

# 2021 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

- 作品編號** 160008
- 參展科別** 物理與天文學
- 作品名稱** Nonlinear thermal diffusion dynamics  
measured using a simple light-transmission  
method
- 得獎獎項** 大會獎 一等獎  
美國 ISEF 正選代表
- 就讀學校** 國立嘉義高級中學
- 指導教師** 李文堂、林芳妃
- 作者姓名** 羅宇佑
- 關鍵詞** 熱擴散率、溫度梯度、折射率梯度

## 作者簡介



我是羅宇佑，就讀於國立嘉義高中科學班，有幸受到了李文堂老師和林芳妃老師的教導，不僅在物理上得到了很大的進步，對參加科展也產生了濃厚的興趣，在兩位老師的指導之下，參加臺灣國際科展。

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，在不斷的自我修正以及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。

## 摘要

方形盒盛透明液體，置放在冷源上方，液體發生熱擴散時，溫度由上往下逐漸下降，形成溫度梯度以及折射率梯度。雷射光照射和鉛直線成一定角度的玻璃透鏡，再穿過方形盒的透明液體時，在屏上形成斜直線，經一段時間的熱擴散後，變成曲線；曲線和斜直線的距離(h)，隨著時間(t)以及光線照射的位置(y)改變，作不同 y 的 h-t 圖可得知液體的熱擴散率狀況。

冷源的溫度 0°C，分別用甘油和乙醇作待測液，得到的 h-t 圖，符合熱擴散推導出的 h 隨 t 改變的方程式；改用水當待測液，得到的 h-t 圖，就不符合熱擴散推導出的 h 隨 t 改變的方程式。改用 -5°C 的冷源，分別用水和氯化鈉水溶液作待測液，得到的 h-t 圖，不符合熱擴散推導出的 h 隨 t 改變的方程式。

用簡易的設備可以了解折射率梯度，溫度梯度，熱擴散率，以及液體的非線性熱擴散。

## Abstract

Refractive index of a liquid is known to depend strongly on the temperature gradient of liquids. When a laser beam is directed onto a glass rod, which then passes through a liquid going through thermal diffusion, the light projected onto a screen will show an oblique line that turns into a curved line in relation to the thermal diffusivity. A simple apparatus is used to measure the laser profile on the screen in relation to time. By measuring the time evolution (t) of the laser profile in relation to the distance between the curve and the oblique line (h) and the position of the laser beam on the liquid container going through thermal diffusion (y), the thermal diffusion dynamics can then be revealed.

The thermal diffusion of water, glycerol, ethanol, and NaCl aqueous solution are studied. The acrylic container contains a transparent liquid and is placed above the cold source. The liquid goes through thermal diffusion, and the temperature gradually decreases from bottom to top, forming a temperature gradient and a refractive index gradient of the liquid. When the laser beam passes through a glass rod at a certain angle, and then passes through the transparent liquid of the container, an oblique line is formed on the screen. After a period of thermal diffusion, it becomes a curve. The distance between the curve and the oblique line (h) changes with the time (t) and the position of the laser beam on the container (y). The chart of (h-t) in relation to (y) can be used to know the thermal diffusivity of the liquid.

Glycerol, ethanol, and NaCl aqueous solution all follow the Thermal Diffusion Law when the cold source is 0° C. Only water does not follow Thermal Diffusion Law at 0°C. When the cold source is switched to -5°C, water and NaCl aqueous solution both exhibit nonlinear characteristics. By using simple equipment, further understanding of the refractive index gradient, temperature gradient, thermal diffusivity, and nonlinear thermal diffusion dynamics of liquids is possible.

## 壹、研究動機

查閱 2010 年臺灣國際科展作品「利用雷射光的偏折測量擴散係數」〔1〕，想到用相似器材，來研究透明液體的熱擴散。

## 貳、研究目的

- 一、實驗探討冰水做冷源(0°C)，透明液體的熱擴散。
- 二、實驗探討冰水加氯化鈉做冷源(-5°C)，透明液體的熱擴散。

## 參、原理

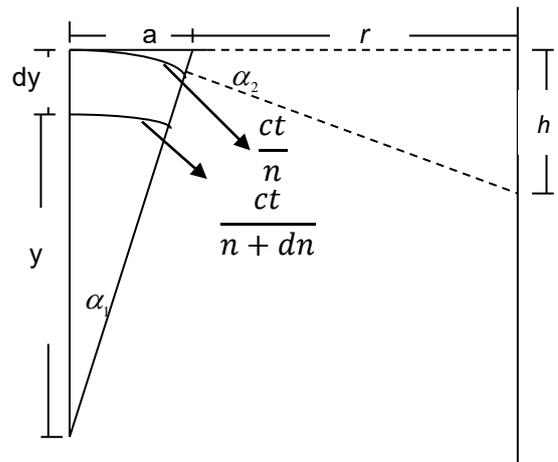
### 一、光束穿過有折射率梯度的透明液體的偏折

方形盒寬度  $a$ ，盛有液體，溶質折射率由下向上漸減，距底部  $y$  及  $y+dy$  處，折射率分別為  $n+dn$  及  $n$ 。

圖一所示

$$\alpha_1 = \frac{ct/(n+dn)}{y} = \frac{ct/n}{y+dy} \rightarrow \frac{dn}{dy} = \frac{n}{y} = \frac{h}{ar} \dots (1)$$

$c$ ：真空中的光速， $t$ ：時間。



圖一：雷射光穿過有折射率梯度透明液，產生偏折。

### 二、熱擴散

$$\text{傅立葉定律} \frac{dQ}{dt} = -kA \frac{dT}{dy} \dots (2)$$

$\frac{dQ}{dt}$ :熱傳導功率， $\frac{dT}{dy}$ :溫度梯度， $k$ :熱導率

熱擴散公式(Thermal diffusion equation)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \dots (3) \quad T:\text{溫度}, t:\text{時間},$$

熱擴散係數(Thermal diffusivity) $D = \frac{k}{\rho c_p}$   $\rho$ :密度， $c_p$ :定壓比熱

### 三、光束照射透明液體

方型盒盛液體高度  $H$ ，光束照射距離冷源  $y$  處，在距離盒  $r$  的屏上偏移  $h$

$$h = -\frac{dn}{dy} ar = -ar \frac{dn}{dT} \frac{dT}{dy} \dots (4)$$

$\frac{dn}{dT}$  : 折射率隨溫度的變化，通常溫度愈高折射率愈小，所以取負號。

公式(3)處理後 [2]

$$\frac{\partial T}{\partial y} = \sum_{p=0}^{\infty} \frac{2(T_a - T_0)}{H} \cos \left[ \left( p + \frac{1}{2} \right) \pi y / H \right] \times \exp \left[ - \left( p + \frac{1}{2} \right)^2 \pi^2 D t / H^2 \right] \dots (5)$$

$$h = -ar \left( \frac{dn}{dT} \right) \sum_{p=0}^{\infty} \frac{2(T_a - T_0)}{H} \cos \left[ \left( p + \frac{1}{2} \right) \pi y / H \right] \exp \left[ - \left( p + \frac{1}{2} \right)^2 \pi^2 D t / H^2 \right] \dots (6)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -ar \left( \frac{dn}{dT} \right) \sum_{p=0}^{\infty} \frac{2(T_a - T_0)}{H^3} \left( p + \frac{1}{2} \right)^2 \pi^2 D \cos \left[ \left( p + \frac{1}{2} \right) \pi y / H \right] \exp \left[ - \left( p + \frac{1}{2} \right)^2 \pi^2 D t / H^2 \right] \dots (7)$$

## 肆、實驗裝置

### 一、冷源

1. 壓克力製方形盒，長 30cm，寬 24cm，高 7.6cm。
2. 銅塊長 16cm，寬 10cm，高 3.5cm，二塊重疊。
3. 放入冰塊、水和食鹽(重量比

10:3:1)，銅塊頂部的溫度(0 ± 0.5)°C 可維持 1 小時。

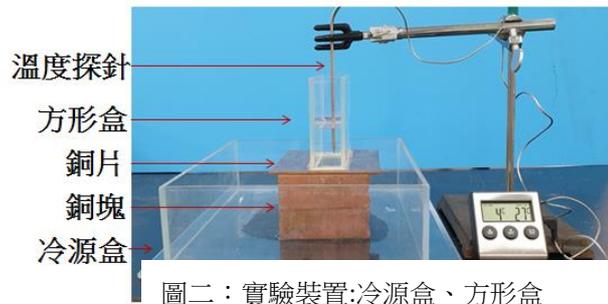
4. 放入冰塊、水和食鹽 10:1:3)，銅塊頂部的溫度(-5 ± 0.5)°C，可維持半小時。

### 二、方形盒

銅片長 16cm，寬 12cm，厚 0.30cm，上方用矽膠黏著壓克力片形成方形盒，盒的內部長 a=11.25cm，寬 3.0cm，高 9.0cm。

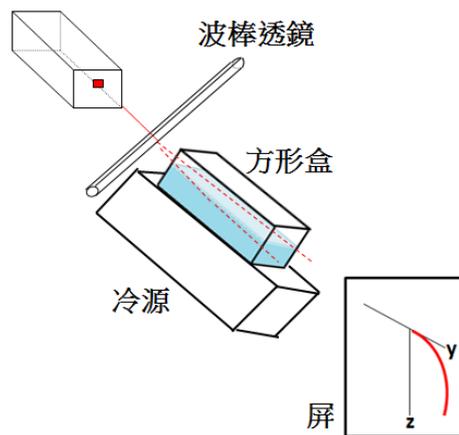
### 三、其他器材

1. 氦氖雷射(0.5mW)，玻棒透鏡，攝影機，Kmplayer 軟體。
2. 甘油，乙醇，水，2m 氯化鈉水溶液和探針式溫度計。



圖二：實驗裝置:冷源盒、方形盒和探針式溫度計。

### He-Ne雷射



圖四：實驗裝置示意圖。

## 伍、實驗步驟

### 一、改變光線的照射位置(y)

1. 玻璃透鏡鉛直置放在雷射光出口處，形成水平光束，照射距盒底  $y=1.865\text{cm}$  處。
2. 冷源放入冰水，盒盛入  $H=4.45\text{cm}$  的甘油。
3. 打開攝影機，將盒放到冷源的銅塊上，量取環境溫度( $T_a$ )和盒底溫度( $T_0$ )。
4. 雷射光點的位置(z)不再有變化時，停止錄影，影片輸入電腦，用 Kmpayer 播放、截圖、分析圖片。
5. 改照射距盒底  $y=1.00\text{cm}$  處，重做上述實驗。

### 二、斜線光線照射盒的不同位置(y 不同)

1. 玻璃透鏡和鉛直成一個角度置放在雷射光出口處，形成斜線光束，照射距盒底  $y=0.50\text{cm}$  至  $y=2.50\text{cm}$  處。
2. 冷源放入冰水，盒盛入  $H=4.45\text{cm}$  的乙醇。
3. 重做上述實驗步驟一的 3 至 4 的實驗。

### 三、點光源照射水(冷源:0°C)

1. 雷射光照射盒的中央距離盒底  $y=1.45\text{cm}$  處。
2. 冷源放入冰水，盒盛入  $H=4.45\text{cm}$  的水。
3. 探針式溫度計的探針頂點至於  $y=1.45\text{cm}$  處。
4. 打開攝影機，將盒放到冷源的銅塊上，量取環境溫度( $T_a$ )和盒底溫度( $T_0$ )。
5. 雷射光點的位置(z)不再有變化時，停止錄影，影片輸入電腦，用 Kmpayer 播放、截圖、分析圖片。
6. 雷射光改照射盒的中央距離盒底  $y=1.20\text{cm}$  處，重做上述實驗。
7. 雷射光改照射盒的中央距離盒底  $y=1.00\text{cm}$  處，重做上述實驗。
8. 盒改盛濃度  $2\text{m}$  的氯化鈉水溶液，雷射光照射  $y=1.20\text{cm}$  處，重做上述實驗。

### 四、點光源照射水(冷源-5°C)

1. 盒盛入  $H=4.45\text{cm}$  的水雷射光照射盒  $y=1.20\text{cm}$  處，重做上述實驗。
2. 盒改盛濃度  $2\text{m}$  的氯化鈉水溶液，雷射光照射  $y=1.20\text{cm}$  處，重做上述實驗。
3. 雷射光最大偏折時，用探針式溫度計量取雷射光照射點的液體溫度。

## 陸、結果與討論

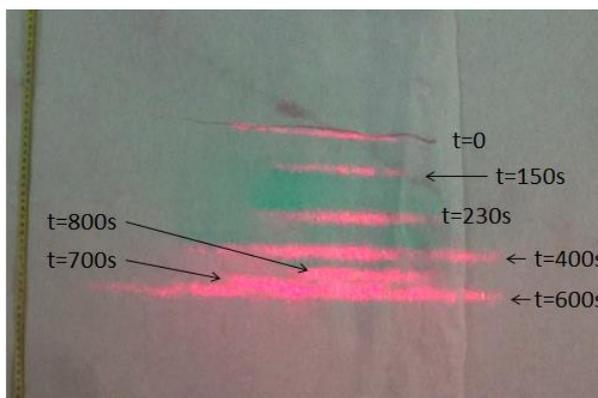
本實驗所用方形盒的壓克力部分厚度0.50cm，盒的內部長 $a=11.25\text{cm}$ ，寬3.0cm，高9.0cm；盒到屏的距離的距離 $r=578\text{cm}$ ；盒內液體的高度均為 $H=4.45\text{cm}$ 。雷射光的偏折位移 $h$

$$h = -ar\left(\frac{dn}{dT}\right) \sum_{p=0}^{\infty} \frac{2(T_a - T_0)}{H} \cos\left[\left(p + \frac{1}{2}\right)\pi y/H\right] \exp\left[-\left(p + \frac{1}{2}\right)^2 \pi^2 Dt/H^2\right] \dots (5)$$

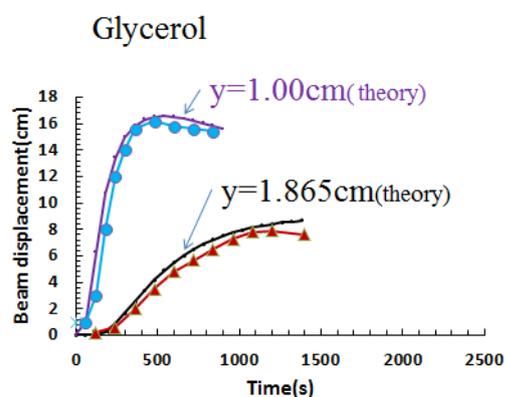
### 一、改變光線的照射位置(y)

- 雷射光通過鉛直豎立的玻棒透鏡後形成水平光束。方形盒盛甘油，置放在 $0^\circ\text{C}$ 的冷源上( $T_0 = 0^\circ\text{C}$ )，環境溫度為 $T_a = 22.0^\circ\text{C}$ 。

- 雷射光束照距盒底 $y=1.00\text{cm}$ 處，由於甘油底層接觸到冷原處溫度為 $0^\circ\text{C}$ ，最頂端溫度 $22.0^\circ\text{C}$ ，甘油溫度隨高度漸增，形成溫度梯度 $\frac{dT}{dy}$ 及折射率梯度 $\frac{dn}{dy}$ 。光束上端甘油的溫度高，折射率小，光速比下端大，所以光束向下偏折。



圖五：水平光線穿過甘油 $y=1.00\text{cm}$ ，位置隨時間的變化。



圖六：水平光線穿過甘油，位置隨時間的變化。

- 圖五為水平光束穿過甘油( $y=1.00\text{cm}$ )產生偏折的錄影片的截圖的疊圖，(1)水平光束向下偏折時呈現，平行狀態下移，偏折位移( $h$ )極大時(溫度梯度最大)，光束變粗且較淡，接著又因溫度梯度偏折位移( $h$ )變小光束又變細，(2) $t=400\text{s}$ 時，盒壁高 $1\text{cm}$ 處的溫度低於盒中央處的甘油溫度，形成水平方向有折射率梯度，光束的長度增大(3) $t=600\text{s}$ 偏折位移( $h$ )極大(溫度梯度最大)光束的長度也最大。

(4) $t=700s$  以後光束偏折位移變小，(5)由公式(3)知光束的偏折位移(h)和溫度梯度 $\frac{dT}{dy}$ 成正比，而不是和溫度 T 成正比；待測液和冷源剛接觸時，熱梯度=0，接著在底部產生很大的熱度梯度，當熱流向時，熱梯度向上熱擴散，當冷鋒抵達  $y=1.00cm$  處，光束的下緣碰觸低溫，上緣溫度較高，光束因很大的溫度梯度而變得很粗；接著，上緣冷鋒通過，熱擴散減少，光束變細，且偏折位移變小。(6)冷鋒比較快抵達  $y=1.00cm$  處，所以在較短的時間內光束的偏折位移(h)達到極大值。

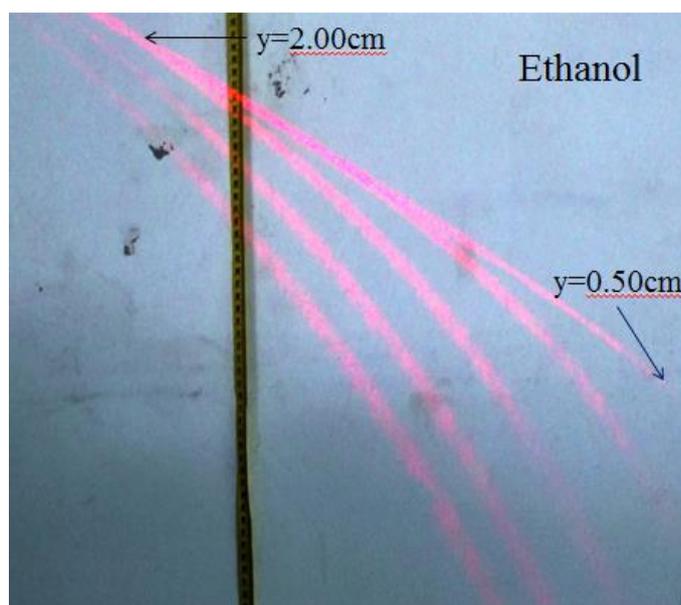
5. 甘油熱擴散率  $D = 9.4 \times 10^{-4} cm^2 s^{-1}$ ，折射率梯度  $\frac{dn}{dy} = -2.9 \times 10^{-4} cm^{-1}$  [ 3 ]

冷源溫度  $T_0 = 273K$ ，環境溫度  $T_a = 295K$ ，雷射光照射的位置為  $y=1.00cm$ ；將這些數值代入公式(5)，用 excel 作光線位移(h)對時間(t)關係圖如圖六所示。

6. 在截圖上量取不同時間(t)下光束的位移(h)，做 h-t 圖，如圖六所示。
7. 改用雷射光照射的位置為  $y=1.865cm$  的截圖取得的 h, t 數據，如圖六所示。
8. 兩個不同的照射高度的光束偏折(h)實驗結果都比理論值小，主要原因為:方形盒底部為 3mm 厚的銅片，放置在  $0^\circ C$  的冷源上方時，需要一段時間才達  $0^\circ C$ ，但是，在未達  $0^\circ C$  前，甘油已經有溫度梯度，光束已經開始向下偏移，偏移量較小，使得整個實驗結果都比理論值小。後面的實驗也都有類似狀況。

## 二、斜線光線照射盒的不同位置(y 不同)

1. 雷射光通過斜置玻璃棒透鏡後形成斜直線光束，照射到盒的位置:下端  $y=0.50cm$ ，上端  $y=2.50cm$ 。方形盒盛乙醇，置放在  $0^\circ C$  的冷源上( $T_0 = 0^\circ C$ )，環境溫度為  $T_a = 22.0^\circ C$ 。
2. 圖七為斜線光束穿過乙醇產生偏折的錄影片的截圖的疊圖，每隔 300 秒截取一張圖片，疊合而成。(1)斜線光束向下偏折時  $y=0.50cm$  處，偏折 600 秒後，取不到數據；

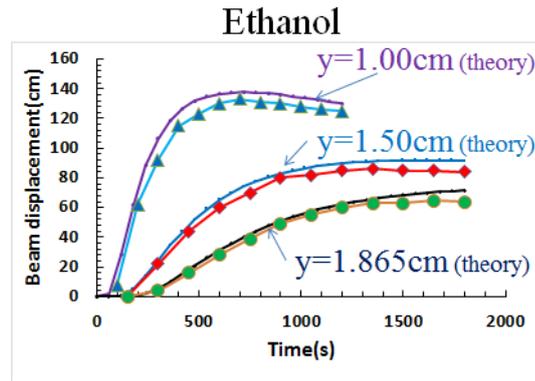


圖七：光束斜線穿過乙醇，位置隨時間的變化。

$y > 2.00\text{cm}$  光束偏折位移太小，(2)取  $y=1.00\text{cm}$ ， $1.50\text{cm}$  和  $1.865\text{cm}$  三個不同位置，量取偏向位移( $h$ )，隨時間( $t$ )的變化如圖八。

3. 乙醇  $D = 7.0 \times 10^{-4} \text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ ，  
 $\frac{dn}{dy} = -3.98 \times 10^{-4} \text{cm}^{-1}$

冷源溫度  $T_0 = 273\text{K}$ ，環境溫度  $T_a = 295\text{K}$ ，雷射光照射的



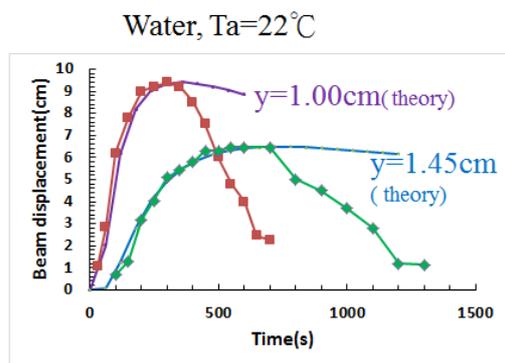
圖八：光線穿過乙醇，位置隨時間的變化。

位置  $y=1.00\text{cm}$ ， $1.50\text{cm}$  和  $1.865\text{cm}$ ；將這些數值代入公式(4)，用 excel 作光線位移( $h$ )對時間( $t$ )關係圖如圖八所示。

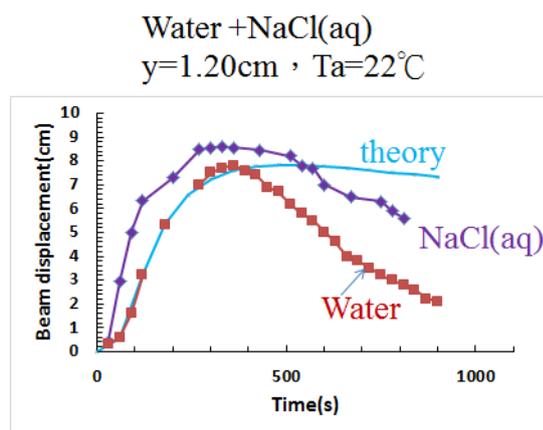
4. 雷射光照射的位置  $y=1.00\text{cm}$  的理論值比實驗值大很多，因為：圖一中盒到屏的距離  $r=578\text{cm}$ ，實驗結果的最大偏移量  $h=126\text{cm}$ ， $\tan\alpha_2 = \frac{126}{578}$ ， $\alpha_2 = 12.3^\circ$  司乃耳定律  $n\sin\alpha_1 = \sin\alpha_2$   $\alpha \leq 5^\circ$ 時，可簡化成  $n\alpha_1 = \alpha_2$ ，據此推導得到公式(1)，實驗值  $\alpha_2 = 12.3^\circ$ ，使得理論值偏大。
5. 雷射光照射的位置  $y=1.50\text{cm}$  最大偏移量  $h=80\text{cm}$ ， $\tan\alpha_2 = \frac{80}{578}$ ， $\alpha_2 = 7.8^\circ$  使得理論值亦偏大。
6. 雷射光照射的位置  $y=1.865\text{cm}$  最大偏移量  $h=58\text{cm}$ ， $\tan\alpha_2 = \frac{58}{578}$ ， $\alpha_2 = 5.7^\circ$

理論值就較為準確。方形盒底部為  $3\text{mm}$  厚的銅片，放置在  $0^\circ\text{C}$  的冷源上方時，需要一段時間才達  $0^\circ\text{C}$ ，但是，在未達  $0^\circ\text{C}$  前，甘油已經有溫度梯度，光束已經開始向下偏移，偏移量較小，使得實驗結果都比理論值小。

### 三、點光源照射水(冷源:0°C)



圖九：光線穿過水，位置隨時間的變化。

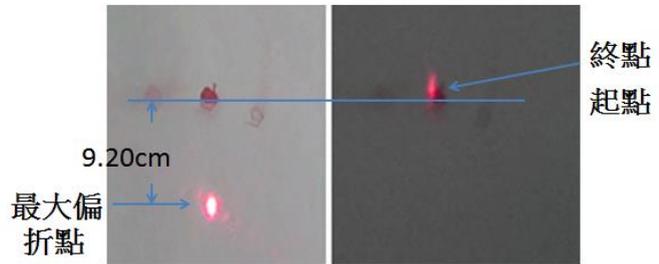


圖十：光線穿過水和 2m 氯化鈉水溶液偏折位置隨時間的變化。

1. 先用斜線光束照射盒找出適當的照射位置，改用點光源實驗。
2. 雷射光點穿過裝水的方形盒，置放在  $0^\circ\text{C}$  的冷源上 ( $T_0 = 0^\circ\text{C}$ )，環境溫度為  $T_a = 22.0^\circ\text{C}$ 。水  $D = 14.3 \times 10^{-4} \text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ ， $\frac{dn}{dy} = -1.36 \times 10^{-4} \text{cm}^{-1}$   
雷射光照射的位置  $y=1.00\text{cm}$ ， $1.20\text{cm}$  和  $1.45\text{cm}$ ；將這些數值代入公式 (4)，用 excel 作光線位移(h)對時間(t)關係圖如圖九所示。
3. 在截圖上量取不同時間(t)下光束的位移(h)，做 h-t 圖，如圖九所示。
4. 雷射光點穿過裝 2m 的氯化鈉水溶液的方形盒，置放在  $0^\circ\text{C}$  的冷源上 ( $T_0 = 0^\circ\text{C}$ )，環境溫度為  $T_a = 22.0^\circ\text{C}$ 。雷射光照射的位置  $y=1.20\text{cm}$ ，在截圖上量取不同時間(t)下光束的位移(h)，做 h-t 圖，如圖十所示
5. 圖九:雷射光穿過水時，理論曲線和雷射光穿過甘油、乙醇類似，都是偏折位移漸增到極大值後，略為減少，然後趨近於沒有變化；但是，實際實驗結果，雷射光穿過水後，偏折位移到極大值後，大幅度的減少，幾乎快回到原照射點。
6. 雷射光最大偏折時，用探針式溫度計量取雷射光照射點的水溫= $5^\circ\text{C}$ ，冷鋒再上升時，折射率梯度變小，雷射光的偏折量(h)變小；水溫低於  $4^\circ\text{C}$  後，折射率梯度反向，換言之，光束底部較低溫處水的折射率小，光束較快，所以向上偏折。
7. 圖十:雷射光穿過濃度 2m 的氯化鈉水溶液時，折射偏折大於雷射光穿過水，判斷其折射率梯度或熱擴散率比水大；偏折位移到極大值後，也大幅度的減少(減少量比水小)。

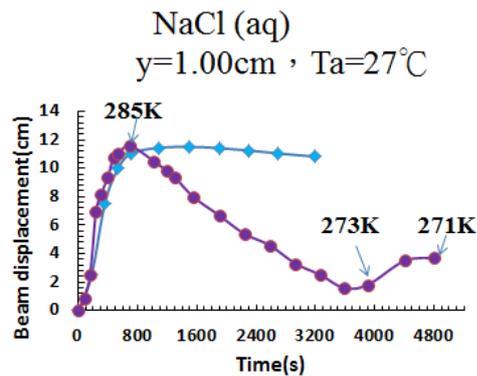
#### 四、點光源照射水(冷源-5°C)

1. 雷射光點穿過裝水的方形盒，置放在-5°C的冷源上 ( $T_0 = -5^\circ\text{C}$ )，環境溫度為  $T_a = 22.0^\circ\text{C}$ 。雷射光照射的位置  $y=1.20\text{cm}$ ，利用公式(4)做出的理論值曲線：在時間  $t=540\text{s}$  雷射光的偏向位移  $h=9.58\text{cm}$  達極大值， $t=900\text{s}$  的  $h$  減少為  $8.94\text{cm}$ (僅  $0.64\text{cm}$ )，接著  $h$  幾乎沒變化。



圖十一：雷射光點的位置:(左)由起點開始，向下偏移，(右)由最大偏折點上移到終點。

2. 用水做實驗，實驗的結果： $t=480\text{s}$  雷射光向下的偏向位移  $h=9.20\text{cm}$  達極大值，接著  $h$  大幅度的減少，在  $t=1400\text{s}$  的  $h$  減少為  $0$ (即光點偏移到起始點處)，在  $t=1700\text{s}$  的  $h$  減少為  $-2.22\text{cm}$  的終點(光點偏移到起始點上方  $2.22\text{cm}$  處)。探針溫度計測量盒中的水  $y=1.20\text{cm}$  的溫度變化： $t=540\text{s}$ (雷射光的偏向位達極大值)的水溫  $T=4.8^\circ\text{C}$ ； $t=1400\text{s}$  起點)水溫  $T=4.8^\circ\text{C}$ ； $t=1700\text{s}$  的  $h=-2.22\text{cm}$ ，光點偏移到終點，水溫  $T=0^\circ\text{C}$ 。實驗結果和理論值相去甚遠。



圖十二：光線穿過水和 2m 氯化鈉水溶液，偏折位移隨時間的變化。

3. 用 2m 的氯化鈉水溶液(凝固點-3.86°C)做實驗，實驗的結果： $t=560\text{s}$  雷射光向下的偏向位移  $h=10.4\text{cm}$  達極大值( $T=4.2^\circ\text{C}$ )，接著  $h$  減少，在  $t=1300\text{s}$  的  $h$  減少為  $4.00\text{cm}$ ( $T=0.4^\circ\text{C}$ )，接著，光點向上， $t=2100\text{s}$  偏向位移  $h=7.31\text{cm}$ ( $T=-2.1^\circ\text{C}$ )。氯化鈉水溶液滴降溫到接近  $0^\circ\text{C}$  時，水溶液的物理性質會改變，改變成濃稠層(mush layer) [ 4, 5 ]，濃稠層的折射率大於原來的氯化鈉水溶液，而且有多孔性(porous)及高滲透性，會有對流(mass convection)現象。在  $t=1300\text{s}$ ， $T=0.4^\circ\text{C}$  雷射光已進入濃稠層，熱擴散率以及折射率梯度都和原來的氯化鈉水溶液不同，光點向上偏移。

## 柒、結論

- 1.本實驗利用很簡單的器材以及光的折射現象可以了解熱擴散現象。
- 2.在溫度介於 0 至 22°C 間，甘油和乙醇的熱擴散率為定值。
- 3.水和氯化鈉水溶液熱擴散率隨著溫度和狀態改變。

## 捌、參考資料

1. 黃宇晟：「簡易方法測量擴散係數」，2010 臺灣國際科學展覽會，科展作品專輯高中物理科 [www.ntsec.gov.tw](http://www.ntsec.gov.tw)
2. Brody, Andreae, and Robinson, *Am. J. Phys.*, Vol. 78, No. 5, May 2010
3. J. Sun and T. F. Irvine, Jr., *Int. J. Heat Mass Transfer* **44**, 645–57 2001.
4. Chung, C.A. and Worster, M.G. *J. Fluid Mech.* 455,
5. 宋冠霖，陳冠任：「液滴凝成奇異形狀的研究」，2016 臺灣國際科學展覽會，科展作品專輯物理與天文學科 [www.ntsec.gov.tw](http://www.ntsec.gov.tw)

## 【評語】 160008

本研究用簡易的設備探討折射率梯度，溫度梯度，熱擴散率，以及液體的非線性熱擴散，以方形盒盛透明液體，置冷源上方，溫度由上往下形成溫度梯度以及折射率梯度。雷射光照射和鉛直線成一定角度的玻璃透鏡，再穿過液體，在屏上形成斜直線，經一段時間的熱擴散後，變成曲線；曲線和斜直線的距離  $h$ ，作不同  $y$  的  $h(t)$  圖探究液體的熱擴散率狀況，設計巧妙，易於瞭解，結果有呈現。可再多往應用方向思考。說明清晰，表達良好。