

ΕΘΝΙΚΟΝ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟΝ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΝ ΑΘΗΝΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΑΣΤΡΟΦΥΣΙΚΗΣ, ΑΣΤΡΟΝΟΜΙΑΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Διαφυγή σχετικιστικών ηλεκτρονίων από τις μαγνητόσφαιρες του Δία και του Κρόνου

Πηνελόπη Αγγελοπούλου
Α.Μ.: 2019301

Τριμελής Επιτροπή:

Καθ. Ι. Δαγκλής
Ακαδ. Καθ. Σ. Κριμιζής
Δρ. Η. Ρούσσος

Αθήνα
Ιούνιος 2021

Στη γιαγιά μου

Πρόλογος

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών του Τμήματος Φυσικής του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, κατά το ακαδημαϊκό έτος 2020-2021 υπό την επίβλεψη του Καθηγητή του τμήματος κ. Ιωάννη Δαγκλή, και τη συνεπίβλεψη του Δρος Ηλία Ρούσσου.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους επιβλέποντές μου, για τις γνώσεις που μου μετέφεραν, την κατανόηση που έδειξαν και τις ευκαιρίες που μου έδωσαν στη διάρκεια της συνεργασίας μας. Ευχαριστώ ειδικά τον Δρ. Ηλία Ρούσσο για την εμπιστοσύνη και την προθυμία του να με καθοδηγήσει στο χρονικό διάστημα του τελευταίου έτους. Ευχαριστώ επίσης τον Δρ. Κώστα Διαλυνά, που αν και δεν αναφέρεται στα μέλη της Τριμελούς επιτροπής, αποτέλεσε καθοριστικό παράγοντα στην ολοκλήρωση αυτής της εργασίας. Θεωρώ τον εαυτό μου παραπάνω από τυχερό που μου δόθηκε η ευκαιρία να συνεργαστώ όχι μόνο με δύο εξαιρετικούς επιστήμονες, αλλά και με δύο εξαιρετικούς ανθρώπους.

Φυσικά, είμαι ευγνώμων στον Ακαδημαικό Καθηγητή κ. Σταμάτη Κριμιζή για το χρόνο που αφιέρωσε στην αξιολόγηση αυτής της Διπλωματικής.

Η πραγματοποίησή της συγκεκριμένης εργασίας δεν θα ήταν δυνατή χωρίς τη βοήθεια και τη συμβολή κάποιων κοντινών μου ατόμων. Καταρχάς, ευχαριστώ τη γιαγιά μου για την ανεκτίμητη βοήθεια και συμπαράστασή της καθ' όλη τη διάρκεια όχι μόνο των σπουδών μου, αλλά και ολόκληρης της ζωής μου. Τέλος, στέλνω τις ευχαριστίες μου στους φίλους μου, ειδικά στην Αφροδίτη, και φυσικά στον Σπύρο, τόσο για την πρακτική όσο και για την συναισθηματική τους υποστήριξη.

Περίληψη

Στη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, έχουν γίνει πολυάριθμες παρατηρήσεις οι οποίες αποδεικνύουν ότι ο Δίας είναι μία ισχυρή πηγή σχετικιστικών ηλεκτρονίων στην ηλιόσφαιρα. Το Pioneer 10 ήταν η πρώτη αποστολή που ανίχνευσε ηλεκτρόνια με ενέργειες της τάξης των MeV σε μεγάλες αποστάσεις από τον πλανήτη, οι οποίες στη συνέχεια επιβεβαιώθηκαν από όλες τις υπόλοιπες αποστολές που πέρασαν από τον πλανήτη. Οι εντάσεις αυτών των ηλεκτρονίων είναι τόσο υψηλές, ώστε κυριαρχούν των ροών των κοσμικών ακτίνων μέχρι περίπου και τα 30 MeV, σε αποστάσεις έως και 10 A.U. από τον Ήλιο, παρόλο που ο Δίας είναι σημειακή πηγή για την ηλιόσφαιρα. Τα διαφυγόντα σχετικιστικά ηλεκτρόνια από το Δία έχουν ανιχνευτεί σε χρονικές κλίμακες που είναι χαρακτηριστικές για το μαγνητοσφαιρικό του σύστημα, οι κυριότερες εκ των οποίων είναι τα 40 λεπτά, οι 5 ώρες και οι 10 ώρες. Οι τελευταίες δύο περιοδικότητες συνδέονται με εγχύσεις ηλεκτρονίων στην εξωτερική μαγνητόσφαιρα του Δία, οι οποίες σχετίζονται με τη μισή και την πλήρη περιστροφή του πλανήτη, αντίστοιχα. Ο ηλιακός άνεμος αλληλεπιδρά με τον πλανήτη, και μεταφέρει με τη σειρά του την δική του περιοδικότητα μερικών εβδομάδων στη διαφυγή ηλεκτρονίων, χαρακτηριστική για την περιστροφή του Ήλιου και την επαναληπτικότητα των Συμπεριστρεφόμενων Περιοχών Αλληλεπίδρασης (Corotating Interaction Regions-CIRs).

Ο κύριος στόχος αυτής της μελέτης, είναι να διαπιστώσουμε αν και ο Κρόνος αποτελεί πηγή σχετικιστικών ηλεκτρονίων για την ηλιόσφαιρα, και μέσω των αποτελεσμάτων μας να προσπαθήσουμε να κατανοήσουμε τις πηγές δημιουργίας υψηλοενεργειακών ηλεκτρονίων στις εξωτερικές μαγνητόσφαιρες των δύο γιγάντιων πλανητών, αλλά και τους μηχανισμούς διαφυγής τους στην ηλιόσφαιρα. Η συγκριτική μελέτη των δύο πλανητών μοιάζει λογική, εφόσον αυτοί μοιράζονται παρόμοια χαρακτηριστικά σχετικά με τη γρήγορη περιστροφή τους και τη δυναμική των μαγνητοσφαιρών τους. Για το σκοπό αυτό, αναλύθηκαν μετρήσεις ηλεκτρονίων από το όργανο LEMMS του Cassini, το οποίο μετράει ηλεκτρόνια σε ενέργειες 18 keV-1 MeV και 0.1–20 MeV, τόσο για το fly-by του διαστημοπλοίου από το Δία, όσο και για όλη την παραμονή του στον Κρόνο.

Επιβεβαιώνουμε προηγούμενες μετρήσεις που δείχνουν ότι ο Δίας είναι σημαντική πηγή σχετικιστικών ηλεκτρονίων για την ηλιόσφαιρα. Τα ηλεκτρόνια που διαφεύγουν από τον πλανήτη εμφανίζουν στο σήμα τους τις γνωστές χαρακτηριστικές περιοδικότητες των 40 λεπτών, των 5 ωρών και των 10 ωρών. Ωστόσο, η μελέτη μας ανέδειξε ακόμα μία περιοδικότητα διαφυγόντων ηλεκτρονίων, ίση με 2-3 ημέρες, η οποία φαίνεται να σχετίζεται με την συχνότητα με την οποία η μαγνητόσφαιρα του Δία γεμίζει και στη συνέχεια αποσυμπιέζεται-μέσω της μαγνητικής επανασύνδεσης-από το πλάσμα που παρέχει η Ιώ, ένα ηφαιστειακό φεγγάρι του Δία.

Όσον αφορά τον Κρόνο, ανιχνεύσαμε ελάχιστες περιπτώσεις διαφυγής σχετικιστικών ηλεκτρονίων, οι οποίες επιπλέον χαρακτηρίζονται από πολύ χαμηλές ροές. Το αποτέλεσμα αυτό υποδεικνύει ότι ο Κρόνος πιθανότατα δεν αποτελεί σημαντική πηγή σχετικιστικών ηλεκτρονίων στην ηλιόσφαιρα. Αυτό θα μπορούσε να σημαίνει, ότι ο μηχανισμός που συνδέεται με τις οιονεί περιοδικές εγχύσεις υψηλοενεργειακών ηλεκτρονίων στην εξωτερική μαγνητόσφαιρα του Κρόνου με μία περίοδο περίπου 60-70 λεπτών, δεν μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική διαφυγή αυτών των ηλεκτρονίων στην ηλιόσφαιρα. Έχοντας υπόψην τη σύγκριση Δία/Κρόνου, αυτό το εύρημα μπορεί επίσης να σημαίνει ότι οι οιονεί περιοδικές εγχύσεις παρόμοιας φύσης που εκδηλώνονται στο Δία, με περίοδο περίπου 40 λεπτών, δεν μπορεί να είναι υπεύθυνες για την έντονη διαφυγή υψηλοενεργειακών ηλεκτρονίων που ανιχνεύεται

σε προηγούμενες μελέτες, αλλά και στη δική μας ανάλυση. Αντίθετα, η μαγνητική επανασύνδεση που οδηγεί στην αποσυμφόρηση της μαγνητόσφαιρας από το πλάσμα της Ιούς, ίσως είναι ένας βασικός μηχανισμός που απελευθερώνει στην ηλιόσφαιρα σχετικιστικά ηλεκτρόνια κάθε λίγες ημέρες, με την διαδικασία αυτή να διαμορφώνεται και από παράγοντες που σχετίζονται με την περιστροφή του πλανήτη, αλλά και με την δυναμική του ηλιακού ανέμου. Ένα άλλο ενδιαφέρον εύρημα που προέκυψε από τη μελέτη μας, είναι η πιθανή επιτάχυνση ηλεκτρονίων σε σχετικιστικές ενέργειες στο κρουστικό κύμα του Δία, το οποίο πρέπει να διερευνηθεί περαιτέρω με ανεξάρτητες μετρήσεις, καθώς η παραγωγή υπερσχετικιστικών ηλεκτρονίων σε πλανητικά κρουστικά κύματα δεν έχει προβλεφθεί θεωρητικά από μεγάλο πλήθος μελετών. Με βάση τα συμπεράσματά μας, φαίνεται ότι η μεγάλη διαφοροποίηση στη διαφυγή σχετικιστικών ηλεκτρονίων στους δύο πλανήτες, οφείλεται μάλλον στην πηγή δημιουργίας αυτών των ηλεκτρονίων και όχι στο μηχανισμό διαφυγής τους.

Περιεχόμενα

Πρόλογος **iii**

Περίληψη **v**

Περιεχόμενα **vii**

Ευρετήριο εικόνων **xv**

1 Εισαγωγή **1**
1.1 Γενικά χαρακτηριστικά του Δία και του Κρόνου 1
1.2 Οι μαγνητόσφαιρες του Δία και του Κρόνου 2
1.2.1 Εσωτερικές πηγές πλάσματος και γρήγορη περιστροφή 3
1.2.2 Πληθυσμοί ενεργητικών σωματιδίων στη μαγνητόσφαιρα 5
1.3 Μετρήσεις διαφυγόντων σχετικιστικών ηλεκτρονίων από τη μαγνητόσφαιρα του Δία 8
1.4 Μετρήσεις διαφυγόντων σχετικιστικών ηλεκτρονίων από τη μαγνητόσφαιρα του Κρόνου 13
1.5 Η σημασία της μέτρησης διαφυγόντων πλανητικών ηλεκτρονίων στον ηλιακό άνεμο 15
1.6 Τοποθέτηση του προβλήματος - Ερωτήματα προς απάντηση 16

2 Πηγές μετρήσεων και μεθοδολογία **19**
2.1 Μετρήσεις ενεργητικών φορτισμένων σωματιδίων από τη διαστημική αποστολή Cassini/Huygens 19
2.2 Επιπρόσθετες πηγές και εργαλεία ανάλυσης δεδομένων 21
2.3 Βασική επεξεργασία και επισκόπηση των μετρήσεων του LEMMS 23
2.4 Ανάλυση περιοδικοτήτων των χρονοσειρών του LEMMS 24
2.5 Προκλήσεις στην ανάλυση και την ερμηνεία των δεδομένων 27

3 Παρατηρήσεις και αποτελέσματα **31**
3.1 Εντοπισμός διαφυγόντων σχετικιστικών ηλεκτρονίων από το Δία 31
3.2 Εντοπισμός διαφυγόντων σχετικιστικών ηλεκτρονίων από τον Κρόνο 35

4 Συμπεράσματα **43**
4.1 Διαφυγόντα σχετικιστικά ηλεκτρόνια από τον Κρόνο 43
4.2 Σύγκριση των αποτελεσμάτων για τους δύο πλανήτες 44
4.3 Μηχανισμοί παραγωγής και διαφυγής σχετικιστικών ηλεκτρονίων από το Δία 48

5 Επίλογος **51**

Βιβλιογραφία **53**

Ευρετήριο εικόνων

Εικόνα 1. Η μαγνητόσφαιρα του Κρόνου με όλους τους περίπλοκους σχηματισμούς της. (Krimigis et al., 2004) 2

Εικόνα 2. Ηφαιστειακή έκρηξη στην Ιώ. Η εικόνα έχει ληφθεί από το Galileo. (NASA/JPL/DLR) 3

Εικόνα 3. Πίδακες νερού στο νότιο ημισφαίριο του Εγκέλαδου. Η εικόνα έχει ληφθεί από το Cassini. (NASA/JPL/SSI) 4

Εικόνα 4. Τρισδιάστατο μοντέλο της μαγνητόσφαιρας του Κρόνου που βασίζεται σε δεδομένα του οργάνου MIMI του Cassini. Απεικονίζεται η κατανομή των ενεργητικών σωματιδίων με E$>$ 3 keV. (Krimigis et al., 2007) 4

Εικόνα 5. Μετρήσεις ενεργητικών ιόντων και ηλεκτρονίων τα οποία συνθέτουν την κύρια ζώνη ακτινοβολίας του Κρόνου από το Cassini. Η ένταση των ιόντων αναπαρίσταται πάνω από την οριζόντια διαχωριστική γραμμή με αυξητική τάση προς τα πάνω, ενώ η ένταση των ηλεκτρονίων αναπαρίσταται κάτω από την οριζόντια διαχωριστική γραμμή με αυξητική τάση προς τα κάτω. Το κόκκινο χρώμα υποδεικνύει υψηλή ένταση, ενώ το μπλε χαμηλή. Ο κάθετος άξονας της ενέργειας έχει εύρος από περίπου 30 keV μέχρι μερικά MeV. Ο οριζόντιος άξονας αναπαριστά το χρόνο, και τα δεδομένα που παρουσιάζονται έχουν συνολική διάρκεια περίπου 36 ωρών. (Krimigis et al., 2005) 6

Εικόνα 6. Έμμεση απεικόνιση των ζωνών ακτινοβολίας του Δία, μέσω της ακτινοβολίας σύγχροτρον που εκπέμπουν τα υψηλοενεργειακά ηλεκτρόνιά τους. (Santos-Costa et al., 2014) 7

Εικόνα 7. Μετρήσεις παλμών ηλεκτρονίων ενέργειας $>$ 8.9 MeV και με διάρκεια 40 λεπτών (QP40), στη μαγνητόσφαιρα του Δία από το Ulysses. Ο κάθετος άξονας είναι counts/s και ο οριζόντιος η τοπική ώρα. (MacDowall et al., 1993) 8

Εικόνα 8. Πάνω πάνελ: Μετρήσεις παλμών ηλεκτρονίων στα κανάλια E_0-E_6 με διάρκεια 60 λεπτών (QP60) στη μαγνητόσφαιρα του Κρόνου από το Cassini, για τις ημέρες 108-109/2016. Ο κάθετος άξονας είναι η διαφορική ροή [$cm^{-2}\ sr^{-1}\ s^{-1}\ keV^{-1}$] και ο οριζόντιος ο χρόνος (hrs) που έχει περάσει από την χρονική στιγμή που αρχίζει η σχεδίαση του διαγράμματος. (Roussos et al., 2016) 9

Εικόνα 9. Αριστερά: Αυξήσεις στις ροές ενεργητικών και σχετικιστικών ηλεκτρονίων, όπως τις μέτρησε το Ulysses σε απόσταση περίπου 0.8 A.U. από το Δία. Δεξιά: Στο πάνω πάνελ δίνεται η απόσταση του Ulysses από το Δία. Στο κάτω πάνελ φαίνονται μετρήσεις ηλεκτρονίων με ενέργειες 3-10 MeV (μαύρο) και πρωτονίων με ενέργειες 38-70 MeV (κόκκινο), τα οποία θεωρούνται ένας καλός δείκτης για την ηλιακή δραστηριότητα. Σε αντίθεση με τα πρωτόνια, οι εντάσεις των ροών των ηλεκτρονίων παραμένουν σε σχετικά υψηλά επίπεδα, έχοντας μία πολύ ασθενή εξάρτηση από την απόσταση από το Δία.(Allen et al., 2019) 10

Εικόνα 10. Μετρήσεις έντονων εξάρσεων στις ροές ιόντων από το όργανο JEDI του Juno σε μεγάλες αποστάσεις από το Δία, οι οποίες σύμφωνα με τη συγκεκριμένη δημοσίευση οφείλονται σε υψηλοενεργειακά ηλεκτρόνια με ενέργειες της τάξης των MeV. (Paranicas et al., 2018) . . . 11
Εικόνα 11. Μετρήσεις σχετικιστικών ηλεκτρονίων (πράσινη και γαλάζια γραμμή) από το Galileo σε μεγάλες αποστάσεις στην μαγνητόσφαιρα του Δία. Φαίνεται ξεκάθαρα ότι οι ροές αυτών των ηλεκτρονίων στο ισημερινό επίπεδο ακόμα και σε αποστάσεις μεγαλύτερες των 100 R_J είναι μη μηδενικές. (Paranicas et al., 2018) 11
Εικόνα 12. Αριστερά: Διάγραμμα FFT για ενεργητικά ηλεκτρόνια με βάση δεδομένα από το Cassini, στο οποίο φαίνεται ότι η πιο έντονη περιοδικότητα αντιστοιχεί στα 40 min (Krupp et al., 2004). Δεξιά: Μετρήσεις από το Ulysses, στις οποίες σημειώνεται πάλι ως κυρίαρχη περιοδικότητα τα 40 λεπτά. (Kaiser et al., 2001) 12
Εικόνα 13. Μετρήσεις σχετικιστικών ηλεκτρονίων από το Cassini, στις οποίες σημειώνονται πολλές διακριτές κορυφές που αντιστοιχούν σε περιοδικότητες 5 ωρών και 10 ωρών. (Krupp et al., 2004) 12
Εικόνα 14. Το μοντέλο που περιγράφει την διαδικασία του "φουσκώματος" και του "ξεφουσκώματος" της μαγνητόσφαιρας του Δία. Στην αρχική κατάσταση (a) η μαγνητόσφαιρα σταδιακά γεμίζει με πλάσμα, ενώ στην αμέσως επόμενη (b) έχει φτάσει στο μέγιστο όριο μάζας που μπορεί να δεχτεί. Ακολουθεί η μαγνητική επανασύνδεση στη μαγνητοουρά (c), κατά την οποία η μαγνητόσφαιρα απελευθερώνει όλο το πλάσμα που έχει αποθηκεύσει, και τελικά το σύστημα επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση (d). Το μαγνητοσφαιρικό σύστημα του Δία υπόκειται σε περιοδικές μεταβολές μεταξύ της πρώτης (a) και της τρίτης (c) κατάστασης. (Kronberg et al., 2007) 13
Εικόνα 15. Η αύξηση στην πιθανότητα διαφυγής ηλεκτρονίων με την αύξηση της ενέργειάς τους, για τα κανάλια C του LEMMS. Ο κάθετος άξονας είναι το ποσοστό διαφυγής και ο οριζόντιος η ενέργεια σε MeV. Το ποσοστό διαφυγής ορίζεται ως ο λόγος της ροής στη μαγνητοθήκη προς τη συνολική ροή (μαγνητοθήκης και μαγνητόσφαιρας), για την περιοχή της αυγής (μπλε), του απογεύματος (πράσινο) και της δύσης (κόκκινο). (Liou et al., 2021) 14
Εικόνα 16. Πάνω: Η ηλιοκεντρική απόσταση για τις τροχιές του Ulysses και του Cassini. Κάτω: Προσομοίωση της διαφορικής ροής ηλεκτρονίων με ένεργεια 1 MeV κατά μήκος της τροχιάς του Cassini (μαύρη γραμμή) και του Ulysses (διακεκομμένη γραμμή). Η προσομοίωση στα αριστερά λαμβάνει υπόψη της ως πηγές μόνο το Δία και τις κοσμικές ακτίνες, ενώ η δεξιά λαμβάνει υπόψη της επιπλέον και τον Κρόνο. Καταρχήν, παρατηρείται ότι η περίοδος μεταξύ των δύο fly-bys του Ulysses (1992 και 2004), εμφανίζει σαφώς υψηλότερες ροές στο δεξιό διάγραμμα. Η σημαντικότερη διαφορά όμως είναι η αύξηση στην ένταση των ροών ηλεκτρονίων καθώς το Cassini πλησιάζει στον Κρόνο, μετά το fly-by του από το Δία το 2001. (Lange & Fichtner, 2008) 16
Εικόνα 17. Το fly-by του Cassini από το Δία. Με κόκκινο χρώμα σημειώνεται η διεύλευση του σκάφους από τη μαγνητόπαυση, η οποία απεικονίζεται προσεγγιστικά με κίτρινο χρώμα. Η τροχιά του σκάφους παριστάνεται με την πράσινη γραμμή. (Allen et al., 2019) 19

Εικόνα 18. Οι τροχιές στο πλανητικό σύστημα του Κρόνου από το Cassini. Με κόκκινο χρώμα σημειώνονται οι διαβάσεις του σκάφους από τη μαγνητόπαυση, ενώ με μπλε από το κρουστικό κύμα. Οι μαύρες εστιγμένες γραμμές αναπαριστούν τη μαγνητόπαυση σύμφωνα με το μοντέλο των Kanani et al., 2010 (αριστερά) και το κρουστικό κύμα σύμφωνα με το μοντέλο των Went et al., 2011 (δεξιά). (Jackman et al., 2019) 20

Εικόνα 19. Αριστερά: Η τοποθεσία του οργάνου LEMMS πάνω στο Cassini. (Πηγή: NASA) Δεξιά: Τα δύο τηλεσκόπια του LEMMS πάνω στη βάση περιστροφής (turntable). ("MIMI User Guide", 2018) 20

Εικόνα 20. Η λίστα των 33 πιο βασικών rate καναλιών του LEMMS (από τα συνολικά 56) που χρησιμοποιούνται συχνά σε δημοσιεύσεις με δεδομένα του οργάνου. Στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκαν κυρίως τα κανάλια E και C. Δίνονται, το τηλεσκόπιο στο οποίο ανήκει το κάθε κανάλι (LE(T)/HE(T)), η ονομασία του, το είδος σωματιδίων που μετράει (ions/electrons) και το ενεργειακό εύρος του. ("MIMI User Guide", 2018) 22

Εικόνα 21. Διάγραμμα που αναπαριστά γραφικά το όργανο LEMMS, με τα δύο αντιδιαμετρικά τηλεσκόπια LET και HET, και τους ανιχνευτές στερεάς κατάστασης (SSDs) που είναι τοποθετημένοι στο καθένα. Στο LET υπάρχει ένα μαγνητικό πεδίο το οποίο εκτοπίζει τα εισερχόμενα ηλεκτρόνια στους ανιχνευτές E και F, ενώ τα ιόντα συνεχίζουν την κίνησή τους χωρίς να επηρεάζονται σημαντικά από αυτό, και τελικά προσπίπτουν στους ανιχνευτές A και B. Βέβαια, ηλεκτρόνια με ενέργειες >884 keV μπορούν επίσης να φτάσουν στους ανιχνευτές A και B και να προσμετρηθούν ως ιόντα. Στο πίσω μέρος του LET υπάρχει ένας απορροφητής χρυσού, έτσι ώστε τα ενεργητικά σωματίδια που διαπερνούν τον ανιχνευτή B να μην συνεχίζουν στο HET. Μπροστά από τον πρώτο ανιχνευτή (D1) του HET έχει τοποθετηθεί ένα φύλλο αλουμινίου ώστε να μειωθεί η εισερχόμενη ροή φωτός και χαμηλοενεργειακών ιόντων. ("MIMI User Guide", 2018) 22

Εικόνα 22. Μετρήσεις ηλεκτρονίων από το όργανο LEMMS, για τα κανάλια C_3 (56-100 keV) και E_1 (220-485 keV). Ο κάθετος άξονας είναι counts/s και ο οριζόντιος χρόνος σε μορφή ημερολογιακής ημέρας. Στο πάνω διάγραμμα παρουσιάζονται τα raw δεδομένα, χωρίς να έχει γίνει time averaging. Στο κάτω διάγραμμα έχει γίνει time averaging ίσο με 86 s. Είναι εμφανές για ποιο λόγο αυτό το βήμα είναι απαραίτητο, αφού στο πάνω διάγραμμα οι μεταβολές δεν είναι ευκρινείς (Οι ενδείξεις BS/I και BS/O σηματοδοτούν διέλευση από το κρουστικό κύμα προς τα μέσα και προς τα έξω, αντίστοιχα). 25

Εικόνα 23. Πάνω: Μετρήσεις ηλεκτρονίων στο κανάλι E_0 (110-365 keV) για κάποιο χρονικό διάστημα όπως καταγράφονται από το όργανο LEMMS, και οι αντίστοιχες περιοδικότητες που προκύπτουν μέσω ανάλυσης Wavelet για το ίδιο χρονικό διάστημα. Κάτω: Οι περιοδικότητες που προκύπτουν για μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή μέσω ανάλυσης Lomb-Scargle. Οι περιοδικότητες που καταγράφονται ως σήμα πρέπει να αποτελούν διακριτές κορυφές και να βρίσκονται εκτός των λευκών και κόκκινων γραμμοσκιασμένων περιοχών. 26

Εικόνα 24. Πάνω πάνελ: Μετρήσεις ηλεκτρονίων στο κανάλι C_5 (175-300 keV) για τις ημέρες 345-346 του 2000, όπου το σκάφος ήταν μακριά από τον πλανήτη, όπως καταγράφονται από το όργανο LEMMS. Παρατηρούμε ότι ακόμα και όταν το Cassini ήταν μακριά από το Δία, το σήμα ηλεκτρονίων είναι μη μηδενικό και κυμαίνεται γύρω από μία περίπου σταθερή τιμή ίση με 1 count/s. Στην αρχή της ημέρας 346 εμφανίζεται ένα κενό στα δεδομένα που διαρκεί για κάποιες ώρες. Κάτω πάνελ: Οι αντίστοιχες περιοδικότητες που προκύπτουν μέσω ανάλυσης Wavelet για το ίδιο χρονικό διάστημα. Το κενό μετρήσεων που εμφανίζεται στη χρονοσειρά εδώ δίνει μία μη πραγματική περιοδικότητα. 28

Εικόνα 25. Πάνω πάνελ: Μετρήσεις ηλεκτρονίων στο κανάλι C_0 (18-40 keV) για τις ημέρες 345-350 του 2000, όπως καταγράφονται από το όργανο LEMMS. Παρατηρούμε ότι τις ημέρες 345 και 349, σημειώνονται πολύ απότομες αυξήσεις οι οποίες δεν φαίνεται να οφείλονται σε πραγματικό σήμα ηλεκτρονίων. Κάτω πάνελ: Οι αντίστοιχες περιοδικότητες που προκύπτουν μέσω ανάλυσης Wavelet για το ίδιο χρονικό διάστημα. Η επιμόλυνση από φως την ημέρα 349 δίνει μία πολύ ισχυρή αλλά μη πραγματική περιοδικότητα. 29

Εικόνα 26. Πάνω: Μετρήσεις χαμηλοενεργειακών ηλεκτρονίων στο κανάλι C_1 (27-48 keV) για τις ημέρες 340-345 του 2000, όπως καταγράφονται από το όργανο LEMMS. Κάτω: Μετρήσεις πρωτονίων στο κανάλι A_7 (1.6-4 MeV) για τις ημέρες 340-345 του 2000, όπως καταγράφονται από το όργανο LEMMS. Συμπεραίνουμε ότι σε αυτό το χρονικό διάστημα εκδηλώθηκε μία CME, καταρχάς από την μεταβολή που σημειώνεται στο κανάλι A7, αλλά και λαμβάνοντας υπόψη την παρόμοια μορφή και χρονική διάρκεια της μεταβολής στα δύο κανάλια. . . 30

Εικόνα 27. Μετρήσεις διαφυγόντων σχετικιστικών ηλεκτρονίων από το Δία, στα κανάλια E_3-E_7 (600-20.000 keV) του LEMMS, για όλο το χρονικό διάστημα του fly-by του Cassini από τον πλανήτη. Ο κάθετος άξονας είναι διαφορική ροή και ο οριζόντιος χρόνος σε μορφή ημερολογιακής ημέρας. Στο χρονικό διάστημα των ημερών 18-31/2001 παρατηρούνται υψηλές ροές, ακόμα και για υπερσχετικιστικά ηλεκτρόνια. 32

Εικόνα 28. Πάνω: Μετρήσεις διαφυγόντων σχετικιστικών ηλεκτρονίων από το Δία, στο κανάλι E_5 ($>$800 keV) του LEMMS, για το χρονικό διάστημα των ημερών 18-31/2001. Ο κάθετος άξονας είναι counts/s και ο οριζόντιος χρόνος σε μορφή ημερολογιακής ημέρας. Παρατηρούνται ιδιαίτερα υψηλές ροές σε όλο το χρονικό διάστημα με πολλές έντονες κορυφές, ενώ ταυτόχρονα διακρίνονται ενισχύσεις στο σήμα των ηλεκτρονίων καθώς το Cassini διασχίζει το κρουστικό κύμα της μαγνητόσφαιρας του Δία. Κάτω: Τα αποτελέσματα της ανάλυσης Wavelet για το ίδιο χρονικό διάστημα. Είναι προφανείς οι περιοδικότητες που εμφανίζονται στις 5 και 10 ώρες, αλλά και στις 2-3 ημέρες. 33

Εικόνα 29. Πάνω: Μετρήσεις διαφυγόντων σχετικιστικών ηλεκτρονίων από το Δία, στο κανάλι E_7 (7-20 MeV) του LEMMS, για το χρονικό διάστημα των ημερών 18-31/2001. Ο κάθετος άξονας είναι counts/s και ο οριζόντιος χρόνος σε μορφή ημερολογιακής ημέρας. Παρατηρούνται και εδώ σημαντικές ροές ηλεκτρονίων, αλλά με μικρότερη ένταση και μεταβλητότητα σε σχέση με το κανάλι E5. Κάτω: Τα αποτελέσματα της ανάλυσης Wavelet για το ίδιο χρονικό διάστημα. Είναι προφανείς οι περιοδικότητες που εμφανίζονται στις 5 και 10 ώρες, αλλά και στις 2-3 ημέρες. 34

Εικόνα 30. Πάνω: Μετρήσεις διαφυγόντων σχετικιστικών ηλεκτρονίων από το Δία, στο κανάλι E_5 ($>$800 keV) του LEMMS, για το χρονικό διάστημα των ημερών 37-43/2001. Ο κάθετος άξονας είναι counts/s και ο οριζόντιος χρόνος σε μορφή ημερολογιακής ημέρας. Παρατηρούνται και πάλι υψηλές ροές, ακόμα και μετά την ημέρα 40/2001, όταν το Cassini βρισκόταν σε πολύ μεγάλες αποστάσεις από τον πλανήτη. Κάτω: Τα αποτελέσματα της ανάλυσης Wavelet για το ίδιο χρονικό διάστημα, όπου διακρίνονται οι χαρακτηριστικές περιοδικότητες που έχουμε ήδη αναφέρει. 34

Εικόνα 31. Πάνω: Μετρήσεις διαφυγόντων σχετικιστικών ηλεκτρονίων από το Δία, στο κανάλι E_5 ($>$800 keV) του LEMMS, για το χρονικό διάστημα των ημερών 30-31/2001. Ο κάθετος άξονας είναι counts/s και ο οριζόντιος χρόνος σε μορφή ημερολογιακής ημέρας. Κοντά στη περιοχή του κρουστικού κύματος, παρατηρούνται έντονες αυξήσεις στις ροές των ηλεκτρονίων, οι οποίες θα μπορούσαν να υποδεικνύουν ως πιθανό μηχανισμό ενίσχυσης και διαφυγής τους, την επιτάχυνση πάνω στο κρουστικό κύμα του Δία. Κάτω: Τα αποτελέσματα της ανάλυσης Wavelet για το ίδιο χρονικό διάστημα, όπου διακρίνονται οι χαρακτηριστικές περιοδικότητες για περίπου 1 ώρα, 5 και 10 ώρες. 35

Εικόνα 32. Τα 6 γεγονότα πιθανής διαφυγής σχετικιστικών ηλεκτρονίων από τη μαγντόσφαιρα του Κρόνου, τα οποία αφορούν το κανάλι C_7. Με τη σειρά, δίνονται ο αριθμός, η θέση του Cassini ως προς το κρουστικό κύμα, η ώρα έναρξης και η ώρα λήξης για το κάθε γεγονός. 36

Εικόνα 33. Μετρήσεις διαφυγόντων ηλεκτρονίων από τον Κρόνο, στα κανάλια C_7, E_1, E_3 και E_4 του LEMMS, για το χρονικό διάστημα των ημερών 300-302/2011. Τα C_7, E_1 είναι αντιπροσωπευτικά για ενέργειες < 1 MeV, ενώ τα E_3, E_4 κυριαρχούνται από ενέργειες > 1 MeV. Ο κάθετος άξονας είναι διαφορική ροή και ο οριζόντιος χρόνος σε μορφή ημερολογιακής ημέρας. Το διαστημόπλοιο βρίσκεται στο εσωτερικό της μαγνητοθήκης. Διακρίνεται μία έντονη αύξηση στα κανάλια E_1 και C_7, που διαρκεί από τα τέλη της ημέρας 301 μέχρι και τις αρχές της ημέρας 302. 37

Εικόνα 34. Μετρήσεις διαφυγόντων ηλεκτρονίων από τον Κρόνο, στα κανάλια C_7,E_1,E_3 και E_4 του LEMMS, για το χρονικό διάστημα των ημερών 201-205/2005. Ο κάθετος άξονας είναι διαφορική ροή και ο οριζόντιος χρόνος σε μορφή ημερολογιακής ημέρας.Το διαστημόπλοιο βρίσκεται στο εσωτερικό της μαγνητοθήκης. Παρατηρούνται κάποιες ασθενείς μεταβολές στα κανάλια E_1 και C_7 τις ημέρες 202 και 203, ενώ γενικά όλη χρονοσειρά βρίσκεται στα όρια του θορύβου. 38

Εικόνα 35. Μετρήσεις διαφυγόντων ηλεκτρονίων από τον Κρόνο, στα κανάλια C_7, E_1, E_3 και E_4 του LEMMS, για το χρονικό διάστημα των ημερών 260-261/2011. Ο κάθετος άξονας είναι διαφορική ροή και ο οριζόντιος χρόνος σε μορφή ημερολογιακής ημέρας. Το διαστημόπλοιο βρίσκεται στο εσωτερικό της μαγνητοθήκης. Παρατηρείται μία έντονη κορυφή στις αρχές της ημέρας 261, στα κανάλια E_1 και C_7. 38

Εικόνα 36. Μετρήσεις διαφυγόντων ηλεκτρονίων από τον Κρόνο, στα κανάλια C_7,E_1,E_3 και E_4 του LEMMS, για την ημέρα 344/2007. Ο κάθετος άξονας είναι διαφορική ροή και ο οριζόντιος χρόνος σε μορφή ημερολογιακής ημέρας. Το διαστημόπλοιο βρίσκεται στον ηλιακό άνεμο, ενώ παρατηρείται μία έντονη αύξηση στις 05:22 της ίδιας ημέρας, στα κανάλια E_1 και C_7. 39

Εικόνα 37. Μετρήσεις διαφυγόντων ηλεκτρονίων από τον Κρόνο, στα κανάλια C_7, E_1, E_3 και E_4 του LEMMS, για την ημέρα 270/2010. Ο κάθετος άξονας είναι διαφορική ροή και ο οριζόντιος χρόνος σε μορφή ημερολογιακής ημέρας. Παρατηρούνται κάποιες αυξήσεις στα κανάλια E_1 και C_7 περίπου στα μέσα του χρονικού διαστήματος, κατά το οποίο το σκάφος έχει καταγραφεί ότι βρίσκεται στη μαγνητοθήκη. 39

Εικόνα 38. Μετρήσεις διαφυγόντων σχετικιστικών ηλεκτρονίων από τον Κρόνο, στα κανάλια C_7, E_1, E_3 και E_4 του LEMMS, για τις ημέρες 217-218/2016. Ο κάθετος άξονας είναι διαφορική ροή και ο οριζόντιος χρόνος σε μορφή ημερολογιακής ημέρας. Σημειώνονται κάποιες ασθενείς αυξήσεις στα κανάλια E_1 και C_7, ενώ το σκάφος έχει καταγραφεί ότι βρίσκεται στη μαγνητοθήκη. 40

Εικόνα 39. Πάνω: Μετρήσεις σχετικιστικών ηλεκτρονίων στο κανάλι C_7 του LEMMS, για το χρονικό διάστημα των ημερών 159-161/2012. Ο κάθετος άξονας είναι counts/s και ο οριζόντιος χρόνος σε μορφή ημερολογιακής ημέρας. Κάτω: Το μέτρο και οι 3 συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου για το ίδιο χρονικό διάστημα. Συγκρίνοντας τη χρονοσειρά με τα δεδομένα του μαγνητικού πεδίου, θεωρούμε πολύ πιθανό ότι οι παρατηρούμενες αυξήσεις την ημέρα 160, είναι στην πραγματικότητα διάβαση από την μαγνητόπαυση προς το εσωτερικό της μαγνητόσφαιρας του Κρόνου. 40

Εικόνα 40. Μετρήσεις σχετικιστικών ηλεκτρονίων στο κανάλι C_7 του LEMMS, για την ημέρα 22/2010. Ο κάθετος άξονας είναι counts/s και ο οριζόντιος χρόνος σε μορφή ημερολογιακής ημέρας. Κάτω: Το μέτρο και οι 3 συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου για το ίδιο χρονικό διάστημα. Οι αυξήσεις που σημειώνονται είναι ιδιαίτερα υψηλές, και τα δεδομένα μαγνητικού πεδίου υποδεικνύουν ότι είναι πολύ πιθανό αυτές οι μετρήσεις να αντιστοιχούν στο εσωτερικό της μαγνητόσφαιρας του Κρόνου. 41

Εικόνα 41. Πάνω: Μετρήσεις σχετικιστικών ηλεκτρονίων στο κανάλι C_7 του LEMMS, για τις ημέρες 81-89/2011. Ο κάθετος άξονας είναι counts/s και ο οριζόντιος χρόνος σε μορφή ημερολογιακής ημέρας. Κάτω: Το μέτρο και οι 3 συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου για το ίδιο χρονικό διάστημα. Οι αυξήσεις στα ηλεκτρόνια είναι και εδώ έντονες και συχνές, ενώ ταυτόχρονα συονδεύονται και από έντονες μεταβολές και στο μαγνητικό πεδίο. 41

Εικόνα 42. Το νέο ενεργειακό φάσμα ηλεκτρονίων με βάση παρατηρήσεις από τις αποστολές Ulysses και Pioneer 10. Για ενέργειες της τάξης $\sim$ MeV, το άνω όριο της διαφορικής ροής των ηλεκτρονίων φτάνει περίπου στο $10^4\ m^{-2}\ sr^{-1}\ s^{-1}\ MeV^{-1}$. (Vogt et al., 2018) 45
Εικόνα 43. Η διαφορά μεταξύ αδιαβατικής και μη αδιαβατικής μεταφοράς. Ηλεκτρόνιο που ξεκινά από το σημείο Α με ενέργεια E_A και μεταφέρεται αδιαβατικά μέχρι το σημείο Β όπου έχει ενέργεια E_B, όταν επιστρέψει αδιαβατικά στο σημείο Α θα έχει πάλι ενέργεια E_A. Αν όμως από το σημείο Β επιταχυνθεί τοπικά και αποκτήσει υψηλότερη ενέργεια ίση με E_Γ, τότε αν στη συνέχεια μεταφερθεί αδιαβατικά μέχρι το σημείο Δ που αντιστοιχεί σε ίδια απόσταση με το σημείο Α, η τελική ενέργειά του θα είναι υψηλότερη από την αρχική, δηλαδή $E_\Delta > E_A$. 46
Εικόνα 44. Ο μαγνητοδίσκος του Δία (αριστερά) και του Κρόνου (δεξιά). Οι δύο άξονες δίνουν την απόσταση σε ακτίνες R_J και R_S αντίστοιχα, αλλά έχουν διαφορετικές κλίμακες. Οι μαύρες καμπύλες αναπαριστούν τις μαγνητικές δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου του κάθε πλανήτη, με αυτές του Δία να είναι εμφανώς πολύ πιο πεπλατυσμένες, ενώ οι διακεκομμένες γραμμές αναπαριστούν τις αντίστοιχες γραμμές του διπολικού μαγνητικού πεδίου. (Birmingham, 1982) 47
Εικόνα 45. Το όριο αδιαβατικότητας των ηλεκτρονίων, K_C, για το Δία (αριστερά) και για τον Κρόνο (δεξιά). Στο Δία, ηλεκτρόνια σε αποστάσεις ~ 25 R_J, έχουν όριο αδιαβατικότητας >10 MeV. Τέτοια ηλεκτρόνια έχουν πράγματι παρατηρηθεί σε τέτοιες αποστάσεις στις ζώνες ακτινοβολίας του Δία. Αντίθετα, στον Κρόνο σε απόσταση $\sim 4\ R_S$ το όριο αδιαβατικότητας είναι 10^4 MeV, ενώ οι μέγιστες ενέργειες που έχουν παρατηρηθεί δεν ξεπερνούν τα 20 MeV. (Birmingham, 1982) 48
Εικόνα 46. Προσομοίωση της τρισδιάστατης χαοτικής κίνησης των ιόντων που βρίσκονται πάνω από το όριο αδιαβατικότητας στη μαγνητόσφαιρα του Δία. Οι άξονες αναπαριστούν την απόσταση από τον πλανήτη σε μονάδες R_J. (Selesnick et al., 2001) 48
Εικόνα 47. Μετρήσεις πλάσματος και μαγνητικού πεδίου στο Δία από το Galileo στο χρονικό διάστημα των ημερών 265-280/1996. Στο πρώτο πάνελ απεικονίζεται η μετάβαση από την "ήρεμη" ισοτροπική ροή, στη "διαταραγμένη" ανισοτροπική ροή στα ιόντα ενεργειών 65-120 keV, όπου ο κάθετος άξονας είναι η ένταση της ανισοτροπίας. Στο δεύτερο και στο τρίτο πάνελ απεικονίζονται μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου, όπου διακρίνονται απότομες αλλαγές στην κατακόρυφη διεύθυνσή του, με τον κάθετο άξονα να είναι η ένταση του μαγνητικού πεδίου. Ο κοινός οριζόντιος άξονας αναπαριστά το χρόνο σε μορφή ημερολογιακής ημέρας (και τα υπόλοιπα τροχιακά χαρακτηριστικά του σκάφους). Τα φαινόμενα ανισοτροπίας και αλλαγής πολικότητας στα διαγράμματα αυτά εμφανίζουν κοινή περιοδικότητα 2-3 ημερών, με το μαγνητικό πεδίο να αλλάζει διεύθυνση όταν η ροή ιόντων μεταβαίνει από μία ισότροπη σε μία ανισότροπη φάση, όπως δείχνουν και οι διακεκομμένες γραμμές. Στη συνέχεια, το μαγνητικό πεδίο επανέρχεται σταδιακά, ενώ η ροή πλάσματος γίνεται ξανά ισοτροπική, μέχρι να αλλάξει και πάλι απότομα την πολικότητά του, ταυτόχρονα με τη ροή ιόντων που γίνεται πάλι ανισοτροπική. 50

1 Εισαγωγή

1.1 Γενικά χαρακτηριστικά του Δία και του Κρόνου

Ο Δίας είναι ο μεγαλύτερος πλανήτης του ηλιακού συστήματος με μάζα που είναι 2.5 φορές μεγαλύτερη από τη συνολική μάζα όλων των υπόλοιπων πλανητών μαζί, ενώ βρίσκεται σε μία μέση απόσταση 5.2 A.U. από τον Ήλιο (1 A.U: 150 εκ. χλμ.). Διαθέτει περισσότερους από 79 δορυφόρους, με σημαντικότερους τους δορυφόρους του Γαλιλαίου (Ιώ, Ευρώπη, Γανυμήδη, Καλλιστώ) ενώ περιστρέφεται εξαιρετικά γρήγορα, με μία περίοδο που φτάνει τις 9h 56min.

Ο Κρόνος βρίσκεται σε μία μέση απόσταση 9.5 A.U. από τον Ήλιο. Διαθέτει περισσότερους από 82 δορυφόρους, με σημαντικότερους τον Εγκέλαδο και τον Τιτάνα. Περιστρέφεται και αυτός πολύ γρήγορα, με μία περίοδο που φτάνει τις 10h 48min.

Οι ατμόσφαιρες των δύο γιγάντιων πλανητών διαφέρουν σημαντικά από αυτή της Γης, καθώς αποτελούνται κυρίως από υδρογόνο και ήλιο, ενώ υπάρχουν και ίχνη μορίων νερού, αμμωνίας και μεθανίου. Η θερμοκρασία τους είναι αρκετά χαμηλή, έτσι ώστε να είναι δυνατή η δημιουργία νεφών αμμωνίας και υδρογονανθράκων τα οποία εκτείνονται σε μεγάλα βάθη στο εσωτερικό τους. Παρά τα κοινά χαρακτηριστικά που μοιράζονται, οι ατμόσφαιρες του Δία και του Κρόνου εμφανίζουν και αρκετές διαφορές, οι οποίες οφείλονται κυρίως στη μάζα του κάθε πλανήτη και στην απόστασή του από τον Ήλιο (η οποία καθορίζει το διαθέσιμο ποσοστό ακτινοβολίας που υπάρχει για την θέρμανση της ανώτερης ατμόσφαιρας).

Ο Κρόνος διαθέτει το εκτενέστερο σύστημα δακτυλίων από οποιονδήποτε άλλο πλανήτη του ηλιακού συστήματος. Οι δακτύλιοί του περιστρέφονται σε κοντινές αποστάσεις από τον πλανήτη, και έχουν πάχος που φτάνει τις μερικές εκατοντάδες μέτρα. Αποτελούνται κυρίως από υδάτινο πάγο, βράχους και άμορφο άνθρακα, ενώ το μέγεθος των σωματιδίων που τους απαρτίζουν φτάνει σε διάμετρο μέχρι και τα 10m.

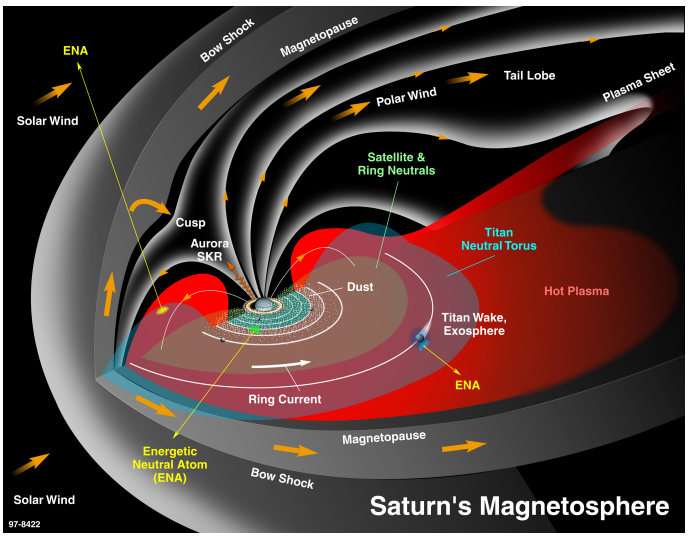
Ο Δίας διαθέτει και αυτός αμυδρότερους δακτυλίους, αλλά το κύριο χαρακτηριστικό που τον ξεχωρίζει από τους υπόλοιπους πλανήτες είναι η Μεγάλη Ερυθρά Κηλίδα, μία αντικυκλωνική καταιγίδα που βρίσκεται στο νότιο ημισφαίριο του πλανήτη και περιστρέφεται αντίθετα από τους υπόλοιπους σχηματισμούς της ατμόσφαιράς του. Δεδομένα στο υπέρυθρο έχουν δείξει ότι η Κηλίδα είναι ψυχρότερη και άρα βρίσκεται σε μεγαλύτερο υψόμετρο από τα περισσότερα νέφη του πλανήτη.

Τα μαγνητικά πεδία των δύο μεγάλων αέριων πλανητών παράγονται σύμφωνα με τη διαδικασία του δυναμό, λόγω της ύπαρξης ρευστού μεταλλικού υδρογόνου στον πυρήνα τους και της γρήγορης διαφορικής περιστροφής τους. Ο Κρόνος διαθέτει ένα αρκετά ισχυρό μαγνητικό πεδίο, με μαγνητική ροπή που είναι 600 φορές μεγαλύτερη από αυτή της Γης, ενώ ο άξονας συμμετρίας του μαγνητικού πεδίου φαίνεται να ευθυγραμίζεται με τον άξονα περιστροφής του πλανήτη, με μια απόκλιση μόλις $\sim 0.01°$ (Dougherty et al., 2018), δηλαδή μία τάξη μεγέθους μικρότερη από εκείνη που είχε υπολογιστεί κατά τα πρώτα χρόνια της αποστολής Cassini (Burton et al., 2009). Ο Δίας διαθέτει το ισχυρότερο μαγνητικό πεδίο ανάμεσα σε όλους τους πλανήτες, με μαγνητική ροπή που είναι 20.000 φορές μεγαλύτερη από αυτή της Γης, ενώ ο μαγνητικός άξονας παρουσιάζει απόκλιση $\sim 10°$ με τον άξονα περιστροφής του πλανήτη (Russell & Dougherty, 2010). Το μαγνητικό πεδίο των δύο πλανητών προκαλεί απόκλιση στην ροή του ηλιακού ανέμου και έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό των μαγνητοσφαιρών τους, οι οποίες αποτελούνται από πλάσμα πολύ διαφορετικό από αυτό του ηλιακού ανέμου.

1.2 Οι μαγνητόσφαιρες του Δία και του Κρόνου

Στην περίπτωση των μαγνητισμένων πλανητών στο ηλιακό μας σύστημα, η μαγνητόσφαιρα ορίζεται ως η κοιλότητα στον ηλιακό άνεμο που περιβάλλει έναν πλανήτη και μέσα στην οποία κυριαρχεί το μαγνητικό του πεδίο. Το μέγεθος της εξαρτάται από την ισχύ του μαγνητικού πεδίου του πλανήτη, αλλά και την ισχύ της δυναμικής πίεσης του ηλιακού ανέμου. Αξίζει να σημειωθεί ότι η μαγνητόσφαιρα του Δία είναι μεγαλύτερη και ισχυρότερη από οποιαδήποτε άλλη πλανητική μαγνητόσφαιρα του ηλιακού συστήματος, και η εκτενέστερη συνεχής δομή σε αυτό μετά την ηλιόσφαιρα.

Η μορφή της μαγνητόσφαιρας καθορίζεται τόσο από την ηλιακή δραστηριότητα, όσο και από εσωτερικούς μηχανισμούς. Στο εσωτερικό της μαγνητόσφαιρας, συνυπάρχουν πολλές περιοχές με ξεχωριστές ιδιότητες, όπως η μαγνητοουρά και οι λοβοί (Southwood, 2015), και πληθυσμοί φορτισμένων σωματιδίων που έχουν παγιδευτεί από το μαγνητικό πεδίο, σχηματίζοντας δομές όπως το δακτυλιοειδές ρεύμα και οι ζώνες ακτινοβολίας (Keiling et al., 2018). Στην προσήλια πλευρά της, η μαγνητόσφαιρα συμπιέζεται από τον ηλιακό άνεμο και στην αφήλια πλευρά της παρασύρεται από αυτόν.



Εικόνα 1. Η μαγνητόσφαιρα του Κρόνου με όλους τους περίπλοκους σχηματισμούς της. (Krimigis et al., 2004)

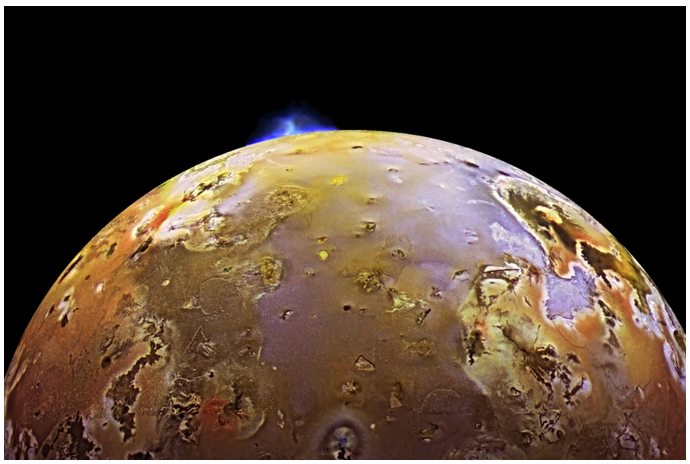
Το εξωτερικό όριο της μαγνητόσφαιρας ονομάζεται μαγνητόπαυση και ορίζεται ως η διαχωριστική επιφάνεια στην οποία το άθροισμα της μαγνητικής πίεσης του πλανητικού μαγνητικού πεδίου και της δυναμικής πίεσης του πλάσματος της μαγνητόσφαιρας, εξισορροπεί την δυναμική πίεση του ηλιακού ανέμου. Το εξώτατο όριο της μαγνητόσφαιρας είναι το κρουστικό κύμα, μία ασυνέχεια που σχηματίζεται όταν ο υπερηχητικός ηλιακός άνεμος αντιμετωπίζει το πλανητικό μαγνητικό πεδίο. Στο κρουστικό κύμα ο άνεμος γίνεται υποηχητικός και θερμαίνεται, δημιουργώντας μία περιοχή που ονομάζεται μαγνητοθήκη. Η μαγνητόπαυση διαχωρίζει το ψυχρότερο και πυκνότερο πλάσμα του διαταραγμένου ηλιακού ανέμου στη μαγνητοθήκη από το θερμότερο και αραιότερο μαγνητοσφαιρικό πλάσμα.

Γενικά, το σχήμα και η χωρική έκταση της μαγνητόπαυσης και του κρουστικού κύματος επηρεάζονται από τις αλλαγές στον ηλιακό άνεμο, αλλά και από εσωτερικές μαγνητοσφαιρικές

διεργασίες. Όταν η δυναμική πίεση του ανέμου είναι ισχυρή, το κρουστικό κύμα και η μαγνητόπαυση συμπιέζονται και πλησιάζουν σε μικρότερες αποστάσεις από τον πλανήτη. Αντίθετα, όταν η ένταση του ανέμου είναι ασθενής, οδηγούνται σε μεγαλύτερες αποστάσεις, αυξάνοντας το μέγεθός τους. Από την άλλη, γνωρίζουμε ότι οι εσωτερικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στις μαγνητόσφαιρες των γιγάντιων αέριων πλανητών κατέχουν κυρίαρχο ρόλο στη διαμόρφωση της τοπολογίας αλλά και της συμπιεστότητας των συγκεκριμένων μαγνητοσφαιρών. Αυτό που διαφοροποιεί θεμελιωδώς τις μαγνητόσφαιρες αυτές από τη μαγνητόσφαιρα της Γης, είναι η γρήγορη περιστροφή τους και οι σημαντικές πηγές πλάσματος στο εσωτερικό τους.

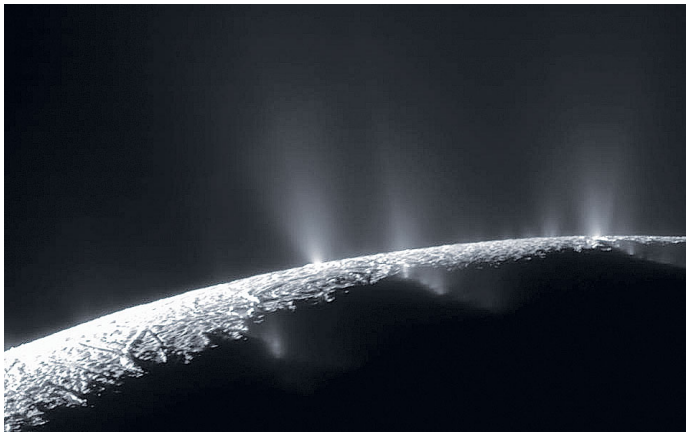
1.2.1 Εσωτερικές πηγές πλάσματος και γρήγορη περιστροφή

Η κύρια πηγή μαγνητοσφαιρικού πλάσματος στο Δία είναι η Ιώ, η οποία διοχετεύει θερμό πλάσμα στην εσωτερική μαγνητόσφαιρα του Δία με ρυθμό ~ 1 ton/s (Thomas et al., 2004), λόγω των ηφαιστειακών εκρήξεων που συμβαίνουν στην επιφάνειά της. Η Ιώ είναι γνωστό ότι διαθέτει μεγάλης κλίμακας ενεργή ηφαιστειακή δραστηριότητα, με τις ενώσεις του θείου (κυρίως SO_2) να βρίσκονται σε αφθονία τόσο στην επιφάνεια, όσο και στην λεπτή ατμόσφαιρα και ιονόσφαιρα της. Δευτερεύουσες πηγές πλάσματος για το μαγνητοσφαιρικό σύστημα του Δία αποτελούν η Ευρώπη (Mauk et al., 2003) με τους υδάτινους πίδακές της, αλλά και η ίδια η ατμόσφαιρα του πλανήτη.



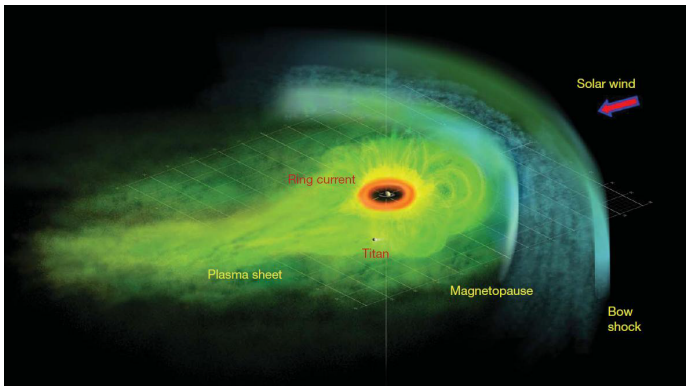
Εικόνα 2. Ηφαιστειακή έκρηξη στην Ιώ. Η εικόνα έχει ληφθεί από το Galileo. (NASA/JPL/DLR)

Η κύρια πηγή πλάσματος (Young et al., 2005) και ενεργητικών σωματιδίων (Krimigis et al., 2005) στον Κρόνο είναι ο Εγκέλαδος (Dougherty et al., 2006), ο οποίος διοχετεύει θερμούς υδρατμούς στην εσωτερική μαγνητόσφαιρα του Κρόνου με ρυθμό ~ 200 kg/s, λόγω των πιδάκων νερού που εκτοξεύονται σε μεγάλα ύψη από την επιφάνειά του. Δευτερεύουσες πηγές πλάσματος για το μαγνητοσφαιρικό σύστημα του Κρόνου αποτελούν ο Τιτάνας (Brandt et al., 2012), οι δακτύλιοι (Christon et al., 2013), αλλά και η ίδια η ατμόσφαιρα του πλανήτη (Shemansky et al., 2009). Ο εντοπισμός μικρών ποσοτήτων He^{++} εντός της μαγνητόσφαιρας του Κρόνου (Allen et al., 2018), ένας πληθυσμός που προέρχεται από τον ηλιακό άνεμο, αποτελεί χαρακτηριστικό στοιχείο της σύζευξης του ηλιακού ανέμου με τη μαγνητόσφαιρα.



Εικόνα 3. Πίδακες νερού στο νότιο ημισφαίριο του Εγκέλαδου. Η εικόνα έχει ληφθεί από το Cassini. (NASA/JPL/SSI)

Το πλάσμα στον Κρόνο και στο Δία συμπεριστρέφεται σε ικανοποιητικό βαθμό μαζί με τον κάθε πλανήτη σε μικρές αποστάσεις, παρουσιάζοντας αποκλίσεις σε μεγαλύτερες αποστάσεις (Kane et al., 2020). Η γρήγορη περιστροφή και η παρουσία πλάσματος έχει ως αποτέλεσμα οι μαγνητόσφαιρες των δύο πλανητών να λαμβάνουν μία πιο επίπεδη μορφή και πλησιέστερα στο μαγνητικό ισημερινό, σε σχέση με τη μαγνητόσφαιρα της Γης, η οποία ονομάζεται μαγνητοδίσκος (Arridge et al., 2008; Carbary & Mitchell, 2016; Khurana & Schwarzl, 2005). Στην περίπτωση του Δία, ο μαγνητοδίσκος έχει μόνιμο χαρακτήρα σε όλους τους τοπικούς χρόνους, ενώ στην περίπτωση του Κρόνου ο μαγνητοδίσκος είναι ημιμόνιμος. Αυτό οφείλεται στο ότι ο Δίας έχει ισχυρότερο μαγνητικό πεδίο, ισχυρότερο φυγοκεντρικό δυναμικό και μεγαλύτερη παροχή πλάσματος στο εσωτερικό της μαγνητόσφαιράς του. Συνολικά, λόγω της γρήγορης περιστροφής των δύο πλανητών αλλά και των ισχυρών εγχύσεων πλάσματος, οι μαγνητόσφαιρές τους εμφανίζονται παραμορφωμένες, ενώ έχουν καταγραφεί αρκετές περιοδικότητες σε μετρήσεις σωματιδίων και πεδίων με δυναμική συμπεριφορά (Brandt et al., 2010).



Εικόνα 4. Τρισδιάστατο μοντέλο της μαγνητόσφαιρας του Κρόνου που βασίζεται σε δεδομένα του οργάνου MIMI του Cassini. Απεικονίζεται η κατανομή των ενεργητικών σωματιδίων με E$>$ 3 keV. (Krimigis et al., 2007)

1.2.2 Πληθυσμοί ενεργητικών σωματιδίων στη μαγνητόσφαιρα

Όπως αναφέρθηκε ήδη, ο Δίας και ο Κρόνος διαθέτουν ισχυρό μαγνητικό πεδίο, γρήγορη περιστροφή και εσωτερικές πηγές πλάσματος. Αυτοί οι τρεις παράγοντες έχουν ως αποτέλεσμα τον σχηματισμό εκτενών και παραμορφωμένων μαγνητοσφαιρών, με τη μαγνητόπαυση τους να βρίσκεται σε αποστάσεις που είναι $\approx$ 60-99 και $\approx$ 20-24 φορές μεγαλύτερες από αυτή τη Γης, για το Δία και τον Κρόνο αντίστοιχα (Kanani et al., 2010) (Joy et al., 2002). Οι διεργασίες και η δυναμική των δύο μαγνητοσφαιρικών συστημάτων εμφανίζουν κάποιες συστηματικές ομοιότητες, αλλά και σημαντικές διαφορές (Dialynas, 2018). Για παράδειγμα, η δυναμική και των δύο μαγνητοσφαιρών διαμορφώνεται κυρίως από εσωτερικές διεργασίες, και όχι από τον ηλιακό άνεμο.

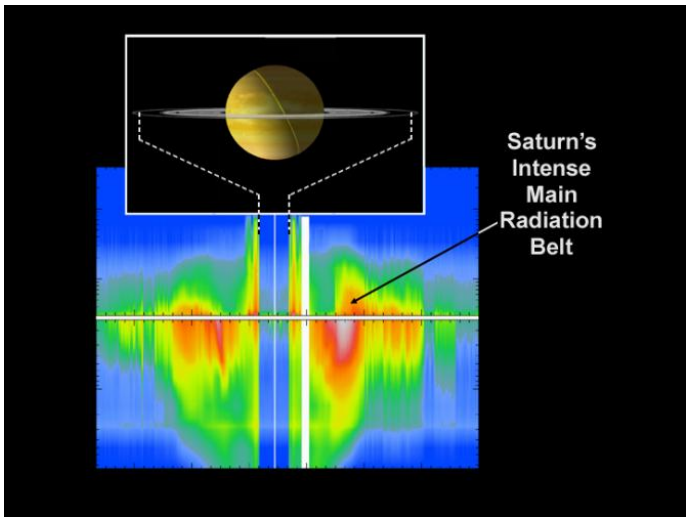
Γενικά, τα ενεργητικά σωματίδια των ζωνών ακτινοβολίας των δύο πλανητών, μπορεί να προέρχονται από τις εσωτερικές πηγές πλάσματος που αναφέρθηκαν στην υποενότητα 1.2.1, από τον ηλιακό άνεμο αλλά και να είναι προϊόντα του μηχανισμού CRAND (Cosmic Ray Albedo Neutron Decay). Ο μηχανισμός CRAND είναι μία άμεση πηγή ενεργητικών πρωτονίων και ηλεκτρονίων για τις ζώνες ακτινοβολίας των πλανητών, τα οποία αποτελούν δευτερογενή παράγωγα της σύγκρουσης των κοσμικών ακτίνων (κυρίως πρωτόνια με ενέργειες $\sim$ GeV), καθώς αυτές εισέρχονται στη μαγνητόσφαιρα και προσπίπτουν στους δακτυλίους και στην ατμόσφαιρα των πλανητών (Kotova et al., 2019). Τα πρωτόνια που παράγονται και παγιδεύονται από το μαγνητικό πεδίο έχουν πολύ υψηλές ενέργειες της τάξης των Mev-GeV, ενώ τα ηλεκτρόνια συνήθως έχουν ενέργειες $<$1 MeV (Li et al., 2015).

Τα σωματίδια που αρχικά έχουν χαμηλές ενέργειες, μπορούν να επιταχυνθούν μέσω της ακτινικής διάχυσης/μεταφοράς (Kollmann et al., 2017) (Roussos, Jones, et al., 2007) προς περιοχές ισχυρότερου μαγνητικου πεδίου, αλλά και λόγω τοπικής επιτάχυνσης απο αλληλεπιδράσεις σωματιδίων σε συντονισμό με ηλεκτρομαγνητικά κύματα (Woodfield et al., 2013). Από την άλλη, οι πολυάριθμοι δορυφόροι και οι δακτύλιοι των δύο πλανητών, μπορούν να αποτελέσουν, εκτός από πηγές πλάσματος, και καταβόθρες για τα ενεργητικά σωματίδια (Roussos, Krupp, Jones, et al., 2007). Μηχανισμοί απώλειας ενεργητικών σωματιδίων αποτελούν επίσης η ανταλλαγή φορτίου για τα ιόντα (Krupp et al., 2012), η απώλεια στην ατμόσφαιρα μέσω σκέδασης της γωνίας κλίσης τους (Schulz & Lanzerotti, 1974) και η απώλεια ενέργειας εξαιτίας ιονισμού από ουδέτερα αέρια/δακτυλίους (Kollmann et al., 2013), εξαιτίας συγκρούσεων με ελεύθερα ηλεκτρόνια (Nénon et al., 2017) και εξαιτίας σκέδασης σε ισχυρά μαγνητικά μαγνητικά πεδία λόγω της ισχυρής ακτινοβολίας σύγχροτρον (Santos-Costa et al., 2001).

Ο Κρόνος διαθέτει ζώνες ακτινοβολίας που έχουν τόσο μόνιμο, όσο και ημιμόνιμο χαρακτήρα. Η μόνιμη ζώνη ακτινοβολίας ιόντων περιλαμβάνει σωματίδια με ενέργειες 10 MeV - 1 GeV (κυρίως πρωτόνια). Οι μόνιμες ζώνες ακτινοβολίας εκτείνονται στην περιοχή L $\approx$ 1.03 $-$ 4.9 για τα πρωτόνια (Roussos, Kollmann, et al., 2018), όπου το L αντιστοιχεί στο L-shell (ακτινική απόσταση από το κέντρο του μαγνητικού διπόλου κατά μήκος του μαγνητικού ισημερινού, σε πολλαπλάσια της ακτίνας του εκάστοτε πλανήτη). Οι μόνιμες ζώνες ακτινοβολίας πρωτονίων διαιρούνται σε 6 τομείς, ανάλογα με τις θέσεις των μεγάλων δορυφόρων και των δακτυλίων του Κρόνου, και έχουν ως κύρια πηγή δημιουργίας της τον μηχανισμό CRAND. Εκτός από αυτές, υπάρχει και μία ημιμόνιμη ασθενέστερη ζώνη ακτινοβολίας ιόντων, που αποτελείται από σωματίδια με ενέργειες της τάξης των $\sim$ keV εώς και περίπου 5 MeV, εμφανίζοντας μέγιστο στην περιοχή L $\approx 6 - 9$, και η οποία δεν έχει κάποιο σαφές εξώτατο όριο. Τα υψηλότερης ενέργειας φορτισμένα ιόντα σε αυτή την παροδική ζώνη εμφανίζονται μετά την αλληλεπίδραση της μαγνητόσφαιρας του Κρόνου με ενεργητικά ηλιοσφαιρικά γεγονότα, όπως διαπλανητικές στεμματικές εκτινάξεις μάζας. Οι μόνιμες

ζώνες ακτινοβολίας πρωτονίων γενικά δεν χαρακτηρίζονται από μεγάλη χωρική και χρονική μεταβλητότητα.

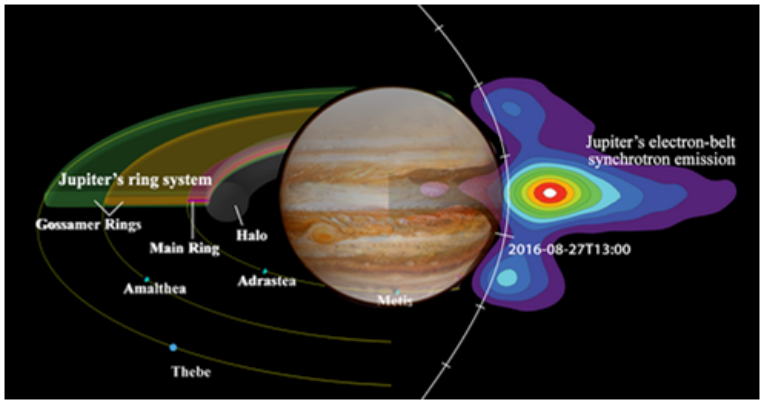
Η ζώνη ακτινοβολίας ηλεκτρονίων στον Κρόνο εκτείνεται χωρικά από το L=2.27 (εξώτατο όριο των πυκνών δακτυλίων) και δεν έχει κάποιο σαφές εξώτατο όριο, αν και μετρήσιμο σήμα από παγιδευμένα MeV ηλεκτρόνια εντοπίζεται κατά μέσο όρο εντός του L=7. Εμφανίζει μέγιστο για L $\approx$ 2.5 και περιλαμβάνει ηλεκτρόνια με ενέργειες μέχρι και μερικές δεκάδες MeV, αρκετά χαμηλότερης έντασης όμως, σε σχέση με το Δία. Η πηγή αυτών των ηλεκτρονίων είναι το δακτυλιοειδές ρεύμα (Roussos et al., 2014), απ΄όπου τα ηλεκτρόνια επιταχύνονται και μεταφέρονται αδιαβατικά πλησιέστερα στον πλανήτη (Paranicas et al., 2010), σε περιοχές με ισχυρότερο μαγνητικό πεδίο. Σε κοντινές αποστάσεις (L$<$4), στην επιτάχυνση των ηλεκτρονίων φαίνεται να συνεισφέρουν και αλληλεπιδράσεις ηλεκτρονίων με ηλεκτρομαγνητικά κύματα υψηλής συχνότητας. Σε αντίθεση με τα ιόντα, οι ζώνες ακτινοβολίας ηλεκτρονίων εμφανίζουν μεγάλη χρονική και χωρική μεταβλητότητα.



Εικόνα 5. Μετρήσεις ενεργητικών ιόντων και ηλεκτρονίων τα οποία συνθέτουν την κύρια ζώνη ακτινοβολίας του Κρόνου από το Cassini. Η ένταση των ιόντων αναπαρίσταται πάνω από την οριζόντια διαχωριστική γραμμή με αυξητική τάση προς τα πάνω, ενώ η ένταση των ηλεκτρονίων αναπαρίσταται κάτω από την οριζόντια διαχωριστική γραμμή με αυξητική τάση προς τα κάτω. Το κόκκινο χρώμα υποδεικνύει υψηλή ένταση, ενώ το μπλε χαμηλή. Ο κάθετος άξονας της ενέργειας έχει εύρος από περίπου 30 keV μέχρι μερικά MeV. Ο οριζόντιος άξονας αναπαριστά το χρόνο, και τα δεδομένα που παρουσιάζονται έχουν συνολική διάρκεια περίπου 36 ωρών. (Krimigis et al., 2005)

Στο Δία, η ζώνη ακτινοβολίας ιόντων εκτείνεται χωρικά από L = 1.2, χωρίς να έχει κάποιο σαφές εξώτατο όριο (Fischer et al., 1996; Mihalov et al., 2000; Roussos & Kollmann, 2021). Σε αντίθεση με τον Κρόνο, δεν διαχωρίζεται τόσο ευκρινώς σε τομείς ανάλογα με τη θέση των δορυφόρων, αν και έχουν παρατηρηθεί απώλειες ιόντων κατά μήκος της τροχιάς φεγγαριών και δακτυλίων του Δία. Η επιμέρους ζώνη με τα πιο υψηλοενεργειακά ιόντα περιλαμβάνει σωματίδια με ενέργειες >350 MeV/nucleon και εμφανίζει μέγιστο στο L $\approx$ 2. Οι διαθέσιμες έως τώρα μετρήσεις δείχνουν ότι τα ενεργητικά ιόντα στο Δία εμφανίζουν αρκετά μεγαλύτερη μεταβλητότητα σε σχέση με τα αντίστοιχα του Κρόνου (Selesnick et al., 2001) ενώ η σύστασή τους ειναι αρκετά πιο πλούσια, καθώς πέραν των πρωτονίων, οι ζώνες ακτινοβολίας ιόντων του Δία παγιδεύουν μεγάλες ποσότητες βαρύτερων σωματιδίων όπως ήλιο, οξυγόνο, θείο και άνθρακα (C. M. S. Cohen et al., 2001).

Όσον αφορά τη ζώνη ακτινοβολίας ηλεκτρονίων στο Δία, αυτή παρουσιάζει τόσο υψηλές εντάσεις σε υπερσχετικιστικές ενέργειες ($>>1$ MeV), έτσι ώστε αυτές να μην μπορούν να μετρηθούν από τα έως τώρα διαθέσιμα όργανα (Taherion et al., 2008). Η πηγή αυτών των ηλεκτρονίων βρίσκεται στην εξωτερική μαγνητόσφαιρα, απ΄όπου τα ηλεκτρόνια επιταχύνονται και μεταφέρονται αδιαβατικά πλησιέστερα στον πλανήτη, σε περιοχές με ισχυρότερο μαγνητικό πεδίο, αν και σε περιοχές πολύ κοντά στον πλανήτη εικάζεται πως τα ηλεκτρόνια επιταχύνονται και τοπικά εξαιτίας της επίδρασης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων υψηλής συχνότητας (Kollmann et al., 2018; Shprits et al., 2012; Woodfield et al., 2014). Η ένταση των MeV ηλεκτρονίων εμφανίζει μέγιστο στο $L \approx 2-3$, ενώ τα ηλεκτρόνια αυτά μπορούν να φτάσουν ενέργειες ακόμα και πολλών δεκάδων MeV, ίσως και πάνω από 100 MeV σύμφωνα με θεωρητικές εκτιμήσεις (Nénon et al., 2017).



Εικόνα 6. Έμμεση απεικόνιση των ζωνών ακτινοβολίας του Δία, μέσω της ακτινοβολίας σύγχροτρον που εκπέμπουν τα υψηλοενεργειακά ηλεκτρόνιά τους. (Santos-Costa et al., 2014)

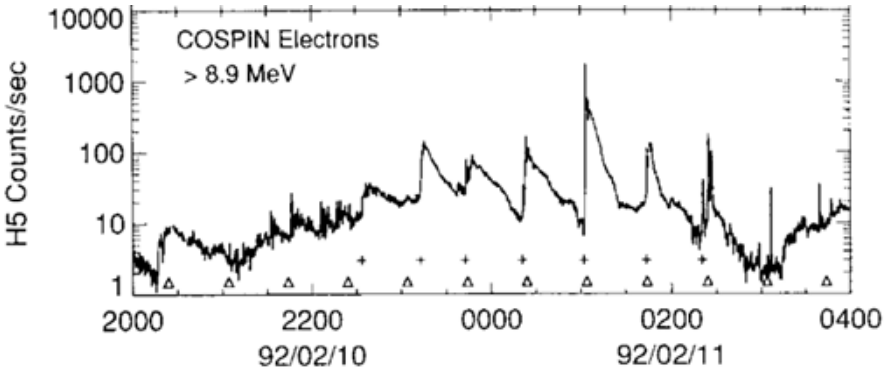
Εκτός από τις ζώνες ακτινοβολίας, οι οποίες αποτελούν περιοχές παγιδευμένων υψηλοενεργειακών φορτισμένων σωματιδίων κοντά στον πλανήτη, τα οποία χαρακτηρίζονται από υψηλές ροές, υπάρχουν και άλλες περιοχές εντός της μαγνητόσφαιρας στις οποίες παρατηρούνται ροές σωματιδίων υψηλών ενεργειών. Σύμφωνα με προηγούμενες μελέτες, έχουν παρατηρηθεί εξάρσεις ηλεκτρονίων σε ενέργειες της τάξης των $\sim$ MeV σε μεγάλες αποστάσεις από τον πλανήτη, έως και μέχρι τη μαγνητόπαυση (Roussos et al., 2016). Παρ' όλα αυτά, δεν είναι ξεκάθαρο αν αυτά τα ηλεκτρόνια προέρχονται από τις ζώνες ακτινοβολίας, καθώς αν μεταφέρονταν αδιαβατικά από μικρότερες σε μεγαλύτερες αποστάσεις από τον πλανήτη, δηλαδή από περιοχές με ισχυρότερο σε περιοχές με ασθενέστερο μαγνητικό πεδίο, η ενέργειά τους θα μειωνόταν.

Στην εξωτερική μαγνητόσφαιρα των δύο πλανητών, έχουν παρατηρηθεί υψηλοενεργειακά ηλεκτρόνια με τη μορφή περιοδικών παλμών 40 λεπτών και 60-70 λεπτών, για το Δία και τον Κρόνο αντίστοιχα, που ονομάζονται QP40 και QP60, όπου το QP αντιστοιχεί στο Quasi-Periodic. Αν και η προέλευση των QP γεγονότων δεν είναι ξεκάθαρη, φαίνεται ότι συνιστούν ένα μη-αμελητέο μηχανισμό παραγωγής ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας στις εξωτερικές μαγνητόσφαιρες των δύο πλανητών. Τα QP γεγονότα έχουν συσχετιστεί με επανασύνδεση μαγνητικών γραμμών, αλλά και με επιτάχυνση σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη εως και τις περιοχές του σέλαος (Roussos et al., 2016).

Στην περίπτωση του Κρόνου, τα γεγονότα αυτά ίσως είναι η κυρίαρχη πηγή υψηλοενεργειακών ηλεκτρονίων στην εξωτερική μαγνητόσφαιρα του πλανήτη, ενώ στο Δία φαίνεται να είναι μία από τις πολλές πηγές υψηλοενεργειακών ηλεκτρονίων με ενέργειες της τάξης των $\sim$

MeV, οι οποίες γεμίζουν σχεδόν μόνιμα όλη τη μαγνητόσφαιρα, μέχρι και την μαγνητόπαυση. Τόσο το Juno όσο και το Ulysses έχουν παρατηρήσει εκροή ηλεκτρονίων με ενέργειες που ξεπερνάνε τα 5-10 MeV (Paranicas et al., 2018) σε χαμηλό υψόμετρο από την ατμόσφαιρα του Δία και σε μεγάλα πλανητογραφικά πλάτη, περιοχές που είναι επίσης μαγνητικά συνδεδεμένες με την εξωτερική μαγνητόσφαιρα, χωρίς όμως αυτά να έχουν απαραίτητα τη μορφή περιοδικών παλμών.

Τα QP60 γεγονότα παρατηρούνται σε ένα μεγάλο εύρος τόσο τοπικής ώρας, όσο και μαγνητικού πλάτους. Ωστόσο, οι παρατηρήσεις υποδεικνύουν ότι είναι 5-25 φορές πιο συχνά στην απογευματινή πλευρά της μαγνητόσφαιρας (dusk magnetosphere), τόσο στο Δία (για τα αντίστοιχα QP40), όσο και στον Κρόνο (Roussos et al., 2016). Τα QP40 γεγονότα παρατηρήθηκαν για πρώτη φορά στο Δία από το Ulysses στο απογευματινό μέρος της μαγνητόσφαιρας και σε μεγάλα νότια γεωγραφικά πλάτη (Kaiser et al., 2001). Φυσικά, υπάρχουν και αντίστοιχες πηγές υψηλοενεργειακών ιόντων στις εξωτερικές περιοχές των δύο μαγνητοσφαιρών, ωστόσο εδώ εστιάζουμε στις πηγές ηλεκτρονίων, παρακινούμενοι από την αξιοσημείωτη έντονη διαφυγή τους από τη μαγνητόσφαιρα του Δία προς την ηλιόσφαιρα, όπως αναφέρεται παρακάτω στην Ενότητα 1.3.

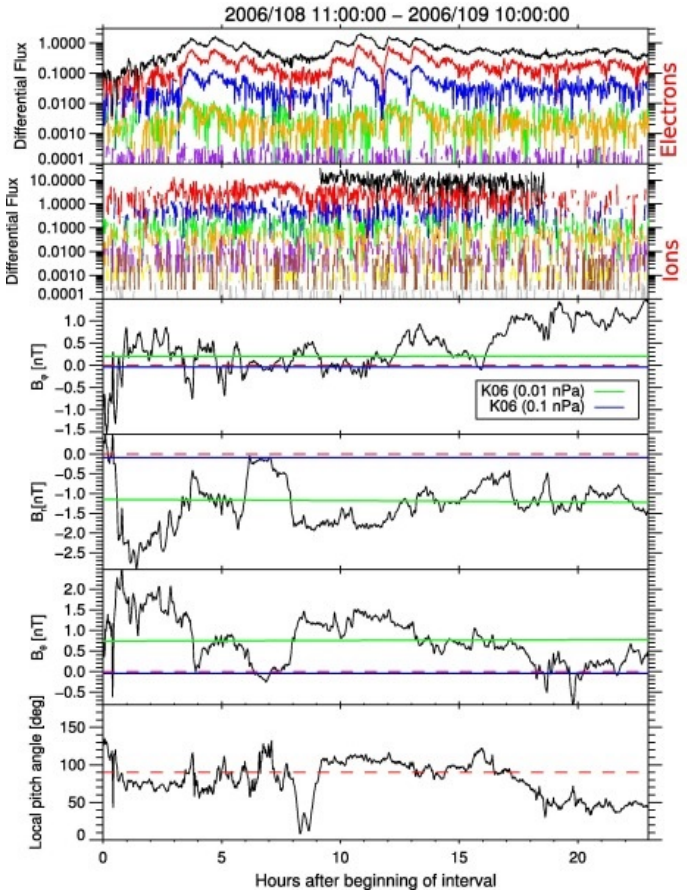


Εικόνα 7. Μετρήσεις παλμών ηλεκτρονίων ενέργειας $>$ 8.9 MeV και με διάρκεια 40 λεπτών (QP40), στη μαγνητόσφαιρα του Δία από το Ulysses. Ο κάθετος άξονας είναι counts/s και ο οριζόντιος η τοπική ώρα. (MacDowall et al., 1993)

1.3 Μετρήσεις διαφυγόντων σχετικιστικών ηλεκτρονίων από τη μαγνητόσφαιρα του Δία

Είναι πλέον επιβεβαιωμένο και αποδεκτό ότι ο Δίας αποτελεί πηγή σχετικιστικών ηλεκτρονίων στην ηλιόσφαιρα. Οι υποψίες σχετικά με το αν ο Δίας ήταν όντως σημαντική πηγή υψηλοενεργειακών ηλεκτρονίων για την ηλιόσφαιρα, προήλθαν από τις παρατηρήσεις ηλεκτρονίων ενεργειών της τάξης των $\sim$ MeV στην τροχιά της Γης, οι οποίες παρουσίαζαν αυξομειώσεις με μια περιοδικότητα 13 μηνών, η οποία αντιστοιχεί στη συχνότητα με την οποία η Γη και ο Δίας συνδέονται μαγνητικά μέσω του σπειροειδούς μαγνητικού πεδίου του ηλιακού ανέμου (Krimigis et al., 1975).

Το Pioneer 10 ήταν η πρώτη αποστολή με την οποία διαπιστώθηκε ότι τα ηλεκτρόνια που παράγονται από το Δία είναι υπεύθυνα για αυξήσεις στις ροές ηλεκτρονίων με ενέργειες μερικών MeV, σε απόσταση 1 A.U. από τον πλανήτη και σε ήρεμες περιόδους (Teegarden et al., 1974) (Krimigis et al., 1975). Οι παρατηρήσεις αυτές επιβεβαιώθηκαν αργότερα από το

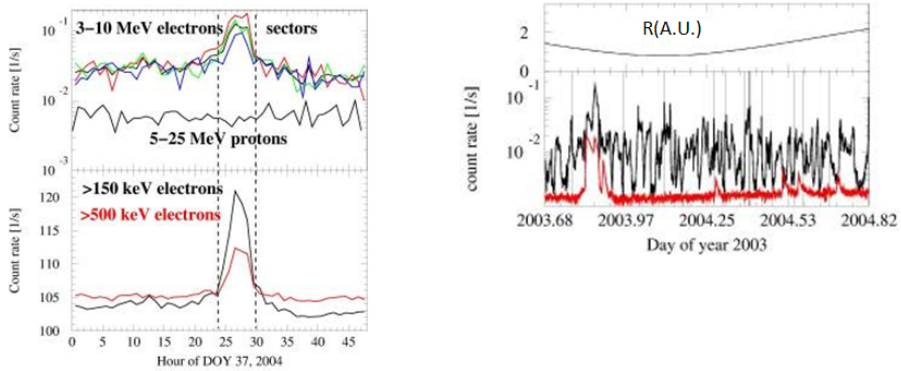


Εικόνα 8. Πάνω πάνελ: Μετρήσεις παλμών ηλεκτρονίων στα κανάλια E_0-E_6 με διάρκεια 60 λεπτών (QP60) στη μαγνητόσφαιρα του Κρόνου από το Cassini, για τις ημέρες 108-109/2016. Ο κάθετος άξονας είναι η διαφορική ροή [$cm^{-2}\ sr^{-1}\ s^{-1}\ keV^{-1}$] και ο οριζόντιος ο χρόνος (hrs) που έχει περάσει από την χρονική στιγμή που αρχίζει η σχεδίαση του διαγράμματος. (Roussos et al., 2016)

Pioneer 11 και τα Voyager (Simpson et al., 1975) (Zwickl et al., 1981), αλλά και από το Ulysses (Kunow et al., 2005). Το τελευταίο επιβεβαίωσε επιπλέον ότι υπάρχουν επεισοδιακές αυξήσεις στις ροές ηλεκτρονίων που χαρακτηρίζονται από μικρή διάρκεια, ισχυρή ανισοτροπία, απότομη αυξομείωση και φάσμα παρόμοιο με αυτό που συναντάται στα μαγνητοσφαιρικά ηλεκτρόνια του Δία (Kunow et al., 2005).

Γνωρίζουμε λοιπόν, ότι κάποια από τα ηλεκτρόνια που επιταχύνονται από το Δία και διαχέονται σε μεγάλες αποστάσεις από τον πλανήτη, μέσω κάποιου μηχανισμού, καταφέρνουν και διαφεύγουν από τη μαγνητόσφαιρά του. Επίσης, γνωρίζουμε ότι τα ηλεκτρόνια αυτά έχουν τόσο ισχυρές ροές που κυριαρχούν επί των ροών των κοσμικών ακτίνων στην ηλιόσφαιρα (μέχρι περίπου τα 20-30 MeV) εντός περίπου 10 A.U. από τον Ήλιο, παρόλο που τα ηλεκτρόνιά του συνυπάρχουν με αυτά των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων, οι οποίες εισέρχονται στην ηλιόσφαιρα από όλες τις κατευθύνσεις στον ουρανό (Kunow et al., 2005) (Teegarden et al., 1974) (Simpson et al., 1975).

Αυτό που δεν είναι γνωστό μέχρι τώρα, είναι η προέλευση αυτών των υψηλοενεργειακών ηλεκτρονίων, δηλαδή ποια είναι η εσωτερική πηγή δημιουργίας τους μέσα στη μαγνητόσφαιρα του Δία. Αν αποδειχτεί ότι προέρχονται από την εσωτερική μαγνητόσφαιρα (για παράδειγμα από τις ζώνες ακτινοβολίας του πλανήτη), αποτελεί εύλογο ερώτημα το πώς



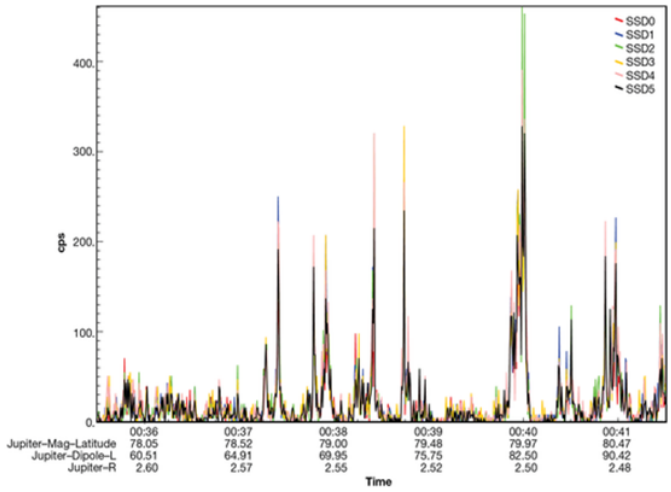
Εικόνα 9. Αριστερά: Αυξήσεις στις ροές ενεργητικών και σχετικιστικών ηλεκτρονίων, όπως τις μέτρησε το Ulysses σε απόσταση περίπου 0.8 A.U. από το Δία. Δεξιά: Στο πάνω πάνελ δίνεται η απόσταση του Ulysses από το Δία. Στο κάτω πάνελ φαίνονται μετρήσεις ηλεκτρονίων με ενέργειες 3-10 MeV (μαύρο) και πρωτονίων με ενέργειες 38-70 MeV (κόκκινο), τα οποία θεωρούνται ένας καλός δείκτης για την ηλιακή δραστηριότητα. Σε αντίθεση με τα πρωτόνια, οι εντάσεις των ροών των ηλεκτρονίων παραμένουν σε σχετικά υψηλά επίπεδα, έχοντας μία πολύ ασθενή εξάρτηση από την απόσταση από το Δία.(Allen et al., 2019)

καταφέρνουν και διατηρούν την ενέργειά τους σε τόσο υψηλές τιμές καθώς διασχίζουν την εκτενή μαγνητόσφαιρα του Δία, αφού η ένταση του μαγνητικού πεδίου του πλανήτη μειώνεται καθώς μεταφερόμαστε σε μεγαλύτερες αποστάσεις από αυτόν.

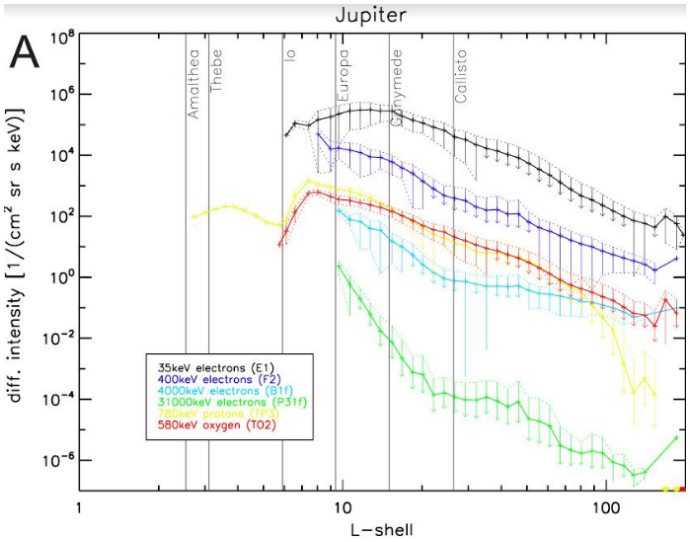
Στη βιβλιογραφία έχουν αναφερθεί ενδείξεις για μία πιθανή πηγή τοπικής επιτάχυνσης ηλεκτρονίων σε μεγάλες αποστάσεις από το Δία, με τα φαινόμενα QP40, που συζητήθηκαν στην προηγούμενη Ενότητα, να είναι μία από αυτές, αν και όχι η μόνη (Paranicas et al., 2018). Το Galileo και το Juno έχουν μετρήσει υψηλοενεργειακά ηλεκτρόνια κατά μήκος μαγνητικών δυναμικών γραμμών που αντιστοιχούν σε μεγάλες αποστάσεις στην εξωτερική μαγνητόσφαιρα. Είναι πιθανό λοιπόν, αυτά τα ηλεκτρόνια να παγιδεύονται στην εξωτερική μαγνητόσφαιρα, και εκεί μέσω κάποιων μηχανισμών (για παράδειγμα μέσω κάποιας αστάθειας κοντά σε συνοριακές περιοχές ή μέσω εκτόξευσης πλασμοειδούς) να διαφεύγουν τελικά εκτός της μαγνητόσφαιρας. Το ανοιχτό θέμα σχετικά με τον μηχανισμό διαφυγής αυτών των ηλεκτρονίων από τη μαγνητόσφαιρα του Δία, επιχειρείται να απαντηθεί σε αυτή την εργασία.

Προκειμένου να εξηγηθεί η έντονη διαφυγή σχετικιστικών ηλεκτρονίων απο το Δία, έχει επιχειρηθεί η σύνδεση των περιοδικοτήτων που εμφανίζονται στο σήμα τους με περιοδικότητες που χαρακτηρίζουν το σύστημα της μαγνητόσφαιρας του Δία, αλλά και της αλληλεπίδρασής της με τον ηλιακό άνεμο. Οι Morioka et al., 1997; Morioka and Tsuchiya, 1996 αναφέρουν πως η ένταση των διαφυγόντων ενεργητικών ηλεκτρονίων από το Δία είναι πιο έντονη, όταν η δυναμική πίεση του ηλιακού ανέμου στην περιοχή του Δία είναι ασθενέστερη. Η αλληλεπίδραση αυτή προκαλεί μια περιοδικότητα στη διαφυγή ηλεκτρονίων, της τάξεως των 13-26 ημερών (μισή ή μία πλήρης περιστροφή του Ήλιου). Αντίστοιχα, οι Tsuchiya et al., 1999 έδειξαν ότι η ένταση των διαφυγόντων ηλεκτρονίων μεταβάλλεται ανάλογα και με την κατεύθυνση του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου (IMF), καθώς αυτό αλλάζει διεύθυνση από βόρεια σε νότια, αλλά και προς ή αντίθετα από τον Ήλιο. Η εξάρτηση της διαφυγής των ηλεκτρονίων από την πολικότητα του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου, υποδεικνύει ως πιθανό μηχανισμό διαφυγής τους την μαγνητική επανασύνδεση μεταξύ του μαγνητικού πεδίου του Δία και του μαγνητικού πεδίου του ηλιακού ανέμου στην περιοχή του πλανήτη, αν και αυτό δεν έχει επιβεβαιωθεί.

Στη βιβλιογραφία έχει επίσης αναφερθεί περιοδικότητα της τάξης των ~ 40 λεπτών (Hospodarsky



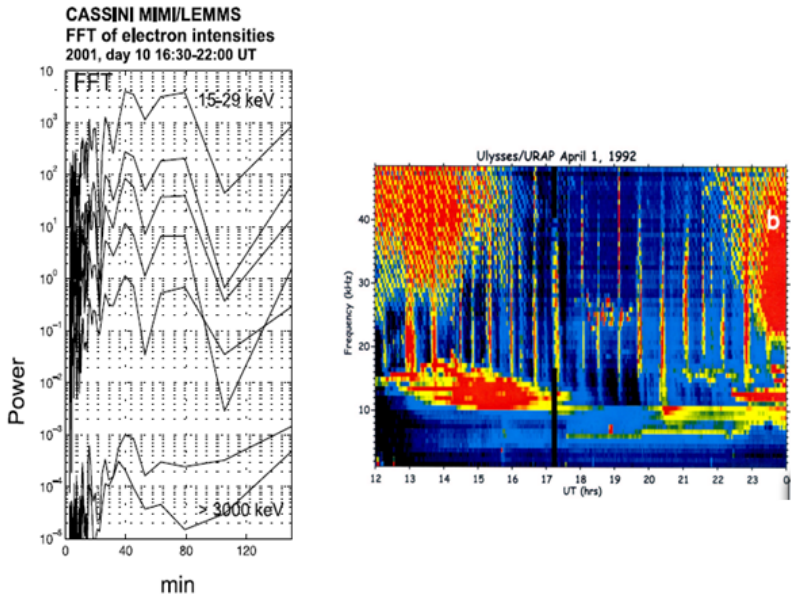
Εικόνα 10. Μετρήσεις έντονων εξάρσεων στις ροές ιόντων από το όργανο JEDI του Juno σε μεγάλες αποστάσεις από το Δία, οι οποίες σύμφωνα με τη συγκεκριμένη δημοσίευση οφείλονται σε υψηλοενεργειακά ηλεκτρόνια με ενέργειες της τάξης των MeV. (Paranicas et al., 2018)



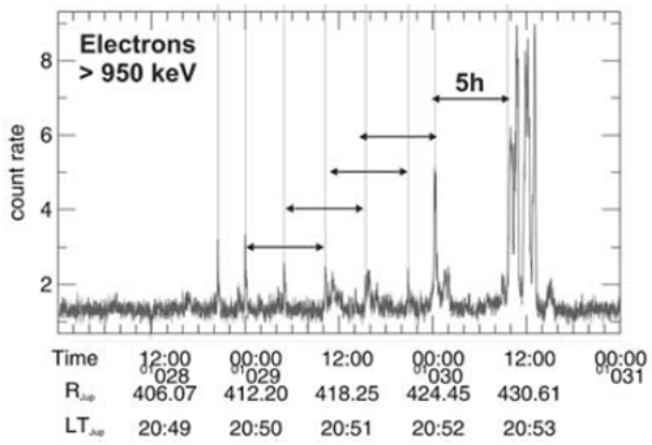
Εικόνα 11. Μετρήσεις σχετικιστικών ηλεκτρονίων (πράσινη και γαλάζια γραμμή) από το Galileo σε μεγάλες αποστάσεις στην μαγνητόσφαιρα του Δία. Φαίνεται ξεκάθαρα ότι οι ροές αυτών των ηλεκτρονίων στο ισημερινό επίπεδο ακόμα και σε αποστάσεις μεγαλύτερες των 100 R_J είναι μη μηδενικές. (Paranicas et al., 2018)

et al., 2019) (Krupp et al., 2004) (δηλαδή τα QP40 γεγονότα που συζητήθηκαν στην υποενότητα 1.2.2) που φαίνεται να είναι χαρακτηριστική του συστήματος, αφού παρατηρείται επίσης σε ταλαντώσεις πλάσματος (MacDowall et al., 1993), αλλά και στις ακτίνες X (Gladstone et al., 2002). Ακόμα μία χαρακτηριστική περιοδικότητα είναι αυτή των $\sim$ 5 ωρών και των $\sim$ 10 ωρών, που αντιστοιχούν στη μισή και στην πλήρη περιστροφή του πλανήτη, αντίστοιχα (Krupp et al., 2004) (Chenette et al., 1974).

Τέλος, μία ακόμα περιοδικότητα που έχει αναφερθεί στη βιβλιογραφία, είναι αυτή των 2-3 ημερών (Kronberg et al., 2005), χωρίς ωστόσο αυτή να έχει εντοπιστεί σε διαφυγόντα σχετικιστικά ηλεκτρόνια. Μετρήσεις από το Galileo αποδεικνύουν ότι η περιοχή της μαγνητοου-



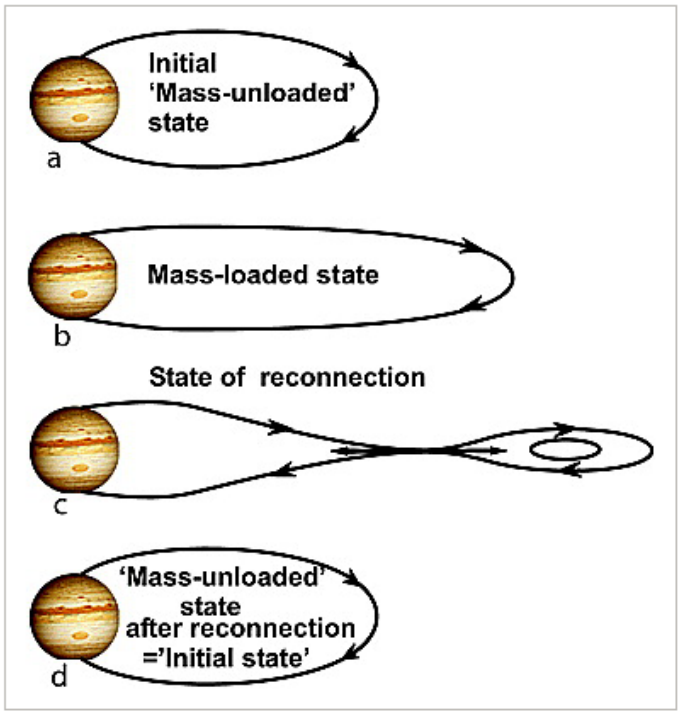
Εικόνα 12. Αριστερά: Διάγραμμα FFT για ενεργητικά ηλεκτρόνια με βάση δεδομένα από το Cassini, στο οποίο φαίνεται ότι η πιο έντονη περιοδικότητα αντιστοιχεί στα 40 min (Krupp et al., 2004). Δεξιά: Μετρήσεις από το Ulysses, στις οποίες σημειώνεται πάλι ως κυρίαρχη περιοδικότητα τα 40 λεπτά. (Kaiser et al., 2001)



Εικόνα 13. Μετρήσεις σχετικιστικών ηλεκτρονίων από το Cassini, στις οποίες σημειώνονται πολλές διακριτές κορυφές που αντιστοιχούν σε περιοδικότητες 5 ωρών και 10 ωρών. (Krupp et al., 2004)

ράς του Δία (αλλά γενικά και ένα μεγάλο μέρος της μαγνητόσφαιράς του) υπόκειται σε μία περιοδική διεργασία μερικών ημερών, η οποία με βάση κάποια μοντέλα, οφείλεται στην απελευθέρωση της μαγνητόσφαιρας από το πλάσμα που παράγει η Ιώ. Αυτή η απελευθέρωση μάζας συμβαίνει λόγω κάποιας επανασύνδεσης που λαμβάνει χώρα στη μαγνητοουρά του πλανήτη, κατά την οποία το μαγνητικό πεδίο του υφίσταται αναδιαμόρφωση, όπως συμβαίνει και στις υποκαταιγίδες που εκδηλώνονται στο γήινο διαστημικό περιβάλλον. Σε αντίθεση όμως με τη Γη, αυτή η διαδικασία δεν φαίνεται να εξαρτάται τόσο σημαντικά από την ισχύ του ηλιακού ανέμου, δηλαδή από την συσσώρευση και αποθήκευση μαγνητικής ενέργειας στη μαγνητοουρά, αλλά μάλλον από εσωτερικές μαγνητοσφαιρικές διεργασίες.

Οι Kronberg et al., 2007 έχουν προτείνει ένα μοντέλο, σύμφωνα με το οποίο μπορούμε να σκεφτούμε αυτή την διαδικασία ως το "φούσκωμα" και το "ξεφούσκωμα" της μαγνητόσφαιρας, καθώς το μαγνητοσφαιρικό σύστημα απελευθερώνει το πλάσμα που παρέχει η Ιώ. Κατά την αρχική φάση του "φουσκώματος", το σύστημα σταδιακά γεμίζει με πλάσμα και διογκώνεται, με αποτέλεσμα οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές να παραμορφώνονται και να αποκλίνουν από την αρχική διεύθυνσή τους. Σε κάποιο κρίσιμο σημείο, όπου η μαγνητόσφαιρα έχει πλέον γεμίσει με την μέγιστη μάζα που μπορεί να δεχτεί, και το μαγνητικό πεδίο έχει παραμορφωθεί ισχυρά λόγω του πολύ έντονου φυγοκεντρικού δυναμικού, οι συνθήκες είναι πλέον ευνοϊκές ώστε να συμβεί μαγνητική επανασύνδεση. Αποτέλεσμα της επανασύνδεσης είναι η δημιουργία και η εκτόξευση πλασμοειδών, παράλληλα με την επιστροφή των δυναμικών γραμμών στην αρχική τους γεωμετρία. Αυτό το μοντέλο αποτέλεσε κίνητρο ώστε να αναζητήσουμε την συγκεκριμένη περιοδικότητα των 2-3 ημερών στο σήμα των διαφυγόντων σχετικιστικών ηλεκτρονίων από τη μαγνητόσφαιρα του Δία.

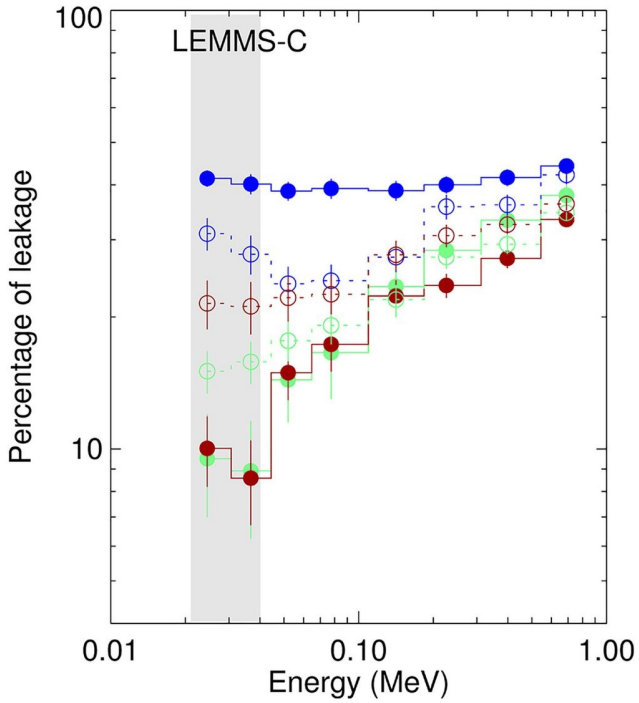


Εικόνα 14. Το μοντέλο που περιγράφει την διαδικασία του "φουσκώματος" και του "ξεφουσκώματος" της μαγνητόσφαιρας του Δία. Στην αρχική κατάσταση (a) η μαγνητόσφαιρα σταδιακά γεμίζει με πλάσμα, ενώ στην αμέσως επόμενη (b) έχει φτάσει στο μέγιστο όριο μάζας που μπορεί να δεχτεί. Ακολουθεί η μαγνητική επανασύνδεση στη μαγνητοουρά (c), κατά την οποία η μαγνητόσφαιρα απελευθερώνει όλο το πλάσμα που έχει αποθηκεύσει, και τελικά το σύστημα επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση (d). Το μαγνητοσφαιρικό σύστημα του Δία υπόκειται σε περιοδικές μεταβολές μεταξύ της πρώτης (a) και της τρίτης (c) κατάστασης. (Kronberg et al., 2007)

1.4 Μετρήσεις διαφυγόντων σχετικιστικών ηλεκτρονίων από τη μαγνητόσφαιρα του Κρόνου

Μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί στο παρελθόν έχουν δείξει ότι υπάρχει διαφυγή ενεργητικών σωματιδίων, τόσο ιόντων όσο και ηλεκτρονίων και από τη μαγνητόσφαιρα του

Κρόνου (Krimigis et al., 2009). Ωστόσο, οι θεμελιώδεις διεργασίες που οδηγούν αυτή τη διαφυγή, αλλά και η αποτελεσματικότητά τους στη διαφυγή αυτών των σωματιδίων δεν είναι πλήρως κατανοητές. Κάποιες διεργασίες σχετικές με πληθυσμούς πλάσματος που συμβαίνουν στη μαγνητόπαυση της Γης, έχουν επίσης αναγνωριστεί στη μαγνητόπαυση του Κρόνου, όπως για παράδειγμα η μαγνητική επανασύνδεση στην προσήλια πλευρά του πλανήτη (Lai et al., 2012), αλλά και περιοχές στις οποίες εκδηλώνεται η αστάθεια Kelvin-Helmholtz (Delamere et al., 2013). Η αποστολή Cassini έχει προσφέρει την ευκαιρία για πολλές στατιστικές μελέτες σχετικά με τα χαρακτηριστικά της μαγνητοθήκης, όπως για την παρουσία H_2O^+, OH^+, O^+, H_30^+) ενεργειών $\sim$ keV τόσο στη μαγνητοθήκη του Κρόνου, αλλά και στον ηλιακό άνεμο (Sergis et al., 2013). Στη δημοσίευση των Liou et al., 2021 μελετώνται πληθυσμοί ενεργητικών σωματιδίων στη μαγνητοθήκη του Κρόνου, εστιάζοντας σε ενεργητικά σωματίδια που βρίσκονται σε περιοχές γειτονικές με τη μαγνητόπαυση του πλανήτη, ώστε να κατανοηθούν οι φυσικές διαδικασίες που οδηγούν στη μετέπειτα διαφυγή τους προς τον τη μαγνητοθήκη. Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης μελέτης δείχνουν ότι οι διαφορές στις διαφορικές ροές των σωματιδίων μεταξύ της μαγνητόπαυσης και της μαγνητοθήκης, φαίνεται να εξαρτώνται από την ενέργεια των σωματιδίων, με τις διαφορές να μειώνονται με τη μείωση της ενέργειας. Δηλάδή, η πιθανότητα διαφυγής των σωματιδίων στη μαγνητοθήκη αυξάνεται με την αύξηση της ενέργειάς τους. Σύμφωνα, λοιπόν, με τα παραπάνω, αναμένουμε να ανιχνεύσουμε διαφυγόντα ηλεκτρόνια με ενέργειες της τάξης των μερικών MeV από τον Κρόνο. Ωστόσο, οι Liou et al., 2021 περιόρισαν την ανάλυση των δεδομένων τους σε ενέργειες μικρότερες του 1 MeV.



Εικόνα 15. Η αύξηση στην πιθανότητα διαφυγής ηλεκτρονίων με την αύξηση της ενέργειάς τους, για τα κανάλια C του LEMMS. Ο κάθετος άξονας είναι το ποσοστό διαφυγής και ο οριζόντιος η ενέργεια σε MeV. Το ποσοστό διαφυγής ορίζεται ως ο λόγος της ροής στη μαγνητοθήκη προς τη συνολική ροή (μαγνητοθήκης και μαγνητόσφαιρας), για την περιοχή της αυγής (μπλε), του απογεύματος (πράσινο) και της δύσης (κόκκινο). (Liou et al., 2021)

1.5 Η σημασία της μέτρησης διαφυγόντων πλανητικών ηλεκτρονίων στον ηλιακό άνεμο

Ο Ήλιος αποτελείται σχεδόν αποκλειστικά από μαγνητισμένο πλάσμα (Parker, 1958), το οποίο διαχέεται στο διαπλανητικό χώρο κατά μήκος της σπείρας του Αρχιμήδη. Η ηλιόσφαιρα είναι μια εκτεταμένη περιοχή που περιλαμβάνει ολόκληρο το ηλιακό σύστημα, μέσα στην οποία κυριαρχεί το αποτύπωμα της ηλιακής δραστηριότητας (Dialynas et al., 2017). Το εξώτατο όριο της ηλιακής μας αστρόφαιρας εκτείνεται σε αποστάσεις $\approx$ 119 A.U (Krimigis et al., 2019) (στην κατεύθυνση του Voyager 2) έως και 122 A.U (Krimigis et al., 2013) (στην κατεύθυνση του Voyager 1). Στην ηλιόσφαιρα υπάρχουν διάφορες πηγές ενεργητικών ηλεκτρονίων, που προέρχονται είτε από τον Ήλιο, είτε έξω από το ηλιακό σύστημα. Ο ηλιακός άνεμος υπάρχει ως συνέπεια της υπερηχητικής διαστολής του εξωτερικού πολύ θερμού μέρους της ατμόσφαιρας του Ήλιου, του στέμματος, και απαρτίζεται κυρίως από ηλεκτρόνια και πρωτόνια, ενώ υπάρχουν σωμάτια άλφα και άλλα ιόντα σε μικρότερο ποσοστό. Η ροή του ηλιακού ανέμου φέρει "παγωμένες" τις δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου του Ήλιου, εξαιτίας της υψηλής αγωγιμότητας του πλάσματος. Ανάμεσα στα κυριότερα χαρακτηριστικά του είναι η πυκνότητα, η ταχύτητα ροής, η ένταση και η διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου. Ως μαγνητισμένο ρευστό διαθέτει θερμική, δυναμική και μαγνητική πίεση, εκ των οποίων η ισχυρότερη είναι η δυναμική (Russell, 2001).

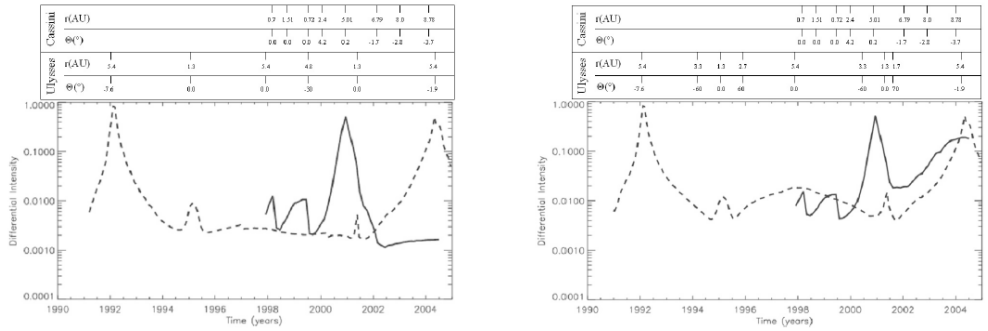
Σε τυπικές ήρεμες περιόδους, το πλάσμα του ανέμου αποτελείται από σωματίδια γενικά χαμηλών ενεργειών και χαμηλών πυκνοτήτων, με μία τυπική ταχύτητα $\sim$ 400 km/s. Ωστόσο, ο ηλιακός άνεμος είναι ιδιαίτερα ευμετάβλητος και η μεταβλητότητα αυτή αντανακλάται τόσο στο σχήμα όσο και στο μέγεθος των πλανητικών μαγνητοσφαιρών. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας των δυναμικών ηλιακών φαινομένων, τα οποία μπορούν να προκαλέσουν από μία μικρή έως και μία ραγδαία αύξηση στα φυσικά χαρακτηριστικά του ανέμου, δηλαδή στην ταχύτητα και στην πυκνότητα των σωματιδίων που τον απαρτίζουν (Russell, 2001).

Οι στεμματικές εκτινάξεις μάζας (CMEs-Coronal Mass Ejections) μεταφέρουν ύλη και μαγνητικό πεδίο από το ηλιακό στέμμα στον ηλιακό άνεμο. Χαρακτηρίζονται από υψηλές πυκνότητες και ταχύτητες, με τις πιο γρήγορες CMEs να ξεπερνούν τα 2000 km/s. Οι πιο ενεργητικές CMEs συμβαίνουν κατά κανόνα μαζί με ισχυρές εκλάμψεις. Τα σωματίδια που επιταχύνονται στα κρουστικά κύματα των CMEs μπορούν να φτάσουν πολύ υψηλές ενέργειες, έχοντας πολλές φορές-και ειδικά όταν συνοδεύονται από εκλάμψεις-σαν αποτέλεσμα την παραγωγή υψηλών ροών πολύ υψηλοενεργειακών πρωτονίων (SEPs-Solar Energetic Particles). Τα SEPs χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την εργασία ως δείκτης ηλιακής δραστηριότητας, προκειμένου να διαπιστώσσουμε αν μία μεταβολή στις ροές ηλεκτρονίων οφείλεται σε κάποιο ηλιακό εκρηκτικό φαινόμενο (Russell, 2001). Άλλη μορφή διαταραγμένου ηλιακού ανέμου αποτελούν οι συμπεριστρεφόμενες περιοχές αλληλεπίδρασης (CIRs-Corotating Interaction Regions), που αποτελούν ροές αργού και γρήγορου ανέμου προερχόμενες από τις ηλιακές στεμματικές οπές, οι οποίες επηρεάζουν τη συνεχή ροή ενεργητικών σωματιδίων στην ηλιόσφαιρα (Kissmann et al., 2004).

Εκτός από τα ενεργητικά σωματίδια που προέρχονται από τον Ήλιο και τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε αυτόν, υπάρχουν και τα πολύ υψηλής ενέργειας σωματίδια των κοσμικών ακτίνων, κυρίως πρωτόνια σε ενέργειες εκατοντάδων MeV έως και εκατοντάδων GeV. Πέραν των πρωτονίων, οι κοσμικές ακτίνες αποτελούνται και από ηλεκτρόνια και βαρέα ιόντα. Τα ηλεκτρόνια έχουν ενέργειες μεγαλύτερες του 1 MeV, που μπορούν να συγκριθούν ενεργειακά με τα υψηλοενεργειακά ηλεκτρόνια που προέρχονται από το Δία. Τόσο τα ενεργητικά σωμάτια του ηλιακού ανέμου, όσο και των κοσμικών ακτίνων, κυκλοφορούν εντός

της ηλιόσφαιρας υπό την επίδραση μηχανισμών μεταφοράς, σκέδασης και διάχυσης που είναι δύσκολο να ποσοστοποιηθούν, καθώς οι περιοχές από τις οποίες πηγάζουν ειναι αρκετά εκτεταμμένες και αρκετά πολύπλοκες. Υπό αυτή την έννοια, η σημειακή πηγή $\sim$ MeV ηλεκτρονίων του Δία είναι ιδανική για μελέτες μεταφοράς σωματιδίων στην ηλιόσφαιρα.

Για το λόγο αυτό, ένα ακόμα κίνητρο για την αναζήτηση σχετικιστικών ηλεκτρονίων από τον Κρόνο είναι να κατανοηθεί το αν αυτά επιμολύνουν το σήμα ηλεκτρονίων από το Δία. Αν αυτό όντως συμβαίνει, τότε πολλές μελέτες που βασίζονται στην παραδοχή πως ο Δίας είναι η μόνη σημαντική πλανητική πηγή MeV ηλεκτρονίων στην ηλιόσφαιρα, θα έχουν πραγματοποιηθεί σε λάθος βάση. Στη δημοσίευση των Lange and Fichtner, 2008 παρουσιάζεται μία προσομοίωση σχετικά με την κατανομή υψηλοενεργειακών (1 MeV) ηλεκτρονίων στην ηλιόσφαιρα, κατά μήκος της τροχιάς του Cassini και του Ulysses. Το συγκεκριμένο μοντέλο υποθέτει-για το πιο ακραίο σενάριο-ότι η ισχύς της πηγής των ηλεκτρονίων στον Κρόνο είναι 1.5 φορές ισχυρότερη από αυτήν στο Δία. Η σύγκριση γίνεται μεταξύ της προσομοίωσης που λαμβάνει υπόψη ως πηγές ηλεκτρονίων μόνο το Δία και τις κοσμικές ακτίνες, και αυτής που λαμβάνει επιπλέον υπόψη της ως πηγή τον Κρόνο. Το συμπέρασμα στο οποίο καταλήγουν οι συγγραφείς είναι ότι τα ηλεκτρόνια που προέρχονται από τον Κρόνο δεν μπορούν να θεωρηθούν αμελητέα για την ερμηνεία σχετικών μετρήσεων στην ηλιόσφαιρα.



Εικόνα 16. Πάνω: Η ηλιοκεντρική απόσταση για τις τροχιές του Ulysses και του Cassini. Κάτω: Προσομοίωση της διαφορικής ροής ηλεκτρονίων με ένεργεια 1 MeV κατά μήκος της τροχιάς του Cassini (μαύρη γραμμή) και του Ulysses (διακεκομμένη γραμμή). Η προσομοίωση στα αριστερά λαμβάνει υπόψη της ως πηγές μόνο το Δία και τις κοσμικές ακτίνες, ενώ η δεξιά λαμβάνει υπόψη της επιπλέον και τον Κρόνο. Καταρχήν, παρατηρείται ότι η περίοδος μεταξύ των δύο fly-bys του Ulysses (1992 και 2004), εμφανίζει σαφώς υψηλότερες ροές στο δεξιό διάγραμμα. Η σημαντικότερη διαφορά όμως είναι η αύξηση στην ένταση των ροών ηλεκτρονίων καθώς το Cassini πλησιάζει στον Κρόνο, μετά το fly-by του από το Δία το 2001. (Lange & Fichtner, 2008)

1.6 Τοποθέτηση του προβλήματος - Ερωτήματα προς απάντηση

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι να εντοπίσει το ενδεχόμενο σήμα διαφυγόντων σχετικιστικών ηλεκτρονίων από τη μαγνητόσφαιρα του Κρόνου, αλλά και να συγκρίνει αυτό το αποτέλεσμα με τα σχετικιστικά ηλεκτρόνια που έχουν διαπιστωθεί ότι διαφεύγουν από τη μαγνητόσφαιρα του Δία, έτσι ώστε να εξαχθεί κάποιο συμπέρασμα για τους μηχανισμούς παραγωγής και διαφυγής τους. Πιο συγκεκριμένα, καλείται να απαντήσει στα εξής ερωτήματα:

1) Υπάρχουν φαινόμενα διαφυγής σχετικιστικών ηλεκτρονίων από τη μαγνητόσφαιρα του Κρόνου, σε αντιστοιχία με τα ανάλογα φαινόμενα από το Δία;

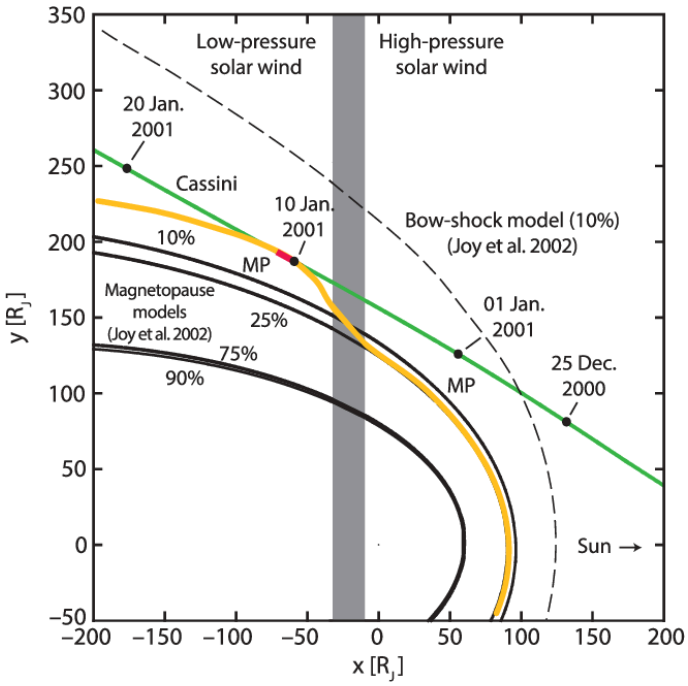
2) Ποιοι είναι οι μηχανισμοί που ευθύνονται για την διαφυγή σχετικιστικών ηλεκτρονίων από τη μαγνητόσφαιρα του Δία, αλλά και από του Κρόνου, εφόσον αυτά υπάρχουν;

3) Ποιες είναι οι ομοιότητες και ποιες οι διαφορές στις μετρήσεις για τα δύο μαγνητοσφαιρικά συστήματα; Μπορούν οι μετρήσεις στον Κρόνο να μας βοηθήσουν στην κατανόηση των μηχανισμών που λαμβάνουν χώρα στο Δία;

2 Πηγές μετρήσεων και μεθοδολογία

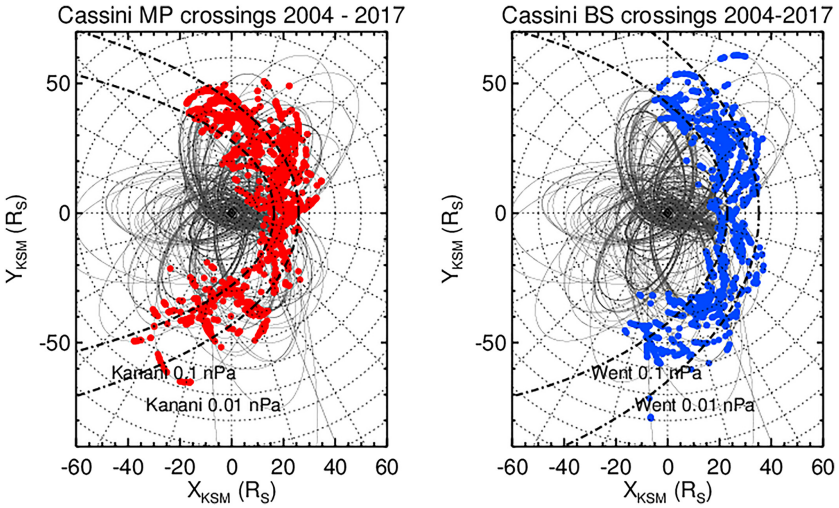
2.1 Μετρήσεις ενεργητικών φορτισμένων σωματιδίων από τη διαστημική αποστολή Cassini/Huygens

Η διαστημική αποστολή Cassini/Huygens εκτοξεύθηκε στις 15/10/1997 και έφτασε στον Κρόνο στις 1/7/2004, όπου και παρέμεινε σε τροχιά για περισσότερα από 13 χρόνια, συμπληρώνοντας ένα ευρύ φάσμα επιστημονικών επιτευγμάτων (Cassini Teams Report, 2019). Πριν φτάσει στον Κρόνο, πραγματοποίησε ένα σύντομο πέρασμα (fly-by) από το Δία στα τέλη του έτους 2000, ενώ μαγνητοσφαιρικές μετρήσεις που υποδείκνυαν την επίδραση του Δία διήρκησαν για αρκετούς μήνες εντός του 2001. Κατά το fly-by αυτό, το Cassini εισήλθε για λίγες ώρες μέσα στη μαγνητόσφαιρα του Δία, ενώ παρέμεινε εντός της μαγνητοθήκης - στο μέρος της που βρίσκεται στην απογευματινή προς νυχτερινή πλευρά - για το μεγαλύτερο διάστημα της τροχιάς του. Κατά την παραμονή του στον Κρόνο, το Cassini πραγματοποίησε συνολικά 294 τροχιές. Η τροχιά του Cassini διαμορφώθηκε με τέτοιο τρόπο, ώστε δόθηκε η ευκαιρία για πολλές διαβάσεις (crossings) του διαστημοπλοίου τόσο από τη μαγνητόπαυση, όσο και από το κρουστικό κύμα της μαγνητόσφαιρας του πλανήτη. Οι διαβάσεις αυτές, εκτός της μαγνητόσφαιρας του Δία αλλά και του Κρόνου, είναι καθοριστικές για την παρατήρηση και ανάλυση ηλεκτρονίων που διαφεύγουν από το κάθε μαγνητοσφαιρικό σύστημα.



Εικόνα 17. Το fly-by του Cassini από το Δία. Με κόκκινο χρώμα σημειώνεται η διεύλευση του σκάφους από τη μαγνητόπαυση, η οποία απεικονίζεται προσεγγιστικά με κίτρινο χρώμα. Η τροχιά του σκάφους παριστάνεται με την πράσινη γραμμή. (Allen et al., 2019)

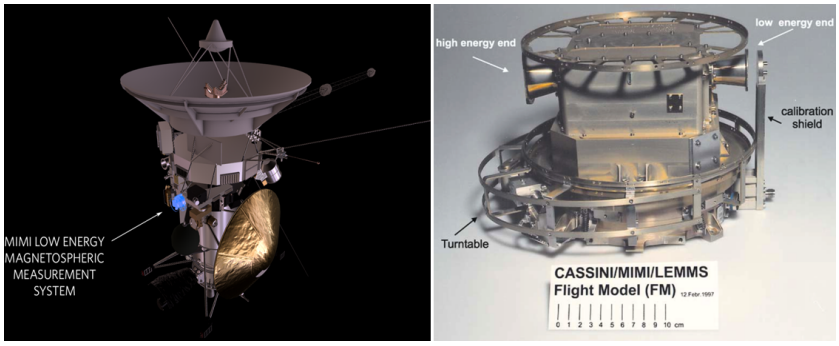
Ανάμεσα στα όργανα μετρήσεων της αποστολής βρισκόταν και το όργανο Low Energy Magnetospheric Measurement System (LEMMS), το οποίο αποτελούσε μία από τις τρεις επιμέρους διατάξεις του πειράματος Magnetosphere Imaging Instrument (MIMI-Krimigis et al., 2004), και του οποίου οι μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν κατα κύριο λόγο στην παρούσα εργασία. Τα ενεργητικά σωματίδια που μετρούσε το LEMMS διαχωρίζονταν με βάση το φορτίο (ιόντα/ηλεκτρόνια),



Εικόνα 18. Οι τροχιές στο πλανητικό σύστημα του Κρόνου από το Cassini. Με κόκκινο χρώμα σημειώνονται οι διαβάσεις του σκάφους από τη μαγνητόπαυση, ενώ με μπλε από το κρουστικό κύμα. Οι μαύρες εστιγμένες γραμμές αναπαριστούν τη μαγνητόπαυση σύμφωνα με το μοντέλο των Kanani et al., 2010 (αριστερά) και το κρουστικό κύμα σύμφωνα με το μοντέλο των Went et al., 2011 (δεξιά). (Jackman et al., 2019)

την ενέργεια και τη διεύθυνση υπό την οποία εισέρχονταν στον ανιχνευτή.

Το LEMMS αποτελούνταν από δύο αντιδιαμετρικά τηλεσκόπια, το LET (Low Energy Telescope) που μετρούσε ηλεκτρόνια με ενέργειες κυρίως σε ένα εύρος ενεργειών 18 keV-874 keV και ιόντα με ενέργειες $>$30 keV, των οποίων το σήμα στο περιβάλλον του Κρόνου κυριαρχείται από πρωτόνια. Το δεύτερο τηλεσκόπιο του LEMMS, το HET (High Energy Telescope), μετρούσε ηλεκτρόνια με ενέργειες 0.1-20 MeV και ιόντα (κυρίως πρωτόνια) με ενέργειες $>$1.5 MeV εώς και μερικές εκατοντάδες MeV. Τα γωνιακά ανοίγματα των δύο τηλεσκοπίων ήταν 15° και 30° για το LET και το HET, αντίστοιχα. Το μεγαλύτερο γωνιακό άνοιγμα του HET επιλέχθηκε ώστε να μπορεί να λαμβάνει ισχυρό σήμα από τα ιόντα και ηλεκτρόνια πολύ χαμηλότερης ροής σε σχέση με τις ροές σωματιδίων σε ενέργειες δεκάδων keV. Όλη η διάταξη του LEMMS ήταν τοποθετημένη πάνω σε μία περιστρεφόμενη βάση (turntable) με περίοδο περιστροφής ίση με 86 s, η οποία παρέμεινε λειτουργική μέχρι και την ημέρα 32 του 2005, όπου και εκδηλώθηκε μία βλάβη με αποτέλεσμα η περιστροφή της βάσης να σταματήσει.



Εικόνα 19. Αριστερά: Η τοποθεσία του οργάνου LEMMS πάνω στο Cassini. (Πηγή: NASA) Δεξιά: Τα δύο τηλεσκόπια του LEMMS πάνω στη βάση περιστροφής (turntable). ("MIMI User Guide", 2018)

Ο τρόπος μέτρησης της ενέργειας των σωματιδίων από το LEMMS, βασίζεται στο ποσό της

ενέργειας που χάνεται, καθώς τα σωματίδια προσπίτουν στους συνολικά 11 ανιχνευτές στερεάς κατάστασης (SSDs) που βρίσκονται σε διάφορες θέσεις στο εσωτερικό της διάταξης (Krupp et al., 2004). Στο LET, τα ηλεκτρόνια και τα ιόντα διαχωρίζονται από ένα εσωτερικό μαγνητικό πεδίο λόγω του φορτίου τους, και τα ηλεκτρόνια-λόγω της μικρής τους μάζας-προσπίπτουν τελικά σε διαφορετικούς ανιχνευτές απ΄ότι τα ιόντα, που έχουν αρκετά μεγάλη μάζα και ταχύτητα ώστε να μην καμπυλώνεται σημαντικά η τροχιά τους από το μαγνητικό πεδίο. Στο HET υπάρχει μία συστοιχία από ανιχνευτές στερεάς κατάστασης, όπου τα ιόντα και τα ηλεκτρόνια αναγνωρίζονται και καταγράφονται με βάση λογικές συνθήκες στις απώλειες ενέργειας σε διαφορετικούς συνδυασμούς των ανιχνευτών.

Το LEMMS κατηγοριοποιεί τις μετρήσεις ανάλογα με το χρόνο καταγραφής τους, το φορτίο (ηλεκτρόνια ή ιόντα) και την ενέργειά τους. Η κατηγοριοποίηση αυτή γίνεται στα λεγόμενα "κανάλια". Η καταγραφή σε ένα οποιοδήποτε κανάλι προϋποθέτει την ικανοποίηση κάποιων συνθηκών (π.χ. απώλειες ενέργειας εντός ορισμένου εύρους σε συγκεκτριμένους μετρητές SSDs). Κάθε κανάλι χαρακτηρίζεται από ένα ενεργειακό εύρος στο οποίο έχει απόκριση, τον τύπο ή τους τύπους σωματιδιών που σχεδιάστηκε να καταγράφει, καθώς και τη χρονική του ανάλυση.

Το LEMMS έχει τρεις διαφορετικούς τύπους καναλιών. Σε αυτή τη μελέτη, χρησιμοποιήσαμε μετρήσεις από τα αποκαλούμενα rate channels του LEMMS. Τα κανάλια αυτά μετράνε με μια μέγιστη χρονική ανάλυση των 5.375 s και έχουν μία μέτρια ενεργειακή διακριτική ικανότητα, η οποία αρκεί πάντως για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης. Οι συνθήκες που τα κανάλια αυτά απαιτούν για το διαχωρισμό του τύπου σωματιδίων και της ενέργειάς τους βασίζεται σε μετρήσεις σε τουλάχιστον δύο SSDs, και έτσι η αναγνώριση των χαρακτηριστικών τους είναι αρκετά αξιόπιστη.

Τα ηλεκτρόνια, που είναι περισσότερο σχετικά για την παρούσα εργασία, καταγράφονται μέσω των καναλιών C_0-C_7 και του καναλιού BE στο LET και μέσω των καναλιών E_0-E_7 στο HET. Οι μετρήσεις για το κάθε κανάλι λαμβάνονται σε μονάδες counts/s (αριθμός σωματιδίων ανά δευτερόλεπτο). Οι μετρήσεις αυτές μπορούν να μετατραπούν σε φυσικές μονάδες διαφορικής ροής $[cm^{-2}\ sr^{-1}\ s^{-1}\ keV^{-1}]$, διαιρώντας το ρυθμό μέτρησης με το ενεργειακό εύρος του κάθε καναλιού και τον λεγόμενο γεωμετρικό του παράγοντα (geometric factor), που αντιπροσωπεύει το πόσο ευαίσθητο είναι το κάθε καναλι στο να καταγράφει σωμάτια στο αντίστοιχο ενεργειακό εύρος. Στην Εικόνα 20 δίνεται η λίστα με τα κανάλια του LEMMS που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτήν την εργασία.

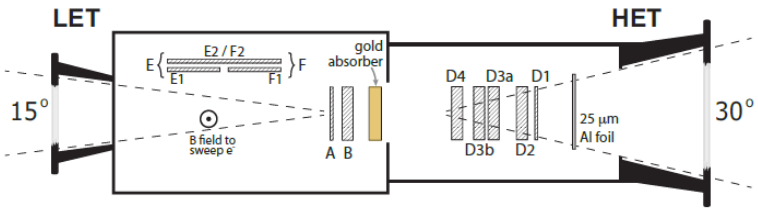
2.2 Επιπρόσθετες πηγές και εργαλεία ανάλυσης δεδομένων

Εκτός από το όργανο LEMMS που αποτελεί την κύρια πηγή δεδομένων μας για αυτή την εργασία, χρησιμοποιήθηκαν επιπλέον και κάποιες άλλες πηγές δεδομένων. Μία από αυτές ήταν το μαγνητόμετρο (MAG) του Cassini. Οι μετρήσεις του μαγνητόμετρου δίνουν το διάνυσμα του μαγνητικού πεδίου. Το διάνυσμα αυτό μπορεί να υπολογιστεί σε διάφορα συστήματα αναφοράς, αλλά στην παρούσα διπλωματική δίνεται στο ηλιοσφαρικό σύστημα συντεταγμένων RTN, όπου R (Radial) είναι η ακτινική συνιστώσα πάνω στην ευθεία Ήλιου-Διαστημοπλοίου, T (Tangential) είναι η εφαπτομενική συνιστώσα που είναι κάθετη στο R και παράλληλη στο ηλιακό ισημερινό επίπεδο και N (Normal) είναι η συνιστώσα που συμπληρώνει το τρισορθογώνιο σύστημα σύμφωνα με τον κανόνα του δεξιού χεριού.

Για τους σκοπούς της μελέτης μας, χρησιμοποιήσαμε επίσης την εκτενή λίστα με τις διαβάσεις από τη μαγνητόπαυση και το κρουστικό κύμα του Κρόνου, η οποία υπάρχει στη δημοσίευση των Jackman et al., 2019 ώστε να γίνει κατανοητό πότε το Cassini ήταν εκτός

Sensor head	Channel	Species	Energy (keV)	Channel	Species	Energy (keV)
LE	A0	Ions	27–35	C0	Electrons	18–40
LE	A1	Ions	35–56	C1	Electrons	27–48
LE	A2	Ions	56–106	C2	Electrons	41–60
LE	A3	Ions	106–255	C3	Electrons	56–100
LE	A4	Ions	255–506	C4	Electrons	92–183
LE	A5	Ions	506–805	C5	Electrons	175–300
LE	A6	Ions	805–1600	C6	Electrons	265–550
LE	A7	Ions	1615–4000	C7	Electrons	510–832
LE	A8	Ions	3328–4080			
HE	P1	Ions	1424–2278	E0	Electrons	110–365
HE	P2	Ions	2280–4492	E1	Electrons	220–485
HE	P3	Ions	4491–5744	E2	Electrons	340–1350
HE	P4	Ions	13 200–25 400	E3	Electrons	600–4950
HE	P5	Ions	8311–11 449	E4	Electrons	790–4750
HE	P6	Ions	11 474–13 433	E5	Electrons	800–2800
HE	P7	Ions	12 101–58 902	E6	Electrons	1600–21 000
HE	P8	Ions	25 185–59 000	E7	Electrons	7000–200 00

Εικόνα 20. Η λίστα των 33 πιο βασικών rate καναλιών του LEMMS (από τα συνολικά 56) που χρησιμοποιούνται συχνά σε δημοσιεύσεις με δεδομένα του οργάνου. Στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκαν κυρίως τα κανάλια E και C. Δίνονται, το τηλεσκόπιο στο οποίο ανήκει το κάθε κανάλι (LE(T)/HE(T)), η ονομασία του, το είδος σωματιδίων που μετράει (ions/electrons) και το ενεργειακό εύρος του. ("MIMI User Guide", 2018)



Εικόνα 21. Διάγραμμα που αναπαριστά γραφικά το όργανο LEMMS, με τα δύο αντιδιαμετρικά τηλεσκόπια LET και HET, και τους ανιχνευτές στερεάς κατάστασης (SSDs) που είναι τοποθετημένοι στο καθένα. Στο LET υπάρχει ένα μαγνητικό πεδίο το οποίο εκτοπίζει τα εισερχόμενα ηλεκτρόνια στους ανιχνευτές E και F, ενώ τα ιόντα συνεχίζουν την κίνησή τους χωρίς να επηρεάζονται σημαντικά από αυτό, και τελικά προσπίπτουν στους ανιχνευτές A και B. Βέβαια, ηλεκτρόνια με ενέργειες >884 keV μπορούν επίσης να φτάσουν στους ανιχνευτές A και B και να προσμετρηθούν ως ιόντα. Στο πίσω μέρος του LET υπάρχει ένας απορροφητής χρυσού, έτσι ώστε τα ενεργητικά σωματίδια που διαπερνούν τον ανιχνευτή B να μην συνεχίζουν στο HET. Μπροστά από τον πρώτο ανιχνευτή (D1) του HET έχει τοποθετηθεί ένα φύλλο αλουμινίου ώστε να μειωθεί η εισερχόμενη ροή φωτός και χαμηλοενεργειακών ιόντων. ("MIMI User Guide", 2018)

της μαγνητόπαυσης. Για το Δία, οι διαβάσεις αυτές υπάρχουν εν μέρει στη δημοσίευση των Achilleos et al., 2004 και είναι βασισμένες σε μετρήσεις μαγνητικού πεδίου. Επιπλέον, χρησιμοποιήσαμε και κάποιες αδημοσίευτες λίστες, με περάσματα βασισμένα και σε μετρήσεις

άλλων μαγνητοσφαιρικών οργάνων του Cassini, οι οποίες παρασχέθηκαν για τις ανάγκες αυτής της μελέτης από τον επιβλέποντα αυτής της διπλωματικής και μέλος της επιστημονικης ομάδας του Cassini/MIMI.

Τέλος, για την αναγνώριση των διαπλανητικών ηλιακών φαινομένων (CMEs, SEPs) αλλά και της διαμόρφωσης της ροής των κοσμικών ακτίνων (GCRs) στην περιοχή του Κρόνου, χρησιμοποιήσαμε τις αναλυτικές λίστες που υπάρχουν ή χρησιμοποιήθηκαν στις δημοσιεύσεις των Roussos, Jackman, et al., 2018, Roussos, Krupp, Paranicas, Kollmann, et al., 2018 και Roussos et al., 2020, οι οποίες διαμορφώθηκαν με βάση μετρήσεις ενεργητικών σωματιδίων. Για το Δία, χρησιμοποιήθηκαν οι αναφορές που γίνονται στη δημοσίευση των Krupp et al., 2004. Η αναγνώριση ηλιακών ενεργητικών φαινομένων ήταν απαραίτητη για το διαχωρισμό ηλεκτρονίων μαγνητοσφαιρικής και ηλιακής προέλευσης.

Τα δεδομένα του LEMMS και του μαγνητικού πεδίου αναλύθηκαν μεσώ scripts που διαμορφώθηκαν στη γλώσσα Interactive Data Language (IDL), αλλά και μέσω διαθέσιμων εργαλείων από την ομάδα του MIMI, όπως π.χ. η εφαρμογή MIDL (http://cassini-mimi.jhuapl.edu/MIDL/). Σημαντικό ειναι επίσης πως για την αποδοτικότερη και πολυεπίπεδη επισκόπηση των δεδομένων, ήταν διαθέσιμές τυποποιημένες γραφικές παραστάσεις (π.χ. ανά ημέρα, εβδομάδα ή μήνα) με δεδομένα του LEMMS αλλά και του μαγνητικού πεδίου (π.χ. σε πολλαπλά συστήματα συντεταγμένων, καταλληλότερα για την κατανόηση της συμπεριφοράς του πεδίου στη μαγνητόσφαιρα του Κρόνου). Οι τυποποιημένες αυτές γραφικές είναι διαθέσιμες μέσω της ιστοσελίδας της ομάδας MIMI (https://cassini-mimi.jhuapl.edu/).

2.3 Βασική επεξεργασία και επισκόπηση των μετρήσεων του LEMMS

Η κύρια μέθοδος που ακολουθήθηκε για την αξιολόγηση των δεδομένων είναι η οπτική επισκόπηση χρονοσειρών. Επικεντρωθήκαμε κυρίως στην επισκόπηση μετρήσεων από τα κανάλια C_5-C_7 και E_0-E_7 που καταγράφουν τις υψηλότερες ενέργειες των ηλεκτρονίων ($>$100 keV). Είναι επίσης σημαντικό πως τα κανάλια E έχουν αρκετά μεγαλύτερη ευαισθησία (δηλαδή γεωμετρικό παράγοντα) σε υψηλοενεργειακά ηλεκτρόνια και είναι συνεπώς καταλληλότερα για τον εντοπισμό ισχνού σήματος διαφυγόντων ενεργητικών ηλεκτρονίων από τον Κρονο ($>$100 keV), που πιθανώς να έχουν αρκετά χαμηλή ροή.

Για την αναζήτηση διαφυγόντων ηλεκτρονίων από το Δία εξετάστηκαν δεδομένα από όλο το fly-by του Cassini από τον πλανήτη, στο χρονικό διάστημα από την ημέρα 340 του 2000, έως και την ημέρα 65 του 2001 (340/2000-65/2001). Τυπικά, το κοντινότερο πέρασμα από το Δία πραγματοποιήθηκε στις 1/1/2001. Το μεγαλύτερο χρονικό εύρος που επιλέχθηκε για ανάλυση οφείλεται στο ότι ενεργητικά ηλεκτρόνια έχουν παρατηρηθεί σε αρκετά μεγάλες αποστάσεις από τον πλανήτη. Επίσης, οι μετρήσεις αρκετά μακριά από το Δία προσφέρονται και για την κατανόηση του υποβάθρου των μετρήσεων του LEMMS, δηλαδή στο κατά πόσο μια ασθενής, μη μηδενική μετρήσιμη ροή σε κανάλια ηλεκτρονίων οφείλεται σε φυσικές ή εγγενείς πηγές θορύβου στο όργανο, ή σε πραγματικό σήμα ηλεκτρονίων.

Για τον Κρόνο, εξετάστηκαν δεδομένα στο χρονικό διάστημα από την ημέρα 179 του 2004, δηλαδή λίγες μέρες πριν την είσοδο του Cassini σε τροχιά γύρω από τον Κρόνο, έως και την ημέρα 242 του 2016, τη μέρα δηλαδή που καταγράφηκε η τελευταία έξοδος του διαστημοπλοίου εκτός της μαγνητόπαυσης. Εφόσον αναζητούμε σήμα διαφυγόντων ηλεκτρονίων, εξετάσαμε τις περιόδους όπου το διαστημόπλοιο βρισκόταν είτε στον ηλιακό άνεμο, είτε στη μαγνητοθήκη.

Για την αποδοτικότερη επισκόπηση και διερεύνηση των δεδομένων, απαραίτητη ήταν και μία σειρά από διαδικασίες επεξεργασίας των ακατέργαστων (raw) δεδομένων του LEMMS. Πρώτο βήμα προς αυτή την κατεύθυνση είναι το time averaging των μετρήσεων των καναλιών του LEMMS, ώστε να μειωθούν κατά το δυνατό οι τυχαίες διακυμάνσεις που μπορεί να κυριαρχούν του σήματος διαφυγόντων ηλεκτρονίων, ειδικά αν αυτό είναι στα όρια του θορύβου και της ευαισθησίας του οργάνου. Το βήμα αυτό αποδείχθηκε απαραίτητο για τις μετρήσεις του Cassini στον Κρόνο, όπου οι ροές των διαφυγόντων ηλεκτρονίων στα >100 keV ήταν αρκετά χαμηλές. Στις περισσότερες περιπτώσεις η διάρκεια του time averaging επιλέχτηκε να είναι ίση με την περιστροφή του LEMMS όταν το όργανο περιστρεφόταν (86 sec). Κατά περίπτωση, στις υπόλοιπες περιόδους εξετάστηκαν και μεγαλύτερες ή μικρότερες τιμές time averaging, ανάλογα π.χ. με τη διάρκεια και την ένταση του υποψήφιου σήματος προς αναγνώριση.

Το αμέσως επόμενο βήμα είναι η αφαίρεση του συστηματικού θορύβου που προκαλείται από τις κοσμικές ακτίνες, αλλά και από τα RTGs (τα οποία αποτελούν την πηγή ενέργειας για το διαστημόπλοιο) μέσω των ακτίνων-γ και των νετρονίων που εκπέμπουν. Σωματίδια υψηλών ενεργειών μπορούν και διαπερνούν τα τοιχώματα του οργάνου με μη κανονικό τρόπο (δηλαδή όχι μέσω των ανοιγμάτων των τηλεσκοπίων), προσπίπτοντας στο όργανο από όλες τις διευθύνσεις. Με αυτόν τον τρόπο, προκαλούν ένα χαμηλό θόρυβο, της τάξης 0.1-3 counts/s, ανάλογα με το ενεργειακό κανάλι ηλεκτρονίων που εξετάζουμε. Η αφαίρεση αυτού του μόνιμου θορύβου είναι ιδιαίτερα σημαντική για σήματα ασθενούς εντάσεως.

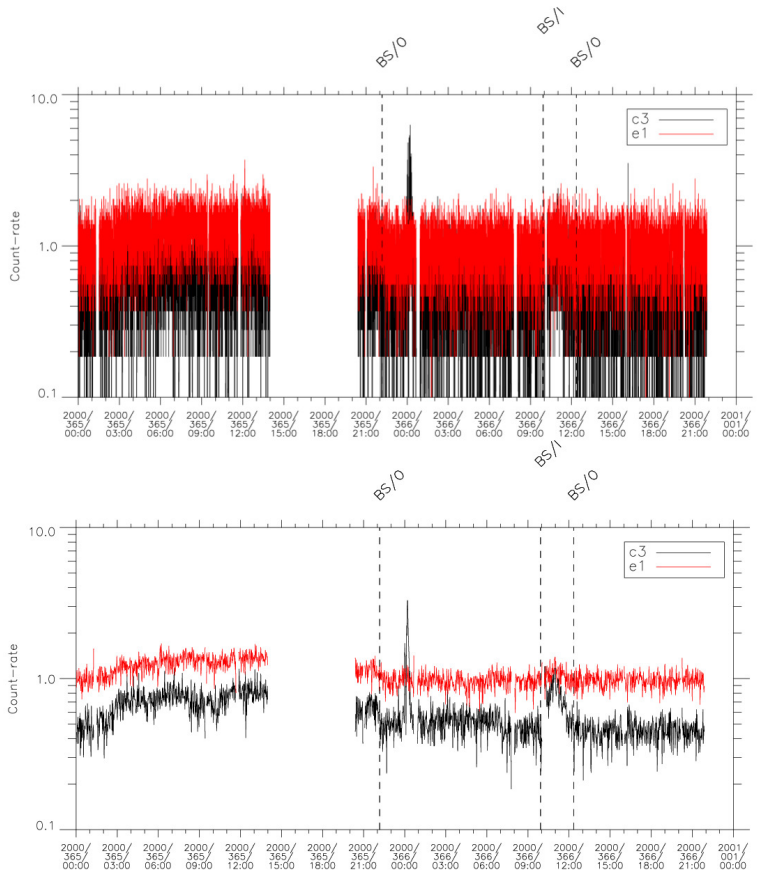
Αντίθετα με τη μεθοδολογία των Liou et al., 2021, που εισήγαγαν σε αυτόματο αλγόριθμο τις χρονικές περιόδους διάβασης του Cassini από τη μαγνητόπαυση του Κρόνου όπως αυτές παρουσιάζονται στη μελέτη των Jackman et al., 2019, για την παρούσα μελέτη επιλέχθηκε η παραγωγή και οπτική επισκόπηση γραφικών παραστάσεων με τις μετρήσεις του LEMMS για κάθε μία απο τις διαβάσεις τόσο από τη μαγνητόπαυση όσο και από το κρουστικό κύμα των Δία και Κρόνου, καθώς όπως θα γίνει κατανοητό και στις επόμενες Ενότητες, πολλές διαβάσεις από τη μαγνητόπαυση ίσως και να μην έχουν καταγραφεί στη λίστα των Jackman et al., 2019. Επίσης, ακόμα και μια μικρή αστοχία ενός λεπτού σε κάποια χρονική στιγμή διάβασης της μαγνητόπαυσης, μπορεί να οδηγήσει σε εξαγωγή σημαντικών σφαλμάτων ως προς τη ροή των ηλεκτρονίων που διαφεύγουν από αυτή.

2.4 Ανάλυση περιοδικοτήτων των χρονοσειρών του LEMMS

Ένας από τους στόχους της μελέτης μας ήταν ο εντοπισμός χαρακτηριστικών περιοδικοτήτων σε διαφυγόντα σχετικιστικά ηλεκτρόνια από τις μαγνητόσφαιρες των Δία και Κρόνου και η κατά το δυνατόν συσχέτιση του μηχανισμού διαφυγής με μαγνητοσφαιρικά φαινόμενα που εξελίσσονται σε χρονικές κλίμακες με τις εντοπισμένες περιοδικότητες.

Για το σκοπό αυτό στις χρονοσειρές του LEMMS εφαρμόστηκε η ανάλυση Wavelet. Η ανάλυση Wavelet, όπως και ο μετασχηματισμός Fourier, χρησιμοποιείται ώστε να εξαχθούν οι επιμέρους συχνότητες μιας χρονοσειράς, αλλά επιπλέον προσφέρει και πληροφορία για τον χωρικό και τον χρονικό εντοπισμό της κάθε συχνότητας (Torrence & Compo, 1998). Ωστόσο, η μέθοδος Wavelet έχει και κάποιους περιορισμούς.

Ο πρώτος περιορισμός αφορά την αδυναμία της ανάλυσης Wavelet να εφαρμοστεί σε μία χρονοσειρά που παρουσιάζει κενά στα δεδομένα. Όπως θα δούμε στην επόμενη Ενότητα, σε αυτήν την περίπτωση η ανάλυση περιοδικοτήτων δίνει ένα ψευδές ή παραπλανητικό σήμα



Εικόνα 22. Μετρήσεις ηλεκτρονίων από το όργανο LEMMS, για τα κανάλια C_3 (56-100 keV) και E_1 (220-485 keV). Ο κάθετος άξονας είναι counts/s και ο οριζόντιος χρόνος σε μορφή ημερολογιακής ημέρας. Στο πάνω διάγραμμα παρουσιάζονται τα raw δεδομένα, χωρίς να έχει γίνει time averaging. Στο κάτω διάγραμμα έχει γίνει time averaging ίσο με 86 s. Είναι εμφανές για ποιο λόγο αυτό το βήμα είναι απαραίτητο, αφού στο πάνω διάγραμμα οι μεταβολές δεν είναι ευκρινείς (Οι ενδείξεις BS/I και BS/O σηματοδοτούν διέλευση από το κρουστικό κύμα προς τα μέσα και προς τα έξω, αντίστοιχα).

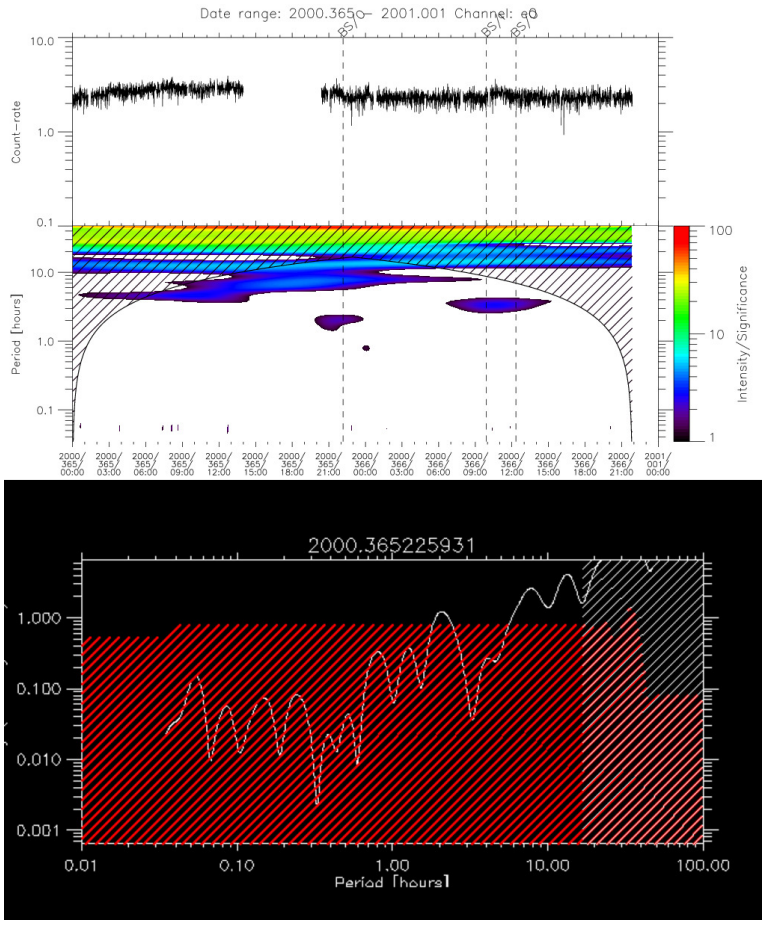
με υψηλές εντάσεις στο αντίστοιχο φάσμα (power spectrum) για ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Προκειμένου να αρθεί αυτός ο περιορισμός, αλλά και για να διασφαλίσουμε επιπλέον ακρίβεια στα αποτελέσματά μας, χρησιμοποιούμε την ανάλυση Lomb-Scargle συνδυαστικά με την ανάλυση Wavelet.

Η ανάλυση Lomb-Scargle είναι πολύ χρήσιμη για την ανίχνευση περιοδικοτήτων σε δεδομένα χρονοσειρών που δεν χαρακτηρίζονται από συνεχή δειγματοληψία (VanderPlas, 2018), δηλαδή σε δεδομένα που εμφανίζουν ασυνέχειες όχι μόνο στη διαθεσιμότητα των μετρήσεων αλλά και στη χρονική τους ανάλυση. Επίσης, προσφέρει έναν επιπλέον έλεγχο στα αποτελέσματα της ανάλυσης Wavelet σχετικά με τις περιοδικότητες που προκύπτουν.

Κάθε μέθοδος εντοπισμού περιοδικοτήτων σε χρονοσειρές έχει φυσικούς περιορισμούς που προκύπτουν από το γεγονός πως οι χρονοσειρές αφορούν μετρήσεις με πεπερασμένη διάρκεια αλλά και ρυθμό δειγματοληψίας. Στην περίπτωσή μας, για παράδειγμα, μία χρονοσειρά περιορίζεται από το χρόνο παραμονής του Cassini εκτός της μαγνητόπαυσης του Κρόνου, αλλά και από το μέγεθος του time averaging που κάνουμε στα δεδομένα. Οι εξαγόμενες περιοδικότητες δε μπορεί να είναι μεγαλύτερες της μισής διάρκειας της χρονοσειράς (εξαιτίας των λεγόμενων edge effects) ή μικρότερες του διπλάσιου χρόνου δειγματοληψίας (ή του διαστήματος time averaging) (Nyquist frequency). Κάθε φασματογράφημα Wavelet, συνεπώς,

περιέχει μαθηματικά αξιόπιστα αποτελέσματα εκτός του λεγόμενου Cone of Influence (COI) (Torrence & Compo, 1998), η εκτίμηση του οποίου είναι δυνατή μέσω του σχετικού προγράμματος που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη μελέτη (https://paos.colorado.edu/research/wavelets/wave_idl/wavelet.pro). Οποιαδήποτε περιοχή εντός του COI θα είναι γραμμοσκιασμένη αναλόγως.

Για να γίνει κατανοητή η μέθοδος που ακολουθήσαμε σχετικά με την εξαγωγή περιοδικοτήτων από το σήμα ηλεκτρονίων με συνδυαστική χρήση της Wavelet και της Lomb-Scargle ανάλυσης, παρουσιάζουμε στη συνέχεια ένα παράδειγμα μίας χρονοσειράς, εξηγώντας την πληροφορία που λαμβάνουμε από κάθε στοιχείο που βρίσκεται στις γραφικές παραστάσεις.



Εικόνα 23. Πάνω: Μετρήσεις ηλεκτρονίων στο κανάλι E_0 (110-365 keV) για κάποιο χρονικό διάστημα όπως καταγράφονται από το όργανο LEMMS, και οι αντίστοιχες περιοδικότητες που προκύπτουν μέσω ανάλυσης Wavelet για το ίδιο χρονικό διάστημα. Κάτω: Οι περιοδικότητες που προκύπτουν για μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή μέσω ανάλυσης Lomb-Scargle. Οι περιοδικότητες που καταγράφονται ως σήμα πρέπει να αποτελούν διακριτές κορυφές και να βρίσκονται εκτός των λευκών και κόκκινων γραμμοσκιασμένων περιοχών.

Στην Εικόνα 23 δίνεται ένα τυπικό παράδειγμα γραφικών παραστάσεων με τις οποίες εργαστήκαμε. Οι μετρήσεις αφορούν το κανάλι E_0 (110-365 keV). Η άνω γραφική παράσταση αποτελείται από δύο πάνελ. Στο πάνω πλαίσιο υπάρχει η χρονοσειρά του LEMMS για την

περίοδο 2000/345 00:00 UTC έως 2000/346 12:00 UTC, όπως καταγράφεται από το όργανο LEMMS, με τον κάθετο άξονα να είναι counts/s και τον οριζόντιο χρόνος σε μορφή ημερολογιακής ημέρας. Στο κάτω πλαίσιο φαίνεται το αποτέλεσμα της Wavelet ανάλυσης για την ίδια χρονική περίοδο, με τον κάθετο άξονα να είναι η περίοδος του σήματος σε ώρες και τον οριζόντιο και πάλι χρόνος σε μορφή ημερολογιακής ημέρας. Η χρωματική κλίμακα δηλώνει την ένταση προς την σημαντικότητα (intensity/significance) της αντίστοιχης περιοδικότητας, όπου οτιδήποτε μεγαλύτερο της μονάδας θεωρείται μαθηματικά σημαντικό. Η γραμμοσκιασμένη περιοχή αντιστοιχεί στο COI που αναφέρθηκε προηγουμένως, και δεν λαμβάνεται υπόψην.

Η κάτω γραφική παράσταση απεικονίζει τα αποτελέσματα της Lomb-Scargle ανάλυσης, όπου κάθε διακριτή κορυφή αντιστοιχεί σε μία καλά ορισμένη περιοδικότητα του σήματος ηλεκτρονίων. Ο κάθετος άξονας είναι η ένταση του σήματος και ο οριζόντιος η περίοδος του σήματος σε ώρες. Η γραμμοσκιασμένη λευκή περιοχή αντιστοιχεί στο COI της ανάλυσης Wavelet. Η γραμμοσκιασμένη κόκκινη περιοχή υποδεικνύει περιοδικότητες με χαμηλή σημαντικότητα, οι οποίες δεν λαμβάνονται υπόψη.

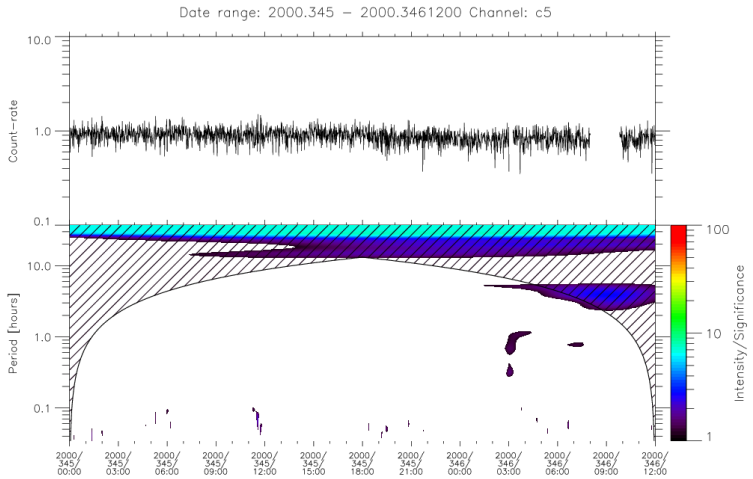
2.5 Προκλήσεις στην ανάλυση και την ερμηνεία των δεδομένων

Όπως είναι αναμενόμενο, στα δεδομένα που επεξεργαστήκαμε υπήρχαν διάφορα προβλήματα που έπρεπε να αξιολογηθούν και να αντιμετωπιστούν με προσοχή. Στη συνέχεια δίνεται από ένα παράδειγμα για κάθε τύπο τέτοιου προβλήματος, ώστε να γίνει καλύτερα κατανοητή η διαδικασία που ακολουθήσαμε για την αξιολόγηση των μετρήσεων.

Όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 2.3, στα δεδομένα του LEMMS εμφανίζεται συστηματικός θόρυβος ο οποίος οφείλεται στα υψηλοενεργειακά σωματίδια των κοσμικών ακτίνων (GCRs) και των RTGs. Τα σωματίδια αυτά προκαλούν ένα σχετικά σταθερό επίπεδο μη μηδενικού σήματος, τόσο σε μικρές όσο και σε μεγάλες αποστάσεις από τους δύο πλανήτες. Ο θόρυβος μεταβάλλεται σε χρονικές κλίμακες μηνών ή και ετών, και μπορεί να εκτιμηθεί για χρονικές περιόδους όπου οι μετρήσεις του LEMMS δεν έχουν συνεισφροά απο ενεργητικά ηλιακά φαινόμενα ή μαγνητοσφαιρικά ενεργητικά σωμάτια. Ο θόρυβος που είναι διαθέσιμος από την ομάδα του MIMI για όλη τη διάρκεια της αποστολής του Cassini στον Κρόνο, αφαιρείται ώστε να γίνει καλύτερη επισκόπηση και εκτίμηση των μετρήσεων ηλεκτρονίων που μας ενδιαφέρουν.

Ένα άλλο πρόβλημα που εμφανίζεται στις μετρήσεις του LEMMS είναι τα κενά στα δεδομένα, τα οποία μπορεί να προκληθούν είτε λόγω διακοπών στη λειτουργία του οργάνου, είτε λόγω ύπαρξης μετρήσεων που εκ των υστέρων κρίθηκαν ως μη αξιόπιστες. Όπως αναφέρθηκε ήδη στην Ενότητα 2.3, ένα κενό στα δεδομένα παράγει στην ανάλυση Wavelet μία περιοδικότητα η οποία δεν αντιστοιχεί σε πραγματικό σήμα ηλεκτρονίων. Η αναγνώριση τέτοιων ψευδών σημάτων είναι εύκολη, εφόσον διαθέτουμε ταυτόχρονα με το διάγραμμα Wavelet, και το διάγραμμα της χρονοσειράς των μετρήσεων ηλεκτρονίων σε counts/s.

Ένα άλλο φαινόμενο που παρατηρείται, ιδιαίτερα στα κανάλια ηλεκτρονίων χαμηλής ενέργειας, είναι η επιμόλυνση των μετρήσεων από το ηλιακό φως. Αυτό συμβαίνει όταν το όργανο κοιτάει προς τον Ήλιο εντός κάποιου μικρού γωνιακού εύρους, οπότε και τα ηλιακά φωτόνια εισέρχονται στον ανιχνευτή. Η επιμόλυνση είναι ιδιαίτερα έντονη για τα κανάλια C_0-C_1 (18-48 keV), ακόμα και όταν ο ανιχνευτής κοιτάει τον Ήλιο υπό μεγάλη γωνία, και είναι ένας από τους λόγους που οι ενεργειακά χαμηλότερες μετρήσεις του LEMMS δεν εξετάστηκαν. Αφαίρεση των περιόδων επιμόλυνσης απο φως σε αυτά τα κανάλια συνεπάγεται

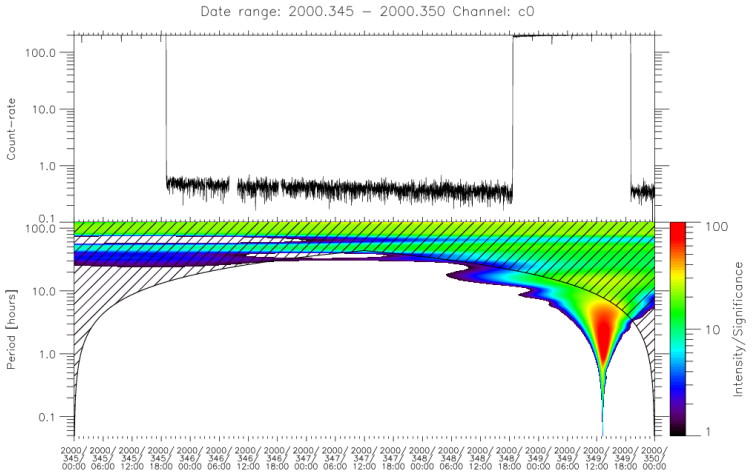


Εικόνα 24. Πάνω πάνελ: Μετρήσεις ηλεκτρονίων στο κανάλι C_5 (175-300 keV) για τις ημέρες 345-346 του 2000, όπου το σκάφος ήταν μακριά από τον πλανήτη, όπως καταγράφονται από το όργανο LEMMS. Παρατηρούμε ότι ακόμα και όταν το Cassini ήταν μακριά από το Δία, το σήμα ηλεκτρονίων είναι μη μηδενικό και κυμαίνεται γύρω από μία περίπου σταθερή τιμή ίση με 1 count/s. Στην αρχή της ημέρας 346 εμφανίζεται ένα κενό στα δεδομένα που διαρκεί για κάποιες ώρες. Κάτω πάνελ: Οι αντίστοιχες περιοδικότητες που προκύπτουν μέσω ανάλυσης Wavelet για το ίδιο χρονικό διάστημα. Το κενό μετρήσεων που εμφανίζεται στη χρονοσειρά εδώ δίνει μία μη πραγματική περιοδικότητα.

πολλά κενά στα δεδομένα που δημιουργούν πολλά προβλήματα σε οποιαδήποτε απόπειρα ανάλυσης περιοδικοτήτων. Η επιμόλυνση στα κανάλια C_2-C_3 είναι λιγότερο έντονη και συμβαίνει συνήθως όταν ο ανιχνευτής κοιτάει τον Ήλιο υπό πολύ μικρή γωνία ($<10^\circ$).

Η επιμόλυνση από το φως είναι εύκολο να αναγνωριστεί στις μετρήσεις, αφού αντιστοιχεί σε μία πολύ απότομη αύξηση στην καταγραφόμενη ροή κατά αρκετές τάξεις μεγέθους, η οποία παρατηρείται πολύ έντονα στα κανάλια C_0-C_1, αλλά όχι το ίδιο έντονα στα υπόλοιπα χαμηλοενεργειακά κανάλια, όπως για παράδειγμα στο C_4. Όπως τα κενά στα δεδομένα, έτσι και η επιμόλυνση λόγω φωτός προκαλεί και αυτή ένα ψευδές σήμα περιοδικοτήτων στην ανάλυση Wavelet αν δεν αφαιρεθεί, οπότε θα πρέπει και αυτές οι περιοδικότητες να μην λαμβάνονται υπόψη. Αν και τα κανάλια C_5-C_7 δεν έχουν άμεση απόκριση στο ηλιακό φώς, για κάποιο λόγο που δεν είναι κατανοητός, παρουσιάζουν μικρές αυξομειώσεις στο επίπεδο θορύβου τους (από κοσμικές ακτίνες και RTGs) όταν τα κανάλια C_0-C_2 καταγράφουν πολύ έντονο σήμα ($>10^4$ counts/s) εξαιτίας επιμόλυνσης από φως. Τα κανάλια E του LEMMS δεν επηρεάζονται από το φως καθώς αυτά ανήκουν στο HET, το οποίο στην είσοδό του περιλαμβάνει ένα λεπτό φύλλο αλουμινίου για αυτόν ακριβώς τον σκοπό (προστασία των μετρητών από φωτόνια).

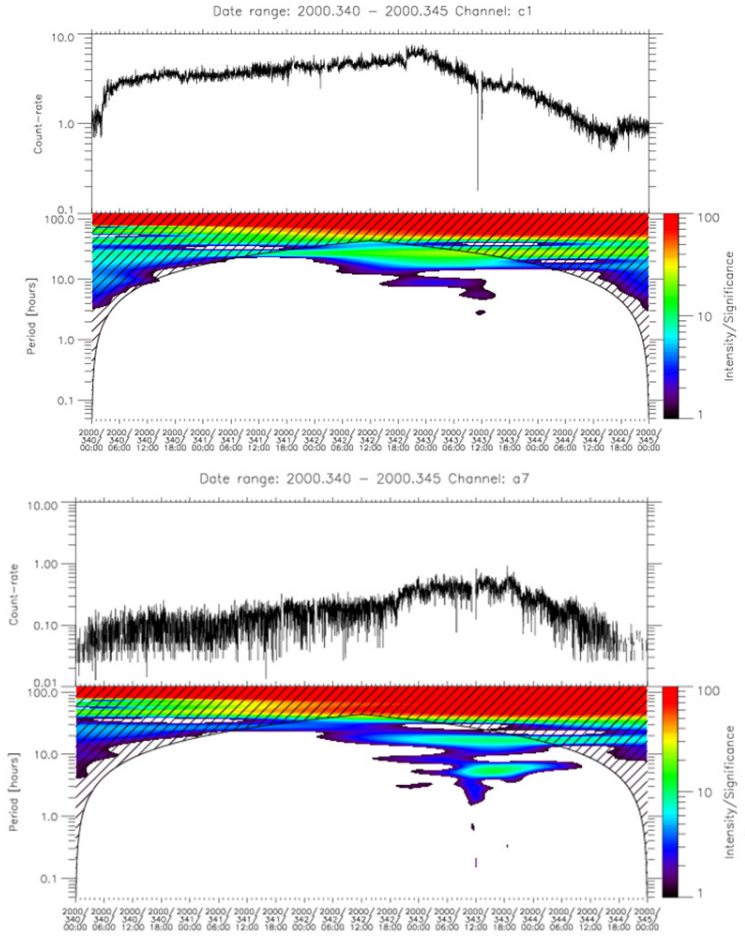
Η τελευταία παράμετρος που έπρεπε να λάβουμε υπόψη όταν επεξεργαζόμασταν δεδομένα από το LEMMS, είναι τα ηλιακά εκρηκτικά φαινόμενα και συγκεκριμένα οι στεμματικές εκτινάξεις μάζας (CMEs). Οι CMEs μπορούν να επηρεάσουν την ερμηνεία των μετρήσεων καθώς στην περίπτωσή μας μπορεί να αποτελέσουν πηγή ενεργητικών ηλεκτρονίων στον ηλιακό ανέμο (Ενότητα 1.5) ή και πηγή πολύ ενεργητικών πρωτονίων (SEPs) τα οποία μπορεί να διαπεράσουν τα τοιχώματα του LEMMS και να καταλήξουν στους μετρητές ηλεκτρονίων. Το αποτέλεσμα και στις δύο περιπτώσεις είναι αυξήσεις στο ρυθμό μέτρησης σωματιδίων στα κανάλια ηλεκτρονίων του LEMMS, οι οποίες μπορεί να ερμηνευτούν λανθασμένα ως διαφυγόντα ηλεκτρόνια όταν το Cassini ειναι εκτός της μαγνητόπαυσης, είτε του Δία είτε του Κρόνου.



Εικόνα 25. Πάνω πάνελ: Μετρήσεις ηλεκτρονίων στο κανάλι C_0 (18-40 keV) για τις ημέρες 345-350 του 2000, όπως καταγράφονται από το όργανο LEMMS. Παρατηρούμε ότι τις ημέρες 345 και 349, σημειώνονται πολύ απότομες αυξήσεις οι οποίες δεν φαίνεται να οφείλονται σε πραγματικό σήμα ηλεκτρονίων. Κάτω πάνελ: Οι αντίστοιχες περιοδικότητες που προκύπτουν μέσω ανάλυσης Wavelet για το ίδιο χρονικό διάστημα. Η επιμόλυνση από φως την ημέρα 349 δίνει μία πολύ ισχυρή αλλά μη πραγματική περιοδικότητα.

Για τον Κρόνο, η αναγνώριση αυτών των ηλιακών γεγονότων έγινε με βάση την αναλυτική λίστα που υπάρχει στη δημοσίευση των Roussos, Jackman, et al., 2018, επιβεβαιώνοντας το κάθε γεγονός με τα κανάλια του LEMMS τα οποία μετράνε πρωτόνια. Για το Δία, η αναγνώριση έγινε ελέγχοντας τα κανάλια των MeV πρωτονίων και αναζητώντας μεταβολές με παρόμοια χαρακτηριστικά στα κανάλια των ηλεκτρονίων, τόσο μεταξύ τους, όσο και με αυτές των πρωτονίων. Γενικά, οι μεταβολές που προκαλούνται από CMEs, παρουσιάζουν διαμόρφωση του σήματος με μεγάλη διάρκεια (μερικές ημέρες) και ένα σχετικά ομαλά μεταβαλλόμενο σήμα, σε σχέση με τις μεταβολές που οφείλονται σε διαφυγόντα ηλεκτρόνια, οι οποίες ειναι πολύ πιο παροδικές και παρουσιάζουν έντονες αυξομειώσεις. Ξεχωρίζουν, επίσης, από το γεγονός ότι η διαμόρφωση αυτή παρουσιάζει γενικά παρόμοια εικόνα και χρονική διάρκεια σε όλα τα κανάλια, τόσο πρωτονίων όσο και ηλεκτρονίων. Ένα παράδειγμα μίας τέτοιας διαμόρφωσης δίνεται στην Εικόνα 26.

Αξίζει να σημειωθεί πως κάποιες από τις εκτιμόμενες περιοδικότητες στην Εικόνα 26 είναι σχετικά κοντά σε αυτές που θα περιμέναμε από το Δία ($\sim$ 10 ώρες), ωστόσο αυτό ειναι μάλλον συμπτωματικό, καθώς το σήμα στις μετρήσεις του LEMMS οφείλεται σε ηλιακά και όχι μαγνητοσφαιρικά ενεργητικά σωμάτια. Το παράδειγμα αυτό μας δείχνει, λοιπόν, πως σημαντικό σήμα σε ορισμένες περιοδικότητες πρέπει να ερμηνεύεται προσεκτικά και όχι άκριτα.



Εικόνα 26. Πάνω: Μετρήσεις χαμηλοενεργειακών ηλεκτρονίων στο κανάλι C_1 (27-48 keV) για τις ημέρες 340-345 του 2000, όπως καταγράφονται από το όργανο LEMMS. Κάτω: Μετρήσεις πρωτονίων στο κανάλι A_7 (1.6-4 MeV) για τις ημέρες 340-345 του 2000, όπως καταγράφονται από το όργανο LEMMS. Συμπεραίνουμε ότι σε αυτό το χρονικό διάστημα εκδηλώθηκε μία CME, καταρχάς από την μεταβολή που σημειώνεται στο κανάλι A7, αλλά και λαμβάνοντας υπόψη την παρόμοια μορφή και χρονική διάρκεια της μεταβολής στα δύο κανάλια.

3 Παρατηρήσεις και αποτελέσματα

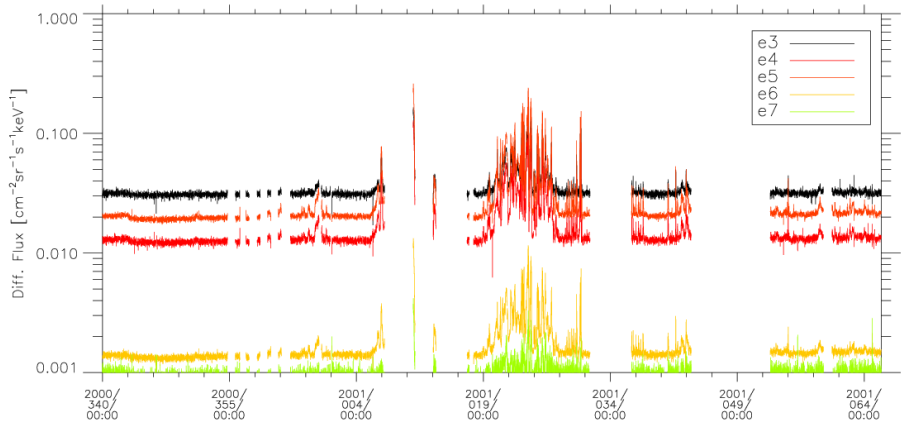
3.1 Εντοπισμός διαφυγόντων σχετικιστικών ηλεκτρονίων από το Δία

Τα αποτελέσματα της μελέτης μας όσον αφορά το Δία, επιβεβαιώνουν τις προηγούμενες μελέτες, καθώς δείχνουν ότι ο Δίας είναι μία ισχυρή πηγή σχετικιστικών ηλεκτρονίων για την ηλιόσφαιρα. Τα ηλεκτρόνια τα οποία ανιχνεύονται, παρουσιάζουν στο σήμα τους περιοδικότητες που είναι χαρακτηριστικές του μαγνητοσφαιρικού συστήματος του πλανήτη. Οι τρεις από τις τέσσερις κυρίαρχες περιοδικότητες που βρέθηκαν στο σήμα των διαφυγόντων ηλεκτρονίων είναι τα 40-50 λεπτά, οι 5 ώρες και οι 10 ώρες, οι οποίες έχουν αναφερθεί και στη βιβλιογραφία. Ωστόσο, από την ανάλυσή μας προέκυψε και μία τέταρτη κυρίαρχη περιοδικότητα, ίση με περίπου 2-3 ημέρες. Αυτό το εύρημα θα μπορούσε να επιβεβαιώσει το μοντέλο που περιγράφηκε στην Ενότητα 1.3, σχετικά με την περιοδική διαμόρφωση ίσης χρονικής διάρκειας της μαγνητόσφαιρας, εξαιτίας της συνεχούς παροχής μεγάλων ποσοτήτων πλάσματος από την Ιώ και του ισχυρού φυγοκεντρικού δυναμικού. Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε κάποια χαρακτηριστικά παραδείγματα γραφικών παραστάσεων, από τα οποία προκύπτουν όσα αναφέρουμε σε αυτή την παράγραφο.

Αρχικά, παραθέτουμε στην Εικόνα 27 τη γραφική παράσταση των μετρήσεων της ροής σε πέντε κανάλια του LEMMS που μετράνε ηλεκτρόνια σε ενέργειες άνω των 600 keV έως και περίπου 20 MeV. Η περίοδος που παρουσιάζεται αντιστοιχεί στο σύνολο του fly-by του Cassini από το Δία, δηλαδή για το χρονικό διάστημα από την ημέρα 340/2000 έως και την ημέρα 65/2001, στο οποίο βέβαια περιλαμβάνεται και μία αρχική χρονική περίοδος όταν το διαστημόπλοιο ήταν ακόμα αρκετά μακριά από τον πλανήτη. Το τελευταίο καταγεγραμμένο πέρασμα από το κύμα κρούσης του Δία είναι κοντά στην ημέρα 65/2001 (Achilleos et al., 2004).

Κατά το κοντινό πέρασμα του διαστημοπλοίου από τον πλανήτη, σημειώθηκαν πολλές διαβάσεις από το κρουστικό κύμα και λιγότερες από τη μαγνητόπαυση. Οι μετρήσεις παρουσιάζουν σχετικιστικά ηλεκτρόνια στα κανάλια E_3-E_7, σε ένα μεγάλο εύρος ενεργειών, από 600 keV έως και περίπου 20 MeV. Αν και σε όλο αυτό το διάστημα υπάρχουν αρκετά κενά στα δεδομένα, διακρίνεται εύκολα η έντονη διαφυγή υψηλοενεργειακών ηλεκτρονίων, ιδιαίτερα στο χρονικό διάστημα μεταξύ των ημερών 18-31/2001, όταν το Cassini παρέμεινε εντός της μαγνητοθήκης, όπου και παρατηρείται σημαντικό σήμα ακόμα και σε ενέργειες άνω των 7 MeV έως και περίπου 20 MeV (πράσινη γραμμή). Παρατηρήσεις σε χαμηλότερες ενέργειες ηλεκτρονίων για αυτό το διάστημα έχουν συζητηθεί και από τους Krupp et al., 2002a; Krupp et al., 2004. Τόσο έντονο σήμα σε αυτές τις ενέργειες ηλεκτρονίων, με τόσο έντονες διακυμάνσεις και χωρίς να συνοδεύεται από αντίστοιχα υψηλές ροές MeV πρωτονίων (που θα υποδείκνυαν κάποιο ηλιακό φαινόμενο), είναι στοιχεία που δεν αφήνουν περιθώρια για εναλλακτική ερμηνεία της πηγής αυτών των υψηλοενεργειακών ηλεκτρονίων.

Στη συνέχεια, εστιάζουμε και παρουσιάζουμε την πιο ενδιαφέρουσα χρονική περίοδο με το ισχυρότερο σήμα σε διαφυγόντα ηλεκτρόνια, η οποία όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο αντιστοιχεί στις ημέρες 18-31 του 2001, κατά τις οποίες το Cassini παρέμεινε εξ' ολοκλήρου μέσα στη μαγνητοθήκη του Δία. Για το διάστημα αυτό, παραθέτουμε δύο γραφικές παραστάσεις για τα κανάλια E5 και E7 ($>$ 800 keV και $>$7 MeV), στις Εικόνες 28 και 29, αντίστοιχα. Οι παρατηρήσεις που θα περιγράψουμε αφορούν γενικά και τα δύο κανάλια, απλά στην περίπτωση του καναλιού E7 οι ροές ηλεκτρονίων είναι λιγότερο ισχυρές αν και



Εικόνα 27. Μετρήσεις διαφυγόντων σχετικιστικών ηλεκτρονίων από το Δία, στα κανάλια E_3-E_7 (600-20.000 keV) του LEMMS, για όλο το χρονικό διάστημα του fly-by του Cassini από τον πλανήτη. Ο κάθετος άξονας είναι διαφορική ροή και ο οριζόντιος χρόνος σε μορφή ημερολογιακής ημέρας. Στο χρονικό διάστημα των ημερών 18-31/2001 παρατηρούνται υψηλές ροές, ακόμα και για υπερσχετικιστικά ηλεκτρόνια.

αυτό είναι αναμενόμενο, αφού το κανάλι E7 μετράει τα πιο υψηλοενεργειακά ηλεκτρόνια από όλα τα κανάλια του LEMMS (7-20 MeV).

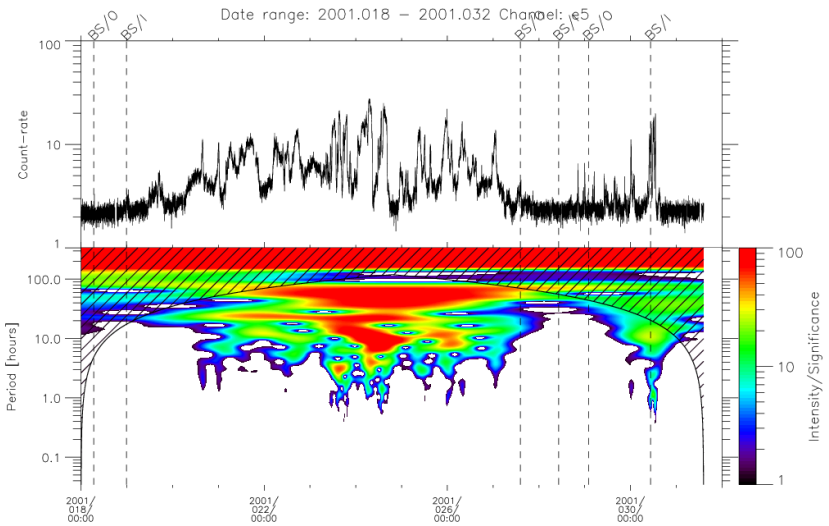
Ξεκινώντας από το πάνω πλαίσιο της Εικόνας 28, μετά την διάβαση από το κρουστικό κύμα προς τη μαγνητοθήκη την ημέρα 19/2001 (BS/I), παρατηρείται πολύ έντονη δραστηριότητα με πολυπληθείς και απότομες εξάρσεις στο ρυθμό καταγραφής ηλεκτρονίων, όπως και κάποιες πιο ομαλές μεταβολές, η οποία διαρκεί μέχρι και λίγο πριν την ημέρα 31/2001. Η μέγιστη τιμή του ρυθμού καταγραφής σωματιδίων ξεπερνά την μία τάξη μεγέθους, σε σχέση με την προηγούμενη πιο ήρεμη περίοδο.

Ένα άλλο ενδιαφέρον στοιχείο είναι οι ενισχύσεις ηλεκτρονίων που παρατηρούνται όταν το Cassini διασχίζει το κρουστικό κύμα της μαγνητόσφαιρας του Δία. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν οι ενισχύσεις κοντά στις ημέρες 28/2001 και 31/2001 (BS/O και BS/I, αντίστοιχα). Σε επόμενη παράγραφο αναλύουμε ένα τέτοιο παράδειγμα.

Στο κάτω πλαίσιο της Εικόνας 28 φαίνονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης Wavelet για το ίδο χρονικό διάστημα με πριν. Στον κάθετο άξονα δίνεται η περίοδος σε ώρες. Εδώ παρατηρούνται οι τρεις κυρίαρχες περιοδικότητες που αναφέραμε πριν, δηλαδή οι περιοδικότητες για 40 λεπτά, 5 ώρες και 10 ώρες, οι οποίες επιβεβαιώθηκαν συνδυαστικά και με την ανάλυση Lomb-Scargle. Η περίοδος των 40 λεπτών, όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 1.3, φαίνεται να είναι μία από τις κυρίαρχες για τη μαγνητόσφαρα του Δία, και έχει αναφερθεί και ως χαρακτηριστική χρονική κλίμακα και από τους (Krupp et al., 2004). Η παρατήρηση αυτή θα μπορούσε να σημαίνει ότι ο μηχανισμός που παράγει αυτές τις σχεδόν περιοδικές εξάρσεις QP40, ίσως παράλληλα να δημιουργεί και τις συνθήκες ταυτοχρονής διαφυγής τους εκτός της μαγνητόσφαιρας (π.χ. αν ο μηχανισμός παραγωγής QP40 φαινομένων σχετίζεται με μαγνητική επανασύνδεση) (Roussos et al., 2016).

Οι περίοδοι των 5 ωρών και των 10 ωρών είναι επίσης χαρακτηριστικές του μαγνητοσφαιρικού συστήματος του Δία, και σχετίζονται με τη μισή και την πλήρη περιστροφή του πλανήτη αντίστοιχα, και ίσως με κάποια ή κάποιες ενεργές περιοχές (active sectors) που ευνοούν την διαφυγή ηλεκτρονίων, όταν συγκεκριμένα πλανητογραφικά μήκη (longitudes) έχουν προσανατολισμό προς μία ή περισσότερες συγκεκριμένες κατευθύνσεις στη μαγνητόσφαιρα

(Tsuchiya et al., 1999). Η έννοια active sector δεν συνοδεύεται προς το παρόν από κάποια συγκεκριμένη ερμηνεία, αν και πιθανότατα να συνδέεται με το γεγονός πως το εγγενές μαγνητικό πεδίο του Δία ειναι αρκετά ασύμμετρο.

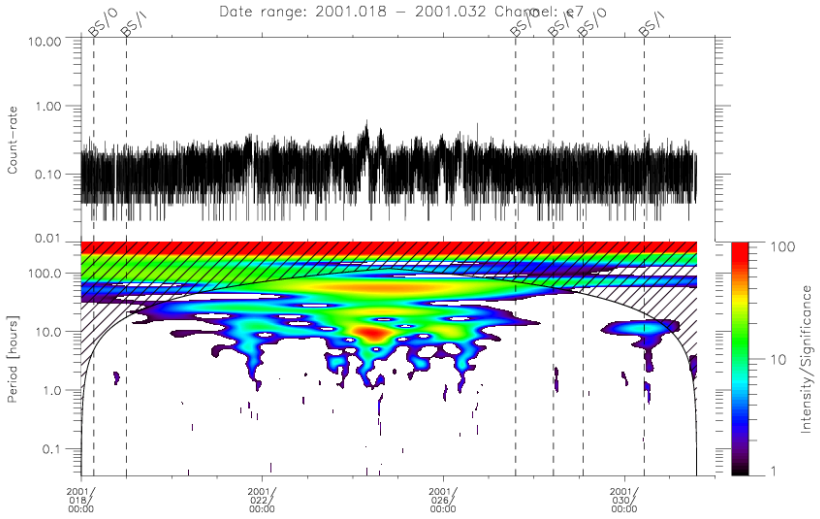


Εικόνα 28. Πάνω: Μετρήσεις διαφυγόντων σχετικιστικών ηλεκτρονίων από το Δία, στο κανάλι E_5 ($>$800 keV) του LEMMS, για το χρονικό διάστημα των ημερών 18-31/2001. Ο κάθετος άξονας είναι counts/s και ο οριζόντιος χρόνος σε μορφή ημερολογιακής ημέρας. Παρατηρούνται ιδιαίτερα υψηλές ροές σε όλο το χρονικό διάστημα με πολλές έντονες κορυφές, ενώ ταυτόχρονα διακρίνονται ενισχύσεις στο σήμα των ηλεκτρονίων καθώς το Cassini διασχίζει το κρουστικό κύμα της μαγνητόσφαιρας του Δία. Κάτω: Τα αποτελέσματα της ανάλυσης Wavelet για το ίδιο χρονικό διάστημα. Είναι προφανείς οι περιοδικότητες που εμφανίζονται στις 5 και 10 ώρες, αλλά και στις 2-3 ημέρες.

Επιπλέον νησίδες στα φασματογραφήματα Wavelet στις Εικόνες 28 και 29 υποδεικνύουν μια επιπρόσθετη περιοδικότητα σχετικιστικών διαφυγόντων ηλεκτρονίων στις 2-3 ημέρες (40-70 ώρες), η οποία όπως αναφέραμε έως τώρα έχει παρατηρηθεί σε διάφορες παραμέτρους (π.χ. ροές ενεργητικών σωματιδίων) μόνο στο εσωτερικό της μαγνητόσφαιρας του Δία. Όπως φαίνεται και στο δεύτερο διάγραμμα των Εικόνων 28 και 29, η περιοδικότητα αυτή εμφανίζει μεγάλο λόγο έντασης προς σημαντικότητα και εκτείνεται σε χρονικό διάστημα πολλών ημερών. Θα προσπαθήσουμε να δώσουμε μία πιθανή ερμηνεία για το μηχανισμό αυτής της χρονικής κλίμακας στο Κεφάλαιο 5.

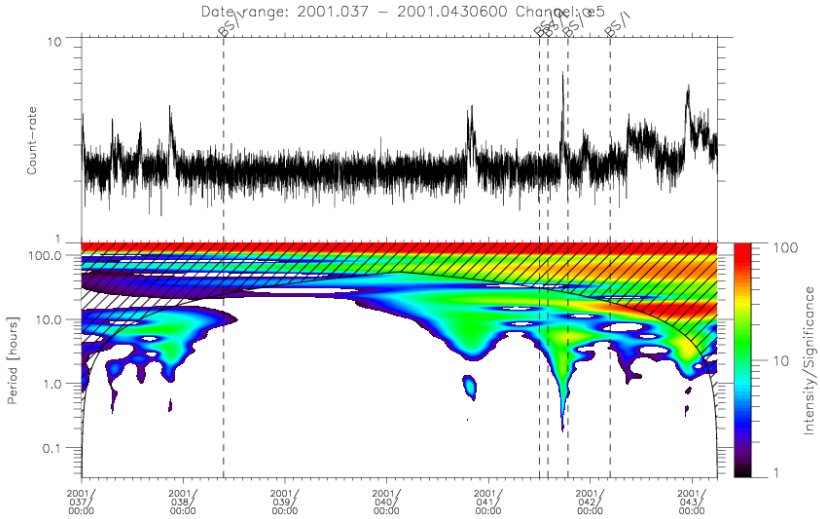
Τα διαφυγόντα σχετικιστικά ηλεκτρόνια στο Δία συνεχίζουν να ανιχνεύονται ακόμα και όταν το Cassini είχε απομακρυνθεί πολύ από αυτόν. Στην εικόνα 30 δίνεται η χρονοσειρά του σήματος των ηλεκτρονίων στο κανάλι E_5 για το χρονικό διάστημα των ημερών 37-43/2001. Παρατηρούνται σημαντικές ροές υψηλοενεργειακών ηλεκτρονίων, ακόμα και όταν το διαστημόπλοιο βρισκόταν σε πολύ μεγάλες αποστάσεις από τον πλανήτη, συγκεκριμένα σε ακτινική απόσταση ίση με ≈ 500 R_J. Αυτό επιβεβαινώνει το γεγονός ότι ο Δίας αποτελεί μία ισχυρή πηγή σχετικιστικών ηλεκτρονίων για την ηλιόσφαιρα.

Αξίζει να σημειωθεί εδώ πως οι μετρήσεις που παρουσιάζονται σε συγκεκριμένα κανάλια ειναι αντιπροσωπευτικές των παρατηρήσεων σε ένα πολύ μεγάλο εύρος ενεργειών. Με λίγα λόγια, είτε κοιτάξουμε κανάλια ηλεκτρονίων που μετράνε ενέργειες των 100 keV, είτε κανάλια που μετράνε ενέργειες μεγαλύτερες του 1 MeV, το σήμα παρουσιάζει ταυτόχρονες και παρόμοιες ενισχύσεις, μεταβολές και περιοδικότητες. Εξαίρεση αποτελούν οι μετρήσεις του



Εικόνα 29. Πάνω: Μετρήσεις διαφυγόντων σχετικιστικών ηλεκτρονίων από το Δία, στο κανάλι E_7 (7-20 MeV) του LEMMS, για το χρονικό διάστημα των ημερών 18-31/2001. Ο κάθετος άξονας είναι counts/s και ο οριζόντιος χρόνος σε μορφή ημερολογιακής ημέρας. Παρατηρούνται και εδώ σημαντικές ροές ηλεκτρονίων, αλλά με μικρότερη ένταση και μεταβλητότητα σε σχέση με το κανάλι E5. Κάτω: Τα αποτελέσματα της ανάλυσης Wavelet για το ίδιο χρονικό διάστημα. Είναι προφανείς οι περιοδικότητες που εμφανίζονται στις 5 και 10 ώρες, αλλά και στις 2-3 ημέρες.

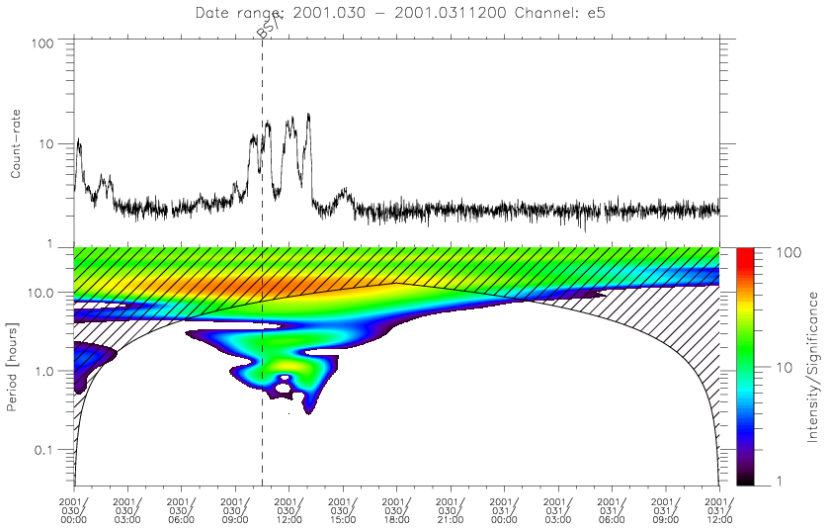
καναλιού E7 ($>$7 MeV), το οποίο μετράει σήμα πάνω από τα επίπεδα θορύβου μόνο για τα πιο ισχυρά επεισόδια διαφυγής.



Εικόνα 30. Πάνω: Μετρήσεις διαφυγόντων σχετικιστικών ηλεκτρονίων από το Δία, στο κανάλι E_5 ($>$800 keV) του LEMMS, για το χρονικό διάστημα των ημερών 37-43/2001. Ο κάθετος άξονας είναι counts/s και ο οριζόντιος χρόνος σε μορφή ημερολογιακής ημέρας. Παρατηρούνται και πάλι υψηλές ροές, ακόμα και μετά την ημέρα 40/2001, όταν το Cassini βρισκόταν σε πολύ μεγάλες αποστάσεις από τον πλανήτη. Κάτω: Τα αποτελέσματα της ανάλυσης Wavelet για το ίδιο χρονικό διάστημα, όπου διακρίνονται οι χαρακτηριστικές περιοδικότητες που έχουμε ήδη αναφέρει.

Πριν αναφέραμε ότι παρατηρούνται διάφορες ενισχύσεις στο σήμα των διαφυγόντων ηλε-

κτρονίων, κατά τη διάβαση του διαστημοπλοίου από το κρουστικό κύμα του πλανήτη. Στην Εικόνα 31 παραθέτουμε το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα, που όπως τονίζουμε δεν είναι το μοναδικό. Περίπου στα μέσα της ημέρας 30/2001, παρατηρούνται δύο πολύ έντονες αυξήσεις (κατά περίπου μία τάξη μεγέθους) στις ροές ηλεκτρονίων, η πρώτη λίγο πριν και η δεύτερη ακριβώς πάνω στη θέση του κρουστικού κύματος. Ακολουθούν άλλες δύο παρόμοιες αυξήσεις λίγο μετά τη διάβαση από το κρουστικό κύμα. Η παρατήρηση αυτή είναι αξιοσημείωτη και χρήζει περαιτέρω διερεύνησης για το κατά πόσο και το κρουστικό κύμα του Δία μπορεί να είναι πηγή σχετικιστικών ηλεκτρονίων υψηλής έντασης. Τα κρουστικά κύματα στο ηλιακό μας σύστημα δεν θεωρούνται έως τώρα ικανά να επιταχύνουν ηλεκτρόνια σε ενέργειες >1 MeV, πόσο μάλλον με τόσο υψηλές ροές (Masters et al., 2013).



Εικόνα 31. Πάνω: Μετρήσεις διαφυγόντων σχετικιστικών ηλεκτρονίων από το Δία, στο κανάλι E_5 (>800 keV) του LEMMS, για το χρονικό διάστημα των ημερών 30-31/2001. Ο κάθετος άξονας είναι counts/s και ο οριζόντιος χρόνος σε μορφή ημερολογιακής ημέρας. Κοντά στη περιοχή του κρουστικού κύματος, παρατηρούνται έντονες αυξήσεις στις ροές των ηλεκτρονίων, οι οποίες θα μπορούσαν να υποδεικνύουν ως πιθανό μηχανισμό ενίσχυσης και διαφυγής τους, την επιτάχυνση πάνω στο κρουστικό κύμα του Δία. Κάτω: Τα αποτελέσματα της ανάλυσης Wavelet για το ίδιο χρονικό διάστημα, όπου διακρίνονται οι χαρακτηριστικές περιοδικότητες για περίπου 1 ώρα, 5 και 10 ώρες.

3.2 Εντοπισμός διαφυγόντων σχετικιστικών ηλεκτρονίων από τον Κρόνο

Σε αντίθεση με το Δία, η ανάλυσή μας για τον Κρόνο κατέδειξε ελάχιστες περιπτώσεις διαφυγόντων σχετικιστικών ηλεκτρονίων, οι οποίες επιπλέον χαρακτηρίζονται και από πολύ χαμηλές ροές, κοντά στο επίπεδο του θορύβου. Συνολικά, από τις τρεις χιλιάδες διαβάσεις εκτός της μαγνητόπαυσης ανιχνεύσαμε 6 πιθανά γεγονότα διαφυγής σχετικιστικών ηλεκτρονίων από τη μαγνητόσφαιρα του Κρόνου, σε χρονικό διάστημα 12 ετών, τα οποία αφορούσαν όλα το κανάλι C_7, που μετράει ηλεκτρόνια ενεργειών 510-832 keV. Το συγκεκριμένο κανάλι, αν και έχει χαμηλή ευαισθησία, έχει σχετικά μικρό ενεργειακό εύρος και μετράει σχεδόν αποκλειστικά σχετικιστικά ηλεκτρόνια (E>511 keV). Τα χαμηλοενεργειακά κανάλια E (E0-E2: 110-1350 keV), που επικαλύπτονται μερικώς με το C7, μέτραγαν επίσης σήμα των διαφυγόντων ηλεκτρονίων στις έξι προαναφερόμενες περιπτώσεις, ωστόσο καθώς η ενερ-

γειακή απόκριση του καθενός από αυτά τα τρία κανάλια βρίσκεται στο εύρος από 110 έως τα 340 keV, δεν τα θεωρήσαμε αντιπροσωπευτικά για σχετικιστικά ηλεκτρόνια. Κανένα από τα κανάλια E με απόκριση αποκλειστικά σε σχετικιστικές ενεργειες (E4-E7) δεν έδωσε σήμα διαφυγόντων ηλεκτρονίων.

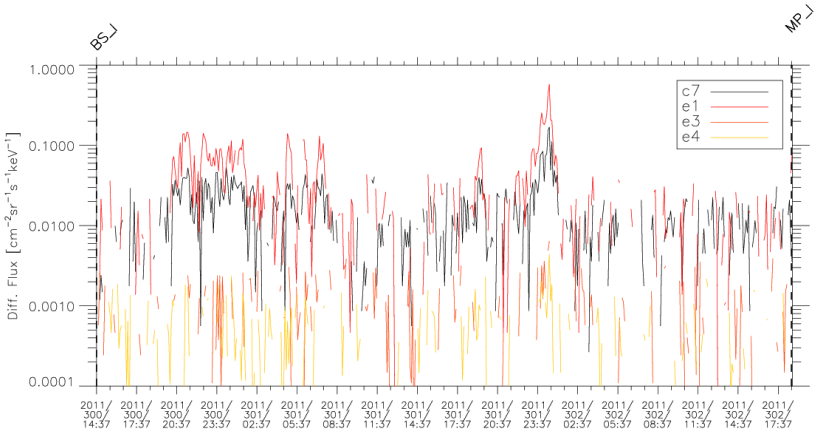
Οι χρονικές περίοδοι αυτών των γεγονότων δίνονται στον πίνακα της Εικόνας 32 και παρουσιάζονται στη συνέχεια. Αν και βρήκαμε αρκετές περιπτώσεις διαφυγής ενεργητικών ηλεκτρονίων σε χαμηλότερες ενέργειες ($<$100 keV), σε συμφωνία με την μελέτη των Liou et al., 2021, παρ' όλα αυτά φαίνεται ότι για αρκετά υψηλότερες ενέργειες η διαφυγή είτε δεν υπάρχει, είτε δεν είναι αποτελεσματική. Όσον αφορά την ανάλυση περιοδικοτήτων, δεν μπορούμε να θεωρήσουμε απόλυτα αξιόπιστα τα αποτελέσματά της για τις μετρήσεις του καναλιού C_7 όπου εφαρμόστηκε, εξαιτίας των μικρών χρονικών διαστημάτων που το Cassini παρέμεινε στον ηλιακό άνεμο και στη μαγνητοθήκη για τις έξι περιπτώσεις στις οποίες εντοπίστηκε σήμα διαφυγόντων ηλεκτρονίων, και έτσι δεν θα τις χρησιμοποιήσουμε σε αυτή την Ενότητα. Σε κάθε μία από τις γραφικές παραστάσεις που ακολουθούν, η χρονική περίοδος επιλέγεται ώστε να αρχίζει ή/και να τελειώνει σε κάποιο από τα περάσματα του Cassini από τη μαγνητόπαυση ή το κύμα κρούσης, σύμφωνα με τη λίστα των Jackman et al., 2019. Αυτά σημειώνονται ως MP/I και MP/I (αντιστοιχώντας σε Magnetopause In και Out) ή BS/I και BS/O (Bow Shock In και Out).

i/i	BS	Start Time	End Time
1	in	201/2005 17:30	205/2005 18:13
2	in	260/2011 05:29	261/2011 17:29
3	in	300/2011 14:37	302/2011 18:36
4	out	344/2007 04:22	344/2007 20:05
5	in	270/2010 00:54	270/2010 02:54
6	in	217/2016 17:16	218/2016 10:48

Εικόνα 32. Τα 6 γεγονότα πιθανής διαφυγής σχετικιστικών ηλεκτρονίων από τη μαγντόσφαιρα του Κρόνου, τα οποία αφορούν το κανάλι C_7. Με τη σειρά, δίνονται ο αριθμός, η θέση του Cassini ως προς το κρουστικό κύμα, η ώρα έναρξης και η ώρα λήξης για το κάθε γεγονός.

Στην Εικόνα 33 παραθέτουμε τη γραφική παράσταση για τις μετρήσεις διαφυγόντων ηλεκτρονίων στα κανάλια C_7, E_1, E_3 και E_4, για τις ημέρες 300-302/2011 όπου το σκάφος βρισκόταν μέσα στη μαγνητοθήκη. Το πιο εμφανές χαρακτηριστικό είναι η δομή με την έντονη κορυφή που παρατηρείται στα κανάλια E_1 και C_7 (τα οποία είναι αντιπροσωπευτικά για ενέργειες $<$ 1 MeV) στα τέλη της ημέρας 301/2011, με σύντομη χρονική διάρκεια, μέχρι και τις αρχές της ημέρας 302. Στην υπόλοιπη χρονοσειρά, παρατηρούνται κάποιες λιγότερο έντονες μεταβολές στα τέλη της ημέρας 300/2011. Γενικά, το σήμα των διαφυγόντων σχετικιστικών ηλεκτρονίων είναι ασθενές, κοντά στο όριο του θορύβου. Η επισκόπηση των χαρακτηριστικών του μαγνητικού πεδιου δείχνει πως τουλάχιστον στην περίπτωση του σήματος των ημερών 300-302 ο προσανατολισμός του είναι κατά περιόδους βόρειος, και συνεπώς το

Cassini είναι σίγουρα εκτός της μαγνητόπαυσης, με το σχετικό σήμα στο LEMMS να μπορεί να αποδοθεί σε διαφυγόντα ηλεκτρόνια.

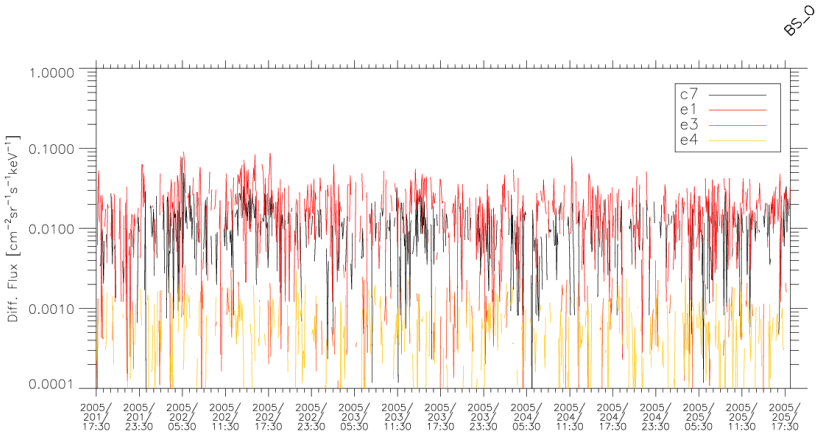


Εικόνα 33. Μετρήσεις διαφυγόντων ηλεκτρονίων από τον Κρόνο, στα κανάλια C_7, E_1, E_3 και E_4 του LEMMS, για το χρονικό διάστημα των ημερών 300-302/2011. Τα C_7, E_1 είναι αντιπροσωπευτικά για ενέργειες $<$ 1 MeV, ενώ τα E_3, E_4 κυριαρχούνται από ενέργειες $>$ 1 MeV. Ο κάθετος άξονας είναι διαφορική ροή και ο οριζόντιος χρόνος σε μορφή ημερολογιακής ημέρας. Το διαστημόπλοιο βρίσκεται στο εσωτερικό της μαγνητοθήκης. Διακρίνεται μία έντονη αύξηση στα κανάλια E_1 και C_7, που διαρκεί από τα τέλη της ημέρας 301 μέχρι και τις αρχές της ημέρας 302.

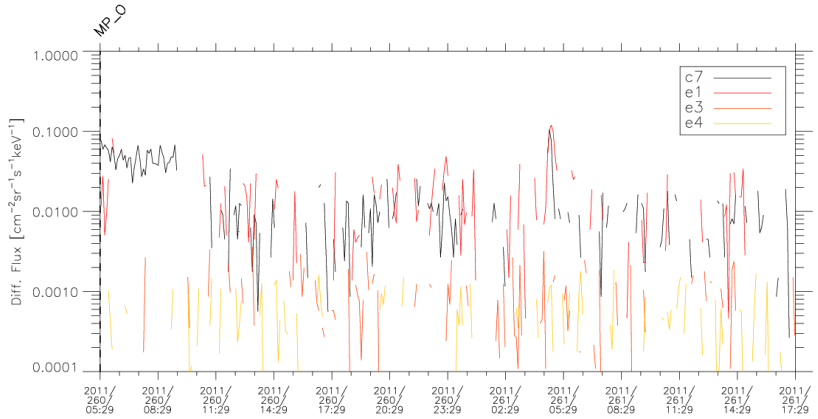
Στην Εικόνα 34 φαίνεται ένα άλλο παράδειγμα μετρήσεων διαφυγόντων ηλεκτρονίων στα κανάλια C_7, E_1, E_3 και E_4, για τις ημέρες 201-205/2005 όπου το Cassini βρισκόταν και πάλι μέσα στη μαγνητοθήκη. Διακρίνονται κάποιες αμυδρές αυξήσεις στις ημέρες 202-203/2005 στα κανάλια E_1 και C_7. Στο συγκεκριμένο διάγραμμα, οι μεταβολές στις ροές που συνιστούν σήμα είναι πολύ ασθενείς, και ακόμα πιο κοντά στο επίπεδο θορύβου σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση. Για να γίνουν αντιληπτές χρειάζεται πολύ προσεκτική παρατήρηση και φυσικά προσοχή ως προς την εξαγωγή συμπεράσματος για την ύπαρξη σήματος. Το ότι αυτές οι αμυδρές αυξήσεις στο κανάλι C_7 δεν οφείλονται σε τυχαίες διακυμάνσεις του θορύβου του, επιβεβαιώνεται από παρατηρήσεις σε χαμηλότερης ενεργειας κανάλια (C_0-C_6),τα οποία όντως δείχνουν αρκετά έντονο σήμα, υποδεικνύοντας δυναμικές μεταβολές στο φάσμα των ηλεκτρονίων σε αυτές τις περιόδους.

Το επόμενο παράδειγμα που φαίνεται στην Εικόνα 35, αφορά μετρήσεις ηλεκτρονίων στα κανάλια C_7, E_1, E_3 και E_4, για τις ημέρες 260-261/2011 όπου το σκάφος βρισκόταν στη μαγνητοθήκη. Το χαρακτηριστικό που ξεχωρίζει είναι η πολύ απότομη αύξηση στις αρχές της ημέρας 261 στα κανάλια E_1 και C_7, η οποία έχει πολύ μικρή διάρκεια. Οι αυξήσεις που σημειώνονται στην αρχή του διαγράμματος οφείλονται σε επιμόλυνση του LEMMS από ηλιακά φωτόνια, η οποία όταν είναι αρκετά έντονη στα κανάλια C_0-C_4, προκαλεί αύξηση στα επίπεδα θορύβου των καναλιών C_5-C_7 (Κεφάλαιο 2).

Η επόμενη περίπτωση διαφυγής ηλεκτρονίων στα κανάλια C_7, E_1, E_3 και E_4 σημειώνεται την ημέρα 344/2007, όταν το διαστημόπλοιο βρισκόταν στη μαγνητοθήκη, και δίνεται στην Εικόνα 36. Διακρίνεται μία έντονη αύξηση στη ροή των καναλιών E_1 και C_7 στις αρχές της ημέρας 344/2007 και ώρα περίπου 05:22. Η μεταβολή που συμβαίνει λίγο πριν από αυτή την αύξηση, πιθανώς αντιστοιχεί σε είσοδο και έπειτα έξοδο από τη μαγνητόσφαιρα του πλανήτη.



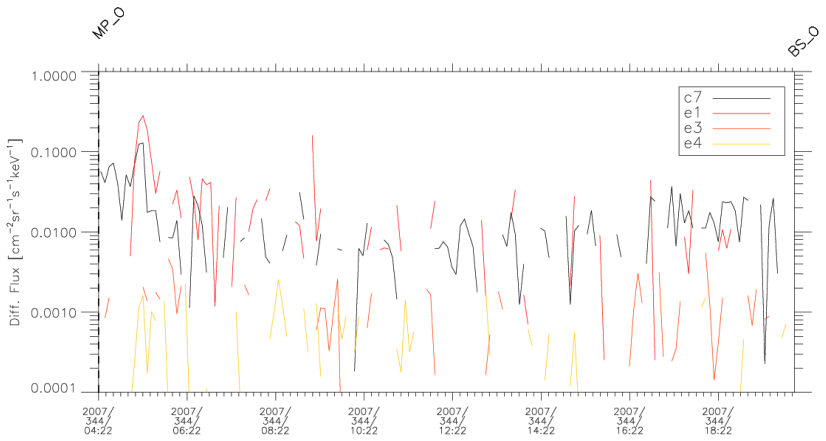
Εικόνα 34. Μετρήσεις διαφυγόντων ηλεκτρονίων από τον Κρόνο, στα κανάλια C_7,E_1,E_3 και E_4 του LEMMS, για το χρονικό διάστημα των ημερών 201-205/2005. Ο κάθετος άξονας είναι διαφορική ροή και ο οριζόντιος χρόνος σε μορφή ημερολογιακής ημέρας.Το διαστημόπλοιο βρίσκεται στο εσωτερικό της μαγνητοθήκης. Παρατηρούνται κάποιες ασθενείς μεταβολές στα κανάλια E_1 και C_7 τις ημέρες 202 και 203, ενώ γενικά όλη χρονοσειρά βρίσκεται στα όρια του θορύβου.



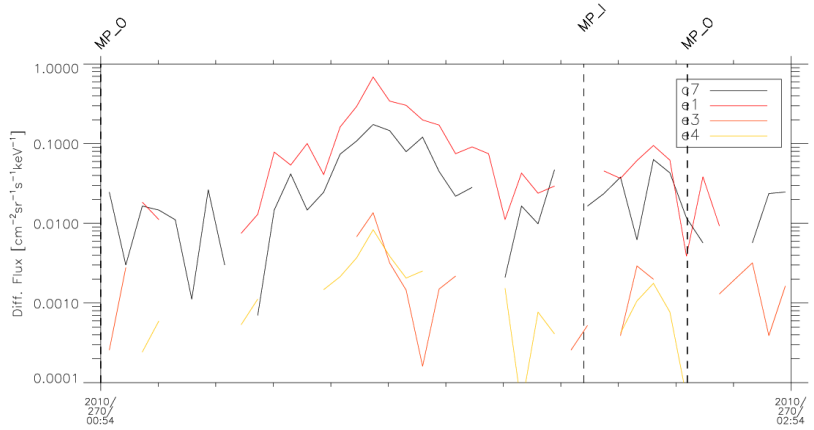
Εικόνα 35. Μετρήσεις διαφυγόντων ηλεκτρονίων από τον Κρόνο, στα κανάλια C_7, E_1, E_3 και E_4 του LEMMS, για το χρονικό διάστημα των ημερών 260-261/2011. Ο κάθετος άξονας είναι διαφορική ροή και ο οριζόντιος χρόνος σε μορφή ημερολογιακής ημέρας. Το διαστημόπλοιο βρίσκεται στο εσωτερικό της μαγνητοθήκης. Παρατηρείται μία έντονη κορυφή στις αρχές της ημέρας 261, στα κανάλια E_1 και C_7.

Ένα ακόμα παράδειγμα διαφυγόντων ηλεκτρονίων στα κανάλια C_7, E_1, E_3 και E_4 παρατίθεται στην Εικόνα 37 και αφορά την ημέρα 270/2010. Στα μέσα περίπου του χρονικού διαστήματος παρατηρούνται κάποιες αυξήσεις στο σήμα στα κανάλια E_1 και C_7, οι οποίες έχουν μικρή διάρκεια (περίπου 20 λεπτά). Η θέση του Cassini έχει καταγραφεί ότι είναι εντός της μαγνητοθήκης (Jackman et al., 2019), ωστόσο είναι πιθανή και κάποια σύντομη είσοδος και έξοδος από τη μαγνητόσφαιρα του Κρόνου που δεν αναφέρεται στις σχετικές λίστες, καθώς το μαγνητικό πεδίο αλλάζει τον προσανατολισμό του από βόρειο σε νότιο αρκετές φορές.

Το τελευταίο γεγονός απεικονίζεται στην Εικόνα 38 και αφορά τις ημέρες 217-218/2016, κατά τις οποίες το σκάφος βρισκόταν στη μαγνητοθήκη. Παρατηρούνται κάποιες ασθενείς μεταβολές στα κανάλια E_1 και C_7, στη διάρκεια όλου του χρονικού διαστήματος, οι οποίες χρήζουν προσοχής στην ερμηνεία τους ως σήμα, καθώς κάποιες ενδέχεται να αντιστοιχούν και σε διαβάσεις από τη μαγνητόπαυση του πλανήτη.



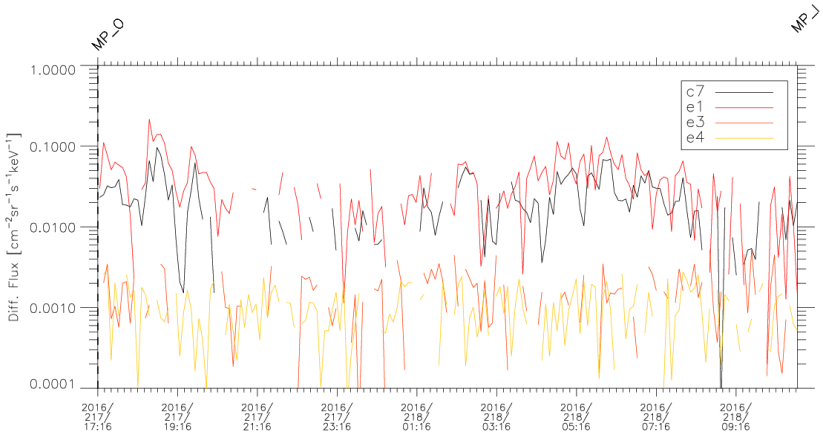
Εικόνα 36. Μετρήσεις διαφυγόντων ηλεκτρονίων από τον Κρόνο, στα κανάλια C_7,E_1,E_3 και E_4 του LEMMS, για την ημέρα 344/2007. Ο κάθετος άξονας είναι διαφορική ροή και ο οριζόντιος χρόνος σε μορφή ημερολογιακής ημέρας. Το διαστημόπλοιο βρίσκεται στον ηλιακό άνεμο, ενώ παρατηρείται μία έντονη αύξηση στις 05:22 της ίδιας ημέρας, στα κανάλια E_1 και C_7.



Εικόνα 37. Μετρήσεις διαφυγόντων ηλεκτρονίων από τον Κρόνο, στα κανάλια C_7, E_1, E_3 και E_4 του LEMMS, για την ημέρα 270/2010. Ο κάθετος άξονας είναι διαφορική ροή και ο οριζόντιος χρόνος σε μορφή ημερολογιακής ημέρας. Παρατηρούνται κάποιες αυξήσεις στα κανάλια E_1 και C_7 περίπου στα μέσα του χρονικού διαστήματος, κατά το οποίο το σκάφος έχει καταγραφεί ότι βρίσκεται στη μαγνητοθήκη.

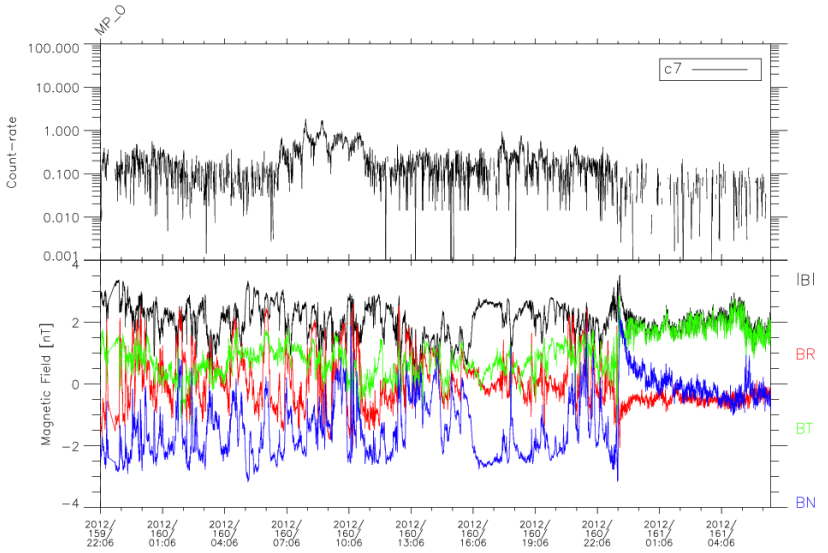
Στα προηγούνενα παραδείγματα, αναφέραμε ότι κάποιες μετρήσεις ηλεκτρονίων ενδέχεται να βρίσκονται εντός της μαγντόσφαιρας, και όχι στη μαγνητοθήκη όπως έχει καταγραφεί, γεγονός που αντιληφθήκαμε κατά την ανάλυση των δεδομένων μας. Είναι αρκετά πιθανό να υπάρχουν ελλείψεις στις καταγραφές των διαβάσεων από τη μαγνητόπαυση, σύμφωνα με τη λίστα η οποία υπάρχει στη δημοσίευση των Jackman et al., 2019.

Η διαπίστωση αυτή έγινε με αφορμή κάποιες ασυνήθιστα υψηλές ροές ηλεκτρονίων που παρατηρήσαμε σε αρκετά χρονικά διαστήματα, ενώ στη συνέχεια ελέγξαμε και τα δεδομένα του μαγνητικού πεδίου προκειμένου να βγάλουμε πιο ασφαλή συμπεράσματα (κυρίως την έντασή του και τον βόρειο ή νότιο προσανατολισμό του). Εφόσον δεν είμαστε βέβαιοι αν ορισμένα γεγονότα είναι όντως εκτός της μαγνητόπαυσης, δεν τα λαμβάνουμε υπόψη στη μελέτη μας. Στην Εικόνα 40 φαίνεται ένα τέτοιο χαρακτηριστικό παράδειγμα, όπου καταγράφονται ροές παρόμοιας έντασης με αυτές που παρατηρούμε μέσα στη μαγνητόσφαιρα, ενώ στην Εικόνα 39 δίνεται μία πιθανώς μη καταγεγραμμένη διάβαση από τη μαγνητόπαυση, η



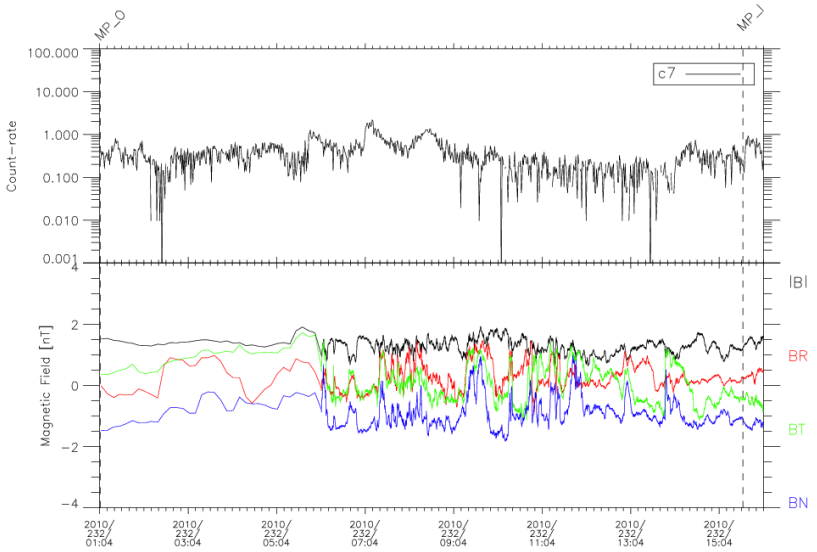
Εικόνα 38. Μετρήσεις διαφυγόντων σχετικιστικών ηλεκτρονίων από τον Κρόνο, στα κανάλια C_7, E_1, E_3 και E_4 του LEMMS, για τις ημέρες 217-218/2016. Ο κάθετος άξονας είναι διαφορική ροή και ο οριζόντιος χρόνος σε μορφή ημερολογιακής ημέρας. Σημειώνονται κάποιες ασθενείς αυξήσεις στα κανάλια E_1 και C_7, ενώ το σκάφος έχει καταγραφεί ότι βρίσκεται στη μαγνητοθήκη.

οποία λογικά έλαβε χώρα κοντά στις 06:00 της ημέρας 232/2010.

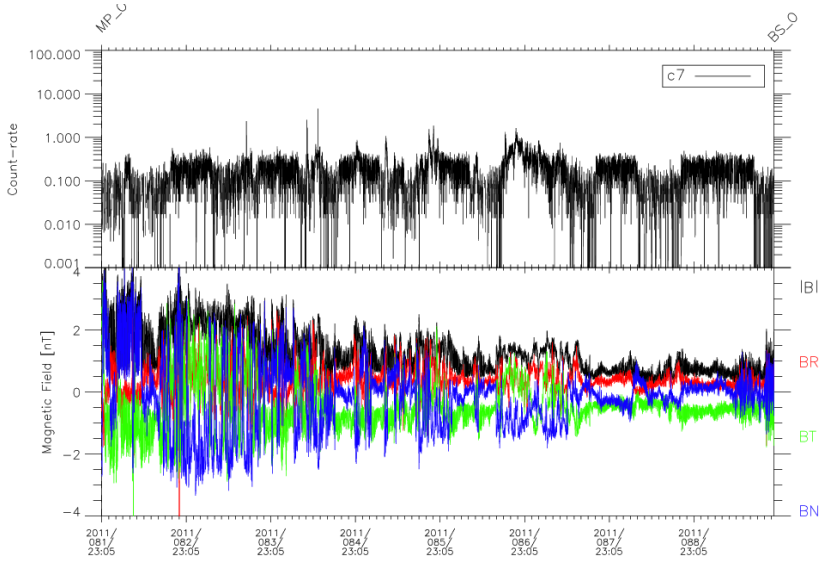


Εικόνα 39. Πάνω: Μετρήσεις σχετικιστικών ηλεκτρονίων στο κανάλι C_7 του LEMMS, για το χρονικό διάστημα των ημερών 159-161/2012. Ο κάθετος άξονας είναι counts/s και ο οριζόντιος χρόνος σε μορφή ημερολογιακής ημέρας. Κάτω: Το μέτρο και οι 3 συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου για το ίδιο χρονικό διάστημα. Συγκρίνοντας τη χρονοσειρά με τα δεδομένα του μαγνητικού πεδίου, θεωρούμε πολύ πιθανό ότι οι παρατηρούμενες αυξήσεις την ημέρα 160, είναι στην πραγματικότητα διάβαση από την μαγνητόπαυση προς το εσωτερικό της μαγνητόσφαιρας του Κρόνου.

Στην Εικόνα 41, με βάση τα δεδομένα του μαγνητικού πεδίου, φαίνεται να έχουμε συχνές διαβάσεις από την επιφάνεια της μαγνητόπαυσης οι οποίες και πάλι δεν έχουν καταγραφεί. Οι αυξήσεις στις ροές ηλεκτρονίων φαίνεται να συμβαίνουν με περιοδικότητα περίπου 1 ημέρας, αυτό ωστόσο ίσως οφείλεται στην περιοδική μετάβαση του Cassini εντός και εκτός της μαγνητόπαυσης.



Εικόνα 40. Μετρήσεις σχετικιστικών ηλεκτρονίων στο κανάλι C_7 του LEMMS, για την ημέρα 22/2010. Ο κάθετος άξονας είναι counts/s και ο οριζόντιος χρόνος σε μορφή ημερολογιακής ημέρας. Κάτω: Το μέτρο και οι 3 συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου για το ίδιο χρονικό διάστημα. Οι αυξήσεις που σημειώνονται είναι ιδιαίτερα υψηλές, και τα δεδομένα μαγνητικού πεδίου υποδεικνύουν ότι είναι πολύ πιθανό αυτές οι μετρήσεις να αντιστοιχούν στο εσωτερικό της μαγνητόσφαιρας του Κρόνου.



Εικόνα 41. Πάνω: Μετρήσεις σχετικιστικών ηλεκτρονίων στο κανάλι C_7 του LEMMS, για τις ημέρες 81-89/2011. Ο κάθετος άξονας είναι counts/s και ο οριζόντιος χρόνος σε μορφή ημερολογιακής ημέρας. Κάτω: Το μέτρο και οι 3 συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου για το ίδιο χρονικό διάστημα. Οι αυξήσεις στα ηλεκτρόνια είναι και εδώ έντονες και συχνές, ενώ ταυτόχρονα συονδεύονται και από έντονες μεταβολές και στο μαγνητικό πεδίο.

4 Συμπεράσματα

Στις προηγούμενες Ενότητες περιγράψαμε τη διαδικασία που ακολουθήσαμε προκειμένου να διαπιστώσουμε αν υπάρχουν σχετικιστικά ηλεκτρόνια που διαφεύγουν από τη μαγνητόσφαιρα του Κρόνου, αλλά και να κατανοήσουμε τον μηχανισμό που είναι υπεύθυνος για τη διαφυγή σχετικιστικών ηλεκτρονίων από τις μαγνητόσφαιρες τόσο του Δία αλλά και του Κρόνου. Στις παρακάτω υποενότητες προσπαθούμε να ερμηνεύσουμε αυτές τις παρατηρήσεις, συζητώντας τη σημασία τους στα πλαίσια τόσο της δυναμικής των μαγνητοσφαιρών του Δία και του Κρόνου, όσο και της ηλιοσφαιρικής φυσικής.

4.1 Διαφυγόντα σχετικιστικά ηλεκτρόνια από τον Κρόνο

Συνολικά, μελετήσαμε πάνω από 3000 περάσματα του Cassini από το κρουστικό κύμα του Κρόνου, εκτός της μαγνητόπαυσης ή του κύματος κρούσης του. Οι περιπτώσεις στις οποίες υπάρχει διαφυγή σχετικιστικών ηλεκτρονίων ($>$511 keV) με μικρή ή καθόλου αμφιβολία είναι μόλις έξι (αν λάβουμε υπόψη μας και την περίπτωση της Εικόνας 38), στις οποίες επιπλέον το σήμα είναι πολύ κοντά στα όρια του θορύβου. Αυτές οι λίγες και μικρής χρονικής διάρκειας παρατηρήσεις είναι αδύνατον να αναλυθούν για την καταγραφή των χρονικών κλίμακων διαφυγής ηλεκτρονίων από τον Κρόνο, τουλάχιστον για σχετικιστικές ενέργειες.

Ωστόσο, όπως αναφέρεται στη δημοσίευση των Liou et al., 2021, ο Κρόνος είναι πράγματι ισχυρή πηγή ηλεκτρονίων σε χαμηλότερες ενέργειες ($\sim$ 10-100 keV), παρατήρηση που επιβεβαιώθηκε και από τη δική μας επισκόπηση των δεδομένων. Αυτό το ενεργειακό εύρος είναι το καταλληλότερο για τη μελέτη του μηχανισμού διαφυγής των ηλεκτρονίων από τον πλανήτη, με την προϋπόθεση ότι ο μηχανισμός αυτός δεν έχει σημαντική εξάρτηση από την ενέργεια των ηλεκτρονίων.

Στην ίδια δημοσίευση αναφέρεται ότι η απόδοση στη διαφυγή ενεργητικών ηλεκτρονίων από τον Κρόνο, αυξάνεται με την αύξηση της ενέργειας. Ωστόσο, η μελέτη μας δεν επιβεβαιώνει αυτή την πρόβλεψη, τουλάχιστον στο ενεργειακό εύρος των σχετικιστικών ενεργειών. Ένας πιθανός λόγος για αυτή την ασυμφωνία της μελέτης μας με αυτή των Liou et al., 2021, είναι ότι στη συγκεκριμένη δημοσίευση συγκρίθηκαν οι ροές ηλεκτρονίων εντός και εκτός της μαγνητόπαυσης με βάση έναν αυτοματοποιημένο αλγόριθμο, ο οποίος έδινε ως αποτέλεσμα μεγάλη πιθανότητα διαφυγής ηλεκτρονίων σε υψηλές ενέργειες, βασιζόμενη όμως σε μετρήσεις κοντά στο όριο του θορύβου.

Παρόλο που οι Liou et al., 2021 αφαίρεσαν τον θόρυβο, η στατιστική του διακύμανση παραμένει και κυριαρχεί σε περιπτώσεις πολύ χαμηλής ή μη διακριτής ροής ενεργητικών ηλεκτρονίων, τόσο εντός όσο και εκτός της μαγνητόπαυσης. Έτσι, όταν οι Liou et al., 2021 έβρισκαν τον λόγο του σήματος ηλεκτρονίων έξω από τη μαγνητόπαυση προς αυτόν μέσα από τη μαγνητόπαυση, ουσιαστικά διαιρούσαν τιμές ροής πολύ κοντά στα όρια του θορύβου, με αποτέλεσμα την εκτίμηση πως ένα μεγάλο ποσοστό ηλεκτρονίων σε αυτές τις ενεργειες διαφεύγει. Ένα ακόμα στοιχείο είναι ότι οι συγγραφείς έλεγξαν μόνο τα C κανάλια του LEMMS· παρ' όλα αυτά, εφόσον ανιχνεύτηκαν διαφυγόντα ηλεκτρόνια στα κανάλια C_5-C_6, θα έπρεπε να ανιχνευθούν και από τα κανάλια E_0-E_2 που επικαλύπτουν ενεργειακά τα C_5-C_6 και έχουν πολύ μεγαλύτερη ευαισθησία. Η επισκόπησή μας δεν ανέδειξε πολλά τέτοια γεγονότα.

Με βάση, λοιπόν, τις παρατηρήσεις μας για όλη την παραμονή του Cassini στον Κρόνο, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι ο Κρόνος δεν είναι σημαντική πηγή σχετικιστικών ηλεκτρονίων στην ηλιόσφαιρα. Για αυτό το λόγο, το μοντέλο που προτείνεται στη δημοσίευση των

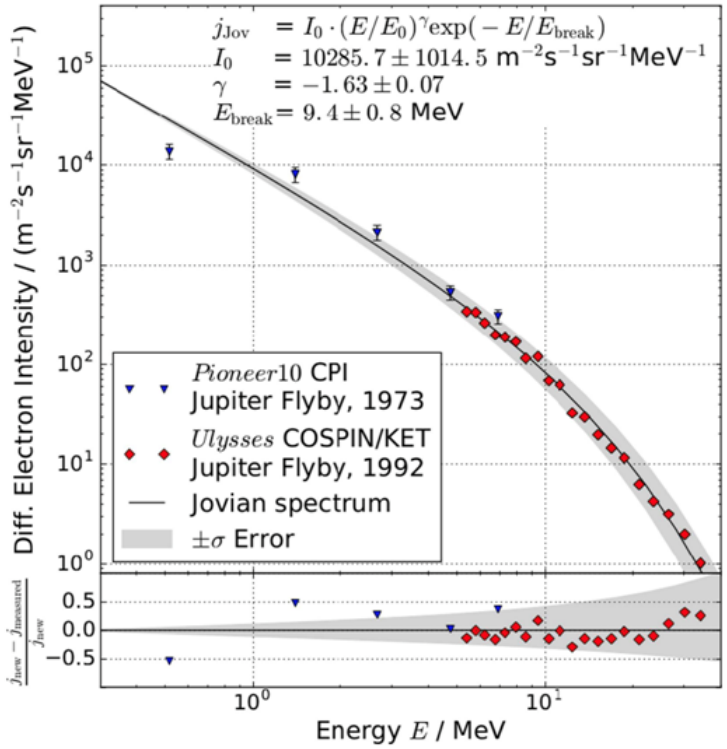
Lange and Fichtner, 2008, σύμφωνα με το οποίο οι ροές ηλεκτρονίων ενέργειας 1 MeV θα έπρεπε να αυξάνουν καθώς πλησιάζουμε στην περιοχή του Κρόνου και συνολικά να επιμολύνουν το σήμα διαφυγόντων ηλεκτρονίων από το Δία, δείχνει να μην επαληθεύεται από τις παρατηρήσεις μας. Μία υπόθεση που μπορούμε να κάνουμε σχετικά με αυτό, είναι πως ίσως οφείλεται στο ότι οι συγγραφείς θεώρησαν την συνάρτηση πηγής στον Κρόνο να είναι 1.5 φορές ισχυρότερη από αυτή στο Δία.

Μια ποσοτική εκτίμηση που μπορεί να αναδείξει πόσο ανίσχυρη ειναι η πηγή διαφυγόντων ηλεκτρονίων στον Κρόνο μπορεί να γίνει υπό το φάσμα της δημοσίευσης των Vogt et al., 2018. Στη μελέτη αυτή προτείνεται ένα μέσο ενεργειακό φάσμα υψηλοενεργειακών ηλεκτρονίων που διαφεύγουν από το Δία, με συνδυασμό μετρήσεων από πολλά διαστημόπλοια. Για ενέργειες της τάξης $\sim$ 1 MeV, η διαφορική ροή των ηλεκτρονίων φτάνει περίπου στα $10^4\ m^{-2}\ sr^{-1}\ s^{-1}\ MeV^{-1}$ κατά μέσο όρο και για ήρεμες περιόδους, εκτός του κύματος κρούσης του Δία, δηλαδή σε κάποια μικρή απόσταση από τη μαγνητόσφαιρά του. Κοντά στη μαγνητόπαυση, η ροή αυτή των ηλεκτρονίων είναι έως και 10-100 φορές μεγαλύτερη, ακόμα και σε ενέργειες $>>$1 MeV (Εικόνα 27). Με τα δεδομένα του Cassini για τον Κρόνο, η διαφορική ροή στα κανάλια E_3-E_6, που ανιχνεύουν ηλεκτρόνια σε ενέργειες μερικών MeV, δεν καταγράφει κάποιο υπολογίσιμο σήμα ηλεκτρονίων σε κανένα από τα 6 καταγεγραμμένα επεισόδια διαφυγής σχετικιστικών ηλεκτρονίων, στα οποία το κανάλι C_7 (510-832 keV) δείχνει κάποιο αμυδρό σήμα. Οι μετρήσεις αυτών των $\sim$ MeV ηλεκτρονίων αντιστοιχούν σε ροή της τάξεως των $10^3 - 10^4\ m^{-2}\ sr^{-1}\ s^{-1}\ MeV^{-1}$, συγκρίσιμη με αυτή των Vogt et al., 2018, ωστόσο στα όρια της μαγνητόπαυσης του Κρόνου, εκεί όπου το αντίστοιχο σήμα των ηλεκτρονίων από το Δία μπορεί να ειναι εκατοντάδες φορές ισχυρότερο. Για την εκτίμηση της έντασης των Κρόνιων ηλεκτρονίων στην ηλιόσφαιρα οι Lange and Fichtner, 2008 υπέθεσαν πως η πηγή ηλεκτρονίων από τον Κρόνο μπορεί να είναι από 10 φορές ασθενέστερη έως και 1.5 φορά ισχυρότερη από αυτη του Δία, έτσι ώστε να έχει κάποια μη αμελητέα επίδραση στα ηλιόσφαιρικά ηλεκτρόνια. Ωστόσο η μελέτη μας αναδυκνύει πως καμία από αυτές τις υποθέσεις δεν ειναι ρεαλιστική.

4.2 Σύγκριση των αποτελεσμάτων για τους δύο πλανήτες

Ενώ ο Δίας αποτελεί αδιαμφισβήτητη και ισχυρή πηγή σχετικιστικών ηλεκτρονίων στην ηλιόσφαιρα, ο Κρόνος φαίνεται να είναι μία αμελητέα πηγή. Δεδομένου ότι οι δύο πλανήτες μοιράζονται αρκετά παρόμοια χαρακτηριστικά σχετικά με τη δυναμική των μαγνητοσφαιρών τους, ένα εύλογο ερώτημα που προκύπτει είναι το τι διαφοροποιεί τόσο σημαντικά τους δύο πλανήτες ως προς την διαφυγή πολύ υψηλοενεργειακών ηλεκτρονίων. Η διαφορά τους έγκειται στο μηχανισμό διαφυγής, στην πηγή δημιουργίας τους ή σε συνδυασμό και των δύο παραγόντων;

Με βάση τη βιβλιογραφία, ο μόνος κοινός μηχανισμός παραγωγής (και πιθανής διαφυγής) σχετικιστικών ηλεκτρονίων σε μεγάλες αποστάσεις από τους πλανήτες είναι τα σχεδόν περιοδικά (Quasi-Periodic) φαινόμενα επιτάχυνσης ηλεκτρονίων (Gladstone et al., 2002; Palmaerts et al., 2016; Roussos et al., 2016) με χαρακτηριστική κλίμακα 60 λεπτών στον Κρόνο και 40 λεπτών στο Δία. Στο Δία παρατηρούνται παροδικά περιπτώσεις διαφυγόντων σχετικιστικών ηλεκτρονίων με περιοδικότητα $\sim$ 40-50 λεπτά (Krupp et al., 2002a). Παρ' όλα αυτά το ίδιο δεν ισχύει για τον Κρόνο. Αν λοιπόν αυτά τα φαινόμενα, ως μηχανισμοί πηγής και διαφυγής υψηλοενεργειακών ηλεκτρονίων ήταν σημαντικά, θα έπρεπε κατά αναλογία να ανιχνεύαμε ένα μη αμελητέό σήμα ηλεκτρονίων με χαρακτηριστική περιοδικότητα $\sim$ 60 λεπτών και από τον Κρόνο. Το ότι αυτό εντοπίζεται στο Δία και όχι στον Κρόνο υποδεικνύει



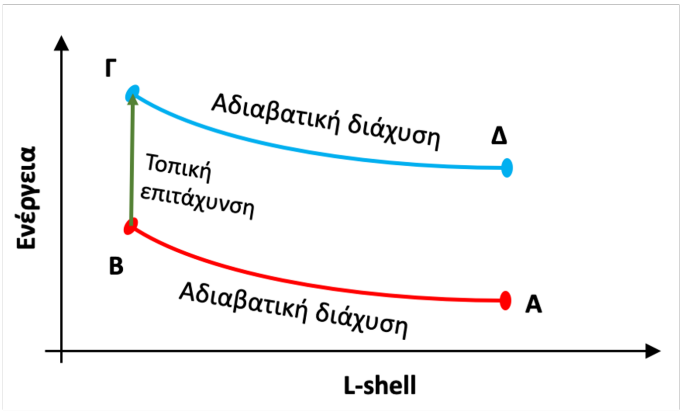
Εικόνα 42. Το νέο ενεργειακό φάσμα ηλεκτρονίων με βάση παρατηρήσεις από τις αποστολές Ulysses και Pioneer 10. Για ενέργειες της τάξης $\sim$ MeV, το άνω όριο της διαφορικής ροής των ηλεκτρονίων φτάνει περίπου στο $10^4\ m^{-2}\ sr^{-1}\ s^{-1}\ MeV^{-1}$. (Vogt et al., 2018)

πως ο μηχανισμός που προκαλεί αυτά τα QP δυναμικά φαινόμενα στο Δία, απλά διαμορφώνει (modulates) τα χαρακτηριστικά των διαφυγόντων ηλεκτρονίων που παράγονται από άλλες πηγές.

Το ερώτημα, λοιπόν, φαίνεται να αφορά την πηγή δημιουργίας σχετικιστικών ηλεκτρονίων στην εξωτερική μαγνητόσφαιρα του Δία, καθώς αυτό μοιάζει να διαφοροποιεί τους δύο πλανήτες, με δεδομένο ότι από τον Κρόνο διαφεύγουν μεν ηλεκτρόνια (Liou et al., 2021), αλλά η ροή τους ειναι σημαντική μόνο στις χαμηλότερες ενέργειες που μετράει το LEMMS ($<$100 keV). Για παράδειγμα, έχει αναφερθεί ότι η διαφυγή ηλεκτρονίων από τη μαγνητόσφαιρα του Δία παρουσιάζει μία ασυμμετρία μεταξύ αυγής και απογεύματος (dawn to dusk), η οποία μάλιστα έχει παρατηρηθεί και στον Κρόνο (Liou et al., 2021). Αυτό το γεγονός υποδεικνύει ότι ίσως οι δύο πλανήτες να έχουν όντως κοινούς μηχανισμούς ως προς τη διαφυγή ηλεκτρονίων, και η καθοριστική διαφορά μεταξύ των δύο πλανητών ως προς τα διαφυγόντα σχετικιστικά ηλεκτρόνια, να είναι οι πολύ μεγαλύτερες ροές σχετικιστικών ηλεκτρονίων στην εξωτερική μαγνητόσφαιρα του Δία.

Μία άλλη υποψήφια πηγή είναι φυσικά οι ζώνες ακτινοβολίας του πλανήτη, με την προϋπόθεση ότι τα ηλεκτρόνιά τους μπορούν να επιταχυνθούν, εκτός απο αδιαβατικά, και με μη αδιαβατικό τρόπο. Αυτό εξηγείται στην Εικόνα 43. Ηλεκτρόνια που ξεκινάνε από το σημείο A στην εξωτερική μαγνητόσφαιρα με ενέργεια E_A και μεταφέρονται αδιαβατικά στις ζώνες ακτινοβολίας στο σημείο B, θα καταλήξουν με ενέργεια $E_B > E_A$. Αν αντιστοίχως υπάρχουν μηχανισμοί και εξωτερικής αδιαβατικής διάχυσης, ηλεκτρόνια με αρχική ενεργεια E_B θα καταλήξουν στο σημείο A με ενέργια E_A, χωρίς κανένα ενεργειακό όφελος από την παρουσία και το περασμά τους από τις ζώνες ακτινοβολίας. Αν όμως εντός των ζωνών ακτινοβολίας

(σημείο Β) υπάρχουν μηχανισμοί τοπικής, μη αδιαβατικής επιτάχυνσης (από το Β στο Γ με $E_Γ>E_B$), τότε η εξωτερική αδιαβατική μετάβαση προς την εξωτερική μαγνητόσφαιρα μέχρι το σημείο Δ θα οδηγήσει σε $E_Δ>E_A$. Με αυτό τον τρόπο, λοιπόν, θεωρητικά μπορεί ηλεκτρόνια που βρίσκονται στην εξωτερική μαγνητόσφαιρα και έχουν αρχικά χαμηλή ενέργεια, να βρεθούν μετά από την κυκλοφορία τους στην ίδια περιοχή της εξωτερικής μαγνητόσφαιρας με υψηλότερη τελική ενέργεια. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετές αναφορές σχετικά με τοπική μη αδιαβατική επιτάχυνση ηλεκτρονίων στις ζώνες ακτινοβολίας του Δία (Shprits et al., 2012; Woodfield et al., 2013, 2014).

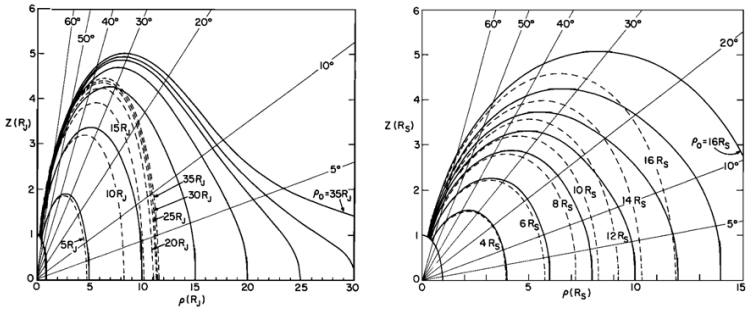


Εικόνα 43. Η διαφορά μεταξύ αδιαβατικής και μη αδιαβατικής μεταφοράς. Ηλεκτρόνιο που ξεκινά από το σημείο Α με ενέργεια E_A και μεταφέρεται αδιαβατικά μέχρι το σημείο Β όπου έχει ενέργεια E_B, όταν επιστρέψει αδιαβατικά στο σημείο Α θα έχει πάλι ενέργεια E_A. Αν όμως από το σημείο Β επιταχυνθεί τοπικά και αποκτήσει υψηλότερη ενέργεια ίση με $E_Γ$, τότε αν στη συνέχεια μεταφερθεί αδιαβατικά μέχρι το σημείο Δ που αντιστοιχεί σε ίδια απόσταση με το σημείο Α, η τελική ενέργειά του θα είναι υψηλότερη από την αρχική, δηλαδή $E_Δ>E_A$.

Εκτός από το μηχανισμό που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο, υπάρχει και ένας άλλος που μπορεί να εξηγήσει θεωρητικά την ύπαρξη ηλεκτρονίων πολύ υψηλής ενέργειας στη εξωτερική μαγνητόσφαιρα του Δία. Όπως έχουμε ήδη πει, η μαγνητόσφαιρα του Δία έχει μία σχετικά πιο πεπλατυσμένη μορφή γύρω από τον μαγνητικό της ισημερινό, σε σχέση με αυτή της Γης, η οποία ονομάζεται συμβατικά μαγνητοδίσκος. Στις περιοχές της μαγνητόσφαιρας όπου η μορφή του μαγνητοδίσκου κυριαρχεί, τόσο η καμπυλότητα των μαγνητικών δυναμικών γραμμών όσο και η βαθμίδα της έντασης του μαγνητικού πεδίου, είναι τέτοια ώστε τα ιόντα και τα ηλεκτρόνια με ενέργεια από ένα κρίσιμο όριο και πάνω (όριο αδιαβατικότητας), να κινούνται με χαοτικό και όχι αδιαβατικό τρόπο (Birmingham, 1982). Εφόσον τα σωματίδια κινούνται μη αδιαβατικά, δεν μπορούν να οριστούν οι ίδιες αδιαβατικές αναλλοίωτες που αντιστοιχούν στην περιοδική κίνηση των σωματιδίων. Η κίνησή τους κυριαρχείται από τον παράγοντα ($v\times B$) της δύναμης Lorentz, η οποία δεν επιφέρει αλλαγή στην ενέργειά τους, παρά μόνο αλλάζει την καμπυλότητα της τροχιάς τους. Σε αυτήν την περίπτωση, λοιπόν, τα σωματίδια κατάλληλης ενέργειας διαχέονται ακτινικά τόσο προς τα μέσα όσο και προς τα έξω και κατά μήκος του μαγνητοδίσκου, διατηρώντας την ενέργειά τους. Η διαφορά με την αδιαβατική μεταφορά που περιγράψαμε στην προηγούμενη παράγραφο, είναι ότι εξαιτίας της χαοτικής κίνησης τα σωματίδια μπορούν να μεταφερθούν από τις ζώνες ακτινοβολίας στην εξωτερική μαγνητόσφαιρα, χωρίς την επίδραση ηλεκτρικών πεδίων και με μηδενικές ή ελάχιστες απώλειες στην ενέργειά τους.

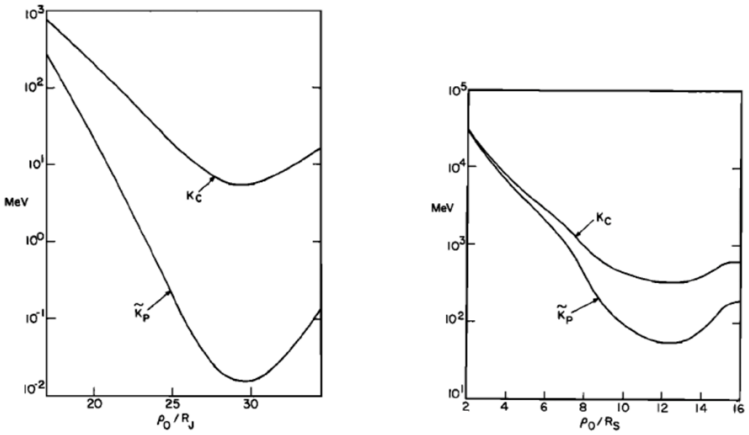
Για να γίνει πιο κατανοητή η σημασία του ορίου αδιαβατικότητας σε γεωμετρίες μαγνητι-

κού πεδίου όπως είναι αυτή του Δία, παραθέτουμε τις Εικόνες 44 και 45. Ο μαγνητοδισκος του Δία έχει τόσο πεπλατυσμένη μορφή, ώστε από μια απόσταση $\sim$ 25 R_J, ηλεκτρόνια με ενέργεια $>$10 MeV (τα οποία έχουν παρατηρηθεί στις ζώνες ακτινοβολίας του Δία σε τέτοιες αποστάσεις (Kollmann et al., 2018)) κινούνται μη αδιαβατικά. Από την άλλη, ο μαγνητοδίσκος του Κρόνου δεν είναι τοσο πεπλατυσμένος, δηλαδή η γεωμετρία του μαγνητικού πεδίου του είναι πιο κοντά στη διπολική μορφή (όπως συμβαίνει και στη Γη). Για τον Κρόνο, το όριο αδιαβατικότητας σε μία απόσταση $\sim$ 10 R_S (δηλαδή στην εξωτερική περιοχή των ζωνών ακτινοβολίας του και στο εσώτερο όριο του Κρόνιου μαγνητοδίσκου) είναι $>$500 MeV. Ωστόσο, στον Κρόνο οι μέγιστες ενέργειες ηλεκτρονίων έχουν παρατηρηθεί σε περιοχές με L$<$ 4, όπου το όριο αδιαβατικότητας είναι 10^4 MeV, και δεν ξεπερνάνε τα 10-20 MeV. Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα, ότι τα ηλεκτρόνια που μεταφέρονται ακτνικά προς τα έξω στον Κρόνο, θα το κάνουν με αδιαβατικό τρόπο, έχοντας απώλειες στην ενέργειά τους καθώς προσεγγίζουν τη μαγνητόπαυση. Βλέπουμε, δηλαδή, ότι οι ζώνες ακτινοβολίας του Κρόνου, σε αντίθεση με του Δία, δεν μπορούν να τροφοδοτήσουν την εξωτερική μαγνητόσφαιρα με ηλεκτρόνια ενεργειών της τάξης $\sim$ MeV μέσω ακτινικής μεταφοράς σε μεγαλύτερες αποστάσεις από τον πλανήτη. Ηλεκτρόνια που ξεκινάνε με ενέργεια 10 MeV στις ζώνες ακτινοβολίας του Κρόνου, θα φτάσουν στα όρια της μαγνητόπαυσης του πλανήτη (L$\sim$ 22) με ενέργεια περίπου 100 keV , αν όντως υπάρχει μηχανισμός εξωτερικής ακτινικής διάχυσης. Αυτός είναι ένας πιθανός λόγος που η μελέτη μας ανέδειξε αμελητέο σήμα σχετικιστικών διαφυγόντων ηλεκτρονίων από τον Κρόνο σε σχέση με το Δία.

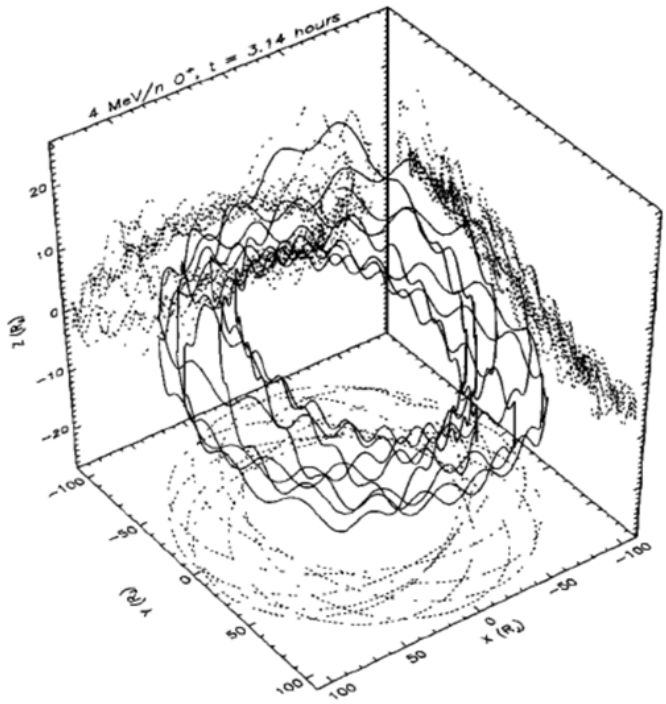


Εικόνα 44. Ο μαγνητοδίσκος του Δία (αριστερά) και του Κρόνου (δεξιά). Οι δύο άξονες δίνουν την απόσταση σε ακτίνες R_J και R_S αντίστοιχα, αλλά έχουν διαφορετικές κλίμακες. Οι μαύρες καμπύλες αναπαριστούν τις μαγνητικές δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου του κάθε πλανήτη, με αυτές του Δία να είναι εμφανώς πολύ πιο πεπλατυσμένες, ενώ οι διακεκομμένες γραμμές αναπαριστούν τις αντίστοιχες γραμμές του διπολικού μαγνητικού πεδίου. (Birmingham, 1982)

Ποιοτικά, αξίζει να σημειωθεί εδώ πως τα ίδια φαινόμενα μπορεί να επηρεάζουν την ακτινική, μη αδιαβατική διάχυση ιόντων προς την εξωτερική μαγνητόσφαιρα του Δία. Σε μια σχετική μελέτη διερευνάται η κίνηση ιόντων με ενέργεια πολύ μεγαλύτερη από το όριο αδιαβατικότητας, σε περιοχές που ο μαγνητοδίσκος του Δία κυριαρχεί (Selesnick et al., 2001). Όπως εκτιμάται, η κίνηση των ιόντων είναι χαοτική, δηλαδή δεν υπάρχει σταθερή περιοδικότητα στην κίνησή τους, και έτσι τα ιόντα διαχέονται ακτινικά καθώς κινούνται γύρω από τον πλανήτη, διατηρώντας την ενέργειά τους. Η κίνηση αυτή αποτυπώνεται στην προσομοίωση της Εικόνας 46, για ιόντα οξυγόνου (O^+) ενέργειας 4 MeV/nuncleon (= 64 MeV). Για τα ηλεκτρόνια με ενέργειες πάνω από το αδιαβατικό όριο, η κίνηση θα είναι ποιοτικά όμοια με αυτή των πολύ ενεργητικών ιόντων.



Εικόνα 45. Το όριο αδιαβατικότητας των ηλεκτρονίων, K_C, για το Δία (αριστερά) και για τον Κρόνο (δεξιά). Στο Δία, ηλεκτρόνια σε αποστάσεις ~ 25 R_J, έχουν όριο αδιαβατικότητας $>$10 MeV. Τέτοια ηλεκτρόνια έχουν πράγματι παρατηρηθεί σε τέτοιες αποστάσεις στις ζώνες ακτινοβολίας του Δία. Αντίθετα, στον Κρόνο σε απόσταση ~ 4 R_S το όριο αδιαβατικότητας είναι 10^4 MeV, ενώ οι μέγιστες ενέργειες που έχουν παρατηρηθεί δεν ξεπερνούν τα 20 MeV. (Birmingham, 1982)



Εικόνα 46. Προσομοίωση της τρισδιάστατης χαοτικής κίνησης των ιόντων που βρίσκονται πάνω από το όριο αδιαβατικότητας στη μαγνητόσφαιρα του Δία. Οι άξονες αναπαριστούν την απόσταση από τον πλανήτη σε μονάδες R_J. (Selesnick et al., 2001)

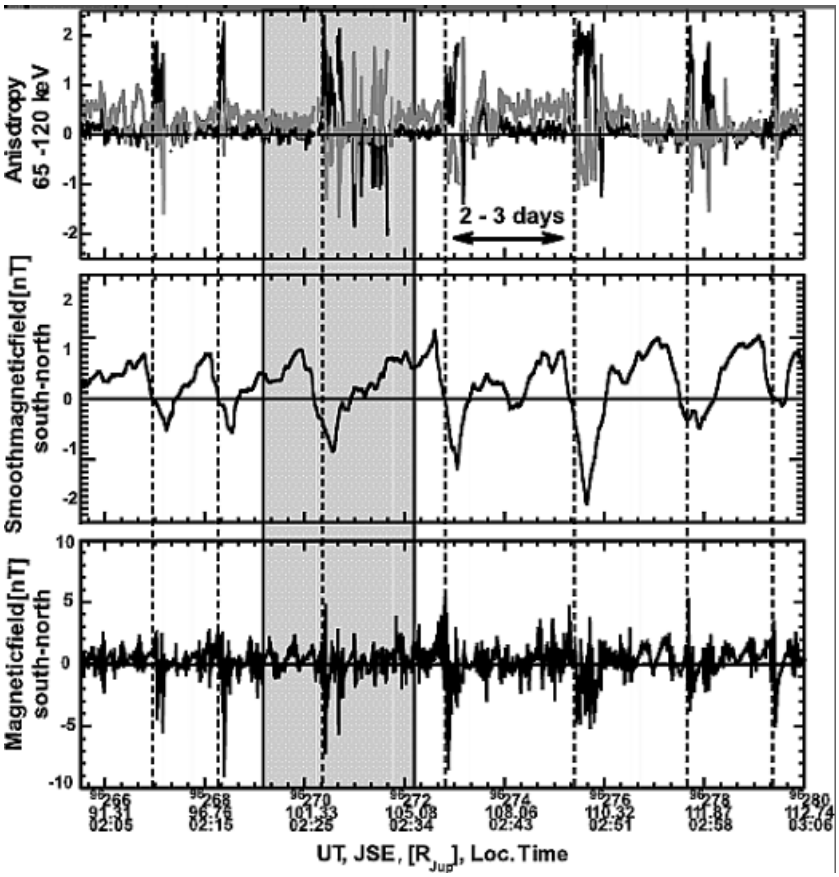
4.3 Μηχανισμοί παραγωγής και διαφυγής σχετικιστικών ηλεκτρονίων από το Δία

Στην Εισαγωγή αναφέραμε ότι η διαφυγή ηλεκτρονίων από τη μαγνητόσφαιρα του Δία και του Κρόνου καθορίζεται από διάφορους παράγοντες, όπως είναι η δυναμική πίεση του ηλιακού ανέμου και η γρήγορη περιστροφή του πλανήτη. Στη μελέτη μας ανιχνεύσαμε διαφυγό-

ντα ηλεκτρόνια με μία χαρακτηριστική περιοδικότητα 2-3 ημερών, γεγονός το οποίο πιθανώς υποδεικνύει έναν επιπλέον μηχανισμό διαφυγής. Στη δημοσίευση των Kronberg et al., 2005 αναφέρεται ότι η χρονική κλίμακα των 2-3 ημερών, έχει παρατηρηθεί ως χαρακτηριστική περιοδικότητα του συστήματος του Δία, που εμφανίζεται υπό τη μορφή μεταβολών στη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου και ταυτόχρονα υπό τη μορφή αλλαγών στη ροή του πλάσματος στη μαγνητοουρά, η οποία εμφανίζει παροδικές έντονες ανισοτροπίες κατά την ακτινική διεύθυνση, υποδεικνύοντας τόσο εκτοξεύσεις πλάσματος προς τον πλανήτη, αλλά και προς τη μαγνητοουρά. Στην ίδια δημοσίευση, αυτή η χαρακτηριστική περιοδικότητα πιθανώς αποδίδεται στη συχνότητα με την οποία η μαγνητόσφαιρα του Δία γεμίζει, και στη συνέχεια αποσυμπιέζεται από το πλάσμα που παρέχει η Ιώ, όπως αναφέραμε στην Ενότητα 1.3. Σύμφωνα με την παρούσα μελέτη, αλλά και τις ενδείξεις που υπάρχουν στη βιβλιογραφία, θεωρούμε και εμείς πιθανό αυτή η περιοδικότητα που εμφανίζουν τα διαφυγόντα υψηλοενεργειακά ηλεκτρόνια από το Δία, να οφείλεται στις εσωτερικές διεργασίες που σχετίζονται με το "φούσκωμα" και το "ξεφούσκωμα" της μαγνητόσφαιρας, λόγω της διοχέτευσης μάζας από την Ιώ και της γρήγορης περιστροφής του πλανήτη. Το "ξεφούσκωμα" αυτό γίνεται μέσω επανασύνδεσης των μαγνητικών γραμμών (κυριαρχούμενο ωστόσο από εσωτερικές μαγνητοσφαιρικές διεργασίες, και όχι από τον ηλιακό άνεμο) και την απελευθέρωση πλασμοειδών που συμπαρασύρουν και ενεργητικά ηλεκτρόνια εκτός της μαγνητόσφαιρας του Δία.

Πρόσφατες μετρήσεις από το όργανο JEDI της αποστολής Juno, δείχνουν αρκετά συχνά την ύπαρξη ηλεκτρονίων με ενέργειες αρκετών MeV πάνω από τις πολικές περιοχές του Δία, στη ζώνη του σέλαος (Paranicas et al., 2018) (Bonfond et al., 2018) (Mauk et al., 2020). Οι ροές αυτών των ηλεκτρονίων εμφανίζουν ισχυρή κατευθυντικότητα κατά μήκος των μαγνητικών γραμμών του πεδίου του πλανήτη. Παρόλο που έχει διαπιστωθεί ότι εκδηλώνονται πάνω και σε ανοιχτές μαγνητικές γραμές, δεν έχει επιβεβαιωθεί έως τώρα αν υπόκεινται στην ίδια δυναμική με τα σχετικιστικά διαφυγόντα ηλεκτρόνια από το Δία. Από αυτές τις παρατηρήσεις, φαίνεται ότι ένας ακόμα πιθανός μηχανισμός επιτάχυνσης ή/και διαφυγής σχετικιστικών ηλεκτρονίων από τη μαγνητόσφαιρα του Δία, είναι η επιτάχυνση ηλεκτρονίων πάνω σε ανοιχτές δυναμικές μαγνητικές γραμμές, σε μεγάλα πλανητογραφικά πλάτη τα οποία βρίσκονται στη σελαϊκή ζώνη του Δία. Το σέλας, λοιπόν, το οποίο συνδέεται μαγνητικά με περιοχές της εξωτερικής μαγνητόσφαιρας, φαίνεται ότι είναι πηγή υψηλοενεργειακών ηλεκτρονίων, τα οποία είτε διαφεύγουν άμεσα κατά μήκος ανοιχτών μαγνητικών γραμμών, είτε τροφοδοτούν την εξωτερική μαγνητόσφαιρα, από την οποία μετέπειτα διαφεύγουν μέσω κάποιου άλλου μηχανισμού.

Ένα ακόμα ενδιαφέρον στοιχείο που αναδείχθηκε από τη μελέτη μας, είναι η πιθανή επιτάχυνση ηλεκτρονίων σε σχετικιστικές ενέργειες στο κρουστικό κύμα του Δία. Προηγούμενες μελέτες έχουν καταδείξει την επιτάχυνση ηλεκτρονίων σε πλανητικά κρουστικά κύματα (Masters et al., 2013), αν και τα αποτελέσματά τους παραμένουν ασαφή, αφού η ενίσχυση που προκύπτει είναι οριακή. Εν τούτοις, δεν έχει αναφερθεί μέχρι τώρα παρατήρηση σχετικά με την επιτάχυνση ηλεκτρονίων σε σχετικιστικές ενέργειες λόγω της διέλευσής τους από το κρουστικό κύμα του Δία. Αυτή η παρατήρηση πρέπει να αντιμετωπιστεί με προσοχή, γιατί θα μπορούσε απλά να σημαίνει ότι κοντά στο κρουστικό κύμα υπάρχει κάποιος μηχανισμός που επιτρέπει στα μαγνητοσφαιρικά ηλεκτρόνια να διαφεύγουν μέσω διόδων στο κρουστικό κύμα, χωρίς κάποιο επιπλέον φαινόμενο τοπικής επιτάχυνσης. Στην παρούσα εργασία καταγράφουμε αυτό το εύρημα προς περαιτέρω διερεύνησή του σε μελλοντικές αναλύσεις. Στη δημοσίευση των Masters et al., 2013 αναφέρονται παρατηρήσεις σχετικά με σχετικιστικά ηλεκτρόνια και στο κρουστικό κύμα του Κρόνου, τα οποία όμως χαρακτηρίζονται από πολύ χαμηλές ροές.



Εικόνα 47. Μετρήσεις πλάσματος και μαγνητικού πεδίου στο Δία από το Galileo στο χρονικό διάστημα των ημερών 265-280/1996. Στο πρώτο πάνελ απεικονίζεται η μετάβαση από την "ήρεμη" ισοτροπική ροή, στη "διαταραγμένη" ανισοτροπική ροή στα ιόντα ενεργειών 65-120 keV, όπου ο κάθετος άξονας είναι η ένταση της ανισοτροπίας. Στο δεύτερο και στο τρίτο πάνελ απεικονίζονται μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου, όπου διακρίνονται απότομες αλλαγές στην κατακόρυφη διεύθυνσή του, με τον κάθετο άξονα να είναι η ένταση του μαγνητικού πεδίου. Ο κοινός οριζόντιος άξονας αναπαριστά το χρόνο σε μορφή ημερολογιακής ημέρας (και τα υπόλοιπα τροχιακά χαρακτηριστικά του σκάφους). Τα φαινόμενα ανισοτροπίας και αλλαγής πολικότητας στα διαγράμματα αυτά εμφανίζουν κοινή περιοδικότητα 2-3 ημερών, με το μαγνητικό πεδίο να αλλάζει διεύθυνση όταν η ροή ιόντων μεταβαίνει από μία ισότροπη σε μία ανισότροπη φάση, όπως δείχνουν και οι διακεκομμένες γραμμές. Στη συνέχεια, το μαγνητικό πεδίο επανέρχεται σταδιακά, ενώ η ροή πλάσματος γίνεται ξανά ισοτροπική, μέχρι να αλλάξει και πάλι απότομα την πολικότητά του, ταυτόχρονα με τη ροή ιόντων που γίνεται πάλι ανισοτροπική.

5 Επίλογος

Στόχος της μελέτης μας ήταν να διαπιστώσουμε αν υπάρχουν διαφυγόντα σχετικιστικά ηλεκτρόνια από τον Κρόνο, και μέσω των αποτελεσμάτων μας να προσπαθήσουμε να κατανοήσουμε τις πηγές δημιουργίας υψηλοενεργειακών ηλεκτρονίων στην εξωτερική μαγνητόσφαιρα των δύο γιγάντιων πλανητών, αλλά και τους μηχανισμούς διαφυγής τους στην ηλιόσφαιρα. Για το σκοπό αυτό, αναλύθηκαν μετρήσεις ηλεκτρονίων από το όργανο LEMMS του Cassini, τόσο για το fly-by του διαστημοπλοίου από το Δία, όσο και για όλη την παραμονή του στον Κρόνο.

Επιβεβαιώνοντας προηγούμενες μελέτες, βρήκαμε ότι ο Δίας είναι ισχυρή πηγή σχετικιστικών ηλεκτρονίων στην ηλιόσφαιρα, τα οποία διαφεύγουν σε χαρακτηριστικές χρονικές κλίμακες των 40 λεπτών, 5 ωρών και 10 ωρών. Η μελέτη μας ανέδειξε ακόμα μία περιοδικότητα, αυτή των 2-3 ημερών, η οποία πιθανώς συνδέεται με την χρονική κλίμακα που η μαγνητόσφαιρα του Δία γεμίζει και στη συνέχεια αποσυμπιέζεται από το πλάσμα που παράγει η Ιώ, μέσω μαγνητικής επανασύνδεσης. Το υλικό που απελευθερώνεται από αυτή τη διαδικασία, εικάζεται πως μπορεί να συμπαρασύρει και σχετικιστικά ηλεκτρόνια που παράγονται και παγιδεύονται στην εξωτερική μαγνητόσφαιρα του Δία. Αντίθετα, στον Κρόνο τα γεγονότα διαφυγής σχετικιστικών ηλεκτρονίων που ανιχνεύτηκαν ήταν ελάχιστα και επιπλέον οι ροές τους πολύ χαμηλές. Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ο Κρόνος μάλλον είναι αμελητέα πηγή σχετικιστικών ηλεκτρονίων για την ηλιόσφαιρα και δεν επιμολύνει το σήμα των ηλεκτρονίων από το Δία. Η θεμελιώδης υπόθεση σε πολλές μελέτες πως η πηγή των υψηλοενεργειακών ηλεκτρονίων μη ηλιακής ή γαλαξιακής προέλευσης στην εσωτερική ηλιόσφαιρα κυριαρχείται από το Δία, είναι βάσιμη.

Όσον αφορά τις πηγές των πολύ υψηλοενεργειακών ηλεκτρονίων για το Δία, αυτές μπορεί να είναι εμμέσως οι ζώνες ακτινοβολίας του πλανήτη (με την έννοια πως η πηγή επιτάχυνσης πριν τη μεταφορά ηλεκτρονίων στην εξωτερική μαγνητόσφαιρα ειναι εκεί) και τα φαινόμενα QP40, αν και η σημαντικότητα των τελευταίων είναι αμφισβητήσιμη, με βάση και τα συγκριτικά αποτελέσματά μας για παρόμοιες διεργασίες που επιβεβαιωμένα συμβαίνουν στον Κρόνο. Επίσης, διαπιστώσαμε ότι υπάρχει πιθανή επιτάχυνση ηλεκτρονίων σε σχετικιστικές ενέργειες στο κρουστικό κύμα του Δία. Αυτή η τελευταία παρατήρηση πρέπει να διερευνηθεί περαιτέρω με ανεξάρτητες μετρήσεις, καθώς από θεωρητική σκοπιά η παραγωγή υπερσχετικιστικών ($>$10 MeV) ηλεκτρονίων σε κύματα κρούσης πλανητικών μαγνητοσφαιρών δεν έχει προβλεφθεί από σχετικά μεγάλο αριθμό μελετών (Masters et al., 2013).

Η παρούσα μελέτη έχει πολλαπλές προεκτάσεις και μπορεί επίσης να επωφεληθεί από περαιτέρω αναλύσεις που δεν ήταν δυνατόν να ολοκληρωθούν στα στενά χρονικά πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας. Ενδεικτικά, τα επόμενα βήματα και οι μελλοντικοί στόχοι για την παρούσα εργασία περιλαμβάνουν τα εξής:

- Χρήση δεδομένων φασματοσκοπίας και σύστασης ιόντων από το όργανο MIMI/CHEMS του Cassini (Krimigis et al., 2004), που έχει τη δυνατότητα να αναγνωρίζει διαφορετικούς τύπους ενεργητικών ιόντων, καθώς και το βαθμό ιονισμού τους, για καλύτερη κατανόηση της περιοχής που βρίσκεται το διαστημόπλοιο σε σχέση με τη μαγνητόπαυση του Κρόνου και του Δία. Το πλάσμα και τα ενεργητικά σωμάτια του ηλιακού ανέμου εμφανίζουν υψηλό βαθμό ιονισμού λόγω μεγαλύτερης θερμοκρασίας, ενώ το μαγνητοσφαιρικό πλάσμα γενικά είναι λιγότερο ιονισμένο. Για παράδειγμα, η ισχυρή παρουσία ιόντων He^{++} είναι ενδεικτική του ηλιακού ανέμου, ενώ η παρουσία O^{+} είναι ενδεικτική πληθυσμών της μαγνητόσφαιρας. Επιπροσθέτως, θα πρέπει να διερευνηθεί ταυτόχρονα και η κατανομή των γωνιών κλίσης (pitch angle) των σωματιδίων, ώστε να διαπιστωθεί αν αυτά κινούνται πάνω σε ανοιχτές μαγνητικές γραμμές.

- Μελέτη διαφυγόντων ηλεκτρονίων στον Κρόνο σε χαμηλότερες ενέργειες. Στη βιβλιογραφία, αλλά και στη μελέτη μας, είναι καλά τεκμηριωμένο με βάση παρατηρήσεις ότι ο Κρόνος είναι πηγή ενεργητικών ηλεκτρονίων για την ηλιόσφαιρα. Η μελέτη αυτών των ηλεκτρονίων πολύ πιθανώς είναι καταλληλότερη για τον εντοπισμό περιοδικοτήτων που είναι χαρακτηριστικές του μαγνητοσφαιρικού του συστήματος.

- Σχετικά με την πιθανή επιτάχυνση ηλεκτρονίων σε σχετικιστικές ενέργειες στο κρουστικό κύμα του Δία, πρέπει να γίνει περαιτέρω ανάλυση μετρήσεων σε ηλεκτρόνια ενεργειών $\sim$ MeV, ώστε να διαπιστωθεί αν η ενίσχυση είναι πραγματική, ή αν τα ηλεκτρόνια διαφεύγουν με κάποιο τρόπο συμπτωματικά από εκείνη την περιοχή. Οι μετρήσεις του CHEMS μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να διαπιστωθεί το κατά πόσο υπάρχει ταυτόχρονη διαφυγή ιόντων με μαγνητοσφαιρική σύσταση (Sergis et al., 2013). Μια τέτοια παρατήρηση θα διαχωρίσει επιταχυνόμενους από διαφυγόντες πληθυσμούς ενεργητικών σωματιδιών.

Βιβλιογραφία

Achilleos, N., Dougherty, M. K., Young, D. T., & Crary, F. (2004). Magnetic signatures of Jupiter's bow shock during the Cassini flyby. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, *109*(A9), Article A09S04, A09S04. https://doi.org/10.1029/2003JA010258

Allen, R. C., Mitchell, D. G., Paranicas, C. P., Hamilton, D. C., Clark, G., Rymer, A. M., Vines, S. K., Roelof, E. C., Krimigis, S. M., & Vandegriff, J. (2018). Internal Versus External Sources of Plasma at Saturn: Overview From Magnetospheric Imaging Investigation/Charge-Energy-Mass Spectrometer Data. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, *123*(6), 4712–4727. https://doi.org/10.1029/2018JA025262

Allen, R. C., Paranicas, C. P., Bagenal, F., Vines, S. K., Hamilton, D. C., Allegrini, F., Clark, G., Delamere, P. A., Kim, T. K., Krimigis, S. M., Mitchell, D. G., Smith, T. H., & Wilson, R. J. (2019). Energetic Oxygen and Sulfur Charge States in the Outer Jovian Magnetosphere: Insights From the Cassini Jupiter Flyby. *Geophys. Res. Lett.*, *46*(21), 11, 709–11, 717. https://doi.org/10.1029/2019GL085185

Arridge, C. S., Khurana, K. K., Russell, C. T., Southwood, D. J., Achilleos, N., Dougherty, M. K., Coates, A. J., & Leinweber, H. K. (2008). Warping of Saturn's magnetospheric and magnetotail current sheets. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, *113*(A8), Article A08217, A08217. https://doi.org/10.1029/2007JA012963

Asbridge, J. R., Bame, S. J., & Strong, I. B. (1968). Outward flow of protons from the Earth's bow shock. *J. Geophys. Res.*, *73*(17), 5777–5782. https://doi.org/10.1029/JA073i017p05777

Birmingham, T. J. (1982). Charged particle motions in the distended magnetosphere of Jupiter and Saturn. *jgr*, *87*(A9), 7421–7430. https://doi.org/10.1029/JA087iA09p07421

Bonfond, B., Gladstone, G. R., Grodent, D., Gérard, J. .-C., Greathouse, T. K., Hue, V., Kammer, J. A., Versteeg, M. H., Davis, M. W., Becker, H. N., Radioti, A., Elliott, S. S., Imai, M., Paranicas, C. P., Bolton, S. J., Levin, S. M., & Connerney, J. E. P. (2018). Bar Code Events in the Juno-UVS Data: Signature ∼10 MeV Electron Microbursts at Jupiter. *Geophys. Res. Lett.*, *45*(22), 12, 108–12, 115. https://doi.org/10.1029/2018GL080490

Brandt, P. C., Dialynas, K., Dandouras, I., Mitchell, D. G., Garnier, P., & Krimigis, S. M. (2012). The distribution of Titan's high-altitude (out to ∼50,000 km) exosphere from energetic neutral atom (ENA) measurements by Cassini/INCA. *Planet. Space Sci.*, *60*(1), 107–114. https://doi.org/10.1016/j.pss.2011.04.014

Brandt, P. C., Khurana, K. K., Mitchell, D. G., Sergis, N., Dialynas, K., Carbary, J. F., Roelof, E. C., Paranicas, C. P., Krimigis, S. M., & Mauk, B. H. (2010). Saturn's periodic magnetic field perturbations caused by a rotating partial ring current. *Geophys. Res. Lett.*, *37*(22), Article L22103, L22103. https://doi.org/10.1029/2010GL045285

Burton, M. E., Dougherty, M. K., & Russell, C. T. (2009). Model of Saturn's internal planetary magnetic field based on Cassini observations. *planss*, *57*(14-15), 1706–1713. https://doi.org/10.1016/j.pss.2009.04.008

Carbary, J. F., & Mitchell, D. G. (2016). Seasonal variations in Saturn's plasma sheet warping. *Geophys. Res. Lett.*, *43*(23), 11, 957–11, 962. https://doi.org/10.1002/2016GL071790

Cassini Teams Report. (2019). Cassini Final Report: Mission Overview, Science Objectives and Results. *Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology*, *Volume 1*.

Cassini/mimi. (n.d.). http://cassini-mimi.jhuapl.edu/

Chenette, D. L., Conlon, T. F., & Simpson, J. A. (1974). Bursts of relativistic electrons from Jupiter observed in interplanetary space with the time variation of the planetary rotation period. *jgr*, *79*(25), 3551. https://doi.org/10.1029/JA079i025p03551

Christon, S. P., Hamilton, D. C., Difabio, R. D., Mitchell, D. G., Krimigis, S. M., & Jontof-Hutter, D. S. (2013). Saturn suprathermal O_2^+ and mass-28^+ molecular ions: Long-term seasonal and solar variation. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, *118*(6), 3446–3463. https://doi.org/10.1002/jgra.50383

Cohen, C. M. S., Stone, E. C., & Selesnick, R. S. (2001). Energetic ion observations in the middle Jovian magnetosphere. *J. Geophys. Res.*, *106*(A12), 29871–29882. https://doi.org/10.1029/2001JA000008

Cohen, I. J., Mauk, B. H., Anderson, B. J., Westlake, J. H., Sibeck, D. G., Giles, B. L., Pollock, C. J., Turner, D. L., Fennell, J. F., Blake, J. B., Clemmons, J. H., Jaynes, A. N., Baker, D. N., Craft, J. V., Spence, H. E., Niehof, J. T., Reeves, G. D., Torbert, R. B., Russell, C. T., … Burch, J. L. (2016). Observations of energetic particle escape at the magnetopause: Early results from the MMS Energetic Ion Spectrometer (EIS). *grl*, *43*(12), 5960–5968. https://doi.org/10.1002/2016GL068689

Delamere, P. A., Wilson, R. J., Eriksson, S., & Bagenal, F. (2013). Magnetic signatures of Kelvin-Helmholtz vortices on Saturn's magnetopause: Global survey. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, *118*(1), 393–404. https://doi.org/10.1029/2012JA018197

Dialynas, K., Krimigis, S. M., Mitchell, D. G., Decker, R. B., & Roelof, E. C. (2017). The bubble-like shape of the heliosphere observed by Voyager and Cassini. *Nature Astronomy*, *1*, Article 0115, 0115. https://doi.org/10.1038/s41550-017-0115

Dialynas, K. (2018). Cassini/MIMI Observations on the Dungey Cycle Reconnection and Kelvin-Helmholtz Instability in Saturn's Magnetosphere. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, *123*(9), 7271–7275. https://doi.org/10.1029/2018JA025840

Dialynas, K., Roussos, E., Regoli, L., Paranicas, C. P., Krimigis, S. M., Kane, M., Mitchell, D. G., Hamilton, D. C., Krupp, N., & Carbary, J. F. (2018). Energetic Ion Moments and Polytropic Index in Saturn's Magnetosphere using Cassini/MIMI Measurements: A Simple Model Based on κ-Distribution Functions. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, *123*(10), 8066–8086. https://doi.org/10.1029/2018JA025820

Dougherty, M. K., Khurana, K. K., Neubauer, F. M., Russell, C. T., Saur, J., Leisner, J. S., & Burton, M. E. (2006). Identification of a Dynamic Atmosphere at Enceladus with the Cassini Magnetometer. *Science*, *311*(5766), 1406–1409. https://doi.org/10.1126/science.1120985

Dougherty, M. K., Cao, H., Khurana, K. K., Hunt, G. J., Provan, G., Kellock, S., Burton, M. E., Burk, T. A., Bunce, E. J., Cowley, S. W. H., Kivelson, M. G., Russell, C. T., & Southwood, D. J. (2018). Saturn's magnetic field revealed by the Cassini Grand Finale. *Science*, *362*(6410), Article aat5434, aat5434. https://doi.org/10.1126/science.aat5434

Fischer, H. M., Pehlke, E., Wibberenz, G., Lanzerotti, L. J., & Mihalov, J. D. (1996). High-Energy Charged Particles in the Innermost Jovian Magnetosphere. *Science*, *272*(5263), 856–858. https://doi.org/10.1126/science.272.5263.856

Gladstone, G., Retherford, K., Solomon, S., Gerard, J., Hubert, B., Meurant, M., Paxton, L., Wolven, B., Zhang, Y., Morrison, D., Christensen, A., Immel, T., & Mende, S. (2002). A Comparison of FUV Auroral Emissions During the April 2002 Events as seen by the IMAGE/FUV and TIMED/GUVI Instruments. *AGU Fall Meeting Abstracts*, *2002*, Article SA21B-0449, SA21B–0449.

Hospodarsky, G. B., Imai, M., Kurth, W. S., Sulaiman, A. H., & Bolton, S. J. (2019). Quasi-Periodic (QP) Emissions at Jupiter: Juno Waves Observations. *AGU Fall Meeting Abstracts*, *2019*, Article SM33G-3306, SM33G–3306.

Hospodarsky, G. B., Kurth, W. S., Gurnett, D. A., Kaiser, M. L., & Zarka, P. (2003). Simultaneous Observations of Jovian Quasi-periodic Radio Emissions by the Cassini and Galileo Spacecraft. *AGU Fall Meeting Abstracts*, *2003*, Article SM12B-07, SM12B–07.

Jackman, C. M., Thomsen, M. F., & Dougherty, M. K. (2019). Survey of Saturn's Magnetopause and Bow Shock Positions Over the Entire Cassini Mission: Boundary Statistical Properties and Exploration of Associated Upstream Conditions. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, *124*(11), 8865–8883. https://doi.org/10.1029/2019JA026628

Joy, S. P., Kivelson, M. G., Walker, R. J., Khurana, K. K., Russell, C. T., & Ogino, T. (2002). Probabilistic models of the Jovian magnetopause and bow shock locations. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, *107*(A10), Article 1309, 1309. https://doi.org/10.1029/2001JA009146

Kaiser, M. L., Farrell, W. M., Desch, M. D., Hospodarsky, G. B., Kurth, W. S., & Gurnett, D. A. (2001). Ulysses and Cassini at Jupiter: Comparison of the Quasi-periodic Radio Bursts. *Planetary Radio Emissions V*, 41–48.

Kanani, S. J., Arridge, C. S., Jones, G. H., Fazakerley, A. N., McAndrews, H. J., Sergis, N., Krimigis, S. M., Dougherty, M. K., Coates, A. J., Young, D. T., Hansen, K. C., & Krupp, N. (2010). A new form of Saturn's magnetopause using a dynamic pressure balance model, based on in situ, multi-instrument Cassini measurements. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, *115*(A6), Article A06207, A06207. https://doi.org/10.1029/2009JA014262

Kane, M., Mitchell, D. G., Carbary, J. F., Dialynas, K., Hill, M. E., & Krimigis, S. M. (2020). Convection in the Magnetosphere of Saturn During the Cassini Mission Derived From MIMI INCA and CHEMS Measurements. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, *125*(2), Article e27534, e27534. https://doi.org/10.1029/2019JA027534

Keiling, A., Marghitu, O., & Wheatland, M. (2018). *Electric Currents in Geospace and Beyond.* (Vol. 235). https://doi.org/10.1002/9781119324522

Khurana, K. K., Kivelson, M. G., Vasyliunas, V. M., Krupp, N., Woch, J., Lagg, A., Mauk, B. H., & Kurth, W. S. (2004). The configuration of Jupiter's magnetosphere. In F. Bagenal, T. E. Dowling, & W. B. McKinnon (Eds.), *Jupiter. the planet, satellites and magnetosphere* (pp. 593–616).

Khurana, K. K., & Schwarzl, H. K. (2005). Global structure of Jupiter's magnetospheric current sheet. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, *110*(A7), Article A07227, A07227. https://doi.org/10.1029/2004JA010757

Kissmann, R., Fichtner, H., & Ferreira, S. E. S. (2004). The influence of CIRs on the energetic electron flux at 1 AU. *aap*, *419*, 357–363. https://doi.org/10.1051/0004-6361:20040072

Kollmann, P., Clark, G. B., Mauk, B., Paranicas, C., Haggerty, D. K., Rymer, A. M., Saur, J., Connerney, J. E. P., Levin, S., & Bolton, S. J. (2018). From high-latitude auroral beams to equatorial radiation belts: Results from the JEDI instrument at Jupiter. *AGU Fall Meeting Abstracts*, *2018*, Article SM31A-03, SM31A–03.

Kollmann, P., Roussos, E., Kotova, A., Paranicas, C., & Krupp, N. (2017). The evolution of Saturn's radiation belts modulated by changes in radial diffusion. *Nature Astronomy*, *1*, 872–877. https://doi.org/10.1038/s41550-017-0287-x

Kollmann, P., Roussos, E., Paranicas, C., Krupp, N., & Haggerty, D. K. (2013). Processes forming and sustaining Saturn's proton radiation belts. *icarus*, *222*(1), 323–341. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2012.10.033

Kotova, A., Roussos, E., Kollmann, P., Krupp, N., & Dandouras, I. (2019). Galactic Cosmic Rays Access to the Magnetosphere of Saturn. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, *124*(1), 166–177. https://doi.org/10.1029/2018JA025661

Krimigis, S. M., Decker, R. B., Roelof, E. C., Hill, M. E., Armstrong, T. P., Gloeckler, G., Hamilton, D. C., & Lanzerotti, L. J. (2013). Search for the Exit: Voyager 1 at Heliosphere's Border with the Galaxy. *Science*, *341*(6142), 144–147. https://doi.org/10.1126/science.1235721

Krimigis, S. M., Mitchell, D. G., Hamilton, D. C., Krupp, N., Livi, S., Roelof, E. C., Dandouras, J., Armstrong, T. P., Mauk, B. H., Paranicas, C., Brandt, P. C., Bolton, S., Cheng, A. F., Choo, T., Gloeckler, G., Hayes, J., Hsieh, K. C., Ip, W. .-H., Jaskulek, S., … Woch, J. (2005). Dynamics of Saturn's Magnetosphere from MIMI During Cassini's Orbital Insertion. *Science*, *307*(5713), 1270–1273. https://doi.org/10.1126/science.1105978

Krimigis, S. M., Mitchell, D. G., Hamilton, D. C., Livi, S., Dandouras, J., Jaskulek, S., Armstrong, T. P., Boldt, J. D., Cheng, A. F., Gloeckler, G., Hayes, J. R., Hsieh, K. C., Ip, W. .-H., Keath, E. P., Kirsch, E., Krupp, N., Lanzerotti, L. J., Lundgren, R., Mauk, B. H., … Williams, D. J. (2004). Magnetosphere Imaging Instrument (MIMI) on the Cassini Mission to Saturn/Titan. *ssr*, *114*(1-4), 233–329. https://doi.org/10.1007/s11214-004-1410-8

Krimigis, S. M., Sarris, E. T., & Armstrong, T. P. (1975). Observations of Jovian electron events in the vicinity of Earth. *Geophys. Res. Lett.*, *2*(12), 561–564. https://doi.org/10.1029/GL002i012p00561

Krimigis, S. M., Sergis, N., Dialynas, K., Mitchell, D. G., Hamilton, D. C., Krupp, N., Dougherty, M., & Sarris, E. T. (2009). Analysis of a sequence of energetic ion and magnetic field events upstream from the Saturnian magnetosphere. *Planet. Space Sci.*, *57*(14-15), 1785–1794. https://doi.org/10.1016/j.pss.2009.02.013

Krimigis, S. M., Sergis, N., Mitchell, D. G., Hamilton, D. C., & Krupp, N. (2007). A dynamic, rotating ring current around Saturn. *nat*, *450*(7172), 1050–1053. https://doi.org/10.1038/nature06425

Krimigis, S. M., Venkatesan, D., Barichello, J. C., & Sarris, E. T. (1978a). Simultaneous measurements of energetic protons and electrons in the distant magnetosheath, magnetotail, and upstream in the solar wind. *grl*, *5*(11), 961–964. https://doi.org/10.1029/GL005i011p00961

Krimigis, S. M., Venkatesan, D., Barichello, J. C., & Sarris, E. T. (1978b). Simultaneous measurements of energetic protons and electrons in the distant magnetosheath, magnetotail, and upstream in the solar wind. *Geophys. Res. Lett.*, *5*(11), 961–964. https://doi.org/10.1029/GL005i011p00961

Krimigis, S. M., Decker, R. B., Roelof, E. C., Hill, M. E., Bostrom, C. O., Dialynas, K., Gloeckler, G., Hamilton, D. C., Keath, E. P., & Lanzerotti, L. J. (2019). Energetic charged particle measurements from Voyager 2 at the heliopause and beyond. *Nature Astronomy*, *3*, 997–1006. https://doi.org/10.1038/s41550-019-0927-4

Kronberg, E. A., Glassmeier, K. .-H., Woch, J., Krupp, N., Lagg, A., & Dougherty, M. K. (2007). A possible intrinsic mechanism for the quasi-periodic dynamics of the Jovian magnetosphere. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, *112*(A5), Article A05203, A05203. https://doi.org/10.1029/2006JA011994

Kronberg, E. A., Woch, J., Krupp, N., Lagg, A., Khurana, K. K., & Glassmeier, K. .-H. (2005). Mass release at Jupiter: Substorm-like processes in the Jovian magnetotail. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, *110*(A3), Article A03211, A03211. https://doi.org/10.1029/2004JA010777

Krupp, N., Roussos, E., Kollmann, P., Paranicas, C., Mitchell, D. G., Krimigis, S. M., Rymer, A., Jones, G. H., Arridge, C. S., Armstrong, T. P., & Khurana, K. K. (2012). The Cassini Enceladus encounters 2005-2010 in the view of energetic electron measurements. *icarus*, *218*(1), 433–447. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2011.12.018

Krupp, N., Woch, J., Lagg, A., Espinosa, S. A., Livi, S., Krimigis, S. M., Mitchell, D. G., Williams, D. J., Cheng, A. F., Mauk, B. H., McEntire, R. W., Armstrong, T. P., Hamilton, D. C., Gloeckler, G., Dandouras, J., & Lanzerotti, L. J. (2002a). Leakage of energetic particles from Jupiter's dusk magnetosphere: Dual spacecraft observations. *grl*, *29*(15), Article 1736, 1736. https://doi.org/10.1029/2001GL014290

Krupp, N., Woch, J., Lagg, A., Espinosa, S. A., Livi, S., Krimigis, S. M., Mitchell, D. G., Williams, D. J., Cheng, A. F., Mauk, B. H., McEntire, R. W., Armstrong, T. P., Hamilton, D. C., Gloeckler, G.,

Dandouras, J., & Lanzerotti, L. J. (2002b). Leakage of energetic particles from Jupiter's dusk magnetosphere: Dual spacecraft observations. *Geophys. Res. Lett.*, *29*(15), Article 1736, 1736. https://doi.org/10.1029/2001GL014290

Krupp, N., Woch, J., Lagg, A., Livi, S., Mitchell, D. G., Krimigis, S. M., Dougherty, M. K., Hanlon, P. G., Armstrong, T. P., & Espinosa, S. A. (2004). Energetic particle observations in the vicinity of Jupiter: Cassini MIMI/LEMMS results. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, *109*(A9), Article A09S10, A09S10. https://doi.org/10.1029/2003JA010111

Kunow, H., Heber, B., Potgieter, M. S., Ferriera, S. E. S., Müller-Mellin, R., & McKibben, R. B. (2005). Ulysses COSPIN/KET Observations of Jovian Electrons during the Distant Ulysses Jupiter Flyby. In B. Fleck, T. H. Zurbuchen, & H. Lacoste (Eds.), *Solar wind 11/soho 16, connecting sun and heliosphere* (p. 437).

Lai, H. R., Wei, H. Y., Russell, C. T., Arridge, C. S., & Dougherty, M. K. (2012). Reconnection at the magnetopause of Saturn: Perspective from FTE occurrence and magnetosphere size. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, *117*(A5), Article A05222, A05222. https://doi.org/10.1029/2011JA017263

Lange, D., & Fichtner, H. (2008). Are there Kronian electrons in the inner heliosphere? *aap*, *482*(3), 973–979. https://doi.org/10.1051/0004-6361:20079069

Lee, M. A. (1982). Coupled hydromagnetic wave excitation and ion acceleration upstream of the earth's bow shock. *J. Geophys. Res.*, *87*, 5063–5080. https://doi.org/10.1029/JA087iA07p05063

Li, X., Selesnick, R. S., Baker, D. N., Jaynes, A. N., Kanekal, S. G., Schiller, Q., Blum, L., Fennell, J., & Blake, J. B. (2015). Upper limit on the inner radiation belt MeV electron intensity. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, *120*(2), 1215–1228. https://doi.org/10.1002/2014JA020777

Liou, K., Paranicas, C., Vines, S., Kollmann, P., Allen, R. C., Clark, G. B., Mitchell, D. G., Jackman, C. M., Masters, A., Achilleos, N., Roussos, E., & Krupp, N. (2021). Dawn Dusk Asymmetry in Energetic (>20 keV) Particles Adjacent to Saturn's Magnetopause. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, *126*(2), Article e28264, e28264. https://doi.org/10.1029/2020JA028264

MacDowall, R. J., Kaiser, M. L., Desch, M. D., Farrell, W. M., Hess, R. A., & Stone, R. G. (1993). Quasiperiodic Jovian Radio bursts: observations from the Ulysses Radio and Plasma Wave Experiment. *planss*, *41*(11-12), 1059–1072. https://doi.org/10.1016/0032-0633(93)90109-F

Masters, A., Stawarz, L., Fujimoto, M., Schwartz, S., Sergis, N., Thomsen, M., Retino, A., Hasegawa, H., Zieger, B., Lewis, G., Coates, A., Canu, P., & Dougherty, M. (2013). Electron acceleration to relativistic energies at a strong quasi-parallel shock wave. *EGU General Assembly Conference Abstracts*, Article EGU2013-6522, EGU2013–6522.

Mauk, B. H., Clark, G., Gladstone, G. R., Kotsiaros, S., Adriani, A., Allegrini, F., Bagenal, F., Bolton, S. J., Bonfond, B., Connerney, J. E. P., Ebert, R. W., Haggerty, D. K., Kollmann, P., Kurth, W. S., Levin, S. M., Paranicas, C. P., & Rymer, A. M. (2020). Energetic Particles and Acceleration Regions Over Jupiter's Polar Cap and Main Aurora: A Broad Overview. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, *125*(3), Article e27699, e27699. https://doi.org/10.1029/2019JA027699

Mauk, B. H., Mitchell, D. G., Krimigis, S. M., Roelof, E. C., & Paranicas, C. P. (2003). Energetic neutral atoms from a trans-Europa gas torus at Jupiter. *Nature*, *421*(6926), 920–922. https://doi.org/10.1038/nature01431

Meng, C. .-I., & Anderson, K. A. (1975). Characteristics of the magnetopause energetic electron layer. *jgr*, *80*(31), 4237. https://doi.org/10.1029/JA080i031p04237

Mihalov, J. D., Fischer, H. M., Pehlke, E., & Lanzerotti, L. J. (2000). Energetic trapped electron measurements from the Galileo Jupiter probe. *Geophys. Res. Lett.*, *27*(16), 2445–2448. https://doi.org/10.1029/2000GL003812

Mimi user guide [Accessed: 2021-06-01]. (2018).

Morioka, A., Tsuchiya, F., & Misawa, H. (1997). Modulation of Jovian electrons by the solar wind. *Advances in Space Research*, *20*(2), 205–208. https://doi.org/10.1016/S0273-1177(97)00534-6

Morioka, A., & Tsuchiya, F. (1996). Solar wind control of Jovian electron flux: Pioneer 11 analysis. *Geophys. Res. Lett.*, *23*(21), 2963–2966. https://doi.org/10.1029/96GL02774

Moses, D. (1987). Jovian Electrons at 1 AU: 1978–1984. *Astrophys. Journal*, *313*, 471. https://doi.org/10.1086/164987

Nénon, Q., Sicard, A., & Bourdarie, S. (2017). A new physical model of the electron radiation belts of Jupiter inside Europa's orbit. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, *122*(5), 5148–5167. https://doi.org/10.1002/2017JA023893

Palmaerts, B., Roussos, E., Krupp, N., Kurth, W. S., Mitchell, D. G., & Yates, J. N. (2016). Statistical analysis and multi-instrument overview of the quasi-periodic 1-hour pulsations in Saturn's outer magnetosphere. *Icarus*, *271*, 1–18. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2016.01.025

Paranicas, C., Mauk, B. H., Haggerty, D. K., Clark, G., Kollmann, P., Rymer, A. M., Bonfond, B., Dunn, W. R., Ebert, R. W., Gladstone, G. R., Roussos, E., Krupp, N., Bagenal, F., Levin, S. M., Connerney, J. E. P., & Bolton, S. J. (2018). Intervals of Intense Energetic Electron Beams Over Jupiter's Poles. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, *123*(3), 1989–1999. https://doi.org/10.1002/2017JA025106

Paranicas, C., Mitchell, D. G., Roussos, E., Kollmann, P., Krupp, N., Müller, A. L., Krimigis, S. M., Turner, F. S., Brandt, P. C., Rymer, A. M., & Johnson, R. E. (2010). Transport of energetic electrons into Saturn's inner magnetosphere. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, *115*(A9), Article A09214, A09214. https://doi.org/10.1029/2010JA015853

Parker, E. N. (1958). Dynamics of the Interplanetary Gas and Magnetic Fields. *ApJ*, *128*, 664. https://doi.org/10.1086/146579

Roussos, E., Jackman, C. M., Thomsen, M. F., Kurth, W. S., Badman, S. V., Paranicas, C., Kollmann, P., Krupp, N., Bučík, R., Mitchell, D. G., Krimigis, S. M., Hamilton, D. C., & Radioti, A. (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. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2017.08.040

Roussos, E., Jones, G. H., Krupp, N., Paranicas, C., Mitchell, D. G., Lagg, A., Woch, J., Motschmann, U., Krimigis, S. M., & Dougherty, M. K. (2007). Electron microdiffusion in the Saturnian radiation belts: Cassini MIMI/LEMMS observations of energetic electron absorption by the icy moons. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, *112*(A6), Article A06214, A06214. https://doi.org/10.1029/2006JA012027

Roussos, E., Kollmann, P., Krupp, N., Kotova, A., Regoli, L., Paranicas, C., Mitchell, D. G., Krimigis, S. M., Hamilton, D., Brandt, P., Carbary, J., Christon, S., Dialynas, K., Dandouras, I., Hill, M. E., Ip, W. H., Jones, G. H., Livi, S., Mauk, B. H., … Smith, H. T. (2018). A radiation belt of energetic protons located between Saturn and its rings. *Science*, *362*(6410), Article aat1962, aat1962. https://doi.org/10.1126/science.aat1962

Roussos, E., Krupp, N., Jones, G. H., Paranicas, C., Mitchell, D. G., Krimigis, S. M., Motschmann, U., Lagg, A., & Woch, J. (2007). Energetic charged particle absorption by Saturn's icy moons: future studies and new applications. *European Planetary Science Congress 2007*, 905.

Roussos, E., Krupp, N., Mitchell, D. G., Paranicas, C., Krimigis, S. M., Andriopoulou, M., Palmaerts, B., Kurth, W. S., Badman, S. V., Masters, A., & Dougherty, M. K. (2016). Quasi-periodic

injections of relativistic electrons in Saturn's outer magnetosphere. *icarus*, *263*, 101–116. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2015.04.017

Roussos, E., Krupp, N., Paranicas, C., Carbary, J. F., Kollmann, P., Krimigis, S. M., & Mitchell, D. G. (2014). The variable extension of Saturn's electron radiation belts. *Planetary Space Sci.*, *104*, 3–17. https://doi.org/10.1016/j.pss.2014.03.021

Roussos, E., Krupp, N., Paranicas, C., Kollmann, P., Mitchell, D. G., Krimigis, S. M., Palmaerts, B., Dialynas, K., & Jackman, C. M. (2018). Heliospheric Conditions at Saturn During Cassini's Ring-Grazing and Proximal Orbits. *grl*, *45*(20), 10, 812–10, 818. https://doi.org/10.1029/2018GL078093

Roussos, E., Dialynas, K., Krupp, N., Kollmann, P., Paranicas, C., Roelof, E. C., Yuan, C., Mitchell, D. G., & Krimigis, S. M. (2020). Long- and Short-term Variability of Galactic Cosmic-Ray Radial Intensity Gradients between 1 and 9.5 au: Observations by Cassini, BESS, BESS-Polar, PAMELA, and AMS-02. *ApJ*, *904*(2), Article 165, 165. https://doi.org/10.3847/1538-4357/abc346

Roussos, E., & Kollmann, P. (2021). The radiation belts of jupiter and saturn. *Magnetospheres in the solar system* (pp. 499–514). American Geophysical Union (AGU). https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9781119815624.ch32

Russell, C. T. (2001). Solar wind and interplanetary magnetic field: A tutorial. *Washington DC American Geophysical Union Geophysical Monograph Series*, *125*, 73–89. https://doi.org/10.1029/GM125p0073

Russell, C. T., & Dougherty, M. K. (2010). Magnetic Fields of the Outer Planets. *ssr*, *152*(1-4), 251–269. https://doi.org/10.1007/s11214-009-9621-7

Santos-Costa, D., Bourdarie, S., Leblanc, Y., Sault, R., Bolton, S. J., & Dulk, G. A. (2001). Synchrotron Emission at 6 and 20 cm: VLA Images and 3-D Modeling of the Jovia n Radiation Belts (Abstract). *Planetary Radio Emissions V*, 245.

Santos-Costa, D., de Pater, I., Sault, R. J., Janssen, M. A., Levin, S. M., & Bolton, S. J. (2014). Multifrequency analysis of the Jovian electron-belt radiation during the Cassini flyby of Jupiter. *aap*, *568*, Article A61, A61. https://doi.org/10.1051/0004-6361/201423896

Sarris, E. T., Krimigis, S. M., & Armstrong, T. P. (1976). Observations of magnetospheric bursts of high-energy protons and electrons at $\sim$35 R_E with Imp 7. *J. Geophys. Res.*, *81*(13), 2341. https://doi.org/10.1029/JA081i013p02341

Schulz, M., & Lanzerotti, L. J. (1974). Particle Diffusion in the Radiation Belts. *Physics and Chemistry in Space*, *7*. https://doi.org/10.1007/978-3-642-65675-0

Selesnick, R. S., Cohen, C. M. S., & Khurana, K. K. (2001). Energetic ion dynamics in Jupiter's plasma sheet. *jgr*, *106*(A9), 18895–18906. https://doi.org/10.1029/2000JA000242

Sergis, N., Jackman, C. M., Masters, A., Krimigis, S. M., Thomsen, M. F., Hamilton, D. C., Mitchell, D. G., Dougherty, M. K., & Coates, A. J. (2013). Particle and magnetic field properties of the Saturnian magnetosheath: Presence and upstream escape of hot magnetospheric plasma. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, *118*(4), 1620–1634. https://doi.org/10.1002/jgra.50164

Shemansky, D. E., Liu, X., & Melin, H. (2009). The Saturn hydrogen plume. *Planet. Space Sci.*, *57*(14-15), 1659–1670. https://doi.org/10.1016/j.pss.2009.05.002

Shprits, Y. Y., Menietti, J. D., Gu, X., Kim, K. C., & Horne, R. B. (2012). Gyroresonant interactions between the radiation belt electrons and whistler mode chorus waves in the radiation environments of Earth, Jupiter, and Saturn: A comparative study. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, *117*(A11), Article A11216, A11216. https://doi.org/10.1029/2012JA018031

Simpson, J. A., Hamilton, D. C., Lentz, G. A., McKibben, R. B., Perkins, M., Pyle, K. R., Tuzzolino, A. J., & Ogallagher, J. J. (1975). Jupiter Revisited: First Results from the University of

Chicago Charged Particle Experiment on Pioneer 11. *Science*, *188*(4187), 455–459. https://doi.org/10.1126/science.188.4187.455

Southwood, D. J. (2015). Formation of Magnetotails. *Magnetotails in the Solar System*, *207*, 197–215. https://doi.org/10.1002/9781118842324.ch12

Sulaiman, A. H., Masters, A., Dougherty, M. K., & Jia, X. (2014). The magnetic structure of Saturn's magnetosheath. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, *119*(7), 5651–5661. https://doi.org/10.1002/2014JA020019

Taherion, S., Armstrong, T. P., & Garrett, H. B. (2008). Ultrarelativistic Electrons in Jupiter's Inner Magnetosphere: First Observation of Angular Distributions in the 2.5 to 6 R_J Region. *ApJ*, *685*(1), L79. https://doi.org/10.1086/592270

Teegarden, B. J., McDonald, F. B., Trainor, J. H., Webber, W. R., & Roelof, E. C. (1974). Interplanetary Mev electrons of Jovian origin. *jgr*, *79*(25), 3615. https://doi.org/10.1029/JA079i025p03615

Thomas, N., Bagenal, F., Hill, T. W., & Wilson, J. K. (2004). The Io neutral clouds and plasma torus. In F. Bagenal, T. E. Dowling, & W. B. McKinnon (Eds.), *Jupiter. the planet, satellites and magnetosphere* (pp. 561–591).

Torrence, C., & Compo, G. P. (1998). A Practical Guide to Wavelet Analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *79*(1), 61–78. https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2

Tsuchiya, F., Morioka, A., & Misawa, H. (1999). Jovian electron modulations by the solar wind interaction with the magnetosphere. *Earth, Planets, and Space*, *51*, 987–996. https://doi.org/10.1186/BF03351569

VanderPlas, J. T. (2018). Understanding the Lomb-Scargle Periodogram. *apjs*, *236*(1), Article 16, 16. https://doi.org/10.3847/1538-4365/aab766

Vogt, A., Heber, B., Kopp, A., Potgieter, M. S., & Strauss, R. D. (2018). Jovian electrons in the inner heliosphere. Proposing a new source spectrum based on 30 years of measurements. *aap*, *613*, Article A28, A28. https://doi.org/10.1051/0004-6361/201731736

Went, D. R., Hospodarsky, G. B., Masters, A., Hansen, K. C., & Dougherty, M. K. (2011). A new semiempirical model of Saturn's bow shock based on propagated solar wind parameters. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, *116*(A7), Article A07202, A07202. https://doi.org/10.1029/2010JA016349

Woodfield, E. E., Horne, R. B., Glauert, S. A., Menietti, J. D., & Shprits, Y. Y. (2013). Electron acceleration at Jupiter: input from cyclotron-resonant interaction with whistler-mode chorus waves. *Annales Geophysicae*, *31*(10), 1619–1630. https://doi.org/10.5194/angeo-31-1619-2013

Woodfield, E. E., Horne, R. B., Glauert, S. A., Menietti, J. D., & Shprits, Y. Y. (2014). The origin of Jupiter's outer radiation belt. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, *119*(5), 3490–3502. https://doi.org/10.1002/2014JA019891

Young, D. T., Berthelier, J. .-J., Blanc, M., Burch, J. L., Bolton, S., Coates, A. J., Crary, F. J., Goldstein, R., Grande, M., Hill, T. W., Johnson, R. E., Baragiola, R. A., Kelha, V., McComas, D. J., Mursula, K., Sittler, E. C., Svenes, K. R., Szegö, K., Tanskanen, P., … Zinsmeyer, C. (2005). Composition and Dynamics of Plasma in Saturn's Magnetosphere. *Science*, *307*(5713), 1262–1266. https://doi.org/10.1126/science.1106151

Zwickl, R. D., Krimigis, S. M., Carbary, J. F., Keath, E. P., Armstrong, T. P., Hamilton, D. C., & Gloeckler, G. (1981). Energetic Particle Events (?30 keV) of Jovian origin observed by Voyager 1 and 2 in interplanetary space. *jgr*, *86*(A10), 8125–8140. https://doi.org/10.1029/JA086iA10p08125