

發現巨大噴流

成功大學物理系 紅色精靈團隊 許瑞榮

前言

發生在雷雨雲與電離層之間的高空短暫發光現象，在近十幾年來吸引了許多科學家積極地投入相關的研究。這些高空短暫發光現象主要包括：1989年所發現的紅色精靈(sprite) [1,2]，1994年所發現的藍色噴流(blue jet) [3]，以及1995所觀測到的淘氣精靈(elves) [4]。

紅色精靈是雲對地面閃電(CG)後幾毫秒內，在雲層頂端與電離層之間，離地面約30~90公里的高空中，所引起的發光現象，發光體最寬的部分約40公里，參考封底圖一。發光的過程持續0.01秒至0.2秒之間，通常是先從70公里的高空開始亮起，再分別向上、下傳播。上半段發光主體以紅光為主，是來自於被激發的氮分子。下半段鬚狀部份以藍光為主，是來自於氮離子以及已被激發到較高能階的氮分子。一般的藍色噴流是從雲頂向上噴發至40公里高空的漏斗狀發光體，頂端的寬度小於5公里。發光的時間可持續約0.3秒，顏色偏藍。而在2001年所發現的大型藍色噴流[5]，可噴到70公里的高空，頂端寬度可達約20公里，持續時間也增長到約0.8秒。淘氣精靈是由閃電所產生的電磁脈衝波(EMP)打到電離層，加熱電離層所造成的環狀發光體，約橫跨300公里。淘氣精靈的顏色是紅色的，發光時間小於0.001秒。在這些高空短暫發光現象中，紅色精靈與淘氣精靈都是由CG所誘發的現象，而藍色噴流並沒有與之對應的CG閃電。

經過了十來年觀測，原本以為各種的高空短暫發光現象，應該都已經被發現了。然而，由成功大學紅色精靈團隊在2002年所發現的巨大噴流(gigantic jet) [6]卻告訴世人，還有另一種新的高空短暫發光現象，參考封底圖一。該結果發表在2003年6月26日的「Nature」期刊上，該期刊中也同時刊登了一篇評論[7]，介紹成大團隊的研究成果。同時也引起世界各國媒體的注意，

報導了這個新現象的發現。例如：2003年6月25日的美國洛杉磯時報就曾經以"These things are so spectacular, and so startling, and we're just finding it this late in the game,..."，以及"It's sort of like biologists announcing we've discovered a new human body part,..."，這樣的句子來形容這一次的發現。

巨大噴流的特性

從可見光波段的觀測，可以很清楚地得知巨大噴流是從雲層的頂端(約15公里高處)向上噴出，直達約90公里高的電離層，建立了從雲層直達電離層的連通光路。由於它的最大長度約為75公里，最大寬度約為40公里，又是向上噴發，因此稱之為巨大噴流。巨大噴流持續時間約0.5秒，整個發光過程有如雲層對電離層的向上閃電(CI)，其動態發展可分為前導噴流(leading jet)，發展完整的噴流(fully developed jet)與後續噴流(trailing jet)等三個階段。其中在發展完整的噴流階段，上半層表現出類似紅色精靈的特徵，而下半層卻像藍色噴流，可說是紅色精靈與藍色噴流的合體(封底圖二與封底圖三)。從型態與動態的分析，可知巨大噴流與紅色精靈及藍色噴流並不相同，是另一種新的高空短暫發光現象。

巨大噴流的動態過程與一般雲對地向下閃電過程中的階梯前導(steped leader)，回擊(return stroke)與迅速前導(dart leader)，也有些異同之處[8]。一般的CG的產生都是在雲層累積足夠的電量之後，先向下開關了一條階梯狀的通路到達地面，這條通路稱為階梯前導；形成通路之後，強大的電流再以極快的速度由地面沿著階梯前導流到雲層，這一過程稱為回擊。一般耀眼的閃光與隆隆的雷聲，都是在回擊時所產生的。若是在第一次雷擊之後，雲層還有夠多的電荷時，會再次向地面放電，只不過第二次雷擊的前導過程所走的路徑，會利用部分的第一次回擊路徑當通路，因此速度較快，稱為迅速前導，緊隨著迅速

前導之後，會有第二次回擊。巨大噴流中的前導噴流扮演著類似階梯前導的角色，而發展完整的噴流也和一般 CG 中的回擊相類似。然而，後續噴流卻無法像一般閃電的迅速前導一般，再次建立從雲層到電離層之間的完整光路。

從日本與南極的極低頻電波(ELF)測站的資料中，所找出相對應於這些巨大噴流的 ELF 訊號(參考封底圖四)，可知對應於巨大噴流的雲對電離層閃電是負極性的，也就是-CI 閃電，此時大量的電流由電離層向下傳送到雲層，產生有如閃電回擊一般的發展完整噴流。另外，所觀測得的 5 個巨大噴流在型態上又可以分為兩類，一種為樹狀的巨大噴流，另一種為蘿蔔狀的巨大噴流，參考圖四。而從 ELF 訊號可知樹狀巨大噴流的電荷矩改變量(charge moment change)約為 2000 C-km，而蘿蔔狀巨大噴流的電荷矩改變量卻只有約為 1000 C-km。也就是每一次巨大噴流的發生，都會將約 13-26 庫倫的電荷傳送到電離層，遠大於一般雲對地的一次回擊所傳送的 5 庫倫。

巨大噴流的重要性

在發生巨大噴流的時候，會有大量的氣體分子會被游離，也會有大量電荷的轉移，將造成該區域的大氣產生激烈的化學反應，以及造成該區域高空物理環境的巨大改變。因此可能會對飛經該區域的高空飛行器造成相當的損害，可能造成故障。另外，巨大噴流所產生的 ELF 訊號與潛水艇通訊用頻帶相當類似，因此巨大噴流的發生可能也會干擾潛水艇的通訊。

科學家告訴我們，在我居住的地球上，即使天氣晴朗的地區，高空與地面也會有約 30 萬伏特的電壓差，因此始終存在著一股稱為晴天電流(fair weather current)的擴散電流，向地面漏電；而分布在全球各地的雷雨雲，則有如發電機一般，藉由雲對地的負閃電來維持高空與地面的電壓差。如封面圖右半邊由 I1-I5 所構成的迴路，這就是地球上一般所謂的大域電流(global electric circuit)。而巨大噴流或紅色精靈的存在，都可以形成另一個迴路，成為另一種使高空大氣快速放電的新途徑，參考封面圖的左半邊。而每一次巨大噴流的發生都將會放掉全球高空中電荷的~0.02%，雖然對地球電性的影響並不大，但

是對該區域的電離層卻有很大的影響。

對科學家而言，最有趣的是：巨大噴流是一個新的高空發光現象，連帶的也會引發出相當多有趣的研究課題。譬如：巨大噴流的顏色為何？它的光譜特性為何？該區域的大氣游離程度為何？該區域中電子的能量有多高？它是否只出現在海洋上空？以高速攝影機來研究它的動態行為，會出現什麼樣的驚奇結果呢？巨大噴流形成的條件為何？三種不同階段的成因為何？為何會有型態上的差異？等等，這些都是值得投入的研究課題，也是成大紅色精靈團隊未來的研究方向。

團隊合作達成任務

紅色精靈團隊是在 1998 年 10 月，因任務需要，由當時正蓬勃發展的「非線性物理研究群」[9]改組，並結合其他數位教授，合組成一支新的團隊，由陳志隆教授領軍，規劃承接中華衛星二號的科學酬載「高空大氣閃電影像儀」(Image of Sprite, Upper Atmosphere Lightning, 簡稱 ISUAL) 的任務[10]。計劃是在 1999 年 7 月開始執行的，由陳志隆教授擔任 PI，並負責規劃籌載儀器任務，許瑞榮教授為副 PI，並負責科學探索與資料分析，蘇漢宗教授負責資料中心，中央大學倪簡白教授負責有關大氣輝光的研究，遠東技術學院的張名輝助理教授協助資料中心事務等。1999 年暑假，可說是成大紅色精靈觀測的濫觴。當時的 PI 陳志隆教授，派遣許瑞榮與蘇漢宗兩位教授至美國，參加由加州大學柏克萊分校 Mende 教授所主持的"Sprite'99"觀測計劃，學習紅色精靈的觀測。回台之後，便開始分析資料以及籌備在台灣觀測紅色精靈的相關事宜。在 2000 年，團隊很幸運地邀得陳炳志博士成為計劃中的博士後研究員，大為提昇了團隊的觀測儀器整合、資料分析以及資料中心規劃的能量。可惜的是，在 2002 年的暑假，陳志隆教授基於個人的生涯規劃，離開了成大物理系，到交大電子與資訊中心及光電所任教。雖然是轉到別的學校服務，陳志隆教授並沒有將 ISAUL 主計劃帶到交大，而是很慷慨地讓主計劃留在成大物理系，由許瑞榮教授接任 PI；只將自己負責的子計劃移到交大，繼續完成規劃籌載儀器任務，以及後續的維護任務。

由許瑞榮教授，蘇漢宗教授，陳炳志博士，研究助理，研究生以及大學部學生所組成的紅色精靈觀測團隊。在 2001 年長達半年的觀測季中，共有 27 個觀測夜晚適合觀測，只有 8 個夜晚有得到結果，共獲得 66 個高空短暫發光事件。主要的結果已經寫成論文，刊登在 *Geophysical Research Letters* 上，其中精采的紅色精靈照片也成為該期期刊的封面故事[11]。另外，其他詳細的分析結果，也發表在相關的期刊上[12]。2002 年共觀測了 54 個夜晚，只有 7 個夜晚有得到結果，共獲得 35 個事件。其中以 7 月 22 日那一夜的 5 個巨大噴流事件最為重要[6]。2003 年已經連續觀測了將近 80 個夜晚，記錄了許多紅色精靈與淘色精靈事件，可是至今尚未再一次覓得巨大噴流的芳蹤，實在令人扼腕。

在團隊成員同心同德的合作之下，紅色精靈團隊在高空短暫發光現象的研究上有相當耀眼的表現，並受到國際的重視。這除了台灣有適合從事觀測的地利之外，主要也是團隊的成員辛勤地工作的結果。當然，團隊也很幸運，除了有老天爺的特別眷顧之外，這幾年來太空計畫室的資助以及國家實驗研究院院長兼太空計畫室主任李羅權院士的督促與指導，也是讓團隊研究成果豐碩的重要因素。在未來幾年，紅色精靈團隊將會繼續善用台灣所處的地利，以及即將升空的中華衛星二號上的「高空大氣閃電影像儀」，繼續在高空短暫發光現象的研究上，做出重要的研究成果。

參考文獻

- [1] R.C. Franz, R. J. Nemzek and J. R. Winckler, *Science*, **249**, 48 (1990).
- [2] D. D. Sentman, E. M. Wescott, D. L. Osborne, D. L. Hampton and M. J. Heavner, *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 1205 (1995).
- [3] E. M. Wescott, D. D. Sentman, D. L. Osborne, D. L. Hampton and M. J. Heavner, *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 1209 (1995).
- [4] H. Fukunishi, Y. Takahashi, M. Kubota, K. Sakanoi, U.S. Inan, and W.A. Lyons, *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 2157 (1996).
- [5] V.P. Pasko, M. A. Stanley, J. D. Mathews, U.S. Inan, and T. G. Wood, *Nature*, **416**, 152 (2002).
- [6] H.T. Su, R.R. Hsu, A.B. Chen, Y. C. Wang, W. S. Hsiao, W. C. Lai, L. C. Lee, M. Sato and H. Fukunishi, *Nature*, **423**, 974 (2003).
- [7] V.P. Pasko, *Nature*, **423**, 927 (2003).
- [8] M. A. Uman, "The lightning discharge", *Academic Press (New York)* (1987).
- [9] R.R. Hsu, H.T. Su, J.L. Chern and C.C. Chen, *Phys. Rev. Lett.*, **78**, 2936 (1997).
- [10] J. L. Chern, R.R. Hsu, H. T. Su, L. C. Lee, S. Mende, H. Fukunishi, and Y. Takahashi, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **65**, 647 (2003).
- [11] H.T. Su, R.R. Hsu, A. B. Chen, Y.J. Lee and L.C. Lee, *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 10.1029/2001GL013737 (2002).
- [12] R.R. Hsu, H. T. Su, A. B. Chen, L. C. Lee, M. Asfur, C. Price and Y. Yair, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **65**, 561 (2003).