

投稿類別：物理類

篇名：彭巴效應違背了熱力學？

作者：

吳宇森。台南市立大灣高級中學。高二 4 班

指導老師：

李俊穎 老師

## 壹、前言：

### 一、研究動機

今年暑假時，我與兄弟姊妹在外婆家打算製作冰棒來消暑，當我們做好，拿去冰箱放置後，總期待著可以趕快吃到自己製作的冰棒，所以就上網查冰棒冷凍的時間需要多久，結果看到一個寫著物理現象名叫“彭巴效應”的網站，然後就好奇心發作的去查了甚麼叫做彭巴效應，他說溫度略高的水會比低溫的水更快結冰。

查完後我就想彭巴效應到底是不是真的，因為這個效應跟常理是有違背甚至是相反的，因此我才做以下的實驗來驗證彭巴效應的真實性。

### 二、研究目的

- (一) 文獻研究及討論
- (二) 不同起始溫度不同時間冷凍測試
- (三) 不同起始溫度同時冷凍測試
- (四) 探究彭巴效應的真實性
- (五) 研究彭巴效應的再現性

### 三、研究方法及架構

- (一) 透過研讀文獻、實測數值、探討統整分析後整理出主要的內容推論出結果。
- (二) 利用文獻與結果來建立結論並驗證彭巴效應。

#### 四、測量儀器製作

##### (一) 溫度計的實際製作

“結冰”當液體下降到一定溫度後會開始變態的過程，而變態過程的放熱量是一定的，所以只需測得變態時溫度的數據即可分析彭巴效應，並且做溫度下降的實驗需要每一小段時間去紀錄一次，而一般溫度計會因為開關冰箱或者是拿取判讀數值而有差異，實驗失敗率非常高；所以我們使用單晶片開發版，搭配溫度電阻來設計實驗觀察儀器。

製作原理：

- 1、溫度電阻會因為溫度高低而有不同電阻率
- 2、此時我串聯一個 1KΩ 電阻（如圖 1）即可依分壓原理得知溫度電阻與 1KΩ 電阻中間腳位的值，並將此端接入單晶片開發版的類比信號接收端
- 3、單晶片開發版的類比值會是 0~1023 這些值分別對應到 0V~5V，所以我當我取得所有的類比數據後要先將它們用 1023 除之，即可得知溫度電阻的電阻值了
- 4、將電阻值帶入  $R_t = R * \text{EXP}(B*(1/T_1 - 1/T_2))$ ，其中  
 $R_t$  是溫度電阻在  $T_1$  溫度下的阻值；  
 $R$  是溫度電阻在  $T_2$  溫度下的阻值；  
 $B$  值是溫度電阻設計時的參數值；  
 $\text{EXP}$  為以  $e$  為底數的指數函數，又稱自然對數；  
 這裡  $T_1$  和  $T_2$  是以凱氏溫標（K）表示，需轉換為°C（ $K = ^\circ\text{C} + 273.15$ ）；

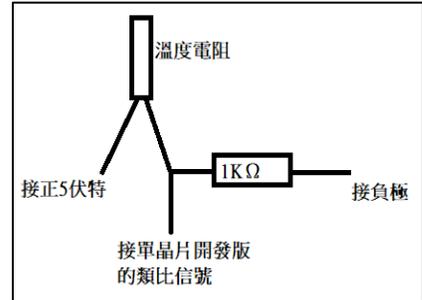


圖 1：溫度電阻的電路設計

NTC 熱敏電阻 -- 參數特性表									
$R_{25(25^\circ\text{C})} = 10.00\text{k}\Omega$					$B_{25(25^\circ\text{C})/90(90^\circ\text{C})} = 3950.00\text{K}$				
T(°C)	R(kΩ)	T(°C)	R(kΩ)	T(°C)	R(kΩ)	T(°C)	R(kΩ)	T(°C)	R(kΩ)
-30.0	177.000	3.0	28.060	36.0	6.208	69.0	1.813	102.0	0.640
-29.0	166.400	4.0	26.680	37.0	6.015	70.0	1.751	103.0	0.622
-28.0	156.800	5.0	25.400	38.0	5.776	71.0	1.693	104.0	0.605
-27.0	147.200	6.0	24.180	39.0	5.546	72.0	1.637	105.0	0.588
-26.0	138.500	7.0	23.020	40.0	5.326	73.0	1.582		
-25.0	130.400	8.0	21.920	41.0	5.118	74.0	1.530		
-24.0	122.900	9.0	20.880	42.0	4.918	75.0	1.480		
-23.0	115.800	10.0	19.900	43.0	4.726	76.0	1.432		
-22.0	109.100	11.0	18.970	44.0	4.544	77.0	1.385		
-21.0	102.900	12.0	18.290	45.0	4.368	78.0	1.341		
-20.0	97.120	13.0	17.760	46.0	4.202	79.0	1.298		
-19.0	91.660	14.0	16.460	47.0	4.042	80.0	1.256		
-18.0	86.540	15.0	15.710	48.0	3.888	81.0	1.216		
-17.0	81.720	16.0	15.000	49.0	3.742	82.0	1.178		
-16.0	77.220	17.0	14.320	50.0	3.602	83.0	1.141		
-15.0	72.980	18.0	13.680	51.0	3.468	84.0	1.105		
-14.0	69.000	19.0	13.070	52.0	3.340	85.0	1.071		
-13.0	65.260	20.0	12.490	53.0	3.216	86.0	1.038		
-12.0	61.760	21.0	11.940	54.0	3.098	87.0	1.006		
-11.0	58.460	22.0	11.420	55.0	2.986	88.0	0.975		
-10.0	55.340	23.0	10.920	56.0	2.878	89.0	0.945		
-9.0	52.420	24.0	10.450	57.0	2.774	90.0	0.916		
-8.0	49.660	25.0	10.000	58.0	2.674	91.0	0.888		
-7.0	47.080	26.0	9.574	59.0	2.580	92.0	0.862		
-6.0	44.640	27.0	9.166	60.0	2.488	93.0	0.836		
-5.0	42.340	28.0	8.778	61.0	2.400	94.0	0.811		
-4.0	40.160	29.0	8.400	62.0	2.316	95.0	0.787		
-3.0	38.120	30.0	8.038	63.0	2.234	96.0	0.764		
-2.0	36.200	31.0	7.724	64.0	2.158	97.0	0.741		
-1.0	34.380	32.0	7.404	65.0	2.082	98.0	0.720		
0.0	32.660	33.0	7.098	66.0	2.012	99.0	0.699		
1.0	31.040	34.0	6.808	67.0	1.942	100.0	0.679		
2.0	29.500	35.0	6.532	68.0	1.876	101.0	0.659		

圖 2：溫度電阻對照表

- 5、溫度電阻購買時已由賣家提供數據（圖 2）得知參數值  $B = 3950$ ，還可從電阻值為  $10\text{k}\Omega$  時為  $25^\circ\text{C}$  帶入公式先得知  $R = 100000$ ， $T_2 = 25$ ，因此只要在知道溫度電阻測得的阻值即可知道當時溫度為何。
- 6、 $T_1$  即為  $3950 / (\ln(R_t / 100000) + (3950 / 298.15)) - 273.15$ ，將它記錄起來即可做分析（整理過程如圖 3）

$$R_t = R * \text{EXP}(B*(1/T_1 - 1/T_2))$$

$$R_t = 100000 * e^{(3950*(1/T_1 - 1/298.15))}$$

$$R_t / 100000 = e^{(3950*(1/T_1 - 1/298.15))}$$

$$(3950*(1/T_1 - 1/298.15)) = \ln(R_t / 100000)$$

$$(3950*1/T_1) - (3950/298.15) = \ln(R_t / 100000)$$

$$1/T_1 = (\ln(R_t / 100000) + (3950/298.15)) / 3950$$

$$T_1 = 3950 / (\ln(R_t / 100000) + (3950/298.15))$$

此時  $T_1$  為凱氏溫標，須轉為°C 方便分析資料  
所以要在減 273.15

圖 3：公式整理

## 彭巴效應違背了熱力學？

程式選寫：

如圖 4 所示即為單晶片開發版的程式碼，此程式碼會每等待一段時間後（時間可由實驗者自行設定）將單晶片開發版收到的類比值直接寫入 Excel（如圖 5），再經由 Excel 打入公式即可得到溫度電阻所處位置的溫度了。

由於實驗數據表與時間有關，而且我的作法每 10 秒鐘回傳一次資料，因此表格龐大，在表格中又看不到有用的數據，所以實驗中我都將其繪製成折線圖做分析。



```
sketch_sep27a | Arduino 1.8.7
int t = 0;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("LABEL,time(Sec),Val(Sim)");
  pinMode(A0,INPUT);
}
void loop() {
  double val = analogRead(A0);
  Serial.print("DATA");
  Serial.print(",");
  Serial.print(t);
  Serial.print(",");
  Serial.print(val);
  delay(10000);
  t=t+10;
}
```

圖 4：單晶片開發版的程式碼

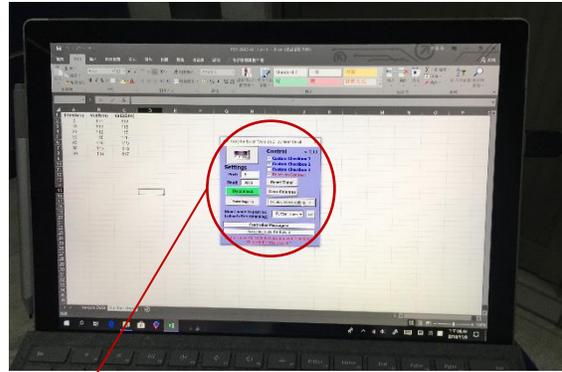


圖 5：接收單晶片開發版的 Excel

此為 Excel 聚集程式  
它會將 COM 的回傳值也就是單晶片開發版的  
回傳值直接寫入 Excel

## 五、實驗步驟簡示

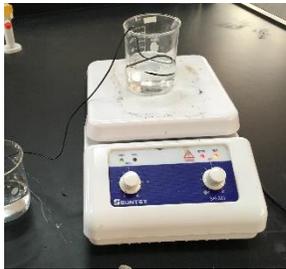


圖 6：加熱至所需溫度



圖 7：秤重



圖 8：放入冷凍庫

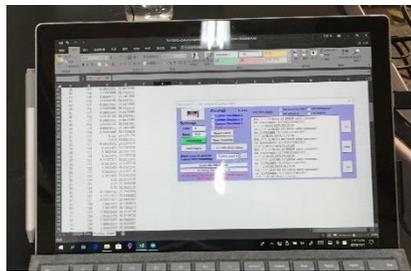


圖 10：編輯判讀數據



圖 9：等待冷卻並紀錄數據

貳、正文

一、實作測試

因為一開始我想到底要冰多久水才會結冰，這樣才能夠在未來的實驗的時間上做一個統一，又不需要花費過多時間去等待；同時可以測試我設計的溫度計到底可不可以正常使用，所以我實作測試了一下。

實驗步驟：

1. 省略做實驗的次數，所以直接先低溫開始冷卻
2. 先將一杯超過 100 克的水放入冰箱（冷藏）
3. 再將水拿出秤重 100 克
4. 將實作的溫度計和水 100 克同時放入冷凍庫
5. 因為是第一次試做，所以我放入後去寫了作業和讀完書後大約快 3 小時再回去觀察回傳數據值

實驗結果：

我發現溫度已經近乎平衡不再下降，所以我就將其拿出冷凍庫，後來才發現原來冷凍庫的溫度是-18 度，可是我實驗只做到了-5 度而已，但是實驗過程已經說明 14 度的降溫大約只需要 22 分鐘即可達到液體變為固體的變態過程，因為液體變為固體的變態過程單位時間的放熱量為一定值，所以我就決定在之後實驗都統一以 1 小時為實驗時間來做圖判斷。

在此實驗後我馬上將溫度計放入測量，發現其溫度和自製溫度計所得值並沒有差，所以可以證實自製溫度計是可以正常使用。

表一：從 14 度開始冷卻到溫度平衡

time(Sec)	Val(Sim)	R(Ω)	T(°C)
0	64	15.984375	14.8056217
10	64	15.984375	14.8056217
20	60	17.05	13.4571727
30	62	16.5	14.1406917
40	62	16.5	14.1406917
50	62	16.5	14.1406917
60	62	16.5	14.1406917
70	60	17.05	13.4571727
80	59	17.3389831	13.1080799
90	60	17.05	13.4571727
100	60	17.05	13.4571727
110	59	17.3389831	13.1080799
120	59	17.3389831	13.1080799
130	59	17.3389831	13.1080799
140	60	17.05	13.4571727
150	59	17.3389831	13.1080799
160	58	17.637931	12.7538906
170	58	17.637931	12.7538906
180	57	17.9473684	12.3944395
190	57	17.9473684	12.3944395
200	56	18.2678571	12.0295529
210	57	17.9473684	12.3944395
220	57	17.9473684	12.3944395
230	55	18.6	11.6590481
240	55	18.6	11.6590481
250	55	18.6	11.6590481
.. (省略) ..			
10360	23	44.4782609	-5.1858964
10370	23	44.4782609	-5.1858964
10380	23	44.4782609	-5.1858964
10390	23	44.4782609	-5.1858964
10400	23	44.4782609	-5.1858964
10410	23	44.4782609	-5.1858964
10420	23	44.4782609	-5.1858964
10430	23	44.4782609	-5.1858964
10440	23	44.4782609	-5.1858964
10450	24	42.625	-4.4099896
10460	24	42.625	-4.4099896
10470	23	44.4782609	-5.1858964
10480	23	44.4782609	-5.1858964
10490	24	42.625	-4.4099896
10500	23	44.4782609	-5.1858964
10510	24	42.625	-4.4099896
10520	24	42.625	-4.4099896
10530	24	42.625	-4.4099896
10540	24	42.625	-4.4099896
10550	23	44.4782609	-5.1858964
10560	23	44.4782609	-5.1858964
10570	23	44.4782609	-5.1858964
10580	23	44.4782609	-5.1858964
10590	24	42.625	-4.4099896
10600	24	42.625	-4.4099896
10610	24	42.625	-4.4099896
10620	23	44.4782609	-5.1858964
10630	24	42.625	-4.4099896
10640	24	42.625	-4.4099896
10650	23	44.4782609	-5.1858964
10660	23	44.4782609	-5.1858964

(來源：自行實驗取得)

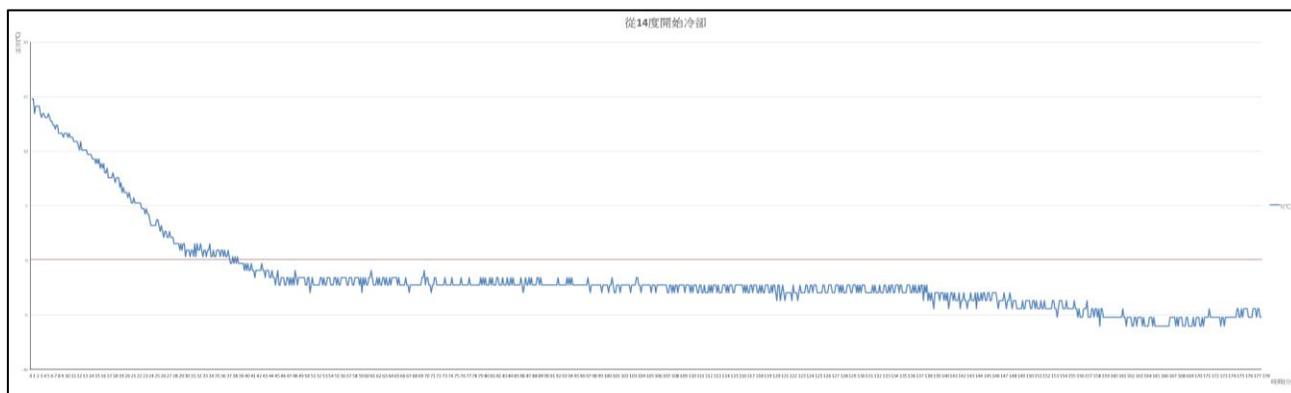


圖 11：從 14 度開始冷卻折線圖  
圖繪製於完整的表一

## 二、文獻研究及討論

因為這是我們第一次做有關於熱力學的實驗，所以我們對這方面非常不了解，因此我們決定先查資料，等查完後再進一步做實驗來佐證及討論。

### （一）水的行為實在太奇特了

出自於書本《水之書：最平凡的物質，最超凡的故事》裡面有詳細提到，1963年當時彭巴（Erasto B. Mpemba）和他的朋友在製作冰淇淋，結果發現自己比同學晚放入冷凍庫卻比同學早結冰。

### （二）20 世紀的十大“科學騙局”

「熱水結凍速度快於冷水。當時立刻引起物理界廣泛關注，最後科學家論證，認為這所謂的“發現”根本站不住腳。」（吳學安，2011）由文獻中得知科學家們也只認為說這是錯誤的現象，但並沒有真正的去找出為什麼當時彭巴會發現這個現象。

### （三）顯熱、潛熱、比熱及牛頓冷卻定律討論

1. 比熱的定義就是指單位質量內要上升一溫度單位所需要的熱量，在維基百科及老師說大學物理課本也有提到說比熱是會隨著溫度改變跟著改變的，也意味著在冷卻的過程中比熱是不斷在改變的。
2. 牛頓冷卻定律是牛頓利用數據歸納統整出的一個算式，它可以計算出溫度再冷卻也就是平衡時所需要花多少時間，它是為溫度差與時間的函數。

顯熱、潛熱、比熱及牛頓冷卻定律討論結果：

我們討論結果認為實驗圖形會趨近於一個  $\log$  的圖形是因為比熱的不斷改變造成的，而牛頓冷卻定律以積分解出來後確實是以自然對數  $\ln$  的形式呈現，但是在查資料的過程中發現牛頓冷卻定律無法適用於變態的過程。

在查資料過程中我們有查到液體在變態的過程是以潛熱在做計算並不是以比熱或顯熱，而放熱的速度也跟當下溫差有關所以溫度及時間圖才會是以一個趨近於  $\ln$  的圖形呈現，也就是說在變態時溫度不變即單位時間放熱量都會相同。

#### (四) 過冷現象

過冷現象通常不易察覺，而且也不易發生，在 David, A.(1995). *Supercooling and the Mpemba effect: When hot water freezes quicker than cold.* 這篇文章中有提到過冷是會有機率性出現，然後我又收尋了一些資料後發現，其實過冷現象需要夠少的懸浮微粒，再加上適當的溫度條件才會出現的，在這次實驗中我完全沒有看到過冷的現象，所以只能靠文獻來了解過冷水的特性；網路上還有一些將冷凍庫的水拿出來（還是液體的）但到入一個放有冰塊的碗裡時液態水會馬上結成冰塊，這即是過冷現象的應用。

圖 12 是理想狀態水為液體降溫的情形（由於在繪製示意圖無法精準畫出  $\ln$  的函數圖形所以以直線代替），理想狀態的水再液體變成固體時會先在  $0^{\circ}\text{C}$  冰水共存直到放熱約  $80 \text{ Cal/g}$  後才會變成冰塊持續降溫直到與外界溫度平衡。

圖 13 是過冷狀態水為液體降溫的情形（由於在繪製示意圖無法精準畫出  $\ln$  的函數圖形所以以直線代替），過冷狀態的水會先降至低於  $0^{\circ}\text{C}$  後再以快速的溫度變化量回到  $0^{\circ}\text{C}$ ，接著冰水共存直到放熱約  $80 \text{ Cal/g}$  後才會變成冰塊持續降溫直到與外界溫度平衡。

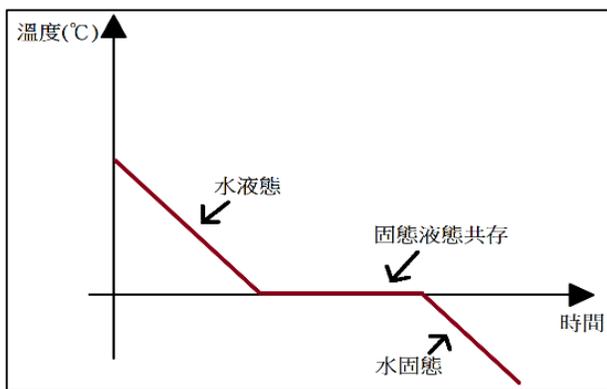


圖 12：理想水結冰示意圖  
由作者自行參考文獻繪製

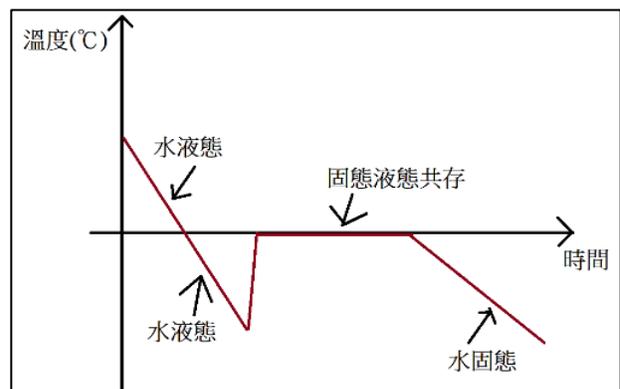


圖 13：過冷水結冰示意圖  
由作者自行參考文獻繪製

### 三、不同起始溫度不同時間冷凍測試

我就先想，那麼不同的起始溫度，其他變因都一樣，分別測試是不是會有彭巴效應產生，所以我就分別取了三種起始溫度不同的水來做實，看哪杯水先達到冰水共存的狀態那杯水即算結冰。

實驗步驟：

1. 我先取三杯超過 100 克的水
2. 分別放入冰箱（冷藏）、常溫、加熱至沸騰
3. 再將三杯分別秤重 100 克
4. 將實作的溫度計和三杯 100 克不同溫度的水同時放入冷凍庫
5. 等待 60 分鐘再拿出觀察

實驗結果：

實驗完後我將表格繪製成折線圖發現

1. 溫水雖然在  $10^{\circ}\text{C}$  到  $0^{\circ}\text{C}$  只需要 13 分又 10 秒而冷水再  $10^{\circ}\text{C}$  到  $0^{\circ}\text{C}$  卻需要 15 分 20 秒，可說明不同起始溫度會對同一溫度範圍有冷卻速度的影響。  
（圖 14 咖啡色線為溫水開始冷卻時的  $10^{\circ}\text{C}$  到  $0^{\circ}\text{C}$  的割線，藍色線為冷水開始冷卻時  $10^{\circ}\text{C}$  到  $0^{\circ}\text{C}$  的割線，第一點推論即咖啡色斜率大於藍色斜率，所以我去看原始資料表更精準計算出所需時間）
2. 不過不管如何溫水還是無法追上冷水，因為冷水 21 分 20 秒即到  $0^{\circ}\text{C}$ ，而溫水則是 26 分 50 秒才到  $0^{\circ}\text{C}$ ，熱水甚至一小時也無法到  $0^{\circ}\text{C}$ ，所以我無法將三條同溫度範圍做割線比較，不過我還是有將熱水和溫水做割線比較後發現，熱水和溫水在同溫時溫水盡然比熱水還快了 3 分 20 秒（即圖 14 黃線斜率小於紅線斜率）。

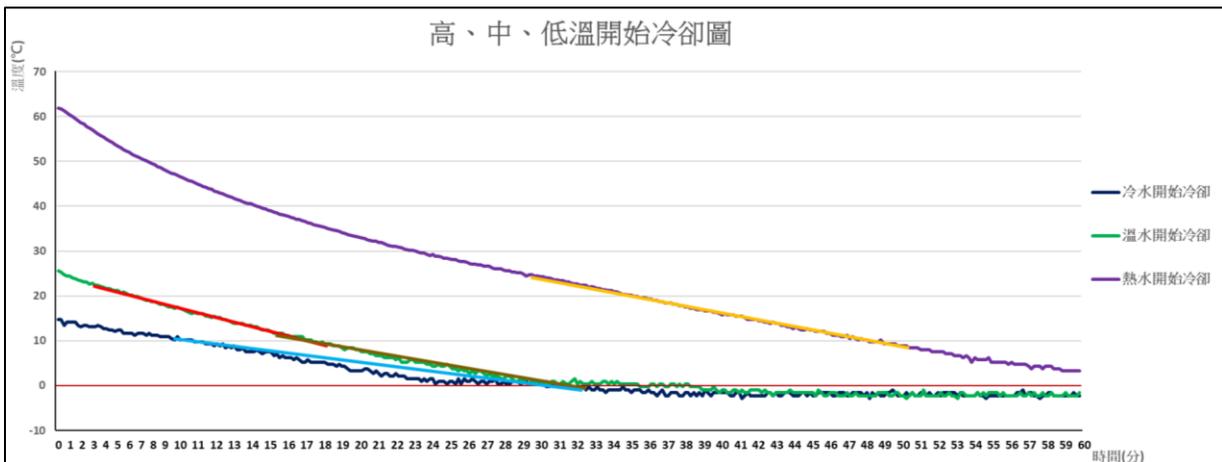


圖 14：不同起始溫度不同時間折線圖

圖自行實驗取得數據繪製而得

#### 四、不同起始溫度同時冷凍測試

我測試完不同時間不同起始溫度冷卻的實驗後發現幾乎沒有機會看到彭巴效應，所以我接著做了跟彭巴當時做的事情一樣的實驗，只不過這次我是使用純水和控制了變因，只有溫度不同這點跟當時彭巴一樣。

由於這次是兩杯同時做測試，所以我將溫度計做一點改良如圖 15，變成由兩個溫度計電路並聯，並且同時會回傳數值。

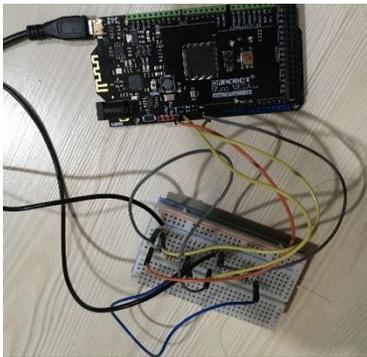


圖 15：兩個溫度計並聯

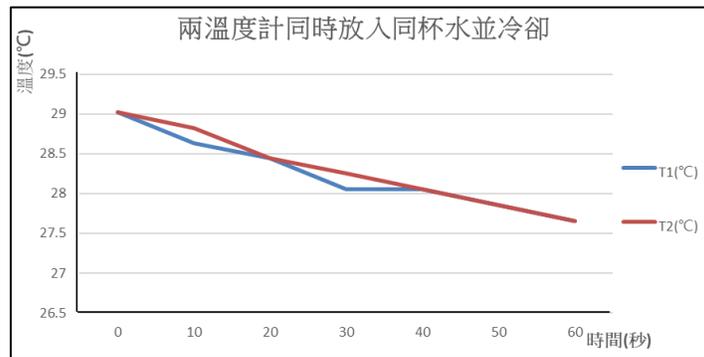


圖 16：兩溫度計同時放入同杯水並冷卻結果

圖繪至於表二

表二：兩溫度計同時放入同杯水並冷卻結果

time(Sec)	Val(Sim)	Val2(Sim)	R1( $\Omega$ )	R2( $\Omega$ )	T1( $^{\circ}\text{C}$ )	T2( $^{\circ}\text{C}$ )
0	122	122	8.3852459	8.3852459	29.0167218	29.0167218
10	120	121	8.525	8.45454545	28.6351275	28.8265925
20	119	119	8.59663866	8.59663866	28.4423059	28.4423059
30	117	118	8.74358974	8.66949153	28.0525074	28.2481065
40	117	117	8.74358974	8.74358974	28.0525074	28.0525074
50	116	116	8.81896552	8.81896552	27.8554864	27.8554864
60	115	115	8.89565217	8.89565217	27.6570204	27.6570204

(來源：自行實驗取得)

實驗步驟：

1. 先取兩杯超過 100 克的水
2. 將其中一杯加熱至沸騰
3. 再分別將兩杯水秤重
4. 將實作的溫度計和兩杯水同時放入冷凍庫
5. 等待 60 分鐘再拿出觀察

實驗結果：

實驗完後我將表格繪製成折線圖發現

1. 就算實驗跟著彭巴效應敘述內容方式進行實驗後，還是無法證實彭巴效應，因為較高溫的熱水冷卻速度還是無法追上較低溫的水。
2. 我分析同溫度值內的割發現，這次的熱水割線的斜率反而較溫水的大（即紫線斜率大於綠線斜率），我從數據內計算發現這次熱水和溫水在同溫時，熱水反而降溫速度比溫水快 1 分 20 秒。
3. 我還發現這次實驗的溫水和「不同起始溫度不同時間冷凍測試」的溫水起始溫度並沒有差太多，但是圖 14 紅色割線的斜率為 1.000 而圖 17 的綠色割線斜率約為 0.698，這代表這次實驗的溫水降溫速度變慢了。
4. 接著是這次實驗的熱水和「不同起始溫度不同時間冷凍測試」的熱水起始溫度並沒有差太多，反而略低一點點，可是圖 14 黃色割線的斜率約為 0.75 而圖 17 的紫色割線斜率約為 0.77，這代表此次實驗的熱水降溫速度變快了。
5. 綜合第 3 及第 4 點可以推論同一時間不同起始溫度的水一起放入冷凍庫，他們之間會自行溫度平衡，又同時跟外面環境溫度平衡，所以最後會趨近於同時到  $0^{\circ}\text{C}$ ，但是實驗結果還是溫水略快一點到  $0^{\circ}\text{C}$ ，因此無法證實彭巴效應是正確的。

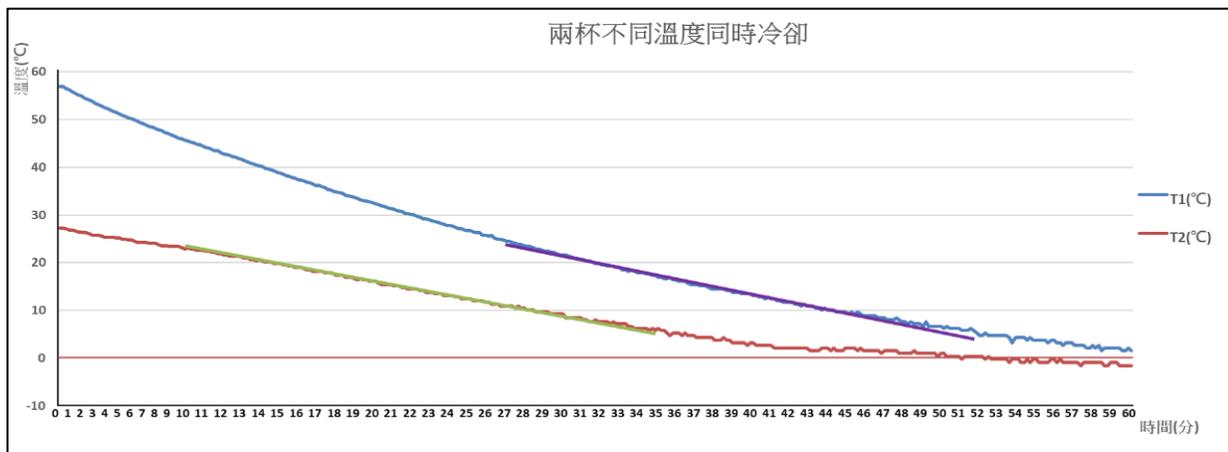


圖 17：不同起始溫度同時冷凍測試折線圖

圖自行實驗取得數據繪製而得

參、結論

我最後統整了所有的實驗結果後和老師討論完想出了幾點結論分別如下。

(一) 彭巴效應在實驗上已經顯示出是無法證實的了，因為溫度略高的水冷卻速度永遠無法追上溫度略低水的冷卻速度，而且若兩杯水同時放在同一冷卻環境時自己還會互相平衡，所以「最理想狀態」就是兩杯水互相平衡後「一起」結冰，不可能熱水追上冷水的冷卻速度。

(二) 我推想，當時彭巴能觀察到這個效應有兩個可能原因；第一點是因為他在做冰淇淋，而冰淇淋是混和物，混和物的比熱跟變態溫度點都不一樣了，所以他才覺得怎麼自己的比別人的還快結冰，其實只是他的冰淇淋比較能結冰而已；第二點是有可能他剛好觀察到過冷的現象出現在別人的冰淇淋裡面，因為過冷後的液體會需要花更多的時間去結冰，而他自己的沒有出現過冷現象，所以他的冰淇淋比別人早進入固態液態共存的時間。

(三) 我想，若想重現彭巴效應應該需要從混和物著手最為方便，因為只要改變混和物即可改變冰點，所以只要找到適當的不同混和物即可製造出彭巴效應；但是由混和物製造出彭巴效應的話無法真正的看到同一物的高溫結冰較快的現象，所以只能朝過冷現象的方向出發來製造彭巴效應，所以未來或許我可以再做一篇「彭巴效應與過冷現象的交互關係」來改正彭巴效應的內容。

#### 肆、引註資料

(一)、盧俊良、陳嘉弘、李卓豪、張婉吟(2005)。彭巴效應(Mpemba effect)的研究及探討。中華民國第50屆中小學科學展覽會參展作品。科學教育館：台北。

※僅參考過冷現象及牛頓冷卻定律

(二)、比熱不固定及比熱計算方式：

取自 維基百科(2018/8)。比熱容。

<https://zh.wikipedia.org/wiki/比熱容>

(三)、黃靜雅(譯)(2017)。水之書：最平凡的物質，最超凡的故事。

台北市：天下文化。

(四)、吳學安(2011)。20 世纪的十大“科学骗局”。

<http://news.sciencenet.cn/sbhtmlnews/2011/3/242074.html?id=242074>

(五)、David, A.(1995). *Supercooling and the Mpemba effect: When hot water freezes quicker than cold*. Max-Planck-Institut.

※參考文獻中過冷機率