

# 中華民國第 56 屆中小學科學展覽會 作品說明書

---

高級中等學校組 物理與天文學科

佳作

051815

「珠」思泉湧

學校名稱：臺北市立中山女子高級中學

作者：  高二 洪瑄璟  高二 李奕萱  高二 張語庭	指導老師：  蘇益加
---	------------------

關鍵詞：反重力、珠鍊噴泉

## 壹、 摘要

本研究為更加了解珠鍊噴泉現象，而以塑膠珠鍊、銅製珠鍊進行模擬，其中銅製珠鍊又分為施放高度、杯子深度、珠鍊重量、杯子口徑四大變因作為探討內容。我們推測噴泉現象的產生與珠鍊緊繃程度無關，但可能與不同材質珠子的恢復係數有相關聯。我們由實驗發現珠鍊上升高度與施放高度成正相關、與杯子深度成負相關、與杯子口徑成負相關；噴泉總上升高度與珠子質量成正相關，並得知沒有杯壁銅製珠鍊也可發生噴泉現象。

## 貳、 研究動機

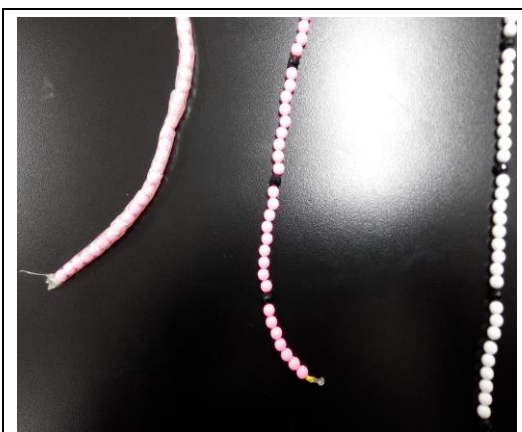
我們在物理課中學到地球的重力是一種將物體拉向地面的力，然而我們開始思考難道所有的物體都會受到重力的影響嗎？於是我們展開一連串的調查，後來接觸到反重力這個名詞，覺得既新鮮又有趣，進而決定朝這個方向進行研究，在偶然的機遇下，看到了一個有關珠鍊噴泉現象的影片，沒想到珠鍊在流出杯子時並不是沿著杯壁流出，反而像是反重力一般高高飛起，這讓我們全都開了眼界，深深地被眼前的影像所吸引，看似不可能的反重力現象在眼前出現，大家都露出興奮且驚奇的神情，接著就是一頭栽入了這個現象的探討，如火如荼地開始進行實驗，看著一次次珠鍊從杯中扶搖直上，便更想了解珠鍊噴泉的現象究竟是如何產生？有什麼力量驅使著它呢？一切的一切都是謎團，要由我們親自找出真相，明白其中的奧妙。

## 參、 研究目的

- 一、 嘗試模擬反重力珠鍊噴泉現象
- 二、 探討以不同方式處理的塑膠珠鍊是否影響噴泉現象的產生
- 三、 使用銅製珠鍊探討施放高度與珠鍊上升高度的關係
- 四、 使用銅製珠鍊探討杯子深度與珠鍊上升高度的關係
- 五、 使用銅製珠鍊探討珠子大小與珠鍊上升高度的關係
- 六、 使用銅製珠鍊探討杯壁有無是否影響噴泉現象
- 七、 使用銅製珠鍊探討杯子口徑與珠鍊上升高度的關係

## 肆、 研究設備及器材

器材	規格
塑膠珠子	6.0mm
釣魚線	3.0mm , 10.0m
燒杯	500ml
熱熔膠	
剪刀	
膠帶	
擋豆	線徑#1-3
銅製珠鍊	珠子直徑 4.0mm、4.5mm、6.4mm、 8.0mm、10.0mm，皆 20.0m
經過處理的量筒	口徑 61.32 mm
白色珍珠板	
木板	64cm(長)x10cm(寬)x1.7cm(高)
捲尺	5.5m
腳架	
Tracker	版本：Tracker 4.87
不同口徑的紙杯	口徑：85.1mm、97.66mm、110.20mm、 136.34mm、147.36mm
報紙	
絕緣膠帶	
攝影機	GZ-EX310AU



▲圖一 經三種處理的塑膠珠鍊



▲圖二 不同質量的銅製珠鍊



▲圖三 不同口徑大小的紙杯

## 伍、 研究過程或方法

### 一、研究方法

#### (一) 實驗原理：

我們的模型包括一個每單位長度質量  $\lambda$  的珠鍊，其中一堆在一個高度  $h_1$  的桌子上，珠鍊噴泉到地面的軌跡是先垂直向上的高度  $h_2$ ，接著在高處有個轉折，然後垂直向下行進的距離為  $(h_1 + h_2)$ ，最後才停止在地板上。在穩定狀態下，鍊上所有在運動的部件速率皆為  $v$ 。在我們的最初的分析中，我們假設在噴泉的頂點的彎曲區域足夠小，並有足夠的曲率，該向心加速度大於重力加速度 ( $\frac{v^2}{r} \gg g$ )，然後向心加速度由該鍊中的張力所提供。如果曲率半徑為  $r$ ，在彎曲區域的張力是  $T_c$

$$\frac{T_c}{r} = \frac{\lambda v^2}{r} \Rightarrow T_c = \lambda v^2 \quad (\text{式 1})$$

桌面上珠鍊的垂直部分的所有運動是以恆定速度在運動，所以在其上的力必須平衡，而得到

$$T_c = T_T + \lambda h_2 g \quad (\text{式 2})$$

珠鍊的  $h_2$  部分的重量為  $\lambda g h_2$ ，而張力  $T_T$  指的是桌面正上方珠鍊的張力。

$$T_c = T_F + \lambda(h_2 + h_1)g \quad (\text{式 3})$$

同樣，對於上述地面的垂直部分，其中張力  $T_F$  是地面正上方珠鍊的張力

在時距  $dt$ ，從桌面拉起質量  $\lambda v dt$  的珠鍊，其動量為  $\lambda v dt$ ，由此我們可以求出  $T_T = \lambda v^2$

將此代入(式 2)及(式 3)即可得到  $h_2 = 0$ (無噴泉現象發生時)

珠鍊被帶至地面上時呈現靜止狀態，即代表  $T_F = 0$ ，再將  $h_2 = 0$ 、 $T_F = 0$  代入(式 2)及(式

3)即求出珠鍊速度  $v = \sqrt{h_1 g}$

當珠鍊噴泉產生時  $h_2 > 0$ ，則  $T_T < \lambda v^2$ 。如果珠鍊上的張力沒有提供足夠的動量讓珠鍊飛起，此力量來源的唯一可能就是來自杯中的珠鍊，所以假設杯中珠鍊提供的力量為  $R$ 。

而  $T_F$  為提供珠鍊減速致靜止至地面的力，所以拉動珠鍊向上飛起的力只有  $T_T$ 、 $R$ ，則

(式 2)即可改為  $T_T + R = \lambda v^2$

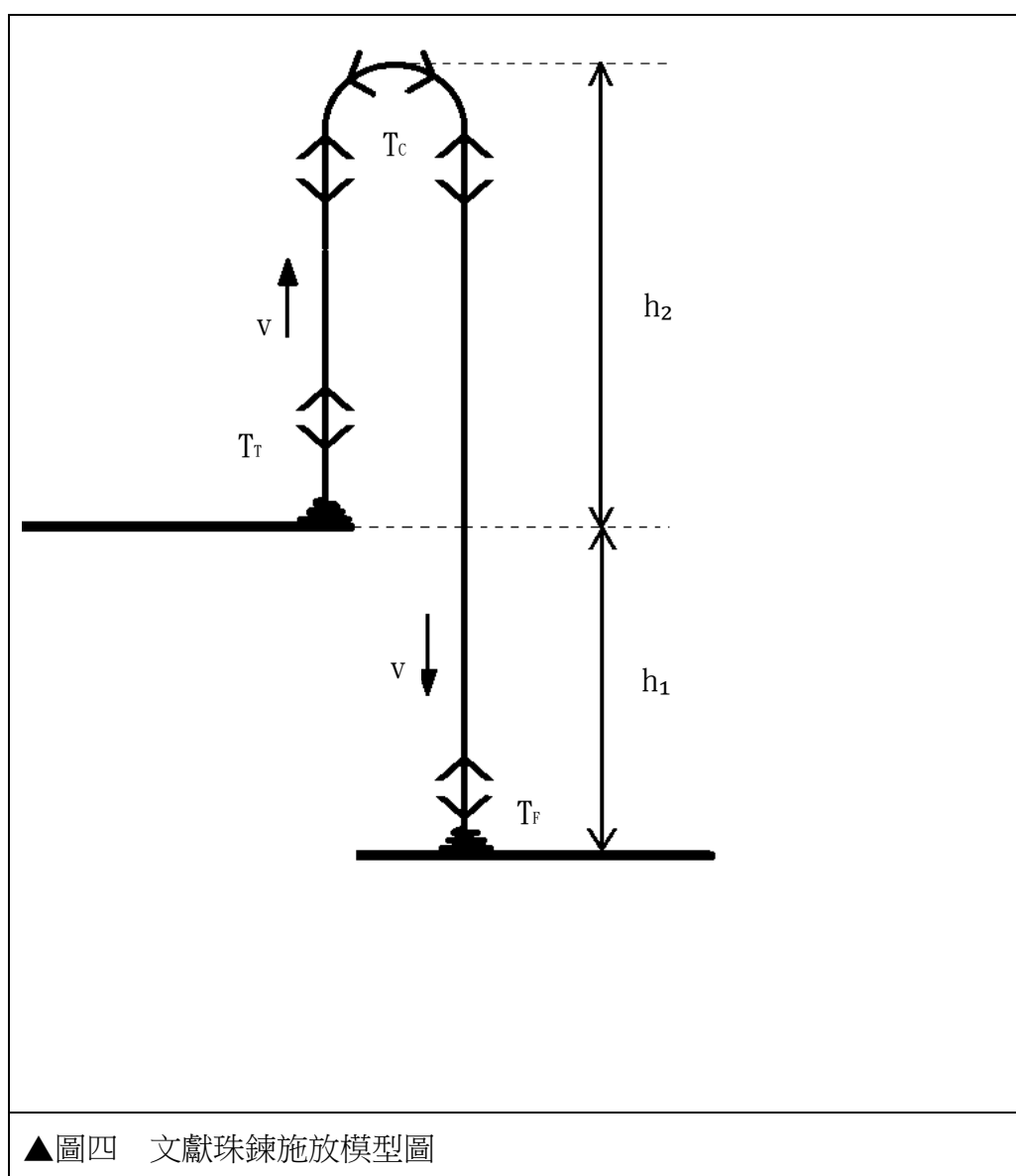
在一維中，所有力皆正比於  $\lambda v^2$ ，所以可假設

$$R = \alpha \lambda v^2 \text{ 和 } T_f = \beta \lambda v^2$$

將其代入(式 3)，即可求出

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{\alpha}{1 - \alpha - \beta} = k \quad (\text{式 4})$$

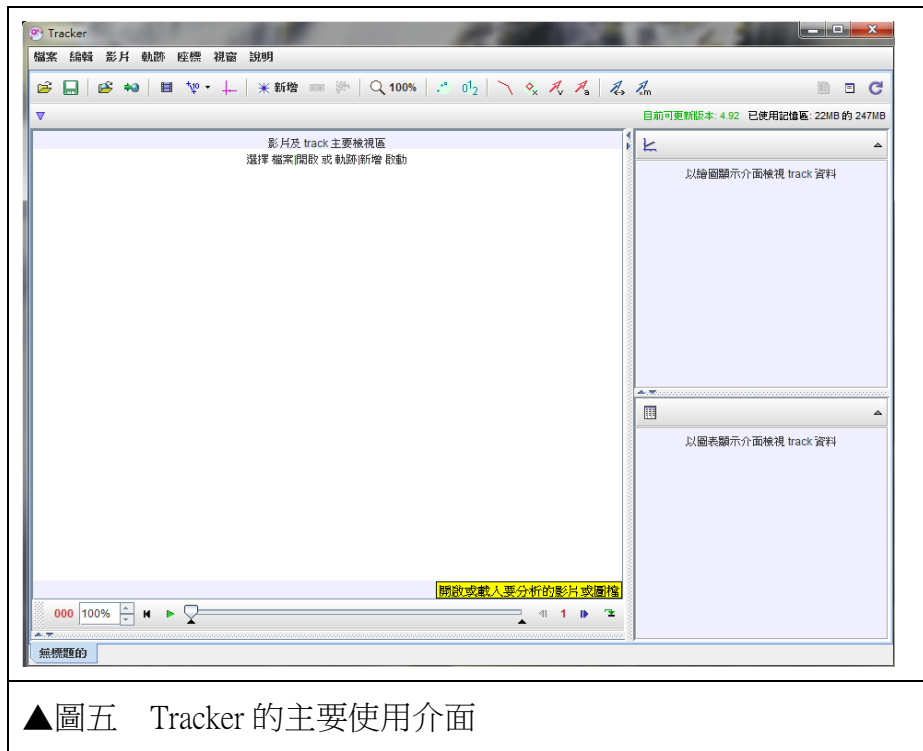
由(式 4)可知  $h_2$  正比於  $h_1$



## 二、實驗過程

### (一) 分析方式

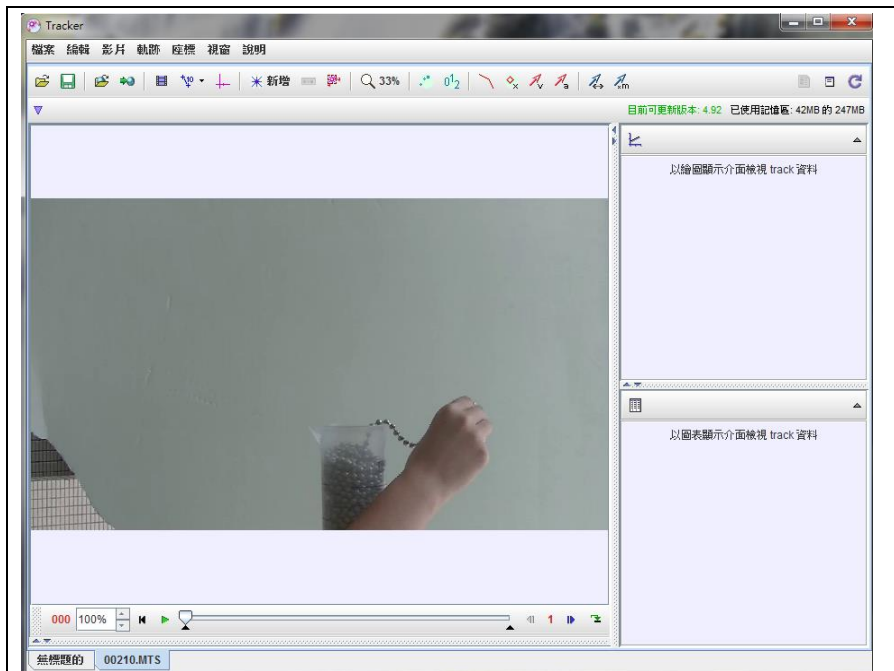
Tracker 軟體是一個建立於 Open Source Physics (OSP) Java 架構下的免費的影像分析與建模工具，適合的作業系統有 Windows、MacOS、Linux。



▲圖五 Tracker 的主要使用介面

#### 1. 開啟影像檔

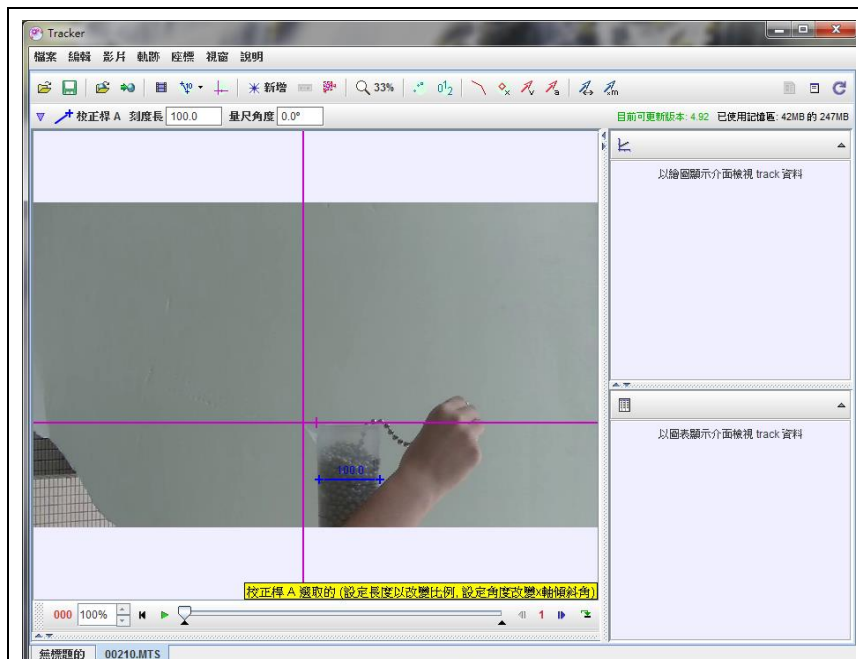
- (1). 從「檔案」中開啟影像檔，其格式可以是 mov、avi、mp4、flv、wmv 或者是動畫式的 gif 以及一系列的 jpg、png。



▲圖六 開啟影像檔

2. 設定時空座標系統及校正桿

- (1). 選取「顯示或隱藏坐標軸」，將坐標軸拖曳至欲設定的原點
- (2). 將校正桿兩端拉至影片中某個標準長度的兩端，再點選校正桿數值，輸入真實長度



▲圖七 設定時空座標系統及校正桿

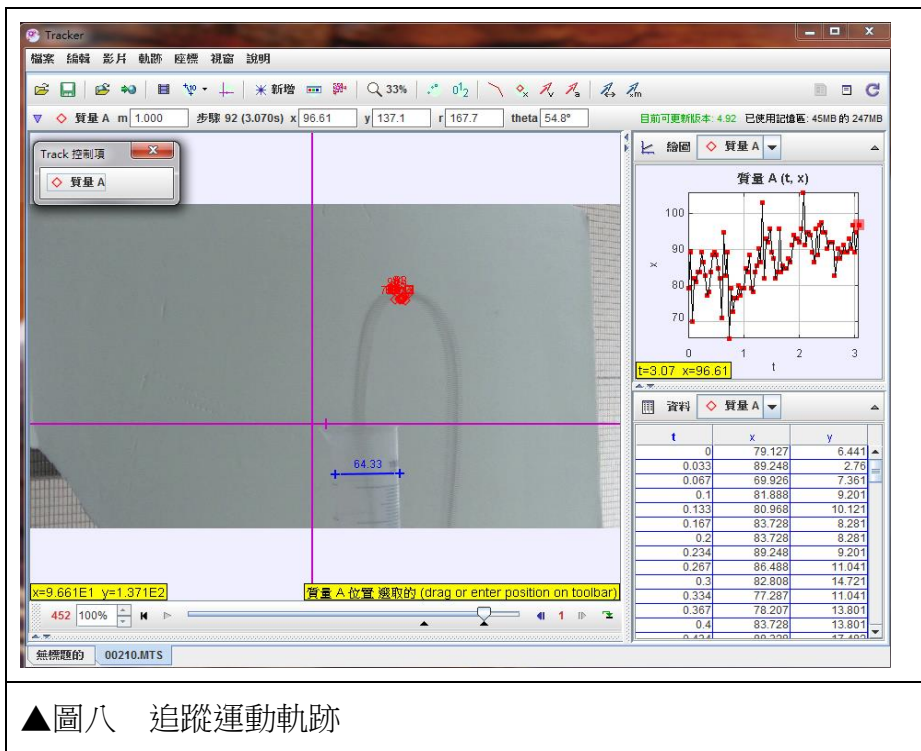


3. 設定開始與結束影格

- (1). 使用播放，找出欲觀測物體移動的開始影格
- (2). 在視頻移動桿上按右鍵，選取「設定視頻移動桿位置為起始幀」，即可設定開始影格，以相同方法可設定結束影格

4. 追蹤運動軌跡

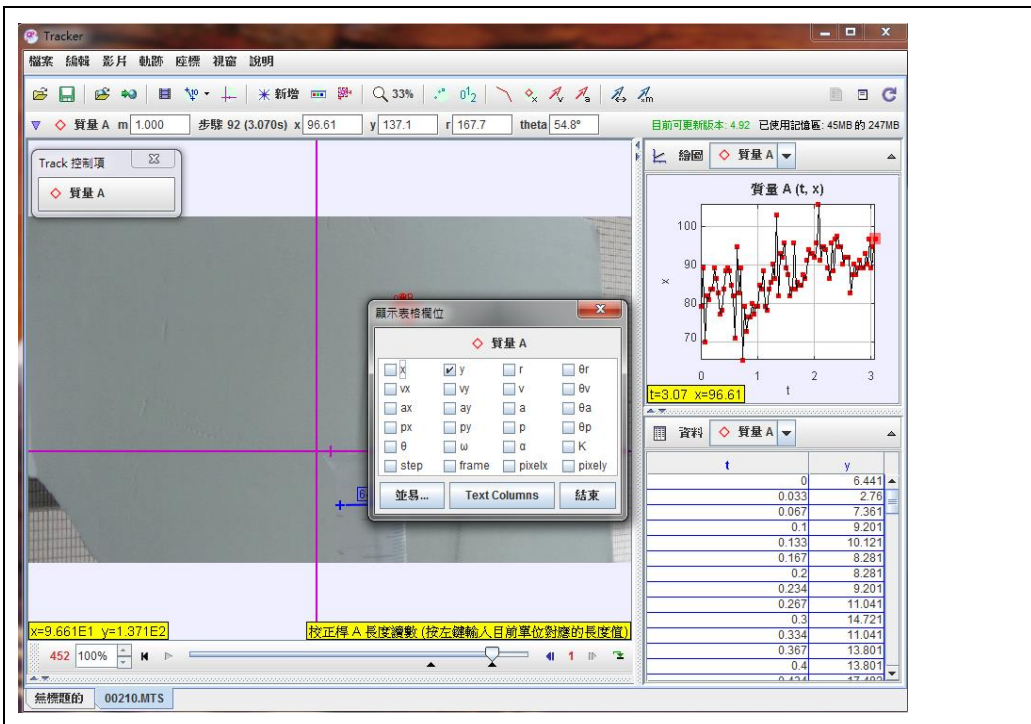
- (1). 點選「新增」，新增一個質點
- (2). 按住 shift 鍵再按下滑鼠以標示位置



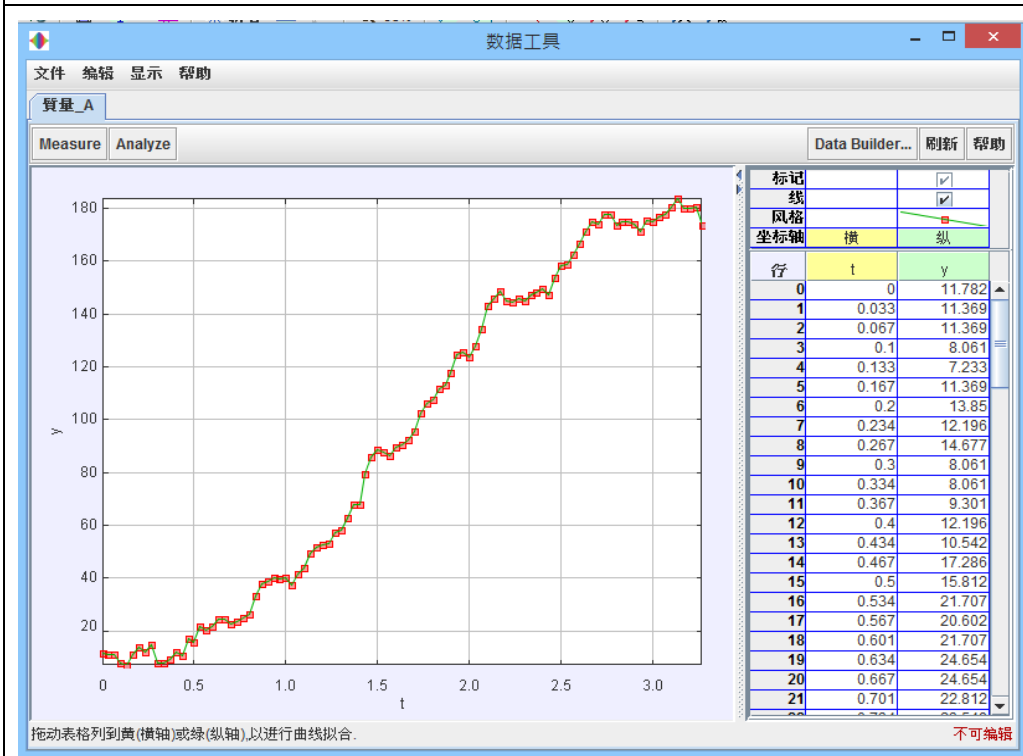
▲圖八 追蹤運動軌跡

5. 數據分析與處理

- (1). 在視窗右下角的區塊點選「資料」，取消勾選 X
- (2). 接著在區塊任意處按右鍵，會出現選單
- (3). 選擇「分析」，即出現時間對縱軸的圖表
- (4). 將平衡位置的數據平均求值得珠鍊噴泉上升高度



▲圖九 顯示表格單位的選單

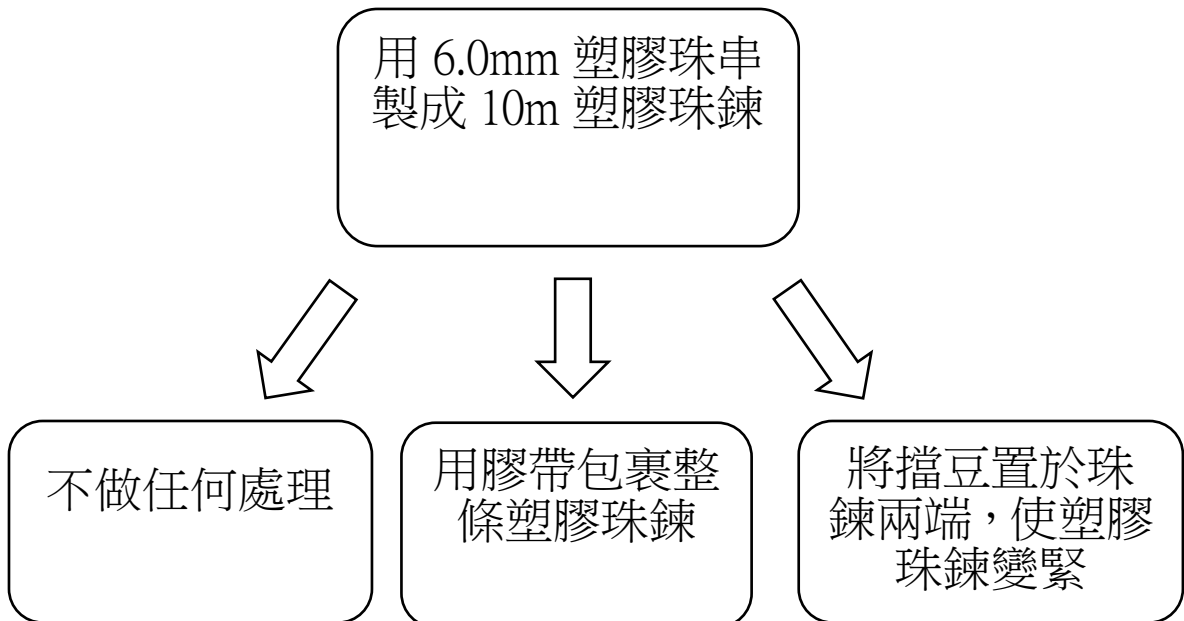


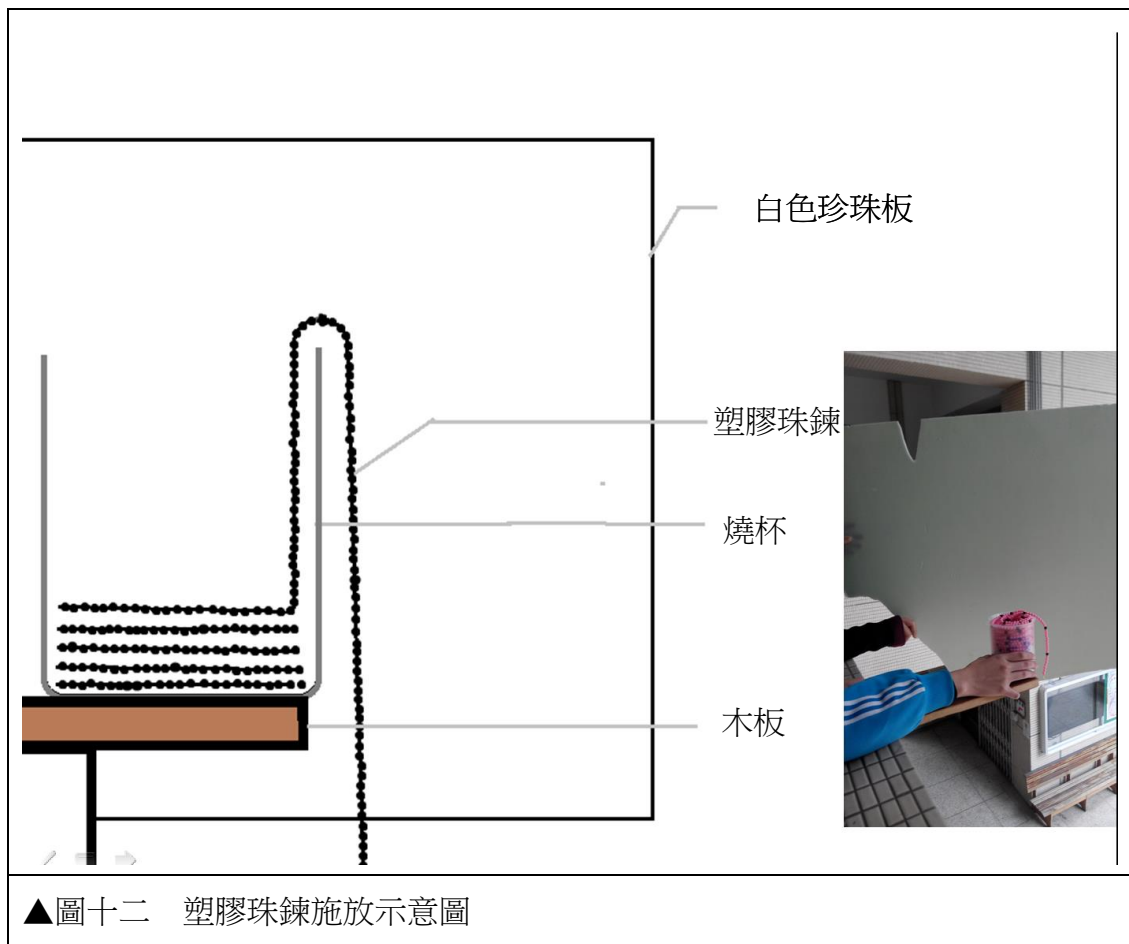
▲圖十 時間對縱軸的圖表



▲圖十一 平衡位置數據求平均

(二) 實驗一：塑膠珠鍊噴泉(模擬反重力噴泉現象)





### 實驗一-1 使用塑膠珠鍊模擬反重力噴泉現象

#### 1. 實驗步驟：

- (1). 利用直徑 6 mm 的塑膠珠子串製 10 m 的塑膠珠鍊
- (2). 將塑膠珠鍊以繞圈方式規則地放入燒杯中
- (3). 把繞好珠鍊的燒杯放置木板邊緣
- (4). 將木板拿至 2 樓(372.3cm)擺在女兒牆上，並使放置燒杯的一端突出女兒牆
- (5). 將珠鍊一端拉出燒杯外施放
- (6). 架設攝影機全程拍攝珠鍊施放過程

#### 2. 實驗結果：

- (1). 無法讓塑膠珠鍊出現噴泉現象
- (2). 推測因為塑膠珠子間結構較鬆散，導致噴泉現象無法出現，所以嘗試使用膠帶包裹塑膠珠鍊，以增加珠鍊緊繃程度

### 實驗一-2 使用膠帶包裹整條塑膠珠鍊以模擬反重力噴泉現象

#### 1. 實驗步驟：

- (1). 利用直徑 6.0 mm 的塑膠珠子串製 10 m 的塑膠珠鍊
- (2). 用膠帶包裹整條塑膠珠鍊
- (3). 將包裹膠帶的塑膠珠鍊以繞圈方式規則地放入燒杯中
- (4). 把繞好珠鍊的燒杯放置木板邊緣
- (5). 將木板拿至 2 樓(372.3cm)擺在女兒牆上，並使放置燒杯的一端突出女兒牆
- (6). 將珠鍊一端拉出燒杯外施放
- (7). 架設攝影機全程拍攝珠鍊施放過程

#### 2. 實驗結果：

- (1). 包裹膠帶環繞時造成珠鍊間的阻力過大，導致珠鍊無法順利滑出杯外
- (2). 改以擋豆置於珠鍊兩端，以增加珠鍊緊繃程度(線密度)，及避免環繞時造成珠鍊間的阻力過大導致噴泉現象無法出現

### 實驗一-3 使用擋豆塑膠珠鍊以模擬反重力噴泉現象

#### 1. 實驗步驟：

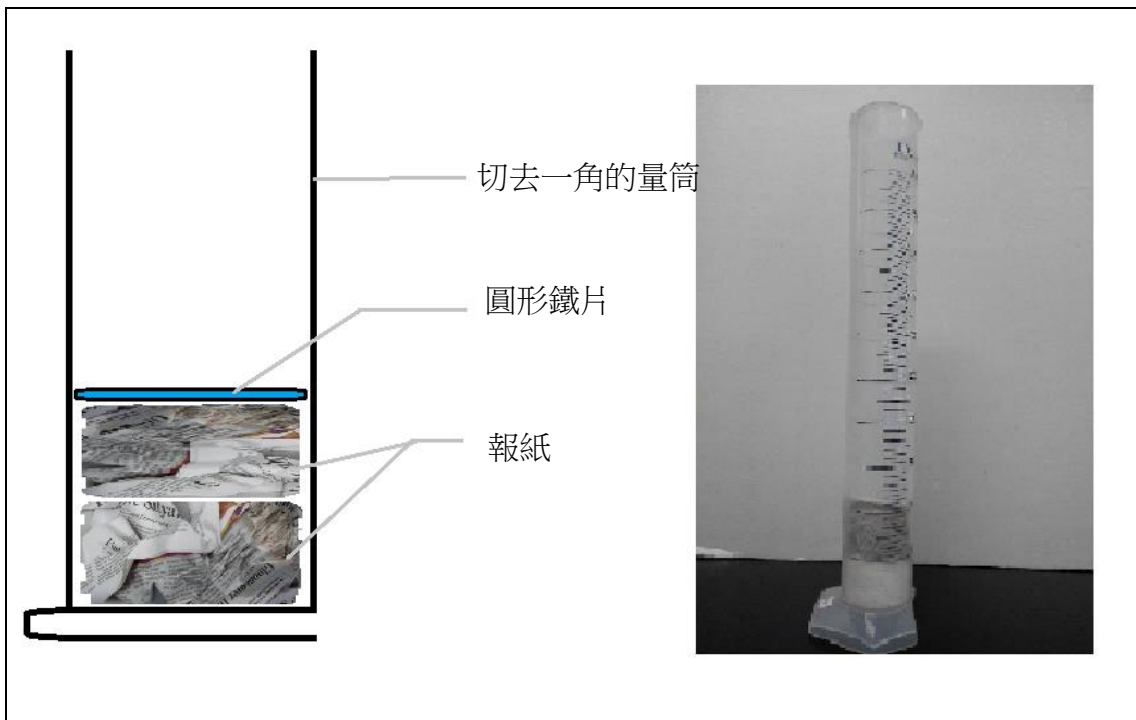
- (1). 利用直徑 6.0 mm 的塑膠珠子串製 10 m 的塑膠珠鍊
- (2). 將擋豆置於珠鍊兩端，使塑膠珠鍊變緊
- (3). 將塑膠珠鍊以繞圈方式規則地放入燒杯中
- (4). 把繞好珠鍊的燒杯放置木板邊緣
- (5). 將木板拿至 2 樓(372.3cm)擺在女兒牆上，並使放置燒杯的一端突出女兒牆
- (6). 將珠鍊一端拉出燒杯外施放
- (7). 架設攝影機全程拍攝珠鍊施放過程

#### 2. 實驗結果：

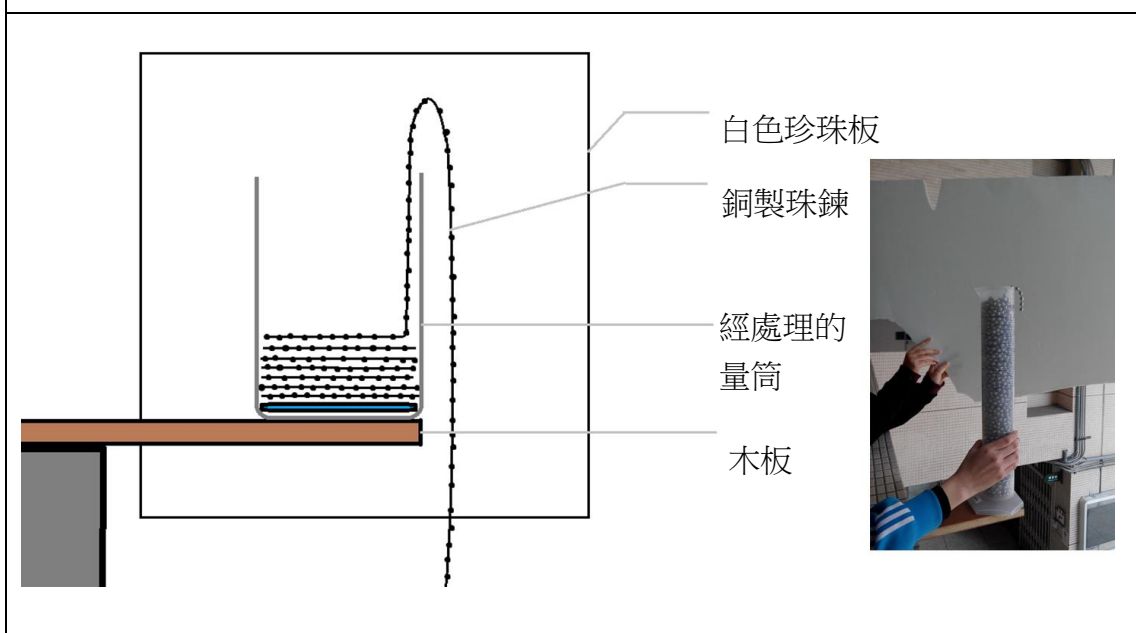
- (1). 無法讓塑膠珠鍊出現噴泉現象
- (2). 推測塑膠珠鍊繃緊的程度與噴泉現象的產生無主要相關性，因此改用質量較大的銅製珠鍊模擬反重力噴泉現象

### (三) 實驗二：銅製珠鍊噴泉

#### 實驗二-1 使用銅製珠鍊模擬反重力噴泉現象



▲圖十三 經過處理的量筒



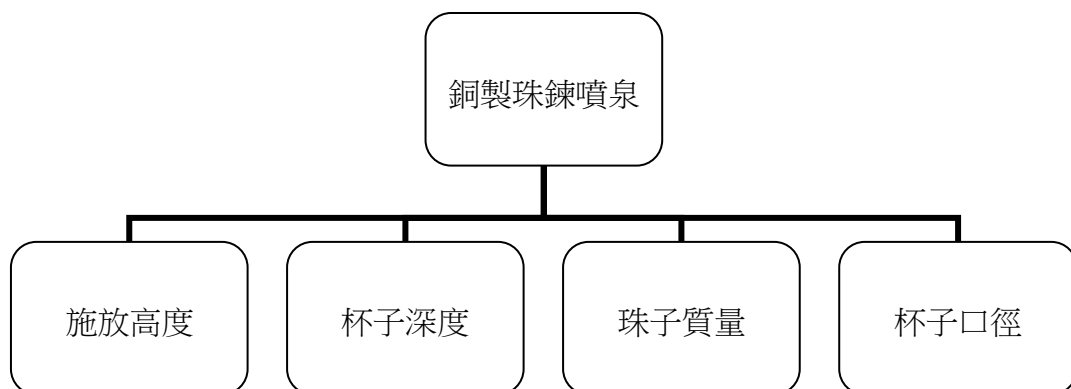
▲圖十四 銅製珠鍊施放示意圖

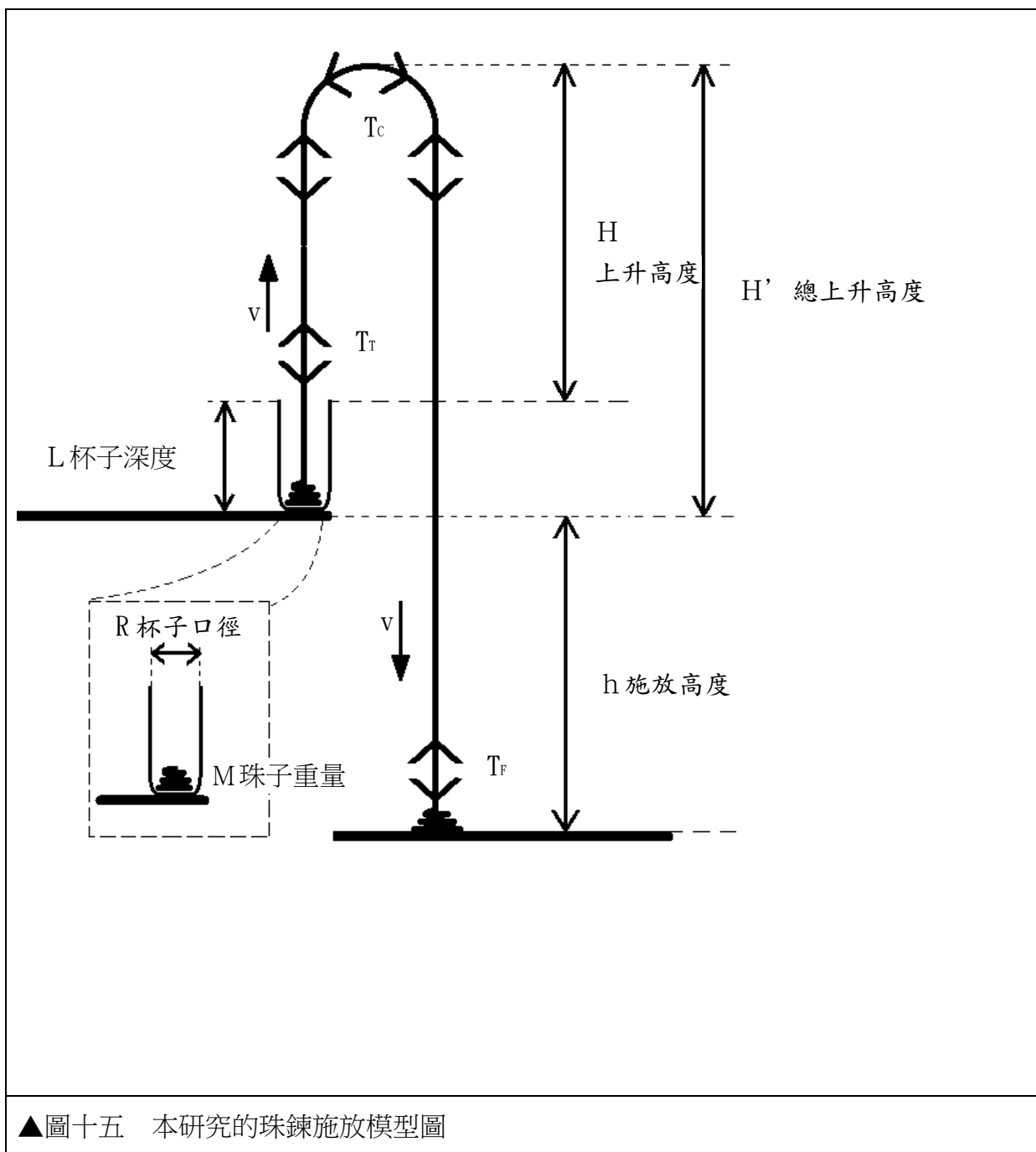
1. 實驗步驟：

- (1). 將銅製珠鍊(珠子直徑 6.4mm ,珠鍊總長 20m)以繞圈方式規則地放入經過處理的量筒中
- (2). 把繞好珠鍊的燒杯放置木板邊緣
- (3). 將木板拿至 2 樓(372.3cm)擺在女兒牆上，並使放置量筒的一端突出女兒牆
- (4). 將珠鍊一端拉出燒杯外施放
- (5). 架設攝影機全程拍攝珠鍊施放過程

2. 實驗結果：

- (1). 銅製珠鍊成功出現噴泉現象
- (2). 開始進一步探討影響噴泉現象的變因





▲圖十五 本研究的珠鍊施放模型圖



## 實驗二-2 使用銅製珠鍊探討施放高度與珠鍊上升高度的關係

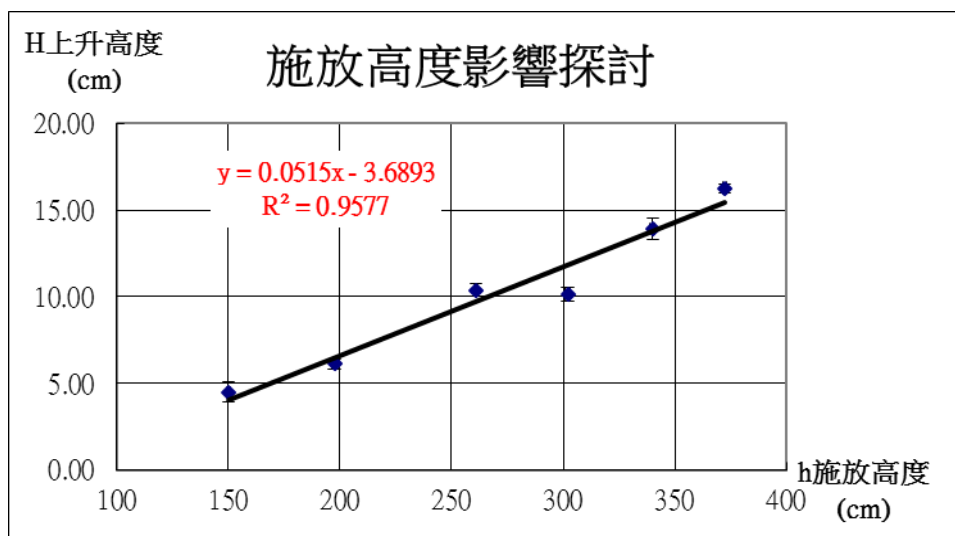
### 1. 實驗步驟：

- (1). 將銅製珠鍊(珠子直徑 6.4mm,珠鍊總長 20m)以繞圈方式放入經過處理的量筒中
- (2). 將繞好的珠鍊置於木板邊緣
- (3). 將木板拿至 2 樓(372.3cm)擺在女兒牆上，並使放置燒杯的一端突出女兒牆
- (4). 將珠鍊一端拉出燒杯外施放
- (5). 以白色珍珠板作為背景放置在後方
- (6). 架設攝影機全程拍攝珠鍊施放過程
- (7). 利用 Tracker 軟體進行影片分析
- (8). 再將數據匯入 Excel 進行數據分析
- (9). 將施放高度改為 150.0 cm、197.5 cm、261.0 cm、302.0 cm、340.0 cm

重複步驟(1)~(8)

### 2. 實驗結果：

h 施放高度 (cm)	H 上升高度(cm)				H 平均(cm)	平均標準差
150.0	3.41	4.63	6.06	3.85	4.49	0.58
197.5	5.55	6.92	5.93	6.17	6.14	0.29
261.0	11.10	10.89	10.03	9.50	10.38	0.37
302.0	10.63	10.81	10.17	9.05	10.17	0.40
340.0	14.20	14.48	14.91	12.13	13.93	0.62
372.3	15.85	17.13	16.10	16.02	16.28	0.25



- (1). 珠鍊噴泉的過程中，珠鍊會往上升，最後維持固定高度(有時下降)
- (2). 發現噴泉上升高度與施放高度成正相關

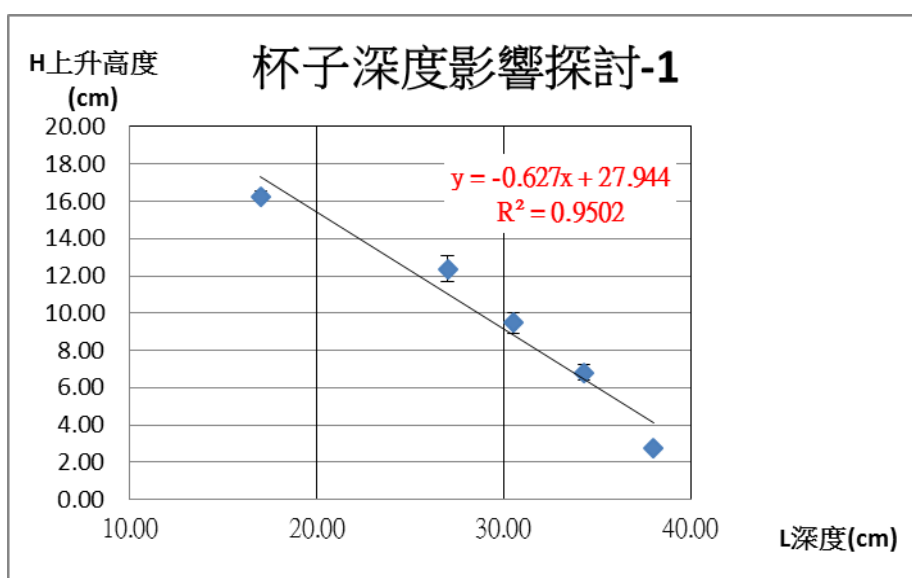
### 實驗二-3 使用銅製珠鍊探討杯子深度與珠鍊上升高度的關係

#### 1. 實驗步驟：

- (1). 量筒底部塞入報紙墊高及圓形鐵片，使量筒產生深度不同的差別
- (2). 將銅製珠鍊(珠子直徑 6.4mm,珠鍊總長 20m)以繞圈方式放入經過處理深度 38.0 cm 的量筒中
- (3). 將繞好的珠鍊置於木板邊緣
- (4). 將木板拿至 2 樓(372.3 cm)擺在女兒牆上，並使放置燒杯的一端突出女兒牆
- (5). 將珠鍊一端拉出燒杯外施放
- (6). 以白色珍珠板作為背景放置在後方
- (7). 架設攝影機全程拍攝珠鍊施放過程
- (8). 利用 Tracker 軟體進行影片分析
- (9). 再將數據匯入 Excel 進行數據分析
- (10). 將量筒深度改為 34.3 cm、30.5 cm、27.0 cm、25.2 cm 重複步驟 (1)~(9)

## 2. 實驗結果：

L 深度(cm)	H 上升高度(cm)				H 平均 (cm)	平均標準差	H'總上升高度 (cm)
38.00	2.72	2.83	3.01	2.41	2.74	0.13	40.74
34.30	6.85	7.96	6.00	6.47	6.82	0.42	41.12
30.50	10.34	8.65	10.40	8.47	9.47	0.52	39.97
27.00	12.49	10.46	13.50	13.06	12.38	0.67	39.38
17.00	17.13	16.10	16.02	15.85	16.28	0.29	33.28



- (1). 發現噴泉上升高度與杯子深度成負相關

### 實驗二-4 使用銅製珠鍊探討珠子大小與珠鍊上升高度的關係

#### 1. 實驗步驟：

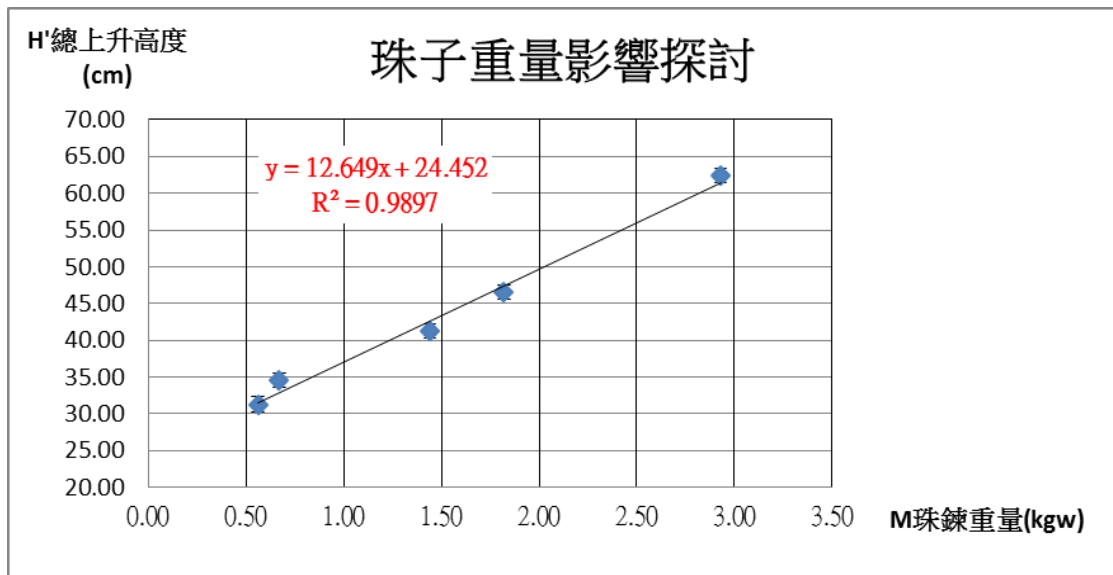
- (1). 量筒底部塞入報紙墊高及圓形鐵片，使珠鍊繞完後剛好達到杯口
- (2). 將珠子直徑 6.4mm 的銅製珠鍊以繞圈方式放入經過處理的量筒中
- (3). 將繞好的珠鍊置於木板邊緣
- (4). 將木板拿至 2 樓(372.3cm)擺在女兒牆上，並使放置燒杯的一端突出女兒牆
- (5). 將珠鍊一端拉出燒杯外施放
- (6). 以白色珍珠板作為背景放置在後方
- (7). 架設攝影機全程拍攝珠鍊施放過程
- (8). 利用 Tracker 軟體進行影片分析

(9). 再將數據匯入 Excel 進行數據分析

(10). 將珠子大小改為 4.0mm、4.5mm、8.0mm、10.0mm 重複步驟(1)~(9)

2. 實驗結果：

M 珠鍊重量 (kgw)	H 上升高度(cm)				H 平均 (cm)	平均標準差	H'總上升高度(cm)
0.56	17.54	18.64	21.06	17.06	18.58	4.10	31.28
0.67	16.49	14.44	18.69	16.97	16.65	3.65	34.55
1.44	15.85	17.13	16.10	16.02	16.28	3.33	41.28
1.82	8.88	8.67	9.38	7.45	8.60	1.56	46.60
2.93	8.53	6.43	6.13	5.39	6.62	1.01	62.42



(H' 總上升高度=珠子上升高度+杯子深度)

(1). 發現噴泉總上升高度與珠子質量成正相關

## 實驗二-5 使用銅製珠鍊探討杯壁有無是否影響噴泉現象

### 1. 實驗步驟：

- (1). 把口徑 8.510cm 的紙套放置於木板邊緣
- (2). 將珠子直徑 6.4mm 的銅製珠鍊以繞圈方式放入紙套中
- (3). 珠鍊繞好後，將紙套拉起
- (4). 將木板拿至 2 樓(372.3cm)擺在女兒牆上，並使放置珠鍊的一端突出女兒牆
- (5). 將珠鍊一端拉出木板外施放
- (6). 以白色珍珠板作為背景放置在後方
- (7). 架設攝影機全程拍攝珠鍊施放過程

### 2. 實驗結果：

- (1). 銅製珠鍊成功出現噴泉現象
- (2). 因為杯套拿起後規則立起的珠鍊會稍微塌掉，導致無法比較，因此我們進而開始探討杯子口徑與珠鍊上升高度的關係

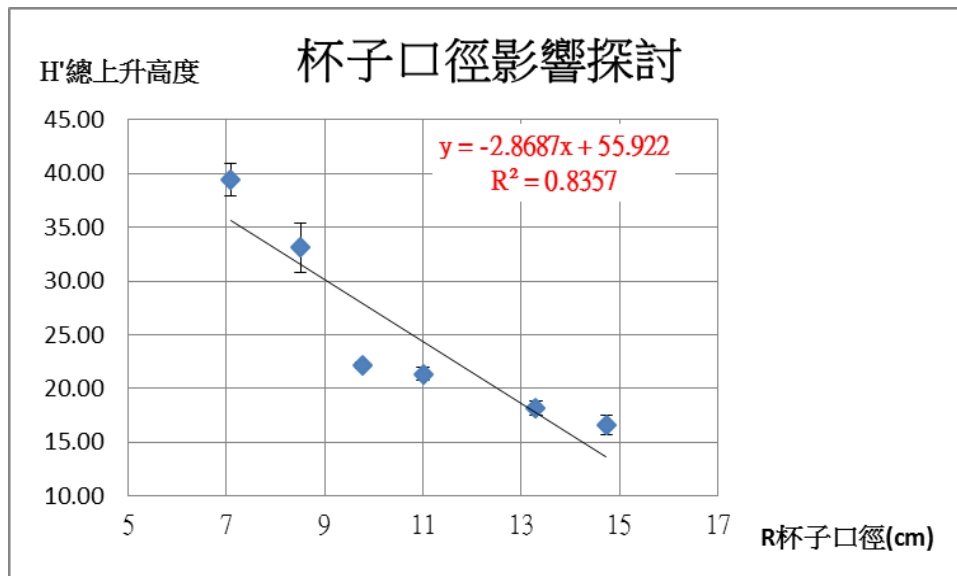
## 實驗二-6 使用銅製珠鍊探討杯子口徑與珠鍊上升高度的關係

### 1. 實驗步驟：

- (1). 使用紙板製作不同口徑的紙杯，再用絕緣膠帶增加杯口的硬度
- (2). 將珠子直徑 6.4mm 的銅製珠鍊以繞圈方式放入口徑 8.510cm 的自製紙杯中
- (3). 將繞好的珠鍊置於木板邊緣
- (4). 將木板拿至 2 樓(372.3cm)擺在女兒牆上，並使放置燒杯的一端突出女兒牆
- (5). 將珠鍊一端拉出燒杯外施放
- (6). 以白色珍珠板作為背景放置在後方
- (7). 架設攝影機全程拍攝珠鍊施放過程
- (8). 利用 Tracker 軟體進行影片分析
- (9). 再將數據匯入 Excel 進行數據分析
- (10). 將自製紙杯的口徑改為 9.766 cm、13.634 cm、11.020 cm、14.746 cm 重複步驟(1)~(9)

2. 實驗結果：

R 杯子口徑 (cm)	H 上升高度(cm)				H 平均(cm)	平均標準差	H'總上升高度 (cm)
7.08	15.65	12.85	12.58	15.07	14.04	1.52	39.44
8.51	19.49	19.20	18.09	21.20	19.50	2.25	33.10
9.76	10.57	10.87	11.30	10.02	10.69	0.28	22.19
11.00	8.92	12.64	10.22	10.04	10.46	0.62	21.36
13.30	10.75	9.11	11.09	10.22	10.29	0.69	18.19
14.73	11.60	11.47	9.50	9.94	10.63	0.92	16.58



(H' 總上升高度=珠子上升高度+杯子深度)

(1). 發現噴泉上升高度與杯子口徑成負相關

## 陸、 討論

### 實驗一-1 使用塑膠珠鍊模擬反重力噴泉現象：

一開始我們使用塑膠製成的珠鍊模擬噴泉現象，但並沒有發現現象的產生。於是在查閱相關文獻後，推測是因為塑膠珠子之間的結構較為鬆散，導致噴泉現象無法出現，因此我們嘗試用膠帶包裹珠鍊，以增加其緊繃程度。

### 實驗一-2 使用膠帶包裹整條塑膠珠鍊以模擬反重力噴泉現象：

我們以膠帶包裹珠鍊，想藉此增加珠鍊的緊繃程度，但依舊沒有現象產生。其中，在實驗過程中我們發現，包裹膠帶造成珠鍊間的阻力過大，會導致珠鍊無法順利滑出杯外，於是我們改用擋豆，將其置於珠鍊的兩端，這樣能夠增加珠鍊的緊繃程度，同時也能避免在環繞時造成的阻力太大。

### 實驗一-3 使用擋豆塑膠珠鍊以模擬反重力噴泉現象：

我們改以擋豆置於珠鍊的兩端，但實驗結果顯示，仍然無法使塑膠珠鍊出現噴泉現象，於是我們推測噴泉現象的產生與珠鍊緊繃的程度無關。再次翻閱文獻後，發現文獻中所使用的均為金屬製成的珠鍊，因此我們改以銅製珠鍊重新模擬了反重力噴泉現象。

### 實驗二-1 使用銅製珠鍊模擬反重力噴泉現象：

由實驗結果發現，使用銅製珠鍊可以成功使其出現反重力噴泉現象，推測是因為銅製珠鍊的恢復係數較塑膠珠鍊大，珠鍊間碰撞後銅製珠鍊可得到較大的反作用力促使銅製珠鍊更容易出現此現象。在成功重現反重力噴泉現象後，我們開始進一步探討影響噴泉現象的變因。

實驗二-2 使用銅製珠鍊探討施放高度與珠鍊上升高度的關係：

由實驗得知珠鍊上升高度與施放高度的比值會成正相關。由於施放高度越高，位能越多，在施放珠鍊時其位能會轉換為動能，轉換過程中會損耗能量，其中位能會以固定比例提供珠鍊能量，讓珠鍊向上飛起而出現噴泉現象，因此施放高度越高珠鍊上升高度就越高

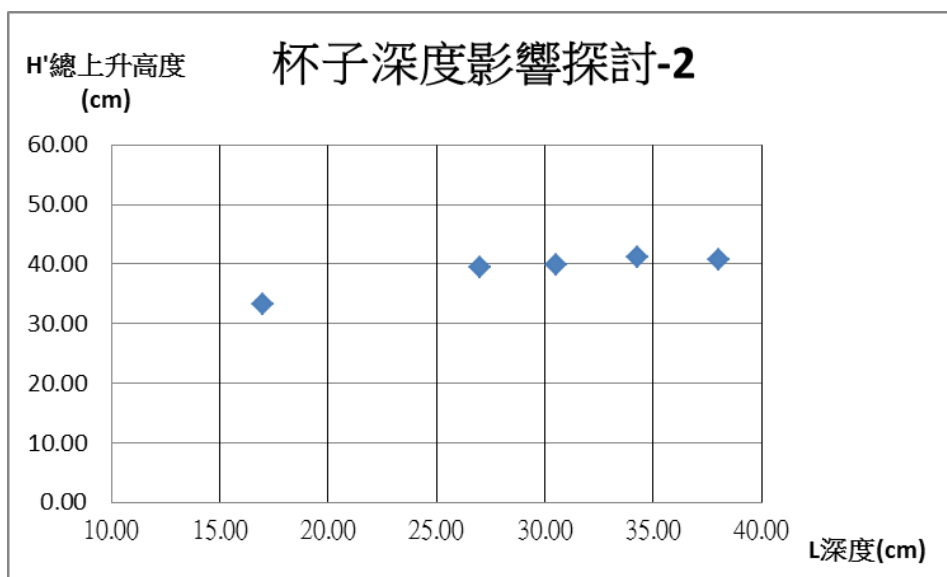
另一方面，根據文獻推導出的算式在  $h_2 = 0$  時  $v = \sqrt{h_1 g}$ ，若在  $h_2 \neq 0$  時，我們設  $v = \omega \sqrt{h_1 g}$  ( $\omega$ ：比例常數)，因此當珠鍊施放高度相同時， $v$  會有一極限值，又根據算式  $h_2 = \alpha \frac{v^2}{g}$ ，當  $v$  有一固定最大值， $h_2$  亦會有一最大值，即噴泉最大上升高度。

實驗二-3 使用銅製珠鍊探討杯子深度與珠鍊上升高度的關係：

在實驗二-3 中，對於噴泉高度的標記，我們以杯緣做基準(杯子深度相同)，為了驗證其準確性，我們改變杯子深度，探討杯子深度對噴泉高度的影響。從實驗二-3 的結果，我們發現珠鍊噴泉高度會與杯子深度成負相關，根據文獻推導出的算式在  $h_2 = 0$  時  $v = \sqrt{h_1 g}$ ，若在  $h_2 \neq 0$  時，我們設  $v = \omega \sqrt{h_1 g}$  ( $\omega$ ：比例常數)，因此當珠鍊施放高度相同時， $v$  會有一極限值，又根據算式  $h_2 = \alpha \frac{v^2}{g}$ ，當  $v$  有一固定最大值， $h_2$  亦會有一最大值，即噴泉最大上升高度，因此杯子深度越深，珠鍊在杯中所要爬升的高度越高，高於杯緣的長度則越短。

為了證實以上推論，我們將各次實驗的杯子深度加回珠鍊上升的最大高度，改成以杯底為基準點的總上升高度與杯子深度作圖，發現大略呈一水平線，由此可知，其結果符合我們的假設： $h_2$  有一最大值，且在杯子口徑、珠子大小、施放高度固定時為一定值。



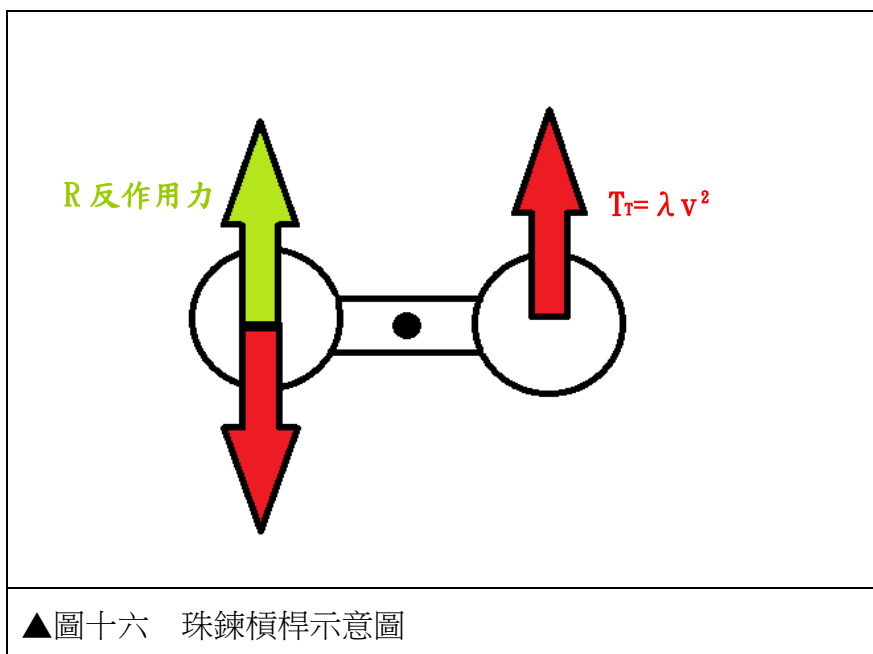


(H' 總上升高度=珠子上升高度+杯子深度)

實驗二-4 使用銅製珠鍊探討珠子質量與珠鍊上升高度的關係：

根據文獻推導出的算式在  $h_2 = 0$  時  $v = \sqrt{h_1 g}$ ，若在  $h_2 \neq 0$  時，我們設  $v = \omega \sqrt{h_1 g}$  ( $\omega$ ：比例常數)，重量不同的珠鍊在相同施放高度  $v$  相同，再根據文獻推導出的算式  $T_T = \lambda v^2$ ，質量不同的珠鍊  $v$  相同，重量越大， $\lambda$  越大， $T_T$  也就越大。我們將珠鍊視作槓桿(如圖十六)，重量越大的珠鍊，被拉起的一端所受  $T_T$  越大，另一端則會以越大的力撞擊杯底，杯底所提供的反作用力  $R$  也就越大，因此重量越大的珠鍊，噴泉總上升高度越高。

從珠子重量與珠鍊上升總高度作圖可發現截距不為 0，我們推測是因為珠子是重量與體積為一比例值的非實心球體，所以珠鍊以繞圈方式堆疊起來會有一高度，當珠子重量逼近於零時也會堆疊出一小段高度。且由數據可知珠鍊重量越小噴泉高度越高，因此由堆疊高度的修正及重量越小噴泉高度越高的趨勢導致珠鍊上升總高度作圖之截距不為零



實驗二-5 使用銅製珠鍊探討杯壁有無是否影響噴泉現象：

根據實驗二-5 的結果，我們發現就算沒有杯壁，銅製珠鍊依舊能發生噴泉現象，換句話說，杯壁並不是主要提供珠鍊上升之力的來源，我們推論很可能是珠鍊間彼此的碰撞，提供向上方向的反作用力，支持珠鍊向上飛起。

實驗二-6 使用銅製珠鍊探討杯子口徑與珠鍊上升高度的關係：

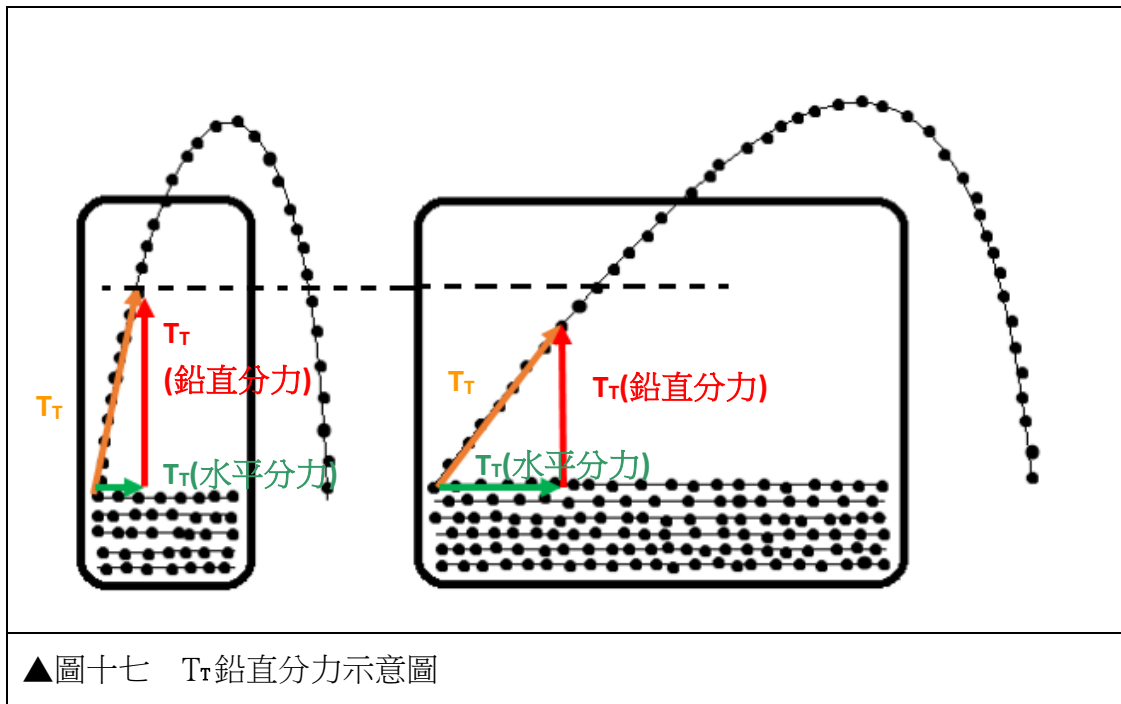
同樣的珠鍊，在拉出杯子的過程中，假設所受張力大小相同，當杯子口徑越大，水平方向所受到的分力也就越大，鉛直方向所受的分力則越小

(如圖十七)，根據牛頓第二運動定律  $F = ma$ ，又可以寫成  $F = m \frac{\Delta v}{\Delta t}$ ，由於珠鍊噴泉現象

全程發生時間短暫，所以我們令  $\Delta t$  為  $dt$ ，且  $m$  值固定，因此可以推得：當鉛直分力  $F$  越

小，鉛直速度  $v_y$  也會跟著越小，再根據文獻推導出的算式  $h_2 = \alpha \frac{v_y^2}{g}$ ， $v$  越小，珠鍊上升

的最大高度  $h_2$  也就越小，符合我們實驗二-6 的結果，隨著杯子口徑越小，噴泉高度越低。



## 柒、 結論

- 一、由實驗一推測噴泉現象的產生與珠鍊緊繃的程度無關。
- 二、由實驗一和實驗二-1 的比較，塑膠珠鍊無法產生噴泉現象，銅製珠鍊可產生噴泉現象，所以我們推測珠鍊噴泉現象的發生和不同材質珠子的恢復係數有關。
- 三、由實驗二-2 得知珠鍊上升高度與施放高度成正相關。推測施放高度所儲存的位能會以固定比例提供珠鍊能量，因此施放高度越高珠鍊上升高度就越高。
- 四、由實驗二-3 發現珠鍊噴泉高度會與杯子深度成負相關。珠鍊總上升高度在杯子口徑、珠子大小、施放高度固定時約呈一定值。
- 五、由實驗二-4 發現噴泉總上升高度與珠子重量成正相關。推論重量越大的珠鍊，杯底所提供的反作用力  $R$  也就越大，因此重量越大的珠鍊總上升高度越高。
- 六、由實驗二-5 發現沒有杯壁銅製珠鍊也可發生噴泉現象，因此杯壁並不是主要提供珠鍊上升之力的來源，我們推論很可能是珠鍊間彼此的碰撞，提供向上方向的反作用力，支持珠鍊向上飛起。
- 七、由實驗二-6 發現噴泉總上升高度與杯子口徑成負相關。若所受張力大小相同，當杯子口徑越大鉛直分力  $F$  越小，珠鍊總上升的最大高度  $H'$  也就越小。
- 八、未來展望：
  - (一) 利用 Tracker、高速攝影機分析珠鍊的速度。
  - (二) 探討珠子形狀、材質對珠鍊噴泉現象的影響。
  - (三) 嘗試將沒有杯壁的實驗量化。
  - (四) 嘗試將噴泉現象以更穩定的方式呈現。

## 捌、 參考資料及其他

一、 J. S. Biggins, M. Warner , Understanding the chain fountain ,

<http://rspa.royalsocietypublishing.org/content/470/2163/20130689> , 摘錄於 24 August 2015

二、 國立台中教育大學科學教育與應用學系科學遊戲實驗室 , <珠鍊噴泉>

<http://scigame.ntcu.edu.tw/power/power-037.html> , 摘錄於 5 June 2015

三、 Elizabeth Gibney , Physicists explain 'gravity-defying' chain trick ,

[http://www.nature.com/news/physicists-explain-gravity-defying-chain-trick-1.14523?WT.mc\\_id=GPL\\_NatureNews](http://www.nature.com/news/physicists-explain-gravity-defying-chain-trick-1.14523?WT.mc_id=GPL_NatureNews) , 摘錄於 10 August 2015

四、 Steve Mould , Steve Mould , [https://www.youtube.com/watch?v=-eEi7f00\\_00](https://www.youtube.com/watch?v=-eEi7f00_00) 摘錄於 24 August 2015

## 【評語】 051815

1. 本實驗探討不同材質的珠鍊之噴泉現象，實驗設計改變施放的高度；杯子的深度；口徑與銅製珠鍊的質量，以觀察珠鍊上升高度的相關性。
2. 實驗動機明確，且有些具體討論，已屬佳作，如果內容可以有更具創新、創意的設計，會是一個更好的作品。