旋轉的魔力－科氏力的研究

國中組物理科第二名

臺灣省立卓蘭實驗高級中學國中部　作者：卓青楓、詹政己、王詔民、賴美鈴
指導教師：邱維宣

一、研究動機

有一天，家中廚房水槽被菜渣堵住，我用筷子挖了很久，突然間，水開始流動，接著出現旋渦，瞬間就排光了。我用橡皮塞輕輕堵住排水口，再放滿水，小心移去塞子，水慢慢流走到剩約三分之一左右，又出現旋渦而迅速流完，且旋轉方向爲逆時針，重複幾次情形都相同；水漕很光滑而且也不是圓形的，爲什麼會產生旋渦呢？廁所內的抽水馬桶也有同樣的現象。理化老師告訴我們，他在澳洲曾經觀察到水槽排水爲順時針方向，因爲澳洲位於南半球。是什麼原因造成這種結果呢？和地球上不同半球位置又有何關係呢？

二、研究目的

利用旋轉系統中運動物體受力作用產生偏移，根據偏移量 (S) 大小探討。

㈠作用力 (F) 與系統轉動角速度（ ω ）。

㈡作用力 (F) 與物體運動速度 (V)。

㈢作用力 (F) 與物體運動方向和系統角速度之夾角（ θ ）等變因間的關係。

三、研究設備

㈠科氏力展示儀：

1. 本設備爲使用抽風機作爲底座，帶動一封閉保利龍圓盒旋轉，造成一個不受氣流擾動的旋轉環境，鋼珠由位於圓盒中央柱上方之蓮頭漏斗（在原地旋轉便於操作）投入，沿導管至直角接頭，經垂直加速管落下以獲得速度，到達斜板後鋼珠將受力偏向落至擋板，撞擊複寫紙上之紀錄紙，留下痕跡，與圓盒靜止時鋼珠撞擊痕跡（參考點）比較水平距離，可獲科氏力的相對大小。
2. 各部份名稱簡介：

⑴插頭。

(2)調向及調速器。

(3)基座。

(4)轉盤座。

(5)斜板。

(6)擋板。

(7)配重電池。

(8)計頻燈。

(9)斜板角度軌。

(10)封閉旋轉盒。

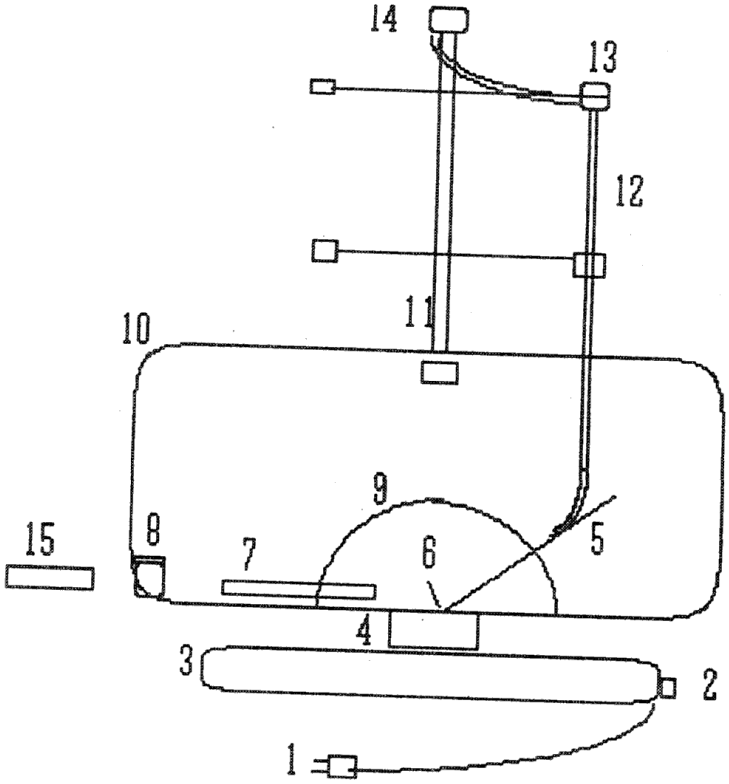
(11)中央支架。

(12)鋼珠加速管。

(13)直角接頭。

(14)薊頭漏斗及鋼珠導管。

(15)光電計頻器。



㈡紀綠紙

㈢複寫紙

㈣尺

四、研究過程

㈠在旋轉坐標系中，運動的物體除了受離心方向的作用力之外，尚受一垂直其運動方向的側向力作用，此力於 1835 年由 G.G.Coriolis 於水車實驗中發現，後世稱之爲科氏力。

㈡科氏力 (F) 等於坐標系之角速度（ ω ），物體的運動速度 (V) 之外積負值的兩倍乘以物體的質量，即 $\vec{F} = -2 \cdot m \cdot \vec{\omega} \times \vec{V}$ （負號代表方向與 $\vec{\omega} \times \vec{V}$ 方向相反），其值等於 $2 \cdot m \cdot \omega \cdot V\sin\theta$ ，其中（ θ ）爲物體運動速度與坐標系轉動角速度之夾角。

㈢關於科氏力的研究大部份利用地球本身的角速度（ ω ）使運動物體發生偏向而觀察之；但是地球自轉每 24 小時轉一圈，即角速度（ ω ）值約爲 $2\pi/86400 = 0.0000726$ （弳／秒），這個值相當小，一般速度不大的物體所受之偏向力便不易被觀察到，除非加大速度 (V) ，那將有較大的危險性；因此我們設計一個封閉的旋轉圓盒（提供一個不受氣流干擾的旋轉坐標系）由可控制轉速的電動馬達提供角速度（ ω ），鋼珠由不同高度受重力自由落下獲得速度 (V) ，經由導管滾至一可變角度之斜板上，以獲得二者不同之夾角（ θ ）值；測量顯示在斜板底部擋板之複寫紙上，鋼珠落點與靜止

時鋼珠的落點之位移 (S)，（此位移與偏向力成正比），每次只改變一種變因（其他爲控制變因），探討鋼珠所受之偏向力，是否和圓盒角速度，鋼珠速度及二者間之夾角正弦值等變因間均有正比關係，以判斷是否可以此設備展示科氏力？

㈣以下介紹本實驗中各項變因的內容及測量方法：

1. 偏向力 (F)

鋼珠離開管口，在斜板上運動時，重力使其直線向下滾動；在兩側則無速度，即側向初速度爲 0，由運動學可知，$S = Vot + \frac{1}{2} at^2$ 因 $Vo = 0$，故可改寫成 $S = \frac{1}{2} at^2$

⑴根據牛頓第二定律，物體質量 (m)，受力 (F)，將產生加速度 (a)，即遵守 $F = ma$ 且 $a = \frac{F}{m}$。

⑵根據運動學，$Vo = 0$ 時，偏向位移 (S)，等於加速度 (a) 和時間 (t) 平方的的乘積，即 $S = \frac{1}{2} at^2$。

合併⑴、⑵得 $S = \frac{1}{2}\frac{F}{m}t^2$ 或 $s = (\frac{t^2}{2m})F$，即偏向位移 (S) 和作用力 (F) 成正比。所以只要測量運動物體的偏向位移量 (S)，及力的作用時間 (t)，便可求得作用力 (F)。

2. 旋轉角速度（ω）：

⑴自旋轉圓盒上方觀察，若爲逆時針方向，則定方向爲向上；若爲順時針則爲向下；測量圓盒旋轉一周所需的時間 (T)，則其角速度 (W) 值等於 $(\frac{2\pi}{T})$，單位爲（弳／秒）。

⑵因馬達旋轉週期 (T)，比地球自轉週期 (86400 秒) 小很多，約爲 1/86400 倍，所以角速度（ω）值約爲地球的 86400 倍，較易觀察；本設備可提供順、逆時針兩種方向的選擇，以模擬南北半球的地球自轉方向。

3. 物體運動速度 (V)

取小鋼珠由高處受重力落下，以獲得速度，並經由控制直角接頭（提供垂直方向初速度爲 0 之保證）之不同高度，以獲得不同速度；因系統旋轉角速度（ω）很大，所以雖然鋼珠運動速度 (V) 不大，其偏向量 (S) 亦可明顯且易於測量。

4. 物體速度與旋轉角速度之夾角（θ）

調整斜板傾斜角度，可獲得不同夾角，即可獲得不同正弦值。

⑴逆時針方向旋轉時：

θ 在 90° 到 180° 間，$\sin\theta$ 值介於 1 到 0 之間，即斜板由水平（此時角速度 ω，鋼珠速度 V 夾角 90°），受偏向力 (F) 最大（即偏向量

最大）；當斜板仰角 90° 時（此時 ω 和 V 夾角 180° ）偏向量最小。

(2)順時針方向旋轉時：

θ 由 90° 到 0° ，即斜板仰角由 0° 到 90°，偏向位移由大而小。以下爲操作說明：

㈠測量 100 次圓盒靜止時鋼珠的落點，求出原點之最大範圍 (Q) ，並記錄之。

1. 選擇直角接頭高度，以決定鋼珠之相對速度 (V) ，並記錄之。
2. 選擇斜板仰角角度，以決定圓盒角速度和鋼珠速度間之夾角（ θ ），並記錄之。
3. 於圓盒靜止時，目薊頭漏斗投入鋼珠，俟其撞及擋板後，小心地作下記號（此爲參考點）。
4. 打開計頻燈，啓動馬達，並調整轉速，使達穩定；使用光電計頻器測量任十次旋轉週期和 (T) 則平均旋轉角速度 $\omega = (2\pi/T) \times 10$ ，並記錄之。
5. 在穩定旋轉狀況下，某次計頻燈通過時，迅速投入鋼珠，當第二次計頻燈再通過時，計時器將停止，記錄下經歷的週期 (T) ，可得旋轉角速度 $\omega = 2\pi/T$ ，並在鋼珠撞擊點作下記號。
6. 鋼珠通過測速器時，將被記錄通過兩光束間的時間 (t) ，因測量點靠近起點和終點，故可求出平均速度 V 及偏向力作用時間，記錄之。
7. 量取偏向點與參考點（原點）間之水平距離，即爲鋼珠受力之偏向位移 (S) 。
8. 改變不同旋轉角速度（ ω ）值，重複步驟 3,4,5,6,7, 至少 10 次，並記錄之。

㈡改變鋼珠速度（調整直角接頭），重複步驟 3,4,5,6,7,8 至少 5 次，並記錄之。

㈢改變斜板仰角（改變 ω 和 V 之夾角 θ ），重複步驟 3,4,5,6,7,8 及㈡至少 5 次，並記錄之。

㈣改變旋轉角速度方向 (D) ，重複步驟 3,4,5,6,7,8 ㈡及㈢，並記錄之。

五、實驗結果

㈠測量 100 次圓盒靜止時鋼珠落點，求出最大範圍 (Q) ：

第一次落點集中範圍 8.0mm ， 8.1mm ， 8.0mm 。

第二次落點集中範圍 9.0mm ， 6.0mm ， 6.0mm 。

第三次落點集中範圍 4.0mm ， 5.0mm ， 5.0mm 。

平均落點集中範圍（原點可能誤差值）= 5.3mm 。

鋼珠質量（ 20 顆） M = 13.9 克，平均質量 0.7 克。

㈡數據與分析：

下列數據中，變數 D 爲角速度 ω 的方向； D = +1 爲逆時針方向。

D = -1 爲順時針方向。

θ 爲斜板仰角， D=+1 時， θ 由 0° ~ 90° 表 $\vec{\omega}$ 與 $\vec{V}$ 夾角由 90° ~ 180° 。

D = -1 時， θ 由 0° ~ 90° 表 $\vec{\omega}$ 與 $\vec{V}$ 夾角由 90° ~ 0°

V = 1 ~ 5 ，表直角接頭高度由高而低。

T 表圓盒轉一圈所需時間，即週期。

ω 表圓盒旋轉角速度， $\omega = 2\pi / T$ 。（下表中每項均未乘上 2π ，其值僅爲 1/T ）

S 表鋼珠偏向位移，爲與圓盒靜止時平均參考點（原點）之水平距離。

(1)：

D = +1(向上)　　θ = 0°　　V = 2(第二高點)

T(秒)	1.96	1.88	1.65	1.63	1.50	1.50	1.41	1.40	1.30	1.25
ω (弳 Hz)	0.51	0.53	0.61	0.61	0.67	0.67	0.71	0.71	0.77	0.80
S(mm)(右)	28.00	52.00	20.00	14.00	30.00	34.00	35.00	40.00	40.00	21.00

(2)：

D = +1(向上)　　θ = 15°　　V = 2(第二高點)

T(秒)	2.14	1.82	1.75	1.68	1.60	1.46	1.41	1.37	1.17	1.14
ω (弳 Hz)	0.47	0.55	0.57	0.60	0.63	0.68	0.71	0.73	0.85	0.88
S(mm)(右)	44.00	37.00	62.00	51.00	44.00	15.00	11.00	25.00	57.00	57.00

(3)：

D = +1(向上)　　θ = 30°　　V = 2(第二高點)

T(秒)	1.51	1.33	1.32	1.32	1.32	1.26	1.23	1.17	1.17	1.07
ω (弳 Hz)	0.66	0.75	0.76	0.78	0.76	0.79	0.81	0.85	0.85	0.93
S(mm)(右)	4.00	18.00	34.00	8.00	13.00	4.00	33.00	31.00	41.00	29.00

(4)：

D = +1(向上)　　θ = 45 °　　V = 2(第二高點)

T(秒)	1.68	1.53	1.51	1.36	1.35	1.24	1.20	1.07	1.05	0.97
ω (弳 Hz)	0.60	0.65	0.66	0.74	0.74	0.81	0.83	0.93	0.95	1.03
S(mm)(右)	3.00	1.00	7.00	15.00	13.00	12.00	4.00	9.00	47.00	85.00

(5)：

D = +1(向上)　　θ = 60 °　　V = 2(第二高點)

T(秒)	1.53	1.47	1.43	1.38	1.20	1.17	1.11	1.10	1.07	0.97
ω (弳 Hz)	0.65	0.68	0.70	0.72	0.83	0.85	0.90	0.91	0.93	1.03
S(mm)(右)	12.00	15.00	23.00	8.00	8.00	19.00	20.00	21.00	21.00	13.00

(6)：

D = +1(向上)　　θ = 75 °　　V = 2(第二高點)

T(秒)	1.46	1.42	1.39	1.25	1.24	1.19	1.14	1.10	1.04	1.00
ω (弳 Hz)	0.68	0.70	0.72	0.80	0.81	0.84	0.88	0.91	0.96	1.00
S(mm)(右)	24.00	6.00	26.00	13.00	0.00	24.00	20.00	3.00	13.00	25.00

(7)：

D = +1(向上)　　θ = 85 °　　V = 2(第二高點)

T(秒)	1.71	1.24	1.20	1.19	1.14	1.14	1.13	1.08	1.02	1.00
ω (弳 Hz)	0.58	0.81	0.83	0.84	0.88	0.88	0.88	0.93	0.98	1.00
S(mm)(右)	19.0	4.0	-14.0	-14.0	34.0	-16.0	9.0	-22.0	-6.0	-5.0

(8)：

D = -1(向下)　　θ = 0 °　　V = 2(第二高點)

T(秒)	2.38	1.65	1.60	1.52	1.51	1.45	1.40	1.40	1.34	1.25
ω (弳 Hz)	0.42	0.61	0.63	0.66	0.66	0.69	0.71	0.71	0.75	0.80
S(mm)(右)	30.00	82.00	49.00	42.00	37.00	42.00	65.00	62.00	42.00	68.00

(9)：

D = -1(向上)　　θ = 15 °　　V = 2(第二高點)

T(秒)	1.80	1.75	1.67	1.59	1.57	1.54	1.49	1.44	1.39	1.03
ω (弳 Hz)	0.56	0.57	0.60	0.64	0.64	0.65	0.67	0.69	0.72	0.97
S(mm)(右)	79.00	22.00	41.00	25.00	49.00	73.00	35.00	29.00	68.00	110.0

(10)：

D＝-1(向下)　　θ＝30°　　V＝2(第二高點)

T(秒)	1.34	1.30	1.24	1.23	1.10	1.04	1.04	0.99	0.94	0.94
ω(弳 Hz)	0.74	0.77	0.81	0.81	0.91	0.96	0.96	1.11	1.06	1.06
S(mm)(右)	7.00	22.00	21.00	19.00	13.00	40.00	61.00	52.00	47.00	52.00

(11)：

D＝-1(向下)　　θ＝45°　　V＝2(第二高點)

T(秒)	1.46	1.39	1.20	1.17	1.12	1.10	1.06	1.00	0.96	0.88
ω(弳 Hz)	0.68	0.72	0.83	0.85	0.89	0.91	0.94	1.00	1.04	1.14
S(mm)(右)	8.00	42.00	17.00	20.00	20.00	12.00	20.00	17.00	59.00	25.00

(12)：

D＝-1(向下)　　θ＝60°　　V＝2(第二高點)

T(秒)	1.29	1.21	1.16	1.10	1.10	1.10	1.07	1.02	0.93	0.87
ω(弳 Hz)	0.78	0.83	0.86	0.91	0.91	0.91	0.93	0.98	1.08	1.15
S(mm)(右)	2.00	23.00	8.00	14.00	28.00	12.00	26.00	35.00	18.00	22.00

(13)：

D＝-1(向下)　　θ＝75°　　V＝2(第二高點)

T(秒)	1.80	1.57	1.29	1.13	1.10	1.07	0.92	0.96	0.91	0.79
ω(弳 Hz)	0.56	0.64	0.78	0.88	0.91	0.93	1.09	1.04	1.09	1.26
S(mm)(右)	-3.00	-3.00	6.00	23.00	1.00	12.00	12.00	11.00	1.00	4.00

(14)：

D＝-1(向下)　　θ＝85°　　V＝2(第二高點)

T(秒)	1.88	1.21	1.10	1.09	1.06	1.06	1.02	0.97	0.95	0.93
ω(弳 Hz)	0.53	0.83	0.90	0.97	0.94	0.94	0.98	1.03	1.05	1.08
S(mm)(右)	3	9	-8	4	5	4	9	-3	4	15

根據以上數據，以系統角速度作爲橫坐標，偏向位移量作爲縱坐標，畫出「位移一角速度」關係圖（S-ω圖），惟此處的角速度ω值均已提出2π值，僅爲頻率f，目的在簡化數據，並找出偏向位移量的變化趨勢。

在下頁右側圖形中，已將對應於每個不同角速度（ω）值的偏向位移(S)標出，並作線性迴歸，將每張圖中第五個角速度值所對應迴歸線的點聯結起來，分爲逆時針及順時針兩個角速度方向（向上D＝+1及向下D＝-1），右側連續圖

爲角速度向上者（逆時針 D ＝ +1 ），左側爲角速度向下者（順時針 D ＝-1 ）。

六、討論

㈠根據科氏力 $\vec{F} = -2M\ \vec{\omega} \times \vec{V}$ 所作的預測，當角速度 $\vec{\omega}$ 向上時，（逆時針方向旋轉），$\vec{\omega}$ 和 $\vec{V}$ 夾角在 90° ～ 180° 之間，科氏力方向爲垂直朝向運動物體速度方向的右方；$\vec{\omega}$ 向下時朝向左方。

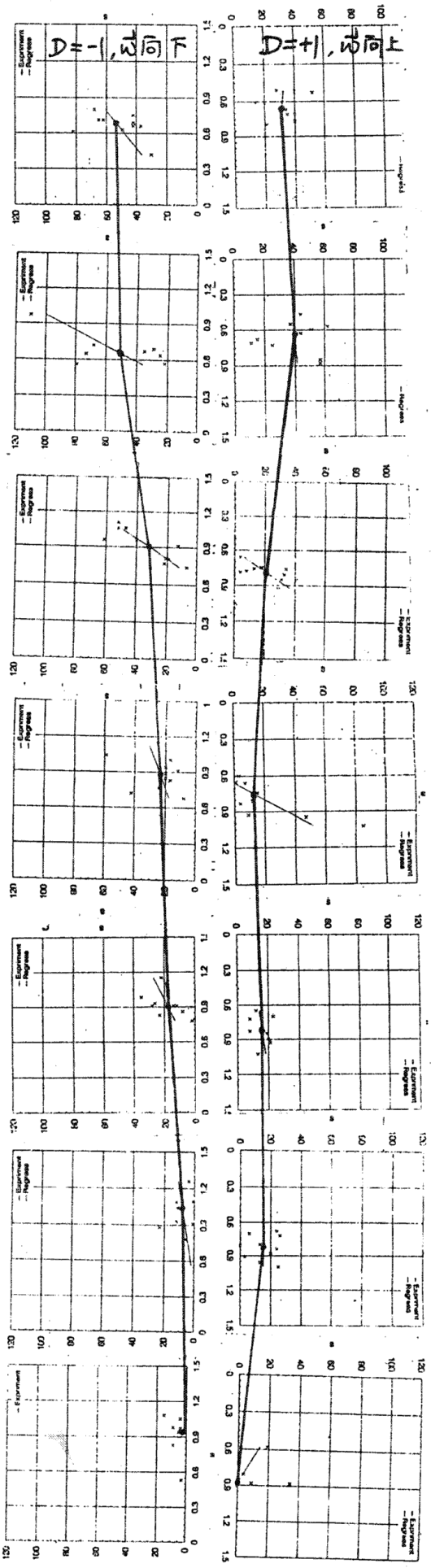
由右側圖可見，D ＝ +1 時，$\vec{\omega}$ 向上，鋼珠受力所偏向的位移朝向原點（參考點）的右側；D ＝-1 時 $\vec{\omega}$ 向下，鋼珠受力所偏向的位移朝向原點（參考點）的左側，與預測狀況符合。

㈡根據科氏力值 $|\vec{F}| = 2m\ \omega\ WV\sin\theta$，所作的預測，當 $\vec{\omega}$ 和 $\vec{V}$ 夾角正弦值由 θ ＝ 90° 時 sin90 ° ＝ 1 ；則 θ ＝ 180° 時 sin180° ＝ 0 ，正弦值由大到小，即偏向力亦由大而小（隨夾角 θ 的增加），偏向位移 (S) 亦由大而小。

由右側圖可見，不論角速度方向朝上或朝下，當斜板仰角由 0° ～ 90° 時，角速度（ $\vec{\omega}$ ） 和速度 $\vec{V}$ 夾角的正弦值亦由 1 遞減到 0 ，偏向力（偏向位移也向 0 收斂），此點亦與預測符合。

㈢根據科氏力值 $|\vec{F}| = 2m\ \omega\ V\sin\theta$，所作的預測，當 m,V,sin θ 爲定值時，偏向力（或偏向位移 S ）將與角速度 ω 值呈正比關係。

由右側圖可見，每一張 S-ω 圖中迴歸線的斜率大致而言爲正值，有部份圖形出現斜率爲負值的狀況，其原因可能是由於測量時，未捨棄誤差較大的數據所致，所以大致上而言仍符合科氏力的預測。



㈣科氏力亦可預測當 m, ω ,sin θ 均爲定值時，偏向力（偏向位移）將與物體運動速度呈正比，這個部份，就現有的數據，尚不足以驗證，必須在 V = 1,V = 2,V = 3,V = 4,V = 5 均操作完成後始可分析。

七、結論

㈠在整個實驗中，我們可以很清楚地觀察到：在一個旋轉系統中，運動的物體會受一個垂直其運動方向的力作用，這就是科氏力。

㈡當系統角速度向上（逆時針旋轉）時，運動的物體偏向右方如同地球的北半球現象，運動物體受向右的偏向力作用，這可以明顯地說明如颱風中心爲低氣壓，四周氣流向中心流動時向右偏形成逆時針方向氣旋；排水槽和馬桶水流也有類似性質；南半球的角速度方向恰與北半球相反，所以低氣壓（颱風）及排水方向爲順時針方向。

㈢由於地球自轉角速度太小，科氏力效應較不明顯，必須速度很快（如砲彈，飛彈）或質量很輕（如氣流）才較明顯，佛科擺也可觀察得到，但較不容易，當我們利用本實驗的設備展示科氏力時，因角速度很大（約爲地球的 8 萬到 10 萬倍），所以速度很小的鋼珠便可明顯觀察到，且可驗證科氏力的預測 $\vec{F} = -2m\ \vec{\omega} \times \vec{V}$ 確爲運動物體所受偏向力。

八、參考資料

㈠質點與系的古典動力學　徐氏基金會出版

㈡高級中學物理　第一册　國立編譯館

㈢國民中學理化　第二册　國立編譯館

評語

本實驗能以簡單材料設計光電計時器計量物體通過某高度的確實時刻。並在旋轉筒中掉落的物體偏離垂直落點的大小，使人可以清楚的觀測科氏力的存在及測量偏轉量與旋轉大小之關係。方法簡單，量精準，甚有意義，亦可當作教具。