

中華民國第 49 屆中小學科學展覽會 作品說明書

科 別：物理科

組 別：國小組

作品名稱：彈珠在撞球檯上的旅行

關 鍵 詞：反射、路徑、接觸面

編 號：

目 錄

壹、	研究動機.....	4
貳、	研究目的.....	4
參、	研究設備及器材.....	4
一、	設計並製造可彈射彈珠之器材 (A1 彈射彈珠器)	
二、	設計並製造長方形球桌 (B1 長方形球桌).....	8
三、	設計並製造圓形球桌 (B2 圓形球桌).....	9
四、	設計並製造橢圓形球桌 (B3 橢圓形球桌).....	10
肆、	研究過程.....	11
一、	活動一：彈珠之入射角與反射角的觀察.....	11
二、	活動二：牆面材質不同之反彈實驗.....	15
三、	活動三：不同發射力道之反彈實驗.....	18
四、	活動四：彈珠在長方形球桌中之移動.....	21
五、	活動五：彈珠在正圓形球桌中之移動.....	23
六、	活動六：彈珠在橢圓形球桌中之移動.....	25
伍、	研究結果.....	27
陸、	討論.....	27
柒、	結論.....	27

作品名稱:彈珠在撞球檯上的旅行

摘要

撞球時球反彈滾動的方向，似乎和四年級時自然課時第四單元『光的世界』中所提到的反射路線相似。所以我展開了一些實驗，來研究球的行為是否與反射的光相同，以及在不同材質、不同形狀的球桌上以不同的速度滾動時，會出現怎麼樣的狀況。一開始進行實驗時，我發現撞球的入射角和反射角並不是完全相同，而是反射角大一些。爲了找出原因，我另外進行了不同力道和不同牆面材質的反射實驗；推論出由於球與牆面摩擦而旋轉，進而使路徑彎曲、反射角增大。最後，我進行了球在不同型撞球桌中移動的實驗，找出當球被困在一個封閉的平面中連續反彈時，會出現特別的形狀：長方形球桌中，會出現許多互相平行的線；在圓形球桌中，依特定角度由圓周上一點發射的彈珠，會在圓形中形成漂亮的正多邊形；在橢圓中由一焦點發射的彈珠反彈後一定會移動到另一焦點上最後在兩焦點中反彈。

壹、 研究動機

最近當紅的 Wii 遊戲機，使我們一家人忍不住想試玩看看，在高興的玩了一陣子之後，我發現撞球遊戲中撞球反彈時滾動的方向，似乎和四年級時自然課第四單元『光的世界』中所提到的反射路線相似。另外由於課本中和撞球檯的牆面都是平的，所以也想研究球在曲面上的反彈路徑。所以我展開了下列實驗，來研究球的行為是否與反射的光相同，以及在不同材質、不同形狀的球桌上已不同的速度滾動時，會出現怎麼樣的狀況。

貳、 研究目的

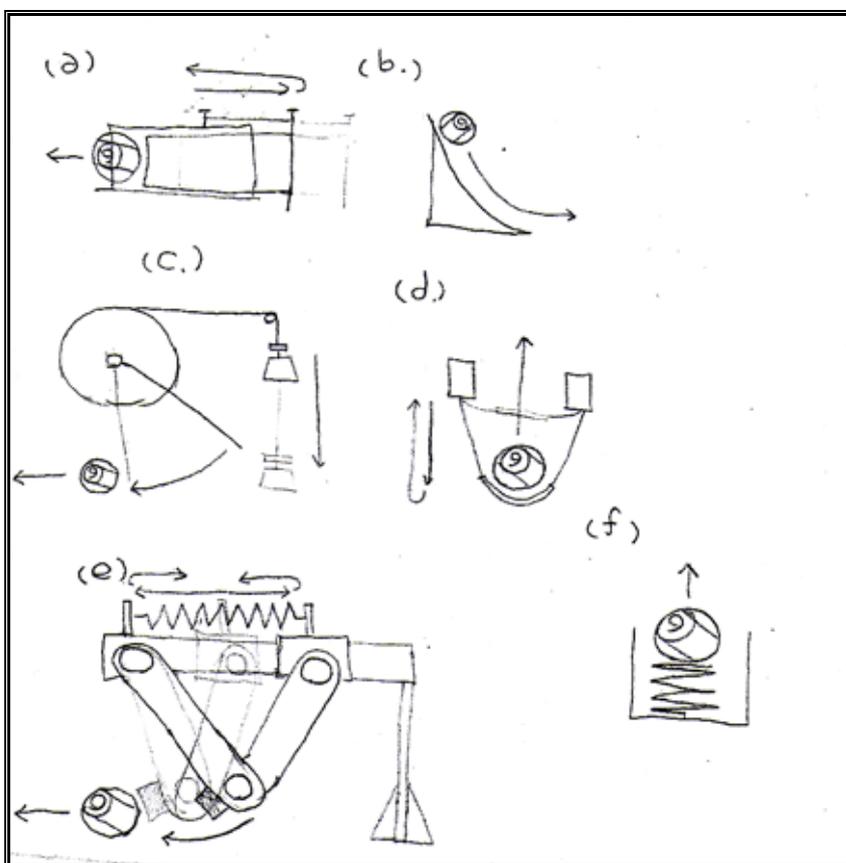
- 一、 觀察彈珠入射角與反射角之關係。
- 二、 觀察球以相同速度撞擊不同材質的平面時的情形。
- 三、 觀察球以不同速度撞擊相同材質的平面時的情形。
- 四、 觀察球撞擊曲面時的情形。
- 五、 觀察球在不同形狀之撞球檯中的移動。

參、 研究設備及器材

二、 設計並製造可彈射彈珠之器材 (A1 彈珠彈射器)

(一)、 初期測試：

下圖一中之(a)-(f)為設計彈珠彈射器材想到之可行設計；其討論與說明如後：



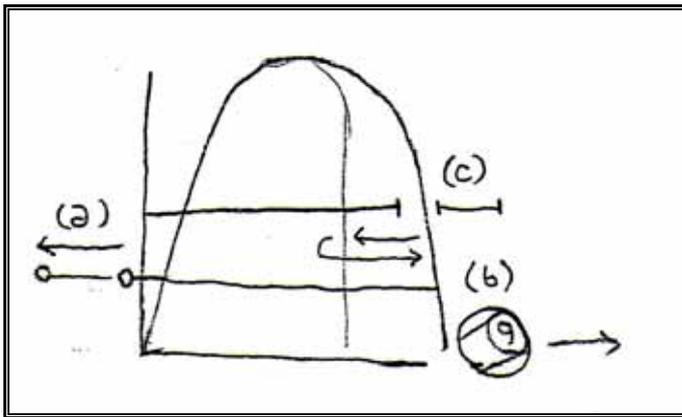
圖一 彈珠彈射器的初步發想

- 1、圖(a)：為一高度同彈珠之半圓形管子中央插入一段木板，以橡皮筋做為動力，使木棒向前移動。因為太複雜，而需要的大小又太小而無法做到如此精密；因此不使用。
- 2、圖(b)：最簡單的設計，就是一個斜坡狀軌道。作成如圖示彎曲狀是為了讓彈珠著地時不彈跳。因為太佔空間而不使用。
- 3、圖(c)：由重物帶動輪子，進而使板子向前擊球。力量不足且精準度不佳。不採用。
- 4、圖(d)：彈弓試的設計，中間裝上彎曲板子是為了不使球滑開。因為精密度不夠高而不採用。
- 5、圖(e)：非常複雜的連桿設計，但是這是其中唯一是模擬手臂動作的設計。因為太複雜，準確度不足而不使用。
- 6、圖(f)：基本的彈簧設計，由彈弓(d)改良而來，準確度增加。但是由於力量不足而不採用。
- 7、以上裝置主要問題如下：
 - A、力道不足：缺乏有效動力來源。
 - B、精準度不佳：球之行進方向差異過大。
 - C、複雜度過高：由於被發射物為彈珠，所以必須要簡單、小巧的設計。
- 8、最後得出了以下結果：
 - A、動力來源：以重力為動力來源經驗證不可行，因為需要大型裝置且強度不足。所以應該使用物質的彈性來做動力：橡皮筋容易彈性疲乏而影響實驗，所以使用竹片。
 - B、其他部分：應要有一段軌道來改善精準度問題。另外，需要可以穩固站立於桌面；但體積要小。

(二)、材料：

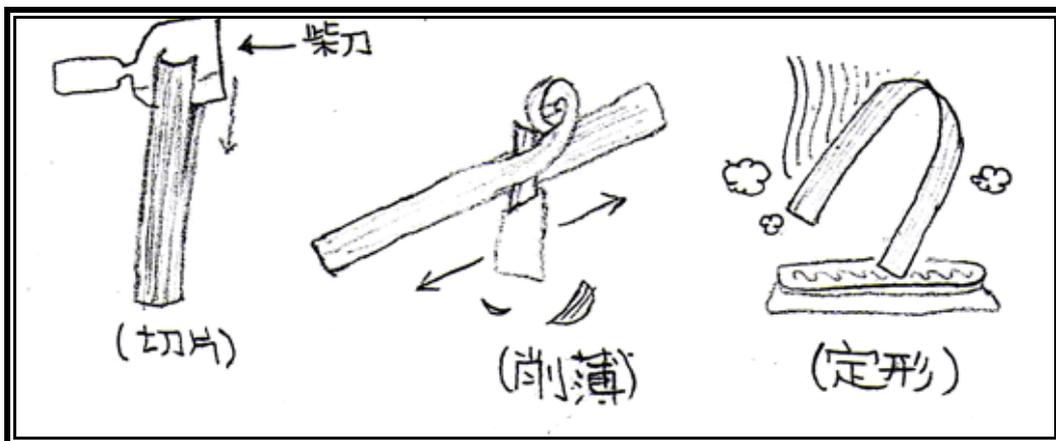
- 1、10cm 長 0.7mm*4.0mm 木材 兩段
- 2、7cm 長 0.6mm*2.0mm 木材 兩段
- 3、3cm 長 0.6mm*2.0mm 木材 一段
- 4、粗竹竿 一根
- 5、棉線 約 25cm 一條
- 6、螺絲釘 兩支
- 7、直徑 1cm 小螺帽 一只
- 8、十字螺絲起子 一支
- 9、電磁爐 一只
- 10、膠帶 一捲
- 11、細砂紙 一張
- 12、約 1cm 長 鐵釘 若干根

(三)、設計圖：



圖二 彈射彈珠器設計圖

(四)、做法：



圖三 彈射彈珠器的製作

- 1、將一竹管以柴刀縱切為八等分。
- 2、取一段截至 36cm 長，以美工刀削成約一至二毫米左右的薄片。
- 3、將竹片置於電磁爐上加熱，同時將其稍微彎曲，。
- 4、放至桌上，在周圍定上鐵釘固定，待其冷卻定型。
- 5、重複步驟 3.與 4.至竹片彎至底部寬度約為竹片全長 1/6 長度。
- 6、依照設計圖將木板以鐵釘與白膠固定。
- 7、取步驟 5.之 U 形竹片，在 U 形竹片一端 1cm 處(A)、另一端 1(B)、3(C)、9(D)cm 處以燒熱之螺絲起子打洞。
- 8、用螺絲釘穿過 C、D 將竹片固定於器材上。
- 9、於 D 處後面木板穿洞。
- 10、將約 25cm 長的棉線一端綁螺帽，另一端穿過 A、D 固定，大約於器材尾部露出 10cm 長。
- 11、將射出孔前方突出一段之木板中間磨出一條溝。

(五)、結果：

製造出來之 A1 彈珠彈射器如下圖四：



圖四 彈珠彈射器成品

(六)、操作方法：

- 1、左手拇指抵住直立木板背面。
- 2、無名指壓於射出孔上方蓋板上。
- 3、填入彈珠、將器材後仰避免彈珠掉出，食、中二指將竹片壓到底，同時右手拉緊棉線；對準目標。
(如圖五)
- 4、將器材平放，鬆開右手。(如圖六)
- 5、彈珠彈出後快速舉起器材，以免影響實驗。



圖五 彈珠彈射器操作 1

- 6、不能連續使用太久，必須有一定長度之休息時間才能保持彈性。

(七)討論：

- 1、其中出現幾個問題：
 - (1)、棉線僅用膠帶固定，一段時間後會脫落。
 - (2)、起初的溝槽不夠深，使彈珠在桌面上彈跳，而非滾動。
 - (3)、竹片由於定型時彎曲太多，以致拉會時釋放之彈力不足，彈珠速度太慢。
- 2、問題修正：
 - (1)、經驗證明不影響實驗，只要於繩子斷裂或脫落時替換即可。
 - (2)、將溝槽加深。
 - (3)、將竹片重新定型。



圖六 彈珠彈射器操作 2

三、 設計並製造長方形球桌 (B1 長方形球桌)

(一)、材料：

- 1、100cm*70cm 厚木板 一片。
- 2、80cm 長 2.5cm*3cm 木條 兩段。
- 3、40cm 長 2.5cm*3cm 木條 兩段。
- 4、8cm 長 2.5cm*3cm 木條 八段。
- 5、切割機 一臺。
- 6、白膠 一袋。
- 7、約 3.5cm 長 鐵釘 若干根。
- 8、量角器 一只。

(二)、做法：

- 1、用切割機在 80cm 及 40cm 長之木條兩端切出 45 度、開口朝同方向之斜邊(切成梯型)。
- 2、用切割機在 8cm 長木條兩端切出 45 度、開口朝反方向之斜邊(切成平行四邊形)。
- 3、將步驟 1.切出之木條排成 80*40 之長方形，用白膠及鐵釘固定於厚木版上。
- 4、將步驟 2.切出之木條兩支排成一個 90 度夾角，用白膠及鐵釘固定於厚木板背面四個角落作為桌腳。
- 5、畫出長方形中心點(對角線交點)。

(三)、結果：

製造出之長方形球桌如圖七：



圖七 B1 長方形球桌

四、設計並製造圓形球桌 (B2 圓形球桌)

(一)、材料：

- 1、100cm*100cm 正八邊形厚木板(邊長約 35cm) 兩片。
- 2、白膠 一袋。
- 3、約 3.5cm 長 鐵釘 若干根。
- 4、棉線 一捲。
- 5、45cm 直尺 一支。

(二)、做法：

- 1、請木工行在一片厚木板中央打出一個直徑 80cm 的正圓形。
- 2、將兩片厚木板以白膠固定，並在正八邊形的每一個角上、圓周上的八個點，各釘入一支鐵釘固定，以免在白膠凝固前滑動。
- 3、待白膠乾後找出圓心，並畫出兩條直徑。
 - (1)、任取一條線連接兩邊圓周。
 - (2)、畫出步驟 A.中線段的垂直平分線。這是第一條直徑。
 - (3)、畫出步驟 B.中線段的垂直平分線。這是第二條、與第一條直徑垂直的直徑。兩條直徑的交點就是圓心。

(三)、結果：

製造出之圓形球桌如圖八：



圖八 B2 圓形球桌

五、 設計並製造橢圓形球桌 (B3 橢圓形球桌)

(一)、材料：

- 1、半徑 100cm 圓形厚木板 兩片。
- 2、80cm 長 2.5cm*3cm 木條 兩段。
- 3、白膠 一袋。
- 4、約 3.5cm 長 鐵釘 若干根。
- 5、量角器 一只。
- 6、棉線 一捲。
- 7、45cm 直尺 一支。

(二)、做法：

- 1、請木工行在一片厚木板上切出長軸 86cm，短軸 62cm，兩焦點距離 59.6cm 的橢圓。
- 2、將兩片圓木片以白膠接合，並如圓形球桌般釘入釘子。
- 3、由於木工裁切完後不會留下原圖，所以必須另外找出焦點。
 - (1)、先找出橢圓中寬度 62cm 處。這條寬度線便是短軸。
 - (2)、從短軸畫出垂直平分線，這條線就是長軸。
 - (3)、以長軸的一半長度為半徑，短軸起點為圓心作出一弧形。此弧形與長軸相交之點為焦點。

(三)、結果：

製造出之橢圓形球桌如圖九：



圖九 B3 橢圓形球桌

肆、 研究過程

一、 活動一：彈珠之入射角與反射角的觀察

(一)、目的：

觀察彈珠撞擊木質牆面時的反彈狀況。

(二)、材料：

- 1、A1 彈射器
- 2、B1 長方形球桌
- 3、面積與球桌相同之報紙 若干張
- 4、稀釋的紅色壓克力顏料 半杯
- 5、彈珠 一顆
- 6、量角器 一只
- 7、細字簽字筆 一支
- 8、薄木片 若干片
- 9、水平儀 一只
- 10、膠帶 一捲、

(三)、方法：

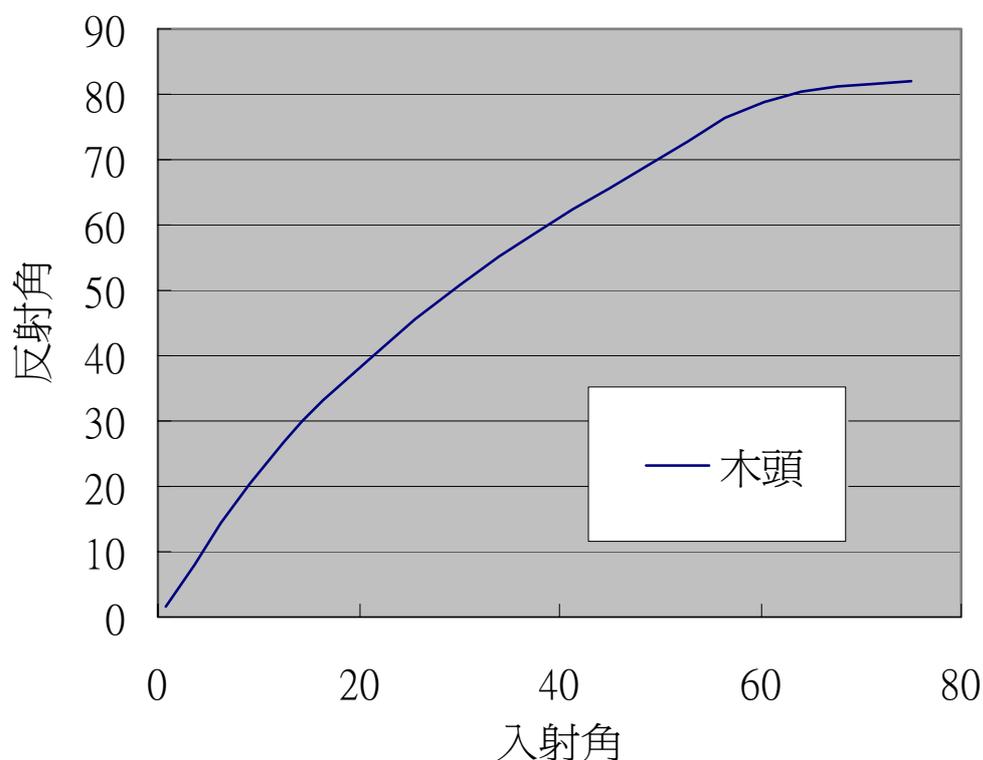
- 1、將長方形球桌置於桌上，利用水平儀及薄木片將桌子墊高至水平
- 2、在報紙上畫出一點，再用量角器畫出入射角，延長至 20cm。
- 3、將報紙鋪平於球桌上。
- 4、將彈珠沾滿壓克力顏料後，裝入彈射器中。
- 5、沿著步驟 2.畫出的線發射。
- 6、留下痕跡後移開彈珠及彈射器，取出報紙。
- 7、用量角器測量入射角及反射角(將牆面通過彈珠撞擊點之垂直線視為法線)。
- 8、記錄。

(四)、結果：如表一。

表一 不同發射方向的入射角與反射角(木材)

發射方向	次數	實際入射角	反射角
75°	1	78°	84
	2	75°	82
	3	72°	80
	AVG.	75°	82°
60°	1	60°	79°
	2	59°	78°
	3	62°	80°
	AVG.	60.3°	79°
45°	1	45°	64°
	2	45°	65°
	3	45°	68°
	AVG.	45°	65.7°
30°	1	30°	51°
	2	30°	49°
	3	30°	53°
	AVG.	30°	51°
15°	1	13°	25°
	2	13°	30°
	3	12°	26°
	AVG.	12.7°	27°
0°	1	1°	5°
	2	0°	0°
	3	1°	0°
	AVG.	0.7°	1.7°

彈珠撞擊木製球桌時之入射角與反射角



(五)、討論：

1、從折線圖可看出：

- (1)、反射角皆大於入射角。
- (2)、入射角越大，誤差就越大。
- (3)、應有某種因素造成此差異。

2、可能的影響來源：

(1)、空氣阻力。

- A、空氣阻力在撞擊之前就有了，但觀察到偏移的只撞擊後之路徑。
- A、彈珠的截面積較小，空氣阻力應不會很大。
- B、作用方向應是彈珠行進的反方向，與實驗中不符。
- C、空氣阻力造成影響的可能性不大。

(2)、球與地板之摩擦。

- A、與地板的摩擦在撞擊之前就有了，但觀察到偏移的只有撞擊後之路徑。
- B、地板摩擦造成影響的可能性也不大。

(3)、發射器發射方向偏斜。

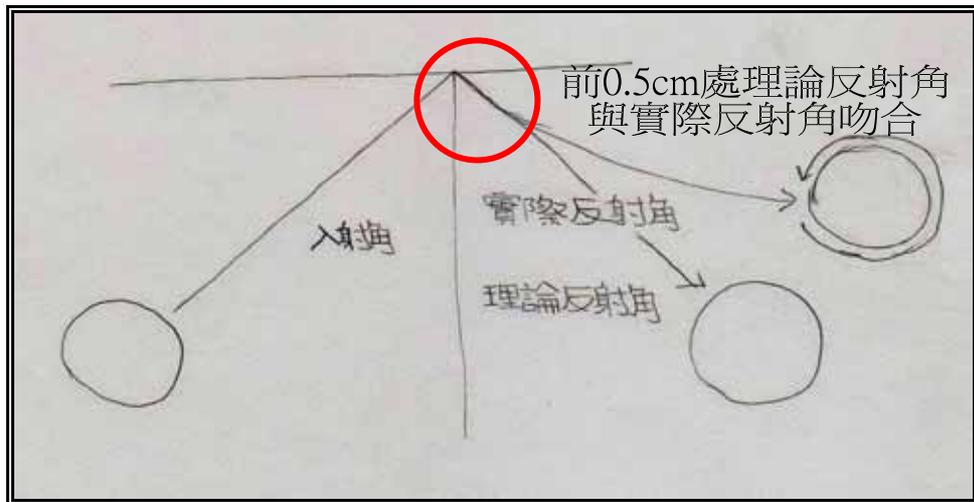
- A、若為發射器問題則彈珠應在撞擊之前就偏斜，但觀察到偏移的只有撞擊後之路徑。
- B、經證實並無偏斜。

(4)、球與牆壁之摩擦。

- A、作用方向相符，且入射角越大、誤差也越大的現象支持此理論。
- B、只有撞擊後才會出現影響。
- C、觀察到球在撞擊後，有橫向旋轉及路徑彎曲的現象。
- D、此原因最有可能是造成實驗中入射、反射角差異的原因。
- E、較光滑之材質摩擦力應較小，所以誤差也應較小，所以以下進行不同材質的撞擊實驗來驗證此理論。(見活動六)
- F、另外，力道較小會造成接觸時間較長，所以以下進行不同力道的撞擊實驗來驗證此理論。(見活動七)

3、整理與解釋：

(1)、如圖十：



圖十 彈珠反彈路徑

在接觸時，與牆壁之球在撞擊前是直線朝牆壁滾動，但在撞擊後並不會立即與牆壁分開，而是有一段接觸時間(牆上稍成長條形的痕跡可以證明這點)，而這段時間中產生的摩擦力會使球產生橫向轉動，因而導致反射角偏移及路徑彎曲。在實驗中便有觀察到，反射角增加是再反彈後一段時間才發生的(如圖紅圈處)，一般來說離牆壁約 0.5cm 以內幾乎呈現完美的入射角=反射角。

二、活動二：牆面材質不同之反彈實驗

(一)、目的：

利用木頭、珍珠板及鐵片以觀察牆面材質不同時彈珠的反彈路徑

(二)、材料：

- 1、A1 彈射器
- 2、B1 長方形球桌
- 3、面積與球桌相同之報紙 若干張
- 4、稀釋的紅色壓克力顏料 半杯
- 5、彈珠 一顆
- 6、量角器 一只
- 7、細字簽字筆 一支
- 8、薄木片 若干片
- 9、水平儀 一只
- 10、珍珠板 一片
- 11、鐵片 一片
- 12、膠帶 一捲

(三)、作法：

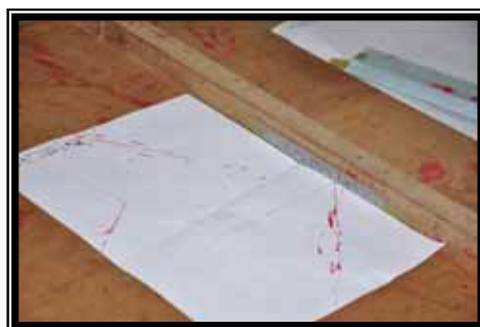
- 1、將長方形球桌置於桌上，利用水平儀及薄木片將桌子墊高至水平
- 2、在報紙上畫出一點，再用量角器畫出入射角，延長至 20cm。(如圖十一)
- 3、將報紙鋪平於球桌上。
- 4、將彈珠沾滿壓克力顏料後，裝入彈射器中。
- 5、沿著步驟 2.畫出的線發射。
- 6、留下痕跡後移開彈珠及彈射器，取出報紙。
- 7、用量角器測量入射角及反射角(將牆面通過彈珠撞擊點之垂直線視為法線。)
- 8、記錄。
- 9、用膠帶將珍珠板黏貼於牆面，固定好。(如圖十二)
- 10、依照步驟 2.至 8.操作(使用新的報紙或換面以免先前實驗留下之痕跡影響觀察。)
- 11、取下珍珠板，用膠帶將鐵尺黏貼於牆面。(如圖十三)
- 12、依照步驟 2.至步驟 8.操作。



圖十一 木板材質



圖十二 珍珠板材質



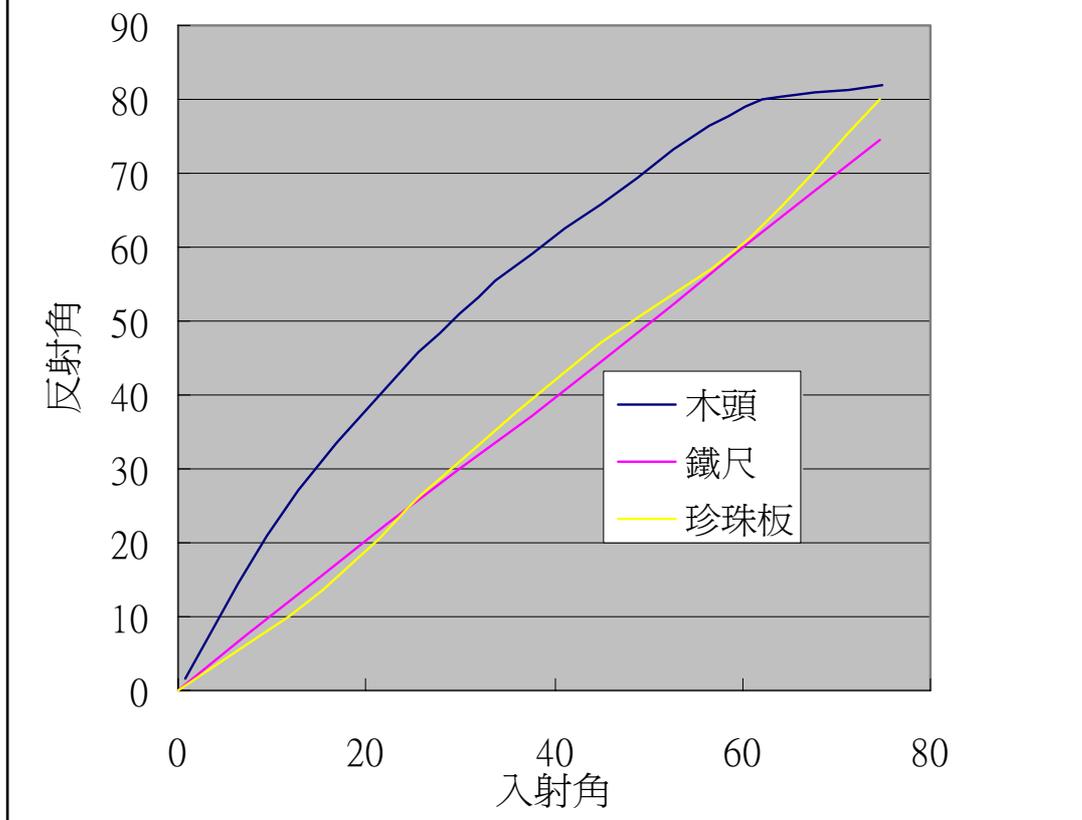
圖十三 金屬材質

(四)、結果：

如下表。

發射方向	次數	珍珠板		鐵片	
		入射角	反射角	入射角	反射角
75°	1	75°	80°	75°	75°
	2	73°	80°	74°	74°
	3	76°	80°	75°	75°
	AVG.	74.7°	80°	74.7°	74.7°
60°	1	62°	60°	60°	60°
	2	60°	60°	60°	61°
	3	60°	63°	60°	59°
	AVG.	60.7°	61°	60°	60°
45°	1	45°	50°	45°	45°
	2	44°	44°	45°	44°
	3	46°	47°	45°	45°
	AVG.	45°	47°	45°	44.7°
30°	1	30°	30°	30°	29°
	2	25°	25°	29°	30°
	3	28°	30°	31°	31°
	AVG.	27.7°	28.3°	30°	30°
15°	1	15°	14°	15°	15°
	2	16°	12°	14°	14°
	3	15°	15°	15°	16°
	AVG.	15.3°	13.7°	14.7°	15°
0°	1	0°	0°	0°	1°
	2	0°	0°	-1°	0°
	3	0°	0°	0°	0°
	AVG.	0°	0°	0°	0°

彈珠撞擊不同材質之牆面的反彈情形



(五)、討論：

1、由折線圖可看出：

- (1)、如先前所預測的，較光滑之材質(鐵、珍珠板)之入射、反射角差異較小。
- (2)、不管甚麼材質，都有入射角愈大誤差值也越大，直至 90° 時幾乎無誤差的情況；此現象亦支持之前對偏離原因之假設。
- (3)、以下進行不同發射力道之反彈實驗，以進一步證明之前的推測。

三、 活動三：不同發射力道之反彈實驗

(一)、目的：

觀察發射力道不同時彈珠的反彈路徑

(二)、材料：

- 1、A1 彈射器
- 2、B1 長方形球桌
- 3、面積與球桌相同之報紙 若干張
- 4、稀釋的紅色壓克力顏料 半杯
- 5、彈珠 一顆
- 6、量角器 一只
- 7、細字簽字筆 一支
- 8、薄木片 若干片
- 9、水平儀 一只

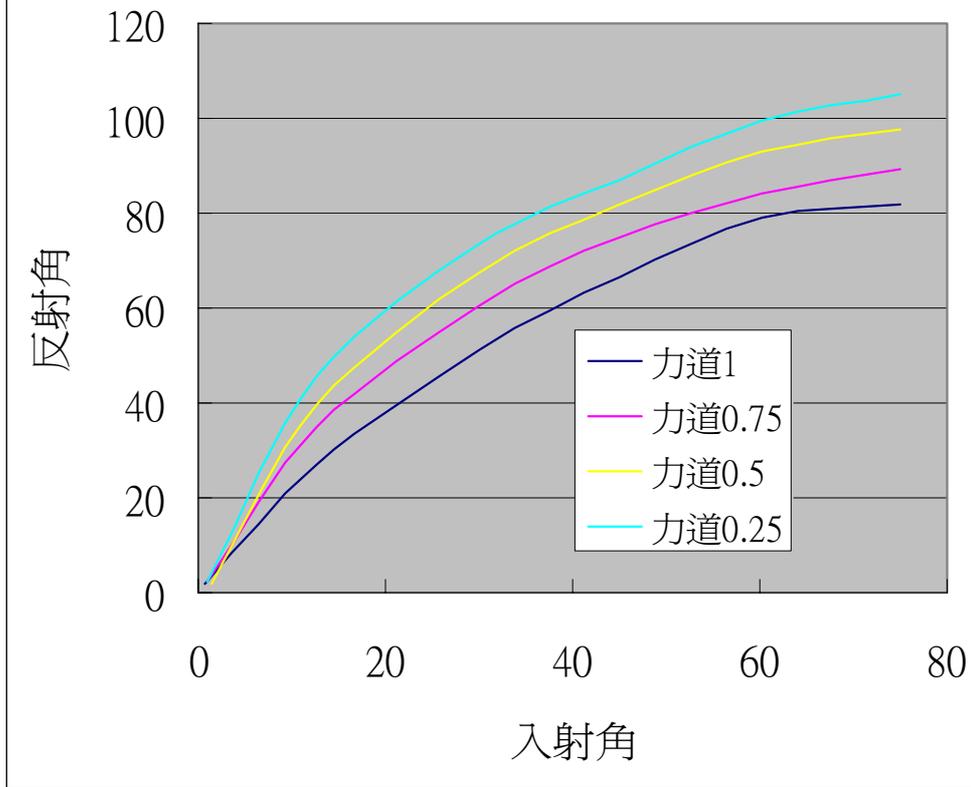
(三)、作法：

- 1、將長方形球桌置於桌上，利用水平儀及薄木片將桌子墊高至水平
- 2、在報紙上畫出一點，再用量角器畫出入射角，延長至 20cm。
- 3、將報紙鋪平於球桌上。
- 4、將彈珠沾滿壓克力顏料後，裝入彈射器中。
- 5、沿著步驟 2.畫出的線發射。
- 6、留下痕跡後移開彈珠及彈射器，取出報紙。
- 7、用量角器測量入射角及反射角(將牆面通過彈珠撞擊點之垂直線視為法線。)
- 8、記錄。
- 9、以 $3/4$ 的力道發射，依照步驟 2.至 8.操作(使用新的報紙或換面以免先前實驗留下之痕跡影響觀察。)
- 10、以 $2/4$ 的力道發射，依照步驟 2.至 8.操作(使用新的報紙或換面以免先前實驗留下之痕跡影響觀察。)
- 11、以 $1/4$ 的力道發射，依照步驟 2.至 8.操作(使用新的報紙或換面以免先前實驗留下之痕跡影響觀察。)

(四)、結果：
如下表。

發射方向	次數	力道 1		力道 0.75		力道 0.5		力道 0.25	
		入射角	反射角	入射角	反射角	入射角	反射角	入射角	反射角
75°	1	78	84	78	90	78	98	78	107
	2	75	82	75	87	75	99	75	105
	3	72	80	72	91	72	96	72	103
	AVG.	75	82	75	89.3	75	97.7	75	105
60°	1	60	79	60	81	60	90	60	99
	2	59	78	59	89	59	92	59	102
	3	62	80	62	83	62	97	62	97
	AVG.	60.3	79	60.3	84.3	60.3	93	60.3	99.3
45°	1	45	64	45	72	45	79	45	84
	2	45	65	45	78	45	85	45	85
	3	45	71	45	75	45	82	45	92
	AVG.	45	66.7	45	75	45	82	45	87
30°	1	30	51	30	59	30	65	30	69
	2	30	49	30	60	30	69	30	75
	3	30	53	30	62	30	68	30	76
	AVG.	30	51	30	60.3	30	67.3	30	73.3
15°	1	13	25	13	33	13	38	13	47
	2	13	30	13	37	13	42	13	44
	3	12	26	12	34	12	39	12	46
	AVG.	12.7	27	12.7	34.7	12.7	39.7	12.7	45.7
0°	1	1	5	1	5	1	3	1	3
	2	0	0	0	2	1	2	2	0
	3	1	0	2	0	2	0	0	4
	AVG.	0.7	1.7	1	2.3	1.3	1.7	1	2.3

彈珠以不同力道撞擊木質牆面之實驗



(五)、討論：

1、由折線圖中可看出：

- (1)、與上一實驗一樣，反射角皆大於入射角。
- (2)、力道越小，反射角與入射角之差異就越大。
- (3)、確認上次實驗對誤差原因之假設正確。

四、 活動四：彈珠在長方形球桌中之移動

(一)、目的：

觀察彈珠在長方形球桌中的反彈路徑

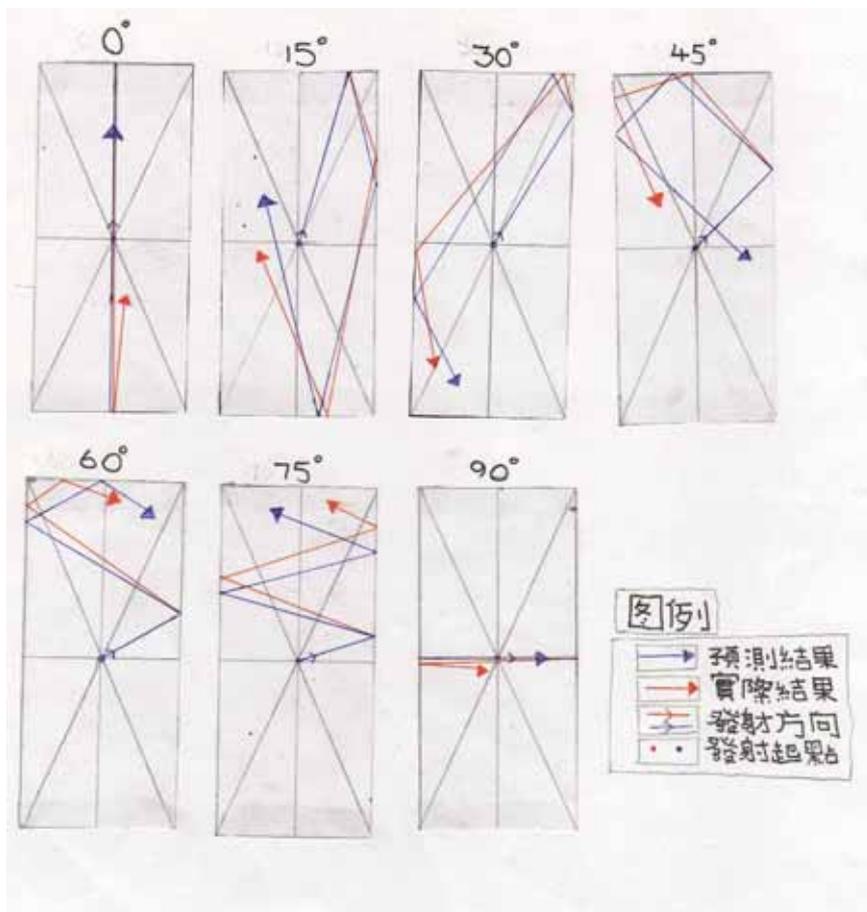
(二)、材料：

- 1、A1 彈射器
- 2、B1 長方形球桌
- 3、面積與球桌相同之報紙 若干張
- 4、稀釋的紅色壓克力顏料 半杯
- 5、彈珠 一顆
- 6、細字簽字筆 一支
- 7、薄木片 若干片
- 8、水平儀 一只
- 9、直尺 一支

(三)、作法：

- 1、將長方形球桌置於桌上，利用水平儀及薄木片將桌子墊高至水平
- 2、在報紙的中心畫出一點，再用直尺畫出中心點至長方形短邊的中點的連線。
- 3、將報紙鋪平於球桌上。
- 4、將彈珠沾滿壓克力顏料後，裝入彈射器中。
- 5、沿著步驟 2.畫出的線發射。
- 6、留下痕跡後移開彈珠及彈射器，取出報紙。
- 7、記錄彈珠之反彈路徑(等比例縮小繪製)。
- 9、在報紙的中心畫出一點，再用直尺畫出中心點至長方形短邊的中點的連線向右 15 度角的線。
- 10、依步驟 3.至 7.操作。
- 11、在報紙的中心畫出一點，再用直尺畫出中心點至長方形短邊的中點的連線向右 30 度角的線。
- 12、依步驟 3.至 7.操作。
- 13、在報紙的中心畫出一點，再用直尺畫出中心點至長方形短邊的中點的連線向右 45 度角的線。
- 14、依步驟 3.至 7.操作。
- 15、在報紙的中心畫出一點，再用直尺畫出中心點至長方形短邊的中點的連線向右 60 度角的線。
- 16、依步驟 3.至 7.操作。
- 17、在報紙的中心畫出一點，再用直尺畫出中心點至長方形短邊的中點的連線向右 75 度角的線。
- 18、依步驟 3.至 7.操作。
- 19、在報紙的中心畫出一點，再用直尺畫出中心點至長方形短邊的中點的連線向右 90 度角的線。
- 20、依步驟 3.至 7.操作。

(四)、結果：
如下圖。



(五)、討論：

- (1)、球在長方形中的移動路徑，大致上是遵守入射角=反射角的定律(如上圖藍色箭號)，只是和前面一樣，有摩擦力造成的誤差(如上圖紅色箭號)。
- (2)、另外，若依入射角=反射角之定律來預測，則最後會出現許多條交叉的直線—其中約半數會平行於第一次反彈前之路徑，另外半數則平行於第一次反彈後至第二次反彈前的路徑。
- (3)、當彈珠往某一邊的 $1/2$ 、 $1/4$ 、 $1/5$...等位置發射時，會形成一個不斷重複的菱形路徑。

五、 活動五：彈珠在正圓形球桌中之移動

(一)、目的：

觀察彈珠在正圓形球桌中的反彈路徑

(二)、材料：

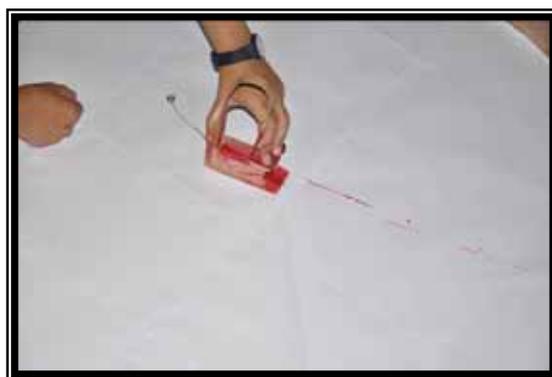
- 1、A1 彈射器
- 2、B2 圓形球桌
- 3、面積與球桌相同之報紙 若干張
- 4、稀釋的紅色壓克力顏料 半杯
- 5、彈珠 一顆
- 6、細字簽字筆 一支
- 7、薄木片 若干片
- 8、水平儀 一只
- 9、直尺 一支

(三)、作法：

- 1、將正圓形球桌置於桌上，利用水平儀及薄木片將桌子墊高至水平
- 2、在報紙上畫出圓心及一條半徑。
- 3、由圓心依步驟 2.畫出之半徑發射。

(如圖十四、十五)

- 4、記錄反彈路徑(等比例縮小製圖)。
- 5、從報紙上之圓周上一點畫出通過此點之直徑，向右 15 度之直線。
- 6、由步驟 5.所畫出之圓周上一點沿線段發射。
- 7、記錄反彈路徑(等比例縮小製圖)。
- 9、從報紙上之圓周上一點畫出通過此點之直徑，向右 30 度之直線。
- 10、依步驟 3.至步驟 4.操作。
- 11、從報紙上之圓周上一點畫出通過此點之直徑，向右 45 度之直線。
- 12、依步驟 3.至步驟 4.操作。
- 13、從報紙上之圓周上一點畫出通過此點之直徑，向右 60 度之直線。
- 14、依步驟 3.至步驟 4.操作。
- 15、從報紙上之圓周上一點畫出通過此點之直徑，向右 75 度之直線。
- 16、依步驟 3.至步驟 4.操作。

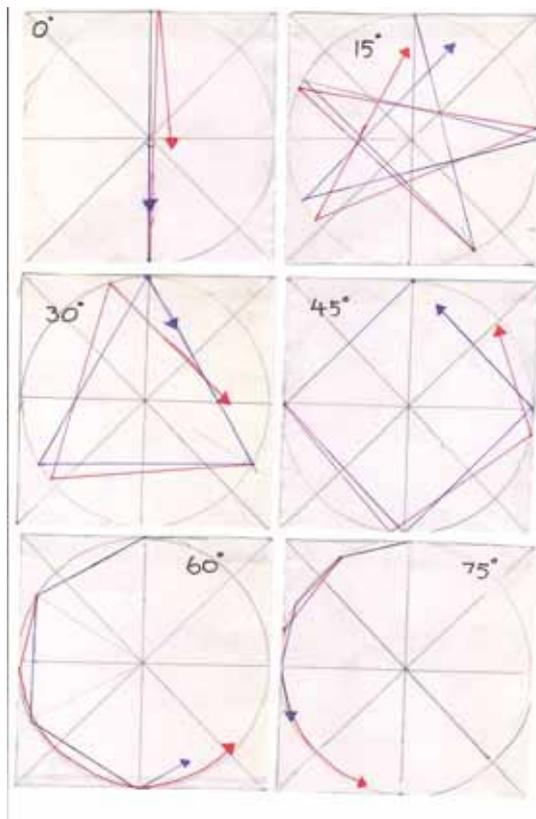


圖十四 彈珠在圓形球桌中移動實驗操作一



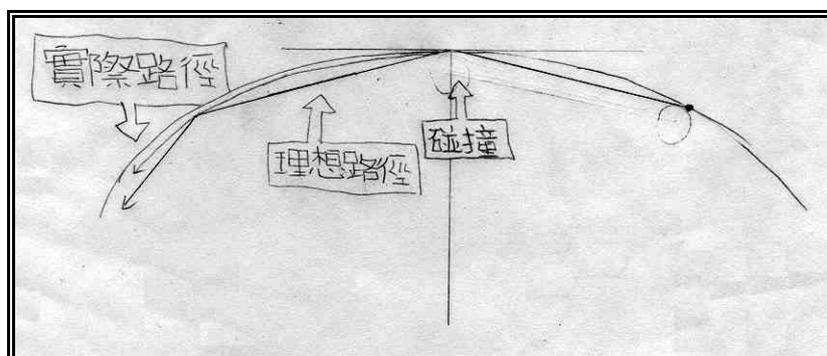
圖十五 彈珠在圓形球桌中移動實驗操作二

(四)、結果：
如下圖。



(五)、討論：

- 1、彈珠撞擊圓周時的反彈路徑，以切線為牆面、半徑為法線。
- 2、注意在 15 度及 30 度實驗中的彈珠一次反彈後就沿圓周滾動。針對此現象提出以下解釋：
 - A、如同前面所說，球在撞擊後會產生旋轉；導致軌跡偏移。
 - B、在圓形中，有時以切線為牆面的偏移角度使路徑應超出圓周(如圖十六所示)，但因球桌有邊緣，無法超出，而只能沿圓周滾動。



圖十六 彈珠在圓形中之移動

- 3、若依照入射角=反射角來繪圖，在圓形中由圓周上依特定角度射出的球會形成正多邊形或其他特殊形狀。例：45 度-正方形。54 度-正五邊形。18 度-五角星形。理論上可以射出任何正多邊形。

六、 活動六:彈珠在橢圓形球桌中之移動

(一)、目的：

觀察彈珠在橢圓形球桌中的反彈路徑

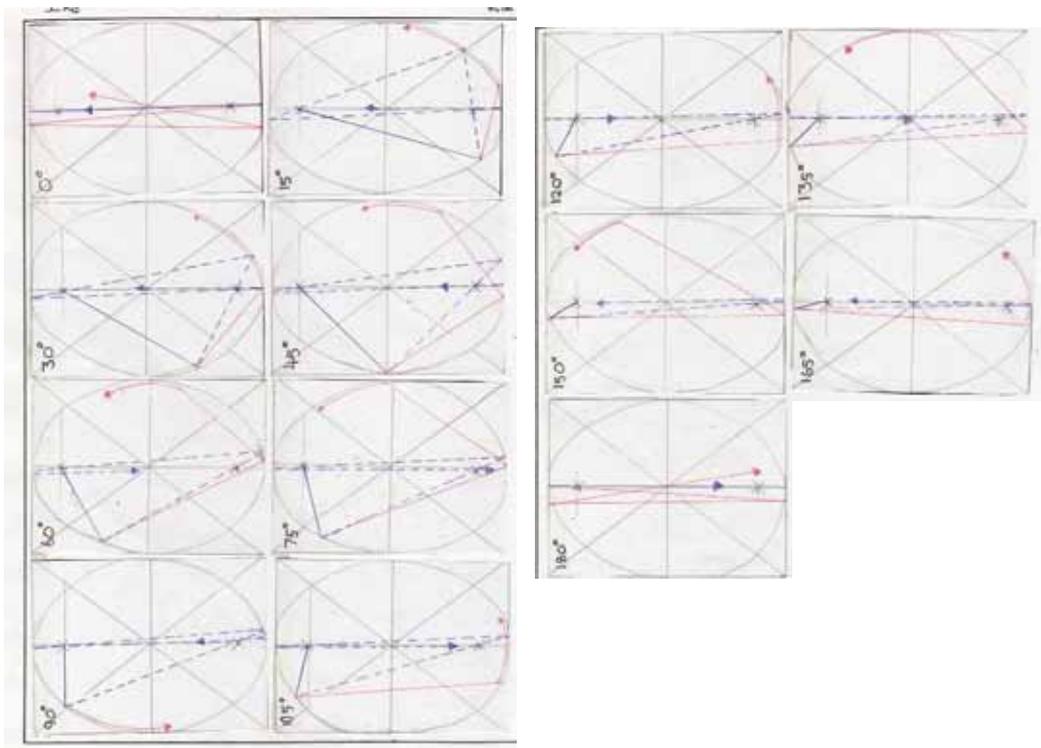
(二)、材料：

- 1、A1 彈射器
- 2、B3 橢圓形球桌
- 3、面積與球桌相同之報紙 若干張
- 4、稀釋的紅色壓克力顏料 半杯
- 5、彈珠 一顆
- 6、細字簽字筆 一支
- 7、薄木片 若干片
- 8、水平儀 一只
- 9、直尺 一支

(三)、作法：

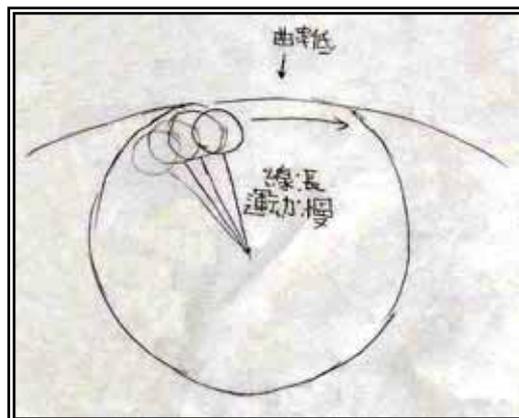
- 1、將橢圓形球桌置於桌上，利用水平儀及薄木片將桌子墊高至水平
- 2、在報紙上畫出橢圓的兩個焦點，然後畫出兩個焦點的連線。
- 3、將報紙鋪平於球桌上。
- 4、將彈珠沾滿壓克力顏料後，裝入彈射器中。
- 5、從其中一個焦點沿著步驟 2.畫出的線發射。
- 6、留下痕跡後移開彈珠及彈射器，取出報紙。
- 7、記錄彈珠之反彈路徑(等比例縮小繪製)。
- 9、用直尺畫出兩焦點連線向右 15 度角的線。
- 10、依步驟 3.至 7.操作。
- 11、用直尺畫出兩焦點連線向右 30 度角的線。
- 12、依步驟 3.至 7.操作。
- 13、用直尺畫出兩焦點連線向右 45 度角的線。
- 14、依步驟 3.至 7.操作。
- 15、再用直尺畫出兩焦點連線向右 60 度角的線。
- 16、依步驟 3.至 7.操作。
- 17、用直尺畫出兩焦點連線向右 75 度角的線。
- 18、依步驟 3.至 7.操作。
- 19、在再用直尺畫出兩焦點連線向右 90 度角的線。
- 20、依步驟 3.至 7.操作。

(四)、結果：
如下圖。

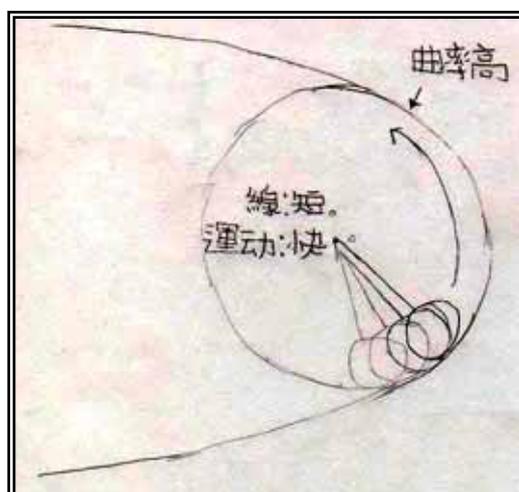


(五)、討論：

- 1、在橢圓中，由一焦點發射的彈珠似乎會往另一交點移動。
- 2、由 1.推論得知，在理想反射狀況下（摩擦力為零），最後會得到一個在兩交點間直線不斷反彈的封閉路徑。
- 3、一般在兩次反彈後就進入環繞橢圓的移動。
- 4、在環繞時，觀測到彈珠在曲率高處移動速度較快。
- 5、應有某種因素造成 4.之現象。
 - (1)、可以把球想像成鐘擺，而擺動路線就是每一小段曲線所畫出的圓之圓周(如圖十七、十八)。
 - (2)、如圖，曲率低處擺線較長，移動慢；曲率高處擺線較短，移動快(如圖十七、十八)。



圖十七 彈珠在橢圓形區率低區域之移動



圖十八 彈珠在橢圓形區率高區域之移動 26

伍、 研究結果

- 一、在實驗一中發現，彈珠在撞擊牆面時入射角並不會完全等於反射角，而是反射角會稍大於入射角，入射角越小反射角與入射角差異就越小。
- 二、在實驗二中發現，彈珠撞擊較光滑之牆面時入射角及反射角的差異較小，其中以金屬效果最佳。
- 三、在實驗三中發現，彈珠撞擊牆面的力道越小，入射角及反射角的差異就越大。
- 四、圓形球台中，彈珠最終會繞著圓周移動。
- 五、橢圓形球台中，從一焦點射出之彈珠大致上是往另一焦點移動。
- 六、由於入射角及反射角之差異，彈珠最後會傾向於繞著橢圓的邊緣移動。
- 七、繞著橢圓的邊緣移動之彈珠，在曲率高處移動較快。

陸、 討論

- 一、實驗一中發現彈珠路徑彎曲之現象，由實驗二及三的結果推論出以下解釋：球在撞擊前是直線朝牆壁滾動，但在撞擊後並不會立即與牆壁分開，而是有一段接觸時間(牆上稍成長條形的痕跡可以證明這點)，而這段時間中產生的摩擦力會使球產生橫向轉動，因而導致反射角偏移及路徑彎曲。反射角增加是再反彈後一段時間才發生的，一般來說離牆壁約 0.5cm 以內仍幾乎呈現完美的入射角=反射角。
- 二、實驗二及三得出之結論支持前項理論：較光滑之表面摩擦力較小，所以誤差較小；力道較小時易受表面摩擦力影響，誤差程度較大。
- 三、在長方形球檯中，若忽略以上入射角及反射角的差異，多次反彈後會出現許多交叉的直線，且只與兩個方向平行：彈珠一開始發射的角度，以及第一次反彈之後的路徑；並且兩方向直線的數目最多相差 1。
- 四、在圓形球台中，若忽略以上入射角及反射角的差異，由圓心往任何方向發射的彈珠皆會滾回圓心，而從圓周上一點發射的彈珠則以半徑為法線反彈。
- 五、橢圓形球檯中，若忽略以上入射角及反射角的差異，從一焦點射出之彈珠上會往另一焦點移動，最後在兩焦點間反彈。
- 六、彈珠在曲率高處移動較快可以如以下解釋：把球想像成鐘擺，而擺動路線就是每一小段曲線所畫出的圓之圓周。

柒、 結論

鏡子反射光線時，由於光線不會產生摩擦力，所以路徑呈現完美的入射角=反射角。但是彈珠與光不同，與牆面的摩擦會使路徑產生彎曲和偏移，而偏移的長度則因牆面材質、發射力道等種種因素而不同。而在封閉平面中不斷反射的彈珠，在摩擦力為零的狀況下，則在長方形中出現許多平行線；橢圓形中的彈珠最後會在兩焦點間反彈；圓形中由圓心發射的彈珠不斷沿著直徑彈來彈去，由圓周發射時有時會形成正多邊形或星形。但實際實驗時，由於摩擦力影響，正圓形和橢圓形中的彈珠最終會繞著圓周移動，且曲率越高移動越快。