

中華民國第 55 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國中組 物理科

最佳創意獎

030104

星際效應中的憤怒鳥

學校名稱：新北市立蘆洲國民中學

作者： 國二 李佳泓 國二 蔡沛庭 國二 游月伶	指導老師： 蔡怡德 郭春華
---	-----------------------------

關鍵詞：重力彈弓、太空航行、行星引力

摘要

由電影「星際效應」所引發的好奇心，我們開始了這次對重力彈弓的實驗與研究，共設計了三種實驗裝置：一、馬達、鋁盤、強力磁鐵及滑軌組成的引力裝置。二、壓克力材質的實驗平台。三、可調整鋼珠從不同高度滾落的凹槽滑梯裝置，利用這三種裝置我們可以進行重力彈弓的模擬與分析。

壹、研究動機

在去年有一部很好看的電影「星際效應」，在影片中主角們為了人類的存續而開始了在太空中的旅行，而影片裡出現許多物理的原理與名詞，其中「重力彈弓」更是屢次出現在影片中，當時「彈弓？」這個名詞，對我們來說十分不可思議，在好奇心的驅使之下我們開始了對「重力彈弓」研究與實驗。

貳、研究目的

目的一、設計與製作可模擬重力彈弓的實驗裝置。

目的二、觀測鋼珠在行經星球引力範圍內時，鋼珠的速度及不同軌道對偏向角度的影響並利用 Excel 分析鋼珠軌跡。

目的三、觀測鋼珠行經移動中的星球時，引力對鋼珠速度變化量的影響。

參、研究設備與器材

實驗器材：星球引力模擬裝置、鋼珠軌道裝置、壓克力實驗平台、直徑 1.6 cm 鋼珠、高速閃光燈、單眼數位相機。



圖一：星球引力模擬裝置

圖二：鋼珠軌道裝置

圖三：壓克力實驗平台

圖四：直徑 1.6 cm 鋼珠

圖五：高速閃光燈

肆、研究過程方法與結果

研究一、設計與製作可模擬重力彈弓的實驗裝置。

（一）實驗思考與設計：

1. 星球引力的模擬：

星球的引力方向要指向星球的中心且引力的 $大小與距離的平方成反比$ ，因此我們利用磁力的 $大小與距離的平方成反比$ 的特性，來進行模擬。

2. 太空船飛行的模擬：

實驗中我們以滾動的鋼珠模擬飛行中的太空船，而太空船的速度及軌道皆會影響重力彈弓的表現，為了瞭解太空船不同飛行速度、軌道所造成的影響，我們設計能改變鋼珠入射速度與軌道的裝置。

3. 摩擦力的影響：

太空中幾乎沒有摩擦力存在，但地球上摩擦力卻無所不在，所以我們要盡量降低摩擦力對實驗結果的影響。

4. 鋼珠滾動軌跡記錄：

以高速閃光燈配合相機即可清晰記錄下鋼珠滾動的軌跡，分析鋼珠速度的變化量及偏向的角度。

（二）裝置製作與測試：

星球引力的模擬：

- 我們將 12 顆直徑為 2.0 cm 高 3.0cm 的圓柱型強力磁鐵平均安裝於直徑 11.5 cm、厚 3.0cm 鋁盤的圓周上，並將鋁盤固定於馬達的承軸上，裝置如圖一。將馬達開啟並以指南針做檢測，調整馬達的轉速直到指針持續指向圓盤的圓心。
- 將步驟 1 所製作的引力裝置安裝於滑軌上，並以牽引馬達拉動，模擬行星的移動，裝置如圖七，測試結果如圖八。

太空船飛行的模擬：

- 我們選用壓克力板來製作實驗平台，並用壓克力製作高 45.0cm 且有 U 型凹槽的軌道來控制鋼珠行進方向，讓鋼珠從不同的高度滾下即可以產生不同的初速，裝置如圖九。

- 在星球引力範圍外，把鋼珠放置於離實驗平台垂直高度 15cm 處的軌道上，並使其從軌道滾落。
- 調整相機快門為 1/2 秒、高速閃光燈的閃爍頻率為 9000rpm，拍下鋼珠運動的軌跡。
- 分別將鋼珠滾落的垂直高度調整為 20 cm、25 cm、30 cm、35 cm、40 cm、45 cm，重複步驟 2、3。
- 利用拍下來的照片計算鋼珠到達平台時產生的初速，記錄測量結果如表二。

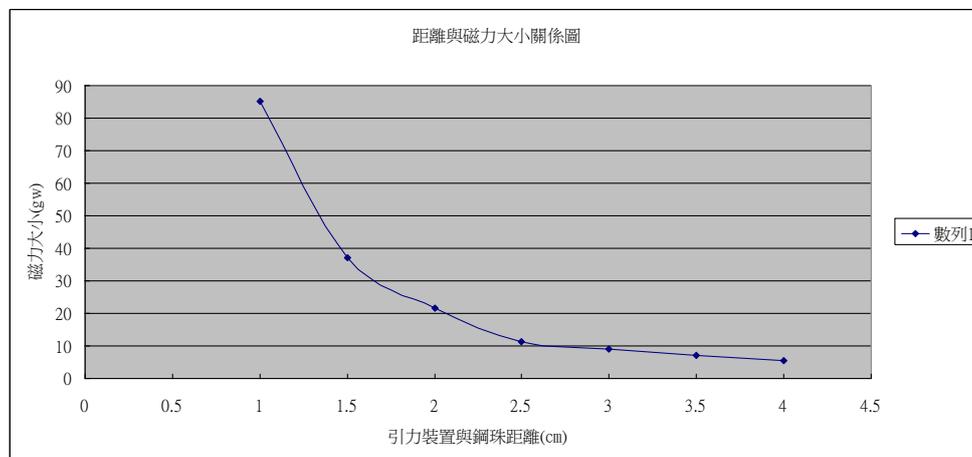
摩擦力的影響：

- 雖然我們選用壓克力板作為實驗平台的材質，但仍會受到摩擦力的影響，因此我們要測出實驗平台的摩擦力大小以了解摩擦力對實驗結果的影響，以減低實驗誤差。
- 在星球引力的範圍外，把鋼珠放置於離實驗平台垂直高度 40cm 處的軌道上，並使其從軌道滾落。
- 調整相機快門為 1/2 秒、高速閃光燈的閃爍頻率為 9000rpm，拍下鋼珠運動的軌跡。
- 利用拍下的照片分析鋼珠滾動時的位移變化量，利用公式 $a=(S_2-S_1)/t^2$ 、 $F=ma$ 可以算出摩擦力的大小，結果如圖十。

(三) 實驗結果：

表一：引力裝置所產生的磁力

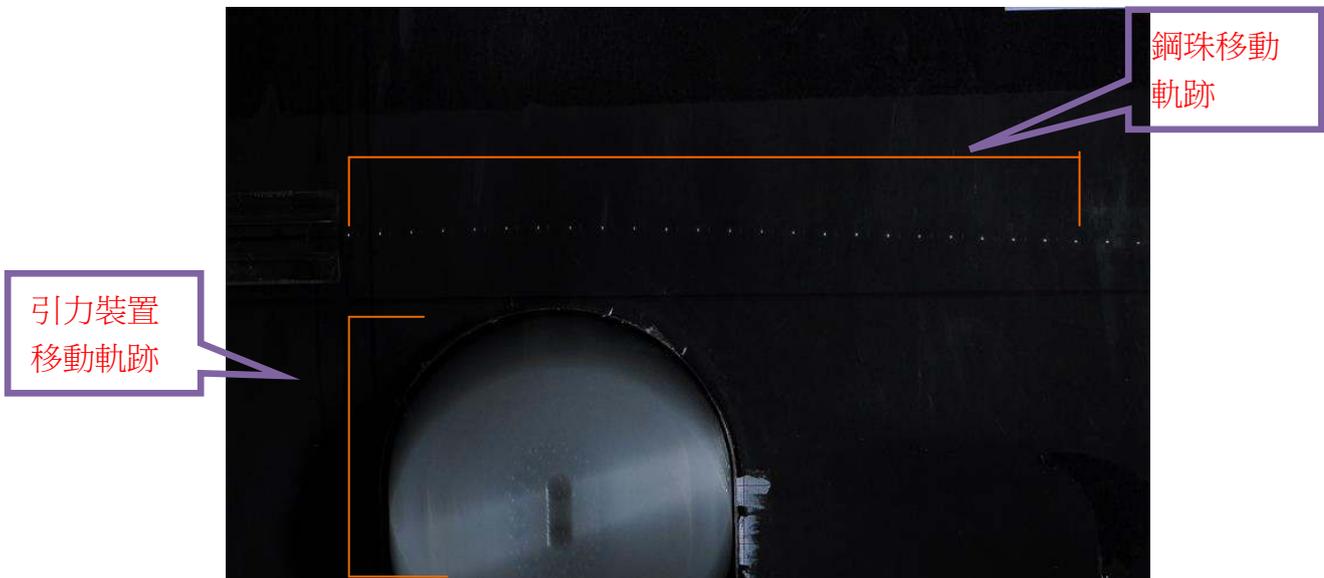
引力裝置與鋼珠距離(cm)	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
磁力大小(gw)	85.1	37.2	21.6	11.2	9.1	7.0	5.4



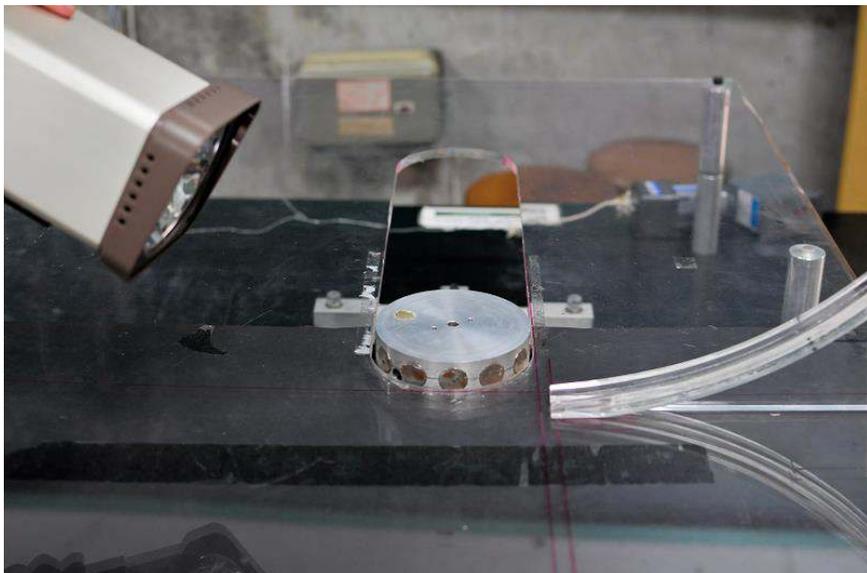
圖六：距離與磁力大小關係圖



圖七：行星位移裝置



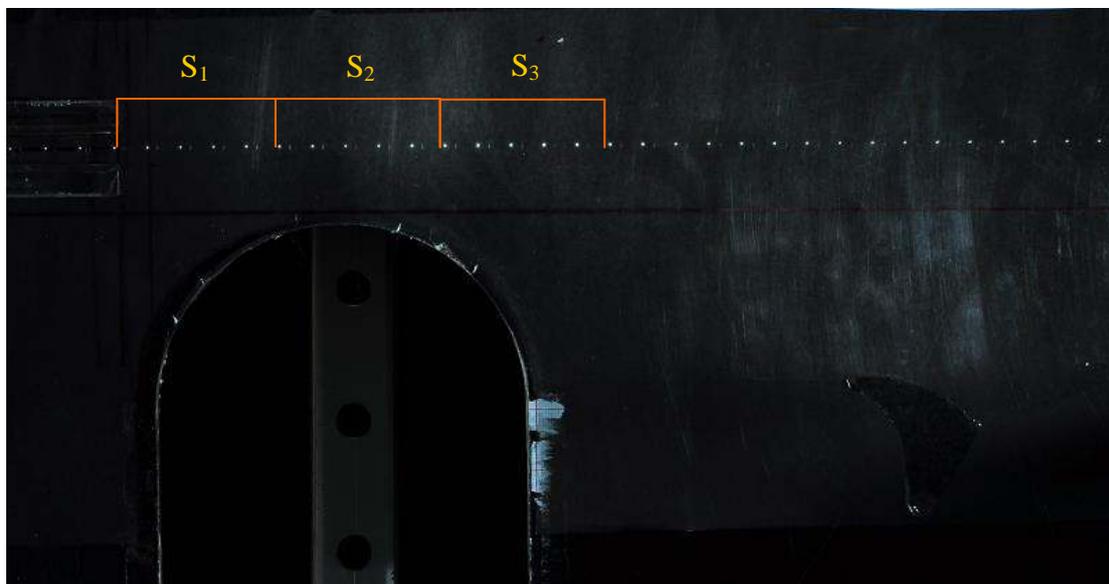
圖八：鋼珠與馬達同步位移，馬達以 4.5cm/s 遠離鋼珠軌道。



圖九：重力彈弓實驗裝置圖

表二：不同高度落下所產生的初速

落下高度(cm)	15.0	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0	45.0
初速(cm/s)	84.0	106.0	122.0	136.0	154.0	168.0	178.0



圖十:無引力裝置初速 168.0 cm/s，加速度為 -90.0 cm/s^2 ，摩擦力大小為 1.49gw。

研究二、觀測鋼珠在行經星球引力範圍內時，鋼珠的速度及不同軌道對偏向角度的影響。

(一) 思考方向：

因為太空船的偏向角度會受到星球引力大小及經過星球時間所影響，所以我們將實驗分為兩部分：

1. 觀測鋼珠入射速度對偏向角度的影響。
2. 觀測不同距離產生的星球引力大小對偏向角度的影響。

(二) 實驗步驟：

觀測鋼珠入射速度對偏向角度的影響：

1. 裝置如圖九，調整鋼珠最初的行進軌跡與引力裝置距離為 3 cm。
2. 把鋼珠放置於軌道上調整落至平台的初速為 84.0 cm/s。
3. 調整相機快門為 1/2 秒、高速閃光燈閃爍頻率為 9000rpm，使鋼珠從軌道落下並拍下鋼珠運動的軌跡。
4. 分別將鋼珠入射的初速調整為 106.0 cm/s、122.0 cm/s、136.0 cm/s、154.0 cm/s、168.0 cm/s、178.0 cm/s，重複步驟 1 至 3。

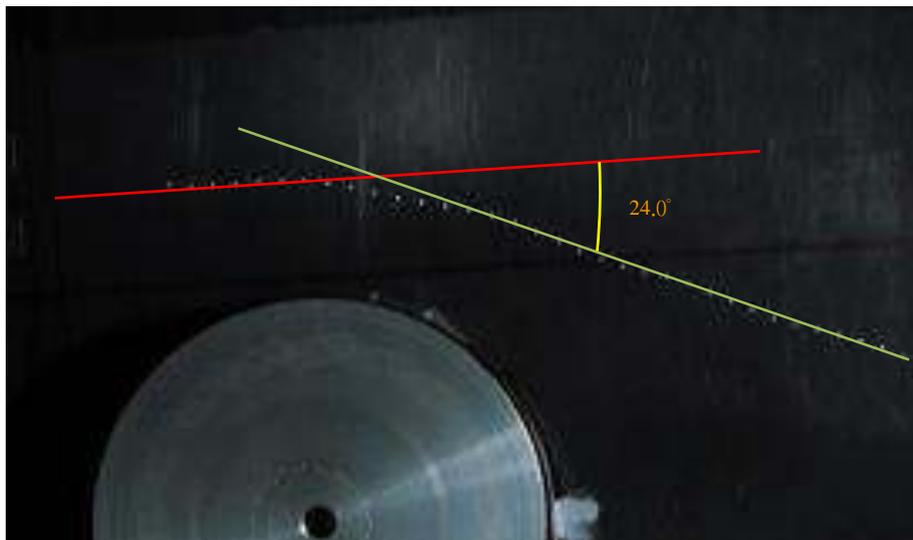
5. 利用拍下的照片分析鋼珠偏向的角度並利用 Excel 計算出其軌跡方程式，實驗結果如圖十一到圖二十四。

觀測不同距離產生的星球引力大小對偏向角度的影響：

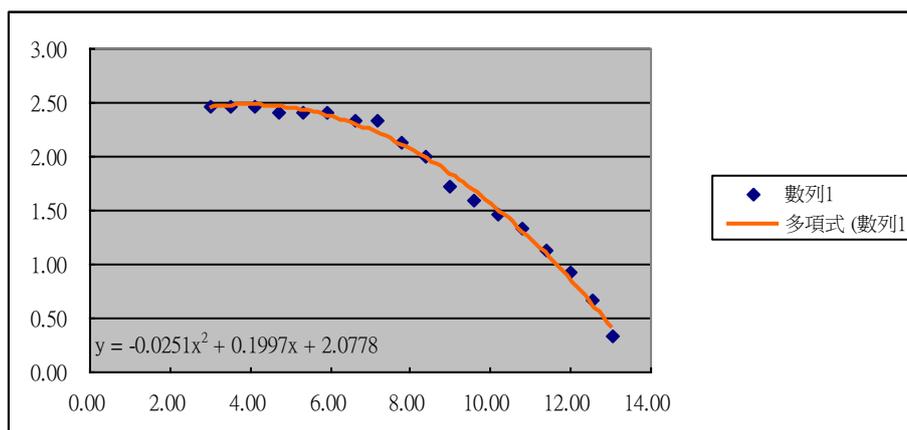
1. 裝置如圖九，調整鋼珠行進的軌道與引力裝置距離為 3.0 cm。
2. 鋼珠放置於軌道上調整至平台的入射速度為 136.0 cm/s。
3. 調整相機快門為 1/2 秒、高速閃光燈的閃爍頻率為 9000rpm，使鋼珠從軌道落下並拍下鋼珠運動的軌跡。
4. 分別調整鋼珠行進的軌道與引力裝置距離為 3.5cm、4.0cm，重複步驟 1 至 3。
5. 利用拍下的照片分析鋼珠偏向的角度並利用 Excel 計算出其軌跡方程式，實驗結果如圖二十五到圖三十。

(二) 實驗結果：

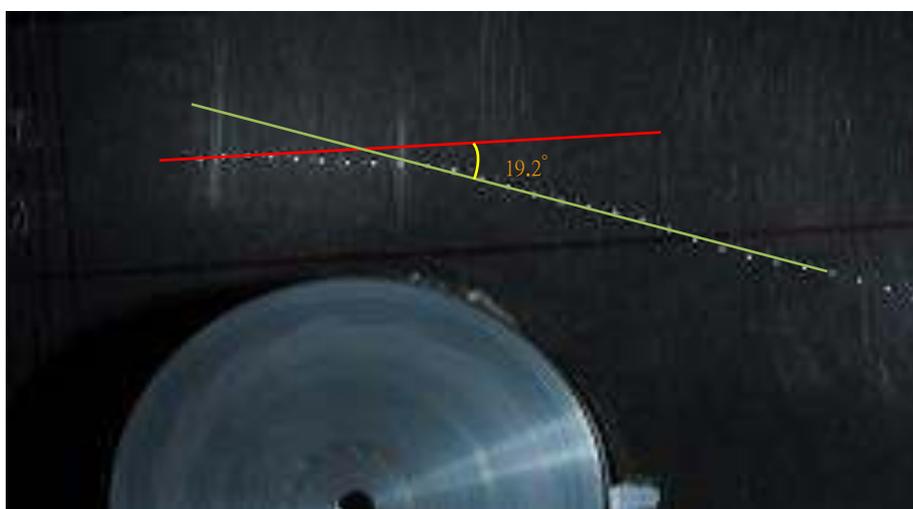
鋼珠入射速度對偏向角度的影響：



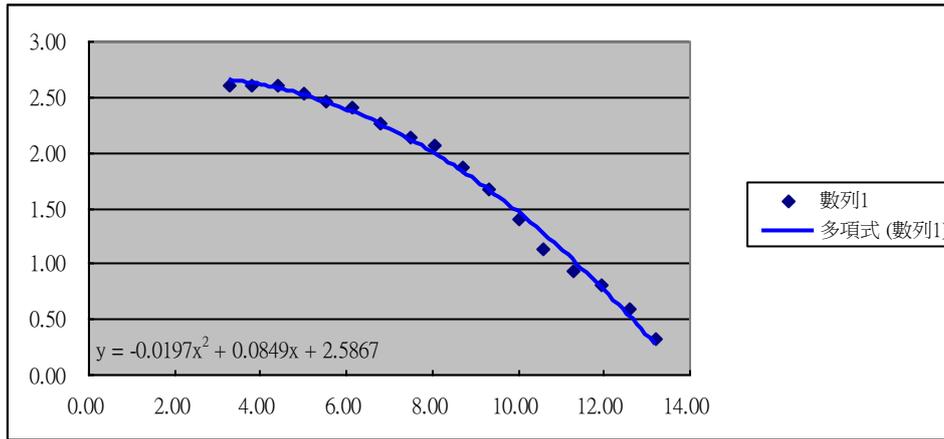
圖十一：距離引力裝置 3 cm，入射速度 84.0 cm/s。



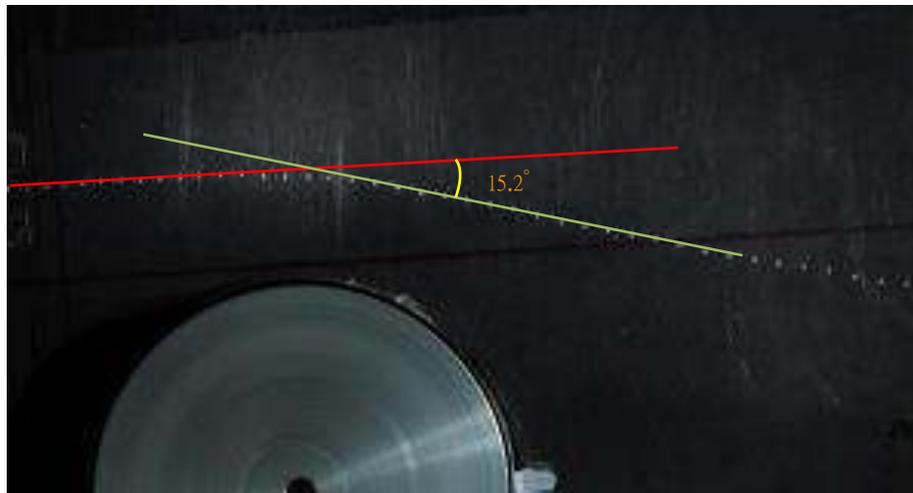
圖十二：距離引力裝置 3 cm，入射速度 84.0 cm/s。



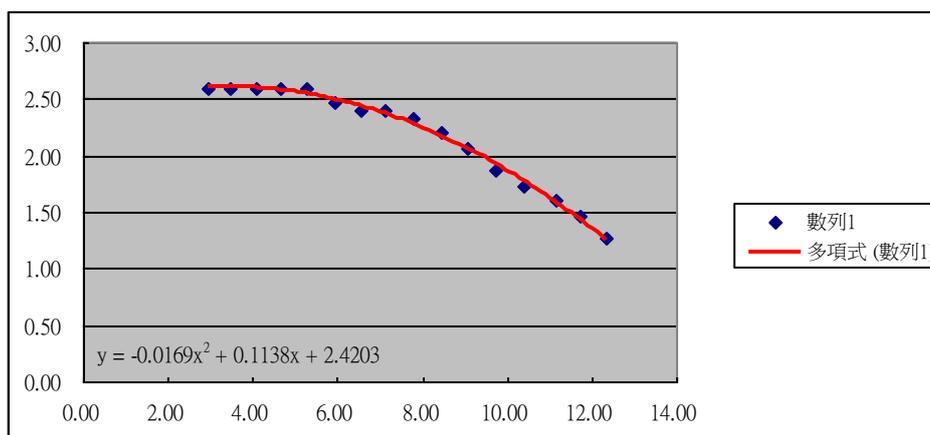
圖十三：距離引力裝置 3 cm，入射速度 106.0 cm/s。



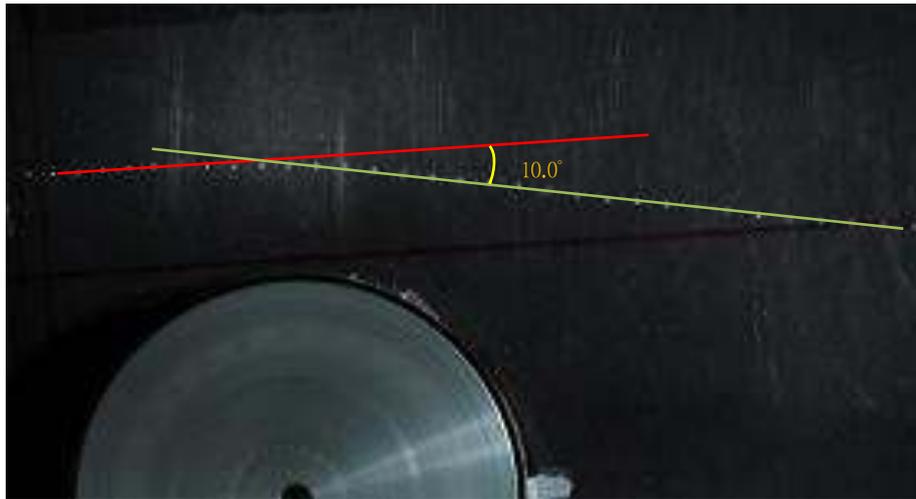
圖十四：距離引力裝置 3 cm，入射速度 106.0 cm/s。



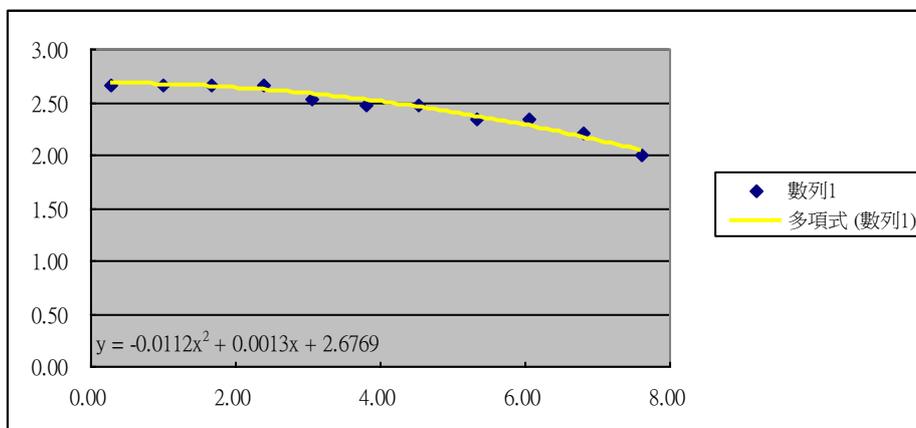
圖十五：距離引力裝置 3 cm，入射速度 122.0 cm/s。



圖十六：距離引力裝置 3 cm，入射速度 122.0 cm/s。



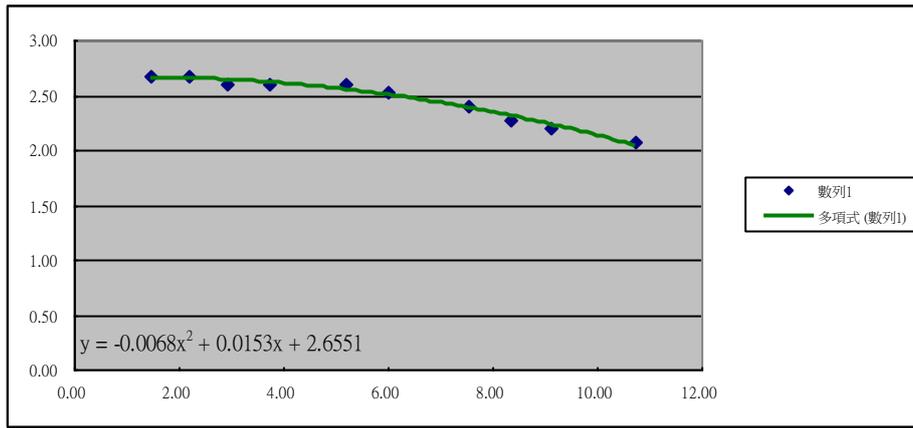
圖十七：距離引力裝置 3 cm，入射速度 136.0 cm/s。



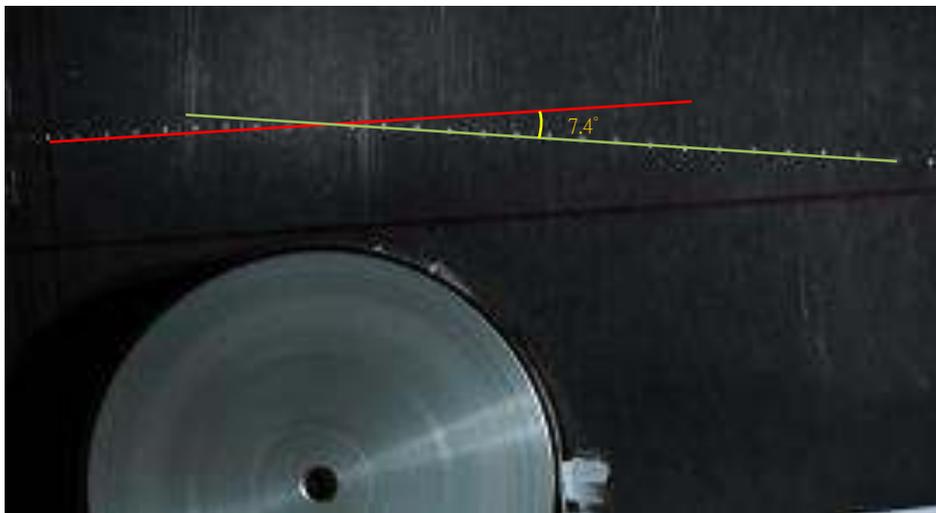
圖十八：距離引力裝置 3 cm，入射速度 136.0 cm/s。



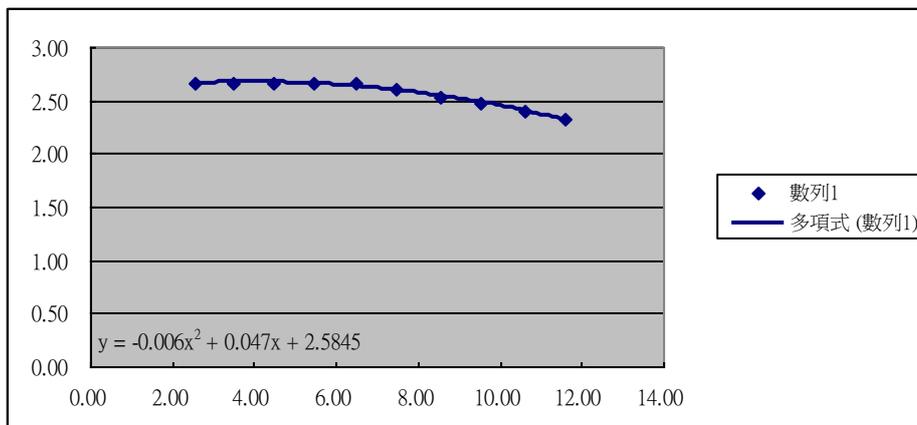
圖十九：距離引力裝置 3 cm，入射速度 154.0 cm/s。



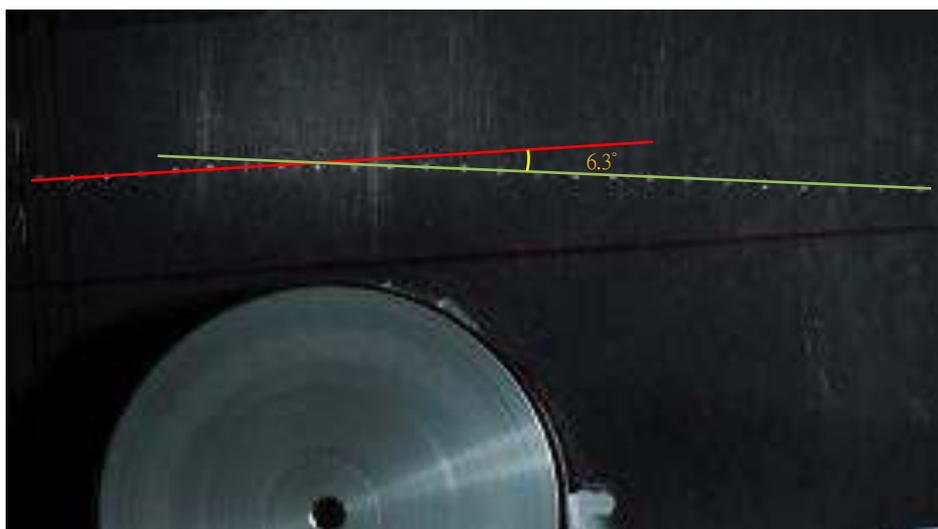
圖二十：距離引力裝置 3 cm，入射速度 154.0 cm/s。



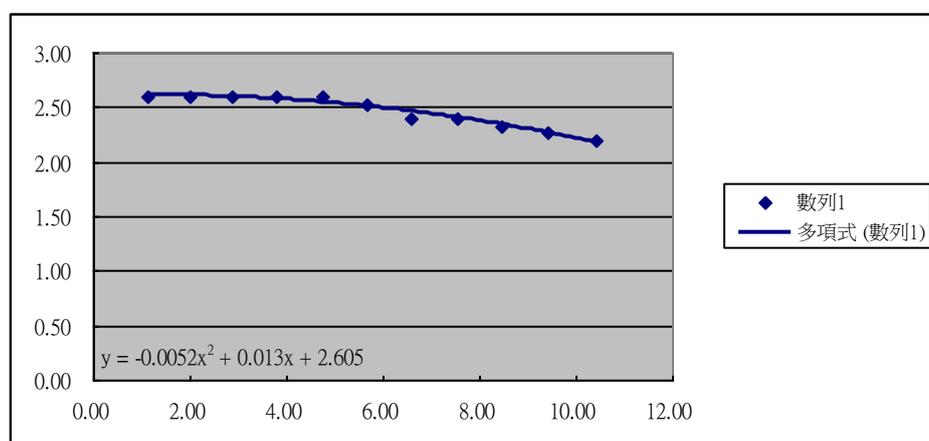
圖二十一：距離引力裝置 3 cm，入射速度 168.0 cm/s。



圖二十二：距離引力裝置 3 cm，入射速度 168.0 cm/s。

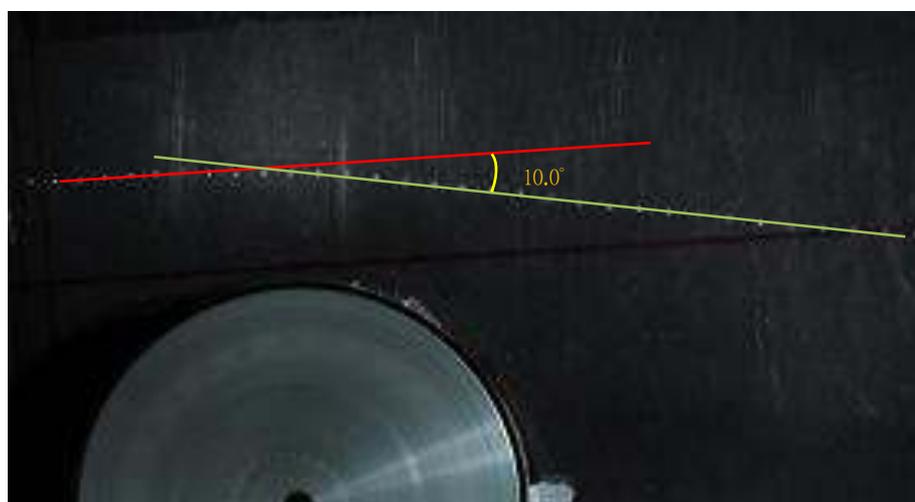


圖二十三：距離引力裝置 3 cm，入射速度 178.0 cm/s。

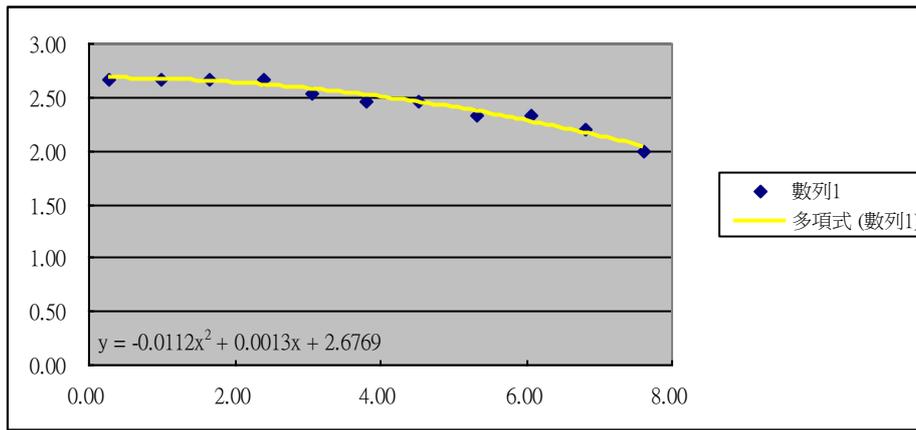


圖二十四：距離引力裝置 3 cm，入射速度 178.0 cm/s。

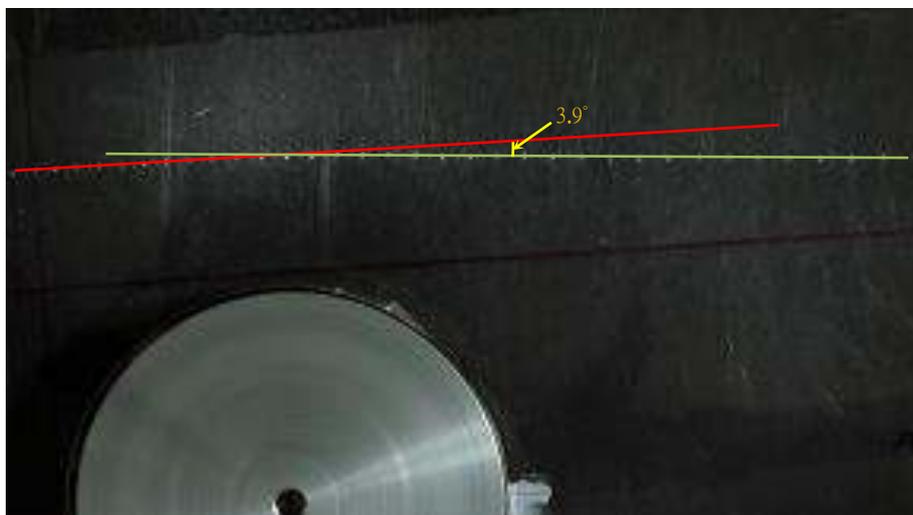
鋼珠軌道與引力大小對偏向角度的影響：



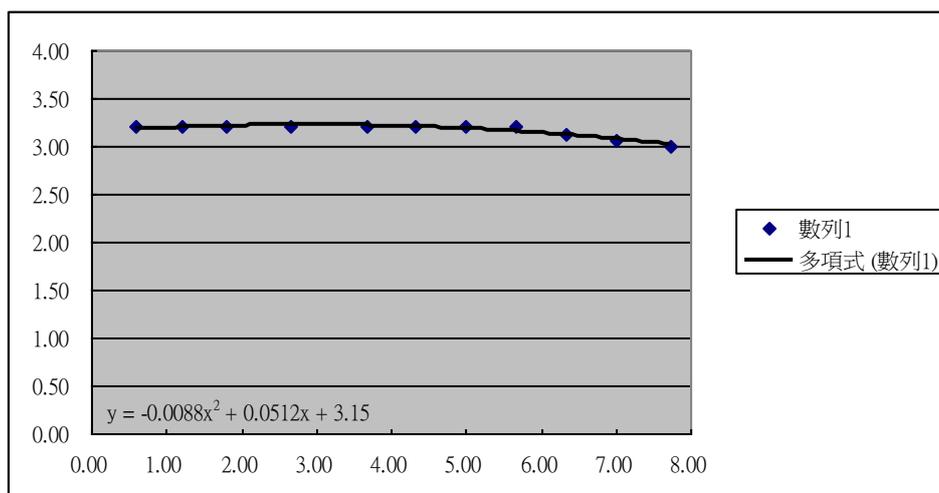
圖二十五：距離引力裝置 3 cm，入射速度 136.0 cm/s。



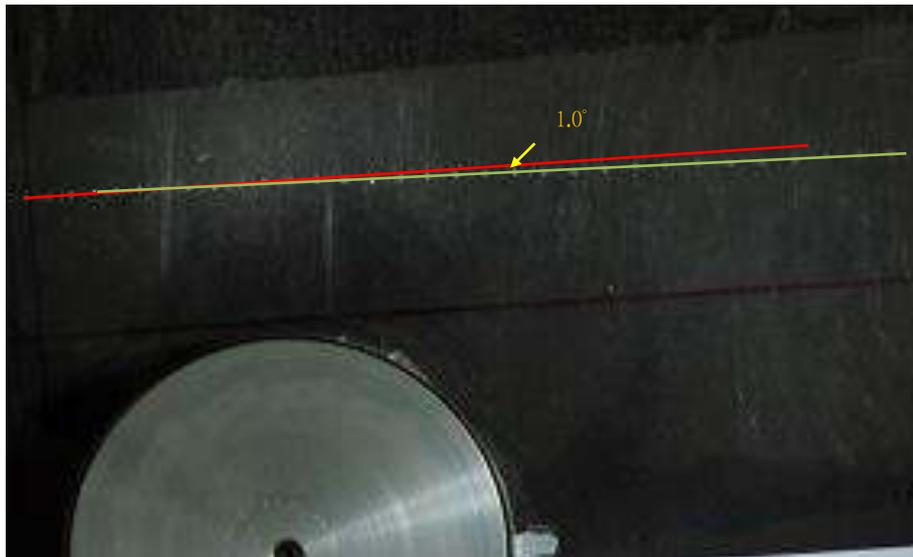
圖二十六：距離引力裝置 3 cm，入射速度 136.0 cm/s。



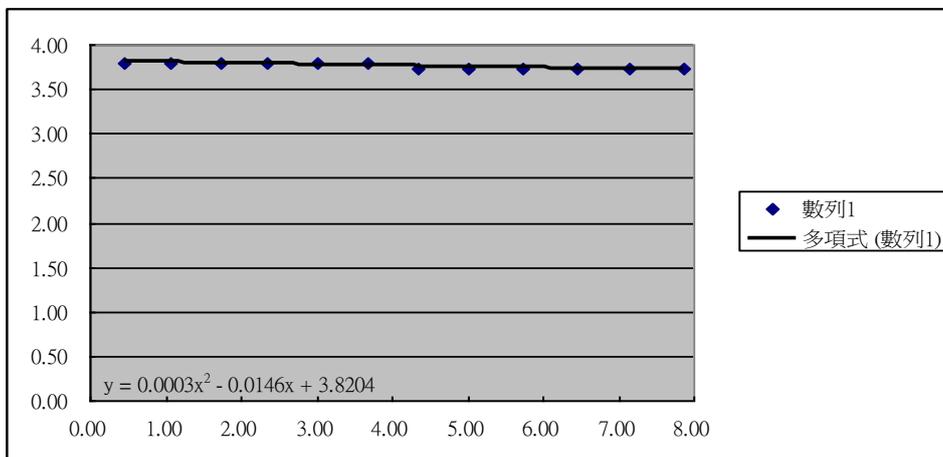
圖二十七：距離引力裝置 3.5 cm，入射速度 136.0 cm/s。



圖二十八：距離引力裝置 3.5 cm，入射速度 136.0 cm/s。



圖二十九：距離引力裝置 4 cm，入射速度 136.0 cm/s。



圖三十：距離引力裝置 4 cm，入射速度 136.0 cm/s。

註：(1)鋼珠行進軌道與引力裝置距離為 4 cm時，偏向的角度非常微小。

(2)鋼珠行進軌道與引力裝置距離為 2.5 cm時，鋼珠會受磁力吸引而衝向引力裝置。

研究三、觀測鋼珠行經移動中的星球時，引力對鋼珠速度變化量的影響

(一) 思考方向：太空船在探索未知的宇宙時，由於燃料有限，除了依靠宇宙中近乎為零的摩擦力之外，更經過精密的計算，利用太空船行經星球時所受到的引力獲得新的動能，太空船在接近和遠離星球時，由於星球與太空船的相對運動，彼此的距離不斷發生改變，帶來引力的變化，使得太空船的速度獲得增加的效果。

我們將實驗分為 2 個部分來探討：

(1)當星球逐漸遠離太空船行進軌道時，太空船的初速對速度變化量的影響。

(2)當星球逐漸遠離太空船行進軌道時，太空船行進軌道與星球的初始距離對速度變化量的影響。

(二) 實驗步驟

1. 裝置如圖九，調整鋼珠最初的行進軌道與引力裝置距離為 2.5 cm。
2. 把鋼珠放置於軌道上調整落下時入射速度為 106.0 cm/s。
3. 調整相機快門為 1/2 秒、高速閃光燈閃爍頻率為 9000rpm，使鋼珠從軌道落下至平台，且同步啟動牽引馬達，使引力裝置遠離軌道，並拍下鋼珠運動的軌跡。
4. 分別將鋼珠滾落的初速調整為 122.0 cm/s、136.0 cm/s、154.0 cm/s、168.0 cm/s、178.0 cm/s，重複步驟 1 至 3。
5. 利用拍下的照片分析鋼珠滾動時的速度變化，實驗結果如表三到表九、圖三十一到圖三十六。
6. 配合研究一所測量的摩擦力，分析表三到表九，計算出增加速度的百分比，將所得的結果記錄為表十。

當星球逐漸遠離太空船行徑軌道時，太空船行進軌道與星球的初始距離對速度變化量的影響：

1. 裝置如圖九，調整鋼珠最初的行進軌道與引力裝置距離為 2.5 cm。
2. 把鋼珠放置於軌道上調整落下時入射速度為 122.0 cm/s，。
3. 調整相機快門為 1/2 秒、高速閃光燈閃爍頻率為 9000rpm，使鋼珠從軌道落下至平台，且同步啟動牽引馬達，使引力裝置遠離軌道，並拍下鋼珠運動的軌跡。
4. 分別調整鋼珠行進的軌道與引力裝置距離為 3 cm、3.5 cm，重複步驟 2 至 3。

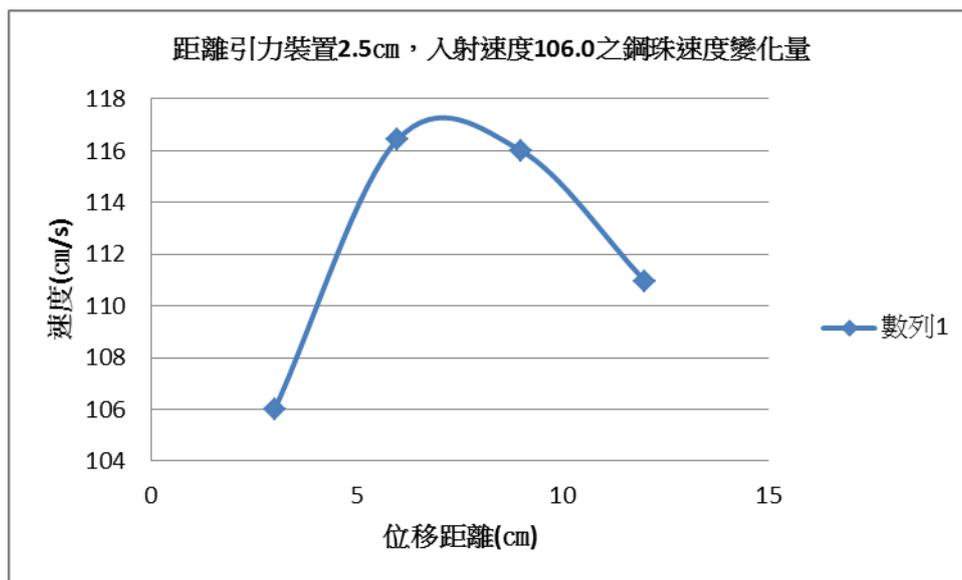
5. 利用拍下的照片與研究一所測得的摩擦力分析鋼珠滾動時的速度變化，實驗結果如表十一到表十三、圖三十七到圖三十九。
6. 配合研究一所測量的摩擦力，分析表十一到表十三，計算出增加速度的百分比，將所得的結果記錄為表十四。

(三) 實驗結果：

當引力裝置逐漸遠離鋼珠滾動軌跡時，鋼珠速度變化量的影響：

表三：距離引力裝置 2.5 cm，入射速度 106.0 cm/s 之鋼珠速度變化量

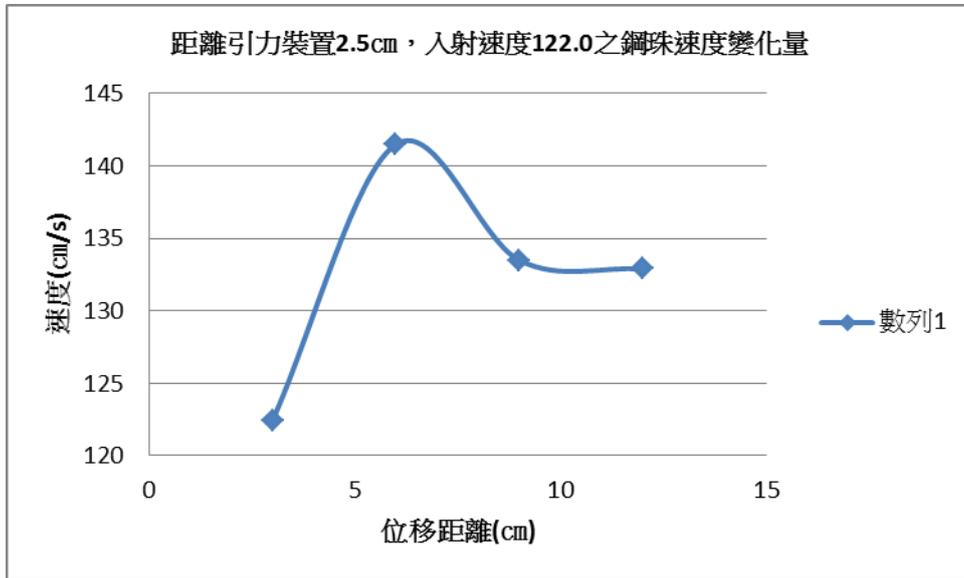
位移距離(cm)	3.0	6.0	9.0	12.0
速度(cm/s)	106.0	116.45	116.0	110.97



圖三十一：距離引力裝置 2.5 cm，入射速度 106.0 cm/s 之鋼珠速度變化量

表四：距離引力裝置 2.5 cm，入射速度 122.0 cm/s 之鋼珠速度變化量

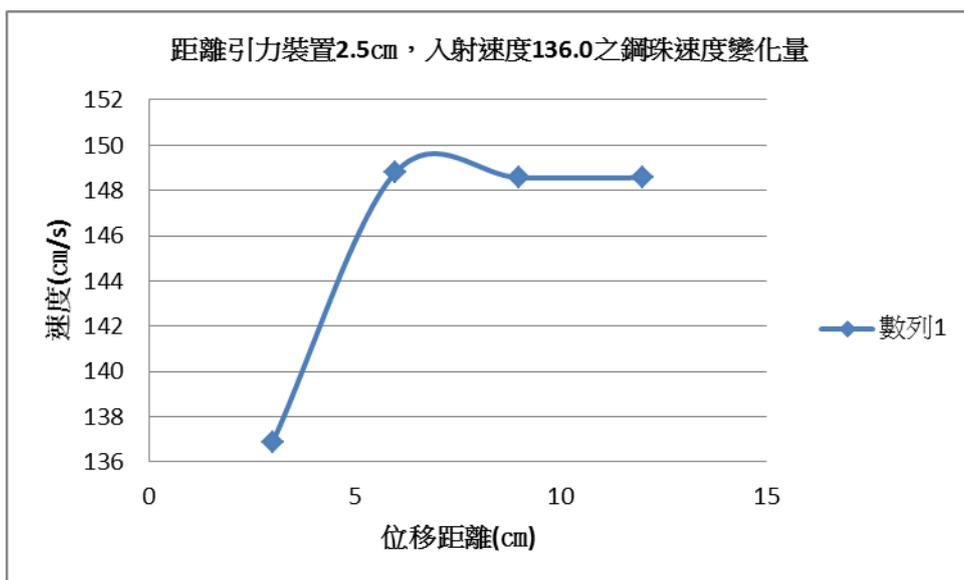
位移距離(cm)	3.0	6.0	9.0	12.0
速度(cm/s)	122.5	141.5	133.5	132.9



圖三十二：距離引力裝置 2.5 cm，入射速度 122.0 cm/s 之鋼珠速度變化量

表五：距離引力裝置 2.5 cm，入射速度 136.0 cm/s 之鋼珠速度變化量

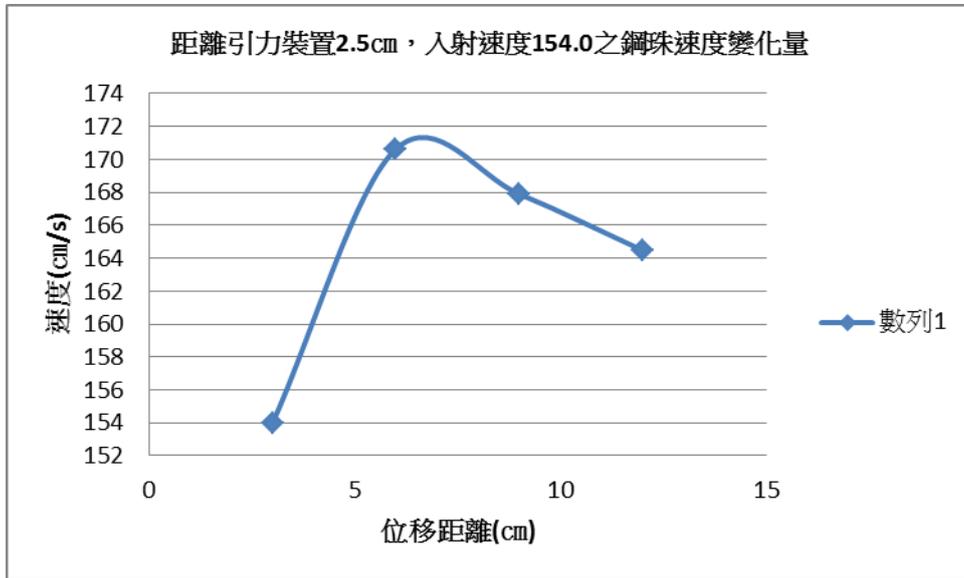
位移距離(cm)	3.0	6.0	9.0	12.0
速度(cm/s)	136.9	148.8	148.6	148.6



圖三十三：距離引力裝置 2.5 cm，入射速度 136.0 cm/s 之鋼珠速度變化量

表六：距離引力裝置 2.5 cm，入射速度 154.0 cm/s 之鋼珠速度變化量

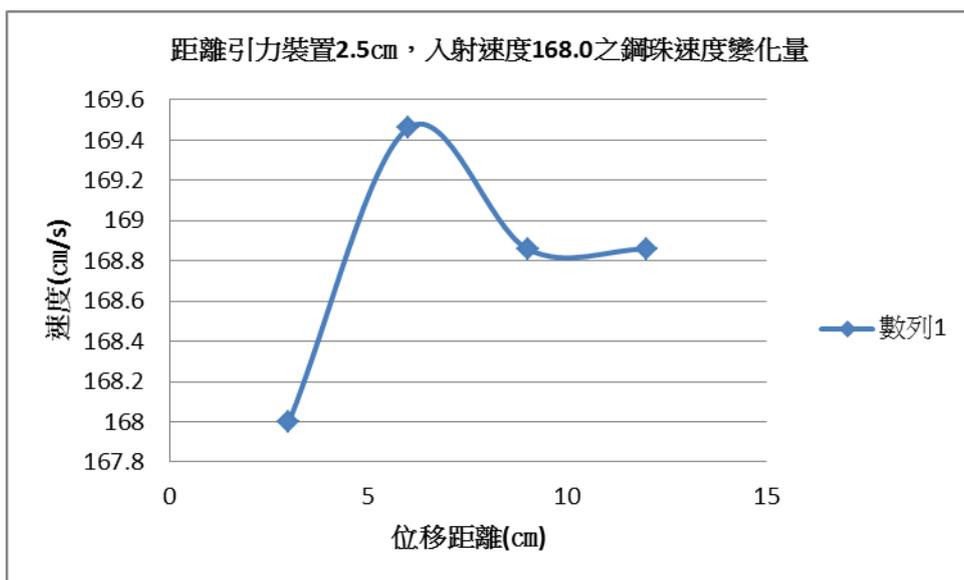
位移距離(cm)	3.0	6.0	9.0	12.0
速度(cm/s)	154.0	170.6	167.9	164.5



圖三十四：距離引力裝置 2.5 cm，入射速度 154.0 cm/s 之鋼珠速度變化量

表八：距離引力裝置 2.5 cm，入射速度 168.0 cm/s 之鋼珠速度變化量

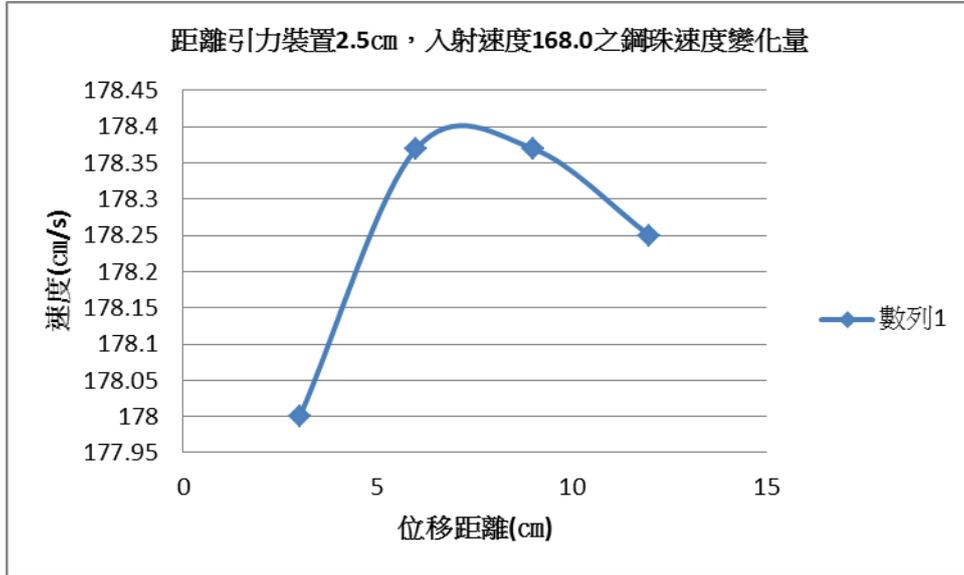
位移距離(cm)	3	6	9	12
速度(cm/s)	168.0	169.5	168.9	168.9



圖三十五：距離引力裝置 2.5 cm，入射速度 168.0 cm/s 之鋼珠速度變化量

表九：距離引力裝置 2.5 cm，入射速度 178.0 cm/s 之鋼珠速度變化量

位移距離(cm)	3	6	9	12
速度(cm/s)	178.0	178.4	178.4	178.3



圖三十六：距離引力裝置 2.5 cm，入射速度 178.0 cm/s 之鋼珠速度變化量

表十：不同入射速度的鋼珠所增加的速度百分比

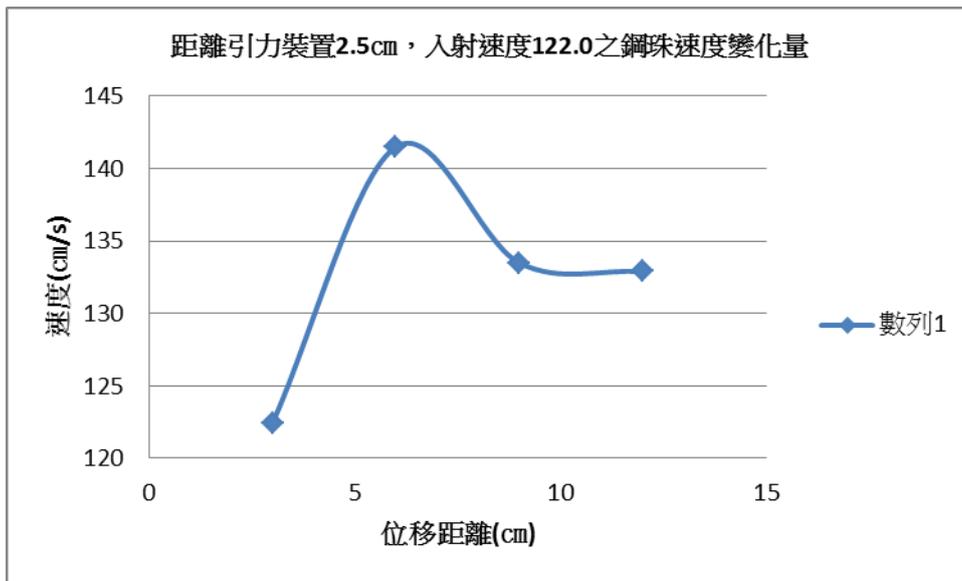
初速(cm/s)	106.0	122.0	136.0	154.0	168.0	178.0
增加百分比 (%)	17.14	16.37	14.24	11.86	4.79	3.85

註：表十是計算過摩擦力後所提供的加速度，所修正的結果。

當引力裝置逐漸遠離鋼珠行進軌道時，鋼珠行進軌道與引力裝置的初始距離對速度變化量的影響：

表十一：距離引力裝置 2.5 cm，入射速度 122.0 cm/s 之鋼珠速度變化量

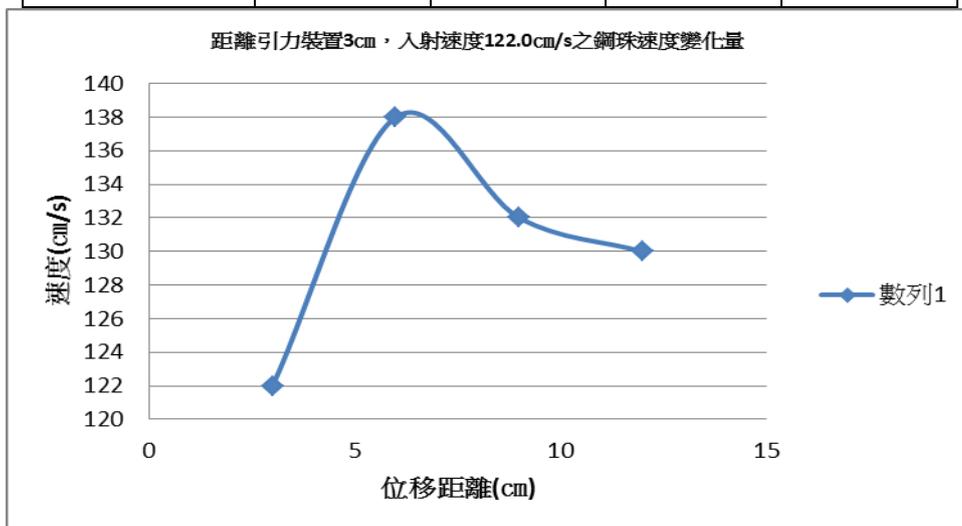
位移距離(cm)	3.0	6.0	9.0	12.0
速度(cm/s)	122.5	141.5	133.5	132.9



圖三十七：距離引力裝置 2.5 cm，入射速度 122.0 cm/s 之鋼珠速度變化量

表十二：距離引力裝置 3 cm，入射速度 122.0 cm/s 之鋼珠速度變化量

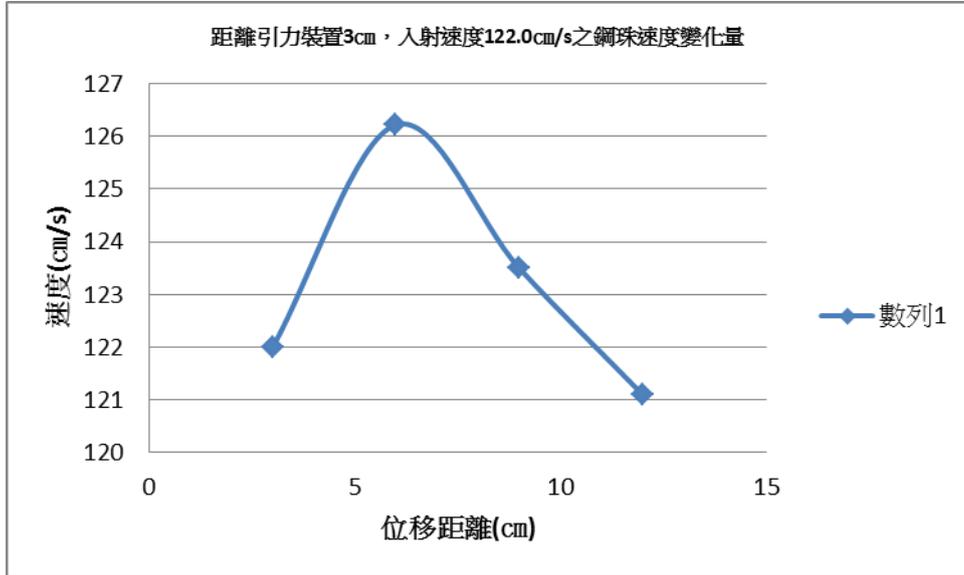
位移距離(cm)	3	6	9	12
速度(cm/s)	122.0	138.0	132.0	130.0



圖三十八：距離引力裝置 3 cm，入射速度 122.0 cm/s 之鋼珠速度變化量

表十三：距離引力裝置 3.5 cm，入射速度 122.0 cm/s 之鋼珠速度變化量

位移距離(cm)	3	6	9	12
速度(cm/s)	122.0	126.2	123.5	121.1



圖三十九：距離引力裝置 3.5 cm，入射速度 122.0 cm/s 之鋼珠速度變化量

表十四：與引力裝置不同距離的鋼珠軌道所增加的速度百分比

距離(cm)	2.5	3.0	3.5
增加百分比(%)	16.37	14.43	7.13

註：表十四是計算過摩擦力後所提供的加速度，所修正的結果。

伍、討論

一、星球引力的模擬：由「星球的引力大小和距離的平方成反比」這個資訊，我們開始思考如何可以在小型的實驗裡模擬出星球的引力，因此我們想到可以利用磁力，但由於磁鐵的磁力分布不均，磁鐵的兩端有較強的磁力，即使以多顆磁鐵排列成圓形也無法使引力指向圓心，因此我們將磁鐵排列於鋁盤的圓周上，讓鋁盤高速旋轉時磁力會指向圓心，且磁力與距離平方成反比。

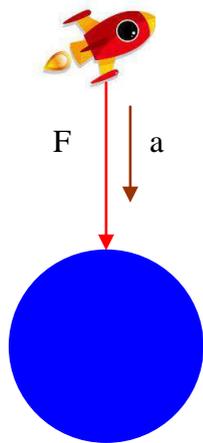
二、無處不在的摩擦力：為了模擬太空中的環境，我們曾經使用許多方法，例如：使用近 7 公尺長的細長繩子懸掛鋼珠，使鋼珠在引力裝置旁擺動，或是用打擊的方式使鋼珠飛向引力裝置等等，不過這些方法都有許多重大的缺點，最後，我們選用摩擦力很小的壓克力板來製作出實驗平台，我們對實驗平台做了摩擦力的測量，實驗中我們發現，摩擦力所提供的加速度為 -90 cm/s^2 ，經由公式 $F=ma$ ，我們可以算出摩擦力的大小為 $1.49g_w$ ，是引力裝置所提供引力的 $1/57.1$ 倍到 $1/3.6$ 倍，經過摩擦力的校正後，使我們的實驗數據能更貼近無摩擦力的環境。

三、太空旅行與重力彈弓：當太空船在太空中進行長距離的探索任務時，雖然外太空幾乎沒有摩擦力，但還是需要推進的動力來改變前進的方向與速度，因為所攜帶的燃料有限，因此有了重力彈弓的應用，利用星球的引力來改變太空船的方向與速度。

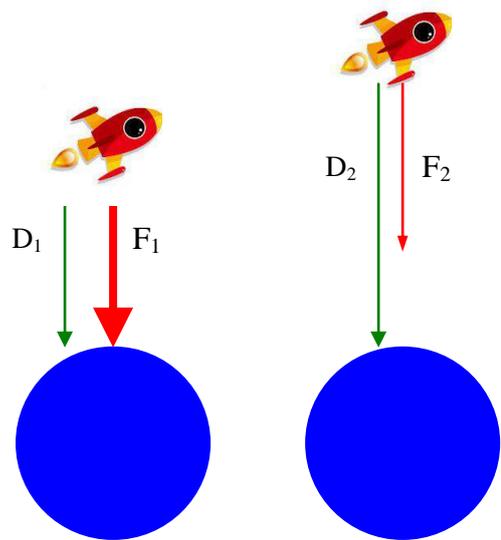
(一) 利用星球引力改變方向：

1. 太空船與星球之間的距離影響偏向角度：如圖四十，當太空船的行經星球時，會受到星球引力 F 的影響而產生 a 的加速度，在我們的實驗中我們分析了太空船的飛行軌道和入射速度如何影響偏向角度的變化，當太空船軌道與星球距離不同時產生的引力也不同，而由圖四十一可知引力與距離的平方成反比，當 $D_1 < D_2$ 時， F_1 會大於 F_2 ，而產生較大加速度使偏轉的角度增加。

而在我們的實驗中，當鋼珠行進軌道與引力裝置距離為 4.0 cm 時，所受引力較小，因此偏向的角度非常微小；當鋼珠行進軌道與引力裝置距離為 2.5 cm 時，鋼珠因距離太近所受引力過大而衝向引力裝置，無法繼續移動。



圖四十：受星球引力產生加速度



圖四一：不同距離所受引力不同

2. 太空船的速度影響偏向角度：當太空船經過星球時會受到引力的影響，而行進的速度影響引力作用時間的長短，當速度較快時，經過星球的時間較短暫，受引力作用時間較短，使得加速度作用時間也較短，所以偏向的角度較小。

我們調整鋼珠以不同的速度通過引力裝置，我們將實驗中所獲得不同初速鋼珠的行進軌跡以 Excel 加以分析，得出曲線方程式分別為式一到式七，方程式中 X^2 項係數的絕對值為二次曲線的開口大小，即為我們實驗中的偏向角度，我們將 X^2 項係數的絕對值與鋼珠初速的關係整理為圖四十二，由圖四十二我們可以得到偏向角度與初速的關係，如式八。

式一：距離引力裝置 3 cm，入射速度 84.0 cm/s。
 $y = -0.0251x^2 + 0.1997x + 2.0778$

式二：距離引力裝置 3 cm，入射速度 106.0 cm/s。
 $y = -0.0197x^2 + 0.0849x + 2.5867$

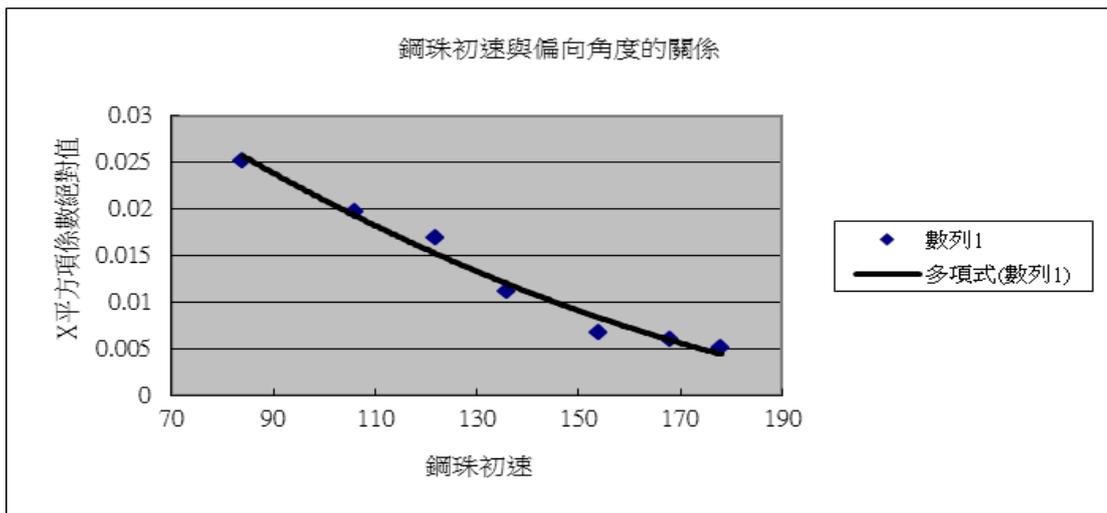
式三：距離引力裝置 3 cm，入射速度 122.0 cm/s。
 $y = -0.0169x^2 + 0.1138x + 2.4203$

式四：距離引力裝置 3 cm，入射速度 136.0 cm/s。
 $y = -0.0112x^2 + 0.0013x + 2.6769$

式五：距離引力裝置 3 cm，入射速度 154.0 cm/s。
 $y = -0.0068x^2 + 0.0153x + 2.6551$

式六：距離引力裝置 3 cm，入射速度 168.0 cm/s。
 $y = -0.006x^2 + 0.047x + 2.5845$

式七：距離引力裝置 3 cm，入射速度 178.0 cm/s。
 $y = -0.0052x^2 + 0.013x + 2.605$



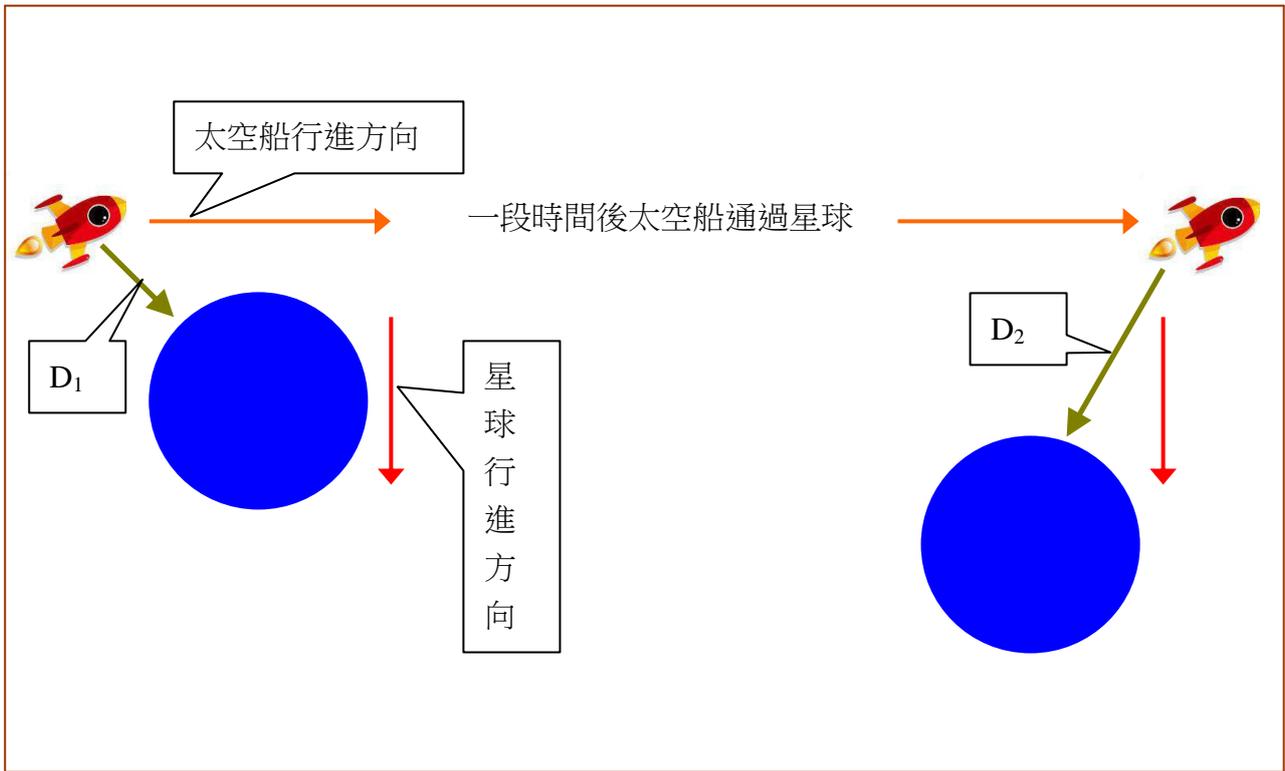
圖四十二：鋼珠初速與偏向角度的關係

式八：偏向角度與初速的關係方程式。

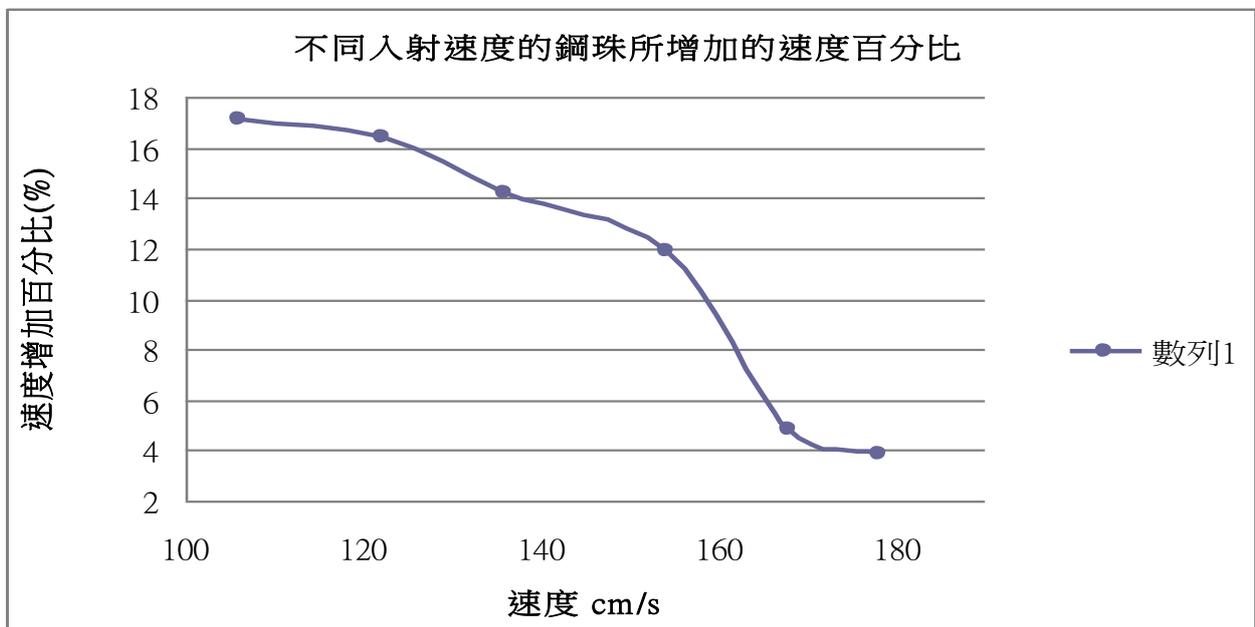
$$y = 9E-07x^2 - 0.0005x + 0.0581$$

(二) 利用星球引力增加太空船速度：在太空中的星球沿著一定的軌道運行，因此與行進中的太空船有相對運動，如圖四十三， D_1 產生的引力 F_1 提供太空船加速的動力， D_2 產生的引力 F_2 使太空船減速，而 $D_1 < D_2$ ，因此 F_1 所產生使太空船加速的 a_1 大於 F_2 所產生使太空船減速的 a_2 ，使太空船的速度增加。

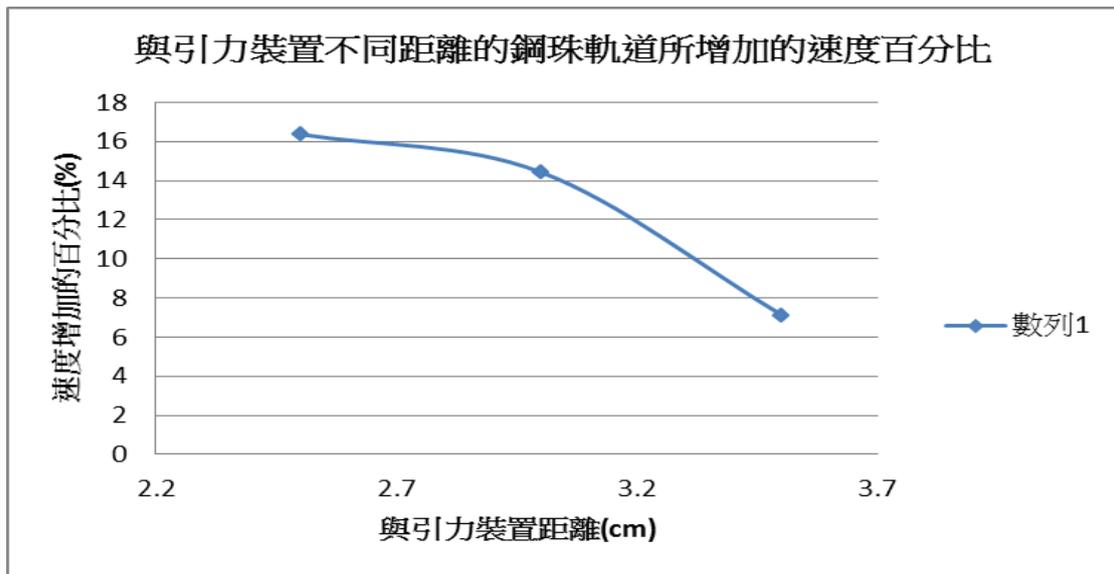
1. 鋼珠的入射速度影響速度的變化量：由實驗我們可以發現當鋼珠速度較快時，經過引力裝置的時間較短暫，所以受引力作用時間較短，使得加速度 a_1 與 a_2 作用時間短，鋼珠所增加的速度較少。
2. 鋼珠行進軌道與行星間的距離影響速度的變化量：當鋼珠與星球間距離越大，所受的引力越小，加速度越小，因此當軌道離星球越遠時，鋼珠所增加的速度較少。



圖四十三：太空船與星球相對運動示意圖



圖四十四：不同入射速度的鋼珠所增加的速度百分比



圖四十五：與引力裝置不同距離的鋼珠軌道所增加的速度百分比

陸、結論

- 一、鋼珠行進軌道與引力模擬裝置的距離越近則偏向角度越大。
- 二、鋼珠入射速度越小則偏向角度越大。
- 三、引力模擬裝置逐漸遠離鋼珠行進軌道時，鋼珠會有加速的現象。
- 四、引力模擬裝置逐漸遠離鋼珠行進軌道時，鋼珠入射速度越小則增加的速度越多。
- 五、引力模擬裝置逐漸遠離鋼珠行進軌道時，鋼珠行進軌道與引力模擬裝置的距離越近則增加的速度越多。

柒、未來展望

在我們的實驗過程中，遇到了最大的兩個困難點：

- 一、我們的實驗範圍只能維持在同一個平面上，而非立體的空間。
- 二、無法克服摩擦力對實驗結果的影響。

我們曾經想過利用其它實驗方式使我們的實驗環境更貼近於太空，例如：用空氣墊來取代壓克力的接觸面，或甚至於直接至做出含鐵的乾冰來取代鋼珠進行實驗，但這種種想法在經費以及操作上都還有不少難題需要克服。

若能解決這兩個困難點，不單是重力彈弓的模擬，甚至可以模擬及分析克卜勒的三大運動定律。

捌、參考資料

國中自然與生活科技 康軒版 第四冊 p142~p146 民國 102 年 2 月初版 康軒文教事業

國中自然與生活科技 康軒版 第五冊 p46~p50 p54~57 民國 102 年 9 月初版 康軒文教事業

【評語】 030104

儀器甚具創意，可惜本題目物理太難，作者未能完全掌握。建議再加強研發此引力裝置，本身即是很好的題材。