

# 中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

## 作品說明書

---

高級中等學校組 地球與行星科學科  
團隊合作獎

051902

探討瓶內氣壓、溫度對光穿透模擬雲照度變化之  
影響-以金星與地球大氣為例

學校名稱： 臺北市立陽明高級中學

作者：  高二 吳欣庭  高二 謝昕妍  高二 廖于涵	指導老師：  林承恩  黃致柔
---	-----------------------------

關鍵詞： 瓶中造雲、氣壓、二氧化硫

## 摘要

本研究分為兩階段實驗，實驗一欲探討改變氣壓與溫度對瓶中模擬造雲的影響。利用鹵素燈控制環境溫度、以打氣機改變瓶內氣壓，以光感應器測量光線穿過模擬雲氣的照度變化，探討模擬造雲的光學厚度變化。研究結果發現，氣壓較大和溫度較高時，產出模擬雲氣較多。以實驗數據提出經驗式，其中以改變氣壓對光照度下降之經驗式有最佳擬合結果。本研究提出之模型經驗證，最佳可得 6.91% 之誤差。

實驗二則在瓶中模擬金星大氣，改變氣壓和溫度，觀察模擬雲氣的變化。研究結果發現模擬金星大氣產生之雲氣較地球大氣多，且氣壓越高、模擬雲氣較多，在剔除極端值後，經驗公式之  $R^2$  值可達 0.99；而氣溫越高、模擬雲氣較少。實驗二之模型驗證結果佳，誤差為 0.46 至 22.34%。

## 壹、前言

### 一、研究動機

我們在學校操場觀察天空中雲的變化，發現雲朵時而稀疏、時而密集，因而對雲的形成產生好奇，想進一步了解雲形成的條件與因素。我們想利用改變環境因素探討雲的形成原因和形成方式，並控制雲的狀態以進行實驗。本研究從常見的瓶中造雲科學遊戲出發，改變氣壓、溫度與瓶中氣體成分，觀察在不同條件中形成模擬雲氣的差異。

### 二、研究目的

- (一) 以一體成形桶裝水瓶作為固定體積模型，模擬造雲。
- (二) 改變瓶中氣壓和溫度，探討光通過模擬雲氣之照度有何變化。
- (三) 藉由經驗公式推導，了解瓶中氣壓與溫度對模擬雲氣的光學厚度之影響。
- (四) 在桶裝水瓶中模擬金星大氣，改變氣壓與溫度，比較與地球大氣環境中之模擬雲氣有何差別。

### 三、文獻回顧

#### (一) 瓶中造雲的原理

許良榮於 2015 年指出，寶特瓶在打氣後，內部氣壓值會大於 1 大氣壓，當快速拔開瓶塞時，氣壓瞬間降低，瓶內的氣壓瞬間降低，會產生下列二個現象：

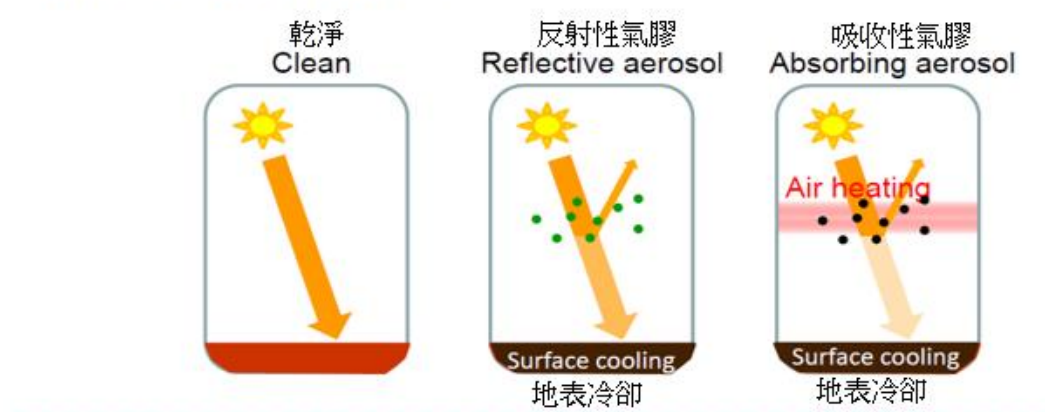
1. 氣壓降低使瓶中空氣發生絕熱膨脹，導致空氣溫度下降。

2. 氣壓降低促使瓶內水加速蒸發，因溫度降低，空氣中的水蒸氣達到飽和，水蒸氣凝結成微小水滴，形成肉眼可見的雲氣，此即為本研究欲觀察的模擬雲氣。

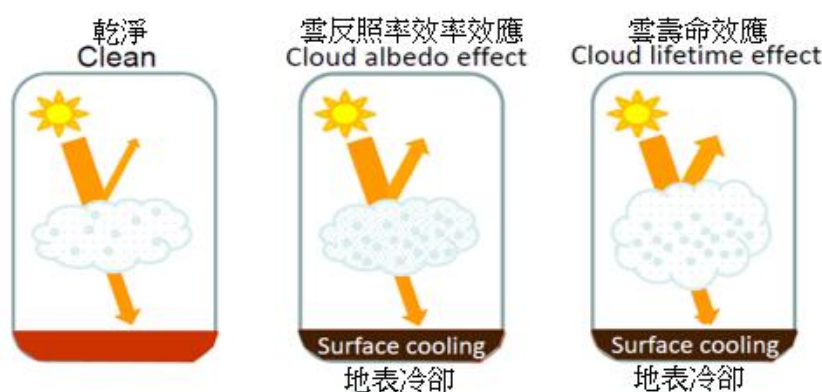
## （二）模擬雲氣之光學厚度

大氣中常用的光學厚度主要分為氣膠光學厚度（Aerosol Optical Depth, AOD）與雲的光學厚度（Cloud Optical Thickness, COT），氣膠（懸浮微粒）對於大氣輻射的影響主要分為直接效應及間接效應（圖一），直接效應為氣膠粒子會反射或吸收太陽輻射，導致地表接收輻射量改變；間接效應為氣膠改變雲的性質，包含雲滴的數量和大小、或是雲的壽命，進而影響太陽輻射到達地表的比例。雲光學厚度是用於描述雲層對太陽輻射的衰減程度，包括散射和吸收的影響。雲光學厚度與雲的粒子大小、含水量和雲層厚度有關，光學厚度越大，雲層越「厚」，阻擋輻射的能力越強，而液態水滴的含量是衡量雲層中水分的關鍵指標，其有效平均半徑也直接決定了雲對輻射的吸收和散射能力 (Peter Victor Hobbs, 1995；John H. Seinfeld, Spyros N. Pandis, 2006)。本研究以光感應器量測光通過模擬雲氣之光照度下降量變化，類比雲的光學厚度。

### Aerosol direct effects 氣膠直接效應



### Aerosol indirect effects 氣膠間接效應



圖一、氣膠對光線穿透的直接與間接效應。

（圖片修改自 Federal Office of Meteorology and Climatology MeteoSwiss, no date）

### (三) 金星的大氣概況

金星有密度極高的大氣層，其中二氧化碳佔 96.5%、氮氣佔 3.5%，二氧化硫則是佔比最多的微量氣體，含量約為 180 ppm，不過微量氣體變動較大(Taylor *et al.*, 2014)。在高度 50 至 70 公里的金星對流層至中氣層，懸浮濃硫酸液滴形成的雲滴，其中還摻雜著硫粒子，所以呈現黃色。由於金星大氣中濃厚的二氧化碳所造成的溫室效應，使得金星的表面溫度達 470 度。地表的大氣壓力也達 90 大氣壓，為地球的 90 倍，是個高溫、高壓的行星。金星地表的重力與地球相近，約為地球的 0.91 倍。

而金星的大氣層在距離表面約 50 至 55 公里處，具有與地球海平面相似的氣壓和溫度條件(S.S. Limaye *et al.*, 2017)，本研究將以此處的大氣環境進行模擬，了解金星大氣與模擬雲氣的狀態。

## 貳、研究設備及器材

### 一、研究器材清單

		
Arduino R4 Wifi	壓力感測器 HX710B	溫濕度感測器 DHT11
		
光感應器	6 公升塑膠桶裝水瓶	12 公升塑膠桶裝水瓶

		
薊頭漏斗	側管錐形瓶	橡皮管
		
橡皮塞 (上直徑 43mm、 下直徑 37mm、 高度 32mm)	Xiaomi 電動打氣機 2 Pro 型號：MJCQB07PQW 充氣壓力：0.2-10.3 Bar /3-150 psi	黑箱（紙箱、黑布）
		
鹵素燈	硫酸	亞硫酸鈉

## 二、重點儀器之原理

- (一) 鹵素燈：鹵素燈管以發出紅外線產生熱能加熱桶裝水瓶中之空氣。
- (二) 光感應器：當鹵素燈照出的光線被產生出的雲氣擋到，光感應器接收到的光量就會受影響。光感應器會將接收到的光線轉換為電子訊號並輸出到電腦（Omron，無日期）。本研究所使用的光感應器量測範圍為 0~6000 lx，解析度 2 lx。
- (三) 溫溼度感測器：溫度測量使用 NTC 熱敏電阻來測量溫度，熱敏電阻的電阻值隨著溫度變化；濕度測量採用電阻式濕度感測，當空氣中的水氣吸附在材料表面時，材料的電阻值會改變，最後內部的 IC 會將這些變化轉換為數位訊號輸出（陸向陽，2015）。



(四) 壓力感測器：當壓力發生變化時，感測器裡的電阻會發生變化，感測器裡的 ADC 類比轉換器會將模擬的信號轉成數位信號。

### 三、實驗裝置（圖二）中的各器材與功能說明

- (一) 橡皮塞：防止加壓後的雲氣跑出。
- (二) 打氣機：於桶裝水瓶中加壓至指定壓力。
- (三) 桶裝水瓶：裝水後當作固定體積模型，以測量雲氣對光照度的影響。
- (四) 鹵素燈：加熱至指定溫度與作為實驗光源。
- (五) 黑箱：防止外界光線影響紙箱中的光感測器讀數。
- (六) Arduino：連接電腦和溫溼度感測器，測量瓶內溫度。



圖二、實驗裝置圖。

(作者自行拍攝)

## 參、研究過程或方法

本研究分為兩階段實驗，實驗流程如圖三所示：

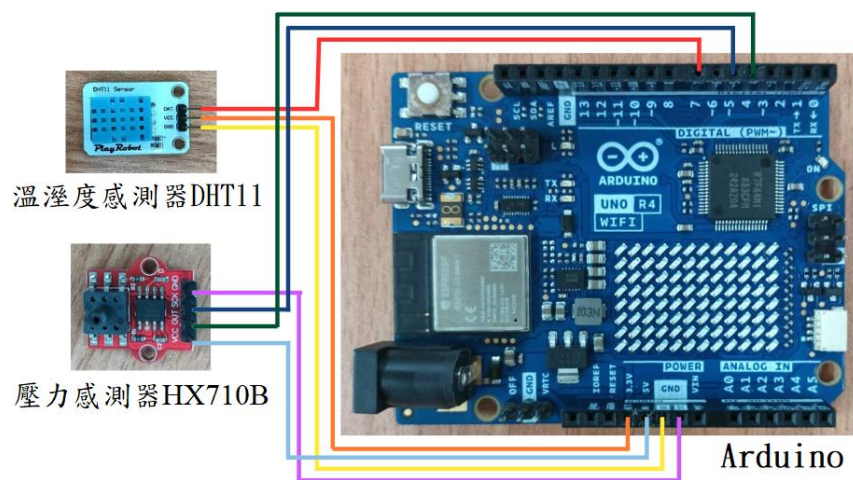


圖三、實驗流程圖

(作者自行製作)

### 一、實驗設計

本研究利用 Arduino R4 Wifi 撰寫程式，並連接壓力感測器及溫溼度感測器來偵測瓶內氣壓及溫度，其中，溫度感測器接在第 7 腳位；壓力感測器輸出腳位接在第 4 腳位，時鐘腳位接在第 5 腳位（圖四）。



圖四、Arduino 接腳圖。

(作者自行拍攝)

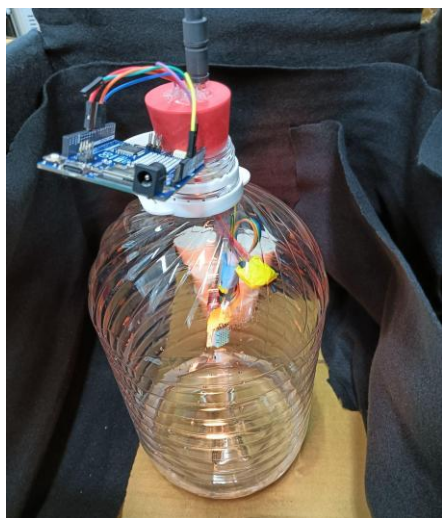
## 二、實驗步驟：

### （一）實驗一：桶裝水瓶實驗

1. 將桶裝水瓶裝滿 500 ml 的水並放入紙箱中，打開鹵素燈與光感應器。
2. 利用溫溼度感測器偵測瓶內溫度，以鹵素燈加熱瓶中空氣至指定溫度（表一）。
3. 將桶裝水瓶瓶口以橡皮塞塞住，用黑布蓋住紙箱避免光進入而影響到光感應器。
4. 利用打氣機加壓（圖五），依據實驗所需的氣壓改變加壓值（表一）。
5. 打氣至目標氣壓值後，瞬間將塞子拔出，讓瓶內產生模擬雲氣（圖六）。
6. 利用光感應器量測光照度變化。
7. 依據表一的控制與操縱變因，分別在固定溫度及固定氣壓下，將各個操縱變因的實驗各做五次取平均，並相互比較，找出溫度與氣壓影響模擬雲氣的經驗式。

表一、桶裝水瓶實驗的實驗操縱變因及控制變因。

項目	測量氣壓對光照度變化之影響	測量溫度對光照度變化之影響
控制變因	溫度：22 °C	氣壓：加壓 11 psi
操縱變因	氣壓加壓值：每次上升 2 psi 3、5、7、9、11、13、15、17、19 psi	溫度：每次上升 2 °C 23、25、27、29、31、33、35、37、39 °C



圖五、加壓前的桶裝水瓶。

(作者自行拍攝)



圖六、加壓後拔開塞子並產生模擬雲氣。

(作者自行拍攝)



## （二）實驗二：模擬金星大氣實驗

為比較金星與地球大氣差異，本研究選擇離金星地表高度為 50 至 55 公里的大氣環境做為模擬，因該高度的大氣溫度介於 0 至 50 °C，氣壓約為 1 大氣壓(S.S. Limaye *et al.*, 2017)，與地球有相似的大氣條件，適合做比對。實驗步驟如下：

1. 採用平滑的桶裝水瓶，以降低光被折射或散射的誤差。
2. 側管錐形瓶加入亞硫酸鈉粉，透過薊頭漏斗加入濃硫酸，產生二氧化硫氣體。
3. 用橡皮管連接桶裝水瓶瓶口，將二氧化硫氣體打入瓶中，再將塞子堵住。
4. 利用打氣機加壓，依據實驗所需的氣壓改變加壓值（表二）。
5. 打氣至目標氣壓值後，瞬間將塞子拔出，讓桶內產生模擬雲氣。
6. 利用光感應器量測光照度變化。
7. 地球大氣之對照組比照實驗一之實驗步驟。
8. 依表二的控制與操縱變因，分別在固定溫度及固定氣壓下，將各個操縱變因的實驗各做五次取平均，並相互比較，找出溫度與氣壓影響模擬雲氣的經驗式。

表二、模擬金星大氣實驗的實驗操縱變因及控制變因。

項目	模擬金星大氣（實驗組）	模擬地球大氣（對照組）
控制變因	溫度：24 °C	
操縱變因	加入二氧化硫氣體：1.2 mL （相當於距地表 50~55 公里高處之 100 ppm 的二氧化硫）	無調整 （與地球大氣相同）
	氣壓加壓值：每次上升 2 psi 11、13、15、17、19、21 psi	氣壓加壓值：每次上升 2 psi 11、13、15、17、19、21 psi

項目	模擬金星大氣（實驗組）	模擬地球大氣（對照組）
控制變因	氣壓：加壓 11 psi	
操縱變因	加入二氧化硫氣體：1.2 mL （相當於距地表 50~55 公里高處之 100 ppm 的二氧化硫）	無調整 （與地球大氣相同）
	溫度：每次上升 2 °C 31、33、35 °C	溫度：每次上升 2 °C 31、33、35 °C

### 三、經驗公式推導：

為建立瓶中氣壓和溫度改變模擬雲氣之光學厚度的關係，本研究使用 Python 內建的工具庫 Scipy 尋找最佳擬合解。為使變數簡單化，先分別針對瓶中氣壓和溫度分析，利用 curve\_fit() 函數，預想關係式為二次函數  $y = ax^2 + bx + c$ ，將實驗收集到的數據：操縱變因（氣壓加壓值或溫度）與應變變因（光照度變化反推模擬雲之光學厚度）輸入後，找到最符合之二次函數。

Python 的 curve\_fit() 在運算過程中，會計算每個數據點與對應模型預測值之間的差異（誤差），然後調整模型的參數，直到誤差最小化。

本研究使用的 Python 運算環境為 Google Colaboratory (Colab)，受惠於免費、組員間可以共編與作筆記，是非常方便的線上撰寫程式工具。

## 肆、研究結果

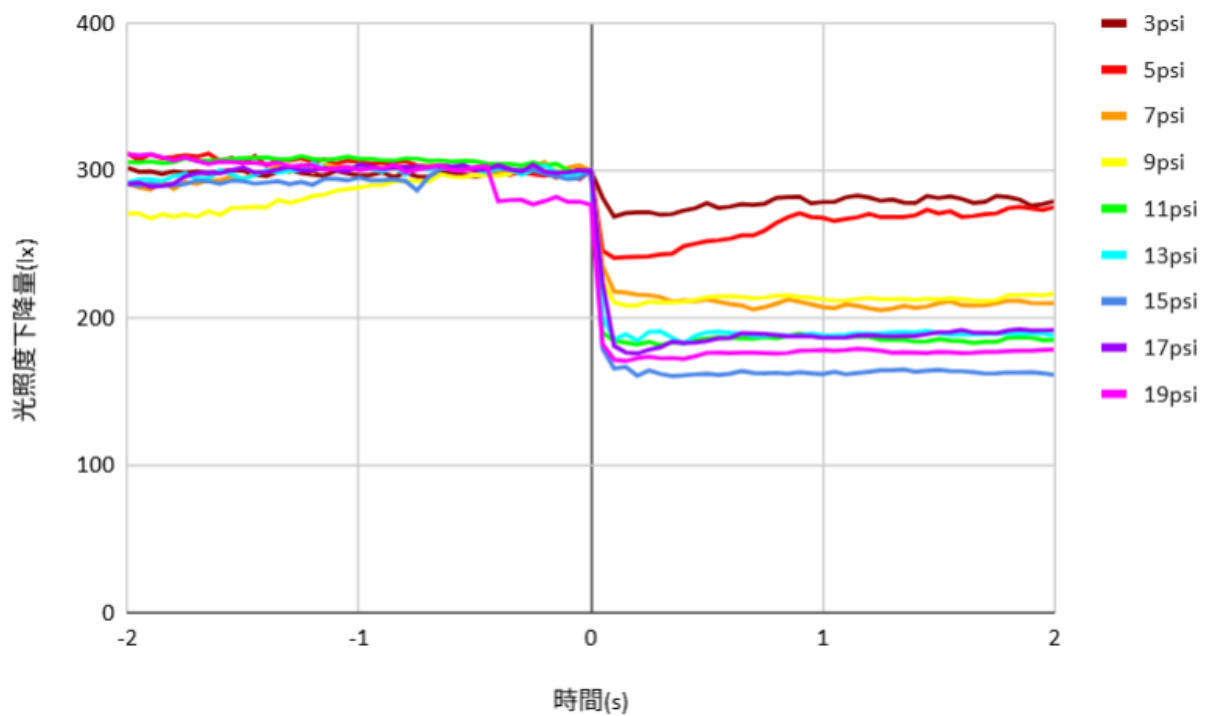
### 一、實驗一：氣壓對光照度變化之影響

本研究將瓶中的溫度控制在 22 °C，改變氣壓加壓值：3 psi、5 psi、7 psi、9 psi、11 psi、13 psi、15 psi、17 psi、19 psi，並分別測量五次，測量時間包含打開塞子前後各兩秒，以光照度 300 lx 為基準，比較打開塞子瞬間光照度的下降情形，算出各氣壓值得到的平均光照度，及使用原始數據得到平均光照度下降百分比，結果整理於表三。

從各氣壓加壓值之平均光照度變化圖（圖七）可知，在氣壓加壓 3~15 psi 時，氣壓加壓值與光照度變化呈正相關。當氣壓達到 15 psi，光照度變化最大，光照度變化 134.3 lx，其次是加壓 19 psi，光照度變化 128.6 lx。

表三、改變氣壓對光照度下降紀錄表。

氣壓 加壓值 (psi)	溫度 (°C)	光照度下降 (lx)						
		第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均	下降 百分比
3	22	45.3	29.4	13.3	46.0	29.3	31.3	11.6%
5		76.1	61.2	64.2	72.8	57.1	59.3	21.7%
7		105.6	56.4	88.9	88.4	40.4	82.1	27.5%
9		73.0	67.5	94.7	95.1	106.7	89.4	32.2%
11		86.3	79.6	133.8	135.5	103.1	115.6	38.7%
13		124.0	123.9	114.0	110.0	98.3	114.7	38.5%
15		95.3	182.4	170.2	95.7	117.2	134.3	40.3%
17		95.5	141.4	109.1	102.7	145.1	123.5	34.7%
19		115.0	97.1	117.1	147.0	101.0	128.6	42.3%



圖七、各氣壓加壓值之平均光照度變化。

(作者自行製作)

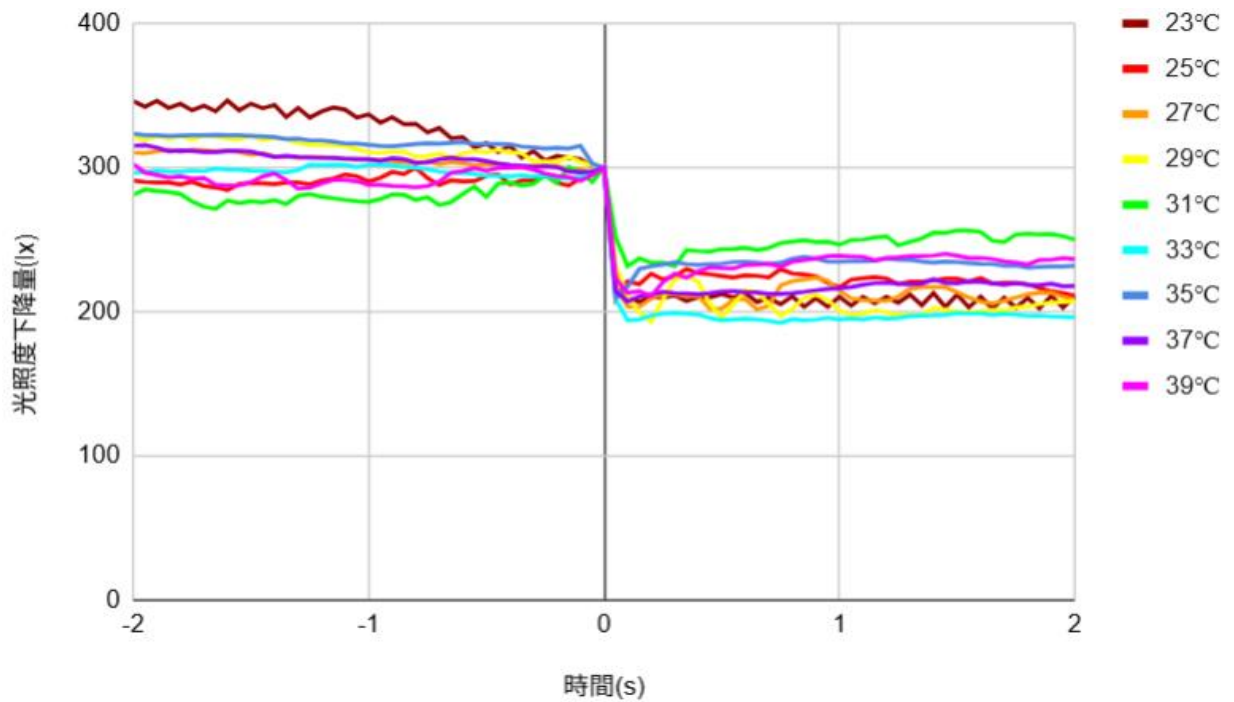
## 二、實驗一：溫度對光照度變化之影響

本研究將瓶中的氣壓加壓 11 psi，改變溫度：23 °C、25 °C、27 °C、29 °C、31 °C、33 °C、35 °C、37 °C、39 °C，並分別測量五次取平均，測量時間範圍包含打開塞子前後各兩秒，以光照度 300 lx 為基準，比較打開塞子瞬間的光照度下降情形，算出每個溫度值得到的平均光照度，以及使用原始數據算出的平均光照度下降百分比，結果整理於表四，「無數據」欄位代表實驗過程受外界干擾產生誤差（如外界光線、瓶內在實驗前即有霧氣），故不採計。

從各溫度之平均光照度變化圖（圖八）可知，溫度 23~29 °C 時，溫度與光照度變化呈現正相關。當溫度達 29 °C 時，光照度下降的最多（106.7 lx），其次是 33 °C，光照度下降 106.01 lx。

表四、改變溫度對光照度下降紀錄表。

氣壓 加壓值 (psi)	溫度 (°C)	光照度下降 (lx)						
		第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均	下降 百分比
11	23	74.2	96.1	76.3	50.2	無數據	73.5	31.4%
	25	90.1	76.4	95.0	99.8	86.6	91.1	28.2%
	27	125.6	72.6	100.6	81.4	101.9	96.3	33.1%
	29	150.2	90.4	71.1	107.6	150.2	106.7	40.4%
	31	73.2	219.4	251.0	326.4	70.7	60.3	32.0%
	33	78.0	106.2	90.9	86.0	96.4	106.0	36.6%
	35	98.0	96.6	101.7	72.8	81.2	90.1	38.1%
	37	100.4	98.2	93.1	91.7	87.3	93.4	30.8%
	39	75.8	78.1	無數據	無數據	無數據	76.8	27.5%



圖八、各溫度之平均光照度變化。

(作者自行製作)

## 伍、討論

### 一、實驗一：各氣壓與光照度間的比較

圖九為各氣壓值與光照度下降量之趨勢，可知加壓越多、光照度下降量整體趨勢呈現上升，代表增加壓力越高，光照度下降量大致也增加。在氣壓加壓值為 3~15 psi 的範圍內，符合本研究之假設。當氣壓加壓值達到 15 psi，模擬雲氣的形成最多，此時模擬雲氣厚度達到最高峰，使光的散射最強，導致光照度下降最多（134.3 lx）。

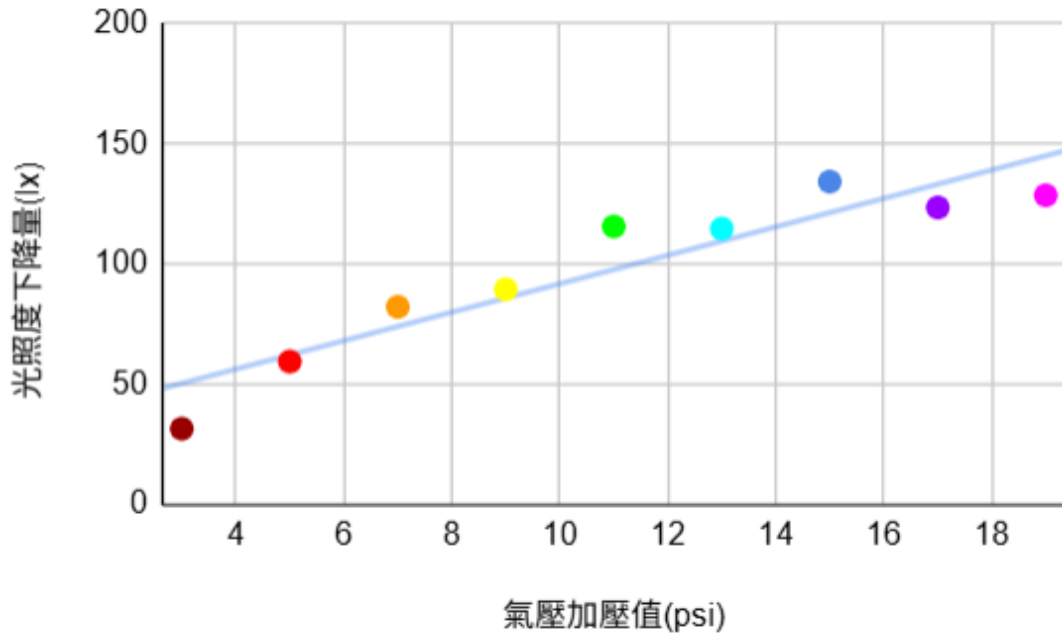
當氣壓加壓值進一步提升至 17~19 psi，模擬雲氣中的水滴可能會因為聚合或變大，使模擬雲氣結構發生改變，較大的水滴可能會減少散射效果，讓部分光線能夠穿透雲層，因此光照度的下降幅度反而變小（17 psi：123.5 lx，19 psi：128.6 lx），這表示模擬雲氣的形成方式可能發生了變化，不是單純地氣壓愈高，雲愈濃。

可以想像成一開始氣壓加至 19 psi 時，水滴可能變大或聚集成大水滴，這些較大的水滴比小水滴不容易散射光線，甚至會讓部分光線穿透，導致光照度下降幅度變小。這可能就是為何實驗結果沒有完全符合「氣壓愈大、光照度愈低」的預期趨勢。

造成誤差的原因可能來自以下四點：光源的穩定性、環境因素、測量設備的精度和模擬雲氣的流動性。其中環境因素推測是溫度和濕度的變化，可能影響水滴的形成與蒸發速度，使模擬雲氣的濃度變化不完全由氣壓控制，而影響光照度數據。此外，在高壓



條件下，模擬雲氣可能不均勻分佈，部分區域的模擬雲氣濃度較低，使得測量點的光照度變化不完全符合預測。



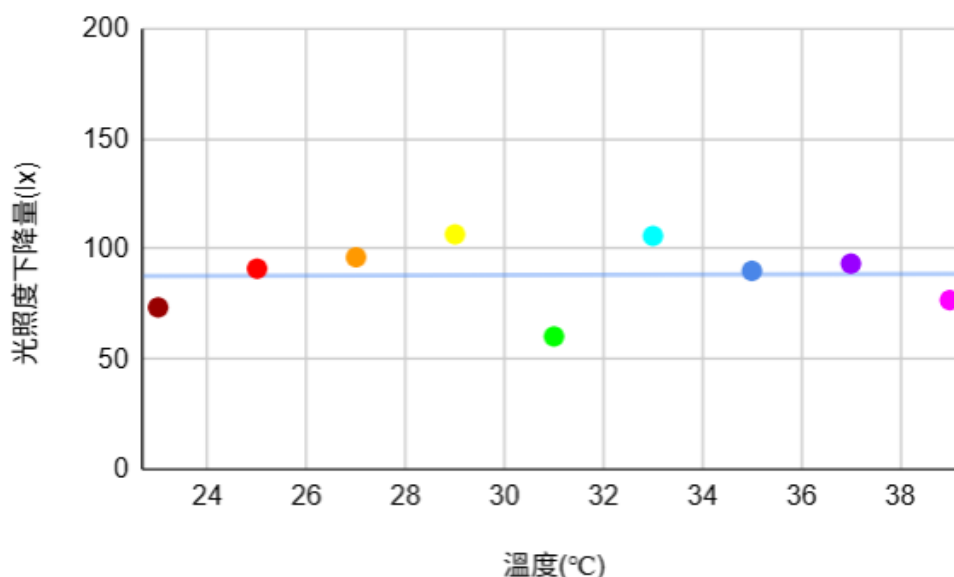
圖九、改變氣壓與光照度下降量之趨勢圖。

橫座標為改變之氣壓加壓值、縱座標為光照度下降量。各顏色代表不同的加壓值。  
(作者自行製作)

## 二、實驗一：各溫度與光照度間的比較

在溫度對光學厚度的影響之實驗中，整體來說，光照度下降量與溫度無顯著關係（圖十），大多維持在 80~110 lx 之間，代表溫度變化對這個結果無顯著影響。在溫度 23~29 °C 時會呈現上升趨勢，且在 29 °C 時光照度下降的最多（下降 106.7 lx），其次是 33 °C（下降 106.01 lx）。本研究推測在溫度 23~29 °C 時，水分蒸發速度隨著溫度增加而加快，使更多細小水滴形成，導致光的散射變強，造成光照度下降程度愈多，當溫度上升到 33 °C，水滴可能開始蒸發或變大，使得散射減弱，讓部分光線能穿透，所以光照度下降程度減弱。

造成實驗誤差的原因可能為桶裝水瓶的表面不平整，若上下搖晃或是移動到裝置，就可能會讓光照度所改變。且實驗過程中光照度可能因為雲氣影響光的傳播，使得部分光被吸收或散射或空氣流動改光線的折射、散射狀態，導致光反應器接收到的光亮驟減而有所變化。



圖十、改變溫度與光照度下降之趨勢圖。

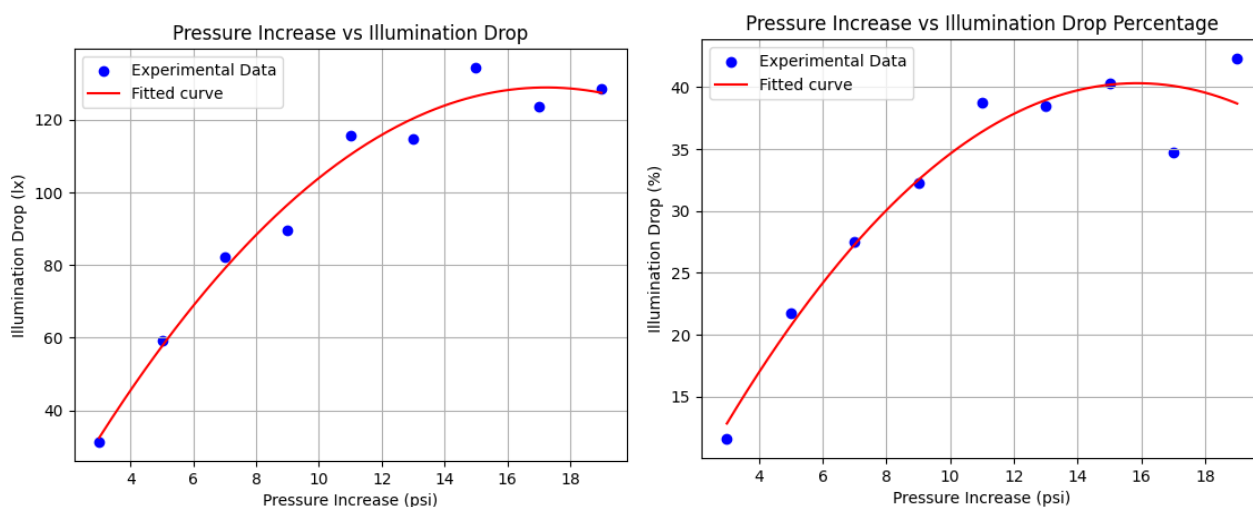
橫座標為改變之溫度值、縱座標為光照度下降量。各顏色代表不同的溫度值。

(作者自行製作)

### 三、氣壓與溫度影響形成模擬雲氣之經驗式：

#### (一) 改變氣壓之光照度變化趨勢之經驗式

利用 Python 內建的工具庫 Scipy 尋找最佳擬合解（圖十一左），得到改變氣壓影響光照度下降二次關係式： $y = -0.47x^2 + 16.37x - 12.37$ ， $R^2$ 值達 0.98。若以下降百分比進行擬合，可得二次關係式： $y = -0.16x^2 + 5.27x - 1.49$ ， $R^2$ 值達 0.94，代表實驗數據與擬合結果具高度相關，在改變氣壓的實驗中可有效擬合。



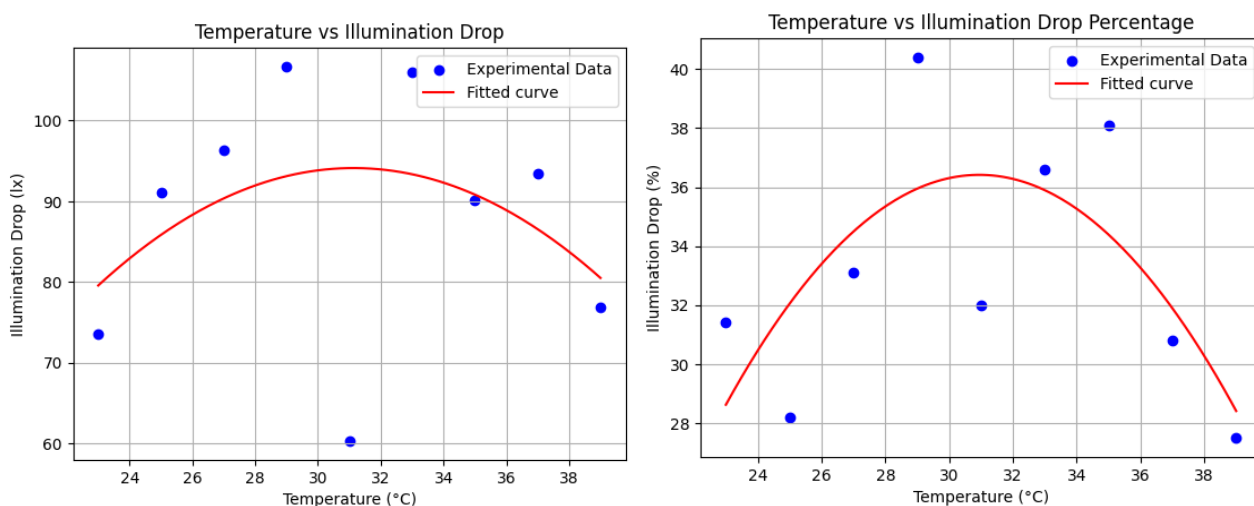
圖十一、改變氣壓對光照度下降之二次函數關係圖。左圖為下降量；右圖為下降百分比。

藍點為實驗結果數據、紅色曲線為最佳擬合二次函數圖形。

(作者自行製作)

## (二) 改變溫度之光照度變化趨勢之經驗式

欲探討改變溫度影響光照度下降的關係。用相同運算方法得到光照度下降量與下降百分比之二次函數（圖十二）。由圖十二可發現擬合效果不佳，兩者之 $R^2$ 值分別為 0.13 與 0.48，代表經驗式無法有效歸納溫度與光照度改變的關係。

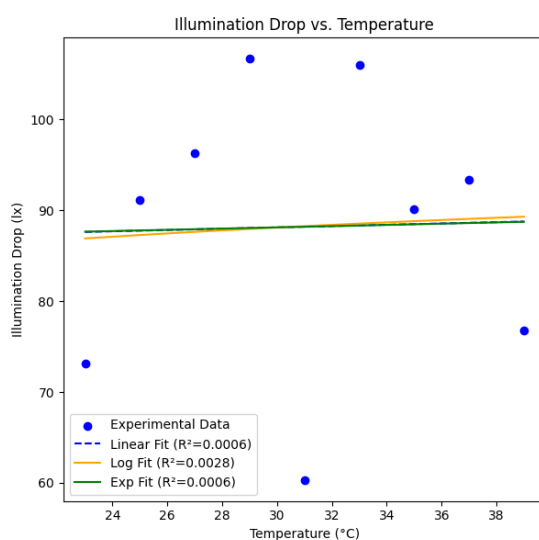


圖十二、改變溫度對光照度下降之二次函數關係圖。左圖為下降量；右圖為下降百分比。

藍點為實驗結果數據、紅色曲線為最佳擬合二次函數圖形。

(作者自行製作)

為尋找較佳擬合方法，接著嘗試使用線性擬合 $y = ax + b$ 、對數擬合 $y = a \log(x) + b$ 與指數擬合 $y = ae^{bx}$ ，結果如圖十三，此三種擬合程度依舊不佳，推測每組實驗僅增加  $2^{\circ}\text{C}$ ，以大氣環境來說尺度較小，故無法得到顯著關係。



圖十三、改變溫度對光照度下降擬合結果。藍點為實驗結果數據、藍色虛線為線性擬合、橘色線為對數擬合、綠色線為指數擬合。 $R^2$ 值標示於圖例旁。

(作者自行製作)

#### 四、綜合比較

由實驗一不同氣壓、溫度之設計，本研究獲得光照度下降值，進而欲尋找經驗式。由經驗式來看，僅改變氣壓使光照度下降有較佳擬合結果。本研究嘗試將兩組實驗結果共同處理，欲了解是否能由指定氣壓與溫度，以推得光照度下降的關係式。

參數給定如下：照度下降(Z)，與溫度(X)和氣壓(Y)之間的關係。同樣使用 Python 的 `curve_fit()` 函數，給定實驗所得各組溫度(X)和氣壓(Y)數據，令其進行雙變量回歸分析，推得照度下降(Z)，可得模型：

$$Z = 0.07X^2 - 0.33Y^2 + 159.07XY - 1755.19X - 3486.33Y + 38577.47$$

#### 五、模型可推展性分析：

為驗證建立的模型是否可以廣泛應用到任意溫度(X)、與任意氣壓(Y)影響照度下降(Z)，本研究設計三組新的參數進行實驗，編號 1 設計溫度為極端值、編號 3 設計氣壓為極端值，編號 2 設計為實驗區間，為驗證本模型的應用程度。實驗結果如表五：

表五、任意氣壓與與溫度影響光照度下降紀錄表。

編號	氣壓加壓值 (psi)	溫度 (°C)	光照度下降(lx)			
			第一次	第二次	第三次	平均
1	5	39	41.83	30.64	13.58	28.68
2	11	31	82.42	75.43	86.73	81.53
3	19	29	79.17	98.41	87.78	88.45

以表五中各組實驗之光照度下降平均值，計算與影響照度下降(Z)模型的相對誤差(Relative Error)，相對誤差為計算實驗值與模型的誤差比例，計算方式如下：

$$\text{相對誤差} = \frac{|Z_{exp} - Z_{pred}|}{Z_{exp}} \times 100\%$$

得到相對誤差計算結果如表六所示。

表六、任意氣壓與與溫度影響光照度下降相對誤差分析結果。

編號	模型預測光照度下降(lx)	平均實驗光照度下降(lx)	相對誤差(%)
1	-16189	28.68	>100%
2	87.16	81.53	6.91%
3	9023	88.45	>100%

編號 2 實驗結果與模型有最佳結果，相對誤差為 6.91%，顯示在設定的增加氣壓與溫度中能以本模型預測實驗結果。編號 1 與編號 3 模型預測光照度下降數值本身即有巨

大偏差，推測原因為本模型之數據庫較小，無法提供模型具備延展至實驗溫度與氣壓範圍外的情形，導致編號 1：過高的溫度與編號 3：極高的氣壓會讓模型預測結果與實驗結果差距較大。未來將擴展實驗數據庫(database)，以期提升模型的準確性，能更廣泛的應用於實驗與教學用途。

## 六、改良實驗

為了解決桶裝水瓶表面不平整的問題，本研究將原本的桶裝水瓶換成體積更大、瓶身平滑的桶裝水瓶，以減少光的散射與折射導致光感應器的接收誤差，實驗裝置如圖十四，除更換成表面更平滑的桶裝水瓶外，亦使用兩支光感應器進行光照度數據收集，研究結果皆為兩支光感應器數值之平均，以減少誤差。**Arduino** 通過橡膠塞，在瓶中收集瓶內氣壓與溫度，加壓過程如圖十五；達實驗設計之氣壓與溫度，拔除橡膠塞、產生模擬雲氣，如圖十六。



圖十四、改良實驗裝置圖。(作者自行拍攝)



圖十五、加壓前的桶裝水瓶。  
(作者自行拍攝)



圖十六、加壓後拔開塞子並產生模擬雲氣。  
(作者自行拍攝)



## 七、模擬金星大氣

(一) 本研究選擇離地表高度為 50 至 55 公里的金星大氣環境做為模擬，此範圍與地球有較相近的條件：溫度介於 0°C 至 50°C，大氣壓力約 1 大氣壓。並於桶裝水瓶內注入 1.2 毫升的二氧化硫氣體，相當於模擬金星含量 100 ppm 二氧化硫之大氣。

### (二) 實驗結果

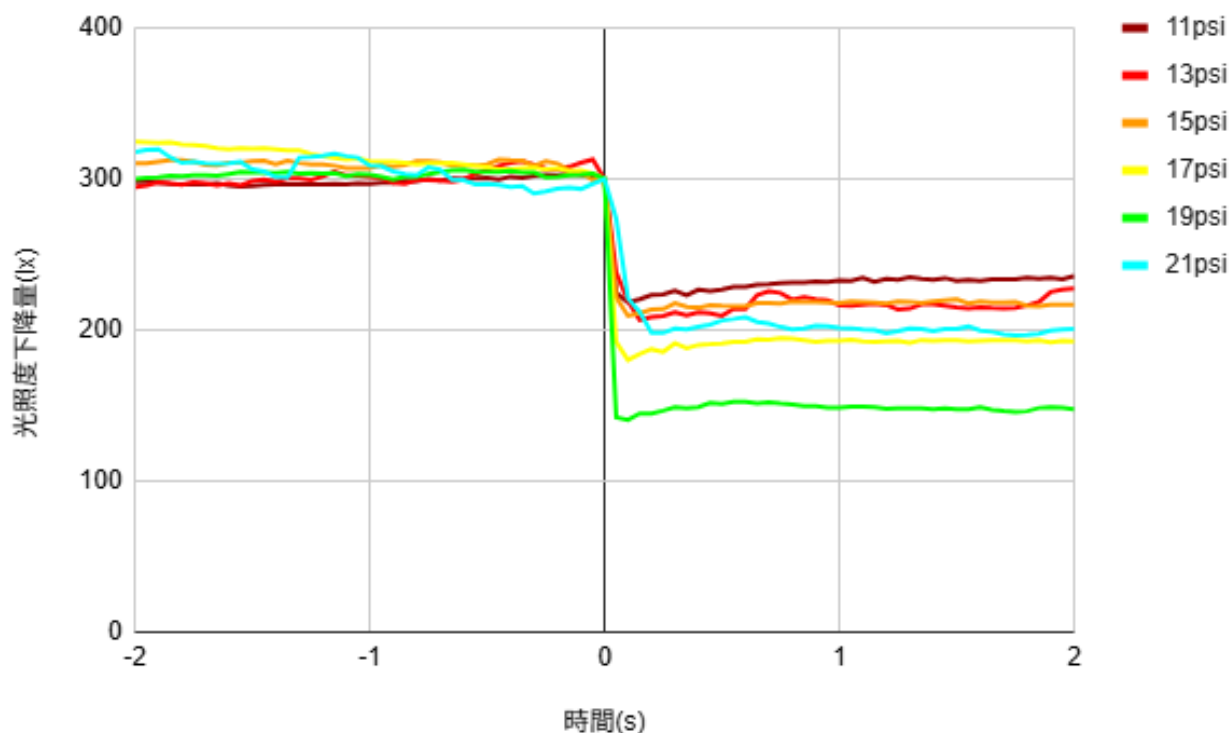
#### 1. 實驗二：各氣壓與光照度間的比較

本研究將瓶中溫度控制在 22°C，改變壓力：11psi、13psi、15psi、17psi、19psi、21psi，並分別測量五次取平均，測量時間範圍包含打開塞子前後各兩秒，以光照度 300 lx 為基準，比較打開塞子瞬間的光照度下降情形，算出每個壓力值得到的平均光照度下降量，亦使用原始資料算出光照度下降百分比，並將其結果整理成表七，並繪製成圖十七，來分析溫度與光照度的關係。

從表七與圖十七可看出，在模擬金星的實驗中，壓力 11~19 psi 時與光照度變化呈現上升趨勢。當溫度達 19 psi 時，光照度下降的最多（159.6 lx），其次是 17psi，光照度下降 106.01 lx。本研究推測在壓力 11~19psi 時，壓力越大，水分蒸發越多，瓶內水氣存在越多，當瓶內壓力急速下降時，水氣（二氧化硫）飽和凝結程度越多。在壓力 21 psi 時，可能因為實驗誤差、極端狀況或系統限制而與趨勢不一樣，但主要實驗誤差原因尚在確認。

表七、模擬金星改變氣壓對光照度下降紀錄表。

氣壓 加壓值 (psi)	溫度 (°C)	光照度下降 (lx)						
		第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均	下降 百分比
11	22	108.1	86.1	56.6	93.4	78.9	81.8	30.5%
13		177.1	152.1	88.5	111.4	87.9	88.3	40.0%
15		79.9	67.5	102.0	199.8	118.9	93.5	30.6%
17		135.2	123.6	123.1	104.3	113.6	119.9	46.3%
19		171.9	129.1	170.7	170.6	162.0	159.6	47.2%
21		107.1	120.5	102.3	115.3	11.6	102	33.2%



圖十七、模擬金星的各氣壓之平均光照度圖。

(作者自行製作)

## 2. 實驗二：各溫度與光照度間的比較

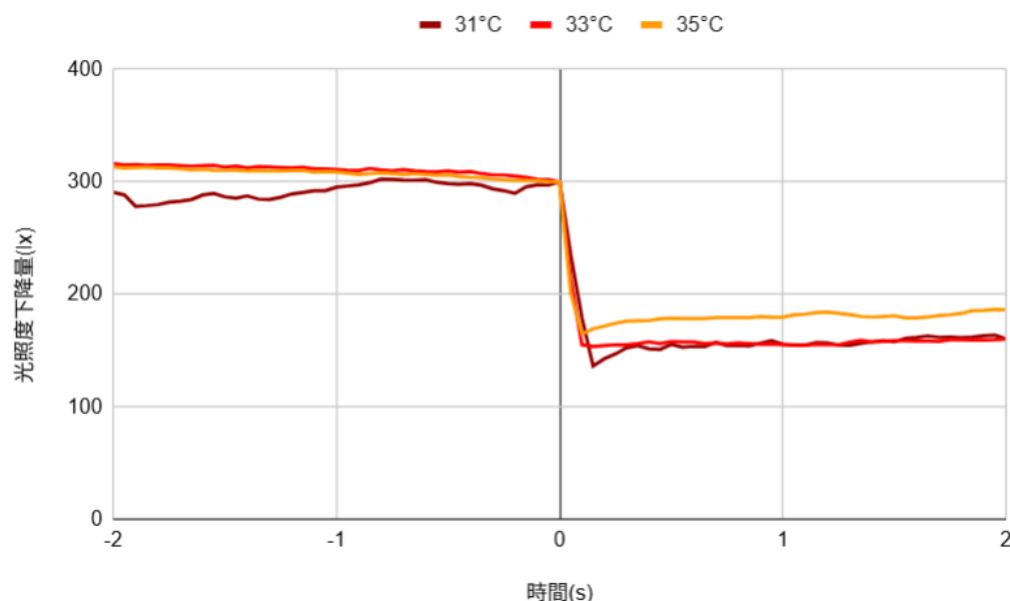
本研究將瓶中氣壓控制在 19 psi，改變溫度：31°C、33°C與 35°C，並分別測量三次取平均，測量時間範圍包含打開塞子前後各兩秒，以光照度 300 lx 為基準，比較打開塞子瞬間的光照度下降情形，算出每個溫度值得到的平均光照度下降量，以及使用原始資料計算出的光照度下降百分比，並將結果整理成表八，並繪製成圖十八，來分析溫度與光照度的關係。

從表八與圖十八可看出，在模擬金星的實驗中，溫度上升越多、光照度下降量越少，與實驗預期及實驗一的結果相違背。推測因溫度改變量太小，不易成為主要改變因素，使實驗結果不明顯。

表八、模擬金星改變溫度對光照度下降紀錄表。

氣壓 加壓值 (psi)	溫度 (°C)	光照度下降 (lx)				
		第一次	第二次	第三次	平均	下降 百分比
19	31	145.8	212.0	138.3	163.1	47.3%
	33	202.9	111.2	127.8	146.4	42.7%

	35	176.1	110.7	120.3	135.3	43.3%
--	----	-------	-------	-------	-------	-------



圖十八、模擬金星改變各溫度之平均光照度圖。  
(作者自行製作)

### (三) 模擬金星對照組（地球大氣）

為了要比較金星（加入二氧化硫）大氣與地球大氣之差別，本研究進行模擬金星與地球大氣的模擬造雲實驗，以比較模擬金星與地球大氣之在不同氣壓、溫度影響光照度下降量有何差異，得到以下研究結果，並進行討論分析。

#### 1. 實驗二：各氣壓與光照度間的比較

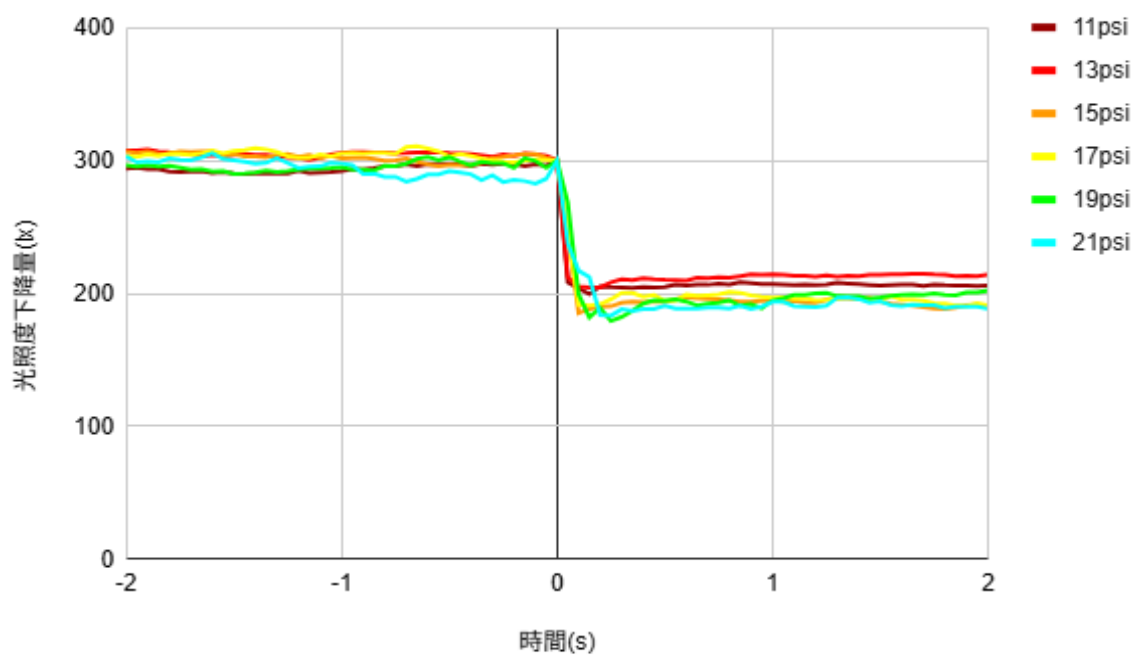
本研究將瓶中溫度控制在 22 °C，改變壓力：11 psi、13 psi、15 psi、17 psi、19 psi、21 psi，並分別測量五次取平均，測量時間範圍包含打開塞子前後各兩秒，以光照度 300 lx 為基準，比較打開塞子瞬間的光照度下降情形，算出每個壓力值得到的平均光照度下降量，以及使用原始資料計算出的光照度下降百分比，並將結果整理成表九，並繪製成圖十九，來分析氣壓與光照度的關係。

發現加壓 11~17 psi 的實驗中，加壓越多、光照度下降量越大，呈一致性，加壓 19~21 psi 之光照度下降量趨於緩和。另發現實驗結果分成兩組：11~13 psi 及 15~19 psi，兩小組間之各溫度的光照度下降並無明顯變化，顯示改變氣壓之實驗有極限，加壓達一定數值將不再使模擬雲氣更厚，此現象與實驗一相符。

加壓 21 psi 發現光照度下降量大幅降低，推測因瓶中水氣已達飽和，改變的壓力差已不足以產生更多的模擬雲氣讓光照度下降，推測已達模擬上限。

表九、模擬地球改變氣壓對光照度下降紀錄表。

氣壓 加壓值 (psi)	溫度 (°C)	光照度下降 (lx)						
		第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均	下降 百分比
11	22	91.2	93.2	109.2	121.6	114.0	96.1	31.8%
13		104.5	92.3	105.5	93.0	106.9	95.7	34.6%
15		137.2	134.2	127.6	77.0	128.1	111.7	37.6%
17		127.8	111.8	113.5	106.5	107.8	119.3	34.9%
19		110.0	124.7	119.8	132.5	102.3	118.1	33.9%
21		142.2	117.7	127.2	116.7	109.1	116.8	35.0%



圖十九、模擬地球的各氣壓之光照度平均圖。

(作者自行製作)

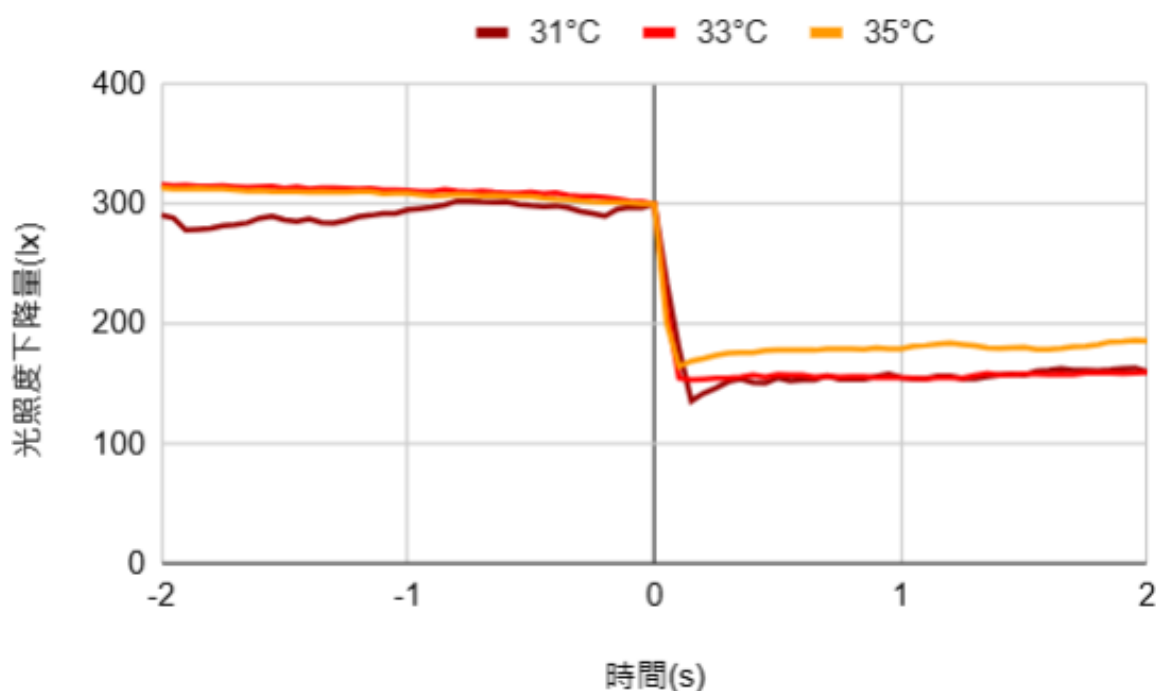
## 2. 實驗二：各溫度與光照度間的比較

我們將瓶中氣壓控制在 19 psi，改變溫度：31°C、33°C、35°C，並分別測量三次取平均，測量時間範圍包含打開塞子前後各兩秒，以光照度 300 lx 為基準，比較打開塞子瞬間的光照度下降情形，算出每個溫度值得到的平均光照度下降量，以及使用原始資料計算出的光照度下降百分比，並將結果整理成表十，並繪製成圖二十，來分析溫度與光照度的關係。

發現溫度越高、光照度下降量越少，推測因溫度越高，寶河水氣壓越大、水氣越不容易達到飽和，故模擬雲氣越稀薄。另外，溫度變化之實驗設計，每次僅增加 2 度，差異過小，不易歸納出具廣泛性的推論。

表十、模擬地球改變溫度對光照度下降紀錄表。

氣壓 加壓值 (psi)	溫度 (°C)	光照度下降 (lx)				
		第一次	第二次	第三次	平均	下降 百分比
19	31	157.1	121.5	139.3	139.3	29.5%
	33	110.5	89.3	102.4	100.7	32.0%
	35	99.2	101.0	91.2	96.4	34.5%



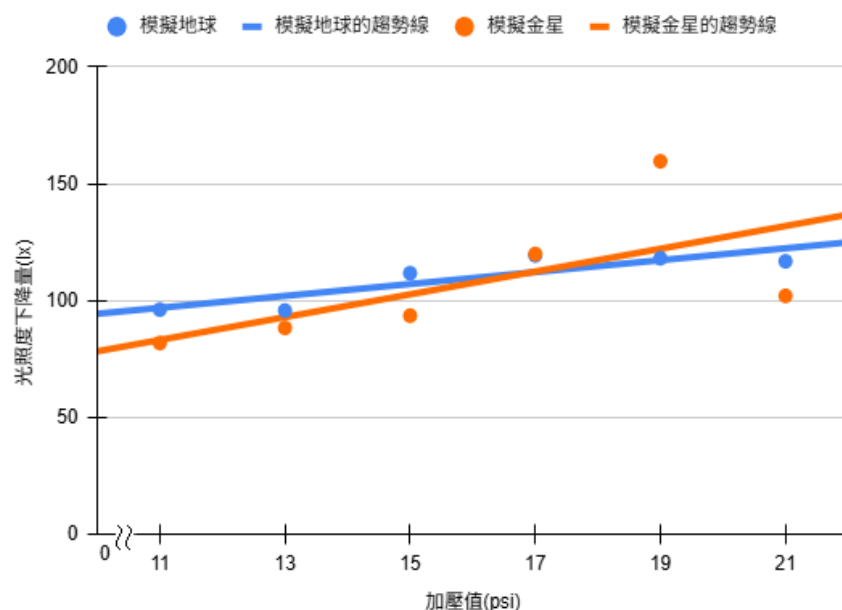
圖二十、模擬地球的各溫度之光照度平均圖。

(作者自行製作)



#### (四) 模擬金星與地球比較

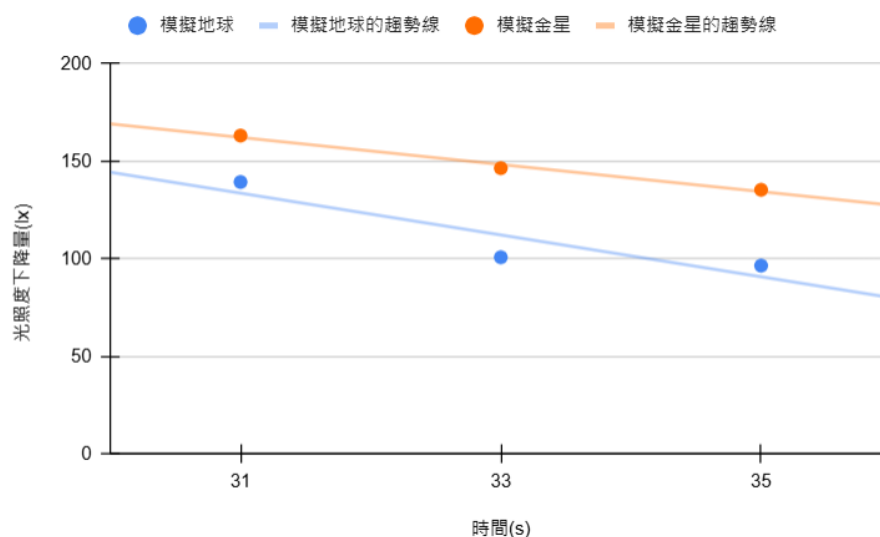
為分析模擬金星大氣與模擬地球大氣之結果，將兩組改變氣壓（圖二十一）、改變溫度（圖二十二）做圖，發現兩組實驗具有一致性：氣壓加壓越高、光照度下降量越多；溫度越高、光照度下降量越少。其中模擬金星大氣之實驗中，加壓使光照度下降量較模擬地球大氣明顯，顯示二氧化硫氣體對壓力改變較為敏感。而改變溫度實驗中，因組數較少，雖光照度均有呈現下降趨勢，但希望在未來能增加實驗組數及擴大溫差範圍，以獲得更完整的分析結果。



圖二十一、模擬金星及模擬地球改變氣壓與光照度間的比較。

橘點與實線為模擬金星大氣之結果與趨勢線、藍點與實線為模擬地球大氣之結果與趨勢線。

(作者自行製作)

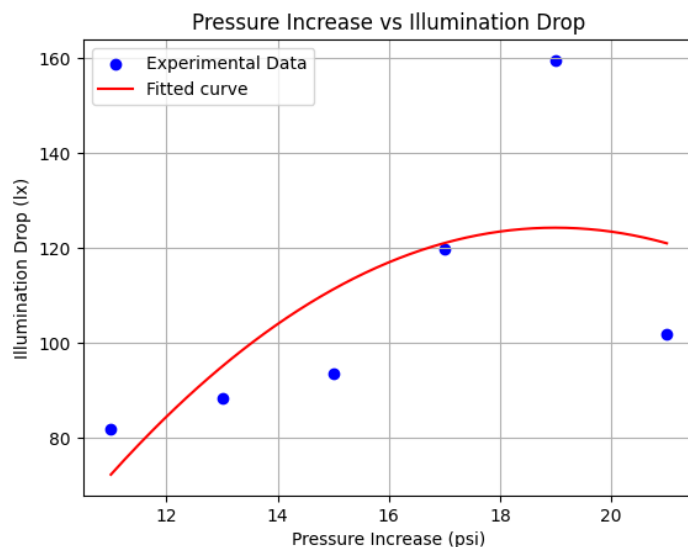


圖二十二、模擬金星及模擬地球改變溫度與光照度間的比較。

(作者自行製作)

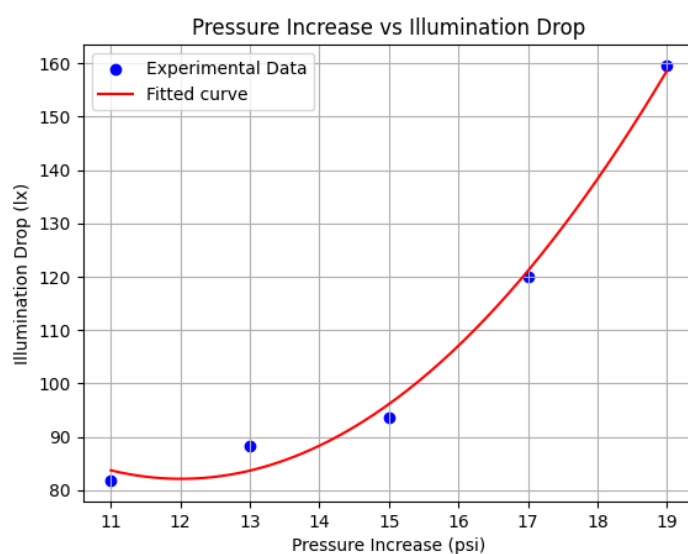
#### （五）模擬金星大氣：改變氣壓之光照度變化趨勢之經驗式

經利用 Python 內建的工具庫 Scipy 尋找最佳擬合解，得到模擬金星改變氣壓對光照度下降量之關係式： $y = -0.81x^2 + 30.95x - 169.56$ 。改變溫度對光照度下降之 $R^2$ 值為 0.50，代表二次函數沒辦法有效擬合（圖二十三）。



圖二十三、模擬金星改變氣壓對光照度下降量之擬合圖。  
藍點為實驗結果數據、紅色曲線為最佳擬合二次函數圖形。  
(作者自行製作)

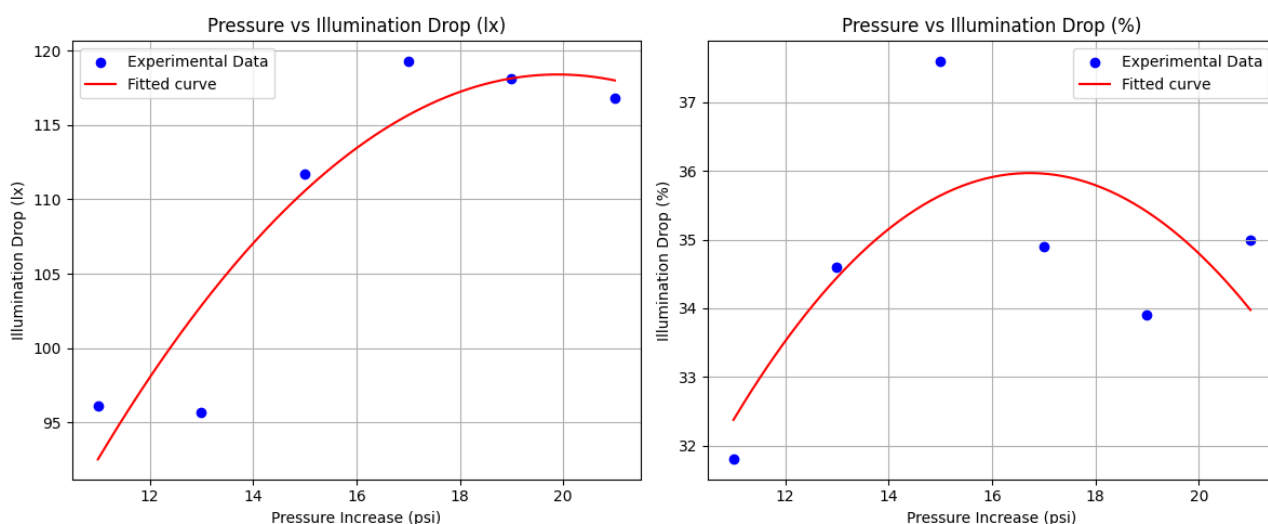
本研究嘗試將極端值 21 psi 去除，得到模擬金星改變氣壓對光照度下降量之關係式： $y = 1.56x^2 - 37.57x + 307.67$ 。改變氣壓對光照度下降相關性高， $R^2$ 值達 0.99（圖二十四）。



圖二十四、模擬金星改變氣壓對光照度下降量之擬合圖（去除極端值 21 psi）。  
藍點為實驗結果數據、紅色曲線為最佳擬合二次函數圖形。  
(作者自行製作)

#### (六) 模擬地球大氣：改變氣壓之光照度變化趨勢之經驗式

欲得知模擬地球大氣中改變氣壓之光照度下降量變化之趨勢，以表九數據進行擬合，圖二十五之左圖為改變氣壓影響光照度下降量之擬合圖、圖二十五之右圖為改變氣壓影響光照度下降百分比之擬合圖。其中左圖得二次函數經驗式 $y = -0.33x^2 + 13.02x - 11.09$ ， $R^2$ 值為 0.87，達相似門檻，顯示此經驗式可有效擬合。右圖得二次函數經驗式 $y = -0.10x^2 + 3.66x + 5.35$ ， $R^2$ 值為 0.51。不論從擬合圖或 $R^2$ 值皆顯示擬合效果不佳，推測因下降百分比均落在 31.8~37.6% 範圍中，縱座標跨距小，顯示數據點較為分散；而百分比相近代表改變氣壓使光照度下降率相近，視為穩定的特徵。



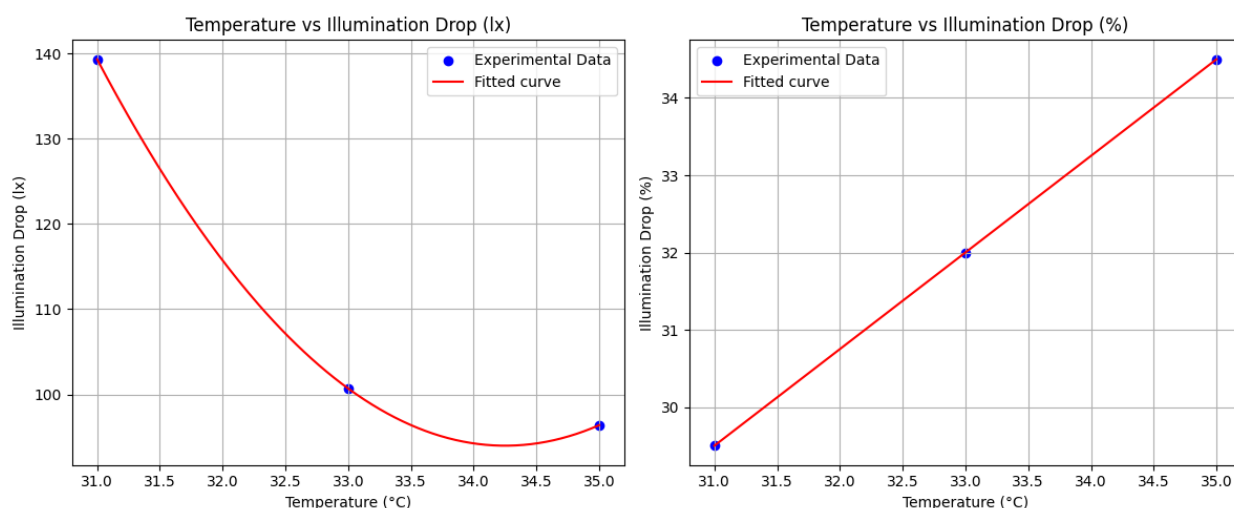
圖二十五、模擬地球改變氣壓對光照度下降之擬合。左圖為下降量，右圖為下降百分比。

藍點為實驗結果數據、紅色曲線為最佳擬合二次函數圖形。

(作者自行製作)

#### (七) 模擬地球大氣：改變溫度之光照度變化趨勢之經驗式

欲得知模擬地球大氣中改變溫度之光照度下降量變化之趨勢，以表十數據進行擬合，圖二十六之左圖為改變溫度影響光照度下降量之擬合圖、圖二十六之右圖為改變溫度影響光照度下降百分比之擬合圖。其中左圖得二次函數經驗式 $y = 4.29x^2 - 293.70x + 5123.71$ ， $R^2$ 值為 1.0，為高度相關。右圖得一次函數經驗式 $y = 1.25 - 9.25x$ ， $R^2$ 值為 1.0。不論從擬合圖或 $R^2$ 值，兩種擬合結果皆顯示假性的高度擬合，因數據較少，輕易達相似門檻，但實際分析價值低。未來將持續新增實驗組數，並將溫差加大，期望能獲得更多實驗結果進行分析。



圖二十六、模擬地球改變溫度對光照度下降量之擬合。左圖為下降量，右圖為下降百分比。

藍點為實驗結果數據、紅色曲線為最佳擬合二次函數圖形。

(作者自行製作)

#### (八) 綜合比較

本研究欲利用模擬金星大氣的實驗數據，進行經驗式的推導：利用改變溫度(X)和氣壓(Y)，推得光照度下降(Z)，達到預測光照度下降的目的。同樣使用Python的 `curve_fit()` 函數，推得模擬金星大氣之模型：

$$Z = -0.88X^2 - 0.33Y^2 - 104.09XY + 2025.96X + 2303.06Y - 44154.96$$

以此模型套用至原實驗數據，可得 $R^2$ 值為 0.79，達相似門檻，故初步推論此模型可預測金星模擬大氣的狀態。

#### (九) 模型可推展性分析

為了解模型是否可運用在更廣泛的實驗設計中，本研究設計三組驗證實驗（表十一）以驗證模型的可推展性，並記錄光照度下降量。模型預測光照度下降、比較相對誤差如表十二。發現三組驗證實驗之相對誤差為 0.46~22.34%，其中編號 3 之對照實驗有最低誤差、最佳預測對照，顯示在不離實驗設計範圍太大時，此模型為有效。未來期望在增加數據庫、擴大模型可推展性。

表十一、任意氣壓與溫度於模擬金星大氣影響光照度下降紀錄表。

編號	氣壓加壓值(psi)	溫度(°C)	光照度下降(lx)
1	13	35	119.9
2	15	33	129.3
3	21	33	124.9

表十二、任意氣壓與與溫度於模擬金星大氣影響光照度下降相對誤差分析結果

編號	模型預測光照度下降(lx)	實驗光照度下降(lx)	相對誤差(%)
1	98.17 lx	119.9	18.12%
2	100.41 lx	129.3	22.34%
3	125.48 lx	124.9	0.46%

## 陸、結論

- 一、從氣壓對光照度之影響及溫度對光照度之影響的數據中，能看出氣壓和溫度較大時，光照度的下降量也會較大，代表此時所產生的模擬雲氣也較厚，且無論是溫度的變化還是氣壓的波動，都會影響模擬雲氣的產生，從而改變光的傳播路徑、散射程度以及最終到達接收端的強度。
- 二、在經驗式來看，只有改變氣壓對光照度下降之擬合圖有較佳擬合結果，改變溫度對光照度下降擬合結果則無明顯關係。
- 三、從實驗數據驗證經驗式模型，發現在設計的實驗範圍內可以得到較佳的預測結果，誤差值較小，實驗範圍外的誤差值過大，代表模型建立需要更多數據做為推論基礎。
- 四、在改良實驗中，本研究發現加壓值較低時，模擬金星的光照度下降量比模擬地球的光照度下降量還少；加壓值較高時，模擬金星的光照度下降量比模擬地球的光照度下降量還多。且未來本研究希望比較金星大氣與地球大氣有何不同。
- 五、未來展望：行星科學中，受限於技術與經費的限制，人類不一定能輕易發射探測器至行星大氣或降落至表面收集數據。實驗室中的模擬實驗亦有設備與技術限制，若能將本研究擴展，進行氣壓、溫度、大氣成分等條件控制，達金星不同層大氣狀態，期望能降低實驗門檻，以較精簡的實驗設備與精省的經費，達到了解金星大氣的目的。亦能參考金星大氣狀態，反思地球大氣在氣候變遷下的演化進程，地球的大氣會不會與金星一樣呢？



## 柒、參考文獻資料

- AGU(2022.3.15)。Dynamical Effect on Static Stability of the Venus Atmosphere Simulated Using a General Circulation Model: A Comparison With Radio Occultation Measurements. From Christine Aebi, Julian Gröbner, Stelios Kazadzis, Laurent Vuilleumier, Antonis Gkikas, and Niklaus Kämpfer (2020). Estimation of cloud optical thickness, single scattering albedo and effective droplet radius using a shortwave radiative closure study in Payerne. EGU, the European Geosciences Union. From <https://reurl.cc/p9zG9e>
- Federal Office of Meteorology and Climatology MeteoSwiss (no date). Aerosols and climate. Swiss federal authorities. From <https://reurl.cc/96jQpO>
- John H. Seinfeld, Spyros N. Pandis (2006). Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change. Wiley-Interscience.
- Peter Victor Hobbs (1995). Basic Physical Chemistry for the Atmospheric Sciences. Cambridge University Press.
- Sanjay S. Limaye (2017). The thermal structure of the Venus atmosphere: Intercomparison of Venus Express and ground based observations of vertical temperature and density profiles
- S.S. Limaye, S. Lebonnois, A. Mahieux, M. Pätzold, S. Bougher, S. Bruinsma, S. Chamberlain, R.T. Clancy, J.C. Gérard, G. Gilli, D. Grassi, R. Haus, M. Herrmann, T. Imamura, E. Kohler, P. Krause, A. Migliorini, F. Montmessin, C. Pere, M. Persson, A. Piccialli, M. Rengel, A. Rodin, B. Sandor, M. Sornig, H. Svedhem, S. Tellmann, P. Tanga, A.C. Vandaele, T. Widemann, C.F. Wilson, I. Müller-Wodarg, L. Zasova (2017). The thermal structure of the Venus atmosphere: intercomparison of Venus Express and ground based observations of vertical temperature and density profiles. Icarus 294, 124–155. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2017.04.020>
- Taylor, F. W., & Hunten, D. M. (2014). Encyclopedia of the Solar System (Third Edition). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2010-0-67309-3>
- WIRED(2013.4.11).Soviet Balloon Probes May Have Seen Rain on Venus. From [https://www.wired.com/2013/04/vega-venus-rain/?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.wired.com/2013/04/vega-venus-rain/?utm_source=chatgpt.com)
- 小米商城（無日期）。Xiaomi 電動打氣機 2 Pro〔圖片〕。小米商城。取自 <https://reurl.cc/M6alxp>
- 中華民國航空運動協會（無日期）。航空氣象-雲的分類。取自 <https://reurl.cc/oVnqgQ>
- Omron（無日期）。光電感測器。取自 <https://reurl.cc/WA522L>
- 許良榮（2015 年 03 月 25 日）。科學遊戲瓶中造雲。人間福報。取自 <https://reurl.cc/74g1QD>

威尼爾儀器（無日期）。光感應器〔圖片〕。廣天國際有限公司。取自

<https://reurl.cc/KdmaYq>

戚啟勳（2014 年 1 月）。大氣科學（一版六刷）。弘揚圖書有限公司。

陸向陽（2015 年 5 月 8 日）。探析 DHT11 溫度感測器。Makerpro。取自

<https://reurl.cc/nq98Al>

葉難（2013 年 09 月 18 日）。Arduino 練習：壓力感測器（Force-Sensitive Resistor）〔部落格文章〕。取自 <https://reurl.cc/oVnnVv>

光與物質小站首頁(2007.2.23)。金星(Venus)。取自 <https://reurl.cc/eM4E9L>

## 【評語】 051902

作者進行地球與金星大氣兩項雲物理實驗。實驗一探討改變氣壓與溫度對瓶中模擬造雲的影響。利用鹵素燈控制環境溫度，使用打氣機改變瓶內氣壓，再以光感應器測量光線穿過模擬雲氣的照度變化，探討模擬造雲的光學厚度變化。研究結果發現，氣壓較大和溫度較高時，產出模擬雲氣較多，其中實驗數據經驗式顯示改變氣壓對光照度下降之經驗式有最佳擬合結果。實驗二則在瓶中加入二氧化硫氣體模擬金星大氣，改變氣壓和溫度，觀察模擬雲氣的變化。研究結果發現模擬金星大氣產生之雲氣較地球大氣多，且氣壓越高、模擬雲氣較多，而氣溫越高、模擬雲氣較少。建議補充減壓與成雲過程中的即時溫度變化紀錄，將有助於更完整呈現「溫度 × 雲氣 × 照度」的交互關係。在優化數據分析與模型建構方面，建議每組數據分別擬合，並觀察趨勢的一致性，以提升模型的統計合理性與精確性。作者可進一步探究實驗模擬之（1）金星大氣產生雲氣較地球大氣的多，（2）兩大氣層皆呈現氣壓越高則模擬雲氣較多，（3）地球大氣溫度較高時有較多的模擬雲氣，而地球大氣則反之，物理機制。

作品海報

探討瓶內氣壓、溫度對光穿透模擬雲  
照度變化之影響-以金星與地球大氣為例



# 前言

## 研究動機

抬頭仰望雲的變化，引發我們對雲的好奇。我們藉改變環境條件探討雲的成因，以瓶中造雲實驗觀察不同瓶內溫度及氣壓對雲氣形成影響；進一步，改變瓶中氣體成分以模擬金星大氣，與地球大氣比較雲氣形成之差異。

## 研究目的

- 一、以一體成形桶裝水瓶作為固定體積模型來模擬造雲。
- 二、改變瓶中氣壓和溫度，探討光通過模擬雲氣之照度有何變化。
- 三、藉由經驗公式推導，了解瓶中氣壓與溫度對模擬雲氣的光學厚度之影響。
- 四、在桶裝水瓶中模擬金星大氣，改變氣壓與溫度，比較與地球大氣環境中之模擬雲氣差異。

## 文獻回顧

### 一、瓶中造雲的原理

- 寶特瓶打氣後，內部氣壓值會增加，當快速拔開瓶塞，氣壓瞬間降低產生氣壓差，並產生以下兩個現象：
- （一）因氣體快速膨脹時會吸收熱量使瓶內氣體降溫。
- （二）因氣壓快速降低，瓶內的水會蒸發成水氣，由於氣體溫度降低，因此水氣會凝結成肉眼所見的雲霧。

### 二、雲的光學厚度

雲光學厚度是描述雲層對太陽輻射的衰減程度，包括散射和吸收的影響。雲光學厚度與雲的粒子大小、含水量和雲層厚度有關，光學厚度越大，雲層越「厚」，阻擋輻射的能力越強，液態水滴的含量是衡量雲層中水分的關鍵指標，其有效平均半徑也直接決定了雲對輻射的吸收和散射能力。

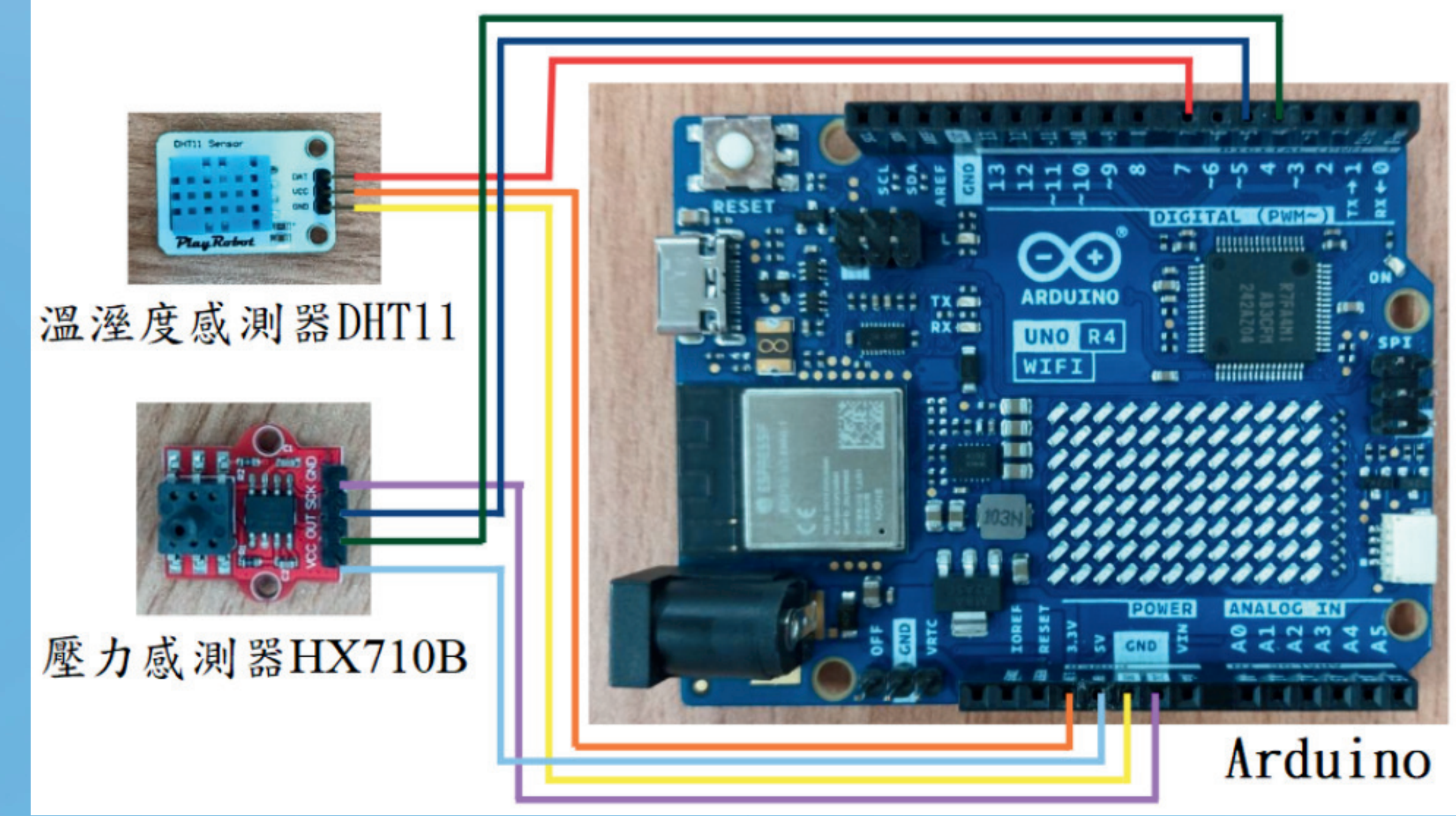
### 三、金星的大氣概況

金星大氣濃厚，二氧化碳佔96.5%、氮氣佔3.5%，而微量氣體則以二氧化硫最多，含量約150 ppm。金星大氣層在離表面約50-55公里處，具有與地球海平面相似的氣壓（1大氣壓）和溫度（0-50 ℃）條件 (S.S. Limaye et al, 2017)，本研究將以此處的大氣環境進行模擬，了解金星與地球大氣模擬雲氣的狀態。

## 研究設備及器材

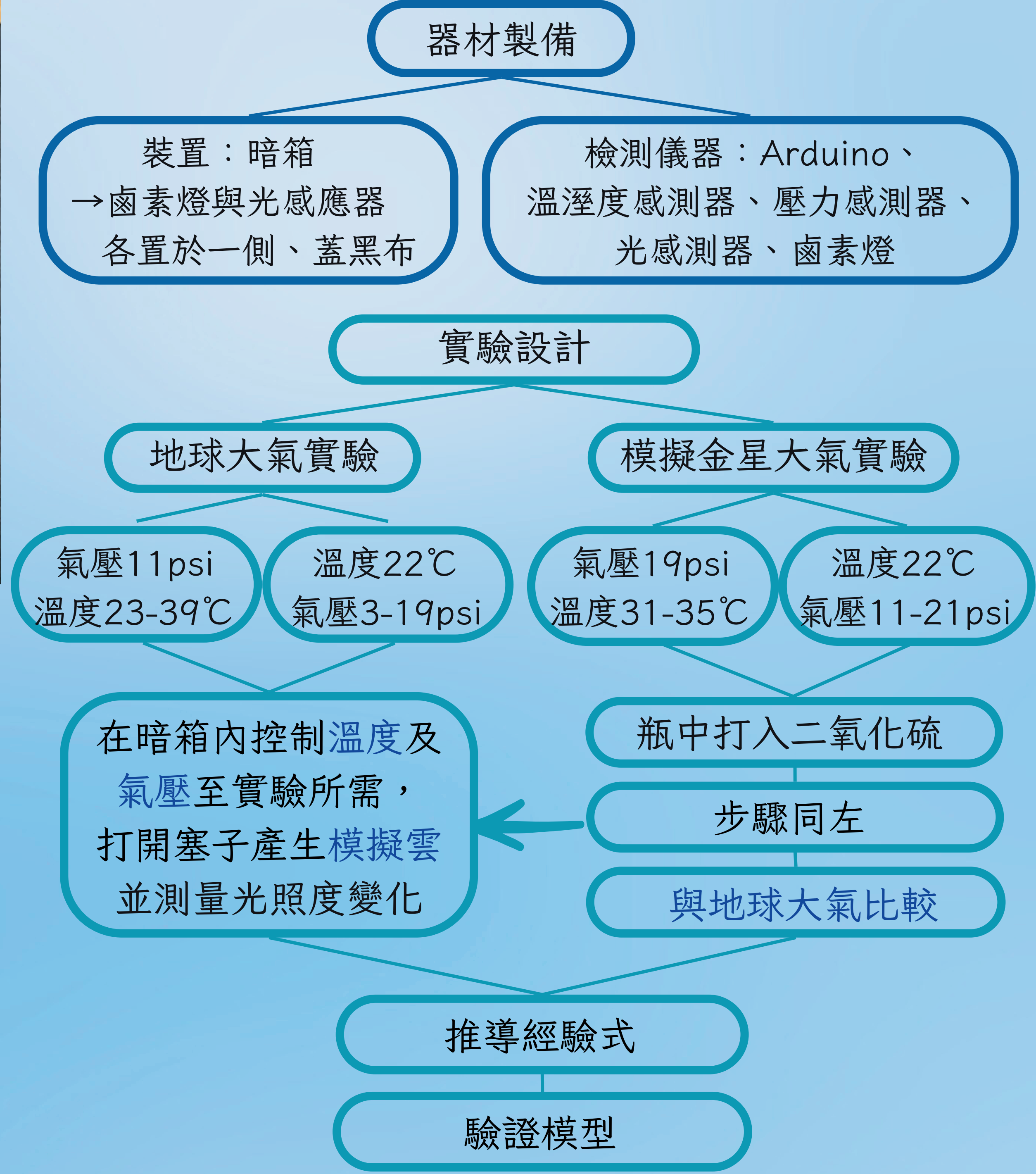


圖一、實驗裝置圖。（作者自行拍攝）



圖二、檢測儀器配置圖。（作者自行拍攝）

## 研究過程或方法



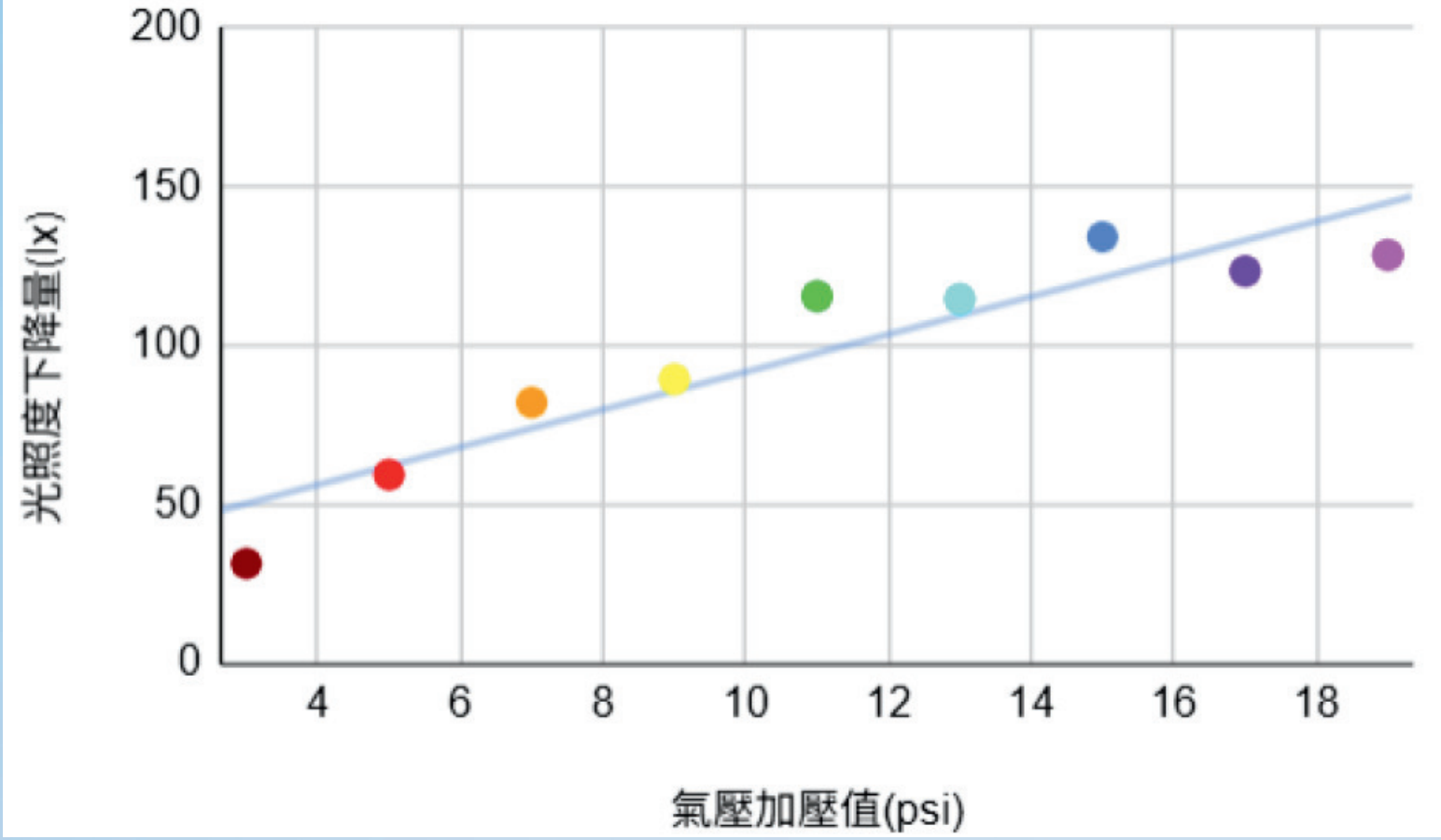
## 研究結果與討論

### 一、氣壓對光照度變化之影響

- （一）加壓3~15 psi：加壓值與光照度下降量呈現上升趨勢。
- （二）加壓15 psi：光照度下降最多。

溫度(℃)		22								
氣壓加壓值(psi)		3	5	7	9	11	13	15	17	19
光照度 下降量 (lx)	平均	31.3	59.3	82.1	89.4	115.6	114.7	134.3	123.5	128.6
	下降百分比	11.6%	21.7%	27.5%	32.2%	38.7%	38.5%	40.3%	34.7%	42.3%

表一、各氣壓加壓值之光照度變化平均圖。（作者自行製作）



圖三、壓力與光照度下降之趨勢圖。（作者自行製作）

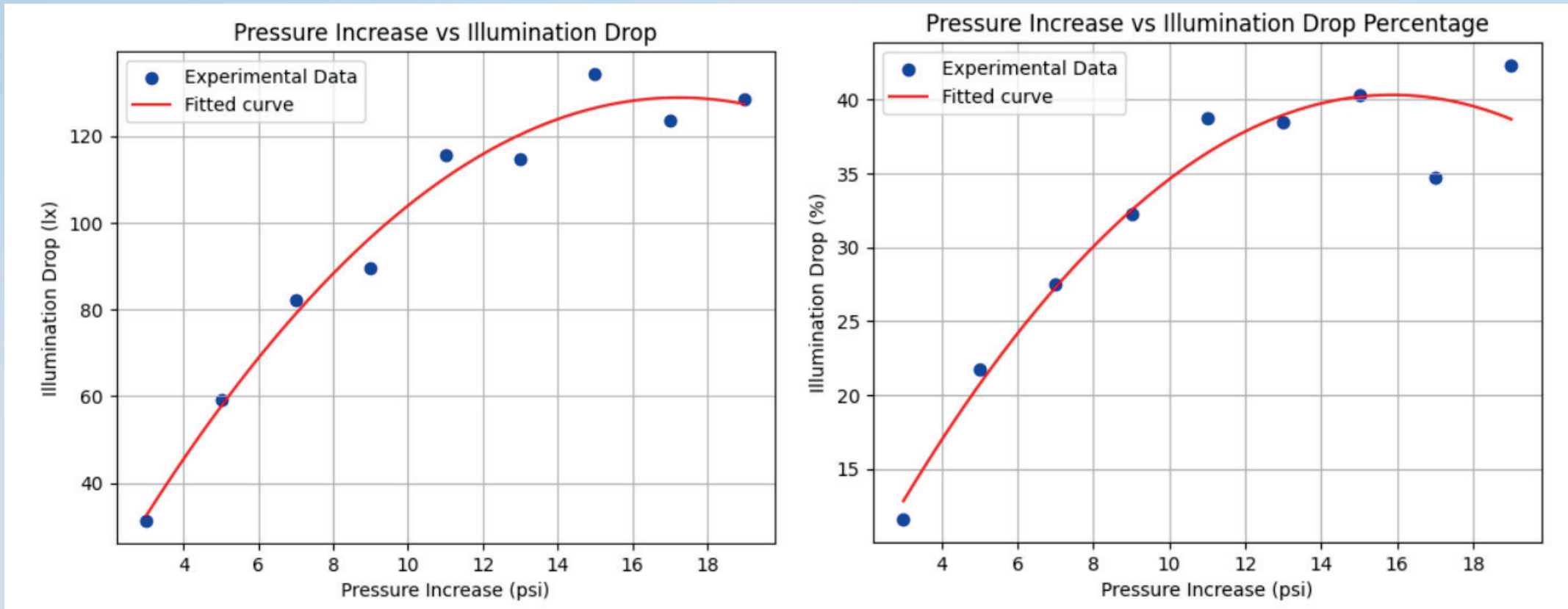
### 推測

- 1.當氣壓愈高，模擬雲氣的形成愈濃，導致光的散射加強，光照度下降愈多。
- 2.當氣壓加壓17-19 psi時，雲氣中的水滴可能因聚合成大水滴而減少散射量，讓光照度下降幅度變小。

### （三）本研究得到以下經驗式：

- 1.改變氣壓影響光照度下降經驗式（圖四左）：  
 $y = -0.47x^2 + 16.37x - 12.37$ ， $R^2$ 值達0.98
- 2.改變氣壓影響光照度下降百分比經驗式（圖四右）：  
 $y = -0.16x^2 + 5.27x - 1.49$ ， $R^2$ 值達0.94

### 顯示擬合效果佳



圖四、改變氣壓對光照度下降二次函數關係圖。（作者自行製作）

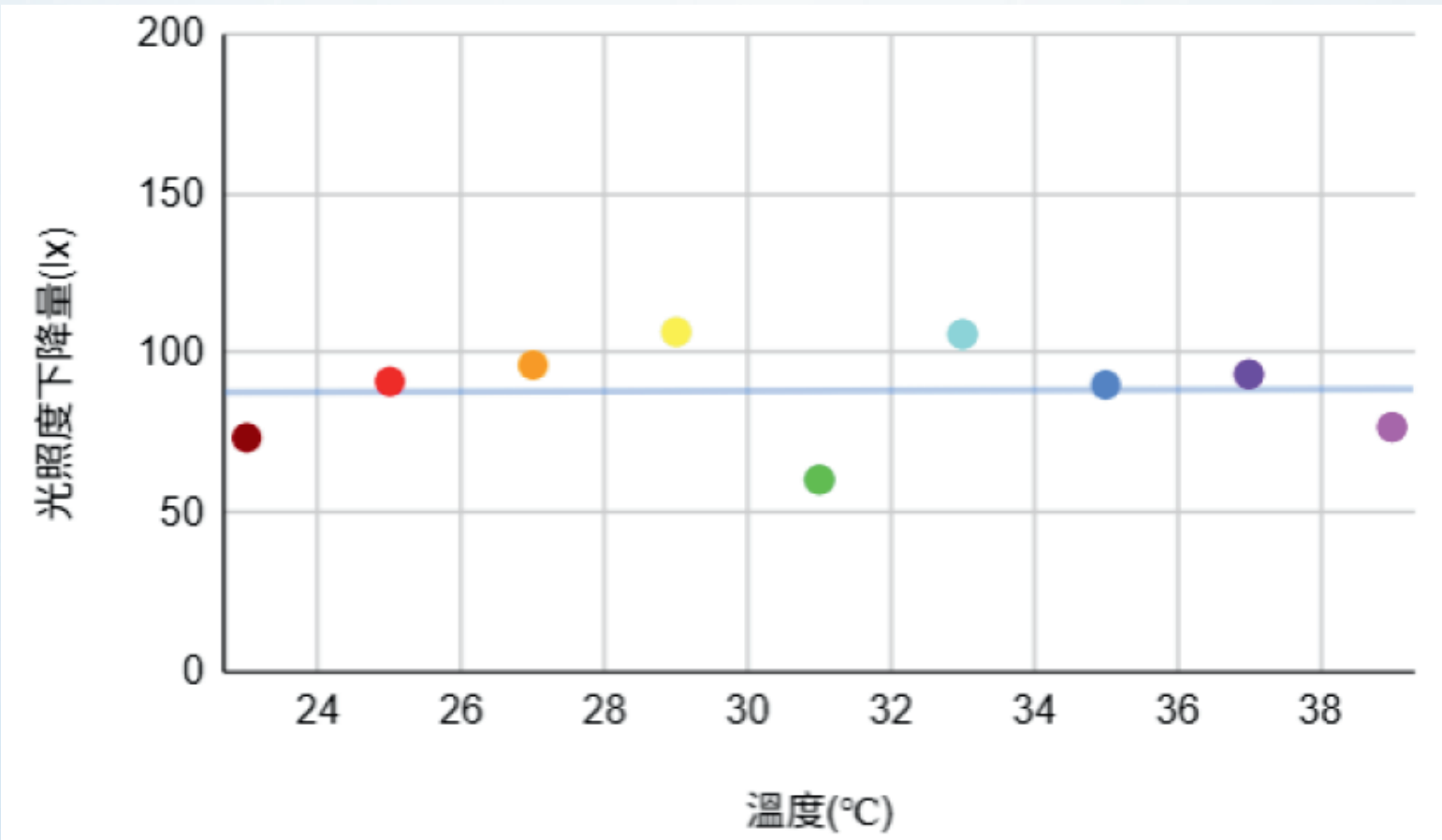


二、溫度對光照度變化之影響

- (一) 溫度23~29 ℃：溫度與光照度下降量呈現上升趨勢。
- (二) 溫度29 ℃：光照度下降量最多。

氣壓加壓值(psi)		11								
溫度(℃)		23	25	27	29	31	33	35	37	39
光照度下降量(lx)	平均	73.5	91.1	96.3	106.7	60.3	106.0	90.1	93.4	76.8
	下降百分比	31.4%	28.2%	33.1%	40.4%	32.0%	36.6%	38.1%	30.8%	27.5%

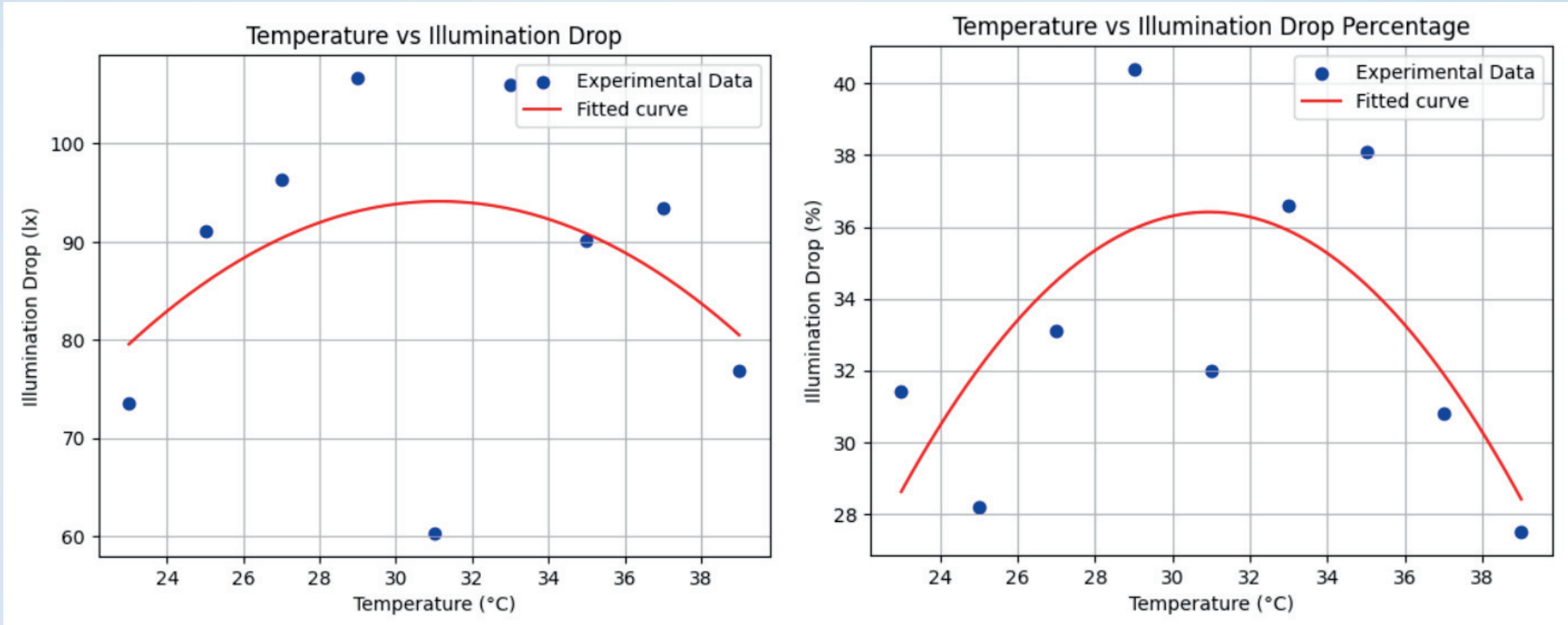
表二、各溫度之光照度變化圖。（作者自行製作）



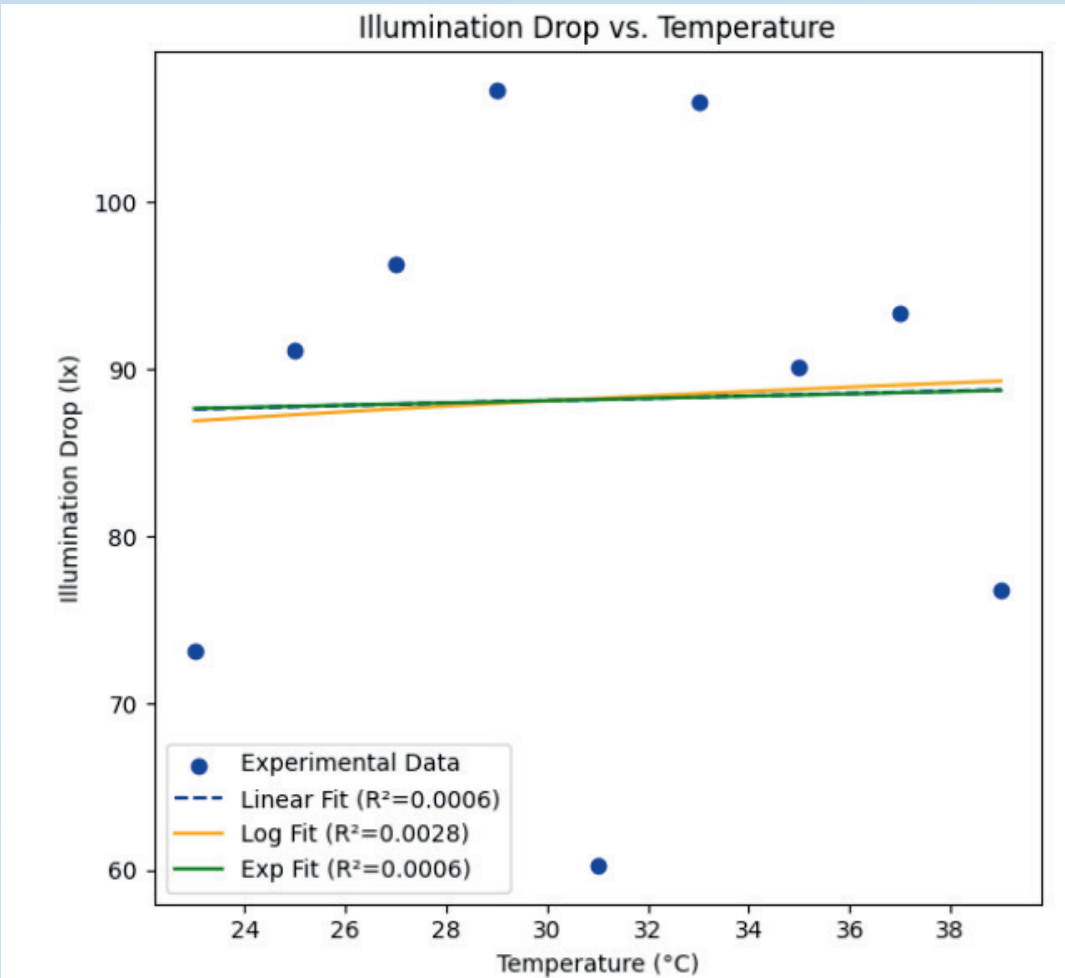
圖五、溫度與光照度下降之趨勢圖。（作者自行製作）

- 1.在溫度23-29 ℃，水分蒸發速度隨溫度增加而加快，更多小水滴形成，光散射變強，光照度下降愈多。
- 推測 2.在溫度33 ℃，水滴可能開始蒸發或變大，導致散射減弱，光照度下降程度趨緩。
- 3.整體來說，光照度下降量無明顯隨溫度升高而改變，大多維持在80-110 lx間，代表改變溫度對實驗結果無顯著影響。

- (三) 改變溫度運用同前面的運算方法得到二次函數擬合：
  - (四) 為確認是否有比二次函數擬合更好的經驗式，本研究嘗試：線性擬合 $y=ax+b$ 、對數擬合 $y=a\log x+b$ 、指數擬合 $y=ae^{bx}$ 。
- 顯示擬合效果不佳



圖六、改變溫度對光照度下降之二次函數關係圖。（作者自行製作）



圖七、改變溫度對光照度下降擬合結果。（作者自行製作）

三種擬合結果不佳

排除經驗式種類選擇錯誤所致

溫度變化  
並非是影響雲氣厚度的主因

三、光照度變化與誤差來源分析

- (一) 雲氣影響光的傳播，使得部分光被吸收或散射。
- (二) 雲氣流動改變光線的折射、散射狀態，導致光反應器接收到的光強度降低。
- (三) 實驗過程：環境因素（如：溫度、濕度等）。
- (四) 實驗設備：光感測器的精度、鹵素燈的穩定性、桶裝水瓶的表面不平整。

四、綜合比較

本研究統整兩組實驗結果，想要了解是否能由指定氣壓與溫度，推得光照度下降值，與恢復至背景值所需時間的經驗式。參數給定如下：照度下降(Z)，與溫度(X)和氣壓(Y)之間的關係。由實驗數據可得照度下降模型：

$$Z=0.07X^2-0.33Y^2+159.07XY-1755.19X-3486.33Y+38577.47$$

五、模型可推展性分析

為了驗證建立的模型是否可廣泛應用到任意溫度(X)、與任意氣壓(Y)影響照度下降(Z)，本研究設計編號1為溫度極端值、編號3為氣壓極端值，編號2為實驗區間。由表一各實驗之光照度下降平均值計算其與模型預測值的相對誤差： $\frac{|Z_{exp}-Z_{pred}|}{Z_{exp}} \times 100\%$  得到計算結果如表三：

編號	氣壓加壓值(psi)	溫度(℃)	光照度下降量平均(lx)	模型預測光照度下降量(lx)	平均實驗光照度下降量(lx)	相對誤差(%)
1	5	39	28.68	-16189	28.68	>100%
2	11	31	81.53	87.16	81.53	6.91%
3	19	29	88.45	9023	88.45	>100%

最佳擬合

模型預測  
光照度下降量  
有較大誤差

表三、任意氣壓與與溫度影響光照度下降紀錄表及光照度下降相對誤差分析。（作者自行製作）

推測 因為本模型之數據庫比較小，所以無法提供模型預測溫度與氣壓範圍外的情形。

六、改良實驗

- (一) 更換瓶身為平滑的桶裝水瓶，以減少光的散射與折射導致光感應器的接收誤差。
- (二) 使用兩支光感應器進行光照度數據收集，並將兩支光感應器數值之平均，以減少誤差。

七、模擬金星大氣

於桶裝水瓶內注入1.2 ml的二氧化硫氣體，模擬大氣中含有150 ppm二氧化硫之金星大氣層，以相同的實驗設計收集地球大氣之對照組，其餘研究流程同原實驗。實驗結果與討論如下：

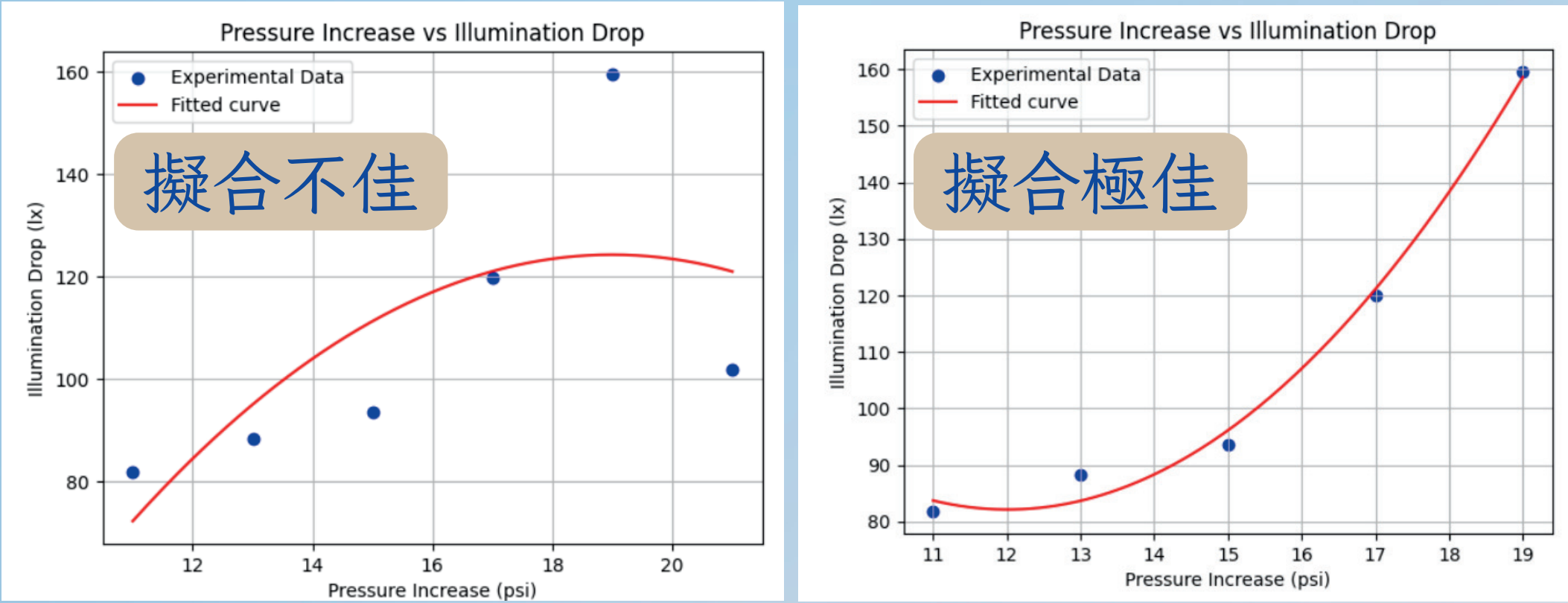
實驗一：改變金星大氣氣壓與光照度間的比較

- (一) 加壓11-19 psi：加壓值與光照度變化呈現上升趨勢。
- (二) 加壓21 psi：光照度下降量減少。← 高壓可能影響雲氣形成

溫度(℃)		22					
氣壓加壓值(psi)		11	13	15	17	19	21
光照度下降量(lx)	平均	81.8	88.3	93.5	119.9	159.6	102
	下降百分比	30.5%	40.0%	30.6%	46.3%	47.2%	33.2%

表四、模擬金星改變氣壓對光照度下降紀錄表。（作者自行製作）

- (三) 模擬金星改變氣壓對光照度下降量之經驗式（圖九左）： $y = -0.81x^2 + 30.95x - 169.56$ ， $R^2$ 值僅0.5
- (四) 21 psi可能影響擬合結果，刪除其值再次擬合（圖九右）： $y = 1.56x^2 - 37.57 + 307.67$ ， $R^2$ 值達0.99



圖九、模擬金星改變氣壓對光照度下降量之擬合圖。（作者自行製作）

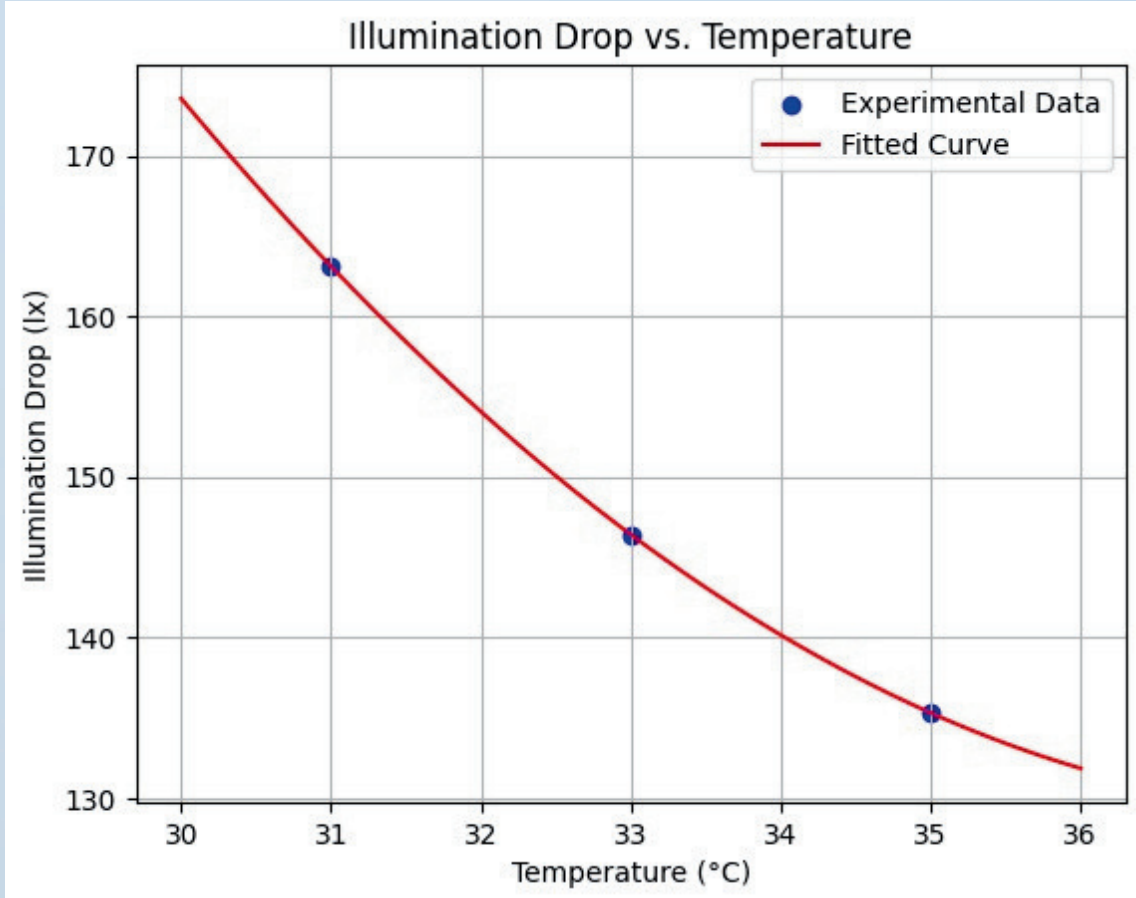
實驗二：改變金星大氣溫度與光照度間的比較

- (一) 發現溫度上升越多、光照度下降越少。
- (二) 推測因溫度改變量太小，使實驗結果無明顯關係。

氣壓加壓值(psi)		19		
溫度(℃)		31	33	35
光照度下降量(lx)	平均	163.1	146.4	135.3
	下降百分比	47.3%	42.7%	43.3%

表五、模擬金星改變溫度對光照度下降紀錄表。（作者自行製作）

- (三) 模擬金星改變大氣溫度之光照度下降量之經驗式：（圖十） $y = 0.7x^2 - 53.15x + 1138.05$ ， $R^2$ 值為1.0
- (四) 因本實驗僅改變三次溫度，故二次擬合可得 $R^2$ 值1.0之完全擬合，對於尋找擬合經驗式的意義不大。
- (五) 未來應增加更多組實驗，以推得有科學意義的擬合經驗式。



圖十、模擬金星改變溫度對光照度下降量之擬合圖。（作者自行製作）



圖八、改良實驗裝置圖。（作者自行拍攝）



八、地球大氣之對照組

為比較金星大氣與地球大氣之氣壓及溫度有何區別，本研究進行模擬金星與地球大氣的模擬造雲實驗，得到以下研究結果，並進行討論分析。

實驗一：改變地球大氣氣壓與光照度間的比較

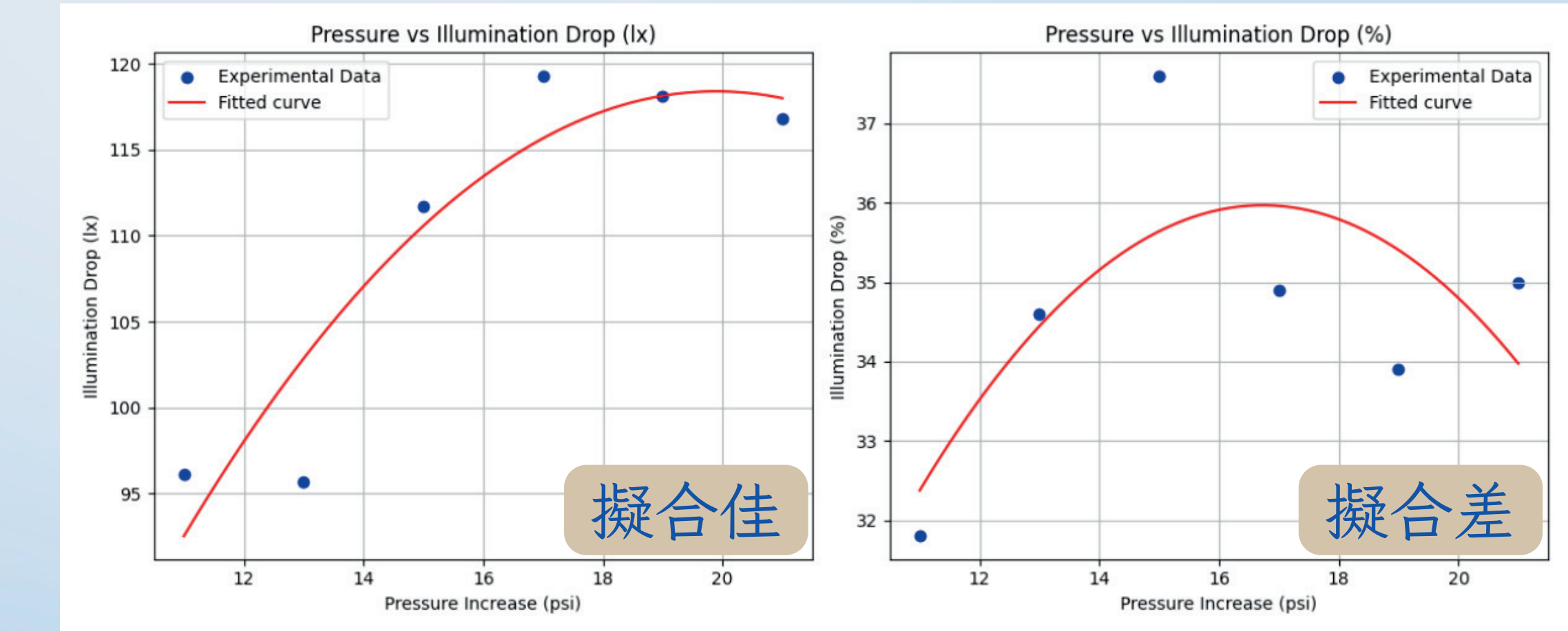
- (一) 加壓11-17 psi：光照度下降量呈上升趨勢。
- (二) 加壓19-21 psi：光照度下降量趨於緩和。
- (三) 加壓11-13 psi：光照度下降量無明顯變化。
- 加壓15-19 psi：

溫度(°C)		22					
氣壓加壓值(psi)		11	13	15	17	19	21
光照度下降量(lx)	平均	96.1	95.7	111.7	119.3	118.1	116.8
	下降百分比	31.8%	34.6%	37.6%	34.9%	33.9%	35.0%

表六、模擬地球改變氣壓對光照度下降紀錄表。（作者自行製作）

- (四) 模擬地球改變氣壓對光照度下降量之經驗式(圖九左)  
 $y = -0.33x^2 + 13.02x - 11.09$ ， $R^2$ 值為0.87
- (五) 若以下降百分比進行擬合，經驗式（圖九右）  
 $y = -0.10x^2 + 3.66x + 5.35$ ， $R^2$ 值為0.51

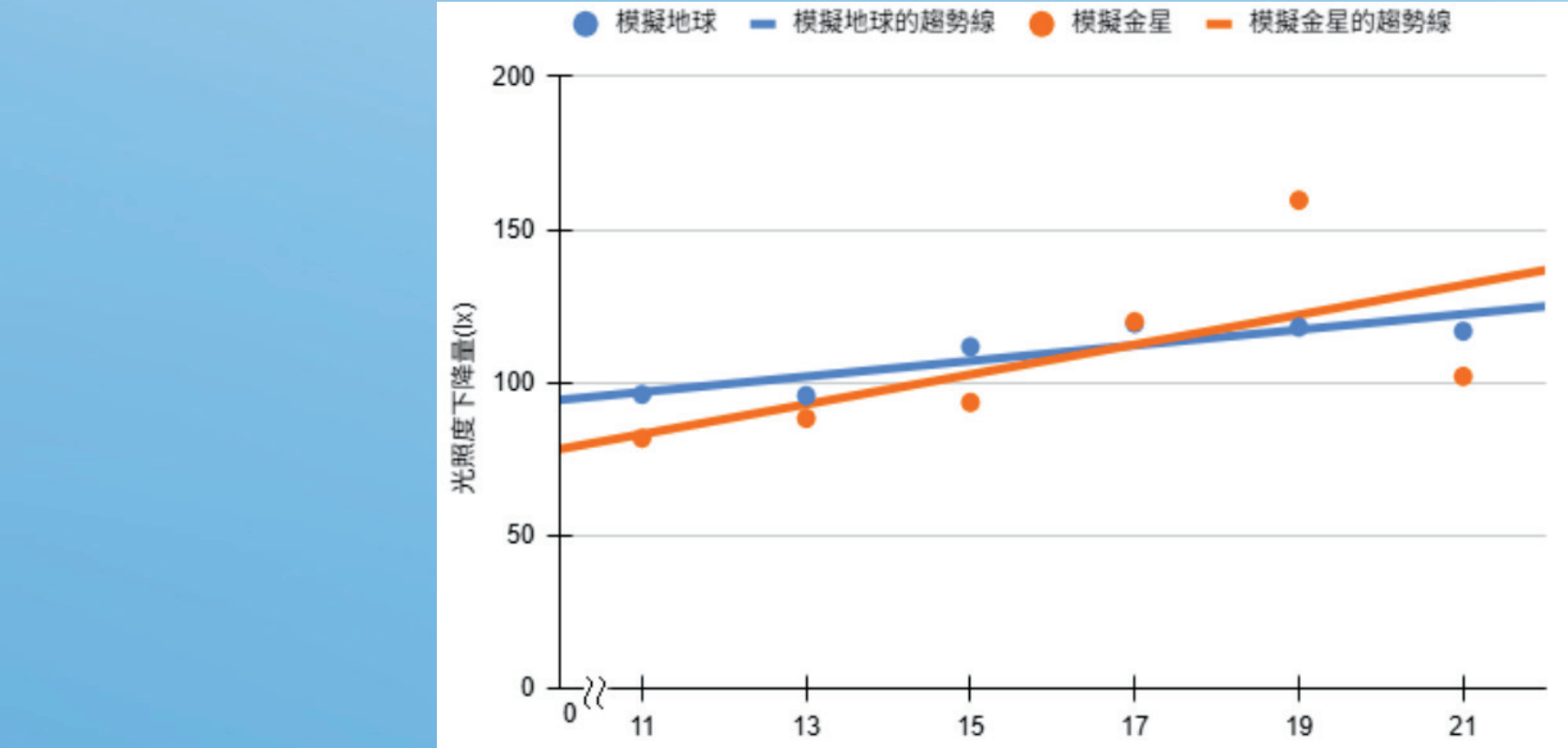
推測因下降百分比數值集中（31.8~37.6），縱座標跨距小，使數據點看似分散所致。



圖十一、模擬地球改變氣壓對光照度下降之擬合。  
（左）為下降量，（右）為下降百分比。（作者自行製作）

九、模擬金星與地球大氣綜合比較

- (一) 兩組實驗具有一致性：氣壓加壓越高、光照度下降量越多；溫度越高、光照度下降量越少。
- (二) 模擬金星大氣之實驗：加壓使光照度下降量較模擬地球大氣明顯，顯示二氧化硫氣體對壓力改變較敏感。
- (三) 改變溫度之實驗：雖光照度下降量均有呈現下降趨勢，但因組數較少，希望在未來能增加實驗組數及擴大溫差範圍，以獲得更完整的分析結果。



圖十三、模擬金星及地球改變氣壓與光照度間的比較。  
（作者自行製作）

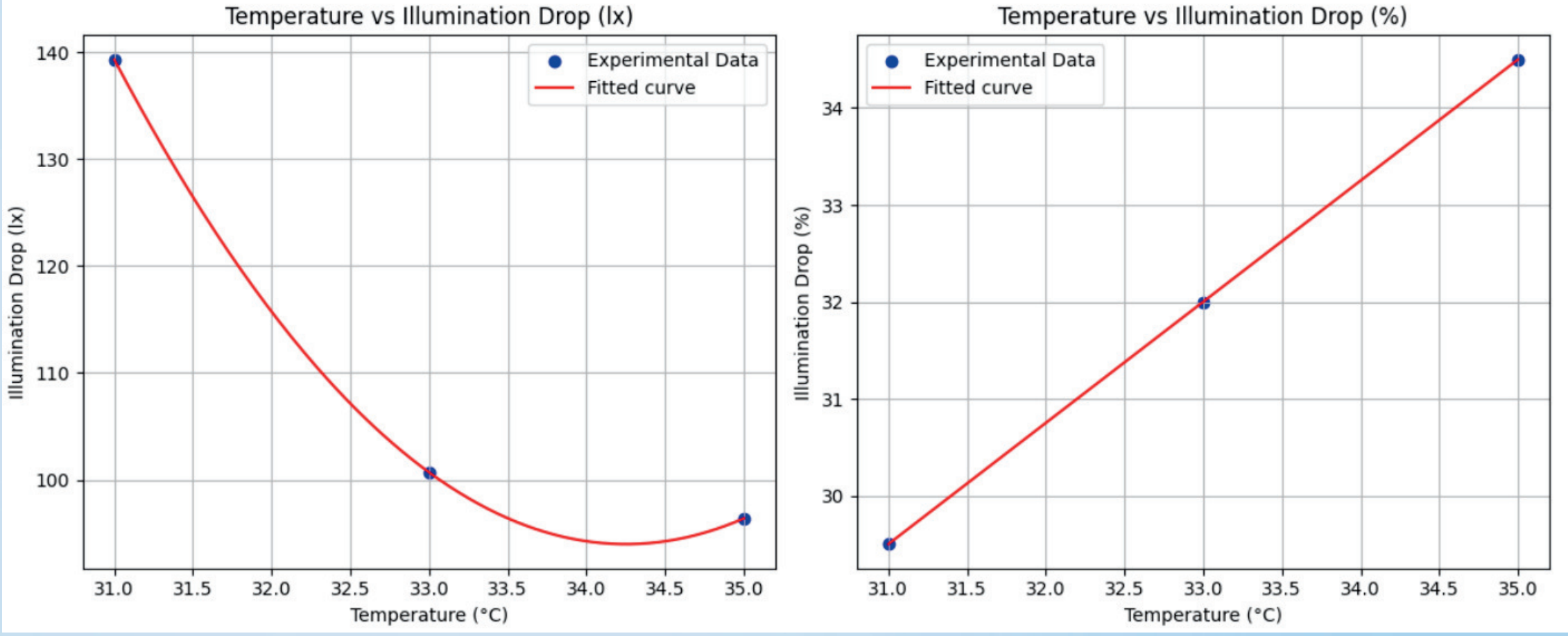
實驗二：改變地球大氣溫度與光照度間的比較

- (一) 溫度越高、光照度下降量越少。
- 推測因溫度越高，飽和水氣壓越大、水氣越不容易飽和，故模擬雲氣越稀薄。
- (二) 每次增加2℃之實驗設計，差異過小，不易歸納出具廣泛性的推論。

氣壓加壓值(psi)		19		
溫度(°C)		31	33	35
光照度下降量(lx)	平均	139.3	100.7	96.4
	下降百分比	29.5%	32.0%	34.5%

表七、模擬地球改變溫度對光照度下降紀錄表。  
（作者自行製作）

- (三) 運用與氣壓相同的運算方法得到光照度下降量與下降百分比之二次函數，發現擬合效果不佳。



圖十二、模擬地球改變溫度對光照度下降量之擬合。  
（左）為下降量，（右）為下降百分比。（作者自行製作）

十、模擬金星大氣之模型可推展性分析

- (一) 本研究想要利用模擬金星大氣的實驗數據，推得模擬金星大氣之模型，參數給定如下：光照度下降(Z)、與溫度(X)和氣壓(Y)之間的關係、與光照度恢復至背景值的時間(T)、與溫度(X)和氣壓(Y)之間的關係。由實驗數據可得照度下降模型： $Z = -0.88X^2 - 0.33Y^2 - 104.09XY + 2025.96X + 2303.06Y - 44154.96$
- (二) 為了了解模型是否可運用在更廣泛的實驗設計中，本研究設計三組驗證實驗以驗證模型的可推展性。發現編號3之對照實驗有最低誤差、最佳預測對照，顯示在不離實驗設計範圍太大時，此模型為有效。

編號	氣壓加壓值(psi)	溫度(°C)	光照度下降量(lx)	模型預測光照度下降(lx)	實驗光照度下降量(lx)	相對誤差(%)
1	13	35	119.9	98.17 lx	119.9	18.12%
2	15	33	129.3	100.41 lx	129.3	22.34%
3	21	33	124.9	125.48 lx	124.9	0.46%

最佳擬合

表八、任意氣壓與與溫度於模擬金星大氣影響光照度下降紀錄表。（作者自行製作）

- 結論
- 一、從實驗數據可知，氣壓和溫度較大時，光照度下降量也會較大，代表此時所產生的模擬雲氣也較厚，且無論是溫度的變化還是氣壓的波動，都會影響模擬雲氣的產生，進而影響光感測機接收到的光多寡。
- 二、在經驗式來看，只有改變氣壓對光照度下降之擬合圖有較佳擬合結果，其餘關係式皆無明顯關係。
- 三、從驗證經驗式模型，發現在實驗範圍內的預測誤差值較小，實驗範圍外的誤差值過大，代表模型建立需要更多數據做為推論基礎。
- 四、在改良實驗中，本研究發現加壓值較低時，模擬金星的光照度下降量比模擬地球的光照度下降量還少；加壓值較高時，模擬金星的光照度下降量比模擬地球的光照度下降量還多。
- 五、未來本研究希望比較金星大氣與地球大氣有何不同，且希望能擴展進行氣壓、溫度、大氣成分等條件控制，達金星不同層大氣狀態，期望能降低實驗門檻，以較精簡的實驗設備與精省的經費，達到了解金星大氣的目的。亦能參考金星大氣狀態，反思地球大氣在氣候變遷下的演化進程。

參考文獻

S.S. Limaye et al, 2017.The thermal structure of the Venus atmosphere: intercomparison of Venus Express and ground based observations of vertical temperature and density profiles. Icarus 294, 124–155. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2017.04.020>