

中華民國第四十六屆中小學科學展覽會
作品說明書

高中組 地球科學科

第三名

040510

閃!閃!閃!閃電在哪裡

學校名稱：嘉義市私立輔仁高級中學

作者： 高二 江宜穎 高二 簡宏安 高二 劉政憲 高二 李冠衡	指導老師： 陳盈霖
---	--------------

關 鍵 詞：閃電、雷、聲速

摘 要

本研究的目的是(1)設計完成在雨天可記錄閃電與雷聲的儀器；(2)藉由分析閃電與雷聲的時間差，來尋找閃電距觀測點的距離，以便了解學校附近落雷的分佈。儀器製作與測試是本次實驗的重點，在儀器製作部分經歷了 3 次的修正，來完成實驗儀器的設計。在儀器製作完畢後僅發生 1 次雷雨，在這次的雷雨中利用此儀器，總共尋找出 7 個閃電的距離。未來希望當夏季來臨時，利用夏日常見的午後雷陣雨進行更進一步的儀器測試與閃電方位的測定，期望能找出學校附近的閃電分佈情形，供學校避雷之參考。

壹、研究動機

夏日午後的雷陣雨往往挾帶著炫目的閃電，往往到了夏天的午後，天空總是雷聲大作，且不時也聽說有些電子設備被雷打壞的事件，就有同學突發奇想說，到底雷是打在哪裡呢？故希望藉由尋找閃電，來了解學校附近的落雷位置，以提供避雷之用。

貳、研究目的

- 一、製作在雨天可測得閃電與雷聲的儀器。
- 二、藉由分析閃電與雷聲的時間差，來推測閃電的距離。

參、研究設備與器材

一、竹子	6 支
二、童軍繩	7 條
三、熱熔槍	1 支
四、塑膠桶(含蓋)	1 個
五、水管(130cm)	1 條
六、2 公升透明寶特瓶	1 個
七、凸面鏡	1 面
八、塑膠版	4 大張
九、無線攝影機	1 架
十、無線電訊號發射器及接收器	1 組
十一、蓄電池(12V,7Ah)	1 顆
十二、電視	1 臺
十三、錄影機	1 架
十四、數位攝影機(DV)	1 臺
十五、錄音筆	1 個
十六、乾溼球溫度計	1 組

肆、研究方法

一、實驗原理：

雷雨的定義：

雷雨就是雷暴，它是由地方性的風暴伴隨閃電和雷聲而形成的，雷雨和一般陣雨不同，因為雷雨的發生，蘊藏閃電放電的現象。

雷電的形成：

1750 年時富蘭克林表明說：「閃電就是天雷所產生出來的火花」。積雨雲就如同發電所，雲層上部主要為正電而雲層下部則為負電。但是，為何對流會產生出電荷？產生的正負電荷是什麼因素使之上下分部，至今還沒有一個切確的解釋。

目前科學家比較認同的是雷雨的正負電荷產生及分離過程和雲的水滴和冰晶有關。由圖 1 可知，這種雲內水滴、冰雹、冰晶間互相碰撞、摩擦。在此作用下，較小的粒子帶正電，並且被上升氣流帶到雲的上方，較大的粒子帶負電，因重力而下降到雲的下端。假設

雲的頂端附近以正電荷組成，底部則為負電荷為主，這樣一來便有電位差存在，雲內的水滴會自動分配內部電荷，使水滴上部為負電，底部為正電，水滴的底部得到負離子較容易，所以，上升的氣流只剩下正離子。

個別的閃電其中含有多個閃擊，閃擊的間隔時間約為 0.001 秒，閃電的溫度約 15000~30000℃ 之間，也就是說閃電經過的軌跡，其周圍空氣瞬間受熱而導致迅速膨脹，進而發出爆炸聲。

雷雨的生命史：

近世研究雷雨，發現一個雷雨從誕生到死亡可以分為三個階段(如右圖 2)。由左而右分別是積雲期、成熟期、消散期。積雲期是一個雷雨的生長期，在此時期雲雨開始從四面八方聚集，在雲頂附近產生強烈的上升氣流，上升速率遠大於水平速率，為此時期主要的氣流運動。

而成熟期開始於雨從雲底落下。在此時期中，雲裡的冰晶

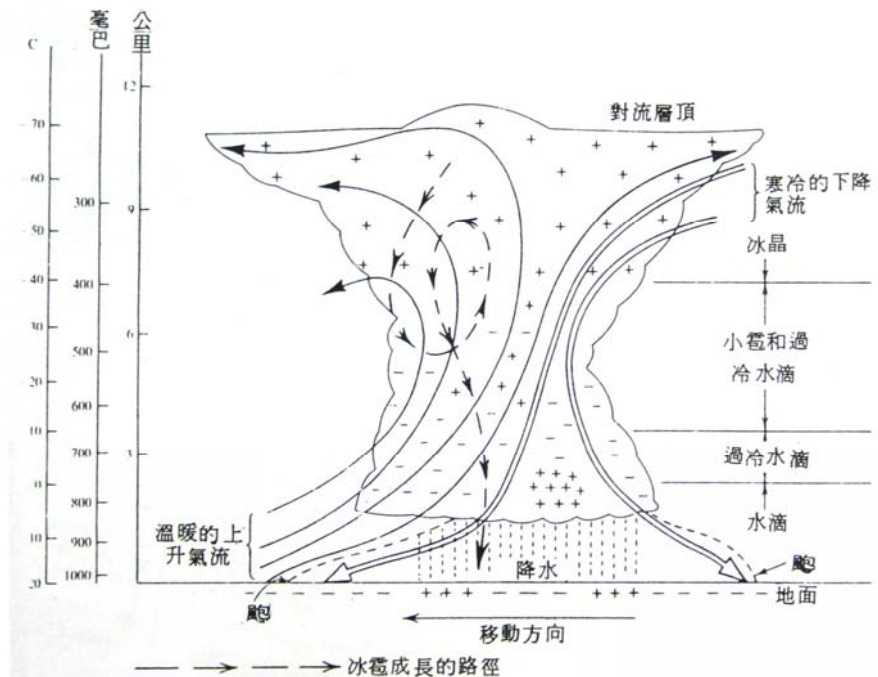


圖 1 劇烈積雨雲內電荷分佈和垂直氣流

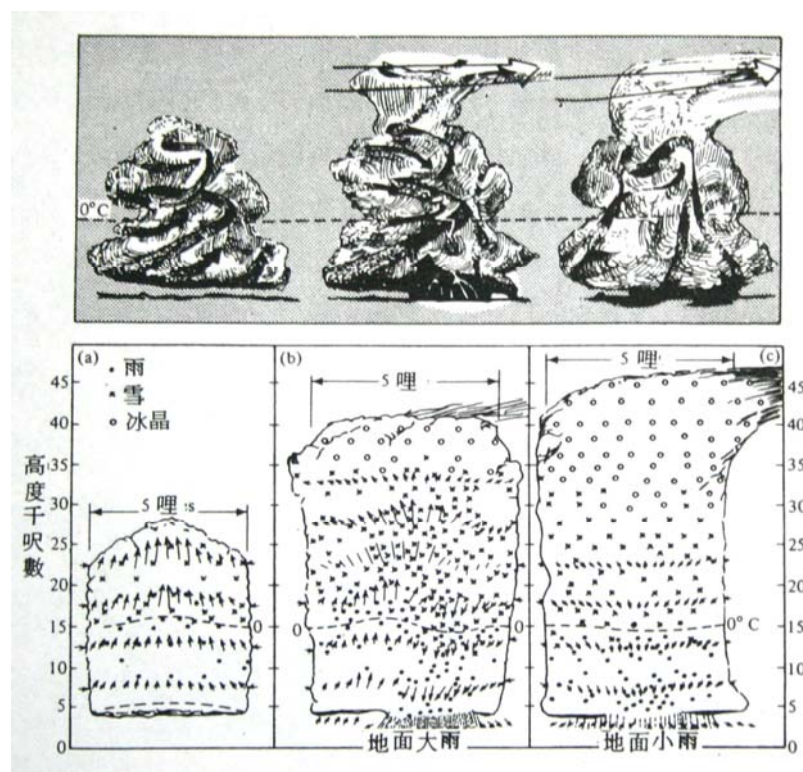


圖 2 典型積雨雲胞生命史

和水滴快速成長，上升氣流無法再支持它們的重量，因而開始以大雨點或冰雹降落，為雷雨的最強時期，此時期的閃電最頻繁，亂流最劇烈。但在雲層底端的上升氣流仍然很強，雲層底下還有強烈的下降氣流流出。當此下降氣流到達地面時，從雷暴中展開，所以當一個雷暴真正到達地面時，還伴隨著下降氣流形成的間歇性冷風為前導。

消散期為雷雨的死亡時期，此時期開始於下降氣流在整個雷雨胞上空展開時，上升氣流被切斷，降水率減小，因而下降氣流也逐漸變弱。最後閃電停止，雷雨開始消散，雷雨胞就此結束。

聲速：

目前在網路所找到的聲速計算程式方法大多是依據 Owen Cramer 在 1993 年所提出來的文章來設計的。這一套計算聲速的公式，可計算的溫度範圍為攝氏 0 到 30 度，相對濕度範圍為 RH 0%到 100%。Owen Cramer 所提出來的聲速計算公式主要是討論「溫度、壓力、濕度、二氧化碳含量對空氣中聲速的影響」其公式如下：

$$f(t, p, x_w, x_c) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + (a_3 + a_4 t + a_5 t^2) x_w + (a_6 + a_7 t + a_8 t^2) p + (a_9 + a_{10} t + a_{11} t^2) x_c + a_{12} x_w^2 + a_{13} p^2 + a_{14} x_c^2 + a_{15} x_w p x_c$$

where the t is the Celsius temperature, p is the pressure, x_w is the water vapor mole fraction, and x_c is the carbon dioxide mole fraction.

The coefficients are:

$a_0 = 331.5024$	$a_6 = -1.82 * 10^{-7}$	$a_{12} = -2.835\ 149$
$a_1 = 0.603\ 055$	$a_7 = 3.73 * 10^{-8}$	$a_{13} = -2.15 * 10^{-13}$
$a_2 = -0.000\ 528$	$a_8 = -2.93 * 10^{-10}$	$a_{14} = 29.179\ 762$
$a_3 = 51.471\ 935$	$a_9 = -85.209\ 31$	$a_{15} = 0.000\ 486$
$a_4 = 0.149\ 587\ 4$	$a_{10} = -0.228\ 525$	
$a_5 = -0.000\ 782$	$a_{11} = 5.91 * 10^{-5}$	

$$x_w = h f p_{sv} / p$$

where h is the relative humidity expressed as a fraction, f is the enhancement factor, and p_{sv} is the saturation vapor pressure of water vapor in air.

$$f = 1.000\ 62 + 3.14 * 10^{-8} p + 5.6 * 10^{-7} t^2 \text{ and}$$

$$p_{sv} = \exp (1.281\ 180\ 5 * 10^{-5} T^2 - 1.950\ 987\ 4 * 10^{-2} T + 34.049\ 260\ 34 - 6.353\ 631\ 1 * 10^3 / T) \text{ Pa}$$

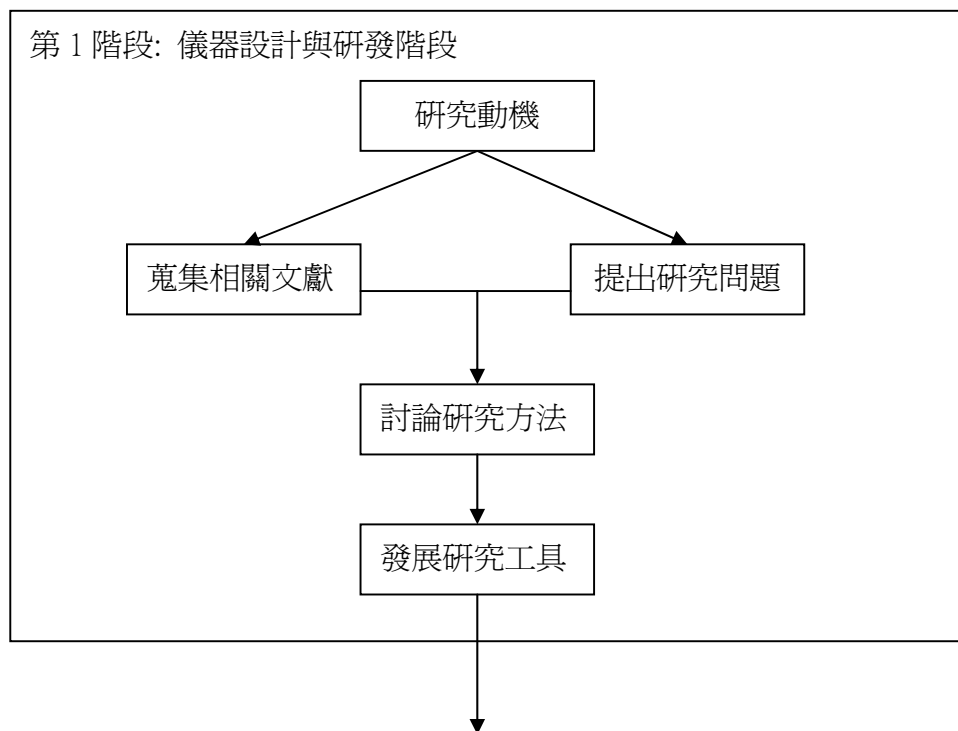
將我們正式實驗時所測出的數據，帶入由

http://www.measure.demon.co.uk/Acoustics_Software/speed.html 網站提供，依據上述公式所精簡製作成的 JAVA 程式，便可求出當時的聲速。

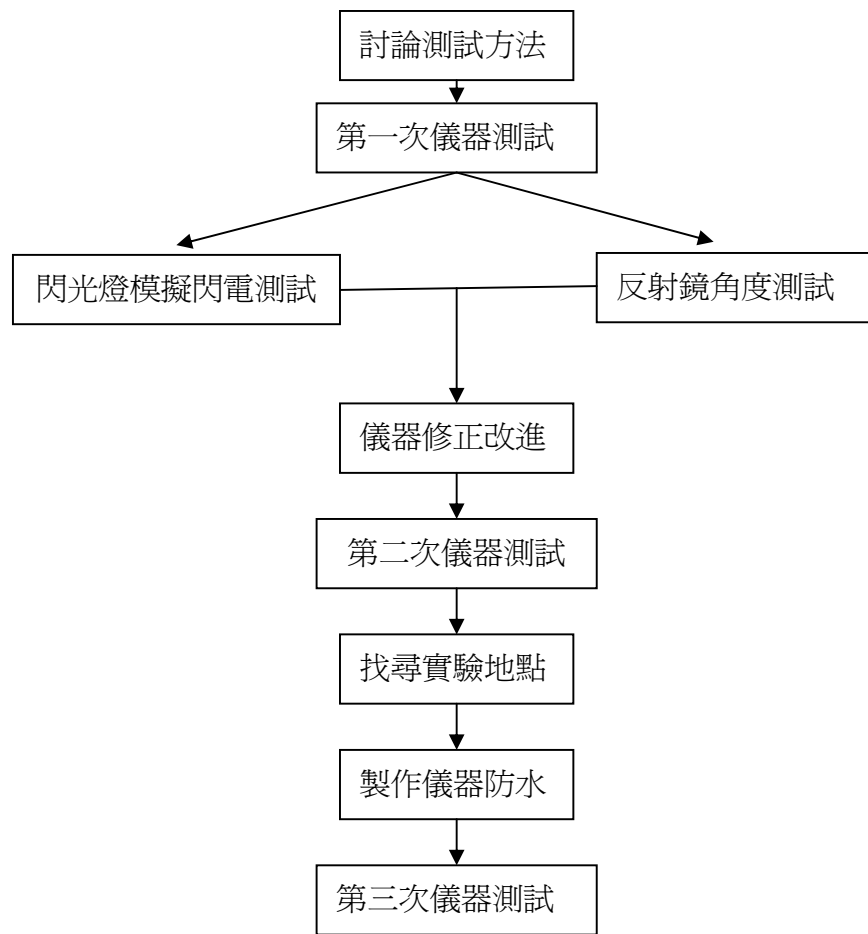
二、實驗步驟：

本研究分為儀器設計與研發階段、儀器測試階段與正式實驗階段等三個部分，共花費大約 7 個月的時間來完成這次的實驗，現將研究流程圖與結果摘錄如下：

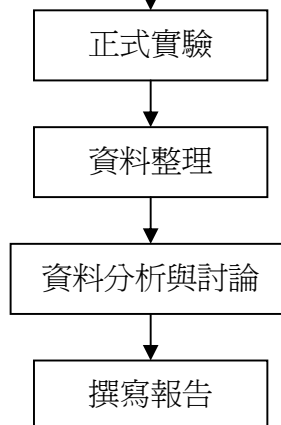
(一) 研究流程圖



第 2 階段：儀器測試階段



第 3 階段：正式實驗階段



(二) 儀器設計與研發階段

1. 攝影機架臺的製作：

- (1) 製作方法：準備六根竹子、七條童軍繩。用三根竹子為底，排成三角形，並用童軍繩固定三個角，當作底架。接著以底部三角為支撐點，使另外三根竹子向上相交於一點，做出一個立體三角錐。
- (2) 用途：此竹製三角架(圖 3)的用途是為固定攝影機於支架上方，使攝影機可以對準下方反射鏡。



圖 3 竹製三角架

2. 反射鏡的製作：

本研究小組在開始設計實驗時，想了許多的方式來拍攝整個天空，偶然在一次尋找資料的過程中，看到了香港天文台在觀測太陽的日照儀，得到了使用反射鏡的靈感。

在反射鏡的部分，本研究小組使用了許多材料來製作並反覆地測試，經過 3 次的修改後，最後決定採用凸面鏡來作為正式實驗時的反射鏡。其反射鏡研發結果如下：

第 1 階段：半圓形鋁箔反射器

製作方法：準備兩個透明塑膠半球(此為地科的天球模型教材)，1 捲鋁箔。將兩

個半球之間夾入一層鋁箔(圖 4)。

放棄原因：本想使之有反光效果，以觀察閃電的情況，但測試時因為反光效果不佳，且用閃光燈測試時，由於鋁箔紙對光的漫射，造成幾乎有近 $\frac{1}{3}$ 的面積會反光，所以放棄此反射鏡。並以此設計為主來改良第 2 階段的反射器。



圖 4 半圓形鋁箔反射器

第 2 階段：六角錐體包裝紙反射器

製作方法：準備厚紙板、銀色包裝紙。將厚紙板作成六角錐的形狀，再用包裝紙銀色的亮面將六角錐整個包覆住(圖 5)。

放棄原因：雖然此反射器的反光效果比上一組好，但是仍達不到研究小組的要求，因此放棄此反射器，且研究小組經過討論後，決定使用鏡子作出反射效果。



圖 5 六角錐包裝紙反射器

第3階段：六角錐鏡子反射鏡

製作方法：研究小組經過了多次測試鏡子反射效果後，決定用塑膠板與鏡子製作出反射鏡(圖 6)。使用塑膠板是因為使其具有防水的功用，而鏡子則到鏡子店購買整片的平面鏡後，再請店家裁切成需要的尺寸，最後將裁切好的鏡子用熱熔膠黏貼到塑膠板上作成的六角錐鏡。

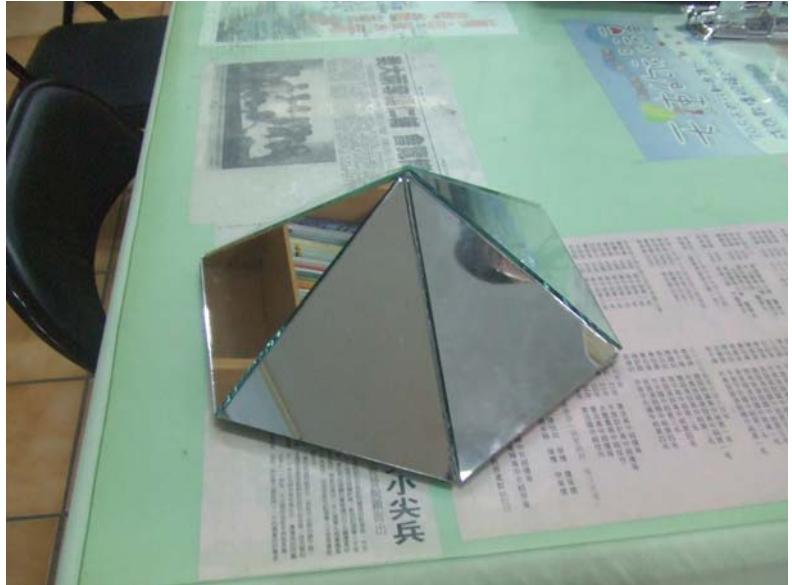


圖 6 六角錐鏡子反射鏡

放棄原因：利用此錐形反射鏡在拍攝的部分，因錐鏡的仰角太大，造成許多的死角，縮小了可觀測的天空範圍(如圖 7)，研究小組最後決定放棄此反射鏡。

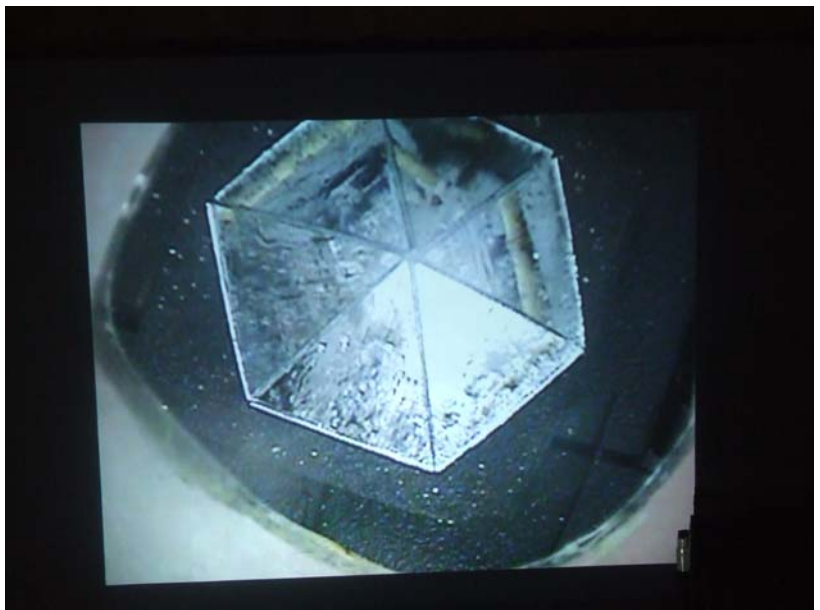


圖 7 攝影鏡頭下的六角錐鏡子反射鏡與影像

第 4 階段：凸面鏡

決定原因：研究小組發現鏡子作出的反射效果非常良好，組員仍希望將反射鏡做成半圓形狀以減少死角，於是至玻璃行訪價後，發現直接訂製一個半圓形鏡子的價格非常昂貴。後來在學校內找到一面凸面鏡(圖 8a)，如同豎立在公路的轉角處，用以警示來(對向)車的凸面鏡，由於鏡子的曲度很小(圖 8b)，而讓觀測的角度也相對變小(視角約 100°)，雖然研究小組錄到閃電的機率也相對地變小，但這組反射鏡也是拍攝效果最好的。



圖 8a 凸面鏡鳥瞰圖



圖 8b 凸面鏡側視圖



圖 9 儀器改良情形，歷時約 4 個月(由左至右為第 1 階段至第 4 階段)

3. 攝影機的防水：

攝影機本身具備工業等級 IP68 之防水標準，可於水下 10M 防水 5 分鐘。為避免雨水沾濕鏡頭，在其外側仍製作一避雨罩，減少雨水沾濕鏡頭造成影像不清的情形發生(如圖 10)。



圖 10 攝影機防水

將攝影機裝置在反射鏡正上方，並固定在竹架上，可以在雨天進行拍攝。

4. 蓄電池與無線訊號發射器的防水：

將提供電力的蓄電池與無線訊號發射器放置在塑膠桶中(圖 11)，可以在大雨中提供攝影機與訊號發射器的電源，並利用無線訊號發射器將攝影機所攝得的影像傳送至樓下的接收器。



圖 11 蓄電池與訊號發射器

5. 聲音(雷聲)的記錄：

研究小組最初的設計是將麥克風裝置在攝影機的旁邊，以便可以在閃電的閃光發生時，一併記錄雷聲的資料，再藉由訊號發射器將畫面與聲音的資料同時傳送至無線接收器處，並將接收器連接至錄影機來記錄實驗數據。

但是在製作的過程中，訊號發射器原本只設計發射影像訊號，如果想要再加入聲音訊號，經詢問專家後，必須重新設計訊號發射器，如此便工程浩大，暫時打住。

後來研究小組想到，在接收影像的儀器下方找一間空教室(垂直距離約 3m)，將無線攝影機所拍攝的畫面用單槍投影機投射出來後，利用 DV 將影像錄下，且在錄製的過程中也利用 DV 本身的麥克風來記錄雷聲，如此便可以解決聲音與影像同步的問題。

(三) 測試階段

1. 儀器測試

採用相機的閃光燈來代替閃電，接著爲了使閃光燈所發出的光源更加明顯，將部分實驗器材（攝影機、攝影機架臺、凸面鏡、發射器、蓄電池）架設在 A 暗室。並在 B 暗室架設電視、接收器、DV，透過接收器把攝影機在 A 暗室的畫面透過電視放映出來，並用 DV 錄製下來。

在 A 暗室中，距凸面鏡不同距離、不同角度利用閃光燈打出閃光，以測試凸面鏡的死角。測試完成後，把 DV 錄製的畫面傳到電腦存檔成爲 MPEG1 格式，此格式爲每秒 30 個畫格，利用 Ulead mediastudio 7.0 軟體來查看以 $\frac{1}{30}$ 秒爲間隔的影像，逐一找出閃光燈的光源起始點。因爲真正的閃電發生時，會伴隨著雷聲，所以可以利用聲速與光速的時間差來算出閃電至觀測點的距離，但在此測試中，我們僅以閃光燈來代替閃電，並沒有聲音的產生，因此無法測出閃光燈到測試點的距離。此階段的主要目的只是要測出此裝置觀測的清晰度及可用性。

2. 尋找實驗地點

為尋求可以同時間拍攝到完整的天空，克服遮蔽物的困擾，所以在校園尋找最高的觀測點。

(一)選擇在行政大樓五樓樓頂(圖 12)。

放棄原因：放置地點旁邊有一座電梯塔，使得視野嚴重受阻。



圖 12 行政大樓五樓樓頂

(二)移至北三樓樓頂(圖 13)。

放棄原因：西側為行政大樓，觀測時會擋住西方的天空，導致觀測的範圍縮小，且距接收器設置地點過遠，以致於收訊不良，故放棄本地點。



圖 13 北三樓樓頂

(三)選擇本校操場(圖 14)。

放棄原因：本校操場周圍非常空曠沒有遮蔽物，雖然克服遮蔽物的困擾，但因距離接收器設置地點太遠，以致於無線訊號在傳輸過程中收訊不良，只好忍痛放棄此地點。



圖 14 操場

(四)選擇在學校東樓一樓樓頂(圖 15)。

決定原因：此地點的視線死角角度範圍是研究小組可以接受的，並且樓下教室內有投影機布幕可作為我們的接收點，此地點克服了訊號與死角視線這兩個問題，因此決定為正式實驗的觀測點。



圖 15 東樓一樓樓頂

(四) 正式實驗階段

1. 資料收集階段

在 2006/04/12 晚上經由氣象局的報導得知，在 2006/04/13 對台灣嘉義以北地區發布大雨特報。

- (1) 4/13 號一早，研究小組便將儀器架設在學校東樓的樓頂(圖 17)，並把無線接收器、DV 與投影機架設於樓下的空教室中。

約在上午 11:00 左右開始有閃電的發生，研究小組使用乾溼球溫度計(圖 16)，測得乾球溫度為 22.0°C ，溼球溫度為 21.4°C ，經查表後得相對溼度為 95%。

- (2) 並藉由無線攝影機回傳的影像，利用投影機將畫面投射在布幕上，再以 DV 錄下所觀察到的畫面及雷聲(圖 18)。



圖 16 乾溼球溫度計



圖 17 正式實驗時儀器擺設情形

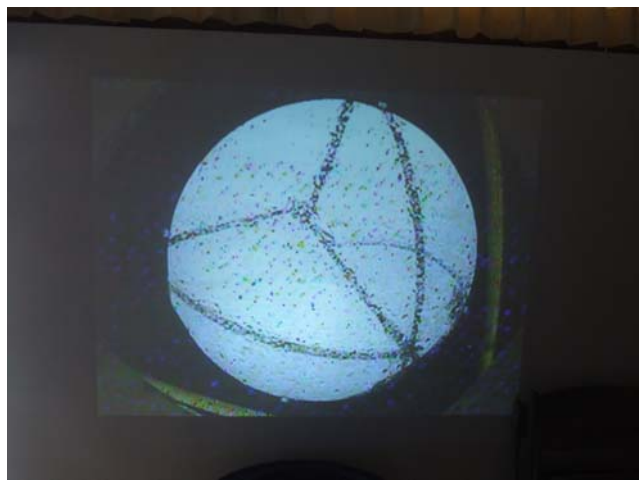


圖 18 實際錄影情況

2. 資料整理與分析階段

- (1) 資料整理：等雨停後將錄影機所攝錄到的畫面傳輸至電腦，並存成 MPEG1 的格式的文件檔。
- (2) 利用 Ulead mediastudio 7.0 軟體進行分析研究小組所錄製之閃電的檔案將影像與聲音從 MPEG 檔中分離出來，藉由畫面的分析，記錄閃電發生的時間與畫格數。

- (3) 利用 Ulead Audio Editor 7.0 將聲音檔載入後，便可得到聲音的波形，將步驟 2 所得到的閃電時間為主，找到波形中最大聲的點，來分析並記錄雷聲到達的時間。
- (4) 將步驟 2、3 所得到閃電與雷聲的時間相減後，得到光速與聲速的時間差。利用 Microsoft Excel 2003 將所量測到的時間差與當時所記錄之氣溫、相對溼度，代入聲速公式乘上時間差後，便可求得閃電發生的距離。

伍、研究結果

觀測日期為 2006/4/13 上午 11:00~12:30，使用乾溼球溫度計，測得乾球溫度為 22.0°C ，溼球溫度為 21.4°C ，經查表後得相對溼度為 95%。

由聲速公式算出當時的聲速為 345.9m/s 。

項次	閃電與雷聲時間差(s)	距離(m)	誤差百分比(%)
1	2.84	982 ± 12	1.0 %
2	4.87	1684 ± 12	0.7 %
3	10.72	3707 ± 12	0.3 %
4	6.39	2210 ± 12	0.5 %
5	3.87	1338 ± 12	0.9 %
6	8.69	3005 ± 12	0.4 %
7	1.33	460 ± 12	2.6 %

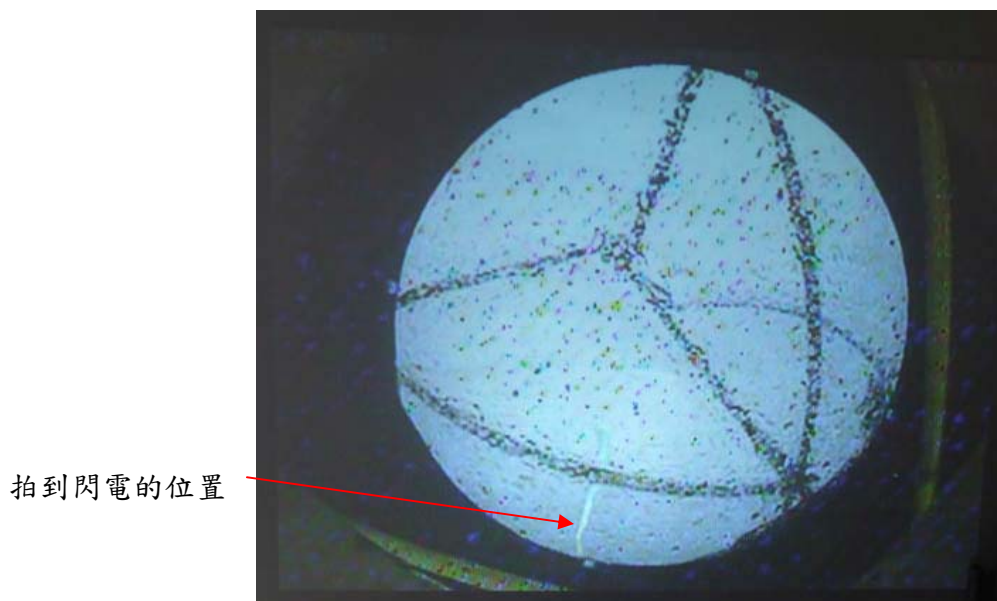


圖 19 拍到的閃電之一

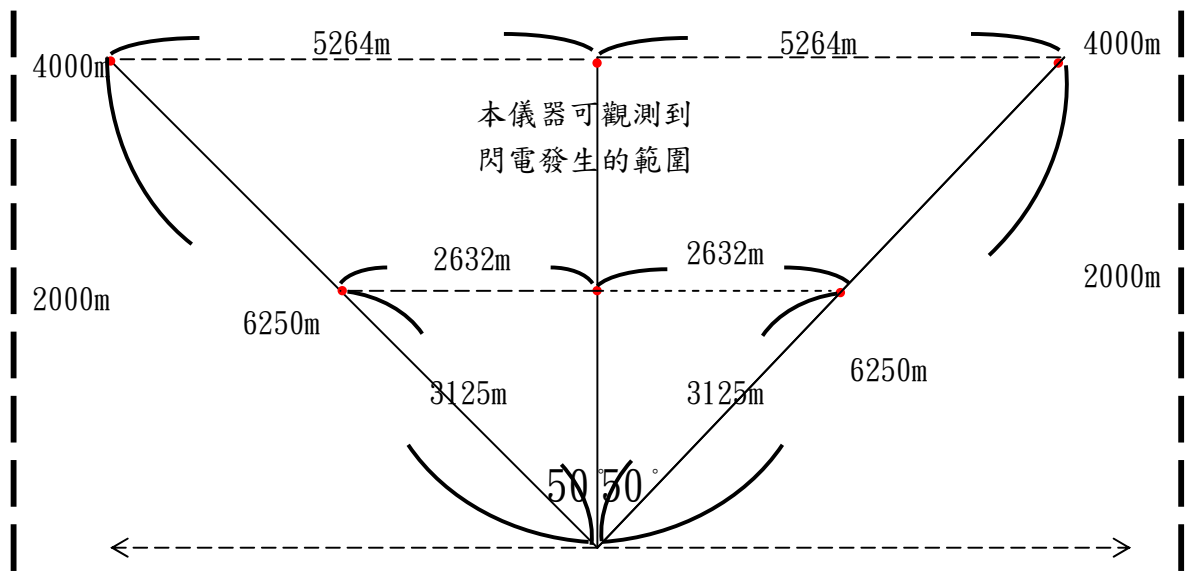
陸、結論與討論：

- 一、聲速公式：研究小組根據程式，帶入空氣與溼度的量值，求出 22℃時，相對溼度 0%~100 %的聲速值，如下表所示：

m/s	RH%											
T(°C)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95	100
20	343.4	343.6	343.6	343.8	343.9	344.0	344.1	344.2	344.3	344.5	344.6	344.6
22	344.5	344.6	344.8	344.9	345.1	345.2	345.3	345.5	345.6	345.8	345.9	345.9
25	346.3	346.5	346.6	346.8	347.0	347.1	347.3	347.5	347.7	347.8	347.9	348.0

由上表所示，相對溼度的變化會影響聲速，但是影響幅度不大，以 RH=90%~100%來說，聲速大約只有 0.1m/s 的差值，對於本次實驗觀測到的閃電，大都是離觀測點較近的，以最遠的 3 號閃電來說，0.1m/s 的誤差在 10.72 秒的時間差中，只有 1m 左右的誤差，遠小於實驗儀器所造成的誤差，且閃電到測站之間的空氣溫度與濕度的變化也無法觀測。所以，本小組在此情形下將閃電到測站之間的空氣濕度與溫度所造成的聲速改變忽略不計。

- 二、下圖為我們可以觀測到的閃電發生的距離範圍，由於凸面鏡的曲率範圍受限，所以我們可以觀測到的範圍為以天頂為基準左右各 50 度的圓錐。



三、本次實驗受限於 MPEG1 檔案格式問題，實驗誤差為 1 個畫格($\frac{1}{30}$ 秒)，所以以當時的氣溫

22°C 來說，理論實驗誤差為 $345.9 \frac{m}{s} \times \frac{1}{30} s = 11.53m$ ，若考慮實驗數據之準確值與估計值，

本實驗將誤差訂為 12 公尺。

四、本實驗的目的主要是設計一部可以觀測閃電的儀器來進行閃電的觀測，儀器設計完成後至實驗結束，僅遭遇到 1 次的雷雨，因此正式實驗的次數只有一次。

五、嘉義地區在冬季時幾乎沒有降雨，更無雷雨的天氣出現，最後在今年 4 月中旬的一場雷雨，終於可以接收到資料，也因為之前沒有雷雨可以密集的測試儀器，故本次實驗所測量到的閃電大多是離學校較近的閃電。

六、落雷的預防方面：由內政部營建署「建築技術規則建築設備編第一章第五節避雷設備」第 21 條指出，『(保護角與保護範圍) 避雷針針尖與受保護地面周邊所形成之圓錐體即為避雷針之保護範圍，而此圓錐體之頂角之一半即謂保護角，普通建築物之保護角不得超過六十度，危險品倉庫之保護角不得超過四十五度。』，校內行政大樓最高樓層約 6 層樓加上電梯塔至少有 30 公尺高，在半徑 50 公尺內的相對突出物體均可能成為落雷點。實驗地點周圍地點半徑 50 公尺範圍內還有建築物較我們的觀測點還高，因此我們較不會有被雷擊中的可能。

七、未來努力方向：

(一) 研究結果可大略測出觀測點附近的落雷，但是仍無法完全的測出所有落雷。因此未來計畫利用第 2 組腳架以延長觀測的基線，利用三角測量法來計算出閃電更精確的位置。

(二) 克服視線上死角無法觀測的問題，尋找曲率更大的反射鏡，以擴大觀察角度，便可觀測到更遠的閃電。

(三) 以觀測點為圓心，製作落雷分布圖，討論落雷與週遭建築物是否有特定的關係。

(四) 未來將以有線發射器代替無線發射器，以減少閃電發生時產生的干擾，由於有線傳送較無線不易受干擾，未來使用有線時，將能減小測得的誤差並能減少閃電干擾的程度。

(五) 礙於 DV 受限於每秒三十個畫格的限制，未來將計畫跟大學商借高速錄影機，每秒高達三千個畫格，如此將可以減小實驗的誤差。

(六) 研究小組從第 39 屆的地科科展的優勝作品「雷公之鎚落在何處－探討影響閃電分布的因素」中得知，閃電的發生與尖端物體、溫度都有關係。未來延伸腳架後，因為都市的高聳建築物較多，又因熱島效應，溫度比鄉村高，因此研究小組將分別在鄉村與都市觀測閃電數量，並經由數據比較分析閃電與地面建築物的關係。

(七) 未來希望能將麥克風裝置在攝影機的旁邊，以便可以在閃電的閃光發生時，一併記錄雷聲的資料，再藉由訊號發射器將畫面與聲音的資料同時傳送至無線接收器處，並將接收器連接至錄影機來記錄實驗數據。但是在製作的過程中，訊號發射器原本只設計發射影像訊號，如果想要再加入聲音訊號，經詢問電信工程專家後，必須重新設計訊號發射器，將聲波與影像一併利用無線訊號發射器傳送到觀察室，一方面錄影記錄，另一方面也可以減少儀器配置所造成的誤差。

柒、參考資料

- 一、王執民(民 94)。物質科學地球科學篇(下)P61~P64。臺北縣：龍騰書局。
- 二、內政部營建署(民 95 修正)。建築技術規則建築設備編。第 19~25 條。
- 三、林明瑞(民 93)。高級中學物理上冊教師手冊 P4~P8。臺北市：南一書局。
- 四、林映岑、周婉婷、林欣穎、李柳萱(民 88)。雷公之鎚落在何處－探討影響閃電分布的因素。中華民國第 39 屆中小學科學展覽會，優勝作品專輯，高中組。P.139~P.149。
- 五、香港天文台：<http://www.weather.gov.hk/wxinfo/lis/indexc.htm>。
- 六、徐晉淮(民 73)。光復科學圖鑑 天氣、氣象 P52~P54；P62~P64。台北：光復書局。
- 七、戚啓勳(民 90)。大氣科學 P306~P311。臺北市：大中國圖書公司。
- 八、Dennis A. Bohn(1988). Environmental Effects on the Speed of Sound. *Journal of the Audio Engineering Society*. 36(4).
- 九、Owen Cramer(1993). The variation of the specific heat ratio and the speed of sound in air with temperature, pressure, humidity, and CO₂ concentration. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 93(5). P2510-P2616.
- 十、Speed Of Sound Calculator：
http://www.measure.demon.co.uk/Acoustics_Software/speed.html

評語

040510 閃！閃！閃！閃電在哪裡

探討方法可再加明確，多測幾組閃電的數據，予以分析，並與台灣電力公司取得閃電資料比對之，如此更可增加確定性及實用性。