

花蓮縣第 63 屆國民中小學科學展覽會

作品說明書

科 別：物理科

組 別：國中組

作品名稱：旋轉乾坤—旋繞擺的變因關聯牽動之研究

關 鍵 詞：旋繞(Looping)、擺(Pendulum)

編 號：

(由教育處統一編列)

摘要

本實驗由一段棉繩與兩組質量塊組合而成，棉繩的一端連接將會進行旋繞動作的旋擺，另一端連接將會垂直下降的鉛錘之後，將細繩橫跨在平行地面的細桿上，用手拉住旋擺，另一端鉛錘呈現自然鉛直狀態。放手後旋擺受力繞旋細桿後以棉繩的摩擦力鎖住鉛錘。我們觀察並討論兩端質量塊在不同質量比、不同施放角度、不同旋擺長時，對兩重物運動的影響，找出能成功的各變因操作界線及範圍並以簡單的牛頓力學及應用程式分析此運動狀態。

壹、研究動機

有一次在家裡觀賞科普性節目時，恰巧看見了一段令我百思不得其解的現象，只見節目中一個人握著繩子綁著一支湯匙，而以手指為支點，在另一端垂掛著一個沉重的馬克杯，當他放開手時，馬克杯竟然沒有如預期的直接掉落，而是在碰到地面的前一刻穩穩地停了下來，經過思考分析一下，也就是在一段細繩兩端繫上一個旋擺能藉由受力後產生迅速纏繞的運動狀態，並將看起來將要垂直落地的重物瞬間拉住。出於好奇，我們想用方便取得的材料進行實驗，研究這種非常具有表演特效的運動原理。

貳、研究目的

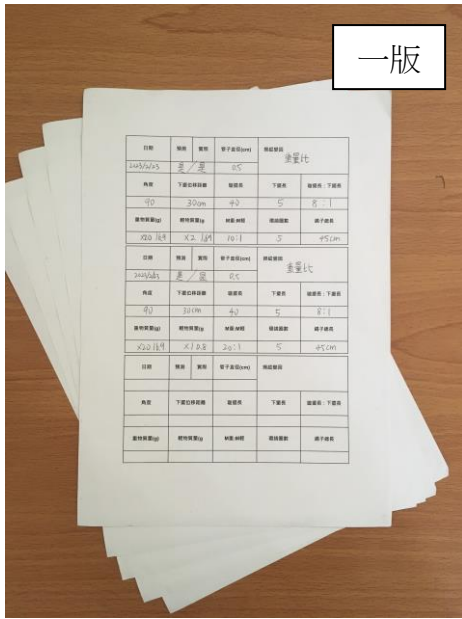
- 一、探討鉛錘與旋擺的質量對運動狀態的影響。
- 二、探討旋擺的施放角度對運動狀態的影響。
- 三、探討旋擺的施放繩長對運動狀態的影響。
- 四、使用應用程式追蹤運動狀態。

參、研究設備及器材

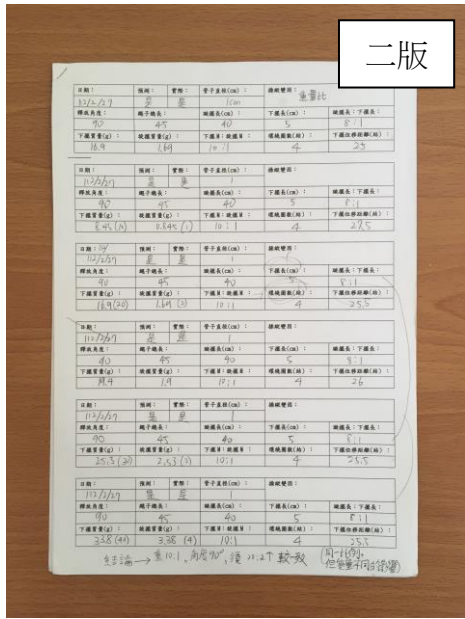
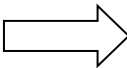
一、實驗器材

<ul style="list-style-type: none">● 電子天平 	<ul style="list-style-type: none">● 棉繩 	<ul style="list-style-type: none">● 金屬墊片 
<ul style="list-style-type: none">● 捲尺 	<ul style="list-style-type: none">● 實驗支架 	<ul style="list-style-type: none">● 轉接頭 
<ul style="list-style-type: none">● 棉繩+墊片 	<ul style="list-style-type: none">● 支架+轉接頭 	<ul style="list-style-type: none">● 支架組+捲尺 

● 實驗紀錄簿



一版



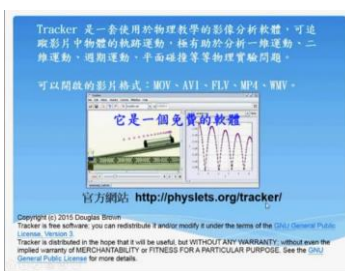
二版

二、實驗設備

● 雷射機



● Tracker 軟體



● 量角器

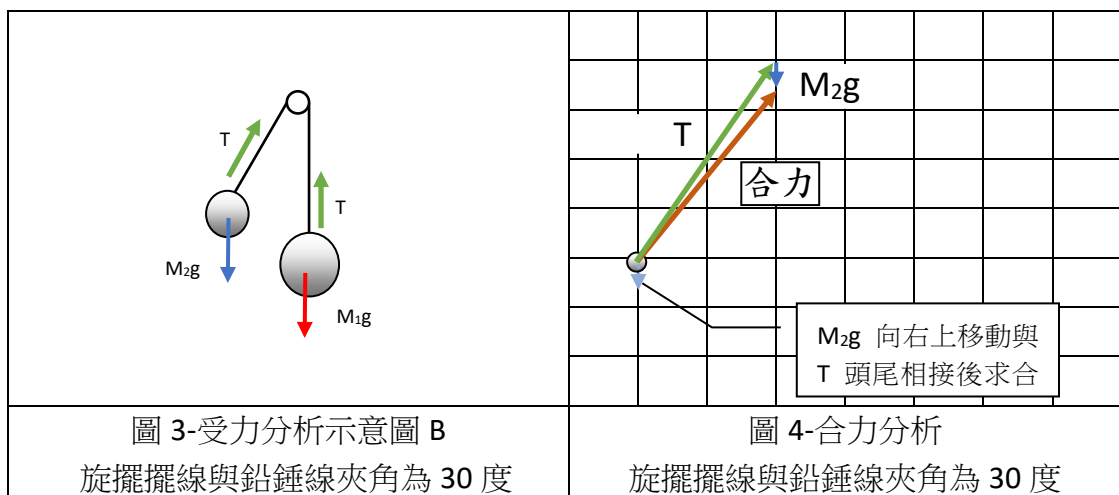
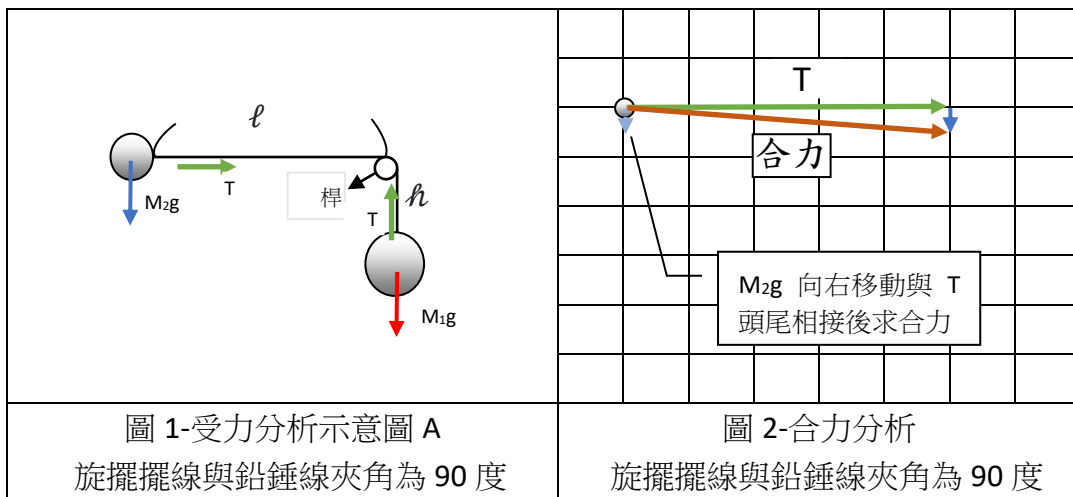


肆、研究過程或方法

一、實驗原理

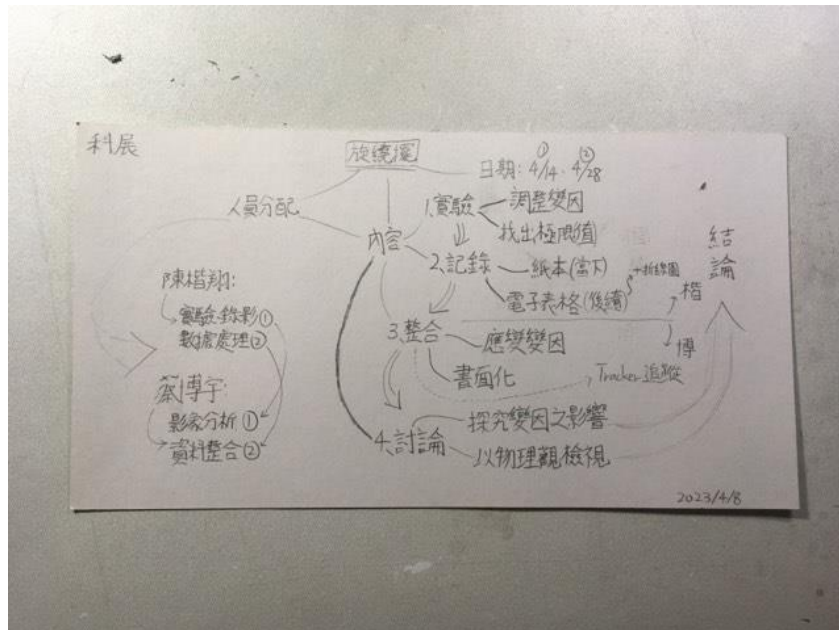
實驗操作裝置如圖 1 所示， l 為旋擺長， h 為鉛錘繩長，棉繩的總長固定為 $L = l + h$ ，兩端固定重物並橫跨在桿子上，鉛錘 M_1 鉛直懸空，旋擺 M_2 用手拉住並與鉛錘線的夾角為 90 度。其中， l 為旋擺到桿的擺長，其餘長度視為 h 。

圖 1 是表示 M_2 的受力分析示意圖， M_2 受垂直向下的重力 M_2g 與水平地面的棉繩拉力 T 作用，利用國中自然課第四冊第五章所學到的合力概念，配合網路應用程式角度計算器，可算出當旋擺擺線與鉛錘線為 90 度時，所受合力方向與水平的夾角，概念如圖 2。接著 M_2 會順著棉繩牽引向下擺動如圖 3、圖 5 及圖 7 的狀態，這期間 M_1 垂直下落， h 的長度增加而 l 的長度減少，當 M_2 纏繞細桿時，所產生的磨擦力加上旋繞的圓周切線運動，使得 M_1 被牽制停止下降，以此實驗成功之標準，若無法牽制 M_1 停下降則稱為失敗。



二、研究方法

分工內容：*備註：.....區域為控制變因及操作變因



實驗設置：



實驗設計：質量、角度、繩長三大變因，再以：

1. 變因對結果的直接影響；
2. 相同變因但基本設定不同的影響；
3. 找出各變因的成功界線。

這三個面向出發，而額外再增加延伸的實驗探討。

基本擺組：用金屬墊片組成鉛錘與旋擺錘，旋擺由 3/4 個墊片組成質量為 M_2 ，鉛錘由 30/40 個墊片組成質量為 M_1 ，鉛錘與旋擺用棉繩分別固定在兩端，使棉繩總長為 45cm，此裝置稱為基本擺組。此時鉛錘與旋擺的質量比值 $M_1/M_2=10$ 。旋擺施放角度為 90 度，旋擺長為 40 公分

(一)、探討不同質量比例的鉛錘與旋擺的運動狀況

實驗 1-1

變因：改變鉛錘與旋擺質量比，但基本單位相同

應變變因：鉛錘下降距離及旋擺纏繞圈數

研究目的：觀察改變質量比的過程鉛錘的下降距離的變化之規律

- 1.將基本擺組跨上支架，旋擺由 4 個墊片組成質量為 M_2 ，鉛錘由 n 個墊片組成質量為 M_1 ，此時鉛錘與旋擺的質量比值 M_1/M_2 固定為 $n/4$ 。
- 2.施放旋擺，觀察旋擺的運動狀況並紀錄鉛錘下降距離及旋擺纏繞圈數。
- 3.固定旋擺墊片數量為 4 個，改變鉛錘墊片數量來改變 M_1 與 M_2 的比值，並重複實驗步驟 1 到步驟 3。

實驗 1-2

變因：改變鉛錘與旋擺質量大小，但質量比皆相同

應變變因：鉛錘下降距離及旋擺纏繞圈數

研究目的：觀察改變質量大小但質量比不變的結果是否相同，若不同則原因為何。

- 1.將基本擺組跨上支架，旋擺由 1/ 2/ 3/ 4 個墊片組成質量為 M_2 ，鉛錘由 10/ 20/ 30/ 40 個墊片組成質量為 M_1 ，這時候的鉛錘與旋擺的質量比值固定 $M_1/M_2=10$ 。
- 2.施放旋擺，觀察旋擺的運動狀況並紀錄鉛錘下降距離及旋擺纏繞圈數。
- 3.改變旋擺、鉛錘墊片數量來改變 M_1 與 M_2 的質量，固定保持相同質量比，並重複實驗步驟 1 到步驟 3。

實驗 1-3

變因：改變鉛錘與旋擺質量比，從比值為 1 往上做，找出成功的開始與結束。

應變變因：該質量比是否將鉛錘成功。

研究目的：找出能將鉛錘成功停止其下落的質量比範圍。

- 1.將基本擺組跨上支架，旋擺由 2 個墊片組成質量為 M_2 ，鉛錘由 n 個墊片組成質量為 M_1 ，此時鉛錘與旋擺的質量比值 M_1/ M_2 固定為 $n/2$ 。
- 2.施放旋擺，觀察旋擺的運動狀況並紀錄鉛錘下降距離及旋擺纏繞圈數。
- 3.改變鉛錘墊片數量來改變 M_1 與 M_2 的質量比，並重複實驗步驟 1 到步驟 3，直到無法成功鎖住鉛錘。

(二)、探討旋擺的施放角度不同的運動狀況

實驗 2-1

變因：改變旋擺施放的角度，固定其質量比。

應變變因：鉛錘下降距離及旋擺纏繞圈數。

研究目的：觀察改變旋擺施放角度所產生的結果變化及規律性。

- 1.將基本擺組跨上支架，用手拉住一端的旋擺，使旋擺的擺線與鉛錘的夾角為 **n 度**。
- 2.施放旋擺，觀察旋擺的運動狀況並紀錄鉛錘下降距離及旋擺纏繞圈數。
- 3.改變旋擺的擺線與鉛錘的角度(每次改變 **10 度**)，並重複上述實驗步驟 1 到步驟 2。

實驗 2-2

變因：改變旋擺、鉛錘的質量，固定其質量比。

應變變因：鉛錘下降距離及旋擺纏繞圈數。

研究目的：觀察改變質量的結果變化及規律性、不同角度的變化是否也不同。

- 1.將基本擺組跨上支架，用手拉住一端的旋擺，使旋擺的擺線與鉛錘的夾角為 **80/ 90/ 100 度**。
- 2.施放旋擺，觀察旋擺的運動狀況並紀錄鉛錘下降距離及旋擺纏繞圈數。
- 3.改變旋擺的擺線與鉛錘的角度，並重複上述實驗步驟 1 到步驟 2。
- 4.以旋擺、不同的質量鉛錘的質量 **40:4/ 3:3 / 20:2 / 10:1** 重複上述實驗步驟 1 到步驟 3。

實驗 2-3

變因：改變釋放旋擺角度，從與鉛錘夾角為 **0 度** 往上做，找出成功的開始與結束。

應變變因：該釋放角度是否可以成功。

研究目的：找出釋放角度成功的兩極和界線。

- 1.將基本擺組跨上支架，用手拉住一端的旋擺，使旋擺的擺線與鉛錘的夾角為 **n 度**。
- 2.施放旋擺，觀察旋擺的運動狀況並紀錄鉛錘下降距離及旋擺纏繞圈數。
- 3.改變旋擺的擺線與鉛錘的角度(從 **0 度** 起每次改變 **10 度**)，並重複上述實驗步驟 1 到步驟 2。

(三)、探討旋擺的施放繩長不同的運動狀況

實驗 3-1

變因：改變旋擺施放的繩長，固定其質量比

應變變因：鉛錘下降距離及旋擺纏繞圈數

研究目的：觀察改變旋擺施放繩長所產生的結果變化及規律性

- 1.將基本擺組跨上支架，用手拉住一端的旋擺，使總繩長扣除鉛錘線長為 **n 公分**(旋擺長)。
- 2.施放旋擺，觀察旋擺的運動狀況並紀錄鉛錘下降距離及旋擺纏繞圈數。
- 3.改變施放的旋擺長(每次改變 5 公分)，並重複上述實驗步驟 1 到步驟 2。

實驗 3-2

變因：改變旋擺、鉛擺的質量，固定其旋擺長、質量比

應變變因：鉛擺下降距離及旋擺纏繞圈數

研究目的：觀察改變質量的結果變化及規律性、不同旋擺長的變化是否也不同

- 1.將基本擺組跨上支架，用手拉住一端的旋擺，使旋擺長固定為 **n 公分**。
- 2.施放旋擺，觀察旋擺的運動狀況並紀錄鉛錘下降距離及旋擺纏繞圈數。
- 3.改變施放旋擺長為 **45/ 40/ 35**，並重複上述實驗步驟 1 到步驟 2。
- 4.以旋擺、不同的質量鉛錘的質量 **40:4/ 30:3 / 20:2 / 10:1** 重複上述實驗步驟 1 到步驟 3。

實驗 3-3

變因：改變釋放旋擺長，從 0 公分往上做，找出成功的開始與結束。

應變變因：該釋放旋擺長是否可以成功。

研究目的：找出釋放旋擺長成功的兩極和界線。

- 1.將基本擺組跨上支架，用手拉住一端的旋擺，使旋擺長為 **n 公分**。
- 2.施放旋擺，觀察旋擺的運動狀況並紀錄鉛錘下降距離及旋擺纏繞圈數。
- 3.改變旋擺的擺線與鉛錘的角度(從 0 公分長起每次改變 **2 公分**)，並重複上述實驗步驟 1 到步驟 2。

伍、研究結果

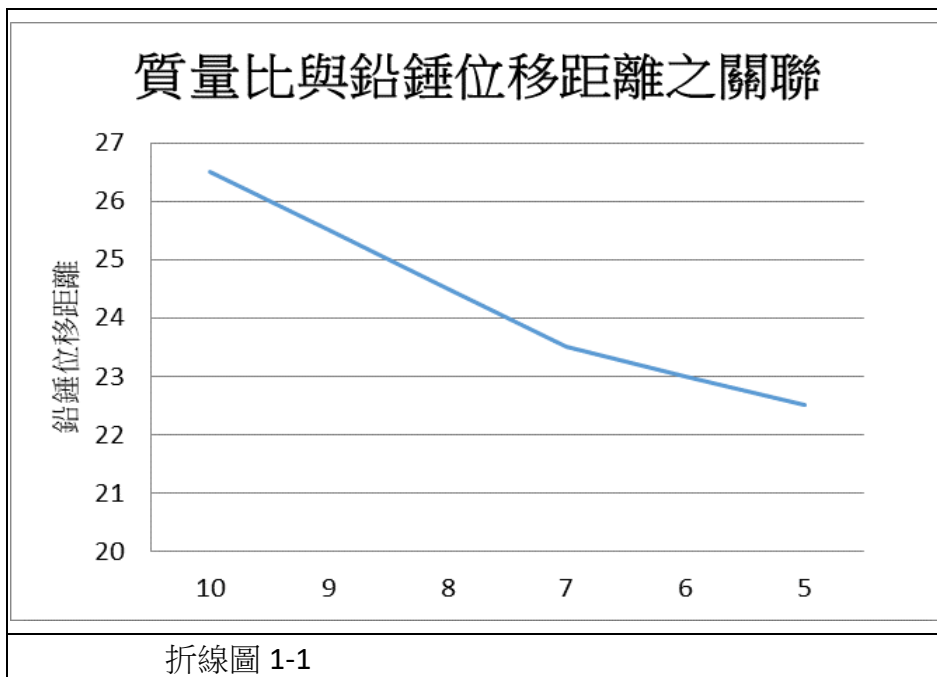
(一)、探討鉛錘與旋擺的質量對運動狀態的影響

實驗 1-1.觀察改變質量比的過程鉛錘下降距離的變化之規律

棉繩總長 45cm，鉛錘繩長 5 cm，旋擺擺長 40 cm 且與鉛錘的夾角為 90 度

表 1-1

編號	M ₁	M ₂	M ₁ /M ₂	旋擺繞圈數	鉛錘位移
1	40	4	10	4	26.5
2	36	4	9	4	25.5
3	32	4	8	4	24.5
4	28	4	7	5	23.5
5	28	4	6	5	23
6	24	4	5	5	22
7	20	4	4	X	X



實驗結果由上圖[1-1]可以看出

- 1、當質量比逐漸下降時，兩端質量慢慢接近，而此時鉛錘下降距離逐漸減少。
- 2、當質量比下降時，也因鉛錘下降距離變短，因此旋擺纏繞圈數增加。

結果討論

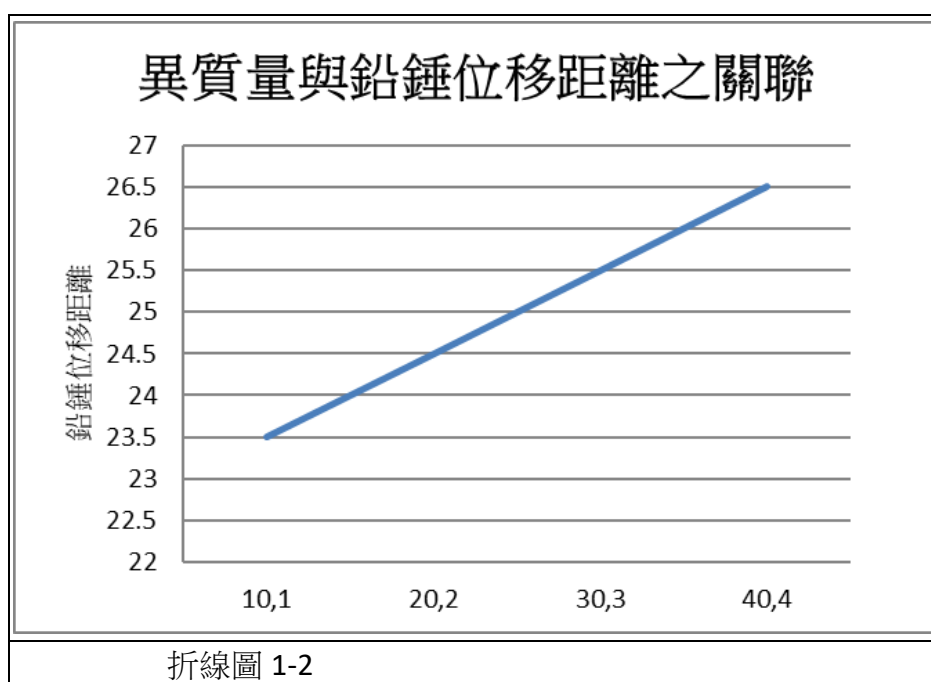
- 1、實驗得知質量比減少會直接的影響鉛錘位移距離，推論原因為鉛錘所提供向下的拉力減少，而旋擺旋繞的力依舊相同，相對的造成鉛錘下落距離的減少，旋擺在更短的時間內制止鉛錘的下降。

實驗 1-2. 觀察改變質量大小但質量比不變的結果是否相同，若不同則原因為何

棉繩總長 45cm，鉛錘繩長 5 cm，旋擺擺長 40 cm 且與鉛錘的夾角為 90 度

表 1-2

編號	M_2	M_1	M_1/M_2	旋擺繞圈數	鉛錘位移
1	1	10	10	4	23.5
2	2	20	10	4	24.5
3	3	30	10	4	25.5
4	4	40	10	4	26.5



實驗結果由上表[1-2]、圖[1-2]可以看出:

- 1、當改變質量大小時而質量比卻相同時，當鉛錘質量越大則下落距離也越長。
- 2、當改變質量大小時，旋擺的纏繞次數並無改變。

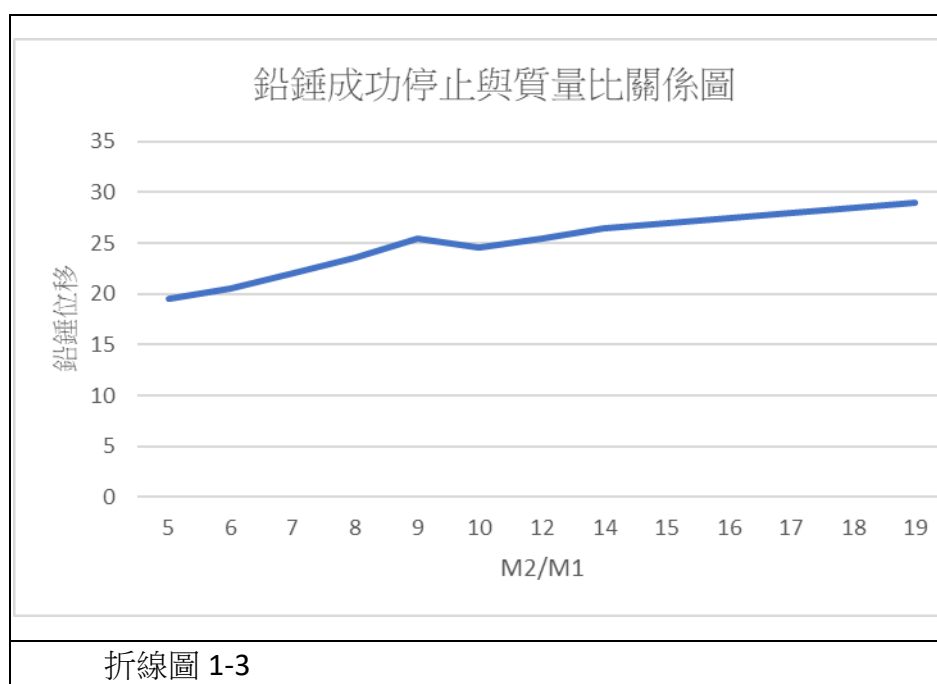
結果討論

- 1、當我們改變質量大小時，雖因質量比相同，但鉛錘位移距離並不相同，我們推論其原因為存在著其他不同的變因，如旋擺與桿子的摩擦力、旋擺旋繞時的空氣阻力，當我們改變其質量大小時，這些潛在的變因也影響著結果。
- 2、因鉛錘下落距離增加幅度無大到影響纏繞圈數，所以旋擺纏繞次數沒有改變。

實驗 1-3. 找出能將鉛錘成功停止其下落的質量比範圍

表 1-3 說明: X 表示沒有鎖住鉛錘

編號	M ₂	M ₁	M ₁ /M ₂	旋擺繞圈數	鉛錘位移
1	2	39	19.5	X	X
2	2	38	19	3	29
3	2	36	18	3	28.5
4	2	34	17	3	28
5	2	32	16	3	27.5
6	2	30	15	3	27
7	2	28	14	4	26.5
8	2	24	12	4	25.5
9	2	20	10	4	24.5
10	2	18	9	5	25.5
11	2	16	8	5	23.5
12	2	14	7	5	22
13	2	12	6	5	20.5
14	2	10	5	6	19.5
15	2	8	4	X	X



實驗結果由上表[1-3]、圖[1-3]可以看出

- 1、當 M_1/M_2 小於等於 4 及 M_1/M_2 大於等於 19.5 的時候，因為旋擺無法完成纏繞或是纏繞 1 圈後發生脫落，無法成功固定住鉛錘。
- 2、當 M_1/M_2 數值增加時，旋擺繞圈數會減少、鉛錘下降距離會增加。

結果討論

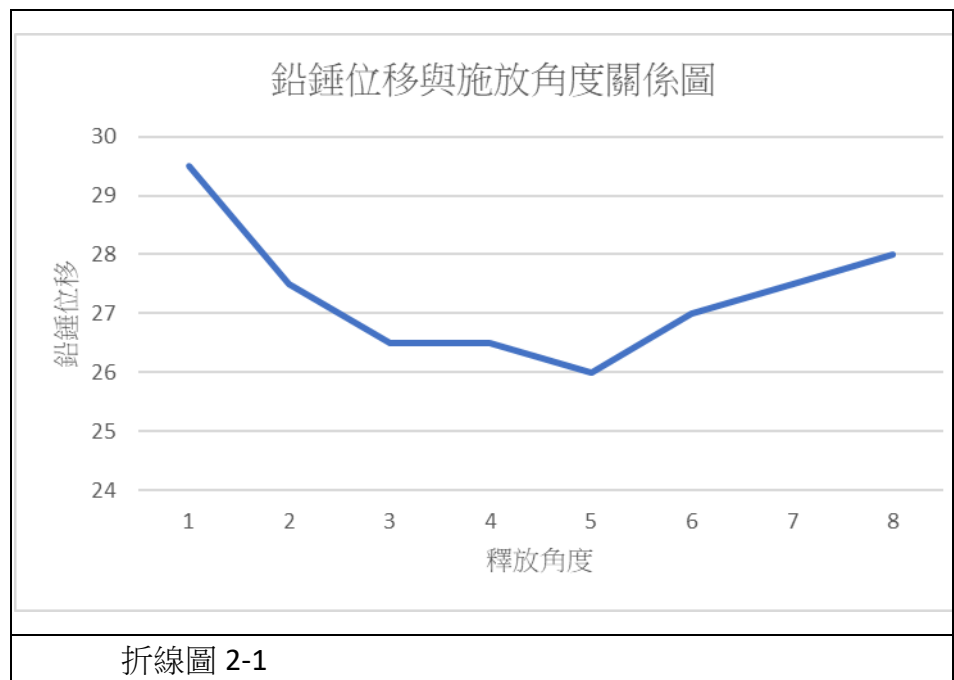
- 1、當 M_1/M_2 小於等於 19.5 時，我們發現只要實驗成功，旋擺繞圈數差異不大，當旋擺能成功纏繞 2 圈時，就能穩穩拉住鉛錘，而旋擺後續是靠旋轉慣性做纏繞運動；而當 M_1/M_2 小於等於 4，因兩端質量相當接近，鉛錘無足夠位能將旋繞中的旋擺往下拉，故旋擺繩長無法縮短造成纏繞之現象。

(二) 探討旋擺的施放角度對運動狀態的影響

實驗 2-1. 觀察改變旋擺施放角度所產生的結果變化及規律性度

表 2-1

編號	釋放角度	M_2	M_1	旋擺繞圈數	鉛錘位移
1	50	3	30	4	29.5
2	60	3	30	4	27.5
3	70	3	30	5	26.5
4	80	3	30	5	26.5
5	90	3	30	5	26
6	100	3	30	4	27
7	110	3	30	4	27.5
8	120	3	30	4	28



實驗結果由上表[2-1]、圖[2-1]可以看出

- 1、當釋放角度由 50°逐漸增加時，鉛錘位移距離會逐漸減少直到 90°時，90°~120°間鉛錘位移距離反開始逐漸增加。
- 2、旋擺纏繞次數相對呼應也是，50°~70°次數增加，90°~120°次數減少。

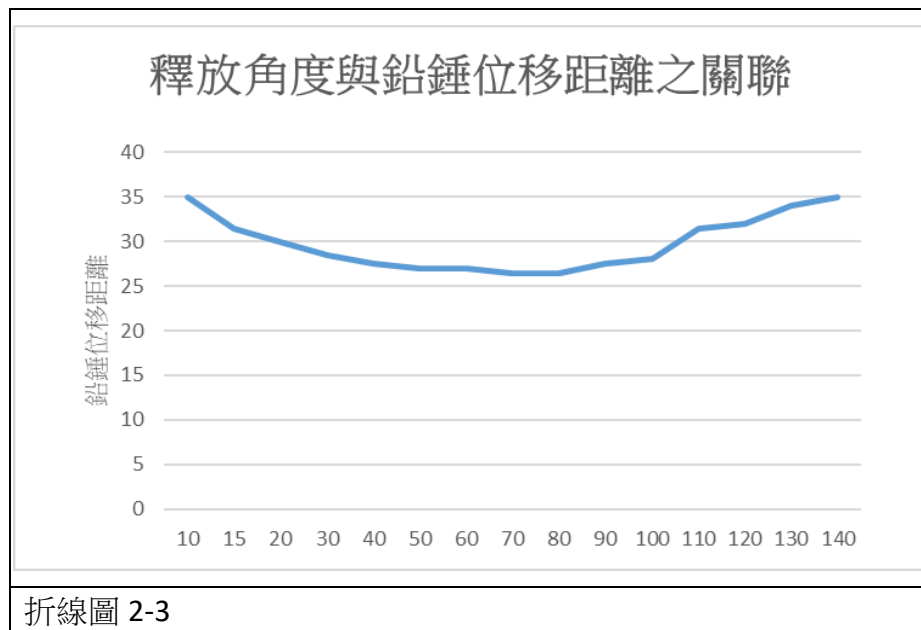
結果討論

- 1、依據實驗結果和圖表，當釋放角度逐漸增加時，可得知其變化過程為一個弧線，我們推論角度的變化直接反映的就是旋擺釋放時重力(M_2g)與棉繩拉力(T)的合力大小，50°~70°度間合力逐漸增加，因此鉛錘位移距離減少，90°~120°間合力逐漸減少，因此鉛錘位移距離增加，有此也可得知最佳釋放角度約為 90°度。

實驗 2-3. 找出釋放角度成功的兩極和界線

表 2-3

編號	釋放角度	M1	M2	旋擺繞圈數	吊錘位移
1	10	3	30	X	X
2	15	3	30	x/1	37/X
3	20	3	30	1	35
4	30	3	30	2.5	31.5
5	40	3	30	3	30
6	50	3	30	4	28.5
7	60	3	30	4	27.5
8	70	3	30	5	27
9	80	3	30	5	27
10	90	3	30	5	26.5
11	100	3	30	4.5	26.5
12	110	3	30	4	27.5
13	120	3	30	4	28
14	130	3	30	4	31.5
15	140	3	30	3	32
16	150	3	30	3	34
17	160	3	30	3	35
18	170	3	30	X	X



實驗結果由上表[2-3]、圖[2-3]可以看出

- 1、當釋放角度小於等於 20 度之後實驗的結果開始不穩定，小於等於 10 度就無法成功；而向上家到 170 度時則無法成功。
- 2、當釋放角度持續增加時，旋擺繞圈數會形成一個曲線。

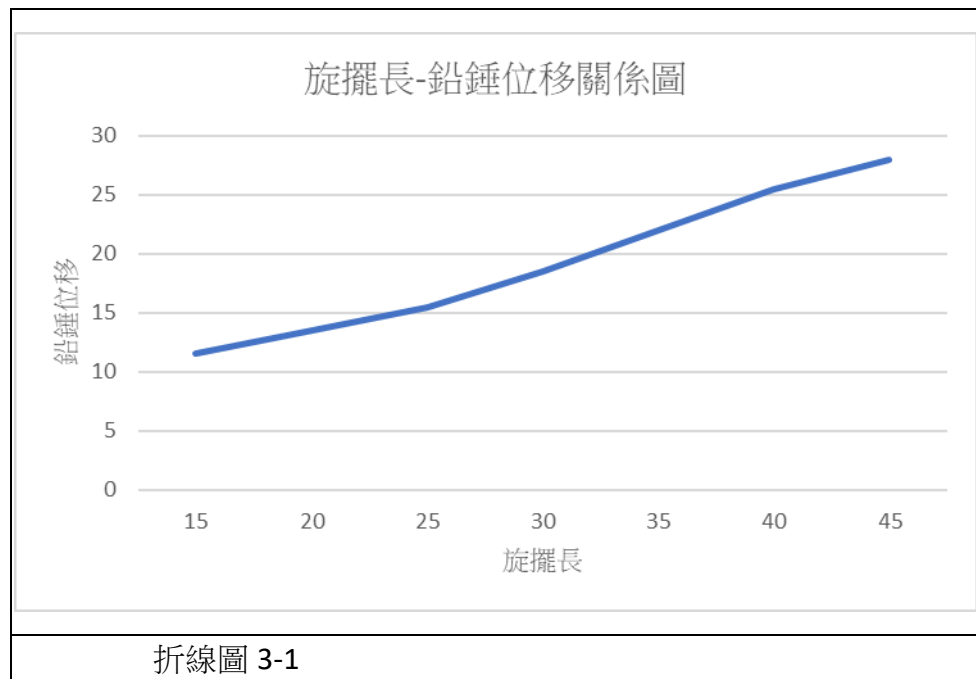
結果討論

- 1、我們發現只要實驗成功，旋擺繞圈數差異不大，當旋擺能成功纏繞 1、2 圈時，就可以成功，而接近 20 度時因無足夠合力纏繞桿子，但向上拉的力很大，會使旋擺剛好扣住桿子因而制止鉛錘下降，而接近 170 度時其實效果也雷同

實驗 3-1. 觀察改變旋擺施放繩長所產生的結果變化及規律性

表 3-1

編號	旋擺長	M ₂	M ₁	旋擺繞圈數	鉛錘位移
1	15	3	30	1	11.5
2	20	3	30	2	13.5
3	25	3	30	2	15.5
4	30	3	30	3	18.5
6	35	3	30	4	22
7	40	3	30	4	25.5
8	45	3	30	5	28



實驗結果由上表[3-1]、圖[3-1]可以看出:

- 1、當旋擺長持續減少時，鉛錘的位移距離也會不斷減少。
- 2、當旋擺長持續減少時，旋擺繞圈數也逐漸減少。

結果討論

- 1、我們在實驗時發現，旋擺長的影響非常大，因為改變的旋擺長就直接影響到了旋擺旋繞時的力矩長度，另一方面能纏繞桿子的線長也改變，導致些微的改變就會大大的影響到鉛錘位移距離和旋擺纏繞次數。

陸、結論

- 一、本次實驗為了方便分析與顧慮安全性，採用旋擺 M_2 與鉛錘 M_1 較小質量的方式操作。而大質量的演示戲劇張力足夠，但不方便操作實驗。
- 二、在旋擺釋放角度為 90° 的條件下: (1) M_1/M_2 的比值最大到 19，最小到 5 是臨界值，超過就不會成功。在 M_1/M_2 的比值固定為 10 的時候，改變多種旋擺與鉛錘的質量，都能成功。
- 三、旋擺釋放角度為 $70^\circ \sim 90^\circ$ 的區間，能使旋擺纏繞數最多達 5 圈。釋放角度增加或減少，很有趣地，纏繞圈數對稱性減少，推測是此條件下旋擺 M_2 所受合力大小相仿。

- 四、旋擺長的長度，只要有機會讓旋擺牢牢穩穩地纏繞一圈，鉛錘都能被成功鎖住。但 M_1/M_2 的比值過大時，雖然旋擺有機會纏繞一圈，此時鉛錘的力量會硬生生把旋擺扯下來。
- 五、我們期待能完成接下來利用 Tracker 來追蹤這次的運動行為，更能利用攝影解析運動體速度與加速度的改變，讓旋擺呈現魔幻似的旋纏即停鉛錘。不僅是看似外表極具有戲劇張力的簡單物理演示活動，幾乎人人可以上手，而此實驗的內在還藏著許多我們渾屯未明的道理呢！

柒、後記

這次科展，我們從對於一支影片的中現象的好奇，到後來設為研究主題，著手從零開始研究，連最開始上網查資料時，網路上的資訊真的是寥寥無幾，大多不是原文就是簡體字，連最基本的名稱都不確定，後來我們討論後才產出了旋繞擺這個名詞，整個的研究過程也相當不容易，不論是組員高燒生病、英文話劇縣賽相衝、課業層迭的壓力、參加童軍隔宿露營等，時間的緊迫，導致不少的實驗遭到耽擱，原預計的 2-2、3-2、3-3 也無法在報名時間內如數完成，真的真的覺得好可惜！經過實驗夥伴討論，我們堅持下去，拚命在 4/28 前將原預計的實驗如期完成，也將使用 Tracker 追蹤其運動軌跡，將此主題探究得更為完整。謝謝父母與師長一直支持與鼓勵讓我們有出件的勇氣。

捌、參考資料及其他

一、國中自然科學第四冊，初版，台南市，南一書局，201-202，民國 110

年 2 月

二、網址連結：

(一) “循环摆”是什么？把铁片系在绳子两端，松手后有趣的现象发生了

(二) <https://arxiv.org/pdf/2103.14752.pdf>--原文網址

(三) (305) 台大電機普通物理 期末專題—循環擺運動現象之探討 - YouTube

(四) 一个你可能不知道的物理现象——循环摆 - 知乎 (zhihu.com)

(五) 学姿势，涨姿势，物循环摆 哔哩哔哩 bilibili

(六) <https://docs.google.com/document/d/1WDL1minJFA1wisIobkPjhjvy60d0VlpV/edit>