

# 極光 與 磁層風暴

## Aurora and Magnetospheric Substorms

呂凌霄 Ling-Hsiao Lyu

國立中央大學 太空科學與工程學系

Department of Space Science and Engineering

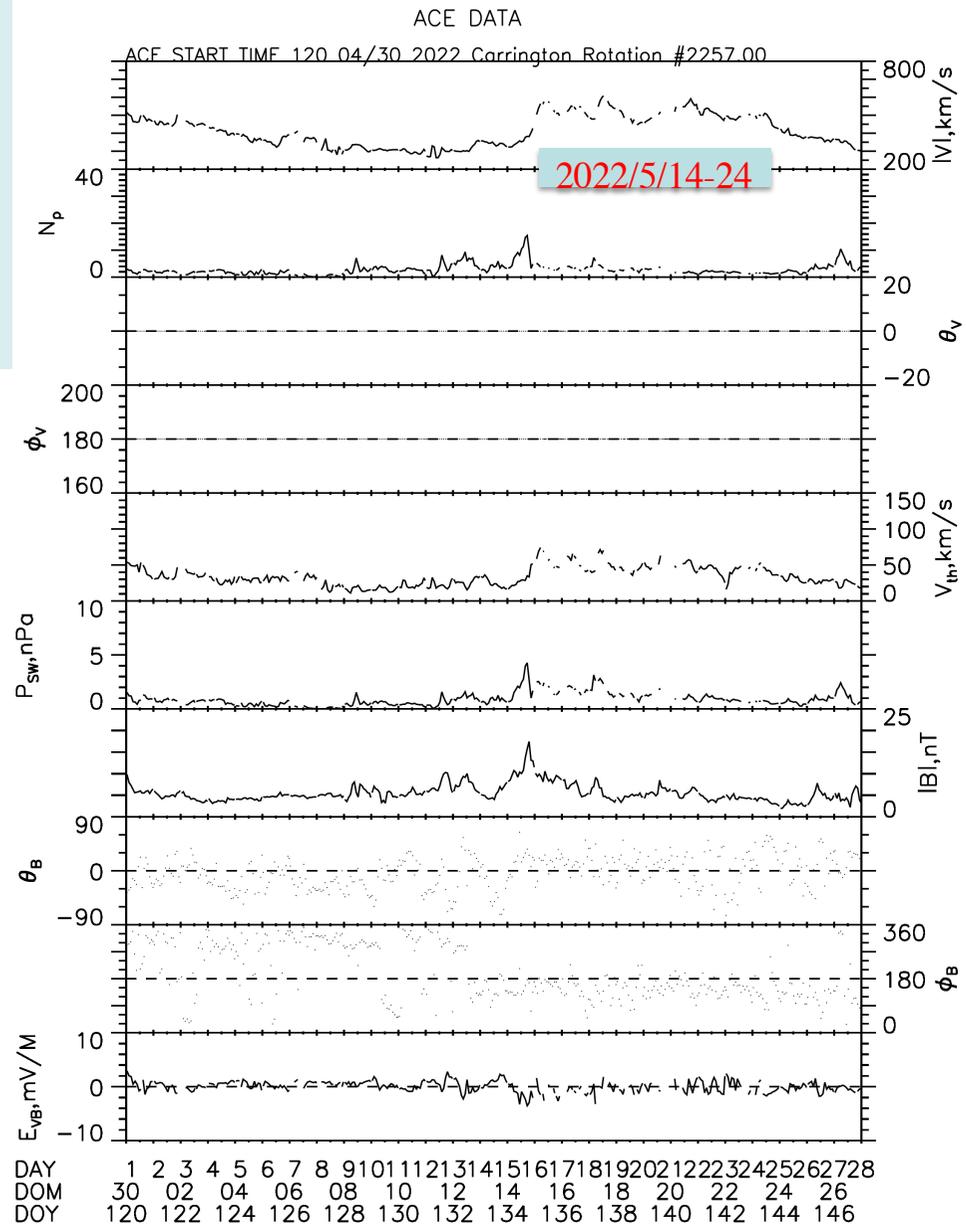
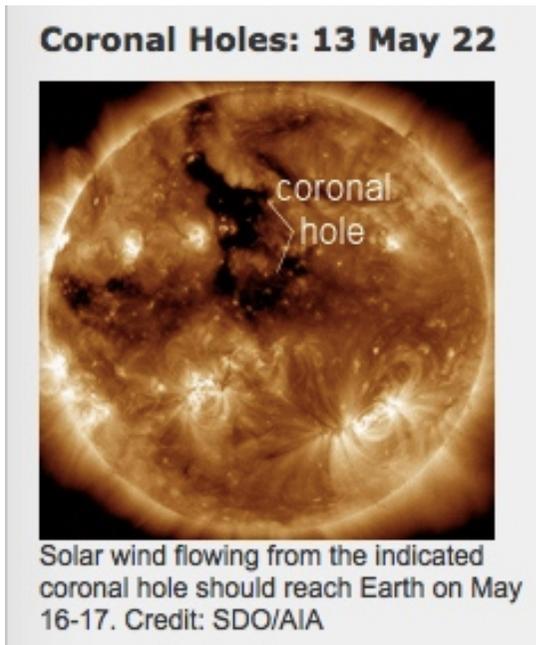
National Central University

## Review 回顧

日冕洞吹出來的高速太陽風  
追撞前方低速的太陽風  
會產生一對 行星際 co-rotating shocks  
當這些激震波掃過地球磁層，會造成  
地球磁場風暴 與 極光現象

# Observations of Solar Wind

- ACE spacecraft Observations (ACE 太空船 的觀測結果)



太陽風  
速度

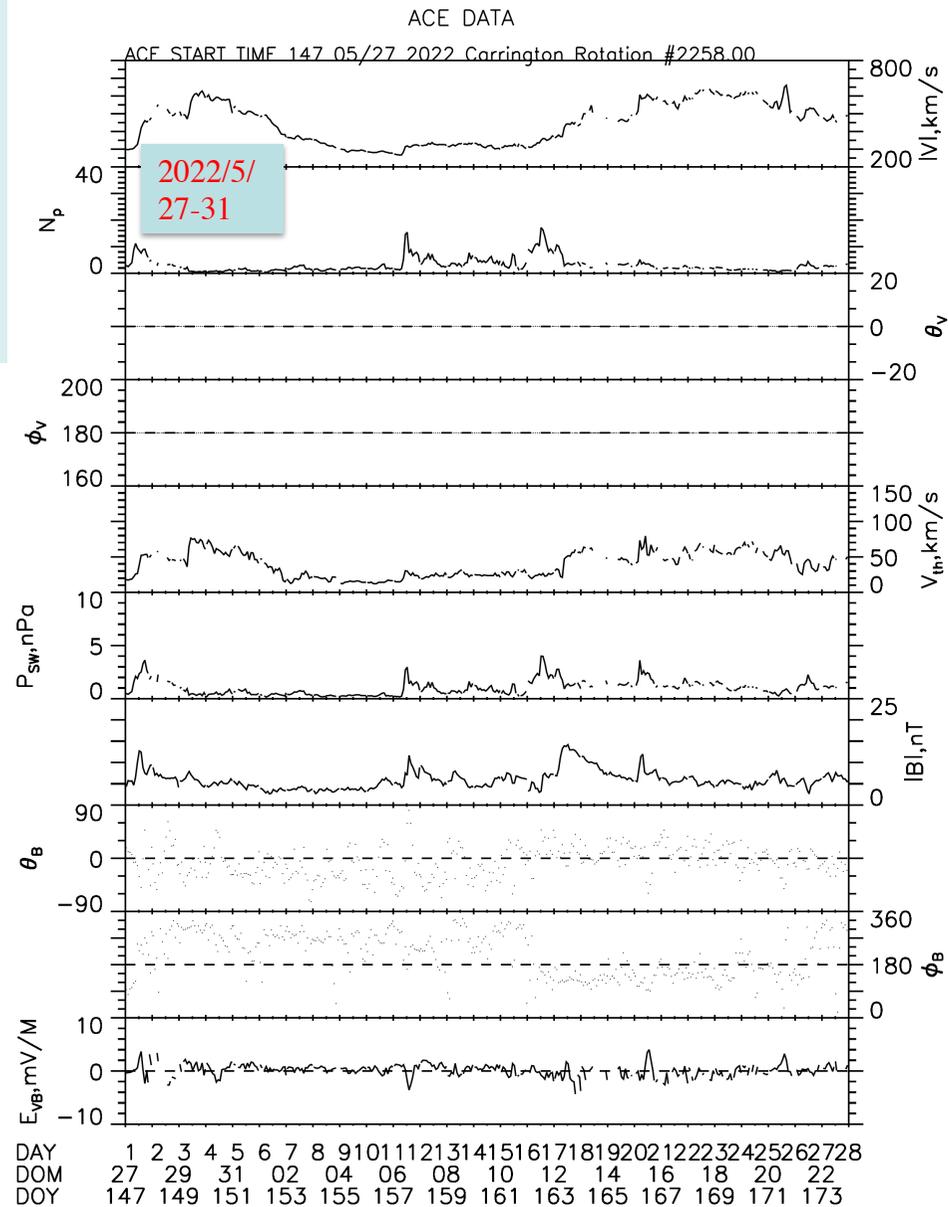
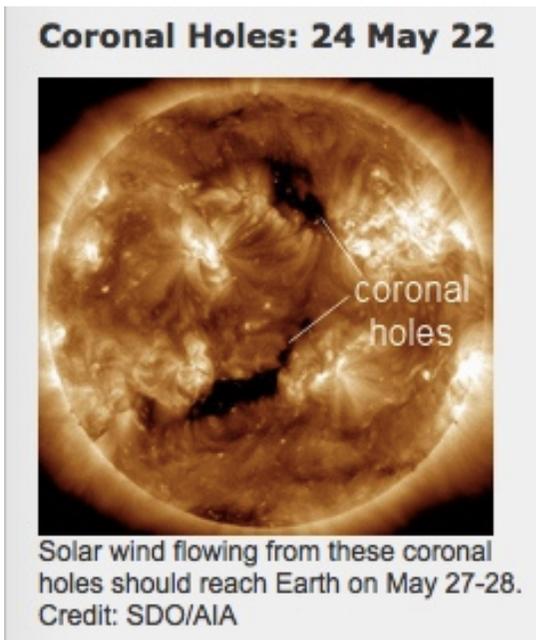
太陽風  
熱速度

**ANTARCTIC LUNAR ECLIPSE:** Around the world, millions of people saw the May 15th lunar eclipse. Only a few saw it from Antarctica. Thomas Leps sends this picture from the geographic South Pole:



# Observations of Solar Wind

- ACE spacecraft Observations (ACE 太空船 的觀測結果)



太陽風速度

太陽風熱速度

高速太陽風 追撞 低速太陽風  
會形成一個「與太陽自轉一  
起旋轉」的交互作用區

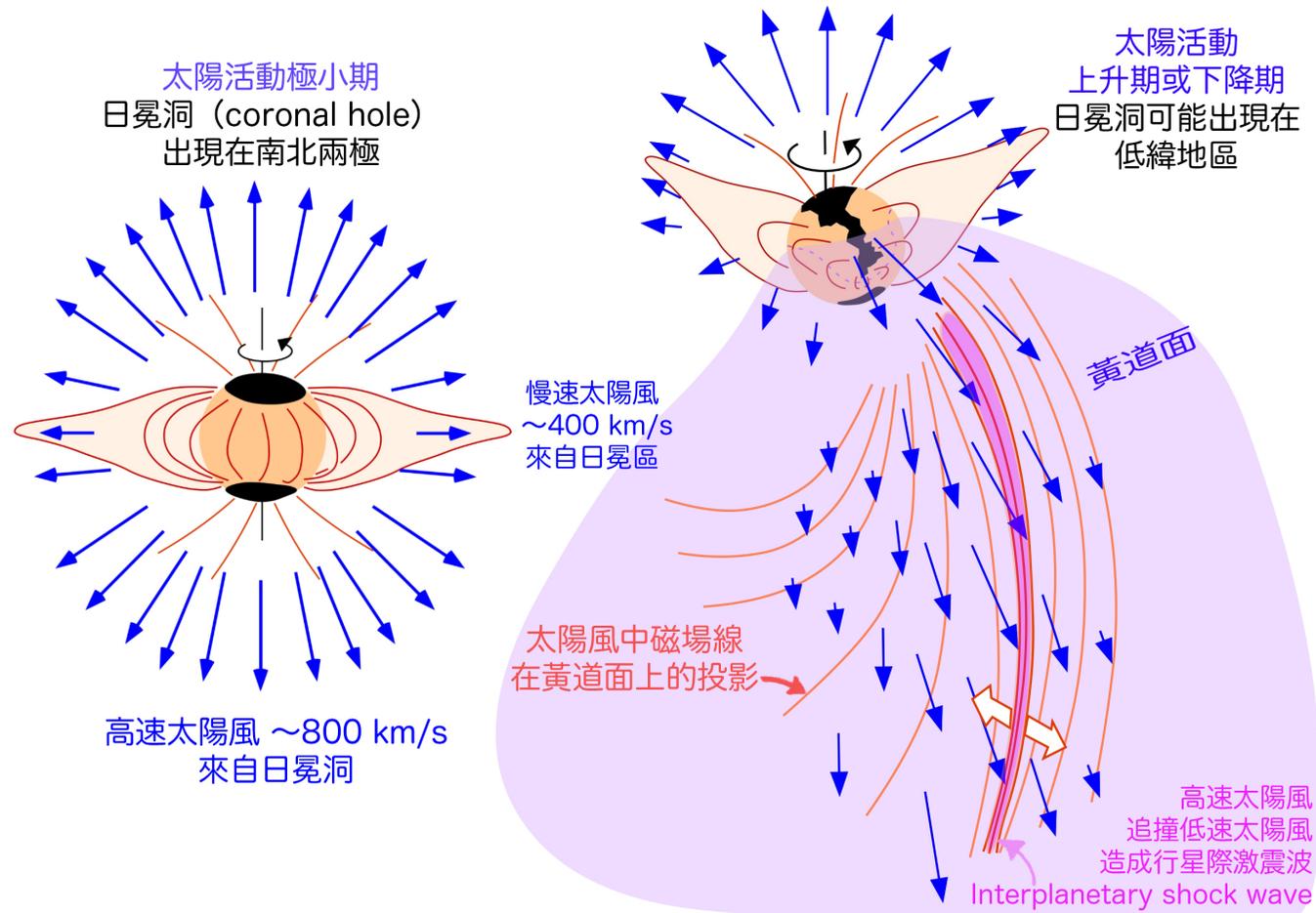
(co-rotating interaction region,  
CIR)。這個CIR區域，會有  
激震波形成  
(co-rotating shocks)。

這張 2022-05-27 的照片是 當  
CIR & co-rotating shock 撞擊  
地球磁層期間，在紐西蘭所  
拍攝到的南極光

**SOUTHERN LIGHTS:** A co-rotating interaction region (CIR) hit Earth's magnetic field on May 27th. The impact sparked [12 hours of geomagnetic storming](#) (G1-class) and a rare display of Southern Lights. Minoru Yoneto sends this deep-sky exposure from Queenstown, New Zealand:



# 當「日冕洞」發生在太陽盤面中央區域時，行星際空間中會發生高速太陽風追撞低速太陽風，造成激震波



本圖摘自：呂凌霄(2016), 太陽系中的風暴-太空天氣，《科學月刊》，47, (3):190-193.

# 什麼是極光？

- 極光是一種自然界的特殊發光現象。
- 它的發生地點主要是在磁緯中高緯地區(80°-60° MLAT)約一百公里到一千公里的高空。
- 發光的原因，是因為中性氣體被來自數千公里外的高能帶電粒子撞擊而游離，當這些游離氣體重新結合成中性氣體時，就會隨中性氣體的種類不同而發出特定波長顏色的光。
- MLAT (Magnetic Latitude)



## 極光（一）中國龍的傳說



贊助單位  
國科會科教處  
網路上高中地球科學學習環境之研究整合型計畫  
<http://geoschool.ncu.edu.tw/>  
子計畫七—網路上太空科學教育之研究  
<http://www.ss.ncu.edu.tw/~SpaceEdu>  
國立中央大學太空科學所  
<http://www.ss.ncu.edu.tw/>

## 極光（二）絢麗的色彩



贊助單位  
國科會科教處  
網路上高中地球科學學習環境之研究整合型計畫  
<http://geoschool.ncu.edu.tw/>  
子計畫七—網路上太空科學教育之研究  
<http://www.ss.ncu.edu.tw/~SpaceEdu>  
國立中央大學太空科學所  
<http://www.ss.ncu.edu.tw/>



攝於March 2013

# 一般的民眾眼中的極光

- 剛到美國不久，一位早我一年到阿拉斯加來求學的美國研究生，課後悄悄跟我說：
  - 我想極光的物理沒有這些老師想的這麼複雜，我想極光就是一種雲！
  - 我傻傻的去問指導教授，老師頭也不抬的回答我說，她亂講！
- 無獨有偶，一位長年居住在費班克的華僑在一次留學生聚會的場合問我：
  - 你研究的就是那些 出現在晚上的 彩色雲嗎？

# 極光會是一種雲嗎？

- 科學家由極光的「高度」與「光譜」得知極光「不是」反射太陽光的雲
- 高度：（三角測量法）
  - 一般的雲高：約10-15 公里
  - 貝母雲高：約15-25 公里（極區，平流層冬天）
  - 夜光雲高：約75-85 公里（極區 $>50^\circ$ ，中氣層的夏天）
  - 極光高：約100-1000公里（冬天午夜仍可見極光）
- 光譜：（連續光譜 或 不連續光譜？）
  - 雲：反射太陽光，呈現太陽的連續光譜。
  - 極光：自己發光而氣體密度又低，故呈現不連續光譜。

[https://en.wikipedia.org/wiki/Polar\\_stratospheric\\_cloud](https://en.wikipedia.org/wiki/Polar_stratospheric_cloud)



貝母雲 nacreous cloud

mother-of-pearl cloud

15-25 km 平流層極區冬天日出日落前2小時

成分：水 + 硝酸 (+ 硫酸) 的冰晶

[http://www.antarctica.gov.au/\\_\\_data/assets/image/0006/29832/varieties/antarctic.jpg](http://www.antarctica.gov.au/__data/assets/image/0006/29832/varieties/antarctic.jpg)

貝母雲 nacreous cloud



# Noctilucent Cloud 夜光雲

75-85 km 中氣層頂 mesopause 極區夏天  
成分：水的冰晶

(流星雨燃燒，沿途留下的電離水氣分子，沿磁場沈降在高緯高空)



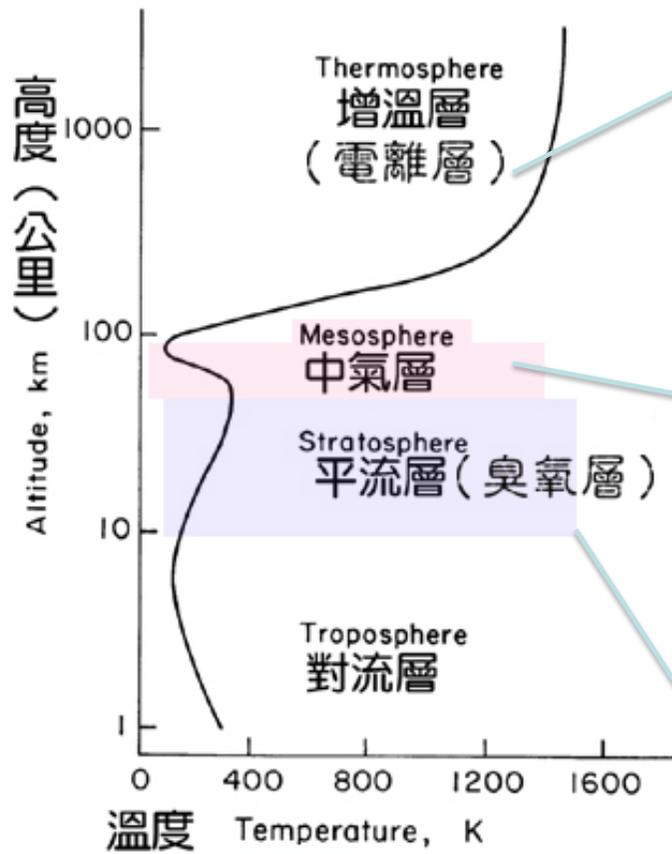
[https://en.wikipedia.org/wiki/Noctilucent\\_cloud](https://en.wikipedia.org/wiki/Noctilucent_cloud)

# Noctilucent Cloud 夜光雲

重力波的觀測 gravity wave observation



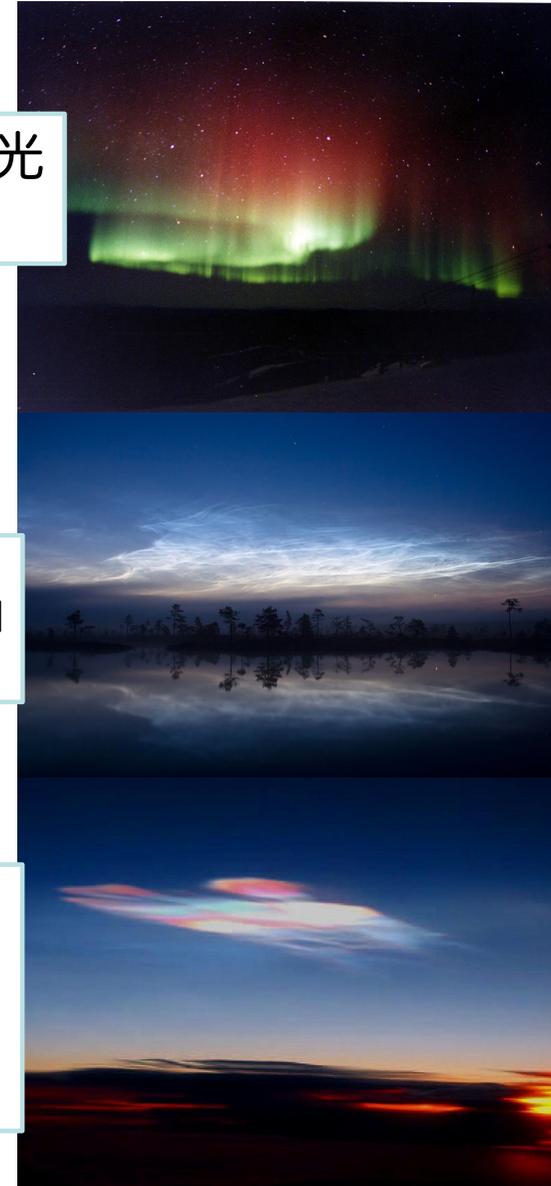
中性氣體溫度的垂直分布  
Neutral Gas

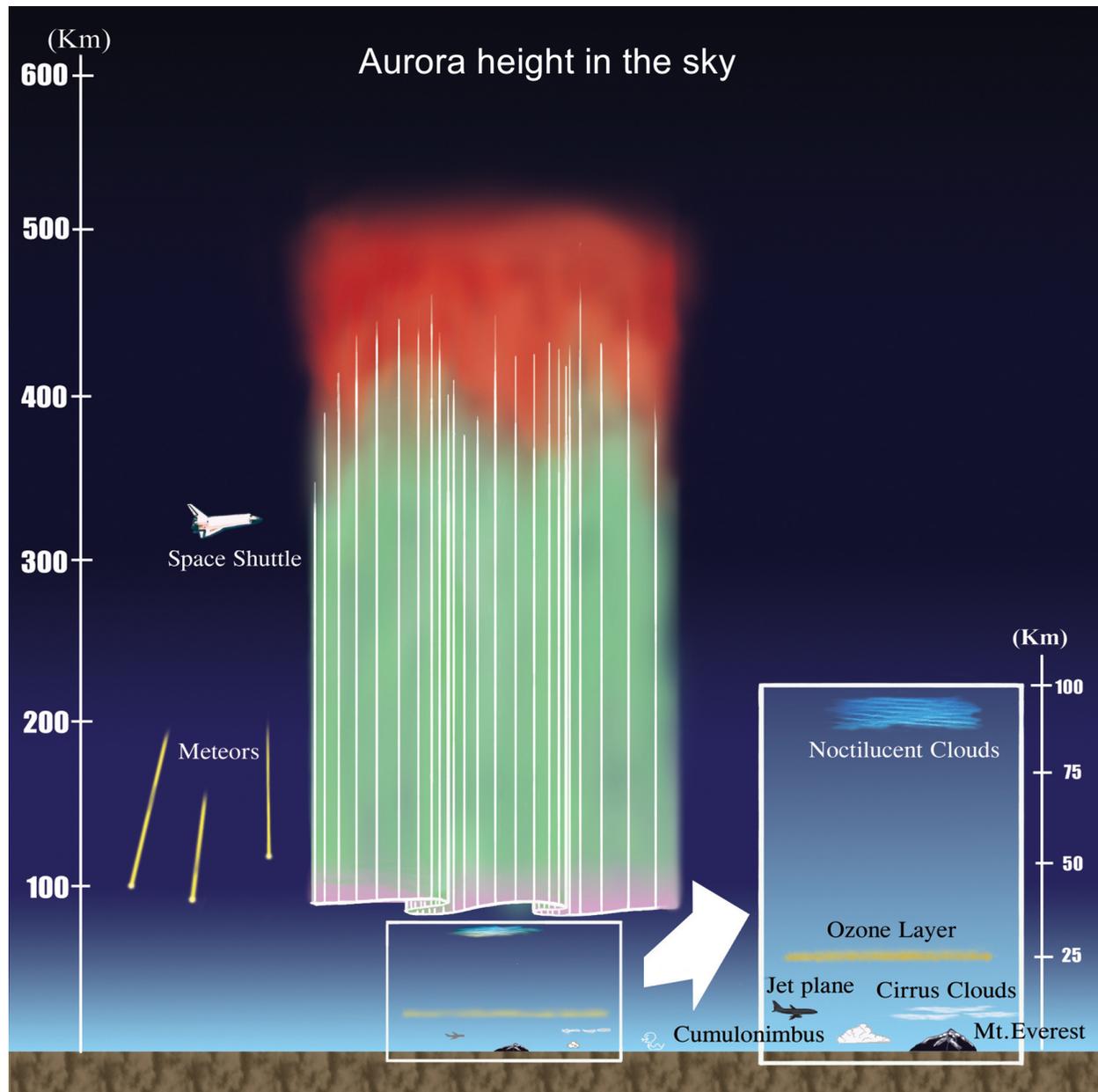


(電離層) 極光  
aurora

(中氣層) 夜光雲  
noctilucent cloud  
極區夏天

(平流層) 貝母雲  
nacreous clouds  
or  
mother of pearl  
極區冬天





# 太陽光譜 與 極光光譜

- 由太陽核心產生出來的 Gamma Ray, 經過一、兩百萬年才穿過緻密的輻射層 radiative zone, 最後呈現連續光譜的黑體輻射。
  - 太陽閃焰, 沒有經過緻密的輻射層, 所以仍保有許多短波的成分, 會造成太空人的輻射傷害。
- 雲: 反射太陽光, 呈現太陽的連續光譜。
- 極光: 自己發光, 而高空氣體密度又低, 故呈現不連續光譜。

# 極光與太陽光 在可見光波段的 部份光譜

極光自己發光，又因為高空氣體密度低，因此極光呈現  
分立光譜（不連續光譜）

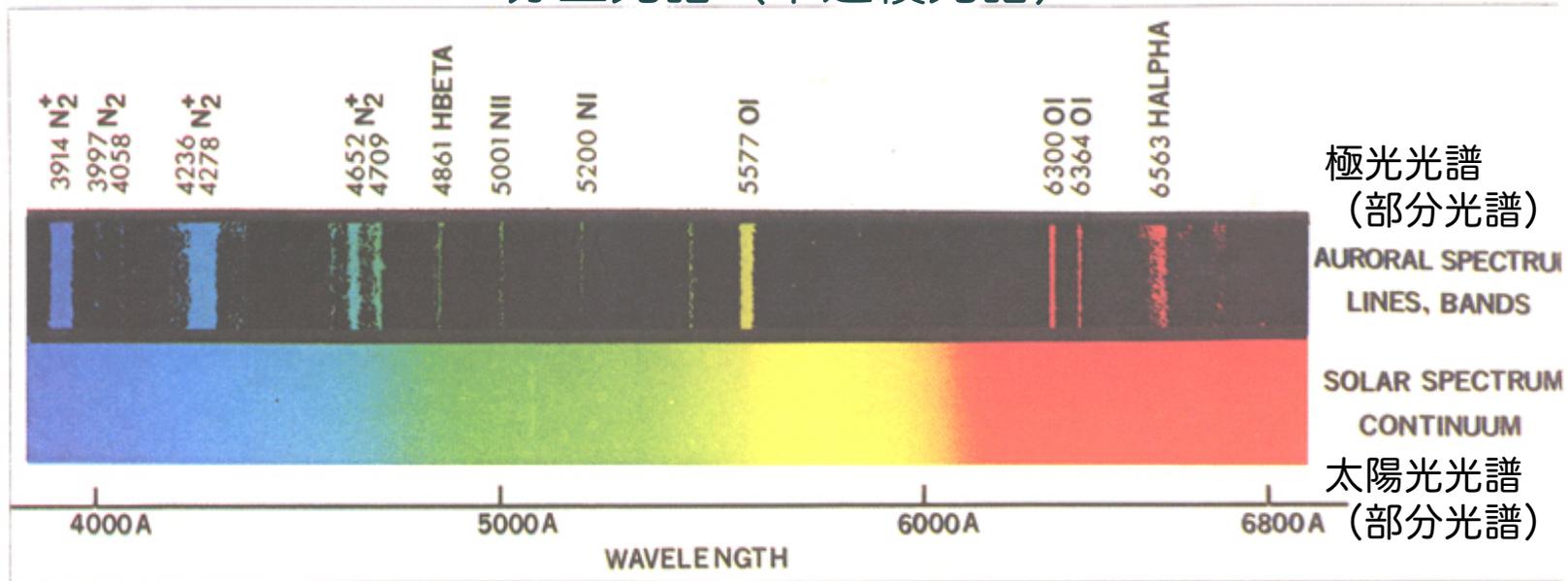


圖5. 極光光譜。

雲反射太陽光因此呈現連續光譜

# 極光與太陽光 在可見光波段的 部份光譜

極光自己發光，又因為高空氣體密度低，因此極光呈現  
分立光譜（不連續光譜）

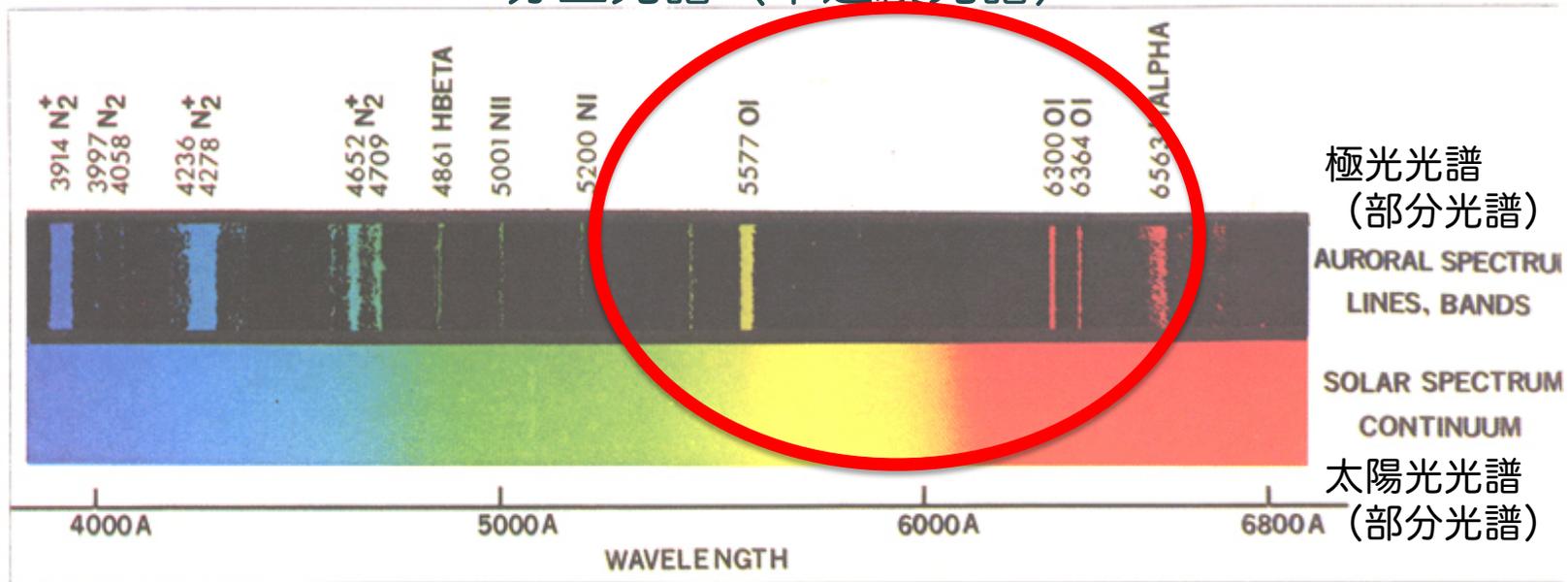
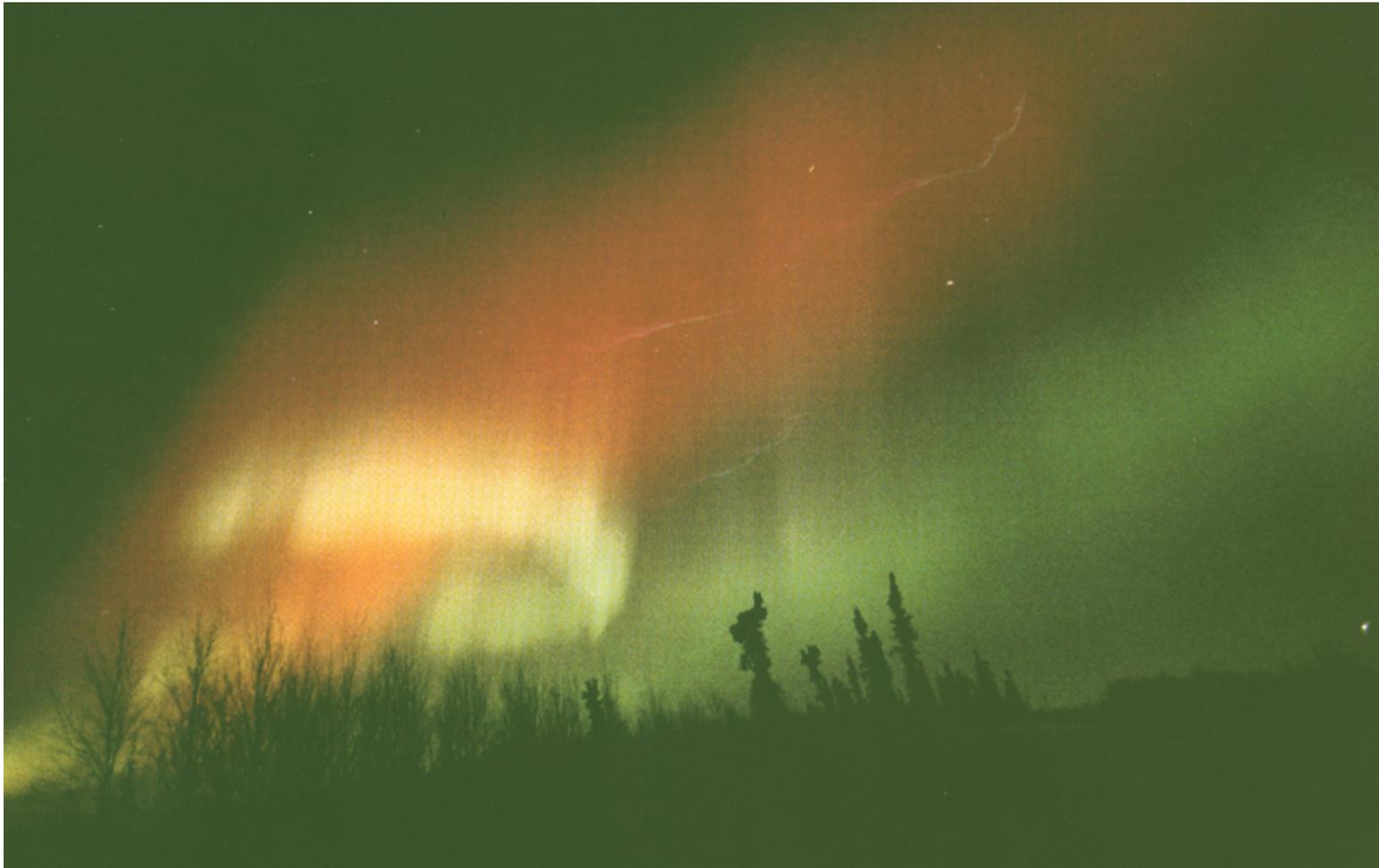


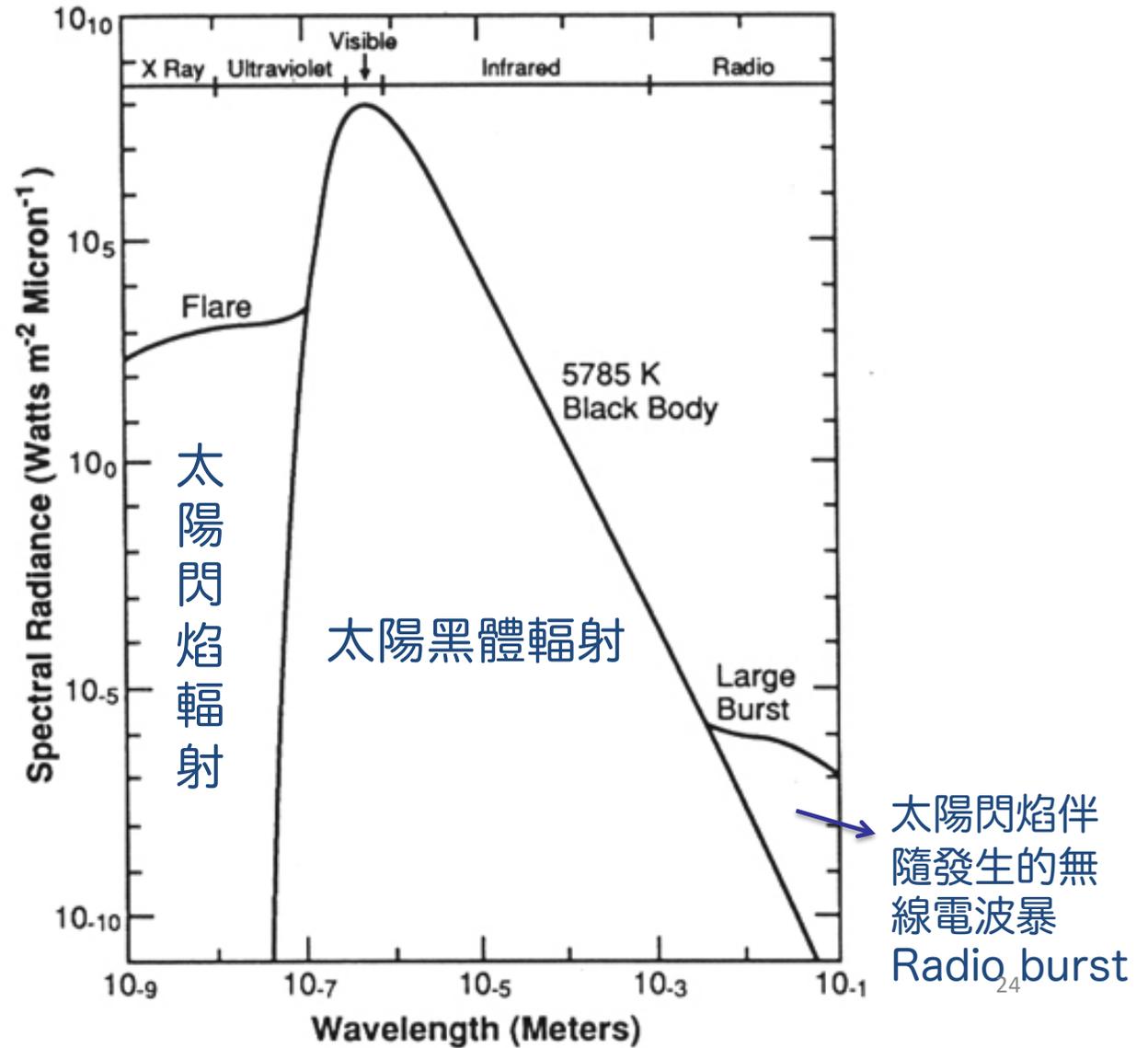
圖5. 極光光譜。

雲反射太陽光因此呈現連續光譜

磁暴時，難得一見之紅綠相間的極光  
( $O_2 \rightarrow O + O$ )



由太陽核心產生出來的 Gamma Ray, 經過一、兩百萬年才穿過緻密的輻射層, 最後變成黑體輻射的連續光譜

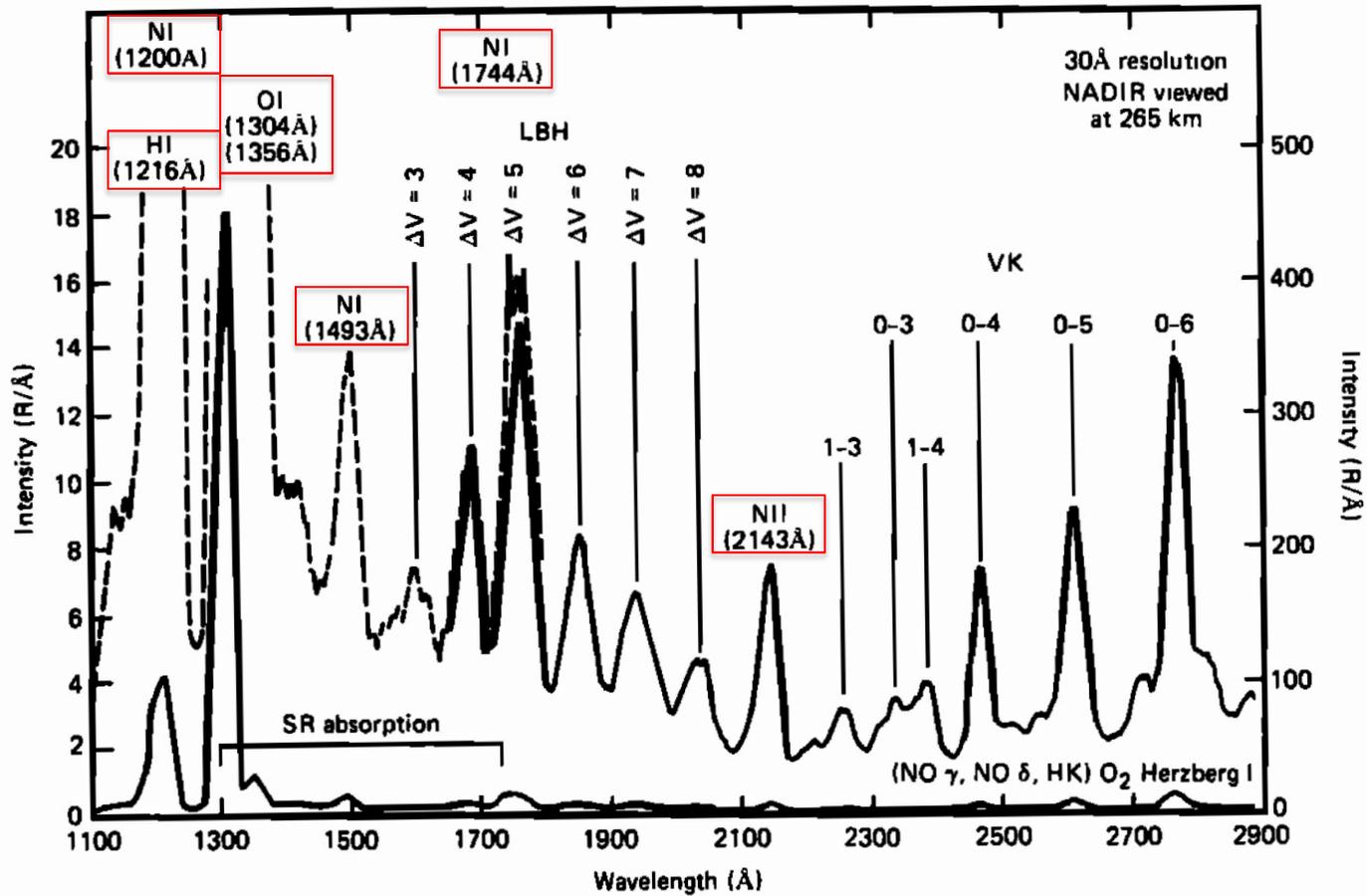


# 極光光譜 也有 紫外線波段

遠紫外線 FUV 110-190 nm (虛線) 與 紫外線 UV 160-290 nm (實線) 觀測  
Ishimoto et al. [1988]

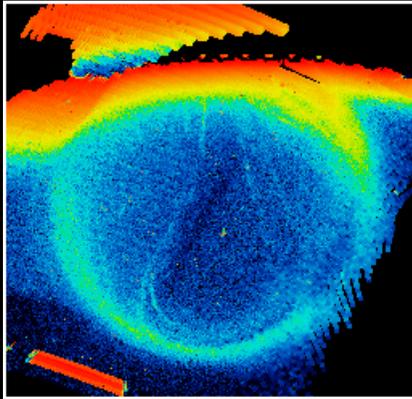
Composite auroral spectrum from S3-4 VUV and UV spectrometers

(a)

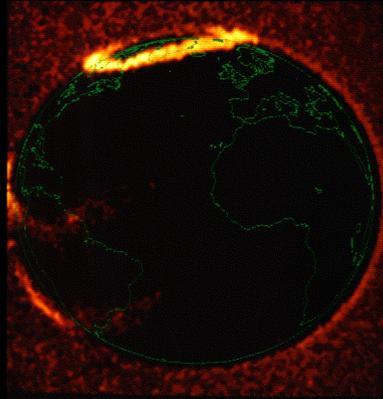


# 人造衛星多利用紫外光看極光

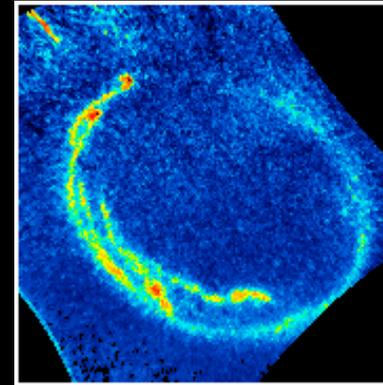
ISIS (Visible)



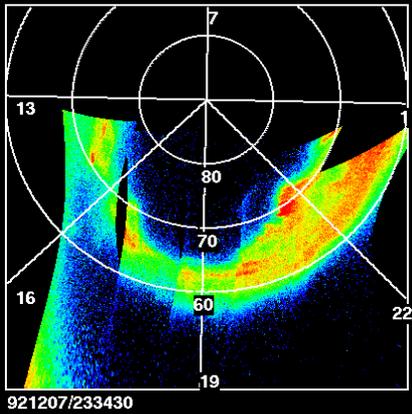
DE-1



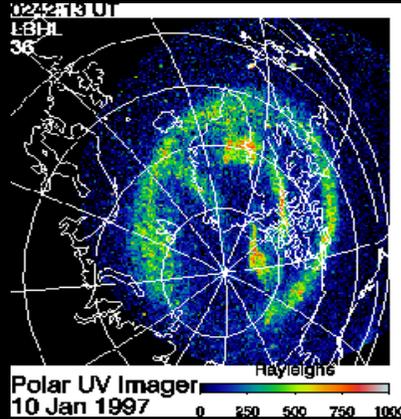
Viking



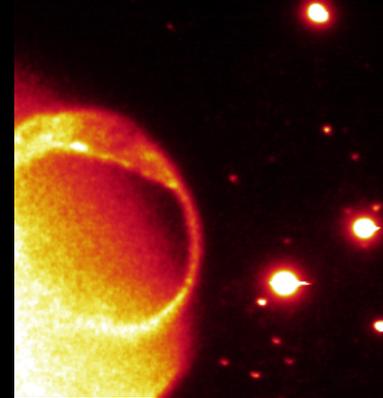
Freja



Polar



IMAGE



鎖定UV波段從衛星看極光，是因為可見光波段，光害嚴重



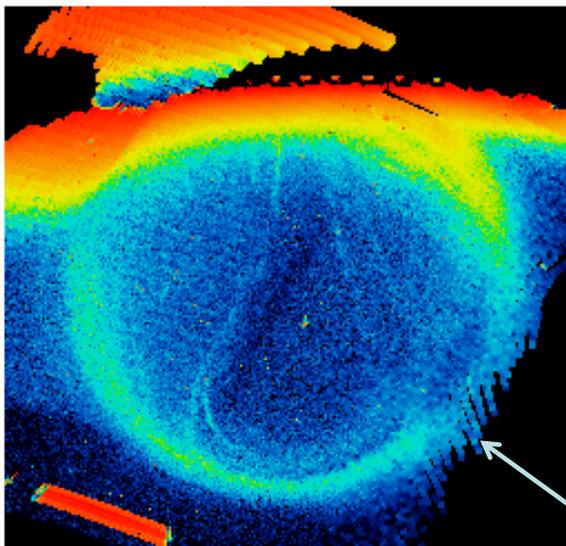
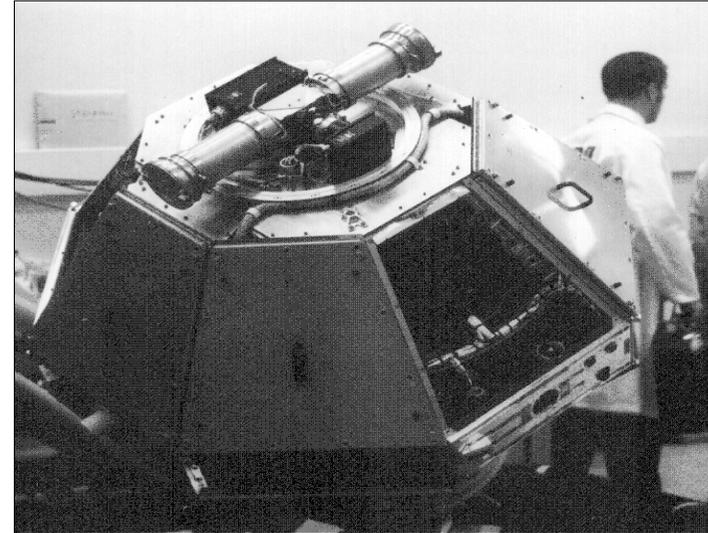
City lights at night  
夜晚的城市燈光

## 少數利用可見光(Visible Light)由 高空觀測極光的計畫

- 這些衛星或太空梭的飛行高度都很低  
(約數百公里)。

## ISIS-II ASP

- Near circular polar orbit (Inc.~88.1°, 1358x1428 km)
- Scanning Photometer at 557.7, 630, and 391.4 nm
- Integration time ~20 min (1 image per orbit)
- Photometer FOV: 0.4°×0.4°



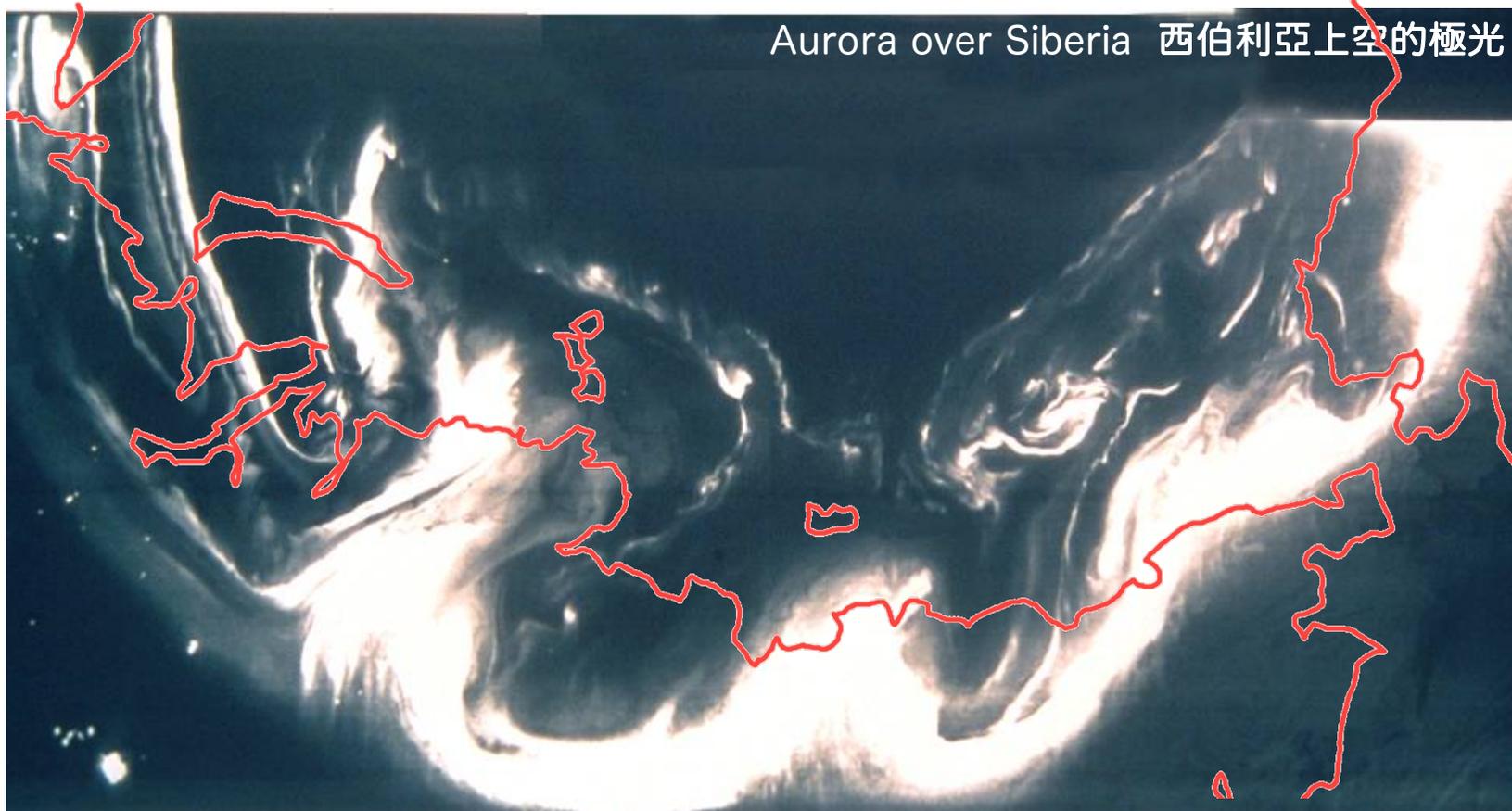
1)

### Major Science Achievements:

- Global mapping of 557.7, 630, and 391.4 nm airglow
- The diffuse aurora [*Lui and Anger, 1973*]
- The tear-drop shape quiet time Polar cap

Visible light image

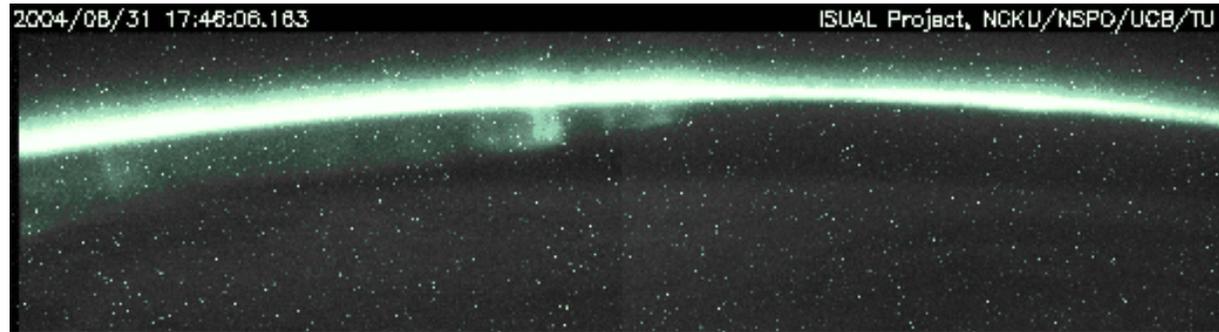
# DMSP Auroral Image



DMSP : Defense Meteorological Satellite Program, 最初的建構計劃是用來提供北半球雲的涵蓋情形, 以利間諜衛星Corona對蘇聯進行空拍攝影  
<http://www.aerospace.org/2013/12/30/dmsp-instruments-a-50-year-legacy/>

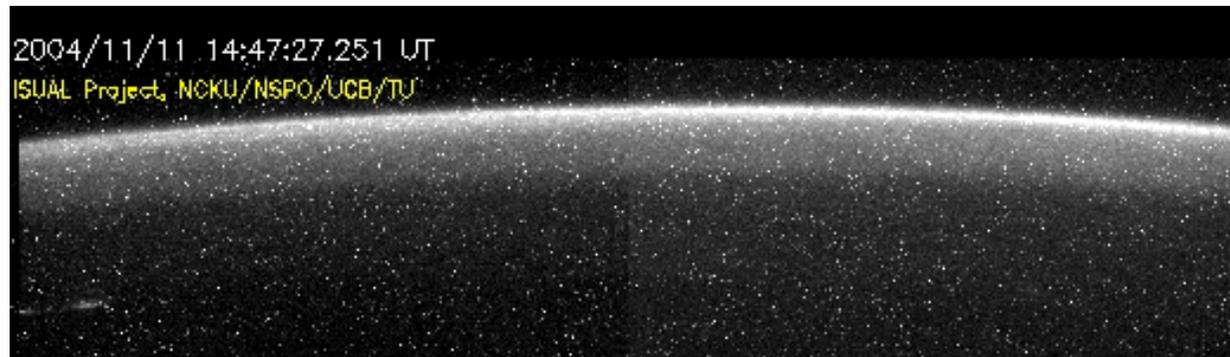
# 太空梭上所拍攝到的極光





## 福衛二號「高空大氣閃電影像儀」極光觀測 ISUAL Aurora Observations

沒有極光的時候，只能看到氣輝 air glow



## 總結：極光與雲之間的差異

- 發生的高度不同
- 發光原理不同
- 光譜的特性不同
  
- 磁暴時，極光會快速的動態變化，雲絕對無法如此快速的變化！

# 認識極光

- 為什麼叫做「極光」？  
極光在「北極」與「南極」出現最多嗎？

# Auroral Zone 極光帶: 統計上最常出現極光的區域

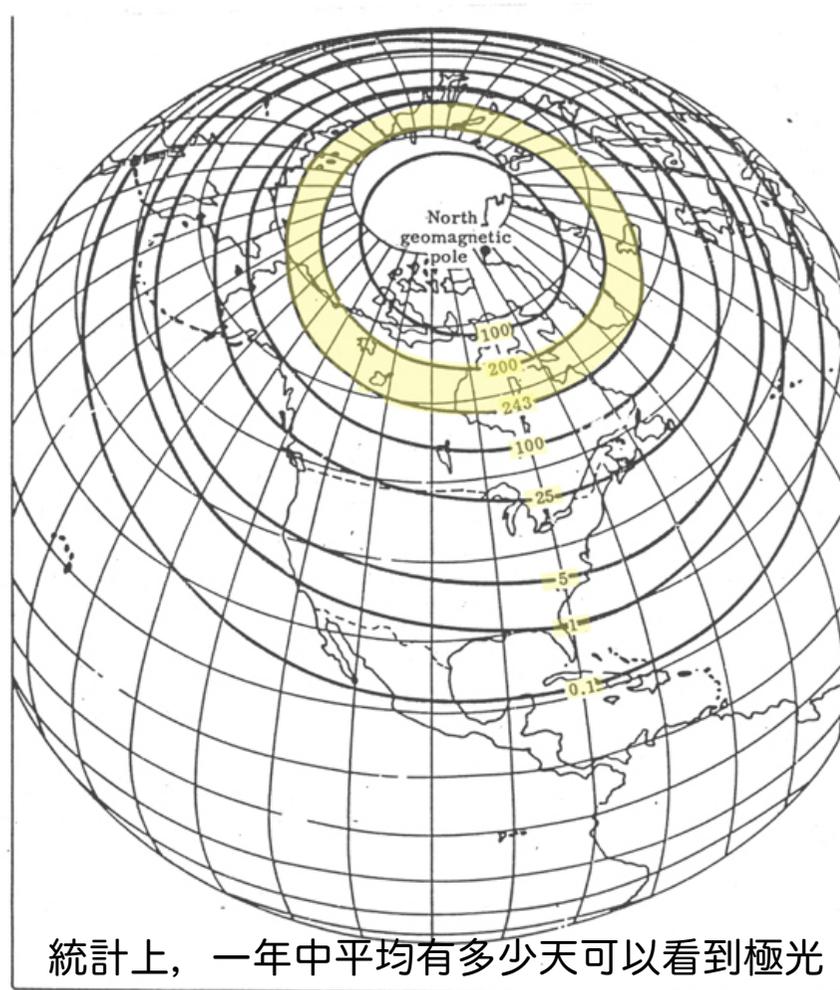
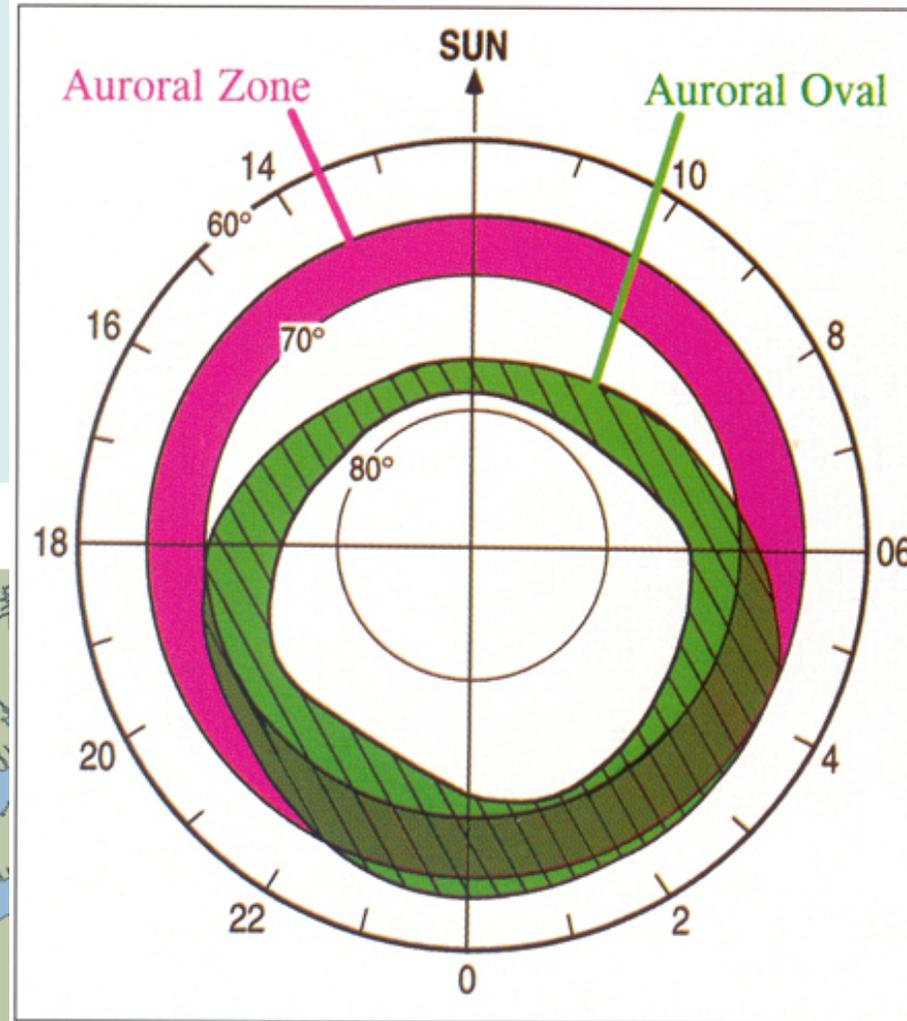
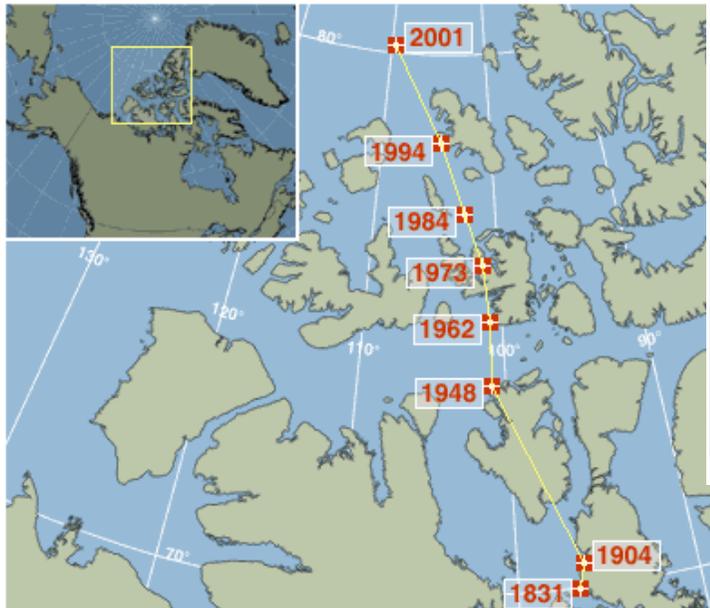


FIG. 6.9. Average distribution of annual frequency of auroral sightings if visibility

# Auroral Zone 極光帶 vs. Auroral Oval 極光橢圓圈

磁極位置在東西半球之間晃動著...

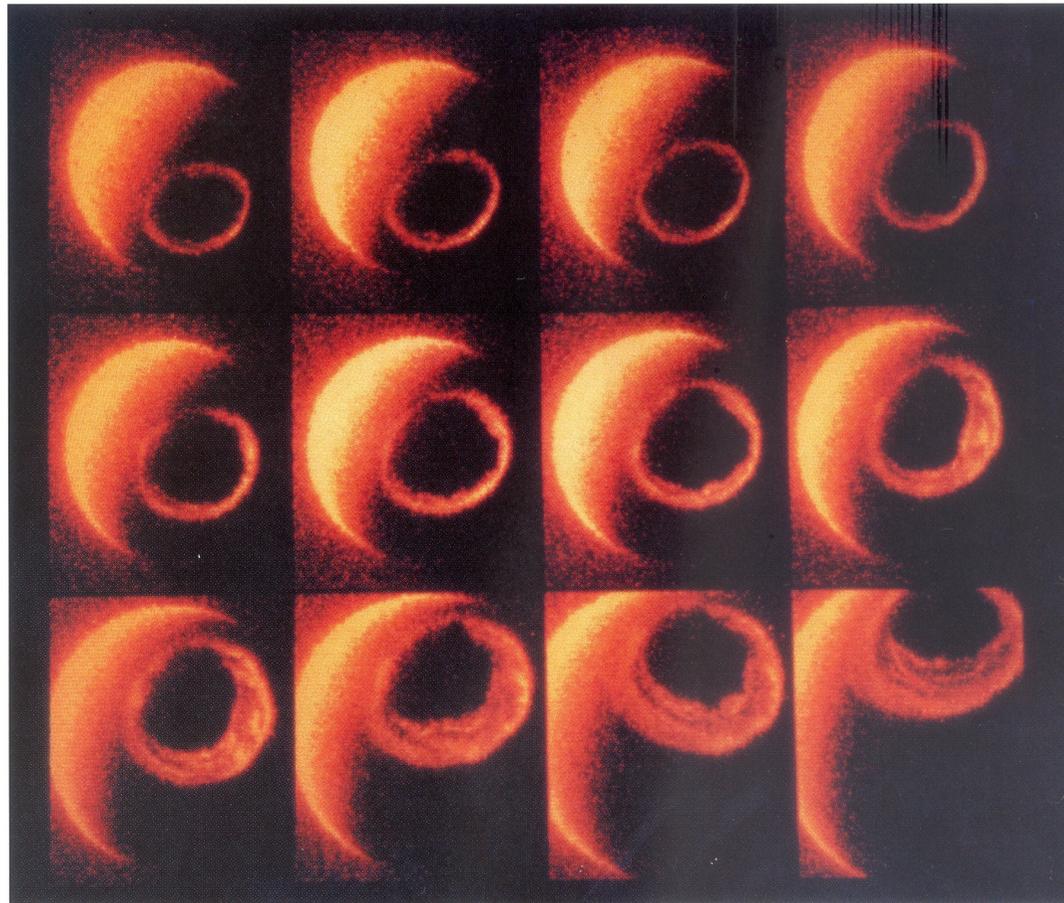


map created with:



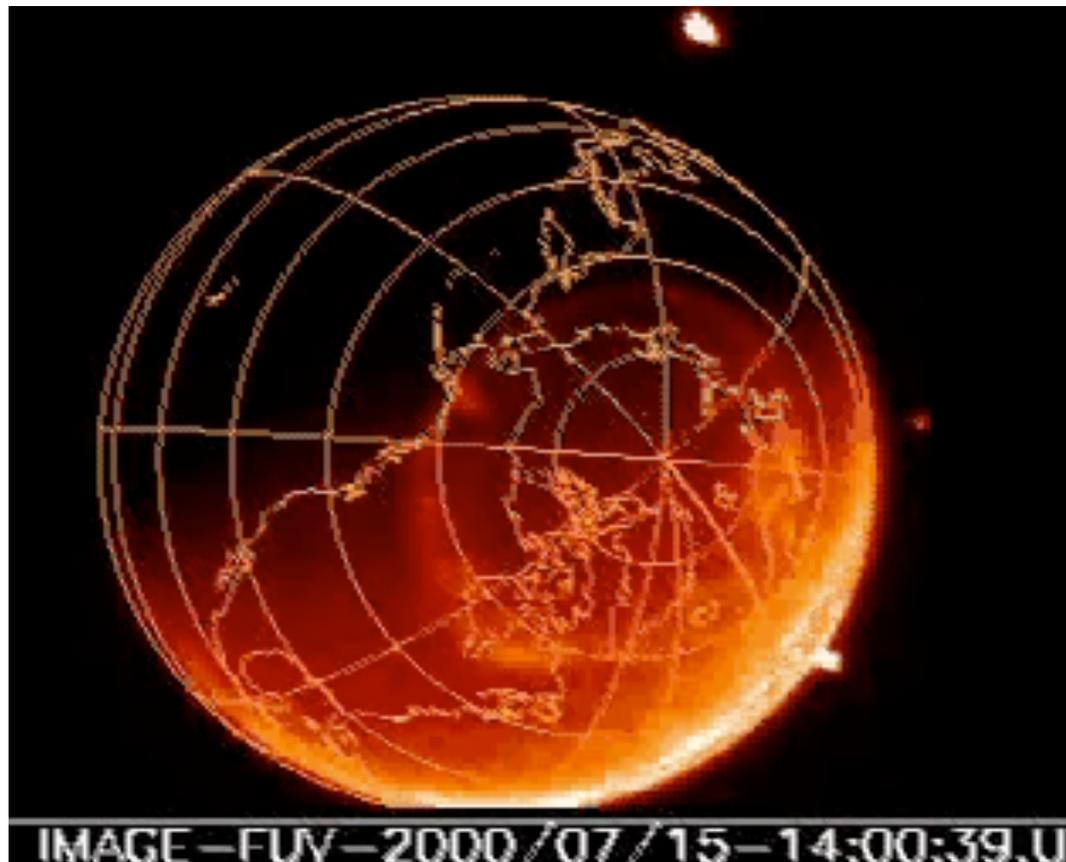
[www.curious-software.com](http://www.curious-software.com)

Auroral Oval 極光橢圓圈 (UV image):  
極光副暴期間，出現明亮極光的環狀區域。  
Auroral Oval 會隨著時間改變它的大小位置



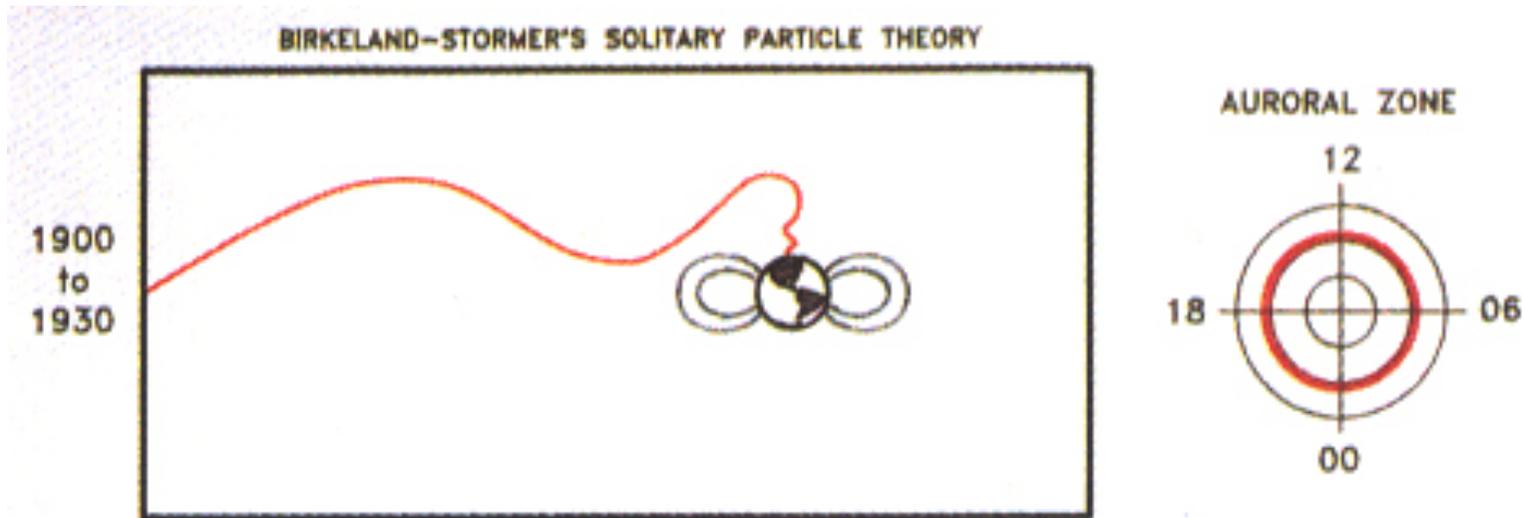
Auroral Oval 極光橢圓圈：  
極光副暴期間，出現明亮極光的環狀區域。  
Auroral Oval 會隨著時間改變它的大小位置

[http://www.ss.ncu.edu.tw/~lyu/lecture\\_files\\_en/Lyu\\_Aurora/movie/A5\\_wic\\_197a.mov](http://www.ss.ncu.edu.tw/~lyu/lecture_files_en/Lyu_Aurora/movie/A5_wic_197a.mov)



# 認識極光

- 極光是怎麼形成的？
  - 西元1859年一次強烈太陽閃焰發生後的幾天，地球上就發生強烈的磁暴與活躍的極光，所以曾經有科學家以為造成極光的電子是直接來自太陽閃焰，後來才知道，其實不然…



# 要了解造成極光的原因， 先要認識我們的地球磁層

- 我們的肉眼看不見我們的磁層，也看不見太陽與我們之間的太陽風以及行星際空間磁場
- 太空時代，開啟了磁層與行星際空間的研究

# 太空時代的來臨(Space Age)

- 德國火箭 V-2 rocket in 1942
- 俄國人造衛星“友伴一號”  
Sputnik 1 in 1957 (Oct. 4)
- 美國人造衛星“探險家一號”  
Explorer 1 in 1958 (Jan. 31)
- Explorer 1 的重大發現：  
Van Allen Radiation Belt 范艾倫輻射帶

# Geiger counter

## 蓋格記數器測量宇宙射線

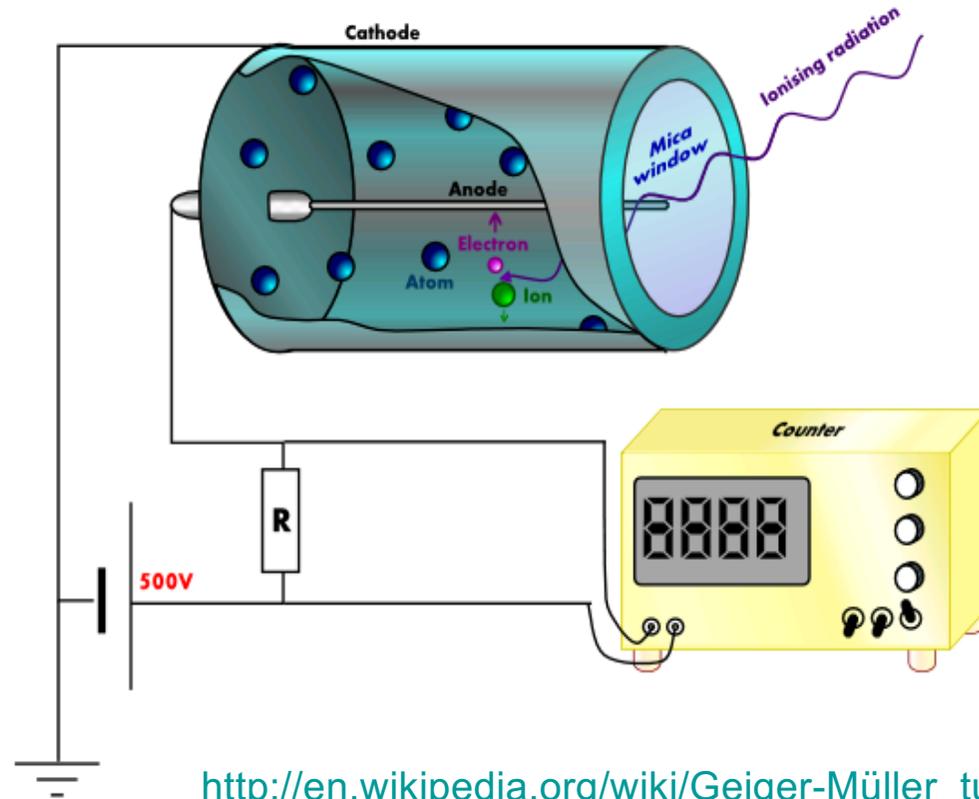
高空張角大



低空張角小



另一種測量宇宙射線的方法：兩銅箔的張角



[http://en.wikipedia.org/wiki/Geiger-Müller\\_tube](http://en.wikipedia.org/wiki/Geiger-Müller_tube)

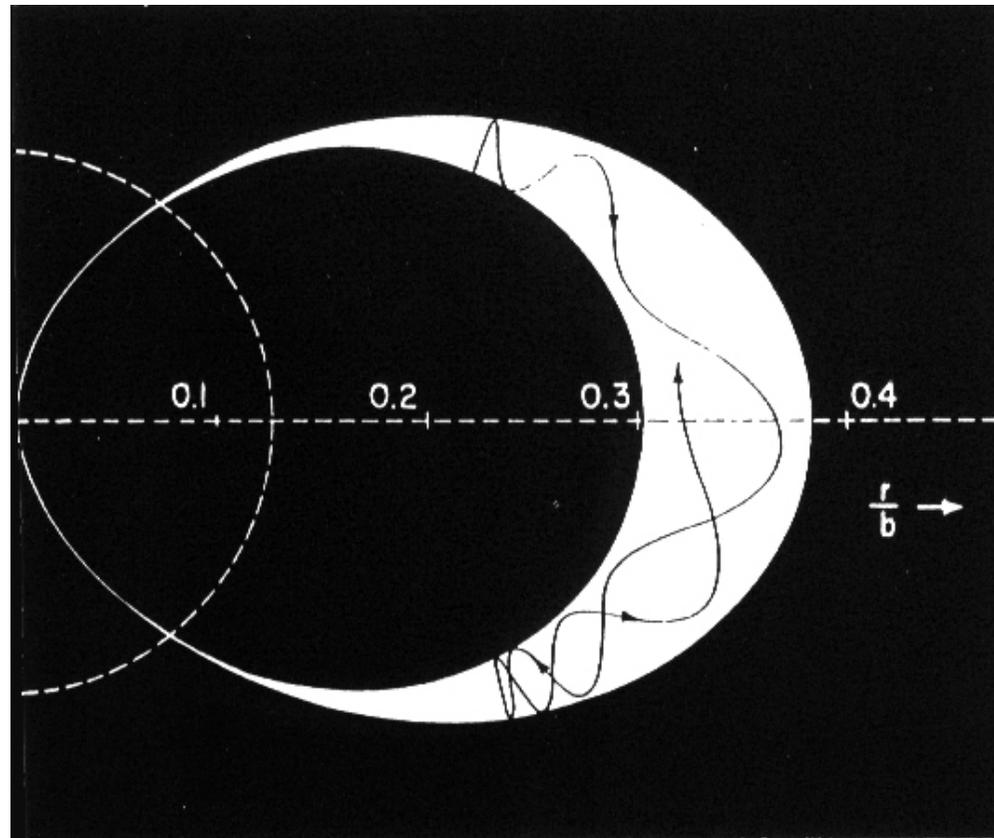
# Van Allen Radiation Belt

## 范艾倫輻射帶的發現過程

- Explorer-1 上面所放的科學酬載(payload)是一個由 Iowa 大學 Van Allen 教授所帶領的研究團隊所設計的宇宙射線(cosmic ray)探測儀：蓋格記數器(Geiger counter)。
- 早期地面觀測顯示：宇宙射線通量 cosmic ray flux, 隨高度增加遞增
- 科學家預期在太空中，每秒可以收到約30顆宇宙射線（高能的帶正電粒子）。由於Explorer-1以橢圓軌道運行，其遠地點據地面約2550公里，其近地點距離地面約358公里，因此可以分析軌道範圍中的宇宙射線分布。
- Explorer-1觀測：每當 飛到約2000多公里的高空，就收不到任何訊號。等到Explorer-1 的回到500公里高空就收到訊號。
- 為何會如此呢？原來是500多公里上空，宇宙射線通量太高了，高出預期通量太多,導致所設計的記錄器無法觀測而歸零！
  - 為了太空人的輻射安全, 現在的太空站高度只有400多公里

# Van Allen Radiation Belt 范艾倫輻射帶的發現過程

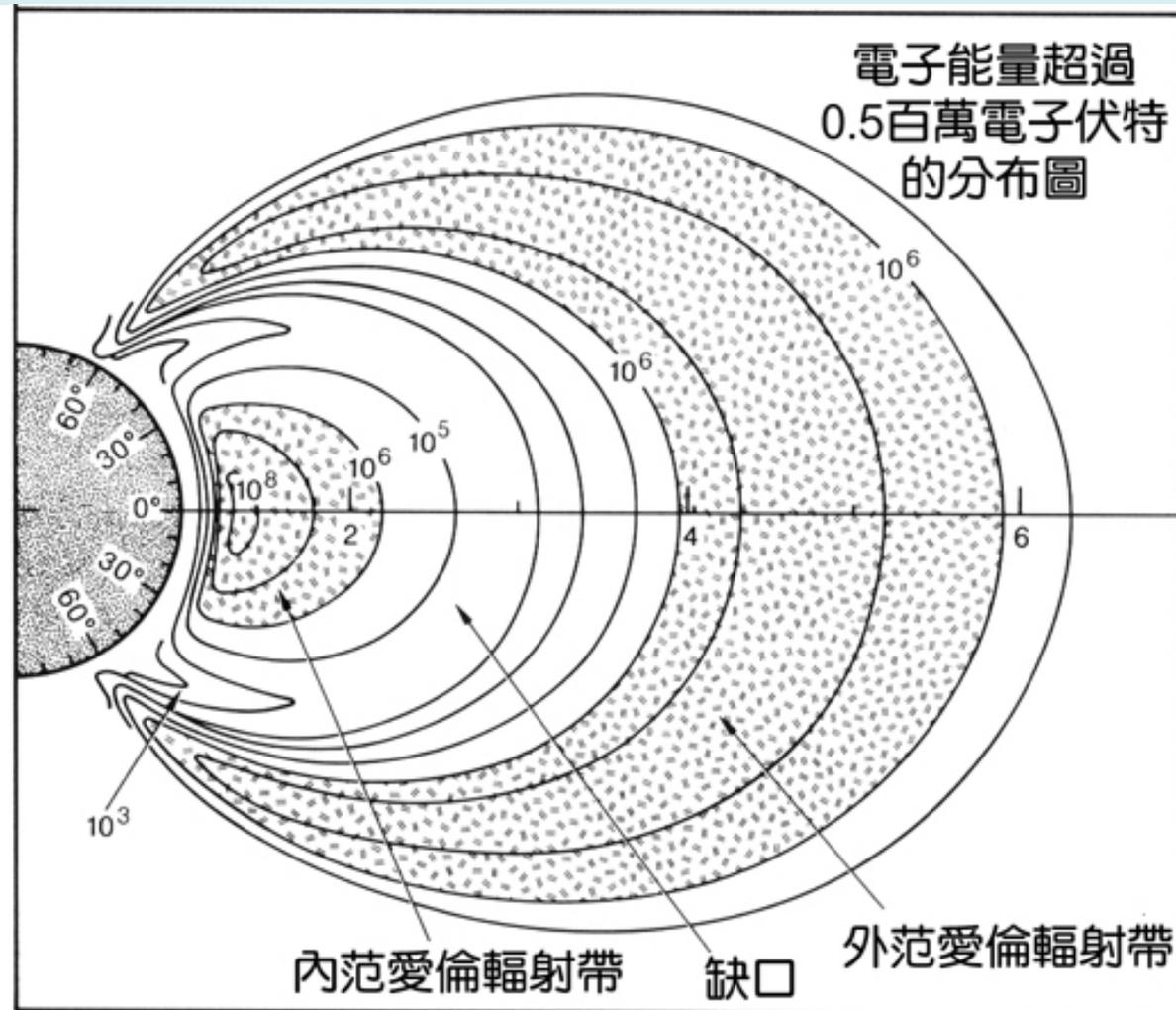
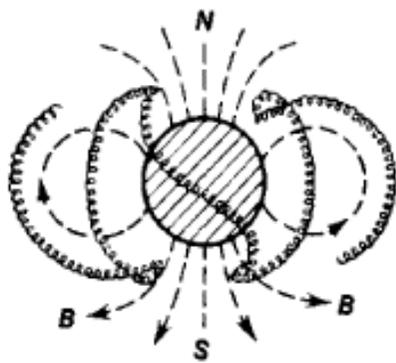
- Explorer-3 再度探測，確定了地球上空磁場線結構，可以像磁瓶一樣，抓住了高濃度的宇宙射線。這些宇宙射線可以把自己的一部份能量傳給四周的電子。這些獲得能量的電子，在磁場中以接近光速的速率快速打轉，就會放出X光，這就是范艾倫輻射帶的成因。



## 內、外范愛倫輻射帶 平均分布情形

磁副暴發生後，外范艾倫帶中的高能粒子數量以及所涵蓋的區域都會發生大幅度的改變

磁副暴發生後，外范艾倫輻射帶中的高能電子數量會大幅度增加，有時可以暫時填滿「缺口」區



## 一般中學課本上都說：是范艾倫輻射帶 中的 高能電子 造成 極光

- 磁暴發生後，范艾倫輻射帶中，「電磁擾動」與「高能電子」都會增加，這些高能電子被輻射帶中的高頻電磁波加速，可造成中緯度夜空中的“擴散極光”(diffuse aurora)，以及高緯度午夜後的散塊狀脈動極光 (patches and pulsating aurora) 。（後詳）
- 然而，范艾倫輻射帶中的高能電子「無法」解釋高緯度( $80^{\circ}\sim 60^{\circ}$ )午夜前所出現之漂亮的分立極光 (discrete aurora)，也稱做極光弧(aurora arcs)。它的外觀與運動情形很像中國的舞龍或是彩帶舞。

# 擴散極光 影片欣賞

<https://www.youtube.com/watch?NR=1&v=VnqqdG0MYTs>



讓我們來看看，除了擴散極光外，地面上  
還可以看到哪些極光呢？

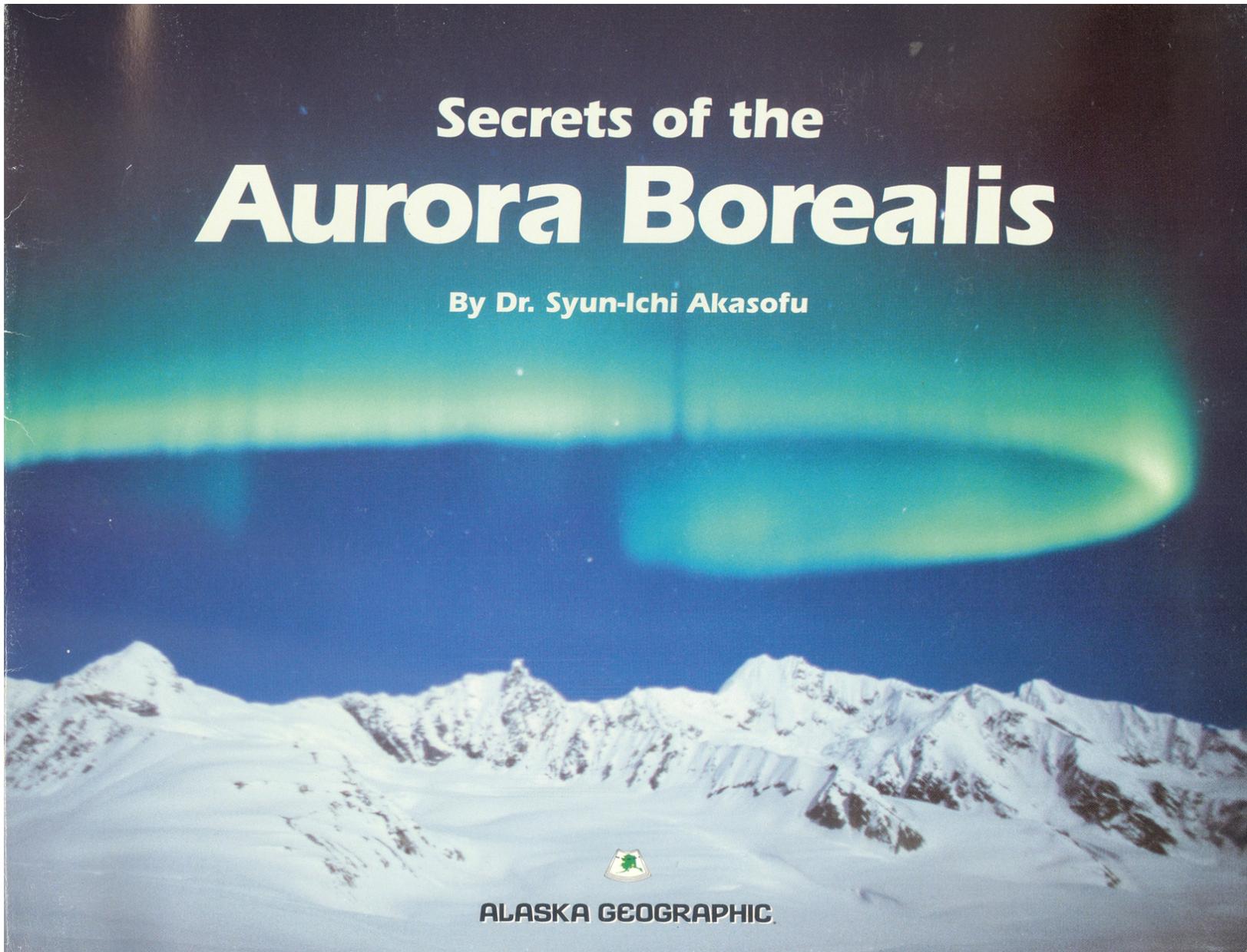
## 地面極光觀測 解說

手繪示意圖，均取材自 Akasofu 教授  
2003 著作 北極光的秘密 Secrets of the  
Aurora Borealis 一書。

(Akasofu 教授好像另外還有一版新書，The Northern  
Lights: Secrets of the Aurora Borealis，2009年出版)

# Secrets of the **Aurora Borealis**

By Dr. Syun-Ichi Akasofu



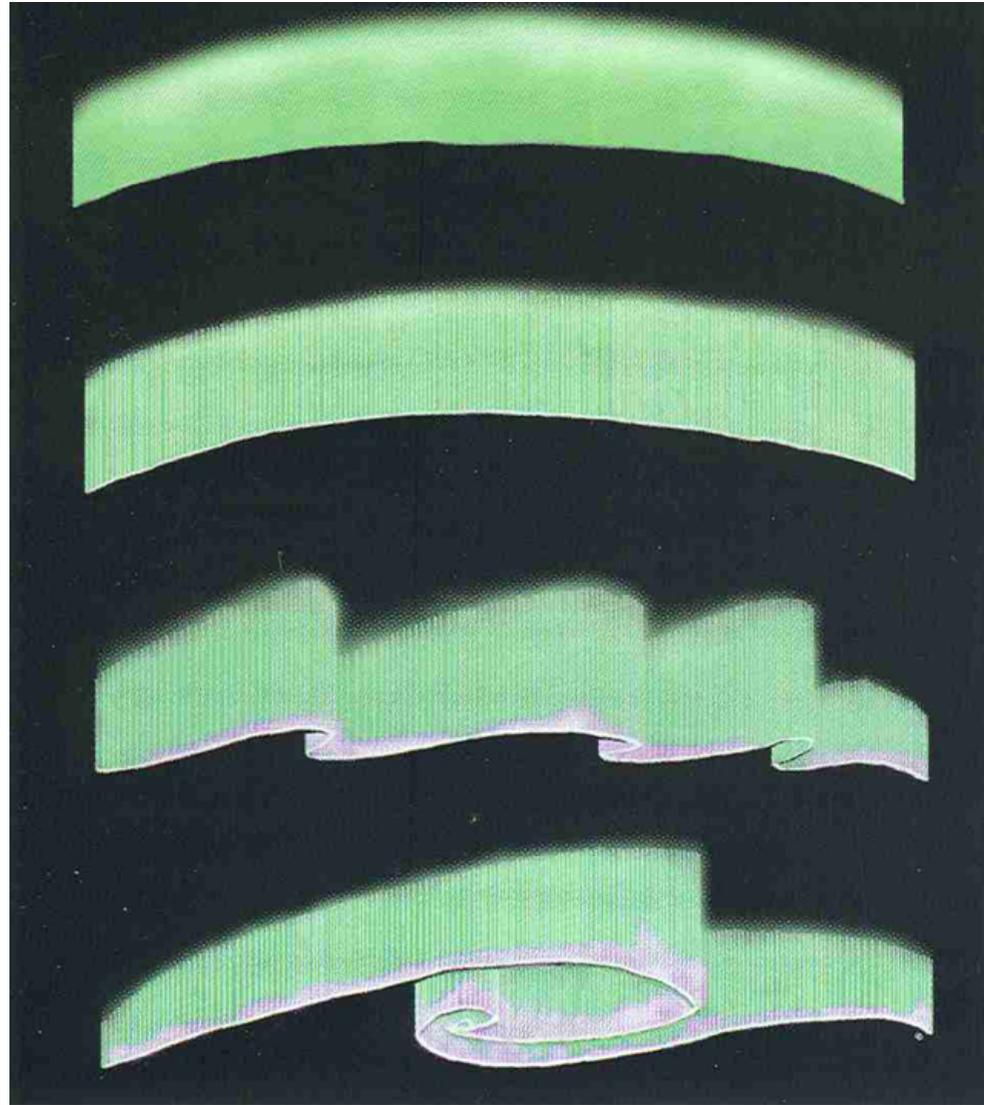
ALASKA GEOGRAPHIC

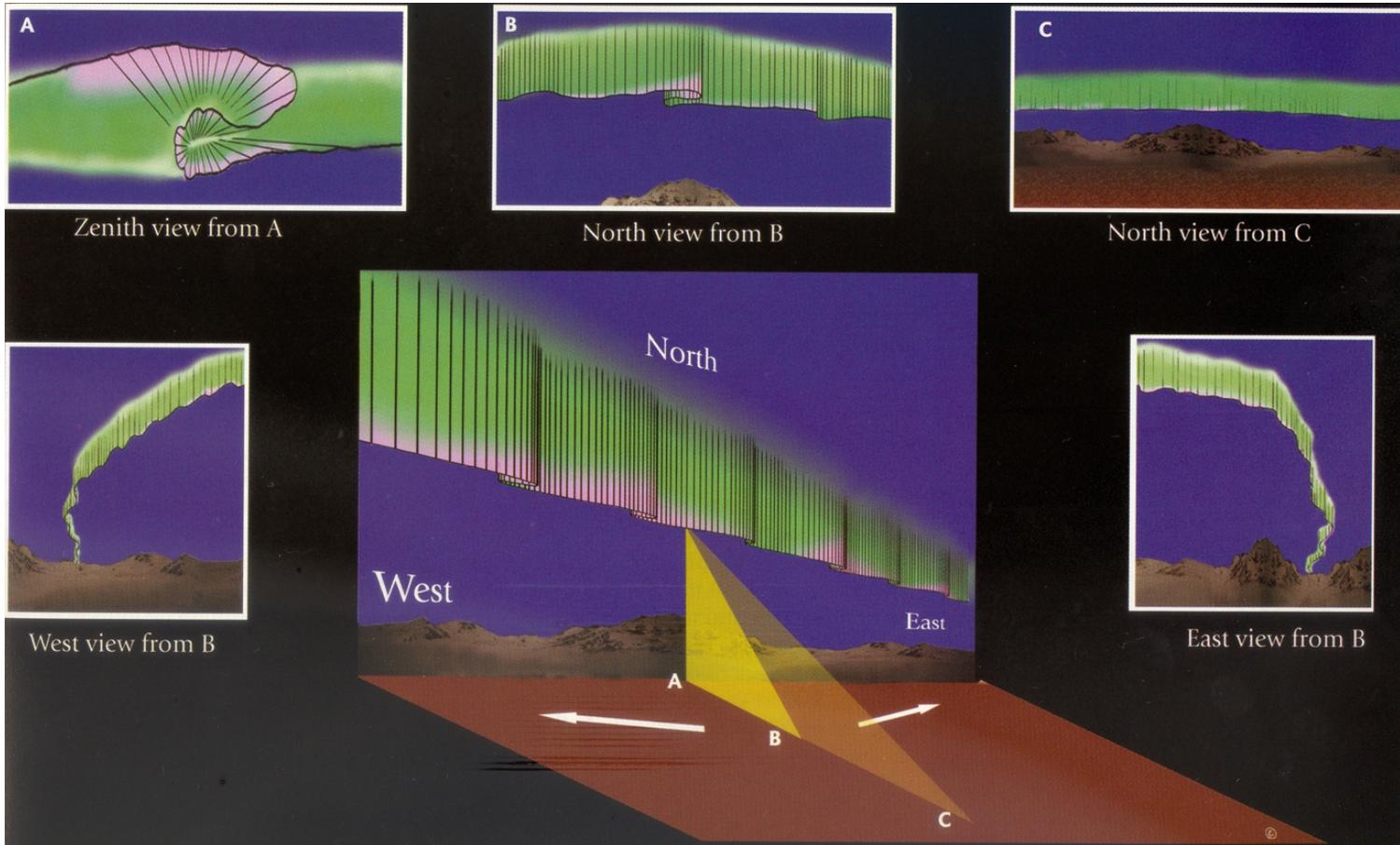
Roman goddess  
Aurora  
羅馬神話  
曙光女神



*Aurora*, the Roman goddess of dawn, identified with the Greek goddess *Eos*. This painting from an ancient Greek vase shows Homer's rosy fingered goddess borne on wings of air dispensing the dew of the morning from two large urns.

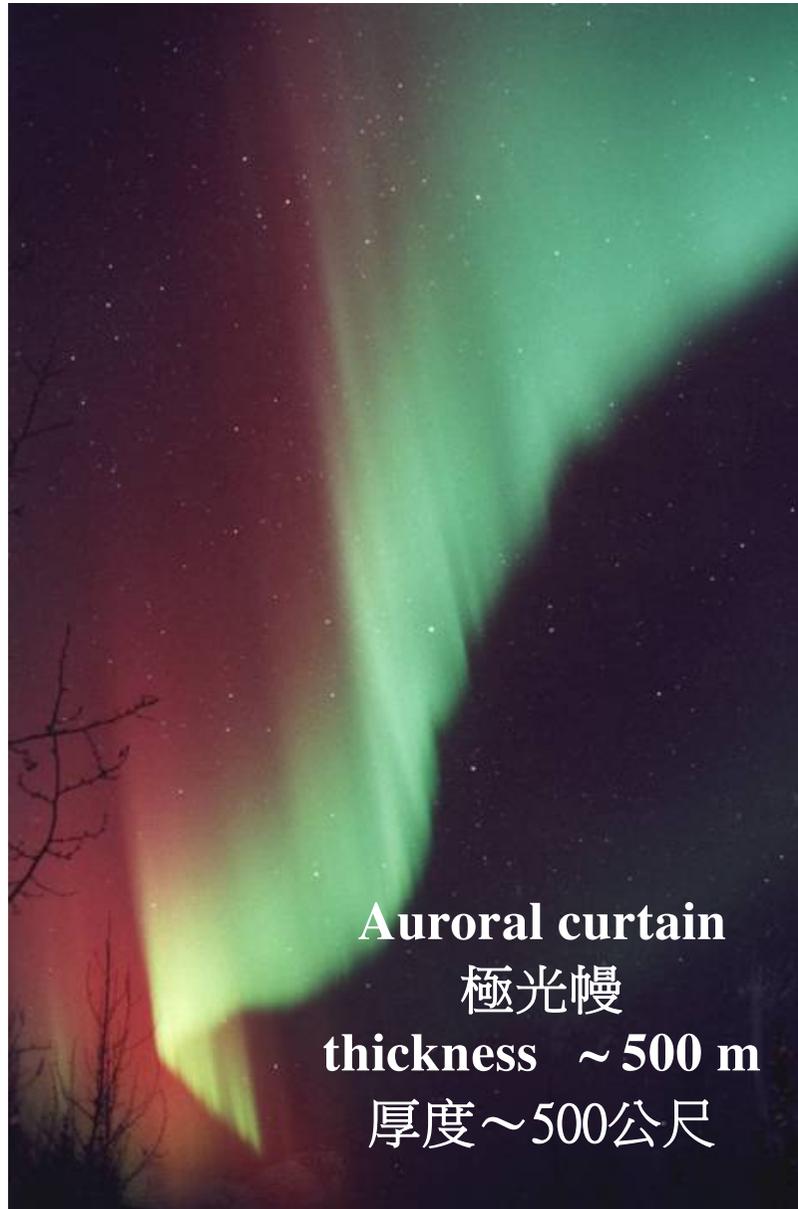
午夜前與午夜時常出現的分立極光 discrete aurora, 它的外觀與運動情形很像中國的舞龍或是彩帶舞。





# 地面觀測極光照片 解析說明

北歐、加拿大、阿拉斯加  
午夜以及午夜以前 所看到的極光，  
大多類似以下的 弧狀、布簾狀結構  
讓人聯想到古時候的 彩帶舞



**BELOW:** A triple-curtained aurora similar to Nansen's woodcut streaks the night sky. (By Takeshi and Aiko Matsuo; from S.-I. Akasofu)

**RIGHT:** In a woodcut, Fridtjof Nansen depicts himself strolling on the ice with a triple-curtained aurora overhead. (In Nansen's *Nord I Takeheimen*, 1911, courtesy of University of Oslo; from S.-I. Akasofu)

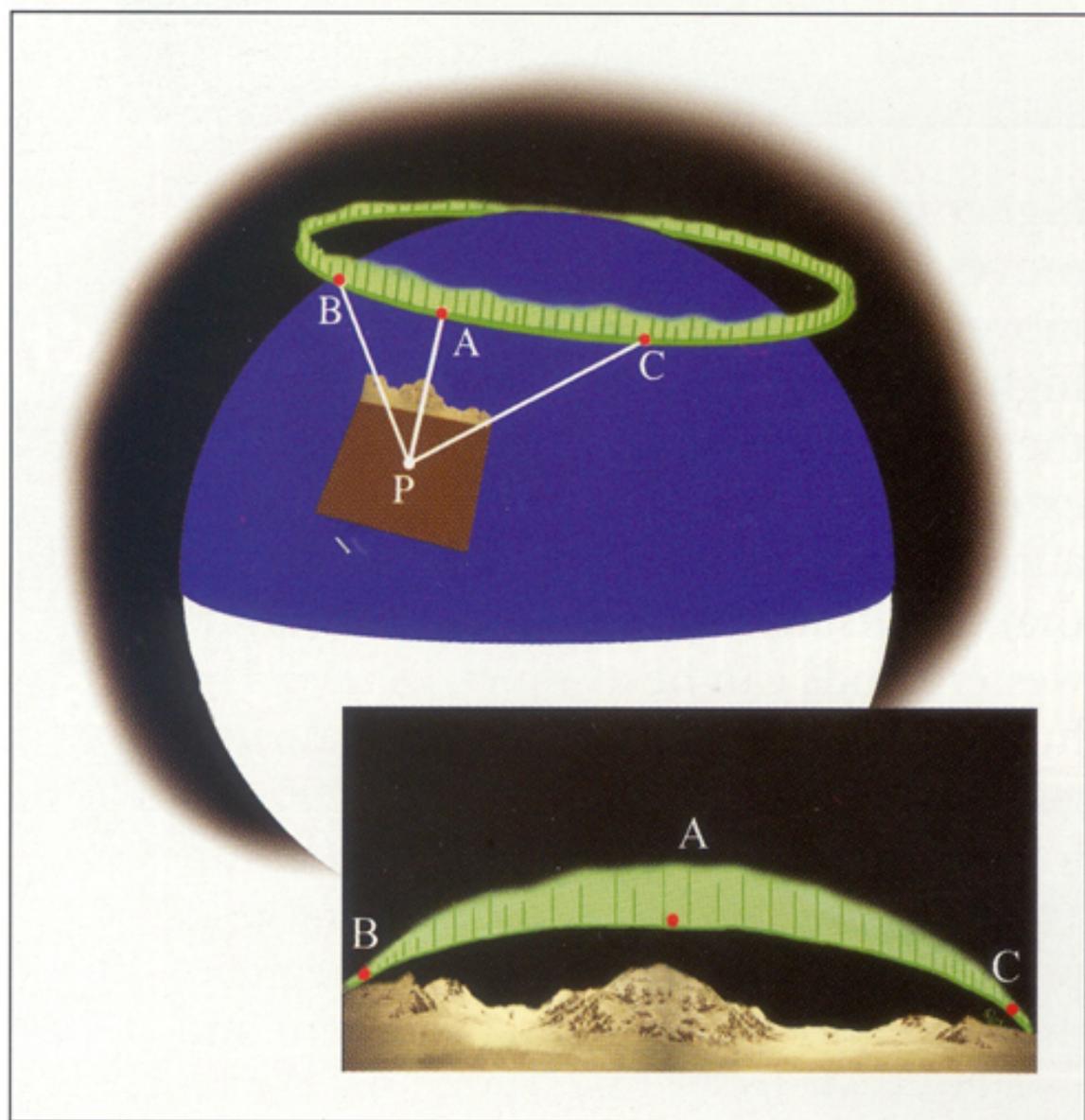






# 地面觀測極光照片 解析說明

在美國本土、英國、與歐陸地區所看到的極光。





The arc shaped aurora

H. Moltke (1899)

# 簾幕狀的極光



在沒有人造衛星的年代  
利用好幾個  
全天照相機

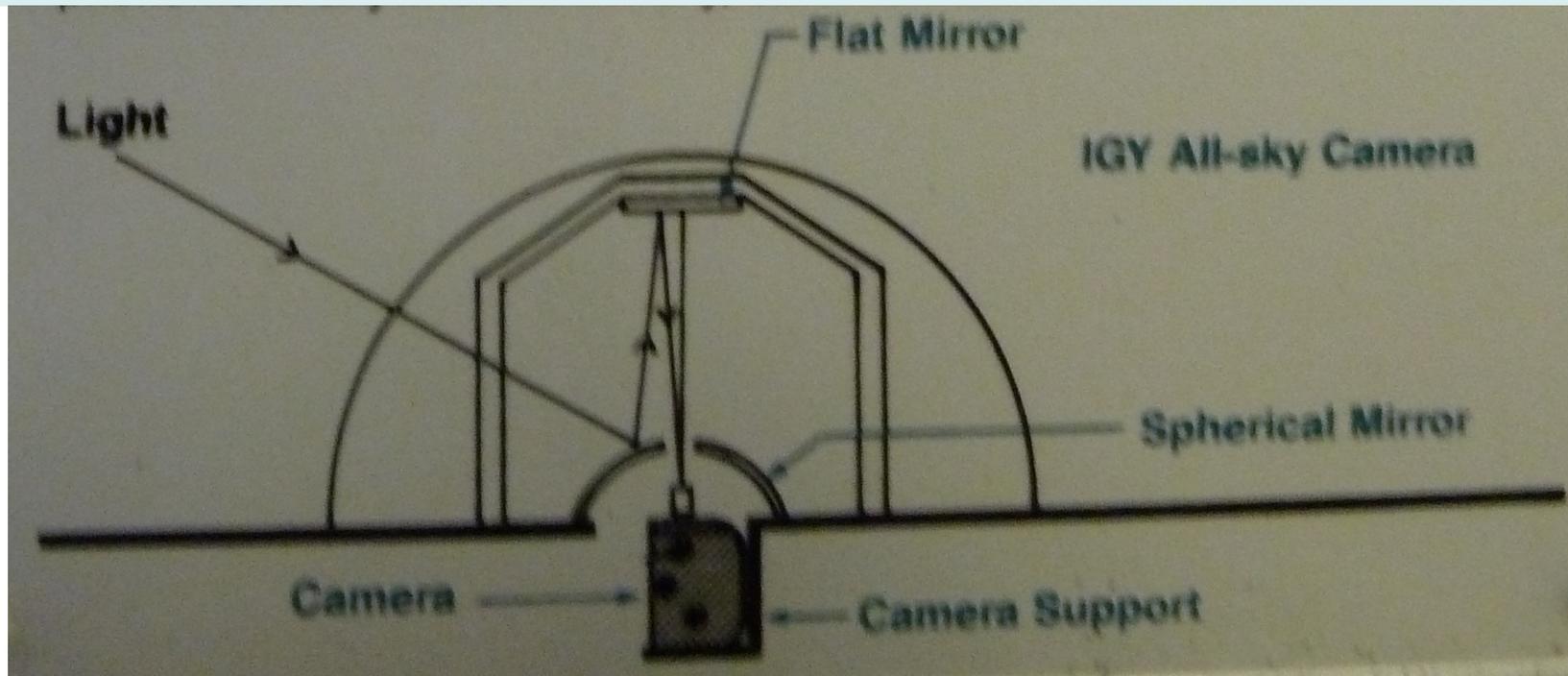
All-Sky Camera

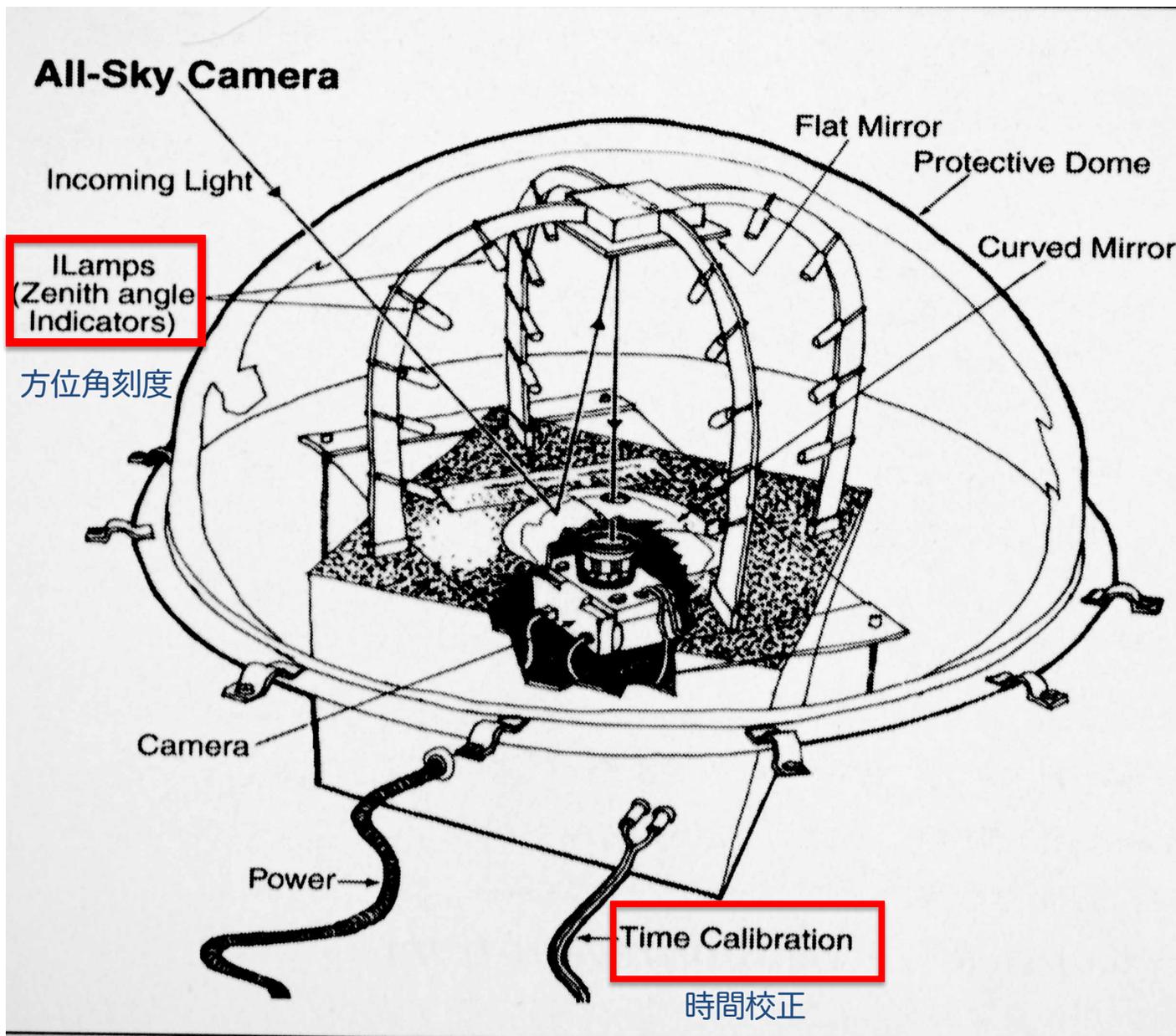
同時觀測極光，也可以拼湊出  
磁副暴時期，極光的全球分布

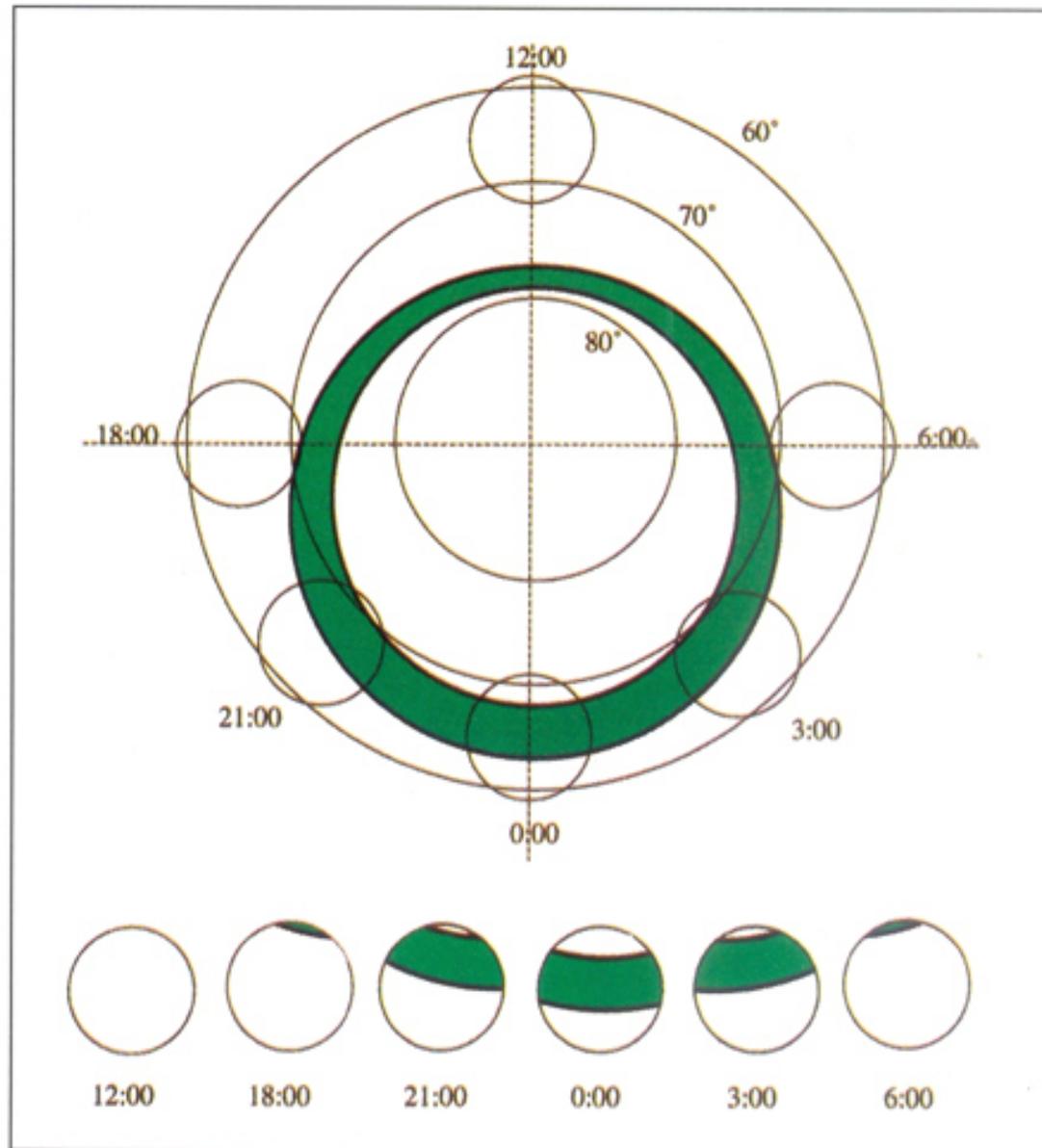
# 全天照相機 All-Sky Camera



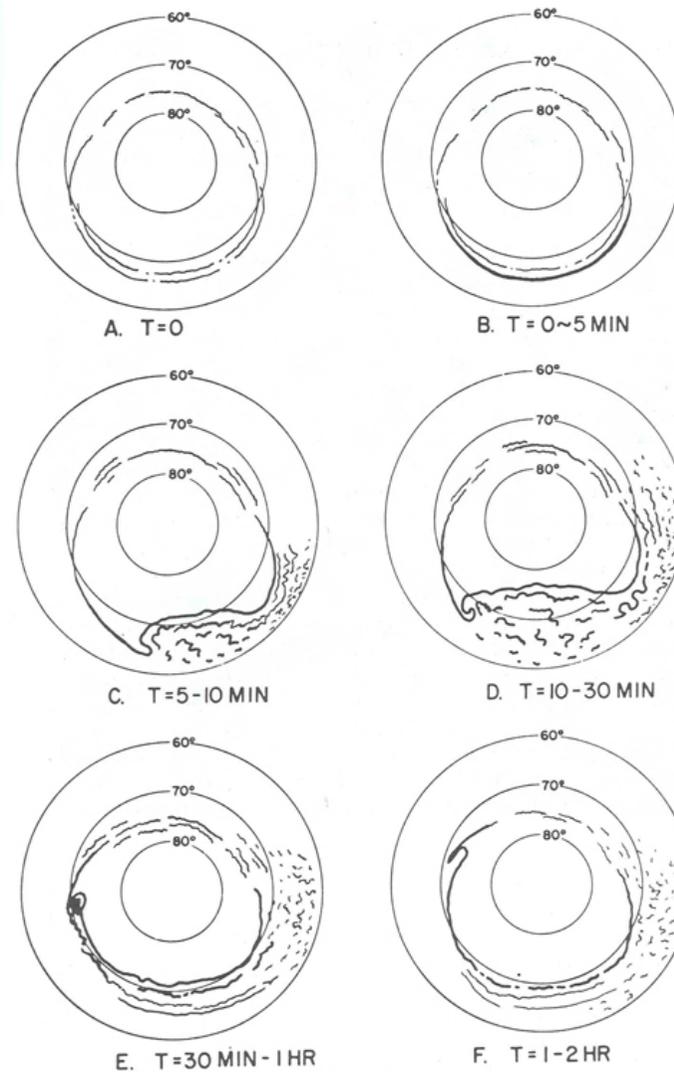
# 全天照相機 成像原理





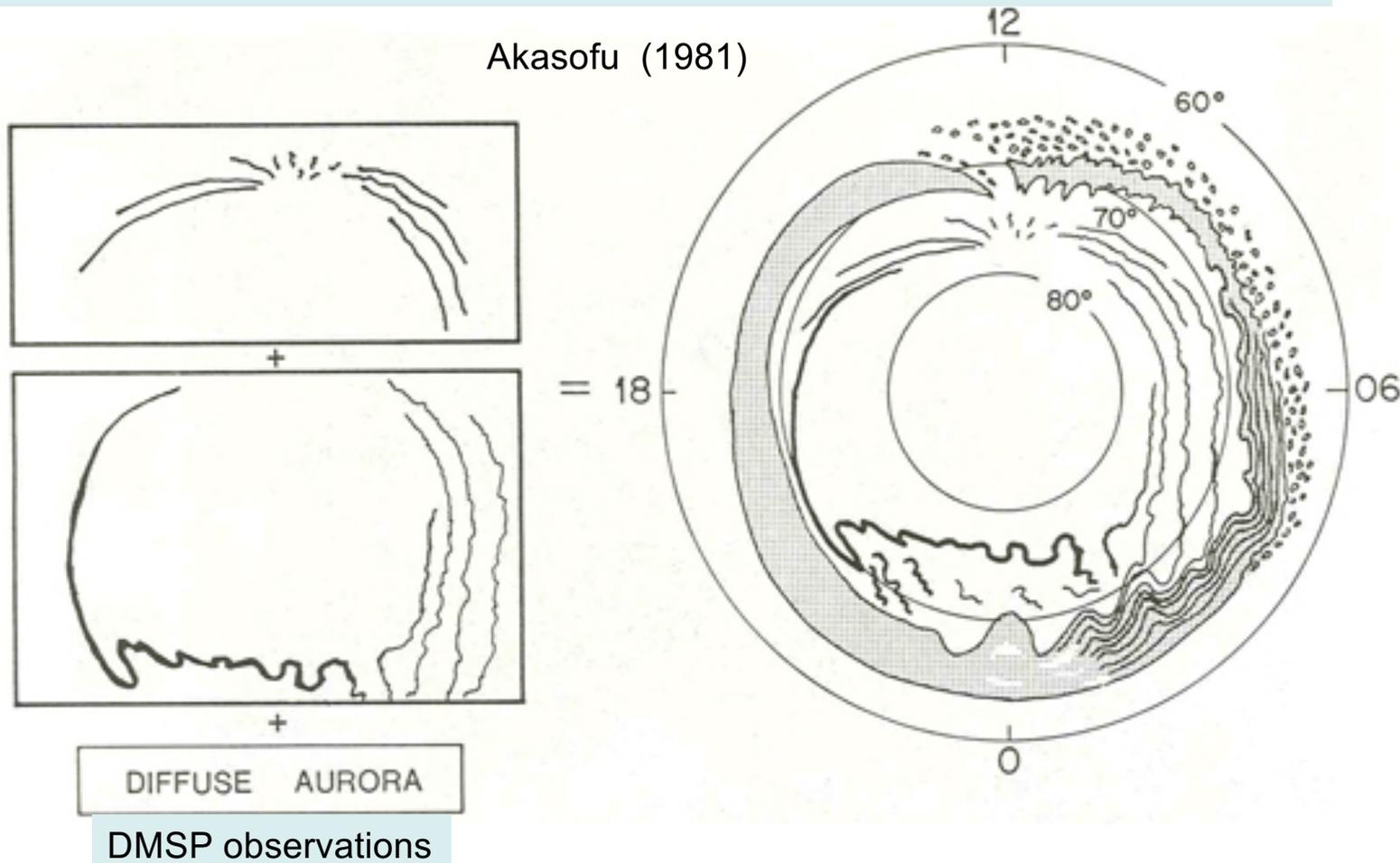


西元1960年代，  
Professor Akasofu  
根據飛機與地面的  
All-sky camera 觀測，  
找出磁副暴發生期間，  
極光的變化特徵，並用  
來定義  
「auroral substorm」

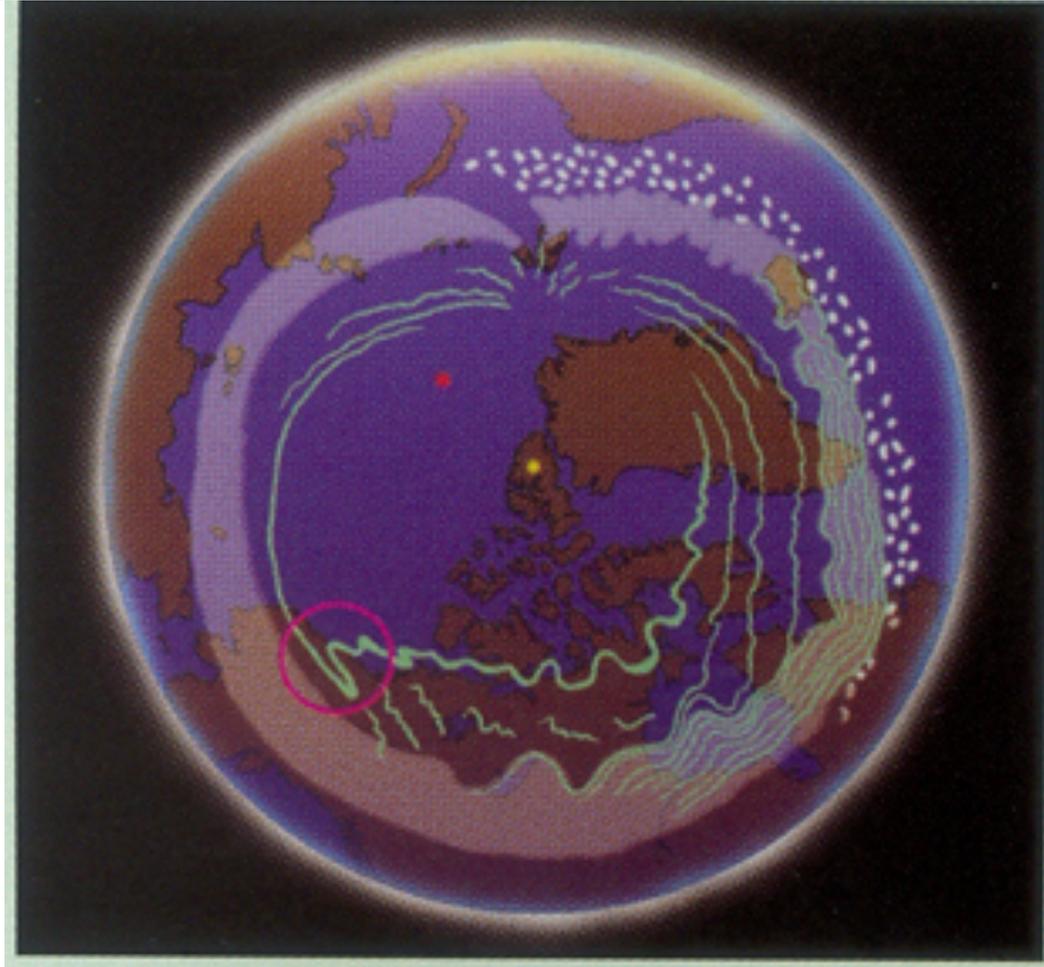


後期，Professor Akasofu 根據日側高緯極光觀測、人造衛星觀測，繪出更完整的極光分佈圖。

Akasofu (1981)



Evening Sector: **The Westward Traveling Surge**  
午夜前，如果發生磁副暴，可以看到 **舞龍與龍頭**





# 像舞龍般的 極光 影片欣賞

- 影片由 阿拉斯加大學費班克分校(UAF) Akasofu 教授提供，僅此致謝。
- 影片拍攝年代為1980s年代。西元2000年後，再經過數位轉錄而成。
- Substorm Aurora movie  
– by GI-UAF Research team in 1980s

## 早期極光影片- 青龍飛舞

[http://www.ss.ncu.edu.tw/~lyu/lecture\\_files\\_en/Lyu\\_Aurora/movie/swirl2.mov](http://www.ss.ncu.edu.tw/~lyu/lecture_files_en/Lyu_Aurora/movie/swirl2.mov)



<https://www.youtube.com/watch?v=cwWxgZlJe-4>

Meeting the Auroras - Real time video of the northern lights (2014)  
(午夜或午夜後極光，真實速度)

<https://www.youtube.com/watch?v=dYRuBwmv8Ac>

Model S meets Aurora (Realtime video)(October, 9th 2015)  
(青龍極光，午夜前極光，磁副暴極光，真實速度)

[https://www.youtube.com/watch?v=4SvDez\\_pyc](https://www.youtube.com/watch?v=4SvDez_pyc)

Aurora Kattfjordeide [Realtime HD Video](January, 3rd 2016)  
(午夜或午夜後極光，真實速度)

<https://www.youtube.com/watch?v=HJSFft03Rec>

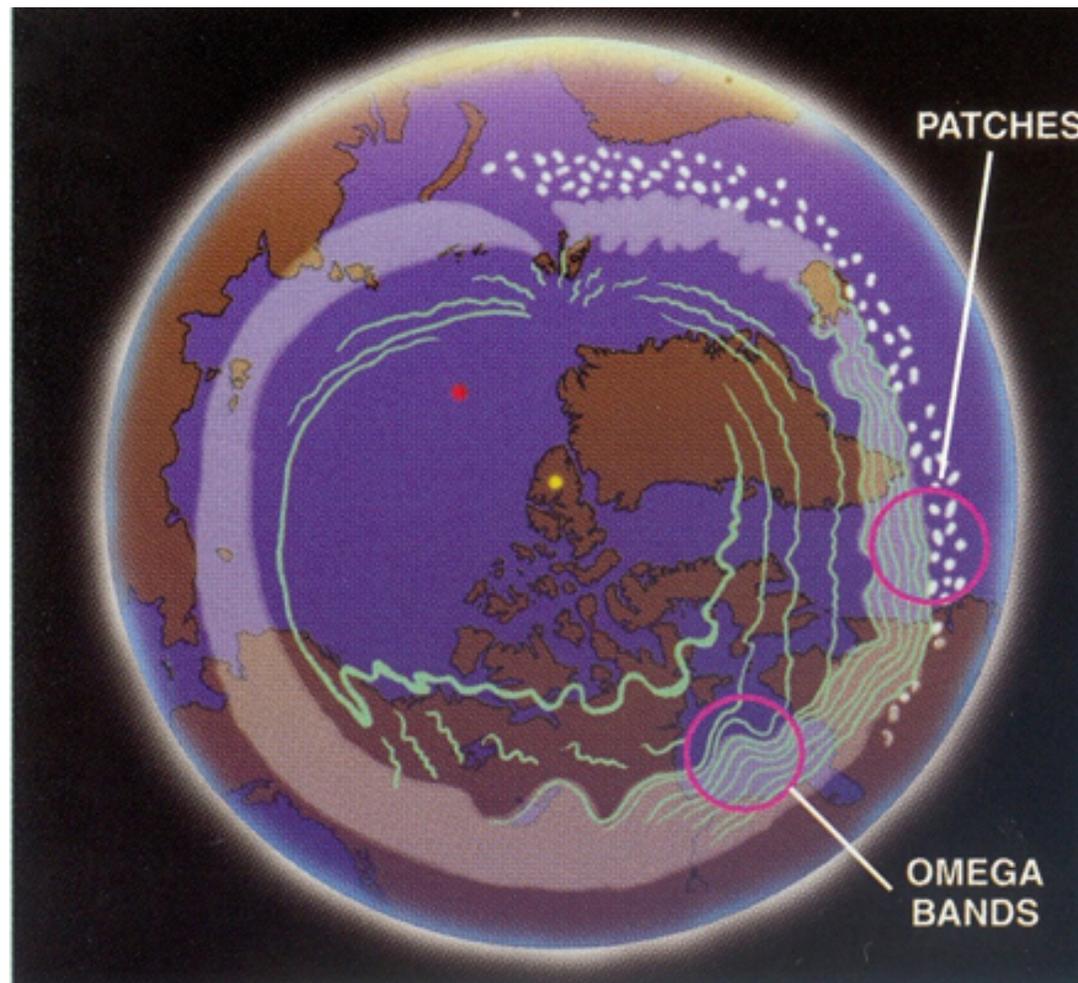
Real Time Aurora Video from Feb 7th 2019  
(青龍極光，午夜或午夜前極光，多弧極光、磁副暴極光，真實速度)

<https://www.youtube.com/watch?v=qOjXuKJ8OHo>

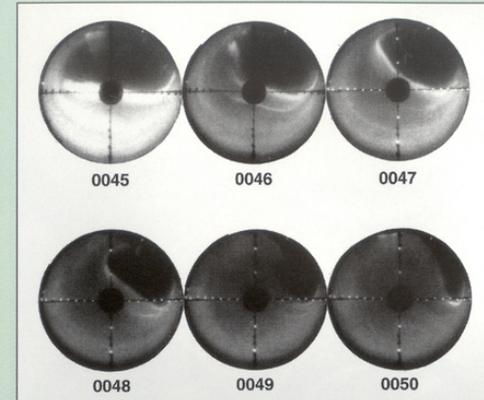
Сияние над Кировском - живое видео. 17.12.2015  
(青龍極光，午夜前極光，磁副暴極光，真實速度)

Morning Sector: **The Eastward drift** Omega Bands, Torches, Black  
Aurora, and Patches

磁副暴發生時，午夜後看到的極光更是千變萬化（可是我都回房睡覺去了！）

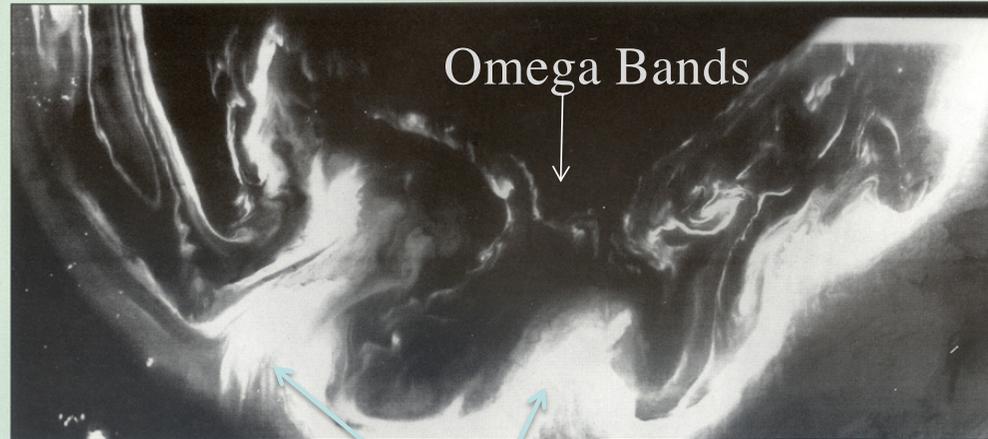
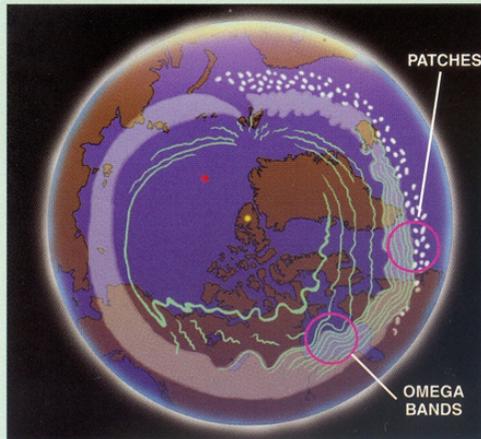


# 午夜後的 Omega-band Aurora



▼ FROM S.-I. AKASOFU; ▲ JACK FINCH

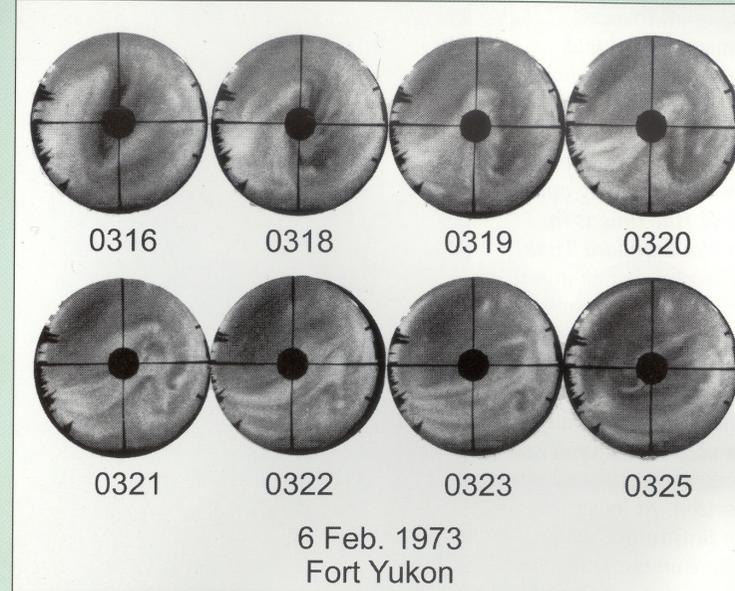
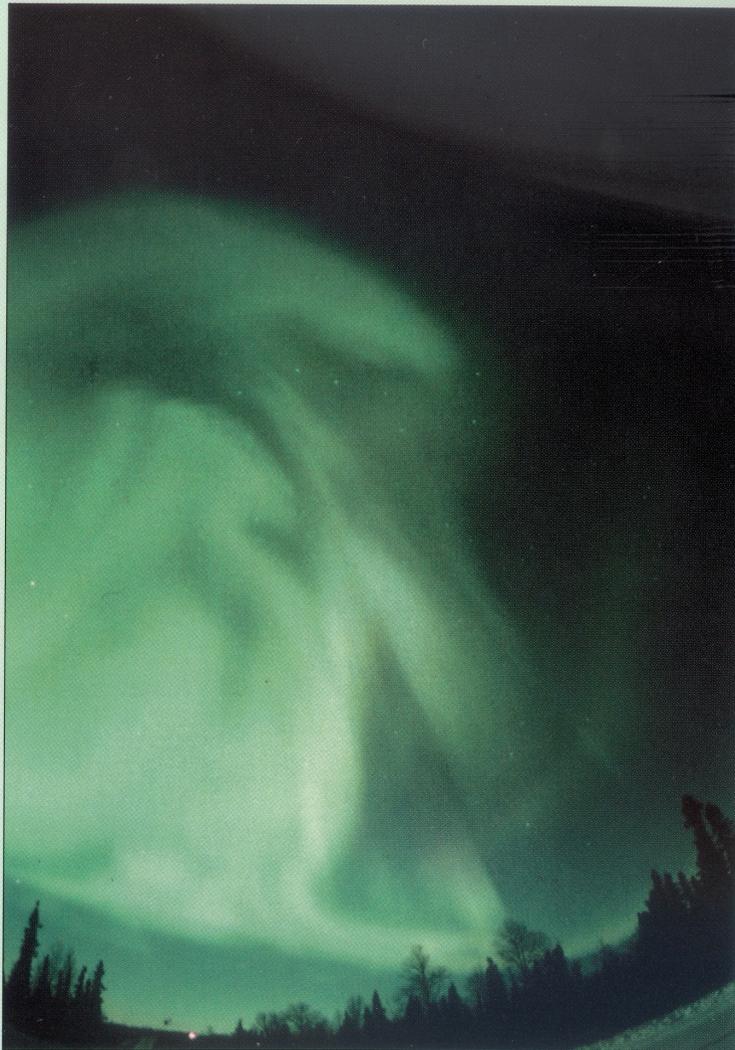
▼ COURTESY OF DEFENSE METEOROLOGICAL SATELLITE PROGRAM; ▲ COURTESY OF GEOPHYSICAL INSTITUTE, UAF



# 午夜後火炬狀擴散極光中還有一絲絲的暗極光

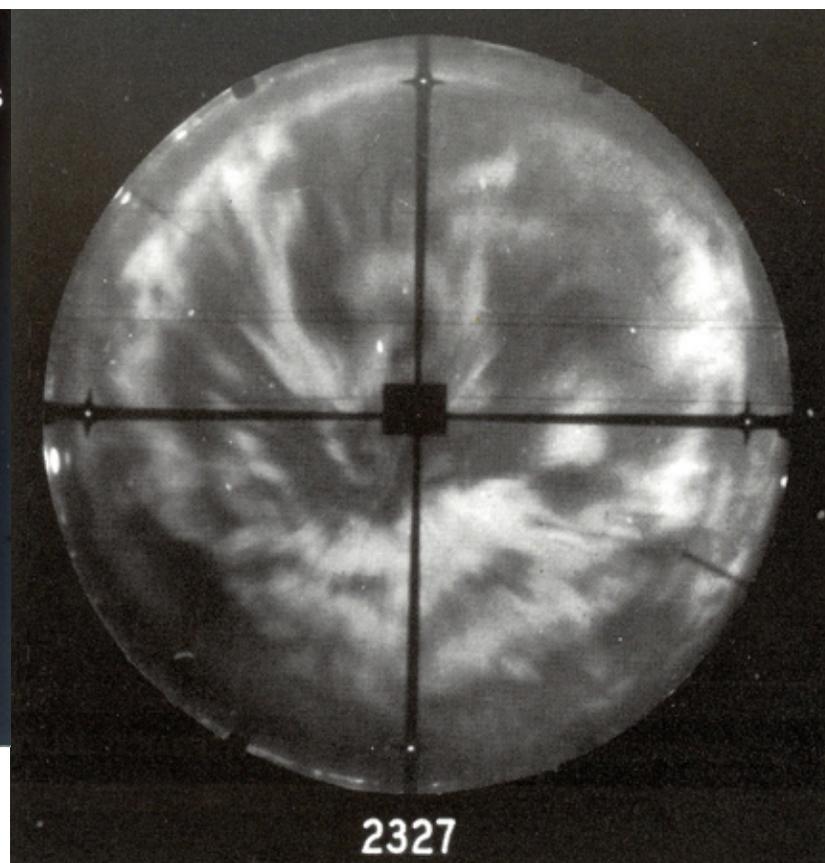
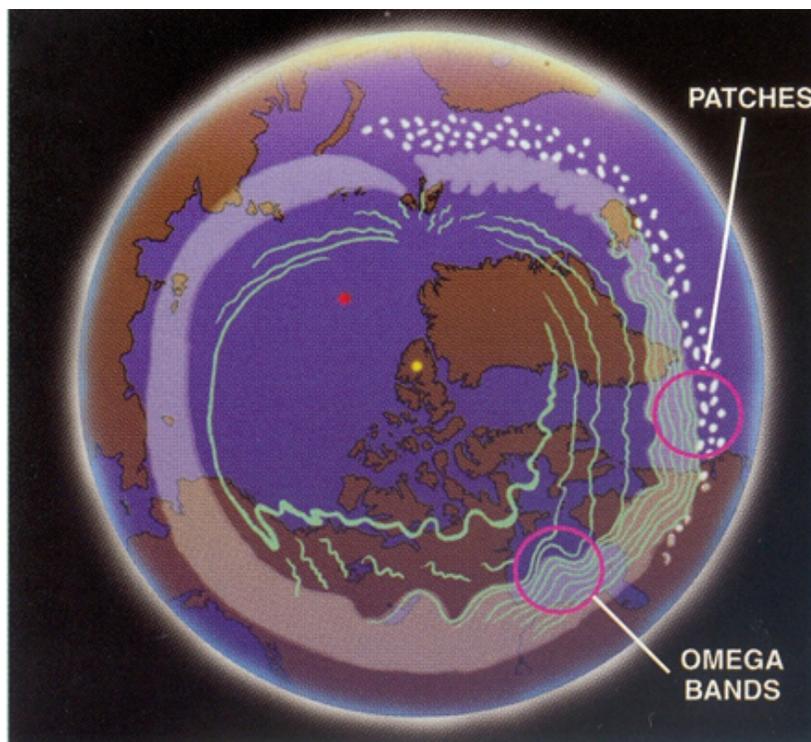
## Torches & Black Aurora

◀ JACK FINCH; ▼ COURTESY OF GEOPHYSICAL INSTITUTE, UAF



*In the morning sky, the aurora often shows a form called the torch (left); it develops from a diffuse glow located a little southward of the curtainlike aurora (see the lower right image on page 84). A series of all-sky photographs, above, shows the torch structure as it drifted eastward (the time is in Alaska Standard Time).*

# 黎明前的 Patches & Pulsating Aurora 散塊 & 脈動 極光



# Omega-band Aurora & Pulsating Aurora

<https://www.youtube.com/watch?v=tuXrhDo59XM>

Полярное сияние (Aurora Borealis) 01.09.2014  
(接近真實速度 0:30 後有 Pulsating Aurora )

[https://www.youtube.com/watch?v=\\_qWKLobBmPA](https://www.youtube.com/watch?v=_qWKLobBmPA)

Полярное сияние 2012 (Aurora Borealis 2012) (January 25, 2012)  
Omega-band Aurora 4:10-6:20?  
Pulsating Aurora 6:20-7:30 (接近真實速度 )

<https://www.youtube.com/watch?v=gckPQZp6F50>

Полярное сияние 2012 (Aurora Borealis 2012 - 2) (February 28, 2012)  
Omega-band Aurora (慢拍快放 接近真實速度 )

# Pulsating Aurora 脈動 極光

Sky and Telescope 也有很多精彩的極光照片與影片連結

Pulsating Aurora — 22 March 2015

<https://www.snexplores.org/article/explainer-auroras-northern-lights-sky>

找到Pulsating Aurora 的影片觀看

或直接點選以下連結

[https://player.vimeo.com/video/128714112?h=1ed160ba6d&dnt=1&app\\_id=122963](https://player.vimeo.com/video/128714112?h=1ed160ba6d&dnt=1&app_id=122963)

by Stephane Vetter

2014 Fall Omega-Band Aurora 04:25

2014-09-13

[https://www.youtube.com/watch?v=v9\\_V5ZCuoF4](https://www.youtube.com/watch?v=v9_V5ZCuoF4)

*Полярное сияние*

*Aurora Borealis*

*13/09/2014*