

利用電離圖與福衛七號掩星技術觀測 2020 年 6 月 21 日

日環食電離層效應

李柏翰¹ 劉正彥¹

國立中央大學太空科學與工程研究所¹

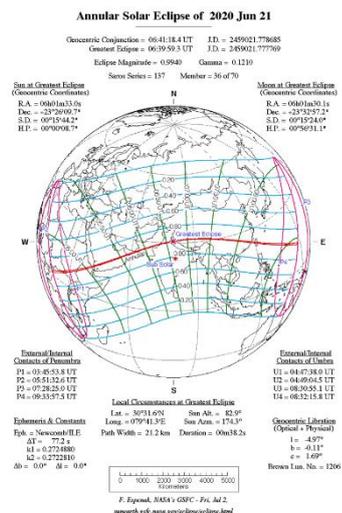
摘 要

日環食發生時，太陽輻射受到遮蔽導致電離層電漿濃度改變。利用花蓮動態電離層探測儀之電離圖以及福爾摩沙衛星七號掩星觀測技術，分別探討台灣地區與全球在 2020 年 6 月 21 日日環食前後電離層電漿濃度的垂直剖面變化。電離層圖中散塊 E 層的臨界頻率隨著遮蔽率上升而從 9 MHz 下降至 4.5 MHz，在遮蔽率達 50% 時散塊 E 層消失，F2 層因而出現，其臨界頻率隨著遮蔽率上升而從 5.5 MHz 上升至 6 MHz，待復圓之後散塊 E 層再次增強，且其臨界頻率上升至與日環食前相當。在日環食前後散塊 E 層最低回波高度不隨遮蔽率產生變化，F2 層最低回波高度則在食甚前以速率 27 m/s 下降、食甚後以速率 12 m/s 上升，並在日環食結束前再以速率 15 m/s 下降。福爾摩沙衛星七號掩星觀測之電離層電子濃度垂直剖線在月影遮蔽區共有 40 筆資料，各自與前後 7 天 1000 公里內、前後 30 分鐘之間的中位數參考值相比，F2 層層峰高度抬升了 20-50 公里。藉由福衛七號提供的校正後全電子含量資料，可確認明顯日環食電離層擾動。

一、前言

從古至今，日食一直都是非常令人注目的天象，當月球在太陽與地球之間遮蔽了光線時，月球影子所在的區域便會發生此一「天狗食日」的奇景，日食又因日、地、月三者的位置、距離不同而出現日全食、日環食、全環食與日偏食等。圖一為 2020 年 6 月 21 日發生之日環食軌跡圖，從 0447 UTC 在剛果開始，於 0813 UTC 經過台灣中南部、東部地區，最後於 0831 UTC 在太平洋上結束，全程 224 分鐘。日食發生時，太陽發光強度降低，導致高層大氣中的光化學反應產生變化，進而對電離層帶來影響。這次日環食軌跡通過台灣上空，提供了一個絕佳的機會了解當陽光被遮蔽時台灣上空的電離層有何變化。過去與日食相關的文獻中電離層 F2 層最低回波高度 ($h'F_2$) 在日環食期間有跳動的現象[1]，同時層峰高度 (hmF_2) 增加且最大電子濃度 (NmF_2) 減少[2]。另一方面，散塊 E 層 (Sporadic E layer, Es layer) 的最大電子濃度在日食期間

會因為月球影子遮蔽所產生的風切或移行電離層擾動 (traveling ionospheric disturbances, TIDs) 而有明顯的增加[3,4,5]。此外，過去利用都卜勒觀測系統 (Doppler sounding system system) 與 GPS TEC 來從事水平傳播研



圖一、NASA 發布之 2020 年 6 月 21 日日環食全球軌跡圖。

究，發現在日食過程中電離層有垂直方向的波動及沿赤道方向水平傳播的大氣聲重波[6,7]。本篇論文使用花蓮動態電離層探測儀之電離圖以及福爾摩沙衛星七號掩星觀測技術，分別探討台灣地區與全球在 2020 年 6 月 21 日日環食前後電離層電漿濃度的垂直剖面變化。

二、觀測儀器與分析方法

(一) 動態電離層探測儀

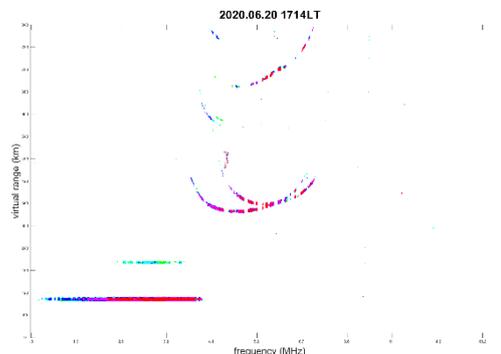
本次研究使用日環食當天下午兩點至七點間的電離圖，由花蓮動態電離層探測儀(23.89°N, 121.55°E)以五分鐘的頻率進行觀測，其探測電離層的方式是垂直向上發射一系列頻率範圍由 0.1~30MHz 的電磁波脈衝訊號至電離層，遇到與發射之電磁波訊號頻率相同的電離層區域則會有反射的回波傳至地面接收機，透過計算電波的抵達時間 (Time of Arrival, ToA)推估該頻率對應之虛高 (virtual height)並繪製電離圖來了解電離層電子濃度的垂直分布情形。

圖二為一張電離圖的範例，包含 F 層正常波 (O-wave)、F 層異常波 (X-wave)及散塊 E 層之回波。F 層正常波所對應到的最大回波頻率稱為 F 層臨界頻率 (f_oF_2)，這項數值反映電離層中電子濃度的最大值。F 層正常波的最低回波高度 ($h'F_2$)雖不能代表電離層的真实高度，但透過其變化仍可推估日環食對電離層 F 層高度帶來的影響。散塊 E 層好發於中、低磁緯度的夏季，理論上散塊 E 層的回波訊號也會受到磁場影響產生正常波與異常波，但在電離圖中兩者的虛高幾乎重疊，大多數情況下都難以區分其臨界頻率，所以有關散塊 E 層的頻率皆為電離圖上該區域的最大回波頻率。

(二) 福衛七號掩星觀測技術

福衛七號利用接收全球定位衛星(GNSS)通過大氣與電離層的折射訊號，運用掩星觀測 (Radio Occultation)技術，計算電波訊號的偏折程度進而反演得到精準大氣與電離層的狀態。本次研究使用福衛七號在日環食當天觀測之電離層校正後全電子含量及電子濃度剖線，一共挑選了 40 筆觀測路徑在月球影子下的資料，取日環食前後七天、觀測時間前後三十分鐘、距離 1000km 內的資料作為參考值，探討日環食對電

離層的影響。另外，為研究日食造成之電離層垂直擾動，將校正後全電子含量剖線與每一公里取其上下五公里高內之平均值相減後，進行快速傅立葉轉換(Fast Fourier Transform, FFT)觀察其波動特性。



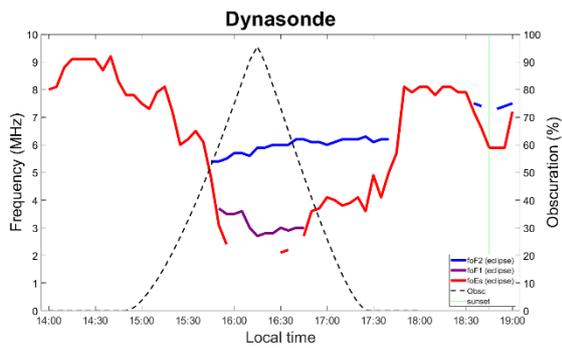
圖二、電離圖範例，包含 F 層正常波(O-wave)、F 層異常波(X-wave)、散塊 E 層之回波，以及各自的二次回波。

三、結果與討論

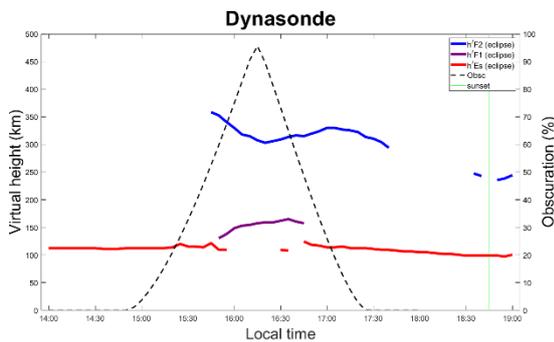
(一) 動態電離層探測儀

圖三與圖四分別為電離層圖中紀錄的臨界頻率及最低回波高度，圖中散塊 E 層的臨界頻率隨著遮蔽率上升而從 9 MHz 下降至 4.5 MHz，在遮蔽率達 50% 時散塊 E 層消失、F2 層出現，其臨界頻率隨著遮蔽率上升而從 5.5 MHz 上升至 6 MHz，而 F1 層的臨界頻率則在食甚前後從 3.7 MHz 下降至 3MHz。待復圓之後散塊 E 層再次出現，且其臨界頻率上升至與日環食前相當。在日環食前後散塊 E 層最低回波高度不隨遮蔽率產生變化，F2 層最低回波高度則在食甚前以速率 27 m/s 下降、食甚後以速率 12 m/s 上升，並在日環食結束前以速率 15 m/s 下降，而 F1 層的最低回波高度則在食甚前後從 130 km 上升到了 160 km。

目前有關散塊 E 層的研究指出其成因與高層大氣風切有關[3]，同時也會受到月球影子以超音速移動時產生之重力波造成的移行電離層擾動影響。這次的觀測結果可能由於移行電離層擾動向上，將原本散塊 E 層的電漿向上傳輸至 F 層，才會導致散塊 E 層的臨界頻率減少而 F 層的臨界頻率增加。這也同時解釋了



圖三、日環食當天下午兩點至七點電離層各層的最高回波頻率，藍線為 F2 層、紫線為 F1 層、紅線為散塊 E 層，黑線為遮蔽率。

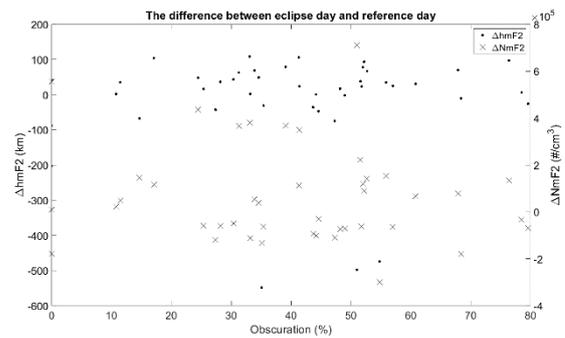


圖四、日環食當天下午兩點至七點電離層各層的最低回波高度，藍線為 F2 層、紫線為 F1 層、紅線為散塊 E 層，黑線為遮蔽率。

F 層最低回波高度的變化，受到移行電離層擾動的影響，F 層底部電漿濃度不斷增加，使得最低回波高度降低，待移行電離層擾動影響結束，F 層底部電漿重新結合變為中性粒子導致 F 層最低回波高度上升，最終隨著日落的接近，F 層最低回波高度下降。

(二) 福衛七號掩星觀測技術

圖五是由福衛七號的掩星觀測技術所得到的日食天 F2 層層峰高度 (hmF2) 及層峰濃度 (NmF2) 減去參考天之值得到的結果，與掩星觀測時間點其位置的日環食遮蔽率作圖。隨著遮蔽率改變，無論是高度或濃度都沒有明顯的趨勢，但在挑選出的 40 筆資料中，有 29 筆日食天的層峰高度較參考天還高，有 23 筆日食天的層峰濃度較參考天還高。另一方面，將校正後全電子含量剖線與每一公里取其上下五公里高內之平均值相減後進行快速傅立葉轉換，結果並沒有出現有特定周期或波長的波動。



圖五、日食天 F2 層層峰高度(黑點)及層峰濃度(叉號)減去參考天之值與遮蔽率之散佈圖。

四、總結

本次日環食透過花蓮動態電離層探測儀之電離層圖，發現了以前不曾出現的散塊 E 層臨界頻率下降、F2 層臨界頻率上升的現象，由於影響兩者的因素非常多，太陽光、中性風風切、流星殘骸、移行電離層擾動等都是有可能的原因，需要使用更多不同位置的電離層探測儀資料才能進一步探討其成因。

雖然福衛七號提供了許多全球各地日環食期間的掩星資料，在 F2 層層峰高度 (hmF2) 及層峰濃度 (NmF2) 呈現的結果和過去的研究相同，但如果要從中找出由日食造成的波動則需要使用更多不同的方法分析。

五、參考資料

1. Liu, J. Y., Yang, S. S., Rajesh, P. K., Sun, Y. Y., Chum, J., Pan, C. J., et al. (2019). Ionospheric response to the 21 May 2012 annular solar eclipse over Taiwan. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 124, 3623–3636. <https://doi.org/10.1029/2018JA025928>
2. Tobias G.W. Verhulst, Danislav Sapundjiev, Stanimir M. Stankov, High-resolution ionospheric observations and modeling over Belgium during the solar eclipse of 20 March 2015 including first results of ionospheric tilt and plasma drift measurements, *Advances in Space Research*, Volume 57, Issue 11, 2016, 2407-2419, 0273-1177, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.03.009>.

3. Haldoupis C. (2011) A Tutorial Review on Sporadic E Layers. In: Abdu M., Pancheva D. (eds) *Aeronomy of the Earth's Atmosphere and Ionosphere*. IAGA Special Sopron Book Series, vol 2. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-007-0326-1_29
4. Chen, G., Zhao, Z., Yang, G., Zhou, C., Yao, M., Li, T., Huang, S., and Li, N. (2010), Enhancement and HF Doppler observations of sporadic-E during the solar eclipse of 22 July 2009, *J. Geophys. Res.*, 115, A09325, doi:10.1029/2010JA015530.
5. M. Pezzopane, M. Pietrella, A. Pignalberi, R. Tozzi, 20 March 2015 solar eclipse influence on sporadic E layer, *Advances in Space Research*, Volume 56, Issue 10, 2015, Pages 2064-2072, ISSN 0273-1177, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.08.001>.
6. Liu, J. Y., C. C. Hsiao, L. C. Tsai, C. H. Liu, F. S. Kuo, H. Y. Lue, and C. M. Huang, Vertical phase and group velocities of internal gravity waves derived from ionograms during the solar eclipse of 24 October 1995, *Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics*, 60, 1679-1686, 1998.
7. Liu, J. Y., Y. Y. Sun, Y. Kakinami, C. H. Chen, C. H. Lin, and H. F. Tsai, Bow and stern waves triggered by the Moon's shadow boat, *Geophys. Res. Lett.*, 38,, 2011.