

# 屏東縣第 64 屆國中小學科學展覽會

## 作品說明書

科別：物理科

組別：國中組

作品名稱：熱中的獨舞—探討溫度與高度對萊頓佛羅斯特效應的影響

關鍵詞：萊頓佛羅斯特效應、溫度、滴落高度

編號：B2008

## 摘要

水滴與高溫表面接觸部分會瞬間產生可絕熱的水蒸氣，因水蒸氣的導熱速度較慢，阻斷固液接觸，蒸氣層因而使水滴沸騰速度變慢，使其保持液體狀態，在加熱板上懸浮並滾動，我們注意到這個有趣的現象，稱為萊頓佛羅斯特效應，但有關萊頓佛羅斯特效應的文獻對於溫度設定不一，加上高度部分的研究較少，因此我們利用晶圓片作為加熱平面，嘗試探討這兩項變因的影響。結果發現：

- 一、未達到穩定溫度前，溫度升高會使蒸氣量增加，加熱平面上的水滴則會因蒸氣量不同而有不同變化。
- 二、接近穩定溫度的水滴會有旋轉的現象。
- 三、未達到穩定溫度前，滴落高度會影響水滴的噴濺程度和接觸加熱底板的面積，進一步造成加熱平面上的水滴形狀有不同變化。

## 壹、前言

### 一、研究動機

使我們開啟這研究的契機，是一支影片(Taras Kul, 2017)，那是一個有鋸齒且為圓形的高溫板，水滴一滴下，在板上隱隱的懸浮，以極快的速度打轉，接著一顆一顆再滴下，眾多水滴逐漸匯集，然後突然破裂，如此有趣的現象，使剛踏入國中的我們對它產生好奇。

在閱讀文獻的過程中，我們發現這樣的現象稱為萊頓佛羅斯特效應(Leidenfrost effect)，過去的研究曾經做過有關聲音、鋸齒表面、不同溫差表面甚至以水晶寶寶作為材料的相關研究，但是也產生了一些困惑，我們決定回歸到基本變因的研究，先從溫度和高度著手，進一步了解萊頓佛羅斯特效應。

### 二、研究目的

- (一) 探討加熱板的溫度差異對萊頓佛羅斯特效應的影響
- (二) 探討滴落高度的差異對萊頓佛羅斯特效應的影響

### 三、文獻探討

(一) 萊頓佛羅斯特效應(Leidenfrost effect)：如圖 1，當水滴接觸一加熱表面，表面溫度明顯高於水的沸點時，水滴與表面接觸部分會瞬間產生可絕熱的水蒸氣，因水蒸氣的導熱速度較慢，阻斷固液接觸，蒸氣層因而使水滴沸騰速度變慢，使其保持液體狀態（李威果等人，2013）。



圖 1. 萊頓佛羅斯特效應示意圖（劉又瑋，2021）

(二) 溫度對萊頓佛羅斯特效應的影響

莊皓亘等人（2021）以紅外線測溫槍測量，設定不同溫度（160°C ~ 250°C）的鋸齒微結構，觀察水滴在其上的移動現象，結果顯示溫度愈高，所產生的蒸氣層愈厚，對水滴在鋸齒微結構上的移動速度會造成影響。

張芳瑀（2011）以熱電偶測溫器測量，設定不同溫度（100°C、200°C、300°C、400°C）的鋸齒微結構，觀察水滴在其上的移動現象，結果顯示 400°C 時，水滴結成珠狀，不會馬上蒸發，且會滾動，100°C ~ 300°C 左右會造成水滴快速的蒸發，甚至在 300°C 會有破裂現象，推測溫度較低時，蒸氣層厚度較薄，阻隔熱傳遞的效果變差，因此整顆水滴會劇烈的蒸發接近沸騰狀態，不過在平面上卻無法觀察到水滴炸開的現象，原因是鋸齒的不對稱形狀促使此巨大的蒸發力量分散，才會導致水滴炸開。

李威果等人（2011）以熱電偶測溫器測量，設定水滴在不同滴落高度(2 cm、6 cm、10 cm、14 cm、18 cm、22cm、26 cm、30 cm)下，於不同溫度（180°C ~ 210°C）的鋁板平面所造成的聲音差別，結果顯示不論滴落高度差為多少，隨著水滴與鋁板溫度差的增加，聲音頻率與其具有正相關性，並且會以線性的方式逐漸增加。推測原因是溫度愈高，空氣膜愈快形

成，氣層與外面大氣的壓力差造成振動而發出聲音。

綜合上述，我們發現溫度高低會影響蒸氣層形成的時間和厚度，不過由於各研究測試的溫度範圍（160°C ~ 400°C）和表面結構（鋸齒、平面）不同，劉又瑋（2021）卻提到水要發生萊頓弗羅斯特效應的溫度點，需要高達 193°C，眾說紛紜，因此我們想要將變因簡化，使用一般加熱平面觀察水滴滴落時的現象，來探討溫度對萊頓弗羅斯特效應的影響。

此外，我們也注意到各研究選用的測溫器不同，紅外線溫度測量器能在不接觸物體的情況下測量其表面溫度，而熱電偶式溫度測量器則能及時反映溫度變化適應於各種環境，但當使用紅外線溫度測量器時，物體自身的分子運動因會產生紅外線輻射熱而測得，但當物體反射光時，反射的光可能導致測量器接收到周圍環境或其他熱源的紅外線輻射，造成測得溫度有異。因此我們討論後，決定使用測量高溫時會比較精準的熱電偶式溫度測量器來進行實驗。

### （三）高度對萊頓弗羅斯特效應的影響

李威果等人（2011）以熱電偶測溫器測量，設定水滴在不同滴落高度（2 cm、6 cm、10 cm、14 cm、18 cm、22cm、26 cm、30 cm）下，於不同溫度（180°C ~ 210°C）的鋁板平面所造成的聲音差別，結果顯示隨著滴落高度差的增加，聲音頻率<sup>2</sup>逐漸降低並趨向一定值，推論滴落高度越高，水珠會因為受空氣阻力的影響而趨向流線形， $r_{\text{曲}}$ （因瞬間蒸發而削去的水滴半徑）會逐漸降低而趨向一定值，根據公式推導聲音頻率<sup>2</sup>逐漸降低並趨向一定值。

從林宥君等人（2004）、張定堯等人（2011）和黃子恆等人（2021）的文獻中可以看到當水或顏料在不同高度滴落於紙時，在一定高度內，高度愈高，所造成滴液痕跡直徑越長、面積愈大，且放射形狀愈明顯，噴濺愈遠。因此，當水滴由不同高處撞擊加熱平面時究竟會產生什麼變化呢？我們在李威果等人（2011）的研究中看不出水滴由不同高度落下碰撞加熱平面後，水滴型態是如何改變。綜合上述，我們決定將高度納入研究，觀察高度會如何影響萊頓弗羅斯特效應。

表 1. 萊頓弗羅斯特效應的相關文獻整理

文獻名稱	水滴在高溫鋸齒狀金屬表面上的爬坡現象（張芳瑀，	微結構下的魔術師——萊頓佛斯特的溫	好聽的鐵板燒—低溫液體撞擊高溫金屬板
------	-------------------------	-------------------	--------------------

	2011)	度效應（莊皓亘、蔡宇綸，2011）	之聲音研究探討（李威果等，2013）
<b>操縱變因</b>	金屬表面溫度	不同溫度 160 °C ~ 250 °C	滴落高度差 鋁板溫度
<b>控制變因</b>	水滴為 0.04c.c.、鋸齒傾斜 5 度角、使用蒸餾水、鋸齒使用	微結構的高度及角度、移動距離、路徑、水滴低落高度、水平狀態	水滴質量 0.017 g
<b>測溫器選擇</b>	熱電偶式溫度計	紅外線溫度計	熱電偶式溫度測量器
<b>結論</b>	<p>1.當鋸齒狀金屬溫度在 100~300°C 左右會造成水滴快速的蒸發。</p> <p>2.當鋸齒狀金屬溫度大約為 300°C，會造成液滴產生炸開的現象，在平面上卻無法觀察到水滴炸開的現象，原因是鋸齒的不對稱形狀促使此巨大的蒸發力量分散，才會導致水滴炸開。</p>	<p>1.190°C 時，跑完路程所需花費的時間最短，水滴的運動速度會是最快的。</p> <p>2.在 170°C 到 190°C，水滴運動速度與溫度成正比。</p> <p>3.過了 190°C 水滴的運動速度會隨溫度逐漸增加而增加，也就代表著過了 190°C 水滴的運動速度是逐漸減慢的。</p>	<p>1. 當溫度愈高，空氣膜會愈快形成，頻率因此而上升，水滴與鋁板溫度差和聲音頻率<sup>-2</sup>成二次變化關係。</p> <p>2. 當滴落高度差越高時，所產生的聲音頻率會有逐漸增加的趨勢，隨著滴落高度差的增加，聲音頻率<sup>-2</sup>逐漸降低並趨向一定值。</p>

表 2. 不同溫度測量器比較

名稱	熱電偶式溫度測量器	紅外線溫度測量器
圖示	 <p>(圖片來源： amazon <a href="https://www.amazon.com/-/zh_TW/uxcell-K-Type-%E6%95%B8%E4%BD%8D%E6%BA%AB%E5%BA%A6%E8%A8%88-TM-902C-%E7%86%B1%E9%9B%BB%E5%81%B6%E7%B7%9A/dp/B016EILWBM">https://www.amazon.com/-/zh_TW/uxcell-K-Type-%E6%95%B8%E4%BD%8D%E6%BA%AB%E5%BA%A6%E8%A8%88-TM-902C-%E7%86%B1%E9%9B%BB%E5%81%B6%E7%B7%9A/dp/B016EILWBM</a> )</p>	 <p>(圖片來源：yahoo 購物中心 <a href="https://tw.buy.yahoo.com/gdsale/BENETECH%E6%A8%99%E6%99%BAGM700%E7%B4%85%E5%A4%96%E7%B7%9A%E6%B8%AC%E6%BA%AB%E6%A7%8D-%E7%B4%85%E5%A4%96%E7%B7%9A-8041262.html">https://tw.buy.yahoo.com/gdsale/BENETECH%E6%A8%99%E6%99%BAGM700%E7%B4%85%E5%A4%96%E7%B7%9A%E6%B8%AC%E6%BA%AB%E6%A7%8D-%E7%B4%85%E5%A4%96%E7%B7%9A-8041262.html</a> )</p>
原理	他由兩種金屬的導線組成,當兩端溫度不同時,會產生電動勢,稱為 seebeck 效應	溫度在絕對零度(約-273 度)以上的物體,會因自身分子運動而產生紅外線輻射熱
特點	可測量及高溫或極低溫環境,能及時反映溫度變化	遠距離測量,能在不接觸物體的情況下測量其表面溫度,適用於要保持安全距離的情況下
應用	廣泛應用於工業、科學實驗及環境監測等領域	工業製造上的溫度監控、能源管理及環境監測等
來源	戴明鳳等 (2009)。	泰菱有限公司 (無日期)。

## 貳、研究設備及器材

一、研究器材：電磁加熱攪拌器、滴定管、滴定管架、燒杯、手機 (OPPO A77 5G)、手機架、隔音棉、遮光板-白、隔熱手套、電子秤、實驗用水 (RO 水)、晶圓片 (8 吋)、熱電偶式溫度測量器。

二、使用軟體：Tracker (影片格放用)

### 三、實驗裝置圖：



圖 2. 實驗裝置架設圖(側面)



圖 3. 實驗裝置架設圖(正面)

## 參、研究過程與方法

### 一、探討加熱板的溫度差異對萊頓佛羅斯特效應的影響

(一) 單顆重量測試：為了確保每次測試水滴大小能有較穩定的一致性，我們先試轉滴定管的旋鈕，確定旋轉幅度能達到我們想要的水滴大小後，做上記號。在滴定管下方架設燒杯，將旋鈕轉至記號處，滴 10 滴 RO 水後關閉，並測量總重量。重複測試共 5 次。

(二) 溫度差測試：

1. 將實驗裝置如圖 2、3 架設好後，以水平儀測定並微調晶圓片平面達到水平。
2. 將滴定管下方開口連結橡皮管，以利手機拍攝。將橡皮管下方開口與晶圓片之間的垂直距離設定為滴落高度差，調整滴定管高度，使滴落高度差達 5cm。
3. 將電磁加熱攪拌器啟動電源，並以熱電偶式溫度測量器測量晶圓片上水滴的預計滴落點溫度，使其達到 230°C，並於每次重複測試時，均先測量溫度，確保實驗溫度穩定。
4. 每次滴一滴 RO 水並錄影紀錄滴落後的狀況，重複測試 10 滴，以手機錄影紀錄。

5. 將溫度拉高至 250°C 和 280°C 並各重複測試 10 滴。

## 二、探討滴落高度的差異對萊頓佛羅斯特效應的影響

如同研究一的裝置和實驗流程，調整滴定管和晶圓片之間的滴落高度差為 10cm，並重複上述三種溫度各測試 10 滴，以手機錄影紀錄。

## 肆、研究結果

### 一、探討加熱板的溫度差異對萊頓佛羅斯特效應的影響

#### (一) 水滴單顆重量測試：

由表 3 可以看出固定旋轉位置的水滴重量平均一顆為 0.18 克，標準差為 0.03，顯示每次開關時，還能維持一定的穩定度。

表 3. 水滴單顆重量測試結果

實驗編號	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均	標準差
平均每滴水 滴重量(g)	0.20	0.18	0.20	0.13	0.19	0.18	0.03

#### (二) 溫度差測試：

我們將滴落後的狀況分成四種類型：

類型一：水滴極少甚至沒有裂成小水珠在加熱平面上懸浮，往各個方向移動，而是絕大部分留在原地平攤開來，未成水珠形狀，有沸騰現象並逐漸變小。（如圖 6、圖 10）

類型二：水滴有少部分裂成小水珠在加熱平面上懸浮，往各個方向移動，大部分留在原地平攤開來，未成水珠形狀，有沸騰現象並逐漸變小。（如圖 4）

類型三：水滴有大部分裂成小水珠在加熱平面上懸浮，往各個方向移動，少部分留在原地平攤開來，未成水珠形狀，有沸騰現象並逐漸變小。（如圖 8、圖 9）

類型四：水滴直接破裂成小水珠，在加熱平面上懸浮，往各個方向移動。（如圖 5）



結果發現，在滴落高度 5cm 的狀況下，不同溫度的結果如表 4。顯示 230°C 和 280°C 時無法達到萊頓佛羅斯特效應，由圖 4 和圖 6 來看，280°C 時水滴有明顯的旋轉狀況。250°C 時水滴剛接觸平面不會呈現皇冠型（230°C 和 280°C 則有），而是直接破裂成小水珠，表現出萊頓佛羅斯特效應，以水珠狀態往各方向移動。

表 4. 滴落高度 5cm 不同溫度下的類型次數分布

次數	230°C	250°C	280°C
類型一	10	0	10
類型二	0	0	0
類型三	0	0	0
類型四	0	10	0



圖 4-1. 230°C-5cm-第 1 次-1 (類型二)



圖 4-2. 230°C-5cm-第 1 次-2 (類型二)



圖 4-3. 230°C-5cm-第 1 次-3 (類型二)



圖 4-4. 230°C-5cm-第 1 次-4 (類型二)



圖 4-5. 230°C-5cm-第 1 次-5 (類型二)



圖 4-6. 230°C-5cm-第 1 次-6 (類型二)



圖 4-7. 230°C-5cm-第 1 次-7 (類型二)



圖 5-1. 250°C-5cm-第 3 次-1 (類型四)



圖 5-2. 250°C-5cm-第 3 次-2 (類型四)



圖 5-3. 250°C-5cm-第 3 次-3 (類型四)



圖 6-1. 280°C-5cm-第  
7 次-1 (類型一)



圖 6-2. 280°C-5cm-第  
7 次-2 (類型一)



圖 6-3. 280°C-5cm-第  
7 次-3 (類型一)



圖 6-4. 280°C-5cm-第  
7 次-4 (類型一)



圖 6-5. 280°C-5cm-第  
7 次-5 (類型一)



圖 6-6. 280°C-5cm-第  
7 次-6 (類型一)



圖 6-7. 280°C-5cm-第  
7 次-7 (類型一)

## 二、探討滴落高度的差異對萊頓佛羅斯特效應的影響

結果發現，在滴落高度 5cm 和 10cm 的狀況下，不同溫度的結果如表 5 和圖 7。顯示 230°C 和 250°C 時會受到滴落高度改變而改變，280°C 時則否。230°C 時滴落高度增加，向外產生的小水珠增加；250°C 時滴落高度增加，水滴不會完全破裂，反而會留下少部分無法形成水珠。

表 7. 滴落高度 5cm-10cm，在不同溫度下的類型次數分布

次數	230°C -5cm	230°C -10cm	250°C -5cm	250°C -10cm	280°C -5cm	280°C -10cm
類型一	10	0	0	0	10	10
類型二	0	10	0	1	0	0
類型三	0	0	0	9	0	0
類型四	0	0	10	0	0	0

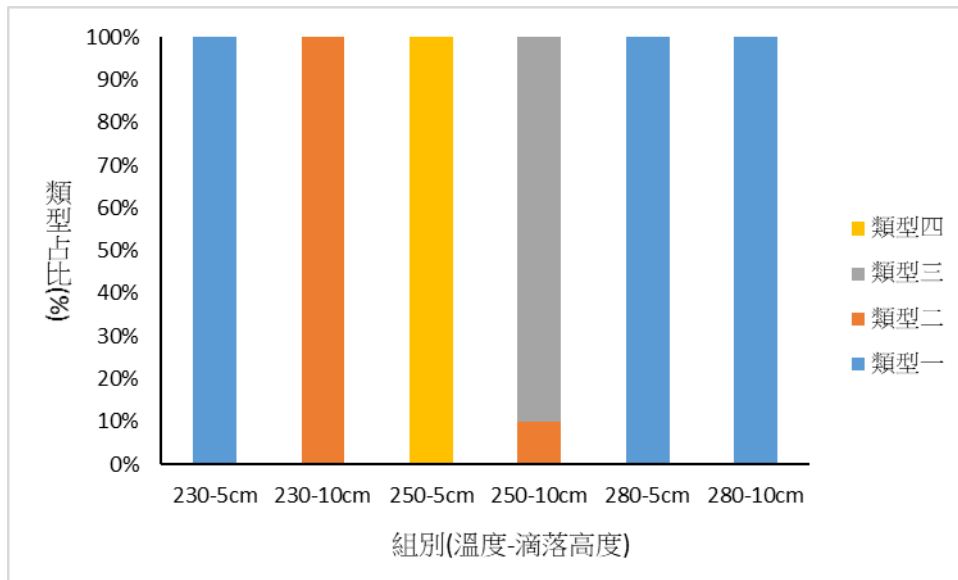


圖 7. 滴落高度 5cm 和 10cm，在不同溫度下的類型次數百分比



圖 8-1. 230°C-10cm-第 7 次-1 (類型三)



圖 8-2. 230°C-10cm-第 7 次-2 (類型三)



圖 8-3. 230°C-10cm-第 7 次-3 (類型三)



圖 8-4. 230°C-10cm-第 7 次-4 (類型三)



圖 8-5. 230°C-10cm-第 7 次-5 (類型三)



圖 8-6. 230°C-10cm-第 7 次-6 (類型三)



圖 8-7. 230°C-10cm-第 7 次-7 (類型三)



圖 9-1. 250°C-10cm-第 1 次-1 (類型三)



圖 9-2. 250°C-10cm-第 1 次-2 (類型三)



圖 9-1. 250°C-10cm-第 1 次-1 (類型三)



圖 9-1. 250°C-10cm-第 1 次-1 (類型三)



圖 10-1. 280°C-10cm-第 6 次-1 (類型一)



圖 10-2. 280°C-10cm-第 6 次-2 (類型一)



圖 10-3. 280°C-10cm-第 6 次-3 (類型一)



圖 10-4. 280°C-10cm-第 6 次-4 (類型一)



圖 10-5. 280°C-10cm-第 6 次-5 (類型一)



圖 10-6. 280°C-10cm-第 6 次-6 (類型一)



圖 10-7. 280°C-10cm-第 6 次-7 (類型一)

## 伍、討論

### 一、探討加熱板的溫度差異對萊頓佛羅斯特效應的影響

1. 結果中我們發現在相同滴落高度(5cm)下，250°C 的結果和其他溫度完全不同，我們推測因為高度不高，所以水滴產生的噴濺效果不大，在 230°C 時因溫度較低產生的蒸汽層少，所以僅有部分噴濺出去的小水珠，因其體積小，所以蒸汽足以使其漂浮，但大部分的水只能在滴落處沸騰轉為蒸氣，同理，280°C 因溫度較高，瞬間產生的蒸汽量較多，反而把要噴濺出去的多數水珠包覆集中在滴落處，加上溫度高，水在沸騰時的蒸氣和水流動的現象導致水滴有旋轉現象(圖 6、圖 10)。而 250°C 蒸氣量介於兩者之間，蒸氣可以包覆噴濺或破裂的水滴形成水珠，但又不曾多到一次包覆住大部分的水滴，所以才會呈現許多小水珠四散的樣子，有較明顯的萊頓佛羅斯特效應。
2. 張峻豪等人(2012)提出產生萊頓佛羅斯特現象時會有兩種臨界溫度和穩定溫度的差異，臨界溫度是指水珠開始可以在加熱板上形成的最低溫度，但停滯時間無法持久，約為 1~3 秒，可推測蒸氣膜開始形成的溫度是臨界溫度，而穩定溫度是指在加熱板上可形成與滴管所滴出水珠相近大小的最低溫度，水珠可在加熱板上停留一段較長時間，另外，不同材質的形成效應的臨界溫度和穩定溫度各不相同。Lin 等人(2021)發現在低基板溫度下，有少量的蒸汽和氣泡流在液滴底部生成，此時旋轉率與基板溫度呈正相關。當基板溫度升高，進入轉變沸騰區域時，底部產生的蒸汽和氣泡流變得更為激烈，此時旋轉率達到

一個局部最大值或平台狀態。萊頓佛羅斯特溫度點以下的水滴會產生自旋運動，而不是快速蒸發或破裂的現象。這種現象被描述為水滴在固體基板上產生陀螺式自旋，而不是快速蒸發或破裂。水滴的自旋運動是由表面微結構中的氣泡流視粘性應力觸發的，並且在表面粗糙度和固液接觸區域較大時，發生自旋的機會更多。

3. Bouillant 等人(2018)以矽晶圓作為加熱平板，加熱到在攝氏 300 到 350 度之間時才會產生萊頓佛羅斯特現象。我們推測由於我們使用的是晶圓片，需要到達 300°C 才算是萊頓佛羅斯特溫度點，水滴才會有穩定懸浮現象，而結果中 280°C 的特殊旋轉現象，是因為水溫還沒有到穩定的萊頓佛羅斯特溫度點所致。
4. 原先實驗所要採用溫度包含 300°C 以上，但受限於器材的選用，當我們以手機拍攝時，溫度達到 300°C 以上，大概 2-4 部影片的拍攝後，手機便會過熱而程式會無法使用，考慮到若一直將手機裝上攝影架再拆下來，反反覆覆可能會造成拍攝角度等不同，便將操縱變因的溫度設定在 300°C 以下，如果未來能有更耐熱的器材，應該能拍攝到更高溫時的狀況來驗證我們的猜想。

## 二、探討滴落高度的差異對萊頓佛羅斯特效應的影響

1. 在不同滴落高度時理論上高度增加，噴濺出去的水珠應該增加，而滴落碰撞時產生的接觸面積應該增大。在 230°C 的確因向外噴濺較多，所以小水珠形成較多，250°C 也因為接觸面積增大蒸氣無法完全包覆，所以有少部分無法形成水珠而在原地沸騰消失，但是 280°C 在不同高度下狀況相同，推測是因為接近穩定的萊頓佛羅斯特溫度點，所以瞬間產生的大量蒸汽將要噴濺出去的水包住，但又因溫度不足只能原地呈現沸騰旋轉現象。
2. 雖然這次使用滴定管已經比滴管更能控制水滴大小，但在實驗過程中仍會出現旋鈕轉過頭或是橡皮管內殘留水滴，導致水滴過大的失敗情形，下次可以參考李威果等人（2013）的方式使用醫療器材來替代。

## 陸、結論

- 一、未達到穩定溫度前，溫度升高會使蒸氣量增加，加熱平面上的水滴則會因蒸氣量不同而有不同變化。
- 二、接近穩定溫度的水滴會有旋轉的現象。
- 三、未達到穩定溫度前，滴落高度會影響水滴的噴濺程度和接觸加熱底板的面積，進一步造成加熱平面上的水滴形狀有不同變化。

## 柒、未來展望

- 一、利用不同材質和結構的加熱平面探索對水滴的萊頓佛羅斯特效應影響。
- 二、嘗試不同介面，例如將微型加熱固體放到水面上觀察變化。
- 三、嘗試萊頓佛羅斯特效應的應用，例如劉又瑋（2021）提到的清潔表面，或是利用水滴的移動或自旋轉，來推動微型物體。

## 捌、參考資料

Bouillant, A., Mouterde, T., Bourriane, P., Lagarde, A., Clanet, C., & Quéré, D. (2018). **Leidenfrost wheels**. *Nature Physics*, 14(12), 1188-1192.

Lin, Y., Chu, F., Ma, Q., & Wu, X. (2021). **Gyroscopic rotation of boiling droplets**. *Applied Physics Letters*, 118(22).

Taras Kul(2017)。 **Leidenfrost Effect Science Toy**。  
[https://youtu.be/-MFj\\_AW9OSs?si=ZcHETDZN5\\_eRtqDe](https://youtu.be/-MFj_AW9OSs?si=ZcHETDZN5_eRtqDe)

李威果、胡耀傑、彭胤傑（2013）。 **好聽的鐵板燒—低溫液體撞擊加熱板之聲音研究探討**。  
中華民國第 53 屆全國中小學科學展覽會。

林子怡、葉亮辰、李命曜（2020）。熱鍋上的舞者-聚丙烯酸鈉的 Leidenfrost 效應分析。中華民國第 60 屆全國中小學科學展覽會。

林宥君、楊喬如、陳榆滢、許軒豪、林琬婷、陳巧芸（2004）。誰是兇手？。中華民國第 44 屆全國中小學科學展覽會。

香港城市大學（2022）。「結構熱裝甲」解決逾 260 年來液體冷卻極端高溫失效的世界級難題。 <https://www.cityu.edu.hk/zh-hk/research/stories/2022/01/27/new-structured-thermal-armour-achieves-liquid-cooling-above-1000degc-overcoming-challenge-leidenfrost-effect>

泰菱有限公司（無日期）。紅外線溫度計與應用需知。  
[https://www.tecpel.com.tw/ou/ditc.html?no\\_redirect=true](https://www.tecpel.com.tw/ou/ditc.html?no_redirect=true)

張定堯、吳庭葦（2011）。犯罪現場—血跡的研究。中華民國第 51 屆全國中小學科學展覽會。

張芳瑀（2011）。水滴在高溫鋸齒狀金屬表面上的爬坡現象。2011 年臺灣國際科學展覽會。

張峻豪、張承宗、羅子捷（2012）。水「升」火熱——探討水珠在高溫下彈性與移動狀態。中華民國第 52 屆全國中小學科學展覽會。

莊皓亘、蔡宇綸（2021）。微結構下的魔術師——萊頓佛斯特的溫度效應。中華民國第 61 屆全國中小學科學展覽會。

黃子恆、周易琦（2021）。紙面上的煙火-液體滴落的狀態與噴濺效果。2021 全國科學探究競賽。

劉又瑋（2021）。精密儀器難清理？科學家從煮菜日常得靈感 他曝「熱鍋上水珠」將成救星。  
<https://www.ftvnews.com.tw/news/detail/2021903W0050>

戴明鳳等（2009）。熱電偶式與熱敏式電子溫度器。  
<http://www.phys.nthu.edu.tw/~gplab/file/thermocouple.pdf>