

中華民國第四十五屆中小學科學展覽會
作品說明書

高中組 物理科

040115

飄飄欲仙

國立台東高級中學

作者姓名：

高二 呂庭佑 高二 石庭亦 高二 楊峰宜

高三 范晉祥

指導老師：

巫培爾 趙臨軒

中華民國第四十五中小學科學展覽會
作品說明書

科 別：物理科

組 別：高中組

作品名稱：飄飄欲仙

關 鍵 詞：終端速率

編 號：

目 錄

壹、	摘要	2
貳、	研究動機	2
參、	研究目的	2
肆、	研究器材	3
伍、	研究方法與過程	6
一、	實驗原理	6
二、	器材配置	6
三、	測量方法	7
四、	實驗一：距風扇中心不同距離的風速關係	7
五、	實驗二：終端速率測量	8
六、	實驗三：兩物體受風時交互作用的觀測	9
七、	實驗四：溫度改變時下落速度的測量	10
八、	溫度改變時兩物體下落情形	10
九、	與實驗操作有關的圖片	10
陸、	研究結果	11
一、	不同風速時，風扇內外圈風速	11
二、	集風裝置下，測出最小懸浮所需的風速（乒乓球）	12
三、	風洞中，風力對物體下落的影響	12
四、	風洞中球體固定下方對上方落下球體速度的影響（追逐）	15
五、	氣溫對物體下落的影響	16
六、	氣溫對物體追逐的影響	17
柒、	討論與檢討	18
捌、	結論	21
玖、	參考資料	21

壹、摘要

本研究是利用風洞裝置觀察球體下落時，後曳力減緩球體下落的現象。並研究球體終端速率與截面積、質量、外在流體溫度的各種關係。並且利用風洞設備研究兩球體下落時，下方下落球體所產生的尾流對上方球體下落的影響。我們測量了球體下落時位置、速度、流體溫度等。依據實驗的結果，我們得到了以下推論：

- 一、風洞可使自由落體中的物體運動減慢，方便觀察終端速率。
- 二、乒乓球終端速率測量 9.2m/s，因為測量方式造成的誤差略高於理論值 8.89m/s。
- 三、保麗龍球終端速率測量略低於理論值，但十分接近，證明本方法可用於測量終端速率
- 四、兩球體下落追逐時，位於上方球體在接近過程中會受尾流影響造成下落情形改變
- 五、溫度降低時，球體下落終端速率會略微升高，但下落情形較為穩定。
- 六、溫度降低時，球體的尾流長度會略為縮短，但尾流會較不明顯

貳、研究動機

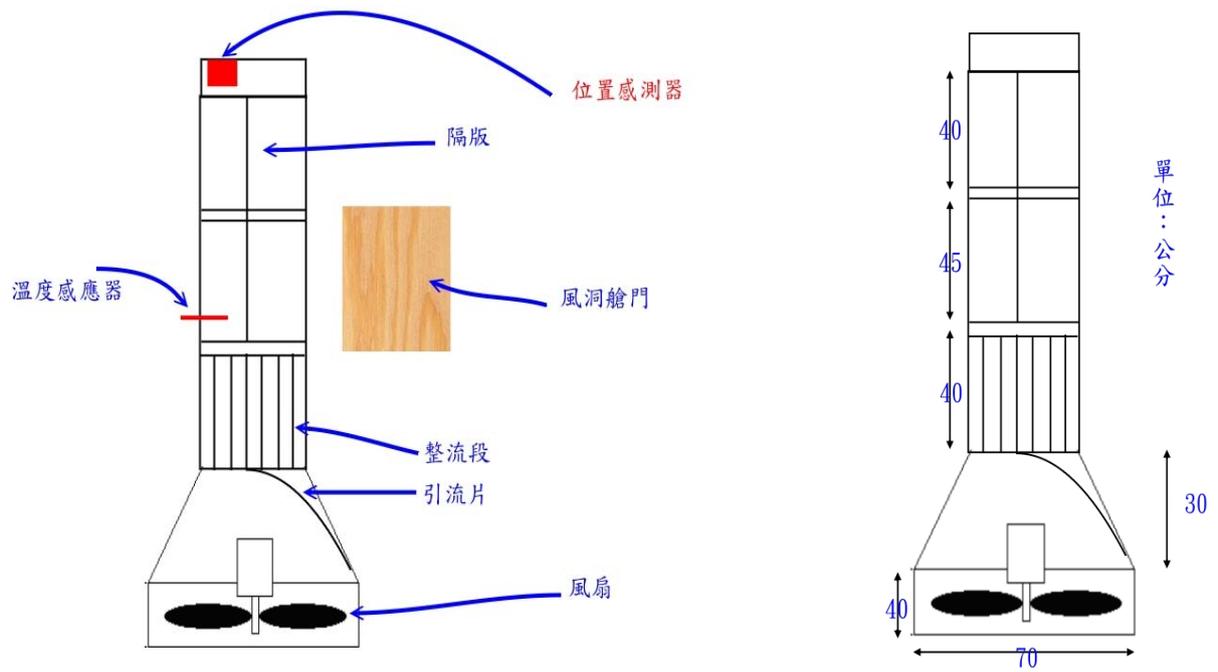
去年，還是高一的我們對物理有著濃厚的興趣，所以看到學長們親手做的風洞時，心理不禁感到好奇。在學長們不吝嗇的指導他們所知道的一切，並讓我們參與討論。當時，便思考到可以利用風洞，減慢物體下落時運動的情形。今年，我們結合兩組學長的想法，並且加上我們的創意，使學長們的成果，可以進一步或的鑽研與應用的機會。也讓物理實驗的種子，能在學校繼續成長茁壯，為學弟們樹立實驗的典範。

參、研究目的

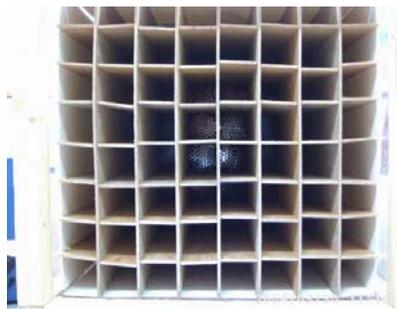
- 一、探討物體下落時空氣與物體的交互作用及影響物體終端速率的因素
- 二、探討兩物體鉛直下落時受流體流動影響的各項效應
- 三、探討溫度對終端速率的影響

肆、研究器材

品名	規格	數量
風洞箱	70cm×70cm×170cm，自製	1 個
整流片（組）	長×寬：40cm×40cm×14 片 內插吸管 8×8 每格，共 64 格	1 組
風扇馬達	電壓：110/220 V 頻率：60Hz 外觀尺寸：24 吋 電流：4.6/2.3A 轉速：1120rpm	一台
待測物	編號：1 材質：保麗龍 直徑：7.842 cm 質量：5.289g	八顆 備註：5 號 8 號球 實驗過程中遭外力撞擊，外型嚴重扭曲，所得實驗數據捨去，不列入待測物中
	編號：2 材質：保麗龍 直徑：7.758 cm 質量：4.953g	
	編號：3 材質：保麗龍 直徑：7.838 cm 質量：5.306g	
	編號：4 材質：保麗龍 直徑：6.772 cm 質量：3.340g	
	編號：6 材質：保麗龍(鑽孔) 直徑：7.807 cm 質量：3.903g	
	編號：7 材質：保麗龍(鑽孔) 直徑：6.733cm 質量：3.087g	
	編號：9 材質：乒乓球 直徑：3.973 cm 質量：2.757g	
	編號：10 材質：乒乓球 直徑：3.975 cm 質量：2.734g	
風速計	Lutron 製 AM-4201 範圍：0.4 ~30.0m/s	1 個
風速計用支架	鋁製	1 支
電腦		1 台
Data studio		1 套
500 型數據擷取介面	PASCO CI-6400	1 組
移動感應器	PASCO CI-6742 0.15 ~ 8 M	1 台
溫度感應器	PASCO CI-6605 -35 ~ 135 °C	1 台
冰塊		
電阻	一般家用風扇燈光電阻 110V 800W	2 只
集風裝置	700 cc 飲料杯去底	一只
大理石變壓器	七段變壓(風扇用)	1 台
自製轉速調節裝置	電阻一只+插座一個	一台



吸管整流裝置 ↑



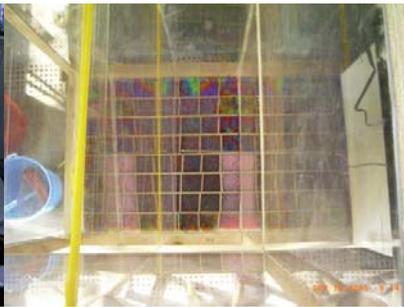
整流葉片 ↑



風洞測試段 ↑



風洞艙門 ↑



風洞內部俯視圖 ↑



風洞內部仰視圖 ↑



500 型數據擷取介面 ↑



500 型數據擷取介面 (已裝置) ↑



位置感測器 ↑



溫度感測器 ↑



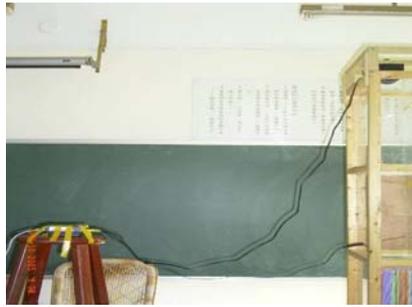
大理石變壓器 ↑



自製調速裝置 ↑



風速計+支架 ↑



實驗裝置 ↑



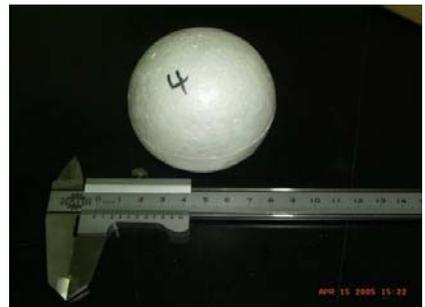
1 號球 ↑



2 號球 ↑



3 號球 ↑



4 號球 ↑



6 號球 ↑



7 號球 ↑



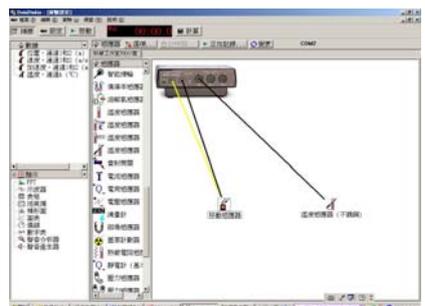
9 號球 ↑



自製集風裝置 ↑



風洞架設討論 ↑



Data studio 介面 ↑

伍、研究方法與過程

一、實驗原理

(一)球體落下運動方程式

重力($m\bar{g}$) - 空氣阻力(F_D) = 物體質量×物體加速度($m\bar{a}$)

(二)後曳力方程式
$$\overline{F_D} = \frac{1}{2} C_D \rho A \overline{V_s}^2$$

ρ 空氣密度=28.8/(0.082*T) [由 $PV = nRT$ 推得]

C_D 後曳係數(網路查詢約為 0.47)

A 球體截面積

$\overline{V_s}$ 球體與空氣相對速率

在本實驗設計中 $\overline{V_s}$ 是由風扇加上自由落體產生而非一般的物體單純因自由下落獲得，因此，當物以等速下落時， $\overline{V_s}$ 即為終端速率

*公式參考資料：流體力學&高中物質物理教師手冊

(三)相對速率轉換算式

$$\overline{V_{bw}} = \overline{V_{bo}} - \overline{V_{wo}}$$

$$\overline{V_{bw}} = \overline{V_{bo}} + \overline{V_{ow}}$$

$\overline{V_s}$ 球體與空氣相對速率

$\overline{V_{wo}}$ 空氣對地速率

$\overline{V_{ob}}$ 球體對地速率

*公式參考資料：高中物質物理上冊教師手冊

(四)自由落體位置、速度、加速度、測量計算

1.PASCO 公司製造位置感測器

2.電腦

3. Data Studio 軟體

(五)風速測定

風速計 (Lutron 製 AM-4201 範圍：0.4 ~30.0m/s)

(六)溫度測定

1.PASCO 公司製造溫度感測器

2.電腦

3. Data Studio 軟體

二、器材配置

(一)將風扇四角以實驗室內附軟墊的矮凳支撐(如圖)

(二)在風扇網格上加上自製集風裝置。

(三)先畫出我們所需要的風洞箱規格，包含主架及整流片，之後到木材行尋找必要的主架材料及訂做整流片，架起木製骨架及整流片(今年在其中加置吸管)，並尋求學校

木工先生的幫助將後方有斜度的腳架處架起，外表貼上壓克力板，底下的方型骨架挑高後裝上工業用風扇(新購置)。在第一層加入木製整流葉片(含吸管)。將探測器支架置於風洞之上固定，並以螺絲鎖緊移動感應器，整體的風洞裝備即完成。

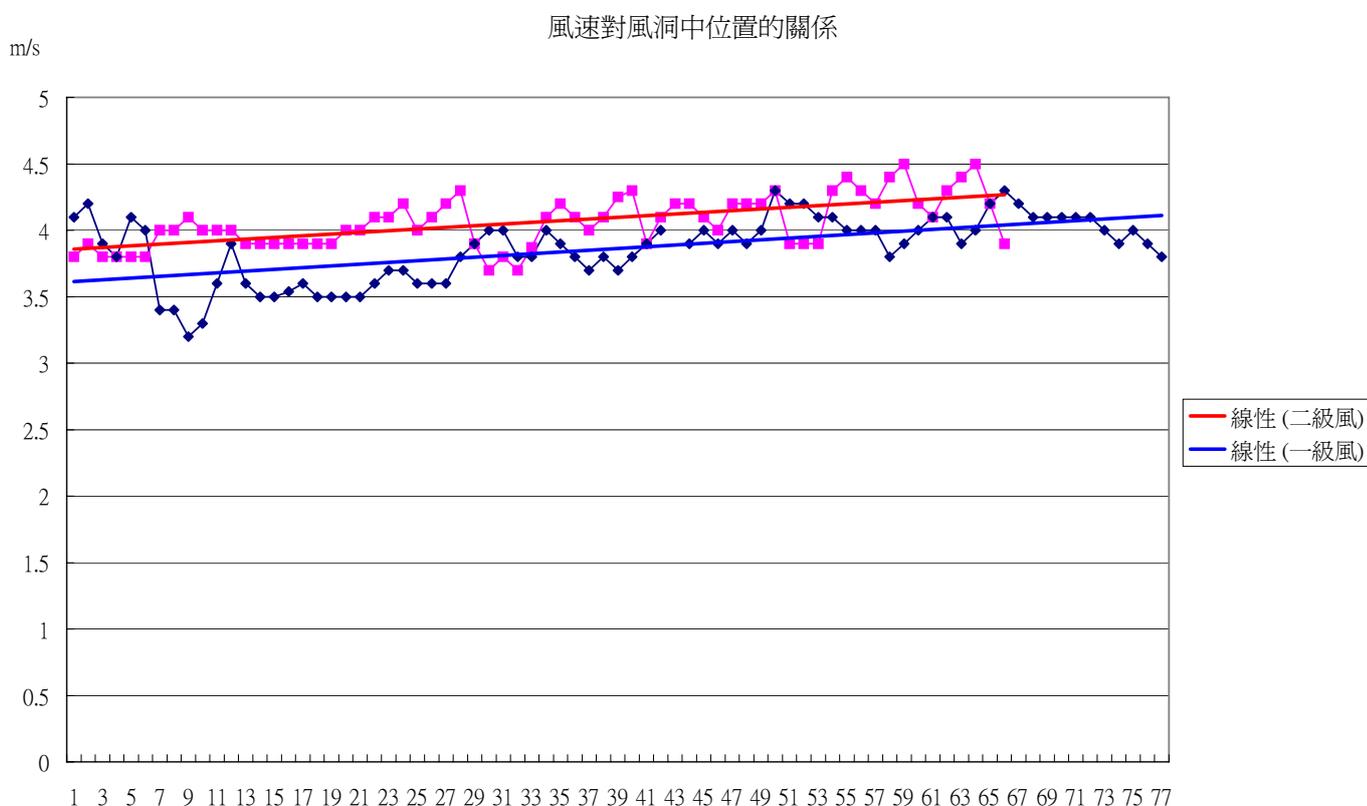
三、測量方法

(一)風速測量

因應三個不同實驗階段，我們設計出三種測量風速的方法

- 1.在風扇網架上標定每一公分一刻度，每刻度以風速計同一位置為標準，測試風扇中心至外圍，不同距離風速。
- 2.將風速計置於集風裝置出風口測量出口風速。
- 3.將風速計固定於鋁軌上，並將電線置於鋁軌內，將整體呈 L 形的設備放入風洞中手持鋁軌，測量風洞內部各部分風速

得到風洞內部風場趨勢圖如下



圖中可看出，風洞內部風場是一個有一個大致的趨勢，離整流段越近，風力越大，唯測量方法誤差大，可以再找改進辦法

(二)溫度測量

- 1.將壓克力版以鑽孔器鑽孔，孔徑約略等於不銹鋼溫度感應器，插入溫度感應器至風洞中，封上艙門，開啓風扇，經過3到5分鐘後使風速穩定後，與位置感應器同時開啓測量，測量實驗時流經空氣的氣溫。

(三)位置測量

- 1.將位置感測器固定於支架上連接至電腦後，將位置感測器開啓取得待測物與感測器距離關係，由電腦進行處理，換算出速度與加速度。

四、實驗一：距風扇中心不同距離的風速關係

觀察實驗二-1時，發現風扇送出的風，並非內外圈風速一致。於是在實驗二-1觀測後，

進行內外圈風速測定

(一) 實驗目的：距風扇中心不同距離的風速

(二) 實驗器材：風扇、大理石變壓器、自製轉速調節裝置、風速計。

(三) 實驗步驟：以公分為單位，在風扇網架上標記 30 個點，風扇開啓後以調速裝置調整風速，將風扇上一定點（距風扇 11 公分處）視為參考點，在參考點上風速分別為 2、3、4、6 m/s 時，測量各點風速大小。

(四) 控制變因：風扇轉速、風速、風速計垂直位置

(五) 操縱變因：風速計水平位置

(六) 檢討與改進：由試驗可知，風扇所輸出的風力，內外圈並不相同實驗二-1 需找方法改進。

五、實驗二：終端速率測量

(一)將實驗用球體(乒乓球，寶麗龍球)置於風扇出風口上方，風上吹時，對球體產生後曳力，後曳力與重力方向相反，所以當物體停滯、或等速落下時，可知後曳力略等於重力，此時風速即為終端速率。

1. 實驗目的：測量終端速率

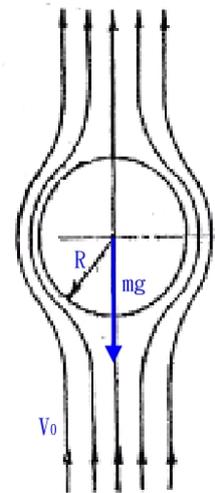
2. 實驗器材：待測物 1、9 號、風扇、大理石變壓器、自製轉速調節裝置、照相機。

3. 實驗步驟：風扇開啓，以水平拋射方式，投入風扇上空觀察。

4. 控制變因：拋球高度，拋球位置

5. 操縱變因：風速大小

6. 測量與分析過程：肉眼觀測漂浮現象，輔以照相機攝影記錄，但因內外圈風速差異（見實驗一），球體漂浮位置無法固定，僅能觀察到球體下落時間有因經過風扇上空延長。證明主動送風來降低球體下落終端速率的想法是可行的。但是實驗裝置還可以再改進。



(二)將架設於風扇護網上，以集風裝置約略限制待測物位置並集中風量，增強風速。將實驗用球體(乒乓球，寶麗龍球)置於集風裝置上方，風上吹時，對球體產生後曳力，與重力方向相反，當物體停住時，可知後曳力等於重力，此時風速即為終端速率。

1. 實驗目的：測量終端速率

2. 實驗器材：待測物 1 號、風扇、大理石變壓器、自製轉速調節裝置、自製集風裝置。

3. 實驗步驟：風扇開啓，3-4 分鐘後風速穩定，將待測物輕放於集風裝置出口，觀察懸浮現象，無懸浮則調整風速，或集風裝置位置後，重新放置待測球體。待球體在集風裝置內懸浮超過十秒後，判定可以在此風速下懸浮，以手取出懸浮中球體，將風速計置於集風裝置出口，測量懸浮風速。反覆進行實驗以尋找達到終端速率之風速。

4. 控制變因：放球位置，球體半徑，球體質量

5. 操縱變因：風速大小

6. 檢討與改進：因為風扇產生的氣流為旋流，待測球體在漂浮過程中會有旋轉的現象，影響測量準確度，但已用這基礎的裝置測出大約的終端速率。

(三)以風洞裝置整流，從風洞上端釋放實驗待測球體，風洞上端加裝位置感應器，測量物體下落速度，並測量內部風速的大小，以相對速度求出終端速率

-
1. 實驗目的：測量終端速率
 2. 實驗器材：待測物 1 號、風扇、大理石變壓器、自製轉速調節裝置、自製風洞，風速計，位置感測器，電腦。
 3. 實驗步驟：將風洞裝置整備架設完成，以大理石變壓器調整風扇轉速，自風洞上端釋放球體落下，以位置感測器觀察實驗球體運動狀況。
 4. 控制變因：球體半徑，球體重量，溫度，釋放位置
 5. 操縱變因：風速
 6. 檢討與改進：因為風洞送風時，內圈半徑較小，切線速度較低，風速也較外圈慢，且送風量不夠，造成內部風場不均勻。為取得一穩定風場。我們改以只取外圍氣流方式修正，並在風扇出口到進入整流段之前，以加裝引流片，擾流板方式增加進入整流段風量。

(四) 以風洞裝置整流，並加裝引流片、隔版，加強整流效果（如圖所示）。風洞上端加裝位置感應器，測量物體下落速度，並測量內部風速的大小，以相對速度求出終端速率。

1. 實驗目的：測量終端速率
2. 實驗器材：待測物 1、2、3 號、風扇、大理石變壓器、自製轉速調節裝置、自製風洞（改良型），風速計，位置感測器，電腦。
3. 實驗步驟：將風洞裝置整備架設完成，以自製轉速調節裝置調整風扇轉速，自風洞上端釋放球體落下，以位置感測器觀察實驗球體運動狀況。
4. 控制變因：球體半徑，球體重量，溫度，釋放位置
5. 操縱變因：風速（大理石變壓器第一段，第二段）
6. 檢討與改進：改良後風洞可送出較為穩定，以及較強的風，方便進行實驗，改良型風洞便列為之後實驗重要器材，實驗過程中發現，因選用的實驗待測物密度低，其在空氣中浮力，應列入影響實驗結果之因素，為比較此效應，另外進行待測物自由落體運動觀測

(五) 球體大小與終端速率的關係

有了穩定的風洞系統，我們開始進行球體半徑變化，觀察球體大小對終端速率的影響

1. 實驗目的：球體大小對終端速率的影響
2. 實驗器材：待測物 1 號（直徑 7.842 cm）、4 號（直徑 6.772 cm）、風扇、大理石變壓器、自製轉速調節裝置、自製風洞（改良型），風速計，位置感測器，電腦。
3. 實驗步驟：將風洞裝置整備架設完成，開啓風扇，大理石變壓器開至第一段，三分鐘後，自風洞上端釋放球體落下，以位置感測器觀察實驗球體運動狀況。
4. 控制變因：風速，溫度，釋放位置
5. 操縱變因：球體大小

六、實驗三：兩物體受風時交互作用的觀測

以風洞裝置製造穩定向上氣流（如圖所示）。風洞上端加裝位置感應器，測量物體下落速度，在下落正方向上，固定一球體待測物 6、7

1. 實驗目的：觀測兩物體受風時交互作用
 2. 實驗器材：待測物 1、6、4、7 號（大、小球）、風扇、大理石變壓器、自製轉速調節裝置、自製風洞（改良型），風速計，位置感測器，溫度感測器，電腦。
 3. 實驗步驟：將 6、7 號球鑽孔，穿入鐵絲，置於下端，開啓風扇，大理石變壓器開至第一段，三分鐘後，自風洞上端釋放球體（1、4）落下，以位置感測器觀察實驗球體運動狀況。
 4. 控制變因：球體釋放位置、風速、溫度
 5. 操縱變因：球體大小
-

七、實驗四：溫度改變時下落速度的測量

以風洞裝置製造穩定向上氣流。並以碎冰塊置於風扇下方（如圖所示），使得導入風扇之氣流降溫，重複前述實驗。風洞上端加裝位置感應器，測量物體下落速度，並測量內部風速的大小，以相對速度求出終端速率

1. 實驗目的：測量溫度對物體下落
2. 實驗器材：待測物 1、4 號(大、小球)、風扇、大理石變壓器、自製轉速調節裝置、自製風洞（改良型），風速計，位置感測器，溫度感測器，電腦，冰塊。
3. 實驗步驟：以紗窗盛裝冰塊置於風扇下方，開啓風扇，大理石變壓器開至第一段，三分鐘後，自風洞上端釋放球體落下，以位置感測器觀察實驗球體運動狀況。
4. 控制變因：球體釋放位置、風速、球體大小
5. 操縱變因：溫度
6. 檢討與改進：溫度改變是藉由水在兩相間轉移吸收空氣中的的熱能，冰塊的量在減少到一定量後，降溫效果便降低，實驗中需添加冰塊以取得持續的降溫效果。

八、溫度改變時兩物體下落情形

1. 實驗目的：觀測溫度下降時，球體下落追逐的情形
2. 實驗器材：測物 1 號(大球)、風扇、大理石變壓器、自製轉速調節裝置、自製風洞（改良型），風速計，位置感測器，溫度感測器，電腦，冰塊。
3. 實驗步驟：以紗窗盛裝冰塊置於風扇下方，將 6 號球鑽孔，穿入鐵絲，置於整流段出口上方約五公分處，並將溫度感測器插入風洞中。
4. 控制變因：球體釋放位置、風速、球體大小
5. 操縱變因：溫度
6. 測量與分析過程：開啓風扇，大理石變壓器開至第一段，三分鐘後，自風洞上端釋放球體(1)落下，以位置感測器觀察實驗球體運動狀況。

九、與實驗操作有關的圖片



測量終端速率



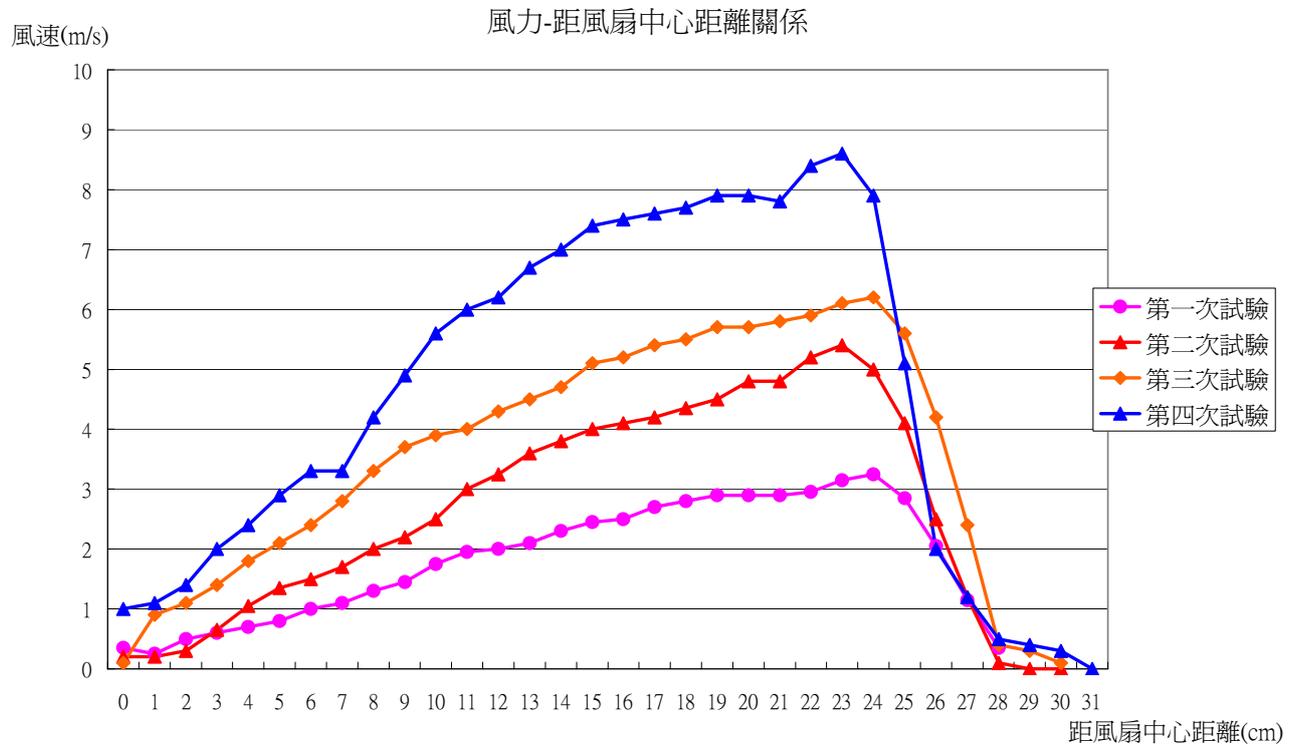
3 號追 7 號球



風洞內部降溫設備

陸、研究結果

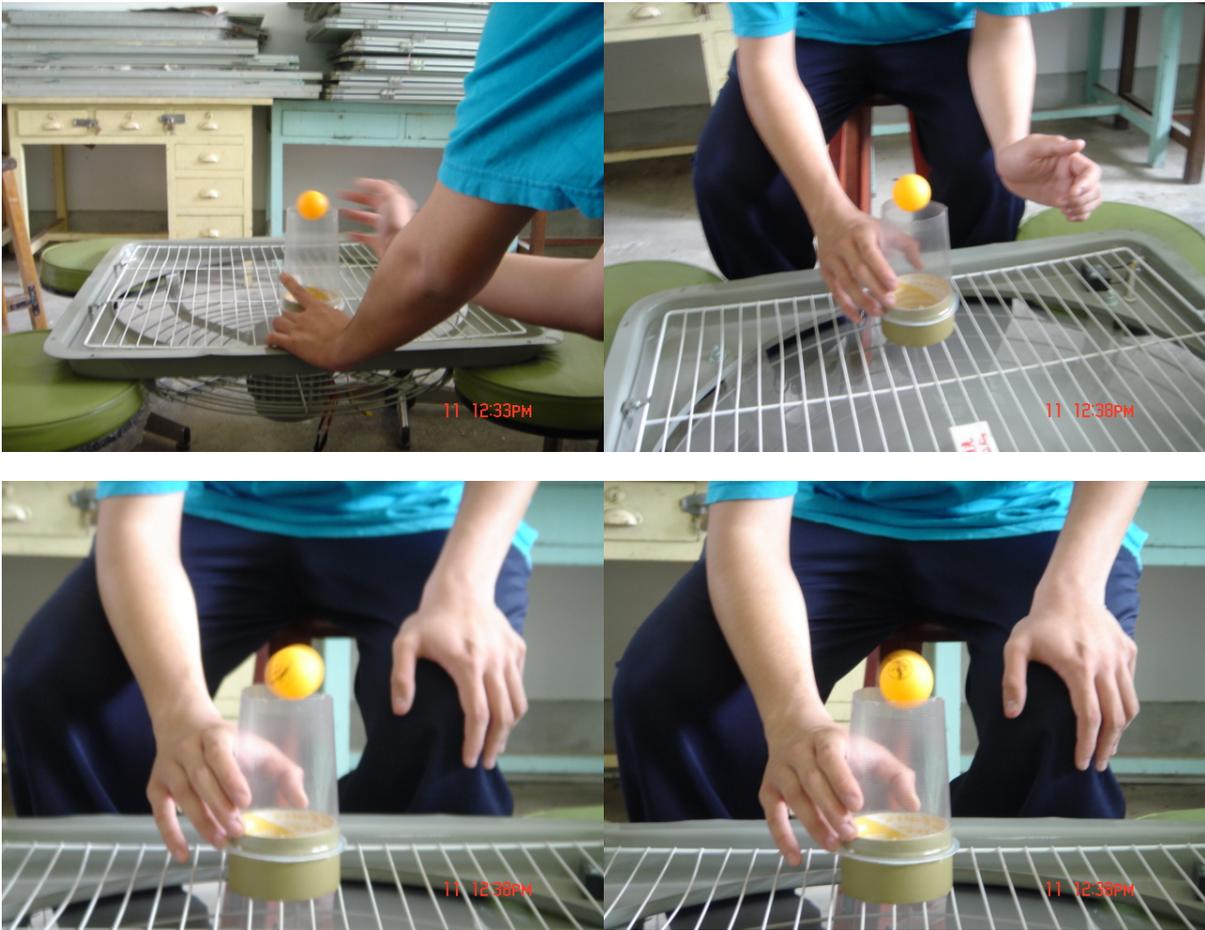
一、不同風速時，風扇內外圈風速



二、集風裝置下，測出最小懸浮所需的風速（乒乓球）

(一) 漂浮最小風速：9.2m/s

(二) 圖片：



三、風洞中，風力對物體下落的影響

實驗當天風洞內溫度：27.47°C(平均值)

300.47 K

黏滯度 = 0.000018482

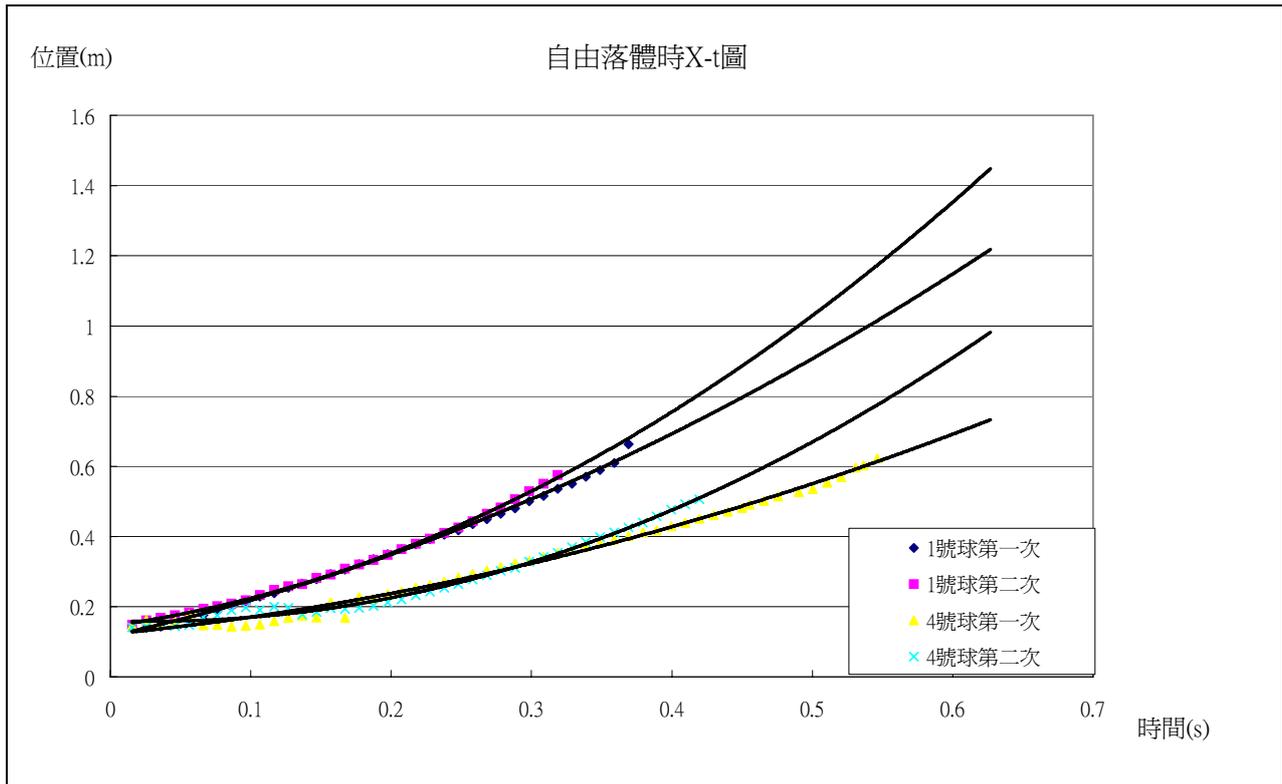
1 號球球體直徑：7.842 cm 質量：5.289g

4 號球球體直徑：6.772 cm 質量：3.340g

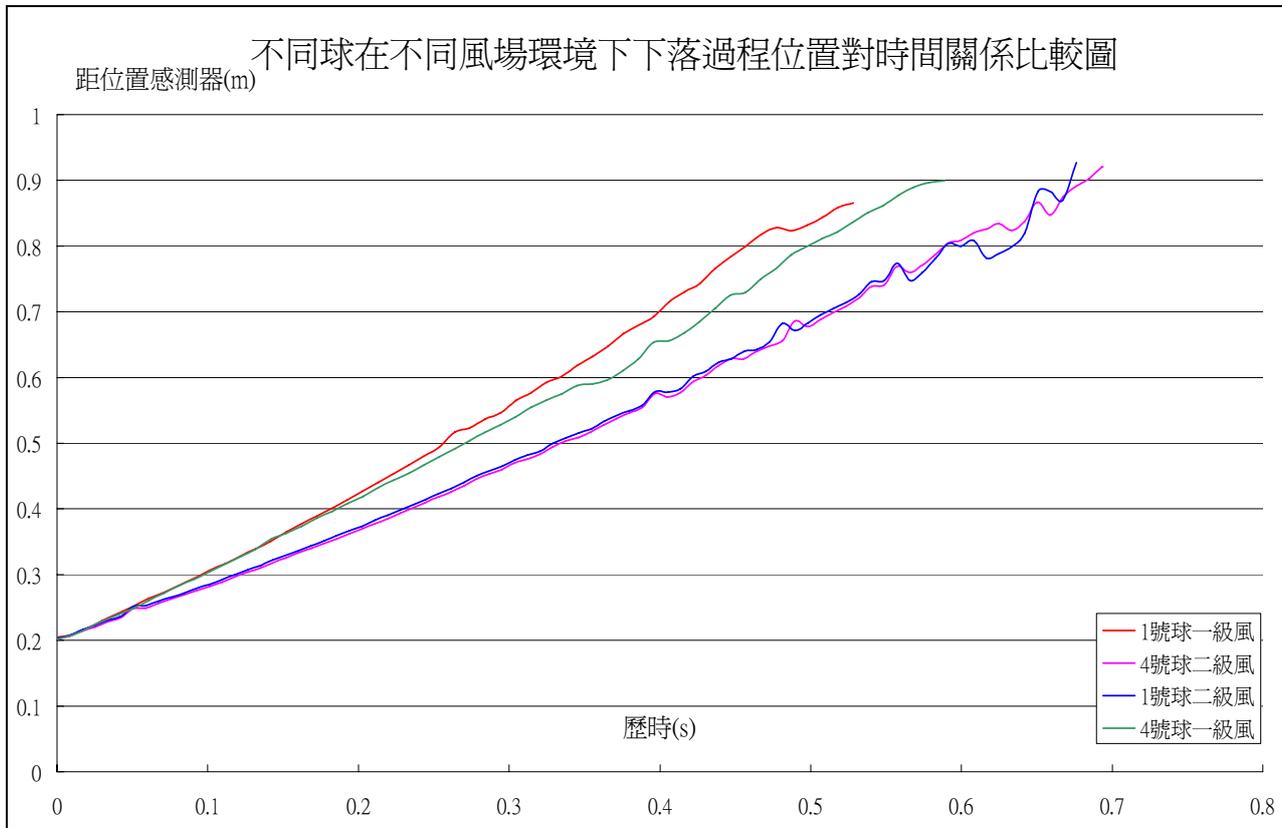
一級風平均風速 3.86 ± 0.25 m/s

二級風平均風速 4.06 ± 0.19 m/s

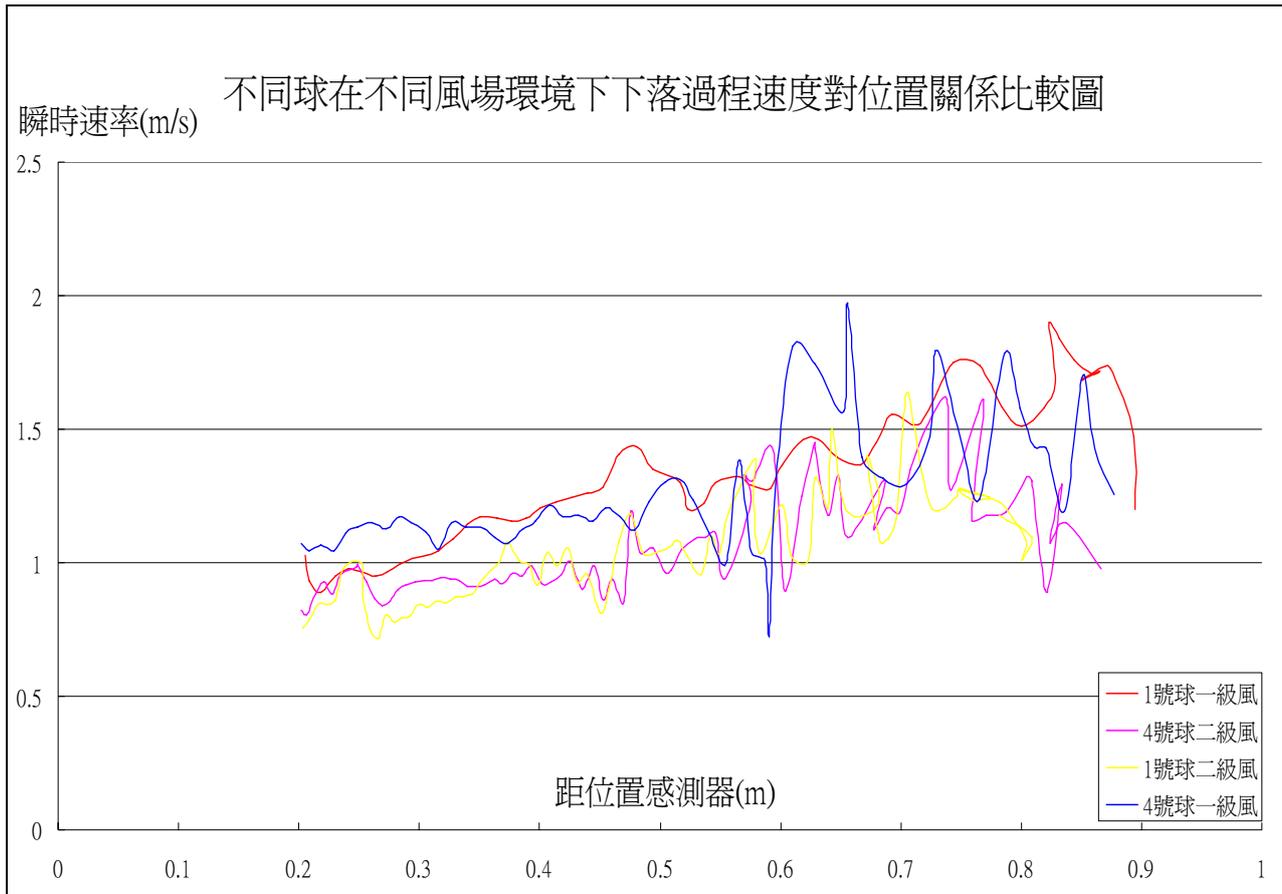
自由下落參考圖



(一)1 號球、4 號球分別在一級風、二級風狀態下下落的位置對時間關係圖



(二)1 號球、4 號球分別在一級風、二級風狀態下下落的速度對位置關係圖



研究結果：風速與下落時間成正相關

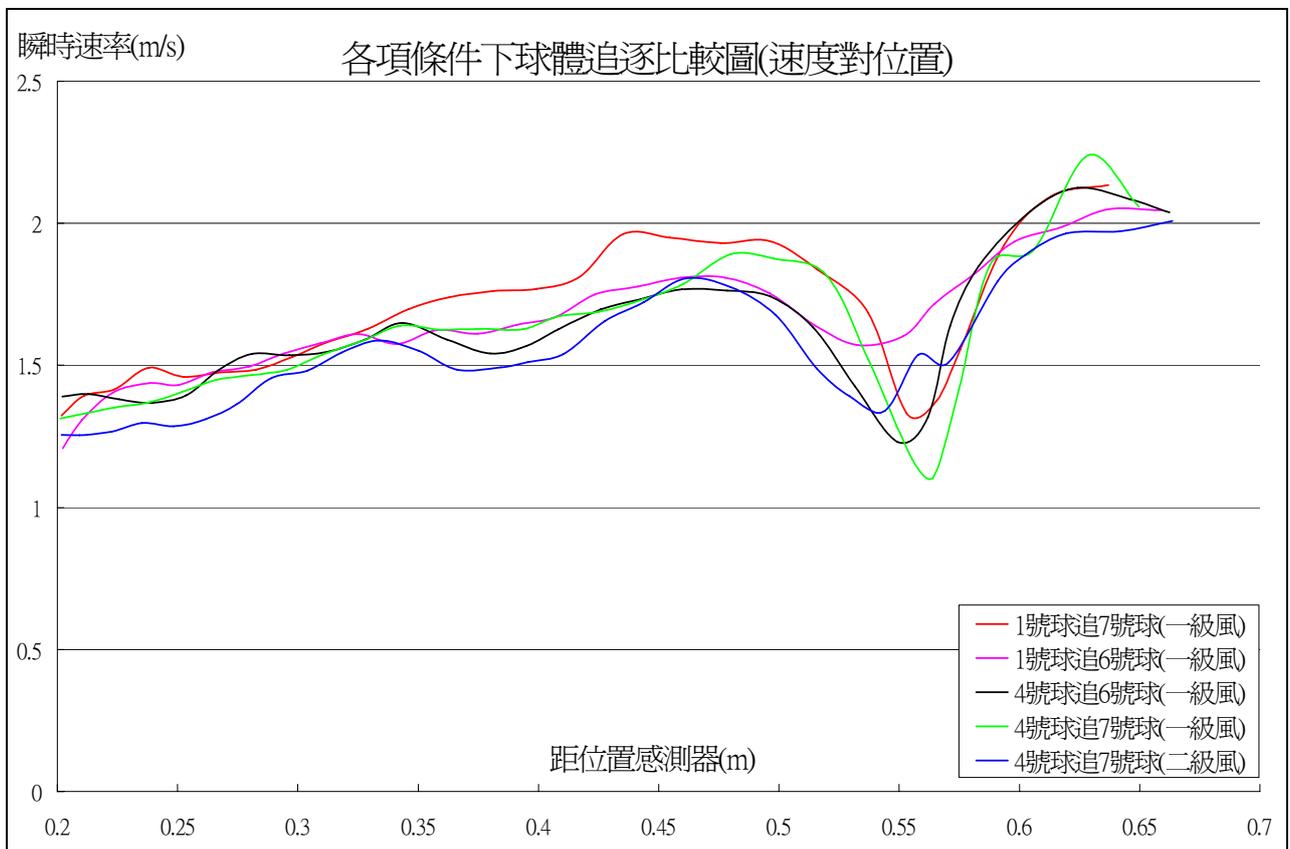
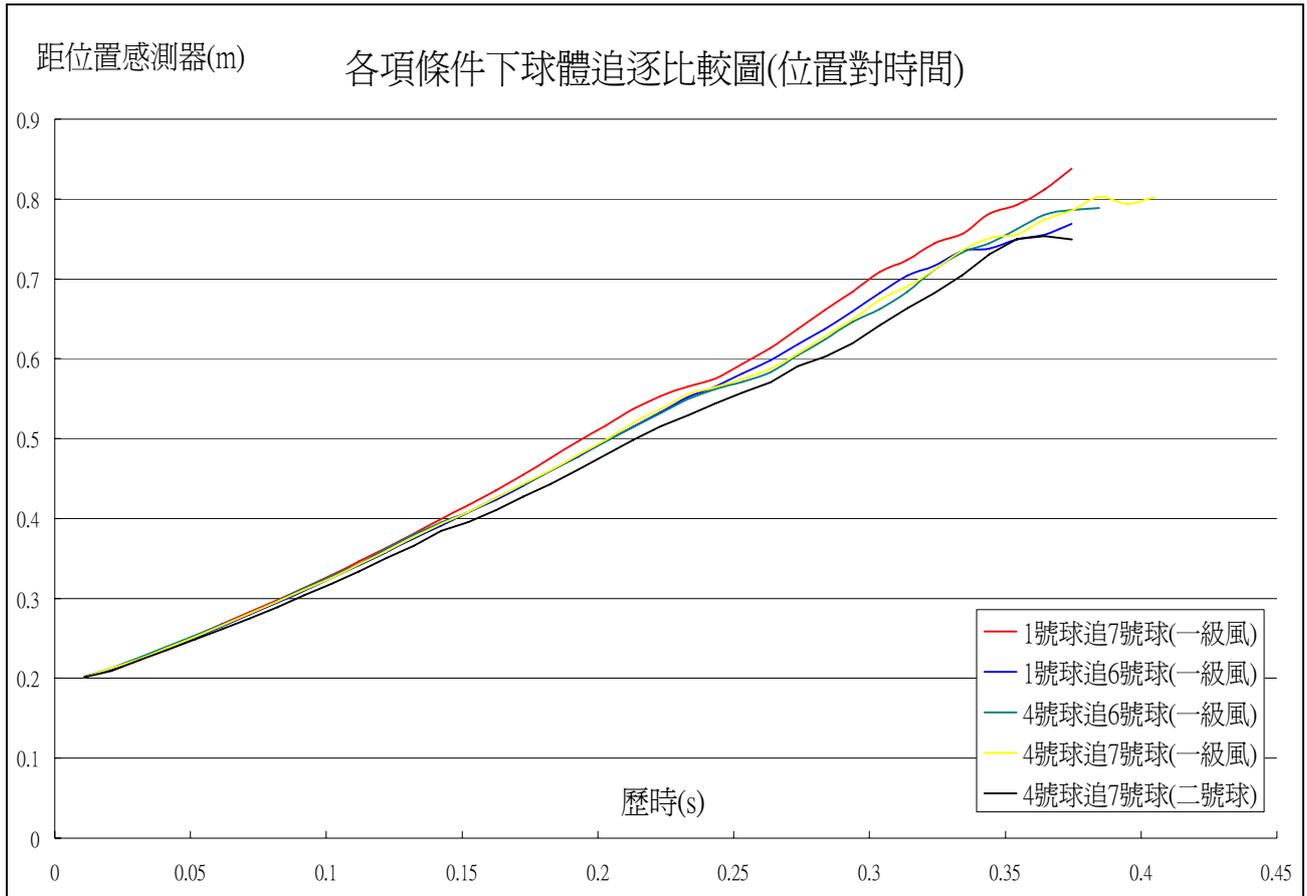
一號待測物終端速率約為 5.4 ± 0.25 m/s

理論值：6.24 m/s

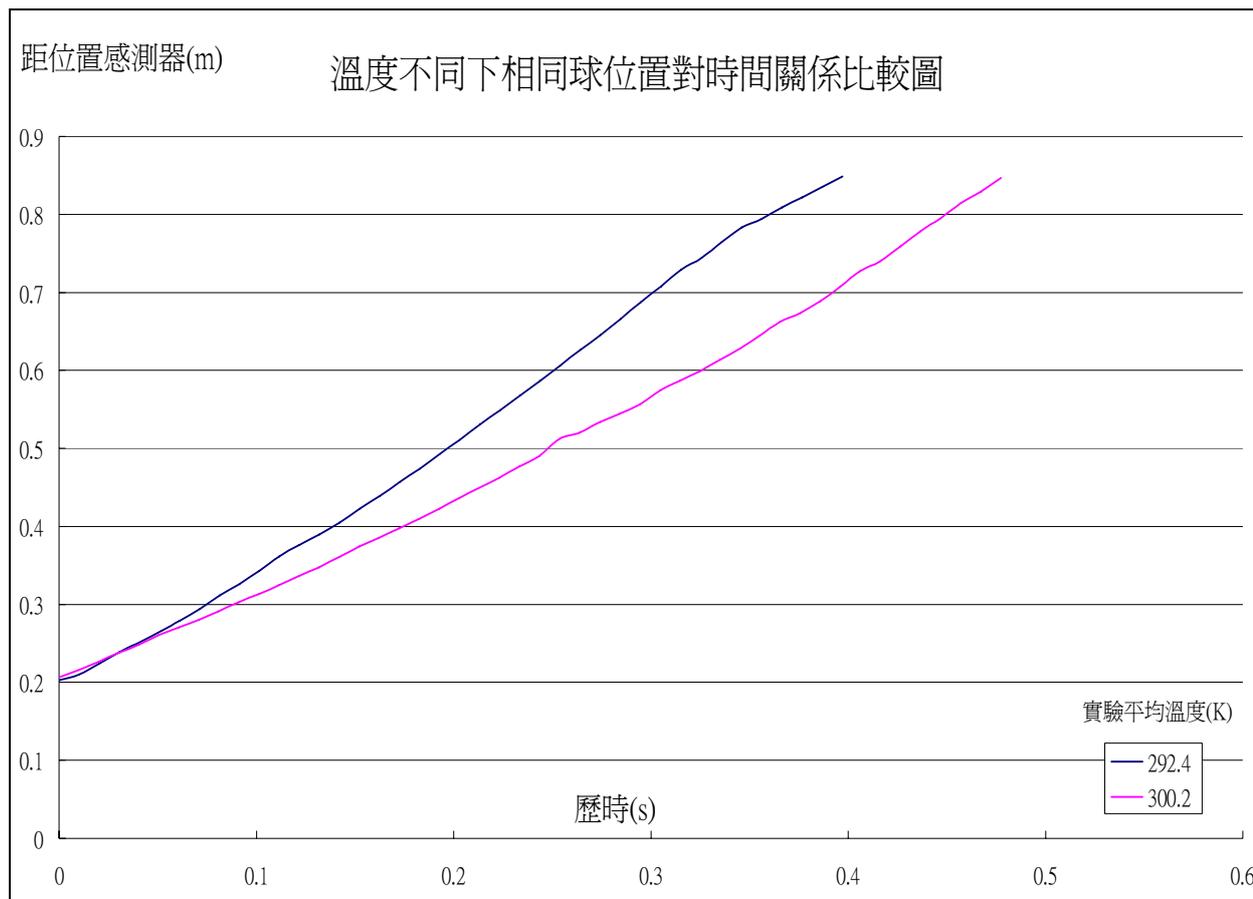
四號待測物終端速率約為 $5.1 \text{m/s} \pm 0.25$ m/s

理論值：5.75 m/s

四、下方球體在風洞中對上方落下球體速度的影響（追逐）

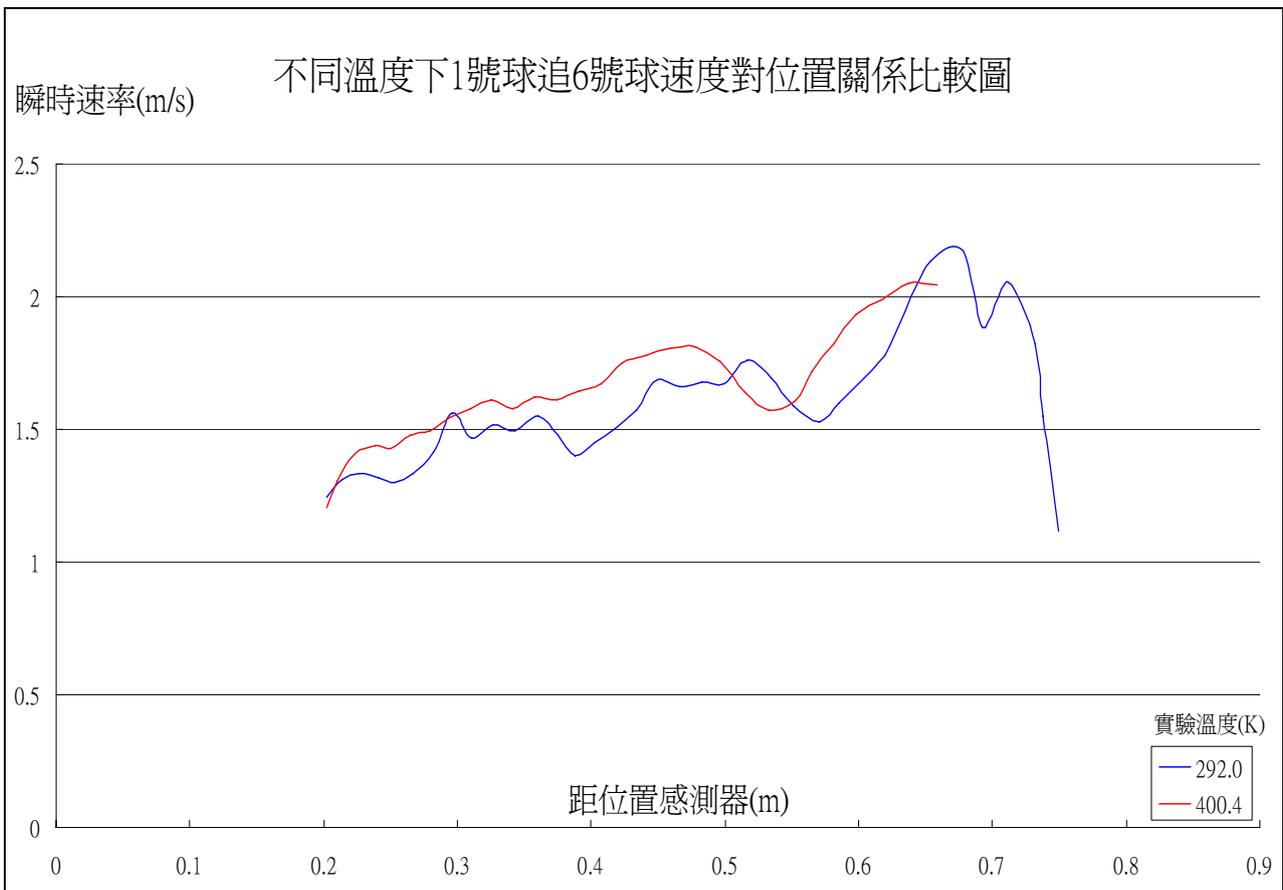
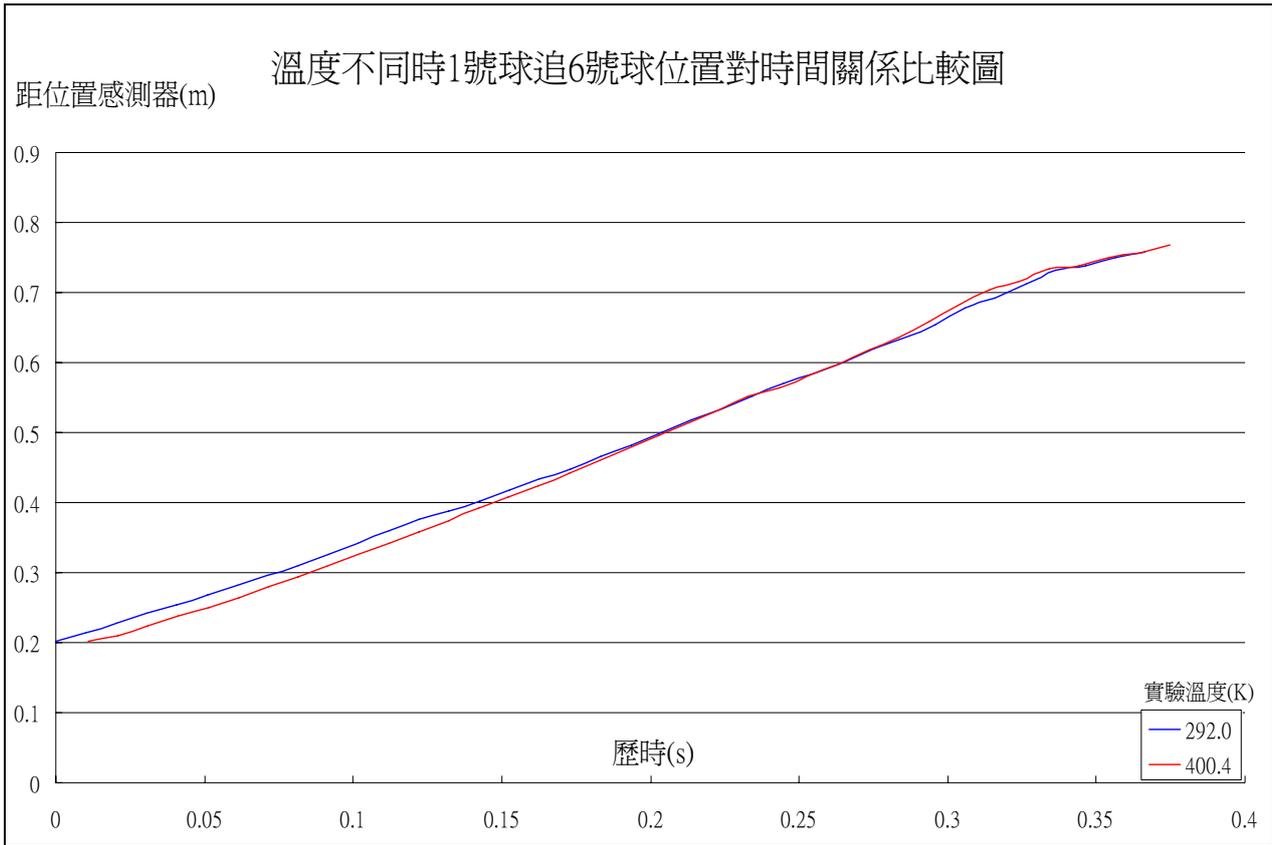


五、氣溫對物體下落的影響



圖中可看到，較高溫時需要較多時間才能下落到相同高度。舉例：下落到距位置感測器 70 公分處 300K 條件需要 0.4 秒，而 292K 只需要 0.3 秒

六、氣溫對物體追逐的影響



柒、討論與檢討

一、實驗一

風速大小，隨距風扇中心距離增加而增加，與風扇上切線速度成正相關，中心處因轉軸無法生風，出現無風情形。若實驗時取樣，數據容易出現誤差，應改以整流或去其他位置方法改善。至於最外圈風速，推測因為與外圍無風區域接觸，氣流較易產生亂流。使流速測定上出現極大誤差。此一問題已在實驗二 2 以集風裝置測量中，透過集風裝置位置的調整，避免亂流產生

二、實驗二

第一項實驗中，我們直接將球投入風扇上空。發現因為風扇氣流不是固定分佈（見研究結果一），待測物進入風扇上空時，只會做短暫漂浮，幾乎很難觀察。於是我們利用中午喝完的飲料杯，就地製作集風裝置。

第二項實驗中，我們以集風裝置測量時，集風裝置可將小球限制於出口周圍，大大改善先前無法限制小球運動位置的困境。我們測得的數據大約比書上所說的 9m/s 多出 $0.2\sim 0.3\text{m/s}$ 推測是因為，風扇所送出的風，是順時針旋轉的渦旋氣流，進入集風裝置中，因為缺少整流設備，實驗球體受渦旋氣流影響產生力矩旋轉。而旋轉的風，可能加速風速計的轉動，對實驗造成誤差，和兩位指導老師討論過後，我們認為實驗應加入整流設備。

接收學長的風洞後，進行少部分改裝，並以風洞對風扇所送出的氣流進行整流，並以整流裝置進行實驗二-3

實驗二-3 中發現，風洞內部水平風場不均勻的問題仍然存在(球是以垂直方向投入)，於是捨去二-3 所有數據。為了解決這個問題，我們設計了一些裝置，試圖導引氣流平均的進入整流段，但是因為整流段對風扇的距離太近，設計無明顯效果。最後只得以多餘的壓克力，做成隔版分隔風洞空間，為了不影響實驗進行，以及增加氣流強度，我們在整流段前，將非實驗區域的整流段以壓克力板封上，並以紙板固定於壓克力上，做成導流裝置，才做出一個理想的風洞實驗裝置，開始進行實驗

實驗二-4 中，因為轉速的改變極大，發現無法以轉速調節裝置調變風速，進行測量，我們改以位置感測器，取得下落中物體的各项運動數值。利用相對運動的概念進行實驗。直接以大理石變壓器做電壓調整，以大理石變壓器上的定格懸鈕，改變風速。定懸鈕在一時，內部風場為一級風狀態。懸鈕在二時，內部風場為二級風狀態。懸鈕到三時，風速過強，超過球體下落終端速度，保麗龍球無法下落，有時甚至直接飛出風洞，因此風速變因，我們改以定單位測量。

測量結果中發現，就位置對時間關係而言，風洞裝置可以將原本只需 $0.5\sim 0.55$ 秒的下落過程延長至 $0.6\sim 0.7$ 秒，證明風洞中確實能對球造成後曳力影響，而速度對時間關係上可發現一級風時，即使是到了 1m/s 還是有繼續加速的情形，只是加速情形較為緩和。大約加速到 1.5m/s 時結束測量。而二級風則因為較為高速的風力吹拂使得速度維持在 1.2m/s 附近，而一、二級風在落下速度上的差異，與風扇造成的風速差異幾乎相等，由此點現象，我們大致推出，球體的終端速率約在 $5.2\sim 5.3$ 之間，而我們以後曳力公式，推算 1 號球的理論終端速率，大約 6.2 左右

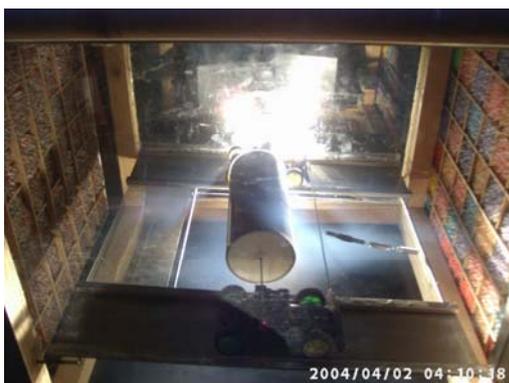
實驗二-5 中，我們將變因改為球體半徑，測量了 4 號球的下落，位置對時間而言，4 號球約需 0.7 秒左右下落到底，較原本 1 號球的數據來的長，經理論計算後推測是同密度下體積變小，有效面積增加，後曳力增加，終端速率降低，同風速的條件下，下落速度較慢。從

速度對時間關係，更可以看出兩者不同，4 號球因為體積較小，在一級風時就已經有 1 號球在二級風的效果，在到達下落速度後，持續加速現象很小甚至可說是幾乎沒有。

實驗二整體說來，在僅有 1 公尺長的垂直風洞中，我們看到了球體下落時間延長的現象，也量測了終端速率的量值。但是位置感測器量測的速度結果，確有很多的誤差值，嘗試以統計方式消去不合理的誤差。但物體下落過程中越接近實驗終點，速度的測定上，誤差越多。誤差原因推測有二點：原因一、可能是距位置感測器過遠，測量精準度降低。原因二、可能是因為整流不完全，出口風場不夠穩定。

三、實驗三：兩物體受風時交互作用的觀測

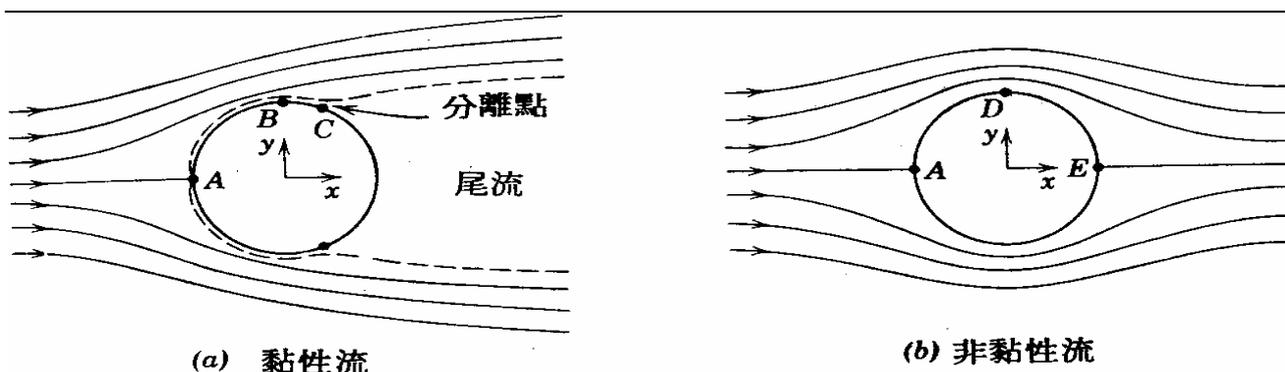
實驗三我們分別用 1、4 號球置於上，追逐下方以鐵絲穿過固定的 6、7 號球，分別以 1 追 6、4 追 6、1 追 7、4 追 7 的方法，模擬各式半徑的球體在下落過程中追逐的情形，其中，經由速度對位置關係作圖，我們發現待測物會有先減速後加速的現象。對固定六號球的實驗而言減速大約出現在離位置感測器 49 cm 處，加速則出現在 53 cm 處。對固定七號球的實驗而言，有兩段減加速段第一次減速段約在距離位置感測器 34 cm 處。第二次減速段，大約出現在距離位置感測器 50 公分左右，加速段則在 56 cm。對 1 號球和 4 號球受尾流影響的比較下可以發現，大球較小球不受尾流影響。而不同風速(一、二級風)下施放 4 號球，可以發現二級風條件下對下落球的影響較一級風來的小。實驗中觀察到。球體在落下時，會有一股作用力將其吸附在下方球上。



針對此一現象，我們做了大量實驗，經過多次的實驗發現，減速並不是因為實驗誤差，我們開始思索其他可能。在看過學長實驗報告後，其中有張照片(如上圖)是氣流流經圓柱體時產生尾流的煙線照片。我們推測是因為氣流流經球體時產生尾流，而當尾流重新匯聚於後方的時候，可能產生較強的風力，而使得球體略微減速，待通過尾流後，又被尾流的低壓帶牽引，開始加速。

另外球體下落時，似乎會因為下方固定球的影響，而有被下方球吸引的趨勢。我們猜測尾流是影響這項實驗的重大關鍵。我們特別去找尋資料，希望能充分了解尾流這個現象之所以會發生的原因，並加以思考。

當我們開始考慮一壓力與黏滯力均重要的穩流流場(流過球體之不可壓縮流)。若應用合宜之觀察技術，我們可觀察流場之一般性如圖 a 所示。



由上圖之流線對稱於 x 軸。流體沿中央流線撞擊在球體上，由 A 點分開流經該球。球上 A 點稱為滯流點。如同流體流經平板一般，在固體表面附近形成一邊界層。邊界層外圍之速度分佈情形可為由流線間之問隔求得。由於流體無法流穿流線。故流線間之問隔遞減者，其速度在該區間必遞增。相反的，流線之間隔遞增，其速度必遞減。

暫且考慮如圖 b 中所示流經球體之不可壓縮之非黏性流時，其流動乃對 x 軸與 y 均呈對稱。沿著球體，流速遞增至最大點 D ，然後沿著流動方向呈遞增。對非黏性流而言，速度之增加乃伴隨著壓力之減少，反之亦然，速度之減少乃伴隨著壓力之增加。因此對不可壓縮之無黏性流而言，壓力分佈乃由 A 點至 D 點呈遞減，然後由 D 點至 E 點呈遞增現象。由於其流動對稱於 x 軸與 y 軸，因此我們判斷其壓力分佈亦對呈於該兩軸。無黏性流動事實即如此。

由於在無黏性流中，剪應力並不存在，故決定對圓柱之淨作用力須考慮其壓力即可。現在壓力分佈呈對稱性，不可歸結出在無黏性流中無論在 x 或 y 方向上均無淨作用力。通常在 x 方向上之淨作用力稱之為拖力(阻力)。因此無黏性流流過圓柱體時並不產生拖力，此係違於常情，由經驗知道任何物體在真實流中均受到拖力。對無黏性流流經物體時，我們依據無黏性流之定義而忽略了邊界層之存在。

在真實的流動中，實驗證明出在圖 a 中， A 點和 C 點間的邊界層是薄的。由於該層係薄的，故假設其壓力場之狀態與無黏性流者相同乃是合理的。又知壓力在 A 點與 B 點之間呈遞減，故邊界層內之流體乃承受一沿著流動方向之淨壓力。在點 A 與點 B 間，淨壓力足夠克服剪應力之阻力，故流體之流動方向不變。

接著考慮球體背面，在 B 點之後邊界層內之流體。由於壓力沿著流動方向遞增，流體元素承受著與流動方向相反之淨壓力。最後，邊界層內流體之動量已不足以將該元素帶入壓力遞增區。緊鄰固體面之流體將停滯下來，而流動與表面分離；此點稱之為分離點。物體背後相對低壓區之形成乃緣起於邊界層之分離，該區屬動量較低區，通常稱為尾流(wake)。因而物體表面產生分離流時，源溯於流動方向上存有不平衡之淨壓力，結果導致物體之壓力拖力。尾流越大，其壓力拖力越大。(以上資料參考自流體力學)

而為了驗證是尾流造成的影響，我們繼續設計了以溫度為變因的實驗，藉降低溫度改變黏滯係數，進而改變尾流，觀察追逐時的改變。

四、實驗四：溫度對物體下落的影響

本實驗中發現，溫度較高時，到達相同高度需要較長飛行時間。從後曳力公式中可以知道，密度正比於後曳力，而密度與溫度成反比，因此溫度越高下降相同的距離需要更多時間是成立的。

五、實驗五：溫度對物體追逐的影響

第一項實驗中(1 號球追 6 號球)發現，溫度較低時，加速起點距離位置感測器較遠，也就是距離固定球(6 號球)的位置較近，尾流較短。

六、誤差的最大來源：

實驗過程中，最大誤差來源，在於風洞內部風場只有局部穩定，球體離開穩定風場數據將產生誤差，我們以反覆實驗加以克服，但還是花去不少時間。位置感測器極為靈敏，但速度擷取偶爾出現偏差值，雖然出現機會不高，但偏差往往很大，需以人工再次檢查數據。

七、實驗中的困難與克服：

(一)風洞箱的設計變更是我們所遇到的第一個難題，在老師的指導下與工友的協助下而解決。(感謝幹事廖文義先生協助電工，楊慶恭先生補強變更風洞設計。)

(二)轉速調整上原本的大理石變壓器，有固定段速，實驗二中所需變動風速上，極為不便。因此自行將插座與調光器結合，成為自制轉速調整裝置。(感謝徐錦木老師惠予指導)

(三)冷卻問題上，原先進行實驗的數日都炎熱不已，遂利用天候以及冰塊輔助，冰塊置於學校實驗室外窗所拆下來的紗窗上，用以通風排水，效果奇佳，使實驗達到 8~10°C 的溫度變化，以利實驗觀察。(感謝幹事翁妃貞小姐提供大量冰塊，紗窗等，使實驗順利進行)

捌、結論

- 一、實驗證實，可以風洞將自由落體運動減慢，進行落體運動觀察。並觀察終端速率。
- 二、乒乓球終端速率測量 9.2m/s，因為測量方式造成的誤差略高於理論值 9m/s。
- 三、保麗龍球終端速率測量略低於理論值，但十分接近，證明本方法可用於測量終端速率。
- 四、兩球體下落追逐時，位於上方球體在接近過程中會受尾流影響造成下落情形改變。
- 五、溫度降低時，球體下落終端速率會略微升高，所需下落時間減少。
- 六、溫度降低時，球體的尾流長度會略為縮短。

玖、參考資料

流體力學導論(Third Edition)

原著者：Robert W. Fox Alan T. McDonald

譯者：李基禎 郭鴻森

出版社：東華書局

流體力學

王叔厚著，三民書局印行

Fundamentals of physics extended

Halliday • Resnick • Walker

高級中學物質科學物理篇上冊教師手冊

南一書局

流體力學

鄭智光 圓山圖書

觀念物理叢書

休伊特 天下文化

物理馬戲團

沃克 天下文化

中華民國第四十四屆中小學科展物理科高中組順風而上

范晉祥 沈祐葦

范姜舜翔 黃冠豪

中華民國第四十五屆中小學科學展覽會
評 語

高中組 物理科

040115

飄飄欲仙

國立台東高級中學

評語：

1. 對風洞內各處風速之測定詳細，對風洞內落體運動觀測極有助益。
2. 對是否達終端速度之分析不夠詳盡。
3. 圖形中之數據點未標出而直接繪出連續曲線不妥。