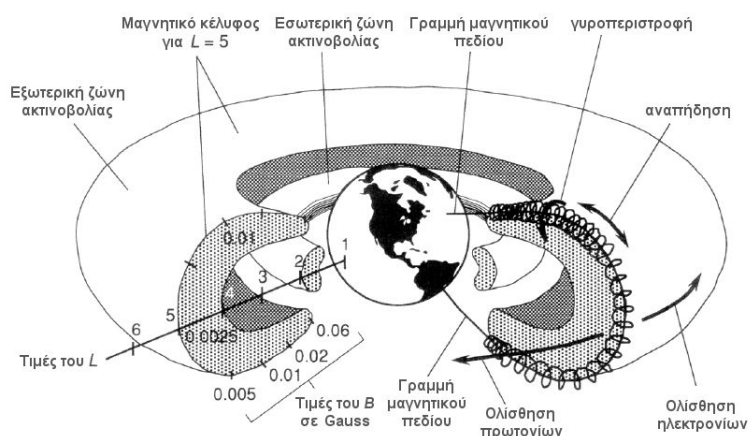




Εργαστήριο Κατεύθυνσης Αστροφυσικής

Άσκηση 1

Ζώνες Van Allen: δυναμικές μεταβολές ενεργητικών ηλεκτρονίων



Επιμέλεια άσκησης:

Ι.Α. Δαγκλής, Χ. Κατσαβριάς

Αθήνα 2022

Περιεχόμενα

1	Σκοπός της άσκησης	5
2	Βασικά στοιχεία θεωρίας	7
1.	Διάστημα, γεωδιάστημα και γεωμαγνητικές διαταραχές	7
2.	Γεωμαγνητικές καταιγίδες και μαγνητοσφαιρικές υποκαταιγίδες . . .	7
3.	Ζώνες ακτινοβολίας Van Allen	10
4.	Μεταβολές στο ενεργειακό φάσμα των ηλεκτρονίων	12
4.1	Πηγές και επιτάχυνση	12
4.2	Απώλειες	13
3	Όργανα και τεχνικές μέτρησης ηλεκτρονίων	15
1.	Μετρητική διάταξη Magnetic Electron Ion Spectrometer (MagEIS) της αποστολής Van Allen Probes	15
4	Βήματα της Άσκησης	18
1.	Ανίχνευση σωματιδίων	18
2.	Αναγνώριση των γεωμαγνητικών διαταραχών	18

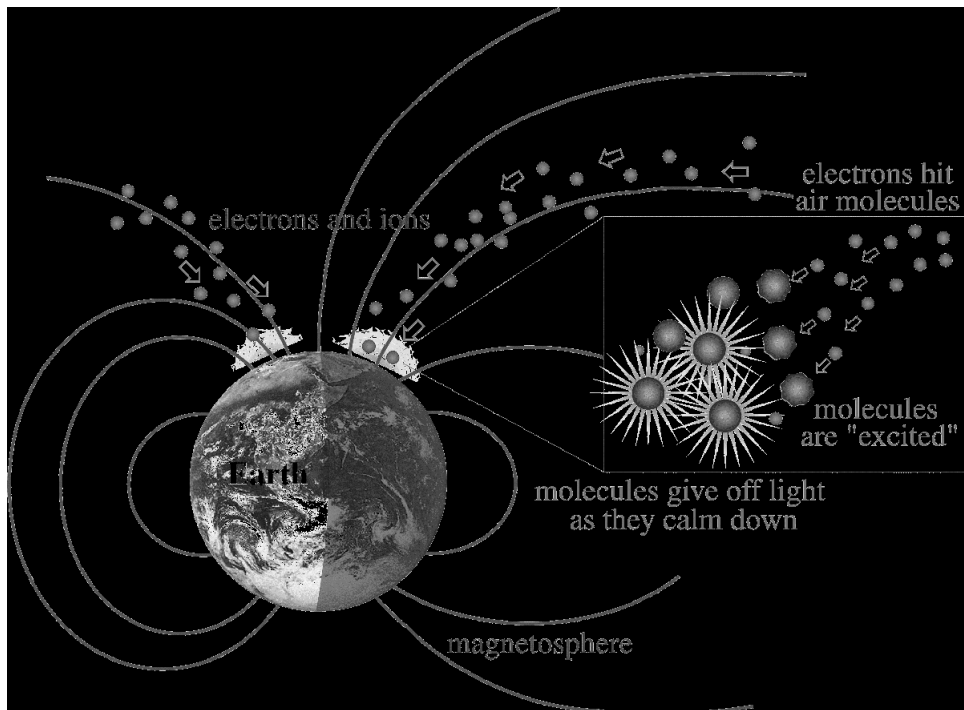
3.	Μελέτη των δυναμικών μεταβολών του ενεργειακού φάσματος των ηλεκτρονίων στην εξώτερη ζώνη Van Allen	20
5	Παράρτημα	22
1.	Δομή μαγνητόσφαιρας	22
2.	Συστήματα ρευμάτων μέσα στη μαγνητόσφαιρα	24
3.	Δακτυλιοειδές ρεύμα	25
4.	Ζώνες ακτινοβολίας (Van Allen)	25
5.	Μαγνητική επανασύνδεση	26
6.	Περιγραφή της κίνησης σωματιδίου μέσα στη μαγνητόσφαιρα	28
7.	Ορισμός αδιαβατικών αναλλοίωτων	28
8.	Silicon Solid–State Detectors	34
9.	Φασματογράφοι μάζας (mass spectrometers)	35

Κεφάλαιο 1

Σκοπός της άσκησης

Ο σκοπός της άσκησης είναι:

1. Η εισαγωγή σε επιλεγμένα στοιχεία διαστημικής φυσικής και τεχνολογίας.
2. Η γνωριμία με τις ζώνες ακτινοβολίας Van Allen και με τις δυναμικές μεταβολές τους.
3. Η γνωριμία με τις μεταβολές του γεωμαγνητικού πεδίου και με τη σημασία τους για τις ζώνες Van Allen.
4. Η επεξεργασία διαστημικών μετρήσεων με το πακέτο λογισμικού MATLAB.



Σχήμα 1.1: Σχηματική αναπαράσταση του μηχανισμού δημιουργίας του σέλαος.

Κεφάλαιο 2

Βασικά στοιχεία θεωρίας

1. Διάστημα, γεωδιάστημα και γεωμαγνητικές διαταραχές

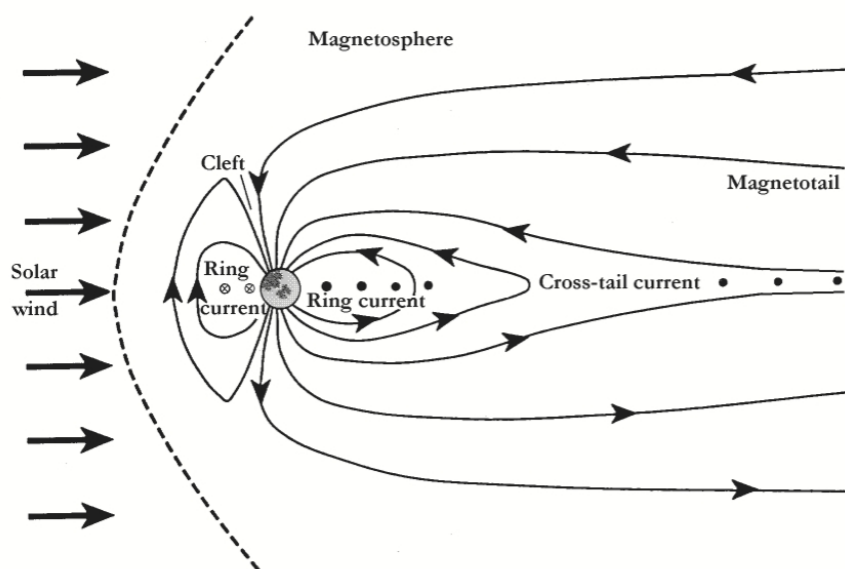
Το διάστημα ορίζεται ως ο χώρος εκείνος του σύμπαντος για τον οποίο διαθέτουμε επιτόπιες (in-situ) μετρήσεις από ειδικά όργανα που έχουν τοποθετηθεί σε διαστημικά σκάφη.

Το γεωδιάστημα είναι ο χώρος του διαστήματος που καθορίζεται από την επικράτεια του μαγνητικού πεδίου της Γης και περιλαμβάνει την ανώτερη ατμόσφαιρα, την ιονόσφαιρα και τη μαγνητόσφαιρα (βλ. παράρτημα). Οι περιοχές αυτές διαφοροποιούνται μέσω του ποσοστού ιονισμού της ύλης, το οποίο αυξάνεται με το ύψος, δημιουργώντας πληθυσμούς πλάσματος διαφορετικής ενέργειας, σύστασης και πυκνότητας οι οποίοι επηρεάζονται από το μαγνητικό πεδίο της μαγνητόσφαιρας και από ηλεκτρομαγνητικά κύματα, τα οποία δημιουργούνται στον ηλιακό άνεμο ή στο εσωτερικό της γήινης μαγνητόσφαιρας.

2. Γεωμαγνητικές καταιγίδες και μαγνητοσφαιρικές υποκαταιγίδες

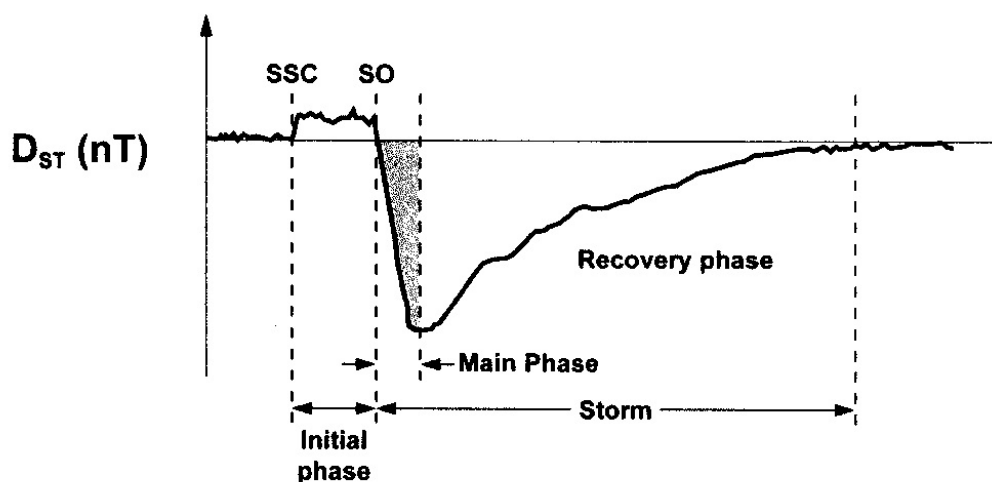
Η γεωμαγνητική καταιγίδα (geomagnetic storm) είναι μια παροδική διαταραχή της μαγνητόσφαιρας της Γης η οποία διαρκεί από μερικές ώρες έως και μερικές μέ-

ρες. Χαρακτηρίζεται από την παγκόσμια μείωση της οριζόντιας συνιστώσας του γεωμαγνητικού πεδίου η οποία είναι το διαμαγνητικό αποτέλεσμα του δακτυλιοειδούς ρεύματος. Αναγκαία συνθήκη εμφάνισης μαγνητικών καταιγίδων είναι η διαμόρφωση του ηλιακού ανέμου με τέτοιο τρόπο ώστε η κατακόρυφη (z) συνιστώσα του μαγνητικού του πεδίου να έχει νότιο προσανατολισμό για παρατεταμένο χρονικό διάστημα (πολλές ώρες). Ο συνδυασμός του νότια προσανατολισμένου πεδίου του ηλιακού ανέμου σε συνδυασμό με το βόρεια προσανατολισμένου πεδίου της Γης στη μαγνητόπαυση ευνοεί την μαγνητική επανασύνδεση (βλ. παράρτημα) η οποία ευθύνεται για τη μεταφορά και αποθήκευση ενέργειας από τον ηλιακό άνεμο στη γήινη μαγνητόσφαιρα.



Σχήμα 2.1: Εγκάρσια τομή της γήινης μαγνητόσφαιρας με τη θέση του δακτυλιοειδούς ρεύματος.

Η συχνότητα των γεωμαγνητικών καταιγίδων αυξάνεται και μειώνεται ανάλογα με τη φάση του ηλιακού κύκλου. Η ένταση μιας γεωμαγνητικής καταιγίδας εκτιμάται μέσω γεωμαγνητικών δεικτών (geomagnetic indices) οι οποίοι υπολογίζονται από τις διακυμάνσεις του μαγνητικού πεδίου της Γης όπως αυτές μετρώνται από επίγειους σταθμούς. Ένας από τους πιο χαρακτηριστικούς δείκτες για την εκτίμηση μιας γεωμαγνητικής καταιγίδας είναι ο δείκτης Dst (Disturbance Storm Time index) ο οποίος—συνοπτικά—αποτυπώνει τη διακύμανση της έντασης της οριζόντιας συνιστώσας του γεωμαγνητικού πεδίου από τη συνήθως "ήσυχη" τιμή της. Με βάση τη χρονική εξέλιξη του δείκτη Dst, μια καταιγίδα χωρίζεται σε τρεις φάσεις (σχήμα 2.2): στην αιφνίδια έναρξη καταιγίδας (storm sudden commencement), στην κύρια φάση (main phase) και στη φάση ανάκαμψης (recovery phase). Κατά την πρώτη φάση έχουμε ενίσχυση του ρεύματος της μαγνητόπαυσης (βλ. παράρτημα 2.)

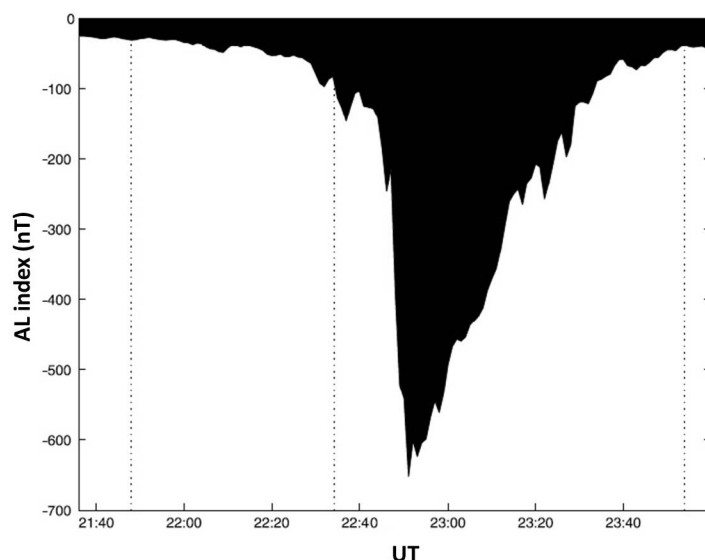


Σχήμα 2.2: Τυπική εξέλιξη του δείκτη Dst κατά τη διάρκεια γεωμαγνητικής καταιγίδας.

που επιφέρει αύξηση της οριζόντιας συνιστώσας του γεωμαγνητικού πεδίου στην επιφάνεια της Γης, η οποία αποτυπώνεται ως αύξηση της τιμής του δείκτη Dst. Η κύρια φάση της καταιγίδας συμπίπτει με την εισροή ενεργητικών ιόντων από τη μαγνητοουρά στην εσώτερη μαγνητόσφαιρα και την ενίσχυση του δακτυλιοειδούς ρεύματος (Ring Current), που επιφέρει μείωση της οριζόντιας συνιστώσας του μαγνητικού πεδίου στην επιφάνεια της Γης και στον δείκτη Dst. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο οι τιμές του δείκτη είναι αρνητικές κατά τη διάρκεια της καταιγίδας. Το δακτυλιοειδές ρεύμα σταδιακά επανέρχεται στα αρχικά του επίπεδα μέσω διαφόρων διαδικασιών απώλειας ιόντων. Αυτή η διαδικασία αποτυπώνεται στη φάση ανάκαμψης του Dst. Η ελάχιστη τιμή που λαμβάνει ο δείκτης Dst κατά τη διάρκεια της κύριας φάσης είναι που καθορίζει και την ισχύ της καταιγίδας. Μια γενική κατηγοριοποίηση της ισχύος των γεωμαγνητικών καταιγίδων έχει δοθεί από τον [Gonzalez *et al.* 1994] ο οποίος, βασιζόμενος σε στατιστική μελέτη του Dst χώρισε τις καταιγίδες σε: ασθενούς ισχύος για $-50 < Dst_{min} < -30\text{nT}$, σε μεσαίας ισχύος για $-100 < Dst_{min} < -50\text{nT}$ και μεγάλης ισχύος για $Dst_{min} < -100\text{nT}$.

Η μαγνητοσφαιρική υποκαταιγίδα είναι μια διαταραχή σύντομης διάρκειας και περιορισμένος έκτασης στη μαγνητόσφαιρα της Γης. Προκαλεί έκλυση ενέργειας που είχε προσωρινά αποθηκευθεί ως αυξημένη μαγνητική ροή στη μαγνητοουρά, και τα αποτελέσματά της εκδηλώνονται κυρίως σε υψηλά γεωμαγνητικά πλάτη. Τυπικά συμβαίνουν καθημερινά μία ως τέσσερεις υποκαταιγίδες ενώ η διάρκειά τους ποικίλλει από 1 έως 5 ώρες. Η έναρξή τους χαρακτηρίζεται από την έγχυση σωματιδίων από το φύλλο πλάσματος μέσω της μαγνητικής επανασύνδεσης (βλ. παράρτημα 5.). Ένα από τα πιο χαρακτηριστικά οπτικά αποτελέσματα των υποκα-

ταιγίδων είναι το βόρειο και το νότιο σέλας, που δημιουργείται από τον καταϊωνισμό ηλεκτρονίων στη γήινη ατμόσφαιρα. Οι υποκαταιγίδες μπορούν να προσδιοριστούν



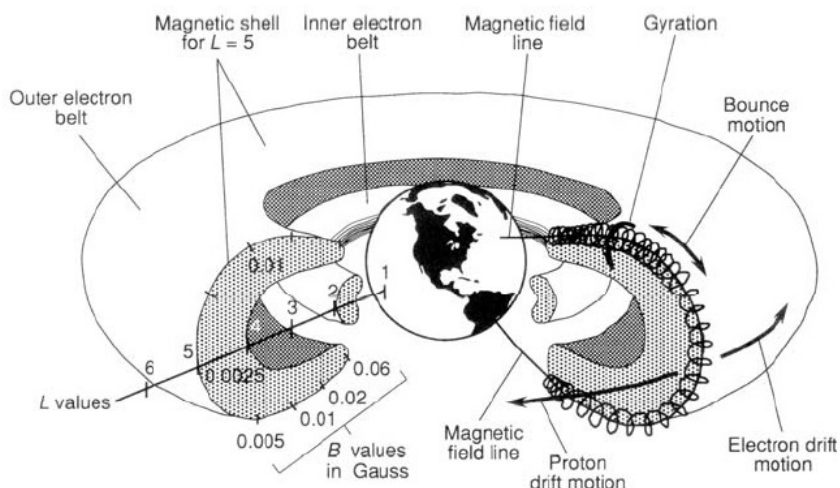
Σχήμα 2.3: Τυπική εξέλιξη του δείκτη AL κατά τη διάρκεια μαγνητοσφαιρικής υποκαταιγίδας.

τόσο από διαστημικές, όσο και από επίγειες παρατηρήσεις. Διαστημικές παρατηρήσεις υποκαταιγίδων πραγματοποιούνται από δορυφόρους στη γεωστατική τροχιά, σε τροχιές με υψηλό απόγειο που τους φέρνουν στη μαγνητοουρά, ή σε πολικές τροχιές. Στο έδαφος, οι υπογραφές των υποκαταιγίδων δίνονται από τους γεωμαγνητικούς δείκτες AE, AU και AL. Ο υπολογισμός του AE είναι σχετικά απλός. Χρησιμοποιούνται μετρήσεις του γεωμαγνητικού πεδίου διακριτικότητας ενός λεπτού της ώρας, από σταθμούς σε μεγάλα γεωμαγνητικά πλάτη, από τις οποίες αφαιρείται η μέση οριζόντια συνιστώσα κατά τη διάρκεια των πέντε μαγνητικά πιο ήσυχων ημερών του έτους. Στη συνέχεια μετράται το συνολικό εύρος των δεδομένων μεταξύ των διαφόρων μαγνητικών σταθμών. Ο AU ορίζεται ως η μεγαλύτερη από αυτές τις τιμές (που χαρακτηρίζει το eastward electrojet), AL ως η μικρότερη (που χαρακτηρίζει το westward electrojet) ενώ η διαφορά ορίζεται ως AE.

3. Ζώνες ακτινοβολίας Van Allen

Οι ζώνες ακτινοβολίας Van Allen είναι πληθυσμοί ενεργητικών φορτισμένων σωματιδίων (energetic charged particles) που βρίσκονται σε τροχιά γύρω από τη Γη, παγιδευμένα από το μαγνητικό της πεδίο, σε τοπολογία ομόκεντρων τόρων. Η

εσώτερη ζώνη, αποτελούμενη κυρίως από ενεργητικά ηλεκτρόνια και πολύ ενεργητικά πρωτόνια, είναι σχετικά σταθερή σε σύγκριση με την εξώτερη ζώνη, που αποτελείται κυρίως από ενεργητικά και σχετικιστικά ηλεκτρόνια με ενέργειες από 100 keV έως και 15 MeV (σχήμα 2.4). Η περιοχή μεταξύ των δύο ζωνών ονομάζεται slot region και χαρακτηρίζεται από την απότομη και δραστική μείωση της έντασης ροής σχετικιστικών ηλεκτρονίων. Πιο συγκεκριμένα, σε περιόδους μαγνητικών δια-



Σχήμα 2.4: Σχηματική αναπαράσταση των ζωνών ακτινοβολίας και περιγραφή των τριών βασικών κινήσεων ενός σωματιδίου μέσα στη μαγνητόσφαιρα. Πηγή:[Baker and Daglis2007].

ταραχών φαινόταν να υπάρχει μετατόπιση της εξώτερης ζώνης προς τη Γη καθώς και μείωση στη ροή των ηλεκτρονίων, ενώ κατά τη φάση της ανάκαμψης των καταιγίδων, η ροή των ηλεκτρονίων αυξάνονταν. Επίσης βρέθηκε ότι η περιοχή μεταξύ των δύο ζωνών μπορούσε να γεμίζει μερικώς κατά τη διάρκεια της καταιγίδας.

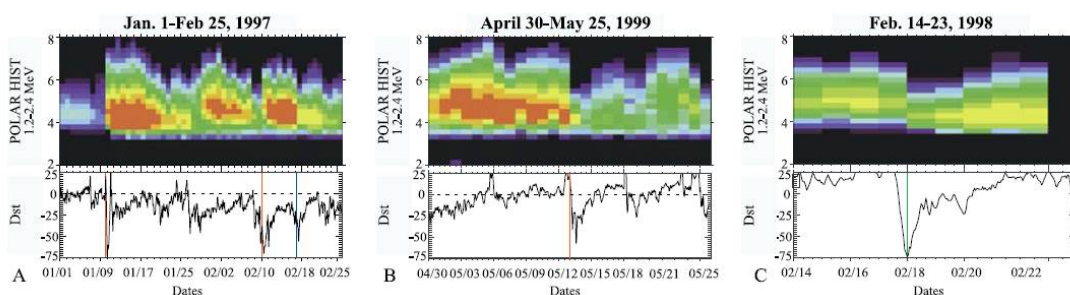
Διάφορες θεωρίες χρησιμοποιήθηκαν για να εξηγήσουν τις παραπάνω παρατηρήσεις. Οι μειώσεις της ροής (flux dropouts), κατά την κύρια φάση της καταιγίδας, εξηγήθηκαν ως αδιαβατικές ακτινικές κινήσεις των ηλεκτρονίων λόγω των έντονων διακυμάνσεων στο μαγνητικό πεδίο, ώστε να διατηρηθούν οι τρεις αδιαβατικές αναλλοίωτες (βλ. παράρτημα 7.). Οι αυξήσεις στις ροές της εξώτερης ζώνης ερμηνεύθηκαν μέσω της ακτινικής διάχυσης σωματιδίων προς τη Γη από μια πηγή ηλεκτρονίων σε υψηλότερα μαγνητοκελύφη (L-shells – βλ. παράρτημα 7.). Για την ερμηνεία των δυναμικών αυτών μεταβολών μελετήθηκαν επίσης διαφόρων τύπων αλληλεπιδράσεις κυμάτων-σωματιδίων (wave-particle interactions).

Η εικόνα για τις ζώνες ακτινοβολίας άλλαξε στις αρχές της δεκαετίας του 1990 με την εκτόξευση των διαστημικών αποστολών SAMPEX (σε χαμηλή πολική τρο-

χιά) και CRRES (σε τροχιά GTO, Geostationary–Transfer Orbit, με κλίση 18) που έφεραν πιο εξελιγμένα επιστημονικά όργανα. Ο συνδυασμός των δεδομένων που αυτά τα όργανα προσέφεραν αποκάλυψε ότι η δυναμική των ηλεκτρονίων της εξώτερης ζώνης ακτινοβολίας καθορίζεται από πιο πολύπλοκες διαδικασίες οι οποίες δημιουργούν βραχυχρόνιες (ώρες) και μακροχρόνιες (μέρες) μεταβολές στους διάφορους πληθυσμούς.

4. Μεταβολές στο ενεργειακό φάσμα των ηλεκτρονίων

Η εξώτερη ζώνη ακτινοβολίας της Γης αποτελείται από έναν δυναμικό πληθυσμό παγιδευμένων ηλεκτρονίων με ενέργειες εκατοντάδων keV έως 15 MeV, ο οποίος υπόκειται σε μεταβολές διαφόρων χρονικών κλιμάκων από δευτερόλεπτα σε δεκαετίες. Βασισμένοι σε μια εκτενή στατιστική έρευνα 276 μαγνητικών καταιγίδων της περιόδου 1989–2000, οι [Reeves *et al.*2003] διαπίστωσαν ότι περίπου οι μισές από αυτές συνέβαλαν στην αύξηση της ροής των ενεργειακών ηλεκτρονίων της εξώτερης ζώνης, περίπου το 1/5 είχαν ως αποτέλεσμα μείωση ενώ οι υπόλοιπες δεν προκάλεσαν καμία μεταβολή καταδεικνύοντας ουσιαστικά την πολύπλοκη φύση των ποικίλων διαδικασιών που κρύβονται πίσω από την επιτάχυνση ή την απώλεια ηλεκτρονίων από τη ζώνη (σχήμα 2.5). Παρόμοια έρευνα από τους [Turner *et al.*2013] οι οποίοι εξέτασαν 53 καταιγίδες για τη χρονική περίοδο 2007–2012 έδειξε παρόμοια αποτελέσματα.

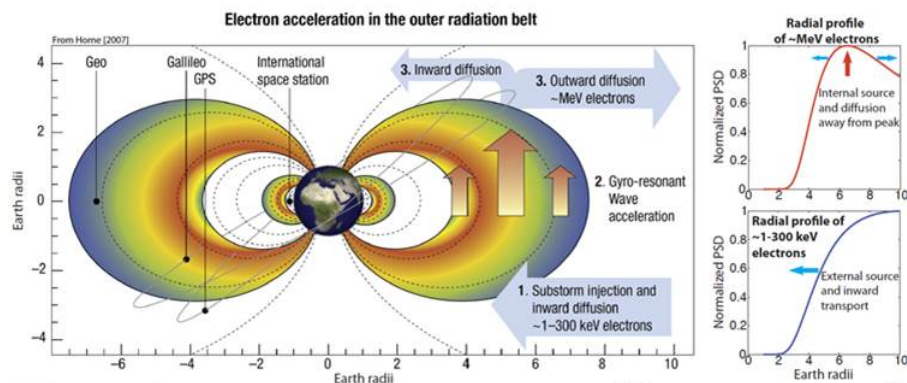


Σχήμα 2.5: Τρία αντιπροσωπευτικά παραδείγματα καταιγίδων με διαφορετικό αποτέλεσμα στην ένταση ροής των ηλεκτρονίων της εξώτερης ζώνης Van Allen. Πηγή:[Reeves *et al.*2003].

4.1 Πηγές και επιτάχυνση

Υπάρχουν δύο πηγές ηλεκτρονίων στην εξώτερη ζώνη ακτινοβολίας: 1) ο ηλιακός άνεμος (ενέργειες μερικών δεκάδων eV) και 2) η ιονόσφαιρα της Γης (ενέργειες

μερικών eV) [Baker and Daglis2007, Ebihara and Miyoshi2011], καμία όμως από αυτές τις πηγές δεν παρέχει ηλεκτρόνια με ενέργεια που να μπορεί να συγκριθεί με αυτή των ηλεκτρονίων της εξώτερης ζώνης, καταδεικνύοντας ότι κάποιοι πολύ αποτελεσματικοί μηχανισμοί επιτάχυνσης αυξάνουν την ενέργεια των ηλεκτρονίων κατά 6–7 τάξεις μεγέθους. Οι μηχανισμοί επιτάχυνσης των ηλεκτρονίων μπορούν



Σχήμα 2.6: Σχηματική αναπαράσταση των δύο μηχανισμών επιτάχυνσης. Οι εγχύσεις πλάσματος μέσω υποκαταιγίδων μεταφέρουν ένα πληθυσμό ηλεκτρονίων μέσα στην εξώτερη ζώνη ο οποίος έχει επιταχυνθεί σε ενέργειες της τάξεως των 300–400 keV. Παράλληλα γεννιούνται κύματα chorus τα οποία αλληλεπιδρώντας με τα παραπάνω ηλεκτρόνια τα επιταχύνουν ακόμα περισσότερο. Πηγή: Horne et al., 2007

να χωριστούν σε δύο βασικές κατηγορίες: 1) ακτινική, προς τη Γη, διάχυση (inward diffusion) και 2) αλληλεπιδράσεις κυμάτων–σωματιδίων.

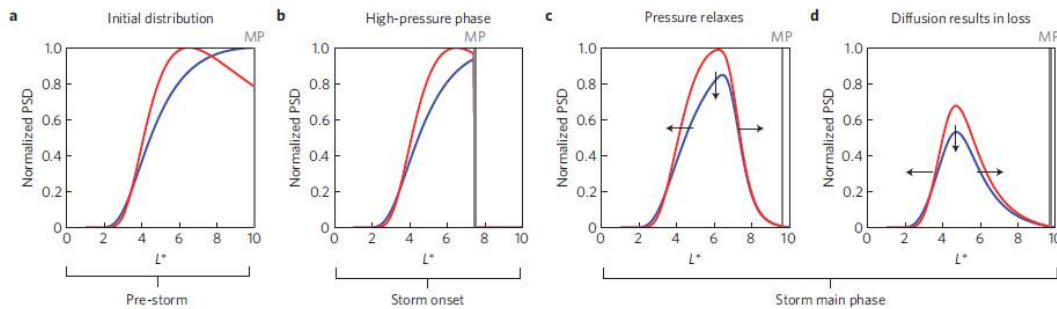
Βασική προϋπόθεση για την επιτάχυνση ενός φορτισμένου σωματιδίου μέσα σε μαγνητικό πεδίο είναι η παραβίαση μιας, τουλάχιστον, εκ των τριών αδιαβατικών αναλλοίωτων (βλ. παράρτημα 7.). Η ακτινική, προς τη Γη, διάχυση ερμηνεύει την επιτάχυνση των ηλεκτρονίων λόγω της παραβίασης της τρίτης αδιαβατικής αναλλοίωτης η οποία επιτρέπει σε λιγότερο ενεργειακά ηλεκτρόνια να διαχυθούν προς τη Γη από υψηλότερα μαγνητικά κελύφη (L–shells) σε χαμηλότερα, κερδίζοντας έτσι ενέργεια λόγω της διατήρησης της πρώτης και δεύτερης αδιαβατικής αναλλοίωτης. Οι πιο σημαντικές διαδικασίες διάχυσης είναι: α) οι εγχύσεις πλάσματος λόγω υποκαταιγίδων (substorm injections) και β) η μεταφορά ηλεκτρονίων από το φύλλο πλάσματος (plasma sheet).

4.2 Απώλειες

Όπως οι αυξήσεις, έτσι και οι μειώσεις στον πληθυσμό των ενεργητικών ηλεκτρονίων μπορούν να προκληθούν από αδιαβατικά φαινόμενα (π.χ. Dst effect), αλλά

κάτι τέτοιο είναι απλώς φαινομενικές απώλειες¹. Οι πραγματικές απώλειες ηλεκτρονίων στην εξωτερική ζώνη ακτινοβολίας συμβαίνουν λόγω: 1) απωλειών στην ιονόσφαιρα μέσω των πολικών χοάνων ή 2) magnetopause shadowing.

Magnetopause shadowing είναι ο όρος που χρησιμοποιείται όταν σωματίδια χάνονται μέσω της μαγνητόπαυσης, γεγονός που είναι σημαντικό για χαμηλά L-shells καθώς η μαγνητόπαυση συμπιέζεται προς τα μέσα λόγω υψηλής ταχύτητας ρευμάτων ηλιακού ανέμου (βλέπε σχήμα 2.7).



Σχήμα 2.7: Περιγραφή του μηχανισμού magnetopause shadowing. Κατά την προς τα μέσα κίνηση της μαγνητόπαυσης, τα ηλεκτρόνια με την κατάλληλη γυρο-ακτίνα χάνονται στην μαγνητοθήκη. Η κόκκινη καμπύλη αντιστοιχεί σε υψηλής ενέργειας ηλεκτρόνια ενώ η μπλε σε χαμηλής. Πηγή: Turner et al., 2012

Η σκέδαση των ηλεκτρονίων μέσω αλληλεπίδρασης κυμάτων-σωματιδίων, όπως και στη διαδικασία της επιτάχυνσης, προκαλείται από διάχυση ενέργειας και/ή σκέδαση των ηλεκτρονίων, μέσω παραβίασης της πρώτης και δεύτερης αδιαβατικής αναλλοίωτης. Η απώλεια ηλεκτρονίων λόγω αλληλεπιδράσεων με κύματα συμβαίνει όταν παρουσιάζεται σκέδαση της γωνίας κλίσης (pitch angle) λόγω παραβίασης της πρώτης και δεύτερης αδιαβατικής αναλλοίωτης, με αποτέλεσμα μέρος των σωματιδίων να οδηγούνται μέσα στον κώνο διαφυγής (loss cone).

¹Κατά τη συμπίεση της μαγνητόσφαιρας, τα σωματίδια που είναι παγιδευμένα στο μαγνητικό πεδίο κινούνται μαζί με αυτό. Αυτή η μετακίνηση αποτυπώνεται σε έναν ανιχνευτή σαν μείωση της ροής, εφόσον το διαστημόπλοιο και άρα και ο ανιχνευτής παραμένουν στην ίδια θέση και δεν ακολουθούν τις μεταβολές του πεδίου

Κεφάλαιο 3

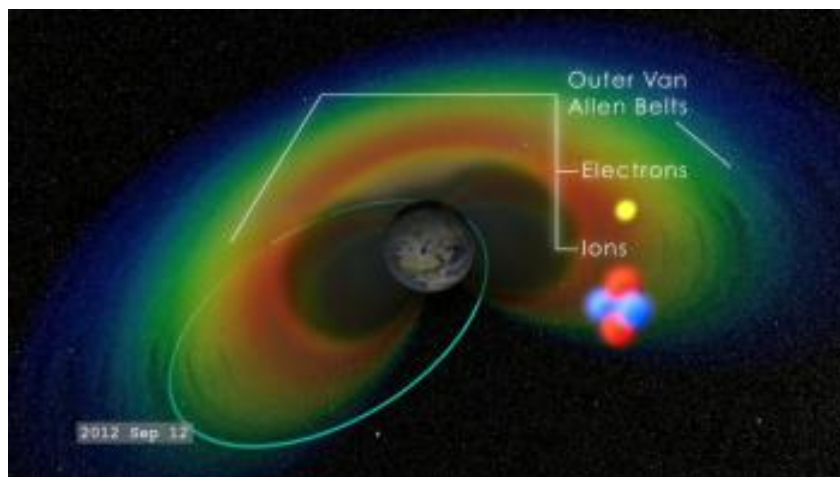
Όργανα και τεχνικές μέτρησης ηλεκτρονίων

Για τη μέτρηση σωματιδίων στο διάστημα αλλά και για τον χαρακτηρισμό τους χρησιμοποιούμε ανιχνευτές στερεάς κατάστασης πυριτίου (Silicon Solid-State Detectors). Η αρχή λειτουργίας αυτών των ανιχνευτών (βλέπε παράρτημα 8.) βασίζεται στους φυσικούς μηχανισμούς απώλειας ενέργειας ενός σωματιδίου όταν αυτό αλληλεπιδρά με την ύλη. Βαρέα φορτισμένα σωματίδια, όπως τα πρωτόνια, αλληλεπιδρούν με το υλικό από το οποίο διέρχονται μέσα από μια σειρά συγκρούσεων με τα ηλεκτρόνια του τελευταίου. Κάθε αλληλεπίδραση οδηγεί σε μια μικρή απώλεια ενέργειας και σχεδόν καμία σκέδαση. Το αποτέλεσμα είναι ότι τα πρωτόνια ταξιδεύουν σε σχεδόν ευθείες γραμμές και η διασπορά στην απώλεια ή το εύρος ενέργειας είναι μικρή. Τα ηλεκτρόνια, από την άλλη πλευρά, μπορούν να χάσουν ένα μεγάλο μέρος της ενέργειάς τους και υφίστανται σημαντική γωνιακή σκέδαση σε μία και μόνο σύγκρουση με ένα υλικό-στόχο ηλεκτρονίων αφού τα δύο σωματίδια έχουν την ίδια μάζα. Επιπλέον, η κατεύθυνση της κίνησης των ηλεκτρονίων μπορεί επίσης να αλλάξει, έως και να αντιστραφεί, με μια σύγκρουση με έναν ατομικό πυρήνα.

1. Μετρητική διάταξη Magnetic Electron Ion Spectrometer (MagEIS) της αποστολής Van Allen Probes

Οι δύο δορυφόροι Van Allen Probes (παλαιότερα γνωστοί και ως Radiation Belts Storm Probes–RBSP) είναι δύο ρομποτικά διαστημικά σκάφη που χρησιμοποιούνται για τη μελέτη των ζωνών ακτινοβολίας Van Allen και εκτοξεύθηκαν στις

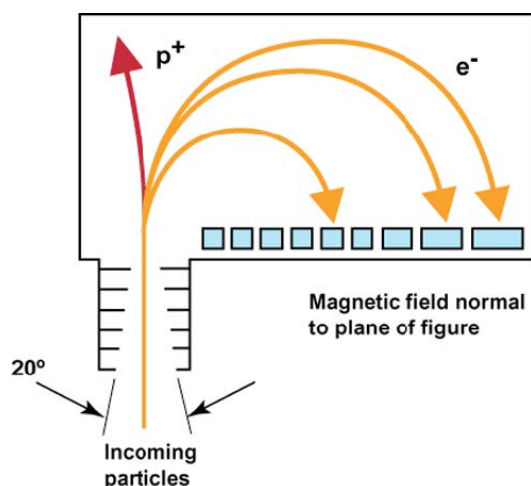
30 Αυγούστου 2012 σε σχεδόν - ισημερινή ελλειπτική τροχιά με μια περίοδο περίπου 9 ώρες (εικόνα 3.1). Τα σκάφη διαθέτουν πανομοιότυπα όργανα για τη μέτρηση φορτισμένων σωματιδίων, μαγνητικών πεδίων και ηλεκτρικών πεδίων.



Σχήμα 3.1: Σχηματική αναπαράσταση της τροχιάς των δύο δορυφόρων της αποστολής Van Allen Probes.

Η μετρητική διάταξη MagEIS αποτελείται από 4 μαγνητικούς φασματογράφους πάνω στα δύο διαστημικά σκάφη RBSP–A και RBSP–B, έναν χαμηλής ενέργειας (20 έως 240 keV), δύο μέσης ενέργειας (80 έως 1.200 keV) και έναν υψηλής ενέργειας (800 έως 4800 keV). Κάθε ανιχνευτής αποτελείται από μια πλάκα πυριτίου πάχους 0.5 mm, και δύο πλάκες πάχους 1.5 mm το καθένα. Κάθε πλάκα πυριτίου έχει εννέα pixels, δηλαδή εννέα επιμέρους αισθητήρες.

Ο μαγνητικός φασματογράφος ηλεκτρονίων και ιόντων [Blake *et al.*2013] είναι ένας τύπος ανιχνευτή στερεάς κατάστασης πυριτίου (SSD). Το μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του θαλάμου είναι ομογενές και εστιάζει τα εισερχόμενα ηλεκτρόνια σε μια λωρίδα εννέα ανιχνευτών πυριτίου (σχήμα 3.2). Το φορτίο και η μάζα του κάθε ηλεκτρονίου είναι μοναδικά, και ως εκ τούτου κανένα άλλο σωματίδιο δεν εστιάζεται πάνω στο επίπεδο του ανιχνευτή. Η ενέργεια που αποτίθεται στον ανιχνευτή πυριτίου, πάνω στον οποίο το ηλεκτρόνιο εστιάζεται, προσδιορίζει την προσπίπτουσα ενέργεια των ηλεκτρονίων. Έτσι, μια ανάλυση δύο παραμέτρων γίνεται για κάθε ηλεκτρόνιο και μόνο τα ηλεκτρόνια των οποίων η ενέργεια είναι αντίστοιχη με την ορμή που καθορίζεται από τη θέση κατά μήκος του εστιακού επιπέδου είναι έγκυρα γεγονότα. Κάθε έγκυρη μέτρηση αντιστοιχεί σε ένα count και στη συνέχεια, ανάλογα με τη διακριτική ικανότητα του οργάνου (time resolution), μπορεί να υπολογιστεί ο ρυθμός καταμέτρησης count–rate. Αυτές οι μετρήσεις, όμως, δεν αποτελούν κάποιο μέγεθος με φυσική σημασία. Γι' αυτό τον λόγο, τα counts ή το count–rate, μετατρέπονται σε διαφορική ροή (δηλαδή αριθμός σωματιδίων ανά μονάδα χρόνου, ενέργειας, στερεάς γωνίας και εμβαδού) μέσω του τύπου



Σχήμα 3.2: Σχηματική αναπαράσταση του φασματογράφου ηλεκτρονίων και ιόντων MagEIS που βρίσκεται στους δύο δορυφόρους της αποστολής Van Allen Probes.

$$I = \frac{Counts}{\Delta E \cdot G \cdot \Delta t} \quad (3.1)$$

όπου Δt ο χρόνος μεταξύ 2 διαδοχικών μετρήσεων σε sec, ΔE το ενεργειακό εύρος κάθε καναλιού σε keV και G ο γεωμετρικός παράγοντας του οργάνου σε $st \cdot cm^2$. Ο G εκφράζει μια εκτίμηση για την διαπερατότητα κάθε καναλιού και υπολογίζεται κατά την διαδικασία της βαθμονόμησης (calibration) κάθε οργάνου στο εργαστήριο, πριν αυτό φτάσει στο διάστημα.

Κεφάλαιο 4

Βήματα της Άσκησης

1. Ανίχνευση σωματιδίων

1. Για το όργανο της παρακάτω εικόνας υπολογίστε τη μέση ενέργεια κάθε καναλιού (ανιχνευτή στερεάς κατάστασης). Η απόσταση του μέσου κάθε ανιχνευτή από την είσοδο του οργάνου δίνεται (σε mm) από τον παρακάτω πίνακα:

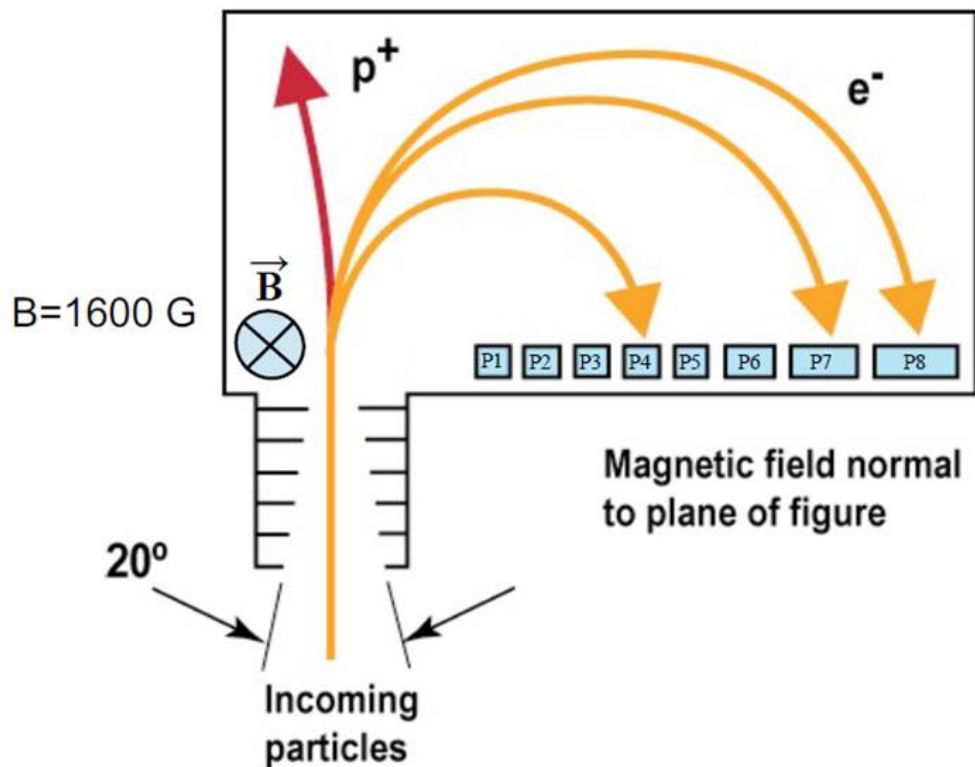
P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
8.1	10.2	12.2	14.1	16.1	17.9	19.7	21.5

2. Στη συνέχεια, γνωρίζοντας το ρυθμό καταμέτρησης (count rate) του κάθε ανιχνευτή, καθώς και το γεωμετρικό του παράγοντα και το ενεργειακό του εύρος, υπολογίστε τη διαφορική ροή. Δίνεται ο πίνακας:

Pixel	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
CR (sec^{-1})	5607	2461	1932	1347	906	721	523	398
ΔE (keV)	72	90	106	120	132	144	150	162
G ($\text{cm}^2 \text{ sr keV}$)	0.281	0.328	0.342	0.343	0.332	0.316	0.303	0.287

2. Αναγνώριση των γεωμαγνητικών διαταραχών

Το αρχείο Indices.mat περιέχει πεντάλεπτες τιμές των γεωμαγνητικών δεικτών Dst και AL, σε μονάδες nanoTesla. Ο χρόνος είναι σε μορφή datenum (δηλαδή ένας



αύξων αριθμός ημερών με εκκίνηση το έτος μηδέν).

1. Κατασκευάστε τη γραφική παράσταση του χρονικού προφίλ των γεωμαγνητικών δεικτών Dst και AL.
Υπόδειξη: Χρησιμοποιώντας την εντολή load, φορτώστε το αρχείο Indices.mat. Κατασκευάστε τις γραφικές παραστάσεις των δεικτών χρησιμοποιώντας την έτοιμη συνάρτηση plotindices.m.
2. Αναγνωρίστε τις γεωμαγνητικές καταιγίδες και μαγνητοσφαιρικές υποκαταιγίδες που εμφανίζονται. Εντοπίστε την ισχυρότερη γεωμαγνητική καταιγίδα και σχολιάστε την τιμή της, με βάση τη θεωρητική εισαγωγή της Άσκησης.
3. Κατασκευάστε μια νέα γραφική παράσταση των δεικτών, γύρω από τη συγκεκριμένη καταιγίδα.
4. Με βάση τη μορφή της νέας γραφικής παράστασης του δείκτη Dst, αναγνωρίστε τις τρεις φάσεις της καταιγίδας και εκτιμήστε την αρχή και το τέλος τους.
5. Για το σπίτι: Ελέγξτε τις συνθήκες που επικρατούσαν στον ηλιακό άνεμο (δηλαδή τις τιμές των κυριότερων παραμέτρων του) κατά τη διάρκεια της καταιγίδας. Επισκεφτείτε την ιστοσελίδα του διαδικτυακού εργαλείου OMNIWeb

¹, το οποίο δίνει την επιλογή να δημιουργήσετε γραφικές παραστάσεις. Να συμπεριλάβετε διαγράμματα της ταχύτητας και πίεσης του ηλιακού ανέμου (flow speed and pressure) καθώς και της κατακόρυφης συνιστώσας του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου (BzGSM) για την ίδια χρονική περίοδο του προηγούμενου υποερωτήματος. Σχολιάστε πώς αυτές οι συνθήκες σχετίζονται με την εκδήλωση της καταιγίδας.

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

Το αρχείο RBSP.mat περιέχει 4 μεταβλητές: τον χρόνο T (σε datenum), το μαγνητοκέλυφος Lstar, την αζιμουθιακή γωνία στο μαγνητικό ισημερινό επίπεδο MLT (σε ώρες) και τον ρυθμό καταμέτρησης ηλεκτρονίων (CountRate, σε 1/sec) από τα 10 ενεργειακά κανάλια του οργάνου MagEIS από τον δορυφόρο RBSP-A, τον πρώτο από τους δυο δορυφόρους της αποστολής Van Allen Probes.

Το αρχείο RBSPenergy.mat περιέχει 4 μεταβλητές για τα 10 ενεργειακά κανάλια: τον γεωμετρικό παράγοντα G (σε $\text{sr}^{-1}\text{cm}^{-2}$), την ελάχιστη Emin, τη μέγιστη Emax καθώς και τη μέση ενέργεια E (σε keV) του κάθε ενεργειακού καναλιού.

1. Υπολογίστε την ένταση ροής (flux intensity) των ηλεκτρονίων σε κάθε ενεργειακό κανάλι.
Υπόδειξη: Χρησιμοποιώντας την εντολή load, φορτώστε τα δυο αρχεία. Συγκρίνετε τον τύπο υπολογισμού που σας δίνεται στο MATLAB, με τον τύπο 3.1 που αναφέρεται στη θεωρητική εισαγωγή της Άσκησης. Τι παρατηρείτε;
2. Κατασκευάστε τη γραφική παράσταση του χρονικού προφίλ της ροής, του Lstar και του MLT, για όλη τη χρονική διάρκεια του αρχείου.
Υπόδειξη: Χρησιμοποιήστε την έτοιμη συνάρτηση plotfluxes.m.
3. Σχολιάστε τις μεταβολές που παρατηρείτε. Ποιες οφείλονται σε φυσικούς μηχανισμούς που δρουν εντός της μαγνητόσφαιρας, και ποιες στη θέση του δορυφόρου; Ποιες οι διαφορές ανάμεσα στα προφίλ της ροής των δυο ενεργειακών καναλιών;

¹https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/omni_min.html

4. Κατασκευάστε τη γραφική παράσταση του χρονικού προφίλ της ροής, ανά ενεργειακό κανάλι, και ανά δεδομένο εύρος/τιμή μαγνητοκελύφους ($L_{star}=3-4, 4-5, 5-6$).
Υπόδειξη: Χρησιμοποιήστε τη συνάρτηση `plotfluxesL.m`.
5. Σχολιάστε τις μεταβολές που παρατηρείτε σε σχέση με αυτές του προηγούμενου ερωτήματος.
6. 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.
Υπόδειξη: Χρησιμοποιήστε την έτοιμη συνάρτηση `plotmeanspectrum.m` για να κατασκευάσετε τη γραφική παράσταση. Τί παρατηρείτε στην κατανομή;
7. Στην ίδια γραφική παράσταση, εφαρμόστε την προσαρμογή νόμου δύναμης (power law fitting) ώστε να υπολογίσετε τις παραμέτρους της κατανομής (κλίση και τεταγμένη) για κάθε ενεργειακό πληθυσμό.
Υπόδειξη: Χρησιμοποιήστε την έτοιμη συνάρτηση `fitPowerLaw.m` για την προσαρμογή του νόμου δύναμης. Σημειώστε τις τιμές της κλίσης (γ) και της τεταγμένης (A) για τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο.
8. **Για το σπίτι:** Επαναλάβετε τα βήματα 5 και 6 για άλλες 3 χρονικές περιόδους διάρκειας μίας ημέρας: κατά την κύρια φάση της καταιγίδας, κατά τη φάση ανάκαμψης της καταιγίδας, και μετά το τέλος της καταιγίδας, αναφέροντας τις χρονικές περιόδους που χρησιμοποιείτε και εξηγώντας τα κριτήρια με τα οποία τις επιλέξατε. Κατασκευάστε τις γραφικές παραστάσεις, προσαρμόστε τον νόμο δύναμης, και σημειώστε τις τιμές των παραμέτρων.
9. **Για το σπίτι:** Σχολιάστε τις διαφορές των γραφικών παραστάσεων και των τιμών των παραμέτρων μεταξύ των 4 γραφημάτων των βημάτων 5,6,7, με βάση τη θεωρητική εισαγωγή της Άσκησης.

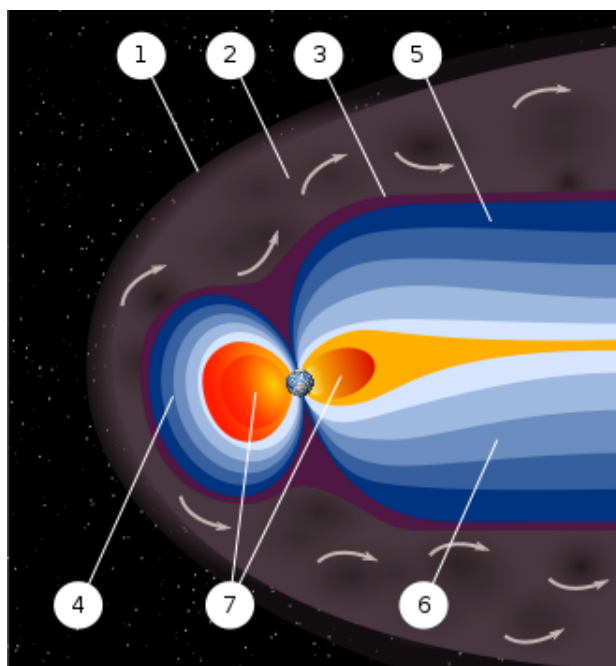
Κεφάλαιο 5

Παράρτημα

1. Δομή μαγνητόσφαιρας

Η μαγνητόσφαιρα (magnetosphere) της Γης (βλέπε επίσης Kallenrode 1998 και Kivelson 1995) είναι η κοιλότητα που δημιουργείται στον ηλιακό άνεμο από το μαγνητικό πεδίο του πλανήτη μας (εικόνα 5.1). Η οριακή ζώνη που χωρίζει το πυκνότερο και ψυχρότερο πλάσμα του ηλιακού ανέμου από το θερμότερο και λιγότερο πυκνό της μαγνητόσφαιρας ονομάζεται μαγνητόπαυση (magnetopause) και είναι ουσιαστικά η επιφάνεια όπου η εσωτερική πίεση της μαγνητόσφαιρας του πλανήτη και η εξωτερική πίεση του ηλιακού ανέμου εξισορροπούνται. Η απόσταση της προσήλιας μαγνητόπαυσης από το κέντρο του πλανήτη κυμαίνεται από 13 R σε ήρεμες έως 6 R σε διαταραγμένες περιόδους και εξαρτάται από την πίεση που ασκείται από τον ηλιακό άνεμο, ο οποίος με τη σειρά του εξαρτάται από την ηλιακή δραστηριότητα.

Η αλληλεπίδραση του γρήγορου πλάσματος, που κουβαλάει ο ηλιακός άνεμος, με τη μαγνητόσφαιρα δημιουργεί το τοξοειδές κρουστικό κύμα (bow shock) στο μπροστινό μέρος της μαγνητόπαυσης. Η περιοχή μεταξύ του κρουστικού κύματος και της μαγνητόπαυσης ονομάζεται μαγνητοθήκη. Στη μαγνητοθήκη κυριαρχεί συμπιεσμένος ηλιακός άνεμος. Επίσης, υπάρχουν περιοχές κοντά στη μαγνητόπαυση όπου λόγω διαφορετικής ταχύτητας ροής μεταξύ του ηλιακού ανέμου και του μαγνητοσφαιρικού πλάσματος, ικανοποιούνται οι συνθήκες για ανάπτυξη ασταθειών Kelvin–Helmholtz, με αποτέλεσμα, τοπικά, να παρατηρείται το φαινόμενο της μαγνητικής επανασύνδεσης (magnetic reconnection), η οποία δημιουργεί συνθήκες επικοινωνίας ανάμεσα στη μαγνητόσφαιρα και στη μαγνητοθήκη. Έτσι, μαγνητοσφαιρικό πλάσμα εισχωρεί στη μαγνητοθήκη.



Σχήμα 5.1: Σχηματικό διάγραμμα της Γήινης μαγνητόσφαιρας. 1: Τοξοειδές κρουστικό κύμα (Bow Shock), 2: Μαγνητοθήκη (Magnetosheath), 3: Μαγνητόπαυση (Magnetopause), 4: Μαγνητόσφαιρα (Magnetosphere), 5: Βόρειος ουραίος λοβός (Northern Tail-Lobe), 6: Νότιος ουραίος λοβός (Northern Tail-Lobe), 7: πλασμόσφαιρα (Plasmasphere). Πηγή: <http://plasmasphere.nasa.gov/>.

Ως πλασμόσφαιρα (plasmasphe) ορίζεται η περιοχή που αρχίζει από την ιονόσφαιρα του πλανήτη και τελειώνει στην πλασμόπαυση (plasmaopause). Κύριο χαρακτηριστικό της είναι ότι περιέχει ψυχρό πλάσμα από την ιονόσφαιρα. Η πλασμόπαυση ορίζεται ως η περιοχή που η πυκνότητα του πλάσματος ελαττώνεται κατά αρκετές τάξεις μεγέθους ως προς την πυκνότητα πλάσματος της πλασμόσφαιρας.

Η μαγνητοουρά (magnetotail) είναι η περιοχή της μαγνητόσφαιρας που βρίσκεται στη νυχτερινή πλευρά του πλανήτη. Σε αντίθεση με την ημερήσια μαγνητόσφαιρα, η οποία συμπιέζεται από τον ηλιακό άνεμο, η μαγνητοουρά επιμηκύνεται και ακολουθεί τη ροή του ηλιακού ανέμου¹.

Η μαγνητοουρά αποτελείται από τρεις περιοχές:

1. τον Βόρειο ουραίο λοβό (Northern tail lobe),
2. τον Νότιο ουραίο λοβό (Southern tail lobe) και
3. το φύλλο πλάσματος (plasma sheet)

Οι ουραίοι λοβοί είναι περιοχές πάνω και κάτω από το φύλλο πλάσματος όπου περιέχεται ψυχρό και αραιό πλάσμα και οι μαγνητοσφαιρικές μαγνητικές γραμμές μέσα σε αυτές τις περιοχές είναι παράλληλες με τη διεύθυνση ροής του ηλιακού ανέμου. Το φύλλο πλάσματος είναι η περιοχή ανάμεσα στους δύο ουραίους λοβούς. Περιέχει θερμό πλάσμα και το μαγνητικό πεδίο σε αυτή την περιοχή είναι ασθενέστερο σε σχέση με αυτό των λοβών. Η μαγνητοουρά είναι ένα κανάλι μέσω του οποίου ηλιακό πλάσμα εισέρχεται στις εσωτερικές περιοχές της μαγνητόσφαιρας, όπου θερμαίνεται και σχηματίζει τις ζώνες ακτινοβολίας.

2. Συστήματα ρευμάτων μέσα στη μαγνητόσφαιρα

Η κίνηση του πλάσματος, η οποία καθορίζεται από την τοπολογία του μαγνητικού πεδίου της μαγνητόσφαιρας, δημιουργεί συστήματα ρευμάτων τα οποία επηρεάζονται από τις μεταβολές του ηλιακού ανέμου και συμβάλλουν στην ποικιλομορφία της γεωμαγνητικής δραστηριότητας. Μερικά από τα βασικότερα συστήματα ρευμάτων στη γήινη μαγνητόσφαιρα (εικόνα 5.2) είναι: το ρεύμα μαγνητόπαυσης

¹<http://www-spf.gsfc.nasa.gov/Education/wtail.html>

(Chapman Ferraro current), τα ρεύματα της ουράς (cross tail current), τα ρεύματα Birkeland και το δακτυλιοειδές ρεύμα (Ring current).

Το ρεύμα Chapman Ferraro δημιουργείται λόγω της εκτροπής του ηλιακού ανέμου στη μαγνητόπαυση, σε κατεύθυνση από δυτικά προς ανατολικά (eastward). Τα ρεύματα της ουράς ρέουν κάθετα στο φύλλο πλάσματος και διαχωρίζουν τον βόρειο από τον νότιο λοβό. Τα ρεύματα Birkeland ρέουν κατα μήκος των μαγνητικών γραμμών (field aligned currents) που συνδέουν τη μαγνητόσφαιρα με την ιονόσφαιρα σε υψηλά γεωγραφικά πλάτη (σε αυτές τις περιοχές παρατηρείται και το Σέλας). Τα ρεύματα Birkeland κλείνουν μέσω των σελαϊκών ηλεκτροχειμάρρων (auroral electrojets) που ρέουν κάθετα στο μαγνητικό πεδίο της ιονόσφαιρας.

3. Δακτυλιοειδές ρεύμα

Το δακτυλιοειδές ρεύμα είναι ένα τοροειδές σύστημα ρευμάτων που ρέει γύρω από τη Γη, με κατεύθυνση από τα ανατολικά προς τα δυτικά westward, σε αποστάσεις 2–9 R_E . Δημιουργείται λόγω της συνισταμένης κίνησης των φορτισμένων σωματιδίων (δυτική ολίσθηση για ιόντα και ανατολική ολίσθηση για ηλεκτρόνια, βλ. παράρτημα 7.) και είναι υπεύθυνο για τις μειώσεις του μαγνητικού πεδίου στην επιφάνεια του πλανήτη (γεωμαγνητικές καταιγίδες). Κύρια συνεισφορά στο δακτυλιοειδές ρεύμα έχουν τα πρωτόνια ηλιακής προέλευσης και τα ιόντα οξυγόνου ιονοσφαιρικής προέλευσης με ενέργειες από 10 έως μερικές εκατοντάδες keV. Πηγές του δακτυλιοειδούς ρεύματος είναι ο ηλιακός άνεμος, σε ήρεμες περιόδους, και η ιονόσφαιρα, σε διαταραγμένες Daglis1999. Η εξασθένιση του δακτυλιοειδούς ρεύματος πραγματοποιείται μέσω αλληλεπιδράσεων ανταλλαγής φορτίου (charge exchange), αλληλεπιδράσεων κυμάτων σωματιδίων και σκεδάσεων (Coulomb) καθώς και με το μηχανισμό του magnetopause shadowing.

4. Ζώνες ακτινοβολίας (Van Allen)

Οι ζώνες Van Allen ήταν ο πρώτος πληθυσμός διαστημικού πλάσματος που ανακαλύφθηκε από τον άνθρωπο. Η ανακάλυψή τους έγινε τυχαία, το 1958 από την ομάδα του James Van Allen VanAllen1959, χρησιμοποιώντας ανιχνευτές Geiger–Mueller στη διαστημική αποστολή Explorer I που είχε ως σκοπό τη μελέτη των κοσμικών ακτίνων. Οι μετρήσεις των ανιχνευτών έδειξαν ότι υπήρχαν περιοχές γύρω από τον πλανήτη όπου η ακτινοβολία αυξάνονταν. Πλέον γνωρίζουμε πως αυτή η ακτινοβολία είναι παγιδευμένα σωματίδια υψηλής ενέργειας που βρίσκονται σε συγ-

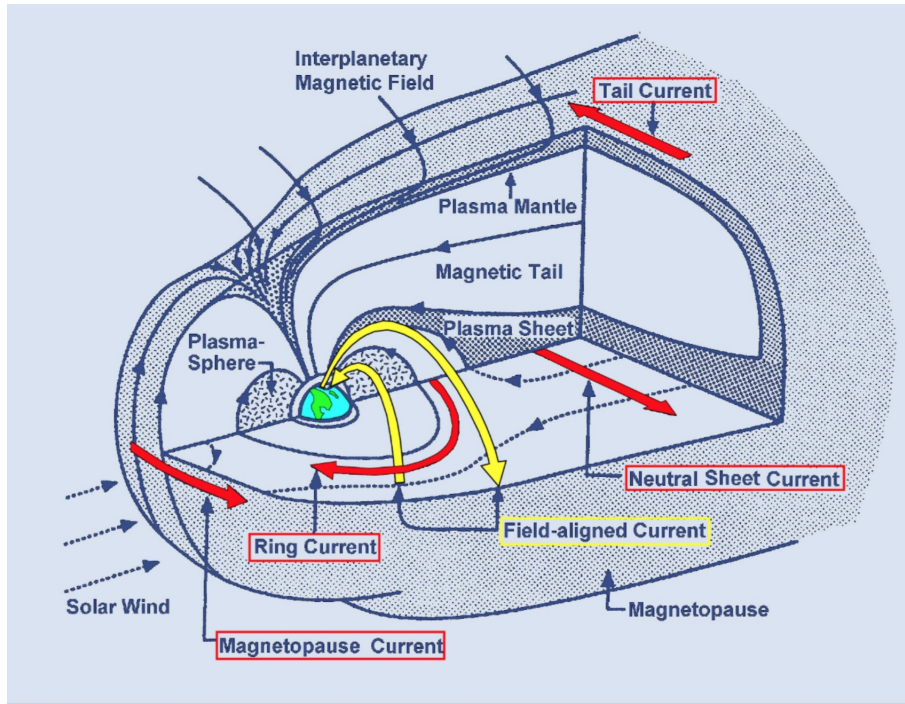
κεκριμένες περιοχές γύρω από τη Γη. Η ικανότητα του γεωμαγνητικού πεδίου να παγιδεύει τα ηλεκτρόνια υψηλής ενέργειας επαληθεύτηκε πειραματικά από το πείραμα Argus, το οποίο προτάθηκε από τον Νικόλαο Χριστόφιλο το 1957 και πραγματοποιήθηκε το 1959.

5. Μαγνητική επανασύνδεση

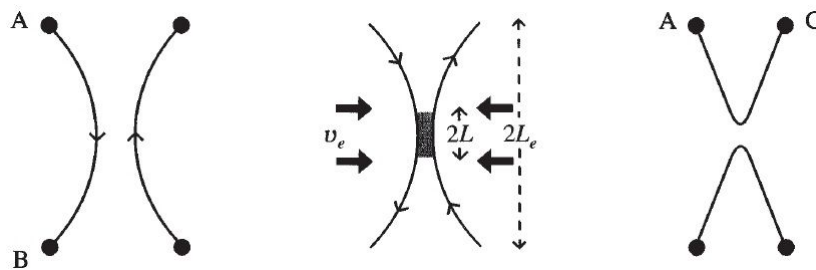
Μαγνητική επανασύνδεση είναι η φυσική διεργασία, που συμβαίνει σε εξαιρετικά αγωγίμο πλάσμα, κατά την οποία η μαγνητική τοπολογία αναδιατάσσεται και η μαγνητική ενέργεια μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια, θερμική ενέργεια και επιτάχυνση σωματιδίων. Η ποιοτική περιγραφή της διαδικασίας της επανασύνδεσης είναι τέτοια ώστε οι γραμμές δύο αντίθετων μαγνητικών πεδίων από διαφορετικές μαγνητικές περιοχές συγκολλούνται μεταξύ τους δημιουργώντας μια νέα τοπολογία Priest2000. Οι ηλιακές εκλάμψεις, οι μεγαλύτερες εκρήξεις στο ηλιακό σύστημα κ.α. περιλαμβάνουν την επανασύνδεση των μεγάλων συστημάτων της μαγνητικής ροής απελευθερώνοντας, μέσα σε λίγα λεπτά, την ενέργεια που έχει αποθηκευθεί στο μαγνητικό πεδίο σε μια περίοδο ωρών έως ημερών. Η Μαγνητική επανασύνδεση στη μαγνητόσφαιρα της Γης είναι υπεύθυνη για ένα από τα εντυπωσιακότερα φαινόμενα, το Σέλας. Σε δύο διαστάσεις, ο πιο κοινός τύπος της μαγνητικής επανασύνδεσης (X), φαίνεται στην εικόνα 5.3 στην οποία τέσσερις ξεχωριστές μαγνητικές περιοχές ανταλλάσσουν γραμμές του μαγνητικού πεδίου. Πιο συγκεκριμένα τα δύο αντίθετης πολικότητας πεδία πλησιάζουν δημιουργώντας ένα φύλλο ρεύματος στην ενδιάμεση περιοχή. Η αγωγιμότητα του πλάσματος πλέον γίνεται πεπερασμένη με αποτέλεσμα να έχουμε διάχυση του μαγνητικού πεδίου. Τελικά ακολουθεί επανασύνδεση των γραμμών με ταυτόχρονη εκτόξευση πλάσματος κάθετα στο φύλλο ρεύματος.

Γενικά, οι συνέπειες του φαινομένου της μαγνητικής επανασύνδεσης είναι σημαντικές εφόσον:

- ▶ μετατρέπει την μαγνητική ενέργεια σε κινητική ενέργεια, θερμότητα και ενέργεια επιταχυσμένων σωματιδίων
- ▶ επηρεάζει τις διαδρομές των σωματιδίων και της θερμότητας
- ▶ δημιουργεί ισχυρά ηλεκτρικά πεδία και ρεύματα αλλά και κρουστικά κύματα.



Σχήμα 5.2: Σχηματικό διάγραμμα των κυριότερων συστημάτων ρευμάτων στη Γήινη μαγνητόσφαιρα. Πηγή: community.emc.com.



Σχήμα 5.3: Μαγνητική επανασύνδεση τύπου X.

6. Περιγραφή της κίνησης σωματιδίου μέσα στη μαγνητόσφαιρα

Ένα σωματίδιο μέσα σε μια μαγνητόσφαιρα ακολουθεί τρεις βασικές κινήσεις :

- ▶ Μια κυκλική κίνηση γύρω από τη δυναμική γραμμή του μαγνητικού πεδίου σε επίπεδο κάθετο στο διάνυσμα του μαγνητικού πεδίου (gyro-motion).
- ▶ Μια κίνηση κατά μήκος της δυναμικής γραμμής του μαγνητικού πεδίου ανάμεσα σε δύο κατοπτρικά σημεία (bounce-motion).
- ▶ Μια κίνηση κάθετα στις δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου και γύρω από τον πλανήτη (drift-motion).

Αυτές οι τρεις κινήσεις (βλέπε εικόνα 5.4 είναι υπεύθυνες για την δημιουργία των ζωνών ακτινοβολίας Schulz1974,Roederer1972 αλλά και του δακτυλιοειδούς ρεύματος σε κάθε πλανητική μαγνητόσφαιρα.

7. Ορισμός αδιαβατικών αναλλοίωτων

Η εξίσωση κίνησης ενός φορτισμένου σωματιδίου μέσα σε στατικό μαγνητικό πεδίο δίνεται από την εξίσωση:

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (5.1)$$

από τη λύση της οποίας καταλήγουμε σε μια ελικοειδή κίνηση: 1) κυκλική κίνηση γύρω και κάθετα στη μαγνητική γραμμή (gyro-motion) με ταχύτητα

$$u_{\perp} = \frac{r_L |q| B}{m} \quad (5.2)$$

όπου r_L η γυρο-ακτίνα του σωματιδίου και 2) ευθύγραμμη κατά μήκος της μαγνητικής γραμμής στον άξονα ζ με u_{\parallel} =σταθερό.

Ορίζεται επίσης η γυροσυχνότητα του σωματιδίου ως:

$$\omega_L = \frac{|q| B}{m} \quad (5.3)$$

Σύμφωνα με τη θεωρία του Hamilton κάθε περιοδική κίνηση πρέπει να διατηρεί τη δράση

$$I = \oint P_{gen} dq_{gen} \quad (5.4)$$

όπου P_{gen} η ορμή στις γενικευμένες συντεταγμένες q_{gen} .

Για χρονικές μεταβολές του μαγνητικού πεδίου για τις οποίες ισχύει

$$\left| \frac{B}{\partial B / \partial t} \right| \gg \left| \frac{2\pi m}{qB} \right| \quad (5.5)$$

η κίνηση του σωματιδίου μπορεί να χαρακτηριστεί ημι-περιοδική (quasi-periodic) και το παραπάνω ολοκλήρωμα θεωρείται σε πρώτη προσέγγιση σταθερό (αδιαβατική αναλλοίωτη).

Αν αντικαταστήσουμε $P_{gen} = m u_{\perp} \gamma_L$, παίρνουμε την πρώτη αδιαβατική αναλλοίωτη που είναι η μαγνητική ροπή μ

$$\mu = \frac{E_{\perp}}{B} = \frac{P_{\perp}^2}{2m_0 B} \quad (5.6)$$

όπου m_0 η μάζα ηρεμίας του σωματιδίου, P_{\perp} η κάθετη ορμή του και B η ένταση του μαγνητικού πεδίου. Η παραπάνω εξίσωση, αν γνωρίζουμε την γωνία κλίσης του σωματιδίου (pitch angle), δηλαδή τη γωνία ανάμεσα στην κάθετη ταχύτητα και το B γίνεται:

$$\mu = \frac{P^2 \sin^2 \alpha}{2m_0 B} \quad (5.7)$$

Η διατήρηση της μαγνητικής ροπής πρακτικά εκφράζει την αναλογία της κινητικής ενέργειας του σωματιδίου κάθετα στο μαγνητικό πεδίο με την ένταση αυτού.

Μέσα σε μια μαγνητόσφαιρα, όμως, το μαγνητικό πεδίο δεν είναι ομογενές αλλά η ένταση είναι πολύ μεγαλύτερη στους πόλους απ' ό τι στον ισημερινό. Με δεδομένη τη διατήρηση της μαγνητικής ροπής αλλά και της ενέργειας

$$\varepsilon = \mu B + \frac{1}{2} m u_{\parallel}^2 \quad (5.8)$$

συμπεραίνουμε ότι καθώς το σωματίδιο κινείται προς περιοχές με ισχυρότερο B, η παράλληλη συνιστώσα της ταχύτητας κάποια στιγμή θα μηδενιστεί με αποτέλεσμα το σωματίδιο να ανακλαστεί προς τα πίσω (μαγνητικός καθρέφτης). Πιο συγκεκριμένα αν υποθέσουμε ότι το ελάχιστο B είναι στον ισημερινό τότε

$$\frac{P^2 \sin^2 a}{2m_0 B} = \frac{P^2 \sin^2 a_{eq}}{2m_0 B_{eq}} \Rightarrow \frac{\sin^2 a}{B} = \frac{\sin^2 a_{eq}}{B_{eq}} \quad (5.9)$$

Το σωματίδιο θα ανακλαστεί εκεί που $a=90$ άρα

$$B = \frac{B_{eq}}{\sin^2 a_{eq}} \quad (5.10)$$

Όσο πιο μικρή, λοιπόν, είναι η γωνία κλίσης, τόσο ισχυρότερο B χρειάζεται το σωματίδιο για να ανακλαστεί που σημαίνει ότι τόσο πιο κοντά στους πόλους πρέπει να φτάσει. Τα σωματίδια με πολύ μικρές τιμές της γωνίας a αναπόφευκτα θα συναντήσουν την ανώτερη ατμόσφαιρα, με αποτέλεσμα να χαθούν ως καταβροχθισμός (precipitation) σωματιδίων στην ατμόσφαιρα ή, σε περίπτωση που η ενέργειά τους έχει τιμή τέτοια που να μπορεί να διεγείρει άτομα και μόρια οξυγόνου και αζώτου, να δημιουργήσουν το πολικό σέλας. Τα υπόλοιπα θα παραμείνουν παγιδευμένα σε μια περιοδική κίνηση (bounce-motion) κατά μήκος της μαγνητικής γραμμής (trapped particles).

Η αδιαβατική αναλλοίωτη που σχετίζεται με αυτή την κίνηση των σωματιδίων είναι η διαμήκης αναλλοίωτη J

$$J = \int_{a_m}^{b_m} m u_{par} ds \quad (5.11)$$

όπου u_{par} η παράλληλη ταχύτητα και ds το στοιχειώδες μήκος της μαγνητικής γραμμής. Η δεύτερη αδιαβατική αναλλοίωτη πηγάζει ουσιαστικά από τη διατήρηση

της πρώτης. Για σταθερή μ , η κάθετη ενέργεια είναι ανάλογη του B , αλλά η ολική ενέργεια πρέπει να διατηρείται. Όταν, λοιπόν, το σωματίδιο φτάνει σε σημεία που το πεδίο είναι πολύ ισχυρό (πόλοι), η παράλληλη συνιστώσα μηδενίζεται στιγμιαία, γυρνώντας το σωματίδιο προς την αντίθετη κατεύθυνση. Τα σημεία στα οποία γίνεται αυτή η αντιστροφή ονομάζονται κατοπτρικά σημεία και είναι τα a_m και b_m που ορίζουν το παραπάνω ολοκλήρωμα. Η σχέση 5.12 μπορεί να γραφτεί και μέσω της 5.6 ως

$$J = (\delta m_0 \mu)^{1/2} \int_{a_m}^{b_m} B_m - B(s) ds \quad (5.12)$$

Επίσης, η κλίση του μαγνητικού πεδίου δημιουργεί άλλη μια συνιστώσα ταχύτητας που αναγκάζει τα σωματίδια να ολισθαίνουν γύρω από τον πλανήτη. Αυτή η ολίσθηση (drift) διαχωρίζει τα θετικά από τα αρνητικά φορτισμένα σωματίδια με αποτέλεσμα την δημιουργία ρεύματος.

Η αδιαβατική αναλλοίωτη που σχετίζεται με αυτή την κίνηση είναι η ολική μαγνητική ροή Φ

$$\Phi = \oint u_{drift} r d\varphi \quad (5.13)$$

όπου η ταχύτητα ολίσθησης είναι

$$u_{drift} = (m/q) \left(u_{par}^2 + \frac{u_{\perp}^2}{2} \right) \left(\frac{\vec{R}_c \times \vec{B}}{R_c^2 B^2} \right) \quad (5.14)$$

όπου R_c η ακτίνα καμπυλότητας της μαγνητικής γραμμής. Μέσω της Φ μπορούμε να ορίσουμε και την γενικευμένη παράμετρο L^* ως

$$L^* = - \frac{2\pi M}{\Phi R_E} \quad (5.15)$$

όπου M η μαγνητική ροπή της Γης και R_E η ακτίνα της. Η παράμετρος L^* ή αλλιώς παράμετρος Roederer είναι μία συνάρτηση της τρίτης αδιαβατικής αναλλοίωτης και της μαγνητικής ροπής μ . Από την άλλη, η παράμετρος του McIlwain (L) είναι μία συνάρτηση της έντασης του μαγνητικού πεδίου στο mirror point και

της μαγνητικής ροπής μ . Θεωρητικά, οι δύο τιμές είναι διαφορετικές εκτός από την περίπτωση ενός μοντέλου διπόλου όπου και οι δύο τιμές θα πρέπει να είναι οι ίδιες.

Μια επίσης σημαντική κίνηση των σωματιδίων μέσα σε μια μαγνητόσφαιρα προκαλείται από την ύπαρξη ηλεκτρικού πεδίου. Η εξίσωση κίνησης ενός σωματιδίου θα είναι

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = q \cdot \vec{E} + q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (5.16)$$

ενώ μπορούμε συχνά να υποθέσουμε ότι υπάρχει μόνο η κάθετη στο μαγνητικό πεδίο συνιστώσα του E ($\parallel \cdot B = 0$). Αυτό ισχύει γιατί η παράλληλη συνιστώσα διαχωρίζεται θετικά από τα αρνητικά φορτισμένα σωματίδια, με τα πρώτα να κινούνται κατά την κατεύθυνση του \parallel και τα δεύτερα κατά την αντίθετη. Αν τώρα υπάρχει μεγάλος αριθμός σωματιδίων, η σχετική τους κίνηση θα δημιουργήσει ένα νέο ηλεκτρικό πεδίο το οποίο με την πάροδο του χρόνου θα μηδενίσει το ήδη υπάρχον \parallel . Η κάθετη συνιστώσα του ηλεκτρικού πεδίου προκαλεί ολίσθηση των σωματιδίων όπως φαίνεται στην εικόνα 5.5.

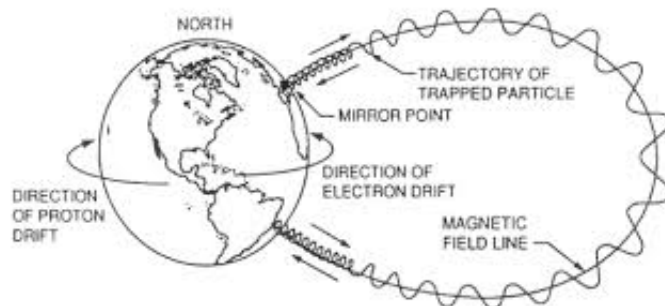
Ουσιαστικά η ολίσθηση προκαλείται αφού ένα σωματίδιο, καθώς περιφέρεται γύρω από τη μαγνητική γραμμή, επιταχύνεται όταν κινείται κατά την φορά του \perp και επιβραδύνεται όταν κινείται κατά την αντίθετη φορά. Επομένως, η μεταβολή της ταχύτητας του σωματιδίου επιφέρει και μεταβολή στην γυρο-ακτίνα του άρα και ολίσθηση κάθετα στο ηλεκτρικό και στο μαγνητικό πεδίο με ταχύτητα που δίνεται από τον τύπο

$$\vec{u}_E = \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{B^2} \quad (5.17)$$

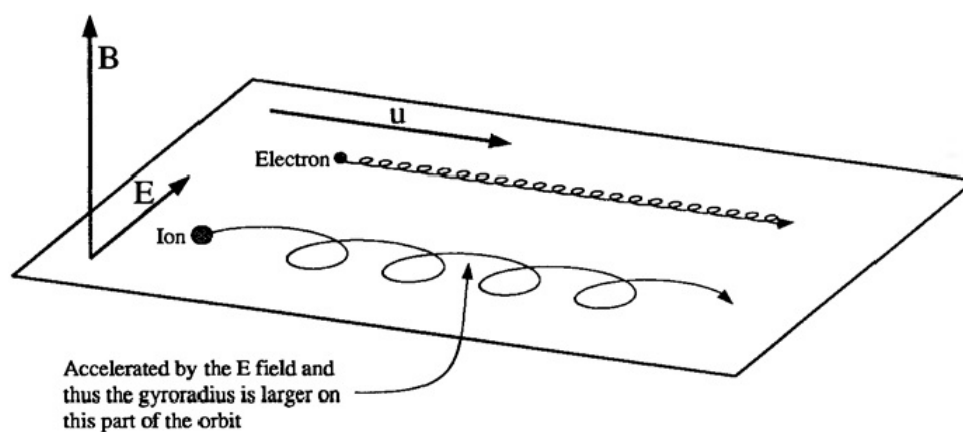
Σημαντικό είναι, επίσης, ότι η ολίσθηση λόγω ηλεκτρικού πεδίου ($E \times B$ drift) δεν δημιουργεί ρεύμα εφόσον, όπως φαίνεται και από τον παραπάνω τύπο, η ταχύτητα ολίσθησης είναι ανεξάρτητη της μάζας και του φορτίου των σωματιδίων.

Γενικότερα, οποιαδήποτε δύναμη είναι ικανή να επιταχύνει και να επιβραδύνει σωματίδια, καθώς αυτά κινούνται γύρω από τις μαγνητικές γραμμές, μπορεί να προκαλέσει ολίσθηση με την αντίστοιχη ταχύτητα να δίνεται από τον γενικό τύπο

$$\vec{u}_F = \frac{\vec{F} \times \vec{B}}{q \cdot B^2} \quad (5.18)$$



Σχήμα 5.4: Οι τρεις βασικές κινήσεις ενός φορτισμένου σωματιδίου σε μαγνητόσφαιρα.



Σχήμα 5.5: Σχηματική αναπαράσταση της ολίσθησης φορτισμένων σωματιδίων λόγω ηλεκτρικού πεδίου. Πηγή: Kivelson1995.

8. Silicon Solid–State Detectors

Οι ανιχνευτές στερεάς κατάστασης πυριτίου (SSD) κατασκευάζονται με χρήση καθαρών κρυστάλλων πυριτίου. Υπάρχουν διάφοροι τύποι, ανάλογα με τις προσμίξεις και τη μέθοδο με την οποία εισάγονται στο κρυσταλλικό πλέγμα. Ωστόσο, η βασική λειτουργία όλων των τύπων ανιχνευτών πυριτίου είναι ίδια. Όταν ένα φορτισμένο σωματίδιο διασχίζει το κρύσταλλο και αλληλεπιδρά με τα ηλεκτρόνια της ζώνης σθένους και τα μεταφέρει στην ζώνη αγωγιμότητας. Άπαξ στη ζώνη αγωγιμότητας, τα ηλεκτρόνια είναι ελεύθερα να κινούνται σε απόκριση προς ένα εξωτερικά εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο Wuest2007.

Για κάθε ηλεκτρόνιο που προωθείται στη ζώνη αγωγιμότητας, μία οπή δημιουργείται στη ζώνη σθένους. Η οπή συμπεριφέρεται ως ένα θετικά φορτισμένο σωματίδιο και κινείται επίσης σε απόκριση προς το ηλεκτρικό πεδίο. Αμφότερα τα ηλεκτρόνια και οι οπές αναφέρονται και ως *φορείς*. Περίπου 3.6 eV απαιτούνται για να παραχθεί ένα ζεύγος ηλεκτρονίου–οπής σε πυρίτιο. Οι κρύσταλλοι, οι οποίοι έχουν ηλεκτρόδια και στις δύο πλευρές τους, λειτουργούν ως ανάστροφες πολωμένες δίοδοι. Το εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο προσελκύει τους φορείς στα αντίστοιχα ηλεκτρόδιά τους και τους αποτρέπει από επανασύνδεση. Το συνολικό φορτίο που συλλέγεται σε ένα ηλεκτρόδιο είναι ανάλογο με την ενέργεια που χάνεται στον κρύσταλλο από το σωματίδιο το οποίο αντιδρά με αυτόν. Στην περίπτωση που το σωματίδιο σταματά στον κρύσταλλο το συλλεγόμενο φορτίο είναι ανάλογο με την ενέργεια του σωματιδίου.

Το ρεύμα που προκύπτει από τη συλλογή φορτίων, που συνήθως λαμβάνονται από την άνοδο (συλλέκτης ηλεκτρονίων), τροφοδοτείται σε ένα προ–ενισχυτή, που το μετατρέπει σε ένα παλμό ουράς τάσης (ταχεία αύξηση ακολουθούμενη από μια μακρά μείωση). Ο παλμός τροφοδοτείται, στη συνέχεια, σε ένα γραμμικό ενισχυτή που διαμορφώνει και ενισχύει το σήμα για να παράξει ένα σύντομο παλμό με ένα πλάτος ανάλογο με το συλλεγόμενο φορτίο. Περαιτέρω επεξεργασία μπορεί να διεξαχθεί χρησιμοποιώντας πρότυπες τεχνικές επεξεργασίας παλμών.

Τα πλεονεκτήματα του SSD είναι το μικρό του μέγεθος, η καλή ενεργειακή διακριτική ικανότητα, η γρήγορη ανάλυση χρονισμού (σύμπτωση χρονισμού είναι δυνατή σε τάξεις νανοδευτερόλεπτου) καθώς και η δυνατότητα να προσαρμόζει το πάχος του κρυστάλλου για να ταιριάζει με τις απαιτήσεις των μετρήσεων. Τα μειονεκτήματα περιλαμβάνουν τον περιορισμό σε μικρά πάχη ($< 1\text{mm}$), την ευαισθησία σε βλάβη από προσπίπτουσα ακτινοβολία και το σχετικά υψηλό κατώφλι ενέργειας (περίπου 20 keV) για την ανίχνευση των σωματιδίων. Ο περιορισμός σχετικά με το πάχος του ανιχνευτή σημαίνει ότι τα πρωτόνια με ενέργειες μεγαλύτερες από περίπου 14 MeV δεν θα σταματήσουν στον ανιχνευτή. Ένας τρόπος μέτρησης υψη-

λότερης ενέργειας σωματιδίων είναι η οργάνωση δύο ή περισσότερων ανιχνευτών πυριτίου, τον ένα μετά τον άλλο, σε μια αξονική διαμόρφωση (ανιχνευτής τηλεσκόπιο).

9. Φασματογράφοι μάζας (mass spectrometers)

Παρόλα τα πλεονεκτήματα ενός φασματογράφου που βασίζεται σε ανιχνευτές στερεάς κατάστασης, υπάρχει ένα σημαντικό μειονέκτημα, το γεγονός ότι βασίζεται αποκλειστικά στην ενέργεια που εναποθέτει ένα σωματίδιο χωρίς να μπορεί να ξεχωρίσει το είδος του προσπίπτοντων ιόντων. Το πρόβλημα αυτό ξεπεράστηκε με την εφαρμογή της μεθόδου μέτρησης του χρόνου πτήσης (Time of Flight–ToF) ενός σωματιδίου, μία πατέντα του 1952 από τον William Stephens. Η μέθοδος αυτή άρχισε να χρησιμοποιείται ευρέως από τη δεκαετία του 1970, όταν και ανάπτυξη της τεχνολογίας οδήγησε σε ηλεκτρονικά εξαρτήματα με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας.

Η φασματομετρία μάζας χρόνου πτήσης (Time Of Flight Mass Spectrometry–TOFMS) έγκειται στην αναλογία μάζας προς φορτίο ενός ιόντος, η οποία προσδιορίζεται από τη μέτρηση ενός χρόνου πτήσης μέσα στο όργανο. Τα ιόντα επιταχύνονται από ένα ηλεκτρικό πεδίο γνωστής έντασης και κάθε ιόν αποκτά την ίδια κινητική ενέργεια με οποιοδήποτε άλλο ιόν που έχει το ίδιο φορτίο, δηλαδή βαρύτερα ιόντα του ίδιου φορτίου αποκτούν μικρότερες ταχύτητες, ενώ ιόντα με υψηλότερο φορτίο αποκτούν μεγαλύτερες. Στη συνέχεια, μετράται ο χρόνος που χρειάζεται για να φτάσει το ιόν σε έναν ανιχνευτή σε γνωστή απόσταση, ο οποίος εξαρτάται από τον λόγο της μάζας προς το φορτίο του ιόντος, αναγνωρίζοντας έτσι τη μάζα του.

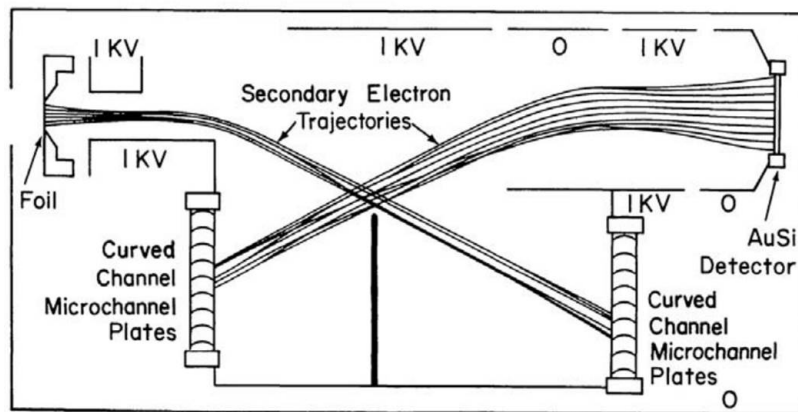
Κατά τη διέλευση ενός ιόντος από έναν φασματογράφο μάζας, περνά πρώτα από έναν ανιχνευτή που μετρά το σήμα εκκίνησης (time zero). Στις περισσότερες περιπτώσεις, αυτό επιτυγχάνεται όταν το ιόν περνά από ένα λεπτό φύλλο κατασκευασμένο από άνθρακα, όπου το σωματίδιο παράγει δευτερεύοντα ηλεκτρόνια. Αυτά τα δευτερεύοντα ηλεκτρόνια επιταχύνονται και κατευθύνονται σε έναν ανιχνευτή πολλαπλασιασμού ηλεκτρονίων (channeltron) ή σε μικροκαναλικές πλάκες (MicroChannel Plate–MCP) μέσω κατάλληλων διαμορφώσεων ηλεκτροστατικού πεδίου (συνήθως χρησιμοποιούνται ηλεκτροστατικοί καθρέπτες για να εκτρέψουν τα ηλεκτρόνια), όπου και μετράται το σήμα εκκίνησης (εικόνα 5.6). Το σήμα διακοπής (dead layer) μπορεί να ανιχνευθεί πάλι μέσω δευτερογενών ηλεκτρονίων ή, όπως γίνεται συνήθως, με την πρόπτωση του ιόντος σε έναν ανιχνευτή στερεάς κατάστασης όπου και μετράται η ενέργειά του (E_{final}). Η σχέση που συνδέει την τελική και την αρχική ενέργεια του ιόντος ($E_{incident}$) είναι:

$$E_{incident} = \alpha E_{final} + E_{foilloss} + E_{deadlayerloss} \quad (5.19)$$

όπου $E_{foilloss}$ και $E_{deadlayerloss}$ η απώλεια ενέργειας του σωματιδίου κατά την πρόσπτωσή του στο λεπτό φύλλο άνθρακα και στον ανιχνευτή στερεάς κατάστασης, αντίστοιχα, ενώ α είναι ένας συντελεστής που σχετίζεται με σφάλματα στη μέτρηση του ανιχνευτή στερεάς κατάστασης.

Γνωρίζοντας την αρχική ενέργεια του ιόντος, καθώς και το χρόνο πτήσης (tof) αλλά και το μήκος s του σωλήνα time-of-flight, μπορούμε να υπολογίσουμε τη μάζα του από τη σχέση:

$$m = 2 \frac{E_{incident}}{(s/tof)^2} \quad (5.20)$$



Σχήμα 5.6: Σχηματική αναπαράσταση του ανιχνευτή χρόνου πτήσης SWICS της αποστολής Ulysses.

Μετά την πρόσπτωση του ιόντος στο φύλλο άνθρακα και την παραγωγή των δευτερευόντων ηλεκτρονίων, το ιόν εισέρχεται σε έναν σωλήνα με γνωστό μήκος, στον οποίο επιταχύνεται σε ομογενές ηλεκτρικό πεδίο με διαφορά δυναμικού V . Είναι γνωστό ότι ένα σωματίδιο σε ομογενές ηλεκτρικό πεδίο θα έχει δυναμική ενέργεια $E_p = q \cdot V$ όπου q το φορτίο του σωματιδίου. Στο τέλος του σωλήνα το σωματίδιο θα έχει αποκτήσει κινητική ενέργεια ίση με την παραπάνω δυναμική και άρα $q \cdot V = 1/2 m u^2$.

Βιβλιογραφία

- [Baker and Daglis2007] Baker, D., Daglis, I. (2007), **Radiation Belts and Ring Current**, in **Space Weather–Physics and Effects** edited by Bothmer, V. and Daglis, I.A., 173–202, doi:10.1007/978-3-540-34578-7. (Διαθέσιμο μέσω Εύδοξου)
- [Blake *et al.*2013] Blake, J.B., Carranza, P.A., Claudepierre, S.G., Clemmons, J.H., Crain, W.R., Dotan, Y., Fennell, J.F., Fuentes, F.H., Galvan, R.M., George, J.S., Henderson, M.G., Lalic, M., Lin, A.Y., Looper, M.D., Mabry, D.J., Mazur, J.E., McCarthy, B., Nguyen, C.Q., O’Brien, T.P., Perez, M.A., Redding, M.T., Roeder, J.L., Salvaggio, D.J., Sorensen, G.A., Spence, H.E., Yi, S., Zakrzewski, M.P. (2013), **The Magnetic Electron Ion Spectrometer (MagEIS) Instruments Aboard the Radiation Belt Storm Probes (RBSP) Spacecraft**. 179, 383–421. doi:10.1007/s11214-013-9991-8.
- [Daglis *et al.*1999] Daglis, I.A., Thorne, R.M., Baumjohann, W., Orsini, S. (1999), **The terrestrial ring current: Origin, formation, and decay**. *Reviews of Geophysics* 37, 407–438. doi:10.1029/1999RG900009. (<http://tiny.cc/vyqtpz>)
- [Ebihara and Miyoshi2011] Ebihara, Y., Miyoshi, Y. (2011), **Dynamic Inner Magnetosphere: A Tutorial and Recent Advances**, in **The Dynamic Magnetosphere**, edited by W. Liu and M. Fujimoto, *Springer Verlag*, 145–187, doi:10.1007/978-94-007-0501-2₉.
- [Gonzalez *et al.*1994] Gonzalez, W.D., Joselyn, J.A., Kamide, Y., Kroehl, H.W., Rostoker, G., Tsurutani, B.T., Vasyliunas, V.M. (1994), **What is a geomagnetic storm?** 99, 5771–5792. doi:10.1029/93JA02867.
- [Kallenrode1998] Kallenrode, M.B. (1998), **Space physics : an introduction to plasmas and particles in the heliosphere and magnetospheres**, *Springer–Verlag Berlin Heidelberg New York*. (Διαθέσιμο μέσω Εύδοξου)
- [Kivelson and Russell1995] Kivelson, M.G., Russell, C.T. (1995), **Introduction to Space Physics**, *Cambridge University Press*, ISBN 0521451043.

- [Priest and Forbes2000] Priest, E., Forbes, T. (2000), **Magnetic Reconnection**, Cambridge University Press, ISBN 0521481791.
- [Reeves *et al.*2003] Reeves, G.D., McAdams, K.L., Friedel, R.H.W., O'Brien, T.P. (2003), **Acceleration and loss of relativistic electrons during geomagnetic storms**. **30**, 1529. doi:[10.1029/2002GL016513](https://doi.org/10.1029/2002GL016513).
- [Roederer1972] Roederer, J.G. (1972), **Geomagnetic field distortions and their effects on radiation belt particles**. *Reviews of Geophysics and Space Physics* **10**, 599–630. doi:[10.1029/RG010i002p00599](https://doi.org/10.1029/RG010i002p00599).
- [Schulz and Lanzerotti1974] Schulz, M., Lanzerotti, L.J. (1974), **Particle diffusion in the radiation belts**, 22, *Physics and Chemistry in Space*, Springer.
- [Turner *et al.*2013] Turner, D.L., Angelopoulos, V., Li, W., Hartinger, M.D., Usanova, M., Mann, I.R., Bortnik, J., Shprits, Y. (2013), **On the storm-time evolution of relativistic electron phase space density in Earth's outer radiation belt**. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)* **118**, 2196–2212. doi:[10.1002/jgra.50151](https://doi.org/10.1002/jgra.50151).
- [Van Allen1959] Van Allen, J.A. (1959), **The geomagnetically trapped corpuscular radiation**, *Journal of Geophysical Research* **64**, 1683–1689.
- [Wüest, Evans, and von Steiger2007] Wüest, M., Evans, D.S., von Steiger, R. editors, (2007), **Calibration of Particle Instruments in Space Physics**, International Space Science Institute, Springer Verlag. (<http://www.issibern.ch/PDF-Files/SR-007.pdf>)