

嘉義縣國民中小學 科學展覽會作品說明書

屆 別：64

科 別：物理

組 別：國小組

作品名稱：衝破雲霄吧小球！——水彈弓的製作與研究

關 鍵 詞：沃辛頓射流 射流高度 水彈弓

編 號：A110

嘉義縣第 64 屆國民中小學科學展覽會

作品說明書（封面）

科 別：物理

組 別：國小組

作品名稱：衝破雲霄吧小球！——水彈弓的製作與研究

關鍵詞：沃辛頓射流 射流高度 水彈弓

編號：(系統自動產生)

摘要

兩滴落入池塘的水花讓我們產生好奇，上網查詢資料後了解到一個特別的現象：沃辛頓射流，因此我們開始著手進行研究。從設計水彈弓裝置及測量裝置開始，我們收集身邊材料製作成水彈弓裝置，並分別探討了鐵棒插入深度、鐵棒長度、小球大小及落下高度對小球彈射高度的影響。最後我們研究出之有最佳彈射高度的水彈弓裝置為：寶特瓶底座 7 公分、鐵棒長度 10 公分、小球直徑 2 公分、鐵棒插入深度 0.1 公分，寶特瓶底座總重 240 公克，同時我們也發現當釋放水彈弓裝置的高度越高時，小球彈射的高度越高。

壹、研究動機

「滴答……滴答……」偶然在下雨天時經過辦公室前的水池，發現雨水滴落在水池時產生了水花，因為有點好奇為什麼會發生這樣的現象，所以我們上網搜尋了相關的原理，才發現是由於「沃辛頓射流」所造成的。回想起四年級時所學的〈水的移動〉單元，我們學到了許多關於水的現象，像是毛細現象、虹吸現象等等，但卻沒有學到這個特別的現象。於是我們內心升起了想要深入研究的渴望，便向老師提議進行這次的研究。

在搜尋「沃辛頓射流」的過程中，發現了一部很有趣的影片：影片中有一個人拿著球從高處跳下水池，球竟然被彈射了近兩層樓高！水就像是彈弓一樣，將球給彈射出去。我們感到相當神奇，因此決定要以此為主要的研究目標，探討影響小球發射高度的因素。

貳、研究目的

- 一、設計並製作出水彈弓之裝置。
- 二、探討不同鐵棒插入深度對小球彈射高度的影響。
- 三、探討不同長度之鐵棒對小球彈射高度的影響。
- 四、探討不同大小之小球對小球彈射高度的影響。
- 五、探討不同高度落下時對小球彈射高度的影響。

參、研究設備及器材

表一、研究設備及器材清單

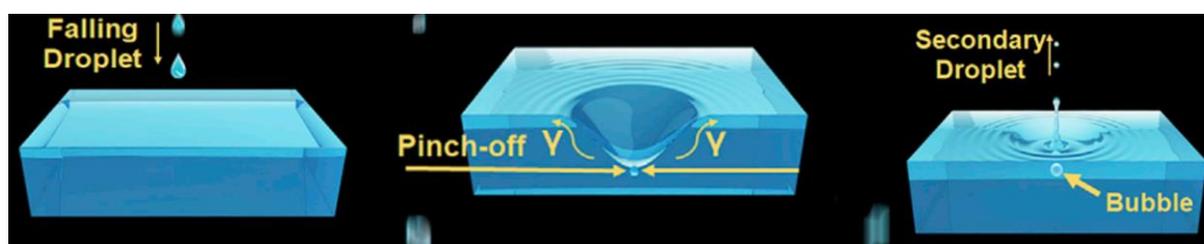
底座	寶特瓶、紙黏土、鐵棒
小球	圓形保麗龍球(直徑：2 公分、3 公分、4 公分、5 公分)
水池	5L 水桶
觀察設備	腳架、手機、身高尺
其他	電子秤、斜口鉗、尺、奇異筆、雙面膠、剪刀

肆、研究過程或方法

一、文獻探討

(一) 沃辛頓射流(Worthington jet)

當物體突然掉進液體時，液體內會因撞擊產生空腔。隨後液體的表面張力及回復力會欲回復原先狀態而收縮空腔，這兩種力量疊加後在中心產生一道噴射水流，稱為「沃辛頓射流(Worthington jet)」。



一、沃辛頓射流示意圖

(二) 歷屆科展作品

1. 金門地區第 63 屆科展：一飛沖天的水花—探討影響沃辛頓射流的因素

(洪旭恒、吳秉諺、陳玉麒、洪子涵、洪筱蕎、洪靖雯，2023)

探討不同重量、體積、高度……對沃辛頓射流噴射高度的影響，依實驗結果得知重量越重、體積越大、落下高度越高、接觸面積越小、水深越深所產生的射流高度越高。

2. 中華民國第 63 屆科展：深水炸彈~探究撞擊波對水體與浮球之力學交互作用
(謝承憲、林意勳、林芷卉、廖彥睿，2023)

探討不同種類大小的球體、不同高度落下……對球體噴射高度的影響，依實驗結果得知直徑 4 公分之保麗龍球、直徑 11 公分瓶頸斜度大、衝擊面積小的寶特瓶組合在球體噴射時，有最佳噴射高度。

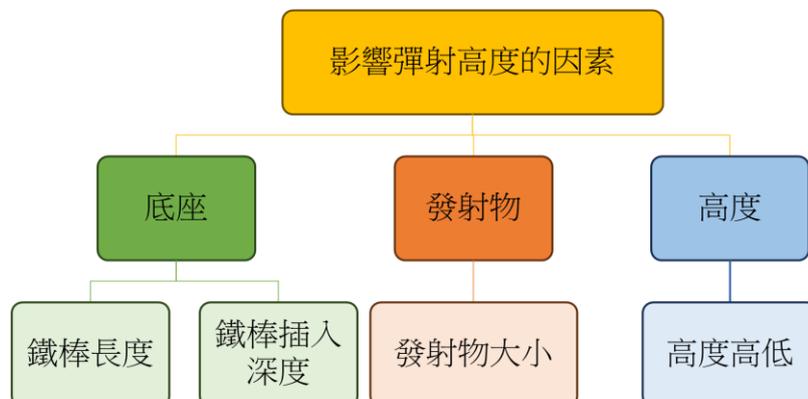
(三) 參考及改良

參閱文獻後發現，以上作品皆是沃辛頓射流相關研究。

第一個作品為研究沃辛頓射流本身液體的噴射高度，由於我們想研究能夠噴射小球的裝置，因此決定以此實驗裝置進行改良，將重物由硬幣改成紙黏土，並加上鐵棒於上方固定一顆小球，形成小球噴射的效果。

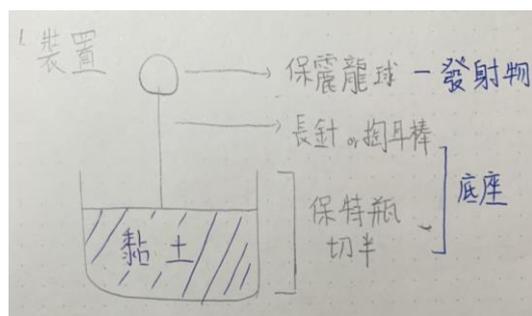
第二個作品則是研究小球的噴射高度，但是是利用寶特瓶裝水後固定小球於中央，再將整個實驗裝置從高處落下的方式。考慮實驗器材取得的方便性及寶特瓶容易在落地時翻覆，因此將實驗裝置改成重物結合小球，由高處是放進水池的方式進行實驗。

二、研究方法

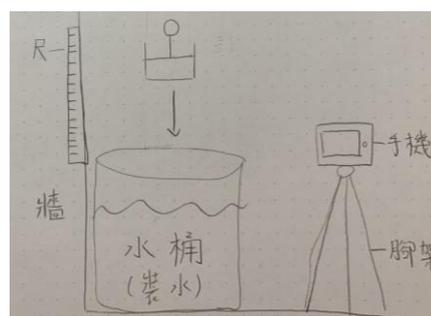


(一) 設計並製作出水彈弓裝置

查閱相關文獻資料後，我們繪製出「水彈弓」及「觀察裝置」設計圖如下。



圖二、水彈弓設計圖



圖三、觀察裝置設計圖

表二、水彈弓裝置功用說明

構造名稱	功用
發射物(保麗龍小球)	彈射出去。
長針(鐵棒)	將保麗龍小球下拉至水中，使小球能利用水中的沃辛頓射流彈射出去。
重物(黏土)	增加水彈弓裝置的重量，使水彈弓能產生較強的沃辛頓射流。
寶特瓶	裝載黏土，以免黏土撞擊水面後變形。

由於文獻中顯示水彈弓之長針長度約為底座長度的 1.5 倍，我們測量所製作的水彈弓底部的寶特瓶為 7 公分，因此決定將鐵棒長度訂為 10 公分，而底座重量則是利用黏土將寶特瓶均勻填滿後進行秤重。另外，文獻顯示直徑 4 公分的保麗龍小球彈射高度最高，因此我們決定先利用 4 公分的小球進行實驗。

表三、觀察裝置功用說明

構造名稱	功用
尺(身高尺)	量測保麗龍小球彈射高度。
水桶(5L 水桶)	將水彈弓裝置是放進水中，使其產生沃辛頓射流。
手機	利用攝影的方式，紀錄保麗龍小球彈射高度。
腳架	固定手機，使其穩定攝影。

「水彈弓」製作步驟：

1. 將寶特瓶裁切一半後裝入紙黏土，並將紙黏土均勻填滿寶特瓶中。
2. 利用斜口鉗裁切鐵棒至 10 公分。
3. 將鐵棒插入黏土中央後，壓緊周圍黏土，使鐵棒固定。
4. 在鐵棒上方插入小球即完成。



圖四、裝置完成圖

「觀察裝置」設置步驟

1. 於身高尺上貼上雙面膠後黏於教室牆壁上。
2. 架設腳架及手機。
3. 將水桶裝滿水後置於下方，水桶底部對齊身高尺 0 公分處。



圖五、觀察裝置正面



圖六、觀察裝置側面

水彈弓運行及實驗觀察方式

1. 按下手機攝影後，於高處定點釋放水彈弓，使其掉入水桶中。
2. 水桶中的水遭受撞擊，形成沃辛頓射流將球彈出。
3. 察看手機錄影，紀錄小球彈射高度。
4. 重新裝上小球並將水桶中的水補滿，重複實驗。



圖七、實驗畫面

(二) 探討不同鐵棒插入深度對小球彈射高度的影響

實際釋放水彈弓裝置於水桶時，我們發現鐵棒插入小球的深度會影響到小球彈射的高度，如果鐵棒插得太深的話，小球可能會無法彈射，因此決定進行實驗，找出最佳的鐵棒插入深度，使小球彈射的高度增高。

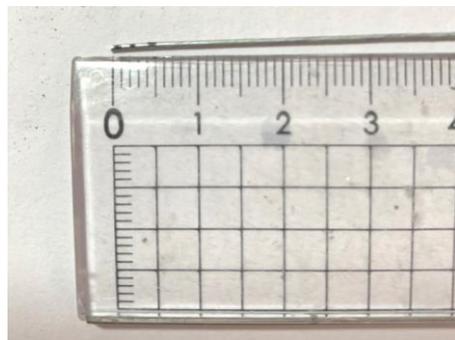
1. 操作變因：鐵棒插入深度(0.1 公分、0.3 公分、0.5 公分)
2. 控制變因：
 - (1) 鐵棒長度(10 公分)
 - (2) 底座重量(240 公克)
 - (3) 水桶水量(5 公升)
 - (4) 水彈弓裝置釋放高度(50 公分)
 - (5) 小球直徑(4 公分)
 - (6) 相同觀測設備

3. 實驗方法：

- (1) 於寶特瓶裝入紙黏土並均勻填滿後，至電子秤進行秤重。
- (2) 鐵棒上 0.1 公分、0.3 公分、0.5 公分位置處利用奇異筆劃記。
- (3) 將小球插入深度 0.1 公分處後，進行實驗並記錄彈射數據。
- (4) 每次實驗後，重新測量底座重量，並將水桶中的水補滿，確保每次控制變因皆相同。
- (5) 依同樣步驟重複進行鐵棒插入 0.3 公分及 0.5 公分實驗。



圖八、電子秤重確認重量



圖九、奇異筆劃記鐵棒

4. 實驗裝置

表四、研究二裝置圖

插入深度 0.1 公分	插入深度 0.3 公分	插入深度 0.5 公分
		

(三) 探討不同長度之鐵棒對小球彈射高度的影響

在參閱文獻及實際嘗試時，我們發現小球於水中釋放的深度很重要。如果釋放的深度太淺或太深，都有可能導致小球彈射不高或無法彈射，因此我們討論後決定利用增減鐵棒長度的方式來改變小球於水中釋放的深度以進行實驗。

1. 操作變因：鐵棒長度(7 公分、10 公分、13 公分)
2. 控制變因：
 - (1) 鐵棒插入深度(0.1 公分)
 - (2) 底座重量(240 公克)
 - (3) 水桶水量(5 公升)
 - (4) 水彈弓裝置釋放高度(50 公分)
 - (5) 小球直徑(4 公分)
 - (6) 相同觀測設備
3. 實驗方法：
 - (1) 於寶特瓶裝入紙黏土並均勻填滿後，至電子秤進行秤重。
 - (2) 將 7 公分的鐵棒固定於底座後，將小球插入 0.1 公分處進行實驗並記錄彈射數據。
 - (3) 每次實驗後，重新測量底座重量，並將水桶中的水補滿，確保每次控制變因皆相同。
 - (4) 依同樣步驟重複進行 10 公分及 13 公分鐵棒的實驗。
4. 實驗裝置

表五、研究三裝置圖

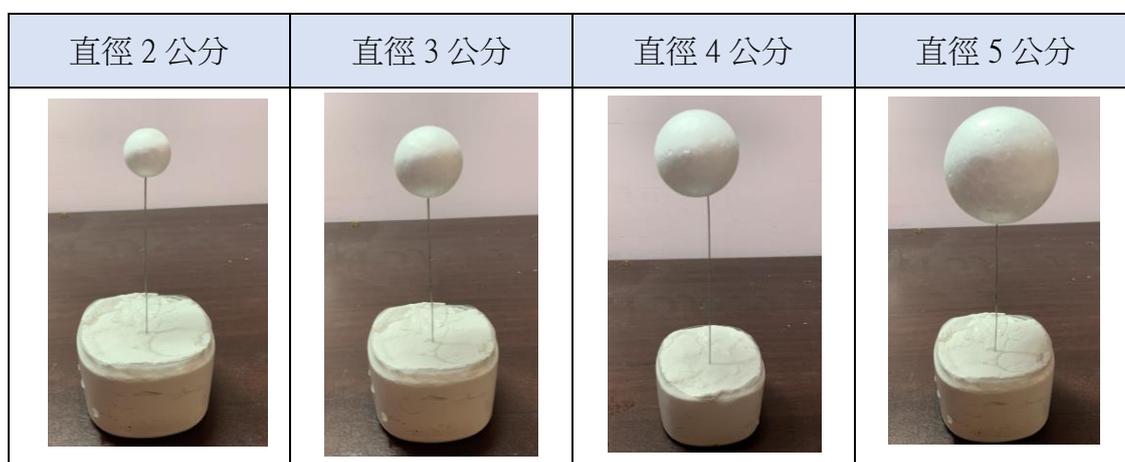


(四) 探討不同大小之小球對小球彈射高度的影響

在參閱相關文獻時，我們發現小球的大小會影響他彈射的高度，因此我們去文具店採買不同大小的保麗龍球，分別為直徑 2 公分、3 公分、4 公分、5 公分來進行實驗，藉此找出何種小球能夠彈射得更高。

1. 操作變因：小球大小(直徑 2 公分、3 公分、4 公分、5 公分)
2. 控制變因：
 - (1) 鐵棒插入深度(0.1 公分)
 - (2) 鐵棒長度(10 公分)
 - (3) 底座重量(240 公克)
 - (4) 水桶水量(5 公升)
 - (5) 水彈弓裝置釋放高度(50 公分)
 - (6) 相同觀測設備
3. 實驗方法：
 - (1) 於寶特瓶裝入紙黏土並均勻填滿後，至電子秤進行秤重。
 - (2) 將直徑 2 公分小球插入鐵棒 0.1 公分處進行實驗並記錄彈射數據。
 - (3) 每次實驗後，重新測量底座重量，並將水桶中的水補滿，確保每次控制變因皆相同。
 - (4) 依同樣步驟重複進行直徑 3 公分、4 公分、5 公分小球的實驗。
4. 實驗裝置

表六、研究四裝置圖



(五) 探討不同高度落下時對小球彈射高度的影響

在參閱相關文獻及回想之前看過跳水選手的畫面，我們發現高度似乎會影響到沃辛頓射流，因此，我們決定利用改變高度的方式來實驗，研究高度是否會影響沃辛頓射流的強度，使小球彈射的高度改變。

1. 操作變因：釋放高度(40 公分、50 公分、60 公分)
2. 控制變因：
 - (1) 鐵棒插入深度(0.1 公分)
 - (2) 鐵棒長度(10 公分)
 - (3) 底座重量(240 公克)
 - (4) 水桶水量(5 公升)
 - (5) 小球直徑(2 公分)
 - (6) 相同觀測設備
3. 實驗方法：
 - (1) 於寶特瓶裝入紙黏土並均勻填滿後，至電子秤進行秤重。
 - (2) 將水彈弓裝置至於 40 公分處釋放，記錄彈射高度數據，重複 5 次取其彈射高度平均值。
 - (3) 每次實驗後，重新測量底座重量，並將水桶中的水補滿，確保每次控制變因皆相同。
 - (4) 將水彈弓裝置至於 50 公分處釋放記錄彈射高度數據，重複 5 次取其彈射高度平均值。
 - (5) 將水彈弓裝置至於 60 公分處釋放，記錄彈射高度數據，重複 5 次取其彈射高度平均值。

伍、研究結果與討論

一、設計並製作出水彈弓之裝置。

(一) 實驗結果

我們每次實驗時皆會利用手機錄影的方式觀測小球彈射高度，而根據我們實驗時的手機錄影畫面顯示，當水彈弓裝置從高度 50 公分自由落體落下時，會發生以下實驗結果：

表七、研究一實驗手機錄影畫面

小球成功彈射	小球未彈射
	

(二) 討論

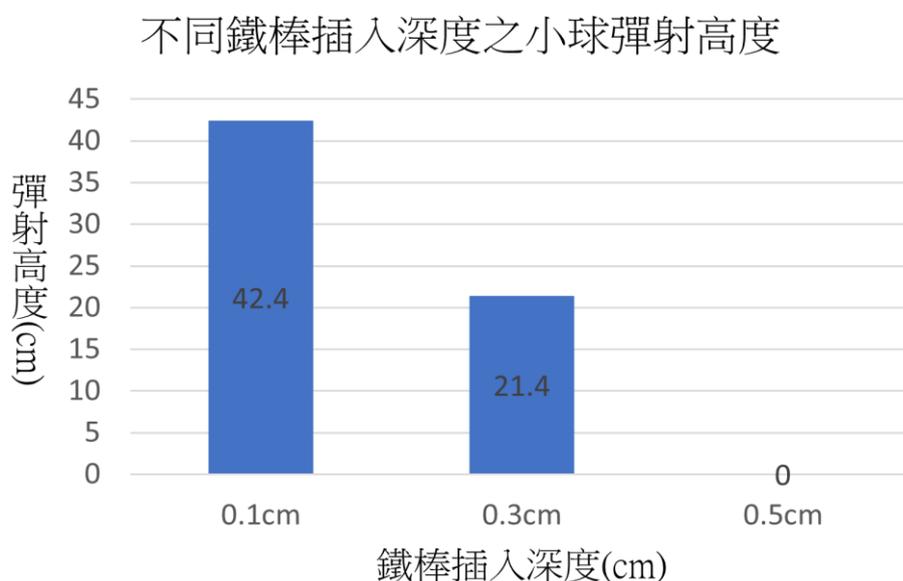
由上表中可知，小球有時會隨沃辛頓射流彈射，有時僅有沃辛頓射流生成，而小球不會隨之彈射。經多次實驗後發現，水彈弓需要完全垂直進入水面，小球才能順利彈射。因此，在實驗時若因水彈弓翻覆或偏離垂直路徑，導致小球無法彈射時，我們將其視為實驗誤差並重新進行水彈弓的釋放，直至水彈弓垂直進入水中，使小球能順利彈射後記錄其彈射高度，以確保實驗正確進行。

二、探討不同鐵棒插入深度對小球彈射高度的影響。

(一) 實驗結果

表八、不同鐵棒插入深度之小球彈射高度

彈射高度 深度(cm)	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	平均
0.1	41.0	40.0	42.0	47.0	42.0	42.4
0.3	25.0	20.0	20.0	21.0	21.0	21.4
0.5	未彈射	未彈射	未彈射	未彈射	未彈射	0.0



圖十、不同鐵棒插入深度之小球彈射平均高度直條圖

(二) 討論

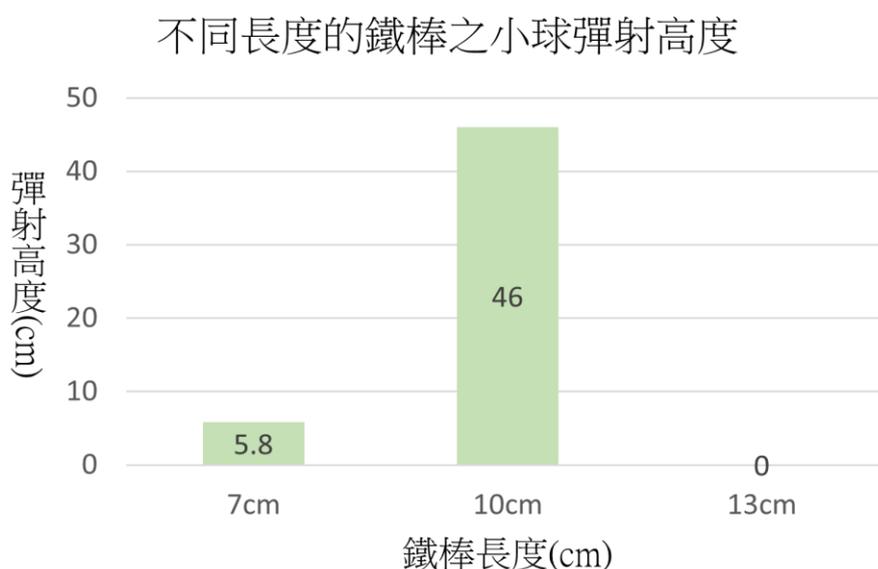
由上表中可知，當鐵棒插入深度為 0.1 公分時，彈射高度平均為 42.4 公分；當鐵棒插入深度為 0.3 公分時，彈射高度平均為 21.4 公分；當鐵棒插入深度為 0.5 公分時，小球並未彈射，平均高度為 0.0 公分。由上述可知，當鐵棒插入為 0.1 公分時，彈射高度較插入深度 0.3 及 0.5 公分高。且在進行實驗過程中，我們發現當插入深度為 0.5 公分時，小球會因為插入深度過深而連著鐵棒一起進入水中，以至於無法彈射。

三、探討不同長度之鐵棒對小球彈射高度的影響。

(一) 實驗結果

表九、不同長度之鐵棒的小球彈射高度

彈射高度 長度(cm)	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	平均
7	5.0	5.0	6.0	5.0	8.0	5.8
10	40.0	47.0	55.0	40.0	48.0	46.0
13	未彈射	未彈射	未彈射	未彈射	未彈射	0.0



圖十一、不同長度的鐵棒之小球彈射平均高度長條圖

(二) 討論

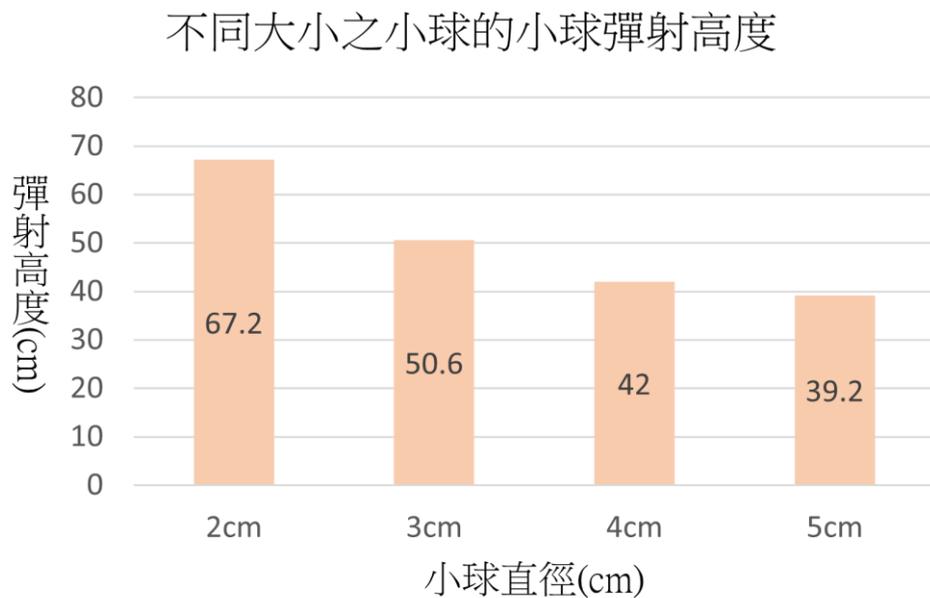
由上表中可知，當鐵棒長度為 7 公分時，彈射高度平均為 5.8 公分；當鐵棒長度為 10 公分時，彈射高度平均為 46.0 公分；當鐵棒長度為 13 公分時，小球並未彈射，平均高度為 0.0 公分。由上述可知，當鐵棒長度為 10 公分時，彈射高度較鐵棒長度 7 及 13 公分高。且在進行實驗過程中，我們發現當鐵棒長度為 13 公分時，沃辛頓射流會先產生，而後小球才會進入水中，因此小球無法藉沃辛頓射流的力量彈射。而鐵棒長度為 10 公分，與寶特瓶底座(7 公分)成 1.5 倍時，有最佳的彈射高度，與所參閱的文獻相同。

四、探討不同大小之小球對小球彈射高度的影響。

(一) 實驗結果

表十、不同大小之小球的小球彈射高度

彈射高度 直徑(cm)	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	平均
2	57.0	56.0	60.0	77.0	86.0	67.2
3	48.0	47.0	50.0	52.0	56.0	50.6
4	46.0	40.0	35.0	47.0	42.0	42.0
5	44.0	45.0	32.0	40.0	35.0	39.2



圖十二、不同大小之小球的小球彈射平均高度長條圖

(二) 討論

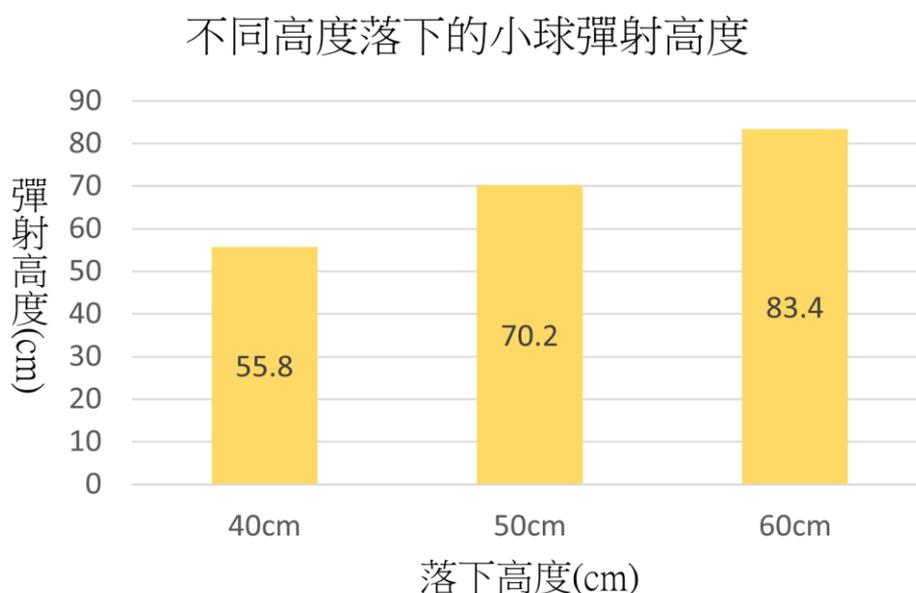
由上表中可知，當小球直徑為 2 公分時，彈射高度平均為 67.2 公分；當小球直徑為 3 公分時，彈射高度平均為 50.6 公分；當小球直徑為 4 公分時，彈射高度平均為 42.0 公分；當小球直徑為 5 公分時，彈射高度平均為 39.2 公分。由上述可知，以上四種直徑的小球皆會因沃辛頓射流而彈射，但是當小球直徑為 2 公分時，彈射高度較其他三者高。

五、探討不同高度落下時對小球彈射高度的影響。

(一) 實驗結果

表十一、不同高度落下的小球彈射高度

彈射高度 高度(cm)	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	平均
40	70.0	45.0	55.0	48.0	61.0	55.8
50	80.0	66.0	75.0	63.0	67.0	70.2
60	77.0	86.0	88.0	90.0	76.0	83.4



圖十三、不同高度落下的小球彈射平均高度長條圖

(二) 討論

由上表中可知，當從高度 40 公分處落下時，彈射高度平均為 55.8 公分；當從高度 50 公分處落下時，彈射高度平均為 70.2 公分；當從高度 60 公分處落下時，彈射高度平均為 83.4 公分。由上述可知，從以上三種高度落下時，小球皆會因沃辛頓射流而彈射，但是落下高度為 60 公分時，彈射高度較其他兩者高。

陸、結論

一、研究結論

- (一) 在水彈弓裝置相同的情況下，鐵棒插入小球的深度為 0.1 公分時，有最佳彈射高度。
- (二) 當鐵棒與底座長度呈 1.5 倍時，有最佳彈射高度。本研究之鐵棒為 10 公分、寶特瓶底座為 7 公分。
- (三) 當小球直徑越小，有越高的彈射高度。
- (四) 當落下高度越高時，有越高的彈射高度。
- (五) 本研究所研究之最佳水彈弓裝置為：寶特瓶底座 7 公分、鐵棒長度 10 公分、小球直徑 2 公分、鐵棒插入深度 0.1 公分，寶特瓶底座總重 240 公克。

二、研究建議

- (一) 在進行實驗時，因為我們是自己用手放開的方式讓它直接掉入水中，所以容易發生水彈弓翻覆而無法使小球順利彈射的現象，建議可設置一個釋放裝置，讓水彈弓裝置能夠垂直進入水中。
- (二) 測量彈射高度時，我們是利用教室內的身高尺作為測量工具，但身高尺只有到公分，可以使用到毫公分的其他尺來進行測量，增加實驗數據精確度。

三、未來展望

- (一) 本研究原理為沃辛頓射流，日常生活當中有許多應用，像是跳水、水滴滴落池塘等，而我們研究所使用的設備簡單上手，大家可以在空閒時進行實驗，探討一下日常生活當中的原理。
- (二) 本研究的水彈弓裝置的小球彈射高度高於水彈弓裝置的釋放高度，未來可試著研究將小球改成其他物品，可以達到將物品從低處運送到高處的效果。

柒、參考文獻資料及其他

- 一、洪旭恒、吳秉諺、陳玉麒、洪子涵、洪筱蕎、洪靖雯(2023)。一飛沖天的水花—探討影響沃辛頓射流的因素。金門地區第 63 屆中小學科學展覽會作品說明書。
- 二、謝承憲、林意勳、林芷卉、廖彥睿(2023)。深水炸彈~探究撞擊波對水體與浮球之力學交互作用。中華民國第 63 屆中小學科學展覽會作品說明書。
- 三、Zhuojun Cai , Bo Wang , Shijie Liu , Haofei Li , Siqu Luo , Zhichao Dong , Yilin Wang , Lei Jiang(2022). Worthington jet by surfactants. *Cell Reports Physical Science* Retrieved March, 2022, from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S266638642200042X> .
- 四、【Fun 科學】謎之能量溢出裝置(2022)。取自：<https://www.youtube.com/watch?v=a0pE1pZwSe4>