



ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΑΣΤΡΟΦΥΣΙΚΗΣ, ΑΣΤΡΟΝΟΜΙΑΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

Ιωάννα Αμαρυλλίς Πατσού

A.M.: 200822

*Μελέτη ρευμάτων Ηλιακού Ανέμου και διαπλανητικού
μαγνητικού πεδίου με δεδομένα της αποστολής STEREO*

Ερευνητική εργασία για τη λήψη του Μ.Δ.Ε.
Αστροφυσικής, Αστρονομίας και Μηχανικής

Επιβλέπων καθηγητής: Ξ. Δ. Μουσάς Καθηγητής
Μέλη εξεταστικής επιτροπής:
Π. Πρέκα – Παπαδήμα Επίκουρος Καθηγήτρια
Ε. Χριστοπούλου – Μαυρομιχαλάκη Καθηγήτρια

ΑΘΗΝΑ

2012

Στη μητέρα μου και τη Νάνσυ

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθούν οι άνθρωποι εκείνοι που ποικιλοτρόπως συνέβαλλαν στη διεκπεραίωση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας.

Πρώτιστα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της εργασίας κο. Ξ. Δ. Μουσά, Καθηγητή του Τμήματος Φυσικής για την επιστημονική του καθοδήγηση. Η βοήθεια και το ενδιαφέρον του ήταν διαρκή τόσο σε επιστημονικό όσο και σε προσωπικό επίπεδο.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τις καθηγήτριες της επιτροπής κρίσεως της εργασίας, κα. Π. Πρέκα – Παπαδήμα και κα. Ε. Χριστοπούλου – Μαυρομιχαλάκη. Η άποψή τους επί της παρουσιάσεως της εργασίας και η συμβολή τους στη διόρθωση τυχόντων παροραμάτων στο παρόν σύγγραμμα είναι καθοριστικές.

Η συνεργασία με συναδέλφους της ομάδας Φυσικής Διαστήματος συνέβαλλε καθοριστικά στην επιτυχή διεκπεραίωση της παρούσας εργασίας. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω το Δρ. Κ. Διαλυνά και τους Π. Παπασπύρου, Α. Κουλουμβάκο και Δ. Ιωαννίδη-Βαμβακά οι οποίοι διέθεσαν αφειδώς το χρόνο τους για την επίλυση προβλημάτων τεχνικής φύσεως.

Τέλος, οφείλω να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τόσο τη μητέρα μου όσο και την εξαιρετικά καλή μου φίλη Νάνσυ. Με την κατανόηση και την πολύπλευρη συμπαράστασή τους συνέβαλλαν ουσιαστικότερα στην εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Περίληψη εργασίας

Ο Ηλιακός Άνεμος αποτελεί συνεχή ροή πλάσματος από το στέμμα του Ήλιου. Η ύπαρξή του προβλέφθηκε θεωρητικά το 1958 από τον E. Parker. Οι ιδιότητες του Ηλιακού Ανέμου στις οποίες είχε καταλήξει ο Parker επιβεβαιώθηκαν λίγα χρόνια αργότερα από διαστημικές μετρήσεις. Η επιτυχής πρόβλεψη του Parker και η έναρξη της διαστημικής εποχής άνοιξαν το δρόμο για την ανάπτυξη της Φυσικής Διαστήματος. Παρά το ότι έχουμε διαθέσιμα δεδομένα για τον Ηλιακό Άνεμο εδώ και μισό περίπου αιώνα, πάρα πολλά ερωτήματα παραμένουν ανοιχτά.

Είναι γνωστή ήδη από τις πρώτες παρατηρήσεις η ύπαρξη δύο κατηγοριών ρευμάτων Ηλιακού Ανέμου που διαφέρουν τόσο στις περιοχές προέλευσής τους όσο και στις φυσικές παραμέτρους τους. Η μια κατηγορία ρευμάτων είναι ο καλούμενος αργός Ηλιακός Άνεμος. Έχει ταχύτητες μέχρι $400 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ και φαίνεται να προέρχεται από τη ζώνη επισειδόντων (streamer belt). Από την άλλη πλευρά, διακρίνουμε το γρήγορο Ηλιακό Άνεμο που προέρχεται από τις στεμματικές οπές και η ταχύτητά του φτάνει τα $800 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ (ορισμένες φορές και παραπάνω). Τα αργά ρεύματα είναι πυκνότερα από τα γρήγορα. Τα πρωτόνια των αργών ρευμάτων έχουν θερμοκρασίες περίπου μια τάξη μεγέθους χαμηλότερη από των γρήγορων. Αντίθετα, η θερμοκρασία των ηλεκτρονίων φαίνεται να είναι συχνά περίπου η ίδια και για τις δύο κατηγορίες ρευμάτων.

Ο Ηλιακός Άνεμος είναι πλάσμα πολύ μεγάλης αγωγιμότητας και ως εκ τούτου διατηρεί το μαγνητικό του πεδίο μέσα του για πολύ χρόνο. Αυτό το εκφράζουμε λέγοντας ότι το μαγνητικό πεδίο είναι *παγωμένο* στον Ηλιακό Άνεμο. Η εκτόνωση του Ηλιακού Ανέμου και το παγωμένο μαγνητικό του πεδίο είναι οι κύριοι παράγοντες που διαμορφώνουν το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο. Για τη μορφή των γραμμών του μαγνητικού πεδίου του Ηλιακού Ανέμου έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα, με κυρίαρχο του Parker. Σύμφωνα με αυτό οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές, εξαιτίας του ότι είναι παγωμένες μέσα στο πλάσμα και του ότι ο Ήλιος περιστρέφεται, έχουν τη μορφή έλικας του Αρχιμήδη.

Αν και οι θεωρητικές προβλέψεις γενικά επιβεβαιώνονται από τις διαστημικές μετρήσεις, οι παρατηρήσεις ετών δείχνουν μεγάλο εύρος συμπεριφορών στον Ηλιακό Άνεμο και το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο. Ακόμα και σε περιόδους ηλιακού ελαχίστου, μπορούμε να δούμε διάφορες μορφές δυναμικών γραμμών και ποικίλα χρονικά προφίλ των παραμέτρων του ηλιακού πλάσματος. Οι παρατηρούμενες συμπεριφορές παρέχουν ενδείξεις για μεταβλητότητα των πηγών του Ηλιακού Ανέμου τις χρονικές και χωρικές μεταβολές. Επιπροσθέτως, όπως είναι γνωστό, το ηλιακό στέμμα είναι μια εξαιρετικά δυναμική περιοχή που δίδει εκρηκτικά φαινόμενα τα οποία επηρεάζουν το διαπλανητικό χώρο, άρα και τον Ηλιακό Άνεμο που ταξιδεύει σε αυτόν μαζί με το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο.

Η αποστολή STEREO ξεκίνησε το 2006, δίδοντάς μας για πρώτη φορά την ευκαιρία στερεοσκοπικής παρατήρησης του Ήλιου και του

διαπλανητικού χώρου. Αποτελείται από δύο σχεδόν πανομοιότυπα διαστημόπλοια κινούμενα σε ηλιοκεντρικές τροχιές περίπου στη 1 AU που παρατηρούν ταυτόχρονα τον Ήλιο παρέχοντας εικόνες του σε διάφορα μήκη κύματος, παραμέτρους πλάσματος, υπέρθερμων και ενεργητικών ηλιακών σωματιδίων και μετρήσεις μαγνητικού πεδίου. Με την αποστολή STEREO αναμένουμε πληροφορίες που θα συμβάλλουν στην περαιτέρω διαλεύκανση διαδικασιών στον Ήλιο και το διαπλανητικό χώρο, στο πώς προκαλούνται και εξελίσσονται, σε τρεις πλέον διαστάσεις, φαινόμενα και δομές, όπως οι Εκτινάξεις Στεμματικής Μάζας, ο Ηλιακός Άνεμος, οι στεμματικοί βρόχοι, τα μαγνητικά πεδία κλπ.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη ρευμάτων Ηλιακού Ανέμου και του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου με δεδομένα της αποστολής STEREO τη διετία 2007 – 2008. Ειδικότερα, εξετάζονται σε συγκεκριμένες περιόδους η πιθανή μεταβλητότητα των πηγών του Ηλιακού Ανέμου και η μορφή των γραμμών του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου. Επιχειρείται γεωμετρική κατασκευή των γραμμών για πρώτη φορά με τη βοήθεια μετρήσεων πλάσματος και μαγνητικού πεδίου από τα πειράματα PLASTIC και IMPACT της αποστολής. Επειδή εστιάζουμε στον Ηλιακό Άνεμο, η περίοδος ηλιακού ελαχίστου είναι η καλύτερη δυνατή για τη μελέτη μας, δεδομένου ότι δε λαμβάνει χώρα μεγάλος αριθμός μεταβατικών φαινομένων στο στέμμα και το διαπλανητικό χώρο και ο Ηλιακός Άνεμος κυριαρχεί.

Στο πρώτο κεφάλαιο δίδονται θεωρητικά στοιχεία για τον Ηλιακό Άνεμο, το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο και την αλληλεπίδραση μεταξύ των ρευμάτων του Ηλιακού Ανέμου. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή των μετρικών ηλιακών ραδιοεξάρσεων στη μελέτη των οποίων επικεντρώνεται σε σημαντικό βαθμό η αποστολή STEREO. Το τρίτο κεφάλαιο πελαμβάνει μια γενική εικόνα της αποστολής, των επιστημονικών της στόχων καθώς και τα αναγκαία θεωρητικά στοιχεία για την κατανόηση των διαδικασιών μέτρησης στα πειράματά της. Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφονται λεπτομερώς οι λειτουργίες των πειραμάτων SECCHI και WAVES και εξηγούνται βασικές τεχνικές λεπτομέρειες. Στο πέμπτο κεφάλαιο αναλύεται η λειτουργία των πειραμάτων IMPACT και PLASTIC και εξηγείται η επιλογή των μετρήσεων από αυτά για την παρούσα εργασία. Στο έκτο κεφάλαιο αναφερόμαστε στα κριτήρια επιλογής των περιόδων που μελετήσαμε και περιγράφεται η μέθοδος κατασκευής των γραμμών του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου με τη χρήση των πειραματικών δεδομένων της αποστολής. Στο έβδομο κεφάλαιο εξετάζονται διεξοδικά έξι περίοδοι τη διετία 2007-2008. Γίνεται συζήτηση επί της χρονικής μεταβολής των φυσικών μεγεθών που μετρήθηκαν καθώς και επί της πιθανής σύνδεσής τους με την κατάσταση στον Ήλιο την αντίστοιχη χρονική περίοδο. Σχολιάζεται η μορφή των γραμμών του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου για τις δύο περιόδους στις οποίες κατασκευάστηκαν. Τέλος συνοψίζονται τα κεντρικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα μελέτη.

Λέξεις – κλειδιά: Ρεύματα Ηλιακού Ανέμου, Διαπλανητικό Μαγνητικό πεδίο, STEREO, NASA, Ραδιοήλιος.

Summary

Solar wind is a continuous flow of plasma emanating from the solar corona. Its existence was predicted theoretically by Parker in 1958 and its properties have been confirmed since the first space missions. Even though a huge amount of data is available nowadays, many issues concerning the processes that control the acceleration of the solar wind and the ones that take place during its propagation in the interplanetary medium remain open.

Early in the spacecraft era data showed the existence of two solar wind streams whose origin and properties are quite unlike. The so – called slow solar wind streams have speeds less than $400 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ and come from the streamer belt. On the other hand, fast solar wind streams escape from coronal holes and travel to the interplanetary space with speeds that can even exceed $800 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$. Moreover, slow solar wind is more dense than the fast and protons in the former have temperatures one order of magnitude lower. The electron temperature is often observed to be pretty much the same for the two categories.

The solar wind plasma is characterized by very large values of electrical conductivity, hence it is able to maintain its magnetic field for long periods. This '*frozen-in*' magnetic field is carried outwards to great distances through the expansion of the solar wind and is the key factor that forms the interplanetary magnetic field. Interplanetary magnetic field lines are Archimedean spirals for two reasons: first, due to the fact that they are frozen in the solar wind plasma and, besides, because of the solar rotation.

On the whole, the Parker model for the solar wind and its magnetic field has been well confirmed by space data. However, both of them may exhibit a great variety of behavior. Even in solar minimum periods, various changes have been observed both in plasma parameters and the shape of magnetic field lines, making clear that solar wind sources can be highly variable. One should also keep in mind that the solar corona is an extremely dynamic area where eruptive phenomena take place. The latest may have a high impact on the interplanetary medium, hence to the solar wind with its frozen-in magnetic field, too.

The STEREO mission was launched in 2006 and is the first mission dedicated to stereoscopic observation of the solar atmosphere and the interplanetary space. It consists of two nearly identical spacecrafts which move in heliocentric orbits. STEREO-Ahead (or STEREO-A) travels ahead of Earth while STEREO-Behind (or STEREO-B) trails behind it. With the twin STEREO spacecraft nearly simultaneous images of the Sun in a variety of wavelengths are

available. Furthermore, almost concurrent measurements of the interplanetary magnetic field and the parameters of thermal, suprathermal and energetic particles are provided.

STEREO data will help us to elucidate the nature and the three-dimensional structure of Coronal Mass Ejections (CMEs), as well as any effects caused by CMEs during their propagation through the interplanetary space until they meet the terrestrial magnetosphere. Finally, through stereoscopic view we expect to gain insight into the three-dimensional structure of the solar wind, coronal loops, the solar and interplanetary magnetic fields in the inner heliosphere etc.

The main purpose of this thesis is the study of solar wind streams and the interplanetary magnetic field based on STEREO data for the two-year period 2007 – 2008. Particularly, the variability of the solar wind sources and the shape of the interplanetary magnetic field lines is examined for specific periods. We attempt for the first time to construct geometrically the interplanetary magnetic field lines using plasma and magnetic field data from the IMPACT and the PLASTIC experiments on board the two STEREO. Since we concentrate on the solar wind, the solar minimum period is the best available for our study, since the number of transient events is very small and the solar wind is the dominating structure.

In the first chapter of this thesis the main features of the solar wind are described, as well as the interplanetary magnetic field and the interaction between fast and solar wind streams. The second chapter includes major solar radio bursts characteristics, since the STEREO mission focuses very much on their study. In the third chapter after a general description of the STEREO measurements and the scientific objectives of the mission we mention theoretical issues that are necessary to understand the processes taking place during the STEREO measurements. A description of the SECCHI and the WAVES experiment follows in chapter four. In the fifth chapter the functions of the IMPACT and the PLASTIC experiment are described, as well as the data choice from them for the purposes of this thesis. The sixth chapter includes the criteria on which we based to choose specific periods to examine and the way the interplanetary magnetic field lines were constructed. In the seventh chapter we describe in detail the six periods we studied, providing the corresponding time profiles for all the physical parameters and commenting on the possible connections to the solar state during that period. The shape of the interplanetary magnetic field lines is constructed and described for two periods. Finally, the main conclusions of this work are discussed.

Key words: Solar Wind Streams, Interplanetary Magnetic Field, STEREO, NASA, Radio Sun

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	3
------------------	---

Περίληψη εργασίας.....	4
------------------------	---

Κεφάλαιο 1: Ο Ηλιακός Άνεμος

1.1	Στεμματικές Οπές.....	10
1.2	Επισείοντες (Streamers)	10
1.3	Ιστορικά στοιχεία για τον Ηλιακό Άνεμο.....	13
1.4	Βασικά χαρακτηριστικά του Ηλιακού Ανέμου – Γρήγορος και αργός Ηλιακός Άνεμος.....	14
1.5	Το μοντέλο του Parker για τον Ηλιακό Άνεμο.....	16
1.6	Το μαγνητικό πεδίο του Ηλιακού Ανέμου.....	21
1.7	Συμπεριστρεφόμενες Περιοχές Αλληλεπίδρασης.....	25

Κεφάλαιο 2: Ηλιακές Ραδιοεξάρσεις

2.1	Γενικά.....	26
2.2	Σύμφωνος και μη σύμφωνος μηχανισμός εκπομπής.....	27
2.3	Εκπομπή πλάσματος.....	29
2.4	Ραδιοεξάρσεις τύπου I.....	31
2.5	Ραδιοεξάρσεις τύπου II.....	32
2.6	Ραδιοεξάρσεις τύπου III.....	34
2.7	Ραδιοεξάρσεις τύπου IV.....	36
2.8	Ραδιοεξάρσεις τύπου V.....	38

Κεφάλαιο 3: Η αποστολή STEREO – Θεωρητικά στοιχεία

3.1	Γενικά.....	40
3.2	Επιστημονικοί στόχοι.....	42
3.3	Πειράματα της αποστολής.....	43
3.4	Ηλεκτροστατικοί Αναλυτές.....	44
3.5	Ανιχνευτές Στερεάς Κατάστασης.....	45
3.6	Γεωμετρικός Παράγοντας.....	46
3.7	Φασματοσκοπία ημιθερμικού θορύβου.....	47

Κεφάλαιο 4: Τα πειράματα SECCHI και WAVES της αποστολής STEREO

4.1	Το πείραμα SECCHI.....	48
4.2	Το πείραμα WAVES.....	51

Κεφάλαιο 5: Η επιλογή μετρήσεων από τα πειράματα IMPACT και PLASTIC της αποστολής STEREO

5.1	Το πείραμα IMPACT.....	54
5.1.1	Γενικά.....	54
5.1.2	Η διάταξη βραχίονα.....	55
5.1.3	Η διάταξη SEP.....	59
5.2	Το πείραμα PLASTIC.....	62
5.3	Περιγραφή δεδομένων.....	65

Κεφάλαιο 6: Επεξεργασία μετρήσεων

4.1	Στόχος επεξεργασίας.....	67
4.2	Κριτήρια μελέτης.....	67
4.3	Κατασκευή γραμμών διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου.....	68

Κεφάλαιο 7: Επιλογή περιόδων μελέτης ρευμάτων Ηλιακού Ανέμου και διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου

5.1	Η περίοδος 18 – 21 Μαΐου 2007.....	71
5.2	Η περίοδος 22 – 25 Μαΐου 2007.....	78
5.3	Η περίοδος 09 – 14 Δεκεμβρίου 2007.....	84
5.4	Η περίοδος 11 – 16 Ιανουαρίου 2008.....	89
5.5	Η περίοδος 08 – 13 Φεβρουαρίου 2008.....	94
5.6	Η περίοδος 20 – 25 Απριλίου 2008.....	98

Κεφάλαιο 8: Σύνοψη - συμπεράσματα.....

104

Βιβλιογραφία.....

105

Ιστοσελίδες.....

110

Κεφάλαιο 1

Ο Ηλιακός Άνεμος

1.1 Στεμματικές Οπές

Πρόκειται για περιοχές του στέμματος αραιότερες και ψυχρότερες από το περιβάλλον τους. Ανακαλύφθηκαν από το Skylab με παρατηρήσεις στις ακτίνες Χ. Συνδέονται με ανοιχτές μαγνητικές δυναμικές γραμμές. Η ανοιχτή δομή του μαγνητικού πεδίου επιτρέπει να ρέει σταθερά πλάσμα έξω από τις οπές. Οι στεμματικές οπές αποτελούν την πηγή των γρήγορων ρευμάτων Ηλιακού Ανέμου. Λόγω της πολύ χαμηλής πυκνότητάς τους οι στεμματικές οπές μπορούν να θεωρηθούν με καλή προσέγγιση ως πλάσμα άνευ συγκρούσεων (collisionless plasma). Επομένως αποτελούν ένα εξαιρετικό εργαστήριο για τον έλεγχο, με τη βοήθεια διαστημικών μετρήσεων, των κινητικών διαδικασιών άνευ συγκρούσεων (Cravner, 2009). Τέτοιες διαδικασίες θεωρείται ότι έχουν σημαντική συνεισφορά στη θέρμανση του ηλιακού στέμματος.

Σε ηλιακό ελάχιστο εντοπίζονται μεγάλες στεμματικές οπές κυρίως στις πολικές περιοχές του Ήλιου. Σε ηλιακό μέγιστο οι οπές του στέμματος μπορούν να βρίσκονται σε όλα τα ηλιογραφικά πλάτη και μπορούν να παραμείνουν για αρκετό χρονικό διάστημα πριν να εξελιχθούν σε διαφορετικές μαγνητικές δομές. Παρά το ότι η εικόνα αυτή ισχύει γενικά, έχουν εντοπιστεί σε περίοδο ελαχίστου (όπως για παράδειγμα το Μάιο του 2007) μεγάλες στεμματικές οπές γύρω από τον ισημερινό του Ήλιου που έχουν συσχετιστεί με φαινόμενα ηλιακής δραστηριότητας την περίοδο αυτή (βλ. κεφάλαιο 5).

1.2 Επισείοντες (Streamers)

Είναι μεγάλες αψιδωτές δομές του γενικού ηλιακού μαγνητικού πεδίου που εκτείνονται σε αποστάσεις $1.5 R_{\odot} - 3 R_{\odot}$. Συνήθως τις βλέπουμε συγκεντρωμένες σε μια ευρεία ζώνη γύρω από τον ηλιακό ισημερινό, η οποία για το λόγο αυτό ονομάζεται ζώνη επισειόντων (streamer belt). Μέσα στους μαγνητικούς βρόχους των επισειόντων βρίσκονται παγιδευμένα ηλεκτρόνια τα οποία ακτινοβολούν. Γι' αυτό το λόγο οι επισείοντες αποτελούν φωτεινές δομές του ηλιακού στέμματος. Φαίνεται ότι οι επισείοντες εμφανίζουν συσχέτιση με τα αργά ρεύματα Ηλιακού Ανέμου.

Οι επισείοντες μπορούν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες:

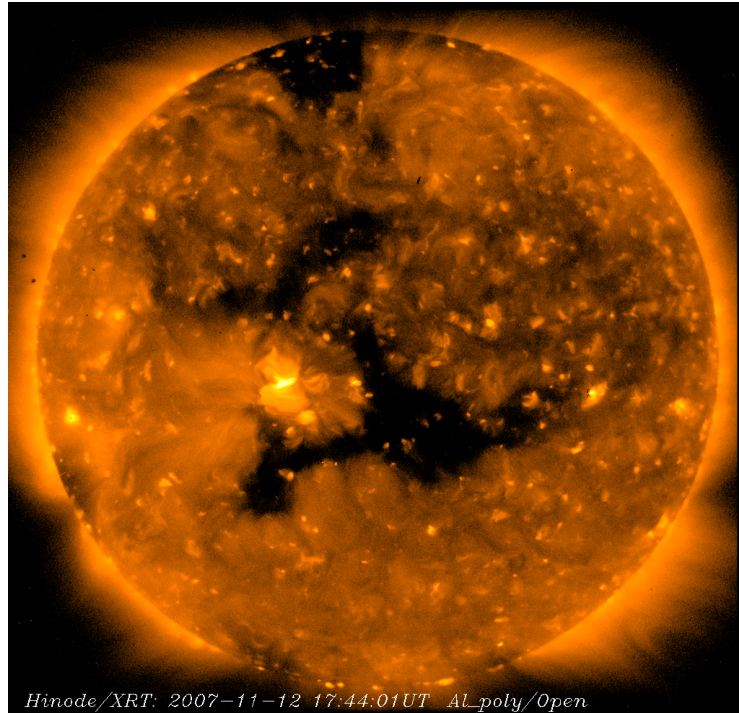
- 1) Ήρεμοι επισείοντες (helmet – type streamers)

Τους βλέπουμε στο ελάχιστο της ηλιακής δραστηριότητας και χαρακτηρίζονται (εκτός από τους φωτεινούς βρόχους εξωτερικά) από

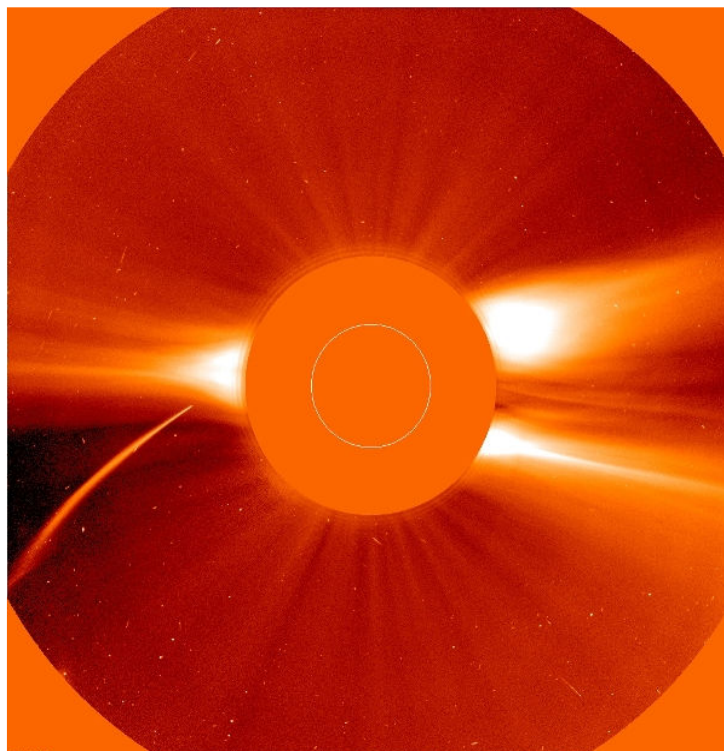
χαμηλότερη στεμματική ένταση στο κέντρο τους, κοντά στις βάσεις τους. Πολλές φορές στη σκοτεινή αυτή περιοχή έχει φωτογραφηθεί στο μήκος κύματος της γραμμής Ηα μια προεξοχή. Πιο πέρα από τους κλειστούς βρόχους, οι επισείοντες επιμηκύνονται σε δομές σχεδόν παράλληλες μεταξύ τους που εκτείνονται πολύ πιο πέρα από τη βασική μορφή του επισείοντος και συνιστούν ένα φύλλο ρεύματος. Οι ήρεμοι επισείοντες αποτελούν αρκετά σταθερές δομές, με χρόνο ζωής αρκετές ηλιακές περιστροφές.

2) Ενεργοί επισείοντες (active streamers)

Παρατηρούνται κύρια στο μέγιστο της ηλιακής δραστηριότητας και εμφανίζουν πολυπλοκότερη δομή στη βάση τους από τους ήρεμους. Στο κέντρο τους κοντά στις βάσεις τους, αντί χαμηλότερης έντασης και προεξοχών υπάρχει μια λαμπρή περιοχή η οποία προέρχεται από μαγνητικούς βρόχους που συνδέουν κέντρα δράσης σε διαφορετικά ηλιογραφικά πλάτη. Οι ενεργοί επισείοντες έχουν χρόνο ζωής κάποιων εβδομάδων. Αξίζει να σημειωθεί ότι φαίνεται να υπάρχει σύνδεση μεταξύ αυτών και φαινομένων της ηλιακής δραστηριότητας.



Σχήμα 1. Εικόνα στις 12 / 11 / 2007 από το διαστημόπλοιο Hinode τριών στεμματικών οπών που εκτείνονται από τον πόλο μέχρι τον ισημερινό του Ήλιου (http://spaceweather.com/images2007/13nov07/coronalhole_hinode_blank.gif?PHPSESSID=ped167n1gr7haqmvifeopo78d3).



Σχήμα 2. Η εσωτερική ζώνη επισειόντων (inner streamer belt) από τον κορονογράφο LASCO C2 κατά το πέρασμα του κομήτη SOHO-6 στις 23 / 12 / 1996 (http://sohowww.nascom.nasa.gov/gallery/images/large/xmascomet_prev.jpg).

1.3 Ιστορικά στοιχεία για τον Ηλιακό Άνεμο

Ο Ηλιακός Άνεμος είναι συνεχής ροή πλάσματος πολύ υψηλής αγωγιμότητας που προέρχεται από το στέμμα του Ήλιου. Η επιβεβαίωση από μετρήσεις διαστημοπλοίων της θεωρίας του Parker (Parker, 1958) πως το ηλιακό στέμμα δεν είναι στατικό (όπως θεωρούνταν), αλλά εκτονώνεται συνεχώς από αυτό υλικό ακτινικά προς τα έξω (ο επονομαζόμενος Ηλιακός Άνεμος), άλλαξε τα μέχρι τότε δεδομένα για τη δυναμική της ανώτερης ατμόσφαιρας του Ήλιου και αποτέλεσε μια από τις βάσεις της Διαστημικής Φυσικής.

Αν και οι πρώτες επιτόπιες μετρήσεις του Ηλιακού Ανέμου από διαστημόπλοια πραγματοποιήθηκαν τη δεκαετία του 1960, η ιδέα για ροή σωματιδίων από τον Ήλιο προς τη Γη είχε προταθεί ήδη από τις αρχές του 20^{ου} αιώνα. Για να εξηγήσει τη σχέση μεταξύ του φαινομένου του Σέλαος και των ηλιακών κηλίδων, ο Birkeland (1908) πρότεινε τη συνεχή εκπομπή σωματιδίων από αυτές. Καθοριστικό ρόλο στην ιδέα του Parker για τη συνεχή εκτόνωση του ηλιακού στέμματος διαδραμάτισαν προγενέστερες παρατηρήσεις των ουρών των κομητών. Ο Hoffmeister (1944) παρατήρησε ότι οι ιοντικές ουρές κομητών απέκλιναν σημαντικά από την ακτινική διεύθυνση και υποστήριξε ότι ο σχηματισμός τους οφείλεται στην επίδραση ροής ηλιακών σωματιδίων. Έως τότε πίστευαν ότι το σχήμα της ουράς των κομητών καθοριζόταν από την πίεση της ηλιακής ακτινοβολίας. Ο Biermann (1951) κατόπιν παρατηρήσεων επιβεβαίωσε την υπόθεση του Hoffmeister (1944). Διαπίστωσε ότι η ουρά σκόνης ενός κομήτη πράγματι κατευθύνεται ακτινικά και υπέθεσε ότι ο σχηματισμός της οφείλεται στην πίεση της ηλιακής ακτινοβολίας, αντίθετα από την ουρά ιόντων του κομήτη, της οποίας την κατεύθυνση απέδωσε σε επίδραση ροής ηλιακών σωματιδίων.

1.5 Βασικά χαρακτηριστικά του Ηλιακού Ανέμου – Γρήγορος και Αργός Ηλιακός Άνεμος

Όπως ειπώθηκε, ο Ηλιακός Άνεμος είναι μια συνεχής ροή ηλιακού πλάσματος που οφείλεται στο ότι το στέμμα του Ήλιου δεν είναι στατικό, αλλά εκτονώνεται συνεχώς. Η εκτόνωση του στέμματος είναι πρακτικά ακτινική. Για να φτάσει ένα τμήμα Ηλιακού Ανέμου στη Γη απαιτούνται χοντρικά τέσσερις ημέρες.

Ο παρακάτω πίνακας περιλαμβάνει τις τιμές (κατά μέσο όρο) που μας έχουν δώσει επιτόπιες μετρήσεις στην τροχιά της Γης για βασικά μεγέθη του Ηλιακού Ανέμου.

Φυσικό Μέγεθος	Τιμή στη 1 AU
Ταχύτητα ροής u ($\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$)	400 – 450
Ένταση μαγνητικού πεδίου B (nT)	7
Αριθμητική πυκνότητα πρωτονίων n_p (cm^{-3})	6.6
Αριθμητική πυκνότητα ηλεκτρονίων n_e (cm^{-3})	7.1
Θερμοκρασία πρωτονίων T_p ($^{\circ}\text{K}$)	$1.2\cdot 10^5$
Θερμοκρασία ηλεκτρονίων T_e ($^{\circ}\text{K}$)	$1.4\cdot 10^5$

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικές τιμές βασικών παραμέτρων του Ηλιακού Ανέμου στη 1 AU.

Ήδη από τις πρώτες διαστημικές μετρήσεις είναι γνωστή η ύπαρξη δύο διάκριτων κατηγοριών ρευμάτων Ηλιακού Ανέμου, που ονομάζονται *γρήγορος και αργός Ηλιακός Άνεμος*. Οι διαφορές τους άρχισαν να γίνονται αντιληπτές από τη δεκαετία του 1970. Οι Gosling et al., 1978 πρότειναν για πρώτη φορά ότι ο γρήγορος και ο αργός Ηλιακός Άνεμος προέρχονται από διαφορετικές περιοχές. Η άποψή τους επιβεβαιώθηκε από μετέπειτα μελέτη των Wimmer-Schweingruber et al., 1997 οι οποίοι επιπλέον έδειξαν ότι έχουμε αλλαγή της σύστασης του Ηλιακού Ανέμου κατά τη διέλευση μιας περιοχής αλληλεπίδρασης γρήγορου με αργό Ηλιακό Άνεμο. Εξαιρετικά σημαντικό αποτέλεσμα ήταν το ότι αυτές οι περιοχές αλληλεπίδρασης αποτελούν πραγματικά τρισδιάστατες δομές, κάτι που προέκυψε εξαιτίας της παρατηρούμενης εκτροπής του πλάσματος του Ηλιακού Ανέμου, τόσο στο επίπεδο της εκλειπτικής (Gosling et al., 1978) στη διεύθυνση ανατολής - δύσης, όσο και κάθετα σε αυτό στη διεύθυνση βορρά – νότου (Gosling et al., 1993).

Τα *ταχεία ρεύματα* Ηλιακού Ανέμου έχουν ταχύτητες ροής στο διάστημα $400 - 800 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$. Προέρχονται από τις στεμματικές οπές. Χαρακτηρίζονται από μεγάλη ευστάθεια για αρκετές ηλιακές περιστροφές και οι μεταβολές από ένα γρήγορο ρεύμα σε ένα άλλο δεν είναι μεγάλες. Είναι αρκετά αραιά, με μέση πυκνότητα ~ 3 ιόντα/ cm^3 στην τροχιά της Γης. Περίπου το 4% των ιόντων τους είναι ήλιο και μάλιστα το ποσοστό δε διαφοροποιείται μεταξύ των διαφόρων ταχέων ρευμάτων. Οι θερμο-

κρασίες που συναντούμε είναι της τάξης των 10^5 °K και είναι λίγο μεγαλύτερες για τα ιόντα σε σχέση με τα ηλεκτρόνια.

Αντίθετα, τα *αργά ρεύματα* Ηλιακού Ανέμου λαμβάνουν ταχύτητες από $250 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ έως $400 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ και είναι πιο πυκνά από το γρήγορα (πυκνότητα ~ 8 ιόντα/ cm^3 στην τροχιά της Γης). Τα πρωτόνια του αργού Ηλιακού Ανέμου είναι κατά μια τάξη μεγέθους ψυχρότερα από του γρήγορου, ενώ η θερμοκρασία των ηλεκτρονίων συχνά είναι περίπου η ίδια και στις δύο κατηγορίες ρευμάτων. Τα ρεύματα αργού Ηλιακού Ανέμου προέρχονται από τη ζώνη επισειόντων (streamer belt) γύρω από τον ισημερινό του Ήλιου.

1.5 Το μοντέλο του Parker για τον Ηλιακό Άνεμο

Για να περιγραφεί μαθηματικά ο Ηλιακός Άνεμος χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις για τη διατήρηση της ορμής και της μάζας καθώς και μια καταστατική εξίσωση. Παίρνουμε με αυτόν τον τρόπο ένα κλειστό σύστημα εξισώσεων. Για τη διευκόλυνση της μελέτης υποθέτουμε χρονική ανεξαρτησία ($\partial/\partial t = 0$) και αξιμουθιακή συμμετρία ($\partial/\partial \varphi = 0$).

Πρέπει να σημειωθεί ότι ο Ηλιακός Άνεμος θεωρείται σε πρώτη προσέγγιση ως ιδανικό αέριο και ειδικότερα πλάσμα το οποίο αποτελείται μόνο από πρωτόνια και ηλεκτρόνια. Φυσικά στον Ηλιακό Άνεμο υπάρχουν και ιόντα απλά ιονισμένου ηλίου (γνωστά και ως σωμάτια α), όπως και ιόντα βαρύτερων στοιχείων. Τα τελευταία βρίσκονται σε απειροελάχιστες ποσότητες στο πλάσμα του Ηλιακού Ανέμου, όμως επιτόπιες μετρήσεις τους στο διαπλανητικό χώρο αναμένεται να δώσουν σημαντικότερες νέες πληροφορίες για τα δυναμικά φαινόμενα του στέμματος.

Με βάση τις παραπάνω υποθέσεις οι εξισώσεις για τη μελέτη του Ηλιακού Ανέμου γράφονται ως (χρησιμοποιούμε σφαιρικές συντεταγμένες):

i) Διατήρηση της ορμής

Θεωρούμε στοιχειώδες τμήμα του ηλιακού στέμματος με μάζα dm και πυκνότητα μάζας ρ , το οποίο βρίσκεται σε απόσταση r από το κέντρο του Ήλιου, έχει πάχος dr και εγκάρσια διατομή dS . Η συνολική δύναμη που ασκείται στο στοιχειώδες τμήμα γράφεται ως:

$$dm \cdot \frac{du}{dt} = \rho \cdot dV \cdot \frac{du}{dt} = \rho \cdot dr \cdot dS \cdot \frac{du}{dr} \cdot \frac{dr}{dt} = \rho \cdot dr \cdot dS \cdot u \cdot \frac{du}{dr}$$

και είναι:

$$\begin{aligned} \rho \cdot dr \cdot dS \cdot u \cdot \frac{du}{dr} &= \overbrace{-G \cdot \frac{M_o \cdot dm}{r^2}}^{\text{δύναμη βαρύτητας}} + \overbrace{P \cdot dS}^{\text{πίεση στο πάνω τμήμα του όγκου}} - \overbrace{(P + dP) \cdot dS}^{\text{πίεση στο κάτω τμήμα του όγκου}} = \\ &= -G \cdot \frac{M_o \cdot \rho \cdot dS \cdot dr}{r^2} - dP \cdot dS \\ \Rightarrow \quad \boxed{\rho \cdot u \cdot \frac{du}{dr} = -G \cdot \rho \cdot \frac{M_o}{r^2} - \frac{dP}{dr}} \quad (1) \end{aligned}$$

όπου $G = 6.67 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \text{g}^{-1} \text{s}^{-2}$ η σταθερά της βαρύτητας και $M_o = 1.99 \cdot 10^{33} \text{ gr}$ η μάζα του Ήλιου.

ii) Διατήρηση της μάζας

Έστω $\Phi = \frac{dm}{dt}$ η μάζα που διέρχεται στη μονάδα του χρόνου. Η διατήρηση της μάζας απαιτεί η ροή Φ να παραμένει χρονικά σταθερή.

Αν θεωρήσουμε σφαιρικά συμμετρική εκροή μάζας, η ροή (στη μονάδα του χρόνου) μάζας μέσα από ένα σφαιρικό κέλυφος πάχους dr που βρίσκεται σε απόσταση r από το κέντρο του Ήλιου είναι:

$$\Phi = 4\pi \cdot \rho(r) \cdot u(r) \cdot r^2 \quad (2)$$

Η διατήρηση της μάζας μας δίνει επομένως:

$$\rho(r) \cdot u(r) \cdot r^2 = (\text{σταθ}) \quad (3)$$

iii) Καταστατική Εξίσωση

Έχοντας υποθέσει ιδανικό αέριο η καταστατική εξίσωση είναι:

$$P = \sum_i n_i \cdot k \cdot T_i \quad (4)$$

όπου:

P : η ολική πίεση

n_i, T_i : η αριθμητική πυκνότητα και η θερμοκρασία του ιόντος i .

Επειδή το πλάσμα είναι ουδέτερο μακροσκοπικά και εφόσον έχουμε θεωρήσει ότι ο Ηλιακός Άνεμος αποτελείται αποκλειστικά από πρωτόνια και ηλεκτρόνια, μπορούμε να πούμε ότι οι αριθμητικές πυκνότητες πρωτονίων και ηλεκτρονίων είναι πρακτικά ίσες:

$$n_p = n_e = n \quad (5)$$

Επίσης μπορούμε να θεωρήσουμε είτε περίπου ίσες θερμοκρασίες πρωτονίων και ηλεκτρονίων: $T_p = T_e = T$ είτε μια μέση τιμή της θερμοκρασίας του Ηλιακού Ανέμου:

$$T = \frac{1}{2}(T_p + T_e) \quad (6)$$

Βάσει των παραπάνω η καταστατική εξίσωση γράφεται ως:

$$P = 2 \cdot n \cdot k \cdot T \quad (7)$$

Από τις ανωτέρω παραδοχές προκύπτει επίσης ότι η πυκνότητα ρ του Ηλιακού Ανέμου μπορεί να γραφεί ως:

$$\rho = n_p \cdot m_p + n_e \cdot m_e = n \cdot (m_p + m_e) \stackrel{m_p \gg m_e}{\approx} n \cdot m_p \quad (8).$$

Θεωρώντας ακτινική εκτόνωση του Ηλιακού Ανέμου ($V\theta = 0$, $V\phi = 0$) μπορούμε να μελετήσουμε πώς εξαρτάται η ακτινική συνιστώσα της ταχύτητάς του από την ηλιοκεντρική απόσταση r και τη θερμοκρασία του T . Επειδή $\rho = n \cdot m_p$ και $P = 2 \cdot n \cdot k \cdot T$, αν θεωρήσω ισόθερμη εκτόνωση όπου $T = \text{σταθερή}$ η εξίσωση διατήρησης της ορμής (1) γράφεται:

$$n \cdot m_p \cdot u \cdot \frac{du}{dr} = -G \cdot n \cdot m_p \cdot \frac{M_o}{r^2} - 2 \cdot k \cdot T \cdot \frac{dn}{dr} \quad (9)$$

Αντικαθιστώντας στο δεξί μέλος την πυκνότητα με τη βοήθεια της εξίσωσης διατήρησης της μάζας: $n \propto 1/(u \cdot r^2)$ καταλήγουμε στη σχέση:

$$\boxed{\frac{1}{u} \cdot \frac{du}{dr} \cdot \left(u^2 - \frac{2 \cdot k \cdot T}{m_p} \right) = \frac{4 \cdot k \cdot T}{m_p \cdot r} - G \frac{M_o}{r^2}} \quad (10)$$

Το δεξί μέλος της εξίσωσης (10) μηδενίζεται όταν η ηλιοκεντρική απόσταση λάβει την τιμή:

$$r_c = \frac{G \cdot M_o \cdot m_p}{4 \cdot k \cdot T} \quad (11)$$

που καλείται *κρίσιμη απόσταση*.

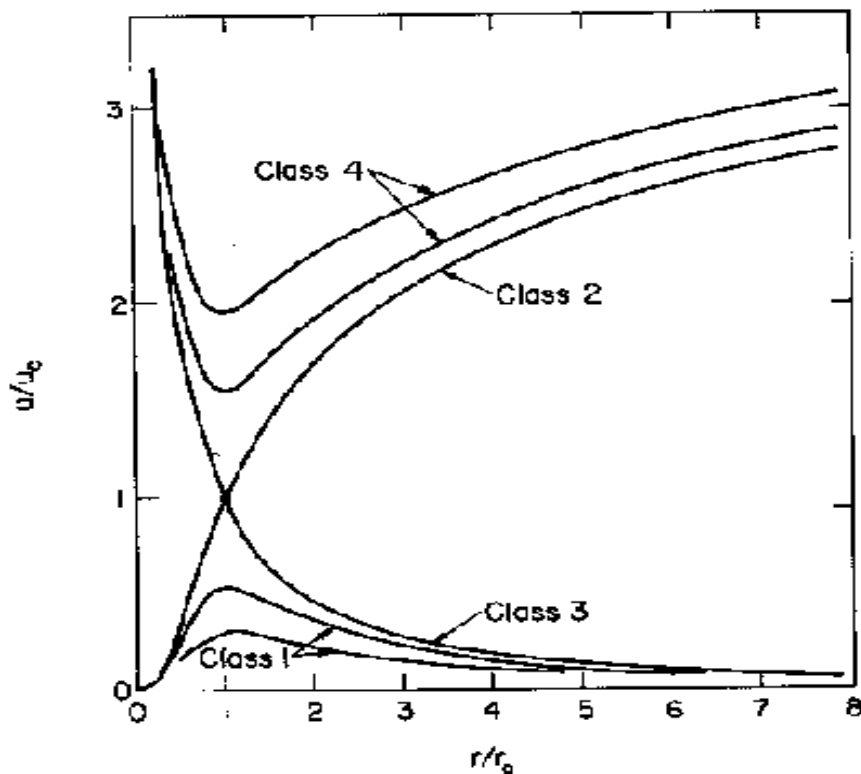
Το αριστερό μέλος της (10) γίνεται μηδέν για:

$$\left. \frac{du}{dr} \right|_{r_c} = 0 \quad \text{ή} \quad u(r_c) = \left(\frac{2 \cdot k \cdot T}{m_p} \right)^{1/2} = u_{th} \quad (12)$$

δηλαδή όταν η ταχύτητα παρουσιάζει ακρότατο ή όταν ισούται με τη θερμική ταχύτητα αντίστοιχα. Η τιμή αυτή καλείται *κρίσιμη ταχύτητα*, u_c . Επειδή η θερμική ταχύτητα είναι περίπου ίση με την ταχύτητα του ήχου, ουσιαστικά η κρίσιμη απόσταση και η κρίσιμη ταχύτητα μας δίνουν από ποιο σημείο και πέρα ο Ηλιακός Άνεμος γίνεται υπερηχητικός.

Από τον περιορισμό για την ταχύτητα προκύπτουν τέσσερα είδη λύσεων εκ των οποίων ωστόσο μια μόνο είναι φυσικά αποδεκτή:

- $\left. \frac{du}{dr} \right|_{r_c} = 0$ και η ταχύτητα παρουσιάζει μέγιστο στην κρίσιμη απόσταση → λύσεις τέτοιας μορφής δεν ταιριάζουν στον Ήλιο, επειδή προβλέπουν πρακτικά μηδενική ταχύτητα σε μεγάλες αποστάσεις, δηλαδή πολύ μακριά από το κρίσιμο σημείο (σχήμα 1, καμπύλη 1).
- $\left. \frac{du}{dr} \right|_{r_c} = 0$ και η ταχύτητα παρουσιάζει ελάχιστο στην κρίσιμη απόσταση → προβλέπει μεγάλες ταχύτητες στη βάση του στέμματος και συνεπώς απορρίπτεται (σχήμα 1, καμπύλη 4).
- $u(r_c) = u_{th}$ και η συνάρτηση $u(r)$ είναι γνησίως φθίνουσα → απορρίπτεται επειδή ομοίως με την προηγούμενη λύση προβλέπει μεγάλες ταχύτητες στη βάση του στέμματος (σχήμα 1, καμπύλη 3).
- $u(r_c) = u_{th}$ και η συνάρτηση $u(r)$ είναι γνησίως αύξουσα → αποτελεί τη φυσικά αποδεκτή λύση (σχήμα 1, καμπύλη 2).



Σχήμα 1. Οι τέσσερις κατηγορίες λύσεων κατά Parker για την ακτινική συνιστώσα της ταχύτητας του Ηλιακού Ανέμου.

Ολοκληρώνοντας την (10) από την κρίσιμη απόσταση r_c έως μια τυχούσα απόσταση r παίρνω τη γενική έκφραση που δίνει τη μεταβολή της ακτινικής συνιστώσας της ταχύτητας του Ηλιακού Ανέμου συναρτήσει της ηλιοκεντρικής απόστασης:

$$\left(\frac{1}{2} \left(\frac{u^2}{u_c^2} \right) \right) - \frac{1}{2} \ln \left(\frac{u^2}{u_c^2} \right) = 2 \ln \left(\frac{r}{r_c} \right) + 2 \left(\frac{r_c}{r} - 1 \right) \quad (13)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι η ακτινική συνιστώσα της ταχύτητας του Ηλιακού Ανέμου κυριαρχεί έναντι των άλλων δύο συνιστωσών (πολικής και αζιμουθιακής). Ωστόσο γίνονται μελέτες που διερευνούν τις μη ακτινικές συνιστώσες και τις επιδράσεις τους.

Από την έκφραση (13) μπορούμε να βρούμε την ασυμπτωτική συμπεριφορά της $u(r)$ για μεγάλες (πολύ μακριά από το κρίσιμο σημείο) και μικρές αποστάσεις (πολύ κοντά στον Ήλιο), καθώς και κοντά στο κρίσιμο σημείο. Καταλήγουμε στις εξής:

- για $r \gg r_c \Rightarrow u(r) \approx 2 \cdot u_c \cdot \sqrt{\ln \left(\frac{r}{r_c} \right)}$ (14)

- για $r \ll r_c \Rightarrow u(r) \approx u_c \cdot e^{-(2r_c)/r}$ (15)

- για $r \approx r_c \Rightarrow u(r) \approx u_c \cdot \left(\frac{r}{r_c} \right)$ (16)

1.6 Το μαγνητικό πεδίο του Ηλιακού Ανέμου

Ο Ηλιακός Άνεμος είναι πλάσμα με πολύ μεγάλη αγωγιμότητα και συνεπώς μπορεί να διατηρήσει το μαγνητικό του πεδίο μέσα του για εξαιρετικά πολύ χρόνο. Η ιδιότητα αυτή καλείται *πάγωμα* των μαγνητικών δυναμικών γραμμών στο πλάσμα.

Για τη μορφή του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου καθοριστικοί παράγοντες είναι το πάγωμα των μαγνητικών δυναμικών γραμμών στο πλάσμα του Ηλιακού Ανέμου και η περιστροφή του Ήλιου. Διάφορα μοντέλα έχουν προταθεί, με κυρίαρχο αυτό του Parker του οποίου η περιγραφή ακολουθεί.

Εξαιτίας του παγώματος οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές ακολουθούν τις γραμμές ροής του Ηλιακού Ανέμου. Αν λάβουμε υπόψη την περιστροφή του Ήλιου με μια μέση περίοδο 27 ημερών (ως προς τη Γη), τότε στο περιστρεφόμενο σύστημα οι γραμμές ροής έχουν τη μορφή έλικας του Αρχιμήδη και το ίδιο θα ισχύει και για τις μαγνητικές δυναμικές γραμμές.

Για να εξετάσουμε τη χωρική εξέλιξη του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου θεωρούμε σύστημα αναφοράς που συμπεριστρέφεται με τον Ήλιο (με γωνιακή ταχύτητα $\omega_0 = 2\pi/27$ ημέρες $\approx 0.23 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$). Σε αυτό, αν $(r_0, \theta_0, \varphi_0)$ είναι οι σφαιρικές συντεταγμένες ενός σημείου αναφοράς, η θέση ενός σημείου (r, θ, φ) της γραμμής ροής θα δίνεται από τις σχέσεις:

$$r = r_0 + u(r) \cdot t \quad (17)$$

$$\theta = \theta_0 \quad (18)$$

$$\varphi = \varphi_0 - \omega_0 \cdot (r - r_0) \cdot \sin(\theta_0) \cdot t \quad (19)$$

Συνήθως ως σημείο αναφοράς επιλέγεται η βάση του στέμματος, που είναι λίγο μεγαλύτερη από την ακτίνα του Ήλιου.

Λόγω του παγώματος των μαγνητικών δυναμικών γραμμών στο ηλιακό πλάσμα ισχύει:

$$\mathbf{B} = \alpha(r, \theta, \varphi) \cdot \mathbf{V}(r) \quad (20)$$

Όμως:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (21)$$

Από την (21) προκύπτει:

$$\begin{aligned} B_r &= \alpha(r, \theta, \varphi) \cdot u(r) \text{ (a)} \\ B_\theta &= 0 \text{ (b)} \\ B_\varphi &= -\alpha(r, \theta, \varphi) \cdot \omega_o \cdot (r-r_o) \cdot \sin(\theta) \cdot u(r) \text{ (c)} \end{aligned} \quad (22)$$

Η (22) σε σφαιρικές συντεταγμένες έχει τη μορφή:

$$\left(\frac{1}{r^2}\right) \cdot \left(\frac{\partial(Br \cdot r^2)}{\partial r}\right) + \left(\frac{1}{r \cdot \sin \theta}\right) \cdot \left(\frac{\partial(B\theta \cdot \sin \theta)}{\partial \theta}\right) + \left(\frac{1}{r \cdot \sin \theta}\right) \cdot \left(\frac{\partial B\varphi}{\partial \varphi}\right) = 0 \quad (23)$$

Λόγω του ότι υποθέτουμε αξιμουθιακή συμμετρία έχουμε $\partial/\partial\varphi = 0$. Επιπλέον, επειδή θεωρήσαμε $B_\theta=0$ μένει τελικά ο ακτινικός όρος:

$$\left(\frac{1}{r^2}\right) \cdot \left(\frac{\partial(Br \cdot r^2)}{\partial r}\right) = 0 \quad (24)$$

που λόγω αξιμουθιακής συμμετρίας γράφεται:

$$\left(\frac{1}{r^2}\right) \cdot \left(\frac{\partial(\alpha(r, \theta) \cdot u(r) \cdot r^2)}{\partial r}\right) = 0 \quad (25)$$

Επομένως:

$$\alpha(r, \theta) \cdot u(r) \cdot r^2 = C(\theta) \quad (26)$$

Η σταθερά C εξαρτάται μόνο από τη γωνία θ εξαιτίας της αξιμουθιακής συμμετρίας και του ότι η μερική παράγωγος ως προς r είναι μηδέν.

Λόγω της (26) οι 22(a) και 22(c) γίνονται αντίστοιχα:

$$B_r = C(\theta) \cdot r^{-2} \quad (27) \quad \text{και} \quad B_\varphi = -C(\theta) \cdot \omega_o \cdot (r-r_o) \cdot r^{-2} \cdot \sin(\theta) \quad (28)$$

Για μια συγκεκριμένη γωνία $\theta = \theta_o$ όπως υποθέτουμε εδώ η συνάρτηση $C(\theta)$ έχει μια συγκεκριμένη τιμή όπως και η $\sin(\theta)$, άρα μένει μόνο η εξάρτηση από την ηλιοκεντρική απόσταση r και είναι:

$$B_r \propto r^{-2}$$

$$B_\varphi \propto r^{-1}$$

Συνεπώς, αν $(B_{r1}, 0, B_{\phi1}), (B_{r2}, 0, B_{\phi2})$ είναι το μαγνητικό πεδίο σε ηλιοκεντρικές αποστάσεις r_1, r_2 έχουμε:

$$\frac{B_{r1}}{B_{r2}} = \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 \quad (29)$$

$$B_{\theta} = 0 \quad (30)$$

$$\frac{B_{\phi1}}{B_{\phi2}} = \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \quad (31)$$

Η θεωρία του Parker περιγράφει πολύ καλά τον Ηλιακό Άνεμο. Παρ'όλ'αυτά υπάρχουν κάποιες απλοποιήσεις που, αν και δεν αλλοιώνουν το χαρακτήρα της λύσης, αξίζει να αναφερθούν:

- Θεωρήσαμε ότι ο Ηλιακός Άνεμος αποτελείται αποκλειστικά από πρωτόνια και ηλεκτρόνια. Μια τροποποίηση μπορεί να είναι το να λάβουμε υπ'όψην και τα σωμάτια α . Θεωρώντας ότι το ποσοστό τους στον Ηλιακό Άνεμο είναι 5 %, προκύπτει ότι η συνεισφορά τους στη μάζα του Ηλιακού Ανέμου είναι: $0.05 \cdot n \cdot 4 \cdot m_p = 0.2 \cdot m_p$, άρα η πυκνότητα του Ηλιακού Ανέμου γράφεται:

$$\rho = n_p \cdot m_p + n_e \cdot m_e + n_a \cdot m_a \approx n \cdot m_p + 0.2 \cdot n \cdot m_p = 1.2 \cdot n \cdot m_p \quad (32)$$

και η πίεση είναι: $P \approx 2 \cdot n \cdot k \cdot T + 0.05 \cdot n \cdot k \cdot T = 2.05 \cdot n \cdot k \cdot T \quad (33)$

- Υποθέσαμε ότι η θερμοκρασία και η πίεση του Ηλιακού Ανέμου είναι ισοτροπικές. Κάτι τέτοιο ισχύει μόνο κοντά στον Ήλιο, αφού σε αυτές τις περιοχές οι συγκρούσεις είναι συχνές. Όσο απομακρυνόμαστε από τον Ήλιο στο διαπλανητικό χώρο οι συγκρούσεις γίνονται όλο και πιο σπάνιες και η υπόθεση της ισοτροπίας πλέον δεν είναι ικανοποιητική. Επιπλέον έχουμε υποθέσει ότι η θερμοκρασία των πρωτονίων και των ηλεκτρονίων είναι η ίδια που φυσικά δεν ισχύει.
- Έχουμε αγνοήσει ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία.

Πρέπει τέλος να σημειωθεί ότι η πολική συνιστώσα B_θ δεν είναι μηδενική, αλλά έχει μετρηθεί σε διαστημικές παρατηρήσεις και μάλιστα φθίνει αντιστρόφως ανάλογα με την ηλιοκεντρική απόσταση:

$$B_\theta \propto r^{-1} \quad (34)$$

Ο βασικός λόγος που η πολική συνιστώσα δεν είναι μηδενική είναι η απόκλιση από τη σφαιρική συμμετρία την οποία υποθέτει ο Parker. Η γωνία της διπολικής ροπής του Ήλιου με τον άξονα περιστροφής του μεταβάλλεται χρονικά, αλλά και η εκτόνωση του Ηλιακού Ανέμου δεν είναι μόνο ακτινική. Επίσης, κατά τη διάδοση του Ηλιακού Ανέμου προς τα έξω έχουμε τη δημιουργία μαγνητοϋδροδυναμικών κυμάτων που μεταβάλλουν το μαγνητικό πεδίο.

1.7 Συμπεριστρεφόμενες περιοχές αλληλεπίδρασης

Όπως ήδη περιγράψαμε, τα ρεύματα γρήγορου και αργού Ηλιακού Ανέμου εκκινούν από τον Ήλιο και, καθώς διαδίδονται προς τα έξω, το παγωμένο σε αυτά μαγνητικό πεδίο παίρνει τη μορφή γραμμικής έλικας του Αρχιμήδη.

Η μορφή των μαγνητικών δυναμικών γραμμών διαφέρει στις δύο κατηγορίες ρευμάτων. Στον αργό Ηλιακό Άνεμο οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές είναι πιο καμπύλες απ'ό,τι απ'ό,τι στο γρήγορο. Δεδομένου ότι οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές δεν μπορούν να τέμνονται, αναμένουμε ότι θα υπάρξει κάποια περιοχή όπου τα δύο ρεύματα Ηλιακού Ανέμου θα αλληλεπιδράσουν. Επειδή τα ρεύματα συμπεριστρέφονται με τον Ήλιο, οι περιοχές αυτές ονομάζονται *συμπεριστρεφόμενες περιοχές αλληλεπίδρασης (Corotating Interaction Regions, CIRs)*. Αν οι πηγές των ρευμάτων παραμένουν σχετικά σταθερές χωρικά, τότε μπορεί να παρατηρούμε μια συμπεριστρεφόμενη περιοχή αλληλεπίδρασης για μερικές ηλιακές περιστροφές. Σε αυτήν την περίπτωση έχουμε τις καλούμενες *επαναλαμβανόμενες συμπεριστρεφόμενες περιοχές αλληλεπίδρασης (recurrent CIRs)*.

Η περιοχή διεπαφής (stream interface) των ρευμάτων Ηλιακού Ανέμου κινείται προς τα έξω, σε μεγαλύτερες ηλιοκεντρικές αποστάσεις και το πλάσμα σε αυτήν είναι συμπιεσμένο. Περίπου στις 2 – 3 AU η βαθμίδα της πυκνότητας στις δύο πλευρές της περιοχής διεπαφής γίνεται πολύ μεγάλη, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ζεύγους κρουστικών κυμάτων. Η αλληλεπίδραση μεταξύ συμπεριστρεφόμενων περιοχών αλληλεπίδρασης και κρουστικών κυμάτων στο διαπλανητικό χώρο συμβάλλει καθοριστικά στη διαμόρφωση των Γαλαξιακών Κοσμικών Ακτίνων.

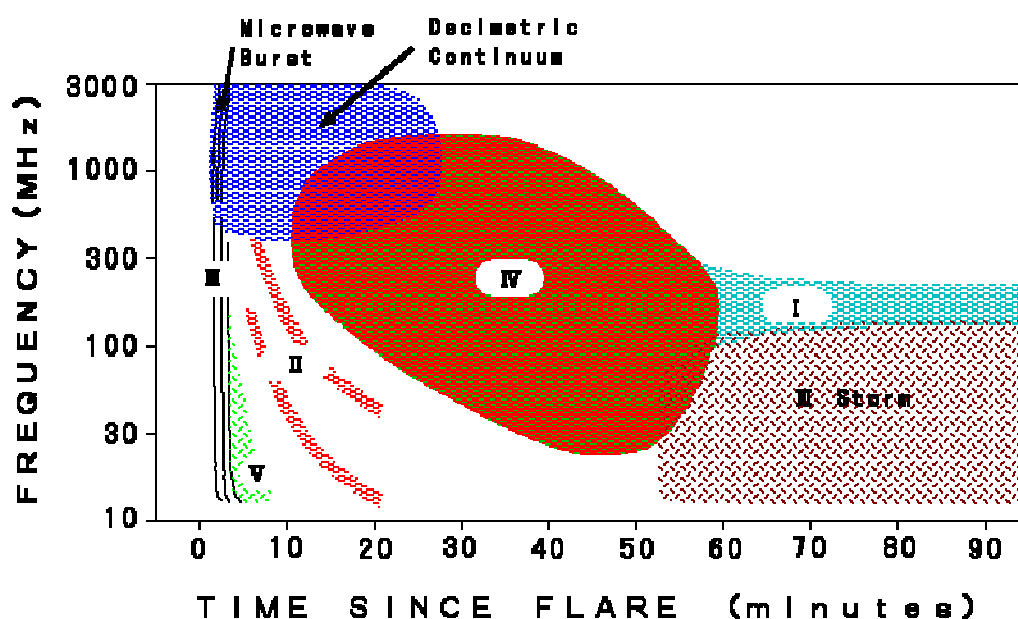
Κεφάλαιο 2

Ηλιακές ραδιοεξάρσεις

2.1 Γενικά

Οι ραδιοεξάρσεις έχουν τεράστια σημασία για τη μελέτη του Διαστημικού Καιρού διότι πιστεύουμε ότι γενικά εκδηλώνονται στις ίδιες περιοχές του Ήλιου στις οποίες γεννώνται φαινόμενα που μπορούν να προκαλέσουν γεωμαγνητικές διαταραχές.

Αρχικά θα αναφερθούμε εν συντομία στις βασικές ιδιότητες του σύμφωνου και του μη σύμφωνου μηχανισμού εκπομπής. Κατόπιν θα περιγράψουμε την εκπομπή πλάσματος (*plasma emission*) που αποτελεί τον κύριο μηχανισμό ακτινοβολίας στις ηλιακές ραδιοεξάρσεις. Τέλος εξετάζουμε τα χαρακτηριστικά των πέντε τύπων ραδιοεξάρσεων στα μετρικά μήκη κύματος (συχνότητες κάτω από ~ 100 MHz) και θα αναφέρουμε ορισμένες μελέτες που έχουν γίνει και βασικά ερωτήματα που παραμένουν ανοιχτά.



Σχήμα 3. Οι πέντε τύποι ηλιακών ραδιοεξάρσεων.

2.2 Σύμφωνος και μη σύμφωνος μηχανισμός εκπομπής

Ως μη σύμφωνη (*incoherent*) εκπομπή χαρακτηρίζεται εκείνη που προέρχεται από διαδικασίες στο συνεχές. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι:

- 1) Η ακτινοβολία πέδησης (*bremsstrahlung*) που οφείλεται σε ελεύθερη – ελεύθερη εκπομπή από θερμική κατανομή ηλεκτρονίων συγκρούονται με ιόντα.
- 3) Η ακτινοβολία γυροσύγχροτρον (*gyrosynchrotron*) που δημιουργείται από την κίνηση θερμικών ή ήπια σχετικιστικών σωματιδίων γύρω από τις γραμμές μαγνητικού πεδίου.

Αντίθετα, η σύμφωνη (*coherent*) εκπομπή προκύπτει από κινητικές αστάθειες που προκαλούνται από ασταθείς κατανομές σωματιδίων. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν:

- 1) Η εκπομπή πλάσματος (*plasma emission*)
- 2) (*electron – cyclotron maser emission*)

Ο σύμφωνος μηχανισμός εκπομπής προβλέπει ιδιότητες ραδιοεκπομπής αρκετά διαφορετικές απ' ό,τι ο μη σύμφωνος:

- 1) Υψηλότερες θερμοκρασίες λαμπρότητας σε σχέση με το μη σύμφωνο.
- 2) Ταχύτητες δέσμης ηλεκτρονίων ήπια σχετικιστικές και, όπως θα εξηγήσουμε παρακάτω, λόγω αυτού του εύρους τιμών ταχύτητας έχουμε αντίστοιχους ρυθμούς ολίσθησης της συχνότητας στο δυναμικό φάσμα, αφού, αν f είναι η συχνότητα που παρατηρούμε στο δυναμικό φάσμα:

$$\left(\frac{\partial f}{\partial t}\right) = \left(\frac{\partial f}{\partial n_e}\right)\left(\frac{\partial n_e}{\partial h}\right)\left(\frac{\partial h}{\partial s}\right)\left(\frac{\partial s}{\partial t}\right) \propto \left(\frac{1}{2\sqrt{n_e}}\right)\left(\frac{\partial n_e}{\partial h}\right)|(\cos\theta)u| \quad (35)$$

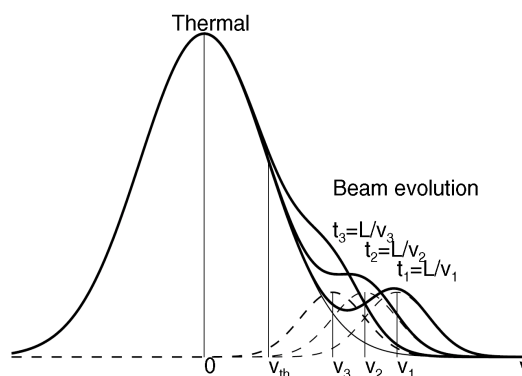
Για παράδειγμα, αν θεωρήσουμε εκθετική ελάττωση της πυκνότητας των ηλεκτρονίων με το ύψος: $n_e \propto \exp(-h/\lambda)$ όπου λ : η κλίμακα ύψους της πυκνότητας βρίσκουμε:

$$\left(\frac{\partial f}{\partial t}\right) \approx -\frac{f \cdot u \cdot \cos\theta}{2 \cdot \lambda} \quad (36)$$

- 3) Επειδή η συχνότητα της ραδιοεκπομπής είναι η συχνότητα πλάσματος (ή και η δεύτερη αρμονική της), είναι ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας της πυκνότητας των ηλεκτρονίων του περιβάλλοντος. Επομένως από τη συχνότητα στο δυναμικό φάσμα μπορώ να έχω άμεση πληροφορία για την πυκνότητα των ηλεκτρονίων στο σημείο της ραδιοεκπομπής.
- 4) Η δημιουργία ρελατιβιστικών ενεργειών των ηλεκτρονίων της δέσμης απαιτεί κάποιο μηχανισμό επιτάχυνσης. Τέτοιους μηχανισμούς μπορούν να παράσχουν οι ηλιακές εκλάμψεις και τα κρουστικά κύματα που καθοδηγούνται από CMEs. Εξαιτίας αυτού αναμένουμε να υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των ραδιοεξάρσεων και εκπομπών σε άλλα μήκη κύματος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που παράγονται από δέσμες.

2.3 Εκπομπή πλάσματος

Η επιτάχυνση σωματιδίων στις ηλιακές εκλάμψεις πρακτικά λαμβάνει χώρα σε ένα πλάσμα άνευ συγκρούσεων (*collisionless plasma*). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η κίνηση των ηλεκτρονίων που επιταχύνθηκαν να μπορεί να θεωρηθεί αδιαβατική. Λόγω αυτού (αφού υπάρχει διασπορά στην ταχύτητα) τα ηλεκτρόνια υψηλότερων ενεργειών μπορούν και προηγούνται έναντι αυτών με χαμηλότερες ενέργειες. Δημιουργείται με αυτόν τον τρόπο μια δέσμη ηλεκτρονίων (beam) και ένα τίναγμα (bump) στη συνάρτηση κατανομής ταχυτήτων των σωματιδίων, πηγαίνοντας προς την <<ουρά>> της κατανομής όπου οι ταχύτητες είναι μεγάλες. Η δημιουργούμενη δέσμη είναι ασταθής (στη μονοδιάστατη συνάρτηση κατανομής ως προς τις ταχύτητες $f(u)$ έχω $\left(\frac{\partial f}{\partial u}\right) > 0$) και λόγω των παραπάνω η αστάθεια ονομάζεται ονομάζεται αστάθεια ουράς (*bump-in-tail instability*).



Σχήμα 4. Αστάθεια ουράς (*bump-in tail instability*).

Όπως φαίνεται και από το σχήμα 4, πρώτα θα φτάσουν σε κάποια απόσταση L τα ταχύτερα ηλεκτρόνια. Στο σχήμα ταχύτερα είναι τα ηλεκτρόνια ταχύτητας v_1 των οποίων ο χρόνος πτήσης είναι L / v_1 και σε αυτήν την τιμή θα έχουμε και τη μέγιστη θετική κλίση στη συνάρτηση κατανομής ταχυτήτων, $\left(\frac{\partial f}{\partial u}\right)_{v_1}$. Με την πάροδο του χρόνου στην απόσταση L φτάνουν τα ηλεκτρόνια που έχουν χαμηλότερες ταχύτητες και σταδιακά το τίναγμα γίνεται όλο και πιο μικρό. Η κλίση γίνεται όλο και πιο «επίπεδη» μέχρι που παύει να είναι θετική και η αστάθεια ουράς σβήνει.

Συντονισμός Landau με την ασταθή δέσμη δημιουργεί κύματα *Langmuir*. Πιστεύουμε ότι οι εκπομπές που χαρακτηρίζονται ως ραδιοεξάρσεις οφείλονται σε μη γραμμικές αλληλεπιδράσεις κυμάτων *Langmuir* με άλλα είδη κυμάτων, ώστε τελικά να εκπέμπεται ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία στην τοπική συχνότητα του πλάσματος ηλεκτρονίων v_{pe} ή τη δεύτερη αρμονική της $2v_{pe}$. Αν θεωρήσουμε υπεύθυνη για τη γένεση του ηλεκτρομαγνητικού (εγκάρσιου) κύματος (T) την αλληλεπίδραση κύματος *Langmuir* (L) με ιοντοακουστικό κύμα (S), τότε οι παρακάτω αλληλεπιδράσεις των τριών κυμάτων έχουν σημαντικό ρόλο στο μηχανισμό εκπομπής πλάσματος (Melrose 1987):

$$\begin{aligned}
 L + S &\rightarrow L' \text{ (a) (L': δευτερεύον κύμα Langmuir)} \\
 L + S &\rightarrow T \text{ (b)} \\
 T + S &\rightarrow L \text{ (c)} \\
 T + S &\rightarrow T \text{ (d)} \\
 L + L' &\rightarrow T \text{ (e)}
 \end{aligned}$$

Η αλληλεπίδραση (a) είναι ουσιαστική για να δημιουργηθεί η τύρβη *Langmuir*. Για τη δημιουργία της θεμελιώδους (F) συνιστώσας της ραδιοέξαρσης καθοριστικές είναι οι αλληλεπιδράσεις (b) και (c), ενώ για τη γένεση της αρμονικής (H) συνιστώσας η (e). Η αλληλεπίδραση (d) περιγράφει τη σκέδαση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (T).

2.4 Ραδιοεξάρσεις τύπου I

Περιλαμβάνουν μια σειρά πολλών ραδιοεξάρσεων με πολύ μικρή χρονική διάρκεια και στενό εύρος ζώνης οι οποίες συνοδεύονται από συνεχές υπόβαθρο σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων το οποίο συχνά ονομάζεται *καταιγίδα θορύβου (noise storm)*.

Μια ραδιοκαταιγίδα τύπου I διαρκεί από κάποιες ώρες έως και μερικές ημέρες. Μια μεμονωμένη ραδιοέξαρση τύπου I διαρκεί περίπου από κλάσμα του δευτερολέπτου έως μερικά δευτερόλεπτα και η διάρκεια αυξάνεται με την ελάττωση της συχνότητας παρατήρησης (όσο πηγαίνουμε ψηλότερα στο στέμμα).

Η ραδιοεκπομπή τύπου I παρατηρείται σε συχνότητες από 100 MHz έως 400 MHz. Το εύρος ζώνης, όπως ειπώθηκε, είναι αρκετά μικρό και κυμαίνεται από ~ 2.5 MHz στα 100 MHz έως ~ 7 MHz στα 400 MHz.

Οι επιμέρους ραδιοεξάρσεις τύπου I χαρακτηρίζονται από ισχυρότατη κυκλική πόλωση (έως και 100%). Η πόλωση αντιστοιχεί στην τακτική (O-mode) συνιστώσα της ραδιοακτινοβολίας. Αντίθετα, στο συνεχές υπόβαθρο η τακτική συνιστώσα εμφανίζεται εν μέρει κυκλικά πολωμένη με μικρό βαθμό πόλωσης.

Οι μεμονωμένες ραδιοεξάρσεις τύπου I είθισται να εμφανίζονται σε ομάδες διάρκειας ενός περίπου λεπτού. Στα δυναμικά φάσματα οι ομάδες των ραδιοεξάρσεων τύπου I έχουν τη μορφή αλυσίδας, εξ' ου και η ονομασία τους *αλυσίδα τύπου I (type I chain)*. Οι κλίσεις των ραδιοεξάρσεων σε μία αλυσίδα τύπου I είναι μικρές και λαμβάνουν θετικές ή αρνητικές τιμές μικρότερες του ± 1 MHz/s για συχνότητες 140-170 MHz. Ως πιθανός μηχανισμός δημιουργίας μιας αλυσίδας τύπου I αναφέρεται η εκπομπή κύκλοτρον από ηλεκτρόνια τα οποία είναι παγιδευμένα στο τοπικό μαγνητικό πεδίο. Η μεγάλη διάρκεια της συνεχούς συνιστώσας οδηγεί στην ιδέα ότι αυτή προέρχεται από ηλεκτρόνια που βρίσκονται παγιδευμένα σε κλειστές μαγνητικές δυναμικές γραμμές.

Οι καταιγίδες τύπου I επειδή δε συσχετίζονται με σαφήνεια με διαδικασίες έκλυσης ενέργειας ορατές σε άλλα μήκη κύματος, αποτελούν μια ενδιαφέρουσα ένδειξη ότι η απελευθέρωση ενέργειας στο στέμμα μπορεί να λαμβάνει χώρα για μεγάλα χρονικά διαστήματα (White 2007). Παρά ταύτα, η έλλειψη διαγνωστικών σε διαφορετικές περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος δυσχεραίνει εξαιρετικά τη μελέτη τους. Εικόνες από το ραδιοηλιογράφο στη Nançay έδειξαν συμπαγείς πηγές στο αντίστοιχο εύρος συχνοτήτων, κυρίως πάνω από κέντρα δράσης που παρήγαγαν εκλάμψεις (τα δυναμικά φάσματα δε βοηθούν σε αυτήν την περίπτωση διότι δεν είναι κατάλληλα για μελέτη χαρακτηριστικών με στενό εύρος ζώνης). Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι η ομοιότητα των καταιγίδων τύπου I με τις καταιγίδες τύπου III συνηγορεί σε έναν κοινό μηχανισμό δημιουργίας τους.

2.5 Ραδιοεξάρσεις τύπου II

Πρόκειται για ραδιοεξάρσεις που χαρακτηρίζονται στα δυναμικά φάσματα από πολύ αργή ολίσθηση (μικρότερη από 1 MHz/s) προς χαμηλότερες συχνότητες. Πιστεύουμε ότι η εκπομπή τους προέρχεται, μέσω του μηχανισμού εκπομπής πλάσματος, από ηλεκτρόνια τα οποία έχουν επιταχυνθεί σε καθοδηγούμενα από CMEs κρουστικά κύματα (CME-driven shocks).

Η επιτόπια παρατήρηση των ραδιοεξάρσεων τύπου II στο διαπλανητικό χώρο έγινε αρκετά πρόσφατα. Η πρώτη σχετική δημοσίευση έγινε από τους Bale et al. (1999) οι οποίοι μελέτησαν γεγονός που έλαβε χώρα στις 26 Αυγούστου 1998 χρησιμοποιώντας δεδομένα της αποστολής WIND. Στις 24 Αυγούστου 1998 και ώρα 22:09:11 UT (από τη ροή στις μαλακές ακτίνες X, SXR, που έδωσε ο δορυφόρος GOES 10) είχαμε έκλαμψη τάξης X1.0 κατά GOES στο βορειοανατολικό τεταρτημόριο του ηλιακού δίσκου (με βάση την παρατήρηση της έκλαμψης στη γραμμή H α). Ταυτόχρονα με την έκλαμψη εκδηλώθηκε έντονη ραδιοέξαρση τύπου III. Η ραδιοέξαρση τύπου II παρατηρήθηκε έντονη στο διάστημα 02:00 – 04:00 UT της 25^{ης} Αυγούστου και κατόπιν έγινε ασθενέστερη. Η έντασή της αυξήθηκε και πάλι τις πρώτες πρωινές ώρες της 26^{ης} Αυγούστου, οπότε και παρατηρήθηκε το καθοδηγούμενο από CME διαπλανητικό κρουστικό κύμα (“CME-driven interplanetary shock”) στις 06:40 UT. Η ύπαρξη της CME διαπιστώθηκε έμμεσα, λόγω του ότι το κρουστικό κύμα ακολουθήθηκε από δομή παρόμοια με μαγνητικού νέφους και τέτοιες δομές συνήθως συσχετίζονται με καθοδηγούμενα από CME διαπλανητικά κρουστικά κύματα.

Η ταχύτητα του κρουστικού κύματος εκτιμήθηκε στα 1300 km·s⁻¹ περίπου. Το κρουστικό κύμα ήταν σχεδόν κάθετο (“quasi – perpendicular shock”) αφού η γωνία μεταξύ της καθέτου στο κρουστικό κύμα και του τοπικού διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου βρέθηκε περίπου ίση με 86°.

Οι Mann et al. (1995) εξετάζοντας 25 ραδιοεξάρσεις τύπου II για το διάστημα 1990 – 1993 κατέληξαν σε ολίσθηση συχνότητας μεταξύ 0.04 MHz/s και 0.46 MHz/s. Αργότερα, οι Shanmugaraju et al. (2003) μελετώντας τις ραδιοεξάρσεις τύπου II την περίοδο ηλιακού μεγίστου 2000 – 2001 διαπίστωσαν κλίση μικρότερη από 0.5 MHz/s. Το εύρος ζώνης της ραδιοεκπομπής στον τύπο II είναι πολύ στενό, από μερικά MHz έως 100 MHz το πολύ. Η έναρξη των ραδιοεξάρσεων τύπου II τοποθετείται περίπου 2-20 min μετά την έναρξη της συσχετιζόμενης έκλαμψης και η συχνότητα έναρξης για τη θεμελιώδη συνιστώσα είναι μικρότερη από 150 MHz (έχουν παρατηρηθεί συχνότητες έναρξης έως και 500 MHz). Όσο χαμηλότερη είναι η συχνότητα έναρξης (άρα πηγαίνουμε πιο ψηλά στο στέμμα) τόσο μεγαλύτερη είναι η καθυστέρηση της ραδιοέξαρσης από τη συσχετιζόμενη έκλαμψη. Η ελάχιστη συχνότητα στην οποία έχω ραδιοεκπομπή τύπου II είναι

περίπου 20 MHz, αν και ενίοτε σταματούν στα 100 MHz (αν ξεκινούν από πιο βαθιά). Η διάρκειά τους κυμαίνεται από 10 έως 15 min στα μετρικά μήκη κύματος.

Στα μετρικά μήκη κύματος οι ραδιοεξάρσεις τύπου II χαρακτηρίζονται από αρμονική δομή σε ένα σχετικά σημαντικό ποσοστό (~ 60%). Η αρμονική δομή είναι εύκολα αναγνωρίσιμη στα δυναμικά φάσματα στα μετρικά μήκη κύματος όπου η θεμελιώδης και η αρμονική συνιστώσα καταλαμβάνουν δύο ζώνες με ίδιο περίπου μέγεθος (διότι η ροή στις δύο συνιστώσες είναι περίπου η ίδια). Έχει παρατηρηθεί και δευτερεύων διαχωρισμός τόσο στη θεμελιώδη όσο και στην αρμονική συνιστώσα που καλείται *διαχωρισμός ζώνης (band splitting)*. Στη θέση της μιας ζώνης εμφανίζονται δύο παρόμοιες που δείχνουν να έχουν προκύψει από διαχωρισμό αυτής σε ποσοστό $\Delta f/f \approx 10\%$. Για την ερμηνεία του διαχωρισμού ζώνης οι υποψήφιοι μηχανισμοί περιλαμβάνουν εκπομπή από δύο περιοχές χωρικά διαχωρισμένες, εκπομπή από το πρόσθιο και το οπίσθιο τμήμα ενός κρουστικού κύματος (Smerd et al., 1975), διαχωρισμός συχνοτήτων λόγω επίδρασης του μαγνητικού πεδίου (Roberts 1959, Tidmann 1966), μετατόπιση λόγω φαινομένου Doppler για την αρμονική συνιστώσα (Zaitsev 1966) κλπ. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι μηχανισμοί που θεωρούν διαχωρισμό λόγω του μαγνητικού πεδίου και μετατόπιση Doppler απαιτούν αρκετά υψηλές τιμές τόσο για το μαγνητικό πεδίο όσο και για την ταχύτητα των ηλεκτρονίων, προκειμένου να δώσουν το διαχωρισμό ο οποίος παρατηρείται.

2.6 Ραδιοεξάρσεις τύπου III

Σε αντίθεση με τις ραδιοεξάρσεις τύπου II, οι ραδιοεξάρσεις τύπου III χαρακτηρίζονται από ταχύτατη ολίσθηση συχνότητας στο δυναμικό φάσμα. Η δομή θεμελιώδους – αρμονικής εδώ είναι πολύ εμφανής. Έχουν συχνότητα έναρξης κοντά στα 600 MHz και φτάνουν έως λίγα MHz. Οι ταχύτητες των ηλεκτρονίων που, φεύγοντας μέσω ανοιχτών μαγνητικών δυναμικών γραμμών προς τα έξω στο στέμμα και το διαπλανητικό χώρο, παράγουν τις ραδιοεξάρσεις τύπου III είναι ήπια σχετικιστικές και κυμαίνονται από $0.2c$ έως $0.2c$. Μέχρι αρκετές δεκάδες R_0 οι επιταχύνσεις τους είναι μικρές, ενώ κατόπιν επιβραδύνονται.

Οι ραδιοεξάρσεις τύπου III μπορούν να συμβαίνουν είτε μεμονωμένες (isolated) οπότε συμβολίζονται ως III B, είτε σε μικρές ή πολύ μεγάλες ομάδες (groups). Οι πιο μικρές ομάδες ραδιοεξάρσεων τύπου III περιλαμβάνουν γεγονότα και συμβολίζονται ως III G, ενώ οι πολύ μεγάλες ομάδες απαρτίζονται από γεγονότα και συμβολίζονται ως III GG.

Ακολουθεί σύντομη περιγραφή βασικών υποκατηγοριών ραδιοεξάρσεων τύπου III ανάλογα με ορισμένα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που εμφανίζουν στο δυναμικό φάσμα.

- *Ραδιοεξάρσεις τύπου U, J, N και M*

Στις *ραδιοεξάρσεις τύπου U* έχω αρχικά ολίσθηση προς χαμηλότερες συχνότητες, σε κάποιο ύψος όμως η ολίσθηση σταματάει και κατόπιν έχω ολίσθηση προς μεγαλύτερες συχνότητες. Το δυναμικό φάσμα έχει συνεπώς τη μορφή ανεστραμμένου U. Η συχνότητα όπου σταματά η ολίσθηση προς χαμηλότερες συχνότητες και πηγαίνουμε πλέον προς υψηλότερες συχνότητες ονομάζεται *συχνότητα αναστροφής (turnover frequency)*. Ενίοτε η ολίσθηση προς υψηλότερες συχνότητες παρεμποδίζεται. Τότε στο δυναμικό φάσμα έχω τη μορφή ανεστραμμένου J και αντιστοίχως *ραδιοέξαρση τύπου J*. Ενδιαφέρον είναι το γεγονός ότι, σε ορισμένες περιπτώσεις η ολίσθηση προς υψηλότερες συχνότητες ακολουθείται από ολίσθηση ξανά προς χαμηλότερες συχνότητες. Τότε στο δυναμικό φάσμα εμφανίζεται και τρίτος κλάδος. Η λόγω της μορφής τους στο δυναμικό φάσμα οι ραδιοεξάρσεις αυτής της κατηγορίας χαρακτηρίστηκαν ως *τύπου N* (Caroubalos et al. 1987, Hillaris et al. 1988). Παρόμοια, οι Wang et al. (2001b) παρατήρησαν στο δυναμικό φάσμα τη μορφή του γράμματος M, την οποία απέδωσαν σε διπλή ανάκλαση της δέσμης ηλεκτρονίων που παράγει την ακτινοβολία και ονόμασαν τα αντίστοιχα γεγονότα *ραδιοεξάρσεις τύπου M*.

- *Δικατευθυνόμενες ραδιοεξάρσεις τύπου III*

Οι δικατευθυνόμενες ραδιοεξάρσεις τύπου III παρουσιάζονται στα δυναμικά φάσματα ως ζεύγη ραδιοεξάρσεων με αντίθετες κλίσεις που εκκινούν από το ίδιο σημείο. Η ερμηνεία που δόθηκε είναι πως πρόκειται για δέσμες ηλεκτρονίων που σχηματίστηκαν στην ίδια περιοχή και κατόπιν κινήθηκαν προς αντίθετες κατευθύνσεις.

Οι Aschwanden et al. (1995) μελετώντας έναν αριθμό δικατευθυνόμενων ραδιοεξάρσεων το διάστημα 1980-1993 κατέληξαν ότι η ολίσθηση συχνότητας (κατ' απόλυτη τιμή) για αυτήν την υποκατηγορία μπορεί να περιγραφεί από την έκφραση:

$$\left| \frac{df}{dt} \right| = 0.10 \cdot f^{1.40} \quad (37)$$

- *Ραδιοκαταιγίδες τύπου III*

Οι ηλιακές ραδιοκαταιγίδες τύπου III είναι σχεδόν συνεχής εκπομπή σε συχνότητες που διαρκεί μεγάλο χρονικό διάστημα (μισή ηλιακή περιστροφή και σε ορισμένες περιπτώσεις έχει παρατηρηθεί διάρκεια πάνω από μια ηλιακή περιστροφή) και περιλαμβάνει τόσο συνεχή εκπομπή όσο και μεμονωμένες ραδιοεξάρσεις τύπου III. Το πώς οι ηλιακές ραδιοκαταιγίδες τύπου III διαρκούν τόσο μεγάλα χρονικά διαστήματα ενώ παράλληλα χαρακτηρίζονται, σε όλη τη διάρκεια της εξέλιξής τους, από εξαιρετικά έντονη δημιουργία ραδιοεξάρσεων τύπου III παραμένει ανοιχτό ερώτημα.

Η κατανομή ως προς τη λαμπρότητα των επιμέρους ραδιοεξάρσεων σε μια ηλιακή ραδιοκαταιγίδα τύπου III ακολουθεί νόμο δύναμης της μορφής (Eastwood et al., (2010):

$$f(S)=A \cdot S^{-w} \quad (38)$$

Μελέτες ηλιακών ραδιοκαταιγίδων τύπου III από δίνουν για τον εκθέτη w τιμές στο διάστημα 0.5-3.

2.7 Ραδιοεξάρσεις τύπου IV

Πρόκειται τύπο ραδιοέξαρσης που δε λαμβάνει συχνά χώρα. Περιλαμβάνει πλήθος ραδιοεξάρσεων, έχει πολύ μεγάλη χρονική διάρκεια και σημαντικό χαρακτηριστικό της είναι η ύπαρξη λεπτής δομής στα δυναμικά φάσματα. Συχνά οι ραδιοεξάρσεις τύπου IV εμφανίζονται συσχετισμένες με ραδιοεξάρσεις τύπου II.

Με βάση τη συχνότητα που παρατηρείται η ραδιοεκπομπή, οι ραδιοεξάρσεις τύπου IV χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

- i) *Μικρομετρικές ραδιοεξάρσεις (IV μ):* εντοπίζονται στα δυναμικά φάσματα σε συχνότητες από 1 – 70 GHz. Το μέγιστο της εκπομπής συμβαίνει περίπου στα 10 GHz και εύκολα μπορεί να κανείς να το διακρίνει στα δυναμικά φάσματα από άλλες κατηγορίες ραδιοέξαρσης τύπου IV. Η τυπική διάρκεια των ραδιοεξάρσεων IV μ είναι περίπου 1 hr. Η κυκλική τους πόλωση γενικά αντιστοιχεί στην έκτακτη (X-mode) συνιστώσα της ραδιοακτινοβολίας. Ως πιθανός μηχανισμός δημιουργίας των ραδιοεξάρσεων IV μ θεωρείται η εκπομπή γυροσύγχροτρον.
- ii) *Δεκατομετρικές ραδιοεξάρσεις (IVdm):* το εύρος συχνοτήτων που καταλαμβάνουν στο δυναμικό φάσμα ξεκινά από ~ 200 MHz και φτάνει έως ~ 2 GHz. Δεν παρουσιάζουν συσχέτιση με άλλες μορφές του τύπου IV. Επιπλέον χαρακτηριστικό τους είναι η μη χρονική μετατόπιση του φάσματός τους. Η κυκλική τους πόλωση εμφανίζεται αντεστραμμένη σε σχέση με την κατηγορία IV μ .
- iii) *Μετρικές ραδιοεξάρσεις (IVm):* τις βλέπουμε στα δυναμικά φάσματα σε συχνότητες από ~ 10 MHz μέχρι ~ 200 MHz. Η μορφή με την οποία παρουσιάζονται στο δυναμικό φάσμα ποικίλλει. Η διάρκειά τους επίσης μπορεί να κυμαίνεται από μερικά δευτερόλεπτα έως 1 hr ή και περισσότερο.

Άλλη μια ενδιαφέρουσα κατηγοριοποίηση των ραδιοεξάρσεων τύπου IV βασίζεται στη μορφή που παρουσιάζει η συνεχής ραδιοεκπομπή στα δυναμικά φάσματα. Διακρίνουμε τον *στατικό*, τον *κινούμενο* και τον *ημιστατικό* τύπο:

- i) *Στατικός τύπος (Stationary Type) IV ((IVmB):* Η ονομασία του οφείλεται στο ότι δεν παρουσιάζεται συστηματική μετατόπιση ούτε της πηγής αλλά ούτε και της φασματικής περιοχής εκπομπής. Μπορεί να διαρκέσει μέχρι μερικές ώρες. Ενίοτε η ραδιοέξαρση αυτού του τύπου μπορεί να καταλήξει σε ραδιοκαταιγίδα θορύβου και να έχει εξαιρετικά μεγάλη διάρκεια. Ο βαθμός κυκλικής πόλωσης μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του γεγονότος (αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου) και

αντιστοιχεί στην τακτική συνιστώσα (O-mode). Ενδιάφερον παρουσιάζει το γεγονός ότι ο στατικός τύπος χαρακτηρίζεται από ισχυρή κατευθυντικότητα της ραδιοεκπομπής. Ο στατικός τύπος εμφανίζει συσχέτιση μόνο με μετρικές ραδιοεκπομπές. Ως μηχανισμός εκπομπής γι' αυτόν θεωρείται η εκπομπή πλάσματος.

- ii) *Κινούμενος τύπος (Moving Type) IV (IVmA)*: Ονομάστηκε έτσι διότι ήδη από αρκετά παλιά (Weiss 1963) είχε παρατηρηθεί μετατόπιση της πηγής που τον παράγει. Στα δυναμικά φάσματα χαρακτηρίζεται από ολίσθηση προς χαμηλότερες συχνότητες. Λαμβάνει χώρα από ~ 20 MHz έως και ~ 410 MHz.

Πρέπει να τονιστεί ότι υπάρχει συμφωνία της ολίσθησης προς μικρότερες συχνότητες με την προς τα πάνω κίνηση της πηγής που έχει παρατηρηθεί, αν κανείς θεωρήσει εκπομπή πλάσματος και κάποιο κατάλληλο μοντέλο στεμματικής πυκνότητας. Η διάρκεια των ραδιοεξάρσεων IVmA ίσως είναι μικρότερη από 0.5 hr αλλά μπορεί να φτάσει και τις 2 hr. Ο βαθμός κυκλικής πόλωσης είναι χρονομεταβλητός. Ξεκινά από χαμηλές τιμές στην αρχή του γεγονότος και προς τη λήξη του μπορεί να ξεπεράσει και το 90 %. Οι ταχύτητες των πηγών IVmA βρίσκονται στο διάστημα $200 - 1600 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ και παραμένουν σταθερές σε όλη τη διάρκεια της εξέλιξης της ραδιοέξαρσης.

- iii) *Ημιστατικός τύπος (Quasi – Stationary) IV (IVmF)*: Παρουσιάζει συσχέτιση με ραδιοεξάρσεις IVμ, αλλά και με εκπομπή πρωτονίων.

Όσον αφορά τη λεπτή υφή, όπως ήδη αναφέρθηκε έχουν ανακαλυφθεί διάφορα είδη αυτής στις ραδιοεξάρσεις τύπου IV (Jiřička et al., 2001). Από αυτά αρκετά συνήθη στα δυναμικά φάσματα είναι η μορφή ζέβρας, οι ινώδεις ραδιοεξάρσεις (Fibers) και οι αναπαλλόμενες ραδιοεξάρσεις (Pulsations).

2.8 Ραδιοεξάρσεις τύπου V

Στα δυναμικά φάσματα οι ραδιοεξάρσεις αυτού του τύπου χαρακτηρίζονται από διάχυτη σχεδόν συνεχή εκπομπή σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων (20-120 MHz, πολύ σπάνια φτάνουν έως και 200 MHz), η οποία (συνήθως) έπεται μιας εκπομπής τύπου III (που είναι είτε μια μεμονωμένη ραδιοέξαρση είτε ομάδα ραδιοεξάρσεων). Πρέπει να σημειωθεί ότι το κάτω όριο για τις ραδιοεξάρσεις τύπου V δεν είναι σαφές, αφού εξακολουθούν να λαμβάνουν χώρα κάτω από συχνότητες που είναι παρατηρήσιμες από τη Γη, ήτοι ~ 10 – 20 MHz. Παρατηρήσεις από το διάστημα δίνουν συχνότητες και κάτω από 1 MHz για τον τύπο V.

Η διάρκεια των ραδιοεξάρσεων τύπου V κυμαίνεται από 0.5 min έως 3 min (με μέση τιμή περίπου 2 min) και μάλιστα είναι μεγαλύτερη σε χαμηλότερες συχνότητες. Σύμφωνα με μελέτη των Weiss & Stewart (1965) η μέση διάρκεια Δt μιας ραδιοέξαρσης τύπου V μεταβάλλεται με τη συχνότητα f ως:

$$\Delta t(\text{sec}) \propto f^{-1/2}, f : \text{MHz} \quad (39)$$

Οι ραδιοεξάρσεις τύπου V παρουσιάζουν ασθενή κυκλική πόλωση (10 % το πολύ). Η πόλωση των ραδιοεξάρσεων στον τύπου V είναι αντίθετη με αυτή των συσχετιζόμενων ραδιοεκπομπών τύπου III. Αυτό εξηγείται με τη μεταβολή της τακτικής συνιστώσας (ordinary (O) mode) της ραδιοακτινοβολίας σε έκτακτη (extraordinary (X) mode).

Η ανίχνευση των ραδιοεξάρσεων τύπου V στα δυναμικά φάσματα δεν είναι εύκολη, ιδιαίτερα εάν ταυτόχρονα με αυτές εξελίσσονται και άλλες ραδιοεξάρσεις. Γενικά στις ραδιοεξάρσεις αυτού του τύπου δεν είναι εύκολο να διαπιστωθεί (λόγω του μεγάλου εύρους συχνοτήτων και των πολύπλοκων φασματικών δομών) εάν εμφανίζεται η χαρακτηριστική δομή θεμελιώδους – αρμονικής και το θέμα παραμένει ανοικτό. Πρόκειται για ένα χαρακτηριστικό που (μέχρι στιγμής) τις διαφοροποιεί από τις ραδιοεξάρσεις τύπου III στις οποίες η θεμελιώδης και η αρμονική εκπομπή είναι καλά ορισμένες.

Οι πηγές των ραδιοεξάρσεων τύπου V εντοπίζονται, πλην εξαιρέσεων, περίπου στο ίδιο ύψος με τις πηγές της ραδιοακτινοβολίας τύπου III που προηγείται. Έχει βρεθεί ότι το μέγεθος των πηγών των ραδιοεξάρσεων τύπου V μεγαλώνει γρήγορα με την ελάττωση της συχνότητας (όπως και στις τύπου III). Τέλος η θερμοκρασία λαμπρότητας αυτών των πηγών κυμαίνεται σε αρκετά ευρέα όρια και μπορεί να πει κανείς ότι γενικά εμφανίζεται να λαμβάνει τιμές έως και 10 φορές μικρότερες από τη θερμοκρασία λαμπρότητας που αντιστοιχεί στον προπορευόμενο τύπο III.

Ο Robinson (1977a) κατέληξε σε ενδιαφέροντα συμπεράσματα μελετώντας 30 ραδιοεξάρσεις τύπου V στο διάστημα 09 / 1973 – 01 / 1975 για τρεις συχνότητες (160, 80 και 43 MHz) με το

ραδιοφασματογράφο στην Culgoora. Στα γεγονότα που μελέτησε ήταν εύκολο να διακριθούν στο φάσμα και η ραδιοέξαρση τύπου III αλλά και η συσχετιζόμενη ραδιοέξαρση τύπου V. Όπως ήταν αναμενόμενο, οι ραδιοεξάρσεις τύπου V ακολουθούσαν ραδιοεξάρσεις τύπου III (μεμονωμένες ή σε ομάδες). Το μέγεθος των πηγών του τύπου V ήταν μεγαλύτερο από αυτό των πηγών του τύπου III και η θέση τους ελαφρώς μετατοπισμένη ως προς του τύπου III. Επιπροσθέτως, ισχυρίστηκε ότι οι ραδιοεξάρσεις τύπου V παρουσιάζουν ενίοτε μεγάλες φαινόμενες ταχύτητες απομακρυνόμενες από τις πηγές της συσχετιζόμενης εκπομπής τύπου III. Οι διάρκειες της εκπομπής τύπου V γενικά ήταν μικρότερες από 3 min. Τέλος, βρήκε συγκρίσιμες θερμοκρασίες λαμπρότητας για τα αντίστοιχα γεγονότα των τύπων III – V (π.χ. για συχνότητα 43 MHz κατέληξε σε θερμοκρασίες λαμπρότητας $10^{10} - 10^{11}$ K).

Όσον αφορά τη διαδικασία δημιουργίας μιας ραδιοέξαρσης τύπου V, έχουν κατά καιρούς προταθεί διάφοροι υποψήφιοι μηχανισμοί. Επικρατέστερος πλέον είναι η εκπομπή πλάσματος από ηλεκτρόνια που επιταχύνονται στην περιοχή της αντίστοιχης ραδιοέξαρσης τύπου III.

Κεφάλαιο 3

Η αποστολή STEREO – Θεωρητικά στοιχεία

3.1 Γενικά

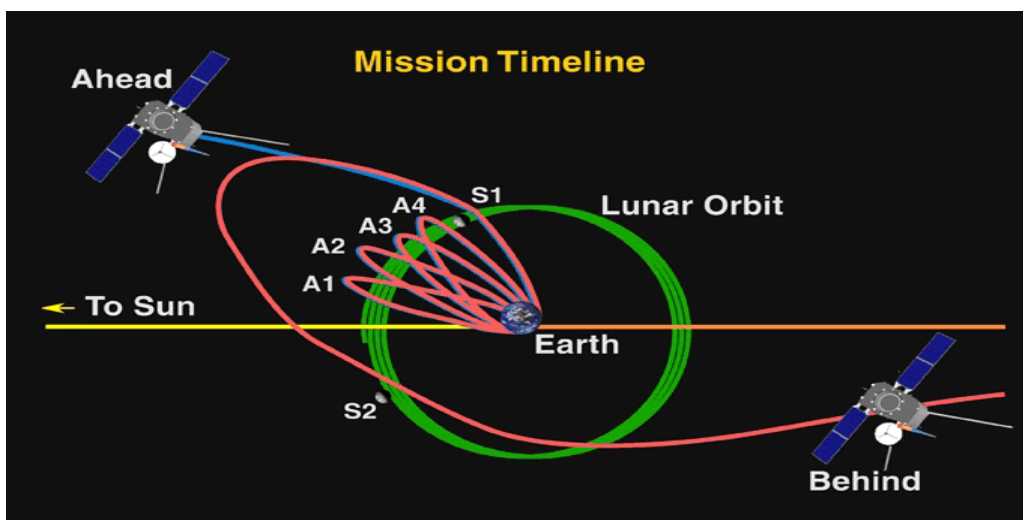
Η αποστολή *STEREO* (*Solar and Terrestrial Relations Observatory*) περιλαμβάνεται στο πρόγραμμα της NASA STP (*Solar Terrestrial Probes*) για την περαιτέρω κατανόηση των διαδικασιών στο ηλιακό σύστημα. Αποτελείται από δύο πανομοιότυπα διαστημόπλοια που το ένα (*STEREO Ahead / STEREO A*) προηγείται (ηλιοκεντρική απόσταση λίγο μικρότερη από 1 AU) και το άλλο (*STEREO Behind / STEREO B*) έπεται (ηλιοκεντρική απόσταση λίγο μεγαλύτερη από 1 AU) της Γης στην τροχιά της γύρω από τον Ήλιο. Εκτοξεύθηκαν στις 25 Οκτωβρίου 2006.



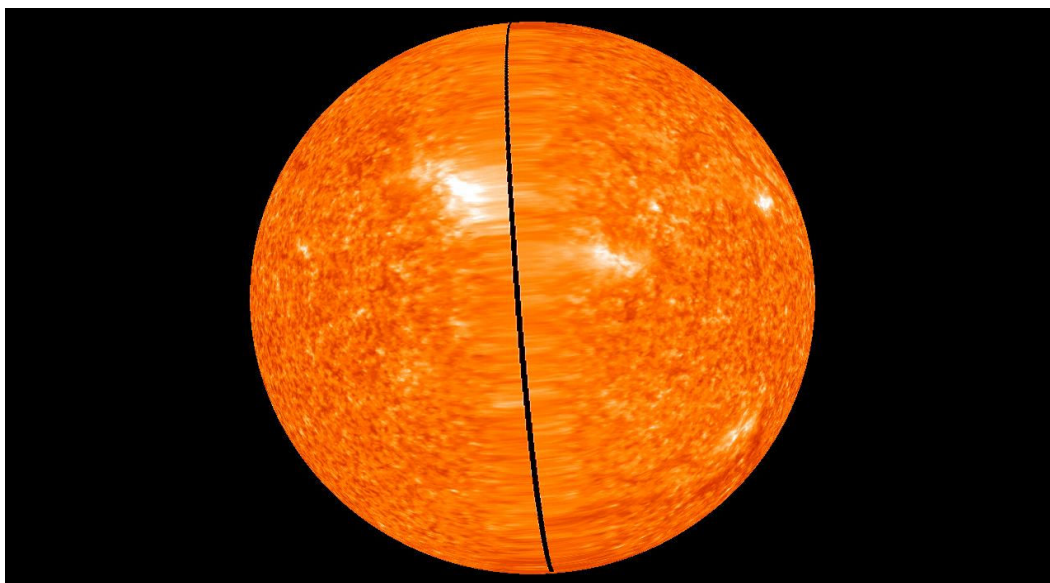
Σχήμα 5. Ο πύραυλος Delta II που χρησιμοποιήθηκε για την εκτόξευση των διαστημικών οχημάτων STEREO A και STEREO B (http://stereo.gsfc.nasa.gov/img/Delta_STEREO_launch.jpg).

Η εκτόξευση των STEREO πραγματοποιήθηκε επί ενός μόνο πυραύλου. Για να τεθούν τα δυο διαστημόπλοια στις κατάλληλες τροχιές γύρω από τον Ήλιο χρησιμοποιήθηκε η βαρυτική προώθηση από τη Σελήνη. Λόγω της επίδρασης δηλαδή του βαρυτικού πεδίου του δορυφόρου προκλήθηκε αλλαγή της κατεύθυνσης κίνησης των διαστημικών οχημάτων, ώστε εν τέλει το ένα να προηγείται και το άλλο να έπεται της Γης κατά την περιφορά γύρω από τον Ήλιο. Η επιθυμητή τροχιά για τα STEREO B, STEREO A επιτεύχθηκε δύο και τρεις μήνες μετά την εκτόξευση, αντιστοίχως. Έκτοτε η γωνιακή απόσταση μεταξύ των δύο STEREO αυξάνεται με ρυθμό $\sim 45^\circ$ το χρόνο. Στις 06 / 02 /

2011 η γωνιακή απόσταση μεταξύ των διαστημοπλοίων έφτασε τις 180° , παρέχοντάς μας για πρώτη φορά στερεοσκοπική (σε τρεις διαστάσεις) εικόνα ολόκληρου του Ήλιου.



Σχήμα 6. Η βαρυτική προώθηση από τη Σελήνη για να τεθούν τα STEREO A και STEREO B στις αντίστοιχες ηλιοκεντρικές τροχιές τους. (<http://stereo.sr.unh.edu/mission/index.html>).



Σχήμα 7. Σύνθεση των εικόνων των δύο STEREO στις 02/02/2011. Στις 06/02/2011 η γωνιακή απόσταση των STEREO έφτασε τις 180° , δίνοντας για πρώτη φορά στερεοσκοπική εικόνα ολόκληρου του Ήλιου (φωτογραφία από NASA). (<http://www.sciencedaily.com/releases/2011/02/110207102145.htm>).

Στην ιστοσελίδα <http://stereo-ssc.nascom.nasa.gov/where.shtml> μπορεί κανείς να δει πού βρίσκονται τα διαστημικά οχήματα STEREO την εκάστοτε χρονική στιγμή, μαζί με ορισμένα τροχιακά στοιχεία τους.

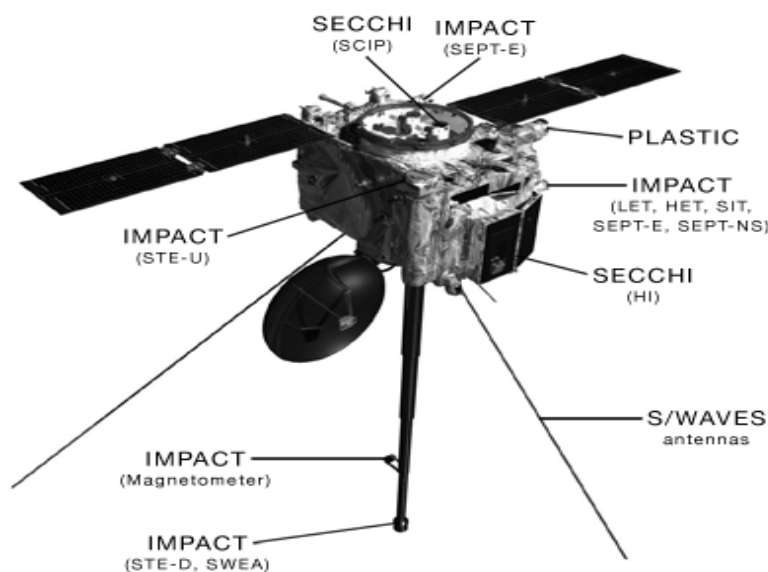
3.2 Επιστημονικοί στόχοι

Ο κεντρικός σκοπός της αποστολής STEREO (Kaiser 2009) είναι η μελέτη και περαιτέρω κατανόηση της προέλευσης, της φύσης και της τρισδιάστατης δομής των Στεμματικών Εκτινάξεων Μάζας (CMEs), αλλά και των συνεπειών της διάδοσής τους στο διαπλανητικό χώρο, μέσω των *στερεοσκοπικών* παρατηρήσεων που παρέχονται ταυτόχρονα από τα STEREO- A και STEREO-B. Κατά τη διάδοση μιας CME στο διαπλανητικό μέσο είναι κρίσιμο να γνωρίζουμε την κατάσταση του περιβάλλοντος Ηλιακού Ανέμου μέσα στον οποίο αυτή ταξιδεύει. Οι μετρήσεις πρωτονίων, σωματίων α, βαρύτερων ιόντων αλλά και ηλεκτρονίων του Ηλιακού Ανέμου από τα πειράματα IMPACT και PLASTIC της αποστολής μας παρέχουν αυτή τη δυνατότητα (για τη 1 AU). Οι μετρήσεις μαγνητικού πεδίου και πλάσματος από τα ίδια πειράματα αναμένεται να βοηθήσουν στο να μάθουμε περισσότερα σχετικά με τις περιοχές και τους μηχανισμούς επιτάχυνσης των ηλιακών ενεργητικών σωματιδίων (Solar Energetic Particles, SEPs). Με τα δύο διαστημικά σκάφη θα εξερευνηθεί η *τρειςδιάστατη* δομή των στεμματικών και διαπλανητικών μαγνητικών πεδίων και εν τέλει, μέσω αυτών, το ηλιακό δυναμό. Μέσω των παρατηρήσεων στα ραδιοκύματα από το πείραμα WAVES θα εντοπιστούν διαπλανητικά κρουστικά κύματα καθοδηγούμενα από ICMEs και δέσμες ηλεκτρονίων που επιταχύνθηκαν σε εκλάμπεις, από τη γένεσή τους στο χαμηλό στέμμα έως και την αλληλεπίδρασή τους με τη γήινη μαγνητόσφαιρα. Θεωρούμε ότι οι εν λόγω παρατηρήσεις θα συνδράμουν στο να συνδέσουμε τις εικόνες που δίνουν οι παρατηρήσεις στο μακρινό υπεριώδες και οι κορονογράφοι της αποστολής με τις επιτόπιες μετρήσεις σωματιδίων. Με τις παρατηρήσεις στα ραδιοκύματα αλλά και με επιτόπιες παρατηρήσεις κυμάτων πλάσματος από το πείραμα WAVES προσβλέπουμε στο να κατανοήσουμε σε μεγαλύτερο βαθμό τις διαδικασίες ραδιοεκπομπής στις ραδιοεξάρσεις τύπου II και III. Τέλος, η αποστολή STEREO περιλαμβάνει την παρατήρηση (σε τρεις διάστασεις) και άλλων δομών πλην των CMEs, όπως για παράδειγμα επισειόντων (streamers), πλουμιδίων (plumes), στεμματικών βρόχων (coronal loops), κομητών κλπ.

3.3 Πειράματα της αποστολής

Τα πειράματα σε καθένα από τα δύο STEREO είναι τα ακόλουθα:

- SECCHI (Sun Earth Connection Coronal and Heliospheric Investigation)
- IMPACT (In-situ Measurements of Particles and CME Transients)
- PLASTIC (Plasma and Suprathermal Ion Composition)
- WAVES (Πείραμα για επιτόπιες μετρήσεις κυμάτων πλάσματος στη 1 AU καθώς και για καταγραφή ραδιοσημάτων διαπλανητικής προέλευσης).



Σχήμα 8. Τα τέσσερα πειράματα της αποστολής STEREO. Διακρίνονται και ορισμένα επιμέρους όργανα των πειραμάτων.

http://www.nasa.gov/mission_pages/stereo/spacecraft/index.html.

Πριν προχωρήσουμε στην περιγραφή των πειραμάτων θα περιγράψουμε σύντομα τη λειτουργία του ηλεκτροστατικού αναλυτή (Electrostatic Analyzer, ESA) και του ανιχνευτή στερεάς κατάστασης (Solid State Detector, SSD). Αυτές οι διατάξεις έχουν χρησιμοποιηθεί στα πειράματα IMPACT και PLASTIC. Δίδεται κατόπιν η έννοια του γεωμετρικού παράγοντα (Geometrical Factor, GF) και η σημασία του για τη μελέτη των σωματιδίων.

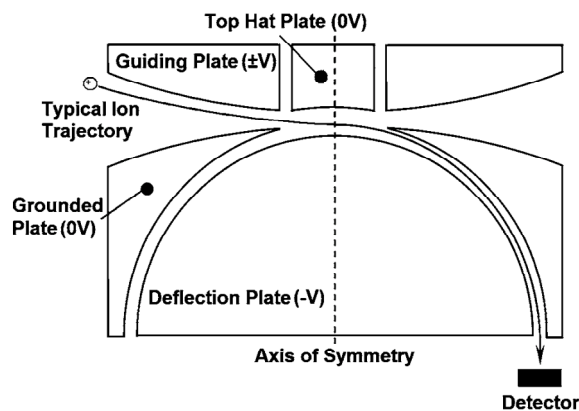
3.4 Ηλεκτροστατικοί αναλυτές

Οι ηλεκτροστατικοί αναλυτές χρησιμοποιούνται αρκετά συχνά σε αποστολές για μελέτη διαστημικών πλασμάτων, όπως είναι για παράδειγμα ο Ηλιακός Άνεμος, το πλάσμα στις ιονόσφαιρες και μαγνητόσφαιρες πλανητικών σωμάτων κλπ.

Ένας ηλεκτροστατικός αναλυτής με τη εφαρμογή κατάλληλου ηλεκτρικού πεδίου επιτρέπει τη διέλευση ιόντων ή ηλεκτρονίων που έχουν συγκεκριμένο εύρος ενεργειών, οπότε έχουμε περιορισμό στα σωματίδια τα οποία θα ανιχνευθούν μετέπειτα και των οποίων τις ιδιότητες θα μετρήσουμε. Τα σωματίδια που επιλέγονται από τον ηλεκτροστατικό αναλυτή συνήθως συγκεντρώνονται σε μια συγκεκριμένη περιοχή.

Μια γεωμετρία (Victor et al., 2006) που μας παρέχει ευρύ οπτικό πεδίο είναι ο top-hat ηλεκτροστατικός αναλυτής. Αποτελείται από δύο ομόκεντρα ημισφαίρια. Στην κορυφή του εξωτερικού ημισφαιρίου υπάρχει ένα άνοιγμα. Στο εξωτερικό ημισφαίριο εφαρμόζεται θετική τάση και στο εσωτερικό αρνητική. Με αυτόν τον τρόπο εφαρμόζεται ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού πλακιδίου που επιτρέπει τη διέλευση (από το άνοιγμα και μέσα από το κενό μεταξύ των πλακιδίων) σωματιδίων σε συγκεκριμένο ενεργειών (“energy passband”).

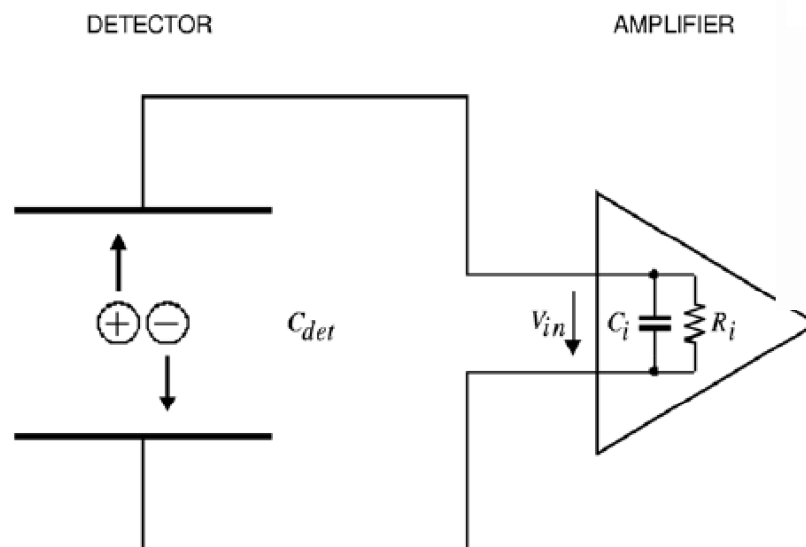
Λόγω γεωμετρίας ο top-hat ηλεκτροστατικός αναλυτής έχει δυνατότητα μετρήσεων σε οπτικό πεδίο 360° στο αζιμουθιακό επίπεδο. Επιπλέον, με την εφαρμογή διαφοράς δυναμικού μεταξύ δύο πλακιδίων πάνω από το άνοιγμα δημιουργούνται ηλεκτρικά πεδία τα οποία επιτρέπουν τη διέλευση σωματιδίων (άρα έχουμε και άλλο ένα οπτικό πεδίο) στην κάθετη διεύθυνση. Ωστόσο, το ολικό οπτικό πεδίο και στις δύο διευθύνσεις είναι μικρότερο λόγω περιορισμών που υπάρχουν στη δομή (αφού παρεμβάλλονται τμήματα του διαστημικού σκάφους και των επιμέρους οργάνων).



Σχήμα 9. Top-hat ηλεκτροστατικός αναλυτής (Victor et al., 2006).

3.5 Ανιχνευτές στερεάς κατάστασης

Είναι ανιχνευτές στους οποίους χρησιμοποιούνται ημιαγωγοί (π.χ. Ge, Si) ως μέσο ανίχνευσης. Η βάση της λειτουργίας τους είναι αυτή της διόδου με ανάστροφη πόλωση. Τα φορτισμένα σωματίδια που προσπίπτουν προκαλούν ιονισμό και ζεύγη ηλεκτρονίων – οπών. Η ζώνη εξάντλησης (“depletion zone”) της επαφής p-n επειδή έχει ηλεκτρικό πεδίο και είναι άδεια από φορτία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ανιχνευτής. Με την εφαρμογή ανάστροφης πόλωσης αυξάνεται το φράγμα δυναμικού. Λόγω της ολίσθησης στο ηλεκτρικό πεδίο παράγεται ηλεκτρικό σήμα που ενισχύεται και καταγράφεται.



Σχήμα 10. Ανιχνευτής στερεάς κατάστασης.

Λόγω των πλεονεκτημάτων τους οι ανιχνευτές στερεάς κατάστασης χρησιμοποιούνται εδώ και αρκετά χρόνια τόσο σε πειράματα Φυσικής υψηλών ενεργειών όσο και σε διαστημικές αποστολές. Παρέχουν δεκαπλάσιο αριθμό φορέων ρεύματος σε σχέση με τα τυπικά αέρια (για ίδιες ενεργειακές απώλειες). Με καλή διακριτική ικανότητα υπάρχει η δυνατότητα ανίχνευσης δομών. Τέλος ο λόγος σήματος προς θόρυβο είναι πολύ καλύτερος.

3.6 Γεωμετρικός παράγοντας

Ένας ανιχνευτής σωματιδίων μετράει αριθμό σωματιδίων στη μονάδα του χρόνου, R . Για να μπορέσουν όμως να αξιοποιηθούν οι μετρήσεις αυτές και να μελετηθεί η φυσική τους σημασία πρέπει ο R να μετατραπεί σε αρχική διαφορική ροή σωματιδίων συναρτήσει της ενέργειας. Ο γεωμετρικός παράγοντας είναι μια παράμετρος που εμπλέκεται στη μετατροπή αυτή και περιλαμβάνει και άλλα στοιχεία που δε σχετίζονται μόνο με τη γεωμετρία του οργάνου. Από τη διαφορική ροή μπορούμε να πάρουμε μια ισοδύναμη πυκνότητα στο φασικό χώρο.

Έστω ότι το πείραμα μπορεί να διακρίνει ένα συγκεκριμένο είδος σωματιδίων α που η ενέργειά του E_α βρίσκεται σε ένα δοσμένο εύρος ΔE . Τότε μια έκφραση που χρησιμοποιείται συχνά για τη μετατροπή του R σε διαφορική ροή dj είναι:

$$\frac{dj}{dE_\alpha} = \frac{R}{G \cdot \Delta E} \quad (40)$$

Αν ληφθεί υπ' όψη και η απόδοση του ανιχνευτή, e , η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$\frac{dj}{dE_\alpha(E)} = \frac{R}{e \cdot G \cdot \Delta E} \quad (41)$$

Η απόδοση e γενικά εξαρτάται από το είδος του σωματιδίου που ανιχνεύεται, την ενέργειά του, τη γωνία πρόσπτωσης του κλπ.

Η εύρεση του γεωμετρικού παράγοντα δεν είναι τετριμμένη. Στις μετρήσεις υπάρχουν τόσο συστηματικά (μη πλήρης ευθυγράμμιση των οπτικών συστημάτων για εντοπισμό των ιόντων, ηλεκτρονικός θόρυβος, μεταβολές στην απόδοση του ανιχνευτή κλπ) όσο και τυχαία σφάλματα (Collinson et al., 2012). Οι προσομοιώσεις τροχιών των σωματιδίων που διεξάγονται βοηθούν μεν στο να βελτιωθεί η εκτίμηση του γεωμετρικού παράγοντα, όμως πραγματοποιούνται με υποθέσεις διαφορετικές και με άλλες συνθήκες από αυτές που έχω στις μετρήσεις. Η σύγκριση επομένως τιμών από μετρήσεις και προσομοιώσεις είναι δύσκολη.

3.7 Φασματοσκοπία σχεδόν θερμικού θορύβου

Η φασματοσκοπία σχεδόν θερμικού θορύβου (*Quasi – Thermal Noise (QTN) spectroscopy*) προτάθηκε αρχικά από τους Meyer – Vernet και Perche (1989) για τη μελέτη του Ηλιακού Ανέμου. Πρόκειται για ένα εξαιρετικό εργαλείο για την εξαγωγή επιτόπιων χαρακτηριστικών των διαστημικών πλάσμάτων, δεδομένου ότι δεν εξαρτάται από το δυναμικό του διαστημοπλοίου.

Η τεχνική είναι βασισμένη στο φάσμα του ηλεκτροστατικού πεδίου που προκαλείται από σχεδόν θερμικές διακυμάνσεις των ηλεκτρονίων (Zouganelis, 2008a). Πιο συγκεκριμένα, εάν τοποθετηθεί μια κεραία σε ευσταθές πλάσμα, οι θερμικές κινήσεις των (φορτισμένων) σωματιδίων του περιβάλλοντος παράγουν ηλεκτροστατικές διακυμάνσεις οι οποίες μπορούν να μετρηθούν με ακρίβεια με τη βοήθεια κατάλληλου δέκτη που συνδέεται με μια διπολική κεραία.

Το φάσμα γύρω από τη συχνότητα πλάσματος f_p περιλαμβάνει μια κορυφή ακριβώς πάνω από την f_p . Επειδή $f_p^2 \propto n_e$ μπορούμε να εκτιμήσουμε την αριθμητική πυκνότητα των ηλεκτρονίων n_e άμεσα από το φάσμα. Το σχήμα του φάσματος καθορίζεται από τη συνάρτηση κατανομής ταχυτήτων των σωματιδίων στο σύστημα αναφοράς της κεραίας. Συνεπώς μπορεί να δοκιμάσει κανείς ποια κατανομή ταχυτήτων ερμηνεύει ικανοποιητικότερα τα παρατηρούμενα φάσματα. Κατόπιν προσαρμογής (fitting) του φάσματος ισχύος που προβλέπεται με βάση κάποια συνάρτηση κατανομής ταχυτήτων με αυτή που μετράται στους ακροδέκτες της κεραίας εξάγουμε τις παραμέτρους του πλάσματος των ηλεκτρονίων.

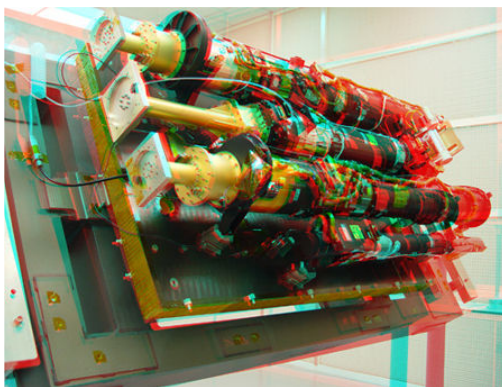
Κεφάλαιο 4

Τα πειράματα SECCHI και WAVES της αποστολής STEREO

4.1 Το πείραμα SECCHI

Πρόκειται για ένα σύνολο πέντε τηλεσκοπίων προηγμένης τεχνολογίας που παρακολουθούν μια CME από την περιοχή της γένεσής της έως και τη συνάντησή της με τη γη.

Με το πείραμα SECCHI (Howard et al. 2008) προσδοκάται να δοθούν πληροφορίες που θα συμβάλλουν στην περαιτέρω κατανόηση των μηχανισμών που ευθύνονται για τη δημιουργία μιας Εκτίναξης Στεμματικής Μάζας. Για παράδειγμα, μας ενδιαφέρει να μάθουμε ποια είναι η διάταξη του μαγνητικού πεδίου που οδηγεί σε μια τέτοια εκτίναξη και μέσω ποιας πορείας, ποιο είναι το έναυσμα για την εκδήλωσή της, αλλά και να κατανοήσουμε το ρόλο θεμελιωδών διαδικασιών, όπως είναι η μαγνητική επανασύνδεση, σε ένα τέτοιο φαινόμενο. Κατόπιν, αφού μια CME λάβει χώρα, θέλουμε να γνωρίζουμε ποια είναι τα φαινόμενα που αυτή προκαλεί κατά τη διάδοσή της στο διαπλανητικό χώρο και από ποιους παράγοντες καθορίζεται η τροχιά του στεμματικού αυτού υλικού. Η αποσαφήνιση των παραπάνω είναι καθοριστικής σημασίας για την πρόγνωση του Διαστημικού Καιρού.



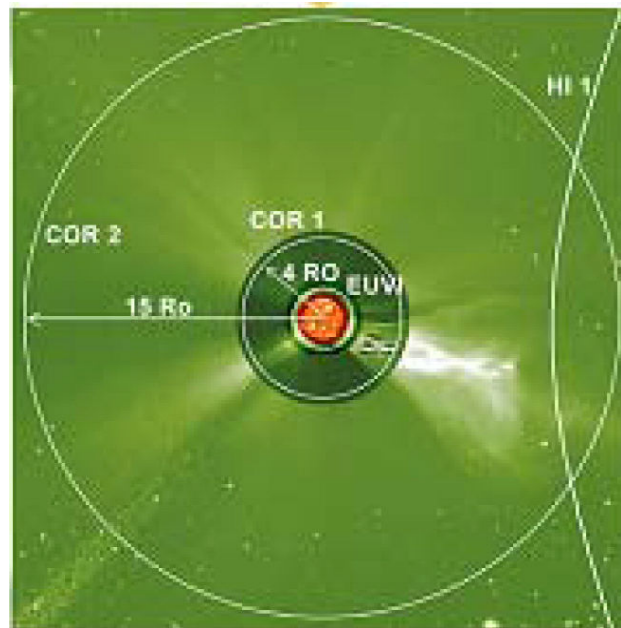
Σχήμα 11. Η διάταξη του πειράματος SECCHI (Howard et al., 2008).

Στο πείραμα SECCHI έχουν χρησιμοποιηθεί οι εξής τρεις τύποι τηλεσκοπίων:

- i) EUVI (EUV Imager): Απεικονίζει την ηλιακή ατμόσφαιρα σε ηλιοκεντρικές αποστάσεις από $1 R_{\odot}$ έως $1.7 R_{\odot}$ (φωτόσφαιρα, χρωμόσφαιρα και στο χαμηλό στέμμα) με τη βοήθεια τεσσάρων γραμμών εκπομπής στο εύρος μηκών κύματος $17.1 - 30.4 \text{ nm}$ (μακρινό υπεριώδες). Οι περιοχές που παρατηρεί το EUVI αντιστοιχούν στα ίδια τμήματα του εξώτερου στέμματος και της εσώτερης ηλιόσφαιρας που παρατηρούνται σε μεγαλύτερες αποστάσεις από τα υπόλοιπα τηλεσκόπια στο SECCHI, δίνοντας τη δυνατότητα να έχουμε συνολικά μια όσο το δυνατόν συνεχή πληροφορία για το πώς εξελίσσονται οι ηλιακές δομές από τη δημιουργία τους μέχρι και πέρα από την τροχιά της Γης. Η χωρική διακριτική ικανότητα του EUVI είναι διπλάσια από εκείνη του τηλεσκοπίου EIT στην αποστολή SOHO. Επιπλέον, το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την καταγραφή και αποθήκευση δύο διαδοχικών μετρήσεων έχει βελτιωθεί εξαιρετικά σε σχέση με αυτό του SOHO / EIT.

- ii) COR_1 , COR_2 (Coronagraphs): Είναι ζεύγος κλασικών κορονογράφων Lyot μεγάλου οπτικού πεδίου που δίνουν εικόνες του χαμηλού ($1.5 - 4 R_{\odot}$, COR_1) και του εξώτερου ($2.5 - 15 R_{\odot}$, COR_2) στέμματος στο ορατό. Πρόκειται για περιοχή που χαρακτηρίζεται από μεγάλη ακτινική βαθμίδα στεμματικής λαμπρότητας και για να έχουμε μια ικανοποιητική εικόνα της απαιτούνται δύο κορονογράφοι.
Ο COR_1 έχει καλυφθεί εσωτερικά (internally occulted) και συνοδεύεται από γραμμικό πολωτή (αξίζει να σημειωθεί ότι με την αποστολή STEREO χρησιμοποιείται για πρώτη φορά σε διαστημική αποστολή κορονογράφος για την απεικόνιση του χαμηλού στέμματος). Η εξήγηση είναι ότι ένας κορονογράφος παρατηρεί μεν το ασθενές φως από το στέμμα, υπό την παρουσία όμως του σκεδασμένου φωτός από τη φωτόσφαιρα που είναι πολύ λαμπρότερη. Επειδή το σκεδασμένο φως κυριαρχεί, ο πολωτής το συμπιέζει και μας επιτρέπει τελικά να διακρίνουμε το πολωμένο σήμα που προέρχεται από το στέμμα.
Ο κορονογράφος COR_2 έχει καλυφθεί εξωτερικά (externally occulted) και είναι πολύ πιο εξελιγμένος σε σχέση με τους κορονογράφους C_2 , C_3 στο SOHO / LASCO. Έχει το ίδιο οπτικό πεδίο όπως οι C_2 και C_3 μαζί, χωρική διακριτική ικανότητα ίδια περίπου με του C_2 και χρόνο έκθεσης πολύ μικρότερο από εκείνον του C_3 .

- iii) HI_1 , HI_2 (Heliospheric Imagers): Είναι δύο συστήματα μικρών τηλεσκοπίων μεγάλου οπτικού πεδίου για παρατήρηση της εσωτερικής ηλιόσφαιρας στο λευκό φως τα οποία είναι τοποθετημένα πλευρικά κάθε διαστημοπλοίου STEREO και προφυλάσσονται από την ηλιακή ακτινοβολία με τη βοήθεια κατάλληλης διάταξης σκιάστρων (occulters) που προκαλεί τεχνητή έκλειψη. Πρόκειται για όργανα απεικόνισης της ηλιόσφαιρας που πρώτη φορά χρησιμοποιούνται σε διαστημική αποστολή. Το σκεπτικό της κατασκευής τους βασίστηκε σε εργαστηριακές μετρήσεις των Buffington et al. (1996), οι οποίοι κατάφεραν να προσδιορίσουν το ποσοστό του φωτός που δε σκεδάζεται συναρτήσει του αριθμού των σκιάστρων και της γωνίας κάτω από το άκρο της περιοχής που έχει καλυφθεί. Οι αναλύσεις τους έδειξαν ότι ένα απλό τηλεσκόπιο μέσα σε ένα μικρό κουτί μπορεί να επιτύχει το επιθυμητό ποσοστό απόρριψης φωτός μέσω κατάλληλης τεχνητής έκλειψης και με τοποθέτηση του διαφράγματος του τηλεσκοπίου κατά μεγάλο ποσοστό στη σκιά του σκιάστρου.



Σχήμα 12. Σχηματική απεικόνιση παρατήρησης του στέμματος και της εσωτερικής ηλιόσφαιρας με το πείραμα SECCHI (Howard et al., 2008).

4.2. Το πείραμα S/WAVES

Το πείραμα S/WAVES (Bougeret et al., 2008) πραγματοποιεί τόσο εξ' αποστάσεως παρατηρήσεις όσο και επιτόπιες μετρήσεις. Οι εξ' αποστάσεως παρατηρήσεις περιλαμβάνουν ραδιοεκπομπές από το στέμμα και το διαπλανητικό χώρο. Από την άλλη πλευρά, υπάρχει η δυνατότητα επιτόπιας ανίχνευσης κυμάτων πλάσματος.

Χάρη στη στερεοσκοπική οπτική που παρέχουν τα δύο διαστημόπλοια STEREO, υπάρχει πλέον η δυνατότητα άμεσου εντοπισμού των πηγών των ραδιοεξάρσεων των τύπων II και III μέσω τριγωνισμού. Μέχρι πρότινος, ο εντοπισμός των ραδιοπηγών γινόταν υποχρεωτικά έμμεσα. Πιο συγκεκριμένα, από το δυναμικό φάσμα, θεωρώντας κάποιο προφίλ για τη στεμματική και τη διαπλανητική πυκνότητα και υποθέτοντας την εκπομπή πλάσματος ως το μηχανισμό γένεσης των ραδιοεξάρσεων υπάρχει η δυνατότητα να μετατραπεί η σχέση – συχνότητας χρόνου σε σχέση απόστασης - χρόνου και να υπολογιστούν οι ταχύτητες του διεγέρτη της ακτινοβολίας:

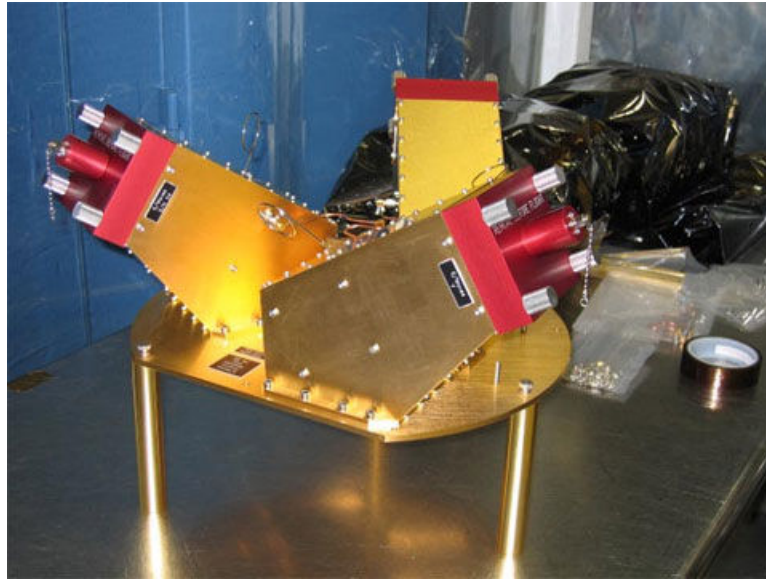
$$\frac{df}{dt} = \frac{df}{dn} \cdot \frac{dn}{dr} \cdot \frac{dr}{dt} \propto \sqrt{n(r)} \cdot \frac{dn(r)}{dr} \cdot u \quad (42)$$

Έχοντας συνεπώς την κλίση $\frac{df}{dt}$ από το δυναμικό φάσμα και τα $n(r)$,

$\frac{dn(r)}{dr}$ από το μοντέλο πυκνότητας που θεωρούμε μπορούμε να βρούμε την ταχύτητα u .

Το πλέον σοβαρό μειονέκτημα της έμμεσης αντιμετώπισης είναι φυσικά το ότι η πυκνότητα στο στέμμα και το διαπλανητικό μέσο μεταβάλλεται δυναμικά με το χρόνο και τα αντίστοιχα προφίλ δεν είναι γνωστά εκ των προτέρων. Ο τριγωνισμός από τα δύο STEREO μας απαλλάσσει πλέον από την ανάγκη υποθέσεων a priori για την πυκνότητα. Επιπλέον, στην περίπτωση των ραδιοεξάρσεων τύπου II για παράδειγμα, συγκρίνοντας τις εικόνες των CMEs στο ορατό από τα STEREO/SECCHI και SOHO/LASCO με τις θέσεις των ραδιοπηγών που παίρνουμε από τον τριγωνισμό, μπορούμε να εξαγάγουμε ενδιαφέροντα συμπεράσματα τόσο για τις συνθήκες που ευνοούν τη δημιουργία ραδιοεκπομπής τύπου όσο και για τη σχέση της CME με το συσχετιζόμενο κρουστικό κύμα.

Πέρα από τον εντοπισμό της ραδιοπηγής, οι παρατηρήσεις στα ραδιοκύματα από τα S/WAVES μπορούν να δώσουν πληροφορίες και για άλλα χαρακτηριστικά της ραδιοέξαρσης, όπως είναι η κατευθυντικότητα της δέσμης (το καλούμενο “beaming pattern”), η διάδοση και η σκέδασή της στο διαπλανητικό μέσο κλπ.



Σχήμα 13. Οι κεραίες του πειράματος SWAVES (Bougeret et al., 2008).

Το SWAVES μετρά τις διακυμάνσεις του ηλεκτρικού πεδίου σε τρεις κάθετες μεταξύ τους μονοπολικές κεραίες οι οποίες είναι τοποθετημένες στην επιφάνεια των διαστημοπολίων που κοιτάζει αντίθετα από τον Ήλιο. Οι κεραίες είναι τοποθετημένες σε μια κοινή πλάκα βάσης η οποία περιλαμβάνει και την στέγαση προενισχυτών που συνδέονται με τις κεραίες. Οι προενισχυτές χαρακτηρίζονται από χαμηλό θόρυβο και υψηλή εμπέδηση, ώστε εν τέλει να ελαχιστοποιείται η επίδραση της χωρητικότητας της βάσης, η οποία μπορεί να επηρεάσει σοβαρά την ευαισθησία του δέκτη.

Ο ραδιοδέκτης του πειράματος S/WAVES μπορεί να προσδιορίζει τη διεύθυνση άφιξης ενός εισερχόμενου ραδιοσήματος (“goniolarimetry”), δηλαδή το αζιμούθιο ϕ και το συμπληρωματικό θ του πλάτους (colatitude). Επίσης από αυτές τις μετρήσεις προσδιορίζονται η πυκνότητα ροής του σήματος και οι παράμετροι Stokes (S, Q, U, V) για αυτό και πιθανόν το γωνιακό άνοιγμα της πηγής γ . Συνολικά έχουμε τέσσερις ταυτόχρονες μετρήσεις από κάθε ζεύγος κεραιών, συγκεκριμένα μια αυτοσυσχέτιση των τάσεων σε καθεμία από τις κεραίες και τις δύο μιγαδικές συσχετίσεις αυτών.

Επειδή συνολικά προκύπτουν επτά άγνωστοι (θ , ϕ , S, Q, U, V, γ) και διαθέτουμε μόνο τέσσερις εξισώσεις, για να μπορέσουμε να έχουμε περισσότερες παραμέτρους διαθέσιμες προσαρμόζουμε κατάλληλα τη διάταξη των κεραιών και παίρνουμε τελικά δύο διαδοχικές μετρήσεις σε δύο διαφορετικά ζεύγη κεραιών. Αυτό συνολικά μας παρέχει επτά ανεξάρτητες μετρήσεις. Αν γίνουν τρεις διαδοχικές μετρήσεις σε τρία διαφορετικά ζεύγη κεραιών έχουμε εννέα ανεξάρτητες παραμέτρους. Επομένως θα πρέπει κανείς να αντιστρέψει κατάλληλα το πρόβλημα ώστε να προσδιορίσει τις παραμέτρους της πηγής.

Όσον αφορά τις συχνότητες παρατήρησης, το S/WAVES διαθέτει ένα δέκτη χαμηλών συχνοτήτων (Low Frequency Receiver, LFR) από 160 kHz έως 2.5 MHz, ένα δέκτη υψηλών συχνοτήτων (High Frequency Receiver, HFR) από 16 MHz έως 125 MHz και ένα δέκτη που παρατηρεί σε συγκεκριμένη συχνότητα (Fixed Frequency Receiver, FFR), είτε 30 MHz είτε 32 MHz για τη σύνδεση με επίγειες παρατηρήσεις.

Όπως ήδη αναφέρθηκε το S/WAVES, εκτός από τις παρατηρήσεις στα ραδιοκύματα, πραγματοποιεί και επιτόπιες μετρήσεις μέσω των οποίων λαμβάνουμε πληροφορία για τις φυσικές συνθήκες και τις παραμέτρους του πλάσματος στην περιοχή του διαστημοπλοίου. Οι επιτόπιες μετρήσεις περιλαμβάνουν ένα σύστημα μετρήσεων χρονοσειρών το οποίο αποτελείται από:

- Το δειγματολήπτη στο πεδίο του χρόνου (Time Domain Sampler, TDS) καθώς και το αντίστοιχο με αυτόν σύστημα για στατιστική μελέτη κυμάτων Langmuir (Langmuir Waves Statistics system, LWS), για μετρήσεις αυτών των κυμάτων πλάσματος. Τα κύματα Langmuir (βλ. κεφάλαιο 2) θεωρείται ότι αποτελούν το πρώτο στάδιο για τη γέννηση των ηλιακών ραδιοεξάρσεων τύπου II, III. Σημαντική είναι η δυνατότητα του του δειγματολήπτη TDS να μετρά τις διακυμάνσεις της πυκνότητας σε χρονική κλίμακα κατάλληλη ώστε να υπάρξει αλληλεπίδρασή τους με τα κύματα Langmuir.
- Ένα σύστημα (Low Rate Science system, LRS) το οποίο μετρά τις διακυμάνσεις της πυκνότητας και τα ηλεκτρικά πεδία στην περιοχή της τοπικής συχνότητας πλάσματος (0.03-32 Hz).
- Ένα σύστημα (Antenna Potential Monitor, APM) το οποίο καταγράφει με αργό ρυθμό τις μεταβολές της πυκνότητας του πλάσματος.

Με τη βοήθεια του δειγματολήπτη TDS μετράται η πόλωση των κυμάτων Langmuir και με το σύστημα LWS οι στατιστικές ιδιότητές τους. Οι διακυμάνσεις των ηλεκτρικών πεδίων που μετρά το σύστημα LRS με την εφαρμογή της φασματοσκοπίας ημιθερμικού θορύβου, QTN, παρέχουν τη δυνατότητα υπολογισμού της πυκνότητας των ηλεκτρονίων. Τέλος, ο συνδυασμός των συστημάτων LRS και AMP δίνει τη δυνατότητα εντοπισμού των κυμάτων Langmuir μέσα σε διάφορες δομές πυκνότητας.

Κεφάλαιο 5

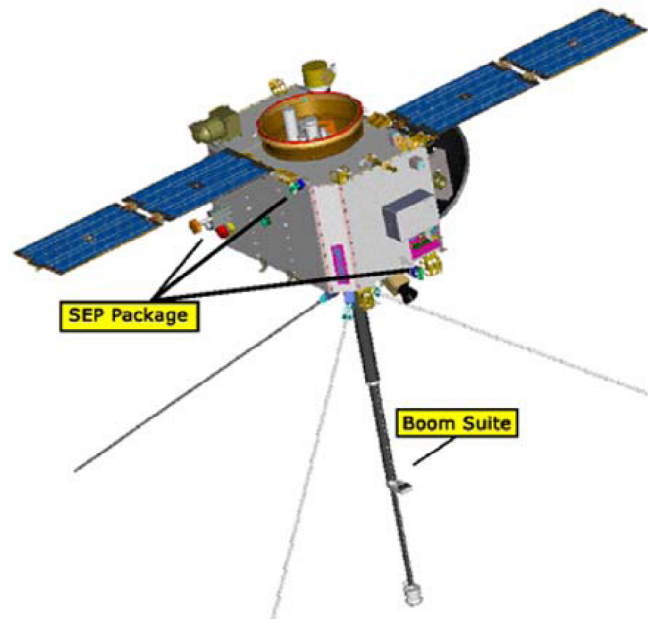
Η επιλογή μετρήσεων από τα διαστημόπλοια STEREO

5.1 Το πείραμα IMPACT

5.1.1 Γενικά

Οι μετρήσεις των ηλεκτρονίων με ενέργειες της τάξης του Ηλιακού Ανέμου (τα καλούμενα θερμικά (“thermal”)) αλλά και μεγαλύτερες (τα καλούμενα υπέρθερμα (“suprathermal”)), του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και των ηλιακών ενεργητικών σωματιδίων (SEPs) μας δίνουν ουσιαστικότερες πληροφορίες για την κατανόηση της φύσης των CMEs και των φαινομένων που προκαλούν στην ηλιόσφαιρα επηρεάζοντας το διαστημικό περιβάλλον της Γης. Το πείραμα IMPACT (Luhmann et al., 2008) συμβάλλει στη μέτρηση των παραπάνω με χρήση επτά αισθητήρων τοποθετημένων σε δύο ομάδες. Η μια στοχεύει στη μελέτη θερμικών και υπέρθερμων ηλεκτρονίων και καλείται διάταξη βραχίονα (“boom suite”), ενώ η άλλη στη μελέτη των ηλιακών ενεργητικών σωματιδίων και ονομάζεται διάταξη SEP (“SEP suite”). Πέραν της βαθύτερης κατανόησης των CMEs, οι μετρήσεις του IMPACT αναμένεται να μας βοηθήσουν να επεκτείνουμε την υπάρχουσα γνώση όσον αφορά τη σύνδεση του τρισδιάστατου ηλιακού στέμματος με τον Ηλιακό Άνεμο, αλλά και τις πηγές και τις διαδικασίες που ελέγχουν την επιτάχυνση και τη διάδοση των SEPs.

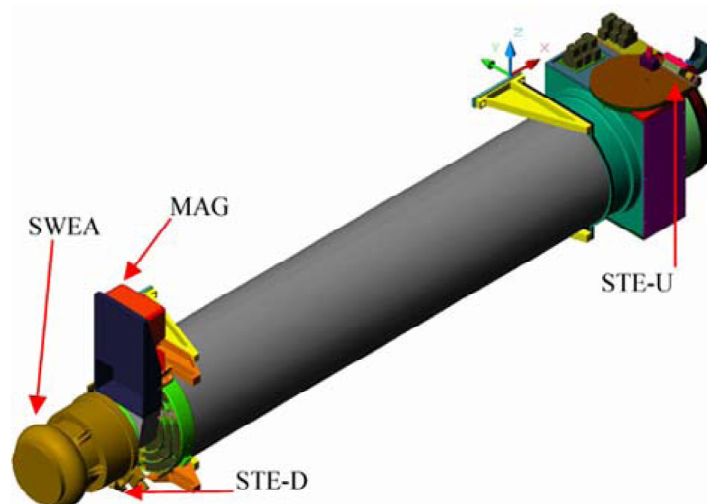
Τα διαστημόπλοια STEREO είναι μη περιστρεφόμενα. Επομένως έχει πολύ μεγάλη σημασία η διάταξη των ανιχνευτών σωματιδίων. Ακολούθως δίδονται βασικά χαρακτηριστικά των επιμέρους τμημάτων του IMPACT και τις διάταξης των αισθητήρων σε αυτά.



Σχήμα 14. Η διάταξη βραχίονα και η διάταξη SEP του πειράματος IMPACT στο STEREO-B (Luhmann et al., 2008).

5.1.2 Η διάταξη βραχίονα

Περιλαμβάνει τους αισθητήρες SWEA, STE και MAG που βρίσκονται τοποθετημένοι σε τηλεσκοπικό βραχίονα μήκους ~ 5.8 m κατασκευασμένο από εποξειδικό φύλλο άνθρακα. Ο βραχίονας είναι τοποθετημένος αντίθετα από τον ήλιο και βρίσκεται στην άκρη των δύο διαστημοπλοίων ώστε να ελαττώνονται οι όποιες παρεμβολές με τις κεραίες του πειράματος WAVES.



Σχήμα 15. Η διάταξη βραχίονα του πειράματος IMPACT (Luhmann et al., 2008).

SWEA (Solar Wind Electron Analyzer)

Ο κύριος στόχος του ηλεκτροστατικού αναλυτή SWEA είναι η λήψη μετρήσεων για θερμικά ηλεκτρόνια (“core electrons”) του Ηλιακού Ανέμου και για υπέρθερμα (“halo electrons”) ηλεκτρόνια, σε στερεά γωνία περίπου 4π, με ικανοποιητική γωνιακή και χρονική διακριτική ικανότητα, ώστε να μπορούν να αξιοποιηθούν τα ηλεκτρόνια με ενέργειες 300-800 eV (χαρακτηρίζονται από υψηλή ανισοτροπία) για την κατανόηση της τοπολογίας του τοπικού μαγνητικού πεδίου και της σχέσης του με ηλιακές δομές.

Ο αναλυτής μετρά τις συναρτήσεις κατανομής των θερμικών ηλεκτρονίων του Ηλιακού Ανέμου και των υπέρθερμων ηλεκτρονίων σε ενέργειες από 0 έως 3 keV. Επειδή χρησιμοποιείται top – hat ηλεκτροστατικός αναλυτής, έχω γωνία υποδοχής 360° στο επίπεδο της εκλειπτικής, ενώ με τη βοήθεια των εκτροπένων παρέχεται δυνατότητα μέτρησης σε ανύψωση $\pm 65^\circ$ από το επίπεδο της εκλειπτικής. Τα ηλεκτρόνια που εισέρχονται υπό διάφορες αζιμουθιακές γωνίες στον αναλυτή συγκεντρώνονται σε ανιχνευτές τοποθετημένους σε 16 διαφορετικές γωνίες.

Ο αναλυτής SWEA είναι τοποθετημένος στο άκρο του βραχίονα, εξασφαλίζοντας τον προσδιορισμό της κατευθυντικότητας των υπέρθερμων ηλεκτρονίων ακόμη και σε περιπτώσεις όπου το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο περιστρέφεται αρκετά μακριά από την εκλειπτική, όπως για παράδειγμα συμβαίνει κατά τη διέλευση μιας ICME.

Αξίζει να σημειωθεί ότι στις χαμηλές ενέργειες (όπως αυτές που μελετά ο SWEA) οι μετρήσεις επηρεάζονται από το δυναμικό του διαστημοπλοίου. Ο λόγος είναι ο εξής: λόγω πρόσπτωσης ηλιακής υπεριώδους ακτινοβολίας η επιφάνεια του διαστημοπλοίου, μέσω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου, εκπέμπει ηλεκτρόνια και επομένως έχουμε φόρτιση της επιφάνειας με θετικό δυναμικό (μερικών Volts για τις τυπικές συνθήκες στον Ηλιακό Άνεμο). Το δυναμικό είναι τέτοιο ώστε η ροή των φωτοηλεκτρονίων που εκπέμπονται να εξισορροπείται από τη ροή των ηλεκτρονίων που χτυπούν την επιφάνεια του διαστημοπλοίου. Για να αποφευχθεί η ανάπτυξη ισχυρού δυναμικού που θα αλλοιώσει τις τροχιές των εισερχομένων ηλεκτρονίων η εξωτερική επιφάνεια του διαστημικού σκάφους είναι κατασκευασμένη από αγώγιμο υλικό. Επιπλέον, ο σχεδιασμός του πειράματος IMPACT έγινε έτσι ώστε το δυναμικό του αναλυτή SWEA να είναι ίσο με του διαστημοπλοίου, ενώ με περαιτέρω μελέτες προσδιορίστηκε υλικό κατάλληλο για την κατασκευή της εξωτερικής επιφάνειας του διαστημικού οχήματος.

STE (Suprathermal Electron Telescope)

Μετράει ηλεκτρόνια ενεργειών από 2 έως 100 keV περίπου, τα οποία είτε κινούνται προς τον Ήλιο είτε απομακρύνονται από αυτόν, κινούμενα κατά μήκος του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου. Σε κάθε

STEREO υπάρχουν δύο τηλεσκόπια STE. Το ένα τηλεσκόπιο βρίσκεται στο άκρο του βραχίονα που βλέπει στην κατεύθυνση του Ήλιου (STE-U/Upstream) προς το τοπικό μαγνητικό πεδίο, ενώ το άλλο (STE-D/Downstream) παρατηρεί σε αντίθετη κατεύθυνση. Οι απαιτήσεις των παρατηρήσεων οδήγησαν σε διαφορετική διάταξη στα δύο STEREO.

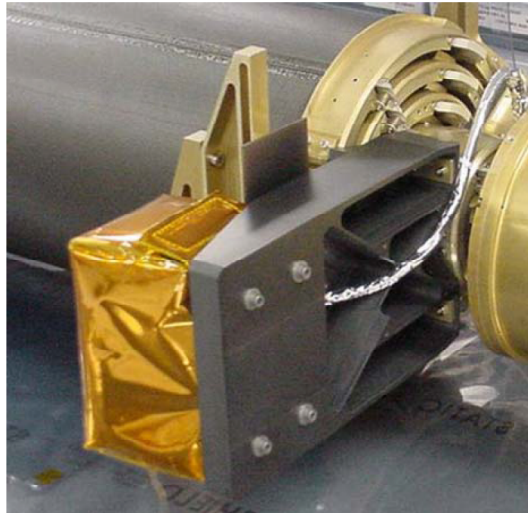
Το STE στοχεύει στη μελέτη i) ηλεκτρονίων με ενέργειες μεγαλύτερες από αυτές που μετρά ο αναλυτής SWEA τα οποία είναι υπεύθυνα για τη δημιουργία ραδιοεξάρσεων τύπου III ii) ηλεκτρονίων τα οποία επιταχύνονται σε διαπλανητικά κρουστικά κύματα και διεγείρουν την εκπομπή στις ραδιοεξάρσεις τύπου II και iii) superhalo ηλεκτρονίων σε περιόδους μειωμένης ηλιακής δραστηριότητας των οποίων η προέλευση δεν έχει διαλευκανθεί ακόμη. Τα τελευταία είχαν ανακαλυφθεί σε μετρήσεις της αποστολής WIND, όμως ο ρυθμός μετρήσεων σε ενέργειες πάνω από τα 2 keV σε περιόδους χαμηλής ηλιακής δραστηριότητας κυριαρχείται από μετρήσεις υποβάθρου δυσκολεύοντας την παρατήρηση των ηλεκτρονίων superhalo.

Στο πείραμα STE χρησιμοποιούνται κατάλληλοι (μικρού μεγέθους, χαμηλής χωρητικότητας και με ελαχιστοποιημένο το όποιο ρεύμα διαφυγής) ανιχνευτές στερεάς κατάστασης διατεταγμένοι σε συστοιχίες πάνω σε ένα πλακίδιο, μαζί με σειρές ηλεκτρονικών χαμηλού θορύβου και χαμηλής ισχύος. Έτσι οι αισθητήρες του πειράματος χαρακτηρίζονται από χαμηλό υπόβαθρο και υψηλή ευαισθησία. Η εγγενής ενεργειακή διακριτική ικανότητα (“intrinsic energy resolution”) σε κάθε STE είναι ~ 1 keV και ο λόγος $\Delta E/E$ σε τηλεμετρήσεις (“telemetered data resolution”) κυμαίνεται από 7% έως 20%. Τα πλακίδια που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν τέσσερις ανιχνευτές στερεάς κατάστασης τοποθετημένους σε μια σειρά. Κάθε πλακίδιο έχει κατάλληλο άνοιγμα που εξασφαλίζει σε κάθε ανιχνευτή οπτικό πεδίο $20^\circ \times 80^\circ$. Τα ηλεκτρονικά βρίσκονται ακριβώς δίπλα από τους ανιχνευτές έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται ο θόρυβος.

MAG (Magnetometer)

Το μαγνητόμετρο του πειράματος IMPACT (Acuña et al. 2008) παρέχει το διάνυσμα του μαγνητικού πεδίου με ακρίβεια 0.1 nT, σε δύο διαστήματα τιμών: έως 65536 nT και έως 500 nT. Το μεγάλο εύρος τιμών επιτρέπει την αξιοποίηση του μαγνητόμετρου σε όλες τις φάσεις της αποστολής. Η κατασκευή του MAG βασίστηκε στο μαγνητόμετρο της αποστολής MESSENGER.

Το μαγνητόμετρο MAG είναι τοποθετημένο κοντά στο άκρο του βραχίονα του IMPACT ώστε να ελαχιστοποιείται η όποια συνεισφορά από άλλα πεδία στο διαστημόπλοιο τα οποία θα μπορούσαν να αλλοιώσουν τις μετρήσεις. Επιπροσθέτως, με κατάλληλο πρόγραμμα ελαχιστοποιήθηκαν ορισμένα μεταβλητά πεδία στα διαστημικά σκάφη και διασφαλίστηκε ότι στατικά πεδία που δημιουργούνται στο διαστημόπλοιο δεν προκαλούν παρεμβολές στο σήμα του οργάνου.

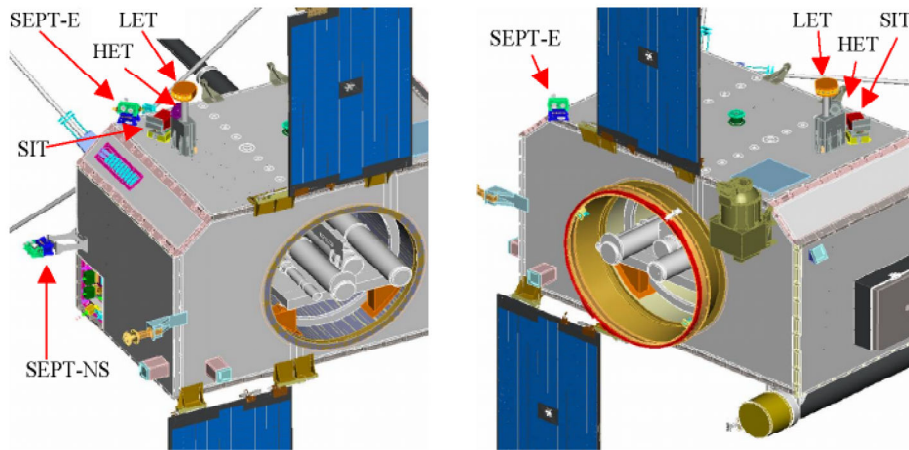


Σχήμα 16. Το μαγνητόμετρο στο πείραμα IMPACT (Luhmann et al., 2008).

Με τις μετρήσεις του μαγνητομέτρου MAG στοχεύουμε σε πληρέστερη κατανόηση του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου, της απόκρισής του στην ηλιακή δραστηριότητα και της σχέσης του με τη δομή του Ηλιακού Ανέμου.

5.1.3 Η διάταξη SEP

Οι αισθητήρες της διάταξης SEP (SIT, SEPT, LET, HET) τοποθετήθηκαν σε διαφορετικά σημεία στα δύο STEREO ώστε να εξασφαλίζονται τα επιθυμητά οπτικά πεδία ως προς τον προσανατολισμό του σπειροειδούς διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου στην εκλειπτική.



Σχήμα 17. Η διάταξη SEP του πειράματος IMPACT στα STEREO-A και STEREO-B (Luhmann et al., 2008).

SEPT (Solar Electron and Proton Telescope)

Έχουν ως στόχο την ανίχνευση πρωτονίων και ιόντων ηλίου καθώς και των ενεργητικών ηλεκτρονίων του πληθυσμού Ηλιακών Ενεργητικών Σωματιδίων (SEPs). Χρησιμοποιείται κατάλληλος ανιχνευτής στερεάς κατάστασης. Τα τηλεσκόπια μας παρέχουν αντίθετων κατευθύνσεων μετρήσεις πρωτονίων και σωματίων α με ενέργειες 0.06-7 MeV, αλλά και ηλεκτρονίων με ενέργειες 30-400 keV. Ξεχωριστές μονάδες τηλεσκοπίων με δύο άκρα (double-ended) είναι τοποθετημένες στο διαστημικό όχημα σε θέσεις τέτοιες ώστε από τη μία μονάδα κάποιος να παίρνει πληροφορία για σωματίια τα οποία ταξιδεύουν και προς τις δύο κατευθύνσεις κατά μήκος του τοπικού διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου Parker (SEPT-E) και από την άλλη μονάδα να έχουμε τις ίδιες μετρήσεις κοιτάζοντας πάνω / κάτω (North / South) από την εκλειπτική (SEPTNS).

Το SEPT χρησιμοποιεί ανιχνευτές από κατάλληλο υλικό ώστε να παίρνει μετρήσεις υψηλής ευαισθησίας της ενέργειας των σωματίων. Με κατάλληλο συνδυασμό μαγνητών και πλακιδίων επιτυγχάνεται διαχωρισμός ηλεκτρονίων και ιόντων. Ο σχεδιασμός επιτρέπει ανίχνευση ηλεκτρονίων που προσπίπτουν από την πλευρά του φύλλου με ουσιαστικά αναλλοίωτο φάσμα. Τα ιόντα καταγράφονται όταν προσπίπτουν από την πλευρά του μαγνήτη. Ένας δεύτερος μαγνήτης σαρώνει ηλεκτρόνια ενεργειών κάτω από 400 keV αλλά αφήνει ανεπηρέαστα τα ιόντα.

Από παρατηρήσεις σε τέσσερις διευθύνσεις παίρνουμε πληροφορίες για την ανισοτροπία των σωματίων. Για να γίνεται όσο το δυνατόν ανεμπόδιστη παρατήρηση τόσο κατά μήκος του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου όσο και κάθετα σε αυτό, το τηλεσκόπιο είναι τοποθετημένο σε διαφορετικές θέσεις στα δύο STEREO.

Οι παρατηρήσεις από το SEPT τόσο ηλεκτρονίων όσο και βασικών ιόντων στο βασικό εύρος ενεργειών των SEPs μας παρέχει:

- i) χρονικά προφίλ για αυθόρμητα και βαθμιαία γεγονότα SEPs
- ii) ανισοτροπίες που δείχνουν προσέγγιση και απομάκρυνση του κρουστικού κύματος – πηγή το οποίο καθοδηγείται από ICME, καθώς και την ισοτροπία κατά το πέρασμα του κρουστικού κύματος.

SIT (Suprathermal Ion Telescope)

Πρόκειται για ένα φασματογράφο χρόνου πτήσης για τη μέτρηση μάζας ιόντων. Ειδικότερα, μελετά τη σύσταση των ιόντων στην περιοχή χαμηλών ενεργειών (τα υπέρθερμα) των SEPs. Το όργανο SIT μετρά τη χημική σύσταση ιόντων από He έως Fe με ενέργειες ~ 30 keV/νουκλεόνιο μέχρι ~ 2 MeV/νουκλεόνιο. Τα ισότοπα ^3He και ^4He αναλύονται πολύ ικανοποιητικά από το SIT, επιτρέποντας να προσδιοριστούν με σαφήνεια αυθόρμητα γεγονότα ηλιακών ενεργητικών σωματιδίων στα οποία έχω μεγάλη αφθονία ^3He . Τα ισότοπα ^3He φέρονται να είναι καθοριστικής σημασίας στο να διακρίνουμε πηγές που συνδέονται με εκλάμψεις από πηγές που συνδέονται με διαπλανητικά κρουστικά κύματα.

Τα ιόντα εισέρχονται στο τηλεσκόπιο SIT μέσω δύο λεπτών φύλλων Ni στην είσοδο και σταματούν σε έναν ανιχνευτή στερεάς κατάστασης. Η πρόσπτωση ηλιακής υπεριώδους ακτινοβολίας στα φύλλα εμποδίζεται με τη βοήθεια σκιάστρου. Δευτερεύοντα ηλεκτρόνια τα οποία εκπέμπονται από τα φύλλα στην είσοδο επιταχύνονται και εκπέμπονται κατάλληλα ώστε προσπίπτοντας σε ανιχνευτές MCPs (“Micro-Channel Plate”) να δώσουν το εναρκτήριο σήμα για τη μέτρηση του χρόνου πτήσης. Το σήμα για το χρόνο λήξης της μέτρησης προέρχεται από δευτερεύοντα ηλεκτρόνια τα οποία γεννώνται από την πρόσπτωση των ιόντων στον ανιχνευτή στερεάς κατάστασης. Επιπλέον από το σήμα του ανιχνευτή στερεάς κατάστασης μπορεί να μετρηθεί η κινητική ενέργεια του ιόντος. Τέλος από τη σχέση $M=2 \cdot E \cdot (T/L)^2$ (όπου L: το μήκος που διασχίζει το ιόν στο τηλεσκόπιο και είναι γνωστό) έχουμε μέσω των ανωτέρω μετρήσεων τη μάζα του ιόντος.

Το τηλεσκόπιο SIT έχει οπτικό πεδίο $\sim 44^\circ$. Ο γεωμετρικός του παράγοντας είναι αρκετά μεγάλος ($\sim 0.29 \text{ cm}^2 \cdot \text{sr}$), επιτρέποντας να μελετηθούν ακόμη και μικρά αυθόρμητα γεγονότα ηλιακών ενεργητικών σωματιδίων.

LET (Low Energy Telescope)

Παίρνει μετρήσεις υψηλής χρονικής διακριτικής ικανότητας για τη σύνθεση και το ενεργειακό φάσμα κυρίως των βαρέων ιόντων σε γεγονότα SEPs και στο διαπλανητικό χώρο. Η κατασκευή του LET επιτρέπει μελέτη της χημικής σύστασης των ιόντων σε εύρος ενεργειών μεγαλύτερο από αυτό του SIT παραπάνω. Στοιχεία από ήλιο έως νικέλιο μελετώνται σε εύρος από 2 MeV/νουκλεόνιο έως 40 MeV/νουκλεόνιο ανάλογα με το στοιχείο, ενώ το υδρογόνο σε ενέργειες 2-13 MeV περίπου. Τέλος είναι δυνατή η μέτρηση πυρήνων βαρύτερων του Fe (με ατομικούς αριθμούς από 30 έως 83).

Παλαιότερες μελέτες των ηλιακών ενεργητικών σωματιδίων έχουν δείξει ότι υπάρχει σημαντική μεταβολή της χημικής και ισοτοπικής σύνθεσης από γεγονός σε γεγονός. Κριτήρια για να ξεχωρίσουμε αυθόρμητα γεγονότα SEPs που συνδέονται με εκλάμψεις από βαθμιαία γεγονότα SEPs που συνδέονται με επιτάχυνση σε κρουστικά κύματα καθοδηγούμενα από CMEs αποτελούν συγκεκριμένες φασματικές υπογραφές, όπως για παράδειγμα τα ποσοστά e^-/p^+ , ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$, He/H , Fe/O , Ne/O . Το τηλεσκόπιο LET, με τις ακριβείς μετρήσεις της ισοτοπικής σύνθεσης στο εύρος ενεργειών (2-40) MeV/νουκλεόνιο το οποίο επιτρέπει τη μελέτη μεγάλου αριθμού ηλιακών γεγονότων, αναμένεται να συμβάλλει περαιτέρω στη διαλεύκανση του θέματος.

Το τηλεσκόπιο LET χρησιμοποιεί μια διάταξη σε σχήμα βεντάλιας δέκα λεπτών συσκευών σε συνδυασμό με ένα κεντρικό πλακίδιο με τέσσερις ανιχνευτές. Οι ανιχνευτές είναι κατάλληλα κατασκευασμένοι ώστε να έχουμε αξιόπιστες μετρήσεις ιόντων με χαμηλό ρεύμα διαφυγής. Ο άξονας συμμετρίας του τηλεσκοπίου είναι ευθυγραμμισμένος με τη μέση σπείρα Parker, σχηματίζοντας γωνία 45° με τον Ήλιο.

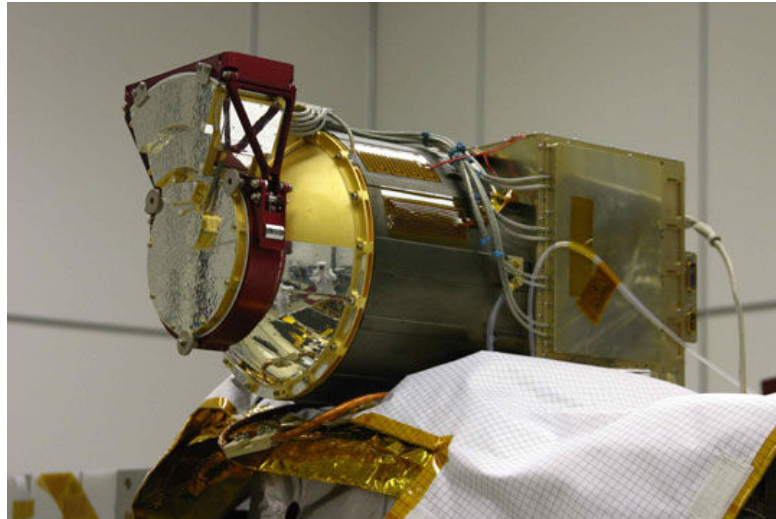
HET (High Energy Telescope)

Μετρά ένταση και ενεργειακά φάσματα των πρωτονίων και των ιόντων ηλίου με τις μεγαλύτερες ενέργειες, καθώς και ηλεκτρονίων που επιταχύνονται σε γεγονότα SEPs. Επομένως, σε συνδυασμό με τα ενεργειακά φάσματα που παίρνουμε από τα όργανα SEPT, SIT και LET καλύπτουμε τρεις τάξεις μεγέθους σε ενέργεια σωματιδίων. Επιπροσθέτως, το HET μετρά τη χημική σύσταση πυρήνων με ατομικό αριθμό μεγαλύτερο του 2 και ενέργειες πάνω από 30 MeV/νουκλεόνιο, διευρύνοντας με αυτόν τον τρόπο το εύρος ενεργειών του πειράματος LET.

Ο συνδυασμός μετρήσεων από τα τηλεσκόπια SIT, LET και HET παρέχει για πολλά είδη σωματιδίων πλήρη κάλυψη ενεργειών από ~ 0.05 MeV/νουκλεόνιο έως ~ 100 MeV/νουκλεόνιο και μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικό έλεγχο των σημερινών μοντέλων για την επιτάχυνση των SEPs.

5.2 Το πείραμα PLASTIC

Στόχο του πειράματος PLASTIC (Galvin et al, 2008) αποτελεί η μελέτη πρωτονίων και βαρύτερων ιόντων του Ηλιακού Ανέμου, αλλά και των υπέρθερμων ιόντων.



Σχήμα 18. Το πείραμα PLASTIC (Galvin et al, 2008).

Ο αισθητήρας του πειράματος PLASTIC απαρτίζεται από τρία δομικά στοιχεία:

- Το σύστημα εισόδου, που είναι ένας αναλυτής της ενέργειας ανά φορτίο
- Το θάλαμο χρόνου πτήσης / ενέργεια (Time-of-Flight/Energy, TOF/E) και το τμήμα στο οποίο στεγάζεται και
- Το κουτί ηλεκτρονικών (Electronics Box, EBox)

Το σύστημα εισόδου επιλέγει τα εισερχόμενα σωματίδια που θα υποστούν μετέπειτα ανάλυση βάσει της διεύθυνσης άφιξής τους και της τιμής του πηλίκου ενέργειας ανά φορτίο, E/Q . Ο θάλαμος χρόνου πτήσης / ενέργεια περιέχει τα οπτικά συστήματα των ιόντων, τους ανιχνευτές και τα ηλεκτρονικά τους και τον πίνακα επεξεργασίας σήματος. Στο κουτί ηλεκτρονικών εμπεριέχονται όλα τα ψηφιακά ηλεκτρονικά, τα υπόλοιπα αναλογικά ηλεκτρονικά, οι τροφοδοσίες ισχύος χαμηλής και υψηλής τάσης και τα τμήματα που είναι υπεύθυνα για τη σύνδεση με την ισχύ του διαστημοπλοίου και τη μονάδα επεξεργασίας δεδομένων των πειραμάτων IMPACT και PLASTIC (IMPACT/PLASTIC Instrument Data Processing Unit, IDPU).

Προκειμένου να επιτευχθούν μετρήσεις τόσο πληθυσμών του πλάσματος όσο και υπέρθερμων σωματιδίων, από ένα μόνο όργανο

που βρίσκεται σε μια πλατφόρμα σταθεροποιημένη σε τρεις άξονες, ο αισθητήρας του PLASTIC περιλαμβάνει τρία ξεχωριστά οπτικά πεδία και γεωμετρικούς παράγοντες. Κάθε οπτικό πεδίο και γεωμετρικός παράγοντας συνδυάζεται με ένα τμήμα των οπτικών των ιόντων το οποίο είναι κατάλληλο για μελέτη ενός συγκεκριμένου πληθυσμού ιόντων.

Ο τομέας SWS (Solar Wind Sector) του PLASTIC που μελετά τον Ηλιακό Άνεμο μας παρέχει οπτικό πεδίο 45° στο αζιμουθιακό επίπεδο (εκλειπτική) και εύρος $\pm 20^\circ$ σε ανύψωση (πολική διεύθυνση), χρησιμοποιώντας ηλεκτροστατικούς εκτροπείς. Ο τομέας SWS έχει δύο κανάλια με διαφορετικούς γεωμετρικούς παράγοντες, ώστε να είναι κατάλληλα αφενός για τη μελέτη των πρωτονίων του Ηλιακού Ανέμου (που έχουν υψηλή ροή) και αφετέρου για βαρύτερα ιόντα (τα οποία απαντώνται σε πολύ μικρές ποσότητες στο πλάσμα του Ηλιακού Ανέμου). Το καλούμενο «μικρό κανάλι» του SWS (“SWS Small Channel”) μετρά τις συναρτήσεις κατανομής των πρωτονίων (H^+) και των ιόντων He^{+2} (σωμάτια α) του Ηλιακού Ανέμου. Δίνει την αριθμητική πυκνότητα, τη θερμική ταχύτητα και την ταχύτητα ροής, ενώ παρέχει και το ποσοστό των σωματίων α προς τα πρωτόνια, He^{+2}/H^+ . Το λεγόμενο «κυρίως κανάλι» του SWS (“SWS Main Channel”) μετράει τη χημική σύσταση, την κατανομή της κατάστασης φορτίου στα ιόντα (“ionic charge state”), τις ταχύτητες ροής και τις θερμικές ταχύτητες για τα (σχετικά) πιο άφθονα βαρέα ιόντα του Ηλιακού Ανέμου (π.χ., C, Mg, Fe).

Το τμήμα μελέτης των υπέρθερμων ιόντων WAP (“Suprathermal Ions Wide-Angle Partition Sector”) καλύπτει οπτικό πεδίο 225° (Stereo A) και 210° (Stereo B) στις απρόσκοπτες αζιμουθιακές διευθύνσεις εκτός του Ήλιου, καθώς και το πολύ 10° στην πολική (ως προς το επίπεδο της εκλειπτικής) διεύθυνση. Το WAP έχει μεγαλύτερο γεωμετρικό παράγοντα σε σχέση με τα δύο κανάλια SWS, μας δίνει όμως μικρότερη πληροφορία όσον αφορά τις διευθύνσεις.

Οι τομείς SWS και WAP μοιράζονται ένα τοροειδή top-hat ηλεκτροστατικό αναλυτή 360° που έχει την αζιμουθιακή του είσοδο στο επίπεδο της εκλειπτικής. Στο επίπεδο του ανιχνευτή, η κυκλική γεωμετρία υποδιαιρείται σε τεταρτημόρια των 90° . Κάθε τεταρτημόριο έχει το δικό του ανιχνευτή MCP. Ανάλογα με τον τομέα και το τεταρτημόριο που διασχίζει το προσπίπτον σωματίο, έχω διαφορετικό γεωμετρικό παράγοντα, άλλη οπτική γωνία και διαφορετικές τεχνικές μέτρησης.

Ο αισθητήρας του PLASTIC συνδυάζει ένα top-hat ηλεκτροστατικό αναλυτή 360° που παρέχει στιγμιαία πλήρη κάλυψη στο επίπεδο της εκλειπτικής, μετέπειτα επιτάχυνση (με εφαρμογή τάσης), ένα σύστημα μετρήσης χρόνου πτήσης και μέτρηση σε προεπιλεγμένα τμήματα της ενέργειας με χρήση ανιχνευτών στερεάς κατάστασης.

Με τη βοήθεια των μετρήσεων που έχουμε για την ενέργεια ανά φορτίο (E/Q), την τάση για μετέπειτα επιτάχυνση (PAC voltage), το χρόνο πτήσης και την απόσταση (προφανώς γνωστή) που διασχίζει το

σωμάτιο μέσα στο θάλαμο χρόνου πτήσης / ενέργεια, μπορούμε να προσδιορίσουμε το πηλίκο της μάζας προς το φορτίο του ιόντος, (M/Q):

$$\frac{M}{Q} = 2 \cdot \left(\frac{E}{Q} + |PAC| \right) \cdot \alpha \cdot \left(\frac{\tau}{d} \right)^2 \quad (43)$$

Όπως δείχνει η τελευταία έκφραση, για τον υπολογισμό του (M/Q) είναι σημαντικό να γνωρίζουμε το ρυθμό απώλειας ενέργειας α στο φύλλο άνθρακα, ο οποίος εξαρτάται από το είδος του σωματίου και από την ενέργειά του, είναι δηλαδή $\alpha = \alpha(M, E)$.

Τελικώς, η μάζα του ιόντος υπολογίζεται με τη βοήθεια της σχέσης:

$$M = 2 \cdot \frac{E_{ssd}}{\beta} \cdot \left(\frac{\tau}{d} \right)^2 \quad (44)$$

όπου E_{ssd} είναι η υπολειπόμενη ενέργεια (“residual energy”) και $\beta = \beta(M, E)$ είναι το πηλίκο της έλλειψης ύψους παλμού¹ (“pulse height defect”) στον ανιχνευτή στερεάς κατάστασης προς την ενέργεια του προσπίπτοντος σωματίου. Η έλλειψη ύψους παλμού εξαρτάται από το είδος του σωματίου και την ταχύτητά του.

Οι συναρτήσεις α και β είχαν προσδιοριστεί με προσομοιώσεις και κατάλληλες βαθμονομήσεις εργαστηριακά.

¹ Η έλλειψη ύψους παλμού (pulse height defect) δηλώνει το πόσο αποκλίνει από τη γραμμική συμπεριφορά η απόκριση βαρέων ιόντων.

5.3 Περιγραφή δεδομένων

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα πρωτονίων Ηλιακού Ανέμου και διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου από τα δύο διαστημόπλοια STEREO. Ειδικότερα, επιλέχθηκε η ιστοσελίδα:

http://aten.igpp.ucla.edu/forms/stereo/level2_plasma_and_magnetic_field.html

η οποία περιλαμβάνει δεδομένα διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου από το πείραμα IMPACT και παραμέτρων των πρωτονίων Ηλιακού Ανέμου από το πείραμα PLASTIC. Μεταξύ άλλων, υπάρχει η δυνατότητα επιλογής:

- i) Χρονικής διακριτικής ικανότητας των μετρήσεων
- ii) Του εύρους τιμών για το μαγνητικό πεδίο
- iii) Του συστήματος συντεταγμένων για το μαγνητικό πεδίο και του συστήματος συντεταγμένων για τη θέση του διαστημοπλοίου
- iv) Μετρήσεων για μια από τις παρακάτω τέσσερις ομάδες μεγεθών, από οποιοδήποτε από τα δύο διαστημόπλοια STEREO, για την επιθυμητή ημερομηνία:

- Time, V_p , N_p , T_p , Entropy, Beta, Pressure (Total & Magnetic).
- Time, V_r/V , V_t/V , V_n/V , $|V|$, N_p , T_p
- Time, B_r , B_t , B_n , $|B|$, X, Y, Z, R
- Time, B_r/B , B_t/B , B_n/B , X, Y, Z, R

- v) Γραφικής παράστασης των μεγεθών που επιλέχθηκαν συναρτήσει του χρόνου ή αποθήκευσης των τιμών τους σε αρχείο .txt για περαιτέρω επεξεργασία.

Στην εργασία μας έχουμε λάβει δεδομένα χρονικής διακριτικής ικανότητας 1 min για τις ομάδες μεγεθών:

- i) $B_r, B_t, B_n, |\mathbf{B}|, X, Y, Z, R$
- ii) $V_r/V, V_t/V, V_n/V, |\mathbf{V}|, N_p, T_p$

όπου:

- Ως σύστημα συντεταγμένων για το διαστημόπλοιο αλλά και για τις μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου και των ταχυτήτων επιλέχθηκε το σύστημα RTN όπου τα μοναδιαία **R, T, N** ορίζονται ως:

R: δείχνει από τον Ήλιο προς το διαστημόπλοιο.

T= $\mathbf{Z} \times \mathbf{R} / |\mathbf{Z} \times \mathbf{R}|$, όπου **Z** είναι ο άξονας περιστροφής του Ήλιου.

N= $\mathbf{R} \times \mathbf{T}$, ώστε να συμπληρώνεται δεξιόστροφο σύστημα.

- $B_r, B_t, B_n, |\mathbf{B}|$ είναι οι τρεις συνιστώσες και το μέτρο του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου στο σύστημα RTN.
- X, Y, Z , είναι οι συντεταγμένες που βρίσκεται το διαστημόπλοιο στο σύστημα RTN και R η ηλιοκεντρική του απόσταση.
- $V_r/V, V_t/V, V_n/V, |\mathbf{V}|$ είναι οι λόγοι των τριών συνιστωσών της ταχύτητας των πρωτονίων του Ηλιακού Ανέμου προς το μέτρο της, καθώς και το ίδιο το μέτρο της, στο σύστημα RTN.
- N_p, T_p είναι η αριθμητική πυκνότητα και η θερμοκρασία των πρωτονίων του Ηλιακού Ανέμου.

Εκτός από τις επιτόπιες μετρήσεις στο διαπλανητικό χώρο, για την πληρέστερη κατανόηση είναι φυσικά απαραίτητο να έχουμε μια αίσθηση της κατάστασης στον Ήλιο το ίδιο διάστημα. Για το λόγο αυτό συμπεριλαμβάνουμε στη μελέτη μας, όποτε είναι διαθέσιμες, εικόνες του Ήλιου από το τηλεσκόπιο υπεριώδους EIT της αποστολής SOHO και από τα διαστημόπλοια STEREO-B, TRACE και HINODE.

Εικόνες και από τα τέσσερα παρατηρητήρια έχουν ληφθεί από τη διεύθυνση: http://www.lmsal.com/solarsoft/latest_events/, ενώ όπου είναι δυνατό (είναι ιδιαίτερα χρήσιμο, ειδικά όταν υπάρχουν ελάχιστες ή καθόλου εικόνες από τα υπόλοιπα) λαμβάνονται εικόνες μόνο του HINODE από τη διεύθυνση: <http://xrt.cfa.harvard.edu/data/synoptics.php>.

Κεφάλαιο 6

Επεξεργασία μετρήσεων

6.1 Στόχος επεξεργασίας

Στην εργασία μας γίνεται προσπάθεια γεωμετρικής κατασκευής των δυναμικών γραμμών του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου, χρησιμοποιώντας τις μετρούμενες ταχύτητες ροής των πρωτονίων του Ηλιακού Ανέμου και τις μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου από τα πειράματα PLASTIC και IMPACT αντίστοιχα της αποστολής STEREO. Επομένως οι μετρήσεις έχουν ληφθεί πρακτικά στο επίπεδο της εκλειπτικής και σε ηλιοκεντρικές αποστάσεις περίπου 1 AU. Επίσης γίνεται προσπάθεια προσδιορισμού των αιτίων που δίνουν τη χρονική υστέρηση στις μετρήσεις των ταχυτήτων από τα STEREO-A και STEREO-B.

6.2 Κριτήρια μελέτης

Δεδομένου ότι εστιάζουμε στον Ηλιακό Άνεμο, μας ενδιαφέρει να υπάρχουν όσο το δυνατόν λιγότερα μεταβατικά γεγονότα στο διαπλανητικό χώρο τα οποία αλλάζουν τις παραμέτρους του περιβάλλοντος Ηλιακού Ανέμου. Το διάστημα 2007–2008 είναι καλή επιλογή για μια τέτοια μελέτη διότι πρόκειται για περίοδο ηλιακού ελαχίστου και υπάρχουν μεγαλύτερες (συγκριτικά με το ηλιακό μέγιστο) πιθανότητες ο Ηλιακός Άνεμος να ρέει ανεπηρέαστος. Παρά ταύτα, στη μελέτη μας συμπεριλαμβάνεται γεγονός στο οποίο, λόγω αλληλεπίδρασης του Ηλιακού Ανέμου με μαγνητικά νέφη, παρουσιάζονται αρκετά γρήγορες μεταβολές στα χρονικά προφίλ των περισσότερων μετρούμενων μεγεθών.

Επιπλέον οι μετρήσεις της αποστολής STEREO προτιμήθηκαν για τη μελέτη μας, δεδομένου ότι λαμβάνονται ταυτόχρονα από δύο διαστημικά οχήματα με αυξανόμενη τη μεταξύ τους γωνιακή απόσταση. Επομένως μπορούμε να έχουμε πληρέστερη εικόνα της τρισδιάστατης εξέλιξης των φαινομένων και του πώς η σχετική θέση του παρατηρητηρίου ως προς τη δομή που μελετούμε επηρεάζει τις τιμές των μεγεθών που έχουμε από τις μετρήσεις και την όλη εικόνα του φαινομένου.

6.3 Κατασκευή μαγνητικών δυναμικών γραμμών

Θεωρούμε τη μαγνητική δυναμική γραμμή της οποίας τη μορφή αναζητούμε ως ένα σύνολο επιμέρους τμημάτων. Έστω ότι ο αριθμός των μετρήσεων μας είναι N . Ξεκινώντας από την τελευταία χρονικά μέτρηση (τη N -οστή) αρχίζουμε να πηγαίνουμε προς τα πίσω στον Ήλιο, φτιάχνοντας ένα ευθύγραμμο τμήμα το οποίο στο σύστημα του διαστημοπλοίου έχει ακτινική συνιστώσα:

$$\Delta R(N-1) = -\left(\frac{V_r(R(N)) \cdot 60 \cdot 1000}{R_o}\right) \quad (45)$$

Έχω συνεπώς την ακτινική απόσταση που διανύεται σε χρονικό διάστημα όσο η χρονική διακριτική ικανότητα (60 sec) από κομμάτι Ηλιακού Ανέμου που ρέει με ακτινική ταχύτητα $V_r(R(N))$. Με αυτόν τον τρόπο πηγαίνω στην προηγούμενη χρονική στιγμή, $N-1$.

Ομοίως, αν θεωρήσω κομμάτι Ηλιακού Ανέμου το οποίο ξεκινά τη χρονική στιγμή $N-1$ και έχει ακτινική ταχύτητα $V_r(R(N-1))$, πηγαίνω χρονικά στη στιγμή $N-2$:

$$\Delta R(N-2) = -\left(\frac{V_r(R(N-1)) \cdot 60 \cdot 1000}{R_o}\right) \quad (46)$$

όπου $1 \text{ AU} \approx 215 R_o$.

Τελικώς, εάν πηγαίνω από τη χρονική στιγμή $i+1$ στη χρονική στιγμή i η ακτινική απόσταση που διανύεται είναι:

$$\Delta R(i) = -\left(\frac{V_r(R(i+1)) \cdot 60 \cdot 1000}{R_o}\right) \quad (47)$$

ή, επειδή η πολική και η αζιμουθιακή συνιστώσα της ταχύτητας του Ηλιακού Ανέμου είναι πολύ μικρές:

$$\Delta R(i) = -\left(\frac{V(R(i+1)) \cdot 60 \cdot 1000}{R_o}\right) \quad (48)$$

Για την πολική και την αζιμουθιακή συνιστώσα, ΔT και ΔN αντίστοιχα, επειδή είναι $\Delta T/\Delta R = B_t/B_r$ και $\Delta N/\Delta R = B_\theta/B_r$, πηγαίνοντας από τη στιγμή $i+1$ στη χρονική στιγμή i χρησιμοποιούμε τις συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου στο σύστημα RTN και έχουμε:

$$\Delta T(i) = -\left(\frac{\Delta R(i) \cdot B_t(R(i+1))}{B_r(R(i+1))}\right) \quad (49)$$

$$\Delta N(i) = -\left(\frac{\Delta R(i) \cdot B_n(R(i+1))}{B_r(R(i+1))}\right) \quad (50)$$

Πρέπει να προσέξουμε ωστόσο πως στη μελέτη μας θεωρούμε ότι τα φυσικά μεγέθη εξαρτώνται μόνο από την ηλιοκεντρική απόσταση R . Υποθέτουμε ότι δεν υπάρχει καμία εξάρτηση από γωνίες. Επιπροσθέτως, πολύ σημαντικό είναι το ότι στις παραπάνω εκφράσεις χρησιμοποιούνται οι εκφράσεις της ταχύτητας ροής και των συνιστωσών του μαγνητικού πεδίου συναρτήσει της ηλιοκεντρικής απόστασης R , που όμως δεν είναι γνωστές εκ των προτέρων. Οι μόνες τιμές που έχουμε στη διάθεσή μας είναι οι μετρούμενες στη 1 AU. Πρέπει συνεπώς να έχουμε μια εκτίμηση για τις τιμές των μεγεθών αυτών σε διάφορες ηλιοκεντρικές αποστάσεις.

Για την ταχύτητα ροής υποθέτουμε λύση κατά Parker, η οποία μας δίνει τις προσεγγιστικές εκφράσεις:

- $V_r(R) \approx u(r) \approx 2 \cdot u_c \cdot \sqrt{\ln\left(\frac{r}{r_c}\right)}$ (51) πολύ μακριά από το κρίσιμο σημείο

$$(r \gg r_c)$$

- $V_r(R) \approx u(r) \approx u_c \cdot \left(\frac{r}{r_c}\right)$ (52) γύρω από το κρίσιμο σημείο ($r \approx r_c$)

- $V_r(R) \approx u(r) \approx u_c \cdot e^{-(2r_c)/r}$ (53) πολύ κοντά στον Ήλιο ($r \ll r_c$)

Για να χρησιμοποιήσουμε τις παραπάνω προσεγγίσεις πρέπει να βρούμε την κρίσιμη θερμοκρασία T_c , αφού είναι $r_c = \frac{G \cdot M_o \cdot m_p}{4 \cdot k \cdot T}$ αλλά και

$$u_c = \left(\frac{2 \cdot k \cdot T}{m_p}\right)^{1/2}. \text{ Η κρίσιμη θερμοκρασία προκύπτει από αριθμητική}$$

επίλυση της έκφρασης του Parker (βλ. κεφάλαιο 1) όπου έχουμε εκφράσει τα r_c , u_c συναρτήσει της T , ενώ ως (r, V_r) χρησιμοποιούμε αντίστοιχες τις μετρούμενες τιμές εκείνη τη χρονική στιγμή.

Για το μαγνητικό πεδίο υποθέτουμε ότι:

$$\frac{B_r}{B_{r0}} = \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \quad (54)$$

$$\frac{B_t}{B_{t0}} = \left(\frac{r_0}{r} \right) \quad (55)$$

$$\frac{B_n}{B_{n0}} = \left(\frac{r_0}{r} \right) \quad (56)$$

όπου B_{r0} , B_{t0} , B_{n0} είναι οι μετρούμενες τιμές του μαγνητικού πεδίου σε ηλιοκεντρική απόσταση r_0 .

Κεφάλαιο 7

Επιλογή περιόδων μελέτης ρευμάτων Ηλιακού Ανέμου και διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου.

7.1 Η περίοδος 18 – 21 Μαΐου 2007

Στην έναρξη της περιόδου (18 / 05 / 2007, 00:00:00 U.T.) τα δύο STEREO απέχουν μεταξύ τους $8^{\circ}.405$ και στο τέλος (21 / 05 / 2007, 23:59:00 U.T.) $9^{\circ}.007$. Όσον αφορά τον Ηλιακό Άνεμο, το διάστημα αυτό κυριαρχούν δύο ρεύματα γρήγορου Ηλιακού Ανέμου προερχόμενα από δύο αρκετά εκτεταμένες στεμματικές οπές στο νότιο ημισφαίριο του Ήλιου. Αξίζει να σημειωθεί ότι, αν και βρισκόμαστε σε ηλιακό ελάχιστο, οι δύο στεμματικές εντοπίζονται πιο κοντά στον ισημερινό και όχι στους πόλους του Ήλιου.

Για αρκετές ημέρες από τις 19 / 05 / 2007 και ύστερα ο διαπλανητικός χώρος διαταράσσεται ισχυρά από δύο μαγνητικά νέφη που συσχετίζονται με δύο partial-halo CMEs προερχόμενες από την ίδια ενεργό περιοχή (AR 10956) στο κέντρο του ηλιακού δίσκου, οι οποίες φεύγουν από τον Ήλιο με χρονική διαφορά μικρότερη της μιας ημέρας (Kilruba et al., 2009). Συγκεκριμένα, η πρώτη CME εκτινάχθηκε στις 19 / 05 / 2007 και το συσχετισμένο με αυτή μαγνητικό νέφος παρατηρήθηκε ξεκάθαρα από τα διαστημικά οχήματα STEREO-B και WIND. Η δεύτερη CME εκτινάχθηκε κάποιες ώρες μετά στις 20 / 05 / 2007 και το συσχετισμένο μαγνητικό νέφος καταγράφηκε μόνο από το STEREO-A. Και οι δύο CMEs βρέθηκαν συσχετισμένες με εκλάμψεις τύπου B από το κέντρο δράσης, αλλά και με εκτόξευση υλικού νημάτων.

Όπως διαπιστώθηκε, τα δύο μαγνητικά νέφη αλληλεπιδράσαν ισχυρότατα με τον περιβάλλοντα Ηλιακό Άνεμο. Είναι πολύ ενδιαφέρον το ότι οι παρατηρήσεις δίνουν ενδείξεις ότι και τα δύο μαγνητικά νέφη αποτελούσαν μέρος της ζώνης επισιόντων (streamer belt). Οι ενδείξεις αυτές δείχνουν το πόσο πολύπλοκη μπορεί να γίνει η εικόνα που παίρνουμε για την περιοχή αυτή στη 1 AU όταν λάβει χώρα μια εκτεταμένη CME, ακόμη και αν αυτή προέρχεται από μικρό εύρος ηλιογραφικών μηκών (αφού και οι δύο CMEs φαίνονται ότι εκτινάχθηκαν κοντά στο κέντρο του ηλιακού δίσκου). Αξιοσημείωτο είναι επιπλέον και το ότι τα μαγνητικά νέφη εμφάνισαν πολύ διαφορετικές εικόνες σε διαφορετικά σημεία παρατήρησης που δεν απείχαν πολύ μεταξύ τους: αν και τα δύο STEREO απείχαν μόλις $\sim 9^{\circ}$ και άρα η γωνιακή τους απόσταση από το WIND ήταν μικρότερη, τα μαγνητικά νέφη δεν καταγράφηκαν και από τα τρία διαστημόπλοια.

Αξίζει επίσης να προσέξει κανείς στο σχήμα 20 (πέμπτη σειρά όπου απεικονίζονται και μοντέλα στεμματικών οπών) πόσο παραμορφωμένο είναι το ηλιοσφαιρικό φύλλο ρεύματος από τις 18 / 05 / 2007 και μετά.

Η πρώτη CME (χρόνος έναρξης onset1 από SOHO/LASCO: 19 / 05 / 2007, 12:56:00 U.T.) είχε γραμμική ταχύτητα $958 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, που θεωρητικά αντιστοιχεί σε χρόνο χοντρικά 1.8 ημερών μέχρι να παρατηρηθεί από τη Γη, 1.9 ημερών για να το δει το STEREO-B και 1.7 ημερών για να καταγραφεί από το STEREO-A. Παρά ταύτα θυμίζουμε ότι, από τα δύο STEREO, μόνο το STEREO-B την παρατήρησε και επομένως θα αναμέναμε κάποιες μεταβολές στο μετρούμενο διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο και τις παραμέτρους των πρωτονίων του Ηλιακού Ανέμου από το STEREO-B περίπου στις 21 / 05 / 2007, 12:00:00 U.T.

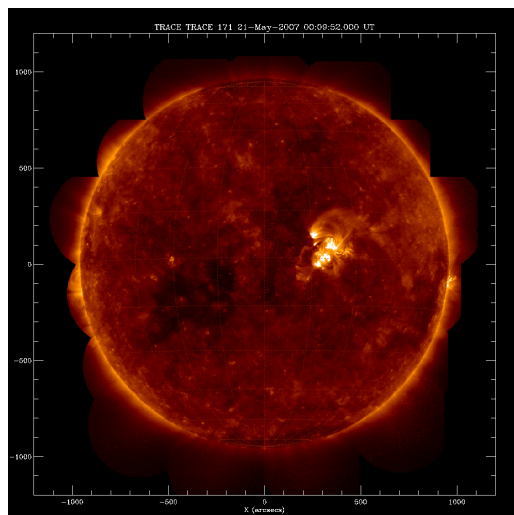
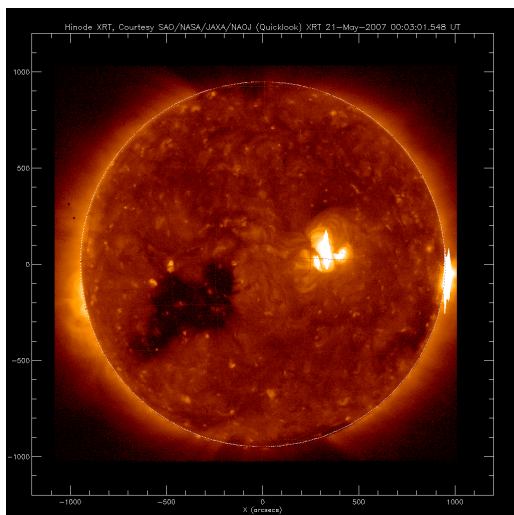
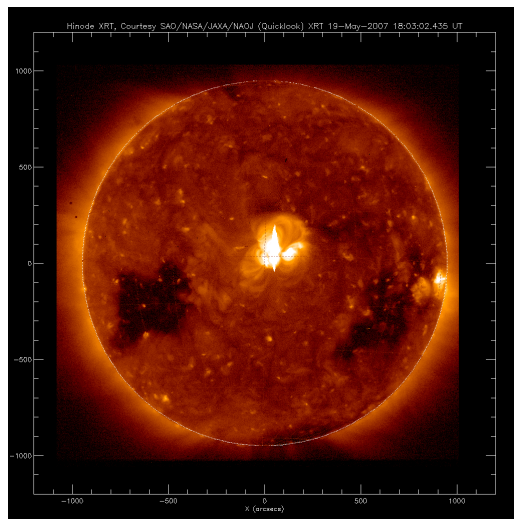
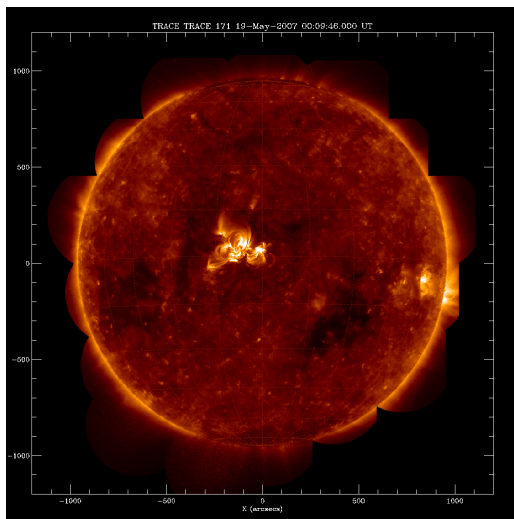
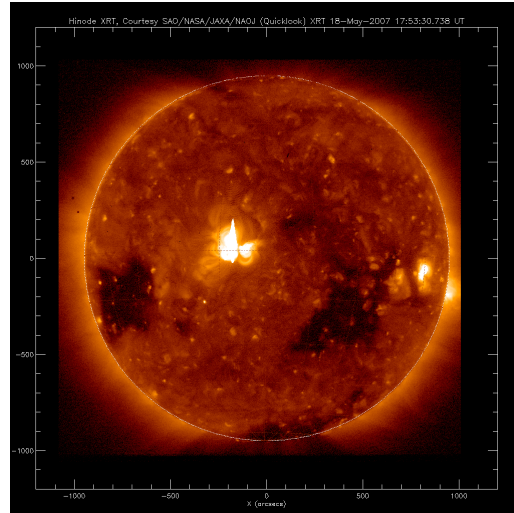
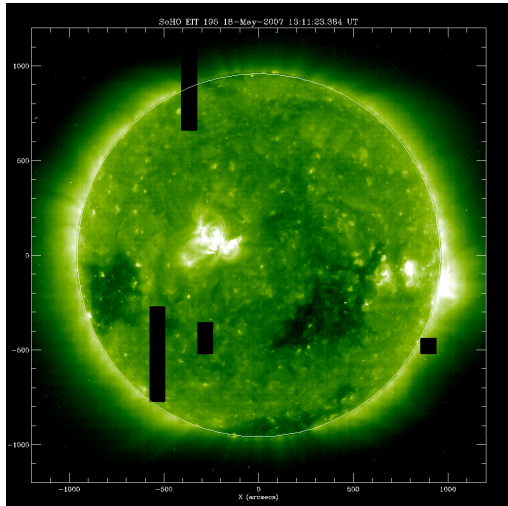
Η δεύτερη CME (χρόνος έναρξης onset1 από SOHO/LASCO: 20 / 05 / 2007, 05:45:00 U.T.) είχε γραμμική ταχύτητα $275 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, που θεωρητικά αντιστοιχεί σε χρόνο περίπου 6 ημερών για να παρατηρηθεί από το STEREO-A (αφού μόνο αυτό την είδε). Συνεπώς οι όποιες μεταβολές σε μαγνητικό πεδίο και παραμέτρους αναμένει ίσως κανείς να μετρηθούν από το STEREO-A περίπου στις 26 / 05 / 2007.

Φυσικά οι παραπάνω εκτιμήσεις των χρόνων πιθανόν να είναι αρκετά απλουστευμένες, αφού θεωρούν σταθερή γραμμική ταχύτητα της CME.

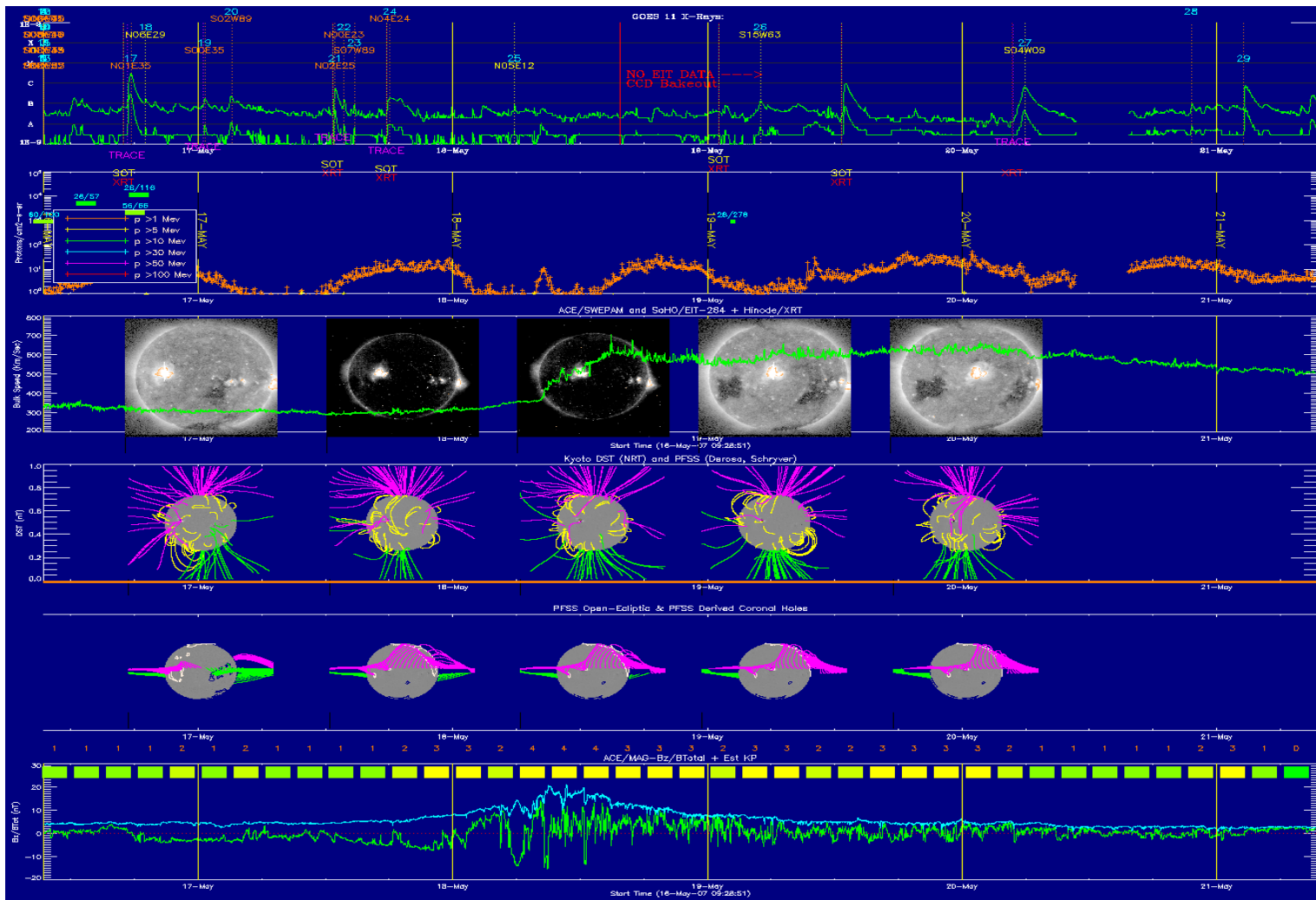
Όπως αναμένεται, μετά τις 19 / 05 / 2007 τα χρονικά προφίλ του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και της ταχύτητας, θερμοκρασίας και αριθμητικής πυκνότητας των πρωτονίων του Ηλιακού Ανέμου δε δείχνουν να παρουσιάζουν ακόμη διαταραχές λόγω των partial-halo CMEs. Αυτό που παρατηρείται είναι μετάβαση από αργό ($275 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$) σε γρήγορο ($650 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$) Ηλιακό Άνεμο, με διαφορά περίπου μισής ημέρας. Το STEREO-B παρατηρεί πρώτο τη μετάβαση περίπου την ημέρα 138.7, ενώ το STEREO-A την ημέρα 139.25. Η διαφορά αυτή είναι αρκετά συμβατή με τις σχετικές θέσεις των STEREO, αφού αν θεωρήσουμε μια μέση γωνιακή απόσταση $8^\circ.7$ και συμπεριστροφή με περίοδο ~ 27 ημερών με τον Ήλιο παίρνουμε χρονική διαφορά ~ 0.65 ημέρες.

Αξίζει να προσέξουμε τη διπλή κορυφή που παρατηρεί το STEREO-B ξεκάθαρα στην ταχύτητα και λιγότερο εμφανώς στα υπόλοιπα μεγέθη και που δείχνει κάποια επιτάχυνση τοπικά στην περιοχή του διαστημοπλοίου, ίσως από κάποιο κρουστικό κύμα. Το STEREO-A εμφανίζει μόνο μια πολύ έντονη κορυφή στην πυκνότητα και κατόπιν μικρότερες κορυφές.

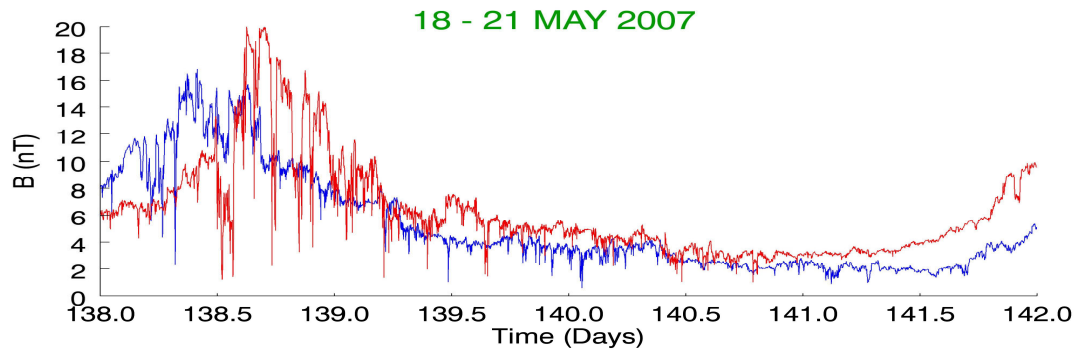
Οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές που βλέπουν τα δύο STEREO ομοιάζουν αρκετά και μπορούμε να πούμε ότι αυτό συμφωνεί με τις επιτόπιες παρατηρήσεις που δείχνουν παρόμοια χρονικά προφίλ των παραμέτρων. Φαίνεται ωστόσο ότι η μορφή που παίρνουν είναι περίπλοκη και δεν ακολουθεί το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο κατά Parker.



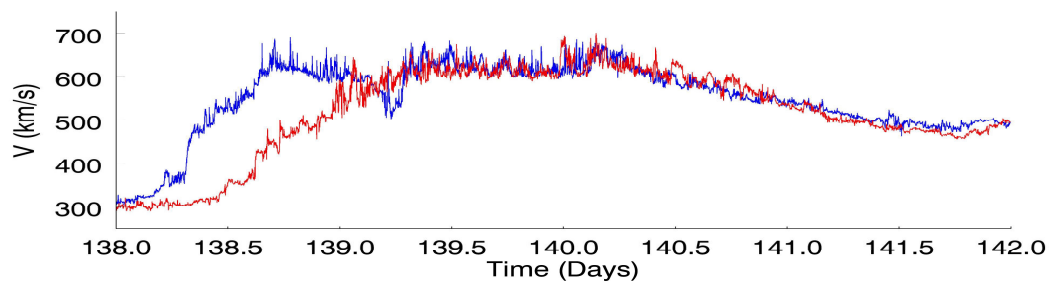
Σχήμα 21. Εικόνες του Ήλιου στις 18 / 05/ 2007, 19 / 05/ 2007 και 21 / 05/ 2007 από τα διαστημόπλοια Hinode και Trace.



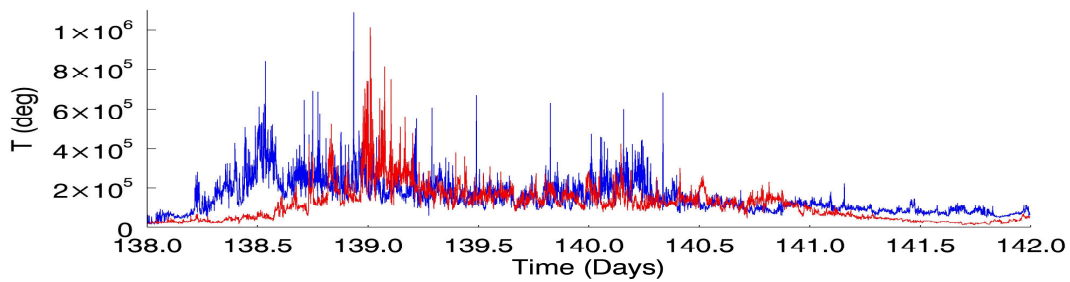
Σχήμα 22. Απεικόνιση και χρονική εξέλιξη βασικών παραμέτρων και ηλιακών δομών το χρονικό διάστημα 17 / 05 / 2007 έως 21 / 05 / 2007. Διακρίνουμε: i) Ροή στις SXR από τους GOES και τη θέση των κέντρων δράσης (πρώτο σχήμα) ii) τη ροή ενεργητικών πρωτονίων σε ενέργειες μεγαλύτερες του 1 MeV (δεύτερο σχήμα) iii) την ταχύτητα του Ηλιακού Ανέμου μαζί με εικόνες του Ήλιου που δείχνουν τις θέσεις των στεμματικών οπών, όπου υπάρχουν (τρίτο σχήμα) iv) μοντέλο του μαγνητικού πεδίου στον Ήλιο (τέταρτο σχήμα) v) μοντέλο του ηλιοσφαιρικού φύλλου ρεύματος μαζί με μοντέλο των στεμματικών οπών (πέμπτο σχήμα) vi) το λόγο B_z/B μαζί με το δείκτη k_p της γεωμαγνητικής δραστηριότητας (έκτο σχήμα).



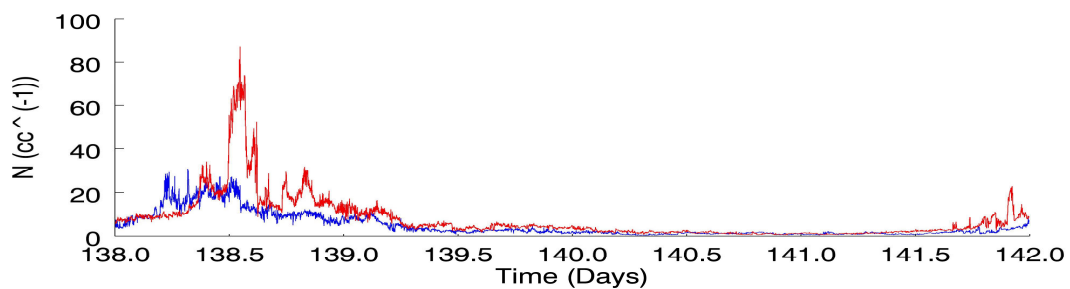
(i)



(ii)

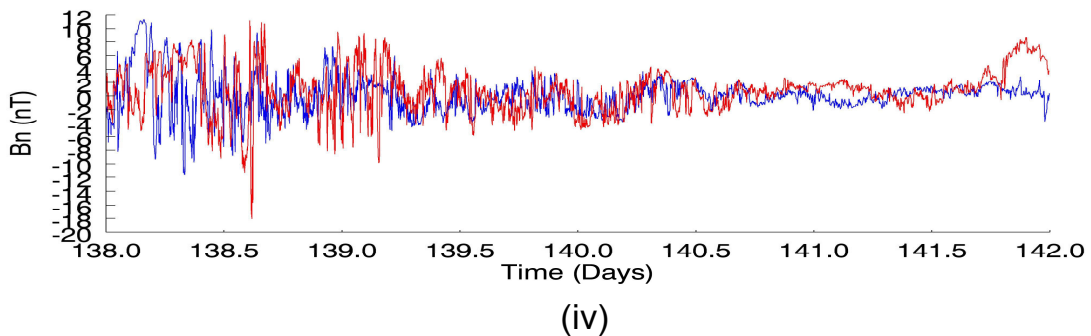
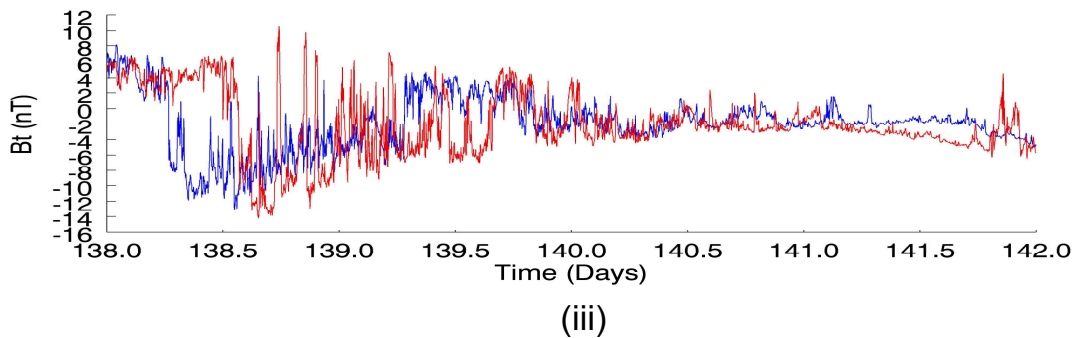
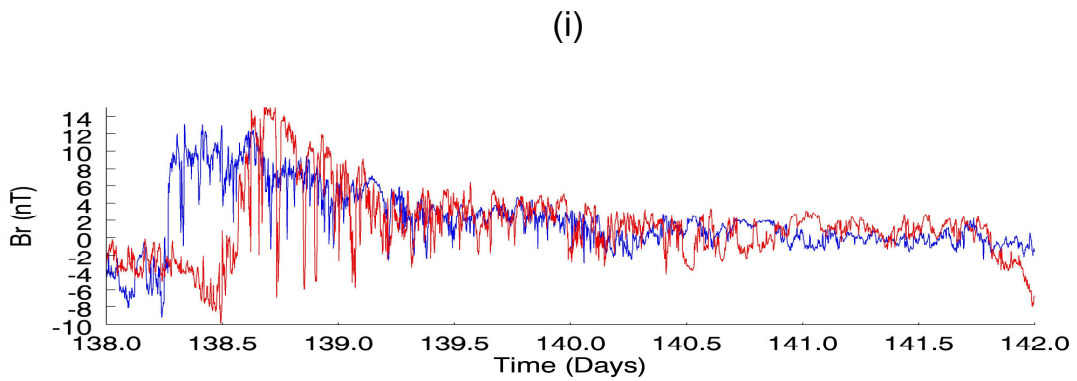
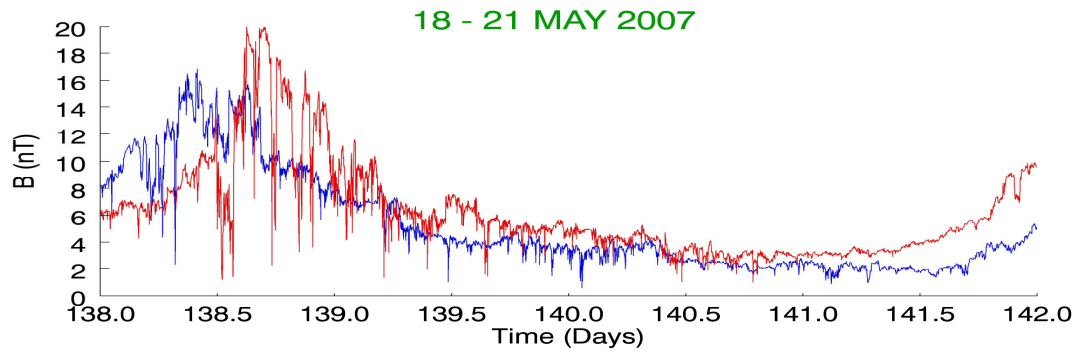


(iii)

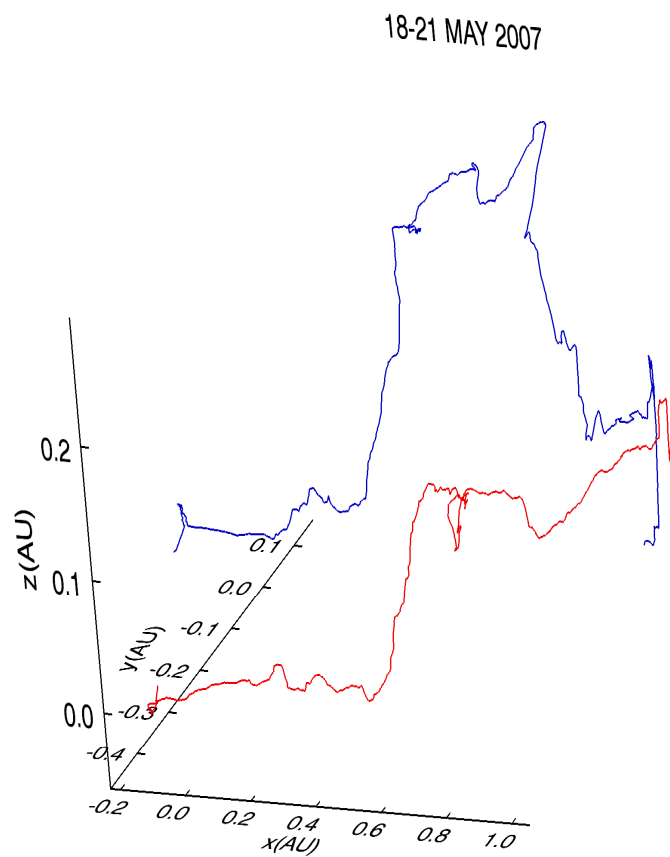


(iv)

Σχήμα 23. Η χρονική μεταβολή του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου, της ταχύτητας ροής, της πυκνότητας και της θερμοκρασίας των πρωτονίων του Ηλιακού Ανέμου από τα διαστημόπλοια Stereo-A (κόκκινο) και Stereo-B (μπλε) το χρονικό διάστημα από 18 / 05 / 2007, 00:00:00 UT έως 21 / 05 / 2007, 23:59:00 UT.



Σχήμα 24. Η χρονική μεταβολή των συνιστωσών του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου από τα διαστημόπλοια Stereo A (κόκκινο) και Stereo B (μπλε) το χρονικό διάστημα από 18 / 05 / 2007, 00:00:00 UT έως 21 / 05 / 2007, 23:59:00 UT. Στην κορυφή της σελίδας δίδεται και η χρονική μεταβολή του μέτρου του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου για σύγκριση.



Σχήμα 25. Οι γραμμές του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου που αναπαράγονται με τις μετρήσεις των STEREO-A (κόκκινο) και STEREO-B (μπλε).

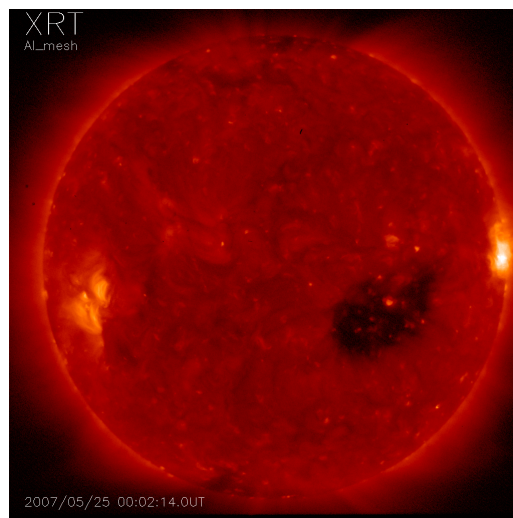
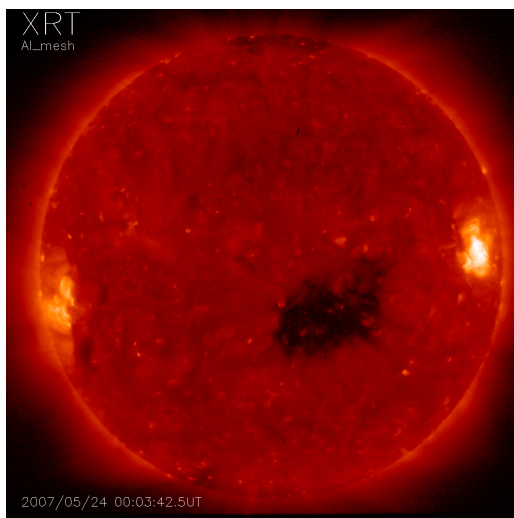
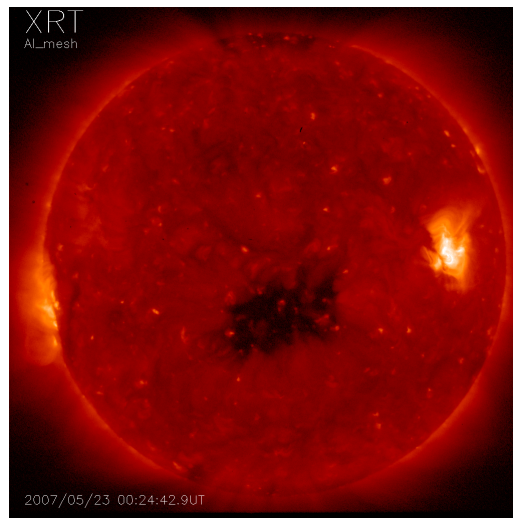
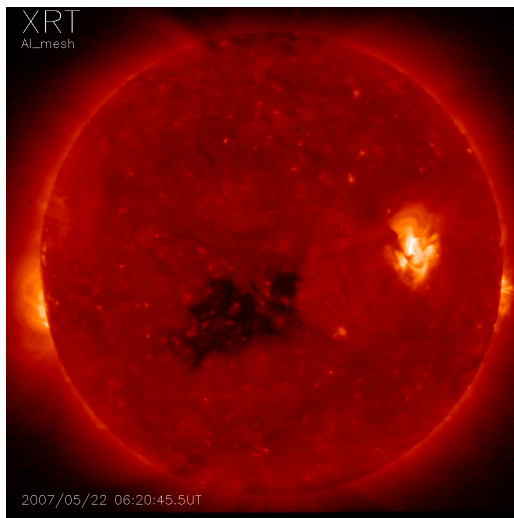
7.2 Η περίοδος 22 – 25 Μαΐου 2007

Η περίοδος 22 / 05 / 2007 - 25 / 05 / 2007 αποτελεί συνέχεια του προηγούμενου διαστήματος που μελετήσαμε. Όπως είδαμε, λόγω της εκτίναξης δύο CMEs και της αλληλεπίδρασης του Ήλιακού Άνεμου με τα συσχετισμένα με αυτές μαγνητικά νέφη αναμένονται μεταβολές τόσο στις παραμέτρους του Ήλιακού Ανέμου όσο και στο διαπλα-νητικό μαγνητικό πεδίο.

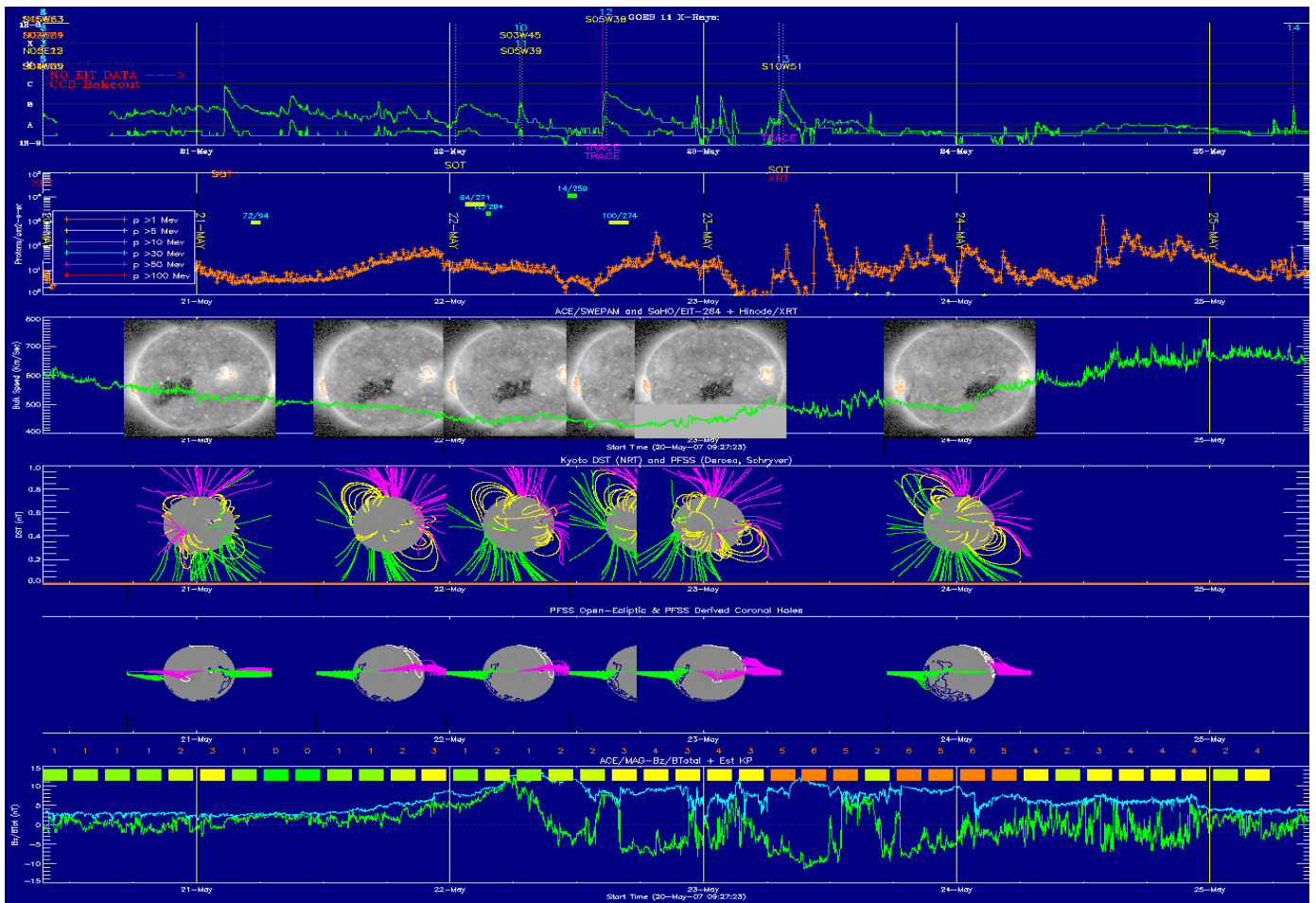
Η μεγάλη στεμματική οπή που εντοπίζεται στο κέντρο του ηλιακού δίσκου εξα-κολουθεί φυσικά να κυριαρχεί. Εντοπίζονται πλέον δύο ενεργές περιοχές: η AR 10956 που έδωσε τις δύο CMEs στις 19 / 05 / 2007 και 20 / 05 / 2007 η οποία κινείται πλέον προς το δυτικό χείλος του Ήλιου, καθώς και μια νέα από το ανατολικό χείλος προς το τέλος της περιόδου.

Η επίδραση των μαγνητικών νεφών είναι πλέον εμφανής. Μέχρι την ημέρα 145 (24 / 05 / 2007) όλα τα μεγέθη εμφανίζουν ταχύτατες αυξομειώσεις. Η θερμοκρασία είναι σχετικά χαμηλή και το υλικό είναι αρκετά πυκνότερο από τις μέσες τιμές το περισσότερο χρονικό διάστημα. Τέλος, ο στροβιλισμός του μαγνητικού πεδίου είναι εξαιρετικά έντονος (συνεχής αλλαγή της κατεύθυνσης των συνιστωσών του).

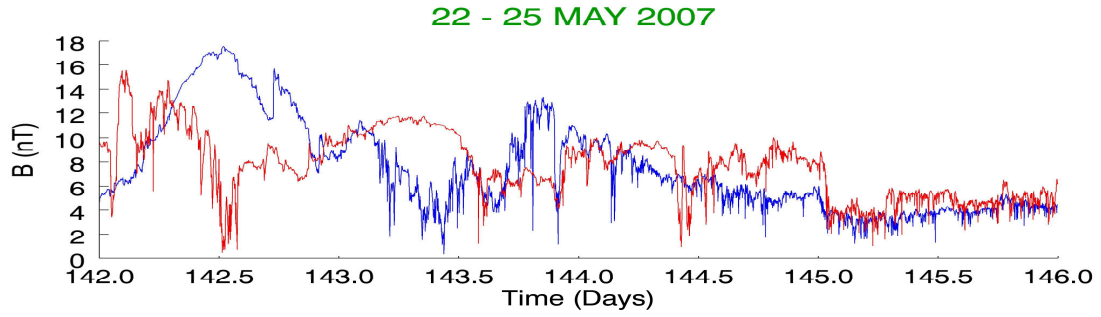
Οι γραμμές του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου είναι εμφανώς διαφορετικές παρά το ότι τα STEREO απέχουν μεταξύ τους περίπου 9° . Η γραμμή που βλέπει το STEREO-B είναι πιο διαταραγμένη από αυτή που βλέπει το STEREO-A. Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι, προφανώς η μαγνητική γραμμή στο STEREO-B φυσικά δεν κλείνει, είναι διαταραγμένη και λόγω φαινομένων προοπτικής δίνει την εντύπωση ότι είναι κλειστή.



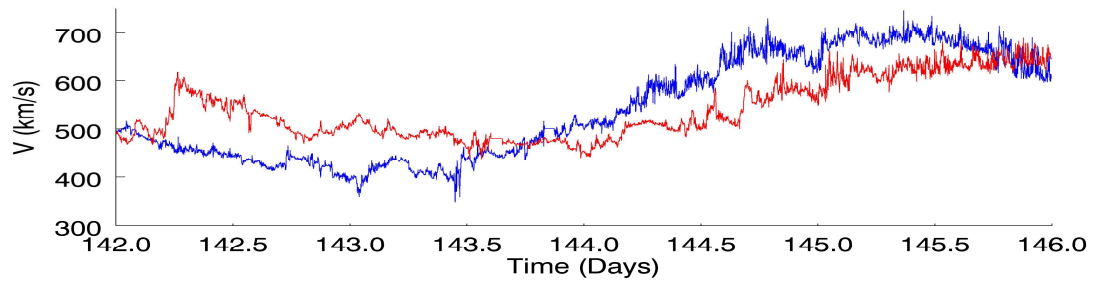
Σχήμα 26. Εικόνες του Ήλιου στις το διάστημα 22 / 05/ 2007 έως 25 / 05/ 2007 από το διαστημόπλοιο Hinode.



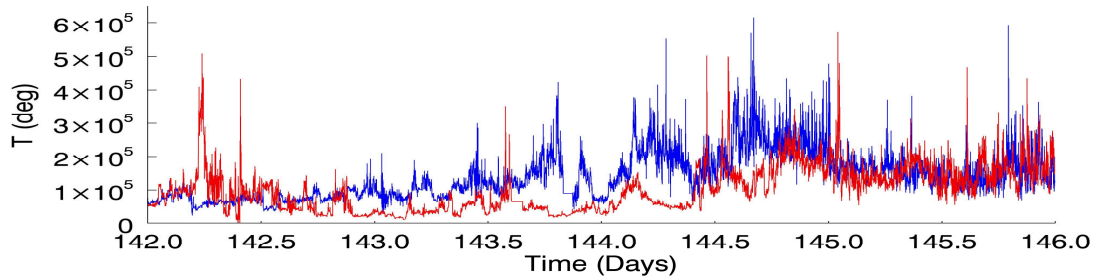
Σχήμα 27. Απεικόνιση και χρονική εξέλιξη βασικών παραμέτρων και ηλιακών δομών το χρονικό διάστημα 22 / 05 / 2007 έως 25 / 05 / 2007. Διακρίνουμε: i) Ροή στις SXR από τους GOES και τη θέση των κέντρων δράσης (πρώτο σχήμα) ii) τη ροή ενεργητικών πρωτονίων σε ενέργειες μεγαλύτερες του 1 MeV (δεύτερο σχήμα) iii) την ταχύτητα του Ηλιακού Ανέμου μαζί με εικόνες του Ήλιου που δείχνουν τις θέσεις των στεμματικών οπών, όπου υπάρχουν (τρίτο σχήμα) iv) μοντέλο του μαγνητικού πεδίου στον Ήλιο (τέταρτο σχήμα) v) μοντέλο του ηλιοσφαιρικού φύλλου ρεύματος μαζί με μοντέλο των στεμματικών οπών (πέμπτο σχήμα) vi) το λόγο B_z/B μαζί με το δείκτη k_p της γεωμαγνητικής δραστηριότητας (έκτο σχήμα).



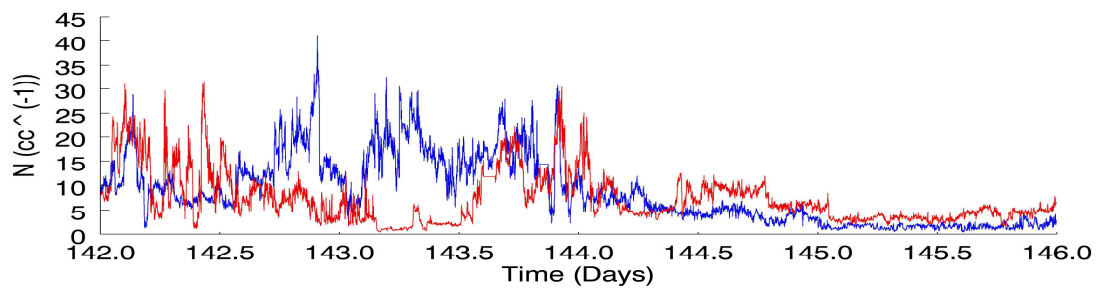
(i)



(ii)



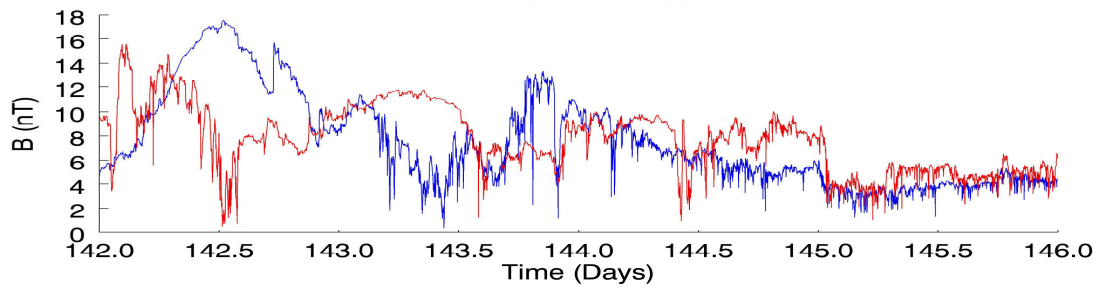
(iii)



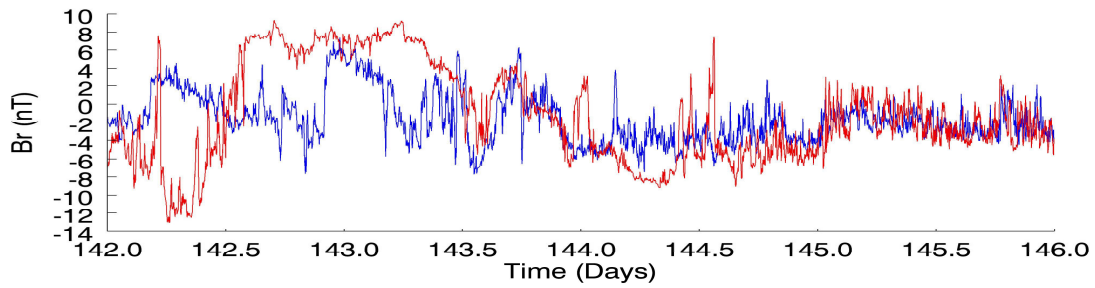
(iv)

Σχήμα 28. Η χρονική μεταβολή του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου, της ταχύτητας ροής, της πυκνότητας και της θερμοκρασίας των πρωτονίων του Ηλιακού Ανέμου από τα διαστημόπλοια Stereo A (κόκκινο) και Stereo B (μπλε) το χρονικό διάστημα από 22 / 05 / 2007, 00:00:00 UT έως 25 / 05 / 2007, 23:59:00 UT.

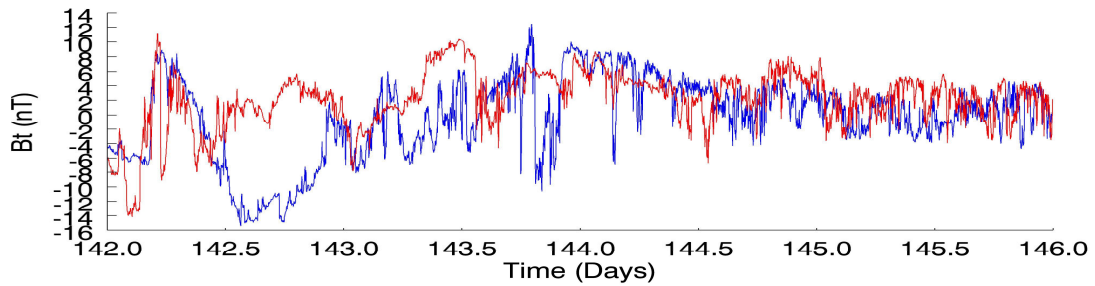
22 - 25 MAY 2007



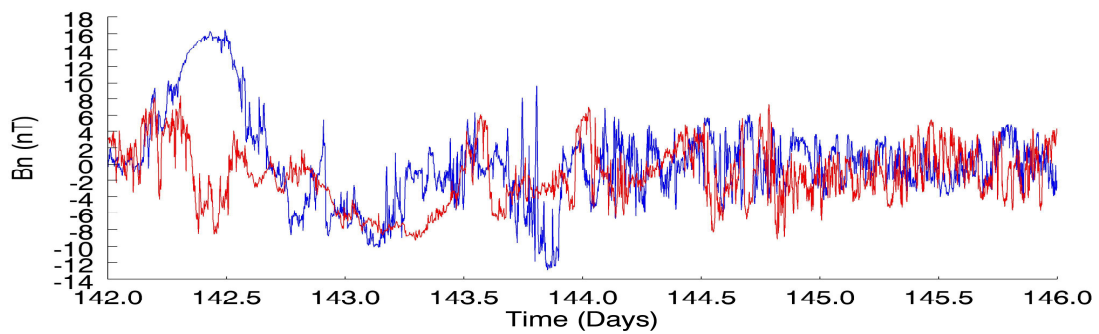
(i)



(ii)

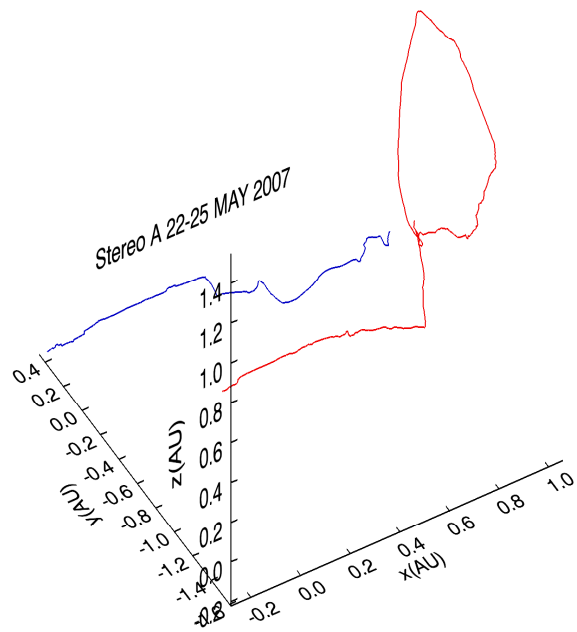


(iii)



(iv)

Σχήμα 29. Η χρονική μεταβολή των συνιστωσών του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου από τα διαστημόπλοια Stereo A (κόκκινο) και Stereo B (μπλε) το χρονικό διάστημα από 22 / 05 / 2007, 00:00:00 UT έως 25 / 05 / 2007, 23:59:00 UT. Στην κορυφή της σελίδας δίδεται και η χρονική μεταβολή του μέτρου του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου για σύγκριση.



Σχήμα 30. Οι γραμμές του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου που αναπαράγονται με τις μετρήσεις των STEREO-A (κόκκινο) και STEREO-B (μπλε)

7.3 Η περίοδος 09 – 14 Δεκεμβρίου 2007

Στις 9 / 12 / 2007, 00:00:00 U.T. η γωνία διαχωρισμού των STEREO ήταν $42^{\circ}.544$ και στις 14 Δεκεμβρίου 2007, 23:59:00 U.T. είχε φτάσει τις $42^{\circ}.990$.

Οι εικόνες του Ήλιου αυτήν την περίοδο δείχνουν:

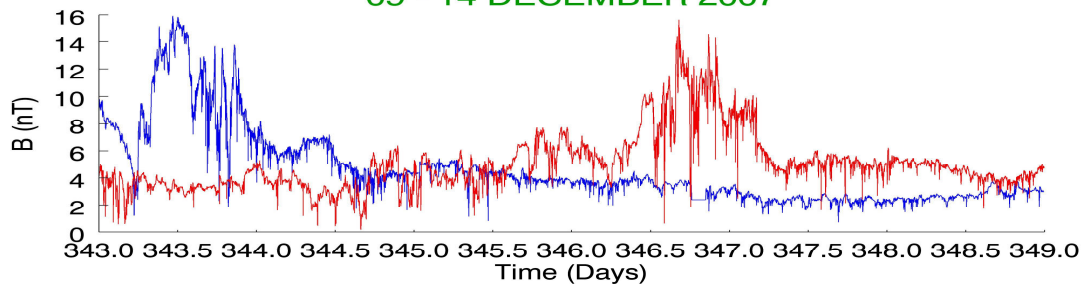
- μια ενεργό περιοχή στο κέντρο του ηλιακού δίσκου και
- τρεις στεμματικές οπές, μια στο βόρειο πόλο του Ήλιου, μια στον ισημερινό δυτικά και μια στο νοτιοανατολικό τεταρτημόριο η οποία μάλιστα μεγαλώνει πολύ κατά τη διάρκεια της περιόδου.

Τα STEREO-A και STEREO-B παρατηρούν ταχύτητες Ηλιακού Ανέμου από $300 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ έως $700 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, επομένως καταγράφονται τόσο αργά όσο και γρήγορα ρεύματα. Η παρατήρησή τους από το STEREO-A γίνεται με σημαντική χρονική υστέρηση (2.5 ημέρες) ως προς το STEREO-B, που δείχνει ότι τα ρεύματα Ηλιακού Ανέμου περιστρέφονται. Αν θεωρήσουμε συμπεριστροφή με τον Ήλιο με μέση περίοδο 27 ημερών, η γωνιακή απόσταση των δύο STEREO αντιστοιχεί σε χρονική διαφορά 3.2 ημερών. Επομένως η περιστρεφόμενη περιοχή έχει παρατηρηθεί στο STEREO-A πολύ νωρίτερα από το αναμενόμενο. Αυτό πιθανόν να εξηγείται από τις μεταβολές στο πλάτος των STEREO, αφού το Heliocentric longitude του STEREO-A μεταβλήθηκε από $-2^{\circ}.8$ σε $+2.2$ και του STEREO-B από $+2^{\circ}.9$ σε $-3^{\circ}.5$ (άρα αφού η περιοχή πρωτοπαρατηρήθηκε «βόρεια» και το STEREO-A μετακινήθηκε προς «βορρά» να είδε την περιοχή νωρίτερα από το αναμενόμενο).

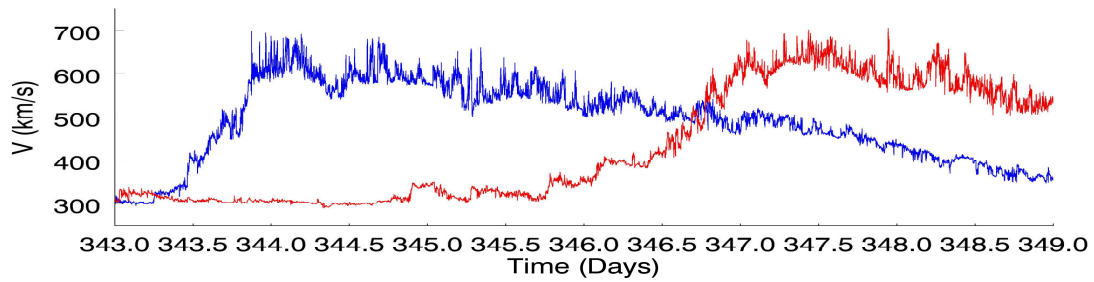
Τα χρονικά προφίλ του μαγνητικού πεδίου, της ταχύτητας και της θερμοκρασίας των πρωτονίων εμφανίζουν αρκετά παρόμοια μορφή στα δύο διαστημόπλοια, ενώ τα προφίλ της πυκνότητας δε συμβαδίζουν ιδιαίτερα. Αξίζει να σημειωθεί ότι το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο εμφανίζεται αρκετά διαταραγμένο και στα δύο STEREO για διάστημα περίπου 1.5 ημέρας (ημέρες 343.25-344.75 στο STEREO-B, ημέρες 346.25-347.5 στο STEREO-A), ενώ έντονος είναι στα ίδια διαστήματα και ο στροβιλισμός του (υπάρχει έντονη αλλαγή της κατεύθυνσης των συνιστωσών).

Η κρίσιμη θερμοκρασία όπως εκτιμήθηκε από τις μετρήσεις μεταβάλλεται από $5\cdot 10^5 \text{ K}$ έως $1.8\cdot 10^6 \text{ K}$. Η κρίσιμη ταχύτητα λαμβάνει τιμές $80 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ – $180 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$. Η κρίσιμη απόσταση μεταβάλλεται από $3 R_{\odot}$ – $12.5 R_{\odot}$. Τα εύρη τιμών είναι πρακτικά τα ίδια και από τα δύο STEREO.

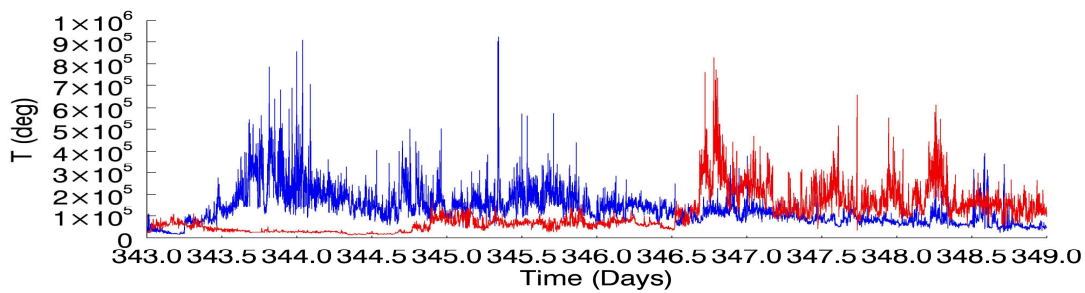
09 - 14 DECEMBER 2007



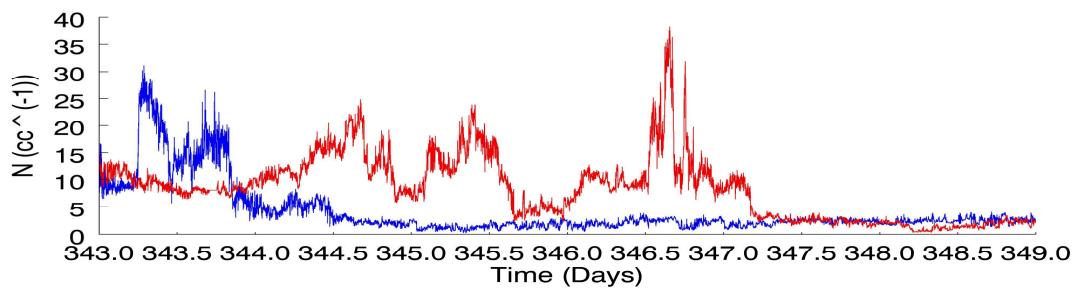
(i)



(ii)

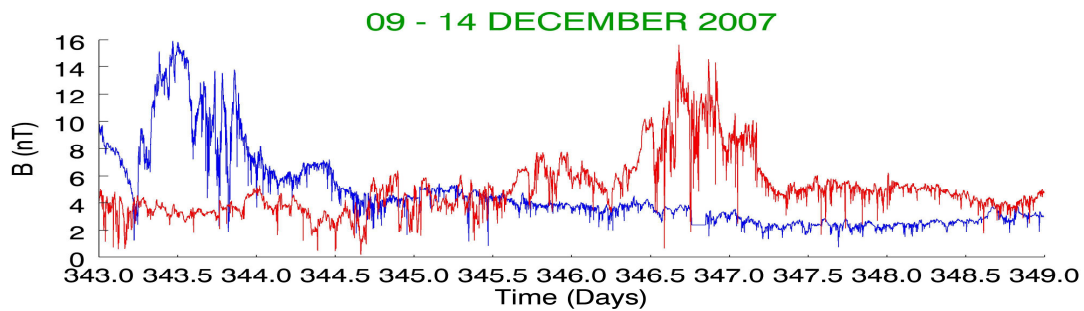


(iii)

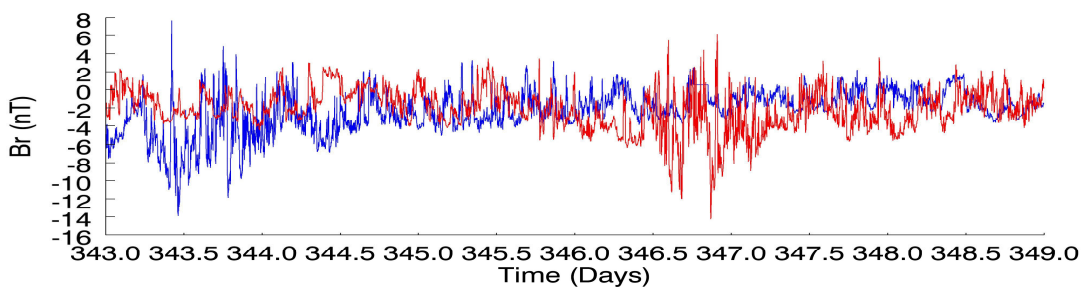


(iv)

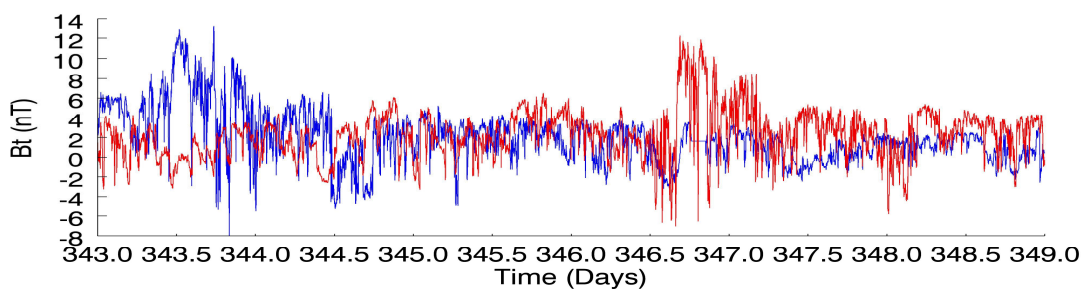
Σχήμα 31. Η χρονική μεταβολή του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου, της ταχύτητας ροής, της πυκνότητας και της θερμοκρασίας των πρωτονίων του Ηλιακού Ανέμου από τα διαστημόπλοια Stereo A (κόκκινο) και Stereo B (μπλε) το χρονικό διάστημα από 09 / 12 / 2007, 00:00:00 UT έως 14 / 12 / 2007, 23:59:00 UT.



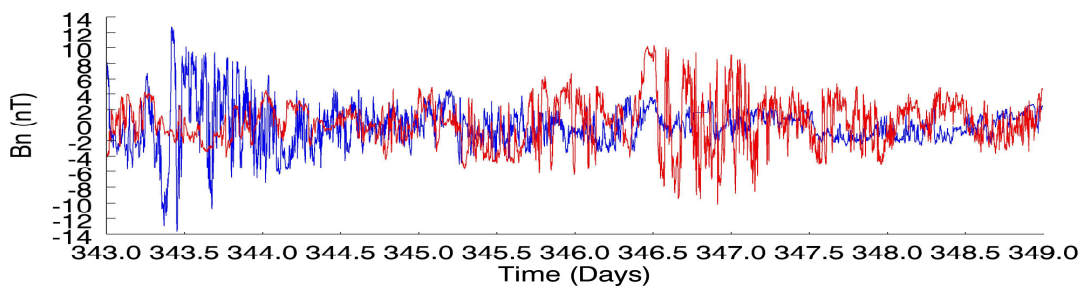
(i)



(ii)

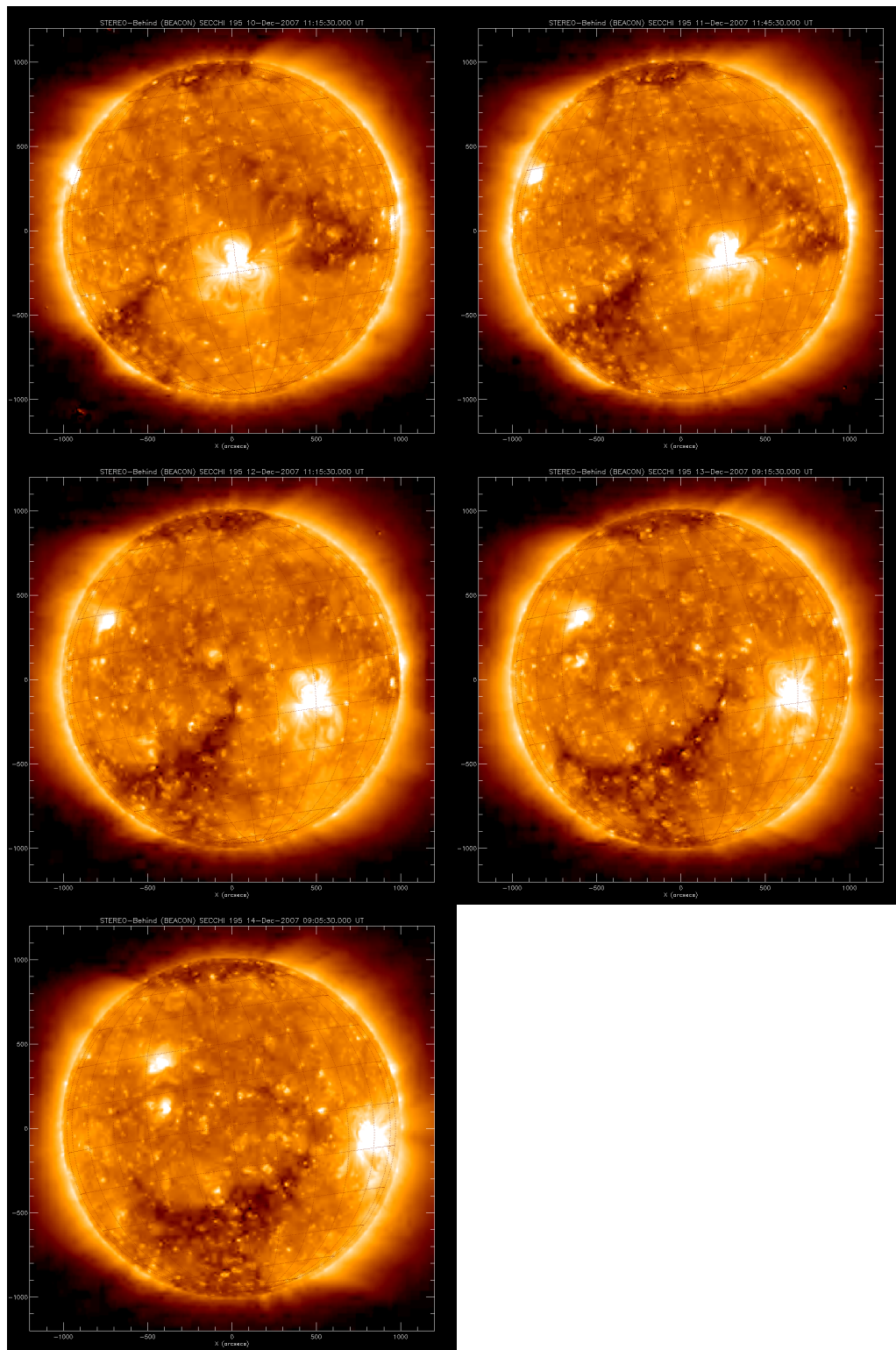


(iii)

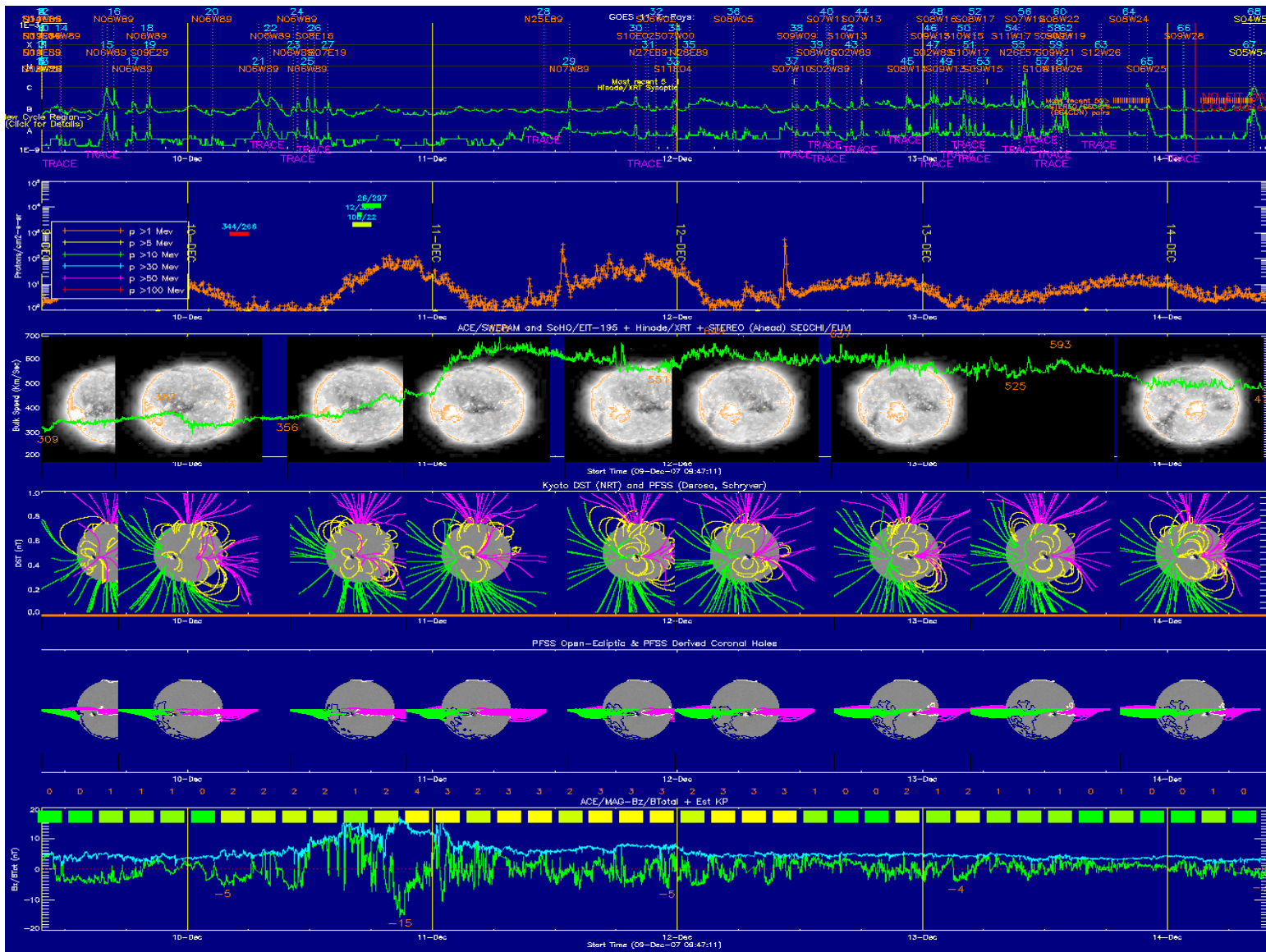


(iv)

Σχήμα 32. Η χρονική μεταβολή των συνιστωσών του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου από τα διαστημόπλοια Stereo A (κόκκινο) και Stereo B (μπλε) το χρονικό διάστημα από 09 / 12 / 2007 00:00:00 UT έως 14 / 12 / 2007, 23:59:00 UT. Στην κορυφή της σελίδας δίδεται και η χρονική μεταβολή του μέτρου του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου για σύγκριση.



Σχήμα 33. Εικόνες του Ήλιου στις το διάστημα 09 / 12/ 2007 έως 14 / 12/ 2007 από το διαστημόπλοιο STEREO-B. Παρατηρούμε ότι σταδιακά επηρεάζει τις μετρήσεις μας η νότια πολική στεμματική οπή, η οποία μάλιστα καταλαμβάνει παραπάνω από το ήμισυ του ημισφαιρίου και είναι η κυρίαρχη πηγή του γρήγορου Ηλιακού Ανέμου το εν λόγω διάστημα.



Σχήμα 34. Απεικόνιση και χρονική εξέλιξη βασικών παραμέτρων και ηλιακών δομών το χρονικό διάστημα 09 / 12 / 2007 έως 14 / 12 / 2007. Διακρίνουμε: i) Ροή στις SXR από τους GOES και τη θέση των κέντρων δράσης (πρώτο σχήμα) ii) τη ροή ενεργητικών πρωτονίων σε ενέργειες μεγαλύτερες του 1 MeV (δεύτερο σχήμα) iii) την ταχύτητα του Ηλιακού Ανέμου μαζί με εικόνες του Ήλιου που δείχνουν τις θέσεις των σεμματικών οπών, όπου υπάρχουν (τρίτο σχήμα) iv) μοντέλο του μαγνητικού πεδίου στον Ήλιο (τέταρτο σχήμα) v) μοντέλο του ηλιοσφαιρικού φύλλου ρεύματος μαζί με μοντέλο των σεμματικών οπών (πέμπτο σχήμα) vi) το λόγο B_z/B μαζί με το δείκτη k_p της γεωμαγνητικής δραστηριότητας (έκτο σχήμα).

7.4 Η περίοδος 11 – 16 Ιανουαρίου 2008

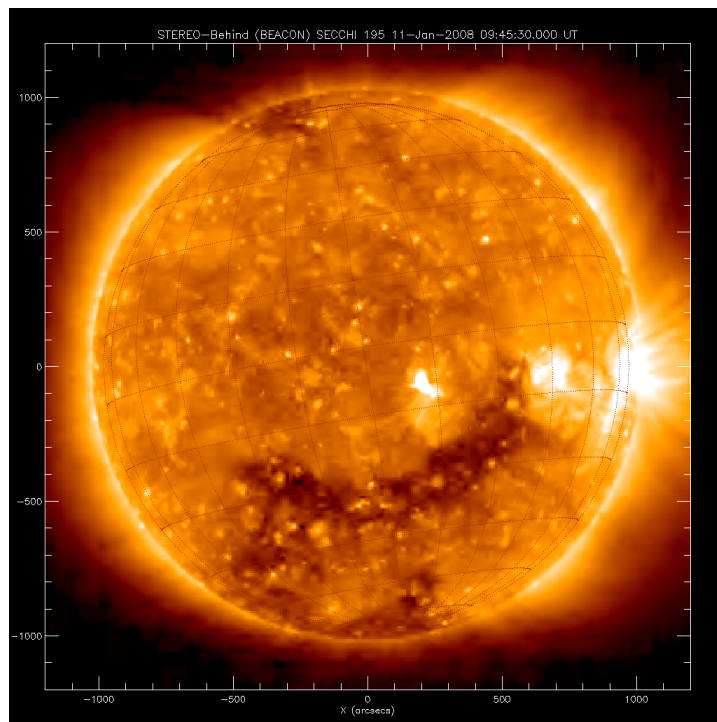
Στην έναρξη της περιόδου (11 Ιανουαρίου 2008, 12:00:00 U.T.) η γωνία διαχωρισμού των STEREO ήταν $44^{\circ}.503$ ενώ στο τέλος (16 Ιανουαρίου 2008, 23:59:00 U.T.) η γωνία διαχωρισμού τους ήταν ελάχιστα μεγαλύτερη ($44^{\circ}.722$). Στον Ήλιο υπάρχουν ελάχιστα κέντρα δράσης. Αντίθετα, κυριαρχεί μια μεγάλη στεμματική οπή η οποία καλύπτει αρκετό τμήμα του νότιου ηλιακού ημισφαιρίου και μας δίνει τον ταχύ Ηλιακό Άνεμο που παρατηρούμε.

Τα δύο STEREO παρατηρούν (όπως αναμέναμε) κυρίως ταχύ Ηλιακό Άνεμο. Το STEREO-B βλέπει σχετικά ομαλή μετάβαση από τα $500 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ στα $700 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$. Για το STEREO-A η παρατηρούμενη μετάβαση στα $700 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ είναι αρκετά πιο απότομη και ξεκινάει από τα $400 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$. Η μετάβαση στην ταχύτητα παρατηρείται από τα διαστημόπλοια με 3.5 μέρες διαφορά περίπου, αφού το STEREO-B την παρατηρεί πρώτο την ημέρα 12, ενώ το STEREO-A την ημέρα 15.5. Αν θεωρήσουμε μια μέση γωνιακή απόσταση των δύο STEREO $44^{\circ}.6$ για τη συγκεκριμένη περίοδο και συμπεριστροφή με τον Ήλιο με περίοδο περίπου 27 ημερών, λαμβάνουμε χρονική διαφορά ίση με 3.345 ημέρες, που είναι αρκετά κοντά στη χρονική διαφορά που βλέπουμε στα προφίλ των ταχυτήτων

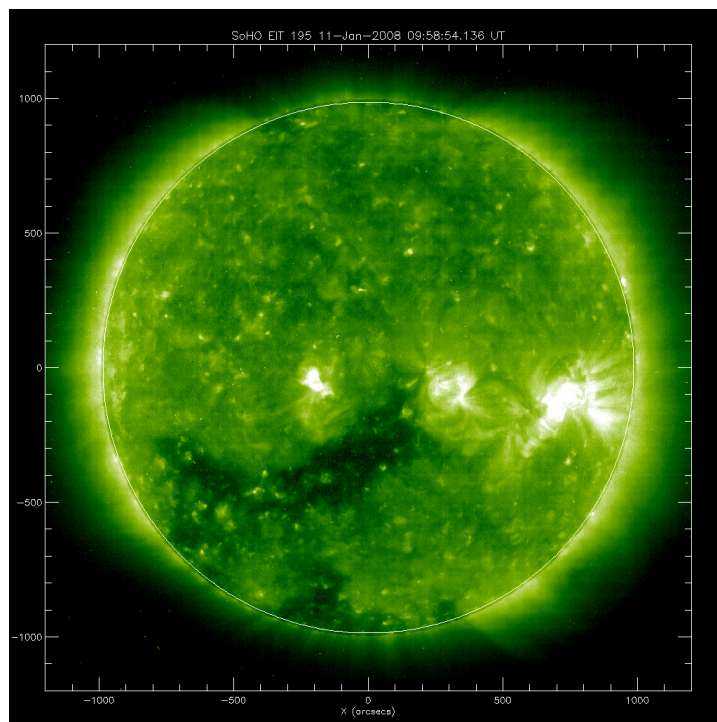
Στους ίδιους χρόνους με την ταχύτητα υπάρχουν αυξήσεις του μαγνητικού πεδίου και της αριθμητικής πυκνότητας των πρωτονίων, περισσότερο απότομες και αυτές για το STEREO-A. Οι μεταβολές στη θερμοκρασία δε δείχνουν τόσο απότομες.

Όσον αφορά τις συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου, έχει ενδιαφέρον ιδιαίτερα από την ημέρα 15 και ύστερα η στροφή των συνιστωσών που βλέπει το STEREO-A. Τέτοιες στροφές υποδηλώνουν κάποιου είδους στροβιλισμό. Το STEREO-B βλέπει το στροβιλισμό αυτό σε μικρότερο βαθμό, περίπου δύο ημέρες πριν το STEREO-A.

Με βάση τις παρατηρούμενες ταχύτητες και από τα δύο STEREO, η κρίσιμη θερμοκρασία του Ηλιακού Ανέμου που εκτιμήσαμε κυμαίνεται από $6\cdot 10^5 \text{ K}$ έως $1.8\cdot 10^6 \text{ K}$. Η κρίσιμη απόσταση (μετά από την οποία ο Ηλιακός Άνεμος γίνεται υπερηχητικός), όπως ήταν αναμενόμενο με βάση τις υποθέσεις μας είναι μερικές ακτίνες Ηλίου, R_{\odot} . Το εύρος τιμών της κρίσιμης απόστασης είναι κάπως μικρότερο για το STEREO-B (3-7 R_{\odot} , ενώ για το STEREO-A είναι 3-10 R_{\odot}). Οι τιμές της κρίσιμης ταχύτητας (που είναι περίπου ίση με την τοπική ταχύτητα του ήχου στο μέσο) κυμαίνονται από $90 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ έως $180 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$.

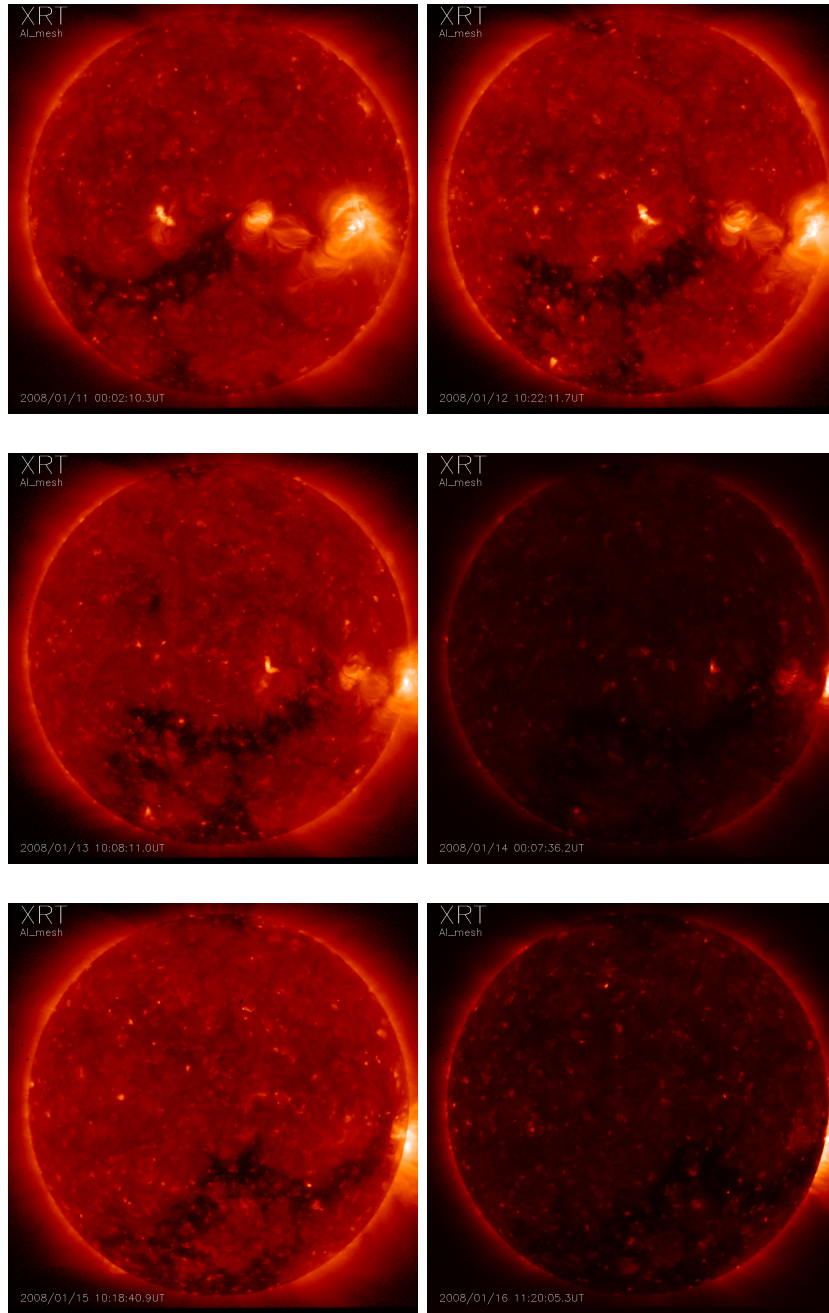


(i)

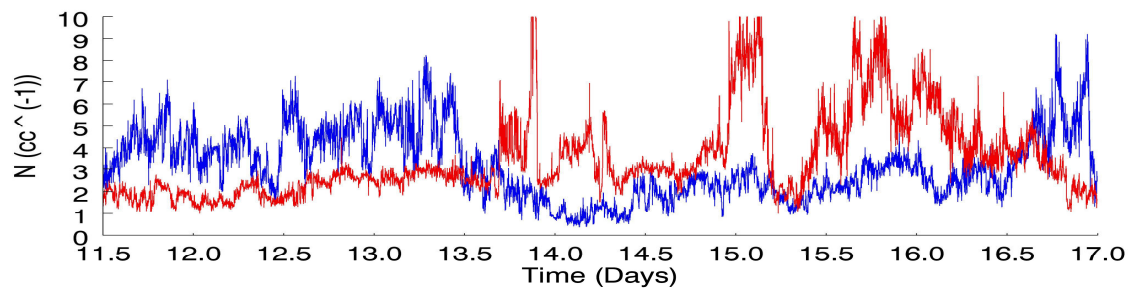
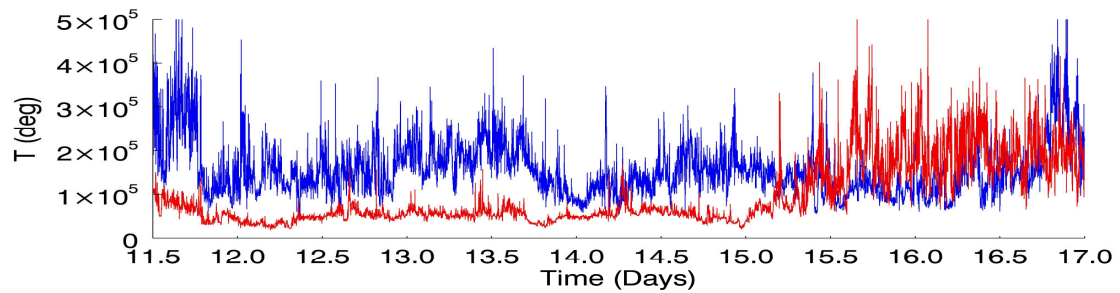
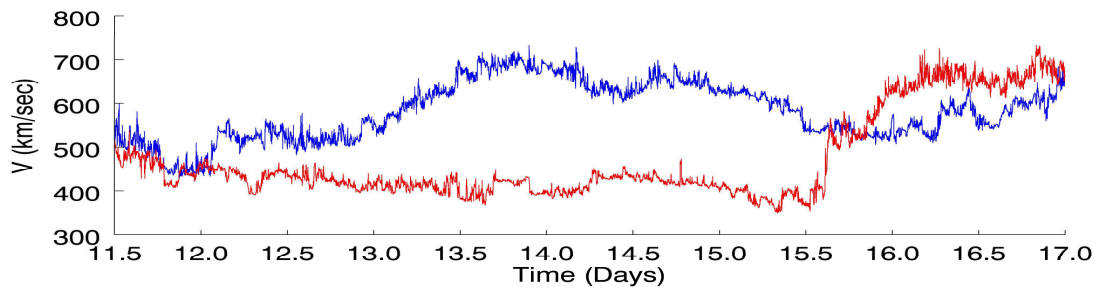
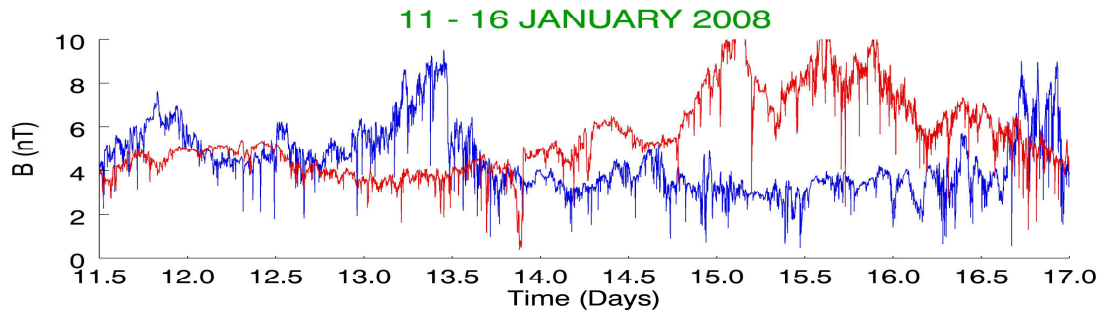


(ii)

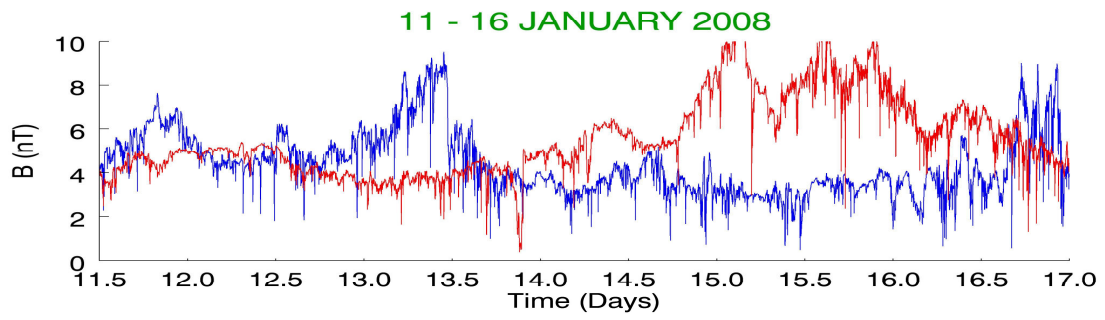
Σχήμα 35. Εικόνες του Ήλιου στο υπεριώδες από τα STEREO-B (πάνω) και SOHO/EIT (κάτω) στις 11 / 01 / 2008.



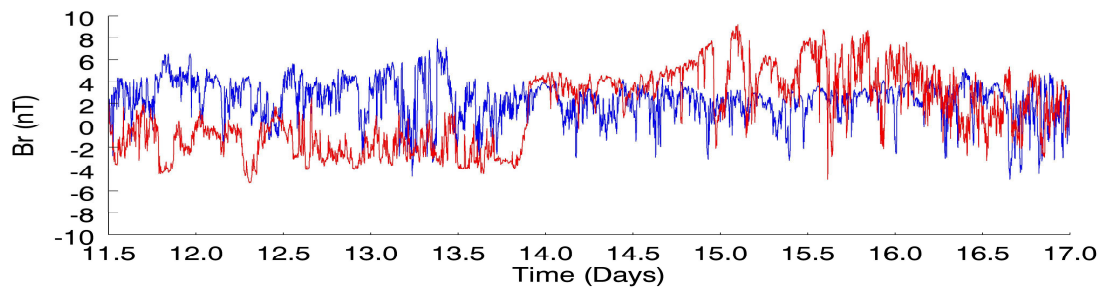
Σχήμα 36. Εικόνες του Ήλιου από το διαστημόπλοιο HINODE το διάστημα 11 / 01/ 2008 - 16 / 01/ 2008.



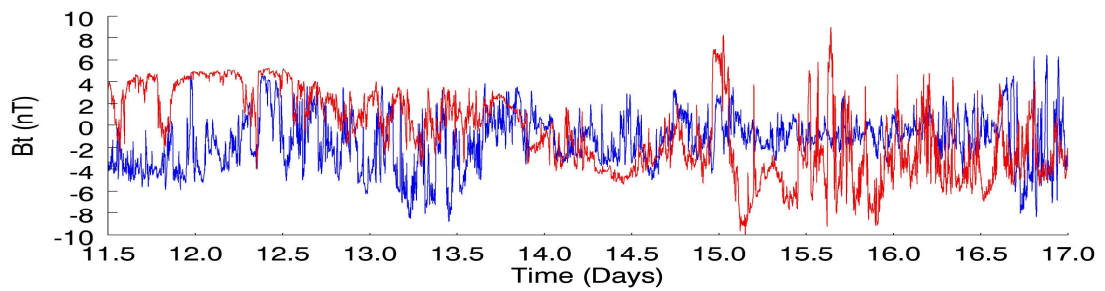
Σχήμα 37. Η χρονική μεταβολή του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου, της ταχύτητας ροής, της πυκνότητας και της θερμοκρασίας των πρωτονίων του Ηλιακού Ανέμου από τα διαστημόπλοια Stereo A (κόκκινο) και Stereo B (μπλε) το χρονικό διάστημα από 11 / 01 / 2008, 12:00:00 UT έως 16 / 01 / 2008, 23:59:00 UT.



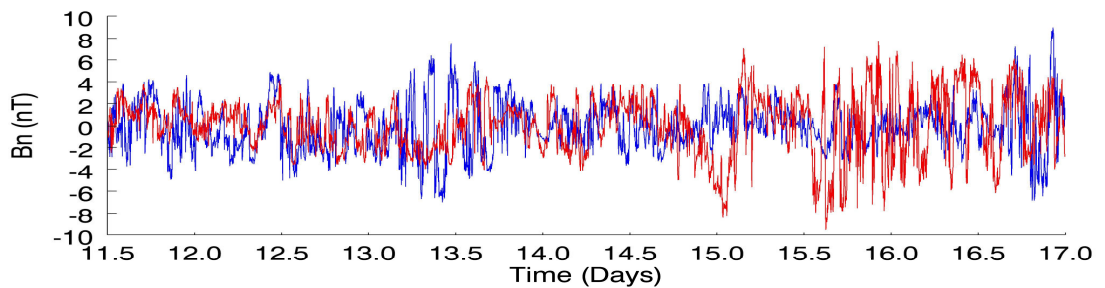
(i)



(ii)



(iii)



(iv)

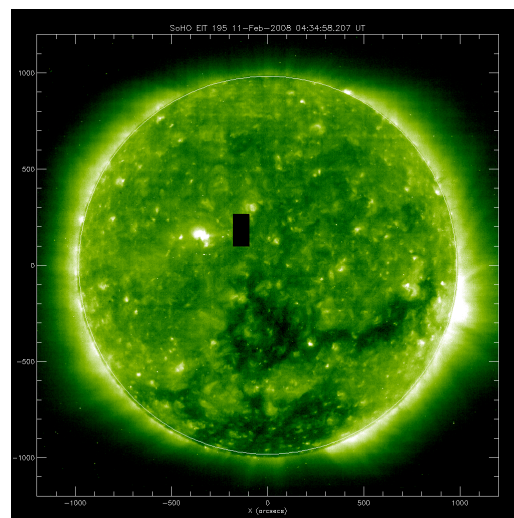
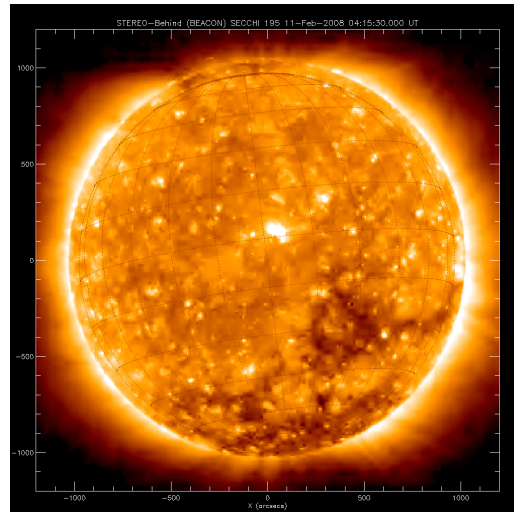
Σχήμα 38. Η χρονική μεταβολή των συνιστωσών του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου από τα διαστημόπλοια Stereo A (κόκκινο) και Stereo B (μπλε) το χρονικό διάστημα από 11 / 01 / 2008, 12:00:00 UT έως 16 / 01 / 2008, 23:59:00 UT. Στην κορυφή της σελίδας δίδεται και η χρονική μεταβολή του μέτρου του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου για σύγκριση.

7.5 Η περίοδος 08 – 13 Φεβρουαρίου 2008

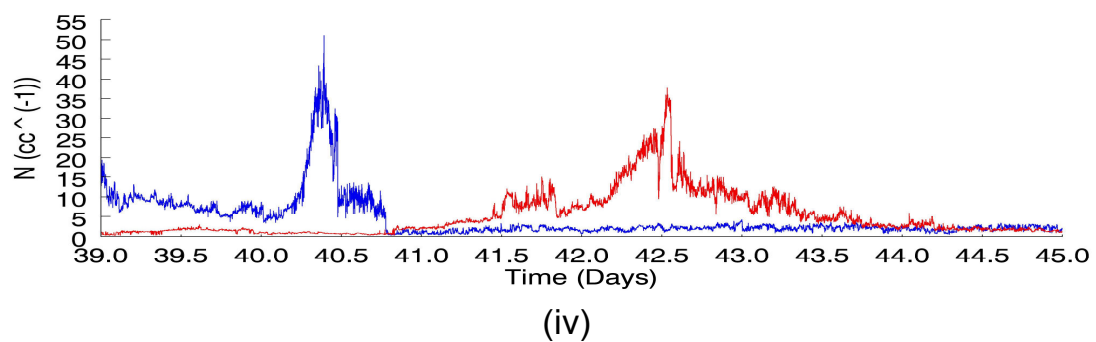
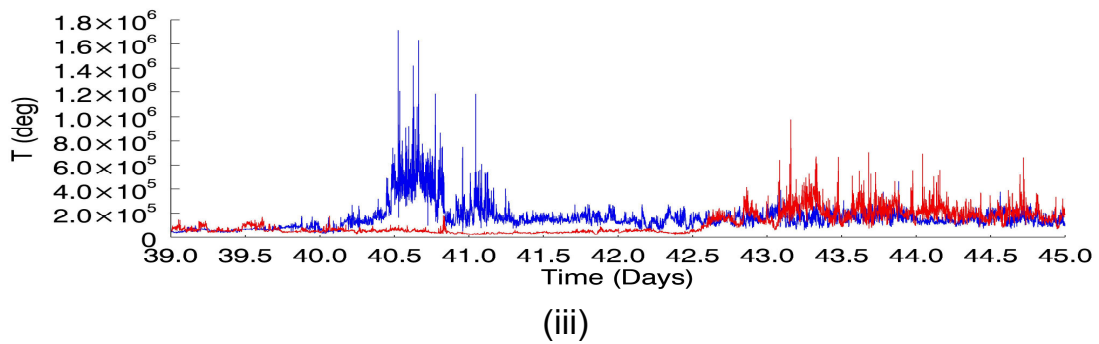
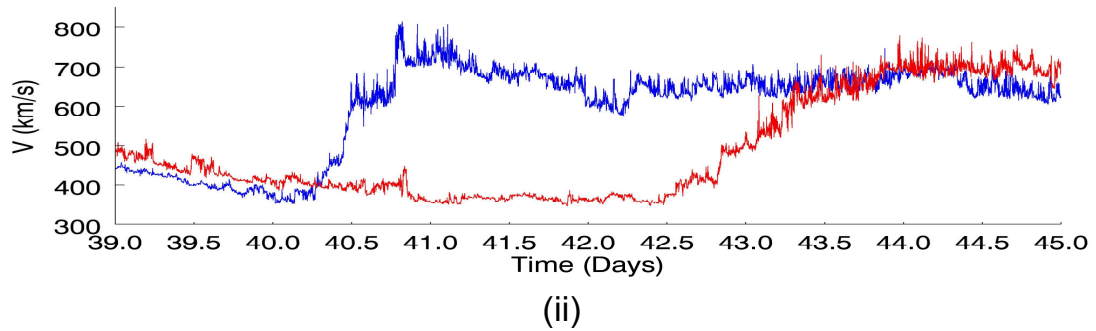
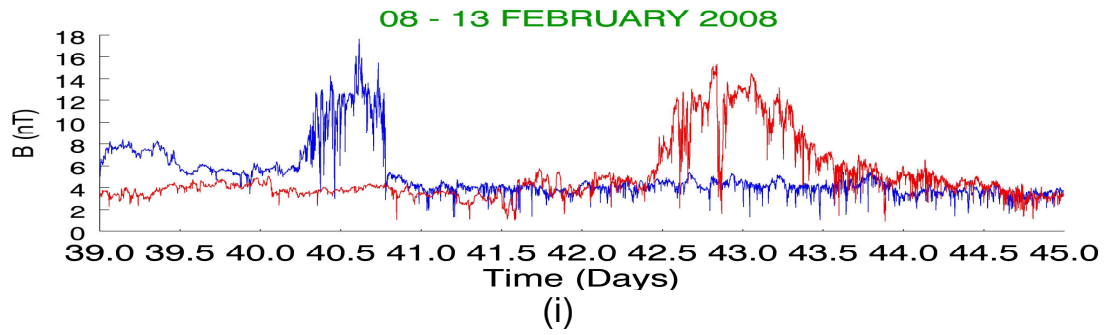
Την περίοδο αυτή η γωνιακή απόσταση μεταξύ των δύο STEREO μεταβάλλεται από $45^{\circ}.436$ (08 / 02 / 2008, 00:00:00 UT) έως $45^{\circ}.611$ (13 / 02 / 2008, 23:59:00 UT). Στο ηλιακό στέμμα κυριαρχεί ξεκάθαρα μια μεγάλη ομάδα οπών στο νότιο ημισφαίριο στις 40° που εκτείνεται περίπου έως 67° ανατολικά και 46° δυτικά. Στον κατάλογο του NOAA δεν υπάρχει καταχωρημένο κανένα κέντρο δράσης αυτό το διάστημα.

Και τα δύο STEREO το διάστημα αυτό παρατηρούν ξεκάθαρα τόσο αργό όσο και γρήγορο Ηλιακό Άνεμο. Η μετάβαση μεταξύ των δύο δεν είναι τόσο απότομη. Το STEREO-B την παρατηρεί πρώτο την ημέρα 40.25, ενώ το STEREO-A τη μετρά την ημέρα 42.5. Έχουμε δηλαδή μια χρονική διαφορά 2.25 ημέρες μεταξύ των παρατηρήσεων. Αν θεωρήσουμε μια μέση γωνιακή απόσταση $45^{\circ}.5$ μεταξύ των STEREO, αυτή (υποθέτοντας συμπεριστροφή με τον Ήλιο με περίοδο 27 ημέρες) αντιστοιχεί σε χρονική διαφορά 3.4 ημέρες. Δηλαδή το STEREO-A παρατηρεί τη μεταβολή αρκετά νωρίτερα από το αναμενόμενο. Η διαφορά των πλατών των δύο STEREO την περίοδο που μελετούμε κυμαίνεται μεταξύ $2^{\circ}.5$ και 3° και άρα είναι αρκετά μικρή για να δικαιολογήσει την παρατηρούμενη εξέλιξη. Δυστυχώς δεν υπάρχουν αρκετές εικόνες ώστε να έχουμε μια αίσθηση του αν αυτή οφείλεται σε μεταβλητότητα της πηγής.

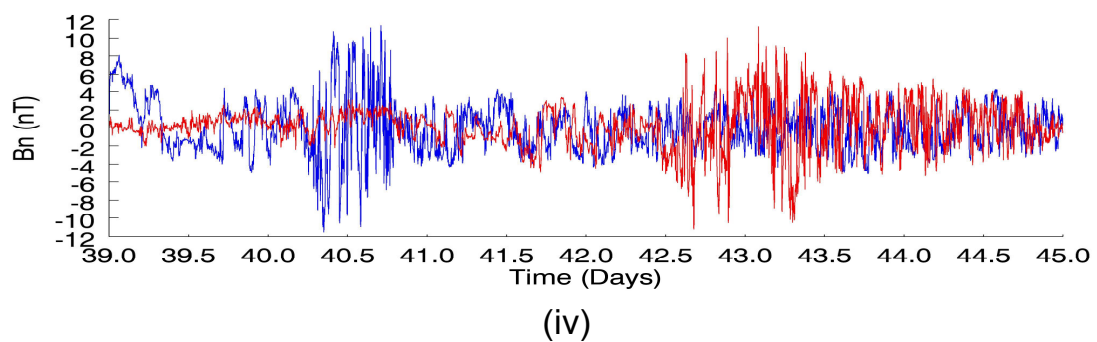
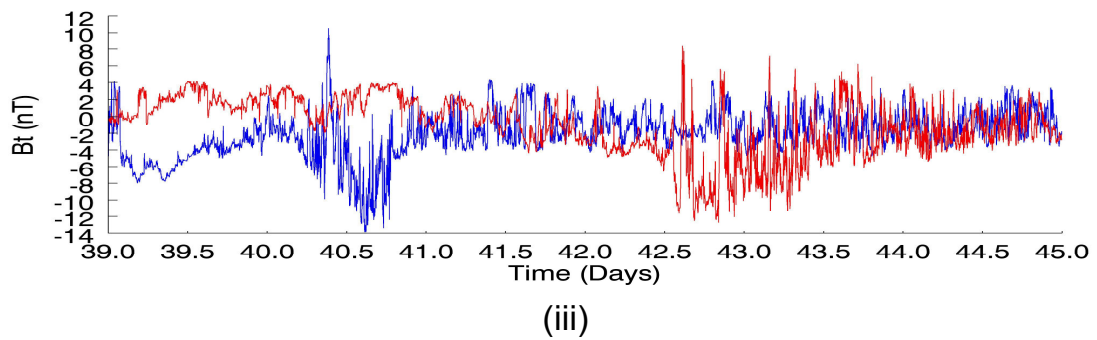
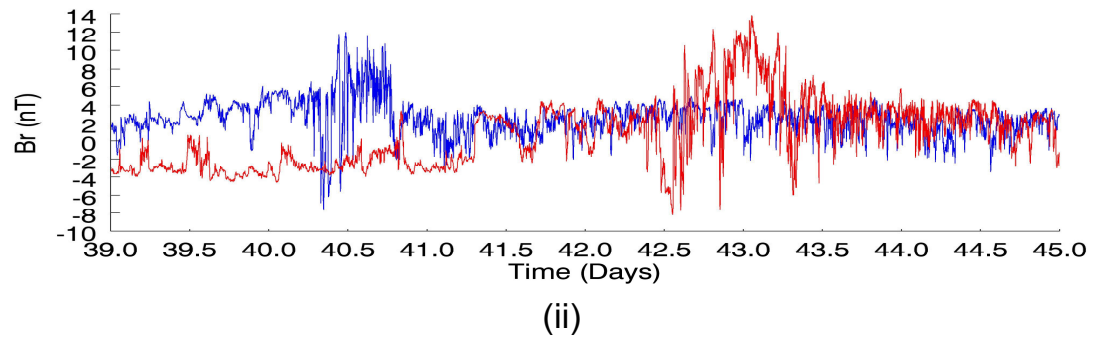
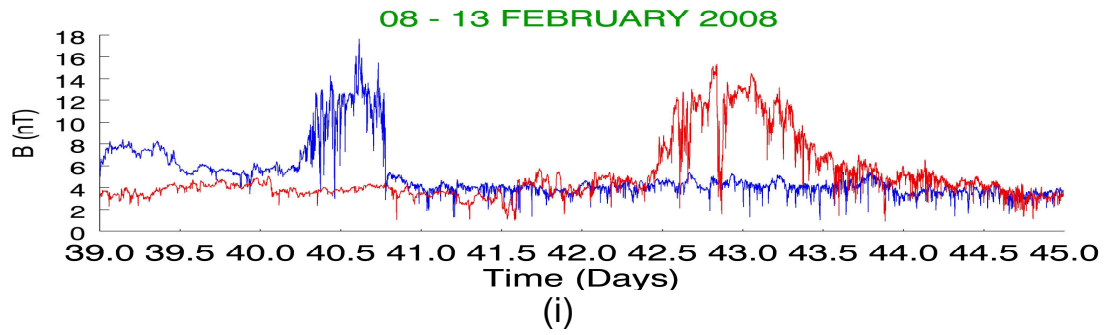
Λίγο πριν τις μεταβολές των ταχυτήτων παρατηρείται έντονη αύξηση του μα-γνητικού πεδίου, περίπου το ίδιο έντονα και από τα δύο STEREO και με ~ 2.5 ημέρες διαφορά. Ομοίως αυξάνεται και η θερμοκρασία, ενώ η αριθμητική πυκνότητα παρουσιάζει απότομη αυξομείωση. Άρα είναι πιθανό να έχουμε τη διέλευση κάποιου κρουστικού κύματος. Επιπλέον, το μαγνητικό πεδίο κοντά στο χρόνο παρατήρησης του κρουστικού κύματος παρουσιάζει ισχυρό στροβιλισμό, όπως φαίνεται από τη συνεχή αλλαγή της κατεύθυνσης των συνιστωσών του.



Σχήμα 39. Εικόνες του Ήλιου στο υπεριώδες στις 11 / 02/ 2008 από τα STEREO-B (πάνω) και SOHO/EIT (κάτω).



Σχήμα 40. Η χρονική μεταβολή του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου, της ταχύτητας ροής, της πυκνότητας και της θερμοκρασίας των πρωτονίων του Ηλιακού Ανέμου από τα διαστημόπλοια Stereo A (κόκκινο) και Stereo B (μπλε) το χρονικό διάστημα από 08 / 02 / 2008, 00:00:00 UT έως 13 / 01 / 2008, 23:59:00 UT.



Σχήμα 41. Η χρονική μεταβολή των συνιστωσών του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου από τα διαστημόπλοια Stereo A (κόκκινο) και Stereo B (μπλε) το χρονικό διάστημα από 08 / 02 / 2008 00:00:00 UT έως 13 / 02 / 2008, 23:59:00 UT. Στην κορυφή της σελίδας δίδεται και η χρονική μεταβολή του μέτρου του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου για σύγκριση.

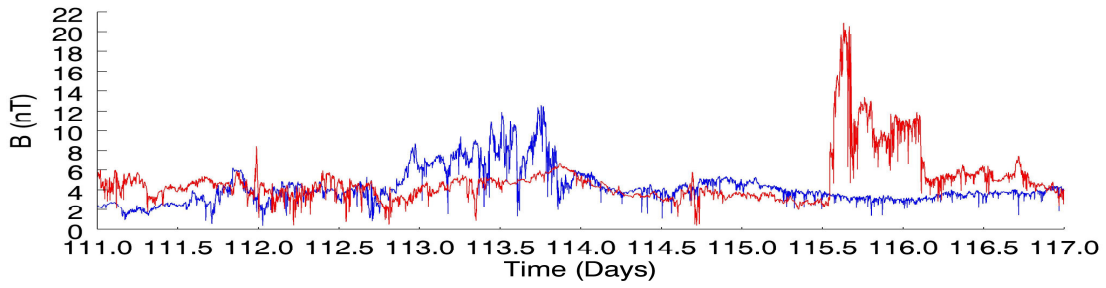
7.6 Η περίοδος 20 – 25 Απριλίου 2008

Η γωνία διαχωρισμού των δύο STEREO την περίοδο αυτή είναι περίπου 49° . (στις 20 / 04 / 2008, 00:00:00 U.T. ισούται με $48^\circ.918$ και στις 25 / 04 / 2008, 23:59:00 U.T. έχει την τιμή $49^\circ.457$).

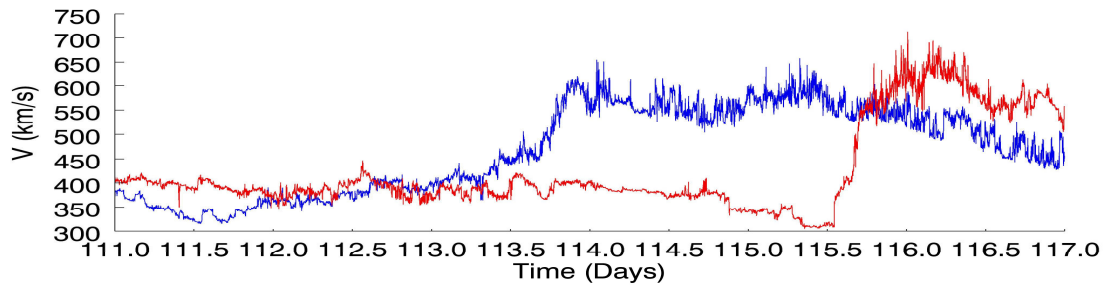
Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα των παρατηρούμενων ταχυτήτων συναρτήσει του χρόνου, τα διαστημόπλοια STEREO παρατηρούν τόσο αργό όσο και γρήγορο Ηλιακό Άνεμο. Οι ταχύτητες του Ηλιακού Ανέμου ξεκινούν από $300 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ και φτάνουν στα $700 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ περίπου. Τα διαστημόπλοια μας δίνουν διαφορετικό χρονικό προφίλ ταχυτήτων, με το STEREO-B να παρατηρεί πρώτο (ημέρα 113), δυόμισι μέρες πριν το STEREO-A (ημέρα 115.5), τη μετάβαση από αργό σε γρήγορο Ηλιακό Άνεμο. Αν θεωρήσουμε μια μέση γωνία διαχωρισμού των STEREO $49^\circ.188$, αυτή αντιστοιχεί (υποθέτοντας πλήρη συμπεριστροφή με τον Ήλιο, με γωνιακή ταχύτητα ~ 27 ημέρες) σε χρονικό διάστημα 3.42 ημέρες, αρκετά μεγαλύτερο δηλαδή από αυτό που παρατηρούμε στο διάγραμμα.

Μια πιθανή εξήγηση είναι ότι η απόκλιση οφείλεται σε σημαντική διαφορά στα πλάτη (ως προς τον Ήλιο) που βρίσκονται τα STEREO, που όμως δεν ισχύει αφού σε αυτό το διάστημα το ΗCΙ πλάτος του STEREO-B μεταβάλλεται μόνο κατά $0^\circ.3$ και του STEREO-A κατά $0^\circ.8$, ενώ και τα δύο εξακολουθούν να κινούνται νότια της εκλειπτικής. Μια άλλη εξήγηση δίδεται από την πιθανή μεταβλητότητα της πηγής. Πράγματι, στις εικόνες του Hinode βλέπουμε μετά τις 23 / 04 να αυξάνεται η έκταση των στεμ-ματικών οπών σημαντικά, οπότε ενισχύεται ο γρήγορος Ηλιακός Άνεμος και ίσως εκεί να οφείλεται το ότι το STEREO-A παρατηρεί συντομότερα μεγάλες ταχύτητες. Αυτό ενισχύεται και από το ότι στο ίδιο διάστημα, εκτός από την αύξηση της ταχύτητας, αυξάνεται και η θερμοκρασία, το μαγνητικό πεδίο παρουσιάζει μια απότομη κορυφή και κατόπιν δύο μικρότερες, ενώ και η αριθμητική πυκνότητα υφίσταται μια εξαιρετικά απότομη αυξομείωση φτάνοντας τα 80 cc^{-1} . Βάσει των παραπάνω καταλήγουμε ότι ένα κρουστικό κύμα στην περιοχή του STEREO-A προκάλεσε τις παρατηρούμενες μεταβολές. Επιπλέον, όπως φαίνεται στα χρονικά τους προφίλ, με τη διέλευση του κρουστικού κύματος προκαλείται πολύ έντονος στροβιλισμός των συνιστωσών του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου.

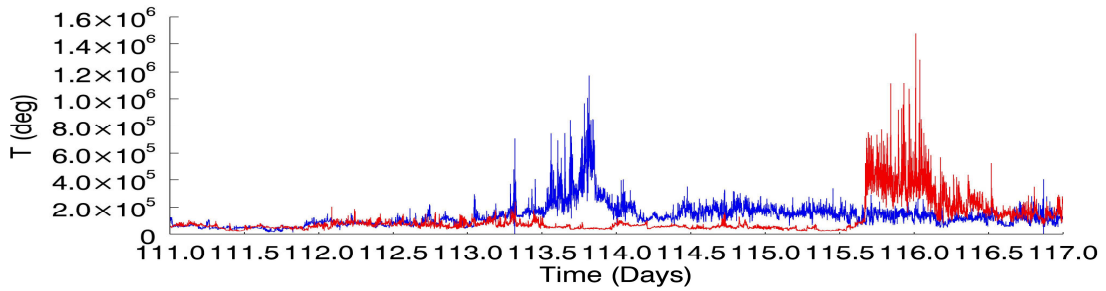
20 - 25 APRIL 2008



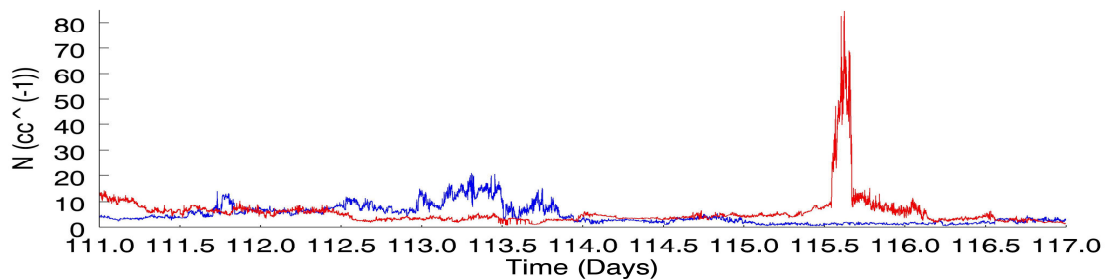
(i)



(ii)



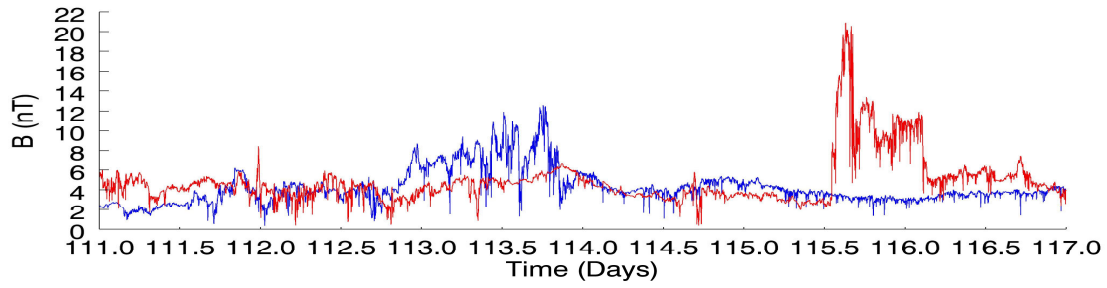
(iii)



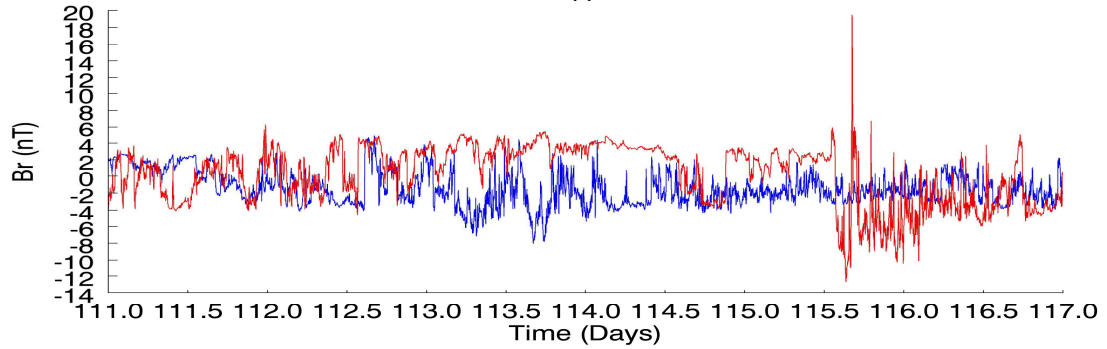
(iv)

Σχήμα 42. Η χρονική μεταβολή του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου, της ταχύτητας ροής, της πυκνότητας και της θερμοκρασίας των πρωτονίων του Ηλιακού Ανέμου από τα διαστημόπλοια Stereo A (κόκκινο) και Stereo B (μπλε) το χρονικό διάστημα από 20 / 04 / 2008, 00:00:00 UT έως 25 / 04 / 2008, 23:59:00 UT.

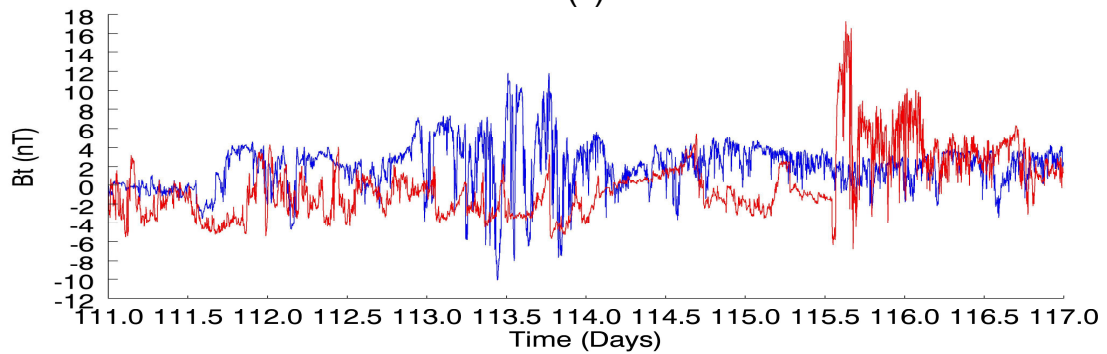
20 - 25 APRIL 2008



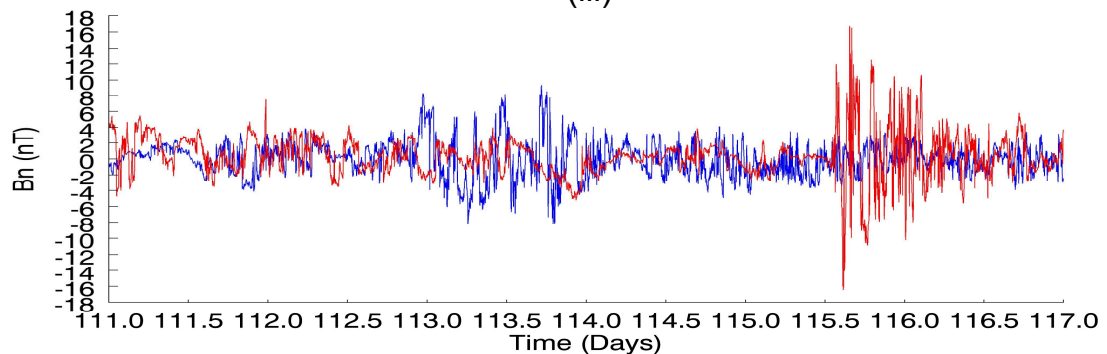
(i)



(ii)

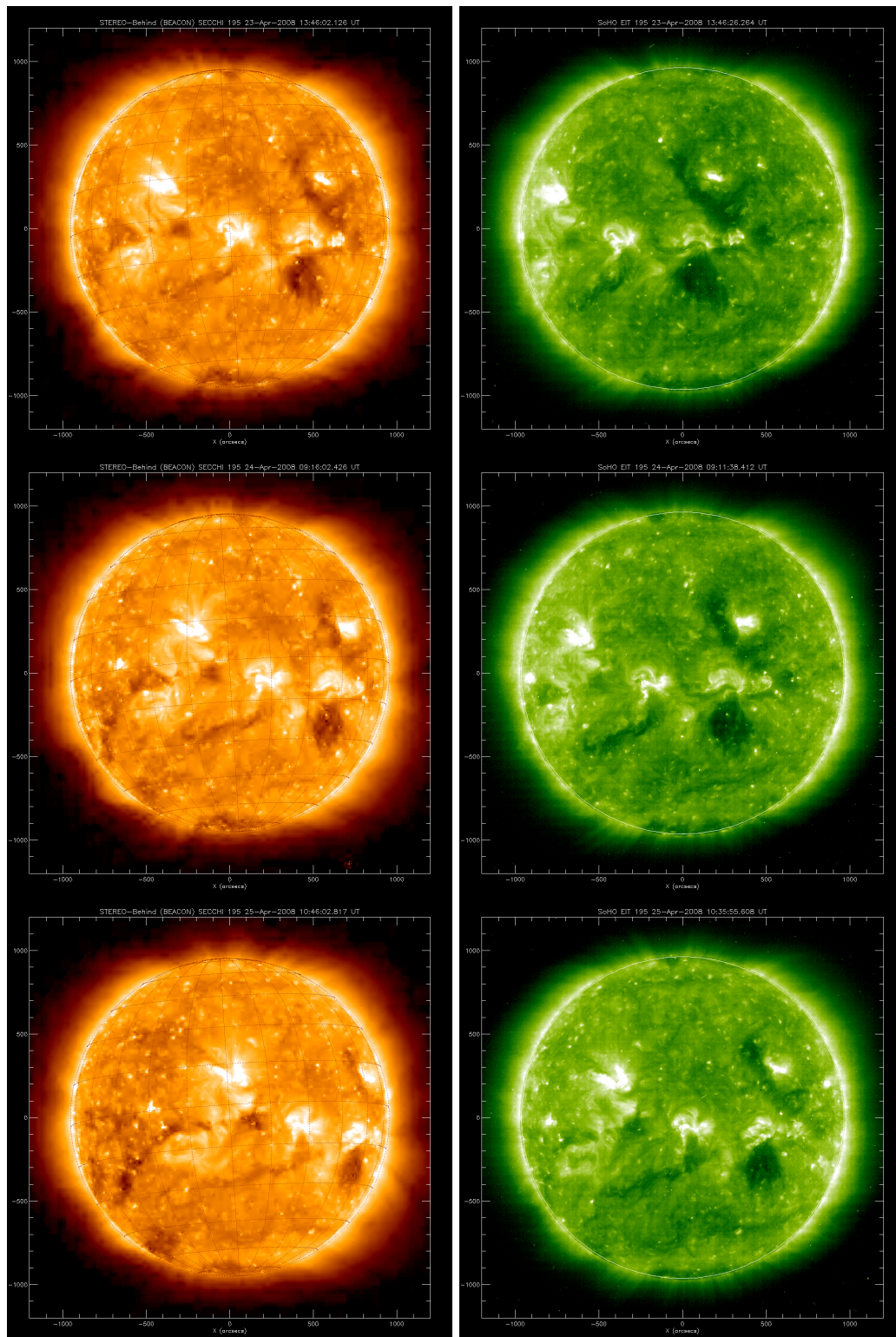


(iii)

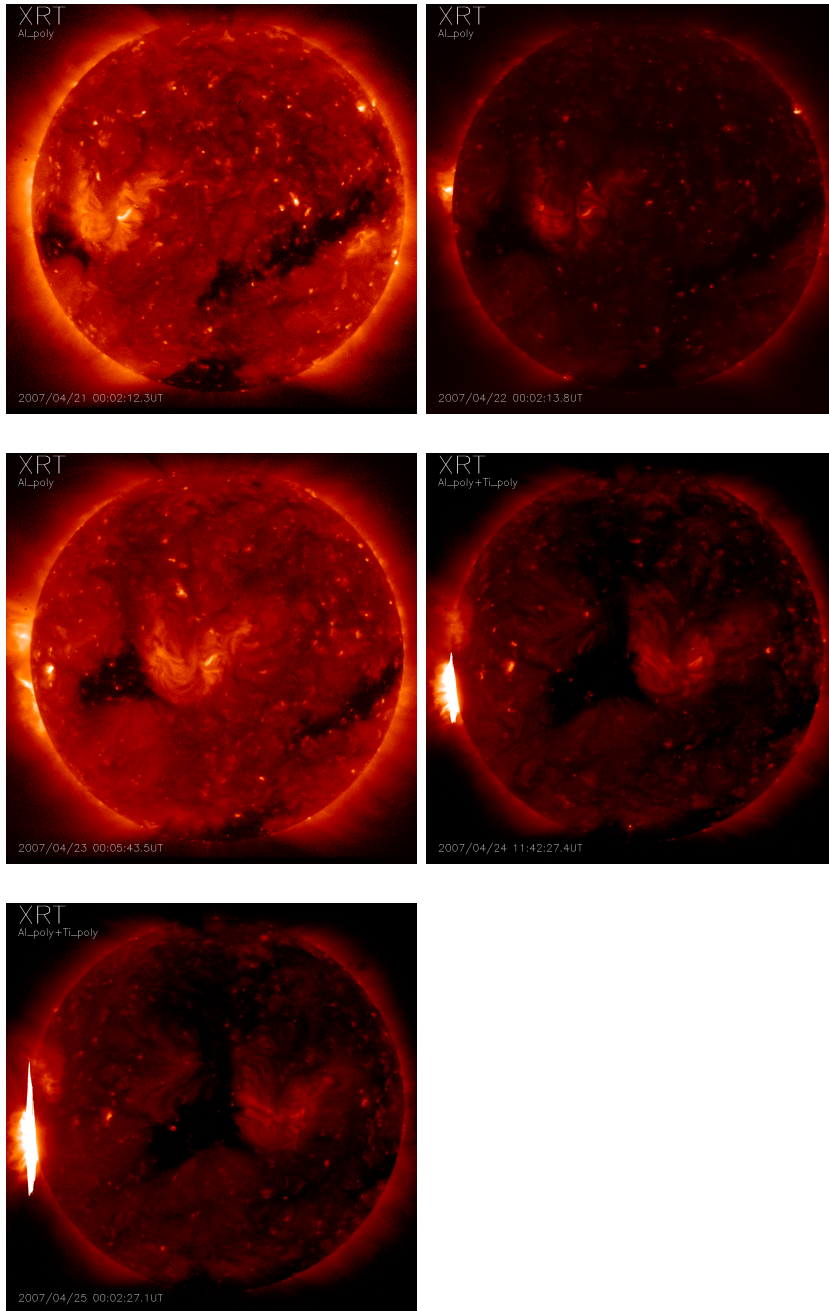


(iv)

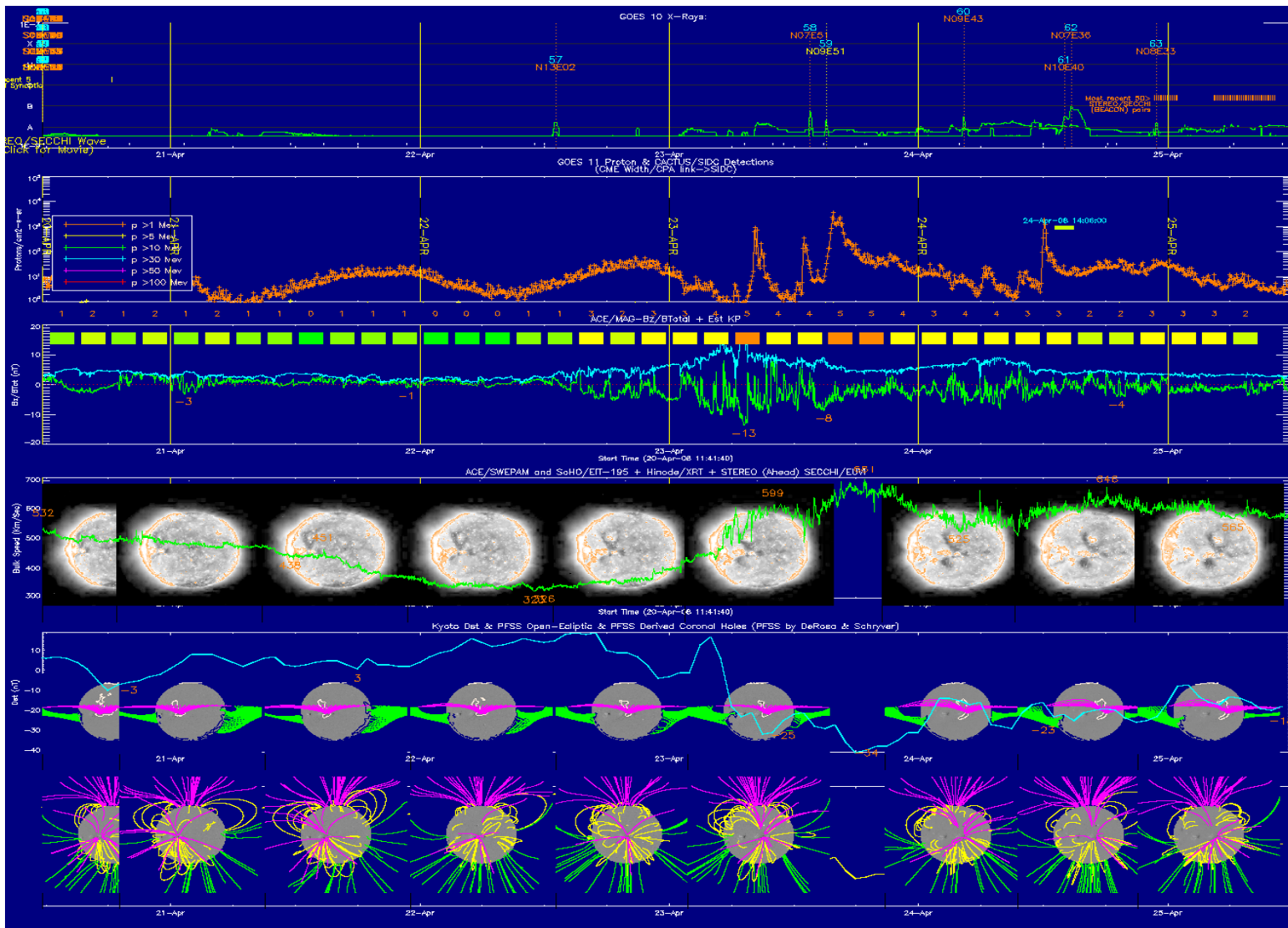
Σχήμα 43. Η χρονική μεταβολή των συνιστωσών του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου από τα διαστημόπλοια Stereo A (κόκκινο) και Stereo B (μπλε) το χρονικό διάστημα από 20 / 04 / 2008 00:00:00 UT έως 25 / 04 / 2008, 23:59:00 UT. Στην κορυφή της σελίδας δίδεται και η χρονική μεταβολή του μέτρου του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου για σύγκριση.



Σχήμα 44 . Εικόνες του Ήλιου στο υπεριώδες από τα διαστημόπλοια STEREO-B (αριστερά) και SOHO/EIT (δεξιά) το διάστημα 20 / 04/ 2008 - 25 / 04/ 2008.



Σχήμα 45 . Εικόνες του Ήλιου από το διαστημόπλοιο HINODE το διάστημα 20 / 04 / 2008 - 25 / 04 / 2008.



Σχήμα 46. Απεικόνιση και χρονική εξέλιξη βασικών παραμέτρων και ηλιακών δομών το χρονικό διάστημα 09 / 12 / 2007 έως 14 / 12 / 2007. Διακρίνουμε: i) Ροή στις SXR από τους GOES και τη θέση των κέντρων δράσης (πρώτο σχήμα) ii) τη ροή ενεργητικών πρωτονίων σε ενέργειες μεγαλύτερες του 1 MeV (δεύτερο σχήμα) iii) την ταχύτητα του Ηλιακού Ανέμου μαζί με εικόνες του Ήλιου που δείχνουν τις θέσεις των στεμματικών οπών, όπου υπάρχουν (τρίτο σχήμα) iv) μοντέλο του μαγνητικού πεδίου στον Ήλιο (τέταρτο σχήμα) v) μοντέλο του ηλιοσφαιρικού φύλλου ρεύματος μαζί με μοντέλο των στεμματικών οπών (πέμπτο σχήμα) vi) το λόγο B_z/B μαζί με το δείκτη K_p της γεωμαγνητικής δραστηριότητας (έκτο σχήμα).

Κεφάλαιο 8

Σύνοψη - συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία με τη βοήθεια δεδομένων από την αποστολή STEREO μελετήθηκαν ρεύματα του Ηλιακού Ανέμου κατά την περίοδο 2007 – 2008, ενώ όπου ήταν δυνατόν κατασκευάστηκαν οι γραμμές του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου.

Το διάστημα 2007 – 2008 βρισκόμασταν σε ηλιακό ελάχιστο. Επομένως κατά μέσο όρο οι κυρίαρχες δομές στον Ήλιο και το διαπλανητικό χώρο είναι τα ρεύματα του Ηλιακού Ανέμου. Επειδή τα όποια μεταβατικά φαινόμενα είναι λίγα συγκριτικά με το ηλιακό μέγιστο, η περίοδος του ελαχίστου ενδείκνυται για τη μελέτη των ιδιοτήτων του Ηλιακού Ανέμου.

Αρχικά έγινε προσπάθεια να εξηγηθούν, για συγκεκριμένες χρονικές περιόδους, οι παρατηρούμενες χρονικές μεταβολές του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου, καθώς και της ταχύτητας ροής, της θερμοκρασίας και της αριθμητικής πυκνότητας των πρωτονίων. Αυτό δεν είναι προφανές. Οι πηγές του Ηλιακού Ανέμου μπορεί να υποστούν μεταβολή αλλάζοντας τα χρονικά προφίλ. Η γεωμετρία των διαστημοπλοίων σε λίγες περιπτώσεις επαρκεί για να εξηγήσει τις διαφορές. Επιπλέον, αν και σε περίοδο ηλιακού ελαχίστου, τα μεταβατικά φαινόμενα δεν παύουν να υπάρχουν, μεταβάλλοντας δραστικά τον Ηλιακό Άνεμο όταν λάβουν χώρα.

Για δύο από τις περιόδους αυτές κατασκευάστηκαν οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές που βλέπουν τα δύο STEREO. Αξίζει να σημειωθεί ότι στη μία περίπτωση αν και τα διαστημόπλοια βρισκόντουσαν πολύ κοντά μεταξύ τους, οι μορφές που παρατηρήθηκαν ήταν πολύ διαφορετικές. Επιπλέον, το μαγνητικό πεδίο απέκλινε σημαντικά από αυτό που προβλέπει ο Parker και είχε μια μάλλον ακανόνιστη μορφή.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Acuña M.H., Curtis D., Scheifele J.L., Russell C.T., Schroeder P., Szabo A., Luhmann J.G.: (2008) *The STEREO/IMPACT Magnetic Field Experiment*, **Space Sci Rev** **136**, 203–226, DOI 10.1007/s11214-007-9259-2.
2. Aschwanden, M. J. (2006) *Physics of the Solar Corona. An Introduction with Problems and Solutions*. Berlin: Springer.
3. Aschwanden M., Benz A., Dennis B. & Schwartz R. (1995) *Solar Electron Beams Detected in Hard X-Rays and Radio Waves*, **The Astrophysical Journal** **455**, 347-365.
4. Bale S.D., Reiner M.J., Bougeret J. L., Kaiser M. L., Krucker S., Larson D.E., Lin R. P. (1999) *The source region of an interplanetary type II radio burst*, **Geophys. Res. Lett.**, **26**, 1573.
5. Biermann, L. (1951) *Kometenschweife und solare Korpuskularstrahlung*, **Z. Astrophys.**, **29**, 274.
6. Birkeland, K. (1908) *The Norwegian aurora polaris expedition 1902–1903, vol. 1: On the cause of magnetic storms and the origin of terrestrial magnetism*, H. Ashebourg, Christiania.
7. Bougeret J.L., Goetz K., Kaiser M.L., Bale S.D., Kellogg P.J., Maksimovic M., Monge N., Monson S.J., Astier P.L. Davy S., Dekkali M., Hinze J.J., Manning R.E., Aguilar-Rodriguez E., Bonnín X., Briand C., Cairns I.H., Cattell C.A., Cecconi B., Eastwood J., Ergun R.E., Fainberg J., Hoang S., Huttunen K.E.J., Krucker S., Lecacheux A., MacDowall R.J., Macher W., Mangeney A., Meetre C.A., Moussas X., Nguyen Q.N., Oswald T.H., Pulupa M., Reiner M.J., Robinson P.A., Rucker H., Salem C., Santolik O., Silvis J.M., Ullrich R., Zarka P., Zouganelis I. (2008) *S/WAVES: The Radio and Plasma Wave Investigation on the STEREO Mission*, **Space Sci Rev** **136**: 487–528, DOI 10.1007/s11214-007-9298-8.
8. A. Buffington, B. V. Jackson, and C. M. Korendyke (1996) *Wide-angle stray-light reduction for a spaceborne optical hemispherical imager*, **Appl. Opt.** **35**, 6669-6673.
9. Caroubalos C., Poquérousse M., Bougeret J.-L., Crépel R. (1987) *Radio evidence for a magnetic mirror effect on beams of subrelativistic electrons in the solar corona*, **ApJ**, **319**, 10.

10. Collinson G.A., Dorelli J.C., Avakov L.A., Lewis G.R., Moore T.E., Pollock C., Kataria D.O., Bedington R., Arridge C.S., Chornay D.J., Gliese U., Mariano A., Barrie A.C., Tucker C., Owen C.J., Walsh A.P., Shappirio M.D., Adrian M.L. (2012) *The geometric factor of electrostatic plasma analyzers: A case study from the Fast Plasma Investigation for the Magnetospheric Multiscale mission*, **Rev. Sci. Instrum.** **83**, 033303, doi: 10.1063/1.3687021.
11. Cranmer, S. R. (2009) *Coronal Holes*, **Living Rev. Sol. Phys.**, **6**, 3.
12. Eastwood J. P., Wheatland M. S., Hudson H. S., Krucker S., Bale S. D., Maksimovic M., Goetz K., Bougeret J.-L. (2010) *On the brightness and waiting-time distributions of a type-III radio storm observed by STEREO/WAVES*, **ApJL** **708**, 2, doi:10.1088/2041-8205/708/2/L95.
13. Galvin A.B., Kistler L.M., Popecki M.A., Farrugia C.J., Simunac K.D.C., Ellis L., Möbius E., Lee M.A., Boehm M., Carroll J., Crawshaw A., Conti M., Demaine P., Ellis S., Gaidos J.A., Googins J., Granoff M., Gustafson A., Heirtzler D., King B., Knauss U., Levasseur J., Longworth S., Singer K., Turco S., Vachon P., Vosbury M., Widholm M., Blush L.M., Karrer R., Bochler P., Daoudi H., Etter A., Fischer J., Jost J., Opitz A., Sigrist M., Wurz P., Klecker B., Ertl M., Seidenschwang E., Wimmer-Schweingruber R.F., Koeten M., Thompson B., Steinfeld D. (2008) *The Plasma and Suprathermal Ion Composition (PLASTIC) Investigation on the STEREO Observatories*, **Space Sci Rev** **136**, 437–486, DOI 10.1007/s11214-007-9296-x.
14. Gosling, J.T., Asbridge, J.R., Bame, S.J., Feldman, W.C. (1978) *Solar wind stream interfaces*, **J. Geophys. Res.** **83**, 1401-1412.
15. Gosling, J.T., Bame, S.J., McComas, D.J., Phillips, J.L., Pizzo, V.J., Goldstein, B.E., Neugebauer, M. (1993) *Latitudinal Variation of Solar Wind Corotating Stream Interaction Regions*, **Geophys. Res. Lett.** **20**, 2789-2792.
16. Hillaris A., Alissandrakis C.E. & Vlahos L. (1988) *Dynamics of sub-relativistic electron beams in magnetic traps: A Model for solar N-bursts*, **Astronomy & Astrophysics** **195**, 301-309.
17. Hoffmeister, C. (1944) *Physicalische Untersuchungen auf Kometen II, Die Bewegung der Schweifmaterie und die Repulsivkraft der Sonne beim Kometen*, **Z. Astrophys.**, **23**, 1.

18. Howard R.A., Moses J.D., Vourlidas A., Newmark J.S., Socker D.S., Plunkett S.P., Korendyke C.M., Cook J. C., Hurley A., Davila J. M., Thompson W. T., St Cyr O.C., Mentzell E., Mehalick K., Lemen J.R., Wuelser J.P., Duncan D.W., Tarbell T.D., Harrison R. A., Waltham N. R., Lang J., Davis C.J., Eyles C.J., Halain J.P., Defise J.M., Mazy E., Rochus P., Mercier R., Ravet M. F., Delmotte F., Auchere F., Delaboudiniere J.P., Bothmer V., Deutsch W., Wang D., Rich N., Cooper S., Stephens V., Maahs G., Baugh R., McMullin D. (2008) *Sun Earth Connection Coronal and Heliospheric Investigation (SECCHI)*, **Space Sci Rev** **136**, Numbers 1-4 (2008), 67-115, DOI: 10.1007/s11214-008-9341-4.

19. Jiříčka K., Karlický M., Mészárosová H., Snížek V. (2001) *Global statistics of 0.8-2.0 GHz radio bursts and fine structures observed during 1992-2000 by the Ondřejov radiospectrograph*, **Astronomy & Astrophysics**, **375**, 243-250.

20. Kallenrode M.-B., *Space Physics*, 1st ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, 1998.

21. Kaiser M. (2009) *Science and Mission Overview*, JOHNS HOPKINS APL TECHNICAL DIGEST, VOLUME 28, NUMBER 2.
<http://techdigest.jhuapl.edu/TD/td2802/Kaiser.pdf>

22. Kilpua E.K.J., Liewer P.C., Farrugia C., Luhmann J.G., Möstl C., Li Y., Liu Y., Lynch B.J., Russell C.T., Vourlidas A., Acuna M.H., Galvin A.B., Larson D., Sauvaud J.A. (2009) *Multispacecraft observations of magnetic clouds and their solar origins between 19 and 23 May 2007*, **Sol. Phys.**, **254**, 325.

23. Luhmann J.G., Curtis D.W., Schroeder P., McCauley J., Lin R.P., Larson D.E., Bale S.D., Sauvaud J.-A., Aoustin C., Mewaldt R.A., Cummings A.C., Stone E.C., Davis A.J., Cook W.R., Kecman B., Wiedenbeck M.E., Von Rosenvinge T., Acuna M.H., Reichenthal L.S., Shuman S., Wortman K.A., Reames D.V., Mueller-Mellin R., Kunow H., Mason G.M., Walpole P., Korth A., Sanderson T.R., Russell C.T., Gosling J.T. (2008) *STEREO IMPACT Investigation Goals, Measurements, and Data Products Overview*, **Space Sci Rev** **136**, 117– 184, DOI 10.1007/s11214-007-9170-x.

24. Mann G., Classen T. & Aurass H. (1995) *Characteristics of coronal shock waves and solar type II radio bursts*, **Astronomy & Astrophysics**, **295**, 775-781.

25. Melrose, D.B. (1987) *Plasma emission: an overview*, **Sol. Phys.**, **111**, 89.

26. Meyer-Vernet, N., and C. Perche (1989) *Tool kit for antennae and thermal noise near the plasma frequency*, **J. Geophys. Res.**, **94**, 2405–2415.
27. Parker, E. N. (1958) *Dynamics of the interplanetary magnetic field*, **Astrophys. J.**, **128**, 664.
28. Roberts J.A. (1959) *Solar Radio Bursts of Spectral Type II*, **Australian Journal of Physics** **12**, 327.
29. Robinson (1977a) *A study of Type V solar radio bursts. I – Observations*, **Sol. Phys.**, **55**, 459-472.
30. Shanmugaraju A., Moon Y.-J., Dryer M. & Umapathy S. (2003) *An Investigation of Solar Maximum Metric Type II Radio Bursts: Do Two Kinds of Coronal Shock Sources Exist?*, **Sol. Phys.**, **215**, 161-184.
31. Smerd, S.F., Sheridan, K.V., & Stewart, R.T. (1975) *Split-band structure in type II radio bursts from the sun*, **ApL**, **Vol. 16**, no. 1, 23-28.
32. Tidman D.A., Birmingham T.J. & Stainer H.M. (1966) *Line Splitting of Plasma and Solar Radio Outbursts*, **Astrophys. J.**, **146**, 207.
33. Victor A. L., Zurbuchen T. H., Gallimore, A. D. 2006 *A Top Hat Electrostatic Analyzer For Far-Field Electric Propulsion Plume Diagnostics*, **Review of Scientific Instruments**, **77**, 013505.
34. Wang M., Fu Q., Xie R. & Duan Ch. (2001b) *Centimetric Type N and Type M Bursts*, **Astronomy & Astrophysics**, **380**, 318-322.
35. Weiss A.A. (1963) *The Type IV Solar Radio Burst at Metre Wavelengths*, **Australian Journal of Physics** **16**, 526.
36. Weiss A. & Stewart R.T. (1965) *Solar Radio Bursts of Spectral Type V*, **Australian Journal of Physics**, **18**, 143.
37. White, S. M. (2007) *Solar Radio Bursts and Space Weather*, **Asian J. Phys.**, **16**, 189.
38. Wimmer-Schweingruber, R.F., von Steiger, R., Paerli, R. (1997) *Solar wind stream interfaces in corotating interaction regions: New SWICS/ Ulysses results*, **J. Geophys. Res.** **102**, A8, PP. 17,407-17,417, doi:10.1029/97JA00951.

39. Zaitsev V.V. (1966) *A Theory for Type II Bursts of Solar Radio Emission*, **Soviet Astronomy** **9**, 572.
40. Zouganelis, I. (2008), *Measuring suprathermal electron parameters in space plasmas: Implementation of the quasi-thermal noise spectroscopy with kappa distributions using in situ Ulysses/URAP radio measurements in the solar wind*, **J. Geophys. Res.**, **113**, A08111, doi:10.1029/2007JA012979.
41. Ξ. Δ. Μουσάς & Π. Πρέκα – Παπαδήμα 2003 *Φυσική Διαστήματος*, Σημειώσεις από τις Πανεπιστημιακές παραδόσεις, Αθήνα.
42. Κ. Μπουρατζής 2001 *Μελέτη Παρατηρήσεων από το Ηλιακό Ραδιοφασματογράφο ARTEMIS IV και Σχέση αυτών με Εκτοξεύσεις Στεμματικής Μάζας (CME) κατά τη Διάρκεια του Μεγίστου της Ηλιακής Δραστηριότητας (1998-2000)*, Εργασία στα πλαίσια Μ.Δ.Ε., Αθήνα.
43. Πρέκα-Παπαδήμα Π., Δανέζης Μ., Θεοδοσίου Σ., Καργιολάκη Δ. (2009) *Στα μονοπάτια του Ήλιου Εισαγωγή στην Ηλιακή Φυσική*, Εκδόσεις Δίαυλος.
44. Π. Τσιτσιπής 2005 *Ανάδειξη χαρακτηριστικών ηλιακών ραδιοεκπομπών*, Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα.

ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ

http://spaceweather.com/images2007/13nov07/coronalhole_hinode_bla nk.gif?PHPSESSID=ped167n1gr7haqmvifeopo78d3

http://sohowww.nascom.nasa.gov/gallery/images/large/xmascomet_pre v.jpg

<http://sunbase.nict.go.jp/solar/denpa/hiras/types.html>

http://stereo.gsfc.nasa.gov/img/Delta_STEREO_launch.jpg

<http://stereo.sr.unh.edu/mission/index.html>

<http://www.sciencedaily.com/releases/2011/02/110207102145.htm>

http://www.nasa.gov/mission_pages/stereo/spacecraft/index.html

http://aten.igpp.ucla.edu/forms/stereo/level2_plasma_and_magnetic_fie ld.html

http://www.lmsal.com/solarsoft/latest_events/http://xrt.cfa.harvard.edu/d ata/synoptics.php

