

2025 大學生創意物理實作競賽

團隊名稱：藍色阿凡達

教具名稱：光語者

目標對象（年齡層）：高中生

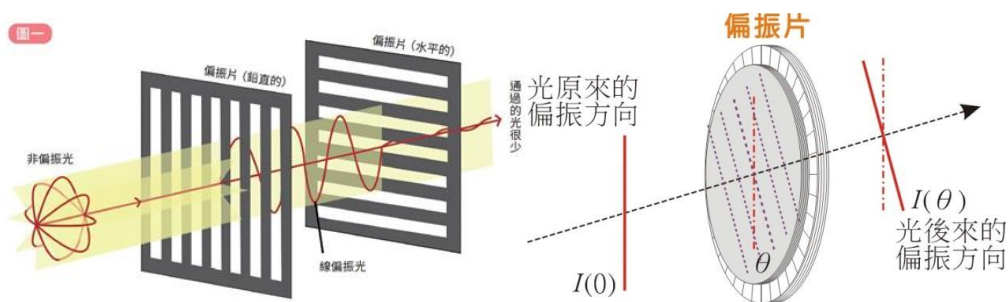
操作時間預估：20 分鐘

一、教具目標簡述(Objectives)：

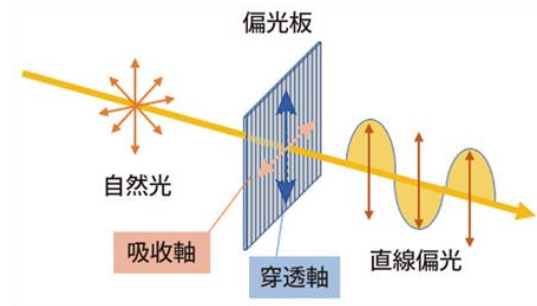
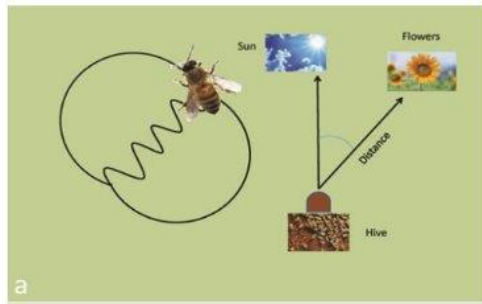
透過由洋芋片空筒製作的圓筒模型裝置，觀察與探討光在不同角度的偏振片下的光行為，並理解光與偏振軸之間的關聯。同時，利用太陽光來觀察筒的進光量，並經由調整偏振片角度，模擬蜜蜂八字舞原理與效果，進一步理解偏振光與偏振片的光學現象。

二、科學原理（物理模型）

- 光的偏振：光的偏振是指光的電場振動方向具有特定規律的性質，可透過偏振片、反射或雙折射等方式產生與控制。
- 偏振片與偏振光關係：偏振片能控制與分析偏振光的方向，當偏振光通過偏振片時，只有與其偏振軸平行的振動分量能穿透；若偏振片與偏振光的振動方向夾角改變，透過光強度依 Malus 定律 $I = I_0 \cos^2 \theta$ ， θ 為偏振片的偏振軸與入射偏振光的振動方向之間的夾角。當偏振軸互相垂直時，光被完全吸收，顯示偏振片可有效調節與檢測偏振光特性。



- 天空偏振光導航原理：蜜蜂透過八字舞以中心線相對重力的角度表示食物與太陽的夾角，以震動頻率與時間長短表示距離；而蜜蜂的複眼內有可感知偏振方向的感光細胞，能根據天空偏振光圖樣推測太陽方位。



- 太陽光為非偏振光，當太陽光進入大氣層經由分子產生 Rayleigh 散射後部分散射光變成偏振光，因此天空不同方向的光偏振程度不同。透過

Rayleigh 散射理論公式 $P = \frac{I_{\perp} - I_{\parallel}}{I_{\perp} + I_{\parallel}}$ (P 為偏振度), $I_{\perp} \propto 1$ 為電場震盪方向垂直於散射平面的分量強度, $I_{\parallel} \propto \cos^2 \theta$ 則為電場震盪方向平行於散射平面的分量強度, 經過整理 $p = \frac{1 - \cos^2 \theta}{1 + \cos^2 \theta} = \frac{\sin^2 \theta}{1 + \cos^2 \theta}$, 從公式可得知 $\theta = 90^\circ$ 時,

偏振度最大.

三、實驗設計與規劃

學生探究問題：

- ① 為什麼轉動偏振片會變暗？
- ② 為什麼在轉 90° 時文字浮現？
- ③ 為什麼蜜蜂能看到人眼看不到的偏振光？

教具硬體內容：

1. 偏振片 - Polarizer
2. 圓筒（洋芋片空筒）- Cylinder

教具使用流程：

〈實驗一：偏振片交叉實驗〉

實驗目的：透由轉動偏振片，不同角度的變換，觀察並得知光的偏振效果。

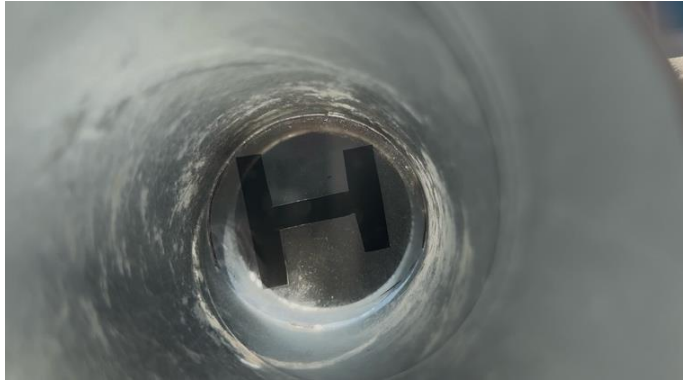
Step 1 將初始偏振片安裝上教具模型



Step 2 將要觀測的英文字安裝上教具模型

Step 3 從左至右滑動英文字偏振片

Step 4 辨認出該英文字母



〈實驗二：天空偏振光導航實驗〉

實驗目的：利用偏振片明顯明暗變化，找出光源位置。



Step 1 將十字偏振片換上

Step 2 盡可能的側視於光源方向

Step 3 轉動圓筒，觀察產生的明暗變化

Step 4 改變自身位置觀察偏振片的明暗差異，逐漸找出光源位置



安全提醒：請避免直接注視太陽光，建議以天空散射光進行觀察。

四、程式碼摘要

〈實驗一：偏振片交叉實驗〉

流程：

1. 掃描資料夾(RAW 或 DNG 檔)
2. 暗場平均
3. 建立/載入 ROI
4. 逐角度處理
5. 正規化與理論
6. 擬合與不確定度
7. 繪圖 (3 張) : Malus 曲線、線性度檢查、殘差 vs 角度

〈實驗二：天空偏振光導航實驗〉

流程：

1. 讀檔與線性化(RAW 或 DNG 檔)
2. 黑卡/灰卡校正
3. 尺寸/方向對齊(補 NaN 到共同最大尺寸)
4. Stokes 計算
5. ROI 產生 (處理 NaN)
6. 光束方向估測

7. 角度對齊
8. 像素篩選與統計
9. 濃度聚合
10. 繪圖（3 張）：DoLP-濃度、R-濃度、AoLP 誤差箱型圖

五、量化實驗結果與分析

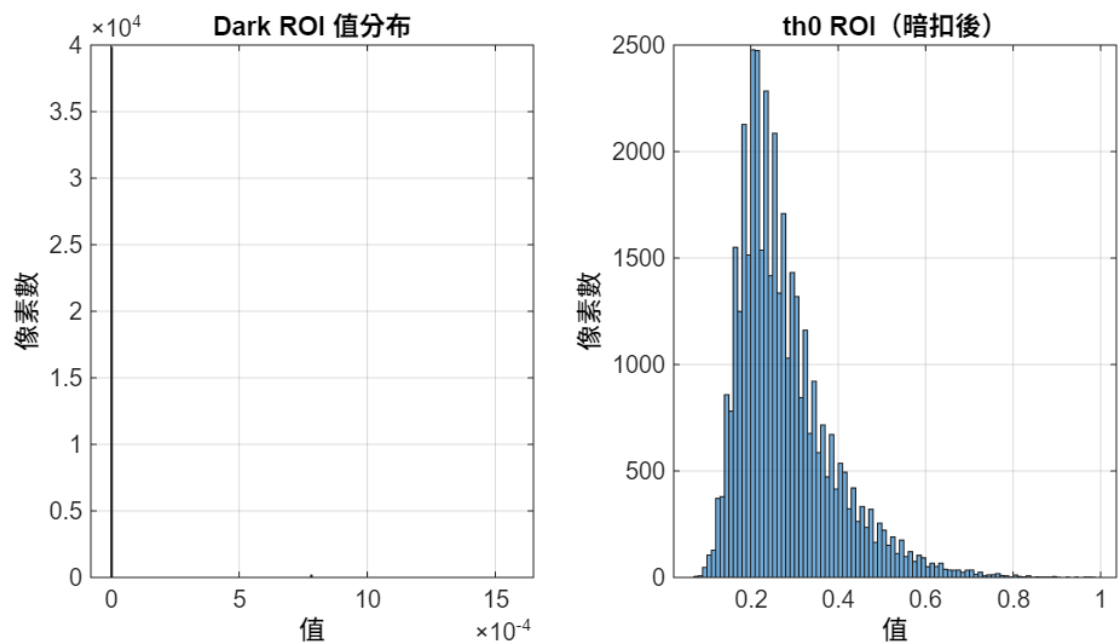
相機設定：



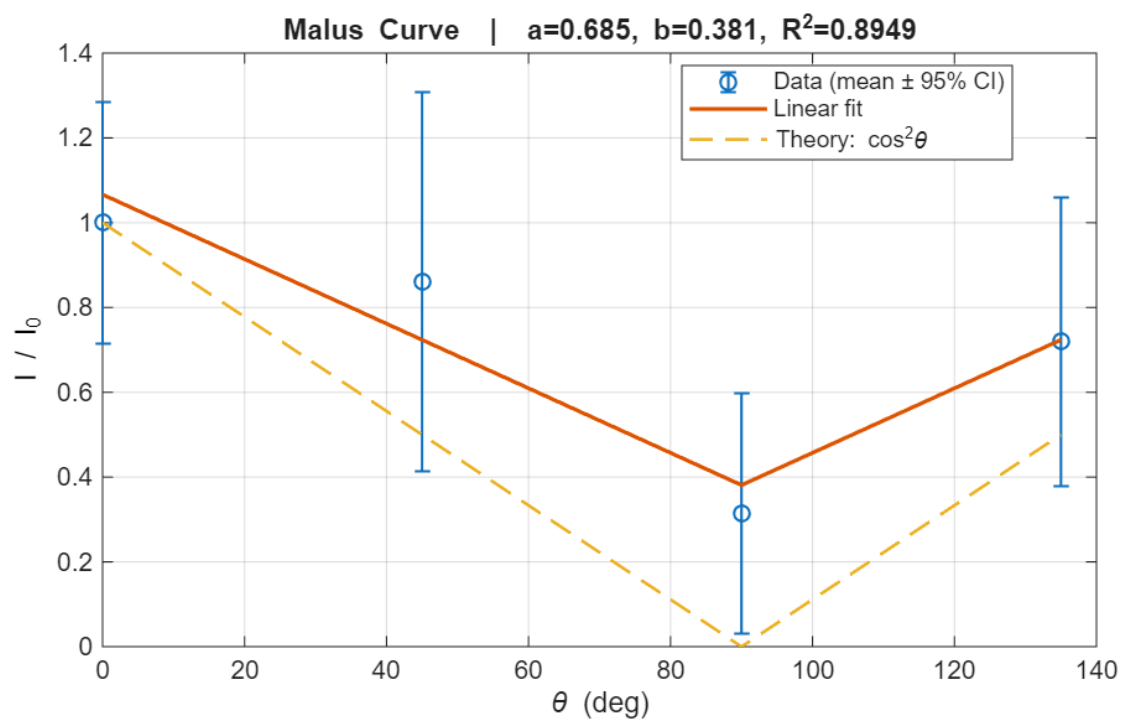
〈實驗一：偏振片交叉實驗〉

量化方式：透過手機相機儲存照片（RAW 檔），透過 matlab 取得數據訂進行分析。

核心公式：Malus 定律： $I = I_0 \cos^2 \theta$ ：



《圖一》左圖：暗場，右圖為扣除暗場後的亮度分布



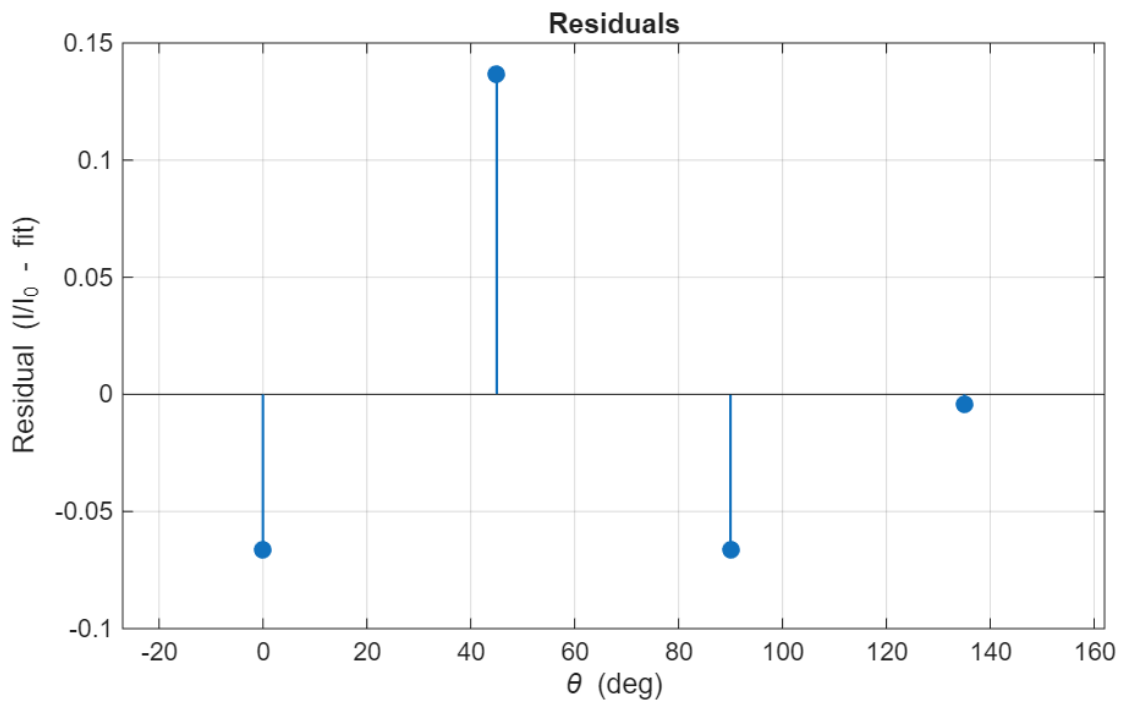
《圖二》Malus 曲線（含誤差棒）

- 藍色圓點：誤差棒（代表每個角度的光強平均值 $\pm 95\%$ 的信賴區間）
- 橘色實線：線性擬合的結果 $\frac{I}{I_0} = a \cos^2 \theta + b$

- 黃色虛線：理論結果 $\cos^2 \theta$
- 上方標示：擬合結果

解讀：

1. 斜率 $a=0.685 < 1$ ：此值代表光強變化幅度，代表理論應變化幅度為 1 時，實際光強變化幅度只有約 68%。
2. 截距 $b=0.381$ ：此值含意為背景光或漏光偏移量（理論值=0）。代表偏振片的偏振軸垂直時，仍具 38% 的光穿透，可能是背景光或散射造成的。
3. $R^2=0.8049$ ：此值代表擬合接近度，越接近 1 代表符合理論，整體而言符合 Malus 定律，但具少量偏差。



《圖三》殘差比較圖

- 殘差幅度落在 ± 0.15 （表 15% 的誤差）。
- 正負誤差交替分布，表示偏振片角度或光軸稍有偏移。
- 沒有明顯單方向誤差，表示沒有嚴重的系統性誤差，主要為隨即及不均勻光。

實驗一總結：

數據可清楚呈現偏振現象，符合 Malus 曲線（ $R^2 \approx 0.89$ ），但光強變化幅度不夠大且受背景光干擾，導致最低點被抬高，幅度不明顯。若提升消光比、優化拍攝環境及角度的矯正， R 可提升至 95%，殘差可下降 5%。

〈實驗二：天空偏振光導航實驗〉

量化方式：透過手機相機儲存照片（RAW 檔），透過 MATLAB 取得數據訂進行分析。

核心公式

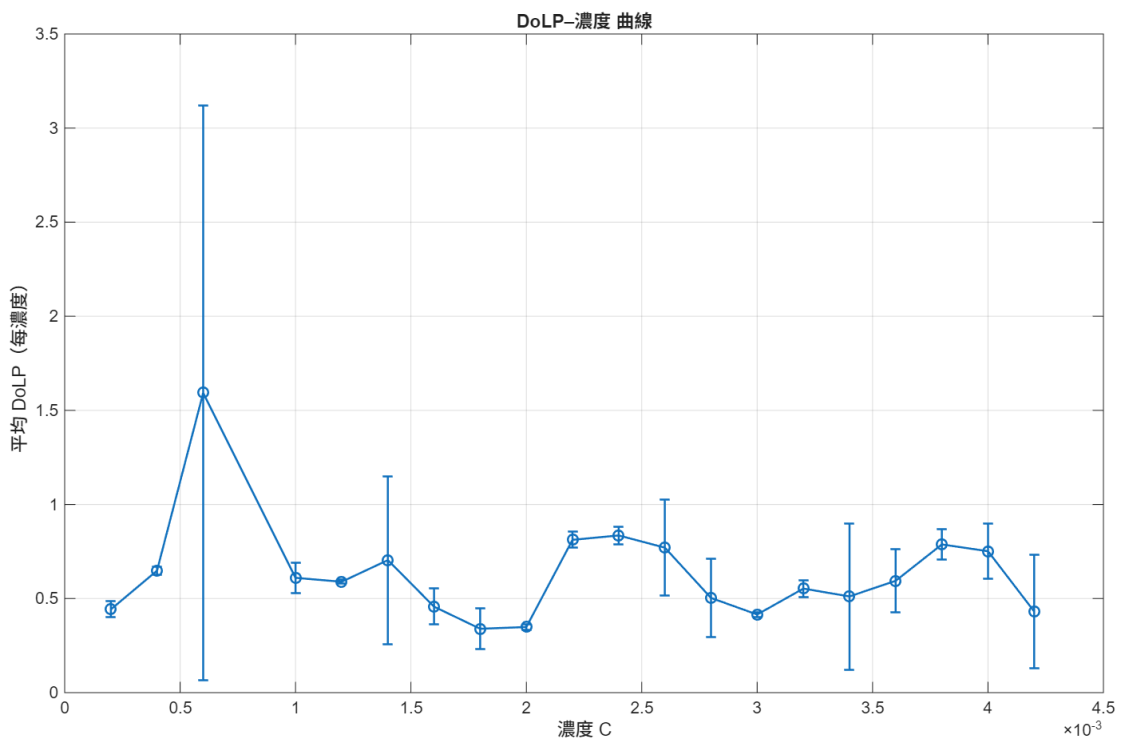
Stokes 參數： $S_0 = I_0 + I_{90}, S_1 = I_0 - I_{90}, S_2 = I_{45} - I_{135}$

DoLP 線偏振度： $\frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0}$

AoLP 偏振角度： $\frac{1}{2} \arctan(S_2, S_1)$

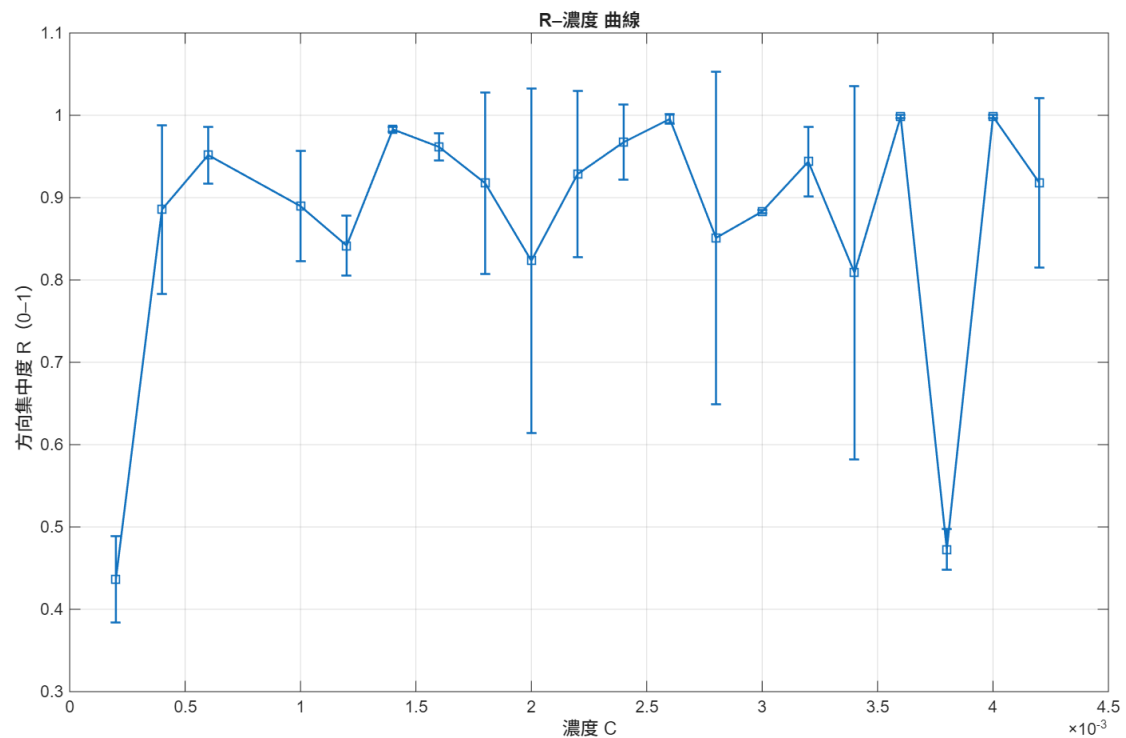
R 方向穩定度： $R = \sqrt{C^2 + S^2}, C = \frac{\sum w_i \cos \phi_i}{\sum w_i}, S = \frac{\sum w_i \sin \phi_i}{\sum w_i}, w_i : \text{DoLP 為權重}, \phi_i : \text{AoLP}$

角度乘 2



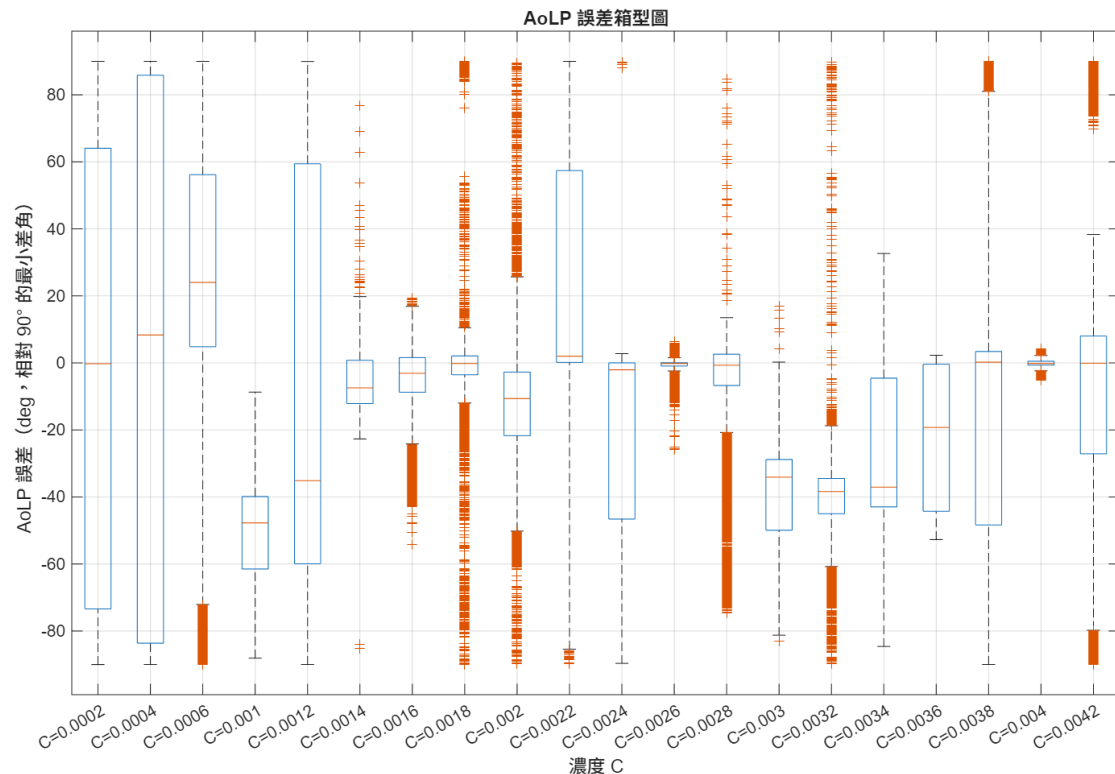
《圖四》DoLP—濃度曲線圖

- 主體落在 0.4 - 0.8；在 $C \approx 6 \times 10^{-4}$ 有一個 $\text{DoLP} \approx 1.6$ 的尖峰且誤差棒極長（明顯異常點）。
- 除該點外，稀端 DoLP 較高，隨濃度提升整體降到中等並出現小幅起伏（0.45~0.7）。



《圖五》R—濃度曲線

- 大多數濃度 $R \geq 0.9$ ，方向一致性高；
- 在最稀一端 $C \approx 2 \times 10^{-4}$ 有 $R \approx 0.45$ 的低谷；中高濃度有零星下探（誤差棒較長），其餘維持 0.9~1.0。



《圖六》AoLP 誤差箱型圖

- 多數濃度的中位數落在 -35° 到 -10° ，不是 0° ；顯示 AoLP 整體有固定偏移。
- IQR 多在 20° ~ 30° ，與 R 高相符（方向分布窄）；個別濃度（如 0.0032、0.0042）髮鬚與離群點較多，代表當次量測混入雜訊/高光或多重散射較強。

實驗二總結：

- DoLP 趨勢：與預期相符，稀溶液以「單次散射」為主，偏振保留較多；濃度提高後多重散射增加，DoLP 下降且起伏。局部高點（如 0.0022~0.0026）常是 ROI 正好抓到主光柱、環境光抑制較好的情況。
- R 高但 AoLP 偏移：R 長期 ≥ 0.9 說明方向很穩；然而 AoLP 多為負值偏離 90° ，屬系統性零點偏差（可能是光束方向估測 θ 光束被杯壁高光/暗尾拉斜 10° ~ 30° ，或偏振片/相機零度定義不一致）。
- 異常點（ $C \approx 6 \times 10^{-4}$ 的 DoLP > 1、長誤差棒；以及少數 R 低谷），可能原因：
 1. RAW 非線性/局部飽和
 2. ROI 選取時含杯壁或液面鏡面反射
 3. 信噪比過低（最稀端雜光占比高）

六、 結論

I. 總結研究發現與理論接近的趨勢

- 成功量測 Malus 定律趨勢： I/I_0 隨角度呈 V 形；線性檢核得到 $a = 0.685$ 、 $b = 0.381$ 、 $R^2 = 0.895 \rightarrow$ 整體吻合度良好。
- 偏振效率未達理想：斜率 $a < 1$ ，可調變成分約 68%；顯示偏振片消光比與系統去偏振影響存在。
- 背景／漏光顯著：截距 $b \approx 0.38$ ，即使近乎交叉仍有 $\sim 38\%$ 殘餘光；來源可能為散射、反射面或環境雜光。
- 殘差型態合理： $45^\circ/135^\circ$ 為正、 $0^\circ/90^\circ$ 略負，RMS 誤差約 ~ 0.08 ；符合「角度零點有小偏移 Δ 」的特徵。
- DoLP：在稀濃度端較高；濃度升高後，因多重散射增加，DoLP 整體下降並伴隨局部起伏。
- R：多數濃度 $R \geq 0.9$ ，代表偏振方向高度一致；僅在 SNR 低或幾何高光／多重散射較強時出現下探。
- AoLP：分布普遍狹窄穩定（與 R 高相符），但相對 90° 存在固定偏移（約 $-35^\circ \sim -10^\circ$ ），顯示需要一次性的零點校正（光束方向或偏振片零度）。

II. 影響資料品質的關鍵原因

1. 手機拍攝的穩定度不夠（尺寸、曝光、背景／漏光顯著…）、設備非機械控制（角度誤差、抖動）。
2. ROI 若含杯壁／液面高光或四角度曝光不一致，會造成 DoLP 異常（甚至 >1 ）與 R 下滑；加入最亮百分比 + 形態內縮 + 邊界距離的 ROI 收斂與飽和像素剔除後，誤差棒顯著縮短，曲線更平順。

III. 應用價值

- 從「看到」變成「量到」
不只演示明暗變化，還能輸出 DoLP - 濃度曲線、R - 濃度曲線、AoLP 誤差箱型圖 與 CSV 表，讓學生連結到「散射平面」「單次／多重散射」等核心概念。
 - 低成本、可複製、可擴充
玻璃杯＋水／牛奶＋手機相機＋偏振片即可；軟體全自動，支援 (DNG, RAW) 或線性 16-bit TIFF。
 - 跨學科學習場域
1. 物理：Malus、Rayleigh、偏振與 Stokes 參量。
 2. 數學／統計：向量平均、圓統計（R、IQR、RMSE）。
 3. 資工／影像：RAW 線性化、ROI、Hough/PCA、曲線擬合與資料視覺化。
 4. 生物：模擬蜜蜂視角去製作教具模型。

教具硬體經費估算表：

項目	名稱	數量	單價	總價
1	偏振片	2 片	145NTD	290NTD
2	圓筒（洋芋片空筒）	1 個	45NTD	45NTD

參考資料(References)：

F. Logiurato, “Teaching light polarization by putting art and physics together,” *arXiv preprint* arXiv:1803.09645 [physics.ed-ph], Mar. 26, 2018.

B. Hunt, A. J. Ruiz, and B. W. Pogue, “Smartphone-based imaging systems for medical applications: A critical review,” *Journal of Biomedical Optics*, vol. 26, no. 4, p. 040902, Apr. 2021, doi: 10.1117/1.JBO.26.4.040902.