

台灣在紅色精靈的研究方面，將來還會有一項獨一無二的利器。那就是「中華衛星二號」的科學酬載 - 「高空大氣閃電影像儀」。在2003年底衛星升空之後，屆時

神祕的紅色精靈

許瑞榮．蘇漢宗．陳炳志



1988 年第一次拍攝到的紅色精靈影像。

R.C. Franz, R. J. Nemzek and J. R. Winckler, 1990.

發現紅色精靈

盛夏的午後，天際間漸漸地堆起烏雲，天色也慢慢的變暗。在陣陣閃光與隆隆雷聲之後，接著就開始落「大水」囉！這是台灣夏季典型的午後雷陣雨。在這樣的季節裡，你或許曾經被雷聲驚嚇過，也曾看過閃電落在大樓頂端的壯觀景象。或許在你的心中也曾浮現過這樣的問題：「雷雨雲的下端會對地面產生閃電，那麼雲層的上端會不會有什麼奇特的現象發生呢？」

對於這個問題，其實早在 19 世紀末的科學文獻中，就曾經報導了在雷電區的上空中，會因閃電而產生一些短暫的發光現象。

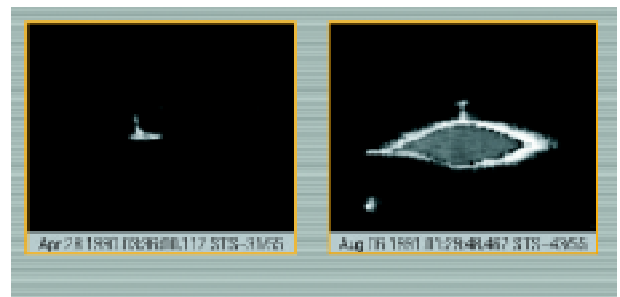
另外，諾貝爾物理學獎得主威爾森（C. T. R. Wilson）也曾在 1956 年的觀測報告中，提及他曾親眼目睹一道光暈出現在雲層上方的高空中，並推測這道光暈可能是雷雨雲對地面閃電之後，在雲層頂端與電離層間所引起的發光現象。

到了 1980 年代，有些飛機駕駛員也陸續報告了，他們在高空中看到一閃即過的紅色閃光。由於這些發光現象都很暗，而且發生的時間也很短暫，以及當時可測量微弱光源的低光度攝影科技尚不發達，因此並沒有獲得確切的觀測紀錄。

直到 1989 年，美國明尼蘇達大學的科學家法蘭茲（R.C. Franz）等人，在測試黑白的低光度攝影機時，無意間拍到在雷雨雲上空有奇特的發光現象，這才有了第一個正式的觀測紀錄，在雲頂的高空有兩個延伸達 30 公里高的光柱。這個難得的證據，有如一把鑰匙，啟動

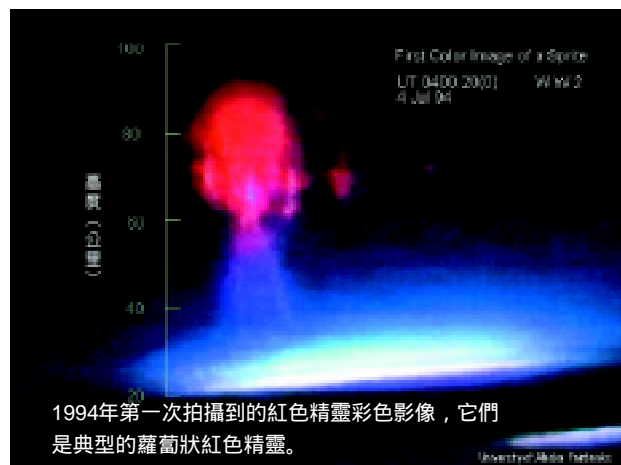
了高空發光現象的研究列車。兩年之後，范福（O.H. Vaughan）等人再重新檢查太空梭拍攝地球的錄影帶時，也發現了太空梭曾不經意地錄下了二十多個類似事件。

然而，歷史上第一個彩色的紅色精靈影像是在 1994 年由美國阿拉斯加大學的研究團隊所拍攝得到的。仙特門（D.D. Sentman）等人利用兩架飛機多次飛抵雷雨系統附近，同時觀測同一個雷雨雲層的上空，直接以可偵測微光的低光度彩色攝影機拍攝，並利用三角測量，決定出紅色精靈的大小與發生高度。



從太空梭所拍到的紅色精靈。遠方淡淡的亮線，就是地球的稜線；而在亮雲上方的細小發光體，就是紅色精靈。

研究的結果顯示，紅色精靈是在雷雨雲向地面閃電後千分之幾秒內，在雲層頂端與電離層之間，離地面約 30—90 公里的高空中，所引起的一種放電發光現象。由於這些發光體主要的顏色是紅色的，而且在空中出現的時間通常不到三十分之一秒，非常短暫，有如鬼魅一





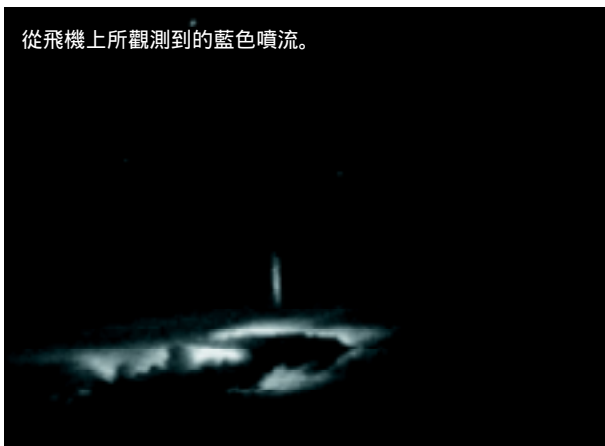
從阿里山氣象站往大陸廣東沿海所觀測到的淘氣精靈。

般難以捉摸，所以仙特門等人就稱它們為「紅色精靈」(red sprite)。

紅色精靈有蘿蔔狀與柱狀兩種主要的型態，共約占80%以上。典型的蘿蔔狀紅色精靈，長度約50公里，寬度約5-10公里。它們的上半部主要是紅色，底部的鬚狀部分則漸漸轉變為藍色。柱狀的紅色精靈，它的長度約10-15公里，寬度小於1公里。

經由科學家們對紅色精靈的光譜分析，可知紅色精靈的紅色主要是來自於受激發氮分子所發出的紅光，而藍色的鬚狀部分主要是由受激發的氮離子所發出的。

另外，利用觀測閃電所發出的極低頻與超低頻的無線電波，可知幾乎所有的紅色精靈事件，都是由帶正電的雲層對地面放電所造成的。在目前所觀測到上千個紅色精靈事件中，只有三個事件是由帶負電的雲層對地面放電所誘發的。



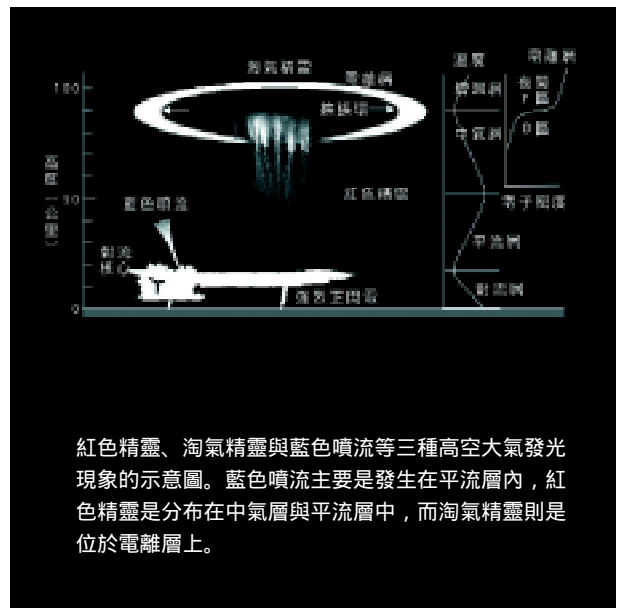
從飛機上所觀測到的藍色噴流。

<http://sprite.gi.alaska.edu>

高空大氣中的發光現象

除了紅色精靈之外，在閃電之後雲層的上方是否還會有其他的發光現象呢？早在1990年代初期，美國史丹福大學伊納(U.S. Inan)的研究群就曾經提出了「當雲對地閃電之後，所產生的電磁脈衝波會向上傳播，加熱電離層中的帶電粒子，產生短暫的發光現象」的想法。這個想法要到1994年，才由萊恩司(W.A. Lyons)的研究群用低光度攝影機獲得證實。

1995年，日本東北大學福西浩(H. Fukunishi)的研究群使用由多個高速光電管所組成的陣列光度儀，來觀測這種電離層的發光現象，才完成較有系統的分析。



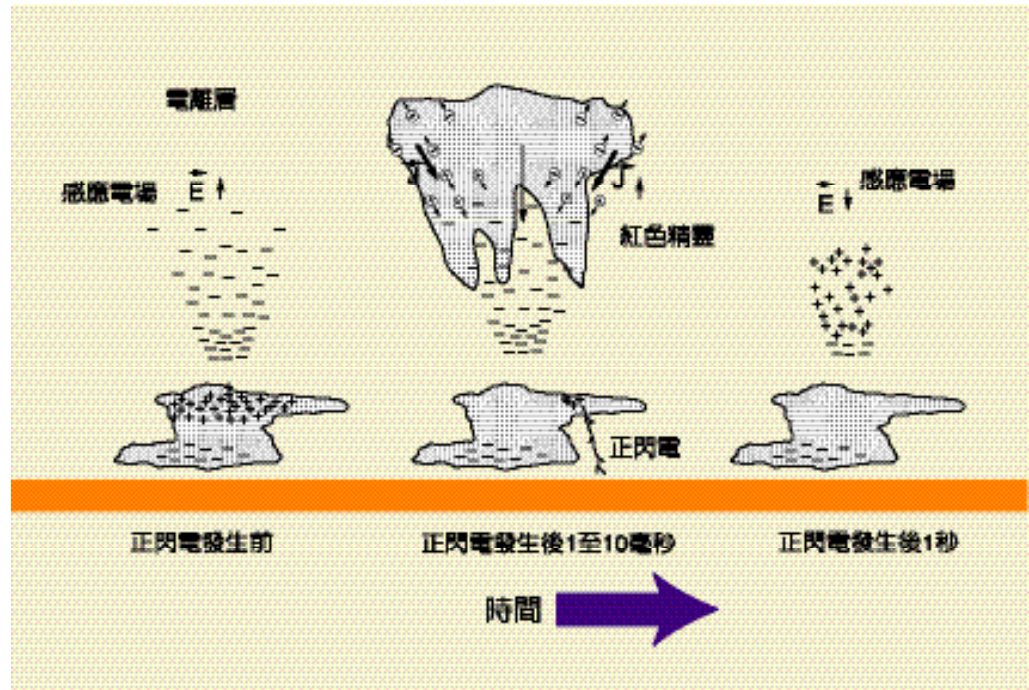
紅色精靈、淘氣精靈與藍色噴流等三種高空大氣發光現象的示意圖。藍色噴流主要是發生在平流層內，紅色精靈是分布在中氣層與平流層中，而淘氣精靈則是位於電離層上。

<http://sprite.gi.alaska.edu>

之後，科學家們就稱這個電磁脈衝波與電離層作用所誘發的發光現象為「淘氣精靈」(elves)。它發生時的高度約在離地75-105公里之間，寬幅可達約300公里。發生後的持續時間很短，大約1毫秒。後來，再重新分析「發現者號」太空梭1990年10月7日的觀測資料時，也發現到了類似的事件。

觀測自然現象時，總是充滿驚喜的。在1994年仙特門等幾位科學家從飛機中觀測紅色精靈時，卻意外地拍攝到「藍色噴流」(blue jets)的新現象。當閃電發生時，雲層頂端也會以每秒100公里的高速，向上噴出帶電粒

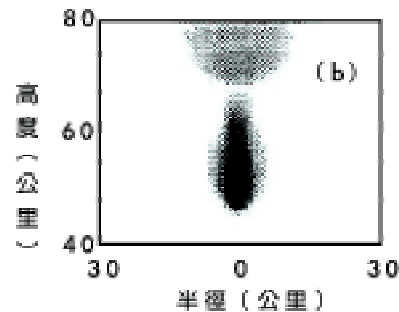
準靜電場模型。正閃電發生之前，雲層與電離層之間會有一個較小的感應電場；正閃電發生之後，1至10毫秒之間，雲層與電離層之間會感應出一個強大的電場，加速電子激發氮氣電子，產生紅色精靈；約在不到1秒之內，感應的電場很快的變小，紅色的精靈也就消失了。



V.P.Pasko, U.S. Inan, T.F. Bell and Y.N. Taranekeo, 1997.

子流。由於這些高速帶電粒子流，會激發氮分子發出藍光，因此稱為藍色噴流。藍色噴流形狀為漏斗型，持續時間約200-300毫秒，最高可達高空40-50公里處。

觀測的結果顯示，紅色精靈、淘氣精靈與藍色噴流，都是由閃電所誘發的。然而，三者之間卻沒有必然的關連。例如，紅色精靈發生時，不一定會有淘氣精靈或藍色噴流發生；反之，發生淘氣精靈時也不一定會有紅色精靈發生。



準靜電場模型所模擬出紅色精靈的影像。

V.P.Pasko, U.S. Inan, T.F. Bell and Y.N. Taranekeo, 1996.

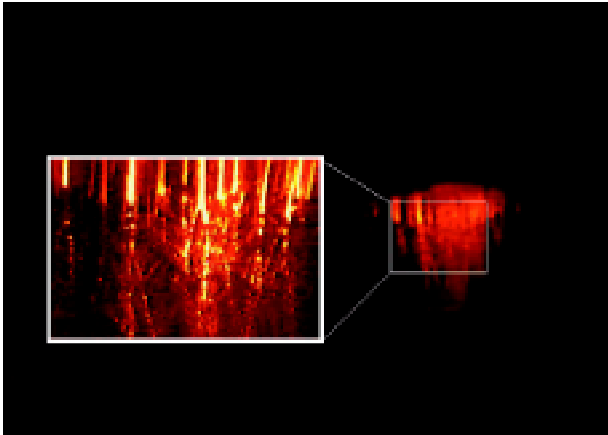
紅色精靈是如何產生的？

早在1925年，威爾森就曾討論過雷雨雲上空的物理現象，認為當雲層放電之後，雷雨雲與電離層之間電場會瞬間增強，進而加速電子；又由於高空中的大氣密度非常稀薄，使得電子可以被加速到相當高的能量，再經由碰撞將氣體分子游離，產生發光現象。以此為基礎，科學家建立了紅色精靈的理論模型 - 「準靜電場模型」。

在閃電之前，雷雨雲中的電荷分布大致可分為兩層：下層為負電荷，上層為正電荷。此時雷雨雲頂到電離層的高空中，會由這兩層正負電荷共同感應出一個由

下到上的小電場。當上層的正電荷對地面放電時，所留下的負電荷，則會在瞬間感應出一個由上到下的強大準靜電場。由於大氣密度會隨著高度增加而大量的減少，電子在行進中與大氣分子的碰撞的機率也隨著降低，使得這個大電場可以將高空中電子加速到足夠高的能量，導致空氣分子或原子游離化並造成一連串的崩潰效應，產生大量的電子，再進而激發空氣分子產生發光現象。

相反的，當下層的負電荷對地放電時，由於上層電荷的屏蔽效應，使得雲頂到電離層之間的電場的增加並不大，而且電場的方向是由下往上，也就是電子是由氣



成功大學物理學系

紅色精靈具有主要光柱、分岔鬚根與豆狀亮點等細微結構。由於所用的儀器是黑白的低光度攝影機，因此原始影像是黑白的。在這一張影像中紅色精靈的顏色，是用紅黃白的漸層依序來表現紅色精靈的亮度。

體密度較低的高空往密度較高的低空加速。在這種情形之下，電子不易達到足夠高的能量，造成空氣分子游離化並產一連串的崩潰效應。因此，雲層帶負電荷的下層部分對地放電時，並不容易產生紅色精靈。

科學家們利用準靜電場模型中的物理方程式，可模擬出電場與電子密度的分布情形。結果顯示，雷雨雲層上層的正電荷對地閃電之後，所產生的瞬間電場強度，要比下層的負電對地面閃電，所產生的瞬間電場強度，高出約一千倍左右。這個結果與「絕大多數的紅色精靈都是由帶正電的雲層對地面閃電所造成」的觀測結果，相當符合。

另外，也顯示出，電子密度在離地 65 90 公里的高度有明顯的變化，水平方向約可延伸 50 60 公里的寬度。

在光譜方面是以氮分子的紅光為主要模擬對象。氮分子的紅光部分會發生在離地 50 90 公里的高空中，寬度約 5 10 公里，這和觀測到的紅色精靈現象是相當符合的。

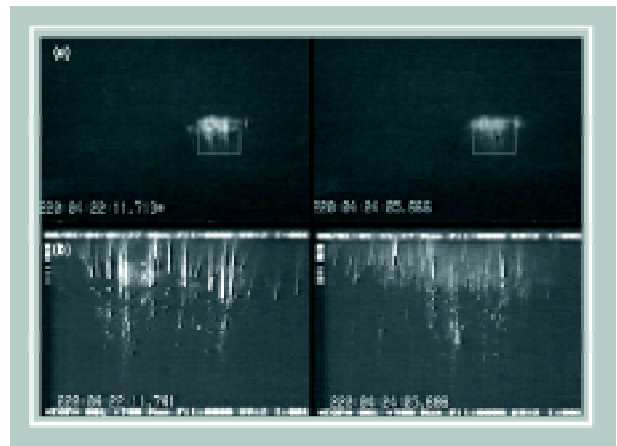
在準靜電場模型中，最初輸入的條件，如雷雲電荷的高度、電量與放電的速度，對數值模擬的結果會有相當的影響。當雷雨雲的放電速度是先快後慢時，那麼所模擬出來的發光影像，是一個具有根部與莖葉部分的蘿蔔狀發光體。這個結果與蘿蔔狀的紅色精靈

是相當一致的。

雖然準靜電場模型的模擬結果，無論在形狀、高度與發生時間和持續的時間，都與紅色精靈的觀測結果相當吻合，可說是一個相當成功的理論模型。然而，更多的觀測資料顯示出，紅色精靈還有一些主要光柱、分岔鬚根與豆狀亮點等細微的結構，而這一個簡單模型卻無法模擬出這些細微結構。因此，在理論的研究部分，還需科學家們多加努力，才能進一步了解紅色精靈的全貌。對於藍色噴流的研究也是如此，仍有一些尚未解決的問題。

台灣的紅色精靈研究

目前，除了美國有六個研究群與日本一個研究群，已在紅色精靈相關領域的研究有相當的貢獻之外，全世界尚有台灣、德國、以色列、丹麥等國的研究團體正積極地投入相關的研究。



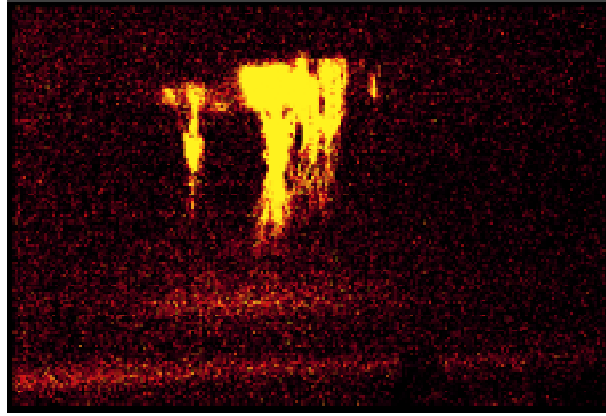
成功大學物理學系

(a) 是用廣角鏡頭所拍攝的兩個紅色精靈事件，它們前後相隔大約 2 分鐘。(b) 是用望遠鏡頭拍攝的兩個紅色精靈，顯現出 (a) 中白色框線中的細部構造。從 (b) 可出清楚的看出 2 分鐘後所產生的紅色精靈影像會比較模糊，而且光柱的四周會有較多的擴散光量。

為何要研究紅色精靈？答案其實是很「科學」的。就像研究天文一樣，都是源自於人類對自然現象的好奇。對它的研究，可讓我們對地球上這種新奇的現象，能有更進一步的了解。它與國計民生有何關係呢？它並不像氣象學可以做天氣預報，與我們生活息息相關，也就是它與我們的國計民生並無太大的關係。但是，紅色精靈的研究告訴我們，雷雨雲層的上空並不是那麼平

靜，也就意味著我們不能輕忽他對洲際飛彈或高空偵察機的影響。

成功大學物理學系的紅色精靈科學團隊，是在1998年10月執行國科會國家太空計畫室籌備處「中華衛星二號」科學酬載－高空大氣向上閃電影像儀時，開始從事紅色精靈的研究。在1999年暑假，團隊成員曾至美國亞利桑納州的基特峰國家天文台，參與由加州大學柏克萊校區的門第（S. Mende）教授所主持的「Sprites '99」觀測計畫，學習紅色精靈觀測。



從阿里山氣象站，往大陸廣東方向觀測到的紅色精靈影像。在這一張影像中紅色精靈的顏色，是用紅黃的漸層依序來表現紅色精靈的亮度。

成功大學物理學系

比較好，然而阿里山氣象站的交通與網路卻較為方便，因此大部分的觀測都在阿里山氣象站進行。

在2001年4月，購買到較靈敏的低光度儀器之後，團隊便開始從事紅色精靈觀測。很幸運地，在2001年5月1日凌晨，便從阿里山氣象站往大陸廣東方向觀測到亞洲大陸的第一組紅色精靈影像，也是在台灣第一次觀測到的紅色精靈。

接著在6月7日、6月21日、7月7日、7月20日、8月17日與8月22日都觀測到紅色精靈。其中又以6月7日、7月20日、

8月22日所觀測到的紅色精靈最為有趣。它們都是發生在海洋上空的紅色精靈，和在美國或中國大陸所觀測到的陸地型紅色精靈似乎有些不一樣的特質：

- (1) 陸上的紅色精靈中約有60%是成群出現的；而海上的紅色精靈卻只有約20%是成群出現的。
- (2) 陸上出現紅色精靈中，蘿蔔狀與柱狀的比率約為3:1；而海上的紅色精靈中卻是16:1。在18個海上的紅色精靈中，有16個是蘿蔔狀的，卻只有一個是柱狀的，另外一個的型態是無法分辨的。
- (3) 在紅色精靈的細部結構上，似乎也有一些不同的特徵。

由於目前觀測資料並不足夠多，因此還需要更多的觀測數據，才能進一步的確認這些結果。

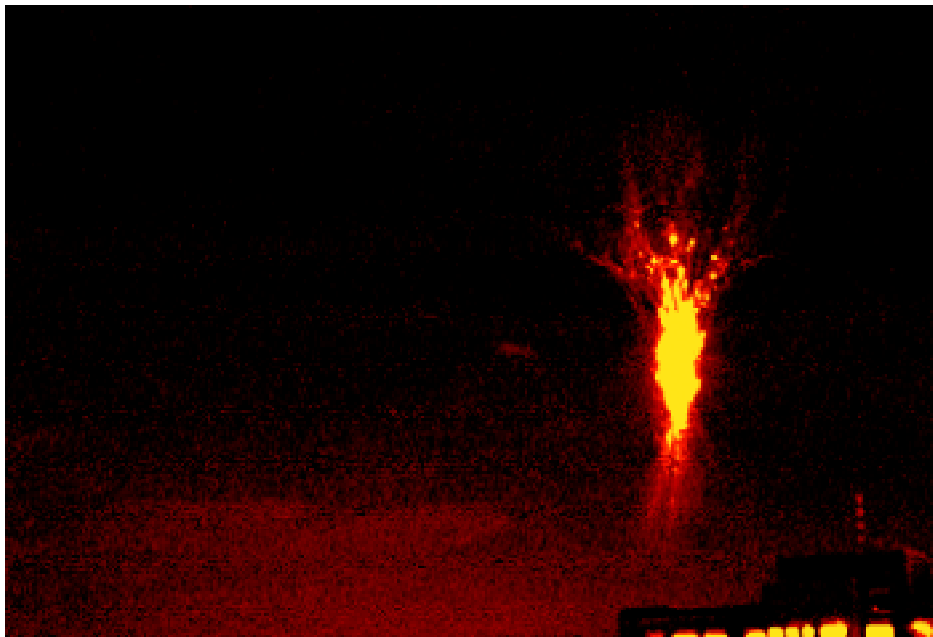
2001年6月7日與8月22日所觀測到的紅色精靈，都是從成功大學的校園中拍攝的。這是世界上第一個能從將近百萬人口的都市中，拍攝到如此巨大而清晰的蘿蔔狀紅色精靈。這也是意味著，紅色精靈的亮度並不弱，只要有較好的天氣狀況，在城市中仍然可以從事紅色精靈觀測。另外，在7月20日與8月15日的觀測中，也觀看到的淘氣精靈共5個。

在這將近半年的持續觀測中，共有27個觀測夜晚，

在28天的觀測日子中，僅有8天觀測到紅色精靈，共得到75個事件。若以每天平均觀測時間約6小時，而平均每個紅色精靈事件的發生時間約1/30秒來計算，則可算出觀測到紅色精靈的機率只有百萬分之四而已。然而，礙於天氣的狀況，所得的數據中，僅有一天的觀測資料共33事件較具科學價值。分析這些觀測資料所得的結果如下：

- (1) 經由望遠鏡頭與廣角鏡頭的同時觀測，可看到紅色精靈的細微結構。其中更可以分析出豆狀亮點之間的距離，會隨著高度增加而加長。
- (2) 比較發生在相同位置的前後不同事件，我們發現幾分鐘內在相同位置產生的紅色精靈中，後產生的紅色精靈影樣也會較模糊，而且在光柱的四周會有較多的擴散光暈。這個結果告訴我們，紅色精靈對高空大氣游離程度的影響可達數分鐘之久。

從美國回來後，紅色精靈科學團隊便積極在國內尋找合適的觀測地點，以及購置觀測儀器，並向中央大學天文所蔡文祥教授借用一個較老舊的天文專用低光度攝影機進行嘗試性的觀測。經過多次的勘察，得知中央大學的鹿林山天文台以及阿里山氣象站都是較好的觀測地點。雖然中央大學的鹿林山天文台的視野與天氣條件都



成功大學物理學系

從台南市成功大學校區觀測到發生在台東外海上空的紅色精靈。影像中的前景是成功大學的化工館。在這一張影像中紅色精靈的顏色，是用紅黃白的漸層依序來表現紅色精靈的亮度。

其中只有8個夜晚有得結果，共獲得66個與紅色精靈相關的事件。在台灣觀測到紅色精靈的機率，大約也是百萬分之四，與在美國閃電帶區域的觀測機率差不多。然而，在美國大陸所觀測的，都是陸地型的紅色精靈；我們卻比美國具有可以觀測陸上與海上紅色精靈的優勢。而且在台灣觀測到紅色精靈的機率也比日本要高很多。

因此，雖然台灣在紅色精靈的研究上起步較晚，但是由於它的地利，只要我們夠勤奮以及擁有夠好的儀器，相信一定可以在短時間內，追上世界的領先群，在紅色精靈的觀測上有重要的貢獻。

台灣在紅色精靈的研究方面，將來還會有一項獨一無二的利器，那就是「中華衛星二號」的科學酬載 - 高空大氣閃電影像儀，在2003年底衛星升空之後，我們就可以從太空長期地觀測紅色精靈。它將是世界上第一個用來觀測紅色精靈的人造衛星。這一個研究利器，將使得台灣在紅色精靈的觀測上取得領先的地位。

研究紅色精靈的利器 - 「中華衛星二號」的高空大氣閃電影像儀

成功大學物理系的紅色精靈科學團隊是於1998年2

月，向國科會太空計畫室提出「高空大氣向上閃電影像儀」計畫參與「中華衛星二號」科學酬載的遴選，並雀屏中選，且於1998年10月開始規劃執行。

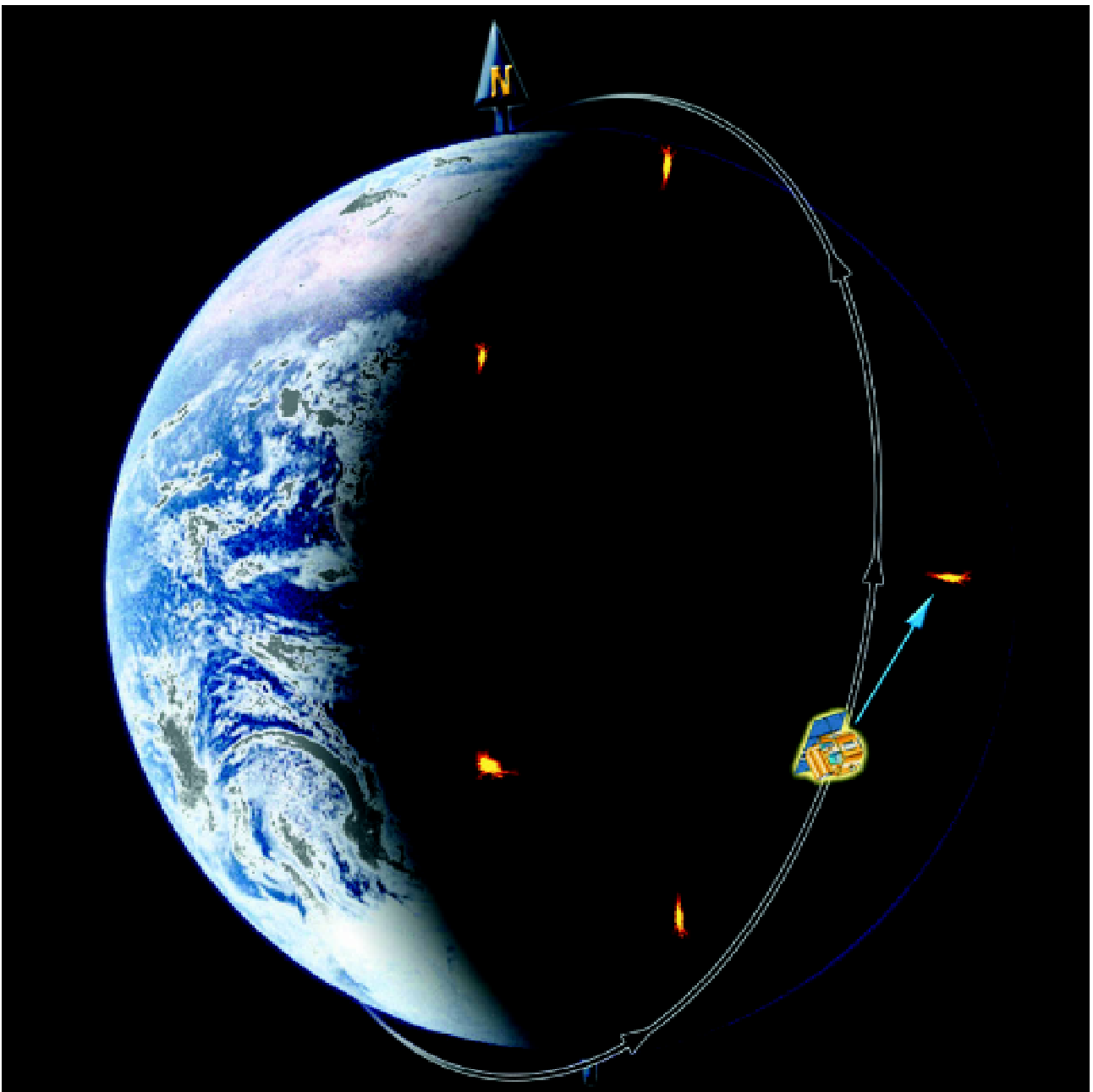
目前，紅色精靈研究團隊是由計畫總主持人成功大學物理學系陳志隆教授率領的「成大團隊」負責科學酬載的發展、測試與系統整合，並建立資料中心與科學探索團隊。成員還包括有成大物理系許瑞榮、蘇漢宗、蔡錦俊等三位教授，博士後研究員陳炳志博士。國內合作團隊主要有中央大學、國科會精密儀器發展中心、台南遠東技術學院等，國外主要合作團隊有美國加州大學

柏克萊校區與日本東北大學等。

「中華衛星二號」的主要任務是利用遙測儀器對台灣的陸地、海洋與大氣，進行即時監控，以了解台灣的土地利用、農林環境、環境污染等狀況，並提供及時的災害評估。所獲得的資料也可以供給民生工業與太空科技研究之用。它是一顆低軌道太陽同步衛星，軌道高度約891公里，傾斜角約99度，每天繞地球14次。衛星經過地球向陽面時，可以從事主要的遙測任務；經過地球背陽面時，無法執行主要的遙測任務。正好可以用「高空大氣閃電影像儀」來執行科學任務—觀測紅色精靈。

高空大氣閃電影像儀計畫是「中華衛星二號」的科學研究計畫，主要的內容是建造一個包括有電子耦合元件影像儀、光譜光度儀與陣列式光度儀三種儀器的高空大氣閃電影像儀。將來可完成的科學目標，主要包括：(1)建立紅色精靈、大氣輝光及極光全球分布情形的數據資料庫，(2)以紫外線波段來探索紅色精靈的未知現象。

由於衛星是在大氣層外不受地面的天氣影響，而且紫外線也不會被大氣吸收，因此這二個目標都是從地面



成功大學物理學系

「中華衛星二號」的科學任務 - 觀測紅色精靈。

觀測所無法達成的。另外，所獲得影像也可以幫助我們了解紅色精靈的動態演變情形與頻譜變化，以及確認發生紅色精靈時大氣的離子化程度。

與美國加州大學柏克萊校區合作建造的電子耦合元件影像儀與光譜光度儀，目前已經完成了，正在測試中。而與日本東北大學合作建造陣列式光度儀也正在組裝中。這些儀器都將在2002年中測試完成，送回太空計畫室進行組裝與系統整合。之後，將於2003年中，伴隨

著「中華衛星二號」發射升空，從事為期五年的紅色精靈觀測。屆時，所得的觀測資料將可告訴我們紅色精靈在全球的分布情形，以及紅色精靈在各波段的動態演變情形，有助於我們更進一步的探討紅色精靈，進而提升台灣在紅色精靈研究上的國際地位。

許瑞榮．蘇漢宗．陳炳志

成功大學物理學系 紅色精靈研究團隊