中華民國第 60 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國中組　物理科

第一名

030104

熱鍋上的舞者-聚丙烯酸鈉的 Leidenfrost 效應分析

學校名稱：宜蘭縣立國華國民中學

作者：	指導老師：
國二 林子怡	林子丞
國二 葉亮辰	邱旻昇
國二 李命曜	

關鍵詞：Leidenfrost、Helmholtz、頻率

得獎感言

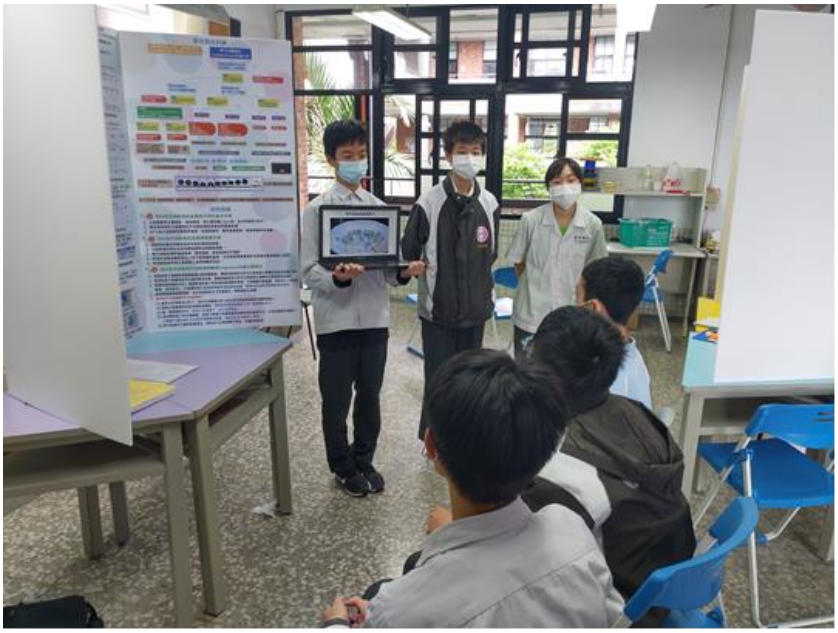
一步一腳印，成功並非偶然！

在縣展時，大家都認為我們的作品不會得到青睞，但意外地獲得推薦參加全國科展的資格。在我們研究中，因實驗儀器受限，有些實驗討論都屬於旁敲側擊式的推論，因此我們與老師不抱有太大的自信。然而，我們再度跌破了眾人的眼鏡，得到全國第一的殊榮！我們相信這並不是什麼偶然的結果，是憑藉著我們的努力所得來的。

從縣展到國展，我們也做了許多改變，嘗試設計新的實驗，並驗證與修改物理模型，最後練習無數次的口說與問答，從中不斷遭受挫折。俗話說：「失敗為成功之母」，我們也在其中一點一滴地成長，透過不斷的討論、測試、修改、實驗、分析，將看似毫無關係的實驗結果，一步一腳印，推論出看似簡單的物理模型。其實背後是好幾個夜晚沉思以及與同學、老師經過無數次激烈討論後得到的心血結晶。

在這個研究中我們學到的不僅僅是物理的知識，其中更多的是如何將一個實驗，從無到有完整的撰寫成一篇報告，也讓我們了解到一篇報告的產出，是需要花費許多心血及精力的。當然指導老師也扮演重要的角色，教導我們許多報告中的小技巧，也教導我們許多課本上不會有的知識。

我們也都非常感謝組員，因為每位組員都必須扮演好自己的角色，才能讓研究順利的完成，如果不是組員的相互扶持及陪伴，肯定無法得到這樣的殊榮。最後，如果沒有老師及家長們的共同支持，我們也無法得到這麼高的成就，因此，我們非常感謝他們。今後，我們會好好珍惜這份榮譽，繼續努力學習，踏上未來的道路。



在校加強口說與問答，進行暖身

抵達國展現場，準備迎接挑戰

努力終獲回報，獲得大會首獎！

摘要

將水晶寶寶放置於加熱板，會不斷跳動並發出高頻聲音。本研究透過錄音及錄影進行分析，探討其跳動的原理及特性。研究發現：水晶寶寶於加熱板溫度 80℃ 開始出現穩定跳動，並發出高頻聲音。溫度越高，跳動高度越低且聲音頻率越高。並發現水晶寶寶為符合虎克定律之彈性固體，其聲音頻率與$\sqrt{k}$成正比，符合簡諧運動的型式。進行動力學分析發現，水晶寶寶於加熱板撞擊之恢復係數穩定於 1 附近震盪，且發現水晶寶寶撞擊加熱板時會噴發氣體。我們嘗試於加熱板上方放置壓電晶片進行撞擊，發現溫度越高，產生電壓越高，可透過碰撞實現能量轉換。最後結合聲音及動力學分析，提出物理模型針對觀測之現象進行解釋，論證此現象屬於高含水彈性固體的 Leidenfrost 效應。

壹、 研究動機

老師曾經在理化課的熱學單元，給我們做了一個滴水在高溫鋁罐上的實驗，神奇的是水滴會像球一樣在鋁罐上滾動，不會馬上被高溫給蒸發掉。後來經過一堂課的實驗與討論才逐漸了解背後的原理，原來是 Leidenfrost 效應所造成的！

圖 1-1：水晶寶寶於加熱平底鍋跳動影片
(影片來源：https://bit.ly/2VUhimU)

而我們在搜尋此效應的相關資料時，又在網路上看到一個很有趣的影片，把水晶寶寶放在高溫的平底鍋裡，水晶寶寶便會在上面持續跳動，並發出尖叫聲！這引起我們相當大的興趣，因此我們使用了水晶寶寶在加熱板上測試，確實會發生本現象（可點擊觀看實驗影片）接著查詢了相關資料，發現水晶寶寶是一種高分子聚合物，名為聚丙烯酸鈉。但究竟為什麼聚丙烯酸鈉會發生這種現象？這是否也是一種 Leidenfrost 效應？我們便展開了一系列的研究。

貳、 研究目的

一、探討聚丙烯酸鈉與加熱板作用的基本性質

實驗 0：觀察聚丙烯酸鈉於高溫金屬板上的行為。

實驗 1：聚丙烯酸鈉於不同吸水量的物理性質分析。

實驗 2：聚丙烯酸鈉穩定跳動現象的臨界溫度分析。

實驗 3：加熱板對聚丙烯酸鈉跳躍運動之影響分析。

二、探討聚丙烯酸鈉的高頻彈跳聲性質

實驗 4：釋放高度對跳動聲音頻率的影響分析。

實驗 5：加熱板溫度對跳動聲音頻率的影響分析。

實驗 6：球體直徑對跳動聲音頻率的影響分析。

實驗 7：聚丙烯酸鈉戳洞次數對跳動聲音頻率的影響分析。

三、探討聚丙烯酸鈉於加熱板跳躍與 Leidenfrost 效應的關聯性

實驗 8：聚丙烯酸鈉與加熱板作用之運動學分析。

實驗 9：聚丙烯酸鈉與加熱板作用之噴發氣體測試。

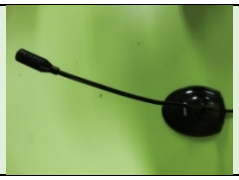
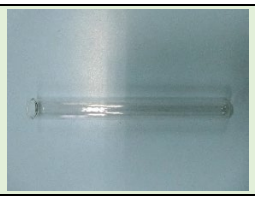
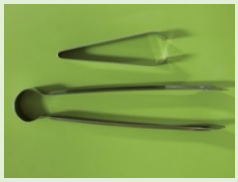
四、探討聚丙烯酸鈉於高溫材質表面跳躍的應用

實驗 10：聚丙烯酸鈉撞擊壓電晶片之發電測試。

參、 研究設備及器材

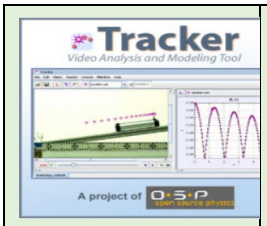
一、設備器材

表 3-1：各式實驗器材

			
電子加熱攪拌器	紅外線測溫儀	指向式麥克風	高速攝影機
			
試管	金屬夾	游標卡尺	鋁合金金屬盤
滴管	鐵架	智慧型手機	水晶寶寶

二、分析軟體：Tracker、Audacity、Praat、Excel、Scratch

表 3-2：各式應用軟體

				
Tracker	Audacity	Praat	Excel	Scratch

肆、 研究過程與方法

一、研究架構

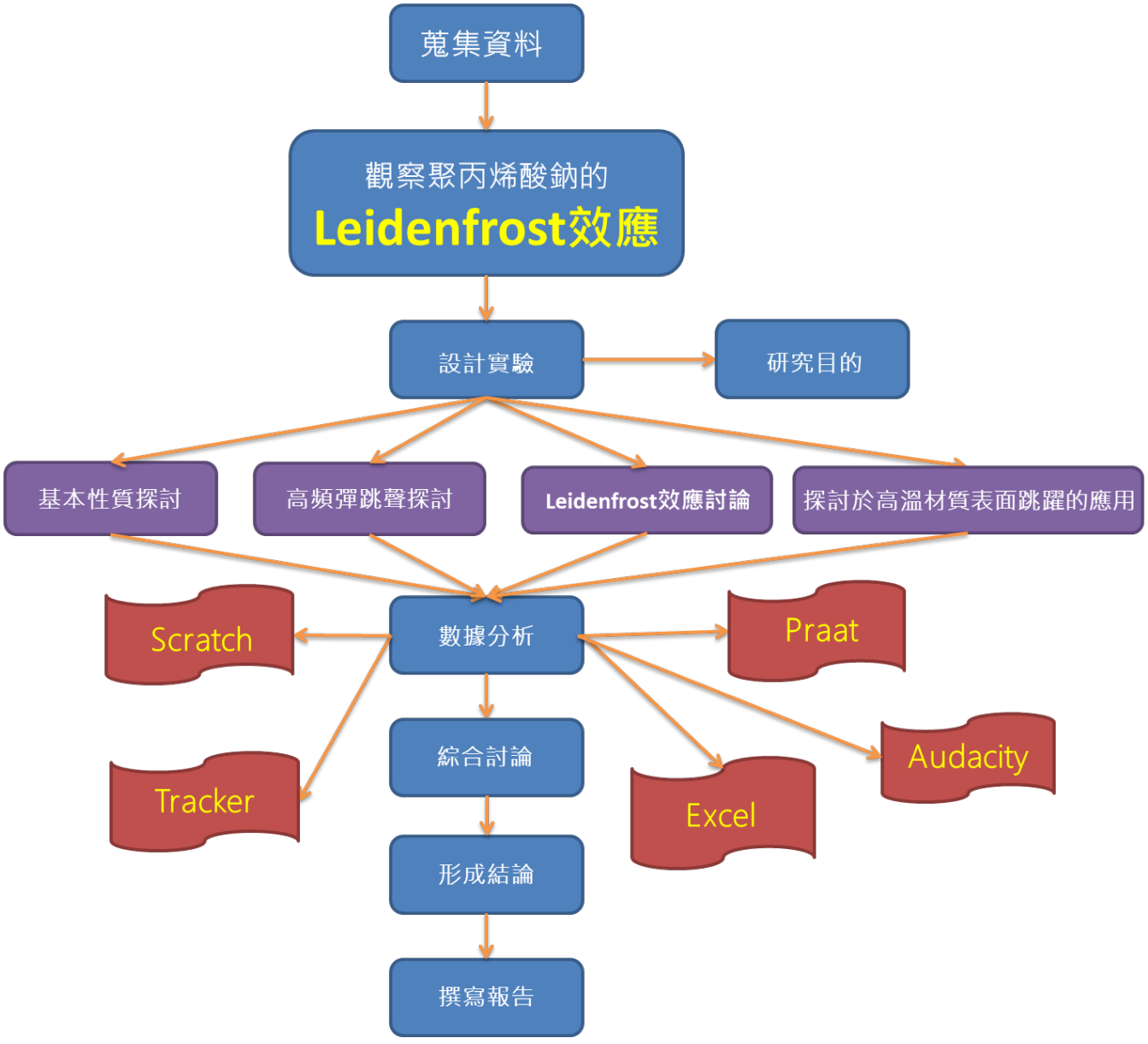


圖 4-1：研究過程架構說明

二、研究原理

(一) Leidenfrost 效應

一般的水滴若滴在溫度略高於水的沸點(100℃)的金屬表面上，水通常會迅速沸騰蒸發掉。然而當溫度更高，達到 Leidenfrost Point 時，水滴表面會產生出一層有隔熱作用的蒸氣，如右圖 4-2 所示。由於空氣的低熱傳導率，將使液體沸騰的速度大幅減慢，並導致出現水滴在金屬表面上滾動的現象。

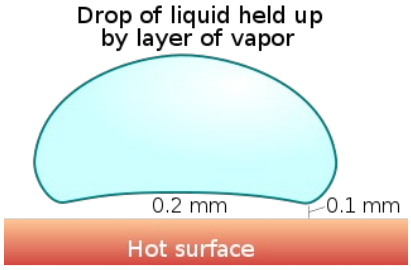


圖 4-2 : Leidenfrost 效應

(圖片來源: https://bit.ly/2UKCE3M)

(二) 聚丙烯酸鈉

為水晶寶寶的主要成分，屬於高吸水性聚合物，進行交聯後構成網狀結構，達到極佳的吸水率，可吸收 200 到 300 倍的水分。如下圖 4-3 所示，吸收水分子後，由於網格碳鏈的彈性，以及親水性官能基對水分子的氫鍵，可將其束縛於其網狀結構內，不易從中溢出，達到半透膜的效果。

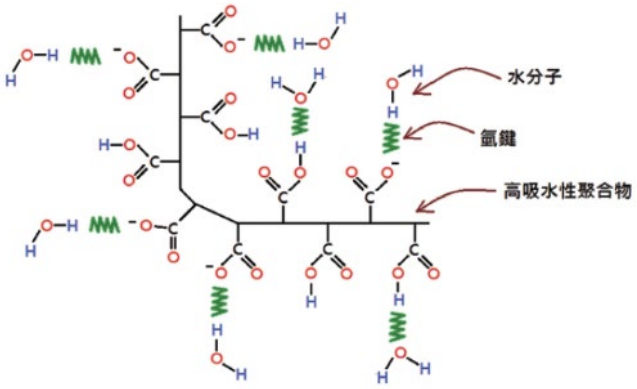


圖 4-3：高吸水性聚合物與水分子的氫鍵作用示意圖

(圖片來源: https://bit.ly/39wjAMg)

(三) 牛頓第二運動定律

一個涉及到物體運動的理論，數學式為$F = ma$，又稱為加速度定律。根據這個定律，任意物體的運動所出現的改變，都是源自於外力的施加於這物體，物體所受到的合力等於質量與加速度的乘積，而加速度與合力同方向。設定物體的質量不變，則物體的加速度與所受到的合力成正比，設定物體所受到的合力不變，則物體的加速度與質量成反比。

(四) 牛頓第三運動定律

又稱為作用力與反作用力，當兩個物體交互作用時，彼此施加於對方的力，其大小相等、方向相反且作用在同一條直線上。任何一道力都可以被認為是作用力，而其對應的力自然地成為伴隨的反作用力。這成對的作用力與反作用力稱為「配對力」。

(五)　恢復係數

恢復係數即為兩物體碰撞後的速度與碰撞前的速度比值。數學式為 $e = \frac{V_f\,(\text{分離速度})}{V_i\,(\text{接近速度})}$，假若恢復係數為 1，則此碰撞為彈性碰撞；假如恢復係數小於 1 且大於 0，則此碰撞為非彈性碰撞；若恢復係數為 0，則此碰撞為完全非彈性碰撞，兩個物體黏貼在一起。恢復係數大於 1，代表非彈性碰撞，且過程中有給予額外的能量。

(六)　彈簧的虎克定律與簡諧運動 SHM（Simple Harmonic Motion）

虎克定律的一個常見例子是彈簧。在彈性限度內，彈簧的彈力 F 和彈簧的長度變化量 x 成線性關係，即：$F = -kx$。負號代表彈簧產生的彈力與其伸長(壓縮)的方向相反，稱為回復力。若質量 m 之物體在運動的過程中的受力符合虎克定律的形式，我們可稱其為簡諧運動 SHM，即是最基本的一種機械振動。其振動頻率可表示為：$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}$。

(七)　Helmholtz(亥姆霍茲)效應

取一個空瓶子，對著瓶口吹氣時，瓶口的空氣柱產生振動，如下圖 4-4 所示。瓶口振動的空氣柱與瓶身內的空氣相互作用產生了共振，因此瓶口就會發出聲音。瓶口的空氣柱可以看作是一個由空氣組成的質量塊，當瓶口空氣柱受到擾動時，瓶內的空氣就會對瓶口的空氣柱產生作用力，這時瓶內的空氣就相當於一個彈簧。瓶口空氣柱向瓶內運動時，內部的氣體就會受到壓縮，產生一個向外推力，在推力的作用下，空氣柱的向內運動就會受阻，轉而向外運動。由於慣性的作用，空氣柱會衝出管口，這時空氣腔內的氣體就會被拉伸而膨脹，對空氣柱產生一個向內的拉力，這樣空氣柱就開始向內運動，**於是空氣柱就會開始在管口位置處不斷的來回振動，符合簡諧運動的形式，並產生了聲音。**

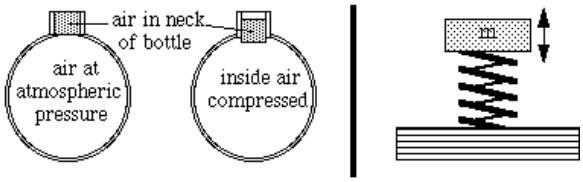


圖 4-4：Helmholtz 效應示意圖
(圖片來源: https://bit.ly/37pxEHS)

三、名詞定義

(一) 起跳臨界溫度：聚丙烯酸鈉跳動所需要的最低溫度(約為 80℃)。

(二) 加熱板：放置於加熱攪拌器上，並進行實驗用的鋁合金金屬板。

(三) 穩定高度：如下圖 4-5，聚丙烯酸鈉持續一段時間跳動後，其彈跳高度維持穩定之高度。

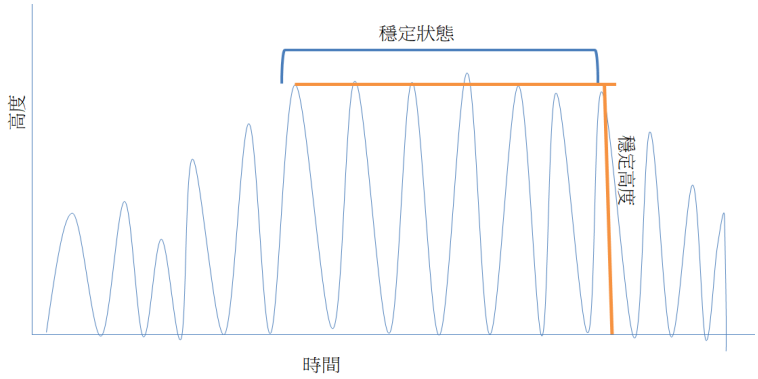
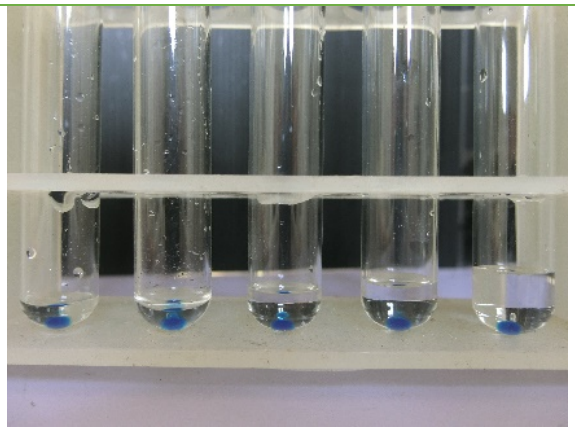
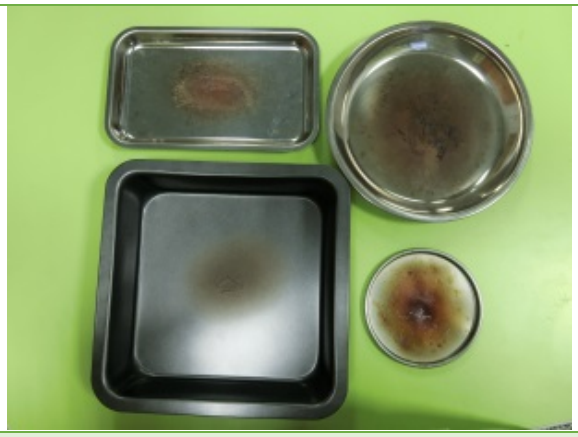


圖 4-5：穩定狀態高度示意圖

四、實驗步驟

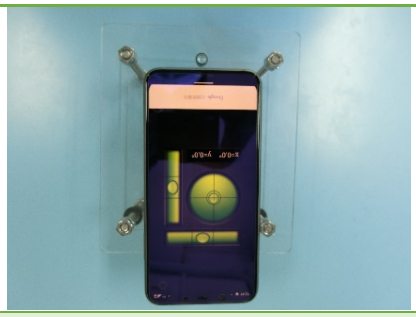
(一) 訂定聚丙烯酸鈉種類與加熱板材質

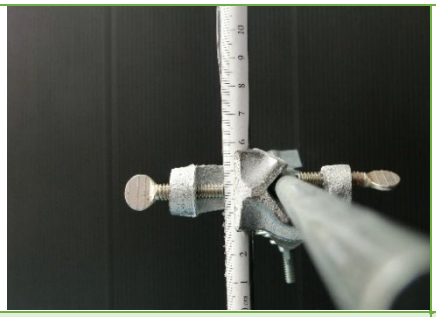
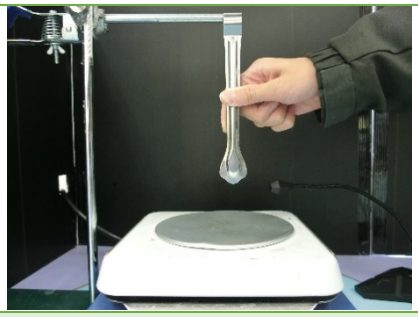
表 4-1：選定方便進行大量實驗之材料

	
選定實驗用聚丙烯酸鈉(水晶寶寶)： 市售水晶寶寶種類眾多，有珍珠大小，也有拳頭大小。另外生長出來的水晶寶寶有球體與較不規則的形狀（橢圓體）。我們選定珍珠大小、且接近球體的水晶寶寶來進行後續實驗。	**測試進行實驗時最穩定的加熱板材質及形狀：** 測試許多種市面上可取得的金屬板，有不鏽鋼金屬盤、奶粉罐盤子、烤箱烤盤、鋁合金蛋糕烤盤。經測試後鋁合金蛋糕烤盤有較佳的耐用度，因此選定其作為後續實驗之加熱板。

(二) 儀器架設及實驗技巧的精進

表 4-2：具體實驗步驟說明

		
1.自組攝影架：以壓克力板、長六角螺栓、螺帽、組成攝影架放置攝影機。	**2.校正水平：**以手機的水平儀校正水平，提高攝影及分析時的精確度。	**3.設置背景：**使用黑色背景過濾光線，降低干擾以方便後續分析。

		
4.固定儀器：固定紅外線測溫儀並與電子加熱攪拌器對齊，將指向式麥克風對準下方的加熱板。	**5.設置水晶寶寶放置點**：調整鐵架台中央的橫桿來改變水晶寶寶的放置位置。	**6.放置水晶寶寶進行實驗**：以金屬夾卡在鐵架台中央橫桿上並放下水晶寶寶。

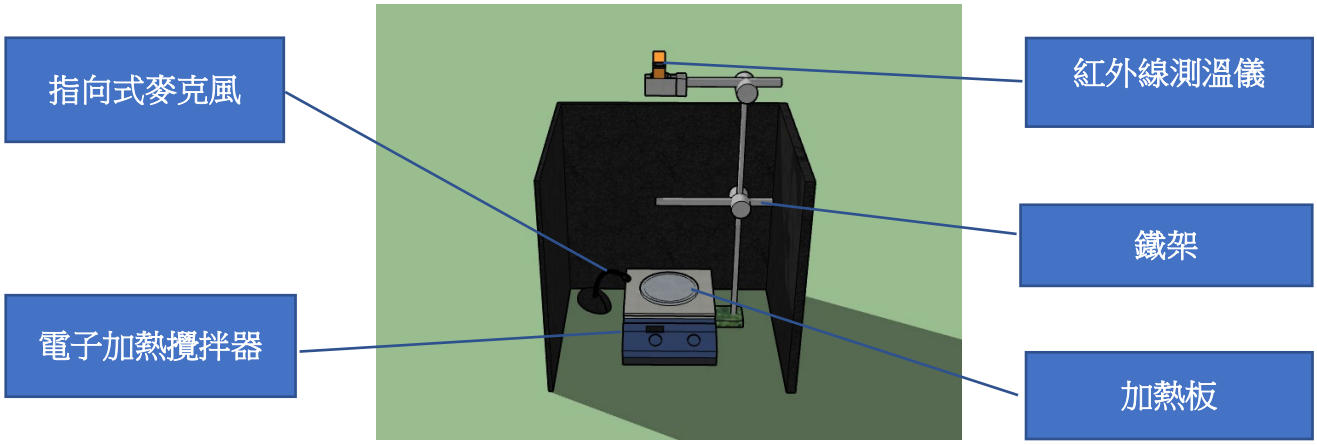
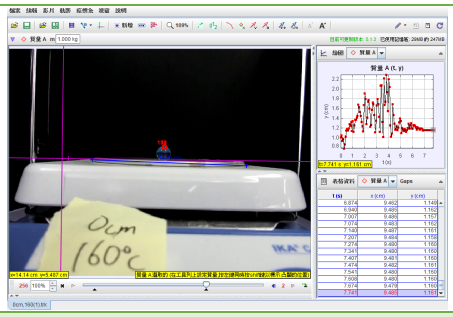
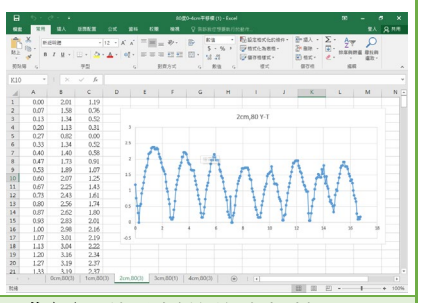


圖 4-6：實驗裝置詳細說明示意圖

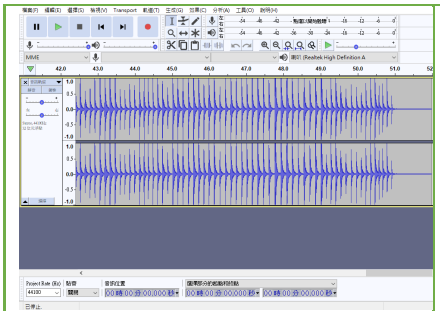
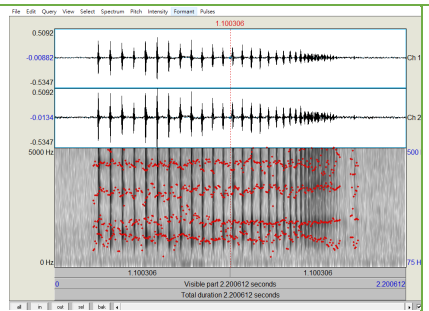
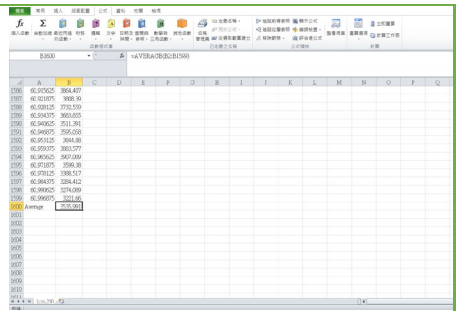
(三) 以高速攝影機錄影後匯入電腦進行分析

表 4-3：實驗影像分析

		
1.錄影：使用高速攝影機以 240 幀(FPS)進行錄影。	**2.分析**：匯入電腦並以運動學分析軟體 Tracker 進行分析。	**3.作圖**：將分析後的資料檔匯入 Excel 繪製散佈圖。

(四) 以指向式麥克風錄音後匯入電腦進行分析

表 4-4：實驗音訊分析

		
1.錄音：使用指向式麥克風並以 Audacity 進行錄音。	**2.分析**：匯入電腦並以聲音分析軟體 Praat 進行分析。	**3.作表**：將分析後的資料檔匯入 Excel 並取平均值。

伍、 研究結果與討論

【研究一：探討聚丙烯酸鈉與加熱板作用的基本性質】

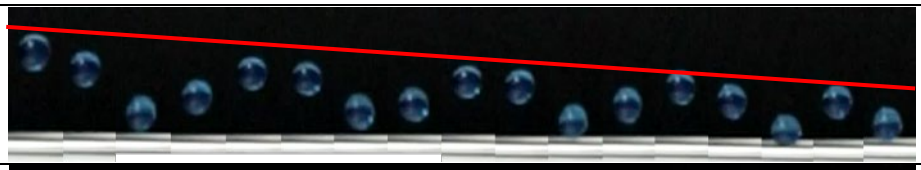
實驗 0：觀察聚丙烯酸鈉於高溫金屬板上的行為

在看過網路上的影片後，讓我們對水晶寶寶(聚丙烯酸鈉)於高溫金屬板上跳動的現象十分好奇，於是進行了前置實驗，針對其在高溫金屬板上的行為進行測試。

一、實驗方式

於金屬板進行實驗，且同時進行錄音，並將觀察到的行為做成分解圖。

二、實驗結果(可點擊📻圖示觀看實驗影片)

分類	水晶寶寶於金屬板之行為分解圖
1.常溫跳動 📻	
2.高溫跳動 📻	
3.高溫 滾動、滑動 📻	
4.高溫爆裂 📻	

三、分析討論

(一) 運動現象討論

我們證實水晶寶寶置於高溫的金屬板時，確實會發生持續跳動的現象，並發現水晶寶寶在每次跳動的高度皆無明顯變化，對比常溫時水晶寶寶跳動的高度則是不斷下降。我們也發現水晶寶寶在 200℃，釋放高度 0cm 時，會在金屬板上滑動並滾動，過程中不會發出任何聲音，且可持續很長一段時間。水晶寶寶在滑動或滾動持續一

段時間後，水晶寶寶停止移動，部分黏在加熱板上，一段時間後爆裂。**最常觀察到的現象為水晶寶寶在加熱板上持續穩定跳動，因此本研究將以此現象做為主要的研究目標。**

(二) 聲音現象討論

聲音的部分，如下圖 5-0-1，發現水晶寶寶在撞擊高溫加熱板的瞬間會發出高頻聲。經過實驗也證實水晶寶寶碰撞到常溫金屬板時，幾乎不會發出任何聲音。因此能**證實此聲音會產生必有另外的原因，可能與高溫材質表面有極高的關聯性，並非來自於單純的碰撞！**至於此聲音產生的原因以及其與 Leidenfrost 效應的關聯性我們將會在後續的實驗繼續進行探討。

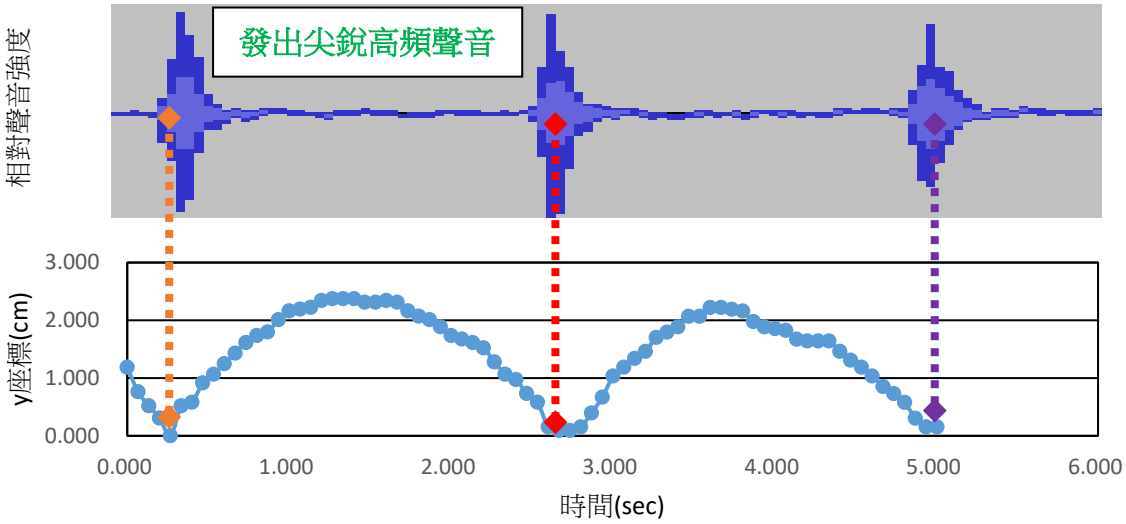


圖 5-0-1：80，2cm 高度,相對聲音強度與時間關係圖比較(片段)

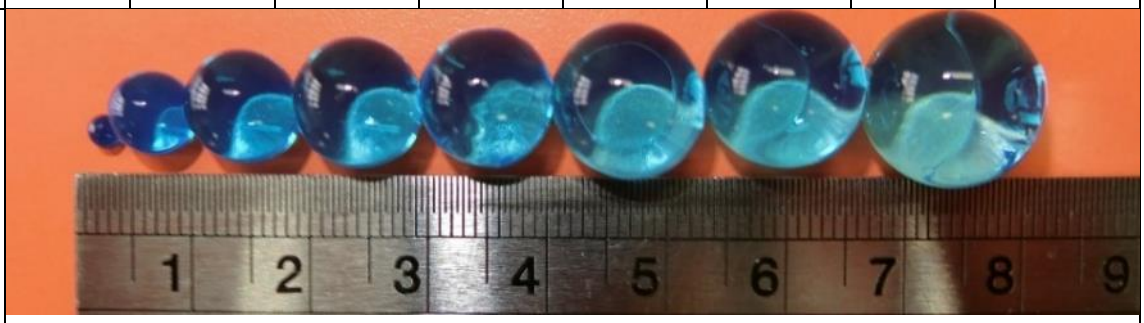
實驗 1：聚丙烯酸鈉於不同吸水量的物理性質分析

聚丙烯酸鈉吸水性非常強，為了訂定後續實驗所使用的水晶寶寶大小，我們首先設計了這個實驗，了解聚丙烯酸鈉的基本吸水性質。

一、實驗方式

在試管中每 0.2mL 作為一個單位進行配置，從 0.2mL 到 1.4mL，在其完全吸水成長後，測量直徑、質量及含水率並觀察其吸水狀況。

二、實驗結果

吸水量(mL)	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4
吸水狀況	 (由左至右分別為吸了 0.0、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.2、1.4mL 水的聚丙烯酸鈉)							
質量(g)	0.018	0.195	0.44	0.665	0.745	1.025	1.145	1.375
直徑(mm)	2.9	6.95	9.3	10.6	11.05	11.95	12.2	13.25
含水率	0.0%	90.8%	95.9%	97.3%	97.6%	98.2%	98.4%	98.7%

三、分析討論

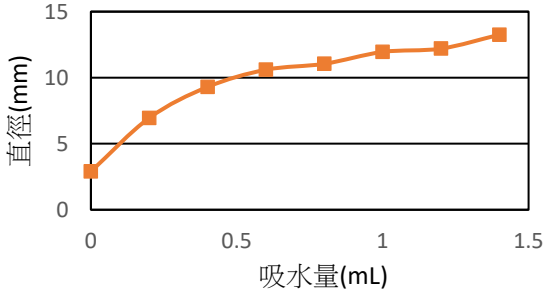


圖 5-1-1：直徑與吸水量之關係圖

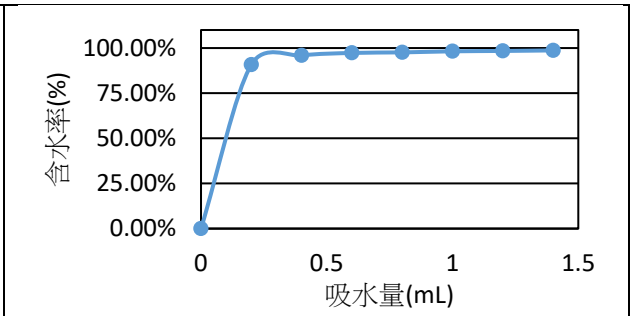


圖 5-1-2：含水率與吸水量之關係圖

如上圖 5-1-1 所示，我們可得知吸水量越多，直徑越長，體積越大。由於試管內徑會限制水晶寶寶成長，而 1.4mL 是試管大小所能讓水晶寶寶成長的吸水量上限。

而上圖 5-1-2 可以發現當吸水量為 0.2mL 時，含水率即可達到 90%以上。當吸水量到達 1.4mL 時，含水量接近 100%的飽和狀態。

吸水量小於 1.4mL 的水晶寶寶皆可以順利生長，但因為水量太少，於試管內分佈不均勻，導致無法每個面都接觸到水面，所以生長出來的水晶寶寶會有形狀不一的情況，因此我們選定 1.4mL 的吸水量進行往後實驗最為理想。

實驗 2：聚丙烯酸鈉穩定跳動現象的臨界溫度分析

為了初步了解高溫金屬板溫度對應之水晶寶寶跳動狀態，我們設計了這個實驗。

一、實驗方式

測試不同溫度的加熱板，於固定高度釋放，並觀察水晶寶寶能否穩定跳動。並針對**穩定跳動進行定義：如下圖 5-2-1 中有呈現規律的跳動且高度沒有明顯遞減的情況。**

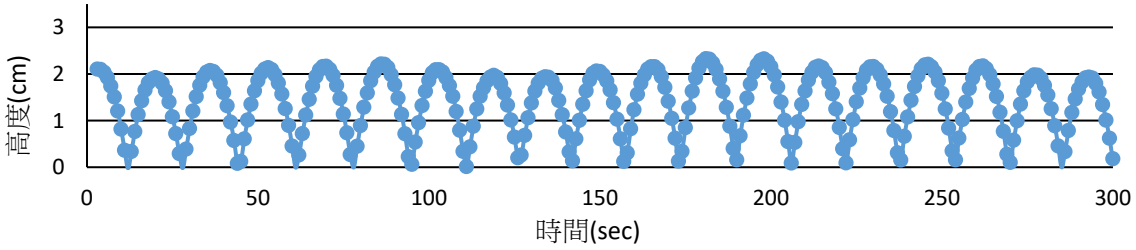


圖 5-2-1：200˚C，2cm 高度與時間關係圖

二、實驗結果 (可點擊圖示觀看實驗影片)

溫度	70°C	80°C	120°C
跳動情形	無法跳動	有跳動但持續時間不長	有跳動可持續維持一段時間

三、分析討論

水晶寶寶在 80°C 時，雖然跳動時間不長，但有穩定跳動的情形，所以我們認定 80°C 為水晶寶寶最低起跳溫度。

這個結果使我們非常訝異，經過文獻查詢，由林宇政等(2019)[1]指出，一般水滴於 220°C 才有機率發生 Leidenfrost 效應，但水晶寶寶在 80°C 時便能開始跳動，該溫度甚至未達沸點！和水珠有明顯差異，我們為了探討這到底是不是一種 Leidenfrost 效應，進行後續的實驗探討。

實驗 3：加熱板對聚丙烯酸鈉跳躍運動之影響分析

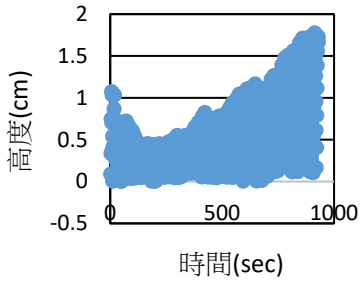
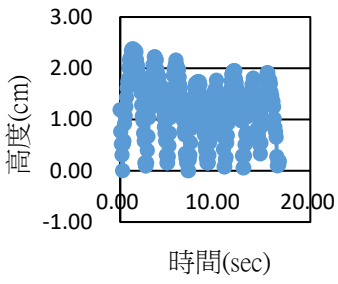
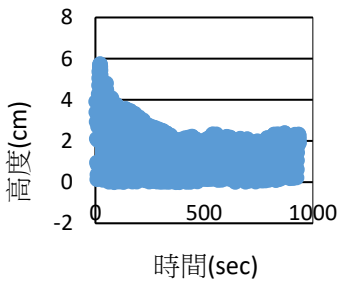
由實驗 0、1 我們得知水晶寶寶確實可在加熱板上持續穩定彈跳，我們想要更進一步的探討溫度變化對於水晶寶寶跳躍運動之影響，所以我們設計了這個實驗。

一、實驗方式

1. 於加熱板溫度 80˚C、120˚C、160˚C、200˚C 進行實驗。
2. 於初始條件(釋放高度)0cm、1cm、2cm、3cm、4cm 進行實驗。

二、實驗結果

1. 我們發現水晶寶寶可歸納為三種跳躍高度走勢，來自於三種初始釋放高度。

跳躍高度走勢	走勢 1	走勢 2	走勢 3
高度與時間關係圖			
初始釋放高度（相對於穩定高度）	釋放高度 < 穩定高度 (由低到高)	釋放高度 = 穩定高度 (高度不變)	釋放高度 > 穩定高度 (由高到低)

2. 將各釋放高度、溫度對應之平均穩定高度整理為下圖 5-3-1

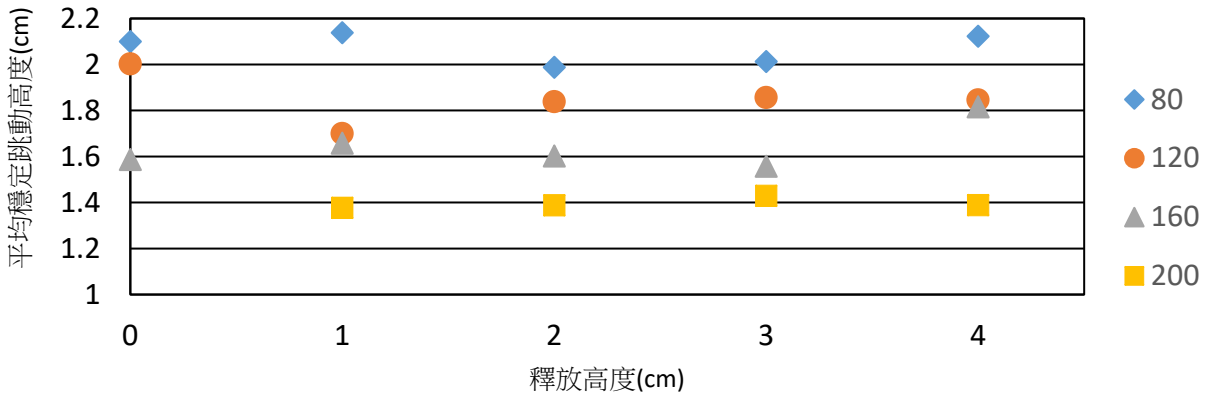


圖 5-3-1：穩定高度與釋放高度關係圖

三、分析討論

由上圖 5-3-1 可知，**釋放高度對於水晶寶寶的平均穩定彈跳高度並無顯著影響**。另外由下圖 5-3-2 可發現，**溫度越高，則平均穩定跳躍高度越低，兩者呈現線性負相關。**

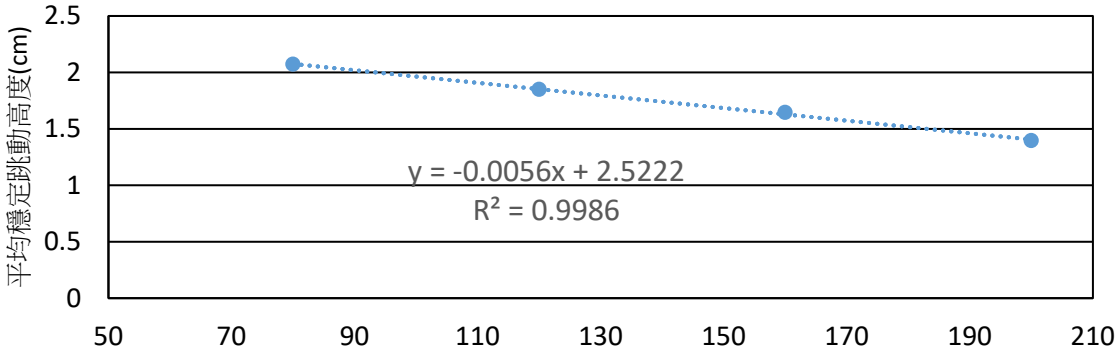


圖 5-3-2：平均穩定跳動高度與加熱板溫度關係圖

【研究二：探討聚丙烯酸鈉的高頻彈跳聲性質】

實驗 4：釋放高度對跳動聲音頻率的影響分析

經由實驗 0 的前置實驗，我們已初步確認，水晶寶寶於高溫金屬板上跳動之高頻聲音，來自於水晶寶寶與高溫金屬板撞擊之瞬間。因此我們設計一連串實驗，逐步進行抽絲剝繭，來探討其聲音生成的機制。

一、實驗方式

在加熱版溫度 160℃，釋放高度 0cm、1cm、2cm、3cm、4cm 進行實驗錄音，並分析頻率取平均值。

二、實驗結果

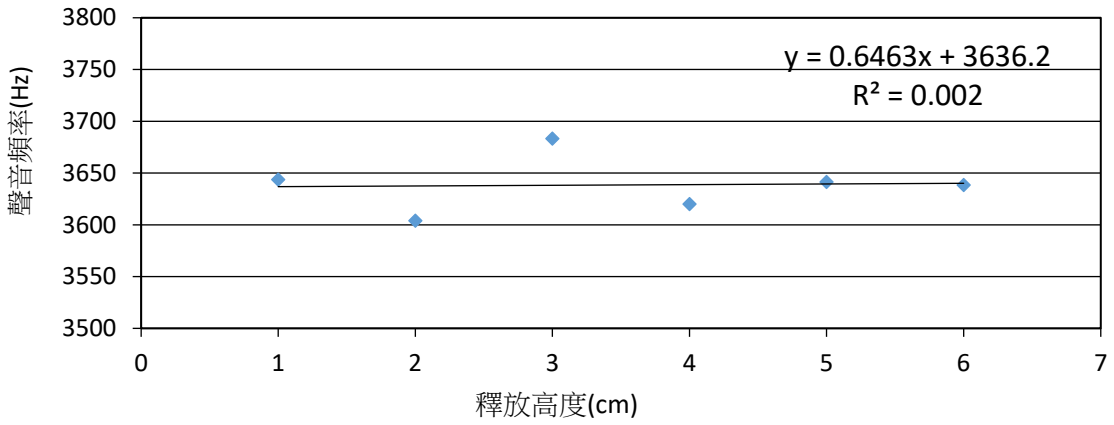


圖 5-4-1：聲音頻率與釋放高度關係圖

三、分析討論

我們之所以選定 160℃ 作為實驗使用的溫度，是因為 80℃ 無法持續維持穩定高度一段時間，且較不穩定，而 200℃ 則是沒有 0cm 的數據做為比較，較 160℃ 與 120℃ 溫度越高越穩定，所以我們決定使用 160℃ 的做實驗。

相關係數等於 0.002，代表 X 軸與 Y 軸關聯性極低，也就是說水晶寶寶的釋放高度對聲音頻率並無顯著影響。

實驗 5：加熱板溫度對跳動聲音頻率的影響分析

一、實驗方式

於不同溫度進行多次實驗錄音，並分析頻率取平均值。

二、實驗結果

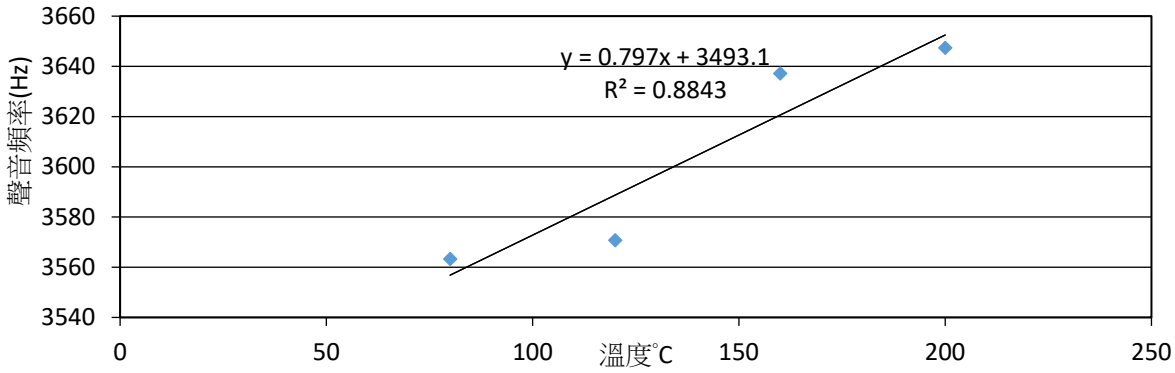


圖 5-5-1：聲音頻率與溫度的關係圖

三、分析討論

由上圖 5-5-1 我們可得知，有溫度愈高，頻率越高的趨勢，雖然沒有明顯的差異，但我們發現相較常溫時，加熱的頻率比無加熱時高出了許多。

實驗 6：球體直徑對跳動聲音頻率的影響分析

一、實驗方式

從實驗 1 中，我們了解了吸水量與球體直徑的關係，因此我們給予水晶寶寶不同水量 0.4mL、0.6mL、0.8mL、1.0mL、1.2mL、1.4mL 並在 160°C，2cm 處放置水晶寶寶，測量其聲音。

二、實驗結果

吸水量(mL)	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4
直徑(mm)	9.3	10.6	11.05	11.95	12.2	13.25
直徑倒數(1/mm)	0.107527	0.09434	0.090498	0.083682	0.081967	0.075472
聲音頻率(Hz)	3745.52	3730.19	3710.91	3698.464	3659.62	3647.68

三、分析討論

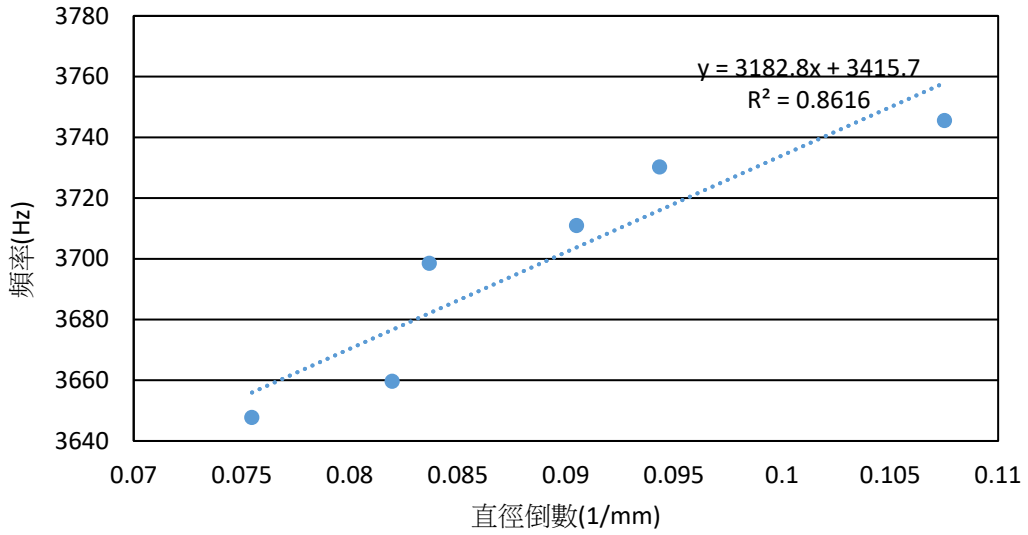


圖 5-6-1：聲音頻率與直徑倒數的關係圖

從上圖 5-6-1 可以發現，球體直徑倒數值越大時，聲音頻率就越高，兩者呈現線性正相關。

實驗 7：聚丙烯酸鈉戳洞次數對跳動聲音頻率的影響分析

一、實驗方式

1. 在水晶寶寶表面上均勻的使用針頭（25G，外徑 0.5mm）向球心戳洞，並且固定深度 2.5mm，示意圖如圖 5-7-1 所示。戳洞後於溫度 160℃ 之金屬板進行多次跳動實驗並錄音，再分析其頻率取平均值。

圖 5-7-1：戳洞示意圖

2. 如圖 5-7-2 所示，取一注射筒，將其底部剖開，並且在電子秤上固定。內部放入水晶寶寶，並使用不同質量的砝碼，穩定壓於活塞芯桿上，記錄水晶寶寶的形變量。首先確認其受力與形變量關係是否為線性關係，並且透過虎克定律計算其彈力常數 k。

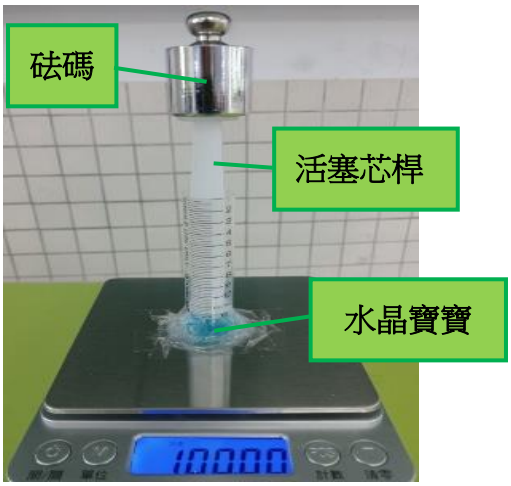


圖 5-7-2：彈性常數測量裝置

二、實驗結果

戳洞次數(次)	50	100	150
聲音頻率(Hz)	3826.76	3754.10	3690.98
彈力常數 k(gw/mm)	38.60	36.92	35.74

三、分析討論

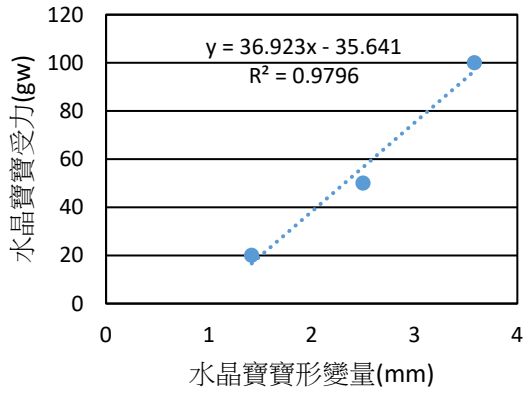


圖 5-7-3：戳 100 洞水晶寶寶受力與形變量關係圖

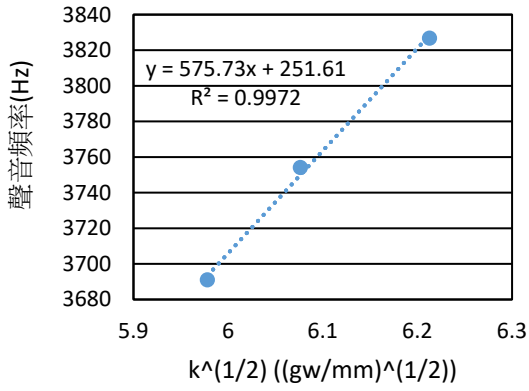


圖 5-7-4：聲音頻率與根號彈力常數大小之關係圖

由實驗結果我們可得知，有戳洞次數越多，頻率越低的趨勢。為了確認其聲音頻率是否與水晶寶寶的彈力常數有關係，我們首先確認其是否符合虎克定律，如圖 5-7-3 所示：以戳 100 洞之水晶寶寶為例，其受力與形變量成正比，確認其符合虎克定律。因此我們可以將整顆水晶寶寶視為無數個小彈簧的串並聯形式。

進一步我們測量了水晶寶寶在不同戳洞數下的彈力常數，將聲音頻率與根號彈力常數大小做成圖 5-7-4，發現其為線性關係，**符合簡諧運動振動頻率$f \propto \sqrt{k}$的形式。可將戳洞視為一種破壞彈簧並聯的過程，因此戳洞量越大，彈力常數越低。**

【研究三：探討聚丙烯酸鈉於加熱板跳躍與 Leidenfrost 效應的關聯性】

實驗 8：聚丙烯酸鈉與加熱板作用之運動學分析

一、實驗方式

無加熱和有加熱 160 度的進行實驗，繪製高度與時間的關係圖、速度與時間的關係圖、加速度與時間的關係圖進行比較。

二、實驗結果

(一)無加熱

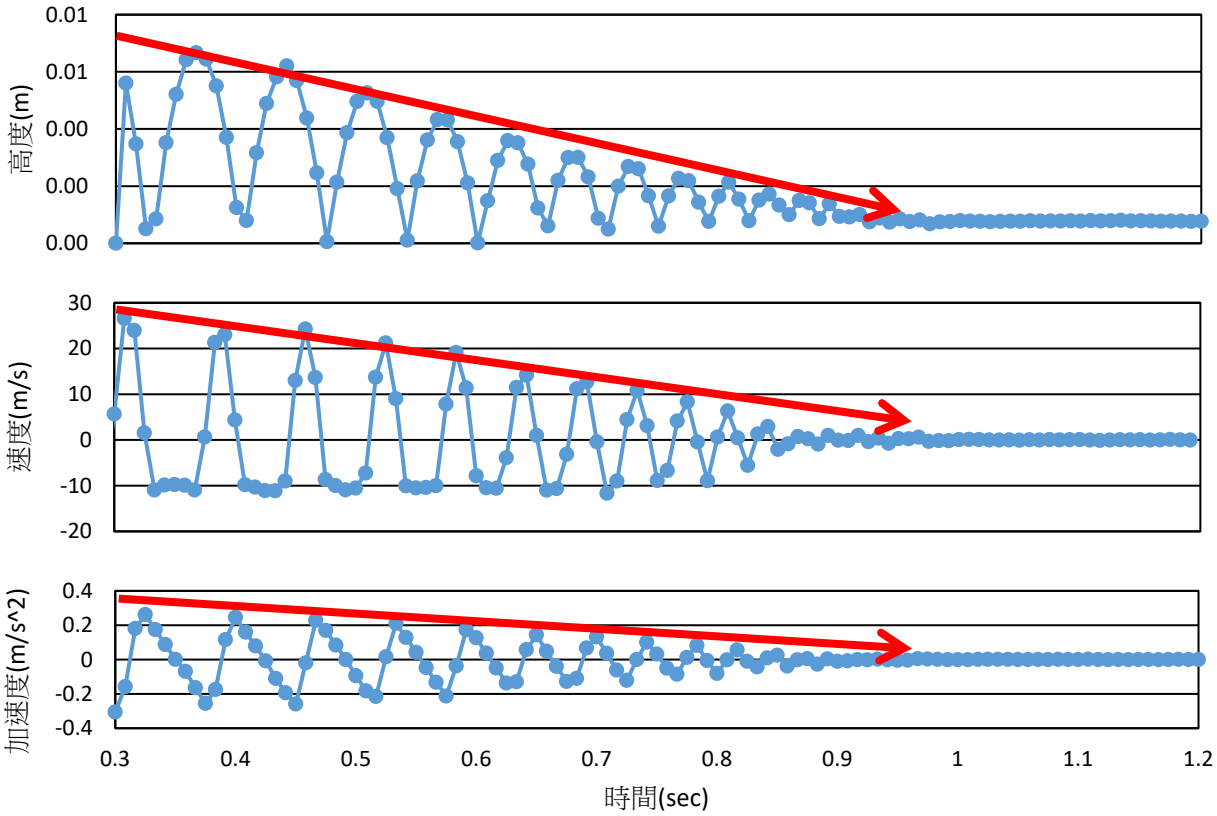


圖 5-8-1：加熱板常溫狀態下高度、速度、加速度與時間的關係圖

(二)高溫(160℃ 為例)

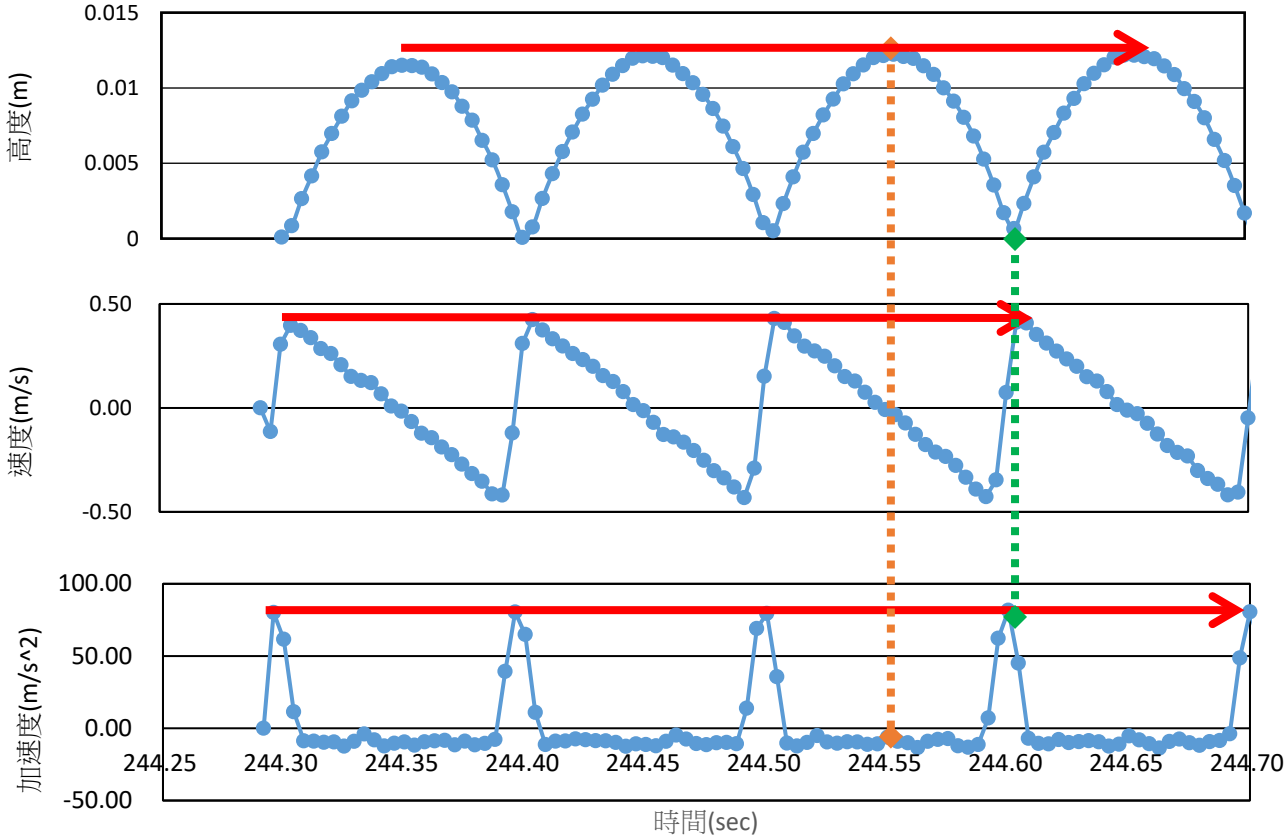


圖 5-8-2：加熱板 160 度狀態下高度、速度、加速度與時間的關係圖

三、分析討論

從 y-t 圖我們可以發現 160℃ 有穩定跳動時，高度會維持一定，而常溫狀態則是能量不斷遞減，高度越降越低。從速度與時間的關係圖我們可得知水晶寶寶在有加熱的板子上彈跳，速度都是固定的，反之在無加熱的板子上彈跳速度會逐漸下降。從加速度與時間的關係圖我們可得知在加熱的板子上彈跳，加速度都是在碰到金屬板時產生的，也都是固定的，但在無加熱的板子上彈跳，加速度隨著時間逐漸下降。

接著比較前 10 次撞擊金屬板之恢復係數，由 5-8-3 撞擊次數和恢復係數的關係圖，

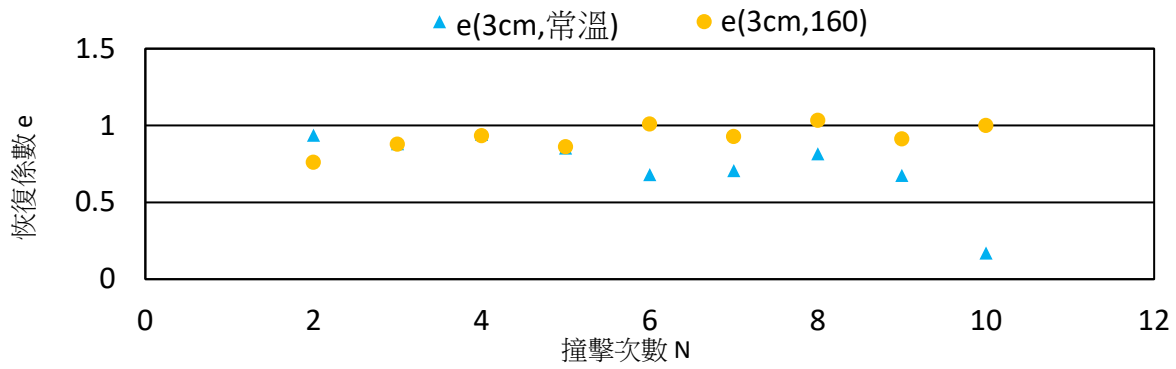


圖 5-8-3：恢復係數與撞擊次數的關係圖

我們可以從中發現在 160℃ 金屬板上跳動的水晶寶寶，於加熱板上撞擊之恢復係數 e，在第 6 次撞擊後開始穩定於 e = 1 附近震盪，甚至有時候會出現 e > 1 的情形。代表穩定後水晶寶寶彈跳所消耗掉的能量，便會在與金屬板接觸時，以某種形式補充回來，反之在無加熱的狀態下，能量不斷消耗，最後停止了跳動。

本實驗可合理解釋實驗 3 中所提到之跳躍高度走勢（至穩定高度的過程）如下：

跳躍高度狀態	該狀態之恢復係數	高度變化
> 穩定高度	e < 1	逐漸下降
= 穩定高度	e = 1	穩定不變
< 穩定高度	e > 1	逐漸上升

最後將無加熱以及有加熱的水晶寶寶彈跳動狀態進行統整如下表：

加熱版狀態	位置	加速度	速度	恢復係數	能量
無加熱	逐漸下降	逐漸下降	逐漸變小	逐漸下降	逐漸下降
有加熱 160°C	維持一定高度	維持一定	穩定不變	維持趨近於 1	維持一定

實驗 9：聚丙烯酸鈉與加熱板作用之噴發氣體測試

一、實驗方式

為了證明水晶寶寶跳動時下方有氣體存在，我們於水晶寶寶跳動之空間範圍周邊放置一些鹽巴，並觀察水晶寶寶在有加熱和無加熱跳動時，對其造成的位移。

二、實驗結果

圖 5-9-1：常溫金屬表面撞擊

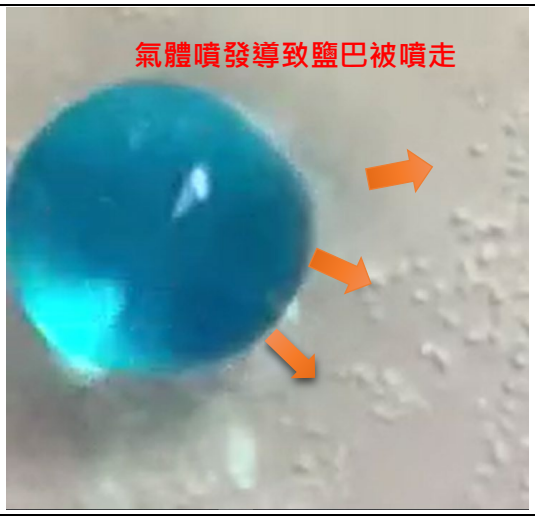


圖 5-9-2：高溫金屬表面撞擊

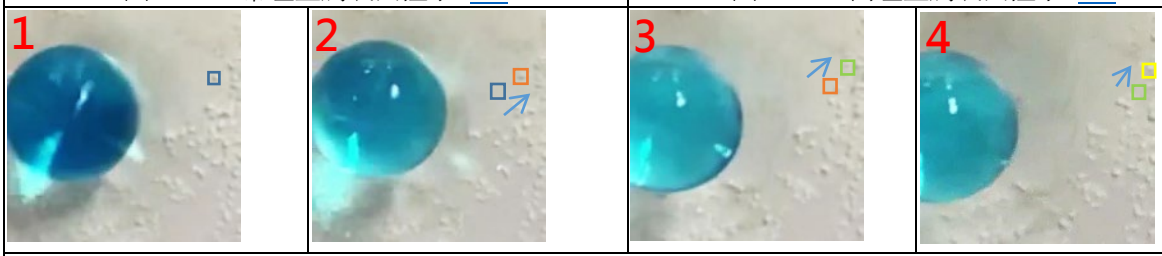


圖 5-9-3：高溫金屬表面撞擊，鹽巴移動方向分解圖

三、分析討論

在本實驗中藉由比較加熱板周邊的鹽巴，於常溫及高溫放置的情形。首先可以發現常溫狀態下，於撞擊瞬間鹽巴只有非常輕微的震動。然而高溫狀態的撞擊瞬間，可以發現鹽巴有劇烈的震動，並發生明顯的位移，朝向與水晶寶寶中心相反的方向移動。更可以排除是單純震動造成的效應，這讓我們懷疑，這是否為撞擊瞬間由於高溫造成水份汽化而噴發出的氣體？這是否為一種 Leidenfrost 效應？我們將於下一部份的研究綜合討論進行探討。

【研究四：探討聚丙烯酸鈉於高溫材質表面跳躍的應用】

實驗 10：聚丙烯酸鈉撞擊壓電晶片之發電測試。

一、實驗方式

為了發展聚丙烯酸鈉於高溫金屬板跳動的應用，我們運用壓電晶片，探討利用此現象做為發電的可能性，我們將壓電晶片黏在另一片金屬板，如右圖 5-10-1 所示。並將其放置於加熱板上 1cm 處**(低於穩定高度)**，如左圖 5-10-2 所示，限制水晶寶寶的跳動高度，使其不斷地在高溫金屬板以及上方之壓電晶片碰撞，（點擊 觀看實驗影片 ）再將其連接三用電表，讀取電壓，如右圖 5-10-3 所示，觀察電表上的電壓變化。

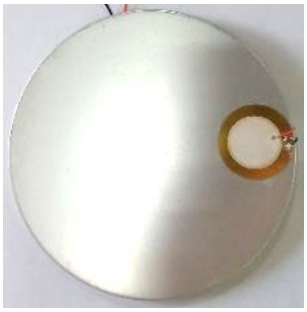


圖 5-10-1：壓電晶片與金屬板

圖 5-10-2：壓電晶片與實驗裝置圖

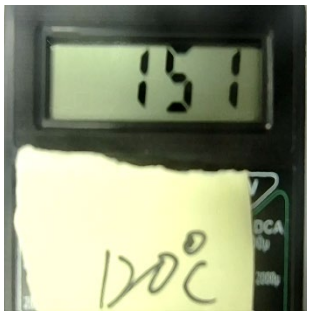


圖 5-10-3：三用電表讀取電壓

二、實驗結果

加熱金屬板溫度(°C)	120	160	200
電壓(V)	0.158	0.196	0.239

三、分析討論

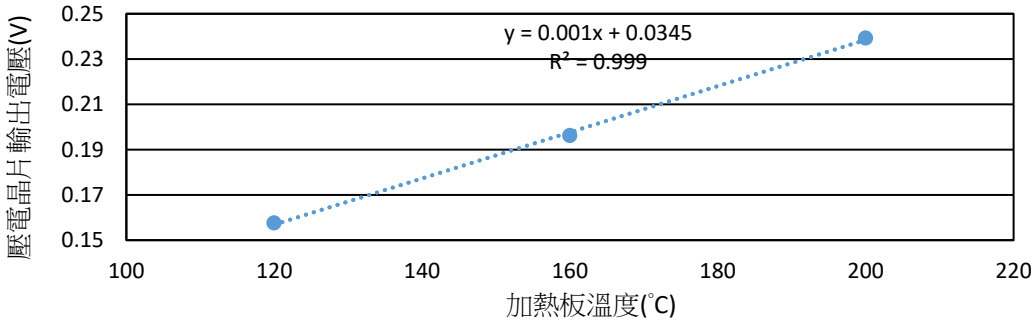


圖 5-10-4：壓電晶片輸出電壓與加熱板溫度關係圖

我們確認水晶寶寶可以在限制其跳躍高度的情況下持續撞擊上方壓電晶片，而由圖 5-10-4 可得知加熱板溫度越高，電壓值越高，兩者於加熱版溫度範圍內呈線性關係。

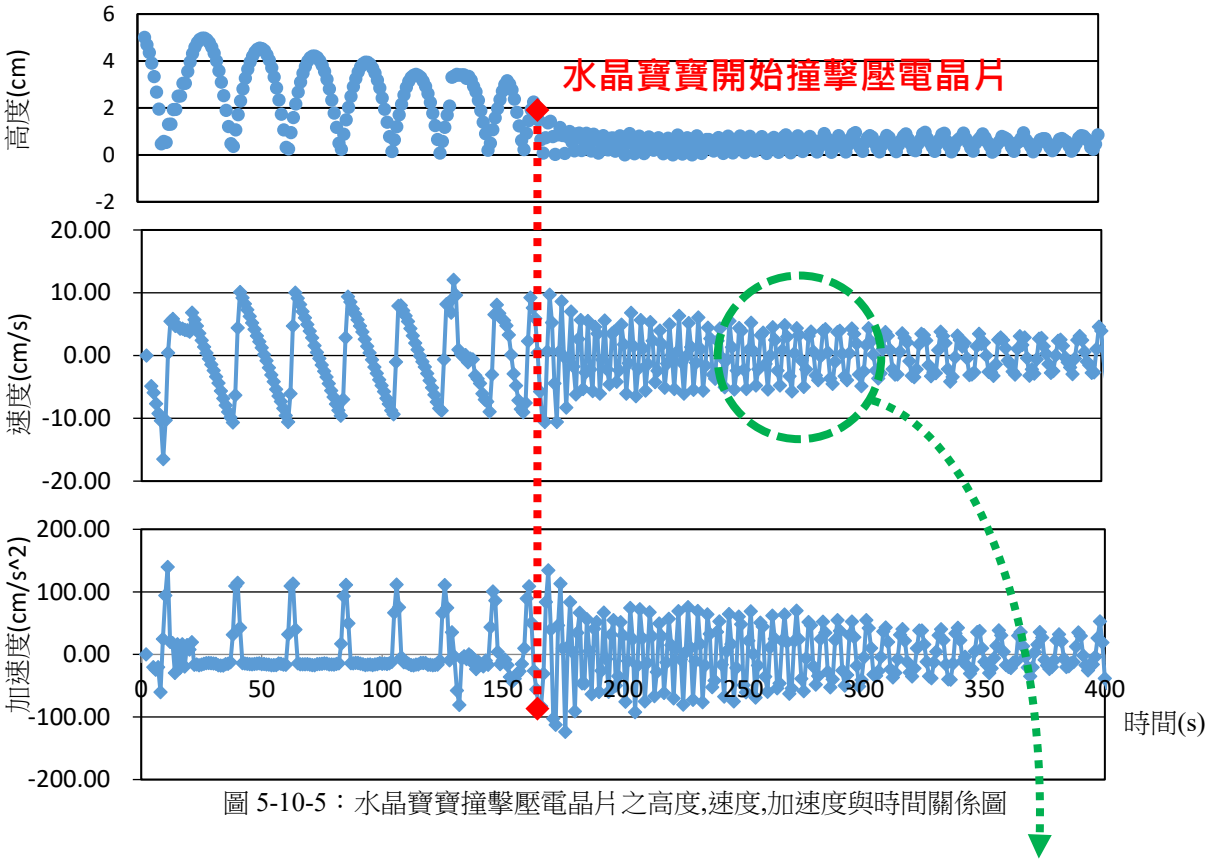


圖 5-10-5：水晶寶寶撞擊壓電晶片之高度,速度,加速度與時間關係圖

另外我們進行水晶寶寶撞擊壓電晶片過程之運動學分析，如上圖 5-10-5 所示。透過分析高度、速度與加速度，進一步發現速度的每個週期皆會有 5 個階段以及三種斜率（加速度），如圖 5-10-6。並將各階段分解說明如下表：

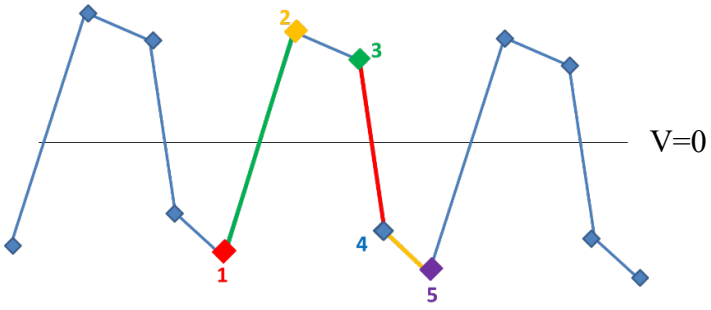


圖 5-10-6:水晶寶寶彈跳 v-t 圖

階段	說明
點 1	釋放後開始撞擊下方加熱板的瞬間。
線段 1→2	撞擊加熱板的過程，向上的加速度，準備向上反彈。
點 2	離開加熱板瞬間。
線段 2→3	往上飛行的過程，如同鉛直上拋，受到重力影響，速度大小逐漸下降。
點 3	撞擊到上方壓電晶片的瞬間。
線段 3→4	撞擊壓電晶片的過程，向下的加速度，準備向下彈回。
點 4	離開壓電晶片瞬間。
線段 4→5	自由落體落下。
點 5	開始撞到下方加熱板瞬間，完成一個週期的循環。

透過力學能守恆的概念，我們可以從階段 2（離開加熱板瞬間，力學能等同撞擊上方壓電晶片前）與階段 5（撞擊加熱板瞬間，力學能等同撞擊上方壓電晶片後）之速度大小進行動力學分析。然而如圖 5-10-4 所示，數據量太大（大於 200 個數據點）不便於人工進行分析，因此我們撰寫輔助分析程式 (可點擊 觀看程式碼及架構流程圖)，抓取出每個週期中的階段 2 與階段 5 數據，便於進行大量數據的分析。

將抓取出的數據進行分析後如下表，可以發現加熱金屬板溫度越高，每次撞擊上方金屬板的平均撞擊速度越快，恢復係數也越大。每次撞擊後平均損耗動能也隨之提高，符合所對應到壓電晶片所測量到之電壓，為線性正相關之關係。

加熱金屬板溫度(°C)	120	160	200
平均階段 2 速度(cm/s)	2.41	3.12	4.20
平均恢復係數	0.75	0.83	0.88
每次撞擊後 平均損耗動能(J)	0.00233	0.00238	0.00262
平均量測電壓(V)	0.158	0.196	0.239

本實驗確認了聚丙烯酸鈉於高溫金屬表面上的彈跳現象，適用於能量傳遞的應用。因其能量較小，適用的尺度不同。這是一種新穎的能量傳遞方式，使高含水物質於加熱板中獲取熱能轉換成動能，且撞擊過程可以維持數分鐘，並非是偶然的結果，其具有於軟物質領域的應用潛力。

陸、 研究綜合討論

我們為了論證**水晶寶寶在金屬板上的彈跳現象是否為 Leidenfrost 效應所造成？探討動力是否源自於其與高溫金屬表面接觸，瞬間汽化的水蒸氣？以及發出聲音的物理機制是否相似於 Helmholtz(亥姆霍茲)效應？**我們設計了一系列的實驗，改變了水晶寶寶球體直徑、對水晶寶寶球體進行戳洞、改變加熱板溫度以及釋放高度，並以 Tracker 與 Praat 進行分析其跳躍高度、聲音頻率、速度、加速度，我們綜合本研究實驗結果，進行重新排列，並討論如下：

一、確認高頻聲音來自與高溫加熱板撞擊瞬間

1. 實驗 0：得知聲音為水晶寶寶在撞擊高溫加熱板瞬間所發出。

二、確認高頻聲音來自於氣體劇烈振動

1. 實驗 6：由圖 5-6-1 發現到聲音頻率和直徑的倒數呈線性關係。查閱相關文獻如下：

   (1) 李威果等(2013)[2]研究水滴的 Leidenfrost 效應提出：「水滴蒸氣層的振動頻率，與截面半徑成反比。」

   (2) Anderson, A. B. C. (1952).[3]提出：「管子噴氣發出之聲音震動頻率，與截面半徑成反比。」

   我們的研究中也有發現類似的現象，透過實驗 1 的結果發現，當吸水量越高其體積越大，每次與加熱板撞擊的接觸截面就會越大。其與實驗 6 之實驗數據相吻合，我們有更高的信心推斷水晶寶寶的高頻振動聲來自與高溫金屬表面撞擊瞬間，水分汽化的噴發振動。

2. 實驗 7：透過實驗 6 了解其高頻聲來自水分汽化的噴發振動，進一步探討其物理機制。

   (1) 由圖 5-7-3，確認水晶寶寶為符合虎克定律 $F = -kx$ 的彈性物質。

   (2) 由圖 5-7-4，確認水晶寶寶撞擊高溫金屬板所發出的聲音頻率，符合簡諧運動振動頻率$f \propto \sqrt{k}$的形式。

   (3) 綜合上述兩點，我們推斷水晶寶寶的發聲機制與 Helmholtz(亥姆霍茲)效應有高度關聯性。對比圖 6-1，水晶寶寶為彈性物質，可視為彈簧，等同瓶身內的空氣；從實驗 6 的文獻探討、實驗 9 的噴發氣體測試，確認了與高溫加熱板接觸後會有氣體噴發，此噴發的氣體，可視為彈簧上的質量塊，等同瓶口的空氣柱。而噴氣的過程中，會引發壓力的變化，進而帶動空氣柱的來回振動，於是產生了聲音。

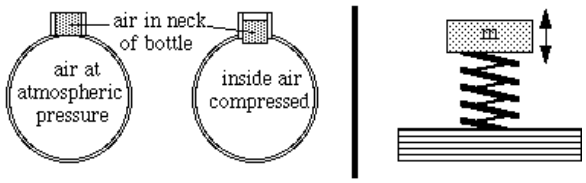


圖 6-1：Helmholtz 效應示意圖
(圖片來源: https://bit.ly/37pxEHS)

3. 透過上述兩點，嘗試解釋實驗 2、實驗 3、實驗 5 之結果。

   (1) 實驗 2：為什麼 80℃ 可以發生水晶寶寶的 Leidenfrost 效應？

   雖然水的沸點為 100℃，但水在未達到 100℃ 時也可以蒸發，只是速度較慢。水

晶寶寶在與物體接觸時，表面會出現薄薄一層水，又無加熱狀態下水晶寶寶彈跳時，前幾下恢復係數與加熱的差別不大，所以就算汽化時間沒有高溫的時間快，仍然可以在加熱板上彈跳。但這些因素也導致了 80℃ 的跳動較不穩定，且時間較短。

(2) 實驗 3：由圖 5-3-2，可得知溫度和穩定跳動高度呈現線性負相關，我們推測是因為高溫時水份汽化速度較快，更快生成如同水滴 Leidenfrost 效應的蒸氣層，所以與加熱板的接觸時間較短，而獲得的能量較少，則穩定跳動高度較低。反之，低溫時汽化速度較慢，所以與加熱板的接觸時間較長，獲得的能量較多，跳動高度較高。

(3) 實驗 5

i. 由圖 5-5-1，可得知溫度與聲音頻率呈現性關係，我們推測，溫度越高，則接觸高溫金屬板瞬間，汽化速度越快，引發更快速的氣壓變化。使水晶寶寶與金屬板振動頻率較高，所以與低溫時相較起來聲音頻率越高。

ii. 無加熱常溫之跳動聲音頻率明顯小於加熱板跳動之聲音頻率，聲音大小甚至難以透過人類的耳朵觀察，需要在安靜環境以指向式麥克風收音才能記錄到聲音。這更說明了與高溫加熱板接觸後，水份高溫汽化所噴發出的氣體，是造成水晶寶寶發出高頻率聲音的關鍵。

三、確認能量來源：動力學的分析觀點

1. 實驗 8

(1) 由圖 5-8-1 可得知加熱板常溫的狀態下，高度愈降愈低，速度會逐漸變小，加速度也會因為能量不斷地散失，逐漸降低直到變為 0。

(2) 由圖 5-8-2 發現在有加熱的狀況下，穩定高度與速度大小、加速度大小的最大值穩定維持定值。

(3) 由圖 5-8-3 可以明顯看出水晶寶寶無加熱的狀態下恢復係數會不斷降低。但加熱板上的撞擊恢復係數趨近於 1，並於附近震盪。而有時候甚至大於 1，代表動能大於初始狀態。便可說明實驗 3 當中的跳躍高度走勢變化。

(4) 從動力學的分析可以明顯看出，撞擊的過程中水晶寶寶因為高溫而持續獲得跳動的能量。這能量很有可能來自於高溫汽化的水蒸氣，在噴發過程中引起的高速震動，如同熱機（引擎）的概念。整顆水晶寶寶就是個小引擎：水份就如同燃料，空氣層的振動變化如同活塞機構，成功從加熱板中獲取熱能轉換成動能。

2. 實驗 9

(1) 由圖 5-9-1 可得知，鹽巴在無加熱的狀態下幾乎不會有位移的情形。

(2) 由圖 5-9-2、5-9-3 可得知，在有加熱的狀態下鹽巴會產生明顯的位移，朝向與水晶寶寶中心反向遠離，我們推測是水晶寶寶下方的氣體噴發造成鹽巴的位移。

3. 實驗 10

(1) 由圖 5-10-3 可得知，溫度越高，則壓電晶片輸出的電壓越高，透過水晶寶寶的撞擊實現能量轉換：熱能→動能→電能。

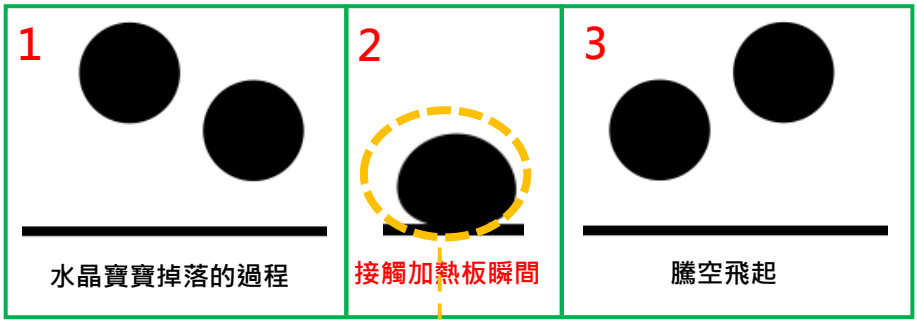
(2) 本實驗確認了水晶寶寶可以穩定從加熱板中獲取能量。

四、綜合聲音分析、動力學分析，提出物理模型

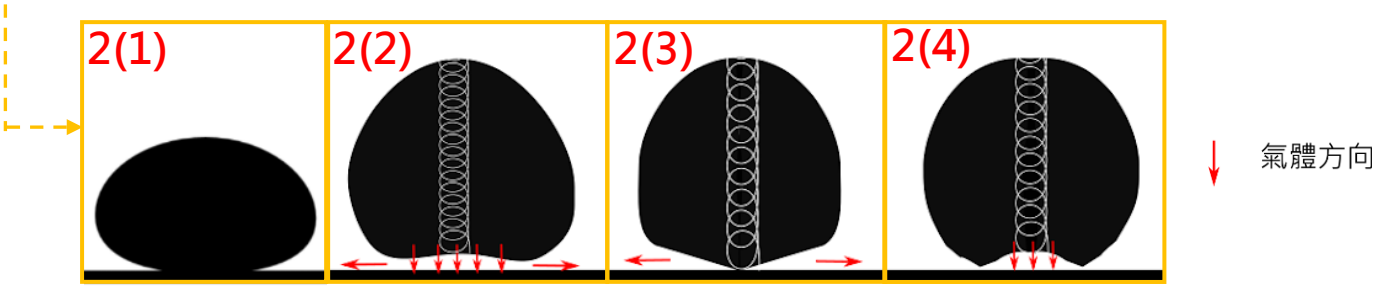
1. 在網路上可以找到非常高 FPS 的水球彈跳高速攝影畫面，如右圖 6-2 所示，能夠拍到我們拍不到的畫面，看出水球在撞擊地面時產生的形體改變。同樣都是大量的含水固體，我們認為水球有相當大的參考價值，因此我們不斷觀察高速攝影下的水球撞擊。從而推論水晶寶寶的形體改變情形，綜合以上一至三點討論，我們推論出了水晶寶寶與加熱板接觸瞬間的變化如下。

圖 6-2：水球彈跳的高速攝影影片
(影片來源：https://bit.ly/3dAHt8t)

水晶寶寶與加熱板接觸過程：



如上圖所示，我們將水晶寶寶彈跳過程分解為 3 大部分，再將第 2 部分**水晶寶寶碰觸到加熱板的瞬間，極短時間內所發生的現象，細分為 4 個部分進行說明**，如下圖所示：



水晶寶寶接觸到加熱板的過程，接觸面會發生劇烈的震動，發生的次序可簡化為：

1→2(1)→2(2)→2(3)→2(4)→2(2)→2(3)→2(4)⋯2(2)→2(3)→2(4)→3。

可點擊觀看說明動畫，圖片文字說明如下：

(1) 階段 2(1)：水晶寶寶撞擊到加熱板，與加熱板直接接觸，並接收大量熱量。

(2) 階段 2(2)：大量的熱量使接觸面水份快速汽化生成氣體，累積的氣體逐漸提高底部氣壓，造成水晶寶寶底部形變壓縮，且大量的氣體累積後向外噴發。

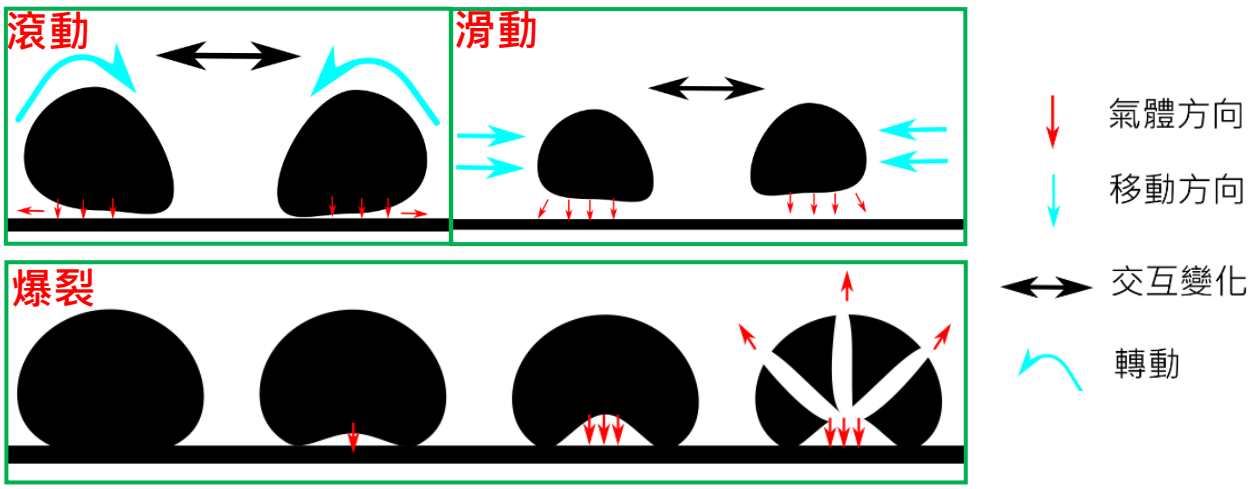
(3) 階段 2(3)：向外噴發氣體後，階段 2(2)累積之氣壓下降，因此水晶寶寶底部開始恢復，且因為慣性，造成水晶寶寶底部形變伸長，再次貼近加熱板。

(4) 階段 2(4)：延續階段 2(3)，水晶寶寶接觸到加熱板的面積越來越大，然而隨著熱量的累積，水份汽化產生的氣體也越來越多，回到階段 2(2)。

(5) **看似只有一次的撞擊，其實水晶寶寶不斷地高速重複階段 2(2)～2(4)。**其過程不斷噴發的氣體，引發了水晶寶寶的底部高速震動，因此發出高頻聲。

(6) 水晶寶寶的底部震動過程，如同引擎的運作過程，並透過加熱板得到的能量，使其可不斷地持續跳動。

2. 水晶寶寶在 0cm,200℃ 時有水平滑動的現象，且在一段時間下會發生爆炸的情形，在部分實驗中我們也有發現到滾動與滑動及爆裂的現象 (可點擊影片)。我們依據前面推測出的物理模型也可以進行合理解釋，如下圖所示：



(1) 滾動：因為在水晶寶寶產生氣體時，氣體從旁溢出，導致水晶寶寶發生滾動的現象

(2) 滑動：因為水晶寶寶會發生滑動的現象，都需在 200℃，0cm 才會產生，我們推測因為沒有初速，不會造成其彈跳的現象。短時間內產生大量的氣體，因此水晶寶寶能被氣墊所支撐。不均勻的噴氣造成左右方向受力不同，因此進行滑動。

(3) 爆裂：我們推測因為溫度過高，兩旁的聚丙烯酸鈉融化在加熱板上，然而氣體無法排出，導致水晶寶寶底部氣壓過大，產生爆裂的現象。

2. 綜合以上，無論是水滴的滑動，亦或是水晶寶寶的持續跳動。**成因皆來自高溫汽化的水份，因此我們認為這是一種屬於高含水彈性固體的 Leidenfrost 效應。**將其與水滴的 Leidenfrost 效應進行比較如下表：

Leidenfrost 效應	發生條件	現象
水晶寶寶	與高溫材質表面接觸，引發水份汽化。	持續跳動、高頻聲、滑動、滾動、爆裂
水滴		滑動、滾動

柒、 研究結論與應用

一、結論

(一) 聚丙烯酸鈉與金屬板作用的基本性質

1. 發現水晶寶寶在高溫金屬板跳動的高度可維持穩定，並於接觸加熱板瞬間發出高頻聲，且聲音並非來自於單純的碰撞。
2. 水晶寶寶最常發生的現象為持續於加熱板跳動並發出高頻聲。但在 200℃，釋放高度 0cm 時，會觀察到滑動、滾動與爆裂的現象。
3. 水晶寶寶吸水量越多，直徑越長、體積越大，吸水量到達 1.4mL 時，含水量接近 100%。
4. 水晶寶寶在 80℃時便能開始跳動，與水滴的 Leidenfrost 效應有明顯差異。
5. 釋放高度對於水晶寶寶的平均穩定彈跳高度並無顯著影響。
6. 溫度越高，則平均穩定跳躍高度越低，兩者呈線性負相關。

(二) 聚丙烯酸鈉的高頻彈跳聲性質

1. 水晶寶寶的釋放高度與聲音頻率沒有顯著相關。

2. 穩定跳動狀態時：加熱板溫度愈高，頻率越高，兩者呈線性正相關。
3. 聲音頻率與水晶寶寶之直徑倒數呈線性正相關。
4. 水晶寶寶為符合虎克定律的彈性固體。
5. 水晶寶寶撞擊高溫金屬板所發出的聲音頻率，符合簡諧運動振動頻率 $f \propto \sqrt{k}$的形式。

(三) 探討聚丙烯酸鈉於加熱板跳躍與 Leidenfrost 效應的關聯性

1. 常溫狀態下跳躍高度隨著碰撞次數明顯遞減，透過加速度的分析可以發現每次撞擊的加速度明顯下降。
2. 高溫狀態下跳躍高度可以維持穩定定值，透過加速度的分析可以發現每次撞擊的加速度皆為定值。
3. 透過恢復係數的分析，發現高溫狀態下的恢復係數相較於常溫，不受撞擊次數影響，穩定於 $e = 1$ 附近震盪，甚至有時候會出現 $e > 1$ 的情形。
4. 透過實驗驗證撞擊瞬間，高溫造成水分快速汽化，進而噴發出氣體。

(四) 探討聚丙烯酸鈉於高溫材質表面跳躍的應用

1. 水晶寶寶可以在限制其跳躍高度的情況下持續撞擊上方壓電晶片。
2. 加熱板溫度越高，電壓值越高。
3. 成功透過水晶寶寶實現「熱能→動能→電能」的能量轉換。
4. 加熱金屬板溫度越高，撞擊上方金屬板平均損耗動能也隨之提高。

二、應用與未來展望

(一) 現有的高速攝影機畫質愈高則 FPS 愈低，因此無法透過更高的 FPS 捕捉水晶寶寶的跳動，若能採用有更高 FPS 且畫質更佳的高速攝影機，應可以觀察到更精細的跳動過程變化，提出更完善的物理模型描述此現象。

(二) 使用較易控制變因的金屬板（現金屬板外圍過高造成無法分析、難控制溫度且容易變形或刮傷），避免分析時產生誤差。

(三) 此研究讓我們發現了一種相似於熱機，可應用於軟物質的特殊能量傳遞方式。有些軟機器人（Soft robotics）的部件會使用高含水的水凝膠做為材料（hydrogel robot），在軟物質的微小尺度下，這是一種具有潛力取代傳統電路，新穎的能量傳遞方式。

捌、 參考資料

1. 林宇政等(2019)：**萊頓弗羅斯特現象的應用與震盪現象探討。**中學生網站。
2. 李威果等(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 屆中小學科學展覽會高中組物理科。
3. Anderson, A. B. C. (1952). **Dependence of Pfeifenton (pipe tone) frequency on pipe length, orifice diameter, and gas discharge pressure.**The Journal of the Acoustical Society of America,24(6), 675-681.

【評語】030104

本件作品探討水晶寶寶置於加熱板發生跳動及高頻聲音現象，研究者能設計系統化變因，以錄影及錄音配合進行分析跳動特性及原理，並提出物理模型解釋所觀測現象；以水晶寶寶在與加熱板接觸表面的薄層水，受高溫瞬間汽化產生彈跳動力。

建議應可進一步設計控制實驗變因，如溫度對彈跳高度關係，以及確證 Leidenfrost 效應解釋高溫瞬間汽化產生彈跳動力模型等。

另作品學生應學習實驗數據誤差分析及有效數字以及作圖呈現，數據回歸分析應留意物理意義等。

作品海報

摘要

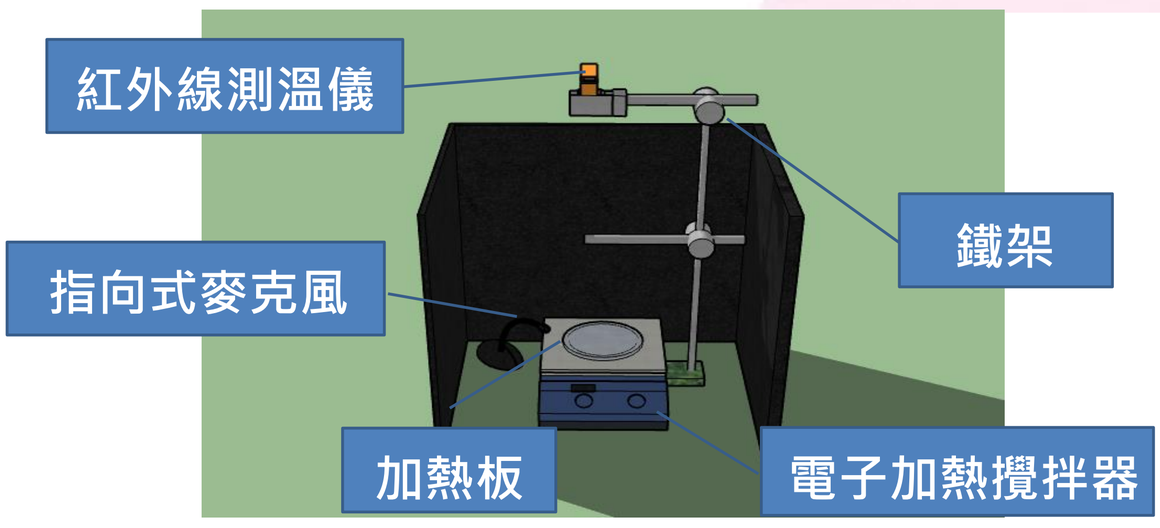
將聚丙烯酸鈉(水晶寶寶)置於加熱板上，會不斷跳動並發出高頻聲音。本研究透過錄音及錄影進行分析，以探討其跳動的原理及特性。並嘗試與壓電晶片結合，透過碰撞實現能量轉換。最後結合聲音及動力學分析，提出物理模型針對觀測之現象進行解釋，論證此現象屬於高含水彈性固體之Leidenfrost效應。

前言與研究動機

觀察網路上水晶寶寶於高溫平底鍋，可以不斷跳動並發出高頻聲音的影片，開始思考以下相關問題：

1. 為何可持續跳動並發出高頻聲？
2. 這是否也是一種Leidenfrost效應？
3. 本現象之應用可能性？

實驗裝置示意圖



研究結果與討論

一、探討聚丙烯酸鈉與加熱板作用的基本性質

實驗0：觀察聚丙烯酸鈉於高溫金屬板上的行為

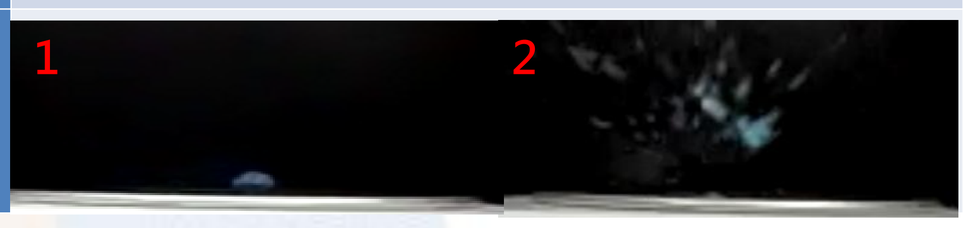
實驗方式

於金屬板進行錄影、錄音，並將觀察到的行為做成分解圖。

跳動測試影片

實驗結果與分析

一、運動現象討論

分類	水晶寶寶於金屬板之行為分解圖
1.常溫跳動	
2.高溫跳動	
3.高溫滾動、滑動	
4.高溫爆裂	

最常觀察到的現象為高溫跳動，因此本研究將以此現象做為主要的研究目標。

二、聲音現象討論

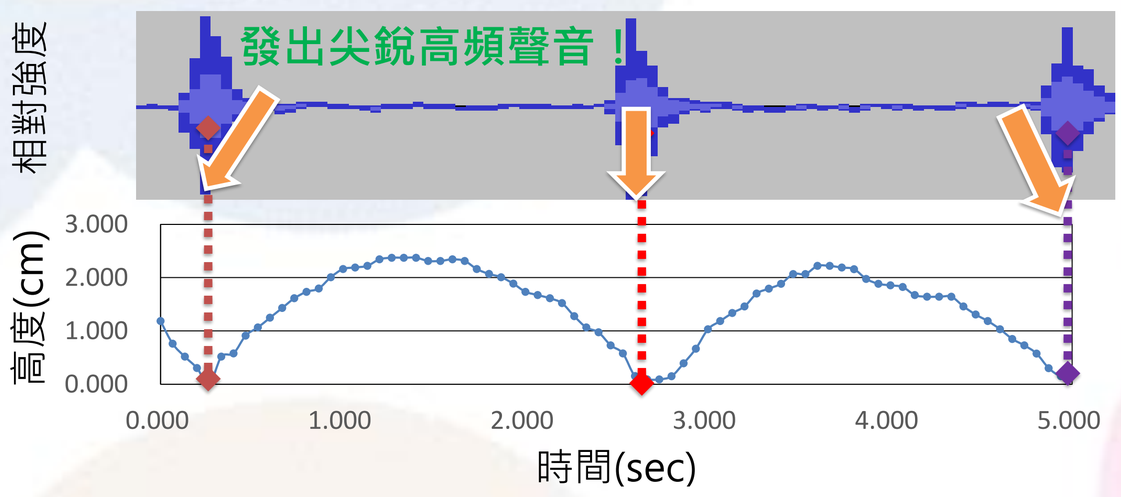


圖1: 水晶寶寶於高溫加熱版跳動之高度與時間關係圖

此聲音產生必有另外的原因，可能與高溫材質表面有極高的關聯性，並非來自於單純的碰撞！

實驗1:聚丙烯酸鈉於不同吸水量的物理性質分析

實驗方式

每0.2mL作為一個單位，至1.4mL，測量其質量、大小，進行分析。

實驗結果與分析

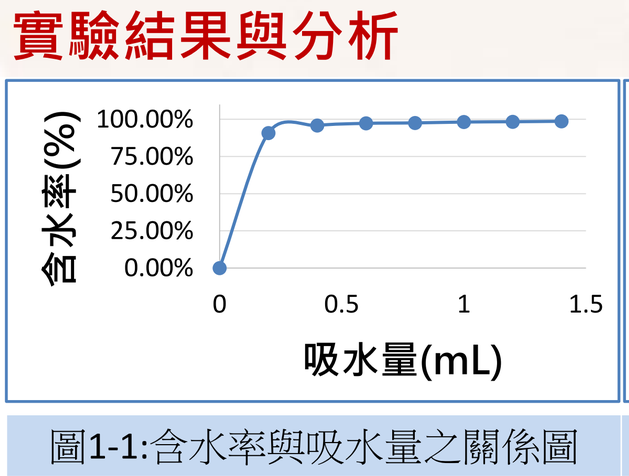


圖1-1:含水率與吸水量之關係圖

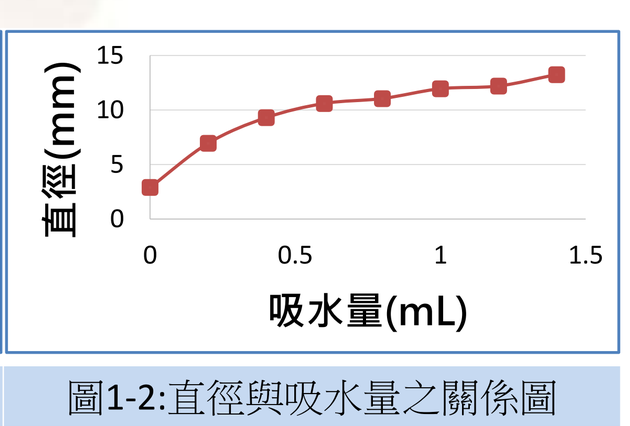


圖1-2:直徑與吸水量之關係圖

吸水量到達1.4mL時，含水率接近100%的飽和狀態。因此選定1.4mL的吸水量進行實驗最為理想。

實驗2:聚丙烯酸鈉穩定跳動現象的臨界溫度分析

實驗方式

在不同溫度時觀察水晶寶寶能否穩定跳動。

跳動定義：如下圖2-1以200°C，釋放高度2cm為例，最大高度沒有明顯遞減的情況。

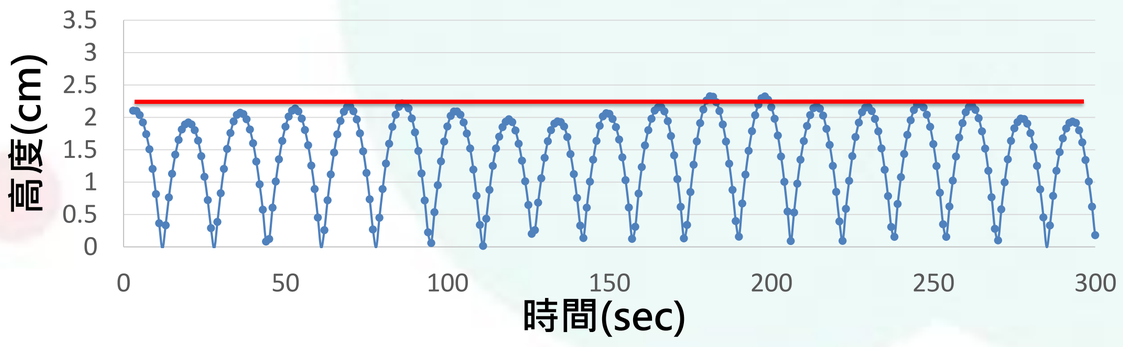


圖2-1: 200°C，2cm高度與時間關係圖

實驗結果與分析

溫度	70°C	80°C	120°C
跳動情形	無法跳動	有跳動 持續時間短	有跳動 持續時間長

水晶寶寶在80°C時，有穩定跳動的情形，因此認定80°C為水晶寶寶起跳臨界溫度。

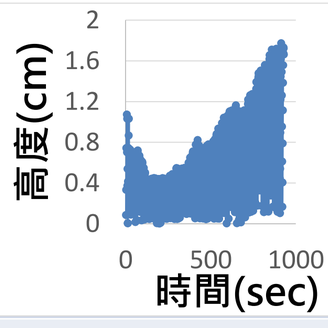
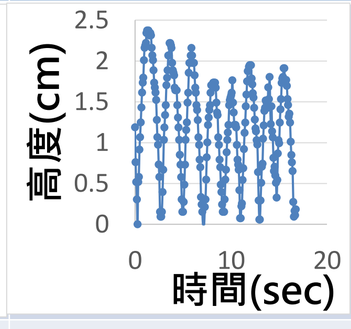
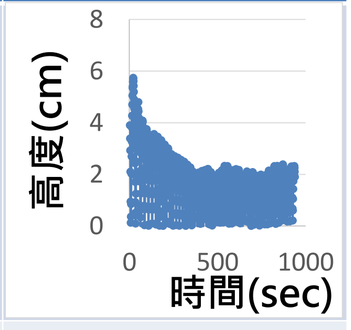
實驗3:加熱板對聚丙烯酸鈉跳躍運動之影響分析

實驗方式

水晶寶寶於加熱板80°C、120°C、160°C、200°C，並調整釋放高度於0cm、1cm、2cm、3cm、4cm進行實驗。

實驗結果與分析

其跳動時可歸納為三種跳躍高度走勢：

跳躍高度走勢	走勢1：由低到高	走勢2：高度不變	走勢3：由高到低
高度時間關係圖			
釋放高度	< 穩定高度	= 穩定高度	> 穩定高度

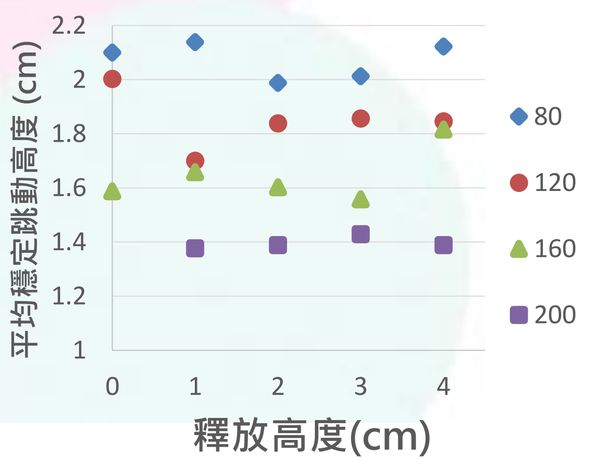


圖3-1: 穩定高度與釋放高度關係圖

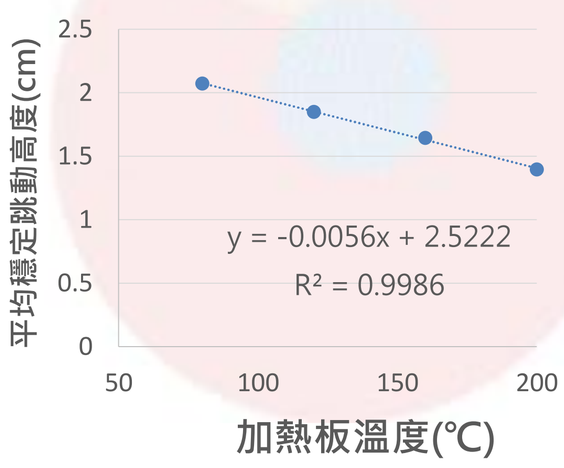


圖3-2: 穩定高度與溫度關係圖

由圖3-1可知，釋放高度對於平均穩定跳動高度並無顯著影響。由圖3-2可發現，溫度越高，穩定跳躍高度越低，呈線性負相關。

而在200°C，0cm時，不會發生跳動，而是像水滴的Leidenfrost效應，在加熱板上滾動，一段時間後停止，並發生爆裂。

二 探討聚丙烯酸鈉的高頻彈跳聲性質

實驗4:釋放高度對跳動聲音頻率的影響分析

實驗方式

在加熱板160°C，釋放高度0cm、1cm、2cm、3cm、4cm進行實驗錄音，並分析頻率取平均值。

實驗結果與分析

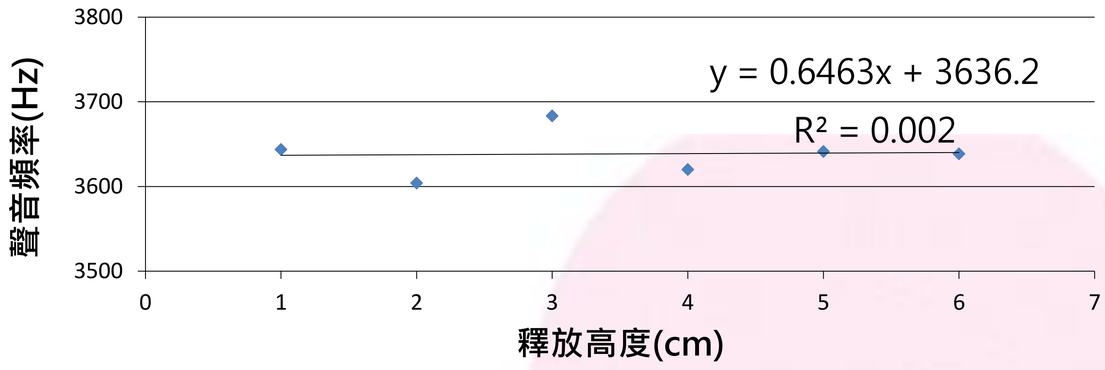


圖4-1：聲音頻率與釋放高度關係圖

我們之所以選定160°C作為實驗使用的溫度，是因為160°C較其他溫度更穩定跳動，相關係數等於0.002，代表X軸與Y軸關聯性極低，也就是說水晶寶寶的釋放高度對聲音頻率並無顯著影響。

實驗5:釋放高度對跳動聲音頻率的影響分析

實驗方式

在高度0cm、1cm、2cm、3cm、4cm進行實驗錄音，並分析頻率取平均值。

實驗結果與分析

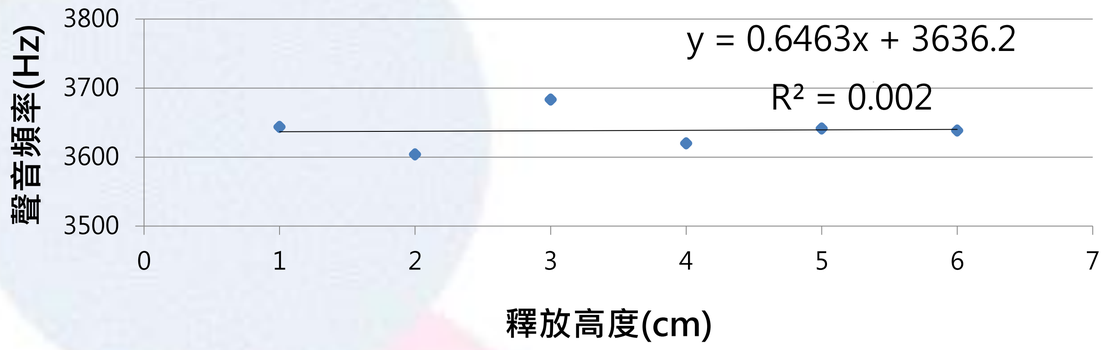


圖5-1: 聲音頻率與釋放高度關係圖

相關係數顯示，釋放高度對聲音頻率無顯著影響。

實驗6:球體直徑對跳動聲音頻率的影響分析

實驗方式

從實驗1我們了得知吸水量與球體直徑的關係，因此以不同吸水量放置並測量其聲音頻率。

實驗結果與分析

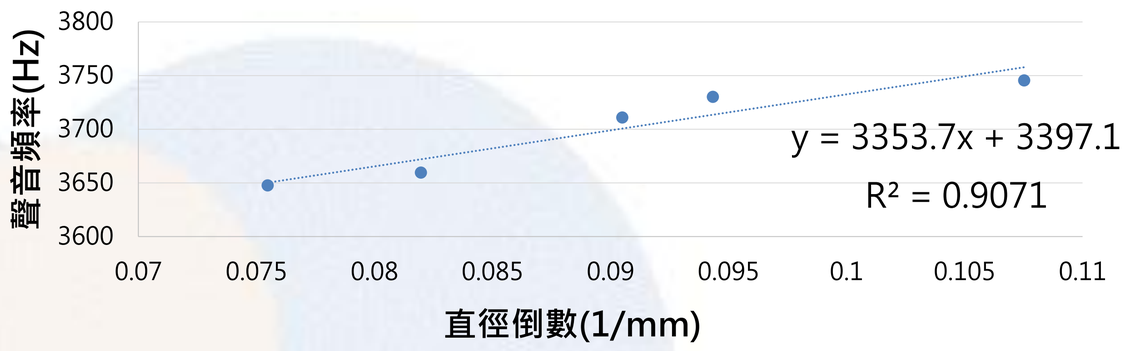


圖6-1:聲音頻率與直徑倒數的關係圖

從上圖可以發現，球體直徑倒數值越大時，聲音頻率就越高，兩者呈現線性正相關。

實驗7：聚丙烯酸鈉戳洞次數對跳動聲音頻率的影響分析

實驗方式

1. **確認水晶寶寶是否為符合虎克定律之彈性物體：**
   使用不同質量砝碼，記錄水晶寶寶的形變量。確認其受力與形變量關係是否為線性關係，並計算其彈力常數k。

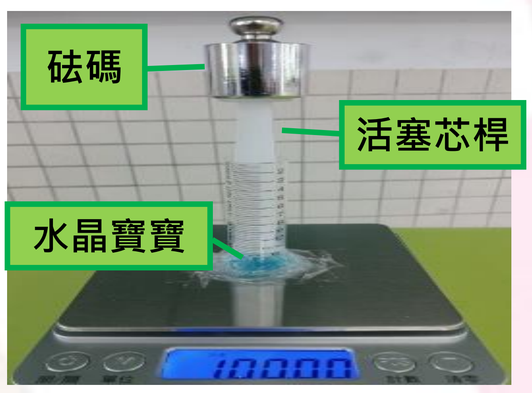


圖7-1：彈性常數測量裝置

2. **改變水晶寶寶之彈力常數，測量其聲音頻率：**
   將水晶寶寶使用針頭，指向球心於球面上進行多次戳洞，使其均勻分布。分析其高頻聲音頻率。

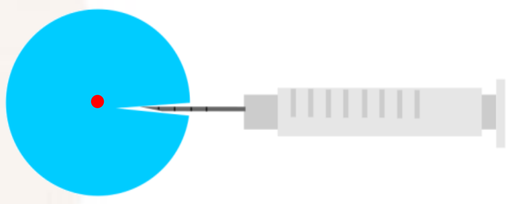


圖7-2：戳洞示意圖

實驗結果與分析

由實驗結果可得知：

1. 水晶寶寶為符合虎克定律之彈性物體。
2. 其高頻聲音頻率與彈力常數符合簡諧運動振動頻率$f \propto \sqrt{k}$的形式。可將戳洞視為一種破壞彈簧並聯的過程，因此戳洞量越大，彈力常數越低。

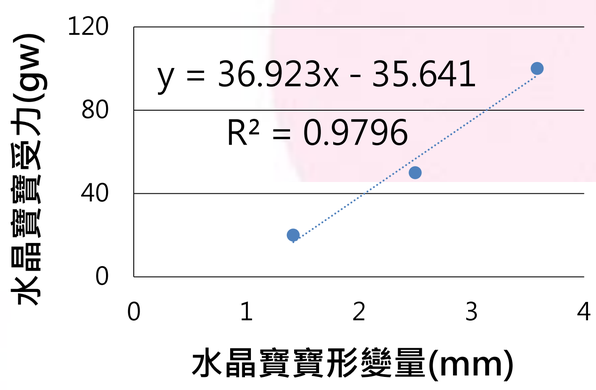


圖7-3：戳100洞水晶寶寶受力與形變量關係圖

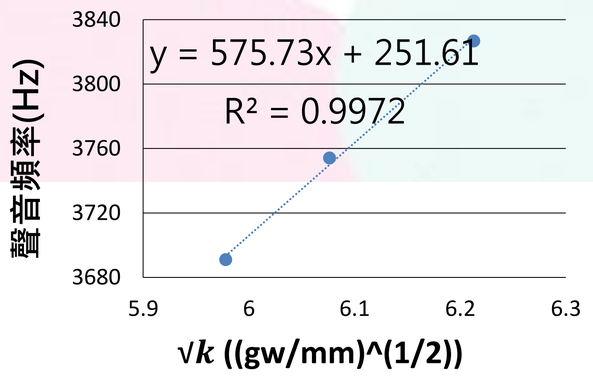


圖7-4：聲音頻率與彈力常數根號大小之關係圖

三 探討聚丙烯酸鈉於加熱板跳躍與Leidenfrost效應的關聯性

實驗8:聚丙烯酸鈉與加熱板作用之運動學分析

實驗方式

不同溫度進行實驗，分析並比較跳動狀況。

實驗結果與分析

(一)常溫加熱板　　(二)高溫加熱板

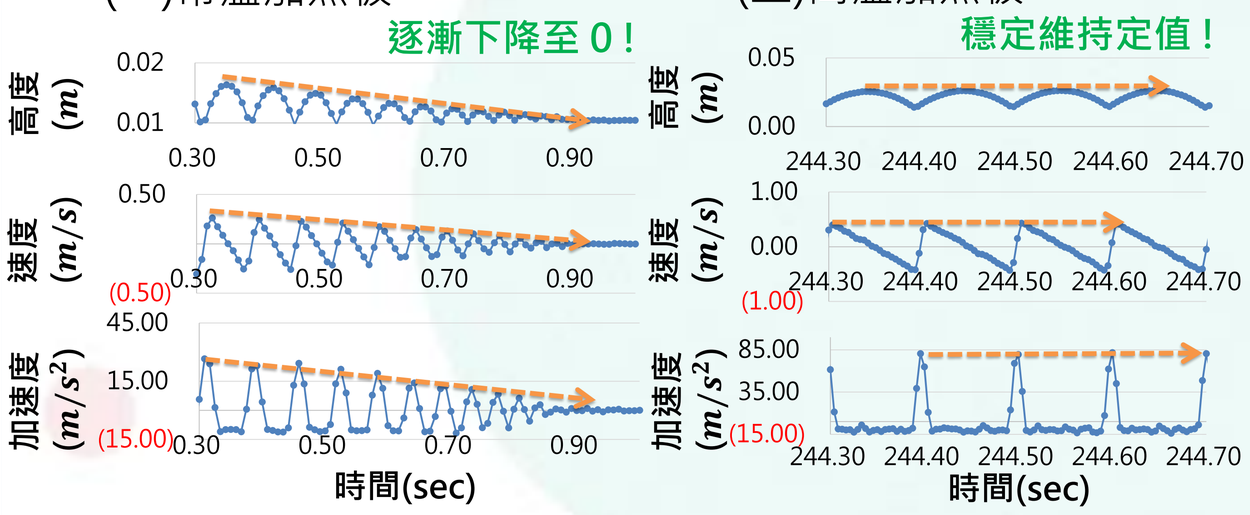


圖8-1:高度、速度與加速度與時間的關係圖

圖8-2:高度、速度與加速度與時間的關係圖

A. 高溫加熱板上彈跳高度、最大速度、最大加速度穩定維持定值。常溫加熱板皆會逐漸下降。
B. 最大加速度都是在碰到金屬板瞬間所發生。

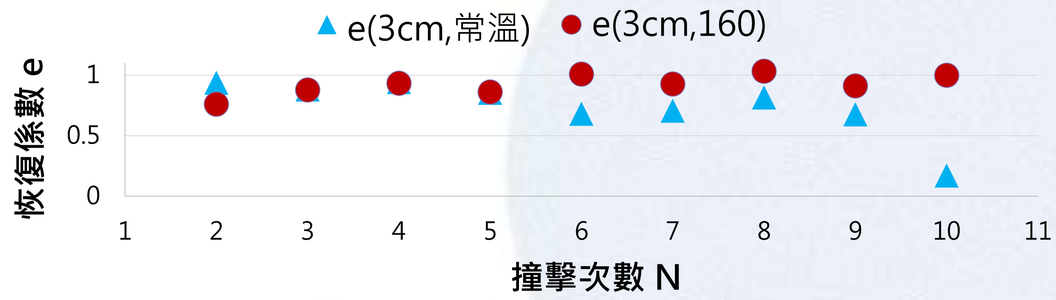


圖8-3:恢復係數與撞擊次數的關係圖

圖8-3可發現在160°C時，水晶寶寶撞擊之恢復係數e，在第6次撞擊後開始穩定於 1附近震盪。將常溫及有加熱的彈跳動狀態進行統整如下：

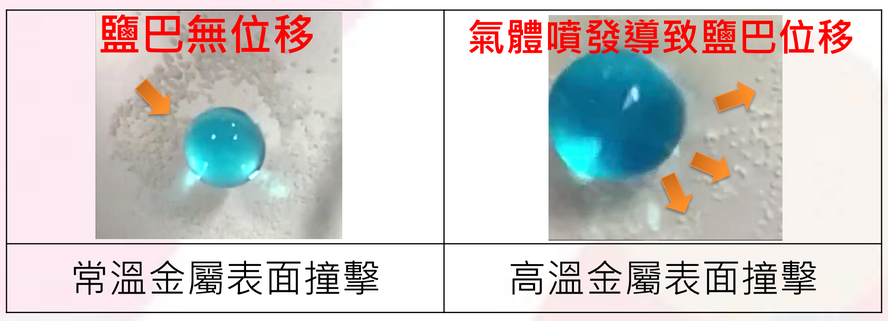
	位置	加速度	速度	恢復係數	能量
常溫	逐漸下降	逐漸下降	逐漸變小	逐漸下降	逐漸變小
160°C	維持一定高度	維持一定	穩定不變	逐漸趨近於 1	維持一定

實驗9:聚丙烯酸鈉與加熱板作用之噴發氣體測試

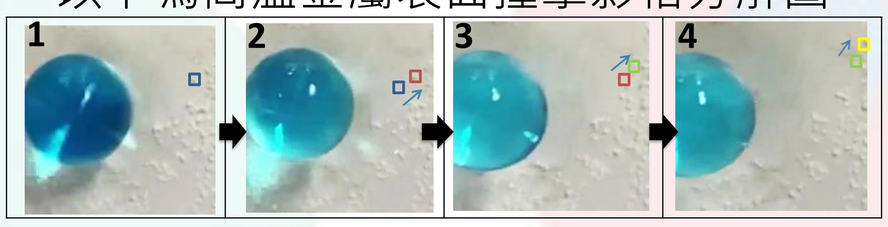
實驗方式

為了確認水晶寶寶跳動時下方有噴發氣體，我們於水晶寶寶跳動周邊放置鹽巴，並觀察水晶寶寶在有加熱與無加熱跳動時，對其造成的位移變化。

實驗結果與分析



以下為高溫金屬表面撞擊影格分解圖



高溫狀態的撞擊瞬間，可以發現鹽巴有劇烈的震動，並朝向與水晶寶寶中心相反的方向移動。

四 研究四：探討聚丙烯酸鈉於高溫材質表面跳躍的應用

實驗10：聚丙烯酸鈉撞擊壓電晶片之發電測試

實驗方式

在水晶寶寶跳躍高度範圍內，再放置一金屬板，**限制其跳躍高度。並黏置壓電晶片**，連接三用電表。使其於跳動過程中撞擊，觀察電壓變化，如右圖10-1所示。

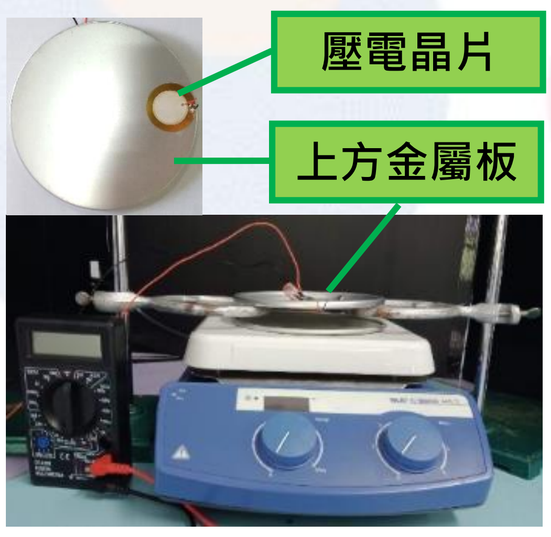


圖10-1：壓電晶片與實驗裝置圖

實驗結果與分析

一、輸出電壓分析

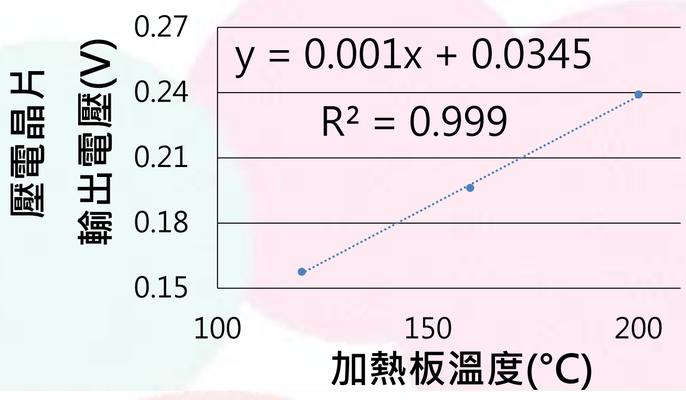


圖10-2：壓電晶片輸出電壓與加熱板溫度關係圖

1. 水晶寶寶可在限制其跳躍高度的情況下，持續撞擊上方壓電晶片。
2. 其輸出電壓與加熱版溫度於範圍內呈線性關係。

二、運動學分析

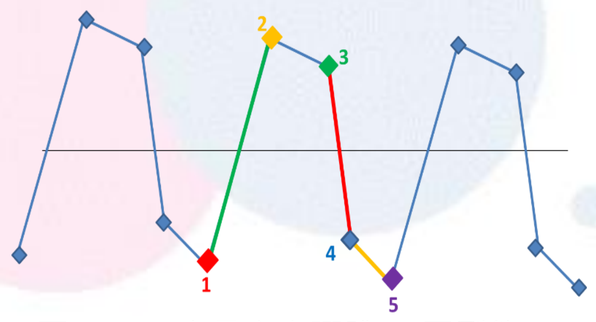


圖10-3：水晶寶寶彈跳v-t圖型態

透過分析，發現速度的每個週期皆有5個階段以及三種斜率，如圖10-3。各階段分解說明：

階段	說明	階段	說明
點1	開始撞擊下方加熱板的瞬間	點3	撞擊到上方壓電晶片的瞬間
線段1→2	撞擊加熱板的過程，準備向上反彈	線段3→4	撞擊壓電晶片的過程，準備向下彈回
點2	離開加熱板瞬間	點4	離開壓電晶片瞬間
線段2→3	往上飛的過程，受到重力影響，速度逐漸下降	線段4→5	自由落體落下
		點5	開始撞到下方加熱板瞬間，完成一個週期的循環

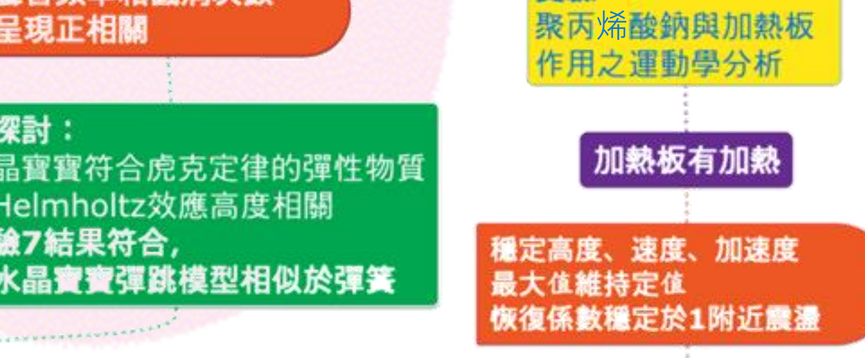
本實驗確認聚丙烯酸鈉可用於能量傳遞，因其能量較小，適用的尺度不同，是一種新穎的能量傳遞方式，**使高含水物質於加熱板中獲取熱能轉換成動能，且撞擊過程可以維持數分鐘，具有用於軟物質領域潛力。**

研究綜合討論

持續彈跳的動力來源，是否源自於與高溫加熱板接觸，瞬間氣化的水蒸氣？ ↔ 聚丙烯酸鈉的Leidenfrost效應分析

聚丙烯酸鈉的Leidenfrost效應分析
- 確認高頻聲音來自於與加熱板之撞擊瞬間
  - 實驗0：聚丙烯酸鈉與加熱板作用之高頻聲音初探
    - 高頻聲音為水晶寶寶撞擊到加熱板過程中所發出！
  - 確認高頻聲音：來自於氣體劇烈震動
    - 實驗6：球體直徑對跳動聲音頻率的影響分析
      - 聲音頻率與直徑倒數呈現正相關
      - 文獻探討：1.水滴Leidenfrost效應之蒸氣層振動頻率 2.管子噴氣震動聲音頻率 與實驗6結果符合，推測聲音來自氣體震動！
    - 實驗7：球體戳洞次數對跳動聲音頻率的影響分析
      - 聲音頻率和戳洞次數呈現正相關
      - 文獻探討：1.水晶寶寶符合虎克定律的彈性物質 2.與Helmholtz效應高度相關 與實驗7結果符合，推測水晶寶寶彈跳模型相似於彈簧
    - 可解釋實驗2、3、5的結果
      - 實驗結果可解釋高頻聲音與氣體震動相關！
  - 確認能量來源：動力學的分析觀點
    - 實驗8：聚丙烯酸鈉與加熱板作用之運動學分析
      - 加熱板有加熱
      - 穩定高度、速度、加速度最大值維持定值 恢復係數穩定於1附近震盪
      - 能量於碰撞過程中不斷補充
      - 水晶寶寶跳動能量來自於加熱板碰撞過程！
    - 實驗9：聚丙烯酸鈉與加熱板作用之噴發氣體測試
      - 加熱板有加熱
      - 鹽巴發生位移
      - 高溫造成水分快速氣化噴發出氣體
      - 水晶寶寶與加熱板接觸面有大量氣體生成！
  - 綜合聲音分析、動力學分析，提出物理模型
    - 文獻探討 ↔ 水球彈跳的高速攝影影片

- 提出模型



- 1.水晶寶寶掉落的過程
- 3.空中變回原形的過程

- 2(1).水晶寶寶撞擊到加熱板，接收大量熱量
- 2(4).延續階段2(3)，熱量累積使水份汽化產生的氣體越來越多，回到階段2(2)
- 2(2).接觸面水份快速汽化生成氣體，氣壓持續變大，造成底部形變壓縮，同時氣體向外噴發
- 2(3).氣體向外噴發後，氣壓下降，又因慣性造成水晶寶寶底部形變伸長，再次貼近加熱板

研究結論

聚丙烯酸鈉(水晶寶寶)於加熱板溫度80°C開始出現穩定跳動，並發出高頻聲音。溫度越高，跳動高度越低且聲音頻率越高。經測試確認，其為符合虎克定律的彈性固體，撞擊高溫金屬板所發出的聲音頻率，符合簡諧運動振動頻率$f \propto \sqrt{k}$的形式。透過動力學分析，發現高溫狀態下的恢復係數，穩定於$e = 1$附近震盪；確認撞擊瞬間，高溫使水分快速汽化，進而噴發出氣體；也成功透過水晶寶寶實現「熱能→動能→電能」的能量轉換。最後提出物理模型針對觀測之現象進行解釋，論證此現象屬於高含水彈性固體之Leidenfrost效應。