

中華民國第四十四屆中小學科學展覽會

作者說明書

高中組物理科

040107

臺中縣私立弘文高級中學

指導老師姓名

張義杰

黃美慧

作者姓名

蕭力瑋

傅冠傑

徐國銘

羅時修

迴旋鏢

壹、摘要

本實驗以厚紙板為原料，作各種不同的迴旋鏢，改變其長度、中心凹凸程度、傾斜程度、邊緣膠帶的圈數與纏繞膠帶的位置，以捲尺和碼錶量測其迴旋半徑及時間，觀察其飛行軌跡、週期和迴旋半徑之間的關係。由討論數據變化之趨勢，及引進白努利定律、牛頓運動定律來解釋迴旋鏢軌跡變化與力的關係，希望進而了解如何設計出適合各種環境的迴旋鏢。

貳、研究動機

偶然在書中，看到迴旋鏢的製作方法。由於材料容易取得，操作又十分簡單，便開始玩起了迴旋鏢。在遊戲的過程中，對迴旋鏢會飛回來的現象感到十分好奇。因此，著手進行了以下一系列的實驗。

參、研究目的

- 一、取 3 片時，探討影響飛行軌跡的力
 - (一)、探討造成進動的力－重力(改變迴旋鏢嵌合方向)
 - (二)、探討氣流對運動的影響－升力(改變迴旋鏢中心凹凸程度)。
阻力(改變迴旋鏢紙片傾斜程度)。
- 二、取 3 片時，探討迴旋鏢轉動慣量與軌跡和飛行時間之關係。
- 三、取 3 片時，探討使迴旋鏢飛行最佳(能完整迴旋)之長、寬比例範圍。
- 四、迴旋鏢以各種紙片數(2 至 4 片)做成，對於飛行軌跡的影響。

肆、研究設備與器材

一、器材

- (一) 厚紙板(1000 磅)。
- (二) 釘書針。
- (三) 膠帶。

二、設備

- (一) 剪刀。
- (二) 直尺。
- (三) 訂書機。
- (四) 捲尺。
- (五) 碼錶。

伍、研究過程或方法

一、迴旋鏢的製作

- (一) 先用厚紙板，剪出三張寬為 3 公分，長為 13 公分的紙片。

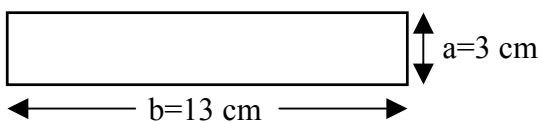


圖 5-1

- (二) 將三張紙片沿著邊緣，剪出長約一公分的缺口。

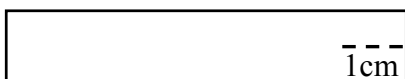


圖 5-2

(三) 左手拿二張紙片，右手拿一張紙片，將兩者互相嵌合在一起。

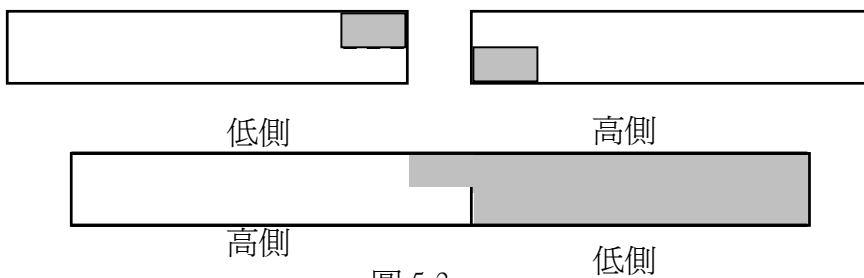


圖 5-3

灰色表剪開 1cm 後，
紙片凹進去的部分。

兩者嵌合後，會互相重疊，
紙片會一邊高，一邊低

此時，三張紙片兩兩重疊，
每一張紙片均一高一低。
紙片與水平所夾的角度即
為攻角。

(四) 將重疊的二張紙旋開，使三張紙片夾角均為 120° 。

(五) 利用釘書機釘在中央部分，固定三片紙片不滑動，完成。

二、迴旋鏢的投擲

手持其中一片紙片的邊緣，將它沿著與地面垂直方向射出。要特別注意是要運用腕力讓迴旋鏢旋轉，而非利用臂力將迴旋鏢丟出去。

三、實驗步驟

(一) 影響飛行軌跡的力

1. 改變紙片嵌合的方向，使紙片高低端互換。
2. 改變迴旋鏢中心的凹凸程度。
3. 改變紙片的傾斜程度。

(二) 轉動慣量與軌跡及飛行時間的關係

1. 固定迴旋鏢的尺寸，於邊緣纏上膠帶並改變圈數(圈數分別為 0、2、4、6、8)。
2. 固定迴旋鏢的尺寸、膠帶的圈數，改變纏膠帶的位置(距邊緣分別是 0、2、4、6、8cm)。
3. 固定紙片的寬度、改變長度(長度為 7、10、13、16、19cm)。
4. 承 3.，於邊緣纏上固定圈數的膠帶。

(三) 紙片長度(13、15、17cm 三組)，每組改變紙片寬度(寬度各為 4、5、6cm)

(長，寬)=(13，4)、(13，5)、(13，6)←第一組

(15，4)、(15，5)、(15，6)←第二組

(17，4)、(17，5)、(17，6)←第三組

(四) 不同紙片片數與飛行軌跡的關係

四、測量方法

(一)迴旋半徑的測量

- 1.預先將 10 公尺長的捲尺，鋪在地上，如圖 4-5 所示。
- 2.捲尺的方向跟投擲方向呈 45° 。
- 3.每組實驗均取 5 組有效數據，取其平均值。

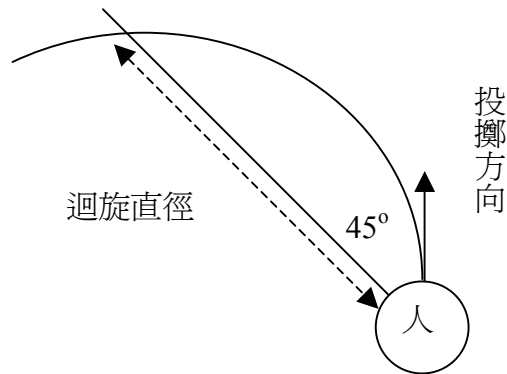


圖 5-5

(二)迴旋時間的測量

使用碼錶當測量工具，從迴旋鏢脫手開始計時，到落地為止。將時間記錄下來。每組實驗均取 5 組有效數據，取其平均值。

陸、研究結果

一、影響飛行的力

(一)改變紙片嵌合的方向，使紙片高低端互換

改變紙片嵌合的方向，會使飛行軌跡由逆時針轉為順時針。

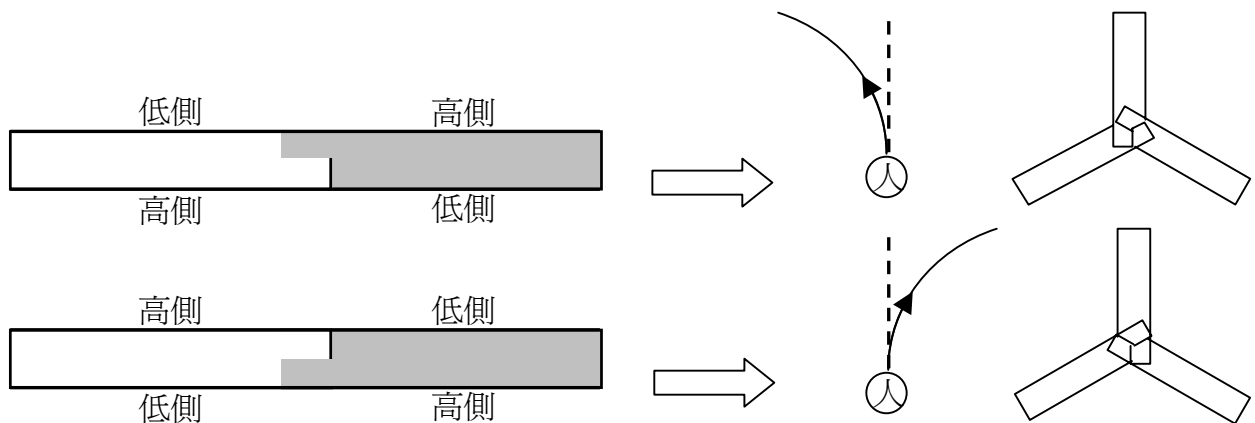


圖 6-1

(二)改變迴旋鏢中心的凹凸程度

如圖 6-2 所示，以左旋迴旋鏢為例，若迴旋鏢既不凹陷，也不凸起，則射出後，高度無顯著變化。但若中心向右凸(如圖)，則飛行軌跡向上，反之(如圖)則飛行軌跡向下。

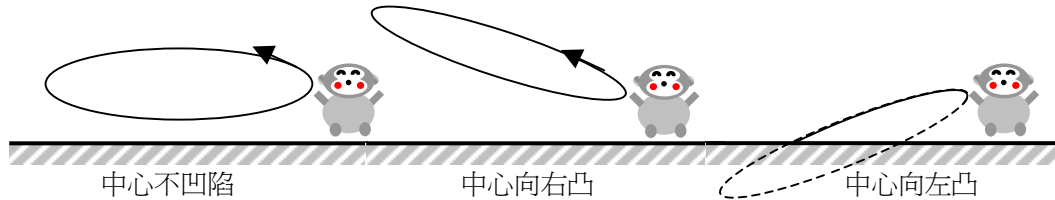


圖 6-2 飛行軌跡示意圖

(三)改變紙片的傾斜程度

傾斜角度變大，自轉的角速度變小且迴旋半徑也會變小。若傾斜角度過大，則迴旋鏢射出後，飛到一半就停止旋轉而落地。

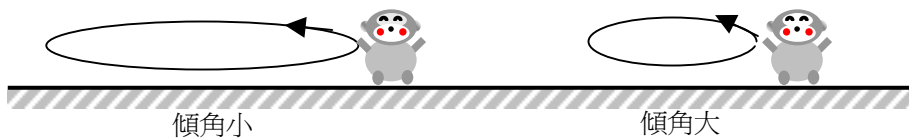


圖 6-3

二、探討迴旋鏢轉動慣量與飛行軌跡之關係

(一)固定迴旋鏢的尺寸，於邊緣纏上膠帶並改變圈數。

(圈數分別為 0、2、4、6、8)

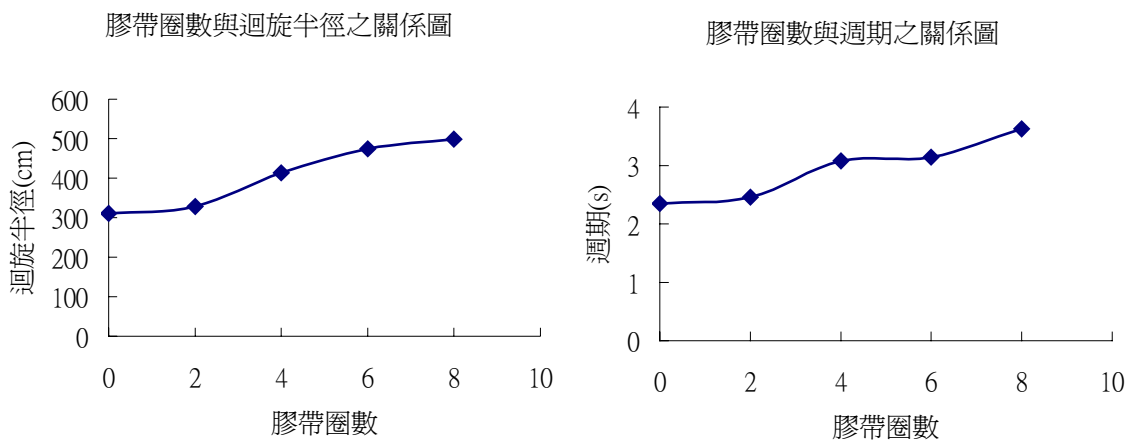


圖 6-4

(二)固定迴旋鏢的尺寸、膠帶的圈數，改變纏膠帶的位置。

(距邊緣分別是 0、2、4、6、8 公分)

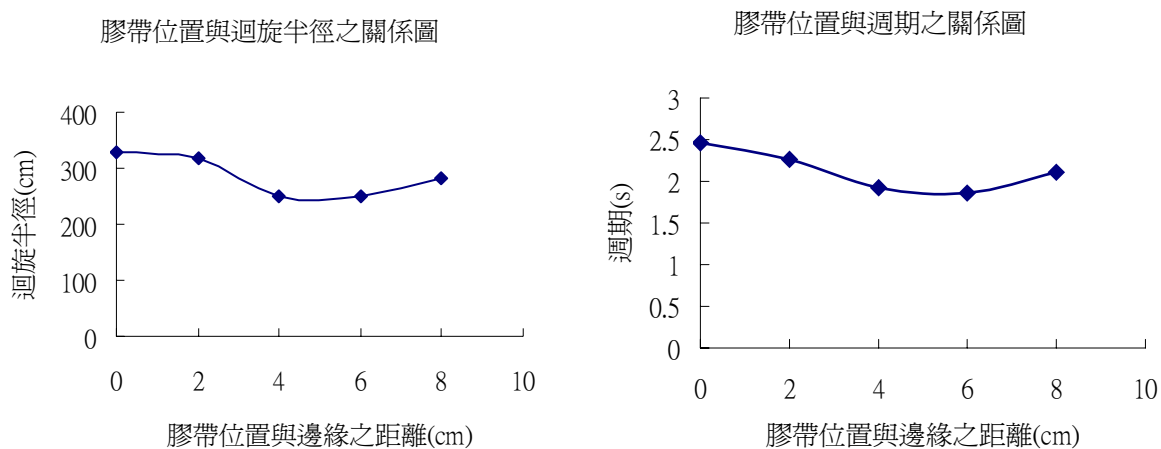


圖 6-5

(三)固定紙片的寬度、改變長度，長度為 10、13、16、19 公分。

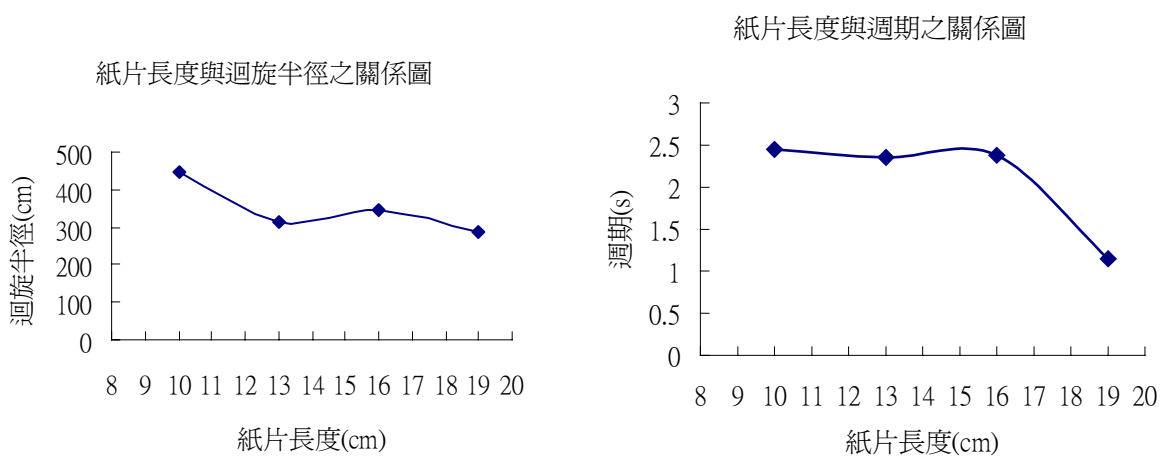


圖 6-6

(四)同上，於邊緣均纏上 4 圈膠帶。

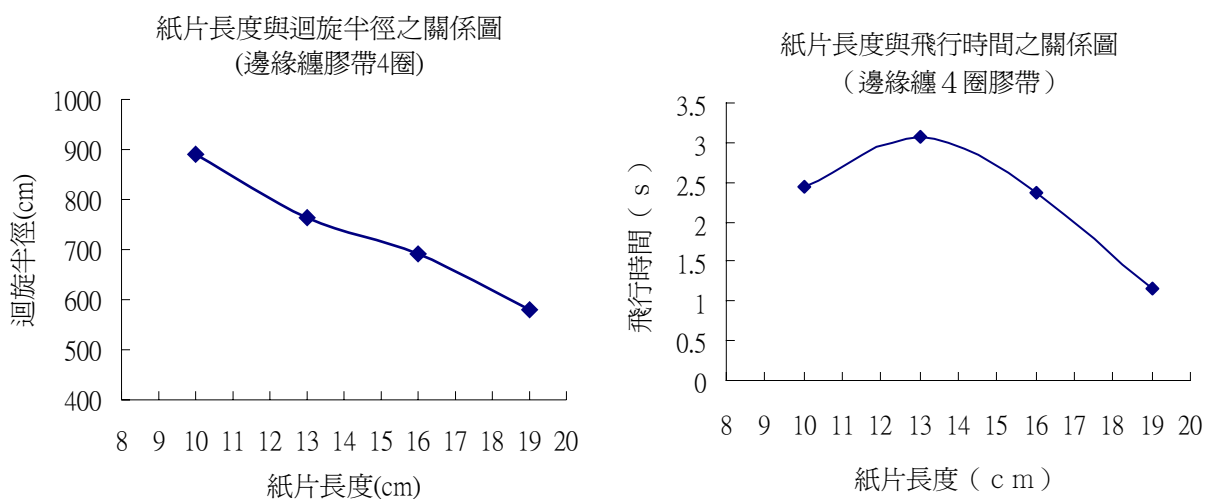


圖 6-7

三、取三片迴旋鏢，探討迴旋鏢最佳長寬比例

(一)紙片長度(13、15、17cm 三組)，每組改變紙片寬度(寬度各為 4、5、6cm)

長度 \ 寬度 (cm)	3	4	5	5.5	6	7
13	311	554	×	×	×	×
15	825	720	782	×	×	×
17	890	838	912	1008	×	×

表格內數據代表可完成迴旋之迴旋半徑

“×” 代表無法完成迴旋之迴旋鏢

四、各種不同片數迴旋鏢飛行之比較

隨著迴旋鏢片數的增多，迴旋半徑越小，且飛行的軌跡也越不完整。

柒、討論

一、探討影響飛行的力

(一)造成進動的力—重力

以向左迴旋之迴旋鏢為例，當迴旋鏢射出之後，因為紙片在鑲嵌時會略向左傾斜，與氣流相對速度如圖 7-1，故氣流的流線在紙片右側較密集，如圖 7-2，

$$\text{根據白努利原理 } P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = \text{定值} \quad (\text{式 1})$$

可知，流經右側之氣流流速較快，壓力較小，故受一垂直紙片向右之力，使紙片的重心向右傾斜。當迴旋鏢開始傾倒時，重力即產生一力矩，加上迴旋鏢本身的自轉，造成類似陀螺儀的進動現象，使迴旋鏢能夠逆時針迴旋，如圖 7-3。

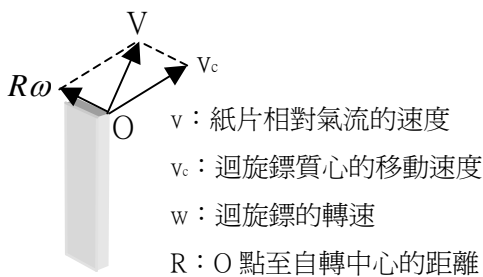


圖 7-1

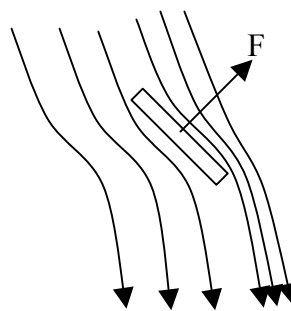


圖 7-2

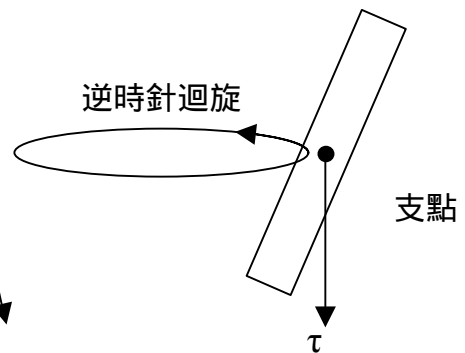


圖 7-3

(二)升力與阻力

升力的來源，主要是由白努利原理和牛頓第三運動定律而來。飛機的機翼如圖 7-2 所示，上面有隆起，下面較為平滑。當飛機在飛行時，因為上端的空氣流速快，下端的空氣流速慢，因此根據白努利定理，上端的壓力比下端小，因此產生一個垂直紙面的作用力，升力與阻力的來源，如圖 7-4。

此原理亦可由微觀來看，利用牛頓第三運動定律來解釋，因為紙片並不與前進方向平行，而是與前進方向夾一角度，此角度即為攻角。當空氣衝擊紙片時，空氣折流而下，根據牛頓第三運動定律，紙片給空氣一個垂直紙面的作用力 F_{air} ，則空氣亦還給

紙片一個垂直紙片的反作用力 F 。此空氣反作用力可分解成與紙片前進方向平行與垂直兩分力，平行分力與前進方向反向即形成阻力，垂直分力即形成升力，如圖。例如竹蜻蜓的葉片，或是直昇機的螺旋槳，皆會發現葉片並不與前進方向平行，而是有夾一個攻角。因此，當我們用手轉動竹蜻蜓，或是發動直昇機，這兩者便獲得升力，而向上飛行。

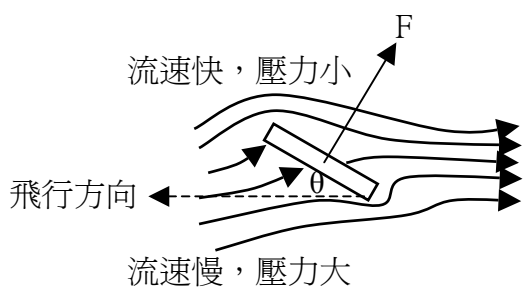


圖 7-4

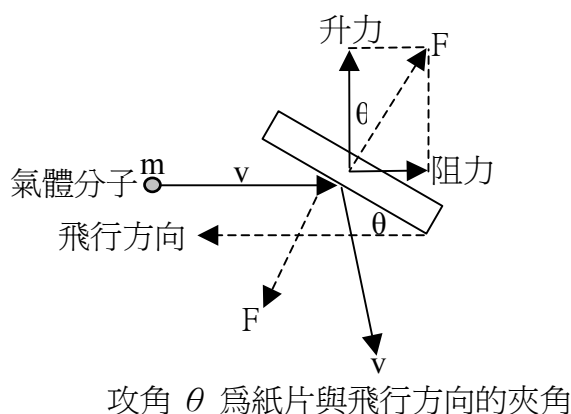


圖 7-5

如圖 7-4，假設空氣分子質量 m ，以相對速率 v 與紙片夾角 θ 入射紙片後，假設空氣分子與紙片彈性碰撞，則

$$\text{空氣分子動量變化 } \Delta \vec{P} = 2mv \sin \theta$$

$$\text{若碰撞時間 } \Delta t, \text{ 空氣分子所受衝力 } \vec{F}_{air} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = \frac{2mv \sin \theta}{\Delta t}$$

$$\text{空氣分子還給紙片反作用力 } \vec{F} = \frac{2mv \sin \theta}{\Delta t} \quad (\text{式 2})$$

$$\text{升力} = F \cos \theta = \frac{2mv \sin \theta \cos \theta}{\Delta t} = \frac{mv \sin 2\theta}{\Delta t} \alpha \sin 2\theta \quad (\text{式 3})$$

$$\text{阻力} = F \sin \theta = \frac{2mv \sin \theta \sin \theta}{\Delta t} = \frac{mv \sin^2 2\theta}{\Delta t} \alpha \sin^2 \theta \quad (\text{式 4})$$

⇒ 攻角 θ 小，升力為影響軌跡之主因，且 θ 微調大，升力變大，軌跡向上，例如將中心向右凸出。

⇒ 攻角 θ 大，阻力為影響軌跡之主因，且 θ 變大，阻力變大，半徑變小，例如紙片傾斜角增加。

二、轉動慣量對迴旋半徑及飛行時間的影響

(一) 固定迴旋鏢的尺寸，於邊緣纏上膠帶並改變圈數

當膠帶的圈數逐漸增加時，迴旋鏢的重量也不斷增加。我們原先的設定是要控制力，也就是給迴旋鏢一個固定的力矩。但是發現，當膠帶的圈數越多，越難使迴旋鏢轉動。這是因為力矩=轉動慣量*角加速度，轉動慣量增大，角加速度變小，迴旋鏢就比較不會轉。因此，我們將實驗改成讓迴旋鏢能夠完整的迴旋為目標，所以施力會隨著膠帶圈數增加而增加。當每個迴旋鏢都能迴旋時，膠帶圈數多者轉動慣量大，較不容易因為力矩的影響而改變角動量的方向。因此，單位時間內公轉轉過的角度變小，週期變大，迴旋半徑也變大。

(二) 固定迴旋鏢的尺寸、膠帶的圈數，改變纏膠帶的位置

由理論可知，所纏膠帶的位置越靠近邊緣，迴旋半徑越大且飛行時間會越長。但根據上一組實驗的結論，我們將膠帶纏在離邊緣六公分與八公分位置時，竟發現迴旋半徑與飛行時間的數據有微微上升的趨勢，與理論相違背。所以我們推測因為我們在室外進行實驗，容易受到風與空氣密度等變因的影響，但因為數據趨勢起伏不大，所以我們敢大膽假設變因對我們實驗的影響不大，因此本組實驗前三點的數據應不會有問題!

(三)自轉半徑對迴旋半徑及飛行時間的影響

1.固定紙片的寬度、改變長度，長度為 10、13、16、19 公分

實驗結果顯示，當迴旋鏢的自轉半徑加大至 19 公分時，迴旋半徑和飛行時間卻都突然變小，與 10~16 公分結果相反。。根據之前的結論，轉動慣量大者，會有較大的迴旋半徑及較長的飛行時間。本組實驗將紙片長度加長，其效果亦是增加其轉動慣量，但為何有不同的結果?我們詳細去比較兩者飛行的軌跡後發現，前幾組的樣品均能做完整的迴旋，最後是迴旋鏢與地面平行後，再緩緩落下。而本組的樣品，當落地時，迴旋鏢卻還是跟地面尚未平行。這就顯示紙片長度越長，迴旋鏢越能保持其角動量，使本身持續和地面垂直。但因為太早落地的緣故，因此無法進行完整的迴旋。

2.同上，於邊緣均纏上 4 圈膠帶

本組的實驗目的是想觀察，增加相同的質量於不同的長度的迴旋鏢，是否長度越長者，其迴旋半徑增加的越多。但實驗結果卻跟預期的完全相反。隨著紙片長度的增加，重量增加時，落地時間會越短，迴旋半徑也會縮短。其原因也是因為迴旋鏢本身還有迴旋的能力，但太重了所以太早落地。所以，我們得到的結論是長度低於 7 公分，所製成的迴旋鏢根本無法飛行，因為易受風的影響而改變其飛行軌跡。而長度大於 19 公分的迴旋鏢，則是因本身太重，落地太快，而無法順利的轉完一圈。因此，寬度 3 公分時，以長度為 13~17 公分的紙片所製成的迴旋鏢，有最好的迴旋效果。

三、長度與寬度的關係

長度與寬度的關係，增加長度與寬度可同時增加昇力、阻力及重力。所以長寬有一定的可飛行範圍。當長度增加時，寬度範圍也可增加。但太寬仍如前一項結論，太重會加速掉下來而無法完成完整的迴旋。所以，長 13 公分，寬度上限是 4 公分；長 15 公分，寬度上限是 5 公分；長 17 公分，寬度上限是 5.5 公分。

捌、結論

一、迴旋鏢飛行過程中，紙片由直立至傾倒、進動迴旋方向、軌跡上下偏向及軌跡大小決定於氣流壓力、重力及空氣反作用力所提供的升力與阻力。

(一)紙片嵌合為左高右低時，無論紙片以何種角度射出，根據白努利定律，氣流壓力必使紙片向右傾斜，而產生逆時針迴旋；若嵌合為左低又高，則反之。

(二)將紙片中心略往右凸，攻角略微增大，但攻角仍然很小。由(式 3)，(式 4)得知升力較阻力明顯增加，使軌跡往上揚；若中心往左凸，則反之。

(三)改變紙片嵌合之傾斜角度，攻角較往左或右凸之迴旋鏢還大，因攻角大時，由(式 3)，(式 4)阻力較升力變化明顯，故增加攻角時，阻力銳增，使飛行軌跡明顯縮小。

二、固定角速率，增加轉動慣量會使得迴旋半徑和飛行時間越變大。

三、不同尺寸的迴旋鏢，有不同的飛行效果。當寬為 3 公分時，長為 13~17 公分，所製作出

來的迴旋鏢飛行的最佳(迴旋最完整)。

每一種長度，也有最大寬度的限制，如果長度為 13 公分，可迴旋之最大寬度為 4 公分；當長度增加時，可飛行之最大寬度亦可增加。

三、紙片片數增加，質量亦增加，射出時使轉速立即變慢而不易進動迴旋，且在製作過程當中因厚度太厚而不易製作，故以三片為實驗研究基準。

玖、參考資料及其他

- 一、 褚德三編著，「物質科學物理篇(下)-教師手冊」，初版，台北，國立編譯館，PP232-233，2003 年出版。
- 二、 褚德三編著，「物質科學物理篇(下)」，初版，台北，國立編譯館，PP93-99，2003 年出版。
- 三、 張德光編著，「直昇機」，初版，台北，五洲出版社，PP41-45，2000 年出版。
- 四、 牧野賢治編著，「有趣的科學實驗 100」，初版，台北，世茂出版社，pp186-187，2000 出版。
- 五、 林懿偉編著，「愛麗絲科學魔法遊戲書」，初版，台北，方智出版社，pp88-89，2003 年出版。
- 六、 Jearl Walker著，「物理馬戲團」，初版，台北，天下遠見，pp68-69，2002 年出版。
- 七、 Roberil Wolke著，「愛因斯坦這麼說」，初版，臉譜文化，pp30-33，2000 年出版。
- 八、 張國標、簡安男編著，「流體力學概論」，初版，台南，復文書局，pp150-152，1986 年出版。
- 九、 K. 俄斯瓦惕希著，王石安譯，「氣體動力學」，初版，臺北，正中書局，1985 年出版。

評語

040107 高中組物理科 佳作

迴旋鏢

1. 主題難度高具挑戰性。
2. 理論的解釋尚不夠清楚。
3. 內容及實驗步驟佳。