

ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΟΣ ΚΑΙΡΟΣ
ΕΡΓΑΣΙΑ 2
ΓΡΟΣΔΟΥΛΗ ΠΑΝΑΓΙΩΤΑ 58523

Άσκηση 2

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

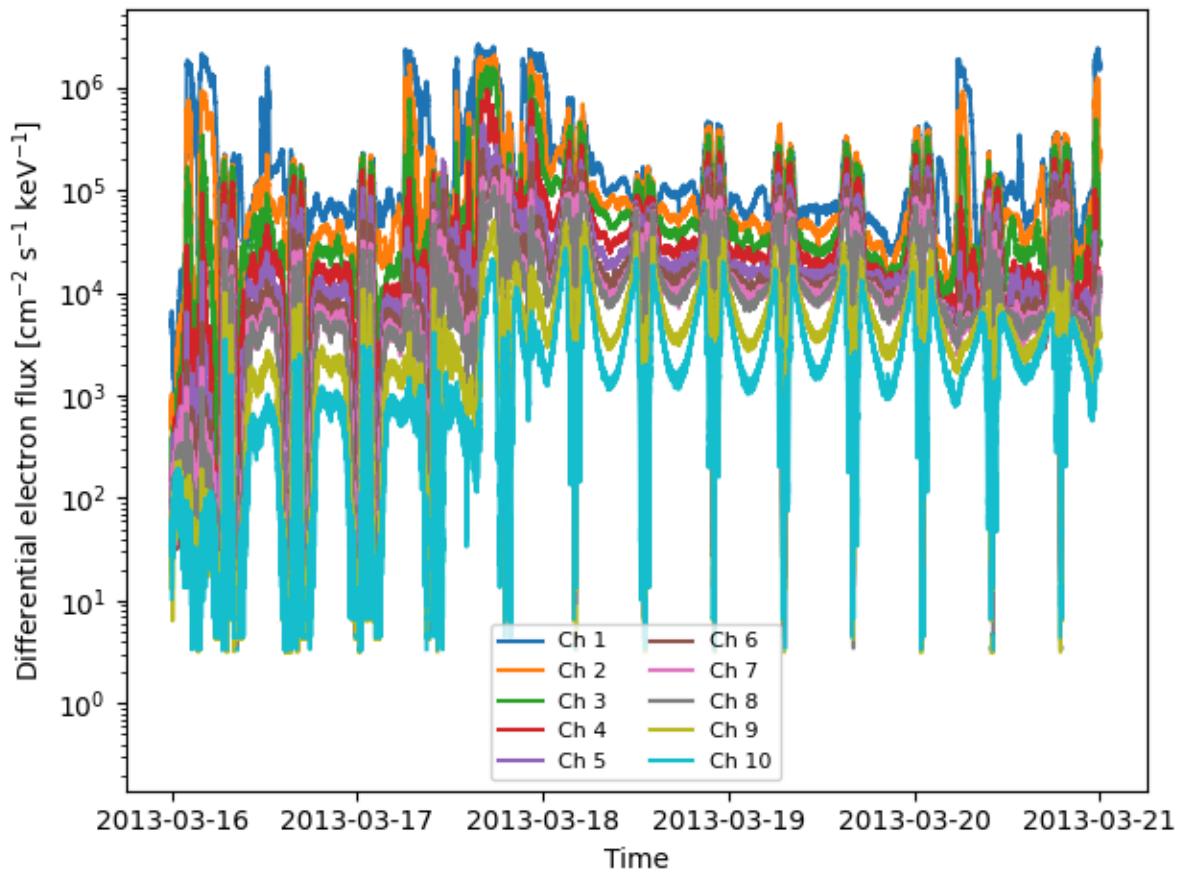
(α1) Κατασκευάστε τη γραφική παράσταση του χρονικού προφίλ της ροής για όλη τη χρονική διάρκεια του αρχείου.

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 αζιμουθιακή 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 (Emin, Emax) κάθε καναλιού, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του ενεργειακού εύρους ΔΕ.

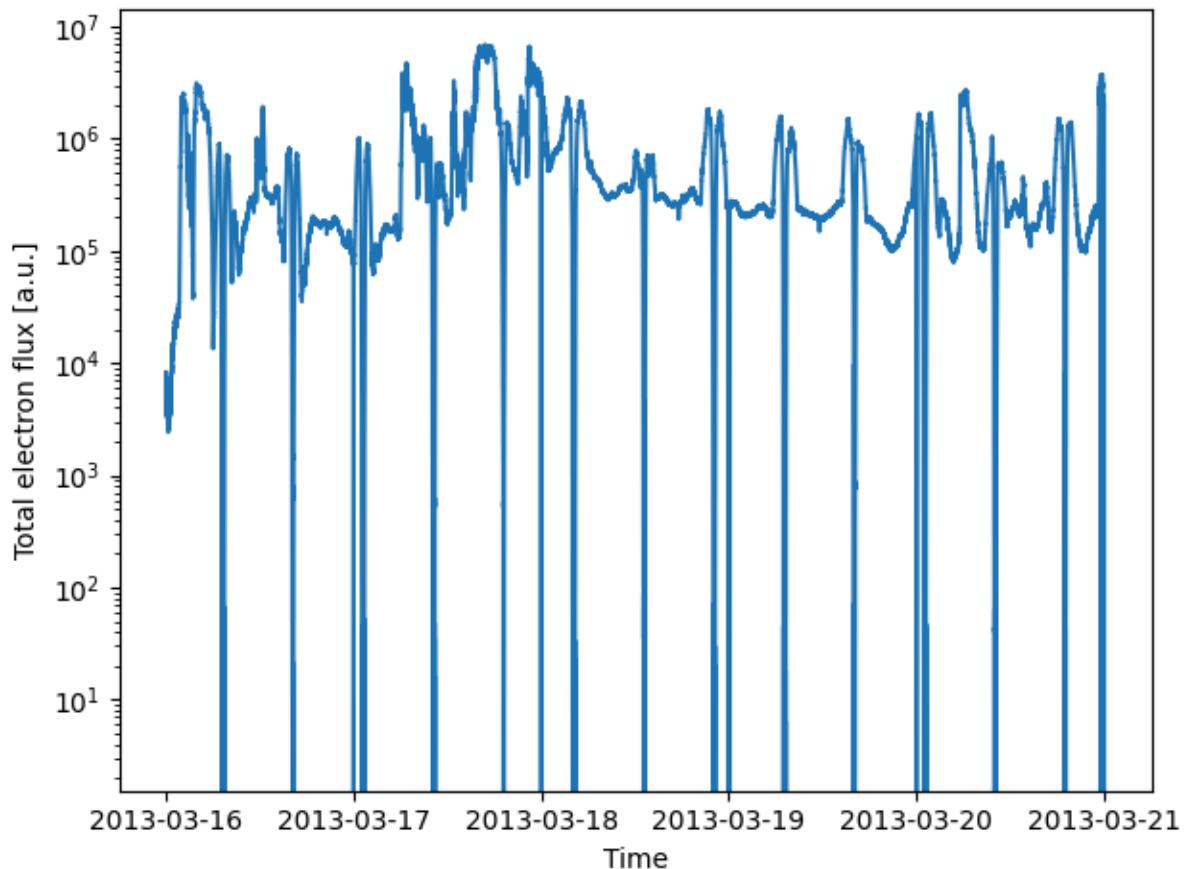
Οι χρονικές σφραγίδες μετατράπηκαν από μορφή MATLAB datenum σε αντικείμενα Python datetime, ώστε να καταστεί δυνατή η γραφική απεικόνιση. Η διαφορική ενεργειακή ροή ηλεκτρονίων υπολογίστηκε ως:

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

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



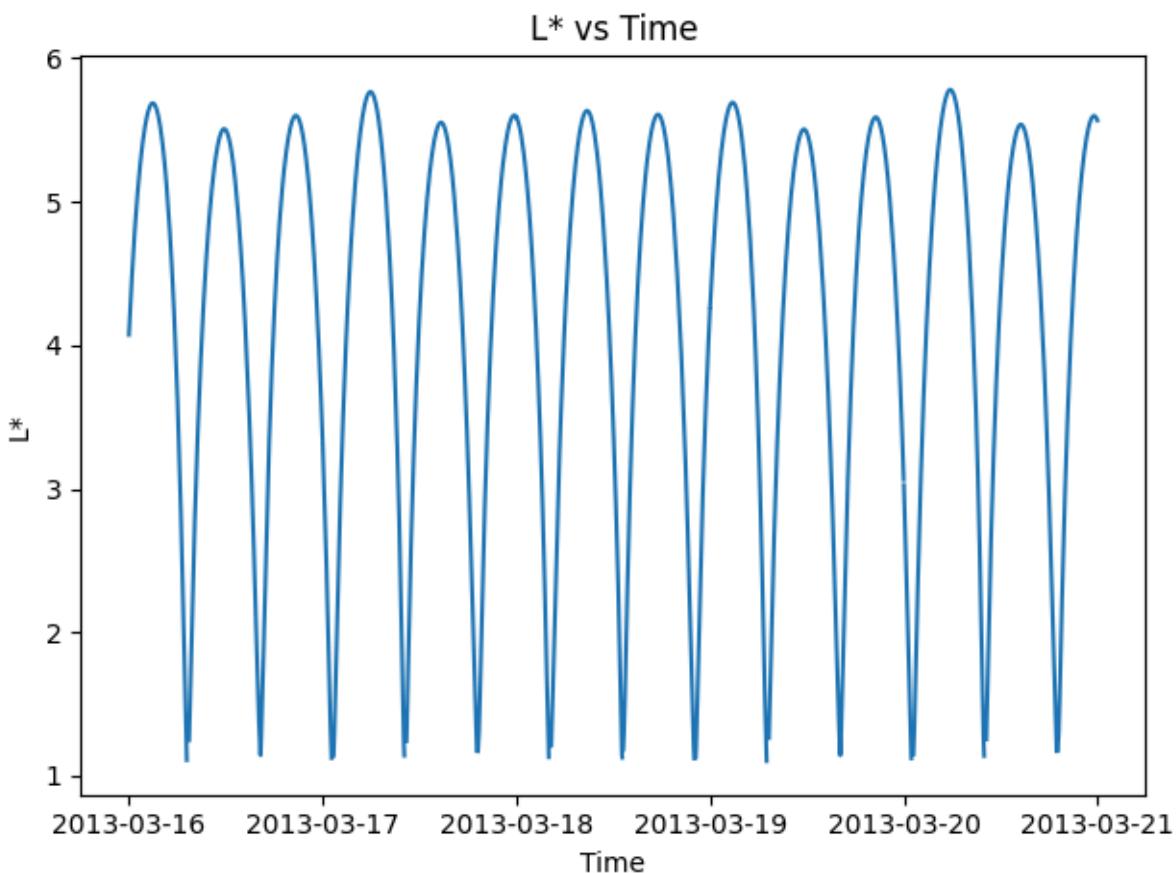
Στην πρώτη γραφική παράσταση παρουσιάζεται το χρονικό προφίλ της ροής για όλα τα ενεργειακά κανάλια. Οι καμπύλες δείχνουν έντονη μεταβλητότητα σε χρονικές κλίμακες ωρών, η οποία σχετίζεται με τη διάβαση του δορυφόρου μέσα από τις περιοχές ενισχυμένης ακτινοβολίας. Τα απότομα «βουτιά» (sharp dropouts) που εμφανίζονται ταυτόχρονα σε όλα τα κανάλια αντιστοιχούν σε περιοχές όπου ο δορυφόρος κινείται εκτός της εξώτερης ζώνης ή σε γεωμετρικές θέσεις όπου οι καταμετρήσεις είναι φυσιολογικά χαμηλές.



Στη δεύτερη γραφική παράσταση απεικονίζεται η συνολική ροή, προκύπτουσα ως άθροισμα των ροών όλων των ενεργειακών καναλιών. Η συνολική συμπεριφορά επιβεβαιώνει τις έντονες διακυμάνσεις και παρουσιάζει επαναλαμβανόμενο μοτίβο, το οποίο συνδέεται με την περιοδική τροχιά του δορυφόρου γύρω από τη Γη. Οι κορυφώσεις αντιπροσωπεύουν τη διέλευση του RBSP-A μέσα από περιοχές ισχυρής παγιδευμένης ακτινοβολίας, ενώ τα τοπικά ελάχιστα υποδηλώνουν έξοδο από τη ζώνη Van Allen.

Συνολικά, οι παρατηρούμενες μεταβολές συμφωνούν με την αναμενόμενη δυναμική της εξώτερης ζώνης ακτινοβολίας, η οποία είναι ευαίσθητη στις περιστροφικές συνθήκες της μαγνητόσφαιρας και στις διαταραχές του ηλιακού ανέμου.

(α2) Κατασκευάστε τη γραφική παράσταση του Lstar για όλη τη χρονική διάρκεια του αρχείου.



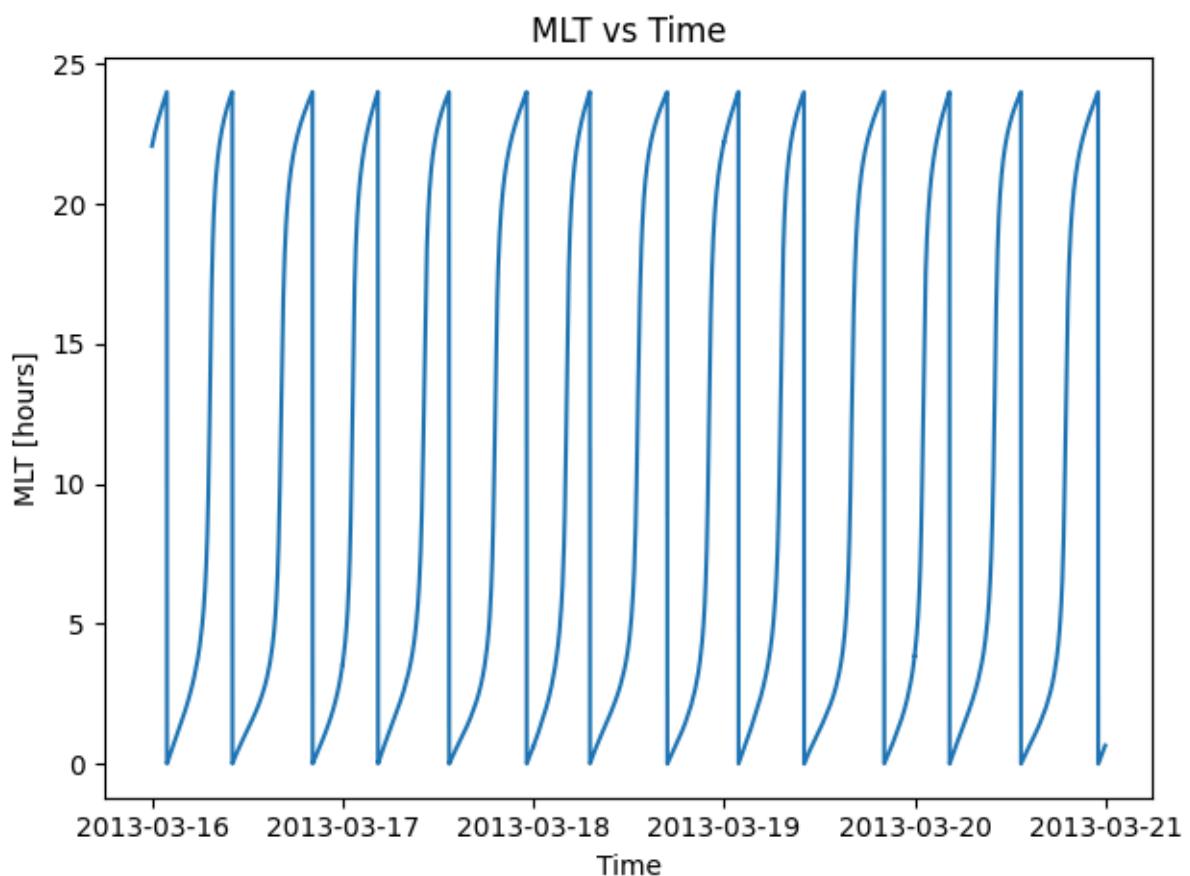
Για τη μελέτη της χωρικής θέσης του δορυφόρου ως προς το μαγνητικό πεδίο της Γης απεικονίστηκε η χρονική εξέλιξη του μαγνητοκέλυφου L^* για όλη τη διάρκεια των διαθέσιμων δεδομένων. Η παράμετρος L^* αποτελεί μαγνητική αδιάσταση που χαρακτηρίζει τη θέση μιας μαγνητικής γραμμής πεδίου στο γεωμαγνητικό δυναμικό και συνδέεται άμεσα με την ακτινική απόσταση των παγιδευμένων φορτισμένων σωματιδίων.

Η γραφική παράσταση παρουσιάζει μια έντονα περιοδική μεταβολή του L^* μεταξύ τιμών περίπου **1.2** και **5.8**, αντανακλώντας την καθ' ύψος κίνηση του δορυφόρου RBSP-A κατά μήκος της ελλειπτικής τροχιάς του γύρω από τη Γη. Κάθε κύκλος στο διάγραμμα αντιστοιχεί σε μία πλήρη τροχιακή περίοδο. Όταν το L^* λαμβάνει χαμηλές τιμές, ο δορυφόρος βρίσκεται πιο κοντά στη Γη, εντός ή κοντά στην εσωτερική ζώνη ακτινοβολίας. Αντίθετα, οι μέγιστες τιμές του L^*

αντιστοιχούν σε σημεία της τροχιάς όπου εισέρχεται στην εξώτερη ζώνη Van Allen, σε μεγαλύτερες ακτινικές αποστάσεις.

Το περιοδικό μοτίβο επιβεβαιώνει τη σταθερή και επαναλαμβανόμενη γεωμετρία της τροχιάς του RBSP-A στο εξεταζόμενο χρονικό διάστημα. Η επικάλυψη των κύκλων και η ομαλή μεταβολή του L^* δείχνουν ότι ο δορυφόρος κινείται με τρόπο κατάλληλο για τη συστηματική δειγματοληψία της ακτινοβολιακής ζώνης, προσφέροντας συνεχή κάλυψη σε εύρος μαγνητοκελύφων μεταξύ περίπου 1 και 6.

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



Η χρονική εξέλιξη της παραμέτρου **MLT (Magnetic Local Time)** παρουσιάζει μια χαρακτηριστική περιοδική συμπεριφορά που

αντανακλά την τροχιακή κίνηση του RBSP-A γύρω από τη Γη. Η MLT εκφράζει τη μαγνητική τοπική ώρα ενός σημείου στη μαγνητόσφαιρα και κυμαίνεται από 0 έως 24 ώρες, με τιμές που αντιστοιχούν στις μαγνητοσφαιρικές περιοχές “midnight–noon–midnight”.

Στο διάγραμμα παρατηρείται ότι η MLT αυξάνεται σχεδόν μονοτονικά από 0 έως 24 ώρες, ακολουθούμενη από στιγμιαία επαναφορά στο 0. Κάθε τέτοια αύξηση αντιπροσωπεύει μία πλήρη περιστροφή του συστήματος αναφοράς γύρω από τη Γη, καθώς ο δορυφόρος διασχίζει διαδοχικά όλες τις μαγνητοσφαιρικές περιοχές. Οι επαναλαμβανόμενοι κύκλοι κατά τη διάρκεια των πέντε ημερών του αρχείου είναι συνέπεια της σταθερής, σχεδόν επαναλαμβανόμενης τροχιάς του RBSP-A.

Η συνεχής κάλυψη όλου του εύρους 0–24 h υποδεικνύει ότι ο δορυφόρος πραγματοποιεί μετρήσεις σε όλες τις μαγνητικές τοπικές ώρες, επιτρέποντας τη συσχέτιση της ηλεκτρονικής ροής με συνθήκες ημέρας, νύχτας, αυγής και σούρουπου στο μαγνητικό ισημερινό επίπεδο. Η περιοδικότητα που παρατηρείται στο διάγραμμα είναι πλήρως αναμενόμενη και επιβεβαιώνει την ομαλή και σταθερή τροχιακή γεωμετρία του δορυφόρου στο εξεταζόμενο χρονικό διάστημα.

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

Η σύγκριση των χρονοσειρών που παρουσιάστηκαν στα βήματα (α1)–(α3) επιτρέπει τη διάκριση των μεταβολών που προκύπτουν από την τροχιακή κίνηση του RBSP-A και εκείνων που αντικατοπτρίζουν ενδογενείς φυσικές διεργασίες της μαγνητόσφαιρας.

1. Μεταβολές που οφείλονται στη θέση και στην τροχιά του δορυφόρου

Οι παράμετροι L^* και MLT εμφανίζουν ισχυρή περιοδικότητα, η οποία σχετίζεται αποκλειστικά με την τροχιακή γεωμετρία του δορυφόρου:

- Το L^* μεταβάλλεται ομαλά από ~1 έως ~6 σε κάθε τροχιά, καθώς ο RBSP-A διέρχεται διαδοχικά από εσωτερικά προς εξωτερικά L-shells και πίσω. Η κυματομορφή επαναλαμβάνεται σχεδόν πανομοιότυπα, δείχγοντας ότι η μεταβολή αυτή δεν συνδέεται με φυσικές διεργασίες αλλά με τη θέση δειγματοληψίας.
- Το MLT αυξάνεται γραμμικά από 0–24 ώρες και επανέρχεται στο 0, κάτι που αντανακλά την περιφορά του δορυφόρου γύρω από τη Γη και τη συνεχή μεταβολή της μαγνητικής τοπικής ώρας.

Αυτές οι περιοδικές μεταβολές στα L^* και MLT εξηγούν επίσης το επαναλαμβανόμενο μοτίβο που εμφανίζεται στη ροή ηλεκτρονίων: όταν ο δορυφόρος βρίσκεται σε μεγαλύτερα L-shells, η μετρούμενη ροή αυξάνεται (εξωτερική ζώνη), ενώ σε χαμηλότερα L μειώνεται. Αυτό αποτελεί χωρική, και όχι χρονική, μεταβολή του πληθυσμού των trapped ηλεκτρονίων.

2. Μεταβολές που οφείλονται σε φυσικούς μηχανισμούς της μαγνητόσφαιρας
- Πέρα από την περιοδική συμπεριφορά, η χρονοσειρά της ροής ηλεκτρονίων στο (a1) παρουσιάζει χαρακτηριστικά που δεν επαναλαμβάνονται από τροχιά σε τροχιά, όπως:
- Απότομες ενισχύσεις της ροής (peaks) που συμβαίνουν σε διαφορετικό χρόνο και όχι στο ίδιο σημείο της τροχιάς.
 - Σταδιακές αυξομειώσεις που δεν συγχετίζονται με συγκεκριμένες τιμές L^* ή MLT.

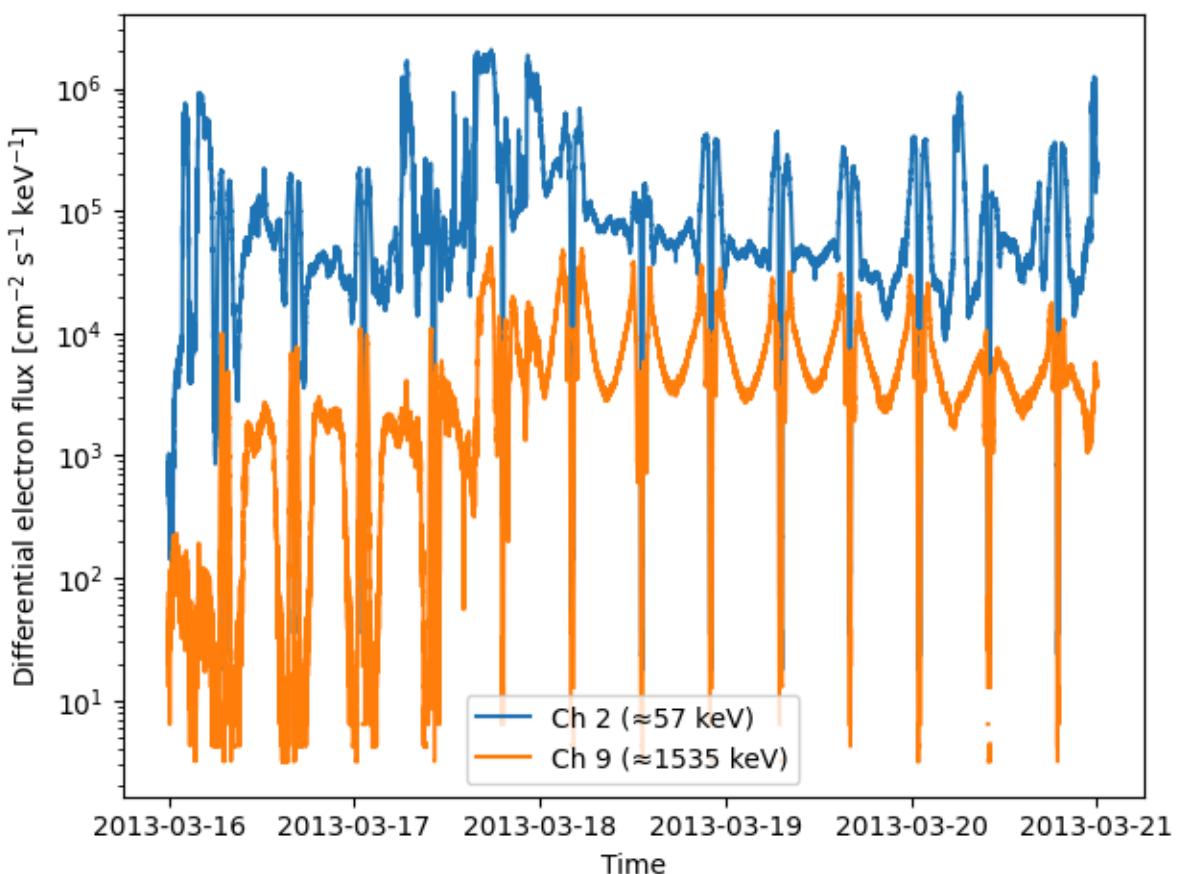
Αυτές οι μη περιοδικές μεταβολές δεν προέρχονται από την κίνηση του δορυφόρου, αλλά αποτελούν υπο signatures μαγνητοσφαιρικών διεργασιών, όπως:

- Substorm injections στην περιοχή $MLT \approx 0\text{--}6$ h.
- Radial diffusion, που μπορεί να ενισχύσει σταδιακά τη ροή σε συγκεκριμένα L-shells.
- Επιταχύνσεις λόγω κυμάτων (π.χ. chorus waves) στην εξώτερη ζώνη Van Allen.
- Μηχανισμοί απώλειας, όπως pitch-angle scattering ή magnetopause shadowing.

Αυτά τα φαινόμενα αντικατοπτρίζουν τη δυναμική της μαγνητόσφαιρας και αποτελούν γνήσιες χρονικές μεταβολές του ηλεκτρονικού πληθυσμού.

Συμπερασματικά οι μεταβολές στα L* και MLT είναι απολύτως τροχιακές: περιγράφουν μόνο τη θέση του δορυφόρου. Αντίθετα, η ροή ηλεκτρονίων επηρεάζεται τόσο από την τροχιά (δηλαδή από το ποια περιοχή της ζώνης Van Allen δειγματοληπτείται) όσο και από ενδογενείς φυσικούς μηχανισμούς, που προκαλούν πραγματικές αλλαγές στον trapped πληθυσμό. Έτσι, μόνο η ροή παρουσιάζει ταυτόχρονα χωρική και χρονική μεταβλητότητα, ενώ οι δύο άλλες παράμετροι λειτουργούν ως καθαροί δείκτες θέσης.

(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 (≈ 57 keV) και 9 (≈ 1535 keV). Τα δύο κανάλια

αντιπροσωπεύουν χαμηλής και υψηλής ενέργειας ηλεκτρόνια αντίστοιχα, επιτρέποντας τη σύγκριση της δυναμικής των δύο πληθυσμών στην εξώτερη ζώνη Van Allen.

Και οι δύο χρονοσειρές εμφανίζουν έντονη τροχιακή περιοδικότητα, με χαρακτηριστικές αυξομειώσεις που επαναλαμβάνονται ανά ~τροχιά του RBSP-A. Οι κορυφές αντιστοιχούν σε περιοχές αυξημένου L^* , όπου ο διορυφόρος εισέρχεται στην εξωτερική ζώνη ακτινοβολίας, ενώ τα τοπικά ελάχιστα καταγράφονται κατά τη διέλευσή του από περιοχές μικρότερου L -shell, όπου ο trapped πληθυσμός ηλεκτρονίων είναι σημαντικά μειωμένος.

Η σύγκριση των δύο καναλιών δείχνει ότι:

- Το κανάλι 2 καταγράφει πολύ υψηλότερες τιμές ροής, φτάνοντας έως και $10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ keV}^{-1}$. Αυτό αντικατοπτρίζει τον μεγάλο πληθυσμό χαμηλοενεργειακών ηλεκτρονίων, που είναι ιδιαίτερα άφθονος στην εξωτερική ζώνη.
- Το κανάλι 9, που αντιστοιχεί σε ηλεκτρόνια $\approx 1.5 \text{ MeV}$, παρουσιάζει ροή μικρότερη κατά αρκετές τάξεις μεγέθους. Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς τα πολύ ενέργεια ηλεκτρόνια είναι πολύ αραιότερα και υπόκεινται σε εντονότερους μηχανισμούς απώλειας.
- Η μορφή της καμπύλης του καναλιού 9 εμφανίζει μεγαλύτερη διακύμανση σε σύγκριση με το κανάλι 2, γεγονός που υποδηλώνει ότι τα MeV ηλεκτρόνια επηρεάζονται πιο έντονα από διεργασίες όπως η επιτάχυνση μέσω chorus waves, το magnetopause shadowing και οι μηχανισμοί απώλειας στο loss cone.

Τέλος, η σύγκριση χαμηλής και υψηλής ενέργειας αποκαλύπτει ότι οι δύο πληθυσμοί ανταποκρίνονται διαφορετικά στις συνθήκες της μαγνητόσφαιρας: τα χαμηλοενεργειακά ηλεκτρόνια εμφανίζουν πιο ομαλή και σταθερή περιοδικότητα, ενώ τα MeV ηλεκτρόνια παρουσιάζουν μεγαλύτερη χρονική και χωρική μεταβλητότητα, αντικατοπτρίζοντας την ισχυρή δυναμική της εξωτερικής ζώνης ακτινοβολίας.

(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 ροής για τα ενεργειακά κανάλια 2 (\approx 57 keV) και 9 (\approx 1.5 MeV) αποκαλύπτει σημαντικές διαφορές τόσο ως προς το επίπεδο όσο και ως προς τη δυναμική της καταγεγραμμένης ροής.

Πρώτον, η ροή στο κανάλι 2 είναι συστηματικά υψηλότερη κατά 1–3 τάξεις μεγέθους σε σχέση με το κανάλι 9. Αυτό αντανακλά την ίδια τη μορφή της ενεργειακής κατανομής των trapped ηλεκτρονίων, η οποία εμφανίζει πολύ μεγαλύτερο πληθυσμό σε ενέργειες δεκάδων keV σε σύγκριση με την πολύ αραιή, υψηλής ενέργειας tail των MeV ηλεκτρονίων.

Δεύτερον, το προφίλ του καναλιού 2 παρουσιάζει πολύ μεγαλύτερη βραχυχρόνια μεταβλητότητα, με απότομα peaks και βαθιές πτώσεις της ροής. Αυτή η συμπεριφορά είναι αναμενόμενη, καθώς τα ηλεκτρόνια δεκάδων keV:

- εμπλουτίζονται άμεσα από substorm injections της ουράς,
- είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα σε τοπικές κυματικές αλληλεπιδράσεις (όπως chorus waves),
- υπόκεινται σε γρήγορους μηχανισμούς απώλειας (π.χ. pitch-angle scattering).

Αυτές οι διεργασίες λειτουργούν σε χρονικές κλίμακες λεπτών έως ωρών, οδηγώντας σε έντονη αστάθεια στο χρονικό προφίλ.

Αντίθετα, το προφίλ ροής του καναλιού 9 χαρακτηρίζεται από πολύ μικρότερη και πιο ομαλή μεταβολή. Τα ηλεκτρόνια του MeV ενεργειακού εύρους:

- παράγονται κυρίως μέσω μακροχρόνιας επιτάχυνσης (π.χ. radial diffusion + chorus acceleration),
- απομακρύνονται ή χάνουν ενέργεια σε επίσης αργούς μηχανισμούς απώλειας,
- δεν παρουσιάζουν αιχμηρές χρονικές μεταβολές, εκτός αν σημειωθούν έντονα γεωμαγνητικά γεγονότα.

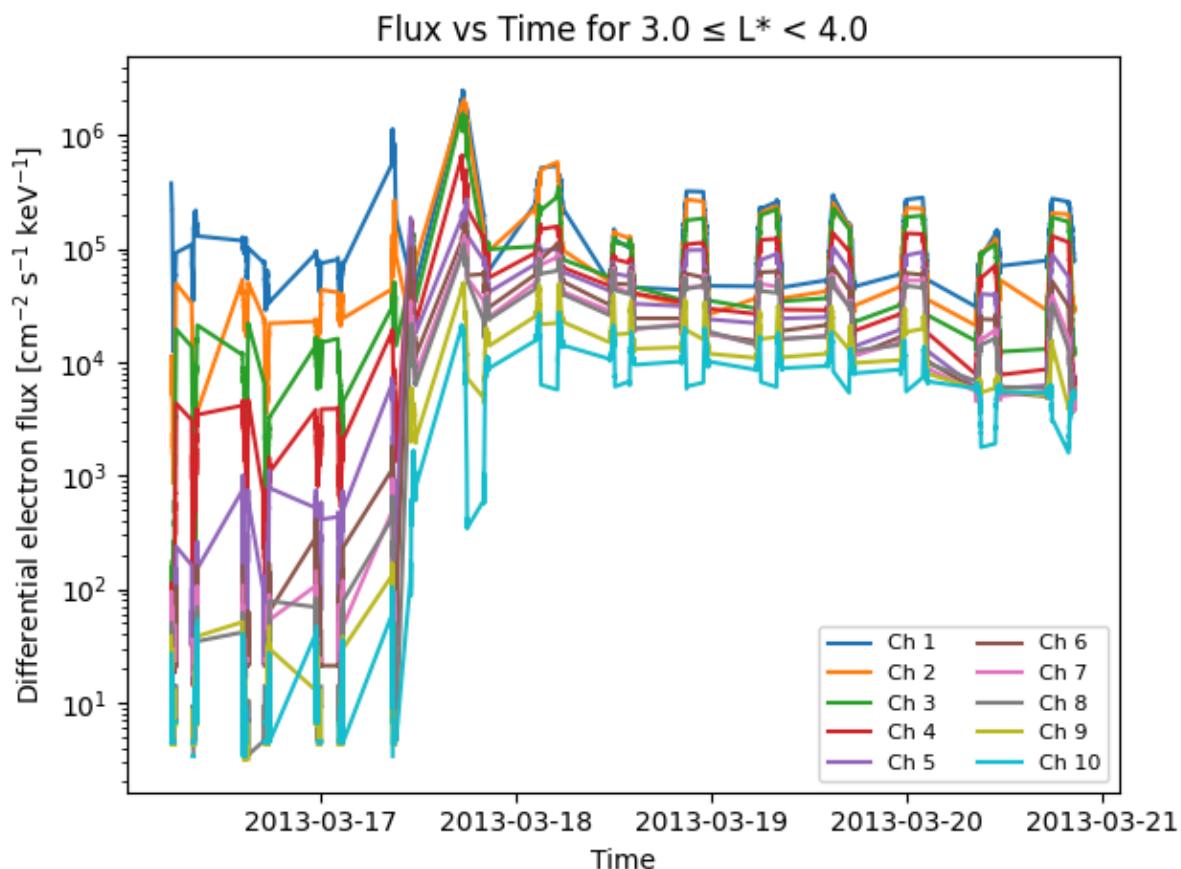
Η διαφορά στη δυναμική των δύο καναλιών επομένως σχετίζεται άμεσα με το γεγονός ότι οι μηχανισμοί επιτάχυνσης και απώλειας στη μαγνητόσφαιρα είναι έντονα ενεργειακά εξαρτώμενοι. Τα ηλεκτρόνια χαμηλής ενέργειας ανταποκρίνονται γρήγορα σε τοπικές μεταβολές της μαγνητόσφαιρας, ενώ τα

MeV ηλεκτρόνια αντανακλούν την πιο βαθμιαία εξέλιξη της εξωτερικής ζώνης ακτινοβολίας.

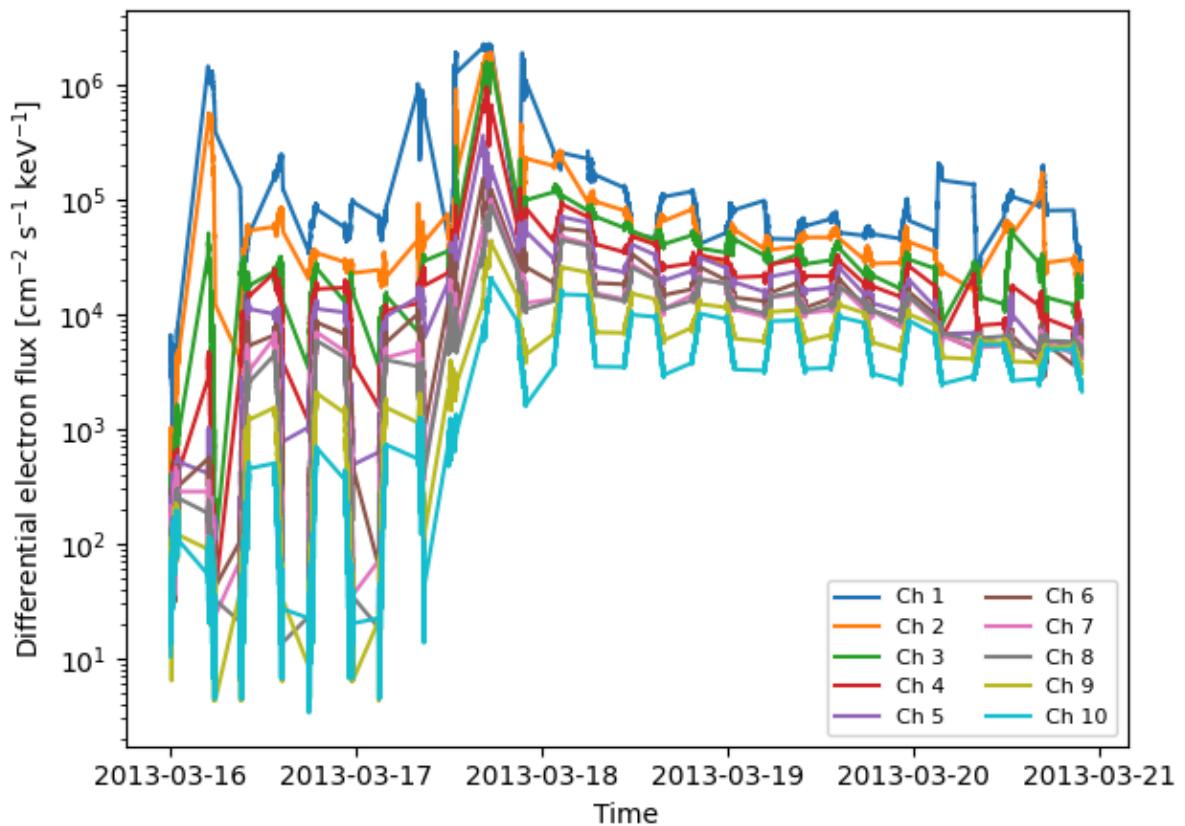
Συνοπτικά, οι διαφορές στα δύο προφίλ ροής οφείλονται στο ότι:

- ο trapped πληθυσμός είναι εγγενώς πολύ πυκνός σε χαμηλές ενέργειες,
- οι κυρίαρχοι μηχανισμοί παραγωγής και απώλειας έχουν διαφορετικούς χρονικούς ρυθμούς για χαμηλές και για πολύ υψηλές ενέργειες,
- η μαγνητόσφαιρα επιδρά πολύ εντονότερα και ταχύτερα στα keV ηλεκτρόνια απ' ότι στα MeV ηλεκτρόνια.

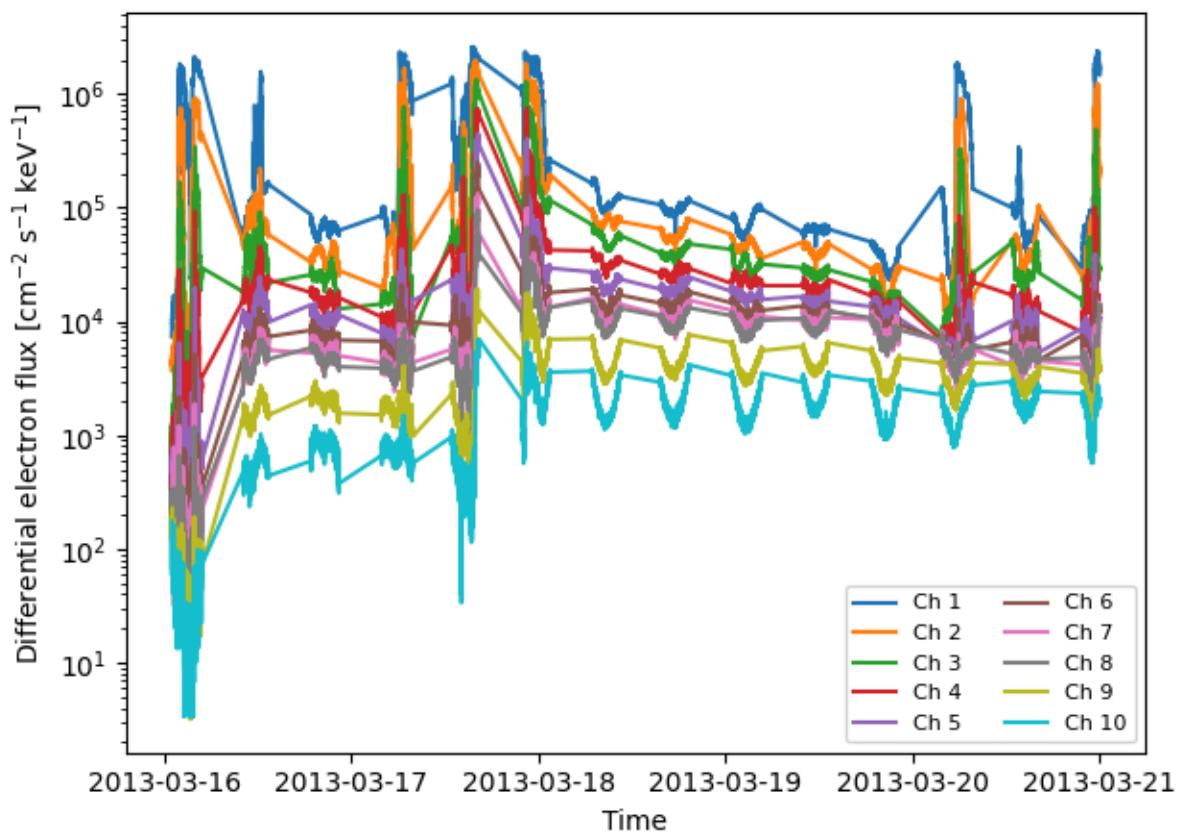
(γ1) Κατασκευάστε τη γραφική παράσταση του χρονικού προφίλ της ροής, ανά ενεργειακό κανάλι, και ανά δεδομένο εύρος/τιμή μαγνητοκελύφους ($L_{\text{star}}=3-4, 4-5, 5-6$).



Flux vs Time for $4.0 \leq L^* < 5.0$



Flux vs Time for $5.0 \leq L^* < 6.0$



Η ανάλυση των χρονικών προφίλ της ροής για τα εύρη $3 \leq L^* < 4$, $4 \leq L^* < 5$ και $5 \leq L^* < 6$ αποκαλύπτει μια συστηματική χωρική εξάρτηση της δυναμικής των trapped ηλεκτρονίων. Τα διαφορετικά ενεργειακά κανάλια παρουσιάζουν διακριτή συμπεριφορά στα τρία L-shells, γεγονός που αντανακλά τη μεταβολή των κυρίαρχων μηχανισμών επιτάχυνσης, απώλειας και μεταφοράς κατά μήκος της ακτινικής διεύθυνσης της εξώτερης ζώνης Van Allen.

Περιοχή $3 \leq L^* < 4$

Στο εσωτερικό αυτό τμήμα της εξώτερης ζώνης, η ροή των χαμηλής ενέργειας ηλεκτρονίων (κανάλια 1–4) παρουσιάζει απότομη και έντονη χρονική μεταβλητότητα, με χαρακτηριστικές αιχμές και πτώσεις. Η συμπεριφορά αυτή είναι τυπική για περιοχές όπου η επίδραση των substorm injections είναι έντονη, καθώς τα ηλεκτρόνια δεκάδων keV μπορούν να μεταφερθούν γρήγορα από την ουρά της μαγνητόσφαιρας προς την εσωτερική ζώνη.

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 $4 \leq L^* < 5$

Σε αυτό το διάστημα εμφανίζεται ενίσχυση σχεδόν σε όλα τα ενεργειακά κανάλια. Η δραστηριότητα παραμένει υψηλή στα χαμηλής ενέργειας ηλεκτρόνια, αλλά πλέον παρατηρείται σαφής αύξηση και στα μεσαίας και υψηλής ενέργειας κανάλια.

Η συμπεριφορά αυτή είναι συνεπής με την αυξημένη αποτελεσματικότητα των chorus waves, οι οποίες εμφανίζουν μέγιστη ισχύ σε αυτή την περιοχή και επιταχύνουν ηλεκτρόνια από δεκάδες σε εκατοντάδες keV. Αποτελεί επίσης περιοχή όπου το radial diffusion αρχίζει να δρα πιο έντονα.

Περιοχή $5 \leq L^* < 6$

Το L-shell αυτό αντιστοιχεί στον χώρο όπου κυριαρχούν οι πιο ισχυροί και αποτελεσματικοί μηχανισμοί επιτάχυνσης, οδηγώντας συχνά στη δημιουργία των λεγόμενων “killer electrons” (MeV).

Εδώ παρατηρείται:

σημαντική ενίσχυση στα υψηλότερα ενεργειακά κανάλια (κανάλια 7–10), πιο σαφής δομή και δυναμικότητα στο προφίλ των MeV ηλεκτρονίων, και μια ροή που εξελίσσεται σε μεγαλύτερες χρονικές κλίμακες,

αντικατοπτρίζοντας τη βαθμιαία επιτάχυνση και τη συσσώρευση ηλεκτρονίων.

Τα χαμηλής ενέργειας κανάλια εξακολουθούν να μεταβάλλονται έντονα, αλλά η σχετική κυριαρχία στα μεγάλα L περνά πλέον στα υψηλής ενέργειας ηλεκτρόνια.

Συμπερασματικά, οι γραφικές παραστάσεις δείχνουν ότι η δομή της ηλεκτρονικής ροής εξαρτάται ισχυρά από τη χωρική θέση μέσα στην εξώτερη ζώνη ακτινοβολίας:

Σε χαμηλά L*, κυριαρχούν injections και γρήγορες μεταβολές στα keV ηλεκτρόνια.

Σε μεσαία L*, αρχίζουν να ενεργοποιούνται αποτελεσματικοί μηχανισμοί επιτάχυνσης που εμπλουτίζουν το φάσμα στα εκατοντάδες keV.

Σε υψηλά L*, η επιτάχυνση MeV ηλεκτρονίων γίνεται περισσότερο αποτελεσματική, οδηγώντας σε ισχυρή ενίσχυση στα υψηλής ενέργειας κανάλια.

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

Η σύγκριση του (β) έδειξε δύο βασικά χαρακτηριστικά στη ροή ηλεκτρονίων:

(1) τα χαμηλής ενέργειας ηλεκτρόνια παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερη ροή και έντονη βραχυχρόνια μεταβλητότητα, ενώ

(2) τα υψηλής ενέργειας ηλεκτρόνια μεταβάλλονται πιο ομαλά και παραμένουν σε πολύ χαμηλότερα επίπεδα.

Στο (γ1), όπου η ροή εξετάζεται ανά διακριτό εύρος L*, γίνεται πλέον σαφές πού μέσα στη μαγνητόσφαιρα εμφανίζονται αυτές οι διαφορές και ποιοι φυσικοί μηχανισμοί τις εξηγούν.

• **L* = 3–4**

Σε αυτή την περιοχή της εσωτερικής εξώτερης ζώνης, τα χαμηλής ενέργειας ηλεκτρόνια (όπως το κανάλι 2) εμφανίζουν τις μεγαλύτερες αιχμές και απότομες μεταβολές. Αυτό οφείλεται στο ότι τα substorm injections και οι τοπικές κυματικές αλληλεπιδράσεις επηρεάζουν κυρίως ηλεκτρόνια δεκάδων keV.

Αντίθετα, τα MeV ηλεκτρόνια (π.χ. κανάλι 9) παραμένουν ασθενή και μεταβάλλονται αργά, όπως είχε παρατηρηθεί και στο (β).

• **L* = 4–5**

Εδώ οι διαφορές μεταξύ των ενεργειακών καναλιών μειώνονται. Τα χαμηλής ενέργειας ηλεκτρόνια παραμένουν δυναμικά, αλλά αρχίζει να ενισχύεται και η ροή

των υψηλότερων ενεργειών, λόγω της αυξημένης αποτελεσματικότητας των chorus waves και της radial diffusion σε αυτή την περιοχή.

Συνεπώς, το εύρος αυτό αποτελεί τη «μεταβατική ζώνη» όπου οι μηχανισμοί επιτάχυνσης αρχίζουν να επηρεάζουν και τα πιο ενεργητικά ηλεκτρόνια.

• **L* = 5–6**

Στην εξωτερική περιφέρεια της εξώτερης ζώνης, τα υψηλής ενέργειας ηλεκτρόνια ενισχύονται σημαντικά και παρουσιάζουν μεγαλύτερη δυναμικότητα σε σχέση με μικρότερα L*. Αυτό εξηγεί γιατί, στο (β), το κανάλι 9 εμφανίζει γενικά πιο ομαλή αλλά σημαντική ενίσχυση σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα: η κύρια περιοχή παραγωγής MeV ηλεκτρονίων βρίσκεται στα μεγάλα L*.

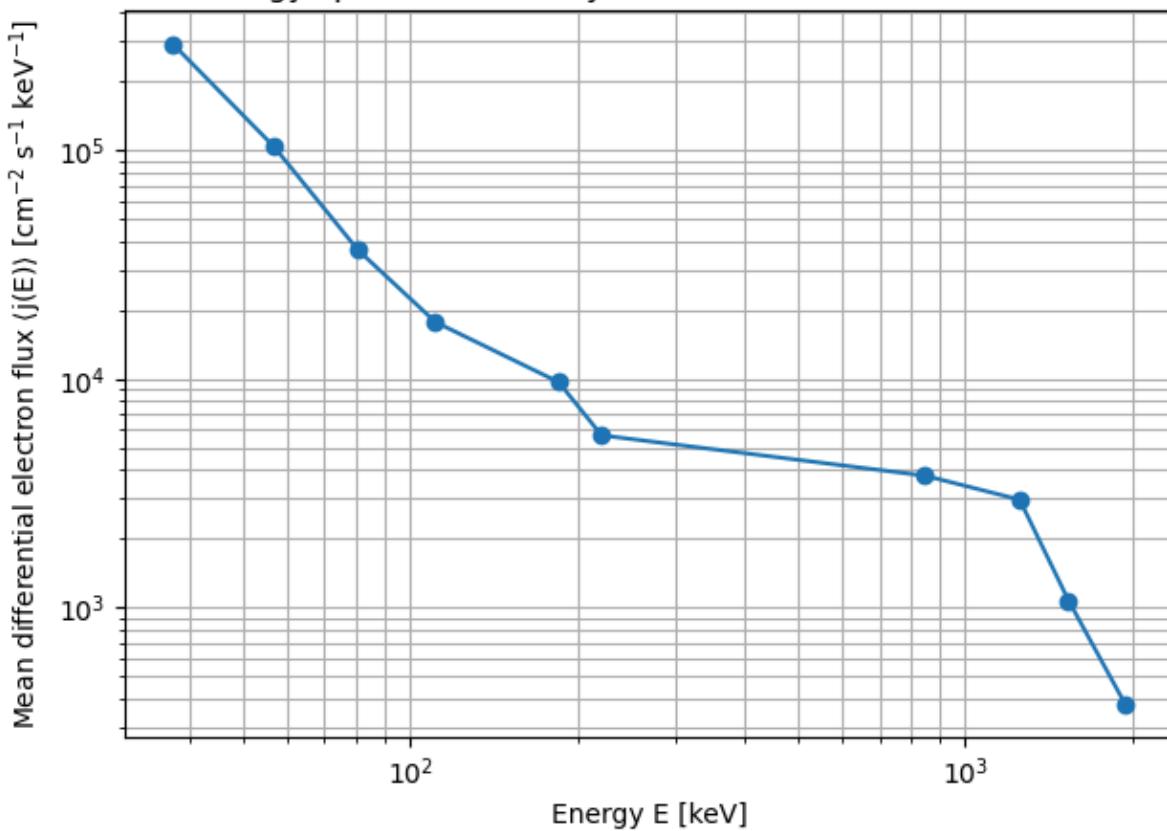
Συνολική σύνδεση με το (β)

Το (γ2) δείχνει ότι οι διαφορές στα ενεργειακά κανάλια που παρατηρήθηκαν στο (β): είναι μέγιστες στο $L^* = 3\text{--}4$,
μειώνονται στο $L^* = 4\text{--}5$,
και αντιστρέφονται μερικώς στο $L^* = 5\text{--}6$, όπου τα υψηλής ενέργειας ηλεκτρόνια ενισχύονται.

Έτσι, οι διαφορές χαμηλής–υψηλής ενέργειας που φάνηκαν στο (β) εξηγούνται χωρικά από τη μεταβολή της φυσικής δυναμικής σε διαφορετικά L-shells 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.

Energy spectrum one day before the storm (2013-03-16)



Για να μελετηθεί η κατάσταση της εξώτερης 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, δηλαδή μία ημέρα πριν το κύριο γεγονός. Για όλα τα χρονικά δείγματα της ημέρας αυτής υπολογίστηκε η διαφορική ροή ανά ενεργειακό κανάλι και στη συνέχεια προέκυψε το μέσο ενεργειακό φάσμα.

Το φάσμα που προκύπτει εμφανίζει μια καθαρά φθίνουσα τάση με την ενέργεια, η οποία εκτείνεται σε περίπου τρεις τάξεις μεγέθους. Οι ροές είναι υψηλότερες στα χαμηλής ενέργειας κανάλια ($\approx 30\text{--}100 \text{ keV}$) και μειώνονται σταδιακά προς τα κανάλια των εκατοντάδων keV και των MeV . Το γενικό σχήμα του φάσματος είναι κοντά σε power-law μορφή, χωρίς ενδείξεις ενισχυμένης παρουσίας ή ανωμαλιών στα υψηλής ενέργειας κανάλια.

Η μορφή αυτή είναι χαρακτηριστική ενός ήρεμου ή προ-καταιγιδικού περιβάλλοντος της εξώτερης ζώνης ακτινοβολίας. Συγκεκριμένα:

Ο πληθυσμός των χαμηλοενεργειακών ηλεκτρονίων κυριαρχεί, όπως είναι αναμενόμενο σε μη διαταραγμένες συνθήκες.

Ο πληθυσμός των MeV ηλεκτρονίων παραμένει χαμηλός, υποδηλώνοντας ότι δεν έχει ακόμη ενεργοποιηθεί η διαδικασία ισχυρής επιτάχυνσης που συνήθως

συνοδεύει μεγάλες γεωμαγνητικές καταιγίδες.

Η ομαλή κλίση του φάσματος υποδεικνύει ότι δεν υπάρχει ακόμη σημαντική εισροή «seed electrons» ή αποτελεσματική δράση chorus waves, οι οποίες ενισχύουν τυπικά το φάσμα λίγο πριν ή κατά τη διάρκεια μιας καταιγίδας.

Έτσι, το ενεργειακό φάσμα της 16/03 λειτουργεί ως baseline (προ-καταιγιδική κατάσταση), επιτρέποντας άμεση σύγκριση με τα φάσματα των επόμενων ημερών προκειμένου να γίνει ποσοτική εκτίμηση της επιτάχυνσης, του εμπλούτισμού και της αναδόμησης των trapped ηλεκτρονίων κατά την εξέλιξη της καταιγίδας.

(δ2) Στην γραφική παράσταση του δ1, εφαρμόστε power law fitting1 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:

$j(E) = AE^{-\gamma}$. Η εφαρμογή της προσαρμογής σε όλα τα ενεργειακά κανάλια έδωσε τον συνολικό εκθέτη $\gamma = 1.32$ και $A = 1.55 * 10^7$.

Η τιμή αυτή αντανακλά τη γενική μορφή ενός σχετικά ήπιου, προ-καταιγιδικού φάσματος, όπου η ροή μειώνεται σταδιακά με την ενέργεια.

Προκειμένου να εξεταστεί αν η κλίση του φάσματος μεταβάλλεται σημαντικά σε διαφορετικές ενεργειακές περιοχές, έγινε επιπλέον διαχωρισμός των καναλιών σε:

χαμηλής ενέργειας (κανάλια 1–6),
υψηλής ενέργειας (κανάλια 7–10).

Οι αντίστοιχες προσαρμογές έδωσαν:

$\gamma_{low} \approx 2.15$, $\gamma_{high} \approx 2.76$

Η αύξηση του εκθέτη στα υψηλότερα κανάλια δείχνει ότι το φάσμα μαλακώνει (steepening) σε μεγαλύτερες ενέργειες: η ροή μειώνεται γρηγορότερα καθώς

περνάμε από δεκάδες σε εκατοντάδες keV και τελικά στο MeV επίπεδο. Αυτό σημαίνει ότι την ημέρα πριν από την καταιγίδα:

οι χαμηλοενεργειακοί πληθυσμοί παραμένουν ισχυροί και σχετικά άφθονοι, οι υψηλοενεργειακοί πληθυσμοί είναι ακόμα ασθενείς, με μικρή συμβολή στο συνολικό φάσμα.

Η διαφορά στις τιμές των εκθετών ($\gamma_{high} > \gamma_{low}$) αποτελεί ισχυρό δείκτη ότι το σύστημα δεν έχει ακόμη δεχθεί την ενίσχυση και επιτάχυνση που θα ακολουθήσει κατά τη διάρκεια της καταιγίδας.

(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.

Η εφαρμογή της εκθετικής προσαρμογής στα δεδομένα έδωσε τις παραμέτρους: $J_0 \approx 1.9 \times 10^6$, $E_0 \approx 19.8 \text{ keV}$.

Η τιμή του χαρακτηριστικού ενεργειακού μήκους $E_0 E_0$ δείχνει ότι η ροή μειώνεται σημαντικά ήδη σε σχετικά χαμηλές ενέργειες, κάτι που συνάδει με μια μη-επιταχυσμένη, προ-καταιγιδική κατάσταση της εξώτερης ζώνης ακτινοβολίας. Η προσαρμογή αποτυπώνει πολύ καλά το σχήμα της κατανομής, καλύπτοντας με ακρίβεια τόσο τα χαμηλά όσο και τα υψηλά ενεργειακά κανάλια.

Για την ποσοτική αξιολόγηση της ποιότητας των δύο μεθόδων

χρησιμοποιήθηκε ο συντελεστής προσαρμογής R^2 . Προέκυψαν οι τιμές:

$$R^2_{power-law} = 0.638 \quad R^2_{exponential} = 0.996$$

Η σημαντική αυτή διαφορά δείχνει ότι το εκθετικό μοντέλο περιγράφει τα δεδομένα πολύ πιο αποτελεσματικά από το power-law του (δ2). Η power-law προσαρμογή αποτυγχάνει να συλλάβει την έντονη καμπυλότητα του φάσματος, ιδιαίτερα στα υψηλής ενέργειας κανάλια, όπου το μοντέλο αποκλίνει αισθητά από τα πραγματικά δεδομένα. Αντιθέτως, η εκθετική προσαρμογή προσαρμόζεται σχεδόν τέλεια στο σύνολο των καναλιών.

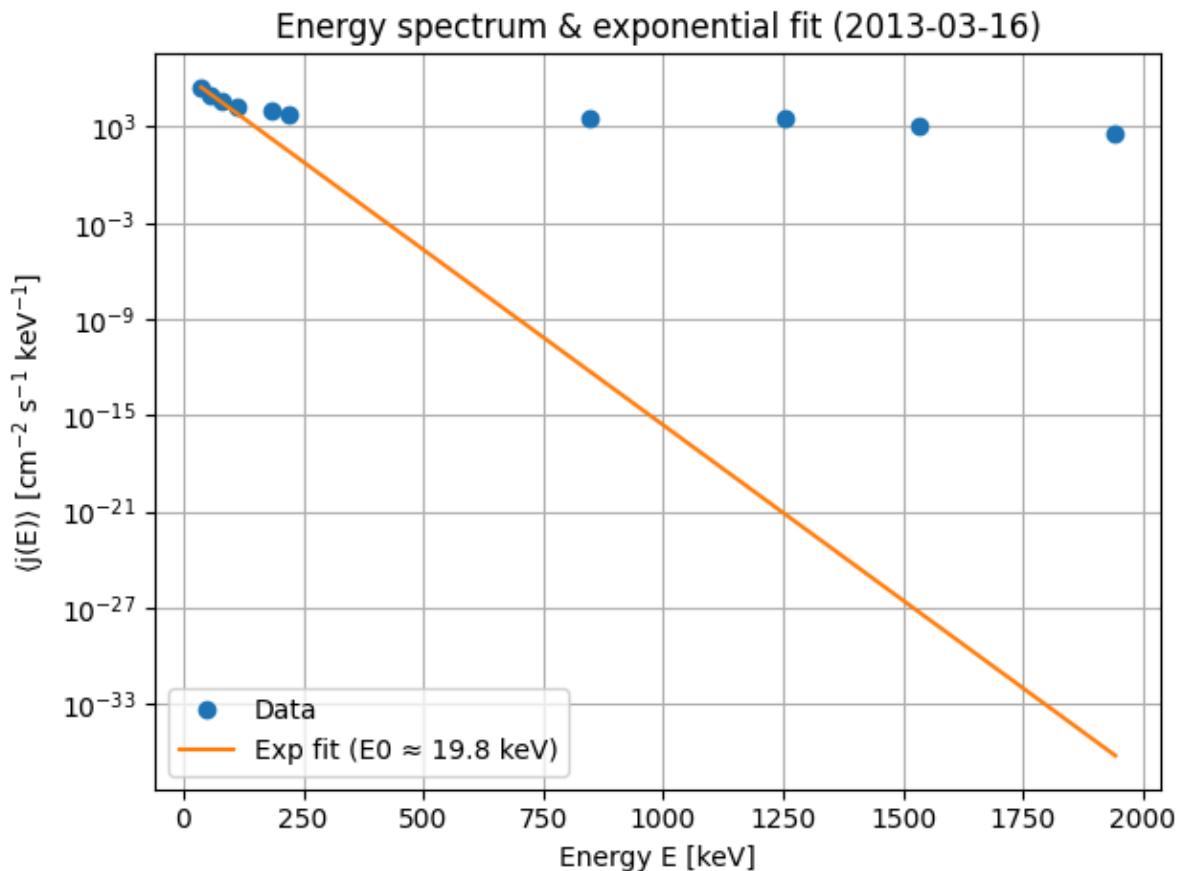
Η φυσική ερμηνεία του αποτελέσματος είναι ιδιαίτερα σημαντική:

ενώ τα power-law φάσματα είναι χαρακτηριστικά ενεργών διαδικασιών επιτάχυνσης (όπως chorus-driven acceleration ή radial diffusion), η σχεδόν τέλεια εκθετική συμπεριφορά που παρατηρείται εδώ υποδηλώνει ότι την 16η Μαρτίου η εξώτερη ζώνη ακτινοβολίας δεν είχε ακόμη εισέλθει σε κατάσταση έντονης επιτάχυνσης. Οι υψηλής ενέργειας πληθυσμοί ήταν ακόμα εξασθενημένοι, και το φάσμα διατηρούσε τη μορφή μιας ήρεμης, θερμικής κατανομής.

Συνολικά, η σύγκριση των δύο μοντέλων δείχνει ότι πριν από την καταιγίδα το ενεργειακό φάσμα περιγράφεται πολύ καλύτερα από έναν εκθετικό νόμο, ενώ ο power-law νόμος παρέχει μόνο μια χονδρική προσέγγιση της κλίσης. Αυτό σημαίνει ότι η μαγνητόσφαιρα, μία ημέρα πριν το γεγονός, δεν είχε ακόμη υποστεί τις διαδικασίες επιτάχυνσης που θα οδηγήσουν σε power-law τύπου φάσματα κατά την κορύφωση της καταιγίδας.

Exponential fit: $j(E) = J_0 * \exp(-E/E_0)$

$J_0 \approx 1.90e+06$, $E_0 \approx 19.84$ keV



R^2 power law = 0.638

R^2 exponential = 0.996

(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) επεκτείνουμε την ανάλυση του ενεργειακού φάσματος, που αρχικά έγινε για την 16η Μαρτίου 2013, σε τρεις επιπλέον χρονικές περιόδους διάρκειας μίας ημέρας, ώστε να παρακολουθήσουμε την εξέλιξη της ζώνης ακτινοβολίας κατά την καταιγίδα. Πρώτα ορίζονται οι χρονικές φάσεις: ως προ-καταιγιδική περίοδος θεωρείται η 16/03/2013 (πριν από την κύρια ενίσχυση της ροής), ως κύρια φάση της καταιγίδας επιλέγεται η 17/03/2013, όταν στα χρονικά προφύλ της συνολικής ροής εμφανίζεται η μεγαλύτερη και πιο απότομη αύξηση, ως φάση ανάκαμψης η 18/03/2013, κατά την οποία η ροή

παραμένει αυξημένη αλλά μειώνεται βαθμιαία, και ως μετα-καταιγιδική περίοδος η 20/03/2013, όταν τα προφίλ υποδηλώνουν ότι η ροή έχει πλησιάσει σε πιο «ήρεμα» επίπεδα χωρίς έντονες αιχμές (η 19/03 είναι μεταβατική). Τα κριτήρια επιλογής βασίζονται στην οπτική επιθεώρηση του total flux ως προς τον χρόνο: μέγιστη ενίσχυση για την κύρια φάση, σαφής φθίνουσα τάση για την ανάκαμψη και σχετική σταθεροποίηση για τη μετα-καταιγιδική κατάσταση. Για καθεμία από τις παραπάνω ημερομηνίες υπολογίζεται η μέση διαφορική ροή σε κάθε ενεργειακό κανάλι και κατασκευάζεται το αντίστοιχο ενεργειακό φάσμα. Στη συνέχεια εφαρμόζεται προσαρμογή power law της μορφής $j(E) = A E^{(-\gamma)}$, όπως στο δ2, ώστε να εξαχθούν οι παράμετροι της κατανομής. Στην προ-καταιγιδική ημέρα (16/03), που έχει ήδη αναλυθεί, βρίσκουμε $A \approx 1.55 \times 10^7$ και $\gamma \approx 1.32$, γεγονός που αντιστοιχεί σε ένα σχετικά «μαλακό» φάσμα όπου η ροή μειώνεται ομαλά με την ενέργεια και κυριαρχούν τα χαμηλοενεργειακά ηλεκτρόνια. Κατά την κύρια φάση της καταιγίδας (17/03) οι παράμετροι γίνονται $A \approx 4.15 \times 10^7$ και $\gamma \approx 1.21$. Η κανονικοποίηση αυξάνεται σημαντικά, υποδηλώνοντας γενικευμένη ενίσχυση της ροής σε όλο το ενεργειακό εύρος, ενώ η μικρότερη τιμή του γ δείχνει σκλήρυνση του φάσματος: τα υψηλότερης ενέργειας ηλεκτρόνια ενισχύονται σχετικώς περισσότερο από τα χαμηλής ενέργειας, όπως αναμένεται σε συνθήκες έντονης επιτάχυνσης και injections κατά την κύρια φάση μιας γεωμαγνητικής καταιγίδας.

Στη φάση ανάκαμψης της 18/03 οι τιμές μεταβάλλονται σε $A \approx 2.47 \times 10^6$ και $\gamma \approx 0.73$. Η συνολική ένταση του φάσματος μειώνεται αισθητά σε σχέση με την κύρια φάση, όμως ο εκθέτης γίνεται ακόμη μικρότερος, οπότε το φάσμα γίνεται πολύ σκληρό: η ροή στα χαμηλής ενέργειας κανάλια έχει μειωθεί δυσανάλογα, ενώ ο πληθυσμός των ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας παραμένει σχετικά ισχυρός. Αυτό είναι συνεπές με την εικόνα όπου, μετά την αρχική ενίσχυση, οι μηχανισμοί απώλειας (pitch-angle scattering, magnetopause shadowing κ.λπ.) απομακρύνουν κυρίως τα χαμηλοενεργειακά ηλεκτρόνια, αφήνοντας έναν πιο «σκληρό» πυρήνα MeV ηλεκτρονίων. Τέλος, στη μετα-καταιγιδική περίοδο της 20/03 οι παράμετροι προκύπτουν $A \approx 4.34 \times 10^6$ και $\gamma \approx 0.92$. Η ζώνη έχει αρχίσει να επανέρχεται σε πιο ήρεμη κατάσταση: η κανονικοποίηση είναι μέτρια, ενώ ο εκθέτης έχει αυξηθεί σε σχέση με την ανάκαμψη, γεγονός που δείχνει μερική «μαλάκωση» του φάσματος. Παρ' όλα αυτά, η τιμή $\gamma \approx 0.92$ παραμένει μικρότερη από την προ-καταιγιδική τιμή 1.32, κάτι που σημαίνει ότι ο πληθυσμός των υψηλής ενέργειας ηλεκτρονίων εξακολουθεί να είναι

ενισχυμένος σε σχέση με την αρχική κατάσταση, ακόμη και αρκετό χρόνο μετά τη λήξη της καταιγίδας.

Συνολικά, η εξέλιξη των παραμέτρων Λ και γ από την προ-καταιγιδική φάση στην κύρια φάση, στην ανάκαμψη και στη μετα-καταιγιδική περίοδο απεικονίζει με ποσοτικό τρόπο τη δυναμική της εξώτερης ζώνης Van Allen: αρχική ήρεμη κατάσταση με μαλακό φάσμα, απότομη ενίσχυση και σκλήρυνση κατά την κορύφωση της καταιγίδας, έντονα σκληρό φάσμα με επικράτηση των MeV ηλεκτρονίων στη φάση ανάκαμψης και, τέλος, σταδιακή επιστροφή προς μια πιο ήρεμη αλλά όχι πλήρως αποκατεστημένη φασματική κατανομή.

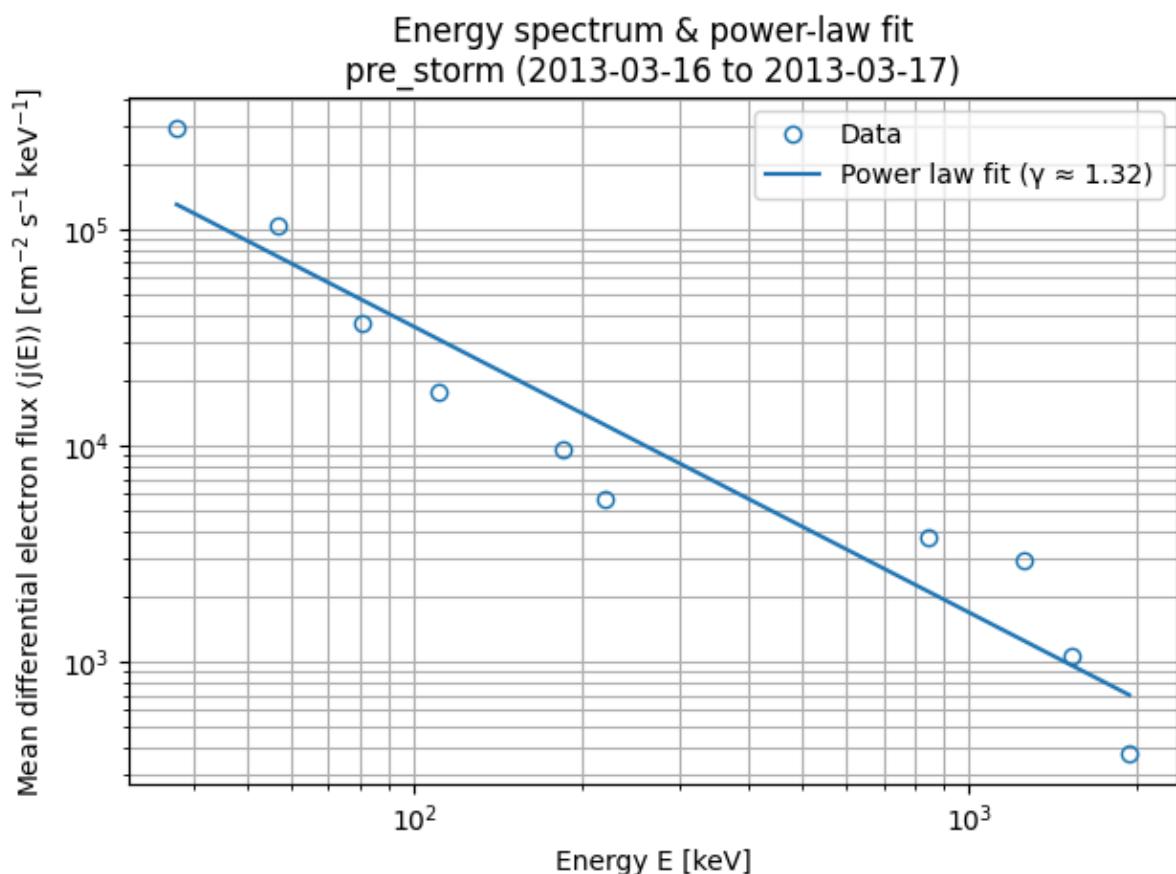
Περίοδος: pre_storm

Χρονικό διάστημα: 2013-03-16 00:00:00 έως 2013-03-17 00:00:00

Power-law fit: $j(E) = A * E^{-\gamma}$

$A \approx 1.549e+07$ [$\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{keV}^{\gamma-1}$]

$\gamma \approx 1.321$

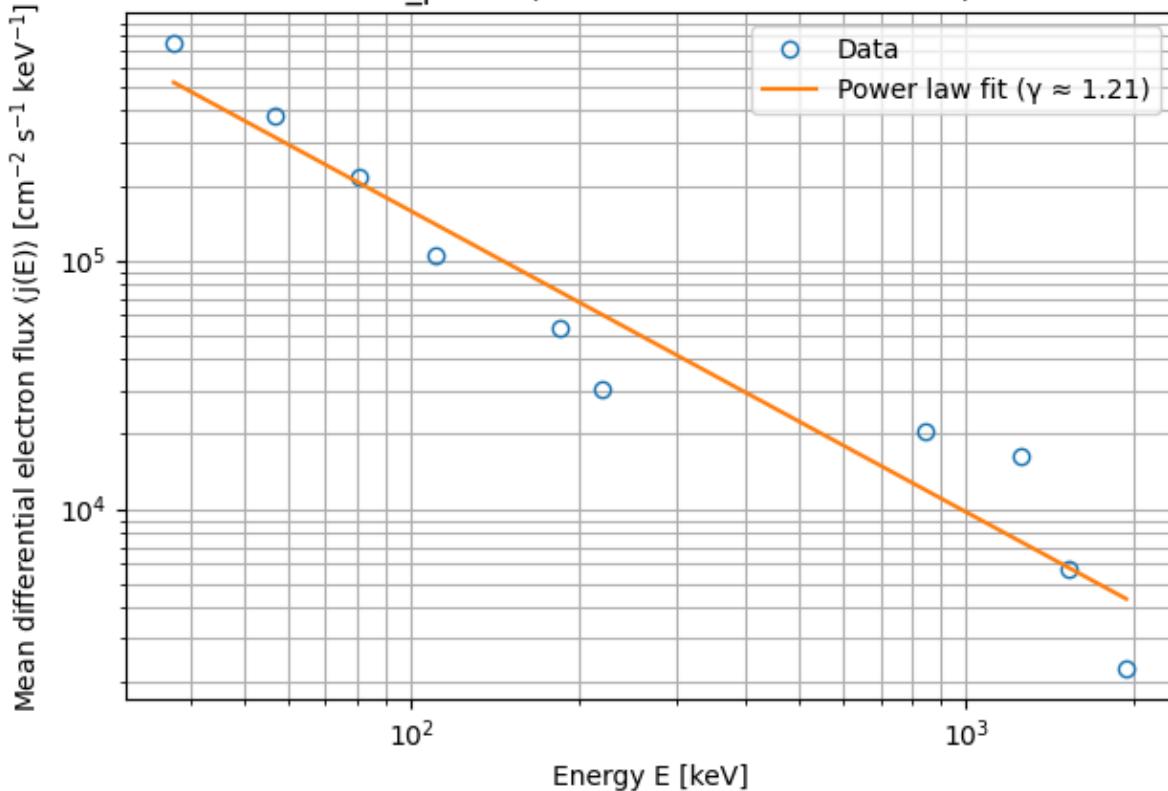


=====
Περίοδος: main_phase

Χρονικό διάστημα: 2013-03-17 00:00:00 έως 2013-03-18 00:00:00

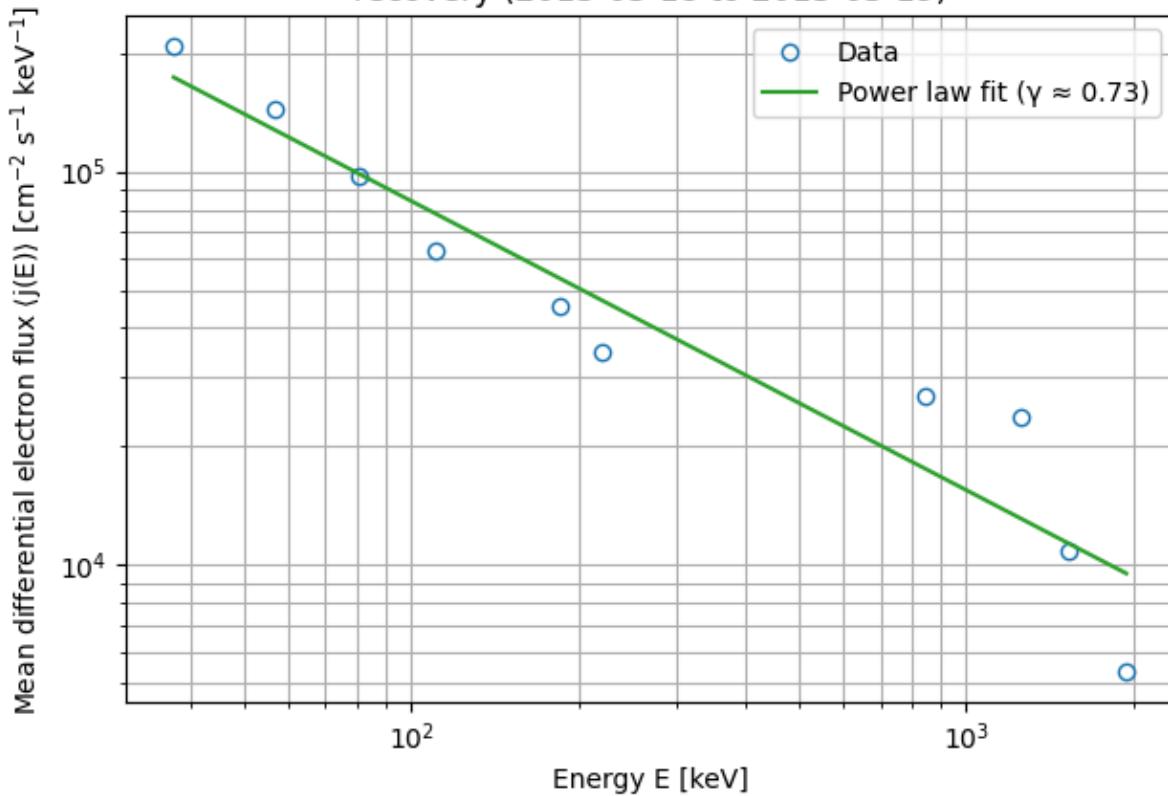
Power-law fit: $j(E) = A * E^{-\gamma}$
 $A \approx 4.154e+07$ [cm⁻² s⁻¹ keV^(gamma-1)]
 $\gamma \approx 1.211$

Energy spectrum & power-law fit
main_phase (2013-03-17 to 2013-03-18)



Περίοδος: recovery
Χρονικό διάστημα: 2013-03-18 00:00:00 έως 2013-03-19 00:00:00
Power-law fit: $j(E) = A * E^{-\gamma}$
 $A \approx 2.474e+06$ [cm⁻² s⁻¹ keV^(gamma-1)]
 $\gamma \approx 0.734$

Energy spectrum & power-law fit
recovery (2013-03-18 to 2013-03-19)



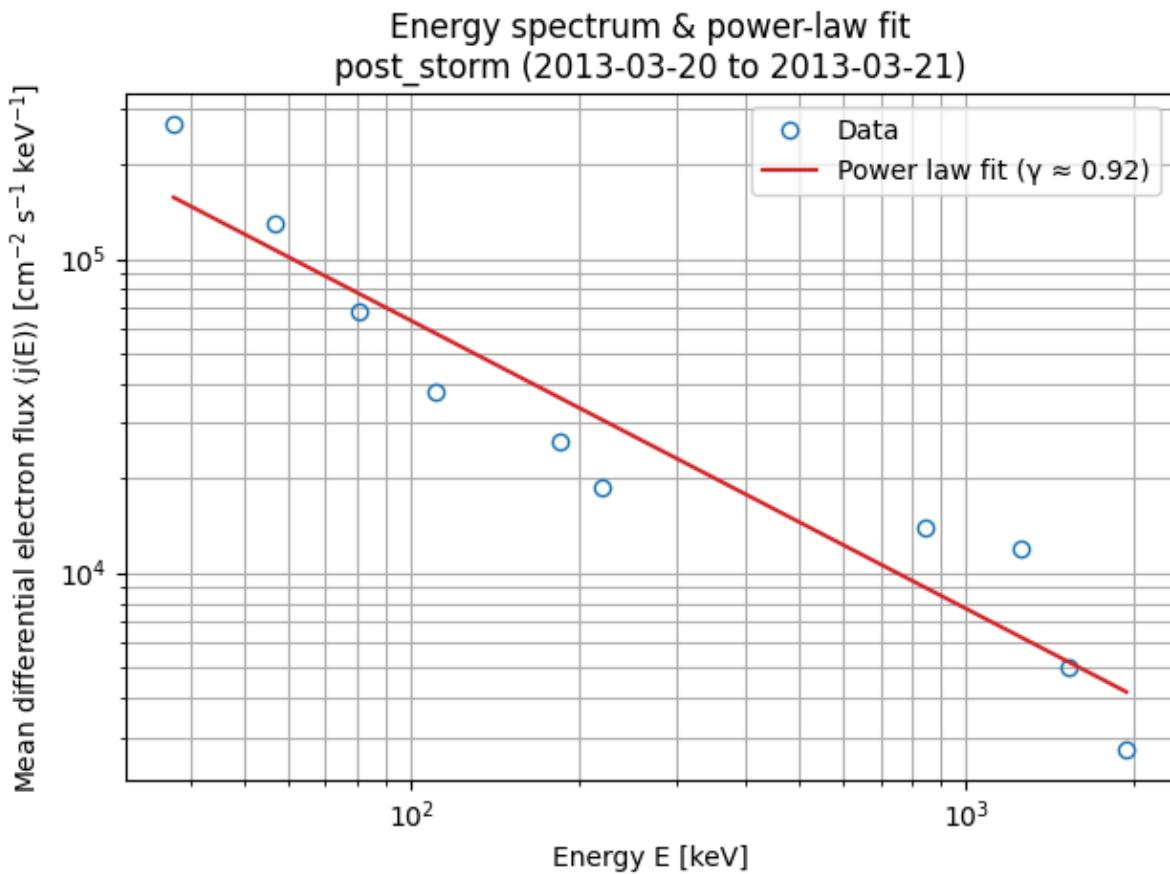
Περίοδος: post_storm

Χρονικό διάστημα: 2013-03-20 00:00:00 έως 2013-03-21 00:00:00

Power-law fit: $j(E) = A \cdot E^{(-\gamma)}$

A $\approx 4.337 \times 10^6$ [cm⁻² s⁻¹ keV^(γ-1)]

γ ≈ 0.917



(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.

Αν κοιτάξει κανείς διαδοχικά τα ενεργειακά φάσματα και τα power-law fitting των τεσσάρων φάσεων, είναι σαν να βλέπει μια μικρή ιστορία να ξετυλίγεται πάνω στο log–log χαρτί.

Πριν την καταιγίδα (pre-storm) το φάσμα είναι «μαλακό». Η καμπύλη πέφτει ομαλά με κλίση $\gamma \approx 1.32$ και κανονικοποίηση $A \approx 1.5 \times 10^7$. Οι χαμηλές ενέργειες κυριαρχούν, αλλά όχι βίαια· τα σημεία σχηματίζουν μια αρκετά τακτική ευθεία, σαν μια ήρεμη φωνή της μαγνητόσφαιρας που μιλά χαμηλόφωνα. Η ζώνη ακτινοβολίας βρίσκεται σε ισορροπία: υπάρχουν trapped ηλεκτρόνια, αλλά τίποτα δεν δείχνει ακόμη το «ξέσπασμα» που θα ακολουθήσει.

Στην κύρια φάση της καταιγίδας (main phase) η εικόνα αλλάζει απότομα. Η γραμμή του fitting ανεβαίνει ψηλότερα ($A \approx 4.2 \times 10^7$) και η κλίση γ μειώνεται

ελαφρά σε ≈ 1.21 . Το φάσμα σκλήρυννει: τα υψηλότερης ενέργειας κανάλια δεν πέφτουν τόσο γρήγορα όσο πριν. Ολόκληρη η καμπύλη μοιάζει να φωτίζεται, σαν να άναψε ξαφνικά ένας δυνατότερος προβολέας σε όλες τις ενέργειες. Αυτή είναι η στιγμή που η μαγνητόσφαιρα «βομβαρδίζεται» από injections και μηχανισμούς επιτάχυνσης· τα χαμηλά Ε πλημμυρίζουν, αλλά τα υψηλά αποκτούν πλέον ουσιαστική παρουσία.

Στη φάση ανάκαμψης (recovery) η συνολική ένταση πέφτει δραματικά ($A \approx 2.5 \times 10^6$), όμως η κλίση γ πέφτει ακόμη περισσότερο, σε ≈ 0.73 . Το φάσμα γίνεται τώρα πολύ «σκληρό»: η γραμμή είναι πιο επίπεδη, τα σημεία των υψηλών ενέργειών στέκονται σχεδόν πεισματικά ψηλά σε σχέση με τα χαμηλά. Είναι σαν την επόμενη μέρα μιας μεγάλης καταιγίδας· ο «πολύς κόσμος» (τα χαμηλοενέργειακά ηλεκτρόνια) έχει διαλυθεί, αλλά αυτοί που απέμειναν είναι οι πιο ανθεκτικοί, οι πιο ενεργητικοί. Οι μηχανισμοί απώλειας έχουν καθαρίσει κυρίως τις χαμηλές ενέργειες, αφήνοντας πίσω έναν πυρήνα MeV ηλεκτρονίων. Μετά την καταιγίδα (post-storm) το φάσμα αρχίζει να θυμίζει ξανά ήρεμη κατάσταση, αλλά όχι ακριβώς όπως στην αρχή. Η κανονικοποίηση ανεβαίνει λίγο ($A \approx 4.3 \times 10^6$) και η κλίση γ αυξάνεται σε ≈ 0.92 . Η ευθεία του fitting μαλακώνει σε σχέση με την ανάκαμψη, όμως παραμένει πιο σκληρή από την προ-καταιγιδική. Η μαγνητόσφαιρα ηρεμεί, οι χαμηλές ενέργειες ανακτούν μέρος του πληθυσμού τους, αλλά το φάσμα κρατά ακόμη τη «μνήμη» της καταιγίδας: οι υψηλές ενέργειες είναι πιο παρούσες από ότι πριν ξεκινήσει όλο το επεισόδιο.

Συνολικά, οι καμπύλες των τεσσάρων φάσεων δείχνουν ένα πλήρη κύκλο: από ένα ήπιο, κεκλιμένο φάσμα, σε μια έντονα ενισχυμένη και ελαφρώς σκληρότερη κατανομή στην κορύφωση·

στη συνέχεια σε ένα χαμηλότερο αλλά πολύ σκληρό φάσμα κατά την ανάκαμψη, όπου επιβιώνουν κυρίως τα πιο ενεργητικά ηλεκτρόνια· και τέλος σε μια μετα-καταιγιδική κατανομή που ξαναμαλακώνει, χωρίς όμως να επιστρέφει πλήρως στην αρχική της μορφή.

Οι παραμετρικές τιμές A και γ λειτουργούν έτσι σαν «ποιητικές συντεταγμένες» της καταιγίδας: μετρούν πόσο δυνατά μιλά η ζώνη ακτινοβολίας και πόσο γρήγορα σιωπούν οι υψηλές ενέργειες σε κάθε στάδιο της ιστορίας.

(δ2) Στην γραφική παράσταση του δ1, εφαρμόστε power law fitting1 ώστε να υπολογίσετε τις παραμέτρους της κατανομής για κάθε ενεργειακό πληθυσμό.
(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. (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. (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.

Με τη χρήση του έτοιμου αρχείο fitPowerLaw.m που έχει ανέβει στο υλικό του μαθήματος.

δ2)

Low-energy population (channels 1–5):

$$A \approx 6.856e+08$$

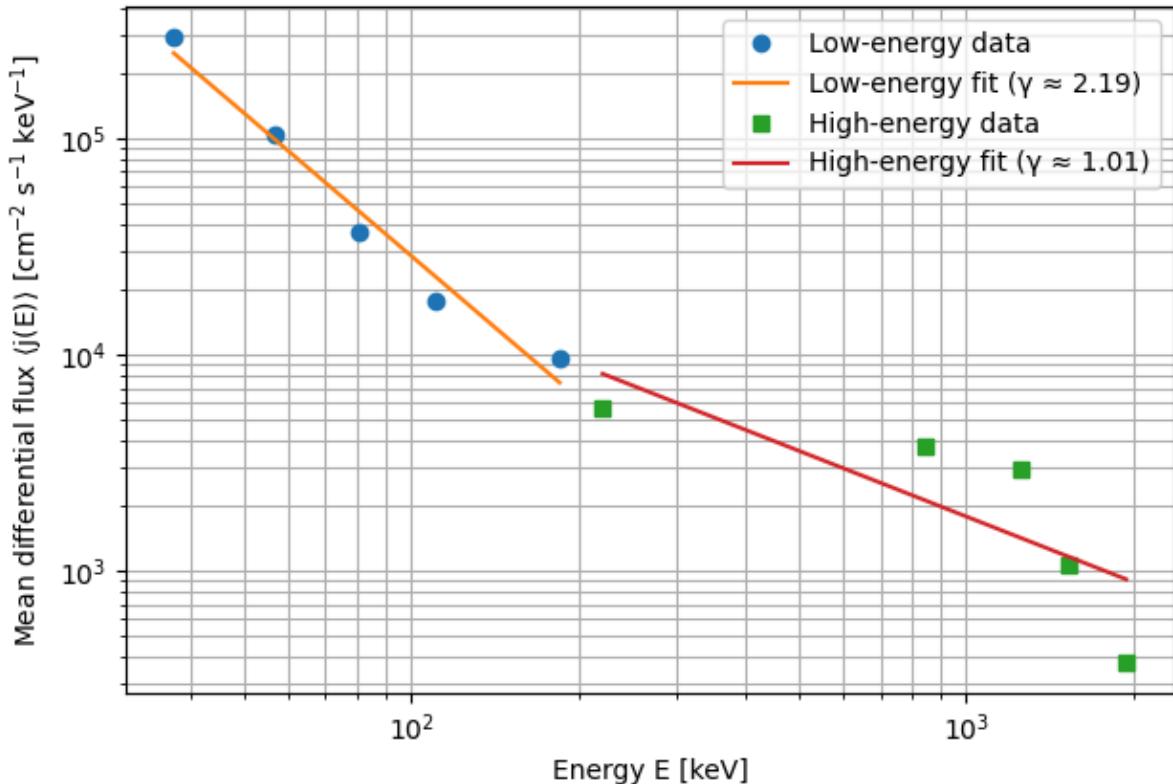
$$\text{gamma} \approx 2.190$$

High-energy population (channels 6–10):

$$A \approx 1.870e+06$$

$$\text{gamma} \approx 1.007$$

Energy spectrum one day before storm with power-law fits per population



Για την ημέρα πριν από την καταιγίδα (16/03/2013) εξετάστηκε εάν το ενεργειακό φάσμα των ηλεκτρονίων μπορεί να περιγραφεί από μία ενιαία power-law κατανομή ή εάν απαιτείται διαχωρισμός σε επιμέρους ενεργειακούς πληθυσμούς. Για τον σκοπό αυτό, τα δεδομένα χωρίστηκαν σε δύο ομάδες: ηλεκτρόνια χαμηλής ενέργειας (κανάλια 1–5) και ηλεκτρόνια υψηλής ενέργειας (κανάλια 6–10). Σε κάθε ομάδα εφαρμόστηκε ξεχωριστή προσαρμογή της μορφής

$$j(E) = AE - \gamma.$$

Για τον χαμηλοενεργό πληθυσμό προέκυψαν οι παράμετροι $A_{low} \approx 6.86 \times 10^8$, $\gamma_{low} \approx 2.19$.

Η σχετικά μεγάλη τιμή της κλίσης δείχνει ότι το φάσμα μειώνεται απότομα με την αύξηση της ενέργειας, κάτι που υποδηλώνει μία έντονη κυριαρχία ηλεκτρονίων δεκάδων keV.

Για τον υψηλοενεργό πληθυσμό, η προσαρμογή έδωσε

Η πολύ μικρότερη κλίση αντικατοπτρίζει ένα «σκληρότερο» φάσμα, στο οποίο η ροή μειώνεται πολύ πιο αργά με την ενέργεια. Αυτό σημαίνει ότι, παρά το γεγονός ότι τα MeV ηλεκτρόνια είναι αριθμητικά λιγότερα, αποτελούν έναν πιο ανθεκτικό πληθυσμό, με σημαντική παρουσία μέχρι τις υψηλότερες ενέργειες.

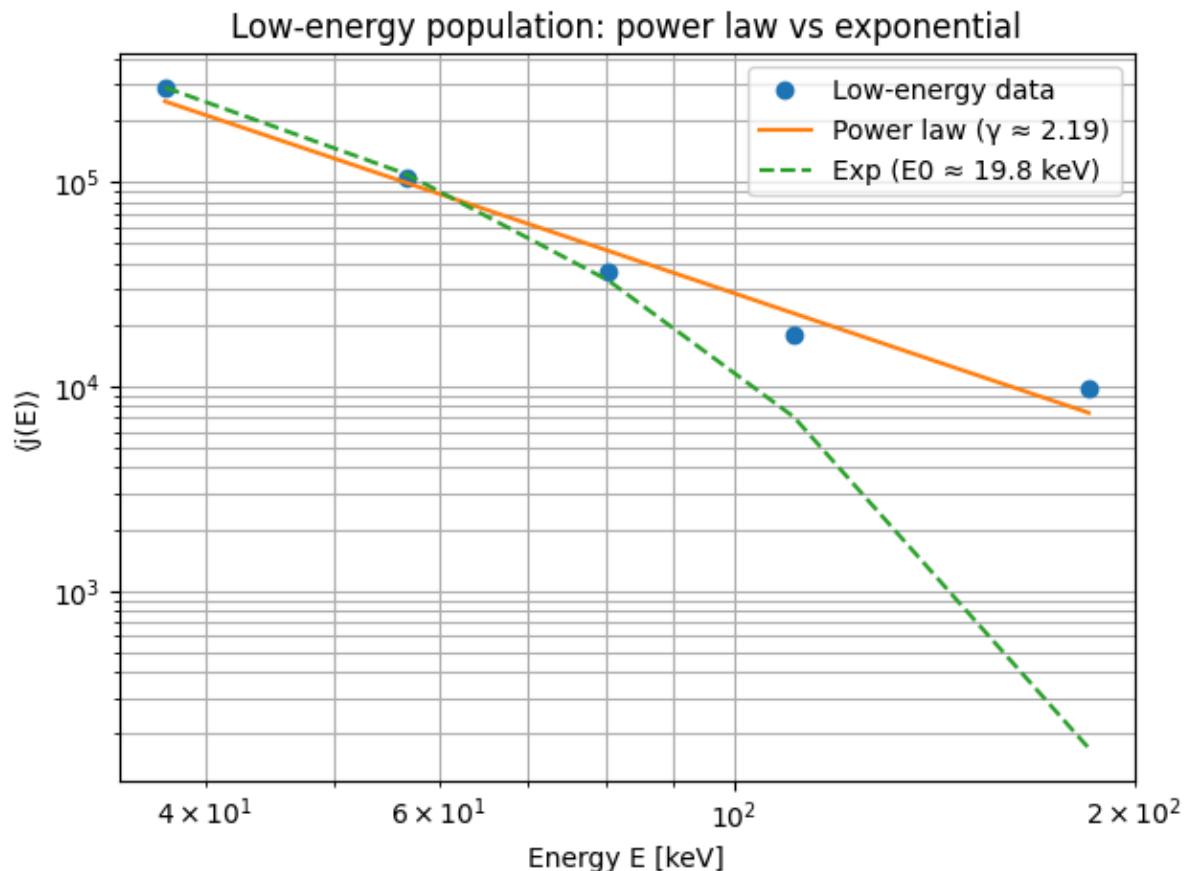
Συνολικά, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το ενεργειακό φάσμα πριν από την καταιγίδα δεν μπορεί να περιγραφεί από έναν ενιαίο power-law δείκτη. Αντίθετα, παρουσιάζει μια σαφή αλλαγή κλίσης μεταξύ χαμηλών και υψηλών ενεργειών, γεγονός που υποδηλώνει την ύπαρξη δύο διακριτών πληθυσμών ηλεκτρονίων με διαφορετική φυσική προέλευση και διαφορετικούς μηχανισμούς επιτάχυνσης και απώλειας.

δ3)

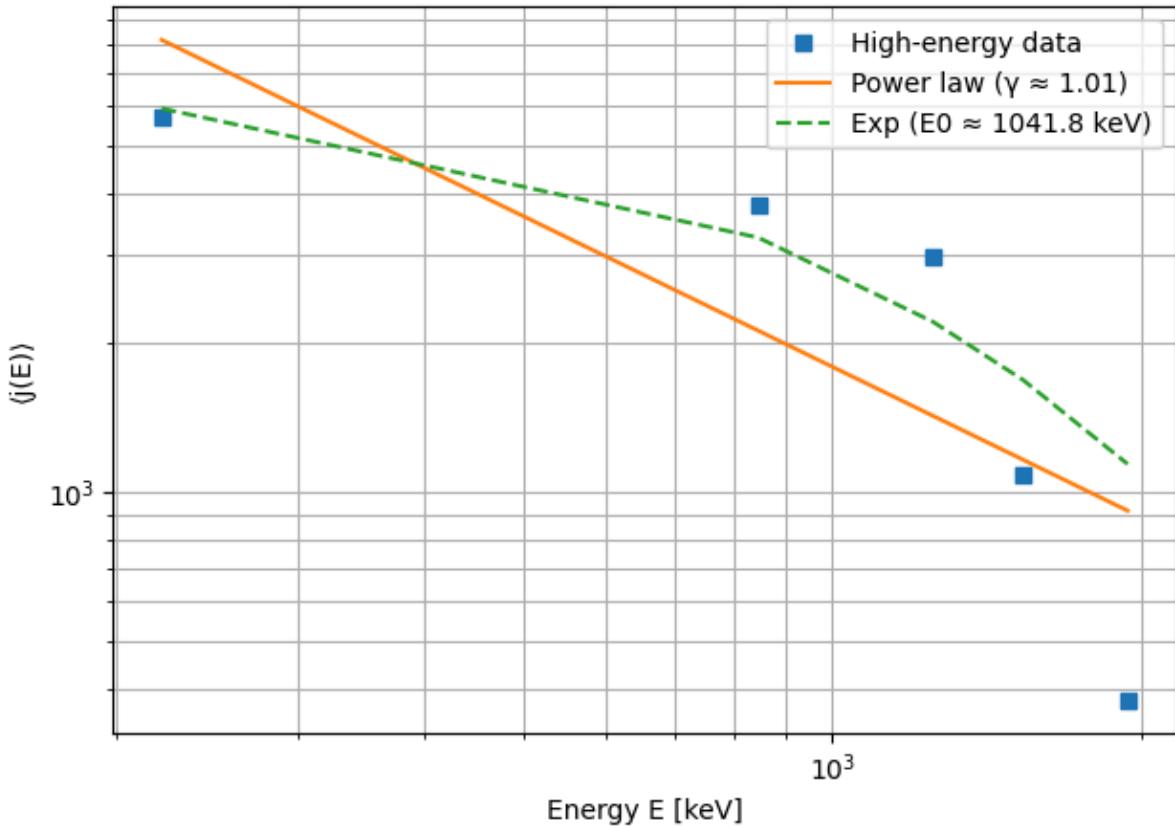
Exponential fits:

Low-energy: $J_0 \approx 1.900\text{e+}06$, $E_0 \approx 19.84 \text{ keV}$

High-energy: $J_0 \approx 7.332\text{e+}03$, $E_0 \approx 1041.78 \text{ keV}$



High-energy population: power law vs exponential



Για να συγκριθούν συστηματικά οι δύο μορφές κατανομής, power law και εκθετική, το ενεργειακό φάσμα της 16/03/2013 χωρίστηκε σε δύο διακριτούς πληθυσμούς: χαμηλής ενέργειας ηλεκτρόνια (κανάλια 1–5) και υψηλής ενέργειας ηλεκτρόνια (κανάλια 6–10). Για κάθε πληθυσμό εφαρμόστηκαν δύο εναλλακτικά μοντέλα:

- (i) νόμος ισχύος $j(E) = AE^{-\gamma}$
- (ii) εκθετική κατανομή $j(E) = J_0 \exp(-E/E_0)$

Για τον χαμηλοενέργο πληθυσμό, το power-law fitting έδωσε Α Η αντίστοιχη εκθετική προσαρμογή έδωσε $J_0, \text{low} \approx 1.9 \times 10^6$ και χαρακτηριστική ενέργεια $E_0, \text{low} \approx 20 \text{ keV}$. Οπτικά, η ευθεία του power law ακολουθεί ικανοποιητικά όλα τα σημεία των καναλιών 1–5, ενώ η εκθετική καμπύλη τείνει να πέφτει πολύ πιο γρήγορα στις υψηλότερες ενέργειες αυτής της ομάδας, υποεκτιμώντας τη ροή στα τελευταία κανάλια. Αυτό σημαίνει ότι, για τις δεκάδες keV, το φάσμα συμπεριφέρεται περισσότερο σαν καθαρός νόμος ισχύος, με έντονη επικράτηση των χαμηλών ενέργειών αλλά χωρίς «κόψιμο» τύπου εκθετικής απόσβεσης μέσα στην ίδια ενεργειακή περιοχή.

Για τον υψηλοενεργό πληθυσμό, το power-law fitting οδηγεί σε $A_{high} \approx 1.9 \times 10^6$ και $\gamma_{high} = 1.01$, δηλαδή σε ένα αρκετά σκληρό φάσμα που μειώνεται σχετικά αργά με την ενέργεια. Η εκθετική προσαρμογή δίνει $Io_{high} = 7.3 * 10^3$ και πολύ μεγάλη χαρακτηριστική ενέργεια $E0,high \approx 1.0$. Με, πράγμα που αντιστοιχεί σε σχεδόν επίπεδη εκθετική για τις υπάρχουσες τιμές E. Στις γραφικές παραστάσεις, η power-law ευθεία τείνει να είναι πιο απότομη από τα δεδομένα: υπερεκτιμά το πρώτο σημείο και υποεκτιμά τα ενδιάμεσα, ενώ η εκθετική καμπύλη με τόσο μεγάλο E0 ακολουθεί καλύτερα τη συνολική «καμπυλότητα» των τεσσάρων σημείων, ιδίως γύρω από τις εκατοντάδες keV και το ≈ 1 MeV. Εδώ, λοιπόν, καμία από τις δύο προσεγγίσεις δεν είναι ιδανική λόγω του μικρού αριθμού σημείων, αλλά η εκθετική μορφή περιγράφει κάπως πιο ομαλά τον τρόπο με τον οποίο «σβήνει» η ουρά του φάσματος στις πολύ υψηλές ενέργειες.

Συνολικά, η σύγκριση δείχνει ότι ο χαμηλοενεργός πληθυσμός την ημέρα πριν από την καταιγίδα περιγράφεται καλύτερα από έναν καθαρό νόμο ισχύος, ενώ ο υψηλοενεργός πληθυσμός επιτρέπει και μια ερμηνεία τύπου εκθετικής κατανομής με μεγάλο E0, που αντιπροσωπεύει μια σχετικά επίπεδη, μακρόβια υψηλοενεργειακή ουρά. Αυτό υποδηλώνει ότι οι δύο ενεργειακές περιοχές δεν είναι απλώς διαφορετικές σε ένταση, αλλά και σε φυσική συμπεριφορά: τα ηλεκτρόνια χαμηλής ενέργειας σχηματίζουν έναν πληθυσμό που ακολουθεί κλασική power-law κατανομή, ενώ τα πολύ ενεργητικά ηλεκτρόνια εμφανίζονται ως μια πιο «ανθεκτική» εκθετική ουρά, η οποία μπορεί να λειτουργήσει ως seed population για περαιτέρω επιτάχυνση κατά τη διάρκεια της επερχόμενης καταιγίδας.