

臺灣二〇〇八年國際科學展覽會

科 別：物理與太空科學

作 品 名 稱：熱巧克力效應之迷思

學校 / 作者：臺中縣私立弘文高級中學 張瓊如

作者簡介



我喜歡物理，因為它不像文科那樣的龐雜，它是有條理、有規則性的，懂得觀念，去推導、思考，就可以與它成為朋友。當然有時會摸不透它，那段時間真的挺難過的，整個心情都非常的不好，不過當弄清楚它後，那種成就感我覺得比任何事物都美好！我也喜歡走訪大自然，因為大自然是一個可以放鬆心情、整理思緒的地方，每次被難題纏身，出去走走，思路會更加清晰，題目大多可以迎刃而解。除此之外，大自然不時灌入好奇心的泉水在我的腦袋中，激發我去探討好多事，不僅是物理，還有生物、歷史……甚至是人生哲理。

熱巧克力效應之迷思

摘要：

“熱巧克力效應”是當你將巧克力粉加入裝有熱水之馬克杯後用湯匙輕敲杯壁，可以聽出攪拌前後敲擊所得聲音頻率明顯不同，攪拌後巧克力粉溶解頻率會較高。一般論文的解答是「當粉末溶解的時候，藏在粉末裡的空氣就會跑出來，在空氣與水混合的環境裡，音速比在水裡低。當水裡不斷有空氣與水混進去時，這個容器的共振頻率和它裡面的音速有關，所以也會降低。因此你會聽到較低之音調，直到空氣全跑光。」但根據我的實驗我覺得這樣的解釋並不對。我們提出新的模型來解釋“熱巧克力效應”。

The Myth of Hot Chocolate Effect

Abstract:

When we put an ounce of dry chocolate powder into a mug filled with hot water, then tapping the side with your spoon will generate a sound. The pitch of this sound will rise after stirring. This is called “the hot chocolate effect”. According to a published paper, the explanation is “The air trapped in the powder is released as the powder dissolves. Since the speed of sound is lower in air than that in water, the speed of sound in the air-water mixture is lower than that in pure water. During that period while the air escapes the container, the resonant frequencies of the water, which depend directly on the speed of sound, will also be lower. Hence, you hear a lower tone until the air escapes”. However, our experiments clearly demonstrated that the explanation is plainly wrong. A new theoretical model is also proposed for the observed phenomenon .

一、前言：

(一)、研究動機

“熱巧克力效應”是當你將巧克力粉加入裝有熱水之馬克杯後用湯匙輕敲杯壁，可以聽出攪拌前後敲擊所得聲音頻率明顯不同，攪拌使巧克力粉溶解後頻率較高。一般論文的解答是「當粉末溶解的時候，藏在粉末裡的空氣就會跑出來，在空氣與水混合的環境裡，音速比在水裡低。當水裡不斷有空氣與水混進去時，這個容器的共振頻率和它裡面的音速有關，所以也會降低。因此你會聽到較低之音調，直到空氣全跑光。」但根據我的實驗我覺得這樣的解釋並不對。

(二)、研究目的

1. 研究氣泡對杯振動頻率之影響,證明氣泡會使敲擊所得聲音頻率變高而非變低。
2. 測量不同密度之液體中之聲速,證明杯中所裝液體之聲速較低，敲擊所得聲音頻率並非較低，而是較高。
3. 提出“熱巧克力效應”新的解釋。

二、原理：

杯中裝有液體時，杯壁的振動發出之頻率為何比空杯低？在 2004 年美國 intel 國際科展得大會三等獎作品酒杯發出的音符中提到：杯壁的振動是 S.H.M.，杯面形變之張力即是恢復力。當杯壁作 S.H.M. 變形時水被擠壓水質點也作 S.H.M.，水運動造成水壓。根據牛頓第二定律與流體的不可壓縮條件可推導出水壓 P 與杯壁振動位移 η_g 之關係為：

$$P = -\frac{\omega^2 \rho_l}{k} \eta_g$$

式中 ω 為杯壁振動的角頻率， ρ_l 為液體密度， k 為波數，“-”號代表杯壁處水壓 P 與

杯壁振動位移 η_g 之相位角差為 180° ，也就是杯壁凸出時水壓是最大的，如圖 1 中較亮之點處水壓較大。此時杯內單位面積總水壓應是大於杯外之大氣壓力，所以杯壁因水壓所受之力是向外的，與恢復力反向，造成恢復力之負擔，導致頻率下降。

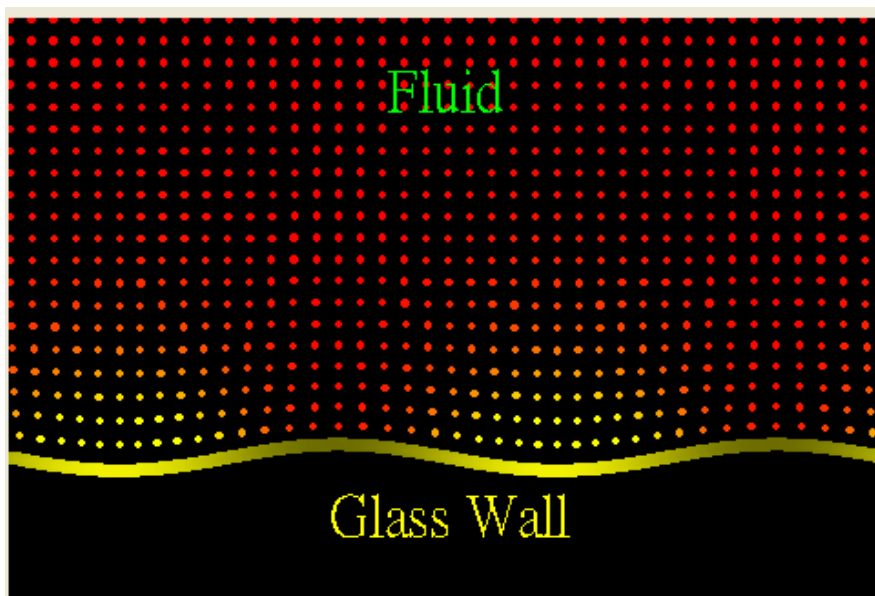


圖 1:壁杯往外時杯內水壓較大(圖中較亮之點)，大於杯外之大氣壓力。

三、實驗器材：

高腳杯、穿孔之塑膠管、氣流計、氣壓計、氧氣筒、1MHz 超音波探頭、波形發射與接收器 PR5073 pulser / receiver、示波器。

四、研究方法：

(一)、聲波頻率之測量是利用指向性麥克風以電腦錄音後以 Adobe Audition 軟體分析。參考 2006 年台灣國際科展作品都是氣泡惹的禍知道以溼手指摩擦高腳杯杯緣或用湯匙敲擊杯子所得頻率基音都相同，但用敲的會激發 exciting mode，有些 exciting mode 的強度甚至超過基音的強度，造成無法知道敲後之基音頻率之困擾。所以用摩擦高腳杯杯緣代替敲擊。

(二)、測量氣泡對杯振動頻率影響之方法：

- 1.以支架將穿孔之塑膠管固定，圓形一端伸入杯中，另一端連接安裝有氣流計、氣壓計之氧氣筒，安排如圖 2 所示。
- 2.杯內裝水，先不開氧氣筒，摩杯測無氣泡時之頻率。
- 3.打開氧氣筒，灌入氧氣，摩杯測有氣泡時之頻率。

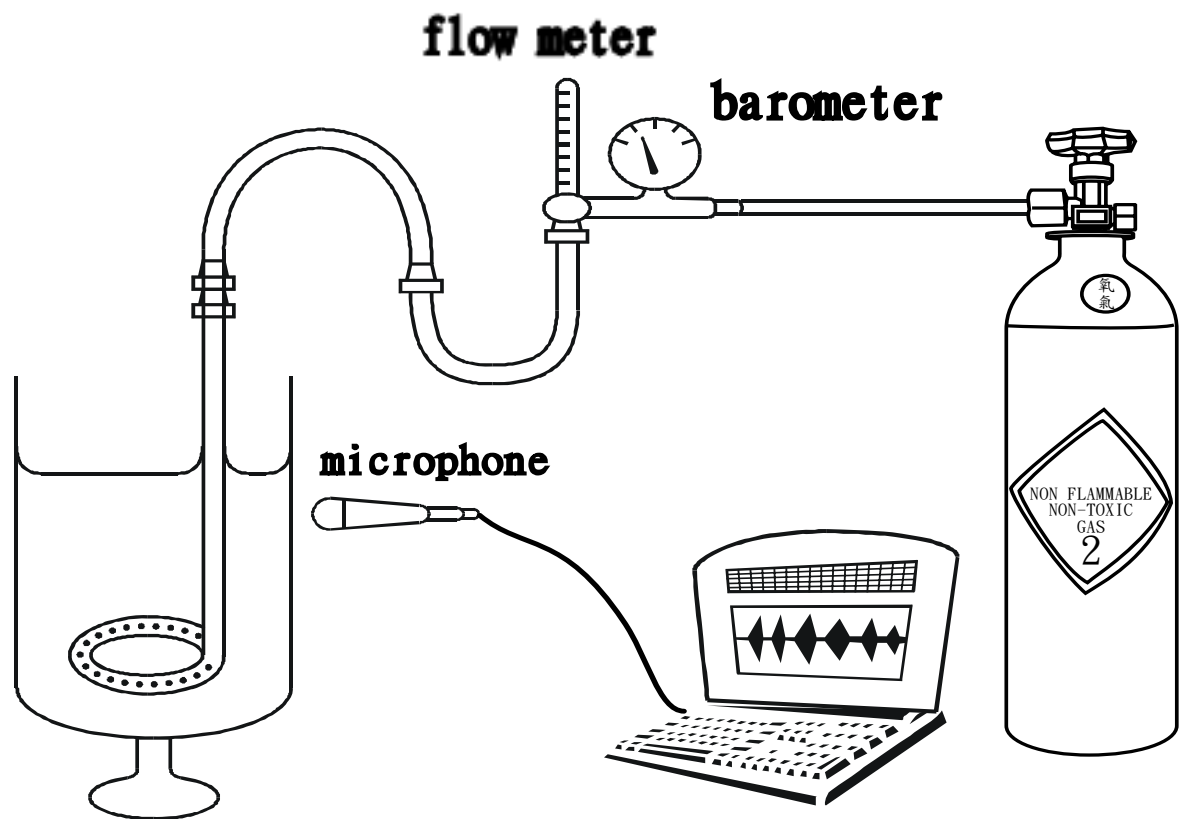


圖 2: 氣泡實驗架構圖

(三)、測量聲速之方法：

1. 將 1MHz 超音波探頭(聚焦深度=1.96 inch)沒入水中並垂直於反射用之鋁塊如圖 3 所示，其信號之發射與接收均由波形發射與接收器 PR5073 pulser /receiver 控制。
2. 超音波探頭；波形發射與接收器 PR5073 pulser/receiver；示波器安排如圖 4 所示。

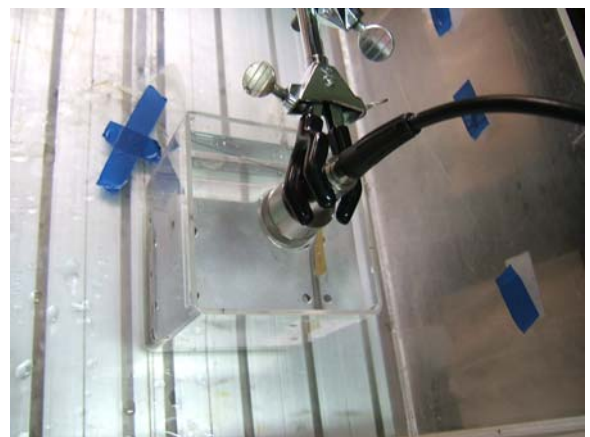


圖 3: 超音波探頭沒入水中並垂直於反射用之鋁塊

3. 將 PR5073 接收之訊號送至 LeCroy 示波器判讀，讀取超音波探頭之發射訊號、接收訊號時間差(如圖 5 所示)，同時以游標尺測量超音波探頭與鋁塊之距離，如此即可計算出純水中之聲速。

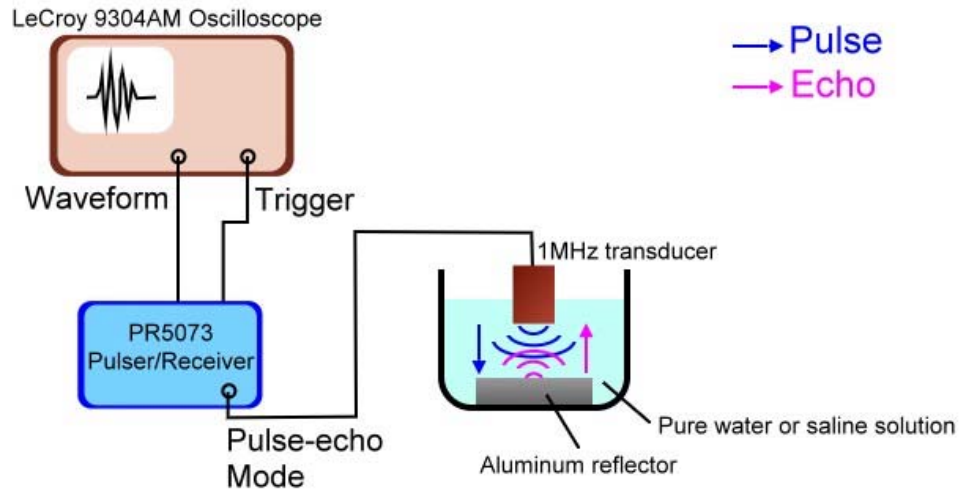


圖 4: 聲速實驗架構圖

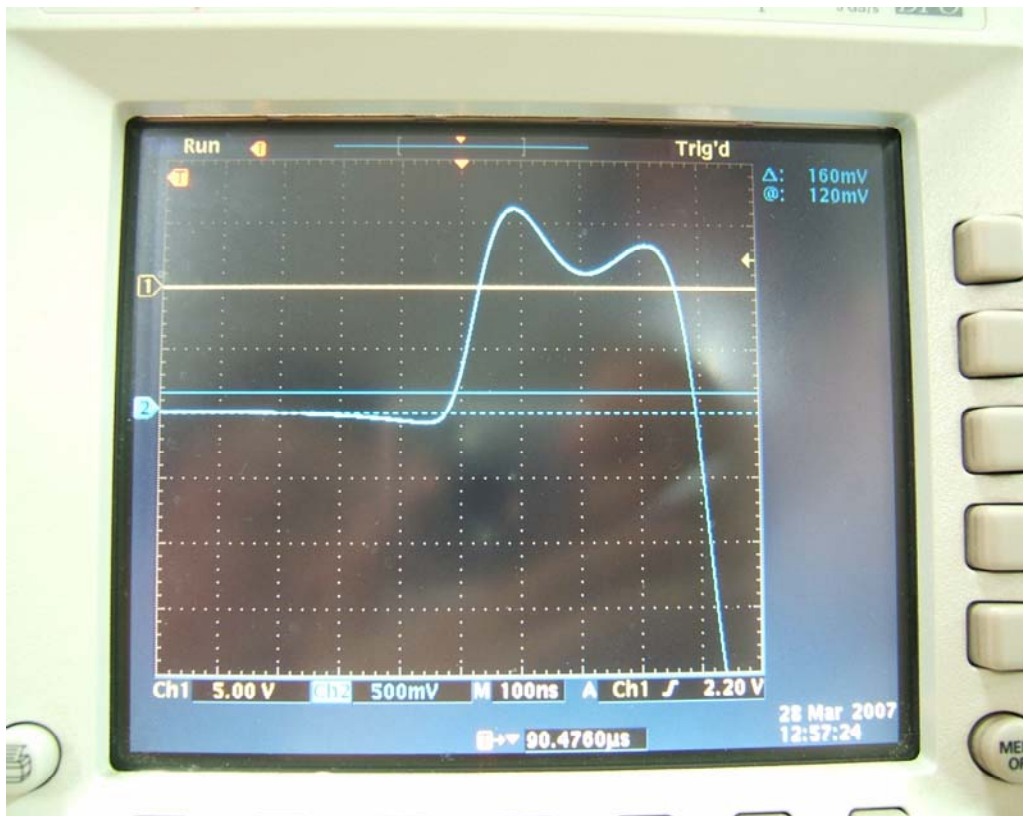


圖 5: 示波器顯示發射訊號、接收訊號時間差為 90.476 微秒

4. 將食鹽緩緩加入水槽並使其溶解均勻，測量不同食鹽濃度下之聲速。

5. 改將糖加入水槽測量糖水中之聲速。

五、實驗結果：

(一).氣泡使杯振動頻率上升，如圖6、7所示。

1.

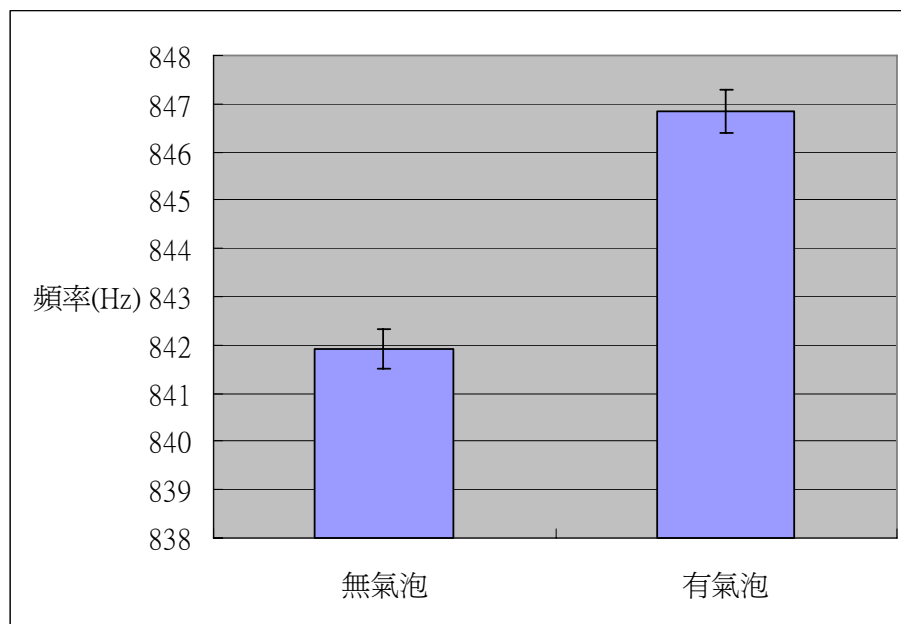


圖6:葡萄酒杯中裝水振動頻率有氣泡時較高

2.

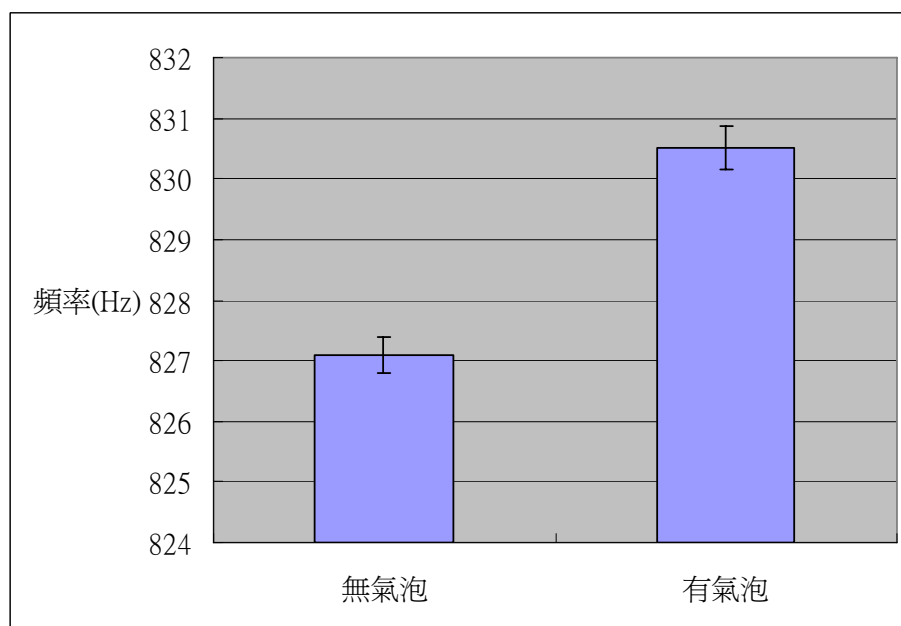


圖7:直筒高腳杯中裝水振動頻率有氣泡時較高

(二).鹽水濃度愈高杯子之發聲頻率愈低。

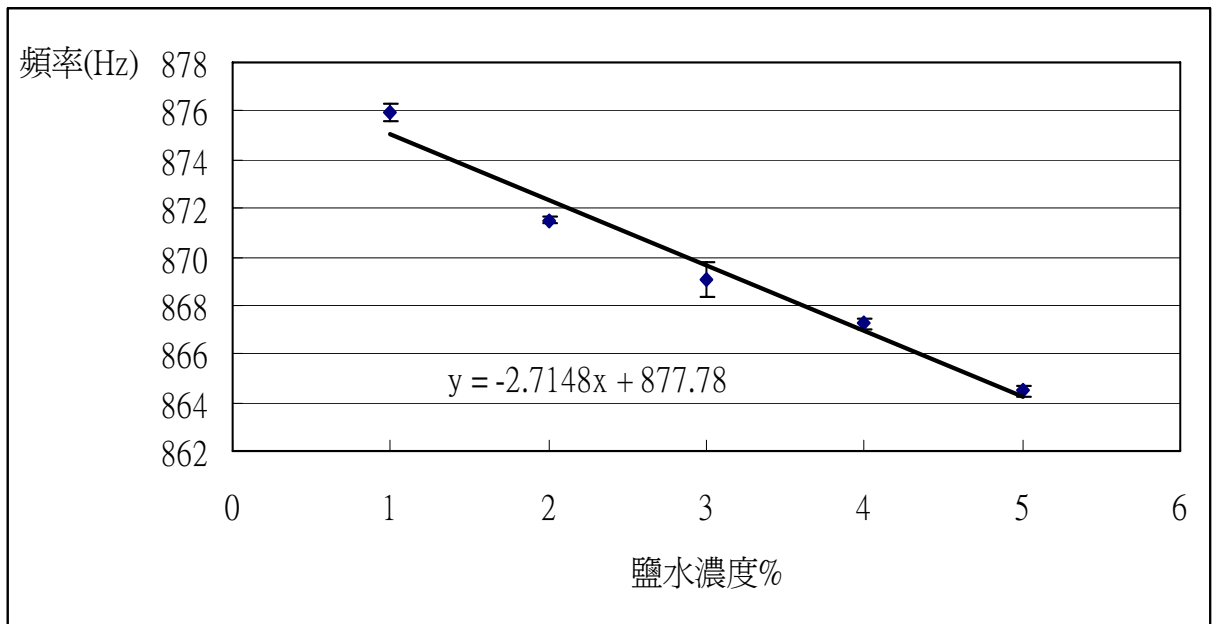


圖8:鹽水濃度愈高杯子之發聲頻率愈低

(三).鹽水濃度愈高之液體聲速愈高。

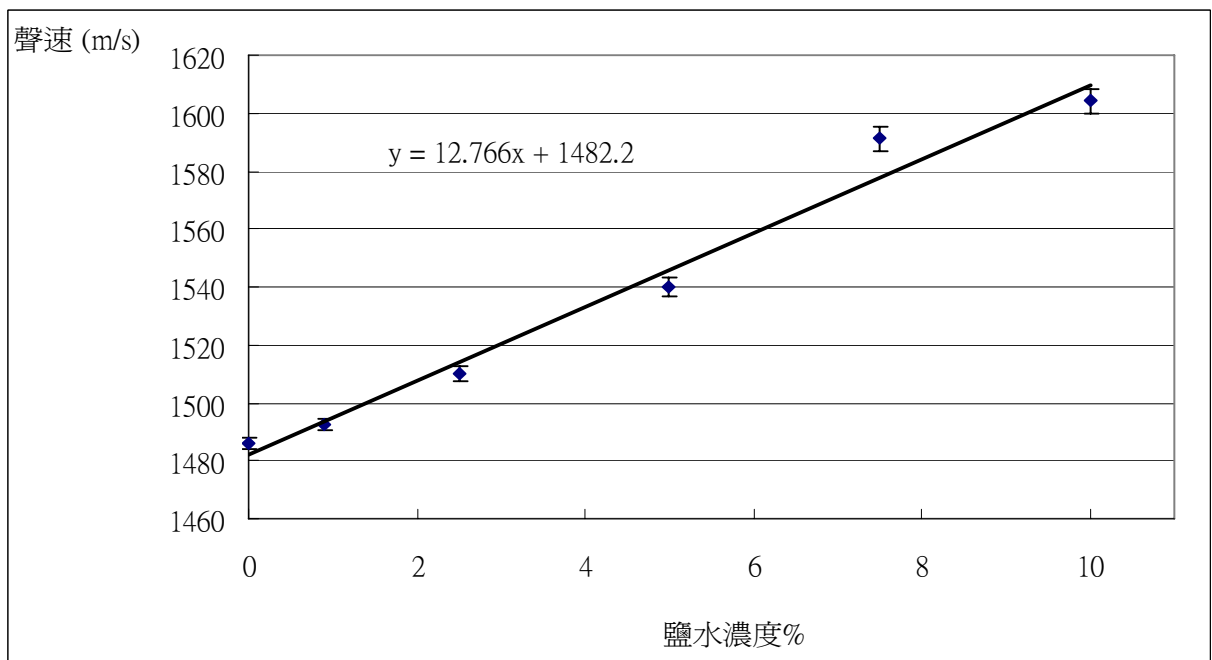


圖9:鹽水濃度愈高之液體聲速愈高

(四).鹽水、糖水中之聲速比純水高但裝鹽水、糖水杯子之發聲頻率比純水低如圖10、11所示。

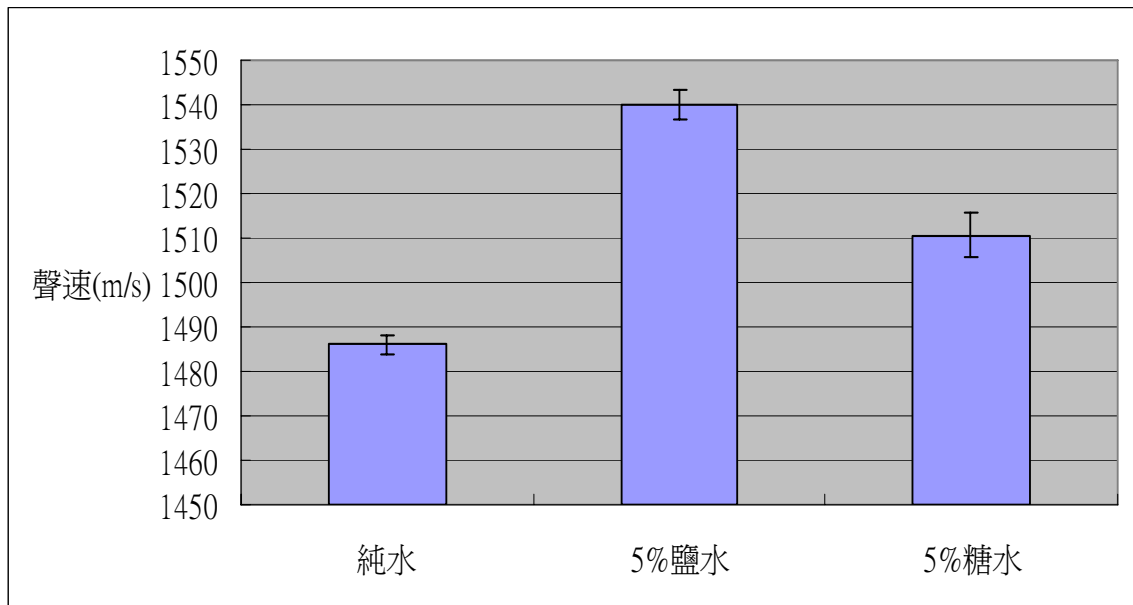


圖10: 鹽水、糖水中之聲速比純水高

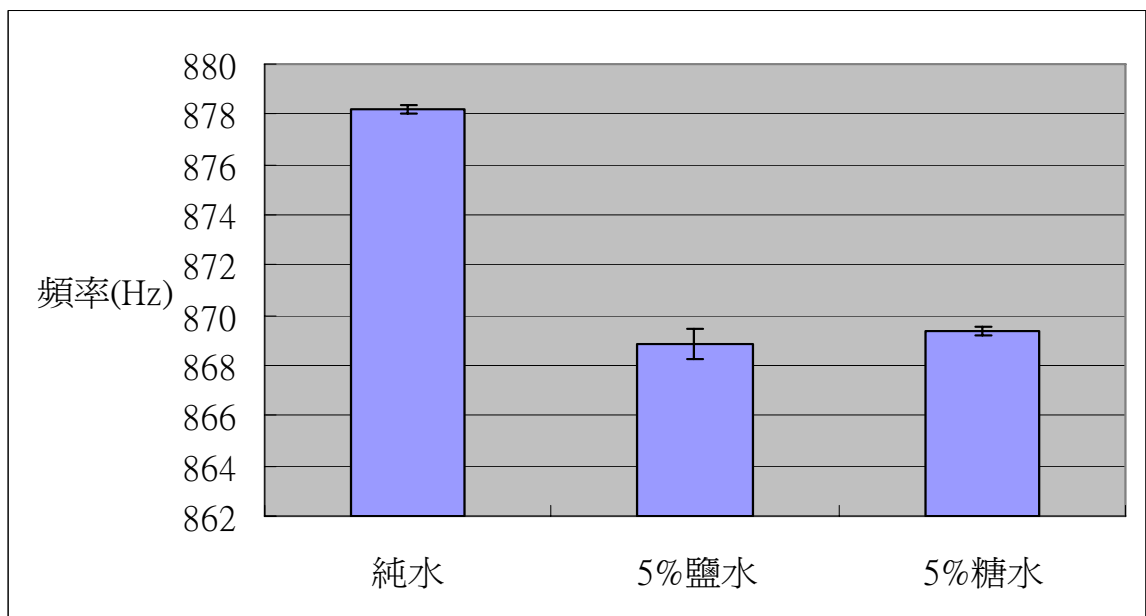


圖11: 裝鹽水、糖水杯子之發聲頻率比純水低

(五).巧克力粉加入熱水前後之頻率如表一所示，加入後頻率變低，攪動後變高，但還是比最初低。

| 狀態 | 摩酒杯之頻率(Hz) | 敲咖啡杯之頻率(Hz) |
|-----|------------|-------------|
| 加入前 | 915.0±0.3 | 2309±6 |
| 加入後 | 895.2±0.4 | 2293±4 |
| 攪動後 | 907.0±0.2 | 2305±5 |

表一

六、討論：

(一).爲何氣泡使杯振動頻率上升，

我們請教物理系的教授，他覺得理論的推導超出高中生的程度，不妨用一個模型來看。本實驗原理所提流體的壓力 P 和靜電場的電位有相似的地方，因負的壓力梯度代表單位體積

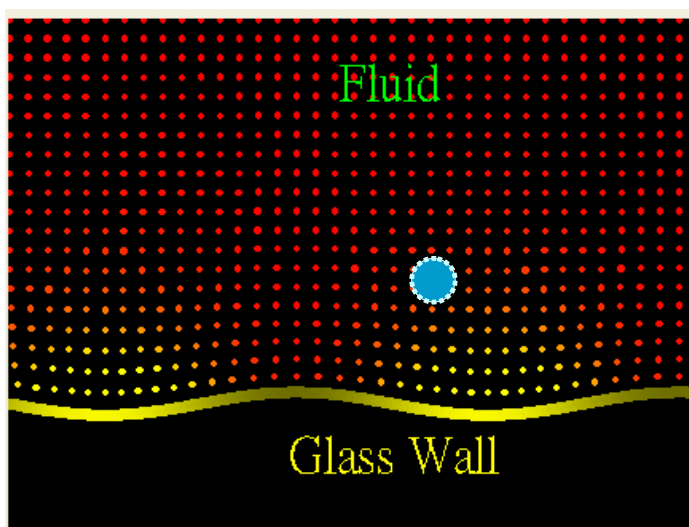


圖12: 氣泡所在處壓力由杯壁逐漸往內變小

的液體所受的力 ($-\frac{\partial P}{\partial x} = \rho \frac{\partial u_x}{\partial t}$) 而負的電位梯度是代表單位電荷所受的力

($-\frac{dV}{dr} = E$)。若有一個氣泡在流體中，由前面的原理得知，由於杯壁振動流體中即使

同一高度壓力也不同，圖 12 中氣泡所在處壓力由杯壁逐漸向內減少，由於氣泡兩旁壓力不同，又因氣泡密度比水低移動會比水多，所以氣泡會 overshoot，移動以後靠近杯壁這邊多出來液體，另一邊液體被氣泡佔有而消失，一多一少，就好像電偶極一正一負。

圖 12 中氣泡所在處壓力由杯壁逐漸往杯內變小（圖示爲向上），就好像有一電位逐漸向上減小之電場（電場方向向上）如圖 13 所示，若加進電偶極的電場，因氣泡是上

移故電偶極之正電荷應在下方，它產生電場的方向和原電場相反，造成電場變小，所以杯壁這邊壓力變小。也就是氣泡 overshoot 後，杯壁處水壓力變小，會使杯壁振動頻率上升。

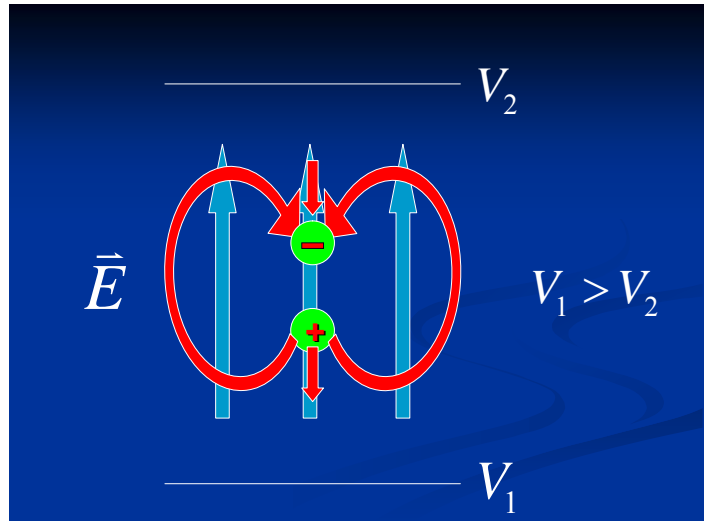


圖 13: 原有電場再加一電偶極

(二).當實驗證明熱巧克力效應的原解釋是錯誤時，我提出如下的解釋：實驗確定杯中央若放置固體障礙物（勿接觸杯底），則因水質點振動撞擊障礙物，回衝速度變大，導致杯壁水壓力變大，杯振動頻率降低，熱巧克力就像障礙物，所以杯振動頻率下降。但教授覺得巧克力塊是泥狀，且在崩解中，故不同意我的看法。於是我又提出如結論二的論點，結果獲得教授認同，我真是雀躍不已。

七、結論：

- (一).由研究結果可以看出鹽水、糖水中之聲速比純水高，但置於杯中時敲杯所得頻率卻比純水低。而含有氣泡之水中之聲速比純水低,但杯中之水通以氣泡時敲杯所得頻率卻比無氣泡時高。所以書上所說「當水裡不斷有空氣與水混進去時，這個容器的共振頻率和它裡面的音速有關，所以也會降低。因此你會聽到較低之音調，直到空氣全跑光。」這種用共振頻率與音速來解釋敲杯所得頻率是不對的，應該用水壓力來解釋。
- (二).“熱巧克力效應”的解釋是：敲擊杯壁時杯壁做 S.H.M.，水質點也作 S.H.M.造成水壓，水壓產生之力與杯壁恢復力反向，導致裝水後敲杯頻率下降，也知道由杯壁至杯中心各點水壓不同，本來高水壓的地方若水之位置被氣泡取代，則因氣泡密度比水低移動比水多

(overshoot)，導致水壓降低，杯壁負擔減小頻率升高。若水之位置被巧克力粉末質點取代，它的密度比水高，它之移動不是超過而是不及水質點，所以頻率不同於氣泡的上升而是下降。當巧克力粉末逐漸溶解後頻率則又升高。

八、參考文獻：

- (一) J. Walker, "The Flying Circus of Physics", John Wiley & Sons, Inc., p.6 and 226, 1977.
- (二) Frank S. Crawford "The hot chocolate effect" 398. Am. J. Phys. 50(5), May 1982
- (三) 大學物理學 第五版 Sears. Zemansky. Young 著 曹培熙譯。
- (四) 台灣2004年國際科展作品專輯 高中組 物理科 酒杯發出的音符 台灣科學教育館網站。
- (五) 台灣2006年國際科展作品專輯 高中組 物理科 都是氣泡惹的禍 台灣科學教育館網站。
- (六) 物理馬戲團 沃克著 葉偉文譯 天下文化書坊。

評語

優：實驗對象明確，步驟尚清楚。

缺：1) 對共振原理未完全理解。

2) 理論解釋需加強。