

中華民國第四十八屆中小學科學展覽會  
作品說明書

---

高中組 物理科

040112

光風車性質之相關研究

學校名稱：國立臺中第一高級中學

<p>作者：</p> <p>高二 廖冠翔</p> <p>高二 陳光祥</p> <p>高二 蕭景文</p>	<p>指導老師：</p> <p>林宗徽</p>
--	-------------------------

關鍵詞：熱輻射、氣體分子運動

## 摘要

本研究是關於俗稱「光風車」的葉輪輻射計之一些基本性質，經過討論後，我們決定對其幾個可能變因做實驗測試，處理測量所得數據整理於下內文中，並做結論於末。關於實驗測量部份，我們探討使其轉動之主要原理，並討論其於相同環境下改變測試變因是否影響轉速，藉此研究其確實之影響變因，並探討是否能將其作為某些應用。



(圖 1)葉輪輻射計(光風車)



(圖 2)輻射計 俯視

## 壹、研究動機

我們第一次看到光風車時，覺得很有趣，想知道使它轉動的原因，因為葉輪輻射計是一種熱輻射計，應與「熱輻射」有較顯著的相關性，然而上網找、和老師借書翻閱都找不到確切的原理，跟老師借到的「愛因斯坦這麼說」書中提到目前對於其原理仍無法確實得知，雖有各種不同的說法，卻無詳細的證明，只知其在極低氣壓下照光會轉動，且歷史上對光風車的研究不完整，年代也很久遠，也許可嘗試去做較完整的研究。教授給我們的 1968 年 10 月物理教師月刊中有提到關於輻射計(radiometer)的原理，但有些地方講得不是很清楚，故我們想以實驗來了解其可能的實際原因。

## 貳、研究目的

- 一、探討改變其不同環境條件後是否對其轉速造成影響
- 二、了解何種原因使其產生轉動
- 三、是否能將其應用於一般日常生活中

## 參、研究設備及器材

基本實驗器材：輻射計、雷射筆、照相機、PASCO 雷射光發射器、筆記型電腦、燒杯、LED 燈、鐵盒(架高)及紙板(擋光)、(電子)溫度計、暖暖包、吹風機、柱形燈及桌燈、燈泡、DataStudio 軟體、SW750 主機及光感測器

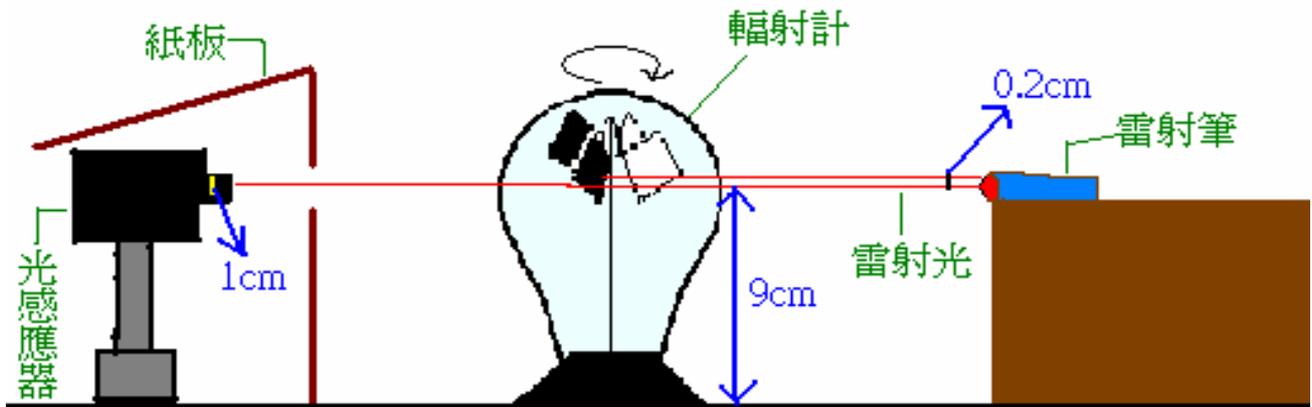
氣壓實驗設備：Pyrex 玻璃、塑膠真空乾燥皿、氣壓計、壓克力裝置、Grease、接管與接頭、抽氣 pump、On-Off valve、真空膠與 AB 膠

葉片測溫設備：紅外線溫度計

## 肆、研究過程或方法

### 一、雷射測速裝置

將 SW750 主機連接至電腦、光感應器接於類比接孔，另一端架上雷射筆與光感應器約等高，並將雷射光對準於感應器中，再放置輻射計於感應器與雷射筆中間，使雷射光剛好照到葉片邊緣後以光源照射輻射計，而光感應器接收雷射光後(因葉片在轉動，雷射光在無葉片遮擋時可通過)，從 DataStudio 程式中顯示出光源強度隨時間的變化(測量頻率設為 500Hz)，由圖表便可算出其穩定時的轉速頻率(往後提到輻射計的轉速或轉動即指葉片的旋轉)。



p.s.其餘未註明之距離因隨實驗不同而有所差異，故不一一列出

(圖 3)

\* 為避免其他非要測的光源，用兩紙板(圖 3)擋住，在雷射通過處留一小孔，但僅在光源實驗中使用，而只用雷射光時輻射計仍不轉(圖 5)，故不影響轉速的測定。



(圖 4)雷射測速裝置(未放紙板)



(圖 5)雷射測速裝置

### 二、取得光強度變化之數據判讀

因輻射計有四個葉片，故葉片旋轉一圈時，會擋住雷射光四次，於電腦顯示的圖表上，可看出光強度的變化呈週期性的高低起伏，取四波峰為一週期，計算所需時間，便可計算出轉速(轉/s)。

## 伍、研究結果

### 一、光源實驗

因為光風車照光會轉動的特性，我們想先就不同功率的光源試試。在雷射測速裝置旁置一光源，距輻射計支軸 15cm(水平)，但 LED 手電筒光強較弱只距輻射計外殼 1cm。比較不同功率(25W、60W、100W 白熾燈泡、LED 手電筒)的光源，分別照射輻射計使其轉動，並做雷射測速取得光強度變化之數據。

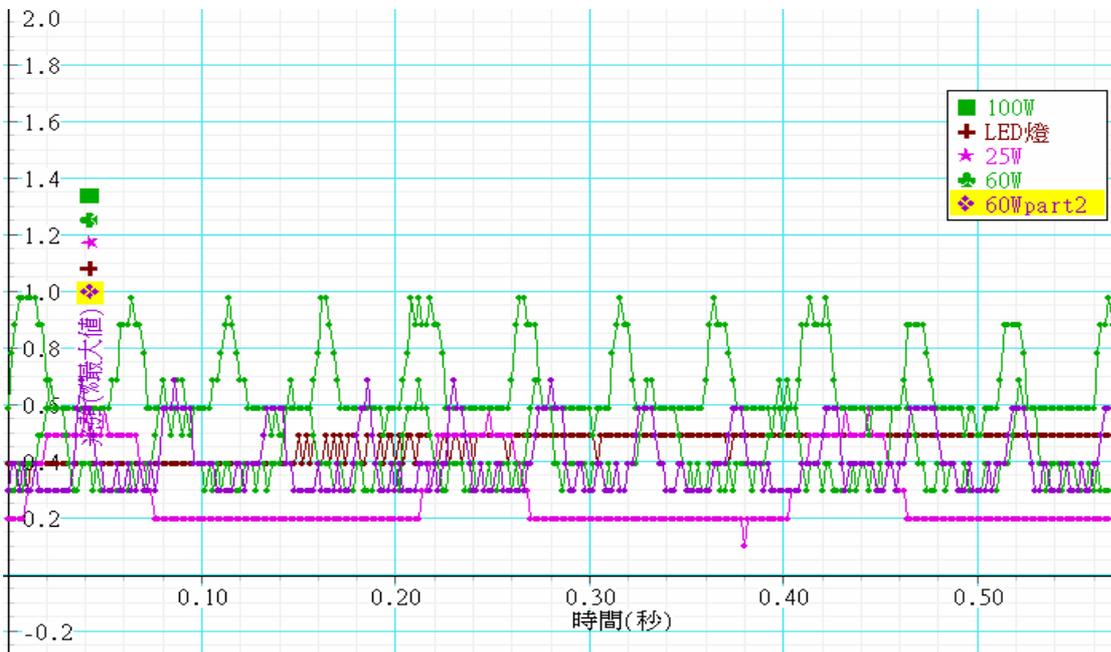
\* 輻射計轉動時，皆由黑面往白面推。



(圖 6)各種功率的燈泡測量



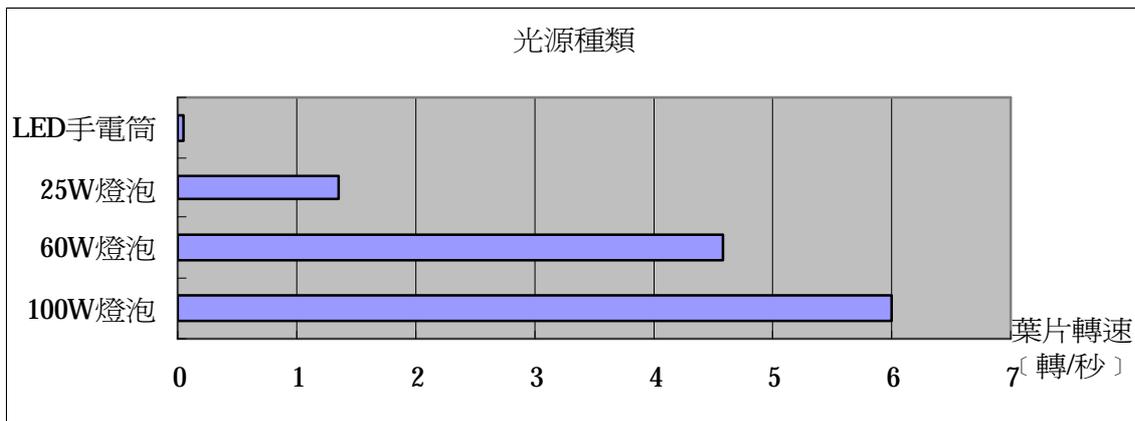
(圖 7)LED 燈測量



(圖 8) 光強度對時間的關係圖

光源種類	轉速 [ 轉/秒 ]
100W 燈泡	23.993/4=5.998
60W 燈泡	18.3/4=4.575
25W 燈泡	5.421/4=1.355
LED 手電筒	0.178/4=0.045

(表 1)



(圖 9)

功率越大的光源，轉速越快，而最後都會達一終端轉速(實驗所測)。由圖 9，燈泡功率與轉速大致成正相關的關係，其實不只光源，如光源的距離，可知光源一定時，距離越遠，轉速越慢。

由圖 8 知光強度對時間的關係，隨時間經過呈波動的週期曲線，其中上方的綠色線是 100W 燈泡，而下方綠色線是 60W 燈泡。以 100W 燈泡為例，兩波峰(曲線的頂點)間之距離為  $1/4T$ ， $T$  代表週期，也就是說從一個波峰，到其往後數來第四個波峰的連線段距離，就是間隔的時間，故可算出轉速。而光強度只是光感測器接收時訊號的強弱，在轉速的推導上較不重要。

## 二、熱源實驗

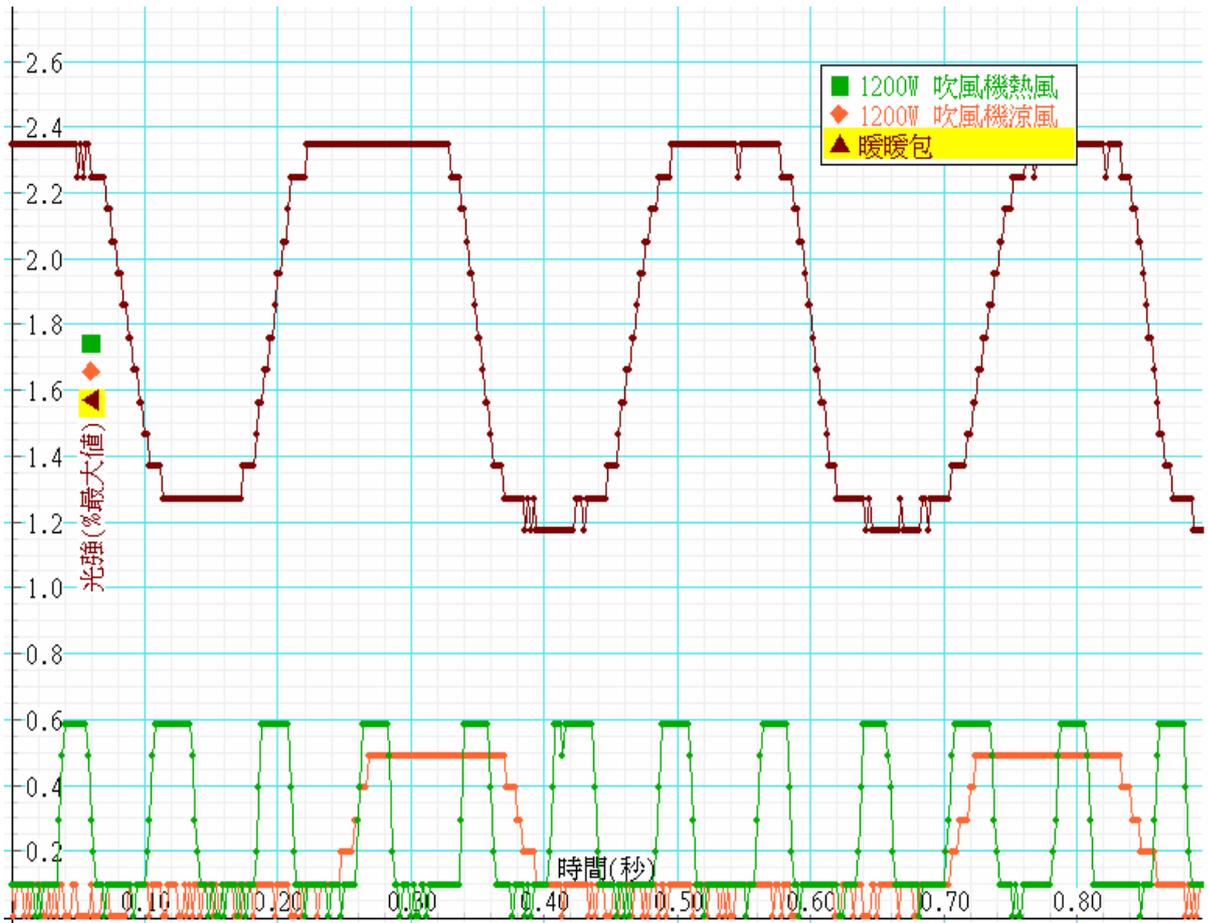
有光便會生熱，若只用熱源而非光的照射下會有怎樣的結果呢？測定熱源的裝置中，我們使用 1200W 吹風機(涼風、熱風)及暖暖包來使其轉動，並測量得數據比較結果。吹風機距支軸水平 5cm，暖暖包是直接疊在上面。吹風機熱風可達  $102^{\circ}\text{C}$ ，暖暖包為  $56^{\circ}\text{C}$ 。



(圖 10)暖暖包測量



(圖 11)吹風機測量

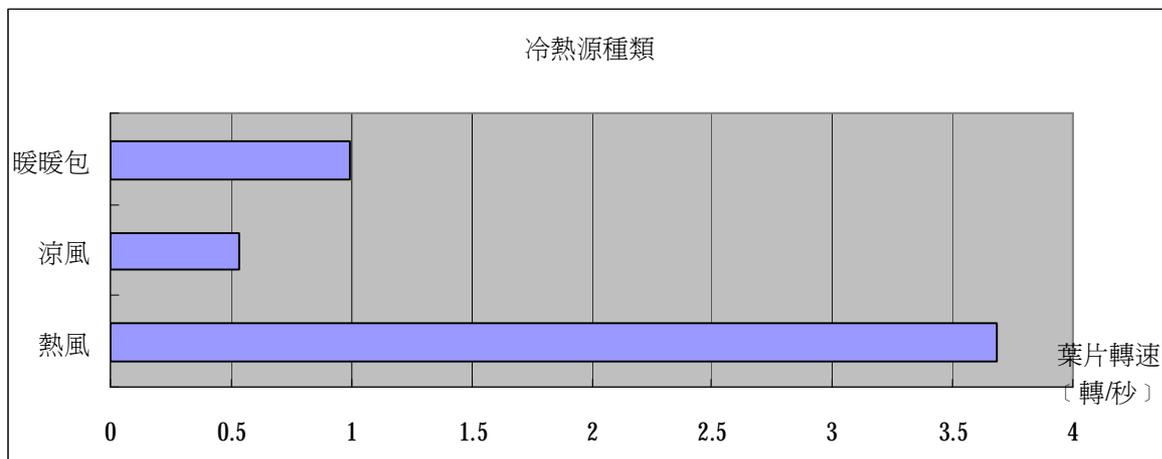


(圖 12)

\* 輻射計轉動時，由黑往白推，唯以吹風機(涼風)測量時「由白往黑」推，表示旋轉方向並非一定，而關閉熱源後，輻射計在由黑往白轉停止後，隨即明顯「由白往黑」轉。

冷熱源種類	轉速 [ 轉/秒 ]
熱風	$14.73/4=3.683$
涼風	$2.231/4=0.533$
暖暖包	$3.966/4=0.992$

(表 2)



(圖 13)

因吹風機熱風不斷提供能量，使溫度持續上升，輻射計的旋轉較連續；而暖暖包的溫度緩慢下降，旋轉沒有明顯持續很久，而是剛開始快，到後來變慢。熱風提供的能量較多且有效，而暖暖包只是放在輻射計上方，較無明顯的效率。吹風機供應的涼風儘管功率和熱風差不多，但溫度沒有熱風高到與室溫相差大到一定的大小，而無法使其明顯轉動，也就是說涼風的溫度和室溫的差異沒有很大，只是有冷卻的效果，較不同的是，換成涼風時，葉片會以和加熱時反方向旋轉，表示葉片旋轉方向並非一定。

熱源在可使輻射計轉動的情況下不需照光，表示輻射計主要是在有熱的改變才會轉，且改變越大，轉動越快。因為光也會提供熱，且供應較穩定，而使其有穩定的轉速，最後與阻力達平衡。

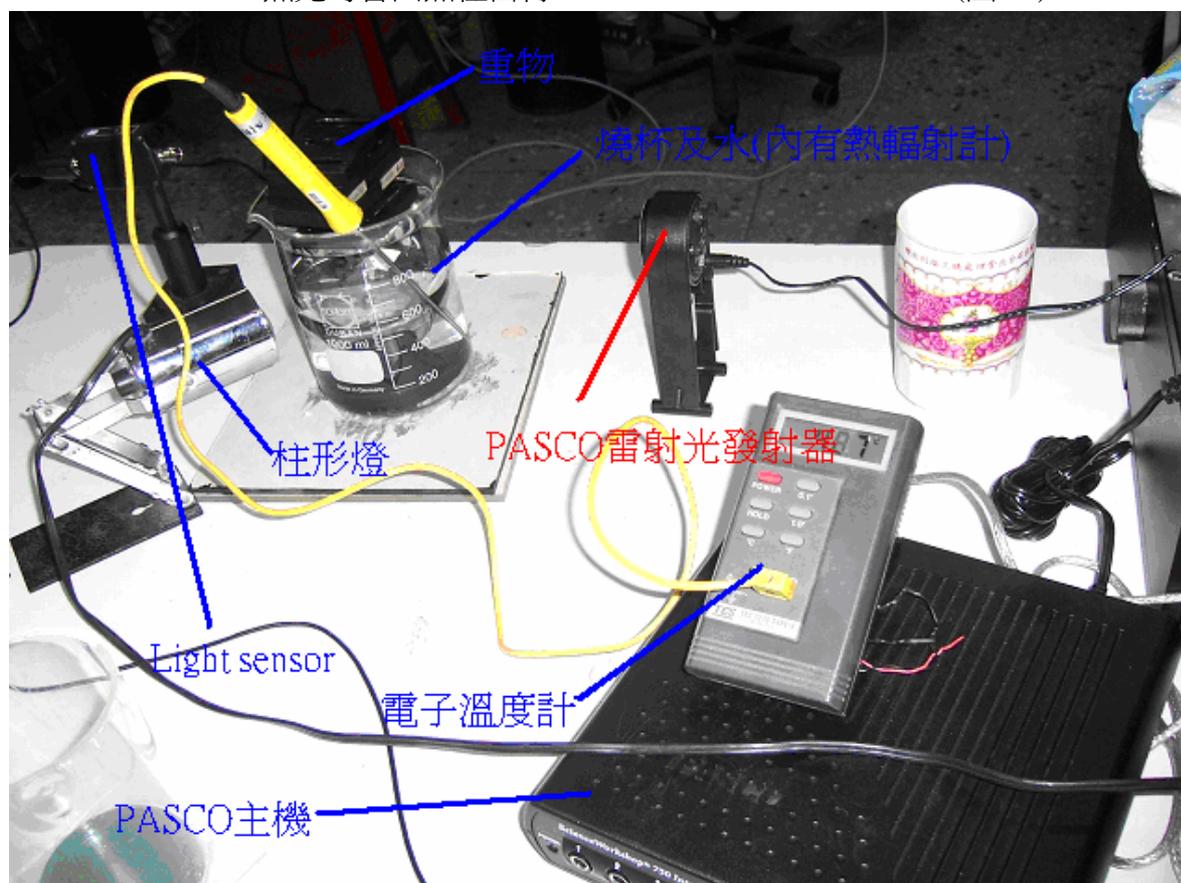
### 三、溫度實驗

將輻射計放入 1L 燒杯中，以重物壓住避免浮起，再倒入水，以光源照射使其轉動。以雷射裝置測量轉速，期間以冷水、電湯匙調整溫度，測出在不同溫度下以固定光源照射之轉速，燒杯下壓克力板是為配合雷射測速，如圖 14，範圍為 15~ 85°C 間特定溫度的測量。



\* 照光時皆由黑往白轉。

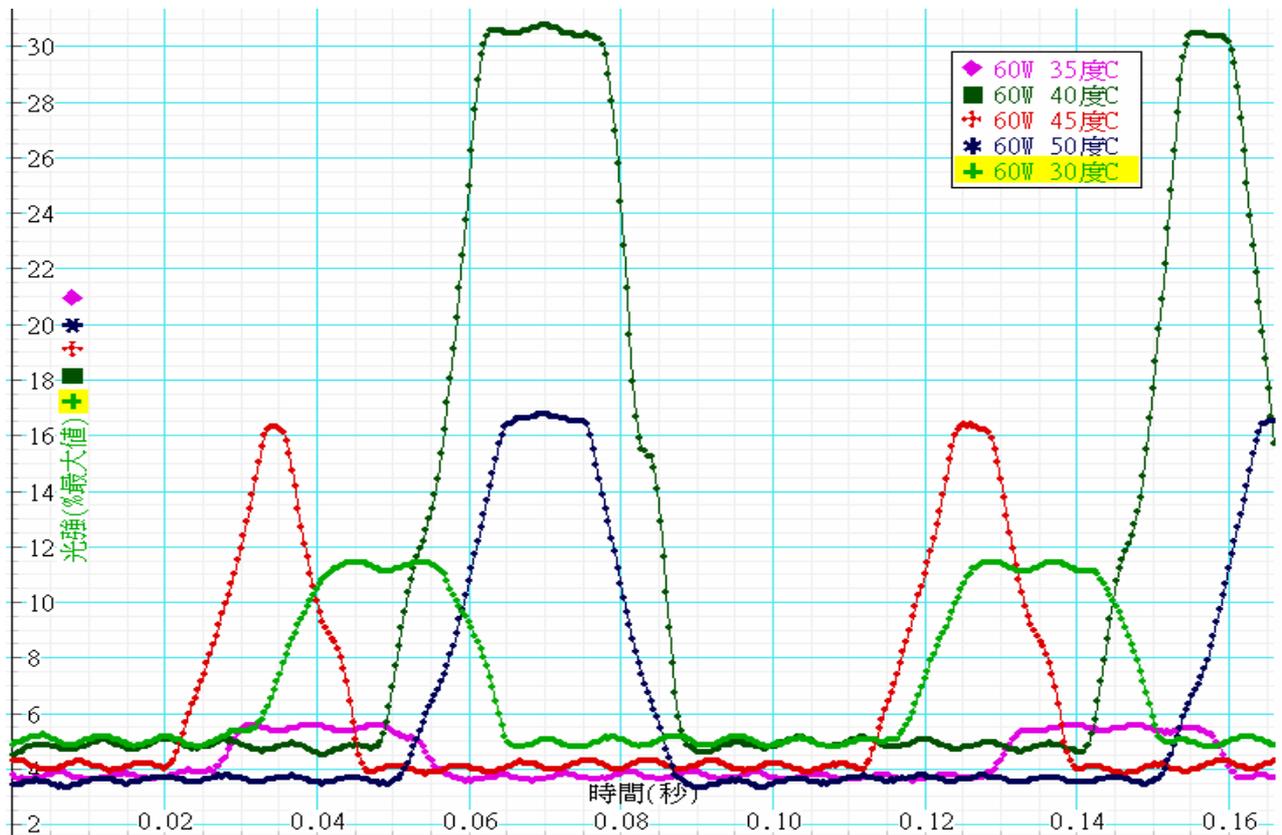
(圖 14)



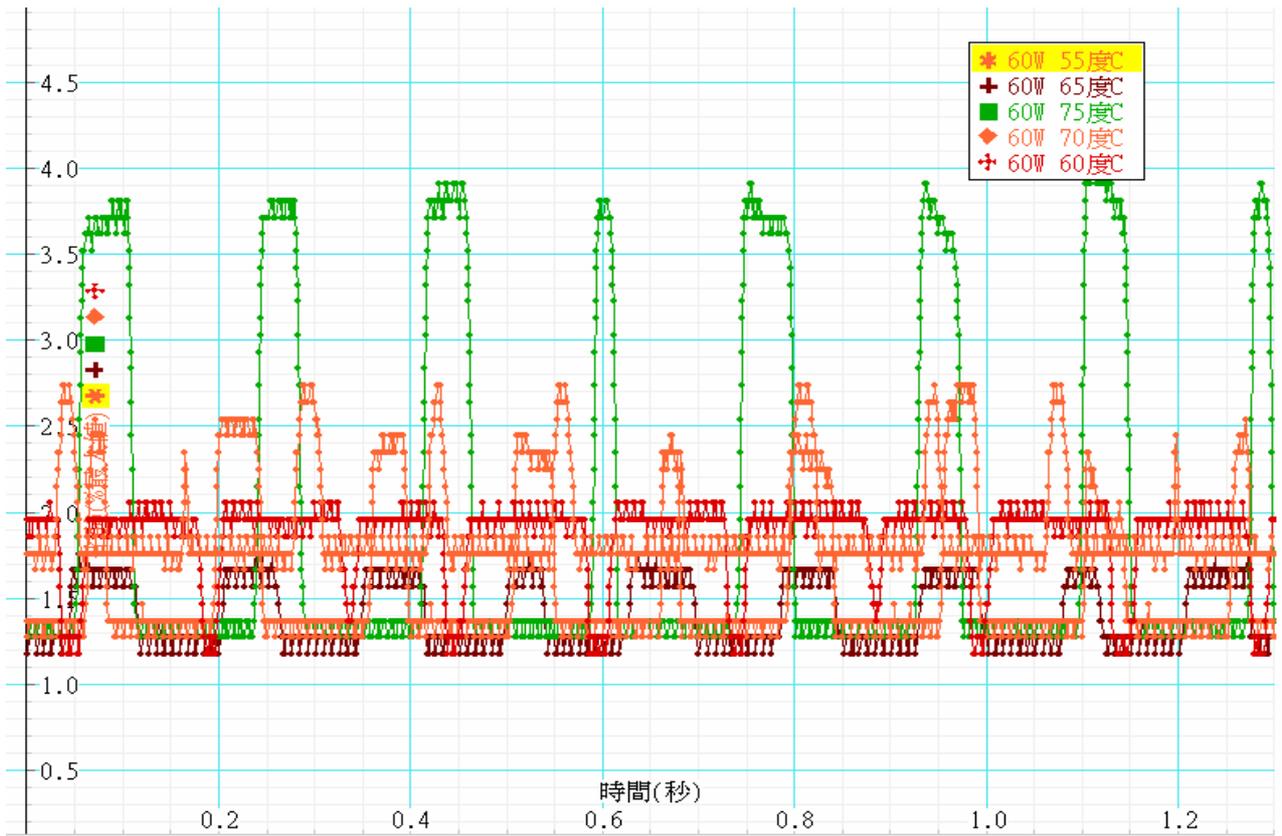
(圖 15) 溫度實驗示意圖



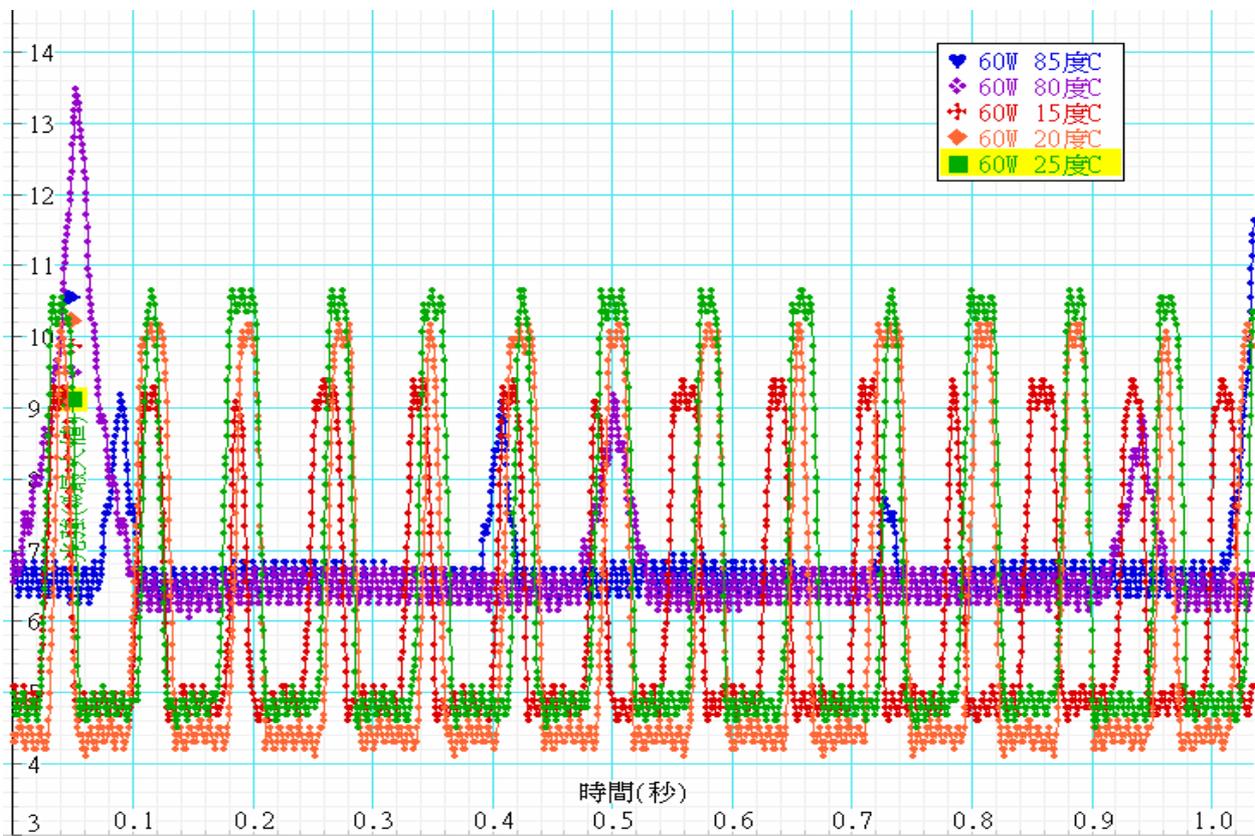
(圖 16)因雷射光會折射，故調整光感應器較高



(圖 17)



(圖 18)

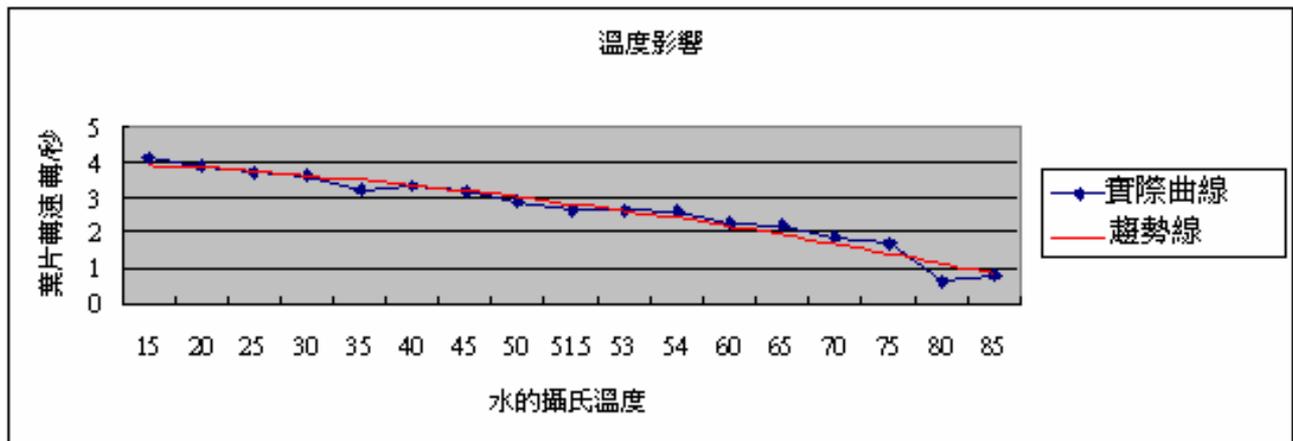


(圖 19)

攝氏溫度	15	20	25	30	35	40	45	50
轉速 (轉/s)	4.1	3.85	3.70	3.57	3.22	3.333	3.125	2.86

攝氏溫度	51.5	53	54	60	70	75	80	85
轉速 (轉/s)	2.63	2.63	2.56	2.27	2.17	1.67	0.63	0.78

(表 3)



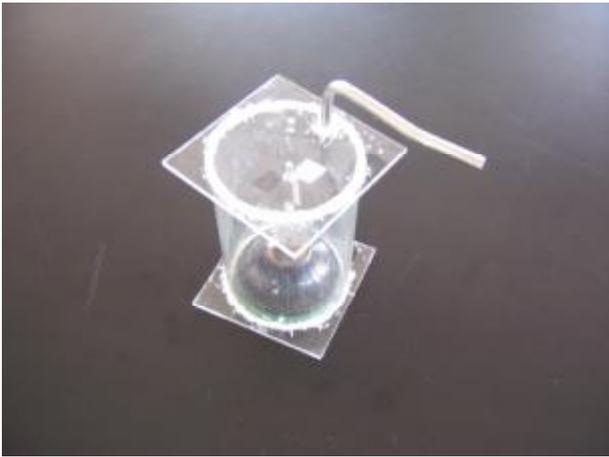
(圖 20)

表 3 中，轉速為定溫下輻射計轉速的平均值，但仍有誤差，在測出曲線對應的轉速後，由圖 20，可看出輻射計葉片轉速隨水溫上升而下降，表示在一定高溫(水溫)下以定光源所測得的轉速較慢，低溫時則較快。熱源實驗中，了解輻射計轉動主要是藉熱的輻射，溫度實驗中，觀察到若只倒入熱水，輻射計轉動一下子後便不再轉，由此知輻射計轉動不需一定的高溫，而是溫度差(後環境溫度-原環境溫度)，然而，須在短時間內改變環境溫度才能使其轉動，緩慢改變溫度效果不佳。所以可知正溫度差：由黑往白轉，由涼風測量時可相對看出，負的溫度差：由白往黑轉。

#### 四、氣壓實驗

本實驗是改變其內部氣壓，與固定光源照射時轉速的關係。一開始嘗試用壓克力裝置及塑膠真空乾燥皿，但釋氣、漏氣都嚴重(圖 21~25)。我們取出輻射計的扇葉及底座部份，將其置於我們要使用的容器(塑膠真空乾燥皿、Pyrex 玻璃)中(O-ring 接頭)，再接上抽氣幫浦持續抽氣，雖然玻璃比塑膠裝置較不會漏氣，但目前約只能抽至 170mtorr 的氣壓。照光後，塑膠製物有釋氣現象，氣壓開始緩慢回升，故仍不易在不變動的氣壓下測量(玻璃、真空皿裝置都會遇到此問題)。

抽到一定氣壓後，以 60W 定光源(距中心 5cm)，測量不同氣壓下輻射計的轉速，比較氣壓與轉速的關係，而葉片與不同容器壁距離的關係也會影響轉速，因為不同距離可能使氣體分子撞擊容器反彈到葉片的效力不一致，我們主要是以內徑 4.7cm 的 Pyrex 玻璃裝置為容器。



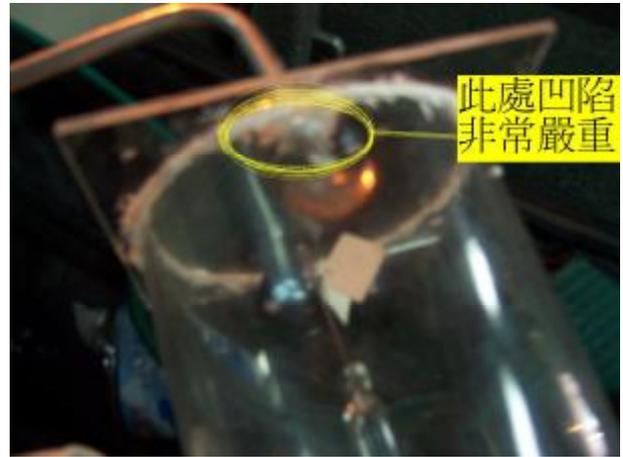
(圖 21)圓柱形壓克力裝置



(圖 22)較厚的立方體壓克力裝置  
外 14×11.5×11.5/內 12.5×10×10/單位：cm



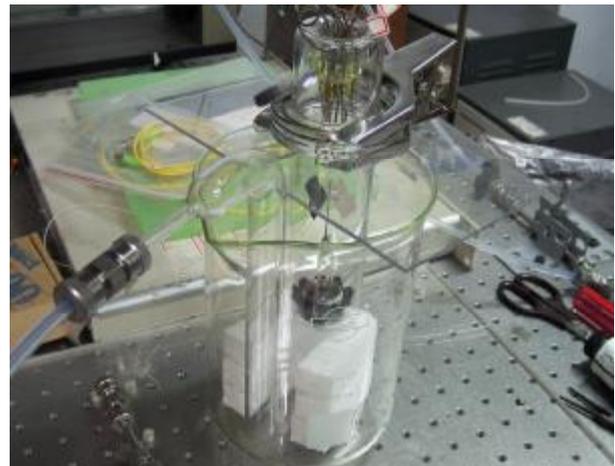
(圖 23)壓克力抽氣示意圖



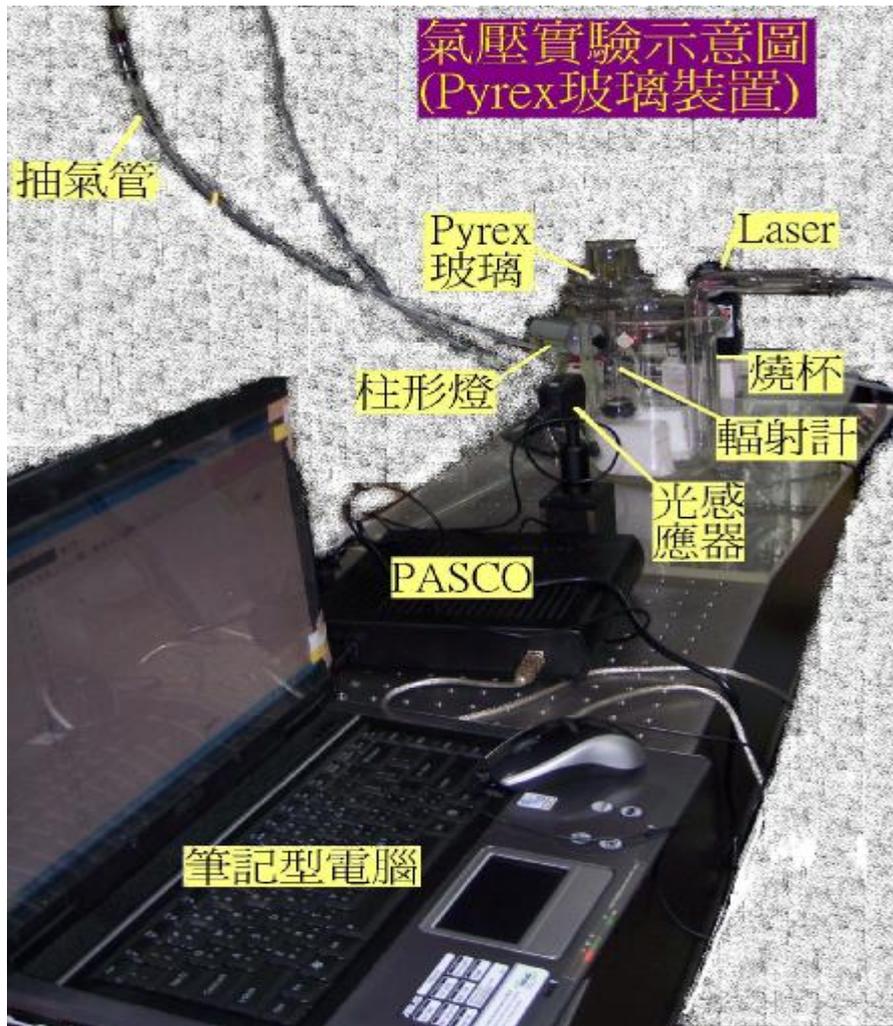
(圖 24)抽氣裝置凹陷圖  
此處凹陷非常嚴重



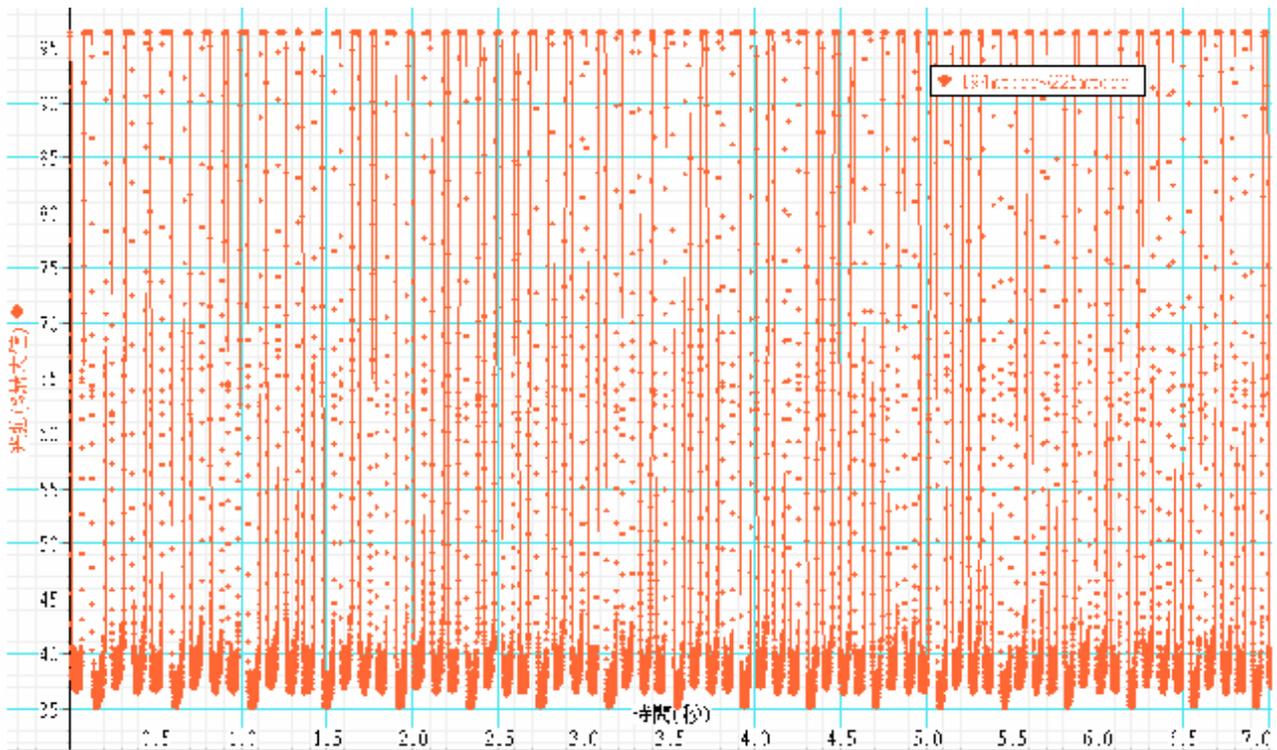
(圖 25)塑膠真空乾燥皿



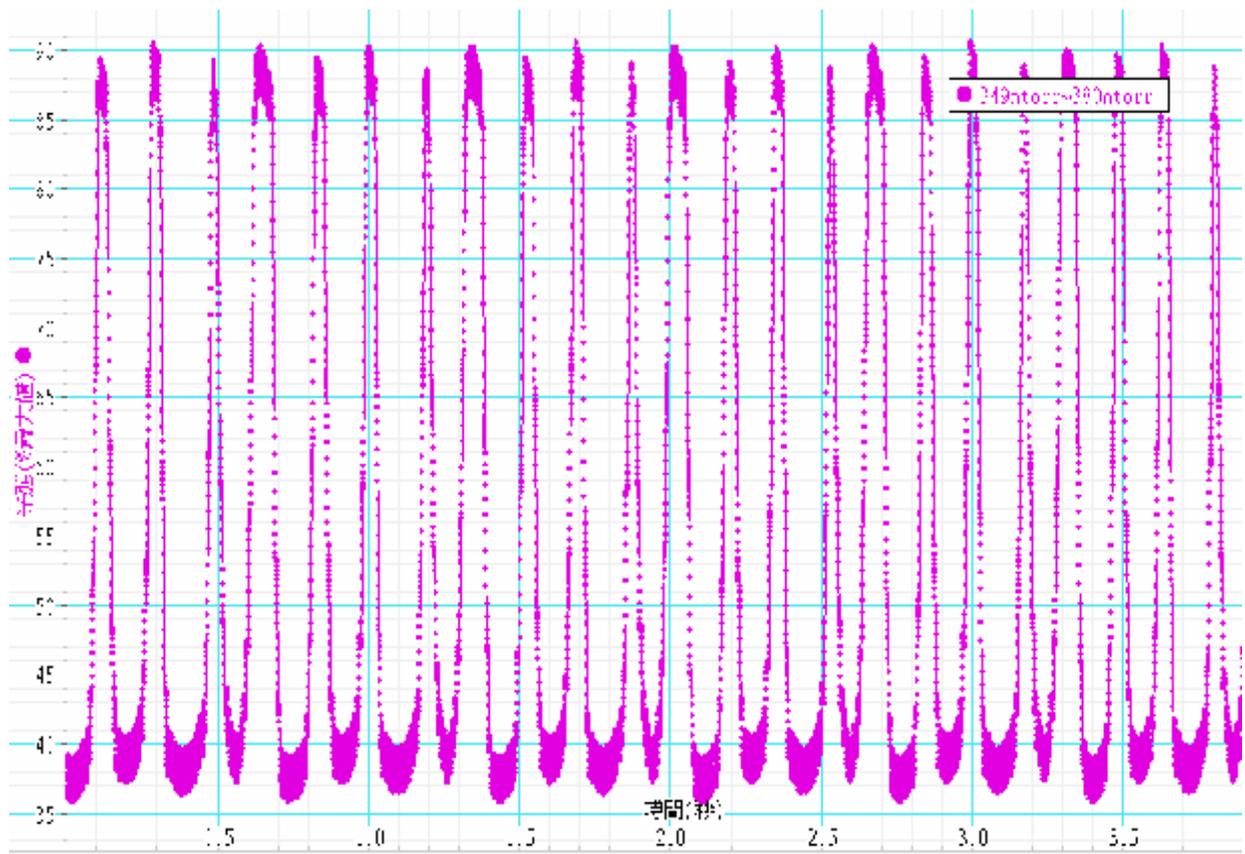
(圖 26)Pyrex 玻璃裝置



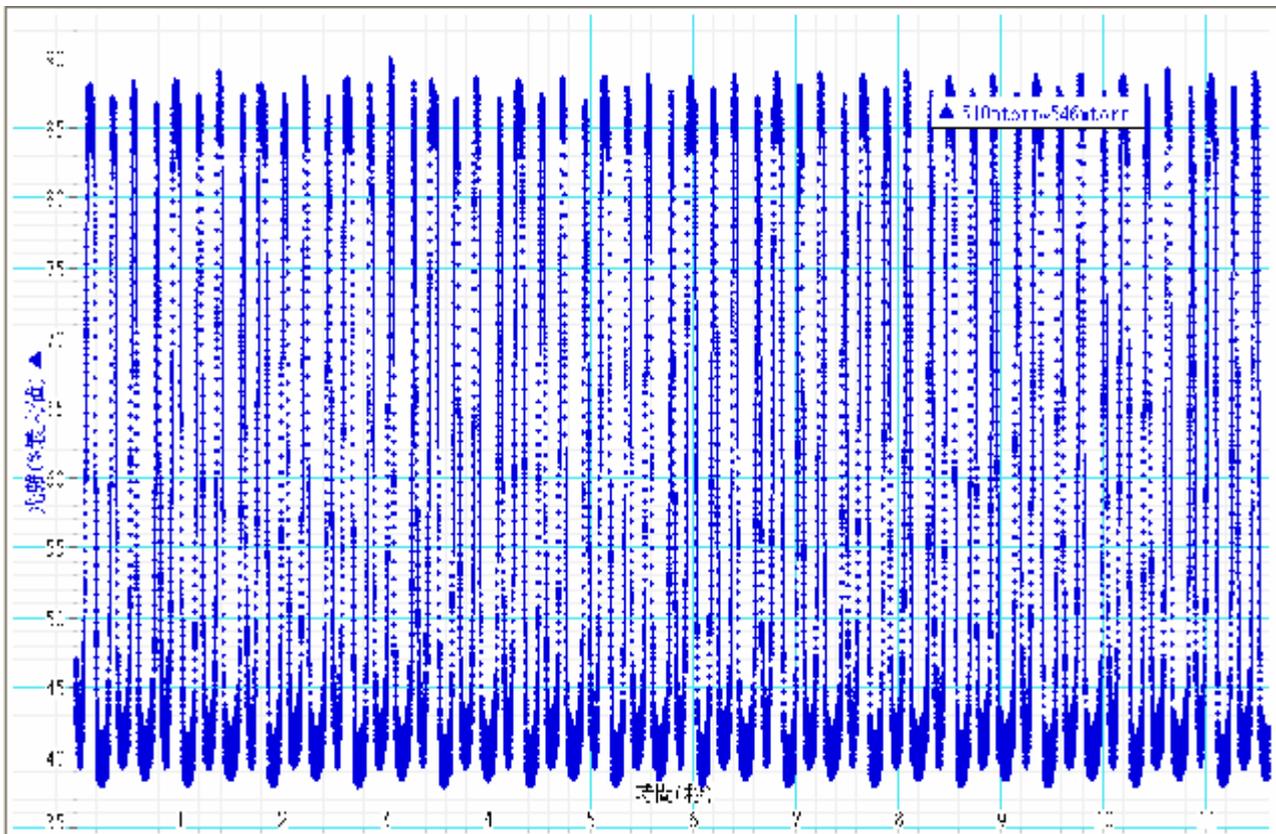
(圖 27)



(圖 28)194~225mtorr



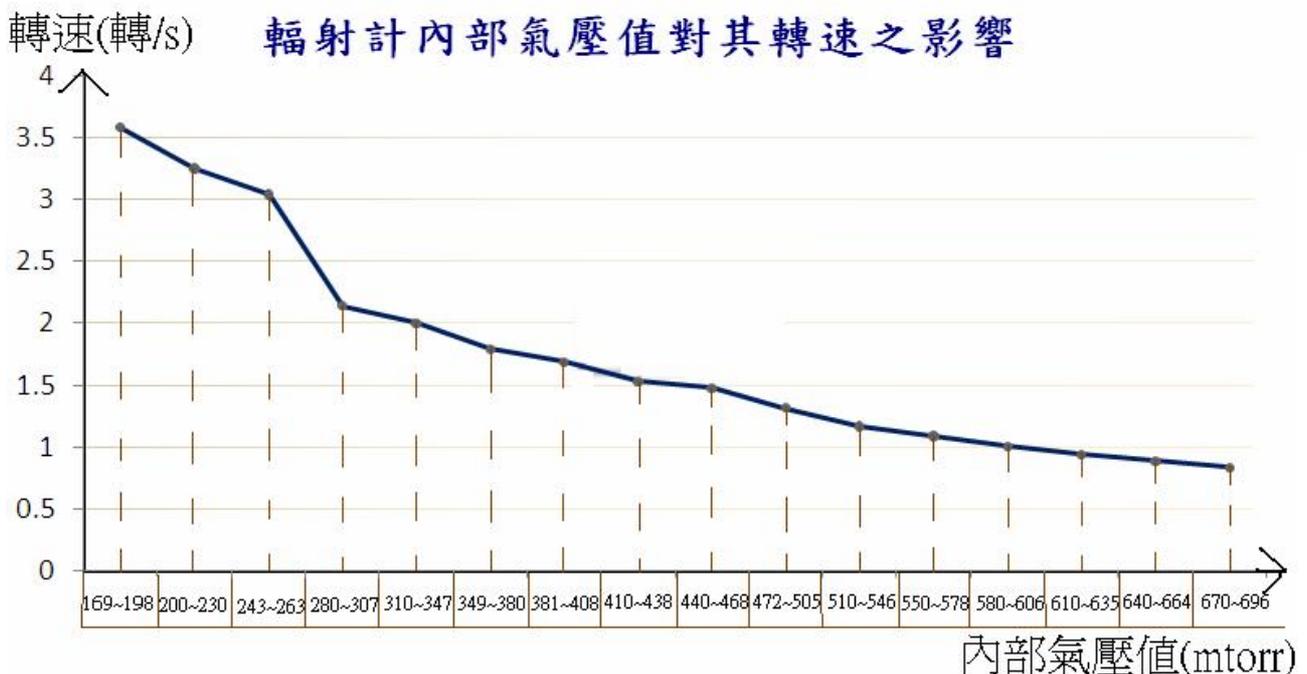
(圖 29)349~380mtorr



(圖 30)510~546mtorr

輻射計內部壓力值	平均轉速(轉/s)	輻射計內部壓力值	平均轉速(轉/s)
169~198mtorr	3.58	440~468mtorr	1.47
200~230mtorr	3.25	472~505mtorr	1.32
243~263mtorr	3.04	510~546mtorr	1.17
280~307mtorr	2.14	550~578mtorr	1.09
310~347mtorr	2.00	580~606mtorr	1.01
349~380mtorr	1.79	610~635mtorr	0.94
381~408mtorr	1.69	640~664mtorr	0.89
410~438mtorr	1.53	670~696mtorr	0.84

(表 4)



(圖 31)

由於真空需求度頗高，氣壓需抽至低於 4torr 才能使其轉動，也就是對於此容器，使輻射計轉動的氣壓臨界值約為 4torr。圖 28~30 為 Pyrex 玻璃的測速數據圖表，而表 4、圖 31 是我們就目前可抽氣至的範圍做測速，但釋氣問題仍大，持續以 60W 定光源照時氣壓會漸回升，故只能先測定一氣壓範圍的轉速變化關係。

由圖 31 可看出，低於 1torr 時，氣壓越低，轉速越快，可知低氣壓下氣體分子少，空氣阻力低，使轉速加快，但是否會有一氣壓值為轉速最快(高於或低於此氣壓值皆會讓轉速降低)需未來進一步的探討。

## 五、原理探討(參附錄一)

氣體分子因環境溫度上升，運動速度變快是對的(由氣壓實驗中的釋氣現象，因氣體碰撞頻率變大導致氣壓持續上升)，我們認為氣體分子被加熱後，**黑色表面附近的分子速度較白色表面附近的分子速度快**。也就是說，改變溫度讓單一葉片兩面的溫度產生差異，此溫度差使

其轉動(與溫度實驗中的環境溫度差指的不同)。

氣體因溫度升高使葉片附近分子速度變快，但分子是向四面八方擴散，而非只往葉片擴散，只是含分量是往葉片那方向的分子才會影響葉片轉動，其他方向較不會，而往反方向(另一葉片的白色那面)擴散的其實只在靠近葉片處才較會影響，且白色面附近氣體分子能量、速度較低，往相反方向的那些分子到達白色那面阻力也較多。

溫度下降時，由於黑色放熱快，使黑色面附近的溫度下降較快，而白色面附近的溫度下降較慢，單一葉片兩面有了溫度差異，使兩面附近氣體分子速度不同，也就是說有溫度的變化就有速度的變化，而推向那葉片的分子造成兩邊的力，但方向相反而造成一個方向的淨力，若只是溫度下降時，白色面分子速度較快(溫度較高)而導致葉片由白往黑轉而已，這與熱源實驗觀察到溫度下降使葉片由白往黑轉的情形相同。

### (一) 水平距離測溫

將輻射計固定在桌上以 60W 光源照射，改變輻射計與光源的距離，這時轉速隨距離增大而下降，用紅外線測溫計在兩側測量葉片兩面的溫度差(圖 28)，看是否轉速越慢，葉片黑白兩面的溫度差越低。

光源距中心水平距離 (cm)	黑色面攝氏溫度( °C) (距中心 5cm)	白色面攝氏溫度( °C) (距中心 5cm)	黑白面溫度差 ( °C)
15	23.7	21.6	2.1
	M24.6	M22.4	1.7~2.9
	m24.1	m21.7	
30	M24.3	M21.9	1.6~2.8
	m23.5	m21.5	
45	M24.8	M23.0	0.7~2.1
	m24.3	m22.7	
60	M25.2	M23.8	1.2~1.9
	m25.0	m23.3	
75	M24.1	M23.5	0.1~1.4
	m23.6	m22.7	
90	M25.1	M24.6	0.1~0.9
	m24.5	m24.2	

(表 5)

表 5 為水平距離改變時，用紅外線溫度計測出的葉片黑白兩面溫度，其中單一次的測量，紅外線溫度計約測了 3s，表 5 中的 M 是 3s 內最高溫度，m 是最低溫度，由此表可看出，水平距離上升時(轉速越慢時)，黑白面的溫差大致是越來越小，與上述推測原理相吻合。



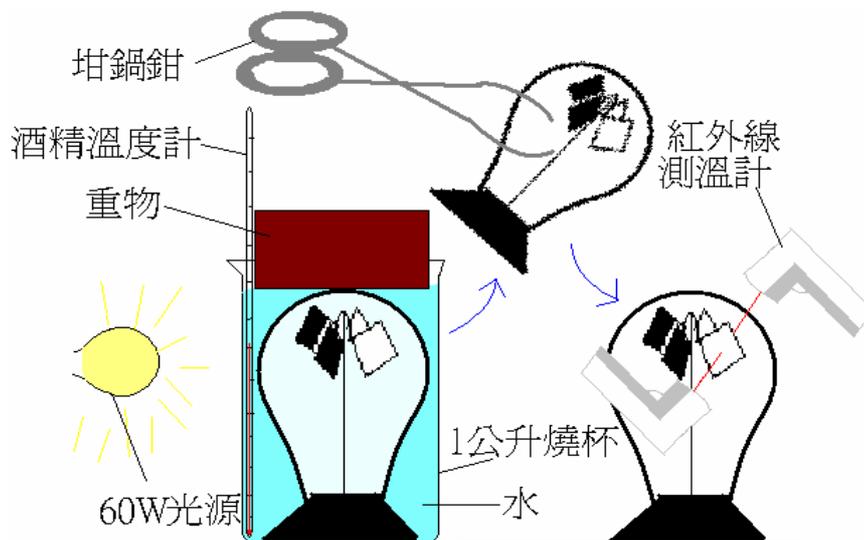
(圖 32)水平距離測溫示意圖

## (二) 紅外線測溫實驗

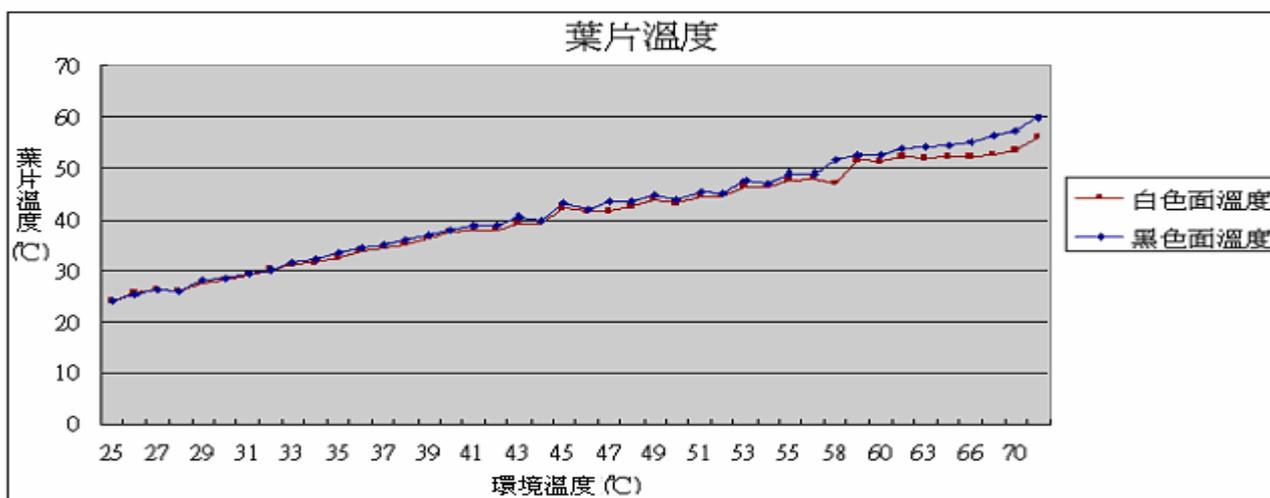
本實驗在探討環境溫度改變下葉片黑白兩面溫度的差異，爲了減少內部及外殼溫度不均勻的問題，將輻射計整個泡在水裡，但在水中以紅外線溫度計測量需先透過燒杯及水，再從輻射計外殼進入內部，我們有測過(泡於室溫水中、60W 燈泡、距離 15cm 的環境下)，結果不太準確。

既然不能把輻射計浸在水裡直接測溫，又環境溫度需均勻，便先在燒杯中加水，把輻射計浸在水中，以定光源照射直到轉速一定後趕緊取出輻射計、瞬間用紅外線溫度計測量葉片兩面的溫度，這樣雖仍有誤差，但會較之前的方法準確。

加入 90°C 的水至對齊輻射計頂部，以重物壓住(避免浮起)，旁有酒精溫度計隨時得知水溫，因紅外線溫度計測量過高溫度時較不準確(見附錄三一溫度計校正)，故約從 71°C 開始測量，而水溫之後降到 25°C。圖 29 爲其示意圖，以 60W 燈泡照射，從較高溫下降的過程中測量，輻射計因整個在水中，溫度較均勻，而瞬間將重物移開以坩鍋鉗取出輻射計，可大致瞬間保留輻射計內部葉片當時的溫度(但散熱也不慢)，故測溫時也能不透過燒杯、水測量。



(圖 33)

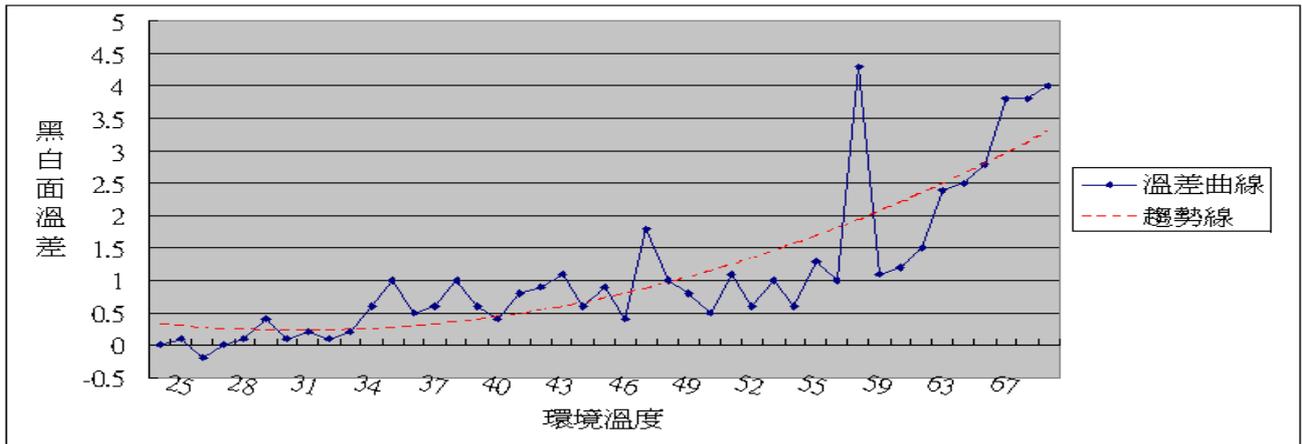


(圖 34)

圖 34 是實驗作出在一定環境溫度下葉片的平均溫度(表 5)所得，黑色面溫度一般高於白色面(因為穩定的光源持續提供熱能)，表 5 中，溫度差表黑色面溫度減白色面溫度的值，此值隨環境溫度上升而變大。

水溫°C	黑色面°C	白色面°C	溫度差°C	水溫°C	黑色面°C	白色面°C	溫度差°C
71	60.0	56.0	4.0	45	43.0	42.1	0.9
70	57.2	53.4	3.8	44	39.8	39.2	0.6
67	56.3	52.5	3.8	43	40.4	39.3	1.1
66	55.1	52.3	2.8	42	38.9	38.0	0.9
64	54.6	52.1	2.5	41	38.8	38.0	0.8
63	54.2	51.8	2.4	40	37.9	37.5	0.4
61	53.8	52.3	1.5	39	37.0	36.4	0.6
60	52.5	51.3	1.2	38	36.0	35.0	1.0
59	52.5	51.4	1.1	37	35.1	34.5	0.6
58	51.4	47.1	4.3	36	34.2	33.7	0.5
56	49.0	48.0	1.0	35	33.4	32.4	1.0
55	48.9	47.6	1.3	34	32.0	31.4	0.6
54	46.9	46.3	0.6	33	31.3	31.1	0.2
53	47.5	46.5	1.0	32	30.1	30.0	0.1
52	45.0	44.4	0.6	31	29.4	29.2	0.2
51	45.4	44.3	1.1	30	28.4	28.3	0.1
50	43.6	43.1	0.5	29	28.1	27.7	0.4
49	44.6	43.8	0.8	28	25.9	25.8	0.1
48	43.5	42.5	1.0	27	26.3	26.3	0.0
47	43.4	41.6	1.8	26	25.4	25.6	-0.2
46	41.8	41.4	0.4	25	24.0	23.9	0.1

(表 6)



(圖 35)

高溫下，輻射計黑白兩面溫差較大，若對應溫度實驗時輻射計的轉速，高溫時轉速較慢！我們的推測是溫度實驗時，泡在水中的輻射計受周圍水的影響，內部整體的大氣環境溫度改變，在高溫時整體的氣壓、空氣阻力都隨之增加，這時氣體分子的動量及擾動也增加，使得儘管葉片溫差大，但阻力也大，使葉片轉速變慢，低溫時整體大氣阻力小，較不影響原本的轉速，但這只是推論，許多細節仍需未來實驗探究。

綜合溫度、測溫的實驗，[溫差](#)大時會使轉速變快，但比較時需考慮[不同溫度環境對輻射計內部空氣阻力大小](#)的影響。

## 陸、討論

### 一、光源的影響

功率越高，接收的能量就越多，轉速越快。而 LED 燈因功率太低，轉速極慢但仍可測量，若是雷射筆照的光便不會轉動。故只能說功率和輻射計的轉速有正相關，但非正比。

### 二、熱源和光源比較探討

只有熱而沒有光，輻射計亦會轉動，顯示出光不是單獨影響輻射計轉動的因素，而也包含「熱」的關係，排除光的主要影響性質，熱經輻射計內部接近真空的環境下以輻射方式傳播。

另外，若用光源照射，溫度上升不快，但用吹風機熱風吹，溫度很快上升，不過吹風機熱風測出的轉速比用 100W 光源照射還低，是因光源以電磁波的輻射方式，很快傳到輻射計內部，而吹風機還要先加熱玻璃外殼，再由外殼輻射至內部，故需要時間。

### 三、溫度的影響

高溫下放在水中一段時間的輻射計不再轉動，但改變溫度後又開始轉動，這跟熱源實驗「在吹風機熱風影響的溫度是持續上升，暖暖包的溫度是持續下降的」的想法有相應處，有「溫度變化」，輻射計才會轉。

而溫度測量的實驗結果，越高溫轉速越慢，越低溫轉速越快，這跟測量葉片溫度差的實

驗結果有關，環境水溫高時輻射計內部的空氣阻力也被提升，而這阻力似乎隨溫度增加也有可觀的成長，使溫度高時轉速慢。

#### 四、氣壓的影響

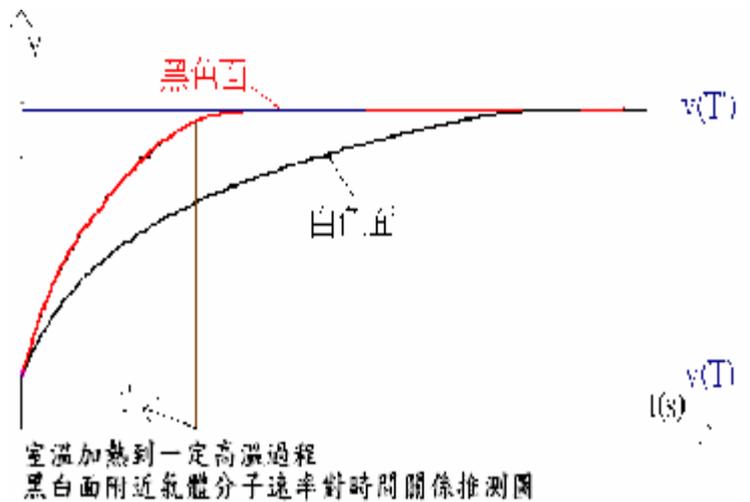
據實驗結果，輻射計內部氣壓越低，氣體分子越少，這時空氣所產生的阻力(討論第六點將提到)也跟著變少，葉片會較易轉動；但氣體分子也是讓葉片轉動的原因。

#### 五、關於葉片黑白兩面溫差

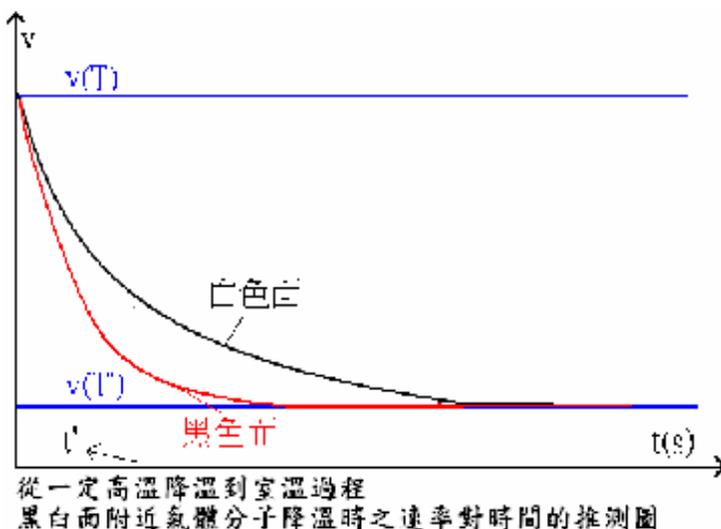
在使葉片轉動的原因中，黑白兩面溫差所造成之動能差所產生之推力應是主要原因(前人文獻有提過相關說法，但較無完整實驗)，氣體分子的速度因溫度的改變而有變化，導致黑白兩面的速度不同(實驗結果有提)，速度不同造成動量不同，在一定時間內存在一力，而單一葉片兩面周圍氣體分子，會產生一淨力(即黑白兩面不等的力抵銷後所剩)，在穩定能量提供下，此淨力會是一定的。

圖 36、37、38 是依我們的實驗結果暫時推測出的想像圖：

在升到一定溫  $T$  時，黑色面因吸熱快，使周圍氣體分子速度上升較快，白色面則較慢，圖 36 中  $v(T)$  的水平線所對應的速度表常溫下氣體分子的運動速度，設時間到達  $t'$  時，黑白兩面的溫度差會達最大，那此時就是輻射計轉速最快的時候，但不能完全就這張圖的溫度差來對照真實的轉速，因為還要考慮轉動慣性。



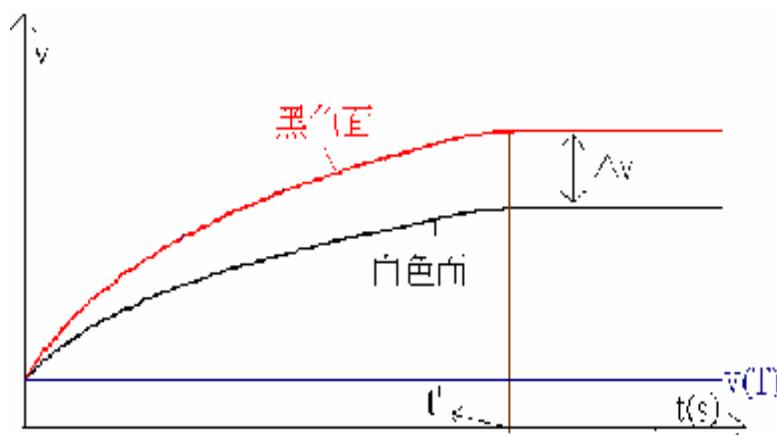
(圖 36)



在降到一定溫  $T$  的情形下，黑色面因散熱快的特性，使周圍氣體分子速度下降較快，白色面則較慢，圖 37 中  $v(T)$  的水平線所對應的速度表常溫下氣體分子的運動速度，時間到達  $t'$  時，黑白兩面的溫度差會達最大。

(圖 37)

照光後，黑色面吸收熱較白色面快，且光源提供穩定能量來源，即使能量一直供應，最後仍會達穩定的狀態，等到圖 38 中黑線與紅線成水平時，兩者速度差( $\Delta v$ )為定值，此時轉速便為終端速度。



從開燈後穩定的照光過程  
黑白面附近氣體分子速率對時間關係推測圖

(圖 38)

## 六、阻擋葉片轉動的可能阻力

給予光源後，雖然光源持續提供能量，但葉片最後仍會達終端轉速，可能是因輻射計內部少量空氣造成的一阻力(後曳力)，可用  $C=1/2 \rho \sigma A v^2$  表示，在輻射計內部空氣中， $C$  表空氣所造成的後曳力(Nt)， $\sigma$  是後曳力係數， $\rho$  為空氣密度( $\text{kg/m}^3$ )， $A$  為空氣流體撞擊的有效垂直面( $\text{m}^2$ )， $v$  是「葉片速度」( $\text{m/s}$ )。在其他條件不變下  $C \propto v^2$ ，這與物體從空中落下最終與空氣阻力達平衡的道理一樣。

## 柒、結論

### 一、實驗結論

燈泡功率越高，距離越近，輻射計接收的能量越多，轉速越快，這都是輻射計基本的性質。在低氣壓狀況下，造成輻射計轉動的主因應是「單一葉片黑白兩面的溫差」與「不同的溫度環境對輻射計內部空氣阻力大小的影響」。從兩個觀點共同來看，環境溫度高時給予能量(光源 or 熱源等)，溫差大但阻力亦大，而溫度低時給予能量，溫差小但阻力亦小，其中溫度影響阻力的改變量應不小；而葉片的溫差從「原理探討中的水平距離測溫」已可看出，溫差大時轉速較快，反之較慢，而降溫時，白色面溫度高於黑色面也可得溫差的觀點。綜合實驗結果可看出定光源下(或穩定的能量源)，環境溫度高時轉速慢，溫度低時轉速快。

輻射計內部的氣壓越小，其轉動的阻力也越小，就目前的實驗結果來看轉速會較快，但氣體分子雖造成阻力，卻也是造成葉片轉動的因素(葉片兩面溫差的實驗結果有提)，因此可以推測氣壓在極小時其轉速有可能會變慢。氣體分子被加溫後動能上升，但須強調的是僅有離葉片近的分才有較明顯的動能提升，而葉片與葉片之間離葉片較遠的區域，氣體分子被影響的範圍有限。

另外，輻射計在穩定光源下到達終端轉速的原因，主要應是空氣所造成的後曳力，隨時間漸增，最後達到與推動葉片之淨力平衡的結果。

## 二、展望

經實驗可得到輻射計在不同變因下，轉速較快的環境，以改善其效率。還可改變葉片材質，測量不同材質組成之葉片轉速的高低；在 50km 的高空中，氣壓接近 0.001atm，環境溫度約為 0°C，若以陽光為光源，應為良好的發展環境，而像是較大規模的光風車，或許對發電有幫助，但僅是初步的想法。

壓力也是影響輻射計環境的主因之一，輻射計內部的壓力環境接近真空狀態，但不能真空，因轉動仍需氣體分子的參與，氣壓實驗由於真空需求度大，故需進一步觀察。而光風車內部的氣體分子運動研究，與氣體分子運動學有較明顯的相關性，值得更深的探究。

## 捌、參考資料及其他

- 一、周祥順教授, 《牛頓馬戲團講義》, p11~12
- 二、E.Woodruff, The Radiometer and how it doesn't work  
《THE PHYSICS TEACHER》, Oct, 1968, p358~p363
- 三、葉輪輻射計之示範, [http://www.photonics.fcu.edu.tw/colloquium/y2000/2000\\_09.htm](http://www.photonics.fcu.edu.tw/colloquium/y2000/2000_09.htm)
- 四、國立科學工藝博物館, <http://www.nstm.gov.tw>
- 五、克魯克斯輻射計及其應用,  
<http://translate.google.com/translate?hl=zh-TW&sl=zh-CN&u=http://www.jys.edu.cn/shuzihua/20071010101350.asp&sa=X&oi=translate&resnum=3&ct=result&prev=/search%3Fq%3D%25E8%2591%2589%25E8%25BC%25AA%25E8%25BC%25BB%25E5%25B0%2584%25E8%25A8%2588%26complete%3D1%26hl%3Dzh-TW>
- 六、2000 物理教學及示範研討會論文集
- 七、沃克, Jearl Walker, 葉偉文, 《物理馬戲團》, 天下文化, 西元 2000 年 5 月 26 日
- 八、Robert L. Wolke, 高雄柏 譯, 《愛因斯坦這麼說》, 臉譜, 28, Nov, 2000, p80~84
- 九、S. L. Paveri-Fontana, An elementary model for the radiometer, 《American Journal of Physics》, Vol.45, No. 5, May, 1977, p447~450
- 十、Frank S. Crawford, Running Crooke's radiometer backwards, 《American Journal of Physics》, Vol.53, No.11, Nov, 1985, p1105
- 十一、H.E. Marsh, E. Condon and L.B. Loeb, The Theory of The Radiometer, Sep 1925
- 十二、David Halliday, Robert Resnick and Jearl Walker, Drag Force,  
《Fundamentals of Physics 7th Edition》, Chapter6, p6-10

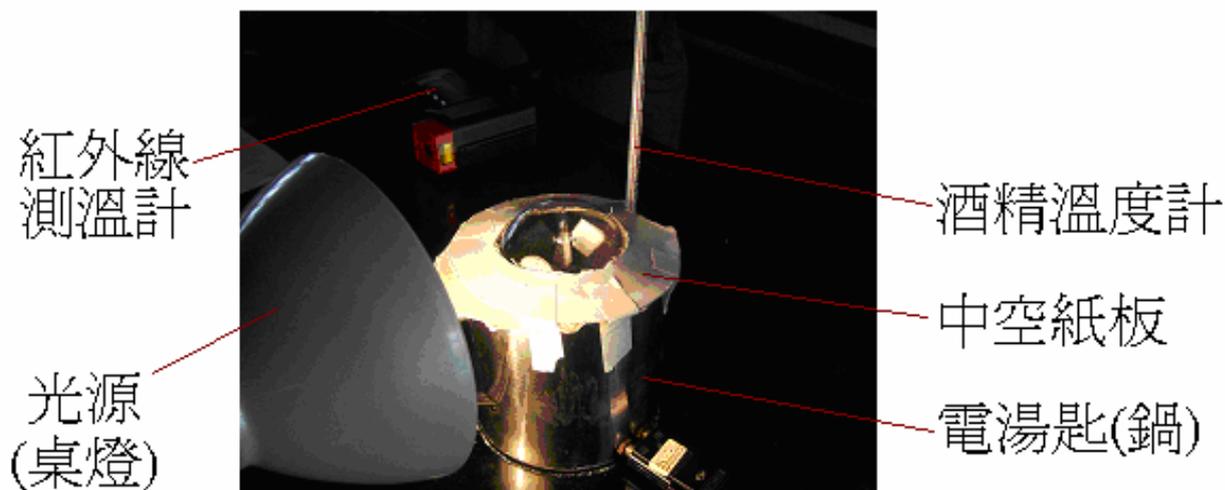
## 附錄一、各種原理說法

關於輻射計的轉動原理，最初的說法有很多，但藉現在一些原理的了解，很多並不正確：

- 1.輻射壓力：輻射壓力(光壓)常被認為是輻射計轉動的原因，牛頓引入光的微粒學說，自然引進輻射壓力的想法，而其量值在量子力學時期也討論過，1873年 Maxwell 的電磁波理論預言光壓非常地小。他主張在光所傳播的介質中，有一垂直波方向之壓力，其大小(光壓) = 光能量密度。曾有科學家在類似輻射計的輕質葉輪上測試過，以盡量散失熱為原則，在幾乎只有光照的情形下測量，他們將扇葉掛在一扭擺上，並放置於一高真空腔中，結果輕質葉輪的確會轉，但轉動幅度不大，且還要在光壓夠大時才會輕微的轉動。但轉動若是由光壓造成的，就不會轉那麼快了。
- 2.氣體釋出：有人認為其轉動是因某種塗料上的氣體釋出而推動(反作用力)，但若氣體的散發結束，葉片即不再轉動，而輻射計的轉動效果其實不會減損。
- 3.光電效應：光子從葉片的黑色表面打出電子，離開時的反作用力使葉片轉動，但這須是一種特別的塗料(可產生光電效應)，而即使電子被抓的很緊，照光下應還是可使其轉動，更何況光電效應在真空時仍會發生，若輻射計內部無空氣便不轉動了(僅就氣體分子的理論推測，實際上並無絕對的真空。另外，在輻射壓力的說法中，其實光壓應也會影響但很微弱)。
- 4.空氣對流：此說法認為輻射計內部擁有一較為穩定的空氣對流現象導致空氣對流，但一定範圍的密閉容器內似乎不太可能。
- 5.葉片溫度差異：這與鄰接黑色表面的空氣較溫暖有關，因為黑色吸熱的本性，使葉片的黑色面比白色面吸收更多光能，故變得較溫暖，空氣加熱使葉片附近氣體分子的運動因素改變，造成一淨力推往葉片，使輻射計旋轉，這應是較正確的說法，但分子運動的「因素」到底是什麼？因溫度的改變，故氣體的速度會改變，曾在 1881 年時，英國的 Osborne Reynolds 發表的論文提到：較快的分子撞擊邊緣的角度比那些較涼的分子撞擊的角度更斜，於是在溫度上升時推動葉片向白色的那一面轉。此角度的說法似乎在當時較能被接受，但分子撞擊的角度有那性質嗎？因為分子是向四面八方擴散，在特定溫度下有一定的角度是較奇怪的地方。

## 附錄二、輻射計外殼的影響

紅外線溫度計測溫其實有誤差，將輻射計泡在水中加熱，在不同的水溫下測量輻射計葉片的溫度與外殼溫度(大致與水溫同)的差異，來看看紅外線溫度計在測量葉片溫度時，是否因透過輻射計外殼而造成主要測到外殼溫度。

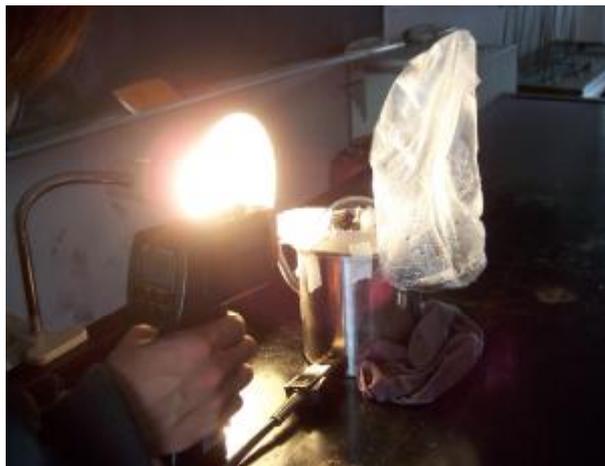


(圖 39)

用電湯匙加熱內部的水，我們也試過用燒杯(圖 40、41)，但水溫難控制，圓形中空紙板是爲了遮擋高溫時的水蒸氣，當時用一塑膠袋套住溫度計是因水氣從開口冒出造成測溫不準。測量結果如表 7。



(圖 40)



(圖 41)

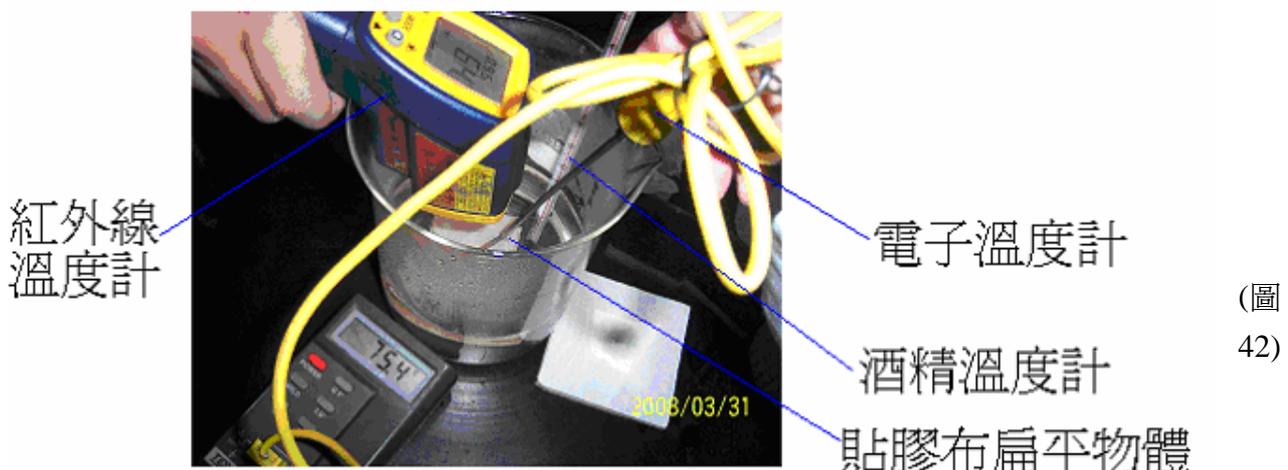
水的攝氏溫度(接近外殼溫度) 〔燈距中心 8.5cm〕	黑色面攝氏溫度 〔距中心 7.5cm〕	白色面攝氏溫度 〔距中心 7.5cm〕	黑白面溫度差
51	37.8	32.3	5.5
	38.2	33.1	5.1
50	39.6	34.3	5.3
48~49	38.0	35.3	2.7
	39.2	35.0	4.2
45~46	41.2	39.3	1.9
	40.3	38.3	2.0
	40.0	37.8	2.2
43	37.3	36.1	1.2
42	37.0	34.5	2.5
40	33.5	32.6	0.9
38	30.9	30.6	0.3

(表 7)

從表 7 可看出輻射計外殼溫度與葉片溫度不同，表示可測量葉片溫度，但仍會受外殼溫度些許的影響，且浸在水中的輻射計外殼只是中下部分，上方的外殼因要測溫，故露出外面與環境接觸(圖 40、41)，又玻璃非熱的良導體，故誤差是存在的。表 7 之黑白面溫度差不能代表輻射計在真實水溫下的溫度差，葉片高度高於水的高度，而內部的氣體應也是下方溫度平均高於葉片周圍的溫度，但至少可說紅外線測葉片溫度時，輻射計外殼的影響不會太大。

### 附錄三、溫度計的校正

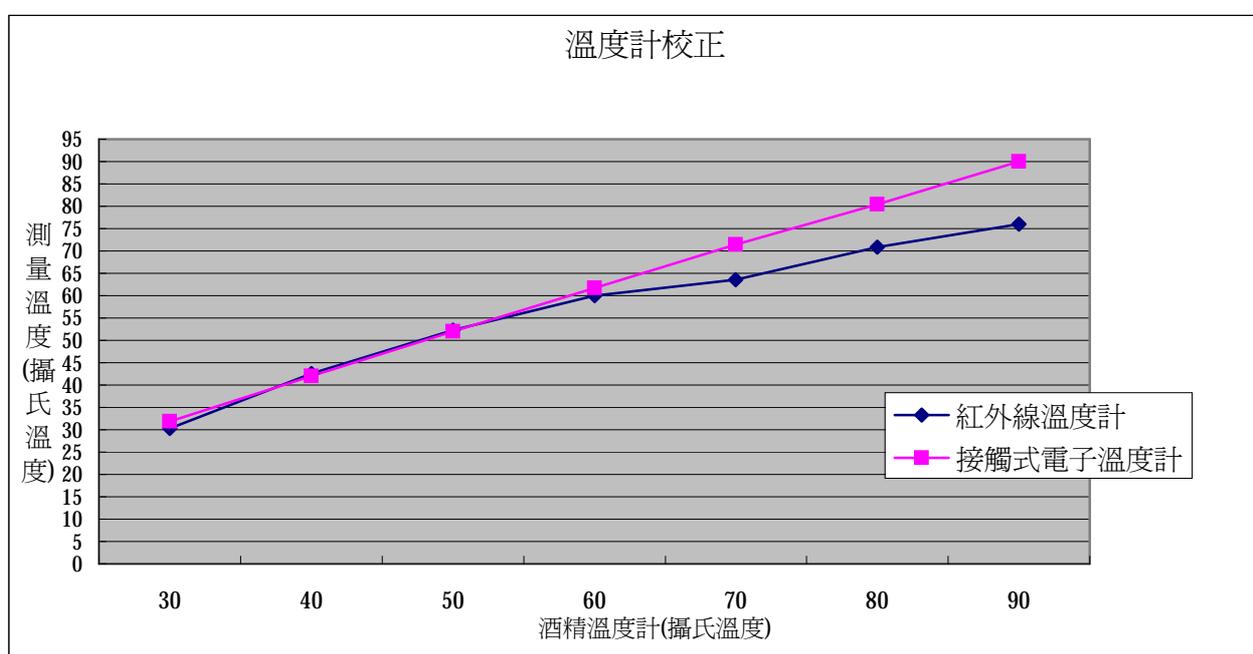
若將紅外線溫度計與酒精溫度計和溫度實驗時用的接觸式電子溫度計做比較。紅外線溫度計在高度 5cm 水上方近水處，測量底部貼膠布扁平物體之溫度表面，電子溫度計則是直接接觸測量物體，而酒精溫度計測量當時的水溫(圖 42)。以酒精溫度計為標準，畫出圖 43，可大致看出溫度計在不同溫度下測出溫度值的差異。



(圖 42)

酒精溫度計(°C)	紅外線溫度計(°C)	接觸式電子溫度計(°C)
30	30.3	31.8
40	42.5	42.0
50	52.3	52.1
60	60.0	61.7
70	63.6	71.5
80	70.9	80.5
90	76.0	90.0

(表 8)



(圖 43)

由圖 43，電子溫度計大致呈線性變化，較準確；紅外線溫度計在高溫時(> 60°C)，誤差越來越大(表 8 標示紅色處)，儘管紅外線溫度計標示的許可溫度測量範圍包含這些溫度，但透過水測量時的誤差在高溫時卻這麼大，可了解紅外線溫度計在高溫時透過透明物測量，所得的溫度值將會較實際溫度小很多(有誤差)，故前述實驗測的溫度範圍較低。

**【評語】** 040112

本作品引進熱對光風車的效應，是件很有特色的工作，在實驗的執行及數據的搜集都有令人滿意的表現，由於光風車的探討已有很長的歷史，故本作品很難有超越前人的表現，另對結論最好能有量化的結果來支持。