

淺介雷射大氣環境遙測

陳韡彙研究副技師（環境變遷研究中心）

披覆著淺薄大氣的地球表面是人類主要生活區域，但傳統的標準大氣與氣膠測量方法多局限在地面觀測，因此不僅為了滿足人類對未知領域的探索慾，更為氣候與環境之研究提供所需的資料，從雷達到衛星等大氣遠程遙測技術早被發展出來並用以測量溫度、濕度、風等基本大氣參數，以及氣膠、微量氣體(例如水氣、臭氧、氮氧化物)等，藉此彌補傳統大氣與環境的測量方法在空間和時間的不足。在各種遙測技術當中，以雷射為基礎的遙測技術也許是最晚開始的，但自雷射於1960年代發明以來，雷射的遙測技術幾乎是同時開始快速發展起來。

光達或稱(雷射雷達)就是以雷射為基礎的一種主動式的遠程遙測技術，簡稱為LIDAR (Light Detection And Ranging)。相較於雷達(radar)或聲波雷達(sodar)這些以無線電波或聲波為基礎的主動式遙測方法，以雷射測量大氣參數的優點是雷射光在大氣中傳播時能與大氣中的介質發生足夠強的交互作用，這些交互作用包含分子的瑞利散射 (Rayleigh Scattering)、氣膠的米式散射(Mie Scattering)、分子吸收、自發或誘發或共振的拉曼效應、多普勒頻移(Doppler shift)等線性或非線性散射。原則上，藉由收集並分析這些交互作用產生的背向散射光，光達可以測量沿著光傳播路徑上的各種大氣或環境參數的空間分佈，其遙測範圍視雷射功率、接收器的效率、光散射的交互作用的種類來決定，可從到數百公里到數十米不等，最高空間分辨率約與雷射脈衝持續長度相當，一般約在數米到數十米之間。

光達所使用的雷射光譜範圍大約是從紫外到近紅外，這個波段的電磁波和大氣成分之間的各種交互作用是足夠強到使光達能被用來檢測氣膠和微量氣體的存在和濃度，以及具有高空間分辨率的風場結構。在過去的四十年裡，光達技術已被證明是測量大氣垂直結構有效工具，特別是應用於行星邊界層(PBL)的氣膠光學與相關的邊界層氣象的研究。基本的單通道彈性散射(elastic scattering, 散射光波長與入射光相同)氣膠光達通常只使用單一波長的雷射，經過適當的訊號反演可以提供氣膠散射係數的垂直或空間分佈，但一個較完整的氣膠光達系統通常有三個彈性散射通道以及一個以上的拉曼散射通道(例如環變中心的氣膠光達)，根據氣膠在不同波段的彈性散射強度以及解偏率(depolarization ratio)，反演後可以提供氣膠的微物理參數(氣膠種類、等效半徑、折射率、單次散射反照率)，其中氣膠的解偏率和氣膠的濃度無關，而只與形狀與折射率有關，通常大顆粒的非球型氣膠(例如沙塵、海鹽、冰晶)的解偏率愈大，因此氣膠解偏率經常被用做氣膠粒子種類的分類參考，普遍在空氣污染物的洲際長程傳送以及邊界層氣象的區域環流研究中被用於鑑別不同來源的氣膠(e.g.工業污染物、沙塵、煙塵等)的判斷根據。

從光達測量反演而得的氣膠參數，是大氣化學中計算大氣輻射收支平衡的基礎，也是研究氣膠形成、傳送的主要依據，又因雷射遙測對氣膠偵測的高敏感度，這個技術對研究空氣污染擴散的動態特別有利，已經開始被廣泛的應用於大氣氣膠和工業來源的氣體污染的調查和監測。圖1為環境變遷研究中心的氣膠光達系統在2004年4/5-4/6期間對大陸沙塵暴襲臺事件觀測結果。從氣膠的散射強度來看(圖a)，高濃度的氣膠顯然主要集中在一公里以下的大氣邊界層中，但從解偏率的資料卻可以發現沙塵(圖b中解偏率DP大於0.05(5%)的

部分) 在這個事件中主要分布在大氣邊界層上方，沙塵只在4/6的中午左右因地表對流增強而被帶到地面，這個觀測結果與地面的化學成分分析非常吻合。光達的對氣膠與雲的測量並不僅止用於大氣結構的研究，圖2為光達所測得的解偏率與埃係數(Angstrom)，其中埃係數為顆粒大小的指標。由圖中可見不同的懸浮顆粒(氣膠與卷雲 cirrus)的解偏率都在0.05以上，但配合埃係數的就可以發現解偏率的分佈與顆粒大小有關，並且這相關性對不同種類的顆粒是不一樣的。

通過因氣膠的運動而造成的多普勒頻移可以測量得到沿著雷射傳播方向(徑向)的風速，因此若將雷射沿著東西南北方位掃描或定方位測量徑向風速就可以得到在不同高度層的風場。在技術上，因為雷射的多普勒頻移量大約是幾個 MHz，因此頻移量主要是以通過數個不同頻段的窄頻濾鏡或是利用有較長同調長度的雷射干涉拍頻(beat)技術來定量。環變中心目前使用的測風光達即是利用干涉拍頻(beat)技術，目前正投入臺灣地區的區域性環流的研究。圖3為環變中心的測風光達與氣膠光達在南投縣竹山鎮的觀測結果，由圖中氣膠的濃度(色階) 可看出氣膠大約是分布在兩公里以下的大氣邊界層中，而風的垂直剖面則顯示500公尺以下的風有明顯的山谷風晝夜風向交替的現象，同時可以注意到高度在500公尺以上的風向與地面風向經常是相反的，這應該是地表的風受中央山脈阻擋而造成的回流現象，此回流現象同時壓抑近地層氣膠的高度分佈，使得地表的氣膠主要都集中分佈在約500公尺的高度以下。

光達遙測技術已經從過去單純的空氣散射強化到可以測量大氣中的多種成份。由於光達對雲與氣膠已經被廣泛利用，並且目前有衛星的光達觀測可以提供全球氣膠與雲的三維空間分佈。同時目前全球已有數個光達聯合監測網，例如歐洲的 EARLINET (The European Aerosol Research Lidar NETwork)，成員遍佈歐洲各國，亞洲則有AD-Net(Asian Dust Network)。這些監測網的成立拓展了氣膠與雲的觀測範圍，藉由分享各個光達觀測站的資料來迅速的瞭解氣膠或沙塵的分佈和傳送途徑，幫助科學家進一步的研究氣膠和沙塵對環境的影響以及其對地球大氣的直接與間接效應，並用以改進全球氣象場模式的準確度。目前中央研究院和中央大學的光達系統已全力投入對臺灣懸浮微粒的觀測研究上，相信臺灣光達遙測技術的發展必能對臺灣的污染環境的改善提供最大的研究助力。

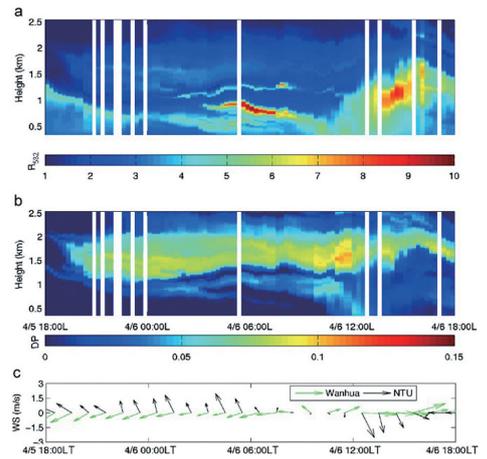


圖 1：Lidar observed (a) backscattering ratio, (b) depolarization ratio, and (c) surface ground wind arrows measured at Taipei during April 5-6, 2004. (Chen et al., 2007. Atmospheric Environment, 41(7), pp.1440-1455.)

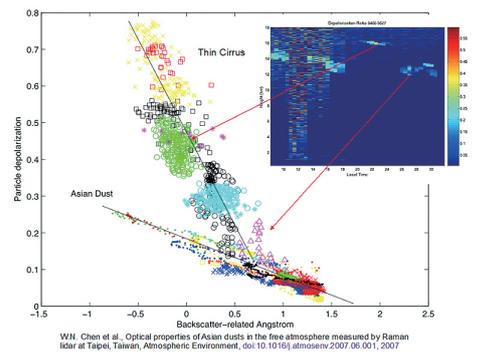


圖 2：Composited scatter plots of Particle Depolarization vs. Backscatter-related Angstrom Exponent for Asian Dust and Cirrus clouds observed by Lidar at Taipei

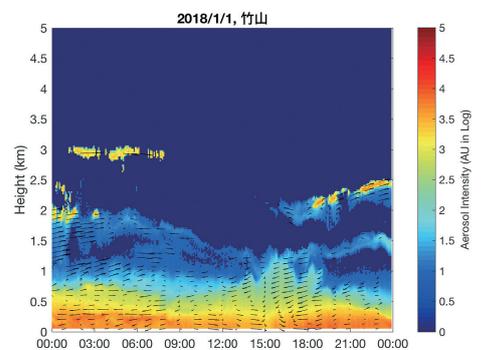


圖 3：Time Height distributions of aerosol backscatters (color) and wind arrows (black arrow) observed by aerosol lidar and wind lidar at南投縣竹山鎮 on 2018/1/1.