

中華民國第 51 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國中組 物理科

030105

冰漩渦

學校名稱：臺北市立天母國民中學

作者： 國二 劉婕宇 國二 林子珉 國二 林品君	指導老師： 張意唯 洪啟軒
-----------------------------------	---------------------

關鍵詞：氣體的逃逸線、放熱式漩渦

摘要

由我們的實驗及研究發現，水結冰時的放熱方式是漩渦式的流動，且其強度和溫度有關。我們以染色水結冰，透過染色物的集中方式發現此結論。因容器中各部分水結冰的時間不同，當色素粒子結冰後即難以再流動，而尚未結冰的色素粒子則繼續流動，可捕捉到水結冰時水流的影像。而不同的受冷方式，可輕易控制某些非水分子的集中位置，甚至可造出令人驚嘆的美麗形狀。另外將有色冰柱解剖，竟發現正中心顏色較淺，好像颱風眼喔！粒沙見世界，也許颱風的形成、或大如銀河系的形成也和受冷放熱的漩渦式流動有關呢！

壹、研究動機

炎炎夏日，把保特瓶放在冰箱結冰，再帶到學校去，真是清涼又消暑的享受。但我們發現冰塊並不是整塊都是無色透明的。中間都有一條白色的冰柱，外圍才是透明的。把果汁或茶拿來結冰，也是中間顏色顏色較深。這美麗的冰塊中，藏著什麼樣的秘密呢？這白柱是什麼東西？怎麼形成的？又為何只在中心呢？深深引起我們探討的興趣。

與教材的相關性：

- 1、國中理化第三冊第一章
- 2、國中理化第三冊第五章
- 3、拉午耳定律

貳、研究目的

- (一) 了解水在凝固成冰時，中心為何會呈現白色的現象
- (二) 白色冰柱的形成是什麼原因
- (三) 是否有方法改變白色冰柱的位置
- (四) 形成冰柱的能量動力及熱對流方式為何

參、研究設備及器材

- (一) 藥品：食用色素、自來水、食鹽、冰塊、糖、乾冰、液態氮。
- (二) 器材：透明容器、冰箱、溫度計、塑膠盒、相機、量筒、尺、保力龍板、鋸子、鉸槍、熱熔槍、泡綿膠。

肆、研究過程與方法

實驗一

- 1、實驗目的：了解中心白柱是由什麼物質造成的。
- 2、實驗材料：食用色素、自來水、熱水、鹽水、糖水。
- 3、實驗裝置：透明容器（1 公升）、冷凍庫-30°C、水溫 19°C。
- 4、實驗步驟：
 - (1) 將四瓶透明容器分別裝入自來水、加食用色素的自來水、糖水、鹽水，放入冷冰庫（-30°C）冰一天。
 - (2) 再將一瓶加食用色素的自來水放入冷藏庫-5°C 冰一天。
 - (3) 將熱水倒入冰塊上方。
 - (4) 觀察冰塊內部。
- 5、研究結果：
 - (1) 食用色素水顏色集中到中心處成柱狀，自來水中心柱成白色。鹽水、糖水所結成的冰塊整塊不透明。
 - (2) 色素水並未結冰，被集中到中央處。
 - (3) 熱水倒入，會有大量氣體由色柱冒出。
 - (4) 可以清楚發現氣體移動的細線，我們暫稱為氣體的逃逸線，很清楚的發現逃逸線的排列方式為下方氣體由四周斜向上捲入色柱，上方由色柱斜向上沿往液面，中央上方逃逸線漸漸水平且垂直色柱，並非單純的向上逃逸。



色素原本均勻分布，
結冰後形成中央色柱



溶化部分後取出觀察



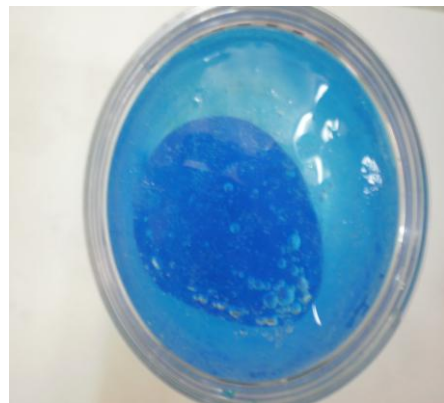
自來水結冰後形成中央白心柱



鹽水結冰，整塊冰幾乎都不透明



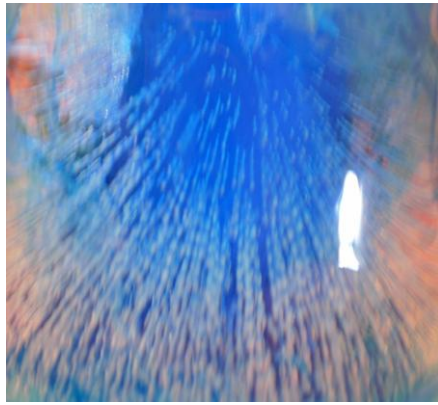
在-5°C下外側水已結冰，
色素水被包於冰塊內。



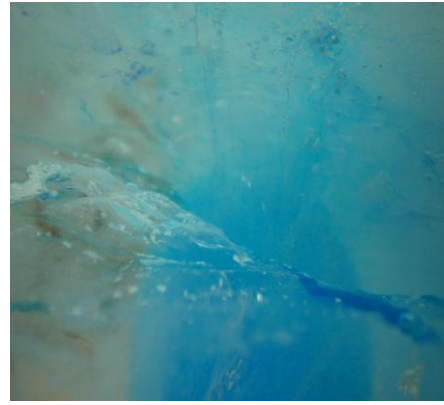
色柱內有無數小氣泡



倒入熱水，氣體由色柱冒出



下方氣體逃逸線



上方氣體逃逸線

6、研究討論：

- (1) 原本混色均勻的色素水，在結冰後顏色集中到中心處，應是雜質有往中間集中的證明。
- (2) 在第二組實驗中，因冷凍庫溫度較高，結冰速度也明顯變慢，含雜質的色素水因水溶液含雜質，故凝固點下降，不易結冰，但也被鎖在冰塊中間，而周圍的冰塊是透明晶瑩的，如此更能證明水溶液中的溶質被集中到中央處，而造成冰塊透光性的不同。
- (3) 倒入熱水，氣體只由色柱冒出，表示大多數氣體被集中到色柱內，空氣和色素皆不易分散溶於冰塊內，故一直被先結冰的冰塊驅趕至最後結冰的中心處。
- (4) 我們使用鹽水、糖水，整塊冰塊呈白霧狀，顯示糖分子及鹽的電解質粒子並不能被水結冰過程集中，其中原因我們並沒有深究，可能粒子太重，也可能這些粒子可分散於冰中。反倒是對於色素粒子能被集中感到興趣，這樣的情形表示，色素粒子的排列與分布可以捕捉水結冰的水流狀況。
- (5) 由氣體逃逸線發現，這些氣體似乎被捲了進去，又在上方被吐了出來。這外觀的現象使我們聯想到了漩渦。

實驗二

- 1、實驗目的：了解在水中，物質集中於中心處的方式。
- 2、實驗材料：水、鹽。
- 3、實驗裝置：鐵鍋、筷子。
- 4、實驗步驟：將鹽加入水中直到有大量沉澱，再快速攪拌形成漩渦。
- 5、研究結果：
沉澱的鹽原本均勻散落在底部，攪拌形成漩渦，當漩渦消失，鹽集中於中央沉澱。
- 6、研究討論：
漩渦能把內含的物質集中到中心處，由此現象我們推論水在結冰時，可能形成漩渦式的流動，將雜質及空氣集中於中央處，形成透光性的不同而造成中央白柱。



實驗三

- 1、實驗目的：了解水在結冰時熱量及水流的流動方式。
- 2、實驗材料：食用色素、自來水。
- 3、實驗裝置：透明容器（1 公升）加水至 900c.c 水溫 19°C、冰庫（冷凍庫-30°C）並在容器中各加入 0.5c.c 的藍色食用色素、溫度探測針。
- 4、實驗步驟：
 - (1) 將一支透明容器裝入色素水後，以定時連續攝影。
 - (2) 將兩支透明容器裝入色素水後，緊密排列，並以橡皮筋固定放入冰庫
 - (3) 將三、四、五支透明容器裝入色素水後，各別緊密排列成環形，並以橡皮筋固定放入冰庫。
 - (4) 測量中心及周圍溫度，並剖開冰塊。
- 5、研究結果：
 - (1) 步驟(1)實驗結果：由單支透明容器的連續攝影，我們發現到色素先上浮，之後底部再縮小成漩渦狀，最後在完全結冰時分布為圓柱狀。



放入冷凍庫溫度-30°C



3 小時後



4 小時後



7 小時後



9 小時後



10 小時後取出



剖開上下層的冰柱比較

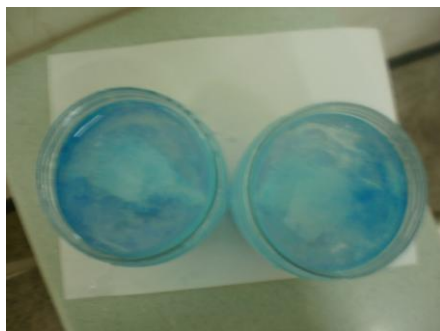
(2) 步驟(2)實驗結果：兩支透明容器，有色的物質集中於兩瓶的交接處。



結成冰於冰庫內，
有色的物質集中於兩瓶的交接處



取出冰庫發現上部交界膨脹



由上方看色柱幾乎以一線相連



打開看交界線，顏色較淺呈一線

(3) 步驟(3)實驗結果：

三支透明容器，有色的物質集中於靠近三瓶中心處的器壁處。



放入冰庫前



置入冰庫中



結冰取出冰庫，
有色柱集中於三瓶中心



由上方看色柱靠環心中央



打開看交界線，顏色較淺呈一粗線



上部交界膨脹

(4) 步驟(4)實驗結果：

四支透明容器，有色的物質集中於靠近四瓶中心處的器壁處。



放入冰庫前



置入冰庫中



結成冰於冰庫內，
有色的物質集中於四瓶的中心處



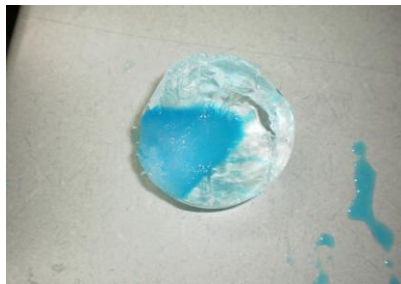
由上方看色柱靠環心中央，
上方交界膨脹容器略凸出變形



打開看交界線，並不明顯，
在上方交界有一環緊貼器壁



單支容器側影像



冰塊取出將其剖開，發現白心在
瓶壁上，表示此處為漩渦中心

(5) 步驟 (5) 實驗結果：

五支透明容器，有色的物質集中於靠近五瓶中心處的器壁處。



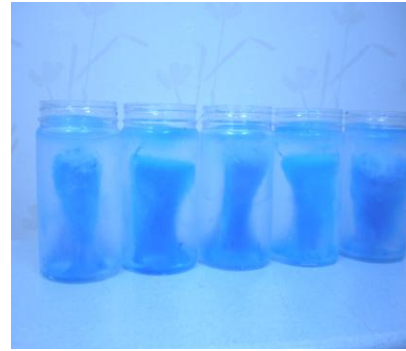
置入冰庫中 6 小時後，
上方水仍未結冰的形態



結冰取出冰庫，
有色柱集中於五瓶中心處



由上方看色柱靠環中央，
上部交界膨脹，容器略凸出變形



打開看交界線，並無交界線，
但上方交界有一環緊貼器壁



單支容器側邊影像

兩支容器以上的排列，有色冰柱皆向新的排列中心移動，且色柱最後結冰形狀並非圓柱狀，反而有點類似溜滑梯。上緣幾乎相連成排列的多邊形，有色冰柱的下部皆會和器壁分離形成透明帶。容器也最易在上方相連處因冰塊膨脹而變形。

6、研究討論：

- (1) 步驟 1 的實驗中，透過定時連續攝影更加強了水流是漩渦式流動。因為若僅以中心處溫度最高，不易溶於冰的非水粒子及空氣，一直被推向中心來解釋，則中心線的顏色應為最深。但經我們剖開冰塊後，發現中心只在下部顏色最深，往上則出現白心。經觀察白心主要充滿了小氣泡，而且各高度白心直徑並不一樣。反而以漩渦高度不同，中空直徑不同來解釋更為合理。
- (2) 由步驟 1 的實驗，透過定時連續攝影發現，冰柱是由下方開始往上結冰，最後結冰是在色柱的上方。若以熱傳導來看，上方冷度因有開口，甚至比下方溫度低，最後結冰處應在色柱中心處，而非上方，但和實際結冰的方式不同。我們推論，剛開始水結冰是由受冷面向內推，但到某一範圍後，受到漩渦的抵抗，在這範圍內結冰方式應是漩渦主導。



上方最後結冰

- (3) 由其它容器排列的實驗得知，有色冰柱並沒有出現在每瓶的中間處，而是移往瓶子的交界處，即移向排列環中心的新中央區。經實際測量，中心處因水行方向的冷氣較不易到達，或相接處瓶壁較厚，而造成溫度較高。在剖開冰塊後，白心出現於器壁處，並非色柱中心。合理推論為高溫處會成為漩渦中心線。當不易溶於冰的非水粒子及空氣，一直被已結冰的冰塊推向溫度高處，最後結冰時仍受漩渦水流影響而成形。
- (4) 多瓶容器排列，發現在上方相連處，色柱貼在器壁上，幾乎繞中心流動，往下色柱外開，上方相連處因冰塊膨脹而變形，推論此處是最後結冰的地方，冰只能往器壁膨脹，也應是溫度最高處。可惜我們使用的溫度計無法測出溫差，若改以探測針測量，溫差也不到 1°C ，但下方溫度較低！不過若以颱風來解釋就圓滿了，颱風中心因冷空氣下降造成颱風眼，故中心下方是冷的。我們發現環中心下方色柱被推離器壁，應是先結冰了。上方晚結冰色柱黏在器壁，自然該處溫度大於下方處，和超級大漩渦颱風是一樣的。

實驗四

- 1、實驗目的：了解不同的受冷方式，對於冰柱的形成位置及水流的流動方式的影響。
- 2、實驗材料：食用色素、自來水、冰塊、鹽。
- 3、實驗裝置：
塑膠盒、透明容器（1公升）、保力龍板、鉸槍、熱熔槍、泡綿膠、溫度計。

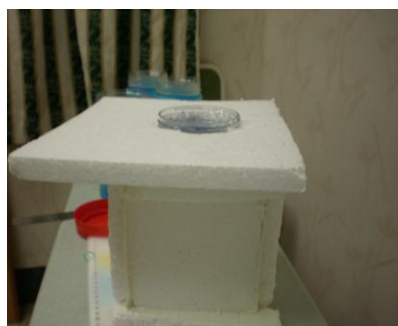


4、實驗步驟：

- (1) 將塑膠盒底挖洞，再放入冰塊、鹽，並將裝食用色素水的透明容器上半部塞入盒底挖洞，外圍包覆保力龍板，形成上冷下熱。置入-3℃的冷藏庫。經測量盒內初溫為-18℃，每5小時換一次冰塊。



- (2) 將透明容器放入另一個更大些的容器中，間隙填充保力龍，外側再以保力龍板包覆，僅露出瓶口，放入-30℃之冷凍庫中。



- (3) 將透明容器外側以保力龍板包覆，在一側開出約5公分的縫，形成單邊受冷，放入-30℃之冷凍庫中。



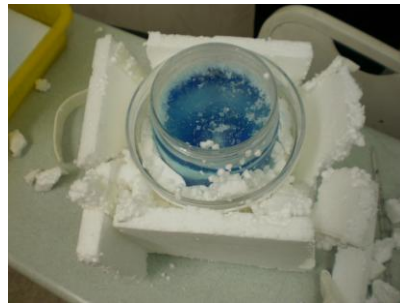
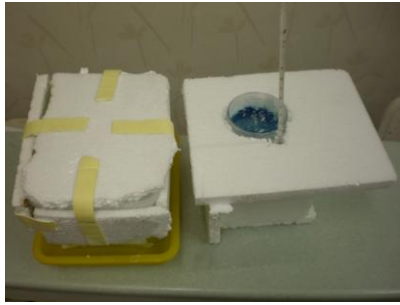
- (4) 將透明容器底部外側以保力龍板包覆，間隙填充保力龍，倒置放入-30℃之冷凍庫中。形成下冷上熱的下方受冷。



- (5) 將透明容器外側以保力龍板包覆，僅露出底部，依然下冷上熱，但僅底部受冷。



5、研究結果：



(1) 1 號實驗



整支有色柱被壓縮至底部，上方潔淨透明。



另將一瓶染色水一起放入-3°C的冷藏庫，發現此漩渦有氣無力般，事實上底部並未結冰。但上方有結冰處仍可見淺淺的漩渦。

(2) 2 號實驗



哇！原子彈爆炸嗎？有色柱被壓縮至底部，形成蕈狀，上方依然潔淨透明。



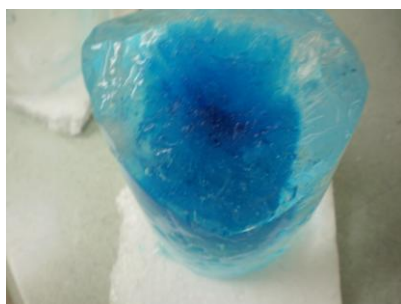
對照一下，將一、二號實驗結果和正常均勻受冷比較。

(3) 3 號實驗

有色柱被推向開縫的另一邊，即單邊受冷，有色柱將出現於對稱的另一邊，請特別注意，它特別高，幾乎延伸到液面。再注意它的下方，並沒有完全被推走喔！



冰塊經 2 小時融化部分後取出，再觀察。



在高 7cm 處藍心依舊清晰明顯

(4) 4 號實驗

下方受冷的方式，有色柱結構較大，且色柱可達液面。在保力龍封閉的交界上還出現腰身喔！



注意腰身



注意色柱高度

(5) 5 號實驗

底部受冷的方式，有色柱結構較下方受冷小，色柱也幾乎可達液面。特別注意下方形態，像 4 隻腳的章魚，把冰柱向上拱一般。上推力量大於下方受冷的方式。



4 隻腳的章魚

6、研究討論：

- (1) 由 1、2、3 號實驗，我們發現色柱會出現在受冷面的反方向，合理推論為：水中有色雜質及空氣不易溶於冰中，而被先結冰的冰塊推出，因此流往受冷面的反方向，但溫度夠低時，即放熱夠多，有色水依然要結冰。由 1、2 號實驗看來，在上冷下熱形式下，冰塊由上方先結冰，有色水被推往下方，但結冰時色柱依然成漩渦形，而 1、2 號實驗最大差異在於溫度，1 號因整體溫度較高，漩渦形態較不紮實，2 號溫度低，漩渦形態相對完整。這更能證明水於結冰時會產生漩渦式的流動。否則有色水應只均勻集中於下方而非被集中到下方中央成為漩渦形。
- (2) 由 4、5 號實驗，我們發現下方受冷時，並不像上方受冷般色柱被推往反方向，即色柱並不集中於容器上方，不過色柱幾乎都可達到液面，都有上推的現象。合理推論為：向上要克服密度及重力本來就比向下推難。而漩渦是愈下愈強，漩渦上方比較容易被壓制，下方則是不易的，對照 3 號實驗，色柱下方也有不易全部被推走的特性。
- (3) 在 3 號實驗的色柱剖開後，幾乎沒有中心白心，中心在色柱中央，和實驗三的漩渦中心在容器壁上不同。合理推論被先結冰的冰塊推出，流向反方向的色素，要結冰時因漩渦活動空間相對小，能量較為集中，故呈現較強漩渦的形態。同時也證明了漩渦的中心線是可移動的。

實驗五

- 1、實驗目的：了解容器形狀是否影響水流動的方式，並測量圓柱形容器所結冰的冰塊色柱和容器直徑比。
- 2、實驗材料：水、色素。
- 3、實驗裝置：各式容器、冰箱。
- 4、實驗步驟：
 - (1) 將各式容器裝水約 8 分滿，置入 -30°C 的冷凍庫中。
 - (2) 將圓柱容器（1 公升）裝入 800c.c 的水倒放，置入 -30°C 的冷凍庫中。
 - (3) 將圓柱形容器所結冰的冰塊中央剖開測色柱和容器直徑比。
- 5、研究結果：各式容器不管形狀為何，色素皆集中於中央處。
將圓柱容器（1 公升）倒放，結冰後白柱仍然出現於中央。

測量色柱和容器直徑比

	容器直徑 (cm)	色柱直徑 (cm)	直徑比
1 號	5.3	2.6	0.49
2 號	9.0	4.5	0.50
3 號	7.5	3.5	0.47
4 號	8.8	4.3	0.49





測量色柱和容器直徑比

6、研究討論：

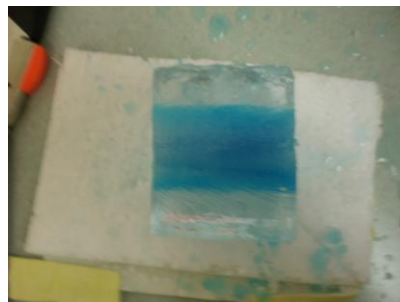
- (1) 只要在均勻受冷的情況下，容器形狀並不會影響非水分子集中於中央處的結果，合理推論為容器形狀並不會改變熱量流動方式，也就是水流依然漩渦式流動。在放倒的圓柱容器中，原本我們認為或許受重力影響，白冰柱應該會偏下方，但冰了很多次並沒有發現此現象，甚至上方分布比下方多。顯然必有一股推力將溶質及空氣往上推，而溶有溶質的水，凝固點愈低，不可能是一般上冷下熱形式的對流，這樣的對流冷水會下降，白冰柱會出現在下方。所以這股往上推的力量，合理推論為漩渦式流動。
- (2) 只要是圓柱形容器，色柱直徑和容器直徑比幾乎都在 0.5，表示結冰時有兩種力量在此抗衡。在相同溫度及受冷方式時，這兩種力的平衡位置是相同的。

實驗六

- 1、實驗目的：解剖冰塊了解漩渦結構。
- 2、實驗材料：色素水結冰後的冰塊。
- 3、實驗裝置：容器（1 公升）、冰箱、鋸子、尺。
- 4、實驗步驟：
 - (1) 先取 5 公升水，加入 1.5c.c 的藍色食用色素。倒入透明容器至 900c.c 藉以控制水溫（19℃）及色素濃度，置入冰庫（-30℃）並冷凍 16 小時後，在冰塊各處切開，觀察剖面數據。
 - (2) 再取 5 公升水，加入 0.5c.c 的藍色食用色素。重複上述步驟觀察。



鋸冰塊



縱剖面圖



中段剖面



同冰柱上部和下部剖面比較



測直徑



不同濃度的比較

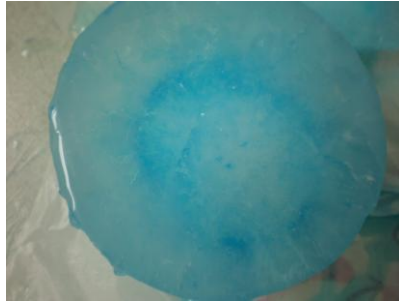
5、研究結果：

5 公升水，加入 1.5c.c 的藍色食用色素

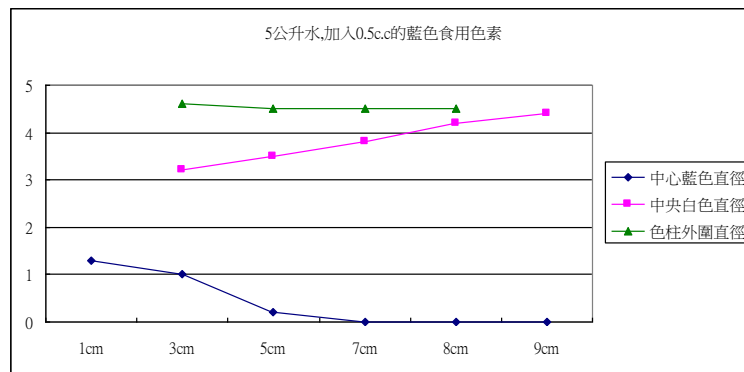
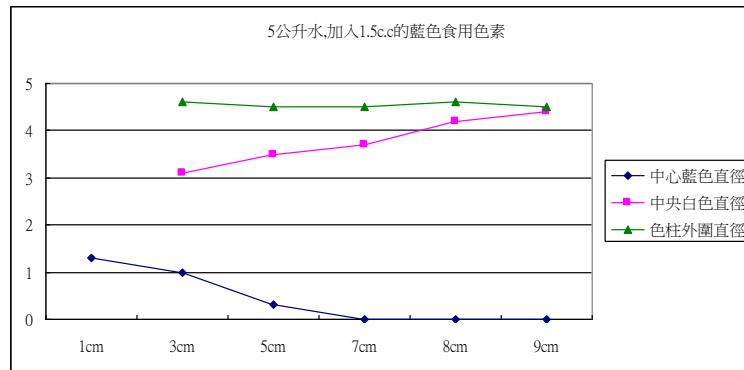
高度(cm)	1	3	5	7	8	9	11
中心藍色直徑 (cm)	1.3	1.0	0.3	0	0	0	0
中央白色直徑 (cm)	0	3.1	3.5	3.7	4.2	4.4	4.2
色柱外圍直徑 (cm)	不成圓	4.6	4.5	4.5	4.6	4.5	4.2

5 公升水，加入 0.5c.c 的藍色食用色素

高度(cm)	1	3	5	7	8	9	11
中心藍色直徑 (cm)	1.3	1.0	0.2	0	0	0	0
中央白色直徑 (cm)	0	3.2	3.5	3.8	4.2	4.4	4.2
色柱外圍直徑 (cm)	不成圓	4.6	4.5	4.5	4.5	4.5	4.2



上方幾乎沒有色環，
全為白心且直徑縮小



6、研究討論：

- (1) 我們發現色素濃度不同，並不會各項測量數據的太大差異。僅顏色深度有不同而已。可推論色素分佈只是忠實呈現水流流動的方式，並不會破壞水流流動的方式。

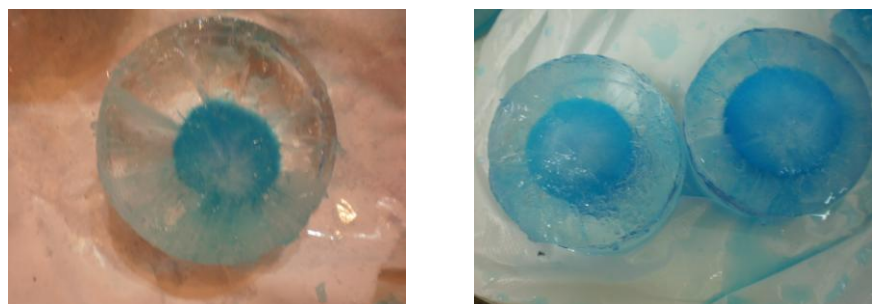


不同濃度同高度的剖面比較

- (2) 冰柱下方的色層有三層，分別為中心深藍、中心外圍白色、藍色外圍環，愈往上白心柱直徑愈大，藍心則愈小到消失。但色柱外圍直徑幾乎沒有改變，只是愈往上顏色變淡一點。
- (3) 以水流式漩渦來觀察，物質易被吸入下方，且愈往上漩渦直徑愈大，對照我們實驗結果，有色冰柱下方中央有深藍色小中央，應是色素粒子被吸入漩渦底部，愈往上白心擴大，就如同漩渦直徑的變大。
- (4) 色素粒子除了受到漩渦流動的影響，也因不溶於冰中，受先結冰的冰塊推力，剛開始逃離冰的冰塊推力大於漩渦流動的推力，所以開始結冰時，色素粒子向受冷面的反方向集結（實驗四），直到漩渦範圍被局限於某一較小的空間中，此時壓制的推力和漩渦的流動力量平衡。
- (5) 我們從實驗發現在直徑 9cm 的圓形容器中，由外均勻受冷在 -30°C 下放熱，漩渦剛開始一直被外圍先結冰的冰塊推向中央，直到直徑約為 4.6cm 的中心圓邊界，壓制的推力和漩渦的流動力量平衡，色素粒子受冰塊推力及漩渦外推力，在平衡點上結冰形成外圈色環。此色環也可以說是被漩渦捲到外圍來，在此圓內則明顯以漩渦流動。

實驗七

- 1、實驗目的：了解溫度是否會造成水流強度的不同。
- 2、實驗材料：水、色素。
- 3、實驗裝置：圓柱容器（1 公升）、可調溫冰櫃、乾冰 10 磅、液態氮、保麗龍箱、溫度計、量筒。
- 4、實驗步驟：將不同溫度的染色水（900c.c 的水加入 0.5 cc 色素）放入可調溫冰櫃，結冰後觀察冰柱形狀及高度。



不同結冰溫度下，同一高度的色柱中心差異。
左側冰柱冰於 -15°C ，直徑明顯較小，向右結冰溫度愈低，直徑變大。



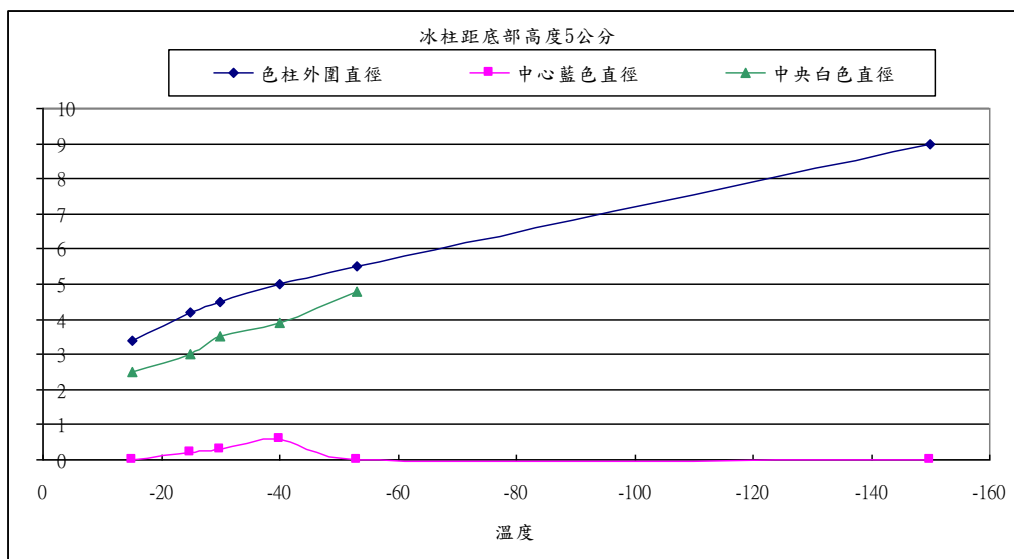
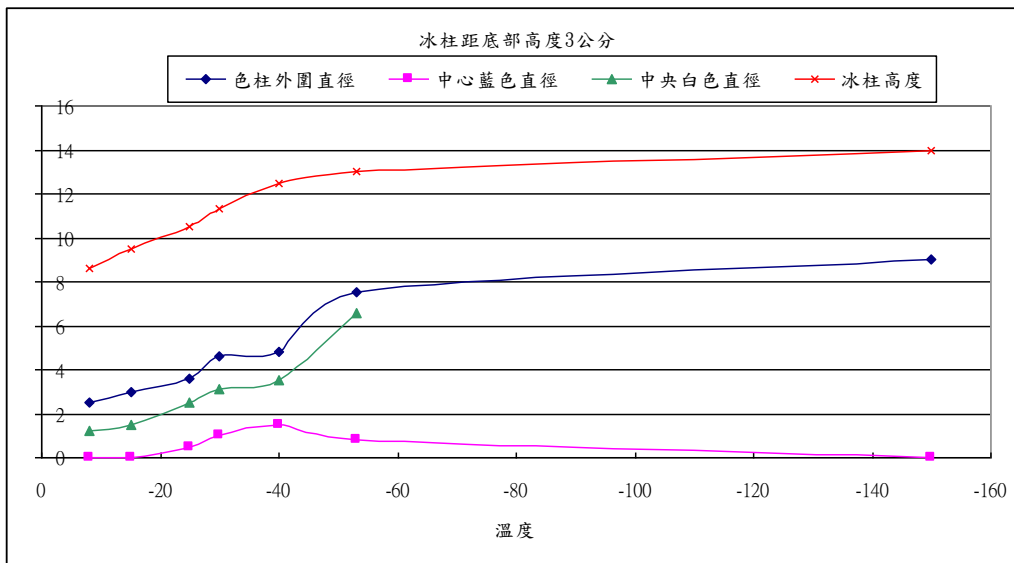
在冷凍庫中擺放乾冰，製造溫度更低的环境(-53°C)
使用乾冰冷卻的過程中，可以發現有色色柱內縮的腰身提高

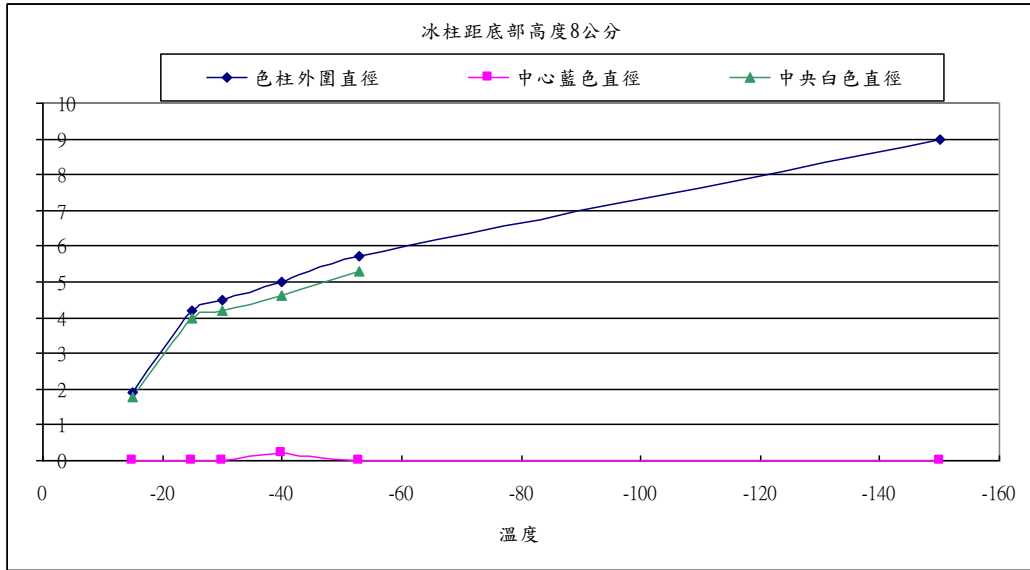
5、研究結果：

冰庫溫度 (°C)	冰柱距底部高度 (cm)	色柱外圍直徑 (cm)	中心藍色直徑 (cm)	中央白色直徑 (cm)	冰柱高度 (cm)
-8	3	2.5	0	1.2	8.6
-15	3.0	3.0	0	1.5	9.5
-25	3.0	3.6	0.5	2.5	10.5
-30	3.0	4.6	1.0	3.1	11.3
-40	3.0	4.8	1.5	3.5	12.5
-53	3.0	7.5	0.8	6.6	13.0
-150 以下	3.0	9.0	0	難以判斷	14.0

冰庫溫度 (°C)	冰柱距底部高度 (cm)	色柱外圍直徑 (cm)	中心藍色直徑 (cm)	中央白色直徑 (cm)
-8	5.0	冰水交界不易測量		
-15	5.0	3.4	0	2.5
-25	5.0	4.2	0.2	3.0
-30	5.0	4.5	0.3	3.5
-40	5.0	5.0	0.6	3.9
-53	5.0	5.5	0	4.8
-150 以下	5.0	9.0	0	難以判斷

冰庫溫度 (°C)	冰柱距 底部高度 (cm)	色柱外圍 直徑 (cm)	中心藍色 直徑 (cm)	中央白色 直徑 (cm)
-8	8.0	未結冰		
-15	8.0	1.9	0	1.8
-25	8.0	4.2	0	4.0
-30	8.0	4.5	0	4.2
-40	8.0	5.0	0.2	4.6
-53	8.0	5.7	0	5.3
-150 以下	8.0	9.0	0	難以判斷





6、研究討論：

- (1) 我們發現不同冰箱，因冷凍庫大小及出風口位置不同，會造成色柱外觀形狀及色柱位置的改變，因此選擇舊式無風口，冷凍庫較小的同一冰箱調溫實驗。冷凍庫無法達到 -40°C ，改使用冰櫃實驗。另外在冷凍庫中放入10磅的乾冰，經溫度計測量，冷凍庫中的溫度達到 -53°C 。
- (2) 由實驗發現，結冰溫度愈低，色柱直徑愈大，若非正圓，則取平均直徑（我們也嘗試用電腦色差定位各色環，但發現和目視取平均值誤差不大），推論應是漩渦在愈低溫，放熱速率較快，所以強度比較大，可被壓縮的空間小，因此在大一點的直徑上就和由外圍結冰的冰塊推力達平衡，形成外圍的色環。而直徑比較大的色柱，內部漩渦結構也愈紮實。由色素粒子被吸入下方，藍心的大小高度可推知，另外溫度愈低色柱也愈高，表示漩渦力比較大，不易被壓下來。
- (3) 若以色素粒子是因重力作用而集中於下方，是不能解釋實驗結果的。因為
 - a. 溫度較高結冰的色柱，底下並沒有藍心。將容器排成環狀的結冰法，底下色柱也無藍心。
 - b. 若受重力影響，則藍色素粒子應均勻沉澱，非集中於中心。因此以藍心大小及高度，可做為判別漩渦吸力的依據。



三瓶環底沒有藍心

(4) 在使用液態氮結冰的方式中，結冰時間可縮短至 30 分鐘，過程有色素集中的現象，整個冰柱都呈藍色。可能因漩渦夠強，所以一開始就可和冰塊推力抗衡。因結冰後色素分布較為均勻反而不易觀察。不過由剖面觀察仍有色層，但不明顯。只在最接近液面處有一幾乎等於冰柱半徑的環。急冷狀況底部藍心消失，推論應為液態氮較冷的液體必在下方，且水流因放熱速率加快，在冰凍過程中一直有冰塊爆裂聲，這爆裂所引起的氣流應也會影響水流。因此或許有我們較難預測的水流方式。但整體上，色柱直徑加大增高，中央白心氣體等現象，和使用投影片製作扇葉轉盤，剛開始結冰時有較快的轉動。仍然符合我們的預測。不過因實驗無足夠的次數，來改善實驗技術和對照組的安排，因此急冷下的水流方式仍存有較難完全明白的地方。



色素水在液態氮中冷卻情形



左圖為液態氮結冰後上層薄切片；
右圖為中段切片，有色層出現，但是不明顯

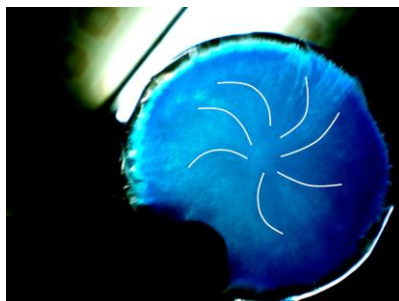
伍、討論

- 1、我們發現原本染色均勻的色素水，結成冰後，其色素粒子不再均勻分布，反而集中到中央；可以推論水在結冰時，會將不溶於冰的非水分子粒子及空氣集中到中央，而造成透光性和均勻分布時的不同，形成中央的白柱。
- 2、由漩渦能把內含的物質集中到中心處的現象，我們推論水在結冰時可能形成漩渦式的流動，而把非水分子的粒子集中到中央。而漩渦的能量應來自水的放熱。
- 3、依據我們的實驗，找到水結冰有漩渦式流動，其證據如下：
 - (1) 由實驗三的連續定時攝影，發現有色柱由下方先縮小往上發展，並不會沉澱，最後結冰位置幾乎在色柱的最上方。若只由受冷面向內結冰，最後結冰位置應於色柱中央，非在上方。顯示有一力量往上發展。單以色素水結冰的過程來看，大多數時間色素粒分布的外觀都像是漩渦的外形。



最後結冰處於上方

- (2) 觀察氣體分子的逃逸線，發現下方氣體由四周斜向上捲入色柱，上方由色柱斜向上沿往液面，中央上方漸漸水平垂直色柱，很明顯受漩渦力影響，並非單純的向上逃逸，若以薄切片的色素分佈圖來看，可清楚的判斷出色素分佈的情形類似漩渦的流向。



使用乾冰冷凍後的薄切片，內部色素分佈狀態，可看到漩渦放射狀

- (3) 由實驗四的各種不同位置受冷方式，若不易溶於冰中的雜質粒子及空氣，在水結成冰時，被推往別處尚未結冰的水中，只是平行推擠，應均勻或沉澱於受冷面的反方向，但色柱形狀並非如此，而是於最後結冰時，在推往的反方向上形成漩渦，其中以實驗四的 2 號實驗最為經典。
- (4) 在實驗六的冰塊解剖中，發現有色冰柱在某一直徑下（直徑受結冰溫度影響）形成一色環，此色環內部色素不再均勻分布，表示出現另一力量和冰塊推色素粒子抗衡，由內部結構分析，色柱下方有藍心，應是藍色素粒子被吸入下方，且下方白心半徑小，往上白心有變大趨勢，白心好像颱風眼喔！和漩渦結構愈下愈強是相同的。
- (5) 在實驗七中發現，結冰溫度愈低，色柱直徑愈大，意謂漩渦並非在最後形成，而是放出熱量時就開始了。只是不夠強所以被外圍先結冰的冰塊壓縮，直到某一小範圍，漩渦不易再被壓縮。放熱愈快漩渦愈大，也就不易被壓縮，形成的外圍色環就大。

4、漩渦中心的分析

- (1) 若我們以兩瓶緊密排列的透明瓶色素水結冰，發現色素冰柱集中於交界處。推論交界處是兩瓶的新中央，而以此為漩渦中心。
- (2) 若我們以多瓶緊密排列為多邊形的透明瓶色素水結冰，發現色素冰柱集中於交界處內環。即移向排列環中心的新中央區。推論排列環中心為多瓶排列的新中央，而以此為漩渦中心線。
- (3) 在排列中心處因水行方向的冷氣較不易到達，或相接處瓶壁較厚，而造成該處溫度較高，成為漩渦中心。即溫度高處可成為漩渦中心。
- (4) 在實驗四中單方受冷有色柱的移動，也可証實漩渦中心是可移動，隨結冰的狀況，及受冷方式可在結冰過程中再調整位置，但如受冷是均勻的，中心較不會移動。

5、漩渦強度的分析

- (1) 我們以反抗沉澱及色柱白心直徑和外圍色環直徑來判斷漩渦強度。
- (2) 由實驗七發現，結冰溫度愈低漩渦強度愈大。也可以說是放熱速率愈快漩渦強度愈大。
- (3) 值得一提的是，在實驗四的實驗 4 中，單邊受冷色柱被推向受冷面反方向，色柱被強迫結冰時，漩渦範圍相對小，能量較為集中，有色柱高度幾乎達到液面，且中心幾無白心，顏色相對較深。漩渦範圍受到壓縮也會使漩渦相對較強。
- (4) 結冰時突然放出的凝固熱，加強了漩渦的強度，可將色素粒子往上游，吸入下方，及推內外圍。凝固熱應為漩渦的大補丸。

- 6、愈透明的冰，內含非水分子之其它粒子就愈少，空氣溶解量也愈少，推論如果純水分子結冰，可能透明無暇，但要讓水中完全無雜物，也不溶有氣體，實在太難了。
- 7、我們原本希望能找到方法測量漩渦的強度，流速應是最直接的方法，我們使用投影片製作扇葉轉盤及沉浮子漂流等方法，透過連續攝影，觀察水流動的情形。卻因轉盤的轉軸一旦結冰後，轉盤便無法繼續轉動；再者，因水在結冰的過程中，密度會一直改變，影響沉浮子在水中的位置，最後會下沉於底部，造成數據上的不準確，而無法測出較為精準的水流速，只好忠實記錄色柱的外觀，解剖內部，藉由色柱結構分析結論。或許能有更好的設備可以幫助我們，完成更佳的水流速數據。



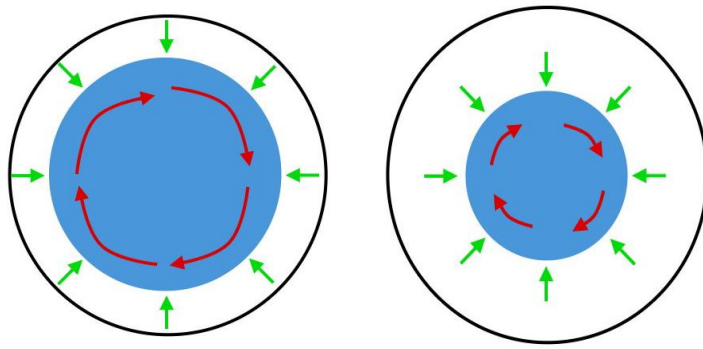
扇葉轉盤架設於容器中



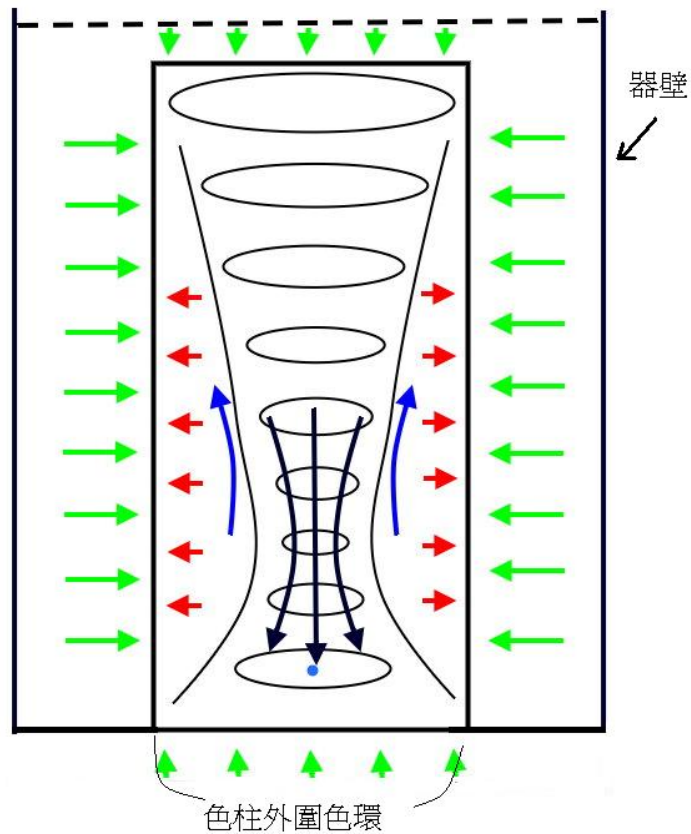
於冷凍庫中架設連續攝影裝置

陸、結論

- 1、從一開始的好奇，到開始設計實驗，我們冰了好幾百瓶的水，解剖了好幾百塊的冰塊，由冰凍水成冰，卻發現問題越來越多。原先的設想也因實驗結果的事實，而不斷的修正，在我們的能力下重新設計實驗，讓我們了解到科學實驗的永無止境。
- 2、由我們的實驗發現，水結冰的過程中，熱量的流動在一定的範圍內會出現漩渦狀流動。
- 3、不易溶於冰中的雜質粒子及空氣，在水結成冰時，被推往別處尚未結冰的水中，如果溫度夠低，含雜質粒子及空氣的水終將結冰，此時雜質粒子及空氣將受水的漩渦狀流動影響而排列成形。
- 4、若我們將容器環形排列，仍然發現，熱量的流動在一定的範圍內仍會以環為中心漩渦狀流動。環的中心溫度較高，但受容器限制，而使得在各容器在排列中心處各自形成漩渦，因此漩渦並不會出現於各自容器的中央處。
- 5、歸納我們的結論為：
 - (1) 水結成冰後，非透明的區域是由非水粒子（包含空氣）集結而成。集結原因為，這些粒子無法溶散於冰中，受到先結冰的冰推出，又受水放熱時所形成的漩渦影響而集中，成為非透明的區域。
 - (2) 水在受冷放熱過程中，熱量會以漩渦狀流動放出，但色素粒子（結冰時不易溶散於冰中的非水粒子）除受漩渦流動的影響，也受先結冰的冰塊推力，剛開始逃離冰的冰塊推力大於漩渦流動的推力，所以開始結冰時，色素粒子向受冷面的反方向集結，若外圍均勻受冷就集向中間，也表示了漩渦一直被冰塊壓縮，直到漩渦範圍被局限於某一較小的空間中，此時壓制的推力和漩渦的流動力量平衡，色素粒子就開始排列為漩渦形狀了。
 - (3) 非水粒子被集結處，造成該處水溶液濃度較高，而使凝固點下降，若於 $0^{\circ}\text{C} \sim -5^{\circ}\text{C}$ 結冰，色素水被冰包覆於中央下方，並不會結冰。且色素水均勻分布較難觀察水流動方式。達熱平衡時漩渦沒有新的能量提供，應會漸漸消失，也就無法將色素水的熱量帶出，只好等待溫度再降，重新啟動漩渦流動，當凝固熱放出時，再加強漩渦的強度。強的漩渦可將色素粒子捲入下層形成藍心，也可將色素粒子推向外圍形成色環。



冰塊由外圍向內結冰壓縮漩渦



色柱內水流及受力圖

1. 綠色箭頭表示水結冰時向內推擠尚未結冰的水流漩渦。
2. 紅色箭頭表示漩渦向外推擠擴張的力。
3. 黑色箭頭表示漩渦向下捲入的力。
4. 藍色箭頭表示漩渦向上升的力。
5. 黑圈表示漩渦的範圍。

- (4) 將瓶子排列為環形，在均勻受冷的情況下，熱量以環中心漩渦狀流動。
- (5) 溫度愈低，冰柱漩渦狀愈明顯，高度也愈高；有色冰柱中心下方出現藍心代表色素粒子被吸入，漩渦直徑愈大，結構愈紮實，也就是說漩渦強度因放出的熱量較多及放熱的速率較快會愈大。因此在較大的直徑圓上，就可和冰塊的推力維持平衡了。
- (6) 最後說明水結冰的流程
水受冷開始放出熱量。
→水流以溫度最高處為中心線開始漩渦狀流動。
→受冷面開始先結冰，將水中空氣及不溶於冰中的雜質推向尚未結冰的水中。
→冷度夠低放出大量的凝固熱所造成的漩渦會變強，在冰塊推力和漩渦推力平衡處以內，逃無可逃的雜質粒子將會排列成水流的漩渦狀。

6、結後語：

一般對水流式漩渦的形成，認知上大都是因為水流的速度和方向突然發生變化的關係。放縱我們的想像力，颱風、原子彈乃至太陽系的生成，甚至漩渦式的銀河系。出現漩渦式的形狀，其共同點都是熱量大量的放出。粒沙見世界，或許在小小的瓶中，會有大家想找的答案。

柒、參考資料及其他

颱風（無日期）。維基百科。取自：

<http://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%A2%B1%E9%A2%A8>

颱風辭典（無日期）。臺灣颱風資訊中心全球資訊網。取自：<http://typhoon.ws/>

颱風百問（無日期）。防災颱風資料庫網頁。取自：<http://rdc28.cwb.gov.tw/data.php>

台北市立天文台

【評語】 030105

經由觀測寶特瓶結冰時中間出現白色冰柱的現象，本作品的同學進一步的在水中摻入其他物質，探討產生此現象的原因，並得到添加物最後聚集到中心部份的結論，整體而言本作品對結冰現象有一完整的描述，如能在發生原因上做更正確的解釋，則更能突顯本作品的價值。