

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

040119

高雄市立高雄女子高級中學

指導老師姓名

廖寶瑾

陳建宏

作者姓名

賴薇羽

張維玲

王靜嫻

賴宜彥

## 一、摘要

本實驗主要探討水滴自由落體的過程，首先我們嘗試設計不同方法測量自由落體水滴速度，並試著改進設計實驗，以達較理想結果。我們發現水滴落下加速度穩定但逐漸變小，但落下距離超過一公尺後，加速度變動大，針對此點，我們進一步研究。

我們以直接照相的方式，探究水滴形變，看一看形變的過程，發現有規律性，並對距離的規律性與時間的規律性做探討；發現形變果然影響加速度。我們並翻查理論資料，嘗試解釋實驗並比對異同。我們模擬水滴振動做研究，比較結果，再嘗試在水滴中加入界面活性劑降低表面張力，研究表面張力的影響。

我們考慮水滴“形變比率” = 橢圓水滴垂直長度/水平寬度，發現以形變比分析水滴確實能發現更多水滴特性，真是一有趣的發現。

最後我們提出實驗改進的方向，並對實驗過程一些疑點，嘗試研究發現。

## 二、實驗動機

高一時在學校的科學研究社物理組研究“水霧降溫”實驗，利用電扇吹送水霧微細水滴降低空氣的溫度，後來 SARS 橫行，大家對飄浮在空氣中的細微小水滴頗為害怕，怕它會攜帶病毒，因此實驗暫時停擺，但也埋下了對小水滴興趣的種子。難得的下雨天中，看見窗外

的小水滴一滴滴的落下，不禁好奇從飄浮雲中的微細水滴，一直到雨滴落下的過程中是如何運動的呢？於是就引起我們的興趣，作進一步的相關探討。

### 三、實驗目的

1. 設計測量雨滴速度實驗並改進實驗。
2. 測量落下過程中小水滴的速度與加速度。
3. 了解自由落體小水滴形變與振動研究。

### 四、實驗原理

1. 水滴落下的運動方程式： $mg-f=ma$

重力( $mg$ )-摩擦力( $f$ )= $ma$ ， $f$  為空氣阻力有關。

根據流體的斯托克斯定律(Stokes' law) 固體圓球的空氣阻力

$$f = 6\pi\eta rv \quad \eta \text{ 空氣黏滯係數} \quad r \text{ 為圓球半徑} \quad v \text{ 為圓球速度}$$

但小水滴不是固體圓球會形變，故其阻力會更複雜

\*公式參考資料：高中物質科學物理篇教師手冊上冊第四章

2. 自由落體的速度、加速度計算:
  - a. 雨絲速度：利用雨絲的長度 $\div$ 快門時間 = 雨絲速度
  - b. 水滴速度：兩光電閘的距離 $\div$ 時間間距=水滴平均速度
  - c. 水滴加速度：水滴平均速度 $\div$ 時間間距=水滴平均加速度
3. 水滴振動公式

$$f = \left( \frac{2\sigma}{\pi^2 \rho_w a_0^3} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \sigma \text{ 表面張力} \quad \rho_w \text{ 水的密度} \quad a_0 \text{ 水珠半徑}$$

\*公式參考資料：Pruppacher, H. R., and Pitter, R. L., 1971: J. Atmos. Sci., 28, 86

## 五、研究方法與過程

“實驗一”中，我們測量數位相機拍攝的雨絲路徑長度，並控制快門速度，進一步計算自由落體水滴速度。結果實驗數據顯示誤差大，於是我們便思考另一實驗方法-----“實驗二”。

“實驗二”中，我們使用舊高中課程標準的實驗器材“光電計時器”，藉由光電管測量水滴飛行時間，我們採用光電計時器的五段計時功能。令人訝異的是，數據不合理，測不準。於是我們就改良光電計時系統，我們將光電管拆解，從光電管的接收器兩端接電線，電線拉至電壓計，電壓計再連接到個人電腦上，當光電管有訊號時，就會傳遞到電腦，借由電腦讀出訊號，進一步分析水滴自由落的時間。

“實驗三”中，得到精確的結果，並發現水滴落下時的加速度呈現大大小小的交替變化。為了進一步研究個中原因，我們進行“實驗四”。

“實驗四”中，我們利用閃光燈拍攝飛行中小水滴的瞬間靜止照片，發現水滴做某些規律形變，並與翻查的書籍、論文，加以比較。

“實驗五”中，我們設計實驗，模擬飛行中水滴的振動，測量振動周期。

“實驗六”中，我們將小水滴加界面活性劑，減少表面張力，重複

實驗四與實驗五的過程。發現表面張力對自由落體水滴有影響。

### 實驗一 由雨絲長度測量雨滴速度

由於小水滴是透明的，拍照頗不易，若使用閃光燈只能拍攝瞬間靜止的小水滴，無法拍照出雨絲路徑長度，故必需使用固定光源。我們自行製作了強力投射燈具，加強水滴的反射光，陽光強烈時，便採用直接的陽光照射小水滴。

1. 實驗器材：點滴瓶、長尺、數位像機、長竹竿

圖為滴水裝置



2. 實驗目的：測出雨絲在落下過程中不同高度的運動狀態
3. 實驗步驟：
  - a.點滴瓶中裝入適量的水並轉開開關使水順利留下
  - b.數位像機拍下水滴落下過程中的圖像

c. 改變水滴滴落距離再重複以上步驟

4. 控制變因：水滴大小 拍攝者與水滴的距離

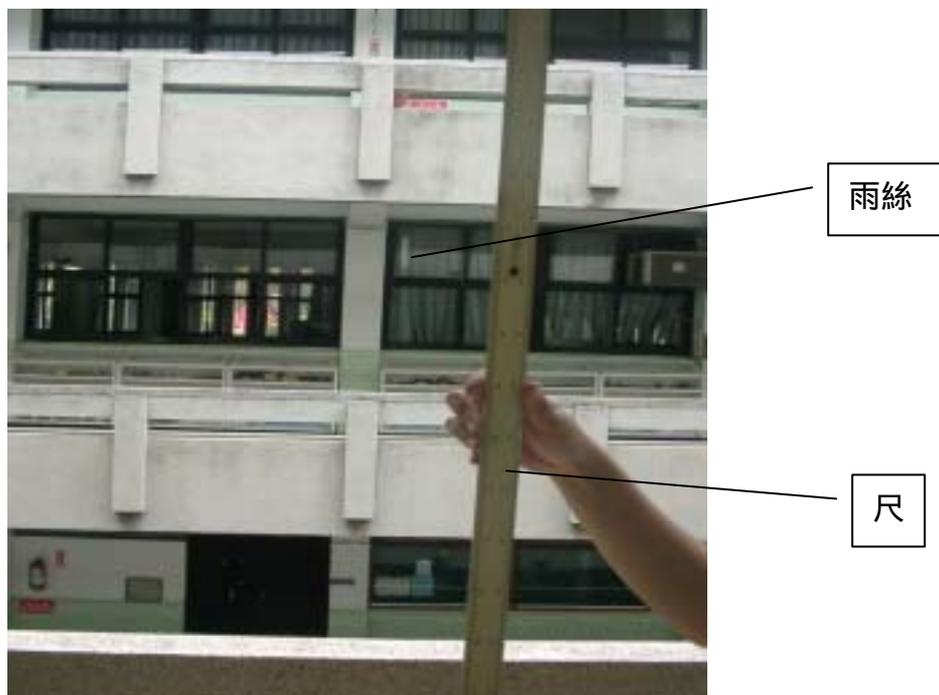
操縱變因：水滴落下高度

5. 分析過程：

a. 將照片檔傳入電腦

b. 用 photo impact 程式，沿著雨絲的外觀選取，並將其並列於長尺，

看出雨絲的長度將其紀錄於 excel



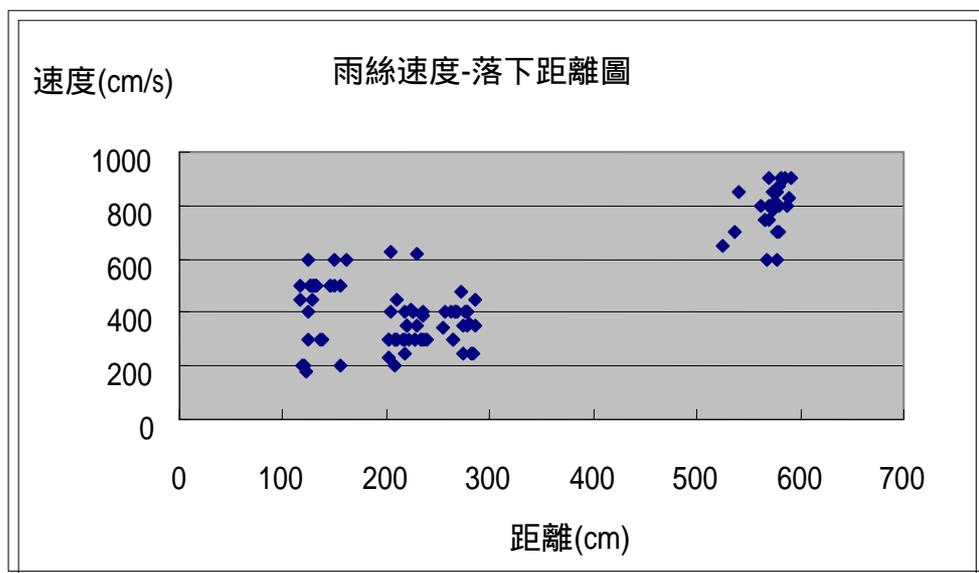
c. 利用雨絲的長度 ÷ 快門時間 = 雨絲速度

d. 將數據製成圖表

6. 實驗數據與結果：

a. 下圖每一數據點代表一張照片所分析，可看出落下距離愈大，水滴速度增加的趨勢。但同一距離的數據點卻有相差 300 至 400 公分/秒

的大小，顯示結果為---誤差大，故我們必需尋求改進。



6+

## 實驗二 光電計時器的改良

一般的光電計時器是成套的，含有一組光電管，一個光電顯示盒。

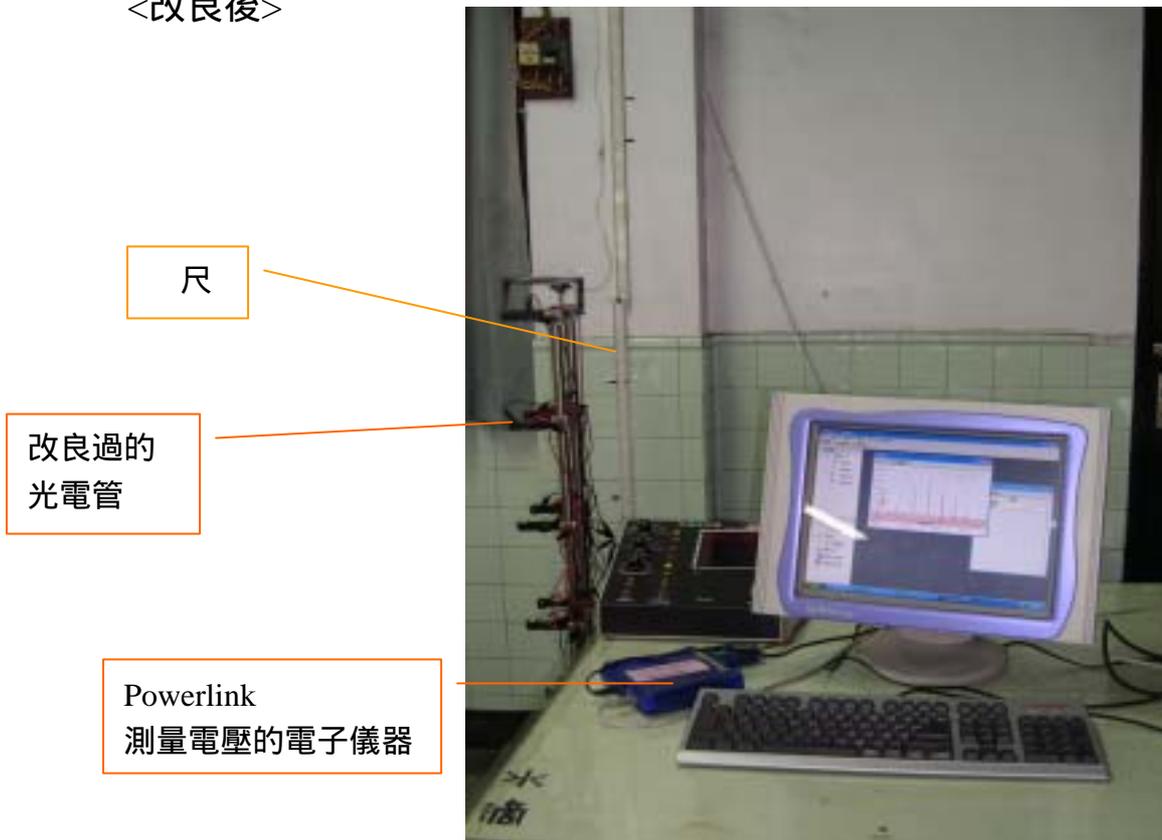
我們做如下的改良，將光電管的接收端兩端接出接線，連接到一組測量電壓的電子器材，再將電子器材連接到個人電腦，電腦讀電壓變化，並由電腦軟體顯示出電壓與時間關係，由電壓變化可去取得時間，得到物體在兩個光電管間的飛行時間。

1. 實驗器材：改良過的光電計時器、長尺、電腦、點滴瓶、powerlink
2. 實驗目的：精準的測出落下過程所需的時間，  
以算出速度。

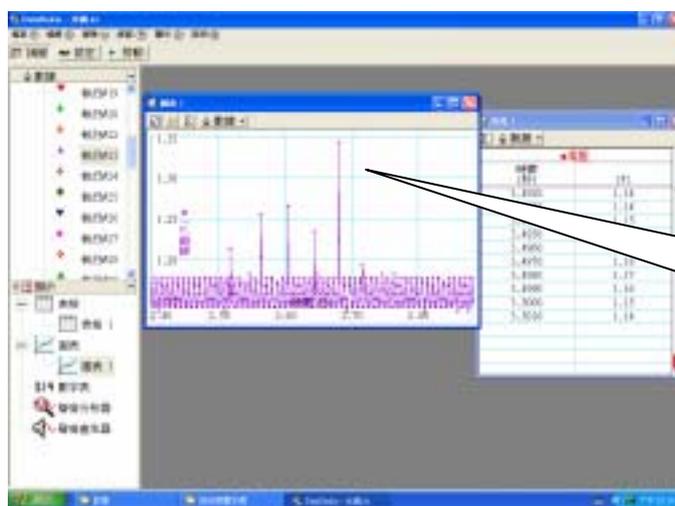
<改良前>



<改良後>



3. 改良過程：在光電閘的接收器兩端接電線，  
以 powerlink (Pasport 公司)量電壓變化，電腦分析數據。
4. 實驗步驟：
  - a.裝適量的水入點滴瓶中      b.打開光電計時器等相關設備電源
  - c.轉開管線開關使水順利留下      d.觀察電腦螢幕上電壓的變化
5. 控制變因：光電閘之間的距離  
操縱變因：水滴大小、距離光電閘的高度
6. 分析過程：利用 data studio 程式顯示電壓的改變，得知落下的時間，以各光電閘間的距離÷通過時間差=落下的速度

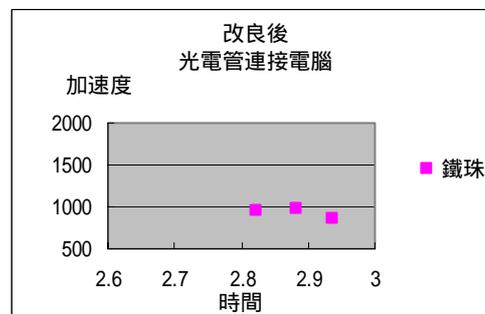
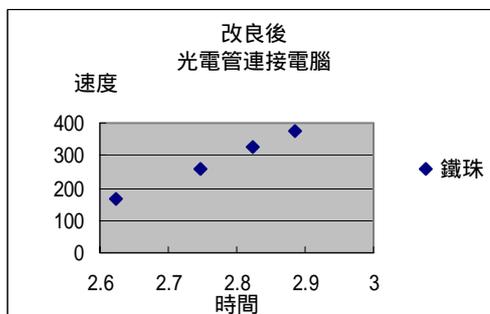
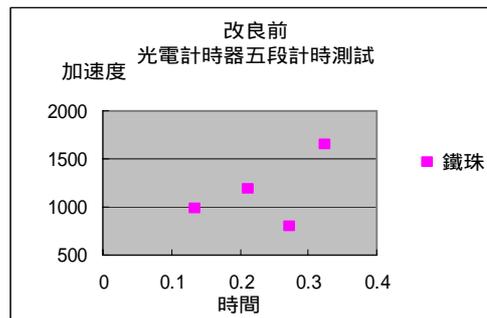
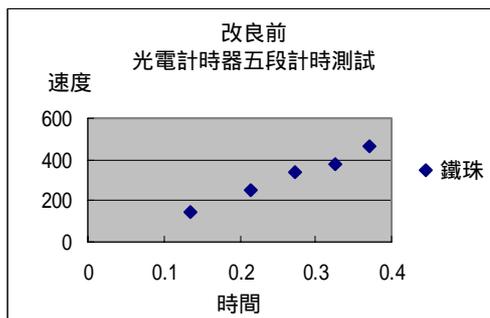


水滴經過 5 個光電閘時的電壓

7. 實驗數據與結果：測出的加速度值趨向穩定。
8. 改良前後的光電計時器比較：  
我們使用自由落體的鐵珠來比較改良前後的光電計時器，鐵珠自由落下時，加速度約為  $9.8 \text{ 米/秒}^2$ 。實驗結果顯示，改良前所得加速度並不穩定也不準確，改良後就精準了。見下面圖與表。

鐵珠	改良前的光電計時器			
距離(cm)	時間間格(s)	時間(s)	平均速度(cm/s)	加速度(cm/s <sup>2</sup> )
20	0.1354	0.1354	147.7	
20	0.0788	0.2142	253.8	990.6
20	0.0596	0.2738	335.5	1181
20	0.0526	0.3264	380.2	796.0
20	0.0435	0.3699	459.7	1655

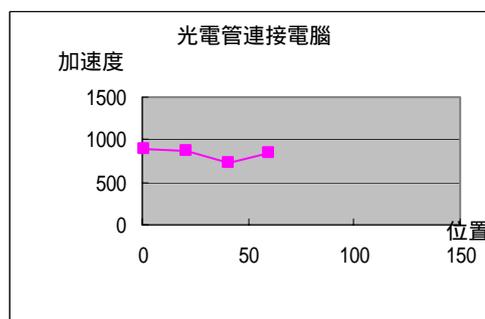
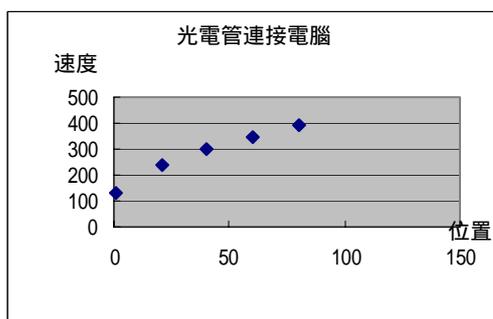
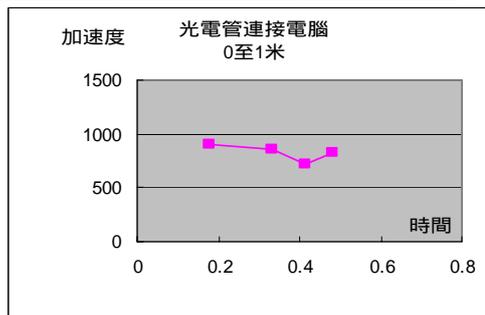
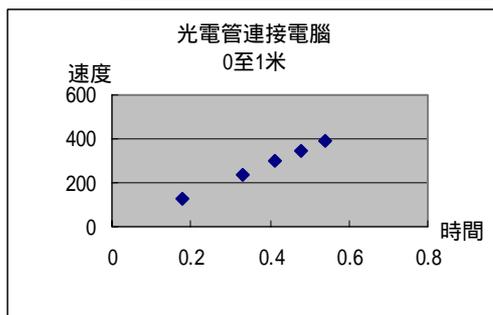
鐵珠	改良後的光電計時器			
距離(cm)	時間(s)	時間間距(s)	平均速度(cm/s)	加速度(cm/s <sup>2</sup> )
	2.624			
20	2.746	0.122	163.9	
20	2.823	0.077	259.7	962.8
20	2.884	0.061	327.8	987.3
20	2.937	0.053	377.3	868.2



### 實驗三 改良光電計時器測量水滴速度

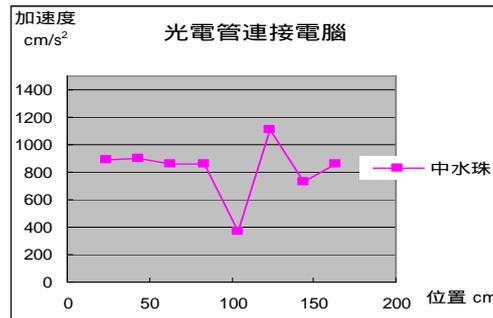
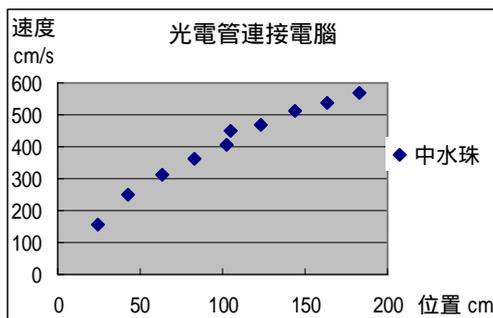
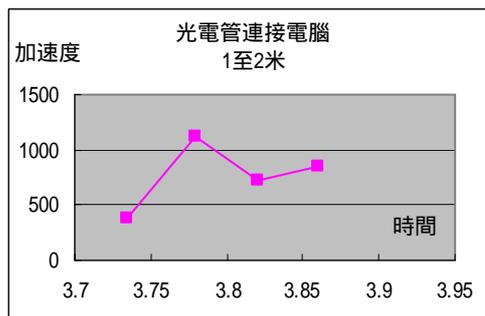
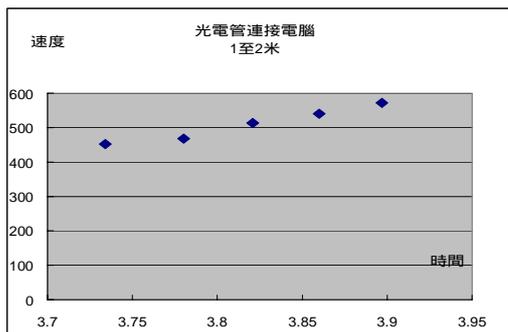
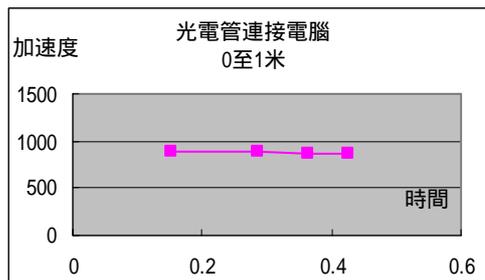
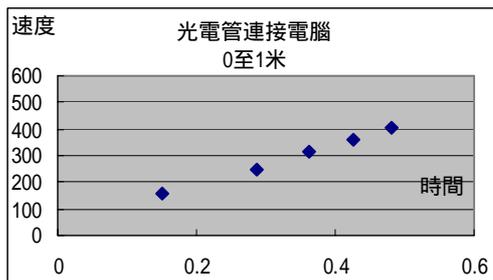
1. 實驗器材：光電計時器、點滴瓶、長尺
2. 實驗步驟：
  - a. 裝適量水入點滴瓶中，並轉開開關使水順利留下
  - b. 打開改良光電計時器測速度
3. 實驗目的：了解水滴速度
4. 實驗設計：改良光電計時器算出小水滴的速度
5. 實驗數據與結果：
  - a. 本實驗有小水珠、中水珠、大水珠，其體積為 0.02、0.05、0.1 ml。我們採用六個光電管偵測，每兩個光電管的距離約 20 公分，1 次測量 1 公尺的範圍。其中小水珠只做 0 至 1 米的自由落下，因為小水珠太小，落下距離超過一米時，光電管偵測不易。中水珠、大水珠則分兩次，每次測量一米，共量 2 米的距離。
  - b. 結果顯示在 0 到 1 米間，加速度穩定且逐漸減少，顯示因為空氣阻力逐漸增加，故加速度遞減。1 到 2 米過程中，加速度呈現不穩定的上下變化(見下面表與圖)。為了探究此一原因，我們再設計”實驗四”，探究原因。

小水珠	小水珠的運動資料分析				
位置(cm)	光電管距離(cm)	時間(s)	時間間距(s)	平均速度(cm/s)	加速度( $\text{cm/s}^2$ )
1		0.18			
21	20	0.332	0.152	131.5	
40.4	19.4	0.414	0.082	236.5	897.4
60.2	19.8	0.48	0.066	300.0	856.9
80.2	20	0.538	0.058	344.8	723.0
100.1	19.9	0.589	0.051	390.1	832.4



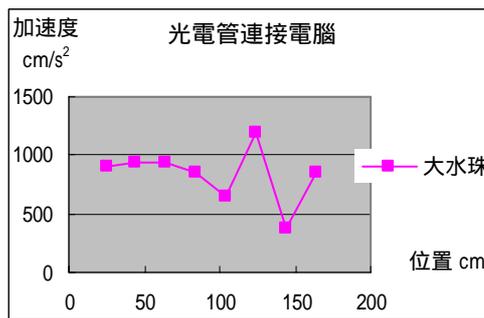
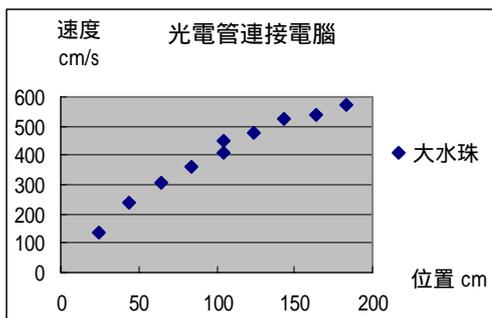
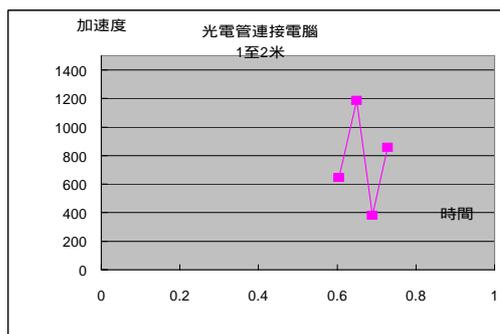
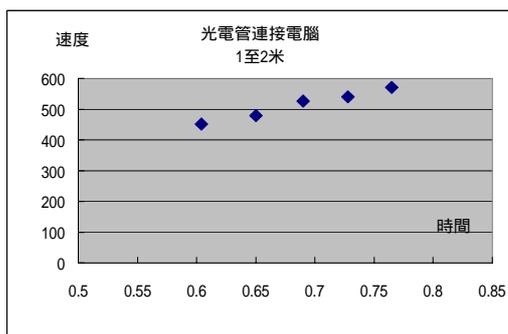
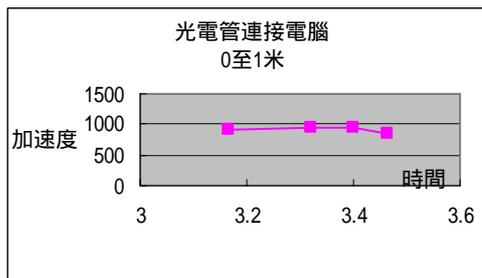
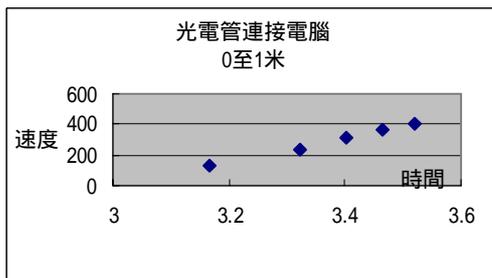
中水珠	中水珠的運動資料分析				
位置(cm)	光電管距離(cm)	時間(s)	時間間距(s)	平均速度(cm/s)	加速度( $\text{cm/s}^2$ )
3		0.152			
23.8	20.8	0.286	0.134	155.2	
43	19.2	0.363	0.077	249.3	892.1
63	20	0.427	0.064	312.5	895.7
83	20	0.482	0.055	363.6	859.4
103	20	0.531	0.049	408.1	856.2
		3.734			
104.3	20.8	3.78	0.046	452.1	
123.5	19.2	3.821	0.041	468.2	370.5
143.5	20	3.86	0.039	512.8	1113
163.5	20	3.897	0.037	540.5	729.4

183.5	20	3.932	0.035	571.4	858.0
-------	----	-------	-------	-------	-------



大水珠	大水珠的運動資料分析				
位置(cm)	光電管距離(cm)	時間(s)	時間間距(s)	平均速度(cm/s)	加速度(cm/s <sup>2</sup> )
4.1		3.165			
24.9	20.8	3.321	0.156	133.3	
44.1	19.2	3.401	0.08	240.0	903.9
64.1	20	3.466	0.065	307.6	933.6
84.1	20	3.521	0.055	363.6	932.4
104.1	20	3.57	0.049	408.1	856.2
		0.604			
104.3	20.8	0.65	0.046	452.1	
123.5	19.2	0.69	0.04	480.0	647.1
143.5	20	0.728	0.038	526.3	1187
163.5	20	0.765	0.037	540.5	379.3

183.5	20	0.8	0.035	571.4	858.0
-------	----	-----	-------	-------	-------



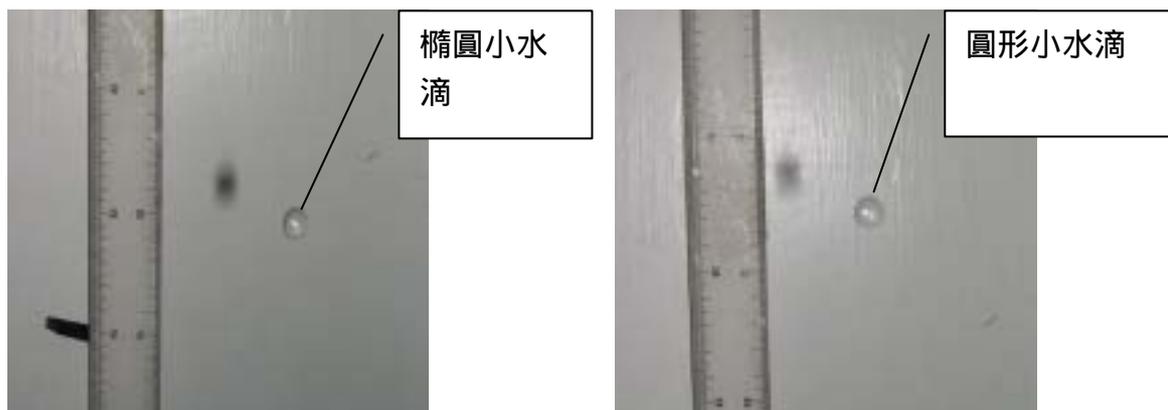
### 實驗四 水滴落下過程形變分析

為了研究水滴自由落下的過程，我們拍攝水滴瞬間影像，看看水滴的形狀如何改變。因為沒有高級器材可以定點定位拍攝水滴，我們讓水滴連續穩定的滴落，再用數位相機閃光燈照相，每拍十張約有一張有水滴出現，總共拍了上萬張。

1. 實驗器材：點滴瓶、長尺、數位像機、角架、管徑不同的滴管



2. 實驗目的：了解小水滴落下過程中的形變及落下距離
3. 實驗步驟：
  - a. 點滴瓶中裝入適量的水，並轉開開關使水順利留下
  - b. 數位像機拍下水滴落下過程中的圖像
  - c. 換不同的管徑重複以上步驟
4. 分析過程：
  - a. 將照片檔傳入電腦
  - b. 紀錄每張照片中水滴的形狀、落下的距離
  - c. 數據製成圖表，分析其在特定距離的形變



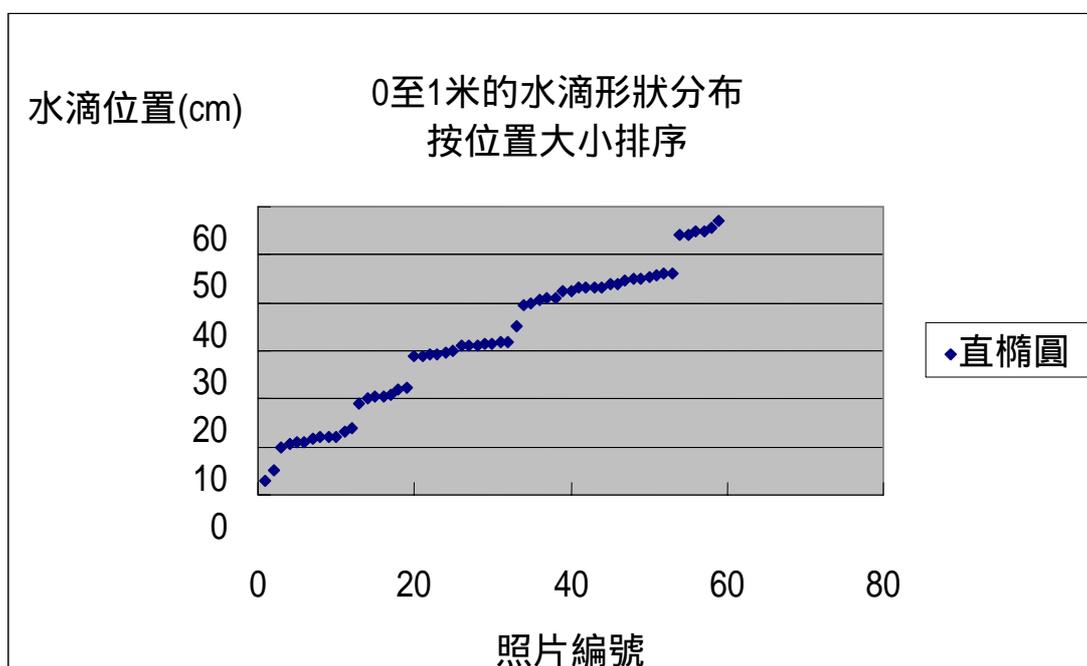
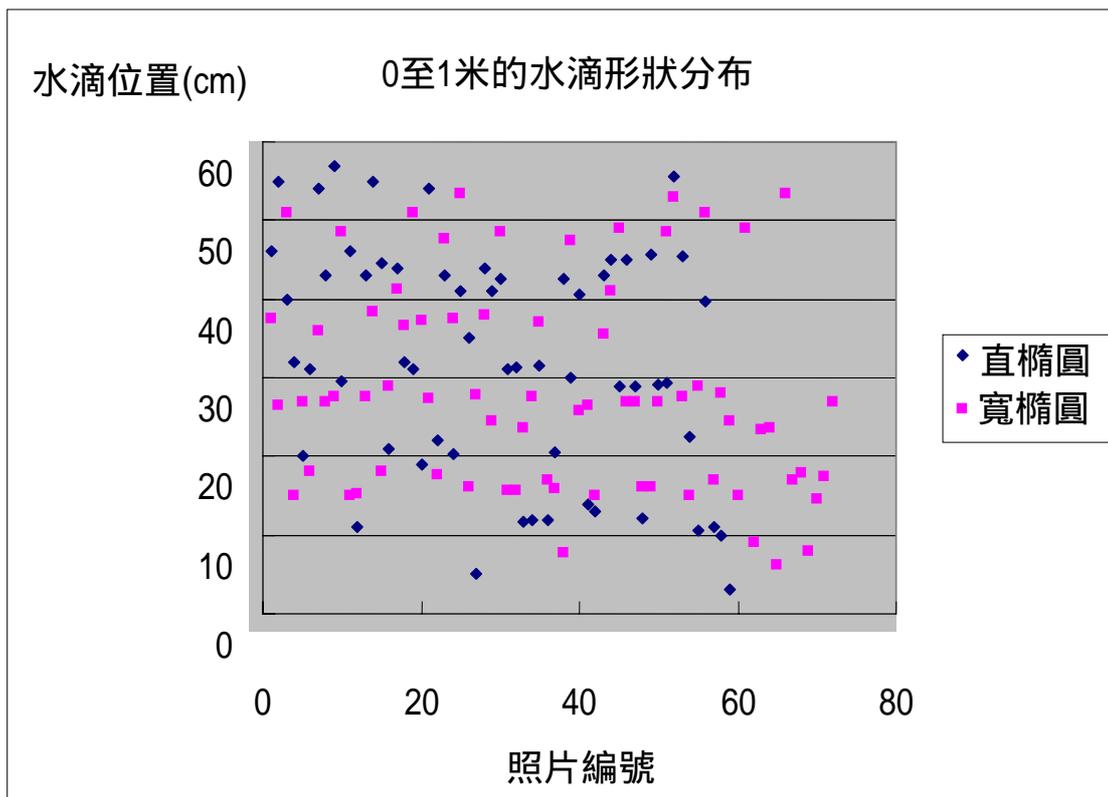
### 5. 實驗數據與結果：

- a. 我們將拍出的水滴分成直橢圓與橫橢圓，前者水滴垂直高度為橢圓長軸，是瘦長橢圓。後者水滴垂直高度為橢圓短軸，是矮胖橢圓。
- b. 每個水滴的位置(即垂直落下的距離)均紀錄下來，再畫位置分布圖，觀察發現有周期性的變化。
- c. 為了看清楚 0 至 1 米不同形狀水滴圖的周期性，我們將位置排序，圖形具有階梯狀分布，如此可估算周期性，就距離看約是 10 公分左右，再進一步引用實驗三所得水滴速度，可計算時間周期約 0.05 至 0.07 秒左右。見下面圖表。

0 至 1 米不同形狀水滴的位置(公分)							
照片編號	寬橢圓	直橢圓	圓	照片編號	寬橢圓	直橢圓	圓
1	37.5	46	29	37	15.9	20.5	
2	26.5	55	23.5	38	7.8	42.5	
3	51	40	23.5	39	47.5	30	
4	15	32	53	40	25.9	40.5	
5	27	20	53.5	41	26.5	14	
6	18	31	6	42	15	13	

7	36	54	53	43	35.5	43
8	27	43	14	44	41	45
9	27.5	57	24	45	49	29
10	48.5	29.5	14.5	46	27	45
11	15	46	19	47	27	29
12	15.2	11	28	48	16	12.1
13	27.6	43	23.5	49	16	45.6
14	38.3	55	7	50	27	29.2
15	18	44.5	15.9	51	48.5	29.4
16	29	21	45.4	52	53	55.5
17	41.2	44	54.5	53	27.5	45.5
18	36.6	32	13.8	54	15	22.5
19	51	31	45	55	29	10.6
20	37.3	19	12.8	56	51	39.6
21	27.3	54	24.2	57	17	11
22	17.6	22	11	58	28	10
23	47.6	43	51	59	24.5	3
24	37.6	20.4	51.5	60	15.1	
25	53.4	41	51	61	48.9	
26	16	35	23	62	9.1	
27	27.9	5	48.5	63	23.4	
28	37.9	44		64	23.7	
29	24.4	41		65	6.2	
30	48.5	42.5		66	53.4	
31	15.7	31		67	16.9	
32	15.6	31.3		68	17.8	
33	23.5	11.6		69	8	
34	27.5	12		70	14.6	
35	37	31.6		71	17.5	
36	17	12		72	27	

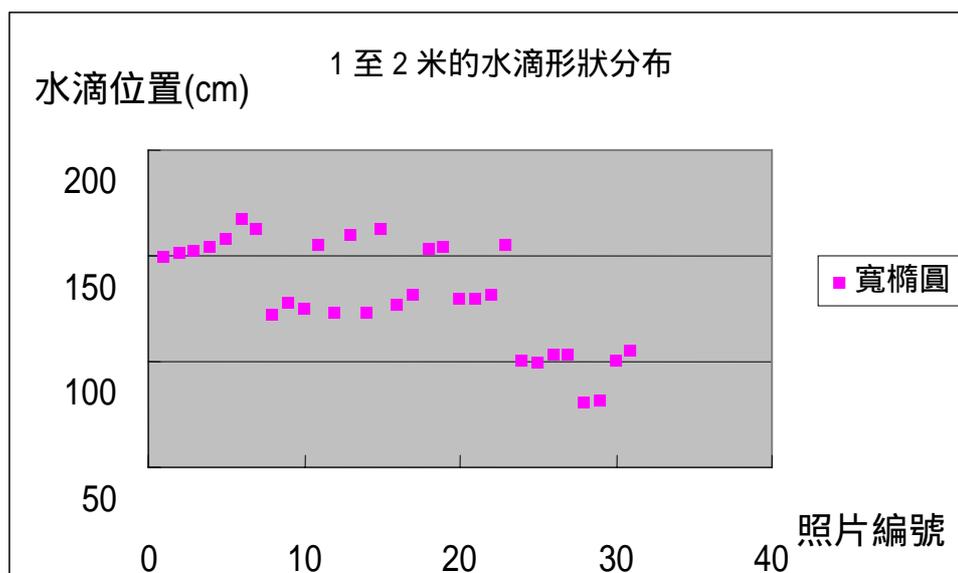
0 至 1 米 水滴形變周期估計					
直橢圓出現位置(公分)	12	21	31	43	56
間隔距離(公分)		9	10	12	13
估計平均速度(公分/秒)		120	160	200	260
間隔時間(秒)		0.075	0.0625	0.06	0.05

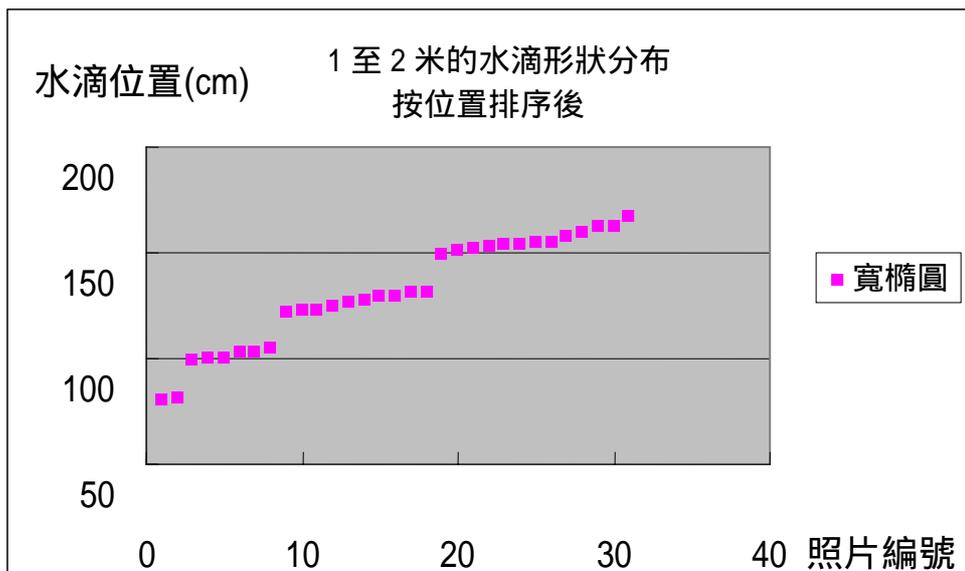


- d. 為了看清楚 1 至 2 米不同形狀水滴圖的周期性，我們將位置排序，圖形具有階梯狀分布，如此可估算周期性，就距離看約是

25 公分左右，再進一步引用實驗三所得水滴速度，可計算時間周期約 0.05 至 0.07 秒左右。見下面圖表。

1 至 2 米不同形狀水滴的位置 (公分)		
寬橢圓		
149.5	155	131
151.2	123	154.3
151.5	159	100
154	123	99
157.2	162.5	103.2
167	126.5	102.5
162	131.5	80.2
121.5	152.5	80.7
127	153.8	100
124.8	129	105
	129.2	





寬橢圓出現位置(公分)	80	105	130	160
間隔距離(公分)		25	25	30
估計平均速度(公分/秒)		380	460	515
間隔時間(秒)		0.0657	0.0543	0.0582

- e. 我們由前兩點可看出，0 至 1 米與 1 至 2 米水滴的時間周期均約 0.05 至 0.07 秒左右。我們將實驗原理中的公式引入，計算

理論值， $f = \left( \frac{2\sigma}{\pi^2 \rho_w a_0^3} \right)^{\frac{1}{2}}$  可得 周期  $T=1/f=0.029$  秒。

$\sigma$  表面張力=0.0727 牛頓/米       $\rho_w$  水的密度=1000 公斤/米<sup>3</sup>

$a_0$  水珠半徑=0.0023 米 (由水滴體積推得)

我們由實驗可看出，落下距離愈大，水滴速度愈大，形變周期有逐漸愈小，會愈接近理論值。而我們引入的振動公式是在達終端速度平衡時的周期公式。

- f. 我們由距離周期也可看出，0 至 1 米時距離周期約 10 公分，我

們的光電計時器的光電管間隔距離約 20 公分，所以我們實驗三結果，無法看出水滴形變對速度的影響。1 至 2 米時距離周期約 25 公分，所以我們實驗三結果，可明顯看出水滴形變對速度的影響。由本實驗可看出，在位置 120 公分與 160 公分為寬橢圓階段，對照實驗三，即為加速度小的位置。

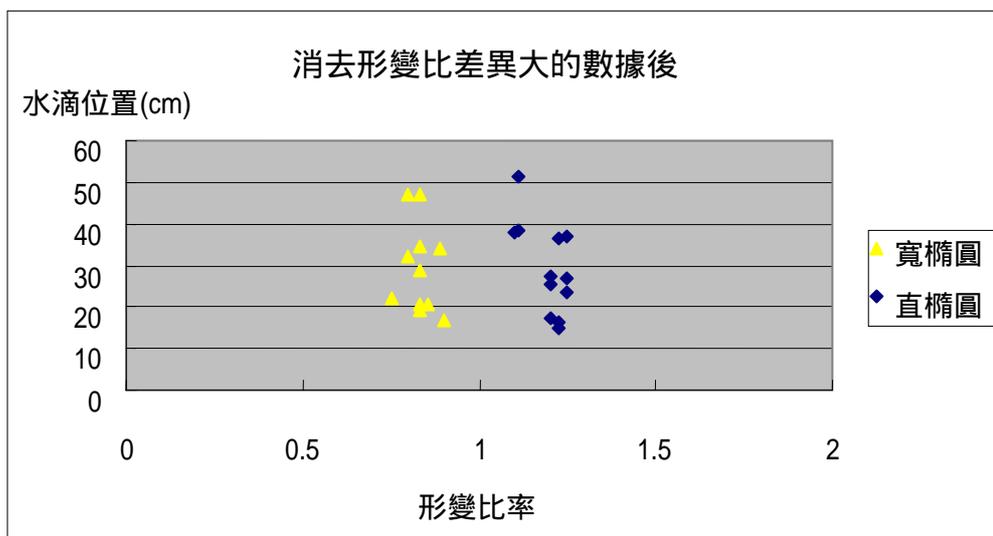
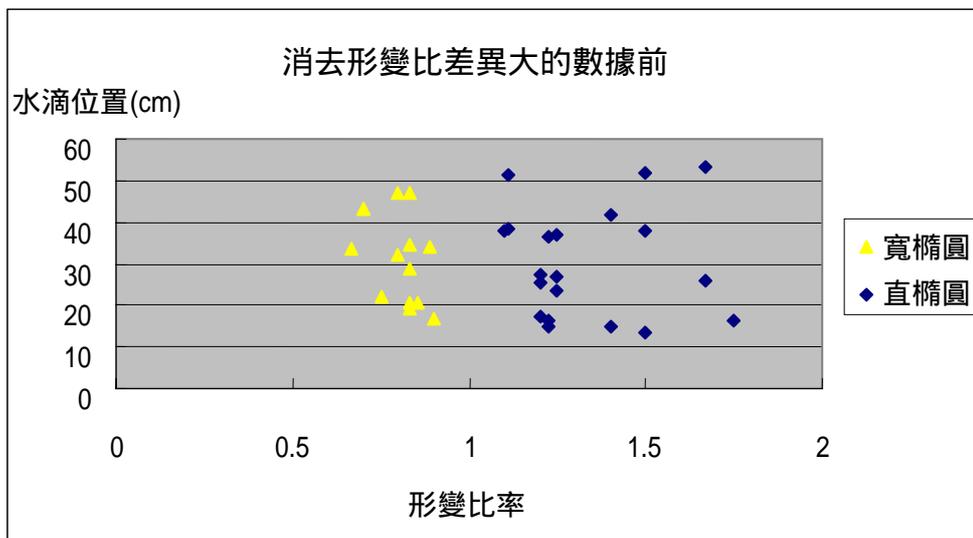
#### g. 形變比率的研究

我們將變形的水滴垂直長度除以水平長度稱為形變比率，形變比率小於 1 為寬橢圓，變形比率大於 1 為長橢圓。

經由此種分析，我們可得水滴位置與形變比率關係圖，我們發現透過此種分析，過濾形變比差異大的數據，可以獲得更為密集準確的數據母群。下面的圖表就是顯示這個過程。

直橢圓			寬橢圓		
垂直長軸	水平短軸	垂直長軸/水平短軸	垂直短軸	水平長軸	垂直短軸/水平長軸
0.5	0.3	1.67	0.4	0.45	0.889
0.5	0.3	1.67	0.35	0.5	0.7
0.5	0.4	1.25	0.4	0.6	0.667
0.6	0.5	1.2	0.3	0.4	0.75
0.6	0.4	1.5	0.5	0.6	0.833
0.55	0.45	1.22	0.5	0.6	0.833
0.6	0.5	1.2	0.4	0.5	0.8
0.5	0.45	1.11	0.35	0.5	0.7
0.6	0.5	1.2	0.5	0.6	0.833
1.1	0.9	1.22	0.5	0.6	0.833
0.5	0.45	1.11	0.5	0.6	0.833
0.6	0.4	1.5	0.6	0.7	0.857

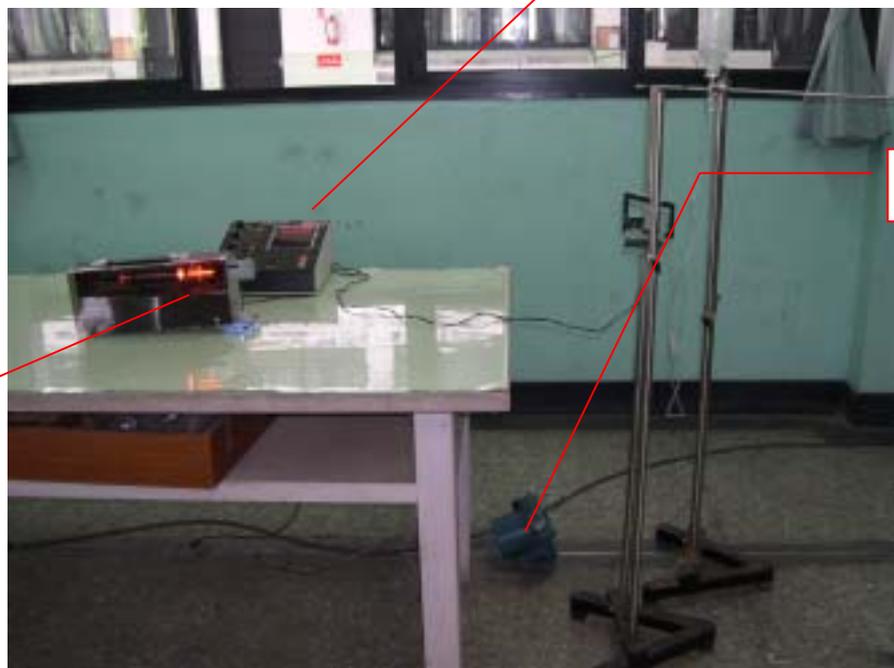
0.7	0.5	1.4	0.45	0.5	0.9
0.55	0.5	1.1	0.4	0.5	0.8
0.55	0.45	1.22			
0.5	0.4	1.25			
0.7	0.5	1.4			
0.6	0.4	1.5			
0.7	0.4	1.75			
0.5	0.4	1.25			



## 實驗五 模擬水滴振動

1. 實驗器材:雷射光發射器、光電計時器、吹風機

光電計時器



雷射光發射器

吹風機

2. 實驗目的：研究水滴的振動

3. 實驗步驟：

- a. 點滴瓶中裝入適量的水，打開開關使水滴停留在滴管
- b. 吹風機從下面向上吹，使水滴振動，小水滴會遮住光電閘的感應器，使其感應不到雷射光，而在振動的期間，會有部份雷射光透過使感應器有反應

4. 實驗數據與結果：

- a. 模擬結果發現，風速愈大，水滴周期愈小，符合實驗四中，水滴落下速度愈大，形變周期變小的結果。可見模擬成功。

不同風速與振動周期關係(以實驗五模擬)					
大水滴			中水滴		
風速(米/秒)	4	5	風速(米/秒)	4	5
周期 T(秒)	0.0379	0.0319	周期 T(秒)	0.0404	0.0352

b. 模擬結果發現，所得周期更接近實驗四的水滴理論振動公式所得結果，與實驗結果也相去不遠(見下表)。可見模擬成功。

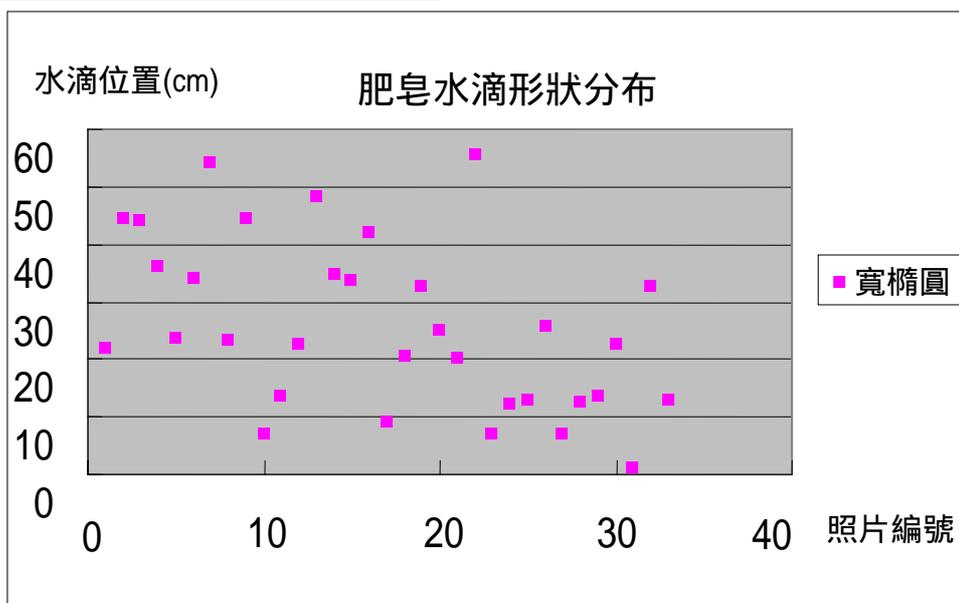
	模擬水滴	模擬肥皂水滴	自由落體水滴	理論值
風速(米/秒)	5	5.36	1 至 5	略
周期 T(秒)	0.0352	0.0215	0.05 至 0.07	0.029

c. 由模擬肥皂水滴與水滴比較，發現肥皂水表面張力小，故振動周期減少，這一點與理論振動公式不同；又大水滴的周期比小水滴小，也與理論公式不同。

## 實驗六 肥皂水

1. 實驗器材：點滴瓶、數位相機
2. 實驗目的:探討表面張力對水滴在落下過程中對形狀的影響
3. 實驗步驟:
  - a. 點滴瓶中裝入適量的肥皂水，並轉開開關使水順利留下
  - b. 用數位像機拍下水滴落下過程中的圖像:
4. 分析過程:
  - a. 照片檔傳入電腦
  - b. 紀錄每張照片中水滴的形狀 落下的距離
  - c. 製成圖表，分析其在特定距離的形變
5. 實驗數據與結果：
  - a. 肥皂水滴的數據點位置分散，不易看出其形變周期。可能表面張力小了，水珠形變不穩定。

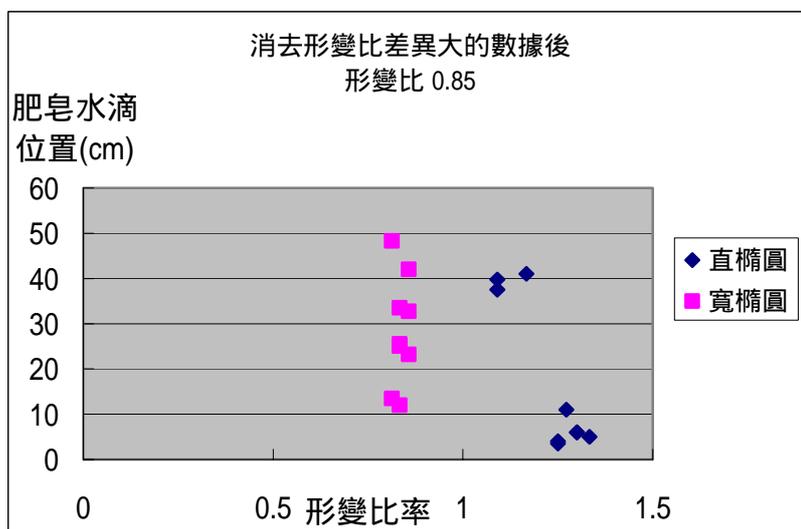
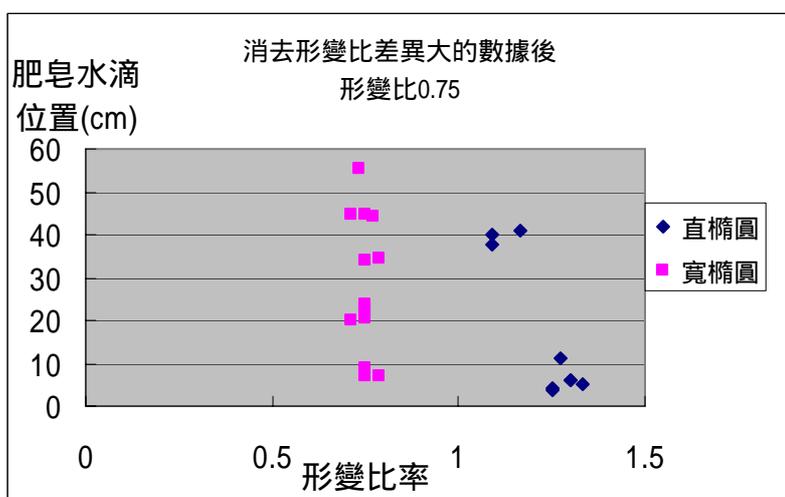
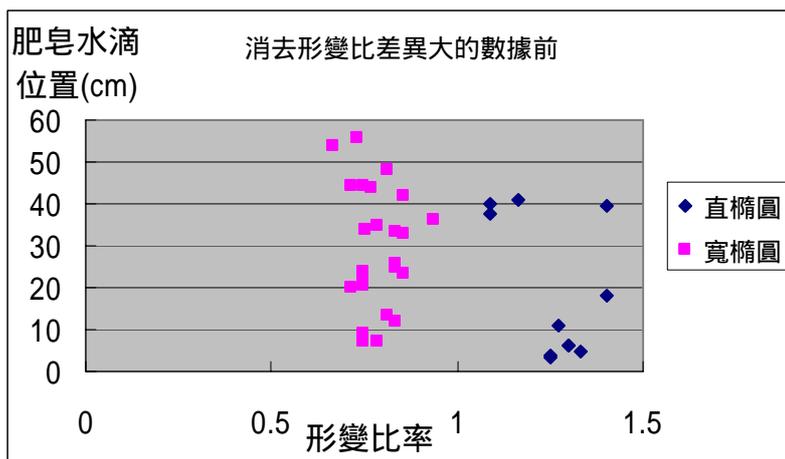
寬橢圓(cm)		
22	48.3	6.8
44.5	34.6	12
44	33.5	12.7
36	42	25.5
23.6	9	7.1
34	20.5	12.5
54	32.7	13.4
23.2	25	22.5
44.5	20	1
7	55.5	32.5
13.5		13
22.6		



- b. 我們以“位置 v.s.形變比圖”分析發現，在固定形變比處，水滴可看出周期性。特別是寬橢圓處，可看出兩種不同的形變比均有相同的周期性變化，而且此周期變化與純水滴類似，距離周期為每 10 至 14 公分左右。但是比較特殊的是，隨著落下位

置變大，距離周期變小，這一點與水滴在實驗四中 5-d 項，隨著落下位置變大距離周期變大，明顯不同，這一點有待進一步研究。由此發現更加強證明利用形變比分析，確實能得到更多的物理特性資訊。

位置(cm)	垂直高度	水平寬度	形變比	位置(cm)	垂直高度	水平寬度	形變比
寬橢圓	y	x	y/x	直橢圓	y	x	y/x
22	0.6	0.8	0.75	5	0.8	0.6	1.33
44.5	0.5	0.7	0.714	11	0.7	0.55	1.27
44	0.5	0.65	0.769	39.3	0.7	0.5	1.4
36	0.75	0.8	0.937	4	0.75	0.6	1.25
23.6	0.6	0.8	0.75	39.8	0.6	0.55	1.09
34	0.45	0.6	0.75	41	0.7	0.6	1.16
54	0.6	0.9	0.666	18	0.7	0.5	1.4
23.2	0.6	0.7	0.857	6	0.65	0.5	1.3
44.5	0.6	0.8	0.75	6	0.65	0.5	1.3
7	0.6	0.8	0.75	3.5	0.5	0.4	1.25
13.5	0.65	0.8	0.812	37.5	0.6	0.55	1.09
22.6	0.6	0.8	0.75				
48.3	0.65	0.8	0.812				
34.6	0.55	0.7	0.785				
33.5	0.5	0.6	0.833				
42	0.6	0.7	0.857				
9	0.6	0.8	0.75				
20.5	0.6	0.8	0.75				
32.7	0.6	0.7	0.857				
25	0.5	0.6	0.833				
20	0.5	0.7	0.714				
55.5	0.55	0.75	0.733				
12	0.5	0.6	0.833				
25.5	0.5	0.6	0.833				
7.1	0.55	0.7	0.785				



## 六、研究結果與討論

1. 控制照相機快門來拍攝水滴路徑，進一步求速度，此種方法誤差

大。

為了探求誤差為何如此大，我們推測可能原因有 (1)相機快門速度本身就誤差大 (2)圖片上雨絲長度模糊，測量時就有誤差。

我們以教室上壁扇為對象，測量在 1/100 秒快門下，壁扇的角位移精準度。經過一番研究，我們發現，在曝光較不足時，照片模糊時，誤差果然大。我們推測，快門應是準的，但曝光不足時，相機感光造成誤差大。見下圖



曝光充足的壁扇					曝光不足的壁扇				
檔名	弦長	半徑	角位移	與平均的誤差	圖檔名	弦長	半徑	角位移	與平均的誤差
1	6	15	0.40	-1.73%	1010005	3.5	10.5	0.33	12.58%
1	6.3	15.1	0.42	2.50%		3.7	10.5	0.35	19.02%
2	6.2	15	0.41	1.54%	1010006	3.7	10.5	0.35	19.02%
2	5.9	15.2	0.39	-4.64%		2.4	10.5	0.23	-22.80%
3	6.2	15.3	0.41	-0.45%	1010007	3.1	10.5	0.30	-0.28%
4	6	15.2	0.39	-3.02%	1010008	3.7	10.8	0.34	15.71%
4	6.3	15.2	0.41	1.82%	1010009	2.7	10.5	0.26	-13.15%
5	6	15	0.40	-1.73%		2	10.5	0.19	-35.67%
5	6.3	15	0.42	3.18%	1010010	3.2	10.5	0.30	2.93%
6	6.3	15.2	0.41	1.82%	1010011	3.2	10.5	0.30	2.93%
7	6.4	15.1	0.42	4.13%	1010012	3.1	10.5	0.30	-0.28%
8	6.4	15.2	0.42	3.44%					
9	5.8	15.3	0.38	-6.87%					

2. 改良光電計時器的線路，確實能增加精準度，使得測量小水滴運

動能順利進行。

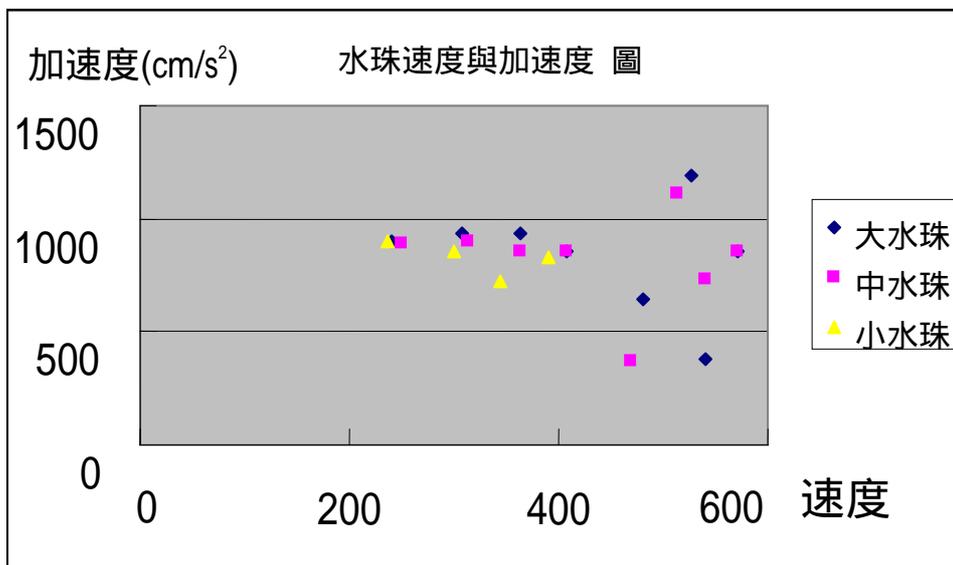
3. 水滴落下距離愈遠，速度愈大，空氣阻力也跟著增加，故加速度平均逐漸變小，由實驗三所得圖表可看出。

根據斯托司克定律，空氣阻力與空氣黏滯係數、物體速度、及球

半徑有關，故可得  $a = \frac{mg - 6\pi\eta v}{m} = g - \frac{9\pi\eta v}{2r^2}$ ，又可知加速度與半徑

有關，我們分析實驗三數據，做出加速度與速度關係圖，可看出

在相同速度下，大水珠半徑大，加速度大，符合公式預測。下圖。



4. 實驗四中，水滴的兩米內的自由落體過程中形狀會以直橢圓、橫橢圓交替出現，周期由 0.07 秒至 0.05 秒漸次變小，比理論公式所得 0.029 秒大，也比模擬水滴振動 0.035 秒大。未來可考慮克服困難，測量落下 2 米以後至終端速度的水滴形變，此時為平衡狀態，應會更接近理論值。

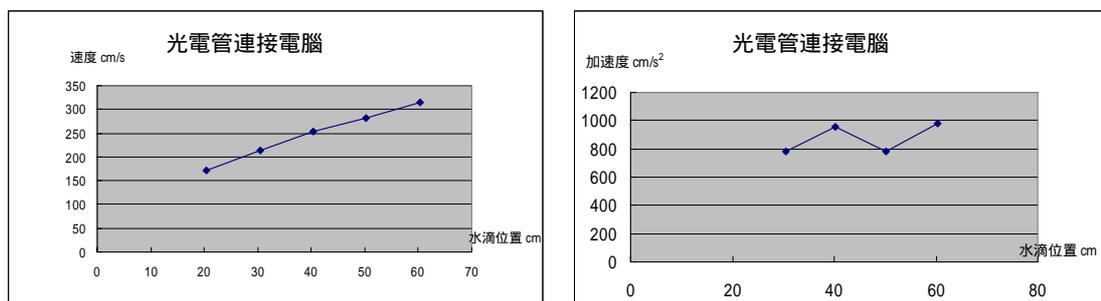
5. 由實驗四的結果，我們發現水滴落下距離愈大，水滴形變周期有逐漸變小的趨勢。若考慮水滴形變的主要力量為表面張力與空氣阻力，在空氣阻力隨落下距離增加而增加時，而表面張力並不變的因素下，其形變的時間應是縮小的。直到達到終端速度時，空氣阻力才達到穩定，此時周期才穩定。

我們以實驗五的模擬裝置，觀察風速與振動周期關係。發現風速愈大時，振動周期變小，符合我們的推想。模擬過程中，可視為平衡狀態下，如同水滴達到終端速度，故模擬水滴的形變周期比加速下的水滴形變週期實驗值更接近理論值。

6. 實驗三中，水滴在 1 至 2 米過程加速度上下變動加大，頗為吻合直橢圓、橫橢圓的交替出現，至於其原因，可有 1 個解釋。
  - a. 水滴在 0 至 1 米過程，距離周期為 10 公分，我們的光電管間隔 20 公分，故無法辨識出加速度的變動。而水滴在 1 至 2 米過程，距離周期為 25 公分，我們的光電管間隔 20 公分，故可辨識出加速度的變動。未來若能加強光電計時器的解析度，可考慮進一步分析 0 至 1 米的加速度變動，是否也吻合直橢圓、橫橢圓的交替出現。

為了研究這一部分，我們進一步將光電管距離縮短為 10 公分，看一看是否能看到 0 至 1 公尺內，水滴的加速度的變化，果然看

出了加速度的變動。見圖。



7. 實驗六 ”肥皂水滴” 的觀察，起初未獲得振動周期性結果，但以固定形變比加以觀察，肥皂水滴的周期性就被發現了，而且兩種不同形變比率的周期性均相同，使我們對自己發展出，以 ”形變比” 分析水滴周期性的方法更具信心與興趣。

## 七、參考資料

1. 高中物質科學物理篇第一章自由落體、第四章空氣阻力。
2. 高中物質科學物理篇教師手冊上冊第四章
3. 雲物理學 第八章 雲中粒子之流體動力學 國立編譯館主編 王寶貫著
4. Pruppacher, H. R., and Pitter, R. L., 1971: J. Atmos. Sci., 28, 86

## 評語

040119 高中組物理科 第三名

當蒼天落淚時——小水滴的自由落體

本作品以簡易實驗裝置，探討水滴自由下落後，變形對終端速度與加速度的影響，能從實驗數據區分出水滴長短軸的比例，可開發成探討液滴形變的裝置。作品內容完整，討論詳盡。