

[研究新領域報導]

高空短暫發光現象的全球分佈與對地球環境的影響

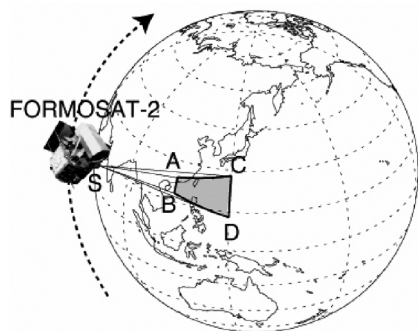
成功大學物理系 許瑞榮 蘇漢宗
成功大學太空天文與電漿科學研究所 陳炳志
中央大學太空科學研究所 郭政靈
交通大學光電工程學系 陳志隆

一、前言

2008 年 8 月 21 日，英國線上雜誌“New Scientist”，刊登資深編輯 Nora Schultz 女士以“*Atmospheric homes of elves and sprites revealed*”為標題的文章[1]，報導成功大學物理系紅色精靈團隊，在高空短暫發光現象的研究成果[2]。成功大學物理系紅色精靈團隊是在國科會/國研院/國家太空中心的資助之下，執行福爾摩沙衛星二號的科學酬載「高空大氣閃電影像儀」(ISUAL, *I*mager of *S*prites and *U*pper *A*tmospheric *L*ightning, <http://sprite.phys.ncku.edu.tw/>)。福衛二號自從 2004 年 5 月 20 日升空，經過二個月的測試與調整，於 2004 年 7 月正式開始觀測。此篇報導所引用的研究成果，是紅色精靈團隊分析過去三年衛星觀測資料所得的結果。

二、ISUAL 的科學目標與儀器設備

探討高空短暫發光現象(TLEs, *T*ransient *L*uminous *E*vents)的全球分佈，是 ISUAL 的主要科學目標之一。福衛二號的夜面軌道如圖一，ISUAL 儀器的視野是側看地球的臨邊，所涵蓋的



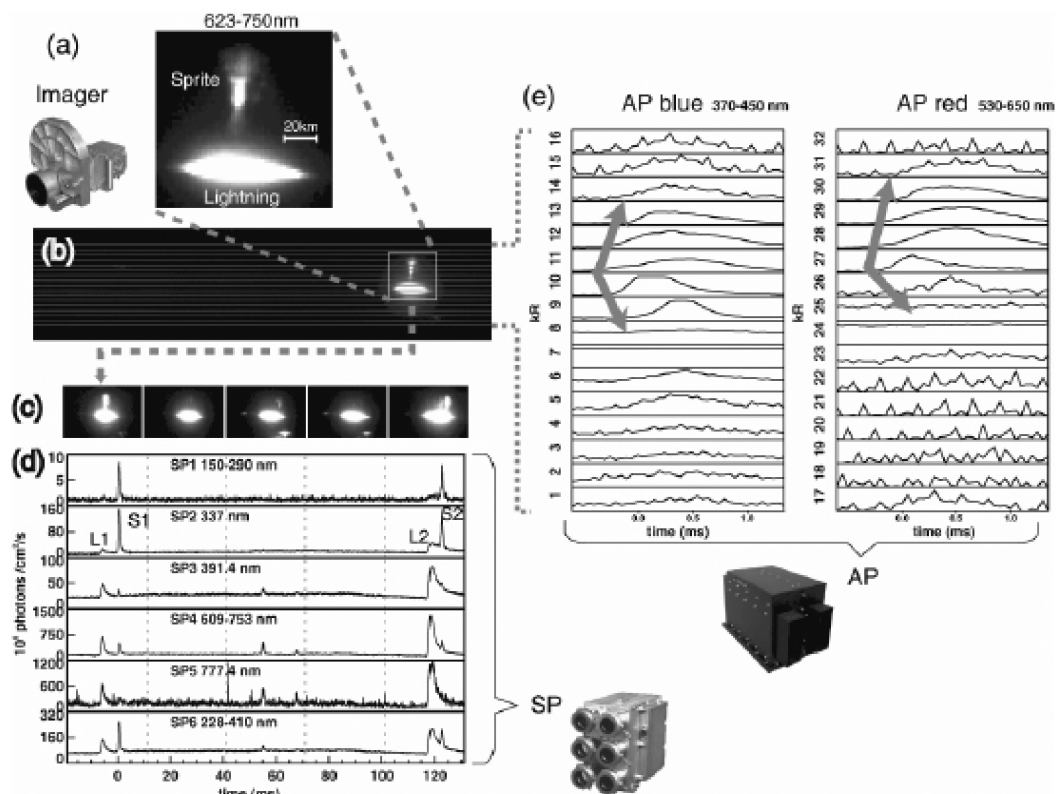
圖一 福衛二號的夜面軌道與視野。四邊形 ABCD 是儀器的觀測視野，約有 $3 \times 10^6 \text{ km}^2$

地面區域約為 3 百萬平方公里。由於福衛二號是一顆繞極衛星，因此每天都會在當地晚上約 11 點鐘時，掃過被觀測的區域，每一區域被觀測時間約只有 2 分鐘。如圖二所示，ISUAL 觀測儀器包含有：曝光積分時間為 29 ms 的「影像儀」(Imager)；時間解晰度為 0.1 ms 的 6 通道「光譜光度儀」(SP)，以及具有 0.05-0.5 ms 時間解晰度與 12-14 km 垂直空間解晰度的雙波段「陣列光度儀」(AP)。這些觀測儀器可以提供事件影像、觸發時間、空間定位與動態光譜光度等各種資訊。利用這些觀測資料，可以得知 TLEs 的全球分佈，以及高時間解晰度的動態物理與化學特性，進而探討 TLEs 對地球環境的影響。

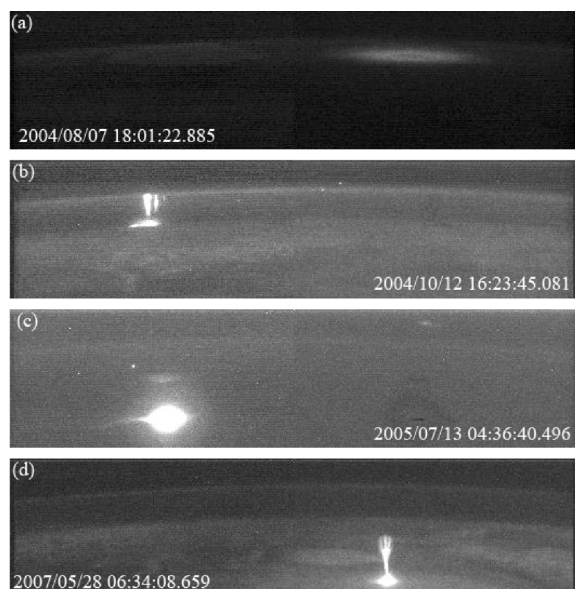
三、第一幅 TLEs 的全球分佈圖

在 2004 年 7 月至 2007 年 8 月的三年中，ISUAL 紀錄了 633 個“紅色精靈”(Sprite)、5434 個“淘氣精靈”(Elve)、657 個“精靈量盤”(Halo)與 13 個“巨大噴流”(Gigantic Jet)等各類 TLEs。圖三是福衛二號從太空中，所拍攝的各種 TLEs 影像範例。分析 ISUAL 在三年之中的觀測資料，得到了以下幾項重要成果[2]：

1. 意外地發現淘氣精靈是 TLEs 的大宗，約佔所有事件的 80%。紅色精靈與精靈量盤僅各佔 10% 左右，而巨大噴流的數量最少。
2. 儘管紅色精靈的統計樣本數不太夠，但從全球的分佈情形（圖四），仍可以得知紅色精靈發生率的較高的區域是非洲中部，日本海，西大西洋。精靈量盤的全球分佈情形與紅色精靈類似。
3. 淘氣精靈的統計樣本數較足夠。從全球分佈情形，得知淘氣精靈較集中在加勒比海，南中國海，印度洋，南太平洋，西大西洋等區域。

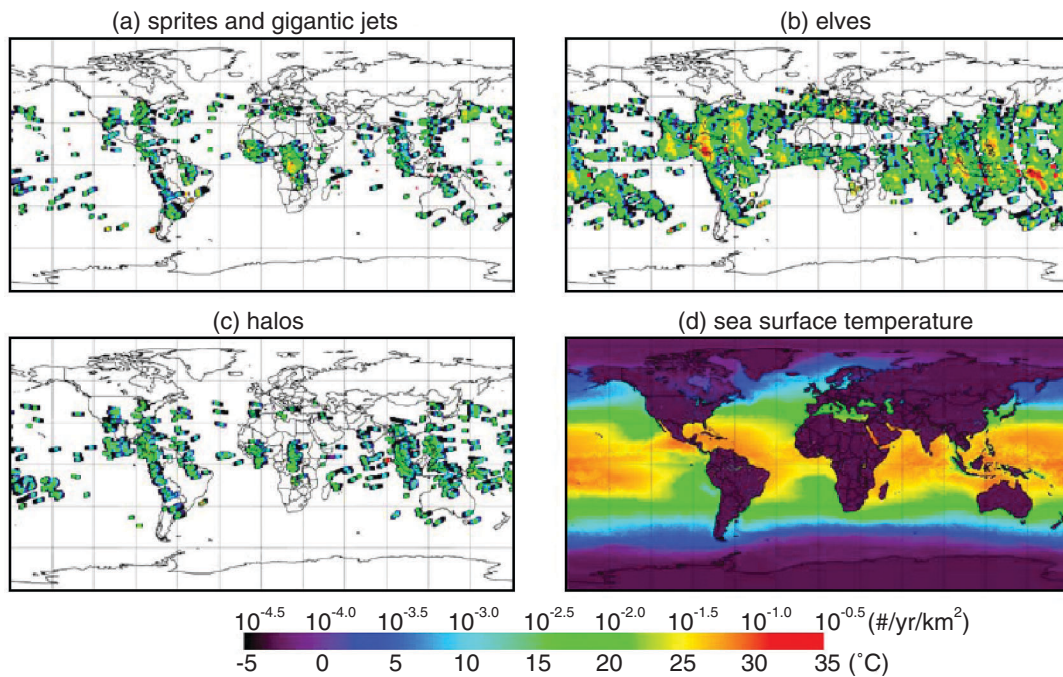


圖二 ISUAL 的影像儀、光譜光度儀與陣列光度儀，以及它們所記錄的科學資料範例。(a)影像儀；(b)影像儀所拍攝的單格紅色精靈影像；(c)影像儀所拍攝的連續影像，最左邊的那一幅影像是影像(b)方框中的影像；(d)光譜光度儀與相對應於影像序列(c)的 6 個波段光度訊號，S1 與 S2 是兩個紅色精靈的光度訊號；(e)雙波段陣列光度儀與相對應於影像序列(c)的光度訊號，從此訊號可知，紅色精靈從 75 公里的高空分別向上、下發展

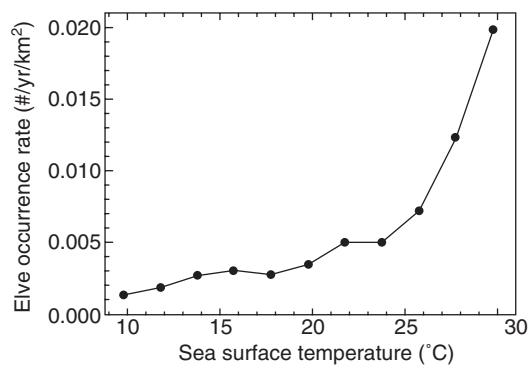


圖三 福衛二號所拍攝的各種 TLEs 影像範例。(a)淘氣精靈(elve)，(b)紅色精靈(sprite)，(c)精靈量盤(halo)，(d)巨大噴流(gigantic jet)

4. 目前已知閃電在陸地上的平均單位面積發生頻率是海洋的 10 倍。然而 ISUAL 所記錄的淘氣精靈，陸地上空的單位面積發生頻率卻祇有海洋上空的 1.1 倍；精靈量盤是 2.4 倍；紅色精靈是 4.1 倍。由於淘氣精靈基本上是由強閃電所誘發，因此從淘氣精靈的分佈情形，可得知海洋上空強閃電所佔的比例，約為陸地上 10 倍。
5. ISUAL 也首次測得全球每分鐘約有 3.53 個淘氣精靈發生。根據理論的估計，峰值電流大於 60kA 的閃電就會加熱電離層，產生淘氣精靈；而與美國 NLDN 的閃電資料相比，發現 ISUAL 儀器所只能測得的峰值電流大於 80kA 的閃電所觸發之淘氣精靈，其數量僅佔理論估計值的 1/10。因此，可推估出全球每分鐘應該有約 35 個淘氣精靈發生，也就是全球每天大約有 50,000 個淘氣精靈，約為全球每天閃電數量的 1/80。



圖四 (a)紅色精靈的全球分佈圖，(b) 洶氣精靈的全球分佈圖，(c)精靈暈盤的全球分佈圖，(d)海水表面溫度全球分佈圖



圖五 平均海水溫度與洶氣精靈生成率的相關圖，可以發現當海水溫度高於 26 度後，洶氣精靈的生成率幾乎是呈指數增加

6. 發現了洶氣精靈發生率與海洋表面溫度(Sea surface temperature; SST)有很高的相關性，參考圖五。海水溫度升高時，洶氣精靈的發生率也會提高，尤其是的是當海水平均溫度高於攝氏 26 度時，Elves 的發生率幾乎是呈指數增加。值得注意的是，海水水溫超過攝氏 26 度為颱風形成的條件之一。

四、TLEs 對電離層的影響

由 ISUAL 觀測得知全球發生率以洶氣精靈最高，每分鐘將近有 35 個事件，因此對地球環

境的影響，也是以洶氣精靈最重要。洶氣精靈發生的高度介於 80-90 公里之間，此區域亦為夜間電離層的底部，所以首先探討的是洶氣精靈對電離層電子濃度的貢獻。現有的文獻指出[3]，洶氣精靈發生時，內部的自由電子濃度增幅在 100% 左右，而且所增加的電漿團可以持續的時間長達 2~3 分鐘。平均而言，洶氣精靈的體積約相當於一個直徑 165km、厚度為 10km 的圓柱體。據此，可以估計出洶氣精靈的產生，將使得全球電離層的平均電子濃度增加約 1%。對於洶氣精靈發生率較密集的加勒比海區域上空的電離層，則可達約 5% 的增加率；這樣的增幅，足以影響該地區的部份電磁波通訊。

以上的這些重要成果，獲得國際知名的洶氣精靈專家，美國加州史丹福大學電機系 Umran Inan 教授的重視，並在接受採訪時評論說：「It is particularly interesting that elves may have an important global effect on the lower ionosphere and the total electron content.」[1]

五、TLEs 對上大氣層能量平衡之影響

TLEs 的發生機制因種類而有所差異。紅色精靈源自雷雨雲與電離層之間的準靜電場；洶氣精靈則來自閃電所輻射出的電磁脈衝；而精靈暈

表一 由 ISUAL 的 TLEs 事件所推算之主要氮分子輻射激發上態的數量、相對應的能量貢獻及因電子撞擊而轉移給氮分子的能量

TLE	Total excited number of molecular band				Energy deposition (MJ)				E _{total} (MJ)
	1PN ₂	2PN ₂	LBH	1NN ₂ ⁺	1PN ₂	2PN ₂	LBH	1NN ₂ ⁺	
sprite S1	2.7×10 ²⁴	6.0×10 ²³	9.3×10 ²³	1.2×10 ²²	3.18	1.06	1.27	0.04	31.8
sprite S2	1.5×10 ²⁴	3.6×10 ²³	6.1×10 ²³	12×10 ²²	1.76	0.63	0.83	0.04	17.6
halo	4.5×10 ²³	4.4×10 ²²	N/A	1.5×10 ²¹	0.53	0.08	N/A	0.005	5.3
elve	1.5×10 ²⁴	2.0×10 ²³	N/A	4.8×10 ²¹	1.76	0.35	N/A	0.014	17.6
gigantic jet	7.9×10 ²³	1.7×10 ²³	5.1×10 ²²	1.6×10 ²²	0.93	0.3	0.07	0.05	9.3

盤之起源機制，則和紅色精靈相同。雖起源機制有異，但總體而言，都是閃電所產生的靜電場或電磁脈衝中的電場加速著電子。當電子與大氣中的氮和氧碰撞時，被加速電子將激發氮氧分子中的電子到達不穩定的高激發態，而當高激發態的電子躍遷回到穩態，就會產生輻射，成為地面及衛星觀測所記錄的 TLEs。

因此計算出電子被加速，傳輸到氮、氧振動和轉動能與電子激發態的能量比率，即可由 ISUAL 的觀測數據，估計出每一類事件裡，不同 SP 所量測的光子數，反算出在不同氮分子輻射譜帶的光子數，最後乘上該波段光子的最低能量，即可得在該氮分子輻射譜帶所注入的能量，最後再把所有的輻射帶能量加總，即可得到每一個事件以輻射形式射出的能量。如再考慮其他非輻射形式的能量注入（例如，振動態和轉動態激發），即可估出每一個事件對上大氣層的能量貢獻（表一）；最後，再配合全球發生率，則可估計出在單位時間內，全球的高空短暫發光事件對上大氣層注入多少能量[4,5]。

由計算得知，TLEs 內因為電子撞擊而傳給氧和氮分子的總能量約是 1PN₂（氮分子第一正則譜系）的 10 倍。在分析 1415 個 ISUAL TLEs 事件後，可推算出在 1PN₂ 波段，紅色精靈、精靈量盤和淘氣精靈所注射的能量平均為 2.2, 1.4 及 1.9 MJ，因此紅色精靈、精靈量盤和淘氣精靈內的釋出的能量為 22, 14 和 19 MJ。如再考慮全球發生率，則紅色精靈、精靈量盤和淘氣精靈每分鐘分別傳送 22, 14 及 665 MJ 的能量到上大氣層[6]。

在 Chen [2]與 Kuo [6]這兩篇論文發表之後，曾將事件統計到 2008 年 6 月 30 日為止。四

年的觀測累計紀錄了淘氣精靈為 7964 個，紅色精靈為 826 個，精靈量盤為 842 個，巨大噴流有 19 個。以此為統計樣本，所得有關 TLEs 全球分佈，與對電離層電子濃度的影響，以及傳輸到上大氣層的能量結論，與之前的研究結果類似，並無太大的差異。

六、未來的發展方向

根據影像儀 CCD 與光譜光度儀的感光度衰減的情形，如果衛星與科學酬載健康狀態一切正常的話，ISUAL 將可繼續運轉到 2013 年，也就是說，未來可能還有五年的觀測期。因此，繼續增加 ISUAL 的科學產出與培養太空科技人才是重要的課題。以下是一些目前正在進行的以及未來將要從事的研究主題：

- (1) 繼續收集 ISUAL 資料，增加樣品數，以探索紅色精靈與精靈量盤的全球分布情形。
- (2) 在台灣建立閃電電波量測系統，獲得有關閃電的物理特性，用以輔助 ISUAL 與地面觀測資料的分析。
- (3) 以高時間解析度的 SP 與 AP 資料與地面觀測，來探討巨大噴流與藍色噴流的物理機制。
- (4) 與台大追風計畫團隊合作，探索颱風上空的 TLEs，以及 TLEs 分佈與間熱帶輻合區(ITCZ)以及暴風路徑(storm tracks)的關係。
- (5) 探討 TLE 與聖嬰現象、赤道電離層密度異常區、大氣環流、太陽黑子數量周期等自然現象之間的相關性。
- (6) 與國內、外的學者專家合作，繼續從事大氣輝光的觀測。
- (7) 與國內、外的學者專家合作，繼續從事極光的觀測。

- (8) 積極投入福爾摩沙衛星六號的科學酬載。
- (9) 強化太空科學人才（研究生，助理，工程師）之培育。

誌謝

感謝國科會與國家太空中心在研究經費與衛星操作上的幫助；感謝成大物理系提供環境與空間讓團隊得以發展，中央大學天文所與大氣物理系在 TLEs 地面觀測的協助，感謝李羅權院士多年來的督導，以及歷年來所有團隊成員的努力。

參考資料

- [1] N. Schultz, *New Scientist*, **21**, August (2008).
- [2] A.B. Chen, C.L. Kuo, Y.J. Lee, H.T. Su, R.R. Hsu, J.L. Chern, H. U. Frey, S. B. Mende, Y. Takahashi, H. Fukunishi, Y.S. Chang, T.Y. Liu and L.C. Lee, *J. Geophys. Res.*, **113**, A08306, doi:10.1029/ 2008JA013101, (2008).
- [3] S.B. Mende, H.U. Frey, R.R. Hsu, H.T. Su, A.B. Chen, L.C. Lee, D.D. Sentman, Y. Takahashi and H. Fukunishi, *J. Geophys. Res.*, **110**, No. A11, A11312; 10.1029/2005JA011064, (2005).
- [4] C.L. Kuo, R.R. Hsu L.C. Lee, H.T. Su, A.B. Chen, S.B. Mende, H.U. Frey, H. Fukunishi and Y. Takahashi, *Geophysical Research Letters*, **32**, Issue 19, (2005).
- [5] C.L. Kuo, A.B. Chen, Y.J. Lee, R.R. Hsu, H.T. Su, S.A. Cummer, L.C. Lee, H. Frey, S.B. Mende, Y. Takahashi and H. Fukunishi, *J. Geophys. Res.*, **112**, A11312, doi:10.1029/ 2007JA012407, (2007).
- [6] C.L. Kuo, A.B. Chen, J.K. Chou, L.Y. Tsai, R.R. Hsu, H.T. Su, H.U. Frey, S.B. Mende, Y. Takahashi and L.C. Lee, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **41**, 234014, (2008).