

磁層副暴簡介

呂凌霄

國立中央大學 太空科學研究所

本文取材自2008年【臺灣太空研究團隊參與西蜜斯號衛星任務之國際合作計畫-子計畫三：磁層副暴期間多尺度之非線性物理過程的理論與數值模擬研究】之研究計畫書部份內容

有關磁層副暴的相關研究，可追溯到二十世紀初的高緯地磁觀測。挪威科學家Birkeland (1908) 將高緯地區所觀測到的忽正忽負的短時間脈衝型地磁變化，稱之為positive and negative polar elementary storms。這裡所謂的短時間脈衝型地磁變化，是相對於低緯的磁暴 (magnetic storm) 而言。低緯磁暴可持續數天到超過一週的時間。而高緯的短時間脈衝型地磁變化，持續時間只有一、兩小時。低緯的磁暴主要是因為在地表上空約三~六個地球半徑附近的環型電流 (Ring Current) 強度與位置改變所造成的磁場變化。不過磁暴開始時，日側地磁呈現脈衝型增強過程 (sudden storm commencement, SSC)，卻與環型電流無關，而是由於日側磁層頂電流 (i.e., Chapman-Ferraro current) 的強度與位置改變所造成的。當然，因為地球表面是個良好的導體，因此上空的電流變化也會造成地表的感應電流變化。因此，地表所測到的磁場變化，其實是兩種電流之加成效應。至於Birkeland所觀測到的正負脈衝型地磁變化，則是由高緯電離層中的東向與西向強電流 (eastward and westward electrojets) 以及地表所產生的感應電流所造成的。而這些東、西向強電流與流入、流出電離層的場向電流 (field-aligned currents) 相連結形成一個磁副暴的電流系統，通常被稱為substorm Region I current system (圖一)。因為Birkeland首先發現極光弧附近存在很強的場向電流，為了紀念Birkeland的早期貢獻，現在field-aligned current 也被稱為Birkeland current。

Birkeland後的五十年地磁觀測結果顯示，在低緯磁暴發生時期的地磁記錄中，也可以看到一些短時間大振幅的磁場擾動疊加在原有的磁暴地磁變化曲線上 (圖二)。因此低緯地區的科學家稱這些小尺度的地磁擾動為polar magnetic disturbances。直到Akasofu and Chapman (1961; 1963) 有系統的分析不同緯度地區地磁變化記錄才發現，這些地磁擾動在極區的變化幅度，約為一般低緯磁暴地磁變化的五倍以上 (圖三)，因此認為polar magnetic disturbances這個名稱不足以反應這樣巨大的磁場變化，故建議將這些高緯的脈衝型地磁變化改名為polar magnetic substorms。副暴 (substorms) 這個名詞，就是在這時開始使用的。「副」表示它的時間短，並不代表它的強度弱。副暴 (substorms) 所代表的現象，涵蓋了中低緯度地磁變化中的polar magnetic disturbances，以及高緯度地磁變化中的positive and negative polar elementary storms。由於造成副暴的電流位在高緯電離層，所以對高緯地區的地磁影響很大。但是此電離層電流對中低緯的地磁影響，應該會隨著緯度減少而快速遞減。因此，中低緯度所觀測到的polar magnetic disturbances主要應該是受到副暴發生時，黃昏與夜側距離地心約三~六個地球半徑上空的partial ring current增強的影響。由於partial ring current距離地表比較遠，所以影響層面雖比較廣，但是地磁的變化振幅卻小得多。可是現在的人造衛星，尤其是通訊用的同步衛星，若剛好位在磁層中聯結副暴的電流系統附近，則它們所受到的影響，就會比中低緯地面觀測所量到的磁場變化強得多。這也就是為何隨著科技的進步，副暴對民生的影響也越來越重要。

在Akasofu and Chapman提出polar magnetic substorms這個名詞後不久，Akasofu (1964) 進一步發現在polar magnetic substorms發生期間，極光的活動呈現一個有系統的變化，因此決定將它進一步改名為auroral substorms。而且明確的定義substorm的啟動 (onset) 為：a sudden brightening of the most equatorward auroral form which is followed within a few minutes by an explosive expansion of the bright auroral bulge (Akasofu, 1964)。圖四為Akasofu 教授經過多次

地面與飛機觀測，統計分析所得出的auroral substorm發生時，極光活動所呈現的一個標準的發展模式示意圖。圖中 $t=0$ 代表onset of substorm的時間。這張由許多觀測拼湊出來的示意圖，在二十多年後，才由DE-1與DE-2人造衛星利用紫外光觀測副暴期間，南北半球極光的活動情形，得以進一步的確認。

在提出極光副暴這個概念後的幾年，科學家觀測到地面與磁層中許多其他形式的電磁場擾動，都會伴隨著副暴極光與地磁擾動同時發生。因此Akasofu(1968)進一步將極光副暴(auroral substorms)改名為目前通用的名稱，磁層副暴(magnetospheric substorms)，以彰顯磁層副暴其實是一個地球磁層全面性的擾動。

在隨後的1970及1980年代，大量的通訊用同步軌道人造衛星傳回了豐富的磁場變化訊息。根據這些同步軌道人造衛星的磁場變化資料，以及地面的觀測資料，科學家逐漸的建構出一幅描述磁層副暴發生前後，地球磁尾結構如何改變的圖像，並依照磁層結構的變化將磁層副暴劃分為三個時期：成長期(growth phase)、爆發期(expansion phase)、與恢復期(recovery phase)。Kaufmann(1987)用簡單的電流迴路模型，說明同步軌道衛星附近磁場結構的改變，主要是由於near Earth plasma sheet (NEPS)附近電流系統改變所造成的。這裡NEPS，近地球磁尾電漿片，是指位在夜側磁層靠近磁赤道附近距離地心約八~十個地球半徑的區域。雖然該文並沒有說明導致這些電流系統改變的物理機制，可是目前大多數研究磁層副暴的理論學者，都會依據此文中所描述的電流系統變化情形，加以修正建構其理論模式。以下我們就簡單介紹在磁層副暴不同時期(phase)，磁層中的磁場與電流特徵。

Growth phase:

原則上，磁層副暴成長期就是一個將來自太陽風的能量儲存在磁尾中的過程。當地球磁層前方太陽風帶來的行星際磁場出現夠強的南向磁場分量時，就揭開了磁層副暴成長期的序幕。這是因為南向的行星際磁場容易與地球磁場在日側磁層頂發生磁場線重聯(Dungey, 1961)。磁場線重聯過程中所產生的晨-昏方向感應電場所造成的polar cap potential jump，強度約為背景量的兩倍以上(e.g., Kan et al., 1988)，因此可以大幅增強磁層內的電漿環流，使磁尾腔(tail lobes)中的電漿更往電漿片(plasma sheet)集中，導致電漿片附近晨昏方向跨磁尾電流增強。總之，在磁層副暴成長期，磁層的特徵包括了：磁尾腔中的磁場強度增加、整體的電漿片厚度變薄(thinning of plasma sheet)、同步軌道附近的人造衛星觀測到磁場方向也呈現大角度的變化，比較偏向x軸，也就是地日連線的方向(圖五，採自McPherron, 1972)。Kaufmann(1987)的電流分析結果顯示，這樣的磁場變化代表了NEPS附近跨磁尾晨-昏電流強度增加。

Onset of expansion phase:

相對於成長期的特徵thinning of plasma sheet，爆發期的特徵就是dipolarization of plasma sheet。至於磁層副暴爆發期是如何被啟動的？在啟動(onset)前後一、兩分鐘左右的時間內，發生了許多事情，但是詳細的過程與發生的先後順序到現在還沒有定論，更遑論彼此的因果關係。這也就是THEMIS計畫想要了解的主要問題。這些過程包括了near Earth plasma sheet

的午夜區附近一、兩個地球半徑的寬度內，電漿片由thinning轉變為dipolarization。這個localized dipolarization區域中，跨磁尾的晨昏電流強度減弱，且在邊緣形成一對場向電流分別在午夜前（pre-midnight，即昏側）與午夜後（post-midnight，即晨側）流出、流入電離層（圖一）。這對場向電流系統被稱為current wedges。由地面觀測與磁層觀測顯示，在這對current wedges內側的磁場比平時（quiet time）的磁場還沿z方向，也就是磁軸的方向（可參考圖五的觀測結果）。而在這對current wedges外側的電流片則會持續變薄（continuous thinning）。Kaufmann (1987)認為這是current wedges所造成的影響。可是他所舉的地面觀測例子，是發生在午夜前的區域。最近本整合型計畫總計畫主持人許志宏教授與他的學生統計分析GOES人造衛星觀測資料得到的結果顯示，午夜後（晨側）的電漿片並未持續變薄，而午夜前（昏側）的電漿片的變化則與Kaufmann (1987)的結論相仿。這樣的結果顯示，current wedges的結構，可能不見得如Kaufmann (1987)的模式中那樣是晨昏對稱的。最後，值得一提的是，許多觀測結果顯示，行星際磁場由南轉北往往可導致onset of substorm expansion phase (Caan et al., 1975; Rostoker et al., 1982; Rostoker, 1983; Samson and Yeung, 1986; Kamide, 1991; Lyon, 1996; Kamide and Kokubun, 1996)。如果行星際磁場由南轉北的時間太早，使得成長期能量累積不足，則可能出現sudden brightening of the most equatorward auroral form，但是卻無法製造一個完整的副暴極光爆發期。這樣的假啟動過程被稱為pseudo breakup或pseudo onset。當然，並不是所有的onset of substorm expansion phase都與行星際磁場轉向有關。所以，可以想見，導致磁層副暴的物理機制可能不只一種。此外，根據Ohtani et al. (1992)的觀測結果顯示，在end of growth phase，午夜或午夜前區域的NEPS的電漿片會突然間變得很薄（The explosive thinning of near Earth plasma sheet prior to the onset of substorm），這種explosive thinning過程是如何造成的，它與後來的onset之間有何關係，都是理論模式需要考慮的問題。

Expansion phase and recovery phase:

在onset後的三十分鐘到一小時的極光爆發期，最初localized dipolarization區域不斷向磁尾以及晨昏兩側擴大，隨著dipolarization區域的擴大，極光活動區域也不斷向磁極區域以及東西兩側擴展。當然field-aligned current wedges的位置也不斷向晨昏方向移動，並向磁尾方向擴展（e.g., Kan, 1993）。一般相信，當成長期所儲存的磁能用盡時，就是恢復期的開始。可是如果爆發期的行星際磁場持續維持南向，則何時開始恢復期，仍是一個值得研究的課題。

目前關於磁層副暴爆發期啟動機制的理論模式有很多種。我們簡單地將它們分為以下三大類型：

（一）因磁場線重聯而導致磁層副暴爆發期的啟動：

這類模式認為跨磁尾晨昏電流強度減弱以及形成current wedges是由於磁尾電漿片區域的磁場線重聯所造成的（e.g., Hones, 1979; Baker et al., 1996）。磁場線重聯時磁場的瞬間改變，產生感應電動勢，可加速電漿，產生高能粒子。這些高能粒子若衝入電離層可造成極光，若衝入內磁層可造成內磁層環型電流強度增加，形成partial Ring current，加強磁暴的地磁變化。這類型理論模式的優點是，可以解釋磁層副暴在很短時間內，突然被啟動的過程，也可以解

釋爆發期高能粒子的來源。但是這類型理論模式也有一些問題。

問題之一，就是根據傳統的二維磁場線重聯模式，在重聯區的背陽側，應該可以觀測到朝磁尾方向的電漿流。而根據Kaufmann (1987)所推估的cross-tail current disruption region約位在十個地球半徑內。可是科學家分析位在磁尾十到十五個地球半徑區域的人造衛星觀測資料，卻找不到朝磁尾方向快速電漿流的證據 (e.g., Shue et al., 2003) (圖六)。要解釋這些觀測結果，這些支持重聯模式的科學家想出了一個新的解釋方法。他們認為磁場線重聯區可能發生在十五個地球半徑之外。重聯所產生的向地球方向的電漿流，遇到了電漿球層頂 (plasmopause) 會在十個地球半徑附近產生渦流，如圖七。根據磁流體力學的特性，可以證明圖七中的渦流可以造成場向電流，且方向符合圖一所標示的方向。這樣的渦流擾動，也可導致該區域的cross-tail current disruption。所以這樣的模式，還是能符合觀測結果。至於為何與重聯區相連的磁場線下方電離層不會先看到極光活動的反應，這就是三維現象複雜的時間先後關係。很難加以評估或驗證了。

此外在磁尾引發磁場線重聯的物理過程，也是一個需要深思的問題。文獻上，造成磁場線重聯的物理機制包括forced reconnections (Lee et al., 1985) or reconnection due to local instabilities such as collisionless tearing mode instability (Coppi et al., 1966; Dobrowolny, 1968) or drift kink instability (e.g., Pritchett et al., 1996; Zhu and Winglee, 1996; Daughton, 1998)。還有最近幾年熱門的磁重聯課題，由2001年的GEM Magnetic Reconnection Challenge (e.g., Birn et al., 2001, and references there in) 到2005年的Newton Challenge (e.g., Pritchett, 2005; Birn et al., 2005, and references there in)，目的雖然都是要解釋磁層副暴的爆發機制。但是這些數值模擬結果，其實完全是由初始條件與邊界條件來掌控。其中週期性的邊界條件顯然與NEPS區域的特性不符。GEM Magnetic Reconnection Challenge的初始擾動，完全不切實際，且造成系統力的不平衡 (Pritchett, 2005)。至於Newton Challenge的初始擾動，是一種forced reconnections，但是南、北的擠壓存在於整個南北磁尾腔，為何只有NEPS區域才會發生這樣的擠壓重聯，這仍是一個需要解決的問題。此外，以上這些重聯的數值模擬中，背景磁場都缺乏垂直電流片的分量。如何使電流片normal magnetic field component減少到零，是一個需要解決的問題。Explosive thinning of near Earth plasma sheet似乎可以為這個難題解套。可是什麼樣的物理過程，會造成Explosive thinning，又成了新的問題。Pseudo breakup與磁場線重聯之間的關係，也是耐人尋味。

(二) 非磁場線重聯之其他區域性不穩定導致磁層副暴爆發期的啟動：

這類型的理論模式認為，NEPS區域可以不透過磁場線重聯，直接藉著區域性電漿不穩定，來啟動substorm expansion phase。這些區域性電漿不穩定包括了cross-field current instability (Lui et al., 1988, 1992, 1995), MHD ballooning instability (Roux et al., 1991), and kinetic ballooning instability (Chen and Lui, 1998)。其中cross-field current instability的發生機制是因為維持跨磁尾電流的電子與正離子運動所產生的垂直磁場的電子-正離子雙流不穩定。此雙流不穩定所產生的亂流波動，可增加此區域的有效電阻，進而使跨磁尾電流強度銳減，導致磁場的

dipolarization以及current wedges的形成，來啟動爆發期。只是這個理論模式似乎並未說明這種跨磁尾電流不穩定為什麼會選定在NEPS這個區域發生。

至於ballooning instability的發生是當電漿片與電漿球層相接處的NEPS中出現太多高能的電漿粒子時，尤其如果這些粒子的垂直磁場溫度遠高於平行磁場的溫度，就容易引發這種電漿不穩定。這種電漿不穩定也算是一種interchange instability，因此可以由磁場線的彎曲方向與熱電漿的相對位置來判別（圖八）。這就好像由蛋殼內要衝破蛋殼很容易，但是要由蛋殼外壓破蛋殼，就比較困難。這個區域的熱電漿外圍的磁場線很像蛋殼一般裹著內部電漿，因此是屬於interchange unstable的結構。相對於發生forced magnetic reconnection需要藉外力朝內壓來改變磁場結構，ballooning instability顯然是比較容易造成磁場的dipolarization。可是早期MHD ballooning instability (Roux et al., 1991) 所預測的不穩定發生的閾值太低了，與觀測結果不符。太空中心首席科學家陳秋榮教授所倡議的kinetic ballooning instability加上了電漿的kinetic effect，可大幅提升不穩定發生的閾值，因此其結果比較符合NEPS附近的觀測結果。由於發生ballooning instability的位置，大致符合觀測上的磁層副暴onset的發生地點，因此由ballooning instability啟動爆發期是很不錯的理論模式。

由於cross-field current instability以及kinetic ballooning instability兩個理論模式，都沒有對造成這些電漿不穩定的電漿來源，以及電漿在速度空間中的分布情形，做self-consistent的闡述與研究。也無法說明外來的擾動，如太陽風中磁場方向的改變等因素，是否會提早引發這些電漿不穩定。因此若要根據這類型的理論模式，完滿的解釋導致磁層副暴的啟動過程，將來就必須通盤考量這些造成不穩定發生之電漿的產生機制與分布情形，以及其他擾動源對這樣一個電漿系統的影響。

（三）外來擾動觸發磁層副暴爆發期：

這裡所謂的外來擾動包括了來自太陽風的擾動、來自遠方磁尾的擾動、以及來自電離層的擾動。前面我們已經提過，許多觀測結果已經顯示，當行星際磁場由南轉北，可以引發磁層副暴爆發期 (Caan et al., 1975; Rostoker et al., 1982; Rostoker, 1983; Samson and Yeung, 1986; Kamide, 1991; Lyon, 1996; Kamide and Kokubun, 1996)。但是相關的物理過程，目前仍眾說紛紜，沒有定論 (e.g., Lyon, 1996)，也尚無數值模擬可以驗證它。在磁層副暴相關會議中，也有不少科學家建議，磁尾中所觀測到的短暫快速電漿流 (bursty bluk flows, BBF，可能是遠方磁尾的磁場重聯所造成的現象，Angelopoulos et al., 1992)，或許也可以導致NEPS區域跨磁尾電流的阻斷而啟動磁層副暴爆發期。

此外，Kan et al., (1988)則倡議透過艾爾文波 (Alfven wave) 進行磁層與電離層的耦合 (magnetosphere-ionosphere (M-I) coupling)，可由電離層來引發磁層副暴爆發期。這個理論模式的要素除了艾爾文波外還需要電離層中不均勻的導電率分布。因為在poleward edge of diffuse aurora通常會出現不均勻的導電率分布，因此這個模式可以解釋為何爆發期的啟動地點所對應的磁層區域位在NEPS。此外這個模式還可以說明為何在夏季的半球，電離層的導電

率雖高，但分布相對比較均勻，所以磁層副暴的發生機率反而不如春、秋時節高。Kan et al., (1988)所提出的M-I coupling模式，是透過Alfven wave將來自磁層頂的太陽風中電場能量導入電離層，再透過電離層中不均勻的導電率，重新分布這些能量。可惜的是，此模式沒有完整的考慮磁尾的儲能過程，以致於模擬出來的場向電流強度太弱。這要的結果，就好像空有發號司令的頭，卻缺乏有力的尾來執行任務。相形之下，前述磁場重聯導致爆發期啟動的模式，則是有一條有力的尾，卻缺少一個發號司令的頭，來指揮它如何正確執行任務。

本計畫主持人在本世紀初提出了一個跨尺度的、涵蓋了電離層與磁尾的理論模式 (Lyu and Chen, 2000)。本模式中，磁層副暴爆發期是由午夜前 (pre-midnight) 的場向電流所啟動的。我們的模式預估熱電漿的分布會隨著靠近地球與靠近昏側而增加，並且隨著成長期的發展而增多。而NEPS區的跨磁尾電流主要是由這些被磁場所束縛住的熱電漿來維持。當不均勻的電離層導電率產生來回震盪的場向電流時，會先後在午夜附近的NEPS造成explosive thinning與dipolarization。其中explosive thinning只會更加強跨磁尾電流的強度。可是dipolarization卻能釋放那些被束縛住的電漿 (Kaufmann, 1987)，因此導致此區跨磁尾電流銳減，造成current disruption。總之，我們的模式與其他模式最大的不同在於因果順序的不同。其他模式先產生cross-tail current disruption，再形成一對current wedges，同時造成磁場dipolarization。我們的模式 (Lyu and Chen, 2000)，先產生一支午夜前的current wedge，再導致dipolarization以及current disruption，然後才會在午夜後形成另外一支分布較為寬廣的current wedge。我們仔細分析我們的模式，發現它與kinetic ballooning instability (KBI)比較相似。因為脈動式的場向電流，會在NEPS附近造成磁場出現脈動式的氣球漲縮擾動。因此我們的模式很像一個外來擾動觸發的KBI。本模式也可以解釋為何行星際磁場由南轉北會導致爆發期或pseudo breakup的啟動。這是因為電離層E-region不均勻的導電率，會使來自太陽風的電場不均勻的打轉。它們必須轉到一定程度，才能產生夠強的場向電流 (Kan et al., 1988)。但是來自太陽風的晨昏電場，卻一再的減慢這些電場打轉的速度。這就好像開車時車速如果太快，就不易轉彎。反而減慢車速，有助於車子轉彎。同樣的，當行星際磁場由南轉北，可使晨昏電場強度銳減，進而加速電場打轉，提早形成一支夠強的場向電流 (Lyu and Chen, 2000)。至於pseudo breakup的發生，本模式認為是因為NEPS中，高能電漿數量太少所致。

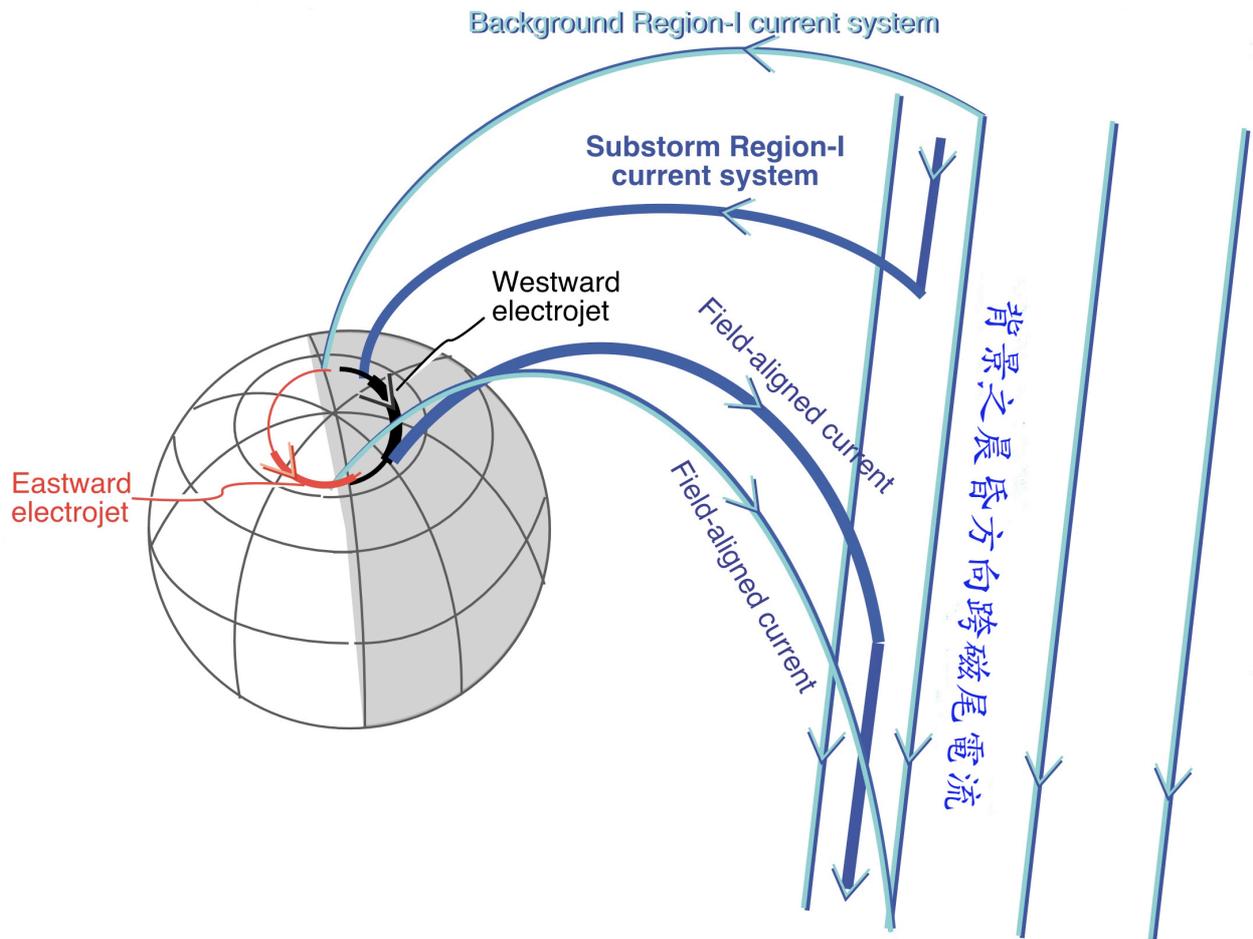
本模式提出後，最大的遺憾就是，當時缺乏一套理想的數值模擬程式，來驗證本模式中所預測之成長期磁尾不均勻的熱電漿產生與分布情形。因此過去五年來，我們默默的研發了一套多尺度、非週期性、低雜訊的流體與電漿動力數值模擬碼。希望能用來徹底了解磁層副暴這種跨尺度的非線性電漿物理過程。

參考文獻

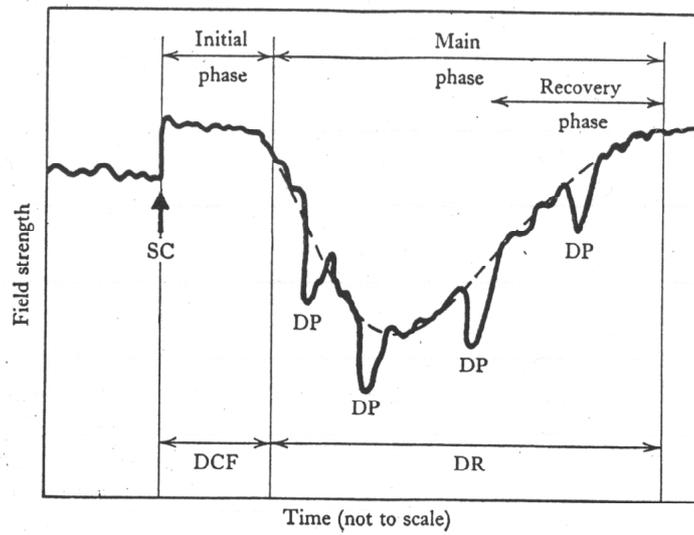
- Akasofu, S.-I. (1964), The development of the auroral substorm, *Planet. Space Sci.*, 12, 273.
Akasofu, S.-I. (1968), *Polar and Magnetospheric Substorms*, D. Reidel, Dordrecht, Holland.
Akasofu, S.-I., and S. Chapman (1961), The ring current geomagnetic disturbances, and the Van Allen radiation belt, *J. Geophys. Res.*, 66, 1321.

- Akasofu, S.-I., and S. Chapman (1963), Magnetic storms: the simultaneous development of the main phase (DR) and of polar magnetic substorms (OP), *J. Geophys. Res.*, *68*, 3345.
- Angelopoulos, V. W., Baumjohann, C. F. Kennel, F. V. Coroniti, M. G. Kivelson, R. Pellat, R. J. Walker, H. Luhr, and G. Paschmann (1992), Bursty bulk flows in the inner central plasma sheet, *J. Geophys. Res.*, *97*, 4027.
- Baker, D. N., T. I. Pulkkinen, V. Angelopoulos, W. Baumjohann, and R. L. McPherron (1996), Neutral line model of substorms: Past results and present view, *J. Geophys. Res.*, *101*, 12,975.
- Birkeland, K. K. (1908), *The Norwegian Aurora Polaric Expedition, 1902-03, Vols I and II*, H. Ascheboub, Christiania.
- Birn, J., J. F. Drake, M. A. Shay, B. N. Rogers, R. E. Denton, M. Hesse, M. Kuznetsova, Z. W. Ma, A. Bhattacharjee, A. Otto, and P. L. Pritchett (2001), Geospace Environment Modeling (GEM) magnetic reconnection challenge, *J. Geophys. Res.*, *106*, 3715.
- Birn, J., K. Galsgaard, M. Hesse, M. Hoshino, J. Huba, G. Lapenta, P. L. Pritchett, K. Schindler, L. Yin, J. Buchner, T. Neukirch, and E. R. Priest (2005), Forced magnetic reconnection, *Geophys. Res. Lett.*, *32*, L06105, doi:10.1029/2004GL022058.
- Caan, M. N., R. L. McPherron, and C. T. Russell (1975), Substorm and interplanetary magnetic field effects on the geomagnetic tail lobes, *J. Geophys. Res.*, *80*, 191.
- Cheng, C. Z., and A. T. Y. Lui (1998), Kinetic ballooning instability for substorm onset and current disruption observed by AMPTE/CCE, *Geophys. Res. Lett.*, *25*, 4091.
- Coppi, B., G. Laval, and R. Pellat (1966), Dynamics of the geomagnetic tail, *Phys. Rev. Lett.*, *16*, 1207.
- Daughton, W. (1998), Kinetic theory of the drift kink instability in a current sheet, *J. Geophys. Res.*, *103*, 29,429.
- Dobrowolny (1968), M., Instability of a neutral sheet, *Nuovo Cimento*, *55*, 427.
- Dungey, J. W. (1961), Interplanetary magnetic field and the auroral zones, *Phys. Rev. Lett.*, *6*, 47.
- Hones, E. W. Jr. (1979), Transient phenomena in the magnetotail and their relation to substorms, *Space Sci. Rev.*, *23*, 393.
- Kamide, Y. (1991), The auroral electrojets: Relative importance of ionospheric conductivities and electric fields, in *Auroral Physics*, p. 385, edited by C.-I. Meng, M. J. Rycroft, and L. A. Frank, Cambridge University Press, Cambridge.
- Kamide, Y., and S. Kokubun (1996), Two-component auroral electrojet: Importance for substorm studies, *J. Geophys. Res.*, *101*, 13,027, 1996.
- Kan, J. R. (1993), A global magnetosphere-ionosphere coupling model of substorms, *J. Geophys. Res.*, *98*, 17,263.
- Kan, J. R., L. Zhu, and S.-I. Akasofu (1988), A theory of substorms: Onset and subsidence, *J. Geophys. Res.*, *93*, 5624.
- Kaufmann, R. L. (1987), Substorm currents: Growth phase and onset, *J. Geophys. Res.*, *92*, 7471.
- Lee, L. C., Z. F. Fu, and S.-I. Akasofu (1985), A simulation of forced reconnection processes and magnetospheric substorms and storms, *J. Geophys. Res.*, *90*, 10,896.

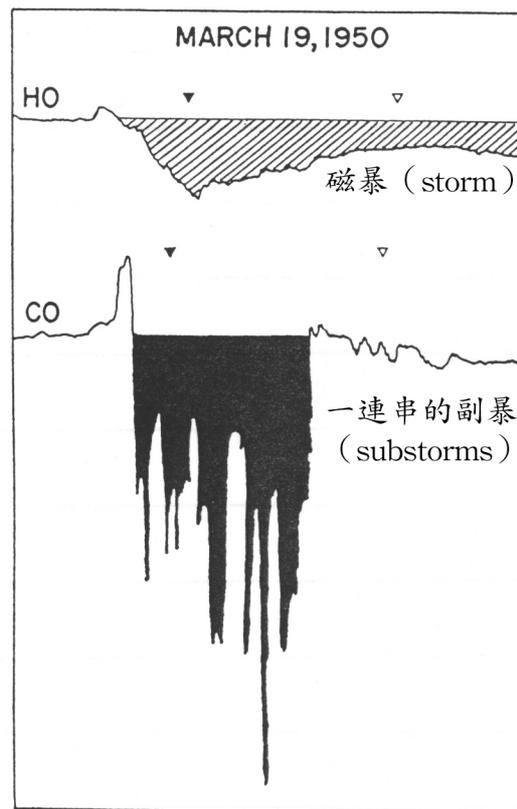
- Lui, A. T. Y., R. E. Lopez, S. M. Krimigis, R. W. McEntire, L. J. Zanetti, and T. A. Potemra (1988), A case study of magnetotail current sheet disruption and diversion, *Geophys. Res. Lett.*, *15*, 721.
- Lui, A. T. Y., R. E. Lopez, B. J. Anderson, K. Takahashi, L. J. Zanetti, R. W. McEntire, T. A. Potemra, D. M. Klumpar, E. M. Greene, and R. Strangeway (1992), Current disruption in the near Earth neutral sheet region, *J. Geophys. Res.*, *97*, 1461.
- Lui, A. T. Y., C. L. Chang, and P. H. Yoon (1995), Preliminary nonlocal analysis of cross-field current instability for substorm expansion onset, *J. Geophys. Res.*, *100*, 19,147.
- Lyu, L. H., and M. Q. Chen (2000), A kinetic M-I coupling model with unloading instability at onset of substorm, *Proc. 5th International Conference on Substorms, St. Petersburg, Russia, 16-20 May 2000, ESA SP-433*, pp. 315-318, July 2000.
- Lyons, L. R. (1996), Substorms: Fundamental observational features, distinction from other disturbances, and external triggering, *J. Geophys. Res.*, *101*, 13,011.
- McPherron, R. L. (1972), Substorm related changes in the geomagnetic tail: The growth phase, *Planet. Space Sci.*, *20*, 1521, 1972.
- Ohtani, S., K. Takahashi, L. J. Zanetti, T. A. Potemra, R. W. McEntire, and T. Iijima (1992), Initial signatures of magnetic field and energetic particle fluxes at tail reconfiguration: Explosive growth phase, *J. Geophys. Res.*, *97*, 19,311.
- Pritchett, P. L. (2005), The "Newton Challenge": Kinetic aspects of forced magnetic reconnection, *J. Geophys. Res.*, *110*, A10213, doi:10.1029/2005JA011228.
- Pritchett, P. L., F. V. Coroniti, and V. K. Decyk (1996), Three-dimensional stability of thin quasi-neutral current sheets, *J. Geophys. Res.*, *101*, 27,413.
- Rostoker, G. (1983), Triggering of expansion phase intensifications of magnetospheric substorms by northward turnings of the interplanetary magnetic field, *J. Geophys. Res.*, *88*, 6981.
- Rostoker, G., M. Mareschal, and J. C. Samson (1982), Response of dayside net downward field-aligned current to changes in the interplanetary magnetic field and to substorm perturbations, *J. Geophys. Res.*, *87*, 3489.
- Roux, A., S. Perraut, A. Morane, P. Robert, A. Korth, G. Kremser, A. Pederson, R. Pellinen (1991), and Z. Y. Pu, Plasma sheet instability related to the westward traveling surge, *J. Geophys. Res.*, *96*, 17,697.
- Samson, J. C., and K. L. Yeung (1986), Some generalizations on the method of superposed epoch analysis, *Planet. Space Sci.*, *34*, 1133.
- Shue, J.-H., S. Ohtani, P. T. Newell, K. Liou, C.-I. Meng, A. Ieda, and T. Mukai (2003), Quantitative relationships between plasma sheet fast flows and nightside auroral power, *J. Geophys. Res.*, *108*(A6), 1231, doi:10.1029/2002JA009794
- Zhu, Z., and R. M. Winglee (1996), Tearing instability, flux ropes, and the kinetic current sheet kink instability in the Earth's magnetotail: A three-dimensional perspective from particle simulations, *J. Geophys. Res.*, *101*, 4885.



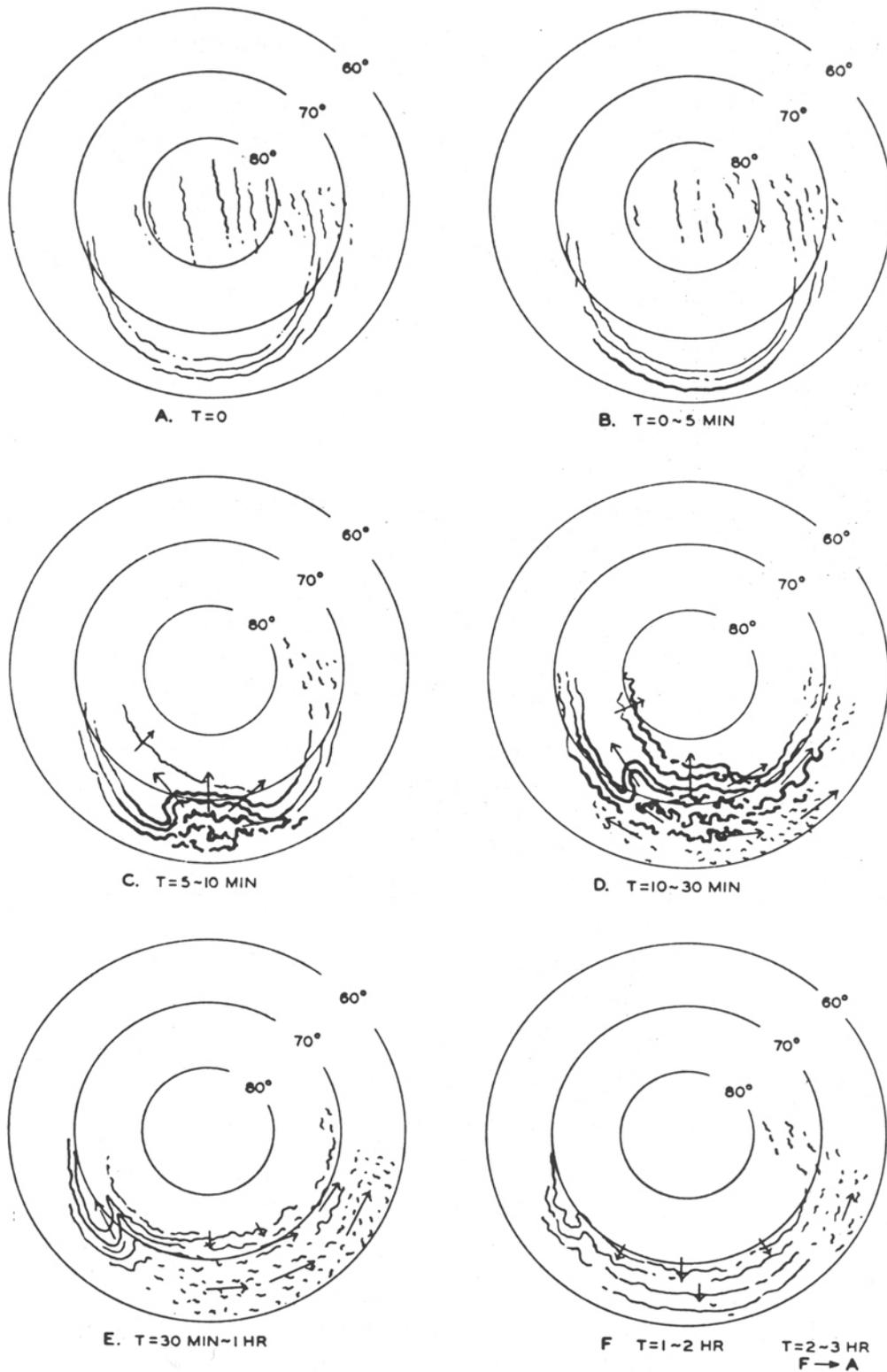
圖一、副暴發生時，電離層中的東、西向電流系統，以及場向電流所組合而成的Substorm Region-I current system的示意圖。



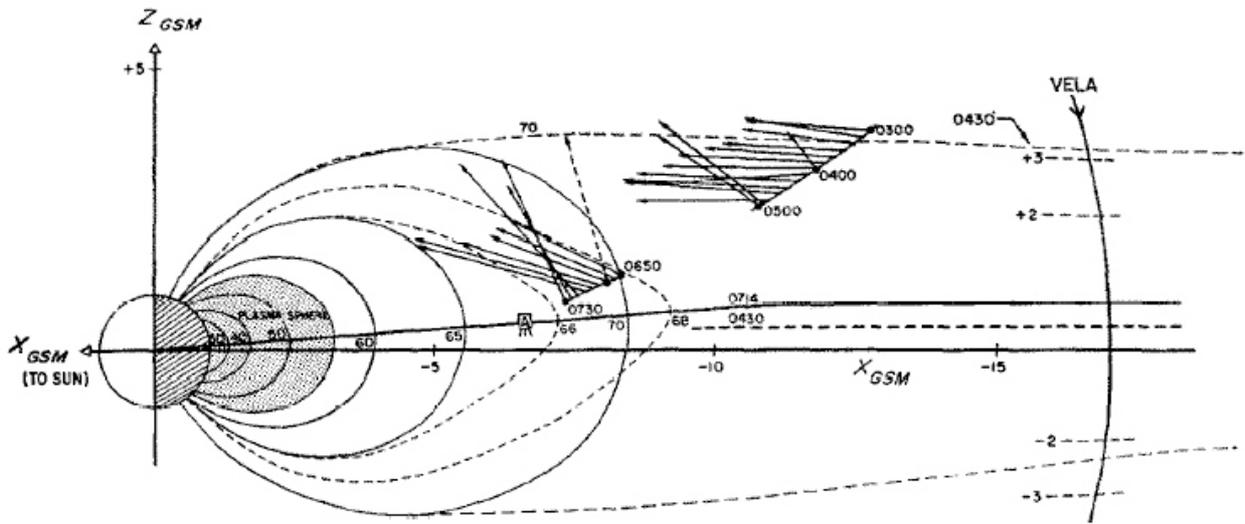
圖二、磁暴時地磁變化示意圖。其中小尺度的DP擾動，乃副暴所造成的地磁擾動，疊加在原有的磁暴地磁擾動曲線上。



圖三、磁暴與磁副暴之地磁擾動強度比較。上圖為夏威夷的地磁觀測，下圖為阿拉斯加的地磁觀測。



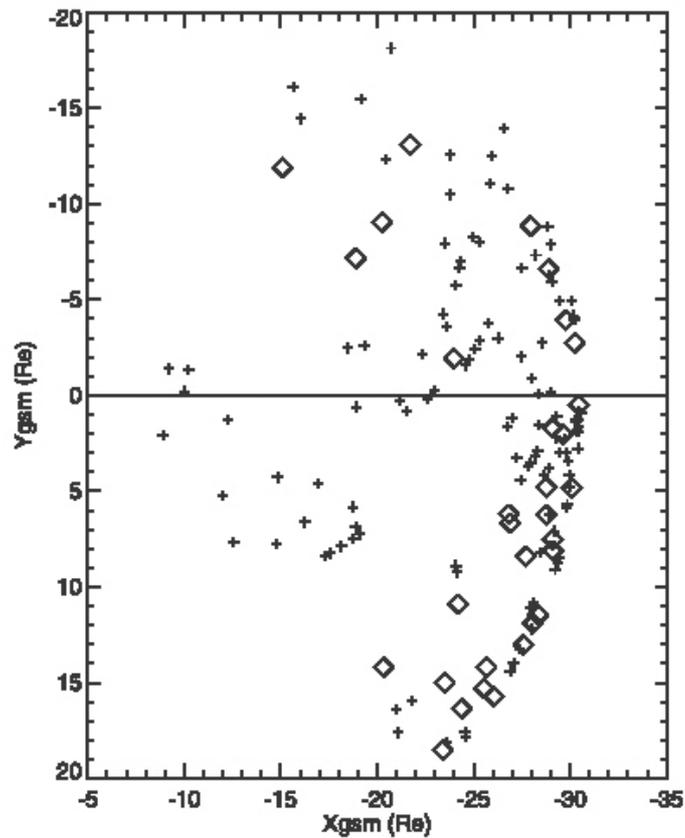
圖四、極光副暴發生時，極光活動所呈現的一個標準的發展模式。（採自Akasofu, 1964）



PROJECTION OF OGO-5 TRAJECTORY AND VECTOR FIELD OBSERVATIONS IN MIDNIGHT MERIDIAN PLANE ON AUGUST 15, 1968.

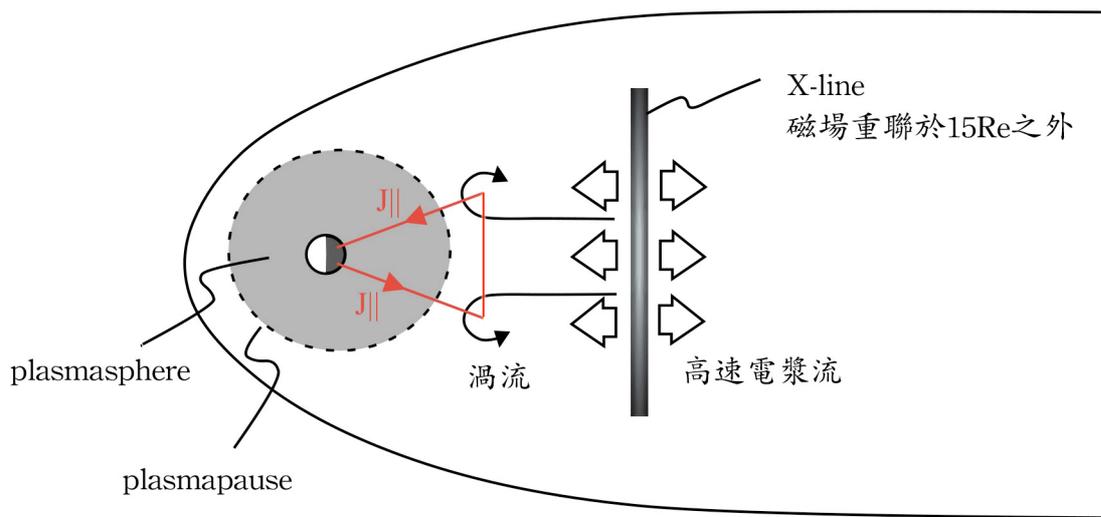
Dashed field lines show quiet time field and solid field lines show dipole field configuration. OGO 5 was in the lobe until 0445 when it entered the plasma sheet. It momentarily re-entered the lobe at 0712 just before the onset of the second substorm.

圖五、磁層副暴由成長期到爆發期之磁尾磁場變化情形。(採自McPherron, 1972)

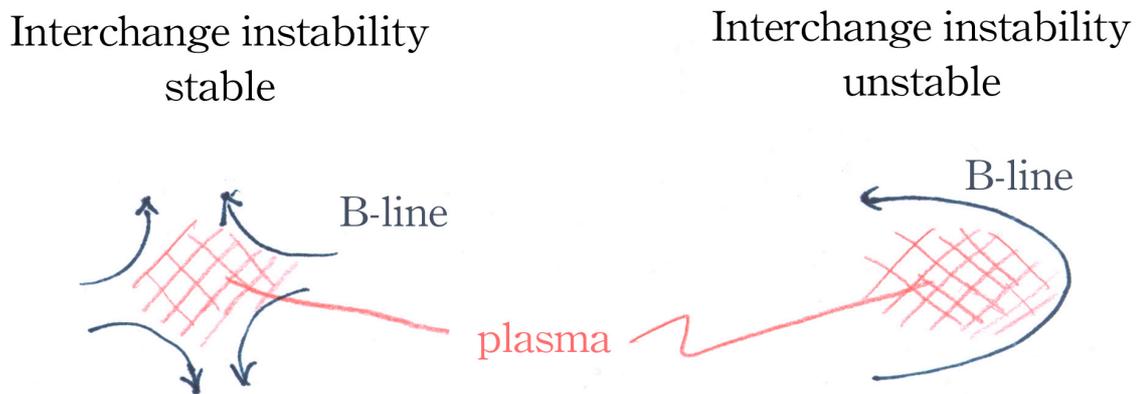


Distribution of Geotail locations in Geocentric Solar Magnetospheric (GSM) coordinates. Pluses and diamonds denote locations for earthward and tailward fast flows, respectively.

圖六、磁尾快速電漿流之流向統計分布圖。(採自Shue et al., 2003)



圖七、磁尾十五個半徑之外的磁場線重聯，造成NEPS區渦流，導致該區跨磁尾電流的阻斷（current disruption）以及一對current wedges的形成。



圖八、由磁場線相對電漿分布決定interchange instability是否穩定的示意圖。