



Επιτάχυνση και Μεταφορά Ηλεκτρονίων Στις Ζώνες Ακτινοβολίας

Δημήτρης Βασιλειάδης
NASA / Goddard Space Flight Center

Τομέας Αστροφυσικής, Τμήμα Φυσικής, ΑΠΘ
5 Νοεμβρίου 2004

Σχεδιάγραμμα

1. Στόχοι της έρευνας

- ## 2. Εισαγωγή στις ζώνες ακτινοβολίας
- Σύνοψη ιστορική αναδρομή

3. Η φυσική των ζωνών

A. Επιτάχυνση ηλεκτρονίων

- Μικροσκοπική θεώρηση: μηχανισμοί επιτάχυνσης
- Μακροσκοπική θεώρηση: σύζευξη με τον ηλιακό άνεμο

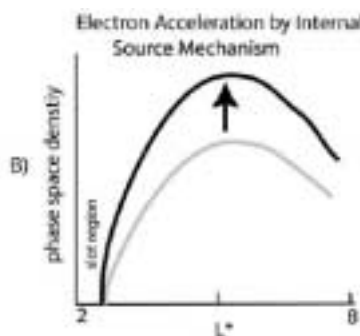
B. Μεταφορά (διάχυση) ενεργειακών ηλεκτρονίων

4. Σύνοψη – Μελλοντικές εξελίξεις

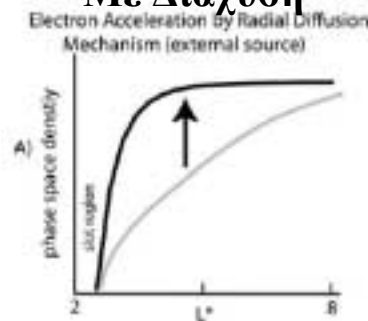
Σημαντικά θέματα φυσικής στις ζώνες ακτινοβολίας

1. Μηχανισμοί επιτάχυνσης φορτισμένων σωματιδίων

Τοπική Επιτάχυνση



Εξωτερική Επιτάχυνση Με Διάχυση



[Green and Kivelson, 2004]

2. Μεταφορά ενέργειας σε συζευγμένα πλασματικά συστήματα:

- Υδροδυναμικές αλληλεπιδράσεις ή Μαγνητική επανασύνδεση;

Η Εξερεύνηση των Ζωνών

Η ιστορία αρχίζει το 1957:

- Η πολιτική διάσταση: Διαστημικά προγράμματα των τότε υπερδυνάμεων
- Τα επιστημονικά ερωτήματα: προέλευση, κατανομή και δυναμική των κοσμικών ακτίνων
 - Μετρήσεις από πυραύλους
 - Πρώτες μετρήσεις με δορυφόρους
 - Sputnik
 - Explorer I, III (Van Allen et al. 1957, 1958):
Μετρήσεις Geiger
Ανακάλυψη της παγιδευμένης «ακτινοβολίας»
 - Τεχνητές ζώνες: Πρόγραμμα Argus
(Christofilos, 1958)



Εκτόξευση του Explorer I
(1957)

Περισσότερες πληροφορίες: The Exploration of Earth's Magnetosphere:
<http://www-istp.gsfc.nasa.gov/Education/Intro.html>

Μαγνητόσφαιρα: Βασική Δομή

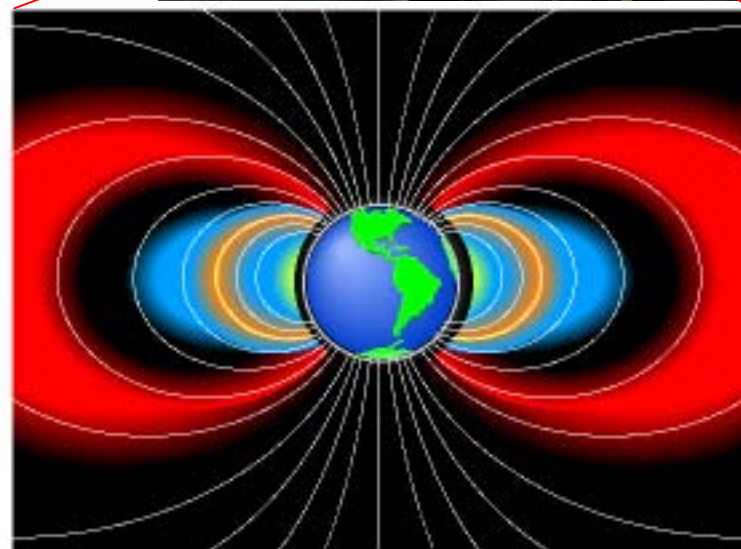
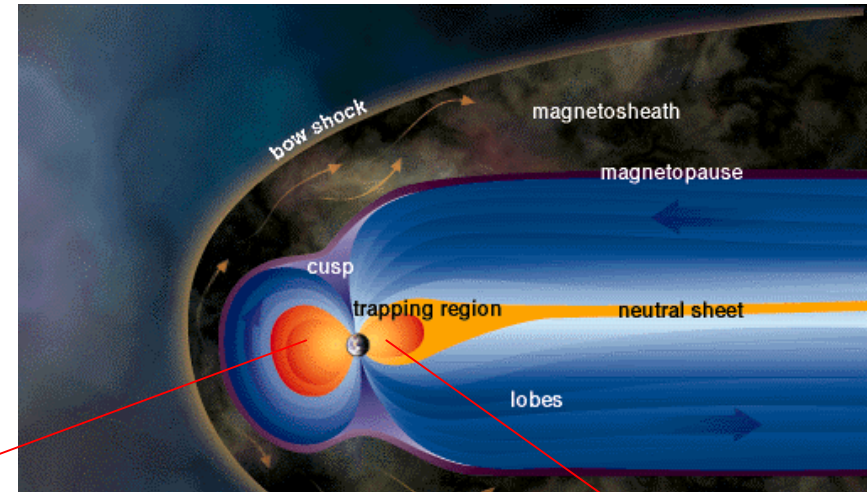
Δομή της μαγνητοσφαιρας:
Εξωτερική και εσωτερική ΜΣ

Εσωτερικη ΜΣ:
Ζωνες ακτινοβολιας (Radiation belts)
Κυρίως ενεργειακά ηλεκτρόνια, $E > 1 \text{ MeV}$

Δακτυλιοειδες ρευμα (Ring Current)
Κυρίως θερμικά πρωτόνια

Πυκνότητα (Density) πλάσματος
στην εσωτερική ΜΣ:
 $n > 10 \text{ cm}^{-3}$

Ροή (Flux) ενεργειακών ηλεκτρονίων:
 $J \sim 10^2 - 10^5 \text{ cm}^{-2} / \text{sr} / \text{sec} / \text{MeV}$
 $E = 0.1 - 10 \text{ MeV}$



Outer Van Allen Belt Inner Van Allen Belt
Trapped ACR (interstellar matter) Energetic Secondary Ions

Εσωτερική Μαγνητόσφαιρα: Η Βασική Δυναμική

Θεμελιώδης διαταραχή: μαγνητικές καταιγίδες:
Ραγδαία ανακατανομή πλάσματος και πεδίων

- Πλάσμα: Ενίσχυση της ροής/Convection Flow
απο τη νυχτερινή πλευρά της ΜΣ προς την ημερήσια

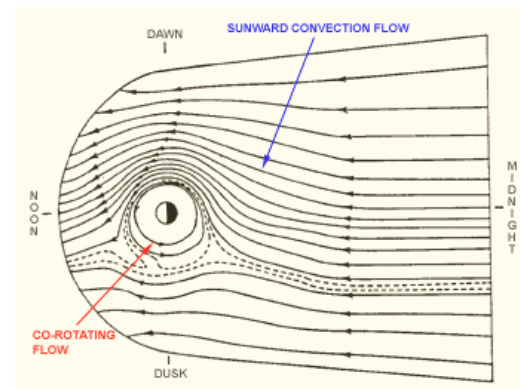
$$V_{PS} = 400 - 1000 \text{ km/sec}$$

- Ηλεκτρικό ρεύμα (και μαγνητικό πεδίο):
Ενίσχυση του δαχτυλιωτού ρεύματος

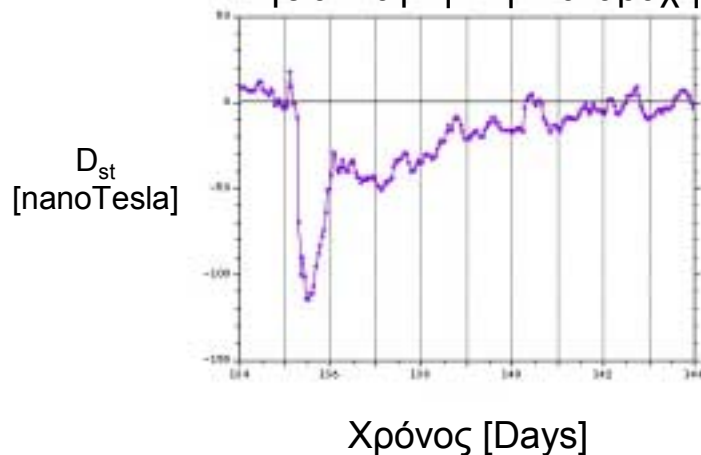
$$I_{RC} \sim 1 \text{ MA}$$

- Ενεργειακά σωματίδια:
Επιτάχυνση ηλεκτρονίων σε ρελατιβιστικές
ενέργειες
Πηγή σωματιδίων: εσωτερική της μαγνητόσφαιρας

Return Convection Flow of Nightside Plasma



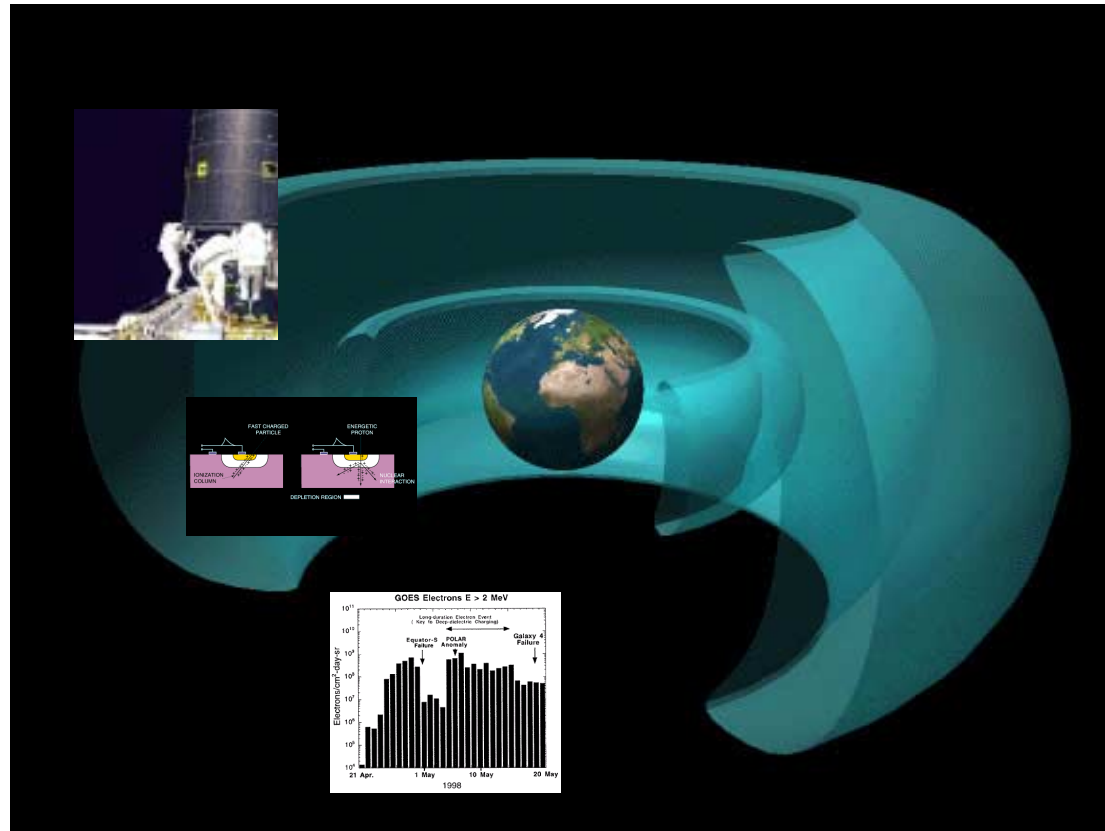
Χρονική Εξέλιξη Μαγνητικής Καταιγίδας Επίγεια Μαγνητική Διαταραχή



Διαστημικός Καιρός

* Ζημίες σε δορυφορικά συστήματα:
Ηλεκτρόνια >1 MeV
Επιφανειακή και εσωτερική φόρτιση
διηλεκτρικών
(Surface and Deep Dielectric Charging)

* Περιορισμοί στη μακρόχρονη
παραμονή ανθρώπων στο διάστημα



3. Φυσική των Ζωνών Ακτινοβολίας: Εισαγωγικά

1. Παγίδευση: Μαγνητική φιάλη
2. Σκεδαση και απώλεια:
 - Χωρικά μεταβαλλόμενα (ανομοιογενή) πεδία
 - Χρονικά μεταβαλλόμενα πεδία (π.χ., κύματα)
 - Αλληλεπίδραση με διαπλανητικό περιβάλλον
3. Επιμέρους σωματίδια:
 - Θεωρία Hamilton-JacobiΣταθερες κίνησης (π.χ. ενεργεια, στροφ/ορμη)
4. Κατανομη σωματιδίων
 - Αλληλεπίδραση με κύματα
 - Ημιγραμμική θεωρία
 - Διάχυση (μεταφορά) στο χώρο και την ενέργεια

Φυσική των Ζωνών Ακτινοβολίας: Μικροσκοπική θεώρηση

Βασικά είδη κίνησης σε μαγνητικό πεδίο:

A. Περιστροφή (Gyration/Gyromotion):

$$\omega^{-1} = \frac{mc}{qB}$$

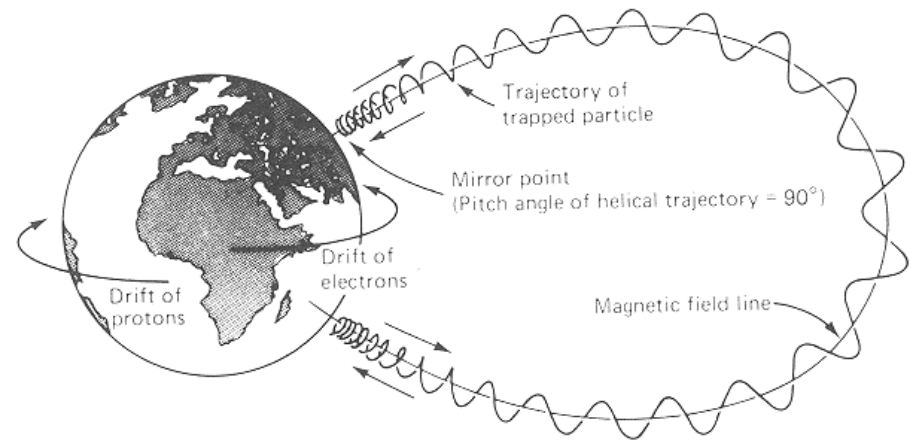
B. Ανάκλαση («Αναπήδηση», Bounce) από περιοχές ενισχυμένου μαγνητικού πεδίου:

$$T = \oint \frac{ds}{v}$$

→ Μαγνητική φιάλη → Παγίδευση

Γ. Ολίσθηση (Drift) κάθετα στις μαγνητικές γραμμές, λόγω ανομοιογενούς/καμπύλου Μαγνητικού πεδίου

Δ. Αποτελέσματα χρονικά μεταβαλλόμενου πεδίου



Φυσική των Ζωνών Ακτινοβολίας: Μικροσκοπική θεώρηση (συνεχ.)

Τύπος Κίνησης:

A. Περιστροφή (Gyration/Gyromotion):

$$\omega^{-1} = \frac{mc}{qB}$$

Χρονικές Κλίμακες
για Ηλεκτρόνιο 1 MeV:

Sec

Διατηρούμενες αδιαβατικές
αναλλοίωτες ποσότητες:

μ (μαγνητική ροπή)

B. Ανακλαση (Bounce)

$$T = \oint \frac{ds}{v}$$

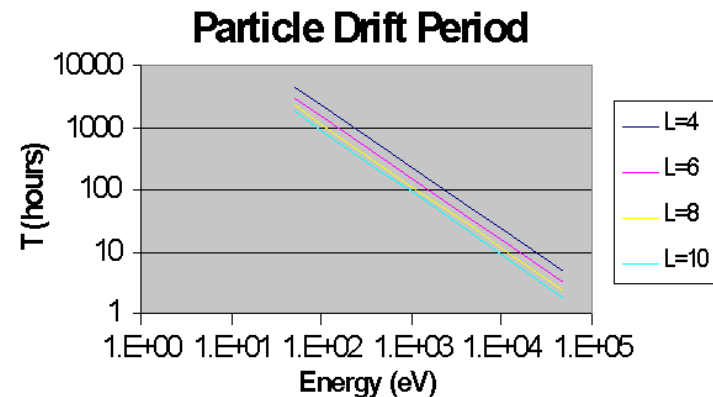
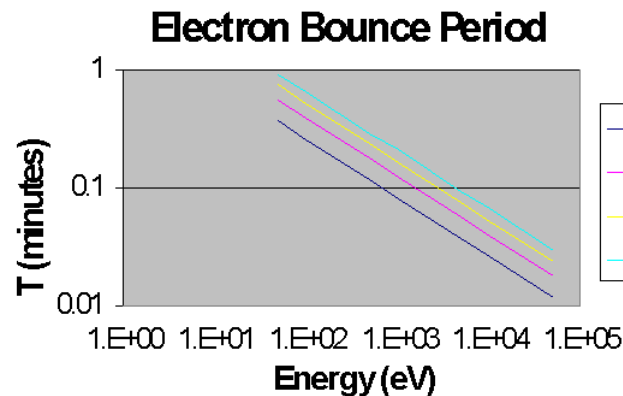
<1 sec

J (ή K)

Γ. Ολίσθηση (Drift)

1 hour

Φ



Φυσική των Ζωνών Ακτινοβολίας: Μεσοσκοπική θεώρηση

Κατανομή ηλεκτρονίων στο χώρο φάσεων (πυκνότητα χ.φ.):

$$f_e = f_e(t; \mathbf{x}, \mathbf{v})$$

Για κατάλληλες χρονικές κλίμακες, η κατανομή γραφεται συναρτήσει των αδιαβατικών σταθερών:

$$f_e = f_e(t; \mu, K, L)$$

Για $\Delta t \gg t_{\text{Drift}}$ μπορούμε να γράψουμε τις μεταβολές της κατανομής βάσει μιας εξίσωσης διάχυσης:

$$\frac{\partial f_e(t; L)}{\partial t} = L^2 \frac{\partial}{\partial L} \left(\underbrace{\frac{D_{LL}}{L^2}}_{\substack{\text{Diffusion} \\ \text{In space and energy}}} \frac{\partial f_e}{\partial L} \right) + \underbrace{S(t; L)}_{\text{Source}} - \underbrace{\frac{f_e}{\tau_{\text{loss}}}}_{\text{Loss}}$$

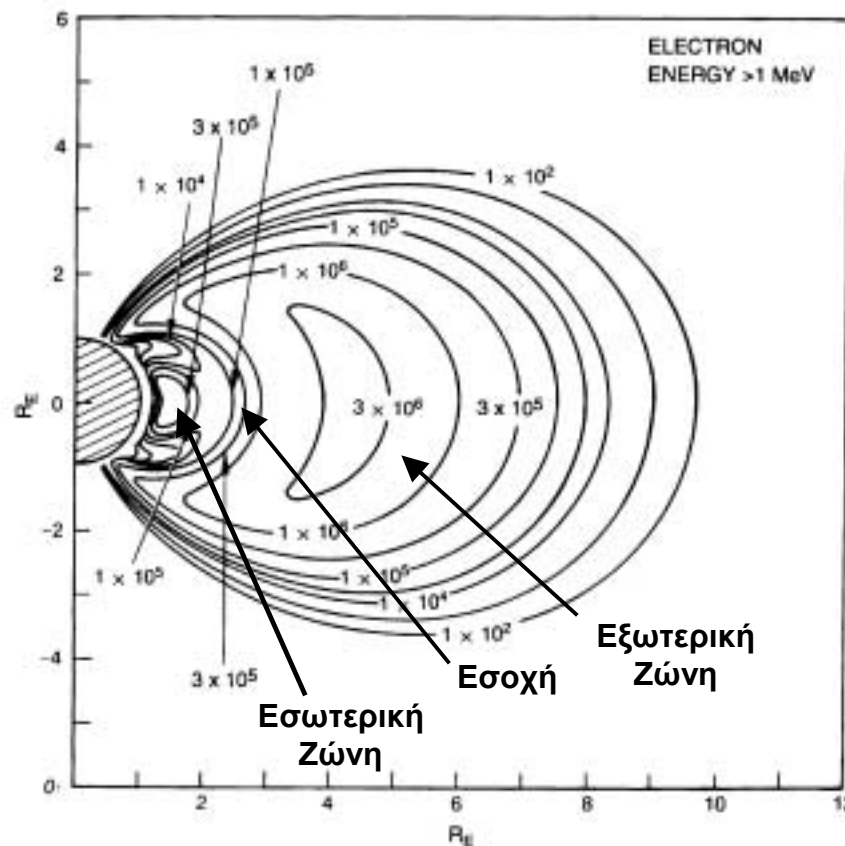
Χρονικές ή μη-γραμμικές αλλαγές στη δυναμική:
Μεταβαλλόμενα πεδία (κύματα) ή σύζευξη με τον ηλιακό άνεμο:
Μεταβολές στο συντελεστή D_{LL}

Κλασική Δομή των Ζωνών Ακτινοβολίας

Μακρόχρονες παρατηρήσεις μας έχουν δώσει την κλασική εικόνα των ζωνών:

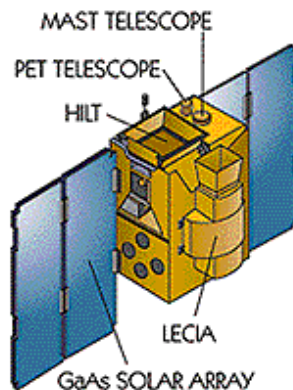
- Διαχωρισμός της εσωτερικής (p^+, e^-) και εξωτερικής (e^-) ζώνης από την εσοχή.
- Η εξωτερική ζώνη εισχωρεί στη μαγνητοουρά (φύλλο πλάσματος). Τα όρια τους είναι ασαφή.
- Η γεωσύγχρονη τροχιά απλά «βολεύει» για παρατηρησιακούς λόγους, χωρίς βαθύτερη φυσική σημασία.

This structure is based on strong averaging of observations by L shell.



Νέες Συνοπτικές Μετρήσεις

Solar, Anomalous, and Magnetospheric Particle Explorer (1992-)

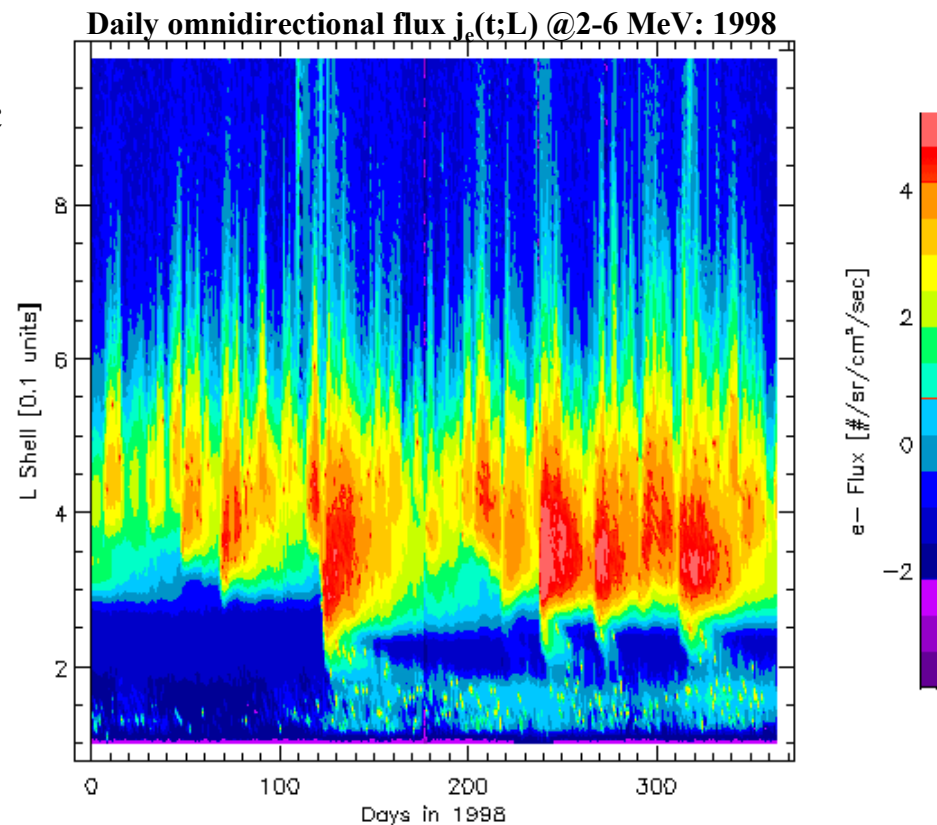


Τροχιά: πολική-κυκλική (Polar-Circular)

Υψος: 600 km (LEO)

Βασικό όργανο: Proton-Electron Telescope

Ενεργειακά κανάλια: 2-6 MeV



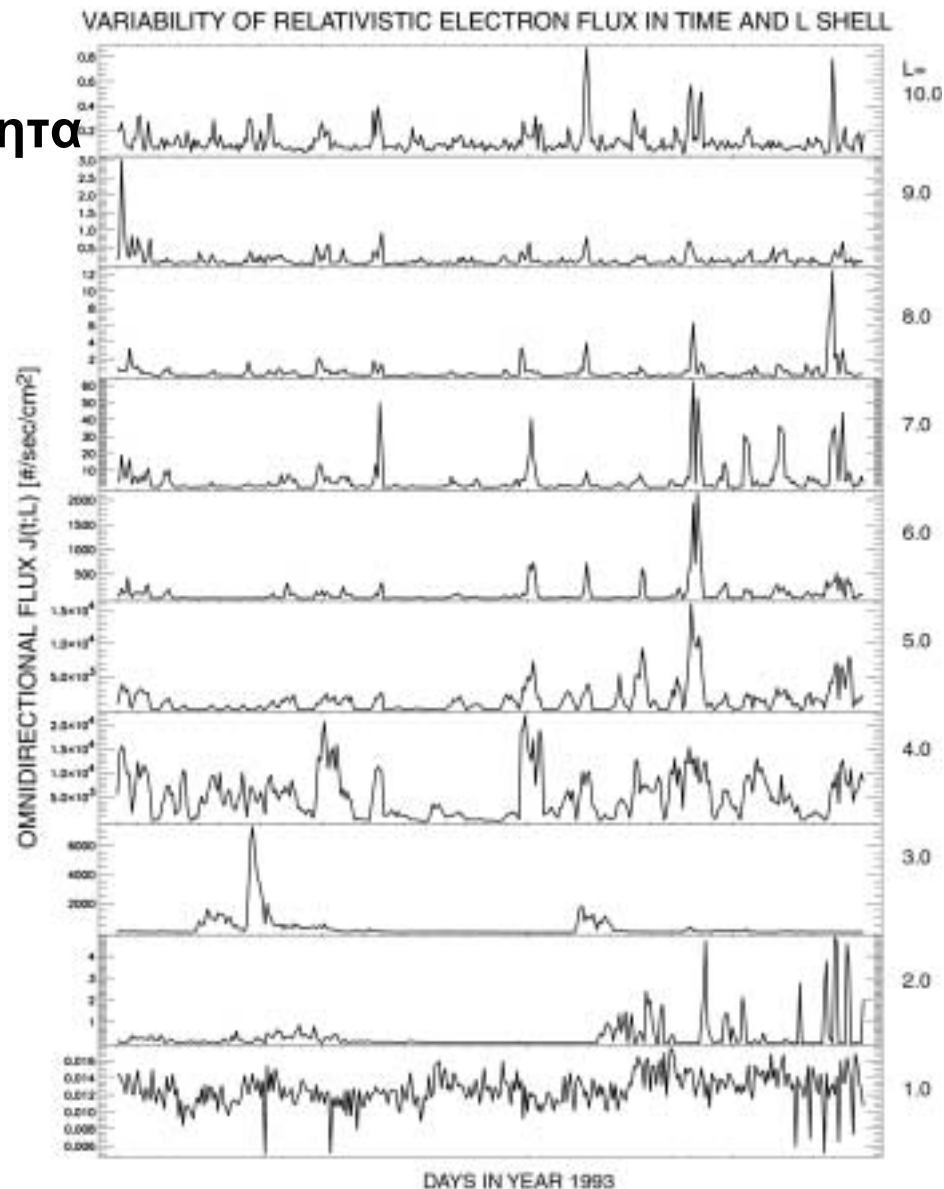
Δορυφόροι όπως οι SAMPEX, Polar, Akebono (Ιαπων.), δίνουν μακροχρόνιες συνοπτικές εικόνες της ροής ρελατιβιστικών ηλεκτρονίων. Έτσι μπορούμε να παρακολουθήσουμε τη χρονική και χωρική εξέλιξη της επιτάχυνσης.

Για τη Δομή των Ζωνών: Χωρική και Χρονική Πολυπλοκότητα Της Ηλεκτρονιακής Ροής

Το προφίλ της ροής χαρακτηρίζεται
απο ραγδαίες μεταβολές, τόσο χωρικές
όσο και χρονικές.

Το διπλανό παράδειγμα δείχνει
τη ροή σε ισαπέχοντα L
για ένα χρόνο, το 1993.
(SAMPEX/PET/2-6 MeV).

Συνοπτικές μετρήσεις:
→ Χρονοσειρές απο «εικονικούς
δορυφόρους» (Virtual Spacecraft)
σε σταθερά ύψη.



Δομή των Ζωνών: Νέα Αποτελέσματα από Μεθόδους Συμβολής

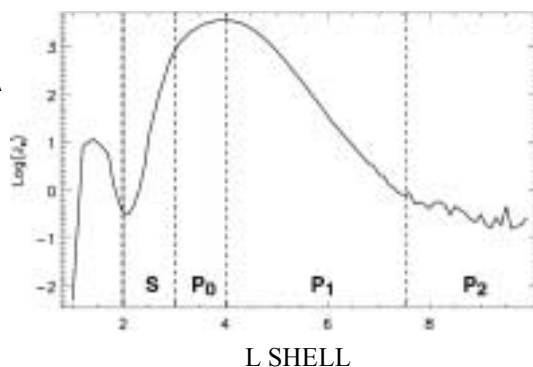
Μετράμε τη χωρική δομή
με την συνάρτηση ακτινικής συσχέτισης
(Two-point Radial Correlation Function):

$$C_{J_e}(L_1, L_2) = \frac{1}{\sigma_{j(L_1)} \sigma_{j(L_2)}} \int_0^{T_{tr}} J_e(t; L_1) J_e(t; L_2) dt$$

Περιοχές που ανακαλύφθηκαν με την $C_J(L_1, L_2)$

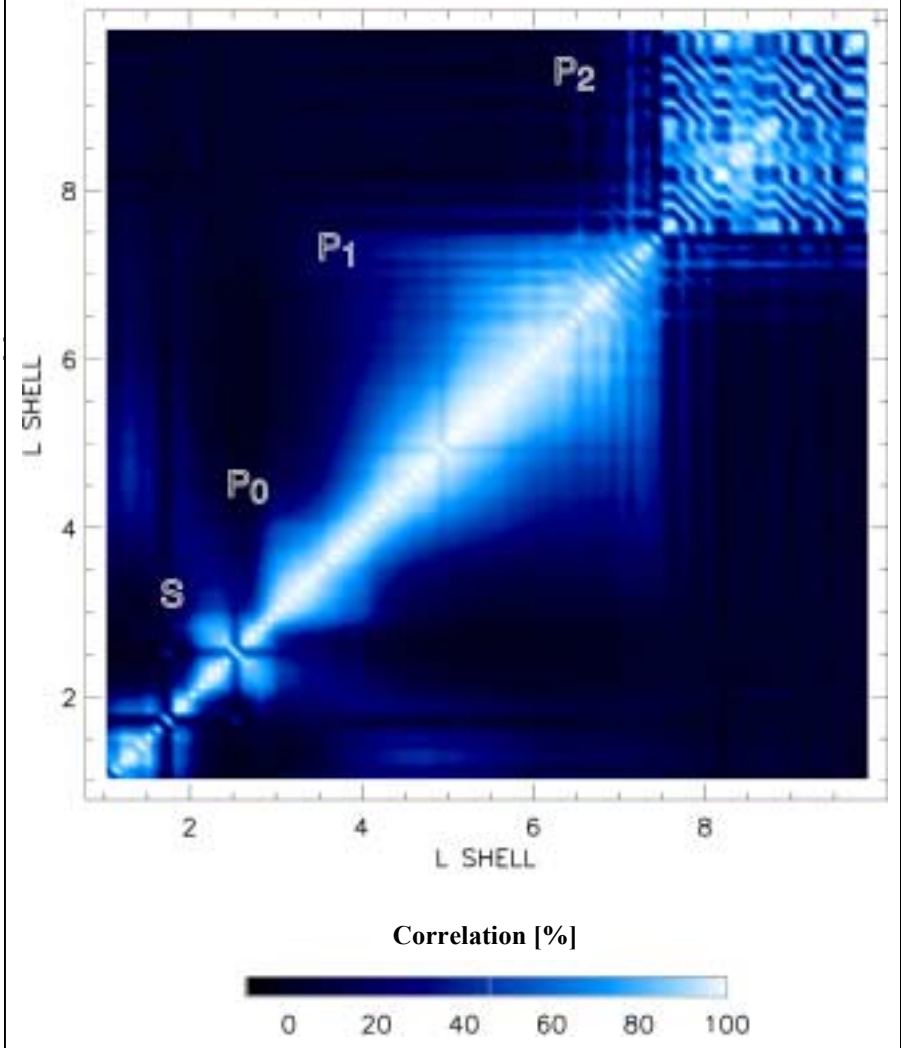
- P_1 : Κύρια εξωτερική ζώνη, συμπεριλαμβ. τη γεωσύγχρονη τροχιά, $L=4.1-7.5$
- P_0 : Κάτω σύνορο της εξωτερικής ζώνης, $L=3.0-4.1$
- P_2 : Ημιπαγιδευμένα e^- εκτός της εξωτερικής ζώνης, $L>7.5$
- S: Εσοχή (Slot region), $L=2.1-3.0$

AVERAGE FLUX DISTRIBUTION



ΝΕΑ ΔΟΜΗ ΑΠΟ ΜΕΘΟΔΟ ΣΥΜΒΟΛΗΣ:

SAMPEX 2-6 MeV Flux: Radial Correlation Function



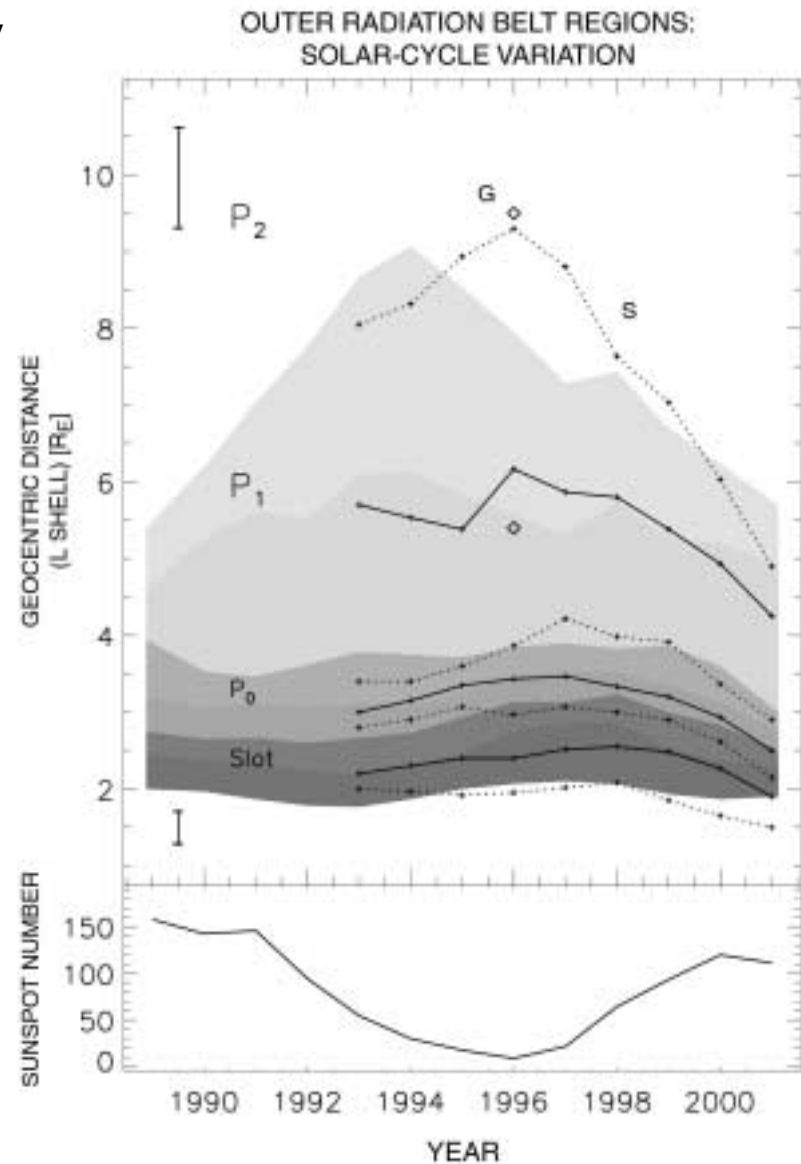
[Vassiliadis et al., GRL 2003]

Μεταβολές του Εύρους των Ζωνών Με τον Ηλιακό Κύκλο

Οι δορυφόροι Akebono και SAMPEX παρακολουθούν τη δραστηριότητα των ζωνών για πάνω από 1 ηλιακό κύκλο.

Το διπλανό σχήμα δείχνει τη μεταβολή των ορίων των περιοχών P_i και της εσοχής από το 1989.

Shaded areas: *Akebono/RDM*
Dashed, dotted lines: *SAMPEX/PET*
Diamonds: *GPS 33/BD-II* (1996 only)



[Vassiliadis, GRL, 2003]

Μεταβολές της Ηλεκτρονιακής Κατανομής: Επιτάχυνση και Μεταφορά

Η εξίσωση διάχυσης περιγράφει τη μεταφορά (Transport) που συμπεριλαμβάνει την επιτάχυνση:

$$\frac{\partial f_e(t; \mu, K, L)}{\partial t} = L^2 \frac{\partial}{\partial L} \left(\frac{D_{LL}}{L^2} \frac{\partial f_e}{\partial L} \right) + S(t; L) - \frac{f_e}{\tau_{loss}}$$

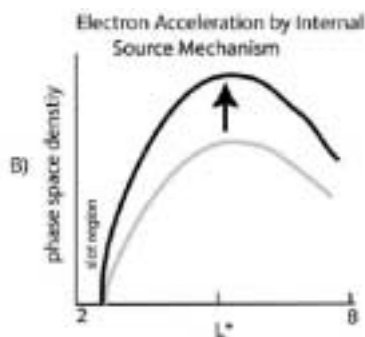
Σε πρώτη προσέγγιση αγνοούμε το χωρικό μέρος της Μεταφοράς και συγκεντρωνομαστε στις αυξομειώσεις της ροής (Source term)

$$\frac{\partial j_e(t; \mu, K, L)}{\partial t} \approx S(t; L) - \frac{j_e}{\tau_{loss}}$$

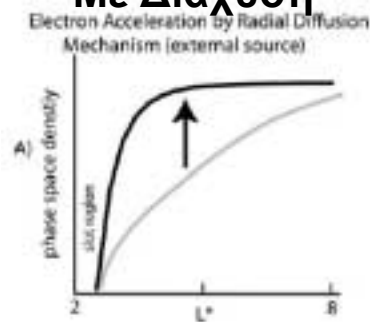
Χρησιμοποιούμε αυτή τη προσέγγιση για να διαχωρίσουμε Το ρόλο εξωτερικών αιτίων στη δημιουργία πηγής ηλεκτρονίων Και της επιτάχυνσης τους.

Δύο Διαφορετικές Ερμηνείες: Τοπική Επιτάχυνση ή Διάχυση;

Τοπική Επιτάχυνση



Εξωτερική Επιτάχυνση Με Διάχυση



[Green and Kivelson, 2004]

Μηχανισμοί Επιτάχυνσης: Μικροσκοπική Θεώρηση

Επιτάχυνση και μεταφορά:
Μεταβολές στη πυκνότητα χώρου φάσης

α. Σκεδαση από σωματίδια → Όχι

β. Σκεδαση από κύματα → Ναι
Συχνότητες: 1-10 mHz (VLF, ULF)

- Γραμμικά κύματα
- Μη-γραμμικά κύματα (κρουστικά)

γ. Συλλογικά φαινόμενα

Παραδειγμα: συντονισμός ολίσθησης (Drift Resonance)

Ημιγραμμική θεωρία (Quasilinear Theory)

Μη-γραμμική θεωρία

Κριτήριο Chirikov, επικαλυπτόμενοι συντονισμοί

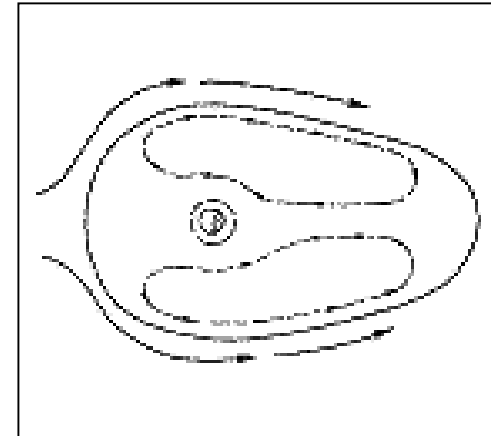
Μηχανισμοί Επιτάχυνσης: Μακροσκοπική Θεώρηση

Παραγωγή κυμάτων:

1. Σύζευξη ηλιακού ανέμου-μαγνητοσφαιρας:
 - Υδροδυναμική σύζευξη (V_{sw}): ~days
 - Μαγνητική επανασύνδεση (IMF B_{south}) ~10s of min
 - Διάθλαση διαπλανητικών κυμάτων ή
διείσδυση διαπλανητικών σωματιδίων
(σπανιότερα φαινόμενα)
2. Εσωτερικές μαγνητοσφαιρικές αστάθειες
(υποκαταιγίδες)

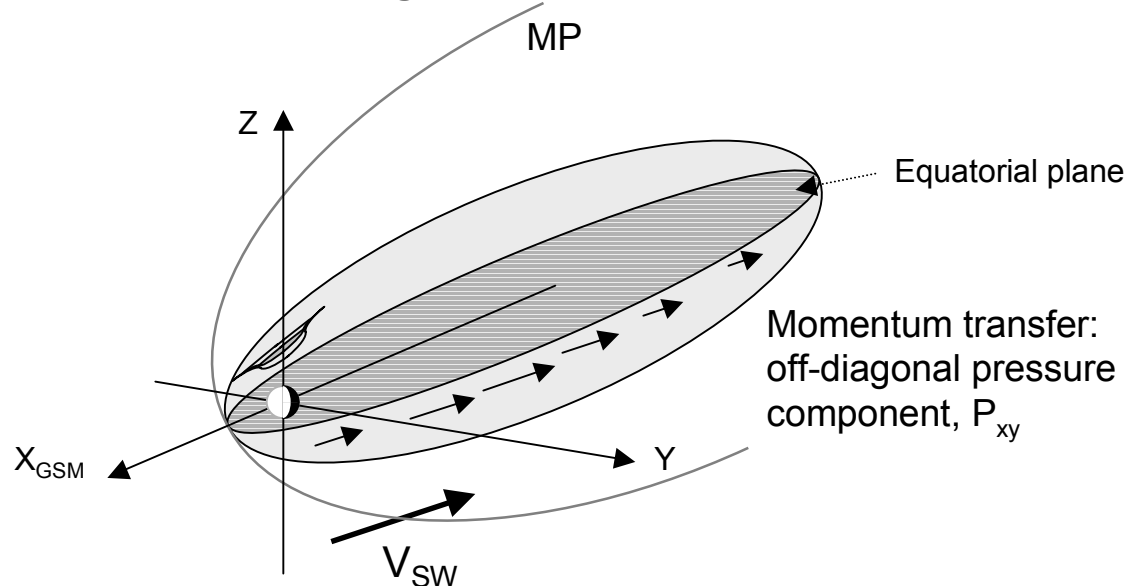
Φυσική της Υδροδυναμικής Σύζευξης

- * Viscous interaction [Axford and Hines, 1961]
- * Excitation of instabilities such as Kelvin-Helmholtz and Rayleigh-Taylor [Farrugia et al., 1999]
- * Generation of low-frequency waves [Hudson et al. 1999]
- * Magnetic reconnection in KH vortices [Nykyri and Otto, 2001]



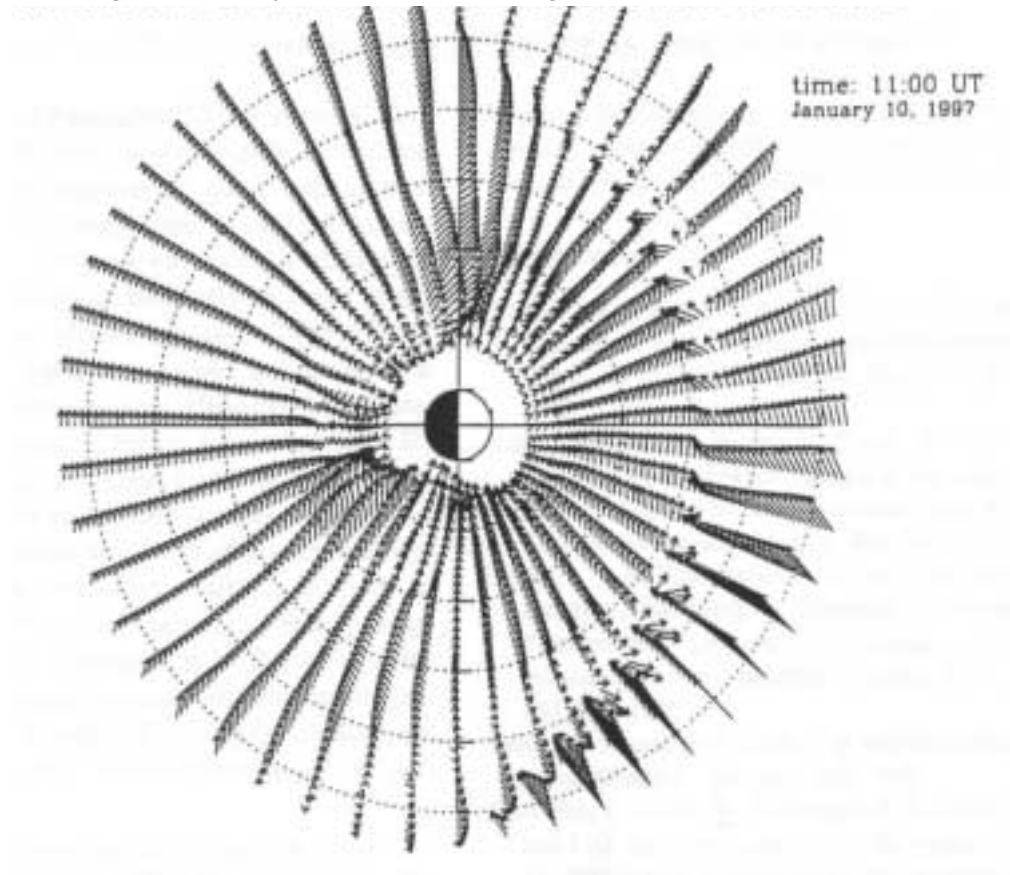
[Axford and Hines, 1961]

SW velocity excites fluid instabilities (e.g. Kelvin-Helmholtz) at the magnetospheric flanks



Particle Energization: ULF Waves as Mediators

Development of ULF waves (E_r -component)
in an MHD simulation driven by SW IMF and plasma data
during January 10, 1997 magnetic cloud

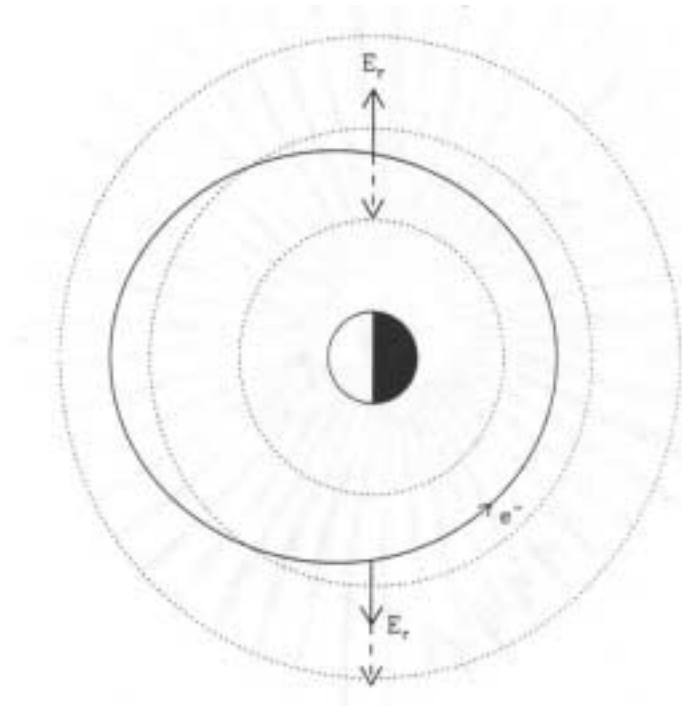


Περίοδοι κυμάτων ULF:
1-10 mHz

Διάρκεια διαστήματος διέγερσης
των κυμάτων:
1 day
[Rostoker et al., 1998]

[Hudson et al., 1999]

Συντονισμός και ακτινική επιτάχυνση ηλεκτρονίων
κατά την αλληλεπίδρασή τους με κύματα ULF.



[Hudson et al., 1999]

Σύζευξη Ροής Ηλεκτρονίων με την Ταχύτητα του Ηλιακού Ανέμου, V_{sw}

Approximate the effective solar wind-Magnetosphere interaction using
Finite Impulse Response (FIR) filters:

$$j_e(t; L) = \int_0^T H(\tau; L) V_{sw}(t - \tau) d\tau + j_e(t - T; L)$$

where:

$H(t)$: impulse response function

T : memory time T .

* The function $H(\tau; L)$ couples to the preceding solar wind velocity back to time $t - T$. $H(t; L)$ provides the average flux dynamics during an electron storm at a linear approximation.

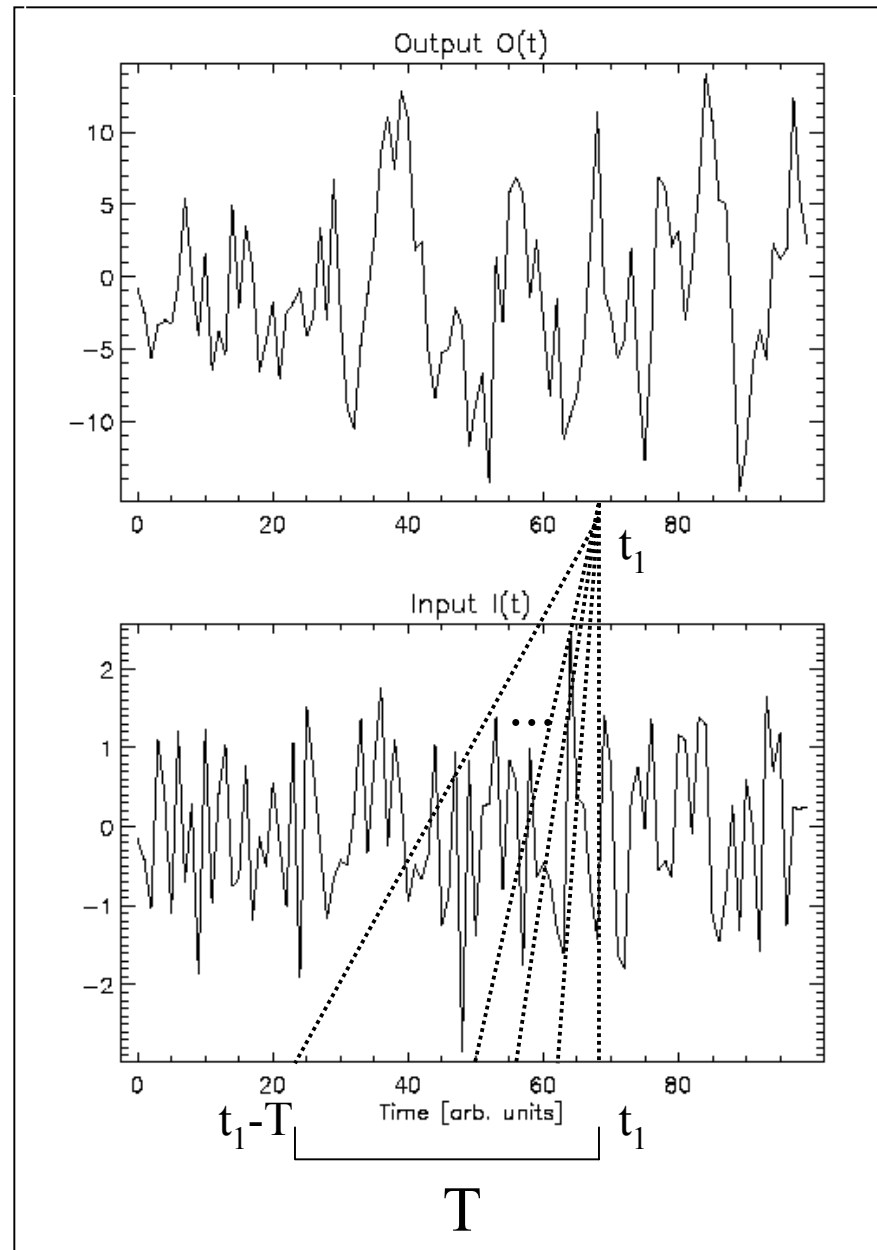
* Straightforward extension to nonlinear approximations.

* V_{sw} measurements: WIND, ACE, OMNI

* Flux measurements: SAMPEX/PET, Akebono/RDM

* Typical time resolutions: 1 day; 90 min.

Σχηματικά:



Απόκριση της Ροής στην Γεωσύγχρονη Τροχιά (GEO)

Μοντέλο Finite-Impulse-Response:

Η ροή γεωσύγχρονων ηλεκτρονίων
βασίζεται στις πρόσφατες
μεταβολές της ταχύτητας του ηλιακού

Ανέμου, V_{SW} :

$$j_e(t; L; E) = \int_0^T H(\tau; L; E) V_{SW}(t - \tau) d\tau$$

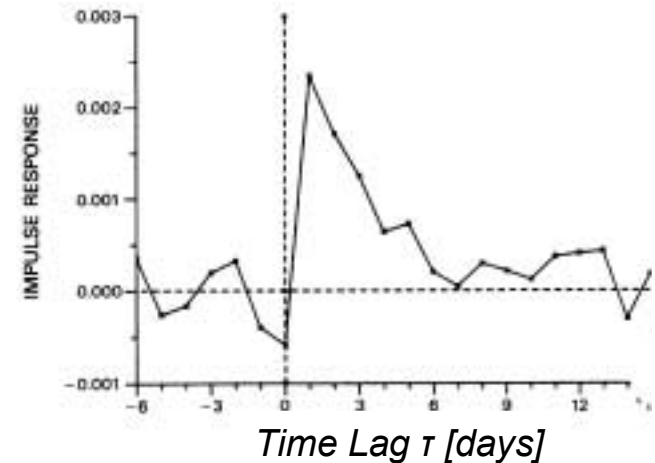
- Η συνάρτηση απόκρισης (Response function) $H(\tau; L; E)$ μετράει τη διάρκεια και ένταση της απόκρισης.

- Επιπλέον παραμετροποιείται με την ενέργεια των e- και τη γεωκεντρική τους απόσταση.

Ετσι κάθε κορυφή (Peak) της $H(\tau; L; E)$ προσεγγίζει την πολύπλοκη αυτή αλληλεπίδραση με τεσσέρις παραμέτρους.

- Αφού υπολογίσουμε την $H(\tau; L; E)$, μπορούμε να τη χρησιμοποιήσουμε σαν ένα γραμμικό μοντέλο για τις μεταβολές της ροής. Ένα τέτοιο μοντέλο χρησιμοποιείται σήμερα στην Υπηρεσία Διαστημικού Καιρού, NOAA/SEC.

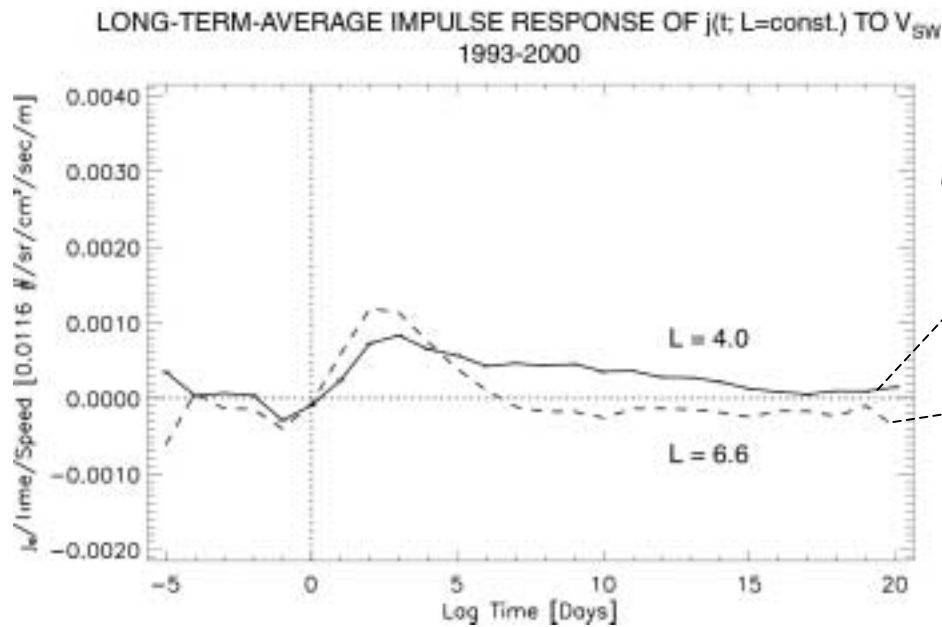
$H(\tau; L=6.6; E>1\text{MeV})$



[Baker et al., 1990]

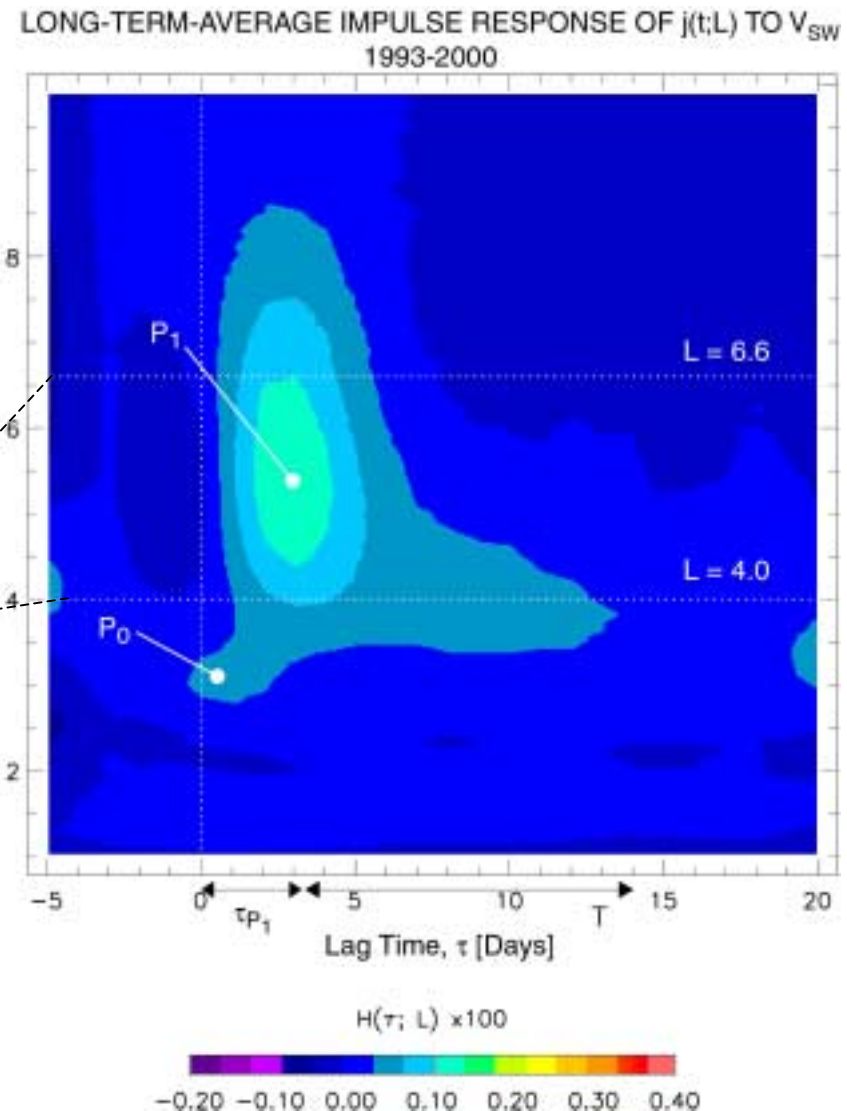
Σύζευξη στην ταχύτητα V_{sw}

A. Απόκριση για ροές ηλεκτρονίων από το SAMPREX/PET σε δυο διαφορετικές γεωκεντρικές αποστάσεις:



- Παρόμοια αποτελέσματα λαμβάνονται και με τον Akebono για διαφορετική τροχιά και ενέργειες (όργανο RDM: $E > 2.5$ MeV).

B. Γενίκευση απόκρισης για όλες τις γεωκεντρικές αποστάσεις, $1 < L < 10$



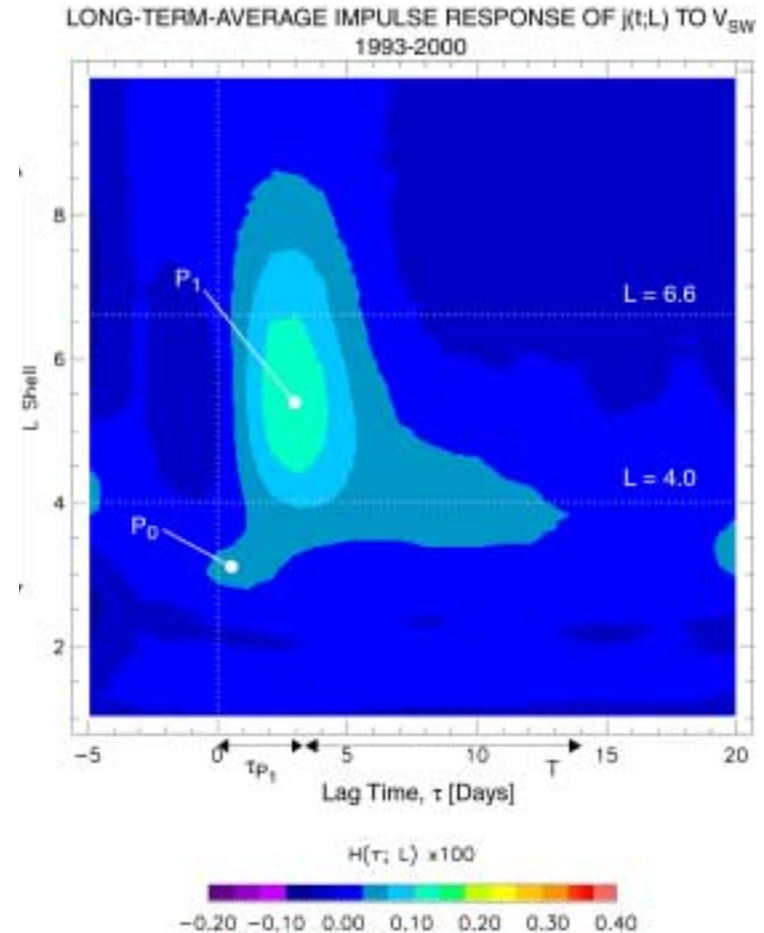
Response of the Flux at all L shells

We generalize the response function by allowing L to vary continuously in L=1-10.

$$j_e(t; L; E) = \int_0^T H(\tau; L; E) V_{SW}(t - \tau) d\tau$$

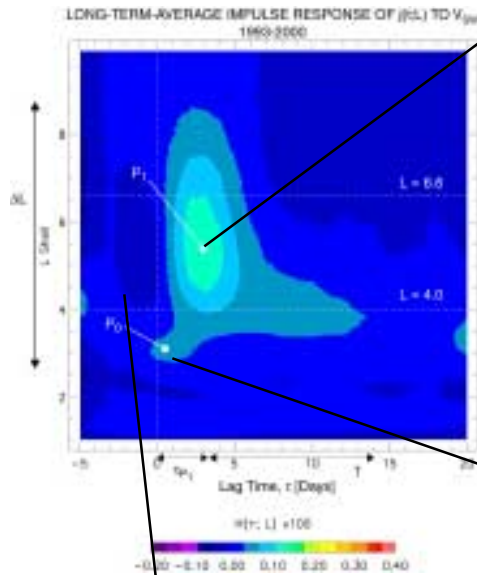
E=2-6 MeV (SAMPEX/PET); or E>2 MeV (Akebono/RDM)

- Response at GEO is actually characteristic of broader region, L=4-7.5
- Onset in P_1 is simultaneous: *magnetospheric large-scale coherence*
- Response duration decreases with L
- Second response peak in the outer belt, at L=3.1-4.0 (region P_0) indicating different mode of acceleration



[Vassiliadis et al., JGR 2002]

Response Peaks Correspond to Two Types of Electron Variability During Storms



Region P_1 :

- Slow (2-3-day) response to hi-speed streams
- Characteristic of GEO orbit
- Prob. involves ULF waves
- Representative study: Paulikas and Blake, 1979.

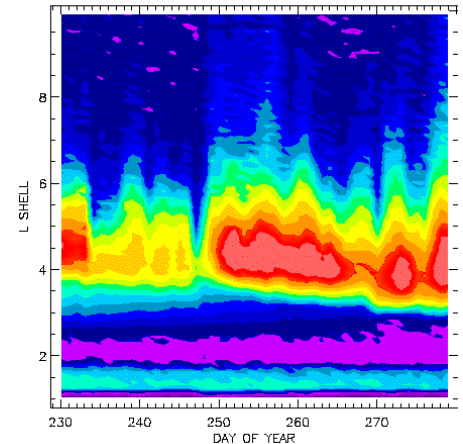
Region P_0 :

- Rapid (<1-day) response to magnetic clouds/ICMEs.
- Characterizes $L < 4$.
- Representative events: Baker et al., GRL 1998; Reeves et al., GRL 1998

- Minimum V_1 : Similar to Dst effect.
- Occurs at $L=5$, then spreads radially in both directions.
- Can serve as a precursor, 2-3 days in advance of radiation belt activity.

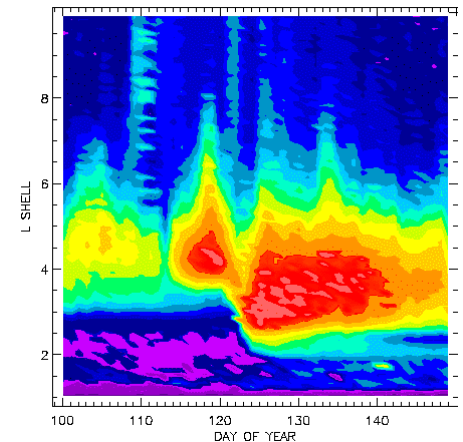
September 5, 1995
(Post Solar-Min)

STORM OF SEPTEMBER 5, 1995: $\text{Log}(J_e)$



May 4, 1998

STORM OF MAY 4, 1998: $\text{Log}(J_e)$



Συνεισφορά της Ταχύτητας V_{SW} Στους Μηχανισμούς Επιτάχυνσης Ηλεκτρονίων

Πως μπορούμε να μετρήσουμε την συνεισφορά μίας μεταβλητής όπως η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου, V_{SW} ; Ένας τρόπος είναι να μετρήσουμε την πρόγνωση της ροής με μοντέλα που χρησιμοποιούν την V_{SW} .

1. Μοντέλο βασισμένο στη V_{SW}

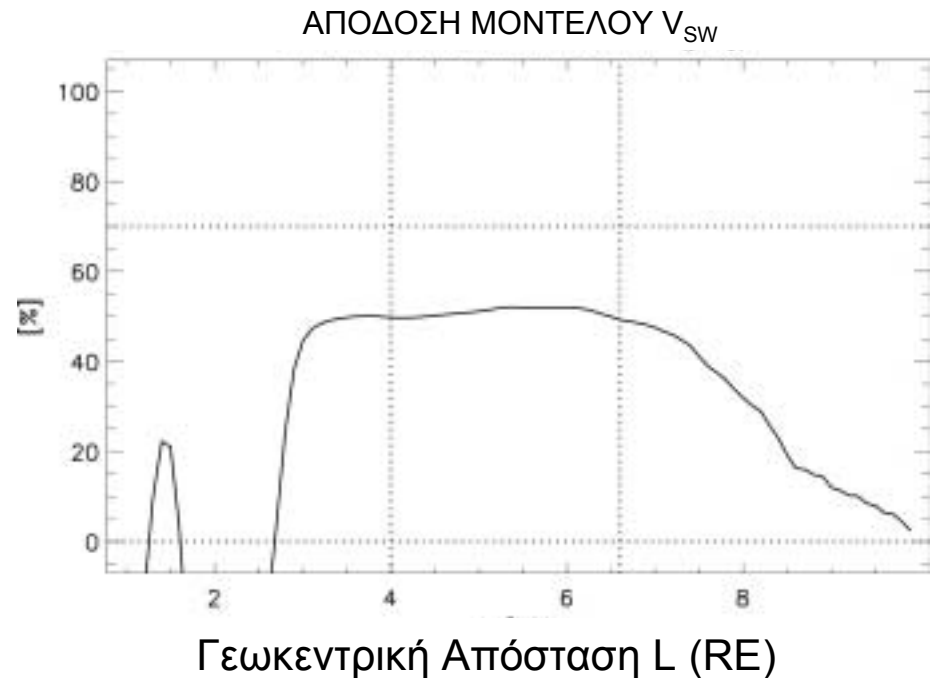
$$\hat{j}_e(t; L; E) = \int_0^T H(\tau; L; E) V_{SW}(t - \tau) d\tau$$

Step 2: Σύγκριση του μοντέλου με μετρήσεις. Συσχέτιση:

$$C_{\hat{j}_e, j_e}(L) = \frac{1}{T_r \sigma_{\hat{j}_e} \sigma_{j_e}} \int_0^{T_r} \hat{j}_e(t) j_e(t) dt$$

Η συσχέτιση ερμηνεύεται ως η **εκτιμώμενη** (Estimated) συνεισφορά της V_{SW} .

Καθώς χρησιμοποιούμε καλύτερα μοντέλα, Η εκτιμώμενη συνεισφορά τείνει προς την **πραγματική** (True) συνεισφορά της V_{SW} .

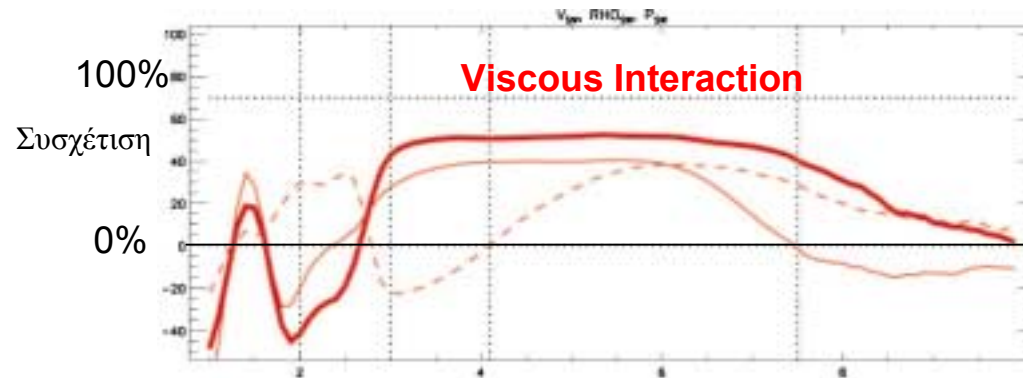


Συγκριτική Μελέτη Μεταβλητών για Μηχανισμούς Επιτάχυνσης

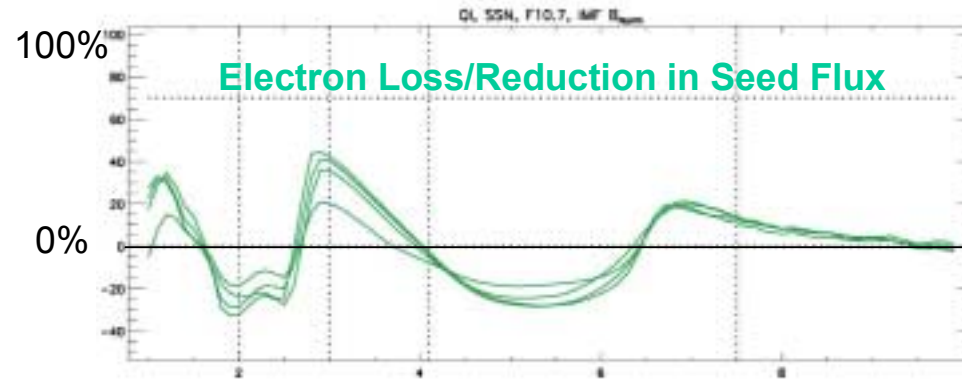
Όπως με τη ταχύτητα, υπολογίζουμε τη συνεισφορά των διαφόρων μεταβλητών που χρησιμοποιούνται σε μοντέλα ζωνών ακτινοβολίας.

- Η συνεισφορά κάθε μεταβλητής είναι συνάρτηση της γεωκεντρικής απόστασης και συγκεκριμένα των περιοχών P_i . Άρα κάθε μεταβλητή επηρεάζει μια συγκεκριμένη περιοχή των ζωνών.

- Τα προφίλ των μεταβλητών χωρίζονται σε 4 κατηγορίες που αντιστοιχούν σε 4 βασικές φυσικές διαδικασίες. Άρα ένα μοντέλο επιτάχυνσης χρειάζεται τουλάχιστον 4 διαφορετικές εξωτερικές μεταβλητές.



- V_{SW}
- P_{SW}
- ρ_{SW}

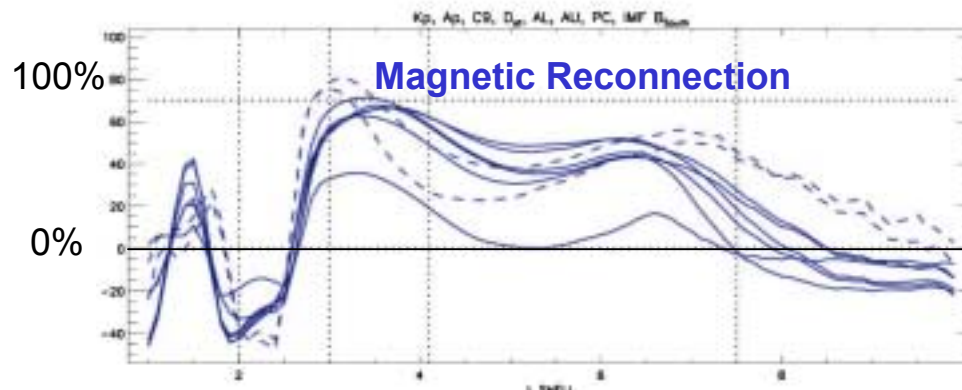


Low seed e-

- IMF B_{north}
- IEF $V_{SW} B_{North}$

Electron loss

- F10.7 Flux
- Sunspot #
- QI



- IMF B_{south}
- IEF $V_{SW} B_{South}$
- $K_p, A_p, D_{st}, C9$
- AL, AU, PC

INNER BELT SLOT P_0 P_1 P_2 OUTER BELT

Γεωκεντρική Απόσταση L

[Vassiliadis et al., JGR 2004]

Πέρα από την Επιτάχυνση: Μεταφορά των Ηλεκτρονίων

Μια κλασική μέθοδος για μοντέλα μεταφοράς (Transport Models) είναι η εξίσωση διάχυσης με κατάλληλες οριακές συνθήκες και πηγές/απώλειες.

Για την κατανομή ηλεκτρονίων έχουμε (απουσία πηγών, $S(t)=0$):

$$\frac{\partial f_e(t; \mu; K; L)}{\partial t} = L^2 \frac{\partial}{\partial L} \left(\frac{D_{LL}}{L^2} \frac{\partial f_e}{\partial L} \right) - \frac{f_e}{\tau_{loss}}$$

Example of Phase-Space-Density modeling:

Μετρήσεις
Polar/HIST

Μοντέλο διάχυσης
(Πηγές=0)

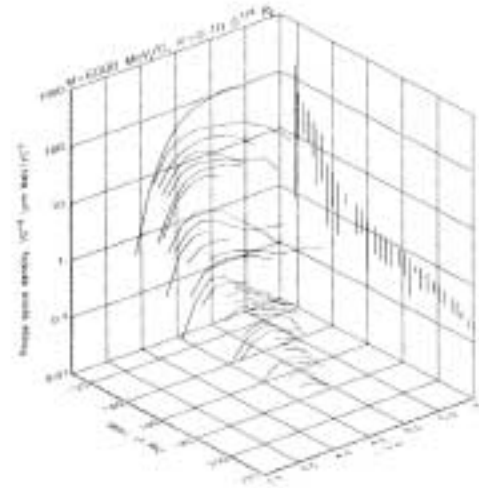


Figure 2. Measured phase space densities versus L shell for selected orbits between days 118 and 230. The curves are also projected on the f - t plane at $L = 5$.

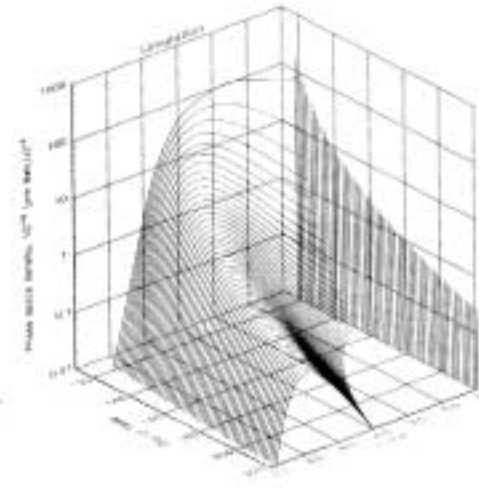


Figure 4. Solution of the model diffusion equation giving the best fit to the data in Figure 2 and shown in the same format at two-day intervals.

[Selesnick et al., 1997]

Γενικευμένο Μοντέλο Μεταφοράς

Για τη μεταφορά χρησιμοποιούμε
ένα γενικευμένο μοντέλο της μορφής:

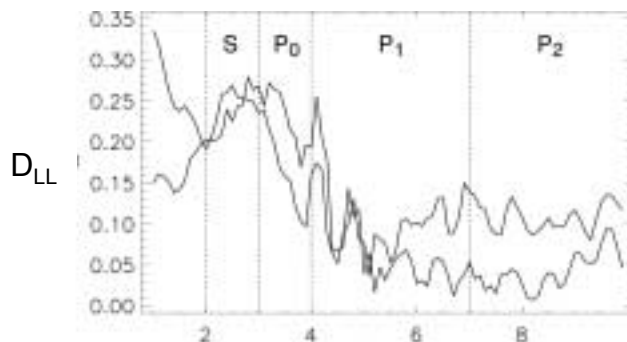
$$f_e(t+1; L^*) = \sum_{i=-N}^N a_i f_e(t; L^* + i\Delta L^*)$$

Απο το μοντέλο υπολογίζουμε:

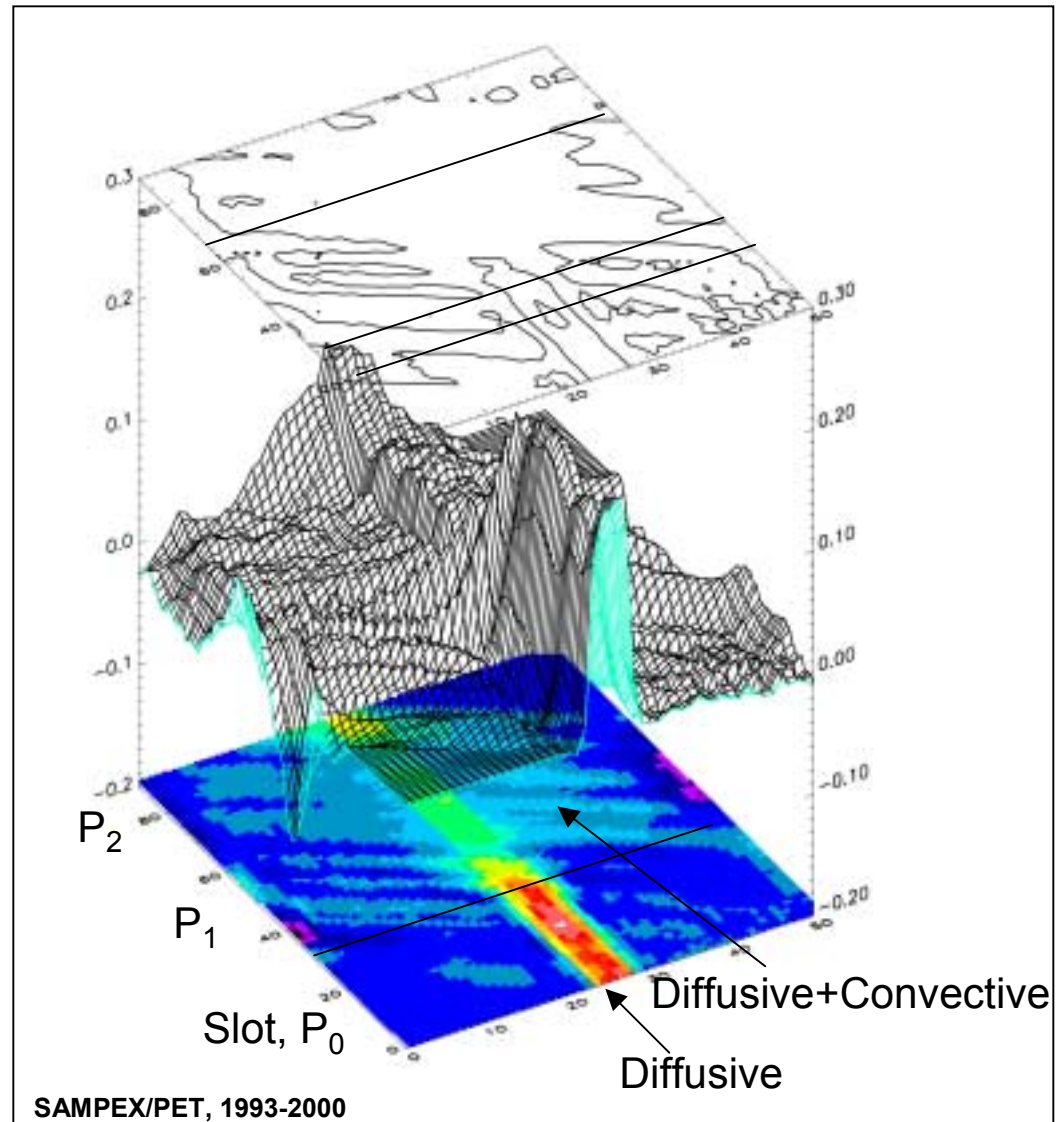
1. Την χωρική κλίμακα συσχέτισης
(Correlation length scale)
συναρτήσει της γεωκεντρικής
απόστασης L:

0.3 RE για τις περιοχές P₀, S
2.5 RE για P₁, P₂

2. Το συντελεστή διάχυσης D_{LL}.



Γεωκεντρική Απόσταση L



[Vassiliadis et al., ESPRIT 2004]

Πρόσφατες Εξελίξεις

Η δυναμική της εξίσωσης διάχυσης, αφού οι οριακές συνθήκες και πηγές είναι δεδομένες, εξαρτάται από τις μεταβολές τού συντελεστή διάχυσης, D_{LL} :

$$\frac{\partial f_e(t; \mu; K; L)}{\partial t} = L^2 \frac{\partial}{\partial L} \left(\frac{D_{LL}}{L^2} \frac{\partial f_e}{\partial L} \right) - \frac{f_e}{\tau_{loss}}$$

Ο συντελεστής μεταβάλλεται σημαντικά παρουσία κυμάτων ULF:

$$D_{LL} \sim L^6 \cdot P^{(ULF)}, \quad \text{Electric fluctuations}$$

$$D_{LL} \sim L^{10} \cdot P^{(ULF)}, \quad \text{Magnetic fluctuations}$$

Αν μετρήσουμε την ισχύ των κυμάτων, μπορούμε να συγκρίνουμε με τις αναμενόμενες μεταβολές του D_{LL} . Όμως οι σημερινοί δορυφόροι στην εσωτερική μαγνητόσφαιρα δε μετρούν την κυματική ισχύ λόγω τροχιών (εκτός της γεωσύγχρονης) ή οργάνων.

Σε πρόσφατη έρευνα μετρούμε την ισχύ των κυμάτων με τηλεπισκόπηση απο επίγειες μαγνητομετρικές συστοιχίες.

Μελλοντικές Εξελίξεις: Προγράμματα της NASA Σχετικά με τις Ζώνες

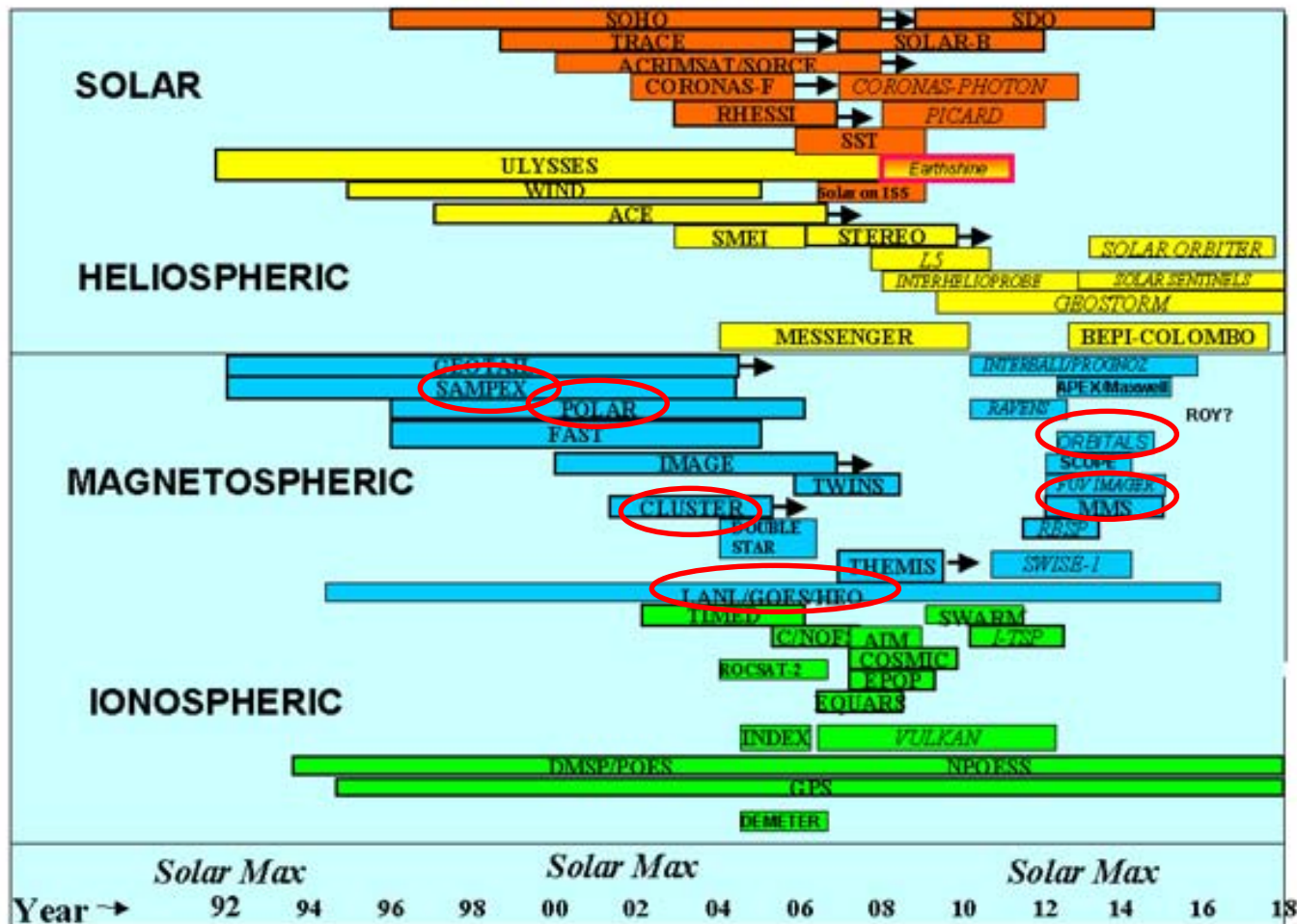
International “Living with A Star” Program



Νεο διαστημικό πρόγραμμα συνεργασίας με την Ευρωπαϊκή, Ιαπωνική, και άλλες διαστημικές οργανώσεις.

Μελλοντικές Εξελίξεις: Αποστολές Σχετικές με τις Ζώνες

ILWS-Related Missions



Νέες αποστολές:
Orbitals (CSA), Radiation Belt Space Probes

Σύνοψη

- Οι ζώνες ακτινοβολίας χαρακτηρίζονται απο ταχύτατες και άτακτες χωροχρονικές μεταβολές της ροής ενεργειακών ηλεκτρονίων. Ομως χαρακτηριστική είναι και η χωρική συνοχή των μεταβολών αυτών, η οποία αποτελεί τη βάση των μακροσκοπικών μοντέλων που συζητήσαμε.
- Στη δεκαετία του 90 οι συνοπτικές μεθοδοι μέτρησης απο δορυφόρους χαμηλής τροχιάς (SAMPEX, Akebono) και μεσης τροχιάς (Polar, CRRES) προσέφεραν μια πλούσια συλλογή δεδομένων για παρατηρήσεις μεμονωμένων μαγνητικών καταιγίδων, αλλά και τη συστηματική ανάπτυξη μοντέλων.
- Όσον αφορά τη φαινομενολογία της επιτάχυνσης ηλεκτρονίων, σημαντικός είναι ο ρόλος της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου και των υδροδυναμικών ασταθειών που προκαλεί. Η διαφορετική απόκριση σε υδροδυναμικές και μαγνητικές μεταβολές στον ηλιακό άνεμο δείχνει οτι η εξωτερική ζώνη διαιρείται σε 3 ακτινικές περιοχές που παρουσιάζουν εντελώς διαφορετική δραστηριότητα ανάλογα με την κατάσταση του ανέμου και τους σχηματισμούς που τον χαρακτηρίζουν (ρευματα, CMEs, κρουστικά κύματα, κλπ).
- Το θεωρητικό πρότυπο για τα φαινόμενα μεταφοράς παραμένει η τροποποιημένη εξίσωση διάχυσης. Ο υπολογισμός των συντελεστών διάχυσης συναρτήσει της μαγνητοσφαιρικής δραστηριότητας βελτιώνεται με νέες πειραματικές μεθόδους όπως η τηλεπισκόπηση της ισχύος ULF απο επίγειες μαγνητομετρικές συστοιχίες.