

2025年臺灣國際科學展覽會

優勝作品專輯

作品編號	160015
參展科別	物理與天文學
作品名稱	Measuring the large nonlinear refractive index of pigment from avocado leaves by a laser pointer
就讀學校	國立嘉義高級中學 國立嘉義女子高級中學
指導教師	李文堂 黃冠夫
作者姓名	林嵩浩 林瑞婕
關鍵詞	<u>Optical Kerr effect、Nonlinear refractive index、Avocado leaves</u>

作者簡介



我們是林嵩浩和林瑞婕，就讀嘉義高中數理資優班以及嘉義女中數理資優班。有幸在李文堂老師和黃冠夫老師的指導下，對物理有更深入的了解，並對物理研究產生更多熱忱。

在實驗的過程中，我們必須對實驗不斷的做出修正，並強化相關的理論知識和實驗技巧，在老師們辛苦的指導下，這段時間我成長了很多，謝謝兩位老師。

2025 年臺灣國際科學展覽會

研究報告

區別：(編號由國立臺灣科學教育館統一填列)

科別：物理與天文學科

作品名稱：Measuring the large nonlinear refractive index of
pigment from avocado leaves by a laser pointer

關鍵詞：Opticl Kerr effect、Nonlinear refractive index、
Avocado leaves

編號：

(所有圖片、圖表、數據表格和圖形均由作者創建)

Measuring the large nonlinear refractive index of pigment from avocado leaves by a laser pointer

摘要

本研究報告，從酪梨葉利用柱層分析技術萃取出葉綠素-a、葉綠素-b 以及類胡蘿蔔素，用來研究其物理性質以及測量非線性折射率 (n_2)。

當雷射光束照射在置於比色管中的樣本時，中央軸上的強度最高，導致溶液產生了溫度梯度和折射率梯度。雷射光束穿過溶液後，在屏幕上產生了遠場繞射圖樣。這些繞射圖樣的最大半徑 (R_m) 和暗條紋的數目 (N) 隨雷射光的功率 (P)、光徑長度 (ℓ)、溶液的熱吸收係數 (μ) 和溶劑的熱光係數 (dn/dT) 變化。從 N 對 ℓ 和 N 對 P 的關係圖中，可以計算出溶液的 n_2 。

在本研究中，從酪梨葉中萃取的色素濃度分別是從菠菜和朱槿葉中萃取色素濃度的 4.0 倍和 3.1 倍。更令人驚訝的是測得的 n_2 值比石墨烯大 100 倍。結果顯示，該樣品具有顯著的非線性折射率，使其成為各種光學開關應用的理想材料。

Measuring the large nonlinear refractive index of pigment from avocado leaves by a laser pointer

Abstract

This study reports, for the first time, the nonlinear refractive index (n_2) of natural pigments extracted from avocado leaves. While n_2 has been previously studied in materials like graphene and other plant extracts such as spinach, coriander, Hibiscus-rosa sinesis, and olive, our findings reveal that the concentrations of chlorophyll-a and chlorophyll-b in avocado leaves are significantly higher than those in previously examined plants. We used silica column chromatography to extract these pigments, with chlorophyll-a dissolved in acetone, chlorophyll-b in acetone, and carotenoids in hexane. These samples will be used to measure their optical properties, contributing new insights into the n_2 of plant-derived materials.

When a laser beam hits a sample in a cuvette, the intensity is highest at the center, leading to increased temperature and a decreased refractive index. This creates temperature and refractive gradients in the solution. After passing through, the laser generates a far-field diffraction pattern of light and dark fringes on a screen. The maximum radius of these patterns (R_m) and the number of dark fringes (N) vary with laser power (P), optical path length (ℓ), thermal absorption coefficient (μ), and the thermo-optic coefficient (dn/dT). Analyzing N vs. ℓ and N vs. P plots allows for calculating the nonlinear refractive index.

In this study, lasers of different powers and different concentrations of chlorophyll- a and -b and carotenoids from avocado leaves are used with different liquid column heights to illuminate the extracted pigments. Comparing to past studies, results have shown that the concentration of the extracted pigment extracted from avocado leaves are 4.0 and 3.1 folds of extracted pigment from spinach and Hibiscus-rosa sinesis, respectively. Even more surprising was that the n_2 value of chlorophyll-a extracted from the avocado leaf is 100 times larger than graphene. The results indicate that the sample possesses a significant nonlinear refractive index, making it ideal for various optical switching applications, as well as holding promise for advancements in data storage and optical communication.

壹、前言

一、研究動機

閱讀近三年全國科展及臺灣國際科學展覽物理與天文學科的得獎作品，作者以雷射光照射橄欖油和酪梨油產生繞射現象。但由於兩種油所含有的吸光物質的含量未標示，所以兩件作品並沒有太多的定量探討；引起我們萃取植物葉中的天然色素用雷射光照射，研究天然色素的物理性質以及非線性折射率的興趣。

二、研究目的

- (一)、從植物葉萃取天然色素研究其物理性質。
- (二)、實驗研究雷射光通過天然色素溶液產生的繞射現象。
- (三)、測量天然色素溶液的非線性折射率。

三、文獻回顧

- (一)、吳子謙、張夏睿 2023 [1] 以雷射光照射橄欖油，產生因熱對流產生的非同心圓繞射圖樣，以及因熱傳導的同心圓繞射圖樣。
- (二)、吳子謙、張夏睿 2024 [2] 以 Studies of spatial self-phase modulation of the laser beam passing through the olive oil 獲臺灣國際科展物理與天文學科二等獎。
- (三)、Tzu-Chien Wu and Hsia-Jui Chang (2024) [3] 以 Precision detections of chlorophyll-a in olive oil 獲土耳其音樂科學工程博覽會(Buca IMSEF)金牌獎。
- (四)、K. Bouchouit (2010) [4] 從菠菜葉萃取類胡蘿蔔素(Carotenoids)，使用 Generate four wave mixing (DEWM)法研究其非線性光學性質(Nonlinear optical properties)。
- (五)、B. Kouissa (2013) [5] 從菠菜葉萃取葉綠素 a 和 b(Chlorophyll a and b)，使用光譜儀(Spectrometer)分析得知:葉綠素 a 在波長 412nm 和 666nm 的光照射下，吸收係數(Absorption coefficient)達到高峰;葉綠素 b 在波長 440nm 和 655nm 的光照射下，吸收係數達到高峰。兩種化合物在波長 532nm 的綠光照射下，吸收係數都非常低。同樣用 DEWM 法研究其非線性光學性質。
- (六)、S. Biswas (2017) [6] 從朱槿葉萃取葉綠素和類胡蘿蔔素，使用光譜儀測量葉綠素在波長 633nm 的紅光照射下的吸收係數，使用 Spatial self-phase modulation (SSPM)法測量非線性折射率(Nonlinear refractive index) n_2 。
- (七)、S. Jeyaram (2020) [7] 從茼蒿葉萃取類胡蘿蔔素，使用 Z-scane 法測量 Third-order Nonlinear optical properties。
- (八)、綠葉的色素主要是: [8]
 - ①葉綠素-a(Chlorophyll-a $C_{55}H_{72}O_5N_4Mg$)，葉綠素-a 丙酮溶液對波長 532nm 的綠光的莫耳衰減係數 $\alpha = 7656cm^{-1}M^{-1}$ ，對波長 670nm 的紅光的莫耳衰減係

數 $\alpha = 12438\text{cm}^{-1}\text{M}^{-1}$ ，對波長 440nm 的藍光的莫耳衰減係

數 $\alpha = 125736\text{cm}^{-1}\text{M}^{-1}$ 。。

②葉綠素-b(Chlorophyll-b $\text{C}_{55}\text{H}_{70}\text{O}_6\text{N}_4\text{M}_g$)，葉綠素-b 丙酮溶液對波長 532nm 的綠光的莫耳衰減係數 $\alpha = 5689\text{cm}^{-1}\text{M}^{-1}$ ，對波長 670nm 的紅光的莫耳衰減係

數 $\alpha = 22438\text{cm}^{-1}\text{M}^{-1}$ ，對波長 440nm 的藍光的莫耳衰減係

數 $\alpha = 45736\text{cm}^{-1}\text{M}^{-1}$ 。。

③類胡蘿蔔素(Cartenoids)包括 β -胡蘿蔔素($\text{C}_{40}\text{H}_{56}$)和葉黃素($\text{C}_{40}\text{H}_{56}\text{O}_2$)，類胡蘿蔔素正己烷溶液對波長 440nm 的藍光的莫耳衰減係數 $\alpha = 22324\text{cm}^{-1}\text{M}^{-1}$ 。

貳、研究方法及過程

一、研究器材

1. 萃取色素

(1)研鉢及杵。

(2)管柱及支架。

(3)矽膠(230-400 網目)

(4)燒杯、漏斗、試管、剪刀、濾紙和玻棒。

(5)乙醇、正己烷、丙酮、蔗糖粉、酪梨葉、朱槿葉和菠菜葉。

2.雷射光筆

(1) 532 nm : 5mW 一支，100mW 二支。

(2) 670 nm : 5mW 一支，100mW 一支。。

(3) 440 nm : 5mW 一支，120mW 一支。。

3. 光感應器 (PASCO scientific 2003)。

4. 微量滴管0-200 μl 一組。

5. 五面光比色皿($10 \times 10 \times 45$) mm^3 二支，圓柱管(截面內徑 16.1mm，高 50mm)。

6. 平面鏡。

7. 屏幕 (到容器的距離 $L = 560$ cm).

8. 起偏器。

9. 攝影機， Kmplayer 軟體。

10. Microsoft Excel.

二、實驗方法及步驟

(一)、原理

1. 強度 I_0 的入射光束，通過路徑長度 ℓ 的溶液後光的強度 I ，

$$I = I_0 e^{-\alpha C \ell} = I_0 e^{-\mu \ell} \dots (1)$$

$$\mu = \alpha C \dots (2)$$

$$\ln \frac{I}{I_0} = -\alpha C \ell = -A \dots (3)$$

α :溶質的莫耳衰減係數 (Molar attenuation coefficient, 單位為 $M^{-1}cm^{-1}$)

μ :溶質的衰減係數 (Attenuation coefficient, 單位為 cm^{-1})

C :溶質的濃度(單位為 M)

A : 吸光率(Absorbance)

2. (1)雷射光是高斯光束，照射介質時，
通過中央軸的光線 A 強度最大(I_p)，
距離中央軸 w 處，光的強度 $I = I_p/e$ ，
 w :雷射光的光束半徑(beam radius)

(2)功率 P 的雷射光

$$P = I_p \pi w^2 / 2 \dots (4)$$

- 3.(1)中央軸的介質受熱後溫度最高，折射率
為 n ，光束邊緣的光線通過介質的溫度
低，和中央軸的溫度差 ΔT ，折射率
為 $n + \Delta n$ 。

$$\Delta n = \frac{dn}{dT} \Delta T \dots (4)$$

$\frac{dn}{dT}$:熱光係數(thermo-optic coefficient)

(2) Optical Kerr effect: $\Delta n = I_p n_2$

n_2 :非線性折射率(Nonlinear refractive index)

4. 雷射光通過溶液後，不同相位的光線互相干涉，在距離溶液 L 的屏上出現繞射圖樣

(1) 繞射圖樣中的暗紋數 N 等於平面波通過介質後，中央軸光線和光束邊緣光線的相位差 p

$$N = p = \frac{\ell \Delta n}{\lambda} = \frac{\ell}{\lambda} I_p n_2 = \frac{2n_2 \ell}{\lambda \pi w^2} P \dots (5) \quad [8]$$

- (2) 從入口到出口的折射率梯度可以忽略不計 (路徑長度 ℓ 不大) 時，繞射圖樣的
最大半徑 R_m

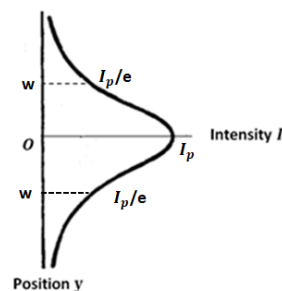


圖 1. 高斯光束，光的強度隨位置的變化。

$$R_m = \frac{L \left(\frac{dn}{dT} \right) \ell P \mu}{\lambda k} + R_0 \cdots (6) \quad [8]$$

μ_a :溶質的吸收係數、 λ :雷射光波長、 k :溶劑的熱傳導係數、 R_0 :光束沒有發生繞射的半徑。

(二)、實驗步驟

1. 柱層分析法萃取色素

- (1) 葉片 4 g 剪成小碎片，置於研鉢中，加入 10 ml 體積比為 1:1 的正己烷與丙酮混合液，研磨至溶液呈深綠色，溶劑因部分揮發只剩約 2 ml，如果少於 2 ml，酌量加入溶劑於研鉢中，量筒量取 2 ml 萃取液。
- (2) 管柱賽入少許棉花，加入矽膠 2.4 g，將萃取液以滴管加到矽膠上方，加入 15 ml 的正己烷洗脫類胡蘿蔔素，將這些淡黃色的胡蘿蔔素正己烷溶液收集到試管中(約 6 ml)以橡皮賽密封備用。
- (3) 加入 15 ml 的丙酮洗脫葉綠素，將這些綠色的葉綠素丙酮溶液收集到試管中(約 8 ml)。加入蔗糖粉 1.2g，葉綠素丙酮溶液會分成兩層，綠層是葉綠素 b(約 2.7 ml)，藍層是葉綠素 a(約 5.4 ml)。
- (4) 分別用滴管將葉綠素 a 和葉綠素 b 滴入管柱中，以丙酮再次洗脫，分別密封到試管中以橡皮賽密封備用。

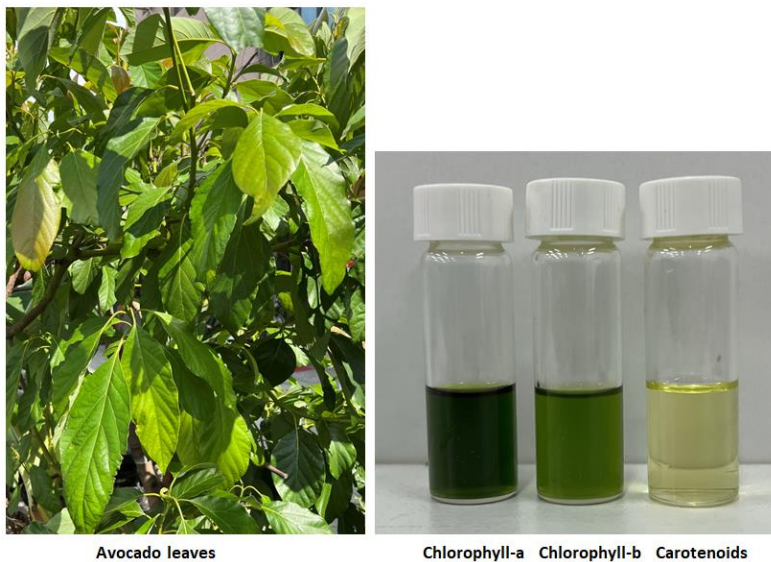


圖 2. 酪梨葉和萃取出的葉綠素 a 丙酮溶液、葉綠素 b 丙酮溶液，以及類胡蘿蔔素正己烷溶液。

2. 測量萃取液的濃度

- (1) 圓柱管用三叉夾鉛直立於光感應器上方，5mw 的雷射光筆架於圓柱管上方。
- (2) 開啟雷射，紀錄光感應器的讀數 I_0 。
- (3) 微量滴管吸取待測液，滴入圓柱管中，紀錄光感應器的讀數 I 。

(4) Excell 做 $\ln \frac{I}{I_0}$ vs ℓ 關係圖，由直線的斜率可以得到溶質的衰減係數 μ ，

由公式(2) $\mu = \alpha C$ ，查閱文獻紀載的溶質的莫耳衰減係數 α ，可以計算得到萃取液的濃度 C 。

3. 測量溶液的非線性折射率以及溶劑的熱光係數

- (1) 圓柱管用三叉夾鉛直立於平面鏡(和桌面夾角 45 度)上方，功率 P 的雷射光筆架於圓柱管上方，開啟雷射，在距離圓柱管底部 L 的屏上出現亮點(半徑 R_0)，打開攝影機，調整光圈攝錄光點影像。
- (2) 微量滴管吸取待測液，滴入圓柱管中，改變光徑長度 ℓ 直到 ℓ 達 1cm 左右。
- (3) 偏振片放置於比色皿上方，改變照射光的強度 P 。
- (4) 將拍攝的影片放在電腦中，以 Kmplayer 軟體擷取照片，由照片讀取繞射圖樣的最大半徑 R_m ，以及暗紋數目 N 。
- (5) Microsoft Excel 製作 $R_m - \ell$ 關係圖可得到溶劑的熱光係數 dn/dT ， $N-P$ 關係圖可得到溶液的非線性折射率 n_2 ， $N - \ell$ 關係圖亦可得到溶液的非線性折射率 n_2 。

參、結果與討論

一、測量萃取液的濃度

(一)、三種葉子含葉綠素-a

1. 酪梨葉(Avo)、朱槿葉(Hibi)和菠菜葉(Spn) 各 4 g，分別經柱層分析得到 5 ml 葉綠素-a。
2. 微量滴管吸取待測液，滴入圓柱管中，紀錄光感應器的讀數 I ；Excell 做 $\ln \frac{I}{I_0}$ vs ℓ 關係圖。

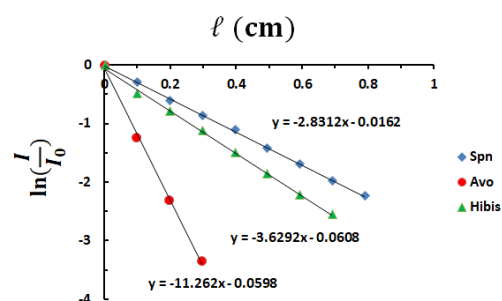


圖 3. 5mW 的綠光照射三種葉子萃取的葉綠素-a，出射光的強度和入射光的強度比值的對數值隨光徑長度變化。

3. 由圖 3 的趨勢線斜率和公式(3)

$$\ln \frac{I}{I_0} = -\alpha C \ell \text{ 擬和參數，查閱文獻紀載的}$$

溶質的 莫耳衰減係數 $\alpha = 7656 \text{ cm}^{-1} \text{ M}^{-1}$ ，

計算得到三種葉子的葉綠素-a 丙酮溶液的濃度分別為：

$$\text{酪梨葉 } C = 1.5 \times 10^{-3} \text{ M}$$

$$\text{朱槿葉 } C = 0.47 \times 10^{-3} \text{ M}$$

$$\text{菠菜葉 } C = 0.36 \times 10^{-3} \text{ M}。$$

4. 葉綠素是植物葉光合作用的產物，植物葉中葉綠素的含量隨著日照時間、氣候和向光性等諸多因素而異。本實驗所用的酪梨葉和朱槿葉由校園中採集，菠菜由市場購買，光照程度雖有不同，但酪梨葉的葉綠素含量為菠菜葉的 4 倍以

上應無庸置疑。

- 市售的葉綠素-a 由菠菜葉萃取，每毫克售價 2 萬元，而且保存不易，本實驗從校園摘取酪梨葉，以柱層分析技術萃取，約一個小時就可以進行天然色素的光學性質實驗。

(二)、葉綠素-a 和葉綠素-b

- 酪梨葉 4 g，經柱層分析得到 5 ml 葉綠素-a(Chlo-a)，2.5 ml 葉綠素-b(Chlo-b)。
- 微量滴管吸取待測液，滴入圓柱管中，紀錄光感應器的讀數 I；Excell 做

$\ln \frac{I}{I_0}$ vs ℓ 關係圖。

- 由圖 4 的趨勢線斜率和公式(3)

$$\ln \frac{I}{I_0} = -\alpha C \ell \text{ 擬和參數}$$

計算得到葉綠素-a 丙酮溶液和葉綠素-b 丙酮溶液的濃度分別為：

葉綠素-a $C = 1.5 \times 10^{-3} M$

葉綠素-b $C = 0.49 \times 10^{-3} M$ 。

- 酪梨葉的葉綠素-a 含量為葉綠素-b 的 3.1 倍。

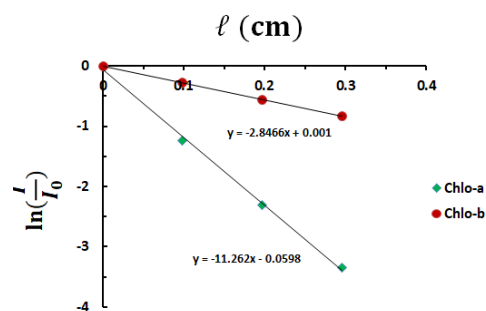


圖 4. 5mW 的綠光照射從酪梨萃取的葉綠素-a 和葉綠素-b，出射光的強度和入射光的強度比值的對數值隨光徑長度變化。

二、測量葉綠素-a 的光學性質

(一) 最大半徑隨時間變化

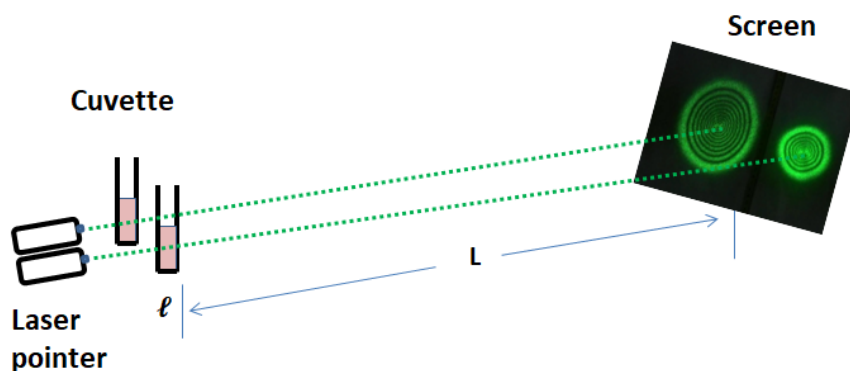


圖 5. 實驗裝置示意圖。

- 圖 5 為：兩支比色管($\ell = 1\text{cm}$)平行並立，分別盛 2ml 的葉綠素-a 丙酮溶液，左管濃度 $C = 1.5 \times 10^{-3} M$ 吸光率 $A=11.5$ ，右管濃度 $C = 0.86 \times 10^{-3} M$ 吸光率 $A=6.58$ ，以兩支 100mW 的綠光

雷射照射，在 $L=560\text{cm}$ 處的屏幕上呈現繞射圖樣，用攝影機拍下繞射圖樣。利用 Kmplayer 軟體，每隔 0.67 秒擷取一張照片，量取最大半徑。

2.

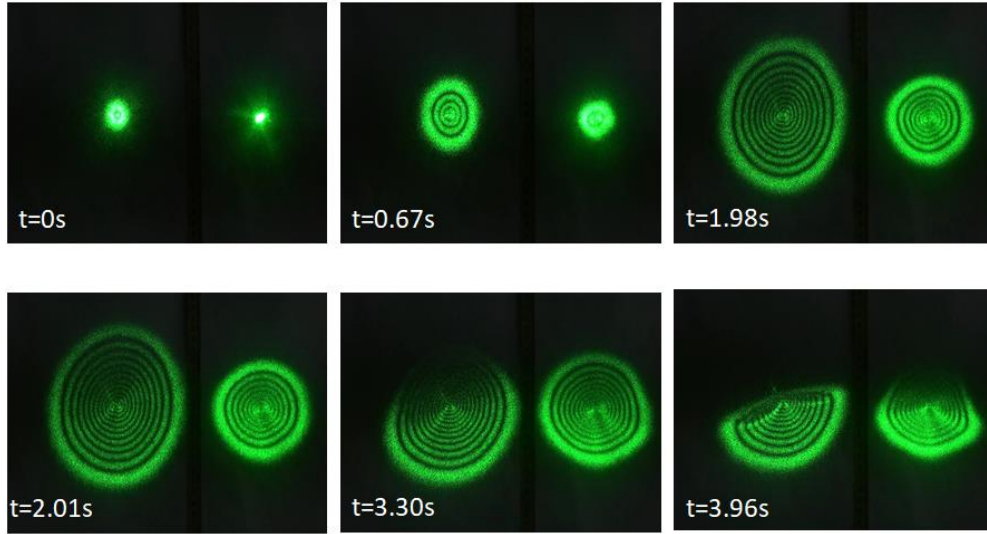


圖 6. 繞射圖樣隨時間的變化。

3. 雷射光照射溶液時，光束中央軸的強度最大，溶液溫度最高，折射率最小；光束在穿過有折射率梯度的溶液時，相鄰兩光線有相位差，出口處各光線互相干涉在屏幕上出現同心圓狀的繞射圖樣。但是由於光束中央軸通過的液體密度小，會向上方流動，上方密度大的液體向下流動，形成對流現象，使得繞射圖樣不再是同心圓。

4. 圖 6 和圖 7 顯現的物理意義:

(1). 兩支雷射的 R_0 均為 3.14cm ，兩管均 $\ell = 1\text{cm}$

$\alpha = 7656\text{cm}^{-1}\text{M}^{-1}$ ，左管 $C = 1.5 \times 10^{-3}\text{M}$

右管 $C = 0.86 \times 10^{-3}\text{M}$ ，兩管的衰減係數

$\mu = \alpha C$ 分別為 11.4cm^{-1} 和 6.58cm^{-1} ，兩者的比值 $=1.73$ ； $t=2.01\text{s}$ 時 R_m 達到極大，左右管繞射圖樣的 $R_m - R_0$ 分別為 7.66cm 和 4.46cm ，兩者的比值

$=1.13$ 由公式(6) $R_m - R_0 = \frac{L(\frac{dn}{dT})\ell P\mu}{\lambda k}$ 可知本實驗的結果和理論相當吻合。

(2). 繞射圖樣的下半部(Ld:左側圖樣下半部，Rd:右側圖樣下半部)，沒有對流現象(因為中央軸下方的液體密度大於中央軸)，繞射圖樣是同心(半)圓，圖 7 中 Ld-t 和 Rd-t 圖的趨勢線都有相同的趨勢(先漸大後漸小)，因為 $t=0\text{s}$ 溶液開始形成折射率梯度， $t=2.01\text{s}$ 時 R_m 達到極大，光束邊緣的液體溫度也漸增，中央和邊緣的液體溫差漸小，折射率梯度也變小， R_m 變小。

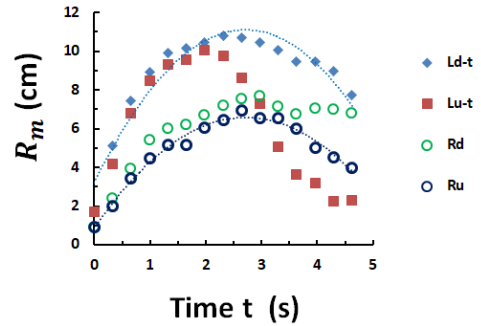


圖 7. 繞射圖樣隨時間的變化，Ld:左側圖樣下半部，Lu:左側圖樣上半部，Rd:右側圖樣下半部，Ru:右側圖樣上半部

(3) 圖 6 和圖 7 中 Lu 左側圖樣上半部因溶液的濃度大吸收熱量多所以容易形成對流，減少折射率梯度，所以 $t=2.01s$ 以後 R_m 小於 R_u 右側圖樣上半部。

(二) 最大半徑和暗紋數目隨光徑長度的變化

1. (1) 圓柱管(截面積 $2.0cm^2$)分

別盛 $C_1 = 1.5 \times 10^{-3}M$ 、

$C_3 = 0.86 \times 10^{-3}M$

和 $C_2 = 0.58 \times 10^{-3}M$

三種不同濃度的葉綠素-a
丙酮溶液 2ml。

(2) 100mW 的綠光雷射由上向

下照射，出射光經和平面呈 45

度的平面鏡反射到 $L=560cm$ 處
的屏幕上呈現繞射圖樣。

(3) 打開攝影機拍下繞射圖樣，

用微量滴管逐步吸掉 0.2ml。

(4) 利用 Kmplayer 軟體，擷取照片，
量取最大半徑(R_m)和暗紋數目(N)。

Excell 做 N vs ℓ 和 $R_m - R_0$ vs ℓ
關係圖。

2. 圖 10 為的繞射暗紋數目 N 隨光徑
長度 ℓ 的變化。雷射光的波長
 $\lambda = 532nm$ ，光束半徑 $w=0.35mm$
〔9〕，功率 $P=0.1W$
由公式(5)

$$N = \frac{2n_2 P}{\lambda \pi w^2} \ell \quad \text{擬合參數得到表一結果}$$

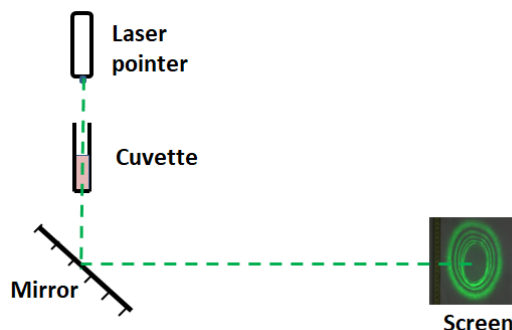


圖 8. 實驗裝置示意圖。

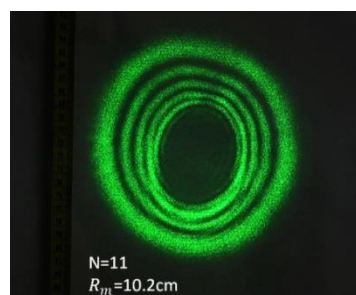


圖 9. 光徑長度 $\ell = 1.00cm$ 的繞射圖樣。

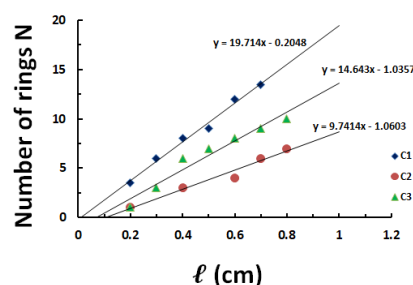


圖 10. 綠光雷射照葉綠素-a 丙酮溶液，
繞射圖樣的暗紋數 N 隨光徑長度 ℓ 的
變化。

表一: 不同濃度的葉綠素-a 的非線性折射率 n_2

濃度	$n_2 (\times 10^{-10} m^2 W^{-1})$
$C_1 = 1.5 \times 10^{-3} M$	- 20.1
$C_2 = 0.58 \times 10^{-3} M$	- 9.9
$C_3 = 0.86 \times 10^{-3} M$	-14.9

3. 圖 11 繞射圖樣的最大半徑差
($R_m - R_0$)隨光徑長度 ℓ 的變化。
由公式(6)

$$R_m - R_0 = \frac{L \left(\frac{dn}{dT} \right) P \mu}{\lambda k} \ell$$

丙酮的熱傳導係數 $k=0.161$ (W/m-K)

由斜率計算得丙酮的熱光係數 $\frac{dn}{dT}$

分別為

$$C_1 = 1.5 \times 10^{-3} M \quad \frac{dn}{dT} = 6.4 \times 10^{-4}$$

$$C_2 = 0.58 \times 10^{-3} M \quad \frac{dn}{dT} = 6.3 \times 10^{-4}$$

$$C_3 = 0.86 \times 10^{-3} M \quad \frac{dn}{dT} = 6.4 \times 10^{-4}$$

和參考資料 [8] 所列丙酮的 $\frac{dn}{dT} = 5.9 \times 10^{-4}$ 多出 8.5%，判斷應該是本實驗測到是葉綠素-a 丙酮溶液的熱光係數，比丙酮的熱光係數大。

4. 圖 12 為:兩支比色管平行並立，分別盛 2ml 的 $C = 0.58 \times 10^{-3} M$ 葉綠素-a 丙酮溶液，左管以 100mW 的綠光雷射照射，右管以 100mW 的紅光雷射照射在 $L=560\text{cm}$ 處的屏幕上呈現繞射圖樣。葉綠素-a 丙酮溶液對波長 532nm 的綠光莫耳衰減係數 $\alpha = 7656\text{cm}^{-1}M^{-1}$ 對波長 670nm 的紅光的莫耳衰減係數 $\alpha = 12438\text{cm}^{-1}M^{-1}$ ，紅光的 $\mu_r = 10.7\text{cm}^{-1}$ ，綠光的 $\mu_g = 6.58\text{cm}^{-1}$ ，兩色光的 $\mu/\lambda=0.016/0.012$ ，由公式(6)

$R_m - R_0 = \frac{L \left(\frac{dn}{dT} \right) P \mu}{\lambda k} \ell$ 紅光的最大半徑 R_m 應該比綠光大；但圖 12 顯示紅光的最大半徑僅為綠光的 0.71 倍，判斷應該是紅光的莫耳衰減係數太大，只有靠近中央軸附近的光線才能穿過溶液。

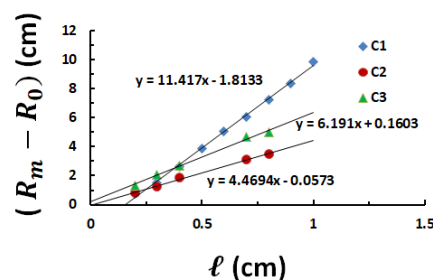


圖 11. 綠光雷射照葉綠素-a 丙酮溶液，繞射圖樣的最大半徑差($R_m - R_0$)隨光徑長度 ℓ 的變化。

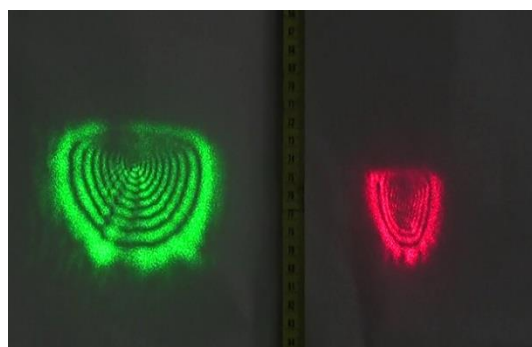


圖 12. 綠光雷射和紅光雷射照射相同濃度的葉綠素-a 丙酮溶液。

5. 濃度 $C = 0.58 \times 10^{-3} M$ 葉綠素-a

丙酮溶液，圖 13(a) 以 100mW 的紅光雷射照射，產生螢光--紅外線，使得比色管中左半部的溶液呈現暗紅色。圖 13(b) 以 100mW 的綠光雷射照射，產生螢光--紅外線紅光、橙光和黃光混合成橙紅色。圖 13(c) 以 100mW 的藍光雷射照射，產生螢光混合成白色。

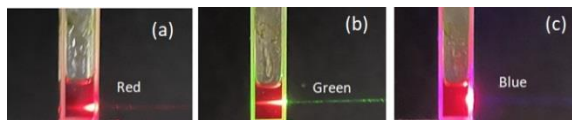


圖 13. 綠色的葉綠素-a 丙酮溶液以(a)紅光照射，溶液呈現紅光散射的紅色，(b)綠光照射，溶液呈現螢光橙紅色，(c)藍光照射，照射點附近溶液呈現螢光混合成白色。

6. S. Biswas(2017)〔6〕認為:葉綠素-a 具有大的非線性折射率歸因於其為不對稱性結構(asymmetrical structure)、分子重排(molecular orintation)和熱誘導的非線性(induced nonlinearity)。
7. 石墨烯(Graphene)的非線性折射率 $n_2 = 0.113 \times 10^{-10} m^2 W^{-1}$ 〔6〕; 本實驗測得 $C_1 = 1.5 \times 10^{-3} M$ 葉綠素-a 丙酮溶液的 $n_2 = 20.1 \times 10^{-10} m^2 W^{-1}$ ，為石墨烯的 178 倍。

三、測量葉綠素-b 的光學性質

(一)、三管萃取液含葉綠素-b 的濃度

1. 酪梨葉 4 g，經柱層分析按順序收集三管各 2 ml 的葉綠素-b 丙酮溶液。
2. 微量滴管吸取待測液，滴入圓柱管中，紀錄光感應器的讀數 I； Excell 做 $\ln \frac{I}{I_0}$ vs ℓ 關係圖。
3. 由關係圖和溶質的莫耳衰減係數 $\alpha = 5689 cm^{-1} M^{-1}$ ，計算得到三管的葉綠素-b 丙酮溶液的濃度分別為: $C_1 = 0.49 \times 10^{-3} M$ $A=2.78$ 、 $C_2 = 0.36 \times 10^{-3} M$ ， $A=2.04$ 和 $C_3 = 0.27 \times 10^{-3} M$ ， $A=1.53$ 。
4. 第三管葉綠素-b 丙酮溶液對綠光的吸光率太小，改用對波長 670nm 的紅光莫耳衰減係數 $\alpha = 12438 cm^{-1} M^{-1}$ ，三管的葉綠素-b 丙酮溶液的吸光率分別為: $A_1=6.09$ 、 $A_2=4.47$ 和 $A_3=3.35$ 。
5. 紅光雷射光筆的光點不是正圓形，而是接近橢圓狀。

(二)、最大半徑和暗紋數目隨光徑長度的變化

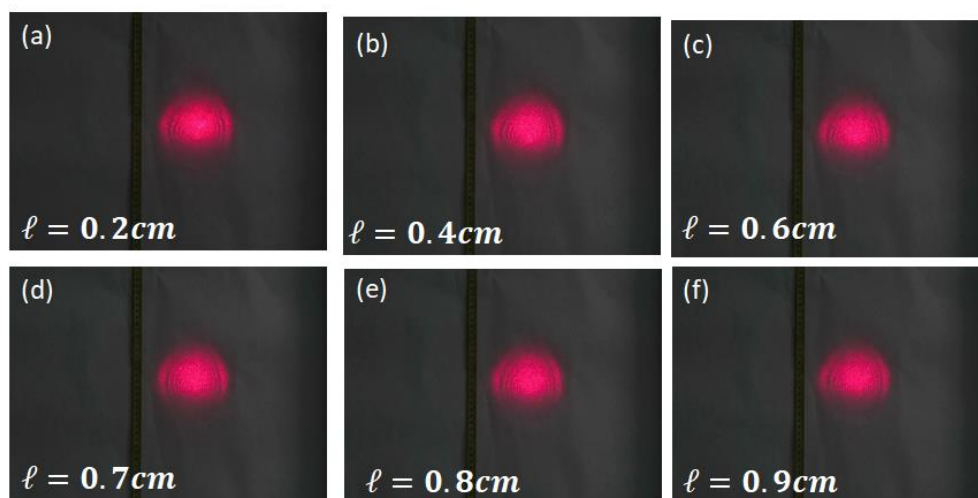


圖 14. 濃度 $C_3 = 0.27 \times 10^{-3} M$ 的葉綠素-b 丙酮溶液以紅光照射，繞射圖樣隨光徑長度的變化。

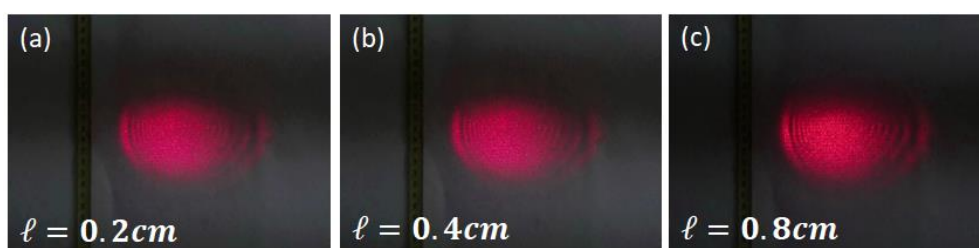


圖 15. 濃度 $C_1 = 0.49 \times 10^{-3} M$ 的葉綠素-b 丙酮溶液以紅光照射，繞射圖樣隨光徑長度的變化。

1. 圓柱管(截面積 2.0 cm^2)分別盛
 $C_1 = 0.49 \times 10^{-3} M$ 、
 $C_2 = 0.36 \times 10^{-3} M$ 和
 $C_3 = 0.27 \times 10^{-3} M$ 三種不同濃度的葉綠素-b 丙酮溶液 2ml，100mW 的紅光雷射由上向下照射，出射光經和平面呈 45 度的平面鏡反射到 $L=560 \text{ cm}$ 的屏幕處用微量滴管逐步吸掉 0.2ml。
2. 利用 Kmplayer 軟體，擷取照片，量取最大半徑(R_m)和暗紋數目(N)。Excell 做 $N \text{ vs } \ell$ 和 $R_m - R_0 \text{ vs } \ell$ 關係圖。

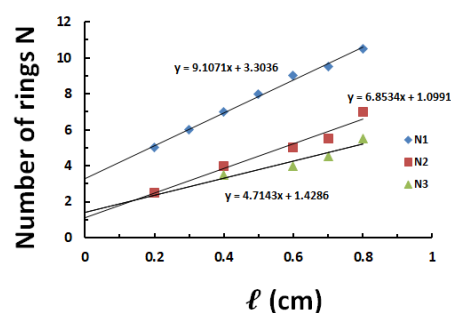


圖 16. 綠光雷射照葉綠素-b 丙酮溶液，繞射圖樣的暗紋數 N 隨光徑長度 ℓ 的變化。

2. 圖 16 為的繞射暗紋數目 N 隨光徑長度 ℓ 的變化。雷射光的波長 $\lambda = 670 \text{ nm}$ ，光束半徑 $w=0.35 \text{ mm}$ [9]，功率 $P=0.1 \text{ W}$ ，由公式(5)

$N = \frac{2n_2 P}{\lambda \pi w^2} \ell$ 擬合參數得到表二結果

表二: 不同濃度的葉綠素-b的非線性折射率 n_2

濃度	$n_2 (\times 10^{-10} m^2 W^{-1})$
$C_1 = 0.49 \times 10^{-3} M$	-12.0
$C_2 = 0.36 \times 10^{-3} M$	-9.0
$C_3 = 0.27 \times 10^{-3} M$	-6.2

3. 圖 17 繞射圖樣的最大半徑差 $(R_m - R_0)$ 隨光徑長度 ℓ 的變化。
由公式(6)

$$R_m - R_0 = \frac{L \left(\frac{dn}{dT} \right) P \mu}{\lambda k} \ell$$

丙酮的熱傳導係數 $k=0.161$ (W/m-K)

由斜率計算得丙酮的熱光係數 $\frac{dn}{dT}$

分別為

$$C_1 = 0.49 \times 10^{-3} M \quad \frac{dn}{dT} = 5.8 \times 10^{-4}$$

$$C_2 = 0.36 \times 10^{-3} M \quad \frac{dn}{dT} = 6.0 \times 10^{-4}$$

$$C_3 = 0.27 \times 10^{-3} M \quad \frac{dn}{dT} = 6.0 \times 10^{-4}$$

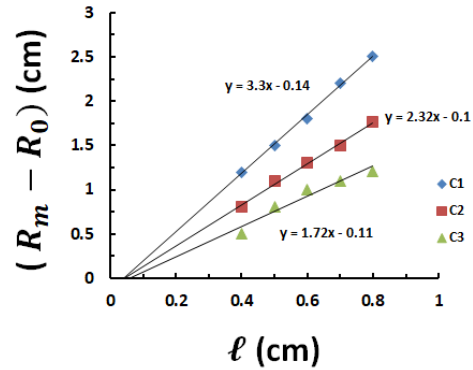


圖 17.紅光雷射照葉綠素-b 丙酮溶液，繞射圖樣的最大半徑差 $(R_m - R_0)$ 隨光徑長度 ℓ 的變化。

和參考資料〔8〕所列丙酮的 $\frac{dn}{dT} = 5.9 \times 10^{-4}$ 多出 5.65%，判斷應該是本實驗測到

是葉綠素-b 丙酮溶液的熱光係數，比丙酮的熱光係數大；但是由於葉綠素-b 丙酮溶液濃度比葉綠素-a 丙酮溶液濃度小，所以和參考資料的差值較小。

4. S. Biswas(2017)〔6〕認為:葉綠素-b 和葉綠素-a 結構類似，基本結構是一個卟啉 (porphyrin ring)環，與中心的鎂原子配位。不同之處在於它含有一個稍微修飾的側鏈，即將甲基 (CH₃) 替換為醛基 (CHO)。這些修飾使這兩種葉綠素能夠作為有效的光受體(effective photo receptor)。兩者都有很大的非線性折射率，本實驗方法萃取出的葉綠素-a 濃度大，非線性折射率較大。

四、測量類胡蘿蔔素的非線性折射率

(一)、三管萃取液含類胡蘿蔔素的濃度

1. 酪梨葉 4 g，經柱層分析按順序收集三管各 2 ml 的類胡蘿蔔素己烷溶液。
2. 微量滴管吸取待測液，滴入圓柱管中，用 440nm 的藍光照射，紀錄光感應器的讀數 I ；Excell 做 $\ln \frac{I}{I_0}$ vs ℓ 關係圖。
3. 由關係圖和溶質的莫耳衰減係數 $\alpha = 22324 \text{ cm}^{-1} \text{ M}^{-1}$ ，計算得到三管的類胡蘿蔔素己烷溶液的濃度分別為: $C_1 = 7.9 \times 10^{-5} \text{ M}$ 、 $C_2 = 4.0 \times 10^{-5} \text{ M}$ ，和 $C_3 = 1.9 \times 10^{-5} \text{ M}$ 。
4. 本實驗得到的淡黃色的類胡蘿蔔素己烷溶液濃度很小，要用藍光照射才會產生有足夠的折射率梯度，形成繞射圖樣。
5. 藍光雷射光筆的光點不是正圓形，無法量取最大半徑。

(二)、暗紋數目隨光徑長度的變化

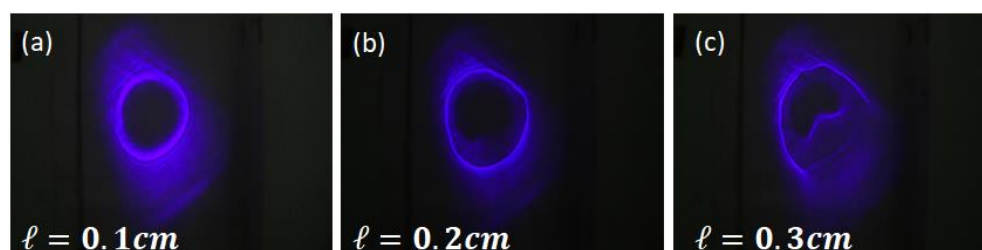


圖 18. 濃度 $C_1 = 7.9 \times 10^{-5} \text{ M}$ 的類胡蘿蔔素己烷溶液以藍光照射，繞射圖樣隨光徑長度的變化。

1. 比色管(截面積 1.0 cm^2)固定在鐵架上，120mW 的藍光雷射由上向下照射，射出光經和平面呈 45 度的平面鏡反射到 $L=560 \text{ cm}$ 屏幕處；用微量滴管逐步滴入 0.1ml 濃度 $C_1 = 7.9 \times 10^{-5} \text{ M}$ 的類胡蘿蔔素己烷溶液。
2. 利用 Kmplayer 軟體，擷取照片，如圖 18 所示:
 - (1) 第一亮帶的面積隨著光徑長度的增大而增大。
 - (2) 第一亮帶內的暗紋太密集，無法算出暗紋數目，形成一片黑暗。
3. 藍光經厚度 1mm 的類胡蘿蔔素己烷薄膜，因繞射而類似光未穿過；類胡蘿蔔素己烷薄膜可用來過濾光，成為光學開關應用的理想材料，鍍到眼鏡片上，可防止藍光損壞眼睛造成黃斑部病變。

(三)、暗紋數目隨雷射光功率的變化

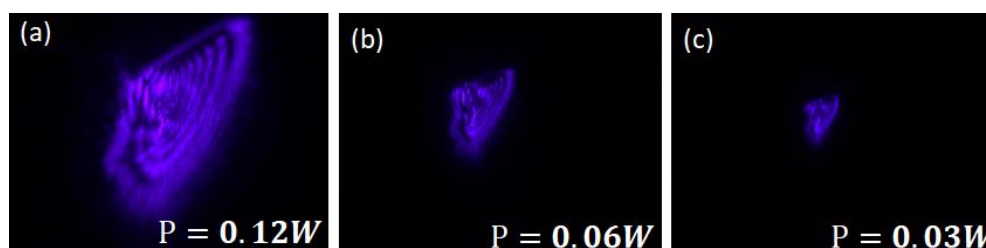


圖 19.濃度 $C_3 = 4.0 \times 10^{-5}M$ 的類胡蘿蔔素己烷溶液以藍光照射，繞射圖樣隨照射光功率的變化。

1. 比色管盛濃度分別為:

$$C_2 = 4.0 \times 10^{-5}M,$$

和 $C_3 = 1.9 \times 10^{-5}M$ 。類胡蘿蔔素

己烷溶液，藍光雷射照射比色管；利用起偏器改變照射光的功率。

2. 圖 19 為濃度 $C_3 = 4.0 \times 10^{-5}M$ 的類胡蘿蔔素己烷溶液以藍光照射，繞射圖樣隨照射光功率的變化。
3. 圖 20 繞射圖樣的暗紋數 N 隨照射光功率的變化。雷射光的波長 $\lambda = 440nm$ ，光束半徑 $w=0.35mm$ ，光徑長度 $\ell = 1.0cm$ ，由公式(5)

$$N = \frac{2n_2\ell}{\lambda\pi w^2}P \quad \text{擬合參數得到表三結果}$$

表三: 不同濃度的類胡蘿蔔素的非線性折射率 n_2

濃度	$n_2(\times 10^{-10}m^2W^{-1})$
$C_2 = 4.0 \times 10^{-5}M$	-19.7
$C_3 = 1.9 \times 10^{-5}M$	-8.27

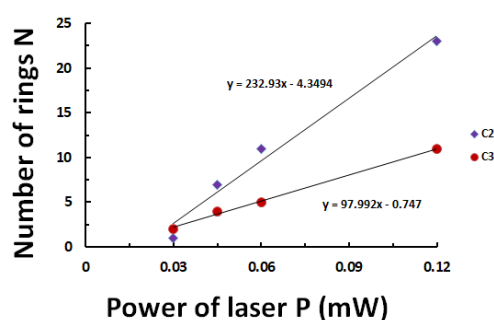


圖 20.藍光雷射照射類胡蘿蔔素己烷溶液繞射圖樣的暗紋數 N 隨照射光功率的變化。

4. K. Bouchouit (2010) [4] 認為: 類胡蘿蔔素的分子結構呈現出施體-p-受體形式 (donor-p-acceptor form)，這使它們在光電子應用中成為非常有前景的候選材料。

肆、結論

本實驗利用低功率雷射和簡單的組裝器材：

1. 從酪梨葉萃取葉綠素-a、葉綠素-b 和類胡蘿蔔素。
2. 雷射光通過高熱吸收率的透明液體，使液體產生溫度梯度和折射率梯度，在屏上出現繞射圖樣。
3. 由繞射圖樣的最大半徑可計算得到溶劑的熱光係數。
4. 由繞射圖樣的暗紋數目隨光徑長度的變化可計算得到溶液的非線性折射率。
5. 由繞射圖樣的暗紋數目隨入射光功率的變化也可計算得到溶液的非線性折射率。
6. 測量得到的葉綠素-a、葉綠素-b 和類胡蘿蔔素的非線性折射率，高於石墨烯百倍以上。

伍、參考資料

1. 吳子謙、張夏睿， 高斯光束照射橄欖油產生繞射的研究，中華民國第 62 屆科學展覽會歷屆參展作品物理與天文科。 www.ntsec.gov.tw
2. 吳子謙、張夏睿， Studies of spatial self-phase modulation of the laser beam Passing through the olive oil，2023 年臺灣國際科學展覽會歷屆參展作品物理與天文科。 www.ntsec.gov.tw
3. Tzu-Chien Wu and Hsia-Jui Chang， Precision detections of chlorophyll-a in olive oil，土耳其音樂科學工程博覽會 (Buca IMSEF) (2024)。
4. K. Bouchouit and B. Derkowska, 2010, *Dyes and Pigments*, **86**, 161-165。
5. B. Kouissa and K. Bouchouit, 2013, *Optics Communications*, **293**, 75-79。
6. S. Biswas and P. Kumbhakar, 2017, *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2017, **173**, 400-406。
7. S. Jeyaram and T. Geethakrishnan, 2020, *Optical Materials*, **107**, 110148。
8. M. Taniguchi 2018 *Photochem. Photobio.* **94** 290-327.
9. P. Yang, and J. Liu, 2017, *European Journal of Physics*, **38**, 025302.

【評語】 160015

本作品建構於過去以雷射光照射橄欖油和酪梨油產生繞射現象的研究基礎，此次從酪梨葉利用柱層分析技術萃取出葉綠素- α 、葉綠素- β 、以及類胡蘿蔔素，進一步研究其物理性質，尤其是對其非線性折射率之測量做更精細的定量分析。本題目已有相對多背景可參考，研究成果亦相當紮實。技術上雖未見真正創新之處，但觀察到酪梨葉萃取液的 n_2 值比石墨烯大 100 倍，有一定的應用潛力。