

# 熱水結冰比冷水快?! WHY?

在寒帶地區生活的大多數人們都有個常識：如果把水留在戶外，熱水通常會比一般的冷水結凍得快。聽起來好像有點怪怪的吧？可是卻不是無稽之談喔！高愛迪斯曾經從科學部落格上的報導，看到了2012年英國皇家化學學會一個科學有獎徵答活動 *Why does hot water freeze faster than cold water?* 它的懸賞獎額高達1000英鎊(新台幣約5萬)。

雖然國外活動時效已過，高愛迪斯也提不出更優惠的條件來吸引問題的答案，但還是以百分百的熱心邀請小朋友在參閱網路參考資料後，用你可以做到的方式，一起來為五十多年前的坦尚尼亞(Tanzania, 東非, 熱帶地區)高中生姆添巴 (Mnemba) 探討「為什麼熱水結冰比冷水快」這個現象的可能解答。**務必注意安全!**

**實驗基本題** 試著用不同的容器裝些冷水和熱水，將它們放在冰箱裡，A1.看看溫度變化情形如何？A2.哪個先凝固？如果是熱水先凝固，你覺得原因是什麼(你認為的，先不用查資料沒關係)？A3.如果水中加入雜質如咖啡、茶葉，凝固早晚的結果有沒有不同？A4.若在熱水和冷水的容器中，放入鋼珠或玻璃珠等物品(一次放一種)，實驗結果會不相同嗎？

**實驗進階題** 請你運用上述基本題的概念，自行設計個「熱水 VS 冷水實驗」，B1.請寫出你的實驗設計(題目、器材、實驗變項、設計理念)，B2.比較各種不同因素變化及實驗結果之異同，B3.「熱水 VS 冷水」實驗結論。

**網路參考資料**：

1.英國皇家化學學會有獎徵答原文：RSC offers £1000 for explanation of an unsolved legendary phenomenon

<http://www.rsc.org/AboutUs/News/PressReleases/2012/mpemba-effect-water-ice-hot.asp>

2.科學網(中國)新聞報導：英懸賞1000英鎊求解：為何熱水結冰比冷水快

<http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2012/6/266225.shtm>

3.部落客整理報導：熱水結冰快于冷水問題答案水落石出？

<http://blog.sciencenet.cn/blog-99360-664278.html>

**提示**：

- 請你說出理論題造成熱水結冰比冷水快現象的原因(原理)，透過實驗來秀出你的答案，並告訴高愛迪斯根據和理由。本實驗有危險性，請在大人的協助與監督下進行！
- 歡迎使用科學儀器及實驗證明，能用數據或圖表、繪畫呈現是最好的；使用攝影器材也佳。
- 請勿複製或抄襲網路之現成答案。若有其他檢索出處或參考書籍，請記得標明資料來源。

# 一、實驗

為了研究姆潘巴效應（又稱彭巴效應），我們進行了一系列實驗。

## [實驗一]

- 實驗目的：**
1. 熱水、室溫水、冰水的冷卻過程中是否有彭巴效應
  2. 如果把水中加上可溶性物質（鹽、糖），結冰過程是否會受影響？
  3. 如果把水中加上固態物質（綠豆、湯圓、玻璃彈珠、鋼珠），結冰過程是否會受影響？
  4. 酸鹼值不同、成分不同的溶液（水、可樂、醋、牛奶、咖啡）間，結冰過程是否會有差異？

**實驗器材：** 100ml 塑膠燒杯、250ml 玻璃燒杯、溫度計、熱水、自來水、飲水機的「冰水」（但實際上是只有 15°C 的冷水）、鹽、糖、綠豆、湯圓、彈珠、鋼珠、可樂、醋、牛奶、咖啡、冷凍櫃



**實驗結果：**

(溫度 °C)	說明	時間 (分鐘)						
		0	30	45	50	55	60	65
<b>A、純水</b>								
熱水	80ml；塑膠杯	79.0	10.0	0.0	1.0	0.5	(1.0)	0.5
室溫水	80ml；塑膠杯	27.0	10.0	2.5	0.0	0.0	(1.0)	0.0
冷水	80ml；塑膠杯	15.0	5.0	2.0	0.5	1.0	1.0	(1.5)

<b>B、加可溶解物質</b>								
熱水	150ml；玻璃杯	79.0	20.0	8.0	3.0	2.0	1.5	1.0
熱水+鹽	濃度：17%；150ml；玻璃杯	79.0	12.0	2.0	0.0	(4.0)	(4.0)	(4.0)
熱水+糖	濃度：17%；150ml；玻璃杯	79.0	13.0	3.0	2.0	(1.0)	(1.0)	(1.0)
室溫水	150ml；玻璃杯	27.0	8.0	0.5	(2.0)	1.0	0.0	0.0



C、加料組								
熱水	80ml；塑膠杯	79.0	10.0	0.0	1.0	0.5	(1.0)	0.5
熱水+綠豆	綠豆重30g，加水到80ml；塑膠杯	79.0	6.0	2.0	(1.0)	(0.5)	0.0	(1.0)
熱水+湯圓	湯圓重30g，加水到80ml；塑膠杯	79.0	9.0	3.0	1.0	(1.0)	0.0	0.0
熱水+彈珠	彈珠重30g，加水到80ml；塑膠杯	79.0	5.0	2.0	1.0	0.0	0.0	(1.0)
熱水+鋼珠	鋼珠重30g，加水到80ml；塑膠杯	79.0	8.0	3.0	0.0	0.0	0.0	(2.0)

D、其他溶液組								
室溫水	80ml；塑膠杯	27.0	10.0	2.5	0.0	0.0	(1.0)	0.0
可樂	pH=4；80ml；塑膠杯	27.0	8.0	3.0	0.0	(2.0)	(2.0)	(2.0)
醋	pH=4；80ml；塑膠杯	27.0	6.0	(1.0)	(4.0)	(3.0)	(4.0)	(4.0)
牛奶	pH=6；80ml；塑膠杯	27.0	4.0	(2.0)	(1.0)	(1.0)	(0.5)	(3.0)
咖啡	pH=8；80ml；塑膠杯	27.0	4.0	1.0	0.0	(2.5)	0.0	0.0

### 說明與發現：

- 在 A 組中，達到 0°C 的時間是熱水 < 室溫水 < 冷水
  - 由於 100ml 塑膠燒杯數量不足，我們改以 250ml 玻璃燒杯進行 B 組的實驗。在 B 組中，室溫水比熱水、鹽水、糖水都快達到 0°C 的溫度，而鹽水又比糖水還快達到甚至溫度更冷，但鹽水不會結冰
  - 在 C 組中，加了料的溶液達到 0°C 的溫度都比只有熱水還慢，而整體速度是熱水 < 綠豆 < 鋼珠 < 湯圓 < 玻璃彈珠
  - 在 D 組中，醋跟牛奶都比室溫水快達到 0°C 的溫度，但看起來酸鹼值影響不大
- 然而，雖然在塑膠量杯的那一組可以看出熱水比溫水或室溫水都快達到可以結冰的 0°C，但是在玻璃杯組裡頭的熱水及室溫水中卻看不到相同的效果。我們擔心這是測量誤差（有可能我們在測每杯溶液的溫度時酒精溫度計還沒有降到實際溫度），也擔心是因為塑膠量杯可能可以儲熱（或者是燒杯玻璃太薄）所造成的，所以決定進行第二次實驗。

### [實驗二]

#### 實驗目的：

1. 熱水、室溫水、冰水的冷卻過程中是否有彭巴效應
2. 如果把水中加上可溶性物質（鹽、糖），結冰過程是否會受影響？
3. 如果把水中加上固態物質（綠豆、湯圓、玻璃彈珠、鋼珠），結冰過程是否會受影響？
4. 酸鹼值不同、成分不同的溶液（水、可樂、醋、牛奶、咖啡、蜂蜜）間，結冰過程是否會有差異？

#### 實驗器材：

250ml 玻璃燒杯、溫度計、熱水壺、自來水、飲水機的「冰水」（實際測量為 9°C）、鹽、糖、綠豆、湯圓、彈珠、鋼珠、可樂、醋、牛奶、咖啡、蜂

蜜、冷凍櫃、固定溫度計用的鐵架、塑膠籃（承裝實驗物體用）



實驗結果：

(溫度 °C)	說明	時間 (分鐘)									
		0	30	45	60	75	85	95	100	105	
<b>2A、純水</b>											
熱水	175ml；玻璃杯	100.0	34.0	22.0	15.0	8.0	4.0	1.0	(0.5)	(2.0)	
溫水	175ml；玻璃杯	52.0	23.0	16.0	11.5	6.0	3.0	1.0	0.0	(1.0)	
室溫水	175ml；玻璃杯	19.0	13.0	9.0	6.5	3.0	2.0	0.0	0.0	0.0	
冷水	175ml；玻璃杯	9.0	6.5	4.0	3.0	0.0	(0.5)	(1.0)	(0.5)	(0.5)	

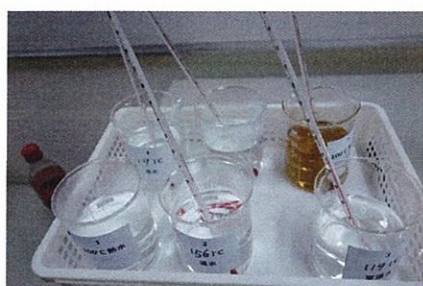
<b>2B、加可溶解物質</b>											
熱水	175ml；玻璃杯	100.0	34.0	22.0	15.0	8.0	4.0	1.0	(0.5)	(2.0)	
熱水+鹽	濃度17%；175ml；玻璃杯	100.0	28.0	18.0	11.5	6.0	2.0	(1.5)	(3.0)	(5.0)	
熱水+糖	濃度17%；175ml；玻璃杯	100.0	31.5	22.0	15.0	9.0	5.0	1.0	(1.0)	(3.0)	
室溫水	175ml；玻璃杯	19.0	13.0	9.0	6.5	3.0	2.0	0.0	0.0	0.0	

<b>2C、加料組</b>											
熱水	175ml；玻璃杯	100.0	34.0	22.0	15.0	8.0	4.0	1.0	(0.5)	(2.0)	
熱水+綠豆	綠豆重30g，加水到175ml；玻璃杯	100.0	25.0	14.0	7.5	2.0	0.5	0.0	0.0	(0.5)	
熱水+湯圓	湯圓重30g，加水到175ml；玻璃杯	100.0	21.5	12.0	5.0	2.5	1.0	0.0	(0.5)	(0.5)	
熱水+彈珠	彈珠重30g，加水到175ml；玻璃杯	100.0	25.0	16.0	9.0	2.5	1.0	(1.0)	(1.0)	(0.5)	
熱水+鋼珠	鋼珠重30g，加水到175ml；玻璃杯	100.0	32.0	21.0	15.0	8.5	6.0	3.0	1.0	0.0	

<b>2D、其他溶液組</b>											
室溫水	175ml；玻璃杯	19.0	13.0	9.0	6.5	3.0	2.0	0.0	0.0	0.0	
可樂	pH=4；175ml；玻璃杯	16.0	10.0	6.0	3.5	0.5	(2.0)	(3.0)	(2.0)	(2.0)	
醋	pH=4；175ml；玻璃杯	18.0	10.0	6.0	3.0	0.5	(2.0)	(3.0)	(0.3)	(3.0)	
牛奶	pH=6；175ml；玻璃杯	18.0	11.0	7.0	4.0	0.5	(1.0)	(1.0)	(0.5)	(0.5)	
咖啡	pH=8；175ml；玻璃杯	19.0	10.0	6.0	3.5	1.5	0.0	(0.5)	(0.5)	(0.5)	
蜂蜜	pH=6；175ml；玻璃杯	20.0	11.0	7.0	4.0	0.5	(2.0)	(4.0)	(5.0)	(6.0)	

## 說明與發現：

- 在這次實驗裡頭，我們全部都用 250ml 的玻璃燒杯來做，並且每個燒杯裡頭都放一個溫度計，以減少因為測量時間不夠而造成溫度記錄上的實驗誤差
- 我們這次除了觀察溫度變化，也特別記錄了有無結冰的狀況（綠色格子即代表結冰）
- 從 2A 組可看出：100°C 熱水的溫度下降幅度，比 9°C 冷水來得大；但熱水的結冰速度比冷水慢，結冰速度是冷水 > 室溫水 > 溫水 > 熱水
- 從 2B 組可看到：
  - 鹽水仍舊不結冰，但是溫度卻很低，我們推測和海水不結冰的原因相關
  - 熱水結冰的速度比糖水還慢，這跟第一次實驗 B 組看到的現象一樣
- 從 2C 組可看出：
  - 這次除了加鋼珠那個燒杯外，有加料的其它燒杯（綠豆、湯圓、彈珠）結冰都比純熱水還快，這跟第一次實驗 C 組看到情形不一致
  - 在水裡加東西後最多只降到 -0.5°C
- 從 2D 組可看出：
  - 咖啡結冰最快，但是溫度卻不是最低。而且所有溶液的降溫速度都比室溫水還快
  - 偏酸性的溶液（醋、可樂）降溫的速度比較快，但是溫度會持續下降到 -2~-3°C
  - 偏中、鹼性的溶液（咖啡、牛奶）降溫的速度比較慢，但是到達 -0.5°C 之後就不再降溫
  - 第 105 分鐘時，蜂蜜的溫度最低，是 -6°C，卻沒有結冰。蜂蜜只凝固不結冰，用手摸黏黏的
- 整個實驗中降溫幅度最大的是熱水，室溫水的溫度降到 0°C 之後就不再下降。有趣的是，有許多組都發現有溫度下降以後反而回升的現象。這是實驗誤差嗎？



由於這次實驗結果並沒有看到彭巴效應，而且有跟第一次實驗相互矛盾的現象，我們決定先捨去所有加料或者是混合溶液，改成用自來水放在不同材質的容器裡作實驗，看看在相同材質的容器裡彭巴效應是否存在，也看看不同材質間是否結冰速率會不同。

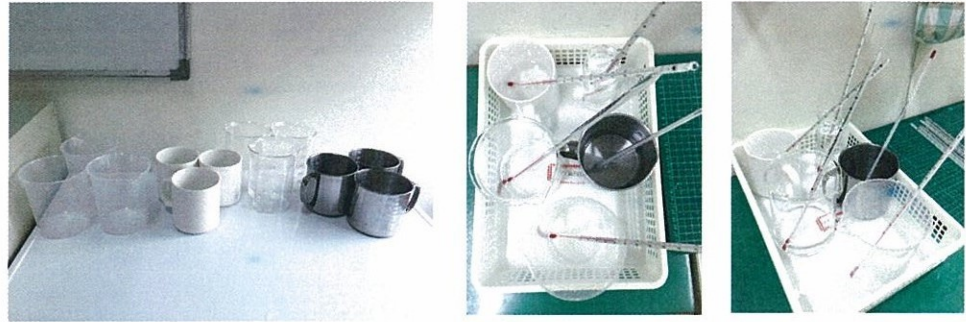
## [實驗三]

### 實驗目的：

1. 熱水、室溫水、冰水的冷卻過程中是否有彭巴效應
2. 同樣的水裝在不同材質的容器裡結冰速率是否會不同

### 實驗器材：

溫度計、熱水壺、自來水、500ml 玻璃燒杯、250ml 玻璃燒杯、鋼杯、馬克杯、塑膠量杯、塑膠籃（承裝實驗物體用）



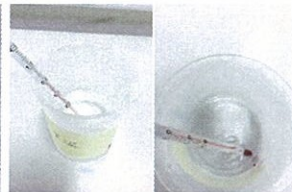
實驗結果：

(溫度 °C)	說明	時間 (分鐘)								
		0	30	45	60	70	80	90	100	105
<b>3A、大燒杯</b>										
室溫水	125ml；500ml燒杯	19.0	6.0	3.0	0.0	(0.5)	(0.5)	(0.2)	0.0	(0.2)
溫水	125ml；500ml燒杯	38.0	13.0	7.0	2.0	(0.5)	(0.5)	(0.5)	(0.5)	(0.5)
熱水	125ml；500ml燒杯	85.0	18.0	9.0	1.5	(1.0)	(1.0)	(1.0)	(1.5)	(1.1)
<b>3B、小燒杯</b>										
室溫水	125ml；250ml燒杯	19.0	8.0	3.5	1.0	(0.5)	(0.5)	(0.5)	(0.5)	(0.2)
溫水	125ml；250ml燒杯	38.0	10.0	3.5	0.0	(0.5)	(1.0)	(0.5)	(0.5)	(0.5)
熱水	125ml；250ml燒杯	85.0	21.0	12.0	4.0	1.0	(1.0)	(1.0)	(1.0)	(1.0)
<b>3C、鋼杯</b>										
室溫水	125ml；鋼杯	19.0	6.0	2.5	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.5
溫水	125ml；鋼杯	38.0	9.0	4.0	0.0	(0.5)	(0.5)	(0.5)	(0.5)	(1.0)
熱水	125ml；鋼杯	85.0	16.0	8.0	1.5	(0.5)	(0.5)	(0.5)	(0.5)	(0.5)
<b>3D、馬克杯</b>										
室溫水	125ml；馬克杯	19.0	6.0	3.0	0.0	(0.5)	(0.5)	(0.2)	(0.5)	(0.2)
溫水	125ml；馬克杯	38.0	10.5	4.0	0.0	(0.5)	(0.5)	(0.5)	(0.5)	(0.5)
熱水	125ml；馬克杯	85.0	22.0	13.0	5.5	1.5	(1.0)	(1.0)	(0.5)	(0.5)
<b>3E、塑膠杯</b>										
室溫水	125ml；塑膠杯	19.0	8.0	4.5	1.0	(1.0)	0.0	0.0	0.0	0.0
溫水	125ml；塑膠杯	38.0	11.0	5.0	0.0	(0.5)	(0.5)	(0.5)	(0.5)	(0.5)
熱水	125ml；塑膠杯	85.0	20.0	12.0	4.0	0.5	0.0	0.0	(0.5)	0.0

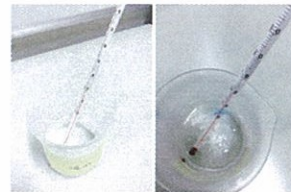
說明與發現：

- 在這次實驗裡頭，除了 250ml 的玻璃燒杯外，我們特別都選用底部口徑差不多的容器來進行，並全部改用自來水作實驗（溫水或熱水均由自來水加熱後倒入容器內）

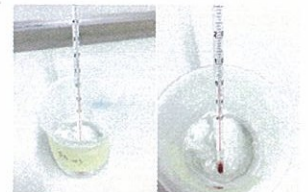
- 從 3A 大燒杯組中，可看到冷水還是比較先到達  $0^{\circ}\text{C}$ ，但從結冰狀況來看，冷水、溫水、熱水都是在 70 分鐘時結冰，而溫水溫度也下降到跟冷水一樣
- 從 3B 小燒杯組中可看到，溫水的確看起來降到  $0^{\circ}\text{C}$  最快，結冰速度跟冷水差不多
- 從 3C 鋼杯組中可看到，冷水、溫水都同時達到  $0^{\circ}\text{C}$ ，只是冷水那時候已經結冰了，而溫水還沒有結冰
- 在 3D 馬克杯組中，冷水、溫水都同時達到  $0^{\circ}\text{C}$ ，也同時結冰
- 在 3E 塑膠杯組中，溫水先達到  $0^{\circ}\text{C}$ ，但冷水結冰了以後反而溫度更低



塑膠杯，125ml 室溫水



塑膠杯，125ml 溫水



塑膠杯，125ml 熱水

做完了自來水的實驗後，看起來彭巴效應可能存在，於是我們想再做一次加料的實驗，也再來做一次自來水以確定彭巴效應的情形。

#### [實驗四]

實驗目的：

1. 如果把水中加上固態物質（綠豆、湯圓、玻璃彈珠、鋼珠），結冰過程是否會受影響？
2. 再次確認熱水、室溫水、冰水的冷卻過程中是否有彭巴效應

實驗器材：

250ml 玻璃燒杯、溫度計、熱水壺、自來水、綠豆、湯圓、彈珠、鋼珠、冷凍櫃、塑膠籃（承裝實驗物體用）



實驗結果：

(溫度 °C)	說明	時間 (分鐘)								
		0	30	45	60	70	80	90	100	105
<b>4A、室溫組</b>										
室溫水	125ml ; 250ml燒杯	19.0	6.5	1.5	(1.0)	(1.0)	(1.0)	(1.0)	(1.0)	(1.0)
室溫水+綠豆	加水到125ml ; 250ml燒杯	19.0	5.0	1.0	(0.5)	(0.5)	(0.5)	(0.5)	(0.5)	(0.5)
室溫水+湯圓	加水到125ml ; 250ml燒杯	19.0	6.0	1.5	0.0	0.0	(0.5)	(0.2)	(0.5)	0.0
室溫水+彈珠	加水到125ml ; 250ml燒杯	19.0	6.0	1.5	(0.5)	0.0	0.0	(0.5)	(0.5)	0.0
室溫水+鋼珠	加水到125ml ; 250ml燒杯	19.0	7.0	3.0	1.0	(0.5)	(0.5)	(0.5)	(0.5)	0.0
<b>4B、溫水組</b>										
溫水	125ml ; 250ml燒杯	38.0	13.0	6.0	2.0	0.0	(0.5)	(0.5)	(0.5)	0.0
溫水+綠豆	加水到125ml ; 250ml燒杯	38.0	11.5	5.0	1.0	(0.5)	(0.5)	(0.5)	(0.5)	0.0
溫水+湯圓	加水到125ml ; 250ml燒杯	38.0	13.5	7.5	3.0	0.8	(1.0)	(1.0)	(1.0)	(1.0)
溫水+彈珠	加水到125ml ; 250ml燒杯	38.0	14.5	7.5	3.0	1.5	(0.5)	(0.5)	(0.5)	0.0
溫水+鋼珠	加水到125ml ; 250ml燒杯	38.0	16.5	9.5	4.0	2.5	0.0	0.0	(0.2)	0.0
<b>4C、熱水組</b>										
熱水	125ml ; 250ml燒杯	72.0	24.0	14.0	8.0	3.0	1.0	(0.5)	(0.5)	0.0
熱水+綠豆	加水到125ml ; 250ml燒杯	72.0	26.0	15.0	8.0	5.0	2.0	0.0	0.0	0.0
熱水+湯圓	加水到125ml ; 250ml燒杯	72.0	20.0	11.5	4.5	1.1	0.5	(1.0)	(0.5)	(0.5)
熱水+彈珠	加水到125ml ; 250ml燒杯	72.0	22.0	13.0	6.5	3.0	1.0	(0.5)	(0.5)	(0.5)
熱水+鋼珠	加水到125ml ; 250ml燒杯	72.0	14.5	9.0	4.0	2.5	(0.5)	0.0	0.0	0.5

<b>4D、彭巴效應是否存在？</b>										
室溫水	125ml ; 250ml燒杯	19.0	6.5	1.5	(1.0)	(1.0)	(1.0)	(1.0)	(1.0)	(1.0)
溫水	125ml ; 250ml燒杯	38.0	13.0	6.0	2.0	0.0	(0.5)	(0.5)	(0.5)	0.0
熱水	125ml ; 250ml燒杯	72.0	24.0	14.0	8.0	3.0	1.0	(0.5)	(0.5)	0.0


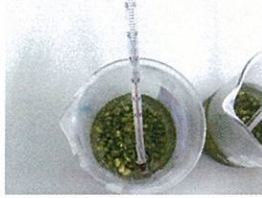









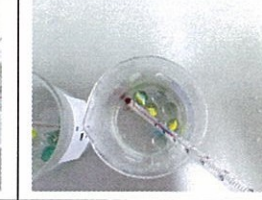

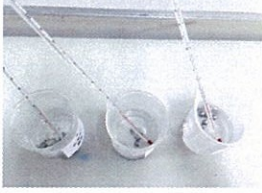


冷水	125ml ; 250ml燒杯 ; 3B實驗	19.0	8.0	3.5	1.0	(0.5)	(0.5)	(0.5)	(0.5)	(0.2)
溫水	125ml ; 250ml燒杯 ; 3B實驗	38.0	10.0	3.5	0.0	(0.5)	(1.0)	(0.5)	(0.5)	(0.5)
熱水	125ml ; 250ml燒杯 ; 3B實驗	85.0	21.0	12.0	4.0	1.0	(1.0)	(1.0)	(1.0)	(1.0)

#### 說明與發現：

- 從 4A 組，室溫水、室溫水+綠豆、室溫水+湯圓、室溫水+彈珠都是在同一個檢查時間結冰的，而由於室溫水的溫度較低，所以或許是室溫水最先結冰。室溫水+鋼珠則是最晚結冰的
- 從 4B 組，雖然溫水+綠豆在 70 分鐘時測得的溫度最低，溫水卻是最早結冰的。溫水+鋼珠仍然是最晚結冰的
- 從 4C 組，熱水+鋼珠反而是最早結冰的，而在 80 分鐘時，熱水+湯圓雖然測得溫度最低，卻還沒有結冰
- 我們把這次實驗的室溫水、溫水跟熱水降溫的狀況跟 3B 的實驗數據拿來比較（整理在 4D）。在 3B 裡頭，溫水最早到達 0°C 並且溫水跟室溫水都在 70 分檢查時結冰；但這次實驗中，反而是室溫水最早降到冰點以下並結冰。這兩個實驗結果並不一致！





	加料組合照	室溫水	溫水	熱水
綠豆				
湯圓				
玻璃彈珠				
鋼珠				

## 二、延伸討論

除了上面提到的利用學校冷凍庫作的實驗以外，我們在家中也曾經用冰箱冷凍庫做過水（盛裝在鋼杯及馬克杯）、牛奶（裝在鋼杯）、麵粉水（裝在鋼杯）等多次實驗，但卻都無法很明確得到溫水比室溫冷水早結冰的結果。不禁問自己，彭巴效應確實存在嗎？

上網查過網路資料以後，發現有些人主張有彭巴效應，也有些人跟我們一樣做很多次實驗都沒有結果（有人甚至認為彭巴效應是愚人節的玩笑）。

### [有關彭巴效應的故事]

1963年，坦桑尼亞中學三年級的學生彭巴經常與同學們一起做冰淇淋吃。他們總是先把生牛奶煮沸，加入糖，等冷卻後倒入冰格中放進冰箱冷凍。有一天，當彭巴做冰淇淋時，冰箱冷凍室內放冰格的空位已經所剩無幾，一位同學為了搶在他前面，竟把生牛奶放入糖後立即放在冰格中送進了冰箱。彭巴只得急急忙忙把牛奶煮沸，放入糖，等不及冷卻，立即把滾燙的牛奶倒入冰格送入冰箱。一個半小時後，彭巴發現熱牛奶已經結成冰，而冷牛奶還是很稠的液體。

根據上面的故事，我認為彭巴發現彭巴效應時應該結合了以下幾個條件：

- 實驗的溶液是牛奶+糖（而不是水，雖然網路上資料都說彭巴後來有用水再作實驗也得到一樣的結果）
- 容器是冰格
- 牛奶是滾燙的（相對於可能是常溫的生牛奶）

### [有關彭巴效應的定義]

根據科技部高瞻自然科學教學資源平台的資料，（彭巴效應（Mpemba effect）是指在同等體積、同等質量和同等冷卻環境下，溫度略高的液體比溫度略低的液體先結冰的現象。）彭巴效應並不是指熱水一定會比冷水先結冰，兩者的溫度如果有較大差異，那麼仍然將是冷水先結冰。

### [有關彭巴效應的解釋]

有關彭巴效應常見的解釋為：

#### 1. 蒸發：

- 熱水冷卻的過程中，會因蒸發而失去較多的質量。因所剩質量較少，所以液體需要被移除的熱較少，溫度冷卻得較快。用這個解釋，熱水會先結冰，只是因為它將較少的水結成冰。如果水只是透過蒸發來冷卻，和溫度分佈維持均勻，那麼熱水會先結冰

#### 2. 氣體溶解度：

- 熱水中的氣體溶解被逐出，改變了水的一些性質。氣體溶解的缺乏可能會改變水的傳

熱能力，或改變令單位質量的水結冰所需的熱量，又或改變熔點。熱水比冷水留住較少氣體溶解是對的，沸水趕走了大部分的溶解氣體。

### 3. 溶質

- 熱水可能溶有較多的溶質，可以較容易產生冰晶，使熱水更容易結冰
- 如果使用水的純度不夠，那些雜質有可能成為晶種 (seed)；比較高溫的水分子有較高的動能因而較可能跑到正確位置而結晶。

### 4. 過冷：

- 過冷現象發生在當水不在  $0^{\circ}\text{C}$ ，而在更低的溫度才結冰。水在  $0^{\circ}\text{C}$  時結冰是水分子「想」排列成冰晶體。這意味著，它們要停止像液態時那樣，隨機地嗡嗡亂飛，而代之以有  $^{\circ}\text{C}$  秩序的固態晶格。然而，它們不知道怎樣去排列，而需要小量不規則的物體或成核位置去告知它們。有時，當水被降到  $0^{\circ}\text{C}$  以下，它還看不到成核位置，這時，水就低於  $0^{\circ}\text{C}$  而沒有結冰。這種現象並不罕見。有一個實驗發現將熱水冷卻，只是過冷少許 (大約  $-2^{\circ}\text{C}$ )，但冷水會過冷較多 (大約  $-8^{\circ}\text{C}$ )。

### 5. 對流

- 液體降溫速度的快慢不是由液體的平均溫度決定的，而是由液體上表面與底部的溫度差決定的，當熱的液體冷卻時，這種溫度差較大，而且在凍結前的降溫過程中，熱的液體的溫度差一直大於冷的液體的溫度差。這種情況是由於上表面的溫度愈高，從上表面散發的熱量就愈多，因而降溫就愈快。即使當熱的液體冷卻到冷液體的初始溫度時，熱的液體比冷的液體，有較大的表面與底部的溫度差，所以有較快的降溫曲線
- 高溫容器的與環境有較大的溫差可產生較佳的熱傳導與對流，使得熱能更容易流到周遭的環境中

### 6. 環境

- 比如冷凍庫的地面有一層霜，而霜的導熱效果不好，熱水比冷水更易融化霜，使得熱水與冷卻器有較佳的接觸，因此熱水降溫較快

之前也有很多科展或研究針對彭巴效應做實驗：

資料	實驗方式	主要結論
彭巴效應 (Mpemba effect) 的研究及探討  (國立金門高級中學盧俊良等四人，中華民國第四十五屆中小學科學展覽會高中組物理科作品說明書)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 只看水下降到零度時所花的時間</li> <li>● 用試管(水量不多)、冷劑(而非冷凍庫)</li> <li>● 為何要用冷劑呢？他們認為冷凍庫裡並無定溫質，而出風口也只有一個，因此迎風面試管的溫度較低、背風面試管的溫度較高，且經過循環溫度有稍微的誤差，而冷劑是一個單位系統，因此溫度也較一致。而冷劑也簡單製造、隨手都可以取得。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 可得知溶解氣體的多寡對抵達 <math>0^{\circ}\text{C}</math> 之時間有很大的關係，<math>100^{\circ}\text{C}</math> 所釋放出來的溶解氣體量較其他溫度為多，所以溶解氣體很少，也較快下降至 <math>0^{\circ}\text{C}</math>，而 <math>70^{\circ}\text{C}</math> 和 <math>50^{\circ}\text{C}</math> 因釋出氣體比 <math>100^{\circ}\text{C}</math> 較少，下降至 <math>0^{\circ}\text{C}</math> 的時間需要花費比 <math>100^{\circ}\text{C}</math> 較長的時間</li> <li>● 蒸發對水結成冰影響可是非常小、不太明顯</li> <li>● 溫度下降的快慢與水的種類有些許的相關性</li> <li>● 以整體平均值下降到 <math>0^{\circ}\text{C}</math> 的時間來看，<math>100^{\circ}\text{C} &lt; 30^{\circ}\text{C} &lt; 70^{\circ}\text{C} &lt; 50^{\circ}\text{C}</math> 而其中 <math>100^{\circ}\text{C}</math> 和 <math>30^{\circ}\text{C}</math> 間差距較小；<math>70^{\circ}\text{C}</math> 和 <math>50^{\circ}\text{C}</math></li> </ul>

		<p>℃差距較小。</p>
<p>彭巴效應之實驗探討</p> <p>(台北市立金華國民中學邱雅鈺, 2006 台灣國際科展物理科科展說明書)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 用熱敏電阻、數位電錶、冰箱冷凍庫、不同水溫，測繪「冷卻曲線」探討彭巴效應</li> <li>● 針對 80℃、60℃、40℃、20℃ 的不同水初溫研究</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 利用熱敏電阻進行彭巴效應，確立了彭巴效應的存在</li> <li>● 80℃較 60℃快結冰的影響主因是因為氣體溶解以及蒸發</li> <li>● 結冰速度 80℃&gt;60℃&gt;40℃的影響主因是因為過冷效應</li> <li>● 彭巴效應並非由於單方面因素而形成，而是由於多重原因造成</li> <li>● 過冷推論：冷水比熱水更容易(且明顯)發生過冷，因此較不易結冰</li> <li>● 氣體溶解推論：冷水中溶解較熱水多的氣體，因此較不易結冰</li> <li>● 蒸發、氣體溶解、過冷效應確定為造成彭巴效應的原因</li> </ul>
<p>彭巴效應-探討液體的降溫機制</p> <p>(宜蘭高中江冠勳等 3 人, 宜蘭高中 98 學年度學生數理自然科學專題研究)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 利用 GLX 多功能測定儀連續取得溫度變化的數據</li> <li>● 使用容量為 100 毫升的燒杯裝入 75 毫升的自來水，用加熱器分別將燒杯隔水加熱至不同溫度後實驗</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 將燒杯內置入 6 個感測點，作出對流、傳導、蒸發的實驗後，認為冷卻時的熱密度無論為何，只要平均溫度相同，傳導冷卻率均相同。實驗團隊將其歸納為蒸發及對流所造成的現象</li> <li>● 水在冷卻時，會因為冷卻不均勻，造成溫度較高的水因為密度小而對流至上層，形成些微的「熱頂效應」。但溶液冷卻至 4℃左右，則因為水的密度曲線改變，上層較溫暖的水因密度較大而沉降至底層，而有上冷下熱的情形</li> <li>● 將燒杯放在冰塊上（模擬結霜）並不會促進彭巴效應的發生，甚至會有反效果</li> </ul>
<p>彭巴效應找到解答-「氫鍵」讓熱水比冷水更易結冰！</p> <p>(ETtoday 國際新聞)</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>● 新加坡南洋理工大學宣稱他們成功解開此現象之謎，關鍵就在於讓水分子聚合的「氫鍵」</li> <li>● 研究團隊指出，氫鍵將水分子拉近，卻也觸發它們之間的排斥力，這時氫鍵便會藉由伸展來儲存能量。當液體溫度上升時，水分子距離增大、氫鍵透過伸展儲蓄能量；而溫度下降時，氫鍵隨之萎縮，迅速釋出能量冷卻下來</li> </ul>

<p>結冰速率的迷思－彭巴效應 (Mpemba Effect) 的研究及探討</p> <p>(楊明祥，教育部數位教學資訊入口網)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 利用試管、冷凍櫃作實驗</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 當溫度在44°C(約50°C)時彭巴效應最明顯，且水中含空氣量較少，食鹽濃度愈高時，溫度下降速率較快</li> <li>● 若以硬水而言，則溫度下降速率較慢，彭巴效應不明顯</li> <li>● 管徑粗細及加蓋與否並不影響溫度下降的速率，顯示蒸發速率不影響彭巴效應</li> </ul>
<p>長庚大學生物醫學系四年級吳家偉、中原大學特殊教育學系三年級陳泊翌</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>● 回歸水結冰的本質，也就是物質的相變(phase change)上。將結冰的過程拆解成”水－&gt;碰撞冰面－&gt;形成冰”這三個步驟，猜測熱水碰撞冰面的頻率應該遠高於冷水</li> </ul>

### [彭巴效應是誤會嗎?]

中國上海向明中學的葉莎莎、庾順禧、董佳雯等三人也從2004年開始作實驗，2005年發表報告宣稱已破解 Mpemba 效應。他們的結論是：同質同量同外部溫度之環境下，Mpemba 效應不可能出現(即熱水不可能比冷水先結冰)。他們認為，彭巴效應的發生是因為三種可能誤差：

1. 冰箱內溫度不均勻：若 Mpemba 將未冷卻冰淇淋放在冷卻管附近，甚至與冷卻管接觸到，將會比已冷卻者先凝固
2. 若 Mpemba 不喜歡吃甜而在冰淇淋中少放了糖、或攪拌時未攪拌均勻，使糖粒沉澱，實驗證明會導致較快凝固
3. 其冰淇淋中除了牛奶及糖之外，還加入了澱粉類物質，在其牛奶及糖較少的狀況下，使其較快凝固

而許博硯在「彭巴效應及水凝固之探討」(國立臺灣科技大學機械工程系碩士論文)中首先評述許多有關彭巴效應的重要文獻，並據之設計一系列的凝固試驗以觀察彭巴效應和關於水凝固為冰的現象。經過相當嚴謹的多項試驗後，彭巴現象未能如所預期地於研究中重現，但卻觀察到水在冷卻過程會出現所謂『熱頂』現象，即上層水位的溫度為最高；水結冰的過程為，(水會先過冷，出現再輝點，而後水溫保持在0°C，最後完全結冰時水溫會再下降)；當最底層水溫降到4°C後，會有一個對流階段，此時水中任何一處的水溫開始保持為幾乎相同，並一直持續到再輝點；水由過冷最低點到再輝的時間很短，幾乎是在1秒鐘完成。

## [我的疑問]

真的有彭巴效應嗎？如果就我做出彭巴效應的第一及第三次主要實驗來看，我覺得有些變因可能並沒有控制好，而這些是不是造成「假」彭巴效應的原因呢？

1. 溶液擺放位置：由於學校冷凍庫有幾處都已經結霜了，雖然有人實驗過結霜應該不會因影響結冰或受冷，但畢竟學校冷凍庫裡頭並不是均勻結霜的，真的沒有影響嗎？而且學校冷凍庫有階梯，所以會不會冷空氣的循環受到影響？
2. 溫度計所測得的溫度：溫度計所測得的都是燒杯底部的溫度，會不會因為燒杯較薄，所以當有的燒杯放在塑膠籃裡時，其實量到的是塑膠籃底的溫度；而有的燒杯因為空間不夠就直接放在冷凍庫底部（而或許冷凍庫底部已經結了很薄很薄的冰）時，這些溫度計就直接量到冷凍庫的溫度呢？另外，為了觀察溫度變化，我們在一定時間會把溫度計拿起來查看溫度，這樣會不會破壞結冰過程而影響結冰呢？
3. 結冰可能發生在定期查看溫度的空檔間，所以只有方向，不夠準確。如果能像科展作品一樣連續測量溫度，或許可以更清楚瞭解結冰時到底有什麼變化

針對彭巴效應，我也有以下的疑問：

1. 彭巴效應到底是指比較快全部結冰還是比較快有結冰的現象呢？
2. 雖然有連續偵測溫度的設備很好，但是由於偵測點都是貼在燒杯內部，會不會反而是這些偵測點提供了水結冰所需要的「核」，而使得水結冰的呢？那那些偵測設備通電所以有微小電流，對於結冰有影響嗎？
3. 目前看來，許多成功測出彭巴效應的實驗都是利用試管當容器，但是試管底部是圓弧狀，而且試管的水量這麼少，彭巴效應的產生有這麼多限制嗎？更何況，有的是利用試管隔水加熱，那會不會是因為試管冷卻的過程（而非水溫本身）而帶動溫熱水結冰呢？
4. 有的實驗利用冷劑降溫，有的放在冷凍櫃裡降溫。那到底哪一種降溫的方法才是比較適合的？
5. 有的實驗說彭巴效應最多只存在溫差 $20^{\circ}\text{C}$ 以內的溶液做比較，但我覺得如果今天是拿 $5^{\circ}\text{C}$ 跟 $20^{\circ}\text{C}$ 的溶液比較，應該 $5^{\circ}\text{C}$ 的溶液無論如何還是會比較快結冰吧。那這樣就沒有彭巴效應了呀。

雖然我不知道到底有沒有彭巴效應或造成彭巴效應的原因，但這的確是個很有趣的問題，以後我也會更注意觀察冷、熱水的結冰狀況！

### 三、參考資料：

1. 彭巴效應 (Mpemba effect) 的研究及探討，國立金門高級中學盧俊良等四人，中華民國第四十五屆中小學科學展覽會高中組物理科作品說明書  
<http://www.tyc.edu.tw/files/CD/science45/senior/0401/040117.pdf>
2. 彭巴效應-探討液體的降溫機制，宜蘭高中江冠勳等3人，宜蘭高中98學年度學生數理自然科學專題研究  
<http://blog.ylsh.ilc.edu.tw/life/gallery/45/%E8%87%AA%E7%84%B67-%E5%BD%AD%E5%B7%B4%E6%95%88%E6%87%89.pdf>
3. 彭巴效應之實驗探討，台北市立金華國民中學邱雅鈺，2006台灣國際科展物理科科展說明書 <http://science.ntsec.edu.tw/Science-Content.aspx?sid=2980>
4. Ask PanSci 天天問討論區文章：對於「彭巴效應」不知道各位有何看法？  
<http://ask.pansci.tw/archives/280>
5. 維基百科「彭巴效應」  
<http://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%A7%86%E6%BD%98%E5%B7%B4%E7%8E%B0%E8%B1%A1>
6. 彭巴效應及水凝固之探討，許博硯，國立台灣科技大學機械工程系碩士論文  
<http://ndltd.ncl.edu.tw/cgi-bin/gs32/gswweb.cgi/login?o=dnclcdr&s=id=%22096NTUS5489063%22.&searchmode=basic>
7. 彭巴效應找到解答-「氫鍵」讓熱水比冷水更易結冰！ | ETtoday 國際新聞 | ETtoday 新聞雲 <http://www.ettoday.net/news/20131104/290628.htm#ixzz2jm1h4gXc>
8. 結冰速率的迷思-彭巴效應 (Mpemba Effect) 的研究及探討，楊明祥，教育部數位教學資訊入口網 [https://isp.moe.edu.tw/resources/search\\_content.jsp?rno=1582964](https://isp.moe.edu.tw/resources/search_content.jsp?rno=1582964)
9. 教育部電子報「我國學生進入英國皇家化學會彭巴效應競賽決賽」  
[http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:EMv-ADHhRrAJ:epaper.edu.tw/windows.aspx%3Fwindows\\_sn%3D12082+&cd=1&hl=zh-TW&ct=clnk&gl=tw](http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:EMv-ADHhRrAJ:epaper.edu.tw/windows.aspx%3Fwindows_sn%3D12082+&cd=1&hl=zh-TW&ct=clnk&gl=tw)
10. 新華網報導 2005/3/4 報導「牛奶比冷牛奶結冰快 滬3名高中女生破譯」  
[http://www.xinhuanet.com/chinanews/2005-03/04/content\\_3818090.htm](http://www.xinhuanet.com/chinanews/2005-03/04/content_3818090.htm)