

旋轉流體中物體移動的研究

高中組物理科第一名

省立嘉義高級中學

作者：陳逸舟、林劭穎

蔡耀城、蕭宇劭

指導教師：吳慶叁

一、研究動機

有一個題目是“愛因斯坦曾發現：茶水在杯中攪動時茶葉會向中央移動，其解答為：茶水在杯中攪動時，茶水比茶葉重（按：“重”應是“比重大”的誤植），受力較大，因而在杯邊緣，茶葉較輕，所以被擠到杯中央。”照此說法，砂子密度比水大，應向杯緣移動，但事實上砂子也會集中到中央，這一奇怪事實引起我們研究旋轉流體的興趣。

二、研究目的

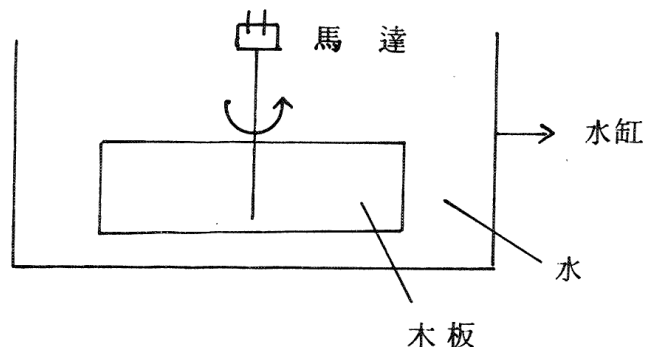
- (一)以實驗了解旋轉流體中的現象。
- (二)對這些現象，找出一些合理的解釋。
- (三)再以實驗證明吾人之理論是否正確。

三、研究器材

(一)器材：

(1)特製木架	×	1	(2)天平	×	1
(3)水缸	×	1	(4)馬達	×	1
(5)電磁鐵	×	1	(6)黏土	×	1
(7)控制板	×	1	(8)砝碼	×	1
(9)木板	×	1	(10)鋼珠	×	1

(二)實驗裝置簡圖如下：



四、研究過程

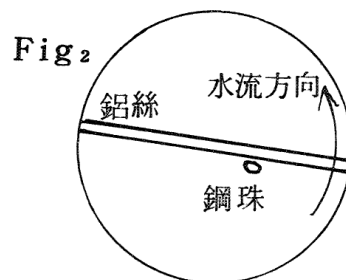
(一)沈體：

- 1.我們先以砂和鐵珠作實驗，發現砂子向中央移動而鐵珠向外移。由於 $e_{\text{砂}}$ 並不大（較接近水），所以我們做了以下錯誤的推論：假設其尚有一向內的未知力。又因曾看過在一罐中如果有粗細不同的砂子，搖動後較粗的向上移動，參考〈 Fig.1 〉，移此結果到我們實驗上，可知 e 接近水的物體較易向中移動，但經實驗後發現此力極小（或不存在），並無影響。

Fig 1



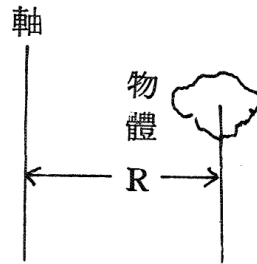
- 2.後又以黏土和砂子做實驗，發現黏土塊向外，但 $e_{\text{黏土}} < e_{\text{砂}}$ ，顯然物體向內或向外移動與密度關係並不是絕對的。
- 3.利用黏土，我們做出不同密度的沈體用以研究，其中有一餅狀物密度 4.0 g/cm^3 ，發現在轉速適合時會由沈在底部微微浮起，在短時間中向中央移動再停住下沉，由於餅狀物在移動過程中角速度很小，我們得到一個啓示：向內或向外移動和物體角速度有關。
- 4.繼續以其他不同密度之物實驗，觀察其角速度與其運動方向等。（參考實驗結果）
- 5.在缸底置一不動的鉛絲，當作爲軌道，然後以不同物體置入（使 $w_{\text{物}} = 0$ ），看是否會進入中間。見 Fig.2



實驗到此，我們依手上的資料作出了以下的討論：

- (二) 1. 考慮水缸中水的流動，我們大致可以假設為等速率圓周運動，（因為杯中吾人以木板轉動強迫水運動，且木板轉速一定）而等速率圓周運動須要一向心力： $F = m \cdot W^2 \cdot r$

考慮缸中一小部分的水，體積為 V ，本物體各點受壓力不等，視距軸遠近而定，因其作圓周運動，受水的壓力差所產生的向內合等於其所需的向心力。



$$F_{\text{向內}} = F_{\text{向外}} = m \cdot a = e \cdot V \cdot W^2 \cdot R \quad (\text{離心假想力})$$

假想代水以同一形狀的其他物體，周圍流體對此物所施的合力仍與前者相同。因此，對一在水中旋轉的物體而言：

$$F_{\text{向中央}} = e_{\text{水}} \cdot V \cdot W_{\text{水}}^2 \cdot R$$

$$F_{\text{向外}} = e_{\text{物}} \cdot V \cdot W_{\text{物}}^2 \cdot R$$

$F_{\text{向中央}} > F_{\text{向外}}$ 時，物體向中央旋進。

$F_{\text{向中央}} = F_{\text{向外}}$ 時，物體作圓周運動。

$F_{\text{向中央}} < F_{\text{向外}}$ 時，物體向外旋出。

2. 對 A，B 二式我們在研究初期只考慮 e 的影響，乃因砂子在水中攪動時一片混亂，而且旋進中央之物歷時都很短，要測 w 實在是件難事，所須向心力既不能減小，因此想由加一向內力著手，而有 e 相似之物裝在罐中搖動，體積大者上升之聯想，但經實驗後發現此力很小，並無影響。

(三) 浮體

以小木塊，保利龍……等試驗看是否會進入中央，驗證茶葉在水中的現象是不是在其他浮體也成立。（參考實驗結果）

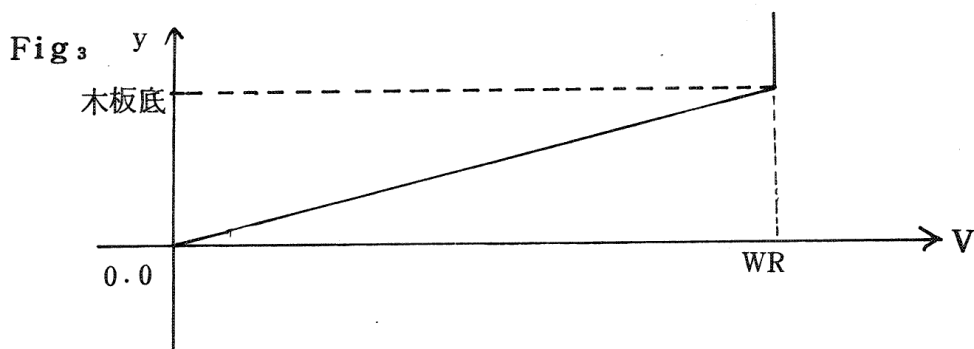
五、實驗結果

見附錄 1。

六、研究討論

- (一) 今將力的分析記於附錄 2。

(二) 1. 對於流體的問題，我們時常想得過於理想化，但實際流體在界面上速度差卻為 0。水為牛頓流體，以鉛直線為 y 軸，速度為 x 軸，取缸中一小段作圖可得 Fig.3。所以事實上我們可測得的 W 是板子推動部分水的 W，我們所要的 W 比測得的小。



2. 由 (Fig.3) 還可對一些我們所看到的有趣現象做解釋：

- (1) 對沈體我們發現很少會跑到木板底以上，實因由速度差所造成的向上力只到木板底為止，實驗也驗證了，跑到板底以上者也會立刻下降。
- (2) 我們曾以較小的木板旋葉實驗，板邊緣離缸緣尚有一段距離，結果鋼珠跑到最外層，但黏土或石塊卻在板緣，由六、(二)、1. 知板緣到缸緣速度漸減，因而有一向板緣的力，正好充當物體（黏土或石塊）的向心力，但鋼珠需要更大的向心力，所以移至缸緣。

(三) 由實驗與理論推導來說，A、B 兩式是正確的。因此，我們對問題中的解答，就可以提出一番較合理的解釋：

在浮體中 重量 = 浮力

$$F_{\text{向中央}} = e_{\text{水}} \cdot V_{\text{水}} \cdot W_{\text{水}}^2 \cdot R$$

$$F_{\text{所須向心力}} = e_{\text{物}} \cdot V_{\text{物}} \cdot W_{\text{物}}^2 \cdot R \quad \text{其中 } V_{\text{物}} \text{ 為浮體排開水 (在水中) 的體積}$$

在以上兩式中： $e_{\text{水}} V_{\text{水}} = e_{\text{物}} V_{\text{物}}$ ，但在一般情形下 $w_{\text{水}} > w_{\text{物}}$

所以浮體一定會移向中央，而不是茶比水重或輕的關係。這樣的解釋對保利龍小方塊不易旋入的結果較合理。（因為保利龍表面積大，致使其 W 亦非常接近）又由 (Fig.3) 可知在板以下，愈向下速度愈慢，依白努力原理，物體會受一向上力，而可以使向上力 $> m \times g$ ，致使上浮擺脫底部摩擦力，開始運動，但在內部之速度差較小，因而向上力變小以致於下沉不再運動，這對餅狀黏土乃至多數沈體之部分運動現象可以提出合理的解釋。

(四) 對於 A、B 二式的證明，吾人曾想到三種方法加以證明：

第一種方法是使用電磁鐵來控制鐵珠的轉速，進而能更準確地驗證 A、B

式，可是電磁鐵的吸力不足，無法完全操縱鐵珠的 w ，所以不得不宣告放棄，實在非常痛心。

第二種方法是利用鐵絲或有凹槽的缸底來帶動珠子，但技術困難且有紊流。第三種方法是將木板打水改成整個水缸旋轉，再以馬達經鐵絲帶動物體，這使對 $w_{水}$ 和 $w_{物}$ 的測定都有長足的進步。這種方法使我們可以證明 A、B 二式，為防止紊流的干擾，因此採用浮體，又因實驗困難，所以沒有大量的數據，不過這已經足以證明我們的推論（請參考實驗結果）

(五)結果中部分的珠子 $f_{向外} / f_{向內}$ 的比值很大，但卻不向外移，我們推論是因其 e 接近水，因此在水中極易浮起，因為其所在的 $w_{水}$ 較接近我們所測得的。且 $w_{物}$ 易受影響造成位置變化大。

七、研究結論

(一)這一次科展的過程中，我們最主要得到並證明了 A 式和 B 式，不但解決了動機中的疑惑，而且知道沈體會向中央移動主要是由於 $w_{水} > w_{物}$ 的關係，但是對沈體中，水和物體之 w 難以做良好的定量分析，是我們的困難，未來應往這方面努力，以求更精密的分析與討論。

(二)旋轉流體和我們生活是密切相關的，而對其中物體動向的討論也具有良好的推廣性，像洗衣機中衣服的運動，河中的旋渦，暴風（龍捲風、颱風），離心機， u_{235} 與 u_{238} 的分離等研究都與之有關，而它們和我們日常生活也都有關，像遇到旋渦時，使我們的 w 愈大愈好（需較大的向心力）才易脫離。看到水中砂子向中間移，或見風旋轉時樹葉向內旋進也不再疑惑。

(三)流體實驗向來是變因相當多且複雜的，利用自製的實驗器具，難免有少許的誤差，況流體具有黏滯性，壓縮性分子內聚力，表面張力……等關係，期有較精密的實驗器具以獲得最佳的效果。

八、參考資料

(一)國立編譯館：高中物理第二冊

(二)陳錫垣：力學第四版及第六版 中央圖書出版社

(三)Halliday & Resnick: Fundamentals of physics (Extended) 3rd edition.
第一冊第二冊胡玲毅編譯基本物理學。 復文書局。

(四)Sears, Zemansky, Young: University Physics 第二冊大專物理學徐氏基金會出版。

附錄：

(一)附錄 1

1. 沈體

物質	餅狀黏土		物質	鋼珠	鋼珠
體積	2.1 cm ³		實驗 中特 別處	用鐵絲將鋼珠擋住，使其不能隨水轉動，W _水 大時再將之放開。	以一直段的鋁絲當軌道，使其只能做一維運動。
形狀	餅狀				
質量	10.1 g				
密度	4.0 g / cm ³				
趨勢	微微浮起而 迅速旋入	向外	結 果		
角速度	趨近 0	1.0 周/sec			
水速	1.6 周/sec	2.0 周/sec			

開始處

Case 1	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
轉數	Time (water)	time (ball)	水轉速(w)	珠轉速	重量(g)	體積(cm ³)	密度(g/cm ³)	F(外)	F(內)	J/K	位置		
1	Ball 9	10.00	5.30	6.89	11.86	9.12	0.40	0.35	1.14	3.33	4.92	0.68	0.5-1
2	Ball 17	10.00	5.20	6.40	12.08	9.83	0.76	0.72	1.06	7.34	10.51	0.70	0.0.7
3	Ball 14	10.00	5.20	8.46	12.08	7.43	1.53	0.82	1.87	8.45	11.97	0.71	0.8.1
4	Ball 16	10.00	5.20	7.85	12.08	8.00	0.97	0.59	1.64	6.21	8.61	0.72	0.7.1
5	Ball 18	10.00	5.20	6.73	12.08	9.34	1.00	0.80	1.25	8.72	11.68	0.75	0.5.0.9
6	Ball 19	10.00	5.10	6.95	12.32	9.04	0.85	0.61	1.39	6.95	9.26	0.75	0.5.0.9
7	Ball 15	10.00	5.10	8.47	12.32	7.42	1.67	0.80	2.09	9.19	12.14	0.76	0.8.1
8	Ball 8	10.00	5.30	6.14	11.86	10.24	0.40	0.38	1.85	4.19	5.34	0.79	0.1
9	Ball 13	10.00	5.30	7.75	11.86	8.11	1.20	0.71	1.69	7.90	9.98	0.79	0.6.0.9
10	Ball 6	10.00	5.30	7.36	11.86	8.54	0.69	0.45	1.53	5.04	6.32	0.80	0.5.0.9
11	Ball 20	10.00	5.30	9.78	11.86	6.42	1.98	0.70	2.71	7.84	9.84	0.80	0.9.1
12	Ball 10	10.00	5.40	6.12	11.86	10.27	0.32	0.30	1.07	3.37	4.06	0.85	0.1
13	Ball 12	10.00	5.30	8.37	11.86	7.51	1.26	0.60	2.10	7.10	8.43	0.84	0.8.1
14	Ball 11	10.00	5.20	9.55	12.08	6.58	1.45	0.50	2.90	6.28	7.30	0.86	0.9.1
15	Ball 2	10.00	5.30	9.40	11.86	6.68	1.50	0.53	2.83	6.70	7.45	0.90	0.9.1
16	Ball 3	10.00	5.30	6.00	11.86	10.47	0.50	0.40	1.25	5.48	5.62	0.98	0.5.1
17	Ball 1	10.00	5.10	9.10	12.32	6.90	1.30	0.40	3.25	6.20	6.07	1.02	0.9.1
18	Ball 7	10.00	5.30	5.49	11.86	11.46	0.40	0.35	1.14	5.25	4.92	1.07	0.5.1
19	Ball 4	10.00	5.20	5.63	12.08	11.17	0.40	0.32	1.25	4.99	4.67	1.07	0.4.1
20	Ball 5	10.00	5.20	5.71	12.08	11.01	0.58	0.40	1.45	7.03	5.84	1.20	0.5.1
21	小鋼珠	10.00	5.10	10.46	12.32	6.81	0.13	1.00	8.00	28.85	15.18	1.90	1.00
22	中鋼珠	10.00	5.10	10.35	12.32	6.07	0.43	3.44	8.00	101.49	52.21	1.94	1.00
23	大鋼珠	10.00	5.20	10.30	12.08	6.10	1.05	8.40	8.00	249.90	122.64	2.04	1.00

Case 3	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
轉數	Time (水)(20 轉)	time (ball)	水轉速	珠轉速	重量(g)	體積(cm ³)	密度(g/cm ³)	F(外)	F(內)	J/K	位置		
1	球 20	10	9.8	7.76	12.82	8.10	0.71	0.5	1.42	465.47	822.12	0.57	0.9.1
2	球 14	10	9.8	8.85	12.82	7.10	1.51	0.8	1.89	761.11	#####	0.58	1
3	球 12	10	9.8	7.54	12.82	8.33	0.85	0.61	1.39	590.25	#####	0.59	0.8.1
4	球 17	10	9.7	6.6	12.96	9.52	0.60	0.55	1.09	543.78	923.08	0.59	0.6.1
5	球 9	10	9.7	7.95	12.96	7.90	1.20	0.71	1.69	749.56	#####	0.63	1
6	球 10	10	9.7	8.82	12.96	7.12	1.67	0.8	2.09	847.50	#####	0.63	1
7	球 8	10	9.7	8.8	12.96	7.14	1.26	0.6	2.10	642.34	#####	0.64	1
8	球 4	10	9.5	6.33	13.23	9.93	0.40	0.35	1.14	394.11	612.41	0.64	0.6.1
9	球 13	10	9.8	7.22	12.82	8.70	0.69	0.45	1.53	522.56	739.91	0.71	1
10	球 3	10	9.8	6.5	12.82	9.67	0.40	0.32	1.25	373.76	526.16	0.71	0.7.1
11	球 19	10	9.8	9.1	12.82	6.90	1.52	0.62	2.45	724.64	#####	0.71	1
12	球 15	10	9.7	7.79	12.96	8.07	0.98	0.53	1.85	637.55	889.51	0.72	1
13	球 16	10	9.8	9.6	12.82	6.54	1.93	0.7	2.76	826.75	#####	0.72	1
14	球 18	10	9.8	9.73	12.82	6.46	1.50	0.5	3.00	625.50	822.12	0.76	1
15	球 11	10	9.7	5.69	12.96	11.04	0.76	0.72	1.06	926.72	#####	0.77	0.2.1
16	球 7	10	9.7	5.5	12.96	11.42	0.32	0.3	1.07	417.62	503.50	0.83	0.4.1
17	球 6	10	9.7	5.61	12.96	11.20	0.40	0.35	1.14	501.76	587.41	0.85	0.2.1
18	球 1	10	9.70	9.37	12.96	6.71	1.30	0.40	3.25	584.55	671.33	0.87	1.00
19	球 2	10	9.7	5.77	12.96	10.89	0.50	0.4	1.25	592.90	671.33	0.88	0.7.1
20	球 5	10	9.7	5.22	12.96	12.04	0.40	0.38	1.05	579.53	637.76	0.91	0.4.1
21	小鋼珠	10.00	9.8	9.91	12.82	6.34	0.13	1.00	8.00	32.16	16.44	1.96	1
22	中鋼珠	10.00	9.7	9.51	12.96	6.61	0.43	3.44	8.00	120.13	57.73	2.08	1
23	大鋼珠	10.00	9.8	9.40	12.82	6.68	1.05	8.40	8.00	300.24	138.12	2.17	1

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Case 2	轉數	Time (water)	time (ball)	水轉數(w)	珠轉數	重量 (g)	體積(cm ³)	密度(g/cm ³)	F(外)	F(內)	J/K	位置
2	Ball 15	10.00	9.26	16.06	6.79	3.91	1.67	0.88	2.09	255.61	368.32	0.69	0.9-1
3	Ball 16	10.00	9.13	14.02	6.88	4.48	0.97	0.59	1.64	194.82	279.43	0.78	0.7-1
4	Ball 13	10.00	9.30	13.75	6.76	4.57	1.20	0.71	1.69	250.57	324.08	0.77	0.8-1
5	Ball 20	10.00	9.15	16.46	6.87	3.82	1.90	0.70	2.71	276.86	330.08	0.84	0.0-7
6	Ball 14	10.00	9.34	13.82	6.75	4.55	1.53	0.82	1.87	316.25	371.09	0.85	0.8-1
7	Ball 3	10.00	9.28	10.89	6.77	5.77	0.50	0.40	1.25	166.45	183.37	0.91	0.0-5
8	Ball 7	10.00	9.33	9.98	6.73	6.30	0.40	0.35	1.14	158.55	158.73	1.00	0.0-6
9	Ball 6	10.00	9.26	11.33	6.79	5.55	0.69	0.45	1.53	212.20	207.18	1.02	0.2-0.7
10	Ball 8	10.00	9.35	9.45	6.72	6.65	0.40	0.38	1.05	176.83	171.60	1.03	0.0-5
11	Ball 9	10.00	9.41	9.47	6.68	6.63	0.40	0.35	1.14	176.08	156.04	1.13	0.0-4
12	Ball 1	10.00	9.13	15.47	6.88	4.06	1.30	0.40	3.25	214.45	189.44	1.13	0.5-0.9
13	Ball 5	10.00	9.37	10.46	6.71	6.01	0.58	0.40	1.45	209.28	179.86	1.16	0.0-6
14	Ball 4	10.00	10.01	9.57	6.28	6.57	0.40	0.32	1.25	172.42	126.08	1.37	0.0-6
15	Ball 11	10.00	9.40	13.66	6.68	4.68	1.45	0.50	2.90	306.78	223.40	1.37	0.7-1
16	Ball 2	10.00	9.26	跑到中央	6.79	#VALUE!	1.50	0.53	2.83	#VALUE!	244.01	#####	0.00
17	Ball 10	10.00	9.27	跑到中央	6.78	#VALUE!	0.32	0.30	1.07	#VALUE!	137.82	#####	0.05
18	Ball 12	10.00	9.02	跑到中央	6.97	#VALUE!	1.26	0.60	2.10	#VALUE!	291.14	#####	0.00
19	Ball 17	10.00	9.14	跑到中央	6.87	#VALUE!	0.76	0.72	1.06	#VALUE!	340.25	#####	0.07
20	Ball 18	10.00	9.25	跑到中央	6.79	#VALUE!	1.00	0.80	1.25	#VALUE!	369.12	#####	0.00
21	Ball 19	10.00	9.10	跑到中央	6.90	#VALUE!	0.85	0.61	1.39	#VALUE!	290.81	#####	0.00

2.浮體

保利龍球 2

質量：0.14 g

保利龍珠 1

質量：0.07 g 密度：0.044 (珠子的)

項目	水轉速 (W _水)	珠轉速 (W _珠)	F (向外) F (向內)	方 向
1	9.65	14.68	2.31	向外移
2	10.01	13.15	1.73	向外移
3	9.72	12.57	1.67	向外移
4	9.82	11.86	1.46	向外移
5	9.91	11.32	1.30	向外移
6	9.84	10.67	1.18	向外移
7	9.76	7.82	0.64	向內移
8	9.54	6.70	0.49	向內移
1	10.44	15.56	2.22	向 外
2	9.97	14.78	2.20	向 外
3	9.73	12.38	1.62	向 外
4	9.38	11.77	1.57	向 外
5	9.61	11.14	1.34	向 外
6	9.67	10.43	1.14	向 外
7	9.82	6.61	0.45	向 內
8	9.71	6.52	0.45	向 內

保利龍球 2
質量：0.14gs

保利龍球 1
質量：0.7g 密度：0.044

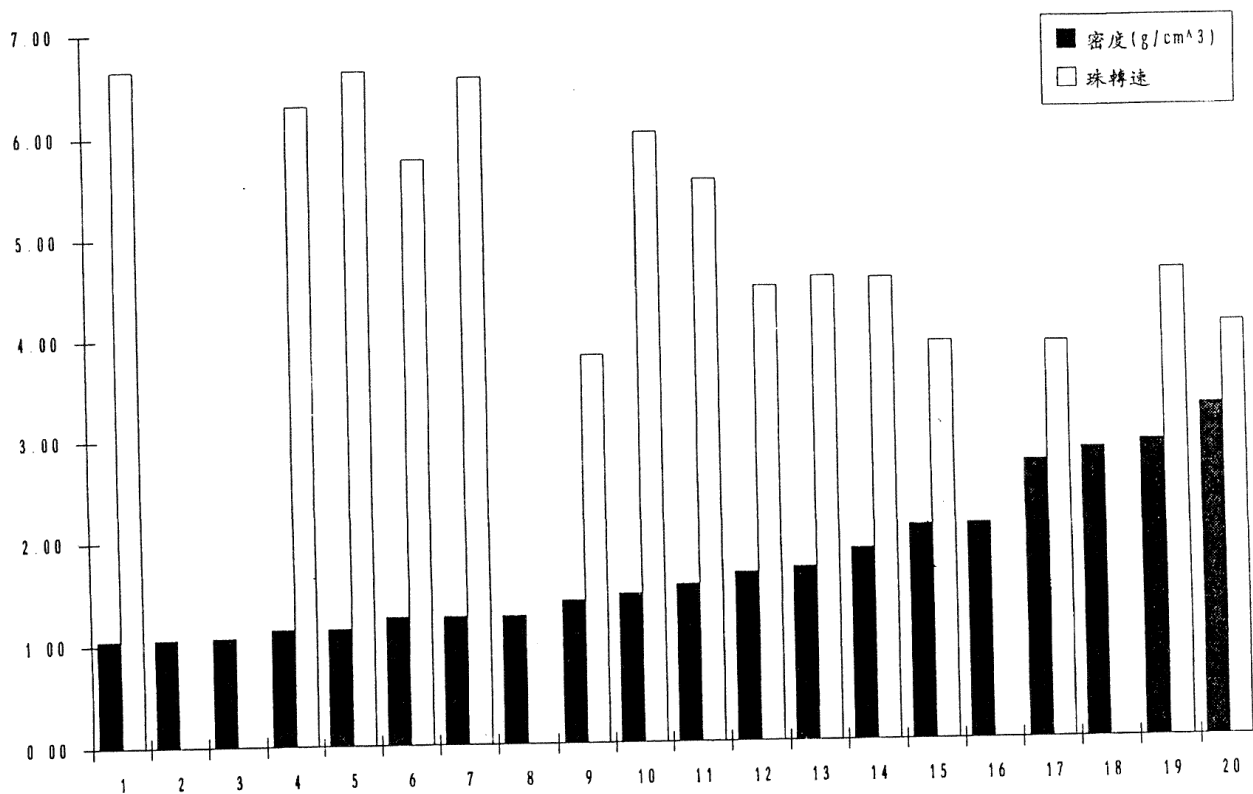
浮體	水轉速	物轉速	重量	體積	密度	形狀	F(外) F(內)
保利龍球(1)	12.1	8.6	0.07	1.60	0.044	球	0.51
保利龍球(2)	12.1	9.0	0.14	3.10	0.045	球	0.55
保利龍小塊	12.0	11.4	0.02	0.42	0.048		0.90
木塊1	12.1	9.4	0.72	1.20	0.60		0.60
木塊2	12.0	9.8	1.18	1.90	0.62		0.67
保利龍球(1)	6.8	6.0	0.01	1.60	0.044	球	0.78
保利龍球(2)	6.9	6.3	0.14	3.10	0.045	球	0.83
保利龍小塊	6.9	6.7	0.02	0.42	0.048		0.94
木塊1	6.8	6.2	0.72	1.20	0.60		0.83
木塊2	6.9	6.4	1.18	1.90	0.62		0.86

(二)附錄 2

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
Case 1	轉數	Time (water)	time (ball)	水轉速(w)	珠轉速	重量(g)	體積(cm³)	密度(g/cm³)	F(外)	F(內)	J/K	位置	
2	Ball 14	10 00	5 20	8 46	12 08	7 43	1 53	0 82	1 87	8 45	11 97	0 71	0 8-1
3	Ball 15	10 00	5 10	8 47	12 32	7 42	1 67	0 80	2 09	9 19	12 14	0 76	0 8-1
4	Ball 20	10 00	5 30	9 78	11 86	6 42	1 90	0 70	2 71	7 84	9 84	0 80	0 9-1
5	Ball 12	10 00	5 30	8 37	11 86	7 51	1 26	0 60	2 10	7 10	8 43	0 84	0 8-1
6	Ball 11	10 00	5 20	9 55	12 08	6 58	1 45	0 50	2 90	6 28	7 39	0 86	0 9-1
7	Ball 2	10 00	5 30	9 40	11 86	6 68	1 50	0 53	2 83	6 70	7 45	0 90	0 9-1
8	Ball 1	10 00	5 10	9 10	12 32	6 90	1 30	0 40	3 25	6 20	6 07	1 02	0 9-1
9	小鋼珠	10 00	5 10	10 46	12 32	6 01	0 13	1 00	8 00	28 85	15 18	1 90	1 00
10	中鋼珠	10 00	5 10	10 35	12 32	6 07	0 43	3 44	8 00	101 49	52 21	1 94	1 00
11	大鋼珠	10 00	5 20	10 30	12 08	6 10	1 05	8 40	8 00	249 90	122 64	2 04	1 00

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
Case 3	轉數	Time (水) (20 轉)	time (ball)	水轉速(w)	珠轉速	重量(g)	體積(cm³)	密度(g/cm³)	F(外)	F(內)	J/K	位置	
2	球 20	10	9 8	7 76	12 82	8 10	0 71	0 5	1 42	465 47	822 12	0 57	0 9-1
3	球 14	10	9 8	8 85	12 82	7 10	1 51	0 8	1 89	761 11	#####	0 58	1
4	球 12	10	9 8	7 54	12 82	8 33	0 85	0 61	1 39	590 25	#####	0 59	0 8-1
5	球 9	10	9 7	7 95	12 96	7 90	1 20	0 71	1 69	749 56	#####	0 63	1
6	球 10	10	9 7	8 82	12 96	7 12	1 67	0 8	2 09	847 50	#####	0 63	1
7	球 8	10	9 7	8 8	12 96	7 14	1 26	0 6	2 10	642 34	#####	0 64	1
8	球 13	10	9 8	7 22	12 82	8 70	0 69	0 45	1 53	522 56	739 91	0 71	1
9	球 19	10	9 8	9 1	12 82	6 90	1 52	0 62	2 45	724 64	#####	0 71	1
10	球 15	10	9 7	7 79	12 96	8 07	0 98	0 53	1 85	637 55	889 51	0 72	1
11	球 16	10	9 8	9 6	12 82	6 54	1 93	0 7	2 76	826 75	#####	0 72	1
12	球 18	10	9 8	9 73	12 82	6 46	1 50	0 5	3 00	625 50	822 12	0 76	1
13	球 1	10	9 70	9 37	12 96	6 71	1 30	0 40	3 25	584 55	671 33	0 87	1 00
14	小鋼珠	10 00	9 8	9 91	12 82	6 34	0 13	1 00	8 00	32 16	16 44	1 96	1
15	中鋼珠	10 00	9 7	9 51	12 96	6 61	0 43	3 44	8 00	120 13	57 73	2 08	1
16	大鋼珠	10 00	9 8	9 40	12 82	6 68	1 05	8 40	8 00	300 24	138 12	2 17	1

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
Case 4	轉數	Time (water)	time (ball)	水轉速	珠轉速	重量(g)	體積(cm³)	密度(g/cm³)	F(外)	F(內)	J/K	位置	
2	球 10	10	8 70	16 5	7 22	3 81	1 67	0 8	2 09	#####	417 26	0 58	0 8-1
3	球 9	10	8 80	14 85	7 14	4 23	1 20	0 71	1 69	#####	361 95	0 59	0 8-1
4	球 19	10	9 30	18 4	6 76	3 41	1 52	0 62	2 45	#####	283 00	0 63	0 9-1
5	球 8	10	8 90	15 77	7 06	3 98	1 26	0 6	2 10	#####	299 04	0 67	0 8-1
6	球 18	10	9 00	18	6 98	3 49	1 50	0 5	3 00	#####	243 69	0 75	0 9-1
7	球 17	10	8 90	10 71	7 06	5 87	0 60	0 55	1 09	#####	274 12	0 75	0 4-0 7
8	球 16	10	8 90	16 8	7 06	3 74	1 93	0 7	2 76	#####	348 86	0 77	0 9-1
9	球 14	10	8 95	13 7	7 02	4 59	1 51	0 8	1 89	#####	394 28	0 81	0 6-0 8
10	球 13	10	8 70	11 84	7 22	5 31	0 69	0 45	1 53	#####	234 71	0 83	0 5-0 8
11	球 20	10	9 00	11 73	6 98	5 36	0 71	0 5	1 42	#####	243 69	0 84	0 6-0 8
12	球 6	10	8 80	10 1	7 14	6 22	0 40	0 35	1 14	#####	178 43	0 87	0 2-0 5
13	球 1	10	8 60	16 50	7 31	3 81	1 30	0 40	3 25	#####	213 51	0 88	0 8-1
14	球 11	10	8 70	9 3	7 22	6 76	0 76	0 72	1 06	#####	375 54	0 92	0 7
15	球 15	10	8 50	12	7 39	5 24	0 98	0 53	1 85	#####	289 60	0 93	0 7-0 8
16	球 2	10	8 70	9 73	7 22	6 46	0 50	0 4	1 25	#####	208 63	1 00	0 0-4
17	球 3	10	8 60	跑到中央	7 31	#VALLE!	0 40	0 32	1 25	#####	170 81	#####	0 0-4
18	球 4	10	8 60	跑到中央	7 31	#VALLE!	0 40	0 35	1 14	#####	186 82	#####	0 0-4
19	球 5	10	8 60	跑到中央	7 31	#VALLE!	0 40	0 38	1 05	#####	202 84	#####	0 0-5
20	球 7	10	8 70	跑到中央	7 22	#VALLE!	0 32	0 3	1 07	#####	156 47	#####	0 0-5
21	球 12	10	8 70	跑到中央	7 22	#VALLE!	0 85	0 61	1 39	#####	318 16	#####	0 0-2



評語

本作品以旋轉裝置驅動水缸中的水旋轉形成液面之傾斜，觀測水中之物體受壓力差（即向心力之來源）與物體旋轉所受之離心力間的關係，說明該物體會向中心靠近或向邊緣移動的現象。

其實驗題材相當有趣，所設計之實驗裝置可清楚的達成其觀測目的。現象之分析雖有可再改進之處，但對物理的探討頗為深入。