

五十年前，大約是二次世界大戰結束後的十年，百廢待舉，正值冷戰年代，也是一個充滿希望的年代。在二次世界大戰時期，人們已經知道，地表上空約100公里處，有一層良導體可以反射某些波長的電磁波。科學家把天上這層良導體稱作電離層(ionosphere)。我們的大地也是一個良導體，因此電源接地可以獲得穩定的零電位參考值。二次世界大戰的年代，人們就是利用特定波長的電磁波(短波、微波)，可以在電離層與大地之間來回反射，以進行越洋通訊。

是什麼樣的成分使電離層成為良導體呢？原來，這個區域的大氣濃度很低，所以當它吸收了來自太陽的紫外光與X光，並進行光化游離(photoionization)後，不會馬上發生碰撞而重新結合成中性的氣體。所以只要光化游離的速率大於等於重新結合的速率，就可以維持一定的游離度。這些游離的氣體，又叫做電漿(plasma)，是一種良好的導體，只要加一點電場，就可以產生很大的電流。電離層白天被太陽光照射，氣體游離率很高，因此涵蓋的天空範圍很廣，電離層的範圍可以降低到地表上空七、八十公里。到了晚上，因為缺乏陽光的照射，就必須仰賴超低的重新

結合率才能維持一定的游離度。因此電離層的高度，就退縮到約100公里的高空。我們要談的極光，就是發生在這100公里到數百公里高空的發光現象。

以定性而言，極光大致可分為兩類：一種是在水平方向、瀰漫一片的擴散極光(diffuse aurora)。另一種是垂直方向，一片片像簾幕似的、掛在高空的分立極光弧(discrete aurora)。由於絢麗的極光(圖一)通常指的是分立極光弧，本文的重點也將放在極光弧的相關研究上。

## 極光不是一種雲！

從古至今不少人都天真地以為，極光是天上的一種彩雲。其實早在一百多年前，科學家就已經能藉著三角測量法，測量到極光弧底部的高度，距離地面約有100公里，寬度由1公里到10公里不等。也許，1公里聽起來很寬，可是將1公里寬的結構放到視線的100公里之外，張角才不到一度；所以1公里寬的極光，從地面上看起來幾乎就像紙一般薄！對於如此薄的結構，三角測量的誤差自然很大；在過去十多年來，科學家透過火箭實地觀測結果，已經發現一些非

# 引人追尋的飛舞彩光 ——橫跨三世紀的極光研究

美麗的極光令人絢惑，極光現象從古至今一直吸引著人們去探索。

讓時光倒退到三百年前，看看科學家對極光研究的開始與經過；

也看過去五十年來，我們對極光的認識增進了幾分。

呂凌霄



圖一：地面上所見的分立極光弧如幕簾般掛在高緯區的夜空中。圖中構成幕簾的直線光束與地球磁場線方向一致。

常薄的極光弧，其厚度大約只有 100 公尺左右。由於極光弧底部的高度有 100 公里，因此可以確定它們不是雲彩。因為一般的雲，最高約 10~15 公里，也就是在對流層頂的高度。

不過，極區確實存在一種異常的高空雲，叫做夜光雲 (noctilucent cloud)。夜光雲距地面的高度可達 90 公里，因此可以反射遠方 (相對於地面觀測者為地平線下方) 的陽光，而呈現出夜光雲的現象。至於，為何水汽可以跑到這麼高的高空？五十年前的科學家並不太清楚答案是什麼。不過現在的科學家，透過各種雷達的觀測，逐漸了解組成夜光雲的水汽，並不是來自地表，而是來自外太空流星所含的水汽。這些水汽在流星燃燒時被釋放出來，最初也是呈現高溫的游離態。當它們沿著地球磁場線，沉降到高緯地區較低的高度時，會凝結成冰晶、變成夜光雲。這也就是為什麼，夜光雲多發生在高緯度地區的上空。

除了高度的問題外，另外還有至少三個原因，讓研究極光的科學家肯定極光不是雲彩，也不是反射太陽光的冰晶結構。原因之一，極光弧有時活動速度之快，我們很難找出一個合理的物理機制，能解釋為什麼在這個高度的中性物質，可以進行如此快速的移動。原因之二，因為科學家在極光下方的地表，測量到劇烈的地磁擾動現象，因此科學家相信，極光是一種與電流有關的物理現象。因為除了

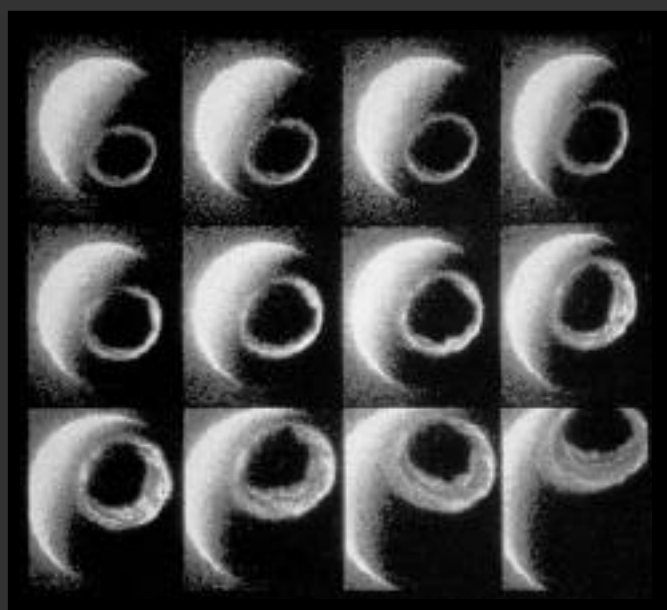
磁鐵之外，電流也是物理上一種能產生磁場的來源。原因之三，是因為反射與折射太陽光的光譜，應該是連續光譜，可是極光的光譜卻不是，因此更可以確定極光不是雲彩。

## 極光的空間分布

如果極光不是雲，那麼極光是什麼樣的物理現象呢？

### 哈雷揭開極光電磁奧秘

將近三百年前，也就是在太陽黑子的芒德極小期 (Maunder minimum，約 1645~1700 年) 結束後不久，西元 1716 年的一次強烈太陽活動，引發了大範圍且劇烈的極光。當時著名的英國天文物理學家 Edmond Halley (1656~1742)，也就是發現彗星週期運動的著名科學家哈雷，以六十歲的年紀初次目睹漂



圖二：磁層副暴發生時，Dynamics Explorer 1 人造衛星利用紫外光，拍攝大尺度極光結構變化情形。圖中左側弧狀光亮區，是白天太陽光照射電離層所造成的紫外光散射結果。然而此衛星影像的解析度，尚不足以辨識分立極光弧等精細結構。

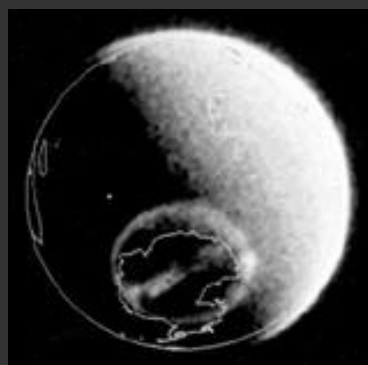
亮的極光秀。由於哈雷也是當時少數幾位研究地球磁場的專家，他也就成為歷史上首次發現「極光簾幕是沿著地球磁場線的方向下垂排列」的科學家。相較之下，當時另一位法國學者因為缺乏對地球磁場的知識，因此認為極光是那些造成黃道光的物質，被地球重力吸引而下墜燃燒，所造成的發光現象。可見要了解一種物理現象，背景知識是非常重要的。

哈雷之後，隨著科學界對電與磁的認識越來越豐富，美國物理學家富蘭克林（ Benjamin Franklin, 1706~1790 ）、與挪威物理學家柏克蘭（ Kristian Birkeland, 1867~1917 ）等人都提出許多理論，認為極光與電或放電現象有關。柏克蘭在挪威北部建立了地磁觀測網，他曾多次前往蒐集資料，觀測極光下方的地球磁場擾動情形，並證實強烈極光處的電流會沿著磁場線向上流動。他也發現沿著極光弧水平方向流動的電流強度估計可達100萬安培。柏克蘭對極光地區地磁擾動的辛苦觀測結果，對日後極光的研究，造成深遠的影響；為了紀念他的貢獻，太空科學界就把

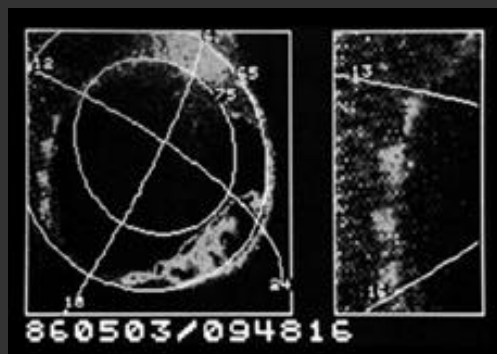
沿著磁場線方向流動的電流，稱為 Birkeland 電流。

## 柏克蘭的放電實驗

19世紀末到20世紀初，近代物理蓬勃發展。陰極射線實驗與湯姆生的實驗所發現的電子，為柏克蘭提供了靈感，並成功地在1907年設計出一個令當時的科學界大為震驚的放電實驗——柏克蘭將一個具有磁性的球體，放入一個低氣體密度的真空腔中，進行陰極射線放電實驗。也就是外加一個強電壓，讓電子由陰極打向陽極，並撞擊低密度的氣體、使之發光。柏克蘭的實驗，能在磁極四周製造出一個近似圓圈狀的發光區，成功地解釋極光帶（auroral zone）的分布情形。什麼是極光帶呢？原來極光帶是19世紀中葉，科學家經過幾次極區探險的活動後，發現極光出現的頻率並不會隨著緯度增加而增高。統計結果顯示，極光出現頻率最高的區域，大致是一個以南北地磁極為中心，距離磁極約20~27度左右的圓圈型帶狀區域——這就是所謂的極光帶。



圖三：Dynamics Explorer 1 (DE 1) 人造衛星利用紫外光所攝得連接日夜半球的跨極極光弧 (theta aurora)。這種跨極極光弧結構，多發生在行星際磁場有北向的分量時。一般相信，這種跨極極光弧是由於行星際磁場與地球磁場，在極區發生磁場線重聯所造成的現象。圖中右側半圓形的亮區，是白天太陽光照射電離層，所造成的紫外光散射結果。



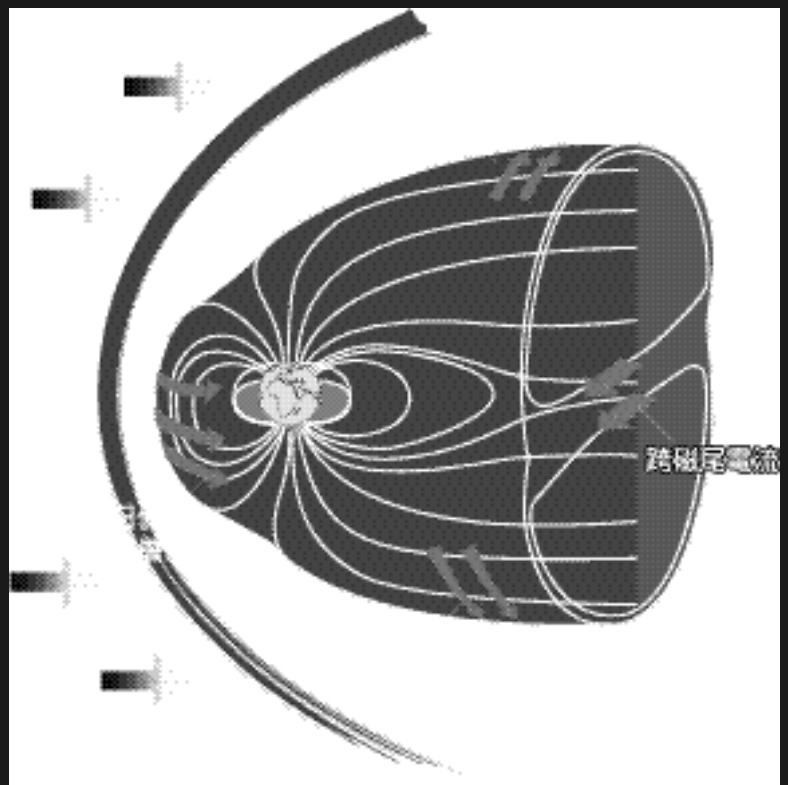
圖四：Viking人造衛星上利用紫外光所攝得亮點極光 (bright spots aurora) 結構。這些亮點極光的形成，與高速太陽風吹過地球磁層，在磁層頂內部之邊界層所造成的渦流有關。這些亮點發生地點，多位於中午到下午的極區電離層，但有時也能在中午前的方位出現。

## 夜側極光驗明正身

柏克蘭的極光實驗所呈現的圓圈狀放電區，曾造成科學界對極光空間分布的長期誤解，直到五十多年後，才由 Akasofu 博士靠著許多次飛機巡迴、配合地面觀測網，在晴朗無雲的夜晚持續觀測後，終於證實絢麗的極光主要分布在夜半球，至於日側極光的強度則相對較弱。二十多年後，人造衛星的觀測也證實了 Akasofu 博士當年的觀測結果是正確的(圖二)。人造衛星甚至觀測到一種連接日夜半球的跨極極光弧(圖三)，以及出現在下午區

域的亮點極光（圖四）。這些極光現象，都不是簡單的放電實驗所能複製出來的。

由於極光出現的範圍，每天不同，甚至一天變化數次，科學家稱這個不太對稱、有時一天數變的極光環狀區域為極光橢圓圈（auroral oval）（圖二）。通常極光橢圓圈的大小，可以反應地球磁層擾動程度的大小。通常地球磁層發生劇烈擾動時，極光橢圓圈的範圍也會隨之擴大。因此即使位在極光帶外圍的中低磁緯地區，也有機會看到絢麗的極光活動。



圖五：地球磁層與磁層頂的電流示意圖。

## 極光的電子束來源

科學家很早就已經注意到一些太陽閃焰（solar flare）發生後一天左右，地球上會出現絢麗的極光活動。因此曾經有此一說——造成極光的電子束，是沿著連接太陽黑子與地球的磁場線，一路到達地球表面，打出極光。這種說法顯然太天真了。因為電子彼此之間有靜電斥力，要讓來自太陽表面高濃度的電子束，在到達地球時仍然維持一個濃度很高的電子束形態，是件不可能的事。柏克蘭的實驗雖然精彩，但是卻無法說明自然界是如何產生像陰極射線管這樣強的電壓，也無法說明造成極光電子束的來源。

## 柏克蘭的修正理論

為了要解決電子束靜電斥力的問題，柏克蘭於去世前一年提出了一個新理論：若一群電子，與帶正電的質子或其他正離子一起由太陽出發，這樣就可以順利到達地球了。這種電子與帶正電的質子或其他正離

子共存的介質，就是現在我們所熟知的電漿（plasma）。電漿是物質的第四態，整個太陽與所有的恆星都是由電漿所組成的。由太陽表面所散逸出來的電漿物質，越是遠離太陽，重力場強度跟著減弱，由內向外的熱壓梯度，可使這些向外膨脹的電漿逐漸加速，再加上一些波動的幫助，可造成一個流速甚快的電漿流，平均速度範圍約是每秒200~800公里。因此科學家稱它為太陽風（solar wind，在英文裡wind表示強風，breathing表示微風，因此在太空時代之前，曾有solar wind與solar breathing之爭）。事實上，所有恆星都會向外吹出恆星風，銀河星系也會由中心向外吹出星系風。

## 日側磁層頂電流形成

太陽風與地球磁層的接觸面，科學家稱它為磁層頂。柏克蘭提出修正理論後三年，一位寄居英國的德籍猶太科學家也於西元1919年，提出相似的理論，

並因此啟發了查普曼( Sytedy Chapman, 1888~1970 ) 博士對太陽風與磁層交互作用的研究。查普曼博士與他的研究生 Ferraro , 根據太陽風壓與地球磁場的磁壓平衡點, 精確地估算出日側磁層頂的位置, 同時成功解釋日側磁層頂上電流的形成過程。為了紀念他們的成就, 科學家今日稱日側磁層頂上的電流為 Chapman-Ferraro 電流。

## 夜側磁層頂跨磁尾電場

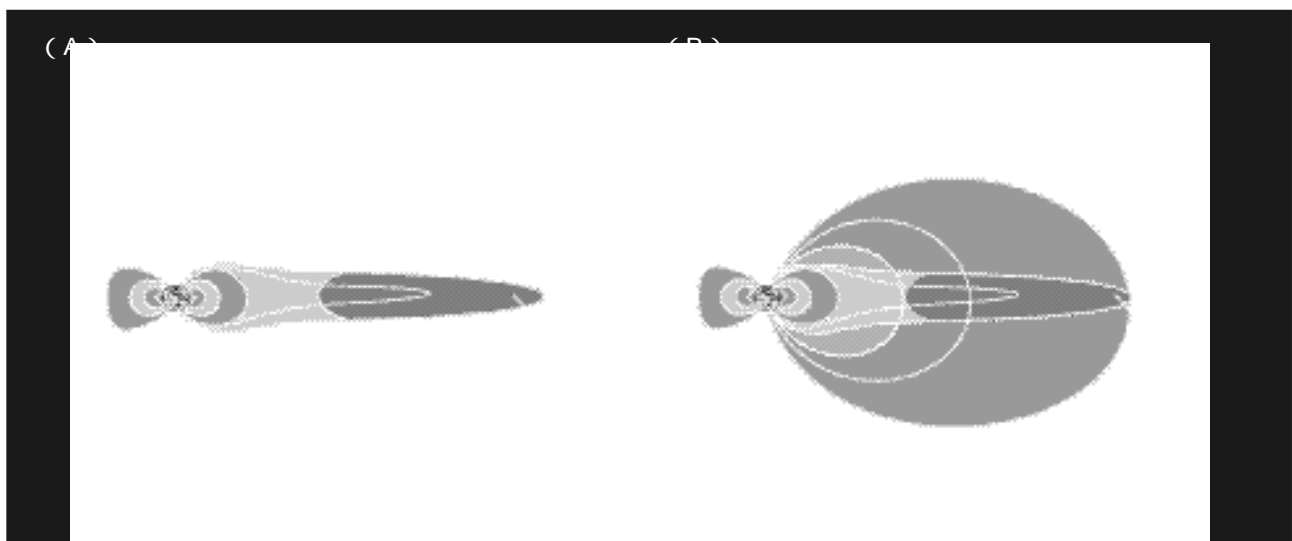
至於夜側磁層頂上, 也有電流; 太陽風吹拂夜側磁層頂, 還可造成一個穩定的跨磁尾電場。這個晨-昏方向的跨磁尾電場, 可以把夜側磁層中來自電離層的電漿, 都趕到靠近磁赤道面, 但是平行於日地連線的平面區域, 也可把部分太陽風的電漿, 由磁尾磁層頂開口處抽進來, 因此形成了一條又長又扁的電漿片。電漿片上的電流與夜側磁層頂上的電流, 兩者合起來所形成的電流迴路, 很像兩個電感線圈, 可以改變地球磁層的對稱性, 在背陽的磁層一側, 形成一條直徑約五、六十個地球半徑、長約數百個地球半徑的磁尾(見圖五)。

## 太陽風與磁層頂的互動

科學家現在已經知道, 由於有磁層頂的保護, 太陽風中的電漿流, 只能由磁層頂上的少數兩三個開口區或是渦流區進入地球磁層。只有在某些特殊的情況下, 磁層頂上的開口區會增加, 因此太陽風就可以由這些區域進入地球大氣, 再沿磁場線到達高緯電離層上空, 並被該處的電場加速, 造成前述的日側極光、跨極極光弧、與亮點極光等現象(圖三、四)。另一方面, 電漿片也是儲存電漿的好地方。當來自太陽的擾動, 造成地球磁層擾動時, 可提供額外的跨磁尾電場, 因此加強了電漿片中電漿的儲存量。當磁層中的擾動大到足以破壞電漿片結構的穩定態時, 儲存在電漿片中的電漿就會一股腦灌進電離層(圖六), 造成夜側絢麗的極光。

## 太空時代的極光研究

五十年前, 查普曼教授與范愛倫( James Van Allen, 1914~2006 ) 教授等人所提出的 IGY 國際合作



圖六：電漿片中的電漿, 可造成絢麗的夜側極光。(A) 當來自太陽的擾動, 造成地球磁層擾動時, 可提供額外的跨磁尾電場, 因此加強了電漿片中電漿的儲存量。(B) 當磁層中的擾動大到足以破壞電漿片結構的穩定態時, 儲存在電漿片中的電漿就會一股腦灌進電離層, 造成絢麗的極光。

研究計畫，獲得不少劃時代的成就。西元 1957 年秋天，人類史上第一枚人造衛星——蘇聯的友伴一號 (Sputnik 1) 成功地發射升空，人類正式進入太空時代。次年，美國第一枚人造衛星探險家一號 (Explorer 1) 也順利升空，上面搭載著范愛倫博士堅持放上去的蓋格計數器，因此得到了友伴一號沒獲得的科學成果，幸運地發現了內、外范愛倫輻射帶。其中，外范愛倫輻射帶中的高能電子，日後被證明正是造成擴散極光的主要電子來源。

范愛倫輻射帶所放出的 X 光，與極光活動中所放出的紫外光與 X 光，在傳向地面時都會被大氣所吸收，所以地面觀測不易，但在太空中觀測是很合適的。只是早期的光電技術還不夠成熟，因此，雖然人類在 1969 年就有能力登上月球，但是有能力直接由人造衛星上，利用紫外光來觀測極光，或是利用微波觀測雲層的分布，卻是到 1980 年以後的事了。

1981 年，美國愛荷華大學 Louis A. Frank 教授所帶領的研究團隊，在 Dynamics Explorer 1 (DE 1) 人

造衛星上，放置了數個紫外光與可見光波段的光譜儀，首次獲得可以涵蓋完整極光橢圓圈的極光紫外光影像 (圖二至圖四)。為什麼不用可見光拍攝這些極光呢？據說是因為地表可見光的光害太嚴重了。自 DE 1 人造衛星後，還有 Viking、FAST、POLAR 與 IMAGER 等人造衛星，也都是利用紫外光影像觀測極光大尺度的分布。值得注意的是，這些人造衛星的影像解析度都很低，因此無法解析一條條薄薄的極光弧結構。最近我們的福衛二號，在觀測紅色精靈高空閃電與中低緯度氣輝現象的同時，也經由其中的紫外線光譜，看到不少的極光事件。由福衛二號所拍攝到的極光，與過去由太空梭上所拍攝到的極光 (圖七)，外觀上看起來非常類似！

事實上，除了極光影像的記錄外，DE 1 還配合後來的 DE 2 人造衛星，一高一低同時觀測沿著磁場方向、電子能量與電場的分布情形。這兩個人造衛星的觀測結果顯示，打出極光的電子，主要的加速區局限於極區高空約兩、三千公里到低空數百公里之間。

## 極光光譜與發光原理

極光是如何發光的呢？其實與霓虹燈的發光原理非常相似；日常生活中的霓虹燈與日光燈管內的氣體，在熄燈時是低密度的氣態，開燈時就被從陰極打向陽極的電子游離而呈現電漿態。

說到霓虹燈，就不能不介紹極光的早期研究史上，另一批貢獻偉闊的科學家。19 世紀瑞典著名的科學家埃斯特朗 (Anders Jonas Ångström, 1814~1874)，首先用三菱鏡分析了極光的光譜 (我們現在

稱 0.1 奈米為 1Å，就是以他為名)。埃斯特朗發現極光的光譜中，只出現某些特定波長的發射光譜，而不是太陽光那樣的連續光譜。科學家知道發射光譜是粒子由激發態的高能階，躍遷到較低能階時所放出來的光。就像人的指紋那樣，每一種物質，都有它特有的一組發射光譜。霓虹燈所呈現的紅光，就是燈管內所灌的低密度氫氣的發射光譜。不過科學家經過數十年的研究，仍無法找出埃斯特朗所觀測到的那些極光譜線，究竟是哪些化

學物質的發射光譜。

後來科學家才明白，因為當時實驗室所製造的真空環境不夠真空，所以無法看到那些由生命期較長的亞穩定態造成的自發性躍遷過程所產生的光譜。又經過許多年，才由挪威物理學家 Lars Vegard (1880~1963) 首先分析出生命期比較短的游離態氮分子光譜，包括藍色光譜 (427.8nm) 與紫外線光譜 (391.4nm)。其後科學家又先後找到生命期約 0.7~0.8 秒的黃綠色氧原子光譜 (557.7nm)、

同時，這兩個人造衛星的電場觀測結果，也間接顯示這個區域可能存在沿著磁場方向、還算穩定的電位差。這些電位差所對應的電場，有些向上、有些向下，它們可以加速來自太陽風或磁尾電漿片中的電子與正離子，使它們加速打入低空大氣，造成極光。

## 極光研究的近況

要產生絢麗的極光，首先要有高濃度的電漿來源，還要有沿磁場方向的電位差。目前已知極光電漿的來源，包括了太陽風以及儲存在地球磁尾電漿片中的熱電漿。但是，目前太空科學界對沿磁場方向電位差的成因，以及導致磁尾電漿片崩潰的過程，還是存在著許多不同的理論與看法。此外，科學家對於決定極光弧厚度、多重極光弧的空間分布與極光弧飛舞過程等現象的物理機制，也還沒完全達到共識。基於篇幅所限，筆者在此就不一一贅述各家理論，希望未來有機會再撰文介紹極光時，這些問題都能有比較明確

的答案！

就像中醫問診，可以藉著把脈，診斷出部分病情；同樣地，地球磁層中的磁場線，多集中在高緯地區，因此極光的活動，往往也反應了浩瀚磁層中所發生的擾動。科學家透過對極光的好奇，所發展出來的各種理論與觀測方法，不斷提升科學家對太空物理與



圖七：太空梭上所拍攝到的極光上部照片。

生命期約 110 秒的紅色氧原子光譜 (630nm/636.4nm) 及更短的紫外線光譜 (297.2nm)。因為這些亞穩定態的生命期較長，因此這些極光只能在比較稀薄的大氣中，才得以不被中性氣體碰撞而發生自發性的躍遷，而能在同一時間放出這些漂亮的光線。

科學家觀測的結果顯示，氧原子所放出的黃綠色極光 (557.7nm) 主要出現在 100 公里以上的高空，而 250 公里以上的高空則以氧原子所放出的紅色極光 (630nm/636.4nm) 為主。要造成這樣的極光，電子能量不需要很高 (約 1keV 以下)。當打下來的電子能量高過 10keV

時，可以在 100 公里以下造成非常活躍的極光。包括了撞擊氮分子所放出的藍光 (427.8nm) 與紅光，以及撞擊氧分子所放出的綠光與紅光。這些高能的電子向下打入大氣時，多餘的能量除了可以持續撞擊路上遇到的大氣原子或分子，也可以把一部分能量轉給其他被游離出來的電子。這些被游離出來的電子也會沿著磁場線上下運動，繼續打出更多極光。只是向下大氣密度高，所以不久就走不動了。這就是為什麼劇烈活動的極光下緣特別明亮，而向上則沿著磁場線，一根根，都染色上光了！

除了高能電子外，由高空沉降

的質子，也可以藉著與氫原子交換電荷，造成紅色質子極光 (656.3nm) 與藍色質子極光 (486.1nm)。通常質子極光的光度比電子極光黯淡，且空間分布比較模糊。質子極光與電子極光可以同時發生，但是空間中的分布略微錯開。因為電子是被向上的電場加速打入大氣，而質子則被向下的電場所加速而打入大氣。向上與向下的電場通常呈現波動形式，呈現交錯分布的狀況。

總之，決定極光顏色的因素很多，大氣的成分、密度、打出極光的電子與質子的能量，都可能影響極光的顏色與出現的高度。

日地物理這些研究領域的了解。因此，極光除了是一個令人眩目的自然景象，也是驅使太空科學與太空科技不斷精進的原動力。

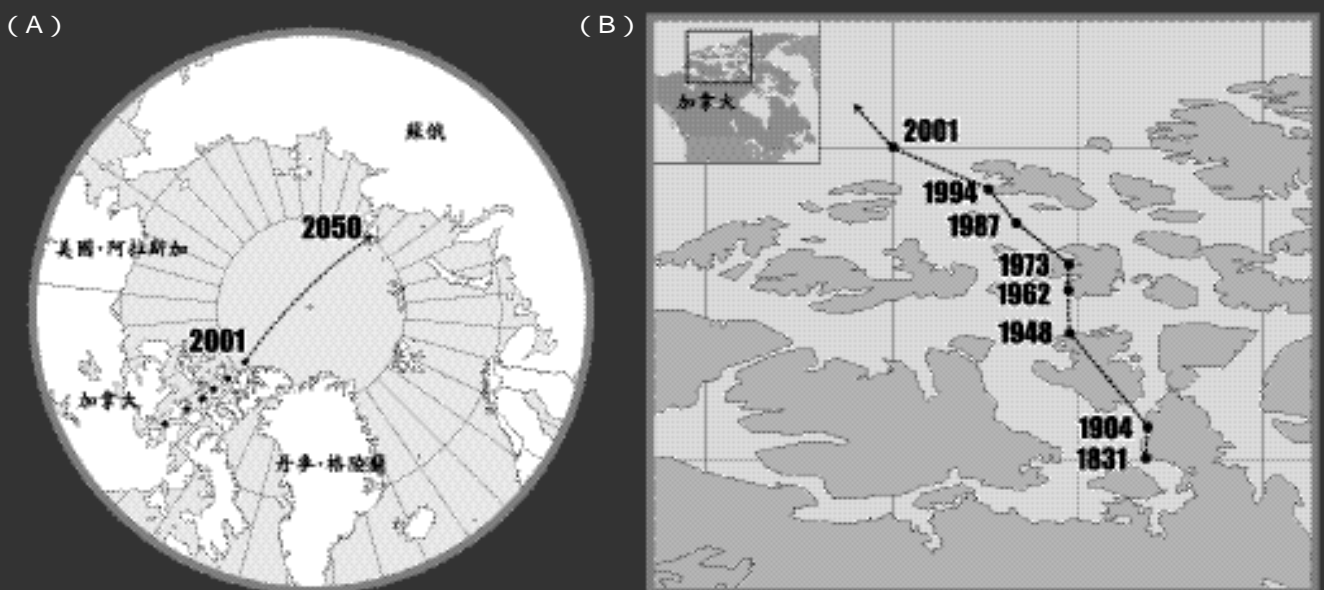
絢麗飛舞的極光，與舞龍非常相似。中國古代龍的傳說，可能就是古人看到極光後，想像出來的天上動物。二十年前，因為地球磁極位在北半球偏加拿大一側，所以科學家並不認為中國的黃河流域有機會看到極光活動。但最近二十年來，地球磁極快速移向北極地區（圖八），眼看就要轉到西伯利亞這一側。由此可見，地球磁軸應該會像單擺那樣擺動，或像陀螺那樣在東西半球之間晃動著。由此推想，古代中國人看到極光的機率可說非常高，因此才可能設計出像是舞龍和彩帶舞這種與極光動態相似的傳統舞蹈。只可惜我們生不逢時，所以沒有機會在台灣看到漂亮的極光活動。希望地球生態可以長長久久，這樣我們的子孫才有機會再次目睹祖先所看過的迷人極光！而極光的電能，如果能透過地面上的超導電纜引導下來，作為天然能源，或許可以解決部分能源問題，也可化解部分溫室效應所造成的生態危機！然而這個利用極光發電的夢想，還需要靠科學家研發超導材質與更好的

儲存電能的方法，才可能實現。🌐

## 參考資料

1. Akasofu, S.-I., Secrets of the Aurora Borealis, Alaska Geographic, vol. 29, 2002.
2. Craven, J. D., Y. Kamide, L. A. Frank, S.-I. Akasofu, and M. Sugiura, Distribution of aurora and ionospheric currents observed simultaneously on a global scale, Magnetospheric Currents, AGU Monogr. Ser., vol. 28, p 137-146, 1983.
3. Frank, L. A., Dynamics of the near Earth magnetotail – Recent observations, Modeling Magnetospheric Plasma, AGU Monogr. Ser., vol. 44, p261-276, 1988.
4. Frank, L. A., J. D. Craven, and R. L. Rairden, Images of the earth 's aurora and geocorona from the Dynamics Explorer Mission, Adv. Space Res., vol. 5, p53-68, 1985.
5. Lui, A. T. Y., D. Venkatesan, J. S. Murphree, Auroral bright spots on the dayside oval, J. Geophys. Res., vol. 94, p 5515-5522, 1989.

呂凌霄：任教中央大學太空科學所

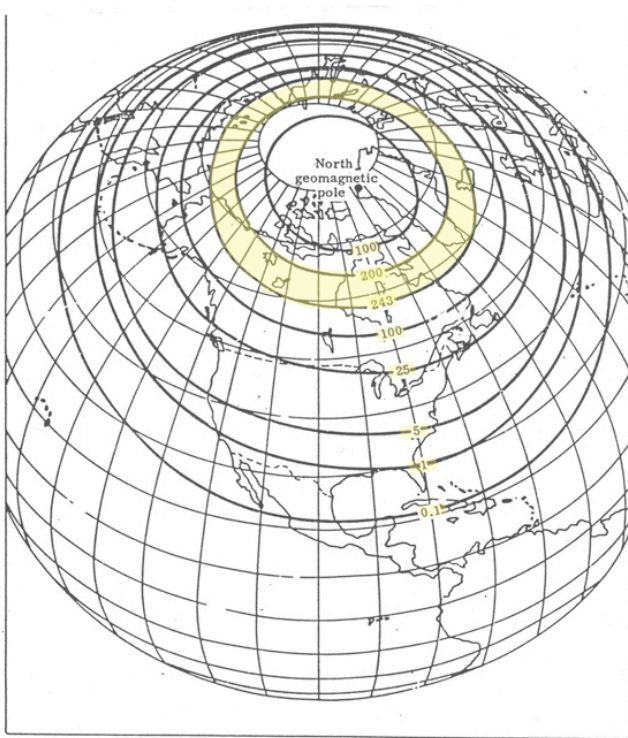


圖八：(A) 過去170多年來，地球磁極位置改變情形。顯示地球磁軸晃動的特性。根據大西洋海底山脈中磁化物質的磁極排列情形，可知地球磁軸每隔五十萬到數百萬年，會反轉一次。(B) 在兩次反轉之間，可能會呈現不同幅度與不同週期的晃動現象。

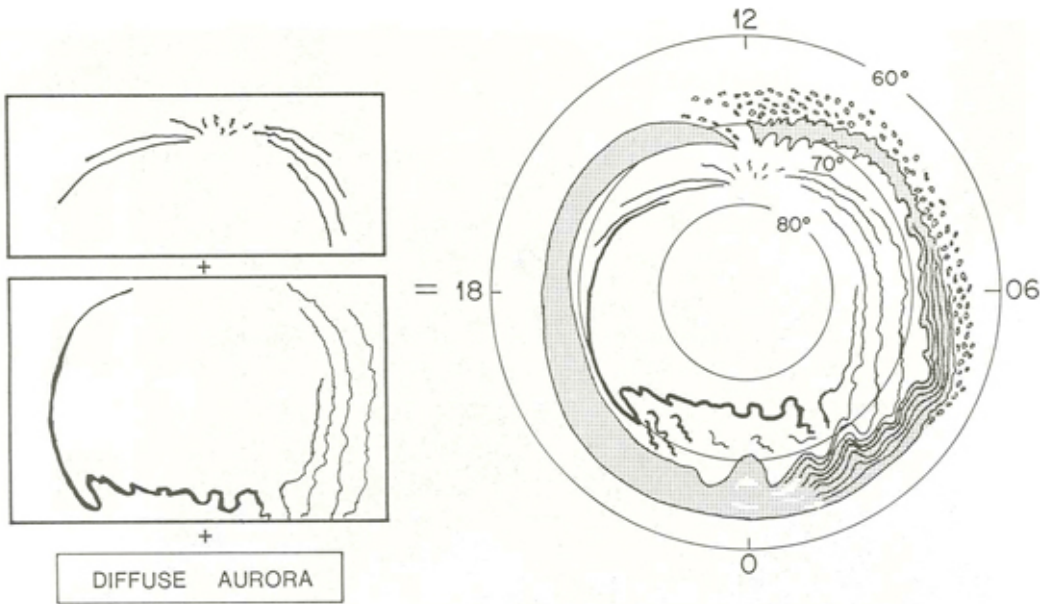




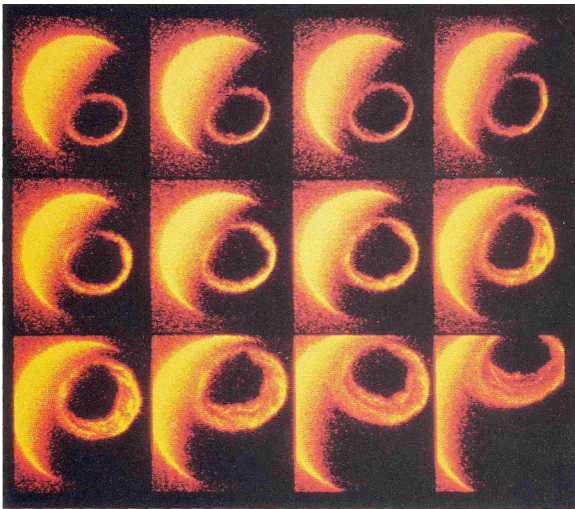
圖一、地面上所見的分立極光弧如幕簾般掛在高緯區的夜空中。圖中構成幕簾的直線光束與地球磁場線方向一致。



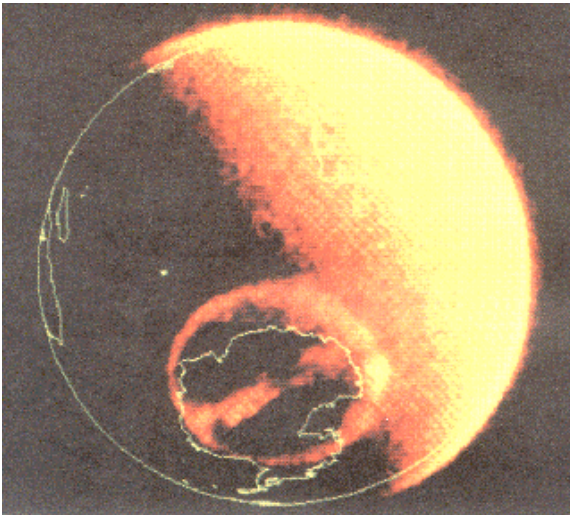
圖二、極光帶（auroral zone）分布的示意圖。圖中等值線上的數字，表示該地區一年平均能觀測到極光的天數（假設天空無雲）。其中，黃色陰影區，就是位在北半球的極光帶。同樣的，南半球也有一個極光帶。這張圖是二十多年前的極光帶分布情形。由於地球磁極會像陀螺那樣，在北極附近晃動。根據大西洋海底山脈的記錄，每隔一陣子，約百萬年，地球磁極會南北反轉。近年來，地球磁極已經逐漸加快腳步，朝我們東半球方向晃過來，因此這張極光帶分布情形，已經跟不上時代了，需要適度的更新。



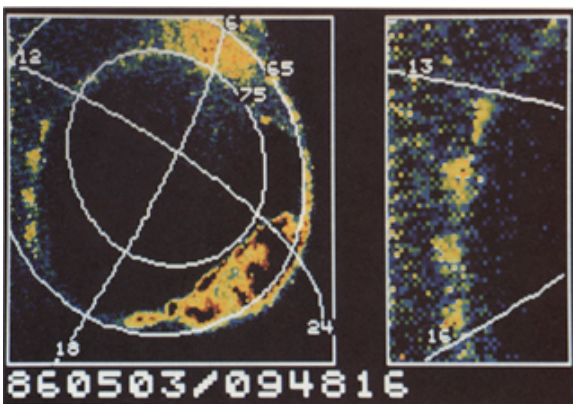
圖三、日側極光、夜側極光、與擴散極光的分布情形（左圖），以及它們的合併分布情形（右圖）。（摘自Akasofu, 1981）



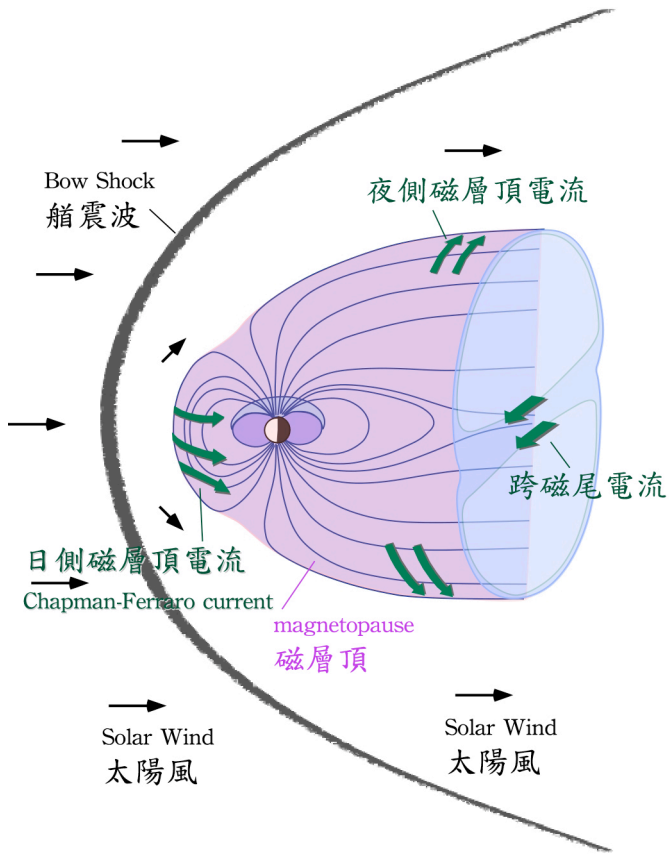
圖四、磁層副暴發生時 Dynamics Explorer 1人造衛星利用紫外光所攝得的大尺度極光結構變化情形。（摘自 Craven et al., 1983）。圖中左側弧狀光亮區，是白天太陽光照射電離層，所造成的紫外光散射結果。此衛星影像的解析度不足以辨識分立極光弧等精細結構。這樣大尺度的極光結構，又稱為極光橢圓圈（auroral oval）。通常極光橢圓圈的大小，可以反應地球磁層擾動程度的大小。當地球磁層發生劇烈擾動時，極光橢圓圈的範圍也會隨之擴大。因此即使住在極光帶（auroal zone）外圍的中低磁緯地區，也有機會看到絢麗的極光活動。



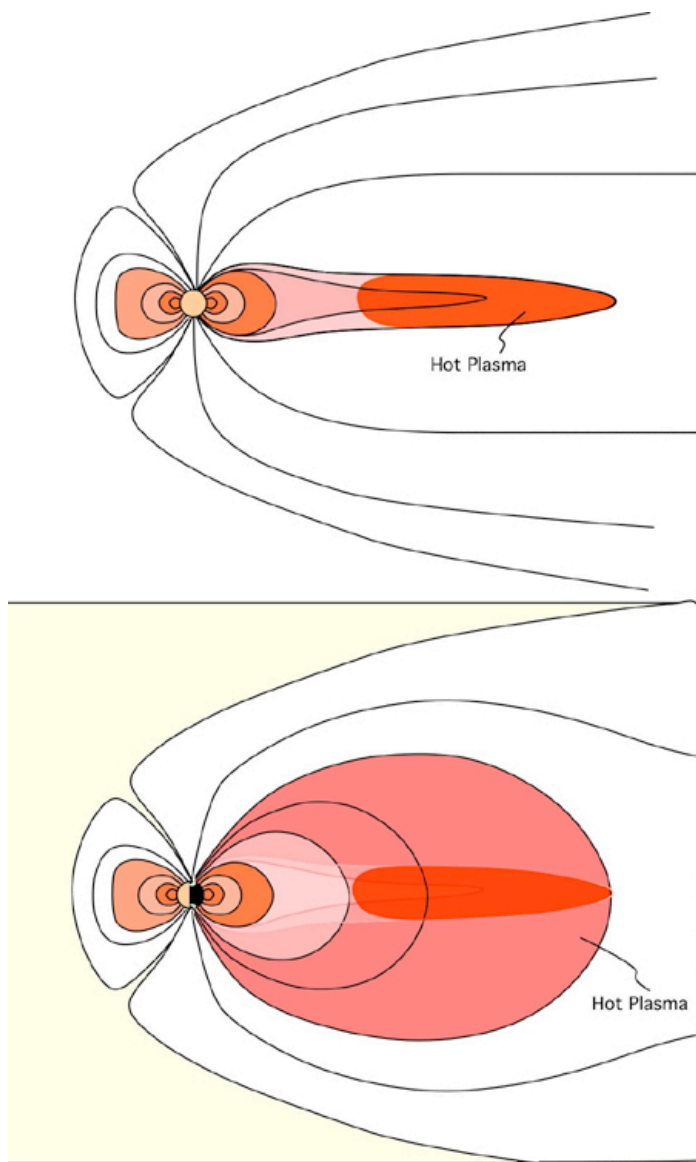
圖五、 Dynamics Explorer 1人造衛星上利用紫外光所攝得連接日夜半球的跨極極光弧 ( $\theta$  theta aurora)。(摘自 Frank, 1988 或 Frank et al., 1985) 這種「跨極極光弧」結構多發生在行星際磁場有北向分量時。一般相信，這種「跨極極光弧」是由於行星際磁場與地球磁場在極區發生「磁場線重聯」所造成的現象。這是一張紫外光影像。圖中右側半圓形光亮區，是白天太陽光照射電離層，所造成的紫外光散射結果。



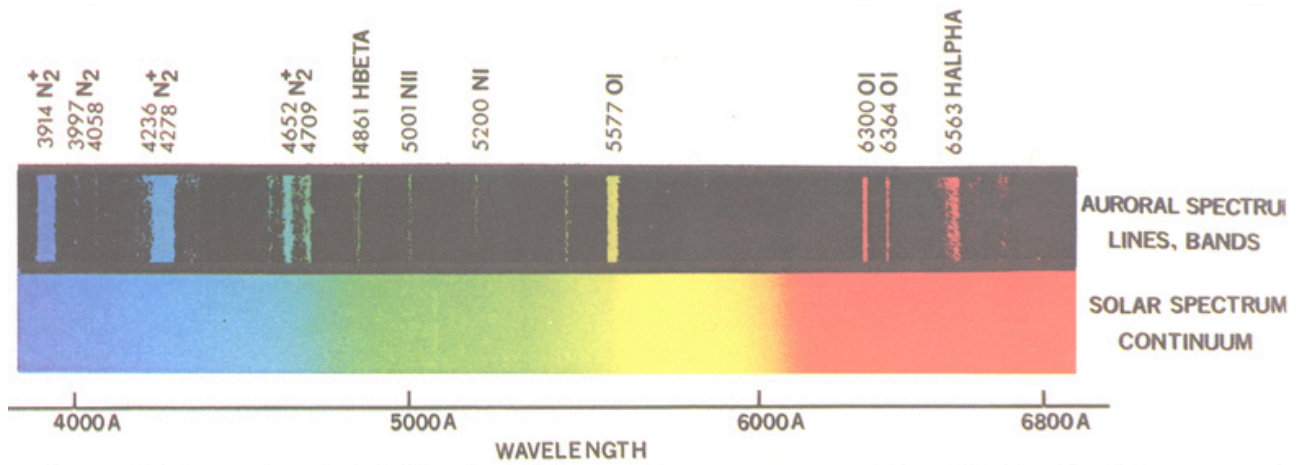
圖六、 Viking人造衛星上利用紫外光所攝得亮點極光 (bright spots aurora) 結構。(摘自 Lui et al, 1989)。這些「亮點極光」結構的形成與高速太陽風吹過地球磁層，在磁層頂內部之邊界層所造成的渦流有關。這些亮點發生地點多位於中午到下午之極區電離層，但有時亦可以在中午前的方位出現。



圖七、地球磁層與磁層頂電流示意圖。



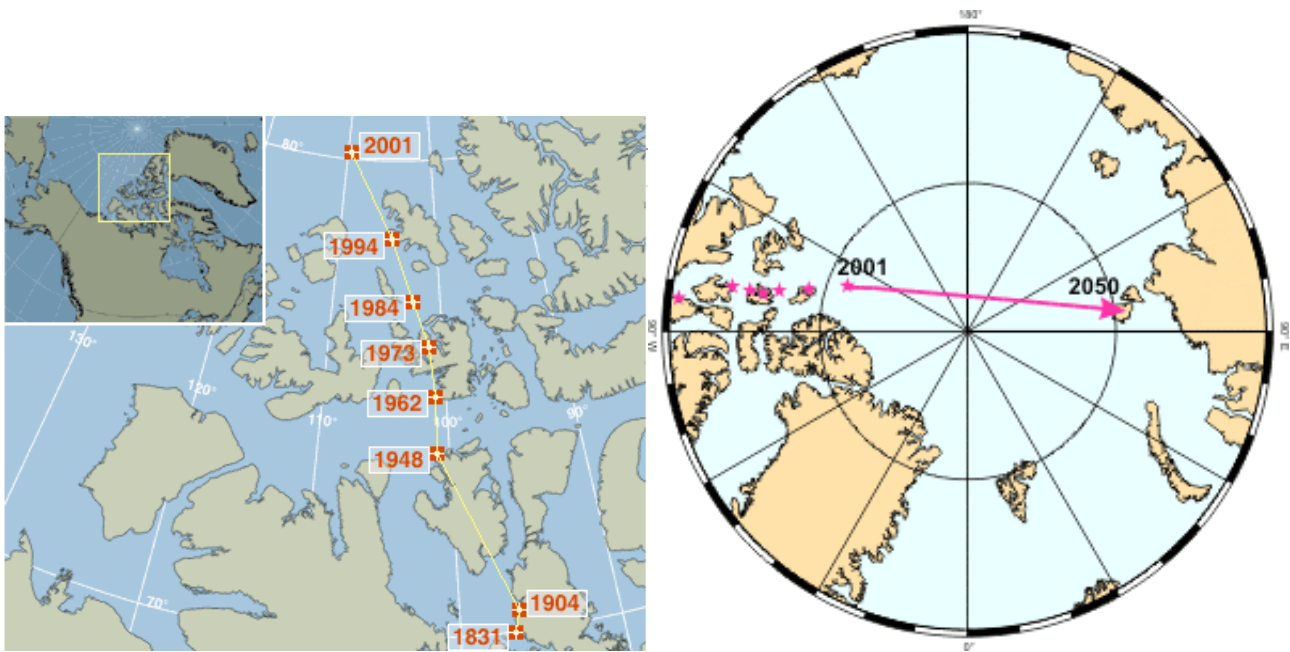
圖八、電漿片中的電漿，可造成絢麗的夜側極光。當來自太陽的擾動，造成地球磁層擾動時，可提供額外的跨磁尾電場，因此加強了電漿片中電漿的儲存量（上圖）。當磁層中的擾動大到足以破壞電漿片結構的穩定態時，儲存在電漿片中的電漿就會一股腦灌進電離層（下圖），造成絢麗的極光。



圖九、極光光譜（上）與太陽光譜（下）之比較。



圖十、太空梭上所拍攝到的極光上部照片。



圖十一、過去一百七十多年來，地球磁極位置改變情形。顯示地球磁軸晃動的特性。根據大西洋海底山脈中磁化物質的磁極排列情形，可知地球磁軸每隔五十萬到數百萬年，會反轉一次。在兩次反轉之間，可能會呈現不同幅度與不同週期的晃動現象。

(摘自 [http://gsc.nrcan.gc.ca/geomag/nmp/long\\_mvt\\_nmp\\_e.php](http://gsc.nrcan.gc.ca/geomag/nmp/long_mvt_nmp_e.php) (Extra Information)與  
[http://gsc.nrcan.gc.ca/geomag/nmp/long\\_mvt\\_nmp\\_e.php](http://gsc.nrcan.gc.ca/geomag/nmp/long_mvt_nmp_e.php))