

幾十年以來，科學家多次派遣探測器前往觀測木星，但有關木星磁場的來源仍有許多尚未解開的謎團，NASA希望朱諾號（Juno spacecraft）在探索木星的過程中，能將這些謎團一一解開。本期的天文教室將跟隨朱諾號的腳步，了解科學家對於木星磁場的新發現。

文/周毅桓

# 朱諾號木星探測任務 木星磁場與極光

圖片來源：NASA/JPL-Caltech

## 木星磁場

### 發出強烈的無線電波

在朱諾號抵達木星之前，科學家們就已經知道木星具有全太陽系最強大的行星磁場，木星磁場最明顯的特徵是會發出強烈的無線電波，在木星的兩極和地球一樣會產生極光（圖1），而科學家最初認為，木星磁場是來自木星內部的一層液態金屬氫（metallic hydrogen）以發電機（dynamo）效應而產生。

當太陽風（圖2）衝擊木星磁場時，一部份太陽風中高速的帶電粒子會掉進木星的磁層（magnetosphere）中，被木星磁場所束縛，並在無線電波段發出迴旋輻射（Cyclotron Radiation）。迴旋輻射是電子在轉彎時發出的電磁輻射。

木星磁場發出的無線電波大約在10MHz至40MHz，只有在磁場中最靠近木星赤道的深處才能夠發現100MHz以上的無線電波。

由於木衛一艾歐的火山活動非常活躍，艾歐會不斷噴發硫離子與氧離子等帶電粒子，散佈到艾歐繞木星公轉的軌道中，這些帶電粒子會被木星磁場所吸引，並撞上木星兩極的大氣產生極光。

而艾歐繞木星公轉的軌道由於位在木星磁場中，於是當艾歐穿過木星磁場時產生感應電流，這道感應電流會加強木星所發出的無線電波（圖3）。這是科學家們在朱諾號探測之前就已經知道的。



圖1. 木星的磁場，圖片中木星赤道的兩側，發光的區域，即是木星發出強烈無線電波的地方。圖片來源：NASA/JPL

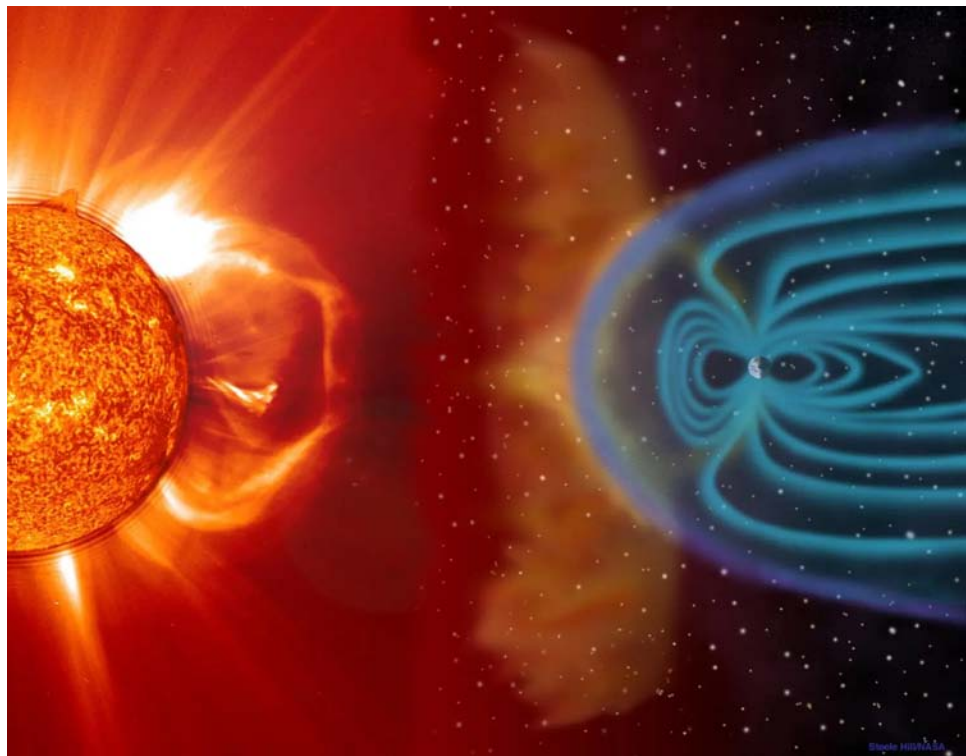


圖2. 太陽風是由太陽發出的高速帶電粒子如電子、質子、 $\alpha$ 粒子等所組成，這些帶電粒子無時無刻會以秒速450公里的高速衝擊行星的磁場。圖片來源：NASA/ESA/SOHO

### 木星磁場模型 揭露木星內部的構造

在2016年抵達木星，並完成預定的33次飛掠後。朱諾號首次進入木星的電波輻射帶中心，其

觀測結果使木星內部構造模型必須做部分的修正。首先，原先科學家們認為，木星磁場可能源自於表面下大約7,000公里左右，大約是0.9個木星半徑的位置。科學家根據朱諾號觀測資料修正後的模型，看到大約在0.8個木星半徑

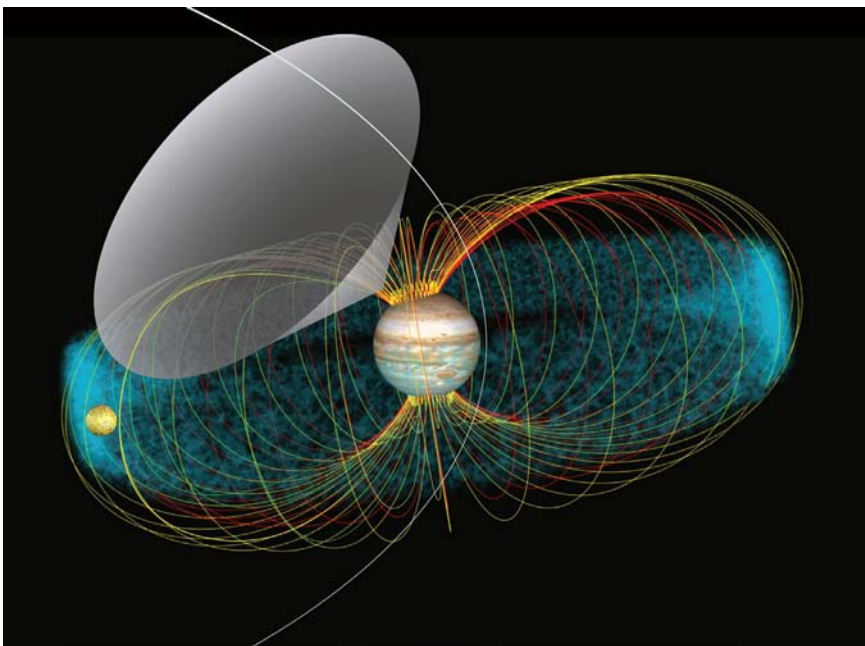
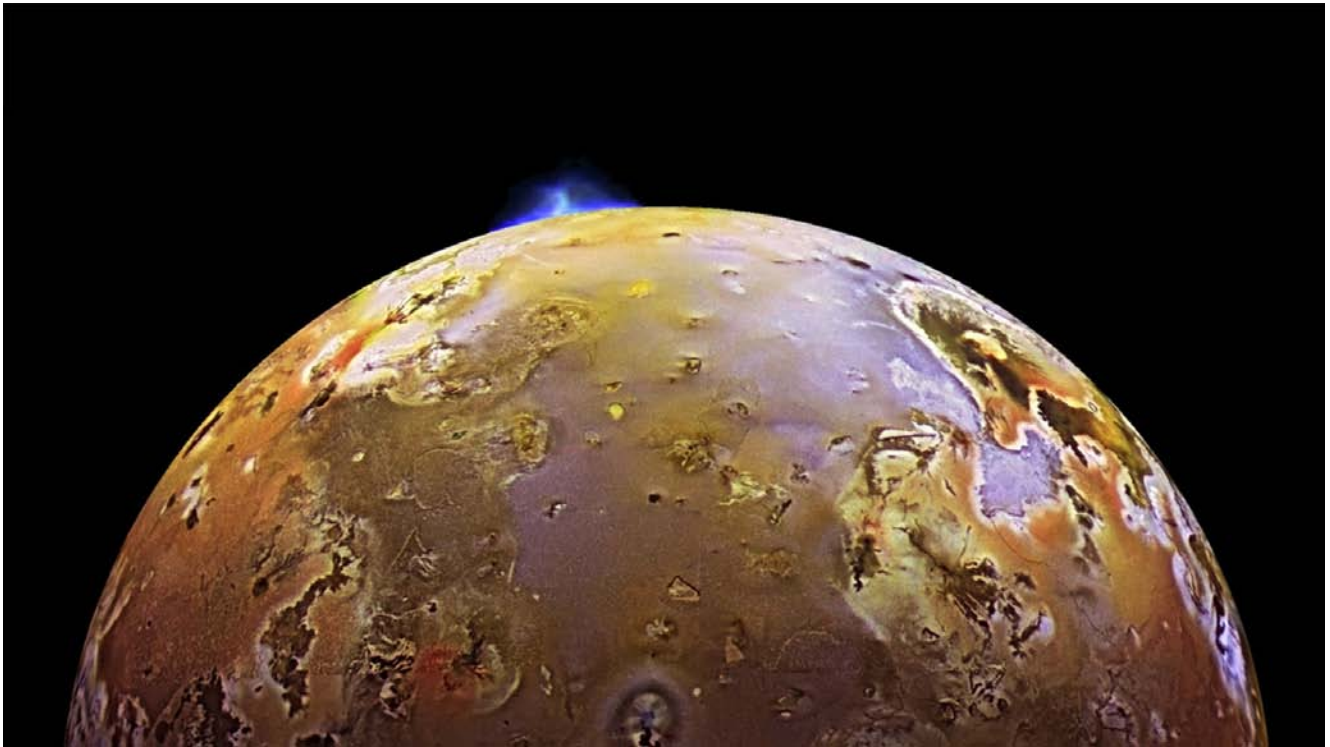


圖3. 木衛一艾歐的火山活動，艾歐會不斷的噴發硫離子，散佈到艾歐的軌道中，如左圖中藍綠色的部分。艾歐所引發的無線電波將沿著灰色錐形區域向外發送。圖片來源：NASA's Goddard Space Flight Center（上圖），NASA/GSFC/Jay Friedlander（左圖）

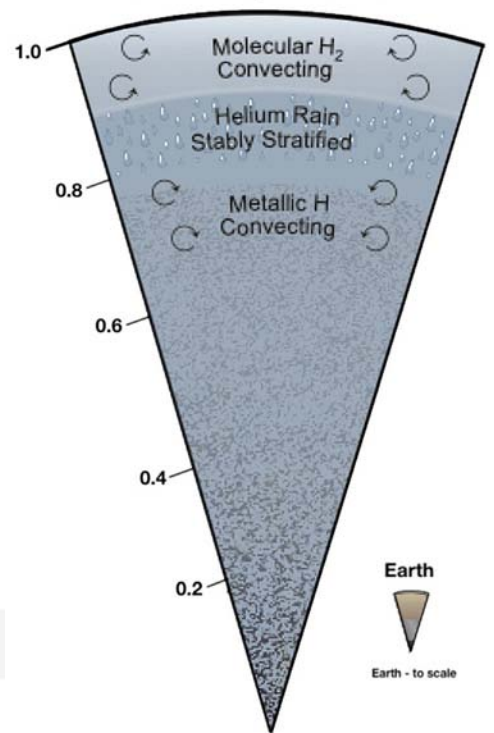
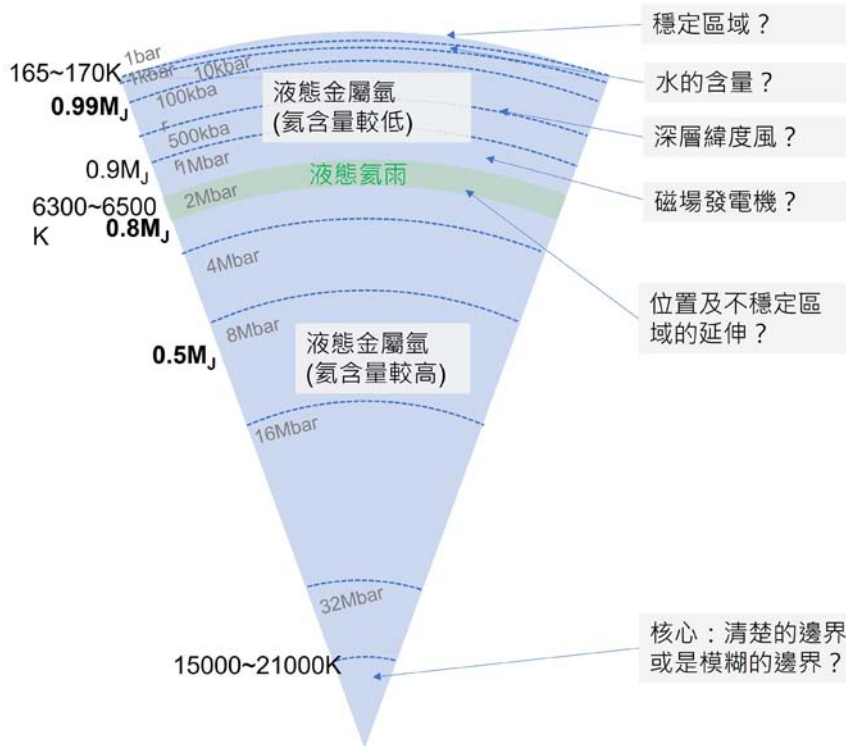
以下有一層對流的液態金屬氫。朱諾號發現，木星的磁場正是在這層液態金屬氫的下方產生。在其上方則下起了液態氦的雨（helium rain），穩定了液態金屬氫的對流，使木星磁場能持續產生。（圖4）

朱諾號還發現在木星赤道南邊，有一處磁場強度特別高的區

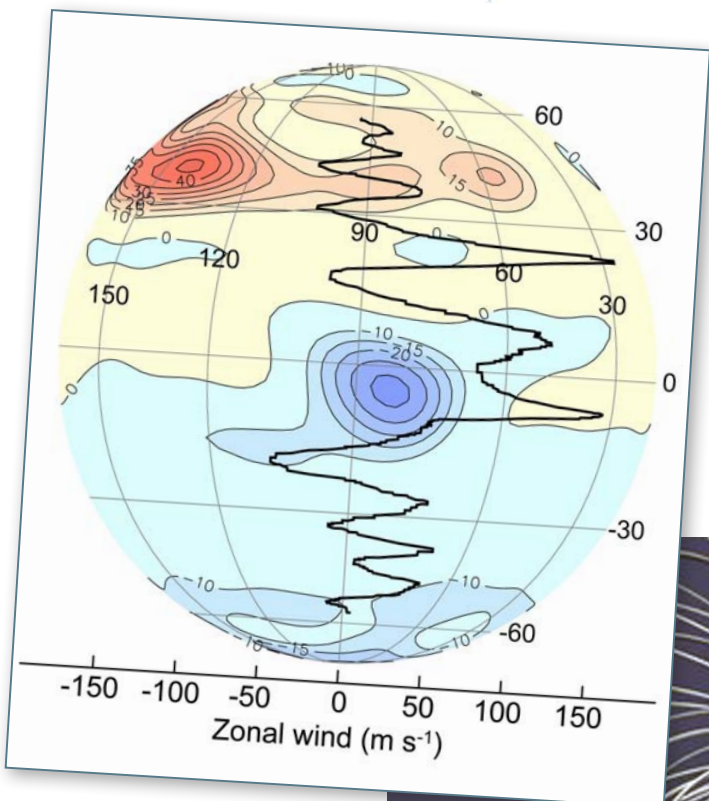
域，科學家稱這個區域為「大藍斑（Great Blue Spot）」。朱諾號在北側及南側發現了水平的風切。科學家認為這可能代表在這個區域的深處，木星磁場和大氣有交互作用，因此相互關連。在朱諾號詳細測量木星磁場強度後發現，木星磁場分佈南北並不對稱，且為非偶極（non-dipole）分佈，使發電機效應產生木星磁場

的模型受到嚴峻的挑戰（圖5）。

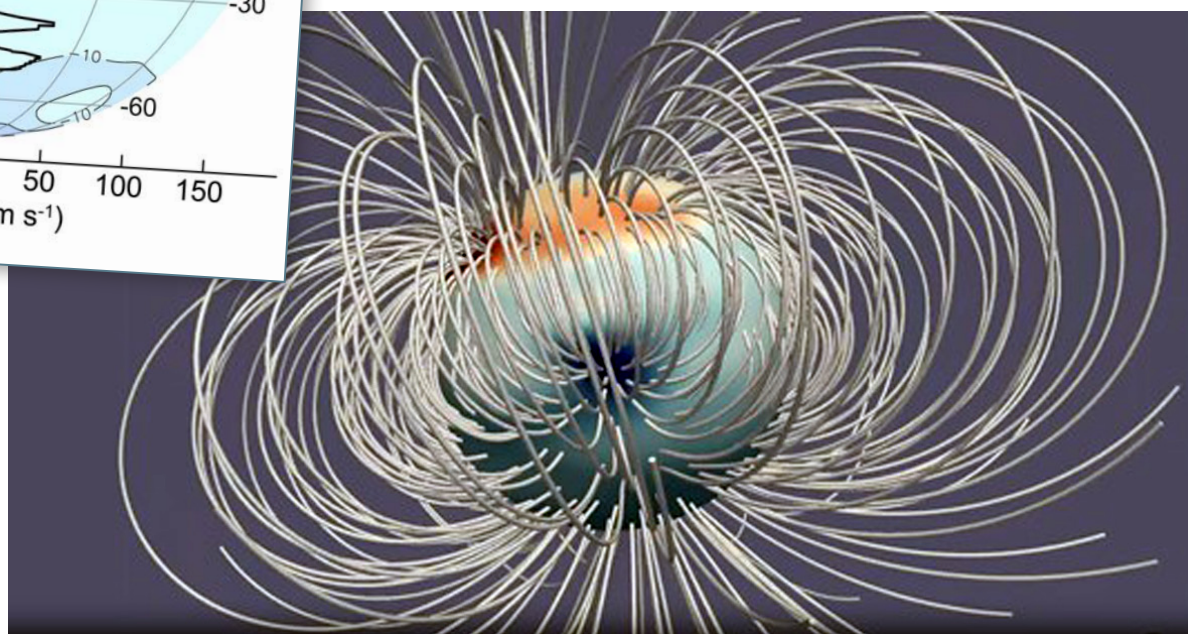
在原本的發電機模型中，一整層的液態金屬氫做為導體（液態金屬氫是當液態氫受到木星強大重力緊密壓縮，使電子能夠在氫原子間移動，產生類似導體的性質。），在木星每10小時自轉一圈的高速旋轉中，產生了感應磁場，成為木星的磁場，這樣子



↑圖4. 木星內部構造模型。左圖是在朱諾號抵達木星前科學家們推測的模型，右圖是科學家依據朱諾號的觀測資料修正的模型。圖片來源：Tristan Guillot, *The Interior of Jupiter*, 2004 (左圖)，J.E.P., Connerney et al., (2022), NASA (右圖)



←↓圖5. 朱諾號發現木星有一處「大藍斑」，是磁場強度特別高的區域。這個大藍斑肉眼不可見，和木星的大紅斑不在同一個位置上。另外從上、下圖的磁場強度分佈來看，可以發現木星的磁場並不是對稱分佈。圖片來源：NASA/JPL-Caltech/SwRI/John E. Connerney (左圖)，NASA/JPL-Caltech/Harvard/Moore Et Al. (下圖)



產生的行星磁場將會以磁場的中心軸產生對稱的偶極（dipole）結構。但朱諾號測量到木星的磁場為非對稱且非偶極的結構，因此科學家們認為木星磁場來源遠比既有模型複雜。這個謎團仍等科學家們進一步的研究解開。

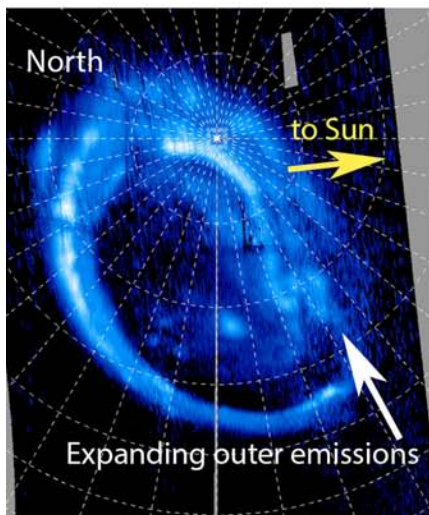
### 發現木星極光中的新特徵

此外，朱諾號也在木星極光中發現了一些新的特徵。朱諾號先拍攝到極光中，有高能帶電粒子大規模朝木星移動，4個小時後，在木星的午夜拍攝到這圈極光出現突出的結構，科學家們猜測可能是木星磁層高能帶電粒子朝木星北極降落的軌跡。而衛星艾歐火山活動所產生

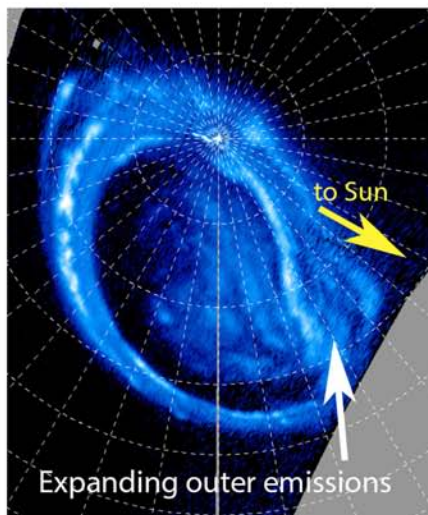


圖6. 右圖為哈伯太空望遠鏡在2016年於紫外光波段拍攝到木星的極光。下圖為朱諾號拍攝到木星極光中，高能帶電粒子大規模的移動，與木星夜間極光出現的突出特徵。左側兩條帶狀則為艾歐的足跡。圖片來源：NASA, ESA, and J. Nichols (University of Leicester) (上圖)，Bonfond et al. (2017) Geophys. Res. Lett. (下圖)

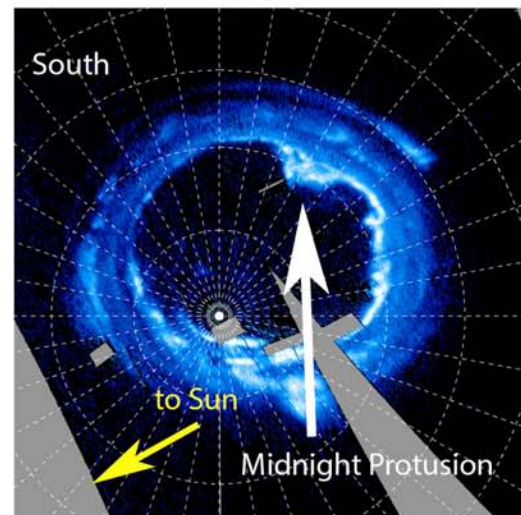
10:00



11:00



14:00



的硫離子等帶電粒子，則被拍攝到分離成兩道尾巴離開木星，就像是衛星艾歐的足跡被印在畫面上一樣。(圖6)

木星極光是以紫外線的形式存在，為了解木星為什麼會發出這麼強烈的紫外光極光，朱諾號徹底測量了木星磁層中帶電粒子分佈狀況，結果發現木星磁場中

越高層的帶電粒子分佈越稀疏，粒子的動能及溫度越高。越低層的帶電粒子分佈越密集，動能及溫度則越低。這個分佈特徵擴及整個木星表面，和經緯度分佈無關。(圖7)

朱諾號在木星磁層中來回穿梭了數十趟，為了避免高能帶電粒子破壞了朱諾號上的探測儀器，探

測儀器以鈦合金的蓋子保護。朱諾號前33趟的飛越，完成了科學家原先設定的任務目標，遠比預料的更「堅忍不拔」。探測船上搭載的儀器，僅管歷經超過56趟的飛越(圖8)，依舊運作良好，屹立不搖。直到現在，朱諾號仍在執行觀測任務。相信隨著任務進展會有更多珍貴的發現被揭露。

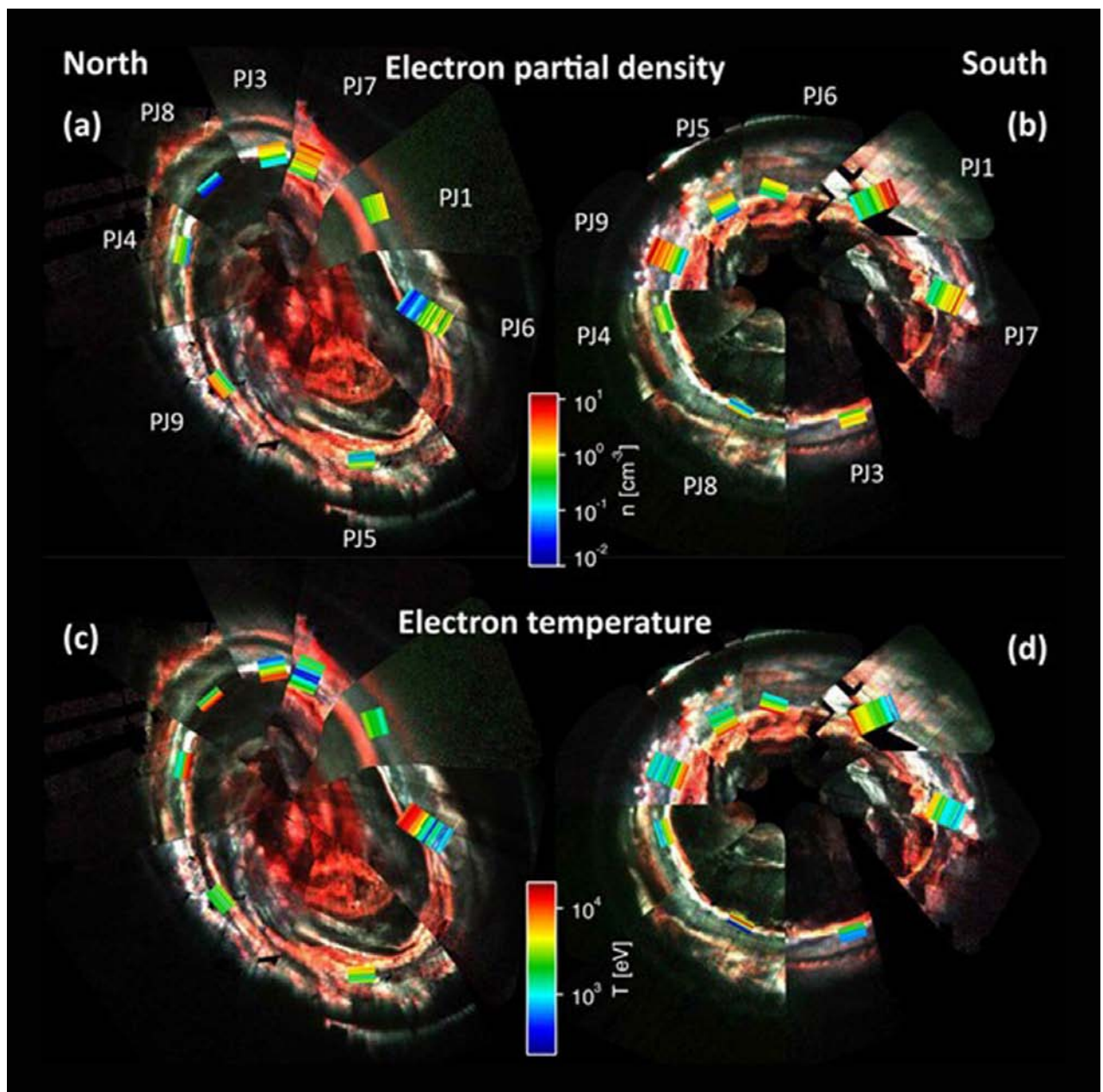


圖7. 朱諾號測量木星磁層中電子的分佈狀況，上圖中 (a) 為木星北半球的電子密度，紅色表示電子密度越高，(c) 為木星北半球的電子溫度，紅色表示電子溫度越高，即動能越高，可以發現兩者呈現負相關的關係。(b) 跟 (d) 為南半球的測量結果，可以發現狀況非常類似。圖片來源：Allegrini et al., (2021) · Journal of Geophysical Research

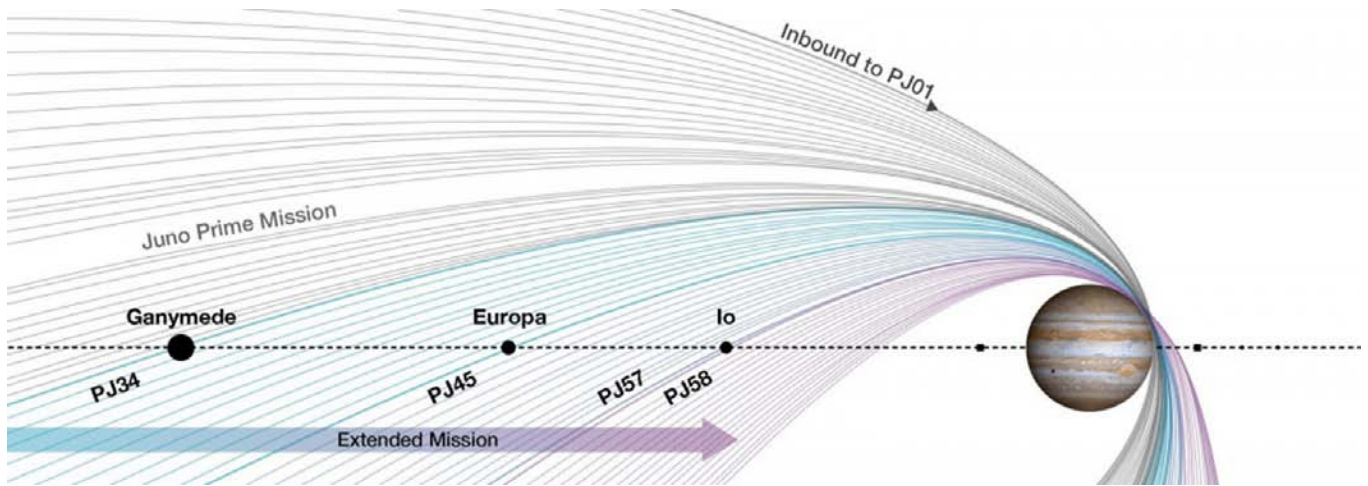


圖8. 朱諾號飛越木星探測的軌道。灰色部份是原先設定的任務目標。在33次飛越後，朱諾號上的儀器仍舊運作良好。因此科學家們決定延展朱諾號任務到2025年，並前往探測木星的衛星。圖片來源：NASA/JPL-Caltech/SwRI

參考資料：

1. Leonard N. Garcia. How scientists learn about Jupiter by observing its radio emissions. Retrieved from [https://radiojove.gsfc.nasa.gov/library/sci\\_briefs/decametric.htm](https://radiojove.gsfc.nasa.gov/library/sci_briefs/decametric.htm)
2. NASA, Jet Propulsion Laboratory. (2016). Jupiter Orbit Insertion Press Kit. Retrieved from [https://www.jpl.nasa.gov/news/press\\_kits/juno/](https://www.jpl.nasa.gov/news/press_kits/juno/) (July 4, 2016)
3. J. E. P. Connerney, S. Timmins, R. J. Oliverson, J. R. Espley, J. L. Joergensen, S. Kotsiaros, P. S. Joergensen, J. M. G. Merayo, M. Herceg, J. Bloxham, K. M. Moore, A. Mura, A. Moirano, S.

- J. Bolton, S. M. Levin (2022). A New Model of Jupiter's Magnetic Field at the Completion of Juno's Prime Mission. *Journal of Geophysical Research-Planets* 127 e2021JE007055, doi: 10.1029/2021JE007055
4. F. Allegrini, W. S. Kurth, S. S. Elliott, J. Saur, G. Livadiotis, G. Nicolaou, F. Bagenal, S. Bolton, G. Clark, J. E. P. Connerney, R. W. Ebert, G. R. Gladstone, P. Louarn, B. H. Mauk, D. J. McComas, A. H. Sulaiman, J. R. Szalay, P. W. Valek, R. J. Wilson (2021). Electron Partial Density and Temperature Over Jupiter's Main Auroral Emission Using Juno Observations.

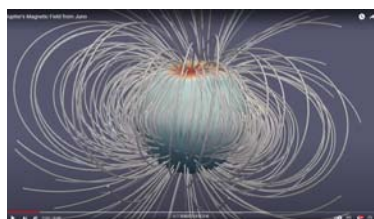
- Journal of Geophysical Research-Planets* 126 e2021JA029426, doi: 10.1029/2021JA029426
5. C.A. Jones (2014). A dynamo model of Jupiter's magnetic field. *Icarus* 241, 148-159 doi: 10.1016/j.icarus.2014.06.020
6. NASA, Juno Science Findings. Retrieved from <https://www.missionjuno.swri.edu/science-findings/>
7. Roger Freedman, Robert Geller, William J. Kaufmann. (2019). *Universe 11 Edition*. New York, United States of America: Macmillan Learning.

周毅桓：臺北市立天文科學教育館

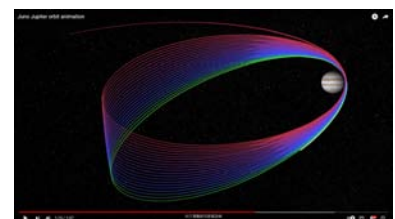
YouTube相關影片：



探索木星的磁場  
[https://www.youtube.com/watch?v=ITPizr7Pqgg&ab\\_channel=NASAGoddard](https://www.youtube.com/watch?v=ITPizr7Pqgg&ab_channel=NASAGoddard)



朱諾號測量木星磁場3D模型  
[https://www.youtube.com/watch?v=N7nRh5v1Iw&ab\\_channel=APODVideos](https://www.youtube.com/watch?v=N7nRh5v1Iw&ab_channel=APODVideos)



朱諾號繞木星探測軌道  
[https://www.youtube.com/watch?v=y8KuqumqBgM&ab\\_channel=NASAJuno](https://www.youtube.com/watch?v=y8KuqumqBgM&ab_channel=NASAJuno)