



Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Τμήμα Φυσικής

Τομέας Αστροφυσικής, Αστρονομίας και Μηχανικής

**Δείκτης Μαγνητοσφαιρικής Παραμόρφωσης:
Μέθοδοι υπολογισμού και εφαρμογή στη μαγνητόσφαιρα
του Κρόνου με τη χρήση μετρήσεων του διαστημοπλοίου
Cassini**

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Κωνσταντίνα Μουτσουρούφη

(AM. 201537)

Επιβλέπων καθηγητής: Ιωάννης Α. Δαγκλής

Συνεπιβλέπων: Δρ. Νικόλαος Σέργης

Ιούνιος 2018

Πρόλογος - Ευχαριστίες

Αυτή η διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών του τομέα Αστροφυσικής, Αστρονομίας και Μηχανικής του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά και με όλη μου την καρδιά τον Δρ. Νίκο Σέργη, Ερευνητή στο Γραφείο Διαστημικής Έρευνας και Τεχνολογίας της Ακαδημίας Αθηνών για την αμέριστη, άοκνη και αδιάλειπτη βοήθεια και καθοδήγηση. Αντιμετώπισε όλες μου τις απορίες με υπομονή και κατανόηση και με βοήθησε να ακουμπήσω λιγάκι τον υπέροχο πλανήτη Κρόνο. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή του Πανεπιστημίου Αθηνών κ. Ιωάννη Δαγκλή για τα πολύτιμα μαθήματα, τη δημιουργική κριτική και την συνεχή έμπνευση. Σημαντικό ρόλο στην πορεία μου στο Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών έπαιξε η Επίκουρη Καθηγήτρια του Πανεπιστημίου Αθηνών κα. Παναγιώτα Πρέκα - Παπαδήμα την οποία και ευχαριστώ, καθώς και τον Δρ. Γεώργιο Μπαλάση, Ερευνητή του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών για τις παρατηρήσεις και τα σχόλια.

Ένα ακόμα ευχαριστώ ανήκει στους αγαπημένους μου ανθρώπους που πίστεψαν σε εμένα και ενθάρρυναν την κάθε μου επιλογή. Πέρα και πάνω απ' όλα θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου Νίκο και Κωνσταντία για την προσφορά και την αγάπη τους. Είναι οι δίδυμοι πυλώνες μου, πάνω στους οποίους μπορώ πάντα να στηριχθώ.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή.....	7
2. Κρόνος (γενικά χαρακτηριστικά).....	11
2.1. Το ενδογενές μαγνητικό πεδίο του Κρόνου	12
2.2. Η αποστολή Cassini	14
2.3. Το μαγνητόμετρο (MAG)	17
2.4. Σύγκριση πλανητικών μαγνητοσφαιρών.....	20
2.5. Η δυναμική της μαγνητόσφαιρας του Κρόνου.....	25
2.6. Δείκτες μαγνητικής παραμόρφωσης	30
2.7. Η γνώση από προηγούμενες μελέτες	31
3. Μοντέλα αναπαράστασης του μαγνητικού πεδίου Κρόνου.....	33
3.1. Το μοντέλο του μαγνητικού διπόλου (Bdip).....	34
3.2. Το μοντέλο Achilleos – Guio – Arridge (UCL/AGA).....	35
3.3. Τοποθέτηση του προβλήματος – ερωτήματα.....	36
4. Μεθοδολογία & Αποτελέσματα.....	39
4.1. Η κατασκευή του Δείκτη – Κριτήρια Επιλογής.....	39
4.2. Εφαρμογή Δεδομένων στο Μοντέλο Μαγνητικού Διπόλου	41
4.3. Εφαρμογή δεδομένων στο μοντέλο UCL/AGA.....	53
4.4. Σύγκριση αποτελεσμάτων των μοντέλων	65
4.5. Σύγκριση δείκτη με επεισόδια SEP.....	68
4.6. Συζήτηση – Συμπεράσματα	73
5. Παράρτημα.....	76
5.1. Δείκτης Μαγνητοσφαιρικής Παραμόρφωσης (μοντέλο μαγνητικού διπόλου).....	76
5.2. Δείκτης Μαγνητοσφαιρικής Παραμόρφωσης (μοντέλο UCL/AGA)	79
5.3. Αναπαράσταση τροχιών B ως 213 (μοντέλο μαγνητικού διπόλου).....	80
5.4. Αναπαράσταση τροχιών C ως 26 (μοντέλο UCL/AGA)	94
References.....	97

1. Εισαγωγή

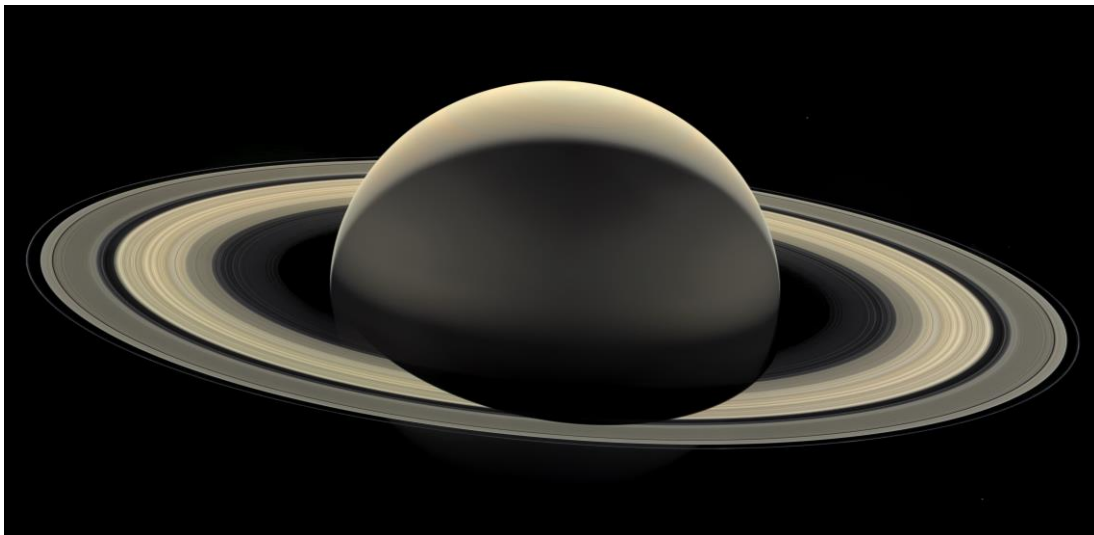
Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο μελέτης τη μαγνητόσφαιρα του Κρόνου και στόχος της είναι η εκτίμηση των δυναμικών μεταβολών της. Για αυτό τον λόγο ορίζεται και υπολογίζεται ένας Δείκτης Μαγνητοσφαιρικής Παραμόρφωσης χρησιμοποιώντας μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου που ελήφθησαν από το διαστημόπλοιο Cassini στο ισημερινό επίπεδο της εσωτερικής και μέσης μαγνητόσφαιρας.

Πριν την άφιξη του Cassini στον Κρόνο υπήρχε μόνο γενική γνώση της μαγνητόσφαιρας βασισμένη στα σύντομα περάσματα των διαστημοπλοίων Pioneer 11 και Voyager 1&2 στα τέλη της δεκαετίας του 1970 και τις αρχές της δεκαετίας του 1980, τα οποία ωστόσο παρέμεναν λίγες μόνο μέρες εντός της μαγνητόσφαιρας του Κρόνου. Οι εκτενέστερες και πιο λεπτομερείς μετρήσεις που διαθέτουμε πλέον για το σύστημα του Κρόνου προέρχονται από το διαστημόπλοιο Cassini και άλλαξαν πλήρως την κατανόηση της μαγνητόσφαιρας του πλανήτη, αφήνοντας ωστόσο και πολλά αναπάντητα ερωτήματα.

Η μαγνητόσφαιρα ενός πλανήτη σμιλεύεται από τις δυνάμεις που επιδρούν σε αυτή, εσωτερικές και εξωτερικές. Εξωτερική αιτία παραμόρφωσης είναι ο ηλιακός άνεμος και οι μεταβολές του. Εσωτερικές πιέσεις στην μαγνητόσφαιρα προκαλούνται από το πλάσμα, θερμό και ψυχρό στην περιστρεφόμενη μαγνητόσφαιρα και από το ενδογενές μαγνητικό πεδίο του πλανήτη. Όταν οποιαδήποτε από αυτές τις αιτίες παραμόρφωσης μεταβληθεί, η διαμόρφωση του μαγνητικού πεδίου ακόμη και βαθιά μέσα στη μαγνητόσφαιρα αναπροσαρμόζεται, καθώς οι βαθμίδες πίεσης μεταβάλλονται για να επαναφέρουν την ισορροπία στο σύστημα.

Οι δυναμικές μεταβολές της μαγνητόσφαιρας του Κρόνου μπορούν να εκτιμηθούν, αφού αρχικά υπολογιστεί η μέση κατάσταση του συστήματος με την οποία στη συνέχεια θα συγκρίνουμε την εκάστοτε μετρούμενη κατάσταση. Όταν η μαγνητόσφαιρα παραμορφώνεται από μεταβολές στις εξωγενείς, ή ενδογενείς πιέσεις προς το σύστημα, οι δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου παραμορφώνονται αντιστοίχως σε ολόκληρο σχεδόν το εύρος της μαγνητόσφαιρας.

Στην παρούσα εργασία θα ορίσουμε και θα υπολογίσουμε ένα δείκτη της μαγνητοσφαιρικής παραμόρφωσης χρησιμοποιώντας μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου που ελήφθησαν από το διαστημόπλοιο Cassini στο ισημερινό επίπεδο της μαγνητόσφαιρας, ανάμεσα σε 4 και 8 ακτίνες πλανήτη (R_s). Ο προτεινόμενος δείκτης είναι ανάλογος με τον δείκτη Dst που χρησιμοποιείται για τη Γήινη μαγνητόσφαιρα και το δείκτη μαγνητοσφαιρικής παραμόρφωσης που δημιουργήθηκε για το Δία από τα δεδομένα του Galileo. Ο δείκτης αναγνωρίζει ασυνήθιστες αποκλίσεις της μαγνητόσφαιρας από τη μέση κατάσταση και τις διακρίνει από μικρότερες αποκλίσεις που είναι συνεπείς με το μέγεθος και τη διάρκεια των αναμενόμενων, λόγω των συνήθων διακυμάνσεων στον ηλιακό άνεμο. Κατ' αυτόν τον τρόπο, ο υπολογισμός του κατά μήκος της τροχιάς του διαστημοπλοίου μας πληροφορεί για το βαθμό συμπίεσης της μαγνητόσφαιρας τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή, παρά το γεγονός ότι οι μετρήσεις προέρχονται από ένα μόνο διαστημόπλοιο το οποίο μάλιστα βρίσκεται μακριά από τη μαγνητόπαυση, η ανίχνευση της οποίας αποτελεί πάντοτε αξιόπιστη ένδειξη της κατάστασης στην οποία βρίσκεται η μαγνητόσφαιρα ενός πλανήτη. Επιπροσθέτως, η τιμή του δείκτη (και κατ'έκταση η γνώση της γενικής κατάστασης του συστήματος) μας δίνει τη δυνατότητα να αξιολογήσουμε με καλύτερο τρόπο τις επιτόπιες μετρήσεις που λαμβάνει το διαστημόπλοιο και τα φαινόμενα που καταγράφει.



Εικόνα 1: Πανοραμική άποψη του Κρόνου από το διαστημόπλοιο Cassini Huygens. (Image credit NASA/JPL-Caltech/Space Science Institute)

Περίληψη περιεχομένων:

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από την εισαγωγή, τρία κύρια κεφάλαια, το παράρτημα και τις αναφορές. Περιληπτικά:

Κεφάλαιο 2: Γίνεται σύντομη αναφορά στα γενικά χαρακτηριστικά του Κρόνου και αναπτύσσεται το ενδογενές μαγνητικό του πεδίο. Επίσης αναπτύσσεται η αποστολή του διαστημοπλοίου Cassini/Huygens, και οι σημαντικότερες ανακαλύψεις της αναφορικά με τη μαγνητόσφαιρα του Κρόνου. Αναλύονται οι επιστημονικοί στόχοι του μαγνητομέτρου MAG με το οποίο λήφθηκαν τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται στη διπλωματική εργασία και γίνεται περιγραφή της λειτουργίας του. Γίνεται αναφορά σε πλανητικές μαγνητόσφαιρες του Ηλιακού μας Συστήματος και αναπτύσσονται οι μηχανισμοί που τις επηρεάζουν. Επίσης αναπτύσσεται η δυναμική της μαγνητόσφαιρας του Κρόνου και υπογραμμίζεται η δυσκολία να περιγραφεί πλήρως η τοπολογία της. Στη συνέχεια γίνεται μνεία σε δείκτες μαγνητοσφαιρικής παραμόρφωσης που χρησιμοποιούνται στη Γη και στον Δία. Τέλος αναλύεται προηγούμενη μελέτη (Leisner et al 2007) που παρουσίασε για πρώτη φορά Δείκτη Μαγνητοσφαιρικής Παραμόρφωσης για τον Κρόνο.

Κεφάλαιο 3: Αναλύονται τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση της τοπολογίας της Κρόνιας μαγνητόσφαιρας. Σε αυτή τη μελέτη γίνεται χρήση δύο μοντέλων:

- Το μοντέλο του μαγνητικού διπόλου (στατικό μοντέλο)
- Το μοντέλο Achilleos – Guio – Arridge (δυναμικό μοντέλο).

Τέλος γίνεται η τοποθέτηση του προβλήματος, αναλύονται οι στόχοι της διπλωματικής εργασίας και τα ερωτήματα που θα επιχειρηθεί να απαντηθούν σε αυτή.

Κεφάλαιο 4: Αυτό το κεφάλαιο περιλαμβάνει τα κριτήρια επιλογής και την ανάλυση των δεδομένων και την εφαρμογή τους στα δύο μοντέλα. Εξάγεται δείκτης για τις τροχιές B ως 231 του διαστημοπλοίου Cassini που συνέβησαν σε χρονικό διάστημα από το 2004 ως το 2016. Γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ τους και με τα αποτελέσματα του Leisner. Ο δείκτης αξιολογείται ως προς διάφορα

επεισόδια SEP που συνέπεσαν με την περίαψη των υπό μελέτη τροχιών. Επίσης γίνεται αντιπαράθεση των τιμών του δείκτη ως προς τον Ηλιακό Κύκλο. Η διπλωματική αυτή εργασία ολοκληρώνεται με συζήτηση των αποτελεσμάτων, καταγράφονται τα συμπεράσματα πάνω στο επιστημονικό αντικείμενο και τίθενται μελλοντικοί στόχοι.

Τέλος στο **Παράρτημα** παρατίθενται αναλυτικά οι πίνακες των τιμών των εξαχθέντων δεικτών και η αναπαράσταση των τροχιών βάσει των οποίων εξήχθησαν (Εικόνες 47-65).

2. Κρόνος (γενικά χαρακτηριστικά)

Ο Κρόνος είναι ένας αέριος γίγαντας πλανήτης. Διαθέτει ένα πολύπλοκο και εντυπωσιακό σύστημα που αποτελείται από τους χαρακτηριστικούς δακτυλίους και 62 δορυφόρους. Ο πλανήτης αποτελείται κυρίως από αέριο υδρογόνο και ήλιο, διαθέτει ωστόσο ένα μικρό βραχώδη πυρήνα. Είναι ο έκτος κατά σειρά πλανήτης από τον Ήλιο σε μέση απόσταση 9,5 AU και χρειάζεται 29,5 έτη για μια πλήρη περιφορά. Η διαφορική περιστροφή του γύρω από τον άξονά του έχει περίοδο 10,65 ώρες

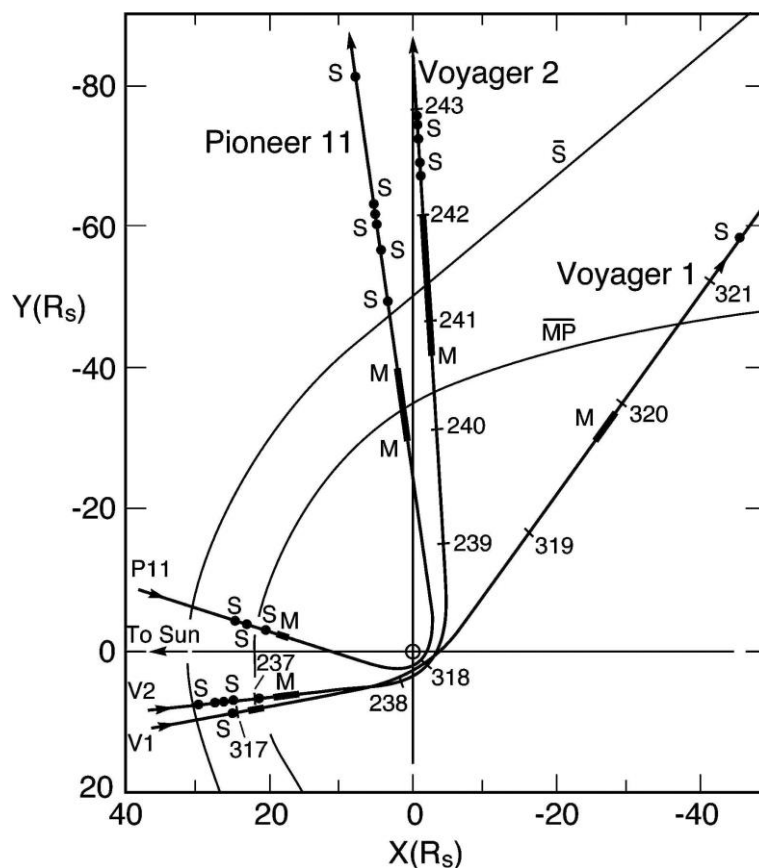
Οι δορυφόροι του παρουσιάζουν εξαιρετικό ενδιαφέρον, πολυμορφία και ποικιλία. Χαρακτηριστικοί είναι ο Τιτάνας, που διαθέτει θάλασσες υγρού μεθανίου και πυκνή ατμόσφαιρα, ο Εγκέλαδος που με τους πίδακες υδρατμών στο νότιο πόλο του, εμπλουτίζει με πλάσμα τη μαγνητόσφαιρα. Άλλοι δορυφόροι είναι η Ρέα, η Διώνη και ο Ιαπετός. Εντυπωσιακοί είναι και οι μικρότεροι δορυφόροι, που στην πραγματικότητα είναι αστεροειδείς βαρυτικά δεσμευμένοι από τον Κρόνο, όπως ο Δάφνις, η Πανδώρα και η Παλλήνη.

Το σύστημα των δακτυλίων περιέχει εννέα συνεχείς κυρίους δακτυλίους και τρεις ασυνέχειες/χάσματα. Αποτελούνται κυρίως από κομμάτια πάγου και βράχων, ενώ η όλη δομή είναι εξαιρετικά λεπτή, με πάχος από 50 ως 500 μέτρα.

Πριν την άφιξη του Cassini στον Κρόνο είχαμε μόνο γενική γνώση της μαγνητόσφαιρας βασισμένη στα σύντομα περάσματα των διαστημοπλοίων Pioneer και Voyager 1&2 στα τέλη της δεκαετίας του 1970 και τις αρχές της δεκαετίας του 1980, τα οποία ωστόσο πέρασαν λίγες μόνο μέρες εντός της μαγνητόσφαιρας του Κρόνου. Παρόλα αυτά μας έδωσαν μια πολύ καλή γενική κατανόηση της μαγνητοσφαιρικής διαμόρφωσης σε μεγάλη κλίμακα. Ο Κρόνος έχει ένα διπολικό ενδογενές μαγνητικό πεδίο με τον άξονα του διπόλου να ευθυγραμμίζεται ακριβώς με τον άξονα της πλανητικής περιστροφής (μέσα σε περίπου 1°). Το ισημερινό μαγνητικό πεδίο ($B_S \approx 2 \times 10^{-5} \text{T}$) είναι πολύ κοντά στο ισημερινό μαγνητικό πεδίο της Γης ($B_E \approx 3 \times 10^{-5} \text{T}$) και περίπου μια τάξη μεγέθους μικρότερης από εκείνη του Δία ($B_J \approx 4 \times 10^{-4} \text{T}$).

2.1. Το ενδογενές μαγνητικό πεδίο του Κρόνου

Το μαγνητικό πεδίο του Κρόνου περιστρέφεται με τον πλανήτη. Στη Γη και στον Δία τα μαγνητικά πεδία είναι ελαφρώς κεκλιμένα σε σχέση με τον άξονα περιστροφής του πλανήτη, αλλά το μαγνητικό πεδίο του Κρόνου είναι σχεδόν τέλεια προσανατολισμένο με τον άξονα περιστροφής του πλανήτη. Η δομή και η ένταση του μαγνητικού πεδίου σε διαφορετικές περιοχές της μαγνητόσφαιρας μας οδηγούν σε συμπεράσματα για την εσωτερική δομή του Κρόνου και αποκαλύπτουν άγνωστες λεπτομέρειες για τον τρόπο που ο πλανήτης αλληλεπιδρά με τον ηλιακό άνεμο.



Εικόνα 2: Οι τροχιές του Pioneer 11, και των διαστημοπλοίων Voyager 1, και Voyager 2 όπως προβάλλονται στο ισημερινό επίπεδο του Κρόνου. Φαίνονται επίσης οι διαβάσεις του κρουστικού σοκ (S) και της μαγνητόπαυσης (MP). (Αναπαραγωγή από το βιβλίο Saturn from Cassini Huygens)

Οι πρώτες επί τόπου μετρήσεις του εσωτερικού μαγνητικού πεδίου του Κρόνου έγιναν από το Pioneer 11 το 1979. Σε συνδυασμό με τις μετρήσεις από τα δύο Voyager, οι πρώτες παρατηρήσεις παρείχαν μια εξαιρετικά ακριβή εικόνα για το εσωτερικό μαγνητικό πεδίο του Κρόνου (Εικόνα 2), που περιγράφεται ως ελαφρώς

μετατοπισμένο μαγνητικό δίπολο, το οποίο είναι σχεδόν ευθυγραμμισμένο με τον άξονα περιστροφής του πλανήτη. Λεπτομερείς μελέτες των παρατηρήσεων του Cassini επιβεβαίωσαν τα αρχικά συμπεράσματα και πρόσθεσαν κάποιες επιπλέον λεπτομέρειες.

Εντός της μαγνητόσφαιρας μπορεί να βρεθεί περιοχή όπου ο όγκος των ρευμάτων είναι ασθενής και το πεδίο μπορεί να θεωρηθεί κατά προσέγγιση αστρόβιλο. Πρόκειται για την περιοχή όπου η επίδραση των εξωτερικών ρευμάτων μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα. Υπό αυτή την προσέγγιση το πεδίο σε αυτή την περιοχή μπορεί να γραφτεί ως η βαθμίδα ενός μαγνητικού βαθμωτού δυναμικού ($\mathbf{B} = -\nabla\Psi$), χρησιμοποιώντας σφαιρικές αρμονικές, που ικανοποιούν την εξίσωση Laplace ($\nabla^2\Psi = 0$):

$$\Psi(r, \theta, \varphi) = \alpha \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} \sum_{m=0}^{\infty} P_n^m(\cos\theta) [g_n^m \cos(m\varphi) + h_n^m \sin(m\varphi)] \quad (1)$$

όπου a η ακτίνα του πλανήτη και r , θ και φ είναι οι σφαιρικές πλανητοκεντρικές συντεταγμένες, ενώ g_n^m και h_n^m οι συντελεστές Gauss του πεδίου που υποδηλώνουν τη συνεισφορά της κάθε αρμονικής στο συνολικό πεδίο. Οι τιμές n είναι ο βαθμός και m η τάξη του αναπτύγματος. Η επιλογή μιας Schmidt ημί-κανονικοποίησης επιτρέπει τις συγκρίσεις των όρων. Για τον καθορισμό των συντελεστών Gauss, συνήθως χρησιμοποιείται η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων.

Το μοντέλο έχει μοναδική λύση Ψ , αν και μόνο αν οι μετρήσεις καλύπτουν πλήρως μια κλειστή επιφάνεια περί της πηγής. Οι τροχιές του διαστημοπλοίου είναι καμπύλες στο χώρο και ως εκ τούτου οι τιμές των συντελεστών Gauss για αυτά τα μοντέλα δεν είναι μονοσήμαντες. Μπορεί να παρατηρηθεί σύζευξη, ή εξάρτηση μεταξύ των συντελεστών. Και ενώ το μοντέλο μπορεί να δώσει εξαιρετική προσαρμογή κοντά σε συγκεκριμένη τροχιά, μπορεί να είναι πολύ λάθος μακριά από αυτή. Επιπλέον απαιτούνται πολλές τροχιές, σε διάφορες ακτινικές αποστάσεις, κρονογραφικά μήκη και πλάτη ώστε να υπάρξει καλή εκτίμηση των σημαντικότερων συντελεστών Gauss (Εικόνα 3).

Οι πρώτοι τρεις συντελεστές Gauss για $n=1$ θεωρούνται τα μοναδιαία διανύσματα του μαγνητικού διπολικού πεδίου κατά τους άξονες X, Y και Z. Η διπολική μαγνητική ροπή είναι:

$$M_0 = \frac{4\pi\alpha^3}{\mu_0} \sqrt{(g_1^0)^2 + (g_1^1)^2 + (h_1^1)^2} \quad (2)$$

Όπου μ_0 η μαγνητική διαπερατότητα του κενού.

Μια ιδιότητα που έχουν τα ενδογενή μαγνητικά πεδία με μεγάλες τετραπολικές ($n=2$) συνιστώσες, είναι ότι το ενεργό δίπολο είναι μετατοπισμένο κάθετα εκτός του ισημερινού επιπέδου, κατά μία απόσταση $z_0 = ag_2^0/2g_1^0$. Αυτή η μετατόπιση παρατηρείται κοντά στον ισημερινό του Κρόνου και πρέπει να ληφθεί υπόψιν κατά τη μοντελοποίηση.

Πλήθος μοντέλων έχουν δημιουργηθεί για την ακριβέστερη αναπαράσταση του μαγνητικού πεδίου του Κρόνου με βάση των μετρήσεων των Pioneer 11, Voyager 1&2, αλλά και των πρώτων τροχιών του Cassini.

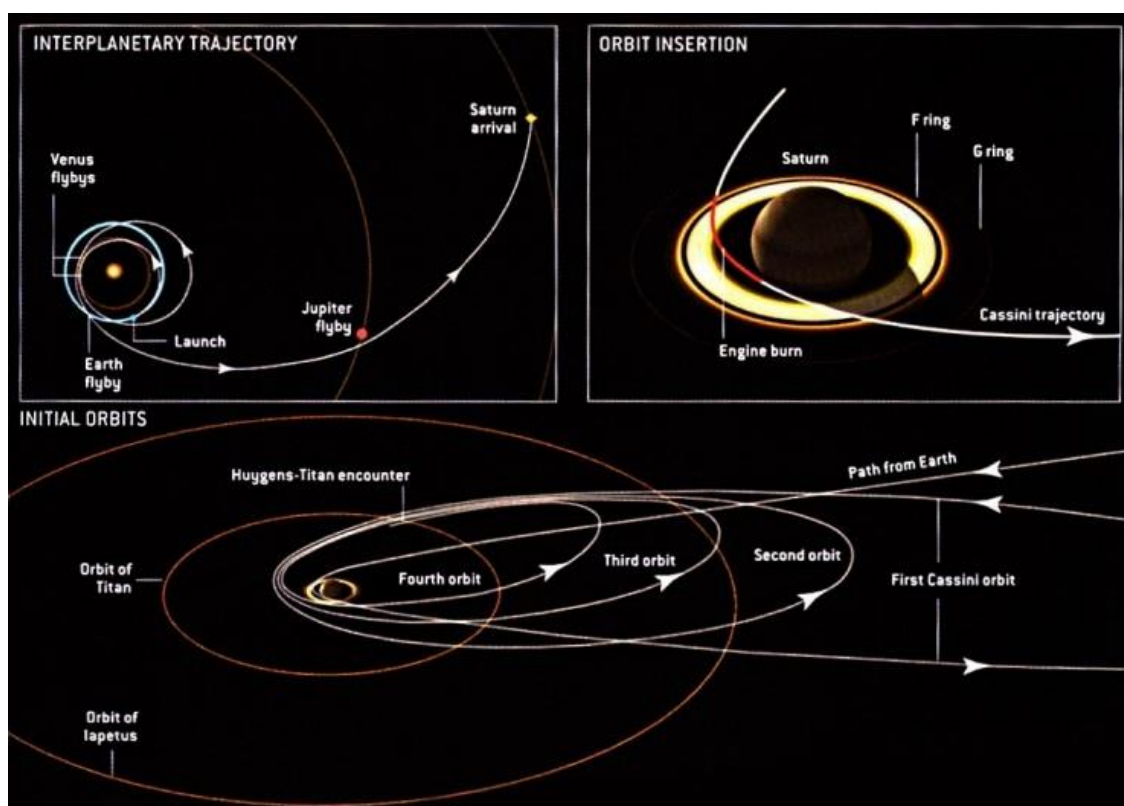
	Z_3 [40]	P ₁₁ 84 [50]	SPV [51]	ZMP [21]	Cassini SOI [57]	Cassini Zonal
g_1^0 [nT]	21535	21140	21160	21431	21084	21162
g_2^0 [nT]	1642	1600	1560	2403	1544	1514
g_3^0 [nT]	2743	2260	2320	2173	2150	2283
M_0 [10^{34} A m ²]	4.714	4.628	4.632	4.691	4.615	4.633
z_0 [km]	2298	2280	2220	3379	2207	2156

Εικόνα 3: Στον πίνακα φαίνονται οι συντελεστές Gauss του ενδογενούς μαγνητικού πεδίου για αξονικά συμμετρικά μοντέλα. (Αναπαραγωγή από το βιβλίο Saturn from Cassini Huygens)

2.2. Η αποστολή Cassini

Οι εκτενέστερες και πιο λεπτομερείς μετρήσεις που διαθέτουμε πλέον για το σύστημα του Κρόνου προέρχονται από το διαστημόπλοιο Cassini που εκτοξεύθηκε

στις 15 Οκτωβρίου 1997 από το ακρωτήριο Canaveral (Εικόνα 4), μπήκε σε τροχιά γύρω από τον Κρόνο την 1η Ιουλίου 2004, όπου και παρέμεινε μέχρι την λήξη της αποστολής του στις 15 Σεπτεμβρίου 2017, με μια βουτιά στην ατμόσφαιρα του Κρόνου. Συνολικής μάζας 5.600 kg, ύψους 6.7 m και πλάτους 4 m, λάμβανε ενέργεια από 32.7 kg πλουτωνίου-238 που του παρήγε ισχύ 633-885 W. Το διαστημόπλοιο μετέφερε το διερευνητικό σκάφος Huygens το οποίο εκτοξεύτηκε μετά την τρίτη τροχιά του Cassini γύρω από τον Κρόνο για μια αποστολή στον Τιτάνα διάρκειας 22 ημερών. Το Huygens έφτασε στον Τιτάνα στις 14 Ιανουαρίου 2005.



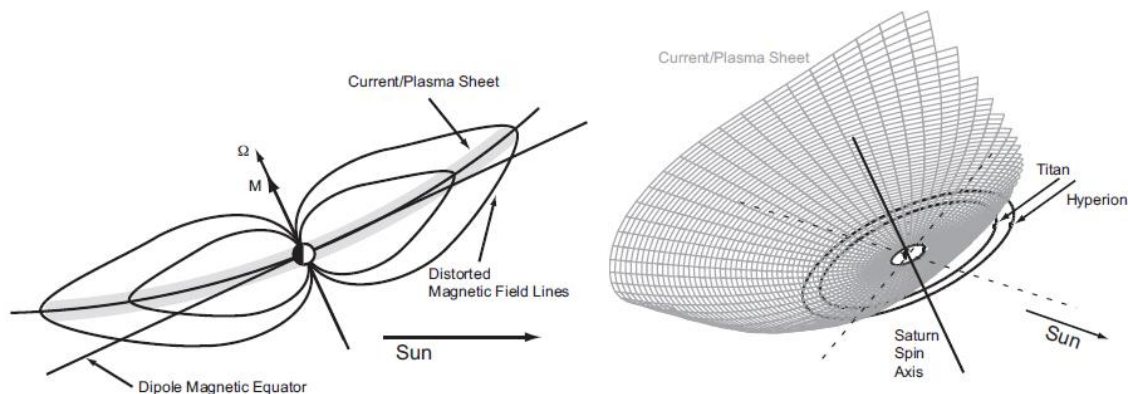
Εικόνα 4: Αναπαράσταση της τροχιάς εκτόξευσης του διαστημοπλοίου Cassini – Huygens, η προσέγγιση του Κρόνου και οι τέσσερις πρώτες τροχιές στο σύστημά του.

Για τη συλλογή όσο το δυνατόν περισσότερων επιστημονικών δεδομένων από το σύστημα του Κρόνου το διαστημόπλοιο Cassini-Huygens ήταν εξοπλισμένο με 18 όργανα, 12 πάνω στο Cassini και 6 στο διερευνητικό σκάφος Huygens. Πολλά από αυτά τα εξελιγμένα όργανα ήταν ικανά για πολλαπλές λειτουργίες και τα δεδομένα που συγκεντρώθηκαν έχουν αποτελέσει αντικείμενο μελετών από επιστήμονες σε όλον τον κόσμο.

Η αποστολή Cassini έκανε ορισμένες πολύ σημαντικές ανακαλύψεις. Μερικές από αυτές είναι:

- Κατά την προσέγγισή του στον Κρόνο, το Cassini ανίχνευσε εξερχόμενη ροή ενεργητικών (~ 100 keV/charge) μαγνητοσφαιρικών ιόντων όπως He^+ και O^+ στο κρουστικό σοκ όπου και το διαστημόπλοιο συνδέθηκε μαγνητικά με την μαγνητόσφαιρα του Κρόνου.
- Κατά την εισαγωγική τροχιά (Saturn Orbit Insertion, SOI) το διαστημόπλοιο ανίχνευσε "δακτυλιοειδή ιονόσφαιρα" που περιέχει κυρίως ιόντα υδρατμών προερχόμενα από τους παγωμένους δακτυλίους.
- Η εισαγωγική τροχιά SOI έδωσε μερικές ακόμα σπουδαίες ανακαλύψεις όπως η μικρή παρουσία ιόντων N στη μαγνητόσφαιρα, κάτι που ήταν έκπληξη, καθώς πριν την αποστολή υπήρχε η υπόθεση ότι ο Τιτάνας ήταν μια πλούσια πηγή ιόντων αζώτου. (Andre' et al. 2005)
- Το όργανο μαγνητοσφαιρικής απεικόνισης (MIMI) ανακάλυψε την ύπαρξη μιας νέας ζώνης ακτινοβολίας εντός του δακτυλίου D. (Roussos et al. 2008)
- Το όργανο κυμάτων πλάσματος (RPWS) ανακάλυψε την ύπαρξη μιας πολύπλοκης και εκτρεπόμενης διακύμανσης στην ακτινοβολία στα χιλιομετρικά μήκη κύματος (SKR).
- Το Cassini ανακάλυψε επίσης ότι το δακτυλιοειδές ρεύμα του Κρόνου αποτελείται κυρίως από ιόντα υδρατμών, κάτι απολύτως αναμενόμενο αφού σχεδόν όλες οι πηγές μαγνητοσφαιρικού πλάσματος κυριαρχούνται από υδρατμούς. Οι πηγές περιλαμβάνουν τους δακτυλίους, τους παγωμένους δορυφόρους και ειδικά τον Εγκέλαδο που αποδείχτηκε η κυρίαρχη πηγή μαγνητοσφαιρικού πλάσματος του συστήματος του Κρόνου.
- Το Cassini επίσης ανακάλυψε ότι ο Κρόνος έχει φύλλο πλάσματος σε κοίλο σχήμα που οφείλεται στην αλληλεπίδραση μεταξύ της κλίσης του άξονα περιστροφής του Κρόνου και της κατεύθυνσης του ηλιακού ανέμου στην απόσταση του Κρόνου (Εικόνα 5).
- Τέλος πολύ βαριά αρνητικά φορτισμένα σωματίδια (πιθανότατα aerosols) ανακαλύφθηκαν πάνω από την ομοιόπαυση του Τιτάνα.

Για το σκοπό αυτής της εργασίας θα περιγράψουμε τη λειτουργία του μαγνητόμετρου (MAG) από όπου και προέρχονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήσαμε.



Εικόνα 5: Αριστερά σχηματική απεικόνιση του φύλλου πλάσματος κατά τον μεσημβρινό μεσημέρι-μεσάνυχτα. Δεξιά μια τρισδιάστατη απεικόνιση της παραμόρφωσης που έχει ως αποτέλεσμα φύλλο πλάσματος κοίλου σχήματος. Οι τροχιές του Τιτάνα και του Υπερίωνα συμπεριλαμβάνονται στην εικόνα και βρίσκονται εκτός του φύλλου πλάσματος. (Αναπαραγωγή από το βιβλίο *Saturn from Cassini Huygens*).

2.3. Το μαγνητόμετρο (MAG)

Ο πρωταρχικός στόχος του μαγνητόμετρου διπλής τεχνικής (MAG) ήταν να προσδιορίσει τα πλανητικά μαγνητικά πεδία και τις δυναμικές αλληλεπιδράσεις στο περιβάλλον του Κρόνου (Εικόνα 6). Τα μαγνητόμετρα είναι όργανα επί τόπου μέτρησης που μετρούν την ένταση των μαγνητικών πεδίων κοντά στο διαστημικό σκάφος. Το μαγνητόμετρο Cassini Dual Technique (MAG) μετρά μαγνητικά πεδία κατά τις προσεγγίσεις στον Τιτάνα και στον Κρόνο.

Οι επιστημονικοί στόχοι του MAG ήταν:

- Ο προσδιορισμός του ενδογενούς μαγνητικού πεδίου του Κρόνου
- Η ανάπτυξη ενός τρισδιάστατου μοντέλου της μαγνητόσφαιρας του Κρόνου
- Ο προσδιορισμός της μαγνητικής κατάστασης του Τιτάνα και της ατμόσφαιράς του
- Η εξαγωγή ενός εμπειρικού μοντέλου του ηλεκτρομαγνητικού περιβάλλοντος του Τιτάνα

- Η διερεύνηση των αλληλεπιδράσεων του Τιτάνα με τη μαγνητόσφαιρα, τη μαγνητόπαυση και τον ηλιακό άνεμο
- Η διερεύνηση των αλληλεπιδράσεων των δακτυλίων και της σκόνης με το ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον
- Η μελέτη των αλληλεπιδράσεων των παγωμένων δορυφόρων με τη μαγνητόσφαιρα του Κρόνου
- Η διερεύνηση της δομής της μαγνητοουράς και των δυναμικών διεργασιών της.

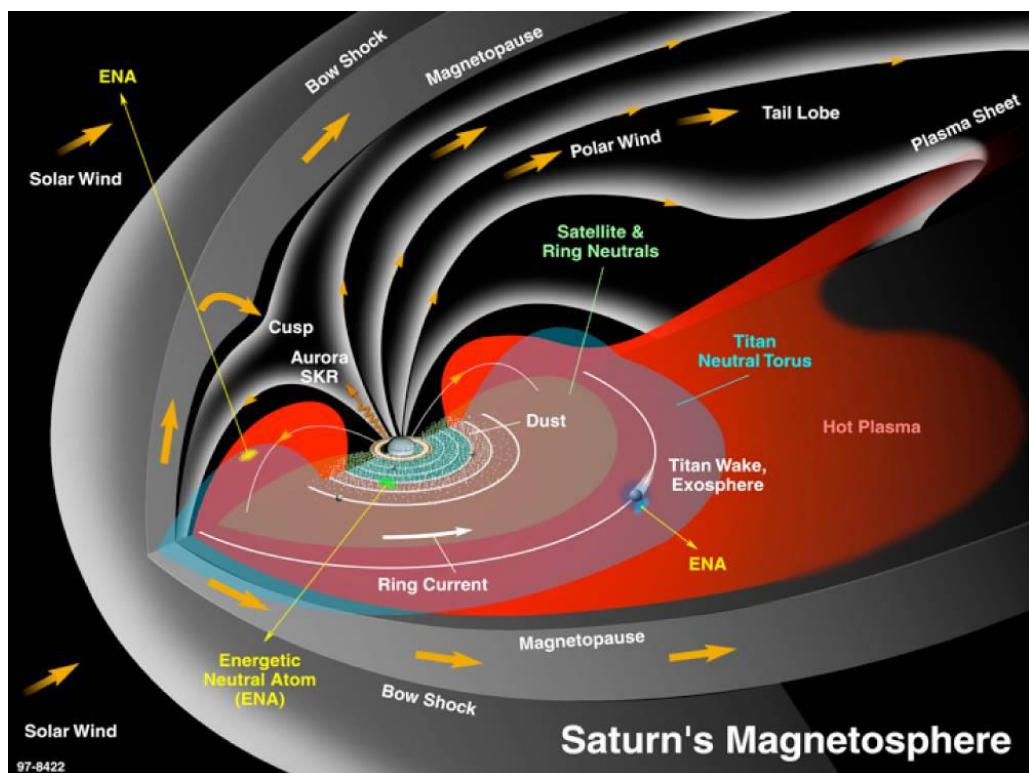
Περιγραφή του μαγνητομέτρου:

Το πείραμα MAG περιλαμβάνει δύο μαγνητόμετρα, το Fluxgate Magnetometer (FGM) και το Vector/Scalar Helium Magnetometer (V/SHM). Δεδομένου ότι τα μαγνητόμετρα είναι ευαίσθητα σε ηλεκτρικά ρεύματα και αγωγά στοιχεία στο διαστημικό σκάφος, τοποθετούνται γενικά σε εκτεταμένο βραχίονα, όσο το δυνατόν πιο μακριά από το διαστημόπλοιο. Σε αυτή την περίπτωση, ο αισθητήρας FGM βρίσκεται στο μέσο του άξονα του βραχίονα και ο αισθητήρας V/SHM βρίσκεται στο τέλος του βραχίονα μήκους 11 μέτρων που είναι προσαρτημένος στο διαστημόπλοιο ώστε να επηρεάζονται κατά το δυνατόν λιγότερο από τα υπόλοιπα συστήματα.

Το FGM είναι ένα μαγνητόμετρο παρόμοιο με αυτό του Ulysses και πολλών άλλων αποστολών, το οποίο αποτελείται κυρίως από τρεις αισθητήρες μαγνητικής ροής – έναν για κάθε συνιστώσα του πεδίου– τοποθετημένους ορθογώνια ανά δύο μεταξύ τους σε μία κεραμική βάση. Ο κάθε αισθητήρας απαρτίζεται από ένα βασικό πηνίο τυλιγμένο σε έναν δακτύλιο υλικού υψηλής μαγνητικής επιδεκτικότητας και ένα δευτερεύον πηνίο που περικλείει το βασικό με τον δακτύλιο. Ένα τετραγωνικό ηλεκτρικό σήμα 15.625 kHz διαπερνά το βασικό πηνίο και δημιουργεί μαγνητικό πεδίο φτάνοντας τον δακτύλιο σε μαγνητικό κορεσμό δύο φορές σε κάθε περίοδο. Όταν δεν υπάρχει κάποιο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, στο δευτερεύον πηνίο επάγεται ρεύμα αντίστοιχο του αρχικού τετραγωνικού σήματος. Η παρουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, ωστόσο, κάνει ασύμμετρο τον εναλλάξ μαγνητικό κορεσμό του δακτυλίου και το επαγόμενο ρεύμα στο δευτερεύον πηνίο αποκτά νέα χαρακτηριστικά από τα οποία υπολογίζουμε το εξωτερικό πεδίο. Το μαγνητόμετρο

αυτό διαθέτει τέσσερα κανάλια λειτουργίας, καθένα από τα οποία χαρακτηρίζεται από διαφορετική τιμή μέγιστου και ελαχίστου μετρήσιμου μαγνητικού πεδίου και διαφορετική διακριτική ικανότητα.

Τα όργανα του μαγνητομέτρου κάνουν μέτρηση της διεύθυνσης και της έντασης του μαγνητικού πεδίου γύρω από το διαστημόπλοιο και 3D απεικόνιση της μαγνητόσφαιρας του Κρόνου με μέσο ρυμό μέτρησης τις 32 μετρήσεις/s και ακρίβεια τα 4.9 pT.

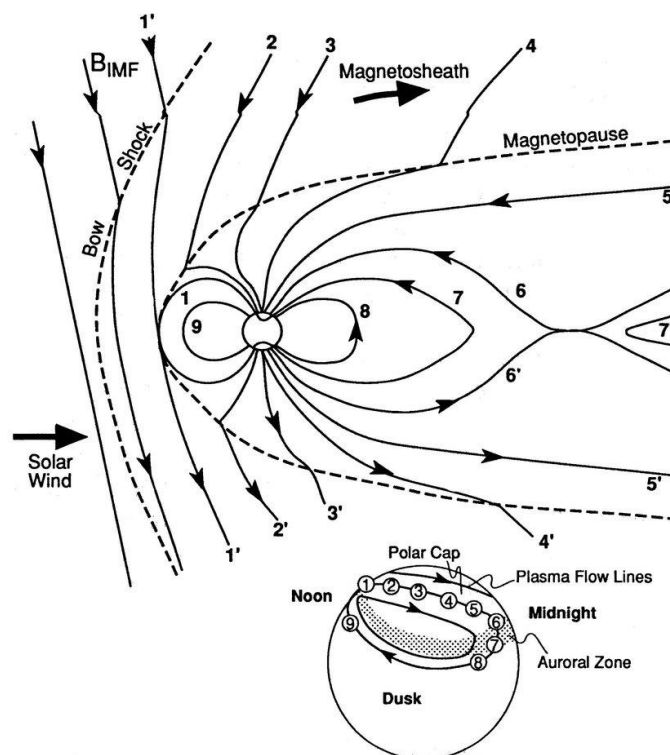


Εικόνα 6: Η μαγνητόσφαιρα του Κρόνου. Οι μετρήσεις του Κασσίνι άλλαξαν πλήρως την κατανόηση της μαγνητόσφαιρας του Κρόνου, αφήνοντας ωστόσο πολλά αναπάντητα ερωτήματα. (Αναπαραγωγή από τη σελίδα <https://saturn.jpl.nasa.gov/science/magnetosphere>)

2.4. Σύγκριση πλανητικών μαγνητοσφαιρών

Προκειμένου να έχουμε μια βάση σύγκρισης με τους άλλους πλανήτες θα παρουσιάσουμε εν συντομία της μαγνητόσφαιρες της Γης, του Δία και του Κρόνου. Πριν την αποστολή Cassini η συμβατική γνώση ήταν ότι οι ισχυρά μαγνητισμένοι πλανήτες έχουν δύο διακριτούς τύπους μαγνητόσφαιρας: Ελεγχόμενη από τον ηλιακό άνεμο, είτε ελεγχόμενη από ενδογενείς παράγοντες.

Η Γήινη μαγνητόσφαιρα είναι χαρακτηριστικό παράδειγμα μαγνητόσφαιρας που ρυθμίζεται από την ηλιακό άνεμο. Όπως φαίνεται και στον σχετικό πίνακα (Εικόνα 8), η Γη περιστρέφεται αργά, το ηλεκτρικό πεδίο συμπεριστροφής κυριαρχεί μόνο στην άμεση γειτονιά του πλανήτη, με σχετικά μικρή εισροή εσωτερικού πλάσματος ($\sim 1\text{kg/s}$) που προέρχεται από την ιονόσφαιρα σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη. Η αλληλεπίδραση με τον ηλιακό άνεμο συνήθως αναφέρεται ως ο «κύκλος Dungey» (Εικόνα 7). Αυτή η διαδικασία ξεκινάει στην προσήλια μαγνητόπαυση όπου μπορεί να γίνει επανασύνδεση μεταξύ των μαγνητικών γραμμών του ενδογενούς μαγνητικού πεδίου και της νότιας συνιστώσας του διαπλανητικού πεδίου.



Εικόνα 7: Το σκαρίφημα δείχνει τη ροή πλάσματος σε μαγνητόσφαιρα που ελέγχεται από μαγνητική επανασύνδεση. Οι αριθμημένες δυναμικές γραμμές δείχνουν την εξέλιξη μιας δυναμικής γραμμής σε κύκλο Dungey. Ημερήσια επανασύνδεση γίνεται στην προσήλια πλευρά της μαγνητόπαυσης. Στη συνέχεια ξαναγίνεται επανασύνδεση στη νυχτερινή πλευρά στο 6. (Kivelson and Russell, 1995).

Αυτή η διαδικασία ξεκινάει στην προσήλια μαγνητόπαυση όπου μπορεί να γίνει επανασύνδεση μεταξύ των μαγνητικών γραμμών του ενδογενούς μαγνητικού πεδίου και της νότιας συνιστώσας του διαπλανητικού πεδίου. Η επανασύνδεση ανοίγει τις μαγνητικές γραμμές που εκπορεύονται από τα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη και εκτείνονται στον ηλιακό άνεμο.

Τα ανοιχτά διαπλανητικά άκρα αυτών των δυναμικών γραμμών κινούνται με την ταχύτητα του ηλιακού ανέμου στη γειτονιά τους, ενώ οι άκρες στην ιονόσφαιρα γυρίζουν προς την νυχτερινή πλευρά. Οι ανοιχτές δυναμικές γραμμές σχηματίζουν ανοιχτούς σωλήνες μαγνητικής ροής.

Εν τέλει, οι ανοιχτοί σωλήνες κλείνουν ξανά και επανασυνδέονται στη μαγνητοουρά, στο φύλλο πλάσματος. Η διαδικασία δημιουργεί επιμήκεις κλειστούς σωλήνες ροής στη Γήινη πλευρά της επανασύνδεσης. Στην αντίθετη πλευρά οι αποκομμένες δυναμικές γραμμές επιταχύνουν το πλάσμα της ουράς μακριά από τον πλανήτη. Ο ρυθμιστής του κύκλου Dungey είναι επομένως η μαγνητική επανασύνδεση.

Parameter	Earth	Jupiter	Saturn
Heliocentric distance (AU)	1	5.2	9.5
Average IMF magnitude [nT]	4	1	0.5
Nominal Parker spiral angle from radial direction	45°	80°	85°
Typical solar wind ram pressure (nPa)	1.7	0.07	0.015
Equatorial radius	1 R_E = 6,371 km	1 R_J = 71,492 km = 11.2 R_E	1 R_S = 60,268 km = 9.45 R_E
Magnetic moment (T m ³)	7.75×10^{15}	1.55×10^{20}	4.6×10^{18}
Dipole tilt	10.5°	10°	< 1°
Equatorial magnetic field (μ T)	31	420	20
Typical subsolar bow shock distance	~13 R_E	~70 R_J	~27 R_S
Typical subsolar magnetopause distance	~10 R_E	~50 R_J	~22 R_S
Solar wind transport time from subsolar bow shock to terminator	~3.5 ^m	~3.5 ^h	~1.1 ^h
Magnetospheric plasma source (kg/s)	~1	~10 ³	~300
Equatorial rotation period (hours)	23.934	9.925	10.53
Equatorial angular velocity (s ⁻¹)	7.29×10^{-5}	1.76×10^{-4}	1.66×10^{-4}
Equatorial rotation velocity (km/s)	0.465	12.6	9.87
Equatorial gravitational acceleration (m/s ²)	9.78	24.8	8.96
Centrifugal acceleration at the equator (m/s ²)	0.034	2.22	1.62
Corotation electric field at equator (mV/m)	14.2	5290	197
Solar wind motional electric field (mV/m)	1.6	0.4	0.2
Radius where $E_{corot} = 0.1 E_{sw}$	3 R_E	115 R_J	31 R_S

Εικόνα 8: Στον πίνακα φαίνεται η σύγκριση των φυσικών παραμέτρων της Γης, του Δία και του Κρόνου. .
(Αναπαραγωγή από το βιβλίο *Saturn from Cassini Huygens*).

Ο Δίας αντίθετα αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα μαγνητόσφαιρας όπου ο ηλιακός άνεμος έχει μικρή συνεισφορά. Ο Δίας περιστρέφεται ταχύτατα και επιπλέον διαθέτει ισχυρότατο μαγνητικό πεδίο. Σαν συνέπεια οι εσωτερικές

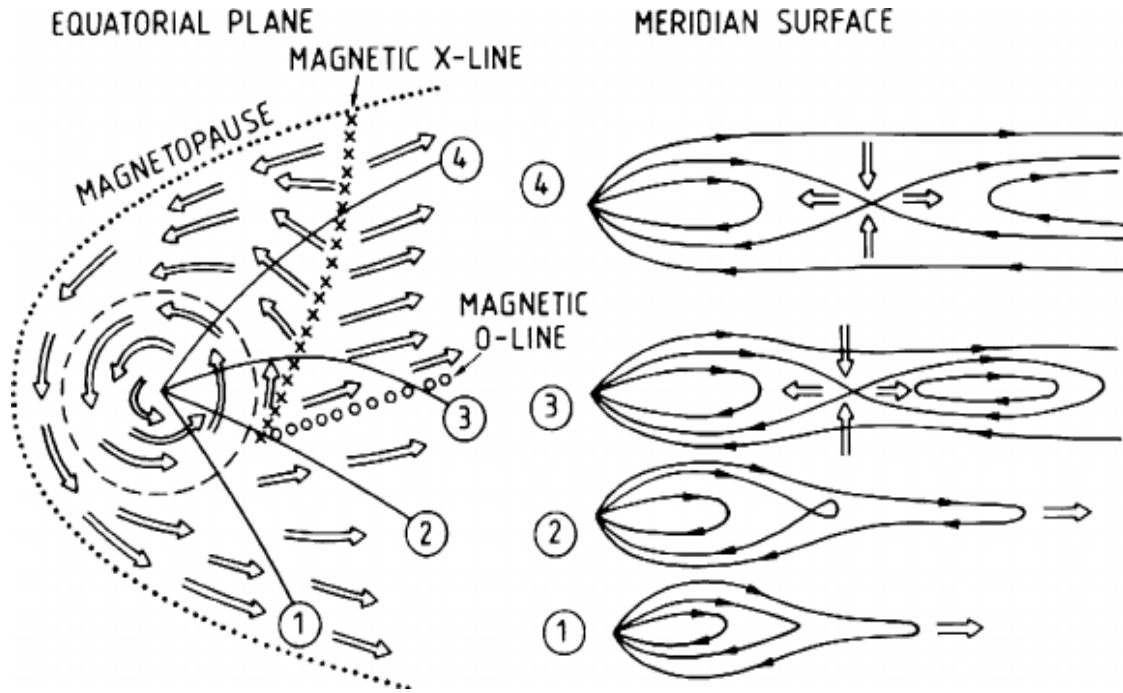
διαδικασίες κυριαρχούν τη μαγνητόσφαιρα σε αποστάσεις έως και $100R_J$ και η επίδραση με τον ηλιακό άνεμο (κύκλος Dungey) είναι σχεδόν αμελητέα. Το συμπεριστρεφόμενο ηλεκτρικό πεδίο υπερισχύει του ηλεκτρικού πεδίου του ηλιακού ανέμου, και η I_ω παράγει περίπου 103kg/s πλάσματος εντός της μαγνητόσφαιρας. Αυτή η πηγή πλάσματος εμπλουτίζει τους συμπεριστρεφόμενους μαγνητικούς σωλήνες και τους διαστέλλει προς τα έξω. Όταν ένας μαγνητικός σωλήνας που περιέχει μεγάλη ποσότητα πλάσματος διαστέλλεται πέραν της απόστασης συμπεριστροφής, το πλάσμα θα συνεχίσει να κινείται προς τα έξω, εκτός και αν κάποια άλλη διαδικασία σταματήσει αυτή την τάση.

Στην προσήλια πλευρά, η μαγνητόπαυση λειτουργεί σαν φράγμα και αναγκάζει τις μαγνητικές γραμμές να κινηθούν εντός του ορίου και έτσι επιβάλλει μια περιστροφή γύρω από τον πλανήτη που μοιάζει με τη συμπεριστροφή. Στη νυχτερινή πλευρά ωστόσο, το πλάσμα κινείται χωρίς περιορισμούς μέχρι τη μαγνητοουρά. Οι μαγνητικές γραμμές παραμένουν συνδεδεμένες με την συμπεριστρεφόμενη ιονόσφαιρα από τη μία πλευρά και με το πλάσμα που κινείται προς τα έξω από την άλλη πλευρά. Τελικώς οι δυναμικές γραμμές επιμηκύνονται, λεπταίνουν και δημιουργείται πλασμοειδές που μπορεί πλέον να κινηθεί ελεύθερα προς την μαγνητοουρά.

Στην πλευρά προς τον πλανήτη η νέα μικρότερη δυναμική γραμμή έχει πλέον απαλλαγεί από το φορτίο της και η δυναμική πίεση έλκει το ισημερινό μέρος της γραμμής προς τον πλανήτη, αποκαθιστώντας τη ροή προς την συμπεριστροφή. Αυτή η διαδικασία λέγεται κύκλος “Vasyliunas” (Εικόνα 9).

Όπως φαίνεται και στον πίνακα της εικόνας 8, ο Κρόνος βρίσκεται κάπου μεταξύ της Γης και του Δία. Περιστρέφεται γρήγορα, αλλά το μαγνητικό του πεδίο στο ισημερινό επίπεδο είναι συγκρίσιμο με της Γης. Η μάζα πλάσματος που εισέρχεται στην μαγνητόσφαιρα είναι 3 τάξεις μικρότερη αυτής του Δία και το συμπεριστρεφόμενο ηλεκτρικό πεδίο κυριαρχεί σε αποστάσεις μερικών δεκάδων R_s .

Ως εκ τούτου η μαγνητόσφαιρα του πλανήτη παρουσιάζει τόσο κύκλο Dungey, όσο και κύκλο Vasyliunas, κάτι που κάνει την μαγνητόσφαιρα του Κρόνου ακόμα πιο συναρπαστική και πολύπλοκη από αυτές της Γης και του Δία.

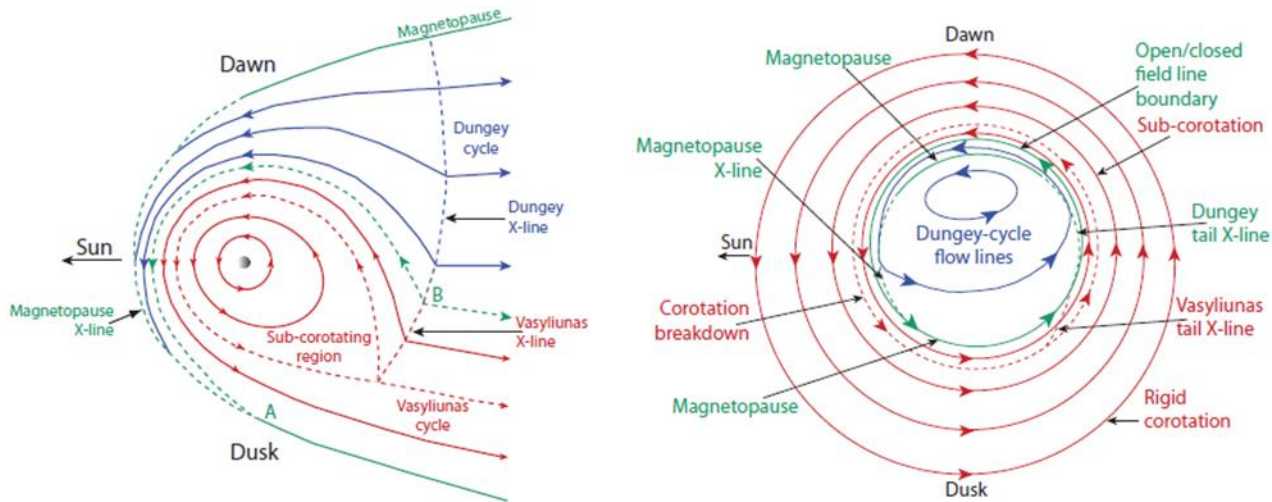


Εικόνα 9: Προβλεπόμενα διάγραμμα ροής (αριστερά) και διαμόρφωση μαγνητικού πεδίου (δεξιά) για σταθερή ροή πλάσματος, όπως προτάθηκε για τον Δία από τον Vasyliunas (1983). (Αναπαραγωγή από το βιβλίο Saturn from Cassini Huygens)

Στο σχέδιο (εικόνα 10) που δείχνει τη σύζευξη μαγνητόσφαιρας – ιονόσφαιρας φαίνονται τρεις διακριτές περιοχές μεταφοράς πλάσματος στην ιονόσφαιρα και τη μαγνητόσφαιρα. Κοντά στον πλανήτη ($r \leq 3R_s$) το πλάσμα συμπεριστρέφεται με την ανώτερη ατμόσφαιρα. Αυτή η περιοχή αναπαρίσταται με τις συμπαγείς κόκκινες γραμμές. Ημι-συμπεριστροφή εμφανίζεται σε μεγαλύτερες ακτινικές αποστάσεις, καθώς οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές «φορτώνονται» με πλάσμα. Το όριο της συμπεριστροφής αναπαρίσταται με την διακεκομμένη κόκκινη γραμμή, τόσο στην μαγνητόσφαιρα, όσο και στην ιονόσφαιρα.

Η δεύτερη περιοχή ξεκινάει από την κόκκινη διακεκομμένη γραμμή και εκτείνεται προς έξω και περιλαμβάνει τον κύκλο Vasyliunas. Έξω από τη συμπεριστροφή οι αποκολλούμενοι σχηματισμοί πλασμοειδών αποστραγγίζουν τη μαγνητόσφαιρα από πλάσμα. Η τρίτη περιοχή κυριαρχείται από τον κύκλο Dungey. Αυτή η διαδικασία ξεκινάει στην προσήλια μαγνητόπαυση όπου είναι δυνατό να συμβεί επανασύνδεση μεταξύ των μαγνητικών δυναμικών γραμμών του πλανήτη και της βόρειας συνιστώσας του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου κατά μήκος μίας εκτεταμένης

περιοχής. Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι η μαγνητική ροπή του Κρόνου είναι αντίθετη με αυτή της Γης.



Εικόνα 10: Σχηματική αναπαράσταση της σύζευξης ιονόσφαιρας – μαγνητόσφαιρας. Αριστερά φαίνεται η μεταφορά πλάσματος στο ισημερινό επίπεδο της μαγνητόσφαιρας και δεξιά φαίνεται η μεταφορά στην ιονόσφαιρα σε μεγάλα πλάτη. Διακρίνονται οι 3 διακριτές περιοχές, συμπεριστροφής, δημιουργία πλασμοειδών τύπου Vasyliunas και κυκλοφορία που κυριαρχείται από επανασύνδεση τύπου Dungey. (Αναπαράγωγή από το βιβλίο Saturn from Cassini Huygens)

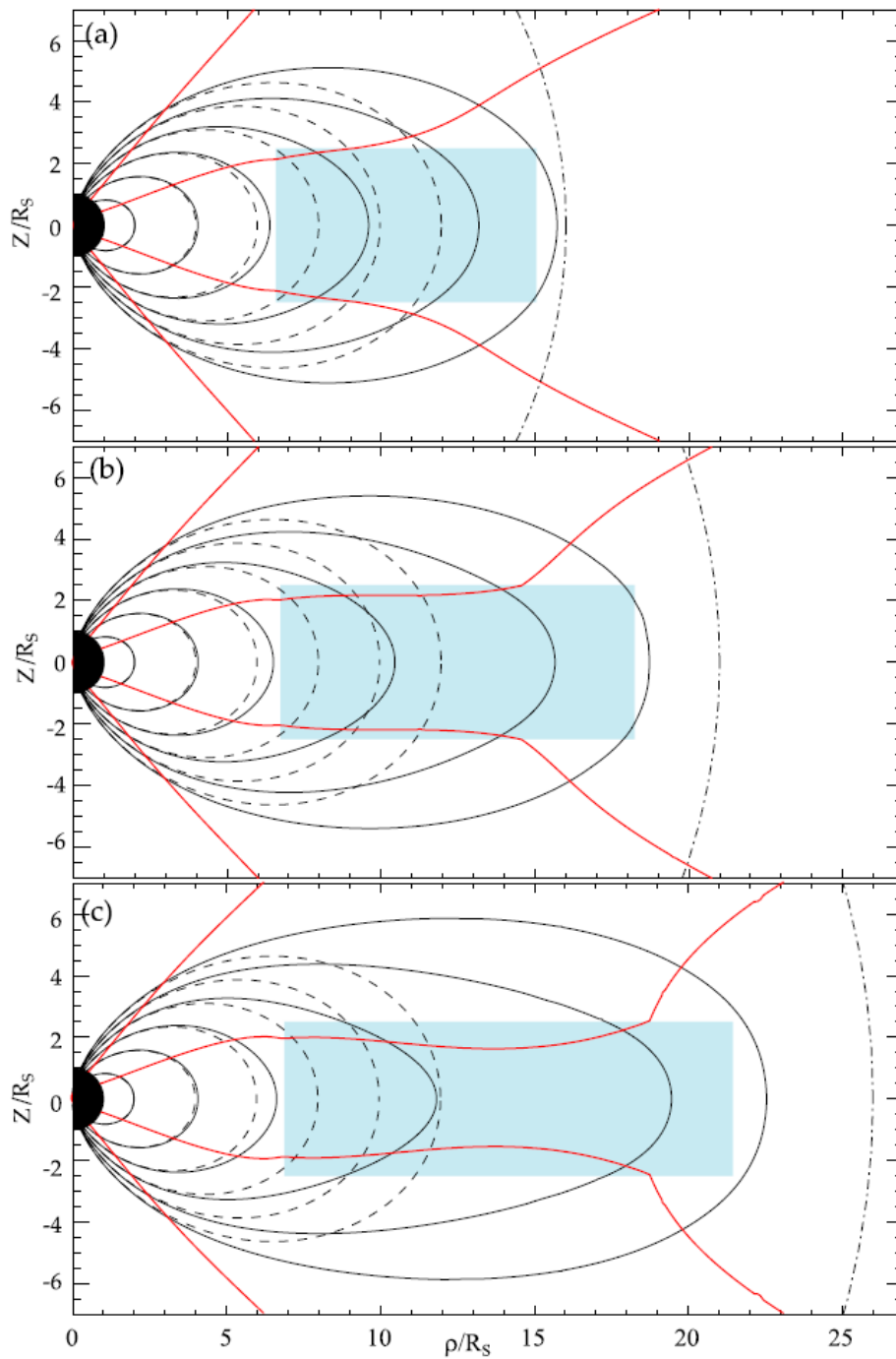
Η επανασύνδεση δημιουργεί ανοιχτές δυναμικές γραμμές που εν τέλει κλείνουν στη νυχτερινή πλευρά. Στην δυτική πλευρά οι ανοιχτές γραμμές δημιουργούν ανοιχτούς λοβούς ροής που βρίσκονται πάνω από το ισημερινό επίπεδο συνεχώς. Το σημείο A βρίσκεται στην δυτική πλευρά της μαγνητόπαυσης και συμβολίζει το όριο της ημερήσιας γραμμής επανασύνδεσης. Στο σημείο B συμβολίζει το τέλος της νυχτερινής επανασύνδεσης. Ο κύκλος Dungey συμβαίνει κυρίως στη δυτική πλευρά και συμπιέζεται στην ημερήσια πλευρά ανάμεσα στον κύκλο Vasyliunas και τη μαγνητόπαυση. Το όριο μεταξύ των δύο κύκλων αναπαρίσταται με την διακεκομμένη πράσινη γραμμή.

2.5. Η δυναμική της μαγνητόσφαιρας του Κρόνου

Στη μαγνητόσφαιρα του Κρόνου (Εικόνα 6) δρούν εξωγενείς και ενδογενείς ρυθμιστές. Κυριότερος εξωγενής ρυθμιστής είναι η δυναμική πίεση του ηλιακού ανέμου και λιγότερο η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου, ή ο προσανατολισμός του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου. Ο κύριος ενδογενής ρυθμιστής είναι η ταχύτατη περιστροφή του. Δεν υπάρχουν στοιχεία που να υποδεικνύουν την ύπαρξη υποκαταιγίδων, αν και όπως αναπτύχθηκε παραπάνω εμφανίζονται διαδικασίες απελευθέρωσης πλάσμοειδών.

Σημαντικό επίσης ρόλο παίζει η εισροή θερμού πλάσματος από την εξωτερική προς την εσωτερική μαγνητόσφαιρα, καθώς και η επιτάχυνση ενεργητικών ιόντων στην εξωτερική μαγνητόσφαιρα που προήλθαν από ανταλλαγή φορτίων. Ενδογενείς διακυμάνσεις της μαγνητόσφαιρας παράγουν περιοδικότητες ~ 10.8 ωρών και ~ 10.6 ωρών που εντοπίζονται στα ραδιοκύματα στα χιλιομετρικά μήκη κύματος, στα ενεργητικά ηλεκτρόνια και ιόντα, στα ενεργητικά ουδέτερα άτομα, στο πλάσμα χαμηλής ενέργειας, στα μαγνητικά πεδία και στις κινήσεις του φύλλου πλάσματος και της μαγνητόπαυσης. Μεγαλύτερης περιόδου διακυμάνσεις ~ 1 χρόνου, ή $\sim$ εβδομάδων συνδέονται με αλλαγές στην ταχύτητα του ηλιακού ανέμου.

Με τον όρο δυναμική της μαγνητόσφαιρας αναφερόμαστε στις διαδικασίες στη μαγνητόσφαιρα που σε χωρική κλίμακα κυμαίνονται σε αποστάσεις μεγαλύτερες $1R_s$, ενώ σε χρονική κλίμακα κυμαίνονται σε χρόνους μεγαλύτερους του $1/10$ της περιόδου περιστροφής του πλανήτη, δηλαδή περίπου της 1 ώρας. Συνεπώς η μαγνητοσφαιρική δυναμική περιλαμβάνει την παγκόσμια ροή πλάσματος, είτε στη συμπεριστροφή (κατά την αξιμουθιακή διεύθυνση), ή μη συμπεριστροφή (κατά την ακτινική διεύθυνση), τους εξωγενείς ρυθμιστές όπως η δυναμική πίεση του ηλιακού ανέμου, ή τους ενδογενείς όπως η γρήγορη περιστροφή του πλανήτη, την μαγνητική επανασύνδεση στην προσήλια μαγνητόπαυση και στη μαγνητοουρά, συμπίεση της προσήλιας μαγνητόσφαιρας από τον ηλιακό άνεμο (Εικόνα 11).



Εικόνα 11: Σκαρίφημα των μαγνητικών γραμμών (μαύρες συμπαγείς γραμμές) στο επίπεδο των μαγνητικών μεσημβρινών του μοντέλου Bunce et al. [2007] που περιλαμβάνει το δακτυλιοειδές ρεύμα. Οι γραμμές αντιστοιχούν σε προσήλια απόσταση της μαγνητόπαυσης για (a) 16, (b) 21, και (c) 26 R_s . Οι διακεκομμένες μαύρες γραμμές απεικονίζουν τις δυναμικές γραμμές για το ενδογενές πεδίο ανά 2 R_s στο ισημερινό επίπεδο. Το μοντέλο του δακτυλιοειδούς ρεύματος απεικονίζεται με το μπλε παραλληλόγραμμο. Τα ζεύγη των κόκκινων γραμμών σε κάθε ημισφαίριο φράζουν τις περιοχές που η διεύθυνση του πεδίου βρίσκεται εντός 30° από το ισημερινό επίπεδο. Η μαγνητόπαυση που φαίνεται ως το διακεκομμένο τόξο στην άκρη δεξιά, σε σχέση με το δακτυλιοειδές ρεύμα για την τοπική ώρα 11 LT. Δεν απεικονίζονται μικρές λεπτομέρειες που εξαρτώνται από τον τοπικό χρόνο. (Αναπαραγωγή από την δημοσίευση Bunce et al 2008 doi:10.1029/2007JA012538).

Σε μια τόσο γρήγορα περιστρεφόμενη μαγνητόσφαιρα, χωρίς ομογενή κατανομή πλάσματος, το συνολικό αξιμουθιακό ρεύμα που ρέει κοντά στο ισημερινό επίπεδο μπορεί να αντιμετωπιστεί ως η συνισταμένη τριών συνιστωσών α) αδρανειακή ολίσθηση του πλάσματος κοντά στη συμπεριστροφή (αδρανειακό ρεύμα) β) η βαθμίδα της κάθετης πίεσης πλάσματος, παρούσα κυρίως κατά μήκος της ακτινικής διεύθυνσης (ρεύμα βαθμίδας πίεσης) και γ) της ανισοτροπίας της πίεσης πλάσματος παράλληλα και κάθετα στις δυναμικές γραμμές, παρουσία καμπυλότητας πεδίου. Το δακτυλιοειδές ρεύμα παίζει πρωταγωνιστικό ρόλο στη σύζευξη μαγνητόσφαιρας – ιονόσφαιρας. Η αξιμουθιακή του ασυμμετρία σχετίζεται με την τοπολογία και την ένταση των ρευμάτων που είναι ευθυγραμμισμένα με το πεδίο. Η δυναμική αλληλεπίδραση των δύο ρευμάτων, επηρεάζει και ίσως και να καθορίζει τις περιοδικότητες μικρής διάρκειας που αν και έχουν παρατηρηθεί εκτενώς, δεν έχουν κατανοηθεί ακόμα πλήρως.

Το αξιμουθιακό ρεύμα του Κρόνου προέρχεται από φορτισμένα σωματίδια, κυρίως ιόντα υδρατμών (W^+) και πρωτόνια (H^+) που κατανέμονται σε ακτινική απόσταση μεταξύ ~ 8 and ~ 15 Rs και χαρακτηρίζονται από αυξημένη υπέρθερμη (>3 keV) πίεση σωματιδίων, υψηλή (1-10) παράμετρο πλάσματος β (λόγος σωματιδίων προς μαγνητική πίεση) και έντονη δυναμική συμπεριφορά. Ανακαλύφθηκε εμμέσως επειδή συμπίεζε το μαγνητικό πεδίο του πλανήτη [Ness et al., 1981, 1982; Connerney et al., 1981, 1983] και άμεσα, αλλά μερικώς από ανιχνευτές σωματιδίων [Krimigis et al., 1981, 1983; Mauk et al., 1985] κατά τη διάρκεια των αποστολών Voyager 1 Voyager.

Ακόμα και μετά και την 13-ετή αποστολή Cassini, ορισμένα θέματα σχετικά με τη φύση και τα χαρακτηριστικά του πολύπλοκου αυτού συστήματος ρεύματος παραμένουν ανεπίλυτα.

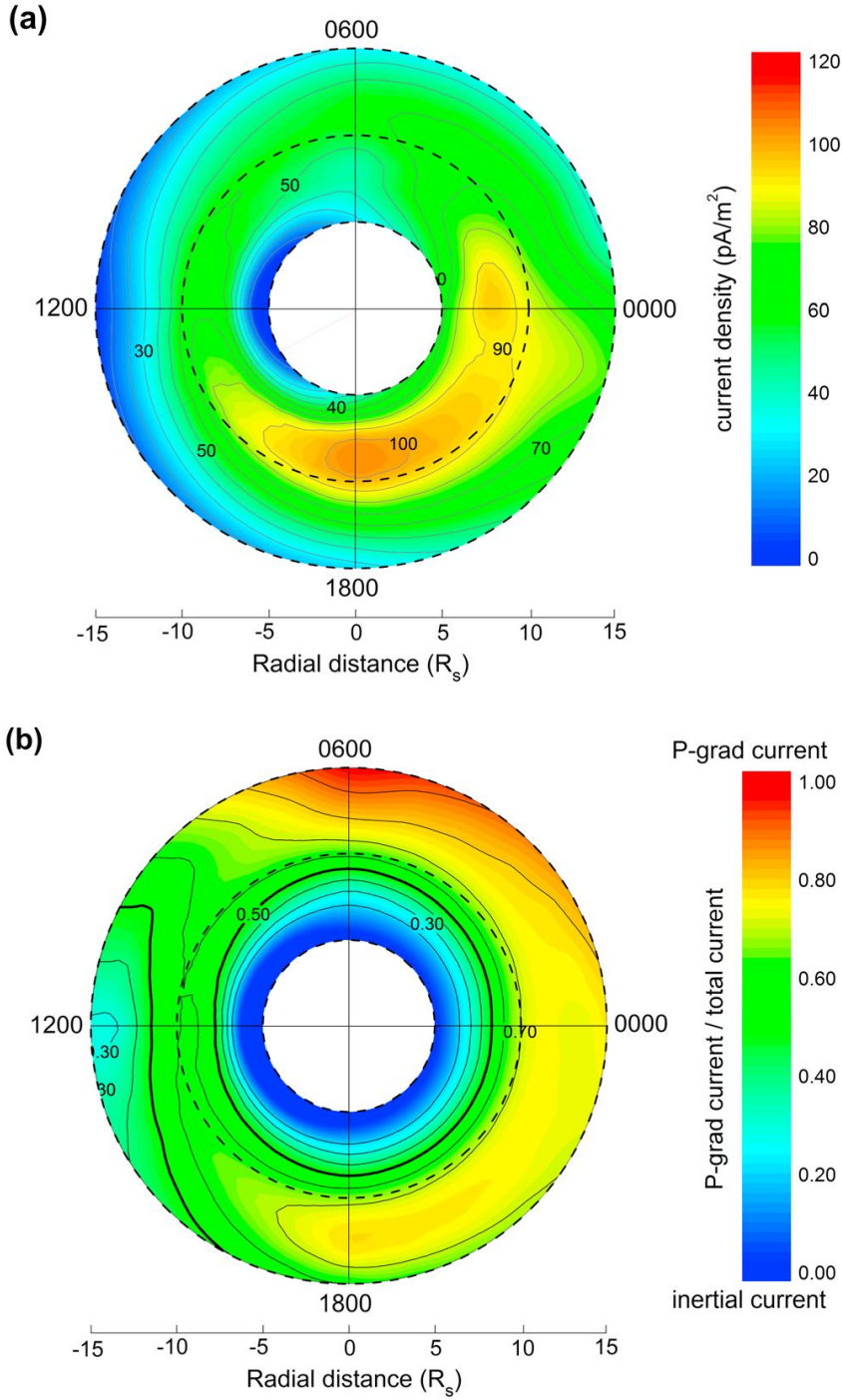
Όπως φαίνεται στην εικόνα 12 το δακτυλιοειδές ρεύμα έχει εξάρτηση από την ακτινική απόσταση και τον τοπικό χρόνο. Η χρωματική κλίμακα απεικονίζει τη σχετική συνεισφορά της αδρανειακής συνιστώσας και της συνιστώσας του ρεύματος ολίσθησης λόγω βαθμίδας πίεσης στο συνολικό ρεύμα. Το κόκκινο αντιστοιχεί σε πλήρη κυριαρχία του ρεύματος λόγω βαθμίδας πίεσης, ενώ το μπλε σε πλήρη κυριαρχία του αδρανειακού όρου. Η κυρίαρχη εξάρτηση είναι από την ακτινική

απόσταση. Ωστόσο υπάρχει μια ασυμμετρία που εξαρτάται από τον τοπικό χρόνο, που έχει προβλεφθεί από ορισμένα μοντέλα [e.g., Jia et al. [2012a, 2012b]], αλλά δεν έχει αποκαλυφθεί επαρκώς από τις μετρήσεις ως τώρα. Από το τοπικό απόγευμα (τοπική ώρα 1600h), σε όλη τη διάρκεια της νύχτας ως το τοπικό πρωί (0800h) το δακτυλιοειδές ρεύμα είναι αδρανειακό εντός των 7 Rs (μπλέ χρώμα >70% συνεισφορά από το αδρανειακό ρεύμα), κυριαρχείται από την βαθμίδα πίεσης έξω από τις 11Rs (κίτρινο και πορτοκαλί >70% συνεισφορά του ρεύματος βαθμίδας πίεσης), ενώ υπάρχει μια μεταβατική περιοχή σε ενδιάμεσες αποστάσεις. Στην ημερήσια πλευρά (0800 – 1600 h) το αζιμουθιακό ρεύμα παρουσιάζεται σε ισορροπία μεταξύ των δύο συνιστωσών πέραν των 7Rs. Το μεγαλύτερο μέρος όμως του δακτυλιοειδούς ρεύματος παραμένει ανεπηρέαστο από την τοπική ανισοτροπία.

Θα πρέπει ωστόσο να υπογραμμιστεί ότι τα αποτελέσματα που αφορούν στον νυχτερινό τομέα πρέπει να αξιολογούνται προσεκτικά, γιατί δεν υπάρχει στατιστικά αξιόλογο δείγμα. Επίσης είναι σαφές ότι το δακτυλιοειδές ρεύμα επηρεάζεται από την πίεση των σωματιδίων ακόμη και κατά τη διάρκεια μέτριας μαγνητοσφαιρικής δραστηριότητας.

Η χαρτογράφηση του δακτυλιοειδούς ρεύματος είναι πολύ σημαντική και αναμένεται η ανάλυση των δεδομένων της τελικής φάσης “proxima” της αποστολής Cassini (Σεπτέμβριος 2017), με μετρήσεις σε μεγάλα πλάτη και κοντά στον πλανήτη, ώστε να υπάρξει καλύτερη και ακριβέστερη εικόνα του συστήματος ρευμάτων του Κρόνου.

Είναι σαφές ότι για να μελετηθεί μία μαγνητόσφαιρα που υπόκεινται σε πληθώρα δυναμικών μεταβολών θα πρέπει να υπάρχει ένα μέγεθος που να μπορεί να χαρακτηρίσει την γενική κατάσταση στην οποία βρίσκεται η μαγνητόσφαιρα, ούσα υπό την επίδραση των παραγόντων που την διαμορφώνουν. Για να μελετήσουμε τις δυναμικές καταστάσεις της μαγνητόσφαιρας, πρέπει να έχουμε μια ποσοτική μέτρηση της παραμόρφωσής της. Επομένως υπάρχει η ανάγκη εισαγωγής ενός δείκτη δηλωτικού της μαγνητικής παραμόρφωσης.



Εικόνα 12: (α) Χάρτης περιγράμματος που απεικονίζει τη μέση κατανομή του μέσου αζιμουθιακού ρεύματος και την εξάρτησή του από την ακτινική απόσταση και την τοπική ώρα στην ισημερινή μαγνητόσφαιρα του Κρόνου. Οι διακεκομμένοι κύκλοι δείχνουν ακτινικές αποστάσεις 5, 10 και 15 R_s . Η χρωματική κλίμακα αναπαριστά την πυκνότητα ρεύματος σε pA / m^2 . (β) Παρόμοια με το χάρτη του Σχήματος 10α που δείχνει τη φύση του μέσου ρεύματος του δακτυλίου του Κρόνου. Η χρωματική κλίμακα υποδηλώνει τη συνεισφορά του ρεύματος εξ' αιτίας της βαθμίδας πίεσης ($-\frac{1}{B_z} \frac{\partial P}{\partial r}$) στο συνολικό μετρούμενο ρεύμα. Οι διακεκομμένοι κύκλοι υποδηλώνουν ακτινικές αποστάσεις 5, 10 και 15 R_s . Ο Ήλιος και στις δύο περιπτώσεις βρίσκεται στα αριστερά. (Αναπαραγωγή από το Sergis et al. 2017)

2.6. Δείκτες μαγνητικής παραμόρφωσης

Έχουν αναπτυχθεί διάφοροι δείκτες για την παρακολούθηση της μαγνητοσφαιρικής παραμόρφωσης, όπως για παράδειγμα ο δείκτης AE που χρησιμοποιείται στη Γη για να χαρακτηρίζει τις υποκαταιγίδες ως προς την έντασή τους και ο δείκτης Dst (μονάδες nT) που δίνει τη μέση τιμή της διαταραχής της οριζόντιας συνιστώσας του γεωμαγνητικού πεδίου σε ωριαία βάση. Δηλώνει δηλαδή, την απόκλιση, θετική ή αρνητική, από τη μέση τιμή του γεωμαγνητικού πεδίου. Ο δείκτης Dst παρακολουθεί τη συμπίεση της Γήινης μαγνητόσφαιρας από τον ηλιακό άνεμο και τη διάταση που προκαλείται από τη θέρμανση του μαγνητοσφαιρικού πλάσματος.

Η πίεση του ηλιακού ανέμου επηρεάζει τον δείκτη Dst, ωστόσο ο κύριος ρυθμιστής του είναι η πίεση των ενεργητικών ιόντων στη μαγνητόσφαιρα. [Dessler and Parker, 1959; Sckopke, 1966]. Η ενεργοποίηση της μαγνητόσφαιρας και η αύξηση της τιμής του δείκτη Dst ρυθμίζονται κυρίως από αλλαγές στη νοτίου προσανατολισμού μαγνητική ροή που μεταφέρεται από τον ηλιακό άνεμο στη μαγνητόσφαιρα.

Στον Κρόνο, ωστόσο, το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο είναι ασθενέστερο, και ως εκ τούτου η μαγνητική επανασύνδεση είναι λιγότερο σημαντική για τη μεταφορά ενέργειας, αλλά οι διακυμάνσεις της δυναμικής πίεσης του ηλιακού ανέμου εξακολουθούν να παίζουν σημαντικό ρόλο στη μαγνητική επανασύνδεση. [Crary et al., 2005; Jackman et al., 2005]. Σημαντικό επίσης ρόλο παίζουν οι δακτύλιοι, οι παγωμένοι δορυφόροι και το ουδέτερο νέφος υδρατμών στο εσωτερικό σύστημα, γύρω από τον δακτύλιο E, μεταξύ 2 και 8 Rs ακτίνων Κρόνου (Rs, 1 Rs = 60,268 km).

Αυτή η διαμόρφωση είναι πολύ διαφορετική από της Γης, ή του Δία. Εντούτοις, μπορεί να είναι εξίσου δυναμική, αν και σε διαφορετικές χρονικές κλίμακες. Ενώ η κατανομή μάζας στη μαγνητόσφαιρα του Κρόνου διαφέρει στις λεπτομέρειες από του Δία, αλλά τα αποτελέσματα είναι παρόμοια. Οι δυναμικές γραμμές επεκτείνονται και η μαγνητόσφαιρα διογκώνεται από την ταχεία συμπεριστροφή του πλάσματος που περιέχεται στη μαγνητόσφαιρα. Δείκτης παρόμοιος του Dst έχει κατασκευαστεί και για το Δία από τα δεδομένα του Galileo [Russell et al. 2001].

Η συνολική ενέργεια των ενεργητικών σωματιδίων που βρίσκονται στη μαγνητόσφαιρα είναι ανάλογη της μεταβολής του μαγνητικού πεδίου στο κέντρο της Γης [Dessler and Parker, 1959; Sekopke, 1966]. Καθώς η μέτρηση στο κέντρο της Γης είναι αδύνατη, οι μεταβολές του μαγνητικού πεδίου προσεγγίζονται με τον δείκτη Dst που χρησιμοποιεί τη μέση απόκλιση της οριζόντιας συνιστώσας του μαγνητικού πεδίου πάνω από περιοχές χαμηλού γεωγραφικού πλάτους. Ωστόσο καθώς στο Δία και τον Κρόνο δεν έχουμε μετρήσεις επιφανείας, και προκειμένου να κατασκευάσουμε έναν δείκτη που θα παρέχει πληροφορία αντίστοιχη με εκείνη του Dst, υπολογίζουμε τη μέση απόκλιση της πολικής συνιστώσας (παράλληλη στον άξονα του διπόλου) στην εσωτερική μαγνητόσφαιρα από ένα στατικό, συμμετρικό μοντέλο (μαγνητικό δίπολο) και από ένα δυναμικό μοντέλο που παρακολουθεί τις περιοδικότητες της μαγνητόσφαιρας (UCL/AGA).

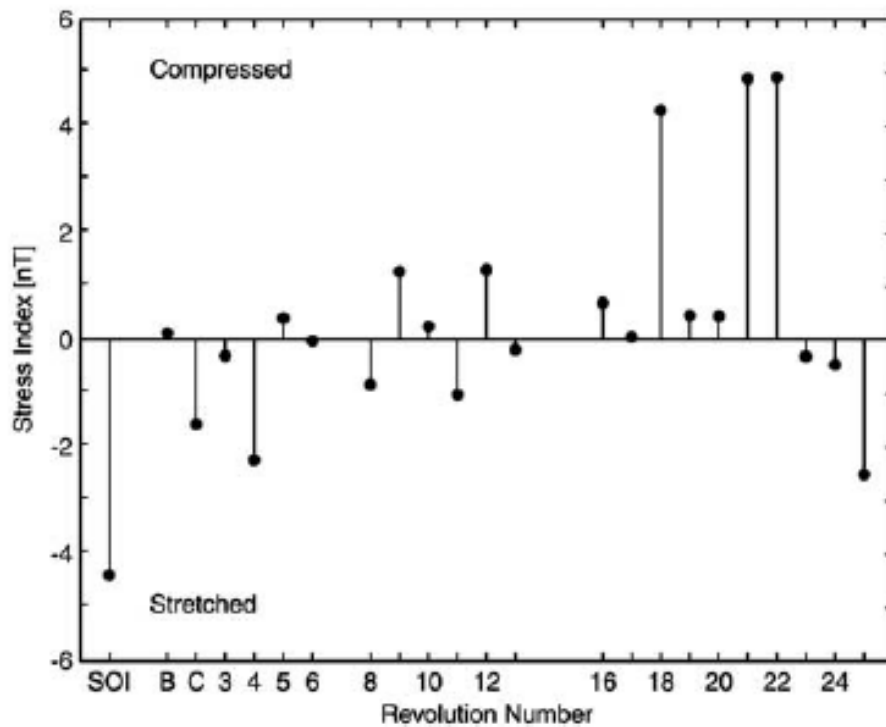
2.7. Η γνώση από προηγούμενες μελέτες

Μετά την ολοκλήρωση των πρώτων 25 τροχιών της αποστολής του Cassini οι Leisner et al. (2007) παρουσίασαν για πρώτη φορά έναν δείκτη μέτρησης της μαγνητοσφαιρικής παραμόρφωσης του Κρόνου με τη χρήση του μοντέλου μαγνητικού πεδίου του Κρόνου *Khurana et al.* [2005] το οποίο εξήχθη από μετρήσεις χρονικής διακριτικότητας λεπτού των αποστολών Voyager 1&2, καθώς και των τεσσάρων πρώτων τροχιών του Cassini, με χρήση τεχνικών που έχουν εφαρμοστεί και στη Γήινη μαγνητόσφαιρα [Tsyganenko, 1998, 2002a, 2002b] για τον καθορισμό ενδογενών και εξωγενών μαγνητικών πεδίων. Το μοντέλο αποτελείται από συνιστώσες του ενδογενούς αξονικά συμμετρικού και σφαιρικά αρμονικού μοντέλου [Davis and Smith, 1986], του δακτυλιοειδούς ρεύματος και της μαγνητοουράς (φύλλο πλάσματος μορφής δίσκου).

Αρχικά κατασκευάστηκε ένα συμμετρικό, χωρίς κλίση μοντέλο της μαγνητόσφαιρας με τη μαγνητοουρά παράλληλη στην ευθεία Ηλίου – Κρόνου. Στη συνέχεια προστέθηκε μια ανομοιομορφία κατά την οποία το φύλλο πλάσματος είναι πλησιέστερα στο διπολικό μαγνητικό ισημερινό στην εσωτερική μαγνητόσφαιρα και παράλληλο στον ηλιακό άνεμο για μεγάλες αποστάσεις. Το μοντέλο παρουσιάζει εξαιρετική συμφωνία με δεδομένα.

Παρατηρήθηκαν ορισμένες τροχιές με έντονη απόκλιση της μαγνητόσφαιρας από τη μέση κατάσταση όπως η SOI, 18, 21,22 και 25 (Εικόνα 13).

Η μελέτη κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η μαγνητόσφαιρα του Κρόνου βρίσκεται συνήθως κοντά στη μέση κατάστασή της, εντούτοις περιστασιακά παρουσιάζει μεγάλες αποκλίσεις από αυτή.



Εικόνα 13: Δείκτες παραμόρφωσης όπως εξήχθη από τον Leisner για κάθε τροχιά στην οποία το Cassini έκανε διασχίσεις της εσωτερικής μαγνητόσφαιρας στο ισημερινό επίπεδο. (Αναπαραγωγή από Leisner et al. 2007)

3. Μοντέλα αναπαράστασης του μαγνητικού πεδίου Κρόνου

Στην παρούσα μελέτη, για να αναπαραστήσουμε την τοπολογία της μαγνητόσφαιρας χρησιμοποιούμε το μοντέλο του μαγνητικού δίπολου που όπως έχει αποδειχθεί είναι πολύ κοντά στο παρατηρούμενο που είναι αξονικά συμμετρικό. Στο ισημερινό επίπεδο που μελετούμε, έχουμε μια συστηματική πτώση από το δίπολο λόγω δακτυλιοειδούς ρεύματος, που ρέει γύρω από τον Κρόνο και συμπεριστρέφεται σχεδόν συζευγμένα με τον πλανήτη (Krimigis et al. 2007).

Επίσης θα χρησιμοποιούμε το μοντέλο UCL/AGA (Achilleos-Guio-Arridge, Achilleos et al., 2010). Το μοντέλο UCL/AGA περιλαμβάνει μαγνητικό δυναμικό που σχετίζεται με τις διακυμάνσεις του μαγνητικού πεδίου του Κρόνου, από περιστρεφόμενο δίσκο πλάσματος στο ισημερινό επίπεδο του πλανήτη. Τέτοιες δομές είναι θεμελιώδεις στις ταχέως περιστρεφόμενες μαγνητόσφαιρες, όπως του Κρόνου και του Δία που τροφοδοτούνται εσωτερικά από πηγές πλάσματος. Σε αυτό τον φορμαλισμό το μαγνητικό πεδίο θεωρείται αξιμουθιακά συμμετρικό ως προς τον άξονα περιστροφής του πλανήτη, και η θερμοκρασία σταθερή κατά μήκος των δυναμικών γραμμών.

Μολονότι ως σήμερα και μετά και την ολοκλήρωση της 13-ετούς απόστολής Cassini, έχουν γίνει εκτεταμένες μετρήσεις σε ολόκληρη σχεδόν την Κρόνια μαγνητόσφαιρα, έχουν διερευνηθεί φυσικοί μηχανισμοί που ρυθμίζουν τα χαρακτηριστικά της και έχουν αναπτυχθεί αρκετά υπολογιστικά μοντέλα που περιγράφουν ή προσπαθούν να προβλέψουν τις μεταβολές της, κανένα από αυτά δεν είναι σε θέση να περιγράψει με απόλυτη ακρίβεια τις δυναμικές μεταβολές στην τοπολογία της συγκεκριμένης μαγνητόσφαιρας.

3.1. Το μοντέλο του μαγνητικού διπόλου (B_{dip})

Το διάνυσμα της έντασης του μαγνητικού πεδίου από ιδανικό μαγνητικό δίπολο δίνεται από τη σχέση:

$$\mathbf{B}_{dip}(r, \theta) = \frac{\mu_0 m}{4\pi r^3} [2\cos\theta \mathbf{r} + \sin\theta \boldsymbol{\theta}] \quad (3)$$

Όπου μ_0 η μαγνητική διαπερατότητα του κενού και m (διπολική) μαγνητική ροπή του διπόλου, ενώ $\mathbf{r}$ και $\boldsymbol{\theta}$ τα μοναδιαία διανύσματα κατά την ακτινική και την πολική διεύθυνση.

Το μέτρο του είναι:

$$B_{dip} = \frac{\mu_0 m}{4\pi r^3} \sqrt{4\cos^2\theta + \sin^2\theta} \quad (4)$$

Παρατηρούμε ότι το πεδίο είναι αξονικά συμμετρικό, δηλαδή έχει εξάρτηση μόνο από την απόσταση r και την πολική γωνία θ και όχι από τον τοπικό χρόνο. Για το ισημερινό επίπεδο που θα μελετήσουμε η μορφή του διπόλου είναι:

$$\mathbf{B}_{dip}(r) = \frac{\mu_0 m}{4\pi r^3} \boldsymbol{\theta} \quad (5)$$

Διαπιστώνουμε ότι η ένταση του μαγνητικού πεδίου για ισημερινές περιοχές είναι κάθετη στο ισημερινό επίπεδο και εξαρτάται αποκλειστικά από την απόσταση r από το δίπολο. Θεωρητικά αναμενόμενη είναι επομένως μόνο η πολική συνιστώσα, ενώ η εμφάνιση ακτινικής, ή αζιμουθιακής θεωρούνται ως διαταραχή.

Στο σύστημα του Κρόνου, βάσει παρατηρήσεων η εξίσωση (5) παίρνει τη μορφή:

$$\mathbf{B}_{dip}(r) = \frac{21162}{r^3} \boldsymbol{\theta} \quad (6)$$

όπου r δίνεται σε ακτίνες Κρόνου R_s

Η χρήση του μοντέλου του διπόλου εισάγει αβεβαιότητα στη μελέτη μας, όπως θα δούμε με μεγαλύτερη λεπτομέρεια παρακάτω.

3.2. Το μοντέλο *Achilleos – Guio – Arridge (UCL/AGA)*

Ο φορμαλισμός του μοντέλου βασίζεται στη μαγνητοστατική λύση ενός δυναμικού Euler συνεπούς με την παγκόσμια ισορροπία μεταξύ βαθμίδας πίεσης πλάσματος, φυγόκεντρου δύναμης και μαγνητικής δύναμης ($\mathbf{J} \times \mathbf{B}$) σε κυλινδρικά συμμετρικό σύστημα. Το μοντέλο διαταράσσει το διπολικό δυναμικό (ομογενής λύση) χρησιμοποιώντας απλοποιημένες κατανομές της πίεσης πλάσματος και της γωνιακής ταχύτητας, βάσει παρατηρήσεων από τα διαστημόπλοια Cassini (για τον Κρόνο) και Voyager (για τον Δία). Το μοντέλο εφαρμόζεται και στους δύο πλανήτες.

Τέτοια προσέγγιση έχει το πλεονέκτημα να προβλέπει ένα αυτοσυνεπές σύστημα χαρακτηριστικών πλάσματος, μαγνητοσφαιρικών αζιμουθιακών ρευμάτων και μαγνητικού πεδίου. Οι συνοριακές συνθήκες του μοντέλου προέρχονται από παρατηρήσεις των πρώτων χρόνων της αποστολής Cassini για τις κατανομές του πλάσματος σε διάφορες θέσεις και σε διάφορες ενέργειες εντός της μαγνητόσφαιρας και επικαιροποιείται συνεχώς καθώς ενσωματώνει όλο και περισσότερες μετρήσεις.

Για τη διαμόρφωση ενός μοντέλου με ρεαλιστική συμπεριφορά, υιοθετήθηκαν σχετικά απλές εξισώσεις μαγνητοϋδροδυναμικής αυτών των φυσικών παραμέτρων. Σε αυτό το πλαίσιο, εφαρμόστηκε η έννοια του μοναδιαίου όγκου σωλήνα ροής σε συνέχεια του Caudal (1986) ώστε να υπολογιστεί η παγκόσμια κατανομή του πλάσματος, του οποίου η πυκνότητα και η πίεση να είναι συνεπής με τις διαφορετικές μαγνητοσφαιρικές ακτίνες, σύμφωνα με την αναμενόμενη συμπεριφορά «παγωμένου» πλάσματος. Έγινε χρήση των εμπειρικών προσαρμογών για την πίεση θερμού πλάσματος, τη σύνθεση ψυχρού πλάσματος και την θερμοκρασία ψυχρού πλάσματος από Sergis et al. (2007, 2009) και Wilson et al. (2008) για να επιτευχθεί εύλογη αναπαράσταση στο μοντέλο των μέσων μαγνητοσφαιρικών συνθηκών του Κρόνου. Επίσης έγινε χρήση πολυωνυμικής προσαρμογής στα δεδομένα από Kane et al. (2008) και Wilson et al. (2008) της γωνιακής ταχύτητας του πλάσματος.

Τα αποτελέσματα ποσοτικοποιούν το βαθμό της διαστολής που προκαλείται στις δυναμικές γραμμές του διπολικού μαγνητικού πεδίου κατά την ακτινική διεύθυνση εξ' αιτίας της περιστροφής του πλάσματος και της πίεσης που αυτή προκαλεί. Μια απλοποιημένη εκδοχή του μοντέλου, ο «ομογενής δίσκος» μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της απόστασης της μετάβασης της εξωτερικής μαγνητόσφαιρας από κατάσταση που κυριαρχείται από την πίεση, σε κυριαρχούμενη από τη φυγόκεντρο. Σχολιάζεται επίσης το μέγεθος του ισημερινού περιορισμού όπως καθορίζεται από την κλίμακα ύψους που σχετίζεται με ιόντα του δίσκου διαφόρων μαζών και θερμοκρασιών.

Στην περίπτωση του Κρόνου, αναγνωρίζονται οι κύριες δυνάμεις που συνεισφέρουν στο ρεύμα του μαγνητοδίσκου και γίνονται συγκρίσεις μεταξύ της δομής του μαγνητικού πεδίου όπως προβλέπεται από το μοντέλο και τις μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου από το Cassini. Το μοντέλο εφαρμόζεται και στον Δία, ώστε να επιβεβαιωθεί η εφαρμογή του. Επίσης καταδεικνύεται ότι ο εξωτερικός δίσκος πλάσματος στον Δία κυριαρχείται σαφώς από την πίεση, σε σύγκριση με τον δίσκο πλάσματος του Κρόνου όπου η βαθμίδα πίεσης είναι κατά μέσο όρο ασθενέστερη από την φυγόκεντρο.

Το μοντέλο UCL/AGA προσφέρει μια πιο ρεαλιστική προσέγγιση της Μαγνητόσφαιρας του Κρόνου.

3.3. Τοποθέτηση του προβλήματος – ερωτήματα

Η παρούσα εργασία έρχεται να συνδράμει στην αντιμετώπιση ενός πολύ βασικού και παλαιού προβλήματος ανάλυσης δεδομένων που προέρχονται από ένα μόνο διαστημόπλοιο. Η δυσκολία στην ανάλυση δεδομένων τέτοιων αποστολών έγκειται στο ότι η πληροφορία αντιστοιχεί σε μία χρονική στιγμή και ένα σημείο (την εκάστοτε θέση του διαστημοπλοίου), δεν έχουμε δηλαδή μετρήσεις πολλαπλών σημείων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα περιορισμένη εποπτική εικόνα και αδυναμία διαχωρισμού μεταξύ των χωρικών και των χρονικών μεταβολών. Το πρόβλημα αυτό είναι σύνηθες σε αποστολές προς πλανήτες εκτός της Γης, όπου τις περισσότερες

φορές έχουμε ένα μόνο διαστημόπλοιο να προσεγγίζει ή να γίνεται δορυφόρος ενός πλανήτη.

Ωστόσο η σύνδεση φαινομένων που εμφανίζονται σε μία περιοχή με την αιτία τους να εντοπίζεται αρκετά μακριά, απαιτεί πληροφορίες και για τις δύο περιοχές, πχ συνθήκες πίεσης εκτός και εντός μαγνητόσφαιρας, ενώ ιδανικά είναι επιθυμητή η γνώση της γενικής κατάστασης της μαγνητόσφαιρας (συμπιεσμένη/διεσταλμένη).

Δυστυχώς, ασφαλής εικόνα της μαγνητόσφαιρας υπάρχει μόνο για τη χρονική στιγμή που το διαστημόπλοιο διασχίζει τη μαγνητόπαυση, σε οποιοδήποτε σημείο της μαγνητόπαυσης και αν συμβεί η διάβαση, καθώς τότε – βάσει μοντέλων – είναι δυνατό να γνωρίζουμε τη θέση της προσήλιας μαγνητόπαυσης και συνεπώς την κατάστασή της. Από εκείνη τη στιγμή ωστόσο, ως τη στιγμή που το διαστημόπλοιο θα βρεθεί στην περίαψη ενδεχομένως να έχουν περάσει αρκετές μέρες, οπότε και η μαγνητόσφαιρα πιθανώς να έχει μεταβληθεί.

Στόχος μας είναι η βέλτιστη χρήση των μετρήσεων ώστε, όχι μόνο να μπορούμε να εκτιμήσουμε τη γενικότερη κατάσταση που βρίσκεται κάποια χρονική στιγμή η μαγνητόσφαιρα (δεδομένης της έλλειψης πολλαπλών μετρήσεων), αλλά και να ποσοτικοποιηθεί η δυναμική συμπεριφορά της μαγνητόσφαιρας σε βαθμό που να είναι εφικτή η στατιστική μελέτη της.

Τα ερωτήματα στα οποία θα προσπαθήσουμε να απαντήσουμε στην παρούσα εργασία είναι συνοπτικά τα εξής:

- Μπορούμε να κατασκευάσουμε έναν δείκτη, ο οποίος να περιγράφει ποιοτικά και ποσοτικά τη γενική κατάσταση της μαγνητόσφαιρας (διεσταλμένη/συμπιεσμένη) με βάση μετρήσεις που έχουν ληφθεί αποκλειστικά στο εσωτερικό της μαγνητόσφαιρας;
- Είναι εφικτό ένας τέτοιος δείκτης να λειτουργήσει ανεξάρτητα από την τοπολογία των διαθέσιμων μετρήσεων, ώστε οι τιμές του να έχουν γενικευμένη εφαρμογή και να δίνουν τη δυνατότητα σύγκρισης μεταξύ διαφορετικών χρονικών περιόδων;
- Μπορούν τα αποτελέσματα αυτής της προσέγγισης να ελεγχθούν με ανεξάρτητο τρόπο;

- Ποιες πληροφορίες μας δίνει η στατιστική κατανομή των τιμών του δείκτη σε σχέση με την κατάσταση της μαγνητόσφαιρας;
- Είναι εφικτό ένας τέτοιος δείκτης να χρησιμοποιηθεί σε περιπτώσεις και άλλων μαγνητοσφαιρών όπου έχουμε δεδομένα από ένα μόνο διαστημόπλοιο;
- Μπορεί ένας τέτοιος δείκτης να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα για ένα τόσο δυναμικά μεταβλητό σύστημα όπως αυτό του Κρόνου;
- Πόσο ευαίσθητος είναι ο δείκτης αυτός στην επιλογή του μοντέλου για το μαγνητικό πεδίο που θα χρησιμοποιηθεί;
- Μπορεί η διακύμανση του δείκτη να συσχετιστεί ή και να επιβεβαιώσει την αλληλεπίδραση της μαγνητόσφαιρας του Κρόνου με έντονα φαινόμενα στον ηλιακό άνεμο, όπως SEPs; Θα μπορούσε ο δείκτης αυτός να αποτελέσει ένα εναλλακτικό εργαλείο καταγραφής των συνθηκών του ηλιακού ανέμου στην περιοχή του Κρόνου;

4. Μεθοδολογία & Αποτελέσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο αναπτύσσεται η επεξεργασία των δεδομένων, η μεθοδολογία για την εξαγωγή του δείκτη και γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων.

4.1. Η κατασκευή του Δείκτη – Κριτήρια Επιλογής

Για τη μελέτη μας, χρησιμοποιήσαμε δεδομένα του μαγνητομέτρου του Cassini από τις 28 Ιουνίου 2004 ως τις 30 Ιανουαρίου 2016. Τα δεδομένα περιλαμβάνουν το χρόνο παρατήρησης (έναρξη, λήξη), τις σφαιρικές και καρτεσιανές συντεταγμένες του Cassini στο σύστημα του Κρόνου (Κρονογραφικές Συντεταγμένες) και τις σφαιρικές συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου (μέσες ωριαίες τιμές σε nT). Στο σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιούμε η αρχή των αξόνων είναι το κέντρο του πλανήτη, ο άξονας z ταυτίζεται με τον άξονα περιστροφής του, ο άξονας x συνδέει τον Κρόνο με τον Ήλιο, ενώ ο y συμπληρώνει το τρισορθογώνιο σύστημα, ώστε το επίπεδο x-y να ταυτίζεται με το ισημερινό επίπεδο του πλανήτη και ο Ήλιος να ανήκει το επίπεδο x-z. Αντίστοιχα, στο σφαιρικό σύστημα η μέτρηση της πολικής γωνίας θ ξεκινά από το θετικό ημιάξονα z και σταματά στον αρνητικό, ενώ η μέτρηση της αζιμουθιακής γωνίας ϕ γίνεται στο επίπεδο του ισημερινού ξεκινώντας από τον αρνητικό ημιάξονα x (δηλαδή στο μέσο της νυχτερινής πλευράς, LT:00:00) και αριστερόστροφα καταλήγει στο ίδιο σημείο. Η αζιμουθιακή γωνία λέγεται και τοπικός χρόνος (Local Time - LT) και μετράται σε ώρες, με έναν πλήρη κύκλο να αντιστοιχεί σε 24 ώρες.

Ο συνολικός αριθμός των παρατηρήσεων που είχαμε στη διάθεσή μας ήταν 77.246 ωριαίες τιμές και μέρος τους παρατίθεται στην Εικόνα 14. Τα δεδομένα είναι διαθέσιμα και ελεύθερα για χρήση.

Start(Y)	Stop(Y)	Year(Y)	DOY(Y)	DecYear(X)	r(Y)	Lat(Y)	LT(Y)	x(Y)	y(Y)	z(Y)	Br(Y)	Btheta(Y)	Bphi(Y)	Btot(Y)
2004-180T00:00	2004-180T01:00	2004	180.0208	2004.49186	42.75	-15.53	7.61	17.49	-39.01	-11.45	0.26	-0.57	-0.18	0.65
2004-180T01:00	2004-180T02:00	2004	180.0625	2004.49197	42.31	-15.52	7.62	17.36	-38.58	-11.32	0.25	-0.72	-0.15	0.77
2004-180T02:00	2004-180T03:00	2004	180.1042	2004.49209	41.86	-15.51	7.62	17.23	-38.15	-11.19	0.33	-0.24	-0.31	0.51
2004-180T03:00	2004-180T04:00	2004	180.1458	2004.49222	41.41	-15.50	7.63	17.10	-37.72	-11.06	0.10	-0.03	-0.02	0.11
2004-180T04:00	2004-180T05:00	2004	180.1875	2004.49232	40.96	-15.49	7.63	16.97	-37.28	-10.94	0.11	-0.09	-0.06	0.15
2004-180T05:00	2004-180T06:00	2004	180.2292	2004.49243	40.51	-15.48	7.64	16.84	-36.85	-10.81	0.16	-0.13	-0.07	0.22
2004-180T06:00	2004-180T07:00	2004	180.2708	2004.49254	40.06	-15.46	7.64	16.70	-36.41	-10.68	0.13	-0.13	-0.26	0.32
2004-180T07:00	2004-180T08:00	2004	180.3125	2004.49266	39.61	-15.45	7.65	16.57	-35.97	-10.55	0.39	-0.75	-0.35	0.92
2004-180T08:00	2004-180T09:00	2004	180.3542	2004.49277	39.15	-15.44	7.66	16.45	-35.53	-10.42	0.34	-0.44	-0.30	0.63
2004-180T09:00	2004-180T10:00	2004	180.3958	2004.49288	38.70	-15.43	7.66	16.31	-35.09	-10.29	0.42	-0.36	-0.40	0.68
2004-180T10:00	2004-180T11:00	2004	180.4375	2004.493	38.24	-15.41	7.67	16.17	-34.65	-10.16	0.44	-0.18	-0.56	0.73
2004-180T11:00	2004-180T12:00	2004	180.4792	2004.49311	37.78	-15.40	7.67	16.04	-34.21	-10.03	0.39	-0.24	-0.38	0.59
2004-180T12:00	2004-180T13:00	2004	180.5208	2004.49323	37.32	-15.39	7.68	15.91	-33.76	-9.90	0.35	-0.25	-0.41	0.59
2004-180T13:00	2004-180T14:00	2004	180.5625	2004.49334	36.86	-15.37	7.69	15.77	-33.31	-9.77	0.39	-0.29	-0.42	0.64
2004-180T14:00	2004-180T15:00	2004	180.6042	2004.49345	36.40	-15.36	7.70	15.63	-32.87	-9.64	0.35	-0.21	-0.21	0.46
2004-180T15:00	2004-180T16:00	2004	180.6458	2004.49357	35.93	-15.34	7.70	15.50	-32.41	-9.51	0.25	0.05	-0.36	0.44
2004-180T16:00	2004-180T17:00	2004	180.6875	2004.49368	35.46	-15.33	7.71	15.36	-31.97	-9.37	-0.31	-0.23	-0.28	0.48
2004-180T17:00	2004-180T18:00	2004	180.7292	2004.4938	35.00	-15.31	7.72	15.22	-31.51	-9.24	0.03	0.13	-0.47	0.48
2004-180T18:00	2004-180T19:00	2004	180.7708	2004.49391	34.53	-15.30	7.73	15.08	-31.06	-9.11	0.04	0.33	-0.17	0.37
2004-180T19:00	2004-180T20:00	2004	180.8125	2004.49402	34.06	-15.28	7.74	14.94	-30.60	-8.97	-0.37	0.38	-0.05	0.54
2004-180T20:00	2004-180T21:00	2004	180.8542	2004.49414	33.58	-15.26	7.74	14.81	-30.14	-8.84	-2.79	2.73	0.93	4.01
2004-180T21:00	2004-180T22:00	2004	180.8958	2004.49425	33.11	-15.24	7.75	14.66	-29.68	-8.70	-2.04	2.31	1.33	3.36
2004-180T22:00	2004-180T23:00	2004	180.9375	2004.49436	32.63	-15.23	7.76	14.52	-29.22	-8.57	-2.72	2.14	1.56	3.80
2004-180T23:00	2004-181T00:00	2004	180.9792	2004.49448	32.15	-15.21	7.77	14.37	-28.76	-8.43	-0.65	0.67	0.48	1.05
2004-181T00:00	2004-181T01:00	2004	181.0208	2004.49459	31.67	-15.19	7.78	14.23	-28.29	-8.30	0.05	0.05	-0.22	0.23
2004-181T01:00	2004-181T02:00	2004	181.0625	2004.49471	31.19	-15.17	7.79	14.09	-27.82	-8.16	0.17	-0.05	-0.29	0.34

Εικόνα 14. Δείγμα δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν. Πρόκειται για τις μέσες ωριαίες τιμές των σφαιρικών συνιστωσών του μαγνητικού πεδίου. Ταυτόχρονα φαίνεται η θέση του διαστημοπλοίου σε Κρονογραφικές συντεταγμένες, τόσο σφαιρικές όσο και καρτεσιανές. Τα δεδομένα ελήφθησαν από την αποστολή Cassini-Huygens και είναι διαθέσιμα και ελεύθερα στο διαδίκτυο.

Στη συνέχεια επιλέξαμε τις μετρήσεις που ελήφθησαν εντός δακτυλίου μεταξύ 4Rs και 8Rs ($4Rs < r < 8Rs$) και απαιτήσαμε η z συνιστώσα της μέτρησης να βρίσκεται εντός 1Rs από τον ισημερινό.

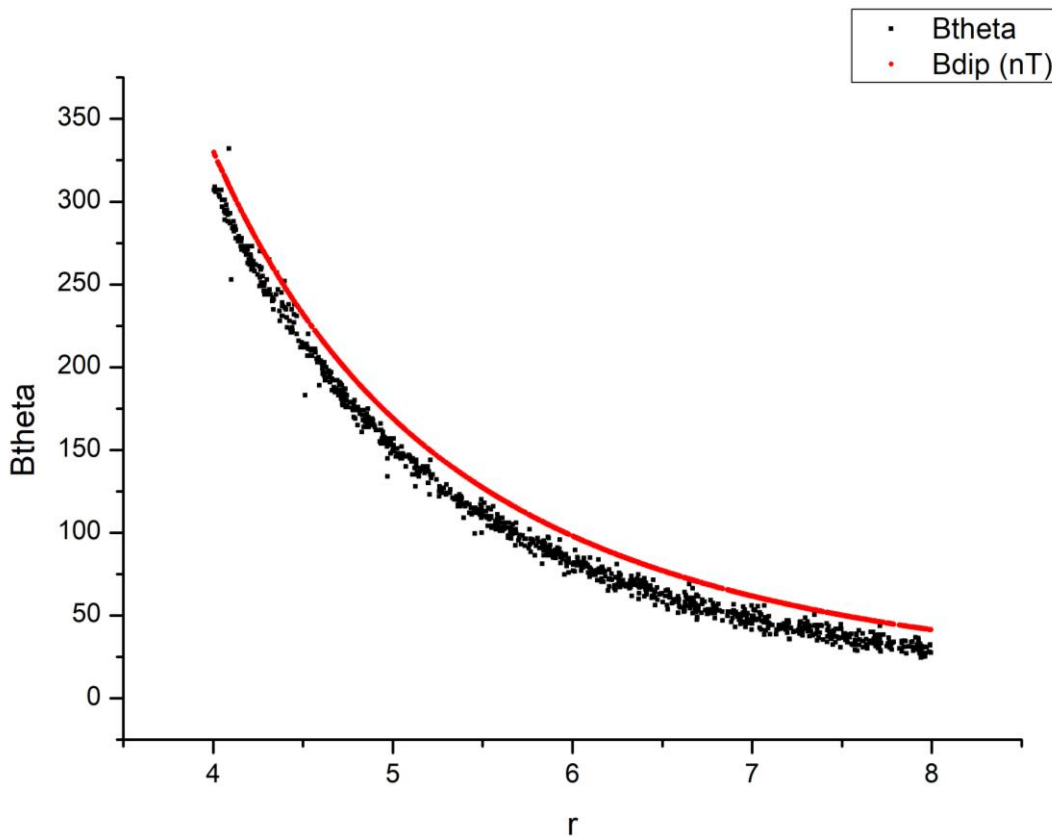
Όπως αναφέρθηκε αναλυτικά στην παράγραφο 2.5 η ανισοτροπία του αζιμουθιακού ρεύματος έχει ως αποτέλεσμα έντονα φαινόμενα με τοπικό χαρακτήρα στη νυχτερινή πλευρά της μαγνητόσφαιρας όπου και εντοπίζεται περιοχή περίπου 45° γύρω από τα μεσάνυχτα που εμφανίζει μεγάλες διακυμάνσεις που δεν παρατηρούνται αλλού στην τροχιά, όπως φαίνεται και στην μελέτη Σκλαβενίτη (2017). Ίσως αυτό συμβαίνει λόγω δυναμικών διεργασιών στην μαγνητοσφαίρα που δεν λαμβάνονται υπόψιν στο μοντέλο μας και που οι επιδράσεις τους περιορίζονται στον νυχτερινό τομέα. Για να μην επηρεάσουν αυτές οι διεργασίες τον δείκτη μαγνητοσφαιρικής παραμόρφωσης που κατασκευάζουμε, εξαιρούμε αυτές τις μετρήσεις από τους υπολογισμούς μας. Συνεπώς εξαιρούμε την περιοχή που αντιστοιχεί σε τοπικό χρόνο LT από 21.00 ως 03.00

Η εφαρμογή των ως άνω κριτηρίων φιλτράρει τα σημεία μας σε 1193 ωριαίες μετρήσεις.

Θεωρητικά, στο ισημερινό επίπεδο η μοναδική μετρούμενη συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου αναμένεται να είναι η πολική B_{theta} ωστόσο καταγράφονται μη μηδενικές συνιστώσες B_r (ακτινική) και B_{phi} (αζιμουθιακή). Αυτό συμβαίνει πρωτίστως διότι οι πληθυσμοί φορτισμένων σωματιδίων αλλοιώνουν σημαντικά τη διαμόρφωση του μαγνητικού πεδίου. Επιπροσθέτως εισάγεται ένα μικρό συστηματικό σφάλμα καθώς η δειγματοληψία μας δεν προέρχεται αυστηρά από το ισημερινό επίπεδο, αλλά φτάνει έως και $1R_s$ εκατέρωθεν του ισημερινού επιπέδου. Σε αυτά τα πλάτη αναμένεται μη μηδενική ακτινική συνιστώσα όπως αναφέρθηκε στο 1.9.1. Ωστόσο στην παρούσα εργασία θα αντιμετωπίσουμε την B_{theta} σαν τη μοναδική μετρούμενη συνιστώσα, όταν αναφερόμαστε στο μαγνητικό δίπολο.

4.2. Εφαρμογή Δεδομένων στο Μοντέλο Μαγνητικού Διπόλου

Αρχικά κατασκευάζουμε το διάγραμμα του μαγνητικού πεδίου B_{theta} συναρτήσει της απόστασης r και το συγκρίνουμε με το θεωρητικά αναμενόμενο του διπόλου B_{dip} .



Εικόνα 15: Η ένταση του μαγνητικού πεδίου συναρτήσει της απόστασης από το κέντρο του Κρόνου. Με μαύρο χρώμα συμβολίζονται οι μετρήσεις και με κόκκινο χρώμα το θεωρητικό δίπολο.

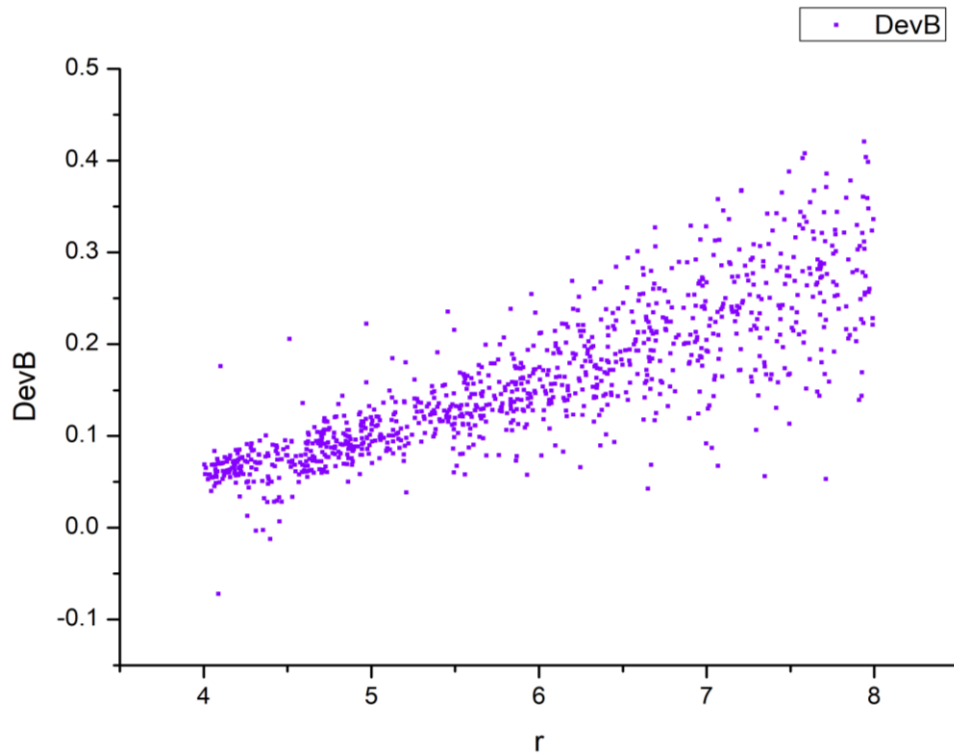
Στην Εικόνα 15, που απεικονίζει την ένταση του μαγνητικού πεδίου συναρτήσει της απόστασης από το κέντρο του Κρόνου, οι μετρήσεις συμβολίζονται με τις μαύρες κουκίδες, ενώ το θεωρητικό δίπολο αναπαριστάται με την κόκκινη καμπύλη. Παρατηρούμε αφενός ότι η καμπύλη που προκύπτει από τις μετρήσεις ακολουθεί τον νόμο τρίτης τάξης του θεωρητικού διπόλου και αφετέρου ότι υπάρχει μια συστηματική πτώση σε σχέση με το δίπολο. Η απόκλιση οφείλεται κυρίως στην ύπαρξη δακτυλιοειδούς ρεύματος, που ρέει γύρω από τον Κρόνο και συμπεριστρέφεται σχεδόν συζευγμένα με τον πλανήτη. Η μέση απόκλιση από το δίπολο λοιπόν εκφράζει τους εγγενείς μηχανισμούς που επηρεάζουν το σύστημα του Κρόνου.

Για τη μελέτη μας θα θεωρήσουμε τη σχετική απόκλιση όλων των μετρήσεων από το θεωρητικό δίπολο.

$$DevB = \frac{B_{dip} - B_{theta}}{B_{dip}} \quad (7)$$

Η χρήση της σχετικής απόκλισης έχει το πλεονέκτημα ότι έχει την ίδια βαρύτητα σε κάθε απόσταση από τον πλανήτη. Σε ένα δίπολο η μεγαλύτερη εξάρτηση είναι από την ακτινική απόσταση και μάλιστα με νόμο δύναμης -3. Για να παράξουμε έναν λειτουργικό δείκτη που να περιγράφει το σύστημα για ικανό εύρος αποστάσεων, θα πρέπει να εξαλειφθεί η ακτινική εξάρτηση. Η χρήση της σχετικής απόκλισης οδηγεί σε εξάλειψη της εξάρτησης από την ακτινική απόσταση και πλέον δημιουργείται ένας αδιάστατος δείκτης με τον οποίο μπορούμε να συγκρίνουμε μετρήσεις από διάφορες περιοχές και αποστάσεις.

Η κατανομή της σχετικής απόκλισης $DevB$ ως προς την απόσταση r φαίνεται την Εικόνα 16.



Εικόνα 16: Η κατανομή της σχετικής απόκλισης του Btheta από το θεωρητικό δίπολο. Φαίνεται να υπάρχει γραμμική εξάρτηση από την απόσταση. Ταυτόχρονα παρατηρούμε ότι υπάρχουν κάποιες μετρήσεις που βρίσκονται αρκετά εκτός της διαφαινόμενης μέσης τιμής. Υποθέτουμε ότι ανήκουν σε κατάσταση παραμόρφωσης της μαγνητόσφαιρας.

Σε μια τυπική μέρα η απόκλιση δεν διαφέρει από τη μέση κατάσταση. Όταν όμως σε μια τροχιά παρατηρούμε μεγάλες διαφορές από τη μέση αναμενόμενη απόκλιση, τότε πλέον μπορούμε να μιλάμε για συμπιεσμένη, ή διεσταλμένη μαγνητόσφαιρα.

Για να υπολογίσουμε τη μέση σχετική απόκλιση (στο εξής απόκλιση) θα χωρίσουμε το δείγμα των μετρήσεων ανά $0.2R_s$ και θα εφαρμόσουμε στατιστική ανάλυση (Εικόνα 17) για να βρούμε τη μέση τιμή της απόκλισης σε αυτή την απόσταση.

r	N total	Mean	SE of mean	Standard Dev	1st Quartile (Q1)	3rd Quartile (Q3)	Median	error minus	error plus
4.1	54	0.063	0.004	0.026	0.057	0.071	0.063	0.006	0.008
4.3	54	0.063	0.003	0.024	0.053	0.078	0.069	0.015	0.009
4.5	41	0.071	0.005	0.032	0.058	0.083	0.071	0.013	0.012
4.7	73	0.088	0.002	0.018	0.073	0.103	0.091	0.018	0.011
4.9	63	0.098	0.003	0.026	0.083	0.110	0.093	0.009	0.017
5.1	49	0.107	0.003	0.022	0.094	0.117	0.102	0.008	0.016
5.3	40	0.124	0.004	0.026	0.108	0.137	0.125	0.017	0.012
5.5	66	0.128	0.004	0.031	0.113	0.144	0.124	0.011	0.020
5.7	48	0.140	0.004	0.029	0.122	0.158	0.134	0.012	0.024
5.9	64	0.149	0.004	0.035	0.129	0.167	0.148	0.018	0.019
6.1	51	0.163	0.005	0.038	0.139	0.191	0.157	0.017	0.034
6.3	56	0.177	0.005	0.041	0.149	0.200	0.176	0.027	0.025
6.5	49	0.194	0.006	0.044	0.168	0.218	0.193	0.025	0.025
6.7	60	0.204	0.007	0.055	0.164	0.241	0.213	0.049	0.028
6.9	48	0.221	0.008	0.052	0.188	0.259	0.209	0.021	0.050
7.1	45	0.230	0.009	0.064	0.194	0.273	0.235	0.041	0.038
7.3	45	0.236	0.010	0.067	0.180	0.285	0.245	0.065	0.040
7.5	46	0.259	0.011	0.071	0.211	0.316	0.259	0.048	0.057
7.7	49	0.266	0.009	0.066	0.239	0.307	0.276	0.038	0.031
7.9	40	0.280	0.011	0.069	0.225	0.327	0.278	0.053	0.048

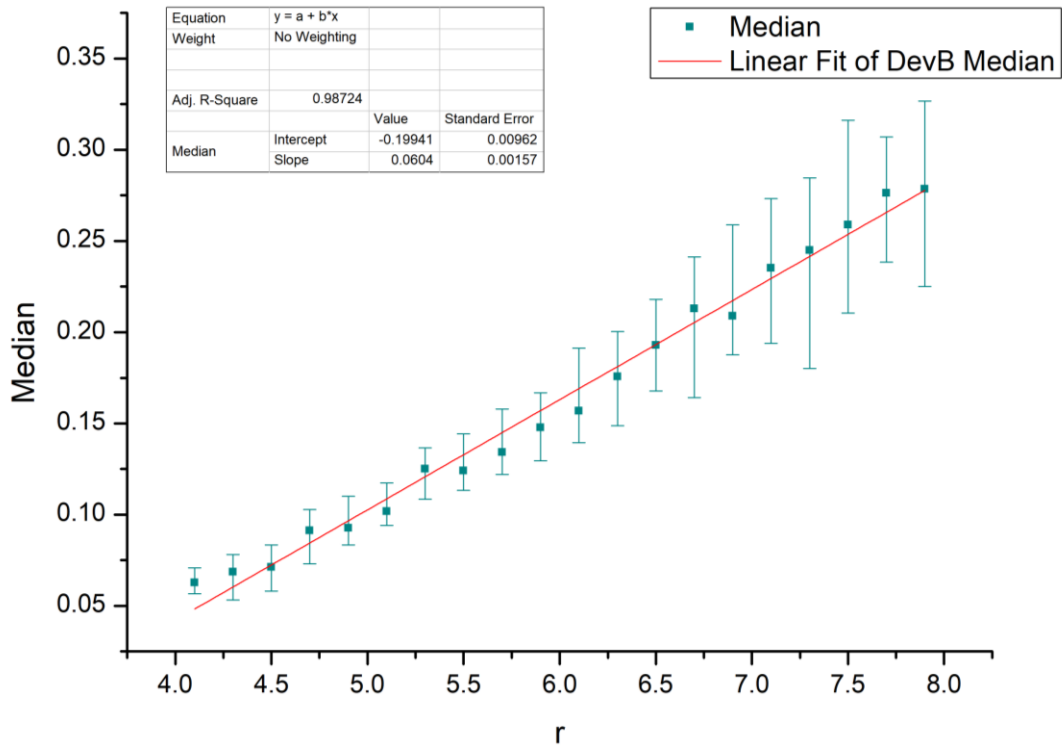
Εικόνα 17: Στατιστική ανάλυση των σχετικών αποκλίσεων. Το μεγαλύτερο πλήθος μετρήσεων (73) εντοπίζεται στο διάστημα 4.6-4.8Rs, ενώ το μικρότερο πλήθος μετρήσεων (40) στα διαστήματα 5.2-5.4Rs και 7.8-8.0Rs. Επιλέγουμε τη χρήση του median έναντι του mean για λόγους στατιστικής ακρίβειας.

Παρατηρούμε ότι όντως η απόκλιση έχει γραμμική εξάρτηση από την απόσταση. Μια προσαρμογή του median δίνει (Εικόνα 18).

$$y = 0.0604r - 0.20 \quad (8)$$

Το σφάλμα του παράγοντα 0.0604 είναι ± 0.0016 και το σφάλμα της σταθεράς -0.20 είναι ± 0.01 ενώ ο συντελεστής συσχέτισης R-value είναι 0,99394, δηλαδή μπορούμε να μιλήσουμε με ασφάλεια για απόλυτη γραμμική εξάρτηση της απόκλισης από το μαγνητικό πεδίο του διπόλου και της απόστασης από τον πλανήτη.

Επιλέγουμε τη χρήση του median για μεγαλύτερη στατιστική ασφάλεια. Δοκιμαστικά κάναμε ταυτόχρονη χρήση και των δύο και δεν παρατηρήσαμε ανησυχητικές διαφορές



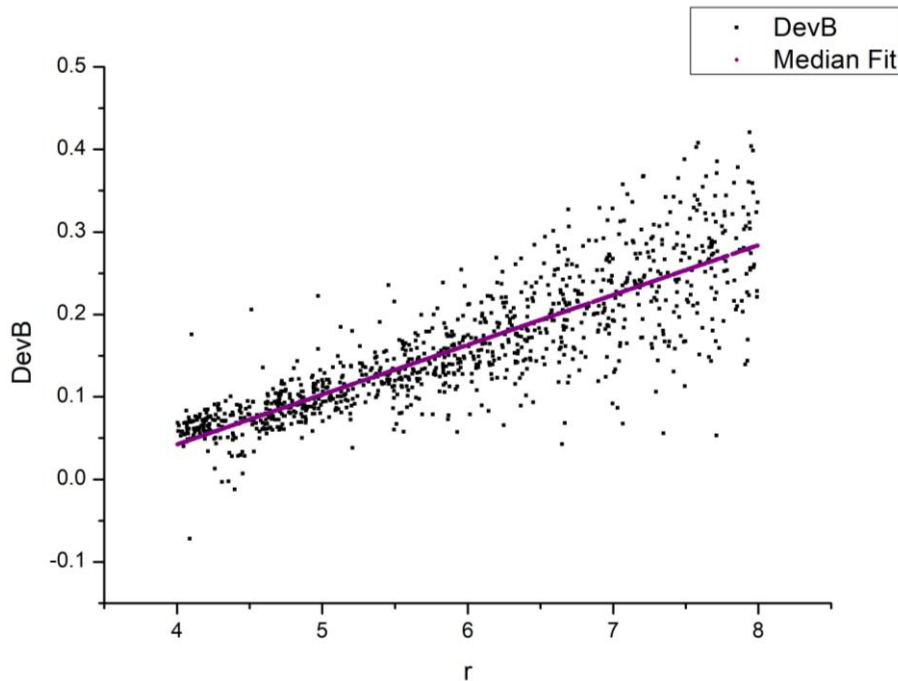
Εικόνα 18: Στο γράφημα φαίνεται η γραμμική προσαρμογή και τα σφάλματα της σχετικής απόκλισης του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου από το δίπολο, συναρτήσει της απόστασης από τον Κρόνο, με συντελεστή συσχέτισης 0,99394.

Αφού έχει υπολογιστεί η μέση κατάσταση της μαγνητόσφαιρας, μπορεί να απεικονιστεί στο ίδιο διάγραμμα με τα δεδομένα (Εικόνα 19) ώστε να γίνει σύγκριση.

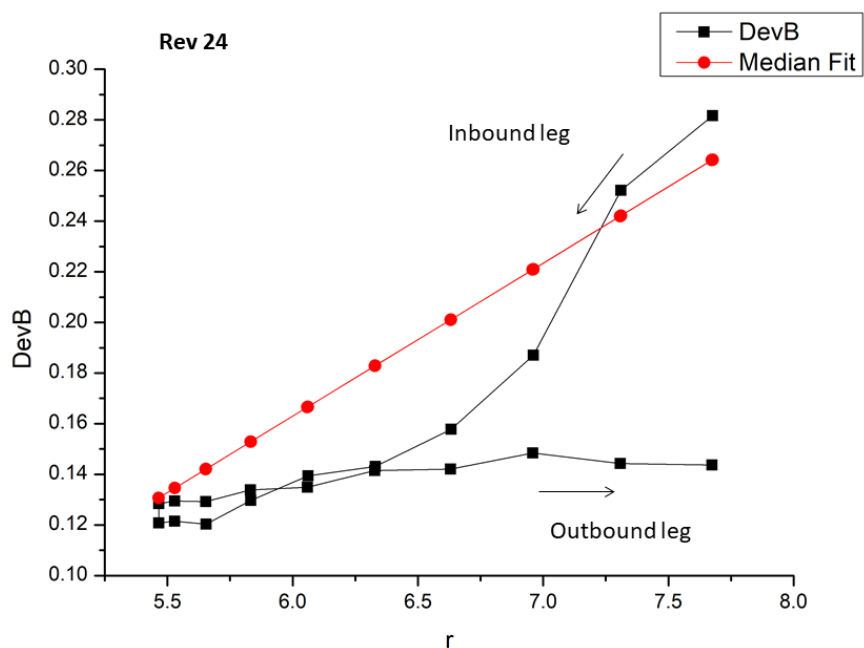
Το επόμενο βήμα είναι να γίνει σύγκριση των επιμέρους τροχιών με τη μέση αυτή κατάσταση. Οι τροχιές που έχουμε στην διάθεσή μας είναι από την B ως την 231. Επιλέγουμε τις τροχιές που έχουν τουλάχιστον τρεις ωριαίες μετρήσεις εντός των κριτηρίων όπως αυτά αναφέρονται στην ενότητα 4.1 (Κατασκευή Δείκτη – Κριτήρια επιλογής). Με την εφαρμογή των κριτηρίων κάποιες τροχιές αποκλείονται και ο τελικός αριθμός των προς μελέτη τροχιών είναι ενενήντα τέσσερις (94).

Στην Εικόνα 20 απεικονίζεται η κατάσταση της μαγνητόσφαιρας για την τροχιά 24 (Rev24). Η τροχιά επιλέχθηκε ως παράδειγμα γιατί περιλαμβάνει και εισερχόμενο (inbound) και εξερχόμενο (outbound) σκέλος. Ανάλογα με την κίνηση του διαστημοπλοίου που μεταβάλλεται στη διάρκεια της αποστολής υπάρχουν τροχιές που έχουν και εισερχόμενο και εξερχόμενο σκέλος, και τροχιές που έχουν μόνο το ένα από τα δύο.

Με μαύρο χρώμα αναπαριστάται το DevB βάσει των μετρήσεων που λήφθηκαν από το Cassini, ενώ με κόκκινο η μέση κατάσταση του μαγνητικού πεδίου όπως έχει υπολογιστεί από τη στατιστική ανάλυση του DevB.



Εικόνα 19: Αναπαράσταση της μέσης κατάστασης της μαγνητόσφαιρας στο ίδιο γράφημα με τις μετρήσεις

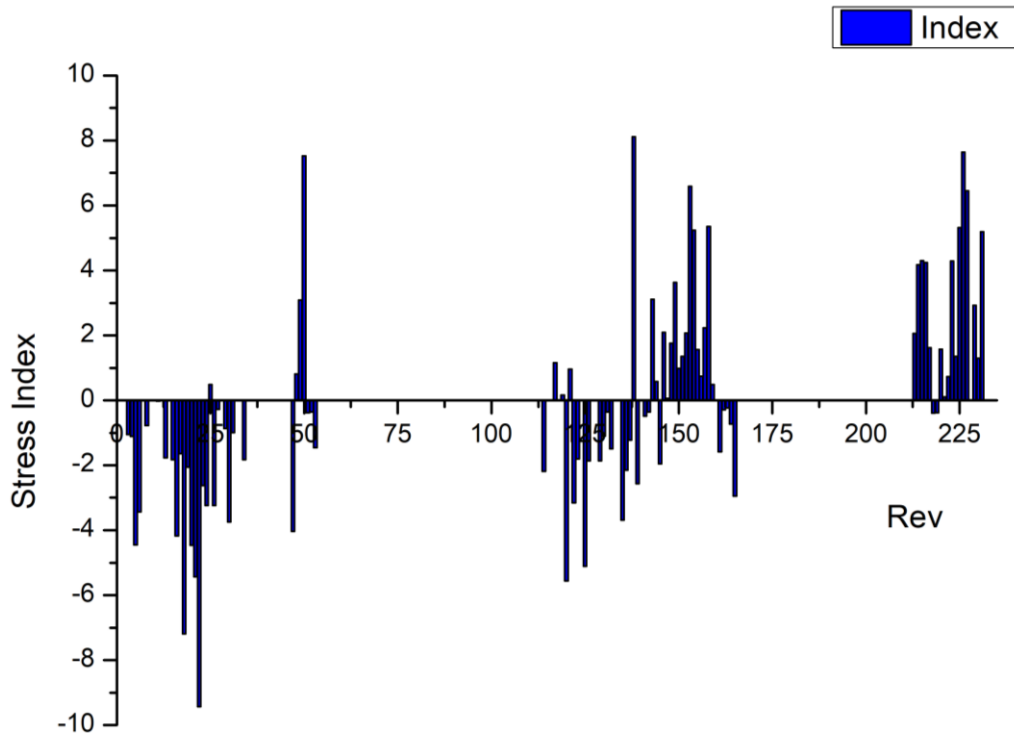


Εικόνα 20: Η μαύρη καμπύλη αναπαριστά τις μετρήσεις που λήφθηκαν κατά την τροχιά 24 στο εισερχόμενο και το εξερχόμενο σκέλος της, σε σύγκριση με τη μέση κατάσταση της μαγνητόσφαιρας (κόκκινη καμπύλη).

Στη συνέχεια ορίζουμε τον Δείκτη Μαγνητοσφαιρικής παραμόρφωσης ως τη μέση τιμή της διαφοράς ανάμεσα στη μέση κατάσταση της μαγνητόσφαιρας (μέση απόκλιση από το μαγνητικό δίπολο) από την μετρούμενη απόκλιση από το μαγνητικό δίπολο, για όλες τις μετρήσεις N της κάθε τροχιάς και στο εισερχόμενο και στο εξερχόμενο σκέλος της.

$$Index = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [DevB(r_i) - Median(r_i)] \quad (9)$$

Όταν η μαγνητόσφαιρα είναι διεσταλμένη ο δείκτης είναι θετικός, αντίθετα όταν η μαγνητόσφαιρα είναι συμπιεσμένη, τότε ο δείκτης που εξάγεται είναι αρνητικός (Εικόνα 21). Χρησιμοποιώντας τη σχέση (9) για κάθε τροχιά που πληροί τα κριτήρια επιλογής εξάγεται ο Δείκτης Μαγνητοσφαιρικής Παραμόρφωσης με την απόκλιση και το σφάλμα του και για τις ενενήντα τέσσερις τροχιές (Παράρτημα παράγραφος 5.1). Για λόγους ευκολίας στην χρησιμοποιούμενη κλίμακα πολλαπλασιάζουμε τις τιμές με το 100.



Εικόνα 21: Στο ιστόγραμμα φαίνεται ο δείκτης μαγνητοσφαιρικής παραμόρφωσης από την τροχιά B ως την 231 (94 τροχιές)

Το μεγαλύτερο δείκτη συμπίεσης παρουσιάζουν οι τροχιές 22, 18, 120 και 21, ενώ η μαγνητόσφαιρα ήταν περισσότερο διεσταλμένη για τις τροχιές, 138, 226, 50 και 153. Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται ο αριθμός τροχιάς, ο χρόνος περίαψης της τροχιάς και ο δείκτης μαγνητοσφαιρικής παραμόρφωσης αντίστοιχα.

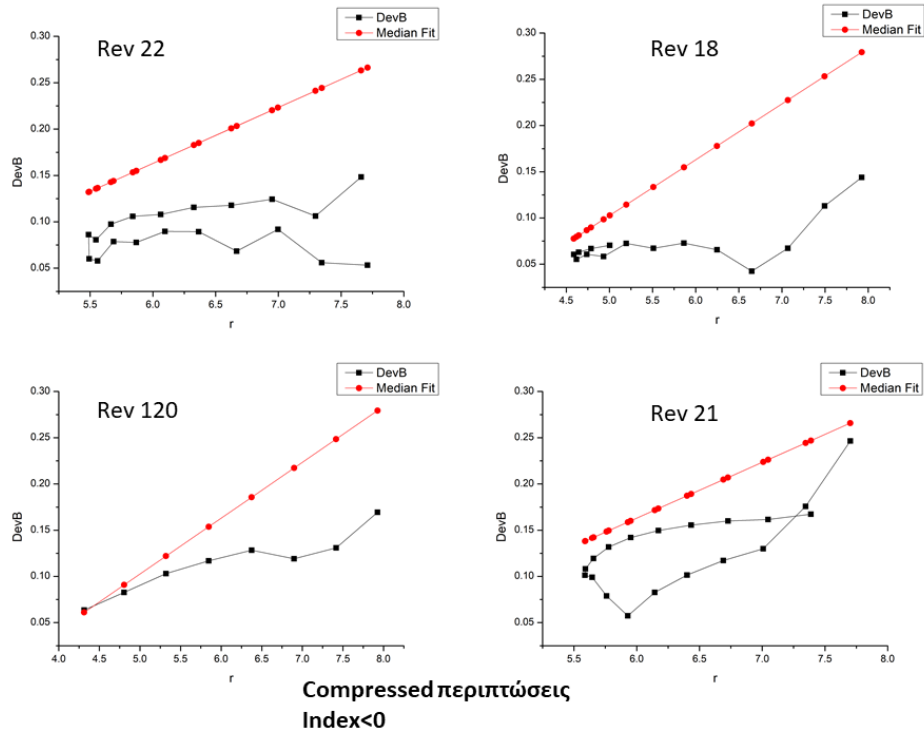
Most Compressed

Rev	Time of periapsis	S. Index
22	2006-079T20:05	-9.4
18	2005-331T11:21	-7.2
120	2009-306T04:39	-5.6
21	2006-056T10:56	-5.4

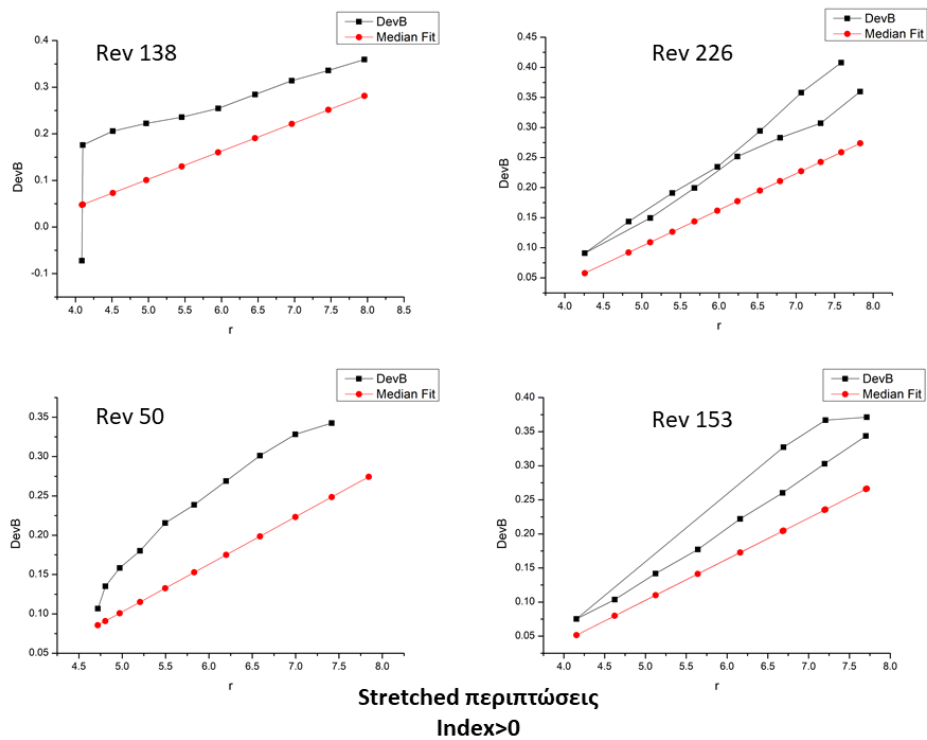
Most Stretched

Rev	Time of periapsis	S. Index
138	2010-265T23:59	8.1
226	2015-328T03:14	7.6
50	2007-273T11:29	7.5
153	2011-256T23:01	6.6

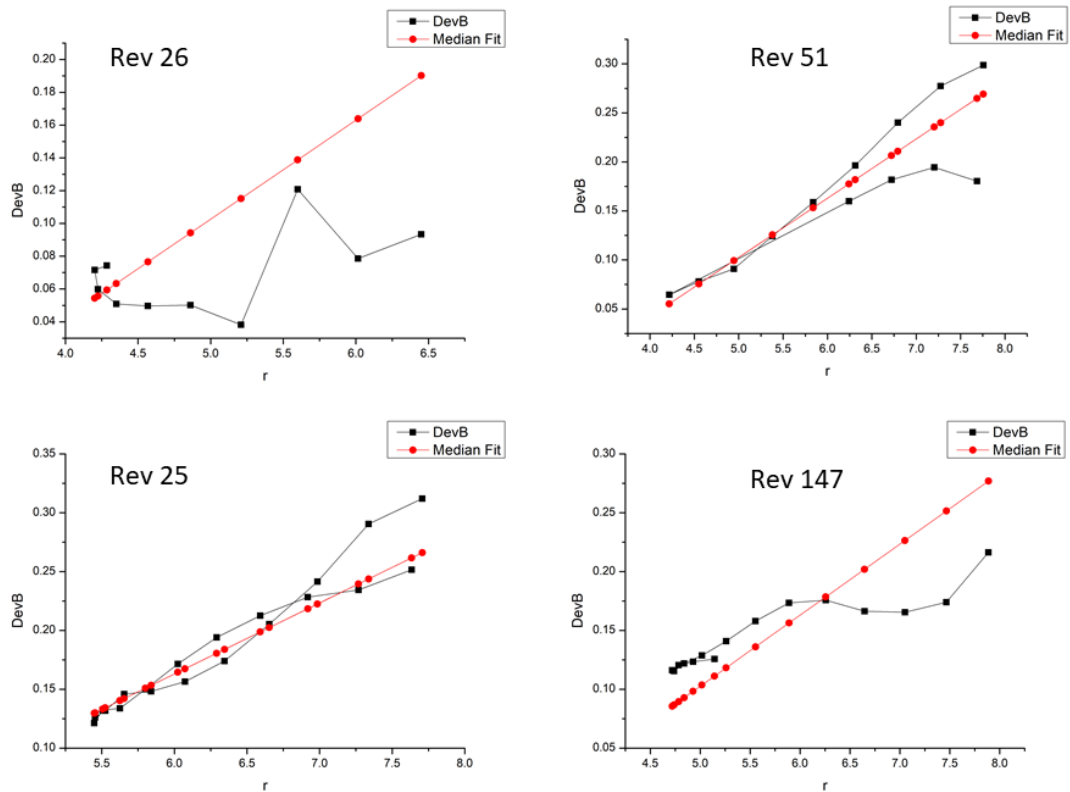
Στην Εικόνα 22 φαίνονται οι μετρήσεις που λήφθηκαν στη διάρκεια των τροχιών με τον μεγαλύτερο δείκτη συμπίεσης (αρνητικός δείκτης). Για την κάθε τροχιά με μαύρο χρώμα φαίνεται το DevB βάσει των μετρήσεων που λήφθηκαν στη διάρκεια της, ενώ με κόκκινο η μέση κατάσταση του μαγνητικού πεδίου όπως έχει υπολογιστεί από τη στατιστική ανάλυση του DevB. Στην Εικόνα 23 φαίνονται οι μετρήσεις για τις τροχιές με τη πλέον διεσταλμένη μαγνητόσφαιρα (θετικός δείκτης) και στην Εικόνα 24 απεικονίζονται μερικές τροχιές που παρουσιάζουν ενδιαφέρον. Στην τροχιά 26 υπάρχει μια κορυφή, στην τροχιά 51 το inbound leg είναι πάνω από τη μέση κατάσταση της μαγνητόσφαιρας, ενώ το outbound leg κάτω, στην τροχιά 25 έχουμε πολλές φορές διάσχιση της μέση κατάστασης και τέλος στην τροχιά 147 η μισή τροχιά είναι πάνω από τη μέση κατάσταση της μαγνητόσφαιρας και η υπόλοιπη μισή τροχιά βρίσκεται κάτω. Στο Παράρτημα (παράγραφος 5.3) φαίνονται 84 τροχιές από τις συνολικά 94 που μελετήσαμε, ενώ δεν απεικονίζονται οι τροχιές με 3 ή 4 μετρήσεις.



Εικόνα 22: Περιπτώσεις τροχιών κατά τις οποίες η μαγνητόσφαιρα ήταν συμπιεσμένη. Ο Δείκτης Μαγνητοσφαιρικής παραμόρφωσης για αυτές τις τροχιές είναι αρνητικός.

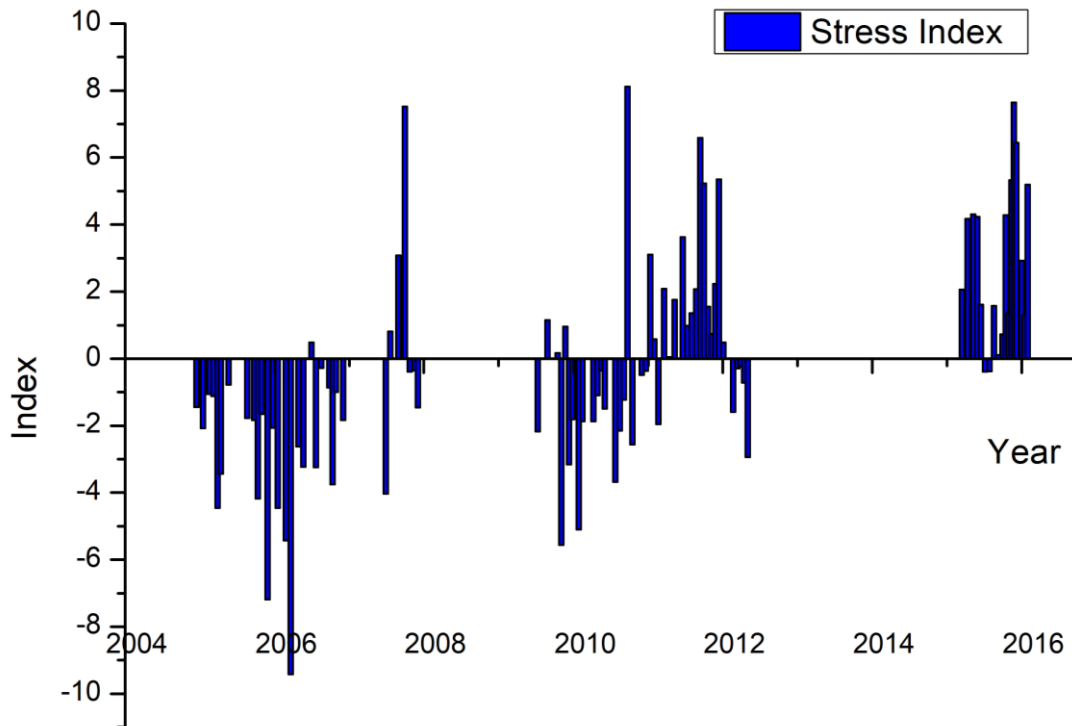


Εικόνα 23: Περιπτώσεις τροχιών κατά τις οποίες η μαγνητόσφαιρα ήταν διεσταλμένη. Ο Δείκτης Μαγνητοσφαιρικής παραμόρφωσης για αυτές τις τροχιές είναι θετικός.



Ενδιαφέρουσες περιπτώσεις

Εικόνα 24: Περιπτώσεις τροχιών που παρουσιάζουν ενδιαφέρον. Στην τροχιά 26 υπάρχει μια κορυφή, στην τροχιά 51 το inbound leg είναι πάνω από τη μέση κατάσταση της μαγνητόσφαιρας, ενώ το outbound leg κάτω, στην τροχιά 25 έχουμε πολλές φορές διάσχιση της μέση κατάστασης και τέλος στην τροχιά 147 η μισή τροχιά είναι πάνω από τη μέση κατάσταση της μαγνητόσφαιρας και η υπόλοιπη μισή τροχιά βρίσκεται κάτω.



Εικόνα 25: Στο ιστόγραμμα φαίνεται ο δείκτης μαγνητοσφαιρικής παραμόρφωσης ως προς τον χρόνο περίαψης της κάθε τροχιάς.

Στην Εικόνα 25 ο δείκτης μαγνητοσφαιρικής παραμόρφωσης εξελίσσεται ως προς τον χρόνο. Θεωρούμε χρόνο της τροχιάς, τη χρονική στιγμή της περίαψης.

Για τιμή δείκτη κοντά στο μηδέν $-2 \leq \text{stress index} \leq 2$ θεωρούμε τον δείκτη ουδέτερο. Επιπλέον σε αυτές τις περιπτώσεις το σφάλμα είναι συγκρίσιμο με τον δείκτη και ως εκ τούτου η κατάσταση της μαγνητόσφαιρας είναι αβέβαιη. Ο αριθμός των τροχιών που η μαγνητόσφαιρα βρέθηκε διεσταλμένη (stretched, $\text{index} > 2$) είναι 21, και ο αριθμός τροχιών που βρέθηκε συμπιεσμένη (compressed, $\text{index} < -2$) είναι 22. Για τις υπόλοιπες 50, η μαγνητόσφαιρα βρίσκεται κοντά στη μέση κατάσταση. Ο αριθμός των τροχιών που η μαγνητόσφαιρα βρέθηκε πολύ συμπιεσμένη (high compressed $\text{index} < -4$) ήταν 9 και ο μέσος όρος (μ.ο.) του δείκτη για αυτές τις περιπτώσεις -5.5. Ο αριθμός των τροχιών που η μαγνητόσφαιρα βρέθηκε πολύ διεσταλμένη (high stretched $\text{index} > 4$) ήταν 13 και ο μέσος όρος (μ.ο.) του δείκτη για αυτές τις περιπτώσεις 5.7 (Εικόνες 26-27).

Επομένως οι πιθανότητες να βρεθεί σε μία από τις καταστάσεις που περιγράφηκαν καταγράφονται ως εξής:

$$P_{high\ compressed} = 9.57\%$$

$$P_{compressed} = 23,40\%$$

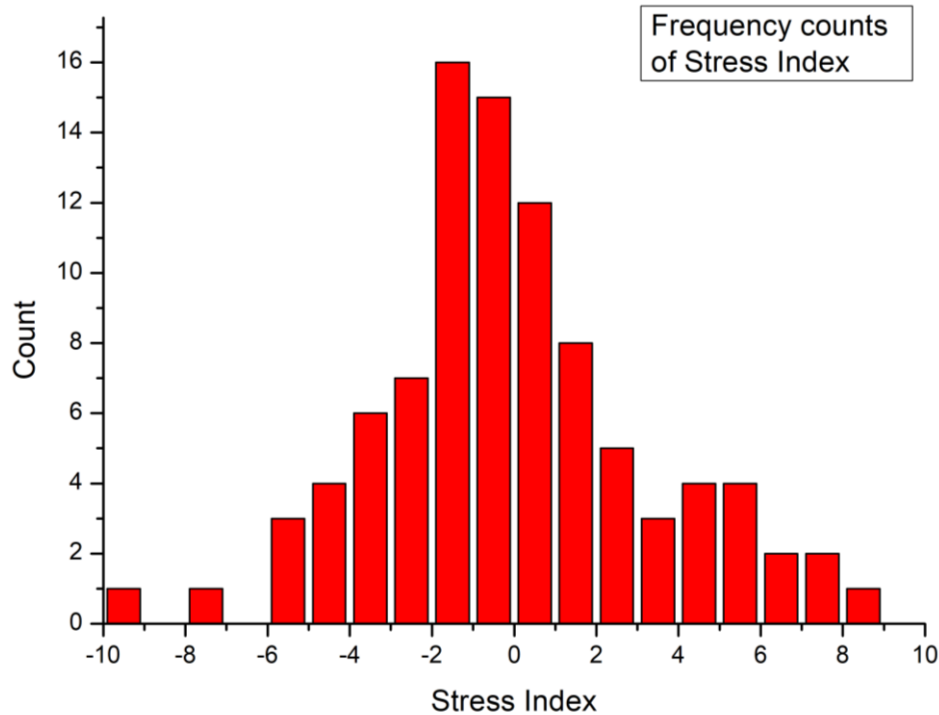
$$P_{stretched} = 22.34\%$$

$$P_{high\ stretched} = 13.82\%$$

$$P_{ambiguous} = 54,26\%$$

State	Index	N total	Mean	Standard Dev	SE of Mean
Highly Compressed	<-4	9	-5.5	1.7	0.6
Highly Stretched	>4	13	5.7	1.4	0.4

Εικόνα 26: Στατιστική ανάλυση των τιμών του Δείκτη για τις πολύ συμπιεσμένες και πολύ διεσταλμένες περιπτώσεις.



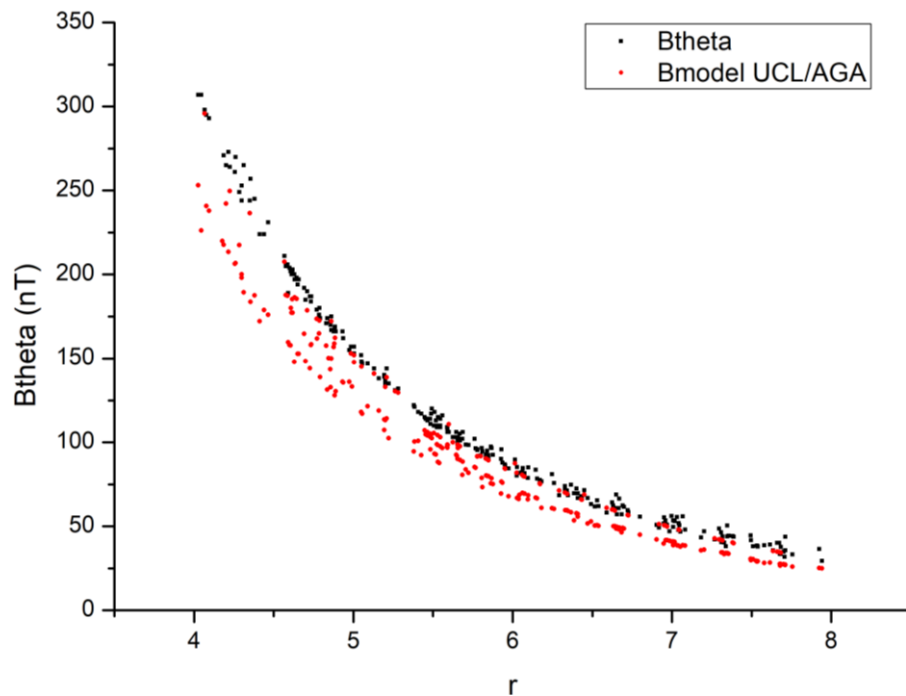
Εικόνα 27: Στη στατιστική ανάλυση των τιμών του δείκτη, εμφανίζονται 51 τροχιές για τις οποίες δεν μπορούμε να χαρακτηρίσουμε με ασφάλεια την κατάσταση της μαγνητόσφαιρας, 22 τροχιές στις οποίες η μαγνητόσφαιρα είναι εμφανώς συμπίεσμένη και 21 τροχιές στις οποίες είναι εμφανώς διεσταλμένη.

Παρατηρούμε ότι για πάνω από τις μισές των περιπτώσεων η μαγνητόσφαιρα βρίσκεται στη μέση κατάσταση και το υπόλοιπο διαμοιράζεται ανάμεσα σε συμπίεσμένη, ή διεσταλμένη κατάσταση. Η πιθανότητα να εμφανιστεί πολύ διεσταλμένη, ή πολύ συμπίεσμένη είναι σχετικά μικρή και εμφανίζεται περίπου στο 10% των περιπτώσεων.

4.3. Εφαρμογή δεδομένων στο μοντέλο UCL/AGA

Θα εφαρμόσουμε το μοντέλο UCL/AGA ενδεικτικά για την χρονική περίοδο από 15 Δεκεμβρίου 2004 ως τις 24 Ιουλίου 2006 που περιλαμβάνει συνολικό αριθμό 14.233 ωριαίων μετρήσεων και που αντιστοιχούν στις πρώτες 26 τροχιές του Cassini. Επιλέξαμε αυτή την περίοδο καθώς η μελέτη του Leisner περιλαμβάνει αυτές τις τροχιές και θέλουμε να αντιπαραβάλουμε τα αποτελέσματα του με αυτά του μοντέλου UCL/AGA. Ως μελλοντικό βήμα προγραμματίζουμε να επεκτείνουμε την εφαρμογή του σε όλες τις τροχιές.

Με την εφαρμογή των τεθέντων κριτηρίων το δείγμα φιλτράρεται στις 329 ωριαίες μετρήσεις. Ακολουθούμε τα ίδια βήματα για το μοντέλο UCL/AGA όπως για το μοντέλο του μαγνητικού διπόλου. Κατασκευάζουμε το διάγραμμα του μαγνητικού πεδίου B_{θ} συναρτήσει της απόστασης r (Εικόνα 28) και το συγκρίνουμε με το θεωρητικά αναμενόμενο του μοντέλου $B_{UCL/AGA}$.



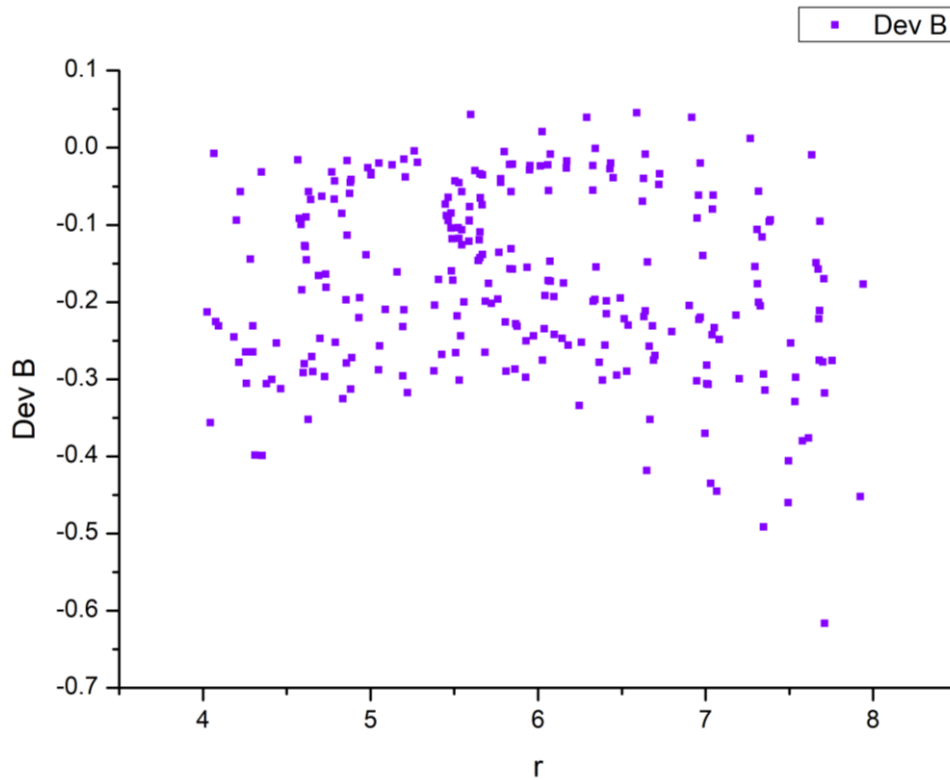
Εικόνα 28: Η ένταση του μαγνητικού πεδίου συναρτήσει της απόστασης από το κέντρο του Κρόνου. Με μαύρο χρώμα συμβολίζονται οι τιμές της B_{θ} (nT), ενώ με κόκκινο χρώμα οι τιμές $B_{UCL/AGA}$ του μοντέλου.

Η μαγνητόσφαιρα του Κρόνου έχει αποδειχθεί ότι έχει περιοδική συμπεριφορά, περίπου ίση με την περιστροφή του πλανήτη 10h 48min και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την περιοδική διαστολή και συστολή της μαγνητόσφαιρας εξαιτίας εσωτερικών αιτιών. Εικάζεται ότι έχουν να κάνουν με το εσωτερικό πλάσμα, χωρίς ο μηχανισμός να έχει αποσαφηνιστεί πλήρως, με πιθανότερη αιτία την ιονοσφαιρική ανωμαλία στο Νότιο Ημισφαίριο που προκαλεί μια περιοδική αλλοίωση στους σωλήνες ροής του μαγνητικού πεδίου. Αυτό έχει αποτέλεσμα την πάλση (breathing) της μαγνητόσφαιρας και όπως όλες οι ταλαντώσεις έχει πλάτος και φάση. Το μοντέλο UCL/AGA παρακολουθεί αυτή την πάλση και για αυτό τον λόγο παρατηρούμε στο γράφημα ότι τα σημεία που απεικονίζουν τις τιμές του μοντέλου παρουσιάζουν διακυμάνσεις.

Στη συνέχεια εφαρμόζουμε τη σχετική απόκλιση από το θεωρητικό μοντέλο, όμως όπου B_{dip} αντικαθιστούμε με $B_{\text{model AGA}}$ και η σχέση (7), γίνεται:

$$DevB = \frac{B_{\text{model AGA}} - B_{\text{theta}}}{B_{\text{model AGA}}} \quad (10)$$

Επιλέγουμε τη σχετική απόκλιση για λόγους που αναλύθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Η κατανομή της σχετικής απόκλισης $DevB$ ως προς την απόσταση r από τον Κρόνο φαίνεται την Εικόνα 29.



Εικόνα 29 : Η κατανομή της σχετικής απόκλισης του B_{theta} από τη θεωρητική τιμή του μοντέλου. Το σημείο κάτω δεξιά που έχει και τη μεγαλύτερη απόλυτη τιμή $DevB$, αντιστοιχεί στην περιστροφή (Rev) 22.

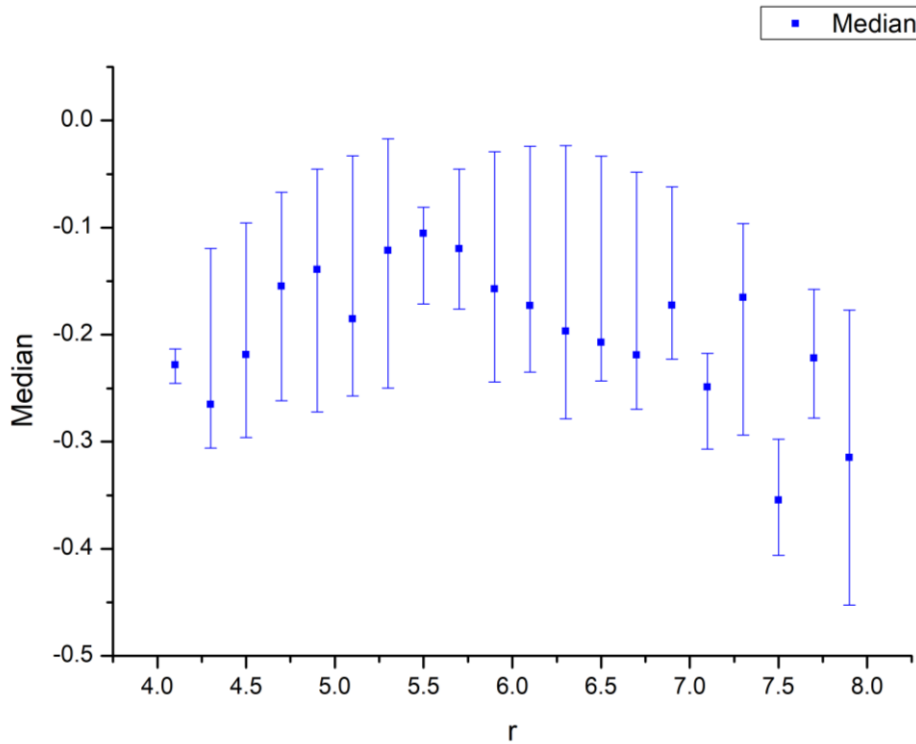
Η κατανομή του $DevB$ ως προς την απόσταση r από τον Κρόνο, δεν φαίνεται να παρουσιάζει κάποια γραμμική εξάρτηση.

Στη συνέχεια χωρίσαμε το δείγμα των μετρήσεων ανά $0.2R_s$ και κάναμε στατιστική ανάλυση για να βρούμε τη μέση τιμή της απόκλισης σε αυτή την απόσταση. Τα

αποτελέσματα της στατιστικής φαίνονται στην Εικόνα 30 και η αναπαράσταση του σταθμικού μέσου (median) ως προς την απόσταση r από τον Κρόνο γίνεται στην Εικόνα 31.

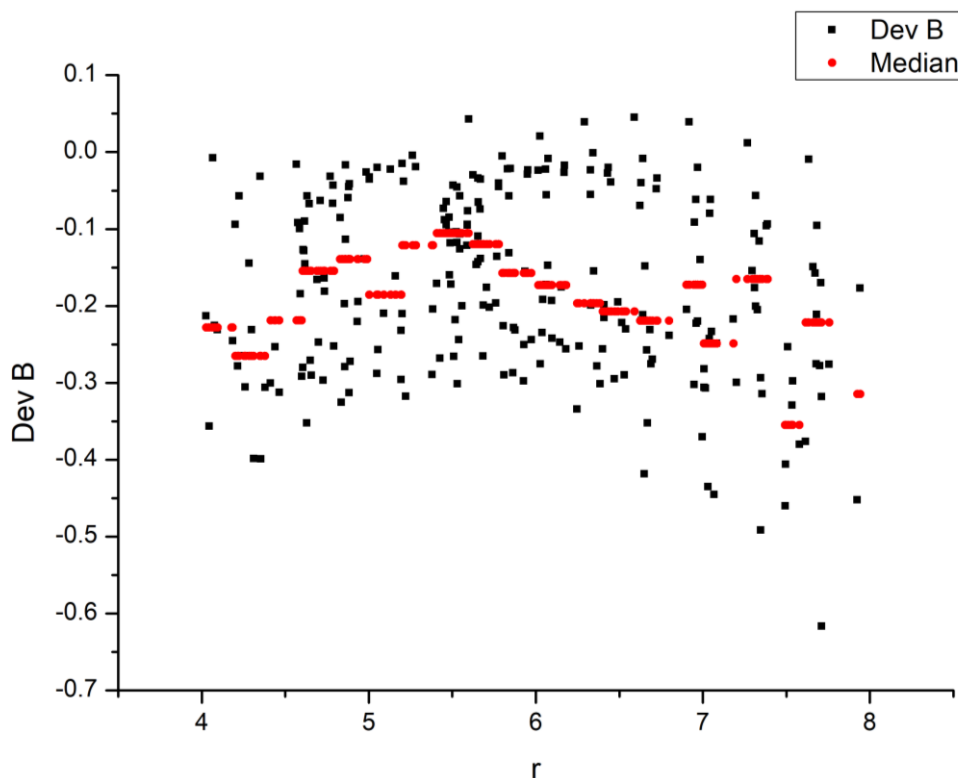
r	N total	Mean	Standard Dev	SE of Mean	1st Quartile (Q1)	3rd Quartile (Q3)	Median	Error minus	Error plus
4.1	6	-0.21	0.11	0.05	-0.25	-0.21	-0.23	0.02	0.02
4.3	12	-0.23	0.12	0.04	-0.31	-0.12	-0.26	0.04	0.15
4.5	8	-0.19	0.11	0.04	-0.30	-0.10	-0.22	0.08	0.12
4.7	20	-0.17	0.10	0.02	-0.26	-0.07	-0.15	0.11	0.09
4.9	15	-0.16	0.11	0.03	-0.27	-0.05	-0.14	0.13	0.09
5.1	10	-0.16	0.12	0.04	-0.26	-0.03	-0.19	0.07	0.15
5.3	8	-0.14	0.13	0.05	-0.25	-0.02	-0.12	0.13	0.10
5.5	28	-0.13	0.08	0.01	-0.17	-0.08	-0.11	0.07	0.02
5.7	19	-0.12	0.07	0.02	-0.18	-0.05	-0.12	0.06	0.07
5.9	18	-0.16	0.11	0.02	-0.24	-0.03	-0.16	0.09	0.13
6.1	18	-0.14	0.10	0.02	-0.23	-0.02	-0.17	0.06	0.15
6.3	11	-0.16	0.13	0.04	-0.28	-0.02	-0.20	0.08	0.17
6.5	12	-0.16	0.12	0.03	-0.24	-0.03	-0.21	0.04	0.17
6.7	15	-0.19	0.12	0.03	-0.27	-0.05	-0.22	0.05	0.17
6.9	10	-0.16	0.13	0.04	-0.22	-0.06	-0.17	0.05	0.11
7.1	11	-0.26	0.12	0.04	-0.31	-0.22	-0.25	0.06	0.03
7.3	14	-0.19	0.13	0.03	-0.29	-0.10	-0.17	0.13	0.07
7.5	6	-0.35	0.08	0.03	-0.41	-0.30	-0.35	0.05	0.06
7.7	13	-0.24	0.15	0.04	-0.28	-0.16	-0.22	0.06	0.06
7.9	2	-0.31	0.19	0.14	-0.45	-0.18	-0.31	0.14	0.14

Εικόνα 30: Στατιστική ανάλυση των σχετικών αποκλίσεων. Η στατιστική είναι μικρότερη καθώς το μοντέλο εφαρμόστηκε ενδεικτικά στα δεδομένα από 15 Δεκεμβρίου 2004 ως τις 24 Ιουλίου 2006 και οι μετρήσεις που έχουμε στη διάθεσή μας είναι 329.



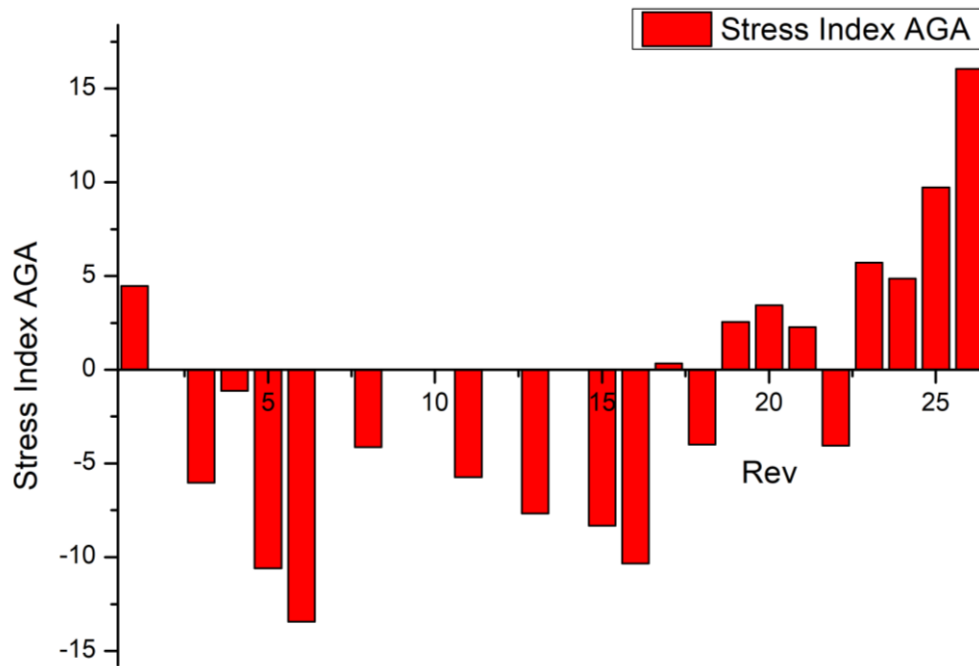
Εικόνα 31: Στο γράφημα φαίνεται το median και τα σφάλματα της σχετικής απόκλισης του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου από το δίπολο, συναρτήσει της απόστασης από τον Κρόνο. Με τη χρήση του μοντέλου γίνεται προσπάθεια να παρακολουθηθεί η ταλάντωση της μαγνητόσφαιρας και αυτό απεικονίζεται στο median, που μπορεί να μην έχει γραμμική εξάρτηση όπως στο δίπολο, αλλά φαίνεται καθαρά η διακύμανση της μαγνητόσφαιρας.

Καθώς δεν μπορεί να γίνει κάποια προσαρμογή, θεωρήσαμε ως προβλεπόμενη τιμή του DevB σε όλο το εύρος του κάθε διαστήματος πλάτους $0,2R_s$ την τιμή του median βάσει του πίνακα της εικόνας 30 και αυτή αποτέλεσε τη μέση κατάσταση, με την οποία συγκρίθηκαν οι μετρήσεις (Εικόνα 32).



Εικόνα 32: Στο γράφημα με κόκκινο χρώμα απεικονίζεται η προβλεπόμενη από το μοντέλο UCL/AGA τιμή του DevB – μέση κατάσταση μαγνητόσφαιρας, ενώ με μαύρο χρώμα απεικονίζονται οι μετρήσεις.

Από τις 26 τροχιές, αποκλείονται οι 5 καθώς δεν έχουν τουλάχιστον τρεις μετρήσεις εντός των κριτηρίων όπως αυτά αναφέρονται στην ενότητα 4.1 (Κατασκευή Δείκτη – Κριτήρια επιλογής), και ως εκ τούτου ο τελικός αριθμός των προς μελέτη τροχιών διαμορφώνεται στις 21. Ο Δείκτης Μαγνητοσφαιρικής Παραμόρφωσης ορίζεται και σε αυτό το μοντέλο ως η μέση τιμή της διαφοράς ανάμεσα στη μέση κατάσταση της μαγνητόσφαιρας (προβλεπόμενη απόκλιση από το μοντέλο) από την μετρούμενη απόκλιση από το μοντέλο, για όλες τις μετρήσεις N της κάθε τροχιάς (Σχέση 9) και απεικονίζεται στην Εικόνα 33, ενώ στην Εικόνα 37 ο ίδιος δείκτης εξελίσσεται ως προς τον χρόνο. Ο Δείκτης Μαγνητοσφαιρικής Παραμόρφωσης με την απόκλιση και το σφάλμα του και για τις είκοσι μία τροχιές φαίνεται στο Παράρτημα (παράγραφος 5.2).



Εικόνα 33: Στο ιστόγραμμα φαίνεται ο δείκτης μαγνητοσφαιρικής παραμόρφωσης από την τροχιά Β ως την 26 όπως εξάγεται με τη χρήση του μοντέλου UCL/AGA.

Υπενθυμίζεται ότι όταν η μαγνητόσφαιρα είναι διεσταλμένη ο δείκτης είναι θετικός, αντίθετα όταν η μαγνητόσφαιρα είναι συμπιεσμένη, τότε ο δείκτης που εξάγεται είναι αρνητικός. Το μεγαλύτερο δείκτη συμπίεσης παρουσιάζουν οι τροχιές 6, 5, 16 και 15, ενώ η μαγνητόσφαιρα ήταν περισσότερο διεσταλμένη για τις τροχιές, 26, 25, 23 και 24. Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται ο αριθμός τροχιάς, ο χρόνος περιάψης της τροχιάς και ο δείκτης μαγνητοσφαιρικής παραμόρφωσης αντίστοιχα.

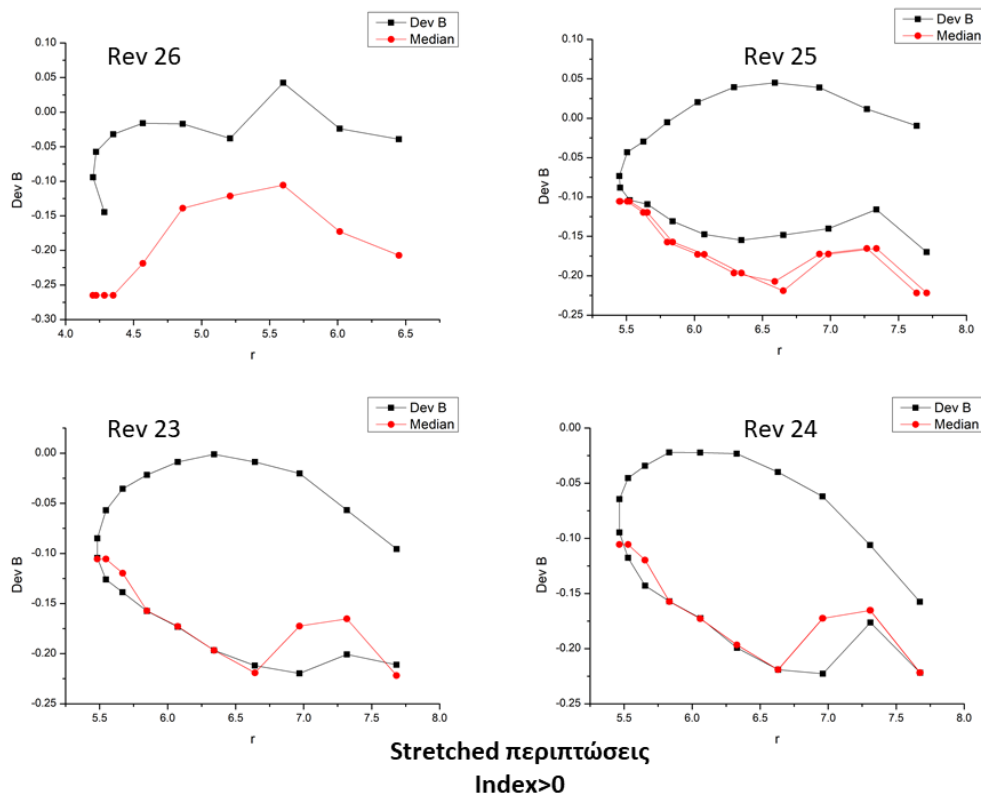
Most Compressed

Rev	Time of periapsis	S. Index
6	2005-104T23:16	-13.4
5	2005-088T23:38	-10.6
16	2005-285T01:31	-10.3
15	2005-266T21:36	-8.3

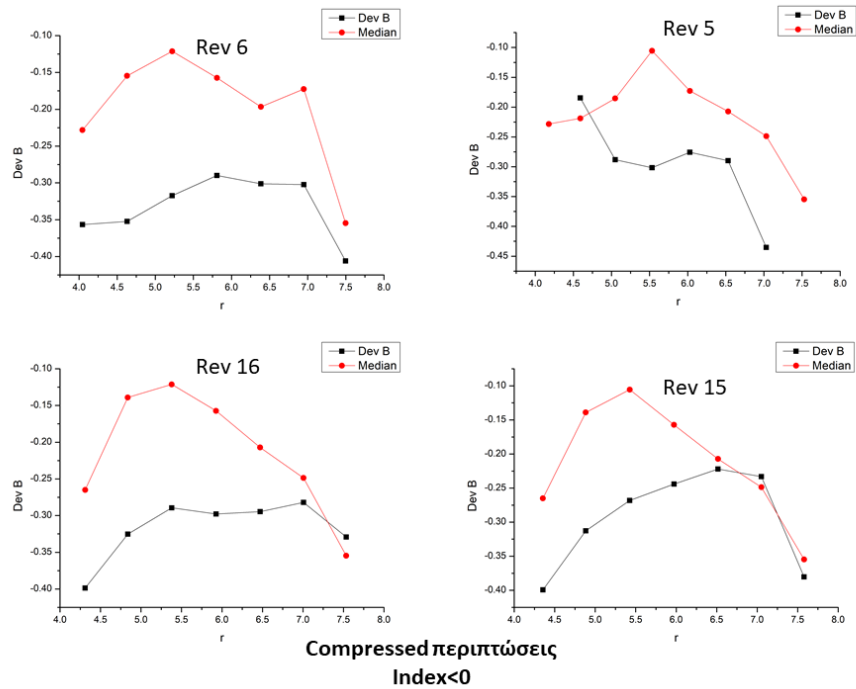
Most Stretched

Rev	Time of periapsis	S. Index
26	2006-204T21:48	16.0
25	2006-181T13:05	9.7
23	2006-118T23:59	5.7
24	2006-142T09:01	4.9

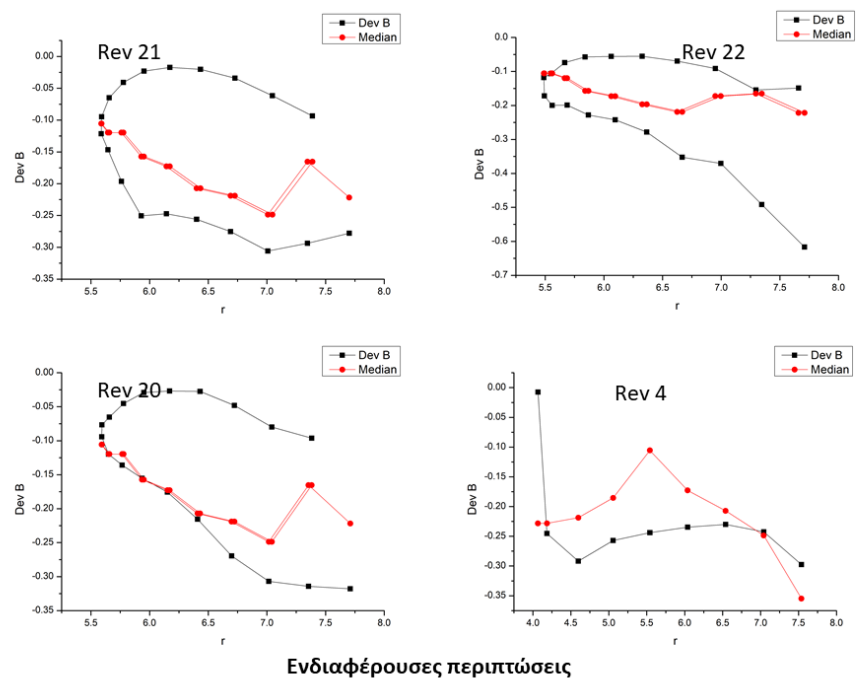
Στην Εικόνα 34 φαίνεται η σύγκριση για τις τροχιές που ο δείκτης λαμβάνει τη μέγιστη θετική τιμή (διεσταλμένη μαγνητόσφαιρα), στην Εικόνα 35 οι τροχιές που ο δείκτης λαμβάνει τη μέγιστη αρνητική τιμή (συμπιεσμένη μαγνητόσφαιρα) και στην Εικόνα 36 απεικονίζονται μερικές ενδιαφέρουσες περιπτώσεις. Στο Παράρτημα (παράγραφος 5.4.) απεικονίζονται 17 τροχιές που έχουν πάνω από 4 μετρήσεις.



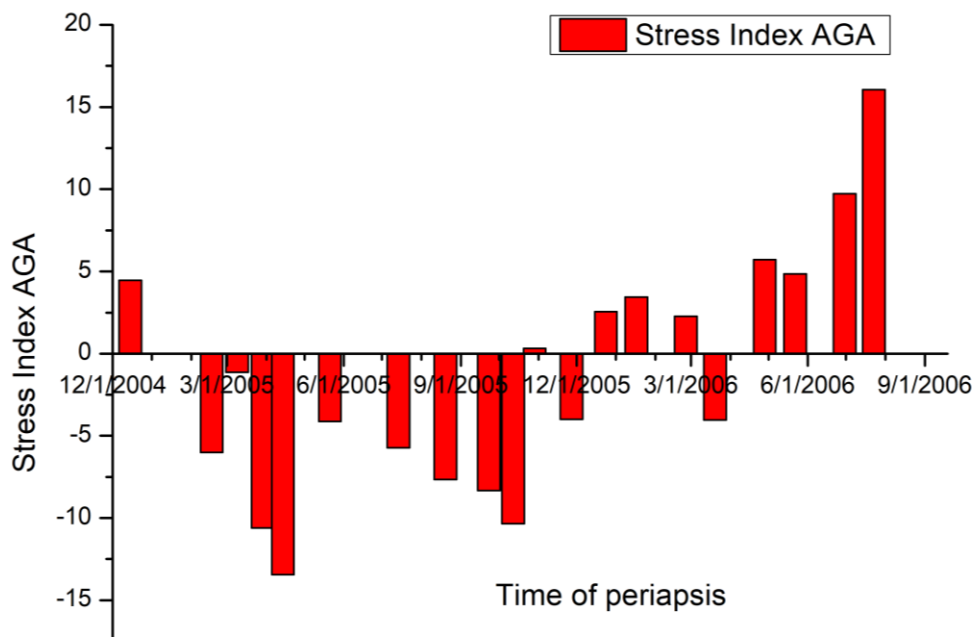
Εικόνα 34: Περιπτώσεις τροχιών κατά τις οποίες η μαγνητόσφαιρα παρουσίαζε τη μέγιστη διαστολή. Με κόκκινο χρώμα απεικονίζεται η προβλεπόμενη από το μοντέλο UCL/AGA τιμή του DevB – μέση κατάσταση μαγνητόσφαιρας, ενώ με μαύρο χρώμα απεικονίζονται οι μετρήσεις για την κάθε τροχιά. Παρατηρούμε ότι το μοντέλο παρακολουθεί πολύ καλά τα δεδομένα. Όπου εμφανίζεται διπλή γραμμή στην κόκκινη καμπύλη, αντιστοιχεί στο inbound και outbound σκέλος της τροχιάς.



Εικόνα 35: Περιπτώσεις τροχιών κατά τις οποίες η μαγνητόσφαιρα παρουσίαζε τη μέγιστη συμπίεση. Με κόκκινο χρώμα απεικονίζεται η προβλεπόμενη από το μοντέλο UCL/AGA τιμή του DevB – μέση κατάσταση μαγνητόσφαιρας, ενώ με μαύρο χρώμα απεικονίζονται οι μετρήσεις για την κάθε τροχιά. Παρατηρούμε ότι το μοντέλο παρακολουθεί πολύ καλά τα δεδομένα. Όπου εμφανίζεται διτλή γραμμή στην κόκκινη καμπύλη, αντιστοιχεί στο inbound και outbound σκέλος της τροχιάς.



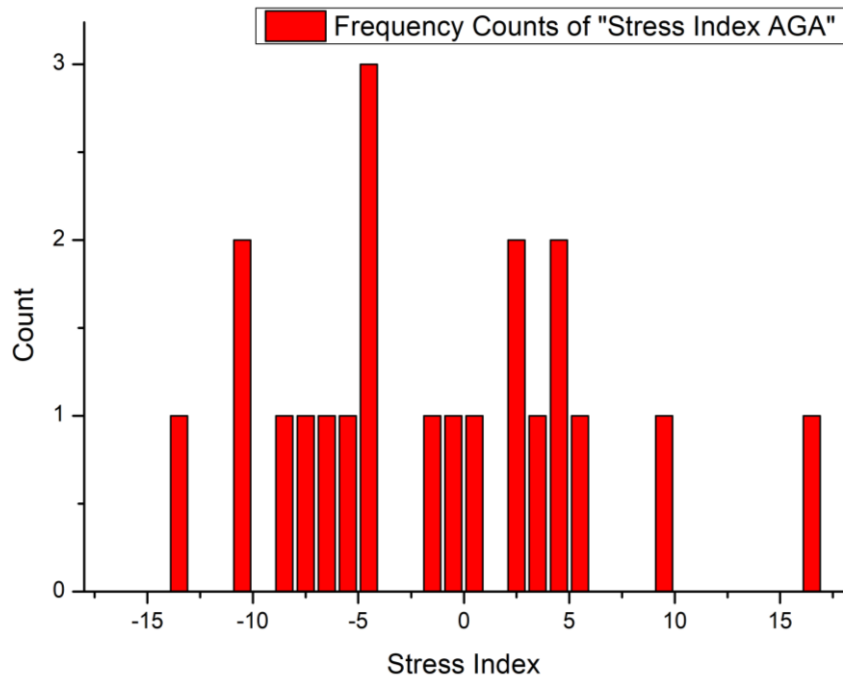
Εικόνα 36: Περιπτώσεις κατά τις οποίες παρουσιάζεται ενδιαφέρον. Στην τροχιά 22 ανήκει η μέτρηση με τη μεγαλύτερη απόκλιση στο σετ (DevB=-0.62).



Εικόνα 37: Στο ιστόγραμμα φαίνεται ο δείκτης μαγνητοσφαιρικής παραμόρφωσης ως προς τον χρόνο περιάψης της κάθε τροχιάς.

Καθώς η μαγνητόσφαιρα πάλλεται, κάθε μέτρηση είναι ένα στιγμιότυπο της ταλάντωσης, που αντιστοιχεί στην εκάστοτε φάση της. Για να ισχυριστεί κανείς με βεβαιότητα ότι η μέτρηση ανήκει σε πολύ διεσταλμένη, ή πολύ συμπιεσμένη μαγνητόσφαιρα, θα πρέπει η τιμή του δείκτη να είναι μεγάλη. Όταν ο δείκτης λαμβάνει τιμές $-2 < \text{index} < 2$, δεν μπορούμε να αποφανθούμε αν οδεύει προς διαστολή, ή προς συμπίεση.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 33 και στον αναλυτικό πίνακα της Εικόνας 48 (Παράρτημα κεφάλαιο 5.2) ο δείκτης λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του (stress index=16) στην τροχιά 26 και την ελάχιστη τιμή του (stress index=-13.4) στην τροχιά 6.



Εικόνα 38: Στη στατιστική ανάλυση των τιμών του δείκτη, εμφανίζονται μόνο 3 τροχιές για τις οποίες δεν μπορούμε να χαρακτηρίσουμε με ασφάλεια την κατάσταση της μαγνητόσφαιρας, 10 τροχιές στις οποίες η μαγνητόσφαιρα είναι εμφανώς συμπιεσμένη και 8 τροχιές στις οποίες είναι εμφανώς διεσταλμένη.

Το δείγμα είναι σχετικά μικρό (21 τροχιές) για να κάνουμε ασφαλή στατιστική και παρουσιάζεται σχετικά μεγάλο συστηματικό σφάλμα. Εξάλλου το μοντέλο UCL/AGA εφαρμόστηκε ενδεικτικά για τις τροχιές B ως 26. Ωστόσο για την πληρότητα της εργασίας εξάγουμε τις πιθανότητες να βρεθεί η μαγνητόσφαιρα συμπιεσμένη, πολύ συμπιεσμένη, διεσταλμένη, πολύ διεσταλμένη, και αμφίβολη (Εικόνα 38). Επίσης κάνουμε στατιστική ανάλυση των τιμών του Δείκτη για τις πολύ συμπιεσμένες και πολύ διεσταλμένες περιπτώσεις (Εικόνα 39).

$$P_{high\ compressed} = 47.62\%$$

$$P_{compressed} = 47.62\%$$

$$P_{stretched} = 38.10\%$$

$$P_{high\ stretched} = 23.81\%$$

$$P_{ambiguous} = 14.28\%$$

State	Index	N total	Mean	Standard Dev	SE of Mean
Highly Compressed	<-4	10	-7.4	3.2	1.0
Highly Stretched	>4	5	8.2	4.9	2.2

Εικόνα 39: Στατιστική ανάλυση των τιμών του Δείκτη για τις πολύ συμπιεσμένες και πολύ διεσταλμένες περιπτώσεις.

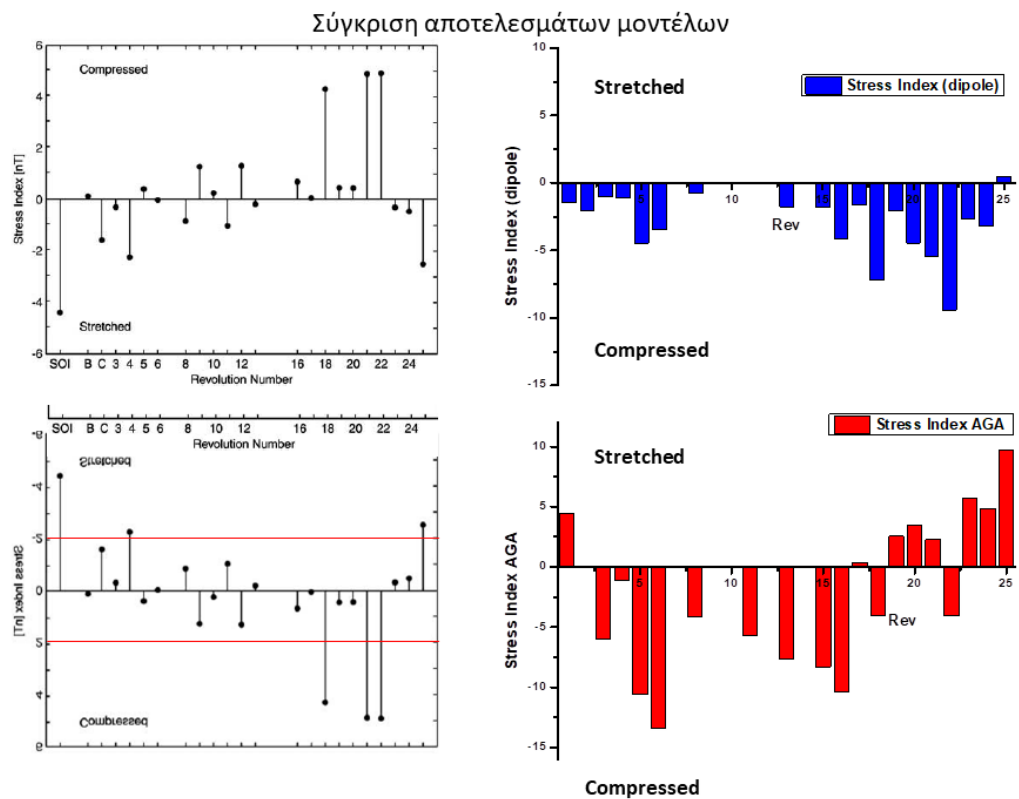
Η ταλάντωση που παρουσιάζει η μαγνητόσφαιρα ενσωματώνεται στα αποτελέσματα, αλλά το δείγμα είναι μικρό για να βγάλουμε ασφαλή συμπεράσματα.

Ωστόσο παρατηρούμε ότι όλες οι περιπτώσεις συμπιεσμένης μαγνητόσφαιρας, είναι περιπτώσεις με μεγάλο δείκτη ($\text{stress index} < -4$) και σύμφωνα με τα όσα ορίσαμε στην προηγούμενη παράγραφο χαρακτηρίζεται ως ισχυρά συμπιεσμένη μαγνητόσφαιρα. Για την ίδια περίοδο η χρήση του μοντέλου του μαγνητικού διπόλου εξάγει ξεκάθαρα αρνητικό δείκτη για 12 από τις 26 τροχιές.

Συγκρίνοντας τις δύο μεθόδους παρατηρούμε ότι η πολύ συμπιεσμενη μαγνητόσφαιρα ($\text{index} < -4$) έχουμε στην περίπτωση της χρήσης μοντέλου AGA 47% των τροχιών, ενώ για χρήση του μαγνητικού διπόλου πολύ συμπιεσμένη μαγνητόσφαιρα 9,5% των τροχιών, πράγμα που αποτελεί μεγάλη διαφορά.

4.4. Σύγκριση αποτελεσμάτων των μοντέλων

Καθώς στην δημοσίευση του Leisner δεν υπάρχουν οι τιμές του δείκτη, η σύγκριση είναι περισσότερο ποιοτική παρά ποσοτική. Στην Εικόνα 40 φαίνονται τα αποτελέσματα της μελέτης του Leisner, και τα δικά μας, τόσο με τη χρήση του μοντέλου του μαγνητικού διπόλου, όσο και με τη χρήση του μοντέλου Achilles – Guio – Arridge (UCL/AGA). Καθώς εμείς έχουμε ορίσει με τέτοιο τρόπο το δείκτη μας ώστε θετικός να σημαίνει διεσταλμένη μαγνητόσφαιρα και ο Leisner έχει ορίσει το αντίθετο, αντιστρέφουμε την εικόνα για ευκολότερη σύγκριση.



Εικόνα 40: Ποιοτική σύγκριση των αποτελεσμάτων της μελέτης του Leisner και της παρούσας με τη χρήση και των δύο μοντέλων (μαγνητικού διπόλου/ Achilles – Guio – Arridge). Το σχήμα του Leisner παρουσιάζεται ορθό και αντεστραμμένο. Η σύγκριση γίνεται με το αντεστραμμένο.

Στο σχήμα του Leisner θέτουμε ως όριο το 2. Για δείκτη από μηδέν ως δύο, ορίζουμε την κατάσταση της μαγνητόσφαιρας ως s και για δείκτη μεγαλύτερο του 2, την ορίζουμε S (Stretched). Αντίθετα για δείκτη από το μηδέν ως το μείον δύο, ορίζουμε την κατάσταση της μαγνητόσφαιρας ως c και για δείκτη μικρότερο του μείον 2, την ορίζουμε C (Compressed). Κατά αναλογία μετατρέπουμε και τον δικό μας αριθμητικό δείκτη, σε ποιοτικό.

Στον απέναντι πίνακα (Εικόνα 41), με έντονο κόκκινο χρώμα καταγράφονται οι περιπτώσεις που βρίσκονται σε συμφωνία οι δείκτες και για τα τρία μοντέλα, με πράσινο οι περιπτώσεις που το δίπολο συμφωνεί με τον Leisner, με μωβ οι περιπτώσεις που το δίπολο συμφωνεί με το μοντέλο UCL/AGA. Τέλος με γκρί φαίνονται οι περιπτώσεις που το UCL/AGA συμφωνεί με τον Leisner. Η γενική εικόνα δείχνει συμφωνία.

Κάνοντας ανάλυση με μεγαλύτερη λεπτομέρεια, παρατηρούμε μεγαλύτερη συμφωνία μεταξύ του Leisner και του AGA, παρά ανάμεσα στον Leisner και το μοντέλο του διπόλου. Απόλυτη συμφωνία των δύο δεικτών (Leisner και δικός μας με χρήση και των δύο μοντέλων) παρατηρείται για 5 από τις 19 τροχιές.

Χαρακτηριστικό είναι ότι το δίπολο βρίσκεται σε όλες τις τροχιές πλην της Rev25 τη μαγνητόσφαιρα συμπιεσμένη. Αυτό οφείλεται στο χρησιμοποιούμενο μοντέλο. Το δίπολο αντιμετωπίζει τη μαγνητόσφαιρα ως κενή πλάσματος, χωρίς ταλαντώσεις. Το μοντέλο UCL/AGA ως ένα βαθμό παρακολουθεί την ταλάντωση της μαγνητόσφαιρας, η οποία έχει ενσωματωθεί στις τιμές B_{model} . Βέβαια ακόμα και έτσι δεν είναι δυνατή η ακριβής παρακολούθηση της κατάστασης της μαγνητόσφαιρας και κυρίως της φάσης της ταλάντωσης, ωστόσο είναι ακριβέστερο από το δίπολο, το οποίο δεν λαμβάνει υπόψιν κανένα είδος ταλάντωσης. Για αυτό τον λόγο η υπολογισθείσα απόκλιση από μέση κατάσταση της μαγνητόσφαιρας (median UCL/AGA) δεν ακολουθεί κάποιο συγκεκριμένο μοτίβο, σε αντίθεση με το διπολικό μοντέλο όπου η απόκλιση έχει γραμμική εξάρτηση. Αυτό συμβαίνει γιατί το μοντέλο Achilleos UCL/AGA παρακολουθεί τις δυναμικές μεταβολές της μαγνητόσφαιρας, ενώ το διπολικό μοντέλο όχι.

Rev	Leisner	Index Dipole	Index UCL/AGA
B	c	c	S
C	S	C	c
3	s	c	C
4	S	c	c
5	c	C	C
6	-	C	C
7	-	-	-
8	s	c	C
9	c	-	-
10	c	-	-
11	s	c	C
12	c	-	-
13	s	c	C
14	-	-	-
15	-	c	C
16	c	C	C
17	-	c	s
18	C	C	C
19	c	C	S
20	c	C	S
21	C	C	S
22	C	C	C
23	s	C	S
24	s	C	S
25	S	s	S

Εικόνα 41: Σύγκριση των δεικτών της εργασίας Leisner et al (2007) με τον δείκτη που έχουμε υπολογίσει στην παρούσα εργασία για τις τροχιές B ως 25. Στη μέση ο δείκτης που προκύπτει από τη χρήση του μοντέλου του μαγνητικού διπόλου και δεξιά ο δείκτης που προκύπτει από τη χρήση του μοντέλου UCL/AGA.

4.5. Σύγκριση δείκτη με επεισόδια SEP

Η έλλειψη ενός οργάνου μέτρησης που να βρίσκεται μονίμως στον ηλιακό άνεμο, είναι η σημαντικότερη δυσκολία για κάθε μελέτη που ερευνά την επίδραση του ηλιακού ανέμου στην διαμόρφωση και τη δυναμική της μαγνητόσφαιρας του Κρόνου. Παρόλα αυτά οι παρατηρήσεις από τα όργανα MIMI/LEMMS του Cassini στα Ηλιακά Ενεργητικά Σωματιδία (Solar Energetic Particle – SEP) και στις Γαλαξιακές Κοσμικές Ακτίνες (Galactic Cosmic Ray - GCR) που σχετίζονται με ενεργητικές διεργασίες στην ηλιόσφαιρα όπως Διαπλανητικές Στεματικές Εκτινάξεις Μάζας (Interplanetary Coronal Mass Ejections – ICMEs) και Περιοχές Αλληλεπίδρασης Συμπεριστροφής (Corotating Interaction Regions - CIRs) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό των συνθηκών του ηλιακού ανέμου στην απόσταση του Κρόνου. Πρωτόνια που προέρχονται από SEP διακρίνονται εύκολα από τα μαγνητοσφαιρικά ιόντα, ειδικά στο φάσμα των MeV. Πολλά SEPs επίσης συνοδεύονται από ισχυρές μειώσεις του δείκτη GCR Forbush που ανιχνεύεται σαν χαμηλό σήμα θορύβου σε πολλά κανάλια του LEMMS. Καθώς τα SEPs και οι GCRs διεισδύουν με ευκολία στην εξωτερική και μέση μαγνητόσφαιρα, παρακολουθούνται διαρκώς, ακόμα και όταν το Cassini δεν βρίσκεται στον ηλιακό άνεμο.

Μελέτη στα δεδομένα του MIMI/LEMMS (Roussos et al, 2017) αναγνώρισε 46 επεισόδια SEP, τα περισσότερα εκ των οποίων διαρκούν πάνω από δύο εβδομάδες και παρουσιάζουν ελάχιστο εμφάνισης γύρω στο ηλιακό ελάχιστο ανάμεσα στο 2008 και το 2010, κάτι που υποδηλώνει ότι σχετίζονται περισσότερο με τα ICMEs παρά με τα CIRs. (Εικόνες 42-43-44).

	SEP Dates (Year-DOY)			Forbush Decrease	LEMMS Ion Channels			Region	Notes
	Start	Peak Time	Stop		H ⁺	He ⁿ⁺	O ⁿ⁺		
1	2004-210	2004-239T01:00	2004-252	Yes	A1-A7 P2-P3	—	—	SW	1) Jackman et al. (2005) 2) Shocks: end of day 207, day 232, day 247 3) Multiple HCS crossings
2	2004-260	2004-271T01:00	2004-288	No	A1-A7 P2-P4	—	—	SW	1) Extended compression during days 260-270
3	2004-322	2004-338T13:00	2004-350	Yes	A1-A7 P2-P6	A8 H1	—	SW, MSH, MSP	1) CIR compression day 322 2) CIR compression coincident with SEP peak 3) HCS crossing, day 338
4	2005-021	2005-034T11:00	2005-046	Yes	A2-A7 P2-P8	A8 H1-H3 B2-B3	Z1	SW, MSH	1) Roussos et al. (2008) 2) X7.1 flare (Foullon et al., 2007)
5	2005-055	2005-060T18:00	2005-067	No	A2-A7 P2-P3	—	—	SW, MSH	1) Roussos et al. (2008)
6	2005-083	2005-085T01:00	2005-087	Yes	A4-A7 P2-P3	—	—	SW, MSH	1) Roussos et al. (2008) 2) Rarefied SW (days 80-84) 3) Compressed SW days 84-86
7	2005-142	2005-151T13:00	2005-159	Yes	A4-A7 P2-P3	—	—	SW, MSH, MSP	1) Roussos et al. (2008) 2) No CAPS after day 145
8	2005-203	2005-208T06:00	2005-212	No	A4-A7 P2-P6	—	—	SW, MSH, MSP	1) Roussos et al. (2008) 2) Rarefied SW (days 206-209)
9	2005-213	2005-224T16:00	2005-240	Yes	A3-A7 P2-P8	A8 H1-H2 B2-B3	—	SW, MSH, MSP	1) Roussos et al. (2008) 2) 2 periapses
10	2005-243	2005-258T23:00	2005-292	Yes	A0-A7 P2-P9	A8 H1-H4 B2-B3	Z1-Z2	SW, MSH, MSP	1) Roussos et al. (2008) 2) 3 periapses
11	2005-310	2005-313T13:00	2005-317	No	A3-A7 P2	—	—	MSH, SW	1) Short solar wind excursions
12	2006-001	2006-002T00:00	2006-003	Maybe	A3-A6	—	—	MSH, SW	1) CHEMS based 2) detection
13	2006-346	2006-355T08:00	2007-017	Yes	A4-A7 P2-P6	H1-H2	—	SW, MSH, MSP	1) 3 periapses 2) Elevated lobe field (e.g. days 7-11)
14	2007-292	2007-297T23:00	2007-298	No	P2	—	—	MSH, MSP	1) Noisy magnetic field in and out of the MSP
15	2007-306	2007-316T04:00	2007-332	Maybe	A0-A7 P2	—	—	SW, MSH, MSP	1) HCS crossing (days 307-310)
16	2007-335	2007-353T18:00	2007-360	No	P2-P3	—	—	SW, MSH, MSP	1) 2 periapses 2) Data gaps (day 346-348, 355-358)
17	2008-018	2008-027T04:00	2008-028	Maybe	A4-A7 P2	—	—	SW, MSH, MSP	1) MAG data gap up to day 24

Εικόνα 42: Λίστα των επεισοδίων SEP και μερικά από τα βασικά χαρακτηριστικά τους. Ο χρωματικός κώδικας αναφέρεται στην έντασή τους. Κόκκινο χρώμα για $SNR > 10$, πράσινο χρώμα για $2.5 < SNR < 10$, και μπλέ χρώμα για $SNR < 2.5$. Το γκρι χρώμα συμβολίζει αμφίβολες περιπτώσεις. Περισσότερα επεισόδια φαίνονται σε πίνακες παρακάτω. (Αναπαράγωγή από το Roussos et al. 2017)

	SEP Dates (Year-DOY)			Forbush Decrease	LEMMS Ion Channels			Region	Notes
	Start	Peak Time	Stop		H ⁺	He ⁿ⁺	O ⁿ⁺		
18	2008-099	2008-102T04:00	2008-117	Maybe	A7 P2-P3	—	—	SW, MSH, MSP	1) 2 periapses 2) Strong B compression before SEP (day 97)
19	2011-081	2011-094T04:00	2011-106	Yes	A4-A7 P2-P4	—	—	SW, MSH, MSP	1) Compressed SW around SEP peak (days 93-97) Solar-wind driven auroral storm (Meredith et al., 2014)
20	2011-159	2011-172T08:00	2011-187	Yes	A3-A7 P2-P6	—	—	SW, MSH, MSP	1) SEP peak around periapsis
21	2011-189	2011-190T18:00	2011-197	Maybe	P2-P3	—	—	SW, MSH, MSP	1) Rarefied SW (all times after day 194)
22	2011-279	2011-286T11:00	2011-307	Yes	A4-A7 P2-P4	—	—	SW, MSH, MSP	1) Rarefied SW (days 278, 282-284)
23	2012-031	2012-053T23:00	2012-069	Yes	A4-A7 P2-P4	—	—	SW, MSH, MSP	1) SEP peak around periapsis 2) Sharp entry into SW ~1 day after SEP peak
24	2012-070	2012-097T13:00	2012-106	Yes	A0-A7 P2-P6	A8 H1	—	SW, MSH, MSP	1) 3 periapses 2) Possible IP shock (day 73)
25	2012-162	2012-163T08:00	2012-170	Yes	A4-A7	—	—	SW, MSH	1) Rarefied SW
26	2012-205	2012-206T18:00	2012-209	Maybe	P2-P3	—	—	SW, MSH, MSP	1) SEP peak around periapsis and MP crossing 2) Steady field inbound, fluctuating outbound after SEP arrival
27	2012-212	2012-228T16:00	2012-246	Yes	A4-A7 P2-P6	—	—	SW, MSH, MSP	1) 2 periapses 2) SEP peak around periapsis
28	2012-271	2012-281T16:00	2012-287	Maybe	A4-A7 P2	—	—	SW, MSH, MSP	1) Short SW and MSH encounters
29	2013-151	2013-160T04:00	2013-177	Yes	A3-A7 P2-P4	—	—	MSH, MSP	1) 3 periapses
30	2013-248	2013-258T06:00	2013-267	Yes	A5-A7 P2-P3	—	—	MSH, MSP	1) Enhanced B in lobe (days 248-253) 2) Enhanced B in magnetotail (after day 259)
31	2013-330	2013-332T23:00	2013-345	Yes	A0-A7 P2-P5	A8 H1	—	MSH, MSP	1) Sudden dropouts in B (days 330-332) 2) Strong B enhancement and rotation at SEP peak 3) Enhanced B in lobe (days 337-342) 4) T96 flyby in the SW (Bertucci et al. 2015)

Εικόνα 43: το ίδιο με την εικόνα 42 για τα επεισόδια 18-31

	SEP Dates (Year-DOY)			Forbush Decrease	LEMMS Ion Channels			Region	Notes
	Start	Peak Time	Stop		H ⁺	He ⁿ⁺	O ⁿ⁺		
32	2014-015	2014-025T01:00	2014-038	Yes	A6-A7 P2-P4	—	—	MSH, MSP	1) Enhanced B after SEP arrival (days 17-18)
33	2014-073	2014-077T18:00	2014-090	Maybe	A5-A7 P2-P4	—	—	SW, MSH, MSP	1) Enhanced B in lobe (days 72-77)
34	2014-238	2014-260T11:00	2014-269	Maybe	A5-A7 P2-P9	—	—	SW, MSH, MSP	1) SEP peak around periapsis 2) Enhanced B in lobe (days 266-270)
35	2014-270	2014-272T23:00	2014-285	Maybe	A3-A7 P2-P4	—	—	SW, MSH, MSP	1) Short SW and MSH encounters
36	2014-318	2014-319T23:00	2014-324	Yes	A4-A7 P2-P3	—	—	SW, MSH	1) Signature of strong shock (day 322) 2) HCS crossing (days 321-322) 3) Witasse et al. (2017)
37	2014-346	2014-358T08:00	2015-001	Yes	A0-A7 P2-P7	—	—	SW, MSH, MSP	1) Enhanced B in lobe (days 346-355)
38	2015-001	2015-007T18:00	2015-025	Yes	A4-A7 P2-P4	—	—	MSH, MSP	1) SEP peak around periapsis 2) Enhanced B in lobe (days 13-23)
39	2015-026	2015-034T08:00	2015-040	Maybe	A4-A7 P2-P3	—	—	MSH, MSP	1) Lack of enhancement in B of lobe
40	2015-041	2015-044T23:00	2015-057	No	A4-A7 P2-P3	—	—	MSP	1) Enhanced B in lobe (days 45-60)
41	2015-058	2015-066T18:00	2015-072	No	A4-A7 P2-P4	—	—	MSH, MSP	1) Sheath encounters frequent around SEP peak (days 65, 67-70)
42	2015-073	2015-086T18:00	2015-097	Yes	A4-A7 P2-P3	—	—	MSP	1) Enhanced B in lobe (days 78-86)
43	2015-101	2015-113T23:00	2015-117	Yes	A0-A7 P2-P3	—	—	MSP	1) Enhanced B in lobe (days 201-205) 2) Noisy magnetic field after SEP peak
44	2015-131	2015-138T11:00	2015-145	Maybe	A4-A7 P2	—	—	MSH, MSP	1) Enhanced B in lobe (days 132-141) 2) Possible sheath excursions at 40 Rs (days 141-143) although Cassini at ~04:00LT
45	2015-186	2015-197T11:00	2015-208	Yes	A0-A7 P2-P4	A8 H1	—	MSH, MSP	1) Noisier field compared to similar orbits 2) Enhanced B in lobe (days 191-195)
46	2015-358	2015-361T18:00	2016-001	No	A4-A7 P2-P3	—	—	MSH, MSP	1) Moderately enhanced tail field

Εικόνα 44: Ίδιο με την εικόνα 42 για τα επεισόδια 32-46.

Εντοπίσαμε τις τροχιές που συνέπεσαν με τα καταγεγραμμένα SEP (ισχυρά/κόκκινα και μεσαίας έντασης/πράσινα επεισόδια) και συγκρίναμε με τις τιμές του Δείκτη Μαγνητοσφαιρικής Παραμόρφωσης (Εικόνα 45).

Rev	Time of periapsis	Stress Index Dipole	Stress Index UCL/AGA	Sep Number
B	2004-350T05:51	-1.4	4.5	3
3	2005-048T00:57	-1.1	-6.0	4
12	2005-214T05:48	--	--	9
13	2005-232T11:15	-1.8	-7.7	9
14	2005-248T11:52	--	--	10
15	2005-266T21:36	-1.8	-8.3	10
16	2005-285T01:31	-4.2	-10.3	10
149	2011-169T23:46	3.6	--	20
150	2011-191T16:00	1.0	--	20 after
155	2011-292T12:24	1.6	--	22
162	2012-070T02:13	-0.3	--	24
163	2012-087T21:32	-0.2	--	24
164	2012-105T17:03	-0.7	--	24
218	2015-186T11:14	-0.4	--	45
219	2015-208T05:49	-0.4	--	45

Εικόνα 45: Παράθεση των δεικτών μαγνητοσφαιρικής παραμόρφωσης με τα επεισόδια SEP που συνέπεσαν με την περίαψη των τροχιών που φαίνονται στην αριστερή στήλη.

Από την σύγκριση συμπεραίνουμε ότι η μαγνητόσφαιρα βρισκόταν σε διάφορες καταστάσεις όταν συνέβησαν τα επεισόδια SEP. Πιο συγκεκριμένα για το επεισόδιο 10, που εκδηλώθηκε στις 31 Αυγούστου του 2005, διήρκησε σχεδόν πενήντα ημέρες και συμπεριέλαβε 3 τροχιές (Rev 14-15-16) του διαστημοπλοίου Cassini, παρατηρούμε ότι η μαγνητόσφαιρα ξεκινάει από μία κατάσταση κοντά στη μέση και οδηγείται σταδιακά σε σχετικά μεγάλη συμπίεση, κάτι που απεικονίζεται και από τα δύο μοντέλα. Το ίδιο επεισόδιο επηρέασε και τη Γη λίγες μέρες πριν φτάσει στον Κρόνο και είναι γνωστό στους μελετητές της Γήινης μαγνητόσφαιρας καθώς προξένησε μεγάλη πτώση του δείκτη $Dst = -150\text{nT}$ (Εικόνα 46). Αντίθετα το επεισόδιο 20 βρήκε τη μαγνητόσφαιρα σε διεσταλμένη κατάσταση (Rev 149) και λίγες μέρες μετά το τέλος του επεισοδίου (20 after) ο δείκτης βρίσκεται μειωμένος (Rev 150). Επίσης για το επεισόδιο 4, ενώ ο δείκτης από το μοντέλο του διπόλου είναι αμφίβολος, ο δείκτης που δίνει το AGA δείχνει ότι η μαγνητόσφαιρα είναι

ισχυρά συμπίεσμένη (Rev 3). Το ίδιο συμβαίνει και για το επεισόδιο 9 (Rev 12-13). Κατά τη διάρκεια των υπολοίπων έντονων επεισοδίων SEP, έχουμε εξάγει δείκτη μόνο από το μοντέλο του διπόλου και είναι αμφίβολος γιατί βρίσκεται κοντά στο μηδέν. Θα πρέπει να παρατηρήσουμε ότι δεν μπορούμε να γνωρίζουμε την εξέλιξη της μαγνητόσφαιρας σε αυτά τα επεισόδια γιατί το διαστημόπλοιο χρειάζεται αρκετές μέρες για να επανέλθει στην περιήψη.



Εικόνα 46: Στο γράφημα απεικονίζεται η εξέλιξη του δείκτη Dst για τη Γήινη μαγνητόσφαιρα για τον Σεπτέμβριο του 2005

4.6. Συζήτηση – Συμπεράσματα

Ο Κρόνος είναι πλανήτης με εξαιρετικά δυναμική συμπεριφορά σε ότι αφορά στη μαγνητόσφαιρά του. Η αποστολή Cassini-Huygens κατέχει το μέγιστο χρόνο παραμονής διαστημοπλοίου σε τροχιά πλανήτη εκτός της Γης. Ένα από τα σημαντικά προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι αποστολές που αποτελούνται από ένα και μόνο διαστημόπλοιο είναι η αδυναμία διαχωρισμού των χρονικών από τα χωρικά φαινόμενα. Ο Δείκτης Μαγνητοσφαιρικής Παραμόρφωσης που εισάγεται σε αυτή τη μελέτη αποτελεί συνδρομή σε αυτό το θεμελιώδες πρόβλημα καθώς με τις μετρήσεις μιας τροχιάς προσφέρει μια ασφαλή εικόνα για την κατάσταση της μαγνητόσφαιρας, ελλείψει μετρήσεων από τον ηλιακό άνεμο, ή περάσματος από τη μαγνητόπαυση του πλανήτη.

Για τον υπολογισμό του Δείκτη Μαγνητοσφαιρικής Παραμόρφωσης χρησιμοποιούνται ένα στατικό μοντέλο (Magnetic Dipole) του πλανητικού μαγνητικού πεδίου που το αντιμετωπίζει ως ακίνητο μαγνητικό δίπολο και ένα δυναμικό μοντέλο (UCL/AGA) που ενσωματώνει τις ταλαντώσεις που

παρατηρούνται στη μαγνητόσφαιρα. Μολονότι ως σήμερα και μετά και την ολοκλήρωση της 13-ετούς απόστολής Cassini, έχουν γίνει εκτεταμένες μετρήσεις σε ολόκληρη σχεδόν τη μαγνητόσφαιρα του Κρόνου, έχουν διερευνηθεί οι φυσικοί μηχανισμοί που ρυθμίζουν τα χαρακτηριστικά της και έχουν αναπτυχθεί αρκετά υπολογιστικά μοντέλα που περιγράφουν, ή προσπαθούν να προβλέψουν τις μεταβολές της, κανένα από αυτά δεν είναι σε θέση να περιγράψει με απόλυτη ακρίβεια τις δυναμικές μεταβολές στην τοπολογία της συγκεκριμένης μαγνητόσφαιρας.

Κατά την επεξεργασία των δεδομένων αρχικά υπολογίζεται η απόκλιση $DevB$ του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου από την αναμενόμενη τιμή βάσει του εφαρμοζόμενου μοντέλου. Προκύπτει ότι η $DevB$ για το μοντέλο του μαγνητικού διπόλου παρουσιάζει γραμμική εξάρτηση από την απόσταση r από το κέντρο του Κρόνου, ενώ για το μοντέλο του UCL/AGA δεν εμφανίζει κάποιο συγκεκριμένο μοτίβο εξάρτησης.

Ο υπολογισμός του Δείκτη Μαγνητοσφαιρικής Παραμόρφωσης γίνεται ανά τροχιά και με κατάλληλο τρόπο ώστε να είναι αδιάστατος και ανεξάρτητος της ακτινική απόστασης. Αυτό επιτυγχάνεται χάρη στο μεγάλο αριθμό μετρήσεων του Cassini. Η παρούσα εργασία αναλύει δεδομένα που ελήφθησαν σε διάστημα 11,5 ετών και ο μεγάλος αριθμός τροχιών (94) που μελετάει καταλήγει σε ασφαλή στατιστική κατανομή των περιπτώσεων που η μαγνητόσφαιρα αποκλίνει από τη μέση κατάστασή της προς την κάθε κατεύθυνση (συμπιεσμένη/διεσταλμένη) και αξιολογεί το πόσο έντονα συμβαίνει αυτό, δίνοντας ταυτόχρονα την αντίστοιχη πιθανότητα. Παρατηρούμε ότι για πάνω από τις μισές των περιπτώσεων η μαγνητόσφαιρα βρίσκεται στη μέση κατάσταση και το υπόλοιπο διαμοιράζεται ανάμεσα σε συμπιεσμένη, ή διεσταλμένη κατάσταση. Η πιθανότητα να εμφανιστεί πολύ διεσταλμένη, ή πολύ συμπιεσμένη είναι σχετικά μικρή με αυτή της πολύ συμπιεσμένης να είναι περίπου 10% ($P_{high\ compressed} = 9.57\%$), ενώ η πιθανότητα να βρεθεί η μαγνητόσφαιρα σε πολύ διεσταλμένη κατάσταση είναι ελαφρώς μεγαλύτερη $P_{high\ stretched} = 13.82\%$. Επίσης παρατηρείται συμμετρία στις τιμές του Δείκτη για πολύ συμπιεσμένη και πολύ διεσταλμένη μαγνητόσφαιρα.

Η ενδεικτική εφαρμογή του δυναμικού μοντέλου UCL/AGA στις πρώτες τροχιές της αποστολής τείνει να δώσει μια πιο ξεκάθαρη εικόνα για την γενική κατάσταση της μαγνητόσφαιρας, σε σύγκριση με το δίπολο, διότι το μοντέλο UCL/AGA παρακολουθεί τις δυναμικές μεταβολές της μαγνητόσφαιρας, ενώ το διπολικό μοντέλο όχι. Η ποιοτική σύγκριση του προϋπάρχοντος Δείκτη (Leisner et al 2007) και του Δείκτη Μαγνητοσφαιρικής Παραμόρφωσης αυτής της εργασίας καταλήγει σε συμφωνία.

Η σύγκριση με τα καταγεγραμμένα επεισόδια SEP, εντοπίζει συσχέτιση του επεισοδίου 10 (Εικόνα 45) που είχε έναρξη στις 31 Αυγούστου 2015 και διήρκεσε 49 ημέρες. Η μαγνητόσφαιρα του Κρόνου συμπιέστηκε και αυτό απεικονίζεται και στην τιμή του Δείκτη που εξελίσσεται μειούμενος στις τροχιές Rev 14-15-16.

Συμπερασματικά και απαντώντας στα ερωτήματα που τέθηκαν η σημαντικότητα της παρούσας μελέτης εντοπίζεται στο γεγονός ότι παρέχει ένα νέο εργαλείο μελέτης της δυναμικής ενός μαγνητοσφαιρικού συστήματος με χρήση μόνο επιτόπιων μετρήσεων της έντασης του μαγνητικού πεδίου. Με τη βελτίωση των χρησιμοποιούμενων μοντέλων του μαγνητικού πεδίου έχουμε τη δυνατότητα να προσεγγίζουμε καλύτερα τις δυναμικές μεταβολές του συστήματος, και τις παρουσιάζουμε παραμετροποιημένες.

Ένα από τα πλεονεκτήματα του δείκτη που εισάγουμε στην παρούσα εργασία, είναι η δυνατότητά του να μεταφραστεί σε αντίστοιχη ποσότητα μετρούμενη σε nT, ώστε να δίνει την ακριβή τιμή της ταπείνωσης του μαγνητικού πεδίου και να είναι άμεσα συγκρίσιμος με αντίστοιχους δείκτες τη βιβλιογραφίας, όπως ο δείκτης Dst.

Είναι επίσης εφικτή η αξιολόγηση του δείκτη με χρήση δεδομένων του διαστημοπλοίου για τις διαβάσεις από τη μαγνητόπαυση, εφόσον αυτές είναι χρονικά κοντά στην περιοχή που έχει υπολογιστεί ο δείκτης, κάτι που μπορεί να αποτελέσει αντικείμενο μελλοντικής μελέτης.

5. Παράρτημα

5.1. Δείκτης Μαγνητοσφαιρικής Παραμόρφωσης (μοντέλο μαγνητικού διπόλου)

Rev	N total	Time of periapsis	Stress Index	SE of Stress Index
B	9	2004-350T05:51	-1.4	0.8
C	13	2005-016T06:25	-2.1	0.7
3	8	2005-048T00:57	-1.1	0.8
4	8	2005-068T11:40	-1.1	0.3
5	6	2005-088T23:38	-4.5	2.6
6	7	2005-104T23:16	-3.4	1.0
8	3	2005-141T06:02	-0.8	1.5
11	3	2005-195T22:10	0.0	0.7
13	3	2005-232T11:15	-1.8	1.3
15	8	2005-266T21:36	-1.8	1.0
16	8	2005-285T01:31	-4.2	0.6
17	15	2005-302T22:56	-1.6	0.3
18	15	2005-331T11:21	-7.2	1.4
19	15	2005-358T21:23	-2.1	0.5
20	19	2006-017T06:58	-4.5	0.6
21	19	2006-056T10:56	-5.4	0.7
22	20	2006-079T20:05	-9.4	1.0
23	20	2006-118T23:59	-2.6	0.4
24	20	2006-142T09:01	-3.2	0.8
25	20	2006-181T13:05	0.5	0.4
26	10	2006-204T21:48	-3.2	1.3
27	10	2006-228T20:53	-0.3	0.8
29	3	2006-268T19:42	-0.9	1.1
30	4	2006-284T22:59	-3.7	0.4
31	3	2006-301T00:10	-1.0	0.9
34	3	2006-336T21:39	-1.8	0.5
47	11	2007-179T00:54	-4.0	0.7
48	11	2007-201T20:31	0.8	0.5
49	10	2007-241T13:03	3.1	0.2
50	10	2007-273T11:29	7.5	0.9
51	13	2007-297T07:56	-0.4	0.9
52	13	2007-321T07:52	-0.4	0.4
53	9	2007-337T07:40	-1.5	0.9
114	4	2009-191T22:10	-2.2	0.5
117	13	2009-239T10:33	1.2	0.4

119	9	2009-287T05:10	0.2	0.3
120	8	2009-306T04:39	-5.6	1.7
121	9	2009-325T05:15	1.0	0.3
122	9	2009-344T06:04	-3.2	1.1
123	7	2009-360T05:41	-1.8	0.5
125	7	2010-027T04:07	-5.1	0.9
126	8	2010-044T16:55	-1.9	0.9
129	8	2010-097T12:53	-1.9	0.9
130	10	2010-117T21:41	-1.1	0.7
131	10	2010-138T08:32	-0.4	0.3
132	8	2010-154T07:43	-1.5	0.8
135	8	2010-206T03:14	-3.7	1.2
136	8	2010-226T01:04	-2.2	0.2
137	10	2010-246T01:40	-1.2	0.6
138	10	2010-265T23:59	8.1	2.3
139	16	2010-289T17:57	-2.6	0.9
141	10	2010-334T09:33	-0.5	0.6
142	9	2010-354T22:49	-0.4	0.6
143	9	2011-010T16:14	3.1	0.9
144	9	2011-031T02:50	0.6	0.7
145	15	2011-051T13:44	-2.0	1.1
146	15	2011-079T11:45	2.1	0.2
147	15	2011-107T09:46	0.1	1.0
148	9	2011-130T20:44	1.8	0.9
149	12	2011-169T23:46	3.6	0.7
150	12	2011-191T16:00	1.0	0.3
151	12	2011-213T08:12	1.4	0.3
152	12	2011-235T03:58	2.1	0.6
153	11	2011-256T23:01	6.6	1.2
154	11	2011-274T16:53	5.2	1.0
155	11	2011-292T12:24	1.6	1.2
156	11	2011-310T07:58	0.7	0.1
157	12	2011-328T04:32	2.2	0.5
158	11	2011-346T02:00	5.3	1.4
159	12	2012-004T13:03	0.5	0.6
161	7	2012-052T05:23	-1.6	0.9
162	8	2012-070T02:13	-0.3	0.6
163	9	2012-087T21:32	-0.2	0.9
164	8	2012-105T17:03	-0.7	0.3
165	9	2012-123T12:34	-2.9	0.7
166	9	2012-141T06:26	0.0	1.0
213	12	2015-073T15:49	2.1	0.6
214	16	2015-101T17:09	4.2	0.7
215	18	2015-129T18:03	4.3	0.8

216	16	2015-148T14:54	4.2	0.4
217	14	2015-167T12:44	1.6	0.3
218	18	2015-186T11:14	-0.4	0.8
219	18	2015-208T05:49	-0.4	0.2
220	16	2015-230T01:24	1.6	0.6
221	17	2015-251T21:41	0.1	0.5
222	10	2015-273T16:17	0.7	0.5
223	11	2015-287T14:06	4.3	0.8
224	13	2015-301T11:56	1.4	0.9
225	10	2015-315T09:30	5.3	1.1
226	13	2015-328T03:14	7.6	0.9
227	10	2015-340T20:31	6.4	1.3
229	4	2016-001T10:39	2.9	0.8
230	8	2016-014T06:58	1.3	0.3
231	15	2016-030T04:56	5.2	0.9

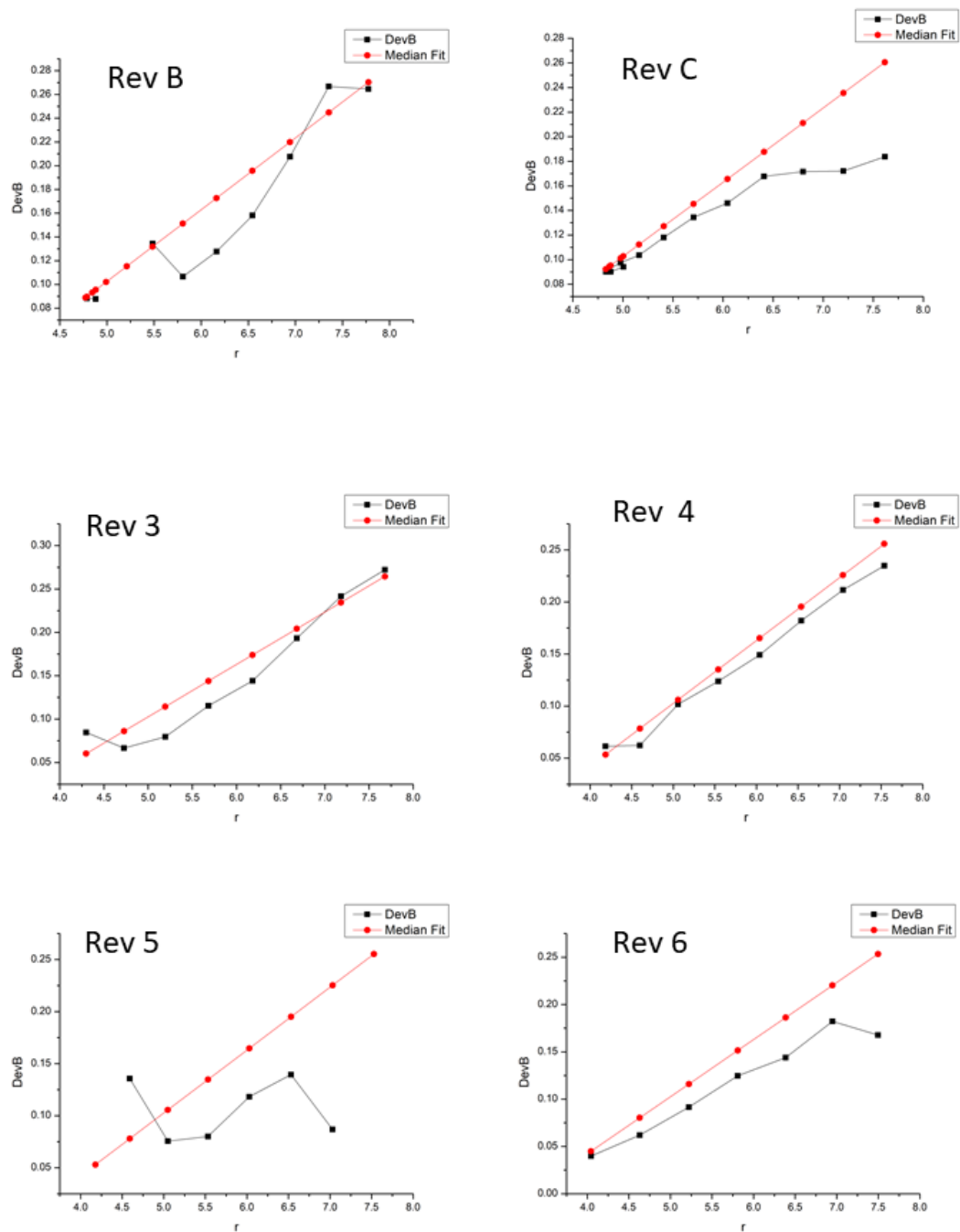
Εικόνα 47: Στον πίνακα φαίνεται ο Δείκτης Μαγνητοσφαιρικής Παραμόρφωσης (όπως προέκυψε με τη χρήση του μοντέλου του μαγνητικού διπόλου), ο αριθμός των μετρήσεων, και το standard error για κάθε τροχιά.

5.2. Δείκτης Μαγνητοσφαιρικής Παραμόρφωσης (μοντέλο UCL/AGA)

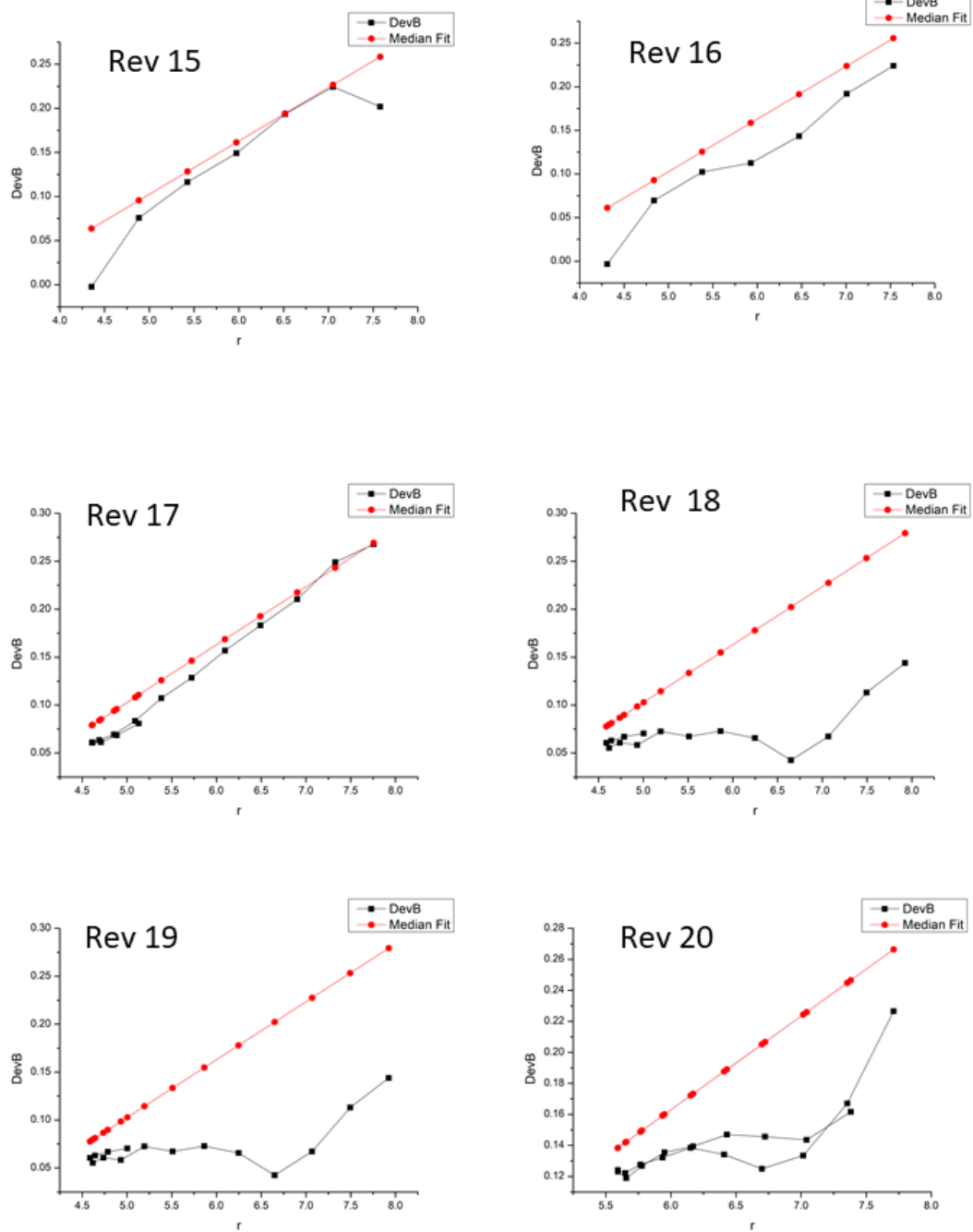
Rev	N total	Time of periapsis	Stress Index AGA	SE of Stress Index AGA
B	5	2004-350T05:51	4.5	4.6
C	14	2005-016T06:25	0.0	2.3
3	8	2005-048T00:57	-6.0	2.6
4	9	2005-068T11:40	-1.1	3.4
5	6	2005-088T23:38	-10.6	3.4
6	7	2005-104T23:16	-13.4	1.9
8	3	2005-141T06:02	-4.1	3.3
11	3	2005-195T22:10	-5.7	4.3
13	3	2005-232T11:15	-7.7	3.9
15	7	2005-266T21:36	-8.3	2.9
16	7	2005-285T01:31	-10.3	2.9
17	15	2005-302T22:56	0.3	1.9
18	16	2005-331T11:21	-4.0	3.0
19	16	2005-358T21:23	2.6	2.2
20	19	2006-017T06:58	3.4	2.1
21	19	2006-056T10:56	2.3	2.4
22	20	2006-079T20:05	-4.0	3.3
23	20	2006-118T23:59	5.7	1.8
24	20	2006-142T09:01	4.9	1.6
25	20	2006-181T13:05	9.7	1.9
26	10	2006-204T21:48	16.0	1.4

Εικόνα 47: Στον πίνακα φαίνεται ο Δείκτης Μαγνητοσφαιρικής Παραμόρφωσης (όπως προέκυψε με τη χρήση του μοντέλου UCL/AGA), ο αριθμός των μετρήσεων, και το standard error για κάθε τροχιά.

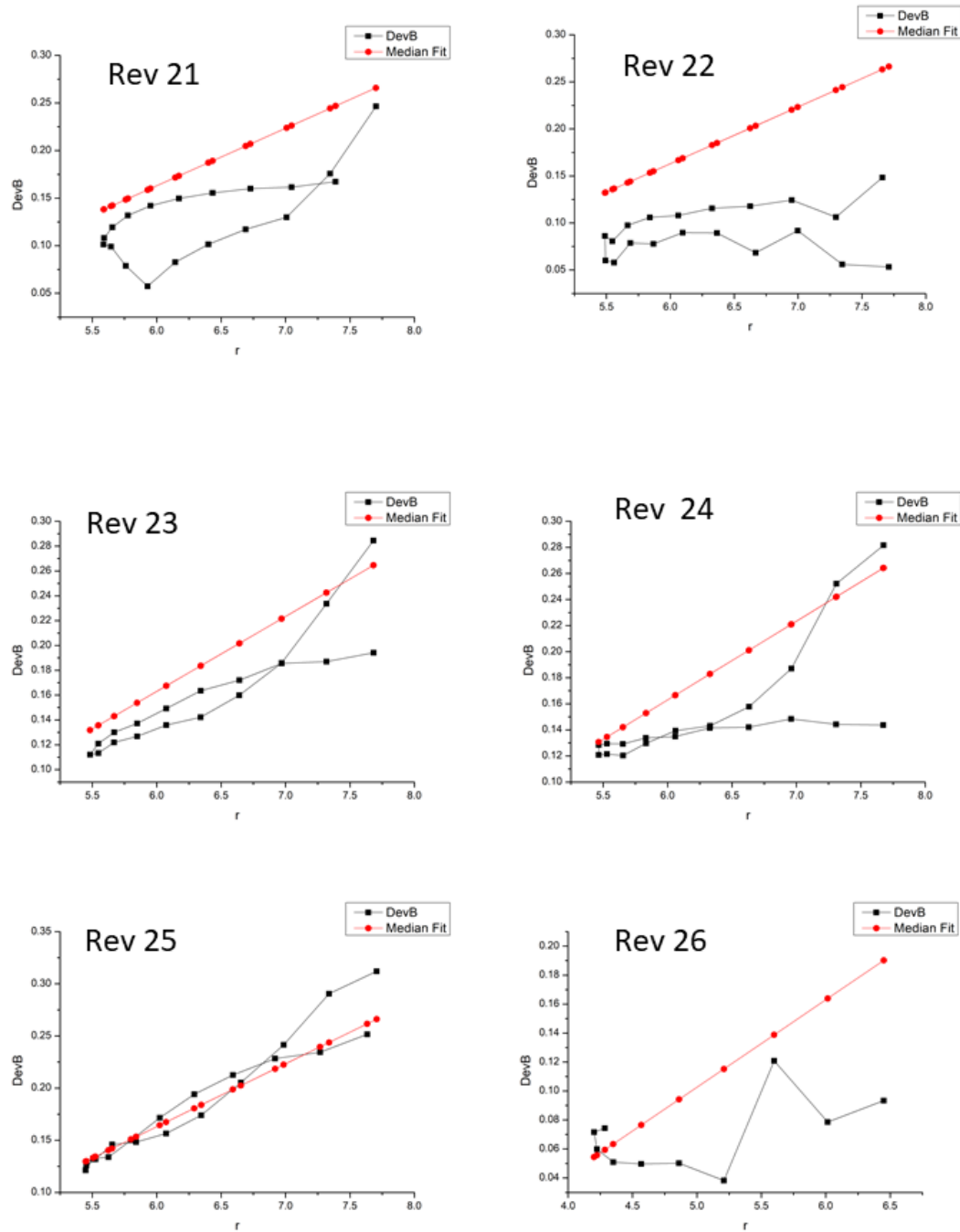
5.3. Αναπαράσταση τροχιών B ως 213 (μοντέλο μαγνητικού διπόλου)



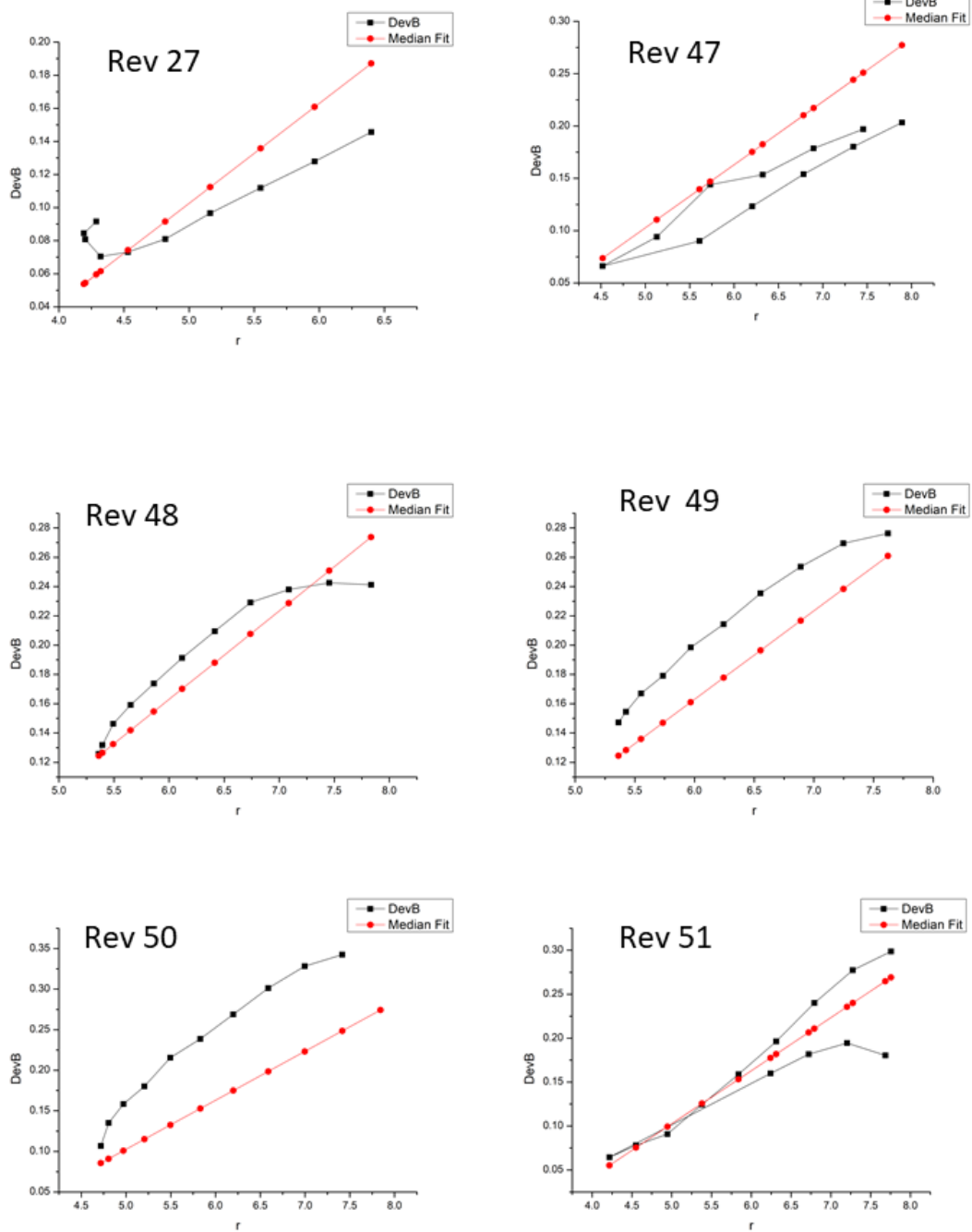
Εικόνα 48: Αναπαράσταση τροχιών B-6. Στα επιμέρους γραφήματα η μαύρη καμπύλη αναπαριστά τις μετρήσεις που λήφθηκαν από το διαστημόπλοιο Cassini σε σύγκριση με τη μέση κατάσταση της μαγνητόσφαιρας (κόκκινη καμπύλη).



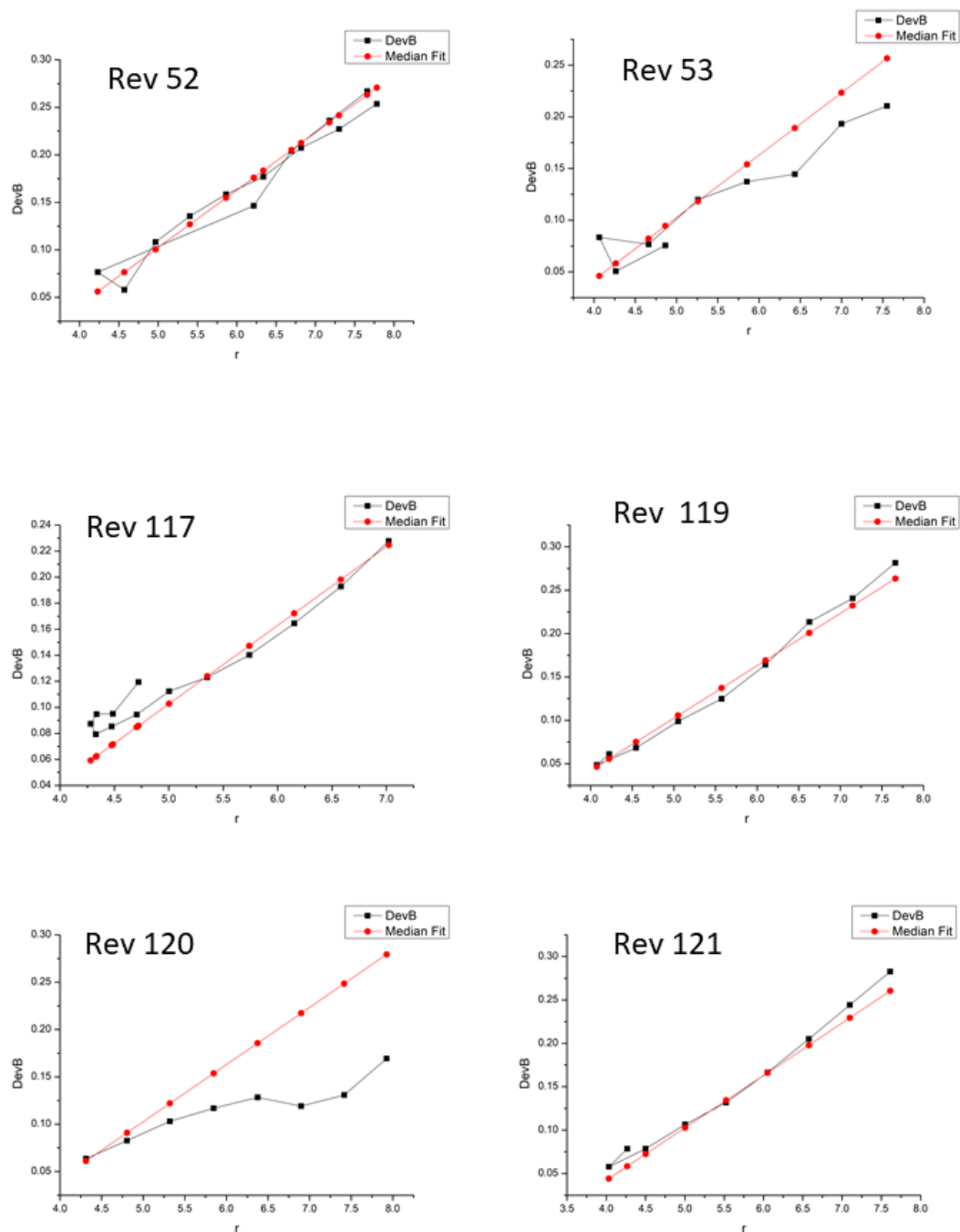
Εικόνα 49: Αναπαράσταση τροχιών 15-20. Στα επιμέρους γραφήματα η μαύρη καμπύλη αναπαριστά τις μετρήσεις που λήφθηκαν από το διαστημόπλοιο Cassini σε σύγκριση με τη μέση κατάσταση της μαγνητόσφαιρας (κόκκινη καμπύλη).



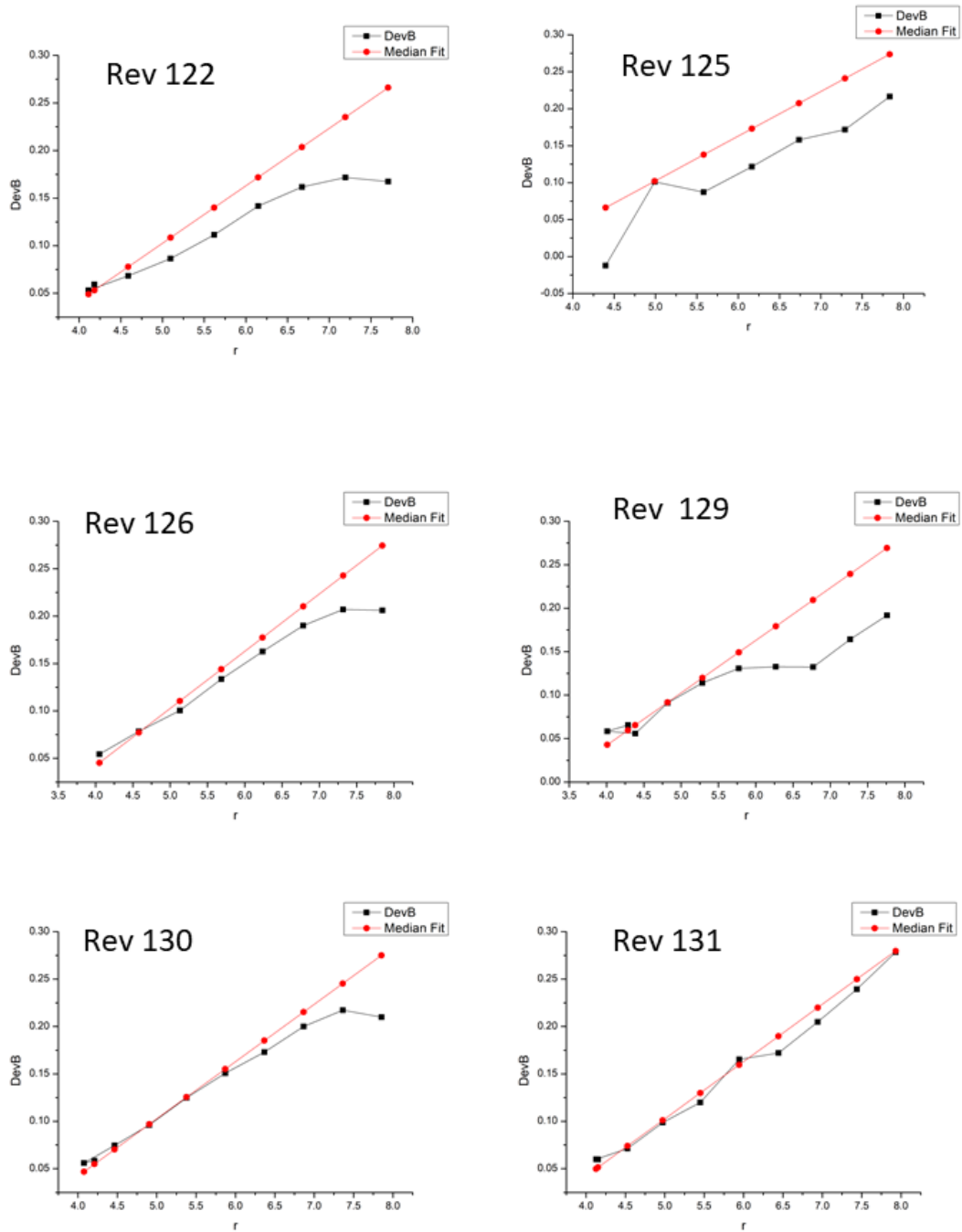
Εικόνα 50: Αναπαράσταση τροχιών 21-26. Στα επιμέρους γραφήματα η μαύρη καμπύλη αναπαριστά τις μετρήσεις που λήφθηκαν από το διαστημόπλοιο Cassini σε σύγκριση με τη μέση κατάσταση της μαγνητόσφαιρας (κόκκινη καμπύλη).



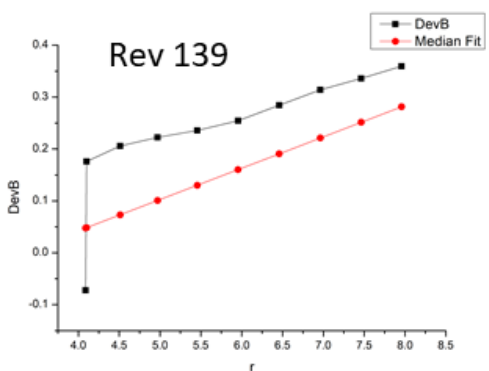
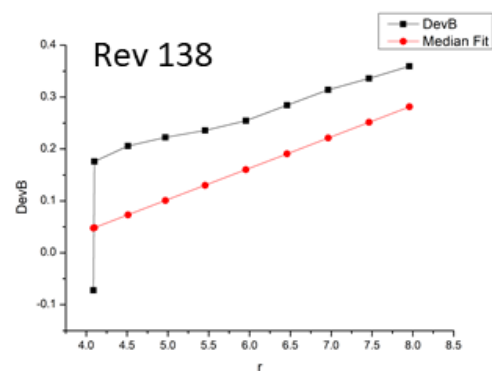
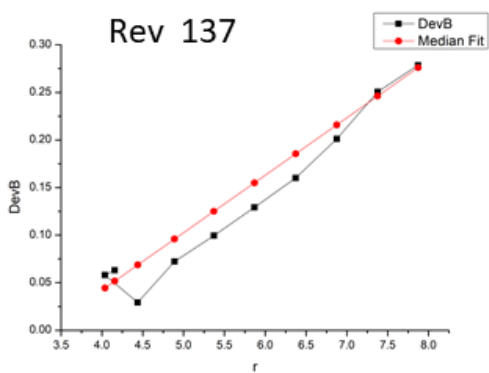
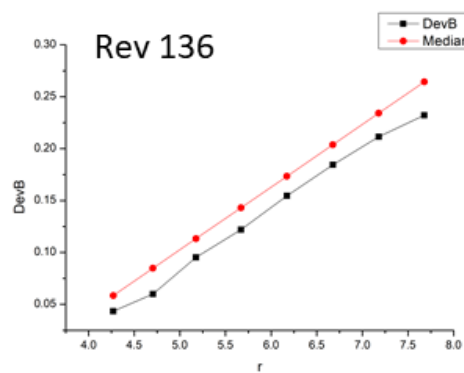
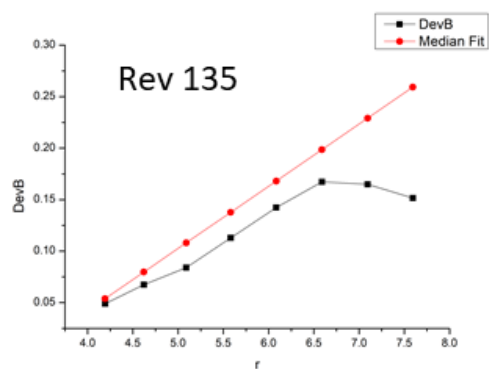
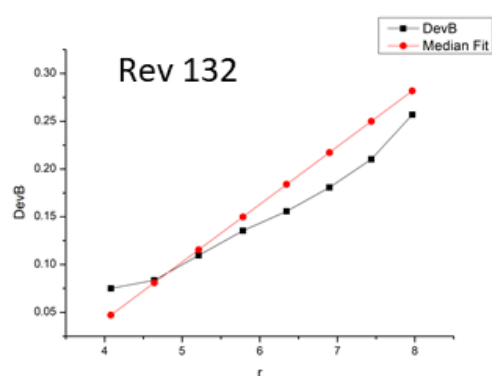
Εικόνα 51: Αναπαράσταση τροχιών 27-51. Στα επιμέρους γραφήματα η μαύρη καμπύλη αναπαριστά τις μετρήσεις που λήφθηκαν από το διαστημόπλοιο Cassini σε σύγκριση με τη μέση κατάσταση της μαγνητόσφαιρας (κόκκινη καμπύλη).



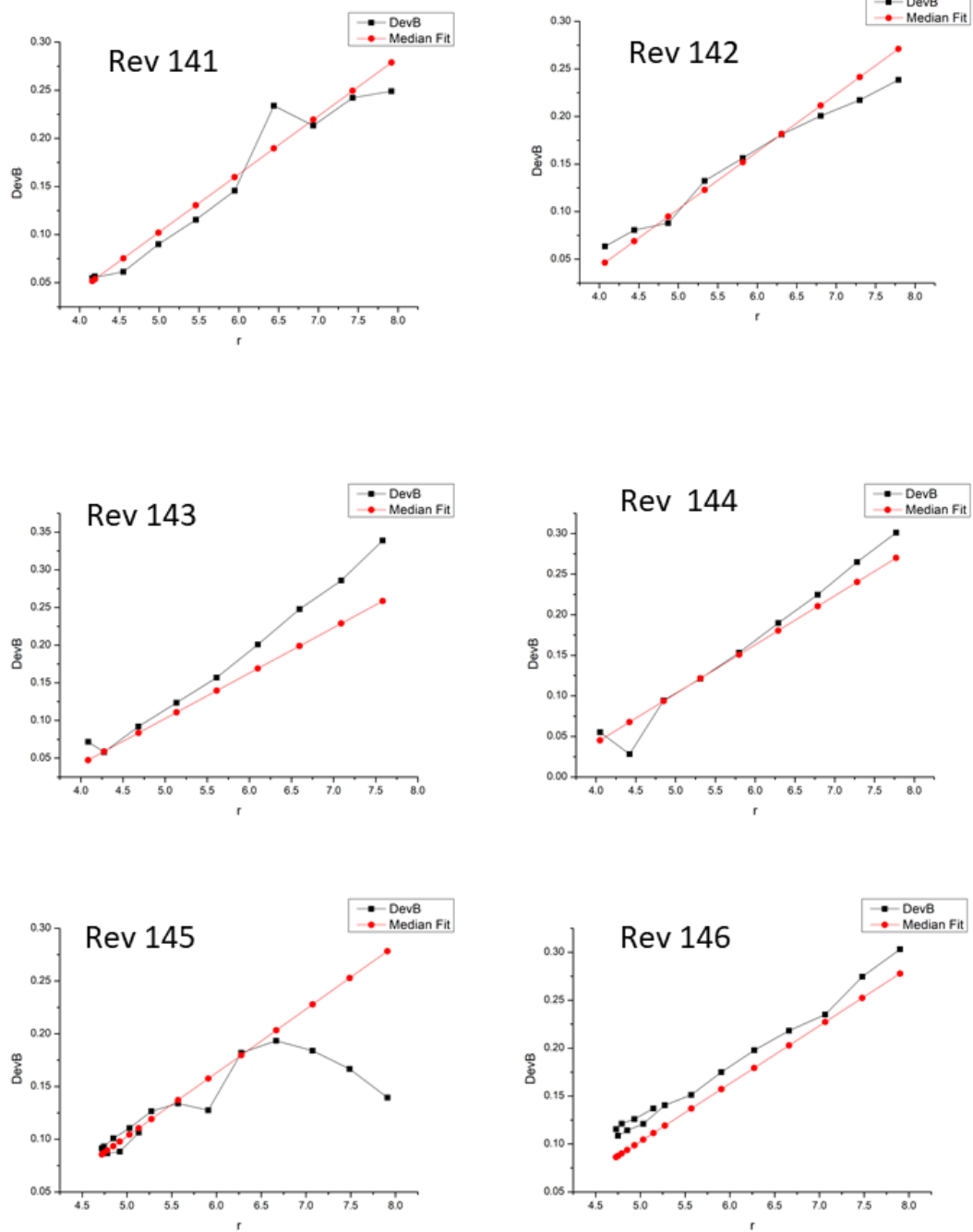
Εικόνα 52: Αναπαράσταση τροχιών 52-121. Στα επιμέρους γραφήματα η μαύρη καμπύλη αναπαριστά τις μετρήσεις που λήφθηκαν από το διαστημόπλοιο Cassini σε σύγκριση με τη μέση κατάσταση της μαγνητόσφαιρας (κόκκινη καμπύλη).



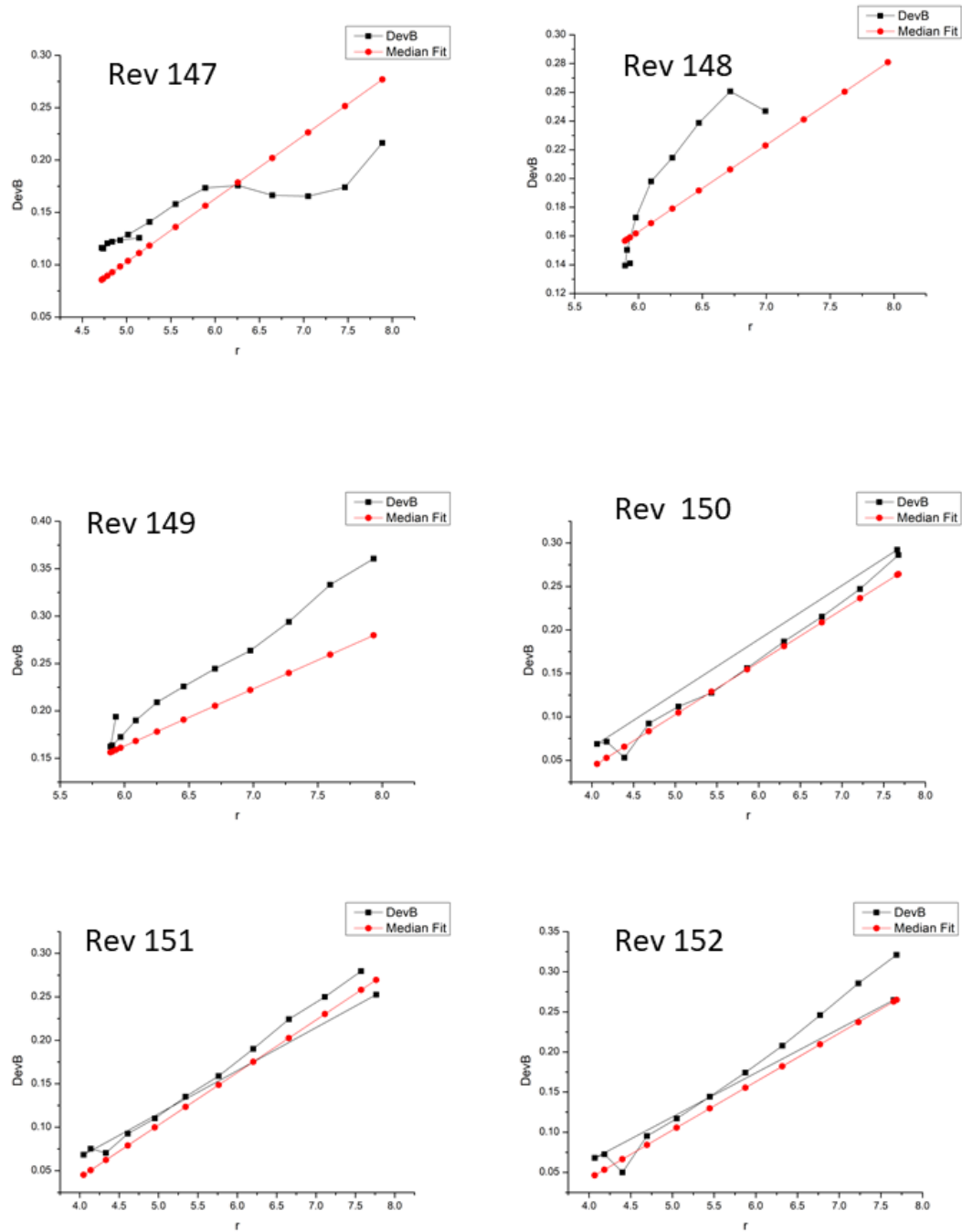
Εικόνα 53: Αναπαράσταση τροχιών 122-131. Στα επιμέρους γραφήματα η μαύρη καμπύλη αναπαριστά τις μετρήσεις που λήφθηκαν από το διαστημόπλοιο Cassini σε σύγκριση με τη μέση κατάσταση της μαγνητόσφαιρας (κόκκινη καμπύλη).



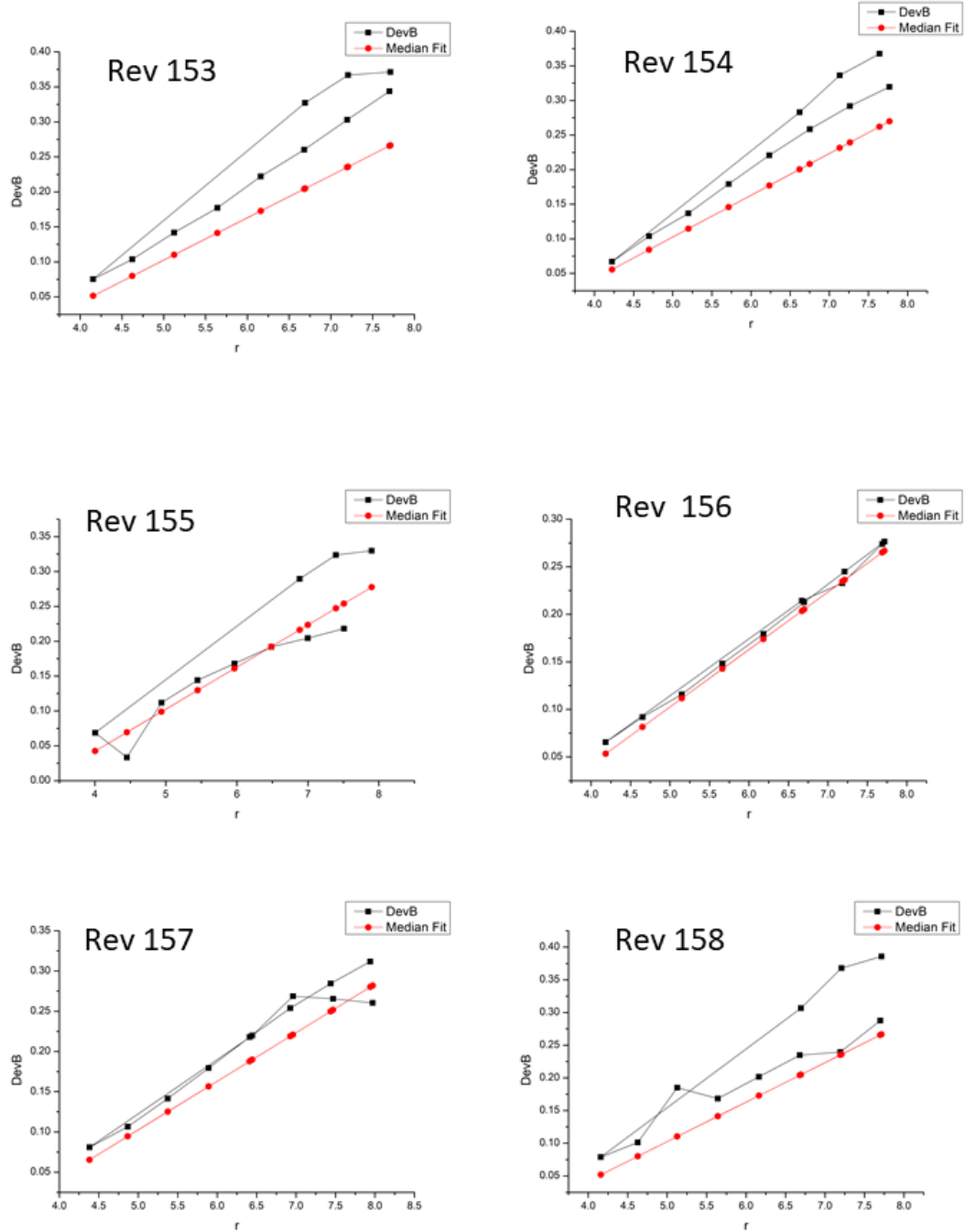
Εικόνα 54: Αναπαράσταση τροχιών 132-139. Στα επιμέρους γραφήματα η μαύρη καμπύλη αναπαριστά τις μετρήσεις που λήφθηκαν από το διαστημόπλοιο Cassini σε σύγκριση με τη μέση κατάσταση της μαγνητόσφαιρας (κόκκινη καμπύλη).



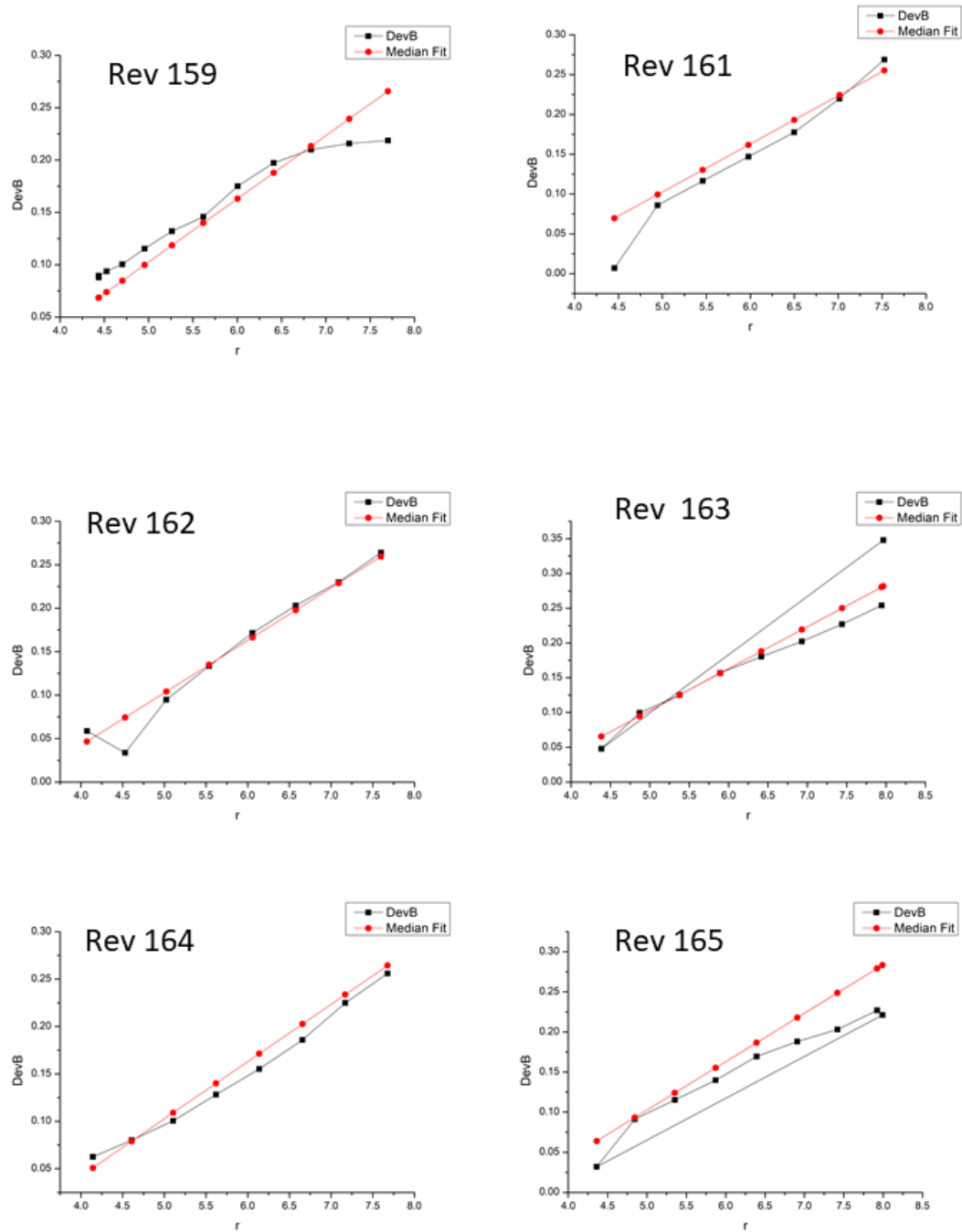
Εικόνα 55: Αναπαράσταση τροχιών 141-146. Στα επιμέρους γραφήματα η μαύρη καμπύλη αναπαριστά τις μετρήσεις που λήφθηκαν από το διαστημόπλοιο Cassini σε σύγκριση με τη μέση κατάσταση της μαγνητόσφαιρας (κόκκινη καμπύλη).



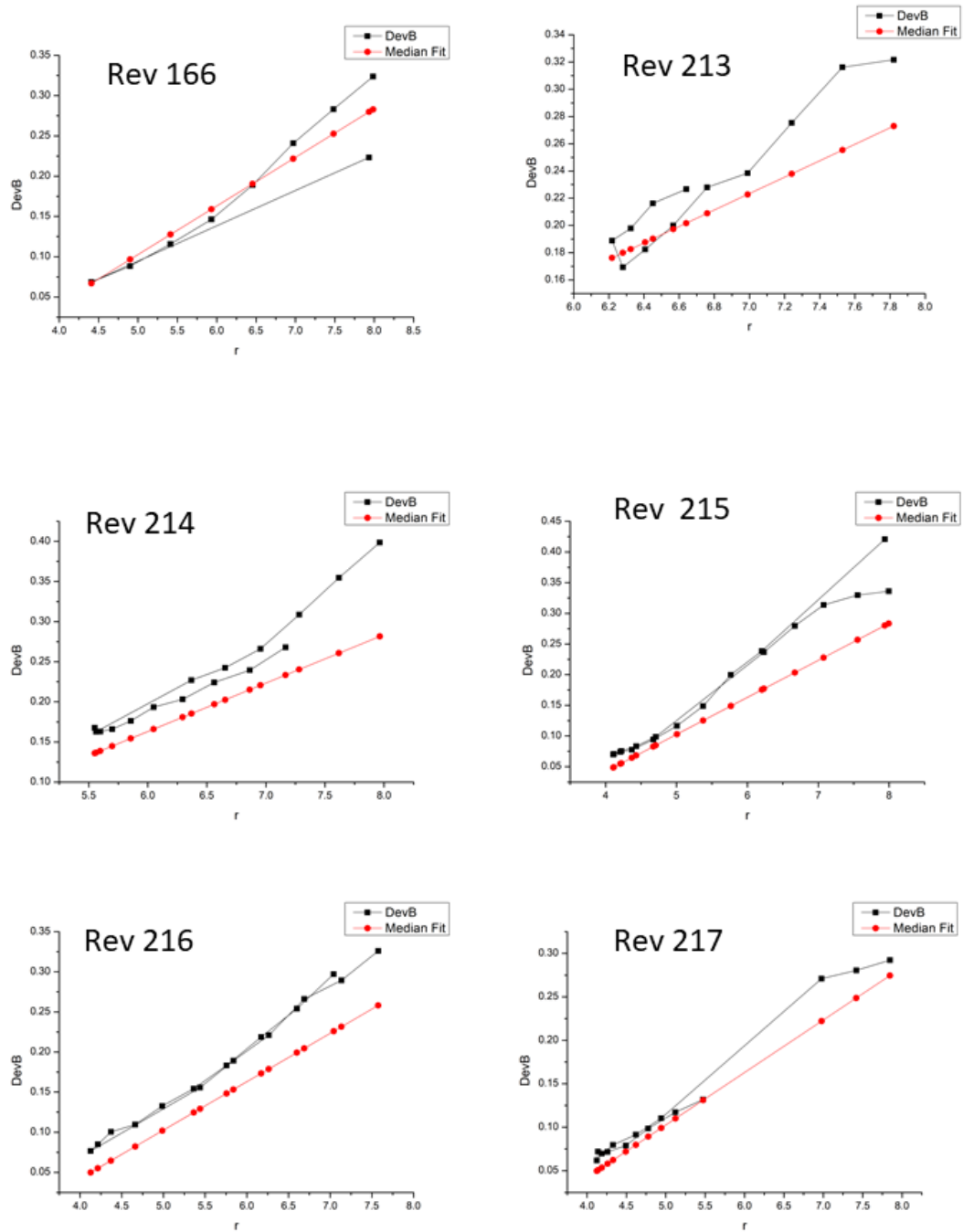
Εικόνα 56: Αναπαράσταση τροχιών 147-152. Στα επιμέρους γραφήματα η μαύρη καμπύλη αναπαριστά τις μετρήσεις που λήφθηκαν από το διαστημόπλοιο Cassini σε σύγκριση με τη μέση κατάσταση της μαγνητόσφαιρας (κόκκινη καμπύλη).



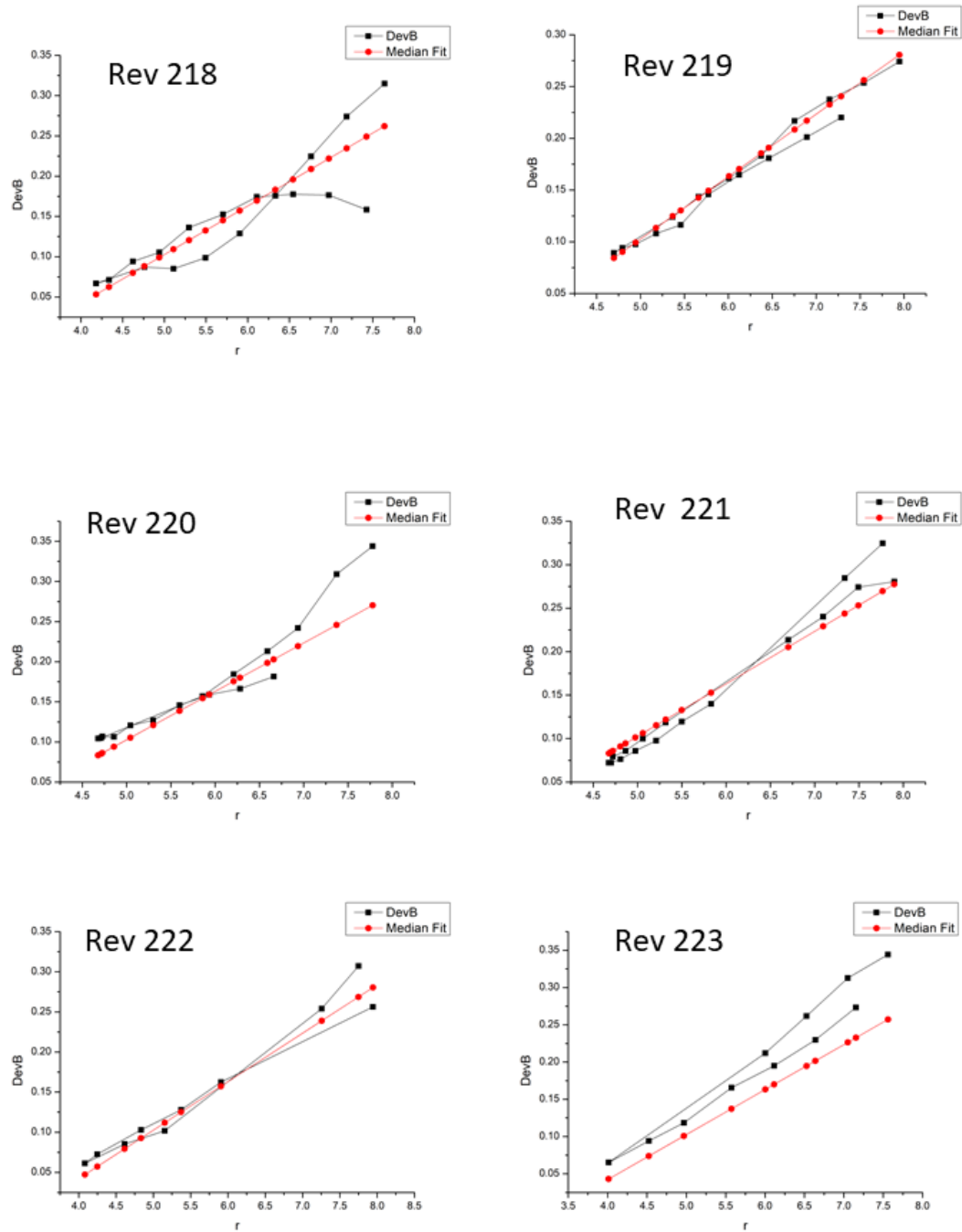
Εικόνα 57: Αναπαράσταση τροχιών 153-158. Στα επιμέρους γραφήματα η μαύρη καμπύλη αναπαριστά τις μετρήσεις που λήφθηκαν από το διαστημόπλοιο Cassini σε σύγκριση με τη μέση κατάσταση της μαγνητόσφαιρας (κόκκινη καμπύλη).



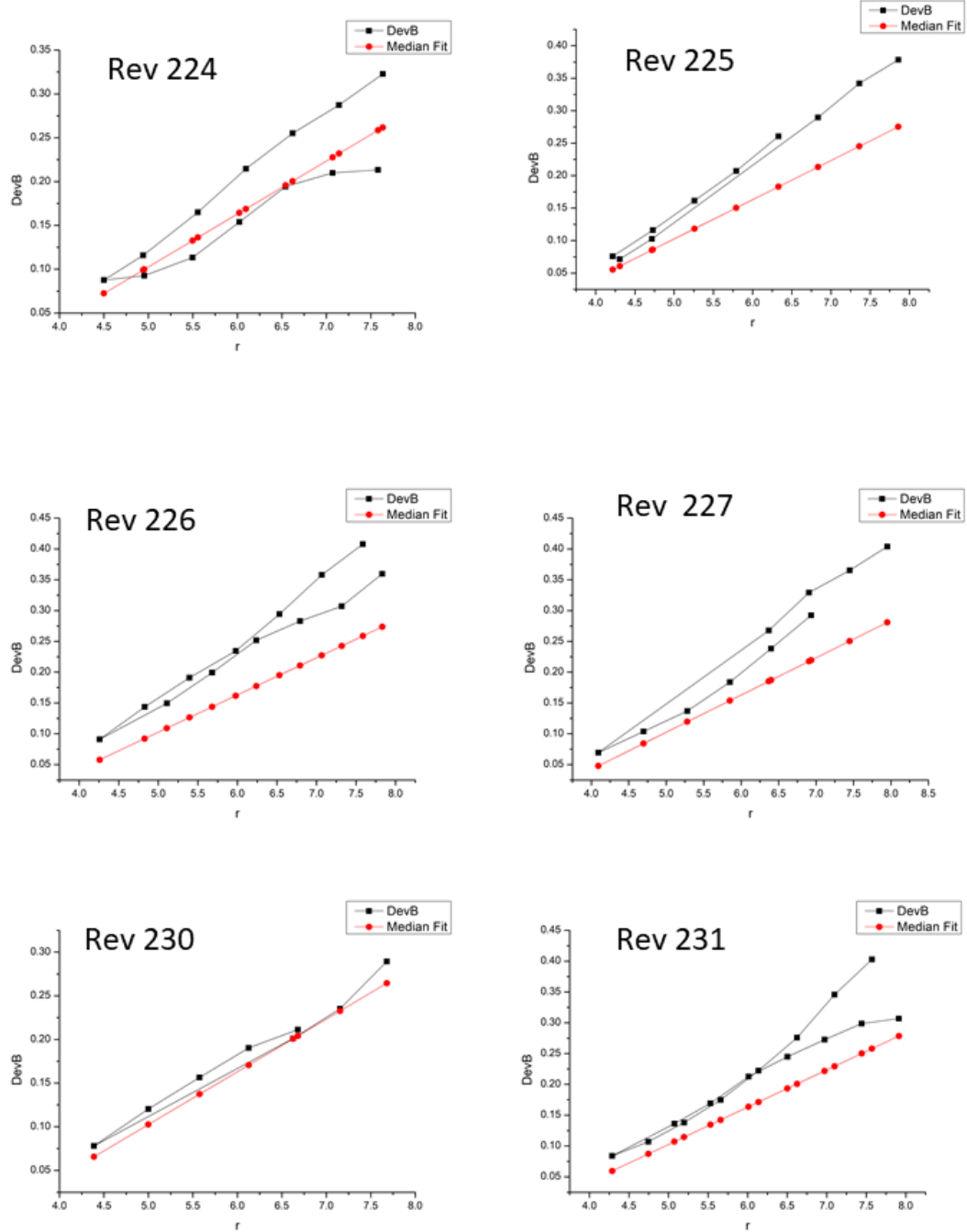
Εικόνα 58: Αναπαράσταση τροχιών 159-165. Στα επιμέρους γραφήματα η μαύρη καμπύλη αναπαριστά τις μετρήσεις που λήφθηκαν από το διαστημόπλοιο Cassini σε σύγκριση με τη μέση κατάσταση της μαγνητόσφαιρας (κόκκινη καμπύλη).



Εικόνα 59: Αναπαράσταση τροχιών 166-217. Στα επιμέρους γραφήματα η μαύρη καμπύλη αναπαριστά τις μετρήσεις που λήφθηκαν από το διαστημόπλοιο Cassini σε σύγκριση με τη μέση κατάσταση της μαγνητόσφαιρας (κόκκινη καμπύλη).

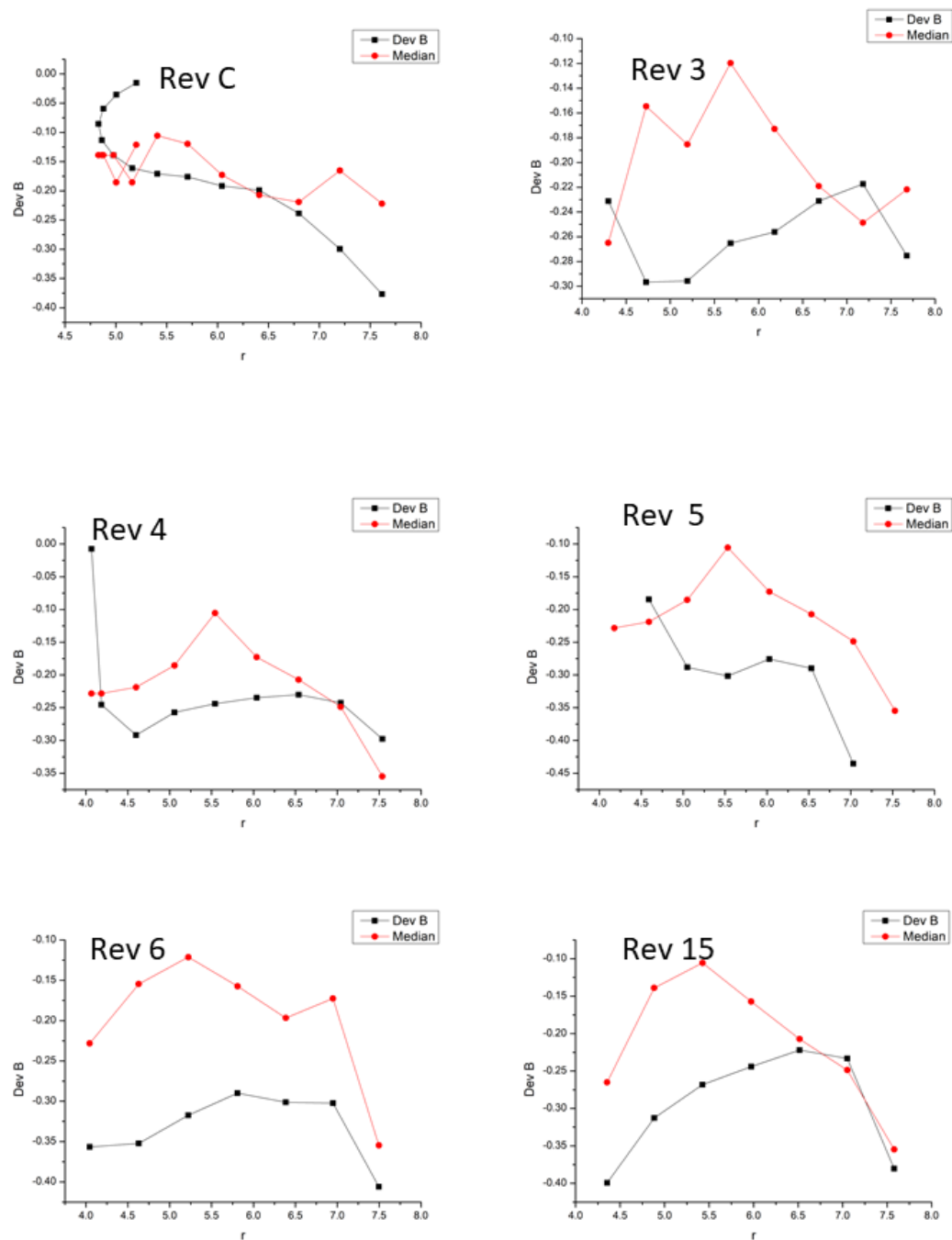


Εικόνα 60: Αναπαράσταση τροχιών 218-223. Στα επιμέρους γραφήματα η μαύρη καμπύλη αναπαριστά τις μετρήσεις που λήφθηκαν από το διαστημόπλοιο Cassini σε σύγκριση με τη μέση κατάσταση της μαγνητόσφαιρας (κόκκινη καμπύλη).

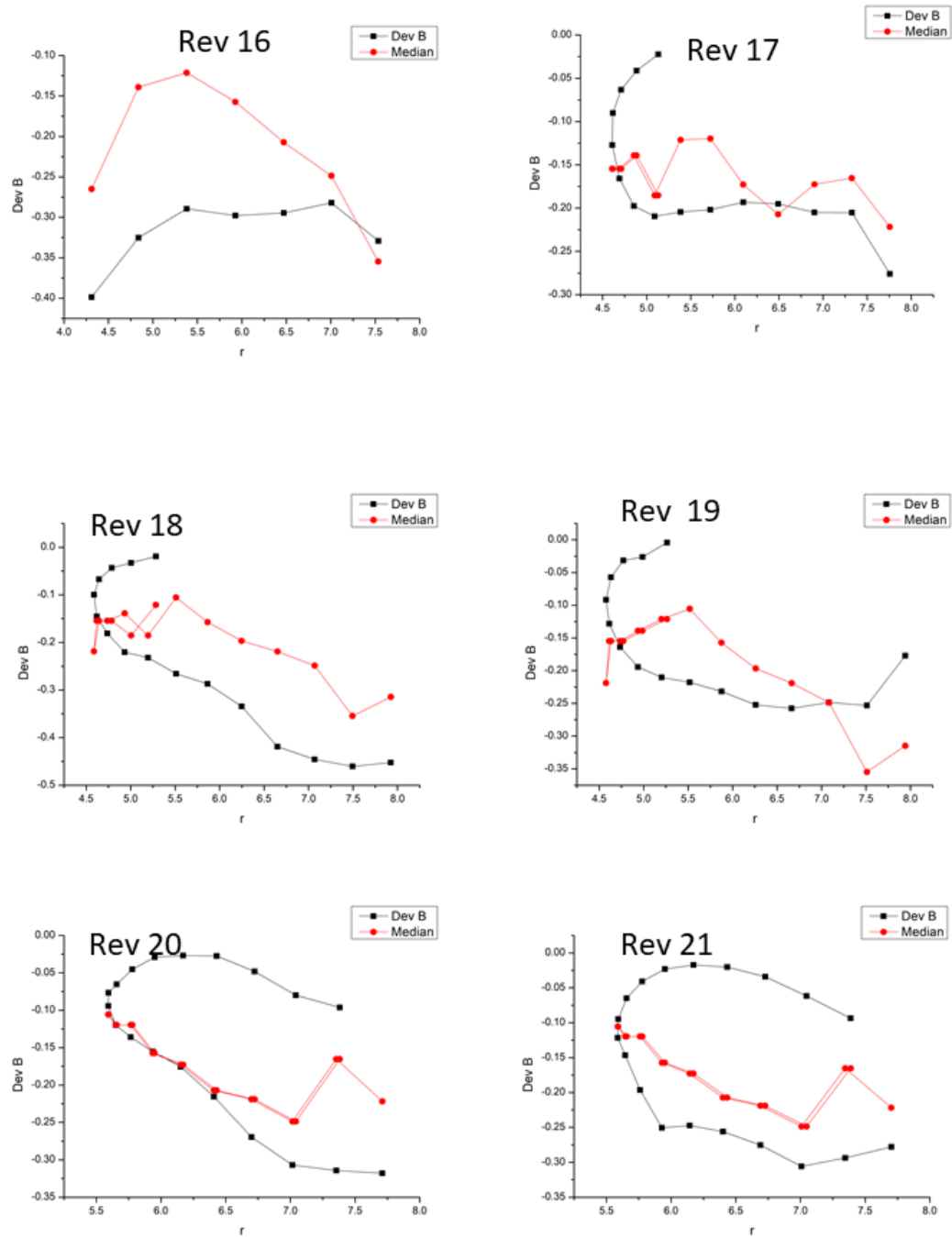


Εικόνα 61: Αναπαράσταση τροχιών 224-231. Στα επιμέρους γραφήματα η μαύρη καμπύλη αναπαριστά τις μετρήσεις που λήφθηκαν από το διαστημόπλοιο Cassini σε σύγκριση με τη μέση κατάσταση της μαγνητόσφαιρας (κόκκινη καμπύλη).

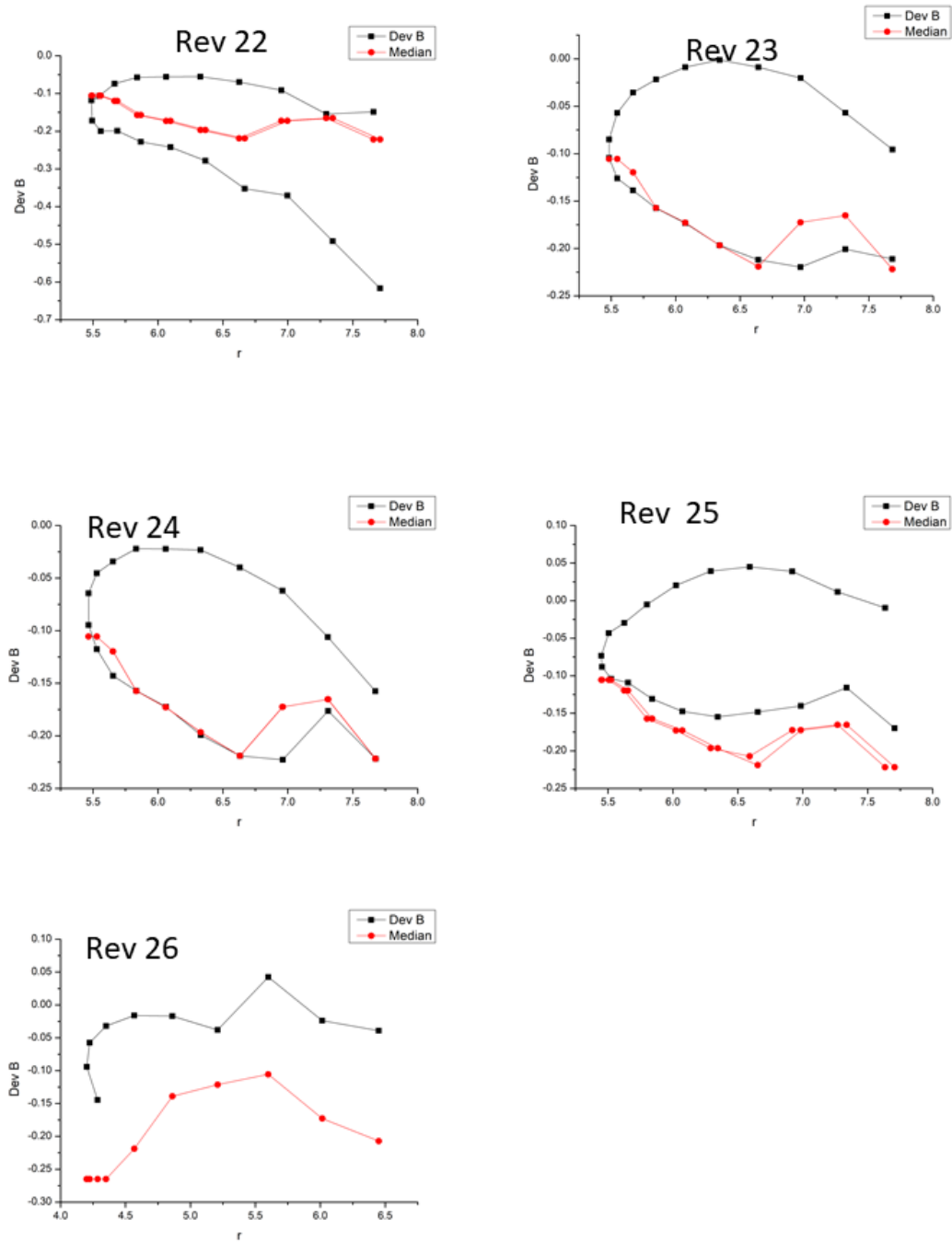
5.4. Αναπαράσταση τροχιών C ως 26 (μοντέλο UCL/AGA)



Εικόνα 62: Αναπαράσταση τροχιών C-15 με τη χρήση του μοντέλου UCL/AGA. Στα επιμέρους γραφήματα η μαύρη καμπύλη αναπαριστά τις μετρήσεις που λήφθηκαν από το διαστημόπλοιο Cassini σε σύγκριση με τη μέση κατάσταση της μαγνητόσφαιρας (κόκκινη καμπύλη).



Εικόνα 63: Αναπαράσταση τροχιών 16-21 με τη χρήση του μοντέλου UCL/AGA. Στα επιμέρους γραφήματα η μαύρη καμπύλη αναπαριστά τις μετρήσεις που λήφθηκαν από το διαστημόπλοιο Cassini σε σύγκριση με τη μέση κατάσταση της μαγνητόσφαιρας (κόκκινη καμπύλη).



Εικόνα 64: Αναπαράσταση τροχιών 22-26 με τη χρήση του μοντέλου UCL/AGA. Στα επιμέρους γραφήματα η μαύρη καμπύλη αναπαριστά τις μετρήσεις που λήφθηκαν από το διαστημόπλοιο Cassini σε σύγκριση με τη μέση κατάσταση της μαγνητόσφαιρας (κόκκινη καμπύλη).

References

Andre, N., M. K. Dougherty, C. T. Russell, J. S. Leisner, and K. K. Khurana (2005), Dynamics of the Saturnian inner magnetosphere: First inferences from the Cassini magnetometers about small-scale plasma transport in the magnetosphere, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L14S06, doi:10.1029/2005GL022643.

Brandt, P. C., K. K. Khurana, D. G. Mitchell, N. Sergis, K. Dialynas, J. F. Carbary, E. C. Roelof, C. P. Paranicas, S. M. Krimigis, and B. H. Mauk (2010), Saturn's periodic magnetic field perturbations caused by a rotating partial ring current, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L22103, doi:10.1029/2010GL045285.

Bunce, E. J., S. W. H. Cowley, I. I. Alexeev, C. S. Arridge, M. K. Dougherty, J. D. Nichols, and C. T. Russell (2007), Cassini observations of the variation of Saturn's ring current parameters with system size, *J. Geophys. Res.*, 112, A10202, doi:10.1029/2007JA012275.

Bunce, E. J., C. S. Arridge, S. W. H. Cowley, and M. K. Dougherty (2008), Magnetic field structure of Saturn's dayside magnetosphere and its mapping to the ionosphere: Results from ring current modeling, *J. Geophys. Res.*, 113, A02207, doi:10.1029/2007JA012538.

Burton, M. E., M. K. Dougherty, and C. T. Russell (2010), Saturn's internal planetary magnetic field, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L24105, doi:10.1029/2010GL045148.

Crary, F. J., et al. (2005), Solar wind dynamic pressure and electric field as the main factors controlling Saturn's aurorae, *Nature*, 433, 720 – 722, doi: 10.1038/nature03333

Dessler, A. J., and E. N. Parker (1959), Hydromagnetic theory of geomagnetic storms, *J. Geophys. Res.*, 64 (12), 2239 – 2252. doi.org/10.1029/JZ064i012p02239

Gombosi T., T. P. Armstrong, C. S. Arridge, K.K. Khurana, S.M. Krimigis, N.Krupp, A. M. Persoon and M. F. Thomsen, (2009) Saturn's Magnetospheric Configuration. In Dougherty M., Esposito L., and Krimigis S., *Saturn from Cassini Huygens* pag 203-255, Springer.

Jia, X., M. G. Kivelson, and T. I. Gombosi (2012a), Driving Saturn's magnetospheric periodicities from the upperatmosphere/ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 117, A04215, doi:10.1029/2011JA017367.

Jia, X., K. C. Hansen, T. I. Gombosi, M. G. Kivelson, G. Tóth, D. L. DeZeeuw, and A. J. Ridley (2012b), Magnetospheric configuration and dynamics of Saturn's magnetosphere: A global MHD simulation, *J. Geophys. Res.*, 117, A05225, doi:10.1029/2012JA017575.

Leisner J. S., C. T. Russell, K. K. Khurana, and M. K. Dougherty (2007), Measuring the stress state of the Saturnian magnetosphere, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L12103, doi:10.1029/2007GL029315.

Khurana, K. K., and H. K. Schwarzl (2005), Global structure of Jupiter's magnetospheric current sheet, *J. Geophys. Res.*, 110, A07227, doi:10.1029/2004JA010757.

Khurana, K. K., C. S. Arridge, and M. K. Dougherty (2005), A versatile model of Saturn's magnetospheric field, paper presented at General Assembly 2005, Eur. Geosci. Union, Vienna, Austria, 24 – 29 April.

Krimigis S.M., N. Sergis, D. G. Mitchell, D. C. Hamilton & N. Krupp, (2007) A dynamic, rotating ring current around Saturn, *Nature* volume 450, pages 1050–105, doi.org/10.1038/nature06425

Roussos, E., N. Krupp, T. P. Armstrong, C. Paranicas, D. G. Mitchell, S. M. Krimigis, G. H. Jones, K. Dialynas, N. Sergis, and D. C. Hamilton (2008), Discovery of a transient radiation belt at Saturn, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L22106, doi:10.1029/2008GL035767.

Roussos E, C.M. Jackman, M.F. Thomsen, W.S. Kurth, S.V. Badman, C. Paranicas, P. Kollmann, N. Krupp, R. Bućík, D.G. Mitchell, S.M. Krimigis, D.C. Hamilton, A. Radioti (2018), Solar Energetic Particles (SEP) and Galactic Cosmic Rays (GCR) as tracers of solar wind conditions near Saturn: Event lists and applications, *Icarus* 300. 47–71.

Sergis N., S. M. Krimigis, D. G. Mitchell, D. C. Hamilton, N. Krupp, B. H. Mauk, E. C. Roelof, and M. K. Dougherty (2009), Energetic particle pressure in Saturn's magnetosphere measured with the Magnetospheric Imaging Instrument on Cassini, *J. Geophys. Res.*, 114, A02214, doi:10.1029/2008JA013774.

Sergis, N., et al. (2010), Particle pressure, inertial force, and ring current density profiles in the magnetosphere of Saturn, based on Cassini measurements, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L02102, doi:10.1029/2009GL041920.

Sergis, N., C. S. Arridge, S. M. Krimigis, D. G. Mitchell, A. M. Rymer, D. C. Hamilton, N. Krupp, M. K. Dougherty, and A. J. Coates (2011), Dynamics and seasonal variations in Saturn's magnetospheric plasma sheet, as measured by Cassini, *J. Geophys. Res.*, 116, A04203, doi:10.1029/2010JA016180.

Sergis N., C. M. Jackman, M. F. Thomsen, S. M. Krimigis, D. G. Mitchell, D. C. Hamilton, M. K. Dougherty, N. Krupp, and R. J. Wilson (2017), Radial and local time structure of the Saturnian ring current, revealed by Cassini, *J. Geophys. Res. Space Physics*, doi:10.1002/2016JA023742

Sckopke, N. (1966), A general relation between energy of trapped particles and disturbance field near Earth, *J. Geophys. Res.*, 71(13), 3125 – 3130. doi.org/10.1029/JZ071i013p03125

Scurry, L., and C. T. Russell (1991), Proxy studies of energy transfer to the magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, 96(A6), 9541 – 9548.

Sklavenitis S., (2017) Στατιστικές Ιδιότητες του μαγνητικού πεδίου στη μαγνητόσφαιρα του Κρόνου και επίδραση του ηλιακού ανέμου. Πτυχιακή Εργασία ΕΚΠΑ.

Tsyganenko, N. A. (1998), Modeling of twisted/warped magnetospheric configurations using the general deformation method, *J. Geophys. Res.*, 103(A10), 23,551 – 23,563.

Tsyganenko, N. A. (2002a), A model of the near magnetosphere with dawn-dusk asymmetry: 1. Mathematical structure, *J. Geophys. Res.*, 107(A8), 1179, doi:10.1029/2001JA000219.

Tsyganenko, N. A. (2002b), A model of the near magnetosphere with dawn-dusk asymmetry: 2. Parameterization and fitting to observations, *J. Geophys. Res.*, 107(A8), 1176, doi:10.1029/2001JA000220.

Tsyganenko, N. A., and M. Peredo (1994), Analytical models of the magnetic field of disk-shaped current sheets, *J. Geophys. Res.*, 99(A1), 199–206.

Vasyliunas, V. M. (1983), Plasma distribution and flow, in *Physics of the Jovian Magnetosphere*, chap. 11, edited by A. J. Dessler, pp. 395–453, Cambridge Univ. Press, New York

Vasyliunas, V. M. (1984), Fundamentals of current description, in *Magnetospheric Currents*, *Geophys. Monogr. Ser.*, vol. 28, edited by T. A. Potemra, pp. 63–66, AGU, Washington, D. C