

水珠漫舞 - 表面張力與溫度變化共舞

壹.研究動機：

偶而進出廚房時，我發現在煎蛋或炒飯時熱鍋的水滴像珠子般的 在鍋內滾來滾去，極速變化，隨即蒸發消逝了。因而想設計一些簡易方法，探討水珠微妙的變化原因。

貳.研究目的：

- 一、探討熱平台上水滴變化情形及水滴基本形狀。
- 二、探討水滴在不同加熱板，不同溫度之下，水珠的大小、形狀、變化與 Hotplate 的表面性質相關性。
- 三、測定不同加熱板上，形成水珠的臨界溫度及其穩定溫度，並探討蒸發快慢的相關性。
- 四、研究水珠形狀變化的規律與表面張力、熱對流所造的振動與簡諧運動的相關性。
- 五、觀察記錄水珠互撞的現象，且進一步探討大小水珠的彈性係數。

參.實驗原理：

觀念[1]-----液體表面張力-----

液體內部分子的引力，表面的分子被吸引向內，使液體宛若被一層看不見的膜所包圍，此種表面分子行為，稱為表面張力。

由純熱力學觀點，表面張力可視作由於液體減少其表面積的傾向，使其表面位能降低至最低，此為穩定表面平衡之必要條件。

由數學上可知，同體積以球形表面積為最小，因此液體分子受表面張力作用，使液滴本身趨向呈球形。

液滴在不同固體表面上,因表面張力不等,呈現不同接觸角。

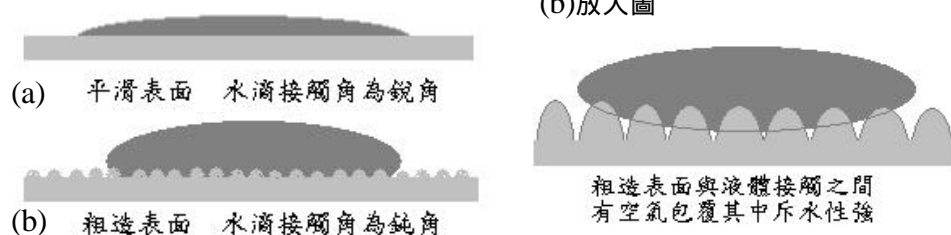
如圖示：



依楊氏方程式知： $g_L \cos\theta = g_S - g_{SL}$

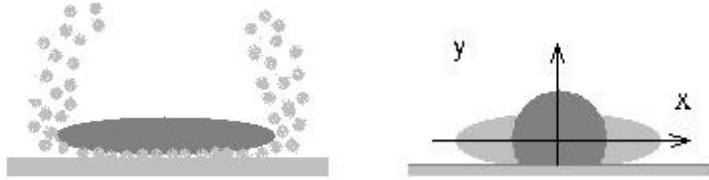
觀念[2]-----固體表面粗糙程度與水滴接觸角-----

一般而言，水滴對平滑表面之親水性較佳，而對粗糙表面之疏水性增強,如圖(a)(b)所示。親水性佳者接觸角為銳角，由圖(b)放大圖解知道水滴覆蓋表面有空氣充斥其間，使接觸面疏水性增強,接觸角為鈍角。



觀念[3]-----蒸氣層與熱對流-----

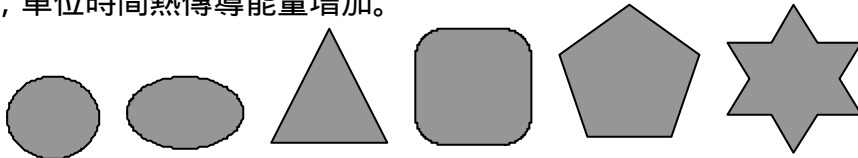
高溫加熱板上的水滴於接觸瞬間，立即有水分子汽化成一層蒸氣膜，降低了 Hotplate 的熱傳導速率，水滴宛如一層蒸氣膜保護而形成穩定水珠，延長了停滯時間。如圖示：



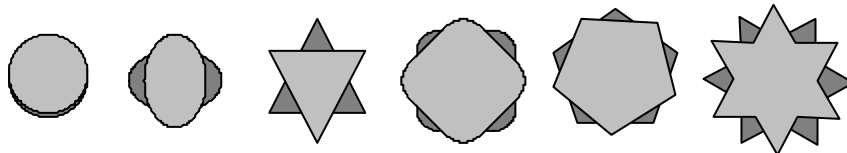
水珠週遭空氣，在高溫加熱板的熱輻射下劇烈對流；加上高溫水珠內部分子的熱運動，形成水珠內外壓力差的作用，因此水珠不停的移動！振動！轉動！變形！

觀念[4]-----水珠變形與蒸發速率-----

水珠處高溫狀態急待蒸散熱能，以降低溫度。高溫水分子的熱運動與空氣熱對流所造成的壓力差，致使水珠向外突出變形，以增大表面積加快蒸發速率，可以降低熱能。但是水珠變形的同時與 Hotplate 接觸表面積變大，單位時間熱傳導能量增加。



表面張力內縮作用，水珠在突出變形與表面積縮小之下，劇烈變形後恢復球形，如此交替循環變化。如簡諧振盪一般，將熱能以位能和動能形式互換；且以轉動方式在擾動之下，取得動態穩定平衡。以達最小的吸收，最快的蒸發。



觀念[5]-----碰撞與彈性係數-----



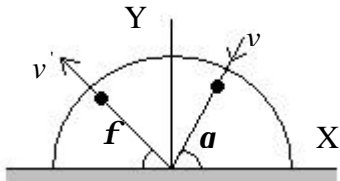
兩個小水滴的表面積總和
大於等體積大水滴的表面積

水珠互撞時,表面膜破裂後立即合而為一。因為兩水滴合為同體積之大水滴總表面積變小,是最小表面能的效應。

設計簡易方式測定水珠彈性係數：

水珠撞擊障礙物時, 假設碰撞前後水珠質量不變。

依圖示：



X:水平方向 動量守恆

Y:垂直方向 障礙物視為不動

$$\Delta \vec{P}_x = 0 \quad mv \cos q = mv' \cos f$$

$$\frac{v'}{v} = \frac{\cos q}{\cos f}$$

$$\text{彈性係數 } e = \frac{\text{分離速度}}{\text{接近速度}} = -\frac{-v' \sin f}{v \sin q} = \frac{\cos q \sin f}{\cos f \sin q} = \frac{\tan f}{\tan q}$$

肆. 實驗設計：

一. 實驗裝置



二. 實驗器材：

- (1) 加熱器 Stirrer Hotplate (Corning) 平台。
- (2) 高溫陶瓷板、不銹鋼板、鐵氟龍平底鍋。
- (3) 熱電偶式 k 型溫度計、兩支一般、一支細針型。
- (4) 計時器：可分次分別計時。
- (5) 數位攝錄影機一台。
- (6) 不銹鋼方形框架一個、圓形框架一。
- (7) 游標尺一支。
- (8) 量筒 10ml 一支。

三.名詞定義：

- (1) 單位體積：滴管每滴落一滴之平均體積。
- (2) 停滯時間 T_m ：水滴在加熱板上蒸發消逝的時間亦可稱為蒸發速率。
- (3) 圓形水珠：水滴在加熱板上形成扁球形之狀態稱為水珠。
- (4) 臨界溫度 t_c ：水滴在加熱板上開始形成水珠的最低溫度。
- (5) 穩定溫度 t_s ：水滴在加熱板上形成與低入水滴體積相等時的最低溫度。
- (6) 變形數：水珠變形時觀察者（含視覺暫留）所看到的變形角數量。

伍.實驗步驟：

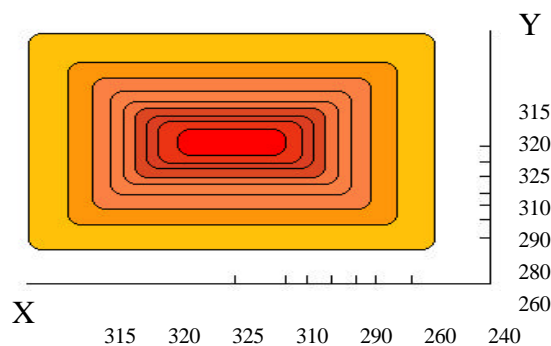
實驗一 基本測量：

- (1) 先測試加熱器(Hotplate)，分段加熱的溫度範圍及加熱速率，測試加熱平台的溫度高低分布情形及穩定性，記錄溫度分布梯度。
- (2) 使用小量筒測定一般滴管滴下一滴水滴的平均體積，以一滴一滴水滴入量筒方式，每 50 滴讀一次體積....一直到 200 滴為止，求取每一滴水的平均體積。
- (3) 拍攝不同材料平台，在常溫下與水滴接觸角；陶瓷板、不銹鋼板、鐵氟龍平底鍋、細砂紙、海綿塊，比較其親水性與疏水性現象。
- (4) 常溫水滴接觸角的測量：用光源投射水滴的影子，並拍攝記錄量取接觸角。
- (5) 高溫水珠的接觸角用 D8 攝影機拍攝，擷取影像處理，以了解水滴與 Hotplate 的接觸角變化。

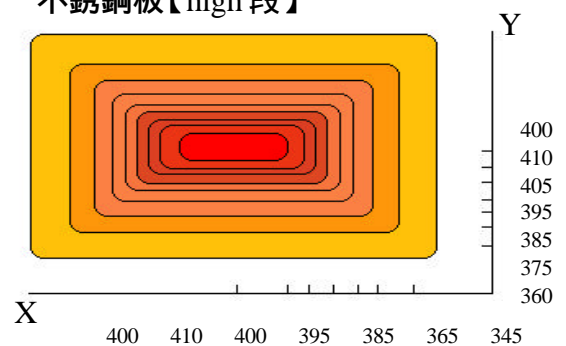
測量結果：

- (1) 加熱板溫度分布梯度如下：

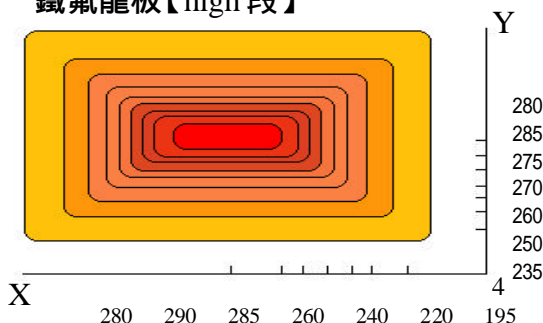
陶瓷板【high 段】



不銹鋼板【high 段】



鐵氟龍板【high 段】



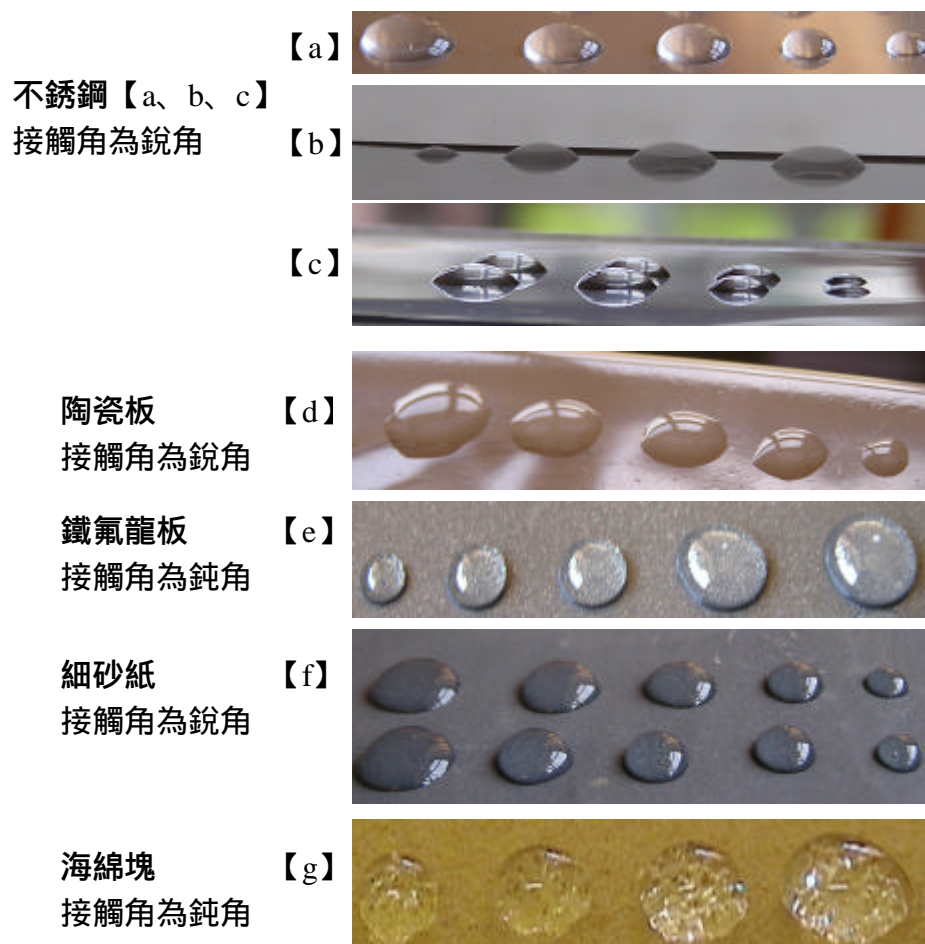
(2)【a】水滴平均體積： 單位 (cc)

滴數	50	100	150	200	平均體積	單位體積
體積	1.98	4.02	6.00	7.98	0.0399	0.0400
體積	2.00	4.05	6.02	8.02	0.0401	
體積	1.96	4.00	5.98	8.00	0.0400	

【b】水滴大小 (截面直徑)：不銹鋼板上 單位 (mm)

滴數	一滴	二滴	三滴	四滴	五滴
平均直徑	6.6	8.3	9.8	10.7	11.2

(3) 常溫下不同材料水滴接觸角：

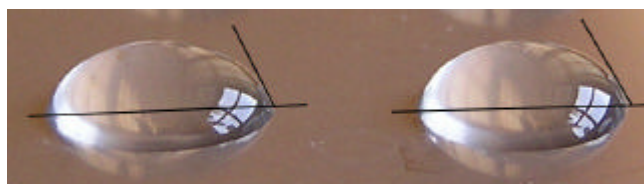


(4) 水滴接觸角的測量：

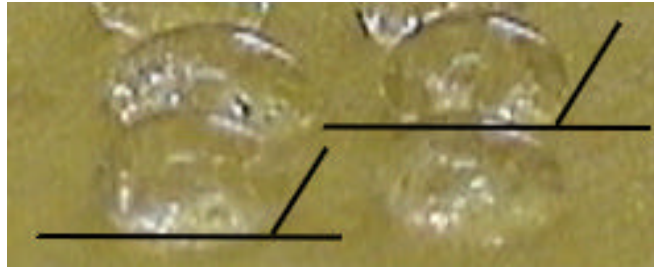
提供兩種材料

不銹鋼




接觸角約 64° 度



海綿塊
接觸角約 121° 度



(5) 水滴與 Hotplate 的接觸角變化：

不銹鋼板	球形	球形變四角形	變形中
形狀			
接觸角	較大	較小	變大變小循環

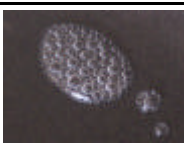

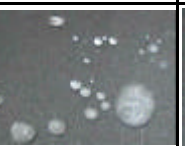

實驗二 形成水珠的臨界溫度、停滯時間探討：

(1) 用滴管於不同材質之加熱板(Hotplate)上方，低於 1cm 得高度，滴入一滴一滴的常溫(28)水滴，同時控制平台的溫度，由 220 逐漸上升至高溫度段(Coring-high)，分別紀錄不同加熱板，水滴變化狀態，蒸發速率(停滯時間)。

【數據表一】 不同材質之加熱板水滴的運動情形：

(a) 鐵氟龍板

最高溫約 205

溫度	110	125	135	150 ~
形狀				
狀態	立即蒸發	中間形成氣泡爆開	散成小水珠	形成穩定水珠但不會轉動

(b) 陶瓷板

最高溫約 330

溫度	220 以下	220 ~240	250	280 ~300	310 ~
形態	立即 ㄉㄉㄉ	小部份散成 極小水珠	散成 小水珠	形成大水珠 少數水珠	形成 穩定水珠
狀態	蒸發	跳動	散射各 方向	四處移動	無變形

			方向		水珠
--	--	--	----	--	----

(c) 不銹鋼板

最高溫約 410

溫度	160 ~	180 ~	195 ~	205 ~235	245 ~
形態	大部分立即蒸發少部分散成極小水珠	大部分散開成小水珠	形成穩定水珠	三兩水珠持續碰撞而後相依	水珠對撞大吃小合而為一
狀態	跳動	移動	移動、轉動 變形	碰撞約十次許 前後 8 至 30 秒	移動、轉動 變形

【數據表二】停滯時間 不銹鋼板

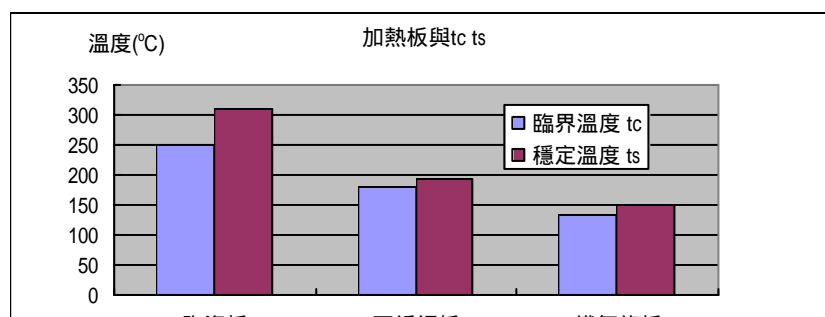
時間單位 (秒)

溫度	250			300			350		
單位體積	3	5	10	3	5	10	3	5	10
停滯時間	127	146	258	97	131	180	86	105	150
	122	149	262	98	129	182	85	104	147
	125	151	260	95	128	184	84	103	152
平均時間	125	149	260	97	129	182	85	104	150

(2) 在上述的記錄中，於形成水珠的溫度上下，用滴管滴入數滴水，精確量測不同加熱板，形成水珠之臨界溫度 t_c 及形成穩定水珠的穩定溫度 t_s 。並於 t_c 及 t_s 的溫度上下，檢測水滴大小對形成水珠是否有影響。

【數據表三】







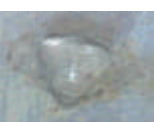





Hotplate 名稱	陶瓷板	平均溫度	不銹鋼板	平均溫度	鐵氟龍板	平均溫度
臨界溫度	248	250	180	180	138	135
	252		176		134	
	250		180		135	
	248		178		135	
	250		180		136	
穩定溫度	312	310	198	195	148	150
	305		196		150	
	310		195		150	
	308		192		148	
	310		195		152	



【函數分析
一】

(3) 控制不銹鋼加熱板溫度為約 350 ，滴入不同水滴溫度 28 、 55 、 65 ，於 Hotplate 中央靜止的滴入一滴、二滴、、、的水滴，記錄水滴變化，對水珠蒸發速率(停滯時間)及臨界溫度的影響，記錄如表。


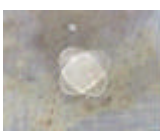




【數據表四】 不銹鋼板 溫度為約 350

滴數 水滴溫度	一滴	二滴	三滴	四滴	五滴	十滴
28	呈圓水珠 原地自轉	呈圓水珠 原地自轉				
水滴變化	呈圓自轉 至蒸發	呈圓自轉 至蒸發	內部 強烈對流	圓球、扁圓 交替	三角、橢圓 球形 循序變化	四角、三角 橢圓、球形 循序變化
停滯時間	48 秒	69 秒	85 秒	93 秒	105 秒	147 秒
55	呈圓水珠 原地自轉	呈圓水珠 原地自轉				
水滴變化	呈圓自轉 至蒸發	呈圓自轉 至蒸發	內部 對流較強	圓球、扁圓 交替	三角、橢圓 球形 循序變化	四角、三角 橢圓、球形 循序變化
停滯時間	47 秒	68 秒	83 秒	91 秒	102 秒	145 秒
65	呈圓水珠 原地自轉	呈圓水珠 原地自轉				
水滴變化	呈圓自轉 至蒸發	呈圓自轉 至蒸發	內部 對流更強	圓球、扁圓 交替	三角、橢圓 球形 循序變化	四角、三角 橢圓、球形 循序變化
停滯時間	47 秒	67 秒	81 秒	91 秒	102 秒	145 秒
















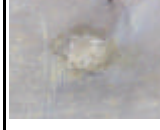








實驗三 水珠形狀，形狀變化與溫度的關係：

(1) 選用水珠停滯時間最久，形狀變化最豐富的不銹鋼板為加熱板，探討水珠之大小、形狀、溫度、變化之規律，用 D8 攝影紀錄。Video-1

(a) 水珠之大小、形狀、溫度：

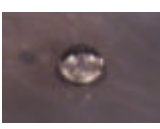

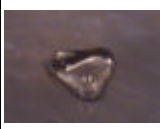



名稱	圓球形	橢圓形	三角形	四角形	五角形	六角形
照片						
變化範圍	260		320		350	
溫度	85 ~86	86 ~87	88 ~90	90 ~91	91 ~94	93 ~95
大小 mm	6 以下	6 ~ 8	8 ~ 10	10 ~ 12	12 ~ 16	18 ~ 20

(b) 變化之規律

名稱	橢圓形	變形	圓球形	橢圓形	十二邊形	十二邊形
變化流程						
名稱	八角形	四角形	圓球形	橢圓形	變形	變形
變化流程						
名稱	變形	變形	八角形	八角形	四角形	四角形
變化流程						
名稱	四角形	橢圓形	橢圓形	橢圓形	圓球形	圓球形
變化流程						

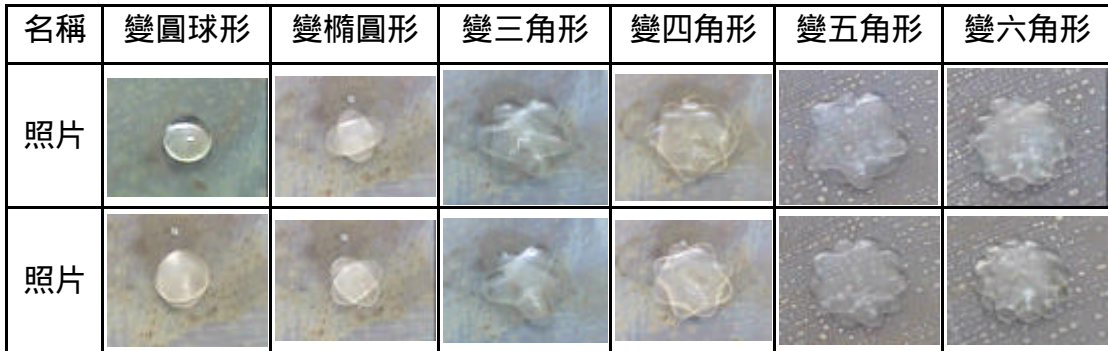
(2) 擷取影像分析水珠漫舞的形狀變化。

【a】基本形狀

名稱	圓球形	橢圓形	三角形	四角形	五角形	六角形
照片						



【b】疊合形狀

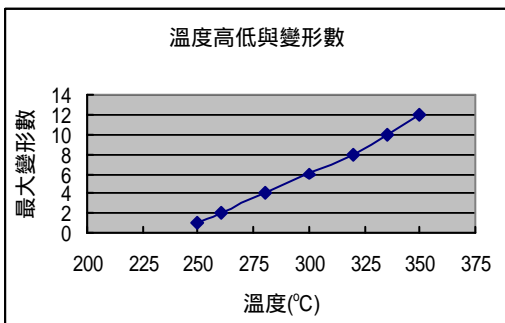


(3) 選取固定溫度 250 、 280 、 300 、 350 、 370 ，用 10 單位體積水滴，觀察水珠變化之規律，並測量形狀變化種類(多角形)、停滯時間、轉動快慢。

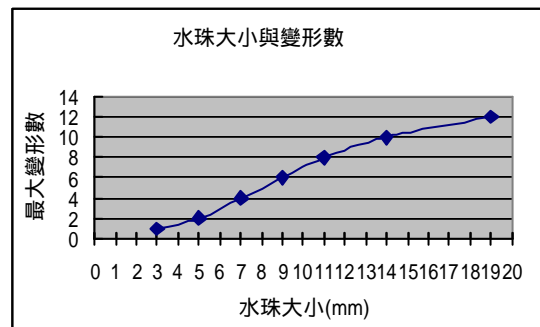
固定 10 單位體積水滴： 不同溫度下 時間 (秒)

溫度	250	280	300	350	370
變形數規律	6-4-2-1	6-4-2-1	8-4-2-1	8-6-4-2-1	10-8-6-4-2-1
最大變形數	6	6	8	8	10
停滯時間	262	192	184	150	143
	258	198	180	147	145
	254	202	178	153	139
平均時間	258	197	180	150	142

【數據分析二】

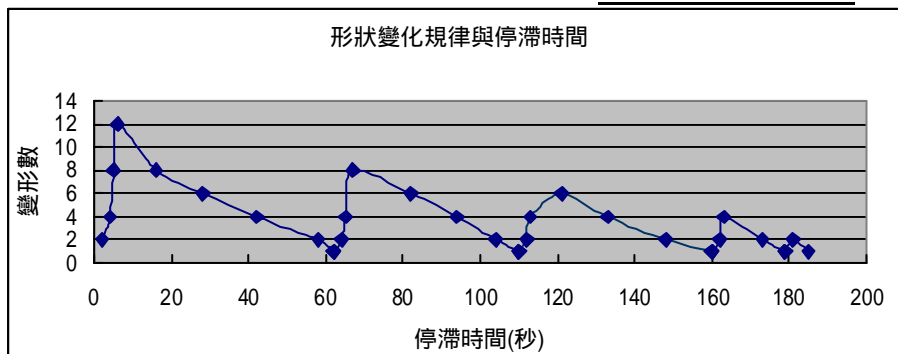


【數據分析三】



【數據分析四】

溫度 390 20 滴



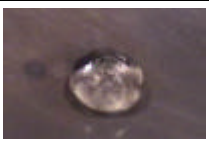

(4) 固定滴入 5 單位體積水滴在 260 至 350 之間，升溫降溫，由 D8 攝影機了解形狀變化的速率及自轉速率的快慢的規律並記錄不同溫度之形狀變化多角形。

固定滴入 5 單位體積： 升降溫度下

溫度變化	260 上升至 350	350 下降到 260
形狀變化	形狀交替	形狀交替
速率	變化增快	變化趨緩
自轉速率	轉速 加快	轉速 降低





(5) 於 240 至 345 溫度範圍，使用細針型溫度計，測量不同變形水珠本身溫度。

水珠本身溫度：

Hotplate 溫度	測量水珠的位置		溫度	溫度範圍
240		上層	85	85
		中央	92	
		底層	95	95
345		上層	92	92
		中央	95	97
		底層	97	

(6) 在 Hotplate(390 ~410)於不銹鋼板上滴入 10 滴、15 滴、20 滴、30 滴水滴，記錄停滯時間。觀察記錄水滴大小與變形數的關係。

固定溫度： 水滴大小不同下 外徑 (mm) 時間 (秒)










水滴大小	10 滴	15 滴	20 滴	30 滴
最大變形數	八角形 	八角形 	十二角形 	無規變形 
水珠外徑	10	12	18	22
停滯時間	126	156	186	246
	134	161	192	238
	128	149	178	252
平均時間	129	155	185	245

實驗四 水珠的跳動與碰撞：

(1) 選用陶瓷板控制溫度在 250 以上，於側邊注入水滴，用 D8 攝錄影機

全程拍錄，水珠碰撞方形框架的情形，擷錄分析。Video-2

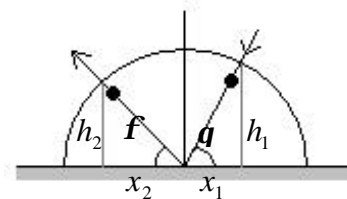
擷錄碰撞影像 摘錄其中三組圖像：

名稱	入射點	撞擊點	反射點
擷錄照片			
擷錄照片			
擷錄照片			

(2) 選用水珠是一單位體積大小，碰撞不銹鋼方形框架，擷錄前一張、撞擊一張、後一張，在液晶螢幕上套合，已製作好的撞擊模版 OHP (透明片)，描入射點、撞擊點、反射點，每次碰撞量取三組數據，繪製碰撞圖形如觀念【5】

計算彈性係數 e

$$\tan \theta_2 = \frac{h_2}{x_2} \quad \tan \theta_1 = \frac{h_1}{x_1} \quad e = \tan \theta_2 / \tan \theta_1$$



【數據表四】

水珠彈性係數 e

第一組		e	第二組		e	第三組		e
tan	0.278	0.501	tan	0.329	0.573	tan	0.613	0.577
tan	0.555		tan	0.574		tan	1.062	
tan	0.281	0.505	tan	0.377	0.561	tan	0.631	0.595
tan	0.557		tan	0.672		tan	1.060	
tan	0.284	0.514	tan	0.350	0.559	tan	0.622	0.583
tan	0.553		tan	0.626		tan	1.067	
第四組		e	第五組		e	第六組		e
tan	0.730	0.760	tan	0.759	0.735	tan	0.696	0.752
tan	0.961		tan	1.032		tan	0.926	
tan	0.750	0.767	tan	0.732	0.716	tan	0.668	0.741
tan	0.978		tan	1.023		tan	0.901	






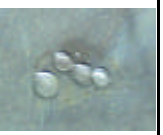






tan	0.749	0.763	tan	0.725	0.724	tan	0.671	0.746
tan	0.982		tan	1.001		tan	0.899	

(3) 由**實驗一**(1)之(b)知在臨界溫度上下，約於 220 至 280 之間滴入的水滴，立即散射成極細小水珠跳動；用 D8 攝錄影機拍錄，觀察記錄運動情形。**Video-3**

(4) 改用不銹鋼板，控制溫度自 195 到 250 之間，滴入二滴或三滴水滴，觀察紀錄穩定水珠碰撞情形。

觀察結果：水珠連續碰撞次數少者三、五次，多者十幾次；而後穩定靠攏一段時間，最後表面模破裂合而為一。前後持續 8 至 30 秒之久。

擷取影像如下：

名稱	兩滴碰撞	三滴碰撞	三滴轉向	三滴靠攏	三滴排列	四滴碰撞
照片						
照片						

實驗五 驗證「大水滴吃小水滴」：

設計一支架如圖，於 A、B 間繫上綿線並維持水平，用滴管在線上非常接近的 P、Q 兩處，滴上大小不等之水滴，觀察液滴移動情形。

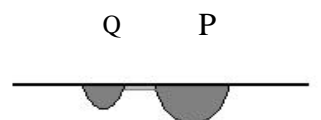
觀察結果：(1) 若 P、Q 兩點之間是乾燥的，則即使間距很小，大小水滴也不會相吸。

(2) 若 P、Q 兩點之間被浸濕時，則即使間距增大，大水滴很快吃掉小水滴。

(3) 綿線更換為金屬桿，實驗結果相同。



證實：浸濕時水在 P、Q 間形成一層水膜，因表面張力的作用，使大水滴吃掉小水滴。



大水滴利用水膜吃掉小水滴

實驗六 驗證「水滴與高溫加熱板間存在蒸氣層」：

【方法】一

將不銹鋼板加熱到 220 以上，水滴在高溫加熱板上形成穩定水珠，開始移動、振動、轉動、變形時，測量水珠本身溫度，鋼板表面溫度及水珠原覆蓋處之溫度，以了解鋼板表面溫度是否因水珠覆蓋而降溫。

測量結果：(1) 水珠溫度 85 ~95 ，比原來水溫 29 高出許多，表示水滴落至高溫鋼板時，即時吸收大量熱量溫度上升。

(2) 水珠原覆蓋處之鋼板表面溫度與原來未覆蓋水珠的鋼板表面溫度相同。

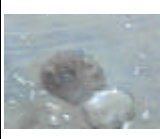
證實：水珠與高溫加熱板間形成蒸氣層，致使水珠與高溫鋼板熱傳導速率降低，加熱板的輻射不變，週遭的冷熱空氣劇烈對流，開始移動、振動、轉動、變形。

【方法】二

在穩定水珠之中心，注入強力水柱，直衝不銹鋼平台，以降低平台溫度，使水珠與接觸板之間溫度下降，以了解水珠正下方是否還有一層高溫氣膜，隔絕水珠與加熱板。

觀察結果：發現水柱浸濕平板時，水珠立即「吱吱吱！吱吱吱！」劇烈變形而後，迸裂！炸開！快速蒸發。

擷取影像如下： 參考**實驗二**【數據表一】(c) 180 以下水珠情形

名稱	浸濕	接觸	迸裂	炸開	散射	蒸發
照片						

證實：水珠與接觸板之間，確實存在一層高溫氣膜，以維持水珠穩態平衡。

陸、實驗討論：

- 一、**實驗一** (3) 顯示表面光滑的陶瓷板、不銹鋼板、細砂紙，接觸角為銳角，而表面較粗糙的鐵氟龍板、海綿塊，接觸角為鈍角。符合觀念【2】接觸面的光滑粗糙程度影響接觸角的說法。
- 二、**實驗二**【數據表三】中的臨界溫度、穩定溫度，以陶瓷板最高、不銹鋼板次之、鐵氟龍板最小，此種關係恰與板面親水性成正比。也就是水滴與板面接觸角為鈍角者 t_c 、 t_s 較低，容易形成水珠，反之接觸角為銳角者，較不易形成水珠。由**實驗一**(3)得知陶瓷板接觸角最小故 t_c 、 t_s 最高。
- 三、鐵氟龍平底鍋高溫時，仍然不易看到水珠產生轉動或變形，如【數據表一】(a)。那是因為鐵氟龍板，在 Hotplate 上加熱最高溫不過 205 ，比穩定溫

度 150 高出不多，而且板表面粗糙，底部蒸發的氣體受阻隔，無法形成一層氣墊，所以水珠的轉動或變形皆會受阻。若能改善 Hotplate 的加熱系統，使鐵氟龍板表面溫度上升到 300 以上，肯定可以看到水珠轉動或變形。

- 四、高溫陶瓷板上，可以觀察到水珠極速的轉動及振動，但是幾乎看不到水珠變形。是因為陶瓷板表面光滑，常溫下親水性本來就比較好。由【數據表三】可以了解陶瓷板的臨界溫度 250 穩定溫度 310，皆比不銹鋼板、鐵氟龍板高出許多，且陶瓷板上的加熱最高溫為 330，因此只有提高陶瓷板上的溫度才有機會看到水珠變形。
- 五、實驗二【數據表三】中的臨界溫度、穩定溫度，不會受到水滴大小的影響。那是因為水滴是用滴管一滴一滴滴落不銹鋼板上，每一滴滴落的瞬間立即形成水珠；因此不管是十滴二十滴合併的大小不同水滴，並不影響 t_c 、 t_s 的測定結果。
- 六、從實驗二【數據表四】可知注入的水滴溫度不同，對水珠變化的基本形狀沒有影響；祇是移動、轉動之前的對流加劇而已。
- 七、由實驗三(1)(a)(b)探討得水珠大小影響變形數，而溫度高低變化會影響轉動速率。至於形狀變化的規律是波浪式的，由多到少再從多到少，遞次降低變形數，一次又一次波浪式的循環。如 12-8-4-2-1、8-4-2-1、4-2-1,2-1、1；或是 10-6-4-2-1、6-4-2-1、4-2-1、2-1、1。
- 八、水珠漫舞的基本形狀，可以從拍攝的影像中擷錄分析。得六種基本形狀，如實驗三(2)(a)圓球形、橢圓形、三角形、四角形、五角形、六角形等六種。當水珠轉速加劇時，也會拍得或看得到，疊合形狀六種，如實驗三(2)(b)變圓球形、變橢圓形(四角形)、變三角形(六角形)、變四角形(八角形)、變五角形(十角形)、變六角形(十二角形)。
- 九、由實驗三(3)(4)探討得固定體積的水滴形成水珠時，若 Hotplate 溫度持續上升，形狀變化交替增快，自轉速率也加快；反之溫度下降，形狀變化交替趨緩，自轉速率也降低。同時加熱板上，溫度越高形狀變化種類較多（變形數），最大變形數高，且自轉速度較快，停滯時間變短。
- 十、從實驗三(6)知 Hotplate 控制在一定溫度下，水滴越大的形成水珠時，變形越豐富種類較多，自轉速率較低，停滯時間越久。總之水滴大小會限制到最大變形數，同時加熱板的溫度高低也會影響最大變形數。也就是最大變形數由水滴大小及溫度高低決定。

十一、實驗三（6）水滴太大達 30 滴以上（外徑達 22mm 以上）時，蒸氣逸散受水滴重力覆蓋，水珠中間就容易形成大氣泡（溫度是 100^o）；水珠變形規律受到蒸氣泡的推擠而破壞，待水珠汽化體積縮小到外徑在 20mm 以下，才恢復規律變形。

十二、實驗四（2）經攝影擷錄影像，用製作好的碰撞模版（OHP）套合，計算前三組數據水珠彈性係數 $e = 0.50\sim 0.60$ 之間，但是後三組數據水珠彈性係數 $e = 0.71\sim 0.77$ 之間。經仔細觀察才發現水珠大小不同所致，稍大的水珠彈性係數較小，較小的水珠剛性較強彈性係數大。若 Hotplate 的溫度控制可以更精確，水珠的大小可以精準的控制，則水珠彈性係數 e 就會更精確。

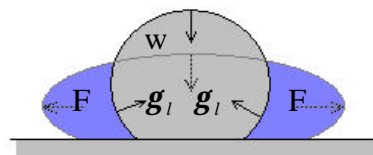
十三、這次水珠漫舞實驗中，大小水珠相遇（碰撞）過程中，發現總是大水滴吃小水滴的結果；因此設計實驗五驗證「大水滴吃小水滴」的事實。結果是兩水滴之間介面是否浸濕，才是水滴合而為一的道理；也是表面能降到最低的效應。

十四、從實驗六的測量中，【方法一】水珠原覆蓋處之鋼板表面溫度與原來未覆蓋水珠的鋼板表面溫度相同，【方法二】發現水柱浸濕平板時，加熱板的溫度降到 t_c 以下，所以水珠立即「吱吱吱！吱吱吱！」劇烈變形而後，迸裂！炸開！快速蒸發。證明「水珠與高溫加熱板間形成蒸氣層」。

柒、實驗結論：

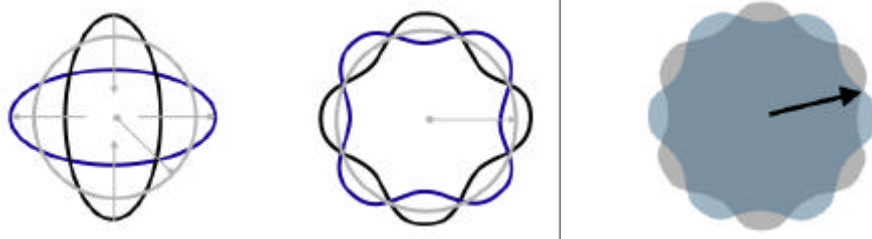
一、液體分子間藉熱運動，對流不息的互相碰撞，由高溫動量大、快的分子與低溫較慢的分子碰撞，使分子團間造成動量交換，使得分子團間動量產生增減現象，因而造成振動變形。

二、水滴與高溫 Hotplate 板間有一層蒸氣膜，熱傳導受阻，單位時間熱傳導速率降低，但熱輻射不變，所以水滴蒸發汽化速度減慢。此際分子內聚力的作用之下，表面張力可以顯著的表現出來，恰與重力效應形成拉鋸，水珠不斷交互變形。大水滴因重力效應作用大於表面張力，成為扁圓形；小水滴因重力效應相對較小，而形成圓球形的水珠狀。



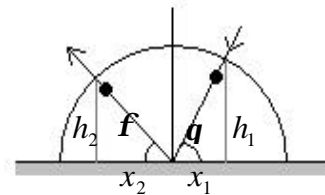
三、一般液體之黏度、表面張力皆因溫度上升而降低，所以水滴於高溫板上猶如懸浮的高溫液滴(82^o-97^o)；水滴內部分子劇烈的熱運動，動量大所造成的碰撞易造成變形。又因表面張力的縮收作用，表面積變化要最小，如圖

示，突出一角的相鄰為內凹以參考圖為準，交替變化，每一突出角、內凹處，猶如簡諧振盪（S.H.M.）般的來回振動。水珠以對稱變形，達到最小能量吸收；以轉動達到最快的蒸發。這是水珠漫舞，舞姿曼妙的表面張力與溫度變化共舞的奧秘。



四、我們在實驗時發現，當兩個或多個水滴碰上了，就形成一個較大水滴，且必然是大水滴吃掉水滴，原因是兩個水滴的表面積總和大於一個等體積大水滴的表面積。這就是液體表面張力會將液滴表面縮到最小的現象；也是表面能達最小狀態的道理。

五、水珠的碰撞由【實驗四】(1) (2)成功的被測定是件令人驚喜的傑作與突破。擷錄碰撞影像直接在液晶螢幕上套合，已製作好的撞擊模版 OHP（透明片），描入射點、撞擊點、反射點，每次碰撞量取三組數據，用觀念【5】參考圖中的 h_1 x_1 h_2 x_2 計算 $h_1 / x_1 = \tan q$ $h_2 / x_2 = \tan f$ 彈性係數 $e = \tan f / \tan q$ 。



水珠越小顆的彈性越好，而且加熱板的溫度越高時，彈性係數比較大。

六、水滴與接觸面的光滑粗糙程度，會影響接觸角的大小；光滑者接觸角為銳角，粗糙者為鈍角。臨界溫度、穩定溫度高低的關係，恰與板面親水性成正比。也就是水滴與板面接觸角為鈍角者，疏水性強所以 t_c 、 t_s 較低，容易形成水珠，反之接觸角為銳角者，較不易形成水珠。

七、探討得水珠大小影響變形數，而溫度高低變化會影響轉動速率。至於形狀變化的規律是波浪式的，由多到少再從多到少，遞次降低變形數，一次又一次波浪式的循環。如 12-8-4-2-1 8-4-2-1 4-2-1,2-1 1；或是 10-6-4-2-1 6-4-2-1 4-2-1、2-1、1。

八、水珠漫舞的基本形狀，有圓球形、橢圓形、三角形、四角形、五角形、六角形等六種。同時加熱板上，溫度越高，形狀變化種類較多（變形數），最大變形數高，且自轉速度較快，停滯時間變短。水滴越大的形成水珠時，變形越豐富種類較多，自轉速率因重力而降低，但停滯時間越久。總之水珠大小會影響最大變形數，也就是最大變形數由水滴大小及溫度高低決定。

捌、感想與展望：

從試著報名參賽到進入決賽，是一陣驚喜，也是一次陣痛。最早於物理馬戲團 2一書中，看到水滴之舞報導，就引發我的興趣，到真正踏進實驗過程，才知道研究是怎麼一回事。這次陣痛讓我體會到，研究須要極高的耐心，冷靜的頭腦，理性的思考和創意的實驗技能；沒很好的科學實驗方法，無法洞悉大自然隱藏的奧秘。方法改進再改進，結果突破再突破，由混沌到頓悟，一次又一次高潮迭起，一波又一波美不勝收！其實科學實驗可以很有趣，也可以很美妙。大家一起來發現大自然隱藏著很多看不到的奧秘。

玖、參考文獻：

1. Jearl Walker 著 葉偉文譯 物理馬戲團 2 天下文化出版.
2. 酒井高男著 力學的趣味實驗 亞東書局出版.
3. 熱納、巴寶著 郭兆林譯 固、特、異的軟物質 天下文化出版.
4. Vennard 著 任碩，張俊盛譯 基本流體力學 科技圖書公司出版.
5. 黃定加著 物理化學 高立圖書有限公司出版.
6. 陳光旨著 物態 凡異出版.
7. 林明瑞著 高級中學 物質科學-物理篇 (下冊) 南一書局出版.