

雷公的髮髻

從人造衛星鳥瞰風暴之頂

作者：王寶貴

王寶貴任職於威斯康辛大學麥迪遜分校，中央研究院環境變遷研究中心特聘研究員兼主任。專長為雲物理學。科普著作《天與地》（1996）曾獲《中國時報》1996開卷十大好書，《洞察》（2002）獲第一屆吳大猷科普著作獎佳作，另著有《微塵大千》（2004）。

烈風雷雨弗迷

艷陽高照的天空，突然陰暗下來；喧囂嘈雜的周遭，突然變得寂靜，只有幾聲敲打聲從遠方傳來；空氣中似乎有一種不尋常的信息在醞釀著……

您聽過「暴風雨前的寧靜」嗎？不錯，這就是暴風雨即將來臨的景象。

暴風雨或雷雨，大概是大自然「暴力」現象中最為人們所熟悉的現象了。它們不像火山爆發或龍捲風那麼罕見，而是三不五時就會發生。不但出現在溫暖潮濕的熱帶叢林中，即便半乾旱的地區如蒙古草原也照樣會發生。

雷雨來臨時，先是天空幾乎無預警的出現團團濃雲，霎那間烏雲密布，接下來往往是遠方天際的烏雲雲層底端和地平線之間，一道紫色閃光連通了天與地。一兩秒之內，先是一聲清脆的焦雷聲炸開，繼而驚心動魄的雷聲隆隆在四周響起，宛如兩軍大戰之前的號角。不久，豆大的雨點從天而降，電光閃閃，雷聲此起彼落，偶然一陣狂風，捲起漫天雨滴拋灑，大地陷入一片混亂迷濛……

突如其來的雷聲，誰能不為之「震」驚？「震」這個漢字，本來就是代表因「疾雷」而產生的振動。它們不止振動空氣，也震撼著人們的心弦。《易經》中有「震卦」，它的卦辭中有：「震驚百里，不喪匕鬯」，用來形容那種神經線非常粗大，不輕易為小事驚嚇的人，即使周遭發生了大雷雨，一聲響徹百里的巨雷霹靂炸開，正在吃飯的這位不但湯匙（匕）沒嚇掉，連酒杯裡的香酒（鬯）也不濺一滴，看來堪當大任。

傳說上古時代，堯要把地位傳給舜，先讓他經過

三次考驗，其中之一是「納於大麓，烈風雷雨弗迷」（見《尚書》〈舜典〉），原來堯把舜派遣到大森林中辦事，發現他在大風暴的打雷暴雨中也不會迷路，具有領導人的資質。當然，這道考題隱含的意義便是認定雷雨是一種可怕的自然現象。

所以古代華人社會罵人極其惡毒的一句話，就是咀咒人家會遭到「五雷轟頂」，因為那代表上天的懲罰。古希臘神話中，厄利斯（Elis）國王沙蒙紐斯（Salmoneus）膽敢模仿天神宙斯的神力，造了一座銅橋，駕銅馬車從橋上通過時，模仿宙斯的雷炬，投擲了一束火炬。結果宙斯怒不可遏，投下一道不知道幾十萬安培和幾百萬伏特的真正閃電把沙蒙紐士直接「寵召」回去。

印度神話中，大神因陀羅（Indra）也是因為掌握了終極武器——雷電，而得以戰勝惡龍，釋放了雅利安人所亟需的水源，成就了祂「帝釋天」（Śakra）的名號。看來全世界人類對雷電威力的恐懼都是一樣的。

然而雷雨是在什麼樣的氣象狀況下產生的？

雷雨之雲——積雨雲

近代氣象學經由系統研究，發現雷雨是在一種稱為「積雨雲」的雲覆蓋之下所產生的。這積雨雲長得什麼樣子？圖1及圖2是兩個例子：

用比較具體的說法，積雨雲就是一種「頂天立地」的雲。它的底部風雨電霰交加，可以直接到地面，頂部則直達對流層頂（tropopause）。對流層算是地球大氣最低一層的「天」，對流層頂大約十幾公里高，因此積雨雲頂部的確可以算是「頂天」了。所以當您注視著一朵積雨雲的頂部時，您其實



圖 1 1992 年 3 月 22 日傍晚在威斯康辛州歐克雷爾 (Eau Claire) 附近拍攝到的碩大無朋的積雨雲。積雨雲是一種「頂天立地」的雲，它的下方會有大雷雨、冰雹，甚至龍捲風等現象發生。它的雲頂高達十幾公里，比世界最高山峰還要高得多。筆者當晚開車從明尼蘇達州的明尼亞波利斯 (Minneapolis) 回到威斯康辛州的麥迪遜 (Madison)，路上正好經歷了這個雷暴系統，是筆者有生以來最驚心動魄的一次，途中超大的豪雨、豆粒大小的冰雹、每秒將近 5、6 次的閃電、風向忽左忽右的狂飆全都出現，幾乎永無休止。原本只要四小時左右的行程大概費了八小時左右才到家。隔天閱報方知當時不遠還有龍捲風。這一次總算讓筆者親身體驗了美國中西部雷暴系統的威力。(王寶貴攝於明尼阿波利斯)

是在看十幾公里之外的「風景」。

生長在臺灣的人對雷雨一定非常熟悉。臺灣位於亞熱帶，北迴歸線（北緯 23.5 度線）穿過臺灣中南部的嘉義，這是太陽能夠「直射」地表最北的緯度了。在夏至那一天的正中午，太陽正好在天頂垂直照下來，其光線和地平面成 90 度交角。如果您那時正好在嘉義的北迴歸線上，您的影子會正在您的腳下。因此，臺灣每年能夠接收到大量的太陽光能（當陽光直射時，每單位面積的陽光功率最大），不像高緯度地區太陽光無法直射地面，斜射時每單位面積接收到的太陽能就不如臺灣多。

充足的太陽能轉換成充足的地表熱能，而地表的熱能正是產生對流的直接能源，再加上臺灣四周環海，水蒸氣非常充沛。既有熱能，又有水蒸氣，更有高聳的山岳來幫忙「煽風點火」（提供動力強迫

機制），不愁沒有雷雨。以是之故，臺灣夏季多的是高抵天際的積雨雲。

筆者小時候在漫長的暑假裡，最喜歡的消遣之一，便是看雲，尤其是高聳的積雨雲。靠坐在南臺灣到處生長的老榕樹下，遠眺一座座正在旺盛發展的積雨雲（那時候當然還不知道那叫積雨雲），只見原先不過稍稍突過山峰的雲頭，在 10 到 20 分鐘左右就可以成長到快要接天了。每座積雨雲都像是一座銀白色的天空城堡，城牆是近乎垂直的壁立萬仞。最神奇的是雲頂不停在翻滾移動，時有幾片小雲，從「堡頂」飛出，又消失掉。在我的幼稚腦海中，那就是有神仙駕雲從仙城裡飛進飛出了。想來這就是蘇東坡所謂：「武皇已老白雲鄉，正與群帝驂龍翔。」的寫照。

這樣的神奇想像激發當年的我，想要飛到那座雲



堡上空去一探這種「群仙盛會」的衝動。如果辦得到的話，那種盛況一定是像「青冥浩蕩不見底，日月照耀金銀臺。……虎鼓瑟兮鸞回車，仙之人兮列如麻。」（李白〈夢遊天姥吟留別〉）的真實版。不過隨著年齡漸長，這種想像也就逐漸蒸發掉了，然而想要一探風暴之頂的念頭卻一直沒有冷卻過。

想不到這樣的兒時願望竟然終於能夠實現，這得完全感謝氣象衛星的發明，使得我等凡人終於能夠一探雷暴之頂這一塊仙宮禁地。

下文將以氣象衛星觀測，和讀者共享雷暴之頂的一些徵象和它們相關的物理學。

氣象衛星

人造衛星是第二次世界大戰後的產物。1957年10月4日，蘇聯發射了世界首顆人造衛星「衛星一號」（Sputnik-1，經常音譯成史普尼克一號），震驚了西方世界，尤其是美國。在那時之前，美國政府一直以為蘇聯的科技遠遠落後美國。另外，能



圖 2 2010 年 9 月 15 日在麥迪遜拍攝的積雨雲照片，積雨雲被夕陽映照得呈現瑰麗的紅色。與圖 1 中相同的是，兩者都有砧狀雲，不同的是此圖中的積雨雲上層風切小，是故雲狀直立不傾斜，砧狀雲呈對稱圓圈形。（王貴攝於麥迪遜）

夠把人造衛星發射進入繞地軌道，也代表有先進的火箭技術，具備把某些裝置（例如衛星或核彈彈頭）投射到遠距離的能力。這在軍事上有非常重大的涵義，因為用火箭投射炸彈彈頭，就是二次大戰期間，納粹德國用來轟炸英國的戰術武器。於是美國急起直追，最後終於追上更超越蘇聯。同時，「衛星一號」事件也標誌著所謂冷戰時期的開端，不過那就不是本文的重點了。

由於人造衛星是在繞地軌道上運轉，把它的視線

（照相機）調為往下，就可以觀察到地球上的許多現象如雲層。人們很快就想到，人造衛星可以用來觀測天氣變化，這就是氣象衛星的由來。

第一顆氣象衛星（那時叫「天氣衛星」）是『先鋒 2 號』（Vanguard 2），於 1959 年 2 月 17 日升空，但由於自轉軸不穩定及其他原因，沒有收集到許多有用資料。第一顆真正成功的氣象衛星是 1960 年 4 月 1 日發射升空的泰洛斯一號（TIROS 1）。憑據這個經驗，以後就陸陸續續發射了許多成功的氣象衛星了。

氣象衛星最重要的工具便是它的眼睛——照相機，而衛星用的照相機和一般所用的不同，是掃描式的。早期的氣象衛星所用的照相機叫做「旋轉掃描輻射計」（spin scan radiometer）也稱為「旋轉掃描照相機」（spin scan camera），是威斯康辛大學麥迪遜分校氣象系（現已改名為大氣與海洋科學系）已故教授蘇米（Verner E. Suomi）所發明的，使用的時間非常久，早期衛星氣象資料大都是利用這種掃描相機取得的，因而有人稱蘇米為「衛星氣象之父」，可謂名符其實。

蘇米在 1995 年（那時我正好任該系系主任）去世。我本人 1980 年到威斯康辛大學任教，因此與蘇米相熟。我剛到任時，他曾經半開玩笑地跟我說：「你來得太晚了。當年我剛到這裡時，跟 NASA（美國航太總署）要求 100 萬經費做研究，他們說：『我們不能給你 100 萬，但是我們可以給你 200 萬！』」原因是當時正是冷戰高峰期，美國政府幾乎不計代價的發展太空科技，要和蘇聯競爭，和現在情況不可同日而語。

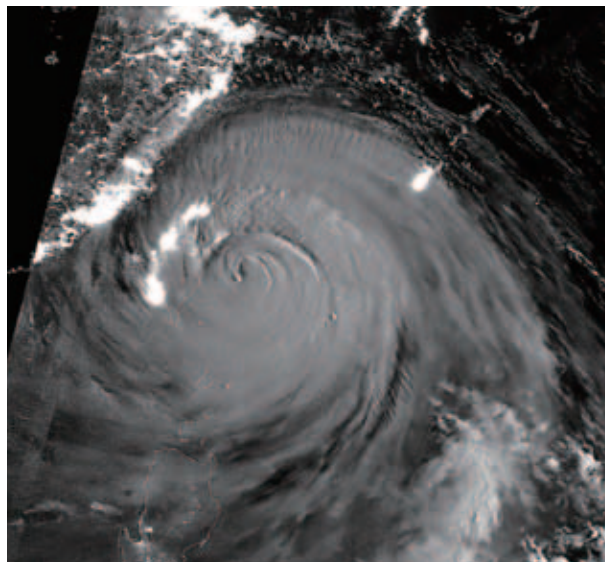
氣象衛星目前有兩種軌道運行方式，一種是地轉

圖3 月光下的蘇德勒颱風，SUOMI NPP 衛星的 DNB 影像！這是颱風在 2015 年 8 月 7 日 16:55UTC（國際標準時，對應台灣時間 8 月 8 日清晨 00:55）為月光所照亮之影像。圖中可見台灣西海岸的城市燈光透過雲層而被衛星偵測到。中國大陸福建沿海的燈光也清晰可見。

同步衛星（geosynchronous），另一種是繞極衛星（polar orbiting）。前一種顧名思義就是和地球的自轉角速度一樣，所以相對地球而言，衛星像是靜止不動的。這種衛星的軌道只有一條——正好在赤道上空！所以全世界的同步衛星都大夥兒全擠在赤道上，而且都位於同樣高度（離地面 35786 公里）。這樣的好處是因為相對於地面是靜止的，可以連續對固定地區掃描攝影，錄製成電影，由此可以獲得天氣系統隨著時間變化比較完整的資料¹。壞處是離地面太遠，影像解析度就不可能太高。而且影像在赤道及附近的熱帶看得最清晰，但偏離赤道太遠的地方，則會有嚴重的像差，需要修正。高緯度地區和極地更是很難觀測到。

至於繞極衛星，則沒有一定高度。它們通常以大致通過南北兩極的「經向」軌道環繞運轉。這種軌道一般離心率較大，橢圓的形狀很明顯。有時離地近，有時離地遠。近地點若安排在中高緯度地區，就可以把那裡的情況看得很清楚。它們的軌道高度通常在幾百公里至幾千公里之間，比同步衛星低得多，因而解析度也好得多。繞極衛星的缺點是，相對於地球不是靜止，無法對同一地點持續拍攝影像，不能取得時間連續的資料。

繞極衛星的軌道常常安排在接近所謂的「晨昏圈」處運轉，也就是軌道接近地球半明半暗的交界處。這樣安排的好處是，所有地點所取得的資料都是衛星早晨或者黃昏時候的資料，時間屬性雷同（雖然每個地方的晨昏時間不同），闡釋起來較為均勻。但是壞處是如果有些現象只在中午或下午（例如夏天常有的氣團雷暴）發生，它們就無法觀測。總之，軌道選擇有許多取捨，端視需求來決定。



繞極衛星通常繞地球一圈的週期在 90 到 100 多分鐘左右。

不管是同步衛星或繞極衛星，白天都可以攜帶可見光及紅外線的掃描照相機。白天的影像固然可用可見光拍攝，晚上因沒有日光照射，只能利用紅外線取得影像。不過紅外線的波長比可見光長，其解析度就會比較差。然而紅外線卻可以顯示某個天氣系統的熱力學狀態，由於紅外線的亮度大致代表溫度，這是可見光看不出來的，因此紅外線影像極其重要。結果就是，大部分氣象衛星不但晚上運用紅外線拍攝影像，連白天也要取得紅外線的影像資料。

不過，最新發展的衛星觀測儀器有一項叫做「日夜頻帶」（day-night band），目前運載於美國國家海洋暨大氣總署（NOAA）的蘇米國家繞極夥伴衛星（Suomi NPP）上²。它在夜間也能利用微弱的光源，像月光、甚至星光就可以攝取影像，沒有日光也無所謂。將來新的衛星很可能都會裝備這種儀器。圖3是以月光為光源所取得的「蘇德勒颱風」的影像，這個颱風 2015 年 8 月曾經重創臺灣。

另外，有的衛星還能利用微波取得影像資料，這些大都是用來做降雨研究。

雷暴的衛星影像

雷暴，當然就是一大團雲。但是這一大團雲有它

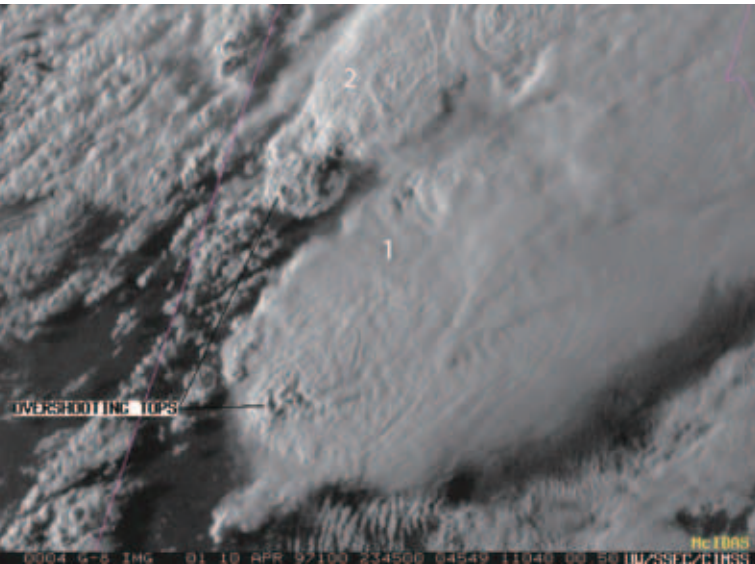


圖 4 1997 年 4 月 10 日，美國同步氣象衛星 GOES-8 所拍攝的發生於美國南方的雷暴系統可見光照片。圖中 1、2 符號標示兩個不同的雷暴系統。（威斯康辛大學 SSECI/CIMSS 提供）

的特徵，所以可以利用這些特徵來判別斷定，某一團雲是雷暴的雲，而另一些雲團則不是雷暴雲。早期的衛星影像不夠清晰，誤判的例子所在多有。近年來衛星影像不但清晰，而且有多種資料可以交叉比對，誤判的可能性就少很多了。圖 4 是一個發生在美國南部德州地區的雷暴雲例子，這是一個以可見光拍攝的影像。圖中可以看到兩個雷暴，分別以「1」及「2」標出。雷暴 1 是比較成熟的個例，雷暴 2 則尚在發展階段。

光看雷暴 1 的影像，怎麼知道它是一個雷暴？首先從形狀可以看出，它的左下端（也就是雷暴的上風區）有點橢圓的形狀，這是雷暴的特徵之一。因為雷暴區域是個上升氣流非常旺盛的地區。這股強烈的上升氣流在大約十幾公里高度就會碰到對流層頂。對流層頂就像一個看不見的玻璃屋頂，上升氣流到這裡就被擋駕，再也上不去。這是因為它的上面是「平流層」，這裡氣溫往上漸增，是個「逆溫層」（inversion layer，下冷上暖）。熱力學指明，一團在逆溫層往上升的空氣包會變得比周遭冷，密度比周遭大，因而會下沉；反之，往下沉的空氣包會變得比周遭暖而輕，而會升回原位。總之逆溫層對任何垂直運動（不管上升還是下沉），都會很快壓制，只能做水平運動。於是，雷暴的上升氣流到此只好改向水平方向擴散，就像香菇的傘蓋。

如果對流層頂沒有什麼風，「傘蓋」就會呈現頗

為對稱的圓形。但是在中緯度（如德州）一般對流層的頂風都不小，在這種情況下。傘蓋就會順著風向被吹拂拉長，呈現橢圓的形狀，就像雷暴 1 的例子一樣。從這圖中我們可輕易看出，對流層頂的風向是從左下方（西南）吹向右上方（東北）。氣象學把雷暴在對流層頂擴張出去的這層雲叫做「砧狀雲」，您如果從側面看這層雲，它的形狀頗像鐵匠打鐵用的鐵砧（圖 5）。



圖 5 鐵匠打鐵用的鐵砧。積雨雲的頂部猶如鐵砧，故名砧狀雲。（王寶貴拍攝於捷克 Český Krumlov）

圖 4 中的雷暴 1 及雷暴 2 各有類似氣泡的中心點，其周圍有一圈或數圈的圓形「漣漪」。這部分稱為「過衝雲頂」（overshooting top，簡稱 OT，參見圖 4），是強烈雷暴的特徵，代表極強的上升氣流可以暫時突破對流層頂的高度，雖然它們往往撐不了多久就會崩潰，要等到下一波的氣泡才能再重新撐起。

- ① 因為掃描費時，所以並不是 100% 完整。
- ② NOAA 是 National Oceanic and Atmospheric Administration 的縮寫。Suomi NPP 為紀念蘇米教授之貢獻而命名，全名是 The Suomi National Polar-orbiting Partnership。

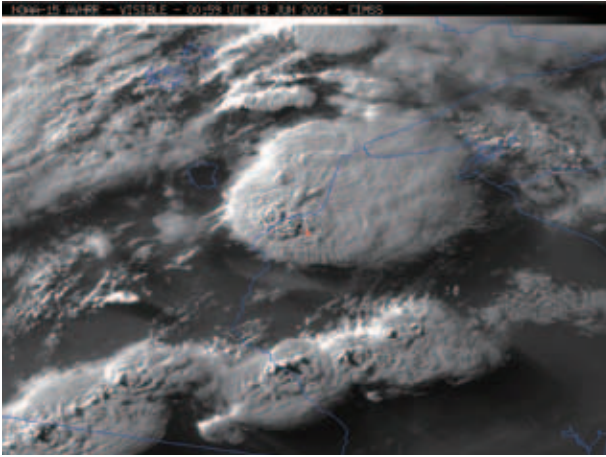


圖 6 2001 年 6 月 19 日在美國威斯康辛北部發生的雷暴系統可見光衛星照片。圖中有「+」號的地點是賽倫 (Siren) 市，當天遭受龍捲風之侵襲。(威斯康辛大學 SSEC/CIMSS 提供)

從圖 4 還可以看出，雷暴 1 的頂上還有許多「皺紋」，這些皺紋並不是隨隨便便出現的，一定是經由某些物理過程才得以產生。如果我們能夠理解「什麼樣的皺紋是透過什麼樣的物理過程而產生的」，就有可能以這樣的理解發展一種預報技術，憑著衛星影像上雷暴雲頂的特徵，判定雷暴目前的發展情況（例如上升氣流有多強，雲頂風速有多大等等），進而預測它的未來動向（例如，未來 6 小時的前進方向，變強或變弱，會不會產生龍捲風等等），進一步事先預防因雷暴而產生的人命及財產損失，這真是「善莫大焉」了。關於這方面的研究，近幾年才真正開展的較為系統化，但是許多皺紋的特徵到底代表什麼樣的物理過程，到如今都還沒有完全研究清楚。

圖 6 和圖 7 顯示另一個雷暴的案例，這個雷暴於 2001 年 6 月 19 日國際標準時（威斯康辛地方時 6 月 18 日）發生於威斯康辛州北方，並在賽倫（Siren）鎮產生一個龍捲風（圖 7 中的黃色 + 號處），造成三人死亡，16 人受傷，財物損失超過千萬美元的災害。這裡我們同時呈現雷暴的可見光（圖 6）及紅外線（圖 7）衛星影像，對比兩者觀測到的特徵，可以得到比僅僅研究可見光影像更確切也更豐富的資訊。

在可見光影像中（圖 6），同樣可以見到雷暴雲頂有許多皺紋，這些皺紋的紋路和圖 4 中的紋路有

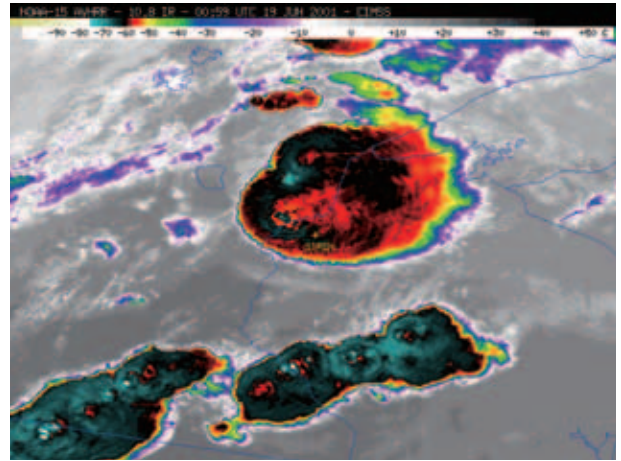


圖 7 與圖 6 同樣的雷暴系統的紅外線衛星照片。顏色意義請見內文。
(威斯康辛大學 SSEC/CIMSS 提供)

同有不同，代表它們既同樣是強烈雷暴（所以有共同的特徵），但又是不同的大氣環境下成長的，因此未來動向及發展程度也有可能不同。同樣是強烈風暴，有些會產生龍捲風，有些卻沒有。圖 6 中有與圖 4 中同樣的 OT，但在 OT 右上角卻比圖 4 多了兩道交叉成魚尾狀的雲。而且這個魚尾雲在原雲頂投下陰影，代表它比原雲頂還要高。關於這種高於原雲頂的「雲上雲」之物理過程，以及它們對於大氣科學的意義，我們後面還要再談。

圖 7 是同樣雷暴但是以紅外線拍攝的影像。紅外線本來沒有所謂的「顏色」^⑨，只有強弱（明暗）的區別。不過這樣的黑白影像，人眼不易鑑定出特徵，所以我們常用電腦將影像著色突顯其特徵。本圖中用顏色來代表某個紅外線波段的亮度。由於紅外線通常對應於物體表面的溫度（雖則紅外線亮度與溫度不完全對應），我們常常將此種衛星雲圖看成是雷暴雲頂的溫度。至於著色的色彩就看個人喜好了。圖 7 中，天青色、黑色代表低溫（冷），而紅黃綠藍則依次代表由高到低的溫度。

仔細觀察這團雷暴，我們發現它也有兩個雷雨胞（thunderstorm cell），一大（南方）一小（北方），約略類似圖 4。兩胞之間有一點明顯天青色，代表那裡有一塊極冷區。仔細對比圖 6 的可見光圖，可以看出那冷區對應於一塊突出一般雲頂的部分。顯然因為那裡高度較高，因而也就比較冷。

讀者也許會疑惑：如果一般雲頂是對應對流層

頂，那麼突出部分不是就應該在平流層裡了？而前面說過，平流層溫度不是比對流层高嗎？所以那塊突出部分難道不該是「暖區」才對嗎？答案是：錯！前述所謂「平流層溫度高於對流層」是大氣的靜態平均狀態。但當大氣中有強烈運動時，就要另當別論。那塊突出部分是由於上升氣流造成的，所以它的溫度結構是由上升運動所決定，而不只是由它所在高度來決定。

我們可以用一個理想型的空氣包上昇運動來簡單推估其溫度。一個空氣包如果是經由和周遭空氣沒有能量交換的過程，這樣的上升過程在熱力學上叫做「絕熱過程」(adiabatic process)。絕熱上升過程會使空氣包冷卻。這是因為絕熱過程要求空氣包能量保持不變，但是空氣包上升一定會膨脹，因為它周遭空氣氣壓減低了。但膨脹是需要耗費能量的(熱力學上叫做「做功」，「功」是 work，單位就是能量)，這一筆能量的「財源」哪裡來？既然不能從外來(因為絕熱)，只好由空氣包的內能來負擔。內能是以溫度來衡量的，內能降低，就代表空氣包的溫度也要降低。是以絕熱上升必然導致空氣包冷卻。

絕熱過程也可以是沉降的。空氣包沉降會使得它變熱，和上升剛好相反。絕熱過程有「乾」、「濕」兩種。乾絕熱過程就是空氣包在上升過程中，除了不與周遭空氣交換能量外，內部的水蒸氣也沒有凝結(所以沒有潛熱的釋放)。濕絕熱過程則是空氣包在上升過程中除了不與周遭空氣交換能量外，內部的水蒸氣卻有凝結(所以有潛熱的釋放)。這兩種過程雖然都會冷卻上升的空氣包，但冷卻率(氣象學稱為「溫度遞減率」)卻不一樣。乾絕熱過程

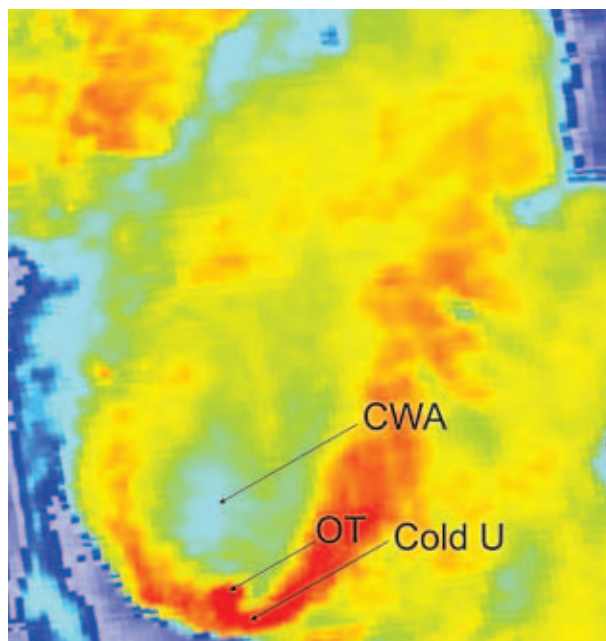


圖 8 強烈雷暴系統雲頂常見的紅外線特徵。內容詳見內文。(威斯康辛大學 SSEC/CIMSS 提供)

每上升一公里冷卻 9.8°C ；而濕絕熱的冷卻率則比這個值小，而且也不固定，端視有多少水蒸氣凝結而定。一般拿每公里下降 6.5°C 作為典型值。濕絕熱上升之所以冷卻率較小，是因為雖然空氣包也膨脹冷卻，但是膨脹做的功除了內能之外，還多了潛熱這個「財源」來支出，不必從內能提出這麼多能量，所以溫度遞減率就比較小。從圖 7 那一個突出點的溫度比周遭低了十幾度，再加上因為有雲，應當是濕絕熱過程，可以估計出它大概比周遭高出兩公里左右。

冷 U (或冷 V) 及暖區

衛星紅外線所拍攝的強烈雷暴經常有一個特徵：它的雲頂上游端常常有一個 U 字形或 V 字形的冷區，現在多半稱之為「冷 U」(cold U) 或「冷 V」(cold V)。冷區的平均溫度比一般雲頂要低大約 10°C 或更冷。緊鄰這個冷 U 的，卻往往是一個半封閉的暖區(close-in warm area, CWA)，似乎就被「夾」在 U 字彎谷裡。圖 8 是一個典型的例子。

③ 所謂顏色，純粹是人類視覺感受定出來的名詞，物理上只有光波波長才有明確的意義。

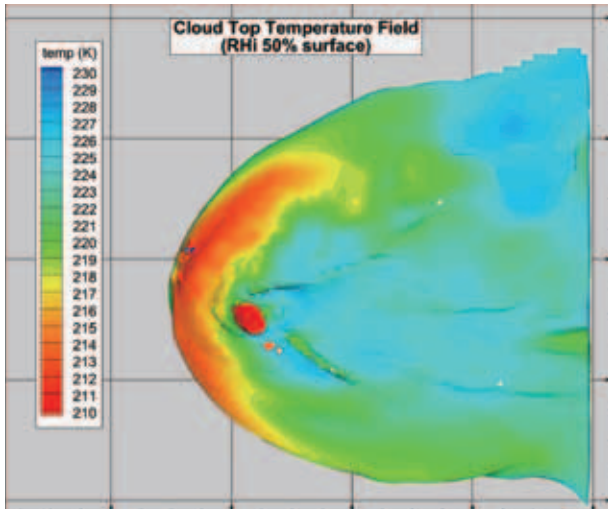


圖 9 筆者研究群研發之雲模型 WISCDYMM 所模擬出的強烈雷暴系統之雲頂溫度特徵，基本上顯示出所有衛星觀測到的主要紅外線特徵。其中 WISCDYMM 是 Wisconsin Dynamic and Microphysical Model (威斯康辛動力與微物理模型) 的縮寫。

這裡最冷的區域是過衝雲頂 (OT 處)，它幾乎位於冷 U 的頂點。而 CWA 則被夾在 U 形谷內。根據一些統計，出現這類冷 U 特徵的雷暴，有 75% 的機率是所謂的「劇烈雷暴」(severe storm)，通常會產生直徑大於一吋的冰雹，而且陣風風速高達每小時 93 公里以上。

以前大家對於產生這種特徵的雷暴物理過程不甚了了，出現過很多猜測的想法。近幾年筆者的研究群用自己研發的一套數值雷暴模型，可以把這種特徵成功模擬出來。圖 9 是我們數值模擬的一個類似的雷暴雲頂溫度分佈圖，可以看出它和圖 8 的主要特徵十分類似，既有冷 U，也有 CWA 等其他特徵。

由於數值模型是以物理方程式為基礎而建立起來的，包括一系列的古典運動方程及熱力學方程，其中大多數是偏微分方程，以及微物理的「參數化」公式。所以成功的模擬結果，應當代表這個模型所含的物理能夠用來解釋這一自然過程。我們的結論是：冷 U 的形成是由於那部分的雲頂，高過其他的砧狀雲部分，是由於環境風場和雷暴的上升氣流相互作用而引起的。強烈的上升氣流對於環境風場中大致是水平的風產生了「障礙效應」(obstacle effect)，就像一座山一樣。當水平氣流衝擊到一座山，氣流會被迫抬升，而這裡的雲頂面也隨著

上升 (畢竟雲基本上是空氣上升達到飽和而出現的)，所以迎風面的雲頂一般會比背風面來得高些。反之，當氣流吹過這座「雲山」的山頂後，會往下沉降，所以背風面的砧狀雲就比較低了。我們的數值模型結果指出，上風區的雲頂可以高出下風區雲頂一到兩公里以上，因此遵照前面所提的絕熱降溫率，這裡比背風面的砧狀雲溫度要低 10-20°C，是很合理的估計。

讀者可能會覺得，這個解釋好像一點不稀奇，山坡的迎風面氣流會被迫上升似乎是人人都知道的事情。問題是，我們以前怎麼知道雷暴的確像一座山一樣，所以會產生「障礙效應」？一來，這是因為既沒有人雷暴發生時，坐飛機跑到雷暴之頂的迎風面直接測量氣流 (這是極端危險的飛航區，沒有人會故意冒這種險)；二來，遙測資料像雷達或衛星也無法提供這裡的氣流狀況 (這裡只有透明空氣，沒有大的粒子讓都卜勒雷達發揮作用)。所以對於障礙效應之存在與否一直都有爭議。

我們的數值模型模擬結果終於給出一個比較讓人信服的理論，不但定性上合理，定量上也符合觀測。但是一個好的科學理論不止是能做出合乎一個觀測的結果，更重要的是假如這個理論為真，它應該可以推導出其他應該會被觀測到的其他物理現象。上述這個「雷暴像一座山一樣，會產生障礙效應」的理論，能夠推導出其他物理現象嗎？

答案是「有」！這正是下節要談的「跳卷雲」現象。

跳卷雲與 AACP

已故芝加哥大學教授藤田哲也 (Tetsuya Fujita)

是著名的雷暴觀測專家，對劇烈天氣現象諸如強烈雷暴、龍捲風之研究有卓著貢獻，現今美國的龍捲風等級制度便是他創立的，稱之為 Fujita Scale（藤田等級，簡稱 F-scale）。他在上世紀 60-80 年代搭乘小型噴射機直接就在雷暴雲的上方觀測。氣象學者都知道那裡是氣流極端擾動區，在那裡飛行簡直就是玩命（現在的駕駛員根本就禁止故意飛進那塊空域），藤田當然也知道，所以他是抱著「不入虎穴，焉得虎子」的信念去從事觀測的⁴。

在許多觀測中，藤田看到一種經常發生的現象：「砧狀雲上有一個常見而引人注目的特徵——每當過衝雲頂猛烈崩垮到砧狀雲裡時，就會形成卷雲，從過衝雲頂的後方往上跳起來。」[1] 他把這個現象稱之為「跳卷雲」（jumping cirrus）。這個說法讓藤田在那個年代裡遭受到很多人的質疑，尤其是他宣稱某些時候，這種卷雲似乎還會朝逆風的方向跳去。這些質疑讓他當時頗感苦惱，因為他無法提出眾人能夠接受的說法來解釋。

藤田教授於 1998 年去世。那時我雖已耳聞「跳卷雲」之事，卻沒有去深究過。當時我集中注意力在「砧狀雲上的長煙狀卷雲」（above anvil cirrus plume, AACP）這個問題上，而正是這個題目後來才導入解釋跳卷雲的理論。最早提出 AACP 現象的是賽特瓦克（M. Setvak）和多斯威爾（C. Doswell）[2]，其後列維扎尼（V. Levizzani）和賽特瓦克再提出更詳細的觀測研究 [3]。在他們之前，傳統的氣象學認為，雷暴高度最高可達對流層頂，但不能超過此層。前面提到的「過衝雲頂」，雖然以高度來說高於普通對流層頂，但那只是部分對流層頂的暫時變形而已，它裡面的空氣物理化學

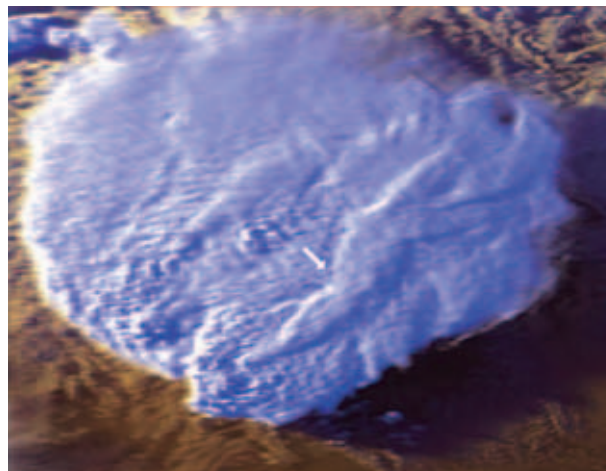


圖 10 在地中海之巴勒阿立克群島（Balearic Islands）米諾卡島上空發生的雷暴系統。白色箭頭指出長煙狀卷雲現象。（Martin Setvak 提供）

性質都和對流層的空氣一樣，所以實質上並沒有突破穿越對流層。可是 AACP 的現象卻顯示，雷暴物質的確有可能穿透對流層頂進入平流層。圖 10 是 AACP 的例子。這是發生於地中海西側西班牙米諾卡島（Minorca）上空的一個風暴系統的衛星影像。

圖 10 的風暴系統有不只一個雷雨胞，我們只討論最下面（南方）的部分。圖中最下方略呈長橢圓形的是雷暴的主體，而高空的風把大片的雲向東北（右上）方向吹去，形成長條的砧狀雲，綿延約 200 公里以上。奇特的是，在這片砧狀雲上另有一道像煙囪吐出的長煙狀雲（白色箭頭所指者），它比下面的砧狀雲狹窄，但也綿延 200 公里左右，而且還在砧狀雲上投下陰影，清楚顯示它位於砧狀雲的上方。從影像取得時間可得出太陽角度，再加上陰影寬度的資訊，可以約略估計這條煙狀雲大致位於砧狀雲上三公里左右。由於這種大範圍雷暴系統的砧狀雲幾乎就在對流層頂（大約 12 公里左右），因此這道煙狀雲高度約 15 公里，顯然已經位於平流層裡。

問題是，平流層是眾所周知的乾燥氣層，一般測量到的水蒸氣濃度大約是 2 到 3ppm 左右，就算這

⁴ 不過藤田曾經告訴筆者說，他有一次測量到驚人的亂流量，是之前他認為不可能的。從此以後，他就再也不敢直接飛到雷暴頂上觀測了。看來他還真幸運！



圖 11 碎波現象 (wave breaking)。(王寶貴攝於美國加州)

樣的水蒸氣全部凝結成冰晶（高空溫度低，水蒸氣如果凝結多半成冰）也不可能形成圖 10 中那麼廣大的雲帶。產生那條雲帶的水蒸氣原來絕非存在於平流層裡。

最明顯的答案應該就是，這些水蒸氣來自下面的雷暴。但是這裡有個大障礙——水蒸氣要達到平流層必須穿過對流層頂，但如前述，對流層頂上方的平流層是傳統氣象學公認的穩定層，這個氣溫往上漸增的逆溫層會壓制任何垂直運動，除非這運動強度有如火山爆發或核子彈爆炸，但一般雷暴不應該有這樣的威力。按照這種說法，既然平流層是逆溫層，水蒸氣就不該穿透對流層頂來到平流層。這個傳統信念是如此強烈，以致當初筆者提出水蒸氣源自雷暴時，幾乎遭到一致的質疑。

然而卻有一個機制可以使水蒸氣穿透對流層頂——重力波的碎波機制 (breaking of gravity wave)。一團雷暴在其成熟期，有相當強烈的上升氣流，中緯度的雷暴最強的上升氣流可高達 60-

70 m/s。這樣的上升氣流雖尚不足以如火山爆發或核彈爆炸一般衝破對流層頂，卻足以把原來安靜平直的對流層頂攪出很大的波動。這種波便是重力波 (gravity waves) ^⑤，說起來類似海上的海浪，但是普通海浪只是「表面波」，其運動只在水面附近。大氣的重力波是所謂的內部重力波 (internal gravity waves)，其波動行為和表面波不同，不過此處可先忽略不論。重要的是，這個重力波在適當條件下，也會像海浪一樣產生碎波 (wave breaking) 的現象。

大家最熟悉的碎波意象，大概就是在度假聖地夏威夷海邊，一些閒得沒事幹的踏浪兒踩著衝浪板，在翻天巨浪上恣意滑行。翻天巨浪就是種碎波。碎波有大有小，圖 11 是小碎波的例子，俗稱為「翻白浪」。普通的水波和碎波有何不同？普通的水波是個「絕熱過程」的運動，個別水分子只在很小的範圍內運動，它們因波動而產生的週期平均位移為零，它們的運動只是把波的形式（當然包含能量）

往外移動而已。可是碎波則不同，它會造成水分子的淨位移，碎波產生後水分子已經不能自動復歸原位了。

應用這個原理到雷暴雲頂的重力波及碎波現象，我們得到如下結論：如果雲頂的重力波不發生碎波，則那裡的水蒸氣只是「隨波浮沉」，最終還是留在對流層，不會穿越對流層頂。但是如果發生碎波，則水蒸氣就可以穿透對流層頂被輸送到平流層去了。

為了證明這個碎波現象的確會在雷暴雲頂發生，我們利用前述的雷暴數值模型，選取一個很典型的美國中西部發生的強烈雷暴的案例，運用其大氣環境場（氣象學上稱為「探空資料」⁵）作為這模型的初始場（值）來進行數值模擬。圖 12 則是模擬出來的結果，它非常明確的指出，在雷暴的頂端的確會產生翻天巨浪一樣的碎波，我們終於可以喊一聲「證明了！QED 了！」

其實正確的說，圖 12 中的碎波是很明顯的穿越了「等熵面」（isentropic surface），這個現象在模擬結果的動畫中尤其容易看出。圖 12 中的白色等值線是等位溫（potential temperature）線，其作用完全相當於熱力學上的「熵」（entropy），所以等位溫面就是等熵面。如果是正常的重力波，由於只是絕熱運動，就不會穿越等熵面，因為絕熱運動就是一種等熵運動，只會順著等熵面行進，而對流層頂就是等熵面。而在此圖中的碎波攜帶著一大片水分穿越了等熵面，代表水分穿過對流層進入平流層，於是這些水分就能夠形成圖 10 中的煙狀雲帶！

圖 12 的碎波使我聯想到藤田的跳卷雲。此圖中

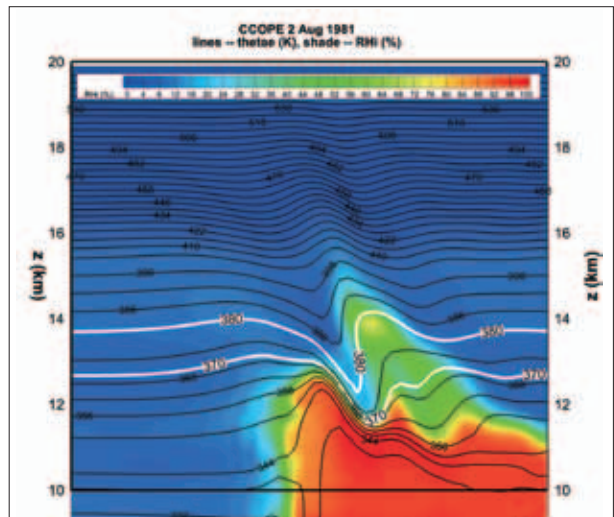


圖 12 WISCDYMM 模型所模擬的雷暴雲頂垂直剖面圖。顏色代表（相對於冰面之）相對濕度，紅色代表濕度較大區，綠色次之，藍色代表乾燥區。基本上紅線區即是雷暴雲涵蓋區。黑和白等值線代表相當位溫等值線。以三度空間而言，它們便是等值面，它們同時也等於是等熵面（isentropic surfaces）。圖中可見，綠色的大氣碎波（代表較充裕之水分）穿越 370K 及 380K 的等熵面，進入平流層，因而它們起了濕潤平流層的作用。380K 的等熵面也呈現碎波型式。

的高空風向是由左往右吹，然而碎波卻是由右下向左上衝出，這正符合他的觀測描述，亦即跳卷雲似乎逆風而行的。我們還計算出跳卷雲「跳」的速度，大約是每秒 10 公尺左右，的確可稱之為「跳」。另外其實正確說來，這裡的「逆風」只是相對於雷暴而言。由於整個雷暴系統其實是順著中層風向而行，所以即使是跳卷雲也是大致順風移動。不過您如果把雷暴當作靜止，則跳卷雲看起來的確像是逆風而行。

⁵ 注意，這裡談的流體力學中由重力所造成的 gravity waves（如海浪），而不是時空曲率以波的形式傳播擾動的 gravitational waves。

⁶ 英文為 sounding data。某區域大氣基本參數之測量值，如氣壓、溫度、風速、風向、濕度等。

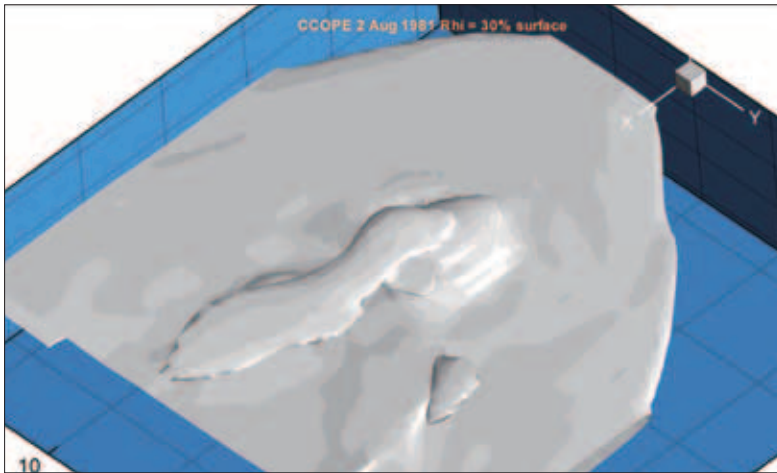


圖 13 WISCDYMM 模型所模擬的雷暴雲頂俯瞰圖。圖中可見模擬出的長煙狀卷雲從過突雲頂向下風區延伸出去，其高度距離砧狀雲約二、三公里，與觀測相當符合。



圖 14 從飛機上觀測到之跳卷雲現象。圖中可見，卷雲向上風方向跳出，上面卻遭高空風吹向下風區，形成長煙狀卷雲。（Martin Setvak 提供）

所以藤田的跳卷雲其實便是雷暴雲頂的碎波，只是他在世時尚無法完美解釋。我們的研究則證實了這一點（參閱 [4]）。幾年前，筆者應邀到芝加哥大學地球物理系演講，我講的就是這些現象，並證明藤田的觀測描述是正確的。可惜當時已經無法告訴他了，藤田芝大的那些同事也頗表惋惜。

這些到達平流層的水分經過高空風往下游吹送，就會產生長煙狀的卷雲。圖 13 是模擬結果的 3D 圖像。可以清楚看出碎波產生的穿越水分，其位置及形狀基本上與衛星觀測到的影像一致，證實了碎波的確可以產生煙狀雲帶。（想知道更詳細的讀者，請參閱拙著 [5]。）

在我們證實了這個碎波機制之後，除了有大量衛星觀測證據之外，也有不少飛機觀測看到同樣的現

象。圖 14 就是一個飛機觀測的例子。圖中可見一個碎波向「上風」（右側）跳出，到了高空被風吹往下風區，形成煙狀雲帶。圖 15 則是筆者從赫爾辛基開完會返台，在桃園附近的臺灣海峽上空所拍攝到的跳卷雲及長煙狀雲的現象。這些觀測指出，長煙狀雲的發生不限於中緯度，即使是亞熱帶的臺灣也照樣會出現。

水分能夠從對流層被傳送到平流層的現象，除了有趣之外，還有實際的重要性。第一，平流層的水蒸氣是製造「奇氫類」分子的原料^⑦。而平流層的 HO 通過一些催化循環反應卻會把平流層的臭氧消除，所以平流層中水分之多寡可能和臭氧的存活有密切關係。但影響更

直接的是，平流層的水蒸氣是吸收紅外線輻射的「高手」。它吸收地表所輻射的熱（即紅外線）之能耐（也就是所謂的溫室效應），比在對流層時要高出數百倍。平流層的水蒸氣越多，地表熱輻射越會被這些水蒸氣擋回來無法散出去，結果是地表變得更暖。這表示平流層中的水蒸氣量是控制全球暖化的一個重要因子，必須嚴肅考慮。

以前大家一直以為，平流層中的水蒸氣沒有多大變動，近來的觀測卻指出這是錯誤的。現在學界對於調控平流層水蒸氣，哪一種機制的貢獻最大尚無一致結論。然而上述的雷暴碎波傳輸機制已逐漸證實是個有效率的機制，很有可能它便是最重要的傳輸方式。假設真是如此，則雷暴的物理機制對全球暖化過程的理解及預估就十分重要了。

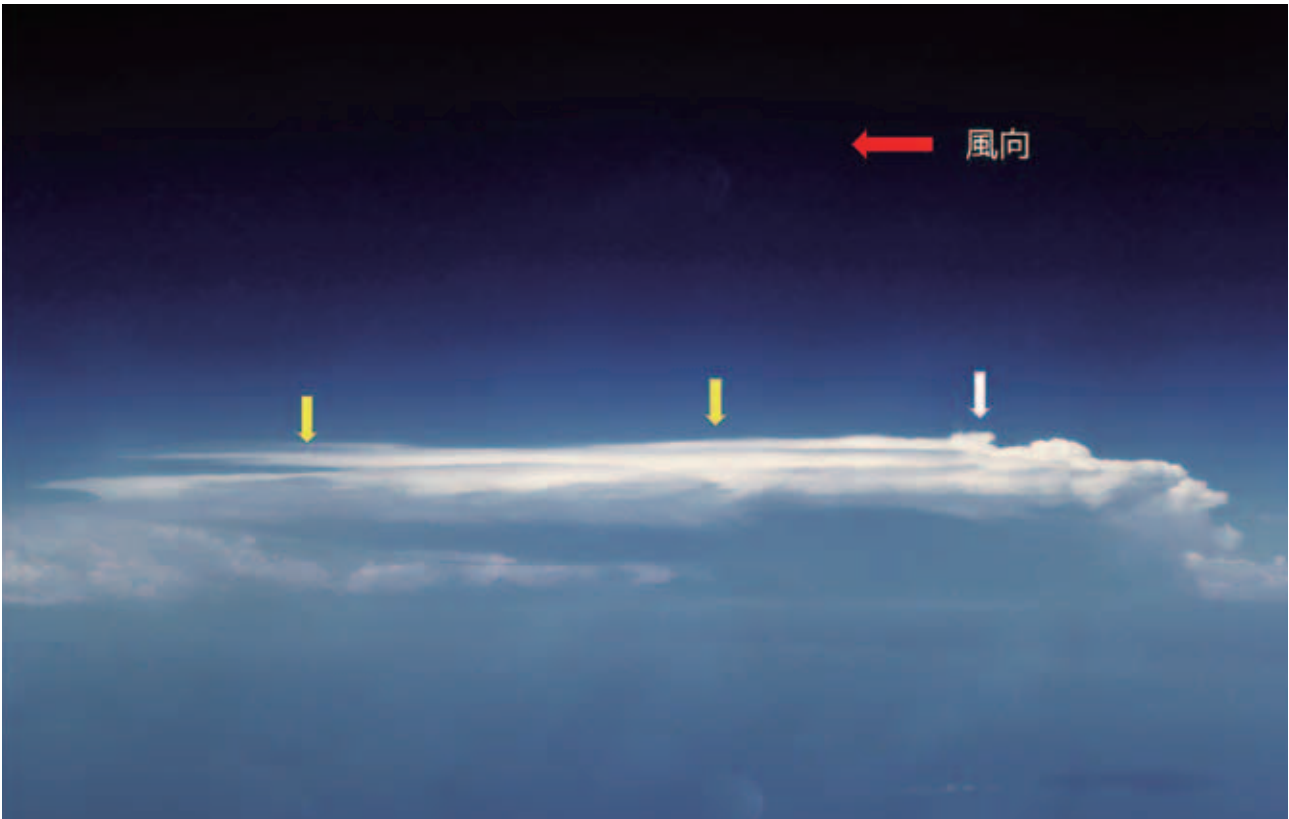


圖 15 2013 年 6 月 23 日在台灣海峽上空之積雨雲所見之跳卷雲現象。白色箭頭指出剛發生之跳卷雲，黃色箭頭指出較早發生，已被高空風吹成長煙狀之跳卷雲。（王寶貴攝）

結語：美夢成真

當然，對筆者而言，最奇妙的是童年的幻想竟然成真。人造衛星的發明使得人類能夠像神仙一樣飛到雷暴頂端，仔細端詳雲頂到底在辦什麼慶典熱鬧活動，還可以將之拍成電影，記錄下來細細研究觀賞。至於它竟然如此「有用」，那就是附帶的紅利了。

仔細想來，研究雷暴雲頂的物理過程，有點像在研究雷公頭頂上的髮髻形式，如果它平坦柔和，雷公的情緒大概很穩定，我們或許可以期望獲得一些甘霖，不至於形成大害。但是如果看到的形式是「怒髮衝冠」，例如有不少跳卷雲及長煙狀雲，那就大勢不妙了，說不定會有「大風折木」、豪雨成災，或者甚至降下雞蛋大小的冰雹等等災害了。目前我們正在研究這些雲頂特徵與災害天氣的對應關係，希望將來可以用於風暴的即時預報。☺

本文參考資料請見〈數理人文資料網頁〉<http://yaucenter.nctu.edu.tw/periodical.php>

延伸閱讀

- ▶ 王寶貴《天與地》（1996），牛頓出版社。本書曾獲《中國時報》1996 開卷十大好書。
- ▶ 王寶貴《雲物理學》（1997），國立編譯館（渤海堂印行）。
- ▶ Strelch, L., “When thunderstorms have wings”, 97 *Eos* 21 June 2016. 此文是美國地球物理聯盟（AGU）會刊 *Eos* 當期的「研究亮點」，介紹王寶貴最新研究，與本文介紹的 AACP 有關。
<https://eos.org/research-spotlights/when-thunderstorms-have-wings>
- ▶ Pretor-Pinney, Gavin. *The Cloudspotter's Guide: The Science, History, and Culture of Clouds*. 中譯本《看雲趣：漫遊雲的科學、神話與趣聞》（2008），黃靜雅譯，遠流。

⑦ odd hydrogen 分子式中的氫原子是奇數，例如 HO₂，通常用 HO_x 或 HO_X 來代表。