

日地交互作用中的磁場重連

中央大學太空科學研究所 郝玲妮

一、前言

太陽除了輻射電磁波，亦釋出大量帶電粒子至整個太陽圈。當超音速的太陽風行經地球時，原行星磁偶極磁場即被規範於所謂的磁層內，在太空中形成一空腔。磁層頂為分隔太陽風與地球磁層電漿之邊界，厚度約為五百公里，日側面距離地球中心平均約為六萬五千里，為磁層之大門，掌控日地交互作用。太空電漿碰撞頻率很低，為一絕佳之導體，但複雜的波與帶電粒子之交互作用常會導致一些異常的電阻與傳輸效應，使得太陽風的粒子與能量無法完全屏障於磁層外。

關於太陽風的電漿與電磁場如何進入磁層，早在六十年代時即有兩種不同的定性模式可以解釋在高緯度地區所觀測到的電離層之大範圍電漿對流現象，分別為封閉型與開放型模式。前者之機制類似一般流體流經物體之黏滯交互作用，而後者為經由太陽風所帶之行星際磁場與地球磁層磁場之重連作用。觀測證據顯示，電離層與磁層內的電漿對流型態及大規模擾動如磁暴與行星際磁場方向有密切之相關性。開放型模式與磁重連已廣泛地被認為是太陽風的電漿與電磁場滲入磁層之最有效機制，磁層頂的磁力線重連研究因此是探討日地交互作用很重要的一環。

由磁流體力學觀點，當磁層頂屬封閉型模式時，為一切線不連續面；而有磁重連發生時為一旋轉不連續面。其最大之特徵差異為，前者之磁場貼著磁層頂面，因此無沿磁層頂法向之分量(B_n)，且磁流體無法穿越磁層頂；後者之 B_n 則不為零，且會伴隨著電漿加速，遵循所謂的 Walén 關係式。由人造衛星穿越磁層頂所收集的電漿與磁場資料，配合著根據 $\nabla \cdot \vec{B} = 0$ 理論的最小變異量法，可決定磁層頂面之法線方向並分析出 B_n 之值，此為許多研究中做為判斷是否有磁重連之方法。而更具信服力的則是檢驗電漿速度是否接近 Alfvén 速度之 Walén 關係

式。

雖然已有些個案研究利用上述方法之一分析磁層頂發生磁重連的證據，但對於切線不連續面及旋轉不連續面發生的相對情形並無一有系統之研究，且對於物理定律應用於觀測資料之適用性並無嚴謹之探討與過濾。尤其是，最小變異量法與 Walén 關係式中假設磁層頂為一維的平面結構，並存在著一特殊的 DeHoffmann-Teller (DHT)座標，在其上磁流體之速度可平行於磁場。另外，在幾個衛星通過磁層頂的案例中，我們發現 B_n 不為零時並不一定伴隨著電漿加速。這些問題促使我們對於磁層頂的磁重連的觀測與理論做一探討。

二、衛星觀測與分析

當人造衛星通過磁層頂時，其所測得的物理量如電漿的密度、速度、溫度、壓力及電場、磁場會有明顯的變化。但由於磁層頂會隨著太陽風的擾動而波動，其移動的速度甚至比人造衛星運行速度還快，資料中常有所謂的多重穿越。此外，磁層頂外之磁鞘區位於震波下游，充滿各種波動，使得磁層頂位置的判別無法自動化處理，須個案檢驗。利用兩年的德國人造衛星 AMPTE 之電漿與磁場找出約三百個磁層頂穿越事件後，我們進行 B_n 與 DHT 座標及 Walén 關係式之分析，並且計算每一方法所伴隨之可能錯誤。由於錯誤之程度反應出應用理論於資料之可信度，錯誤愈大表示結果所引申之物理意義愈不可信，因此可做為篩選高品質實驗案例之準則。

有了約 100 個好的磁層頂穿越事件，再依 Walén 關係式來判別是否有因磁場重連產生之電漿加速特徵，並分類為切線與旋轉不連續面。結果顯示：約五分之一的案例為旋轉不連續面，電漿速度接近 Alfvén 速度，其他大部份為切線不連續面，其電漿速度比起聲速或 Alfvén 速度均小許多，以及有少數無法歸類的事件。我們也發現，若將錯誤較大之案例亦列

入分析，無法歸類之事件比例將增高。由於 B_n 與 DHT 座標之理論方法是建立在幾個非常嚴厲的假設下，實際的太空電漿未必遵循這些條件，錯誤較大之事件並不表示未有磁重連之特徵，只是無法套用簡單之磁流體理論模式。另即使是切線不連續面，我們也發現有些案例的 Walén 關係顯示無可觀之電漿速度，但卻存在著明顯之 B_n 或於磁層頂內 B_n 在正負值之間呈現浮動。這些結果顯示，傳統由電漿與磁場衛星資料來比對切線與旋轉不連續面的一維理論模式，並尋找行星際磁場與地球磁場發生磁重連之證據無法完整地解釋磁層頂電漿之行為。

三、建構磁層頂全貌圖

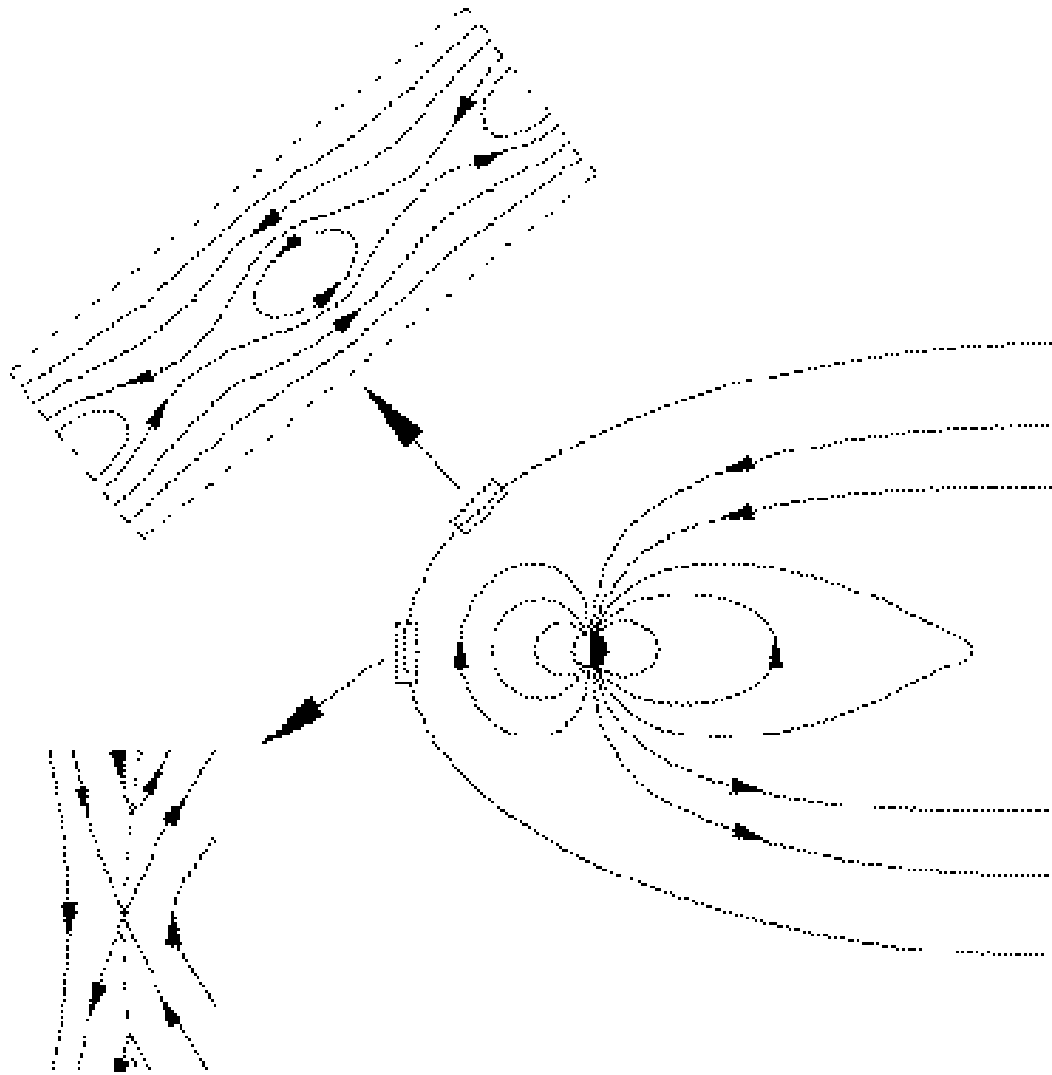
上述之結果所引發的問題之一是：如何拉近磁流體理論與衛星資料之差距並對發生的磁重連動力做深一層之信息掌握。我們首先要探討的是，如何利用觀測資料架構一磁層頂結構，可以解釋類似切線不連續面但又存在著 B_n 之特徵。基本上，當一切線不連續之 B_n 及 DHT 座標分析所伴隨之錯誤如果很小，表示我們可以找到一 DHT 參考座標，在其上此結構為一靜態力平衡之系統。由於磁流體之靜態力平衡問題相較於動態力平衡問題無論在數學上或數值上均較易處理，這也是我們先著手探討切線不連續面之主要原因。接下來的問題是：如果觀測資料無法由一維之理論模式解釋，我們如何由單一顆的人造衛星穿越磁層頂所收集之電漿密度、速度、溫度或壓力及磁場來推斷其二維之結構。一般而言，太空中之電漿體結構無論在時間或空間的座標中都相當複雜，但如果 B_n 之分析誤差很小，表示是一良好的近似一維結構，其最大的變化方向即是沿著磁層頂法線方向。這樣的切線不連續面如果 B_n 之值又不為零，極可能是一近似二維之結構，存在著一不變軸，亦即沿此軸物理量在空間中的變化最小。顯而易見的，此二維結構之不變軸必定垂直於磁層頂法線方向，我們所欲建立之電漿與磁場結構即是垂直於不變軸之二維平面。沿著衛星軌跡所收集之物理量如磁場可投影在這個面上，並遵循磁流體靜態力平衡定律；數學上此平面之物理解可由衛星軌跡之投影線向兩側延伸而得出。由單一衛星資料架構二維之磁層

頂全貌最大的困難之一即是如何定出不變軸的方向；基本上，我們必須檢驗每一建構出來之解是否滿足磁流體力平衡之限制。由上述方法得出之磁場圖顯示：磁層頂內充滿電漿島像珍珠一樣的串起來鑲在磁層頂內，磁島間為 X 型之磁場結構，是磁層內外磁力線重連的結果；但這些結構外面，大體是屬於一切線不連續面。

四、電流片的不穩定性引發之磁重連

由衛星資料配合理論建立之磁層頂內部的電漿與磁場圖，很容易的可以解釋為什麼一切線不連續面會存在著 B_n 或在某些個案中 B_n 浮動於正負值之間。前者發生於當人造衛星相對於磁層頂的運動速度主要是沿著磁層頂法線方向，穿越一磁島之結果；而後者的情形則是由於人造衛星貼著磁層頂面，其相對於磁層頂的運動速度主要是垂直於磁層頂法線方向，穿梭於 X 型磁場與磁島間，因此觀測到忽正忽負之 B_n 值。由於磁重連為將電流片所儲存的磁能轉為電漿動能及熱能之有效過程，但模式中之電漿島幾乎近似靜態平衡，無顯著之電漿加速現象。這些結果所引發的電漿物理問題因此是：在什麼情況下一原不具有 B_n 之切線不連續面會發展成這種結構。

由於撕裂模不穩定性為著名之磁重連過程之一，我們首先利用線性磁流體力學理論分析一切線不連續面電流片之線性撕裂模不穩定性，得出線性不穩定性發生之參數範圍與各個擾動量之特性。接著植入這些微小的線性擾動源於非線性的磁流體模式中任其隨時間發展。數值模擬結果顯示，在經過一段初始的線性成長階段後，有些電漿島會繼續長大，直到非線性階段達到飽和並呈凝滯狀態，而此時電漿速度也變的非常小，類似由觀測所建立之磁場與電漿圖。但這樣的結果只發生在電阻較小的參數範圍；當電漿系統的電阻較大時，磁島於長成可觀的大小前即被消散掉。由比對衛星的觀測時間與磁島發展成飽和的時間，以及磁島的大小等，我們可以推算出在某一電阻範圍內觀測結果可由非線性撕裂模不穩定性模擬獲得解釋。由於太空電漿幾乎是無碰撞的，等效的電阻一般由微觀的波與粒子交互作用所產生，但



圖一 地球磁層頂的磁場重連示意圖

實際的計算很複雜亦無法由觀測獲得數值。我們的研究顯示，些微的電阻即可使得封閉模式中的磁層頂切線不連續面發展成充滿電漿島的磁重連結構。這些結果與開放型模式的旋轉不連續面所伴隨之電漿加速的觀測證據顯示：磁層頂發生磁場重連為普遍之現象，只是規模的大小而已。

參考文獻

- [1] L. N. Hau and B. U. Ö Sonnerup, *J. Geophys. Res.*, **104**, 6899 (1999).
- [2] L. N. Hau, and S. W. Chiou, *J. Geophys. Res.*, **106**, 8371 (2001).
- [3] L. N. Hau, and S.-H. Cheng, *JASPT*, revised (2001)