

中華民國第四十三屆中小學科學展覽會參展作品專輯

國小組

物理科

科別：物理科

組別：國小組

作品名稱：360°旋轉 — 小鋼珠的驚奇之旅

關鍵詞：U 型軌道、360 度迴旋軌道、滾動

編號：080116

學校名稱：

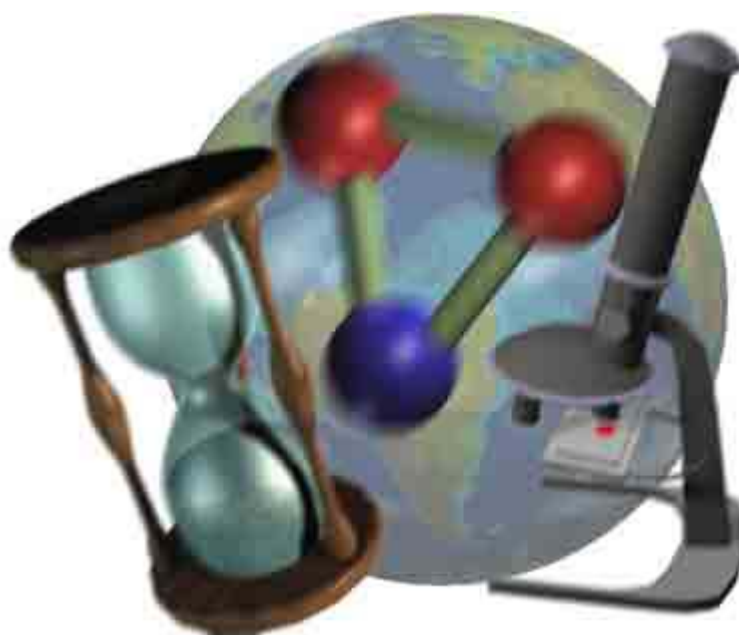
台北市萬華區西門國民小學

作者姓名：

陳柏勳、呂冠彥、黃琪茜、祝偉倫、林芷卉

指導老師：

黃翠娟、連思漢



摘要

一顆從斜面滾下來的珠子引起了討論，於是對球體滾動產生了許多的遐想。在遊戲中，看著鋼珠在 U 型軌道內翻滾、徘徊，似乎很想跳脫軌道的侷限；於是決定了研究主題分別是（一）拯救鋼珠大作戰（二）讓鋼珠乘坐雲霄飛車在 360°的軌道上自在遨遊、（三）鋼珠的登山之旅；這一系列活動組成了小鋼珠的驚奇之旅！本研究，要了解鋼珠在彎曲軌道上的滾動情形。過程中必須製造 u 形軌道、360°迴旋軌道，以及連續坡道；於是，拿著電鑽、鋸子、螺絲起子等，像木工一樣，這樣的體驗很特別；當工具完成，進行操作時，許多的問題又一個個冒出來了，我們一面讓自己反覆的操作使自己熟練；一方面必須仔細觀察、思考，找出問題也才能解決問題，例如測量滾動不停的鋼珠所到達之終點高度等等。然而，最後看到鋼珠在軌道上奔馳，那種欣喜的感覺，是不可言喻的！

壹、研究動機

六年級上學期，自然課第三單元－物體的運動，上課時，老師問：在什麼情況下物體會做運動？全班進行討論，結論是在風力、人力、獸力、磁力等作用下，物體會做運動。但是有人卻提出：「不一定吧！小彈珠從斜面滾下，而我並沒有施力，它就自動滑落了呀！而且還會往返的滾來滾去。」因為這個同學的問題，引起班上一番熱烈討論，大家都對這個單元興致勃勃，於是全班就分組來研究物體的各種運動情形，有的組別做單擺的實驗，有的組別研究骨牌的間距不同，比較倒下去的快慢；而我們所選擇的研究題目是利用珠子從斜面滾下來的衝力，想知道彈珠在彎曲，甚至 U 形的斜面上滾動的情形，會不會跳脫出來呢？有人說讓小珠子做雲霄飛車？或者讓小珠子翻山越嶺，有可能嗎？好期待！

貳、研究目的

- 一、想知道小鋼珠在彎曲軌道上的運動情形，進而製作一個小鋼珠的雲霄飛車。
- 二、完成讓小鋼珠爬山坡的夢想，希望夢想能成真。
- 三、讓思考變成生活中的一種習慣，碰到問題會動腦、動手來解決，而且相信自己是可以做得到的。
- 四、製作實驗器材，並進行實驗，將實驗結果和實驗器材留給學弟學妹，讓學弟學妹們學習這個單元的時候可以更加有興趣。

參、研究器材

一、製作的器具：

(一) 製作一個 U 形軌道

木板、銅片、壓克力條、鐵架四具、海綿條

(二) 製作小鋼珠雲霄飛車

銅片、兩塊三夾板、活頁、魔術粘、紙箱

(三) 製作山峰與山谷連續坡道

三夾板、活頁、魔術粘、銅片、小木條

二、購買的實驗器具：

鋼珠、(大中小各數顆) 玻璃彈珠、塑膠珠、量角器



肆、研究過程：

玩了將近一個學期的彈珠、鋼珠的滾動遊戲後，我們經過好幾次的討論，也經過了無數次的改進，而我們的組員也有異動，有進有出；最後終於大勢底定，幾個人決定接受挑戰，把我們的想法實踐，於是確定了實驗器材的做法，以及訂定實驗的主題和操作測量的方法，說明如下：

一、我們想研究的內容包括：

(一) 鋼珠在 U 形軌道運動情形。改變：

1. 對稱與不對稱軌道
2. 鋼珠大小
3. 大 U 與小 U 的軌道

(二) 鋼珠乘坐雲霄飛車。改變：

1. 起點高度
2. 鋼珠大小

(三) 鋼珠的登山之旅。改變：

1. 山峰高度
2. 山與山之間間距
3. 鋼珠的起始點高度

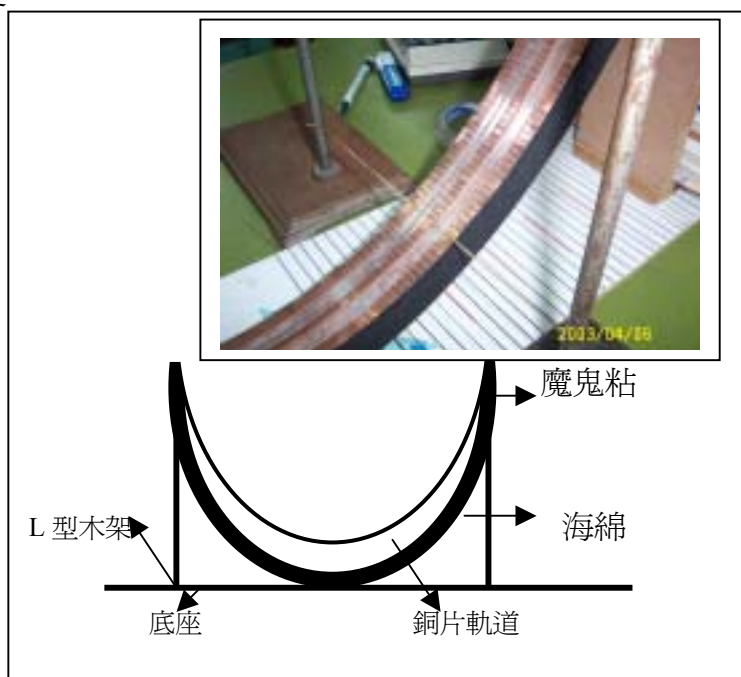
二、我們製作的器材與測量方法

(一) 製作 U 形軌道

1. 設計圖：如右圖

(1) L 形木架：可改變大 U 和小 U。

(2) 底座：兩塊三夾板以活頁鎖在一起，可摺疊。



- (3) 海綿條：自海綿條中央彎曲固定在底座，使軌道穩定、不變形。
- (4) 軌道：在銅片上每隔 0.5 cm 劃一個刻度，並貼上壓克力條，使鋼珠順著軌道滾動。
- (5) 魔術粘：改變固定 U 形軌道的弧度

2.測量方法：

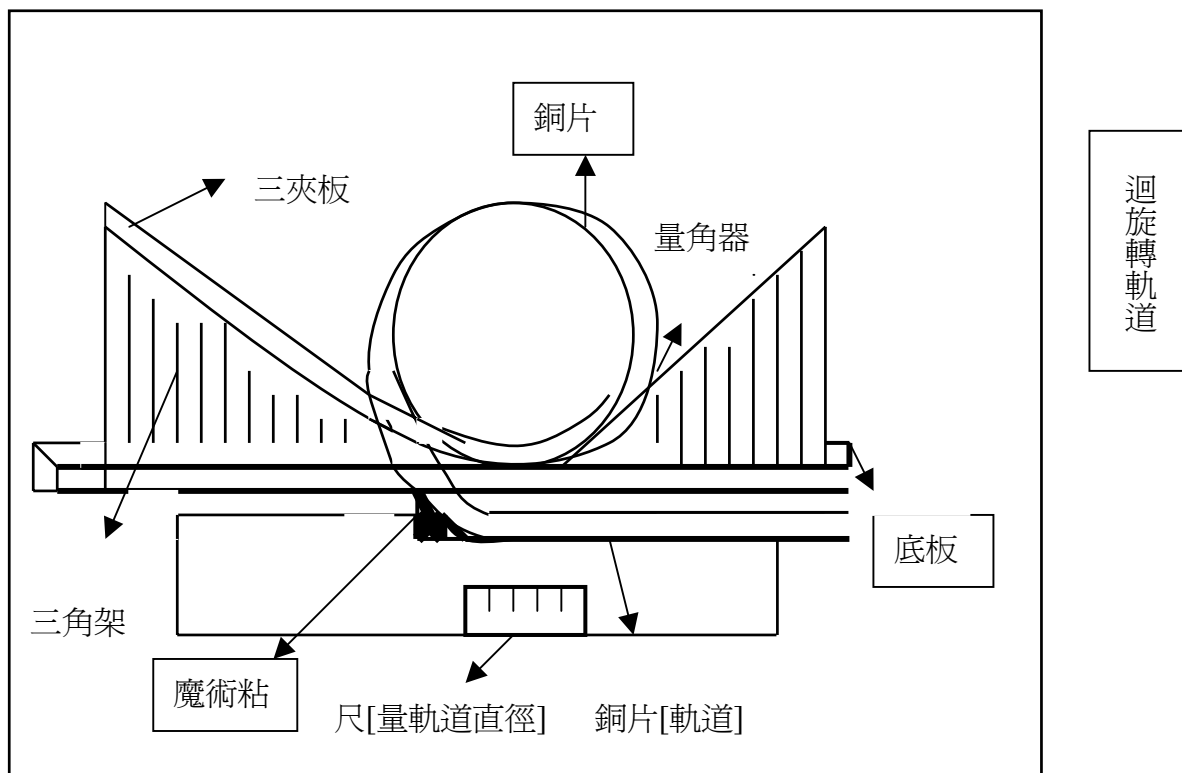
- (1) 起點高：測量鋼珠的直徑，以球心對準起始點。
- (2) 終點高：用兩個鐵架綁橡皮筋放在 U 型軌道兩旁，調整橡皮筋的高度，以及鐵架的位置，直到鋼珠碰不到橡皮筋為止，測量終點高度

(二) 製作雲霄飛車軌道

1.設計圖：如下圖

- (1) 底座：三夾板用活頁鎖住，架設一個斜面。
- (2) 三角架：用小紙箱製作，一邊固定斜坡，一邊固定迴旋軌道。
- (3) 銅片：製作 360° 旋轉軌道。
- (4) 魔術粘：改變同時固定旋轉軌道傾斜度。
- (5) 量角器：測量迴旋軌道的傾斜度。

2.測量方法：調整旋轉軌道的直徑大小，讓鋼珠從斜坡上滾下來，觀察有沒有脫軌。



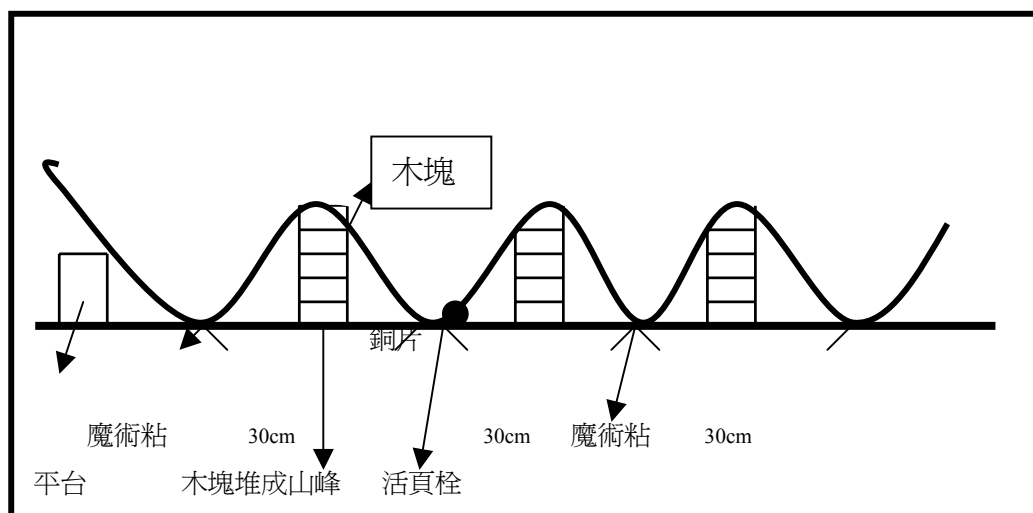


(三) 製作連續山坡道

1.設計圖：如下圖

- (1) 底座：三夾板用活頁鎖住，可摺疊
- (2) 小木條：堆疊起來做為山峰，可改變高度。
- (3) 銅片：底部每隔 30cm 貼魔術粘，架在小木條上，做連續坡道。
- (4) 鋼珠往下滾動平台：支撐銅片（軌道），使鋼珠可以從不同高度滾下。

2.測量方法：鋼珠從起始點出發，紀錄可以翻越多少個山坡



連續坡道





研究一、拯救鋼珠大作戰

實驗一、調查鋼珠在 U 形軌道上滾動情形

(一) 器材：U 形軌道、鋼珠（直徑 1 公分）、橡皮筋架

(二) 方法：

1. 讓小鋼珠分別從左右滾下來（十次）
2. 調整、移動橡皮筋架的位置，記錄滑行高度。
3. 改變鋼珠的滑行高度，比較不同高度的滑行情況，紀錄起點高度和終點高度。

(三) 結果：

從右滾			從左滾		
起點高 cm	終點高度 cm	比值	起點高 cm	終點高度 cm	比值
1.5	~1.5	~1	1.5	~1.5	~1
4.3	4.0	0.93	4.3	4.0	0.93
7.6	6.5	0.86	7.6	6.6	0.87
11.7	8.9	0.76	11.7	8.9	0.76
16.1	12.	0.73	16.1	12	0.73
21	15.3	0.73	21	15.3	0.73
25.8	18	0.70	25.8	18.2	0.70
30.8	21.1	0.69	30.8	21	0.68

(四) 發現：

1. 在對稱軌道上，小鋼珠從左右兩邊滾下來，沒有什麼差別
2. 當起點高不高於兩公分時，起點高可能幾乎等於終點高
3. 終點高不可能大於起點高，而且起點高越高時，與終點高的差距就越大
4. 把它們之間的情形用比值表示，會發現起點高由 1.5cm 增大到 30.8cm 時，比值幾乎由 1 遞減為 0.7

5.看到鋼珠在軌道上左右反覆滾動，滾動的動作會越來越小，但鋼珠總是跳脫不出軌道的侷限



實驗二、讓小 U 軌道變大 U

(一) 用具：自製 U 型軌道、鋼珠

(二) 方法：

1.調整 U 型軌道，使二個 U 型軌道夾板間距分別是 40cm 與 60cm，造成大 U 和小 U

2.操作方法與實驗一相同，紀錄起點高與終點高的不同，並計算比值

(三) 結果：

	大的 U 型軌道							小的 U 型軌道						
起點高 cm	1.5	3.3	5.7	8.4	11.6	15	16.9	2.05	2.5	4	6.9	10	13.4	16.9
終點高 cm	1.5	3.1	5.3	7.4	9.8	12	13.4	2.05	2.5	3.6	5.8	8.35	9.9	11.8
比值	1.0	0.94	0.93	0.88	0.84	0.80	0.79	1	1	0.9	0.84	0.83	0.74	0.70

(四) 發現：

1、不管小 U 或大 U，起點越高，終點高度差越多，比值變小，尤其是小 U 軌道。

2、當起點高相同時（如陰影所示），那麼在大 U 軌道上滾動的鋼珠，可以到達較高的地方；所以我們推想如果要做雲霄飛車的話，軌道不要太過垂直（而採取大 U 型式），如此，從相同高度滾下來的鋼珠，才可以翻滾過比較大直徑的雲霄飛車迴旋軌道，會比較刺激。



實驗三、改變鋼珠的大小

(一) 用具：U 形軌道、大中小三種鋼珠（直徑 1.8、1、0.5 cm）

(二) 方法：

1. 用直徑 1.8 公分、1 公分及 0.5 公分的鋼珠從 U 形軌道滾下。

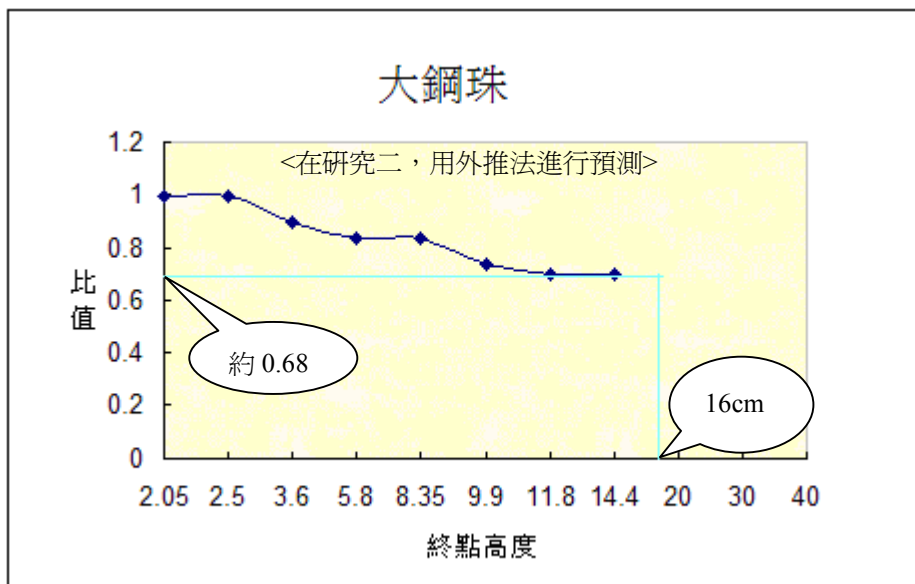
2. 做法與實驗一相同。

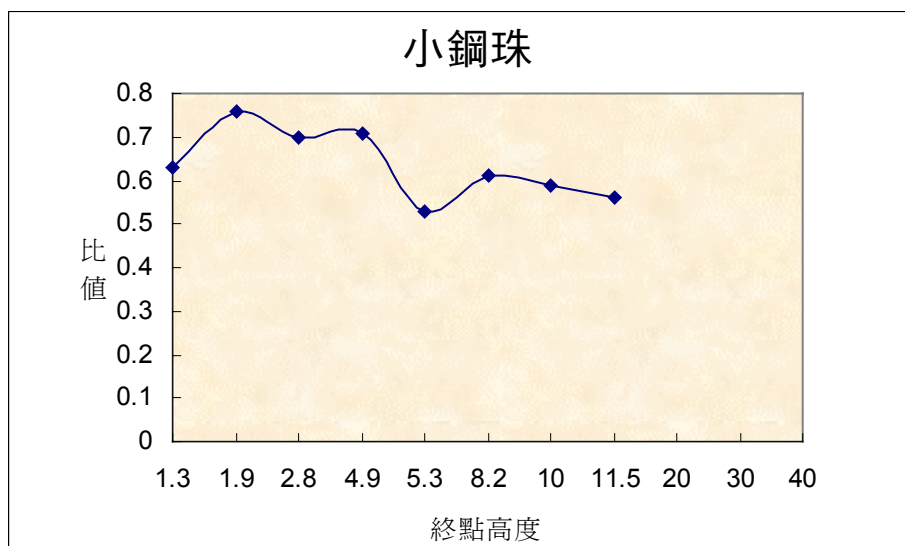
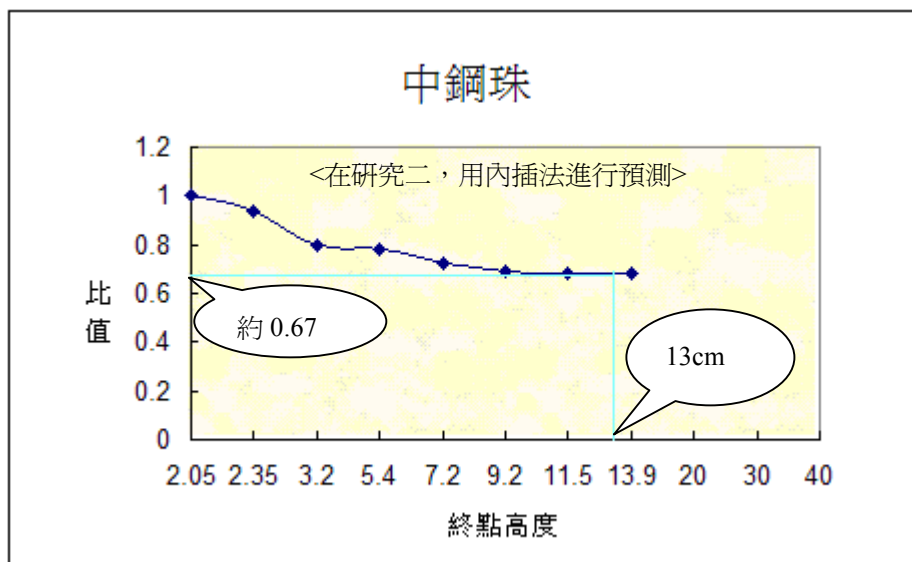
(三) 結果：

起點高 cm		2.05	2.5	4	6.9	10	13.4	16.9	20.4
終點高與比值	大鋼珠	≐2.05	≐2.5	3.6	5.8	8.35	9.9	11.8	14.4
	比值	≐1	≐1	0.90	0.84	0.835	0.70	0.70	0.70
	中鋼珠	≐2.05	2.35	3.2	5.4	7.2	9.2	11.5	13.9
	比值	≐1	0.94	0.80	0.78	0.72	0.69	0.68	0.68
	小鋼珠	1.3	1.9	2.8	4.9	5.3	8.3	10	11.5
	比值	0.63	0.76	0.70	0.71	0.53	0.61	0.59	0.56

(四) 發現：

1. 在起點高度約 2cm 時，大、中鋼珠可以滾到和起點幾乎一樣高的地方。
2. 從相同高度滾下大鋼珠可以滾得較高，其次是中鋼珠，最低的是小鋼珠。
3. 大、中兩種鋼珠都出現共同現象：起點越高，終點會越矮，也就是比值逐漸變小，但是小鋼珠反覆做過多次，並沒有規則的變化。
4. 我們想要找尋終點高度和比值之間的關係，因此做了以下的關係圖：





讓關係圖為我們做一些事

根據這個關係圖，我們可以利用內插法或外推法得到比值，並進一步將終點高度÷比值而得到起點高度的答案；如此就可以利用這個進行 360°迴旋軌道的設計與製作，根據迴旋軌道的直徑（~終點高度），求得起點高度，有助於實驗的進行，但是小鋼珠則無法做此項預測；在以後的實驗中，我們進行了此項預測，並且加以驗證。



實驗四、鋼珠在不對稱軌道上的滾動情形

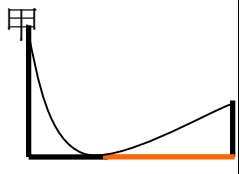
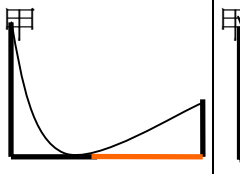
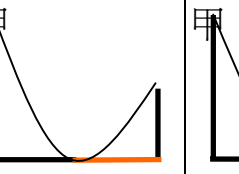
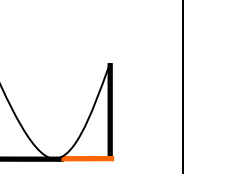
(一) 用具：U 型軌道、鋼珠、橡皮筋架

(二) 方法：

1.將 U 型軌道兩邊的弧度調成不對稱軌道

2.分別把大、中、小鋼珠放在起點位置 10.5cm 處滾下來，觀察紀錄鋼珠在不對稱軌道上的滾動高度，並計算比值。

(三) 結果：

左右 不對稱 軌道					
終 點 高 & 比 值	大鋼珠 (1.8cm)	9.9	9	7.4	7
	比值	0.94	0.86	0.7	0.67
	中鋼珠 (1cm)	9.8	8.9	7.1	6.4
	比值	0.94	0.85	0.68	0.61
	小鋼珠 (0.5cm)	9	8	6.3	5.1
	比值	0.86	0.76	0.6	0.49

(四) 發現：

- 1.起點高大於終點高，和對稱軌道滾動的情形大致相同。
- 2.當 U 型軌道逐漸由大 U 變成小 U 時，它的比值也由大逐漸變小，也就是鋼珠在大 U 軌道滾動，比較容易衝出軌道。
- 3.如果把鋼珠從甲方大於 10.5cm 處，甚至更高的地方滾下來，鋼珠就會衝出軌道，因此，拯救任務完成。



研究二、讓小鋼珠乘坐 360° 迴旋雲霄飛車

實驗一、雲霄飛車，安全嗎？

(一) 用具：尺、鋼珠、自製 360° 旋轉軌道。

(二) 方法：

1. 佈置好實驗器具。
2. 測量改變迴旋軌道的直徑。
3. 把鋼珠放在起點位置，讓鋼珠自 38.5 公分滾下
4. 測量觀察鋼珠是否可在 360 度迴旋軌道上旋轉（以 √ 和 × 來表示）
5. 測量迴旋軌道的傾斜度

(三) 結果

迴旋軌道的直徑 (cm)	鋼珠大小			迴旋軌道的傾斜角度
	大鋼珠 28.5g	中鋼珠 5.7g	小鋼珠 0.5g	
24	×	√	√	$98 - 90 = 8$ (度)
22	√	√	√	$105 - 90 = 15$ (度)
19.2	√	√	√	$108 - 90 = 18$ (度)
16	√	√	√	$112 - 90 = 22$ (度)
14.5	√	√	√	$120 - 90 = 30$ (度)
12.5	√	√	√	$125 - 90 = 35$ (度)

(四) 發現：

1. 當迴旋軌道直徑大到 24 cm 時, 鋼珠就不容易順利的繞過迴旋軌道，會翻覆。
2. 迴旋軌道必須傾斜才不會出軌或翻覆。
3. 迴旋軌道直徑越大, 傾斜角度越小，軌道直徑越小傾斜角度越大，實驗中，直徑由 24 公分逐漸變小為 12.5 公分，而傾斜角度則由 8 度變大為傾斜 35 度。鋼珠都能安全的通過迴旋軌道。



實驗二、從不同高度滾下迴旋軌道的雲霄飛車

(一) 用具：與上面實驗相同

(二) 方法：

1 把起點高度從 38.5cm 縮短為 22cm。

2 操作方法與上面實驗相同。

(三) 結果：

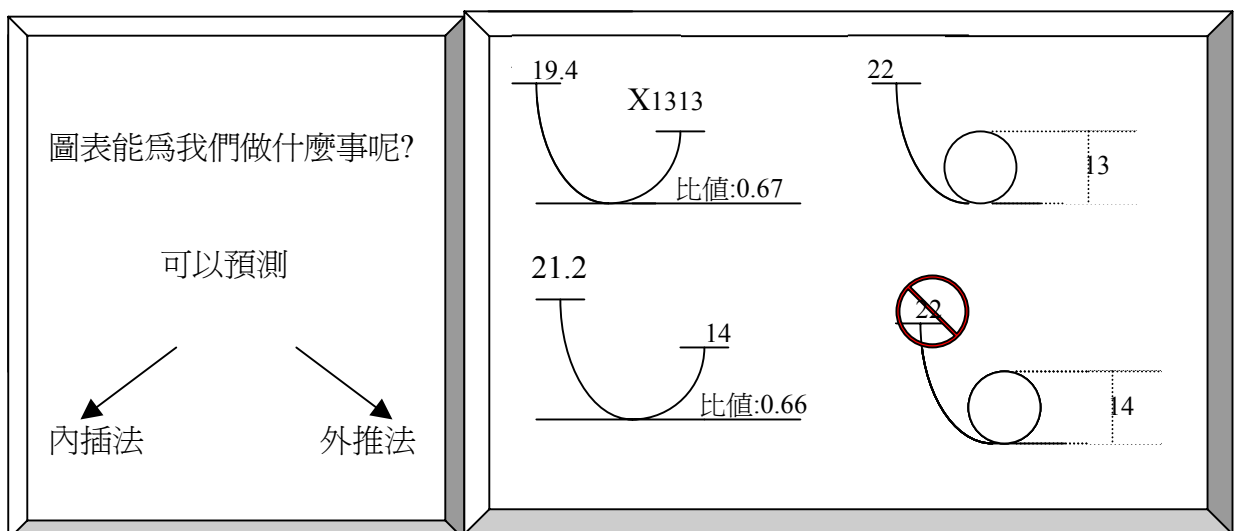
迴旋軌道 直徑 (cm)	起點高度 22cm			起點高度 38.5cm		
	大鋼珠	中鋼珠	小鋼珠	大鋼珠	中鋼珠	小鋼珠
24	×	×	×	×	√	√
22	×	×	×	√	√	√
19	×	×	×	√	√	√
17	×	×	×	√	√	√
16	√	×	×	√	√	√
15	√	×	×	√	√	√
14	√	×	×	√	√	√
13	√	√	×	√	√	√
12	√	√	√	√	√	√

(四) 發現：

1. 鋼珠乘坐雲霄飛車，如果想翻越直徑較大的迴旋軌道，必須從較高的地方滾下來。

2. 大、中、小三種鋼珠從迴旋軌道上滾下時，當迴旋軌道直徑低於 17 公分，以大鋼珠較容易翻越迴旋軌道；當迴旋軌道直徑大於 17 公分時，以中、小鋼珠較容易繞過迴旋軌道，較不容易翻覆，安全性較高。

3. 讓圖表為我做事：



根據上面第 8 頁所作的圖表<二>(中鋼珠的曲線圖)進行預測（內插法），鋼珠要到達 14cm 的高度（針對迴旋軌道直徑 14cm 而言），那麼找到 14cm 對應的比值大約是 0.66，因此 $14 \div 0.66 \sim 21.2$ ；也就是中鋼珠在 U 型軌道的滾動，起點高度必須至少是 21.2cm。但是根據上面的實驗，起點高度已經是 22cm 高，鋼珠仍然沒能通過旋轉軌道，我們大膽假設：鋼珠要繞過頂端的圓弧型軌道，需要更大的力量，在這裡我們只是列式做簡單的計算：

U 的終點高（迴旋軌道直徑）	對應	找到比值	求得 U 起點高 （終點高÷比值）	U 起點高：迴旋起點高 U 起點高：迴旋起點高
13	$\Rightarrow$	0.67	$13 \div 0.67 = 19.4$	U：迴 = U：迴
14	$\Rightarrow$	0.66	$14 \div 0.66 = 21.2$	$19.4 : 22 = 21.2 : ?$

計算求得？=24.04，也就是說中鋼珠要繞過直徑 14cm 的旋轉軌道，起點高至少約需 24cm；用同樣的方式計算，可以利用 P.8 圖表<一>（大鋼珠的曲線圖），求得要繞過 24cm 直徑的旋轉軌道，起點高至少約需 43cm。

驗證：利用大、中鋼珠在 U 型軌道滾動的關係圖，加上鋼珠在迴旋軌道上實際翻滾的實驗結果，我們用內插法、外推法進行預測和計算，求得要順利通過不同直徑的迴旋軌道，它的起點高預測值如下，同時根據預測值，加以實驗，結果如下表：

鋼珠大小	直徑大小	起點高	安全翻越與否	迴旋軌道 起點高預測值	驗證結果 (起點高度)
中鋼珠	14cm	22cm	×	內插法 24,04cm	24cm 可安全翻越
大鋼珠	24cm	38.5cm	×	外推法 43cm	44cm 可安全翻越

發現：1.確實可以利用鋼珠在 U 型軌道上滾動的情形，所繪製的關係圖進行預測；再利用六年級數學學過的比值的方法進行計算，大約可得知鋼珠從迴旋軌道滾下來的起點高。

- 2.鋼珠要繞過迴旋軌道，確實比鋼珠在 U 型軌道上滾動需要更大的能量。
- 3.對大鋼珠而言，或許是因為使用外推法進行預測，正確性降低；但是也有可能是因為 —— 迴旋軌道的直徑越大時，大鋼珠翻越的困難度增加了；所以預測值可以做一個參考，鋼珠要安全翻越迴旋軌道，起點高度最好再增高一些（尤其是直徑較大的迴旋軌道），較保險。

實驗三、 雙迴旋、三迴旋軌道的雲霄飛車，可能嗎？

我們的假設：要製作雙迴旋軌道，必須第一個迴旋軌道直徑大於第二個迴旋軌道，否則鋼珠無法通過

(一) 用具:同上，但迴旋軌道改為三公尺長銅片

第一個迴旋			第二個迴旋			第三個迴旋		
直徑 cm	通過次數	傾斜度	直徑 cm	通過次數	傾斜度	直徑 cm	通過次數	傾斜度
19	10 次	20 度	19	6 次	10 度	19	0 次	9 度
19	10 次	20 度	17	9 次	10 度	17	7 次	8 度
19	10 次	20 度	17	10 次	10 度	15	8 次	8 度

(二) 方法:

- 1.將雙迴旋、三迴旋軌道直徑先調成一樣大
- 2.再將第二個和第三個迴旋軌道直徑慢慢變小
- 3.將中鋼珠放於起點位置 38.5cm，每個實驗做 10 次
- 4.觀察鋼珠是否能通過及其次數

(三) 結果

(四) 發現:

- 1.鋼珠蘊藏的能量，超乎我們的想像，原來兩個直徑相等的雙迴旋軌道，鋼珠仍然可以順利通過，至於製作第三個迴旋軌道的雲霄飛車時，必須要第三個迴旋軌道直徑較小，才能順利通過。
- 2.我們的假設沒有成立，但迴旋軌道直徑逐漸變小，可以讓鋼珠在多迴旋軌道上安全翻越。
(重新製作一個測量迴旋軌道直徑的器材)



研究三、鋼珠的登山之旅

實驗一、比較山峰間距不同

(一) 用具：鋼珠、自製的連續山坡軌道

(二) 方法：

1. 在自製的連續山坡軌道上，調整山峰及山峰間距，分別是 30 公分及 60 公分。
2. 將鋼珠放在滾動平台上自 6cm 處滾下。
3. 觀察紀錄鋼珠翻越的山峰數。

(三) 結果：

山 峰 間 距	次 數	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
30cm	大鋼珠	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	中鋼珠	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	小鋼珠	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
60cm	大鋼珠	1	1	1	1	1	2	2	2	1	0
	中鋼珠	2	1	1	1	1	1	0	0	0	0
	小鋼珠	1	1	1	1	0	0	2	2	0	0

(四) 發現：

1. 山峰的間距 30cm, 鋼珠可以爬過的山峰數較多, 當間距變為 60cm 時, 鋼珠可以爬過的山坡數較少。
2. 相同的間距, 大鋼珠比小鋼珠越過的山峰數量要多。



實驗二、改變鋼珠滾動起點的高度

（一）用具：自製的連續山坡軌道、鋼珠

〈二〉方法：

- 1.改變滾動起點的高度，分別高出山峰 1cm、2cm、3cm。
- 2.讓鋼珠自起點高度滾下。
- 3.觀察紀錄鋼珠翻越山峰的個數。

〈三〉結果：

（山峰高度 4cm）

山坡數 起點高		次數	1	2	3	平均
增高 1cm (5 cm)	大鋼珠		2	2	2	2
	中鋼珠		2	2	2	2
	小鋼珠		1	1	1	1
增高 2cm (6 cm)	大鋼珠		3	4	3	3.3
	中鋼珠		2	2	3	2.3
	小鋼珠		2	2	2	2
增高 3cm (7 cm)	大鋼珠		5	6	6	5.6
	中鋼珠		4	4	4	4
	小鋼珠		3	2	3	2.6

（四）發現：

- 1.鋼珠從高於山峰 1cm 處滾下，可以翻越 1-2 座山峰；高於山峰 2cm 處滾下，可翻越 2-4 座山峰；至於高過山峰 3cm 時，就可以翻越 2-6 個山峰。
- 2.如果鋼珠滾下平台的高度和山峰一樣高,則不能滾過任何山峰。
- 3.小的鋼珠能翻越的山峰數較少



實驗三、改變山峰的高度

(一) 用具：自製的連續山坡軌道、鋼珠

(二) 方法：

- 1.改變山峰的高度：分別用四塊、五塊、六塊木頭疊起來做山峰
- 2.設定鋼珠起點高度 7 公分
- 3.分別讓大中小鋼珠，從七公分處滾下來
- 4.記錄鋼珠翻越幾座山峰

(三) 結果：

山 峰 次 數	山 峰 高 度	4 塊木條高度 (4cm)			5 塊木條高度 (5 cm)			6 塊木條高度 (6cm)		
		大鋼珠	中鋼珠	小鋼珠	大鋼珠	中鋼珠	小鋼珠	大鋼珠	中鋼珠	小鋼珠
1		7	3	3	2	1	1	0	0	0
2		5	4	3	3	1	1	0	0	0
3		6	4	3	2	2	1	1	0	0
4		6	3	2	3	2	1	0	0	0
5		5	5	3	3	1	2	1	0	0
6		6	4	3	4	1	1	1	0	0
7		5	3	3	3	2	2	1	0	0
8		7	5	2	4	2	1	0	0	0
9		5	3	3	3	2	1	0	0	0
10		5	4	2	4	1	1	1	0	0
平均		5.7	3.8	2.7	3.1	1.5	1.2	0.5	0	0

(四) 發現：

- 1.由四塊木頭堆成的山峰，鋼珠平均可以翻越過 2~7 座；由五塊木頭堆成的山峰，鋼珠平均可以翻越 1~4 座；至於山峰堆成六個木頭高時，除了大鋼珠，其它都翻不過；所以起點高相同，山峰越高，鋼珠要翻山越嶺就越不容易。
- 2 鋼珠的大小不同，大鋼珠較容易翻越較多的山峰。



伍.研究結果：

經過將近一個學期的嘗試錯誤與不斷的檢討改進，終於實踐了夢想，讓鋼珠完成了驚奇萬分的旅程，也了解到：

一、**拯救鋼珠大作戰**—調查鋼珠在 U 型軌道上的運動情形如下：

- (一) 實驗中如果起點高度低於 2-3cm，那麼鋼珠幾乎可以滾到對邊相同的高度。
- (二) 當鋼珠滾下的起點高度越高時，和終點高度的差距就會更大，以比值表示，比值由 1 逐漸遞減。
- (三) 在大 U 的軌道上，鋼珠反而可以滾的比較高。而且滾下的起點高與終點高差距較小
- (四) 大、中、小三種鋼珠中，大鋼珠可以滾得比較高。

二、**拯救鋼珠大作戰**—當鋼珠從不對稱的 U 型軌道滾下來時：

- (一) 起點高度大於終點高度，而且起點高度愈高，兩者的差距愈大。與對稱軌道滾動的情形大致相同。
- (二) 當左右兩邊的長短、坡度並不對稱時，從陡又高的斜坡上滾下，鋼珠會衝出軌道，不再受 U 型的限制；於是獲得解救。

三、**鋼珠的驚險之旅**—鋼珠可以安全乘坐 360°迴旋的雲霄飛車，必須：

- (一) 鋼珠的起點高度必須大於旋轉軌道的直徑，直徑越大，起點高也必須更高，否則會翻車。
- (二) 當旋轉軌道的直徑越小，那麼軌道必須傾斜，而且傾斜角度要越大，否則會脫軌。
- (三) 當直徑較小（實驗中低於 17 cm）時，選擇大鋼珠搭乘的安全性比較高；但直徑較大時，以較小的鋼珠容易通過迴旋軌道。
- (四) 建議:可以將鋼珠在 U 型軌道的運動情形製作折線圖，再根據圖表進行預測，估計鋼珠乘坐雲霄飛車的起點高度，與迴旋軌道的直徑大小。
- (五) 鋼珠不但可以繞過 360°軌道，而且鋼珠還有可能翻越直徑相同的雙迴旋軌道，甚至乘坐直徑稍小的三迴旋雲霄飛車。

四、**鋼珠的登山之旅**—知道鋼珠有翻山越嶺的本事

- (一) 根據鋼珠在 U 型軌道上的運動情形知道，必須讓鋼珠的起點高度 > 山峰高度，鋼珠才

可能越過山峰，而且差距越大，本事越強，翻越的山峰數越多。

- (二) 山峰與山峰之間的距離為 30cm 時，鋼珠大多可以翻越兩座山峰；間距變為 60cm 時，大多只能翻越一座山峰。所以山峰的間距小，鋼珠翻山越嶺的本事比較強。
- (三) 當山峰的高度由 4 塊木條高度變為 6 塊木條高度時，翻越的山峰數也由 7 座逐漸降低為 1 座，甚至翻不過（大鋼珠除外）。

五、辦法是人想的,相信自己擁有能力，實驗過程中，我們解決了一些問題：

- (一) U 型軌道的製作。
- (二) 用鐵架及橡皮筋製作橡皮筋架，測量鋼珠到達終點位置的方法。
- (三) 製作 360 度的旋轉軌道，更進一步製作雙迴旋以及三迴旋軌道。
- (四) 利用魔鬼粘的黏貼，來改變山峰的高度，以及 360 度旋轉軌道的直徑。
- (五) 利用螺絲釘鎖住活頁的方法，製作可摺疊式的軌道。
- (六) 應用壓克力細棒做成彎曲的鋼珠軌道，可以讓變因控制的更好，以防軌道上偶爾出現的一點小摺痕，就影響了鋼珠的滾動。
- (七) 製作一個測量迴旋軌道直徑的簡便工具。
- (八) 把數學科學到的方法，應用在實驗中，同時利用關係圖來進行預測，對於圖表的應用，相信以後會更熟練。

實驗過程中，真正體會了自己想辦法解決問題，是喜悅的、豐富的，這種痛快的感覺，前所未有，而且看著鋼珠在迴旋軌道上、在連續坡道上翻滾，真的好過癮！

陸、討論

- 一、在研發 360 度迴旋雲霄飛車軌道和 U 型軌道的過程中，深深感覺這個實驗在考驗我們的耐力和創造力。
- 二、關於 U 型軌道的設計，最早是使用塑膠管作為軌道，結果珠子滾動的緩慢,不容易爬升，我們認為是摩擦力太大的緣故；接著就直接用鋁片當軌道，但彎成 U 型軌道時會有凹凸不平的痕跡，於是大家開始思索，找一種容易彎曲卻又不變形的東西，於是改用稍薄的銅片做軌道，下面放稍硬的海綿；這一招確實管用。後來開始做實驗後又發現：直接目測鋼珠的終點高度是不準確的，於是在銅片上畫刻度，雖然畫了刻度，不過光用眼睛就要觀察記錄滾動不停的鋼珠還是不夠準確，大家靈機一動，便在終點兩旁，各放一個鐵架,並綁上橡皮筋，放在終點位置，看到鋼珠碰到橡皮筋，便是終點高；可是這時又出現問題了，我們發現鋼珠滾下時不一定依照軌道滾動，便在銅片上黏上壓克力條，讓鋼珠有固定的路線，終於大功告成，而實驗也才順利進行。

三、360 度迴旋軌道的製作

我們一開始是用膠帶、膠泥或雙面膠來固定迴旋軌道，但是只要每變換一次直徑，就要把東西撕下來重新黏貼，弄得桌上亂七八糟，後來大家靈機一動：用魔術粘，既容易固定又容易撕下來變換實驗裝備，而且桌上變乾淨了。緊接著又出現如何測量旋轉軌道的直徑這個難題，該怎麼安裝設置讓大家感到心煩，這也是經過長時間的研究才想出解決問題的方法：在軌道旁黏一把尺，假使直徑是 12cm，將軌道的一邊對準零，一邊對準 12cm，再拿另一把尺對準 6[半徑]，軌道的高點對準 12，這樣就容易多了

後來我們進一步做了雙迴旋及多迴旋軌道，於是又做了測量迴旋軌道直徑的器具，如第 13 頁照片。

四、鋼珠在 U 型軌道起點 21.2cm，可滾到 14cm 高的地方；但把 U 型軌道換成迴旋軌道時，起點同樣是 21.2cm，但鋼珠滾不過直徑 14cm 的迴旋軌道，我們認為是因為鋼珠滾到迴旋軌道最上方時，抵擋不過地吸引力，被地心引力拉了下來，以至於它滾不過去而掉落，因此鋼珠如果想乘坐雲霄飛車，他必須對抗地心引力。

五、在所有實驗中，大鋼珠總是爬得最高，我們認為是大鋼珠的質量大，所以他的衝力也較大，而我們如果想阻止大鋼珠，也必須花較大的力氣，因此我們可以說，大鋼珠因為質量大，所以慣性大，才可以滾動的比較高。

六、實驗中我們還比較了大、中、小三種鋼珠在 U 型軌道上滾動次數，如下：

鋼珠大小	擺動次數					平均
大鋼珠	60	57	57	63	66	61
中鋼珠	35	37	39	40	40	38
小鋼珠	5	4	6	5	6	5

由上表發現，大鋼珠的滾動次數最多，小鋼珠的滾動次數最少，我們認為是因為大鋼珠的質量大，慣性大，所以不容易停下來，因此滾動次數最多。

七、鋼珠在 U 型軌道上軌動，我們還測量了鋼珠的滾動次數，若鋼珠大小不變，雖然起點高不停的改變，但是滾動次數相差不多，(我們認為它和單擺的擺動很相似)，不過以起點高度高的，滾動的距離最長，表示它在滾動的過程中，受到摩擦較多。

八、在 360° 迴旋滾動中，我們根據實驗和觀察的結果發現迴旋軌道直徑 17cm 以下，以大鋼珠滾得最好，但是迴旋軌道直徑大於 17cm 時，以中、小鋼珠滾得最好，我們認為是因為

當迴旋軌道直徑小於 17cm 時，大鋼珠以它較大的慣性，所以比中小鋼珠更容易翻越過迴旋軌道，但是迴旋軌道直徑大於 17cm 時，大鋼珠的慣性抵擋不了地吸引力，所以會翻滾掉落，反而中小鋼珠滾得較好，不過，只要增加大鋼珠的起點高度，大鋼珠仍然可以安全通過迴旋軌道。

九、根據書上的說明，在 U 型軌道內讓球體滾動，不管左右兩邊對稱與否，起點高度會等於終點高度。不過實驗中發現：起點高度低時，終點高度幾乎與它相等；其餘的則都是起點高度大於終點高度。可能是因為摩擦力、地心引力改變了它的運動情形。

十、以前在上自然課時，老師常常會問：「這樣的結果代表什麼意思？」當各組討論並且報告以後，往往老師會再說：「做更深度的思考，看誰可以講出更深刻的意思？了不起！」做完這個實驗以後，我好像比較懂得老師講這句話的意義了！就像：在進行讓關係圖為我們做事這個活動時，我們在數字和圖形之中轉了很久，理不出一個頭緒。最後和老師一起討論時，在老師不斷的提問之下，才豁然開朗；以前劃關係圖，頂多是把題目上提供的數字在座標軸上劃一個點，然後把許多個數字畫出來的許多個點連接起來，變成一條曲線圖，再進一不去判斷：兩者之間有無關係？正比？反比？

現在，我們體會到了：一條簡單的曲線圖底下，其實蘊藏著許多意義，"深度的思考"，就是這個意思吧！

十一、根據鋼珠在 U 型軌道上滾動，已經知道：使用大 U 軌道，鋼珠可以滾的比較高。但是在鋼珠翻越連續坡道的實驗中，卻發現山峰與山峰之間，距離近的（相當於小 U），可以翻越較多的山峰數（p14）；這兩個結果顯得很矛盾。當時大家都聚在一起，想不出理由來解釋，心裡懷疑：實驗做錯了！於是重新佈置實驗器具，再實驗！終於發現：起點高相同，連續坡道間距大的，雖然鋼珠只翻越過一座山峰，卻已經至少滾動了 60 cm 的距離，甚至更長；而山峰間距小的，鋼珠雖然翻越過兩座山，也只是滾動了大約 60 cm 的距離，所以實驗並沒有錯。

十二、物體的運動這個單元，課本裡只有說將彈珠從軌道滾下，了解彈珠撞擊後的運動方向；另一個活動則是計算在固定的時間內，根據跑步的距離長短來判斷運動的快慢。這樣的活動，我們並不覺得有趣，甚至有人覺得有點幼稚！課堂上，老師讓我們選擇自己想做的題目來研究，我們做了許多有趣的實驗，例：小鋼珠坐雲霄飛車、小鋼珠的登山之旅……等，大家都覺得這些實驗比課本的活動更具挑戰性、更刺激，我們也願意把我們的研究成果、研究器材，留給學弟學妹，讓他們在學習這個單元時能享受更多的樂趣！

柒、結論

在鋼珠結束這一段驚奇之旅時，我們也學習知道了：

一、關於鋼珠在 U 型軌道上滾動：

- 1.起點高度會大於終點高度。
- 2.當起點高度越大，與終點高度的差距就越多，比值也逐漸降低。
- 3.在大 U 的軌道上，鋼珠可以滾的比小 U 高。
- 4.大鋼珠滾得比較高。
- 5.鋼珠在不對稱軌道上滾動的情形，與對稱軌道的滾動並無差異。但是如果軌道兩邊不等長，則鋼珠會跳脫出來，不再受軌道的侷限。

二、鋼珠乘坐 360° 迴旋的雲霄飛車是可以做得到的，但是必須注意：

- 1.起點高度大於旋轉軌道直徑，可以將鋼珠在 U 型軌道上的滾動曲線圖，預測比值的大小再加以計算，得知起點高。
- 2.要製作 360° 旋轉軌道時，軌道必須傾斜，否則鋼珠會出軌；尤其直徑越小，傾斜角度越大。
- 3.迴旋軌道直徑小時，選擇大鋼珠在迴旋軌道上的滾動，較不易翻車、脫軌；迴旋軌道直徑較大時，選擇小鋼珠較容易翻越迴旋軌道。
- 4.鋼珠不但可以乘坐單迴旋雲霄飛車，更可以繞過雙迴旋或三迴旋的雲霄飛車，但是當迴旋軌道數增加，那麼迴旋軌道的直徑要遞減，鋼珠才容易安全翻滾過。

三、鋼珠具有翻山越嶺的本事，但是根據 U 型軌道的運動情形知道，起點高度會小於終點高，所以必須注意：

- 1.鋼珠的起點高度大於山峰高度，而且差距越大，可以連續翻越多座的山峰。
- 2.山峰間距近的比間距遠的更容易翻越
- 3.當山峰高度增加時，鋼珠翻越山峰的本事降低。

捌、參考資料

- 一、林特伊 觀念物理 I 第一版 台北市 104 松江路 93 巷 1 號 2 樓 天下遠見出版股份有限公司 P.84~P.85 西元 2001 年。
- 二、黃崇城 國民小學自然教科書六年級上學期 初版 台北市忠孝西路一段 50 號 24 樓之 1 牛頓開發教科書股份有限公司 P.32~P.35 民國九十年。
- 三、鄭李足 動力與應用 第三版 台北市重慶南路一段 121 號 台灣東方出版社股份有限公司 P.82~P.85 西元 1996 年
- 四、運動 - 概念的轉變

<http://www.phy.ntnu.edu.tw/demolab/Notes/motion.html>

評語

這個實驗的設計與執行顯然必須是經由五位同學共同合作才能完成的。在問答時，我們也看到大家共同合作的團隊默契。