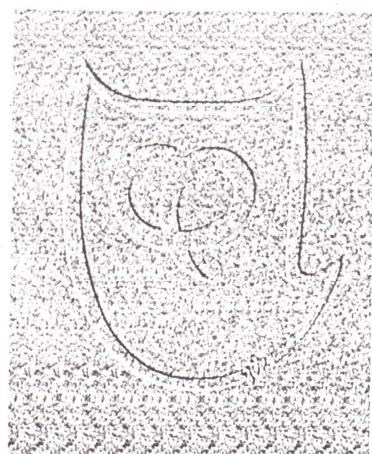


23/54

7<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Φυσικής  
&  
**6<sup>ο</sup> Κοινό Συνέδριο**  
Ένωσης Ελλήνων Φυσικών και Ένωσης Κυπρίων Φυσικών

**ΠΡΑΚΤΙΚΑ ΣΥΝΕΔΡΙΟΥ  
ΤΟΜΟΣ Α'**



Ηράκλειο, 4-7 Απριλίου 1996



**ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΟΛΩΝ ΤΟΥ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΣΤΗ ΓΗΝΗ  
ΜΑΓΝΗΤΟΣΦΑΙΡΑ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΝΑΡΞΗ ΜΑΓΝΗΤΟΣΦΑΙΡΙΚΩΝ  
ΥΠΟΚΑΤΑΙΓΙΔΩΝ ΜΕ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΓΕΩΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΔΟΡΥΦΟΡΩΝ ΚΑΙ  
ΕΠΙΓΕΙΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ**

Άννα Μπελεχάκη<sup>1</sup>, Ελένη Μαυρομιχαλάκη<sup>2</sup> και Ιωάννα Τσαγγούρη<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, Ινστιτούτο Ιονόσφαιρας και Φυσικής Διαστήματος,  
Μεταξά & Β. Παύλου, 15236 Π.Πεντέλη

<sup>2</sup>Πανεπιστήμιο Αθηνών, Φυσικό Τμήμα, Τομέας Πυρηνικής Φυσικής & Στοιχειωδών  
Σωματιδίων, Σόλωνος 104, 10680 Αθήνα

**Περίληψη**

Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται παρατηρήσεις από τους γεωσύγχρονους δορυφόρους GOES-5 και GOES-6 και από δ επίγεια παρατηρητήρια κατά τη διάρκεια μαγνητοσφαιρικών υποκαταιγίδων. Οι δορυφόροι GOES-5 και GOES-6 βρίσκονται σε γεωγραφικά μήκη 282°E και 265°E αντίστοιχα, ενώ τα επίγεια παρατηρητήρια εκτείνονται σε γεωγραφικά μήκη 202°E μέχρι 294°E. Η συγκεκριμένη διάταξη των σημείων παρατήρησης στο χώρο μας επιτρέπει τη μελέτη των μεταβολών της μαγνητικής τοπολογίας στην εσωτερική μαγνητοσφαιρια που οφείλονται σε δυναμικές διαταραχές των ηλεκτρικών ρευμάτων που ρέουν σ' αυτή την περιοχή.

**Εισαγωγή**

Κατά τη διάρκεια μιας μαγνητοσφαιρικής υποκαταιγίδας, η διαμόρφωση του μαγνητικού πεδίου στη γεωσύγχρονη τροχιά εμφανίζει δραστικές μεταβολές. Στη φάση ανάπτυξης το μαγνητικό πεδίο εκτρέπεται ολόένα και περισσότερο από τη σχεδόν διπολική σε κομπτοειδή (taillike) μορφή. Η έναρξη της φάσης επέκτασης σηματοδοτείται από μια επαναδιαμόρφωση του μαγνητικού πεδίου στη διπολική μορφή του (dipolarization)[1]. Η διαδικασία της διπόλισης γίνεται εξαιτίας της απόκλισης/διάσπασης μέρους του εγκαρπίου ρεύματος της μαγνητοουράς προς την ιονόσφαιρα [2]. Επιτλέον, από την άποψη της μεταφοράς ενέργειας από τη μαγνητοσφαιρια στην ιονόσφαιρα η έναρξη της φάσης επέκτασης συνοδεύεται από απότομη απελευθέρωση ενέργειας αποθηκευμένης στη μαγνητοουρά [3]. Η απόκλιση/διάσπαση του εγκαρπίου ρεύματος μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα την απελευθέρωση της μαγνητικής ενέργειας, μέσω της δημιουργίας του σφηνοειδούς ρεύματος της υποκαταιγίδας (substorm current wedge)[4]. Ετσι, το εγκάρσιο ρεύμα της μαγνητοουράς, ανατολικά της διαταραχής αποκλίνει προς την ιονόσφαιρα κατά μήκος των δυναμικών γραμμών (field aligned currents(FACs)), συνεχίζει στην ιονόσφαιρα σχηματίζοντας έναν προς δυσμάς ηλεκτροχείμαρο (westward electrojet) και επιστρέφει πίσω στη μαγνητοουρά δυτικά της διαταραχής, πάλι κατά μήκος των δυναμικών γραμμών. Ο σχηματισμός του σφηνοειδούς ρεύματος της υποκαταιγίδας αρχικά ενεργοποιείται σε μια στενή περιοχή κοντά στα τοπικά μεσάνυκτα και στη συνέχεια επεκτείνεται σε οξιμουθιακά, ανατολικά και δυτικά [5], αλλά και ακτινικά προς τη μαγνητοουρά [6;7].

Μια από τις πιο χαρακτηριστικές ενδείξεις μιας υποκαταιγίδας είναι η μεταβολή της ροής των ενεργητικών σωματιδίων [1;8]. Κατά τη διάρκεια της φάσης ανάπτυξης η ροή αυτή μειώνεται ενώ η έναρξη της υποκαταιγίδας συνοδεύεται από καταιγισμό ενεργητικών σωματιδίων (energetic particle injection). Η κυριότερη αιτία γι' αυτό είναι η λέπτυνση και στη συνέχεια η επέκταση της ζώνης του πλάσματος [9]. Επιπλέον, οι μεταβολές στη ροή των σωματιδίων στη γεωσύγχρονη τροχιά μπορούν να άποδοθούν στην μετατόπιση της εξωτερικής ζώνης παγιδευμένων σωματιδίων προς τη Γη [1].

Σκοπός αυτής της εργασίας είναι η μελέτη των ενδείξεων μιας μαγνητοσφαιρικής υποκαταιγίδας μέσω των μεταβολών της μαγνητικής τοπολογίας στην εσωτερική μαγνητοσφαιρια που οφείλονται στις δυναμικές διαταραχές των ηλεκτρικών ρευμάτων που ρέουν στην περιοχή και που περιγράφονται παραπάνω.

### Παρατηρήσεις

Σ' αυτή την εργασία χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα μαγνητικού πεδίου από τους δύο γεωστατικούς δορυφόρους GOES-5 και GOES-6 για την περίοδο Απρίλιος-Μάιος 1986. Τα γεωμαγνητικά πλάτη είναι περίπου 11° για τον GOES-5 και 9° για τον GOES-6, ενώ τα γεωγραφικά τους μήκη είναι 282°E και 265°E αντίστοιχα. Η απόσταση των δορυφόρων από το επίπεδο του μαγνητικού ισημερινού είναι 1.3 R<sub>g</sub> (βόρεια) για τον GOES-5 και 1R<sub>g</sub> (βόρεια) για τον GOES-6. Η απόκλιση της ουδέτερης ζώνης από το επίπεδο του μαγνητικού ισημερινού είναι αμελητέα [10], συνεπώς οι παραπάνω τιμές αντιστοιχούν επίσης στη θέση των δορυφόρων ως προς την ουδέτερη ζώνη. Οι τιμές του ήσυχου γεωμαγνητικού πεδίου έχουν αφαιρεθεί από τις τιμές του μαγνητικού πεδίου των GOES, με βάση το μοντέλο Rufenach [11] και το διαταραγμένο πεδίο παρουσιάζεται στο VDH σύστημα συντεταγμένων. Χρησιμοποιήθηκαν επίσης δεδομένα από έξι επίγεια παρατηρητήρια, από 202°E έως 294°E σε γεωγραφικό μήκος. Είναι κυρίως μέσου και χαμηλού πλάτους σταθμοί. Ο δορυφόρος GOES-5 βρίσκεται μεταξύ των μεσημβρινών του Fredericksburg και του San Juan, ενώ ο GOES-6 μεταξύ των αντίστοιχων του Tucson και του Boulder. Η συγκεκριμένη διάταξη των σημείων παρατήρησης μας επιτρέπει την αναγνώριση των ενδειξεών μιας μαγνητοσφαιρικής υποκαταγίδας στη γεωσύγχρονη περιοχή και τη μελέτη αυτών.

Στην εργασία αυτή παρουσιάζουμε αναλυτικά το γεγονός της 7ης Μαΐου 1986 που συνέβη μεταξύ 0500-0900 UT. Στο Σχ.1 παρουσιάζονται οι ενός λεπτού τιμές της H-, V- και D-συνιστώσας του διαταραγμένου μαγνητικού πεδίου, η πυκνότητα ενέργειας του πεδίου και η ροή των ενεργητικών πρωτονίων με ενέργειες 0.6-4.2 MeV, από τους GOES-5 και GOES-6. Με τις κάθετες γραμμές σημειώνεται η τοπική έναρξη (local onset) της υποκαταγίδας. Με τον όρο αυτό ορίζουμε το χρόνο στον οποίο ένας συγκεκριμένος δορυφόρος καταγράφει τη διπόλιση του πεδίου. Από τα μαγνητογράμματα της V- και H- συνιστώσας φαίνεται καθαρά η αλλαγή στη γεωμετρία του πεδίου προς μια κομητειδή διαμόρφωση πριν την τοπική έναρξη. Η D-συνιστώσα επηρεάζεται από την ύπαρξη των ρευμάτων κατά μήκος των δυναμικών γραμμών. Την πρώτη ένδειξη αυτών έχουμε στις 0612 UT στη θέση του GOES-6 με μία προς δυσμάς διαταραχή της D-συνιστώσας, ενώ στη θέση του GOES-5 η πρώτη ένδειξη είναι στις 0615 UT με προς ανατολάς διαταραχή. Οι παραπάνω παρατηρήσεις δηλώνουν ότι ο GOES-6 ήταν πιο κοντά στο κέντρο της διαταραχής και ότι οι δύο δορυφόροι αρχικά βρίσκονται εκατέρωθεν αυτού. Πιο συγκεκριμένα ο GOES-5 είναι ανατολικά του κέντρου της διαταραχής, ενώ ο GOES-6 είναι δυτικά αυτού. Το κέντρο προτείνεται να είναι μεταξύ 252°E και 268°E, ή καλύτερα μεταξύ 2300-2400 MLT. Και οι δύο δορυφόροι βρίσκονται κάτω από τη ζώνη των FACs, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το κέντρο της διαταραχής τοποθετείται πίσω από τη γεωσύγχρονη τροχιά και προς τη μαγνητοουρά. Η διπόλιση του πεδίου καταγράφεται πρώτα από τον GOES-6 στις 0641 UT ενώ από τον GOES-5 στις 0653 UT. Σύμφωνα με το Σχ.1 η διπόλιση του πεδίου συμπίπτει χρονικά με μία μείωση της πυκνότητας ενέργειας του πεδίου, η οποία μπορεί να ερμηνευτεί σαν απελευθέρωση της μαγνητικής ενέργειας που αποθηκεύτηκε στη μαγνητοουρά κατά τη διάρκεια της φάσης ανάπτυξης. Η απελευθέρωση της ενέργειας μπορεί να αποδοθεί στην διάσπαση/απόκλιση του εγκαρδίου ρεύματος της μαγνητοουράς και συνεπώς ο κλασσικός ορισμός της έναρξης της υποκαταγίδας συμπίπτει με την άποψη του μοντέλου του σφηνοειδούς ρεύματος. Επιπλέον από το Σχ.1 ο GOES-6 φαίνεται να καταγράφει καθαρά μια μείωση στη ροή των σωματιδίων κατά τη φάση ανάπτυξης ενώ η διπόλιση συμπίπτει με καταιγισμό των σωματιδίων. Επειδή οι GOES δορυφόροι κινούνται στη γεωσύγχρονη τροχιά το παρουσιάζουμενο ενεργειακό κανάλι αντιστοιχεί στα σωματίδια της εξωτερικής ζώνης παγιδευμένων σωματιδίων. Ετσι η μείωση στη ροή των σωματιδίων μπορεί να εξηγηθεί με μεταπότιση της ζώνης αυτής προς τη Γη.

Τα μαγνητογράμματα της D- και H-συνιστώσας από τα επίγεια παρατηρητήρια για το ίδιο γεγονός δίνονται στο Σχ.2. Οι διαταραχές στην D- συνιστώσα είναι εξαιτίας των ρευμάτων κατά μήκος των δυναμικών γραμμών που έρχονται ή φεύγουν από τη Γη, ενώ η H-συνιστώσα επηρεάζεται από το όλο σύστημα του ρεύματος της υποκαταγίδας. Θετική

μεταβολή στην Η-συνιστώσα συνοδευόμενη με προς δυσμάς απόκλιση του πεδίου (αρνητική D διαταραχή) δηλώνει ότι ο επίγειος σταθμός τοποθετείται ανατολικά της περιοχής της διαταραχής, ενώ στην αντίθετη περίπτωση (θετική D απόκλιση) ο σταθμός προτείνεται να είναι δυτικά της διαταραχής [6]. Σύμφωνα με το παραπάνω σενάριο, το Tucson και το Boulder βρίσκονται δυτικά της διαταραχής, ενώ το Fredericksburg και το San Juan ανατολικά αυτής. Συνεπώς το κέντρο της διαταραχής τοποθετείται μεταξύ 255°E-269°E, το οποίο είναι σε σύμφωνία με το αντίστοιχο αποτέλεσμα από τη μελέτη των δεδομένων από τους δορυφόρους. Η περιοχή εκκίνησης της υποκαταιγίδας λοιπόν, αρχικά περιορίζεται σε μια στενή περιοχή κοντά στα τοπικά μεσάνυχτα και στη συνέχεια επεκτείνεται δυτικά και ανατολικά. Οι ταχύτητες διάδοσης υπολογίζονται από τα επίγεια μαγνητογράμματα της Η-συνιστώσας και οι υπολογιζόμενες τιμές είναι 0.48°/min για την προς ανατολάς διάδοση και 0.93°/min για την προς δυσμάς διάδοση.

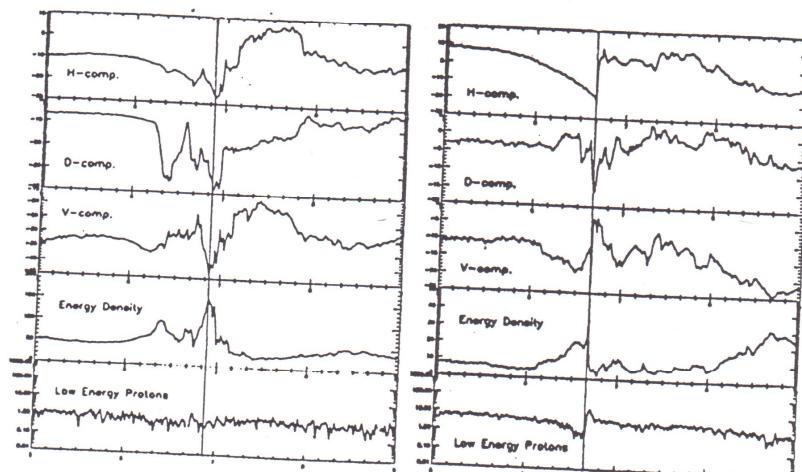
### Συμπεράσματα

Οι ενδείξεις μιας μαγνητοσφαιρικής υποκαταιγίδας στη γεωσύγχρονη τροχιά παρουσιάζονται στην εργασία αυτή και είναι σε συμφωνία με το μοντέλο της διάσπασης του εγκαρσίου ρεύματος της μαγνητοουράς. Πριν την έναρξη της υποκαταιγίδας και κατά τη διάρκεια της φάσης ανάπτυξης, το περίπου διπολικό μαγνητικό πεδίο αποκλίνει προς μία πιο κομητοειδή διαμόρφωση. Συγχρόνως, μαγνητική ενέργεια αποθηκεύεται στη μαγνητοουρά, ζώνη του πλάσματος λεπταίνει και η εξωτερική ζώνη παγιδευμένων σωματιδίων φαίνεται να κινείται προς τη Γη. Οι ενδείξεις αυτές μπορούν να αποδοθούν σε αύξηση της έντασης του εγκαρσίου ρεύματος και σε μετατόπιση του εσωτερικού ορίου της ζώνης του εγκαρσίου ρεύματος προς τη Γη. Η έναρξη της υποκαταιγίδας σηματοδοτείται από επαναφορά του πεδίου στη διπολική τοπολογία, η οποία συμπίπτει με απελευθέρωση της ενέργειας και συνοδεύεται απ' το σχηματισμό του σφηνοειδούς ρεύματος της υποκαταιγίδας. Ο σχηματισμός αυτός αρχικά περιορίζεται, αζιμουθιακά και ακτινικά, σε μια στενή περιοχή κοντά στα τοπικά μεσάνυκτα. Η προτεινόμενη θέση για το κέντρο του είναι μεταξύ 2300-2400 MLT και σε ακτινική απόσταση πίσω από τη γεωσύγχρονη τροχιά. Το πλάτος του υπολογίζεται να είναι μικρότερο από 2h σε MLT. Ο σχηματισμός αυτός επεκτείνεται αζιμουθιακά, ανατολικά και δυτικά, με μια ταχύτητα διάδοσης προς δυσμάς λίγο μεγαλύτερη από την αντίστοιχη προς ανατολάς αν και οι δύο ταχύτητες είναι της ίδιας τάξης.

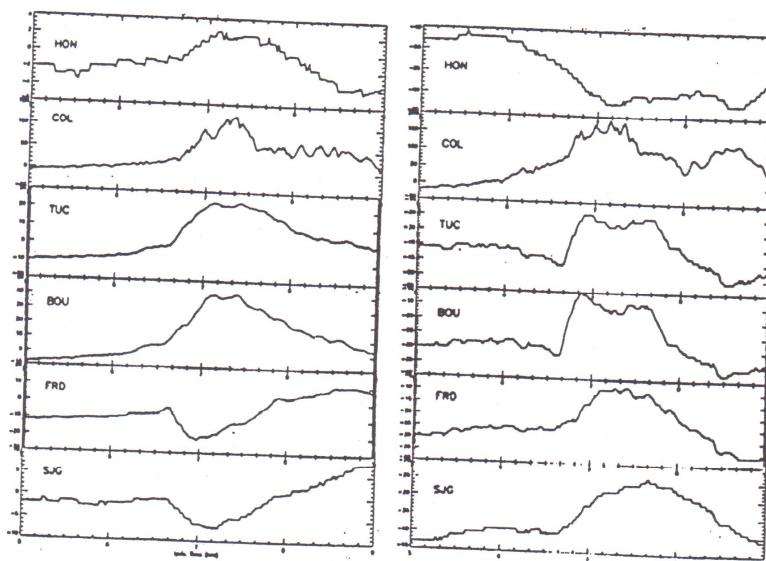
### Αναφορές

- [1] Sauvage J.A. and J.R. Winckler: "Dynamics of plasma, energetic particles, and fields near synchronous orbit in the nighttime sector during magnetospheric substorms", *J. Geophys. Res.*, 85, 2043-2056, 1980.
- [2] Lui, A.T.Y.: "Estimates of current changes in the geomagnetic tail associated with a substorm", *Geophys. Res. Lett.*, 5, 853-856 1978.
- [3] Belehaki et al.: "Energy dissipation during a small substorm, *Ann. Geophysical* 13, 494-504, 1995.
- [4] McPherron R.L. et al.: "Satellite studies of magnetospheric substorms on August 15, 1968: 9. Phenomenological model for substorms", *J. Geophys. Res.*, 78, 3131-3149, 1973.
- [5] Nagai T.: "Observed magnetic substorm signatures at synchronous altitude", *J. Geophys. Res.*, 87, 4405-4417, 1982.
- [6] Lopez R.E and A.T.Y. Lui: "A multisatellite case study of the expansion of a substorm current wedge in the near-Earth magnetotail", *J. Geophys. Res.*, 95, 8009-8017, 1990.
- [7] Ohtani S. et al.: "Tail current disruption in the geosynchronous region, *Geophysical Monograph* 64, 131, 1991.
- [8] Lopez R.E. et al.: "The longitudinal and radial distribution of magnetic reconfigurations in the near-Earth magnetotail as observed by AMPTE/CCE", *J. Geophys. Res.*, 93, 997-1001, 1988.
- [9] Lopez R.E. et al.: "On the relationship between the energetic particle flux morphology and the change in the magnetic field magnitude during substorms" *J. Geophys. Res.*, 94, 17105-17119, 1989.
- [10] Lopez R.E.: "The position of the magnetotail neutral sheet in the Near-Earth region", *Geophys. Res. Lett.*, 17, 1617-1620 1990.

- [11]Rufenach C.L. et al: "The quiet geomagnetic field at geosynchronous orbit and its dependence on the solar wind dynamic pressure", *J. Geophys. Res.*, 97, 25-42 1992.



Σχ.1: Τα μαγνητογράμματα της H-, D- και V-συνιστώσας του μαγνητικού πεδίου, η πυκνότητα ενέργειας και η ροή των ενεργητικών πρωτονίων με ενέργειες 0.6-4.2 MeV, από τους GOES-5 και GOES-6.



Σχ.2: Τα μαγνητογράμματα της D- και H- συνιστώσας από έξι επίγεια παρατηρητήρια.