

## 大氣折射水工觀測實驗系統研發

### The Development of an Atmosphere Refraction Hydraulic Experiment System

胡明森<sup>1</sup> 陶家瑞<sup>2</sup>

Ming-Sen Hu<sup>1</sup>, Chia-Rei Tao<sup>2</sup>

航空通訊電子系副教授<sup>1</sup> 軍事氣象系講師<sup>2</sup> 空軍航空技術學院

<sup>1</sup>Department of Aviation Communication & Electronics, <sup>2</sup>Department of Military Meteorology, Air Force Institute of Technology

#### 摘要

大氣科學深奧且複雜，從物理光學上可知，電磁波在經過不同密度之介質時會產生折射現象，且其行進路徑上又會有散射或反射發生。由於這些傳播特性，當太陽光射向地球經過大氣層時，不但引起變幻莫測的天氣現象，也容易引發豐富多采的大氣光象，諸如天邊的彩虹、晨曦、火紅的夕陽、極光或海市蜃樓…等等。二次大戰後微波雷達被廣泛應用在軍事、航空及氣象領域，科學家發現大氣垂直溫度之變化，電磁波可能產生次折射、超折射或陷波折射等異常現象，致使雷達偵測上產生盲區而造成防空漏洞，此種現象在冬季大氣垂直溫度有逆溫時特別嚴重。另一方面，當運用氣象雷達進行天氣即時預報時，雷達回波也易因逆溫現象而產生異常折射，導致氣象預報員誤判劇烈天氣出現的位置或回波強度等，影響氣象預報準確率，甚至危及飛航安全。本文研製一套大氣折射水工觀測實驗系統，利用長方形水槽做為水工模型，藉由改變水槽上下層水溫並控制其溫差，讓水槽中液體介質產生溫度(密度)之漸層變化(水溫越高密度越小，水溫越低密度越大)，然後將激光器光束入射或引太陽光射入水工模型，以模擬電磁波在大氣層中各種異常折射現象，達到將抽象的大氣光學現象具體化、形象化之目標。

**關鍵字：**電磁波折射、大氣光象、氣象雷達偵測、逆溫層、水工觀測實驗

#### 一、前言

大氣是地球的最外層，愈向外空氣愈稀薄，延綿伸向浩瀚的宇宙，沒有明顯的界限。大氣對人類的重要性有以下幾點：一是它具有溫室效應，可防止地球日夜溫差過大；二是吸收來自太陽99%的紫外線，讓地面生物免於受到紫外線傷害；三是阻擋落向地球的隕石，使它受到摩擦變為火流星而氣化。實際上，大氣對人類的重要性不僅如此，當太陽光射向地球時，先行經過大氣

層，不但引起變幻莫測的天氣現象，而且引發豐富多采的大氣光象，例如天邊的彩虹、火紅的大夕陽、甚至極光或海市蜃樓等等[1,6,7]。

由於大氣科學深奧複雜，學過物理的人都知道，電磁波在經過不同密度的介質時會產生折射現象[8]，電磁波的折射可依據斯涅爾定律(Snell's Law) [12,13,14]，電磁波入射到不同介質的界面上會發生折射或反射，入射波和折射

波位於同一個平面上，並且與界面法線的夾角滿足下列關係：

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

其中 $n_1$ 和 $n_2$ 分別是兩個介質的折射率， $\theta_1$ 和 $\theta_2$ 分別為入射波、折射波與界面法線之夾角，稱之為入射角和折射角。如圖1所示，當電磁波從折射率較大的介質傳播進入折射率較小的介質時，其入射角越大，光線的折射角也越大，直至當入射角大於臨界角 $\theta_c$ 時，由於折射角不能大於 $90^\circ$ ，即會出現全反射現象[10,11]。

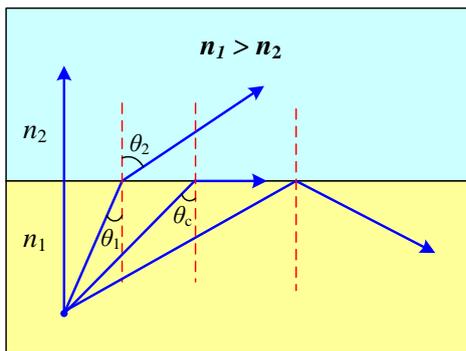
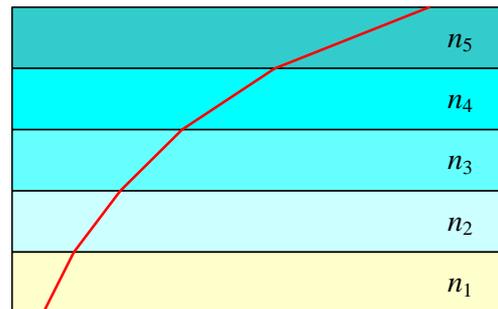


圖1. 電磁波的折射與反射[1]

其實可見光即是一種電磁波，在大氣光象中相關於大氣折射的部分牽涉到光波的反射、漫射與折射等現象[5,7]。例如，在黃昏夕陽西下時，雖然還能看到火紅的太陽掛在地平線上，其實太陽真正的位置可能早已在地平線之下了，這是由於光線從外太空進入大氣層時發生折射，造成眼睛所見之太陽或星星都不是在視線位置上。當入射角度越大，折射所偏折的折射角也越大，所以黃昏時陽光仰角最低，入射角最大，折射偏移最明顯；而中午時陽光仰角最高，入射角最小，折射偏移最不明顯。至於下沉夕陽為何都是紅色的，正是因為太陽光中的紅色光波長最長，在介質中傳播速率最快，當太陽角度越來越低時，陽光偏折的角度也越來越大，不同色光因為光速差

異而有不同偏折角度的現象也越來越明顯，首先是波長最短的紫光無法折射進入地面，然後依序是藍光，綠光，黃光，橘光，最後剩下紅光，所以在黃昏時可以看到太陽由白色慢慢轉為金黃色、橘黃色、橘色，到最後成為紅色[4]。另外像海市蜃樓亦是一種大氣光學幻景，它是因為從地面到高空之空氣密度出現特殊漸層變化，導致地面景象所發出的光線在空氣中產生全反射之現象，且氣溫的反常分佈通常是海市蜃樓形成之主要氣象條件[7]。值得注意的是，由於不同高度的空氣層其密度都不一樣，而光在不同密度的空氣中又有著不同的折射率，所以通過大氣層的折射光線並非是一次折射的直線，而是經過多次折射之弧形折射曲線，如圖2所示。



$$n_1 > n_2 > n_3 > n_4 > n_5$$

圖2. 電磁波連續折射之弧形曲線[4]

## 二、大氣折射對軍事與氣象觀測之影響

在二次大戰後微波雷達被廣泛的應用在軍事、航空及氣象領域[2]，然而大氣的垂直溫度變化，會讓電磁波產生折射現象，而此種折射的現象，會在雷達的偵測範圍內產生盲區(Radar shadow)，如圖3中的盲區即為電磁波折射遇到不同溫度層後電波折向下方傳播，讓防空產生漏洞，此種現象在冬季大氣垂直溫度有逆溫(Inversion)時會特別嚴重，會產生超折射(Super refraction)甚至導管(Ducting)現象。正常大氣的溫度會隨高度向上遞減，但有時會出現相反現

象，即大氣中某一層的温度會隨高度向上遞升，如圖4所示之逆温層(該層若出現在地面則為地面逆温層)[9,19]，這種現象在冬季發生的頻率很高，尤其是當有強大寒流來襲時特別嚴重。

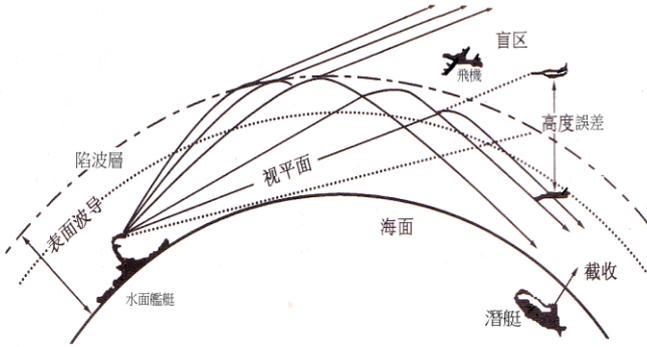


圖3. 海面波導對海軍電子戰的影響[3]

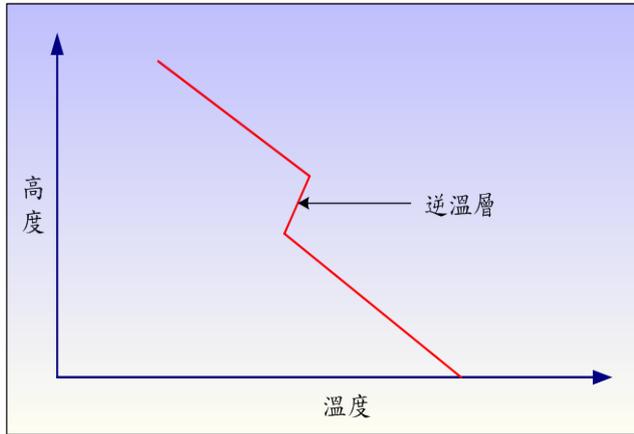


圖4. 大氣中的逆温層[5]

假設在標準大氣之下，大氣的温度是每上升1000公尺下降9.8°C，地球半徑平均為6371公里的狀況下，電磁波的曲率約是地球曲率的1/5 ~ 1/6，大致是一致的。此外，大氣中水氣的分布也是向上遞減，如此大氣折射指數(N)可為乾燥項(Dry term)與潮濕項(Wet term)之和[13,14]。

$$N = 77.6 \frac{P}{T} + 3.73 \times 10^5 \frac{e}{T^2} \dots\dots(1)$$

*Dry term, Wet term*

(1)式中T為温度(°K)、e為水氣壓(hpa, 百帕)、P為大氣壓(hpa)。只要從每天的探空資料(如圖5)中取出大氣的氣壓、温度及溼度等資料，即可以算出大氣對電磁波的折射指數。

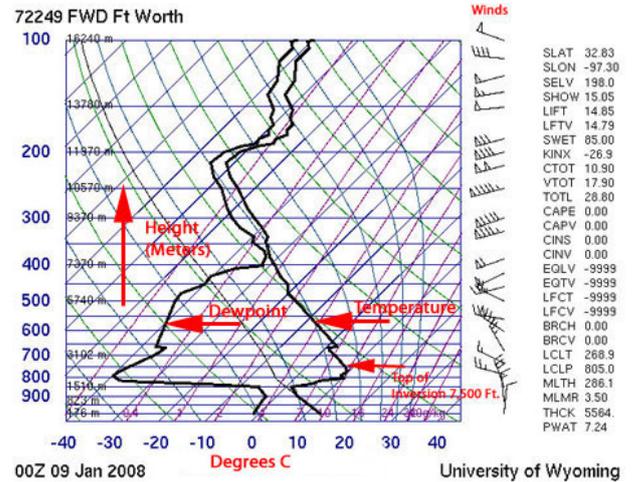


圖5. 大氣垂直温度及濕度探空曲線

當電磁波傳播距離很短時，可近似認為地球表面為平面，但若電磁波傳播距離較長時，就必須考慮地球曲率的影響，此時，為了將地球表面處理成平面，通常使用地球曲率將大氣折射指數修正為M [3]，其表達式如下：

$$M = N + \frac{Z}{R} \cdot 10^6 \dots\dots\dots(2)$$

(2)式中  $R=6.371 \times 10^6$  m 為平均地球半徑，Z(單位:m)為地表以上的高度。將上式進行對高度h之求導可得

$$\frac{dM}{dh} = \frac{dN}{dh} + 0.157 \dots\dots\dots(3)$$

大氣折射可具有四種傳播現象：次折射(Sub-refraction)、正常折射(Normal refraction)、超折射(Super-refraction)及陷波折射(Trapping)

等，如圖6所示。當(3)式中的  $\frac{dN}{dh} > 0$ ，或者

$\frac{dM}{dh} > 0.157$ 時，電磁波將背離地球表面上凸起

傳播，此時的大氣折射稱為負折射或次折射；

當  $-0.077 < \frac{dN}{dh} < 0$ ，或者  $0.08 < \frac{dM}{dh} < 0.157$ 時，電磁

波將彎向地面凹著傳播，此時的大氣折射稱為正常折射或標準折射(Standard refraction)；當

$-0.157 < \frac{dN}{dh} < -0.077$ ，或者  $0 < \frac{dM}{dh} < 0.08$ 時，電磁

波傳播曲率大於標準折射的曲率，而小於地球曲率，此時大氣折射稱為超折射；當

$\frac{dN}{dh} < -0.157$ ，或者  $\frac{dM}{dh} < 0$ 時，電磁波彎向地面的

傳播曲率大於地球曲率，此時大氣折射稱為陷波折射(即出現具導管現象之大氣波導)，在這種大氣條件下，低仰角的電磁波將射向地面，經地面反射後向空中傳播，經大氣的折射又射向地面。圖7所示為大氣折射的四種傳播現象對應之折射指數 $N$ 與高度 $h$ 之關係[16,17]，其中在正常(standard)折射時 $h$ 每上升1公里(km)其 $N$ 值將減少40，若 $N$ 之減少量低於-40/km是為次折射(sub-reflective)，若高於-40/km則為超折射(super reflective)，但若超過-157/km則將出現導管(ducting)現象，即發生大氣波導。

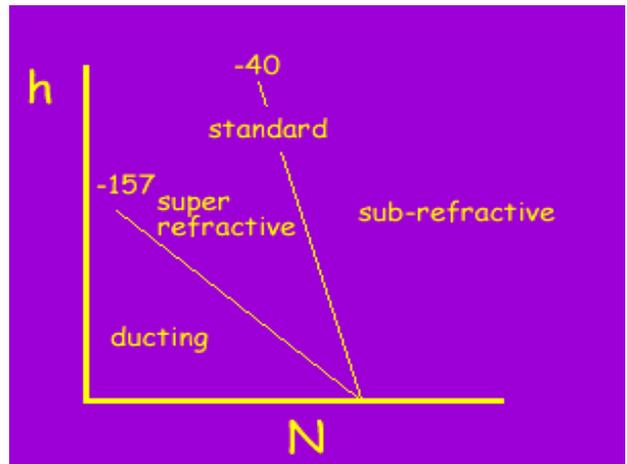


圖7. 各種折射現象的折射指數 $N$ 與高度 $h$ 之關係[16]

近代氣象雷達普遍應用於氣象預報，氣象雷達成為天氣預報中非常重要的工具[1,3,9]，尤其在即時預報(Nowcasting)方面，例如利用氣象雷達觀測降水對流雲胞之位置和高度，做為即時天氣預報之依據(如圖8所示)，在正常折射環境下，電磁波可以正確掌握對流雲胞的位置與高度(如圖8(A))；但若處在次折射、超折射或陷波折射環境中，雷達波束則皆無法正確觀測到對流雲胞之位置和高度(如圖8(B)~(D))。由於預報時限極短，預報員必須在很短的時間對劇烈的天氣現象作出判斷，但是當大氣出現逆溫時，會導致雷達波產生異常折射現象，往往會讓預報員出現位置或回波強度的誤判，影響預報的品質，甚至危及飛安。

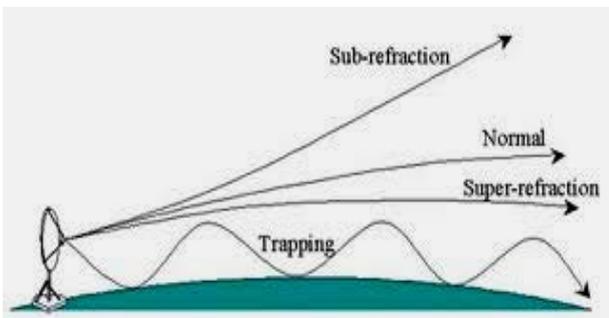
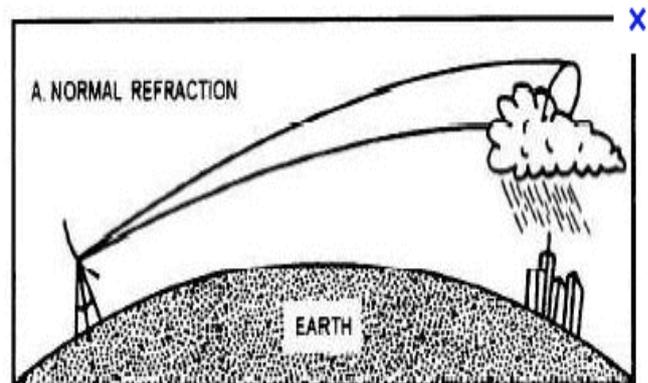
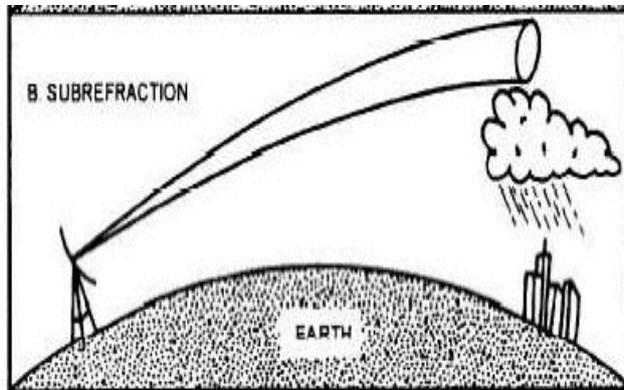


圖6. 大氣折射四種傳播現象[20]

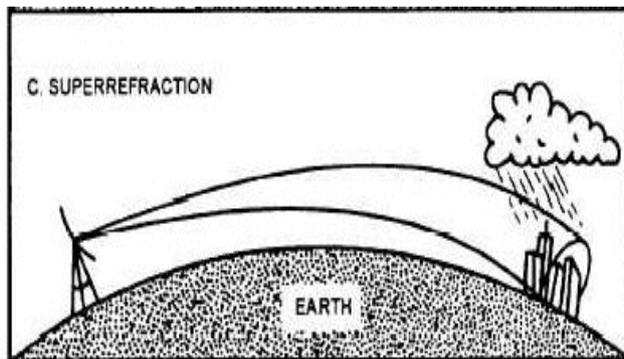


(A)正常折射(Normal refraction)：氣象雷達在正常大氣

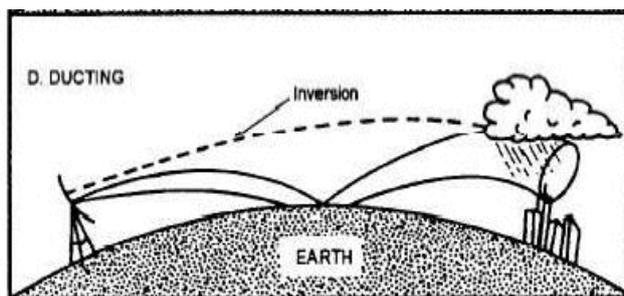
折射狀況下觀測降水對流雲胞，電磁波可以正確掌握對流雲胞的位置與高度。



(B)次折射(Sub-refraction)：氣象雷達在「次折射」狀況下觀測降水對流雲胞，雷達波束高度偏高，無法正確觀測到對流雲胞。



(C)超折射(Super-refraction)：氣象雷達在「超折射」狀況下觀測降水對流雲胞，雷達波束高度偏低，無法正確觀測到對流雲胞。



(D)波導/陷波(Ducting/Trapping)：氣象雷達在「波導」狀況下觀測降水對流雲胞，雷達波束因受逆溫影響，傳向地面後又被反射，雷達波始終在逆溫層內傳播，無法正確觀測到雲胞。

圖 8. 氣象雷達各種折射現象產生之判斷[18]

前面所述之種種現象都是由於電磁波在大氣中傳播時，因為溫度的分佈不均勻而影響到

空氣的密度所致，在自然科學相關學科之教學上皆非常抽象，初學者要完全憑想像力去理解，頗為困難。許多教育家均認為透過在實驗室中的實驗，讓學生動手作，視覺的展示，能夠加強啟發學生的學習潛能[12,13,15]；再經過老師指導，激發學生思考，在抽象的物理概念上效果更好。但是在氣象領域裡的教材，要在實驗室用複雜裝置去控制變幻莫測的流體，困難度很高，因此甚少能將它納入課堂上。雖然網路上也有很多資料可用，但遠不如讓學生自己動手做來的有意義。

本研究主要針對電磁波傳播時因大氣的垂直溫度變化所產生之折射現象，運用自動量測技術以進行光波弧形折射曲線之水工模擬，讓學習者能在實驗室中觀測到電磁波的弧形光徑(optic path)及其次折射、超折射(甚至陷波折射)與太陽光色散等大氣光象。本計畫中研製一套具備溫度自動量測機制之大氣折射水工觀測系統，利用長方形水槽做為水工模型，並在水槽中盛入清水或食鹽水(或油液)，然後改變水槽上下層之水溫並控制其溫差，讓水槽中的水介質產生溫度(密度)之漸層變化(水溫越高密度越小，水溫越低密度越大)，然後利用自製的激光器讓光束入射或引太陽光射入水工模型，以模擬電磁波在大氣層中各種光徑彎曲折射現象。

藉由本系統之研發，能將抽象的大氣折射現象在實驗室內呈現出來，讓初學者能夠深入了解到大氣層內溫度與密度之垂直變化，會對電磁波產生何種異常折射現象，進而理解這些現象在軍事、航空、氣象及生活上之應用。

### 三、系統設計

本研究中我們設計研發一套大氣折射水工觀測系統，其系統架構如圖 9 所示。本系統提供一個可置入清水之長方形觀測水槽作為水工模型，並分別在液面與槽底建置一加熱器與一冰水導管，用以控制水槽上下方之溫度，讓水

工模型中的液體介質產生密度之漸層變化，再射入紅、綠色雷射光(或引入太陽光)，以供觀測光波在不同漸層密度的液體介質中傳導時所發生之折射情況，藉此來模擬電磁波在不同密度的大氣中傳播之折射現象；

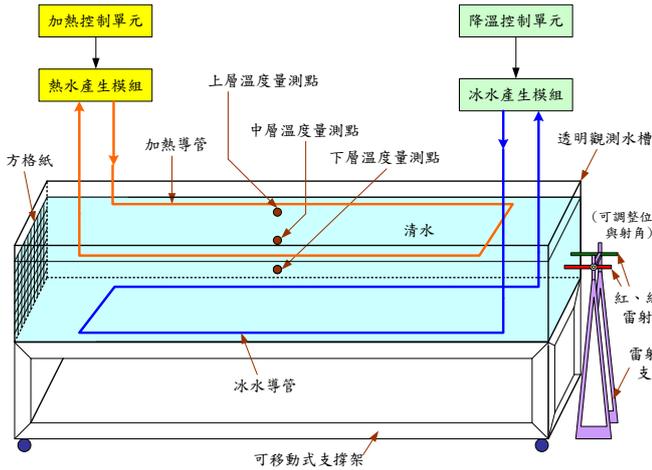


圖 9. 系統結構圖

本系統中各組成單元之功能分述如下：

- (1) **透明觀測水槽**：為大氣折射實驗之觀測容器，外框以透明強化耐熱玻璃製作成一個長方形的平底槽，水槽規格為長 240 公分，寬 15 公分，高 60 公分，觀測水槽內置入清水，作為光波傳播之介質；水槽上方裝置一加熱器，用來提升水溫以產生高溫低密度之介質，水槽底部裝置一冰水導管，用來降低水溫以產生低溫高密度之介質；水槽右側為雷射光(或太陽光)射入端，水槽左端可貼上方格紙，用來量測雷射光經過不同密度變化之介質後，移動位置變化情況。
- (2) **三層溫度量測點**：在水工模型槽壁分別設置上、中、下三層之溫度計，用以量測水槽量測上、中、下三層之溫度。
- (3) **移動式支撐架**：為一鋁擠型支撐架，用於支撐觀測水槽，支撐架下方有四組滾輪可供系統移動之用。
- (4) **可調式雷射光源模組**：由紅、綠色雷射筆及

雷射筆支架組成，此支架可供上下移動雷射筆高度，並可調整雷射光之射出角度。雷射光折射水工實驗之剖面結構如圖 10 所示。

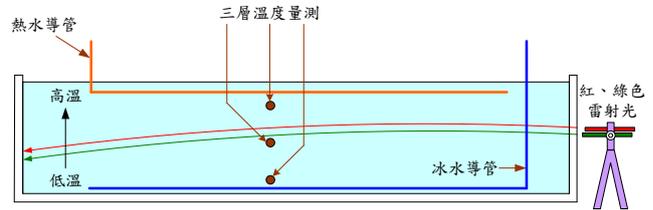


圖 10. 雷射光折射實驗之剖面結構

- (5) **加熱控制單元**：可接受使用者設定熱水溫度，並進行溫度自動控制，只要熱水未到達設定溫度皆會啟動加熱器，在達到設定溫度後自動關閉加熱器。
- (6) **熱水產生模組**：包含熱水儲存桶、溫度加熱器及液態傳輸汞，溫度加熱器可依加熱控制單元指令對儲存桶加熱，液態傳輸汞則可加壓將儲存桶中的熱水傳送至液面加熱裝置。
- (7) **加熱裝置**：為附著熱水導管之不鏽鋼溫度循環片，液態傳輸汞傳送之熱水可經熱水導管對不鏽鋼溫度循環片加熱，藉以調升水槽上方液面之水溫。
- (8) **冰水控制單元**：可接受使用者設定冰水溫度，並進行溫度自動控制，只要冰水未到達設定溫度皆會啟動冷媒壓縮機進行降溫，在達到設定之冰水溫度後自動關閉冷媒壓縮機。
- (9) **冰水產生模組**：包含冰水槽、冷媒壓縮機及液態傳輸汞，冷媒壓縮機可依冰水控制單元指令對冰水槽降溫製造冰水，液態傳輸汞則可加壓將冰水槽中的冰水傳送至槽底降溫裝置。
- (10) **降溫裝置**：為附著冰水導管之不鏽鋼溫度循環片，液態傳輸汞傳送之冰水可經冰水導管對不鏽鋼溫度循環片降溫，藉以調降水槽底部之水溫。

#### 四、硬體系統製作

為進行大氣折射水工觀測系統之開發，本計畫

中首先依系統設計規格研製各項硬體元件，再進行整體硬體系統之組裝測試。各項硬體元件之研製分述如下：

**1. 水工觀測模型：**為便於搬遷運送之考量，本研究之水工觀測模型是由兩組水槽單元組合而成(如圖 11(a)所示)，每組水槽單元上半部皆為一組長方型不鏽鋼支框，可裝置兩長一短之三片耐熱強化玻璃作為槽壁(高 60 公分)，水槽單元下半部皆為鋁製可移動支架。圖 11 (b)所示為 4 片長形耐熱強化玻璃，圖 11 (c)所示則為 2 片短形耐熱強化玻璃。



(a) 兩組水槽單元



(b) 4 片長形耐熱強化玻璃



(c) 2 片短形耐熱強化玻璃

圖 11. 水工觀測模型組成元件

**2. 水溫加熱單元：**由加熱控制單元、熱水產生模組及加熱裝置所組成，加熱控制單元包含溫度控制器與熱水溫度設定顯示器(如圖 12 (a)所示)，熱水產生模組為一個內含加熱器之電熱水槽與及液態傳輸汞(如圖 12(b)所示)，加熱裝置主要為熱水導管與不鏽鋼溫度循環片(如圖 12(c)所示)。



(e)不鏽鋼溫度循環片

圖 12. 水溫加熱單元硬體元件

**3. 冰水降溫單元：**由冰水控制單元、冰水產生模組及降溫裝置所組成，冰水控制單元包含溫度控制器與冰水溫度設定顯示器(如圖 13 (a)所示)，冰水產生模組包含冰水槽、冷媒壓縮機(1/4 HP)、熱交換器含散熱風扇以及液態傳

輸汞(如圖 13(b)所示),降溫裝置主要為冰水導管與裝置在槽底之不鏽鋼溫度循環片(如圖 13(c)所示)。



(e)裝置在槽底之不鏽鋼溫度循環片

圖 13. 冰水降溫單元組成元件

**4.可調式雷射光源模組:**雷射光源模組是由紅色與綠色雷射筆及雷射筆支架組成(如圖 14(a)所示),此支架可供上下移動雷射筆高度,並可調整雷射光之射出角度(如圖 14(b)所示)。



圖 14. 可調式雷射光源模組

在本計畫中我們將前述研製完成之溫度量測單元、水工觀測模型、水溫加熱單元、冰水降溫單元及可調式雷射光源模組等各項硬體元件加以組裝整合,建構出完整的大氣折射水工觀測系統實體,如圖 15 所示,此實體已拼接左右兩組水槽單元成為完整的水工觀測模型。



圖 15. 拼接完成之大氣折射水工觀測系統實體

## 五、大氣折射水工觀測實驗

應用本系統可執行之大氣折射水工觀測實驗項目：

(1) **電磁波連續折射偏移實驗**：將加熱器置於水槽液面而冰水導管置於槽底，首先在水槽均勻常溫(未加熱未降溫)情況下，以紅綠兩色之雷射筆光束傾斜射入水工模型，觀測未折射之雷射光點落在水槽尾端方格紙之位置，再依各種設定溫度啟動並控制加熱器與冰水導管，使水工容器液面加熱且槽底降溫至預期溫差，記錄雷射光點之位置變化情形，分析溫度、密度、光點偏移與折射率之漸層變化關係。將加熱器與冰水導管之位置對調(即將冰水導管置於液面而加熱器置於槽底)，重做此電磁波連續折射偏移實驗。

(2) **大氣超折射觀測實驗**：將加熱器置於液面而冰水導管置於槽底，先依各種設定溫度啟動並控制加熱器與冰水導管，使水工容器液面加熱且槽底降溫至預期溫差，產生水槽溫度向上遞增之漸層變化，以模擬大氣逆溫層內之溫度隨高度上升而漸層增加(密度漸層減少)之情況，再以雷射光束傾斜射入水工模型，並觀測雷射光波是否出現超折射(甚或陷波折射)之傳播現象，如圖16所示。

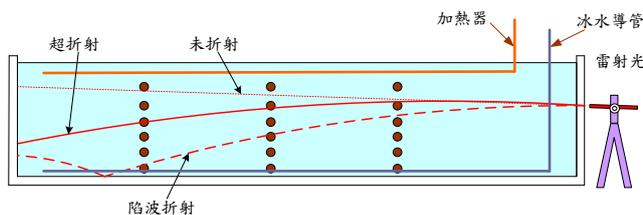


圖16. 大氣超折射水工觀測實驗示意圖

(3) **大氣次折射觀測實驗**：將冰水導管置於液面而加熱器置於槽底，先依各種設定溫度啟動並控制加熱器與冰水導管，使水工容器液面降溫且槽底加熱至預期溫差，產生水槽溫度向上遞減之漸層變化，以模擬大氣層內之溫度隨高度上

升而漸層降低(密度漸層增加)之情況，再以雷射光束傾斜射入水工模型，並觀測雷射光波是否出現次折射之傳播現象，如圖17所示。

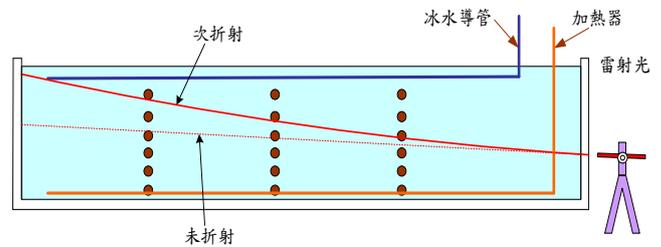


圖17. 大氣次折射水工觀測實驗示意圖

(4) **電磁波全反射弧形曲線觀測實驗**：將加熱器置於液面而冰水導管置於槽底，先依各種設定溫度啟動並控制加熱器與冰水導管，使水工容器液面加熱且槽底降溫至預期溫差，產生水槽溫度向上遞增之漸層變化，再以雷射光束傾斜射入水工模型並適當調整雷射光源之仰角，觀測雷射光是否出現如拱橋般之弧形傳播曲線，以模擬電磁波在大氣中之全反射傳播現象，如圖18所示。

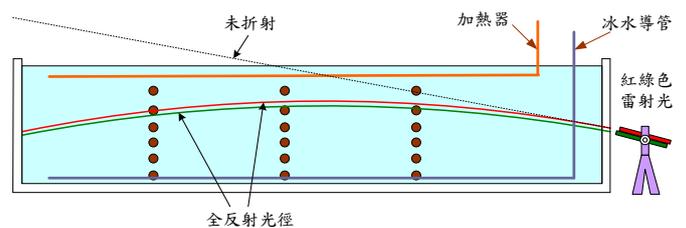


圖18. 電磁波全反射水工觀測實驗示意圖

(5) **太陽光色散偏折觀測實驗**：先依各種設定溫度啟動並控制加熱器與冰水導管，使水工容器上下端產生預期溫差，再將太陽光透過一聚光反射鏡斜射入水工模型(或將一全波長燈光射入水工模型)，讓光線經過具有溫度漸層變化之液體介質，最後投射在一白色屏幕上，檢視過程

中是否有紅光「拉長」，藍光「偏失」的情形，藉以解析日出和日落時天色偏紅的景象；並檢視是否有彩虹形成，觀察光徑偏折程度是否紫光最大，紅光最小，如圖19所示。

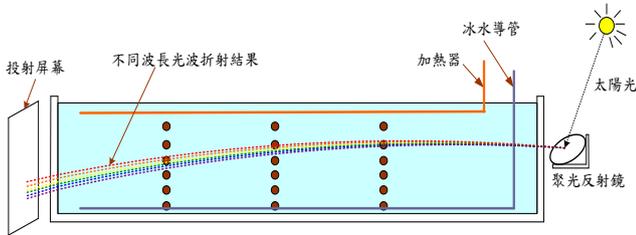


圖 19. 太陽光色散偏折水工觀測實驗示意圖

## 六、結論

本研究主要針對電磁波傳播時因大氣的垂直溫度變化所產生之折射現象，運用自動量測技術以進行光波弧形折射曲線之水工模擬，讓學習者能在實驗室中觀測到電磁波的弧形光徑及其次折射、超折射(甚至陷波折射)與太陽光色散等大氣光象。在本計畫中我們研製一套大氣折射水工觀測系統，利用長方形水槽做為水工模型，並在水槽中盛入清水，然後改變水槽上下層之水溫並控制其溫差，讓水槽中的水介質產生溫度(密度)之漸層變化(水溫越高密度越小，水溫越低密度越大)，然後利用自製的激光器讓光束入射水工模型，以模擬電磁波在大氣層中各種光徑彎曲折射現象。另一方面，本研究亦在此水工觀測系統上建置溫度自動量測機制，可在水工模型中劃分A、B、C三個位置，每個位置自下而上設定6個量測點，自動進行此18個量測點之溫度量測，所量測之結果可供進行相關定量分析與探討。

藉由本系統之研發，能將抽象的大氣折射現象在實驗室內呈現出來，讓初學者能夠深入了解到大氣層內溫度與密度之垂直變化，會對電磁波產生何種異常折射現象，進而理解這些現象在軍事、航空、氣象及生活上之應用。

## 參考文獻

1. Barbara Taylor(曹培熙審訂)，1996，*光*，理科出版社，頁 4-9，頁 14-21。
2. 趙樹海，1994，*航空氣象學*，北京，氣象出版社。
3. 張軍，2005，*軍事氣象學*，p69-84。
4. 連續折射曲線: <http://www.webassign.net/sercp>.
5. 逆溫現象:  
[http://www.weatherquestions.com/What\\_is\\_a\\_temperature\\_inversion.htm](http://www.weatherquestions.com/What_is_a_temperature_inversion.htm).
6. 虹霓現象的形成:  
<http://www.phy.ntnu.edu.tw/java/Rainbow/index.html>.
7. 科學史上光概念的發展:  
<http://memo.cgu.edu.tw/yun-ju/CGUWeb/SciKnow/PhyStory/OpticHistory.htm#C>.
8. Bean, B R. Dutton E J., 1968, *Radio Meteorology*, Dover Publications Inc., New York.
9. Holton J. R., 1972, *The Momentum Equation: An Introduction to Dynamic Meteorology*, Academic Pre., New York and London.,1972.
10. Wolf, K. B. , 1995, "Geometry and dynamics in refracting systems", *European Journal of Physics* **16**: 14–20.
11. M.P.M Hall, L.W. Barclay, M.T. Hewitt, 1996, *Propagation of Radio Waves*, Published by IEE 1996 ISBN 0 85296 819 1.
12. Thornton, R.K., 1996, *Learning physics concepts in the introductory course, microcomputer-based labs and interactive lecture demonstrations*, In Proceedings Conference on the Introductory Physics Course. New York: John Wiley & Sons, p. 69–85.

13. Turner, J.S., 2000, *Development of geophysical fluid dynamics: The influence of laboratory experiments*, Applied Mechanics Reviews, 53:11–23.
14. Kwan, A., Dudley, J., and Lantz, E., 2002, Who really discovered Snell's law?. Physics World. 15 (4): 64.
15. Roebber, P.J., 2005, *Bridging the gap between theory and applications: An inquiry into atmospheric science teaching*, Bulletin of the American Meteorological Society, 86:507–517.
16. Mike Willis, 2006, *Atmospheric Refraction*, December 26th, <http://www.mike-willis.com/Tutorial/refraction.htm>.
17. Mike Willis, 2007, *Beyond the Horizon*, May 5th, <http://www.mike-willis.com/Tutorial/PF6.htm>.
18. Joan Bech, Adolfo Magaldi, Bernat Codina and Jeroni Lorente , 2012, Effects of Anomalous Propagation Conditions on Weather Radar Observations, Doppler Radar Observations - Weather Radar, Wind Profiler, Ionospheric Radar, and Other Advanced Applications, University Campus STeP Ri, InTech Europe .
19. <http://www.weatherquestions.com>.
20. <http://paoc.mit.edu/labweb/experiments.htm>.

