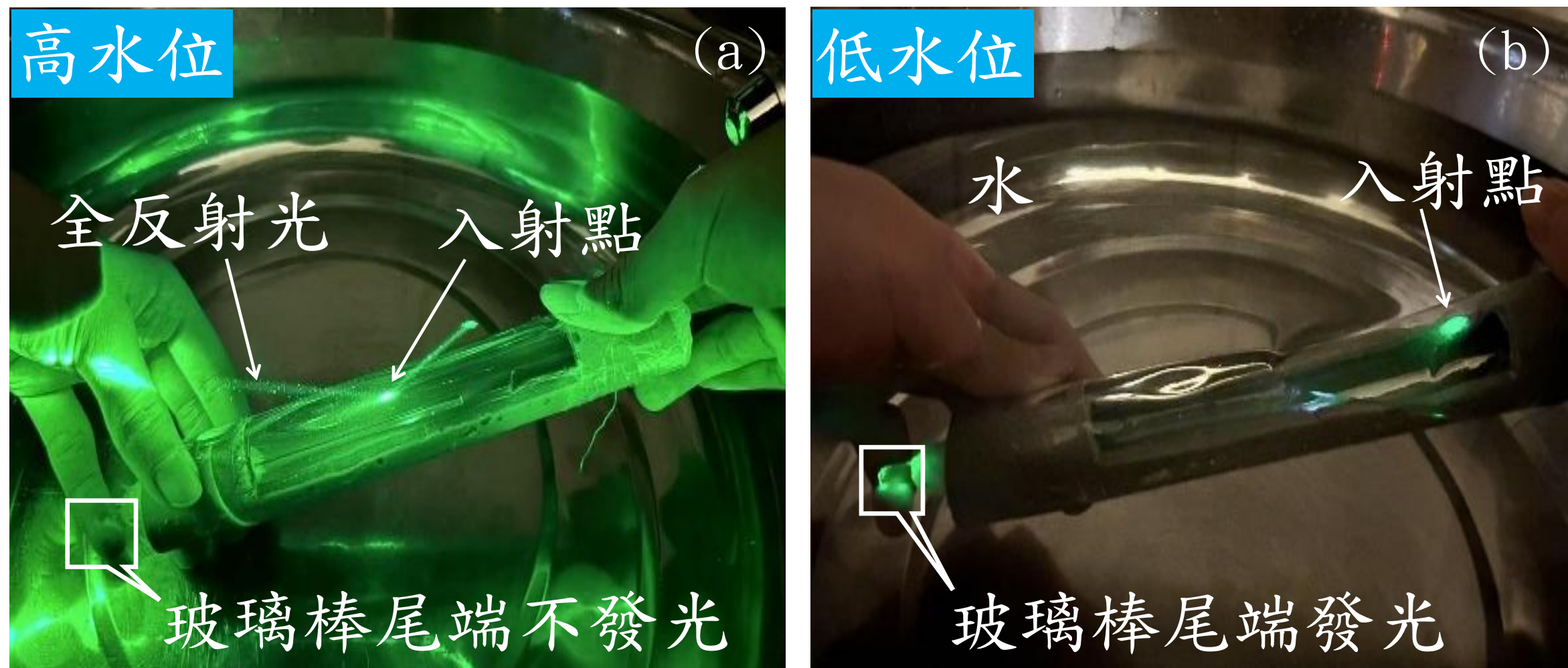


圖14. (a)高(b)低液位偵測實驗

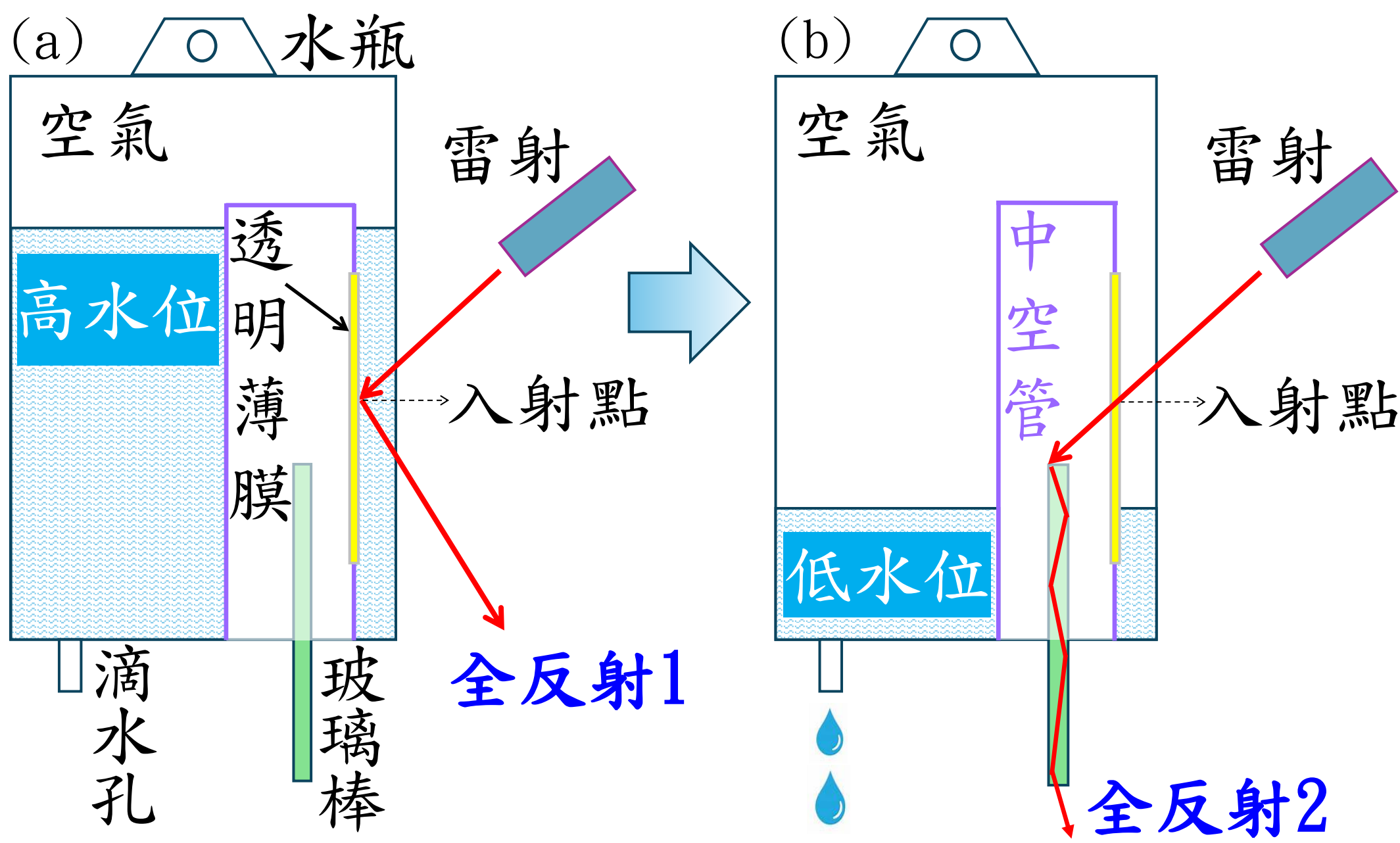


圖15. 模擬醫療點滴(a)高(b)低液位示意圖

高水位：  
全反射1(薄膜內空氣與薄膜外的水)

低水位：  
全反射2(玻璃棒與空氣)

三、全反射轉變成光穿隧

(一)、光穿隧發生條件：

- 入射光(行進波)在介面全反射，另一側出現漸逝波(垂直介面方向不傳遞能量且看不見的衰減波)，漸逝波消失處是實際反射面，與介面的距離是穿隧深度，介面出現古斯-漢欣位移。
- 間隙大於幾個波長，介質折射率落差須夠小(液體輔助)。
- 間隙小於幾個波長，光穿透空氣進入另一介質(空氣微距)。



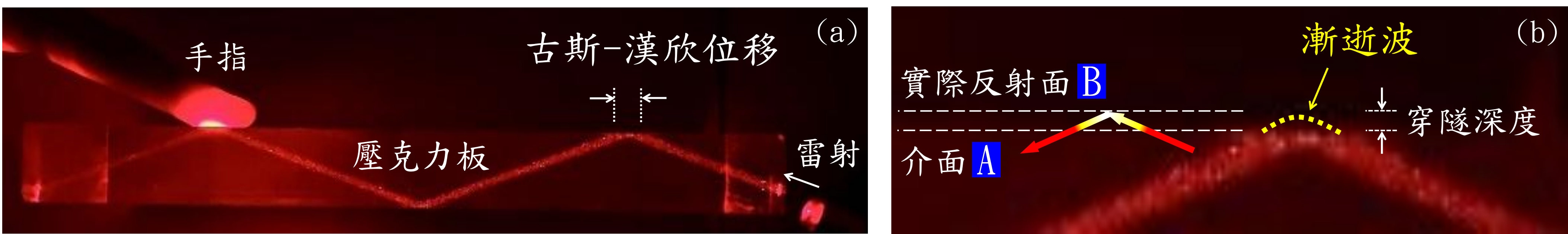


圖16. (a)手指光穿隧與古斯-漢欣位移 (b)漸逝波與穿隧深度

(二)、第一代光穿隧(液體輔助):

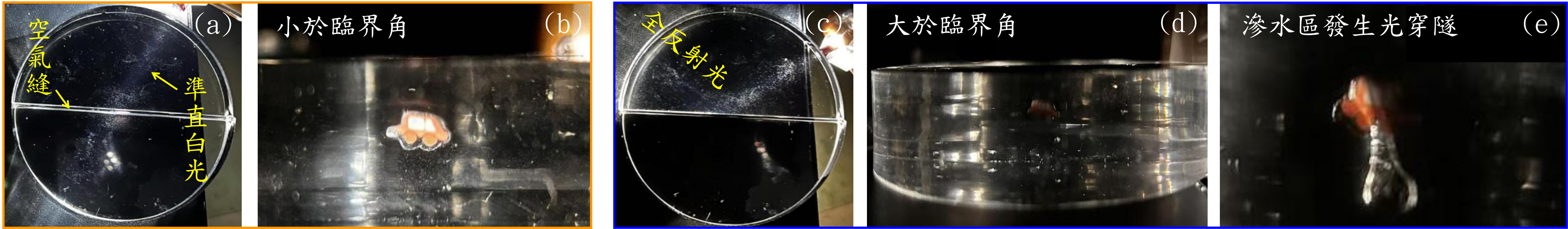


圖17. (a)白光穿透 (b)看見汽車 (c)白光全反射 (d)看不見汽車 (e)滲水區又能看見汽車

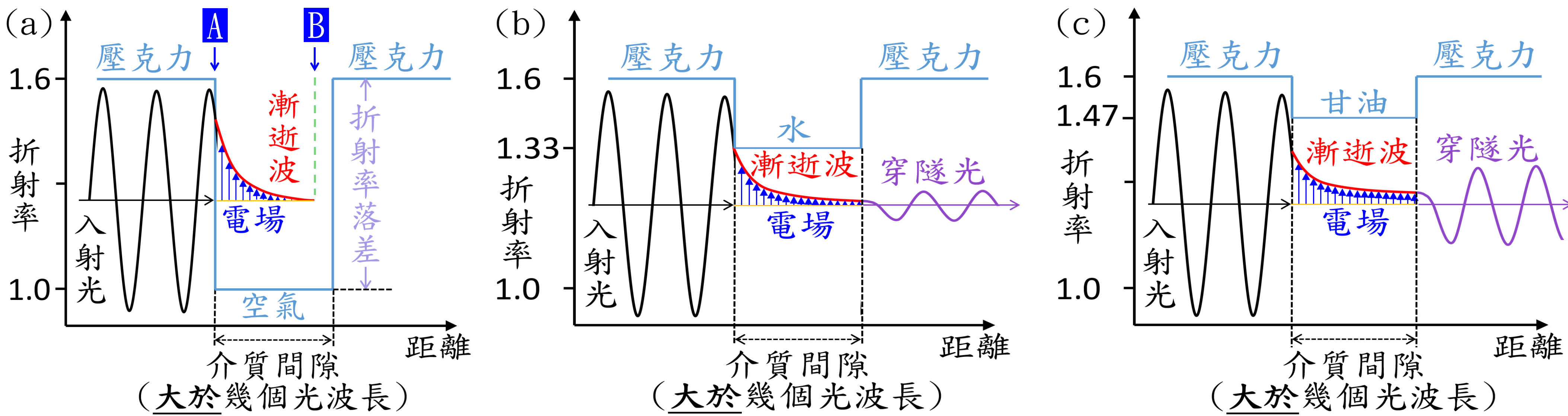


圖18. (a)漸逝波無法穿越空氣 (b)漸逝波穿越水使光穿隧發生 (c)甘油讓光穿隧更易發生

(三)、第二代穿隧(軟硬結合): (四)、第三代光穿隧(空氣微距):

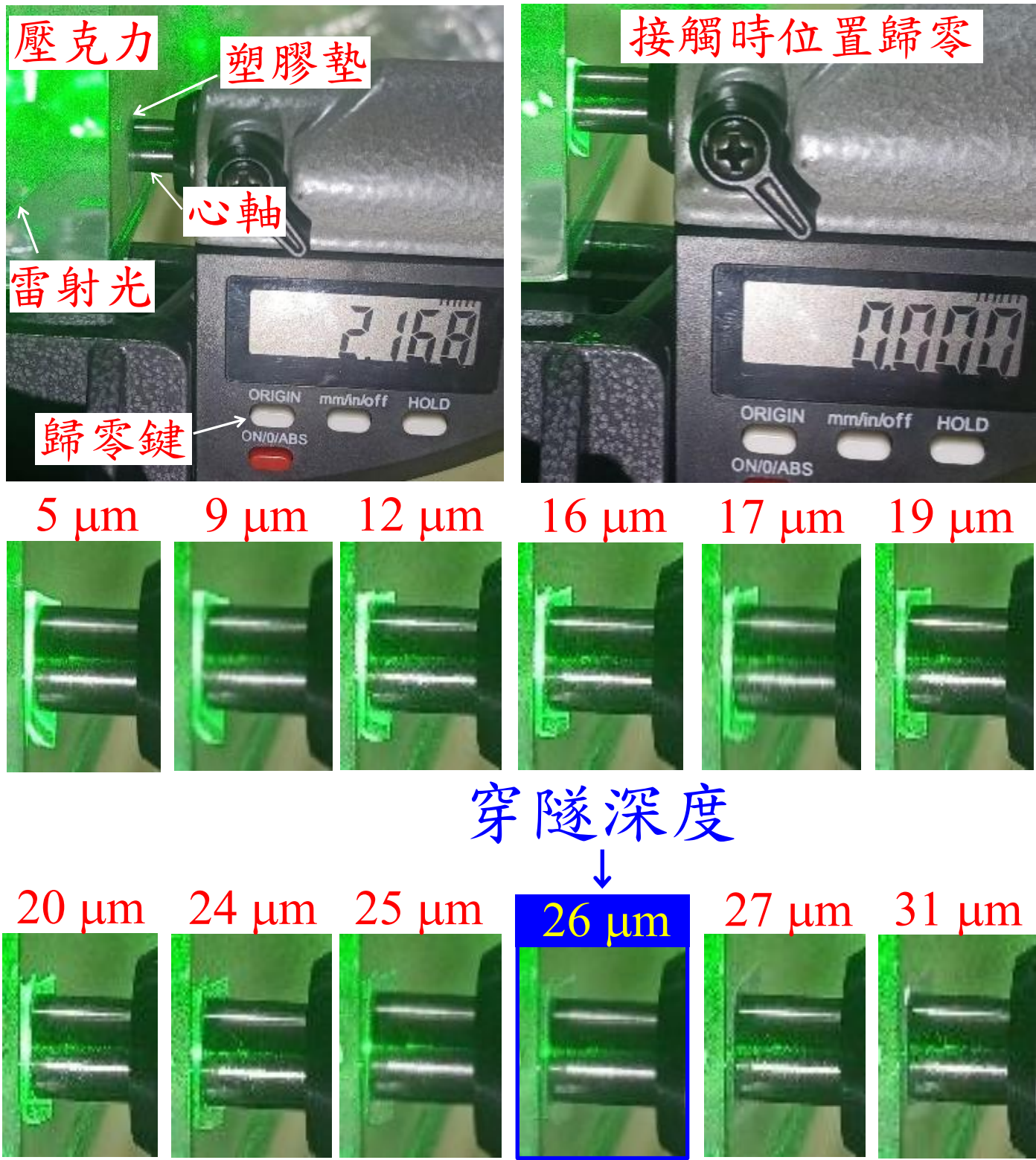


圖19. 第二代軟硬結合

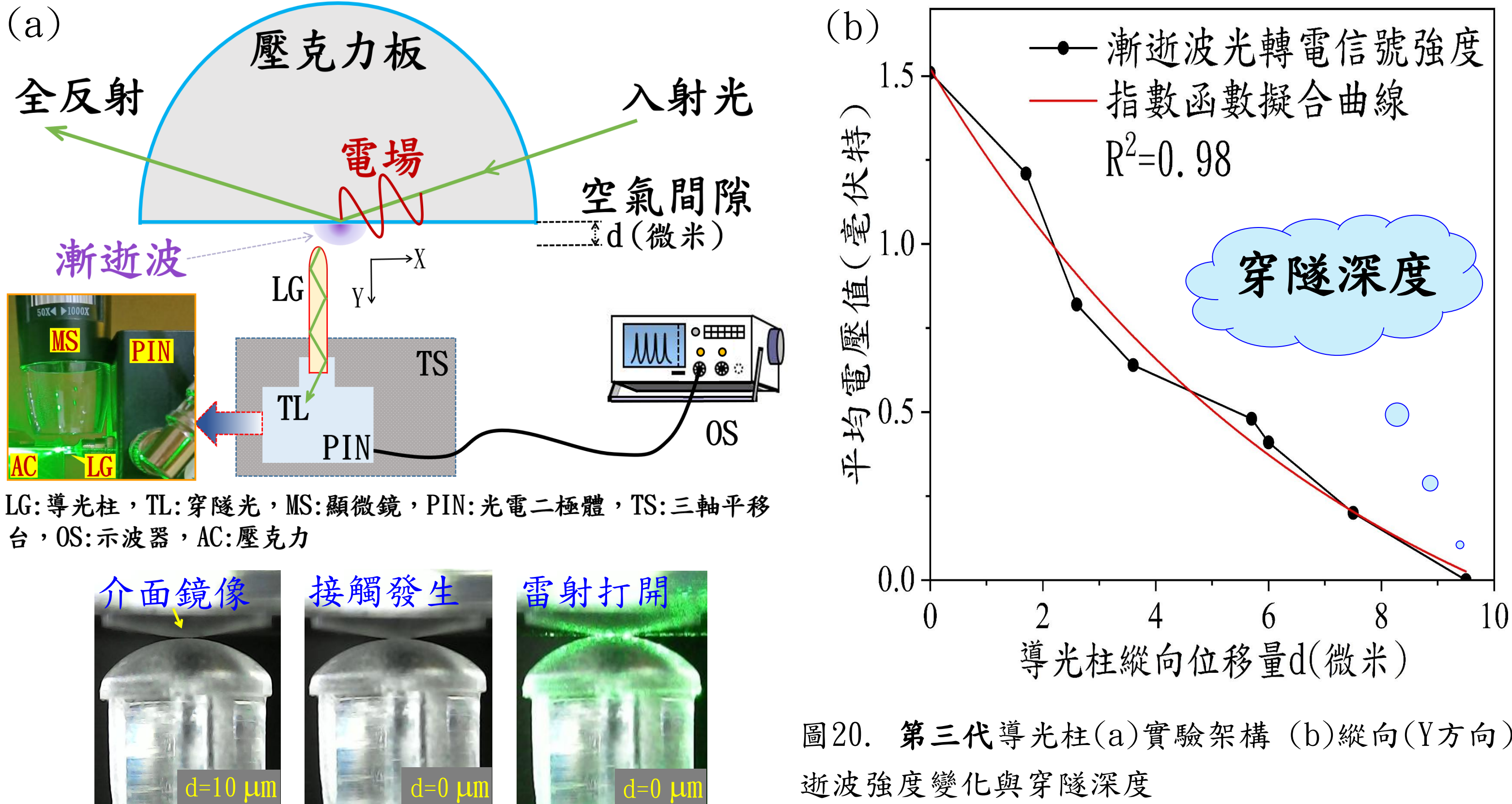


圖20. 第三代導光柱(a)實驗架構 (b)縱向(Y方向)漸逝波強度變化與穿隧深度

1. 光可穿隧微米間隙空氣牆
2. 平均穿隧深度9微米，與國際期刊(文獻一、二)的6.5微米接近
3. 漸逝波強度在介面的垂直方向呈指數衰減，在介面的切線方向呈高斯分布

肆、討論

- 一、火焰拋光可達鏡面
- 二、紅紫光折射角相同，壓克力為低色散材料
- 三、液體溫度、相變化、濃度都會影響臨界角；相變化的影響比溫度更明顯
- 四、旋轉隱身術讓貼紙依序隱身和現身；內外全反射可區分液位高度
- 五、導光柱使光穿隧實驗更輕易實現並證明漸逝波強度分別在X和Y方向呈高斯分布和指數衰減

伍、結論與展望

- 一、紅紫光折射角差值，可用做色散量化指標
- 二、相變化大於溫度對臨界角的影響
- 三、旋轉隱身術和內外全反射可擴展光學的新應用(如密室逃脫的視覺定位系統)
- 四、相較於玻璃稜鏡或50微米金屬探針方法(文獻一、二)，本研究新創使用導光柱實現光穿隧
- 五、光學液位偵測可應用於危險或偏遠環境(如飛機油箱、化學腐蝕液槽、電磁敏感區、山洪偵測)
- 六、光穿隧效應可用來製作微米精準度位移感測器

陸、參考文獻

- 一、D. A. Papathanassoglou and B. Bohnsen, (2003) Direct visualization of evanescent optical waves (71 670-677), Am. J. Phys. Figure 2和Figure 3
- 二、單曦辰，丁若禹，孫緒波，張文凱．(2023)．受抑全內反射原理及應用(42 13-17)．大學物理·Figure 7和Figure 8