

ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΟΣ ΚΑΙΡΟΣ

ΕΡΓΑΣΙΑ 2

ΓΡΟΣΔΟΥΛΗ ΠΑΝΑΓΙΩΤΑ 58523

## Άσκηση 2

Μελέτη των δυναμικών μεταβολών του ενεργειακού φάσματος των ηλεκτρονίων στην εξώτερη ζώνη Van Allen.

(α1) Κατασκευάστε τη γραφική παράσταση του χρονικού προφίλ της ροής για όλη τη χρονική διάρκεια του αρχείου.

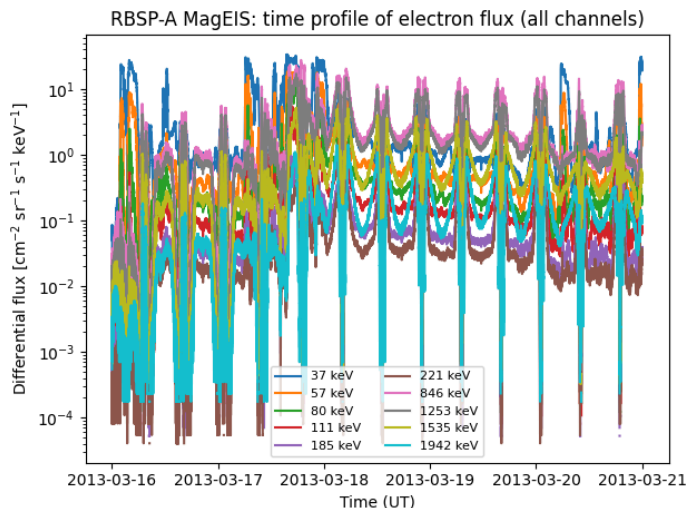
Για τη μελέτη των χρονικών μεταβολών της ροής ηλεκτρονίων στην εξώτερη ζώνη Van Allen χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα του οργάνου MagEIS από τον δορυφόρο RBSP-A. Από το αρχείο RBSP.mat ανακτήθηκαν ο χρόνος καταγραφής, το μαγνητοκέλυφος  $L^*$ , η αξιμουθιακή γωνία MLT και ο ρυθμός καταμέτρησης ηλεκτρονίων (CountRate) για 10 ενεργειακά κανάλια. Το αρχείο RBSPenergy.mat παρείχε τον γεωμετρικό παράγοντα  $G$  και τα ενεργειακά όρια ( $E_{min}$ ,  $E_{max}$ ) κάθε καναλιού, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του ενεργειακού εύρους  $\Delta E$ .

Οι χρονικές σφραγίδες μετατράπηκαν από μορφή MATLAB datetime σε αντικείμενα Python datetime, ώστε να καταστεί δυνατή η γραφική απεικόνιση. Η διαφορική ενεργειακή ροή ηλεκτρονίων υπολογίστηκε ως:

$$J(E) = \frac{CountRate * G}{\Delta E}$$

όπου  $G$  είναι ο inverse geometric factor του οργάνου (σε  $sr^{-1} cm^{-2}$ ) και  $\Delta E = E_{max} - E_{min}$  το ενεργειακό εύρος κάθε καναλιού.

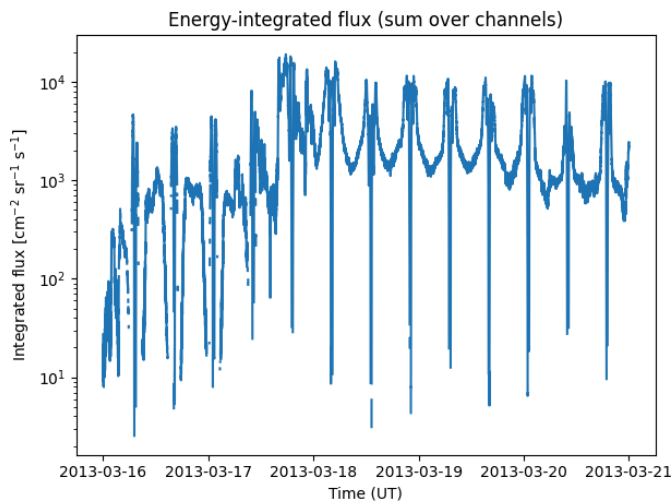
όπου  $J(E)$  είναι η ροή σε μονάδες  $cm^{-2} sr^{-1} s^{-1} keV^{-1}$ .



Στην πρώτη γραφική παράσταση παρουσιάζεται το χρονικό προφίλ της ροής για όλα τα ενεργειακά κανάλια. Οι καμπύλες δείχνουν έντονη μεταβλητότητα σε χρονικές κλίμακες ωρών, η οποία σχετίζεται με τη διάβαση του δορυφόρου μέσα από τις περιοχές ενισχυμένης ακτινοβολίας. Οι απότομες πτώσεις της ροής (sharp dropouts), που εμφανίζονται σχεδόν ταυτόχρονα

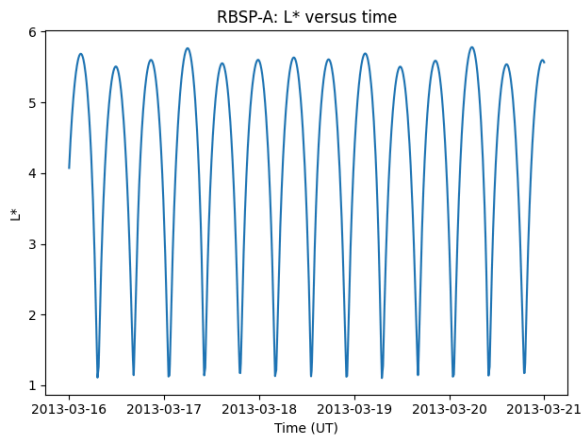
σε όλα τα ενεργειακά κανάλια και επαναλαμβάνονται περιοδικά, αποδίδονται κυρίως στην τροχιακή κίνηση του δορυφόρου και στη διέλευσή του εκτός της εξωτερικής ζώνης Van Allen ή σε περιοχές μικρότερων L-shells, όπου η παγιδευμένη ροή είναι φυσιολογικά χαμηλή. Παρά την έντονη τροχιακή περιοδικότητα, παρατηρούνται και διαφοροποιήσεις στο επίπεδο της ροής μεταξύ διαδοχικών τροχιών, γεγονός που υποδηλώνει πραγματικές χρονικές μεταβολές του πληθυσμού ηλεκτρονίων λόγω μαγνητοσφαιρικών διεργασιών.

Στη δεύτερη γραφική παράσταση απεικονίζεται η **ενεργειακά ολοκληρωμένη ροή** (energy-integrated flux), η οποία υπολογίστηκε ως  $J_{int}(t) = \sum_i J_i(t) \Delta E$ .



Η συνολική συμπεριφορά επιβεβαιώνει τις έντονες διακυμάνσεις και παρουσιάζει επαναλαμβανόμενο μοτίβο που συνδέεται με την περιοδική τροχιά του δορυφόρου. Οι κορυφώσεις αντιπροσωπεύουν διελεύσεις του RBSP-A από περιοχές ισχυρής παγιδευμένης ακτινοβολίας (μεγαλύτερα  $L^*$ ), ενώ τα ελάχιστα αντιστοιχούν σε δειγματοληψία περιοχών μικρότερου  $L^*$  και συνεπώς χαμηλότερης ροής. Επιπλέον, μετά τις 17/03 διακρίνεται ανύψωση της βασικής στάθμης της ροής, ένδειξη πραγματικής χρονικής ενίσχυσης πέρα από την καθαρά τροχιακή μεταβολή

(α2) Κατασκευάστε τη γραφική παράσταση του  $L^*$  για όλη τη χρονική διάρκεια του αρχείου.



Για να εξεταστεί η χωρική μεταβολή της θέσης του RBSP-A ως προς το γεωμαγνητικό πεδίο, απεικονίστηκε η χρονική εξέλιξη του μαγνητοκελύφους  $L^*$  για όλη τη διάρκεια των δεδομένων. Το  $L^*$  λειτουργεί ως δείκτης της ακτινικής θέσης (σε όρους μαγνητικών κελυφών) της γραμμής πεδίου που δειγματοληπτεί ο δορυφόρος.

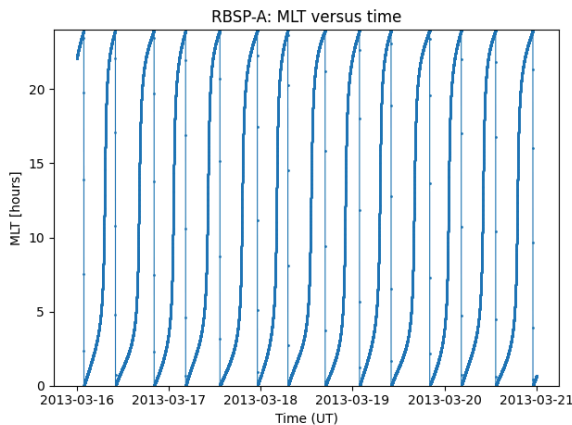
Η χρονοσειρά παρουσιάζει έντονα περιοδική συμπεριφορά, με το  $L^*$  να μεταβάλλεται επαναλαμβανόμενα περίπου από  $\sim 1.1$  έως  $\sim 5.8$ . Η μορφή “U” σε κάθε κύκλο αντιστοιχεί στην ελλειπτική τροχιά: τα ελάχιστα  $L^*$  δηλώνουν προσέγγιση σε μικρότερα L-shells (πιο κοντά στη Γη), ενώ τα μέγιστα  $L^*$  αντιστοιχούν στη διέλευση από μεγαλύτερα L-shells, δηλαδή στην περιοχή της εξώτερης ζώνης Van Allen.

Η σχεδόν ίδια επανάληψη των κύκλων από ημέρα σε ημέρα δείχνει ότι οι μεταβολές του  $L^*$  στο συγκεκριμένο διάστημα είναι κυρίως τροχιακό/γεωμετρικό αποτέλεσμα (θέση δορυφόρου) και όχι ένδειξη άμεσης φυσικής μεταβολής του πεδίου ή του πληθυσμού σωματιδίων. Το  $L^*$  επομένως χρησιμοποιείται ως “άξονας θέσης” για να ερμηνευτούν οι μεταβολές της ροής στα επόμενα ερωτήματα.

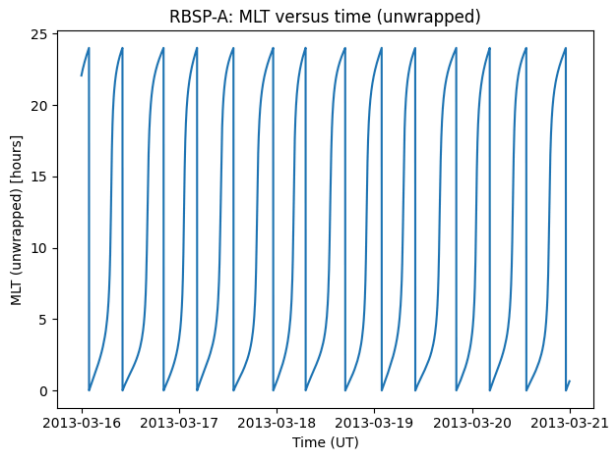
(α3) Κατασκευάστε τη γραφική παράσταση του MLT για όλη τη χρονική διάρκεια του αρχείου.

Η χρονική εξέλιξη της παραμέτρου MLT (Magnetic Local Time) παρουσιάζει έντονα περιοδική συμπεριφορά που είναι συμβατή με την τροχιακή δειγματοληψία του RBSP-A στη μαγνητόσφαιρα. Η MLT εκφράζει τη μαγνητική τοπική ώρα του σημείου μέτρησης στο μαγνητικό ισημερινό επίπεδο και ορίζεται στο εύρος 0–24 h.

Στο σχήμα παρατηρείται ότι η MLT αυξάνεται σχεδόν μονοτονικά από τιμές κοντά στο 0 προς τιμές κοντά στο 24 και στη συνέχεια εμφανίζει απότομη επαναφορά περίπου στο 0. Η “ασυνέχεια” αυτή δεν αντιστοιχεί σε πραγματική στιγμιαία μεταβολή της φυσικής κατάστασης, αλλά είναι αναμενόμενο φαινόμενο wrap-around επειδή η MLT είναι κυκλική μεταβλητή (mod 24 h). Οι επαναλαμβανόμενοι “κύκλοι” κατά το διάστημα 2013-03-16 έως



2013-03-21 αντανακλούν ότι ο δορυφόρος περνά διαδοχικά από διαφορετικούς τομείς μαγνητικής τοπικής ώρας σε κάθε τροχιακή επανάληψη. Η κάλυψη μεγάλου μέρους (πρακτικά όλου) του εύρους 0–24 h υποδεικνύει ότι στο συγκεκριμένο χρονικό παράθυρο οι μετρήσεις πραγματοποιούνται σε πολλές μαγνητικές τοπικές ώρες, επιτρέποντας συσχέτιση της ροής ηλεκτρονίων με περιοχές όπως νύχτα/ανγή/ημέρα/σούρουπο. Συνεπώς, η δομή του διαγράμματος εξηγείται κυρίως από τη γεωμετρία της τροχιάς και την κυκλική φύση της MLT, και όχι από αλλαγές στους ίδιους τους μηχανισμούς της μαγνητόσφαιρας.



Για λόγους καθαρότερης απεικόνισης της περιοδικότητας, η MLT παρουσιάζεται επιπλέον και σε “unwrapped” μορφή, όπου έχει αρθεί το τεχνητό άλμα από τις 24 στις 0 ώρες. Στο unwrapped διάγραμμα η MLT αυξάνεται συνεχώς με τον χρόνο, επιτρέποντας την άμεση οπτική αναγνώριση της επαναληπτικότητας της τροχιάς και της διάρκειας κάθε πλήρους κύκλου. Το σχήμα αυτό δεν αντιστοιχεί σε διαφορετική φυσική ποσότητα, αλλά χρησιμοποιείται αποκλειστικά ως μαθηματικό εργαλείο για την καλύτερη ανάδειξη της περιοδικής συμπεριφοράς της μαγνητικής τοπικής ώρας.

(α4) Σχολιάστε τις μεταβολές που παρατηρείται στα βήματα α1-α3. Ποιες οφείλονται σε φυσικούς μηχανισμούς που δρουν εντός της μαγνητόσφαιρας, και ποιες στη θέση του δορυφόρου;

Η σύγκριση των χρονοσειρών στα (α1)–(α3) επιτρέπει τον διαχωρισμό των μεταβολών που οφείλονται στην τροχιακή δειγματοληψία του RBSP-A από εκείνες που αντανακλούν πραγματική δυναμική της μαγνητόσφαιρας.

- **Μεταβολές λόγω θέσης και τροχιάς του δορυφόρου**

Το μαγνητοκέλυφος  $L^*$  παρουσιάζει καθαρά περιοδική μεταβολή ( $\approx 1-6$ ), η οποία επαναλαμβάνεται σχεδόν πανομοιότυπα από τροχιά σε τροχιά. Η συμπεριφορά αυτή αντανακλά τη διέλευση του δορυφόρου από εσωτερικά προς εξωτερικά L-shells και πίσω. Αντίστοιχα, η MLT αυξάνεται σχεδόν μονοτονικά από  $\sim 0$  προς  $\sim 24$  ώρες και στη συνέχεια επανέρχεται απότομα κοντά στο 0, λόγω του κυκλικού ορισμού της (wrap-around mod 24 h). Η περιοδικότητα και των δύο παραμέτρων δείχνει ότι πρόκειται κυρίως για γεωμετρικό/τροχιακό αποτέλεσμα.

Στα σχήματα της ροής ηλεκτρονίων (ανά ενεργειακό κανάλι και ολοκληρωμένη), οι επαναλαμβανόμενες κορυφές και κοιλάδες είναι σε μεγάλο βαθμό συμβατές με τη μεταβολή του  $L^*$ : όταν ο δορυφόρος δειγματοληπτεί μεγαλύτερα L-shells καταγράφεται αυξημένη ροή, ενώ σε μικρότερα L μειώνεται. Οι βαθιές και στενές πτώσεις που επαναλαμβάνονται περιοδικά αποδίδονται κυρίως στην τροχιακή δειγματοληψία και στη γεωμετρία της μέτρησης σε περιοχές χαμηλότερης έντασης.

- **Μεταβολές λόγω φυσικών μηχανισμών της μαγνητόσφαιρας**

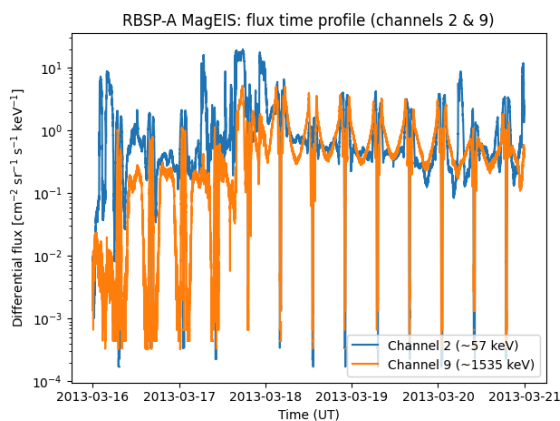
Πέρα από το επαναλαμβανόμενο τροχιακό μοτίβο, παρατηρούνται μεταβολές της

ροής που δεν επαναλαμβάνονται στο ίδιο σημείο κάθε τροχιάς, όπως αλλαγές στο ύψος των κορυφών από κύκλο σε κύκλο ή ενισχύσεις/μειώσεις που αποκλίνουν από την καθαρά περιοδική συμπεριφορά. Τέτοιες μεταβολές είναι συμβατές με ενδογενείς μαγνητοσφαιρικές διεργασίες, όπως substorm injections, radial diffusion, κυματική επιτάχυνση (π.χ. chorus waves), καθώς και μηχανισμούς απώλειας όπως pitch-angle scattering και magnetopause shadowing.

#### Συμπέρασμα

Οι παράμετροι  $L^*$  και MLT λειτουργούν κυρίως ως δείκτες θέσης και τροχιάς του δορυφόρου. Αντίθετα, η ροή ηλεκτρονίων επηρεάζεται τόσο από το ποια περιοχή της ζώνης Van Allen δειγματοληπτείται (χωρική μεταβλητότητα), όσο και από πραγματικές χρονικές μεταβολές του trapped πληθυσμού λόγω μαγνητοσφαιρικών διεργασιών.

#### (β1) Κατασκευάστε τη γραφική παράσταση του χρονικού προφίλ της ροής για τα κανάλια 2 και 9



Στο σχήμα παρουσιάζεται το χρονικό προφίλ της διαφορικής ροής ηλεκτρονίων για τα ενεργειακά κανάλια 2 ( $\approx 57$  keV) και 9 ( $\approx 1535$  keV). Τα δύο κανάλια αντιπροσωπεύουν χαμηλής και υψηλής ενέργειας ηλεκτρόνια αντίστοιχα, επιτρέποντας σύγκριση της δυναμικής των δύο πληθυσμών στην εξώτερη ζώνη Van Allen.

Και οι δύο χρονοσειρές εμφανίζουν έντονη τροχιακή περιοδικότητα, με

επαναλαμβανόμενες αυξομειώσεις που είναι συμβατές με τη δειγματοληψία διαφορετικών περιοχών της ζώνης κατά μήκος της τροχιάς. Οι κορυφές εμφανίζονται όταν ο δορυφόρος βρίσκεται σε περιοχές μεγαλύτερου  $L^*$  (εντός/πλησίον της εξώτερης ζώνης), ενώ τα βαθιά τοπικά ελάχιστα και οι πολύ στενές πτώσεις που εμφανίζονται σχεδόν ταυτόχρονα και στα δύο κανάλια συνδέονται κυρίως με την έξοδο σε περιοχές χαμηλότερης έντασης (sampling/γεωμετρία τροχιάς).

Η σύγκριση των δύο καναλιών δείχνει ότι το κανάλι 2 καταγράφει συστηματικά υψηλότερη ροή από το κανάλι 9, όπως αναμένεται αφού ο trapped πληθυσμός είναι πολύ πυκνότερος στις δεκάδες keV από ό,τι στις MeV ενέργειες. Το κανάλι 9 ( $\approx 1.5$  MeV) εμφανίζει χαμηλότερες τιμές και πιο “ασθενές” σήμα, με μεγαλύτερη **σχετική** μεταβλητότητα σε ορισμένα διαστήματα, κάτι που είναι συνεπές με το ότι τα MeV ηλεκτρόνια είναι αραιότερα και επηρεάζονται έντονα από μηχανισμούς επιτάχυνσης/απώλειας (π.χ. κυματικές αλληλεπιδράσεις, magnetopause shadowing, pitch-angle scattering).

(β2) Ποιες οι διαφορές ανάμεσα στα προφίλ της ροής των ενεργειακών καναλιών μεταξύ των καναλιών 2 και 9; Πού οφείλονται;

Η σύγκριση των χρονικών προφίλ της διαφορικής ροής για τα ενεργειακά κανάλια 2 ( $\approx 57$  keV) και 9 ( $\approx 1.5$  MeV) αναδεικνύει σαφείς διαφορές τόσο στο επίπεδο της ροής όσο και στη συμπεριφορά της στο χρόνο, οι οποίες σχετίζονται με την ενεργειακή εξάρτηση των μαγνητοσφαιρικών διεργασιών.

Καταρχάς, η ροή στο κανάλι 2 είναι συστηματικά υψηλότερη από εκείνη του καναλιού 9 κατά περίπου 1–2 τάξεις μεγέθους σε όλη τη διάρκεια του αρχείου. Αυτό είναι σύμφωνο με τη γενική μορφή του ενεργειακού φάσματος των trapped ηλεκτρονίων, όπου ο πληθυσμός στις δεκάδες keV είναι πολύ πυκνότερος σε σύγκριση με την αραιή υψηλής ενέργειας συνιστώσα των MeV ηλεκτρονίων.

Και τα δύο κανάλια παρουσιάζουν έντονη περιοδικότητα και σχεδόν ταυτόχρονες βαθιές πτώσεις της ροής, οι οποίες συνδέονται κυρίως με την τροχιακή δειγματοληψία (μεταβολή του  $L^*$ ) και όχι με πραγματικές χρονικές απώλειες του πληθυσμού. Αυτό δείχνει ότι μεγάλο μέρος της δομής των χρονοσειρών οφείλεται στη θέση του δορυφόρου μέσα και έξω από την εξωτερική ζώνη Van Allen.

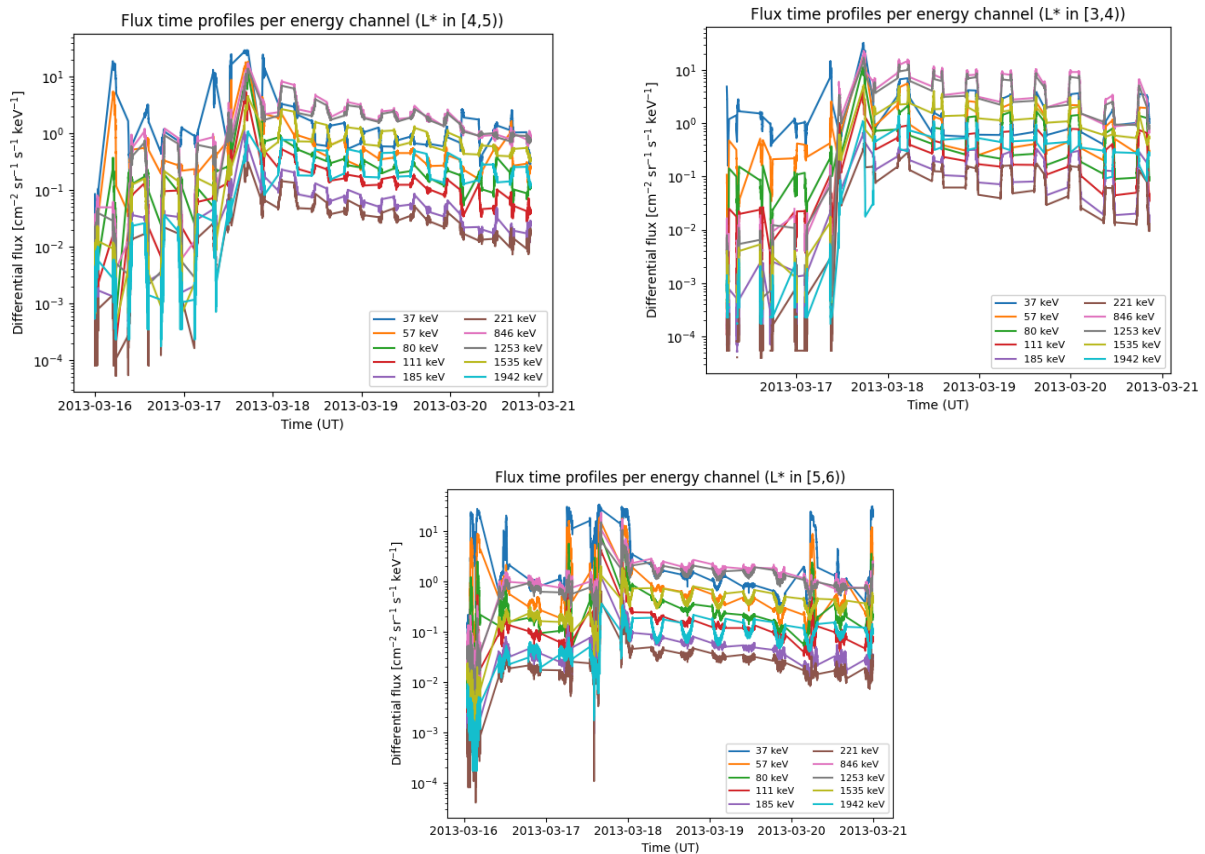
Ωστόσο, παρατηρούνται διαφορές στη λεπτομερή συμπεριφορά των δύο καναλιών. Το κανάλι 2 εμφανίζει γενικά πιο ομαλή εξέλιξη της ροής εντός κάθε τροχιακού κύκλου, αντανakλώντας τον μεγάλο και σχετικά σταθερό πληθυσμό χαμηλοενεργειακών ηλεκτρονίων. Αντίθετα, το κανάλι 9 παρουσιάζει χαμηλότερες απόλυτες τιμές και μεγαλύτερη σχετική μεταβλητότητα, γεγονός που υποδηλώνει ότι ο πληθυσμός των MeV ηλεκτρονίων είναι πιο ευαίσθητος σε μεταβολές της μαγνητοσφαιρικής κατάστασης.

Οι διαφορές αυτές οφείλονται στο ότι τα ηλεκτρόνια δεκάδων keV εμπλουτίζονται γρήγορα από substorm injections και επηρεάζονται άμεσα από τοπικές διεργασίες, ενώ τα MeV ηλεκτρόνια παράγονται και εξελίσσονται κυρίως μέσω βραδύτερων μηχανισμών, όπως radial diffusion και κυματική επιτάχυνση (π.χ. chorus), και υπόκεινται σε ισχυρούς μηχανισμούς απώλειας (magnetopause shadowing, pitch-angle scattering).

Συνεπώς, τα δύο προφίλ αντικατοπτρίζουν διαφορετικούς φυσικούς πληθυσμούς: το κανάλι 2 καταγράφει έναν άφθονο και σχετικά σταθερό χαμηλοενεργειακό πληθυσμό, ενώ το κανάλι 9 αποτυπώνει έναν αραιό, πιο ευαίσθητο και δυναμικό πληθυσμό υψηλής ενέργειας, του οποίου η εξέλιξη εξαρτάται έντονα από τη γενικότερη μαγνητοσφαιρική δραστηριότητα.



(γ1) Κατασκευάστε τη γραφική παράσταση του χρονικού προφίλ της ροής, ανά ενεργειακό κανάλι, και ανά δεδομένο εύρος/τιμή μαγνητοκελύφους ( $L_{star}=3-4$ ,  $4-5$ ,  $5-6$ ).



Η ανάλυση των χρονικών προφίλ της ροής για τα εύρη  $3 \leq L^* < 4$ ,  $4 \leq L^* < 5$  και  $5 \leq L^* < 6$  αποκαλύπτει χωρική εξάρτηση της καταγεγραμμένης ροής ηλεκτρονίων στην εξωτερική ζώνη Van Allen. Η ομαδοποίηση σε στενά εύρη  $L^*$  περιορίζει το τροχιακό (sampling) αποτύπωμα και επιτρέπει τη σύγκριση της συμπεριφοράς των διαφορετικών ενεργειακών καναλιών σε διακριτές ακτινικές περιοχές.

### **Περιοχή $3 \leq L^* < 4$**

Στο σχετικά εσωτερικό αυτό τμήμα της εξωτερικής ζώνης, η ροή παρουσιάζει γενικά χαμηλότερα επίπεδα, ιδιαίτερα στα υψηλότερα ενεργειακά κανάλια. Τα χαμηλής ενέργειας κανάλια (δεκάδες keV) εμφανίζουν έντονες χρονικές μεταβολές με αιχμές και πτώσεις, γεγονός που υποδηλώνει ότι ο πληθυσμός αυτός ανταποκρίνεται γρήγορα σε παροδικές διεργασίες. Αντίθετα, τα υψηλής ενέργειας κανάλια παραμένουν σε χαμηλές τιμές και παρουσιάζουν πιο ομαλή εξέλιξη, ένδειξη ότι η παραγωγή ή διατήρηση MeV ηλεκτρονίων είναι περιορισμένη σε αυτό το εύρος  $L^*$ .

Αντίθετα, τα υψηλότερα ενεργειακά κανάλια (κανάλια 6–10) παραμένουν σε πολύ χαμηλότερα επίπεδα και μεταβάλλονται ομαλά, υποδεικνύοντας ότι σε αυτή την περιοχή η επιτάχυνση των MeV ηλεκτρονίων είναι περιορισμένη.

#### ***Περιοχή $4 \leq L^* < 5$***

Στο ενδιάμεσο αυτό εύρος παρατηρείται γενική ενίσχυση της ροής σε περισσότερα ενεργειακά κανάλια. Τα χαμηλής ενέργειας ηλεκτρόνια παραμένουν ενεργά, ενώ εμφανίζεται σαφέστερη συμμετοχή και των μεσαίων ενεργειών. Το εύρος αυτό θεωρείται ιδιαίτερα ευνοϊκό για διαδικασίες που μεταβάλλουν το ενεργειακό φάσμα, όπως κυματικές αλληλεπιδράσεις και ακτινική μεταφορά, κάτι που είναι συμβατό με την αυξημένη και πιο συνεκτική δραστηριότητα που παρατηρείται στα διαγράμματα.

#### ***Περιοχή $5 \leq L^* < 6$***

Στο πιο εξωτερικό τμήμα που εξετάζεται, η ροή παρουσιάζει έντονη δυναμική σε όλο το ενεργειακό εύρος, με πιο εμφανή συμμετοχή των υψηλής ενέργειας καναλιών σε σχέση με τα χαμηλότερα  $L^*$ . Οι καμπύλες δείχνουν μεγαλύτερη σχετική μεταβλητότητα και πιο καθαρή δομή στα MeV ηλεκτρόνια, υποδηλώνοντας ότι σε μεγάλα  $L^*$  οι μηχανισμοί που επηρεάζουν τον υψηλοενεργειακό πληθυσμό γίνονται σημαντικότεροι. Παράλληλα, τα χαμηλής ενέργειας κανάλια εξακολουθούν να παρουσιάζουν έντονες μεταβολές, διατηρώντας τη δυναμική τους φύση.

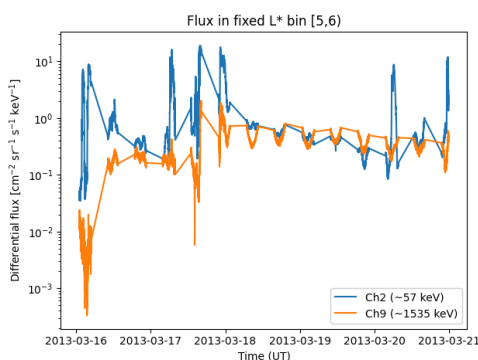
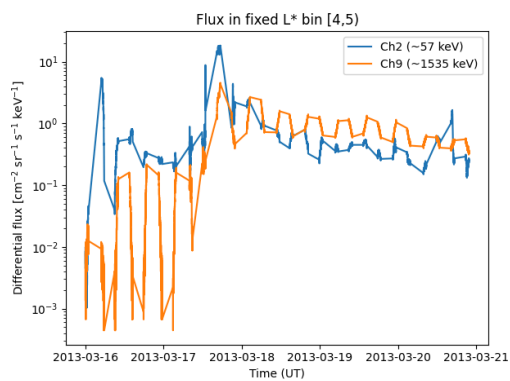
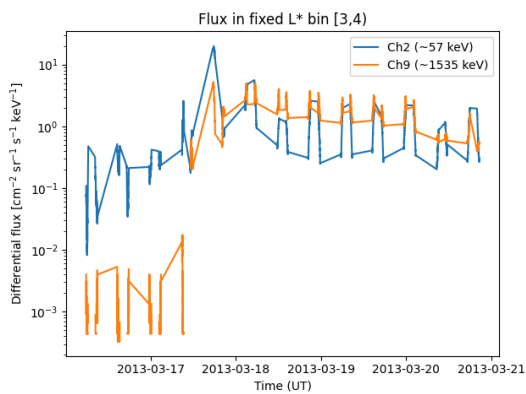
Συνολικά, οι γραφικές παραστάσεις δείχνουν ότι η δομή και η εξέλιξη της ηλεκτρονικής ροής εξαρτώνται έντονα από το  $L^*$ . Σε χαμηλότερα  $L^*$  κυριαρχεί η μεταβλητότητα των keV ηλεκτρονίων, ενώ όσο αυξάνεται το  $L^*$  γίνεται εμφανέστερη η συμβολή των υψηλότερων ενεργειών. Η συμπεριφορά αυτή είναι συμβατή με την ακτινική διαφοροποίηση των διεργασιών μεταφοράς, επιτάχυνσης και απώλειας στην εξώτερη ζώνη Van Allen.

(γ2) Σχολιάστε τις μεταβολές που παρατηρείτε σε σχέση με αυτές του ερωτήματος β.

Στο ερώτημα (β), τα χρονικά προφίλ των καναλιών 2 και 9 περιλαμβάνουν έντονα το αποτύπωμα της τροχιακής κίνησης, επειδή ο δορυφόρος μεταβαίνει συνεχώς σε διαφορετικά  $L^*$  (και MLT). Έτσι, οι μεγάλες αυξομειώσεις που φαίνονται στο (β) προκύπτουν από συνδυασμό (i) χωρικής δειγματοληψίας διαφορετικών περιοχών της ζώνης ακτινοβολίας και (ii) πραγματικών χρονικών μεταβολών του πληθυσμού ηλεκτρονίων.

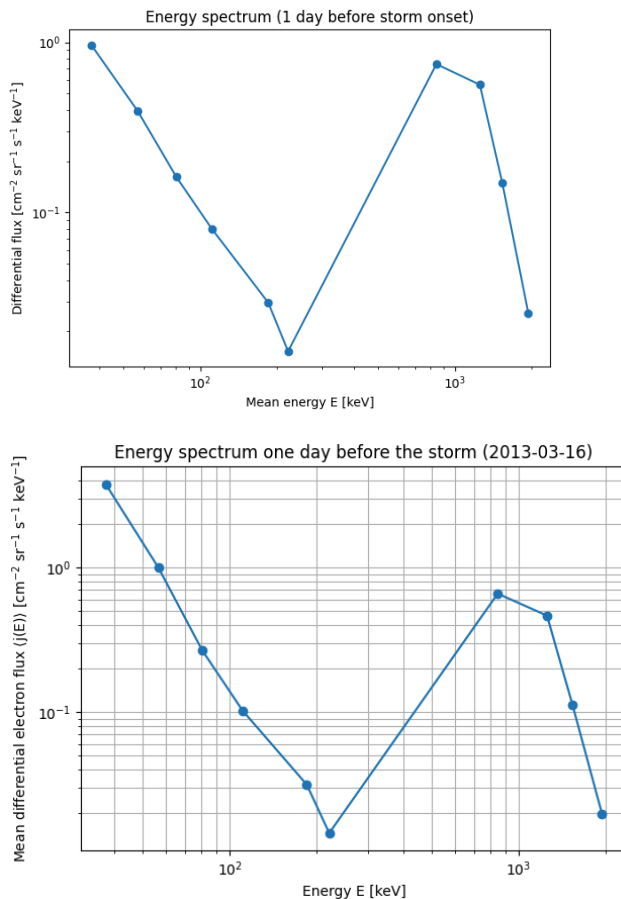
Στο (γ1), όπου η ροή εξετάζεται σε στενά εύρη  $L^*$  (3–4, 4–5, 5–6), το χωρικό “sampling effect” μειώνεται σημαντικά. Αυτό επιτρέπει να φανεί καθαρότερα πώς η ενεργειακή εξάρτηση που παρατηρήθηκε στο (β) μεταβάλλεται με την ακτινική θέση:

- Για  $3 \leq L^* < 4$ : τα χαμηλής ενέργειας κανάλια εμφανίζουν εντονότερη και ταχύτερη μεταβλητότητα, ενώ τα υψηλής ενέργειας παραμένουν σε χαμηλότερα επίπεδα και πιο ομαλά. Αυτό είναι συμβατό με το ότι οι χαμηλοενεργειακοί πληθυσμοί ανταποκρίνονται πιο άμεσα σε παροδικές διεργασίες και μεταφορά.
- Για  $4 \leq L^* < 5$ : οι διαφορές μεταξύ χαμηλών και υψηλών ενεργειών μειώνονται, καθώς παρατηρείται ενίσχυση σε περισσότερα κανάλια. Το εύρος αυτό λειτουργεί ως “ενδιάμεση” περιοχή όπου η φασματική μορφή μπορεί να μεταβάλλεται πιο αισθητά.
- Για  $5 \leq L^* < 6$ : η σχετική συμμετοχή των υψηλότερων ενεργειών γίνεται πιο εμφανής σε σχέση με τα μικρότερα  $L^*$ , και η μεταβλητότητα των υψηλών ενεργειών ξεχωρίζει περισσότερο. Αυτό συμφωνεί με την εικόνα του (β), όπου το κανάλι 9 δείχνει ενισχύσεις σε συγκεκριμένα διαστήματα, αλλά όχι με την ίδια ένταση/συχνότητα όπως το κανάλι 2.



Συνολικά, το (γ) δείχνει ότι το συμπέρασμα του (β) (ισχυρότερη και ταχύτερη απόκριση στα keV σε σχέση με τα MeV) παραμένει, αλλά τώρα μπορεί να ερμηνευθεί χωρικά: όταν “κλειδώνουμε” το  $L^*$ , μειώνεται η τεχνητή περιοδικότητα από την τροχιά και αναδεικνύεται πιο καθαρά η ενεργειακά και χωρικά εξαρτώμενη δυναμική της εξώτερης ζώνης Van Allen.

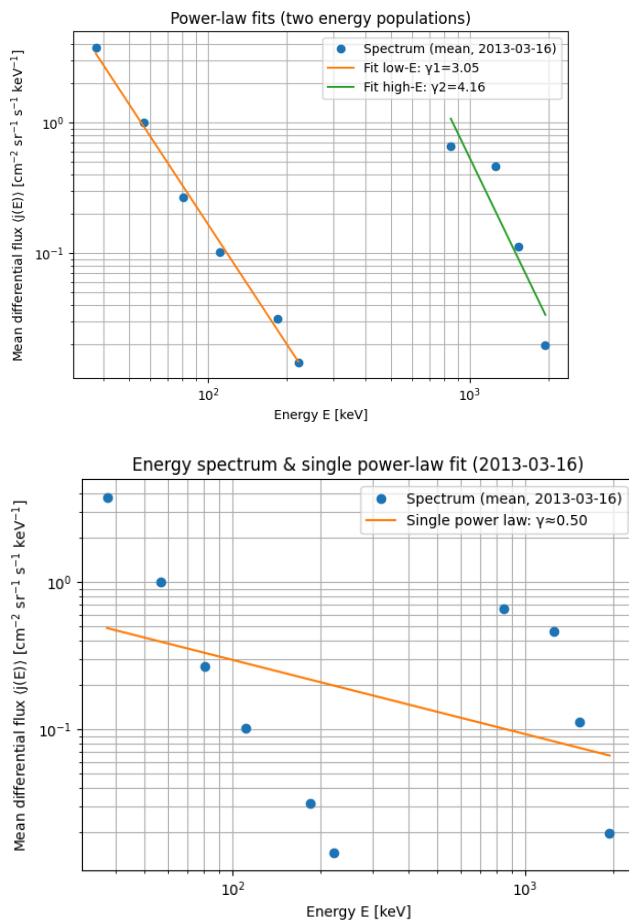
(δ1) Κατασκευάστε τη γραφική παράσταση της ενεργειακής φασματικής κατανομής των ηλεκτρονίων (δηλαδή την ένταση ροής του κάθε καναλιού ως προς την αντίστοιχη μέση ενέργειά του), για το χρονικό διάστημα μιας ημέρας πριν την έναρξη της γεωμαγνητικής καταιγίδας.



Για να μελετηθεί η κατάσταση της εξωτερικής ζώνης Van Allen πριν την έναρξη της γεωμαγνητικής καταιγίδας της 17ης Μαρτίου 2013, υπολογίστηκε η ενεργειακή φασματική κατανομή της ροής ηλεκτρονίων για την ημέρα 16 Μαρτίου 2013 (00:00–24:00 UT). Για όλα τα χρονικά δείγματα της ημέρας αυτής υπολογίστηκε η διαφορική ροή ανά ενεργειακό κανάλι από τη σχέση  $j(E) = \text{CountRate} \cdot G/\Delta E$ , και στη συνέχεια προέκυψε το μέσο ενεργειακό φάσμα

Το φάσμα εμφανίζει ισχυρή μείωση της ροής στο εύρος **δεκάδων–εκατοντάδων keV** ( $\approx 37\text{--}221 \text{ keV}$ ), δηλαδή το keV τμήμα παρουσιάζει καθαρά **φθίνουσα τάση** με την ενέργεια. Ωστόσο, στο **υψηλότερο ενεργειακό εύρος** ( $\approx 846\text{--}1942 \text{ keV}$ ) η συμπεριφορά διαφοροποιείται: παρατηρείται **σχετική ενίσχυση** στα κανάλια γύρω από  $\sim 0.8\text{--}1.3 \text{ MeV}$  σε σχέση με την ομαλή προέκταση του keV τμήματος, και στη συνέχεια πτώση προς το υψηλότερο κανάλι. Αυτό υποδεικνύει ότι το ενεργειακό φάσμα δεν περιγράφεται ικανοποιητικά από έναν ενιαίο απλό νόμο ισχύος σε όλο το εύρος, αλλά είναι πιο συμβατό με ύπαρξη **διακριτών ενεργειακών περιοχών/πληθυσμών** (keV έναντι MeV).

Η εικόνα αυτή μπορεί να ερμηνευτεί ως προ-καταιγδική κατάσταση όπου ο πληθυσμός των χαμηλοενεργειακών ηλεκτρονίων παραμένει κυρίαρχος, ενώ στο MeV εύρος η ροή είναι σημαντικά χαμηλότερη αλλά με ενδείξεις διαφοροποιημένης κλίσης/μορφολογίας σε σχέση με το keV τμήμα. Έτσι, το φάσμα της 16/03 μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως σημείο αναφοράς (baseline) για σύγκριση με τα φάσματα κατά την κύρια φάση και την αποκατάσταση, ώστε να ποσοτικοποιηθούν μεταβολές όπως σκλήρυνση/μαλάκωμα του φάσματος και μεταβολές του MeV πληθυσμού κατά την εξέλιξη της καταιγίδας.



(δ2) Στην γραφική παράσταση του δ1, εφαρμόστε power law fitting<sup>1</sup> ώστε να υπολογίσετε τις παραμέτρους της κατανομής για κάθε ενεργειακό πληθυσμό.

Για την ποσοτική περιγραφή της ενεργειακής φασματικής κατανομής της 16/03/2013 εφαρμόστηκε προσαρμογή power-law της μορφής:

$j(E) = AE^{-\gamma}$ . Επειδή το φάσμα παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά στο keV και στο MeV εύρος, η προσαρμογή έγινε **ξεχωριστά** σε δύο ενεργειακούς πληθυσμούς: χαμηλών ενεργειών (κανάλια 1–6, 37–221 keV) και υψηλών ενεργειών (κανάλια 7–10, 846–1942 keV).

Για τις χαμηλές ενέργειες προέκυψε:  $A_1 = 2.135 \cdot 10^5$ ,  $\gamma_1 = 3.054$ , υποδεικνύοντας ότι στο εύρος 37–221 keV η ροή μειώνεται έντονα με την ενέργεια και το φάσμα περιγράφεται ικανοποιητικά από power-law.

Για τις υψηλές ενέργειες προέκυψε:  $A_1 = 1.638 * 10^5$ ,  $\gamma_1 = 4.162$ .

Η μεγαλύτερη κλίση ( $\gamma_2 > \gamma_1$ ) δείχνει **steepening** στο MeV εύρος, δηλαδή τα πολύ υψηλής ενέργειας ηλεκτρόνια είναι σαφώς σπανιότερα. Παράλληλα, η προσαρμογή στο high-E έχει μεγαλύτερη αβεβαιότητα, καθώς βασίζεται σε μόνο 4 σημεία και στο σχήμα διαφαίνεται καμπύλωση στο MeV, άρα το power-law εκεί πρέπει να θεωρείται κυρίως περιγραφικό.

Συνολικά, την ημέρα πριν την καταιγίδα, ο πληθυσμός keV ηλεκτρονίων είναι κυρίαρχος, ενώ στο MeV εύρος η ροή είναι χαμηλότερη και μειώνεται ταχύτερα με την ενέργεια, κάτι συμβατό με προ-καταιγιδική κατάσταση πριν από ισχυρή επιτάχυνση.

(δ3) Στην γραφική παράσταση του δ1, εφαρμόστε μια άλλη μέθοδο fitting ώστε να υπολογίσετε τις παραμέτρους της κατανομής για κάθε ενεργειακό πληθυσμό. Συγκρίνετε τις δύο μεθόδους fitting.

Στο ερώτημα (δ3) εφαρμόστηκε μια δεύτερη μέθοδος προσαρμογής στο ενεργειακό φάσμα της 16ης Μαρτίου 2013, με σκοπό τη σύγκριση με το power-law μοντέλο του (δ2) και την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη φυσική μορφή της κατανομής. Η εναλλακτική αυτή μέθοδος χρησιμοποιεί ένα εκθετικό μοντέλο της μορφής:

$$j(E) = J_0 e^{-E/E_0}$$

το οποίο αποτελεί μια συνήθη περιγραφή ενεργειακών κατανομών σε περιβάλλοντα όπου οι μηχανισμοί επιτάχυνσης δεν είναι ισχυροί και το φάσμα κυριαρχείται από βαθμιαία εξασθένιση με την ενέργεια.

Log-log fitting (δ2):

$$\text{Low-E (κανάλια 1-6): } A_1 = 2.135 * 10^5, \gamma_1 = 3.054$$

$$\text{High-E (κανάλια 7-10): } A_2 = 1.638 * 10^{12}, \gamma_2 = 4.162$$

Nonlinear LS στο j (δ3)

$$\text{Low-E: } A_1 = (4.771 + 1.009) * 10^5, \gamma_1 = 3.246 + 0.058$$

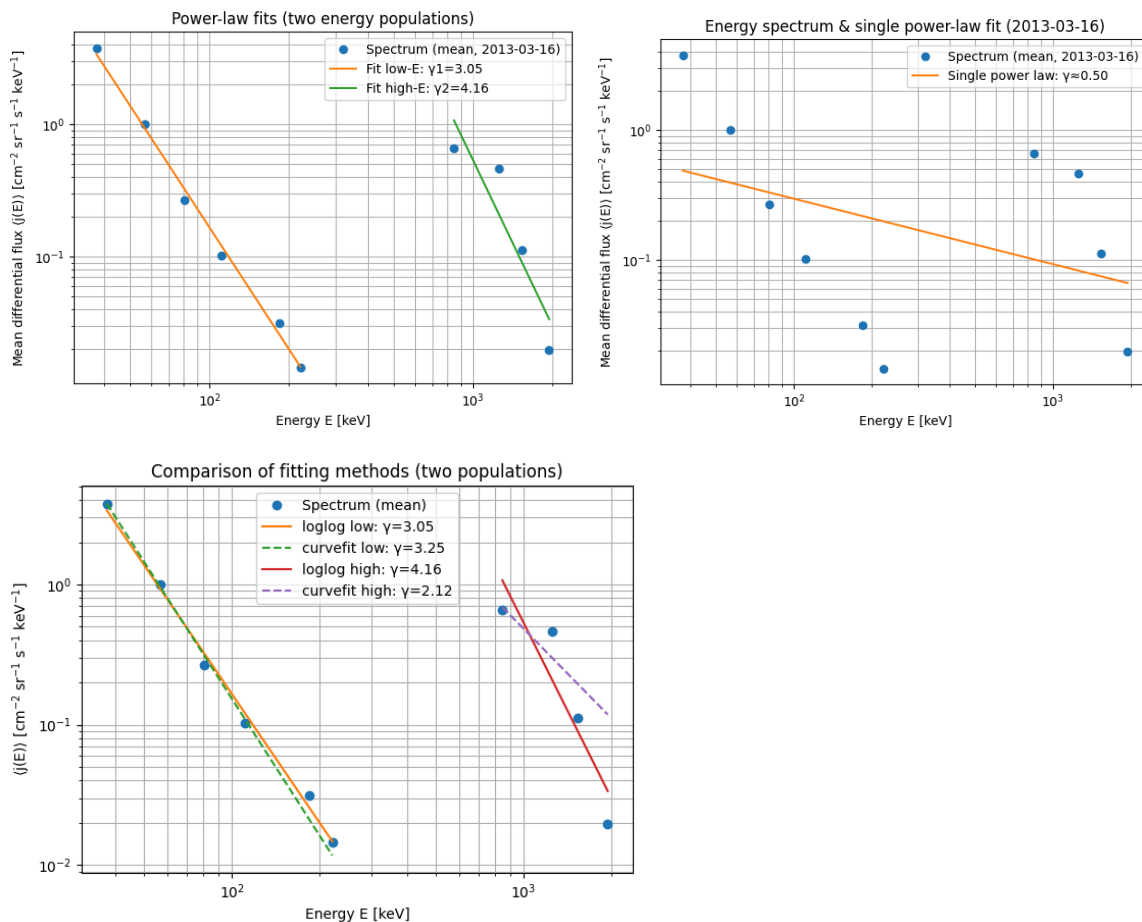
$$\text{High-E: } A_2 = (1.116 + 6.685) * 10^6, \gamma_2 = 2.121 + 0.874$$

### Σύγκριση των δύο μεθόδων

Στις χαμηλές ενέργειες (Low-E) οι δύο μέθοδοι δίνουν συμφωνία ως προς την κλίση:  $\gamma \approx 3.1-3.33$ . Αυτό δείχνει ότι στο εύρος 37–221 keV το power law είναι σχετικά καλή

περιγραφή και τα αποτελέσματα είναι σταθερά.

Στις υψηλές ενέργειες (High-E) οι δύο μέθοδοι διαφέρουν έντονα και το nonlinear fit δίνει πολύ μεγάλες αβεβαιότητες (ιδίως στο AAA). Αυτό είναι αναμενόμενο γιατί: υπάρχουν μόνο 4 σημεία → μικρή στατιστική ισχύς και μεγάλη ευαισθησία σε ένα σημείο, το high-E τμήμα δεν ακολουθεί “καθαρό” power law με τον ίδιο τρόπο (υπάρχει καμπύλωση/break στο συνολικό φάσμα), οι δύο μέθοδοι ζυγίζουν διαφορετικά τα σφάλματα: το log-log ουσιαστικά δίνει έμφαση σε σχετικές αποκλίσεις (σαν multiplicative noise), το nonlinear LS στο jji δίνει μεγαλύτερο βάρος στα σημεία με μεγαλύτερη απόλυτη ροή (εκτός αν βάλεις weights), οπότε μπορεί να “τραβηχτεί” διαφορετικά η κλίση.



LOG-LOG polyfit:

Low-E :  $A=2.135 \times 10^5$ ,  $\gamma=3.054$

High-E:  $A=1.638 \times 10^{12}$ ,  $\gamma=4.162$

Nonlinear curve\_fit (original space):

Low-E :  $A=4.771 \times 10^5 \pm 1.009 \times 10^5$ ,  $\gamma=3.246 \pm 0.058$

High-E:  $A=1.116 \times 10^6 \pm 6.685 \times 10^6$ ,  $\gamma=2.121 \pm 0.874$

(δ4) Επαναλάβετε τα βήματα δ1 και δ2 για άλλες 3 χρονικές περιόδους διάρκειας μίας ημέρας: (i) κατά την κύρια φάση της καταιγίδας, (ii) κατά τη φάση ανάκαμψης της καταιγίδας, και (iii) μετά το τέλος της καταιγίδας. Αναφέρετε τις χρονικές περιόδους που



χρησιμοποιείτε και εξηγώντας τα κριτήρια με τα οποία τις επιλέξατε. Κατασκευάστε τις γραφικές παραστάσεις, προσαρμόστε power law fitting, και σημειώστε τις τιμές των παραμέτρων.

Στο ερώτημα (δ4) επεκτείνεται η ανάλυση του ενεργειακού φάσματος σε τρεις επιπλέον χρονικές περιόδους διάρκειας μίας ημέρας, ώστε να εξεταστεί η εξέλιξη της εξώτερης ζώνης ακτινοβολίας κατά τη γεωμαγνητική καταιγίδα. Επιλέχθηκαν διαδοχικά παράθυρα 24 ωρών που αντιστοιχούν σε χαρακτηριστικές φάσεις του γεγονότος: (i) κύρια φάση 17/03/2013 00:00–18/03/2013 00:00, (ii) φάση ανάκαμψης 18/03/2013 00:00–19/03/2013 00:00 και (iii) μετα-καταιγιδική περίοδος 19/03/2013 00:00–20/03/2013 00:00. Ως προ-καταιγιδική αναφορά (baseline) χρησιμοποιείται η 16/03/2013 00:00–17/03/2013 00:00 από το (δ1)–(δ2). Για κάθε 24ωρο υπολογίστηκε η μέση διαφορική ροή ανά ενεργειακό κανάλι και κατασκευάστηκε το αντίστοιχο ενεργειακό φάσμα.

Στη συνέχεια εφαρμόστηκε προσαρμογή power law της μορφής  $j(E)=AE^{-\gamma}$ . Επειδή το φάσμα παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά σε χαμηλότερες και υψηλότερες ενέργειες, η προσαρμογή έγινε ξεχωριστά για δύο ενεργειακούς πληθυσμούς: χαμηλής ενέργειας (κανάλια 1–6, 37–221 keV) και υψηλής ενέργειας (κανάλια 7–10, 846–1942 keV).

#### **Προ-καταιγιδική περίοδος (16/03–17/03):**

Για τα χαμηλά E προκύπτει  $A_1 = 2.135 \cdot 10^5$  και  $\gamma_1 = 3.054$ , ενώ για τα υψηλά E  $A_2 = 1.638 \cdot 10^{12}$  και  $\gamma_2 = 4.162$ . Η μεγαλύτερη τιμή του  $\gamma$  στα υψηλά E δείχνει πιο απότομη πτώση της ροής προς το MeV εύρος, δηλαδή πιο «μαλακό» φάσμα στις υψηλές ενέργειες.

#### **Κύρια φάση (17/03–18/03):**

Στα χαμηλά E βρίσκουμε,  $A_1 = 1.706 \cdot 10^5$  και  $\gamma_1 = 2.670$ , ενώ στα υψηλά E  $A_2 = 4.161 \cdot 10^{12}$ ,  $\gamma_2 = 4.053$ . Σε σχέση με την pre-storm κατάσταση, η μείωση του  $\gamma_1$  ( $3.05 \rightarrow 2.67$ ) υποδεικνύει σκλήρυνση του φάσματος στο keV εύρος (σχετικά μεγαλύτερη ενίσχυση των υψηλότερων keV σε σχέση με τα χαμηλότερα keV). Παράλληλα, η υψηλή-ενέργεια περιοχή διατηρεί μεγάλη κλίση ( $\gamma \approx 4$ ), αλλά με μεταβολή της κανονικοποίησης.

#### **Φάση ανάκαμψης (18/03–19/03):**

Στα χαμηλά E προκύπτει  $A_1 = 2.860 \cdot 10^3$ ,  $\gamma = 1.905$  και στα υψηλά E  $A_2 = 4.491 \cdot 10^{10}$ ,  $\gamma_2 = 3.350$ .

Η περαιτέρω μείωση των εκθετών (ιδίως στο low-E:  $2.67 \rightarrow 1.91$ ) δείχνει επιπλέον σκλήρυνση/αναδόμηση του φάσματος κατά την ανάκαμψη, δηλαδή ότι η σχετική κατανομή των ροών μεταξύ καναλιών μεταβάλλεται αισθητά μετά την κύρια φάση.

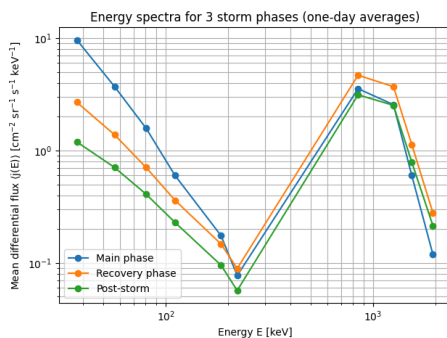
Μετα-καταιγιδική περίοδος (19/03–20/03):

Στα χαμηλά E προκύπτει  $A_1 = 6.382 \cdot 10^3$ ,  $\gamma = 1.699$  και στα υψηλά E  $A_2 = 1.069 \cdot 10^{10}$ ,  $\gamma_2 = 3.199$ . Οι τιμές δείχνουν ότι, παρότι το σύστημα τείνει προς πιο



ήρεμη κατάσταση, η μορφή του φάσματος παραμένει διαφοροποιημένη σε σχέση με το pre-storm: οι εκθέτες είναι μικρότεροι (πιο «σκληρό» φάσμα) και στις δύο ενεργειακές περιοχές σε σχέση με την 16/03–17/03.

Συνολικά, η εξέλιξη των  $\gamma_1, \gamma_2$  από την pre-storm προς την κύρια φάση και στη συνέχεια προς ανάκαμψη/μετα-καταιγιδική περίοδο δείχνει συστηματική σκλήρυνση του φάσματος (μείωση του  $\gamma$ ) τόσο στο keV όσο και στο MeV εύρος, με παράλληλες μεταβολές της κανονικοποίησης. Αυτό αποτελεί ποσοτική ένδειξη ότι η ενεργειακή κατανομή των trapped ηλεκτρονίων αναδομείται σημαντικά κατά την καταιγίδα και σταδιακά προσαρμόζεται σε νέα κατάσταση μετά το κύριο γεγονός.



=== Power-law parameters (log-log fits) ===

Main phase: 2013-03-17 00:00:00 to 2013-03-18 00:00:00

Low-E (ch1–6, 37.3–221.1 keV):  $A_1=1.706e+05$ ,  $\gamma_1=2.670$ ,  $SSE_{log}=1.704e-02$

High-E (ch7–10, 846.0–1942.0 keV):  $A_2=4.161e+12$ ,  $\gamma_2=4.053$ ,  $SSE_{log}=2.138e-01$

Recovery phase: 2013-03-18 00:00:00 to 2013-03-19 00:00:00

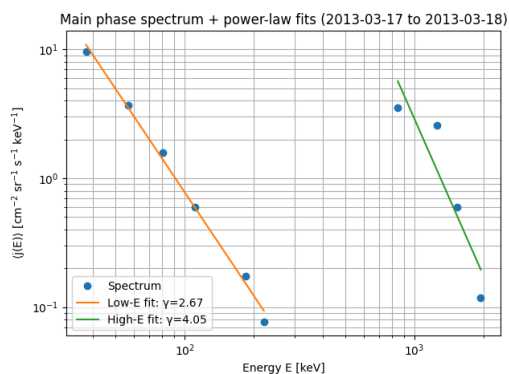
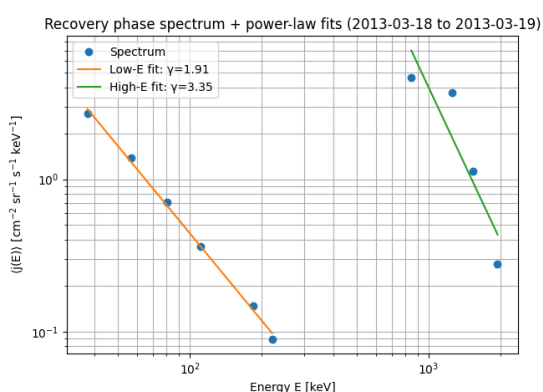
Low-E (ch1–6, 37.3–221.1 keV):  $A_1=2.860e+03$ ,  $\gamma_1=1.905$ ,  $SSE_{log}=4.604e-03$

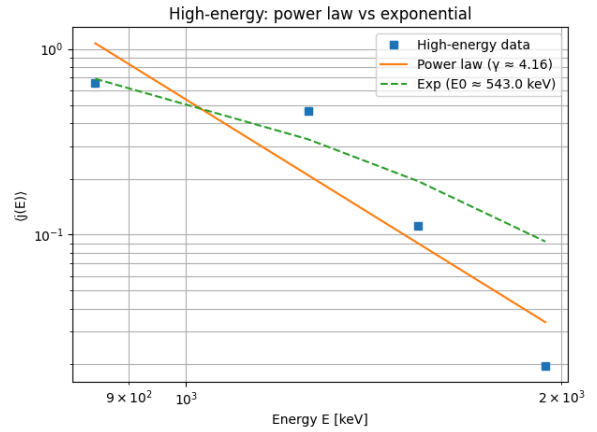
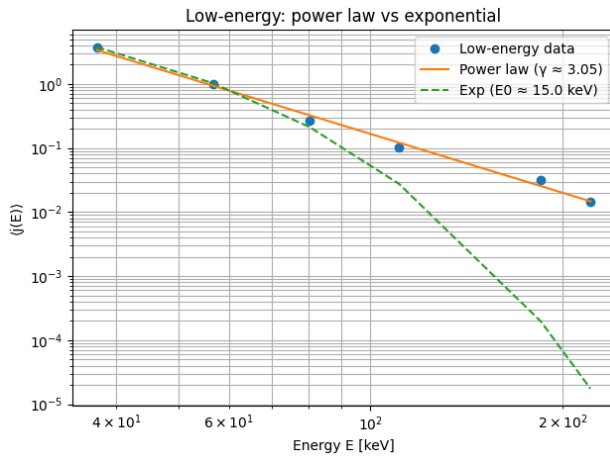
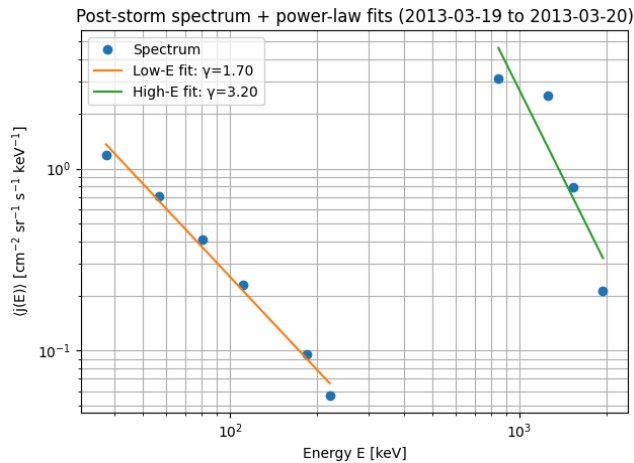
High-E (ch7–10, 846.0–1942.0 keV):  $A_2=4.491e+10$ ,  $\gamma_2=3.350$ ,  $SSE_{log}=1.597e-01$

Post-storm: 2013-03-19 00:00:00 to 2013-03-20 00:00:00

Low-E (ch1–6, 37.3–221.1 keV):  $A_1=6.382e+02$ ,  $\gamma_1=1.699$ ,  $SSE_{log}=1.185e-02$

High-E (ch7–10, 846.0–1942.0 keV):  $A_2=1.069e+10$ ,  $\gamma_2=3.199$ ,  $SSE_{log}=1.447e-01$





#### ===== FIT PARAMETERS (4 phases) =====

Pre-storm: 2013-03-16 00:00:00 to 2013-03-17 00:00:00  
 Low-E:  $A1=2.135e+05$ ,  $\gamma1=3.054$ ,  $SSElog=2.384e-02$   
 High-E:  $A2=1.638e+12$ ,  $\gamma2=4.162$ ,  $SSElog=2.290e-01$

Main phase: 2013-03-17 00:00:00 to 2013-03-18 00:00:00  
 Low-E:  $A1=1.706e+05$ ,  $\gamma1=2.670$ ,  $SSElog=1.704e-02$   
 High-E:  $A2=4.161e+12$ ,  $\gamma2=4.053$ ,  $SSElog=2.138e-01$

Recovery phase: 2013-03-18 00:00:00 to 2013-03-19 00:00:00  
 Low-E:  $A1=2.860e+03$ ,  $\gamma1=1.905$ ,  $SSElog=4.604e-03$   
 High-E:  $A2=4.491e+10$ ,  $\gamma2=3.350$ ,  $SSElog=1.597e-01$

Post-storm: 2013-03-19 00:00:00 to 2013-03-20 00:00:00  
 Low-E:  $A1=6.382e+02$ ,  $\gamma1=1.699$ ,  $SSElog=1.185e-02$   
 High-E:  $A2=1.069e+10$ ,  $\gamma2=3.199$ ,  $SSElog=1.447e-01$

#### ===== POETIC ANALYSIS =====

Pre-storm (2013-03-16):  
 Στις χαμηλές ενέργειες, το φάσμα είναι ισορροπημένο, με καθαρή κλίση ( $\gamma1=3.05$ ).  
 Στις υψηλές ενέργειες, το φάσμα είναι μαλακό και απότομο, σαν να σβήνει γρήγορα ( $\gamma2=4.16$ ).

Main phase (2013-03-17):  
 Στις χαμηλές ενέργειες, το φάσμα είναι ισορροπημένο, με καθαρή κλίση ( $\gamma1=2.67$ ).  
 Στις υψηλές ενέργειες, το φάσμα είναι μαλακό και απότομο, σαν να σβήνει γρήγορα ( $\gamma2=4.05$ ).

Recovery phase (2013-03-18):  
 Στις χαμηλές ενέργειες, το φάσμα είναι πιο σκληρό, κρατάει ουρά ( $\gamma1=1.91$ ).  
 Στις υψηλές ενέργειες, το φάσμα είναι ισορροπημένο, με καθαρή κλίση ( $\gamma2=3.35$ ).

Post-storm (2013-03-19):

Στις χαμηλές ενέργειες, το φάσμα είναι σκληρό και επίμονο, δεν αφήνει εύκολα την ενέργεια ( $\gamma_1=1.70$ ).

Στις υψηλές ενέργειες, το φάσμα είναι ισορροπημένο, με καθαρή κλίση ( $\gamma_2=3.20$ ).

Μετάβαση Pre-storm  $\rightarrow$  Main phase:

Low-E: σκληραίνει (η κλίση μικραίνει) ( $\gamma_1: 3.05 \rightarrow 2.67$ )

High-E: σχεδόν δεν αλλάζει ( $\gamma_2: 4.16 \rightarrow 4.05$ )

Μετάβαση Main phase  $\rightarrow$  Recovery phase:

Low-E: σκληραίνει (η κλίση μικραίνει) ( $\gamma_1: 2.67 \rightarrow 1.91$ )

High-E: σκληραίνει (η κλίση μικραίνει) ( $\gamma_2: 4.05 \rightarrow 3.35$ )

Μετάβαση Recovery phase  $\rightarrow$  Post-storm:

Low-E: σκληραίνει (η κλίση μικραίνει) ( $\gamma_1: 1.91 \rightarrow 1.70$ )

High-E: σκληραίνει (η κλίση μικραίνει) ( $\gamma_2: 3.35 \rightarrow 3.20$ )

Κλείσιμο:

Όσο η καταιγίδα κορυφώνεται, το φάσμα αλλάζει ρυθμό σαν μουσική: άλλοτε σφίγγει, άλλοτε χαλαρώνει, και στις υψηλές ενέργειες φαίνεται πιο εύθραυστο—σαν λεπτή γραμμή που την τραβούν μαζί επιτάχυνση και απώλειες

Στην προ-καταιγιδική φάση το ενεργειακό φάσμα μειώνεται έντονα όσο αυξάνει η ενέργεια. Το χαμηλό ενεργειακό μέρος κυριαρχεί, ενώ η συνεισφορά των πολύ υψηλών ενεργειών είναι μικρή και “σβήνει” γρήγορα, κάτι που αντιστοιχεί σε μια σχετικά ήρεμη κατάσταση της ζώνης.

Κατά την κύρια φάση της καταιγίδας το φάσμα ενισχύεται συνολικά και γίνεται λιγότερο απότομο, δηλαδή “σκληραίνει”. Αυτό σημαίνει ότι οι υψηλότερες ενέργειες ενισχύονται σχετικά περισσότερο σε σχέση με πριν, κάτι που είναι συμβατό με ενεργοποίηση μηχανισμών επιτάχυνσης και τροφοδοσίας του συστήματος.

Στη φάση ανάκαμψης, ενώ η συνολική ένταση της ροής πέφτει, το φάσμα συνεχίζει να γίνεται πιο σκληρό. Με άλλα λόγια, οι χαμηλότερες ενέργειες εξασθενούν δυσανάλογα πιο γρήγορα, ενώ οι υψηλότερες ενέργειες επιμένουν περισσότερο. Αυτό είναι συνεπές με το ότι οι μηχανισμοί απώλειας και αναδιάταξης δεν δρουν το ίδιο αποτελεσματικά σε όλα τα ενεργειακά εύρη.

Μετά το τέλος της καταιγίδας η ροή μειώνεται ακόμη περισσότερο και η ζώνη δείχνει να επιστρέφει προς πιο ήρεμες συνθήκες, όμως το φάσμα παραμένει πιο σκληρό από την αρχική προ-καταιγιδική κατάσταση. Αυτό υποδηλώνει ότι ο πληθυσμός των υψηλότερων ενεργειών δεν έχει αποκατασταθεί πλήρως στο αρχικό του επίπεδο και ότι η καταιγίδα αφήνει “ίχνος” στη φασματική μορφή για κάποιο διάστημα.

Συνολικά, η εξέλιξη των καμπυλών δείχνει μια μετάβαση από ένα πιο απότομο, προ-καταιγιδικό φάσμα, σε ένα πιο σκληρό φάσμα κατά την κορύφωση και την ανάκαμψη, και τέλος σε μια μερική επιστροφή προς πιο ήρεμη κατάσταση, χωρίς πλήρη επαναφορά στην αρχική φασματική δομή.

(ε) Σχολιάστε τις διαφορές των γραφικών παραστάσεων που προέκυψαν από το fitting στις 4 φάσεις της καταιγίδας (σχήματα από τα ερωτήματα δ1-δ4. Αναλύστε ποιητικά τις διαφορές που παρατηρείτε.

Στα σχήματα των ενεργειακών φασμάτων και των προσαρμογών power-law αποτυπώνεται με σαφήνεια η «ζώνη» της εξώτερης ζώνης Van Allen καθώς η καταιγίδα γεννιέται, κορυφώνεται και σταδιακά σβήνει. Κάθε φάση έχει τη δική της φασματική υπογραφή, σαν διαφορετικό μουσικό θέμα στην εξέλιξη του ίδιου έργου.

Στην **προ-καταιγιδική φάση**, το φάσμα είναι ομαλό και προβλέψιμο. Οι γραμμές του fitting κατεβαίνουν ήρεμα με την ενέργεια, με μεγάλους εκθέτες  $\gamma$ , υποδηλώνοντας ότι η ροή μειώνεται γρήγορα προς το MeV εύρος. Η ζώνη βρίσκεται σε σχετική ισορροπία: τα χαμηλοενεργειακά ηλεκτρόνια κυριαρχούν και οι υψηλές ενέργειες σχηματίζουν μια αδύναμη, απόμακρη ουρά. Το φάσμα μοιάζει «μαλακό», χωρίς ενδείξεις έντονης επιτάχυνσης.

Κατά την **κύρια φάση της καταιγίδας**, το φάσμα αλλάζει χαρακτήρα. Οι καμπύλες ανυψώνονται σχεδόν σε όλο το ενεργειακό εύρος και οι κλίσεις των power-law μειώνονται. Το φάσμα σκληραίνει: οι γραμμές του fitting γίνονται πιο επίπεδες, ιδιαίτερα στα χαμηλά και μεσαία ενεργειακά κανάλια. Η ζώνη μοιάζει να «γεμίζει» ενέργεια, καθώς injections και μηχανισμοί επιτάχυνσης τροφοδοτούν όχι μόνο τα keV ηλεκτρόνια αλλά και την υψηλής ενέργειας ουρά. Το MeV τμήμα, αν και παραμένει πιο απότομο, αρχίζει να αποκτά μεγαλύτερη σημασία.

Στη **φάση ανάκαμψης**, τα σχήματα αποκαλύπτουν μια πιο λεπτή και σύνθετη εικόνα. Η συνολική ένταση μειώνεται, όμως οι κλίσεις των γραμμών γίνονται ακόμη μικρότερες στα χαμηλά ενεργειακά κανάλια. Το φάσμα εμφανίζεται έντονα σκληρό: τα χαμηλοενεργειακά ηλεκτρόνια εξασθενούν ταχύτερα, ενώ τα υψηλής ενέργειας διατηρούνται σχετικά ισχυρά. Οπτικά, οι καμπύλες μοιάζουν να «στρέφονται» γύρω από το MeV εύρος, δείχνοντας ότι η ζώνη δεν επιστρέφει απλώς στην αρχική της κατάσταση, αλλά περνά μέσα από μια φάση αναδιάρθρωσης.

Τέλος, στη **μετα-καταιγιδική περίοδο**, το φάσμα αρχίζει να ηρεμεί. Οι καμπύλες χαμηλώνουν και οι κλίσεις αυξάνονται ελαφρώς σε σχέση με την ανάκαμψη, υποδηλώνοντας μια μερική μαλάκωση. Παρ' όλα αυτά, οι γραφικές παραστάσεις δεν ταυτίζονται με την προ-καταιγιδική μορφή: το υψηλής ενέργειας τμήμα παραμένει πιο ενισχυμένο απ' ό,τι πριν την καταιγίδα. Η ζώνη έχει «θυμάται» το γεγονός, διατηρώντας έναν ενισχυμένο MeV πληθυσμό ως αποτύπωμα της προηγούμενης έντονης δυναμικής.

Συνολικά, οι γραφικές παραστάσεις του fitting αφηγούνται μια συνεχή μετάβαση: από ένα μαλακό και ήρεμο φάσμα, σε ένα σκληρό και ενεργειακά πλούσιο κατά την κορύφωση, έπειτα σε μια φάση όπου τα υψηλής ενέργειας ηλεκτρόνια κυριαρχούν δυσανάλογα, και τέλος σε μια αργή επιστροφή προς την ισορροπία. Οι διαφορές στα σχήματα δεν είναι απλώς αριθμητικές· αποτελούν το οπτικό αποτύπωμα της ενεργειακής αναδόμησης της εξώτερης ζώνης Van Allen κατά τη διάρκεια μιας γεωμαγνητικής καταιγίδας.